

1167

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

작품요약설명

- 한국 줄타기를 **처진 줄 위의 이중역진자 시스템**으로 모델링.
- 핵심메커니즘으로 **'허리접기'**를 제안하고
- **최적 접기량**을 **닫힌형 해석해로 유도**함.
- 직접 만든 시뮬레이션과 로봇으로 메커니즘을 실증함.

- 출품자: 김지훈, 송주호, 이혜원 (충북과학고등학교)
- 지도교사: 정도일(충북과학고등학교)

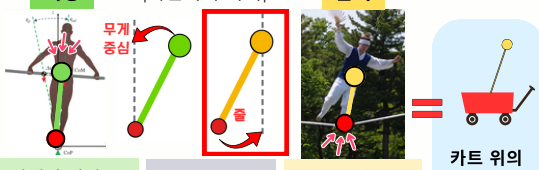


연 구 내 용

I. 탐구 동기

WH? 한국 줄타기와 서양 줄타기의 차이는?

서양 | 복원력의 차이 | 한국



장대의 외력으로 무게중심 위치를 바꿀 수 있다!

장대가 없는 한국 줄타기는?

느슨한 **줄**을 발로 **끌어올 수 있다!**

카트 위의 역진자다!

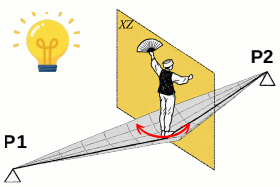


카트 위의 역진자 : **기저면**을 움직여 균형을 잡는다!
⇒ 한국 줄타기 : **처진줄**을 끌어와 균형을 잡는다!

연구 문제 그렇다면 줄은 "어떻게 끌어올까?" + "얼마나 끌어올까?" 아직 밝혀지지 않은 한국 줄타기의 핵심원리를 규명하고 로봇으로 구현해보자!

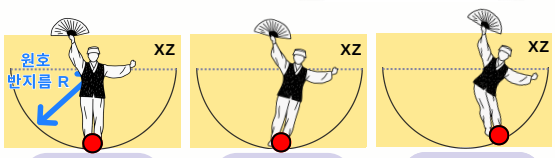
II. 탐구 내용

Q1 줄은 어떻게 끌어올 수 있을까?



한국 줄타기 단순화
줄의 처짐 깊이 R은 XZ평면에서 원호 궤적을 만든다!





1. 초기 상태 — 중심에 곧게 서있는 상태
2. 기울어짐 — 줄 위에서 몸이 벗어남
3. 허리 접기 — 줄을 내 밑으로 끌어올 수 있다!

A 허리접기로 발을 움직이면 줄을 끌어올 수 있다!

Q2 허리는 얼마나 접어야하는 것일까?

발을 무게중심 너머로 옮겨 쓰러지는 방향을 바꾼다!

한국 줄타기 2체 모델

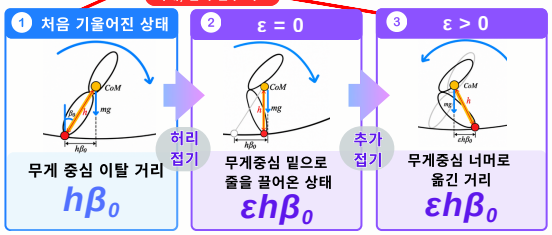


우리의 메커니즘

주요 변수 정의
- φ : 줄의 각도
- β : 몸의 기울기
- β_0 : 몸의 초기 기울기
- ε : 접기 비율

소각 근사, β_0 는 (rad)

확대, 접기 전후 비교



A 초기 기울기 β_0에 비례해 추가로 접는다! 이때의 더 접는 비율을 ε 이라 하자!

Q3 최적의 접기 비율 ε은?

한국 줄타기는 가만히 서있지 않다 ⇒ 줄과 한몸이 되어 진동한다!



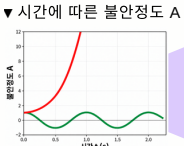
우리가 재정의한 균형

줄(φ)과 몸(β)이 일정비율(r)을 유지하며 진동하는 것이 동적균형이 아닐까?

$\beta = r\varphi$

고유값 문제로 풀면? ⇒ $\ddot{q} = M^{-1}Gq = \lambda q$

▼ 시간에 따른 불안정도 A





불안정모드	안정모드
$\lambda > 0$	$\lambda < 0$
비율이 틀어져 발산 ⇒ 쓰러짐	일정 비율로 진동 ⇒ 균형

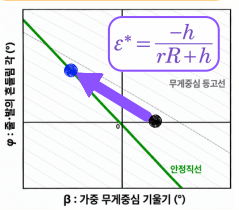
▲ (β, φ)평면에서 두 모드의 고유 공간

<우리가 찾아낸 균형의 목표>

A 불안정 모드를 소거하는 것이 한국 줄타기의 균형!!

Q4 불안정 모드는 어떻게 소거할 수 있을까?

초기 상태 (β, φ)에서 허리를 접어도 ⇒ 무게중심의 수평 위치는 변하지 않는다!



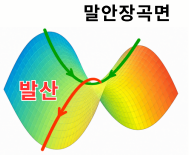
▲허리 접기 한 번 = (β, φ)평면에서의 좌표이동으로 나타난다!

⇒무게중심 등고선에 평행한 **좌표 이동**으로 나타난다!

불안정 모드를 소거한다 = **좌표가 안정직선 위로** 올라간다!

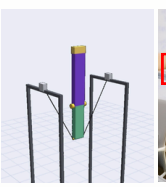
A ε* 만큼 접으면 허리 접기 한 번으로 균형을 잡을 수 있다!!

Q5 로봇에 ε* 를 적용하면 균형이 잡힐까?



▲불안정모드가 자랄 수 밖에 없는 환경

반복 접기



▲v23 시뮬레이션



▲로봇 '어름이'

시간에 따라 자라나는 오차만큼 반복해서 다시 접는 메커니즘
⇒ **로봇이 27000초 동안 균형을 잡았다!**

A 오차만큼 반복해서 접으면 영원히 안쓰러진다!

III. 탐구 결론

<탐구 결론>
1. 한국줄타기의 **핵심 메커니즘으로 '허리접기'**를 제안
2. **불안정 모드를 소거**하는 것으로 균형을 재정의
3. 닫힌형 **해석해**로 최적 접기량 도출!
4. **디지털 트윈**을 이용해 실증!

한국줄타기의 메커니즘을 '최초로 발견'한 연구!

<활용 및 의의>
1. 기저면이 불안정한 재난 현장 로봇으로 활용될 수 있다!
2. 강화학습 등 기존 **physical AI는 설명하지 못하는 줄타기의 물리적 메커니즘을 설명**해내었다!
3. 시스템의 평균 제어 주기가 사람의 반응 주기와 매우 유사!
   ⇒ **생체역학 분야의 연구와 연계**될 가능성!