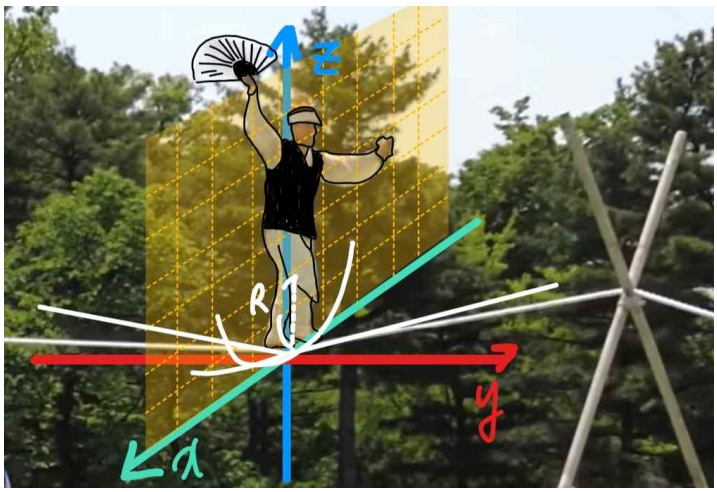
출품번호
1167

제72회 전국과학전람회

한국 줄타기는 어떻게 장대 없이 균형을 잡는가? 처진 줄 진자 위 이중 역진자가 허리 접기 하나로 서는 원리의 규명과 로봇 실증



2026. 8. 12.

출품학생	
지도교원	
구 분	학생부
출품부문	물리

<차례>

I. 탐구 동기 및 목적 ····· 1

1. 탐구 동기 ····· 1

2. 탐구 목적 ····· 3

II. 탐구 내용 ····· 4

1. 문헌 조사— 찾은 것은 답이 아니라 공백이었다 ····· 4

2. 첫 번째 열쇠— 처진 줄은 받침이 아니라 변환기다 ····· 5

3. 발을 무게중심 너머로 보내 쓰러짐 방향을 바꾼다—
FWE 메커니즘 ····· 9

4. 완전히 정지할 필요 없이 떨어지지만 않으면 된다—
한국 줄타기에 맞는 균형의 정의 ····· 9

5. 흔들림 속에서 균형의 길을 찾다— 결합 모드와 안정모드선 ····· 11

6. 기운 크기가 달라도 같은 비율로—
상태공간의 기하와 최적 접기 비율 ε^* ····· 12

7. 위치와 속도를 하나의 점에 담다—
예측점 평면과 차원 축소 ····· 16

8. 접고, 기다리고, 펴는 박자를 닫다—
순간동작 가정의 완전FWE 사이클 ····· 19

9. 완벽한 한 번보다 불완전한 여러 번—
유한시간 접기와 증분 접기의 시뮬레이션 ····· 21

10. 이론을 현실의 줄 위에 세우다—
줄타기 로봇 '어름이' ····· 25

III. 탐구 결론 및 의의 ····· 28

1. 탐구 결론 ····· 28

2. 탐구 의의 ····· 29

IV. 참고 문헌 및 AI 활용 ····· 30

<그림 차례>

그림 1. 서양의 장대 줄타기와 한국의 전통 줄타기. 한국 줄타기는 장대 없이 부채만 든 채 …· 2

그림 3 파울레티 선행연구를 시뮬레이션으로 재현한 모습. …… 6

그림 5 처진 줄 진자 위 상·하체 2링크 모델과 좌표 정의. φ·α·θ는 모두 연직 기준 오른쪽을 양(+)으로 잡았다. …… 8

그림 7 균형 운동을 설명하기 위한 모드 좌표 (φ, β, δ). β는 몸 전체의 가중 무게중심 기울기이고, δ는 허리 접힘각이다. …… 9

그림 8 FWE의 인과 사슬: 기울어진 상태에서 허리를 접어 발을 무게중심 너머로 보내고, 기다린 뒤 자세를 회복한다. …… 10

그림 9 가운데로 되돌아오는 정진자와 기울수록 더 쓰러지는 역진자의 대조. …… 11

그림 10 입력 없이 떨어지지 않는 운동을 찾기 위한 세 후보: β=0, β=−φ, 그리고 그 사이의 일정한 비율. …… 12

그림 11 결합계의 두 운동: 줄과 몸이 엇갈려 유계 진동하는 안정모드와 지수적으로 커지는 불안정모드. …… 12

그림 12 상태 공간에서의 안정 모드 선 …… 13

그림 13 접기 전과 ε 접기 후의 시뮬레이터 장면. 왼쪽에는 (β,φ) 평면의 무게중심 등고선과 상태점 이동, 오른쪽에는 실제 2링크 자세와 동일한 x_CoM 표시 …… 15

그림 14 안정모드선과 무게중심 등고선의 교점 …… 15

그림 15 초기 기울기에서 ε*를 계산하고, 접기로 상태를 안정모드선 위에 옮긴 뒤 유계 진동에 들어가는 과정. …… 16

그림 16 ε* 접기 후 φ와 β가 반대 위상으로 일정한 진폭을 유지하는 시간응답] …… 17

그림 18 순간접기 완전 사이클: 과접기-대기-펴기로 펴기 뒤의 상태를 안정모드선 위에 착지시킨다. …… 21

그림 19 초기 몸이 기울어진 상태 …… 21

그림 20 만큼 접은 상태 …… 21

그림 21 기다리는 상태 …… 21

그림 22 몸을 편 후 안정 모드선 위에 있는 상태 …… 21

그림 23 LQR제어 시뮬레이션 …… 22

그림 24 MUJOCO 시뮬레이션(V14) …… 23

그림 35 유한시간접기의 시뮬레이션 검증 …… 24

그림 26 증분접기의 시뮬레이션 검증(V19) …… 25

그림 42 모터 Servo 보정 …… 28

그림 43 비틀림 진자로 관성모먼트 실측 …… 28

그림 44 나이프 엣지 방법으로 무게중심 위치 측정 …… 28

I 탐구 동기 및 목적

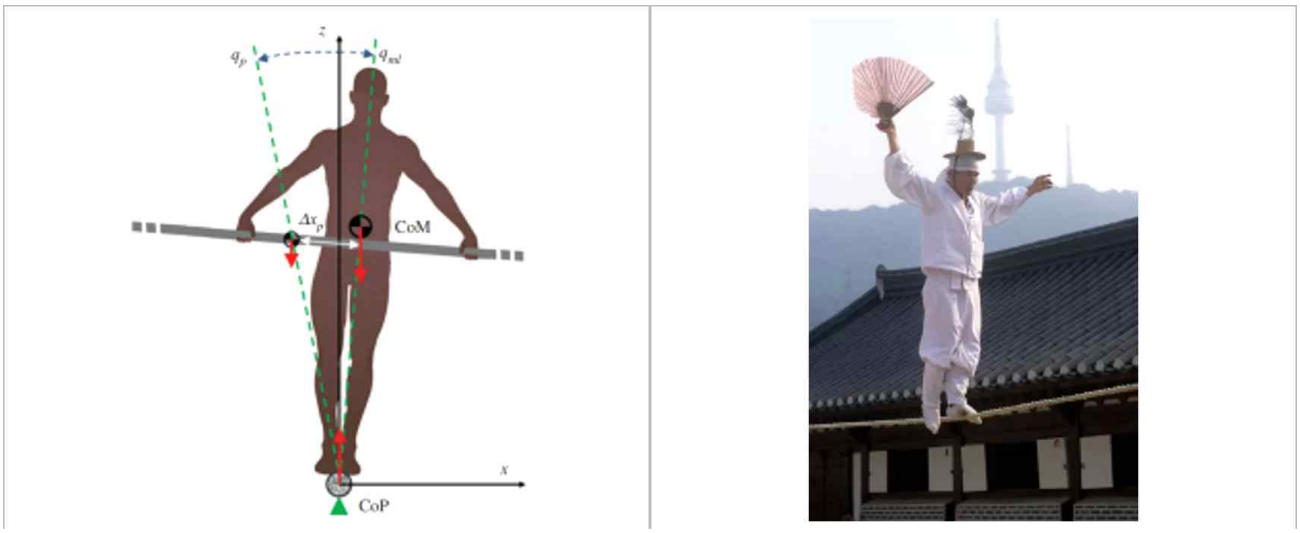
1. 탐구 동기

가. 문제 의식 — 서양 줄타기와 한국 줄타기

한국의 전통 줄타기 영상을 관찰하면서 가장 먼저 직관적인 의문이 들었다.

“장대도 없이 흔들리는 줄 위에서 어떻게 저렇게 움직이며 균형을 잘 잡을 수 있을까?”

서양의 줄타기와 한국의 전통 줄타기는 겉보기에서부터 역학적 차이가 뚜렷하다. 서양 줄타기는 양끝을 팽팽하게 당긴 줄 위에서 길고 무거운 장대를 들고 천천히 이동한다. 몸이 기울어질 때 장대를 반대 방향으로 기울이거나 회전시켜 발생하는 외부 토크를 이용해 균형을 유지한다. 반면 한국 줄타기는 줄을 느슨하게 매어 V자로 처지도록 만든다. 광대는 줄 위에서 걷고, 뛰며, 온갖 역동적인 장기와 묘기를 선보인다. 그들의 손에는 기다란 장대는 커녕, 부채 한 자루가 전부이다. 서양의 줄타기는 장대를 기울여 토크를 만들고 무게중심을 정렬하지만, 부채는 그 역할을 할 수 없다.



(가) 서양 줄타기: 장대 사용 (나) 한국 줄타기: 장대 없이 부채 사용

그림 2. 서양의 장대 줄타기와 한국의 전통 줄타기. 한국 줄타기는 장대 없이 부채만 든 채 처진 줄 위에서 역동적인 동작을 수행한다.

역학적으로 부채는 가벼운 종이와 대나무 구조물에 불과하므로, 기울어진 광대의 몸을 바로 세울 만큼의 회전 관성이나 복원 토크를 만들어 낼 수 없다. 그렇다면 외부에서 토크를 가할 도구가 전혀 없는 상황에서, 광대는 어떻게 넘어지지 않고 지속해서 균형을 잡을 수 있는가에 대한 본질적인 문제 의식이 형성되었다.

나. 얼음판 위의 사고실험 — 이건 불가능한 일이다

질문이 소박한 데 비해, 물리 수업에서 배운 것을 대입하자 사태는 훨씬 심각해졌다.

마찰이 전혀 없는 얼음판 위에 사람이 서 있다고 하자. 이 사람이 팔을 휘두르든 몸을 비틀든 허리를 접든, 자기 무게중심의 수평 위치는 단 1 mm도 옮기지 못한다. 몸속에서 만들어지는 힘은 전부 내력이고, 내력은 무게중심을 움직이지 못하기 때문이다(운동량 보존). 몸속 동작으로 할 수 있는 일은 무게중심을 중심으로 부분들을 재배치하는 것뿐이다.

줄 위의 광대도 마찬가지 아닌가? 줄은 점접촉이므로 몸을 밀어 올릴 뿐, 무게중심을 중앙으로 당기거나 몸을 되세울 토크를 줄 수 없다. 기울어진 몸에서는 그 밀어 올리는 힘마저 바깥쪽을 향한다. 그렇다면 한 번 기운 몸은 영영 돌아오지 못하고 떨어져야 한다.

그런데 광대는 떨어지지 않는다.

수백 년째 눈앞에서 벌어지고 있는 이 일이 우리가 아는 물리와 충돌한다면, 답은 둘 중 하나다. 물리가 틀렸거나, 우리가 무언가를 빠뜨렸거나. 물리는 틀리지 않았을 것이다. 그러니 우리가 빠뜨린 것이 있다.

> *"불가능해 보이는 일이 실제로 일어나고 있다면, 그 안에 우리가 아직 모르는 물리가 있다는 뜻이다."*

다. 역발상

그러나 우리는 이 관점을 완전히 뒤집는 역발상에서 탐구를 시작하였다.

"어려워 보이는 한국 줄타기의 요란한 몸동작들이, 방해 요소가 아니라 오히려 균형잡기를 더욱 쉽게 만드는 움직임이 아닐까?"

위와 같은 질문을 시작으로, 한국 줄타기가 장대 없이 균형을 잡는 메커니즘 규명을 위한 탐구를 시작하였다.

무게중심을 줄 위에 있게 하는 것이 균형이라면, 꼭 무게중심을 움직여야 할까? 몸을 세우는 대신 느슨한 줄을 내 밑으로 끌어오면 되지 않을까? 그렇다면 한국 줄타기의 줄은 균형을 어렵게 하면서도, 동시에 줄과 발을 움직일 수 있게 하려고 느슨해야 했던 것은 아닐까?

> *"몸을 세우는 대신 줄을 끌어오면 된다."*

2. 탐구 목적

가. 장대 없는 한국 줄타기의 균형 회복 원리를 물리 법칙으로 규명

선행 연구는 균형에 필요한 복원 토크를 장대나 팔의 회전이라는 외부 입력으로 다루었으나, 장대가 없는 한국 줄타기에는 이를 적용할 수 없다. 따라서 본 탐구는 광대가 실제로 가진 수단만으로 — 즉 처진 줄과 허리 관절만으로 — 기울어진 몸이 어떻게 균형을 되찾는지를 설명하는 인과 사슬을 세우는 것을 첫 번째 목적으로 한다. 여기에는 "균형이란 무엇인가"를 이 시스템에 맞게 다시 정의하는 일이 함께 포함된다.

나. 원리를 수학적으로 유도하고 물리 엔진 시뮬레이션으로 검증

원리가 설명에 그치지 않으려면, 얼마나 접어야 하는지가 수식으로 결정되어야 한다. 따라서 라그랑주 역학으로 운동방정식을 세우고 모드 해석을 거쳐 최적 접기량을 닫힌 형태의 해로 유도하는 것, 그리고 그 결과를 로봇 물리 엔진(MuJoCo) 기반의 독립적인 시뮬레이션에서 수치적으로 대조하여 오차를 정량화하는 것을 두 번째 목적으로 한다.

다. 자체 제작한 줄타기 로봇으로 실물 실증

후술로 다루겠지만, 시뮬레이션은 우리가 세운 가정 안에서 옳다. 그러므로 이론이 실제 물체에서도 성립하는지를 확인하기 위해, 모델과 같은 구조(허리 관절 하나로 구동되는 이중 역진자)의 로봇을 직접 설계·제작하여 실제 줄 위에 올린다. 로봇의 무게중심·관성모멘트·줄 마찰을 실측하여 시뮬레이션에 되먹임하고, 센서로 기울기를 측정해 스스로 접는 폐루프 균형을 실증하는 것을 세 번째 목적으로 한다.

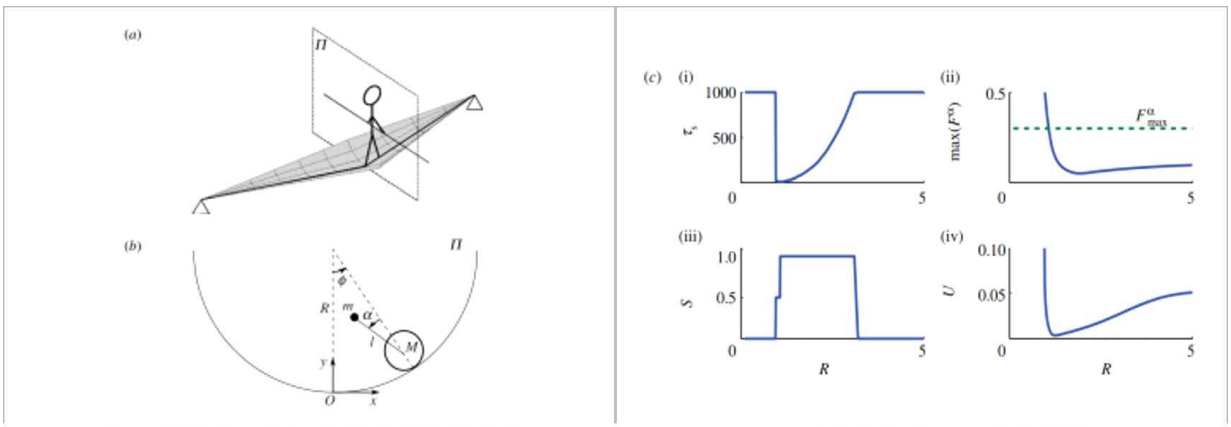
Ⅱ 탐구 내용

1. 문헌 조사 — 찾은 것은 답이 아니라 공백이었다

답을 찾으러 자료부터 뒤졌다. 조사할수록 이상했다.

한국 줄타기 자료(국가무형문화재 제58호 기록물, 기술 분류 연구, 명인 인터뷰와 방송)는 풍부 했다. 줄타기의 역사, 공연의 구성, 4가지 기술의 이름과 형태까지 상세히 기록되어 있었다. 그러나 '기울어진 몸이 어떻게 균형으로 돌아오는가'를 설명한 대목은 어디에도 없었다. 대중적 과학 기사(서울신문, 2006)의 설명도 "부채와 팔을 펼쳐 회전 관성을 키워 넘어지는 것을 느리게 하고 시간을 번다"까지 였다. 그것은 천천히 넘어지는 법이지, 되돌아오는 법이 아니다.

역학 논문으로 넘어가자 사정이 조금 나았다. 하버드대학교 연구진 Paoletti와 Mahadevan은 2012년 영국 왕립학회가 발행하는 학술지 《Journal of the Royal Society Interface》에 〈Balancing on tightropes and slacklines〉를 발표했다. 이 논문은 줄 위 균형을 정면으로 다룬 사실상 유일한 선행연구였다. 이들은 줄 위의 사람을 "원호 트랙 위를 움직이는 카트(각 ϕ) + 그 위에 선 단일 강체 역진자(각 α)"로 모델링하고, LQG 제어기로 안정화에 성공했다. 두 가지 결과가 중요하다. (i) 제어기가 있으면 균형이 가능하다. (ii) 제어 노력이 최소가 되는 최적의 줄 처짐(sag)이 존재한다.



(가) 선행연구의 원호 위 카트-역진자 모델 (나) 줄 처짐과 제어 노력의 관계

그림 2. Paoletti와 Mahadevan의 선행연구: 원호 위 카트–단일 역진자 모델과 줄 처짐에 따른 제어입력의 변화.

그러나 이 선행연구는 팔이나 장대의 움직임이 만드는 여러 효과를 몸에 직접 작용하는 하나의 복원 토크로 묶어 모델링하였다. 이 식을 그대로 시뮬레이션으로 만들어보니, 발보다 몸이 더 바깥쪽에 남아 있어 줄의 힘만으로는 복귀하기 어려운 상태에서도 몸이 직립 방향으로 돌아왔다. 즉 몸의 복귀가 발의 이동과 처진 줄의 복원력에서 나온 것이 아니라, 몸에 직접 주어진 토크에서 나온 것이다. 따라서 장대가 없는 한국 줄타기의 균형 회복 과정을 설명하기에는 적절하지 않다고 판단하였다.

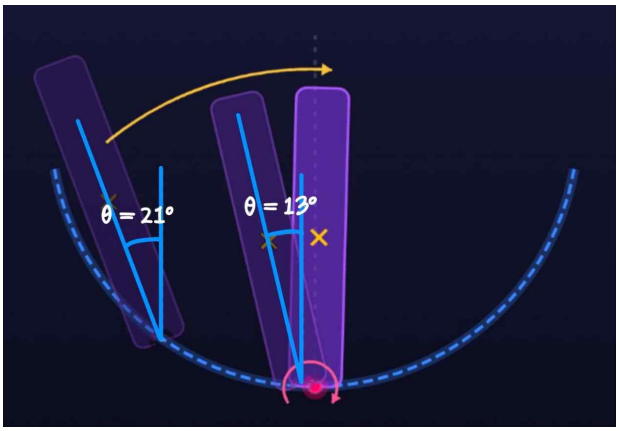


그림 4 파울레티 선행연구를 시뮬레이션으로 재현한 모습.

그리고 결정적으로, 이 논문은 "제어기가 잡을 수 있다"는 가능성까지만 보였을 뿐 "어떤 물리 과정을 거쳐 몸이 되돌아오는가"라는 인과는 다루지 않았다.

슬랙라인 생체역학 연구들(Kimmerle 2022, Serrien 2017, Mombaur 2020 등)은 측정 결과를 준다. 숙련자는 초보자보다 각운동량과 무게중심 가속도를 낮게 유지하고, 훈련될수록 균형 협응이 엉덩관절 쪽으로 이동한다. "사람이 몸통과 엉덩이를 균형에 쓴다"는 정황 증거는 되지만, 대부분 발을 고정한 조건의 실험이라 회복의 인과 과정 자체는 비어 있다.

> ***"우리가 문헌 조사에서 찾은 것은 답이 아니라 공백이었다. 천천히 넘어지는 법은 알려져 있어도, 되돌아오는 법은 아무도 설명하지 않았다. 광대는 몸으로 알지만 말로 알려주지 않는다 — 그렇다면 우리가 물리로 지어내는 수밖에 없다."***

문헌 조사의 결론: 우리가 풀어야 할 것은 제어 문제가 아니라 역설의 해명이다. 그리고 그 해명은 인용할 곳이 없으므로 직접 지어내야 한다.

2. 첫 번째 열쇠 — 처진 줄은 받침이 아니라 변환기다

가. 결정적 관찰 — 발이 줄과 함께 흔들린다

줄타기 영상을 느린 속도로 반복 재생하며 우리가 들여다본 것은 발 밑의 줄이었다. 사람이 올라서면 줄은 발 위치에서 꺾여 V자가 되고, 그 꼭짓점이 발과 함께 좌우로 오간다. 여기서 발이 지나가는 자취의 모양이 정해진다. V자의 두 토막은 길이가 각각 L/2로 고정되어 있으므로, 꼭짓점이 놓일 수 있는 자리는 두 기둥을 잇는 선의 한가운데에서 일정한 거리만큼 떨어진 점들뿐이다. 즉 발은 그 한가운데를 중심으로 하는 원호 위를 움직인다 — 줄이 곧아도 그네가 원호를 그리는 것과 같다(원호를 그리는 것은 발의 자취이지 줄의 모양이 아니다). 반지름은 처짐의 깊이 R이고, 무질량 줄(직선 두 토막) 가정에서는 기둥 간격 D와 줄 길이 L로부터 피타고라스로 곧장 나온다.

$$R = \tfrac{1}{2}\sqrt{(L^2 - D^2)}$$

원호 위를 흔들리는 물체 — 그것은 정진자다. 가운데로 되돌아오려는, 안정한 진자.

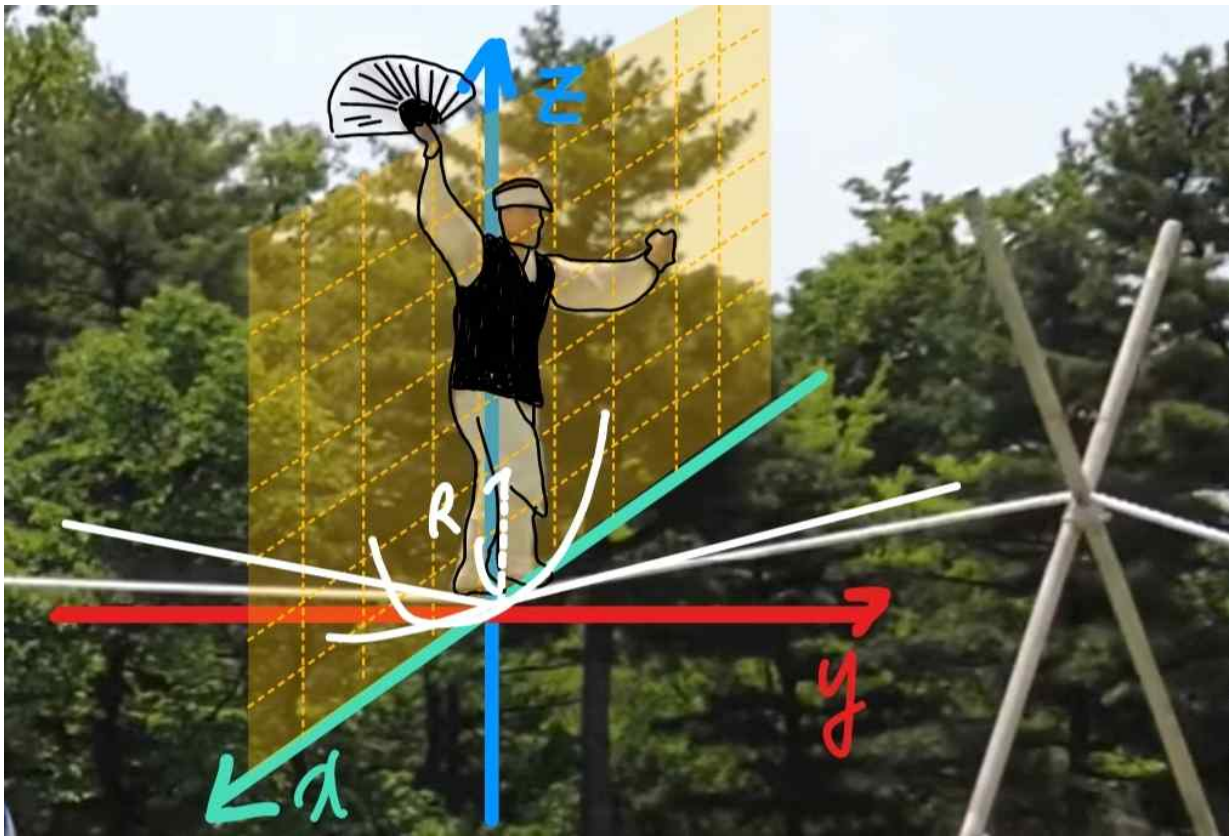


그림 4. 처진 줄의 실제 기하. 발은 V자 줄의 꼭짓점에 고정되어 줄과 함께 움직이며, 발의 자취가 반경 R의 원호를 이룬다. 우리 줄타기 모델은 x-z 평면상의 흔들림을 표현하는 것이다.

나. 얼음판과 줄의 차이

여기서 탐구 동기의 역설이 풀리기 시작한다. 얼음판에는 무게중심을 옆으로 밀어 줄 바깥 힘이 없다. 그런데 처진 줄에는 있다. 줄은 발을 통해 몸 전체를 가운데로 끌어당기고, 그 힘의 방향과 크기는 오직 발의 위치가 정한다.

이것을 무게중심에 대한 운동방정식으로 쓰면 놀랍도록 깨끗한 한 줄이 된다. 무질량 줄은 줄 방향의 힘만 전달하므로,

$$d^2 x_{CoM}/dt^2 = -g \cdot \phi(t) \quad \text{(무게중심의 수평 운동방정식)}$$

무게중심은 "발이 놓인 각 ϕ에 비례한 옆밀침을 받는 자유입자"다.

이 식의 무서운 점은, 허리를 어떻게 접든 토크를 얼마나 주든 정확히 성립한다는 것이다. 몸속에서 무슨 짓을 하든 무게중심을 직접 밀 수는 없다. 그러나 발의 위치는 바꿀 수 있고, 발의 위치만 바꿔 놓으면 나머지는 줄이 해 준다.

> ***"처진 줄은 단순한 받침이 아니라, 발의 위치를 무게중심을 되돌리는 힘으로 바꿔 주는 변환기였다. 무게중심을 직접 밀 수는 없어도 발의 위치는 바꿀 수 있다 — 여기에 균형의 열쇠가 있을 것이다."***

다. 그렇다면 발은 무엇으로 옮기는가 — 모델의 정의

열쇠를 찾았지만 아직 쓸 수가 없었다. 선행연구의 '막대 하나' 모델에는 발을 옮길 몸속 동작이 없기 때문이다. 몸을 하나의 강체로 보면 몸속에서 아무리 움직여도 그 강체 안에서 끝난다.

사람 몸에서 힘을 만들 수 있는 곳을 찾다가, 막대 중간에 관절을 달아 접었다 펴면 두 토막이 서로 반대로 회전한다는 데 생각이 닿았다 — 허리다. 그래서 모델을 이렇게 세웠다.

원호 위의 발(발목은 자유 회전) + 하체 막대 + 허리 관절(모터 1개) + 상체 막대

각도는 셋: ϕ(줄+발이 함께 흔들리는 각, 발 위치 xfoot=Rϕ), α(하체 절대 기울기), θ(상체 절대 기울기)

우리가 직접 명령할 수 있는 것은 하나: 허리 접힘각 $\delta = \theta - \alpha$, 입력은 힙 토크 τ

자유도 3, 입력 1. 제어가 어렵기로 유명한 저구동(underactuated) 시스템이다.

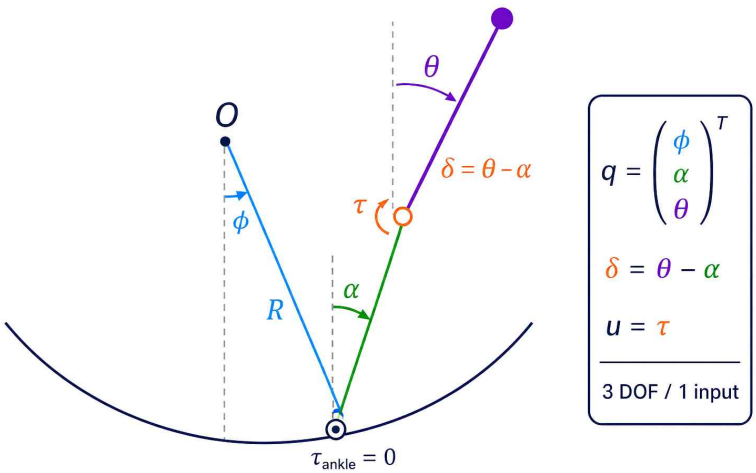


그림 6 처진 줄 진자 위 상·하체 2링크 모델과 좌표 정의. ϕ · α · θ는 모두 연직 기준 오른쪽을 양(+)으로 잡았다.

소각 선형화한 운동방정식은 다음과 같다(라그랑주 역학).

$$M\ddot{q} = Gq + E\tau, \quad q = (\varphi,\ \alpha,\ \theta)^T, \quad E = [0,\ -1,\ +1]^T$$

$$M = \begin{bmatrix} M_t R^2 & Rp_1 & Rp_2 \\ Rp_1 & J_{\alpha\alpha} & J_{\alpha\theta} \\ Rp_2 & J_{\alpha\theta} & J_{\theta\theta} \end{bmatrix}, \quad G = \mathrm{diag}\,(-M_t\, gR,\ p_1\, g,\ p_2\, g)$$

여기서 이 연구 전체를 지배하는 구조 하나를 지목해 둔다. 중력 행렬 G는 대각인데, 질량 행렬 M은 비대각 항(Rp_1, Rp_2, $J_{\alpha\theta}$)을 갖는다. 즉 이 시스템에서 변수들을 얽는 것은 힘이 아니라 관성이다. 앞으로 벌어지는 모든 흥미로운 일 — 두 개의 모드도, 허리 하나로 줄까지 제어되는 신비도 — 전부 이 비대각 관성항에서 나온다.

라. 좌표를 물리가 단순해지는 축으로 갈아타기

(ϕ, α, θ)는 측정하기는 좋지만 의미를 읽기에는 나쁘다. 그래서 물리적 의미가 분명한 좌표로 바꿨다.

쓰러짐 각 β = (p₁ α + p₂ θ)/(M_t h) — 상·하체 기울기를 질량 배분으로 가중평균한 것. "몸 전체가 실질적으로 얼마나 기울었나"

접힘각 δ = θ − α — 우리가 명령하는 자세 변수

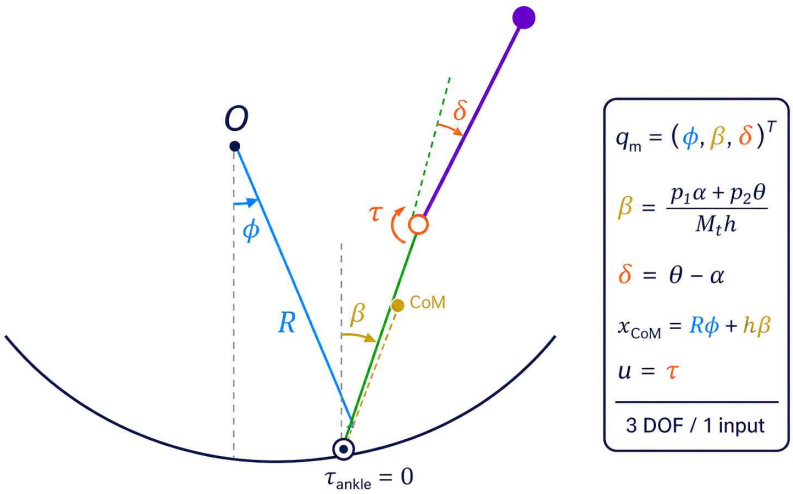


그림 8 균형 운동을 설명하기 위한 모드 좌표 (ϕ, β, δ). β는 몸 전체의 가중 무게중심 기울기이고, δ는 허리 접힘각이다.

그림 2

이 좌표에서 무게중심의 수평 위치가 한 줄로 정리된다.

x_CoM = R ϕ + h β (h = 직립 무게중심 높이)

줄이 발을 옮긴 거리 + 몸이 기운 효과. 이 한 줄이 이 연구 전체의 뼈대다.

표 2-1. 사람 스케일 형상 파라미터 (이론·MuJoCo 검증 기준)

기호	값	설명
M₁ / m₂ / M_t	30 / 45 / 75 kg	하체 / 상체(유효) / 총 질량
L₁, LC₁, LC₂	0.85, 0.30, ≈ 0.40~0.467 m	하체 길이, 하체·상체 질량중심 위치
p₁ / p₂ (유효값)	51.0 / 21.0 kg·m	정적 모멘트
h	0.96 m	직립 무게중심 높이
J_β / μ / J_δ	89.03 / 4.33 / 2.03 kg·m²	모드 좌표 관성 상수
R	0.3~2.0 m (가변)	줄 처짐 반경

모델 설정의 결론: 균형의 열쇠는 발의 위치이고, 발을 옮기는 유일한 수단은 허리다. 이제 허리를 어떻게 써야 하는가만 남았다.

3. 발을 무게중심 너머로 보내 쓰러짐 방향을 바꾼다 — FWE 메커니즘

허리를 어떻게 써야 하는가? **이 질문에 답하기 위해 한 가지 사고실험을 하였다.** 몸을 직접 세워 무게중심을 줄 위로 되돌릴 수 없다면, 허리를 써서 발과 줄을 무게중심 아래로 가져오면 되지 않을까? 더 나아가 발을 무게중심 너머까지 보내면 쓰러지던 방향 자체를 바꿀 수 있지 않을까?

허리를 접으면 몸 전체가 한쪽으로 움직이는 것이 아니라, 허리를 중심으로 상체와 하체가 서로 접힌다. 이 과정에서 하체의 기울기가 바뀌고, 줄의 꼭짓점에 고정된 발도 옆으로 움직여 줄과 함께 흔들린다. 발이 무게중심 너머로 이동하면 줄 장력의 수평 성분이 쓰러지던 몸을 반대 방향으로 가속하여 쓰러짐의 방향을 바꿀 수 있다. 즉, **허리 토크의 직접적인 효과는 '몸을 접는 것'이지만, 균형에 실제로 필요한 효과는 '발을 옮기는 것'이었다.**

이로부터 **허리 접기 → 하체 기울기 변화 → 발과 줄의 이동 → 줄의 복원력 변화 → 쓰러짐 방향 전환**이라는 경로를 생각하였다. 먼저 허리를 접어 발을 무게중심 너머로 보내고, 줄의 복원력이 쓰러짐을 되돌릴 때까지 기다린 뒤, 몸을 다시 편다. 우리는 이 세 단계를 **접기(Fold)-기다리기(Wait)-펴기(Extend)**, 줄여서 **FWE 메커니즘**이라 이름 붙였다.

조금 더 구체적인 원리는 다음과 같다.

① 몸이 기울어졌다는 것은 무게중심이 줄 선에서 옆으로 벗어나 있다는 뜻이다.

② 허리를 순간적으로 접는다고 가정하면, 외력이 들어올 시간이 없으므로 무게중심의 위치는 변하지 않고 발의 위치만 바뀐다.

③ 이때 발을 무게중심 바로 아래가 아니라 무게중심 너머까지 던지면, 애초에 기울어진 방향과 반대 방향으로 중력 토크가 생긴다 — 몸의 회전이 뒤집힌다.

④ 잠시 기다려 무게중심이 중앙으로 복귀하면, 다시 펴서 자세를 회복한다.

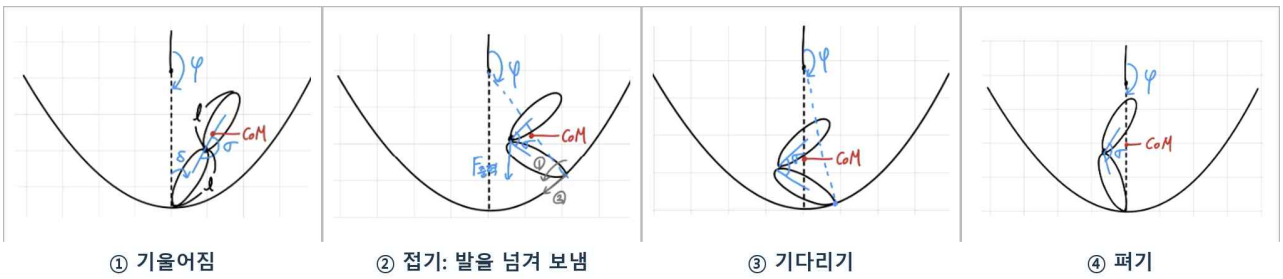


그림 9 FWE의 인과 사슬: 기울어진 상태에서 허리를 접어 발을 무게중심 너머로 보내고, 기다린 뒤 자세를 회복한다.

이 메커니즘이 성립하려면 두 가지 정량 질문에 답해야 한다. 얼마나 접어야 하는가? 얼마나 기다렸다 펴야 하는가? 그러나 '얼마나 접고 얼마나 기다릴 것인가'를 계산하려면, 그보다 먼저 무엇을 균형이라 부를 것인지부터 정해야 했다. 흔들림을 완전히 멈추는 것만이 균형이라면, 역동적으로 줄을 타는 광대의 모습은 끝내 설명할 수 없기 때문이다.

4. 완전히 정지할 필요 없이 떨어지지만 않으면 된다 — 한국 줄타기에 맞는 균형의 정의

우리 시스템에는 성질이 반대인 두 진자가 겹쳐 있다.

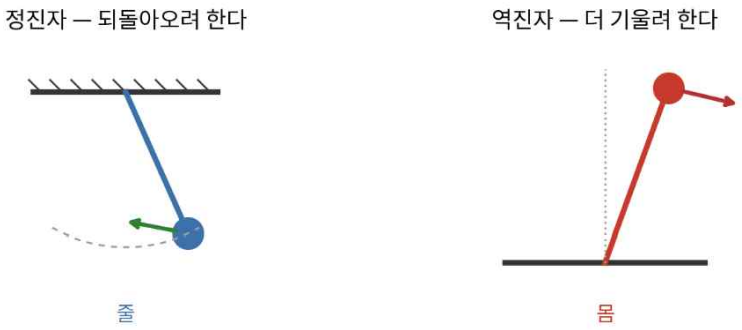


그림 10 가운데로 되돌아오는 정진자와 기울수록 더 쓰러지는 역진자의 대조.

줄(ϕ)은 안정 요소다. 처진 줄의 V자 꼭짓점에 발이 고정되어 반경 R의 원호를 따라 흔들리는 정진자이며, 기울면 중력이 가운데로 되돌린다. 시계는 주기(등시성 — 진폭과 무관)다. 쓰러짐 각 β는 불안정 요소다. 가중 무게중심 기울기 $\beta = (p_1 \alpha + p_2 \theta)/(M_t\ h)$는 역진자이며, 기울수록 더 기운다. 시계는 배가시간 0.2~0.3초다. 따라서 $(\phi, \beta) = (0, 0)$의 완전 직립 상태는 불안정 정적 평형점이다. 이 점에 "도달해서 머무는 것"을 균형의 목표로 삼는 순간, 우리는 존재하지 않는 것을 쫓게 된다 — 입력이 끊기면 즉시 발산하는 점이기 때문이다.

그래서 균형을 다시 정의했다. 줄이 흔들려도 되고 몸이 기울어 있어도 된다. 무게중심이 줄 위에서 안정적으로 머물러 있거나, 유계 범위에서 안정적으로 진동하고 있으면 그것이 균형이다. 즉, 우리 줄타기 시스템에서의 **균형은 안정 정적 평형에 도달하는 일이 아니라, 불안정 정적 평형 주변에서 흔들리는 범위를 일정한 이내로 유지하는 일**이다.

가. 입력 없이도 떨어지지 않고 흔들리는 상태가 가능한가

재정의가 서자 다음 질문이 나왔다. 입력(허리 토크) 없이도 떨어지지 않고 흔들리기만 하는 운동이 존재하는가? 후보를 세우고 하나씩 소거했다.

후보 ① — 몸은 수직($\beta = 0$), 줄만 흔들림. 기각. 흔들리는 발은 가속 중이고, 가속하는 받침 위에서 몸이 수직으로 남으려면 발목에서 붙잡는 힘이 필요한데 점접촉인 줄 위에 그런 힘은 없다. 발의 가속은 관성력이 되어 몸을 기울인다. (행렬로도 한 줄: $\beta = c_\beta \cdot \phi + \lambda^2 \beta$ 에 $\beta = 0$을 넣으면 $\beta = c_\beta \cdot \phi \neq 0$.)

후보 ② — 줄과 몸이 나란함($\beta = -\phi$). 기각. 접기 직후 진폭 최대 순간에는 관성력 토크와 중력 토크가 맞설 수 있으나, 발이 중앙으로 돌아갈수록 가속도가 줄어 관성력이 약해지므로 평형이 깨진다. 첫 순간에만 평형이고 유지되지 않는다.

후보 ③ — 나란함보다 덜 기운 어딘가. 접은 직후에도, 시간이 지난 뒤에도 돌림힘 평형이 유지되려면 몸의 기울기가 나란함보다 작은 어떤 비율이어야 한다는 데까지 추론이 갔다. 방향(줄과 엇갈림)과 형태(1보다 작은 비율)는 여기서 나왔다. 그러나 여기서 물러섰다 — 관성력이 시간에 따라 약해진다면 그 비율도 시간에 따라 계속 변해야 한다고 보았고, 그 함수를 구할 자신이 없었다.

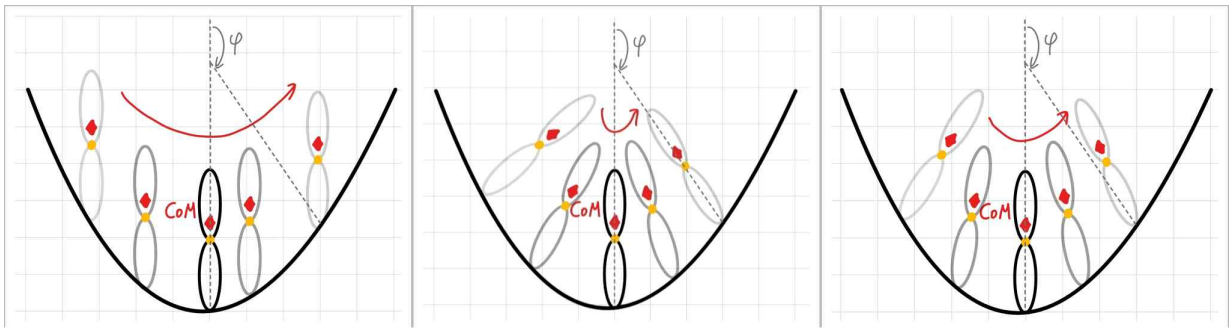


그림 11 입력 없이 떨어지지 않는 운동을 찾기 위한 세 후보: $\beta=0$, $\beta=-\phi$, 그리고 그 사이의 일정한 비율.

사고실험은 줄과 몸이 엇갈린 채 어떤 비율로 함께 움직여야 한다는 데까지 도달했다. 우리가 시간에 따라 달라져야 한다고 생각했던 그 비율이 실제로 일정하게 유지될 수 있는지 확인하려면, 줄과 몸의 운동을 따로 보지 않고 하나의 결합된 운동으로 살펴보아야 했다.

5. 흔들림 속에서 균형의 길을 찾다 — 결합 모드와 안정모드선

나중에 배웠다. 선형 연립 진동계에는 두 변수가 정확히 일정한 비율을 유지한 채 함께 움직이는 특별한 해가 언제나 존재한다. 물리학이 이미 이름까지 붙여 둔 개념 — 모드(mode)였다. 우리가 놓친 것은 관성력이 약해질 때 중력 토크도 정확히 같은 박자로 약해진다는 사실이었다. 줄의 각도 ϕ와 몸의 기울기 β가 같은 진동을 공유한다면 두 효과가 함께 작아지므로, 처음 정해진 비율은 시간이 지나도 깨지지 않는다.

결합된 (ϕ, β) 연립계 $M_{2\,2}\,\ddot{q} = G_{2\,2}\,q$ 의 고유값 문제를 풀면 부호가 반대인 두 모드가 나온다.

안정 모드 (고유값 $-\omega^2 < 0$): 줄과 몸이 일정 비율 $r = \phi/\beta$ 로 엇갈려 흔들리며 가운데로 되돌아오는 반진동. R = 0.7에서 $r = -2.12$.

불안정 모드 (고유값 $+\lambda^2 > 0$): 줄과 몸이 같은 쪽으로 협력하며 지수적으로 발산하는 운동. 배가시간 0.2~0.3초.

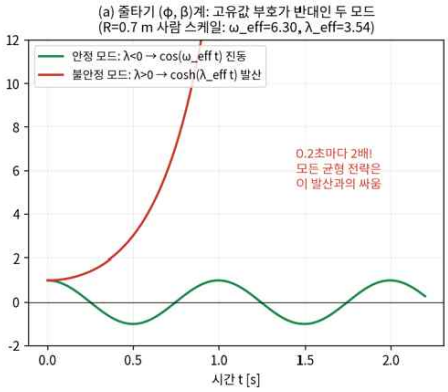


그림 12 결합계의 두 운동: 줄과 몸이 엇갈려 유계 진동하는 안정모드와 지수적으로 커지는 불안정모드.

(β, ϕ) 평면에 상태를 찍으면 안정 모드는 하나의 직선(안정모드선 $\phi = r \cdot \beta$)이 된다. 되돌아오는 운동은 전부 이 직선 위에 있고, 이 직선 위의 초기조건에서 출발한 상태는 영원히 직선 위에 머문다.

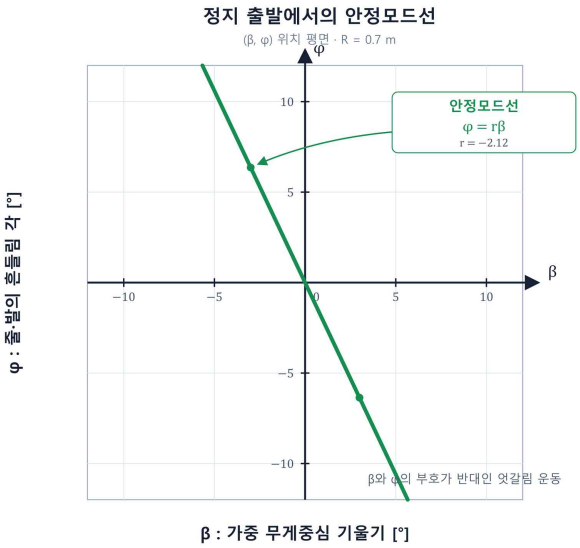


그림 13 상태 공간에서의 안정 모드 선

> *"균형 잡기란 상태를 불안정 모드 성분 없이 안정모드 위에 올려놓는 일이다. 그리고 접기는 바로 그 일을 하는 동작이다."*

모드 분석으로 균형이 놓이는 자리는 안정모드선이라는 한 줄로 정해졌다. 이제 남은 문제는 얼만큼 접으면 현재의 상태를 그 선 위로 옮길 수 있을 것인가이다. 허리 접기가 만드는 상태 변화와 안정 모드선의 만남을 상태공간의 기하로 살펴보자.

6. 기운 크기가 달라도 같은 비율로 — 상태공간의 기하와 최적 접기 비율 ε^*

앞의 모드 분석을 통해 균형이 놓이는 자리는 찾았다. 줄과 몸이 일정한 비율로 엇갈려 움직이는 안정모드선 $\phi = r\beta$ 위에 상태를 올려놓으면 불안정 모드 성분이 사라지고, 줄과 몸은 쓰러지지 않은 채 유계 진동한다.

이제 남은 질문은 분명했다.

허리를 접으면 상태는 어느 방향으로 움직이며, 안정모드선 위에 정확히 도달하려면 얼마나 접어야 하는가?

가. 접기량을 허리각이 아니라 '얼마나 지나쳤는가'로 나타내다

허리를 몇 도 접었는지만으로는 접기의 물리적 효과를 바로 알기 어렵다. 같은 허리각으로 접더라도 처음 몸이 얼마나 기울어져 있었는지에 따라 발이 무게중심을 지나치는 정도가 달라지기 때문이다.

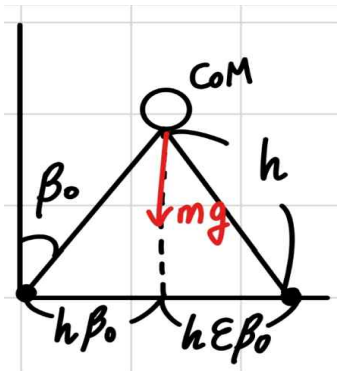
우리는 접기의 핵심이 허리각 자체가 아니라 **발을 무게중심 너머로 얼마나 보내는가**에 있다고 보았다. 이에 접기 전 발과 무게중심 사이의 거리를 기준으로, 접은 뒤 발이 무게중심을 지나친 거리의 비율을 ε로 새롭게 정의하였다.

ε = 접은 뒤 발이 무게중심을 지나친 거리 / 접기 전 발과 무게중심 사이 거리

이 값을 **과접기 비율**이라 하였다.

- ε=0이면 발이 무게중심 바로 아래까지만 이동한다.
- ε>0이면 발이 무게중심을 지나 반대편까지 이동한다.
- ε가 클수록 쓰러지던 방향을 반대로 바꾸기 위해 발을 더 멀리 보낸 것이다.

ε는 단순히 새로운 기호를 붙인 것이 아니다. '얼마나 접어야 하는가'라는 동작의 문제를, 초기 기울기와 비교할 수 있는 하나의 무차원 비율 문제로 바꾼 것이다.



위 그림과 같이 처음 몸이 오른쪽으로 β_0만큼 기울어져 있다면, 발과 무게중심 사이의 수평거리는 소각 근사에서 $h\beta_0$이다. 접은 뒤 발이 무게중심을 $h\varepsilon\beta_0$만큼 지나쳤다면 발의 전체 이동거리는 $\Delta x_foot=h(1+\varepsilon)\beta_0$ 가 된다. 접은 뒤에는 무게중심이 발의 반대편에 놓이므로 새로운 몸의 기울기는 $\beta_new=-\varepsilon\beta_0$ 가 된다.

나. 접기는 무게중심 등고선을 따라 상태를 옮긴다

우리 모델에서 몸 전체 무게중심의 수평위치는 $x_CoM=R\phi+h\beta$ 로 나타난다. 순간적으로 허리를 접는 동안에는 몸의 모양과 발의 위치는 달라지지만, 몸 전체 무게중심의 수평위치는 변하지 않는다. 따라서 접기 전후에는 $R\phi_new+h\beta_new=R\phi_0+h\beta_0$ 가 성립한다. 이를 변화량으로 쓰면 $R\Delta\phi+h\Delta\beta=0$ 이다.

즉, (β,ϕ) 상태공간에서 순간접기가 만드는 상태 이동의 기울기는 $\Delta\phi/\Delta\beta=-h/R$ 로 일정하다. 상태공간에서 $R\phi+h\beta$의 값이 같은 평행선들을 **무게중심 등고선**이라 하였다. 접기와 펴기에 의한 순간적인 상태 변화는 언제나 현재 상태를 지나는 무게중심 등고선을 따라 일어난다. 줄이 중앙에 있는 정지 출발 $\phi_0=0$을 생각하면 앞에서 정의한 $\beta_new=-\varepsilon\beta_0$를 이용하여 $\phi_new=h(1+\varepsilon)\beta_0/R$ 을 얻는다. 따라서 과접기 비율 ε를 적용한 순간접기의 상태 변화는 다음 두 식으로 완전히 표현된다.

$$\beta_new=-\varepsilon\beta_0$$
$$\phi_new=h(1+\varepsilon)\beta_0/R$$

첫 번째 식은 접은 뒤 발이 무게중심을 얼마나 지나쳤는지를 나타내고, 두 번째 식은 그 발

이동으로 줄과 발의 흔들림각 ϕ가 얼마나 변했는지를 나타낸다.

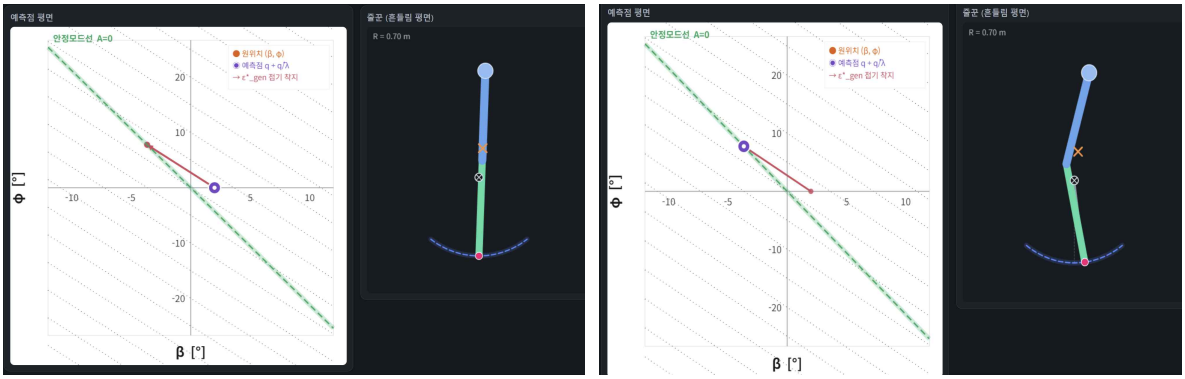


그림 14 접기 전과 ε 접기 후의 시뮬레이터 장면. 왼쪽에는 (β, ϕ) 평면의 무게중심 등고선과 상태점 이동, 오른쪽에는 실제 2링크 자세와 동일한 x_CoM 표시

시뮬레이터에서는 상태공간과 2링크 자세를 한 화면에 함께 나타냈다. 오른쪽 자세에서는 허리가 접히고 발과 줄이 옆으로 이동한다. 동시에 왼쪽 상태공간에서는 점이 회색 무게중심 등고선을 따라 움직인다. 몸과 발의 위치는 크게 달라졌지만 접기 전후의 x_CoM은 같았다. 실제 동작에서 일어난 발의 이동과 상태공간의 점 이동이 같은 사건임을 확인할 수 있다.

다. 그림으로 보면 교점, 식으로 쓰면 ε^*

모드 분석이 정해 준 목표는 안정모드선 $\phi = r\beta$ 이다. 순간접기가 움직일 수 있는 길은 현재 상태를 지나는 무게중심 등고선이다. 따라서 필요한 접기량은 **무게중심 등고선을 따라 이동한 상태점이 안정모드선과 만나는 교점**으로 정해진다.

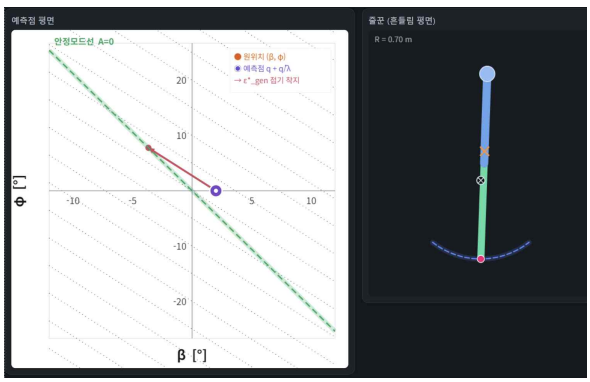


그림 15 안정모드선과 무게중심 등고선의 교점

R=0.7 m에서 두 직선의 기울기는 다음과 같다.

- 안정모드선의 기울기: $r = -2.12$
- 무게중심 등고선의 기울기: $-h/R = -1.37$

두 직선의 기울기가 서로 다르므로, 현재 상태에서 무게중심 등고선을 따라 적당한 만큼 이동하면 안정모드선과 단 하나의 점에서 만난다. 그림으로 보면 이 교점이 필요한 접기량을 결정한다.

같은 내용을 식으로 나타내면 더욱 간단하다. 접은 뒤의 상태가 안정모드선 위에 놓이려면 $\phi_{new} = r\beta_{new}$ 이어야 한다. 앞에서 구한 두 상태변화식을 대입하면 $h(1+\varepsilon)\beta_0/R = r(-\varepsilon\beta_0)$ 이고, 양변에 R을 곱하면 $h(1+\varepsilon)\beta_0 = -rR\varepsilon\beta_0$ 가 된다. $\beta_0 \neq 0$이므로 양변에서 β_0를 소거하

면 $h(1+\varepsilon)=-rR\varepsilon$ 이고, 이를 ε에 대하여 풀면 우리 연구의 메인 식을 얻는다.

$$\boxed{\varepsilon^* = -\frac{h}{rR+h}}$$

이것이 상태를 안정모드선 위에 정확히 올려놓는 최적 과접기 비율 ε^*이다. 여기서 '최적'은 에너지가 가장 작다는 뜻이 아니라, 접기 직후 불안정 모드 성분을 정확히 0으로 만드는 비율이라는 뜻이다.

복잡한 3자유도 동역학에서 출발했지만, 필요한 접기 비율은 결국 안정모드선과 무게중심 등고선이라는 두 직선의 교점, 즉 하나의 1차식으로 결정되었다.

라. 초기 기울기 β_0가 사라지다

ε^*를 구하는 과정에서 가장 놀라운 결과는 초기 기울기 β_0가 완전히 소거된다는 점이다. **최적 접기 비율 ε^*는 처음 몸이 얼마나 기울어졌는지와 관계없이 시스템 파라미터 h, R, r만으로 정해진다.**

몸이 조금 기울어졌다면 발의 이동량도 작아지고, 많이 기울어졌다면 발의 이동량도 커진다. 그러나 처음 기울어진 양에 대해 발을 **몇 배만큼 지나쳐 보내야 하는가**는 언제나 같다. 따라서 매번 새로운 접기량을 계산하는 대신, 현재 기울기에 일정한 비율을 곱하는 방식으로 접기를 정할 수 있다.

마. 접기 한 번으로 불안정 모드를 없애다

ε^*만큼 접으면 접기 직후의 상태는 안정모드선 위에 놓인다. 따라서 불안정 모드 성분이 사라지고, 줄과 몸은 서로 반대 방향으로 일정한 비율을 유지하며 유계 진동한다.

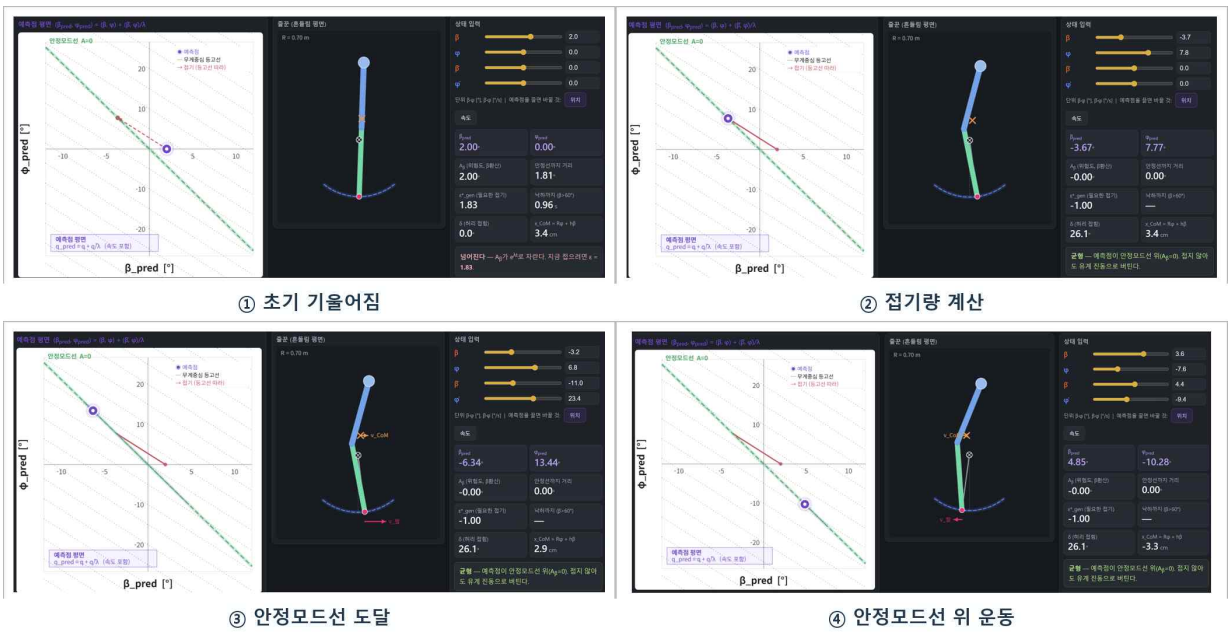


그림 17 초기 기울기에서 ε^*를 계산하고, 접기로 상태를 안정모드선 위에 옮긴 뒤 유계 진동에 들어가는 과정.

균형 잡기란 상태를 불안정 모드 성분 없이 안정모드 위에 올려놓는 일이다. 그리고 접기는 바로 그 일을 하는 동작이다.

이 결과는 처음 세운 FWE의 역할도 분명하게 나누어 준다.

- 접기는 상태를 안정모드 위로 옮긴다.
- 기다리기는 줄과 중력이 몸을 되돌릴 시간을 준다.
- 펴기는 접힌 자세를 회복한다.

특히 이상적인 순간접기에서는 ε^*만큼 한 번 접은 뒤 몸을 펴지 않더라도 상태가 안정모드선 위에서 계속 유계 진동한다. 즉, 펴기는 균형을 만들기 위한 필수 동작이라기보다 접힌 자세를 회복하기 위한 동작이다. 이 성질은 뒤에서 증분 접기 제어를 구성하는 출발점이 된다.

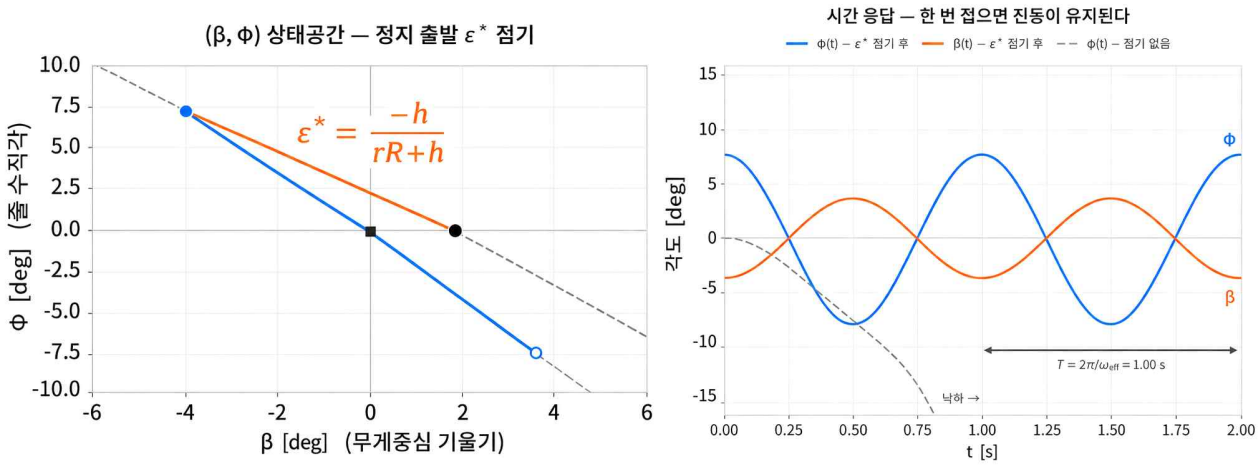


그림 18 ε^* 접기 후 ϕ와 β가 반대 위상으로 일정한 진폭을 유지하는 시간응답]

바. '얼마나 접어야 하는가'에 대한 첫 번째 완전한 답

모드 분석은 균형이 놓이는 자리가 안정모드선이라는 사실을 알려 주었다. 무게중심 등고선은 허리 접기가 상태를 옮길 수 있는 방향을 알려 주었다. 그리고 우리가 정의한 과접기 비율 ε는 이 두 직선의 교점을 하나의 수로 나타낼 수 있게 하였다.

그 결과, '얼마나 접어야 하는가'에 대한 답은 $\varepsilon^* = -h/(rR+h)$ 라는 닫힌형 해로 정리되었다.

이 식의 가장 중요한 의미는 숫자 하나를 계산했다는 데 있지 않다. 처음 기울어진 크기가 달라도 같은 비율로 접으면 된다는 사실, 그리고 허리 접기 한 번으로 3자유도 시스템의 상태를 불안정 모드가 없는 곳으로 옮길 수 있다는 사실을 밝혔다는 데 있다.

다만 ε^*는 **줄과 몸이 정지한 상태에서 순간적으로 한 번 접는다**는 이상적인 조건의 답이다. 실제 줄 위의 몸은 이미 움직이고 있으며, 같은 위치에 있더라도 속도가 다르면 다음 순간의 운명이 달라진다. 따라서 다음 장에서는 위치뿐 아니라 속도까지 반영하여 안정모드선을 읽는 **예측점 평면**으로 이 결과를 확장한다.

7. 위치와 속도를 한 점에 담아 — 예측점 평면, 차원 축소와 일반화 접기 비율 ε^*_{gen}

6장에서 구한 $\varepsilon^* = -h/(rR+h)$ 는 줄과 몸이 정지한 상태에서 출발할 때 필요한 접기 비율이었다. 처음 기울어진 크기 β_0는 달라도 항상 같은 비율로 접으면 상태를 안정모드선 위에 올려놓을 수 있었다. 그러나 실제 줄 위의 몸은 한순간도 완전히 정지해 있지 않는다. 줄과 몸이 이미 움직이고 있다면 현재의 위치가 같더라도 움직이는 방향과 속도에 따라 다음 순간의 상태는 전혀 달라진다. 따라서 정지 상태에서 얻은 ε^*를 실제 운동에 사용하려면 속도까지 반영한 새로운 균형 판정법이 필요했다.

가. 같은 위치에서도 운명은 다르다

(β, ϕ) 위치 평면에서는 몸의 기울기와 줄의 흔들림을 하나의 점으로 나타낼 수 있다. 하지만 실제 상태는 $(\phi, \beta, \dot{\phi}, \dot{\beta})$ 의 네 변수로 이루어진 4차원 상태이다. (β, ϕ) 평면은 이 가운데 위치만 보여 주는 그림자에 불과하며 속도는 화면에서 사라진다. 따라서 상태점이 안정모드선 $\phi = r\beta$ 위에 있다는 사실만으로는 균형을 판정할 수 없다. 같은 점에 있더라도 안정모드선을 따라 움직이는 상태는 유계 진동을 하지만, 안정모드선에서 멀어지는 속도를 가진 상태는 곧 발산한다. 균형은 어디에 있는지만으로 결정되지 않는다. 어느 방향으로 얼마나 빠르게 움직이고 있는지도 함께 알아야 한다.

문제는 네 개의 상태변수를 그대로 사용하면 균형을 그림 한 장으로 설명하기 어렵다는 데 있었다. 우리는 위치와 속도를 하나의 평면 위에 함께 나타낼 방법을 찾기로 하였다.

나. 속도를 위치로 바꾸어 더하다 — 예측점의 정의

불안정 모드는 $e^{(\lambda_eff\ t)}$의 비율로 성장한다. 여기서 λ_eff는 불안정 모드가 얼마나 빠르게 커지는지를 나타내는 성장률이다. 따라서 현재 속도를 λ_eff로 나누면, 그 속도가 불안정 모드의 시간척도 안에서 만들어 내는 '위치에 해당하는 양'으로 바꿀 수 있다.

이에 우리는 현재 위치에 속도를 λ_eff로 나눈 값을 더한 점을 정의하였다.

$q_pred = q + \dot{q}/\lambda_eff$ 여기서 $q = (\phi, \beta)^T$ 이므로 각 성분은 $\phi_pred = \phi + \dot{\phi}/\lambda_eff$, $\beta_pred = \beta + \dot{\beta}/\lambda_eff$ 이다. 우리는 이 점을 예측점이라 하고, (β_pred, ϕ_pred)를 표시한 평면을 예측점 평면이라 하였다.

'예측점'이라는 이름만 보면 일정 시간 뒤의 위치를 근사한 것처럼 보일 수 있다. 처음의 직관도 "현재 속도로 계속 움직인다면 조금 뒤 어디에 있을까?" 라는 생각이었다. 그러나 모드식을 정리하면서 이 점이 단순한 미래 위치의 근사가 아니라, 불안정 모드의 성장 성분을 정확히 골라내는 좌표임을 알게 되었다.

다. 예측점이 불안정 모드만 골라내는 이유

불안정 모드의 운동을 한 변수 z로 나타내면 $z(t) = Ae^{(\lambda_eff\ t)} + Be^{(-\lambda_eff\ t)}$ 로 쓸 수 있다. 첫 번째 항은 시간이 지날수록 커지는 성장 성분이고, 두 번째 항은 시간이 지날수록 작아지는 감쇠 성분이다. 이를 미분하여 λ_eff로 나누면 $\dot{z}(t)/\lambda_eff = Ae^{(\lambda_eff\ t)} - Be^{(-\lambda_eff\ t)}$ 이다. 두 식을 더하면 $z(t) + \dot{z}(t)/\lambda_eff = 2Ae^{(\lambda_eff\ t)}$ 가 된다. 감쇠 성분 B는 정확히 사라지고 성장 성분 A만 남는다. 이것이 위치와 속도를 $q + \dot{q}/\lambda_eff$의 형태로 더한 이유이다. 안정모드선에 수직인 벡터를 u_2 라 하면, 현재 상태에 포함된 불안정 모드의 성장 진폭은 $u_2{}^T q_pred = 2A$ 로 나타난다. 따라서 $u_2{}^T q_pred = 0$ 이면 성장 성분 A가 0이고, 예측점은 안정모드선 위에 놓인다.

즉, 예측점이 안정모드선 위에 있다 ⇔ 불안정 모드의 성장 성분이 없다 라는 정확한 판정이 가능해진다.

라. 이것이 우리가 말한 차원 축소다

원래 균형을 판단하려면 네 개의 변수 (ϕ, β, ϕ, β) 를 모두 확인해야 했다. 예측점은 위치와 속도를 결합하여 이를 두 개의 좌표 (ϕ_pred, β_pred) 로 줄인다. 그리고 예측점이 안정모드선에서 얼마나 떨어져 있는지를 구하면, 균형의 위험도는 다시 하나의 값인 불안정 모드 진폭 A로 줄어든다. 이를 정리하면 다음과 같다. 4차원 상태 (ϕ, β, ϕ, β) → 2차원 예측점 (ϕ_pred, β_pred) → 1차원 불안정 모드 진폭 A 이것이 본 연구에서 사용한 차원 축소이다.

이 차원 축소는 원래 상태의 정보를 단순히 버리는 과정이 아니다. 안정모드의 세부적인 진폭과 위상은 그대로 존재하지만, "앞으로 발산하여 떨어질 것인가?" 라는 질문에 필요하지 않은 정보는 제외하고, 발산을 결정하는 성장 성분만 남긴 것이다. 균형 판정에 관한 한, 네 개의 상태변수는 예측점과 안정모드선 사이의 거리 하나로 줄어든다. 이제 현재 상태가 얼마나 위험한지는 예측점이 안정모드선에서 얼마나 떨어져 있는가로 읽을 수 있다. 안정모드선 위에 있으면 A=0이고, 직선에서 멀어질수록 제거해야 할 불안정 성분도 커진다.

마. 움직이는 상태의 접기량을 구하다 — ε*_gen

차원 축소를 통해 균형 판정은 간단해졌다. 그렇다면 움직이는 상태에서는 얼마나 접어야 할까? 정지 상태에서는 접은 뒤의 현재점을 안정모드선 위에 놓으면 되었다. 움직이는 상태에서는 접은 뒤의 예측점을 안정모드선 위에 놓아야 한다. 순간접기에서는 위치가 바뀌지만 속도는 그대로 유지된다. 과접기 비율을 ε라 하면 접기 직후의 상태는 β_new=$-\varepsilon\beta$_i ϕ_new=ϕ_i+h(1+ε)β_i/R β_new=β_i ϕ_new=ϕ_i 이다. 따라서 접기 직후의 예측점은 β_pred,new=$-\varepsilon\beta$_i+β_i/λ_eff ϕ_pred,new=ϕ_i+h(1+ε)β_i/R+ϕ_i/λ_eff 가 된다. 접기 후 예측점이 안정모드선 ϕ_pred=rβ_pred 위에 놓여야 하므로 ϕ_i+h(1+ε)β_i/R+ϕ_i/λ_eff =r($-\varepsilon\beta$_i+β_i/λ_eff) 를 만족해야 한다. 이 식을 ε에 대하여 풀면 ε*_gen = $-[\phi$_i+hβ_i/R+ϕ_i/λ_eff$-$rβ_i/λ_eff]/[β_i(h/R+r)] 을 얻는다.

이것이 위치와 속도를 모두 반영한 **일반화 최적 과접기 비율 ε*_gen**이다.

바. ε는 ε_gen 안에 그대로 들어 있다

ε*_gen은 6장의 ε*를 버리고 새로 만든 공식이 아니다. ε*를 움직이는 상태까지 확장한 공식이다. 줄이 중앙에 있고 몸과 줄이 모두 정지해 있다면 ϕ_i=0, ϕ_i=0, β_i=0 이므로 ε*_gen은 ε*_gen=$-$h/(rR+h)=ε* 로 정확히 환원된다.

반대로 상태가 이미 순수한 안정모드로 진동하고 있다면 예측점은 어느 순간에도 안정모드선 위에 있다. 이 상태를 공식에 넣으면 ε*_gen=$-$1 이 나온다. 우리의 정의에서 ε=$-$1이면 발의 이동량은 Δx_foot=h(1+ε)β_i=0 이므로 아무것도 하지 않는다는 뜻이다. 이미 균형 잡힌 상태에는 공식도 ** "접지 말라" **고 답한다.

따라서 두 공식의 관계는 다음과 같다.

정지한 상태에서는 ε*가 현재점을 안정모드선 위로 옮긴다.

움직이는 상태에서는 ε*_gen이 예측점을 안정모드선 위로 옮긴다.

6장에서 발견한 '안정모드선과 무게중심 등고선의 교점'이라는 기하는 7장에서도 그대로 유지된다. 달라진 것은 현재 위치점 대신 속도까지 담은 예측점을 사용한다는 점뿐이다.

사. 네 개의 상태에서 하나의 접기 명령으로

7장에서 이루어진 차원 축소의 최종 결과는 다음과 같다.

$$(\phi, \beta, \phi, \beta) \rightarrow (\phi_pred, \beta_pred) \rightarrow A \rightarrow \varepsilon^*_gen$$

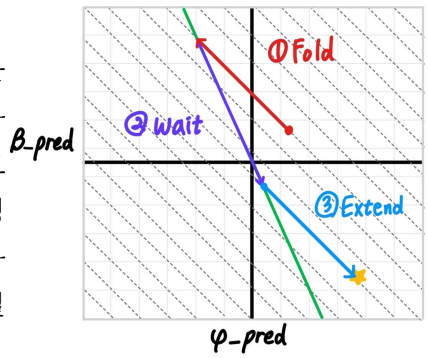
네 개의 상태변수는 예측점 평면의 한 점으로 줄어들고, 그 점과 안정모드선 사이의 거리는 불안정 모드 진폭 A가 된다. 그리고 ε^*_gen은 그 거리를 한 번의 접기로 0으로 만드는 비율이다.

6장의 ε^*가 "정지한 상태에서 얼마나 접어야 하는가?"에 답했다면, 7장의 ε^*_gen은 더 일반적인 질문에 답한다.

"지금 이 위치에서, 이 속도로 움직이고 있다면 얼마나 접어야 하는가?"

다만 ε^*_gen도 아직 순간적으로 한 번 접고 그 자세를 유지한다는 조건의 답이다. 하지만 광대는 접은 채로 줄을 타지 않는다. 다시 몸을 펴고도 균형을 잃지 않으려면, 접기에서 시작한 이야기를 기다리기와 펴기까지 이어 하나의 사이클로 닫아야 한다.

8. 접고, 기다리고, 펴는 박자를 닫다 — 순간동작 가정의 완전 FWE 사이클



우리 FWE 메커니즘은 접고-기다리고-편다였다. 이제 접기를 완벽하게 했으니 펴야한다. 그런데 사이클을 수식으로 닫는 과정에서 함정을 만났다. 펴기는 접기의 정확한 역벡터다. 그러므로 ε^*로 불안정 성분을 정확히0으로 만든 뒤 펴면, 펴기의 고정킥이 지웠던 발산 성분을 원래 크기로 되살린다. 정확히 소거하고 나서 편다는 가장 자연스러운 전략이 정확히 그 이유로 실패한다.

따라서 펴기가 만들어 낼 불안정 효과까지 접기 단계에서 미리 계산해야 한다. 해결책은 안정모드선을 조금 지나쳐 접는 것이다. 펴기의 효과를 없애려면 처음부터 안정모드선 위에 정확히 멈추면 안 된다. 안정모드선을 조금 지나쳐 반대편까지 접어, 펴기가 만들 불안정 성분과 반대부호인 성분을 일부 남겨 두어야 한다. 동작의 순서는 다음과 같다. ε^*_gen보다 더 접어 안정모드선을 지나친다. 반대편에 남겨 둔 불안정 성분이 기다리는 동안 커지게 한다. 그 크기가 펴기가 만들 불안정 성분과 같아지는 순간 몸을 편다. 두 성분이 서로 상쇄되면서 사이클이 끝난 뒤 다시 안정모드선 위에 놓인다.

즉, 완전한 FWE는 단순히 접었다가 다시 펴는 동작이 아니다. 과접기 → 기다리기 → 펴기의 순서로 이루어진다.

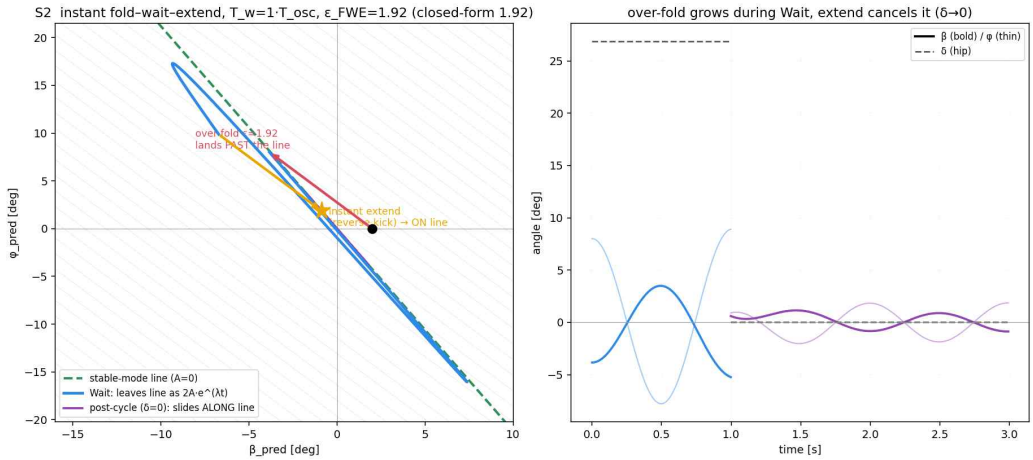


그림 20 순간접기 완전 사이클: 과접기-대기-펴기로 펴기 뒤의 상태를 안정 모드선 위에 착지시킨다.

이 그림에서 접기는 상태점을 안정모드선 반대편으로 보낸다. 기다리는 동안 점과 안정모드선 사이의 거리는 불안정 모드의 성장률에 따라 커진다. 마지막으로 펴기가 상태점을 반대 방향으로 이동시키면, 기다리며 커진 성분과 펴기의 효과가 정확히 상쇄되어 안정모드선 위에 도착한다.

그러면 얼마를 더 접어야할까? 더 접는 비율을 ε_FWE라 하면 다음과 같은 닫힌 식을 얻을 수 있다. 이 식에서 T_w를 제외하면 모두 시스템에 의해 결정되는 상수이다. 따라서

$$1 + \varepsilon_FWE = (1 + \varepsilon^*_gen) / (1 - e^{\wedge}(-\lambda T_w))$$

이 식이 완전 FWE 사이클 접기 비율이다.

다음은 $\dot{\beta}, \dot{\phi}$까지 고려한 즉, 예측점 평면에서의 시뮬레이션이다. β, ϕ의 초기조건은 같지만, $\dot{\beta}, \dot{\phi}$이 0이 아닌 상태로 출발하여, 초기조건이 다르다.

ϵ^*를 구했을 때와 마찬가지로 과접기식도 검증을 해보았다.

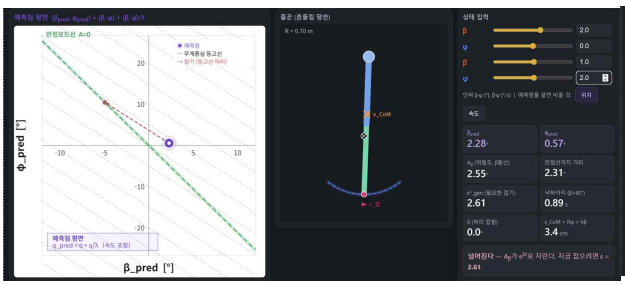


그림 21 초기 몸이 기울어진 상태

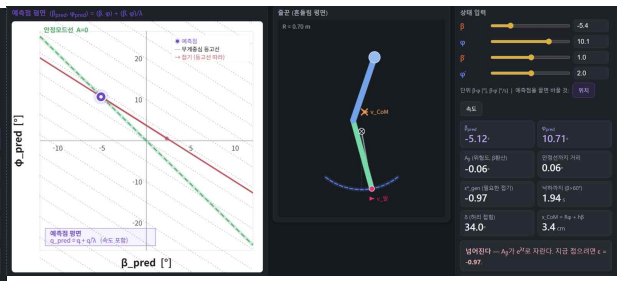


그림 22 ϵ_{FWE}만큼 접은 상태

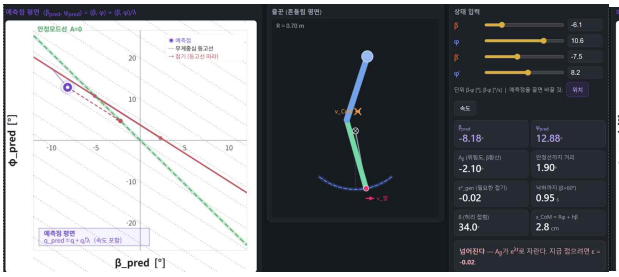


그림 23 기다리는 상태

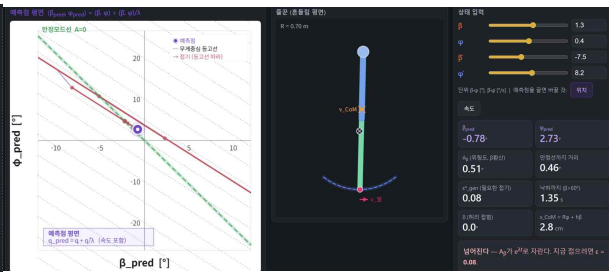


그림 24 몸을 편 후 안정 모드선 위에 있는 상태

이로써 순간적으로 접고 펼 수 있다는 가정 아래에서는 ‘얼마나 접고, 얼마나 기다리고, 언제 펼 것인가’에 대한 이론적 답이 닫혔다. 그러나 실제 모터는 순간적으로 움직이지 않으며, 한 번의 완벽한 동작을 언제나 정확히 재현할 수도 없다. 이제부터는 원리를 더 일반화하는 문제가 아니라, 완성된 원리를 유한한 속도와 실행오차가 있는 현실에 적용하는 문제다.

9. 물리 엔진 시뮬레이션을 통한 메커니즘 적용 가능성 검증

메커니즘이 한 단계 발전할 때마다 그것을 검증할 시뮬레이션을 새로 제작하였고, 그 결과 현재까지 총 19개 버전(V1~V19)이 만들어졌다. 아래는 그중 발전의 마디가 된 버전들이다.

가. 선행 연구 재현(V1)

탐구의 출발은 선행 연구를 그대로 구현해 보는 것이었다. 파올레티 논문의 원호 위 단일 역진자 모델을 시뮬레이션 V1으로 제작하였다.

그러나 시뮬레이션으로 구현한 1체 모델은 몸이 쓰러졌을 때 발목의 힘으로 몸을 일으켜 세웠다. 논문의 부록을 참고한 결과, 복원 토크를 "팔 또는 장대 회전의 반작용"이라는 외부 토크로 가정하고 있었다. 이는 장대가 없는 한국 줄타기에서는 존재할 수 없는 힘이기에 새로운 모델이 필요했다. 따라서, 허리 관절을 도입하게 되었고, 2체 모델로 발전하게 된 계기가 되었다.

나. LQR 제어로 균형을 확인(V4)

1) 가제어성 판별

2체 모델을 시뮬레이션에 올리고 먼저 물었다. 허리 토크는 줄에 직접 닿지 않는데, 발까지 제어할 수 있는가? 가제어성 행렬의 rank가 6(전체 상태 수)으로 나와, 관성 커플링이 단일 입력을 줄까지 전달함을 확인하였다. 하지만 가제어성은 “가능하다“는 존재성 진술일 뿐, 어떻게 잡는지는 알려주지 않는다.

2) PID의 실패와 최적제어(LQR)의 성공

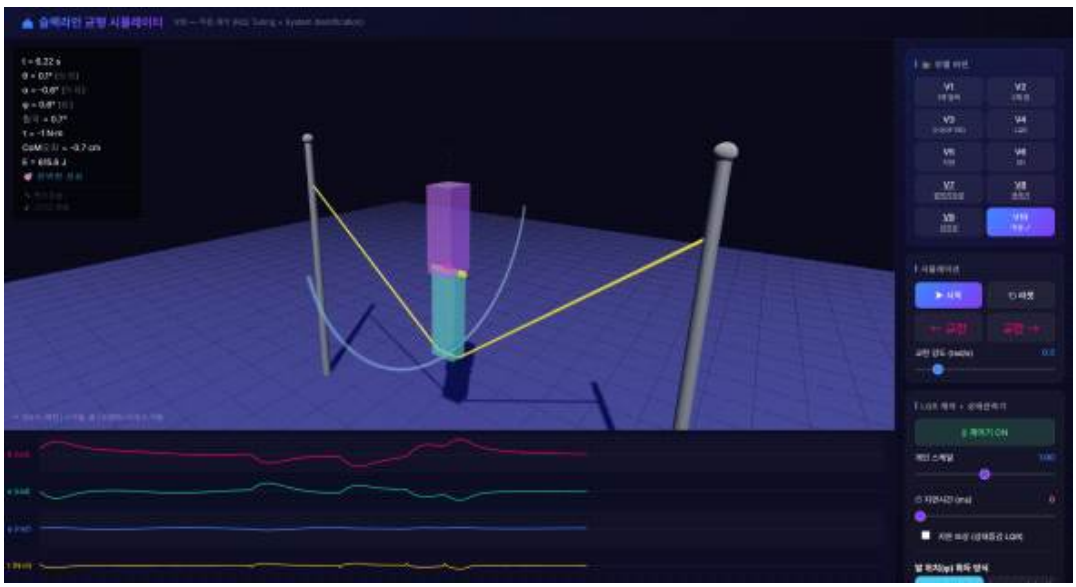


그림 25 LQR제어 시뮬레이션

단일 오차 기반 PID는 발산하였다. 이 시스템의 균형은 “허리 토크 → 발 이동 → 중력 토크 반전 → 기울기 복원“의 다단계 인과이고 각 단계에 지연이 있는데, PID는 그 지연을 기다리지 못하고 과조작하기 때문이다. 반면 여섯 상태(세 각도와 세 각속도)를 동시에 피드백하는 최적 제어(LQR)는 발이 이미 올바른 방향으로 움직이고 있으면 토크를 줄여 방해하지 않았고, 허리 토크 하나만으로 균형과 외란 복원이 확인되었다. 모델이 설 수 있다는 사실이 여기서 확정되었다 — 다만 **LQR은 어떻게 서는지를 설명하지 못하였고, 그것이 FWE 메커니즘 제안의 이유가 되었다.**

다. MuJoCo 프로그램을 통한 이론 검증(V14)

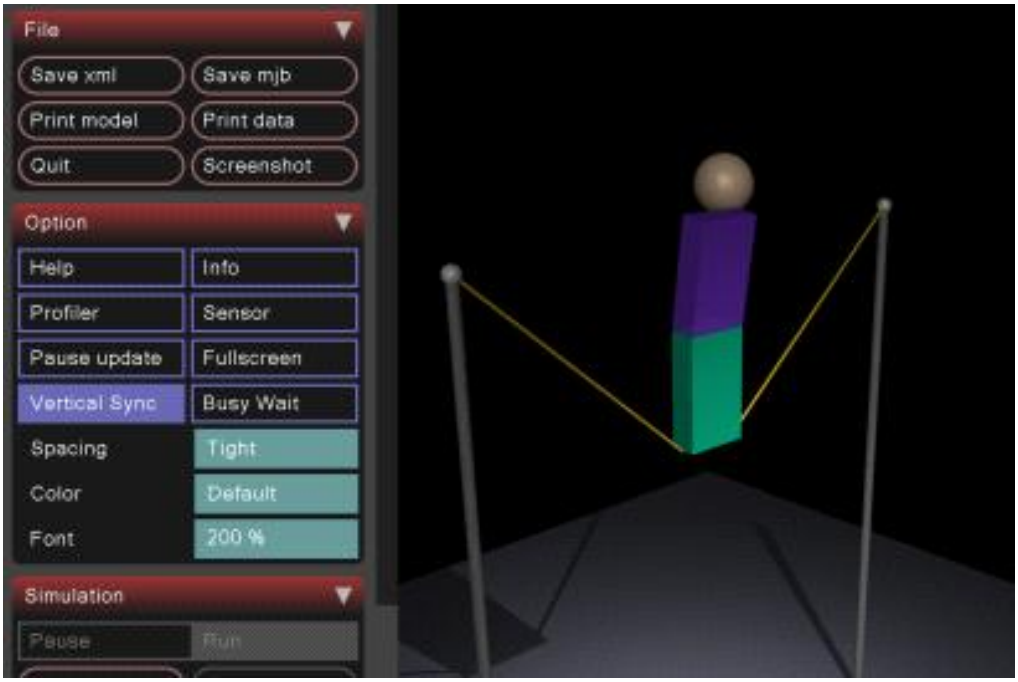


그림 26 MUJOCO 시뮬레이션(V14)

이론에서 유도한 최적 접기 공식 $\varepsilon^* = -h/(r \cdot R + h)$는 소각 근사 위에 서 있다. 이 공식이 근사 밖의 현실에서도 옳은지 확인하기 위해, 자체 시뮬레이션과 독립적인 로봇 물리 엔진 MuJoCo에 동일 스펙을 이식하고, 접기 비율을 스캔하여 수치적 최적값을 찾아 공식과 대조하였다. 결과는 $R \geq 0.6$ m 전 구간에서 오차 ±2% 이내의 일치였다. 흥미로운 것은 $R = 0.3$ m에서 오차가 10%로 벌어진다는 점인데, 이 조건에서는 진동 진폭이 커져 소각 근사 자체가 깨진다 — 공식이 자기의 유효 범위를 스스로 알려주는 것으로, 이론의 정당성과 한계가 함께 확보되었다.

라. FWE 구현(V15~V17)

1) 유한시간 접기

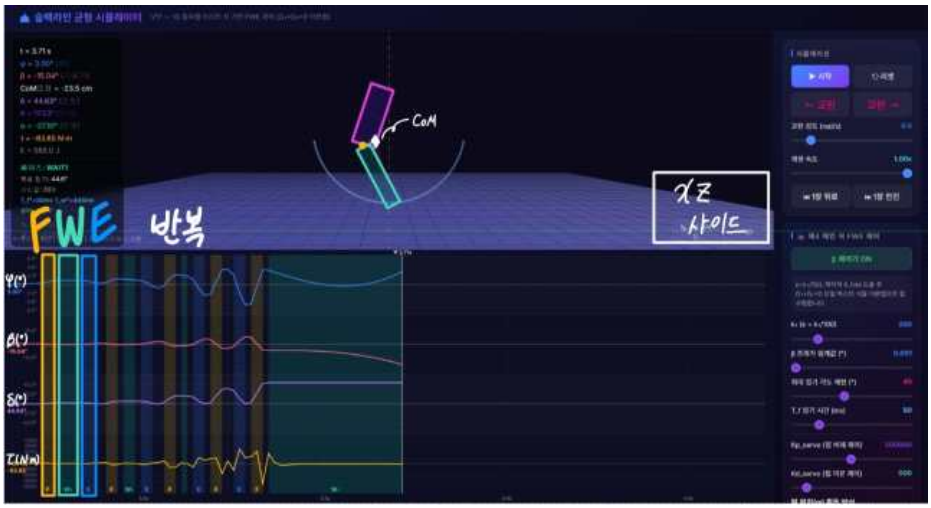


그림 35 유한시간접기의 시뮬레이션 검증

이론의 접기는 순간이지만 실제 서보는 시간이 걸린다. 접는 시간 T_f 동안에도 불안정 모드는 자라므로, 항상 더 접어야 한다. 얼마나 더 접어야 하는지는 시간에 따라 지수적으로 자라는 오차를 적분해야 하는 문제여서, 이 보정 계수 γ의 닫힌형 유도는 AI(Claude)에게 맡겼다. 대신 우리는 그 결과를 검증하는 책임을 맡았다 — T_f → 0의 극한에서 $\gamma \to 1$로 순간 접기 공식이 정확히 복원되는지 검산하고, 시뮬레이션의 수치 최적값과 대조하였다. 사람 스케일의 T_f ≈ 0.25초에서 +53%의 과접기가 필요하다는 결과는 "빠른 서보가 필수"라는 하드웨어 요구의 정량적 근거가 되었다. 상태공간에서 보면 순간 접기의 직선 점프가 유한시간에서는 곡선 경로가 되고, 그만큼 밀리는 도착점을 접기량으로 미리 갚는 셈이다.

2) 완전 사이클에서 반복 제어로

펴기까지 포함한 완전 사이클(접고-기다리고-펴기)을 닫힌 공식으로 완성하였으나, 단발의 완벽한 사이클에는 치명적 약점이 있었다. 대기 구간이 접기 오차를 지수적으로 증폭한다 — 대기가 줄 진동 한 박자면 오차는 최대 34배가 된다. 해법은 박자의 재배열이었다. 대기를 증폭 구간(접기-펴기 사이)에서 빼내어 사이클 바깥으로 옮기고, 매번 위험도를 다시 재서 다시 접는 반복 피드백으로 바꾸자, 접기에 20%의 오차를 섞어도 수렴하였다. 이 과정에서 수렴 조건 $|G(1-\rho)| < 1$이 가리키는 방향이 분명해졌다. 증폭 배수 G는 사이클 시간의 지수함수이므로, 성능의 핵심 변수는 접기의 정확도가 아니라 사이클 한 바퀴가 도는 시간이다. 사이클이 짧을수록 시스템은 오차에 관대해진다.

마. 전물리와 실측을 통합하다

1) 실측에서 드러난 문제점

실물 로봇을 제작하고 그 실측값 — 질량, 무게중심, 관성모멘트, 그리고 줄의 마찰 — 을 모두 반영한 전물리 시뮬레이션 V19를 구축하였다. 그러자 실측된 줄 마찰이 가정값의 약 1/24에 불과하다는 사실과 함께, 실측 마찰의 세계에서 완전 사이클 계열의 성적이 절반 이하로 무너지는 것이 드러났다. 사이클 시간을 더 줄여야 했다.

2) 처음의 접근에서 찾은 해법 - 증분 접기

그런데 사이클 시간을 줄이는 궁극의 방법은, 사실 가장 처음의 단일 접기 정리 속에 이미 있었다. "ε^*로 정확히 접으면, 펴지 않아도 몸은 영원히 유계로 진동한다." 유도 당시에는 흥미로운 여담이었던 이 성질을 다시 꺼내 보자, 우리가 그동안 펴는 행위를 굳이 고집하고 있었음을 깨달았다 — 펴기는 균형의 필수 동작이 아니라 자세 회복의 편의였던 것이다. 그래서 펴기를 버렸다. 단일 접기 후, 불안정도가 성장한 만큼의 오차분만 현재 자세에서 더 접는다. 위험이 조용해지면 천천히 자세를 되돌릴 뿐이다. 이것이 증분 접기이며, 펴기가 사라져 사이클이 절반 이하로 줄면서 오차 허용폭은 ±6%에서 ±37%로 여섯 배 넓어졌다 — 실물의 부정확한 실행을 견디는 힘이다.

3) 제어에서 엿보이는 광대의 모습

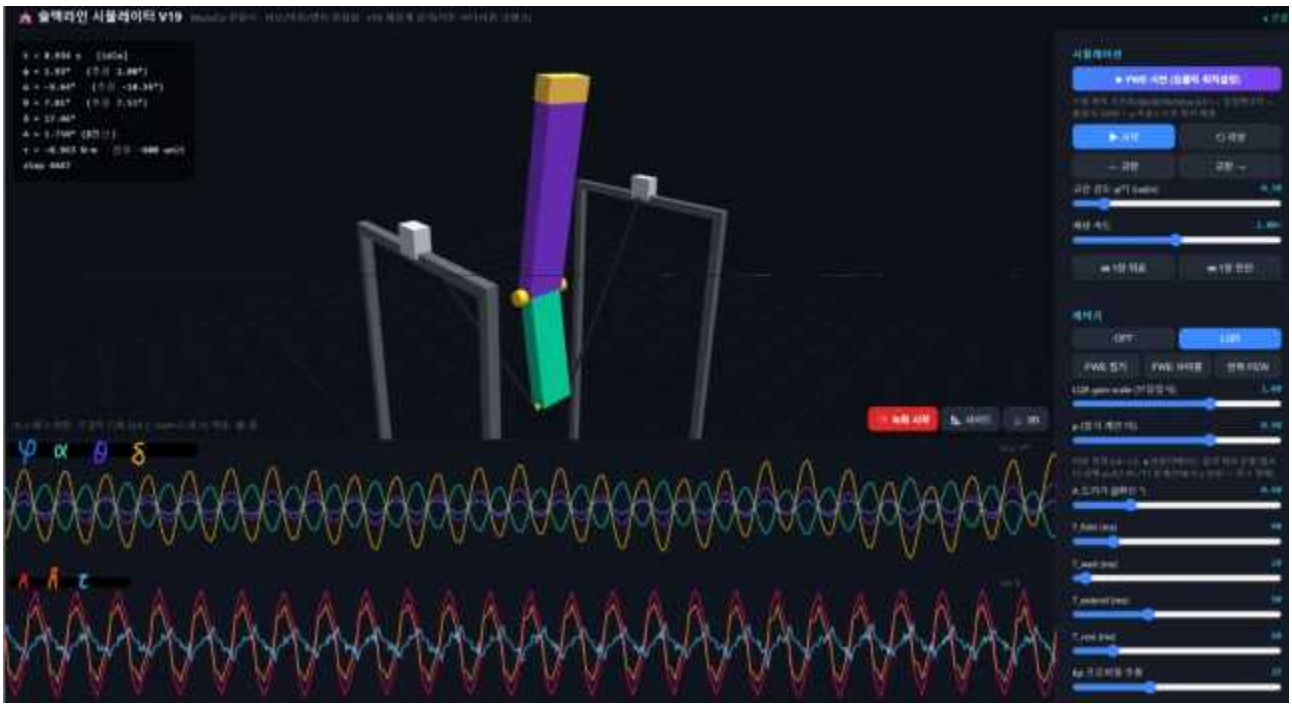


그림 28 증분접기의 시뮬레이션 검증(V19)

증분 접기에는 정해진 박자가 없다. 위험도가 문턱을 넘을 때만 접는다. 그런데 시뮬레이션을 관찰하자, 트리거 조건만 두었을 뿐인데 접기가 저절로 약 0.2초 주기로 반복되는 것이 확인되었다 — 불안정 모드의 배가시간이 만드는 자연 리듬으로, 사람의 반응 속도와 같은 눈금이다. 동작의 모양도 사람을 닮았다. 크게 기울면 한 번에 크게 접고, 이후 미세조정을 거듭하며, 한 가해지면 천천히 몸을 세운다 — 외란을 맞은 광대의 회복 동작 그대로다. 물리에서 유도한 제어기가 한국 줄타기의 균형잡기를 스스로 모사하게 된 것이다. 한편 이 제어는 개입 간격이라는 축 위에서 LQR과 연결된다. 간격을 줄여 매 순간 개입하게 만들면 연속 피드백(LQR)에 수렴하고, 간격을 늘리면 이산적인 접기 사건이 된다 — 둘은 별개의 제어기가 아니라 같은 기하(상태를 안정 모드로 보내기)의 양 끝이며, 광대는 그 축의 0.2초 지점에서 줄을 탄다.

4) 결과

실측 마찰 조건에서 증분 접기 제어는 20개 초기 조건 전부가 시험 상한인 120초까지 생존하였다 — 최악의 케이스조차 완전 사이클 챔피언의 최고 기록(77.5초)보다 길다. 상한을 올린 후속 시험에서는 27,000초 이상의 균형까지 확인되었다. 실물의 물리량으로 채운 세계에서, 고정 환산비만으로, 환산비가 두 배 가까이 어긋나도(γ = 8~15 전 구간 생존) 균형이 유지된다는 것 — 이 메커니즘이 현실에서 작동할 가능성의 확보다.

이런 일련의 시뮬레이션은 이론의 인과 사슬이 유한한 속도와 실행오차 속에서도 이어질 수 있음을 보여 주었다. 그러나 마찰과 유격, 센서 오차가 매번 다르게 나타나는 현실의 줄은 또 다른 시험대다. 그래서 마지막으로 증분 접기를 실제 로봇의 몸에 옮겼다.

10. 로봇 구현과 실제 제작

가. 설계와 제작

1) 전체 모델링



(가) 로봇 전체 CAD 모델　　(나) 실물 로봇 '어름이'

그림 18. 줄타기 로봇 '어름이'의 CAD 설계와 제작된 실물.

로봇과 실험 장치는 OpenSCAD로 전체를 매개변수 모델링하였다. 좌우의 알루미늄 프로파일(2020, 400 × 600 × 1220 mm) 기둥이 두 개의 상단 피벗을 60 cm 간격으로 지지하고, 여기서 8 mm 카본 빗변 두 개가 내려와 하단의 10 cm 발축 바에서 만나 카본 사다리꼴 크랭크를 이룬다. 이것이 우리 모델의 "처진 줄"에 해당하며, 이 기하에서 발이 그리는 원호의 반지름은 $R = \sqrt{(50^2 - 25^2)} = 43.3$ cm로 설계값이 곧 물리값이 된다. 실제 밧줄 대신 강체 크랭크를 택한 이유가 여기에 있다. 밧줄은 좌우로도 비틀리고 처짐이 하중에 따라 변하지만, 크랭크는 운동을 평면으로 구속하고 R을 고정하므로, 모델의 전제인 평면 운동과 정해진 처짐을 실물이 그대로 만족한다. 하단 발축 바에는 베어링을 두어 하체 끝이 자유롭게 회전하게 하였는데, 이는 모델이 가정한 점접촉·발목 토크 없음을 기계적으로 구현한 것이다. 그 결과 이 장치는 4절 스윙(ϕ) — 발목(α) — 허리(δ)의 3자유도에 입력은 허리 토크 하나뿐인 저구동 구조를 그

대로 실현하며, 우리 모델과 일대일로 대응한다.

2) 본체 모델링



그림 19. 로봇의 상체 · 하체 · 중앙 결합부 구성.

본체는 하체(파랑) 25.9 cm와 상체(초록) 40 cm를 허리의 서보 하나로 연결한 2체 구조로, 3D 프린팅(PLA)으로 제작하였다. 제어 보드와 배터리는 상체 내부에 좌우 대칭으로 매립하였다.

제작 과정에서는 설계와 실물의 차이를 여러 번 확인하고 되먹였다. 보드가 수납부를 꽉 채워 삽입이 불가능해 상체를 세 부분(스플라이스-보드베이-배터리 뚜껑)으로 분할하였고, 축이 베어링을 무는 공차를 0.1 mm 단위로 수정하였으며, 엔코더 기판 규격은 실물 도착 후 실측하여 브래킷을 재설계하였다.

3) 하드웨어 제원

항목	내용
프레임	알루미늄 프로파일 2020, 400 × 600 × 1220 mm (회전축 높이 1245 mm)
줄(크랭크)	8 mm 카본 파이프 사다리꼴
몸체	하체 25.9 cm + 상체 40 cm, 3D 프린팅(PLA)
제어 보드	Robotis OpenCR (제어 주기 500 Hz, 전류 제어 모드)
허리 모터	Dynamixel XM430-W210-R (스톨 토크 3.0 N·m, 감속비 212.6 : 1)
각도 센서	AS5047P 절대 엔코더 × 2 (상단 피벗 φ, 발목 α) + 서보 내장 엔코더 (허리 δ)

나. 제어 정교화를 위한 로봇 실측

시뮬레이션이 아무리 정교해도, 그 안의 숫자가 실물과 다르면 검증이 아니라 상상이다. 그래서 로봇을 조립한 뒤 모델에 들어가는 모든 물리량을 하나씩 실제로 측정하여 시뮬레이션에 되먹이는 작업을 진행하였다.

질량과 길이는 저울과 자로, 무게중심은 균형점을 찾아, 관성모멘트는 복합진자법으로 측정하였다 — 부품을 축에 매달아 미소진동 주기 T를 재면 $I = mgd(T/2\pi)^2$ 로 관성모멘트가 나온다. 상체는 반드시 보드와 배터리를 매립한 뒤에 쟀다. 줄의 진동수와 마찰은 자유 흔들기 실험으로 측정하였다. 로봇을 떼고 크랭크만 흔들어 ϕ를 200 Hz로 기록한 뒤 진폭이 줄어드는

양상을 분석한 것이다. 허리의 유효 관성은 모터에 전류 펄스를 주고 그 반응을 적분하는 방식으로 측정하였다.

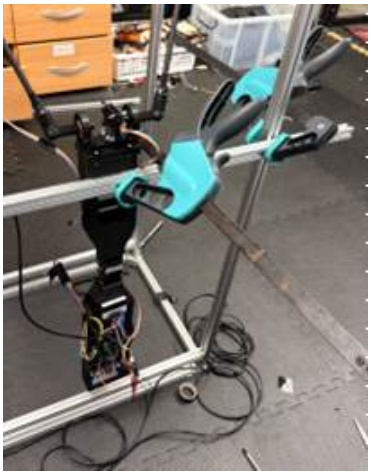


그림 42 모터 Servo 보정

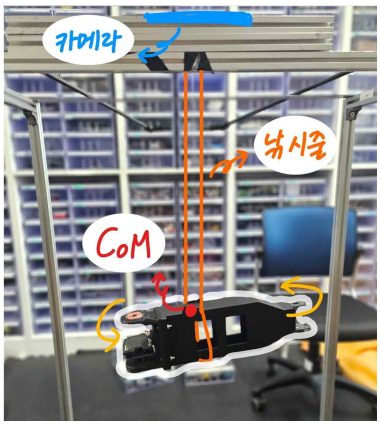


그림 43 비틀림 진자로 관성모먼트 실측



그림 44 나이프 엣지 방법으로 무게중심 위치 측정

다. 증분 접기 알고리즘 적용(가능성 확보)

증분 접기 알고리즘을 로봇에 이식하여 줄 위 시험에 들어갔다. 이를 통하여 페루프 생존 기록을 얻었다 — 최고 12.8초(수동 개입 포함), 자율 최고 4.75초. 아직 시뮬레이션에 없던 큰 각도의 시소 운전이 나타나는 등 개선할 지점이 남아 있고, 균형 시작 시 로봇을 수직으로 잡아 줄 거치 장치도 필요함을 확인하였다.

아직 균형잡기가 어렵다고 판단되는 원인은 메커니즘이 아니라, 모델이 가정한 조건을 실물이 아직 충족하지 못한 데 있다고 판단하였다. 이에 세 가지를 보완하여 다시 시험할 계획이다. 첫째, 자립해 있는 프레임이 로봇의 움직임에 따라 함께 흔들려 정확한 각도 수신에 방해가 되어, 프레임을 책상 등에 거치·고정한다. 둘째, 실측 과정에서 탄성 진동이 발견된 몸체 결합부를 더욱 견고하게 보강하여, 접기 명령과 실제 동작 사이의 오차를 줄인다. 셋째, 손으로 세워 출발하면 초기 기울기와 속도가 매번 달라지므로, 균형 시작 시 로봇을 수직으로 잡아 주는 지지대를 설치하여 동일한 조건에서 출발하게 한다. 이 보완을 마친 뒤 다시 줄 위에서의 균형 유지를 시도할 예정이다.

로봇의 균형 실증은 아직 진행 중이지만, 그 성패와 별개로 한국 줄타기의 불가능해 보이던 장면에서 출발한 질문은 균형의 재정의, 결합 모드, 최적 접기 비율과 예측점 평면으로 이어지는 하나의 물리적 설명에 도달했다.

Ⅳ 탐구 결론 및 의의

1. 탐구 결론

이 탐구에서 얻은 핵심 성과는 다음과 같다.

가. 한국 줄타기를 처진 줄 진자 위의 상·하체 2링크 역진자’로 표현하는 **새로운 역학 모델을 제안**하였다.

나. 허리 접기 하나로 발을 무게중심 너머로 보내 쓰러짐의 방향을 바꾸는 FWE(Fold-Wait-Extend) **균형 회복 메커니즘을 제안**하였다.

다. 한국 줄타기에 맞게 **균형을 ‘완전한 정지’가 아니라 불안정 모드 성분이 0인 상태로 새롭게 정의**하였다.

라. 모드 분석과 상태공간의 기하를 이용하여 **최적 접기 비율 ε^*와 그 일반화 조건을 닫힌형 해석해로 유도**하였다.

$$\varepsilon^* = -\frac{h}{rR+h}$$

마. **물리 엔진 시뮬레이션으로 제안한 FWE와 증분 접기 메커니즘의 작동을 검증**하였으며, 이를 실제 **로봇으로 실증하는 연구를 진행**하고 있다.

2. 탐구의 의의

가. 한국 줄타기의 균형을 제어 기술이 아니라 물리 원리로 설명하였다

기존 선행연구가 “제어기가 있으면 균형을 잡을 수 있다”는 가능성을 보였다면, 본 탐구는 장대 없는 한국 줄타기에서 허리 접기가 어떤 물리적 경로를 거쳐 균형을 회복하는가를 설명하였다.

한국 줄타기는 외부에서 큰 복원 토크를 만들어 쓰러짐을 억누르는 방식이 아니었다. 허리 접기로 상태를 안정모드 위에 옮기고, 처진 줄과 중력이 가진 자연스러운 진동을 이용해 되돌아오는 방식이었다.

서양은 장대로 균형을 만들고, 한국은 허리 접기로 균형이 존재하는 운동 속에 들어간다.

나. 직관적인 질문에서 출발해 해석해까지 도달하였다

이 탐구는 “흔들리는 줄과 역동적인 동작이 오히려 균형에 도움을 주는 것은 아닐까?”라는 의심에서 시작하였다. 이 질문은 모델의 제안, FWE 메커니즘, 균형의 재정의, 모드 분석, 상태공간의 기하, ε의 정의와 ε^*의 해석해로 이어졌다.

특히 선형대수와 동역학을 정식으로 배우지 않은 상태에서, 떨어지지 않는 운동이 어떤 모습이어야 하는지를 사고실험으로 추론하고, 그것이 안정모드라는 사실을 공부하여 수학적으로 완성했다는 데 의미가 있다. 복잡한 시스템의 균형 조건을 하나의 비율과 직선의 교점으로 정리한 ε^*는 본 탐구의 가장 핵심적인 이론 성과이다.

다. AI를 활용하되 질문・판단・검증의 책임은 탐구자가 맡았다

AI는 복잡한 계산, 코드 구현과 유도식의 독립적 검증을 도왔다. 그러나 한국 줄타기의 역설을 발견하고, 모델을 제안하고, 기존 가설을 기각하고, 균형을 새롭게 정의하며, 다음 질문을 결정한 것은 탐구자였다. AI의 결과도 기호 계산, 극한 검산, 독립적인 물리 엔진과 실물 측정을 통해 다시 확인하였다.

이를 통해 AI 시대의 학생 탐구에서 중요한 것은 모든 계산을 직접 수행하는가가 아니라, 어떤 질문을 던지고, 무엇을 믿지 않을지 판단하며, 최종적으로 어떻게 검증할 것인가임을 경험하였다.

3. 한계 및 향후 탐구 계획

본 탐구의 해석해는 소각 선형화와 이상적인 순간접기를 출발점으로 한다. 유한시간 접기와 전물리 시뮬레이션으로 이를 실제 조건에 가깝게 확장하였지만, 마찰과 구조물의 탄성, 센서 오차와 서보의 실행오차가 함께 존재하는 실물 로봇에서는 아직 시뮬레이션 수준의 안정적인 생존을 재현하지 못하였다.

향후에는 증분 접기 제어와 상태 추정을 개선하여 로봇의 반복 가능한 자율 균형을 완성하고자 한다. 또한 실제 한국 줄타기 광대의 동작을 영상으로 분석하여, 본 탐구에서 이론적으로 유도한 접기 비율, 줄과 몸의 안정모드 관계, 회복 후 몸을 펴는 시점과 속도가 실제 동작에서도 나타나는지 검증할 것이다.

Ⅳ 참고 문헌 및 AI 활용

1. 김대균(2022),「줄타기 전승교육을 위한 잔노릇 기본동작 개발 연구: 국가무형문화재 제58호 줄타기 중심으로」, 고려대학교 대학원 응용언어문화학협동과정 문화콘텐츠학전공 박사학위논문.
2. 국가유산청(연도 미상),「국가무형유산 줄타기」,『국가유산포털』, 검색일 2026. 8. 11.
3. 국립무형유산원(2013),「[국내리포트] 중요무형문화재 제58호 줄타기」, 2013. 7. 25. [국립무형유산원]
4. 서울신문(2006),「[신나는 과학이야기] 줄타기 무게중심 어떻게 잡나?」, 2006. 11. 3.
5. Paoletti, P., & Mahadevan, L. (2012). “Balancing on tightropes and slacklines.” *Journal of the Royal Society Interface*, 9(74), 2097-2108.
6. Serrien, B., Hohenauer, E., Clijsen, R., Taube, W., Baeyens, J. P., & Küng, U. (2017). “Changes in balance coordination and transfer to an unlearned balance task after slackline training: A self-organizing map analysis.”
7. Stein, K., & Mombaur, K. (2019). “Performance indicators for stability of slackline balancing.” *2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*6.
8. Stein, K., & Mombaur, K. (2020). “Whole-body dynamic analysis of challenging slackline jumping.” *Applied Sciences*, 10(3), 1094.
9. Stein, K., & Mombaur, K. (2022). “A quantitative comparison of slackline balancing capabilities of experts and beginners.” *Frontiers in Sports and Active Living*, 4, 831362.
10. Todorov, E., Erez, T., & Tassa, Y. (2012). “MuJoCo: A physics engine for model-based control.”
11. ROBOTIS,「OpenCR 1.0」, *ROBOTIS e-Manual*,
12. ROBOTIS,「XM430-W210-T/R」, *ROBOTIS e-Manual*,

13. AI와의 역할 분담

이 탐구는 대화형 인공지능(AI)을 연구 조수로 두고 진행되었다. AI와 우리 탐구자의 역할 분담을 밝힌다. 소프트웨어 분야에는 '바이브 코딩'이라는 개발 방식이 있다. 코드를 한 줄씩 직접 쓰는 대신 AI에게 구현을 맡기되, 사람은 무엇을 만들지 정의하고, 결과물이 제대로 작동하는지 기능 테스트로 확인하며, 논리적으로 디버깅한다. 이 방식의 본질은 구현의 위임이 아니라 검증의 책임이다. 우리는 이 방식을 물리 탐구에 옮겨 와 '바이브 물리'라 이름 붙였다. 지식과 계산은 AI에게 빌리되 — 질문을 만드는 것, 가설을 세우고 기각하는 것, 다음에 무엇을 할지 판단하는 것, 그리고 빌려온 모든 것을 검증하는 것은 사람이 한다. 실제 분담은 이랬다. 첫 가설('접어서 세운다')을 사흘 만에 스스로 뒤집은 것도, 균형의 정의 후보들을 돌림힘 평형으로 분석해 $\beta \approx -0.x\varphi$까지 간 것도, 일체형 각도 센서를 요구 조건 표와 대조해 철회한 것도 우리였다. AI의 일은 우리의 추론이 멈춘 자리에서 물리학이 이미 아는 것을 알려주고(모드의 존재가 그랬다), 손으로 하기 어려운 계산을 대신하고, 우리의 유도를 독립적으로 검증하는 것이었다. 그리고 우리는 AI가 준 것을 그대로 믿지 않았다 — 배운 개념은 물리 엔진(MuJoCo)에서 수치로 확인했고, 유도한 공식은 기호 연산과 극한 해석으로 재검증했으며, 그 검증 과정에서 좌표 부호 오류를 잡아내기도 했다. 바이브 코딩의 기능 테스트와 디버깅에 해당하는 일을, 물리의 방식으로 한 것이다.

이런 협력은 연구의 역사에서 새로운 것이 아니다. 하이젠베르크가 맨손으로 만든 곱셈 규칙에 '행렬'이라는 이름을 알려준 것은 보른이었고, 아인슈타인에게 리만 기하학을 알려준 것은 수학자 그로스만이었다. 구조에 도달하는 일과 이름을 알려주는 일은 다르며, 지식의 조력자를 두는 것은 연구의 정상적인 구조다. 우리 세대는 그 조력자가 AI인 첫 세대다. 그래서 이 기록을 남긴다 — AI 시대의 학생 탐구에서 양도할 수 없는 것은 질문과 판단과 검증이라는 것을, 이 탐구의 과정 자체로 보이고자 했다.