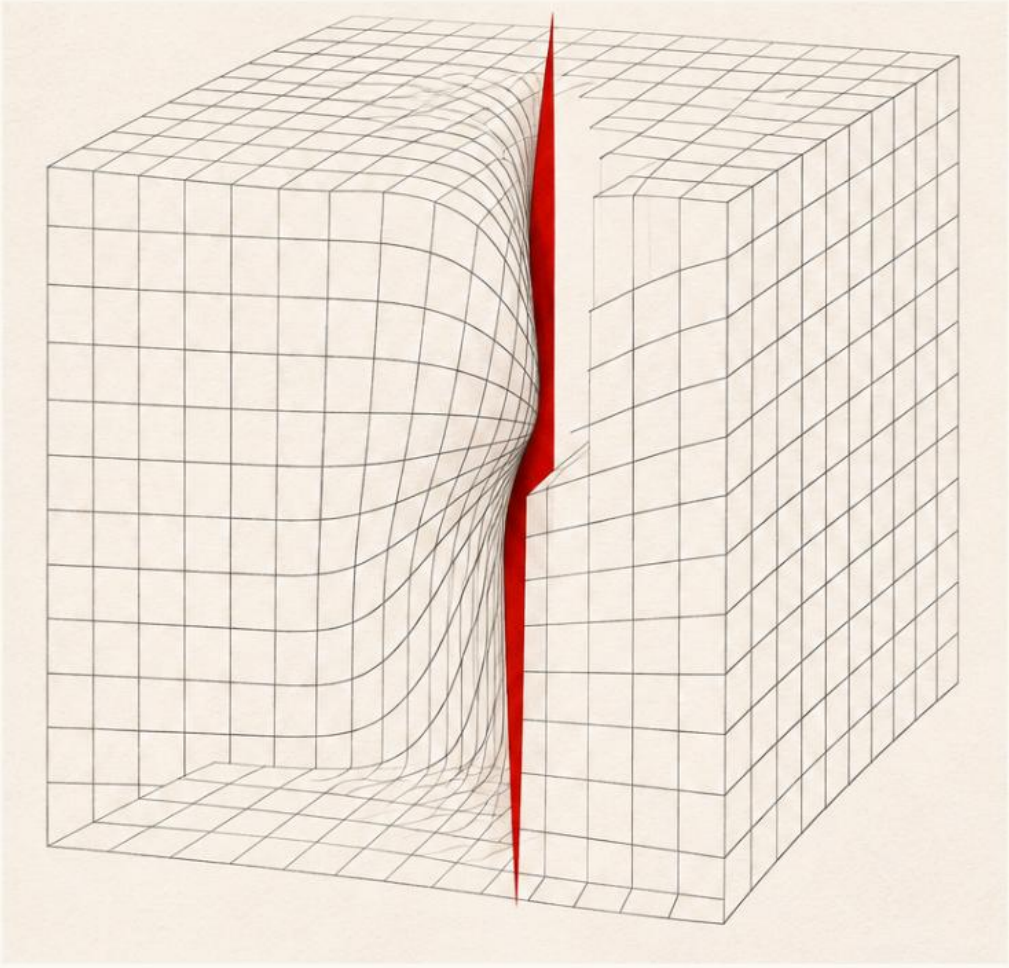
선명한 빨강



Eudgene Brenev
Mira Veyran

2026

Eudgene Brenev
Mira Veyran

선명한 빨강

공간, 시간, 물질, 정보의 이상현상을 다루는 프로토콜

2026

머리말

이례적인 현상을 마주한 연구자에게는 두 과제가 주어진다. 새로운 효과를 발견할 가능성을 열어 두는 동시에, 관찰된 것이 이미 알려진 과정이나 기기의 특성, 해석 방식 때문에 생긴 것은 아닌지 검증해야 한다. 두 과제를 함께 수행하려면 공통 언어가 필요하다. 그 언어 안에서 사건의 기술은 측정, 모형, 판단, 판단을 재고할 조건과 연결된다.

『선명한 빨강』은 그러한 언어를 만들고 실제로 적용하는 방법을 다룬다. 이 책은 시간의 불일치, 공간적 어긋남, 특이한 장, 빛과 열의 과정, 물질의 변화, 경험, 디지털상의 이상, 응답이 의미를 지닌 것처럼 보이는 현상을 살펴본다. 각 분야마다 관측가능량과 대안 설명, 사례에 대한 평가를 바꿀 수 있는 검증을 제시한다.

독자에게 모든 이례적 사건의 본성이 하나라고 미리 받아들이라고 요구하지 않는다. 이상현상이라는 말은 명시된 예상 모형을 기준으로 제기되는 문제를 뜻한다. 어떤 문제는 알려진 설명으로 해결되지만, 다른 문제에는 자료를 더 모으거나 새로운 측정 수단을 개발해야 한다. 일부 장에서는 국소적인 시간 진행률의 변화와 이례적인 공간 연결성을 비롯한 조건부 모형을 탐구한다. 그 가정과 한계는 해당 본문에서 직접 밝힌다.

이러한 구성 덕분에 책을 순서대로 읽을 수도 있고 상황에 맞추어 활용할 수도 있다. 앞의 두 부는 공통 원칙을 세운다. 이어지는 다섯 부는 개별 현상 유형을 다룬다. 조직과 운영에 관한 절은 측정을 집단의 행동과 연결한다. 열째 부는 기기와 연구 프로그램의 발전을 다룬다. 부록의 작업 서식은 이 논리를 구체적인 사례의 명세서에 적용하도록 돕는다.

이 책은 안정적으로 반복되는 관찰에서 기원 모형, 매개변수 계산, 공학적 검증으로 나아가는 경로를 제시한다. 기기 설계안은 측정 사슬의 구성과 그 적격성을 확인하는 조건을 보여 준다. 마지막 실습에는 자료, 판단, 제한된 결론을 갖춘 교육용 사례가 담겨 있다. 작업 서식과 색인은 이 사례들을 관련 주제의 장과 연결한다.

과학적 주장과 응용 주장을 읽는 방법

대괄호 안의 인용 표시는 참고문헌의 출처를 가리킨다. 발표된 연구의 사실적 결과는 해당 연구에 기술된 조건 안에서만 사용한다. 이 책의 독자적인 연구 구상은 저자의 제안으로 표시한다. 그러한 구상은 구체적인 실험 장치에 적합한지 검증해야 하며, 현행 분야별 요구사항을 대신하지 않는다. 실제 운용 한계는 선택한 측정 수단, 과제, 적용되는 규범에 따라 정해진다.

교육용 시나리오는 허구다. 그 목적은 추론과 행동의 순서를 보여 주는 데 있다. 예제의 수치는 과제를 분석하기 위한 것이며 안전이나 탐지의 보편적 임계값이 되지 않는다. 수학적으로 정의한 가정 모형 역시 그 발생원이 자연에 존재함을 입증하지 않는다. 관찰과 비교할 수 있는 결과를 도출하게 할 뿐이다.

읽는 동안 네 질문을 계속 구분하면 도움이 된다. 무엇이 기록되었는가, 결과를 어떻게 얻었는가, 무엇으로 설명하는가, 어떤 행동이 허용되는가? 한 답에 대한 확신이 나머지로 자동 이전되지는 않는다. 잘 기록한 신호도 원인은 미지일 수 있다. 설득력 있는 설명도 개입 방법을 주지 못할 수 있다. 작용을 성공적으로 제한해도 발생원은 계속 작동할 수 있다.

프로토콜의 목적

프로토콜은 지식 획득과 의사결정을 조직한다. 수행자, 시작 조건, 행동, 관찰 결과, 중단 근거, 후속 검증 절차를 정한다. 가치는 절차를 이해하고 반복하며 고장 원인을 밝히고 새 자료에 따라 재검토할 수 있는지에 달려 있다. 상세 지침의 존재가 미지 현상의 불확실성을 없애지는 않는다. 그 불확실성을 참여자들에게 드러내 준다.

이 책은 관찰과 가설을 구분하고 전문 작업에는 해당 역량을 찾을 준비가 된 독자를 위한 것이다. 기본 개념은 도입할 때 설명한다. 복잡한 물리 모형은 측정할 결과를 구체화하는 데 도움이 되는 곳에 포함했다. 상황에 따라 읽을 때는 먼저 길잡이 표를 쓰고 이어 자료, 위험, 운영 방식 선택에 관한 공통 장을 참고한다.

미지에 관한 과학 연구는 정확히 설정한 질문에서 시작된다. 결과는 더 정확한 세계의 기술과 더 근거 있는 행동이다. 새 기록으로 설명을 고를 수 없더라도 다음 기기나 실험에 무엇이 부족한지 보여 줄 수 있다. 불확실성에서 검증 가능한 과제로의 이 전환이 이 논고의 모든 부를 연결한다.

차례

머리말 3

그림 목록 9

상황별 길잡이 11

제I부 연구의 토대 14

제1장 이상현상 과학의 연구 대상 14

제2장 관찰과 설명 16

제3장 증거와 불확실성 19

제4장 인과 모형과 구별하는 검증 23

제5장 지식의 한계와 연구 윤리 27

제II부 분류와 기술 31

제6장 이상현상의 다차원 분류 31

제7장 위험 프로필과 결정의 한계 33

제8장 사례 명세와 자료의 기원 38

제9장 최초 기록과 운용 방식 선택 40

제10장 효과의 결합과 사건의 전개 45

제11장 이상 상태의 발생과 유지 50

제III부 시간과 인과성 55

제12장 물리적 시간과 시계의 지시값 55

제13장 국소적 시간 차이의 검증 58

제14장 사건 반복과 가정한 시간 고리 63

제15장 예지와 역인과성 65

제16장 시간 진행률의 국소적 변화에 대한 가정 모형 68

제IV부 공간과 새로운 상호작용 73

제17장 공간 기하와 광학 경로 73

제18장 이례적인 연결성과 공간 전이의 검증 77

제19장 중력과 관성의 편차 80

제20장 새 장과 근본 매개변수의 변화 83

제21장 웜홀과 물리 모형의 한계 88

제V부 환경 속 물리 과정 91

제22장 전자기적 편차 91

제23장 이례적인 발광 물체 93

제24장 음향과 기계적 진동 97

제25장 열 과정과 에너지 수지 99

제26장 물체의 운동과 겉보기 공중 부양 102

제VI부 물질과 생명계 106

제27장 질량과 조성의 변화 106

제28장 전리방사선과 검출기 고장 110

제29장 생물학적 편차와 생태학적 편차 112

제30장 복합 과정과 연쇄 변화 116

제31장 시료와 연구 대상 상태의 보존 118

제VII부 지각과 정보 123

제32장 사라진 시간과 기억의 단절 123

제33장 존재감과 유체이탈 경험 126

제34장 실내에서 느끼는 이례적인 감각 129

제35장 디지털 이상과 자동 분석의 한계 131

제36장 겉보기 행위성과 의미 있는 응답의 검증 134

제VIII부 연구의 조직 139

제37장 연구팀과 책임 분담 139

제38장 정찰과 원격 관찰 145

제39장 통제된 실험과 독립 재현 149

제40장 자료 관리와 연구 보고 152

제41장 방법의 오류와 실패 분석 157

제IX부 관리와 무력화 160

제42장 확인된 영향의 격리와 제한 160

제43장 안정화와 가역적 개입 163

제44장 무력화의 확인 168

제45장 작업 종료와 후속 관찰 172

제46장 상충하는 결과에 대한 전문가 평가 174

제X부 기기와 엑스트라과학의 발전 178

제47장 범용 측정 복합체의 구조 178

제48장 새 센서의 설계 182

제49장 기기 시험과 성능 확인 184

제50장 자율 시계 비교 장치 설계안 189

제51장 미세 힘 측정 장치 설계안 195

제52장 가정한 상호작용의 차등 센서 설계안 201

제53장 미지 현상의 연구 프로그램 208

제54장 이론과 프로토콜을 수정하는 방법 211

제XI부 연구 실습 215

제55장 사례 1: 통신 복구 뒤 시계의 불일치 215

제56장 사례 2: 안정적으로 남는 미세 힘의 잔여값 218

제57장 사례 3: 시계와 역학을 이용한 시간 모형의 검증 221

제58장 사례 4: 변화하는 영역과 관측가능성의 상실 225

제59장 사례 5: 새 과제에서의 정보 의존성 228

제60장 사례 6: 가정한 무력화의 검증 232

제61장 사례 7: 기원이 소실된 물질 자료 236

제62장 사례 8: 드문 사건, 누락과 음성 결과 239

부록 244

부록 A 사례 명세서 서식 244

부록 B 설명을 구별하는 실험 계획 246

부록 C 측정 독립성 지도 248

부록 D 운용 방식과 중단에 대한 결정 249

부록 E 개입 결과 검증 확인서 251

부록 F 용어와 약어 252

부록 G 조직 운영의 작업 서식 255
부록 H 가정한 정적 시간 영역의 발생원 264
부록 I 사례와 미해결 질문의 대장 268
부록 J 주제별 색인과 상황별 색인 270
참고문헌 274

그림 목록

그림들은 장의 순서를 따른다. 복합 패널은 하나의 캡션으로 묶었다. 가정 모형과 허구의 훈련 자료는 그림 곁에 표시했다.

1 네 층위: 기록, 처리, 측정, 설명 17

2 보고가 늘어도 사건이 늘었다고 할 수 없는 이유 22

3 인과 지도와 우회 설명 24

4 한 영역의 세 지도: 검출, 관측가능성, 접근 37

5 연구의 다섯 운용 방식과 전환의 근거 42

6 상태 이력과 응답의 두 가지 분기 49

7 문턱과 상태의 안정성 변화 53

8 발진기, 계수기, 로그: 불일치가 생기는 곳 57

9 삼차원 망과 검증 노드 E 62

10 표적이 만들어진 시점과 제시된 시점 66

11 제자리 유지 가속도와 필요한 응력 72

12 변하지 않은 장면과 달라진 빛의 경로 74

13 관측 배치도와 기록된 연결의 그래프 78

14 지지대에 고정한 가속도계와 중력경도계가 측정하는 것 81

15 추가 힘의 형태와 크기를 갖는 물체의 기하 87

16 유한한 에너지 저장량과 유지되는 발광 96

17 공기와 구조물을 통한 전달 경로 98

18 검사체적과 에너지 수지의 잔차 101

19 두 방향에서 본 같은 판 105

20 채널의 유효성을 잃었을 때 나타나는 영의 지시값 112

21 공통 추세와 연구 구역에만 생긴 변화 114

22 시료 지도, 분할한 부분들과 상태 변화 120

23 한 에피소드를 재구성하는 네 경로 124

24 감각운동 연결과 참여자의 별도 보고 128

25 경보 109건 속 표적 아홉 개 133

26 평균을 내면 사라지는 상호작용 137

27 통신 단절 뒤의 K7: 수신이 실행을 뜻하지는 않는다 149
28 공통 시간 척도가 없는 부분 순서 156
29 차폐판은 한 경로를 막고 구조물은 다른 경로를 유지한다 163
30 방열을 유지한 열적 전이 168
31 표적 특징이 사라진 데 대한 다섯 설명 169
32 측정 채널의 독립성이 끝나는 곳 180
33 대조용 입력이 검증하는 경로의 범위 186
34 달력상 기간에서 유효 노출로 189
35 발진기를 고정한 채 입력을 바꾸기 191
36 주파수 계단은 끝나도 위상 기여는 남는다 194
37 자율 주파수 비교: 측정과 공통 기준 195
38 비틀림 시험대: 돌림힘과 광학 판독의 기하학 197
39 비틀림 응답에서 제한된 힘 추정까지 201
40 서로 다른 두 공진기와 각각의 대조 채널 203
41 차등 지표가 보존하는 것과 지우는 것 207
42 가정한 결합 χ와 구현 가능한 측정 경로 208
43 보고, 자료, 사건, 실험 계열은 서로 다른 단위다 214
44 시각 표지의 공통 도약과 발진기의 별도 표류 217
45 힘 모형과 독립적인 검증 측정 221
46 같은 계량이 시계 검증은 통과하지만 역학 검증은 통과하지 못한다 224
47 측정한 경계의 확대와 측정 유효성의 상실 227
48 독립 자료 집합으로의 결과 일반화 231
49 지시값의 억제와 전달의 제한 235
50 확인된 근원의 경계 Π-07 238
51 달력상 시간에서 사건 빈도의 경계로 242

상황별 길잡이

표는 최초 관찰을 측정 과제와 주제별 장에 연결한다. 사건 원인을 정해 주지는 않는다. 실무 양식은 부록 A–E와 G에, 주제별 색인과 상황별 색인은 부록 J에 있다.

상황	장	첫 질문	관련 절
시계의 지시값이 어긋난다	12–13	시간 출처와 비교의 독립성	8, 9, 47
기억의 한 구간이 사라졌다	32	기억, 행동, 시간 기록의 구분	2, 5, 13
사건이 반복되는 듯하다	14	주기 기록과 남아 있는 흔적의 확인	3, 15, 40
메시지가 예측처럼 보인다	15	기록 시점과 통상 정보 경로	4, 39, 46
경로 또는 거리가 일치하지 않음	17–18	기하와 측정 신호의 경로	3, 19, 38
국소적인 시간 영역을 가정한다	16	가정 모형과 그에 부합하는 관측 가능한 결과	12, 13, 21
물체가 이상하게 움직인다	26	궤적, 힘과 재구성의 한계	19, 22, 24
빛나는 물체가 나타난다	23	원본 프레임, 스펙트럼과 기하	17, 22, 38
장이나 간섭이 발생한다	22	센서의 대역과 공통 의존 관계	10, 35, 47
이상한 소리가 들린다	24	음향 측정 경로의 적합성과 진동 전달	9, 34, 38
온도가 변한다	25	온도 측정과 수지의 경계	3, 30, 49

상황	장	첫 질문	관련 절
물질이나 질량이 변했다	27, 31	시료의 출처와 독립적인 방법	8, 29, 44
선량계에서 이례적인 결과가 나온다	28	범위, 정상 작동과 포화	7, 9, 44
생물체나 생태계가 변한다	29	비교 가능한 배경과 작용의 성격	5, 30, 31
어떤 존재가 느껴진다	33–34	체험과 외부 기록의 구분	5, 32, 36
의미가 있는 듯한 응답을 받았다	36	미리 정한 기준과 정보 누출 점검	15, 35, 39
처리 뒤에만 효과가 보인다	35, 40	원본과 변환 이력	2, 3, 41
여러 현상이 함께 나타났다	10, 30	공통 원인과 판별 가능한 사건 순서	7, 39, 46
작용을 제한해야 한다	42–43	확인된 경로와 검증 가능한 조치	7, 37, 44
개입 뒤 신호가 사라졌다	44–45	발생원의 상태와 감도 유지	28, 40, 49
새 계기가 필요하다	47–49	측정 모형과 성능 시험	3, 20, 53
자료가 서로 모순된다	41, 46	불일치의 범위와 독립적인 검증	2, 8, 54
대조 검증 뒤에도 효과가 남았다	53	모형, 매개변수와 독립적인 예측	56
측정기를 개발해야 한다	50–52	공학 설계와 적격성 검증	48, 49

상황	장	첫 질문	관련 절
두절 뒤 통신이 복구되었다	38	상태와 명령 처리 결과의 확인	40
사건이 검출되지 않았다	49	유효 관측 노출량과 모형의 한계 설정	62
처음부터 끝까지 이어지는 예가 필요할 때	55–62	연구 실습	부록 A–E, G

제I부

연구의 토대

제1장

이상현상 과학의 연구 대상

이례적인 사건은 그 안에서 정확히 무엇을 설명해야 하는지 정식화할 수 있을 때 연구 대상이 된다. 시계의 시각이 어긋나고, 영상이 둘로 겹치고, 물체의 위치가 바뀌고, 사람이 어떤 존재를 느끼고, 센서가 예상 밖의 신호를 낸다. 이런 보고는 서로 다른 물리 과정이나 관찰 사슬의 서로 다른 고리에 관한 것일 수 있다. 연구자가 먼저 할 일은 검증 가능한 주장을 가려내는 것이다. 그것이 없으면 새 측정은 불확실성을 줄이지 못한 채 인상의 수만 늘릴 수 있다.

이 책에서 이상현상이란 명시된 예상에서 벗어난 관찰 가운데 별도 검증을 할 만한 것을 뜻한다. 예상의 기준은 물리 모형, 대상의 이전 상태, 대조 구역 또는 측정 계기의 특성일 수 있다. 이 정의에서 용어의 의미는 지식과 관찰 절차에 따라 정해진다. 현상에 미지의 본성이 있다고 미리 단정하지 않는다. 기전이 밝혀진 뒤에도 이례적인 사례에는 연구 가치가 남는다. 이전 모형이 어떤 조건에서 더 이상 성립하지 않았는지 알 수 있기 때문이다.

이야기에서 연구 대상으로

최초 보고에는 대개 여러 층위가 담겨 있다. "방 안에서 시간이 멈추고 낯선 누군가가 나타났다"라는 문장에는 지속 시간에 대한 체험, 물리적 시간이 변했다는 추정, 존재에 대한 해석이 합쳐져 있다. 연구에서는 이를 독립적인 질문으로 나눈다. 시계 기록이 남아 있는가? 움직임과 소리에는 무슨 일이 있었는가? 관찰자의 상태는 어떠했는가? 정확히 무엇을 근거로 외부 발생원을 추정했는가? 이렇게 구분하면 이야기의 내용을 보존하면서 독립적으로 검증할 수 있다.

연구 대상은 환경의 한 구역, 사건, 일련의 측정, 시료, 체험 또는 경로 사이의 불일치일 수 있다. 연구 초기에는 하나의 분석 단위를 고르는 것이 좋다. 사건을 단위로 정했다면 시작과 끝을 정의해야 한다. 구역을 조사한다면 조사 경계와 그 변경 조건이 필요하다. 일련의 보고를 다룬다면 어떤 사례를 그 묶음에 넣을지 규칙이 필요하다. 그렇지 않으면 선호하는 설명에 맞추어 자료의 구성이 눈에 띄지 않게 달라진다.

이 논고의 보편성은 과제를 설정하는 방식에서 나온다. 아직 알려지지 않은 부류의 모든 발현 양상을 미리 열거할 수는 없지만, 관측량, 기록의 출처, 예상 모형, 결정 조건의 설명을 요구할 수는 있다. 이 구조는 확장할 수 있다. 새 현상이 제안된 분류에 들어맞지 않으면 최초 기술을 보존하고 분류를 재검토한다. 적절한 이름이 없다는 사실 자체가 자료를 버리는 이유가 되어서는 안 된다.

주장의 층위

이 책에서 확립된 결과란 명시한 연구로 뒷받침되는 한정된 주장을 뜻한다. 작업 가설은 관찰을 추정 기전과 연결하며 검증할 수 있다. 가정 모형은 추가 가정의 결과를 탐구한다. 예를 들면 시공간 계량의 특정 변화이다. 저자의 프로토콜은 제안하는 행동 순서를 정하며, 구체적 과제에 대한 적합성을 검증해야 한다. 이 지위들은 서로 다른 질문에 답하며 한 장 안에 함께 있을 수 있다.

이례적인 시간 편차를 기술할 때 기록 자체와 시계의 특성은 확립될 수 있다. 국소적인 물리 효과에 의한 설명은 가설로 남는다. 예상 지시값을 계산하게 해 주는 영역의 기하는 가정 모형이다. 관측소 배치 계획은 저자의 프로토콜이 된다. 층위 사이의 전환은 새 근거가 생길 때 이루어지며, 설득력 있어 보이는 용어가 이를 대신하지는 못한다.

엑스트라과학의 과제

여기서 엑스트라과학이란 추론의 검증 가능성을 유지하면서 익숙한 서술의 범위를 벗어나는 현상을 다루는 연구 프로그램을 뜻한다. 대안 설명의 탐색, 측정의 개발, 자체 한계의 분석을 포함한다. 가정한 효과가 계기와 상호작용하는 경로가 아직 확립되지 않았다면, 먼저 그런 경로를 찾아야 한다. 어떤 설명이 선택 조건을 밝히지 않은 채 서로 다른 여러 결과를 허용한다면, 결정적인 실험을 시작하기 전에 모형을 더 구체화해야 한다.

연구의 실질적인 결과는 새 기전의 발견, 측정 절차의 수정, 가설 매개변수의 제약 또는 자료 부족을 문서로 인정하는 것일 수 있다. 어느 결과든 후속 행동을 바꾼다. 감도가 부족하다는 보고는 어떤 개선이 필요한지 보여 줄 때 유용하다. 계기에서 생긴 인공적 신호에 관한 보고는 다른 조건에서도 그것을 알아보게 할 때 유용하다. 허용 가능한 설명의 범위를 좁히고 결정의 질을 높이는 것이 진전의 기준이다.

학습 시나리오

가상의 연구팀이 작은 물체가 사라졌다는 보고 세 건을 받는다. 첫째 사례에는 기억만 있고, 둘째에는 프레임이 누락된 영상 기록이 있으며, 셋째에는 동기화 상태를 모르는 두 카메라의 연속 기록이 있다. 세 사례를 모두 등록하되 다음 단계는 달라야 한다. 첫째에서는 경위와 증언을 조사할 수 있다. 둘째에서는 기록의 단절을 조사해야 한다. 셋째에서는 시계와 기하를 검증한 뒤 순서를 재구성할 수 있다. "사라짐"이라는 공통 단어가 공통 기전을 만들어 주지는 않는다.

연구는 가용 자료로 답할 수 있는 질문에서 시작한다. 질문을 구체화하면서 사례 명세를 만들고, 발현 양상의 부류를 고르며, 허용 가능한 연구 방식을 평가한다. 다음 장에서는 관찰 자체와 거의 동시에 생겨나는 설명 사이의 경계를 어떻게 유지할지 살펴본다.

제2장

관찰과 설명

관찰이 원래 모습 그대로 보고서에 담기는 일은 드물다. 사건과 최종 기술 사이에는 감각기관, 계기, 소프트웨어 변환, 언어가 있다. 각 전환은 정보의 일부를 골라내고 가정을 보탠다. 따라서 과학적 기술은 사슬을 재구성하는 데서 시작하는 것이 유용하다. 무엇이 무엇과 상호작용했고, 어떤 신호가 생겼고, 그것을 어떻게 보존했으며, 어떤 규칙으로 결론을 내렸는가? 이 사슬은 카메라에도 목격자의 이야기에도 중요하다.

기록의 네 층위

첫째 층위에는 가용 원자료가 담긴다. 파일, 지시값, 당사자의 말을 직접 적거나 녹음한 기록, 시료와 그 채취 조건이다. 둘째 층위는 필터링, 동기화, 단위 변환, 사건 경계의 식별과 같은 처리를 기술한다. 셋째 층위는 측정이나 재구성의 결과를 제시한다. 넷째에는 원인에 대한 해석이 담긴다. 원본을 바꾸지 않고 이전 상태로 돌아가 분석 방법을 바꿀 수 있도록 층위 사이의 연결을 보존해야 한다.

빛나는 점의 영상 기록은 원자료이다. 프레임을 안정화한 뒤 얻은 점의 좌표는 처리 자료에 속한다. 각속도는 측정 모형의 결과이다. 궤적과 가속도에 관한 주장에는 거리와 카메라 움직임에 관한 추가 정보가 필요하다. 비행 기전에 대한 추정은 사슬에서 그보다 더 멀리 있다. 전환이 많을수록 각 단계의 매개변수를 문서화하는 일이 중요해진다.

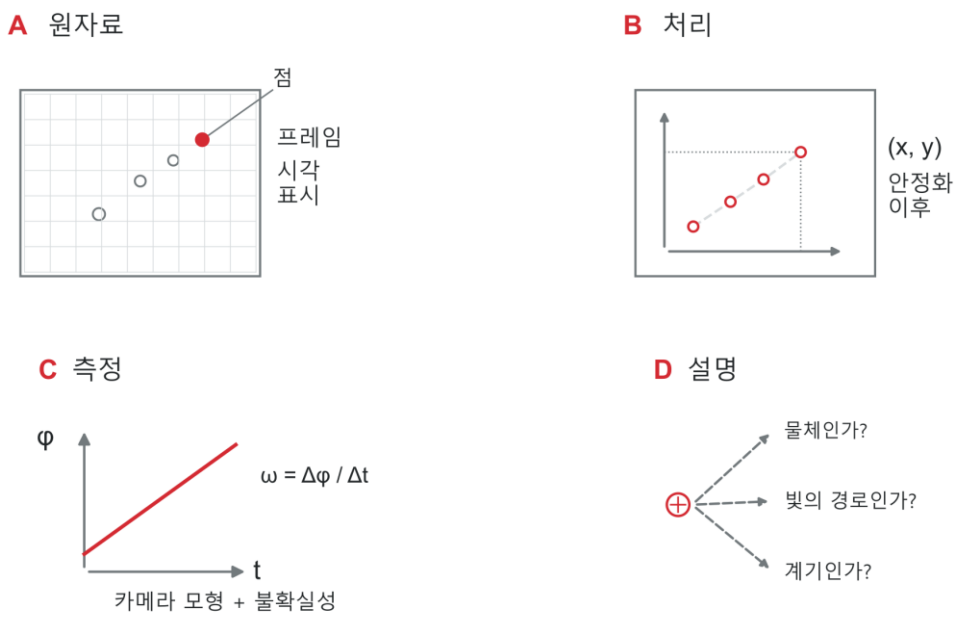


그림 1. 네 층위: 기록, 처리, 측정, 설명. 방법의 도식이다. 하나의 자료가 원기록, 처리, 측정 모형, 가능한 설명이라는 네 층위를 거친다. 진행선은 개념적이며 수치 결과를 담고 있지 않다. 물음표는 경쟁 가설들을 나타낸다. 어느 단계에서든 원기록으로 돌아갈 수 있다.

증언도 구조는 비슷하다. 처음 자유롭게 한 설명은 구체화 질문에 대한 답과 따로 보존한다. 다른 사람의 기록을 보거나 다른 목격자와 이야기한 뒤 얻은 정보에는 입수 시점을 표시한다. 그러면 신뢰할 수 없다고 비난하지 않고 보고의 이력을 조사할 수 있다. 목격자 기억 실험은 사후 논의가 기억 내용에 영향을 줄 수 있음을 보여 준다. 다만 개별 보고는 그 자체로 분석해야 한다. [1]

중립적 표현

중립성이란 주장을 정확히 하는 데 있다. 센서가 어떤 양을 측정했는지 모르는 동안에는, 막연히 에너지가 방출되었다고 말하기보다 "센서가 자체 배경 범위를 넘는 값을 기록했다"라고 쓰는 편이 유용하다. "관찰자가 어떤 존재를 느꼈다고 보고했다"라는 표현은 보고가 있었다는 사실을 보존하며 가능한 외부 자극을 별도로 조사하게 한다. 가설이 달라져도 뜻이 변하지 않는 말을 쓰는 것이 좋다.

해석을 기록부에서 삭제해서는 안 된다. 해석은 왜 다음 실험을 선택했으며 어떤 예상이 조작자에게 영향을 주었을 수 있는지 보여 준다. 작성자, 날짜, 근거를 적는 별도 항목을 둔다.

설명안을 기각하더라도 기록은 남긴다. 이런 이력은 연구의 흐름을 설명하고, 미리 제안한 예측과 결과를 본 뒤에 만들어 낸 그럴듯한 설명을 구별하는 데 도움이 된다.

측정을 매개하는 장치의 검증

계기는 특정한 종류의 상호작용을 감지하며 제한된 범위에서 작동한다. 이례적인 지시값을 기술하려면 기기 모델, 운용 방식, 단위, 평균화 기간, 설정과 상태 정보가 필요하다. 화면 캡처에 이 매개변수가 모두 담기는 경우는 드물다. 재현 가능한 검증을 위해 원자료 흐름이나 확보할 수 있는 가장 이른 단계의 형식을 보존하고, 이어서 불가피한 변환을 기록한다.

설정 변경 뒤 신호가 줄었다면 감도가 달라졌을 수 있다. 영상의 세부가 더 잘 보이는 것은 처리의 결과일 수 있다. 따라서 계측 전문가는 두 기록을 비교하기 전에 운용 조건을 비교할 수 있는지 확인한다. 조건이 다르면 공통 측정 모형으로 환산하는 방법이나 각 조건에 대한 별도 평가가 필요하다. 보기 좋은 최종 영상끼리 비교하는 것으로 이 작업을 대신할 수 없다.

층위를 구분하는 저자의 절차

1. 자료 관리자는 원자료를 보존하고 식별자를 부여한다. 원본이 없으면 이를 명시한다.

2. 조작자는 자료를 얻은 상황, 이용 가능한 설정, 알려진 모든 공백을 기술한다.

3. 분석자는 해당 결과를 얻는 데 필요한 연산을 열거하고 그 버전을 보존한다.

4. 계측 전문가는 신호를 물리량으로 변환할 때의 가정과 중요한 한계를 밝힌다.

5. 연구 책임자는 설명들을 각각 정식화하고 각 설명을 검증 가능한 예측과 연결한다.

6. 핵심 전환을 재구성할 수 없으면 실제로 자료가 뒷받침하는 층위까지만 결과를 제시한다.

분석 중단이 반드시 기록 중단을 뜻하지는 않는다. 위험을 더하지 않고 기록을 계속할 수 있다면 처리 문제를 밝히는 동안 원자료를 보존할 수 있다. 반대로 조작자가 원하는 영상을 얻으려고 미지의 환경에 가하는 작용을 바꾸면 새로운 실험이 된다. 연구 대상의 상태와 안전 조건이 모두 달라지므로 별도 결정이 필요하다.

학습 사례 분석

가상의 카메라가 어두운 복도를 배경으로 나타나는 형체를 보여 준다. 자동 대비 향상으로 윤곽이 더 뚜렷해진다. 연구자는 원본 파일, 처리 결과와 알고리즘 매개변수를 보존한다. 첫 층위에서 확립되는 것은 기록에 특정 구조가 있다는 사실이다. 다음 검증에서는 원본 프레임,

인접 화소와 독립적인 경로에서 그 구조가 안정적으로 유지되는지 확인한다. 그 전까지 윤곽의 모양만으로 발생원의 물리적 본성이나 의도를 정할 수는 없다.

이렇게 구분하면 관찰 이력을 다시 쓰지 않고도 설명을 바꿀 수 있다. 논쟁도 생산적으로 바뀐다. 참여자들이 자료에서 결론으로 넘어가는 구체적인 전환을 논의하기 때문이다. 다음 단계는 결과가 얼마나 정확하며 어떤 편차를 의미 있다고 볼 수 있는지 평가하는 것이다.

제3장

증거와 불확실성

화면의 숫자는 물리량의 정의와 획득 조건이 함께 제시될 때 과학적 의미를 얻는다. 지시값이 높은 정밀도로 반복되면서도 일정한 편향을 포함할 수 있다. 실험실에서는 올바르다가 장소를 옮긴 뒤에는 신뢰하기 어려울 수 있다. 이상현상 연구에서는 입력 자료 사이의 관계까지 포함해 측정 모형 전체를 평가해야 한다. 『측정불확도 표현 지침』의 입문서(JCGM GUM-1)는 바로 이러한 측정과 불확도 표현의 접근법을 다룬다. [2]

예상과 비교하는 것

모든 편차에 대해 관측값, 예상값과 둘을 비교하는 규칙을 기록한다. 예상 자체에도 불확실성이 있을 수 있다. 예를 들어 배경 온도는 시간에 따라 달라지고, 기하 모형에는 좌표 오차가 있으며, 계기의 예측은 환경 상태에 의존한다. 두 수 가운데 하나의 정확도만 알아서는 그 차이를 평가할 수 없다. 공통 보정은 두 결과를 함께 이동시킬 수 있어 특히 중요하다.

반복 관찰의 산포, 계통적 영향, 모형의 불확실성, 자료 부족을 구별하면 유용하다. 각 요소에 필요한 대응이 다르기 때문이다. 추가 평균화는 허용되는 조건에서 무작위 산포를 줄일 수 있지만 잘못된 교정을 없애지는 못한다. 더 상세한 모형은 예상값을 바꿀 수 있으나, 불필요한 매개변수는 검증을 오히려 불명확하게 만들 수 있다. 따라서 모든 개선은 불확실성의 기원에 관한 구체적인 질문에 답해야 한다.

증거력의 수준

한 번의 보고가 뒷받침하는 것은 그 보고가 있었다는 사실이다. 보존된 기록으로는 기록된 신호를 조사할 수 있다. 검증된 측정 경로는 물리량을 논의할 근거를 준다. 통제된 조건에서의 반복은 그 조건과의 연관성을 뒷받침한다. 독립적인 검증은 결과가 다른 구현에도 적용되는지 보여 준다. 이는 과제들의 순서이며 모든 사례가 반드시 올라가야 할 사다리는 아니다. 드문

자연 사건은 반복되지 않을 수 있지만, 질 높은 다중 경로 기록은 여전히 가능한 설명을 제한한다.

약한 고리는 후속 추론의 양으로 보완할 수 없다. 발생원까지의 거리를 모르면 각운동 평가의 정확도가 선속도의 정확도로 바뀌지 않는다. 시료의 출처를 추적할 수 없게 되었다면 상세한 화학 분석은 조사한 물질을 기술할 뿐, 그것이 나타난 장소를 자동으로 복원하지는 않는다. 보고서에는 구체적인 부족 요소가 어떤 주장을 제한하는지 밝혀야 한다.

검출 한계와 음성 결과

신호가 기록되지 않았다는 사실은 알려진 검출 능력에 비추어 볼 때만 정보를 준다. 범위, 시간창, 기하, 배경 수준과 적용한 기준을 밝혀야 한다. 센서가 측정하지 않는 대역에서 신호가 예상된다면 결과는 해당 가설을 제한하지 않는다. 기기가 일부 시간에만 작동했다면 관찰을 누락 구간에까지 확대할 수 없다.

오경보와 검출 누락은 서로 다른 특성이다. 경보가 드문 계기가 관심 효과를 잘 알아차리지 못할 수도 있다. 미국 국립표준기술연구소(NIST)의 오경보 검증 보고서는 결론을 시험 모형과 시험 규모에 연결한다. 그런 결론이 검출 누락 확률까지 자동으로 정해 주지는 않는다. [3] 연구 장비 체계에서는 결정에 중요한 조건 아래 두 특성을 각각 확인해야 한다.

수치 학습 예

두 온도 경로를 비교하는 가상의 사례를 보자. 첫 경로는 배경과의 차이를 0,4도, 둘째는 0,3도로 나타낸다. 첫 경로의 미지 보정량이 0,5도에 견줄 만하고 둘째의 보정량이 0,4도에 견줄 만하다면, 중심값이 가깝다는 사실만으로는 효과를 정확히 확인할 수 없다. 두 경로가 같은 잘못된 배경 온도 추정값을 쓰면 공통 편향이 있어도 서로 일치할 수 있다. 여기의 수치는 과제의 구조를 설명하기 위한 것이며 실제 계기의 기준이 아니다.

다음으로 유용한 행동은 공통 배경 경로나 독립적인 표준을 검증하는 것이다. 편향의 원인을 바꾸지 않은 채 같은 지시값을 거듭 반복하면 같은 모호성을 더 길게 기록할 뿐이다. 다음 측정을 고를 때는 불확실성의 어떤 요소를 줄이며 그에 따라 결정이 얼마나 달라질지 묻는 것이 유용하다.

결과의 실무 기록

- 물리량과 단위, 좌표, 시간과 평균화 범위.
- 원신호의 변환 모형과 매개변수의 출처.

- 반영한 영향과 반영하지 못한 영향을 명시한 불확도 평가.
- 비교 대상인 예상 모형과 배경 구간을 고른 이유.
- 포화, 누락, 고장과 경로들의 공통 의존 관계에 관한 정보.
- 자료가 뒷받침하는 주장과, 바로 그보다 강하지만 아직 근거가 부족한 주장.

통계적인 이례성 역시 선택한 모형에 상대적이다. 그 전제 아래에서 확률값이 작다고 해서 그것이 새 설명이 참일 확률인 것은 아니다. 여러 시간 창, 경로와 필터링 방법을 탐색했다면 탐색 절차 자체를 고려해야 한다. 발견이 안정적으로 유지되는지 평가하려면 미리 고정한 규칙을 적용하는 새 자료 집합이 유용하다. 사건을 발견한 뒤 잡음 모형을 맞추었다면 그 사실이 분석에서 드러나야 한다.

마지막 항목은 결론이 눈에 띄지 않게 확대되는 일을 막는다. 확인된 편차로부터 그 원인을 도출하는 작업은 아직 남아 있다. 이를 위해서는 경쟁하는 여러 모형과, 모형마다 결과가 다르게 예상되는 실험이 필요하다.

연구 대상으로서 분포의 변화

통상적인 사건의 분포도 연구 대상이 될 수 있다. 개별 검출은 알려진 범위 안에 있지만 빈도, 산포, 순서 또는 경로 사이의 의존 관계가 달라지는 경우이다. 이런 사례의 기술은 어떤 기회들의 집합에서 사건을 골라내는지 밝히는 데서 시작한다. 동시 발생이라면 비교하는 쌍의 목록과 허용 시간 창이고, 기기 고장이라면 유효한 작동 주기의 수이며, 드문 펄스라면 유효 관측 시간이다. 이 분모 없이 찾아낸 사례 수만으로는 빈도를 정할 수 없다.

관찰 전에 포함 규칙을 기록한다. 경로, 문턱값, 지속 시간, 계기의 허용 상태, 인접한 작동 신호를 하나로 묶는 방법이 포함된다. 오래 지속된 간섭 하나가 기록부에 백 줄을 남겨도 하나의 에피소드일 수 있다. 통합 알고리즘을 바꾸면 비교하는 모든 자료를 다시 계산해야 한다. 이전 원기록을 잃었다면 이전 빈도와 새 빈도의 비교에는 그에 따른 한계가 생긴다.

검증할 변화	필요한 분모	중요한 대안
펄스의 빈도	유효 관측 시간과 선택한 검출기의 효율	문턱값, 비가동 시간 또는 배경이 달라졌다
동시 발생의 비율	허용되는 모든 쌍과 미리 고른 시간 창	자료를 본 뒤 비교 횟수가 늘었다

검증할 변화	필요한 분모	중요한 대안
지시값의 산포	측정값 사이의 연관성을 고려한 비교 가능한 계열	온도나 평균화 시간이 달라졌다
사건의 군집화	사건이 없는 구간까지 포함한 전체 순서	하나의 발생원이 여러 기록을 만들었다
조건부 의존 관계	미리 정의된 조건의 모든 조합	조건들이 조작자, 장소 또는 일정과 연관된다

학습 예에서 관측망은 첫 기간에 보고 20건, 둘째 기간에 60건을 기록했다. 가동 노드 수는 10에서 40으로 늘었고 두 기간의 길이는 같다. 감도가 같더라도 원래 건수는 노드당 빈도 증가를 뒷받침하지 않는다. 노드당 보고 수가 2에서 1,5건으로 변했기 때문이다. 이 수치가 아직 독립적인 사건의 빈도 추정치는 아니다. 먼저 중복 보고를 묶고 각 노드의 실제 가동 시간을 반영하며 장소를 비교할 수 있는지 검증해야 한다. 이 예는 보고 기록 보관소와 물리적 사건의 흐름을 서로 다른 단위로 기술하는 이유를 보여 준다.

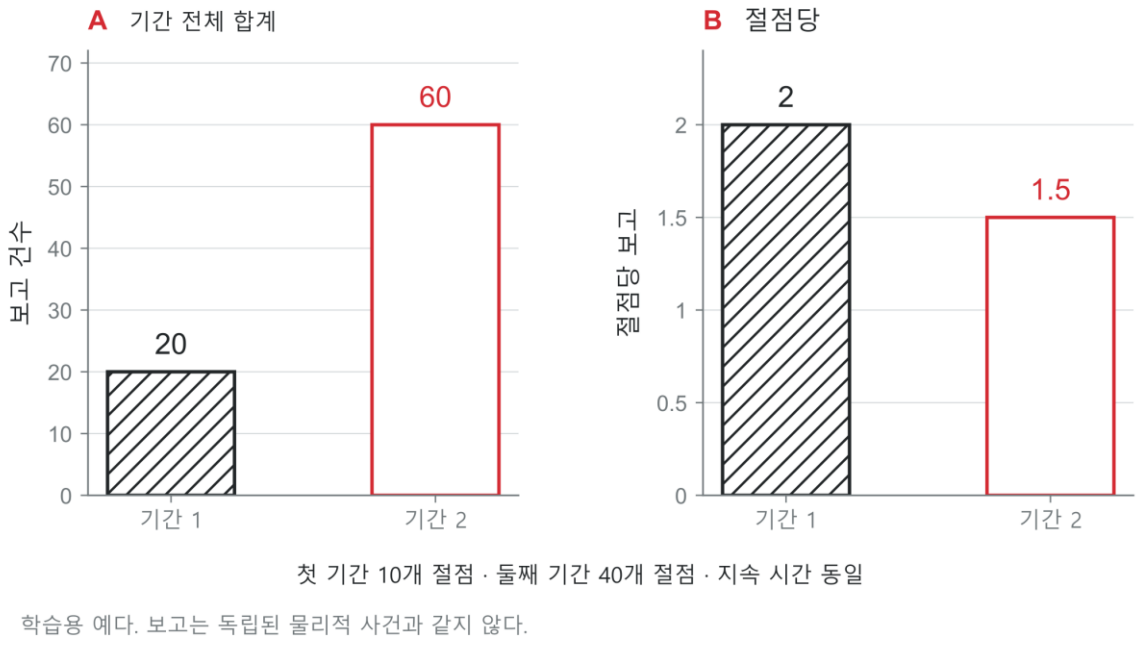


그림 2. 보고가 늘어도 사건이 늘었다고 할 수 없는 이유. 합성 자료를 사용한 학습 예다. 보고 수는 20에서 60으로, 노드 수는 10에서 40으로 늘었다. 같은 기간에 노드당 보고 수는 2에서 1,5로 줄었다. 이 수치들로부터 독립적인 물리 사건의 빈도를 추론할 수는 없다.

확증 계열과 종료 시점

탐색 계열은 특징을 선택하고 다음 측정의 실행 가능성을 평가하는 데 쓰인다. 확증 계열은 특징, 배경 모형, 적합성 기준과 종료 규칙을 고정한 뒤 시작한다. 그 자료로 새로운 동시 발생 시간 창이나 새로운 사람들의 하위 집단을 고른다면, 그렇게 선택한 결과는 탐색 결과가 된다. 측정값이 많다는 사실만으로 사전에 정한 지위가 되돌아오지는 않는다.

간단한 학습 계획에서는 유효한 시도 100, 200, 300, 400회 뒤에 네 번 검증한다. 각 검증에 대해 채택한 모형에서 오류 확률이 0,0125를 넘지 않는 올바른 신뢰구간을 미리 구성한다. 합집합 부등식에 따라 이 네 고정 단계 중 적어도 한 번 참값을 포함하지 못할 확률은 0,05를 넘지 않는다. 이 논증에 네 검증 자체의 독립성은 필요하지 않지만, 각 구간은 자기 자료 모형에서 유효해야 한다. 이 계획은 새 결정 규칙에 따라 기록하지 않은 추가 열람을 허용하지 않는다.

더 유연한 순차적 방법은 결과를 거듭 갱신할 때도 명시한 성질을 유지할 수 있다. 특히 신뢰수열은 명시된 전제 아래 시간 전체에 걸쳐 동시에 참값을 포함하는 구간들을 구성한다 [58]. 적용 전에 구체적인 구성을 고르고 조건을 검증한다. 고정된 자료 규모를 위한 통상적인 구간을 어느 중단 시점에서나 적합하다고 자동으로 선언할 수는 없다.

분포 연구의 결과는 평가한 의존 관계와 다른 조건으로의 적용 한계로 표현한다. 해당 기록 규칙 아래 명시한 운용 방식에서 특정 펄스의 빈도가 더 높다거나, 확립한 감도에서 효과가 검출되지 않았다는 식이다. 분포 변화 자체가 인과성에 대한 개입, 의도 또는 새로운 자연법칙을 확립하지는 않는다. 그것은 발생원, 환경과 관찰의 어떤 변화가 발견한 의존 관계를 재현하는지 밝히는 다음 과제를 만든다.

제4장

인과 모형과 구별하는 검증

설명은 대안들과 다른 예상을 도출할 수 있을 때 작업 가설이 된다. “여기에서 미지의 장이 작용한다”라는 말은 아직 가능한 원인의 이름을 붙일 뿐이다. 검증하려면 그 장이 무엇에 영향을 주며, 조건이 바뀌면 응답이 어떻게 달라지고, 어떤 관찰이 제안한 설명과 양립할 수 없는지 구체화해야 한다. 상호작용 경로를 정확히 정식화할수록 가설 평가를 실제로 바꿀 측정을 고르기 쉽다.

인과 지도

분석 초기에는 인과 도식을 말이나 화살표로 나타내면 유용하다. 추정 발생원이 환경에, 환경이 대상에, 대상이 센서에 영향을 주고, 처리 과정이 결과를 만든다. 별도 화살표로 외부 조건을 센서와 관찰자의 행동에 연결한다. 이런 도식은 우회적인 설명을 드러낸다. 한 요인이 계기 지시값과 사람의 감각을 동시에 바꿀 수 있으며, 둘 사이에는 직접적인 인과관계가 없을 수도 있다.

도식이 완전할 필요는 없다. 알려지지 않은 연결에는 물음표를 붙인다. 다만 관측 변수마다 구체적인 기록을 연결하는 것이 좋다. 추정 원인을 직접 측정할 수 없다면 그로부터 예상되는 결과를 살펴본다. 여러 결과는 모형이 그 동시 발생을 미리 예측하고, 알려진 간섭이 같은 조합을 만들지 않을 때 유용하다.

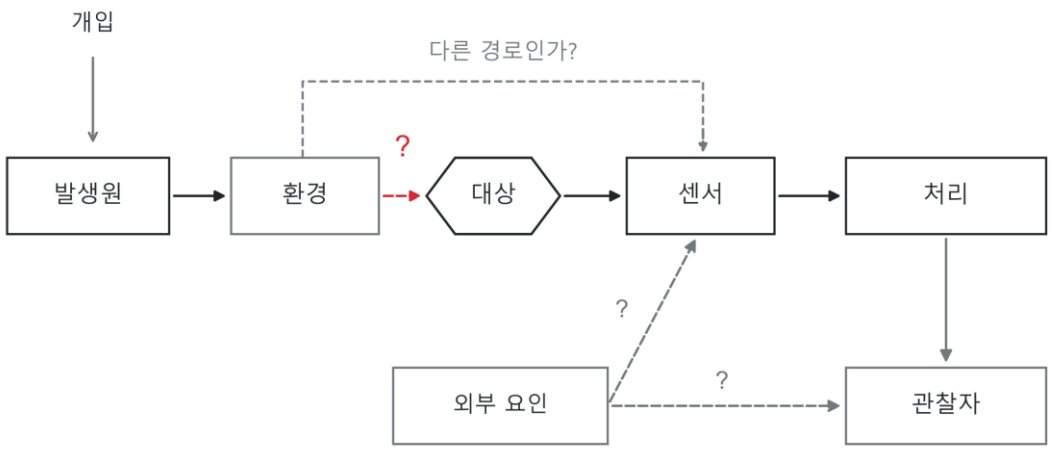


그림 3. 인과 지도와 우회 설명. 저자의 인과 도식이다. 발생원에 대한 개입을 환경, 대상, 센서, 처리의 상태와 함께 살펴본다. 센서로 이어지는 우회 경로와 기기 및 관찰자의 변화를 함께 일으키는 공통 원인이 가능하다. 진홍색 부분은 검증할 연결을 강조하며, 그 연결이 참이라고 확정하지 않는다.

경쟁하는 설명의 행렬

이례적인 시간 편차에 대해서는 국소 발진기의 변화, 시간 전송 오류, 소프트웨어의 시각 표지 재계산, 시간 표준들의 물리적인 진행률 차이를 검토할 수 있다. 각 설명안에는 고유한 예측이 필요하다. 자율적인 비교 뒤에도 편차가 남을 것인가? 원신호에도 나타날 것인가? 특정 전송

체계와 관련될 것인가? 한 설명안을 다른 설명안으로 바꿀 수는 있지만 연구 이력에 그 사실이 드러나야 한다.

가설	설명을 구별하는 예상	유용한 검증
시각 표지 생성의 오류	발진기의 원래 측정값과 시각 표지가 어긋난다	시각 표지 생성에 관한 독립적인 기록부를 대조한다
환경이 계기에 미치는 영향	응답이 센서의 구조나 상태와 관련된다	서로 다른 종류의 측정 경로와 기록된 환경을 비교한다
관찰 대상의 변화	적합한 측정 방법을 바꾸어도 변화가 유지된다	비교 가능한 조건에서 독립적인 측정을 수행한다

행렬은 쓸모없는 반복도 드러낸다. 모든 설명안이 제안한 실험에서 같은 결과를 예측한다면 양성 결과가 나와도 설명을 고르는 데 거의 도움이 되지 않는다. 그런 실험은 기록의 신뢰성을 검증하는 데 필요할 수 있지만, 목적을 바로 그렇게 밝혀야 한다. 결정적인 실험에는 예측들이 현재의 불확실성보다 더 크게 갈라지는 영역이 필요하다.

결과 이전의 예측

실험 전에 주지표, 시간 창, 자료 포함 조건, 처리 계획과 종료 규칙을 고정한다. 사전등록은 연구 결정의 이력을 검증 가능하게 한다. 그 자체가 선택한 모형이나 연구 설계의 질을 보장하지는 않는다. [4] 탐색 분석에도 정당한 자리가 있다. 규칙성을 찾고 나서 새 자료로 검증하도록 돕기 때문이다.

연구 중 계획을 바꾸어야 할 때도 있다. 이때는 원래 판을 보존하고 변경 이유와 새 절차가 적용되는 시점을 기록한다. 이미 본 자료를 그 자료에서 떠올린 생각에 대한 독립적인 검증으로 소급해 바꾸지는 않는다. 이례적인 세부 하나하나를 미리 예상한 확인 증거로 삼고 싶은 유혹이 큰 희귀 사건에서는 이 구분이 특히 중요하다.

새 원인을 만드는 개입

환경을 바꾸면 연구자는 영향을 하나 더 가하게 된다. 기기를 끄면 열, 소음, 전자기 환경, 팀의 행동이 달라진다. 로봇을 옮기면 기하가 달라지고, 때로는 연구 대상 상태 자체도 변한다. 따라서 실험변수는 물리적으로 기술해야 한다. 여러 조건이 동시에 달라졌다면, 추가 검증으로 기여를 나누기 전까지 결과는 그 조건들의 결합 전체에 해당한다.

선택한 환경에서 되돌릴 수 있고, 관찰 가능하며, 결과를 이해할 수 있는 개입이 바람직하다. 이는 실험을 구성하는 저자의 규칙이며 미지의 현상에 대한 안전 보장은 아니다. 결정은 확인된 작용 경로와 구체적 조작의 허용 가능성에 달려 있다. 결과를 구별할 능력을 잃으면 실험을 중단한다. 그런 상태에서 계속하면 검증 가능한 지식은 늘리지 못한 채 위험만 더할 수 있다.

학습 시나리오

가상의 실험실에서 문을 열 때 이상한 펄스가 생긴다. 두 설명안이 제시된다. 문 움직임이 장의 변화를 일으키거나, 들어오는 사람이 대상에 영향을 준다는 것이다. 사람이 들어오지 않고 문만 열기와 다른 경로로 들어오기는 다른 조건을 통제할 때만 두 설명안을 구별할 수 있다. 문이 열릴 때마다 조명도 켜지고 환기도 달라진다면 최초 실험은 여러 원인을 한꺼번에 검증한다. 팀은 먼저 이 관계를 기술한 뒤 허용 가능한 최소 변수를 고른다.

반복할 수 없는 사건에서는 설명을 구별하는 검증을 남아 있는 흔적과 여러 경로의 양립 가능성에 집중할 수 있다. 자연 과정 자체를 반복할 수 없어도 교정, 기하 재구성, 각 설명안의 물리적 결과는 독립적으로 검증할 수 있다. 이런 간접 검증으로 충분한 주장과 재현 가능한 개입이 필요한 주장을 미리 구별해야 한다. 일회성은 방법을 제한하지만 모든 설명을 동등하게 만들지는 않는다.

미리 고려한 어느 설명안과도 맞지 않는 결과는 억지로 승자를 고르지 않고 보존한다. 목록이 불완전하거나 측정이 실패했거나 새 질문이 생겼다는 뜻일 수 있다. 인과 분석은 어떤 연결의 범위를 좁혔으며 다음에 어떤 관찰이 가장 유익할지에 관한 구체적인 결정으로 끝난다.

실행 가능한 구별 표

확증 실험 전에 불편한 결과까지 포함한 결과표를 채우면 유용하다. 각 설명안에 대해 물리량, 예측 범위, 그 적용 조건, 실험을 무효로 만드는 징후를 명시한다. "무엇이 이 설명안을 기각하는가" 칸이 비어 있다면 아직 검증할 준비가 되지 않은 것이다. 양립 불가능성은 불확실성, 관찰 사이의 의존 관계, 검증 계열에 맞추어 매개변수를 조정했는지를 고려하여 미리 고른 규칙으로 판단한다.

적합한 검증의 결과	허용되는 결론	다음 행동
모형의 예측이 자료와 양립하지 않는다	해당 모형의 판은 검증을 통과하지 못했다	계산을 보존하고 새 판에서 바꿀 가정을 명시한다

적합한 검증의 결과	허용되는 결론	다음 행동
정해진 크기의 효과를 배제했다	시험한 조건에서 효과 크기의 범위를 제한했다	범위와 포괄 대상을 명시하고 결과를 다른 운용 상태로 확대하지 않는다
여러 설명안이 자료를 설명한다	기전을 식별하지 못했다	예측들이 갈라지는 구성을 고른다
감도가 부족하다	실험이 설명안들을 구별하지 못했다	측정 과제를 바꾸거나 새 계기의 필요성을 뒷받침한다
적합성 기준을 위반했다	이 계열로 주가설을 검증하지 못했다	실패 원인을 분석하고 이 계열을 음성 결과로 세지 않는다
작업 허용 조건에 따라 중단했다	이 단계의 연구를 마쳤다	상태, 책임과 중단 이유를 보존한다

학습 예는 잔류 신호에 대해 두 설명안을 제시한다. 설명안 A는 발생원을 재배치하면 부호가 바뀐다고 예측하고, 설명안 B는 부호가 유지된다고 예측한다. 재배치할 때 케이블 상태도 함께 달라진다. 케이블의 영향을 검증하기 전까지 이 실험은 A와 B를 구별하지 못한다. 계획한 조작이 여러 변화를 한꺼번에 일으켰기 때문이다. 독립적인 판독을 도입한 뒤에는 받침부를 통한 기계적 전달이라는 설명안 C를 표에 더한다. 목록을 확장할 수는 있지만, 그 절차를 고려하지 않은 채 같은 자료로 새 매개변수를 추정하고 검증해서는 안 된다.

프로그램 종료에도 분명한 의미가 있다. "가용 방법으로는 A와 C를 구별하지 못한다"라는 진술만으로도 한 단계의 결과로 충분할 수 있다. 계속하려면 어떤 관측 가능한 특징이 추가로 필요한지 보고서에 남긴다. 그러면 다른 연구자가 이전의 전 과정을 반복하지 않고 새 계기의 유용성을 평가할 수 있다. 지속되는 잔류 신호에 대한 완성된 분석은 사례 2에 제시했다.

제5장

지식의 한계와 연구 윤리

미지의 대상을 연구하는 일은 물리적 설명이 나오기 전부터 사람들에게 영향을 준다. 보고는 장소의 평판을 바꾸고 불안을 일으키며 개인정보를 드러내거나 타인의 삶에 개입하게 할 수

있다. 따라서 윤리는 계측학과 마찬가지로 연구의 구성에 들어간다. 어떤 정보를 수집할 수 있고, 누가 결정하며, 연구를 계속할 충분한 근거가 무엇인지 정한다.

목격자의 존엄성

목격자는 체험을 기술하는 사람이지 연구자가 제시한 세계관을 입증할 의무가 있는 사람이 아니다. 의학적, 종교적 또는 물리적 해석을 받아들이도록 압박하지 않고 이야기를 기록한다. 불확실성은 자료에 관해 표현한다. 가용 자료로 원인을 밝힐 수 없다는 말은 체험의 가치를 깎아내리지도, 그것을 외부 기전의 증거로 자동 전환하지도 않는다.

사람이 연구 참여자로 포함되면 목적, 허용 절차, 중단 방법과 자료 취급 방식을 미리 정한다. 동의는 이해 가능한 과제에 관한 것이며 설명한 규칙 안에서 철회할 수 있다. 중요한 위험을 숨겨 관찰이 독립적인 듯한 외양을 만들어서는 안 된다. 생리적 작용과 상태 평가에 관한 결정에는 그에 맞는 전문 역량이 필요하다. 연구 대상이 이례적이라는 이유로 연구팀에 그런 역량이 생기는 것은 아니다.

중단 권리

안전 조정자는 연구 책임자가 결과를 얻고 싶어 하는지와 무관하게 작업을 중단할 수 있어야 한다. 이 권한에는 통신 수단, 명확한 중단 명령, 미리 정한 조작자 행동이라는 실질적인 내용이 있어야 한다. 결정을 실행할 수 없는 형식적 권한은 통제의 외양만 만든다. 재가동하려면 중단 이유를 기록하고 작업 허용 조건이 회복되었음을 확인해야 한다.

참여자가 자신의 참여를 그만둘 권리는 장치의 기술적 정지와 별도로 다룬다. 측정이 정상이어도 참여를 거부할 수 있다. 그 거부를 이상현상의 작용 징후나 실험 실패로 해석하지 않는다. 참여자에게 압력을 가하지 않고 상호작용을 마치며 적법하게 이미 얻은 자료를 보존하는 방법을 프로토콜에 미리 마련한다.

연구의 비례성

제안한 행동은 얻을 것으로 예상하는 지식, 추가되는 작용과 가용 대안에 비추어 평가한다. 같은 질문을 수동적 기록이나 기존 자료 분석으로 해결할 수 있다면 능동적 개입에는 별도 근거가 필요하다. 불확실한 과정에서는 환경을 계속 바꾸지 않고 관찰로 돌아갈 수 있는 가역성이 특히 중요하다. 다만 제어 신호 자체를 되돌릴 수 있다고 해서 그것이 일으킨 모든 결과도 되돌릴 수 있다는 뜻은 아니다.

시료의 보존이 사람의 안전보다 무조건 우선하는 것은 아니다. 동시에 보호를 위한 결정도 필요 없이 정보를 없애서는 안 된다. 기술 기록, 원격 자료, 행동의 연쇄를 보존할 수 있다. 연구 가치와 위험 제한이 충돌할 때에는 선택의 근거까지 공개적으로 기록한다. 그래야 나중에 결말을 안 상태가 아니라 당시 이용할 수 있었던 정보에 비추어 결정을 평가할 수 있다.

사생활과 공개

체험의 장소, 시간과 특징에 관한 정보만으로도 이름을 지운 뒤 당사자를 식별할 수 있다. 공개 전에 과학적 결론을 검증하는 데 어느 정도의 세부 정보가 필요한지 정한다. 원자료 보관소와 공개 자료 집합은 다를 수 있지만 변환은 기술해야 한다. 개인정보 보호 때문에 독립적인 검증이 제한된다면 결과와 함께 그 한계를 알린다.

감염, 위험이나 누군가의 작용을 암시하는 명칭은 검증 전부터 영향을 일으킬 수 있다. 공개적인 기술은 확립된 지식 수준에 맞아야 한다. 연구 기록부에는 대안 설명들을 남겨도 되지만, 외부에 알릴 때 의심 목록을 확인된 위협 목록으로 바꾸어서는 안 된다. 이 구분을 책임질 사람을 미리 정한다.

지적 정직성

부족한 정보를 꾸며 낸 정밀도로 채우지 않는다. 안전 한계를 모르면 선택한 조직 운영상의 제한 근거와 재검토 조건을 밝혀야 한다. 해당 운용 조건에서 계기를 검증하지 않았다면 그 한계와 함께 지시값을 기술한다. 가정 모형은 수학적 결과가 설득력 있어 보여도 가정 모형이라는 표시를 유지한다. 계산 검증과 최초 전제의 확인은 별개 과제로 남는다.

모순이 나타나면 연구자는 자신의 절차에 오류가 있을 가능성도 검토해야 한다. 그렇다고 이례적인 결과를 자동으로 기각해야 하는 것은 아니다. 생산적인 태도는 자료에 새 효과가 있다는 가능성과 기존 설명이 불완전하다는 가능성을 함께 유지한다. 두 설명안 모두에 적용 가능한 검증에 근거해 결정한다. 연구 윤리는 사람과 더불어 이전 모형이 예측하지 못한 것을 발견할 가능성도 보호한다.

연구가 환경에 미치는 결과도 결정에 포함한다. 물질 투입, 조명 변경이나 장비 이동은 측정 구역 밖의 환경까지 건드릴 수 있다. 주된 질문이 계기에만 관한 것이어도 비례성 평가에는 이런 변화가 포함된다. 연구 장소의 보존은 근거 있는 과제 범위 안에서 그 상태를 유지한다는 뜻이며, 더 인상적인 결과를 얻으려고 조건을 마음대로 재구성할 권리가 아니다.

가상의 학습 사례가 이 원칙을 보여 준다. 참여자가 실험 구역에서만 심한 불편을 보고한다. 팀은 그 사람의 참여를 중단하고 중립적인 기술을 보존하며 환경을 검증한다. 계기로 원인을

곧바로 찾지 못했다는 사실도, 관심 구역과 일치한다는 사실도 더 설득력 있는 기록을 얻기 위해 작용을 계속할 근거가 되지 않는다. 연구 과제는 허용되는 독립 측정으로 옮겨 간다.

제II부

분류와 기술

제6장

이상현상의 다차원 분류

분류는 다음 검증을 고르는 데 도움이 되어야 한다. 부류의 이름이 곧바로 원인을 전제한다면 연구자는 그 원인을 확인하는 증거만 찾을 위험이 있다. 따라서 제안하는 표지는 우선 관찰된 발현 양상에 관한 것이다. 한 사례에 여러 표지가 붙을 수 있고 정보 일부는 미정으로 남을 수 있다. 이는 이 책을 위한 저자의 길찾기 체계이며 발전시킬 수 있다.

발현 양상의 주요 부류

코드	관찰 영역	최초 연구 질문
TM	시간	어떤 시간 관련 물리량이 예상과 어긋나는가
SP	공간	어떤 기하 관계가 모형과 맞지 않는가
GF	중력과 관성	어떤 가속도나 장의 성분을 측정했는가
MV	운동과 힘	위치나 기계적 상호작용이 어떻게 변하는가
EM	전자기장	어떤 성분과 대역을 측정했는가
OP	광학	무엇이 발생원에 관한 것이며 무엇이 빛의 경로와 기록에 관한 것인가
TH	열과 에너지	온도와 에너지 수지의 경계를 어떻게 정했는가
IR	전리방사선	어떤 응답을 기록했으며 검출기는 적합한가
AC	음향과 진동	어떤 주파수와 진폭을 측정했으며 진동 전달을 어떻게 평가했는가
MT	물질	시료의 질량, 조성과 출처를 어떻게 확인하는가
BI	생물학과 생태학	변화와 비교 가능한 배경을 어떻게 정했는가
PC	지각과 인지	무엇을 체험하며 무엇이 독립적으로 확인되는가

코드	관찰 영역	최초 연구 질문
DI	디지털 데이터	기록이나 처리의 어느 단계에서 편차가 생겼는가
CA	인과 상관관계	사건 순서를 어떻게 확립하고 대안들을 어떻게 검증했는가
AG	행위주체성으로 보이는 양상	미리 정한 어떤 징후가 의미 있는 응답을 뒷받침하는가
UN	아직 충분히 규정되지 않은 사례	첫 검증을 선택하는 데 부족한 정보는 무엇인가

GF 부류는 연구 질문을 설정하는 방식에서 MV와 다르다. 물체의 움직임은 우선 역학적 관찰에 속한다. 해당 측정이나 명시적으로 검증 가능한 가설이 있을 때 중력 편차 표지를 붙인다. 궤적 자체가 중력 기전을 확립하지는 않는다. 마찬가지로 발광 물체에는 OP 표지를 붙이지만 기록의 색이나 밝기로 그 에너지적 본성이 정해지는 것은 아니다.

AG 표지는 행동이 의미를 지닌 듯 보이는지를 연구한다는 뜻이다. 발생원의 의식, 의도나 인격을 보증하지 않는다. CA 표지는 인과 순서나 이례적인 의존 관계에 관한 과제를 기록하며 역인과성을 확인하지 않는다. UN 표지는 아직 충분히 정확한 질문을 만들 수 없는 사례를 보존하는 데 필요하다. 눈길을 끄는 부류를 성급히 고르기보다 이 표지를 쓰는 편이 낫다.

추가 축

발현 양상의 부류에 공간적 성격, 시간적 양상과 기록 방법을 더한다. 공간적 기술에는 한정된 구역, 분산 관측망, 움직이는 발생원이나 위치 미상이 들어갈 수 있다. 시간적 기술에는 일회성, 반복, 지속 상태 또는 명시한 조건과의 연관성이 들어간다. 기록 방법은 보고, 단일 계기, 여러 경로와 통제 실험을 구분한다. 이 축들은 신뢰성 평가를 대신하지 않지만 기록들을 비교 가능하게 한다.

설명의 지위는 별도로 기록한다. 원인은 모형 범위 안에서 확립되거나 작업 가설로 남거나 아예 제안되지 않을 수 있다. 원인을 아는 사례도 발현 부류는 유지한다. 기술적 발생원을 찾은 뒤에도 전자기 편차는 EM 부류의 유용한 사례로 남는다. 바뀌는 것은 설명과 필요한 행동이며 관찰 이력이 아니다.

분류 부여 규칙

기록 담당자는 먼저 인과적 해석 없이 최소한의 주장을 적는다. 이어서 가용 자료와 직접 관련된 부류를 고르고, 검증할 가설의 부류는 따로 표시한다. 각 표지마다 파일, 측정, 증언 또는

계산이라는 근거를 명시한다. 표지를 재검토해도 이전 판은 변경 날짜와 함께 기록부에 남는다. 이렇게 분류는 추적 가능한 분석의 일부가 된다.

표지가 지나치게 많아도 방해가 된다. 사건 당시 작동 중인 무전기가 있었다는 사실만으로 EM을 더할 근거가 되지는 않는다. 참여자가 무언가 느꼈다면 PC는 기록된 체험에 해당하지만 반드시 주된 연구 방향이 되는 것은 아니다. 지금 연구 방법을 결정하는 질문에 따라 주표지를 고른다. 나머지는 관련 관찰로 보존한다.

복합 학습 예

가상의 에피소드에서 카메라는 발광을 기록하고 자력계는 펄스를 표시하며 컴퓨터 시각 표지는 한 초만큼 바뀐다. 최초 기술에는 OP, EM, DI를 부여한다. 독립 기준의 진행률이 달라졌는지, 소프트웨어 표지만 달라졌는지 확인하기 전까지 TM 표지는 가설로 남는다. 펄스가 장비의 공통 전원 때문에 생겼다면 세 관찰은 하나의 기술적 과정을 기술할 수 있다. 별도로 검증해도 관찰들이 유지되면 연구 프로그램을 넓힌다.

또 다른 가상 사례는 복도가 끝없이 이어진다는 느낌에서 시작한다. 당사자의 이야기만 있으므로 최초 표지 PC에 연구 가설 SP를 함께 붙인다. 평면 배치와 경로의 측정은 독립적인 공간 자료를 만들 수 있다. 그 자료가 생기기 전에는 가정한 기하를 건물의 확립된 성질처럼 다루어서는 안 된다. 이런 순서는 이례적인 설명에 대한 개방성과 현재 지위의 정확성을 함께 유지한다.

분류는 방법에 관한 질문에 답하지만 위험성까지 정해 주지는 않는다. 같은 부류의 두 사례에도 서로 다른 제한이 필요할 수 있고, 눈에 잘 띄지 않는 현상이 안전에 중요할 수도 있다. 따라서 명세의 다음 요소는 독립적인 위험 프로필이다.

제7장

위험 프로필과 결정의 한계

위험성은 상호작용이 가져올 수 있는 결과와 그 발생 조건으로 정해진다. 관찰이 이례적이라는 사실 자체가 위험 수준을 정하지는 않는다. 밝은 빛 현상은 충분히 설명되어 있을 수 있고, 눈에 띄지 않는 측정기 고장이 안전에 중요할 수도 있다. 따라서 위험 프로필은 이상현상의 부류와도, 그 설명에 대한 확신과도 별도로 작성한다.

공학적 접근은 최초 정보의 불확실성을 고려하면서 위험을 시나리오, 확률과 결과에 연결한다. NASA의 시스템 공학 지침에 이런 과제 설정 방식이 제시되어 있다. [5] 연구가 충분하지 않은

현상에서는 확률의 수치에 근거가 없는 경우가 많다. 이때는 측정 근거 없이 정확한 점수를 매기기보다 가능한 시나리오와 부족한 지식에 따라 결정이 어떻게 달라지는지 기술하는 편이 유용하다.

프로필의 축

축	기술할 것	결정에 필요한 것
결과	사람, 환경과 장비에 생길 수 있는 피해	구체적인 접촉 또는 고장 시나리오
접촉 가능성	누가 또는 무엇이 작용을 받을 수 있는가	경로, 사람의 현황과 작업 허용 조건
확산	발생원의 이동 또는 작용의 전달	관찰된 경로와 불확실한 경계
기간	과정의 지속과 반복 가능성	관측 시간 창과 재발 가능 조건
가역성	이전 상태를 복구할 가능성	작용을 멈추는 검증된 방법
관측가능성	변화를 제때 알아차릴 능력	적합한 경로, 지연과 검출 한계
제어 가능성	결과를 예측할 수 있는 가용 행동	검증된 작용 경로와 자원
불확실성	행동의 선택을 바꾸는 지식의 공백	필요한 정보 및 대안 목록

각 축에는 평가뿐 아니라 근거도 기록하면 유용하다. 확산 경계는 측정했을 수도, 유추로 가정했을 수도, 전혀 모를 수도 있다. 이 상태들을 하나의 표시로 합쳐서는 안 된다. 경계를 모른다고 무한한 확산이 입증되는 것은 아니다. 선택한 조직 운영상의 경계에 대한 확신이 제한되며 새 자료가 나오면 재검토해야 한다는 뜻이다.

불완전한 정보로 내리는 결정

먼저 논쟁 중인 가설을 받아들이지 않아도 결과를 이해할 수 있는 행동을 검토한다. 명백한 기술적 사고 장소의 출입 제한은 손상 원인을 몰라도 관찰된 손상을 근거로 정당화할 수 있다. 반면 "공간 이상현상"이라는 이름만으로 격리 구역을 넓히는 데에는 측정 근거가 없다. 모든 제한을 구체적인 시나리오, 목적과 재검토 조건에 연결한다.

어떤 추가 관찰이 결정을 바꿀지 미리 정하면 유용하다. 통신 상태를 확인할 수 없어 작업을 멈췄다면, 통신 복구 자체가 고장 원인을 없애지는 않아도 다른 조건을 검증하게 해 준다.

물질의 조성을 몰라 접촉을 금지했다면 새 광학 영상으로는 대개 최초 질문이 해결되지 않는다. 이렇게 작업 허용에 실제로 가치 있는 정보가 무엇인지 드러난다.

저자의 평가 절차

1. 책임자는 계획한 행동과 연구 목적을 기술하며, 새로 가하는 작용도 포함한다.
2. 안전 조정자는 가용 자료와 알려진 조작의 성질에 근거하여 개연성 있는 피해 시나리오를 가려낸다.
3. 계측 전문가는 팀이 어떤 중요한 변화를 얼마나 지연된 뒤 알아차릴 수 있는지 밝힌다.
4. 조작자들은 통신과 자원을 이용할 수 있고 자신의 행동을 중단할 방법이 있음을 확인한다.
5. 팀은 허용 운용 방식, 허용 근거와 중단이 필요한 사건들을 기록한다.
6. 상황이 달라지면 새 판으로 평가를 재개하며 이전 허가는 자동으로 이어지지 않는다.

중단 기준은 관찰 가능해야 한다. 정해진 감시 경로의 상실, 근거 있는 한계를 벗어난 매개변수, 장벽 상태의 훼손, 예기치 않은 과정 변화 또는 이탈 계획을 실행할 수 없는 상황이다. 참여자들이 위험을 다르게 이해한다면 "위험하면 멈춘다"라는 표현만으로는 부족하다. 다만 목록이 새롭고 중요한 상황에서 중단할 권리를 제한하지는 않는다.

학습 시나리오

가상의 팀이 버려진 부지에서 드문 섬광을 연구한다. 발광 자체가 위험을 정하지는 않지만 무너진 바닥 구조와 고정되지 않은 장비는 알려진 부상 시나리오를 만든다. 접근 가능하고 안정된 장소에서 수동적으로 촬영하기로 한다. 섬광의 발생 시각이라는 최초 질문에 답하려고 손상 구역에 들어갈 필요는 없다. 발광의 본성은 여전히 불확실하지만 알려진 기반시설에 관해 근거 있는 결정을 내리는 데에는 지장이 없다.

나중에 여러 계기에 신호가 동시에 나타난다. 연구 과제는 달라지지만 능동적인 작용이 자동으로 허용되지는 않는다. 먼저 공통 의존 관계와 변화를 감시할 능력을 검증한다. 새 자료와 관련된 축의 프로필을 갱신한다. 이런 단계적 접근은 불확실성 때문에 아무것도 하지 않는 일과 근거 없이 개입을 확대하는 일을 함께 피하게 한다.

프로필에는 반드시 재검토할 기한이나 사건을 붙인다. 날씨, 팀 구성, 장비 상태나 발생원 운용 방식이 달라지면 이전 근거가 부족해질 수 있다. 근무조 책임자는 어떤 변화가 이미 일어났는지 알아야 한다. 정보 인계가 끝나지 않았다면 공동 상황 파악이 회복될 때까지 새 행동을 미룬다. 작업 허가는 그 조건과 함께 유효하며 조건과 무관하게 존재하지 않는다.

평가 결과는 정해진 조건에서 허용되는 행동의 기록이다. 이 기록은 사례 명세에 첨부되지만 명세를 대신하지 않는다. 상호작용을 잠시 계속하지 않기로 결정했을 때에도 과학 자료는 보존해야 한다.

동적 지도의 세 층위

작업 지도의 경계는 구체적인 질문에 답한다. 편차가 기록된 영역을 둘러싼 선이 물리적 영향의 한계와 일치할 필요는 없다. 그 선은 기기 배치, 감도, 관측 시간, 채택한 특징에 따라 달라진다. 따라서 사례 지도에는 세 층위를 따로 둔다. 공통 바탕 지도는 서로 비교하는 데 도움이 되지만, 한 층위를 다른 층위로 대체하도록 허용하지 않는다.

층위	표시하는 것	그로부터 도출되지 않는 것
Д — 검출	선택한 특징을 기록한 장소, 구간과 경로. 감도 한계를 함께 제시한 양성 및 음성 결과.	양성 표시 바깥의 모든 곳에는 작용이 없다.
H — 관측 가능성	실제로 조사한 방향과 공간 범위, 사각 구역, 경로의 적합성과 공간 위치 대응 조건.	조사한 영역은 어떤 기전에 대해서도 완전히 특성이 밝혀져 있다.
P — 접근 운용 방식	허용 행동, 위치와 경로. 각 허가의 근거, 책임자와 재검토 조건.	행정적 경계는 물리 과정의 측정된 표면이다.

각 판에 지도 식별자와 상태 기록을 부여한다. 표지마다 좌표의 출처, 원래 위치 기준 체계, 사건 구간과 정보 입수 시점을 보존한다. 위치를 카메라에 대한 상대적 위치로만 안다면 가상의 지리 좌표를 만들지 말고 "프레임의 구역"이라고 적는다. 빈 구역에는 빈 이유를 표시한다. 관측하지 않았거나, 일시적으로 가려졌거나, 경로가 부적합했거나, 적합한 경로에서 선택한 특징이 기록되지 않은 경우이다. 각 상태에는 서로 다른 결정이 필요하다.

갱신은 층위 H의 두 판을 비교하는 데서 시작한다. 새 장소의 표지는 관측 범위 확대 때문에 나타날 수 있고, 사라진 표지는 노출 변경이나 신호 경로 차단의 결과일 수 있다. 이런 변화를 고려한 뒤에야 층위 Д의 변화를 논한다. 이어 조정자는 영향을 받은 조건에 따라 층위 P을 재검토한다. 이전 지도는 보존한다. 현재 작업 허용에는 더 이상 적합하지 않을 수 있어도 이전 상태의 증거로 남기 때문이다.

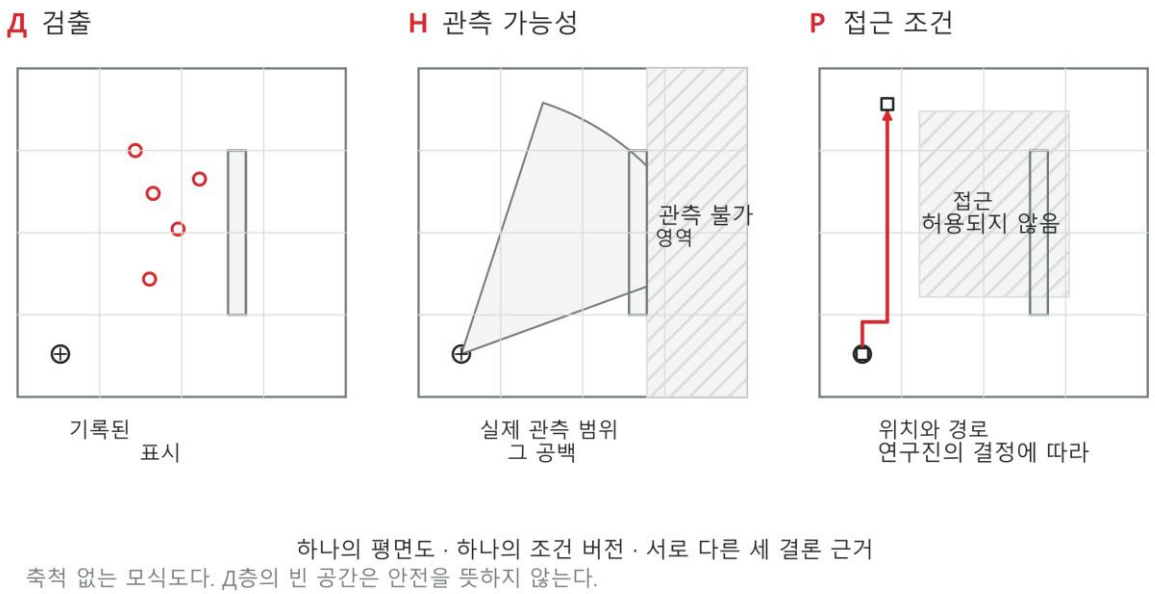


그림 4. 한 영역의 세 지도: 검출, 관측 가능성, 접근. 저자가 구성한 한 영역의 세 층위 도식이다. Д는 기록된 표지를 담는다. H — 실제 관측 범위와 사각 구역, P — 명시한 조건에서 허용되는 위치와 경로이다. 기하는 개략적이다. Д층위의 빈 구역에 자동으로 안전하다는 지위를 부여하지 않는다.

경로의 근거가 사라질 때

경로는 선 하나가 아니라 검증된 구간들과 전환 조건의 순서로 정한다. 경로 카드에는 위치를 확인하는 근거, 필요한 방호와 관측 기능, 최종 위치에 관해 알려진 것, 어떤 변화가 생기면 허가가 효력을 잃는지를 명시한다. 이전에 통과에 성공했다고 해서 환경 변화 뒤의 역방향 통과까지 확인되는 것은 아니다. 이런 구분은 제18장의 이례적인 연결성에 관한 가정 모형에서 특히 중요하다.

1. 지도가 바뀌면 조작자는 현재 위치를 마지막으로 확인된 위치와 대조한다. 불확실한 위치를 항법 프로그램의 예측으로 대체하지 않는다.

2. 조율자는 모든 경로를 자동으로 취소하거나 유지하는 대신 영향을 받은 구역들을 열거한다. 사람, 장비, 운반 물질의 경로는 따로 검증한다.

3. 앞으로의 이동이 이미 사라진 조건에 의존한다면 그 근거로 새 이동을 허용하지 않는다. 현재 구성을 위해 마련한 전환을 수행한다. 복귀 자체에도 유효한 근거가 필요하다.

4. 재개하려면 지도의 새 판과 경로의 구체적인 조건에 대한 확인이 필요하다. 눈에 보이는 현상이 잦아들었다는 사실만으로는 충분하지 않다.

가상의 학습 예이다. 처음에는 서쪽 벽에만 표지가 보인다. 둘째 카메라를 다시 설정하자 동쪽 벽에도 보인다. 지도 M02에서는 층위 H이 바뀌며, 물리적 영역의 확장은 아직 확인되지 않았다. 이어 둘째 카메라와의 통신이 끊긴다. 판 M03에는 효과가 사라졌다는 기록 대신 동쪽 구역의 관측 가능성 상실을 담는다. 이 감시에 의존하던 장비 배치 허가는 중단한다. 서식 ⋇1을 작성하면 임의의 안전 원을 그리지 않고도 세 결정을 각각 드러낼 수 있다.

제8장

사례 명세와 자료의 기원

사례 명세는 관찰, 결정과 그 변경 이력을 함께 모은다. 다른 팀이 가용 자료상 정확히 무슨 일이 있었고, 어떤 행동을 했으며, 어떤 결론이 여전히 허용되는지 이해하게 하는 것이 목적이다. 정보가 들어오는 대로 채우는 실무 구조이다. 모르는 값은 모르는 상태로 남기고, 그 값을 얻을 수 있을 방법을 명시한다.

사례 식별자와 범위

설명을 수정해도 식별자는 바뀌지 않아야 한다. 가정한 현상의 정체를 식별자의 필수 부분으로 넣어서는 안 된다. TM, OP, AG 표지는 별도로 바꿀 수 있다. 에피소드에는 시간 구간과 기록 통합 규칙을, 구역에는 조사 경계를, 시료에는 보관 단위와 채취 장소의 연결을 정한다. 그래야 서로 다른 사건을 같은 이름 아래 눈에 띄지 않게 합치는 일을 막을 수 있다.

사례를 나눌 근거가 생기면 연결된 기록들을 만들고 최초 통합은 이력에 보존한다. 반대로 여러 사례를 명시적인 기준에 따라 하나의 계열로 묶을 수도 있다. 공통 외형, 가까운 장소나 비슷한 날짜는 연관성을 검증할 근거가 되지만, 공통 기전을 결론 내리는 데 반드시 충분한 것은 아니다.

명세의 내용

절	필수 내용	흔한 오류
기록	누가 언제 어떤 방법으로 정보를 전했는가	사건 시각을 기록 시각으로 대체함
관측	최소한의 주장과 원자료	사실 항목에 원인 설명을 넣음
측정	계기, 운용 방식, 단위와 한계	화면 캡처만 보존함
환경	기하, 배경, 기반시설과 변화	모르는 배경을 일정하다고 여김

절	필수 내용	흔한 오류
가설	예측, 대안과 지위	결과를 본 뒤 설명안을 추가하고 그 사실을 표시하지 않음
결정	결정자, 근거, 운용 방식과 중단 조건	연구를 계속할 근거가 없음
시료	시료의 출처, 인계와 상태	시료와 사건의 연결을 잃음
버전	결론의 변화와 재검토 이유	최신 판이 이력을 지움

모든 기록에 출처와 작성 시각을 연결한다. 사건 시각, 발견 시각, 보고 시각과 시스템 입력 시각은 다를 수 있다. 정확한 시점을 모르면 근거를 설명하면서 구간이나 상대적인 순서를 기록한다. 인위적으로 정확한 시각 표지는 실제로 그 정밀도로 배열할 수 없는 에피소드들을 대조할 수 있다는 잘못된 인상을 만든다.

자료의 기원

디지털 기록에는 최초 매체, 복사 방법, 가용 메타데이터와 변환 순서가 중요하다. 물리적 시료에는 장소, 채취 경위, 포장, 이동과 상태 변화가 중요하다. 이 요건들의 공통 목적은 연구하는 자료 또는 시료와 그 출처에 관한 주장 사이의 연결을 보존하는 것이다. 사슬 일부를 잃으면 해당 결론 곁에 그 한계를 표시한다.

디지털 증거를 보관하려면 파일의 무결성과 취급 이력을 고려해야 한다. NIST 지침은 이 문제를 자료 획득의 전체 과정과 별도로 다룬다. [6] 제안하는 명세에서는 체크섬을 파일의 특정 판에 연결한다. 체크섬은 보존한 사본을 비교하도록 돕지만 기록 이전 사건의 신뢰성을 복원하지는 않는다.

접근 구분

모든 참여자에게 모든 정보가 필요한 것은 아니다. 조작자에게는 목격자의 개인정보 없이 측정 계획만 필요할 수 있다. 독립적인 분석자에게는 계기에 관한 필수 정보를 보존하되 추정 설명을 뺀 기록을 넘기는 것이 유용할 때가 있다. 다만 눈가림 때문에 수행자가 안전에 중요한 정보를 받지 못해서는 안 된다. 인계 전에 접근 규칙을 정하고 자료 집합의 판과 함께 기록한다.

공개 카드에는 지리 정보와 개인정보를 줄여 담을 수 있다. 내부 명세에는 축약 근거와 판 사이의 연결을 보존한다. 검토자에게 핵심 자료를 제공할 수 없다면 결론에 독립적 검증의

한계를 반영해야 한다. 비공개 보관소가 있다는 사실만으로 주장이 더 신뢰할 만해지지는 않는다.

작성한 학습 예

가상의 사례에 «사례 0042»라는 식별자를 부여한다. 최초 기록은 약 다섯 분 동안 두 번 번쩍였다고 보고한다. 카메라는 첫 번쩍임 뒤에 켜졌고 시계는 미리 검증하지 않았다. 명세서에서 첫 번쩍임은 목격자의 보고로 남고 둘째는 파일과 연결된다. «기록된 사건 두 건»이라는 포괄 주장 대신 서로 다른 두 근거를 유지한다. 이후의 외부 기록은 처음의 불확실성을 지우지 않으면서 시간 구간을 더 구체화할 수 있다.

결정 기록부에는 팀이 수동적 관찰을 고른 이유와 어떤 추가 자료를 얻으려 했는지 적는다. 며칠 뒤 카메라의 달력 시각 오류를 발견한다. 명세의 새 판은 대조 관계를 바로잡지만 원본 파일과 이전 결정도 계속 열람할 수 있다. 이런 이력은 각 단계에 어떤 지식이 있었는지 이해하게 한다.

자료 집합을 인계할 때에는 실제로 받은 항목들의 목록을 작성하면 유용하다. 인수자는 분석을 시작하기 전에 목록과 내용을 대조하고 빠진 항목을 표시한다. 그러면 원래 연구에 기록이 없었던 경우와 인계 중 잃은 경우를 구별할 수 있다. 나중에 발견한 사본은 기원을 설명하는 새 버전으로 추가한다. 이미 결정의 근거로 삼은 자료를 몰래 대체해서는 안 된다.

명세는 다른 팀에 연구를 인계할 때 특히 유용하다. 인계자는 미해결 질문, 계기 상태, 유효한 제한과 다음 행동의 조건을 열거한다. 인수자는 이 항목들을 이해했음을 확인한다. 이를 바탕으로 최초 기록이 관리 가능한 연구 작업으로 바뀐다.

제9장

최초 기록과 운용 방식 선택

초기 작업은 정보를 보존하고 허용되는 다음 단계를 정해야 한다. 이때는 가정하는 현상 부류의 전문가, 검증된 계기나 분명한 설명이 아직 없을 수 있다. 따라서 제안하는 순서는 가용 관찰과 알려진 행동의 성질에 의존한다. 사건의 본성을 즉시 규명할 필요는 없다.

첫 우선순위

통상적인 사고의 징후가 있으면 해당 대응 체계에 따라 행동하고 담당 기관에 정보를 넘긴다. 과학적 기록 때문에 사람 보호에 필요한 행동을 늦추어서는 안 된다. 연기, 붕괴, 기반시설

손상이나 상태 악화를 검증되지 않은 설명 없이 구체적으로 기록한다. 즉시 대응할 상황이 아니라면 접근하거나 환경을 바꾸지 않고 최초 기록을 마련할 수 있다.

수동적이라는 말은 의도적인 연구 작용이 없다는 뜻이지 영향이 전혀 없다는 뜻은 아니다. 빛, 소리, 장비의 열, 사람의 존재와 차량 이동도 조건을 바꿀 수 있다. 따라서 최초 관찰도 조작자의 위치, 작동 기기와 그 등장 뒤 달라진 것을 물리적으로 기술한다. 가능하다면 이미 확보된 기록부터 사용한다.

다섯 운용 방식

기록은 보고를 모으고 자료를 보존한다. 원격 수동 관찰은 추가 작용을 최소화하면서 반복성과 배경을 검증한다. 제한된 연구는 정해진 조건에서 구체적인 측정 과제를 해결한다. 통제된 개입은 가설을 검증하려고 매개변수를 의도적으로 바꾼다. 중단은 선택한 활동을 멈추고 체계를 미리 정한 상태로 전환한다. 이 운용 방식들은 필수 순서를 이루지 않는다. 연구는 기록 뒤에 끝나거나 실험에서 관찰로 돌아갈 수 있다.

전환은 질문, 측정 적합성과 실행 조건으로 뒷받침한다. 이례적인 효과가 지속된다는 사실 자체가 개입을 요구하지는 않는다. 때로는 장기간의 수동 기록이 새 능동 조작보다 설명안들을 더 잘 구별한다. 측정 경로를 수리하지 않으면 추가 관찰이 무의미할 때도 있다. 결정은 체계의 구체적 상태에 관한 것이며 중요한 변화 뒤에는 재검토한다.

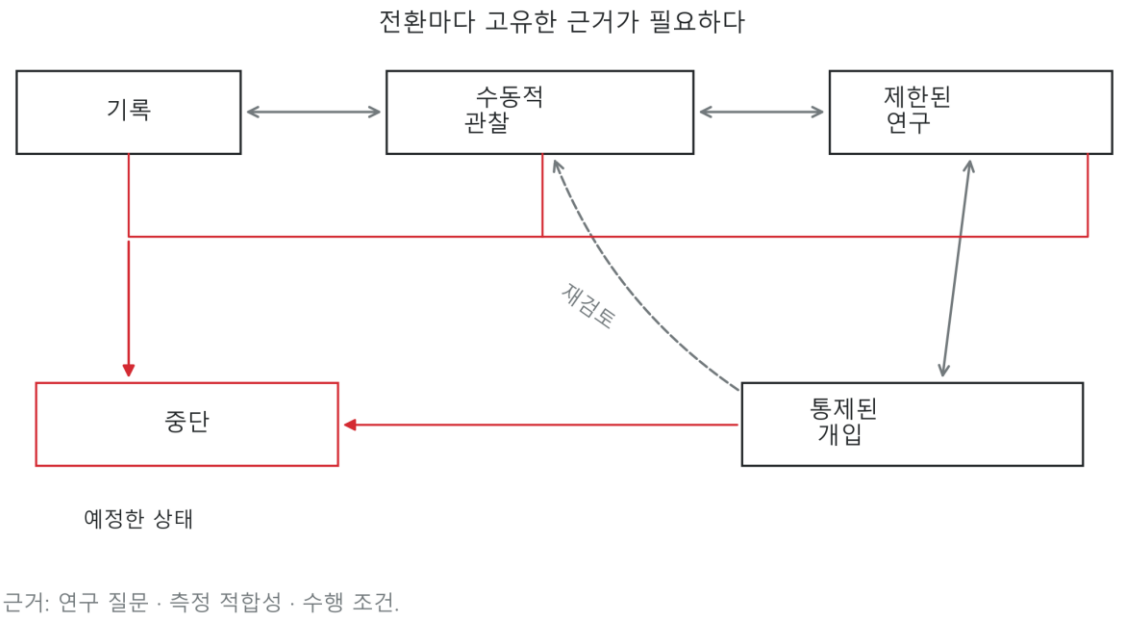


그림 5. 연구의 다섯 운용 방식과 전환의 근거. 저자가 제안한 운용 지도다. 다음 행동으로 넘어가려면 별도의 근거가 필요하며, 되돌아가기, 재검토, 종료도 가능하다. 중단은 선택한 활동에 적용되고, 장치를 미리 정한 상태로 이끈다. 이 도식은 반드시 개입하거나 전원을 모두 끄도록 지시하지 않는다.

최초 작업 허용을 위한 저자의 절차 카드

1. 기록 담당자는 보고, 입수 시각과 가용 출처를 기록하고 최초 표현을 추가 설명과 따로 보존한다.
2. 장소 책임자는 알려진 위험 조건, 유효한 제한과 현장에 있는 사람들을 알린다.
3. 안전 조정자는 접촉을 추가하지 않고 선택한 관찰을 계속해도 되는지 판단한다.
4. 조작자는 계기와 운용 방식을 기술하고 연구 대상 작용의 바깥에서 정상 작동을 확인할 수 있는 징후를 점검한다.
5. 계측 전문가는 이 계기로 답할 수 있는 최소 질문과 결과를 해석할 수 없는 조건을 정식화한다.
6. 책임자는 운용 방식과 과제 범위를 정한다. 팀은 통신, 조작 중단과 자료 인계 절차를 확인한다.
7. 첫 계열 뒤 적합성을 분석한다. 그 뒤에야 계속할지, 방법을 바꿀지, 끝낼지 결정한다.

작은 팀이 이 기능들을 수행하더라도 기록부에는 책임 기능으로서의 역할 이름을 남긴다. 한 사람이 여러 기록을 맡을 수는 있지만, 자기 결정을 독립적으로 확인한 것처럼 꾸며서는 안 된다. 중대한 결과를 낳을 행동에는 어떤 외부 전문 역량과 검증이 필요한지 미리 정해야 한다.

중단 기준

미리 정한 통신의 상실, 중요한 방호 요소의 고장, 예상하지 못한 변화, 분명한 종료 경로의 상실 또는 참여자의 상태 악화가 생기면 작업을 중단한다. 구체적인 문턱값이 필요하다면 선택한 조작에 적용되는 요건과 특성에서 가져온다. 이 책은 미지의 환경에 보편적인 수치를 부여하지 않는다. 근거 있는 문턱값이 없으면 꾸며 낸 값에 허용 여부가 달려 있지 않도록 행동 범위를 제한한다.

중단 명령은 말 한마디에 그치지 않고 조작자가 할 행동을 정해야 한다. 어떤 장치에서는 제어 신호 공급을 멈추는 것이고, 다른 장치에서는 이동을 멈추면서 기록기의 전원을 유지하는 것이다. 안전 상태를 완전한 전원 차단과 자동으로 동일시해서는 안 된다. 전원 차단 자체가 관측가능성이나 유지 기능을 없앨 수 있다. 구체적인 순서는 시작 전에 시스템 구조에 따라 정한다.

학습 시나리오

가상의 직원이 설비실에서 이례적인 소리의 순서를 알아차린다. 확보할 수 있는 기록을 보존하고 장비 책임자에게 알린다. 첫 연구는 알려진 체계의 작동을 바꾸지 않고 소리의 시각과 운용 방식을 대조한다. 추정 발생원의 기능을 파악한 뒤에야 그것을 끌 수 있다. 이렇게 과학적 질문이 환기나 다른 필수 체계의 우발적인 중단으로 이어지는 일을 막는다.

오경보가 해소된 뒤에도 짧게 분석한다. 어떤 징후 때문에 결정했고, 어떤 정보가 있었으며, 무엇이 상황을 구체화하는 데 도움이 되었는지 살핀다. 중단이 미리 정한 기준에 맞았다면 예상한 피해가 일어나지 않았다는 이유만으로 잘못이라고 해서는 안 된다. 절차의 개선은 불확실성 보고를 금지하는 데 있지 않고, 구별 능력과 조건의 명확성을 높이는 데 있다.

최초 기록이 부족하다면 결과는 사건이 없었다는 주장이 아니라 적합한 측정 경로를 갖춘 관찰 계획일 수 있다. 원인을 밝히면 그 발생 조건을 기록한다. 새로운 측정 잔류 신호가 생기면 명세와 위험 프로필을 구체화한다. 다음 단계가 더 근거 있고 검증 가능해졌다면 최초 기록은 성공한 것이다.

부상자나 소재가 확인되지 않은 사람

사건의 기전을 몰라도 관찰된 상황에 따라 지원으로 전환한다. 부상자 보고, 예정 장소에 없는 참여자 또는 상태를 확인할 수 없는 사람은 또 하나의 연구 계열이 아니다. 조정자는 대응으로의 전환을 알리고, 연구 책임자는 지원을 방해할 수 있는 과학적 행동을 중단하며, 지정 연락 담당자는 현행 지역 절차에 따라 담당 기관에 연락한다. 서식 작성 때문에 연락을 늦추어서는 안 된다.

역할, 통신과 외부 기관 협력을 나누어 계획하는 조직상의 근거는 미국 산업안전보건청(OSHA) 표준 29 CFR 1910.120에, 그 문서가 규율하는 작업 범위 안에서 제시되어 있다 [64]. 아래 카드는 연구 구성을 위해 저자가 응용한 것이다. 의료 행위, 구조 인력의 권한이나 미지의 환경에 진입하는 방법을 정하지 않는다.

1. 실제 사건을 밝힌다. 지금 누가 어떤 경로로 무엇을 관찰하는가? 검증되지 않은 보고는 따로 표시한다. 기술을 진단이나 이상현상의 명칭으로 대체하지 않는다.

2. 참여자 명단을 직접 확인한 증거와 대조한다. 사람마다 다음 중 어떤 상태인지 기록한다. 지정한 장소에 있음을 확인했다. 연락은 되었지만 위치를 더 확인해야 한다. 소재를 확인하지 못했다. 무선 통신이 끊겼다는 사실만으로 사람이 사라졌다고 입증되지는 않는다.

3. 담당 기관에 알려진 사건 위치, 소재가 확인된 사람과 확인되지 않은 사람의 수, 관찰된 위험 징후와 접근 제한을 전한다. 좌표를 신뢰할 수 없으면 마지막으로 확인된 지형지물과 제보자에게 연락하는 방법을 알린다.

4. 지도의 현행 층위, 마지막으로 신뢰할 수 있었던 관찰, 유효한 장벽과 유지 기능의 정보를 제공한다. 장비 전원을 모두 끄면 무엇이 악화될 수 있는지 표시한다.

5. 후속 갱신을 주고받을 경로와 정보 수신자를 합의한다. 접수된 보고의 내용과 받은 지시를 기록한다. 전달되지 않은 통보를 인계 완료로 보지 않는다.

6. 지원을 늦추지 않고 가용 기록을 보존한다. 자료 관리자는 대응의 시간 이력을 연구 가설과 따로 기록한다. 나중의 구체화는 최초 기록에 덧붙인다.

연구 직책이 구조 역량을 만들어 주지는 않는다. 구체적인 접근이나 구조 가능성은 준비된 대응 체계와 실제 조건으로 정한다. 첫 사람에 대한 걱정 때문에 다음 참여자의 임의 진입이 허용되지는 않는다. 다만 원인을 모른다는 사실도 자신의 훈련 범위와 현행 지시 안에서 제공할 수 있는 지원을 거절할 이유가 되지 않는다. 탐사 전에 팀이 할 수 있는 일과 외부 역량이 필요한 행동이라는 두 경계를 기록한다.

전에 알려진 경로가 더 이상 확인되지 않으면 연락 담당자는 이를 분명히 알린다. 근거가 사라졌음을 숨기고 도착한 사람들에게 평소 길로 가라고 해서는 안 된다. 반대로 항법이 고장 났다는 이유만으로 경로가 물리적으로 불가능하다고 선언해서도 안 된다. 서식 ⟩K2에서는 확인된 장애물, 관측가능성 상실, 평가하지 않은 가능성을 나눈다. 이를 통해 관련 담당자가 강요된 설명 없이 자신의 평가를 선택할 수 있다.

인수 측이 핵심 정보를 받았음을 확인하고 이후의 기능 분담을 정했을 때 조직상의 인계가 끝난 것으로 본다. 그 전까지 팀은 지정 통신 경로와 가능한 인원 파악을 유지한다. 연락이 복구되었다고 연구가 자동으로 재개되지는 않는다. 참여자 상태, 장소 제한, 제어 체계의 정상 작동과 새 작업 허용의 근거를 따로 검토한다. 더 이상 참여하지 않겠다는 사람의 거부를 기술적 고장으로 재해석하지 않는다.

제10장

효과의 결합과 사건의 전개

이례적인 사건은 여러 경로에서 동시에 나타날 수 있다. 발광에 소리가 동반되고, 온도 변화와 전자장치 고장이 겹치며, 참여자들은 불편을 보고한다. 이런 결합은 정보량을 늘리지만 하나뿐인 인과 이야기를 정해 주지는 않는다. 관찰들이 같은 과정에 관한 것인지, 공통 외부 원인이 있는지, 선택한 시간 창 안에서 우연히 겹쳤는지 검증해야 한다.

연결의 세 구조

순차 구조에서는 한 과정이 다음 과정의 조건을 만든다. 환경 변화가 계기에 영향을 주고 이어 자료 처리에 영향을 주는 경우이다. 공통 발생원 구조에서는 한 요인이 여러 경로에 병렬로 작용한다. 독립적인 우연 일치 구조에서는 사건들 사이에 인과관계가 없지만 연구자가 시간이나 장소에 따라 묶는다. 실제 체계에는 세 구조가 동시에 들어 있을 수 있다.

물리적으로 의미 있는 시간 순서가 이들을 구별하도록 돕는다. 하지만 시각 표지의 순서 자체가 인과 순서와 같지는 않다. 경로마다 지연, 기록 빈도와 시각 생성 방식이 다르다. 연쇄를 구성하기 전에 계측 전문가는 어떤 시간 차이를 실제로 분해할 수 있는지 평가한다. 불확실성이 추정 사건 간격보다 크면 연결 방향은 미정으로 남는다.

공통 원인

공통 원인은 예비 요소들의 작동을 동시에 방해할 수 있다. NASA의 공학 자료는 같은 체계의 수만 늘려 신뢰성을 높이는 데에는 한계가 있으며, 기술의 다양성과 전원 및 제어의 분리가 중요하다고 강조한다. [7] 이상현상 연구에서는 이 논리를 증거에도 적용한다. 여러 기록이 하나의 공통 취약성이 드러난 서로 다른 모습일 수 있다.

따라서 효과 지도와 나란히 장비 의존 관계 지도를 만든다. 물리적 배치, 전원, 동기화, 통신망, 소프트웨어 라이브러리와 공통 처리 단계를 포함한다. 증언에는 서로 논의했을 가능성과 공통 정보원을 고려한다. 의존 관계가 있다고 기록이 쓸모없어지는 것은 아니지만, 확증 역할의 독립성 수준은 달라진다.

과정의 전개

연쇄 과정은 시간에 따라 조건이 달라짐을 뜻한다. 첫 사건 뒤 체계는 가열되거나 손상되거나 재설정되거나 감시 수단 일부를 잃은 다른 상태에 놓일 수 있다. 그 상태에서 같은 조작을 반복해도 최초 실험이 반드시 재현되지는 않는다. 팀 자체의 행동까지 포함하여 후속 관찰에 영향을 줄 수 있는 변화를 기록부에 남겨야 한다.

초기 상태, 전환, 새 상태, 복귀 조건을 나누면 유용하다. 복귀가 확인되지 않았다면 다음 계열은 새로운 출발점에서 시작한다. 이런 기술은 변화하는 장치 하나의 연속 반응 열 번을 독립 실험 열 번으로 세는 오류를 막는다. 계열의 구성은 대상의 물리적 이력과 맞아야 한다.

복합 사건에 대한 저자의 프로토콜

1. 각 경로의 원기록을 따로 보존하고 시간 기준과의 연결을 기술한다.
2. 지연과 불확실성을 고려할 때 어떤 동시 발생을 판별할 수 있는지 정한다.
3. 공통 원인 지도와 장치 및 환경 변화의 공통 기록부를 만든다.
4. 순차 연결, 공통 발생원과 독립적인 우연 일치라는 설명안을 구분한다.
5. 추가 작용이 허용되는 범위에서 도식의 중요한 한 부분을 바꾸는 검증을 고른다.
6. 검증 뒤 과학 모형과 위험 프로필을 따로 갱신한다. 근거 없이 한쪽의 확신을 다른 쪽으로 옮기지 않는다.

중단 기준에는 관측 가능성 상실도 포함한다. 작업 허용의 근거인 경로를 효과가 고장 냈다면 이전 조작을 계속하는 것은 더 이상 이전 결정에 부합하지 않는다. 추가 장비 자체가 의존

사슬을 바꿀 수 있으므로 호환성을 평가한 뒤 도입한다. 예비 수단은 어떤 고장을 견딜 수 있는지 알 때 유용하다.

학습 시나리오

가상의 실험 계열에서 빛 펄스, 자기 측정 경로의 급변과 패킷 몇 개의 손실이 동시에 기록된다. 최초 설명안은 세 징후를 모두 새로운 작용과 연결한다. 검증 결과 카메라와 통신망은 공통 전원을 쓰고 자력계는 그 배선 곁에 놓여 있음이 드러난다. 이는 구체적인 대안을 만든다. 전원을 독립적으로 기록하고 각 경로를 따로 기록하면 미지 물체의 본성을 가정하지 않고도 그 대안을 검증할 수 있다.

공통 의존 관계를 제거한 뒤 한 경로에만 효과가 남으면 최초 복합 사건은 서로 다른 연구 과제로 나뉜다. 서로 부합하는 순서가 유지된다면 기전과 확산 기하를 구체화할 근거가 생긴다. 두 경우 모두 나중에 설명된 경로까지 포함한 모든 원자료가 유용하다.

시간 창의 선택에 따라 동시 발생 수가 달라진다. 너무 넓은 창은 연관성이 확립되지 않은 과정들을 묶고, 너무 좁은 창은 물리적으로 가능한 지연을 제외할 수 있다. 주계열을 분석하기 전에 전파 모형과 경로 특성으로 시간 창을 뒷받침한다. 자료에 맞추어 창을 골랐다면 발견한 순서는 별도 검증의 후보가 된다. 선택한 조합에 들어가지 않은 사건들도 보고서에 보존한다.

분석 결과는 불확실한 연결을 표시하고 검증된 의존 관계 목록을 붙인 인과 도식이다. 이 도식은 공통 방법론을 책의 주제별 절들과 연결한다. 다음 장은 관찰된 상태가 생겨나고 유지되는 과정을 다룬다. 이어서 사건, 신호와 시각 표지의 구분이 특히 중요한 시간 과정으로 연구를 옮긴다.

생애 주기와 상태 기억

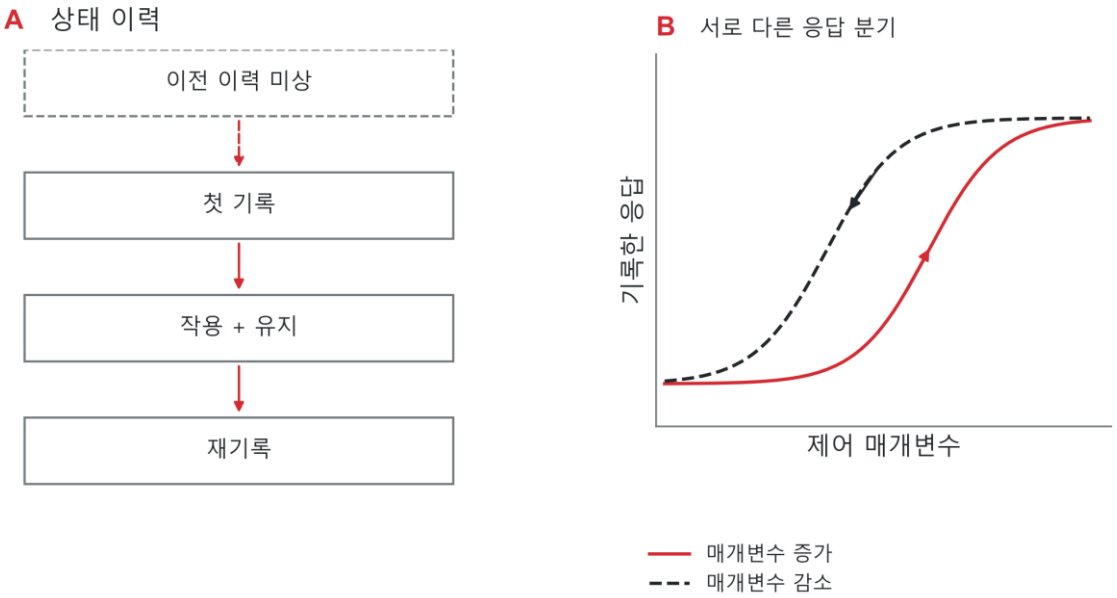
상태 기록에는 다음 행동들을 비교하는 데 충분한 이전 이력이 들어가야 한다. 현재 지시값이 같아도 내부 부품의 온도, 누적 변형, 조성, 전하, 설정이나 프로그램 상태는 다를 수 있다. 여기서 히스테리시스란 체계가 현재 조건에 도달한 경로에 관찰 응답이 의존하는 것을 뜻한다. 이 성질을 명시한다고 기전이 설명되거나 이례적인 물리가 입증되지는 않는다. 하나의 지표만으로 두 운용 상태를 같다고 보아서는 안 된다는 뜻이다.

생애 주기 카드는 발견, 조건 구체화, 허용된 변화, 상태 유지, 능동 행동 중단과 후속 관찰을 구분한다. 이는 현상을 다루는 작업의 지위이지 현상의 본성이 반드시 거치는 단계가 아니다. 정점이 지난 뒤 사례를 기록할 수도 있고, 눈에 보이는 현상이 잦아든 뒤 다시 나타날 수도 있다. 카드의 분기는 모든 대상이 반드시 전 주기를 거친다고 가정하지 않고 이런 가능성을 기록한다.

전환 기록	필요한 내용
초기 상태 S_i	관측량, 구성, 지도의 판, 이전 작용과 알려지지 않은 구간.
사건 또는 행동 T_i	무엇이 달라졌는가, 누가 알아차렸는가, 명령, 실제 실행과 부수적인 변화.
새 상태 S_j	전환 뒤 확인된 것과 유지되거나 사라진 이전 근거.
복귀	복귀를 뜻할 관찰 징후, 검증의 허용 여부, 바뀐 채 남아 있을 수 있는 성질.
다음 관찰	해결하는 질문, 비교 가능 조건과 책임 인수자.

가상의 예이다. 교육용 시험대의 제어 매개변수를 순차적으로 줄일 때, 늘리는 과정에서는 아직 빛 응답이 없었던 지점에서도 응답이 유지된다. 기록부에는 두 분기, 유지 시간과 측정 경로 상태를 모두 남긴다. "성공한" 방향만 반복해서는 안정적인 경계를 확인할 수 없다. 역방향 진행이 안전하지 않거나 허용되지 않으면 대칭 그래프를 얻으려고 수행하지 않는다. 결론을 한 분기로 제한한다. 빠진 이전 이력은 가장 편리한 재구성으로 채우지 않고 미상으로 표시한다.

분기 차이는 측정 자체의 지연 및 과도 상태와도 구별해야 한다. 이를 위해 허용 조건에서 알려진 순서와 유지 시간에 따른 응답을 비교하고 변화 속도 정보를 보존한다. 이런 비교가 없으면 결과를 수행한 순서에 대한 기록 응답의 의존성이라고 부른다. 그래프의 고리 하나만으로 대상에 히스테리시스가 확립되었다고 말하는 것보다 정확하다.



정성적 도식이다. 유지 시간과 지연은 별도로 확인한다.

그림 6. 상태 이력과 응답의 두 가지 분기. 정성적 학습 도식이다. 결과를 이전 이력, 영향의 순서, 유지 시간과 연결한다. 매개변수가 커질 때와 작아질 때 나타나는 분기 차이를 측정 지연 및 과도 상태와 아직 구분하지 않았다. 곡선은 개념적이며 수치 척도는 정하지 않았다.

실행 가능한 프로토콜의 전제 목록

신중한 절차도 전제를 사용한다. 사건들을 구별할 수 있고, 명령의 수신자가 있으며, 기록의 기원이 보존되고, 검증이 의도한 대상을 다룬다는 전제다. 개입을 선택하기 전에 이를 열거해야 한다. 시스템 이론적 위험 분석 방법인 STPA는 제어 대상 과정의 상태, 제어 행동, 되먹임 사이의 관계를 다룬다. 정보의 지연이나 불완전성 때문에 실제 상태에 맞지 않는 행동이 될 수 있다 [62]. 여기서는 이 공학적 논리를 허가 한계에 적용한다. 자연 법칙의 상상 가능한 모든 변화를 포괄한다고 주장하지 않는다.

전제	전제가 성립하지 않는 징후	제한되는 결론 또는 작업 허용
국소적인 순서를 재구성할 수 있다	이어 주는 기록 없는 재시작, 번호 충돌, 단편의 출처 미상.	단절을 가로지르는 행동 순서. 개별 단편이 보존되어 있다면 각 단편의 독립적인 분석은 계속할 수 있다.
중요한 구성을 안다	기록하지 않은 교체, 운용 방식 변경, 서로 맞지 않는 판.	이전 구성의 교정과 허가를 새 구성에 적용하는 것.

전제	전제가 성립하지 않는 징후	제한되는 결론 또는 작업 허용
요구되는 공간적 관계가 확인되었다.	위치 대응의 상실 또는 비교할 수 없는 위치 관찰.	이전 경로를 통한 이동 허용과 확산에 관한 결론.
대상과 경로를 구별할 수 있다	시료 교체, 자료 반복이나 다른 발생원을 구별할 수 없음.	한 대상의 이력으로서 "이전 — 이후"를 비교하는 것.
결정에 필요한 상태를 알 수 있다	되먹임의 지연이나 출처 미상, 필수 경로 상실.	그 상태를 제때 알아야 하는 제어.
중단을 확인할 수 있다	명령은 보냈으나 실행과 결과를 관찰할 수 없음.	작용 중단에 관한 주장과 그 중단에 의존하는 후속 행동.

각 행에 검증 증거와 전제 상실 시 행동을 정한다. 금지는 그 전제에 의존하는 결정에 적용되며 모든 활동을 금지할 필요는 없다. 예를 들어 전역 시간 척도를 잃어도 국소 스펙트럼은 여전히 유효할 수 있지만, 인과 순서의 대조는 더 이상 근거가 없을 수 있다. 남겨 둘 허용 운용 방식은 계속하고 싶다는 막연한 바람이 아니라 실제로 확인된 가능성 가운데서 고른다.

가정 모형이 상태의 구별 가능성, 흔적의 보존과 행동 확인 가능성을 모두 없앤다면 그 모형에 대해 실행 가능하고 검증 가능한 프로토콜은 주어지지 않은 것이다. 외부 카메라나 기계식 시계 자체로는 이 논리적 어려움을 해결하지 못한다. 먼저 모형은 보존되는 하위 체계와 그 체계가 관찰 과정에 맺는 관계를 명시해야 한다. 전제 목록은 임의적인 인과성에 대한 보편적 방호를 약속하는 대신 정확히 어디에 한계가 있는지 보여 준다.

제11장

이상 상태의 발생과 유지

발현 부류는 무엇을 측정해야 하는지 알려 준다. 발생 설명은 여기에 더해 체계가 어떤 경로로 관찰된 상태에 도달했는지 보여 주어야 한다. 상호작용의 이름을 붙이거나 신호 모양을 제시하는 것만으로는 부족하다. 초기 조건, 형성 과정, 유지의 공급원과 관찰된 대상의 후속 상태를 연결해야 한다. 이 분석은 연구팀이 처음 접한 통상 현상에도 가정한 새로운 물리에도 유용하다. 전제가 뒷받침되는 정도는 다르지만 결과를 도출해야 한다는 요건은 공통이다.

발생 원인이 이후 존재를 유지하는 원인과 반드시 같지는 않다. 짧은 펄스가 내부 비축을 소비하며 계속되는 과정을 시작할 수 있고, 지속적인 외부 작용이 중단 뒤에는 불가능한 상태를 유지할 수도 있다. 관측 가능 조건도 별도의 고리이다. 조명 변화는 이미 있는 대상을 만들지 않고도 보이게 할 수 있다. 따라서 사례 이력에서는 상태 자체의 발생, 확보 가능한 기록의 시작과 관찰자가 사건을 이례적이라고 인식한 시점을 구별한다.

기원에 대한 네 질문

먼저 상태 변수를 고른다. 가열에서는 내부 에너지의 양, 진동에서는 진폭과 위상, 조성에서는 특정 성분의 양일 수 있다. 변수는 측정 모형을 통해 관찰과 연결되어야 한다. 화소 밝기 자체는 에너지 비축량이 아니며 시계 지시값도 환경 전체의 상태가 아니다. 변수를 아직 간접적으로만 알 수 있다면 재구성에 필요한 추가 가정을 열거한다.

이어 체계의 경계와 교환 경로를 정한다. 에너지 유입, 물질 전달, 기계적 일과 외부 작용 정보는 각각 기록한다. 그런 뒤 전환 기전을 기술한다. 시작할 때 무엇이 달라지고, 어떤 연결이 중요해지며, 왜 그 효과가 해당 공간 규모를 갖는가? 마지막으로 유지와 종료 조건을 정식화한다. 보기 좋은 정상 상태의 무늬만 기술하는 설명은 아직 그 발생이나 안정성을 설명한 것이 아니다.

작업 가설의 기전	상태를 유지하는 것	설명들을 구별하는 관찰
내부의 유한한 비축량	최초 자원의 소비	모형에 부합하는 감소와 유한한 적분 출력
외부 공급	경계를 지나는 측정 가능한 흐름	그 흐름이 자연적으로 변할 때 출력의 변화
모드 전환	연결 관계의 새로운 안정 구성	문턱값, 지연과 이전 이력에 대한 의존성
이동하는 불균일성	이미 존재하는 구조의 이동	공간적으로 떨어진 노드들의 응답 순서

이 행들은 함께 결합될 수 있는 설명 구조들을 나타낸다. 예를 들어 움직이는 영역은 외부에서 에너지를 받으면서 동시에 저장된 자원을 소모할 수 있다. 이 경우 모형은 속도, 지속 시간, 세기 변화를 함께 예측해야 한다. 메커니즘을 하나 추가할 때마다 검증할 조건도 늘어난다. 단지 자유

매개변수 하나를 더 제공하는 데 그치지 않고 새로운 독립 특징을 설명할 때 그러한 추가가 유용하다.

도식에서 상태방정식으로

저자의 가장 단순한 축적기 모형은 저장 에너지 E를 유입 출력 P 및 이완 시간 τ와 연결한다. P와 τ가 일정하면 아래 형태가 된다. E의 단위는 줄, P의 단위는 와트, τ의 단위는 초이다. 항 E/τ는 선택한 모형의 손실 법칙을 뜻하며 겉모습이 비슷하다는 이유로 모든 미지 대상에 적용하는 것은 아니다.

$$\frac{dE}{dt} = P - \frac{E}{\tau}$$

$$E(t) = P\tau + \left(E_0 - P\tau\right)e^{-t/\tau}$$

이 방정식은 곧바로 여러 시나리오를 구분한다. 공급이 없으면 저장량은 감소하고, 공급이 일정하면 Pτ에 가까워지며, 공급이 달라지면 특성 시간 τ에 걸쳐 새 수준으로 이행한다. 이는 이미 관찰 프로그램이다. 과도 곡선을 얻고, 기록의 한 부분에서 매개변수를 추정한 뒤 다른 부분에서 검증한다. 측정기가 출력만 보여 준다면 최초 저장량은 추가 관계를 통해 재구성한다. 미지의 에너지가 있다고 임의로 선언하는 것은 모형의 독립적인 확인이 아니다.

운용 상태의 변화에는 다른 동역학이 필요하다. 예시로 부호를 가진 위치 편차를 정규화한 것과 같은 무차원 변수 x, 그리고 무차원 제어 매개변수 μ를 보자. 다음 방정식은 독립된 학습 모형이며 이상현상의 보편 법칙이 아니다. μ가 영보다 작으면 유일한 안정 상태는 영에 있다. μ가 양수이면 영이 아닌 두 안정 상태가 생기고 영 상태는 불안정해진다.

$$\tau\frac{dx}{dt} = \mu x - x^3$$

실제로 정상점에서 우변을 x로 미분한 값이 작은 섭동의 부호를 결정한다. 영에서는 μ이고 ±√μ인 점들에서는 −2μ이다. 여기서 검증 가능한 안정성 변화가 나온다. 문턱 근처에서는 응답의 특성 시간도 달라진다. 하지만 이 방정식은 필요한 계수들을 구현하는 물리적 에너지원이나 물질을 아직 명시하지 않는다. 구체적인 대상에서는 이것이 다음으로 반드시 필요한 설명의 층위이다. 상태의 수학적 전환을 그 상태를 만드는 완성된 기술로 받아들여서는 안 된다.

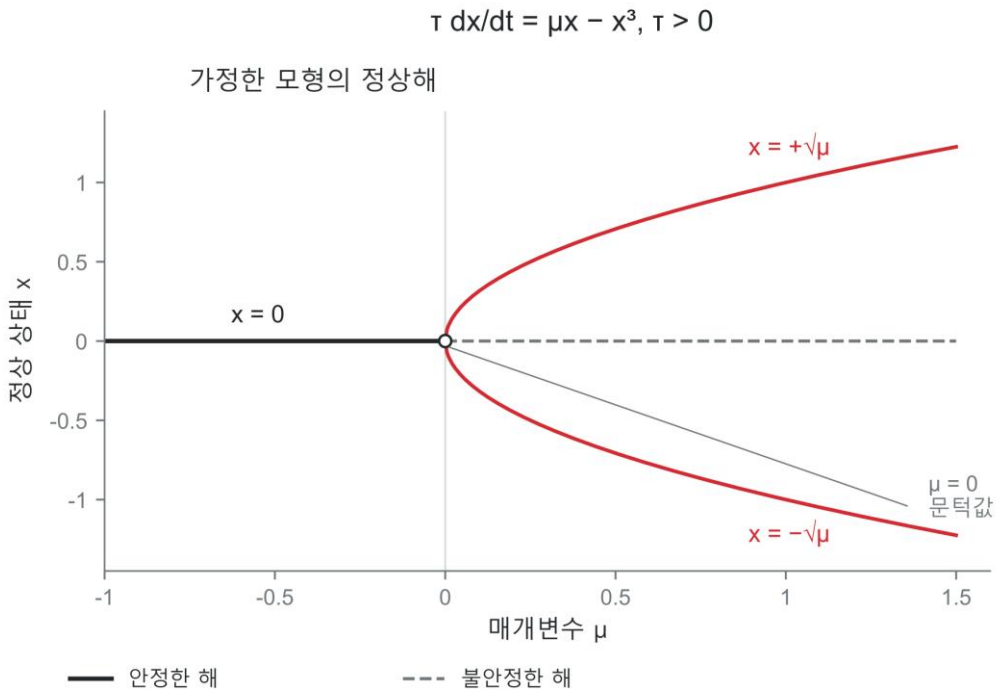


그림 7. 문턱과 상태의 안정성 변화. τ > 0인 가정적 수학 모형 τ dx/dt = μx − x³이다. μ < 0이면 상태 x = 0이 안정하다. μ > 0이면 그 상태는 불안정하고 두 분기 x = ±√μ가 안정하다. μ = 0은 안정성이 바뀌는 문턱이다. 이 도표는 히스테리시스 고리를 규정하지 않으며 자연 현상을 기록한 것도 아니다.

국소화와 지속 시간

공간 크기는 발생원 분포, 경계의 기하, 전달 길이나 장의 안정된 분포로부터 모형 안에서 도출되어야 한다. 사진에 크기를 맞추기만 했다면 아직 형태를 기술했을 뿐이다. 기전으로 나아가려면 지속 시간, 세기나 주변 환경 상태에 따라 크기가 어떻게 달라질지 예측하면 유용하다. 서로 다른 규모의 관찰은 한 에피소드에 맞추어 얻은 일치를 깨뜨릴 수 있어 특히 중요하다.

폭 L인 영역을 속도 v로 통과하는 특성 시간은 L/v 정도이다. 감쇠 시간과 센서 응답 시간은 이와 다를 수 있다. 세 양을 섞으면 짧은 기록으로는 크기도 속도도 정할 수 없다. 제13장과 제17장의 관측망 재구성은 이 질문들을 어떻게 구분하는지 보여 준다. 미지의 현상에서는 서로 양립하는 크기와 속도의 집합을 결과로 제시해도 된다. 충분한 독립 제약이 생긴 뒤에야 하나의 수치가 정해진다.

기존 연구는 기전에서 예측으로 나아가는 이런 과정의 예를 준다. Abrahamson과 Dinniss의 구상번개 모형은 추정 발광을 생성된 입자의 산화와 연결한다. 개별 응집체에 대한 실험적 확인이 대상 전체의 재현을 뜻하지는 않았다 [33]. 가설적인 도메인벽에 대해서는 연구자들이

시계 섭동의 시공간 무늬를 도출하고 위성 자료에서 찾아, 검출 대신 제약을 얻었다 [65]. 두 접근은 기전의 이름에 별도의 검증 가능한 결과가 따른다는 점에서 유용하다.

기전 명세와 다음 실험

기전 명세는 사례 명세를 보완한다. 초기 상태, 변수와 단위, 매개변수, 전환 방정식, 유지 공급원과 관측 가능한 예측을 보존한다. 어떤 매개변수를 독립적으로 측정했고, 어떤 것은 같은 사건에서 추정했으며, 어떤 것은 가정만 했는지 따로 표시한다. 이 경계는 예측과 원자료를 다시 기술한 것을 구별하게 한다. 프로토콜에는 제안한 기전을 바꾸거나 기각해야 할 결과가 적어도 하나는 들어 있어야 한다.

책임자는 예측의 차이에 따라 다음 검증을 선택한다. 계측 전문가는 예상 규모와 지연을 분해할 수 있는지 평가한다. 분야 전문가는 어떤 자연 변화나 안전한 시험대 작용이 유익한 정보를 주는지 정한다. 조작자는 행동 이력을 보존하고, 안전 조정자는 확인된 범위를 벗어나면 개입을 중단한다. 가정한 전환을 일으킬 허용 방법이 없다고 관찰 프로그램이 끝나지는 않는다. 형태, 수지, 지연과 자연적으로 변하는 조건과의 연관성을 검증할 수 있다.

확립된 기전이 생애 주기 일부만 설명할 수도 있다. 팀은 기원을 미해결로 둔 채 붕괴를 확실히 기술하거나, 완전한 국소화 이론 없이 에너지 유입을 확인할 수 있다. 그런 결과가 다음 모형의 근거가 된다. 과학적 발전은 새 판이 관찰에 대해 추가 책무를 맡는 곳에서 시작한다. 이전 자료를 설명하고, 아직 검증하지 않은 것을 예측하며, 더 이상 성립하지 않는 영역을 보여 주는 것이다.

제III부

시간과 인과성

제12장

물리적 시간과 시계의 지시값

시간 이상 보고에는 완전히 다른 세 관찰이 담길 수 있다. 사람이 사건 일부를 기억하지 못하거나, 기기가 잘못된 날짜를 기록하거나, 두 물리적 시간 표준에 서로 다른 시간 간격이 누적된 경우이다. 이 사례들을 하나의 이름으로 묶으면 원인을 미리 가리게 된다. TM 부류의 연구는 정확히 어떤 과정이 시계 역할을 했고, 누가 그 주기를 세었으며, 얻은 결과를 다른 결과와 어떤 방법으로 비교했는지 묻는 데서 시작한다. 사례 명세에 "시간"이라고 쓰려면 관측량의 설명이 따라야 한다.

시계에는 최소한 주기적 과정, 계수기와 지시값의 표시 규칙이 있다. 프로그램이 기록을 잃는 동안에도 발진기는 계속 진동할 수 있고, 사용자 화면이 날짜를 바꾸는 동안에도 계수기는 멈추지 않고 작동할 수 있다. 외부 동기화를 보정할 때에는 반대 상황이 생긴다. 물리적 발진기에 그에 해당하는 주파수 급변이 없었는데도 화면에는 도약이 나타난다. 따라서 시계판 사진은 촬영 순간의 화면 상태를 확립하지만, 그 자체로 계기의 고유시간 이력을 기술하지는 않는다.

고유시간과 비교 방법

상대성이론에서 고유시간은 특정 궤적에 관한 것이다. 서로 다른 경로를 지나거나 서로 다른 중력 조건에 있었던 정상적인 두 시간 표준은 나중에 비교할 때 서로 다른 간격을 나타낼 수 있다. 이는 시간 정의의 결함이 아니다. 측정상의 질문은 그 차이가 계산한 운동 및 장의 모형에 맞는지에 있다. 시계로 중력 퍼텐셜을 비교하는 일은 이미 실험으로 구현되었다. 예측한 차이가 가능하다는 바로 그 점이 이런 비교를 측지학의 도구로 만든다 [8].

약한 장에서 느리게 움직일 때 표준 근사는 다음과 같다.

$$\frac{d\tau}{dt} \approx 1 + \frac{\Phi}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2}.$$

여기서 τ는 고유시간, t는 일관되게 정한 좌표 변수, Φ는 통상적인 음의 부호를 갖는 뉴턴 퍼텐셜, v는 선택한 기준계에서의 속도다. 이 식은 제한된 상태를 기술한다. 어떤 이례적인

지시값이든 공간의 특성으로 바꾸어 주는 보편적 환산식은 아니다. 측지 퍼텐셜에는 이미 지구 자전이 포함된 경우가 있으므로 같은 보정을 다시 더해서는 안 된다.

주파수와 위상도 구별해야 한다. 주파수는 주기가 누적되는 속도이고, 위상은 진동 순서 안에서의 위치이다. 짧은 오류 뒤 주파수는 오래전부터 같아졌어도 일정한 위상 편차가 남을 수 있다. 상대 주파수 차이가 y이며 일정하다면 구간 T 동안 누적된 시간 차이는 대략 yT이다. 이 간단한 계산은 주장한 효과의 크기와 지속 시간이 서로 맞는지 검증하도록 돕는다. 시각 표지에 큰 도약이 생겼지만 그 뒤 시계열의 기울기가 갈라지지 않는 경우는 진행률의 지속적인 변화와 구조가 다르다.

시간 전송은 또 하나의 측정 경로를 더한다. 수신자는 신호 경로와 장비에 따른 지연을 거쳐 발생원의 시계를 본다. 통신망 방식에서 이 지연을 평가하려면 양방향의 대칭성에 관한 가정이 필요하다. 또한 네트워크 시간 프로토콜 NTP, 정밀 시간 프로토콜 PTP와 다른 프로토콜들이 독립적인 시간 표준을 만드는 것은 아니다. 서로 다른 서비스가 하나의 위성 체계에서 원래 시각을 받아올 수 있다 [9]. 검증은 앱의 이름에서 멈추지 않고 기준 신호의 출처까지 이르러야 한다.

측정 주장의 구성

완전한 주장은 구체적이다. 한 지점에서 미리 비교한 두 자율 발진기가 정해진 구간 동안 명시한 불확도 아래 특정한 차이를 누적했고, 알려진 보정이 그 일부를 설명한다는 식이다. 자료 누락, 운용 방식 변경과 비교 방법을 따로 열거한다. “실내에서 시간이 더 느리게 간다”라는 표현은 이런 기술 뒤에야 작업 가설이 되며 그 기술을 대신하지 않는다.

사고 실험을 보자. 기록기는 연속한 만 개의 펄스를 보존했지만 기록부에는 일 분이 빠져 있다. 하드웨어 계수기가 계속 균일하게 증가했다면 누락 행에 대해서는 우선 기록을 검증해야 한다. 독립적인 측정기에서 펄스 간격이 달라졌다면 발진기와 그 환경을 연구한다. 서로 다른 종류의 시간 표준에서 편차가 재현되고 장의 기하에 부합한다면 셋째 과제가 생긴다. 이 가능성들은 눈길을 끄는 이름이 아니라 자료로 구별된다.

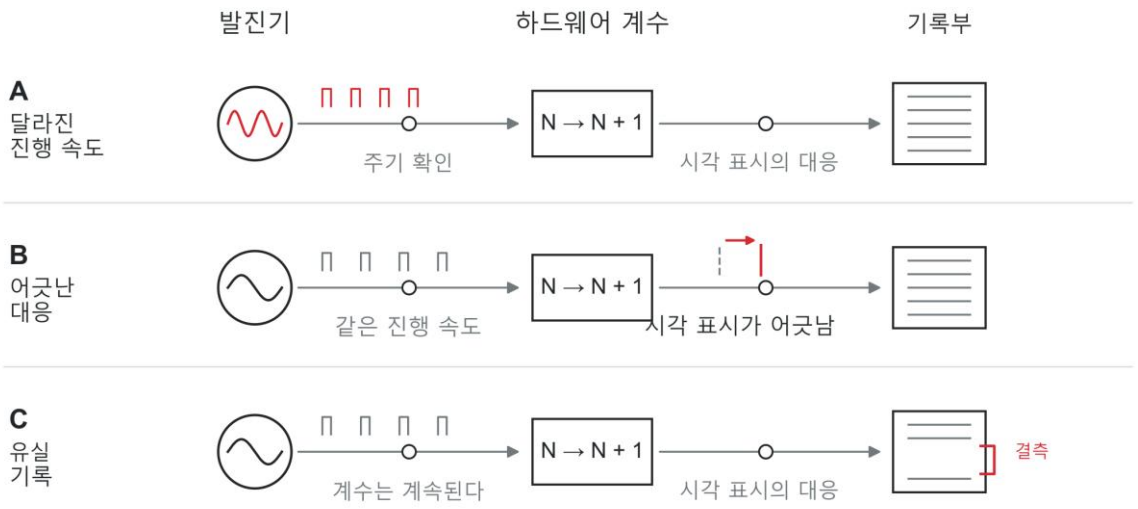


그림 8. 발진기, 계수기와 기록부: 불일치가 생기는 곳. 발진기, 지시값의 시간 대응, 기록부 보존이라는 세 가지 불일치 발생 지점을 보여 주는 학습 도식이다. 연속적인 하드웨어 계수로도 누락 기록을 복원하지는 못한다. 제시한 경로는 기능 도식이며 조립 지침이 아니다.

여러 시계가 서로 부합하게 변해도 공통 작용에 관한 질문은 남는다. 온도, 전원, 펌웨어나 하나의 기준 신호선이 겉으로 다른 기기들을 연결할 수 있다. 하지만 가능한 오류를 끝없이 열거하는 것 역시 설명은 아니다. 중요한 대안마다 시간 표준의 재료, 장소, 전원 운용 방식, 조회 빈도나 전송 방법에 대한 의존성처럼 관찰 가능한 차이를 예측해야 한다.

초기 판정을 위한 저자의 절차

1. 자료 관리자는 원래 기록부, 하드웨어 계수기와 시간 보정 이력을 보존한다. 처리 사본에는 별도 표지를 붙인다.
2. 계측 전문가는 측정량을 정의하고 기기 사이의 숨은 의존 관계까지 포함하여 기준 시간의 출처들을 열거한다.
3. 조작자는 공통 시간 척도에서 위상, 주파수와 기록의 완전성을 대조하며 재시작과 운용 방식 변경을 표시한다.
4. 연구 책임자는 설명들을 구별하는 예측에 따라 다음 검증을 고른다. 안전 조정자는 장비 배치의 허용 여부를 확인한다.

계속할 근거는 측정 순서를 재구성하고 비교의 불확도를 평가할 수 있다는 데 있다. 기준 척도를 모르거나, 기록부 없이 계기를 재시작했거나, 두 기록을 명확하게 대응시킬 수 없다면 시간 진행률에 대한 결론을 멈춘다. 보고 자체는 아직 충분히 규정되지 않은 것으로 목록에 보존한다. 구체적인 측정이 증거력을 잃었다고 사건 부재가 입증되는 것은 아니다.

이 장은 체험, 기록과 물리적 비교 사이의 경계를 긋는다. 다음 과제는 이 층위들이 서로를 대체하지 않는 관찰을 구성하는 것이다. 그 뒤에야 국소적인 시간 편차에 좌표, 지속 시간, 측정상의 의미와 주변 조건에 대한 검증 가능한 연관성이 생긴다.

제13장

국소적 시간 차이의 검증

시간 효과가 국소적이라는 말은 결과가 하루 중 시각뿐 아니라 위치나 궤적에 의존한다는 뜻이다. 이를 검증하려고 추정 구역에 시계를 가져갔다가 돌아온 뒤 지시값을 비교하는 것만으로는 부족하다. 운반 중에는 온도, 방향, 기계적 하중과 통신 조건이 달라진다. 연구 구성은 장소, 특정 계기와 이동 절차의 영향을 구분해야 한다. 그렇지 않으면 발견한 잔류 차이를 어느 요인에도 확실히 귀속시킬 수 없다.

제안하는 프로토콜의 바탕은 연구 지점, 통상 조건이 비교 가능한 대조 지점, 시간 표준들을 함께 비교하는 장소라는 세 위치이다. 가능한 간섭 모형에 따라 대조를 고른다. 옆 복도는 온도에는 좋은 대조지만 전자기 환경에는 나쁜 대조일 수 있다. 멀리 떨어진 실험실은 독립 배경을 제공하지만 복잡한 전송선을 더한다. 주계열 전에 각 지점을 고른 이유를 기록한다.

이동 전후의 점검

함께 얻은 최초 기록에서 일정한 편향, 드리프트와 주파수 차이의 산포를 평가한다. 이 기록이 시계들을 완전히 같게 만들 필요는 없다. 쌍의 예상 거동과 변화를 구별할 수 없는 하한을 확립하는 것이 목적이다. 주계열 뒤 시간 표준들을 다시 함께 비교한다. 상대 거동이 달라진 뒤 회복되지 않았다면 손상, 노화나 운반의 영향일 수 있다. 최초 교정이 변하지 않았던 것처럼 자료를 해석해서는 안 된다.

위치에 안전하게 접근할 수 있다면 계기를 서로 바꾸어 배치하면 유용하다. 편차가 기기를 따라가면 국소성 가설은 약해진다. 장소를 따라가며 비교 방법을 바꾼 뒤에도 유지된다면 더 유익한 결과가 된다. 다만 재배치가 불확실한 환경에 반드시 직접 들어가야 한다는 뜻은 아니다. 접근 근거가 없으면 원격 배치를 쓰거나 관찰 가능한 외부 신호로 결론을 제한한다.

현장용 광시계는 이런 프로그램이 공상적인 계기에만 머물지 않음을 보여 준다. Grotti와 공동 연구자들의 연구에서는 이동 가능한 시간 표준으로 두 부지의 퍼텐셜을 비교했으며, 현지 및 원격 비교로 계기 편향을 검증할 수 있었다. 신뢰성 문제와 제한된 가동 시간은 최종 불확도에 영향을 주었다 [8]. 이는 개별 발진기의 광고상 성능보다 중요하다. 완료된 측정 활동 전체를 평가해야 한다.

다른 이동식 장비 체계도 수천 킬로미터 운반한 뒤 설치해 가동한 사례가 있다. 기술된 실험에서는 도착 후 이틀 안에 장비가 작동 가능한 상태가 되었다 [10]. 이는 전문적인 이동 계측이 가능함을 확인한다. 이동 중에도 연속 작동하거나, 모든 환경을 견디거나, 켜자마자 정확한 답을 내놓을 수 있다는 뜻은 아니다.

독립성이 유지되어야 할 것

자율적인 시계 진행과 외부 비교를 함께 쓰는 것이 좋다. 자율 기록은 발진기의 거동과 동기화 경로의 거동을 구별하도록 돕고, 외부 시간 표준은 서로 다른 부지를 연결한다. 이 기능들을 드러내지 않고 합쳐서는 안 된다. 자동 조정이 연구 대상 편차를 없애는 동시에 외부 체계의 오류를 계기 안으로 옮길 수 있기 때문이다. 모든 보정 명령을 처리 전 위상 또는 주파수와 함께 보존한다.

위성 신호가 고장 났다고 국소 시계가 오류 없는 대체 수단이 되는 것은 아니다. 기준을 잃은 뒤 결과는 자체 발진기와 홀드오버 알고리즘에 달려 있다 [9]. 국소 발진기들의 집합으로 검증하면 외부 시각 위조의 일부 유형을 알아낼 수 있으며, 이는 별도의 실험적 개발에서 제시되었다 [11]. 제안하는 체계에서 이런 검증은 구체적인 의존 관계의 진단이지 무적이라는 인증이 아니다.

각 쌍에 대해 측정 차이와 알려진 효과의 계산값 사이의 잔차를 구한다. 불확도 예산에는 위치, 운동, 주파수 보정, 전송과 누락의 불확도를 포함한다. 시계열의 인접 점들은 대개 하나의 발진기 거동으로 연결되어 있다. 기록 빈도를 늘린다고 그만큼 많은 독립 측정이 생기지는 않는다. 지속되는 잔차의 유의성을 이 의존 관계를 고려해 평가하고 다른 계열에서 결과를 검증한다.

측정 장소 비교를 위한 저자의 프로토콜

1. 연구 책임자는 검증할 공간적 의존 관계와 구별 가능한 최소 효과를 미리 정한다. 계측 전문가는 측정 경로가 그 효과를 구별할 수 있음을 확인한다.
2. 조작자는 함께 최초 기록을 얻은 뒤 합의한 구성에 따라 기기들을 배치하고 이동, 상태와 보정의 기록부를 따로 작성한다.

3. 자료 관리자는 통신이 없는 구간까지 포함하여 원래 측정값과 환경 감시 자료를 보존한다. 누락 구간을 측정한 것처럼 채우지 않는다.
4. 계측 전문가는 예상 보정량과 잔차를 계산한 뒤 대조 지점 및 마지막으로 함께 얻은 기록과 결과를 비교한다.
5. 책임자는 진단 가능한 상태를 유지할 때만 구성을 바꾼 반복을 허용한다. 안전 조정자는 예상하지 못한 작용이 생기면 작업을 중단한다.

측정 결론을 중단하는 기준은 물리적 위험 기준과 다르다. 동기화 기록부를 잃으면 환경이 안전해도 그 계열은 정밀 비교에 부적합해진다. 장비 손상, 원인을 모르는 가열이나 조작자와의 통신 장애가 생기면 신호의 통계적 매력과 무관하게 안전 운용으로 돌아가야 한다. 보기 좋은 곡선을 끝내려고 계기를 더 위험한 위치에 남겨 두지 않는다.

이런 검증을 성공적으로 마치면 시간에 대한 보편적 주장이 아니라, 특정한 관측 잔차가 정해진 조건에 의존한다는 한정된 결과를 얻는다. 국소 효과의 확인에는 재배치 뒤에도 부호와 규모가 유지되는 것, 독립 경로들의 일치와 위치 변경 시 미리 예측한 변화가 특히 중요하다. 이 징후들이 있어야 모형을 구역 이름으로 대체하지 않고 기록에서 모형으로 나아갈 수 있다.

움직이는 선단의 검증 가능한 관측망 모형

국소 편차는 이동할 수 있다. 이때는 서로 다른 노드에서 미리 정한 하나의 특징이 생기는 시점을 측정하면 유용하다. 그 특징은 화면의 날짜 도약이 아니라 주파수 편차의 시작일 수 있다. 각 경로에 먼저 시작점을 가려내는 규칙을 정하고 측정기 자체의 지연을 평가한다. 원래 시각 표지를 보존하면서 별도의 교정에 따라 지연을 보정한다. 여러 센서가 소프트웨어 시각을 공유해도 물리적 응답 지연이 같아지는 것은 아니다.

일정한 속도로 이동하는 평면 선단의 완전히 합성된 예를 보자. 공간 좌표의 단위는 미터이며 시각은 하나의 합의된 척도에서 초로 나타낸다. 네 노드 A–D는 추정에 쓰고 노드 E는 미리 검증용으로 남겨 둔다. 여기의 좌표는 계산용 기하를 정하며 미지의 부지에 장비를 배치하라는 지시가 아니다.

노드	좌표 (x; y; z), m	응답 시작, s	목적
A	(0; 0; 0)	100,00	모형 추정
B	(10; 0; 0)	102,40	모형 추정

노드	좌표 (x; y; z), m	응답 시작, s	목적
C	(0; 10; 0)	103,20	모형 추정
D	(0; 0; 5)	101,50	모형 추정
E	(6; 8; 4)	105,24	예측 검증

평면 선단의 도착 시점은 아래 식으로 기술한다. 벡터 s의 차원은 초 매 미터이다. 방향은 선단의 진행 법선 방향과 같으며, 크기는 이 모형에서 속도의 역수이다. 매개변수 t₀는 좌표 원점을 통과하는 시점을 정한다.

$$t_i = t_0 + \boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{x}_i,\; v = \frac{1}{|\boldsymbol{s}|}$$

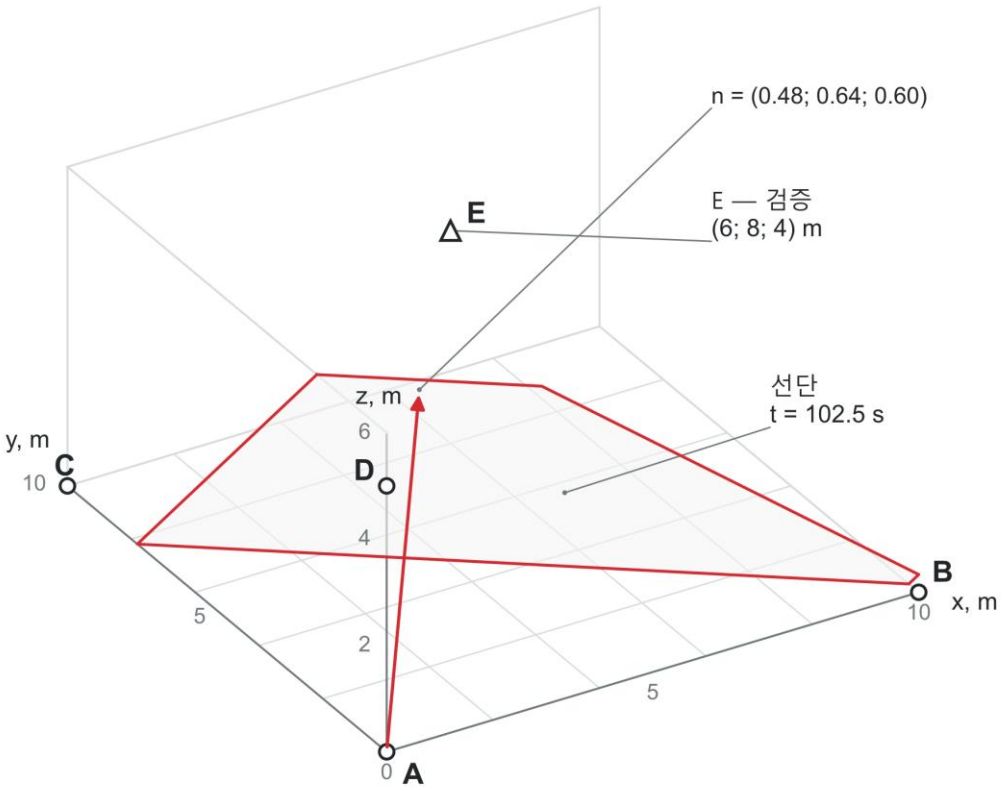
처음 네 행에서 t₀ = 100,00 s와 s = (0,24; 0,32; 0,30) s/m을 얻는다. s의 크기는 0,50 s/m이므로 속도는 2,00 m/s이고 단위 법선은 (0,48; 0,64; 0,60)이다. E에 대해 모형은 105,20 s를 미리 예측한다. 검증 행의 잔차는 0,04 s이다. 이 순서는 매개변수 결정과 검증을 분리한다. E를 최초 적합에 넣으면 이후의 일치는 더 이상 같은 독립 검증이 되지 않는다.

학습 계산에서 각 시점의 표준불확도는 0,02 s이고, 노드 오차는 독립적이며 좌표 불확도는 현재 무시할 만큼 작다고 하자. E의 예측은 추정에 쓴 시각 표지로 −1,2tA + 0,6tB + 0,8tC + 0,8tD와 같이 표현된다. 따라서 예측의 표준불확도는 약 0,035 s이고, 관찰 E와 비교할 때의 표준불확도는 약 0,040 s이다. 얻은 잔차는 모형과 양립한다. 이 수치는 합성 과제를 기술한다. 실제 공통 시간 보정에는 공분산을 고려해야 한다.

양립한다는 사실만으로 선단의 정체가 확립되지는 않는다. 온도 변화, 통상적으로 전파되는 영향, 가정한 새 장이 비슷한 순서를 만들 수 있다. 다음 계열에서는 응답의 형태, 서로 다른 종류의 노드들의 상대 감도, 독립적인 환경 특징이라는 추가 차이를 검증해야 한다. 실제 관측망을 이용한 탐색도 구체적인 시공간 틀을 만든 뒤 그 매개변수를 제한한다. 그런 탐색이 존재한다는 사실이 가정한 대상을 발견했다는 뜻은 아니다 [65].

배치 전에 계측 전문가는 예상 지연이 시작점 식별의 불확도보다 크며 충분한 독립 노드가 유지될지 확인한다. 조작자는 기록 상실을 선단의 부재가 아니라 관측 가능성 상실로 기록한다. 검증 노드가 고장 나면 결과는 추정 자료에 근거한 평가로 남는다. 이 재구성의 기하적 한계는 제17장에서, 적합한 시간 기록을 얻는 방법은 설계 50에서 다룬다.

망 A–E와 계산한 평면 선단



기선 길이: A–B 10 m; A–C 10 m; A–D 5 m

A–D에 따른 추정: v = 2.00 m/s

절점 E: 예측 105.20 s; 관찰 105.24 s

합성한 기하다. 절점 사이의 평면은 모형의 보간이다.

그림 9. 삼차원 망과 검증 노드 E. 합성 망 A–E의 기하다. 노드 A–D로 평면 선단의 삼차원 모형을 정하고, E는 예측 검증용으로 남겨 둔다. 계산한 법선과 t = 102,5 s일 때의 선단 위치를 표시했다. 축측도는 배치를 나타낸다. 노드 사이의 면은 모형에 따른 보간으로 남는다.

제14장

사건 반복과 가정한 시간 고리

반복은 회전, 진동, 프로그램 주기의 작동, 일정과 기록 재생을 비롯한 많은 통상 과정의 성질이다. 시간 고리에 대한 가정은 훨씬 강하다. 두 관찰의 유사성뿐 아니라 세계의 상태와 사건 순서 사이의 특별한 연결도 주장한다. 따라서 연구는 영상, 행동 순서, 여러 계기의 지시값 또는 관측 가능한 물리 상태 일부 가운데 정확히 무엇이 반복되었는지 정하는 데서 시작한다.

완전히 같은 파일은 우선 같은 자료를 다시 내보냈음을 가리킨다. 원본 파일이 다른데 영상이 비슷하다면 주기적인 장면을 반영할 수 있다. 몇 가지 특징이 일치해도 체계 전체가 이전 상태로 돌아갔다고 할 수는 없다. 반복에 관한 주장이 넓을수록 더 많은 독립적인 물리량을 포괄해야 한다. "정확히"라는 말은 분해능, 허용 오차와 비교 특징 목록이 함께 있을 때만 쓸 수 있다.

반복의 세 의미

첫째는 표시의 반복이다. 카메라, 보관소나 화면이 이미 기록한 단편을 다시 보여 준다. 둘째는 관찰 대상 체계가 비슷한 구성으로 돌아오는 것이다. 예를 들어 기구가 한 주기를 마치는 경우이다. 셋째는 사건의 궤적이 시공간에서 닫히는 가정 모형이다. 이 가능성들 사이를 넘어가려면 추가 자료가 필요하다. 누락된 프레임 번호가 셋째 가능성의 중간 증거가 되는 것은 아니다.

닫힌 시간꼴 곡선의 가정 모형에서도 관찰자의 국소 운동을 따른 고유시간이 반드시 뒤로 갈 필요는 없다. 이례성은 사건들의 전역적 연결에 관한 것이지 각 구간에서 시계가 반드시 역회전한다는 뜻이 아니다. 따라서 영화 속 "시곗바늘이 모두 거꾸로 돌았다"라는 모습은 별도의 물리적 시나리오이다. 이를 시간 고리의 정의로 받아들이지 말고 기구와 보존 기록의 동역학으로 설명해야 한다.

세계가 초기 상태로 완전히 돌아왔다는 이야기에는 특별한 한계가 있다. 상태가 정말 완전히 복원되었다면 관찰자의 기억과 기록기의 상태도 복원되어야 한다. 이전 주기의 기록이 남았다는 사실은 적어도 그 매체는 돌아가지 않았다는 뜻이다. 이때 모형은 보존되는 하위 체계와 나머지 과정의 관계를 명시해야 한다. 이는 검증 가능한 주장에 대한 논리적 요건이며 고리의 존재나 불가능성에 대한 증명이 아니다.

실제 시간결정은 이례적인 용어를 정확히 쓰는 예로 유용하다. 한 실험 구현에서는 주기적으로 구동한 이온 체계가 안정적인 부분조화 응답을 보였다 [12]. 평형에서 특정 시간결정을 금지하는

결과는 다른 조건과 구체적인 정의에 관한 것이다 [13]. 어느 주장도 임의의 역사적 사건이 반복된다는 뜻은 아니다. 물리학의 명칭은 체계에서 관찰되는 동역학을 기술한다.

설명들을 구별하는 방법

저자의 검증 구성은 외부 기록과 미리 고른 특징을 사용한다. 여기서 외부 기록이란 거리뿐 아니라 구조에 의해 독립성이 뒷받침되는 기록이다. 두 카메라가 하나의 서버로 자료를 보내면 서버 버퍼의 반복이 두 화면에서 함께 재생될 수 있다. 독립적인 국소 계수기와 별도 보관소는 이 경로를 검증하도록 돕지만 모든 환경 작용으로부터의 독립성을 보장하지는 않는다.

눈길을 끄는 프레임 하나가 아니라 순서를 비교해야 한다. 허용 불일치, 단편의 길이와 과정이 통상적으로 진행할 때 달라져야 하는 특징을 미리 정한다. 안전한 대조 기록 안의 새 표지는 전송 반복과 장면 반복을 구별하도록 도울 수 있다. 다만 어떤 표지도 마법 같은 증거가 아니다. 언제 만들어졌고 어디에 보존되었으며 하나의 경로로 비교 대상인 두 자료 집합에 들어갈 수 있었는지 검증해야 한다.

제안하는 학습 시나리오는 이 차이를 보여 준다. 여러 모니터에서 사람이 문을 지나는 같은 장면이 반복되지만 자율 조도 기록기는 배경이 계속 변함을 보여 준다. 프레임은 일치하고 독립적인 물리 시계열은 불일치하므로 검증은 영상 경로를 향한다. 반면 사람 행동만 반복되고 잡음, 배경과 표지가 다르다면 행동의 주기성을 연구한다. 이는 검증을 고르기 위한 허구 자료이며 시간 고리를 관찰했다는 보고가 아니다.

반복 기록을 위한 저자의 프로토콜

1. 자료 관리자는 원본 단편의 덮어쓰기를 막고 출처, 연속 번호와 체크섬을 보존한다.
2. 계측 전문가는 새 계열을 보기 전에 반복 특징과 허용 불일치를 정한다. 조작자는 물리적 경로를 화면 표시와 따로 기록한다.
3. 분야 전문가는 버퍼, 일정, 장비 주기와 공통 신호원을 점검하며 각 설명안에서 예상하는 차이를 정식화한다.
4. 책임자는 새 계열을 등록한 예측과 대조한다. 반복의 정의를 바꾸면 새 연구 가설로 기록한다.

모든 자료를 본 뒤 유사성 기준을 골랐거나 기록의 출처를 확립할 수 없으면 그 계열을 확증용으로 쓰지 않는다. 보관이 다시 실패하면 분석을 위해 오류 상태를 보존하면서 측정 체계를 복구한다. 사건에 물체의 위험한 움직임, 방향 감각 상실이나 통신 장애가 동반되면 안전 조정자는 접근을 중단한다. 반복성 검증은 허용된 위치에서만 계속한다.

가정한 시간 고리는 더 단순한 주기 과정이 낼 수 없는 차이를 예측하고 기억과 자료의 후속 상태를 설명할 때만 의미 있는 모형으로 남는다. 불일치가 생길 때마다 고리의 경계를 새 매체로 옮기는 불명확한 주장으로는 검증을 끝낼 수 없다. 과학적 기술에는 최초 명칭을 지키기 위해 갈수록 기발한 방어를 만드는 것보다 안정된 반증 조건을 유지하는 일이 중요하다.

제15장

예지와 역인과성

예지는 정보의 문제로 제시할 수 있다. 미리 기록한 답에, 응답자가 통상적인 경로로는 아직 알 수 없었던 사건의 정보가 들어 있는가? 역인과성은 그 기제에 대한 더 강한 가정이다. 이례적인 예측 성공도 인과 관계의 방향을 자동으로 확립하지는 않는다. 성공은 생성기의 규칙성, 정보 유출, 선정 순서, 분석의 특성에 좌우될 수 있다. 이를 구분하는 검증을 정하면 이러한 가능성들은 경쟁 모형이 된다.

일상의 이야기에는 대개 가능한 결과의 전체 범위가 담기지 않는다. 현실과 맞은 꿈은 기억하지만 빗나간 모든 예상은 기억하지 않고, 사건 기술은 사건이 일어난 뒤 구체화된다. 이런 기록은 체험 이력에 중요할 수 있으나 예측의 정량 검증으로 바꾸기는 어렵다. 연구로 나아가려면 결과가 나오기 전에 내용, 시각, 대조 규칙과 전체 시도 횟수를 고정해야 한다.

구체적인 검증에서 보여 준 것

Transparent Psi Project에서는 지지자들과 비판자들이 합의한 프로토콜을 여러 실험실에서 검증했다. 유효한 데이터에는 참여자 2 115명과 핵심 시행 37 836회가 포함되었다. 정답 선택 비율은 49,89%로, 예상했던 무작위 수준 50%의 초과가 나타나지 않았다 [14]. 이 결과는 특정한 과제에 관한 것이다. 원래 주장을 확립된 효과로 반복 제시하지 않을 근거는 되지만 가능한 모든 형태의 예감을 검증한 것은 아니다.

2025년 연구는 참여자 26 483명을 대상으로 한 세 연구에서 이 절차를 추가로 조사했다. 무작위 수준을 넘는 성공률이라는 최초 예측은 재현되지 않았다. 첫 실험의 탐색 분석에서 찾은 50% 아래의 편차는 둘째에서 확인되었으나 셋째에서는 재현되지 않았다 [15]. 따라서 이 연구를 기술할 때는 최초 가설, 새 효과 방향과 후속 검증의 차이를 유지해야 한다. "이례적"이라는 말이 서로 다른 통계적 주장을 하나로 묶어 주지는 않는다.

이 결과는 후속 연구에 방법론적 교훈을 준다. 자료를 본 뒤 효과의 부호를 바꾸면 새 계열이 필요한 새 가설이 생긴다. 미리 정한 모형 없이 적중과 실패를 모두 이점으로 세어서는 안 된다.

그렇지 않으면 사실상 어떤 편차도 확증이 되고, 무작위 수준과의 일치는 상반된 작용들의 숨은 결합으로 선언된다. 이런 구성은 구별 능력을 잃는다.

시간적 순서는 측정해야 한다

저자의 프로토콜은 결정 시점, 답을 되돌릴 수 없게 확정한 시점, 표적 생성 시점과 표적 제시 시점을 구분한다. 이 네 사건을 화면 애니메이션 하나로 대신할 수 없다. 프로그램이 자극을 선택한 뒤 나중에 보여 줄 수 있고, 기록부의 시각 표지도 기록 지연 뒤에 붙을 수 있다. 정보 순서를 검증하려면 중간 버퍼와 접근 권한까지 포함한 실제 자료 흐름도가 필요하다.

표적의 예측 불가능성도 절차의 검증 가능한 성질이다. 미리 알려진 순서에서 고르는 것과 답을 확정한 뒤 만드는 것은 다르다. 암호학적으로 기록을 확정해도 선택한 신뢰 체계에 대해 기록이 변하지 않았음만 확인한다. 물리적 생성 시점이나 정보 누출 부재 자체를 입증하지는 않는다. 강한 프로토콜은 독립 기록, 접근 통제와 미리 기술한 감사 절차를 결합한다.

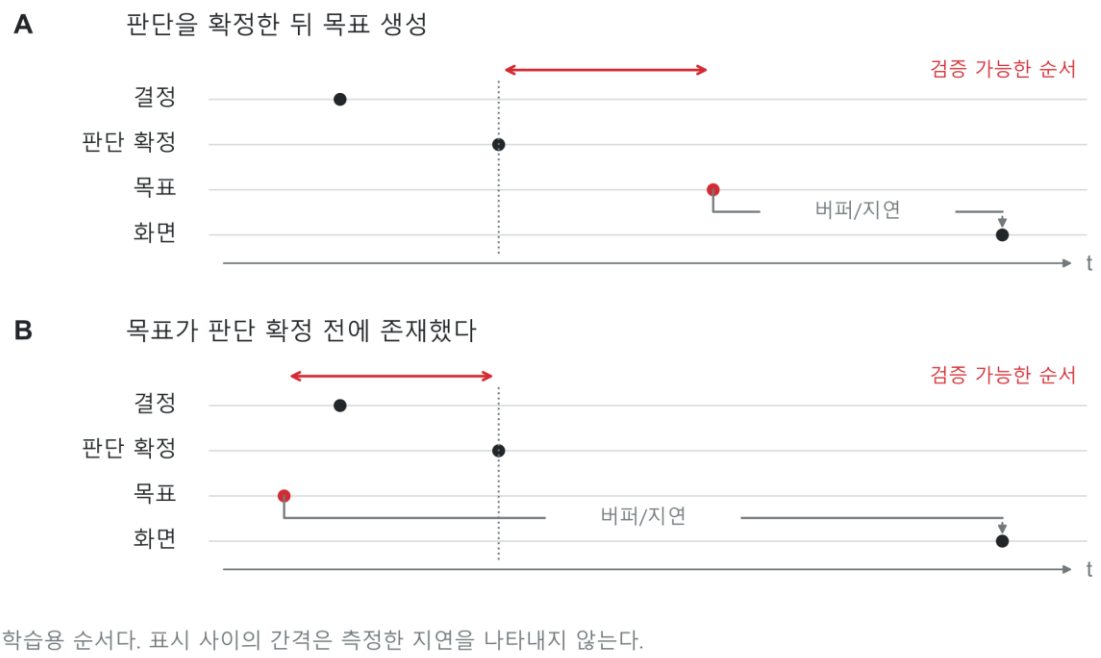


그림 10. 표적이 만들어진 시점과 제시된 시점. 실제 사건의 순서를 보여 주는 두 학습 예다. 화면에 늦게 제시되었다는 사실은 응답을 확정한 뒤 표적을 생성한 경우와, 그 전에 이미 표적이 존재했던 경우 모두와 양립한다. 버퍼 구간은 별도의 지연을 나타낸다. 도식 자체가 역인과성을 확립하지는 않는다.

분석 단위는 시행, 참여자 또는 실험실일 수 있으며 각 층위의 질문은 다르다. 한 사람의 많은 답은 같은 수의 독립 참여자와 같지 않다. 마찬가지로 하나의 프로그램을 쓰는 여러 부지는 일부 오류를 공유한다. 따라서 보고서에는 전체 백분율뿐 아니라 결과 분포와 의존 구조도 제시한다.

제외 시행에 특히 주의한다. 제외 여부가 답이나 결과에 달려 있으면 절차가 인공적인 편향을 만들 수 있다.

확증 실험을 위한 저자의 절차

1. 책임자와 분야 전문가는 하나의 주가설, 효과 방향, 제외 규칙과 자료 수집 종료 기준을 미리 고정한다.
2. 자료 관리자는 답을 되돌릴 수 없게 확정하고 표적 생성 기록부를 따로 둔다. 조작자는 응답이 끝나기 전에 미래 표적을 받지 않는다.
3. 독립 검토자는 비공개 결과를 실험자에게 드러내지 않고 대조 실행과 정보 경로 감사를 수행한다.
4. 등록한 규칙에 따라 통계 분석을 한다. 추가 발견은 탐색적이라고 표시하고 새 자료로 검증한다.
5. 안전 조정자는 자발적 참여를 보장하고 뚜렷한 불편이나 고통이 있으면 부담을 중단한다. 추정 능력을 근거로 삶의 결정을 내리라고 참여자에게 권하지 않는다.

표적 은폐의 훼손, 답의 사후 편집 가능성, 불명확한 시간 순서와 포함 규칙의 실패가 있으면 절차를 중단한다. 해당 구간의 자료를 흔적 없이 지우지 않는다. 제외 이유와 함께 보존하고 위반의 영향을 따로 평가한다. 이 조건에서는 주검증이 이루어지지 않았으므로 중단을 예지 가설의 성공이나 실패로 세지 않는다.

새 효과가 안정적이어도 기전을 단계적으로 구체화해야 한다. 먼저 재현 가능한 정보 의존 관계를 검증한다. 이어서 통상 경로, 무작위성의 출처와 절차를 바꾸어도 유지되는지 검증한다. 그 뒤에야 인과 모형들을 비교할 수 있다. 역인과성은 시간적 간격이나 표적 생성 방식에 대한 의존성처럼 별도의 예측을 내야 하며, 그 예측을 결과마다 자유롭게 바꾸어서는 안 된다.

과학적 결과는 음성이면서도 의미 있을 수 있다. 알려진 감도의 특정 절차가 주장한 이점을 뒷받침하지 못했다는 결과이다. 이 결론은 후속 프로그램의 경계를 정한다. 특정 이야기를 지켜야 한다는 의무에서 연구를 벗어나게 하고, 어떤 관찰이 이례적인 인과관계의 평가를 실제로 바꿀지에 집중하게 한다.

미리 기록한 분포로서의 예측

추정 예지에 대해서는 먼저 가능한 결과의 공간과 예측 평가 규칙을 고정한다. 여러 미래 사건에 들어맞는 말과 미리 정한 선택지 하나를 고르는 것은 검증력이 다르다. 프로토콜에는 모든 예측,

유효 기한, 허용되는 모든 결과와 일치 기준을 보존한다. 사건 없이 기한이 지난 경우도 자료 집합에 남긴다. 결과 뒤 해석을 바꾸면 별도로 기록하고 확증 지표에 넣지 않는다.

가정한 새 모형은 미래를 틀림없이 안다는 것보다 정답 확률의 작은 변화를 예측할 수 있다. 이때는 변화의 크기, 새 과제들 사이의 재현성과 절차 의존성을 연구한다. 질문 표현 사이의 적용, 참여자 사이의 적용과 장치 사이의 적용을 구분한다. 한 적용의 성공이 나머지 성공까지 뜻하지는 않는다. 예상 효과 크기를 고려하여 시도 수와 중단 규칙을 정한다. 관련 원칙은 제3장에 제시했다.

시간 순서의 위반은 별도의 주장이다. 예측 기록과 후속 결과 사이의 연관성이 재현되어도 시각 표지, 과제 생성, 정보 누출, 선택과 전체 행동 순서를 검증해야 한다. 순서를 모르면 해당 절차에서 확립된 통계적 연관성만 남는다. 그 방향을 주장하려면 통상 전송 경로를 구별하고 검증할 수 있는 추가 실험이 필요하다.

제16장

시간 진행률의 국소적 변화에 대한 가정 모형

의미 있는 시간 영역 모형은 시계 지시값을 다른 측정과 연결해야 한다. "여기서는 모든 것이 느려진다"라는 임의의 가정만으로는 외부 관찰자가 무엇을 보고, 신호가 경계를 어떻게 지나며, 계기를 제자리에 유지하는 데 어떤 힘이 필요한지 정할 수 없다. 아래에서는 저자의 가정 모형을 도입한다. 목적은 발견된 대상을 기술하거나 그런 영역을 만드는 기기를 제안하는 것이 아니라 서로 부합하는 검증 가능한 결과를 얻는 것이다.

기하학적 가정

시공간이 정적이고 구대칭이며, 선택한 공간 단면들이 통상적인 유클리드 기하를 갖는다고 가정하자. 다음과 같이 간격을 정한다.

$$ds^2 = -c^2 N(r)^2 dt^2 + dr^2 + r^2 d\Omega^2.$$

함수 N(r)는 정지 관찰자의 고유시간과 공통 좌표 변수 t의 비를 정한다. 각도 부분 dΩ²은 구면 위의 방향을 기술한다. 여기서 공간 단면이 평평하다는 것은 가정의 일부이다. 모형은 하나의 효과를 분리하며 일반성을 주장하지 않는다.

매끄러운 분포를 고르자.

$$N(r) = 1 + \varepsilon \, exp\left(-\frac{r^2}{L^2}\right),$$

여기서 L은 양이고 ε는 −1보다 크다. 그러면 N은 어느 곳에서도 영이 되지 않으며 중심에서 멀리 가면 일에 가까워진다. 고정된 시계에 대해서는 $d\tau = N(r)dt$이다. ε가 양이면 먼 기준에 비해 중심에서 고유시간이 더 빨리 쌓이고, 음이면 더 느리게 쌓인다. 양의 값을 유지한다는 조건은 통상적인 로런츠 부호수를 보존하며, 허용되지 않는 값을 대입해 몰래 시간 정지를 얻으려는 시도를 배제한다.

시계로 퍼텐셜을 비교할 수 있다는 알려진 가능성은 이런 진행률 비의 물리적 의미를 보여 주지만 선택한 분포를 확인해 주지는 않는다 [8]. 여기서 매개변수 ε와 L은 아직 사고 실험의 변수이다. 모형으로 자료를 설명한다면 측정의 한 부분에서 추정하고 다른 부분에서 검증한다. 관찰이 실패할 때마다 영역의 폭을 자유롭게 바꾸면 모형은 예측 역할을 잃는다.

시계, 빛과 제자리 유지에 대한 귀결

한 지점에서 같은 계량 변화는 같은 고유시간 간격을 통해 이상적인 시계들에 작용한다. 따라서 통상 환경이 변하지 않으면 서로 다른 두 국소 원자 전이의 비는 그대로이다. 정지한 두 지점 사이의 진행률 비는 $\frac{N(r_1)}{N(r_2)}$이다. 이 점이 하나의 전이나 발진기 종류만 선택적으로 이동시키는 작용과 순수한 계량 가설을 구별한다. 구조가 같은 기기들 사이에서만 그 차이를 찾아서는 안 된다.

빛도 모형에 포함된다. 동경 방향 광선에서는 영간격 조건으로부터 다음 좌표 속도를 얻는다.

$$\frac{dr}{dt} = \pm cN(r).$$

이는 국소적으로 측정한 빛의 속도가 달라진다는 뜻이 아니다. 작은 영역에서 현지 시계를 쓰면 여전히 c이다. 정지한 송신자와 수신자가 비교하는 주파수는 송신자의 N과 수신자의 N의 비에 따라 달라진다. 따라서 모형은 시계 차이와 그에 부합하는 전송 신호의 주파수 편차를 함께 예측한다.

지점 R에서 중앙 반사기로 광선을 보냈다가 돌아올 때 지점 R에서의 고유 대기 시간은 다음과 같다.

$$T_R = \frac{2N(R)}{c} \int_0^R \frac{dr}{N(r)}.$$

이 식에는 전파와 수신 시계의 진행률이 모두 들어 있다. 하나만 고려하면 인공적인 모순이 생긴다. 실제 비교에서는 기하 모형에 통상적인 광학 매질과 장비 지연을 더해야 한다. 별도 근거 없이 이를 새 효과의 일부로 선언해서는 안 된다.

정지한 계기를 제자리에 유지하는 데에도 대가가 든다. 모형에서 필요한 고유가속도의 크기는 다음과 같다.

$$a = c^2 \left| \frac{d \ln N}{dr} \right|.$$

따라서 진행률의 급격한 공간 변화는 동역학적 예측과 연결된다. 예를 들어 가정한 값 ε = 10⁻¹⁵와 L = 10 m에서는 중심의 시계가 하루에 충분히 먼 시계보다 약 86피코초 앞서지만, 최대 유지 가속도는 8 m/s² 정도이다. 이는 모형 계산이며 실험 결과가 아니다. 작은 상대 시간 효과를 공간 기울기와 따로 평가해서는 안 되는 이유를 보여 준다.

관찰과의 양립 가능성 검증

제안하는 검증은 서로 다른 종류의 시계 비교, 신호의 지연 및 주파수, 제자리 유지에 필요한 역학적 징후라는 세 자료 묶음을 함께 대조한다. 한 묶음에 맞는 매개변수는 불확도 범위 안에서 나머지도 설명해야 한다. 시계가 예측한 분포를 보이지만 그에 해당하는 동역학적 효과를 충분한 감도로 배제했다면 이 모형을 기각한다. 불편한 결과를 임의로 끄거나 숨겨져 있다고 선언할 이유가 되지는 않는다.

1. 계측 전문가는 최초 자료로 허용 매개변수 범위를 정하고 독립 경로들에서 구별 가능한 예측을 계산한다.
2. 분야 전문가는 통상적인 역학 및 환경 설명을 검증한다. 조작자에게는 안전한 원격 측정 과제만 준다.
3. 자료 관리자는 적합에 쓰는 집합과 검증 집합을 분리한다. 책임자는 모형이 관찰과 양립하지 않는 조건을 미리 고정한다.
4. 안전 조정자는 예기치 않은 가속, 받침부의 움직임이나 장비 위치의 확실성 상실이 있으면 접근을 중단한다.

수학적으로 매끄럽다고 그 영역이 물리적으로 실현 가능해지는 것은 아니다. 계량을 아인슈타인 방정식에 대입하면 필요한 에너지 및 응력 텐서가 정해진다. 아래에서는 이 계산을 에너지

조건의 검증까지 진행한다. 형성의 물리적 기전과 발생원의 안정성은 별개의 질문으로 남는다. 함수 N을 고르는 것 자체가 그것을 만드는 물질을 제공하지는 않는다. 여기서 t는 전역적인 시간 순서를 유지한다. 모형에는 시간 고리가 없으며 미래 정보의 귀환을 설명하지도 않는다.

개입은 모형의 결과를 검증하고 확인된 계기 원인을 제거하는 데 한정된다. "시간 평준화"를 설계하려면 재현 가능한 작용 경로가 필요하지만 여기에서는 확립되지 않았다. 모형의 가치는 시계, 빛과 유지력에 대해 서로 연결된 예측을 내는 데 있다. 이를 측정과 대조하고 제한하거나 기각할 수 있다.

선택한 계량의 발생원

이 모형에서는 필요한 원천에 관한 질문을 구체적인 결과까지 밀고 갈 수 있다. 일반상대성이론의 표준 방정식을 유지하고 우주상수를 영으로 놓자. 그러면 주어진 기하학이 필요한 전체 에너지 및 응력 텐서를 정한다. 이는 발견된 물질을 말하는 것이 아니라 그 분포를 유지하려면 어떤 원천이 필요한지를 묻는 것이다. 전체 계산은 부록 H에 제시했다.

정지한 관찰자의 국소 정규직교 틀에서 에너지 밀도를 ρE, 반지름 방향 압력을 pr, 두 횡방향에서 같은 압력을 pt로 표시하자. 세 물리량 모두 부피당 에너지의 차원을 갖는다. 압력의 경우 단위는 파스칼이다. N의 미분은 반지름 좌표에 대해 취한다. 다음과 같은 원천이 얻어진다.

$$\rho_E = 0, p_r = \frac{c^4}{4\pi G}\frac{N'}{rN}, p_t = \frac{c^4}{8\pi G}\frac{N'' + N'/r}{N}$$

여기서 에너지 밀도가 영이라고 발생원이 없다는 뜻은 아니다. 영이 아닌 응력도 아인슈타인 방정식에 기여한다. 이 결과는 선택한 정적 단면에서 공간 기하가 평평하다는 모형의 특히 엄격한 가정과 연결된다. 계량의 공간 부분도 변하도록 허용하면 발생원 요건이 달라진다. 따라서 얻은 결론은 명시한 분포 전체에 관한 것이며 시계 진행률 차이를 만드는 모든 방법에 관한 것이 아니다.

가우스 분포 N을 대입하면 중심에서 유한한 압력을 얻는다. 두 압력의 공통 극한은 −c⁴ε/[2πGL²(1 + ε)]이며 중심에서 멀어지면 발생원의 모든 성분이 영에 가까워진다. 학습용 값 ε = 10⁻¹⁵와 L = 10 m에서 중심 압력의 크기는 약 1,9 × 10²⁶ Pa이다. 따라서 상대 시간 편차가 작다는 사실이 물질적 발생원의 단순함과 같지는 않다. 같은 예에서 최대 유지 가속도 약 7,71 m/s²은 대략 r = 7,07 m에서 생기며 중심 자체에서는 영이다.

영 에너지 조건은 각 공간 방향에서 에너지 밀도와 압력의 합이 음이 아니어야 한다고 요구한다. ε가 양이면 동경 방향의 합이 음이다. ε가 음이면서 −1보다 크면 r이 L보다 큰 영역에서

횡방향의 합이 음이 된다. 따라서 ε가 영이 아닌 한 선택한 모형은 어딘가에서 이 조건을 위반해야 한다. ε = 0이면 발생원이 사라지고 평탄한 시공간이 된다.

이 결론은 물리적 해석을 제한하지만 시간 영역이 불가능하다는 보편 정리는 아니다. 음의 에너지 기여에 대한 양자 제약은 고려하는 장과 기하에 따라 달라진다. 구체적인 양자 발생원의 적용 가능성은 별도로 입증해야 한다 [27]. 형성 모형과 안정성 분석도 필요하다. 이제 가정 계량의 지위는 더 정확해진다. 관찰들을 일관되게 연결하는 동시에 발생원에 대해 강하고 명시적으로 계산된 요건을 제시한다.

자료 검증에서는 이 요건을 시계, 빛과 역학의 관계에 더한다. 주파수 곡선 하나가 가우스 모양과 비슷하다는 이유만으로 제안한 영역이 실현되었다고 선언할 수는 없다. 반면 사례 3처럼 독립 역학 경로의 불일치만으로도 허용 물질에 관한 문제 전체의 해결을 기다리지 않고 이 기하를 기각할 수 있다. 연구자는 관찰과의 양립 가능성, 그리고 발생원의 이론적 실현 가능성이라는 두 검증 경로를 얻는다.

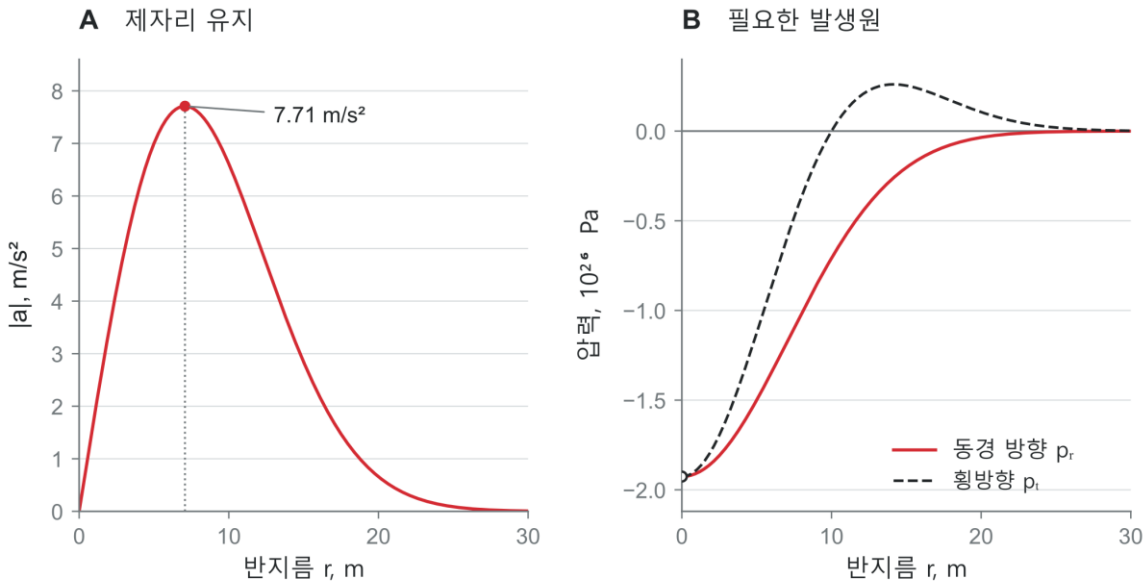


그림 11. 제자리 유지 가속도와 필요한 응력. ε = 10^{-15}, L = 10 m인 가정적 계량의 계산이다. 유지 가속도 크기의 최댓값은 r ≈ 7,07 m에서 약 7,71 m/s²이며, 중심에서는 가속도가 영이다. 동경 방향 압력과 횡방향 압력은 중심에서 같은 유한한 극한을 갖는다. 발생원은 Λ = 0, ρE = 0인 일반상대성이론에서 선택한 정적 기하에 해당한다. 이는 가정에 대한 계산이며 관측 자료가 아니다.

제IV부

공간과 새로운 상호작용

제17장

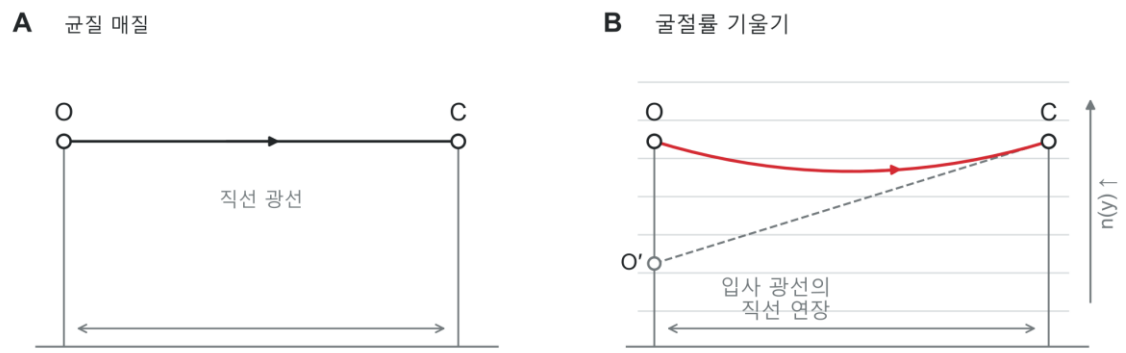
공간 기하와 광학 경로

공간 불일치는 직접이 아니라 영상, 거리, 방향, 도착 시각이나 지도상 물체 위치라는 흔적을 통해 발견된다. 대상과 최종 모습 사이에는 전파 매질, 감지 소자와 재구성 알고리즘이 있다. 따라서 SP 부류의 연구는 먼저 어느 고리에서 불일치가 생겼는지 확인한다. 관찰자가 같은 말로 기술하더라도 방의 보이는 모습이 달라졌다는 주장과 벽 사이의 거리가 달라졌다는 주장은 다르다.

경로의 기하학적 길이는 공간 요소 ds를 합한 것이다. 단순한 정상 매질의 광학적 길이는 $\int n(s)ds$이며 n은 굴절률이다. 위상이나 전파 시간의 측정은 둘째 양과 연결되며 매질의 성질을 알아야 한다. 펄스에서는 해당 군응답이 중요하다. 전파 모형 없이 이 결과를 기하학적 길이와 같다고 놓으면 처음부터 잘못된 공간 해석의 가능성을 만들게 된다.

서로 다른 경로는 서로 다른 특성을 보여 준다

신기루는 확립된 예다. 공기의 굴절률 분포가 빛의 경로를 바꾸어 실제 대상의 어긋나거나 뒤집히거나 여러 개로 보이는 상을 만든다 [16]. 이 메커니즘을 설명했다고 해서 두 겹으로 보이는 모든 영상을 신기루라 해도 되는 것은 아니다. 개별 사례에는 관찰자의 위치, 장면의 기하, 환경 조건이 필요하다. 과학적 설명은 익숙한 말 하나를 내놓는 데 그치지 않고 관찰된 특징을 재현해야 한다.



O — 물체; C — 수신기; O′ — 겉보기 위치.

기준점의 공통 기하다. 광학적 길이 ∫n ds는 경로와 매질에 의존한다.

그림 12. 변하지 않은 장면과 달라진 빛의 경로. 대상 O와 수신기 C의 위치를 고정한 계산 학습 예다. 오른쪽 광선은 무차원 합성 분포 n(y) = 1,2 exp(0,12y)에 대해 계산했다. 광선을 뒤로 직선 연장하면 겉보기 위치 O′를 얻는다. 기울기는 알아보기 쉽게 선택한 것으로, 실제 신기루를 재구성한 것이 아니다. 기준점 사이 거리, 광선의 길이, 광학적 길이 ∫n ds는 서로 다르다.

레이더에서도 빔 전파 때문에 연구 대상 표적처럼 잘못 보이는 표시가 생기는 조건이 있다 [17]. 반사 경로가 거짓 이동 표적을 만들 수도 있으며, 이는 특정 차량 레이더 체계의 자료로 검토하고 검증한 바 있다 [18]. 이런 예는 기전의 다양성을 보여 준다. 광학과 레이더의 이례성이 겹치면 공통 모형이 필요하다. 두 경로는 방식이 달라도 모두 환경과 상호작용하기 때문이다.

모든 공간 결과를 좌표계와 연결해야 한다. 카메라는 자체 자세에 대한 방향을, 거리계는 선택한 반사점까지의 경로를, 위성 수신기는 도착한 신호로 푼 해를 측정 결과로 낸다. 이를 하나의 지도에 옮기려면 변환, 시간 조정과 오차 평가가 필요하다. 카메라 자세가 틀리면 표적이 가속하는 것처럼 보일 수 있고, 관찰 시점이 맞지 않으면 움직이는 물체의 위치가 어긋난 것처럼 보일 수 있다.

측정 구성의 완결

저자의 공간 검증 구성은 안정적인 기준점과 여분의 연결을 중심으로 한다. 같은 상호 배치를 여러 방향에서, 가능하면 다른 물리적 방법으로 측정한다. 고리를 다시 폐합하면 불일치를 찾는 데 도움이 된다. 다만 폐합잔차는 공간 곡률의 보편 지표가 아니다. 기하 모형, 받침부 변형과 모든 측정선의 성질에 의존한다.

방법들의 독립성은 공유하는 가정에 따라 평가한다. 같은 프레임을 처리하는 두 프로그램은 계산을 검증하지만 장면의 둘째 관찰을 제공하지는 않는다. 두 광학 체계는 일부 전파 조건을 공유한다. 접촉식 표준은 다른 종류의 비교를 제공할 수 있으나 이미 접근 가능한 안전한 표면에서만 사용할 수 있다. 더 직접적인 측정을 얻을 가능성이 미조사 경계를 넘을 근거가 되지는 않는다.

결과의 세 층위인 원래 측정값, 기하 재구성과 시각화를 보존하면 유용하다. 시각화에는 평활화, 보간과 자동으로 채운 면이 자주 들어간다. 이는 지도를 편리하게 만들지만 공백을 가릴 수 있다. 구성한 모든 면에 직접 측정했는지, 모형으로 재구성했는지, 그림상의 가정으로 더했는지 출처를 표시해야 한다. 측정하지 않은 틈을 확인된 복도처럼 그려서는 안 된다.

학습 예이다. 거리 측정 분포에 건물 도면에는 없는 공동이 나타났다. 검증은 실제 함몰, 투명 표면의 반사, 잘못된 위치 대응과 모형 오류를 구별해야 한다. 방향을 바꾸자 공동이 사라진다면 아직 설명은 아니지만 유용한 징후이다. 독립적인 기하 측량에서도 유지되고 가능한 구조 조사로 확인된다면 질문은 광학에서 건축 구조물 연구로 옮겨 간다.

공간 검증을 위한 저자의 프로토콜

1. 분야 전문가는 좌표계, 기준점과 허용되는 받침부 변화를 기술한다. 계측 전문가는 변환의 불확도를 평가한다.
2. 조작자는 완성 지도에 그치지 않고 원측정, 계기의 위치와 자세, 환경 조건과 운용 방식을 보존한다.
3. 팀은 기하 가설과 전파 가설을 구별할 대조 측정선과 반복 관측 방향을 미리 고른다.
4. 자료 관리자는 보간 구역을 표시한다. 책임자는 설명안들의 예측을 새 측정과 비교한다.
5. 안전 조정자는 지도에 불명확하게 남은 구간의 이동을 금지한다. 운용 방식을 원격 관찰로 되돌린다.

기준점을 잃거나 자세가 불확실하거나 운용 방식을 기록 없이 바꾸면 측정 계열을 중단한다. 순차 촬영보다 장면이 빨리 변하면 정적 재구성은 부적합해지며 시간 모형이 필요하다. 서로 맞지 않는 점들을 계속 모으면 잘못된 지도가 겉보기에 더 상세해질 뿐이다. 질의 기준은 영상 밀도가 아니라 가정을 밝힌 상태에서 관찰들이 서로 부합하는지에 있다.

구체적 모형에 대한 잔차를 정의하고 중요한 대안 검증을 거친 뒤에 이례적인 기하 가설로 나아갈 수 있다. 그 결과에도 여러 설명이 가능할 수 있다. 이 장의 과제는 길이, 방향, 지연,

주파수, 좌표 연결과 불확도라는 비교 언어를 제공하는 것이다. 이 언어가 없으면 "공간이 변했다"는 말은 인상의 이름에 머문다.

망의 기하와 움직이는 경계의 불확실성

제13장의 관측망 예에서 추정에 쓰는 네 노드는 한 평면 위에 있지 않다. 미지수는 시점 t_0와 s의 세 성분이므로 측정 행렬에 독립인 네 열이 있어야 한다는 점에서 중요하다. 한 지점의 여러 노드는 반복성을 주지만 기하를 주지는 않는다. 모든 위치가 바닥에 있으면 s의 수직 성분은 미정으로 남는다. 이때 평면에서 재구성한 속도는 삼차원 선단의 전체 속도가 아니다.

이 예에서 행렬의 각 행은 $(1;\ x_i;\ y_i;\ z_i)$다. A–D의 공간 부분은 x 방향 10 m, y 방향 10 m, z 방향 5 m라는 독립적인 세 기준 거리를 정한다. 따라서 시간 차이로부터 s의 성분들을 직접 구한다. 시각 표지의 불확실성이 같다면 짧은 수직 기준 거리는 해당 성분에 더 나쁜 추정값을 준다. 노드를 늘리는 일은 새로운 방향을 추가하거나 예측을 검증할 때 유용하다. 이미 퇴화한 배치를 촘촘하게 만들기만 해서는 충분하지 않다.

공통 시각 표지 A가 세 차이에 모두 들어간다. 따라서 학습 예에서 원래 시계들이 독립적이라고 가정했어도 추정한 성분들의 오차에는 상관이 생긴다. 이 연관성을 반영하면 네 추정용 시각에서 얻는 속도의 표준불확도는 약 0,022 m/s이다. 이는 주어진 오차를 전파한 결과이며 실제 계기의 특성이 아니다. 좌표 불확도, 신호 시작점 식별 지연과 기준점의 움직임을 더하면 불확도 예산이 달라지고 대개 추정이 나빠진다.

$$u^2(t_i) = u^2_{\text{time,i}} + \boldsymbol{s}^T \boldsymbol{C}_{x,i} \boldsymbol{s}$$

마지막 식은 위치 오차와 시간 오차가 독립적일 때의 기하적 기여를 보여 준다. 행렬 C_x는 노드 좌표의 불확도를 기술한다. 오차가 공통이거나 같은 신호로 위치를 평가한다면 해당 교차항을 더한다. 같은 공간 불확도가 빠른 과정과 느린 과정에 다르게 작용하므로 모든 속도에 같은 허용 거리 오차를 정할 수 없는 이유도 식에서 드러난다.

검증 노드 E는 사건을 보기 전에 골라야 한다. 선단 형태, 가정한 지연과 재구성 기하의 적용 가능성을 시험하는 것이 목적이다. 잔차는 경계 곡률, 가속, 다른 형태의 국소 응답이나 특정 노드 오류 때문에 생길 수 있다. 따라서 뚜렷한 불일치는 우선 평면 선단의 등속 운동이라는 단순 모형을 기각한다. 이례적인 위상을 입증하거나 관측소마다 새 독립 보정을 자동으로 허용하는 것은 아니다.

관측망의 물리적 시제품은 먼저 알려진 안전한 이동 패턴이나 합성 시계열로 검증하며 두 적격성 검증을 명확히 구분한다. 소프트웨어 검증은 기하 재구성을 시험하고, 실제 패턴은 센서와 시작점 식별 규칙도 추가로 시험한다. 셋째 좌표 방향으로 배치할 수 없다면 평면 재구성으로 결과를 솔직히 제한한다. 유용한 지도는 관찰된 선단 통과와 그 사이의 불확실성 영역을 보여 준다. 그림의 매끄러운 면은 모형 보간이라는 지위를 유지한다.

제18장

이례적인 연결성과 공간 전이의 검증

가정한 공간 전이는 영상 왜곡보다 강한 주장이다. 영역 사이의 경로를 이용할 수 있는지에 관한 것이다. 신호, 물체나 관찰자가 알려진 환경 구성으로 설명되지 않는 방식으로 다른 지점에 도달할 수 있는가? 서로 다른 전달 종류를 하나로 합쳐서는 안 된다. 광학 경로가 물질의 통과를 입증하지 않고, 자료 전달이 발생원의 이동을 입증하지 않으며, 보이는 길이 없다는 사실이 숨은 통상 경로의 부재를 입증하지도 않는다.

이 장은 공간 전이를 가정 모형으로 다룬다. 실제 과제는 지점 사이의 예상 밖 연결을 기록하는 데서 시작한다. 포털이라는 주장을 대상에 대한 완성된 기술로 받아들이지 않는다. 먼저 무엇을 전달했으며, 신호가 어디서 생기고 어디서 기록되었고, 어떤 대체 경로가 여전히 가능한지 확인해야 한다. 그러면 최종적인 본성을 미리 결정하지 않고 이례적인 사례를 연구할 수 있다.

문이라는 이미지 대신 연결을 기술하기

노드가 접근 가능한 위치를, 연결이 관찰된 전달 경로를 나타내는 지도가 편리하다. 각 연결에 신호 종류, 방향, 지연, 발생 조건과 출처에 대한 확신을 명시한다. 두 영역 사이에 예상 밖 변이 있을 수 있지만 관찰된 연결 그래프가 곧 공간의 물리적 위상인 것은 아니다. 숨은 케이블, 반사, 공통 송신기와 계산 오류도 비슷한 기록을 만들 수 있다.

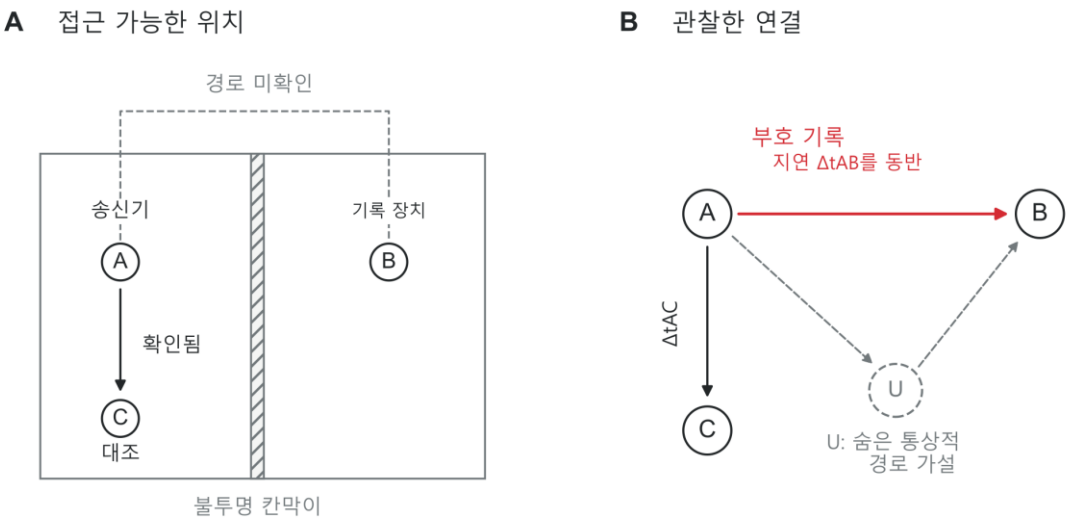


그림 13. 관측 배치도와 기록된 연결의 그래프. 위치 번호를 공유하는 학습용 배치도와 그래프다. 실선 변 A–C는 검증된 통상적 연결을, 진홍색 A–B는 지연 ΔtAB를 갖는 기록된 코드 전달을 나타낸다. U를 지나는 점선 우회는 숨겨진 통상 경로라는 설명으로 남는다. 그래프에서의 위치가 공간 기하를 정하지는 않는다. 이런 기록이 물질의 통로나 공간의 새로운 위상을 확립하는 것은 아니다.

이례적인 연결은 검증을 위해 미리 고른 성질로 드러나야 한다. 안전한 대조 신호의 코드를 바꾸면 기록 순서도 실제 출처에 맞추어 변해야 한다. 경로에 방향성이 있다고 가정하면 허용된 구성에서 이를 검증한다. 경로 단축을 주장하면 좌표를 정한 알고리즘과 독립적으로 지연을 측정한다. 각 검증은 해당 경로에 관한 것이며 가정한 전이 전체에 자동으로 적용되지는 않는다.

상태 전달과 물체 이동은 특히 주의해 구별해야 한다. 양자 텔레포테이션 프로토콜에서는 얽힘과 고전적 메시지를 이용해 미지의 상태를 복원한다 [19]. 물질적 몸체가 숨은 문을 통해 이동한다는 결론은 나오지 않는다. 용어가 자기 분야에서는 기술적으로 정확해도 일상 장면에 옮겨 쓰면 오해를 줄 수 있다. 따라서 사례 명세에는 조작의 이름뿐 아니라 물리적 내용을 기록한다.

통상 경로와 이례적 경로를 구별할 수 있는 것

외부 측정은 추정 입구, 추정 출구와 가능한 통상 경로를 포괄해야 한다. 생각할 수 있는 모든 길을 완전히 배제하기는 사실상 불가능하다. 대신 중요한 설명안들을 구성하고 감시의 가용 감도를 평가한다. 예를 들어 중간 센서에 신호가 없다는 사실은 그 센서가 가정한 통상 경로를

기록할 능력이 입증되었을 때만 의미가 있다. 그런 검증 없이 빈 기록만으로 대안을 배제할 수는 없다.

학습 시나리오에서 두 지점 사이에 불투명한 칸막이가 표시되어 있는데도 두 지점이 같은 가변 광학 코드를 기록한다. 첫 의미 있는 결론은 해당 조건에 설명되지 않은 광학 경로가 있다는 것이다. 아직 공간 변화가 확립된 것은 아니다. 설명을 구별하는 검증은 송신기와 기록기의 독립성, 반사 표면, 구멍, 소프트웨어 재생과 시간 순서를 다룬다. 이 예는 연구 논리를 위한 허구이다.

경로 자체가 시간에 따라 변하는 것도 별도 과제이다. 가정한 연결은 특정 방향이나 환경 상태에서만 나타날 수 있다. 이때는 관찰 시간 창을 미리 정하고 실패한 시도까지 모두 기록해야 한다. 맞아떨어진 경우만 고르면 드문 우연 사건들로부터 안정된 통로라는 인상을 만들 수 있다. 추정 영역의 경계도 몇 가지 인상에 따라 그린 선이 아니라 불확도를 갖는 측정 결과여야 한다.

연결성 검증을 위한 저자의 프로토콜

1. 연구 책임자는 전달에 관한 최소 주장을 정식화하고 이를 드러내지 않은 채 물질이나 사람의 이동으로 확대하는 일을 금지한다.
2. 계측 전문가와 분야 전문가는 관찰된 경로와 통상 대안의 지도를 만든다. 조작자는 접근 가능한 위치들을 동기화된 독립 기록으로 남긴다.
3. 자료 관리자는 대조 순서의 출처와 기록이 없었던 경우까지 포함한 모든 시도를 보존한다.
4. 대조 작용은 장비와 환경의 안전성이 이미 확립된 범위에서만 가한다. 미지의 경계에 접근하는 것은 필수 단계가 아니다.
5. 안전 조정자는 장비 위치의 확실성, 통신 또는 장치의 접근 가능한 부분에 대한 관찰을 잃으면 검증을 중단한다.

추정 경계 곁에서 기록이 끊겼다고 계기가 사라진 것은 아니다. 먼저 전원 고장, 경로 상실, 관측 시야 밖 이탈과 실제 위치 변화를 구분한다. 밧줄, 무선 표지나 자율 저장장치는 추가 정보를 주지만 그 자체가 연결, 하중과 공통 고장 원인을 더할 수도 있다. 사용은 미지 기하에 대한 보편적 방호가 아니라 연구 설계의 일부로 뒷받침한다.

일부 이론 모형은 특별한 전제 아래 통과 가능한 연결을 허용한다 [20]. 하지만 외형상의 특징 하나가 수학적 모습과 맞는다고 모형 전체가 정해지지는 않는다. 의미 있는 대조에는 지연, 주파수, 운동과 에너지 조건에 관한 서로 부합하는 예측이 필요하다. 그 전까지 올바른 결과는

관찰된 경로의 특성이다. 검증된 이례적 연결은 이용 가능한 공간 통로를 성급히 약속하지 않아도 이미 중요한 발견일 것이다.

제19장

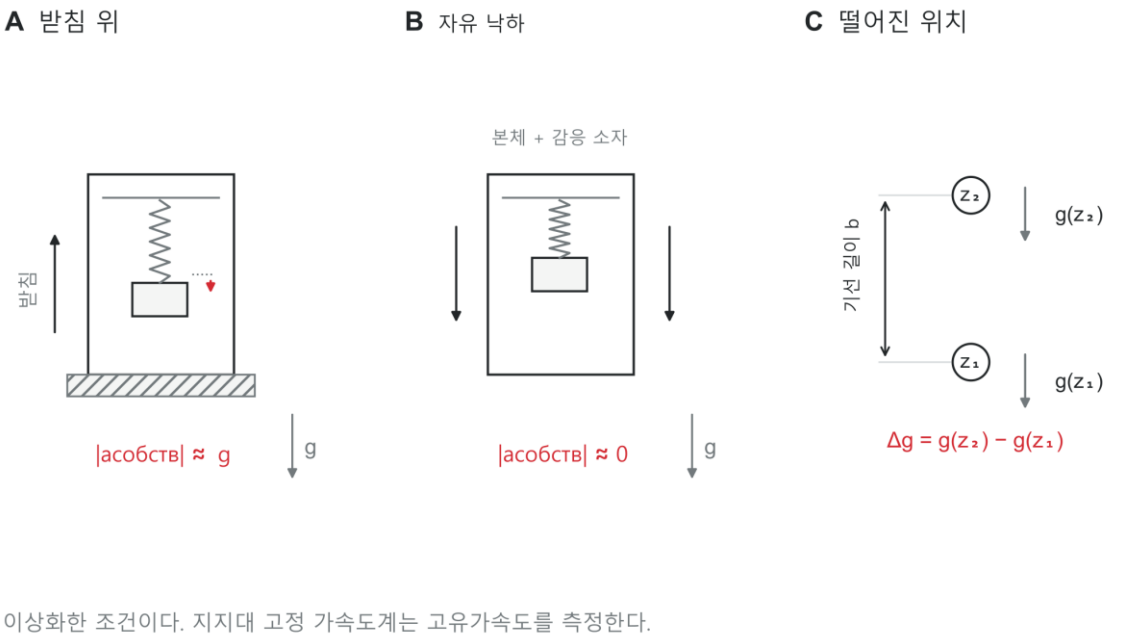
중력과 관성의 편차

측정에서 말하는 중력 이상은 선택한 모형에서 장이 벗어나는 것을 뜻한다. 이 편차는 통상적인 질량 분포에 관한 정보를 줄 수 있다. 관성의 불일치는 선택한 기준계에서의 운동과 힘에 관한 것이다. 두 기술 방식은 서로 관련되지만 어떤 가속도계의 지시값과도 그대로 동일시할 수는 없다. GF 부류를 연구하려면 먼저 자유낙하 가속도, 지지력, 장의 기울기, 플랫폼의 운동 중 무엇을 측정하는지 확정해야 한다.

지지대에 고정한 가속도계는 자유 운동을 기준으로 감응 소자의 고유가속도에 반응한다. 자유낙하 중에는 중력장이 사라지지 않아도 지시값이 영에 가까워질 수 있다. 저울은 지지대와의 상호작용 힘을 측정하며, 이 힘의 변화도 원인을 하나로 정해 주지는 않는다. 따라서 «계기가 중력을 더 이상 감지하지 못했다»는 말에는 장치와 조건에 대한 설명이 필요하다. 그렇지 않으면 기계적으로 하중이 제거된 것을 중력 변화로 오인하게 된다.

장, 기울기와 발생원

중력경사계는 떨어진 위치들의 장을 비교한다. 평균 가속도뿐 아니라 가속도의 공간적 변화에 감응한다. 특정 연구의 현장용 원자 중력경사계는 터널을 검출했다. 저자들이 보고한 통계적 불확도는 20 E, 신호/잡음비는 8이며, E는 $10^{-9}\ s^{-2}$를 뜻한다 [21]. 이 수치들은 해당 실증의 특성이다. 어떤 빈 공간이든 검출할 수 있는 보편적인 거리나 모든 이동 조건에서의 감도를 정하는 수치는 아니다.



이상화한 조건이다. 지지대 고정 가속도계는 고유가속도를 측정한다.

그림 14. 지지대에 고정한 가속도계와 중력경사계가 측정하는 것. 측정 원리를 이상화한 세 도식이다. 고정 지지대 위에서는 감응 소자에 본체와의 연결에 의한 힘이 작용한다. 함께 자유낙하하면 중력에 따른 운동은 계속되어도 고유가속도는 영에 가까워진다. 떨어진 지점들을 비교하면 기준 거리 b에 걸친 Δg를 얻으며, 플랫폼의 운동도 고려해야 한다. 이 스케치는 특정 중력경사계의 구조를 재현하지 않으며 감도를 정하지 않는다.

장 지도가 좋아도 발생원이 유일하게 정해지지는 않는다. 서로 다른 밀도 분포가 비슷한 외부 중력 자료를 만들 수 있으며, 지질 정보와 독립적인 방법이 가능한 해의 집합을 좁힌다 [22]. 따라서 지하 물체의 모형에는 크기, 깊이, 밀도의 불확실성을 포함해야 한다. 충분한 제약 없이 지나치게 세밀한 그림을 만들면 직접 관측한 듯한 잘못된 인상을 준다.

중력 측정에서는 주변 질량, 높이와 받침대 운동의 변화도 고려해야 한다. 해당 연구에서는 장비, 차량과 그 밖의 뚜렷한 발생원이 예상 신호 수준에 영향을 줄 수 있으면 그 위치를 기록한다. 작은 변화가 모두 새로운 상호작용에 해당하는 것은 아니다. 그러나 차량이 있었을 가능성을 언급하는 것만으로 잔차가 설명되지도 않는다. 구체적인 발생원이 해당 부호, 크기와 시간적 형태를 만들어 낼 수 있었는지 검증해야 한다.

중력을 다른 힘과 구분하기

눈에 보이는 지지대 없이 떠 있는 물체가 반드시 중력 약화를 보여 주는 것은 아니다. 예를 들어 적합한 비균일장에서는 반자성력이 중력과 균형을 이룰 수 있다 [23]. 연구에서 중요한 일반 원칙은 평형이 작용하는 힘들의 균형을 뜻하며 어느 힘의 소멸을 뜻하지 않는다는 것이다.

알려지지 않은 장면에서는 잠재적으로 위험한 구성을 직접 재현하지 않고 먼저 전자기적, 기계적, 공기역학적 연결을 확인한다.

설명을 구별하는 검증 계획에서는 여러 대조 물체의 반응을 비교할 수 있다. 다만 검증된 안전 시험 장치에서만 실시한다. 전도도, 자기적 성질, 모양이나 표면적에 대한 의존성은 통상적인 상호작용을 식별하는 데 도움이 된다. 반면 중력 해석은 다른 힘을 고려한 뒤 서로 다른 물체에 대한 해당 운동 모형과 일치해야 한다. 한 번의 일치를 최종 검증으로 보지는 않는다. 재료와 기하 구조가 여러 성질을 동시에 바꿀 수 있기 때문이다.

발생원을 모르며 안전하게 시험 장치에 놓을 수도 없다면 자연적인 변화를 관찰하고 점검하는 편이 낫다. 신호가 물체의 운동, 계기의 기울기 또는 주변 조건과 관련되는지 확인한다. 근거 없이 무거운 질량, 강한 장이나 진동을 도입하면 장면 자체를 바꾸고 새로운 위험을 만들 수 있다. 여기서 연구 관리는 답을 얻으려고 작용을 강화하는 것이 아니라 수동적으로 구별할 수 있는 징후를 선택하는 데 있다.

힘 비교를 위한 저자의 프로토콜

1. 계측 전문가는 각 계기의 물리적 반응을 기술하고 가속도, 힘과 기울기를 혼동하지 않으면서 지시값을 비교 가능한 양으로 환산한다.
2. 해당 분야 전문가는 알려진 질량과 운동의 모형을 만든다. 운용자는 주 측정열과 함께 장치의 기울기, 진동과 구성을 기록한다.
3. 연구진은 이용 가능한 측정 단면과 대조 측선을 반복 측정하여 잔차가 장소, 계기 또는 발생원 상태를 따라가는지 확인한다.
4. 책임자는 예측의 차이에 따라 다음 검증을 선택한다. 자료 관리자는 보정의 모든 판본과 제외한 구간을 보존한다.
5. 안전 조정자는 지지대의 설명되지 않은 운동, 안정성 상실 또는 계기가 진단 가능한 범위를 벗어나는 경우 작업을 중단한다.

수치 결과에는 반복성과 계통적 편향을 구별하는 불확도 예산이 필요하다. 여러 측정값의 산포가 작아도 일정한 기울기, 공통 온도 드리프트나 잘못된 높이는 제거되지 않는다. 또한 공간 단면의 인접 지점들이 동일한 위치 연결 오차를 공유할 수 있다. 지점을 늘리면 각 지점의 의존 관계와 실제 공간 분해능을 아는 범위에서만 형태의 기술이 개선된다.

저자가 정한 결과 수용 경계는 미리 명시한다. 잔차는 근거 있는 불확도 범위를 넘어야 하고, 반복한 구성에서도 유지되며, 확인된 통상 원인을 바로잡은 뒤에도 사라지지 않아야 한다. 앞의

조건들만 충족되면 사례는 열린 상태로 남는다. 지질학적 설명도 근본적인 설명도 자동으로 부여되지 않는다. 유용한 보고서는 자료로 제약한 설명안과 아직 구별할 수 없었던 설명안을 보여 준다.

이로써 중력에 관한 장은 인상적인 운동에서 물리적 비교로의 전환을 마무리한다. 관찰된 상승, 낙하나 무게 변화는 힘과 궤적의 문제가 되고, 공간적 잔차는 장의 발생원에 관한 문제가 된다. 이 토대 위에서만 새로운 상호작용을 논의할 수 있다. 다음 장에서는 측정 가능한 매개변수와 서로 다른 계의 일관된 반응을 통해 이를 다룬다.

제20장

새 장과 근본 매개변수의 변화

새로운 장은 관측 가능한 계와의 연결이 제안될 때 측정 대상이 된다. 장의 이름만으로 계기의 지시값이 정해지지는 않는다. 전이 에너지, 힘, 붕괴율, 광학적 성질 또는 그 밖의 측정 가능한 비 중 무엇이 변하는지 명시해야 한다. 이어서 변화를 장의 크기와 연결하고 통상적인 환경의 영향과 분리해야 한다. 이 과정이 없으면 «미지의 검출기»는 아직 물리적 해석을 얻지 못한 자체 편차만 기록한다.

근본 매개변수 역시 비교 절차와 떼어 논의할 수 없다. 차원이 있는 양의 수치는 단위에 따라 달라진다. 따라서 상수가 변했다는 주장에는 조작적 의미가 필요하다. 어떤 무차원 비가 변했으며 측정계의 어떤 요소를 불변으로 가정했는가? Duff의 이론 연구는 이 차이에 주목한다 [24]. 여기서 나오는 실무적 결론은 비를 측정하고 모형을 공개해야 한다는 것이다. 법칙에 생길 수 있는 모든 변화의 연구를 금지해야 한다는 뜻은 아니다.

차등 응답

두 전이의 주파수 비는 전이에 따라 가정한 매개변수에 대한 의존성이 다를 수 있다는 점에서 편리하다. 선형 근사에서는 비의 작은 상대 변화를 매개변수들의 상대 변화에 감도 계수를 곱한 항들의 합으로 나타낸다. 이 계수들은 구체적인 물리 모형에 속한다. 두 계가 똑같이 반응하면 비는 변하지 않는다. 이때 반응의 부재는 선택한 관측 방식에 제약을 주며, 반드시 모든 형태의 작용을 제약하는 것은 아니다.

광학 시계망 BACON은 서로 다른 원자계의 주파수를 비교하고 자료로 특정 초경량 장 모형을 제약했다 [25]. 다른 연구에서는 수정 발진기와 루비듐 및 디스프로슘의 전이를 비교하여 정해진 상호작용에 대한 제약을 얻었다 [26]. 이 연구들은 문제 설정의 본보기를 제시한다. 먼저

감응하는 계와 결합 모형을 파악하고, 이어서 자료를 매개변수 제약으로 바꾼다. 이들 연구에서 모든 미지의 장을 감지하는 보편적 센서의 존재가 도출되지는 않는다.

핵심 난점은 구별 가능성이다. 관측 가능한 비 하나가 미지의 매개변수 세 개에 의존한다면 무한히 많은 조합이 같은 결과를 낼 수 있다. 두 번째 계기를 더하는 것은 그 의존성이 실제로 다를 때만 도움이 된다. 온도 감도가 같은 동일한 센서 둘은 신호의 반복성을 확인하면서도 새로운 장과 공통 가열 사이의 모호성을 해소하지 못할 수 있다.

예측 행렬

저자의 연구 계획에서는 예상 반응 표를 만든다. 행은 측정 채널에, 열은 중요한 가설들에 해당한다. 특정한 장, 온도, 자기 작용, 기계적 변형, 기준 발진기 오류 등이 열에 들어간다. 각 열에는 모형에서 도출할 수 있는 경우 부호, 상대적 크기와 특징적인 시간 의존성을 지정한다. 빈칸은 영의 반응이 아니라 모름을 뜻한다. 가장 비슷한 열들을 구별하도록 다음 구성을 선택한다.

실제 주파수 대역을 예측에 포함해야 한다. 느린 드리프트, 짧은 펄스와 지속적인 진동은 평균화, 서보계와 기록 과정을 서로 다르게 통과한다. 가정한 효과가 적분 시간보다 짧으면 계기는 약해진 평균 흔적만 보일 수 있다. 주파수가 작동 대역 밖에 있으면 미검출로 예상한 제약을 얻을 수 없다. 따라서 감도 한계는 검증하는 신호의 형태와 지속 시간과 함께 제시한다.

상관관계는 별도로 분석해야 한다. 비 A/B와 C/B에는 공통 분모가 있으므로 B가 변동하면 두 측정열이 함께 변한다. 이 일치를 새로운 장에 관한 독립적인 증거 두 개로 볼 수 없다. 기술적으로 가능하면 검증용 연결을 더하고 원래 주파수를 보존하는 것이 유용하다. 처리 구조도 중요하다. 공통 보정 알고리즘은 하나의 인공적 흔적을 모든 최종 채널로 한꺼번에 옮길 수 있다.

상호작용 탐색을 위한 저자의 프로토콜

1. 연구 책임자는 측정할 비와 구체적인 결합 모형을 명시한다. 해당 분야 전문가는 계수와 적용 범위를 정한다.
2. 계측 전문가는 예측을 실제 대역, 잡음과 계통적 이동에 대조한다. 구별되지 않는 매개변수들은 합치거나 보고하는 결과에서 제외한다.
3. 운용자는 주 측정 기록과 환경 기록을 유지한다. 자료 관리자는 가공하지 않은 채널과 보정 이력을 보존한다.

4. 물리 센서의 교정과 별개로 합성 신호를 이용해 분석을 검증한다. 최종 예측은 따로 보류한 측정열에서 시험한다.
5. 자료를 본 뒤 모형을 바꾸면 책임자는 결과를 탐색 단계로 돌리고 새로운 확인 검증을 지정한다.

필요한 대역에서의 감도 상실, 포화, 원인 모를 운용 상태 변화 또는 채널 독립성 붕괴는 중단 사유다. 이런 측정열로 매개변수 경계를 계속 계산해서는 안 된다. 보기 좋은 수치가 실제로 존재하지 않은 측정 조건에 관한 값이 되기 때문이다. 안전은 장의 추정 명칭이 아니라 확인된 물리적 작용을 기준으로 정한다. 설명되지 않는 신호는 물체에 가하는 에너지를 높일 근거가 아니다.

예측한 신호가 발견되지 않으면 결과를 조건부로 진술한다. 주어진 모형, 주파수 범위와 분석 규칙 아래에서 특정 경계보다 큰 매개변수 값은 채택한 신뢰 수준에서 관측과 양립하지 않는다. 신호가 발견되면 먼저 독립적인 구성에서도 유지되는지 확인한다. 올바른 시간적 거동, 상대 반응과 재현성이 함께 갖추어져야 구체적인 새 기전을 논의할 수 있다.

새로운 장의 발견이 자동으로 그 장의 제어를 뜻하지는 않는다. 개입하려면 조절 가능한 작용과 측정 결과 사이의 연결을 별도로 밝혀야 하며 가역성과 가능한 부수 경로도 포함해야 한다. 때로는 관측만 가능하다. 이것도 온전한 과학적 결과다. 계기는 연구하는 과정을 바꿀 기술이 등장하기 훨씬 전부터 제약을 설정하고 이론 구성을 도울 수 있다.

추가 힘의 명시적 모형

구체적인 탐색 계획은 유카와 형태의 추가 상호작용을 바탕으로 세우기 편리하다. 두 점질량에 대해 아래의 퍼텐셜을 도입하자. α는 추가 항의 무차원 상대 세기, λ는 양의 작용 거리, r은 질량 사이의 거리다. 이는 검증 가능한 대안들의 모음이며, 선택한 상호작용을 발견했다는 주장이 아니다. α = 0이면 뉴턴 법칙으로 돌아간다.

$$U(r) = -\frac{G m_1 m_2}{r}\left(1 + \alpha e^{-r/\lambda}\right)$$

반지름 방향 힘은 퍼텐셜을 미분하여 얻는다. 추가 인자 1 + r/λ는 중요하다. 뉴턴의 힘에 지수 인자만 곱하면 다른 법칙이 된다. α가 양수이면 추가 항은 인력으로 작용한다. 아래에서는 발생원에서 멀어지는 방향을 반지름 성분의 양의 방향으로 삼는다.

$$F_r = -\frac{G m_1 m_2}{r^2}\left[1 + \alpha\left(1 + \frac{r}{\lambda}\right)e^{-r/\lambda}\right]$$

법칙의 형태가 거리 선택을 결정한다. λ보다 훨씬 먼 거리에서는 추가 항이 억제된다. 작은 거리의 좁은 집합에서는 힘의 전체 척도 변화와 구별하기 어려울 수 있다. 따라서 형태가 변할 것으로 예상하는 영역을 포괄하는 측정열이 유용하다. 질량과 거리에 대한 독립적인 지식은 힘 측정과 동등하게 검증에 포함된다. 매번 발생원 위치를 임의로 바꾸도록 허용하면 센서의 정확도만으로는 α와 λ의 구별 가능성을 회복하지 못한다.

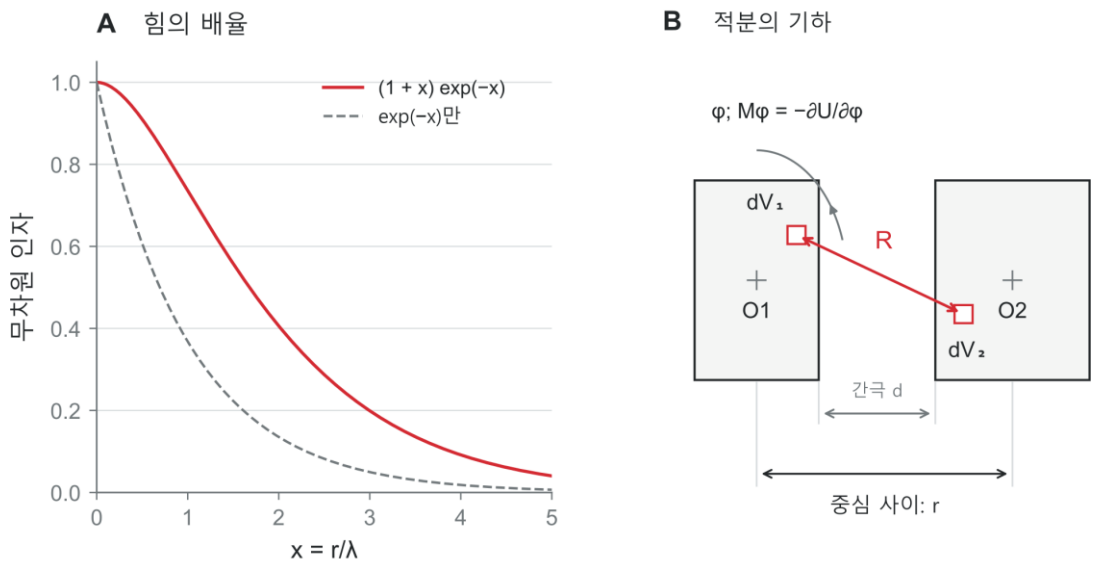
크기를 갖는 물체와 관찰 가능한 돌림힘

실제 장치에는 부피를 가진 물질이 들어 있다. 이때 퍼텐셜은 질량 요소 쌍별로 합산한다. 아래 모형에서 밀도와 적분 영역은 측정한 기하 구조로 정하며, 거리 R은 서로 다른 물체 안의 요소 쌍에 해당한다. 비틀림 계기의 관측 가능한 돌림힘은 각도 φ만큼 회전할 때 이 에너지의 변화로부터 얻는다.

$$U = -G \int_{V_1} \int_{V_2} \frac{\rho_1(\boldsymbol{x}) \rho_2(\boldsymbol{x}')}{R} \left(1 + \alpha e^{-R/\lambda}\right) d^3x d^3x'$$

$$M_{\varphi} = -\frac{\partial U}{\partial \varphi}$$

표면 사이 거리를 변환 없이 점질량 모형의 r 대신 넣어서는 안 된다. 밀도 분포, 현가 구조의 형태와 회전할 때 질량중심의 이동도 중요하다. 수치 계산은 단순한 기하 구조에서, 또 분할을 더 세밀하게 하면서 검증한다. 이는 측정 모형의 독립적인 부분이다. Lee와 동료들의 실제 연구에서는 관측한 돌림힘을 기하 구조 계산과 비교해 추가 상호작용을 제약했다. 통상적인 중력과의 일치가 정량적 결과가 되었다 [66].



가정한 유카와 추가항의 계산 형태다. 실험적 제약은 표시하지 않았다.

그림 15. 추가 힘의 형태와 크기를 갖는 물체의 기하. 왼쪽은 유카와 퍼텐셜을 미분할 때 추가 힘에 나타나는 인자 (1 + r/λ) exp(−r/λ)를 계산한 것이다. 비교를 위해 지수함수만의 곡선도 표시했다. 오른쪽 학습용 단면도에서는 표면 사이 틈 d, 중심 사이 거리 r, 부피 요소 사이의 가변 거리 R를 구별한다. 크기를 갖는 물체는 기하에 걸친 적분이 필요하며, 관측되는 돌림힘은 각도 φ에 대한 에너지의 미분과 연결된다. 이 그래프는 실험에서 얻은 배제 곡선이 아니다.

감도 학습 계산

학습용 점질량 극한에서 m_1 = 0,010 kg, m_2 = 1,0 kg, r = 0,10 m, λ = 0,050 m라고 하자. 이 값들은 규모 계산을 위한 것이다. 실제 시험 장치에는 부피를 고려한 모형이 필요하다. 뉴턴의 힘은 약 0,0667 nN이다. α = 0,10이면 추가 힘은 겨우 0,00271 nN, 즉 2,71 pN이다. 불확도가 0,30 nN인 프로젝트는 이 추가 항을 검증할 수 없다. 그래프를 개선하거나 표시 자릿수를 늘려도 이 제약은 달라지지 않는다.

측정한 잔차가 영이고 λ를 사전에 고정했으며, 단순 계산의 유일한 오차가 표준 불확도 0,30 nN인 정규분포라면 양측 95% 띠는 |α|를 약 22로 제한한다. 약하지만 주어진 모형에서는 의미 있는 경계다. 같은 기하학에서 0,10 수준의 α를 검증하려면 불확도가 약 1,4 pN 또는 그보다 작아야 한다. 따라서 프로젝트 51의 제시 범위를 단거리 중력의 최첨단 시험 성능인 것처럼 제시해서는 안 된다.

λ를 고정한 거리 측정열에서 추가 항 모형은 α에 대해 선형이다. 잔차 벡터는 αK로 기술하며, K는 단위 세기의 추가 항에 대해 계산한다. 공분산 행렬 C를 알 때 추정값과 그 표준 불확도는

다음과 같다. 기하 구조와 통상적인 힘의 불확실성은 공동 모형에 포함하거나 별도 매개변수로 고려한다. 이를 편의상 센서 오차 하나에 숨겨서는 안 된다.

$$\hat{\alpha} = \frac{\boldsymbol{K}^T \boldsymbol{C}^{-1} \Delta \boldsymbol{F}}{\boldsymbol{K}^T \boldsymbol{C}^{-1} \boldsymbol{K}}, u_\alpha = \left(\boldsymbol{K}^T \boldsymbol{C}^{-1} \boldsymbol{K} \right)^{-1/2}$$

λ까지 적합하면 결과는 매개변수 영역과 새로운 자료에서 선택한 함수 형태를 별도로 검증하는 것이 된다. 거리의 역제곱과 비슷한 의존성을 발견해도 중력 기원이 확정되는 것은 아니다. 사례 2는 바로 이처럼 제한된 양성 결과를 남긴다. 강한 모형은 매개변수를 바꾸지 않고 다음 실험을 예측하며, 이용 가능한 작용 경로를 가진 통상적인 힘과의 구별 검증을 견뎌야 한다.

제21장

웜홀과 물리 모형의 한계

웜홀은 시공간의 기하 모형에 속하는 개념이며, 설명하지 못한 모든 통로의 통칭이 아니다. 이 개념을 관찰과 비교하려면 어떤 영역들이 연결되는지, 인과 곡선이 어떻게 지나는지, 어떤 발생원이 기하를 유지하는지, 그 기하가 어떻게 생길 수 있었는지 알아야 한다. 이례적인 영상 하나만으로 이런 성질들이 정해지지는 않는다. 모형의 과학적 가치는 검증하거나 적어도 계산할 수 있는 서로 연결된 귀결과 제약에 있다.

실현 가능성의 네 수준

첫째 수준은 수학적 타당성이다. 계량은 요구되는 성질을 가져야 하며 선택한 장들은 해당 방정식을 만족해야 한다. 둘째 수준은 발생원의 허용 가능성이다. 지정한 에너지, 압력과 상태가 적용하는 물리 이론과 양립해야 한다. 셋째는 형성과 안정적인 존속의 가능성이다. 넷째는 관측상의 제약과의 일치다. 한 수준에서의 성공이 나머지를 대신하지 않는다.

Gao, Jafferis와 Wall의 특수 모형은 삼차원 시공간의 특정 블랙홀 구성(BTZ)에서 경계 사이에 결합을 도입한 뒤 다리를 통과할 수 있음을 보인다. 평균된 영에너지가 음이라는 점이 중요한 역할을 한다. 저자들은 이 구성이 인과성을 위반할 수 없다는 점을 별도로 명시한다 [20]. 실질적인 결과는 명시한 전제 안에서 가능성을 확립한 것이다. 이를 지상의 물체에 적용하려면 바로 그 전제들이 왜 실현되는지 근거를 제시해야 한다.

양자 이론의 음의 에너지도 임의의 성질을 지닌 물질을 자유롭게 이용할 수 있다는 뜻은 아니다. Ford와 Roman은 음의 에너지 밀도의 크기와 지속 시간에 대한 제약을 검토하고 이를 특정한

정적 통과 가능 기하에 적용했다. 얻어진 조건은 허용되는 규모와 분포를 크게 좁힌다 [27]. 이는 특정 모형 부류에 대한 강한 제약이며, 가능한 모든 시공간 이론에 관한 보편 정리는 아니다.

시간을 논의할 때도 같은 주의가 필요하다. Hawking의 연대기 보호 논증은 닫힌 시간꼴 곡선을 형성하려는 시도를 에너지 조건과 양자 역반응에 연결한다 [28]. 이후 Kay, Radzikowski와 Wald의 수학 연구는 특정 지평선 부류에서 표준적인 양자 기술이 겪는 어려움을 드러낸다. 그곳에서는 해당 양들이 특이해지거나 정의되지 않는다 [29]. 근사의 한계를 구체적 폭발이나 물체의 확실한 파괴에 대한 계산으로 자동 전환해서는 안 된다.

모형은 불편한 질문을 견뎌야 한다

어떤 기하를 제안하든 전제 명세를 작성하면 유용하다. 차원 수, 점근적 거동, 경계 조건, 장의 종류와 발생원 기술 방식을 포함한다. 모형에 멀리 떨어진 경계 사이의 외부 결합이 필요하다면 대중적 설명에서도 그 결합이 사라져서는 안 된다. 특정 섭동에 대해서만 안정성을 검증했다면 모든 작용에 대한 안정성을 주장할 수 없다. 경계를 정확히 기술하면 실제로 어디에서 검증할 수 있는지 드러나므로 이론이 강해진다.

수치 모사나 양자 모사는 수학 모형의 일부 동역학을 재현할 수 있다. 그러나 방정식이 비슷하다고 모든 물리적 성질이 동일해지지는 않는다. 신호 전파를 모사하는 계가 지극히 통상적인 기하와 다른 에너지 수지를 가질 수 있다. 공간 통로를 결론 내리려면 바로 그 성질에 대한 별도의 근거가 필요하다. 무엇을 모형화했으며 어떤 관측이 직접 가능한지 기술에 명시한다.

공간적 대상에 관한 검증 가능한 가설은 기하와 동역학을 일치시켜야 한다. 신호 경로 계산은 지연과 주파수 변화에, 기하의 발생원은 기계적 관측과 에너지 관측에, 상태 변화는 가정한 제어 기전에 부합해야 한다. 다른 모든 요소를 자유롭게 선택하는 대가로 한 측면만 설명하는 모형은 예측력이 작다. 이는 공학적 구현을 논의하기 전에도 평가할 수 있다.

전문가 평가를 위한 저자의 절차

1. 해당 분야의 이론가는 최소 전제를 정식화하고 정확한 결과와 근사를 구별한다. 책임자는 주장할 결론의 범위를 기록한다.
2. 계측 전문가는 예측을 관측 가능한 양으로 환산하고 필요한 정확도, 지속 시간과 독립성을 확보할 수 있는지 확인한다.
3. 독립 전문가는 이용 가능한 관찰 결과를 똑같이 만들어 내는 통상적 모형을 찾는다. 설명을 구별할 검증들은 정보 가치와 허용 가능성에 따라 우선순위를 정한다.

4. 자료 관리자는 모형 버전, 매개변수, 원래 계산을 보존한다. 검증 뒤 가정을 바꾸면 이를 명시한다.
5. 개입으로의 전환은 별도로 검토하며 검증된 제어 경로가 필요하다. 이론적 가능성만으로는 그 전환이 허용되지 않는다.

방정식의 적용 범위를 벗어나거나, 매개변수를 근거 없이 대입하거나, 설명안 사이에 측정 가능한 차이가 없으면 이론적 결론 도출을 중단해야 한다. 이 경우 허용되는 결과는 «모형이 아직 구별되지 않는다»이지, 가장 인상적인 설명을 임의로 고르는 것이 아니다. 실무 연구는 독립적인 가치와 확인된 안전을 유지한다면 자료 수집으로서 계속할 수 있다.

가정한 기하의 무력화를 말할 때는 특히 표현에 주의해야 한다. 모형에 «양자»라는 말이 있다는 이유만으로 전자기장을 바꾸면 통로가 닫힌다고 결론 내려서는 안 된다. 조절 매개변수와 대상 상태를 연결하는 방정식과 부작용 검증이 필요하다. 그런 경로가 없는 동안에는 접촉 제한, 관측과 알려진 부수 위험의 제거가 가능하다. 이는 가정한 위상을 바꾸지는 않아도 상황을 관리하는 실제 방법이다.

물리 모형은 가정에 큰 대가가 든다는 사실을 보여 줄 때도 가치가 있다. 확보할 수 없는 발생원을 요구하거나, 실제로는 나타나지 않은 동역학적 효과를 예측하거나, 자체 불안정성을 드러낼 수 있다. 이런 결과는 설명의 공간을 좁힌다. 따라서 웜홀 장이 마무리하는 것은 가능성 목록이 아니라 비교의 규율이다. 세계상을 확장할 때마다 관측 앞에서 지켜야 할 의무도 늘어나야 한다.

제V부

환경 속 물리 과정

제22장

전자기적 편차

명칭보다 먼저 양

«강한 장»이라는 보고만으로는 측정 대상이 정해지지 않는다. 전기장, 자기 유도, 무선주파수 복사와 도체의 전압은 서로 다른 양으로 기술된다. 공간 구조, 시간적 변화와 기록 방법도 다르다. 따라서 사례의 EM 분류는 연구자의 감각이나 만능 표시기의 문구가 아니라 구체적인 채널에서 관찰한 편차에 따른다. 최초 기록에서는 센서가 정확히 무엇을 변환했고, 결과를 어떤 단위로 표현했으며, 어떤 과정들이 감도 밖에 남았는지 복원할 수 있어야 한다.

통상적인 이상현상의 확립된 예는 지구물리학에서 볼 수 있다. 전 지구 격자 EMAG2v3는 서로 다른 기원의 자기 측정을 합친다. 이런 자료는 장의 대규모 구조를 보여 주지만 개별 방이나 작은 구역의 조사를 대신하지 않는다 [30]. 여기서 «이상»은 선택한 배경 표현에서 벗어남을 뜻한다. 다른 고도와 해상도의 지도를 국소 측정과 비교하면 비교 절차 자체에서 차이가 생길 수 있다. 전체 지도에 세부 특징이 없다고 해서 발견한 그 특징이 물리 법칙의 위반이 되는 것은 아니다.

측정 모형과 관측망

저자가 제안하는 프로토콜은 세 질문으로 시작한다. 그 양은 시간에 따라 변하는가, 위치에 의존하는가, 결과가 계기를 따라가는가? 답을 얻기 위해 센서의 좌표와 방향, 대역, 평균화 방식, 온도, 전원 상태와 가까이서 작동하는 장치를 기록한다. 스칼라 지시값과 벡터 성분을 혼동하지 않는다. 장이 일정해도 센서를 돌리면 한 성분이 변할 수 있다. 이 변화를 발생원의 출현이나 소멸로 자동 기술해서는 안 된다.

관측망은 검증할 차이를 중심으로 구성한다. 한 채널은 기준 위치에 두고, 두 번째는 미리 정한 접근 가능한 위치들을 지나며, 필요하면 세 번째에는 다른 변환 원리를 사용한다. 동시 기록은 시간 변화와 좌표에 따른 변화를 구분하는 데 도움이 된다. 계기를 재배치하려면 그 작업 자체를 먼저 평가해야 하며 새 위치를 기록한다. 계측 전문가는 차이가 비교 불확도를 얼마나 넘어야

하는지 미리 정한다. 측정 모형에는 센서 명세의 정확도뿐 아니라 중요한 영향량과 의존 관계가 들어간다 [2].

기록은 필터링하기 전에 보존한다. 진폭 그래프와 함께 시간 척도, 주파수 표현과 과부하 징후가 필요하다. 좁은 봉우리는 실제 발생원, 계기 내부 발진기 또는 처리 중 주파수 변환에 해당할 수 있다. 설명을 구별하는 검증은 독립 채널과 문서화된 장비 운용 상태를 비교하는 것이며, 더 강한 작용을 차례로 가하는 것이 아니다. 장치를 끄는 것이 정상 절차로 허용되고 보호 기능을 해치지 않는다면 예상 변화와 동반 환경 변화를 미리 기록한다.

설명의 분기

편차가 센서를 따라 이동하면 센서 자체의 재료, 전원과 처리를 점검한다. 같은 장소에 남되 장비 가동 일정에 따라 나타나면 인공 설비와의 연결을 연구한다. 다른 계기와 운용 상태에서도 공간 단면이 유지되면 외부 발생원 모형을 구성한다. 이 분기들은 함께 나타날 수 있다. 실제 배경과 계기 오차가 상호작용할 수 있기 때문이다. 발생원 분포 여럿이 하나의 자기 지도와 부합할 수 있으며, 지질과 구조 정보가 이런 비유일성을 제한하는 데 도움이 된다 [22].

학습 상황을 보자. 닫힌 문 근처에서 자력계가 주기적인 급변을 보이고 동시에 카메라 영상에서 프레임이 빠진다. 첫 설명은 두 사건을 하나의 이례적인 장으로 묶는다. 그러나 건물 기록부에는 구동 기구의 작동이 나타난다. 독립 전원을 쓰는 카메라는 영상을 유지하는 반면, 기존 카메라와 기록기는 전원을 공유하고 있었다. 이 가상 예는 실제 사례의 특정 원인을 입증하지 않는다. 물리적 교란, 장비의 감응 취약성과 공통 기반 설비 고장을 구별해야 함을 보여 준다.

허가와 결과

연구 책임자는 질문과 접근 가능한 위치를 승인한다. 계측 전문가는 측정 범위의 적합성을 책임지고, 해당 분야 전문가는 전기 설비와 환경에 대한 장비 적합성을 평가하며, 안전 조정자는 중단 조건을 정한다. 측정기 자체가 사용 조건에 맞아야 한다. 측정 기능이 있다고 위험한 대기에서의 사용이 허용되는 것은 아니다 [31]. 의료기기를 지닌 사람을 장의 지표로 이용하지 않는다. 사람의 작업 허용과 그 장비의 적합성은 관측에 대한 관심과 별개로 검토한다.

현장 기록에는 과학적 결론의 확실성과 다음 행동의 허용 가능성을 별도로 표시하면 유용하다. 기전은 미확정이어도 확인된 분포만으로 특정 접촉을 제한할 근거가 생길 수 있다. 반대 상황도 가능하다. 발생원은 잘 알아도 보유 장비가 그 근처의 안전한 작업에 부적합할 수 있다. 두 평가를 하나의 표시로 합쳐서는 안 된다. 계측 전문가는 채널로 무엇을 확인할 수 있는지 보고하고, 안전 조정자는 그 정보의 품질 아래 어떤 행동이 허용되는지 보고한다.

채널이 검증된 범위를 벗어나거나, 허용된 접근 경계를 침범하거나, 보호 기능을 잃거나, 검토한 상황 밖으로 설비가 변하면 작업을 중단한다. 연구 중단이 대상의 전원을 임의로 끄는 것을 뜻하지는 않는다. 결론은 확인된 장의 분포, 계기 효과, 설명된 인공 발생원 또는 불확실성을 열거한 지속 편차로 진술한다. 새 상호작용 가설에는 추가 예측이 필요하다. 어떤 양이 어떤 비교에서 변하며 알려진 모형들은 왜 이를 예상하지 않는가? 이례적인 지도 하나만으로는 이 단계로 넘어갈 수 없다.

제23장

이례적인 발광 물체

빛나는 영역과 물질적 물체

기록에 나타난 빛의 반점이 별개의 물체와 같은 것은 아니다. 카메라는 매질, 광학계와 전자 처리를 거친 복사 분포를 기록한다. 보이는 경계는 발생원, 조명된 표면, 공기 중 산란 또는 센서의 포화 영역에 속할 수 있다. 연구는 이 가능성들을 구분하는 데서 시작한다. 물질적 독립성을 아직 검증하는 동안 «물체»는 영상에서 추적하는 영역을 가리키는 편의상 명칭으로 사용할 수 있다. 추가 기하 자료 없이 각크기만으로 크기, 속도와 거리를 도출할 수는 없다.

드문 발광을 기기로 연구한 사례는 존재한다. Cen, Yuan, Xue는 구름과 지면 사이의 방전 뒤 구상번개로 해석한 에피소드를 기록했다. 두 무슬릿 분광기로 관측한 자료에는 토양 원소의 특징이 있었다 [32]. 이는 단일 사건에 관한 제한된 결과다. Abrahamson과 Dinniss의 모형에서는 나노입자 망의 산화가 에너지원이다. 이들의 실험실 실험에서는 사슬 모양의 응집체를 찾았으나, 기술한 실험에서 빛나는 구체를 만들지는 못했다 [33]. 메커니즘 일부를 뒷받침하는 것과 현상 전체를 재현하는 것은 서로 다른 증거 수준이다.

다른 규모의 사례로 국제우주정거장의 대기와 우주 상호작용 감시기 ASIM의 관측이 있다. 뇌우 감마선 섬광을 하부 전리층의 elve형 자외선 발광 및 다른 기록 채널과 비교했다 [34]. 이 결과가 모든 발광 형상의 공통 기원을 뜻하지는 않는다. 가까운 구형 발광과 고고도의 짧은 사건에는 다른 기하 모형과 계기 범위가 필요하다. 컬러 영상이 겉으로 비슷하다고 발생 조건과 신호 전달 방식이 다른 과정들을 하나로 묶을 수는 없다.

차이를 보존하는 기록

저자의 관측 구성에는 장면 전체 모습, 각도 척도를 아는 채널, 그리고 질문에 비추어 필요하면 분광 기록을 포함한다. 관측 지점의 위치, 광축 방향과 시간 표지는 사건 자체와 독립적으로

검증한다. 관측 전에 안전한 대조 장면을 기록하여 포화, 광학적 반사상과 자동 노출의 특성을 파악한다. 자동으로 바뀔 수 있는 설정은 프레임과 함께 보존한다. 카메라 원자료를 얻을 수 없으면 그 제약을 사례 명세에 포함한다.

기하를 파악할 때는 시야가 겹치는 떨어진 관측 지점들이 특히 유용하다. 그러나 영상 둘만으로 삼각측량이 보장되지는 않는다. 같은 세부 특징과 같은 시간 구간을 대응시켰다는 것을 입증해야 한다. 발광이 빠르게 변하면 관찰자마다 분포된 발생원의 서로 다른 부분을 볼 수 있다. 따라서 기록부에서는 밝기 최대점의 좌표, 영역 경계와 가정한 물질적 몸체의 중심을 구별한다. 기하의 불일치는 편리한 궤적을 맞추어 고치지 않고 남긴다.

스펙트럼은 배경, 감도, 포화와 영상과의 연결을 점검한다. 선이 있으면 방출 성분을 논의할 수 있으나 전체 조성과 에너지원을 자동으로 정해 주지는 않는다. 선이 없다는 사실은 기록된 대역과 감도 범위 안에서만 의미가 있다. 스펙트럼의 시간 순서는 때로 냉각, 조성 변화와 배경에 대한 이동을 구별한다. 시간 정확도가 부족하면 이 설명안들이 모두 양립 가능한 상태로 남는다. 발광이 사라진 뒤 추정 흔적에서 얻은 스펙트럼은 자체 출처 이력을 가진 별도 측정으로 작성한다.

경쟁하는 설명과 안전

각 설명안에 구별 징후를 정한다. 반사는 가능한 발생원과 표면의 위치에 부합해야 한다. 계기 내부 반사상은 광학계와 그 방향에 연결한다. 대기 굴절로 실제 물체의 상이 이동하거나 여러 개 생길 수 있으나, 특정 신기루를 설명하려면 기하와 공기 조건을 검증해야 한다 [16]. 자체 발광 과정은 보임뿐 아니라 지속 시간, 스펙트럼과 밝기 변화도 설명해야 한다. 완성된 설명이 없으면 사례는 열린 채로 남는다. 그것이 연구자 대신 가장 이례적인 설명안을 골라 주지는 않는다.

예측할 수 없는 발광 사건의 기본 운용은 더 좋은 장면을 얻기 위한 접근이 아니라 가능한 수동 관측이다. 뇌우, 알 수 없는 전기 설비나 전리방사선 의심은 해당 분야 전문가가 각각 독립적인 작업 제한 사유로 검토한다. 분광기는 보호 계기가 아니다. 합의한 위치를 벗어나야 하는 과제라면 운용자는 조준이나 이동을 중단하고, 관측 조건을 위반하면 안전 조정자는 연구를 중단한다. 이 프로토콜은 드문 현상과의 유사성을 확인하려고 방전을 일으키라고 제안하지 않는다.

가정 모형과 결과의 한계

자체 발광은 확인했지만 알려진 설명안으로 지속 시간을 설명하지 못한다면 숨은 에너지 저장부의 가정 모형을 세울 수 있다. 상태 변수, 에너지 유입 또는 방출 경로와 고갈에 따른 관측

결과를 명시해야 한다. 연구자는 외부 에너지 공급이라는 대안을 남겨 두고 계산한 밝기 변화를 새로운 측정열과 비교한다. 가능한 결과들을 미리 구별할 때 모형은 유용하다. «구상번개»라는 명칭만으로 발생원 구조나 안전하게 억제할 방법이 정해지지는 않는다.

결론에서는 신뢰성 있게 기록한 발광, 재구성한 기하와 기전 가설을 구별한다. 포화 구간, 누락 프레임, 이용 가능한 스펙트럼 영역과 대안을 배제한 근거를 열거한다. 재현 실패도 특징의 성공적인 일치와 같은 주의를 기울여 기록한다. 그 결과 반복되지 않은 사건조차 거리를 제한하거나, 특정 광학적 인공 흔적을 배제하거나, 다음 관측 장치가 실제로 수행할 수 있는 검증을 정식화하는 실질적인 과학 성과를 줄 수 있다.

유한한 에너지 저장의 완결된 모형

저장부의 가정 가설을 검증 가능한 계산으로 전개해 보자. t = 0 이후에는 외부 에너지 공급이 없고, 모형에서 저장 에너지 E의 손실이 모두 복사로 바뀌며, 그 출력은 E/τ라고 하자. 또 전체 출력의 일정 비율 b가 선택한 스펙트럼 대역으로 나온다고 가정하자. 이들은 독립된 가정 세 개다. 동역학과 스펙트럼으로 검증해야 한다. 카메라에 빛나는 구체가 보인다는 것만으로는 어느 것도 도출되지 않는다.

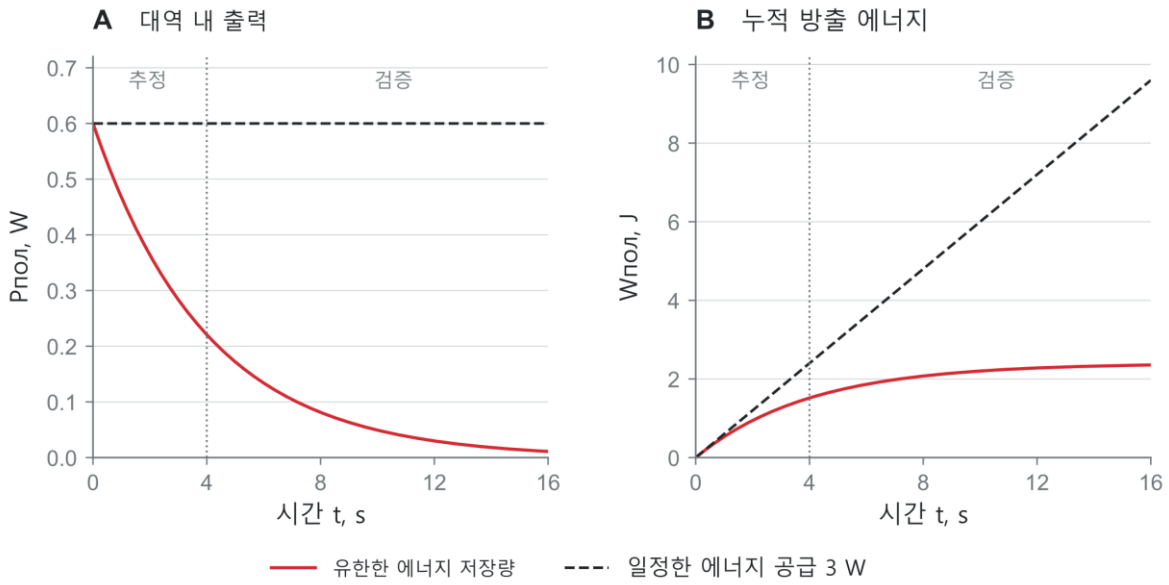
$$E(t) = E_0 e^{-t/\tau}, P_{\text{rad}}(t) = \frac{E_0}{\tau} e^{-t/\tau}, P_{\text{band}} = b P_{\text{rad}}$$

전적으로 학습용인 예에서 E₀ = 12 J, τ = 4 s, b = 0,20이다. 그러면 초기 전체 출력은 3 W이고 관측 대역의 출력은 0,60 W다. 표는 자연 사건의 기록이 아니라 계산을 제시한다. 이 값들은 복사 기하를 확정하고 복사 측정 교정을 마친 뒤에만 비교할 수 있다. 알 수 없는 거리에 있는 수신기 하나의 신호만으로 전체 물체의 출력을 정할 수는 없다.

시간, s	남은 저장량, J	대역 내 출력, W
0	12,000	0,6000
4	4,415	0,2207
8	1,624	0,0812
12	0,597	0,0299

전체 전력을 영부터 무한대까지 적분하면 12 J이고, 대역 내 전력을 적분하면 2,4 J다. 이 두 귀결은 하나의 매개변수 집합으로 일관되게 설명되어야 한다. 처음 네 초로 τ를 추정했다면 남은 구간은 감쇠의 형태를 검증한다. 별도의 스펙트럼 계열은 b가 일정한지 검증한다. 색이나 경로의 불투명성이 달라지면 원래 에너지 법칙을 유지하면서도 대역 예측이 어긋날 수 있다. 따라서 빛의 세기 곡선을 전파 모형과 분리해 다루어서는 안 된다.

경쟁 설명안은 3 W의 일정한 에너지 공급을 더한다. 초기 저장량이 같고 τ = 4 s이면 저장량은 12 J, 대역 내 출력은 0,60 W로 유지된다. 이후 공급이 중단되면 계산한 감쇠가 시작된다. 이런 전환은 확인된 통상 발생원의 자연적 변화에서 또는 적격한 안전 시험 장치에서 관찰할 수 있다. 이 방정식들에서 방전 실험이나 미지의 발광에 대한 임의의 작용이 도출되지는 않는다.



합성 예: E_0 = 12 J; τ = 4 s; b = 0.20. 에너지 공급 없는 방출 상한: 2.4 J.

그림 16. 유한한 에너지 저장량과 유지되는 발광. 이 장의 합성 에너지 예에서 E_0 = 12 J, τ = 4 s, b = 0,20이다. 에너지 공급이 없으면 대역 내 전력은 0,60 exp(−t/4) W이고, 누적 출력 에너지는 2,4[1 − exp(−t/4)] J이다. 3 W를 일정하게 공급하면 저장량은 12 J로 유지된다. 대역 내 전력은 0,60 W, 출력 에너지는 0,60t J이다. 처음 네 초는 매개변수 추정에, 이후 구간은 설명을 구별하는 예측의 검증에 사용한다. 측정 오차는 모형화하지 않았다.

지속적인 발광 자체가 유한한 저장량을 반박하지는 않는다. 매우 큰 E_0와 다른 τ를 제안할 수 있기 때문이다. 따라서 초기 자원의 한계에는 독립적인 근거가 있어야 하며 손실 법칙은 별도로 검증해야 한다. 그런 근거가 없으면 결론은 더 좁아진다. 추정한 매개변수를 가진 이 지수 모형이 기록을 기술하지 못한다는 것이다. 이것도 온전한 결과다. 이후에는 손실 법칙의 변경, 외부 에너지 공급과 측정한 빛의 다른 해석 사이에서 선택한다.

자료 관리자는 원래 복사 측정값, 스펙트럼 대역, 기하와 모든 포화 구간을 보존한다. 계측 전문가는 적분 출력 에너지의 불확도와 출력 교정과의 관계를 평가한다. 책임자는 뒤쪽 구간을 검증하기 전에 적합 영역을 확정한다. 관측이 사건의 시작을 포함하지 않으면 E_0는 물체가 생긴 순간이 아니라 이용 가능한 측정열의 시작에 해당한다. 이 설명을 명시하면 불완전한 기록에서도 모형의 유용성을 유지할 수 있다.

제24장

음향과 기계적 진동

한 보고의 두 경로

웅웅거리는 소리, 물체의 떨림과 압박감은 서로 다른 물리적 채널에 해당할 수 있다. 마이크는 특정 대역의 공기 압력 변화를 측정하고, 가속도계는 부착 지점에 연결된 감응 소자의 고유가속도를 측정하며, 증상 호소 기록은 사람의 경험을 기술한다. 이 자료들은 비교할 수 있지만 서로 대신할 수는 없다. 음향 사례는 확인된 신호나 그 존재에 대한 근거 있는 가설에 따라 AC로 분류한다. 경험만 기록한 상태라면 설명이 매우 구체적으로 보여도 물리적 채널은 여전히 연구 질문이다.

저주파 관측의 주된 어려움은 익숙한 녹음이 찾는 양을 보존하지 못할 수 있다는 것이다. 대역은 감응 소자, 증폭기, 필터, 변환기와 프로그램을 포함한 전체 경로가 결정한다. 재생할 때 증폭한 잡음은 원래 환경에 같은 압력이 있었다는 증거가 아니다. 반대로 일반 기기의 빈 녹음 트랙은 그 범위 밖의 신호를 배제하지 않는다. 따라서 계측 전문가는 중요한 영향량 사이의 의존 관계까지 포함하여 검증된 주파수 응답과 적용 한계를 기술한다 [2].

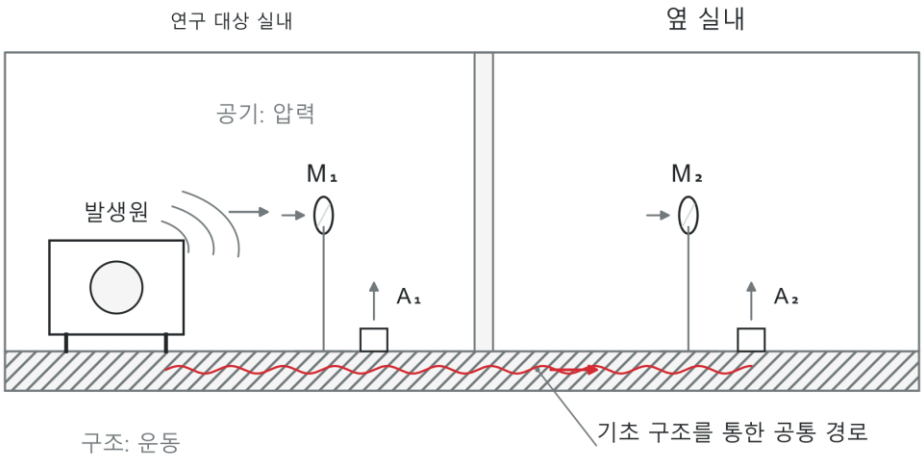
기록 계획

제안한 프로토콜은 공기 채널과 구조물 채널을 분리한다. 접근 가능한 기준 위치에 음압계를, 허용된 구조물에 적합한 운동 센서를 설치한다. 특정 지점의 특정 방향 운동을 측정하므로 부착 방법을 사진과 기록으로 남긴다. 시간 연결과 장비 가동 기록부도 필요하다. 발생원이 움직인다고 추정하면 먼저 측정 플랫폼 자체의 운동을 점검한다. 바람, 센서 접촉과 운용자의 행동은 기록을 바꿀 수 있는 사건으로 표시한다.

주파수 분석과 함께 원래 시계열도 살펴본다. 짧은 충격, 지속적인 단일음과 느린 배경 변화는 서로 다른 설명이 필요해도 평균 지표가 비슷할 수 있다. 각 계산에 구간, 창 함수와 평균화 방식을 명시한다. 흥미로운 봉우리를 발견한 뒤 방법을 바꾸는 것은 탐색 분석으로 허용하지만

새 결과는 다른 기록에서 검증한다. 수집 매개변수는 예상 지속 시간과 주파수에 맞춘다. 측정 경로가 올바르게 기록할 수 없었던 형태는 그래프가 세밀하다고 증거가 되지 않는다.

대조 위치는 가정한 전달 경로에 따라 선택한다. 옆방이 같은 기초를 공유하면 기계적 진동의 독립 대조가 아닐 수 있다. 실외 지점은 공기 중 배경이 다를 수 있다. 발생원 설명안마다 위치 사이에 어떤 차이가 유지되어야 하는지 미리 설명하면 유용하다. 동시 관측은 공간 효과를 기계의 운용 상태 변화와 혼동하지 않게 한다. 다른 시기의 반복 기록은 연결의 안정성을 검증하지만 파일이 따로 저장되었다는 이유만으로 독립적이지는 않다.



M — 마이크; A — 고정 운동 센서. 축척과 작용 수준은 정하지 않았다.

그림 17. 공기와 구조물을 통한 전달 경로. 공통 기초를 갖는 실내 공간의 학습용 단면도다. 마이크 M_1과 M_2는 공기 압력을, 부착한 센서 A_1과 A_2는 표시된 방향의 구조물 운동을 관찰한다. 진홍색 경로는 기초를 통한 공통의 기계적 연결을 강조한다. 따라서 옆방은 진동에 대한 독립 대조군이 되지 않는다. 이 기하는 안전거리, 주파수 응답, 절연 구조를 정하지 않는다.

감각과 인과 추론

사람의 보고에는 증상 목록을 유도해 제시하지 않고 별도의 시간 순서를 작성한다. 물리적 채널과의 연결은 원래 설명을 기록한 뒤 평가한다. 한 연구의 음성 결과를 모든 경험의 부정으로 바꾸어서는 안 된다. Marshall과 동료들의 이중맹검 교차 연구에서 시험한 초저주파음 모사 조건은 모의 대조 조건에 비해 연구한 지표를 악화시키지 않았다. 결론은 해당 참여자, 작용과 선택한 결과 지표에 한정된다 [35]. 보편적인 안전 수준을 정하거나 저주파 소음의 모든 상황을 설명하는 결과가 아니다.

경험이 장비 가동과 일치해도 소리, 진동, 함께 변한 실내 조건과 참여자가 기계 가동을 안다는 사실 등 여러 인과 경로가 남는다. 이를 구별하는 방법은 적합한 관측과 필요할 때 승인받은 인간 대상 연구이며, 집에서 작용을 강화하는 것이 아니다. 상태의 임상 평가는 물리적 재구성과 별도로 한다. 음향적 설명이 없다고 보고의 가치가 사라지지는 않지만, 이례적인 성질의 외부 발생원이 확인되는 것도 아니다.

분기와 중단

마이크에 신호가 있고 발생원의 운용 상태와 연결되면 공기 전달 경로를 구체화한다. 구조물 채널이 더 크게 변하면 기계적 연결을 연구한다. 처리한 트랙만 변하면 원래 기록과 설정으로 돌아간다. 센서들의 결과가 양립하지 않으면 먼저 범위, 방향과 동기화를 점검한다. 단계마다 책임자가 다음 질문을 정식화한다. 운용자는 소리의 인상에 따라 새 자극을 선택하지 않는다. 원인 규명과 작용 감소는 서로 다른 속도로 진행될 수 있다.

안전 조정자는 승인 조건 이탈, 사람의 예상 밖 반응, 구조물 안정성 훼손 또는 발생원 제어 상실 시 연구 개입을 중단한다. 수치 제한은 구체적인 환경과 과제에 적용되는 평가에서 가져온다. 중단할 때도 건물의 필요한 보호 기능을 유지해야 한다. 확인한 발생원을 정상 절차로 안전 상태로 바꿀 수 있으면 해당 분야 전문가가 전환을 정하고, 연구진은 두 물리 채널의 변화와 측정기의 정상 작동 복귀를 확인한다.

학습 상황으로 논리를 마무리하자. 바닥에서 가벼운 물체가 주기적으로 움직이고 웅웅거리는 소리가 들린다. 동시 기록은 단일음이 계속 유지되는 동안 운동은 기계적 충격을 따른다는 것을 보인다. «음향 이상현상»이라는 하나의 표제는 두 과정을 숨겼을 것이다. 분리 분석으로 기계적 전달을 다루면서 공기 중 소음을 따로 계속 연구할 수 있다. 운동을 성공적으로 없애도 모든 감각이 사라진다고 결론에서 약속하지 않는다. 검증한 결과, 남은 채널과 후속 관측 조건을 명시한다.

제25장

열 과정과 에너지 수지

온도, 흐름과 에너지 저장량

영상의 차가운 영역, 물체의 급속 가열과 추정 에너지 초과는 서로 다른 세 과제다. 온도는 선택한 모형에서 열적 상태를, 흐름은 에너지 전달을 기술한다. 에너지 수지에서는 저장량 변화와 계의 경계를 통한 교환을 고려해야 한다. 낮은 온도 자체가 미지의 기전에 의한 에너지

추출을 입증하지 않는다. 높은 온도도 발생원의 출력을 정해 주지 않는다. 이 장의 첫 결정은 검증할 주장과 그 주장이 적용되는 계의 규모를 선택하는 것이다.

열화상 카메라에서는 대상과 화면 수치 사이에 복사 변환 모형이 있다. NIST의 열화상 카메라 교정 보고서는 신호의 공간적 흐림을 포함하여 측정 절차와 불확도를 별도로 다룬다 [36]. 따라서 연구에서는 가능하면 복사 측정 자료와 처리 정보를 보존한다. 색상표를 바꾸는 것은 표시 방식만 바꾼다. 자동으로 늘어난 척도에서 선명한 파란 반점이 나타났다고 물리적으로 새로운 냉각이 발생한 것은 아니다.

열 관찰의 검증

저자의 구성은 접근 가능한 위치에서 고정된 전체 관측으로 시작한다. 연구할 표면, 안정적인 기준물과 대조 영역을 표시한다. 관측 방향, 확정한 기하 안에서의 거리, 공기 상태와 표면 특성을 기록한다. 반사 복사와 방사율 변화는 신호 변화의 경쟁 설명으로 검토한다. 접촉 센서는 사용이 허용되면 다른 비교 채널을 제공하지만 그 자체로 국소 열교환 조건을 바꾼다. 두 측정 방식의 불일치는 계기들의 다수결이 아니라 각 물리 모형으로 분석한다.

반복 관찰에서는 카메라 위치를 복원하고 같은 영역들을 비교한다. 응답 지연을 고려하여 시계열을 맞춘다. 카메라와 설치한 센서가 빠른 과정을 서로 다르게 평활화할 수 있기 때문이다. 표면 재료, 습도, 기하가 달라지면 이전의 신호 변환을 다시 검증한다. 작은 대상의 경계 신호에는 이웃 배경이 섞일 수 있다. 화면 영상을 확대해도 잃어버린 공간 분해능은 돌아오지 않는다. 프로토콜에는 수치적인 온도 추정이 확인되지 않은 영역을 명시한다.

경계를 명시한 수지

에너지 가설을 검증하려면 계의 경계를 그리고 그 경계를 가로지르는 흐름을 열거한다. 열교환, 외부 장치가 하는 일과 물질이 드나들 때 동반하는 에너지 전달을 고려한다. 편리한 표기는 다음과 같다. $R = \Delta E - E_{вх} + E_{вых}$. 여기서 ΔE는 선택한 구간 동안 경계 안의 저장 에너지 변화 추정값, Eвх와 Eвых는 총 유입과 유출, R은 채택한 수지의 잔차다. 모든 항의 부호와 정의를 분석 전에 확정한다. 서로 다른 전달 유형을 중복해서 포함하지 않는다.

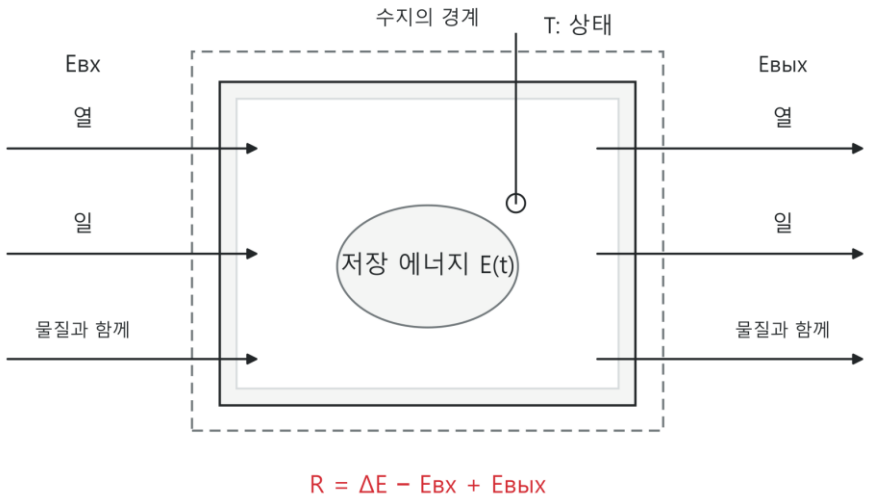


그림 18. 검사체적과 에너지 수지의 잔차. 가정한 검사체적의 에너지 계산 도식이다. 열, 일, 물질이 운반하는 에너지는 같은 시간 구간의 Eвх와 Eвых에 들어간다. 일관된 모형에서 각 전달을 한 번씩만 센다. 온도 채널은 상태를 관찰한다. 진홍색 잔차 R = ΔE − Eвх + Eвых는 계산 결과로서 경계 밖에 따로 표시했으며, 새로운 에너지원으로 그린 것이 아니다. 화살표들은 이미 측정한 흐름이 아니라 계산에 포함할 범주를 보여 준다.

영이 아닌 R은 우선 자료와 모형의 불일치를 나타낸다. 새로운 발생원을 논의하려면 경계, 측정과 알려진 전달 경로를 구체화해도 잔차가 유지됨을 보여야 한다. 잔차의 불확도는 정확도들을 열거한다고 얻어지지 않는다. 공통 센서, 보정과 배경이 각 항의 추정값을 서로 연결할 수 있기 때문이다 [2]. 중요한 흐름을 아예 측정하지 않았다면 보기 좋은 R 수치는 닫힌 에너지 수지 증거의 지위를 갖지 못한다. 보고서에 남는 것은 미지의 기원에서 발견한 에너지가 아니라 미완성 수지다.

열량 측정 검증 계획은 해당 실험실 절차에 이미 사용이 허용된 재료에 대해 작성한다. 책임자는 가설 사이의 예상 차이를 정하고, 열공학 전문가는 축적과 손실 모형을 정하며, 계측 전문가는 대조 측정을 지정하고, 운용자는 운용 상태 전환을 매번 기록한다. 미지의 대상에 앞서 허용된 기준 과정으로 측정계 자체를 검증한다. 장치 매개변수는 필요한 감도와 과제의 성질에 맞춰 선택한다. 대상을 밀폐 용기로 옮기는 것은 중립적인 행동이 아니다. 열 배출, 기체 교환과 재료 상태를 바꿀 수 있다.

개입의 분기

독립 측정으로 온도 변화를 확인했으나 통상적인 열교환으로 수지가 설명되면 확인된 경로를 관리한다. 복사 측정에 따른 추정만 변하면 표면과 기록 경로를 연구한다. 두 채널이 모두 확인되어도 수지가 불완전하면 먼저 흐름을 구체화한다. 그 뒤에야 남은 가설을 정량적으로 진술한다. 허용 조건을 어떻게 바꿀 때 알려진 모형과 다른 결과를 예측하는가? 어느 분기도 미지의 물질을 임의로 가열하거나 사람에게 작용을 시험할 것을 요구하지 않는다.

장치 온도 제어 상실, 재료의 예상 밖 변화, 유지 장치 손상 또는 핵심 측정 상실 시 중단을 선언한다. 이는 필요한 냉각과 관측을 유지하면서 미리 정한 안전 상태로 전환함을 뜻한다. 지시값이 배경으로 돌아왔는지는 채널의 작동 능력을 회복한 뒤 확인한다. 표면의 광학적 성질이 달라졌다면 반점 소멸은 발생원 중단이 아니라 관측의 변화를 반영할 수 있다. 따라서 결과 확인은 결정을 내린 근거인 작용 경로에 의존한다.

학습 사례 분석

가상 실험에서 눈에 보이는 부하가 꺼져 있는데도 닫힌 외함이 서서히 가열된다. 첫 추정은 벽 온도만 고려하여 에너지 초과를 결론 내린다. 확장한 기록부에서는 내부 기록기에 전원이 계속 공급됨이 드러난다. 대조 외함은 탁자 위 설치 방식이 달라 열 배출도 다르게 나타난다. 이 차이들을 고려하자 잔차는 불확도 안에서 사라진다. 이런 결과는 연구 실패가 아니다. 설명 모형을 얻고 다음 시험의 요구 사항을 확립했다. 잔차가 남는다면 바로 이 요구 사항들이 새 결과에 실질적인 의미를 줄 것이다.

제26장

물체의 운동과 겉보기 공중 부양

영상에서 역학으로

관찰한 운동에는 기준계를 명시해야 한다. 물체는 카메라, 탁자, 건물 또는 지표면에 대해 위치를 바꿀 수 있으며 이들은 서로 다른 주장이다. 진동하는 지지대에 고정한 카메라는 자기 운동을 주변 장면의 운동으로 돌릴 수 있다. 따라서 MV 부류의 첫 측정은 좌표와 시간에 관한 것이며, 힘에 대한 결론은 기하, 질량과 상호작용을 분석한 뒤에 나온다. 공중에서 움직이지 않는 듯한 모습도 검증이 필요하다. 위치 유지 자체는 작용하는 힘들이 무엇에 의해 균형을 이루는지 알려 주지 않는다.

비접촉 지지는 물리학에 알려져 있다. Berry와 Geim은 적절한 불균일 자기장에서 자기 상호작용이 무게와 균형을 이룰 수 있는 반자성 부상을 다룬다 [23]. 이 예는 추론의 논리를 검증하는 데 중요하다. 눈에 보이는 지지대가 없다는 사실만으로 중력 차폐가 확립되지는 않는다. 기술한 조건은 강한 자기장을 사용하는 현장 장치를 만들라는 제안이 아니다. 미지의 사례는 자체적으로 재구성해야 한다. 발표된 실험과 겉모습이 비슷하다고 해서 메커니즘까지 같다고 입증되지는 않는다.

궤적과 장면의 완전성

저자의 프로토콜은 대상, 추정 지지대와 주변 기준물을 포함한 변경 불가능한 전체 장면 기록에서 시작한다. 근접 영상은 이를 보완하지만 대신하지는 않는다. 잃어버린 주변부가 플랫폼 운동이나 외부 접촉을 숨길 수 있기 때문이다. 카메라가 여러 대면 시간과 기하를 별도로 검증한다. 각 궤적에 원래 영상 좌표, 물체 추출 규칙과 위치 불확도 추정값을 보존한다. 평활화와 가속도 계산은 파생 연산으로 문서화한다. 작은 위치 추정 오차에서도 날카로운 가속도 봉우리가 생길 수 있다.

레이더를 사용한다면 계기 자체에 따른 설명이라는 별도 분기를 기억하면 유용하다. 다중 송수신 채널(MIMO)을 갖춘 자동차 레이더 연구에서는 반사된 다중 경로가 거짓 이동 표적을 만들었다. 식별은 장면 모형에 의존했으며 일부 필터링 방식은 실제 직접 신호까지 제거했다 [18]. 따라서 알고리즘 정제 뒤 남은 궤적을 원자료와 비교한다. 카메라와 레이더의 일치는 두 채널이 같은 물체를 가리키며 잘못된 시간 연결을 공유하지 않는지 확인한 뒤에만 논거를 강화한다.

힘 측정은 별도로 계획한다. 지지대의 센서는 그 지지대와의 상호작용을, 가속도계는 감응 소자의 고유가속도를 평가한다. 좌표상 운동은 방향과 중력을 고려해 복원한다. 이 가운데 어느 하나만으로 물체에 작용하는 모든 힘을 기술할 수는 없다. 정적 지지에는 가정한 힘의 수지를 작성하고, 운동에는 명시한 기준계에서의 운동량 변화 모형을 작성한다. 공기 흐름, 전기적 및 자기적 상호작용, 기계적 연결, 지지대의 기울기를 검증할 경로로 다룬다. «힘을 검출하지 못했다»는 기록은 측정한 채널과 그 감도 한계의 목록으로 바꾼다.

효과는 무엇을 따라가는가

연구에서 조건의 제한적 변경을 허용한다면 장소, 재료, 계기와 발생원을 구별할 징후를 미리 선택한다. 이용 가능한 비활성 대조 물체를 재배치하면 관측 기하를, 카메라 위치를 바꾸면 광학적 설명을 검증할 수 있다. 미지의 대상을 옮기는 것은 언제나 통상적인 실험 준비가 아니라

별도 개입으로 취급한다. 장 지도에서도 비유일성이 남는다. 다른 발생원 분포가 같은 장 측정과 부합할 수 있다 [22]. 지도 하나가 역학적 힘의 수지를 대신하지는 않는다.

관찰자에 대한 의존성은 특히 조심해서 해석한다. 운용자는 조명, 몸의 위치, 공기 흐름, 바닥 하중과 기록 시작 시점을 동시에 바꾼다. 사람이 떠났을 때 효과가 사라져도 의식의 관여가 확립되지는 않는다. 먼저 달라진 물리 조건과 기록 시작 방식을 연구한다. 기록의 맹검 처리는 조건에 대한 지식을 궤적 추출과 분리하는 데 도움이 되지만 나쁜 촬영을 고치지는 못한다. 인간의 관여를 연구하려면 별도의 윤리적 근거가 필요하며, 움직이는 물체 구역에 사람을 두는 것을 전제하지 않는다.

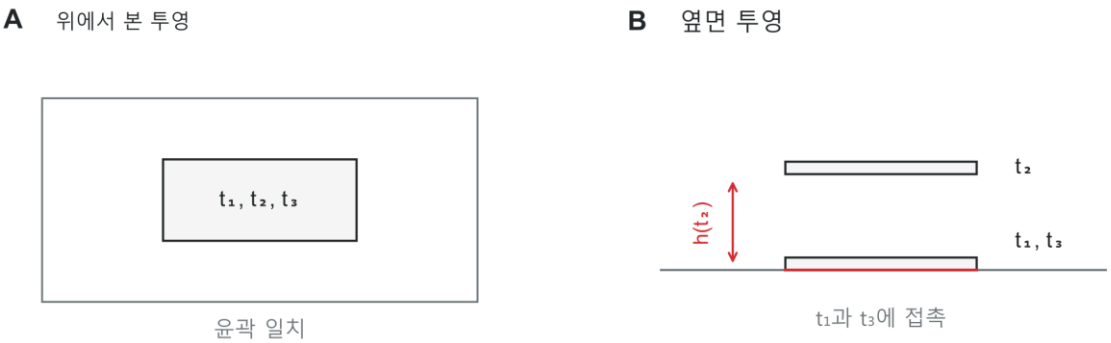
허용 가능한 실험의 한계

개입 전에 해당 분야 전문가는 낙하, 끼임, 회전과 이웃 구조물로의 하중 전달 가능성을 검토한다. 책임자는 측정 목표를, 안전 조정자는 접근 경계와 중단 징후를, 운용자는 허용 행동의 순서를 기록한다. 계획에 없던 운동, 힘의 발생원에 대한 제어 상실, 지지계 변화 또는 안전이 의존하는 채널의 상실 시 관측을 중단한다. 조건은 구체적인 질량, 기하와 환경에 맞춰 정한다. 모든 사례에 동일한 «부양에서의 거리»를 적용하는 데에는 물리적 근거가 없다.

작용 관리는 확인된 기전과 연결한다. 정상 구동 장치가 운동을 만든다면 설계에 마련된 안전 전환을 이용한다. 발생원을 모르면 이동 명령이 없다는 사실을 고정된 상태로 보지 않는다. 카메라를 끄거나 알고리즘으로 신호를 억제하면 관측을 잃는 것이지 물체가 멈추는 것은 아니다. 어떤 제한을 가한 뒤에도 실제 위치, 유지 수단의 상태와 새로운 기계적 하중을 확인한다. 제어 명령이 가역적이어도 전환 중 생겼을 수 있는 손상까지 되돌릴 수 있다는 보장은 없다.

의미 있는 잔여 결과

학습 상황을 보자. 가벼운 판이 표면 위 공중에서 정지한 듯 보이지만 측면 촬영은 위쪽 시점에서 구별되지 않던 주기적 접촉을 드러낸다. 기존의 자유 지지 모형은 접촉을 수반하는 운동 모형으로 바뀌고 연구 질문은 주기성의 기전으로 옮겨 간다. 접촉과 알려진 장을 제한된 범위에서만 배제했다면 결론에도 그 경계를 남긴다. 새 상호작용의 작업 가설은 이용 가능한 매개변수에 대한 의존성을 예측하고 독립적인 반복 검증을 견뎌야 한다. 운동이 주는 강한 인상이 이런 예측의 필요성을 없애지는 않는다.



합성한 장면이다. 두 투영의 수평 위치와 시각 표시는 같다.

그림 19. 두 방향에서 본 같은 판. 하나의 합성 장면에서 프로그램으로 만든 두 투영이다. 판의 수평 위치가 유지되므로 t_1, t_2, t_3에서 위쪽 윤곽이 일치한다. 측면 투영에서는 t_2의 틈과 t_1 및 t_3의 접촉이 드러난다. 위치는 가정한 것이며 실제 실험의 진폭을 정하지 않는다. 이 그림은 관찰의 완전성을 명확히 하며 운동의 메커니즘을 확립하지 않는다.

제VI부

물질과 생명계

제27장

질량과 조성의 변화

실제로 달라진 것

저울 지시값은 물질의 양을 직접 기록한 것이 아니다. 측정은 지지대와의 상호작용, 환경 조건과 계기 모형을 연결한다. 결과를 질량 단위로 표현해도 정확히 무엇을 비교했고 어떤 보정을 적용했는지 확인해야 한다. NIST의 질량 교정 지침은 공기 부력, 표준과 측정 조건을 다룬다 [37]. 물질의 소멸이나 출현을 주장할 때 이런 기초는 특히 중요하다. 그 주장은 장치 하나의 지시값 변화를 관찰했다는 주장보다 훨씬 강하기 때문이다.

저자의 프로토콜에서는 먼저 계산 대상을 정한다. 개별 물체, 용기의 내용물 또는 «용기, 내용물과 닫는 부품»으로 이루어진 계다. 이 경계의 이력을 기록한다. 측정 사이에 뚜껑을 열거나 표지를 더하거나 젖은 도구로 대상을 옮겼다면 이미 물질 교환 가능성이 포함된 순서다. 질량, 화학 조성과 공간 분포의 변화는 따로 연구한다. 한 지표의 일치가 나머지 둘의 불변성을 입증하지 않으며, 불균질 재료의 부분별 차이가 반드시 시간에 따른 변환을 뜻하지도 않는다.

질량 비교

계획에는 연구 대상, 사용이 허용된 대조 용기와 적합한 비교 표준을 포함한다. 계기 드리프트가 조건 차이와 자동으로 겹치지 않도록 측정 순서를 선택한다. 기록마다 시간, 대상 식별자, 용기 구성, 환경 조건과 장치 상태를 보존한다. 가장 이례적인 한 쌍뿐 아니라 허용된 모든 반복 측정도 보존한다. 결과는 정해진 초기 구성에 대한 변화로 표현한다. 재료 손실 시점을 모른다고 순간적인 소멸을 가정하여 대신하지 않는다.

표준이 변하면 측정계 검증이 우선이다. 용기와 시료가 비슷하게 변하면 공통 요인을 연구한다. 시료에서만 차이가 유지되면 가능한 환경 교환 경로와 표면 상태를 점검한다. 계가 닫혔다는 가정은 «닫힘»이라는 말이 아니라 실제 구조와 이력으로 검증한다. 봉합되거나 기밀한 외피도 대상의 일부이며 그 자체로 공학적 과제다. 발생하는 조건을 평가하지 않고 미지의 재료를 그 안에 넣어서는 안 된다.

조성과 스펙트럼 특징

조성은 화학 원소, 화합물, 상 또는 구조라는 구체적 질문에 답하는 방법으로 확정한다. 원소 분광법이 이 질문 모두에 자동으로 답하지는 않는다. NIST가 발표한 에너지 분산형 X선 분광법(EDS) 설명에는 표준과 매트릭스 보정의 필요성, 탈출 피크와 동시계수 피크를 포함한 스펙트럼의 인공적 흔적이 명시되어 있다 [38]. 따라서 미확인 봉우리 하나에 새 원소의 이름을 붙이지 않는다. 먼저 교정, 배경, 응답 모형과 예상 특징 전체의 일관성을 검증한다.

조성 변화를 검증하려면 비교 가능한 영역이나 근거 있는 채취 계획이 필요하다. 시료 관리자는 각 분량의 원래 대상 내 위치와 모든 전처리 단계를 기록한다. 파괴 분석은 해당 분량에 대해 양질의 자료를 줄 수 있지만 그 이전 상태를 나중에 측정하지 못하게 할 수 있다. 재연구가 허용되면 남은 부분을 미리 정한 과제별로 나눈다. 독립 방법은 두 번째 계기의 이름 때문이 아니라 다른 물리적 기반과 다른 오차 집합 때문에 선택한다.

추가 위험 없이 가능하다면 대조 물질에도 비교 가능한 경로를 거치게 한다. 빈 용기는 용기의 기여를, 공정 대조는 전처리가 가한 변화를, 검증된 표준의 반복 측정은 분석 채널의 상태를 드러내는 데 도움이 된다. 이들의 역할은 다르다. 전달 뒤에야 오염을 발견했다면 실험실까지의 전체 경로를 복원한다. 조성의 출처가 불확실하면 스펙트럼 자체를 흠잡을 데 없이 얻었어도 발견 장소에서 비롯되었다고 확신할 수 없다.

보존과 행동의 제한

분석 전에 분야 전문가는 보관, 운송, 선택한 연구 방법이 허용되는지 정한다. 겉모습, 냄새가 없다는 사실, 센서 하나에 신호가 없다는 사실만으로 물질을 취급할 포괄적 허가를 얻지는 않는다. 안전을 위한 처리는 연구할 특징을 바꿀 수 있다. 세계보건기구(WHO)의 권고도 오염 제거가 물질, 조건, 타당성을 확인한 공정에 달려 있음을 강조한다 [39]. 따라서 명세서에는 최초 관찰과 처리 뒤의 상태를 나누어 기록한다. 시료의 과학적 가치는 실험실 능력을 넘어서는 위험한 작업을 계속할 근거가 아니다.

용기의 예상 밖 변화, 유지 기능 훼손 징후, 실제 재료와 작업 허용 조건의 불일치 또는 다음 단계를 무의미하게 만드는 시료 출처 상실 시 작업을 중단한다. 마지막 경우에 항상 비상조치가 필요한 것은 아니지만 해석은 중단해야 한다. 책임자는 재기록을 지정하거나 파괴 분석을 포기할 수 있다. 재개 결정은 해당 분야 전문가와 안전 조정자가 함께 확인한다. 시료 관리자는 무엇이 여전히 미상인지 전달한다.

이례적 결과의 정식화

학습 상황을 보자. 같은 돌에서 얻은 두 시료의 원소 조성이 다르고 일련의 작업 뒤 잔여물의 질량이 줄었다. 처음에는 물질 변환이라는 설명안이 떠오른다. 채취 지도는 두 시료가 서로 다른 포유물에 속했음을 보이고, 기록부에서는 전처리에 소모했으나 계산에 넣지 않은 분량이 드러난다. 얻어진 수지는 원소 변환 없이 관찰을 설명한다. 이런 설명안들을 검증해도 잔차가 남으면 새로운 독립 비교를 예측하는 작업 가설을 정식화한다. 이례적인 조성 자체로 재료의 생성 과정이나 기원이 확립되지는 않는다.

결론에는 변화의 크기와 불확도, 계산 대상 계의 정의, 분석 영역의 분포와 실시한 변환의 목록을 포함한다. 더는 검증할 수 없는 초기 성질은 별도로 명시한다. 이런 보고서는 극적인 이름 없이도 열린 사례의 지위를 유지할 수 있다. 과학적 결과는 재현 가능한 차이와 설명에 대한 제약이다. «물질화»나 «핵종 변환»이라는 말은 질량 변화나 뜻밖의 스펙트럼 선보다 훨씬 강한 요구를 충족할 때만 근거를 갖는다.

물질 변화의 증거 단계

더 강한 주장에는 이전 결과를 더 자신 있게 설명하는 것만이 아니라 새 관찰이 필요하다. 특정 계의 질량 변화, 화학결합 변화, 원자핵 구성 변화는 서로 다른 물리적 질문이다. 따라서 그 사이의 전환을 명시한다. 이 표는 저자가 제안하는 연구 단계를 정한다. 허용되는 취급 경로가 정해지지 않은 물질을 분석해도 된다는 허가는 아니다.

주장	추가 근거	아직 확립되지 않은 것
저울 지시값이 변했다	보존한 원래 지시값과 계기 상태	계의 질량과 변화 원인
지정한 계의 질량이 변했다	비교 가능한 경계; 표준; 보정; 불확도	이동 또는 변환 경로
성분 분포가 변했다	대표성 있는 채취와 공간 지도	전체 조성의 변화
화합물이나 상이 변했다	해당 구조에 민감한 방법	화학 원소의 변화
원소 또는 동위원소 조성이 변했다	독립 방법; 시료 수지; 불순물과 전처리 점검	원자핵 변화의 기전

주장	추가 근거	아직 확립되지 않은 것
구체적인 핵 과정 모형이 뒷받침되었다	서로 일치하는 생성물, 수지와 예측한 추가 징후	검증 범위 밖의 다른 과정들

수치 예로 첫 전환을 잘 보여 줄 수 있다. 한 계의 합성 측정값이 100,0000 g과 99,9996 g이고 각각의 표준 불확도가 0,0002 g이라고 하자. 오차들이 독립이면 차이는 −0,0004 g, 그 표준 불확도는 약 0,00028 g이다. 이 한 쌍으로는 물질 소멸을 논의할 설득력 있는 근거를 얻지 못한다. 오차가 상관되어 있으면 발생 원인에 따라 차이의 불확도 예산을 다시 계산해야 한다. 반복 횟수가 이 작업을 대신하지 않는다.

열린 부분의 질량 감소를 확실히 확인해도 장치 전체의 질량 감소를 뜻하지는 않는다. 벽면 응축, 떨어진 분량이나 다른 상으로의 이동은 국소 분포를 바꾼다. 따라서 물체, 용기, 분리한 분획과 소모한 시료를 병행하여 계산한다. 초기 상태와 최종 상태에 같은 계산 구성을 적용한다. 재료의 일부를 안전하게 계산에 넣을 수 없다면 빠진 고리의 정량적 추정은 보존하면서 결과를 닫히지 않은 수지로 한정한다.

다음 단계들에는 과제가 서로 다른 방법이 필요하다. 원소 조성, 분자 결합, 결정상과 동위원소 비는 한 분석의 네 이름이 아니다. EDS 설명부터 원소 분석 결과의 신뢰성을 표준, 매트릭스 보정과 스펙트럼 인공 흔적 검증에 연결한다 [38]. 더 강한 결론을 위해서는 필요한 차이에 실제로 감응하는 추가 방법을 선택하고, 어떤 전처리 변환이 그 차이를 바꿀 수 있는지 미리 파악한다.

동위원소 차이도 인과적 검증이 필요하다. 불균질 시료의 서로 다른 포유물을 비교하거나 분획의 비중이 달라지면 제안한 원자핵 변환 없이도 측정 비가 변할 수 있다. 따라서 모형은 명시한 계 안에서 특정 성분의 양이 어떻게 변할지 예측하고 채취 이력과 일치해야 한다. 같은 재료의 두 분량을 분석하는 것은 불균질성과 절차의 검증이며 자동으로 사건의 독립적 반복이 되지는 않는다.

특정 핵 기전을 제안하면 그로부터 예상 생성물, 에너지 기여와 실제로 예측하는 방사선 종류를 도출한다. 이 연구 구성에는 «어떤 방사선 신호든 반드시 있어야 한다»는 보편 요구가 없다. 선택한 반응의 예측을 검증한다. 필요한 감도와 기록 시간은 결과 분석 전에 계산한다. 예측한 징후를 감지할 채널이 없다는 것은 검증이 불완전하다는 뜻이며, 징후를 숨기는 이례적인 방법을 확인했다는 뜻이 아니다.

양성 결과가 중간 단계에 남을 수 있다. 예를 들어 독립 분석들은 관찰한 사건 뒤 특정 상의 변화를 확인하지만 원소 조성은 초기 조성과 여전히 양립한다. 이는 형성 조건을 연구할 자체 계획을 가진 실질적인 물리적 결과다. 성급하게 «핵종 변환»으로 넘어가면 결론의 정확성이 떨어진다. 해당 단계와 다음 전환을 위해 측정할 항목을 함께 보존한다. 안전하고 추적 가능한 취급을 위한 자료는 제31장에 따라 넘긴다.

제28장

전리방사선과 검출기 고장

지시값과 위험

방사선 사례는 측정하는 양의 정확한 명칭에서 시작한다. 기록한 사건 수, 방사능 추정값, 스펙트럼과 선량 측정 지표는 서로 바꿔 쓸 수 없다. 계기는 그 구조로 감지 가능한 상호작용을 변환하며, 다른 종류나 에너지 범위의 방사선에는 반응하지 않을 수 있다. 따라서 IR 분류는 확인된 자료나 근거 있는 의심에 따르고, 안전 결정은 전체 상황을 고려하여 해당 분야 전문가가 내린다. 범위, 조건과 측정 수단의 정상 작동 여부가 없는 «방사선 미검출» 문구는 안전한 운용 상태를 정해 주지 않는다.

지시값이 없어진 것을 개선으로 받아들이는 오류는 특히 위험하다. 국제원자력기구(IAEA)의 SSG-8 지침은 일부 가이거 뮐러 계수기(GM)식 측정기, 특히 오래된 기기가 포화되면 영을 가리킬 수 있다고 경고한다 [40]. 이는 특정 기기와 작동 상태의 특성이지 모든 현대 선량계의 특성이 아니다. 실무적으로는 해당 채널이 과부하에서 어떻게 작동하는지 반드시 알아야 한다는 뜻이다. 지시값이 올라간 뒤 뜻밖에 떨어졌다면 진단과 안전한 결정이 필요하다. 발생원이 사라졌다는 추정을 확인하려고 다가가서는 안 된다.

측정 채널의 적격성 확인

저자의 프로토콜은 현장에 나가기 전에 시작한다. 계측 전문가와 방사선 방호 전문가는 측정량, 계기 종류, 범위, 관측 기하와 신뢰할 수 없는 결과의 징후를 합의한다. 명세에는 식별자, 성능 확인 정보, 허용 조건, 전원 상태와 제조사가 마련한 고장 신호를 넣는다. 작동 능력은 전문 역량을 갖춘 기관에서 정상적인 안전 수단으로 검증한다. 이 검증이 계기를 시험하기 위해 미지의 발생원을 직접 찾거나 사용하는 일로 바뀌어서는 안 된다.

기록할 때 평균 수치뿐 아니라 누적 구간, 위치, 시간 표지와 모든 경고도 보존한다. 결과 변화는 발생원, 기하, 차폐 물체나 센서 상태의 변화를 반영할 수 있다. 운용자가 측정 범위를 바꾸는

동시에 이동했다면 이미 두 영향이 섞인 것이다. 연구 기록에서는 안정적 구성 구간, 전환과 해석 불가능한 구간을 구분한다. 자료 누락을 배경 수준이라는 가정으로 채우지 않는다.

확실한 비교에는 배경 변동과 경보 오류의 모형이 필요하다. NIST는 오경보 시험을 검출 성능과 별도로 다루며, 사용하는 통계 모형에는 고유한 전제가 필요하다 [3]. 따라서 경보 없는 측정열로 미검출 확률을 영이라고 볼 수 없다. 시험 계획은 구체적인 기능과 조건에 대해 세운다. 이례적인 지시값을 제거하여 인위적으로 정제한 측정열은 바로 그 관측 목적이었던 사건들의 독립 평가에 적합하지 않다.

결정의 세 갈래

첫째 분기는 검증된 범위의 지시값이 적합한 독립 채널과 일치하는 경우다. 그러면 해당 분야 전문가가 양을 해석하고 실제 방사선 과제에 맞는 조치를 정한다. 둘째는 채널들이 불일치하거나 계기가 과부하를 알리거나 예상 밖으로 작동하는 경우다. 결과는 접근 허용에 사용할 수 없는 것으로 판정하고 연구 단계를 중단하며 이전에 근거를 갖춘 보호 상태를 유지한다. 셋째는 장비가 정상 작동하면서 지시값이 배경과 양립하는 경우다. 결론은 감도, 장소, 구간과 실제로 감시한 방사선 종류에 한정한다.

계기의 독립성은 전체 계의 구조로 검증한다. 외함이 달라도 전원, 계산 소프트웨어나 시간 척도 하나를 공유할 수 있다. 공통 원인은 여러 예비 채널을 훼손할 수 있으므로 장치 수가 독립적인 확인의 수와 같지는 않다 [7]. 모든 기록기가 동시에 자료를 잃으면 자체 검증이 필요한 별도의 DI 사건이다. 전자 장치 고장을 방사선으로 설명하는 것도 자동으로 받아들이지 않는다. NASA는 전자 장치의 단일 사건 효과와 누적 효과를 구별하지만 우주 시스템에 대한 설명이 임의의 지상 고장 원인을 확립하지는 않는다 [41].

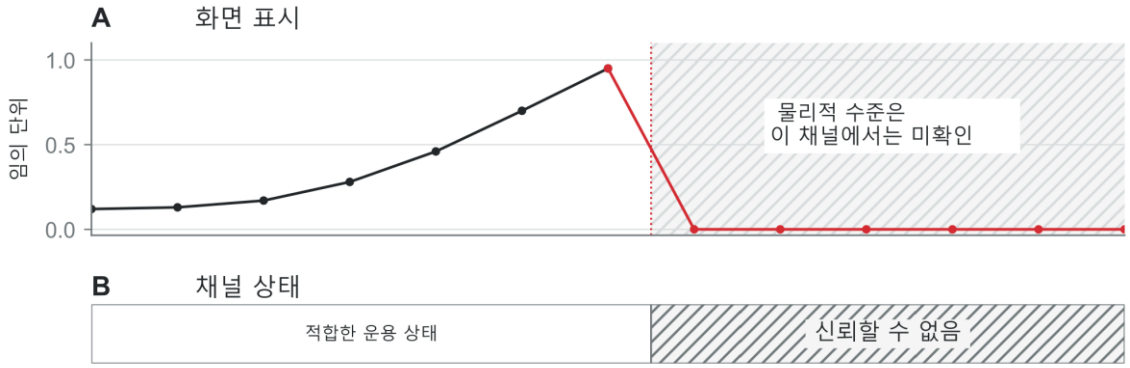
위험을 키우지 않는 연구

방사선 계기의 신호는 손으로 물체를 찾아보라는 초대가 아니다. 연구 책임자는 평가를 담당 전문 조직에 넘기고 과학 과제를 이용 가능한 자료로 한정한다. 안전 조정자는 제어 상실, 상황 변화나 계기 부족 시 작업을 중단할 권한이 있다. 추정 발생원의 이동, 개봉, 차폐와 처리는 책임이 정해진 특수 행동으로 검토한다. IR 부류의 명칭에서 보편적인 반경, 차폐 재료나 접근 순서를 도출할 수는 없다.

연구하던 현상이 사라지면 먼저 측정 경로의 작동 능력과 비교 조건 유지를 확인한다. 발생원이 관측 영역을 떠났거나 장애물에 가려졌거나 운용 상태를 바꾸었을 수 있다. 어느 결과도 그 자체로 위험 제거와 같지는 않다. 오염 가능성의 검증은 외부 장 측정과 다른 과제이며 적합한

전문 계획이 필요하다. 기전에 대한 과학적 불확실성이 이미 확인된 위험 범주에 근거한 조직적 제한을 없애지는 않는다.

학습 상황을 보자. 지시값이 상승한 뒤 한 계기가 영을 표시하고 동시에 기록부에 허용되지 않는 상태의 징후가 남는다. 잘못 해석하면 무력화를 선언할 것이다. 올바른 기록은 측정 실패를 구분하고 다음 단계를 보류하며 독립 평가까지 제한을 유지한다. 나중에 장의 실제 감소가 확인되면 그것은 자체 시간 경계를 갖는 별도 결론이 된다. 최종 보고서는 얻은 측정, 자료가 없는 구간, 채택한 보호 결정과 열린 질문들을 구별한다.



학습용 계측값이다. 유효하지 않은 상태의 영값은 방사선 부재를 입증하지 않는다.

그림 20. 채널의 유효성을 잃었을 때 나타나는 영의 지시값. 가정한 한 채널의 합성 지시값과 그 유효성을 따로 표시한 띠다. 허용되지 않는 상태의 징후가 나타난 뒤 표시값은 영으로 떨어지고, 그 채널로 물리적 수준을 해석할 수 없게 된다. 보이지 않는 선량을 추정해 덧그리지 않았다. 이 예는 검출기 포화의 일반적 특성을 정하거나 허가 문턱을 확립하지 않는다.

제29장

생물학적 편차와 생태학적 편차

생명계의 수준

식물의 이례적인 색, 생물의 집단 폐사, 동물 행동 변화와 미확인 실험실 분석 결과는 서로 다른 조직 수준에 해당한다. BI 부류는 대상 분야를 묶을 뿐 단일 원인을 정하지 않는다. 관찰은 개체, 개체군, 군집이나 생태계와 개체 수, 분포, 손상, 활동 또는 조성이라는 구체적 지표로 기술한다. 겉모습의 특이함이 감염성을 확립하지 않으며 익숙한 징후가 없다고 포괄적인 안전 결론을 내릴 수도 없다. 첫 과제는 생물학적 사건, 환경 상태와 기록 오류를 구별하는 것이다.

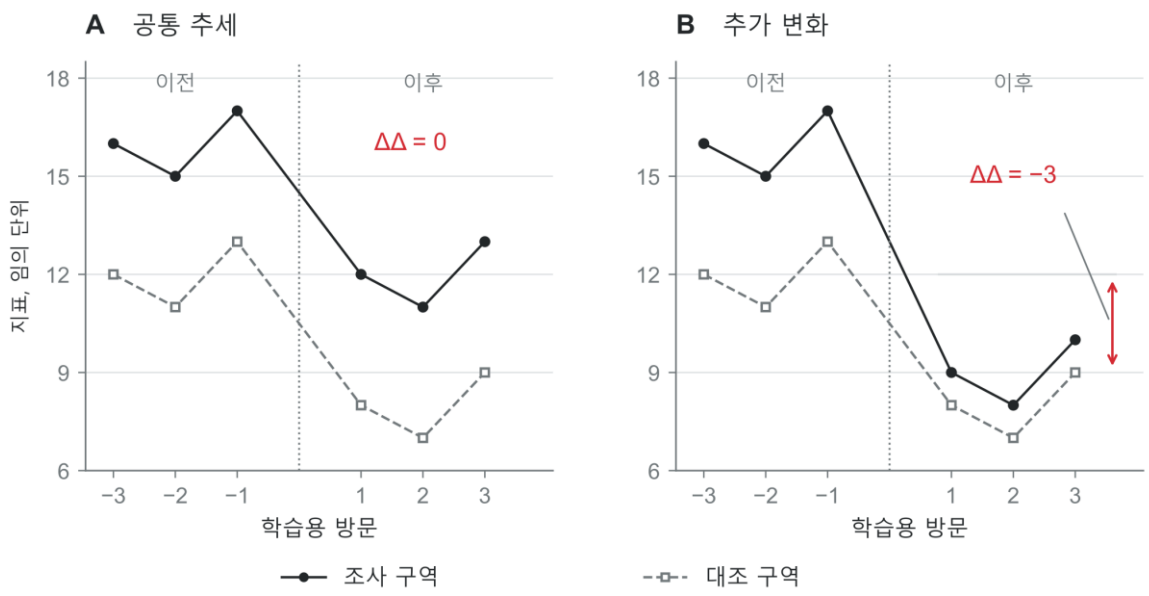
연구는 물과 영양 공급의 변화, 온도, 화학적 작용, 질병, 자연 동태와 인간 영향 등 알려진 지구상의 기전에서 출발한다. 각 대안에 맞는 측정을 선택해 목록을 검증 가능한 설명안으로

바꾼다. 관찰자가 동정하지 못한 생물 형태를 발견했다는 것은 동정의 한계를 뜻한다. 외계 기원, 특별한 생명의 기반이나 지적 행동을 확인하는 것이 아니다. 그런 가설에는 미지의 생물 이름을 바꾸는 것만으로 얻을 수 없는 추가 징후가 필요하다.

생태 관찰 계획

저자의 구성은 관찰 지도, 구역 이력과 비교 가능한 대조 지점들에서 시작한다. 조사 단위, 관찰 면적이나 지속 시간, 계절, 날씨와 발견 규칙을 기록한다. 같은 구역도 촬영 시간이나 가시성이 바뀌면 텅 빈 듯 보일 수 있다. 따라서 영의 관측과 탐색 노력도 보존한다. 대조 구역은 거리뿐 아니라 중요한 조건의 유사성에 따라 선택한다. 수문 조건이나 식생 구성이 다르면 단순한 개체 수 비교에 여러 원인이 섞일 수 있다.

미국 환경보호청(EPA)의 습지 관찰 지침에서 BACI(«전후 / 대조와 영향») 설계는 연구 구역과 대조 구역의 영향 전후 변화를 비교한다. 자연 변동성을 고려하려면 반복 관찰이 필요하다. 영향 이전의 기간이 없거나 구역들이 다르면 인과 추론이 제한된다 [42]. 이 논리를 미지의 사례에 적용하는 것은 저자의 응용이다. 사건이 이미 일어났다면 과거 사진과 로그는 완전성이 다른 역사 자료로 평가한다. 이를 미리 계획한 초기 관찰 계열과 동등한 대체물이라고 선언해서는 안 된다.



합성 계열이며 조사 노력은 같다. ΔΔ는 전후 평균의 변화량을 비교한다.

그림 21. 공통 추세와 연구 구역에만 생긴 변화. 동일한 조사 노력을 가정하여 반복 관찰을 비교한 두 합성 예다. 왼쪽에서는 두 구역의 평균이 모두 네 단위 줄어 변화의 차이 ΔΔ가 영이다. 오른쪽에서는 대조 구역이 네 단위, 연구 구역이 일곱 단위 줄어 ΔΔ = −3이다. 이는 계산의 예시이며 EPA 자료나 원인에 대한 증명이 아니다. 결론은 두 구역과 시작 기간의 비교 가능성에 달려 있다. 영향 이전의 관찰이 없으면 이런 비교도 할 수 없다.

반응 지표와 추정 원인을 분리하면 유용하다. 예를 들어 식생 피복 변화는 물, 조명과 환경의 물리적 성질 측정과 독립적으로 기록한다. 시간적 변화는 모형 선택을 돕는다. 즉각적인 가시적 변화, 점진적 손상과 조건 변화 뒤의 회복에는 다른 설명이 필요하다. 반응 지연이 숨은 작용 인자를 입증하지는 않는다. 계획에는 어떤 비교가 특정 설명안을 뒷받침하고 약화시키며 어떤 결과가 모호하게 남을지 미리 정한다.

관찰에서 시료로

채취가 반드시 첫 행동일 필요는 없다. 먼저 예정한 분석이 결정을 바꿀지, 전문 역량을 갖춘 실험실이 알려진 구성으로 재료를 받을 수 있을지 정한다. WHO는 생물학적 위험 평가를 작용 인자, 절차, 장비, 조건과 인력의 역량에 연결한다. 정보 공백은 조치 선택에 영향을 준다 [43]. 따라서 임의의 만능 보호 장비를 지정하여 미지의 상태를 없앨 수는 없다. 채취 허용 여부는 폐기물 취급과 환경 자체의 변화 가능성까지 함께 검토하여 채취 전에 결정한다.

미국 질병통제예방센터(CDC)와 미국 국립보건원(NIH)이 작성한 «미생물 및 생명의학 실험실의 생물안전»(BMBL)은 위험 평가를 실험실 작업의 기반이자 책임자, 생물안전 전문가와 절차 참여자들이 나누어 지는 책임으로 다룬다. 권고는 자문 성격이며 위협과 조치의 가능한 모든

조합을 열거하지 않는다 [44]. 이 원칙은 모든 생물학적 재료에 가상의 «이상현상 보호» 수준을 부여하는 대신 수령 실험실의 별도 판단을 요구할 근거가 된다. 발견 이력이 이례적이어도 알려진 전문 요구는 유지된다.

채취가 허용되면 관리자는 장소, 시간, 관찰 상태, 사진과의 연결 및 전달 전의 모든 변화를 기록한다. 대조 시료와 배경 관찰은 연구 질문에 맞춰 지정한다. 안전한 취급에 필요한 처리가 분석 예정 특징을 바꿀 수 있으므로 방법 선택과 결론에 이를 반영한다. 미지의 재료를 직접 배양하거나 생물을 시험 감염시키거나 사람에게 시험하는 것은 이 연구 경로에 포함되지 않는다. 유용한 현장 자료를 얻기 위한 필수 조건도 아니다.

개입의 분기와 한계

편차가 측정한 환경 변화와 일치하면 기전과 독립적인 대안들을 평가한다. 모든 구역에 공통 시간 추세가 나타나면 광역 요인을 연구한다. 특정 구역에서만 효과가 유지되면 국소 작용 경로와 대조 비교의 품질을 구체화한다. 실험실 결과가 현장과 다르면 재료의 대표성과 보존을 점검한다. 특정 분석의 음성 결과는 검증한 특징에만 제약을 주며, 모든 생물학적 위험의 부재를 입증하지 않는다.

재료의 예상 밖 이동 징후, 유지 기능 훼손, 시료와 수령 조건의 불일치 또는 사람과 환경에 대한 위협이 생기면 작업을 중단한다. 안전 조정자는 예정된 대응을 시작하고 담당 전문 조직이 실무 문제를 해결한다. 멋진 가설을 검증하려고 생물을 제거하거나 구역을 처리하도록 지정하지 않는다. 한 종류의 작용을 줄이는 행동도 군집을 바꾸고 원인 복원을 방해할 수 있다. 개입에는 과학적 호기심과 별개로 생태학적, 생물학적 근거가 필요하다.

학습 상황을 보자. 한쪽 기슭 근처에 이례적인 번성 현상이 나타났다가 일주일 뒤 날씨가 바뀌면서 줄어든다. 대조가 없으면 연구진의 마지막 행동이 성공적으로 무력화한 듯 보일 것이다. 비교 가능한 관찰은 아무도 개입하지 않은 구역에서도 동시에 변화했음을 보인다. 올바른 결론은 개입의 인과적 역할을 제한하고 조건 연구 과제를 유지한다. 완결된 생물학적 프로토콜은 계의 상태, 이동 가능성, 비교의 신뢰성과 후속 관찰 책임자를 기술한다. 이 정보를 미지의 생물 이름으로 대신하지 않는다.

제30장

복합 과정과 연쇄 변화

한 사례에 나타나는 여러 분류

한 사건에 빛, 온도 변화, 물체 운동과 기록 장애가 동시에 동반될 수 있다. OP, TH, MV와 DI라는 분류 목록은 발현 양상을 기술하지만 그 연결을 아직 설명하지는 않는다. 여러 작용 경로를 가진 단일 발생원, 순차 변화의 사슬 또는 우연히 시간상 겹친 독립 과정들이 가능하다. 연구는 이 구조들을 구별해야 한다. 한 사례에 여러 분류를 붙였다고 여러 새 상호작용을 발견한 것은 아니며, 불확실성들을 하나의 인상적인 이야기로 합칠 수도 없다.

저자의 모형은 과정을 인과 가정의 망으로 표현한다. 노드는 장치의 운용 상태, 장, 온도, 공기 흐름, 대상 위치와 자료 채널 상태처럼 측정 가능한 상태를 뜻한다. 화살표는 구체적인 추정 영향을 뜻하며 예상 변화 방향이나 지연을 함께 표시한다. 별도 노드들은 연구진의 행동을 기술한다. 이 도식이 최종적으로 옳아야 하는 것은 아니다. 어떤 연결을 검증했고, 무엇을 가정만 했으며, 설명안 사이에서 선택하기에 측정이 어디서 부족한지 보여 주는 것이 과제다.

공통 원인과 순서

동시성이 항상 작용의 직접 전달을 뜻하지는 않는다. 센서 세 개가 공통 전원, 공통 시간이나 하나의 처리 알고리즘 때문에 동시에 지시값을 바꿀 수 있다. NASA는 예비 수단을 무력화할 수 있는 공통 고장을 별도로 다룬다 [7]. 따라서 연구 도식에는 주변 조건을 포함한 계기 기반 설비가 들어간다. 확인 횟수를 세기 전에 채널 사이의 의존 관계를 밝힌다. 공통 원인을 아직 검증하지 않았다면 여러 화면의 일치는 서로 다른 물리량의 독립 측정보다 증거력이 낮다.

사건 순서도 조심해서 다루어야 한다. 측정 지연에는 센서 응답, 자료 누적, 전달과 시간 표지 부여가 들어간다. 다른 채널이 평균화 뒤에 결과를 보고한다면 기록부에서 이른 신호가 물리적으로는 늦은 과정일 수 있다. 먼저 이런 불확실성을 고려해 순서를 평가한 뒤 인과성을 논의한다. 가능한 시작 구간들이 겹치면 보고서에 순서 미확정을 남긴다. 원하는 연쇄 모형에 더 잘 맞는 봉우리를 골라 이를 고쳐서는 안 된다.

연구 체계의 개입

원격 관측은 일부 접촉을 줄이지만 관측의 물리적 존재를 없애지는 않는다. 무인 플랫폼의 오염 측정계 연구에서 프로펠러는 오염 기둥의 분포와 지시값을 바꾸었으며 영향은 구성과 운용 상태에 의존했다 [45]. 따라서 로봇 이동, 조명, 팬 작동과 무선 신호 송신을 작용 기록부에

포함한다. 환경을 관측하면서 바꾸는 계기는 양의 되먹임을 만들 수 있다. 계기의 운용 상태 변화가 새 신호를 일으키고, 새 신호가 다시 다음 운용 상태 변화를 유발하는 것이다.

설명안들을 구별하려면 위험을 키우지 않고 검증할 수 있는 관측 가능한 연결을 미리 선택한다. 수동 관측 단계는 안정된 순서를 보일 수 있다. 허용된 장비 대조 운용은 장비의 관여를 검증하는 데 도움이 된다. 독립 기록기와의 비교는 공통 기반 설비의 역할을 평가한다. 조건들의 인과적 기여가 질문이라면 여러 조건을 동시에 바꾸지 않아야 한다. 그러나 실험의 순수성을 위해 보호 기능을 끌 수는 없다. 그 비교를 할 수 없다는 사실은 결론을 솔직하게 제한하며 위험을 정당화하지 않는다.

복합 사례에서는 통상적인 위험을 특히 점검해야 한다. 현장용 기체 센서는 선택성이 제한적이고 사용 조건에 의존한다. 일부 종류는 부적합한 대기에서 실제보다 낮은 지시값을 낼 수 있다 [31]. 따라서 이례적인 빛과 계기 하나의 정상 지시값이 겹쳐도 환경 평가가 면제되지 않는다. 충분히 규정하지 못한 나머지에는 UN 분류를 유지하고, 확인된 요인들은 해당 전문 규칙에 따라 다룬다. 미지의 원인이 이미 발견한 실무 위험을 밀어내서는 안 된다.

연쇄 과정의 관리

각 연결을 끊었을 때의 결과를 정한다. 구동 장치를 멈추면 진동이 줄지만 필요한 열 배출이 끊길 수 있다. 이동 경로를 닫으면 물질 축적이 달라질 수 있다. 연구 책임자와 해당 분야 전문가는 전체 도식에 따라 행동을 선택하고, 안전 조정자는 핵심 상태를 계속 관측할 수 있는지 확인한다. 기전이 명확하고 결과를 검증할 수 있는 변화를 우선한다. 기대 이득이 미확인 연결 여럿에 동시에 의존한다면 이름이 무력화처럼 들려도 개입의 근거는 부족하다.

중단 징후는 한 채널에만 국한되지 않는다. 예상 밖 과정 조합, 변화의 가속, 합의 경계 밖 확산, 독립적 감시 상실과 보호계의 허용 운용 상태 이탈이 포함된다. 운용자는 필요한 기능을 유지하는 예정 상태로 장치를 전환한다. 자료 관리자는 마지막으로 신뢰할 수 있었던 구성과 각 명령의 시점을 기록한다. 중단 뒤에는 기존 도식이 중요하지 않다고 보았던 다른 연쇄 분기가 생겼는지 확인한다.

학습용 재구성

가상 실내에서 표시등이 깜박이고 가벼운 띠가 움직이며 카메라 기록이 끊기고 외함 온도가 오른다. 처음에는 사건들을 하나의 미지의 장으로 연결한다. 기록부는 환기 운용 상태와 공통 전기 회로의 변화를 보인다. 독립 카메라는 기록을 유지하고 띠의 운동은 공기 흐름을 따른다.

온도 지연은 외함의 열교환과 부합한다. 이 재구성이 모든 복합 사건을 통상적이라고 주장할 필요는 없다. 검증 가능한 하나의 망이 불분명한 징후 묶음을 어떻게 대신하는지 보여 준다.

발현 양상의 일부가 미설명으로 남으면 도식은 과제의 공간을 좁힌다. 확인한 연결은 유지하고 미확인 연결은 표시하며 다음 측정열을 가장 잘 구별할 수 있는 노드로 향하게 한다. 결과는 단일 답 대신 확신 수준이 다른 여러 기전일 수 있다. 이 구조는 관리에도 유용하다. 제한 자체의 위험을 평가했다면 최종 이론 이전에도 확인된 작용 경로를 제한할 수 있다. 과학적 설명과 실무적 제어는 연결되지만 반드시 동시에 완성될 필요는 없다.

제31장

시료와 연구 대상 상태의 보존

정확히 무엇을 보존하는가

시료는 과정을 이루던 일부를 다른 연구 상황으로 옮긴 것이다. 현장에서 떼어 내면 주변 환경, 지지, 조명, 온도, 기체 교환이나 다른 연결이 변한다. 따라서 «대상을 변함없이 보존한다»는 말은 충분히 명확하지 않다. 다음 결론에 중요한 성질, 곧 조성, 구조, 성분 분포, 표면 형태나 시간적 동태를 명시해야 한다. 관찰 상태를 어떤 연결이 유지하는지 모르면 먼저 허용된 운용 범위 안에서 현장 기록을 우선한다. 이동은 이상현상을 더 편리한 실험실에 가져가는 기본 방법이 아니다.

저자의 프로토콜은 사람과 환경에 대한 작용 제한, 과학적으로 중요한 성질 보존과 재료 출처 입증이라는 세 과제를 구별한다. 이 과제들은 충돌할 수 있다. 안전한 처리가 연구할 특징을 파괴할 수 있고, 분석에 최적인 보관이 유지 조건에 맞지 않을 수 있다. 결정은 채취 전에 전문 역량을 갖춘 연구진이 내린다. 안전하고 과학적으로 실질적인 취급 경로를 확립하지 못했다면 양질의 관측을 남기면서 시료를 포기하는 것도 온전한 결과다.

허가 조건

책임자는 분석 질문을 정식화하고 기존 자료로 풀 수 없는 이유를 설명한다. 해당 분야 전문가는 추정 성질과 위험을 평가하고, 수령 실험실은 이용 가능한 절차를 확인하며, 안전 조정자는 모든 단계의 취급을 검토한다. 생물학적 맥락에서 BMBL은 위험을 작용 인자, 재료와 활동 자체에 연결한다. 방법을 바꾸면 필요한 조치가 달라질 수 있다 [44]. 이 원칙은 어떤 미지 물질이든 취급할 수 있는 만능 허가가 아니다. 과제와 기관의 역량을 구체적으로 기술할 것을 요구한다.

발송 전에 식별자, 예상 상태, 허용 용기와 책임 수령자를 합의한다. 운송 조건과 의무 요구는 재료의 실제 범주와 적용 관할에 따라 유자격 전문가가 정한다. 이 책은 이를 «이상현상 시료»라는 가상 표지로 대신하지 않는다. 초기 정보가 허용 취급을 정하기에 부족하면 추가 채취를 보류한다. 물체를 닫힌 상자에 넣는다고 미지가 사라지지 않는다. 명시적으로 기술하지 않으면 다른 사람에게 옮겨질 뿐이다.

기원과 변환의 연쇄

현장에서 각 시료에 변하지 않는 식별자를 부여하고 구역의 전체 기록과 연결한다. 시각, 위치, 방향, 관찰 상태, 수행자, 바로 그 부분을 선택한 근거를 기록한다. 추가 위험 없이 촬영할 수 있다면 영상은 원래 대상과의 연결을 보여 주어야 한다. 부분으로 나누면 연결을 보존하는 하위 식별자를 만든다. 파일 이름 변경이나 실험실 내부 번호 부여가 이 이력을 끊어서는 안 된다.

인계할 때마다 발송자, 수령자, 시간과 포장의 실제 상태를 기록한다. 불일치는 조용히 고치지 않고 별도 사건으로 기술한다. 기록부에는 보관 상태 변경, 처리, 개봉, 분할과 재료 소모를 포함한다. 소유자 목록뿐 아니라 변환의 순서가 중요하다. 처리 뒤 측정했다면 결과는 처리된 상태에 해당한다. 처리 전 상태에 관한 가정에는 별도 근거가 필요하다.

대조 구성은 불순물이나 변화의 가능한 발생원에 맞춰 선택한다. 용기 대조는 용기의 기여를, 이동 대조는 경로상 사건의 일부를, 전처리 대조는 실험실 절차의 작용을 보여 준다. 반복 분량은 불균질성 검증에 유용하지만 독립적인 원래 대상은 아니다. 대조의 내용과 수는 과제와 행동의 허용 가능성으로 정당화한다. 많은 시료도 어디에서 얻어 어떻게 변했는지에 관한 기록 부재를 보완하지 못한다.

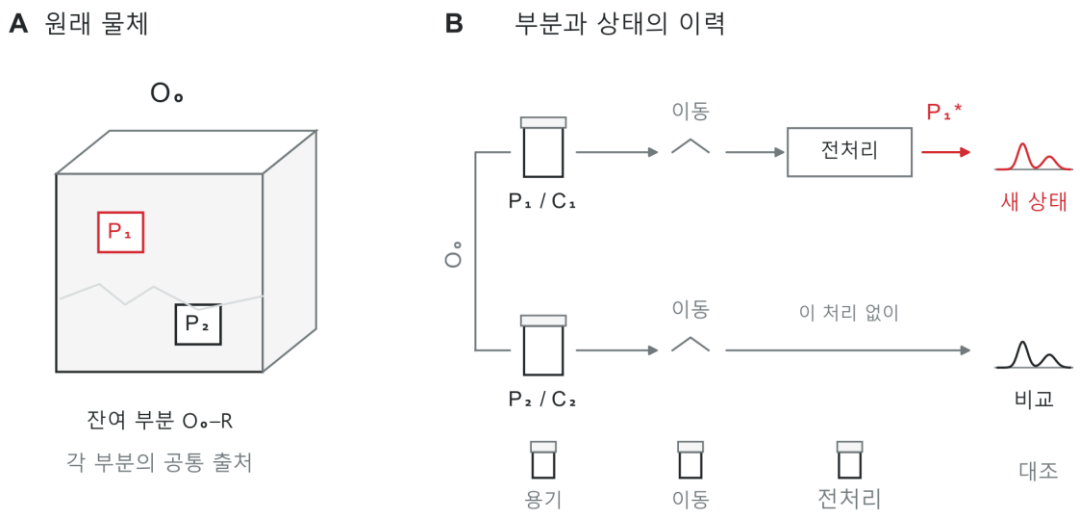


그림 22. 시료 지도, 분할한 부분들과 상태 변화. 원래 대상 O_0, 분할한 부분 P_1과 P_2, 잔여물 $O_0–R$의 학습용 지도다. 이력은 각 부분과 용기, 이동, 이후 상태의 연결을 보존한다. P_1*는 준비 처리 뒤의 부분을 뜻하며, 개념적인 응답 표시는 스펙트럼 자료가 아니다. 용기, 이동, 준비 처리의 대조는 서로 다른 단계에 속한다. 한 대상의 두 부분이 독립적인 원래 대상들로 바뀌지는 않는다. 이 그림은 미지 물질의 취급 방법을 정하지 않는다.

안전한 처리와 특징의 보존

WHO는 구체적인 조건에 맞는 오염 제거 공정의 선택과 검증이 필요함을 강조한다. 재료 성질과 실제 수행이 결과에 영향을 준다 [39]. 따라서 연구 경로에서는 지정한 공정, 수행 증거와 효과 검증을 구별한다. 겉으로 깨끗한 모습이 마지막 검증을 대신하지 않는다. 동시에 처리가 어떤 분석적 성질을 바꿀 수 있었는지 기록한다. 증거 보존은 필요한 안전을 포기할 것을 요구하지 않는다. 잃어버린 추론 가능성을 솔직하게 명시할 것을 요구한다.

가설이 과도 상태에 관한 것이라면 채취 전, 허용된 이동 중과 수령 후의 동시 기록 계획이 유용하다. 시간 표지에는 시계뿐 아니라 지지 변경, 용기 닫힘, 측정 시작 같은 실제 사건도 기술한다. 자료가 충분하면 이 순서로 이동 중 효과 소멸과 자연 감쇠를 구별할 수 있다. 소멸 자체가 현상의 장소 종속성을 입증하지는 않는다. 조건 변화나 관측 감도 상실이 원인일 수 있다.

중단과 물질 자료의 최종 처리

유지 기능 훼손, 시료의 예상 밖 변화, 합의 조건과의 불일치 또는 안전하게 받을 가능성의 상실 시 작업을 중단한다. 식별 문제라면 추측으로 재료 이름을 바꾸지 않고 결정이 내려질 때까지 추적성이 훼손된 대상으로 보존한다. 계속하는 것이 위협을 만들면 정해진 대응 계획이 행동을

결정한다. 자료 관리자는 어떤 기록이 여전히 신뢰 가능한지 남긴다. 책임자는 측정열을 끝내기 위해서만 이동을 계속하라고 요구하지 않는다.

학습 상황을 보자. 이례적인 표면 침착물이 운송 뒤 색을 잃고 실험실 분석에서는 통상적인 성분만 나온다. 이력이 없으면 처음 관찰을 반박한 듯 보인다. 전체 경로는 분석 전에 조명, 표면 상태와 처리가 바뀌었음을 보인다. 올바른 결론은 연구한 상태에서 원래 특징이 재현되지 않았다고 말하고 가능한 원인을 열거한다. 최초 색의 검증은 별도 과제로 남는다. 실험실 결과에 선택한 취급 경로가 제공할 수 없었던 증거력을 부여하지 않는다.

시료의 최종 상태에는 소재지, 후속 취급 조건, 잔량, 허용 연구와 책임 관리자를 포함한다. 폐기, 인계나 장기 보관은 문서화한 근거를 가진 별도 결정이다. 자료 보관소는 결론의 한계를 복원할 수 있다면 재료를 잃은 뒤에도 과학적 가치를 유지할 수 있다. 좋은 보관 이력만으로 미지의 시료가 안전해지지는 않는다. 변화, 책임과 아직 답할 수 있는 질문들이 드러나게 된다.

반출 물품 대장

집계 경계는 과학 시료 목록보다 넓다. 작업 후 연구 장소를 떠나는 것은 홀더, 센서 하우징, 포장, 대조 물질, 분리 가능한 저장장치, 준비 과정의 잔여물일 수 있다. 그 중요성은 물건을 시료라고 부르는지가 아니라 가능한 전달 경로와 상태로 정해진다. 사례의 성격상 접촉 이력이 중요한 모든 물건을 대장 Ж5에 넣는다. 그렇다고 모든 장비가 오염되었다고 선언할 근거가 되는 것은 아니다. 확인된 접촉, 가정된 전달, 평가의 부재는 서로 다른 상태다.

이동 전에 관리자는 물품을 원래 기록에 대조하여 식별자, 구성품의 완전성, 사용 장소와 관찰한 변화를 확인한다. 해당 분야 전문가는 다음 취급에 필요한 상태 정보를 정한다. 수령자는 명시한 구성의 바로 그 물품을 받을 수 있음을 확인한다. 시료 하나에 대한 실험실 허가는 홀더, 잔여물이나 변경된 포장으로 확대되지 않는다. 자료의 전자 전송은 저장 매체 운송과 별도로 다룬다.

1. 반출 단위마다 출처, 관련 시료와 작업을 기록한다. 새 부분들에는 하위 식별자를 부여한다.

2. 예정 경로를 현재 지도와 수령 조건에 대조한다. 연구 대상 상태를 이미 바꾼 작업은 별도로 표시한다.

3. 수령자가 거부하면 즉흥적으로 고른 다른 주소로 물품을 보내지 않는다. 현재 구성을 책임지는 사람과 후속 취급을 재검토한다.

4. 물품이 빠졌으면 마지막 확인 기록과 가능한 이동 방향을 확정한다. 계산에서 빠졌다는 사실을 물질이 사라졌다는 주장으로 대신하지 않는다.

5. 행은 구체적인 상태로만 마감한다. 인수 확인을 받고 전달했음, 지정된 책임 아래 남아 있음, 근거 있는 절차로 처리했음, 또는 위치를 확인하지 못해 분석을 위해 넘겼음 중 해당 상태를 기록한다.

가상 학습 예를 보자. 시료 П1은 실험실이 받았지만 홀더 Д1은 다른 운용 상태에서 사용되었고 신청서에 기술되지 않았다. П1의 수령 확인이 Д1을 일반 도구와 함께 포장할 허가는 아니다. 대장에서 홀더는 미평가 상태와 지정 관리자를 가진 별도 물품으로 남는다. 추가 검증이 과학 질문에 필요하지 않아도 허용 취급 결정이 면제되지는 않는다. 물품 계산은 자료 분석 완료가 아니라 물품에 대한 책임으로 마무리된다.

제VII부

지각과 정보

제32장

사라진 시간과 기억의 단절

«이십 분이 사라졌다»는 보고에는 여러 가능한 주장이 들어 있다. 일어난 일을 기억하지 못하거나, 구간을 더 짧게 느끼거나, 영상 기록의 공백을 찾거나, 시계 불일치를 볼 수 있다. 이 사건들은 다른 검증이 필요하다. 자료가 나오기도 전에 시간 이상현상이라는 이름으로 묶으면 거짓 공통 원인을 만들게 된다. 첫 과제는 질문을 정확히 복원하는 것이다. 어떤 양이 변했고 누가 알아차렸으며 무엇과 비교했는가? 제안한 설명을 확인할 수 있는지와 관계없이 경험 자체는 기록할 가치가 있다.

생리 상태에 따라 명료한 체험, 이례적인 감각, 제한된 신체 조절이 함께 나타날 수 있다. Takeuchi와 동료들의 실험실 연구에서는 참여자 열여섯 명에게서 단독 수면마비 에피소드 여섯 건을 기록했다. 수면다원검사 자료를 통해 이를 수면과 각성 사이 전이의 특징과 연결할 수 있었다 [46]. 이는 제한된 실험적 근거다. 어떤 수면 상태를 들기만 하면 여러 시간의 기억이 없다는 보고가 설명되는 것은 아니다. 물리적 시간의 한 구간이 사라졌다고 입증된 것으로 여길 근거는 더욱 아니다.

다른 연구는 행동에서 나타나는 미세수면을 뇌 활동, 눈 운동, 과제 수행의 동시 기록과 비교했다. 관찰한 짧은 반응 중단에는 측정 가능한 생리적 대응이 있었다 [47]. 연구 프로토콜에서 중요한 것은 자료를 구분하는 방식 자체다. 참여자의 보고, 관찰된 행동, 생리 기록을 비교하되 서로 대체하지 않는다. 영상에서 움직이지 않는다고 수면이 확립되지는 않는다. 반응이 없다는 사실은 기억을 측정하지 않으며, 기억의 공백은 시계가 어긋난 양을 보여 주지 않는다.

독립적인 네 재구성 경로

저자의 프로토콜은 사람에게 도움을 제공하고 상태를 악화시킬 수 있는 행동을 중단한 뒤 시작한다. 연구 책임자는 참여자에게 추가 부담 없이 통상적인 상황 기록이 가능한지 정한다. 안전 조정자는 면담을 중단할 권한이 있고, 해당 분야 전문가는 자신의 역량 범위에서 건강 상태 문제를 판단한다. 운용자는 현장을 기록하고 자료 관리자는 원기록을 받는다. 연구 면담이

필요한 도움을 늦추거나 참여자가 사건 반복을 얼마나 견딜 수 있는지 시험하는 일이 되어서는 안 된다.

첫 경로는 기억을 기술한다. 마지막으로 확실히 기억하는 순간, 그다음 처음 기억하는 순간, 지속 시간 추정의 출처와 세부 사항별 확신 정도다. 둘째는 독립 기록으로 관찰 가능한 행동을 복원한다. 셋째는 참여자 상태와 동의하에 얻은 이용 가능한 생리 자료에 관한 것이다. 넷째는 장치의 시간 척도를 검증한다. 경로마다 확실한 관측 구간, 불확실한 구간과 나중에 생긴 정보를 표시한다. 공백 경계의 일치는 흥미롭지만 먼저 모든 기록기의 전원 중단 같은 공통 발생원을 점검해야 한다.

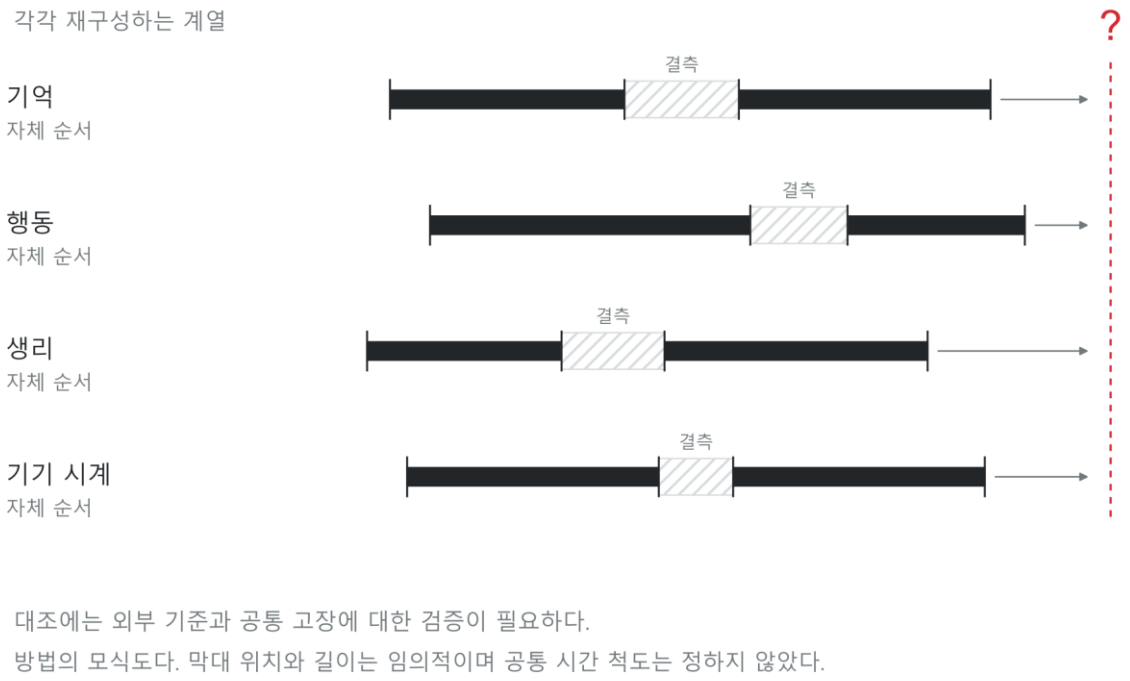


그림 23. 한 에피소드를 재구성하는 네 경로. 방법의 도식이다. 기억, 관찰된 행동, 생리 기록, 장치 시계에는 각각 고유한 관측 범위가 있다. 띠의 위치와 길이는 개념적이다. 이 그림은 공백의 지속 시간을 정하거나 공백들이 동시에 생겼음을 확립하지 않는다. 붉은 점선은 확인된 연결이 아니라 외부 시간 기준과 공통 고장 원인에 관한 질문을 나타낸다.

1. 추정 원인을 암시하지 않고 최초의 자유로운 설명을 기록한다. 진술 날짜와 상황을 보존한다.
2. 이용 가능한 기록의 원본을 받고 시간 표지 생성 방식을 확인하며 빠진 조각을 표시한다.
3. 기억, 행동, 생리와 계기 시간을 별도 경로로 구분한 전체 시간표를 작성한다.
4. 불일치를 해당 분야 전문가에게 넘긴다. 계속하면 부담이 생기거나 준비되지 않은 개입이 필요하면 기록을 마친다.

여러 목격자의 면담은 최초의 개별 설명을 보존하도록 진행한다. 기억에 대한 실험 연구들은 사건 토론이 참여자의 후속 보고를 바꿀 수 있음을 보인다 [1]. 따라서 프로토콜에서는 보고 내용과 진술자 수뿐 아니라 정보 교환 이력도 중요하다. 다른 사람의 세부 사항을 진심으로 반복할 수도 있다. 추궁하는 말투는 방해가 된다. 연구 대상은 정보의 출처이지 사람에 대한 도덕적 평가가 아니다. 나중의 정정은 보관소에서 지우지 않고 변경 시점과 이유를 붙여 추가한다.

학습 사례 분석

가상 학습 상황을 보자. 직원이 짧게 쉰 뒤 예상보다 십칠 분 늦은 시각이 되어 있었다고 보고한다. 실내 카메라에도 공백이 있다. 첫 가정은 두 사실을 하나의 작용에 연결한다. 점검 결과 앱은 연속 촬영 척도가 아니라 내보낸 영상 조각의 생성 시각을 표시하고 있었다. 출입 게이트 기록부와 독립 조명 기록기는 누락 없이 이어진다. 그러나 이들은 직원의 내적 상태를 기록하지 않으므로 영상 공백의 설명이 경험을 자동으로 설명하지는 않는다.

이 분석의 결과는 나누어 서술한다. 제공한 영상의 공백에는 기술적 설명이 있다. 물리적 시간이 실제로 빠졌다는 주장은 이용 가능한 기기로 확인되지 않았다. 주관적 공백의 사정은 여전히 충분히 정해지지 않았다. 추가 연구는 질문이 명확하고 참여가 자발적일 때에만 허용된다. 더 설득력 있는 사례를 얻겠다고 다시 수면을 방해하도록 제안해서는 안 된다. 자료가 부족하다면 억지로 고른 진단이나 환상적인 설명 대신 한계의 지도를 완결된 결과로 삼는다.

물리적 시간 가설에는 시간 절에서 설명한 검증을 견디는 양성 계기 결과가 필요하다. 경험을 연구하려면 다른 질문을 올바르게 설정하면 된다. 주관적 순서의 변화에 어떤 조건이 동반되었는가? 두 방향은 병행할 수 있다. 구별을 유지하면 증언의 존엄을 지키면서 증언에 없는 증거 부담을 지우지 않게 된다. 사례 분석의 결과는 무엇을 직접 확립했고 무엇을 재구성했으며 어떤 새 자료가 실제로 결론을 바꿀 수 있는지 보여 주어야 한다.

서로 양립하지 않는 증언의 행렬

진술이 엇갈리면 먼저 각 증언을 개별 주장으로 나눈다. 주장마다 대상, 행동, 장소, 구간과 지식의 출처를 기록한다. «문이 열리는 것을 보았다»와 «문이 열려 있었다고 전해 들었다»는 서로 다른 행에 들어간다. 목격자의 확신은 진술의 특성으로 남기며 관측 범위 검증을 대신하지 않는다. 최초 설명들은 공동 토론 전에 기록하고, 이후의 변화는 새 정보를 얻은 이력과 연결한다.

학습 사례의 주장	이용 가능한 자료	범위 및 제한	중간 결론
목격자 A가 사람이 들어가는 것을 보았다	진술의 최초 기록	기억으로 추정한 시각; 목격자는 몇 분의 구간을 제시하며 그 정확도는 독립적으로 확인되지 않았다	들어갔다는 증언은 남는다; 정확한 시점은 모른다
카메라에는 들어가는 모습이 없다	출입 구역 영상	선택한 영상 조각의 40초부터 55초까지 기록이 없다	누락 구간에 들어가지 않았다는 것은 확립되지 않았다
문 센서가 펄스 두 개를 냈다	센서의 국소 기록 순서	공통 시간 척도와의 연결이 확인되지 않았다; 접점 채터링 가능성이 있다	지시값 두 개는 확인했다; 통과 횟수는 정해지지 않았다
목격자 B가 영상을 본 뒤 시각을 정정했다	이야기의 두 버전	후속 설명은 보여 준 영상에 의존한다	정정은 독립적인 확인이 아니다

다음 측정은 구체적인 공백에 맞춰 선택한다. 통과 횟수가 핵심 질문이면 센서의 감도와 펄스 통합 규칙을 검증한다. 외부 사건과의 순서가 필요하면 독립적인 시간 연결을 찾는다. 모든 자료를 보여 준 뒤 재면담하면 해석을 이해하는 데 도움이 될 수 있지만 최초의 독립 관찰을 재현하는 것은 아니다. 모순은 진술 수에 따른 다수결로 해소되지 않는다.

이력 변화의 가정 모형은 어떤 기록이나 상태가 왜 보존되는지 정해야 한다. 가능한 모든 흔적을 완전히 임의로 바꾼다면 설명안 사이의 관측 가능한 차이가 정해지지 않는다. 제한된 변화라면 영향을 받는 채널과 보존되는 채널을 비교하고 실제 독립성을 검증하며 구별 예측을 계산하는 과제가 생긴다. 이런 공준은 가정임을 표시한다. 진술 불일치 자체가 이를 확인해 주지는 않는다.

제33장

존재감과 유체이탈 경험

형체를 보거나 목소리를 듣지 않아도 누군가 있다는 느낌은 뚜렷할 수 있다. 반면 유체이탈 경험은 자기 몸을 지각하는 시점의 위치를 바꾼다. 두 경우 모두 최초 기록 대상은 경험의 구성이다. 관찰자가 어디에 있다고 느끼는지, 행동을 누구에게 귀속하는지, 어떤 징후로 다른

존재를 말하는지다. 자세한 기술은 추정 발생원에 즉시 이름을 붙이는 것보다 연구에 더 도움이 된다. 경험의 확실함과 그 외부 원인의 확립은 서로 다른 질문이다.

Ehrsson의 실험 연구는 시각적 시점과 신체 신호를 조율하여 조작할 때 경험되는 자기 몸의 위치를 바꿀 수 있음을 보였다 [48]. 이는 자기 위치감의 구성 요소를 연구할 방법을 준다. 의식이 신체에서 분리되는 것을 측정하지 않으며 실험실 착각이 모든 자발적 사례와 동일함을 입증하지도 않는다. 모형의 실무적 가치는 경험의 일부 조건을 조절하고 대조 상태와 비교할 수 있다는 데 있다.

누군가 있다는 느낌에 관한 로봇 연구는 사람의 운동과 되돌아오는 신체 신호 사이의 불일치를 이용한다. Bernasconi와 동료들의 연구에서는 파킨슨병 환자를 포함해 이 절차가 감각운동 처리의 특징과 연결되었다. 추가 자료는 별도의 임상 표본에서 얻었다 [49]. 2026년에 발표한 통합 분석은 저자들이 수행한 실험 스물다섯 건, 총 참여자 561명을 포괄했다 [50]. 이는 구체적 모형의 경험적 기반을 넓히지만 독립적 외부 검증과 다른 상황으로의 신중한 적용 필요성은 유지된다.

성급한 진단을 피하는 기술

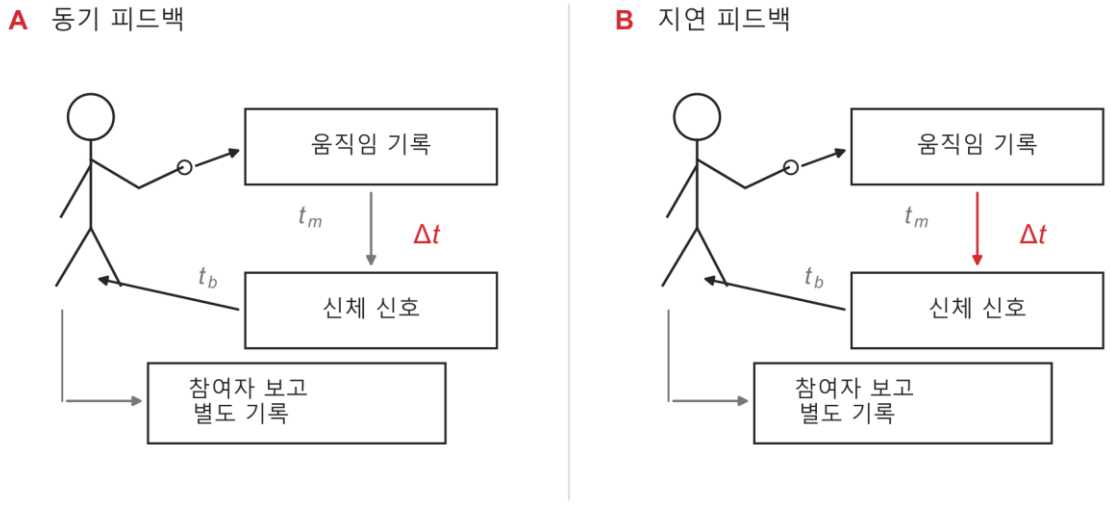
저자의 최초 기술 절차는 세 층을 구별한다. 첫째는 방향, 거리, 운동, 지속 시간과 신체 내 위치처럼 경험의 직접적 성질이다. 둘째는 계기 지시값을 포함한 관측 가능한 외부 사건이다. 셋째는 «관찰했다», «경고했다», «제어했다» 같은 해석이다. 마지막 층도 상황 이해에 중요하므로 기록에서 빼지 않지만 참여자의 결론으로 표시한다. 확인 질문은 이 결론의 근거를 묻는다. 그것이 참이라면 정확히 어떤 사건이 예상되며 어떤 사건은 예상되지 않는가?

최초 면담은 실체를 확인하거나 질병을 입증하겠다고 약속하지 않는 훈련된 전문가가 진행한다. 자료 관리자는 합의한 접근 방식을 보장한다. 개인적 경험을 식별 정보와 함께 기본적으로 공개해서는 안 된다. 심한 어려움이 나타나면 과학 계획보다 전문 경로를 통한 도움을 우선한다. 연구 재개에는 별도 결정이 필요하고, 대화 동의가 감각의 실험적 유도에 대한 동의는 아니다. 참여자가 원정대원이기도 하여 업무상 압박을 느낄 수 있을 때 이 경계가 특히 중요하다.

통제 연구는 구체적인 가설, 검증된 절차 안전과 참여자 요청에 따라 멈출 수 있는 가능성이 있을 때 허용된다. 계측 전문가는 소프트웨어 명령뿐 아니라 실제 지연, 이동과 자극 방식을 기록한다. 운용자는 가능하면 예상 답을 모른 채 지정 순서를 수행한다. 평가자는 조건 정보 없이 보고를 받는다. 주 지표는 임의로 고른 가장 인상적인 문구가 아니라 미리 기술한 경험의 빈도처럼 사전에 정한다. 결과는 시험한 범위 안에서 조건과 지표 사이의 연결이다.

장비가 실제로 측정하는 것

생리 채널은 신체 상태에 대한 특정 질문에 답할 때 유용하다. 경험과 동시에 반응한다는 이유만으로 외부 주체의 검출기가 되지는 않는다. 마찬가지로 카메라는 영상 변화를 확인할 뿐 감각의 기원을 확인하지 않는다. 로봇 시험 장치는 감각운동 모형을 검증하지 보이지 않는 대화 상대의 존재를 검증하지 않는다. 기록마다 결론의 대상을 명시해야 한다. 한 채널이 운동을, 다른 채널이 참여자 보고를 기술하면 그 일치는 운동과 보고 사이의 특정 관계를 확인하며 임의의 제삼 실체를 확인하지 않는다.



$\Delta t = t_b - t_m$ – 측정 지연; 수치는 정하지 않았다.
검증 원리의 모식도다. 특정 실험의 장치를 재현하지 않는다.

그림 24. 감각운동 연결과 참여자의 별도 보고. 신체 신호를 움직임과 맞추어 되돌려 주는 경우와 지연시켜 되돌려 주는 경우의 방법 도식이다. Δt는 운동과 신호 반환 사이에서 실제로 측정할 지연이며, 여기에 정해 놓은 수치가 아니다. 참여자의 보고는 별도 채널로 기록한다. 이 그림은 감각운동 검증의 원리를 보여 준다. 특정 실험의 구성을 재현하거나 체험의 외부 원인을 제시하지 않는다.

추가로 운용자의 존재, 장치 상태와 관찰자가 결과를 볼 수 있는지를 분리해 검증하면 유용하다. 그러나 어떤 차이든 «관찰자 효과»를 완성된 설명으로 도입해서는 안 된다. 먼저 소리, 대기 시간, 실험자 운동, 질문 순서나 기록 처리 등 물리적으로 무엇이 바뀌었는지 기술한다. 대조 뒤에도 차이가 남으면 새 실험이 필요하다. 구체적인 변수를 «의식»이라는 말로 바꾸어도 불확실성이 줄지 않으며 후속 연구 계기를 고를 수도 없다.

학습 시나리오와 추론의 한계

가상 학습 상황을 보자. 로봇 시스템의 특정 모듈이 지연 작동할 때 시험 참여자들은 뒤에서 사람이 다가오는 느낌을 받는다. 독립 기록기가 지연을 확인하지만 숨겨진 대조 회차들은 감각과 운용 상태 명칭 사이의 최초 연결을 약화한다. 일부 참여자는 특징적인 전환 소리를 단서로 삼았음이 드러난다. 소리 조건을 같게 한 뒤 효과는 줄지만 일부 조건에서 유지된다. 이제 검증할 요소는 둘이다. 이용 가능한 단서와 감각운동 불일치의 가능한 영향이다. 어느 것도 진술만으로 사람을 진단할 수 있게 하지는 않는다.

보고서에는 초기의 과대 추정을 포함한 두 단계를 모두 남겨야 한다. 최종 실험의 감도가 부족하면 경험이 없다고 주장하지 않고 불확실성으로 결론을 한정한다. 연결이 재현되면 조건, 범위와 예외를 함께 기술한다. 행위주체성 질문으로 넘어가려면 외부 응답, 사전에 정한 정보 내용과 통상 채널 점검이라는 다른 연구 계획이 필요하다. 이렇게 하면 내적 경험의 기술을 독립적으로 행동하는 발생원의 증거와 혼동하지 않으면서 이례적인 것에 대한 개방성을 유지할 수 있다.

제34장

실내에서 느끼는 이례적인 감각

실내 공간에는 여러 작용과 기대가 모인다. 빛, 소리, 온도, 통로 배치, 장비 작동과 장소의 과거 이야기는 같은 상황에 속하지만 반드시 공통 원인을 갖는 것은 아니다. 따라서 «무거운 분위기»라는 호소는 여러 검증의 출발점이 된다. 하나는 알려진 위험 요인, 다른 하나는 지각의 질, 또 하나는 구체적으로 기록한 편차에 관한 것이다. 방을 나간 뒤 인상이 달라졌다고 어느 경로가 관찰을 설명하는지 정해지지는 않는다.

Haunt 프로젝트에서는 참여자 일흔아홉 명이 시험한 전자기장과 초저주파음의 여러 조합 아래 특별히 구성한 방에 머물렀다. 저자들은 이 조건들에 따른 이례적 감각의 수가 예상대로 달라진다는 결과를 찾지 못했다. 실험자들은 배정된 상태를 알고 있었으므로 연구가 완전한 이중맹검은 아니었다 [51]. 약하고 복잡한 자기장에 대한 별도 이중맹검 검증에서도 예상한 존재감 효과는 확인되지 않았다 [52]. 이 결과들은 구체적인 설명을 제한하며, 모든 물리적 영향이 보편적으로 무해함을 확립하지 않는다.

공간의 최초 점검

저자가 제안하는 프로토콜은 조사가 가능한지 판단하는 데서 시작한다. 안전 조정자는 사람들을 초대하기 전에 어떤 통상 위험을 배제해야 하는지 평가한다. 해당 분야 전문가는 요인별로 계기를 선택한다. 적합한 측정기가 없다고 감도를 모르는 가정용 장치로 대신하지 않는다. 오염물질 측정 현장 지침은 센서의 교정, 선택성과 작동 조건의 중요성을 강조한다 [31]. 따라서 낮은 지시값은 해당 질문에 대한 전체 측정 경로의 적합성을 확인했을 때만 의미가 있다.

추가 장비를 켜기 전에 작동 중인 설비, 문 위치, 조명, 이용 가능한 환기 정보와 관측 시간 등 실내 상태를 기록한다. 이 목록은 존재하는 모든 것을 수집하려는 시도가 아니다. 선택한 측정이나 안전에 영향을 줄 수 있는 변수를 기술한다. 이어서 안정적인 표기를 갖춘 관측 지점 지도를 만든다. 센서 재배치는 더 인상적인 그래프를 얻으려는 은밀한 시도가 아니라 조건 변화로 기록한다. 장비가 사람 없이 작동할 수 있다면 사람이 없는 기간도 유용하다.

책임자는 주 검증 관계를 선택한다. 예를 들어 압박감 보고가 특정 저주파 신호와 일치한다고 가정한다. 그러면 결합 자료를 보기 전에 일치 시간 창, 보고 기록 방식과 음향 사건 평가 규칙을 정한다. 실패 뒤 창을 넓히는 것은 탐색 분석으로 허용하되 결과의 지위가 달라진다. 그렇지 않으면 어떤 감각이든 가장 가까운 진동과 연결할 수 있고, 미리 정한 경계가 없어 가설은 사실상 검증에 흔들리지 않게 된다.

환경과 기대의 통제

두 방의 비교에는 «대조실»이라는 표지 이상이 필요하다. 한쪽이 더 어둡고 차며 웅웅거린다면 보고의 차이에서 원인 하나를 분리할 수 없다. 대조는 질문에 맞춰 구성한다. 같은 방의 서로 다른 기간, 합의한 안전 운용 상태 또는 차이를 기술한 공간들을 비교한다. 조건을 같게 만들 수 없으면 그 제약을 결론에 포함한다. 복잡한 자연 환경의 강한 상관관계는 유용한 가설을 줄 수 있지만 방문자가 많다고 통제 실험이 되지는 않는다.

기대 연구에는 윤리적으로 허용 가능한 설계가 필요하다. 중립적 안내는 유도되는 심상의 수를 줄이지만 사전 지식을 없애지는 않는다. 사전 지식은 올바른 믿음에 대한 시험으로 만들지 않고 따로 확인한다. 자유 진술에는 미리 정한 척도를 보완하되 «이례적인 것이 없었다»고 답할 가능성을 남긴다. 인상적인 이야기의 수로 절차 성공을 평가해서는 안 된다. 평온한 회차, 참여 거부와 주관적 사건 없이 계기 신호만 나타나는 경우도 그에 못지않게 많은 정보를 준다.

환경을 적극적으로 바꾸는 것은 새 운용 방식이다. 제한된 질문, 검증된 장치와 독립적인 안전 근거가 필요하다. 이 책은 사람에게 직접 만든 장치로 조사하거나 강한 음향 작용을 가하는 것을

전제하지 않는다. 조건이 합의 범위를 벗어나거나 제어를 잃거나 참여자가 요청하면 운용자는 절차를 중단한다. 물리적 요인을 사람 없이 안전한 기술적 대응물에서 연구할 수 있으면 먼저 그 경로를 쓴다. 불필요한 노출을 피하면 위험이 줄고 측정 과제도 단순해진다.

학습 시나리오

가상 학습 상황을 보자. 문서 보관실에서 방문자들이 어깨 뒤의 움직임을 자주 느낀다. 최초 기록에서는 경험이 팬의 웅웅거림과 일치한다. 독립 기록기를 설치하자 밝은 화면 쪽으로 돌아본 뒤 보고가 더 자주 나오며 웅웅거림은 평온한 기간에도 이어짐이 드러난다. 이 정보는 시각 조건, 기대와 기계적 신호라는 여러 설명을 제안한다. 아직 어느 것도 인과적으로 분리하지 못했다. 안전한 조명 비교에서 보고 빈도가 변하지만 참여자 간 차이는 남는다.

이 연구의 완결된 보고서는 발견한 의존성과 한계를 기술한다. 공간을 완전히 연구했다고 선언하거나 이전 방문자의 진실성을 평가하지 않는다. 운영 결정에는 유자격 전문가가 검증한 알려진 위험 요인, 허용 조건과 변화 뒤 재조사 책임자를 따로 명시한다. 과학 결과는 최초 이야기보다 소박해도 행동에는 더 유용할 수 있다. 무엇을 바꾸고 다음에 무엇을 측정하며 보유 자료가 아직 어떤 결론을 허용하지 않는지 명확해지기 때문이다.

제35장

디지털 이상과 자동 분석의 한계

파일의 이례적인 조각은 긴 사슬의 마지막 부분에 나타난다. 사건이 센서에 작용하고 신호는 변환, 전달, 저장과 분석을 거친다. 어느 단계의 오류든 화면에서 설득력 있는 모습이 될 수 있다. 따라서 디지털 이상현상은 처음에는 자료의 편차를 뜻한다. 주장을 외부 세계로 확대하려면 기록의 출처를 복원해야 한다. 복잡한 처리 뒤에만 존재하고 원신호로 돌아가면 사라지는 결과는 특히 조심해서 다루어야 한다.

검출 알고리즘은 데이터를 기대 행동의 지정된 모형과 비교한다. 편차의 원인을 몰라도 유용할 수 있다. 그러나 바로 그렇기 때문에 특이성 지표가 높다고 해서 새로운 물리학을 뜻하지는 않는다. NIST의 인공지능 위험관리 체계는 예정된 사용 조건에서 품질을 평가하고, 일반화의 한계를 문서화하며, 도입 후 시스템을 관찰하도록 요구한다 [53]. 이상 현상 연구에서는 이것이 구체적인 질문이 된다. 알고리즘은 어떤 배경에서 검증되었으며, 그 배경은 왜 현재 기록에 맞는가?

서로 다른 두 검증 수준

첫 수준은 알고리즘에 관한 것이다. 프로그램이 계산을 재현하는가, 입력이 정한 형식에 맞는가, 모형 버전과 매개변수가 보존되었는가? 둘째는 측정에 관한 것이다. 원채널에 신호가 있는가, 독립 관측과 부합하는가, 포화, 누락과 잘못된 시간 척도를 배제했는가? 계산이 정상이라고 측정의 정확성이 확인되지는 않는다. 반대로 필요한 사건 부류가 통상 상태의 표현에 포함되지 않으면 정상 프로그램도 실제 환경 변화를 놓칠 수 있다.

저자가 제안하는 프로토콜은 자료 관리자에게 원본 판본 보존을, 계측 전문가에게 기록 사슬 검증을, 분석 전문가에게 재현 가능한 계산 분석을 맡긴다. 책임자는 기록 순위화, 운용자에게 신호 제공 또는 특정 결정 지원이라는 시스템 목적을 정식화한다. 이 기능들을 은밀히 바꾸어서는 안 된다. 흥미로운 영상을 고르기에 적합한 알고리즘이 자동으로 개입 개시 권한을 얻지는 않는다. 위험한 결정에는 독립적인 확인과 미리 정한 사람의 검증 절차가 필요하다.

시험 자료에는 통상 기록, 알려진 인공 흔적, 안전하게 삽입한 대조 신호와 학습 때와 다른 조건을 포함한다. 인공 예시는 표시하여 실제 관측과 분리해야 한다. 이는 주어진 변화를 인식할 능력을 검증하며 미지의 현상의 존재를 검증하지 않는다. 조정과 최종 평가는 분리하는 편이 좋다. 매개변수를 고른 뒤의 시험 자료는 더는 개발자에게 미지라고 볼 수 없다. 같은 자료에서 결과를 반복 개선해도 새로운 독립적 확인이 생기지 않는다.

경보의 수와 정확도의 의미

가상 학습 상황을 보자. 안전한 시험 자료의 조각 일만 개에 대조 사건 열 개를 넣었다. 프로그램은 그중 아홉 개를 찾고 오경보 백 건을 추가로 냈다. 삽입 사건에 대한 감도는 높아 보이지만 보고 109건 중 시험 표적에 해당하는 것은 아홉 건뿐이다. 운용자는 통상적인 조각을 많이 살펴야 한다. 이 예는 전체 정답 비율 하나로 부족한 이유를 보여 준다. 검출, 오경보와 후속 검증 비용을 별도 지표로 제시해야 한다.

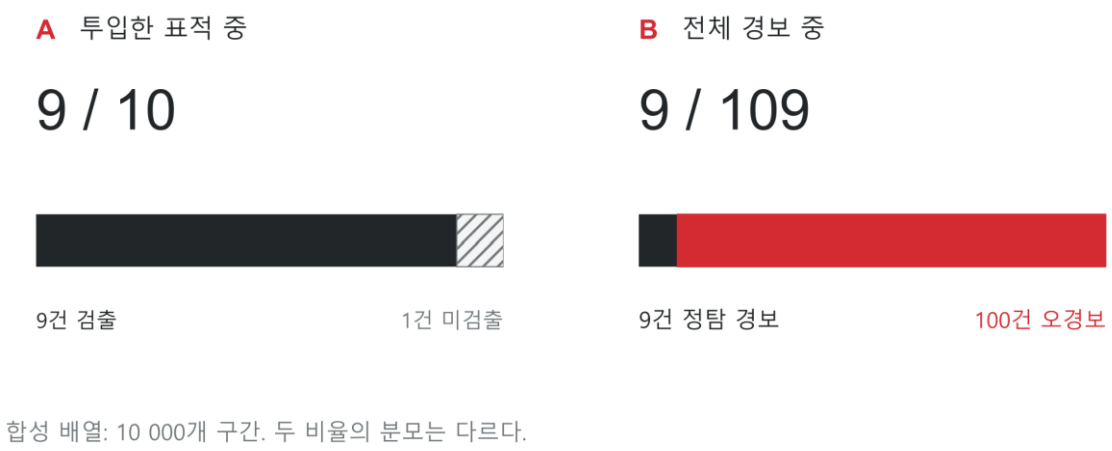


그림 25. 경보 109건 속 표적 아홉 개. 합성 자료를 사용한 학습 예다. 넣어 둔 표적 열 개 중 아홉 개를 찾았지만, 경보 109건 가운데 표적에 해당하는 것은 아홉 건뿐이다. 각 막대의 길이는 자기 분모를 기준으로 정규화했다. 원자료에는 조각 10 000개가 있다. 이 그림은 현실의 미지 사건이 얼마나 흔한지 추정하지 않는다.

문턱은 시연의 매력이 아니라 목적에 맞춰 선택한다. 개괄 탐색에서 허용할 수 있는 수동 검증량과 상시 감시에서 허용할 수 있는 양은 다르다. 실제 사건 빈도를 모르면 각 경보의 신뢰성을 미리 아는 것처럼 약속할 수 없다. 검증 자료에 없던 새 부류는 감도 자체가 미정일 수 있다. 이때 시스템의 실무 응답은 미확인 현상 이름을 자신 있게 붙이는 것이 아니라 검증 요청이나 분류 거부다.

여러 채널과 시간 창은 이례적인 수치를 얻을 기회를 많이 만든다. 거짓 발견 비율 통제를 포함한 통계 방법에는 특정 전제가 있으며, 원래 Benjamini–Hochberg 절차는 해당 통계량의 조건을 포함한다 [54]. 공식을 적용하기만 해서는 잘못된 배경이나 한 신호의 종속적 반복을 고치지 못한다. 프로젝트에서는 검증군과 의존성 고려 방식을 미리 정한다. 탐색 발견은 보존하되 규칙성을 주장하려면 새 자료를 요구한다.

자동화를 중단할 때

입력 형식 변화, 미지의 모형 버전, 필수 채널 누락, 시험 범위 이탈과 설명되지 않는 경보 급증은 적합성 상실 징후다. 이는 자동 의사결정을 중단할 근거이며, 기록이 안전하면 기록은 유지한다. 운용자는 전환 시점을 표시하고 전문가는 사본에서 원인을 검증한다. 새 필터로 경보를 몰래 억제한 뒤 조용해진 것을 작용 소멸의 증거로 삼아서는 안 된다. 필터 변경은 관측을 바꾸며 반드시 연구 환경을 바꾸는 것은 아니다.

최종 분석은 경보마다 원기록, 처리 버전과 검토자 결정을 연결해야 한다. 놓친 대조 사건, 미확정 사례와 적합한 자료가 없던 구간을 별도로 열거한다. 생성형 영상 개선은 명확한 표시가

있는 예시로만 허용한다. 생성한 세부 사항을 증거 자료에 되넣지 않는다. 디지털 시스템의 과학적 힘은 결론의 검증 가능성으로 정해진다. 처리가 복잡할수록 인상적인 결과에서 측정 신호로 되짚어 갈 가능성을 유지하는 일이 중요하다.

제36장

겉보기 행위성과 의미 있는 응답의 검증

관찰자가 신호열에서 자기 행동에 대한 답을 알아보면 신호가 자신에게 말을 거는 듯 보이기 시작한다. 그러나 응답과 우연의 차이는 감정적 설득력이 아니라 검증 조건에 있다. AG 부류에서는 입력 정보와 관측 출력 사이의 통제 가능한 연결을 연구한다. 제어계의 기원, 의식의 존재, 의도와 가능한 위험은 별도 질문으로 남는다. 메시지 처리를 신뢰성 있게 확립해도 발생원에 인간적 동기를 부여하거나 독립적인 존재로 선언할 수는 없다.

수동적인 기술에서 시작해야 한다. 응답 같은 일이 없었던 기간까지 포함하여 이용 가능한 전체 신호 흐름, 현장에 있는 사람들의 행동과 기록 조건을 남긴다. 성공한 사건만 골라서는 안 된다. 나머지 없이는 우연히 맞을 가능성을 모르기 때문이다. 이어 인식 규칙을 기술한다. 사례마다 규칙이 바뀌면 가설은 아직 확인 실험을 할 준비가 되지 않았다. 이는 허용되는 연구 단계이지만 결과를 이미 존재하던 코드의 검증으로 제시해서는 안 된다.

알아볼 수 있는 형상에서 검증 가능한 코드로

저자가 제안하는 프로토콜에서는 출력 사건의 기호 집합을 미리 정해야 한다. 예를 들어 구별할 수 있는 두 펄스 형태를 기록하고, 나머지 신호는 모두 별도의 불확실 범주에 둔다. 응답을 허용할 시간 창과 복수 응답, 침묵, 불완전한 기록의 처리 규칙을 정한다. 코드는 확인 실험 계열 전에 고정한다. 미리 예측한 결과와 나중의 해석을 구분하는 것은 사전등록의 목적에 부합한다[4]. 자료를 본 뒤 코드를 바꾸는 일은 새 가설을 만드는 데 허용되며, 그 가설은 이후 다른 자료로 검증해야 한다.

다음 질문은 입력에 관한 것이다. 추정 발생원이 받은 것은 정확히 무엇인가? 빛 자극, 디지털 메시지, 사람의 운동 아니면 통상적인 소리인가? 의미 이해를 주장하려면 의미에 대한 의존성과 외형 반응을 구별하는 시험이 필요하다. 큰 소리로 한 말마다 펄스가 뒤따르면 확인한 것은 음향 대응이지 질문 이해가 아니다. 다른 표현들이 같은 답을 내야 한다면 표현 집합과 평가 규칙을 미리 정한다. 양성 결과는 우선 관측한 기능을 기술한다.

허가 조건과 역할 분담

메시지를 능동적으로 보내려면 작용을 별도로 평가해야 한다. 소통 시도는 방출기 켜기, 장비 운용 상태 변경이나 사람의 접근이라는 물리적 개입이기도 할 수 있다. 행위주체성이 입증되지 않았다고 이 행동들의 통상 위험이 없어지지는 않는다. 책임자는 제한된 과제를 정식화하고, 안전 조정자는 선택한 채널과 중단 조건을 검토하며, 계측 전문가는 출력 사건의 구별 가능성을 확인한다. 안전한 입력 전달법을 모르면 기존 순서의 기록과 분석에 머문다.

확인 검증에서는 과제에 대한 지식과 결과 평가를 분리하면 유용하다. 한 참여자는 표적 메시지 목록을 보관하고 다른 참여자는 익명화된 출력 기록을 받는다. 운용자는 장치 위치, 억양이나 지연 변화로 정답을 암시하지 않는다. 자료 관리자는 자료 버전과 공개 시점을 기록한다. 기록 보호는 출처와 무결성을 포괄해야 한다. 검사합만으로는 계산 전에 바꿔치기가 없었다고 입증할 수 없다 [6]. 따라서 정보의 전체 경로를 검증한다.

정보 누출 점검에는 가능한 통상 연결, 작업 파일의 정보, 공통 화면, 네트워크 메시지와 사람의 행동을 포함한다. 목적은 주장한 기전 없이도 정답이 나올 수 있는 길을 찾는 것이다. 참여자를 비난하는 것이 아니다. 오히려 미리 합의한 검증은 이후 의도에 관한 논쟁으로부터 연구를 보호한다. 누출이 발견되면 누가 의식적으로 이용했는지와 관계없이 해당 측정열은 확인 검증의 지위를 잃는다. 원인을 제거한 뒤에는 새 자료가 필요하다.

가정 모형과 학습 예

가정 모형에서는 미지의 어떤 과정이 전달한 과제에 따라 두 답 중 하나를 고를 수 있다고 한다. 이 가정에서 과제를 전달한 측정열, 과제가 없는 측정열과 대조 전달 측정열 사이의 검증 가능한 차이가 나온다. 텔레파시, 호의나 적의를 전제하지 않는다. 응답이 일정에만 의존하면 정보 의존성 모형은 약해진다. 의존성이 새 과제에서도 유지되면 어떤 물질적 또는 기술적 경로가 이를 보장하는지 밝혀야 한다. 기능 검증이 그 매개체의 해석보다 앞선다.

가상 학습 상황을 보자. 눈에 보이는 네트워크 연결이 없는 단말기가 운용자에게 카드를 보여 준 뒤 올바른 기호를 출력한다. 최초 관측은 숨은 정보를 읽는 것처럼 보인다. 확인 측정열에서는 단말기의 초기 상태를 확정한 뒤 카드를 고르고 운용자와 평가자를 분리한다. 성공이 사라진다. 검증 결과 최초 카드 순서가 저장된 시험 순서와 일치했음이 드러난다. 이는 그 응답 생성 방식을 설명한다. 다른 기록은 지우지 않되 발견한 원인을 그대로 옮겨 적용하지 않고 별도로 분석해야 한다.

확인이 유지되면 보고서는 정확한 과제, 전체 시도 횟수, 평가 규칙, 불확실성과 수행한 대조 검증을 제시한다. 이를 «발생원이 답하고 싶어 했다»는 말로 대신해서는 안 된다. 응답 거부도

관측일 수 있지만 모든 음성 결과의 보편 설명은 아니다. 응답과 침묵을 모두 확인으로 보는 가설은 구별 능력을 잃는다. 후속 개발에서는 허용 결과를 끝없이 넓히지 말고 새로운 제약을 제안해야 한다.

채널 제어 상실, 합의 프로토콜 위반이나 참여자 상태 변화 시 작업을 중단한다. 결과는 발생원에 인격을 부여하는 것이 아니라 특정 조건에서 정보 의존성을 평가한 것이다. 이 규율은 이례적으로 조직된 행동도 진지하게 연구할 가능성을 유지한다. 또한 자신의 의도 해석을 미지 신호에 접근하거나 개입하거나 신뢰할 확실한 근거로 삼는 위험한 오류로부터 연구진을 보호한다.

행위자를 가정하지 않는 정보 의존성

연구할 의존성은 질문에 대한 답이나 대화 없이도 나타날 수 있다. 가정 모형에서는 정보의 기록, 제시, 접근 가능성이나 해석에 따라 물리 지표가 변한다. 이 경우들은 인과 구조가 다르다. 파일 기록은 저장 매체 작동을, 영상 표시는 빛을 바꾸고 읽기는 사람의 행동에 영향을 준다. 추가 연결을 도입하기 전에 각각의 통상 사슬과 측정 가능한 징후를 기술한다.

작업 구성은 물리적 매체 P, 사전에 정한 내용 범주 S와 운용자의 접근 A를 구별한다. 범주 S는 실험 전에 독립적인 규칙으로 정한다. 확인용 과제를 범주와 매개변수 선택에 사용하지 않는다. 자료의 밝기, 지속 시간, 파일 크기와 기호 배치 같은 물리적 특징은 별도로 기술한다. 이를 대략 같게 맞추었다고 모든 물리적 차이를 제거했다고 선언할 수는 없다.

요인 설계에서는 여러 조건을 바꾸고 그 조합을 평가할 수 있다. 세 요인에 대한 표준 이수준 설계에서는 조합 여덟 개를 다룬다. 설계표의 순서는 실제 시험의 무작위 순서와 다르다 [59]. 아래는 저자의 학습용 구성이다. 지표값은 계산 설명만을 위해 공식으로 정했으며 정보 작용에 대한 실험적 증거가 아니다.

$$Y = 10 + 2P + A + 1.5SA$$

P	S	A	지정한 지표 Y
−1	−1	−1	8,5
+1	−1	−1	12,5
−1	+1	−1	5,5
+1	+1	−1	9,5

P	S	A	지정한 지표 Y
−1	−1	+1	7,5
+1	−1	+1	11,5
−1	+1	+1	10,5
+1	+1	+1	14,5

이 구성에서 S의 수준 간 평균 차이는 영이지만 그 차이는 A에 의존한다. A = +1이면 S가 −1에서 +1로 바뀔 때 Y는 +3만큼, A = −1이면 −3만큼 변한다. 따라서 운용자 접근 조건에 대해 평균을 내면 요인 상호작용이 숨겨질 수 있다. 수치에는 측정 잡음 모형이 없으므로 지정값 여덟 개로 실험적 유의성을 평가할 수 없다. 시험에는 반복 블록, 새 자료와 미리 고른 변동 모형이 필요하다.

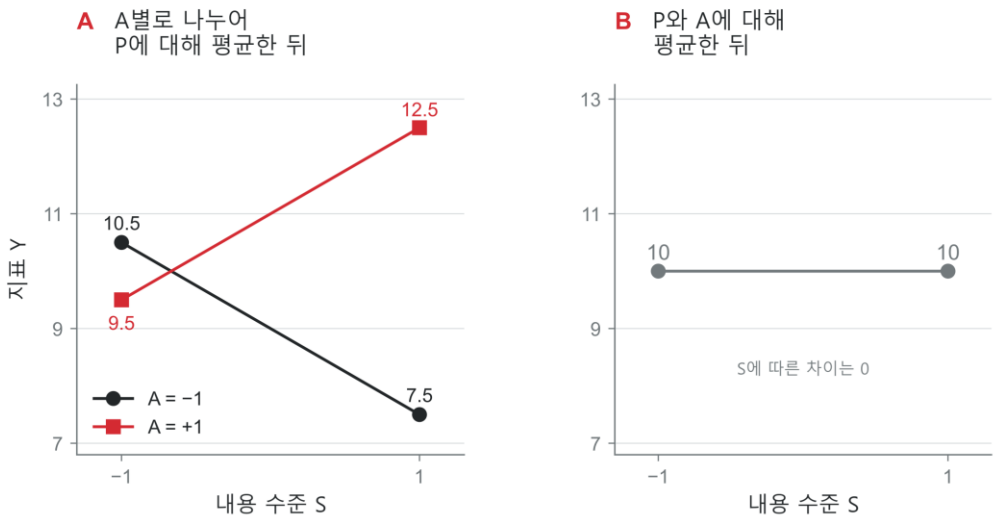


그림 26. 평균을 내면 사라지는 상호작용. 합성 요인 모형 Y = 10 + 2P + A + 1,5SA다. 왼쪽은 A의 수준을 나누어 P에 대해 평균한 값이고, 오른쪽은 P와 A 모두에 대해 평균한 값이다. S에 따른 반대 방향의 변화가 서로 상쇄된다. 잡음 모형을 정하지 않았으므로 이 그림은 실험적 유의성을 보여 주거나 정보 메커니즘을 확인하지 않는다.

A = +1이 내용 접근을 뜻한다면 이 분기의 의존성은 통상적인 행동으로 설명할 수 있다. 운용자가 장치를 다르게 다루는 것이다. 이 설명안만으로 표 전체를 설명하지는 못한다. A = −1, 즉 접근이 없을 때의 S 대비를 따로 설명해야 한다. 이를 위해 행동 기록, 독립 운용자에게 수행

이전과 물리적 행동을 마친 뒤 내용을 공개하는 구성을 검증한다. 분석 기록과 과제 배분은 이미 본 물리적 결과에 따라 범주를 바꾸지 못하게 해야 한다. 각 검증은 특정 영향 경로에 관한 것이며 결과를 따로 보존한다.

가정한 연결 법칙과 새 과제로의 일반화

추가 연결에 관한 저자 가설은 측정 모형에 βS 항을 넣을 수 있지만 누가 어떤 규칙으로 S를 부여하는지 정해야 한다. 그런 규칙 없이 «의미»라고만 하면 매개변수는 조작적으로 정의되지 않은 채 남는다. 미리 적격성을 확인한 평가자 두 명이 불일치하면 물리적 결과를 보기 전에 별도의 불확실 범주나 독립적인 해결 규칙을 프로토콜에 마련해야 한다. 측정 뒤 불편한 과제를 빼는 것은 원래의 확인 측정열에서 허용되지 않는다.

검증은 세 일반화 단계로 이루어진다. 먼저 미리 정한 범주 안에서 표현을 바꾼다. 이어 새로운 물리적 매체를 사용한다. 마지막으로 절차는 유지한 채 다른 참여자에게 내용을 공개한다. 단계마다 저자의 모형과 통상적 대안 설명의 예측을 계산한다. 효과가 미리 정한 범주가 아니라 특정 표시 프로그램을 따라간다면 연구는 표시 장치로 돌아간다. 의존성이 유지된다면 발견한 조건, 크기, 불확실성으로 결과를 서술하며, 발생원에 의식이나 의도를 부여하지 않는다.

사례 5는 정보 의존성 설계의 작성과 새 과제에 대한 검증을 보여 준다. 이런 구성은 가정한 효과를 연구할 언어를 제공한다. 내용에 반응하는 별도의 자연 기전이 존재함을 확립하는 것은 아니다.

제VIII부

연구의 조직

제37장

연구팀과 책임 분담

연구진은 참여자들이 자기 과제뿐 아니라 다른 사람 결정의 경계도 이해할 때 연구 체계가 된다. 뛰어난 물리학자, 의사와 공학자가 있어도 조직의 공백이 사라지지는 않는다. 한쪽은 다른 쪽이 안전을 확인했다고 여기고, 다른 쪽은 허가가 수동 기록에만 해당했다고 여길 수 있다. 따라서 공통 목표를 현재 운용 상태, 허용 행동과 중단 조건의 기술로 바꾼다. 이 정보는 사고 뒤에 복원할 것이 아니라 작업 전에 이용 가능해야 한다.

공학 지침은 요구 사항, 이행 검증과 적합성 확인을 연결되지만 서로 다른 과제로 다룬다 [5]. 여기서 제안하는 조직에서는 세 질문에 해당한다. 연구진은 무엇을 확립하려는가, 장치는 예정 절차를 수행하는가, 결과로 필요한 결론을 낼 수 있는가? 이 질문들의 책임을 집단적 확신 속에 녹여 없애서는 안 된다. 연구 책임자는 전문가의 서면 근거와 의견을 보존하면서 이를 하나의 결정으로 모은다. 작업 조정 권한이 측정 사실을 취소하거나 이의를 숨길 권한은 아니다.

기능과 중단 권한

안전 조정자는 악화 상황을 검토하고 결과의 과학적 매력과 관계없이 중단할 권한이 있다. 계측 전문가는 측정 과제가 장비 능력에 맞는지와 자료의 중요한 제약을 책임진다. 운용자는 승인 순서를 수행하고 이탈을 보고한다. 자료 또는 시료 관리자는 출처, 보존과 인계를 보장한다. 해당 분야 전문가는 특수 역량이 필요한 질문을 평가한다. 소규모 연구진에서는 역할을 겸할 수 있지만 안전이 의존하는 행동의 독립 검증을 없애서는 안 된다.

결정	책임자	필수 검증
운용 개시	책임자	목표, 자원 및 제약
측정의 적합성	계측 전문가	범위, 불확도, 대조 검증
중단	안전 조정자	합의한 안전 전환
자료 무결성	관리자	출처와 접근

회차 준비는 짧게 소리 내어 검토하는 것으로 마친다. 운용자는 계획을 자기 말로 되풀이하고 계측 전문가는 부적합 자료의 징후를 말하며 조정자는 어떤 사건에 중단하고 명령 뒤에 정확히 무엇을 하는지 설명한다. «중단»이라는 말을 반복하는 것만으로는 부족하다. 어떤 장치는 에너지 공급 중단으로 위험이 줄지만 다른 장치는 보호 기능을 유지해야 한다. 따라서 안전 전환은 계에 맞춰 미리 설계한다. 이를 모르면 통제 개입의 운용이 준비되었다고 보지 않는다.

공통 의존성은 겉으로 설득력 있는 예비 구성을 무너뜨릴 수 있다. 원인 하나로 여러 요소가 고장 날 수 있기 때문이다 [7]. 조직에서도 모든 결정이 한 사람의 보고나 한 화면에 의존하면 비슷한 일이 생긴다. 연구진은 실제 독립 검증 정보와 여러 사람이 반복만 한 정보를 알아야 한다. 같은 불완전 보고서를 읽고 동의한 전문가 둘은 독립 관측 경로 둘이 아니다. 독립성은 직책 수가 아니라 논거의 출처에 관한 것이다.

작업 허가 절차

진입 조건은 기록된 과제, 배정 역할, 이용 가능한 위험 특성, 정상 작동하는 필수 채널과 준비된 종료 절차다. 책임자는 안전 상태 복원을 포함한 회차 전체의 자원을 확인한다. 조정자는 접근 경계를 확인한다. 계측 전문가는 초기 구성을 기록한다. 관리자는 기록이 실제로 저장되고 찾을 수 있는지 확인한다. 그 뒤 운용자는 구체적인 순서의 수행 허가를 받는다. 이 허가는 관측 중 유용해 보이는 임의의 행동으로 확대되지 않는다.

중요한 변화는 모두 짧은 별도 결정 주기를 거친다. 제안자는 목적, 기대 이득, 새 의존 관계와 취소 방법을 기술한다. 전문가들은 이전 근거 중 무엇이 여전히 유효한지 밝힌다. 결정은 승인, 거부 또는 자료 확보까지 보류일 수 있다. 보류도 정상적인 실무 결과다. 변화가 감도와 위험에 동시에 영향을 줄 때 특히 중요하다. 계기 출력을 높이는 것은 더 보기 좋은 기록이 필요하다는 이유만으로 설명할 수 없다.

당직 교대에서는 사건 기록부뿐 아니라 계의 실제 상태도 넘긴다. 열린 질문, 임시 우회 조치, 고장 채널과 검증 전 금지 작업을 명시한다. 인수 운용자는 제약을 이해했음을 확인한다. 인계가 이루어지지 않으면 복잡한 운용의 자동 지속으로 책임이 불명확해진다. 장기 관측에서는 시나리오별로 알림 책임자와 허용 응답 시간을 미리 정한다. 모든 미지 과정에 적용하는 보편 응답 시간은 설정하지 않는다.

학습 시나리오

가상 학습 상황을 보자. 제한된 연구 중 대조 시간 척도가 사라지지만 주 채널은 흥미로운 급등을 계속 보인다. 책임자는 남은 측정열을 마치자고 제안한다. 계측 전문가는 사건들을 더는

신뢰성 있게 대응시킬 수 없다고 보고하고, 운용자는 제어 모듈의 계획 밖 재시작을 알아차린다. 조정자는 장치를 미리 정한 안전 상태로 바꾼다. 관리자는 미완료 회차를 이전 자료와 합치지 않고 보존한다. 복구 뒤 연구진은 과거 회차를 소급해 정상이라고 선언하는 대신 새 시작을 논의한다.

연구진의 결과는 검증 가능한 결정으로 표현한다. 회차를 명시 조건에서 수행했거나 특정 이유로 중단했거나 일부 결론에는 부적합하다고 판정했다는 것이다. 중단은 운용자의 개인적 패배가 아니고 오류 인정은 충성 위반이 아니다. 동시에 우호적 분위기가 기록 규율을 대신하지는 않는다. 이탈에는 기록, 결과와 수정 책임자가 있어야 한다. 명확한 권한과 불편한 사실을 보고할 가능성의 결합이 복잡한 연구를 견고하게 만든다.

세션이 끝나도 유지되어야 할 자원

자원표는 유지할 기능별로 작성한다. 기능마다 가용 잔량, 잔량 결정 방식, 다음 행동의 소모량, 종료에 필요한 양과 추정의 중요한 불확실성을 기록한다. 에너지, 여유 저장 공간, 지지대의 정상 상태, 유자격 인력과 재료 수령 가능성은 서로 대신하지 않는다. 저장 공간이 많아도 운용자의 부재를 보완하지 못하며, 호환성을 확인하지 않은 예비 배터리는 아직 이용 가능한 예비 수단이 아니다.

다음 작업 블록을 허가하기 전에 책임자는 서식 Ж4의 모든 필수 행을 확인한다. 충분하다는 것은 블록 자체와 그 뒤의 허용되는 전환을 모두 준비했다는 뜻이다. 종료에 필요한 자원이 알려지지 않은 상태에 의존한다면 임의의 여유 백분율로 그 제약을 숨겨서는 안 된다. 구체화, 과제 변경, 또는 새 블록의 거절이 필요하다. 보충도 하나의 작업으로 평가한다. 필요한 기능을 잃지 않고 가능한가, 누가 수행하며, 교체한 부품의 어떤 특성을 확인해야 하는가?

학습 모형의 가상 계산을 보자. 기록기의 가용 에너지 잔량은 가상 단위로 8이다. 다음 측정열에 4, 예정 종료에 3, 과제 조건에서 고려하는 소모량 변동에 추가로 2가 필요하다. 합계 9는 잔량보다 크다. 새 측정열은 허용되지 않는다. 3 + 2 = 5단위가 필요한 전환은 아직 확보되어 있다. 이 수치들은 학습 과제만 기술한다. 실제 소모량, 불확실성과 허용 종료 순서는 예에서 가져오는 것이 아니라 구체적인 구성에 맞춰 정한다.

근무 인계에서는 현재 실제 상태, 미해결 명령, 자원 제약을 함께 제시한다. DOE-HDBK-1226-2019는 근무 중 인계표를 최신으로 유지하고 인계 전에 완전성을 확인하도록 권고한다 [63]. 서식 Ж4에서 인수자는 다음 필수 행동, 유지해야 할 기능, 금지 사항을 자신의 말로 다시 말한다.

역할을 인수했다는 확인은 별도의 기록을 갖는다. 인수자가 없다면 장비가 아직 작동한다는 이유만으로 장기 운전의 지속이 확보되었다고 보지 않는다.

안전한 훈련 다섯 가지

제안한 계획은 종이, 소프트웨어 모형 또는 사전에 검증한 안전 시험 장치에서 수행한다. 위험한 작용에 대한 사람의 내성이 아니라 공동 결정을 검증한다. 주최자는 구성, 역할, 유효 지침, 치명적 오류와 훈련 자체의 중단 방식을 미리 정한다. 실제 담당 기관에 거짓 신고를 하지 않는다. 지정한 참여자가 그 역할을 맡는다. 사람은 접근 불가능한 곳에 숨지 않고 위험 발생원은 켜지 않으며 기술적 고장은 카드나 안전한 시험 기능으로 모사한다.

매 훈련마다 제시 상황, 실제 순서, 팀 문서, 평가자의 결론을 서식 Ж6에 보존한다. 평가는 세 값이다. 힌트 없이 수행, 힌트 후 수행, 미수행이다. 핵심 행동을 힌트 뒤에야 수행했다면 독립 작업 준비가 확인된 것은 아니다. 전체 평균 점수로 이런 오류를 덮을 수 없다. OSHA는 관할 영역에서 비상계획을 정기적으로 검토하고 훈련할 것을 권고한다 [64]. 아래 시나리오들은 저자의 학습 프로그램이며 전문 자격의 증명이 아니다.

훈련 1. 고장 난 채널의 침묵

- 제시 상황. 가정한 광학 시험 장치의 화면에 영이 나타난다. 채널 카드에는 마지막 적합 패킷이 운용 상태 전환 전에 있었고 현재 상태는 신뢰 불가 자료라고 적혀 있다. 두 번째 독립 채널은 반응을 유지한다. 주최자는 이전에 제한했던 구역을 열라는 책임자의 요청을 전달한다.
- 예상 결정. 운용자는 지시값과 채널 상태를 구별하고, 계측 전문가는 이 기록으로 작용 감소를 결론 내리지 못하게 하며, 조정자는 그 채널에 의존하는 제한을 유지한다. 관리자는 부적합 구간을 표시한다. 연구진은 연구 대상 작용을 다시 만들지 않고 가능한 정상 측정 경로 검증을 선택한다.
- 평가. 신뢰 불가 원인의 기록, 남아 있는 적합 관측의 명시와 근거 없는 제한 해제 거부가 필요하다. 영을 근거로 접근을 허용하거나 불편한 두 번째 채널을 숨기는 것이 치명적 오류다.
- 재허용. 검토 뒤 참여자는 인터페이스가 다르고 영 대신 누락이 있는 변경 상황을 수행한다. 평가자는 효과 부재와 적합 자료 부재를 스스로 구별하는지 확인한다. 책임자는 해당 역할의 실제 작업 허용을 별도로 결정한다.

훈련 2. 사라진 공통 시간 척도

- 제시 상황. 두 기록부의 국소 번호와 대응 메시지는 정상이지만 한 노드의 외부 시계가 초기화되었다. 주최자는 표시 시각으로 모든 사건을 배열하고 제어 지연을 알아야 하는 실험을 계속하자고 제안한다.
- 예상 결정. 관리자는 원래 표지를 보존하고 새 시계 회차를 표시한다. 계측 전문가는 확인된 순서 연결만 만들고 연구진은 순서를 모르는 사건 쌍을 열거한다. 이에 의존하는 실험은 이전 허가로 계속하지 않는다. 적합한 국소 자료는 제한된 분석을 위해 보존한다.
- 평가. 보고서에서 순서, 지속 시간과 인과 설명을 구별해야 한다. 공백이 사라지도록 시계를 소급해 고치거나 대응시키지 못한 사건들을 동시라고 선언하는 것이 치명적 오류다.
- 재허용. 참여자는 공통 시간 척도가 없는 새 짧은 시간표를 풀고 추가한 연결을 하나씩 설명하며 제어 재개 조건을 말한다. 평가자는 보기 좋은 그래프와의 일치가 아니라 모든 결론의 출처를 검증한다.

훈련 3. 명단에서 빠진 참여자

- 제시 상황. 시나리오에서 참여자 한 명이 응답하지 않으며 마지막 확인은 이전 지도 버전에 해당한다. 실제 사람은 주최자가 아는 안전한 훈련 위치에 있다. 동시에 드문 사건의 촬영을 마저 하자는 제안이 온다. 지정 연락 담당자는 외부 담당 기관 역할의 참여자 연락처를 가지고 있다.
- 예상 결정. 연구진은 대응 카드로 전환하여 사람들의 현황을 대조하고 사실과 위치 불확실성을 알리며 대응에 방해되는 과학 행동을 중단한다. 현재 지도와 지원 기능 정보를 전달한다. 연구자는 근거를 잃은 경로로 즉흥적인 진입을 조직하지 않는다.
- 평가. 메시지의 실제 도달, 확인 사실과 추정의 구별, 갱신 담당 지정과 기록을 위한 지연이 없었는지를 검증한다. «모두 확인함»이라는 허위 표기나 조건이 더는 확인되지 않는 경로의 임의 지속은 치명적 오류다.
- 재허가. 서식과 역할 분담을 바로잡은 뒤 다른 사례를 연습한다. 통신은 복구되었지만 참여자의 위치는 아직 확인되지 않은 상황이다. 성공하려면 상태를 올바르게 갱신해야 한다. 대응이 끝났다고 자동으로 선언해서는 안 된다.

훈련 4. 불확실성보다 위험한 반복

- 제시 상황. 플랫폼 모형에 한 단계의 상대 이동 명령을 보냈다. 실행 확인이 사라졌고 재시작 뒤 인터페이스는 이전 프레임을 보인다. 대기열은 같은 명령을 다시 보내자고 제안한다. 이 훈련에는 실제 장치의 물리적 이동이 없다.
- 예상 결정. 운용자는 정해진 방식으로 자동 지속을 막고 미완료 명령을 보존하며 새 회차의 상태를 요청한다. 연구진은 발송, 수신, 실행과 관찰 결과를 구별한다. 옛 프레임에는 보관 영상임을 표시한다. 실행 여부의 불확실성을 반복으로 없애지 않는다.
- 평가. 서식 Ж3에는 명령 식별자, 수신자의 세션, 알 수 없는 단계, 다음 행동의 근거를 남겨야 한다. 핵심 오류는 상태를 확인하지 않은 채 상대 이동 단계를 반복하거나 이전 대기열을 자동 복원하는 것이다.
- 재허용. 평가자는 제시 상황을 최종 상태 지정 명령으로 바꾸고 참여자가 여전히 실제 조건, 권한과 부작용을 평가하는지 확인한다. «멱등성»이라는 말을 아는 것이 특정 명령의 적용 가능성 검증을 대신하지 않는다.

훈련 5. 자원 한계에서의 근무 인계

- 제시 상황. 자원 예의 가상 단위 8, 4, 3과 2 계산을 사용한다. 동시에 당직이 끝난다. 모형에서는 기록 종료 중 별도의 지원 기능을 유지해야 하며 계 전체를 끄면 훈련 조건을 위반한다. 인수 운용자는 처음에 미확인 명령을 모른다.
- 예상 결정. 새 블록을 시작하지 않는다. 명시한 기능을 유지하며 확보된 전환을 수행하고 실제 잔량, 열린 명령과 다음 필수 행동을 넘긴다. 인수자는 제약을 확인한다. 인계자는 파일 하나를 보냈다는 이유만으로 역할에서 벗어나지 않는다.
- 평가. 모든 필수 행의 계산, 서로 다른 자원의 상계가 없는지, 실제 기능 유지와 확인된 인계를 검증한다. 측정열을 위해 종료 예비량을 써 버리거나 포괄 명령으로 필요한 보호를 끄는 것은 치명적 오류다.
- 재허용. 연구진은 다른 제한 자원과 부품 교체 조건으로 훈련을 반복한다. 새 구성의 검증 범위를 스스로 선택하고 합의한 종료를 수행한 뒤에 허용할 수 있다. 이전 훈련의 수치 답을 그대로 적용하지 않는다.

계획 완료 뒤 책임자는 역할별로 확인된 행동과 남은 제약의 목록을 받는다. 프로토콜에는 발견 오류, 지침이나 인터페이스 수정, 책임자와 재검증 결과가 들어간다. 영향을 받은 과제를

반복하고, 역할 상호작용이 바뀌었으면 해당 공동 순서를 반복한다. 훈련 성공이 실제 실험을 자동 허용하지는 않는다. 특정 구성의 작업 허용을 위한 증거 중 하나다.

제38장

정찰과 원격 관찰

거리를 두면 사람이 대상 가까이에 있어야 할 필요는 줄지만 관찰이 무조건 안전한 작업으로 바뀌지는 않는다. 로봇에는 질량, 전원, 통신이 있으며 환경에 자체적인 영향을 준다. 카메라는 관측 방향을 바꾸고 플랫폼은 진동을 만들며 송신기는 장을 형성한다. 따라서 원격 정찰은 알려진 한계를 갖는 측정 절차로 설계한다. 첫 목표는 현상의 가정된 중심에 최대한 다가가는 것이 아니라, 다음 운용 방식을 선택할 정보를 얻는 것이다.

여기서 수동이란 연구하는 과정을 의도적으로 여기하지 않는 운용을 뜻한다. 이 조직적 정의가 모든 교란의 부재를 주장하지는 않는다. 무인 플랫폼의 오염 측정 연구에서는 센서 위치와 프로펠러 영향이 조건에 따라 결과를 바꾸었다 [45]. 따라서 플랫폼 자체의 작용은 관측 모형의 일부여야 한다. 로봇 접근 뒤 대상이 사라졌다면 과정 자체의 변화도, 감도 상실이나 측정 환경 변화도 가능하다. 우선 이 설명안들을 따로 유지한다.

관측 지점의 설계

진입 조건은 정해진 과제, 평가된 접촉 허용 가능성, 알려진 통신 경로와 허용되는 회차 종료 방법이다. 책임자는 위치, 주기성, 스펙트럼, 확산 경계나 신호 안정성 중 어떤 불확실한 성질을 구체화할지 선택한다. 계측 전문가는 관측 기하와 필요한 대조 채널을 정한다. 안전 조정자는 이용 가능한 정보에 비추어 사람과 장비의 배치를 검토한다. 작용마다 전파 경로와 검출 한계가 다르므로 임의의 고정 반경 원으로 이 작업을 대신할 수는 없다.

먼저 이미 허용된 위치에서 기준 관측을 설정한다. 통상 배경, 이용 가능한 가시성과 플랫폼 자체 잡음을 기록한다. 이어 얻은 기록이 알려진 대상이나 안전한 대조 신호의 예상 상태에 맞는지 확인한다. 이 검증이 모든 미지의 작용에 대한 작동 능력을 입증하지는 않지만 주 측정열 전에 일부 오류를 드러낸다. 사각지대와 발생원의 물리적 소멸 없이도 신호가 시야에서 사라질 수 있는 조건을 별도로 기록한다.

환경 감시는 주 신호 중 얼마가 간섭과 연결될 수 있는지 평가하는 데 도움이 된다. 다만 시계열을 한 번 이동한다고 상관관계의 공통 발생원이 제거되지는 않는다 [55]. 따라서 저자 프로토콜에서 중요한 것은 추가 기록 자체가 아니라 채널과 특정 간섭 사이의 근거 있는

연결이다. 카메라 옆 진동 센서는 장치 운동이라는 질문에 답한다. 먼 발광 물체의 기원을 자동 확인하지는 않는다. 공동 해석 전에 각 대조 채널의 목적을 기록한다.

제한된 정찰의 순서

1. 운용자는 플랫폼의 초기 상태, 필수 채널 기록과 합의한 종료의 가능성을 확인한다.
2. 계측 전문가는 기준 배경과 관측 적합성 검증을 기록한다. 관리자는 자료를 구성과 연결한다.
3. 위치는 승인 범위 안에서만 바꾸고 운동과 통신 상태를 기록한다.
4. 바꿀 때마다 주 신호, 대조 채널과 플랫폼 자체의 작용을 비교한다.
5. 필수 감시를 잃으면 예정된 안전 상태로 전환한다. 장비를 회수해야 한다는 이유로 준비되지 않은 사람의 진입을 정당화하지 않는다.

통신은 별도 자원으로 평가한다. 원격 측정 자료의 상실은 채널 고장, 방향 변화나 물리적 고장을 뜻할 수 있으며 그 자체가 이례적인 작용의 징후는 아니다. 통신 상실 뒤 플랫폼의 행동은 작업 조건에 맞춰 미리 합의해야 한다. 자동 복귀, 정지 대기와 이동 중단은 결과가 다르므로 보편적인 선택은 불가능하다. 어느 대안도 수용할 근거가 없다면 그 운용 방식으로 플랫폼을 배치할 준비는 아직 되지 않은 것이다.

장비 회수도 연구 작업이다. 오염, 가열, 손상이나 미지의 상태는 통상 정비 전에 해당 분야 평가가 필요하다. 절차가 은연중에 기술 직원을 대상과 최초로 접촉하는 사람으로 만들어서는 안 된다. 자료 관리자는 이미 얻은 기록과 잃을 수 있는 기록을 정하지만 매체의 과학적 가치가 접근 경계를 없애지는 않는다. 안전한 회수가 불가능하면 이용 가능한 원격 자료를 남기고 시도를 중단하는 것이 올바른 결과일 수 있다.

학습 시나리오

가상의 학습 시나리오다. 움직이는 플랫폼의 카메라에 관찰자로부터 멀어지는 듯한 빛의 표지가 나타난다. 조작자는 추적을 제안한다. 고정 카메라와 비교하면 표지의 움직임이 첫 시스템의 관측 방향 변화와 연결되어 있음을 알 수 있다. 로그에서는 같은 시점의 노출 상태 변경이 발견된다. 이 의존 관계들을 검증하기 전까지 멀어지는 물체라는 주장에는 독립적인 근거가 없다. 정찰은 기준 위치로 돌아가고, 다음 계열에서는 기하와 영상 설정을 따로 검증한다.

이 상황의 자료가 모든 움직이는 물체를 인공 흔적으로 보도록 요구하지는 않는다. 단계적 절차의 목적을 보여 준다. 행동, 관측과 측정계 변화를 계속 구별할 수 있어야 한다는 것이다. 최종 보고서에는 실제 조사 영역의 지도, 감도 조건, 감시 상실 구간과 미해결 질문을 포함한다.

«아무것도 검출하지 못했다»는 표현은 이 경계와 함께할 때만 허용된다. 이 경계가 다음 운용 방식의 정당성과 아직 없는 정보를 줄 새 측정을 결정한다.

통신 단절 뒤의 상태 조율

영상이 돌아왔다는 것은 어떤 자료 흐름이 나타났다는 뜻일 뿐이다. 계속하기 전에 어느 노드와 회차에서 온 것인지, 현재 상태를 반영하는지, 단절 중 명령에 무슨 일이 있었는지 확정해야 한다. STPA는 상태 모형이 과정에 맞지 않게 될 만큼 늦은 자료를 포함한 제어 및 되먹임 경로의 오류를 별도로 다룬다 [62]. 다음의 저자 절차는 이 특정 위험을 연구 플랫폼에 대해 구체화한다.

준비는 배치 전에 한다. 명령마다 식별자, 수신자, 제어 회차 번호, 구성 버전, 허용 조건과 결과 미확정 시의 예정 대응을 부여한다. 시스템은 새 명령과 이전 명령의 재전달을 구별해야 한다. 재시작 뒤에도 구별을 유지할 수 있는지 검증한다. 실행 기록부를 잃었다면 기록 부재를 행동 부재로 보지 않는다. 두 제어 지점이 따로 제어를 계속하지 않도록 운용자 교체도 표시한다.

명령 단계	근거	남은 제한
보냄	식별자가 있는 송신 노드의 기록.	수신자가 받았는지 확인되지 않았다.
수신됨	특정 명령을 받았다는 수신자의 응답.	실행과 결과의 허용 가능성은 아직 확립되지 않았다.
시스템이 실행했다고 보고함	작업 완료에 대한 실행 노드의 기록부.	보고 자체가 물리적 결과를 입증하지는 못할 수 있다.
결과가 관찰됨	감시 대상 상태 변화의 적합한 증거.	인과 연결, 안전과 결과의 충분성은 따로 평가한다.

1. 운용자는 단절을 기록하고 정해진 방식으로 후속 연구 순서를 보류한다. 필요한 지원 기능은 사전 검증된 시나리오에 따라 작동한다. 원격 측정 상실을 포괄적인 종료 명령으로 대신하지 않는다.
2. 관리자는 마지막 적합 자료, 열린 명령 목록, 국소 번호, 회차 식별자와 고장 보고를 보존한다. 모르는 단계는 모르는 채로 남긴다.
3. 통신 복구 뒤 조작자는 수신자와 현재 세션을 확인한다. 과거 패킷은 원래 표지를 유지한 채 이력에 넣는다. 다시 도착한 시점이 그 패킷을 최신 자료로 바꾸지는 않는다.

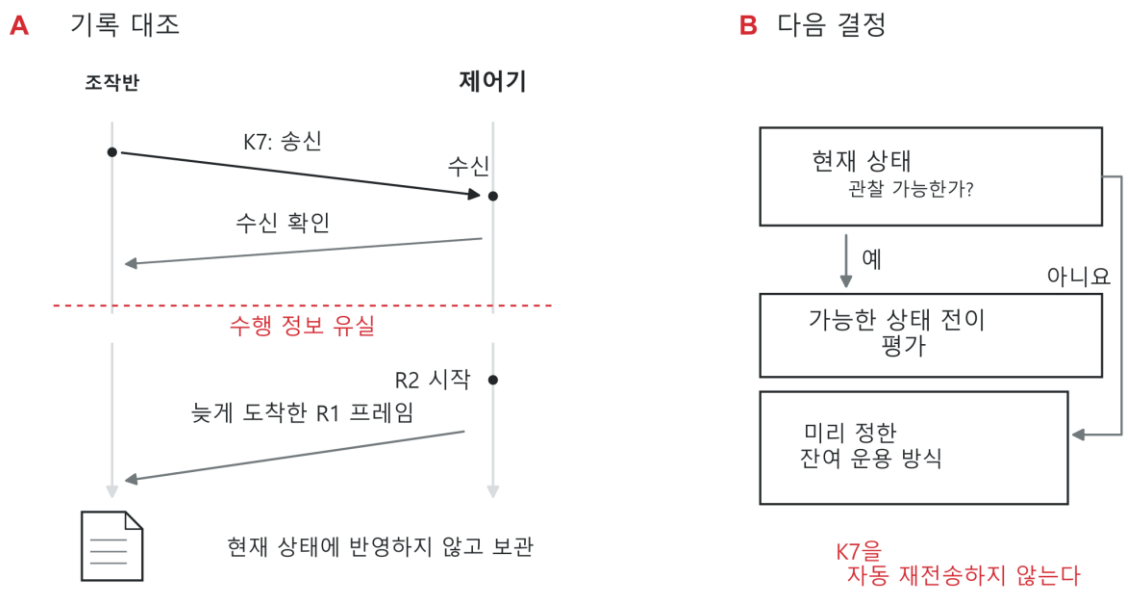
4. 구성, 실행 수단의 운용 상태, 자율 기능 상태와 대기열을 대조한다. 이전 대기열을 자동 재개하지 않는다. 보호 유지에 필요한 행동은 취소한 연구 단계와 별도로 평가한다.
5. 열린 명령마다 마지막으로 확인한 단계를 확정한다. 더 편리한 설명을 골라 기록부의 불일치를 없애지 않는다. 가능하면 예정하지 않은 작용 없이 실제 상태의 새 독립 증거를 얻는다.
6. 계측 전문가는 현재 채널의 적합성과 바로 다음 과제에 필요한 지연 한계를 검증한다. 비교 가능한 시계가 없으면 화면 시각의 차이 하나로 최신성을 입증할 수 없다.
7. 조정자는 현재 지도로 위치와 경로의 근거를 재검토한다. 책임자는 합의한 새 순서만 허가한다. 운용자는 그 경계와 경쟁하는 다른 제어 지점이 없음을 확인한다.

명령의 반복과 재시작

«한 걸음 더 이동하라»는 명령은 멱등이 아니다. 실제 실행 뒤 반복하면 두 번째 이동이 생길 수 있다. 확인 응답을 잃었다고 명령을 반복하는 것은 첫 실행의 검증이 아니다. 최종 상태를 지정하는 명령은 때로 최종 결과를 바꾸지 않고 반복할 수 있다. 하지만 그 상태에 이르는 경로, 재작동, 부수 과정도 평가해야 한다. «멱등»은 정해진 조건에서 특정 연산에 확인된 성질을 뜻한다. 그런 종류의 명령을 무엇이든 반복해도 된다는 허가는 아니다.

재시작 후에는 확인된 정보만으로 새 세션과 이전 세션을 연결한다. 초기화된 계수기, 빈 대기열, 초기 화면은 물리 장치가 초기 상태로 돌아갔다는 증거가 아니다. 구성이 일부만 복원되면 시스템에 그에 맞는 제한 상태를 부여한다. 영향을 받은 기능을 검증한 뒤에야 재개할 수 있다. 플랫폼의 현재 자세를 확인할 수 없다면 연결에 한 번 성공했다는 이유만으로 이전 복귀 알고리즘의 사용을 허가하지 않는다.

가상의 예시다. 명령 K7의 수신은 확인되었지만 실행 보고는 없고, 이후 제어기가 세션 R2를 시작한다. 처음 도착한 패킷은 이전 세션 R1의 것으로 이전 위치의 영상을 담고 있다. 서식 Ж3에는 수신 확인, 실행 여부 불명, 표시 프레임은 과거 자료라고 기록한다. 상대 이동을 반복하지 않는다. 이후 유효한 관찰에서 새 위치가 확인되면 먼저 그 위치와 가능한 전환을 평가한다. 그렇다고 로그에서 유실된 부분까지 알게 되는 것은 아니다. 관찰을 얻지 못하면 정해 둔 잔여 운전 상태를 유지하며 연구 순서는 미완료로 남는다.



학습용 예다. K7 수신은 수행의 확인이 아니다.

그림 27. 통신 단절 뒤의 K7: 수신이 실행을 뜻하지는 않는다. 통신 복구를 다루는 학습 예다. K7의 수신 확인, 명령 실행, 결과 관찰은 서로 다른 주장이다. R2를 시작한 뒤에 도착한 세션 R1의 프레임은 과거 자료로 보존한다. 그 프레임을 받았다는 사실이 상대 이동을 다시 하도록 허가하지는 않는다.

제39장

통제된 실험과 독립 재현

통제 실험은 한 가설에서는 나타나야 하고 다른 가설에서는 나타나지 않아야 하는 차이를 선택하는 데서 시작한다. 이전 사건을 인상적으로 반복하는 것은 유용하지만 이전 오류도 재현할 수 있다. 따라서 새 측정열은 가능한 단서를 제거하고, 작용들을 분리하고, 다른 범위를 검증하거나 독립 측정 사슬을 사용하는 등 결론의 근거를 바꾸어야 한다. «한 번 더 보고 싶다»는 바람만 있다면 작업은 탐색에 머문다. 결과를 사전 예측의 확인으로 제시하지 않는 한 이런 운용도 허용된다.

사전등록은 결과 공개 전에 질문, 분석 계획과 결정 조건을 기록한다. 관측 뒤 발견한 설명과 예측을 구별하게 해 주지만 나쁜 계획을 자동으로 좋게 만들지는 않는다 [4]. 따라서 등록 전에 계획을 공개적으로 비판 검토하면 유용하다. 계측 전문가는 감도를, 해당 분야 전문가는 대조 조건의 타당성을, 관리자는 전체 순서의 복원 가능성을 평가한다. 이후 책임자는 토론 이력과 중요한 변경 이유를 남기며 바로 그 검토된 판본을 승인한다.

실험 계열 전에 정하는 것

저자의 프로토콜에서 진입 조건은 안전성이 검증된 절차, 정상 작동하는 대조 채널과 내리려는 결정의 유한한 목록이다. 주 측정량, 허용 제외, 조건 배정 방식과 중단 규칙을 명시한다. 두 운용 상태의 차이를 예상한다면 과학적 또는 실무적 의미가 있는 크기를 정한다. 그렇지 않으면 음성 결과가 불명확하다. 실험이 질문에 실제로 중요한 효과를 놓쳤을 수 있기 때문이다.

가장 단순한 구조는 $\Delta = Y_a - Y_b$로 적을 수 있다. Y_a와 Y_β 는 연구 운용 상태와 대조 운용 상태에 대해 미리 정한 지표다. 공식 자체에는 입증 기준이 없다. 그 기준에는 불확실성, 관측 의존성 모형과 두 운용 상태가 왜 관심 요인에서 차이나는지에 대한 근거가 필요하다. 조명, 운용자와 프로그램 버전이 동시에 바뀌면 차이는 변화 묶음 전체를 기술한다. 결과를 얻은 뒤 그중 편리한 원인을 고를 수는 없다.

대조는 기술적, 윤리적으로 가능한 범위에서 가정한 작용 차이를 제외한 중요한 조건을 유지해야 한다. 때로는 완전히 같게 만들 수 없다. 그러면 형식상 대조 운용이라고 이름 붙인 하나보다 여러 부분 대조가 더 실질적일 수 있다. 예를 들어 신호 부재, 발생원 없는 기록기 작동과 안전한 기지 신호를 따로 검증한다. 이 결과들은 서로 다른 질문에 답하므로 하나의 «대조 통과» 표기로 합쳐서는 안 된다.

실행과 눈에 띄지 않는 조정의 방지

운용자는 작업에 충분한 행동 순서를 받되 가능하면 예상 결과를 모른다. 평가자는 조건 표지가 없는 기록을 본다. 관리자는 평가 결과를 확정한 뒤에만 대응 관계를 공개한다. 맹검이 불가능하면 이용 가능한 단서를 문서화하고 행동이나 분석을 얼마나 바꿀 수 있었는지 검증한다. 구체적인 제약 기록이 연구진의 엄격한 객관성이라는 포괄적 주장보다 유용하다. 일부 과제에서는 다른 운영 구성의 독립 반복으로 첫 실험 안에서 제거하지 못한 영향을 줄일 수 있다.

경쟁 설명의 지지자들이 설계에 합의하면 무엇을 검증했는지에 관한 후속 논쟁을 줄일 수 있다. Transparent Psi Project에서 이 접근을 사용했다 [14]. 그 조직적 가치는 결과가 바람직한지와 무관하다. 각 측은 가설 평가를 바꿀 조건과 올바른 수행의 중요한 징후를 미리 밝힌다. 절차 합의가 이후의 모든 해석에 동의할 의무는 아니지만 불일치 이유를 더 검증 가능하게 한다.

반복의 독립성에는 여러 수준이 있다. 보존 자료에서 분석을 다시 실행하면 계산을 검증한다. 같은 장치의 새 관측은 비슷한 조건의 안정성을 검증한다. 다른 연구진이 다른 측정 사슬을 쓰면 일부 공통 방법론적 의존성이 줄어든다. 조건 변화는 효과의 다른 조건으로의 적용 가능성을

연구한다. 이 행동들은 보완적이지만 서로 대신하지 않는다. 보고서에는 도달한 수준과 코드, 시료, 계기, 평가자 훈련 중 무엇이 여전히 공통인지 명시해야 한다.

학습 시나리오

가상 학습 상황을 보자. 새 카메라 운용 상태를 켜자 연구진은 반복되는 섬광을 알아차린다. 첫 측정열은 두 상태를 비교하지만 항상 이전 상태 뒤에 새 상태를 켠다. 따라서 차이는 순서나 가동 시간에 의존할 수 있다. 확인 계획에서는 순서를 미리 배정하고 전환 구간을 따로 보존하며 기록을 맹검 분석한다. 섬광은 운용 상태 명칭과 관계없이 주로 전환 뒤 나타남이 드러난다. 특별 작용 가설은 약해지고 연구는 전환 시 장비 상태로 옮겨 간다.

실험 중 필수 채널 상실, 승인 구성 변화나 예상 밖 위험이 생기면 운용자는 합의 절차로 측정열을 중단한다. 보존 자료는 탐색 분석에 유용할 수 있지만 이전의 확인 검증 지위를 자동으로 얻지는 않는다. 재시작 결정은 원인을 없애고 새 계획을 등록한 뒤 내린다. 불완전 실험을 별도 근거 없이 다른 절차의 성공 관측으로 «보충»할 수는 없다.

완결된 결과에는 효과 크기 추정, 불확실성, 프로토콜 준수와 다른 조건으로의 적용 한계를 포함한다. 음성 측정열은 시험 범위에서 실무적으로 중요한 효과를 배제할 수도, 감도가 부족할 수도, 위반 때문에 부적합할 수도 있다. 이 결과들을 구별한다. 양성 측정열은 기전과 확인의 독립성이라는 다음 질문을 연다. 어느 경우든 허용 설명의 공간을 줄이고 후속 연구자가 결론을 검증할 가능성을 남기면 실험은 제 역할을 한다.

검증용 자료와 고정된 분석 버전

확인 실험 계열 전에는 짧고 실행 가능한 자료 묶음을 만든다. 가설 버전, 구성 파일 목록, 사건 규칙, 주지표의 식, 유효성 기준, 시도의 횟수나 기간, 결정표를 포함한다. 자료 관리자는 이 규칙들을 선택할 때 검증용 자료를 사용하지 않았음을 확인한다. 분석 수행자는 먼저 기댓값을 아는 대조 자료를 받는다. 이어 공개하지 않은 계열에 똑같은 계산을 수행한다.

측정열 공개 뒤 프로그램 결함을 발견하면 수정을 문서화한다. 재계산은 과학적으로 유용할 수 있지만 자료를 본 이력은 남긴다. 수정이 사건 검출이나 특징 선택을 바꿀 수 있으면 새 알고리즘 버전을 독립 자료에서 검증한다. 설명문의 오자 수정과 문턱 변경은 결과가 다르므로 하나의 «기술적 수정» 상태로 합쳐서는 안 된다.

완결된 사례의 보관소에는 원기록, 변환, 제외표, 계산 매개변수와 최종 진술을 포함한다. 확인은 검증 조건 안에서 이해한다. 재료, 기하, 시간적 운용 방식이나 운용자가 바뀌면 다음 적용 검증이 필요할 수 있다. 이 순서는 사례 2와 공학 제50–52장에 제시되어 있다.

제40장

자료 관리와 연구 보고

사건을 반복할 수 없어도 기록에서 결론으로 가는 경로는 검증 가능해야 한다. 최종 그래프 보존만으로는 부족하다. 자료의 출처, 획득 조건, 변환과 특정 조각을 제외한 결정이 필요하다. 이 고리 하나를 잃는 것이 때로는 낮은 계기 정확도보다 결론을 더 크게 제한한다. 따라서 자료 작업은 관측 전에 시작한다. 연구진은 미래 기록의 의미를 복원할 정보를 미리 정한다.

저자가 제안하는 체계는 원자료, 전처리된 표현과 분석 결과를 분리한다. 원기록은 측정 경로가 실제로 낸 것을 보존한다. 전처리된 표현에는 환산 단위, 수정 형식이나 일치시킨 시간 척도가 들어갈 수 있다. 분석 결과는 모형과 평가 규칙을 더한다. 수준 사이에는 추적 가능한 연결이 있다. 정제나 알려진 오류 수정이 원자료를 은밀히 대체해서는 안 된다. 그렇지 않으면 후속 전문가는 간섭과 함께 중요한 관측까지 지웠는지 검증하지 못한다.

NIST의 디지털 증거 보존 지침은 출처, 검사합의 보호된 보관, 접근과 해시 계산 전에도 가능한 변경에 주목한다 [6]. 이 책에서는 중요한 구별을 준다. 해시 일치는 보존한 디지털 판본의 일치를 확인하지만 묘사된 사건의 진실을 확인하지는 않는다. 보관소는 파일뿐 아니라 누가 언제 어떤 상황에서 얻었는지에 대한 정보도 보호해야 한다. 무결성의 기술적 징후 하나로 전체 증거 사슬을 보장할 수는 없다.

자료의 인수와 기술

인수 조건은 알려진 전달 참여자나 등록된 유입 출처, 획득 방식의 기술과 허용 접근 방식이다. 관리자는 자료에 안정적인 식별자를 부여하고 읽을 수 있는지 확인하며 불일치를 기록한다. 출처 미상이면 자동 폐기하지 않되 그에 맞는 제약을 부여한다. 운용자는 회차와의 연결을 확인한다. 계측 전문가는 구성, 범위, 교정 상태와 중요한 환경 조건을 더한다. 책임자는 주장한 과제에 필수적인 정보가 실제로 있는지 확인한다.

양의 기술에는 단위, 측정 방향, 공간 연결과 시간 표지의 의미를 포함한다. 설명 없이 패킷 수신 시각을 사건 시각이라고 부르면 안 된다. 장치마다 척도가 다르면 원래 값과 별도 대응 규칙을 그 불확실성과 함께 보존한다. 모르는 지연은 영이 아니라 모름으로 표시한다. 이 단순한 구별들이 사건 순서를 연구할 수 있는지 결정한다. 없으면 보기 좋게 맞춘 그래프가 원기록에는 없는 인과 순서를 만들기도 한다.

빠진 자료에는 자체 표기가 필요하다. 누락, 채널 과부하, 계획된 종료와 검출 한계 아래 값은 의미가 다르다. 네 경우를 모두 영으로 대입하면 존재하지 않은 작용 소멸을 만들 수 있다.

부적합 마스크는 자료와 함께 보존하고 가능하면 결과 해석 전에 제외 이유를 정식화한다. 나중에 결정했다면 시점과 근거를 계속 드러낸다. 보고서의 완전성에는 기록이 제공하지 못한 것을 인정하는 일도 포함된다.

처리, 접근과 재현 가능성

분석 전문가는 관리되는 사본으로 작업한다. 변환마다 입력, 프로그램 버전, 매개변수와 결과를 보존한다. 복잡한 사슬은 알려진 소규모 대조 자료로 검증하면 유용하다. 그러나 그 자료에서 계산에 성공해도 예정한 성질만 확인된다. 미지 과정의 물리 모형을 인증하지는 않는다. 다른 연구진의 분석 재실행은 계산 재현성을 검증한다. 독립 관측은 더 넓은 질문에 답하며 별도 자료가 필요하다.

접근권은 과제에 따라 정한다. 운용자에게는 기록 수단과 저장 성공 확인이, 분석가에게는 작업 사본이, 외부 전문가에게는 주장을 검증할 자료가 필요하다. 개인정보 제한과 과학적으로 중요한 맥락 보존을 함께 달성해야 한다. 위치나 신원을 공개할 수 없으면 그로 인해 불가능한 검증을 공개 판본에 설명한다. 저자가 고른 예시만 제공되는 자료에 완전한 외부 검증 가능성을 주장할 수는 없다.

손상을 발견하면 관리자는 해당 버전을 새 결론에 사용하는 일을 중단하고 상태를 보존하며 적합한 사본을 점검한다. 검사합 변화는 악의의 완성된 증거가 아니라 분석이 필요한 사건으로 본다. 책임자는 어떤 공개 결정이나 내부 결정이 자료에 의존했는지 평가한다. 수정은 그 사슬을 따라 전달한다. 이전 버전이 연구 운용 방식을 고르는 데 이미 사용되었다면 폴더의 파일 교체만으로 끝나지 않는다.

증거에 근거한 보고서의 구성

보고서는 검증 가능한 주장들을 중심으로 구성한다. 먼저 질문과 과제 경계를 정식화하고 방법과 실제 수행을 기술한다. 결과 뒤에 불확실성, 대안 설명과 제약을 제시한다. 저자 가설은 관찰한 사건으로 오인하지 못하도록 배치한다. 독자는 어떤 기록이 각 중요 문장을 뒷받침하며 어떤 추론 단계가 둘을 잇는지 이해해야 한다. 참고문헌은 방법의 출처를 찾도록 돕지만 자체 연구의 원자료를 대신하지는 않는다.

주장	근거	한계
변화를 기록했다	원채널과 구성	범위와 부적합 구간

주장	근거	한계
의존 관계가 확인됨	실험 계획과 모든 측정열	대조 검증과 다른 조건으로의 적용 가능성
기전을 제안했다	모형과 설명을 구별하는 예측	미검증 귀결

가상 학습 상황을 보자. 조도 그래프에서 몇 초 동안 신호가 완전히 사라진다. 점검 결과 내보내기 프로그램이 잃어버린 패킷을 영으로 바꾸었음이 드러난다. 원기록부로 확립할 수 있는 것은 자료 부재이지 그동안 빛이 어떻게 변했는지가 아니다. 수정 보고서는 어둠의 주장을 제거하고 통신 상실 사실을 남기며 해당 구간을 미확정으로 표시한다. 이렇게 기술적 보정이 과학 결론을 바꾸어 사건의 편리한 설명으로 공백을 채우지 못하게 한다.

처리 완료란 훈련된 다른 연구자가 합의 접근 범위에서 결론의 근거를 추적할 수 있다는 뜻이다. 사람의 권리와 보관소 목적을 무시하고 어떤 정보든 무한히 보관하라는 요구가 아니다. 기간, 공개 제약과 인계 절차는 미리 정하고 근거를 갖춰 재검토한다. 프로젝트의 과학적 기억은 성공 관측만으로 이루어지지 않는다. 실패한 측정열, 방법 변화와 인정한 지식의 한계도 들어간다. 이 기억이 없으면 새 연구마다 다른 이름으로 이전 오류를 반복할 위험이 있다.

국소적 순서와 부분 순서

공통 시간 척도를 잃었다고 관리자가 보기 좋은 연대기 하나를 선택해야 하는 것은 아니다. 분산 과정에 대해 램포트는 과정 내부 사건의 순서, 같은 메시지의 송수신, 이 관계들의 전이적 확장을 통해 순서를 정의했다. 모든 사건 쌍을 비교할 수 있는 것은 아니다. 논리 시계는 이 순서와 일치할 수 있지만 물리적인 지속 시간을 측정하지 않는다 [61]. 연구 기록 보관소에서는 로그와 메시지의 기원이 확인된 경우에 이 접근을 사용한다.

기록 식별자는 노드, 가동 회차와 국소 번호를 포함한다. 재시작하면 새 회차가 열리며 그 경계를 넘는 연결은 별도로 확립한다. 눈치채지 못하게 초기화되거나 반복될 수 있는 계수기는 충분한 근거가 아니다. 각 «먼저» 관계에는 국소 순서 또는 대응시킨 송수신이라는 근거를 보존한다. 이 원래 변들로 전이적 결론을 복원할 수 있다. 얻은 그래프의 순환은 우선 연결, 사건 경계나 기록부의 모순을 뜻하며 그 자체가 시간 고리의 증거는 아니다.

풀이를 마친 학습 예

다음 예의 모든 사건은 가상이다. 노드 A와 B는 한 회차의 연속 국소 기록부를 보존했다. 고장 뒤 두 물리 시계는 서로 비교할 수 없다. 국소 순서의 적합성과 메시지 m1, m2, m3의 대응은 따로 확인했다. A2는 노드 A의 두 번째 사건을 뜻하며 공통 척도의 두 번째 시점이 아니다. 이 예에서 X는 섬광, Y는 기계적 반응, Z는 대조 지표의 변화다.

사건	기록 내용	논리 수 L
A1	m1을 B로 보냈다.	1
A2	X를 기록했다.	2
A3	B에서 m2를 받았다.	5
A4	m3을 B로 보냈다.	6
A5	Z를 기록했다.	7
B1	A에서 m1을 받았다.	2
B2	Y를 기록했다.	3
B3	m2를 A로 보냈다.	4
B4	A에서 m3을 받았다.	7

풀이의 첫 단계는 원래 연결을 적는 것이다. 국소적으로 A1 → A2 → A3 → A4 → A5와 B1 → B2 → B3 → B4가 확립된다. 메시지는 A1 → B1, B3 → A3과 A4 → B4를 더한다. 나머지 관계는 이 화살표 사슬로만 도출한다. 예를 들어 Y 기록은 A3보다 앞서며 Z 기록보다도 앞선다. B2 → B3 → A3 → A4 → A5다. 이는 기록 순서를 확립하지만 Y가 Z의 원인이라는 증거는 아니다.

둘째 단계는 선후를 정하지 못한 쌍을 밝히는 것이다. X = A2와 Y = B2 사이에는 어느 방향으로도 유향 경로가 없다. 이 자료만으로 두 사건의 물리적 순서를 알 수 없다. A5와 B4 사이에도 확인된 관계가 없다. 모른다는 것은 동시라는 뜻이 아니며, 기록되지 않은 외부 연결을 배제하지도 않는다. 이는 이용 가능한 증거의 상태를 나타낸다.

풀이를 검증하면 허용되는 선형 배열 둘을 얻는다. A1, B1, A2, B2, B3, A3, A4, B4, A5와 A1, B1, B2, A2, B3, A3, A4, A5, B4다. 둘 다 모든 원래 연결을 유지하지만 X와 Y, 그리고 A5와 B4의 순서를 바꾼다. 따라서 표의 편의를 위해 고른 한 배열이 보고서의 새 사실이 되어서는 안 된다.

마지막 열의 논리 수는 초기 영에서 계산한다. 국소 사건 전에 계수기를 하나 늘리고, 메시지 수신 시에는 현재 값과 전달된 수 중 큰 값에 하나를 더한다. 따라서 B1은 max(0, 1) + 1 = 2, A3은 max(2, 4) + 1 = 5, B4는 max(4, 6) + 1 = 7을 얻는다. A2의 수가 B2보다 작다고 A2 → B2 관계가 입증되지는 않는다. A5와 B4의 수가 같다고 물리적 동시성이 입증되지도 않는다.

사례 명세의 결론은 다음과 같다. 채택한 기록부 모형에서 Y와 Z의 기록 순서는 확립했고 X와 Y의 기록 순서는 확립하지 못했으며 노드 사이 물리적 지연은 정해지지 않았다. 물리 과정 자체의 시작에는 검출 지연도 영향을 준다. 알려진 X–Y 간격이 허가 조건인 실험에는 이 자료가 부족하다. 보존된 국소 조각들은 자체 근거가 있는 다른 과제에 사용할 수 있다. 원래 시간 표지는 보관소에 남기며 근거 그래프, 비교 불가능한 쌍 목록과 재구성 버전을 함께 보존한다.

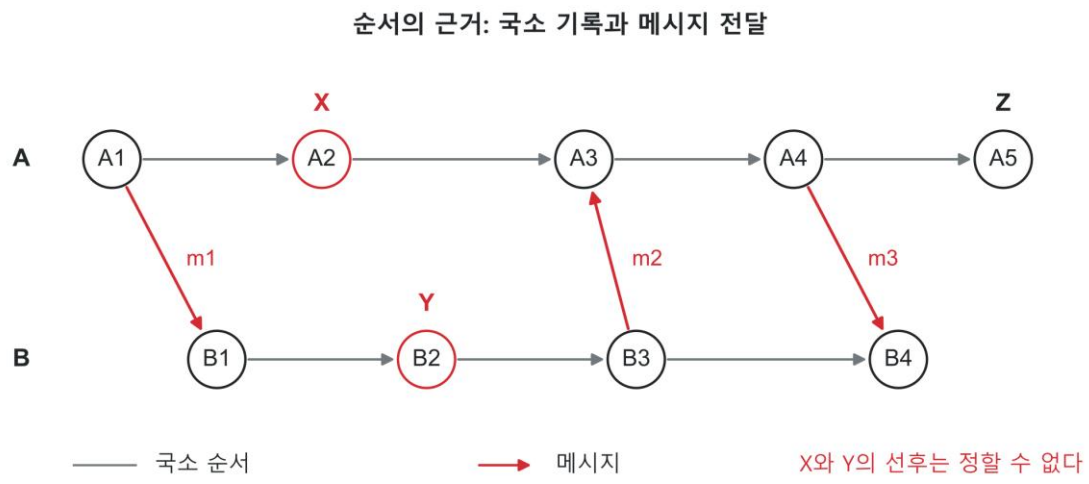


그림 28. 공통 시간 척도가 없는 부분 순서. 풀이를 마친 학습 예의 부분 순서다. 회색 화살표는 국소적 순서를, 진홍색 화살표는 같은 메시지의 송수신을 나타낸다. X=A2와 Y=B2 사이에는 확인된 유향 경로가 없다. 그림의 거리가 물리적인 시간 간격을 정하지 않는다.

제41장

방법의 오류와 실패 분석

연구 실패는 원하는 효과가 없다는 데 그치지 않는다. 실험은 가설을 올바르게 제약하거나 정확도가 부족한 결과를 내거나 자료를 잃거나 예상 밖 작용을 만들 수 있다. 결과마다 다른 행동이 필요하다. 정상 실험의 음성 결과를 양성으로 만들려고 고칠 필요는 없다. 반대로 절차를 어긴 설득력 있는 양성 결과는 전면 재검토가 필요할 수 있다. 분석의 첫 결정은 측정, 예측 검증, 작업 조직이나 위험 관리 중 정확히 무엇이 실패했는지 정하는 것이다.

저자가 제안하는 프로토콜은 결론의 신뢰성이나 후속 작업의 안전을 바꿀 수 있는 모든 사건 뒤에 시작한다. 책임자는 해당 결과의 사용을 제한하고, 조정자는 예정 안전 상태를 확보하며, 관리자는 원기록과 구성을 보존한다. 운용자는 원인을 집단 토론하기 전에 행동 순서를 기술한다. 이는 범인 찾기가 아니다. 처음 제안한 그럴듯한 설명이 아직 수집하지 않은 실제 사건 경과의 정보를 대신할 가능성을 줄인다.

순서의 복원

시간표는 확인된 표지와 명시한 가정으로 구성한다. 장비 상태, 프로그램 변경, 사람의 행동, 외부 조건과 문제 발견 시점을 포함한다. 고장이 발생한 시간과 드러난 시간을 구별해야 한다. 지연이 겉보기 인과 방향을 설명할 수 있다. 정확한 순서를 알 수 없으면 이야기의 편의에 맞춰 복원해서는 안 된다. 구별 자료가 나올 때까지 허용 가능한 시간표 여러 개를 보존한다.

이어서 연구진은 짧은 인과 경로 목록을 만든다. 경로마다 구체적인 변화를 관측 결과에 연결하고 검증을 제안해야 한다. 어떤 인터페이스, 지침이나 의존 관계가 행동을 가능하게 했는지 설명하지 않으면 «인적 요인»은 지나치게 넓은 표현이다. «미지의 에너지»도 같은 결점이 있다. 편리한 원인 이름이 연결을 대신하지 않는다. 결정에 대한 사람의 책임은 고장 기전과 별도로 검토한다. 둘 다 중요하지만 하나가 다른 질문을 덮어서는 안 된다.

공통 원인에는 특별히 주의해야 한다. 여러 채널의 일치는 전원, 시간, 처리에 가해진 하나의 영향 때문에 생길 수 있다. 환경 대조 연구에 따르면 우연한 일치를 검증하도록 설계한 방법을 써도 일부 상관된 간섭이 남는다 [55]. 따라서 분석에는 의존성 지도를 포함한다. 어떤 채널이 함께 오류를 낼 수 있는지 규명하고, 같은 발생원에 기기를 하나 더 붙이는 대신 가정한 경로를 실제로 끊는 검증을 선택해야 한다.

발견한 원인의 검증

안전 시험 장치에서 비슷한 인공 흔적을 재현하면 유용하지만 현장 사건과의 유사성은 미리 추린 특징들로 평가한다. 지속 시간, 스펙트럼과 조건 의존성이 다르면 공통 봉우리 하나로 부족하다. 원기록의 여러 특징과 원인 제거 뒤의 변화를 예측하는 설명이 더 강하다. 오류 가능성만 보였다면 결론도 가능성으로 한정한다. 편리한 시연 실험을 겉으로 비슷한 모든 사례의 기원에 관한 증거로 바꾸어서는 안 된다.

분석 결정도 하드웨어와 같은 주의로 검증한다. Simmons와 동료들의 연구는 결과를 본 뒤 지표, 조건과 자료량을 유연하게 선택하면 형식상 유의한 거짓 발견이 생길 수 있음을 보였다 [56]. 따라서 실무 분석은 실패한 변형까지 모든 수행 분석을 복원한다. 최종 가설이 이런 탐색 중 생겼다면 가치 있는 후보로 남지만 새 측정열로 확인해야 한다. 과거 탐색을 소급해 확인 실험으로 바꿀 수는 없다.

방법 수정은 검증 가능한 기준으로 평가한다. 새 필터는 알려진 간섭을 제거할 뿐 아니라 중요한 대조 신호의 반응도 보존해야 한다. 수정 지침은 운용자가 얻을 수 없는 정보 없이도 수행할 수 있어야 한다. 새 예비 채널은 구체적인 의존성을 줄여야 한다. 변화가 감도를 낮추면 그 대가를 명시한다. 거친 처리 뒤 경보가 사라졌다고 시스템 정상이나 연구 작용 중단이 독립적으로 입증되지는 않는다.

학습 시나리오

가상 학습 상황을 보자. 짧은 발광 사건 뒤 기록기 세 개가 동시에 시간 이동을 보인다. 연구진은 처음에 공통 물리 과정을 고려한다. 분석 결과 장치들이 보정값을 받던 컴퓨터의 재시작이 드러난다. 안전 시험 장치에서 같은 명령 순서가 급변을 재현하지만 독립 대조 기록기에는 나타나지 않는다. 이는 시간 표지의 기술적 설명을 뒷받침한다. 그러나 발광 사건 자체는 별도 관측으로 남는다. 발견한 시계 오류가 광원을 자동으로 정해 주지는 않는다.

이 상황의 수정은 두 부분이다. 기준 시간 구성을 바꾸고 해당 구간을 고려하여 과거 결론을 재검토한다. 확인한 원인이 다른 회차에서도 작용했을 수 있을 때만 전체 보관소의 재분석이 필요하다. 재검토 범위는 작업 규모를 과시하려는 바람이 아니라 입증된 영향 경로로 정한다. 관리자는 수정 결과, 여전히 적합한 결과와 더는 확실히 해석할 수 없는 결과를 기록한다.

피해를 피할 수 있었던 사건도 따로 분석한다. 어떤 방벽이 작동했고 좋은 결과가 얼마나 우연이었는지가 중요하다. 보통 그 당직에는 없는 여유 인력의 전문가가 고장을 발견했다면 그

성공을 안정적인 보호로 볼 수 없다. 중단을 예정하고 올바르게 수행했다면 조직 설계의 특정 부분이 확인된다. 방벽의 정상 작동과 행운의 일치를 같은 지위로 놓지 않고 구별하면 유용하다.

원인을 확립할 수 없으면 보고서는 검증 경로, 이용 가능한 자료의 한계와 안전한 지속 조건을 열거한다. 불확실성은 다수결로 없어지지 않는다. 다음 측정열은 이전 행동을 더 오래 반복할 것이 아니라 빠졌던 구별 정보를 주어야 한다. 때로는 과학 질문을 열어 둔 채 특정 방법을 중단하는 것이 합리적이다. 추가 관측이 원인 식별을 개선하지 못하면서 사람의 부담이나 장치 위험만 늘릴 때 이 결정은 특히 타당하다.

분석 종결은 시정 조치를 수행하고 검증했으며 결과의 제약을 모든 사용자에게 전달했고 미해결 질문의 담당자가 정해졌다는 뜻이다. 이런 작업 규율은 오경보 뒤에도 양성 연구 성과를 만든다. 어떤 경로를 더는 현상의 증거로 삼지 말아야 하며 어떤 자료를 모으고 어디에 실제 불확실성이 남는지 알게 된다. 오류는 그 기전을 다음 검증에 이용할 수 있을 때만 지식의 일부가 된다.

제IX부

관리와 무력화

제42장

확인된 영향의 격리와 제한

장벽의 목적

격리는 발생원과 보호 대상 사이의 특정 작용 경로를 제한하는 것이다. 발생원을 없애야 하는 것은 아니며 현상의 모든 성질을 안다고 전제하지도 않는다. 결정에는 구체적 채널의 근거 있는 모형이면 충분하지만 «이상현상을 닫자»는 포괄적 바람만으로는 부족하다. 물리 장벽은 일부 전달에 작용하지만 다른 전달에는 무관할 수 있다. 따라서 격리 명세는 검증 가능한 문장으로 시작한다. 어느 경로를 어떤 조건에서 제한하고, 어떤 관측으로 결과를 확인하며, 명시 기능 밖에는 무엇이 남는가?

아래는 작용이 확인된 사례에 대한 저자 프로토콜이다. 그 공학적 논리는 NASA 지침의 요구 사항, 이행 검증과 목적에 대한 계의 적합성 구별에 연결된다 [5]. 미지 현상에의 적용은 이 책의 제안이며 산업 규정이 아니다. 작용 경로가 아직 정해지지 않으면 확인된 능력 범위에서 접근 제한과 관측이 가능하다. 임의의 외피를 미지 상호작용의 격리 장치라고 선언할 근거는 없다.

시작 조건과 책임

연구 책임자는 접촉 방지, 특정 전달 감소나 기반 설비와의 과정 분리라는 보호 기능을 정식화한다. 해당 분야 전문가는 선택한 장벽의 적용 가능성을 확인하고 부수 변화를 검토한다. 계측 전문가는 성공적 제한과 감도 상실을 구별할 방법을 정한다. 안전 조정자는 고장 시 행동을 검토하며 중단 권한을 가진다. 운용자는 합의 순서만 수행하고 자료 관리자는 구성과 전환을 기록한다. 역할 겸임은 핵심 결정의 독립 검증을 없애지 않는 곳에서만 허용된다.

장벽 설치 전에 발생원, 채널과 보호 대상의 지도를 만든다. 사례에 관련되면 사람의 접근, 공기, 물, 기계적 연결, 전기 회로와 운반 재료를 포함한다. 경로마다 확인됨, 추정 또는 미평가 상태를 부여한다. 전원, 기밀성, 위치, 고정 부품 상태와 정비처럼 없으면 장벽이 기능하지 못하는 조건도 따로 기술한다. 계획에는 필수 조건을 하나씩 잃으면 무엇이 생기고 누가 상실을 발견할지 설명해야 한다.

초기 기록은 허용 위치에서 수행하며 배경, 작용 지표와 측정기 자체의 상태를 포함한다. 확산 제한이 필요하면 안전을 해치지 않고 얻은 기능 경계 양쪽의 자료가 필요하다. 센서 위치가 바뀐 격리 영역 안에서만 결과를 정해서는 안 된다. 접근 경계와 측정망 경계는 다를 수 있다. 소리, 재료 이동과 전기 위험에 똑같은 반경을 적용하지 않고 평가한 경로와 조건에 따라 배치한다.

장벽의 설치와 검증

바람직한 설계에서는 연구 사례와 접촉하기 전에 알려진 안전한 대표 과정에서 필수 기능을 검증할 수 있다. 불가능하면 그 제약을 솔직히 유지한다. 설치 중 행동 순서와 감시량 변화를 기록한다. 설치 뒤 장벽의 물리 상태, 비상 행동 가능성과 측정 채널 적합성을 별도로 검증한다. 지표 하나의 확인이 전체 묶음을 대신하지 않는다. 구조물 위치가 올바르다고 작용을 충분히 제한했다는 증거는 아니다.

검증할 기능	근거	남은 질문
접근 제한	통행 통제 및 허가증 발급	다른 작용 경로
확인된 전달의 제한	경계에서의 비교 가능한 측정	미검증 조건과 채널
보호 기능 유지	전원과 실행 수단의 상태	공통 고장과 자원
결과의 관측 가능성	검증된 독립 채널	관측 불가 구간과 범위

장벽 둘이 반드시 독립 보호 둘을 주지는 않는다. 공통 전원, 지지대, 제어나 환경이 둘을 동시에 훼손할 수 있으며 이는 공학의 공통 고장 문제와 부합한다 [7]. 따라서 예비 수단마다 어떤 구체적인 고장을 보완하는지 명시한다. 주 수단의 모든 의존성을 되풀이한다면 기여는 제한적이다. 장벽 고장이 그 정상 여부를 평가하는 신호까지 동시에 없앨 수 있는 곳에서는 독립 관측이 특히 중요하다.

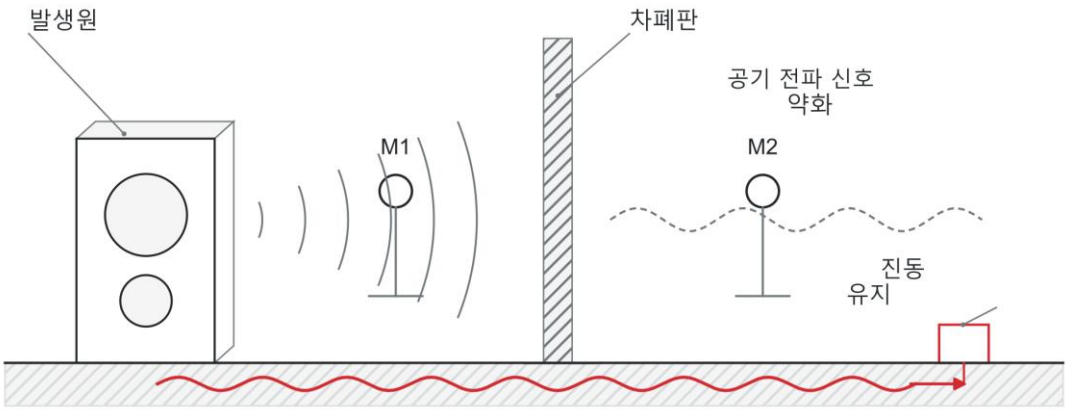
격리에 오염 재료 취급이 포함되면 유지와 무해화를 구별한다. WHO의 처리 권고는 적용 조건에서 공정 검증을 요구한다 [39]. 닫힌 용기는 내용물의 위험 성질을 유지하면서 한 이동 경로를 제한할 수 있다. 처리 표면도 결과의 입증 없이 깨끗해 보일 수 있다. 명세에는 확인 성질, 필요한 정비와 인계 뒤 재료 수령자를 기록한다. 격리는 뚜껑이나 문을 닫는 순간 끝나지 않는다.

중단과 잔여 위험

작업 중단 근거는 시작 전에 정한다. 예상 밖 작용 증가, 확산 변화, 장벽 훼손, 필요한 관측 상실, 보호 기능 고장이나 평가 상황 밖으로의 절차 이탈이다. 운용자는 현장에서 직관적으로 더 강한 보호를 고르지 않고 예정 전환을 수행한다. 해체가 상황을 악화하면 중단이란 장벽을 유지하고 연구 목적의 변경을 멈추는 것이다. 후속 행동 결정은 해당 분야 전문가와 함께 실제 상태에 따라 내린다.

실무 결론에는 제한한 채널, 확인 조건, 보호계 자원과 잔여 불확실성을 열거한다. 원격 기록 지속 같은 특정 행동은 허용하면서 다른 접촉은 금지할 수 있다. 미평가 경로는 이웃 경로를 성공적으로 검증한 뒤에도 미평가로 남는다. 장기 격리에는 기능 책임자, 자원에 맞는 검증 일정과 책임 인계 규칙이 필요하다. 책임자가 없으면 오늘 정상인 장벽이 미래에 대한 미보장 약속으로 바뀐다.

학습 상황을 보자. 음향 차폐판은 기록된 공기 전달 신호를 줄이지만 구조물 센서에는 진동이 남는다. 격리 결과는 한 경로에 양성이고 다른 경로에 음성이다. 사례 전체가 끝났다고 선언하거나 차폐판을 쓸모없다고 판정하면 오류다. 올바른 명세는 달성한 제한을 남기고 잔여 기계적 채널과 다음 허용 질문을 명시한다. 이런 구체성이 미지에 대한 보편 보호를 약속하지 않으면서 과학 모형을 관리에 적용하게 한다.



전달 경로의 학습용 모식도다. 치수와 감쇠량은 정하지 않았다.

그림 29. 차폐판은 한 경로를 막고 구조물은 다른 경로를 유지한다. 두 전달 경로에 대한 격리 학습 예다. 차폐판은 M1과 M2 사이의 공기 전달 음향 신호를 줄이지만, 공통 구조물은 진동 센서로 이어지는 기계적 경로를 유지한다. 결과는 한 채널에 해당하며 사례 전체의 무력화를 뜻하지 않는다.

제43장

안정화와 가역적 개입

인상 대신 상태

안정화란 필요한 보호 기능을 유지하며 과정의 중요한 변수를 미리 정한 영역 안에 두는 것이다. 눈에 띄는 효과의 소멸과는 다르다. 계가 조용해 보여도 에너지, 재료나 기계적 하중을 계속 축적할 수 있고, 관측 신호가 남는 안전한 안정 상태도 가능하다. 따라서 목표는 측정 가능한 매개변수, 허용 변화와 적용 조건으로 적는다. 이 정보가 없는 «이상현상 안정화 장치»는 완성된 제어 수단이 아니라 구상을 뜻한다.

저자가 제안하는 프로토콜은 행동과 상태 사이에 조절 가능한 연결을 적어도 하나 확립했을 때 적용한다. 미지 상호작용에는 그런 연결이 없을 수 있다. 그러면 운용은 관측, 이미 검증한 보호 기능의 유지와 해당 분야 전문가에게 질문 전달로 한정한다. 공학 평가는 기대 이득뿐 아니라 시나리오, 결과와 불확실성을 고려한다 [5]. 확인된 안정화 방법의 부재도 허용되는 과학적, 조직적 결론이다.

통제된 전이의 명세

책임자는 개입 목적과 얻어야 할 새 지식 또는 작용 감소를 설명한다. 해당 분야 전문가는 허용 제어 매개변수와 장치 제약을 정한다. 계측 전문가는 감도, 지연과 채널의 신뢰 불가 기준을 정한다. 안전 조정자는 중단 징후, 필요한 보호 기능과 제어 인계 절차를 승인한다. 운용자는 임의의 운용 확장이 금지된 구체적인 순서를 받는다. 자료 관리자는 명령 전 상태, 명령 자체, 실제 수행과 결과를 기록한다.

명세에는 초기 구성, 목표 상태, 작동 영역과 보호 한계를 포함한다. 작동 영역은 검증 모형의 결론이 적용되는 곳을 보이고 보호 한계는 중단이나 특별 대응 조건을 정한다. 둘이 같을 필요는 없다. 확실한 해석 영역을 벗어난 매개변수는 위험 상태에 이르기 전에도 실험 중단을 요구할 수 있다. 한계는 같은 부류 모든 사례에 붙인 전형적 수치가 아니라 구체적 장치, 적용 요구와 측정 불확도에 따라 선택한다.

가역성은 두 수준으로 검토한다. 명령은 때로 취소할 수 있지만 물질, 구조물이나 생물 상태의 복원을 보장하지는 않는다. 실험 전에 관측 가능한 복귀 징후와 복귀가 금지되거나 이미 불가능한 조건을 기술한다. 중단 계획은 위험 작용의 재생성을 요구해서는 안 된다. 초기 구성이 불안전했다면 운용자에게 익숙하다는 이유만으로 그 상태로의 복귀가 좋은 결과는 아니다.

허가된 실험의 순서

1. 초기 상태, 핵심 채널의 정상 작동과 미리 예정한 안전 전환 준비를 확인한다.
2. 합의한 변화 하나를 수행한다. 발송 명령뿐 아니라 실행계의 실제 행동을 기록한다.
3. 지연을 고려하여 미리 선택한 주 변수와 동반 변수를 관측한다. 결과를 기다리는 대신 추가 명령을 보내지 않는다.
4. 결과를 예측과 중단 기준에 대조한다. 승인된 분기 안에서만 지속, 상태 유지나 중단을 선택한다.
5. 종료 뒤 보호 기능을 검증하고 초기 목표에 없었던 것까지 잔여 변화를 문서화한다.

허용할 변화량을 «작다»는 말만으로 선택해서는 안 된다. 사소한 명령도 중요한 상태 경계를 넘을 수 있고, 안전한 매개변수 하나의 큰 변화가 때로 위험에는 중요하지 않을 수 있다. 근거는 검증한 모형과 공학적 허용 범위에서 나온다. 미지 대상에 적용하기 전에 허용되는 시스템 기능을 승인된 대표 과정에서 검증한다. 이런 준비는 장치의 특정 성질을 확인하지만 미지 물질의 반응을 보장하지는 않는다. 결론에서는 장비의 적격성 확인과 대상에 관한 지식을 구분한다.

기록 자체의 작용도 고려해야 한다. 측정 플랫폼은 연구 과정을 바꿀 수 있다. 무인 공기 감시계 실험은 프로펠러의 유동 교란에 측정이 의존함을 보였다 [45]. 안정화 실험에서는 제어 명령과 함께 관측 장치의 위치와 운용 상태를 기록해야 한다는 뜻이다. 신호 취득 방식 변경이 지시값 변화를 만들었다면 결과 전체를 발생원 제어에 돌릴 수 없다. 검증은 과정 상태와 측정 연결 상태를 구별해야 한다.

지연과 되먹임

계가 지연 응답하면 빠른 보정을 연속해서 가하는 것이 인과 추론을 어렵게 하고 원치 않는 작용을 축적할 수 있다. 따라서 사전 계획은 구체적 계의 동역학에 따라 다음 결정 시점을 정한다. 불확실한 지연 반응을 작용 세기를 높여 고치지 않는다. 자동 제어는 적격성을 확인하고 한계를 검증한 기능에만 허용된다. 미지 사건 검출용 연구 알고리즘이 새 물리적 개입을 스스로 선택해서는 안 된다.

허용 전환 모형과의 불일치, 예상 밖 확산, 보호 기능 저하, 핵심 채널 상실이나 예정 순서 수행 불가 시 중단을 선언한다. 안전 상태에는 냉각, 환기, 유지나 감시 전원 보존이 필요할 수 있다. 따라서 «실험 중단»과 «모두 끄기»는 다른 명령이다. 이 차이는 작업 전에 기술적으로 확보해야 한다. 중단 뒤 대상 상태와 제어계의 정상 작동을 따로 평가한다. 제어 고장이 안정화의 외관을 만들 수 있기 때문이다.

검증 가능한 결과 상태

학습 상황을 보자. 장치의 정상 운용 상태를 바꾸자 관측 매개변수의 변동은 줄지만 외함 온도가 오른다. 목표 채널 하나로 성공을 선언하기는 이르다. 온도 궤적이 허용 영역을 벗어나면 정해진 방식으로 실험을 중단하고 기능 사이의 절충을 기록한다. 합의한 모든 지표가 유지되면 검증 조건에서의 안정화라고 부른다. 발생원 제거를 입증하지 않으며 상태 유지에 필요한 관측을 해제해도 된다는 뜻은 아니다.

안정화한 대상을 인계하려면 자원, 확인된 운용 상태의 지속 시간, 이탈 징후와 책임 운용자를 기술해야 한다. 상태 유지가 계의 지속 작동에 의존한다면 잔여 위험에 고장과 정비가 포함된다. 과거 기록의 안정성이 다른 환경의 미래 안정성을 보장하지 않는다. 따라서 다음 단계는 결과 확인과 결정의 경계를 다룬다. 이런 검증 뒤에야 접근 방식 변경이나 특정 작업 종료를 논의할 수 있다.

열계의 전이 계산 학습 예

알려진 열 장치의 안전한 계산 예를 보자. 적격성을 확인한 작은 가열기, 열적 질량체, 온도 센서와 일정한 열 배출 경로로 이루어진다. 아래 모든 수치는 모형의 학습 매개변수이며 미지 재료 취급 규정이 아니다. 주변 온도는 20 °C, 유효 열용량 C는 200 J/K, 열전달 계수 K는 2 W/K다. 제어 전력 P는 4 W를 넘지 않는다. 이 모형에는 계산에 넣지 않은 자체 에너지 방출이 없다.

$$C\frac{dT}{dt} = P - K\left(T - T_{\text{env}}\right)$$

출력이 일정하면 정상 온도는 Tсреды + P/K이며 이완 시간은 τ = C/K다. 여기서 τ는 100 s다. 평형 상태에서 4 W를 켜면 온도는 계산한 지수함수에 따라 22 °C로 수렴한다. 매개변수와 센서의 불확실성을 포함한 이 동역학이 예상되는 전환을 정한다.

$$T(t) = T_{\text{env}} + \frac{P}{K}\left(1 - e^{-tK/C}\right)$$

켜진 뒤의 시간, s	계산 온도, °C	모형 상태
0	20,000	초기 평형
100	21,264	전환 중
200	21,729	극한값에 접근
300	21,900	극한값까지 남은 차이 약 0,10 K
500	21,987	거의 정상 상태

이 학습 장치의 채택 계획에서 작동 영역은 23 °C에서 끝난다. 이는 선택한 설계 한계이며 다른 장치에 적용하지 않는다. 실험 전에 계측 전문가는 센서 적합성을, 해당 분야 전문가는 열교환 모형을, 운용자는 실제 출력과 열 배출 유지를 검증한다. 명령은 조절기 위치만이 아니라 측정 출력과 온도 궤적으로 평가한다. 모형과의 계통적 불일치는 한계에 도달하기 전에도 연구 목적의 변경을 중단할 것을 요구한다.

300 s 시점에 가열기를 끄되 K는 유지한다고 하자. 다음 100 s 뒤 계산값은 약 20,699 °C다. 이는 확인된 발생원을 중단했을 때의 관측 가능한 귀결이다. 동시에 필요한 송풍이나 다른 열 배출

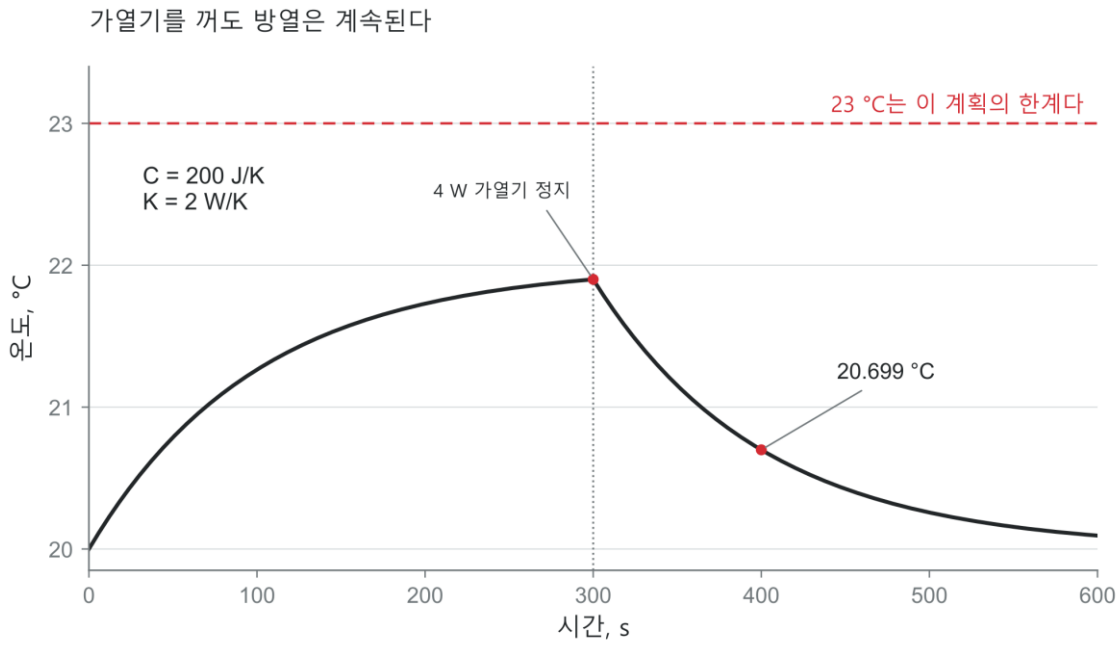
요소를 끄면 K가 바뀌고 이전 예측은 더는 유효하지 않다. 처음 몇 초에 온도 상승이 없어도 전환의 정확성이 확인되지는 않는다. 큰 열용량이 보이는 응답을 지연시키기 때문이다.

$$T(t) = T_{\text{env}} + \left[T(t_s) - T_{\text{env}}\right] e^{-(t-t_s)K/C}, t \geq t_s$$

다른 계산은 격리의 역할을 보여 준다. 기존 4 W에서 K가 0,2 W/K로 줄면 새 정상 수준은 40 °C, 이완 시간은 1000 s다. 처음의 느린 변화가 허용 영역 안에서의 안정화를 뜻하지는 않는다. 이 모형에서 열전달을 줄인 장벽은 가열을 강화한다. 장치에는 보호 기능 상실을 알아차릴 감시가 있어야 하며 실험 중단 때도 예정 에너지 배출 경로를 유지해야 한다.

제어를 확인하려면 먼저 통상적인 허용 대상에서 C, K와 명령 및 출력의 연결을 따로 평가한다. 이어 매개변수 결정에 쓰지 않은 새 출력 순서를 사용한다. 정상 온도뿐 아니라 전환도 검증한다. 잔차가 주변 온도, 센서 위치나 팬 가동과 연결되면 다음 적격성 확인 전에 그 의존성을 모형에 넣는다. 불일치마다 임의 명령으로 보상한 뒤 그 기록을 원래 법칙의 검증으로 제시해서는 안 된다.

이 실험 결과는 알려진 제어 채널에 한정된다. 발생원, 전달 경로, 계의 관성과 중단 기준이 하나의 계산에서 어떻게 연결되는지 보여 준다. 미지 상호작용에는 제어 매개변수와 물리 상태 사이의 자체 확인 연결이 필요하다. 그 연결이 없는 동안에는 장비의 통상 가열 같은 검증된 동반 과정을 제어할 수 있다. 다만 이를 가정한 새 장의 무력화라고 부르지 않는다.



학습용 모형: 주변 20 °C; τ = 100 s. 한계 23 °C는 이 시험 장치에 관한 값이다.

그림 30. 방열을 유지한 열적 전이. C=200 J/K, K=2 W/K, 주변 온도 20 °C인 학습용 장치의 전이를 계산했다. 방열을 유지한 채 300 s 시점에 4 W의 전력 공급을 끈다. 점선 한계 23 °C는 이 설계 예에만 해당한다.

제44장

무력화의 확인

입증해야 할 주장

무력화는 특정 위협과 특정 행동에 관한 결론이지 잦아든 사건의 인상이 아니다. 보이는 효과의 소멸은 발생원 제거, 전달 제한, 운용 상태 변화, 관측 영역 이탈과 검출기 고장 모두와 양립한다. 따라서 확인 절차는 개입 전에 시작한다. 얻으려는 주장과 이를 대안들로부터 구별할 자료를 정식화해야 한다. 결과를 본 뒤 성공 기준을 만들었다면 수행 작업은 탐색에 머물며 새 확인이 필요하다.

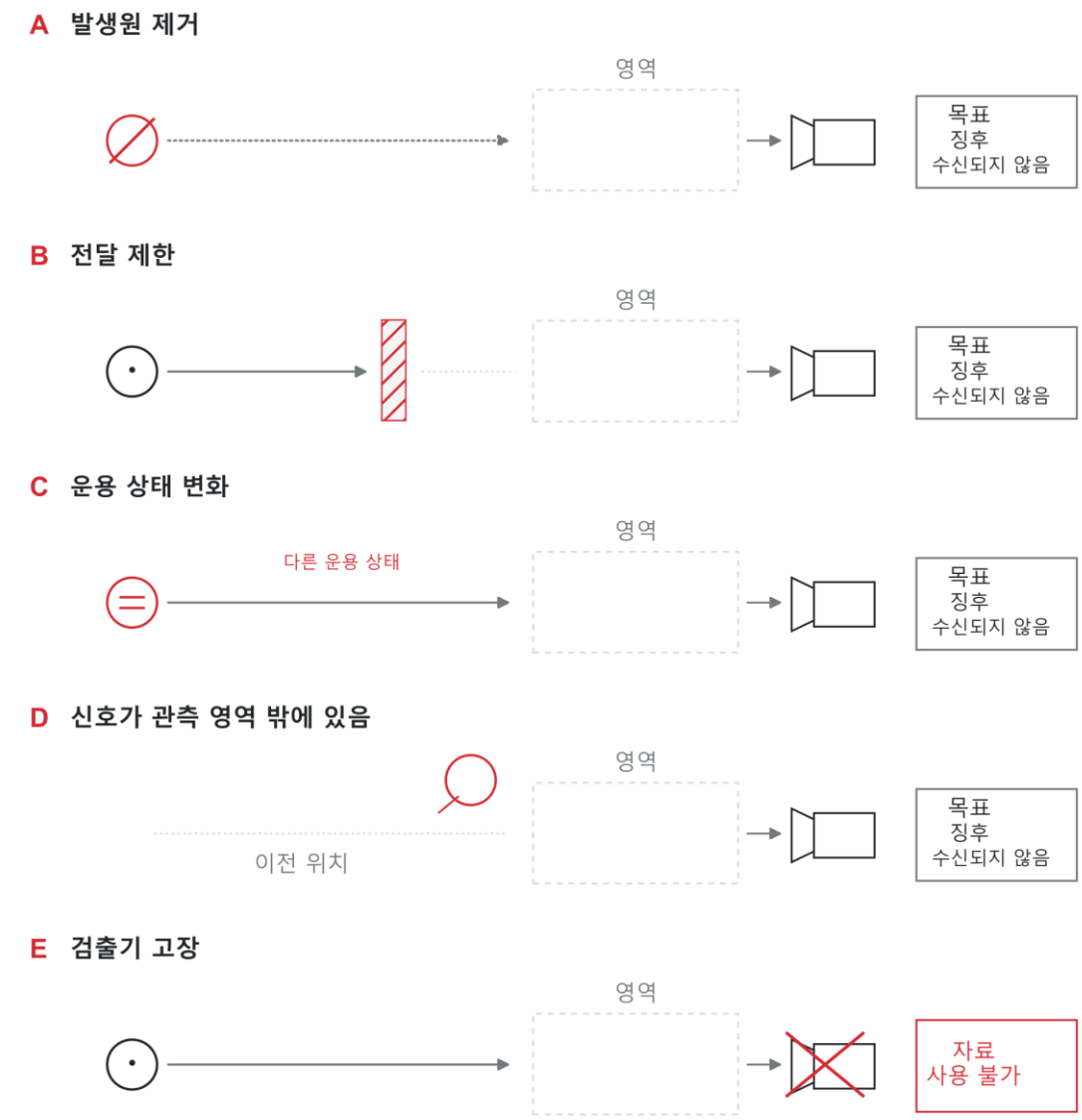


그림 31. 표적 특징이 사라진 데 대한 다섯 설명. 표적 특징이 겉으로 사라져 보일 때 가능한 다섯 논리적 대안이다. 발생원 제거, 전달 제한, 상태 변화, 관측 영역 이탈, 검출기 고장을 구분했다. 마지막 경우는 측정한 물리적 영이 아니라 자료의 무효를 뜻한다. 도식 자체는 어느 대안도 선택하지 않는다.

저자의 프로토콜은 기전, 측정 작용과 후속 행동 결정을 구별한다. 발생원 전체 이론이 없어도 특정 경로는 이미 신뢰성 있게 제한되었을 수 있다. 반대로 기전은 알아도 제한 해제에는 자료가 부족할 수 있다. 방사선 규제에서 비상 운용 종료에는 공식 결정과 책임 인계가 필요하고 그 뒤에도 감시와 제한이 남을 수 있다 [57]. 이 조직적 논리를 다른 부류에 적용하는 것은 제안된 응용이며 보편 표준이라는 주장이 아니다.

결과 자료철

책임자는 검증할 주장과 적용 범위를 정한다. 분야 전문가는 실제 위협의 지표와 적용 가능한 결정 근거를 정한다. 측정 전문가는 개입 뒤에도 측정 절차가 유효한지 확인한다. 안전 조율자는 합의된 결론까지 제약을 유지하며 검증을 중단할 권한이 있다. 자료 관리자는 최초 구성, 행동 로그, 결과, 계획 이탈을 모은다. 독립 검토자는 이 자료들에서 주장한 상태가 도출되는지 평가한다. 이미 써 놓은 «성공»이라는 말에 서명하는 것으로 그쳐서는 안 된다.

자료철에는 초기 상태와의 비교, 대조 배경, 관측 영역과 관측 기간을 미리 정한다. 기간은 기전, 가능한 지연, 주기와 보호 자원에 맞춰 선택한다. 보편적인 무신호 기간을 정하지 않는다. 기전 미상일 때 관측은 확인한 기간에 대한 제한된 증거를 줄 뿐이다. 모른다는 이유로 편리한 기간 아무것이나 충분해지지는 않는다. 기준에는 자료가 신뢰 불가여서 지시값이 낮아도 결론을 보류해야 하는 조건도 명시한다.

개입 뒤 감도의 검증

분석의 첫 행동은 측정계가 필요한 효과를 검출할 능력을 유지하는지 확인하는 것이다. 구성, 전원, 범위, 광학적 또는 기타 신호 경로와 가능한 정상 작동 증거를 점검한다. 일부 GM 계기에서는 포화로 거짓 영이 나올 수 있으므로 지시값 하락을 장의 소멸로 자동 받아들일 수 없다 [40]. 같은 논리를 다른 채널에도 고유 고장 기전에 따라 적용하되 모든 센서가 똑같이 작동한다고 주장하지 않는다.

둘째 행동은 비교 가능성 검증이다. 장벽 설치 뒤 계기 위치나 감도가 바뀌면 수치의 단순 차이로 개입 효과가 정해지지 않는다. 새 구성의 측정 모형과 비교를 복원할 자료가 필요하다. 대조 채널은 공통 배경 변화를 평가하는 데 도움이 된다. 독립 확인에는 이전 프로그램의 사본 하나가 아니라 중요한 취약점의 차이가 필요하다. 제외한 모든 구간을 이유와 함께 보존한다. 성공에 편리한 누락은 중립으로 인정하지 않는다.

셋째 행동은 관측 측정열이 허용하는 결과를 평가하는 것이다. 오경보 시험과 검출 검증은 다른 성능에 관한 것이다 [3]. 기록 사건의 부재는 감도와 관측량 범위에서만 발현을 제약한다.

드물거나 주기적이거나 조건 의존적인 과정은 짧은 측정열에 나타나지 않을 수 있다. 따라서 결과에는 불확실성과 검증 범위를 포함한다. 자료가 부족하면 실무 조치로 작용을 일시 제어하더라도 올바른 지위는 확인 근거 부족이다.

의미를 유지하는 상태 구분

지위	확인된 내용	유지해야 할 것
발생원을 제거했다	확인된 발생원이 없거나 그 기능이 중단되었다	남은 경로와 결과의 검증
채널을 제한했다	검증 조건에서 지정 작용의 전달을 정한 기준까지 줄였다	장벽, 그 감시와 정비
상태 안정화	매개변수를 지정 영역 안에 유지한다	필요한 제어와 자원
대상을 격리했다	명세에 따라 접촉과 이동을 제한했다	현황 관리, 유지와 책임
잦아듦을 관찰한다	명시한 기간에 효과가 기록되지 않았다	결론의 한계와 후속 관측
확인 근거가 부족하다	결과가 아직 중요한 설명안들을 구별하지 못한다	이전에 근거를 갖춘 제한

이 지위들은 한 사례의 서로 다른 채널에 동시에 적용될 수 있다. 예를 들어 소음 발생원은 제거했지만 재료는 분석 전까지 격리한다. «안전함»이라는 포괄 표시는 이 차이를 숨길 것이다. 잠재적 위험 재료를 처리할 때 공정과 효과의 확인은 지정 조건에 해당해야 한다. 외형이 검증된 결과를 대신하지 않는다 [39]. 한 기전의 제거 주장을 절차에서 검증하지 않은 위협으로 확대하지 않는다.

결정의 분기와 검증 종료

기준이 충족되면 독립 검토로 제한된 상태와 구체적으로 허용된 행동을 확인한다. 모순되는 자료가 나오면 먼저 측정과 조건을 검증하고 이어 가설을 구체화한다. 제한은 자동으로 해제되지 않는다. 지표가 악화되면 미리 정한 계획에 따라 검증을 중단한다. 안전하게 검증할 수 없다면 이용 가능한 운영 방식을 유지하고 증거가 없음을 기록한다. 보호 기능이 작동함을 보이기 위해서만 위험한 상황을 만들어서는 안 된다. 기능 시험에는 별도의 근거와 허가가 필요하다.

결론에는 과학적 판단, 안전과 대상의 후속 상태를 책임지는 사람들이 각 역할 범위에서 서명한다. 잔여 작용, 작동 중인 계에 대한 의존성, 미검증 상황과 재검토 근거를 열거한다. 새 관측, 환경 변화나 보호 고장은 과거 측정의 신뢰성을 취소하지 않고도 이전 허가를 취소할 수 있다. 결과는 언제나 기술한 구성에 해당한다. 책임 인계에는 바로 그 구성과 유지 조건을 포함해야 한다.

학습 상황을 보자. 개입 뒤 빛은 사라졌지만 카메라가 광학 경로 변화 때문에 감도를 잃었다. 독립 채널은 작용을 계속 기록한다. 무력화 보고서의 첫 판본은 기각되고 관측 조건 변화만 확인된다. 다른 결과에서는 적합한 두 채널이 모두 감소를 보이고 대조와 후속 측정열이 합의 조건에서 이를 확인한다. 그러면 구체적인 양성 지위를 부여할 수 있다. 바라는 종결이 검증을 대신하기 전에 두 결과를 구별하는 능력에서 과학적 엄밀함이 드러난다.

제45장

작업 종료와 후속 관찰

작업은 명확한 근거로 종료한다. 질문에 충분히 답했거나, 후속 절차가 필요한 정보를 주지 않거나, 가능한 운용 상태가 수용 불가가 되었거나, 다른 유자격 주체에게 과제를 넘긴 경우다. 어느 근거도 모든 가능한 위험의 소멸 주장과 동일하지 않다. 연구 중단, 비상 운용 종료, 특정 제한 해제와 구역의 특정 사용 허용은 서로 다른 결정이다. 강렬한 사건 뒤 눈에 보이는 발현이 멎자 곧 완전 정상으로 선언하고 싶어질 때 이들을 혼동하는 것이 특히 위험하다.

핵 또는 방사선 비상사태의 종료에 관한 IAEA 요구사항에는 공식 결정, 기준, 책임 인계가 포함되며, 종료 뒤에도 관찰 과제가 남을 수 있다 [57]. 이하에서는 미지 현상을 위해 조직 논리를 응용한 저자의 제안을 다룬다. 방사선 규범을 모든 이상현상으로 확대하는 것은 아니다. 실제 분야별 요구사항은 각자의 적용 범위를 유지한다. 이 책은 운용 방식 사이를 전환할 때 책임을 잃지 않는 방법을 기술하며, 가상의 보편적 허가 문서를 만들지 않는다.

종료의 근거

책임자는 수행한 과제, 달성한 결과, 남은 불확실성을 명시한 제안을 준비한다. 측정 전문가는 실제로 유효한 관찰의 범위를 기술한다. 분야 전문가들은 자기 분야의 영향을 평가하고, 안전 조율자는 현재 행동을 끝낼 때의 결과를 검토한다. 관리자는 자료 상태와 미완료 인계 의무를 확인한다. 결정에는 구체적인 다음 운용 방식이 있어야 한다. 제한된 접근 유지, 정해진 조건에서의 통상 사용, 전문 기관 인계, 연구 활동 중단 중 무엇인지 명시한다.

신호가 없다는 사실만으로 근거를 세워서는 안 된다. 먼저 시스템이 관심 영역을 계속 관찰했는지, 유효성을 유지했는지, 처리가 바뀌지 않았는지 확인한다. 이어 어떤 발현이 감도 밖에 남았을 수 있는지 평가한다. 효과의 소멸이 조건 변화와 관련되어 있다면 그 조건도 결론의 일부다. 허용 가능한 서술은 검증한 사용, 기간, 점검 방법에 한정된다. 앞으로 어떤 변화가 생겨도 안전하다는 약속은 유한한 연구의 범위를 넘는다.

종료는 부분적일 수 있다. 예를 들어 알려진 기술적 간섭 발생원은 제거했지만 별개의 드문 사건은 여전히 확정할 수 없다. 운영 결정 근거가 충분하다면 특정 수리 과제를 종결하는 데 방해되지 않는다. 동시에 전체 보고의 편의를 위해 확정 불가 사례를 설명된 것으로 선언해서는 안 된다. 문서에서는 질문을 따로 열거하고 남는 제한을 보인다. 이런 기록으로 인위적으로 잃은 구별을 복원할 필요 없이 나중에 연구를 이어 갈 수 있다.

책임의 인계

인수 주체는 상태, 유효 제한, 재검토 요청 기준과 가능한 통신 경로의 기술을 받는다. 파일 발송이 아니라 이해 확인 뒤 인계가 성립한다. 남긴 장비를 누가 감시하고, 누가 보고에 대응하며, 누가 사용 방식을 바꿀 권한이 있는지 명시한다. 이 기능들의 책임자가 없으면 프로젝트는 장기 관측을 조직했다고 선언해서는 안 된다. 관리되지 않는 카메라만으로는 후속 감시계가 되지 않는다.

남겨 둔 관측 수단에는 자체 계획이 필요하다. 검증 징후, 자료 품질, 작동 능력 점검 주기와 관측 가능성 상실의 발견 방식을 정한다. 빈도와 지속 시간은 보편적인 일수가 아니라 구체적 동역학과 과제에서 선택한다. 동역학 정보가 부족하면 그 제약을 남기고 실제로 유지할 수 있는 보수적 운용을 쓴다. 인력이나 자원이 없으면서 지속 감시를 약속하면 결정의 거짓 근거가 생긴다.

사례 재개의 기준은 관측 가능해야 한다. 특정 신호의 확인된 복귀, 중요한 사용 조건 변화나 필수 보호 채널 고장이 기준이 될 수 있다. 사람의 새 보고도 받고 기록하지만 «다시 이상해지면»이라는 불명확한 표현이 기준을 대신하지는 않는다. 새 보고에는 최초 평가 경로를 미리 마련한다. 재개가 이전 가설의 자동 확인은 아니다. 새 사건에는 자체 출처 및 비교 가능성 검증을 적용한다.

학습 시나리오

가상 학습 상황을 보자. 창고에서 국소 온도 편차가 관측되었다. 점검으로 알려진 기술 회로의 고장을 발견하여 수리하고 예정 운용 상태에서 검증했다. 연구진은 운영 조건과 편차 재발

감시를 유지하며 이 과제를 끝낸다. 나중에 장비 배치와 공기 흐름을 바꾸어 공간을 개조한다. 이전 결정은 새 구성에 자동 적용되지 않는다. 아직 이례적 감각을 보고한 사람이 없어도 근거가 달라졌으므로 재평가가 필요하다.

이 예는 종료 문서가 날짜뿐 아니라 구성과 연결되어야 하는 이유를 보인다. 외부 계에 대한 의존성, 정비 가능성과 허용 변화도 그에 못지않게 중요하다. 조건을 더는 충족하지 못해도 최초의 확신이 소급해 사라지는 것은 아니다. 새 상황을 더는 기술하지 않을 뿐이다. 잘 작성한 문서는 새 사고 전에 전환을 알아차리고 과제 구별 없이 전체 연구를 반복하는 대신 제한된 검증을 선택하게 한다.

참여자와 이해관계자에게 알릴 때는 확인한 것과 추정을 구별해야 한다. 이례적 경험을 보고한 사람에게 특정 외부 원인이 확인되지 않았거나 특정 계기 효과가 기술적으로 설명되었다고 말할 수 있다. 그렇다고 진술을 고의적 기만으로 선언할 근거가 생기지는 않는다. 동시에 안심시키려고 개인적 해석의 확인을 약속해서도 안 된다. 투명한 전달은 결과 의미를 보존하고 작업 종료가 은폐나 최초 가정 전체의 인정으로 이해될 위험을 줄인다.

종결 단계의 자료는 접근, 기간과 재분석 조건을 기술하여 보존한다. 시료는 적용되는 전문 절차에 따라 인계하거나 작업에서 제외한다. 프로젝트가 끝났다는 이유로 미지 상태가 통상 상태가 되지는 않는다. 개인정보는 과학 결론과 함께 자동 공개되지 않는다. 나중에 오류가 발견되면 보고서를 고치고 그에 의존해 결정한 사람들에게 알릴 경로가 있다. 단계 종료가 책임 있는 재검토 가능성을 훼손해서는 안 된다.

이 단계의 최종 결과는 알려진 상태, 허용 활동과 지정 책임 사이의 안정적인 대응이다. 과학 질문은 열려 있어도 실무 과제에는 충분한 제한적 해법이 있을 수 있다. 반대로 기전은 알아도 수용 가능한 제어법이 아직 확인되지 않았을 수 있다. 이 상태들을 따로 기록하면 무지를 재앙으로, 관측 중단을 과정 소멸의 입증으로 내세우지 않으면서 정직하고 체계적으로 작업을 끝낼 수 있다.

제46장

상충하는 결과에 대한 전문가 평가

결과의 모순이 항상 한쪽의 참된 관찰과 다른 쪽의 오류를 뜻하지는 않는다. 연구들이 다른 양, 조건이나 질문을 다루었을 수 있다. 전문가 평가는 주장 내용의 정확한 복원으로 시작한다. «신호를 기록했다», «모형에 비추어 이례적인 신호다», «새 기전을 발견했다»는 결론의 세

단계다. 첫 단계에 동의한다고 셋째에도 동의할 필요는 없다. 단계를 구별하지 않으면 논쟁은 자료 검증 대신 포괄적 입장을 주고받는 일이 되기 쉽다.

전문가 평가의 첫 작업 문서에는 주장과 근거 목록을 포함한다. 주장마다 원자료, 변환, 불확실성 모형과 적용 조건을 명시한다. 이어 모든 참여자가 인정하는 사건, 수치와 제약이라는 공통 부분을 추린다. 이 부분은 편의상 최소 타협으로 정하지 않는다. 이용 가능한 근거로 확인되어야 한다. 불일치는 기록, 처리, 통계 평가, 기전 또는 실무 결정 중 발생 지점에 따라 묶는다.

전문성과 독립성

저자가 제안한 프로토콜은 평가 책임자, 공동 자료 집합 관리자, 논쟁이 있는 연결 요소들의 전문가를 지정한다. 기기를 만든 연구자는 작동 원리를 설명하는 데 유용하지만 독립 검토자를 대신하지 않는다. 반대로 외부 전문가도 접근할 수 없는 구성에 대해 확신에 찬 결론을 내리지 않아야 한다. 참여자들은 중요한 전문적 관계와 재정적 관계를 공개한다. 이렇게 하면 조직이나 학파 소속을 옳고 그름의 자동 증거로 삼지 않으면서 의존 관계를 평가할 수 있다.

서명 수가 논거의 질을 대신하지 않는다. 변환 그래프 하나에 기초한 결론 열 개에는 공통 취약점이 있을 수 있다. 독립 측정 하나도 논쟁 지점을 실제 검증한다면 평가를 바꿀 수 있다. 그러나 이례적인 설명안이 소수의 지지를 받는다는 이유만으로 우선하지는 않는다. 모든 설명에는 자료와의 일치와 검증 가능한 귀결이 필요하다. 확인 조건과 양립하지 않는 설명안을 보고서의 겉보기 균형만을 위해 동등하게 남겨서는 안 된다.

각 측에 어떤 이용 가능한 관측이 평가를 바꿀지 물으면 유용하다. 답은 검증을 구성할 만큼 구체적이어야 한다. 예외를 무한히 제시하면 설명의 실무적 구별 가능성이 사라진다. 후속 이론 개발 계획으로 남길 수는 있지만 개입 선택을 위한 완성된 기전으로 쓸 수는 없다. 전문가 평가는 현 단계에서 일부 진술이 애초에 하나의 검증 가능한 비교 체계에 속하지 않는다고 인정할 수 있다.

설명을 구별하는 검증의 선택

허용 가능한 위험과 가용 자원으로 중요한 불일치를 줄이는 검증을 우선한다. 새 실험일 수도, 메타정보를 복원한 원자료 재분석일 수도 있다. 단위나 시간 척도 때문에 생긴 논쟁이라면 비용이 큰 작용을 반복할 의미가 없다. 그러나 두 모형이 옛 파일을 똑같이 잘 기술할 때는 끝없는 재검토도 도움이 되지 않는다. 이때는 예측이 갈라지는 새 채널이나 다른 조건 범위가 필요하다.

불일치 지점	검증할 질문	가능한 결과
원기록	보존한 판본이 일치하는가?	자료 차이의 위치 확인
처리	어느 단계가 결론을 바꾸는가?	분석 모형 비교
기전	어디에서 예측이 달라지는가?	새로운 제한 실험
실무 결정	어떤 결과가 남는가?	제약을 명시한 운용

가정된 예지를 공동으로 검증해 온 역사는 유리한 결과 하나를 고르는 대신 연구 전체의 순서를 고려해야 함을 보여 준다 [14, 15]. 전문가 평가에서 중요한 일반 원칙은 최초 가설, 나중에 발견한 규칙성, 그 규칙성의 후속 검증이 서로 다른 지위를 갖는다는 것이다. 효과의 방향이 바뀌면 모형이 이를 미리 예측했는지 밝혀야 한다. 새 제약 없이 반대 결과를 확인으로 바꾸어 부른다고 모순이 해결되거나 안정된 메커니즘이 생기지는 않는다.

전문가들은 다음 검증의 올바른 수행 기준과 자료 접근 방식을 미리 합의한다. 이론 평가에는 이견이 있어도 적합 기록의 의미와 위반 고려 방식을 이해해야 한다. 합의가 불가능하면 구체적으로 양립하지 않는 요구를 결론에 남긴다. 검토자의 이름 하나로 절차가 독립적이 되는 것은 아니다. 자료 출처, 분석의 자유와 최종 글에서 삭제되지 않고 불편한 결과를 알릴 가능성이 중요하다.

학습 시나리오

가상의 학습 시나리오다. 첫 팀은 짧은 주파수 이동을 보고하고, 둘째 팀은 같은 구역에서 이를 검출하지 못한다. 처음에는 공개 논쟁이 직접적인 반박처럼 보인다. 비교해 보니 둘째 시스템은 더 긴 구간의 평균값만 저장했다. 이 시스템의 부정적 결과는 첫 팀의 짧은 시간에 관한 예측을 완전히 검증하지 못한다. 동시에 첫 기기는 현지 장비와 기준 채널을 공유했다. 양쪽 모두에서 한계가 발견되어 새로 합의한 실험 계열이 필요해진다.

이 상황의 구별 실험은 적합한 시간 분해능을 유지하고 독립 기준을 도입한다. 공통 의존성을 없애자 원래의 이동이 사라지면 기술적 설명이 강해진다. 유지되면 질문은 다른 영향 경로와 기전으로 옮겨 간다. 측정열을 수행하기 전의 올바른 결론은 승자를 선언하지 않는다. 이전 결과들이 완전히 비교 가능하지 않았고 보유 자료로는 남은 설명 사이에서 선택할 수 없음을 확립한다.

실무 결정이 논쟁의 과학적 해결보다 먼저 필요할 수 있다. 그러면 안전 조정자는 보호 조치를 가장 위험한 이론의 증거로 내세우지 않고 허용 상황들의 결과를 평가한다. 예를 들어 새 물리 기전이 확립되지 않아도 관측 가능성이 부족하여 특정 작업 제한이 정당할 수 있다. 근거에는 그 이유를 명시해야 한다. 그렇지 않으면 일시적 주의가 전문가 평가에서 실제 확인하지 않은 현상의 공개 증거가 된다.

최종 결론에는 공통으로 확인한 사항, 미해결 모순, 기각한 논거와 기각 이유를 포함한다. 중요한 별도 의견은 불분명한 반대 표기가 아니라 구체적 근거와 함께 보존한다. 결정을 바꿀 수 있는 새 정보도 따로 명시한다. 자료 부족도 온전한 전문가 평가 결과다. 자원을 필요한 검증에 돌리고 연구 계획이 특정인 신뢰에 관한 논쟁으로 대체되는 것을 막는다.

좋은 전문가 평가가 반드시 단일 이론으로 끝날 필요는 없다. 과제는 모순을 더 정확히 하고 양립 가능한 오류의 수를 줄이며 다음의 정당한 단계를 정하는 것이다. 이 지점에서 분류, 측정, 조직과 계기 개발이 만난다. 보유 자료로 모형을 구별하지 못하는 곳에 새 관측의 구체적 기술 요구가 생긴다. 이로써 과학적 이견은 이미 확인한 것과 앞으로 검증할 것을 구별하는 연구 과제가 된다.

제X부

기기와 엑스트라과학의 발전

제47장

범용 측정 복합체의 구조

측정 복합체의 범용성이란 여러 물리 과제에 맞춰 관측을 재구성할 수 있다는 뜻이다. 존재하는 모든 것에 감응한다는 의미는 아니다. 토대는 각 측정값의 출처, 채널 상태와 적용 한계를 확립할 수 있는 구조다. 이런 복합체는 미지 외부 과정과 자체 고장을 구별하도록 도와야 한다. 가정한 효과가 이례적일수록 이 진단 기능이 중요하다.

시스템의 다섯 수준

첫 수준은 각각 정해진 양, 범위와 대역을 갖는 교체형 측정 모듈이다. 둘째는 신호 변환, 하드웨어 계수, 원측정값과 상태 징후 보존을 포함하는 국소 기록이다. 셋째는 노드 사이의 시간과 좌표 비교다. 넷째는 환경 채널과 대조 채널이다. 다섯째는 처리와 표시다. 마지막 수준의 출력이 사건의 유일한 잔존 흔적이어서는 안 된다.

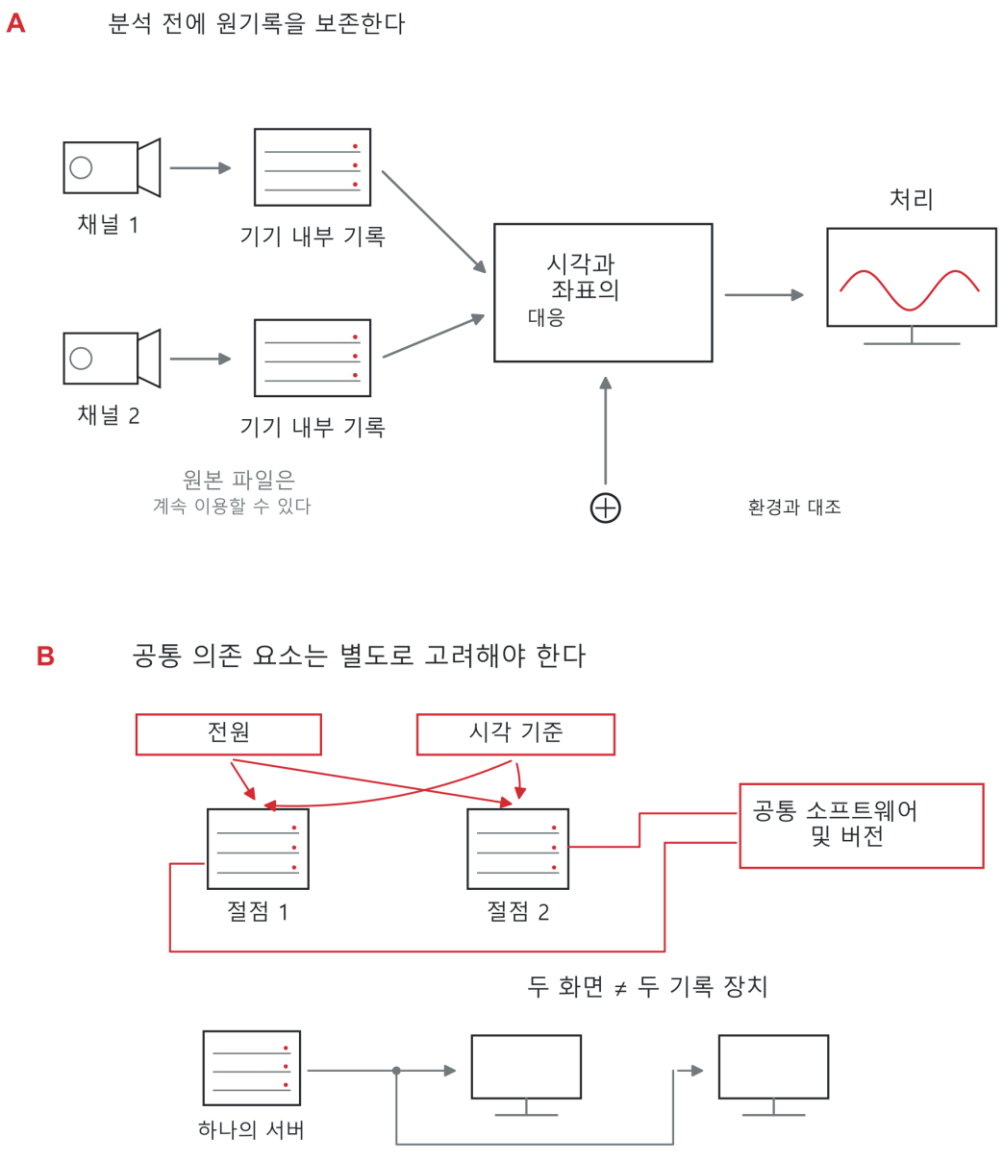
가능한 모듈 구성에는 광학 기록, 온도와 압력 측정, 음향 채널, 자력계, 전원과 기초 운동 감시가 포함된다. 다른 모듈은 가설과 사용 조건에 따라 더한다. 복사 측정, 화학 또는 생물 연구에는 해당 분야 역량과 적합한 장비가 필요하다. 이 모듈 목록은 모든 사례의 필수 장비 묶음이 아니다. 부적합한 센서는 자료를 늘려도 반드시 지식을 늘리는 것은 아니다.

각 노드는 국소 측정 순서, 단조 증가 계수기, 외부 시간 척도와의 대응 정보를 저장한다. 시계 보정은 이력을 지우는 대신 하나의 사건으로 기록한다. 통신이 끊겨도 저장장치는 용량 한도 안에서 자료를 계속 보존한다. 한도에 이르면 불완전성을 명시하는 표지를 남긴다. 재전송이 원래 측정값의 순서를 바꾸거나 공백을 영의 신호로 바꾸어서는 안 된다.

독립성의 연결 고리

예비 구성은 공통 고장 원인으로 평가한다. 같은 계기들이 전원, 프로그램 오류, 기준 발진기나 환경 작용을 공유할 수 있다. 부품 분리는 특정 의존성을 줄이지만 절대적 독립성을 확립하지는 않는다 [7]. 따라서 채널 쌍마다 공통 에너지원, 공통 동기화, 공통 변환기, 공통 프로그램과 공통 자료 경로라는 연결 지도를 만든다.

예를 들어 자체 저장장치를 갖춘 카메라 둘은 한 서버의 화면 둘보다 더 독립적으로 영상을 보존한다. 그러나 같은 펌웨어와 공통 외부 동기화는 여전히 거동을 연결한다. 서로 다른 시간 취득 프로토콜도 같은 최초 표준에 이를 수 있다 [9]. 실무 과제는 검증할 고장에 대한 독립성을 선택하는 것이다. 네트워크 오류를 연구하면 독립 경로가, 온도 드리프트를 연구하면 서로 다른 반응과 환경 감시가 필요하다.



독립성은 구체적인 고장과의 관계로 평가한다.

그림 32. 측정 채널의 독립성이 끝나는 곳. 측정 복합체와 명시한 의존 관계의 도식이다. 국소 원기록은 통합과 분석 전에 보존한다. 하지만 저장장치가 나뉘어 있어도 공통 전원, 시간 기준, 소프트웨어 오류가 사라지지는 않는다. 한 서버의 화면 두 개가 독립 기록 두 개를 만들지는 않는다.

환경 채널은 보기 좋은 이웃 곡선을 보이는 데 그치지 않고 간섭 기여를 정량 평가할 수 있어야 한다. 레이저 간섭계 중력파 관측소 LIGO 연구에서는 이를 위해 센서 배치의 제약과 비선형성을 고려한 외부 작용과 주 채널의 결합 추정값을 사용했다 [55]. 제안하는 복합체에서 같은 논리는 안전 시험 장치의 사전 검증을 뜻한다. 어떤 환경 조건 변화가 관측 신호를 만들 수 있으며 불확실성은 얼마인가?

맥락을 잃지 않는 사건 기록

모든 고주파 채널을 계속 기록하는 것은 기술적으로 불가능할 수 있다. 이때 작동 전후 구간을 보존하는 순환 버퍼를 쓴다. 다만 시작 규칙은 자료 선택의 일부가 된다. 센서 하나의 경보 때만 버퍼를 저장하면 다른 채널의 통계는 이미 그 경보에 조건부인 것이다. 배경 일치를 평가하려면 관심 효과와 독립적으로 고른 대조 시간 창이 필요하다.

채널 상태에는 «작동함» 표지보다 많은 것이 들어간다. 증폭 방식, 적분, 포화, 외함 온도, 패킷 손실, 교정 버전과 운용자 명령을 보존한다. 자동 범위 변경으로 인접 지시값을 보정 없이 비교할 수 없게 될 수 있다. 표시계는 이 경계를 보이고 측정값, 모형 추정값과 얻을 수 없는 결과를 구별해야 한다. 없는 양에 정상 상태의 색을 칠하지 않는다.

설치와 운용 개시를 위한 저자의 절차

1. 책임자는 관측 징후와 운용 방식을 정한다. 계측 전문가는 최소한으로 충분한 모듈 구성과 의존성 지도를 선택한다.
2. 운용자는 배치 전에 안전한 장소에서 국소 저장, 통신 상실과 전송 복구를 검증한다.
3. 자료 관리자는 명명, 버전과 접근 체계를 확정한다. 원자료 흐름은 변경되는 분석 산출물과 분리한다.
4. 해당 분야 전문가는 환경에 대한 모듈 적합성을 확인한다. 안전 조정자는 장비를 안전 상태로 돌릴 기준을 설정한다.
5. 주 측정열 전에 연구진은 배경과 대조 반응을 기록하고 종료 뒤 작동 능력 검증을 반복한다.

핵심 채널의 작동 상태를 알고 결과 출처를 복원할 수 있는 동안 계속할 수 있다. 독립 표준을 잃었다고 항상 계 전체를 꺼야 하는 것은 아니지만 가능한 결론의 부류는 자동 제한되어야 한다. 위험 환경 상태 감시가 중단되면 과학 채널의 보존 여부와 무관하게 연구 운용을 중단한다. 진단과 안전은 단일 처리 과정에 의존해서는 안 된다.

최종 구조는 자료 출처를 훼손하지 않고 모듈을 교체할 수 있어야 한다. 새 센서는 자체 응답 모형과 별도 적격성 확인을 갖추어 연결한다. 단자가 호환된다는 이유로 신뢰를 얻지는 않는다. 이런 복합체는 연구 계획과 함께 발전한다. 안정적인 기록 기반을 유지하며 원리를 아직 검증해야 하는 장치들을 위한 자리를 제공한다.

제48장

새 센서의 설계

새 센서 개발은 특정 측정의 부족에서 시작한다. «이상현상용 계기가 필요하다»는 말은 너무 넓어 감응 소자, 범위나 작동 검증을 고를 수 없다. 유용한 과제는 다르게 표현한다. 두 계의 지정 반응을 구별하거나, 특정 양의 짧은 변화를 기록하거나, 물리 효과를 공통 드리프트와 분리해야 한다는 식이다. 이로써 현상의 불확실성을 미지 대상과 만나기 전에 검증할 수 있는 공학 요구로 바꾼다.

구조 설계에 앞서는 측정 모형

단순 선형 근사에서 계기의 출력은 $q(f) = H(f)x(f) + n(f)$로 표현할 수 있다. x는 연구할 작용, H는 변환의 주파수 응답, n은 총잡음이다. 이 표기에는 모든 양의 단위, 대역과 선형성 한계를 명시해야 한다. 상호작용이 비선형이면 모형에 해당 항을 넣어야 한다. 새 장의 명칭이 미지 함수 H를 대신하지 않는다.

응답이 미지의 장 진폭과 미지의 결합 세기의 곱에 의존하면 단일 채널은 보통 그 조합만 정한다. 계수를 임의로 골라 진폭을 측정했다고 선언할 수 없다. 추가 센서, 독립 제약이나 매개변수의 곱으로 결과를 솔직하게 진술하는 방법이 가능하다. 이 결정은 어떤 양을 교정하고 화면에 무엇을 표시하며 소프트웨어가 어떤 결론을 허용할지라는 전체 설계에 영향을 준다.

서로 다른 물리계의 비교는 실제 연구 접근이다. 특정한 가설적 상호작용의 분광 탐색에서는 원자 전이와 수정 발진기의 반응을 함께 분석했다 [26]. 그러나 새 설계는 자체 계수와 한계를 다시 정해야 한다. 발표 장치와 겉모습이 비슷하다고 측정 성능이 전해지거나 찾는 기전이 확인되는 것은 아니다.

차등 시제품에 대한 저자의 예

가정 과제를 보자. 모형은 한 매개변수에 대한 두 재료의 주파수 반응이 다르다고 예측한다. 제안 시제품에는 공진 소자 둘, 각각의 온도 감시, 주파수 비교 경로와 지지대 상태의 독립

기록이 있다. 추가 전자 채널에는 처리 검증용 기지 시험 신호가 들어간다. 구조는 아직 측정 설계이며 예측한 상호작용의 존재를 확립된 것으로 받아들이지 않는다.

반응 차이는 $D = q_1 - \kappa q_2$로 적으면 편리하다. 계수 κ는 알려진 공통 간섭 억제라는 사전 과제에 맞춰 고르고 별도 측정열에서 검증한다. 그러나 찾는 작용에 대한 유효 감도도 해당 계수들의 차이가 된다. 그 차이가 영이면 장치는 자기 표적 신호를 성공적으로 억제할 것이다. 따라서 결과의 안정성 증가가 감도 향상을 입증하지는 않는다.

안전 시험 장치에서 먼저 소자의 명세상 사용 범위 안에서 통상 조건을 조절하고 영향을 측정한다. 온도 감도, 기준 드리프트, 기계적 상태와 처리를 따로 검증한다. 이어 어떤 작용 조합이 목표 예측을 모방하는지 평가한다. 그 뒤에야 소형화, 자립 운용 확대와 더 복잡한 잡음 억제를 논의하는 것이 유용하다.

교정용 대응물의 의미는 제한적이다. 기지 작용은 감응 소자와 측정 경로가 특정 종류의 주파수 변화에 반응함을 확인할 수 있다. 하지만 미지의 장이 실제로 그런 변화를 일으킨다고 입증하지는 않는다. 개발자는 확인된 계기 특성과 지시값의 가정적 해석을 구별해야 한다. 인터페이스에는 불확실성을 동반한 측정량을 표시하는 편이 낫다. 가설적 발생원의 이름은 분석 결론에서만 허용한다.

개발 단계와 다음 단계로 넘어가는 기준

1. 연구 책임자는 관측할 차이, 범위와 추정 대안들을 정한다. 해당 분야 전문가는 감응 소자와의 물리적 연결에 근거를 제시한다.
2. 계측 전문가는 잡음과 계통적 영향의 예산을 작성하고 전체 복합체 제작 전에 차원과 매개변수 결정 가능성을 검증한다.
3. 운용자는 허용된 실험실 환경에서 진단 가능한 최소 시제품을 조립한다. 자료 관리자는 구성과 모든 변화를 기록한다.
4. 기지 작용으로 시험한 뒤 독립 전문가는 간섭 억제 시에도 표적 감도가 유지되는지 평가한다.
5. 현장 사용 결정은 안정성, 안전한 고장과 외부 조건 적합성을 별도 검증한 뒤에만 내린다.

모형으로 돌아갈 이유는 감도 부족만이 아니다. 모든 가능한 구성에서 중요한 두 기전이 구별 불가 반응을 내면 전자 장치 개선으로는 식별 과제를 풀지 못한다. 다른 감응 소자나 추가 관측이 필요하다. 마찬가지로 너무 느린 반응을 기록 빈도 증가로 고칠 수는 없다. 기록하는 동역학은 물리적 변환 과정에 의해 제한된다.

시제품 중단 근거에는 불안정한 전원, 과부하, 상태 감시 상실과 설명되지 않는 가열이 포함된다. 이 징후들은 먼저 공학적 고장으로 다룬다. 손상 순간의 이례적 출력이 유용한 검출로 바뀌지는 않는다. 개발자가 신호를 잠재적으로 중요하다고 보아도 안전 조정자는 시험 중단 권한을 유지한다.

새 센서의 준비는 외함이나 시연 곡선의 존재가 아니라 명시 측정 과제의 이행으로 확인된다. 무엇을 구별할 수 있고 어떤 통상 작용이 속이며 언제 결과가 무효가 되는지 알아야 한다. 추정 현상과의 물리적 연결이 아직 없다면 개발은 새로운 종류의 측정을 위한 양질의 계기로 마무리될 수 있다. 이것도 후속 발견의 토대가 되는 독립 성과다.

제49장

기기 시험과 성능 확인

시험은 계기가 연구자에게 하는 약속을 검증해야 한다. 교정은 지시값과 기지 값의 관계를 확립하지만 모든 검출 질문에 답하지는 않는다. 계기는 일정 신호를 정확히 측정해도 짧은 사건을 놓칠 수 있고, 경보가 드물면서 거의 아무것도 검출하지 못할 수 있으며, 한 온도에서 잘 작동해도 옮긴 뒤에는 틀릴 수 있다. 따라서 성능은 미래 사용에 맞는 조건에서 별도로 확인한다.

교정에서 검출로

측정 채널에서는 편향, 반복성, 범위 의존성, 시간 응답과 중요한 영향량을 검증한다. 검출계에서는 표적 사건의 기록 확률, 오경보 빈도, 결정 지연과 자료를 얻을 수 없을 때의 거동을 더한다. 이 성능들은 선택한 결정 규칙에 해당한다. 시험 뒤 문턱이나 필터를 바꾸면 이전 확인으로 충분하지 않을 수 있는 새 구성이 된다.

방사선 시스템의 거짓 경보에 관한 NIST 공식 보고서는 오류 빈도와 신뢰 수준의 요구가 시험량 및 인수 규칙과 어떻게 연결되는지 보여 준다 [3]. 다른 장비에도 일반적인 통계 논리는 적용되지만 구체적인 절차가 자동으로 적용되지는 않는다. 무엇을 한 시도로 세는지, 시도들이 얼마나 독립적인지, 조건들이 계속 비교 가능한지 전제를 검증해야 한다.

간단한 자체 계산으로 영 결과의 의미를 설명해 보자. 독립적이고 동일하게 구성한 대조 시도 N번에서 오경보가 없었다고 하자. 실제 오류 확률이 p이면 이 결과의 확률은 $\left(1-p\right)^{N}$ 다. 신뢰도 95%의 단측 상한은 다음 식에서 얻는다.

$$p_{95} = 1 - 0{,}05^{\frac{1}{N}}.$$

시도가 천 번이면 약 0,3%다. 따라서 관찰 오류가 영이라는 것은 오류 확률이 영이라는 뜻이 아니다.

이 계산을 천천히 변하는 한 과정의 인접 측정값 천 개에 적용하여 독립 시행 천 번처럼 취급해서는 안 된다. 상관관계, 조건 변화, 유리한 구간의 선택은 전제를 깨뜨린다. 연속 운용에는 실패한 시도의 비율이 아니라 단위 시간당 사건 빈도 모형이 필요할 수 있다. 보고서에는 실제 관찰 시간, 의존 구조, 추정이 적용되는 조건을 명시한다.

양성 대조와 음성 대조 시험

대조 측정열에는 표적 작용의 부재와 계기가 구별해야 하는 작용을 모두 포함해야 한다. 작동 대역 안에서 여러 진폭, 지속 시간과 위치를 검증한다. 조정 자료는 평가 자료와 분리한다. 개발자가 모든 결과를 보고 문턱을 맞추었다면 같은 자료의 후속 시연은 독립 성능이 아니라 적합 결과의 타당성만 보여 준다.

소프트웨어로 인공 신호를 대입하면 처리를 검증하지만 감응 소자는 검증하지 않는다. 물리적 교정 작용은 더 긴 측정 경로를 검증하지만 자체 불확실성이 있고 연구 과정의 모든 성질을 모방하지 못할 수 있다. 이 수준들은 함께 유용하다. 외부 간섭 감시 방법에서는 대조 작용 위치, 환경 센서와 주 채널 사이 결합의 제약을 고려한다 [55]. 이를 «검증됨»이라는 말 뒤에 숨겨서는 안 된다.

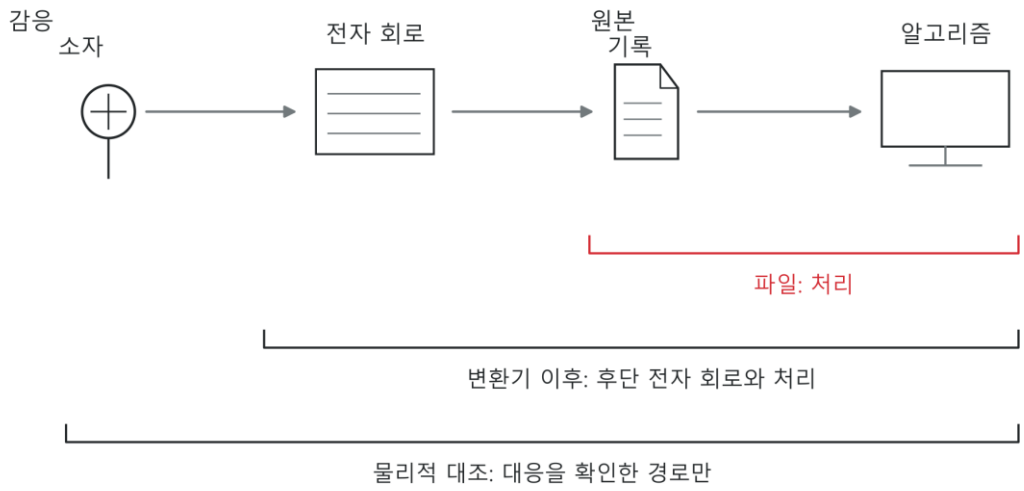


그림 33. 대조용 입력이 검증하는 경로의 범위. 알려진 작용을 넣는 지점에 따라 교정 검증의 범위가 정해진다. 파일 대입은 처리를 검증하고, 변환기 뒤에 입력을 넣으면 그 뒤의 경로를 검증한다. 물리적 검증은 명시적으로 대응시킨 연결 요소들에만 적용된다. 그것만으로 가정한 새 상호작용 χ를 확인하지는 않는다.

부적합 조건에는 별도 시험을 실시한다. 계는 범위 이탈, 포화, 기준 상실과 자료 유입 중단을 구별해야 한다. 이런 상태의 안전한 결과는 명시적 신뢰 불가 표지와 예정된 운용 제한이다. 사용자가 작용 부재로 이해한다면 영 표시는 위험하다. 과부하는 미지 위험을 만들어서가 아니라 검증된 수단과 허용 시험 환경에서만 검증해야 한다.

적격성 확인을 위한 저자의 프로토콜

1. 책임자는 측정열 전에 검증 성능과 수용 규칙을 기록한다. 계측 전문가는 표준, 불확도와 조건 범위를 정한다.
2. 조작자는 가능하면 대조용 영향의 순서를 모르는 상태에서 미리 준비한 순서를 실행한다. 자료 관리자는 모든 실행을 보존한다.
3. 해당 분야 전문가는 미검출, 지연과 오경보를 포함하여 측정 경로와 검출 알고리즘을 별도로 평가한다.
4. 조정을 마친 뒤 독립 검증을 수행한다. 중요한 요소를 바꾸면 적격성을 다시 확인할 범위를 정해야 한다.
5. 안전 조정자는 고장 시 거동을 확인하고 조건의 통제 가능성을 잃으면 시험을 중단한다.

측정열에 성공하면 결과 유효성 명세를 작성한다. 하드웨어와 소프트웨어 버전, 환경 조건, 교정 관계, 확인 범위와 재검증 규칙을 담는다. 수리, 운송 손상, 감응 소자 교체, 큰 드리프트나 미지의 과부하 등 이전 성능을 재검토해야 하는 사건을 정해야 한다. 정기 정비는 실제 안정성과 사용 조건에 따라 지정한다.

출시 기준에는 평균 품질뿐 아니라 제약의 예측 가능성도 포함해야 한다. 주 측정열에서는 잘 작동해도 기준 상실을 인식하지 못하면 그런 상실이 가능한 과제에 준비되지 않은 것이다. 검증 자료에 짧은 펄스가 없으면 긴 신호 성능을 펄스에 적용할 수 없다. 구조가 완성되어 보여도 미검증 영역은 명시한다.

적격성 확인을 마쳤다고 계기가 현상의 본성을 판정하는 심판이 되지는 않는다. 특정 조건에서 어떤 관측을 신뢰할 수 있는지 확립할 뿐이다. 신호 원인은 별도 연구 질문으로 남는다. 이 구별 덕분에 새 센서를 미지 연구에 사용할 수 있다. 신뢰는 측정 절차와 공개된 한계에 부여하고 설명은 계속 독립적으로 검증한다.

탐색 범위와 유효 관측 노출량

음성 결과는 특정 탐색을 기술한다. 범위는 신호의 진폭, 지속 시간과 형태, 공간 영역, 장비 상태와 유효 관측 시간으로 정한다. 달력상의 가동 기간은 지정 신호를 검출할 수 있었던 시간과 같지 않다. 기록 유실, 입력 포화나 미확정 구성이 있는 회차도 기록부에 남기되 탐색 범위에 대한 기여를 재검토한다.

사전에 정한 신호군의 t 시점 검출 확률이 η(t)라고 하자. 유효 구간 밖에서는 η가 영이다. 일정한 시간당 사건 빈도에 관심이 있다면 유효 관측 노출량이 유용한 양이 된다. 이는 바로 그 신호군에 해당한다. 더 짧거나 약하거나 공간 위치가 다른 사건에는 다른 효율 함수가 나온다.

$$T_{\mathrm{eff}} = \int_{\mathcal{T}} \eta(t)\,dt$$

학습용 달력 기간	유효 관측 시간	가정한 효율	Tэффに 대한 기여
처음 4일	3일	0,50	1,5일
다음 3일	2일	0,50	1,0일
마지막 3일	3일	0,50	1,5일
합계 10일	8일	0,50	4,0일

설명을 위해 빈도 λ인 정상 푸아송 흐름, 각 사건의 독립 기록과 기지 효율을 가정하자. 표적 검출이 없고 선택 규칙이 바뀌지 않았으며 모형 사건과 기록 징후 사이의 연결이 정해졌다고 본다. 평균 예상 검출 수는 λTэфф다. 영의 확률은 exp(−λTэфф)이므로 단측 상위 95퍼센트 경계는 다음과 같다.

$$\lambda_{95} = \frac{-\ln(0.05)}{T_{\mathrm{eff}}}$$

Tэфф = 4일이면 하루 λ95 = 0,7489건을 얻는다. 이 학습 결과는 열거한 전제 아래에서 정해진 사건군의 빈도를 제한한다. 지속 시간이 다른 신호, 조사하지 않은 장소, 사건이 주로 공백 중에 발생하는 모형에는 적용되지 않는다. 마지막 경우에는 정상성을 재검토해야 하며, 정상 관찰 구간에 기록이 없다고 문제가 끝나지는 않는다.

효율에도 불확실성이 있다

실제 시험에서는 안전한 기지 신호 삽입이나 측정 경로에 대한 적용이 검증된 모사로 효율을 추정한다. 진폭과 지속 시간마다 삽입 횟수와 검출 횟수를 보존한다. 완성 파일의 처리 시험은 처리만 확인한다. 감응 소자 뒤에 신호를 넣으면 소자 자체는 검증하지 않는다. 전체 경로 확인에는 별도의 작용 방식과 그 방식이 포괄하는 고리의 명확한 기술이 필요하다.

독립적이며 같은 방식으로 구성한 대조 입력 200회 가운데 100회를 검출했다면 추정값 η = 0,5에도 불확실성이 있다. 이 입력들이 유효 관찰 여드레 전체에 작용한 것과 같은 신호군과 공통 효율을 대표한다고 가정하자. 보수적인 학습 계산에서는 효율 하한에 오류 확률 0,025를, 푸아송 계수의 경계에 0,025를 배정할 수 있다. 수준 97,5%의 정확한 단측 이항 하한은 약 0,4287이다. 유효 관찰 여드레에 사건 수가 영이면 상한 −ln(0,025)/(8×0,4287), 즉 하루 약 1,076건을 얻는다. 두 원래 모형이 모두 유효하다면 두 오류 위험을 합산하여 공동 포함률이 95% 이상임을 얻는다. 효율을 정확히 알 때의 값 0,749를 여기 적용하면 지나치게 강한 주장이 된다.

효율 지도로 계기의 개선을 비교할 수 있다. 가동 시간 증가는 드문 사건에, 잡음 감소는 약한 신호에 도움이 된다. 기록 빈도 증가는 물리적 변환기와 전달 경로가 해당 대역을 유지할 때만 도움이 된다. 다음 개발 선택은 제한 고리와 연결한다. 드문 사건에 관한 완결된 학습 연구는 사례 8에 제시했다.

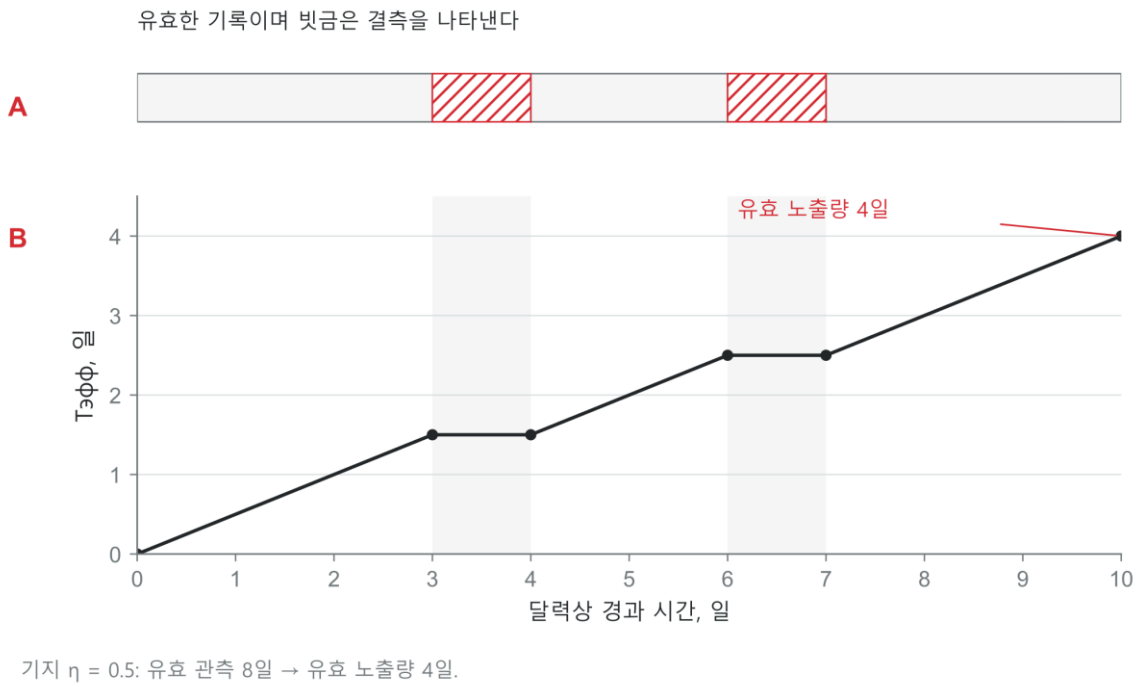


그림 34. 달력상 기간에서 유효 관측 노출량으로. 열흘 동안의 유효 관측 노출량을 계산한 학습 예다. 3–4일과 6–7일의 공백은 유효 관찰에서 제외한다. 효율이 정확히 0,5로 알려져 있을 때 유효한 관찰 여드레는 유효 관측 노출량 나흘을 준다. 공백에서 곡선이 증가하지 않는다는 사실은 사건이 없었다는 증거가 아니다.

제50장

자율 시계 비교 장치 설계안

이 설계는 여러 발진기의 위상과 상대 주파수를 비교하는 계기를 만든다. 직접 결과는 불확도가 정해진 차이의 시계열이다. 장치는 시간 표지, 휴대 기록기와 비교적 완만한 주파수 변화의 검증에 적합하다. 고유시간 변화의 완성된 검출기는 아니다. 그런 결론에는 제13장의 물리 연구 계획이 필요하다. 아래 모든 수치 요구와 자료는 사용 전 실제 시험을 거쳐야 하는 저자의 학습 설계에 해당한다.

과제와 측정량

작업 목표로 100 s 동안 유지되는 추가 상대 주파수 변화 10^{-6}의 구별을 선택하자. 이는 추가 시간차 100 µs의 누적에 해당한다. 초기 주파수에는 뚜렷한 일정 편향이 있을 수 있으며 별도 배경 구간에서 추정한다. 이 설계는 보통 수정 발진기에 10^{-15}의 안정성을 요구하지 않는다. 더 약한 효과는 새 계산과 전체 예산 확인 뒤에만 명세에 포함할 수 있다.

발진기 A와 B는 공칭 10 MHz 신호를 낸다. 각 독립 분주기는 자기 주기가 천만 번 지날 때마다 펄스를 만든다. 펄스 번호는 연속 보존한다. xAB(k)를 B 펄스 도착 시각에서 같은 번호의 A 펄스 도착 시각을 뺀 값으로 정의하자. 이 부호에서는 더 빠른 A가 증가하는 xAB를 만든다. 상대 편차가 작으면 구간 τ의 평균 주파수 차이는 이 양의 변화로 구한다.

$$\overline{y}_{AB}(t,\tau) = \frac{x_{AB}(t+\tau) - x_{AB}(t)}{\tau}$$

희소 펄스로 분주한 뒤 신호를 비교하고 시간차를 기록하는 것은 확립된 측정 접근이다. NIST 지침은 이를 서로 다른 평균 시간에서의 위상 기록, 드리프트와 안정성 분석과 함께 다룬다 [67]. 여기서는 각 고리의 제약을 드러내고 계수를 발진기의 물리 성질과 구별하기 위해 보통 수준의 디지털 분해능을 사용한다.

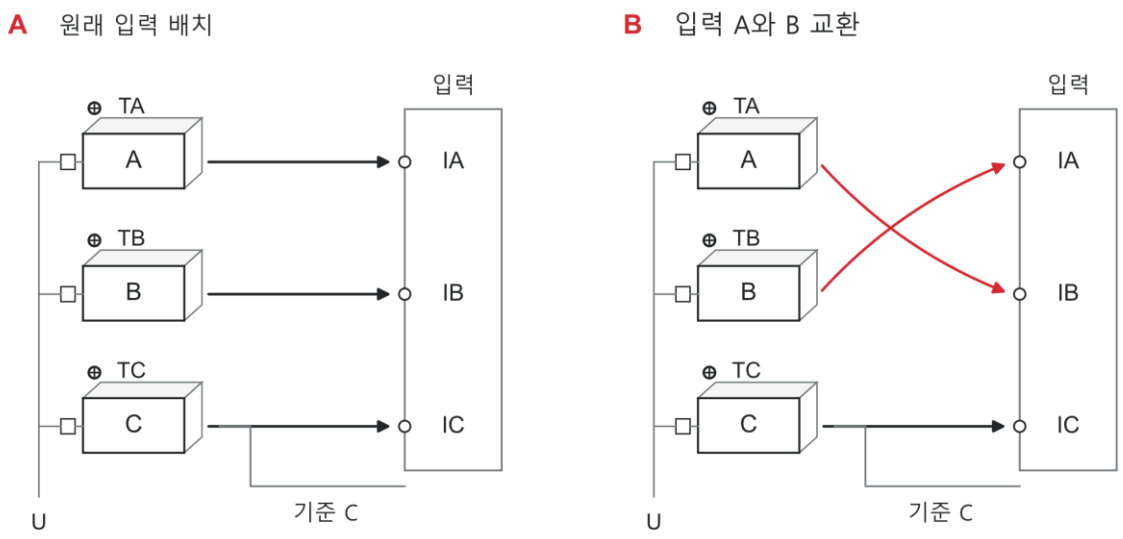
연결 구조와 노드의 구성

노드	설계 특성	기능과 검증
발진기 A와 B	공칭 10 MHz; 측정열 중 자유 발진	비교할 두 주기 과정
발진기 C	독립 10 MHz 모듈	계수기 시간 척도 기준; 별도 분주기와 세 번째 포착 입력
분주기	분리된 연속 계수; 출력 약 1 Hz	자동 초기화 없이 주기 번호 보존
하드웨어 기록기	주파수 배율기/PLL 10 → 100 MHz; 시간 단위 10 ns; 최소 64비트 계수기	프로그램 전송 전 에지 캡처, PLL 잠금 상태 기록
환경 감시	각 모듈 온도; 전원; 외함 상태	통상적인 주파수 영향 평가
로컬 저장소	원래 표지, 펄스 번호와 손실 표지	네트워크 연결이 필수적이지 않은 기록

각 발진기의 신호는 자체 버퍼, 논리 레벨 정합과 분주기를 지난다. 분주기 선단은 기록기의 하드웨어 입력이 포착한다. 마이크로컨트롤러는 이미 포착한 시간 표지를 전달하며 프로그램 실행 시각으로 새로 지정하지 않는다. 공통 계수기는 발진기 C의 10 MHz를 위상고정루프 PLL로 체배한 100 MHz로 작동한다. 이 장치에는 자체 지터가 추가되며 기록기의 일부로 검증한다. PLL 잠금 상실은 부적합 구간을 표시한다. 체배해도 C의 물리적 안정성이 좋아지지는 않는다.

C의 별도 분주기는 세 번째 포착 입력에 펄스를 준다. C가 동시에 시간 척도를 정하므로 이는 진단 채널이며 척도의 정확성을 독립 확인하는 채널이 아니다. 케이블, 입력 문턱과 지연도 채널 차이의 교정에 포함한다.

모듈 전원은 전압을 기록하는 별도 조정 분기로 구성한다. 공통 도체와 에너지원은 의존성 지도에 표시한다. 외함은 온도를 측정하고 발진기 자체를 옮기지 않은 채 전기 입력을 맞바꿀 수 있게 배치한다. 최초 적격성 확인에는 독립적으로 검증된 시간 간격 측정기 또는 주파수 표준, 그리고 대조 신호 발생기가 필요하다. 외부 검증이 불가능하면 장치는 적격 측정 복합체가 아니라 계수 시연 장치로 남는다.



가정한 배치다. 발진기와 보조 연결은 원래 자리에 둔다.

그림 35. 발진기를 고정한 채 입력을 바꾸기. 발진기는 그대로 둔 채 입력 A와 B를 맞바꾸어 자율 비교기를 검증한다. 같은 본체, 온도 측정점, 개별 조절 분기를 갖는 공통 전원, 변하지 않은 기준 경로 C를 표시했다. 이 도식은 채널의 대응을 정하며 조립 도면은 아니다.

GNSS 수신기나 네트워크 시계는 파일의 달력상 시각 표지에 사용할 수 있다. 주 측정열 안에서 A와 B를 보정하지는 않는다. 서로 다른 외부 서비스도 같은 원래 시간에 의존할 수 있다 [9]. 따라서 별도 운용에서 보정 명령이 허용되더라도 사건으로 기록하여 새 측정 구성을 구분한다. 달력 서비스와의 통신 상실이 하드웨어 계수기를 영으로 초기화해서는 안 된다.

수치 예산

시간 간격 10 ns의 양자화 오차가 균일하고 독립이면 xAB 변화를 정하는 시간 표지 네 개의 차이의 표준 불확도는 약 5,8 ns다. 이는 디지털 기여일 뿐이다. 학습 구간 100 s에 대해 다음 목표 예산을 정하자. 각 성분은 별도의 시험 장치 실험으로 확인해야 한다.

100 s 동안의 xAB 변화 성분	표준 불확도, µs	근거
시간 표지의 양자화	0,006	시간 간격 10 ns의 계산
에지 캡처의 반복성	0,040	서로 다른 채널에 공통 입력 신호
케이블과 입력 지연의 변화	0,020	입력 교환과 재교정
시간 계수 척도	0,010	시간 간격의 독립 검증
온도의 잔여 영향	2,000	측정 계수와 온도 기록
배경 드리프트의 불확도	1,500	분리된 배경 구간과 검증 구간

성분들의 독립성을 가정하면 제곱합의 제곱근은 약 2,50 µs, 즉 100 s에서 상대 주파수로 2,50 × 10⁻⁸이다. 실제 공통 영향에는 공분산 항이 필요하다. 목표 추가 시간차 100 µs는 이 예산에서 잘 구별되지만 결과는 기록기의 최하위 비트보다 주로 발진기와 환경에 의해 결정된다. 따라서 계수기만 더 빠르게 바꿔도 최종 결과는 거의 좋아지지 않는다.

조립과 적격성 확인의 순서

공학자는 조립과 전기 레벨 검증을 책임지고 계측 전문가는 지연과 예산을 정한다. 운용자는 비공개 일정에 따라 대조 계단 변화를 넣고 분석가는 순서 공개 전에 처리 방식을 확정한다. 펄스 번호나 PLL 잠금을 잃으면 분석가가 최종 차이에서 알아차렸는지와 관계없이 적합 측정열이 끝난다.

1. 모듈별 전원과 신호 레벨을 따로 검증한다. 알려진 공통 신호를 모든 측정 입력에 연결하고 지연을 정한다.

2. 연속 계수, 프로그램 재시작, 패킷 손실과 버퍼 포화를 시험한다. 통신 복구 뒤에도 펄스 번호와 불완전 표지의 의미가 유지되어야 한다.

3. 독립적인 A, B와 C를 연결한다. 작동 상태가 정착한 뒤 충분히 긴 배경을 기록한다. 전체 과도 구간은 적합 배경과 따로 보존한다.

4. 별도 측정열에서 부품 명세상 사용 범위 안의 온도와 전원 영향을 평가한다. 주 검증 전에 보정 모형을 확정한다.

5. 별도로 검증한 발생원으로 알려진 양의 주파수 계단과 음의 주파수 계단을 넣는다. 분석 담당자는 처리가 끝난 뒤 그 순서를 받는다.

6. 발진기 위치를 유지한 채 입력을 맞바꾸어 검증을 반복한다. 이어 선택 구간을 독립 측정 경로로 비교한다.

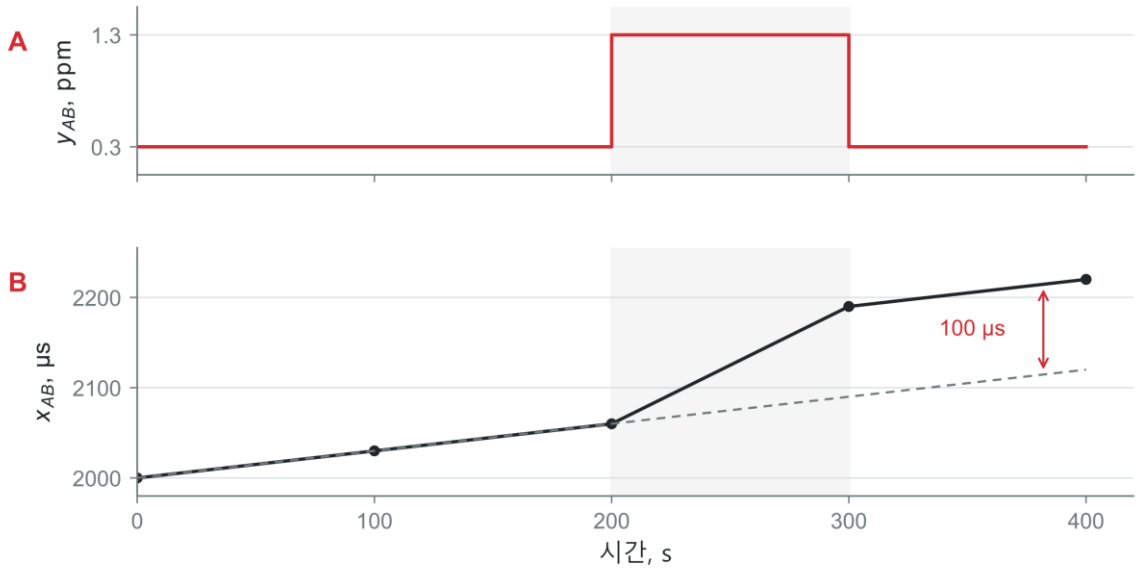
세 번째 발진기는 개별 노드의 불안정성을 구별하는 데 도움이 된다. A만 변하면 AB와 AC 쌍에 나타나지만 BC에는 없을 수 있다. 이 진단은 공개한 구조에 의존하며 절대적 독립성을 입증하지 않는다. 같은 시간 표지 셋으로 계산한 세 차이의 폐합은 대수적 항등식이지 새로운 물리적 확인이 아니다. 독립 검증은 다른 측정 경로나 실제로 다른 취약점을 더해야 한다.

원자료와 대조 신호 분석

최소 기록에는 노드 식별자, 펄스 번호, 정수형 하드웨어 시간 표지, 교정 버전에 따른 계수기 주파수, 온도, 전압, 상태 표지와 명령 이력을 포함한다. 예를 들어 합성 시간 표지 A = 99 999 800 000과 B = 100 000 000 000은 시간 간격 10 ns에서 xAB = 2000 µs를 준다. 바로 정수 시간 표지들이 원자료로 남고 반올림한 차이는 파생 표현이 된다.

시작 후 시간, s	합성 xAB, µs	구간 해석
0	2000	초기 차이
100	2030	배경 주파수 차이 3 × 10⁻⁷
200	2060	배경 유지
300	2190	추가 10⁻⁶이 100 s 동안 작용했다
400	2220	이전 변화율로 복귀

주파수 계단 변화 뒤에도 누적 위상차가 사라져야 하는 것은 아니다. 표에서는 기울기가 변했다가 이전 기울기로 돌아왔지만 추가된 앞섬 100 µs는 남는다. 이를 자동으로 빼면 이력의 중요한 부분이 사라진다. 안정성 분석에는 인접 구간의 평균 주파수 차이도 사용한다. 평균 시간 선택과 누락 처리는 명시해야 한다 [67].



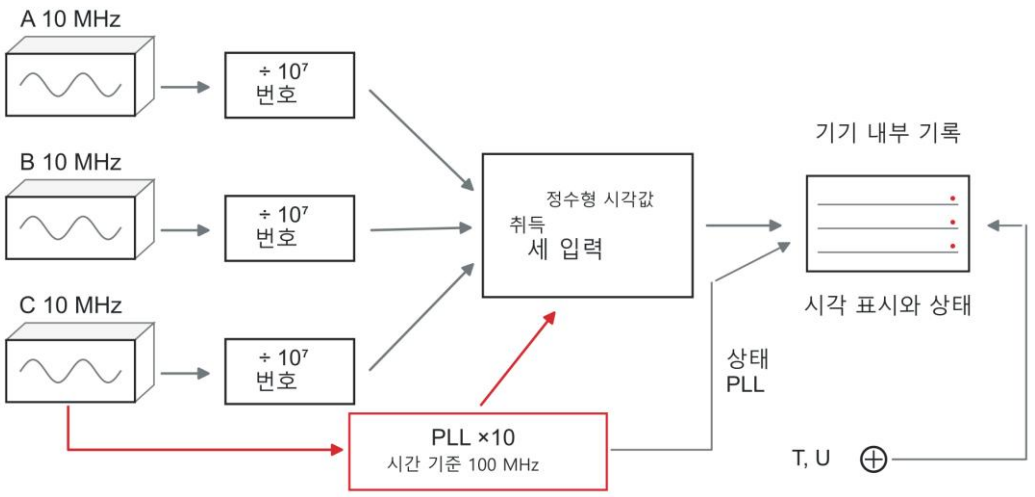
합성 자료다. 표의 측정점 사이에서 주파수는 일정하다.

그림 36. 주파수 계단은 끝나도 위상 기여는 남는다. 비교기의 적격성 확인을 위한 합성 기록이다. 배경 0,3 ppm 위에 추가 상대 주파수 차이 1 ppm이 200–300 s 구간 동안 작용하여 위상 기여 100 µs를 남긴다. 그 구간이 끝나면 xAB의 기울기는 원래대로 돌아오지만 누적된 앞섬은 남는다. 점선은 원래 진행률의 연장을 보여 준다.

인수 판정과 결과 상태

이 학습 설계의 인수 판정에는 100 s 동안 차이의 변화에 대해 3 µs 이하인 예산을 확인하고, 채택한 절차의 확장불확도 안에서 대조 계단 10^{-6}를 복원하며, 의도적으로 만든 모든 자료 손실을 명시적으로 표시해야 한다. 계단을 넣지 않은 실행은 제49장의 미리 고정한 경보 규칙으로 따로 평가한다. 실행 횟수와 관찰한 오류를 명세서에 넣는다. 짧은 시연이 성공했다고 거짓 경보 빈도가 영임이 확립되지는 않는다.

미지의 분주기 초기화, 번호 대응의 모호성, 미기록 보정, 입력 과부하, PLL 잠금 상실이나 적격 조건 밖의 환경이면 측정열은 부적합해진다. 정상 노드는 발진기들의 상대적 진행을 측정하는 수단을 준다. 광학 시계나 훨씬 작은 효과의 탐색에는 다른 장비와 새 예산이 필요하다. 추적 가능한 기록의 공통 구조는 유지하지만 이 설계의 수치 성능을 그 과제에 적용하지는 않는다.



C는 관측 채널이면서 명시된 공통 시간 척도 기준이기도 하다.

그림 37. 자율 주파수 비교: 측정과 공통 기준. 자율 주파수 비교의 기능 도식이다. 발진기 A, B, C는 각각 별도의 분주기와 연속 펄스 번호를 갖는다. 하드웨어 노드는 정수 시각값과 상태를 보존한다. 진홍색 경로는 공통 의존성을 드러낸다. C는 하드웨어 시간 척도 배율기의 기준도 제공하므로, 이것은 C의 안정성을 독립적으로 확인하는 것이 아니다.

제51장

미세 힘 측정 장치 설계안

이 장의 시험 장치는 매달린 물체에 작용하는 기계적 돌림힘을 측정한다. 돌림힘의 힘 환산은 지레팔과 작용 방향이 확립된 경우에만 수행한다. 시료와의 약한 상호작용을 연구하는 데 쓸 수 있지만 상호작용의 기원은 별도 실험으로 확립한다. 저자 설계는 1–20 nN 정도의 준정적 작용을 대상으로 한다. 아래 모든 치수, 허용 오차와 기록은 학습용 설계값이며 이미 제작한 계기의 성능이 아니다.

현가 장치와 측정 사슬

평형 잡힌 수평 보가 닫힌 외함 안에서 수직 탄성 실에 매달려 있다. 보에는 시험 물체, 균형추와 광학 판독 반사체가 있다. 외부 발생원은 현가 장치 외함을 건드리지 않고 측정된 안내 경로를 따라 옮길 수 있다. 광학 채널은 보의 회전을 측정하고 별도 채널들은 기초 기울기, 온도와 발생원 위치를 기록한다. 비틀림 장치는 실제로 중력 법칙의 정밀 시험에 쓰인다. 결과는 실제

기하에서 계산한 돌림힘과 계통적 영향 연구에 의존한다 [66]. 이 설계가 도식의 유사성만으로 그런 장치의 감도를 물려받지는 않는다.

$$I\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + \kappa\theta = M(t)$$

여기서 I는 물체들을 장착한 보의 관성모멘트, b는 채택한 선형 모형의 점성 감쇠 계수, κ는 비틀림 강성이다. 준정적 돌림힘은 평형 위치를 뺀 뒤 κθ다. 알려진 힘이 지레팔 ℓ에 수직으로 작용하면 그 값은 κθ/ℓ다. 분포 압력, 여러 힘 또는 작용점을 모르는 경우 일차 결과는 돌림힘으로 남는다. 이 기하 정보 없이 임의의 기원에서 온 총힘을 측정하는 계기는 아니다.

매개 변수	학습용 값	검증할 항목
작용 지레팔 ℓ	0,050 m	힘의 방향과 작용점 좌표
비틀림 강성 κ	2,0 × 10⁻⁷ N·m/rad	최종 조립 후 측정
관성모멘트 I	5,0 × 10⁻⁶ kg·m²	기하, 질량과 추가 교정
광학 기준 거리 D	0,50 m	척도, 정렬 오차와 반사체 위치
기록	초당 측정값 최소 10개	기록의 완전성과 고유 진동에 대한 반응
작동 범위	명시한 지레팔에서 1–20 nN	선형성, 불확도와 허용 이동

현수 장치는 측정한 강성, 허용 하중, 이동 여유로 선택한다. 특정 재료라는 이유만으로 설계 성능이 보장되지는 않는다. 광학 판독은 카메라를 갖춘 밀폐 광학 지레나 검증한 자동시준기로 할 수 있다. 첫 방식에서 채택한 기하학을 지키면 영상의 가로 변위 s는 s = D tan(2θ)로 각도와 연결된다. 10 nN에서 돌림힘은 5,0 × 10⁻¹⁰ N·m, 각도는 2,5 mrad, 기준 거리 0,50 m에서 변위는 약 2,500 mm다. 영상 위치와 함께 영상 품질도 측정해야 한다. 사라지거나 둘로 갈라진 판독값을 외삽한 수로 대신하지 않는다.

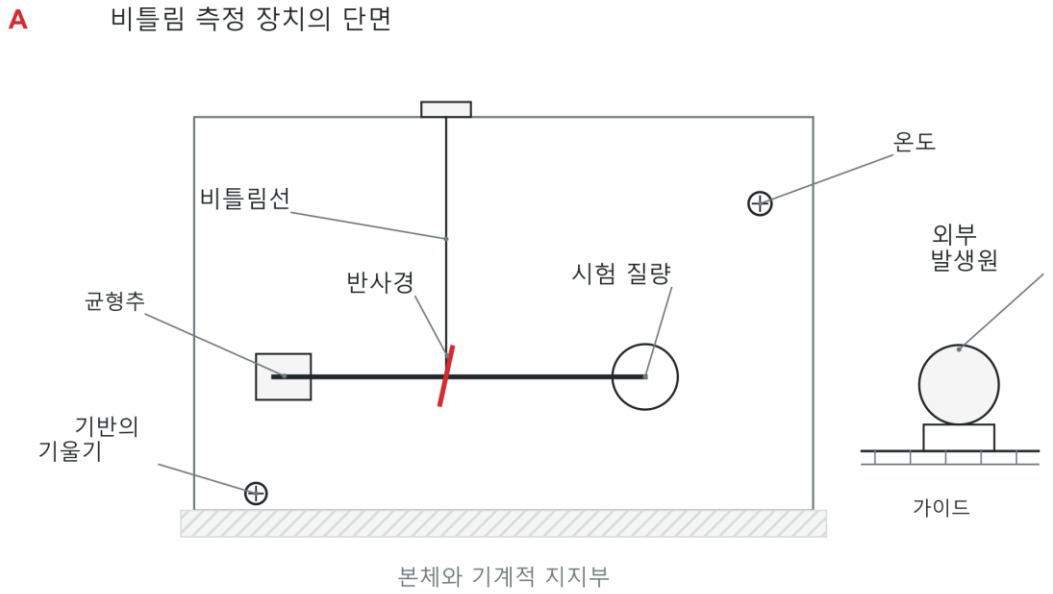


그림 38. 비틀림 시험대: 돌림힘과 광학 판독의 기하. 저자의 학습용 비틀림 시험대 설계로, 외함 단면과 위에서 본 판독 기하를 보여 준다. 알려진 힘이 지레팔 ℓ에 수직으로 작용하면 돌림힘 κθ를 만든다. 반사 광선은 2θ만큼 회전하므로 s=D tan(2θ)다. 설계값 ℓ=0,05 m, D=0,50 m, κ=2×10⁻⁷ N·m/rad에서 힘 10 nN은 θ=2,5 mrad와 s≈2,500 mm에 대응한다. 각도는 보기 쉽게 확대했을 뿐이다.

기계적 척도의 두 검증

첫 κ 추정값은 알려진 관성모멘트 ΔI를 더하기 전후의 자유 진동에서 얻는다. 추가 질량은 균형과 축 위치를 유지하며 대칭 배치한다. 기록으로 주파수와 감쇠를 동시에 추정한다. 아래 식의 T_0와 T_1은 감쇠를 고려한 뒤의 고유 주기다. 감쇠 기록의 이웃한 최대점 사이 거리가 자동으로 그 주기가 되는 것은 아니다.

$$\kappa = \frac{4\pi^2 \Delta I}{T_1^2 - T_0^2}$$

선택한 매개변수에서 T_0 = 31,416 s다. ΔI = 2,5 × 10^{-6} kg·m²를 더하면 T_1 = 38,476 s를 얻는다. 예를 들어 반지름 35,355 mm에 둔, 각각 1,000 g인 학습용 두 점질량이 이에 해당한다. 실제 추의 크기도 관성모멘트에 들어간다. 이 검증은 동적 강성을 정한다. 크리프, 이력 현상, 탄성의 주파수 의존성 때문에 이를 장기 정적 측정에 그대로 적용하지 못할 수 있다.

둘째 검증은 저전압 축전기로 알려진 정적 돌림힘을 만든다. 한 전극은 보에 연결하고 다른 전극은 외함에 고정한다. 주 측정열 전에 별도 각도 장치에서 차폐 전극과 케이블을 포함하여 정전용량 C의 각도 의존성을 측정한다. 전압을 유지하면 교정 돌림힘은 이 관계의 국소 도함수로 표현된다.

$$M_{\mathrm{cal}}(\theta) = \frac{1}{2}(V - V_0)^2 \frac{dC}{d\theta}$$

V_0는 적용 가능한 모형에서 유효한 접촉 전위의 오프셋을 뜻한다. 두 부호의 전압 계열로 추정한다. 닫히지 않거나 불안정한 포물선이면 전하를 연구해야 하며 그런 교정은 부적합하다. 학습용 도함수 4,0 × 10^{-11} F/rad는 유효 전압 5,00 V에서 5,0 × 10^{-10} N·m를 만들며, 선택한 지레팔에서 10,0 nN에 해당한다. 전류 제한이 있는 12 V 이하의 전원과 그에 맞는 부품을 사용한다. 돌림힘이 부족하다고 시험대에서 검증한 조건을 벗어나 보충하지 않는다.

C의 도함수는 실제 평형각 부근에서 정하며 보가 움직이지 않을 때의 값을 대신 넣지 않는다. 예를 들어 정전용량이 각도 구간 0,02 rad에서 약 0,8 pF 변한다면 약 0,005–0,01 pF의 검증된 분해능과 기하 분석이 필요하다. 분해능 자체가 도함수의 불확도는 아니다. 별도 교정의 목표는 약 2%의 상대 표준 불확도다. 유효 전압의 불확도가 5 mV이면 대조 힘 10 nN에 대해 약 0,20 nN을 준다. 이 목표에 이르기 전까지 정적 교정기는 반응 검증 수단이며 정밀 표준은 아니다.

안정화 시간과 예산

학습용 품질계수 Q = 10에서 고유각주파수는 0,20 rad/s, 계수 b는 1,0 × 10⁻⁷ N·m·s/rad이며 자유 응답의 진폭이 e배 감소하는 시간은 100 s다. −20에서 +20 nN으로 최대 부호 전환한 뒤 700 s를 기다리면 계산상 초기 진동의 포락선은 힘으로 환산하여 약 0,037 nN으로 줄어든다. 그다음 100 s 동안 평균할 수 있다. 이 규칙은 해당 구성에서 감쇠를 측정했을 때 적용된다. 품질계수가 달라지면 대기 시간을 다시 계산한다. 기록 주파수 10 Hz가 이런 현수 장치를 빠른 힘의 센서로 바꾸지는 않는다.

힘 10 nN에서의 성분	표준 불확도, nN	설계 근거
비틀림 강성	0,10	상대 불확도 1%
힘의 지레팔	0,04	상대 불확도 0,4%
각도 판독	0,12	평균 각도의 불확도 30 µrad
평형 위치 보간	0,20	작용 전후 영점 검증
환경의 잔여 영향	0,10	기울기, 온도와 공기 운동의 별도 검증

이 기여들이 독립이면 제곱합의 제곱근은 0,276 nN이다. 인수 기준으로 10 nN 부근에서 반올림한 한계 0,30 nN을 정하자. 상관 기여는 공분산 모형으로 고려한다. 같은 측정값을 반복해도 교정 계수의 불확도는 줄지 않는다. 범위의 다른 지점에서는 예산을 다시 계산한다. 강성의 상대 오차가 절대 단위로는 신호와 함께 커지기 때문이다. 불확도 0,20 nN인 독립 정적 교정기로 결합 표준 불확도 약 0,34 nN에서 두 추정의 일치를 검증할 수 있다.

조립과 알려진 영향에 대한 시험

기계 운용자는 구성과 기지 작용을 설정한다. 계측 전문가는 각도 척도, 강성과 대조 돌림힘을 독립 검증한다. 분석가는 처리 확정 뒤 대조 작용의 순서를 받는다. 제한기에 닿거나 안정적 판독을 잃으면 운용자는 작용을 중단하고 과도 기록을 보존한다. 그 구간을 보간으로 고치지 않는다.

1. 기계적 제한기, 닫힌 광학 경로와 외함을 갖춘 현가 장치를 조립한다. 보가 허용 범위 전체에서 벽에 닿지 않는지 확인한다. 미지 시료를 설치하기 전에 통상적인 비활성 물체로 노드를 조정한다.

2. 질량, 지레팔과 광학 척도를 측정한다. 여러 작은 초기 편차에서 자유 응답을 얻는다. 원인 모를 매개변수 변화 없이 하나의 모형이 주파수와 감쇠를 설명하는지 확인한다.

3. 추가 관성모멘트로 교정한 뒤 축전기로 독립 정적 검증을 한다. 분해나 기하 변경 뒤에는 적용되는 두 부분을 모두 반복한다.

4. 고정 발생원, 안내 장치의 공운전 이동과 영전압에서 배경을 기록한다. 시험 장치의 허용 운용 안에서 기울기, 온도, 공기 흐름과 전기 상태의 통상 연결을 검증한다.

5. 영과 양쪽 부호의 기지 돌림힘을 미리 정한 순서로 가한다. 처리 확정 뒤 분석가에게 순서를 알린다. 모든 과도 구간과 자료 제외 이유를 보존한다.

6. 시험 물체를 대조 물체로 교체한 뒤와 기하 배치를 바꾼 뒤 대조 검증을 반복한다. 예산 확인과 기지 작용 복원 뒤에만 주 측정열로 넘어간다.

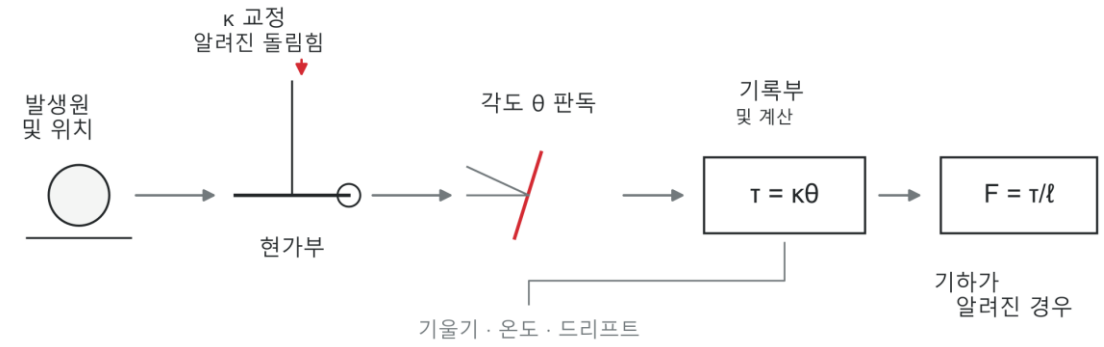
작동 중에는 교정 전극 위치, 접지와 발생원 상태를 명시한다. 교정기 분리도 전기 환경을 바꾸므로 그 구성은 별도로 적격성을 확인한다. 외함의 공기나 압력 상태를 명시한다. 열린 흐름의 부재가 열대류 부재의 증거는 아니다. 전기장, 열교환과 기계적 연결을 동시에 바꾸는 차폐판은 각각 별도 검증이 필요하다.

최초 기록과 인수 조건

원자료 묶음에는 영상이나 원래의 각도 신호, 시각 표지, 원천 위치, 교정기 전압, 관계 C(θ)의 버전, 온도, 기울기, 구성의 질량과 기하학이 들어간다. 합성 예시에서 작용 전후의 영점은 0,20과 0,18 mrad이며 작용 중 각도는 2,70 mrad다. 시간적으로 대칭인 구간의 보간 영점은 0,19 mrad, 유효 각도는 2,51 mrad, 결과는 10,04 nN이다. 영점 드리프트가 비선형이면 이런 보간은 자동 적용할 것이 아니라 추가 검증해야 한다.

장치는 합의한 예산 안에서 독립 대조 돌림힘을 복원하고, 각도 척도 모형을 검증하고, 의도적으로 만든 모든 공백을 기록한 뒤 명시한 범위에서 인수한다. 제한기에 닿거나, 광학 판독을 잃거나, 영점 변화를 추적할 수 없거나, 환경 매개변수가 검증 범위를 벗어나거나, 두 교정이 일치하지 않으면 측정열을 중단한다. 이 검증들 뒤에도 안정적인 편차가 남으면 측정된 잔여 돌림힘이 존재한다고 말할 수 있다. 새로운 근본 힘을 주장하려면 사례 2처럼 추가 구별

실험이 필요하다. 이 학습용 장치의 감도로는 제20장의 구체적인 피코뉴턴 예를 다룰 수 없다. 표의 보기 좋은 자릿수를 늘려도 이 한계는 바뀌지 않는다.



각도 → 교정한 돌림힘 → 기하를 알 때의 힘.

그림 39. 비틀림 응답에서 제한된 힘 추정까지. 비틀림 설계의 기능 경로다. κ를 교정한 뒤 광학 각도를 돌림힘으로 변환한다. 힘의 추정에는 힘에 수직인 알려진 지레팔과 작용 기하가 필요하다. 환경 감시는 통상적인 대안 설명들을 제한하지만 이 교정을 대신하지 않는다.

제52장

가정한 상호작용의 차등 센서 설계안

이 설계는 어떤 새 매개변수가 두 물리계의 주파수를 다른 비율로 바꾼다는 사전 가정을 검증한다. 발진기, 계수기와 대조 작용 자체에는 알려진 기술을 쓴다. 새 연결은 가정 모형으로 도입하며 별도 시험을 견뎌야 한다. 여기서 정상 계기란 정규화 주파수 차이를 재현 가능하게 측정한다는 뜻이며 새 장의 존재를 뜻하지는 않는다. 모든 수치, 결합 계수와 기록은 저자의 학습 계산이다.

두 계와 상대량

첫 계로 공칭 주파수 10 MHz의 수정 발진기 Q를, 둘째로 인덕터와 축전기의 공진 회로(LC 회로)를 갖춘 공칭 주파수 100 kHz의 발진기를 택하자. 탄성 공진기와 전기 회로의 차이는 서로 다른 반응의 검증 가능한 모형을 만들게 한다. 그 차이 자체가 미지 작용에 대한 선택성을 보장하지는 않는다. 실제 연구에서는 서로 다른 주파수계 비교로 구체적으로 정한 물리 매개변수의 변화를 검증한다 [26]. 요구 수준이 보통인 우리 시험 장치는 그 감도를 재현하지 않는다.

기준 R은 약 10 MHz의 주파수를 낸다. 발진기마다 R 주파수에 대한 주파수 비를 측정하고 별도로 정한 초기 비로 정규화한다. 따라서 차이 q는 무차원이다. 이 장에서는 백만분의 일 변화를 1 ppm으로 표시한다. 기준은 물리 관측에 참여한다. 새 매개변수의 감도는 접근 불가능한 절대 시간이 아니라 그 기준에 대해 정해진다.

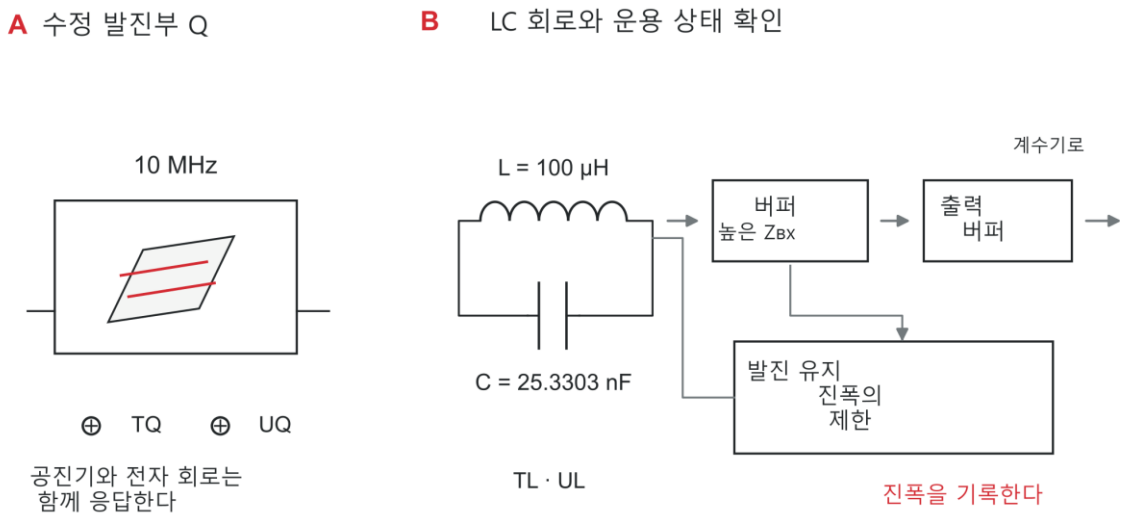
$$q_i = \frac{f_i/f_R}{f_{i0}/f_{R0}} - 1, D = q_Q - \kappa q_L$$

계수 κ는 별도 교정 측정열로 선택하고 후보 검증 전에 고정한다. 원래 qQ와 qL은 반드시 보존한다. 조합이 간섭뿐 아니라 찾는 반응도 억제할 수 있기 때문이다. 설계 목표는 적어도 100 s 동안 유지되는 변화에 대해 D의 표준 불확도 1 ppm 이하를 달성하는 것이다. 짧은 선단에는 다른 시간 측정 경로와 별도 응답 성능이 필요하다.

물리적 구성

서브시스템	학습용 요구	검증할 기능
석영 채널 Q	10 MHz, 자유 발진; 자체 전원 및 온도 감시	전자 장치를 포함한 탄성 공진기의 주파수
LC 채널	약 100 kHz; 낮은 전원 전압; 진폭 기록	되먹임을 포함한 전기 공진기의 주파수
기준 R과 R2	별도 발진기와 상태 기록	작동 척도와 그 변화의 진단
계수 채널	연속 주기 번호; 하드웨어 입력 포착	100 s 구간의 주파수 비
통상 영향 감시	노드별 온도, 전원, 진폭과 위치	보정과 모형 적합성 검증
독립적인 검증	적격성 확인 시 외부 주파수 측정기	공통 척도와 기지 계단 변화의 검증

계산용 LC 회로에서 L = 100 μH, C = 25,3303 nF를 선택하자. 이상적인 공진 주파수는 100 kHz다. 실제 노드에는 공진 회로, 고임피던스 버퍼, 양의 되먹임 증폭기와 진폭 제한이 있으며 출력 버퍼가 계수기 부하를 분리한다. 주파수는 증폭기 위상 이동, 기생 정전용량과 진동 수준에도 의존한다. 따라서 이상 회로 식은 초기 구조를 정하고 최종 전달 특성은 측정으로 정한다.



가정한 배치다. LC 공칭값은 특성의 실측을 대신하지 않는다.

그림 40. 서로 다른 두 공진기와 각각의 대조 채널. 저자 설계의 서로 다른 두 주파수 변환기다. 수정 장치와 LC 장치는 자체 온도 및 전원 감시를 갖추며, LC에서는 진폭도 기록한다. L=100 µH, C=25,3303 nF이면 이상적인 주파수는 100 kHz에 가깝지만 실제 응답에는 버퍼, 발진 유지, 기생 영향이 들어간다. 그림은 개략적인 배치이며 증폭기 조립 회로도가 아니다.

$$f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \frac{\delta f_L}{f_L} \simeq -\frac{1}{2}\left(\frac{\delta L}{L} + \frac{\delta C}{C}\right)$$

선택 부품이 허용한다면 학습 장치의 전자 전원은 전류 제한 전원에서 5 V로, 공진 회로 전압은 실효값 0,1 V 이하로 정할 수 있다. 이는 전체 전원 인가 전에 검증할 설계 요구다. 버퍼 포화와 미기록 운용 전환 없이 진동이 유지되도록 증폭을 제한한다. 진폭 안정화는 주파수와의 연결을 측정하고 명시적으로 기록한 제어 고리로만 허용한다. 연구하는 주파수 변화를 자동으로 고쳐서는 안 된다.

Q 출력을 10^{7}로, LC 출력을 10^{5}로 나누어 약 일 초마다 연속 번호의 펄스를 얻는다. R과 R2는 자체 분주기가 있다. 하드웨어 입력이 네 계열을 모두 포착하며, 시간 척도는 제50장에서 검증한 구조로 구현한다. 계수기가 R에 의존하므로 자체의 R 표지는 그 기준의 안정성을 입증하지 않는다. R2와 외부 측정기는 추가 대조를 제공하며 공통 취약성은 따로 나열한다. 두 번째 수정이 있다고 절대 기준이 되는 것은 아니다.

가정한 상호작용이 구체적으로 예측하는 것

작은 편차의 선형 상태를 생각하자. χ는 두 감응 노드의 부피 전체에서 거의 같은 값을 갖는 무차원 가정 매개변수라고 하자. 저자가 정한 모형에서 상대 결합 계수는 gQ = 1, gL = −2다. 여기에는 감응 노드와 기준 R의 반응 차이가 포함된다. 이 값들은 석영이나 인덕턴스의 알려진 성질로부터 유도한 것이 아니다. 검증할 가설의 명시적 매개변수다. 결과를 본 뒤 값을 바꾸면 다른 모형으로 넘어가는 것이 된다.

$$q_i = g_i \chi + a_i \Delta T_i + b_i \Delta V_i + z + \eta_i$$

계수 a와 b는 측정한 온도와 전원 영향을 기술한다. z는 기준의 통상 드리프트에서 남은 공통 기여, η는 그 밖에 고려한 잔차를 뜻한다. 합성 교정에서는 aQ = 1 ppm/K, aL = 20 ppm/K라고 하자. 온도 변화가 같으면 계수 κ = 0,05가 바로 이 공통 성분을 억제한다. 온도가 다르면 잔차는 온도 변화량 차이에 1 ppm/K를 곱한 값이다. 별도 센서와 열 지연 검증이 필요하다. 계수 자체의 불확도도 예산에 남는다.

$$D_\chi = (g_Q - \kappa g_L)\chi = 1{,}1\chi,\; D_z = (1-\kappa)z = 0{,}95z$$

χ = 10^{-5}이면 모형은 D = 11 ppm을 예측한다. 동시에 Q와 LC 반응의 부호가 반대임을 예측하며 자료 결합 전에 검증할 수 있다. 반면 통상적인 공통 기준 드리프트는 약하게만 억제된다. 온도 반응 벡터 (1; 20)와 가정 벡터 (1; −2)가 달라 이 제한 모형에서는 두 기전을 구별할 수 있다. 미지의 전원, 진폭과 기준 영향을 더하면 수치 두 개로는 부족하다. 사건마다 맞춘 자유 보정이 아니라 추가 관측으로 이 영향을 제한한다.

실제 측정 경로의 적격성 확인

공학자는 물리 채널을 검증하고, 계측 전문가는 계수와 불확도를 평가하며, 운용자는 미리 보존한 일정에 따라 대조 작용을 만든다. 분석가는 순서 공개 전에 조합 D와 기준을 확정한다. 노드가 적격 운용 범위를 벗어나면 운용자는 현재 검증을 중단하고 원인 분석을 위해 가공 전 채널을 보존한다.

1. 각 발진기의 전원, 진폭, 출력 파형, 계수 안정성과 허용 부하 변화를 따로 검증한다. 선택 부품의 실제 운용 상태를 명세에 넣는다.

2. 모든 계수 입력에 기지 신호를 넣는다. 외부 측정기로 분주, 번호 연속성과 지정 주파수 비 복원을 검증한다. 누락, 재시작과 기준 상실을 의도적으로 만든다. 각각 명시적 표지를 받아야 한다.

3. 작동 외함에 통상적인 비활성 부품을 설치한다. 배경을 얻은 뒤 모든 노드가 허용한다면 작동점에서 ±1 K 이내 같은 안전한 온도 수준 몇 개를 설정한다. 전환과 복귀를 측정한다. 지연 검증 전에 작은 계단 변화가 정상 상태에 도달했다고 보지 않는다.

4. 별도 교정 자료로 온도, 전원과 진폭 계수 및 불확도를 추정한다. κ와 선형 모형의 적합 영역을 확정한다. 독립 검증 자료로 계수를 다시 조정하지 않는다.

5. 하드웨어로 첫 계수 채널에 기지 주파수 변화 +10 ppm, 둘째에 −20 ppm을 넣는다. 분석가에게 미리 숨긴 순서로 영의 작용과 통상 온도 작용을 함께 반복한다.

6. 독립 측정기로 구성을 검증한 뒤 입력을 맞바꾸어 측정열 일부를 반복한다. 유효 조합 복원, 통상 작용의 잔차와 배경 오작동을 별도 평가한다.

전자적으로 주파수를 대입하면 계수기와 알고리즘을 검증한다. 알려진 온도나 정전용량 변화는 해당 공진기의 통상 물리 반응을 검증한다. 어느 작업도 χ와 물질의 연결을 교정하지 않는다. 그 교정에는 χ 자체의 독립적으로 확인된 발생원이 필요하다. 연구 명세에서는 세 검증 수준을 구별해야 한다. 자력계나 기울기 센서를 통상 원인 감시에 더할 수 있지만 그 지시값이 여기서 정의한 차등량을 대신하지는 않는다.

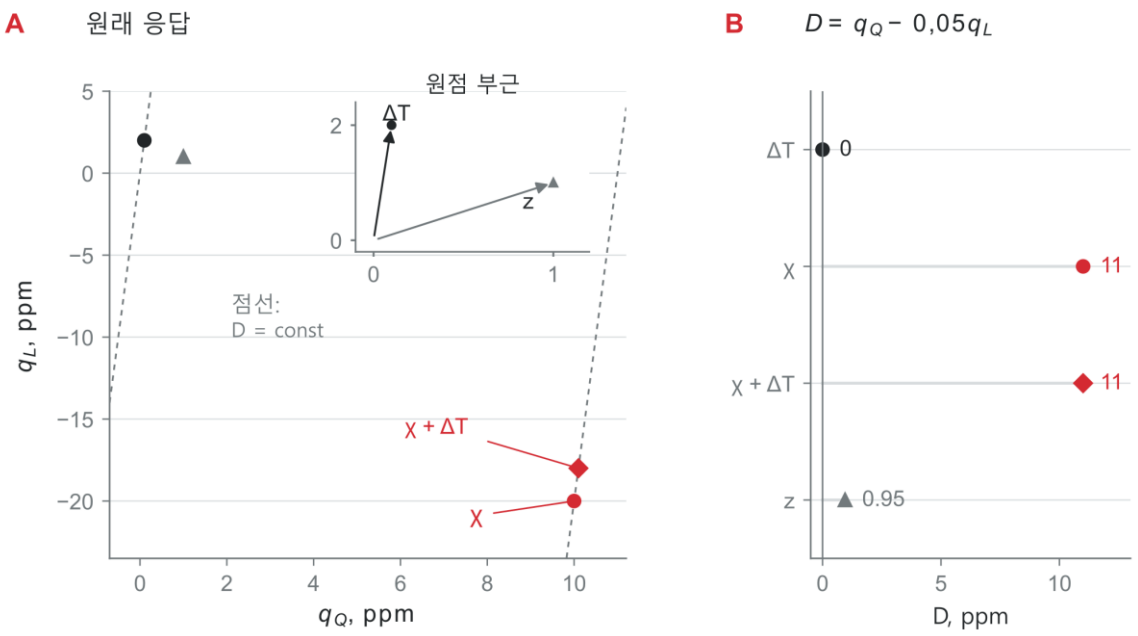
예산과 공개 기록

100 s 구간의 D 기여	표준 불확도, ppm	확인 방법
수정 채널과 계수의 반복성	0,30	배경과 기지 공통 신호
κ를 곱한 뒤 LC의 반복성	0,50	원래 qL의 불확도 약 10 ppm
온도 보정과 기울기	0,30	별도 온도와 계수 검증
전원, 진폭과 그 밖의 통상 연결	0,20	개별 제한 작용
작동 기준과 공통 척도	0,20	R2와 독립 적격성 확인
새 측정열에 배경 모형 적용	0,40	조정에 쓰지 않은 자료

이 목표 독립 기여들의 제곱합 제곱근은 약 0,82 ppm이다. 실제로 상관관계가 있으면 전체 예산을 사용하며 그 값은 더 클 수 있다. 11 ppm은 가정 모형의 설계 신호이지 검출의 약속이 아니다. 인수 판정에는 1 ppm 이하인 불확실성을 독립적으로 확인해야 한다. 긴 평균을 허용 기준 달성의 수단으로 자동 적용해서는 안 된다. 표류와 열적 기억 때문에 기대한 개선이 멈출 수 있다.

합성 조건	qQ, ppm	qL, ppm	D, ppm
0,1 K만큼 공통 가열	0,1	2,0	0,0
가정한 χ = 10⁻⁵만 작용	10,0	−20,0	11,0
같은 χ와 0,1 K만큼 공통 가열	10,1	−18,0	11,0
기준의 통상 공통 기여 z = 1 ppm	1,0	1,0	0,95

표는 채택 모형으로 계산했으며 실제 실험 자료가 아니다. 실제 기록은 네 채널의 정수형 시간 표지, 분주 번호, Q와 LC의 온도, 전압, 공진 회로 진폭, 기준 상태와 모든 명령을 보존한다. κ, 계수와 선택 규칙의 버전은 구체적인 파일과 연결한다. D만 보존하면 연구자는 잘못된 보상을 발견하거나 독립적인 새 측정열에서 다른 모형을 시험할 가능성을 잃게 된다.



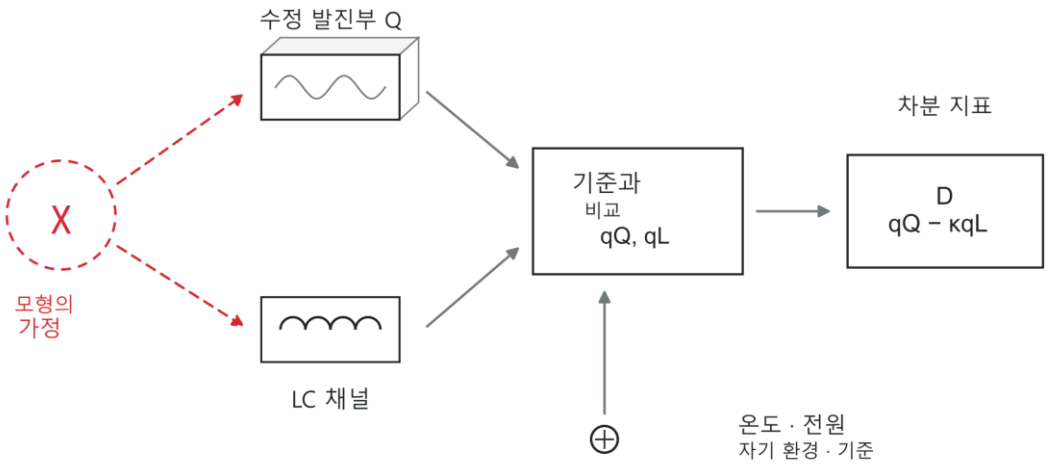
합성 모형이다. D가 같다고 원자료가 같지는 않다.

그림 41. 차등 지표가 보존하는 것과 지우는 것. 채택한 모형의 합성 응답들과 그 선형 결합 D=qQ−0,05qL이다. 공통 가열 ΔT=0,1 K는 (0,1; 2) ppm과 D=0을, 가정한 χ=10⁻⁵는 (10; −20) ppm과 D=11 ppm을 준다. 둘을 더해도 D=11 ppm이 유지되며, 공통 기준의 기여 z=1 ppm은 D=0,95 ppm을 준다. 삽입 그림에는 별도로 표기한 축이 있다. 가정한 상호작용의 계수들은 실험 결과가 아니다.

인수 판정과 설계의 발전

인수 판정에는 알려진 조합 11 ppm을 정해진 확장불확도 안에서 복원하고, 별도의 검증 계열에서 예산을 충족하고, 넣어 둔 모든 계수 실패를 검출해야 한다. 예상하지 못한 히스테리시스, 기록되지 않은 발진기 재설정, 펄스 번호 손실, 검증한 온도 범위의 이탈이 있으면 χ의 검증에 그 자료를 쓰지 않는다. 반복되는 잔차 D는 우선 주파수 조합에서 측정한 편차다. 이어 부호, 두 응답의 비율, 기준의 대조, 대안적인 물리 원인을 검증한다.

다음 세대의 센서에는 추가 예측을 미리 얻어야 한다. 재료나 공진기 운전 상태에 따른 g의 의존성, χ의 공간적 일관성, 세 번째 계의 기대 응답이다. 이어서 독립적인 구성을 제작하여 새 데이터로 예측을 검증한다. 결합 계수를 실험마다 임의로 둘 수 있다면 장치는 새로운 상호작용에 대한 선택성을 얻지 못한다. 반대로 알려진 경로가 성능 검증을 통과하고 고정 모형이 새로운 구별 검증을 견딘다면, 관찰을 장의 이름으로 대신하지 않고도 더 물리적으로 연구할 근거가 생긴다.



점선 χ는 측정 경로 교정으로 확인되지 않은 가정적 연결이다.

그림 42. 가정한 결합 χ와 구현 가능한 측정 경로. 구현 가능한 주파수 채널들과 매개변수 χ와의 가정적 연결이다. 실선은 측정 경로와 상태 감시를 나타낸다. 진홍색 점선 연결은 모형에서 가정한 부분이다. 전자 장치와 공진기의 통상 교정은 그 연결의 존재를 확인하지 않는다.

제53장

미지 현상의 연구 프로그램

기전이 확립되지 않은 현상에는 성공한 실험 하나로 부족하다. 단계마다 다음 단계의 조건을 만들고 실질적으로 작업을 마칠 수도 있는 연구 계획이 필요하다. 목적은 안정적인 기술, 설명의 구별과 가능한 행동의 결정이다. 계획이 반드시 새 물리학에 이르러야 하는 것은 아니다. 잔차 원인은 알려진 과정의 새 조합, 불완전한 환경 모형이나 측정 경로 특성일 수 있다.

첫째 단계는 효과를 정의하는 일이다

연구 단위는 다른 수행자도 이용할 수 있어야 한다. 무엇을 사건으로 보고 어떤 기록이 필수이며 배경과 어떤 차이를 검증하는지 명시한다. 한 관찰자의 인상으로 사건을 정하면 먼저 그 추출 규칙의 안정성을 연구한다. 알고리즘이 찾으면 버전을 기록하고 대조 자료로 검증한다. 그렇지 않으면 검출 절차 변화가 현상 자체의 변화처럼 보일 것이다.

첫 단계의 산출물은 적용 범위를 포함한 효과의 기술이다. 효과를 관측한 조건, 미검출 조건과 누락을 담는다. 정기적으로 반복되지 않아도 후속 연구가 배제되지는 않지만 계획은 달라진다. 자동 배경 감시, 독립 채널과 드문 사건의 사전 기록 기준이 더 중요해진다.

둘째 단계는 다른 조건에서도 성립하는지 검증한다

운용자, 계기 개체, 처리법이나 기록 장소를 바꾸어도 관측이 유지되는지 검증한다. 모두 동시에 바꾸는 것이 항상 유용하지는 않다. 그러면 무엇이 결과 변화를 설명하는지 불명확하기 때문이다. 인과 모형에 맞는 적용 검증 순서를 계획한다. 현상의 조건이자 인공 흔적의 발생원일 수 있는 특성에 특히 주의한다.

예를 들어 특정 카메라와의 연관은 실제 신호에 대한 특별한 감도일 수도, 자체 결함일 수도 있다. 구별하려면 대조 작용과 적합한 독립 방법과의 비교가 필요하다. «이 계기에서만 효과가 존재한다»는 말은 중요한 제약을 기술하지만 설명을 끝내지는 않는다.

셋째 단계는 모형들을 구별한다

재현 가능한 징후를 확립한 뒤 예측이 다른 설명들을 구성한다. 신호 발생원, 전파 매질, 측정과 처리를 포함한다. 설명마다 자료로 실제 결정할 수 있는 매개변수를 명시한다. 자유 매개변수가 많은 모형은 과거를 잘 기술해도 다음 실험을 잘 예측하지 못할 수 있다. 따라서 일부 자료는 독립 검증용으로 남긴다.

새로운 가정적 상호작용은 관측량과의 명시적 연결 규칙으로 도입한다. 전이 주파수에 영향을 준다고 가정하면 어떤 계들이 다르게 반응해야 하는지 명시한다. 공간 연결성 변화를 가정하면 매질 내 신호 전파와 구별되는 기하적 귀결이 필요하다. 정보의 의미 의존성을 주장하면 의미 기준을 물리적 매체와 인간 선택에서 분리해야 한다.

넷째 단계는 제어를 연구한다

제어는 작용을 가할 수 있는 연결을 확립한 뒤 검토한다. 첫 개입은 좁은 인과 질문에 답하고 관측 결과를 가지며 추가 작용을 제한할 수 있어야 한다. 먼저 출력 신호에서 무엇이 변하는지 확립한 뒤 발생원이 바뀐 것인지 측정 채널만 바뀐 것인지 검증한다. 실무적 무력화로의 전환에는 독립 확인이 필요하다.

단계	검증 가능한 결과	전환 기준
정의	안정적인 사건 추출 규칙	검증된 기록과 기술된 배경

단계	검증 가능한 결과	전환 기준
다른 조건으로의 적용 가능성	효과를 유지하기 위한 알려진 조건	비교 가능한 독립적 구현
구별	경쟁 모형의 제약	예측이 갈리는 새 자료
제어	지정 행동에 대한 재현 가능한 반응	작용의 허용 가능성과 측정 채널 검증
적용	특정 작업에 대한 방법의 적합성	확인된 특성 및 작동 한계

프로그램의 종료 기준

계획은 알려진 기전의 확립, 유용한 가설 제약 달성, 다음 측정을 위한 자원 부족이나 허용 불가 위험 발견으로 끝날 수 있다. 종료에 현상을 최종 설명했다고 선언할 필요는 없다. 얻은 결과, 적용 한계와 연구를 재개할 의미가 있는 조건을 명확히 정식화하면 충분하다.

자원은 다음 구별의 가치에 따라 계획한다. 비싼 계기는 성능이 구체적인 공백을 메우고 기반 설비로 그 성능을 활용할 수 있을 때 정당하다. 주 불확실성이 시료 출처에 있다면 분광 분해능 증가로 핵심 결론이 바뀌지 않을 수 있다. 사건이 드문 것이 문제라면 유효 관측 시간을 늘리는 편이 짧은 측정 하나의 기록적 감도보다 가치 있을 때도 있다.

가상의 학습 예는 밤에만 생기는 펄스에서 시작한다. 첫 단계는 검출 규칙을 검증한다. 둘째는 기록기가 달라도 결과가 유지되는지 검증한다. 셋째는 온도, 기반 설비의 운용 상태, 가능한 외부 발생원을 비교한다. 잔여 효과가 남을 때에만 새로운 모형을 도입한다. 프로그램은 이례적인 설명에 열려 있지만, 범위를 넓히는 각 단계는 미리 고른 결말에 이르려는 욕구가 아니라 결과에 근거한다.

이 순서는 미지를 연구 과제의 연속으로 바꾼다. 견고함은 새 자료가 나올 때 이론과 자체 절차를 모두 재검토할 능력에 달려 있다. 다음 장은 이를 다루고 이후 연구 실습은 완결된 학습 사례로 전체 경로를 보여 준다.

잔여 효과가 남은 뒤

효과가 초기 검증을 견디면 계획에는 의존성, 스펙트럼, 분포나 상태 전환이라는 구체적인 관측 대상이 생긴다. 다음 과제는 매개변수와 경계를 확립하는 것이다. 이 단계에서는 관측 관계를

재현하는 경험 모형과 발생을 설명하는 기전을 구별하면 유용하다. 여러 기전이 여전히 양립해도 경험 모형의 성공적인 예측은 독립 지식이다.

먼저 보유 자료가 실제로 결정하는 매개변수를 고르고 공동 불확실성을 평가한다. 이어 남은 설명안들이 측정 불확도보다 크게 갈리는 구성을 찾는다. 선택할 때 변경의 허용 가능성과 미지의 성능 변화 없이 이를 견딜 측정 경로 능력을 고려한다. 검증 지점은 결과 공개 전에 선언하고 이미 추정한 매개변수를 적용한다. 지점마다 다시 적합하면 적용 검증의 의미가 사라진다.

사례 2에서는 판독 방식을 바꾼 뒤에도 잔여 힘이 유지되고 새 지점에서 거리 의존성을 검증한다. 결과는 제한적인 경험 관계와 아직 허용되는 기전 목록이다. 사례 3의 시계 모형은 기계적 귀결 검증을 견디지 못한다. 두 사례는 모형 개발의 실질적인 결과 둘, 곧 확인된 기술의 확대와 특정 설명의 배제를 보여 준다.

새 센서는 구별 예측에 맞춰 주문한다. 요청에는 필요한 양, 범위, 대역, 공간 연결과 중요한 대안들에 대한 견고함을 명시한다. 불확실성이 재료 출처에 있다면 더 민감한 기록기로 결론이 달라지지 않을 수 있다. 두 기전이 가능한 채널들에서 수학적으로 같은 반응을 내면 계와 상호작용하는 다른 방식이 필요하다. 제50–52장의 공학 설계는 이런 요청을 검증 가능한 기술 명세로 바꾸는 방법을 보인다.

제54장

이론과 프로토콜을 수정하는 방법

모든 프로토콜은 근거가 된 조건 안에서 작용한다. 새 자료는 조건을 구체화하거나 빠진 원인을 드러내거나 이전 측정의 부적합성을 보일 수 있다. 따라서 이상현상 과학의 발전에는 관리되는 재검토가 필요하다. 수정은 지식의 이력을 보존하면서 현재 어떤 규칙을 사용해야 하는지 명확히 보여 주어야 한다.

구체적으로 달라진 것

모순이 나오면 먼저 수준을 정한다. 원자료, 처리, 불확실성 평가, 설명 모형 또는 허용 행동 결정 중 무엇이 변했는가? 이 변화들은 관련될 수 있지만 항상 함께 일어나지는 않는다. 새 처리법은 발현 부류를 바꾸지 않고 양을 구체화할 수 있다. 새 위험 평가는 원인 확립 전에 작업을 제한할 수 있다.

수정마다 근거와 적용 범위를 기술한다. 한 계기 유형에서 문제를 찾았다고 해당 부류의 모든 관측을 자동으로 신뢰 불가라 선언해서는 안 된다. 고장이 공통 처리 라이브러리에 연결되면 이를 쓴 측정열까지 검증을 확대한다. 먼저 영향받은 자료 집합을 정하고 결론을 재계산하며 결정을 재검토한다.

프로토콜의 버전

버전에는 날짜, 책임자, 적용 범위, 변경 목록과 이전 판본의 지위를 포함한다. 작업 허용 조건, 측정 구성이나 결과 기준의 중요한 변경에는 새 버전이 필요하다. 오자 수정도 이력에 보존하지만 새 과학적 검증이라는 인상을 주어서는 안 된다. 동반 기록부에서는 편집, 방법과 내용의 변화를 구별한다.

철회한 절차는 이전 작업 이해를 위해 남기되 새 적용에는 부적합하다고 명확히 표시한다. 자료를 공개했다면 이전 결과를 이용했을 수 있는 사람들에게 수정 소식이 도달해야 한다. 알리지 않고 파일을 갱신하면 지침 버전과 수행 행동의 연결이 지워져 결과 분석이 어려워진다.

새로운 효과와 이론의 한계

지속 잔차는 사용하는 설명이 해당 조건에서 부족함을 보인다. 다음 단계는 모형의 어느 부분을 바꿔야 하는지 밝히는 것이다. 빠진 상호작용, 잘못된 계 경계, 미지의 물질 상태나 더 깊은 이론 한계가 가능하다. 선택은 예측 전체로 정한다. 이례적인 가설과 한 번 일치했다고 필요한 재검토 규모를 정할 수 있는 경우는 드물다.

새 모형은 해당 영역의 이전 성공 관측을 설명하거나 왜 다른 해석이 필요한지 명확히 보여 주어야 한다. 장점은 새 자료로 평가하고 추가 가정들을 열거한다. 어떤 결과에도 임의로 맞출 수 있다면 우선 자유도를 제한해야 한다. 그렇지 않으면 다음 실험에서 정확히 무엇을 배웠는지 확립할 수 없다.

자료를 잃지 않는 오류 분석

유용한 분석은 오류 발생 조건과 사람에 대한 평가를 구별한다. 교대 조직, 모호한 지침, 원자료 접근, 계기 인터페이스와 기대의 압력을 연구한다. 개인 책임은 남지만 계 수정의 대체물이 아니다. 다른 성실한 수행자도 같은 오류를 낼 가능성이 있다면 절차 구성을 바꾸어야 한다.

부정적 결과와 해석할 수 없는 결과도 성공한 계열과 함께 보존한다. 이들은 작동 가능성의 한계를 보여 주며 쓸모없는 행동의 반복을 막는다. 어떤 고장이나 공백 때문에 해석할 수 없는지

밝힌다면 해석 불가능성 자체도 유용한 결과일 수 있다. 다음 프로토콜 버전에서는 이 정보를 허가 조건이나 추가 대조로 바꾼다.

수정을 위한 저자의 순환 절차

1. 모순을 기록하고 해당 자료 판본들을 보존한다.
2. 변화 수준을 정하고 논쟁 지점에 의존하는 결론을 일시 제한한다.
3. 이용 가능한 독립 자료로 대안 원인을 검증한다.
4. 수정이 과학적 결론과 안전 조건에 미치는 영향을 따로 평가한다.
5. 적용 범위, 변경 근거와 이전 판본 이력을 갖춘 새 버전을 낸다.
6. 적합한 대조 상황으로 수정 절차를 검증하고 다음 재검토 조건을 정한다.

가상 사례로 책의 이론 부분을 마무리한다. 몇 달의 관측 뒤 연구진이 시간 표지 변환 오류를 발견한다. 이전에 하나로 묶은 일부 사건이 더는 일치하지 않는다. 보고서를 수정하고 남아 있는 독립 관측은 별도 과제로 분리한다. 작업의 과학적 가치는 사라지지 않는다. 절차 취약점을 찾고 자료를 구체화했으며 더 정확한 질문이 생겼다. 오류는 결과를 끝까지 추적한 뒤에만 지식으로 바뀐다.

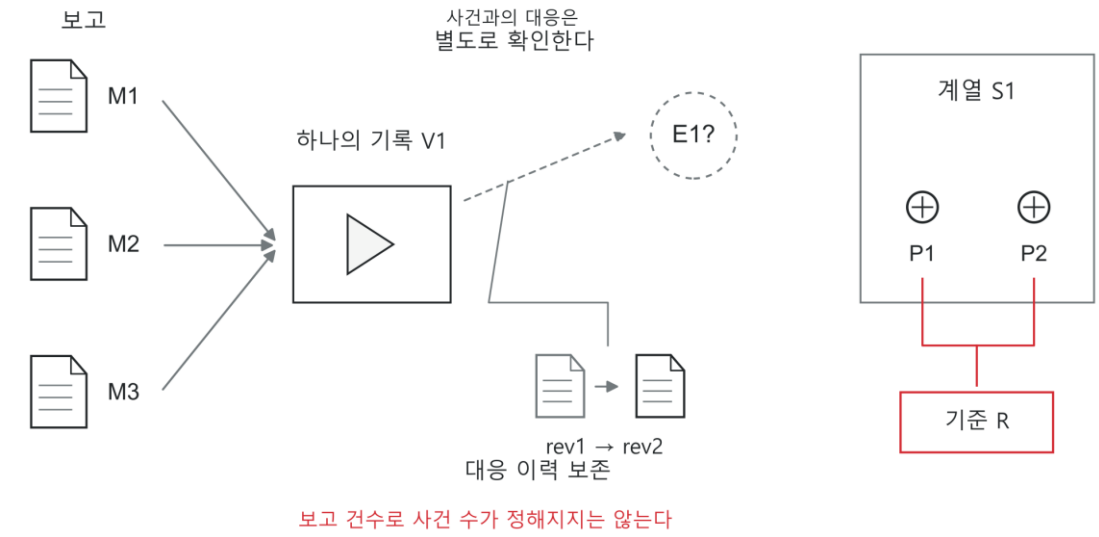
연구 계획의 성숙함은 질문을 열어 두면서 자체 주장을 제한할 능력으로 정해진다. 미지 현상에는 새 개념과 계기가 필요할 수 있다. 이를 위해 보존 자료, 명확한 모형과 수정 가능한 절차가 필요하다. 다음 프로토콜마다 어떤 지식에 근거하고 무엇을 할 수 있으며 어떤 관측이 나오면 더는 충분하지 않은지 보여 주어야 한다.

사례 대장과 재검토 조건

대장은 개별 명세를 연결하고 연구 한계를 비교 가능하게 한다. 확인된 통상 원인, 지속 잔차, 음성 검증, 자료 부족과 작업 허용 조건에 따른 중단 사례들을 포함한다. 이 지위들은 특이함의 척도가 아니다. 한 사례에서도 검증 주장별 지위가 다를 수 있다. 영상의 출처는 확립했지만 동반 소리의 원인은 열린 상태일 수 있다.

기록 조직에는 안정적인 식별자, 메타자료, 출처 기술과 재사용 조건이 유용하다. 이 과제들은 자료의 발견 가능성, 접근 가능성, 상호운용성과 재사용 가능성이라는 FAIR 원칙으로 체계화되어 있다 [60]. 적용하면 자료를 발견하고 비교하는 데 도움이 되지만 물리적 해석을 인증하지는 않는다. 민감 정보 접근에는 제한이 있을 수 있다. 공개 카드에는 어떤 자료가 있고 접근 조건이 무엇인지 명확한 설명을 남기면 충분하다.

사례 비교 전에 집계 단위를 정한다. 영상 기록 하나에 기초한 보고 세 개는 같은 원자료에 해당한다. 같은 장치의 센서 둘은 공통 기준에 의존할 수 있다. 대장은 이 연결들을 명시적으로 보존한다. 보고, 사건, 계기와 연구 측정열의 식별자는 구별해야 한다. 사건 통합 수정은 공개한 빈도를 재현할 수 있도록 버전 이력에 보존한다.



가정한 식별자다. 자료, 사건, 계기와 측정열은 따로 관리한다.

그림 43. 보고, 자료, 사건, 실험 계열은 서로 다른 단위다. 가정한 식별자로 기록의 기원을 나타낸 도식이다. 보고 M1–M3은 하나의 원자료 V1을 가리킨다. 그 자료와 사건의 연결은 별도로 검증하고 수정 이력을 유지한다. 기기 P1과 P2는 계열 S1에 속하지만, 공통 기준 R 때문에 취약성이 서로 연결된다. 보고 수, 자료 수, 사건 수를 같은 것으로 취급해서는 안 된다.

미해결 질문은 다음 연구자가 자기 방법의 유용성을 검증할 수 있도록 기록한다. «정체를 모른다» 대신 다음처럼 명시한다. 이 교환 조건에서 두 설명은 응답 부호가 다르다. 현재 장치는 가정한 지연을 분해해 측정하지 못한다. 물질 자료를 최초 상태와 연결할 수 없다. 재검토 조건은 독립 기록, 기원이 알려진 새 개체, 필요한 성능을 갖춘 기기의 출현일 수 있다. 같은 이야기를 반복하기만 해서는 이 조건을 충족하지 못한다.

부록 I에는 대장 구조와 실습 사례별 학습 행이 있다. 단위, 조건과 목적이 다른 사례들이므로 합산하여 이상현상 빈도로 삼아서는 안 된다. 전체 분석에서는 먼저 비교 가능한 부분집합을 고르고 범위를 검증하며 의존성을 고려한다. 음성 측정열과 무효 측정열도 보존하면 미검출과 적합한 검증 부재를 구별할 수 있다.

제XI부

연구 실습

이 부의 모든 사례는 가상의 학습 연구다. 수치와 기록은 방법 분석을 위해 만들었다. 서술한 효과를 실제로 검출했다는 증거가 아니며 보편적인 운영 한계를 정하지도 않는다.

제55장

사례 1: 통신 복구 뒤 시계의 불일치

이 사례의 모든 사건, 계기와 수치는 가상이며 학습 분석을 위해 구성했다. 자료 전체가 합성이다. 조사하는 기술실의 기록기 둘은 네트워크 복구 뒤 약 1,2초의 시간 급변을 보인다. 나중에는 하나가 계속 앞서간다. 직원은 두 징후를 국소 시간 가속이라는 보고로 묶는다. 연구진은 최초 진술을 보존하되 질문 둘을 구별한다. 왜 지시값이 동시에 변했고 왜 이후 추가 차이가 누적되었는가? 원인은 서로 다를 수 있다.

명세서 A: 실제로 기록된 것

사례에는 УЧ-TM-01이라는 식별자를 부여한다. 기록기 A와 B의 원기록부, 동기화 서버 S의 기록부와 독립 표준 R의 기록을 이용할 수 있다. 첫 DI 표지는 표시 시간에 관한 것이며 TM은 물리적 진행률에 대한 검증 가설이다. 장소는 알려져 있지만 검증할 척도 자체가 시간표의 유일한 근거일 수 없으므로 급변 시점은 처음에 구간으로 주어진다. 공간 소유자는 장비가 정상 운용 상태임을 확인한다. 연구는 기록과 허용 시험 장치 검증에 한정되며 기술 공정 변경이 필요하지 않다.

기준 순서로 계수기 R을 사용한다. 별도 실험실 표준과의 비교는 회차 전후에 수행했다. R 채널은 자료를 국소 저장하고 S의 명령을 받지 않는다. 기록기 A의 하드웨어 계수기는 프로그램의 달력 시각 표지와 독립적으로 읽을 수 있다. B에는 보정 명령 기록부가 남아 있다. 따라서 원자료로 발진기 진행과 지시값 변환을 따로 연구할 수 있다. 제12장에서 정식화한 이 구별이 구체적인 사례의 내용이 된다.

계획서 Б와 독립성 지도 B

반복 측정열 전에 연구진은 세 설명안을 고정한다. 동기화 오류라면 특정 명령 S 뒤 프로그램 표지에 급변이 나타나되 하드웨어 계수는 연속이어야 한다. 온도 드리프트라면 R에 대한 A의

주파수 차이가 발진기 자체의 상태에 의존해야 한다. 국소 계량 설명이라면 이 원인들을 고려한 뒤에도 서로 다른 종류의 독립 표준들에 장소와 연결된 일관된 효과가 남아야 한다. 주 지표는 한 시간 동안의 잔여 차이다. 이 학습 검증의 최소 관심 규모는 0,5밀리초로 정한다.

지도 B는 A와 B가 급변의 독립 증거가 아님을 드러낸다. 둘 다 S에서 보정값을 받는다. 일치는 명령 하나의 전파를 검증한다. R은 전원, 저장과 기준이 별개지만 같은 실험실 환경을 쓰므로 온도와 기계적 의존성을 제거했다고 선언하지 않는다. 계측 전문가는 외함 온도의 별도 기록을 도입하고 장치들을 함께 비교한다. 중요한 것은 독립성이라는 구호가 아니라 새 구성이 끊는 구체적인 연결이다.

자료와 불일치의 분해

표는 R에 대한 차이를 밀리초로 제시한다. 세션 시작의 영값은 선택한 초기 기준 맞춤을 뜻한다. 세션 전에 A는 28 °C에서 안정되었으며 대조 특성은 20 °C에서도 측정했다. 해당 시간 동안 A의 온도는 일정했다. 이전과 이후 표시는 기록한 서버 명령 하나에 관한 것이며 서로 다른 두 물리적 시간 구간이 아니다. 반올림한 표가 더 상세한 원기록을 대신하지는 않는다.

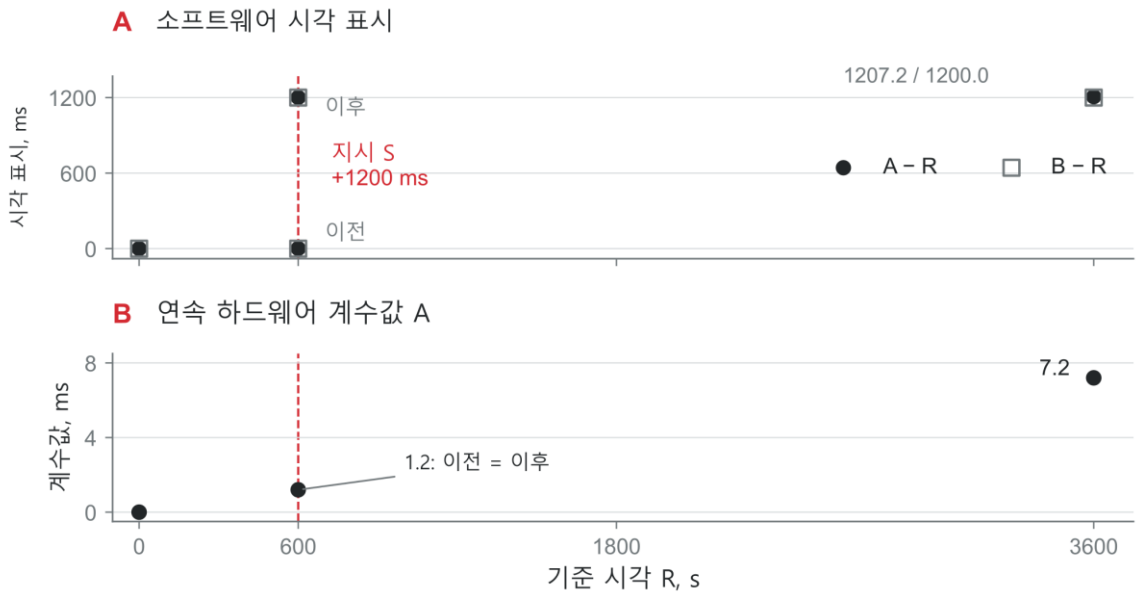
R 측정 시점	시간 표지 A − R, ms	시간 표지 B − R, ms	하드웨어 계수 A − R, ms
시작	0,0	0,0	0,0
600 s, 명령 전	1,2	0,0	1,2
600 s, 명령 후	1201,2	1200,0	1,2
3600 s	1207,2	1200,0	7,2

기록 S에는 통신 복구 중 잘못된 저장 보정값을 불러온 뒤 발생한 1200밀리초 추가 명령이 한 번 들어 있다. 그 순간 하드웨어 계수 A는 연속적이다. 허가된 격리 구성 사본에서 같은 불러오기 순서는 도약을 재현하지만 수정 버전에서는 나타나지 않는다. 이 검증은 공통 소프트웨어 전이를 설명한다. 아직 남은 7,2밀리초는 설명하지 못하므로 발견한 결함 하나로 분석을 끝내지 않는다.

A의 별도 시험 성능은 명시한 두 온도 상태 사이에서 상대 주파수 변화 2,00×10⁻⁶를 준다. 3600초 동안 일정하면 예상 누적은 0,00720초, 즉 7,20밀리초다. 하드웨어 계수와 일치한다.

측정한 온도 의존성은 검증 운용 상태의 이 개체에 해당하며 모든 시계의 성질로 부여해서는 안 된다. 보정은 작업 사본에 적용하고 원래 위상과 온도는 보존한다.

S를 바로잡은 뒤 새 계열에서 하드웨어 계수 A는 이전 온도 상태일 때 한 시간에 7,1밀리초를 누적한다. 미리 정한 보정 뒤의 잔차는 −0,1밀리초이며, 비교의 확장불확도는 포함인자 2에서 0,3밀리초다. 공통 온도 상태에서는 하드웨어 차이가 0,1밀리초이고 명시한 불확실성은 같다. 가능한 위치들을 바꾸어도 표류가 B로 옮겨 가지 않는다. 의존성은 A를 따라간다. 이 결과들은 최초 장면을 단순히 반복하는 것이 아니라 구체적인 예측을 검증한다.



새 계열: 7.1 − 7.2 = −0.1 ms; k = 2에서 U = 0.3 ms.
합성 자료다. 표의 측정값만 제시하며 세로축 척도는 다르다.

그림 44. 시각 표지의 공통 도약과 발진기의 별도 표류. 사례 1의 합성 자료다. 명령 S 뒤 소프트웨어 시각 표지의 공통 도약을 연속 하드웨어 계수 A와 나누어 표시했으며, 수직 척도는 서로 다르다. 600 s의 반복 점들은 하나의 명령 전후 상태를 뜻한다. 아래 설명은 새 계열에 관한 것이다. U = 0,3 ms는 k = 2일 때의 확장불확도이며, 원래 점들의 구간이 아니다.

운용 방식 Г, 결과 Д와 후속 재검토

책임자는 정상 비교, 미리 접근 가능한 위치로의 이동과 설정 사본 시험만 허가한다. 독립 기록 R 상실, 미기록 보정이나 검증 환경 이탈 시 운용자는 측정열을 중단한다. 중단은 국소 기록부를 보존하며 비교 실험을 멈추는 것이다. 조정자는 효과 시연을 위한 기반 설비 서버 종료를 허용하지 않는다. 서버의 실제 기능은 시험 장치 검증과 분리한다. 관리자는 잘못된 구성과 수정 이력을 모두 보존한다.

결과 문서 Д에는 확인 결과 둘을 기록한다. 시간 표지의 공통 급변은 동기화 명령으로 설명되며 A의 추가 진행은 측정한 온도 성능과 일치한다. 시간 보정은 측정 경로 수정이며 물리적 시간 영역의 무력화가 아니다. 보정 뒤 이 검증은 한 시간에 0,5밀리초보다 큰 새 효과를 뒷받침하지 않는다. 결론은 더 작은 효과, 다른 운용 상태나 누락 구간에 적용하지 않는다. 뒷받침된 편차가 없다는 것을 시계의 절대 일치 주장으로 바꾸지 않는다.

사례는 두 원인이 결합한 것으로 설명되어 종결된다. 합의한 비교 경계를 넘는 잔차가 기기 상태의 독립 검증 뒤에도 남으면 다시 연다. 여기에는 새 계열이 필요하며, 사건의 옛 이름을 되살리는 것으로 대신할 수 없다. 명세서는 최초 보고, 발견한 두 메커니즘, 수정한 결론의 연결을 보존한다. 이렇게 분석은 시스템에 관한 구체적인 지식으로 이어진다. 어떤 과정이 불일치의 각 부분을 만들었고, 어떤 관찰로 그 설명을 다시 검증할 수 있는지 알게 된다.

제56장

사례 2: 안정적으로 남는 미세 힘의 잔여값

이 사례는 전적으로 가상의 학습 사례다. 모든 힘, 거리, 성능과 결과는 합성이다. 과제는 미설명 잔차가 남은 뒤 연구를 어떻게 이어 가는지 보이는 것이다. 안전 실험실 시험 장치에서 닫힌 연구 모듈을 옮기자 대조 물체가 작게 편향된다. 모듈 외피와 허용 작업은 사전에 검증했지만 관측 힘의 기전은 모른다. «잔차»는 알려진 영향의 채택 모형과의 차이다. 미리 새로운 근본 힘을 뜻하지 않는다.

명세서 A와 측정 과제

사례 УЧ-MB-02에는 주 표지 MV를 부여한다. 중력 및 전자기 설명은 확립된 원천 부류가 아니라 가설로 기록한다. 모듈과 대조 물체 사이의 지정된 축을 따른 준정적 힘을 연구한다. 비틀림 현수의 각도는 독립적으로 검증한 강성과 지레팔로 힘으로 변환한다. 합성 시험대의 지레팔은 50밀리미터, 비틀림 강성은 $2{,}0\times10^{-7}$ N·m/rad, 관성모멘트는 $5{,}0\times10^{-6}$ kg·m²다. 이에 해당하는 자유 진동 주기는 약 31,4초다.

힘 10 nN에 대해 예상 각도는 2,5 mrad다. 이 값들은 제51장의 설계와 일치한다. 판매되는 장치의 성능을 나타내는 것은 아니다. 이 사례에서는 과도 과정이 끝났음을 확인한 뒤의 정상 구간만 사용한다. 인접 측정값이 많다고 이를 여러 독립 실험으로 선언하지 않는다. 반복의 단위는 배치, 대조 기록, 초기 위치 복귀로 이루어진 별도 주기다. 모든 교환은 허가한 시험 장치 범위 안에 머문다.

계획서 Б와 독립성 B

첫 계획은 광학 판독의 이동, 기초와의 기계적 연결과 대조 물체에 작용하는 힘을 구별한다. 광학 경로는 알려진 작은 회전으로 검증하고 기초 운동은 따로 기록한다. 모듈 위치는 사전 순서로 바꾸며 평가자는 거리 표기 없는 기록을 받는다. 비교 가능한 기하의 대조 모형은 같은 단면을 내지 않는다. 이는 특정 기술적 설명안을 제한하지만 모형의 모든 성질이 연구 모듈과 같음을 확립하지는 않는다.

지도 B에는 공통 탁자, 공기, 기하와 처리계를 넣는다. 따라서 둘째 측정은 독립적으로 교정하고 별도 판독과 분석 코드를 갖춘 탄성 보로 수행한다. 공간과 모듈 자체를 유지하므로 공통 정전기 원인과 열적 원인은 여전히 가능하다. 두 기계적 반응의 측정은 단일 판독기 오류라는 설명에 비해 힘에 대한 주장을 강화한다. 모든 환경 작용에 대한 독립성을 만들거나 후속 발생원 검증을 대신하지는 않는다.

적합과 검증 측정열

첫 계열에서 거리 d는 정해진 기하 기준점 사이로 측정한다. 탐색 분석은 경험 관계 F(d)=A(50 mm/d)²를 제안한다. 여기서 이차 지수는 제한된 범위를 기술하기 위해 선택한 형태이며 상호작용의 정체에 관한 결론이 아니다. 계수 A는 맞춤용 세 행만으로 추정한다. 각 행의 표준불확도 중 독립 성분은 0,30 nN이고 공통 척도의 상대 불확실성은 1,5퍼센트다. 후자는 점의 수가 늘어도 줄지 않는다.

영점 편향은 지점마다 별도의 짝지은 대조 주기에서 추정한다. 제시한 0,30 nN에는 이 차이의 불확도 중 독립 성분이 들어간다. 매개변수 하나인 모형처럼 보이게 하면서 영점, 거리 원점과 의존성의 지수를 동시에 자유롭게 바꾸어서는 안 된다. 여러 기하 보정을 자유롭게 두면 같은 수치 세 개로 훨씬 많은 설명이 가능하다. 따라서 여기서는 A만 적합하고 기준점과 처리는 유지한다. 나중에 바꾸면 기존 예측의 정밀화가 아니라 새 모형 버전이다.

측정열	d, mm	비틀림 측정 경로, nN	탄성 보, nN
적합	40	15,80	측정되지 않음
적합	60	6,80	측정되지 않음
적합	80	4,00	측정되지 않음
새 검증	45	12,50	12,20

측정열	d, mm	비틀림 측정 경로, nN	탄성 보, nN
새 검증	70	5,00	5,20

첫 측정열의 제곱합 최소화로 A=10,068 nN, 반올림하여 10,07을 얻는다. 계수 불확도의 독립 성분은 약 0,171 nN이고 공통 척도를 더하면 약 0,23 nN이다. 이 학습 계산에서 거리 설정 오차는 이 성분들에 비해 무시할 만큼 작다. 실제 설계에서는 이런 단순화를 기하 교정으로 확인해야 한다. 얻은 계수와 식은 다음 측정열 공개 전에 고정한다.

새 거리 45와 70밀리미터에서 예측은 각각 12,430과 5,137 nN이다. 비틀림 경로의 지시값은 12,50과 5,00이며 예측과의 차이는 0,070과 −0,137 nN이다. 들보의 개별 결과에 대한 표준불확도는 0,40 nN이다. 그 자료는 같은 힘 척도와 일치한다. 연구 모듈을 뺀 별도 배경 계열은 표준불확도 0,30에서 잔차 0,08 nN을 준다. 눈에 띄는 결과가 없는 대조 주기까지 포함하여 모든 기록을 함께 보존한다.

잔여값이 남은 뒤 확인된 것

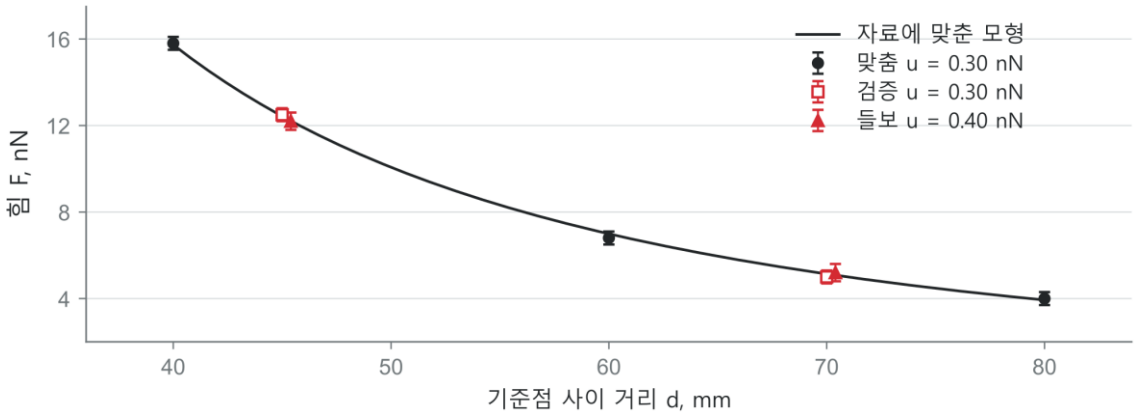
제한된 양성 결과를 얻었다. 시험 구성에서 특정 모듈의 위치는 서로 다른 두 측정 경로의 재현 가능한 기계적 반응과 연결된다. 한 측정열에 적합한 경험 관계가 두 새 거리의 검증을 견뎠다. 결론은 40–80밀리미터 범위와 측정한 계의 상태에 해당한다. 적합 지점 셋과 검증 둘로는 법칙의 정확한 지수나 유일한 힘 발생원을 확립할 수 없다. 이제는 이전의 포괄적인 «편차»라는 말이 아니라 이 측정 관계를 바탕으로 작업을 계속해야 한다.

적어도 세 설명안이 남는다. 잔여 정전기는 외부 감시로 완전히 기술하지 못한 표면 전위 분포에 의존할 수 있다. 기체 매질을 통한 결합은 약한 온도장과 표면 상태에 의존할 수 있다. 다른 본성의 빠진 상호작용은 아직 자체 구별 예측이 필요한 열린 가설이다. 세 번째 행이 있다고 앞의 두 설명안과 동등하게 확인된 것은 아니다. 현재 자료는 비슷한 거리 의존성을 만들 수 있는 기전들 중에서 선택하지 못한다.

다음 계획은 이 설명안들이 갈리는 조건을 바꾼다. 적격성을 확인한 장치 범위에서 기하를 같게 하고 온도 분포를 기록하며 미리 선택한 기체 환경 상태들을 비교한다. 별도 측정열에서는 허용된 도전성 차폐판의 영향을 기계적, 열적 기여 감시와 함께 연구한다. 개입들을 한 실험으로 묶지 않는다. 기전마다 허용 반응 범위를 미리 계산한다. 아직 예측이 없으면 새 단계는 탐색에 머문다. 구별 없이 정확도만 높이면 기존 모호성을 더 정밀하게 할 뿐이다.

운용 방식 Г와 확인서 Д

위치 감시 상실, 현가 장치 손상, 계획 밖 환경 변화나 판독의 적격 범위 이탈 시 운용자는 이동을 멈춘다. 조정자는 이미 시험한 작업만 허용한다. 더 강한 작용은 흥미로운 잔차에 주는 보상이 아니다. 결과 문서 Д에는 무력화 개입을 수행하지 않았다고 명시한다. 검증한 것은 힘 기록과 제한된 예측 관계다. 새 측정열이 고정 예측과 양립하지 않거나 이전에 빠진 공통 원인을 발견하면 재검토한다. 사례는 열려 있지만 이제 측정 결과와 구체적인 다음 질문이 있다.



A = 10.068 nN; 공통 척도 1.5%는 별도로 고려한다. 합성 자료다.

그림 45. 힘 모형과 독립적인 검증 측정. 사례 2의 합성 자료와 경험 모형 F = A(50 mm/d)², A ≈ 10,068 nN이다. 막대는 독립적인 표준불확도 성분을 나타낸다. 비틀림 경로는 0,30 nN, 들보는 0,40 nN이다. 공통 척도의 상대 불확실성 1,5%는 따로 고려한다. 삼각형은 읽기 쉽도록 0,4 mm만 옮겼다. 실제 거리는 45와 70 mm다. 모형의 적용 범위는 40–80 mm로 제한된다.

제57장

사례 3: 시계와 역학을 이용한 시간 모형의 검증

이 사례의 모든 관측과 수치는 가상의 학습 자료이며 전체가 합성이다. 발견된 시간 영역의 보고가 아니라 가정한 계량의 검증을 다룬다. 여러 독립 주파수 표준을 비교한 뒤 연구진은 작지만 안정적인 시간 잔차의 공간 분포를 얻는다. 기지 조건 보정과 전달선 검증으로도 사라지지 않는다. 보기 좋은 식과의 일치를 설명이라고 부르고 싶어진다. 이 사례의 과제는 같은 식의 또 다른 필수 귀결을 검증하고 불편한 결과도 남기는 것이다.

명세서 A와 주장의 범위

사례 УЧ-TM-03은 연구 위치 네 곳과 원격 표준의 일일 비교를 묶는다. 반지름 좌표는 선택한 기하 중심을 기준으로 하며 원격 표준은 R=100미터에 있다. 중심 위치는 탐색 측정열에서

정하고 검증 전에 고정했다. TM 표지는 측정 차이에, 계량 설명은 가정 모형의 지위에 해당한다. 기계 채널 정보는 처음에 시계 분포를 적합하는 분석가에게 숨긴다. 이로써 한 자료군을 모든 후속 예측의 조정에 몰래 사용하지 않는다.

명세에는 국소 원자 주파수, 위상 전달과 지지대 운동을 각각 검증한다고 적는다. 공통 좌표 오차와 환경 오차는 예산에 남는다. 학습 분석에서 각 일일 잔차의 표준 불확도는 3피코초다. 이는 합성 연구 조건의 수준이며 임의의 현장 배치에서 이런 정확도를 이용할 수 있다는 약속이 아니다. 비교 시간은 검증된 기준 척도에 해당하며 원위상은 보정 전에 보존한다.

위치마다 일일 양이 초기 위상의 일정 이동이 아니라 차이의 누적임을 확인했다. 원시계열은 해당 구간에서 대략 선형적인 진행을 뒷받침한다. 분포의 정적 성질은 검증할 설명안의 조건으로 남는다. 다른 상태의 자료를 이 측정열과 기계적으로 합칠 수 없다. 초기 비교 없이 일회성 최종 지시값만 기록했다면 기하 논의 전부터 진행률에 대한 강한 결론을 얻을 수 없었을 것이다.

계획서 Б: 고정한 가정적 계량

연구팀은 제16장의 모형을 그대로 사용한다. 유클리드 공간 단면과 양의 함수 N(r)=1+ε exp(−r²/L²)를 갖는 정적 구면대칭 계량이다. 정지한 시계에는 dτ=N(r)dt가 적용된다. 두 적합 지점에서 반올림한 매개변수 ε≈10⁻¹⁵와 L≈10미터를 얻는다. 새 반지름 위치의 데이터를 열기 전에 이 값들을 고정한다. 이 분포에서 R=100미터인 원격 기준은 사실상 N=1에 대응한다. 이 근사는 모형에 속하며 계산에 명시적으로 들어간다.

r, m	목적	하루 예측값, ps	합성 관측값, ps
0	적합	86,40	86,4
10	적합	31,78	31,8
5	새 검증	67,29	67,5
20	새 검증	1,58	1,6

새 위치 자료는 명시 불확도에서 시간 분포와 일치한다. 한 귀결군 검증의 양성 결과다. 모형이 시험 범위에서 시계 잔차의 보간과 감소를 예측할 수 있음을 보인다. 그러나 분포 일치가 발생

기전을 정하지는 않는다. 모형은 동시에 시계를 빛의 전파와 정지 물체 유지에 필요한 가속도에 연결한다. 사전 계획은 편리한 표 하나 뒤에 평가를 끝내는 것을 명시적으로 금지한다.

독립성 B와 역학적 예측

기계 채널은 검증한 통상 배경을 뺀 뒤 고정 플랫폼 고유가속도의 수평 반지름 성분을 측정한다. 방향, 기울기와 기초 운동은 독립 기록한다. 채널은 전원, 판독과 처리가 별개이며 그 계수는 시계 자료로 정하지 않는다. 측정 장소 일치는 모형 비교에 필요한 공통 물리 연결로 남는다. 교정은 추정 새 효과를 사용하지 않는 조건에서 측정열 전후에 수행했다.

선택한 계량에서 유지 가속도의 크기는 c²|d ln N/dr|다. ε가 양수이면 반지름 성분은 중심을 향한다. 작은 ε에서 최대는 사실상 r=L/√2, 즉 약 7,07미터에 있다. 채택 매개변수를 넣으면 약 7,71 m/s²가 나온다. 일일 시계 이동이 겨우 수십 피코초인데도 큰 역학적 예측이다. 이유는 공간 기울기에 c²를 곱하기 때문이다. 중심에서만 검증하면 부적합하다. 그곳의 기울기는 영이다.

$$a_{\max} \simeq \frac{c^2|\varepsilon|}{L}\sqrt{\frac{2}{e}} \simeq 7{,}71\ \mathrm{ms}^{-2}$$

r=7,07미터에서의 합성 기록은 표준 불확도 0,010 m/s²와 함께 초과 반지름 성분 +0,003 m/s²를 준다. 축의 양의 방향은 중심에서 바깥쪽이다. 모형의 예측은 약 −7,71 m/s²다. 작동 검증에 따르면 이 정도 가속도가 계기의 범위나 영점 표시 속에 숨을 수는 없다. 차이는 제시한 불확도 예산과 양립하지 않으며 ε이나 L을 반올림해서 해결되지 않는다. 시계의 분포가 유지된다는 사실이 이 불일치를 상쇄하지는 않는다.

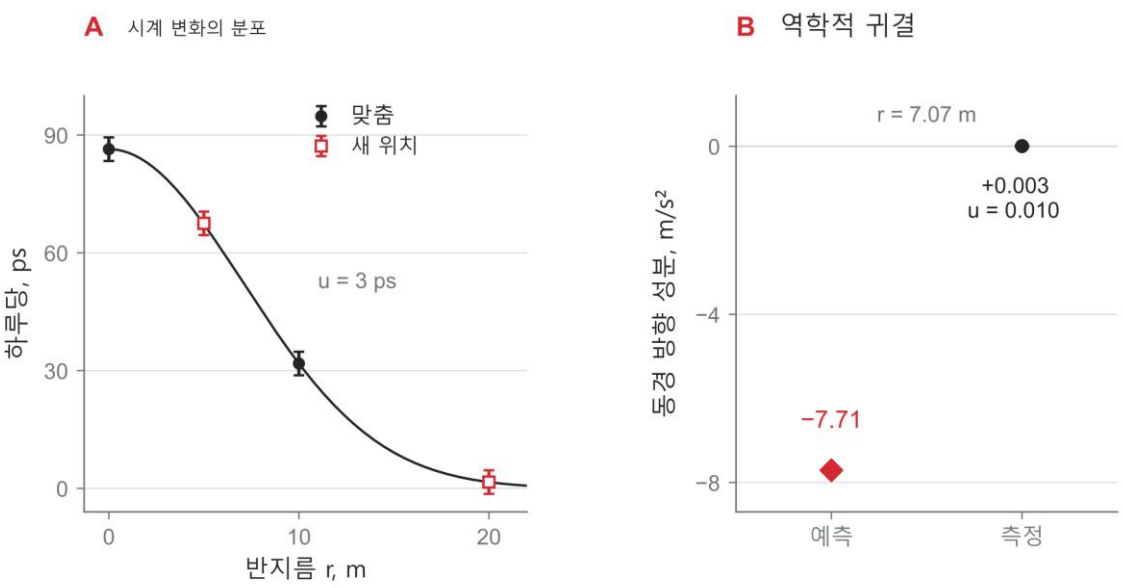


그림 46. 같은 계량이 시계 검증은 통과하지만 역학 검증은 통과하지 못한다. 사례 3의 합성 자료다. ε = 10^{-15}, L = 10 m인 가정적 계량은 새 위치 두 곳을 포함한 시계 지시값 네 개와 일치한다. 하지만 측정과 양립하지 않는 역학적 성분을 예측한다. 시계에는 표준불확도 u = 3 ps, 역학 측정에는 u = 0,010 m/s²를 표시했다. 역학 측정의 짧은 구간은 큰 예측값의 척도에서 거의 보이지 않는다. 양의 방향은 중심에서 바깥쪽이다. 모형 매개변수의 불확실성은 여기서 정하지 않았다.

운용 방식 Γ와 모형에 대한 결정

장비는 이미 허용된 시험 구역에 배치하고 기계 자료는 원격 취득한다. 큰 가속도 가설이 생겼다고 사람이 중력을 주관적으로 확인하도록 보내지 않는다. 조정자는 예상 밖 하중, 위치 상실이나 필수 기계 감시 고장 시 이동을 멈춘다. 보존된 고정 기록만으로 핵심 분기에 충분하다. 기계 채널 교정을 잃었다면 결과는 이 검증의 부적합이지 시간 모형의 자동 참이 아니다.

결과 문서 Д에서는 특정한 공동 해석을 기각한다. 고정 분포를 가진 지정 계량은 시계 자료와 기계 자료에 동시에 부합하지 않는다. 생각할 수 있는 모든 기하의 반박도 아니며 기록한 주파수 잔차 부재의 증거도 아니다. 계량의 공간 부분 변경, 플랫폼에 추가 힘 도입이나 정적 가정 재검토는 추가 예측을 갖는 새 모형이다. 결과 뒤 이런 변경을 넣고 과거 검증에 성공했다고 선언해서는 안 된다.

시계 잔차에는 자체 후속 연구가 이어진다. 환경 감도가 다른 전이들을 비교하고 독립 전달선을 반복하며 좌표 분포의 안정성을 연구한다. 원인이 계기에 있다면 관측 규모와 형태를 재현해야

한다. 잔차가 남으면 새 가설은 기각한 기계적 귀결의 부재도 설명해야 한다. 시간 현상이라는 사례 이름이 선택한 기하를 더는 검증으로부터 보호하지 않는다.

결정 재검토 조건은 기계 기록의 중요한 결함 발견 또는 모든 고정 예측과 양립하는 새 측정열로 명시한다. 무력화 개입은 하지 않았으므로 문서는 영역 제거를 보고하지 않는다. 과학 결과는 원관측을 보존하면서 설명 집합을 좁힌 것이다. 사례는 한 자료군의 양성 일치와 다른 자료군의 음성 비교가 함께 각각보다 더 강한 결론을 주는 방식을 보인다.

제58장

사례 4: 변화하는 영역과 관측가능성의 상실

이 학습 사례의 모든 상황, 지도와 수치는 가상이며 자료는 합성이다. 학습용 실내에서 원격 열 촬영으로 비교 가능한 배경과 다른 표면 영역을 찾는다. 보이는 영역이 점차 커지는 동시에 기록 품질이 나빠진다. 이어 이동 플랫폼의 원격 측정 자료가 끊긴다. 연구진의 과제는 둘이다. 기록 과정의 전개를 이해하고 정보 일부 상실에도 행동 근거를 유지하는 것이다. 화면에서 지도가 사라진 것을 영역 소멸로도 장비 파괴의 증거로도 받아들이지 않는다.

명세서 A: 관측 영역과 그 경계

사례 УЧ-TH-04에는 TH 표지를 부여한다. 윤곽 기하의 변화는 관측 표면의 특성으로 기술한다. 열 차이의 원인은 아직 모른다. 경계는 조작적으로 정한다. 선택 측정 모형에서 온도차가 0,8켈빈을 넘는 윤곽이다. 문턱은 이 기록의 특징 추출에 관한 것이며 사람의 안전 기준이 아니다. 실제 열 해석에는 표면 성질과 반사 복사의 고려가 필요하다. 학습 자료에서는 명시 범위에서 이를 검증했다고 가정한다.

명세에는 원프레임, 기준 온도 영역, 카메라 위치, 부적합 화소 마스크와 배경 정보를 포함한다. «구역 반경» 하나 대신 고정 기준점에서 유효 윤곽 부분까지의 최대 거리를 기록한다. 보이지 않는 부분은 따로 표시한다. 관측 차이 지도와 사람의 허용 배치 지도는 다른 문서다. 합치면 선택 열 특성만 측정한 곳에 거짓 안전 경계가 생길 것이다.

계획서 Б, 지도 B와 최초 운용 방식 Г

첫 계열의 핵심 질문은 측정 경로를 고정하고 유효한 배경을 유지해도 경계 변화가 남는가다. 표면의 물리적 변화라는 설명은 독립 시점 방향들에서 일관된 모습을 예측한다. 측정이 달라졌다는 설명은 설정, 위치, 기준 영역의 상실과의 연관성을 예측한다. 계획에는 변하지 않는

처리와 품질 기준을 고정한다. 추출한 대비와 그 추정 불확실성의 비는 네 이상이어야 한다. 이는 학습 실험의 국소적인 구별 조건이며 보편적 통계 기준이나 보호 규범이 아니다.

지도 B에는 카메라 둘이 표시되어 있지만 최초 독립성은 불완전하다. 전달 채널을 공유하고 하나는 이동 플랫폼에 있다. 국소 저장장치는 따로 작동한다. 별도 상태 채널은 플랫폼 정지만 확인하며 과학 자료를 대신하지 않는다. 따라서 화면의 일치가 통신 연속성을 확인하지 않으며 원격 측정 상실이 모든 원자료의 상실을 뜻하지도 않는다. 시작 전에 채널 고장 시 플랫폼의 행동을 정했다. 예정 기능을 유지하며 이동을 중단하는 것이다. 이 운용은 해당 장소에서 미리 시험했으며 모든 미지 환경의 보편 답으로 제안하지 않는다.

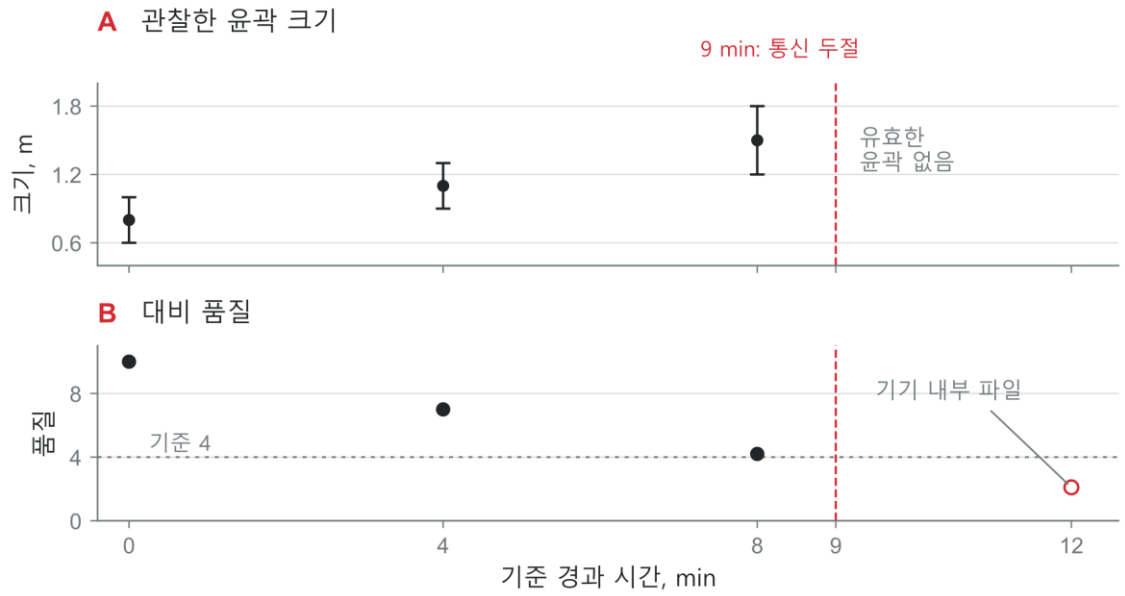
기준 시간	윤곽선 크기, m	대비 품질	기록 상태
0 min	0,8; 간격 0,6–1,0	10	적합
4 min	1,1; 간격 0,9–1,3	7	적합
8 min	1,5; 간격 1,2–1,8	4,2	운용 경계에서 적합
9 min	정의되지 않음	정의되지 않음	원격 측정의 손실
12 min	정의되지 않음	2,1	국소 파일; 윤곽은 부적합

상태 변화와 중단 명령

첫 세 행은 채택한 기준에서 기록된 윤곽의 확장을 뒷받침한다. 중심 추정값 차이는 팔 분에 0,7미터, 즉 분당 0,0875미터다. 이는 문턱 경계의 움직임을 기술하며 물질이나 에너지의 전달 속도가 확립되었다는 뜻은 아니다. 온도 분포가 바뀌면 개별 물체가 움직이지 않아도 그 윤곽이 움직일 수 있다. 여덟 번째 분 뒤에는 사전에 고른 모형이 이미 적합성 상실에 가까워짐을 경고하므로 추가 접근은 허가하지 않는다.

아홉 분째 운용자는 필수 원격 측정 자료 중단 징후를 받는다. 국소 자동계는 미리 시험한 조건에 따라 이동을 멈추고 별도 상태 채널이 정지를 확인한다. 운용자는 작업 중단과 마지막 적합 구성을 기록한다. 책임자는 영역의 현재 크기에 관한 결론을 중단한다. 전체 지도에는 마지막 측정 윤곽, 그 구간과 명시한 미관측 부분이 남는다. 평균 속도 하나로 이후 몇 분까지 곡선을 연장해서는 안 된다. 계획에서 아직 과정 전개 법칙을 확립하지 못했기 때문이다.

나중에 통신이 복구되면 국소 자료를 원격으로 복사한다. 이로써 열두 번째 분의 행을 얻을 수 있지만, 그 행이 이전 기하 결론에 유효해지는 것은 아니다. 고정한 기준에 비해 대비가 부족하기 때문이다. 관리자는 원격 측정의 공백을 연속 경계선으로 대체하지 않는다. 동시에 그 기록 자체는 보존한다. 구별 가능성을 잃은 과정을 분석하는 데 유용하기 때문이다. 파일을 성공적으로 받는 일과 그 안의 측정이 유효한지는 서로 다른 검증에 속한다.



9분째에 이동을 멈춘다. 얻은 파일로는 윤곽을 복원할 수 없다.
합성 자료다. 크기 구간은 사례에서 정했으나 포함 수준은 정하지 않았다.

그림 47. 측정한 경계의 확대와 측정 유효성의 상실. 사례 4의 합성 자료다. 유효한 크기 추정값 세 개를 사례에 주어진 구간과 함께 표시했다. 포함 수준을 밝히지 않았으므로 이들을 표준불확도나 신뢰구간이라 부르지 않는다. 9분째에 원격 측정을 잃어 이동을 중단한다. 복구한 12분째 파일의 품질은 2,1로 국소 기준 4보다 낮다. 이 파일로 크기를 정하지 않았다. 측정값 사이와 공백을 가로지르는 선은 그리지 않았다.

자동 복귀 대신 운용 방식 재검토

팀은 악화를 설명하는 세 가능성을 검토한다. 표면 자체의 변화, 배경 환경의 변화, 측정 연결 일부의 고장이다. 하드웨어 원격측정의 손실에 대해서는 공통 전송 노드가 재시작된 기록을 찾았다. 이것은 연결 부재를 설명하지만 그 전에 일어난 윤곽의 성장을 설명하지는 않는다. 마찬가지로 낮은 대비만으로 발생원의 감쇠가 확립되지는 않는다. 발견한 기술적 원인이 설명되지 않은 물리적 순서를 덮어 버리지 않도록 분석의 갈래들을 따로 유지한다.

새 허가는 이미 접근 가능한 외부 위치의 관측, 독립 전달 경로와 추가 기준 영역을 정한다. 자료 전송 복구와 플랫폼 이동 결정은 별개다. 조정자는 모든 필수 조건의 확인을 요구한다. 연구진은 돌아온 영상을 이전 허가의 연장으로 보지 않는다. 새 구성이 윤곽의 구별 가능성을 확보하지

못하면 크기 평가 없는 제한 기록도 허용 결과다. 장비 회수나 재배치를 위한 사람의 진입은 이 운용에 포함되지 않는다.

후속 합성 측정열에서 적합한 고정 기록 둘은 크기 1,6미터와 구간 1,4–1,8을 준다. 현재 상태 기술은 재개할 수 있지만 마지막 적합 프레임들 사이의 미지 이력을 복원하지는 못한다. 영역이 내내 새 윤곽 안에 있었다고 결론 낼 수 없다. 더 확장한 뒤 복귀, 안정화나 형태 변화 등 전개안이 여럿 남는다. 각각은 미래 결론의 제약과 다음 관측의 요구에 해당한다.

확인서 Д와 재검토 조건

문서에는 첫 구간의 관측 징후 확장, 필수 감시 상실, 수행한 정지와 제한된 측정 적합성 복구를 기록한다. 무력화는 수행하지 않았다. 과정의 최종 지위는 이력이 불완전한 관측 차이이며 작업 지위는 재검토한 구성의 수동 기록이다. 후속 전환은 적합한 동역학을 얻고 환경 조건과의 연결을 검증한 뒤에만 허용한다. 기준 재상실, 관측 불가 영역 확대나 예상 밖 변화는 다시 해당 결론과 행동을 중단시킨다.

이 사례는 대상의 생애주기와 나란히 연구의 생애주기를 보인다. 연구진이 관측 가능성을 잃은 동안에도 발생원은 계속 변했을 수 있다. 보관소 상태와 표면 상태는 같을 필요가 없다. 보존 명세로 두 이력을 구별할 수 있다. 유용한 결과는 어떤 대가를 치러서든 확신에 찬 지도를 만드는 것이 아니라 측정이 어디에서 적합했고 왜 이전 운용의 근거가 사라졌으며 어떤 정보로 제한 지속이 가능했는지 정확히 아는 것이다.

제59장

사례 5: 새 과제에서의 정보 의존성

이는 가상의 학습 연구다. 모든 영상, 응답, 수치와 장치 성질은 합성이며 이례적인 지적 발생원의 존재를 보고하는 것이 아니다. 안전한 광학 모듈은 영상을 제시하면 두 전기 펄스 중 하나를 낸다. 연구진은 자세한 내부 구성을 알 수 없다. 최초 관찰자들은 응답을 그림의 이해라고 부른다. 연구는 더 좁은 질문을 유지한다. 출력에 그려진 도형들 사이의 사전 관계에 관한 재현 가능한 정보가 있고 이 연결이 독립적으로 만든 새 과제에서도 성립하는가?

명세서 A: 인격 대신 기능

사례 УЧ-АГ-05에는 의미 있어 보이는 응답을 검증한다는 표지 AG와 기록을 연구한다는 DI를 부여한다. 장치는 외부 설비를 제어하지 않는다. 출력은 기록만 한다. 입력은 닫힌 윤곽과

별도의 표지가 있는 그림이다. 목표 특징은 표지가 윤곽 안에 있는지다. 허용되는 두 펄스는 0과 1로 표시한다. 그 밖의 모든 출력, 펄스의 부재, 모호한 기록은 각자의 범주를 갖는다. 측정하는 기능은 의식, 의도, 어떤 메시지든 이해할 능력을 전제하지 않는다.

영상 여든 개의 탐색 측정열은 작동 형식, 응답 창과 안정적인 펄스 인식법 선택에만 쓴다. 확인 수치에는 넣지 않는다. 측정열 종료 뒤 코드, 제시 시간, 입력 품질 규칙과 평가 기준을 확정한다. 표적 특징의 두 값은 운용자가 일정을 알 수 없게 생성한다. 비교 영상의 평균 밝기와 지속 시간은 감시하되 모든 물리적 형태 특징을 제거했다고 주장하지 않는다. 이 한계는 응답의 의미라는 질문의 일부다.

계획서 Б: 두 확인 실험 계열

첫 가설은 입력으로 표지 위치 정보를 얻을 수 있다고 가정한다. 열린 광학 경로에서는 새 영상에서 우위가 있고 표적 특징이 없는 대조 제시에서는 그 우위가 사라짐을 예측한다. 순서 암기 설명안은 독립적으로 만든 자료 집합으로 바꾸면 성능이 나빠짐을 예측한다. 단순 밝기에만 반응한다는 설명안은 밝기를 맞춘 자극에서 다른 의존성을 요구한다. 어느 가설도 아직 장치 내부 알고리즘 전체를 정하지 않는다.

주 지표는 정답 수를 전체 배정 시도 수로 나눈 값이다. 침묵은 «답하려 하지 않음»이라며 제거하지 않고 성공 응답 부재로 센다. 블록마다 정답, 오답과 무응답을 따로 보존한다. 대조 영상의 목표 표지는 비공개 시험 목록에만 있다. 제시하는 그림 자체는 어느 답을 정답으로 세는지 알리지 않는다. 이를 통해 기기가 아는 그림의 반복으로 대조를 대신하지 않으면서 추측과 가능한 누출을 평가한다.

독립성 지도 B와 운용 방식 Г의 실행

과제 목록과 정답 키는 장치를 운용하지 않는 참여자가 보관한다. 운용자는 정답 없이 제시 순서를 받는다. 펄스는 키 공개 전에 고정 해독기로 평가한다. 보관소에는 원영상, 실제 제시의 광학 기록, 전기 신호와 상태 기록부가 들어간다. 작업 파일 검증으로 전달 메타자료에 키가 포함되지 않게 한다. 그래도 공통 생성 프로그램이 숨은 단서를 만들 수 있으므로 후속 측정열 B는 다른 연구진이 다른 구현으로 준비한다.

허가는 시험한 조명 수준, 표준 전원, 별도의 출력 기록만 허용한다. 예상 밖 장치 명령, 기록 과부하, 정답 키 공개, 정해진 코드 변경이 생기면 조작자는 제시를 중단한다. 응답이 과학적으로 매력적이라고 의사소통 채널을 확대해도 되는 것은 아니다. 중단 뒤 보존한

시도들은 미리 정한 규칙으로 상태를 부여한다. 유효하지 않은 계열을 다른 세션에서 고른 성공 응답들로 보충하지 않는다. 이 사례에서는 허가 위반이 없었다.

측정열과 조건	모든 시도	정답 / 오답 / 무응답	성공 비율
A, 열린 입력	200	150 / 42 / 8	75,0%
A, 표적 정보 없는 대조 조건	100	48 / 46 / 6	48,0%
B, 새 과제, 열린 입력	160	118 / 35 / 7	73,75%
B, 표적 정보 없는 대조 조건	80	38 / 38 / 4	47,5%

독립 계열이 더한 것

B 계열은 A의 결론을 고정한 뒤 구성했다. 새 연구팀은 이전 이미지 목록을 사용하지 않으며 이전 출력 수열도 모른다. 미리 선언한 과제 부류 안에서 윤곽의 크기, 위치, 무늬를 바꾼다. 사전 검증으로 각 그림의 정답이 유일함을 확인한다. B의 어떤 시험 실행도 해독기의 재조정에 사용하지 않는다. 그러므로 160개 중 118개의 정답은 첫 계열에 계속 적합하는 과정이 아니라, 확인된 기능이 새 조건으로 이전되는지를 검증하는 결과가 된다.

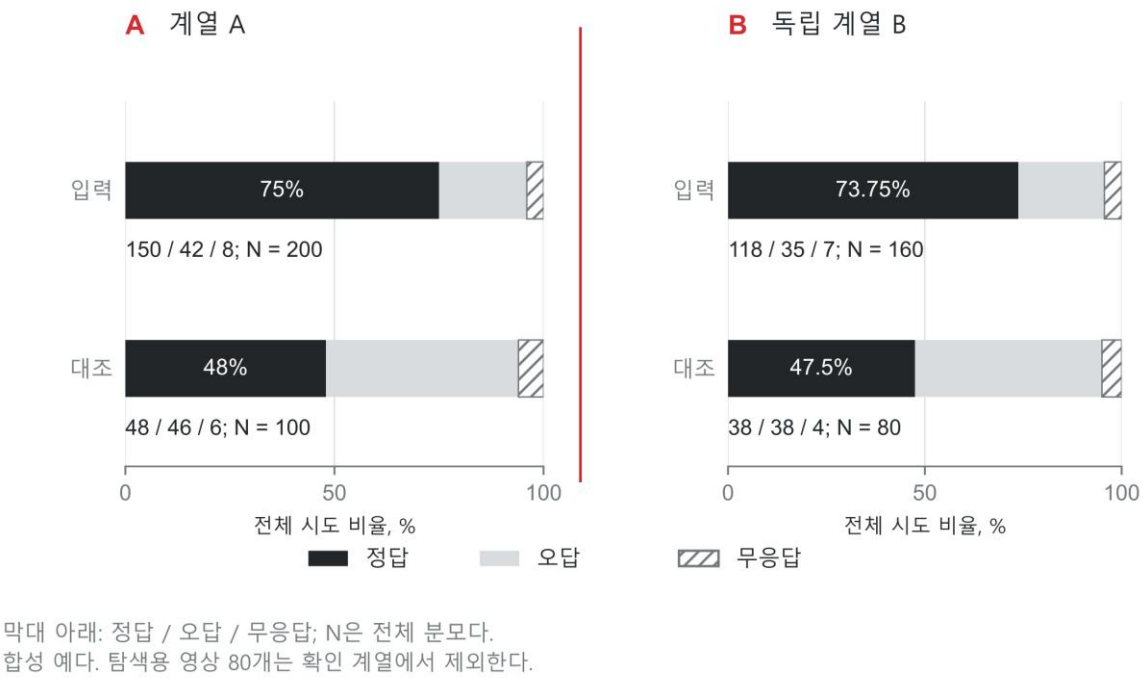


그림 48. 독립 자료 집합으로의 결과 일반화. 사례 5의 합성 자료다. 막대는 무응답을 포함한 모든 배정 시도를 기준으로 정규화했으며, 아래에는 원래 개수와 분모를 제시했다. 계열 B는 절차를 고정한 뒤 새로운 독립 자료를 사용한다. 탐색용 이미지 80개는 포함하지 않았다. 그림은 특정 기능이 새 자료에서도 성립하는지를 보여 준다. 신뢰구간, 유의성 표시, 발생원의 의식에 관한 결론은 담고 있지 않다.

열린 입력의 성공률은 A에서 75,0퍼센트, B에서 73,75퍼센트로 차이는 1,25퍼센트포인트다. 대조 블록에는 비슷한 우위가 없다. 표는 제한된 정보 의존성을 뒷받침하지만 단순 비율 비교로 통계 평가가 끝나지는 않는다. 모형은 조건 배정, 연속 응답의 의존 가능성과 선택 중단 규칙을 고려해야 한다. 쉰 번씩의 완전한 A 블록 네 개에서 성공은 37, 38, 37, 38회이고, 마흔 번씩의 B 블록에서는 29, 30, 29, 30회다. 효과가 성공한 한 조각에만 몰려 있지는 않다.

결과를 위해 모듈이 사람처럼 의미를 이해한다고 주장할 필요는 없다. 통상 영상 처리, 기하 특징에 대한 감도, 규칙의 숨은 전자 구현과 일부 미검증 채널도 모두 양립한다. 보이는 네트워크 단자를 격리했다고 모든 기술 연결의 부재가 입증되지는 않는다. 내부 구조의 미지는 기전 기술의 한계다. 그렇다고 측정 기능이 취소되지는 않는다. 새 과제에서도 출력에는 이 구별에 유용한 정보가 있다.

확인서 Д와 다음 구별 실험

결과 문서 Д에는 지정 영상 부류와 시험 채널에서 재현 가능한 기능 결과를 확립한다. 무력화와 발생원의 물리적 제어는 하지 않았다. 인격, 호의나 의도에 관한 결론은 내리지 않았다. 다음 설계에서는 단순한 기하 규칙과 더 폭넓은 과제 사용을 구별해야 한다. 예를 들어 별도로 준비한

형식은 독립적인 규칙 지시를 통해 같은 영상에도 반대 응답을 요구할 수 있다. 이는 새 과제이며 현재 수치로 이미 확인되었다고 보지 않는다.

내부 구현의 기술 평가는 소유자의 허가와 안전 절차가 있을 때 별도 방향으로 남는다. 통상 회로로 응답을 설명하면 기능 관측은 유지되고 기전이 알려진다. 새 측정열에서 의존성이 재현되지 않으면 적용 한계와 가능한 숨은 조건을 재검토한다. 이미 종결한 결론의 재개 조건은 정답 키, 해독기나 과제 출처의 구체적 훼손이다. 사례는 대화 상대에 관한 임의의 이야기로 바뀌지 않으면서 새 질문을 견디는 양성 정보 결과를 보여 준다.

제60장

사례 6: 가정한 무력화의 검증

이 사례의 모든 사건과 수준은 가상이고 안전한 학습 장치에 해당하며 자료는 합성이다. 수치는 사람에게 허용되는 작용을 정하지 않는다. 통제 공간에서 안정적인 협대역 음향 신호를 기록한다. «억제»라는 명령 뒤 그래프가 급격히 내려간다. 운용자는 무력화된 사례로 종결하자고 제안한다. 독립 분석은 똑같이 조용한 화면이 발생원 중단, 전달 제한과 측정 감도 상실 모두와 양립함을 밝힌다. 이 결과들은 따로 검증한다.

명세서 A와 미리 정한 주장

사례 УЧ-AC-06에는 AC 표지를 부여한다. 주 지표는 일정한 평균화 방식으로 선택 주파수 근처의 고정 대역에서 측정하는 음압 실효값의 수준이다. 주 마이크 M1은 수신 지점, 독립 마이크 M2는 기술 발생원에 더 가까운 곳에 둔다. 좌표는 고정한다. 둘 다 원신호, 설정과 응답 검증을 이용할 수 있다. 측정 과제는 M1까지의 전달 변화를 확립하는 것이다. 발생원 자체의 중단 여부에는 M2의 추가 증거와 그 상태 정보가 필요하다.

표의 모든 수준은 하나의 채택 기준에 대한 데시벨이다. 올바른 비교에는 같은 대역과 같은 처리 조건이 필요하다. M1의 국소 대조 입력은 발생원에서 오는 연구 경로를 지나지 않고 해당 대역의 감도를 검증한다. 따라서 수신 변화와 전파 변화를 구별하도록 돕지만 그 자체로 장벽 효과를 측정하지는 않는다. 학습 자료의 적합한 현장 비교 표준 불확도는 일 데시벨이다.

계획서 Б: 특징이 다른 세 결과

발생원이 멈추면 두 마이크의 주 신호는 줄되 대조 작용은 계속 검출되어야 한다. M1까지의 전달을 제한하면 그 지표는 줄고 M2는 이전 수준을 유지하며 M1의 국소 대조는 적합성을

유지한다. M1의 감도나 처리가 바뀌면 연구 신호와 대조 신호가 함께 줄어든다. 예측은 새 검증 전에 고정한다. 적합한 대조가 없으면 관심 그래프가 매우 낮아도 결과는 «확인 근거 부족»이다.

서식 B에는 M1과 M2의 감응 소자, 전원과 저장이 별개임을 표시한다. 최초 표시 앱은 공통이므로 독립 분석가가 별도 코드로 원자료 흐름을 검증한다. 대조 입력에는 자체 기록부가 있다. 작업 지도에는 실내 구조물을 통한 기계적 전달도 담는다. 공기 전달 신호 감소가 이 경로를 자동으로 기술하지는 않는다. 측정 대역의 결론을 문서에서 가능한 모든 소리나 진동으로 확대해서는 안 된다.

상태	M1, dB	M2, dB	M1 대조, dB
개입 전	68,0	67,5	60,0
소프트웨어 «억제» 뒤	18,0	67,6	10,0
처리 복구 뒤	68,1	67,4	60,1
검증된 음향 장벽 설치 뒤	54,0	67,5	60,0

첫째 분기: 측정이 사라졌다

둘째 행은 무력화를 확인하지 않는다. M1의 연구 지표와 대조 지표가 똑같이 오십 데시벨 줄었고 M2는 이전 결과를 유지했다. 기록부 검증은 명령이 주 채널의 선택 대역 처리만 바꾸었으며 방출기에 작용하지 않았음을 보인다. 이 재설정 뒤 표시량은 같은 이름을 썼지만 전달 특성은 달라졌다. 보존 원신호로 비교 가능한 표현을 복원할 수 있다. 잘못된 화면도 결정 이력의 일부로 보관소에 남는다.

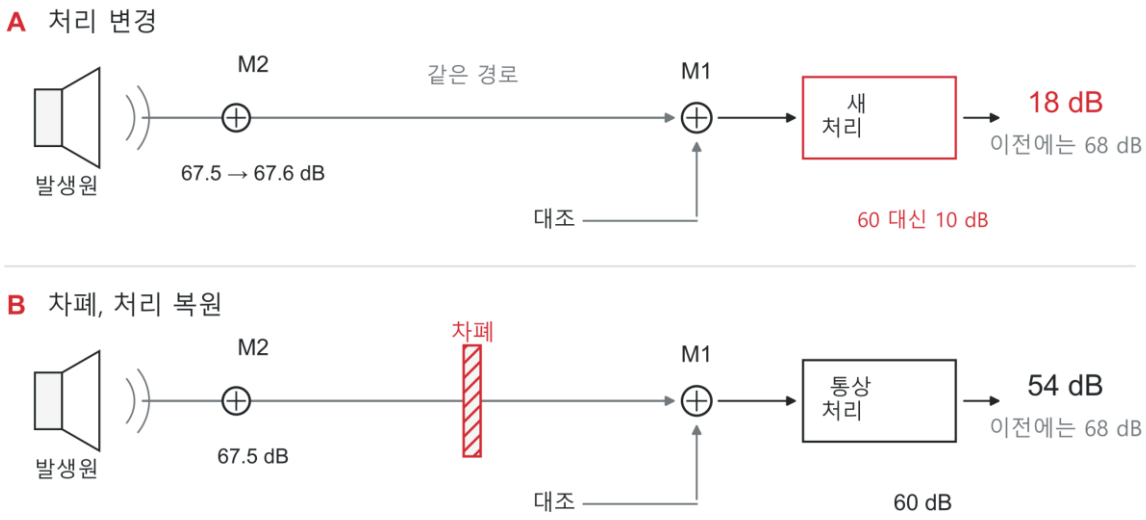
필수 채널이 더는 명시 기능을 수행하지 않으므로 조정자는 이전 허가의 효력을 중단한다. 중단이 발생원 종료나 기록 없는 필터 삭제를 요구하지는 않는다. 운용자는 구성을 기록하고 허용 시험 장치에서 적격 운용을 복원한 뒤 대조를 반복한다. 셋째 행은 이전 척도 복귀를 보인다. 지표 하락은 설명했지만 물리 작용은 아직 제한하지 못했다. 측정기 수정과 발생원 제어는 서로 다른 수행 과제다.

둘째 분기: 전달이 제한되었다

새 계획은 미리 평가한 경로 구간에 표준 음향 장벽을 설치한다. 장벽을 설치해도 마이크 위치를 바꾸거나 필수 환기 및 관찰 기능을 막지 않는다. 작업 전에 분야 전문가는 이 안전한 시험 장치에 구조가 적합한지 확인한다. 책임자는 좁은 목표를 정한다. 발생원의 기록을 유지하면서 M1 지점의 선택한 공기 전달 신호를 줄이는 것이다. 방출의 종료나 가능한 모든 영향 경로의 소멸을 주장하지 않는다.

설치 뒤 M1 수준은 54,0데시벨이고 M2는 약 67,5를 유지한다. M1 대조는 60,0을 유지한다. 합의 수신 지점의 독립 교정 추가 마이크는 표준 불확도 일 데시벨에서 54,3데시벨을 준다. 장벽의 허용된 대조 재배치에서도 프로그램 대역 변화 없이 결과가 재현된다. 최초 관측보다 훨씬 강하다. 이제 주 신호 감소에 대조 작용을 알아볼 능력의 유지와 독립 공간 확인이 동반되기 때문이다.

M1의 처음과 나중 수준의 차이는 십사 데시벨이다. 이 수준 정의에서 평균 제곱 압력의 비는 약 0,0398이며 약 스물다섯 배 감소에 해당한다. 이 계산은 선택한 대역과 수신점에 적용된다. 발생원의 전체 에너지를 정하거나 측정 범위 밖의 감쇠를 확립하지 않으며 보편적인 안전 기준도 아니다. 긍정적인 정량 결과도 원래 측정과 같은 한계를 유지해야 한다.



합성한 시험 장치다. 국소 대조 M1은 조사 대상 경로를 통과하지 않는다.

그림 49. 지시값의 억제와 전달의 제한. 사례 6의 두 합성 검증 도식이다. 처리 방식을 바꾼 뒤 신호 M1과 그 국소 대조가 함께 줄었으므로 그래프가 낮아졌다는 사실은 물리적 억제를 확인하지 않는다. 처리를 복구하고 장벽을 설치한 뒤에는 M1이 54 dB, M2가 67,5 dB, M1의 대조가 60 dB다. 대조 입력은 연구 대상 경로 뒤에 넣는다. 제시한 것은 발생원의 종료가 아니라 선택한 전달 채널의 제한이다. 모든 수준은 명시한 같은 대역과 기준에 해당한다. 유효한 비교의 표준불확도는 1 dB다.

$$\frac{\langle p^2 \rangle_{\text{после}}}{\langle p^2 \rangle_{\text{до}}} = 10^{-14/10} \approx 0{,}0398$$

완전한 대조 주기 네 번에서 수준 차이는 13,8; 14,2; 13,9와 14,1데시벨이다. 평균은 14,0이지만 작은 산포가 기하와 교정의 공통 오차를 없애지는 않는다. 따라서 평균만으로 문서의 정밀도를 데시벨 소수 둘째 자리로 높이지 않는다. 평가자는 수준 확정 뒤 장벽 위치 표지를 받는다. 이 구성은 주기의 모든 자료를 남기면서 기록의 편리한 부분만 고를 가능성을 줄인다.

운용 방식 Г와 작성한 확인서 Д

M2 감시 상실, 장벽의 예상 밖 변형, 장비 상태 변화나 합의 전환 수행 불가 시 행동을 중단한다. 운영 책임자는 정비와 검증 조건을 갖춰 장벽을 인수한다. 보호 기능이 위치와 무결성에 의존하면 이 징후들을 후속 관측에 포함한다. 모든 측정값을 즉시 얻을 필요가 없다고 유지되는 기능의 책임자가 없는 것은 아니다. 해체는 별도 조건 변경으로 다룬다.

첫 작업의 결과 문서 Д에는 처리 변경이며 물리적 무력화 증거가 없다고 적는다. 둘째 작업에서는 시험 조건의 선택 전달 채널 제한을 확인했다. 발생원은 계속 기록되며 «발생원 제거»라는 포괄 지위는 채택하지 않는다. 미연구 기계 경로와 다른 대역들은 결론 한계로 열거한다. 기하 변경, 장벽 손상, 새 발생원 운용 상태나 대조 채널 고장이 재검토 조건이다. 사례는 더 넓은 결과를 부여할 필요 없이 유용한 작용 제한으로 끝난다.

제61장

사례 7: 기원이 소실된 물질 자료

이 학습 사례의 모든 재료, 문서와 수치는 가상이며 자료는 합성이다. 이례적인 발광 사건 뒤 연구진은 작은 시료의 출현과 질량 감소 보고를 받는다. 전달 참여자는 즉시 실험실로 보내자고 제안한다. 최초 분석에서 사진, 표기와 계량 기록이 연속 이력을 이루지 않음이 드러난다. 실험실은 신청한 형태로는 받기를 거부한다. 이제 연구 과제는 어떤 대가를 치러서든 분석하는 것이 아니라 가능한 지식을 보존하고 결론을 제한하는 것이다.

명세서 A: 사건과 시료를 연결하는 데 따르는 한계

사례 УЧ-MT-07에는 물질에 관한 보고라는 주 표지 MT를 부여한다. 섬광 뒤에 나타났다는 것 자체는 증인의 주장으로 남는다. 변환도 이례적인 질량 손실도 아직 확인되지 않았다. 팀이 실제로 접근할 수 있는 포장에 새롭고 안정적인 식별자 П-07을 붙인다. 이는 이후 기록을 해당 물건에 연결하지만 그 이전 기원을 증명하지는 않는다. 이전 표지 A-17과 A-71은 다툼이 있는 정보로 유지한다. 편리하게 일치시키려고 몰래 고쳐서는 안 된다.

허용 경로를 확정하기 전에는 호기심이나 보기 좋은 사진을 위해 포장을 열지 않는다. 실제 보관 책임은 해당 분야 전문가와 합의한 절차에 따라 지정 재료 소유자에게 남는다. 평가용 정보 전달이 대상 자체의 인계는 아니다. 이 구별은 중요하다. 실험실은 신청을 검토하고 물리적 수령을 거부할 수 있으며, 동의가 없다는 사실이 실험실 문 앞에 책임자 없는 물품을 두는 일이 되어서는 안 된다.

기록 자료	주장한 내용	이용 가능한 근거	제한
저울의 사진 01	질량 17,42 g; A-17	내보낸 영상	용기와 원기록부 미상
저울의 사진 02	질량 16,87 g; A-71	별도 파일	같은 물품인지 확립되지 않았다

기록 자료	주장한 내용	이용 가능한 근거	제한
포장 사진	같은 시료	남아 있는 사본	연속 인계 이력이 없다
최초 보고	섬광 뒤 출현	전달 참여자의 말 기록	독립 연결이 확인되지 않았다

계획서 Б: 먼저 주장의 기원부터

계획은 불일치에 대한 세 설명을 검증한다. 같은 재료의 변화, 용기 차이나 다른 물품의 비의도적 대응일 수 있다. 설명안마다 저울 원기록부, 포장 식별과 인계 순서라는 자료가 필요하다. 제시한 두 수치의 차이는 0,55그램이다. 차이 계산이 맞다고 물질 질량 변화가 확립되지는 않는다. 정상 저울이라도 전체 계량 대상을 측정했을 것이며 그 대상은 아직 정해지지 않았고 두 경우에 동일하다고 입증되지 않았다.

관리자는 원파일과 독립 인계 문서를 요청한다. 운용자는 촬영, 내보내기와 보고 첨부 시점을 복원한다. 해당 분야 전문가는 재료의 적격성과 작업 가능성을 판단할 정보를 평가한다. 첫 단계의 주 결과는 미리 추적성 지도로 한정한다. 분광 또는 화학 연구를 현재 기록 이전 사건을 자동 복원하는 방법으로 지정하지 않는다. 이는 제27장과 제31장의 조성과 출처 구별에 해당한다.

지도 B와 발견된 비가역적 공백

제시한 모든 확인은 처음에 전달 참여자 한 명에게로 거슬러 간다. 여러 전달 사본으로 독립 목격자가 생기지는 않는다. 계량 시점은 진술로만 알려져 있고 달력 표지는 내보내기에 속한다. 중간 메시지 일부는 남지 않았다. 이용 가능한 매체를 검증해도 A-17과 A-71이 오자인지 다른 물품 표기인지 확립할 수 없다. 참여자의 정직함도 이후 보관의 꼼꼼함도 이 구체적 공백을 없애지 못한다.

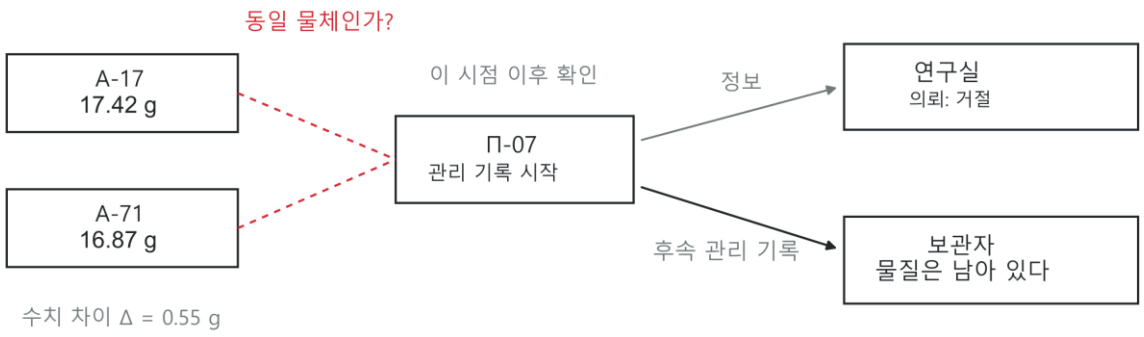
П-07의 첫 신뢰 가능한 문서 상태는 공동 외부 포장 기록과 책임자 지정에서 시작한다. 이후 경로는 추적 가능하게 만들 수 있다. 이 신뢰를 과거로 소급해서는 안 된다. 명세에는 확인 이력의 시작점과 보유 자료로 복원하지 못한 구간을 표시한다. 위조 선언은 아니다. 출처 상실은 성실한 오류, 불완전 기록과 구별 정보가 없는 다른 설명안들과 양립한다.

실험실의 거절과 운용 방식 Γ에 관한 결정

수령 실험실은 설명을 원격 검토하고 이유를 밝힌 거절을 낸다. 명시한 역량과 수령 조건은 포장 상태가 미상이고 인계 책임이 불명확한 불특정 유형 재료를 포괄하지 않는다. 또한 요청한 «사건 뒤 출현을 입증하라»는 결론은 현재 내용물 분석 하나로 도출되지 않는다. 거절은 재료가 위험하거나 이례적이라고 판정했다는 뜻이 아니다. 해당 실험실이 이 진입 조건에서 바로 그 과제를 수행할 가능성을 확인하지 않는다는 뜻이다.

책임자는 거절을 협의의 완료 결과로 기록하고 시료 이름을 바꾸어 보내지 않는다. 조정자는 적합하고 허용된 경로가 나올 때까지 실제 인계 준비를 중단한다. 재료 책임자는 보유와 현재 취급 조건의 유지를 확인한다. 유지할 수 없으면 실제 상황 성질에 따라 담당 전문 조직에 넘긴다. 이 책은 그런 적격성 판단 대신 임의로 미지 내용물을 오염 제거하거나 포장하라고 제안하지 않는다.

과학적 요청을 나눈다. 첫 과제는 원재료의 출처와 질량 변화이며 보유 정보로는 미해결이다. 둘째는 확인 이력 시작점 이후 Π-07의 성질에 관한 것일 수 있다. 새 질문, 적합한 역량, 수령 조건과 소유자 동의가 필요하다. 향후 조성을 성공적으로 정해도 수령 재료를 기술할 뿐 섬광 중 형성을 입증하지는 않는다. 이 구별은 불가능한 결론을 약속하지 않으며 분석의 잠재 가치를 유지한다.



합성 사례다. 물질은 인계하지 않았고 그 이전의 출처는 확인되지 않았다.

그림 50. Π-07의 확인된 기원이 시작되는 경계. 합성 사례 7의 추적 가능성 도식이다. A-17, A-71, 나중에 등록한 포장 Π-07 사이의 연결은 확립되지 않았다. 점선은 같은 물품을 인계했다는 뜻이 아니다. 0,55 g은 두 기록의 수치 차이이며 확인된 질량 손실이 아니다. 확인된 이력은 Π-07을 등록하고 관리자를 지정한 때부터 시작한다. 실험실에는 정보를 전달했다. 실험실이 거절한 뒤에는 물질 자료를 실제로 인계하지 않았다.

작성한 확인서 Д와 과제를 재개할 조건

결과 문서 Д에는 능동 연구와 무력화 개입을 하지 않았다고 명시한다. 디지털 정보 인수, П-07 외부 기록과 선택 실험실의 거절은 확인했다. 0,55그램 차이는 물리 원인을 부여하지 않고 제시 수치 둘의 차이로 남긴다. 최초 주장은 출처가 충분히 확정되지 않은 지위를 받는다. 이 신청 중단 결정이 기록을 없애거나 지정 소유자가 보유 재료의 책임에서 벗어나게 하지는 않는다.

출처 질문은 옛 이야기의 재진술이 아니라 물품들과 시각들을 연결하는 실제로 새로운 독립 문서가 나올 때 재개할 수 있다. 같은 추정 장소의 새 시료는 자체 경로를 갖는 새 재료이며 П-07의 이력을 소급해 고치지 못한다. 사건 반복을 연구하려면 준비되지 않은 접촉 없이 허용 기록을 미리 마련해야 한다. 사례의 결과는 아직 연구할 수 있는 것과 보유 자료가 더는 보장할 수 없는 결론을 정확히 구별한 것이다.

제62장

사례 8: 드문 사건, 누락과 음성 결과

전적으로 가상의 학습 사례다. 모든 사건, 관측 노출량과 검출 성능은 합성으로 정했다. 기록이 부실한 발광 사건 하나 뒤에 열흘 관측을 조직했으나 새 적합 사건을 찾지 못했다. 계가 실제로 얼마 동안 관측했고 어떤 사건을 알아볼 수 있었는지 알면 이 결과에도 실질적인 의미가 있다. 주 과제는 달력상 열흘 동안 가능한 모든 이상현상을 검증했다고 주장하지 않으면서 제한된 음성 결과를 계산하는 것이다.

명세서 A: 사건의 정의

사례 УЧ-OP-08은 OP 부류다. 확인 과제는 고정 조사 기하 안에서 생기며 지속 시간 40–80밀리초, 지정 교정 범위에서 신호가 가상 단위 5–10인 펄스를 다룬다. 이 수치들은 학습용 기록 부류를 정하며 물리 현상의 보편 경계가 아니다. 최초 사건은 장소 선택의 근거지만 이후 측정열에는 넣지 않는다. 품질상 같은 기준을 적용할 수 없기 때문이다. 모든 새 시도는 계획 확정 시점부터 집계한다.

명세에는 공간 마스크, 측정 경로의 주파수 및 시간 대역, 처리 버전, 배경과 부적합 규칙을 담는다. 마스크 밖이나 지정 지속 시간 밖의 펄스는 별도 관측이며 이 검증의 음성 응답이 아니다. 사건 발생 시점과 파일 저장 시각은 다르다. 원자료 흐름과 상태 기록부로 실제 누락을 정할 수 있다. 프로그램은 유실 구간을 영으로 대체하지 않고 사건 부재가 확인된 시간으로 세지도 않는다.

계획서 Б와 측정 독립성 B

합성 모형에서 선택 부류의 사건은 하루당 발생률 λ로 정상적으로 생기며 푸아송 흐름을 이룬다. 유효 구간에서는 각 사건을 확률 ε=0,50으로 독립 검출한다. 이는 소규모 교정 자료로 도출한 정확한 효율이 아니라 학습 모형에 주어진 조건이다. 별도로 누락 원인이 높은 발생률 시점을 골라내지 않는다고 가정한다. 전제가 틀리면 최종 경계는 이전 의미를 갖지 못한다.

관찰 전에 사건 기준, 달력상 관찰 기한, 종료 규칙을 고정한다. 검증할 주장은 선택한 분류의 일정한 발생률이 하루 한 사건 이상일 때 사건 기록이 영인 결과와 양립하는가다. 검출기 조정은 별도 자료로 마쳤다. 대조 신호는 경로를 검증하지만 자연 발생 후보와 섞지 않는다. 지도 B는 카메라, 시간, 전원, 코드를 대상으로 작성한다. 두 프로그램으로 같은 흐름을 복제해도 노출에 같은 길이의 구간 하나가 추가되지 않는다.

이용 가능한 기록 둘은 후보와 장비 상태를 검증하는 데 도움이 되지만 작동 기하가 겹친다고 관측 면적이 두 배가 되지는 않는다. 전체 절차에는 하나의 합의된 검출 효율을 사용한다. 공동 결정 모형 없이 개별 채널 성능과 곱하거나 더해서는 안 된다. 이 사례의 ε는 지정 부류 사건에서 최종 계수 포함까지의 완성 사슬에 이미 해당한다. 거짓 후보는 사전 규칙으로 분석하며 수용 사건 수는 영이다.

달력 간격, 일	유효 관측 시간, 일	유효 시간의 ε	유효 관측 노출량, 일
0–2,5	2,4	0,50	1,2
2,5–5,0	1,6	0,50	0,8
5,0–7,5	2,0	0,50	1,0
7,5–10,0	2,0	0,50	1,0
전체	8,0	0,50	4,0

전제를 유지한 계산

열흘 중 여드레가 유효하므로 비율은 0,8이다. 주어진 효율을 고려하면 유효 관측 노출량은 T_eff=10×0,8×0,50=4일이다. 단위는 프레임 수나 보관 자료량이 아니라 시간이다. 구간별

효율이 다르면 해당 곱의 합, 연속 기록이면 적분이 필요하다. 여기서 모든 구간을 평균값으로 균일 대체할 수 있는 것은 모형 발생률이 일정하고 효율 조건을 명시했기 때문이다.

$$T_{\text{eff}} = 10 \times 0{,}8 \times 0{,}50 = 4 \text{ 일}$$

채택 모형에서 예상 기록 사건 수는 λT_eff, 하나도 기록하지 못할 확률은 exp(−λT_eff)다. 영 계수에 대한 수준 95퍼센트의 단측 상한 신뢰한계는 이 확률을 0,05로 놓아 얻는다. 결과는 하루 −ln(0,05)/4≈0,749건이다. 이는 열거 전제 아래의 빈도주의 신뢰 절차다. 실제 발생률이 95퍼센트 확률로 그 수치보다 낮다는 뜻은 아니다.

$$\lambda_{95} = \frac{-\ln(0{,}05)}{T_{\text{eff}}} \simeq 0{,}749 \text{ 일}^{-1}$$

발생률이 실제 하루 한 건이면 기록 네 건이 예상되고 영 계수 확률은 exp(−4)≈0,0183이다. 따라서 영 측정열은 채택 모형에서 바로 그 사전 주장을 제약한다. 더 낮은 발생률의 드문 사건은 배제하지 않는다. 선택 기하 밖 펄스, 다른 진폭 범위나 유효 측정열에 없던 조건에서만 생기는 과정도 배제되지 않는다.

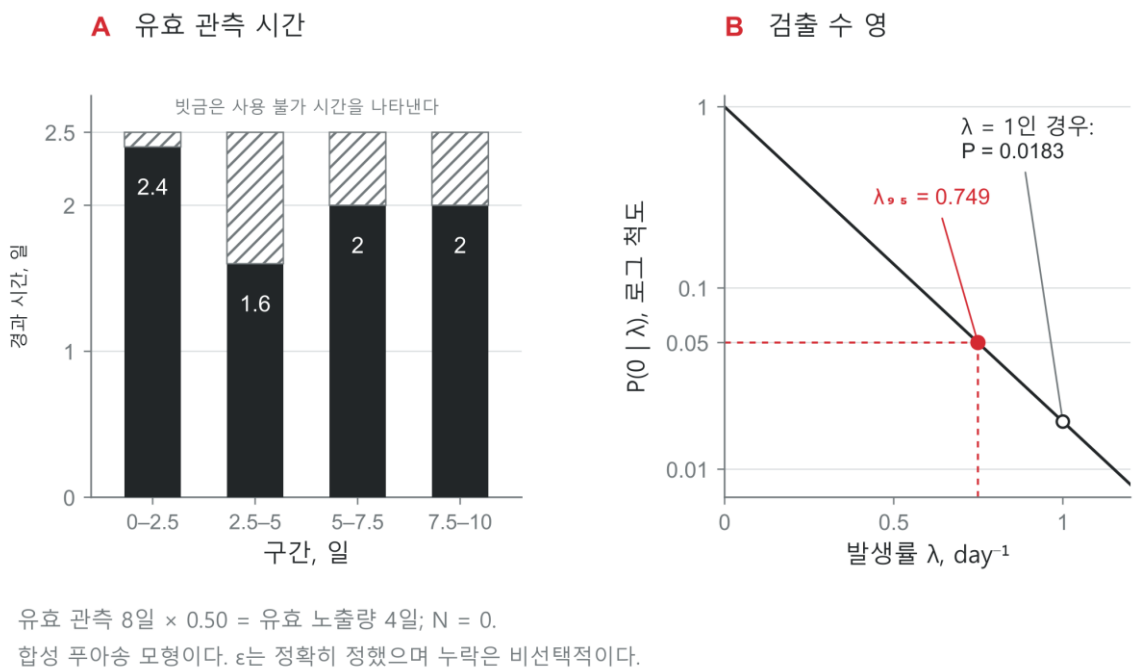


그림 51. 달력상 시간에서 사건 빈도의 경계로. 사례 8의 합성 계산이다. 왼쪽에는 달력상 네 구간의 유효 관찰 시간과 무효 관찰 시간 합계를 표시했다. 각 구간 안에서 공백이 어디에 있는지는 나타내지 않았다. 효율이 정확히 ε = 0,50이면 유효한 관찰 여드레는 유효 관측 노출량 나흘을 준다. 오른쪽은 P(N = 0 | λ) = exp(−4λ)이며 확률축은 로그 척도다. 사건 수가 영일 때 단측 95% 상한 신뢰한계는 0,749 day⁻¹이다. 이 계산은 정상 푸아송 흐름, 독립적인 검출, 선택적이지 않은 누락을 가정한다. 이 곡선은 참 λ의 확률분포가 아니다.

운용 방식 Γ와 음성 결과 검증

과학 운용은 허용 장비 검증을 동반한 수동 관측으로 유지한다. 기준 상실, 포화나 필수 채널 미지 상태 시 해당 구간을 정한 규칙에 따라 유효 관측 노출량에서 뺀다. 운용자는 제한 이유와 시점을 보존한다. 사건 자체가 장비를 끌 수 있다면 그런 누락은 더는 독립이라고 볼 수 없고 이 푸아송 추정으로 가설을 종결하지 못한다. 기록 실패 자체가 다른 관측 모형을 갖는 별도 연구 결과가 된다.

실제 연구에서는 효율 0,50에 불확실성이 있고 진폭, 지속 시간과 위치 분포에 의존할 수 있다. 제한된 대조 신호의 절반을 검출했다는 이유만으로 정확한 값처럼 넣어서는 안 된다. 공동 추정이나 포함 수준을 명확히 정한 근거 있는 보수 경계가 필요하다. 학습 사례에서는 관측 노출량 계산을 보여 주려고 이 과제를 조건으로 분리했다. 문서의 최종 수치에도 반드시 이 한계를 붙여야 한다.

확인서 Д와 재검토 조건

문서 Д는 유효 관측 노출량 나흘 동안 수용 사건이 없었다는 사실과 선택 정상 흐름의 상한을 기록한다. 무력화는 하지 않았고 전 구역 안전을 확립하지 않았으며 최초 단일 사건을 반박했다고 선언하지도 않는다. 이 측정열의 과학 과제는 끝났다. 해당 조건에서는 하루 한 건 정도의 발생률을 뒷받침하지 않는다. 보고서에는 누락 마스크, 선택 규칙, 원후보와 전제를 담는다. 없으면 최종 수치는 대상을 잃는다.

적합 사건, 다른 조건 의존성의 증거 또는 효율의 중요한 오류가 나오면 새 계획을 시작한다. 하루 0,749보다 훨씬 낮은 발생률을 제한하려는 과제라면 필요한 유효 관측 노출량을 미리 계산하고 자원을 평가한다. 새 규칙 없이 원하는 결과가 나올 때까지만 이전 기록을 연장해서는 안 된다. 사례는 수행 검증 경계의 정량 지식으로 끝난다. 미검출은 바로 그 적용 범위를 명시하고 계산했기에 유용해진다.

부록

부록 A

사례 명세서 서식

이 서식은 작업 기록부에 복사하기 위한 것이다. 정보가 들어오는 대로 항목을 채운다. 없는 값은 이유와 함께 «확립되지 않음»이라고 표시한다. 빈칸을 음성 결과로 보지 않는다. 가설이 바뀌어도 사례 식별자는 유지한다.

등록 기록

- 사례 식별자와 명세 버전.
- 기록 날짜와 방법. 기록 작성자와 역할.
- 사건 시각 또는 허용 구간; 시간 연결의 근거.
- 장소 또는 조사 경계; 허용 위치 결정 정확도.
- 보고 출처; 개인정보 접근 규칙.

관찰된 자료

- 인과 설명 없는 최소 주장.
- 개별 식별자를 갖춘 원파일, 지시값, 증언과 시료 목록.
- 계기, 설정, 단위, 기록 빈도와 기지 제약.
- 누락, 포화, 구성 변화와 미확정 매개변수.
- 분류 표지마다 구체적인 근거와의 연결.

가설과 결정

- 현재 설명들과 서로 다른 예측.
- 검증한 대안과 수행 검증의 한계.
- 여덟 축의 위험 특성; 각 평가의 자료와 가정.
- 지정 운용 방식, 책임자, 작업 허용 근거와 중단 기준.
- 다음 질문과 결정을 바꿀 수 있는 자료.

이력과 인계

- 파일과 시료에 대한 작업; 날짜, 수행자, 목적과 결과.
- 처리 버전과 최종 자료 및 원자료의 연결.
- 근거를 갖춘 설명, 분류와 운용 방식의 변화.
- 다른 팀으로의 인계: 자료 목록, 제약, 수신 확인.
- 종료 지위 또는 다음 재검토 날짜.

명세의 일관성을 검증한다. 결론마다 근거, 행동마다 수행자와 조건, 누락마다 명시 표지가 있어야 한다. 연결을 복원할 수 없으면 결과를 연결이 보존된 주장들로 제한한다. 자세한 절차는 제8장에 있다.

명세서와 작업 서식의 연결

현재 상태란에는 최신 지도 Ж1, 열려 있는 대응 카드 Ж2, 관리 조율 Ж3, 반출 물품 Ж5의 식별자를 적는다. 서식이 있다는 것은 기록이 있다는 뜻이며 긍정적인 결정을 뜻하지 않는다. 연결마다 버전과 마지막으로 확인한 행동을 적고, 취소한 버전은 이력에 보존한다.

부록 B

설명을 구별하는 실험 계획

이 서식은 저자의 계획 구조를 정한다. 구체적 작업의 허용 가능성 평가를 대신하지 않는다. 실험 전에 참여자들은 주 질문과 작업 중단 순서를 똑같이 이해해야 한다.

질문과 예측

- 주 검증 주장 하나.
- 가설 H1과 예상 관측 결과.
- 가설 H2와 H1의 예측과 다른 결과.
- 비슷한 반응을 만들 수 있는 다른 원인.
- 결과로 구별할 수 없거나 해석할 수 없는 조건.

측정 구성

- 측정량, 단위, 범위와 필요한 불확도.
- 대상에서 원기록까지의 사슬; 별도의 처리 사슬.
- 교정, 배경, 대조 측정열과 감도 확인.
- 채널의 공통 의존성과 이를 구별할 조치.
- 시간 순서, 지연, 누락 구간과 비교 조건.

바꾸는 조건

- 실험자가 물리적으로 바꾸는 것; 동반되는 열, 빛, 소리, 운동, 전원이나 물질.
- 비교 가능하게 유지할 조건과 검증 방법.
- 선택 행동이 적합하고 허용되는 이유.
- 시작 허가 책임자와 독립적 중단 기능.
- 통신, 감시나 종료 가능성을 잃었을 때의 행동.

분석과 결과

- 주 측정열 전에 확정한 주 지표와 평가 규칙.

- 자료량 또는 다른 근거 있는 종료 규칙.
- 기록 제외 규칙; 없는 자료의 취급.
- 원자료, 코드 버전과 기록부의 보존 절차.
- 결과별로 허용하는 결론과 새 실험이 필요한 사항.

자료를 본 뒤 계획이 바뀌면 새 버전을 따로 보존한다. 이미 본 자료는 탐색 근거로 쓸 수 있으며 후속 검증에는 독립 측정열이나 명확한 결론 제한이 필요하다. 제4장과 제39장을 보라.

확인 실험 계열 계획의 보충 사항

가설 버전과 고정 날짜: _____. 모형 선택에 사용한 자료 집합: _____. 검증용 자료 집합과 분석을 고정하기 전 접근 제한 방법: _____.

사건 단위와 분모: _____. 유효 시간 또는 시도 횟수: _____. 작동 사건 통합 규칙: _____. 기록 효율과 불확도: _____.

자료 열람 시점과 종료 규칙: _____. 제4장에 따른 결과표: _____. 자료 공개 뒤 프로그램 수정 시 행동: _____. 독립 반복 조건: _____.

명령의 실행 조건

- 대장 Ж1의 전제: _____. 행동 전에 확인하는 방법: _____.
- 명령과 기록 Ж3: _____. 구별할 실행 단계: _____.
- 다시 전달되면 일어나는 일: _____. 검증한 방법: _____.
- Ж4에 따른 종료 자원: _____. 새 블록을 금지하는 조건: _____.

부록 C

측정 독립성 지도

지도는 두 채널이나 망 전체에 대해 작성한다. «독립적»이라는 말은 언제나 명시한 오류 종류에 한정된다. 기기 개체가 달라도 공통의 물리적 의존성과 소프트웨어 의존성이 남을 수 있다.

공통 의존성	검증 질문	무엇을 기록할 것인가
시간 표준	채널별 원래 시간 척도의 출처	발진기, 동기화, 독립 운용
전원	하나의 변화가 여러 채널에 영향을 줄 수 있는가	전원 구성과 상태 기록
환경	공통 온도 요인, 기계적 요인이나 장의 요인이 있는가	배치와 보조 측정
구조	어떤 동일한 감응 소자를 사용하는가	기술과 기지 반응 기전
처리	공통 코드나 알고리즘을 사용하는가	라이브러리 버전, 설정 및 독립적인 구현
통신	자료가 공통 채널을 지나는가	버퍼링, 손실과 독립 기록
선택	트리거 하나가 모든 자료 흐름의 저장을 시작하는가	사건 전 이력과 시작 기준
운용자	기대가 결과 선택에 영향을 줄 수 있는가	역할, 맹검과 접근 순서
시료	분석 대상이 실제로 비교 가능한 재료인가	채취, 분할, 보관과 상태 변화

행마다 확인된 의존성, 수행 검증과 남은 제약을 명시한다. 발견한 공통 원인이 없다는 것이 완전한 독립성의 입증과 같지는 않다. 지도는 일치 결과와 아직 양립하는 설명안들을 보인다. 주요 설명은 제10장과 제47장에 있다.

부록 D

운용 방식과 중단에 대한 결정

이 서식은 구체적인 행동에 붙는 문서이며, 범위를 정하지 않은 미래 작업 전체를 허가하지 않는다. 명시한 조건이 달라지면 결정을 재검토한다.

행동하기 전에

- 연구 목적과 현재 사례 명세의 연결.
- 운용 방식: 기록, 원격 수동 관측, 제한 연구 또는 통제 개입.
- 책임 역할과 가능한 통신; 교대 인계 시 대행자.
- 기지 피해 상황, 불확실성과 허용 근거.
- 검증한 관측, 보호와 자체 행동 중단 기능.
- 작업 내내 유지해야 하는 조건.

중단 명령

- 중단 명령을 내릴 수 있는 사람과 전달 방식.
- 중단을 요구하는 관측 사건.
- 명령 뒤 각 운용자가 하는 구체적 행동.
- 종료와 기록을 위해 유지할 기능.
- 실제 행동 중단을 확인하는 방법.

중단 뒤

- 명령 시점, 이유와 실제 수행 순서.
- 사람, 환경, 장비와 자료의 상태.
- 감시 채널 상실과 미확정 결과.
- 재시작 검토에 필요한 조건.
- 책임자들의 결정과 새 작업 허가 버전.

재시작은 기본적으로 이전 허가의 연장이 아니다. 중요한 조건의 복원을 확인하고 다음 행동에 필요한 범위에서 중단 원인을 분석해야 한다. 제7장, 제9장과 제37장을 보라.

중단 뒤 결정의 연결 관계

최신 米1과 米3을 첨부하고, 관련된 사람이 있으면 米2도 첨부한다. 운전 상태를 바꿀 때에는 米4의 자원 확보, 米5의 미완료 물품 처리, 米6의 역할 관련 제약을 명시한다. 결정서에는 실제로 회복된 근거들을 나열한다. 빈 항목이나 확인하지 않은 단계가 서명만으로 허가로 바뀌지는 않는다.

부록 E

개입 결과 검증 확인서

이 확인서는 무력화 결과가 있다고 여기는 모든 행동 뒤에 적용한다. 구조상 연구 과정과 측정 적합성을 따로 검증하게 한다.

1. 작용에 관한 최초 주장과 근거 자료.

2. 확인되거나 추정된 개입 채널.

3. 수행 작업, 수행자, 시각과 실제 조건.

4. 주 채널과 대조 채널의 관측 변화.

5. 계기들이 필요한 감도와 범위를 유지했는지 검증.

6. 전후 상태의 비교 가능성; 배경과 구성 변화.

7. 제44장에 따른 결과 지위: 발생원 제거; 채널 제한; 상태 안정화; 대상 격리; 잦아듦 관찰; 확인 근거 부족. 작용마다 지위를 따로 정한다. 측정 인공 흔적 수정은 별도 기록한다. 이는 관측 신뢰성을 바꾸며 자체로 발생원 무력화를 확인하지 않는다.

8. 남은 제약, 부차 변화와 가능한 복귀 상황.

9. 관측 계획, 재검토 책임자와 작업 재개 기준.

10. 독립 검토자의 결론과 남아 있는 이견 목록.

감도 검증을 채우지 않으면 효과 소멸 결론이 제한된다. 발생원 상태가 미확인이면 제거 결론이 제한된다. 격리만 달성했다면 확인서에 장벽 유지 조건을 명시한다. 제42–45장을 보라.

부록 F

용어와 약어

이 정의들은 이 논저의 작업 언어로 사용한다. 전문 주제를 다루는 장에서는 해당 방법의 조건에 따라 뜻을 더 구체화한다. 분류 기호는 제6장에 제시했다.

이상현상. 명시한 예상에서 관찰이 벗어나 별도의 검증이 필요한 경우다. 이 말 자체는 원인을 정하지 않는다.

인공산물. 측정, 저장, 처리 과정에서 생겨 연구 대상의 성질처럼 보일 수 있는 결과의 특징이다.

타당성 확인. 시스템이나 절차가 특정 목적과 사용 조건에 적합한지 확인하는 일이다.

요구사항 검증. 구현이 주어진 요구사항을 충족하는지 확인하는 일이다. 그 자체로 그 요구사항이 과제에 적합하다는 뜻은 아니다.

가설. 관측 가능한 예상과 재검토 조건을 이끌어 내는 검증 가능한 설명이다.

시스템 경계. 대상과 환경을 나누기 위해 선택한 구분이다. 물질, 에너지, 신호, 외부 영향을 계산에 어떻게 포함할지 정한다.

드리프트. 시간에 따른 측정 채널 특성의 변화로 사용 조건에서 평가해야 한다.

격리. 명시한 장벽 조건을 유지하면서 확인된 영향 경로를 제한하는 일이다.

교정. 해당 조건과 불확도를 포함하여 지시값과 기준값 사이의 관계를 확립하는 일이다.

대조 계열. 특정 대안 설명, 배경, 절차의 작동 여부를 검증하도록 구성한 관찰이다.

거짓 경보. 채택한 검증 조건에서 정해진 표적 사건이 없는데도 검출 기준이 충족되는 경우다.

측정 모형. 원신호, 입력량, 보정값, 보고하는 결과 사이의 관계다.

포화. 입력 영향이 늘어나도 출력 신호에 더 이상 정상적인 방식으로 반영되지 않는 상태다.

독립 확인. 수행자나 기기의 이름만 다른 것이 아니라, 중요한 오류 원인들이 다르다는 근거를 갖춘 확인이다.

불확도. 채택한 측정 모형에서 결과 결정의 불완전성을 나타내는 특성이다. 포함한 영향을 기술해야 한다.

무력화. 영향의 관리를 통칭하는 말이다. 결론에서는 실제로 확인된 결과에 따라 그 뜻을 구체화해야 한다.

역문제. 관측한 결과로부터 발생원이나 시스템의 성질을 복원하는 문제다. 해가 유일하지 않을 수 있다.

공통 원인. 여러 채널, 요소, 관찰에 함께 연관된 영향을 줄 수 있는 요인이다.

사례 명세서. 원자료, 조건, 가설, 결정, 제약, 결론의 변경 이력을 연결해 놓은 기록이다.

검출 한계. 어떤 절차가 주어진 신호를 배경에서 가려낼 능력이 있는지 판단할 때 기준이 되는 조건이다.

사전등록. 관련 검증 자료를 얻거나 보기 전에 계획과 분석 규칙을 고정하는 일이다.

추적 가능성. 자료, 변환, 기준값의 기원을 확인할 수 있게 문서화한 연결의 연쇄다.

구별 실험. 비교하는 가설들이 주어진 불확실성 아래에서도 구분할 수 있는 결과를 예측하는 실험이다.

안정화. 선택한 매개변수를 근거 있는 범위 안에 유지하는 일이다. 계속 작동하는 시스템이 필요할 수 있다.

가정 모형. 명시적으로 도입한 가정의 귀결을 연구하는 모형이다. 그 가정을 자연의 확립된 성질로 제시하지 않는다.

학습 시나리오. 행동과 추론의 논리를 분석하기 위한 가상 예다. 경험적 증거는 아니다.

배경. 다루는 효과를 구별할 때 기준으로 삼는 관찰이나 상태 모형이다. 서로 비교할 수 있는 조건을 정해야 한다.

파일 무결성. 저장한 버전이 특정 자료 상태와 일치하는 성질이다. 기록된 장면이 참임을 그 자체로 입증하지는 않는다.

관찰자 효과. 관찰 중의 구체적인 상호작용 과정과 관련하여 시스템이 변하는 현상이다. 물리적 메커니즘을 별도로 명시해야 한다.

엑스트라과학. 검증 가능한 모형, 추적 가능한 자료, 수정 가능한 절차로 이례적인 현상을 연구하기 위해 이 책에서 채택한 프로그램이다.

유효 관측 노출량. 정해진 신호군의 검출 확률로 가중한 유효 관측량이다. 다른 신호 형태에서는 관측 노출량이 달라질 수 있다.

신뢰 수열. 선택한 방법의 조건이 성립할 때, 시간 전체에 걸쳐 명시한 동시 포함률을 갖는 신뢰집합들의 수열이다.

상태의 이전 이력. 현재 시스템의 응답에 영향을 줄 수 있는 과거의 영향과 전이에 관한 정보다.

히스테리시스. 관찰되는 상태가 조건을 바꿔 온 경로에 의존하는 성질이다. 정방향 전이와 역방향 전이의 문턱이 다를 수 있다.

부분 순서. 일부 사건 쌍의 선후가 정해지지 않은 채로 남는 것을 허용하는, 확립된 선행 관계다.

멱등 명령. 정해진 모형에서 반복 실행해도 한 번 실행한 것과 같은 결과를 내는 연산이다. 구체적인 인터페이스와 상태에 대해 이 성질을 검증해야 한다.

상태 조율. 통신 단절, 재시작, 로그 불일치 뒤에 장치에 대해 확인된 공통 기술을 복원하는 일이다.

관측가능성 지도. 기록의 유효성과 감도가 확립된 장소, 구간, 채널을 기술한 것이다.

검증용 자료 집합. 명시한 계획 안에서 검증할 모형과 그 평가 절차를 선택하는 데 사용하지 않은 자료다.

영 에너지 조건. 에너지 운동량 텐서를 임의의 빛꼴 벡터와 두 번 축약한 값이 음이 아니어야 한다는 요구다. 이 책에서는 명시적으로 정한 중력 모형에 한해 적용한다.

경험 모형. 명시한 조건에서 확인된 의존 관계를 수학적으로 기술한 것이다. 물리적 메커니즘은 밝혀지지 않은 채 남을 수 있다.

다른 조건으로의 적용 가능성. 미리 기술한 조건, 운용자, 계기 개체나 연구 재료의 변경 뒤에도 정해진 결과가 유지되는 성질이다.

부록 G

조직 운영의 작업 서식

서식 Ж1–Ж6은 지도, 사람, 명령, 자원, 물품, 팀의 훈련을 하나의 사례 식별자로 연결한다. 불명이라는 기록은 그에 따른 제약과 다음 결정의 책임자를 함께 적으면 허용된다. 해당 없음에는 짧은 근거가 필요하다. 빈칸이 위험의 부재를 뜻하지는 않는다. 국소적인 순서에는 노드 식별자, 세션, 번호를 사용한다. 물리적 시간은 시각 표지의 의미를 알 때에만 제시한다.

아래의 모든 작성 예는 학습 중단 분석 단계의 가상 사례 УЧ-ОП-01에 해당한다. 작용, 연락 상실과 자원은 카드로 모사한다. 실제 참여자는 모두 주최자가 아는 안전한 상황에 있고 외부 담당 기관은 별도 역할로 연기한다. 예들은 미완료 결정을 보여 주므로 실제 작업 허가가 아니다.

Ж1. 상태와 지도와 전제

항목	빈 서식
사례; 버전; 작성자	_____; _____; _____
상태와 이전 버전	S___; 이전 이력과 미지 구간: _____
지도 및 기록 연결	바탕 지도/시스템: _____; 노드/세션/번호 또는 구간: _____
층 Д	징후; 기록 장소; 음성 관측과 감도: _____
층 Н	적합 채널; 관측 불가 영역; 관측 범위 변화: _____
층 Р와 경로	허용 행동; 구역; 근거; 재검토 기한 또는 사건: _____
전환과 복귀	달라진 것; 새 상태; 복귀 징후; 검증 허용 가능성: _____
전제 대장	전제; 증거; 지위; 의존하는 결정; 책임자: _____
다음 결정과 연결	질문: _____; Ж2/Ж3/Ж4/Ж5: _____; 확인자: _____

작성한 학습 예시 Ж1-УЧ-01, 버전 3.

항목	작성 내용
사례와 상태	УЧ-ОП-01; S2; 작성자 M1. 이전 지도 M02; 통신 상실 전에 카메라 B의 노출이 바뀌었다.
연결 기준	학습실 평면도, 지도 M03. 국소 기록 A/R1/40; 공통 시간 척도는 없다.
Д	서쪽 구역에 빛 표지를 기록했다. 동쪽 표지의 현재 부재는 확립되지 않았다.
H	카메라 A는 자기 구역에 적합하다. B는 현재 자료를 주지 않는다. 동쪽 구역은 관측되지 않는다.
P	확인된 위치에서의 기록만 허용된다. 채널 B를 잃으면서 R 동쪽 경로의 근거도 상실했다.
전환과 복귀	S1 → S2: 관측 가능성 상실. 영상 복구만으로는 부족하다. 적합한 현재 관측과 경로 재검토가 필요하다.
전제	플랫폼의 현재 위치는 확인되지 않았다. 이에 의존하는 이동은 허용되지 않으며, 검증은 M1과 K1이 조정한다.
연결과 결정	Ж2-УЧ-01, Ж3-УЧ-01, Ж4-УЧ-01, Ж5-УЧ-01. 다음 질문은 확인할 수 있는 현재 상태다. 지도는 P1과 K1이 인수했다.

Ж2. 사람과 대응의 인계

항목	빈 서식
사례; 버전; 연락 담당자	_____; _____; 연락처: _____
전환 기준	관찰 사실; 출처; 수령 시점: _____
인원 현황	식별자; 확인된 위치/연락; 출처; 미해결 사항: _____
마지막 확인	국소 기록 또는 구간; 지도 버전; 불확실성: _____

항목	빈 서식
장소의 조건	확인된 위험 징후; 미평가 사항; 잃어버린 경로 근거: _____
유지할 기능	기능; 상태; 훼손 결과; 책임자: _____
인계	수령자; 통신 경로; 전달 내용; 수신 확인: _____
지시와 갱신 정보	받은 지시; 수행자; 다음 갱신 계기: _____
현재 결과	누가 어떤 기능을 인수했는지, 열린 질문, 연구의 한계: _____

작성한 학습 예시 Ж2-УЧ-01, 버전 1.

항목	작성 내용
사례와 연락 담당자	УЧ-ОП-01; 연락 담당자 C1. 외부 담당 기관은 주최자 C2가 연기한다.
근거와 현황	카드 설정에 따르면 참여자 П2가 응답하지 않는다. П1과 П3는 거점에서 확인했다. П2의 위치는 연구진이 확인하지 못했다.
마지막 확인	기록 A/R1/31, 지도 M02: П2가 학습 거점에 있다고 보고했다. 현재 확인은 아니다.
장소의 조건	M03: 동쪽 구역은 관측되지 않는다. 경로 근거를 잃었다. 물리적 장애물은 확립되지 않았다.
유지할 기능	접근 통제와 가능한 국소 기록; K1이 유지를 감시한다. 전체 종료는 지정하지 않았다.
인계와 지시	C1이 C2에게 사실을 전달했다. A/R1/42에서 수신을 확인했다. 훈련 지시는 가능한 인원 확인을 계속하고 변화를 보고하는 것이다.
결과	C2가 학습용 대응의 지휘자 역할을 인수했다. C1은 갱신 정보를 관리한다. 연구 계열은 재개하지 않았으며 Ж3은 열린 상태다.

Ж3. 명령과 제어 조율

항목	빈 서식
사례; 버전; 운용자	_____; _____; 제어 거점: _____
명령	식별자; 의미; 수신자; 회차; 구성: _____
반복	반복이 결과를 바꾸는가; 성질의 조건; 재전달 검증: _____
전송됨 / 수신됨	전송 증거: _____; 수신 증거: _____
실행됨 / 결과가 관찰됨	실행 증거: _____; 유효한 관찰: _____
단절과 복구	마지막 유효 기록; 새 세션; 오래된 패킷; 알 수 없는 사항: _____
현재 제어	자율 기능; 대기열; 현재 운용 거점; 유지하는 기능: _____
위치 및 다음 단계	위치/경로의 근거; 허가한 행동; 확인자: _____
결정	합의 사항; 미확인 사항; 책임자; 조작자; Ж1/Ж4 참조: _____

작성한 학습 예시 Ж3-УЧ-01, 버전 1.

항목	작성 내용
사례 및 명령	УЧ-ОП-01; О1; К7 — 한 단계의 상대 회전, 플랫폼 B, 회차 R1, 구성 C1.
반복	두 번째 이동이 생길 수 있다. 미완료 명령의 자동 반복은 허용되지 않는다.
네 단계	전송: 로그 A. 수신: B/R1/24. 실행: 알 수 없음. 물리적 결과: 미확인.
통신 단절 뒤	B의 현재 회차는 R2다. 과거 자료 B/R1/23이 먼저 도착했다. 이 프레임은 현재 위치를 기술하지 않는다.
제어	연구 대기열을 중단했다. 지원 기록은 유지한다. 현재 근무자는 О1이며 역할 인계는 Ж4에 따른다.

항목	작성 내용
다음 단계	새로운 이동 없이 유효한 상태 증거를 얻는다. Ж1에 따라 R 동쪽 경로는 허가되지 않았다. M1이 확인한다.
결정	P1과 K1은 연구 순서를 미완료로 남겼다. O1은 자동 반복 금지를 확인했다. 잃은 단계들을 추측으로 복원하지 않았다.

Ж4. 자원과 근무 인계

항목	빈 서식
사례; 버전; 근무조	_____; _____; 인계자: _____; 인수자: _____
현재 운용 방식	상태; 구성; Ж1과 Ж3 버전; 유지하는 기능: _____
자원 항목	기능; 자원; 잔량; 평가 방법; 다음 블록 소모량: _____
종료와 불확실성	종료에 필요한 양; 불확실성; 충분성 근거: _____
보충	허용 작업; 교체품 호환성; 필요한 재검증: _____
열린 의무	명령; 고장; 임시 변경; 제약; Ж5의 물품: _____
다음 행동	무엇을 어떤 사건에 수행할지; 수행자; 통신: _____
인계	인수자가 제약을 되풀이함: _____; 인수 기능: _____; 확인 시점: _____
인계가 성립하지 않았다면	역할 유지자; 확보된 잔여 운용; 다음 결정 수신자: _____

작성한 학습 예시 Ж4-УЧ-01, 버전 1.

항목	작성 내용
근무조와 상태	УЧ-ОП-01; O1에서 O2로 인계. S2, C1; Ж1 버전 3, Ж3 버전 1. 연구 대기열은 작동하지 않는다.

항목	작성 내용
자원 항목	기록기의 학습용 에너지: 잔량 8; 측정열 4; 종료 3; 고려할 소모 변동은 가상 단위 2.
자원 결정	4 + 3 + 2 = 9 > 8: 측정열은 허용되지 않는다. 훈련 모형에서는 예정 종료에 5단위면 충분하다.
보충	호환 교체품을 확인하지 못했으므로 보충분을 가용 자원에 넣지 않는다.
미해결 사항	K7: 실행 여부는 불명이다. 채널 B는 현재 위치를 확인하지 못했다. Д1은 Ж5에 따라 관리자가 계속 보관한다.
인계와 행동	O2는 제약을 되풀이하고 관측과 예정 종료만 인수했다. 확인 A/R1/44; O1은 상태를 인계했으며 측정열 지속 허가를 넘긴 것이 아니다.
예비 절차	O2의 확인이 없으면 확보된 전환 범위에서 O1이 역할을 유지하고 P1이 후속 책임을 조직한다.

Ж5. 반출 물품과 최종 관리자

항목	빈 서식
사례; 버전; 물품 단위	_____; _____; 물품 ID: _____; 관리자: _____
기원	원래 ID; 사용 장소; 하위 분할 부분; 관련 시료: _____
접촉과 상태	확인됨/가정됨/평가하지 않음; 증거; 중요한 변화: _____
현재 위치	확인 기록; 구성품 완전성; 취급 조건: _____
이동 계획	목적; 경로와 지도; 상태를 바꾸는 작업: _____
받는 사람	전문 역량이 있는 주체; 합의 구성; 수령 확인: _____
불일치	인수 거절/부족/기록 소실; 마지막 확인; 다음 검토: _____

항목	빈 서식
최종 상태	인계됨/남아 있음/처리됨/소재 미확인; 근거: _____
연결과 책임	Ж1/Ж4; 인계자; 인수자 또는 현재 관리자; 열린 질문: _____

작성한 학습 예시 Ж5-УЧ-01, 버전 1.

항목	작성 내용
단위	УЧ-ОП-01; 홀더 Д1; 관리자 Х1. 학습용 물품이며 분할 부분은 만들지 않았다.
기원 과 상태	작업 О3의 모형에서 사용했다. 시료 П1 카드와 연결된다. 예정 수령자에 대한 Д1 상태는 미평가다.
위치	학습용 선반 Q. Х1이 구성품 완전성을 확인했다. 운송 포장으로 옮기지 않았다.
이동과 수령자	П1과 함께 Л1에게 넘길 계획이었다. Л1은 П1만 합의했고 Д1 수령은 확인하지 않았다.
불일치 및 상태	신청과 실제 구성품이 불일치한다. Д1은 Х1의 책임 아래 남는다. 대체 주소는 고르지 않았다.
다음 결정	정보와 별도 인수 조건 또는 근거 있는 다른 처리 방식을 확인한다. 열린 항목은 Ж4에 따라 인계되었다. 세션이 끝나도 그 항목이 종결되지는 않는다.

Ж6. 훈련과 준비 상태의 확인

항목	빈 서식
훈련; 버전; 역할	_____; _____; 참여자: _____; 주최자: _____; 평가자: _____
안전한 환경	종이/모형/검증된 시험 장치; 실제 작용; 중단 방법: _____

항목	빈 서식
제시 상황	초기 문서; 보고할 편차; 제시 시점: _____
예상 결정	관측 행동과 문서; 치명적 오류: _____
실제 순서	누가 무엇을 했는지; 확인; 힌트; 보존 자료: _____
행동별 평가	독립적으로 수행/힌트 뒤 수행/수행하지 못함; 증거: _____
수정	절차 단절의 원인; 지침/시스템의 변경; 책임자: _____
재검증	변경 제시 상황; 관련 역할; 결과; 평가자: _____
작업 허용과 한계	확인 과제; 남은 금지; 책임자 결정; 구성: _____

작성한 학습 예시 Ж6-УЧ-01, 버전 1.

항목	작성 내용
훈련	УЧ-ОП-01; 훈련 4, 버전 T1. О1 — 운용자; М1 — 계측 전문가; К1 — 조정자; 평가자 У1.
환경과 제시 상황	구동기를 연결하지 않은 소프트웨어 모형. К7 수신 확인; 실행 미상; R2는 과거 프레임을 보인다.
예상	상대 이동 단계를 반복하지 않는다. 단계를 나눈다. 이전 패킷은 과거 자료로 보존한다. Ж3을 작성한다.
사실과 평가	О1은 반복을 제안했다. 모형에서 명령은 실행되지 않았다. 힌트 뒤에 Ж3을 올바르게 작성했다. 핵심 결정을 독립적으로 수행하지 못했다.
수정	О1과 인터페이스 개발자가 회차와 미완료 명령 표시를 구체화한다. К1이 변경 지침을 검증한다.
재검증	최종 상태를 지정하는 새 상황을 배정했다. 아직 수행하지 않았다.

항목	작성 내용
작업 허용	O1이 독립적으로 반복을 허가할 준비는 확인되지 않았다. 힌트 뒤 작성한 서식은 훈련의 양성 결과가 아니다.

빈 서식을 복사할 때는 이름, 사례 식별자, 버전을 보존한다. 표가 모자라면 같은 표지를 가진 추가 부분을 붙인다. 한 장에 맞추려고 알 수 없거나 불편한 정보를 줄여서는 안 된다. 한 서식의 상태를 바꾸면 연결을 확인한다. 위치 확인으로 Ж1과 Ж3을 갱신할 수 있지만 Ж2, Ж4의 자원 제약, Ж5의 미완료 인계가 자동으로 종결되지는 않는다.

부록 H

가정한 정적 시간 영역의 발생원

이 부록에서는 제16장의 계량에 대해 저자 계산을 수행한다. 목적은 이미 도입한 기하 가정에서 발생원 요구를 도출하는 것이다. 계산은 제작한 장치를 기술하거나 필요한 물질 상태의 존재를 입증하지 않는다. 부호 규약 (−, +, +, +), 좌표 $x^0 = ct$, 양의 함수 N(r), 정적 성질, 구면대칭과 영인 우주상수를 채택한다.

계량과 곡률 규약

$$ds^2 = -N(r)^2 (dx^0)^2 + dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\varphi^2$$

좌표 xa에 대한 Γa_{ij}의 미분에서 xj에 대한 Γa_ia의 미분을 빼고 대응하는 접속의 이차 조합 둘을 포함하여 리치 텐서를 구성하는 규약을 쓴다. 방정식 Gμν = 8πG Tμν/c⁴와 함께 아래 부호를 고정한다. 프라임은 r에 대한 미분을 뜻한다. G는 첨자가 없으면 중력상수, 첨자가 있으면 아인슈타인 텐서다.

$$R_{\mu\nu} = \partial_\alpha \Gamma^\alpha_{\mu\nu} - \partial_\nu \Gamma^\alpha_{\mu\alpha} + \Gamma^\alpha_{\mu\nu}\Gamma^\beta_{\alpha\beta} - \Gamma^\beta_{\mu\alpha}\Gamma^\alpha_{\nu\beta}$$

중요한 접속 성분들을 아래에 열거한다. 아래 첨자는 대칭이다. 첫 두 성분에는 시계 진행 함수가 들어간다. 나머지는 평평한 공간 부분에 구면좌표를 쓰는 것만으로도 나타난다. 이들을 유지해야 한다. 기하 항을 빼면 압력이 틀리기 때문이다.

$$\Gamma^0_{0r} = \frac{N'}{N}, \Gamma^r_{00} = NN'$$

$$\Gamma^r_{\theta\theta} = -r, \Gamma^r_{\varphi\varphi} = -r\sin^2\theta, \Gamma^\theta_{r\theta} = \Gamma^\varphi_{r\varphi} = \frac{1}{r}$$

$$\Gamma^\theta_{\varphi\varphi} = -\sin\theta\cos\theta, \Gamma^\varphi_{\theta\varphi} = \cot\theta$$

곡률과 아인슈타인 텐서

직접 대입하면 대각 리치 텐서를 얻는다. 방위각 성분은 극각 성분에 sin²θ 인자를 곱한 것과 같다. 영이 아닌 식들과 곡률 스칼라는 다음과 같다.

$$R_{00} = N\left(N'' + \frac{2N'}{r}\right), R_{rr} = -\frac{N''}{N}$$

$$R_{\theta\theta} = -\frac{rN^{'}}{N}, R_{\varphi\varphi} = \sin^{2}\theta R_{\theta\theta}$$

$$R = -\frac{2}{N}\left(N^{''} + \frac{2N^{'}}{r}\right)$$

곡률 스칼라의 절반에 계량을 곱한 항을 빼면 아인슈타인 텐서의 시간 성분은 영이 된다. 작은 ε에 대한 근사가 아니라 채택 계량의 정확한 상쇄다. 공간 성분들은 영이 아닌 채 남는다.

$$G_{00} = 0, G_{rr} = \frac{2N^{'}}{rN}$$

$$\frac{G_{\theta\theta}}{r^{2}} = \frac{G_{\varphi\varphi}}{r^{2}\sin^{2}\theta} = \frac{N^{''} + N^{'}/r}{N}$$

발생원의 물리적 성분

좌표 성분 자체가 국소 관찰자의 지시값과 같은 것은 아니다. 단위 기저벡터는 $N^{-1}\partial_{0}$, ∂r, $r^{-1}\partial\theta$와 $(r\sin\theta)^{-1}\partial\varphi$에 비례한다. 따라서 정규직교 틀로 바꿀 때 시간 성분은 N^{2}로, 각도 성분은 해당 반지름 인자의 제곱으로 나눈다. 이 틀에서 T의 공변 성분 대각은 (ρE, pr, pt, pt)다.

$$\rho_{E} = 0, p_{r} = \frac{c^{4}}{4\pi G}\frac{N^{'}}{rN}, p_{t} = \frac{c^{4}}{8\pi G}\frac{N^{''} + N^{'}/r}{N}$$

ρE는 질량 밀도가 아니라 단위 부피당 에너지를 뜻한다. 대각 형태와 정적 성질에서 에너지 흐름의 부재가 따른다. 일반적으로 pr과 pt는 다르며, 요구되는 발생원은 이방적이다. 이를 압력이 하나인 통상적 이상유체로 바꾸는 것은 새로운 가정이고, 현재 계산과는 양립하지 않는다. 아인슈타인 텐서의 공변 발산에 관한 기하 항등식은 이런 T의 형식적 수지를 보장하지만, 물질의 미시 모형이나 그 물질을 형성하는 방법을 제공하지는 않는다.

가우스 분포와 정칙 중심

$$N = 1 + \varepsilon e^{-r^{2}/L^{2}}, N^{'} = -\frac{2\varepsilon r}{L^{2}}e^{-r^{2}/L^{2}}$$

$$N^{''} = \varepsilon e^{-r^{2}/L^{2}}\left(-\frac{2}{L^{2}} + \frac{4r^{2}}{L^{4}}\right)$$

$$p_r = -\frac{c^4 \varepsilon e^{-r^2/L^2}}{2\pi G L^2 N}, p_t = \frac{c^4 \varepsilon e^{-r^2/L^2}}{2\pi G L^2 N}\left(\frac{r^2}{L^2} - 1\right)$$

문제처럼 보이는 비 N′/r은 N′이 r에 비례하므로 유한한 극한을 갖는다. 중심에서 압력들은 매끄러운 구면대칭 발생원에 필요한 대로 일치한다. −1보다 큰 고정 ε에서 분모는 양수이고 제시한 모든 성분은 유한하다. r = 0의 구면각 좌표 특이성은 이 분포의 물리적 특이점이 아니다.

$$p_r(0) = p_t(0) = -\frac{c^4 \varepsilon}{2\pi G L^2 (1+\varepsilon)}, R(0) = \frac{12\varepsilon}{L^2(1+\varepsilon)}$$

고정 매개변수에서의 정칙성이 금지 경계 ε = −1로 갈 때의 균일 유계성을 뜻하지는 않는다. 경계에 가까워질수록 중심 식들은 무한히 커질 수 있다. 중심에서 멀리 가면 N은 하나에 수렴하고 압력과 곡률은 사라진다. ε = 0이면 발생원의 모든 성분이 사라진다. 식의 유용한 검증이다.

영 에너지 조건

에너지 흐름이 없는 대각 발생원에서 임의의 빛꼴 벡터에 대한 Tμνkμkν ≥ 0 조건은 ρE + pr과 ρE + pt가 음이 아닌 것과 동등하다. 여기서는 에너지 밀도가 영이다. ε가 영보다 크면 pr은 음이다. −1 < ε < 0이면 반지름 압력은 양이지만 반지름 L 밖에서 pt가 음이 된다. 따라서 이 계열의 자명하지 않은 모든 분포에는 어느 영역에서 영 에너지 조건 위반이 필요하다.

이는 선택 방정식과 전체 기하 전제 안의 결론이다. 명시 조건을 모든 곳에서 만족해야 하는 발생원으로 분포를 해석하는 것을 배제한다. 모든 양자 상태가 그 조건을 만족함을 입증하지 않으며 구체적인 양자 발생원의 더 엄격한 제약을 연구할 필요도 없애지 않는다. 개별 음의 기여를 형식적으로 허용해도 필요한 분포, 지속 시간과 안정성이 확보되지는 않는다.

정량적 대조

학습용 ε = 10^{-15}, L = 10 m에서 점근 표준에 대한 86 400 s 동안의 중심 앞섬은 86,4 ps다. 작은 ε에서 $c^2|N'/N|$의 최대는 대략 $L/\sqrt{2}$에 있고 크기는 $c^2|\varepsilon|\sqrt{(2/e)}/L$, 즉 약 7,71 m/s²다. 중심 압력은 약 −1,9 × 10^{26} Pa이고 중심 곡률 스칼라는 1,2 × 10^{-16} m^{-2} 정도다. 큰 압력과 작은 곡률은 기하와 발생원의 연결에 있는 차원 계수 c^4/G 때문에 양립한다.

이 대조의 모든 수치는 가정 모형 계산이다. 실험 결론에는 측정 매개변수, 공동 불확실성과 나머지 예측의 검증이 필요하다. 독자는 이 부록을 모형 구성 규율의 본보기로 쓸 수 있다. 기하

선택, 발생원 도출, 정칙성과 에너지 조건 검증, 연결된 귀결과 자료 비교의 순서다. 이 단계들 뒤에야 이런 상태의 생성이나 변경에 관한 실질적 질문이 생긴다.

부록 I

사례와 미해결 질문의 대장

아래는 저자가 제안한 대장 구성이다. 개별 사례 명세를 적합 자료, 검증 주장과 지속 조건에 연결한다. 연구 기록과 물리 사건 기록은 식별자가 다르다. 모든 작성 예는 이 책의 가상 사례에 해당한다.

항목	기록 내용
case_id와 revision	안정적인 사례 식별자, 버전 번호, 변경 날짜와 작성자
event_id와 message_id	사건과 최초 보고; 통합이나 분리의 근거
claim_id	검증 주장 하나, 해당 양과 조건
data_refs	원파일, 검사합, 출처와 접근 조건
configuration	계기 식별자, 처리 버전과 공통 의존성
coverage	장소와 유효 구간, 신호군, 효율과 불확도
models	검증 설명안, 매개변수, 예측과 구별 결과
status	원인 확립; 잔차; 제약; 자료 부족; 무효 검증; 중단
open_question	구별 징후로 정식화한 미해결 질문
reopen_condition	결과 재검토가 가능해지는 구체적 새 측정이나 자료
custody	후속 관측, 자료와 유지 제한의 책임자
dependencies	공통 출처, 반복 보고, 관련 측정열과 이전 버전

학습 기록	제한된 결론	지속 조건
사례 1	기록된 시계 불일치의 설명을 확립했다	검증한 원인을 제거한 뒤의 다른 잔차

학습 기록	제한된 결론	지속 조건
사례 2	시험 조건에서 잔여 관계를 확인했다; 기전은 미확정이다	남은 설명안들의 예측이 갈리는 구성
사례 3	구체적인 계량 모형은 채널들을 함께 고려한 자료와 부합하지 않는다	명시적으로 정식화한 다른 모형 또는 독립 새 자료
사례 4	관측 가능성 상실 뒤 조사와 제한을 재검토했다	확인된 노드 상태, 지도와 새 운용 근거
사례 5	제시 조건과 새 과제 범위에서 정보 의존성을 평가했다	미리 준비한 절차의 독립 적용 검증
사례 6	감도 검증과 함께 개입 지위를 정한다	남은 채널들의 비교 가능한 기록
사례 7	재료 이력이 주장한 결론에 불충분하다	출처를 확인한 새 재료
사례 8	선택 신호군의 사건 빈도를 제약했다	근거 있는 관측 범위 확대 또는 새 사건 모형

갱신 절차

1. 카드의 원래 버전과 이전 결론의 근거를 보존한다.

2. 새 자료는 자체 기원과 함께 추가한다. 기존 기록을 몰래 대체해서는 안 된다.

3. 재검토하는 주장과 여전히 유효한 주장을 명시한다.

4. 사건 통합, 적합성이나 효율이 달라지면 비교 가능한 지표를 재계산한다.

5. 새 지위, 미해결 질문과 자료 보존 책임자를 기록한다.

공개할 때는 결론 검증에 충분하며 관련 사람들에게 허용되는 세부 수준을 선택한다. 원자료 접근이 제한되면 그 제약을 독립 검증 가능성 평가에 포함한다. 검사합은 특정 파일과의 연결을 확인할 뿐 내용의 진실을 확인하지 않는다.

부록 J

주제별 색인과 상황별 색인

색인은 용어나 최초 진술에서 측정 과제로 안내한다. 일상 언어의 명칭은 탐색의 진입점이며 사건 기전을 확립하지 않는다. 번호는 이 책의 장을 가리킨다.

주제 색인

개념	주요 장
행위주체성과 의미 있는 응답	36
장벽과 작용 제한 검증	42, 44
시간 척도와 주파수	12, 13, 50
발생과 발생원	11, 16, 23
기하학과 연결성	17, 18, 21
자료와 출처	8, 31, 40
이동하는 선단	13, 17
차등 측정	48, 52
신뢰 절차와 분석 중단	3, 49
생애주기와 이전 이력	10, 11
물질의 변화	27, 31
정보 의존성	15, 35, 36
교정과 적격성 확인	48, 49
관측 가능성 지도	7, 38
미세 힘과 추가 상호작용	19, 20, 51

개념	주요 장
무력화와 그 지위	43, 44, 45
영 결과와 탐색 범위	49, 62
시료와 반출 장비	31, 38
기억과 양립하지 않는 증언	32, 46
피해자 또는 현황이 확인되지 않은 참여자	9, 37
절차의 전제 조건	10, 14, 18
검증용 자료 집합	4, 39, 53
미해결 사례 대장	8, 54
자원과 근무 인계	37, 45
제어 조율	38, 40
안정화와 지연	43
팀 훈련	37
반박 조건	4, 39
사건의 부분 순서	40
에너지 수지	23, 25, 11

최초 기술에서 검증으로

설명	첫 번째 연구 질문	장
유령 또는 형체	어떤 광학, 음향과 지각 채널이 사건을 기록했는가	17, 23, 32, 33
폴터가이스트	어떤 힘과 운동을 실제 측정했으며 기초와 물체는 어떻게 연결되는가	24, 26, 51
사라진 시간	기억, 인터페이스 또는 물리적 척도 중 무엇이 어긋났는가	12, 13, 32
시간 루프	가정한 반복들 사이에서 어떤 상태와 기록이 유지되는가	14, 40
포털	경로, 빛의 전파와 공간 연결성을 어떻게 검증했는가	17, 18, 21
끝없는 복도	기하, 반복성과 관찰자 위치를 어떤 방법으로 복원했는가	17, 18
물질화	계의 경계는 어디이며 재료 출처는 확립되었는가	27, 31
물체 소멸	어떤 궤적, 관측 영역과 이동 경로를 이용할 수 있었는가	8, 17, 27
전조	예측 규칙과 기한을 결과 전에 기록했는가	3, 15
저주받은 곳	관측 범위와 통상 환경을 고려해도 특정 사건 빈도가 달라지는가	3, 7, 34
구상번개 또는 발광 물체	스펙트럼, 기록 기하와 에너지 모형은 무엇인가	22, 23, 25
물체가 공중에 매달린 경우	지지대, 매질 운동과 유지력을 어떻게 확립했는가	19, 26

설명	첫 번째 연구 질문	장
글이 답하거나 이해한다	응답, 의미 범주와 누출 경로를 미리 정했는가	35, 36
이력이 바뀌었다	어떤 독립 흔적이 있으며 어떤 예측이 설명안들을 구별하는가	14, 32, 40
계기가 미쳤다	원신호, 전원, 기준과 고장 징후가 보존되었는가	35, 47, 49

진술에서 연구로 옮길 때는 목격자의 원래 말을 보존하고 작업 진술을 따로 적는다. 원자료를 바꾸지 않고 모형을 구체화할 수 있다. 어떤 사례든 시작할 때 명세 A, 계획 Б와 운용 결정 Г를 사용한다. 특별 작업 서식은 부록 G에 모았다.

참고문헌

문헌들은 구체적인 사실 주장과 방법의 근거로 제시한다. 저자 모형, 학습 계산과 가상 사례는 본문에 표시했다. 그 가정과 결과를 열거한 출처들에 귀속하지 않는다.

[1] F. Gabbert; A. Memon; K. Allan (2003). Memory conformity: can eyewitnesses influence each other's memories for an event?. DOI: 10.1002/acp.885. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/acp.885 관련 장: 2, 32.

[2] Joint Committee for Guides in Metrology (2023). Guide to the expression of uncertainty in measurement Part 1 Introduction. DOI: 10.59161/JCGMGUM-1-2023. https://doi.org/10.59161/JCGMGUM-1-2023 관련 장: 3, 22, 24, 25.

[3] Dennis D. Leber; Leticia S. Pibida (2020). False Alarm Testing for Radiation Detection Systems. DOI: 10.6028/NIST.TN.2118. https://www.nist.gov/publications/false-alarm-testing-radiation-detection-systems 열람 가능한 판본: https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2118 관련 장: 3, 28, 44, 49.

[4] B. A. Nosek; C. R. Ebersole; A. C. DeHaven; D. T. Mellor (2018). The preregistration revolution. DOI: 10.1073/pnas.1708274114. https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1708274114 관련 장: 4, 36, 39.

[5] NASA (2016). NASA Systems Engineering Handbook Revision 2. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/09/nasa_systems_engineering_handbook_0.pdf 관련 장: 7, 37, 42, 43.

[6] National Institute of Standards and Technology (2022). Digital Evidence Preservation: Considerations for Evidence Handlers. DOI: 10.6028/NIST.IR.8387. https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2022/NIST.IR.8387.pdf 관련 장: 8, 36, 40.

[7] Harry W. Jones; NASA Ames Research Center (2025). Common Cause Failures Dominate and Defeat Redundancy. https://ntrs.nasa.gov/citations/20240013667 관련 장: 10, 28, 30, 37, 42, 47.

[8] J. Grotti et al. (2018). Geodesy and metrology with a transportable optical clock. DOI: 10.1038/s41567-017-0042-3. https://www.nature.com/articles/s41567-017-0042-3 열람 가능한 판본: https://arxiv.org/pdf/1705.04089 관련 장: 12, 13, 16.

[9] M. A. Lombardi (2021). An Evaluation of Dependencies of Critical Infrastructure Timing Systems on the Global Positioning System (GPS). DOI: 10.6028/NIST.TN.2189. https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.2189.pdf 관련 장: 12, 13, 47, 50.

[10] T. Bothwell et al. (2025). Deployment of a transportable Yb optical lattice clock. DOI: 10.1364/OL.543310. https://doi.org/10.1364/OL.543310 열람 가능한 판본: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=958732 관련 장: 13.

[11] Md Tanvir Arafin, D. M. Anand, G. Qu (2016). Detecting GNSS Spoofing using a Network of Hardware Oscillators. DOI: 10.33012/2016.13135. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12309389/ 관련 장: 13.

[12] J. Zhang et al. (2017). Observation of a discrete time crystal. DOI: 10.1038/nature21413. https://www.nature.com/articles/nature21413 열람 가능한 판본: https://arxiv.org/abs/1609.08684 관련 장: 14.

[13] H. Watanabe, M. Oshikawa (2015). Absence of Quantum Time Crystals. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.251603. https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.114.251603 열람 가능한 판본: https://arxiv.org/abs/1410.2143 관련 장: 14.

[14] Z. Kekecs; B. Palfi; B. Szaszi; et al. (2023). Raising the value of research studies in psychological science by increasing the credibility of research reports: the transparent Psi project. DOI: 10.1098/rsos.191375. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9890107/ 관련 장: 15, 39, 46.

[15] J. Walleczek; N. von Stillfried; S. Schmidt; M. Wittmann; K. A. Kirmse; J. Moll; Z. Kekecs (2025). Metascientific replication project with the advanced meta-experimental protocol of the transparent psi project procedures for testing the precognitive effect claimed by Bem. DOI: 10.1371/journal.pone.0335330. https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0335330 관련 장: 15, 46.

[16] World Meteorological Organization (날짜 없음). Mirage — International Cloud Atlas, Section 3.2.3.7. https://cloudatlas.wmo.int/en/mirage.html 관련 장: 17, 23.

[17] NOAA / National Weather Service (날짜 없음). JetStream Max: Anomalous Propagation. https://www.noaa.gov/jetstream/anomalous-propagation 관련 장: 17.

[18] Le Zheng; Jiamin Long; Marco Lops; Fan Liu; Xueyao Hu; Chuanhao Zhao (2024). Detection of Ghost Targets for Automotive Radar in the Presence of Multipath. DOI: 10.1109/TSP.2024.3384750. https://ieeexplore.ieee.org/document/10488858 열람 가능한 판본: https://www.iris.unina.it/retrieve/4ee96aa8-19be-4e4e-aa60-c8f3fd914fb9/Detection_of_Ghost_Targets_for_Automotive_Radar_in_the_Presence_of_Multipath.pdf 관련 장: 17, 26.

[19] C. H. Bennett et al. (1993). Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. DOI: 10.1103/PhysRevLett.70.1895. https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.70.1895 관련 장: 18.

[20] P. Gao, D. L. Jafferis, A. C. Wall (2017). Traversable wormholes via a double trace deformation. DOI: 10.1007/JHEP12(2017)151. https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP12(2017)151 관련 장: 18, 21.

[21] B. Stray et al. (2022). Quantum sensing for gravity cartography. DOI: 10.1038/s41586-021-04315-3. https://www.nature.com/articles/s41586-021-04315-3 열람 가능한 판본: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8866129/ 관련 장: 19.

[22] Richard W. Saltus; Richard J. Blakely (2011). Unique geologic insights from “non-unique” gravity and magnetic interpretation. DOI: 10.1130/G136A.1. https://www.geosociety.org/gsa-today/november-2011/unique-geologic-insights-from-nonunique-gravity-and-magnetic-interpretation 열람 가능한 판본: https://www.usgs.gov/publications/unique-geologic-insights-non-unique-gravity-and-magnetic-interpretation 관련 장: 19, 22, 26.

[23] M. V. Berry; A. K. Geim (1997). Of flying frogs and levitrons. DOI: 10.1088/0143-0807/18/4/012. https://doi.org/10.1088/0143-0807/18/4/012 관련 장: 19, 26.

[24] M. J. Duff (2002). Comment on time-variation of fundamental constants. DOI: 10.48550/arXiv.hep-th/0208093. https://arxiv.org/abs/hep-th/0208093 관련 장: 20.

[25] Boulder Atomic Clock Optical Network (BACON) Collaboration (2021). Frequency ratio measurements at 18-digit accuracy using an optical clock network. DOI: 10.1038/s41586-021-03253-4. https://www.nature.com/articles/s41586-021-03253-4 열람 가능한 판본: https://tf.nist.gov/general/pdf/3104.pdf 관련 장: 20.

[26] X. Zhang et al. (2023). Search for Ultralight Dark Matter with Spectroscopy of Radio-Frequency Atomic Transitions. DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.251002. https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.130.251002 관련 장: 20, 48, 52.

[27] L. H. Ford, T. A. Roman (1996). Quantum field theory constrains traversable wormhole geometries. DOI: 10.1103/PhysRevD.53.5496. https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.53.5496 관련 장: 16, 21.

[28] S. W. Hawking (1992). Chronology protection conjecture. DOI: 10.1103/PhysRevD.46.603. https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.46.603 관련 장: 21.

[29] B. S. Kay, M. J. Radzikowski, R. M. Wald (1997). Quantum field theory on spacetimes with a compactly generated Cauchy horizon. DOI: 10.1007/s002200050042. https://doi.org/10.1007/s002200050042 열람 가능한 판본: https://arxiv.org/abs/gr-qc/9603012 관련 장: 21.

[30] Brian Meyer; Richard Saltus; Arnaud Chulliat; NOAA NCEI (2017). EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). DOI: 10.7289/V5H70CVX. https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.geophysical_models:EMAG2_V3 열람 가능한 판본: https://www.ncei.noaa.gov/products/earth-magnetic-model-anomaly-grid-2 관련 장: 22.

[31] Occupational Safety and Health Administration (날짜 없음). OSHA Technical Manual, Section II, Chapter 3: Technical Equipment: On-site Measurements. https://www.osha.gov/otm/section-2-health-hazards/chapter-3 관련 장: 22, 30, 34.

[32] Jianyong Cen; Ping Yuan; Simin Xue (2014). Observation of the Optical and Spectral Characteristics of Ball Lightning. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.035001. https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.112.035001 열람 가능한 판본: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24484145/ 관련 장: 23.

[33] John Abrahamson; James Dinniss (2000). Ball lightning caused by oxidation of nanoparticle networks from normal lightning strikes on soil. DOI: 10.1038/35000525. https://www.nature.com/articles/35000525 열람 가능한 판본: https://scienceinschool.web.cern.ch/wp-content/uploads/2009/08/issue12_nature_abrahamson2000.pdf 관련 장: 11, 23.

[34] Torsten Neubert et al. (2020). A terrestrial gamma-ray flash and ionospheric ultraviolet emissions powered by lightning. DOI: 10.1126/science.aax3872. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31826957/ 열람 가능한 판본: https://birkeland.uib.no/wp-content/uploads/2019/12/308_Neubert_science.aax3872.full_.pdf 관련 장: 23.

[35] Nathaniel S. Marshall et al. (2023). The Health Effects of 72 Hours of Simulated Wind Turbine Infrasound: A Double-Blind Randomized Crossover Study in Noise-Sensitive, Healthy Adults. DOI: 10.1289/EHP10757. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36946580/ 열람 가능한 판본: https://researchers.mq.edu.au/en/publications/the-health-effects-of-72-hours-of-simulated-wind-turbine-infrasou/ 관련 장: 24.

[36] Brandon M. Lane; Eric P. Whitenton (2016). Calibration and Measurement Procedures for a High Magnification Thermal Camera. DOI: 10.6028/NIST.IR.8098. https://www.nist.gov/publications/calibration-and-measurement-procedures-high-magnification-thermal-camera 관련 장: 25.

[37] Georgia L. Harris (2019). Selected Laboratory and Measurement Practices and Procedures to Support Basic Mass Calibrations 2019 Edition. DOI: 10.6028/NIST.IR.6969-2019. https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2019/NIST.IR.6969-2019.pdf 관련 장: 27.

[38] Dale E. Newbury (2008). Energy Dispersive Spectrometry. https://www.nist.gov/publications/energy-dispersive-spectrometry 관련 장: 27.

[39] World Health Organization (2020). Laboratory biosafety manual, fourth edition: Decontamination and waste management. https://www.who.int/publications/i/item/9789240011359 열람 가능한 판본: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/337958/9789240011359-eng.pdf 관련 장: 27, 31, 42, 44.

[40] International Atomic Energy Agency (2010). Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1454_web.pdf 열람 가능한 판본: https://nucleus-apps.iaea.org/nss-oui/Content/Index?CollectionId=m_627a11e1-f527-4ea2-aed9-48f8099e5ba8&type=PublishedCollection 관련 장: 28, 44.

[41] NASA Small Spacecraft Systems Virtual Institute (날짜 없음). Small Spacecraft Avionics Section 8 2 1 Radiation Mitigation and Tolerance Schemes. https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/small-spacecraft-avionics/ 관련 장: 28.

[42] United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology (2007). Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Wetlands. https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1009KCU.TXT 관련 장: 29.

[43] World Health Organization (2020). Laboratory biosafety manual, 4th edition: Risk Assessment. https://www.who.int/publications/i/item/9789240011458 열람 가능한 판본: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/337966/9789240011458-eng.pdf?sequence=1 관련 장: 29.

[44] Centers for Disease Control and Prevention; National Institutes of Health; Paul J. Meechan and Jeffrey Potts, senior co-editors (2020). Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories, 6th Edition. https://www.cdc.gov/labs/bmbl/ 열람 가능한 판본:

https://www.cdc.gov/labs/media/pdfs/2025/08/SF__19a_308133-A_BMBL6_00-BOOK-WEB-final-3.pdf 관련 장: 29, 31.

[45] Tommaso Francesco Villa; Farhad Salimi; Kye Morton; Lidia Morawska; Felipe Gonzalez (2016). Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements. DOI: 10.3390/s16122202. https://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2202 관련 장: 30, 38, 43.

[46] T. Takeuchi; A. Miyasita; Y. Sasaki; M. Inugami; K. Fukuda (1992). Isolated sleep paralysis elicited by sleep interruption. DOI: 10.1093/sleep/15.3.217. https://academic.oup.com/sleep/article-abstract/15/3/217/2749266 열람 가능한 판본: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1621022/ 관련 장: 32.

[47] G. R. Poudel; C. R. H. Innes; P. J. Bones; R. Watts; R. D. Jones (2014). Losing the struggle to stay awake: Divergent thalamic and cortical activity during microsleeps. DOI: 10.1002/hbm.22178. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6869765/ 열람 가능한 판본: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23008180/ 관련 장: 32.

[48] H. Henrik Ehrsson (2007). The experimental induction of out-of-body experiences. DOI: 10.1126/science.1142175. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17717177/ 열람 가능한 판본: https://www.science.org/doi/10.1126/science.1142175 관련 장: 33.

[49] F. Bernasconi; E. Blondiaux; J. Potheegadoo; et al. (2021). Robot-induced hallucinations in Parkinson's disease depend on altered sensorimotor processing in fronto-temporal network. DOI: 10.1126/scitranslmed.abc8362. https://infoscience.epfl.ch/handle/20.500.14299/177671 열람 가능한 판본: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33910980/ 관련 장: 33.

[50] H. Dhanis; J. Potheegadoo; N. Faivre; M. Hara; F. Bernasconi; O. Blanke (2026). Presence hallucination induction through robotically mediated somatomotor conflicts: A pooled analysis of 25 experiments. DOI: 10.1016/j.cortex.2026.03.018. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001094522600095X 열람 가능한 판본: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/42000554/ 관련 장: 33.

[51] C. C. French; U. Haque; R. Bunton-Stasyshyn; R. Davis (2009). The 'Haunt' project: An attempt to build a 'haunted' room by manipulating complex electromagnetic fields and infrasound. DOI: 10.1016/j.cortex.2007.10.011. https://www.haque.co.uk/work/haunt/HauntProject.pdf 열람 가능한 판본: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18635163/ 관련 장: 34.

[52] P. Granqvist; M. Fredrikson; P. Unge; A. Hagenfeldt; S. Valind; D. Larhammar; M. Larsson (2005). Sensed presence and mystical experiences are predicted by suggestibility, not by the application of transcranial weak complex magnetic fields. DOI: 10.1016/j.neulet.2004.10.057. https://portal.research.lu.se/en/publications/sensed-presence-and-mystical-experiences-are-predicted-by-suggest/ 열람 가능한 판본: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15849873/ 관련 장: 34.

[53] National Institute of Standards and Technology (2023). Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). DOI: 10.6028/NIST.AI.100-1. https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/NIST.AI.100-1.pdf 관련 장: 35.

[54] Y. Benjamini; Y. Hochberg (1995). Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x. https://academic.oup.com/jrsssb/article/57/1/289/7035855 열람 가능한 판본: https://engr.case.edu/ray_soumya/mlrg/controlling_fdr_benjamini95.pdf 관련 장: 35.

[55] P. Nguyen et al. (2021). Environmental noise in advanced LIGO detectors. DOI: 10.1088/1361-6382/ac011a. https://dcc.ligo.org/LIGO-P2000343/public 열람 가능한 판본: https://dcc.ligo.org/public/0170/P2000343/007/PEM_O3_paper_210118.pdf 관련 장: 38, 41, 47, 49.

[56] J. P. Simmons; L. D. Nelson; U. Simonsohn (2011). False-Positive Psychology: Undisclosed Flexibility in Data Collection and Analysis Allows Presenting Anything as Significant. DOI: 10.1177/0956797611417632. https://www.psychologicalscience.org/journals/psychological-science/0956797611417632/ 열람 가능한 판본: https://www2.psych.ubc.ca/~schaller/528Readings/SimmonsNelsonSimonsohn2011.pdf 관련 장: 41.

[57] IAEA and co-sponsoring international organizations (2015). Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. https://nucleus.iaea.org/sites/nss-oui/Published%20Collections/m_0fce2a40-ac12-4db9-ad3b-e4bfc93f678e/m_0fce2a40-ac12-4db9-ad3b-e4bfc93f678e__59_0.Html 관련 장: 44, 45.

[58] S. R. Howard; A. Ramdas; J. McAuliffe; J. Sekhon (2021). Time-uniform, nonparametric, nonasymptotic confidence sequences. DOI: 10.1214/20-AOS1991. https://doi.org/10.1214/20-AOS1991 열람 가능한 판본: https://arxiv.org/abs/1810.08240 관련 장: 3.

[59] NIST/SEMATECH (전자자료). e-Handbook of Statistical Methods Section 5.3.3.3.1 Two-level full factorial designs. https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3331.htm 관련 장: 36.

[60] M. D. Wilkinson et al. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. DOI: 10.1038/sdata.2016.18. https://www.nature.com/articles/sdata201618 열람 가능한 판본: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26978244/ 관련 장: 54.

[61] Leslie Lamport (1978). Time, Clocks, and the Ordering of Events in a Distributed System. Communications of the ACM, 21(7), 558–565. DOI: 10.1145/359545.359563. https://doi.org/10.1145/359545.359563 열람 가능한 판본: https://lamport.azurewebsites.net/pubs/time-clocks.pdf 관련 장: 40.

[62] Nancy G. Leveson; John P. Thomas (2018). STPA Handbook. MIT-STAMP-001. https://www.mit.stamp-institute.com/handbooks 열람 가능한 판본: https://www.mit.stamp-institute.com/get_file.php?name=STPA_Handbook.pdf 관련 장: 10, 38.

[63] U.S. Department of Energy (2019). Conduct of Operations Implementation. DOE-HDBK-1226-2019. https://www.energy.gov/documents/doe-hdbk-1226-2019pdf 관련 장: 37.

[64] Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor (전자자료). 29 CFR 1910.120 — Hazardous waste operations and emergency response. 전자판. https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.120 관련 장: 9, 37.

[65] Benjamin M. Roberts; Geoffrey Blewitt; Conner Dailey; Mac Murphy; Maxim Pospelov; Alex Rollings; Jeff Sherman; Wyatt Williams; Andrei Derevianko (2017). Search for domain wall dark matter with atomic clocks on

board global positioning system satellites. DOI: 10.1038/s41467-017-01440-4. https://www.nature.com/articles/s41467-017-01440-4 열람 가능한 판본: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5662606/ 관련 장: 11, 13.

[66] J. G. Lee; E. G. Adelberger; T. S. Cook; S. M. Fleischer; B. R. Heckel (2020). New Test of the Gravitational $1/r^2$ Law at Separations down to 52 μm. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.101101. https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.101101 열람 가능한 판본: https://link.aps.org/accepted/10.1103/PhysRevLett.124.101101 관련 장: 20, 51.

[67] W. J. Riley (2008). Handbook of Frequency Stability Analysis. NIST Special Publication 1065. DOI: 10.6028/NIST.SP.1065. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1065 열람 가능한 판본: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1065.pdf 관련 장: 50.

저자와 프로젝트

이메일: info@brenev.com

저자 웹사이트: brenev.com

미라 웹사이트: mira.technology

다른 프로젝트: haraizen.tech

텔레그램: https://t.me/Eudgenee