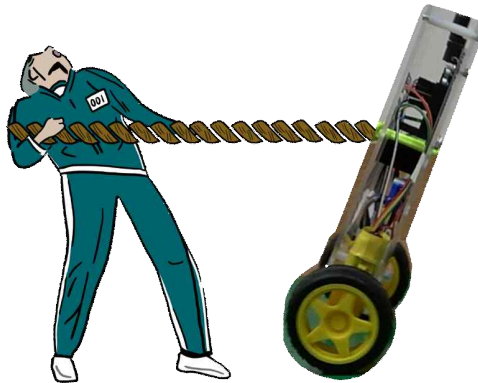


출품번호

1154

제68회 전국과학전람회

줄다리기, 정말 누우면 이길까?
로봇 개발을 통한
줄다리기 핵심 메커니즘 탐구



2022. 9. 1.

출품학생	
지도교사	
구분	학생작
출품부문	물리

【 차 례 】

I. 탐구 동기 및 목적	1
1. 탐구 동기	1
2. 탐구 목적	1
II. 탐구 개요	2
1. 탐구 절차	2
2. 탐구 기간	2
III. 이론적 배경 및 선행연구 조사	3
1. 이론적 배경	3
가. 회전 운동 방정식	3
나. 줄다리기 필승 전략에 대한 속설 수집 및 역학적 검토	4
2. 선행연구 조사	7
III. 탐구 내용	10
1. 기초 탐구(정역학) - 일단 누우면 이기는 게 맞을까?	10
가. 몸의 각도에 따른 장력 변화 이론 탐구	10
나. 몸의 각도에 따른 장력 변화 실험 탐구	11
2. 심화 탐구(동역학) - 끌려가지 않고 상대방을 끌어오려면?	14
가. 반동에 따른 장력 변화 이론 탐구	14
나. 반동에 따른 장력 변화 수치적 시뮬레이션	17
다. 반동에 따른 장력 변화 실험 탐구	19
3. 응용 탐구(로봇 개발) - 줄다리기 핵심 메커니즘을 반영한 로봇 개발	21
가. 줄다리기의 핵심 메커니즘	21
나. 줄다리기 로봇 ‘줄줄이’ 개발	22
다. 줄줄이를 이용한 줄다리기 정역학 모델 검증	26
라. 줄줄이를 이용한 줄다리기 동역학 모델 검증	28
IV. 결론 및 향후 탐구 계획	29
V. 참고 문헌	30

<그림 차례>

그림 3 키가 다른 사람의 줄다리기 모식도	5
그림 4 기울어진 운동장에서의 줄다리기 모식도	6
그림 5 선행연구 결과	7
그림 6 선행연구 결과	7
그림 7 선행연구 결과	8
그림 8 선행연구 결과	8
그림 9 선행연구 결과	8
그림 10 선행연구 결과	9
그림 11 줄을 당기며 버티고 있는 사람의 자유물체도	10
그림 13 2축 플랫폼 센서와 SPARKVUE 프로그램	11
그림 14 Tracker를 이용해 시간에 따른 무게중심의 위치 변화를 측정하는 장면	12
그림 15 각도에 따른 장력 변화 실험을 위한 예비 실험 장면	12
그림 16 몸의 각도에 따른 수평력(장력)의 크기(사람이 직접 실험한 결과)	13
그림 17 양 팀이 최적의 각도를 유지하면서 평형을 유지하고 있는 모습	14
그림 18 선수들이 반동을 주면서 상대를 끌어오는 전략 설명	15
그림 19 선수들이 반동을 줄 때 상체의 움직임은 상하로만 움직인다	15
그림 20 선수의 줄다리기 반동 모델	16
그림 21 각도 변화에 따른 장력 변화 시뮬레이션 결과	18
그림 22 반동을 주는 사람의 각도와 장력 변화 측정하는 모습 및 결과	19
그림 23 LPF 함수	19
그림 24 저역 통과 필터(LPF)가 2번 적용된 장력 데이터	19
그림 25 반동의 동역학적 모델 시뮬레이션과 측정값 비교	20
그림 26 반동을 주었을 때 장력(수평력) 변화와 충격량	20
그림 27 파란색 팀의 강한 공격에 초록색 팀의 몸이 들리자 초록색 팀은 발을 앞으로 주춤 주춤 내딛고 파란색 팀은 뒤로 물러서서 다시 최적의 각도를 만들어내는 모습	21
그림 28 세그웨이가 각도를 유지하기 위해 움직이는 모식도	22
그림 29 세그웨이의 기능을 활용해 제작한 줄다리기 로봇(줄줄이 1호)	23
그림 30 줄줄이 1호~4호 사진	23
그림 31 각도 유지 기능 수행을 하는 줄줄이(4호)의 모습	24
그림 32 줄줄이 5호가 10도의 각도를 유지하면서 버티는 모습	24
그림 33 반동을 주면서 상자를 당기는 줄줄이 6호	25
그림 34 세팅값과 e값을 통한 PID 피드백 묘사	25
그림 35 자랑스러운 줄줄이 6호(모터를 통한 반동)	26
그림 37 줄줄이 각도 세팅 60도	27
그림 38 줄줄이 각도 세팅 80도	27
그림 39 각도 65도랑 85도 장력 비교	27
그림 43 각도 변화를 한 장력 그래프(좌), 줄의 반동으로 인해서 노이즈가 낀 그래프(우)	28
그림 44 반동 주면서 상자를 끌어오는 줄줄이 6호	29

1. 탐구 동기

우리 전통 놀이이자 전 세계적으로 행해지며, 학교 체육 대회의 꽃인 줄다리기는 우리 일상에서 꽤 친숙한 스포츠이다. 최근 유행한 오징어 게임의 명대사인 ‘일단 누워서 버텨!’와 같이 각자마다 가진 혹은 널리 알려진 승리 전략들도 어렵지 않게 떠올릴 수 있다. 그러나 이러한 전략들이 역학적으로 얼마나 타당한지에 대해서 깊게 고민해 본 기억은 거의 없다. 또한 줄다리기가 어떠한 메커니즘을 통해 승패가 갈리는지를 쉽게 이야기할 수 없음을 느끼게 되었다. 친숙하지만 단순하지 않은 이 줄다리기에 대해 흥미가 생겨, 줄다리기의 메커니즘을 물리적으로 명확히 파헤쳐보고자 하였다.

2. 탐구 목적

줄다리기에 대한 선행연구를 조사해 본 결과 현재 제대로 제안된 줄다리기 모델이나 선행연구가 부족하며, 줄다리기에 대해 물리적으로 명쾌하게 설명하는 내용을 찾아보기 힘들었다. 몇 안 되는 자료 중 대부분은 단순히 줄을 당기며 버티는 정역학적인 상황에 관해서만 기술하고 있을 뿐, “영차영차 줄을 당기고, 끌려가고, 끌려오는 동역학적 상황에서 어떻게 줄다리기의 승패가 갈리는가?”에 대해서는 밝혀진 바가 전혀 없었다. 이에 정역학적인 탐구를 넘어 줄다리기의 동역학적 상황에 대한 탐구를 진행하고자 한다.

정역학/동역학적인 각 상황에서 줄다리기의 승패를 가르는 핵심 메커니즘을 찾아내고, 핵심 메커니즘을 표현할 수 있는 줄다리기의 물리적 모델을 개발하고자 한다. 또한 개발한 줄다리기 모델에 실제로 수집한 데이터를 대입하여 분석함으로써 개발한 모델의 타당성을 검증할 것이다.

또, 줄다리기의 핵심 메커니즘 및 우리가 개발한 줄다리기 모델의 특징을 반영한 줄다리기 로봇을 개발하고자 한다.

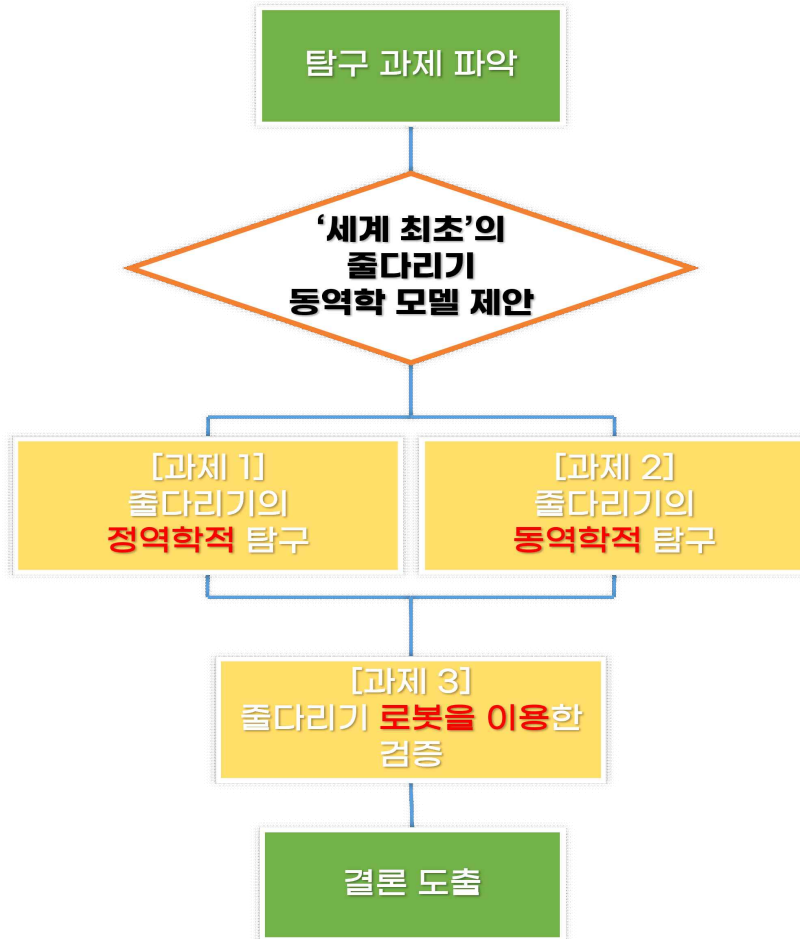
개발한 줄다리기 로봇을 활용하여 통제 변인이 잘 통제된, 신뢰도 높은 실험 데이터를 얻어 최적의 줄다리기 방법을 찾아 볼 것이다.

이러한 탐구 과정을 통해 밝혀낸 메커니즘과 줄다리기 전략을 실제 사람들의 줄다리기에 적용해 보는 것은 물론이고, 로봇이 줄을 당기는 메커니즘을 재난 구조 로봇, 행성 탐사 로봇 등에 활용할 수 있는지 확장 가능성을 검토하고자 한다.

II

탐구 개요

1. 탐구 절차



2. 탐구 기간

[표 1] 탐구 기간

연구내용	추진 시기(월)														
	4월			5월			6월			7월			8월		
	초	중	말	초	중	말	초	중	말	초	중	말	초	중	말
탐구 주제 선정	▶	▶					▶	▶	▶						
선행 연구 조사 및 분석		▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶						
이론적 배경 파악		▶	▶	▶	▶	▶	▶								
탐구설계				▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶			
탐구 수행					▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶
줄다리기 로봇 개발						▶	▶	▶			▶	▶	▶	▶	
결과 정리 및 보고서 작성						▶	▶	▶				▶	▶	▶	▶

III

이론적 배경 및 선행 연구 조사

1. 이론적 배경

가. 회전 운동 방정식

1) 병진 운동과 회전 운동 비교

병진운동은 모든 질점이 평행하게 동일 거리를 움직이는 것을 의미한다. 회전운동은 물체가 회전축 주위로 회전하는 운동을 의미한다. 병진운동에서는 F (힘), m (질량), x (변위), v (속도), a (가속도), p (운동량), E_k (운동에너지) 등의 물리량을 사용하고 회전운동에서는 τ (토크, 돌림힘), I (관성모멘트, 회전관성), θ (각변위), ω (각속도), α (각가속도), L (각운동량), E_r (회전 운동에너지) 등의 물리량을 사용한다. 호도법을 이용하여 병진운동과 회전운동의 관계식인 $s = r\theta$ 를 알 수 있다. 이를 이용하여 $\frac{ds}{dt} = \frac{d\theta}{dt}r$, $v = r\omega$ 의 관계와 $\frac{dv}{dt} = \frac{d\omega}{dt}r$, $a = r\alpha$ 의 관계를 구할 수 있다.

[표 2] 병진운동과 회전운동 물리량 비교

	병진운동	회전운동
운동에너지	$K = \frac{1}{2}mv^2$	$K_R = \frac{1}{2}I\omega^2$
평형	$\Sigma \vec{F}_{ext} = 0$	$\Sigma \vec{\tau}_{ext} = 0$
뉴턴 제 2법칙	$\Sigma \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$	$\Sigma \vec{\tau}_{ext} = I\vec{\alpha}$
비고립계	$\vec{F}_{ext} = \frac{d\vec{P}}{dt}$	$\vec{\tau}_{ext} = \frac{d\vec{L}}{dt}$
운동량	$\vec{P} = m\vec{v}$	$\vec{L} = I\vec{\omega}$
고립계	$\vec{P}_i = \vec{P}_f$	$\vec{L}_i = \vec{L}_f$
일률	$P = Fv$	$P = \tau\omega$

예를 들어 운동방정식 $F = ma$ 는 $\tau = I\alpha$ 로 표현할 수 있고 선운동량이 보존되는 것과 마찬가지로 각운동량도 보존된다. 여기서 각운동량 보존 법칙이란 돌림힘이 0일

때($\tau=0$), 회전하는 물체 A에 대하여 $L_A=L_A'$ 가 성립된다는 것이다. 그래서 피겨 스케이팅 선수가 스핀을 돌기 전에 팔과 다리를 넓게 편 후 스핀을 돌면서 팔과 다리를 모아 스핀을 더 빠르게 하는 것이다.

참고로 토크(τ)는 $\vec{\tau}=\vec{r}\times\vec{F}$, 즉 벡터의 외적이므로 $\vec{F}$ 와 $\vec{r}$ 의 방향이 같거나 반대이면 $\vec{\tau}=0$ 이 된다.

2) 관성모멘트가 변하는 상황에서의 회전 운동 방정식

병진 운동을 표현하는 운동 방정식은 $F=ma$, 회전 운동을 표현하는 운동 방정식은 $\tau=I\alpha$ 로 표현할 수 있다. 그러나 이 표현은 관성모멘트 I 가 변하지 않는 경우에 사용할 수 있는 식이며 관성모멘트가 시간에 따라 변하는 경우에는 다음과 같이 운동방정식을 표현할 수 있다.

$$\tau=\frac{dL}{dt}=\frac{dIw}{dt}=\frac{dI}{dt}w+I\frac{dw}{dt}$$

나. 줄다리기 필승 전략에 대한 속설 수집 및 역학적 검토

민간에 널리 퍼진 줄다리기 필승 전략에 대한 속설들을 수집하여 각각을 역학적인 관점에서 검토하였다. 이를 통해 줄다리기에 적용되는 물리적 원리를 파악하고, 줄다리기의 기본적인 메커니즘에 대해서도 이해하였다.

민간 속설
1) 운동장의 땅을 파라. 운동장은 모래가 많다. 따라서 힘을 주어 당기다 보면 모래 때문에 지지력이 떨어져 힘을 쓰지 못한다. 지지력을 높이기 위해서는 모래를 제거해야 한다. 그래서 시작하기 전이나 코트를 바꾼 다음 바닥의 모래를 밀어내고 맨땅이 나오도록 해야 한다. 그러면 지지력이 높아지게 된다.

해당 속설은 발과 지면 사이의 마찰계수를 크게 하라는 의미를 지니고 있다. 줄을 당기고 있는 사람의 자유물체도를 그려보면 수평 방향으로 줄에 의한 장력과 바닥에 대한 마찰력이 작용한다. 힘의 평형 상태라고 가정하면 장력과 마찰력의 크기가 같다. 상대를 끌고 오기 위해 세계 잡아당기면, 작용 반작용으로 인해 나에게도 더 큰 장력이 작용한다. 따라서 상대가 끌려올 수도 있지만 내가 끌려갈 수도 있다. 상대를 끌어오면서 내가 끌려가지 않기 위해서는 상대보다 더 큰 마찰력이 필요하다. 그러므로 해당 속설은 땅을 파서 발과 땅 사이의 마찰계수를 크게 함으로써 최대정지마찰력의 크기를 크게 하라는 속설이며 역학적으로 타당하다.

민간 속설

2) 키와 체중이 많이 나가는 순서대로 앞에서부터 세워라.
줄의 각도와 높이는 일정해야 힘의 전달이 잘 된다. 줄의 뒤로 갈수록 힘의 전달되는 비율이 떨어지기 때문에 힘을 많이 쓰는 사람부터 앞에 세워야 한다.

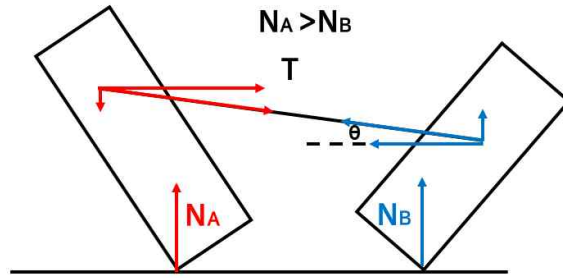


그림 3 키가 다른 사람의 줄다리기 모식도

해당 속설은 키와 체중, 두 개로 분류하여 생각해보아야 한다.

먼저 키가 큰 사람과 작은 사람이 서로 줄다리기 하는 상황을 생각해보자. 이때 키가 서로 다른 줄다리기 상황에서 줄이 지면에 대해 θ 의 각도를 형성하여 장력에 대한 수평 방향과 수직 방향의 벡터 분해를 할 수 있다. 이에 수직 방향의 장력 성분이 큰 사람에게는 아래 방향으로, 작은 사람에게는 위 방향으로 작용함을 알 수 있다. 이는 각각 지면에 대한 수직항력에 영향을 주므로, 키가 큰 사람의 수직항력이 더 커지게 된다. 앞서 기술한 것처럼 줄다리기는 사실상 마찰력 싸움이다. $f = \mu N$ 즉, 수직항력이 클수록 최대정지마찰력이 커지므로 해당 내용은 타당하다.

이어서 체중이 다른 두 팀원의 배치를 생각해보자. 장력 T에 대해 팀원 전체가 각자의 마찰력으로 상쇄하여 끌려가지 않도록 하여야 한다. 체중이 클수록 수직항력이 크므로 전체 마찰력에서 차지하는 비율도 클 것이다. 하지만 결국 전체 마찰력은 순서에 상관없이 각 마찰력들의 총합이다. 팀을 하나의 계로 설정함으로써 이에 대해 설명할 수 있다. 따라서 체중에 따른 선수 배치는 역학적으로는 타당하지 않으며 심리적인 요인일 것이다.

민간 속설

3) 운동장의 기울기를 잘 봐두었다가 가위바위보에서 이기면
운동장의 기울기가 낮은 쪽을 선택하라.
기울기가 있는 경우 그 선택은 승부에 있어서 결정적이다.

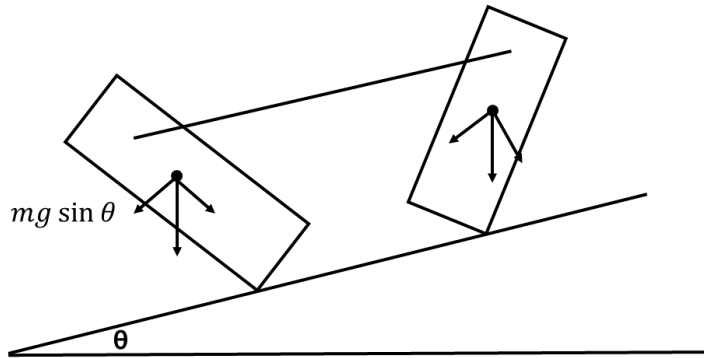


그림 4 기울어진 운동장에서의 줄다리기 모식도

기울기가 있는 공간에서 아래쪽에 위치하여 줄다리를 진행하면, $mg \sin \theta$ 의 힘이 끌어오는 데 도움을 주기 때문에 당연히 유리해진다. 그런데 운동장의 기울기가 아무리 차이가 난다고 해도, 기껏해야 5~7도 정도 차이가 날 것이다. 해당 기울기 차이가 주는 영향은 매우 미미해 보인다. 하지만 줄다리기에서는 엄청난 힘으로 끌어가는 것처럼 보이지만, 실제로 힘의 차이에 의하기 때문에 그렇게 크지만은 않는다. 양 팀 선수의 질량을 640kg 정도라고 생각하고 서로 당기는 힘이 10,000N 정도라고 하면, 양 팀의 힘의 차가 20%가 난다고 해도 실제 힘의 차이는 2,000N 정도이다. 그렇다면 기울기가 미미한 값이라도 경기 결과에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 해당 속설은 타당하다.

민간 속설

4) 몸이 선 채로 40도 정도의 기울기를 유지하는 것이 좋다.
그리고 선수들의 허리가 펴져야 한다. 허리를 굽히면 힘을 쓰기 어렵다.
오히려 뒤로 눕는다는 생각의 자세를 취하는 것이 좋다.
그러나 너무 많이 누워버리면 미끄러지기 쉽다.

누움으로써 θ 가 변화함에 따라 마찰력이나 장력의 변화양상을 단순히 판단하기 어려웠다. 또한 그저 누우면 누울수록 유리한 것이 아니라 일정 이상 누웠을 때 미끄러진다는 현상에 대해서 역학적으로 설명하기 어려웠다. 해당 속설에 대해 더욱 심화하여 이해하고자 우리의 탐구 주제로 삼았다.

2. 선행연구조사

가. Dynamical Analysis Of Indoor Eight People Make Tug Of War Attack Movements - European Back-Step And Japanese Back-Step

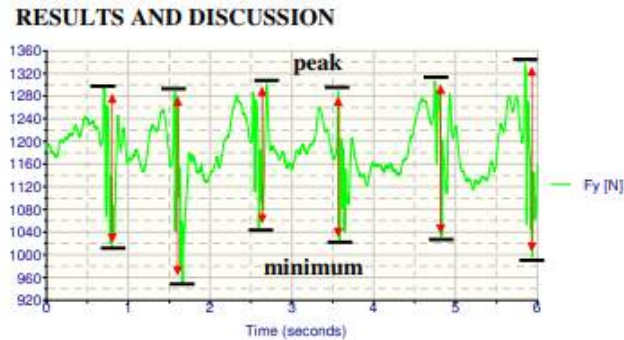


Figure 1: The curve of the peak and minimum backward ground reaction force (GRF)

그림 5 선행연구 결과

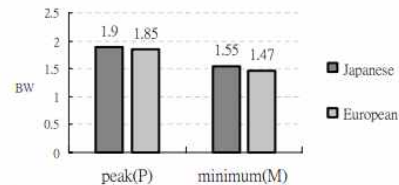


Figure 2: The peak and the minimum backward GRF of "European Back-Step" and "Japanese Back-Step"

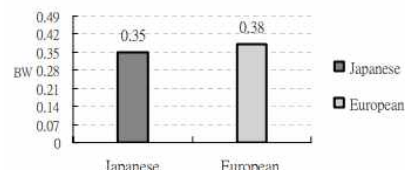


Figure 3: The value between the peak and minimum backward GRF

그림 6 선행연구 결과

해당 논문에서는 영상 촬영 및 영상 분석 기법을 통해 “European Back-step” 과 “Japanese Back-step” 을 실험적인 데이터로 분석하여 비교하였다. ground reaction force에 대한 정량적인 데이터 분석을 통해 peak와 minimum의 차이를 통해 일본인의 전략이 더 좋다는 결론을 내렸다. 그러나 peak와 minimum 모두 일본인이 더 큰 값을 가져 평균적인 힘 자체가 일본인이 더 커 전략이 결정적인 영향을 미친 것인지, 근력 등의 단순 기량 차이인지에 대해서 파악할 수 없었다.

본 탐구와의 차별점 - 줄을 당기는 전략에 따른 힘의 크기에 대해 연구했다는 면에서 우리 연구와 비슷한 부분이 있으나 물리적 모델 없이 실험 데이터에만 의존한 점, 힘을 주는 메커니즘이나 시간에 따른 힘의 크기 변화 등을 설명하지 않고 단순히 힘의 최댓값과 최솟값만을 비교한 점 등에서 부족함이 있어 보이며, 우리 탐구는 이론적 모델을 개발하여 줄을 당기는 역학적 메커니즘을 설명하고 로봇을 이용해 통제된 변인 하에서 실험을 진행한다는 점에서 다르다.

나. BIOMECHANICAL ANALYSIS ON DYNAMIC PULLING SKILL FOR ELITE INDOOR TUG OF WAR ATHLETES

해당 논문 역시 선수들에 대한 실험적 데이터를 수집하여 각 수치에 대해 분석하였다. 양쪽의 발목, 무릎, 허리 관절에 대한 데이터와 힘, 변위 등 여러 수치에 대해 자세하게 분석하였다. 5초간 강하게 당기는 동역학적인 상황에서의 장력(Dynamic Force)까지도 분석하여 수치적으로 나타내었다.

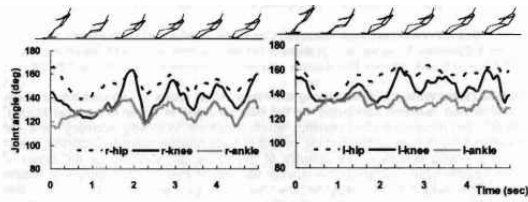


Figure 2 The displacement of right and left lower limb joint angle during trial.

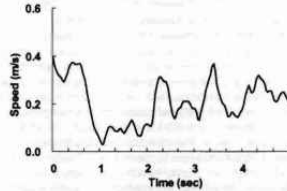


Figure 3 The displacement of COM speed during trial.

그림 7 선행연구 결과

본 탐구의 차별점 - 동역학적 상황에 대해 상세히 분석하였으나 실제 사람에 의한 실험 결과에만 의존하여 실험의 변인 통제가 어렵고, 이론적 모델 없이 결과 분석만으로는 유의미한 물리적 의미를 찾기 어렵다. 우리 연구는 줄을 당기는 이론적 메커니즘을 제안하고 로봇을 이용해 변인이 잘 통제된 실험을 하고자 한다.

다. BIOMECHANICAL CONSIDERATIONS OF PULLING FORCE IN TUG OF WAR WITH COMPUTER SIMULATION

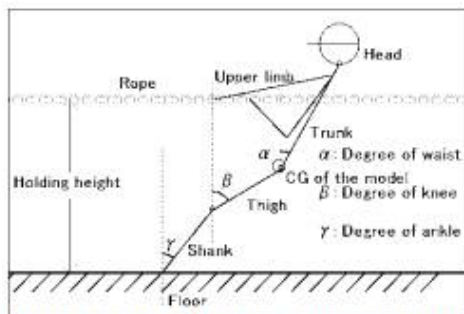


Figure 1 - The simulation model for tug of war.

그림 8 선행연구 결과

해당 논문은 줄다리기 모델, 특히 발목, 무릎, 허리 관절에 대해 구체적으로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. α 가 정해진 시점에서 β 와 γ 가 종속적으로 정해지며, 각 값에서의 정적 상태에 대한 장력 데이터를 수집하는 시뮬레이션이다. 시뮬레이션 데이터와 실험 데이터를 비교 분석하고 특히 허리와 무릎 각도에 대한 그래프가 위상반전 되어있다는 결과를 관찰할 수 있다. 줄을 잡은 높이가 낮을수록, 몸 전체의 각도가 작을수록 장력이 커진다는 것이 결론이다.

본 탐구의 차별점 - 컴퓨터 시뮬레이션을 이용해 줄다리기를 설명하였다는 점에서 우리 연구와 비슷한 점이 있으나 해당 탐구는 정역학적인 값들을 모아 놓은 것에 반해 우리 탐구는 동역학적 상황에서의 각도와 장력 변화에 대해 탐구하고자 한다.

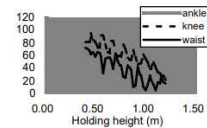


Figure 4 - The relationship between joint degrees of ankle, knee, and waist and holding height.

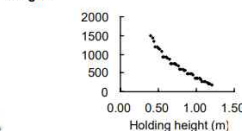


Figure 5 - The relationship between holding height and pulling force by simulation.

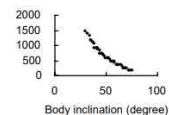


Figure 6 - The relationship between body inclination and pulling force.

그림 9 선행연구 결과

라. 줄다리기의 지혜 (2001 전국과학전람회)

발바닥의 재질	나무	스카치 테이프	종이 테이프	고무
누운 각도(°)	37.	29.	38.	42.

[사진 N-2-①] 몸무게와 당기는 힘
관련 실험

[사진 N-2-②] 발바닥의 마찰과 누울
수 있는 각도 실험

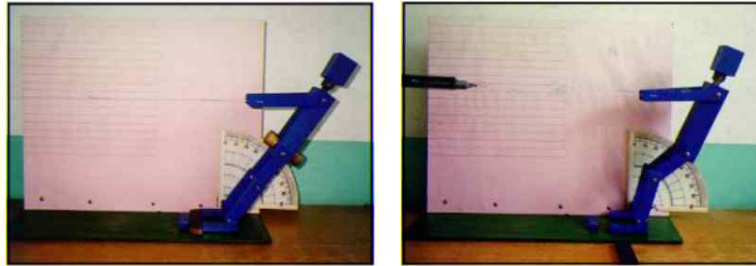


그림 10 선행연구 결과

줄다리기에 대한 거의 유일한 국내 선행연구이며, 각 재질에 대하여 누울 수 있는 각도에 대한 실험을 진행하였다. 또한, 제작한 모형을 통해 관절을 조절하여 자세에 따른 장력을 비교하여 실제 경기 상황에 도입하였다.

본 탐구의 차별점 - 바닥의 마찰계수에 따른 미끄러지는 각도, 각도에 따른 장력 등을 측정하였다는 점에서 우리 연구와 비슷한 점이 있으나, 이론적 설명 없이 실험적인 데이터만 설명하고 있다는 점, 정역학적인 상황만 설명하고 있다는 점에서 우리 연구와 다르다. 우리 연구는 이론적인 원리를 바탕으로 가설을 설정하고 검증하는 방식을 사용할 것이고, 정역학 상황을 넘어 영차영차 줄을 당겨오는 동역학 상황까지 모델링하고 로봇을 활용해 탐구한다는 점에서 기존 연구와 다르다.

IV

탐구 내용

1. 기초 탐구(정역학) - 일단 누우면 이기는 게 맞을까?

가. 몸의 각도에 따른 장력 변화 이론 탐구

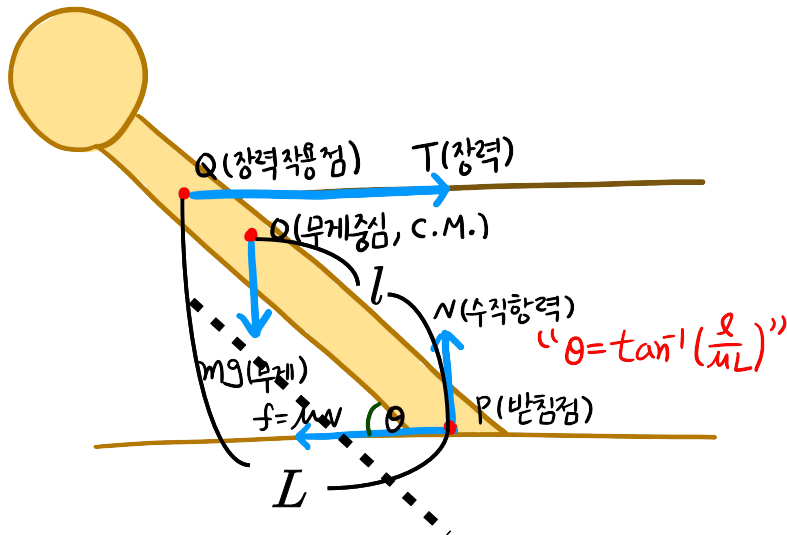


그림 11 줄을 당기며 버티고 있는 사람의 자유물체도

가장 널리 알려진 속설이자, 설명이 쉽지 않은 속설 ‘누우면 이긴다.’에 대해 이해하기 위해 사람이 줄을 잡고 일정 각도로 누워있는 모습을 자유물체도로 표현했다. 사람이 줄을 잡고 버티고 있는 정적 상황이므로 각각 힘의 평형과 돌림힘 평형을 적용하여 다음과 같이 식을 세울 수 있다.

수평 방향으로는 줄에 의한 장력 T 와 바닥에 의한 마찰력 f 만이 서로 반대 방향으로 작용한다. 힘의 평형 상태이므로 장력과 마찰력의 크기가 같다고 놓을 수 있다.

$$x\text{방향 힘의 평형} : F_x = T - f = 0 \quad \text{수식 1}$$

수직 방향으로는 중력 mg 와 수직항력 N 만이 서로 반대 방향으로 작용한다. 힘의 평형 상태이므로 중력과 수직항력의 크기가 같다고 놓을 수 있다.

$$y\text{방향 힘의 평형} : F_y = mg - N = 0 \quad \text{수식 2}$$

사람은 지면과 접촉하고 있는 발을 회전축으로 돌림힘 평형을 이루고 있다. 이를 식으로 쓰면 다음과 같다.(발에서 무게중심까지의 거리를 l , 발에서 줄을 잡고 있는 점까지의 거리를 L 이라 하였다.)

$$\begin{aligned} \text{돌림힘 평형} : \tau &= (\vec{l} \times \vec{mg}) - (\vec{L} \times \vec{T}) \\ &= mgl\cos\theta - TL\sin\theta = 0 \quad \text{수식 3} \\ \therefore T &= \frac{mgl}{L\tan\theta} \end{aligned}$$

돌림힘 평형을 표현한 수식 3에 따르면 누우면 누울수록, 즉 θ 가 작으면 작아질

수록 장력 T 의 값이 커지게 된다. 따라서 누우면 이긴다는 말은 타당하다.

그렇지만 오히려 너무 많이 누우면 미끄러져 넘어진다. 이 상황에 대해 물리적으로 생각해보자. 식1과 같이 장력 T 와 마찰력 f 의 크기가 같기 때문에 누우면 누울수록 장력뿐만 아니라 마찰력의 크기도 커지게 된다. 마찰력이 커지다가 최대정지마찰력을 넘어서면 미끄러지게 된다. 미끄러지는 순간을 식으로 표현하면 아래 식에서 등호일 때에 해당한다.

$$f \leq \mu N = \mu mg \quad \text{수식 4}$$

식 3에 식 4를 대입하면

$$\tan\theta = \frac{mgl}{TL} = \frac{mgl}{fL} \geq \frac{mgl}{\mu mgL} = \frac{l}{\mu L} \quad \text{수식 5}$$

$$\therefore \tan\theta \geq \left(\frac{l}{\mu L}\right)$$

즉, 마찰력이 최대정지마찰력과 같아지는 각도보다 더 누우면 미끄러지기 때문에 최대로 누울 수 있는 한계각도 $\theta_{\min}$ 가 존재한다.

$$\tan(\theta_{\min}) = \frac{l}{\mu L} \quad \text{수식 6}$$

지금까지의 논의를 다시 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

“누우면 누울수록 장력이 커져 유리하지만, 많이 누우면 미끄러진다.
미끄러지지 않으면서 장력을 가장 크게 할 수 있는 최적의 각도($\theta_{\min}$)가
존재한다.

최적의 각도($\theta_{\min}$)는 마찰계수(μ)와 무게중심의 위치(l), 줄을 잡는 위치(L)에
의해 결정된다.”

나. 몸의 각도에 따른 장력 변화 실험 탐구

앞의 탐구에서 이론적으로 알아본 줄다리기의 정역학 모델이 실제로도 그런지 실험을 통해 확인해 보았다.

1) 측정 도구

가) 2축 플랫폼 센서와 Sparkvue 프로그램

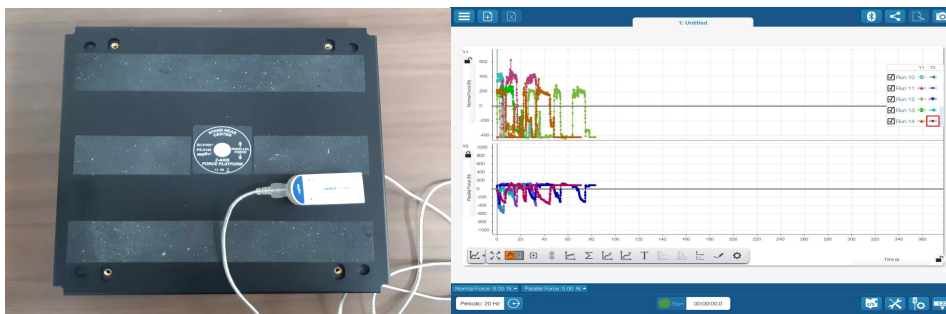


그림 13 2축 플랫폼 센서와 SPARKVUE 프로그램

PASCO사의 2축 플랫폼 센서와 프로그램을 사용하였다. 해당 센서는 시간에 따른 수직 방향 힘과 수평 방향 힘의 크기를 측정할 수 있다.

나) 동영상 촬영 캠코더와 Tracker 프로그램

Sony사의 4K 캠코더를 삼각대에 설치하여 줄다리기 장면을 촬영하고 Tracker 프로그램을 이용하여 특정 점의 시간에 따른 위치, 속도, 가속도, 각도 등을 측정하였다.

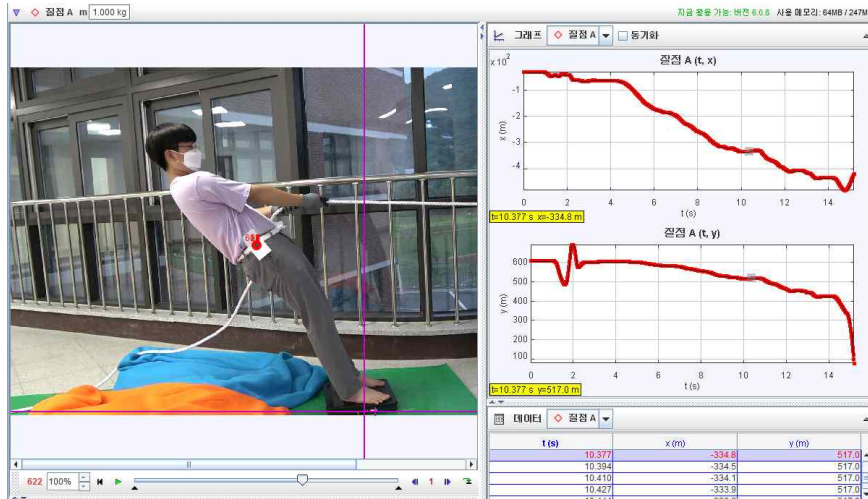


그림 14 Tracker를 이용해 시간에 따른 무게중심의 위치 변화를 측정하는 장면

2) 실험 방법

- 가) 기둥에 줄을 단단히 묶은 후 경로에 고무매트를 편다.
- 나) 카메라를 60Hz로 설정하여 촬영 구도를 잡는다.
- 다) 2축 힘 센서와 Sparkvue를 연결한 후 힘 센서 위로 올라가 센서와 영상 촬영을 실행시킨다.
- 라) 센서와 영상의 시점 통일을 위해서 가볍게 한 번 뛴다.
- 마) 줄을 잡은 팔을 고정하여 천천히 각도를 내리며 넘어지는 순간까지의 데이터를 수집한다.
- 바) 측정한 데이터를 엑셀로 처리하여 시각화한다.



그림 15 각도에 따른 장력 변화 실험을 위한 예비 실험 장면

3) 실험 결과

가) 각도에 따른 수평력 변화

2축 플랫폼 센서로부터 수집한 수평력(여기서 수평력은 마찰력 f 를 의미하며 힘의 평형 상태임을 고려하면 장력 T 와 크기가 같다.)의 크기와 동영상 분석을 통해 수집한 몸의 각도 θ 의 관계는 다음 그림과 같다.

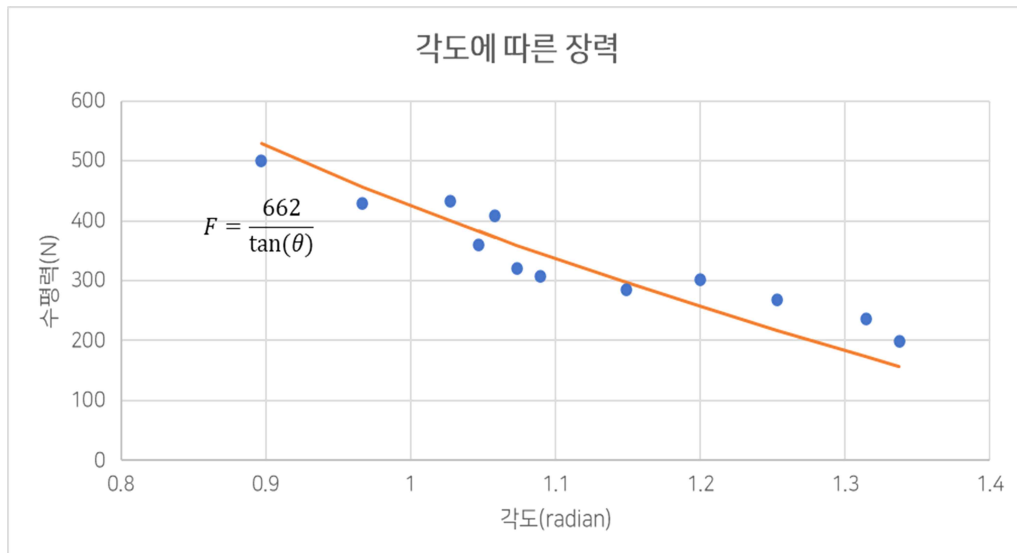


그림 16 몸의 각도에 따른 수평력(장력)의 크기(사람이 직접 실험한 결과)

약 1.33 radian부터 0.9 radian까지 몸의 각도를 넓혀가면서 수평력(장력)을 측정한 결과 누울수록 장력이 커지는 것을 확인할 수 있었고, 추세선을 구해본 결과 장력이 $\frac{1}{\tan\theta}$ 에 비례하는 것으로 나타나, 우리가 앞의 탐구에서 이론적으로 예측한

$T = \frac{mgl}{L \tan\theta}$ 과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

2. 심화 탐구(동역학) - 끌려가지 않고 상대방을 끌어오려면?

가. 반동에 따른 장력 변화 이론 탐구

1) 선수들의 줄다리기 영상 분석을 통한 반동의 필요성 발견

앞의 기초 탐구를 통해 줄다리기 상황 속 누워서 버티는 정역학 모델을 제안하고 검증하였다. 기초탐구 결과에 따르면 미끄러지지 않고 가장 큰 장력을 만들 수 있는 최적의 각도가 존재한다. 그렇다면 양쪽 팀이 같은 조건(질량, 마찰계수, 키, 근력 등)의 상황에서 똑같이 최적의 각도로 눕는다면, 영원히 승부가 나지 않고 비기는 것일까? 승패가 갈린다면 각도 이외에 어떤 요인에 의해 어떤 메커니즘으로 승패가 갈리는 걸까?

이런 질문에 대한 답을 찾기 위해 먼저 엘리트 선수들의 줄다리기 경기 영상을 분석해 보았다. 다음 그림은 양 팀이 최적의 각도를 유지하면서 평형을 이루고 있는 모습이다. 실제로 줄다리기 대표선수들의 경기는 몇 분 동안 평형을 유지하고 있는 경우가 많았는데 이는 우리의 기초탐구 내용을 반영하는 것으로 볼 수 있다.



그림 17 양 팀이 최적의 각도를 유지하면서 평형을 유지하고 있는 모습

자 이제 단순히 버티는 상황을 넘어 상대를 끌고 오려는 상황을 생각해보자. 상대를 끌고 오기 위해 줄을 세게 잡아당기면, 작용 반작용으로 인해 나에게도 같은 장력이 작용한다. 상대방이 끌려올 수도 있지만 내가 끌려갈 수도 있는 것이다. 따라서 상대를 끌어오기 위해서는 장력을 크게 하는 것도 필요하지만 내가 끌려가기 위해 마찰력을 크게 하는 것이 꼭 필요하다. 그렇다면 어떻게 나의 마찰력을 크게 할 수 있을까?

우리는 선수들의 훈련 영상에서 그 힌트를 찾을 수 있었다. 선수들은 경기 중 무게중심을 오르내리며 ‘반동’을 준다. “엉덩이를 내리면서 무게를 준다”는 표현은 무게중심을 위로 가속하기 위해 발로 지면을 강하게 딛고, 그에 의한 반작용으

로 지면이 발에 작용하는 수직항력의 크기가 더 커지면, 기존보다 더 큰 최대정지 마찰력을 가지게 되고 이때 상대를 끌어 올 수 있는 조건이 만들어지는 것이다.



그림 18 선수들이 반동을 주면서 상대를 끌어오는 전략 설명

그런데 무게중심을 위로 가속하면 필연적으로 다시 아래로 가속하는 과정이 필요하다. 그렇게 되면 무게중심을 아래 방향으로 가속할 때는 이전과는 반대로 오히려 수직항력이 작아지는 상황이 발생한다. 다시 말해서 반동을 주는 행위는 수직항력을 순간적으로 크게 할 수도 있고 작게 할 수도 있는 것이다.

따라서 단순히 반동을 준다고 이긴다고 할 수 없지만, 반동을 어떻게 주느냐가 승패에 영향을 줄 수 있을 것이라는 생각을 하였고, 이 ‘반동’의 메커니즘을 규명하는 것을 메인으로 한 심화탐구를 진행하였다.

2) 반동을 주는 행위의 물리적 모델링



그림 19 선수들이 반동을 줄 때 상체의 움직임은 상하로만 움직인다.

위 그림은 선수들이 반동을 주는 장면을 분석한 것이다. 무릎과 골반을 굽혔다 펴

면서 무게중심을 내렸다 올리는데, 그 과정에서 상체의 각도는 거의 변하지 않고 위 아래로만 움직이는 모습을 볼 수 있었다. 이 모습을 모형으로 표현하면 다음 그림과 같다.

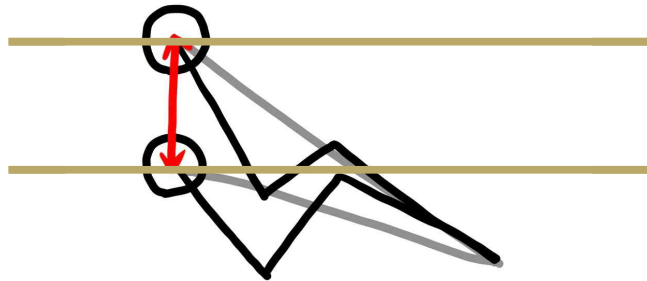


그림 20 선수의 줄다리기 반동 모델

실제로는 무릎과 골반 관절을 굽히는 동작을 통해 상체를 아래로 내리지만, 그림 20에 회색으로 표현된 막대에 상체가 연결되어있다고 생각하면 막대의 길이가 줄어들면서 각도를 낮추는 방식으로 무게중심을 아래로 내린다고 생각할 수도 있다.

따라서 우리는 선수의 모든 질량 m 이 무게중심에 몰려 있고 발에서 무게중심까지의 거리는 l 이며 발과 무게중심을 연결하는 막대의 질량은 무시하는 모델을 사용하여 이후의 탐구를 진행하고자 하였다.

3) 반동의 효과

먼저 수직 반동과 수직항력 사이의 관계를 분석하였다. 반동을 주기 위해 무게중심을 위아래로 움직이면 가속 방향에 따라 수직항력에 변화가 생길 것이다. 그러나 반동의 한 주기가 끝났을 때 처음과 같은 상태가 되어야하기 때문에, 반동을 주기 전과 후의 무게중심의 수직 방향 변위는 0, 속도 변화도 0이어야 한다. 속도의 변화가 0이므로 반동의 한 주기 동안 무게중심이 받은 수직 방향의 충격량($\int Fdt$)이 0일 것이고, 이는 반동에 의해 수직항력이 커진 효과와 작아진 효과가 같아서(Zero Sum) 평균 수직항력에 있어서는 반동이 아무런 이득을 주지 못함을 의미한다.

평균 수직항력에 변화를 주지 못한다면 반동을 주는 행위가 상대방을 끌어오는 데 도움이 되지 않는 걸까?

우리는 반동을 주면서 무게중심을 내렸을 때 몸의 각도 θ 가 작아졌음에 주목하였다. 우리의 기초탐구 결과에 의하면 θ 가 작아지면 장력이 커지게 된다. 따라서 반동을 주는 행위는 무게중심의 상하 운동을 통해 수직항력을 크게 함으로써 최대정지마찰력을 키워 미끄러지지 않게 하면서 몸의 각도를 낮춤으로써 장력을 크게 할 수 있는 것이다.

4) 반동의 물리적, 수학적 모델링

좀 더 정확히 반동의 효과를 알아보기 위해 그림 20의 반동 모델에 대한 운동방정식을 세워 보았다. 운동방정식을 세우기 위해 반동을 줄 때 무게중심의 이동은 수직 방향으로만 이루어지며, θ 값이 변함에 따라 l 값이 변한다고 가정하였다.(무게중심과 발과의 수평거리를 b 라 하면 $l\cos\theta=b$ 의 관계가 된다.) 이러한 가정하에 세운 회전 운동방정식은 다음과 같다.

$$\tau = \frac{dL}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega \frac{dI}{dt} \quad \text{수식 7}$$

$$Tl\sin\theta - mgl\cos\theta = ml^2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + 2ml \frac{d\theta}{dt} \quad \text{수식 8}$$

$$\begin{aligned} T\sin\theta &= ml \frac{d^2\theta}{dt^2} + 2m \frac{d\theta}{dt} + mg\cos\theta \\ &= m(l \frac{d^2\theta}{dt^2} + 2 \frac{d\theta}{dt} + g\cos\theta) \end{aligned} \quad \text{수식 9}$$

$$T = m\csc\theta(l \frac{d^2\theta}{dt^2} + 2 \frac{d\theta}{dt} + g\cos\theta) \quad \text{수식 10}$$

$$T = m\csc\theta(b\sec\theta \frac{d^2\theta}{dt^2} + 2 \frac{d\theta}{dt} + g\cos\theta) \quad \text{수식 11}$$

이처럼 우리는 반동의 물리적, 수학적 모델을 수식 11과 같이 얻어내었다. 이 식은 비선형 2차 미분방정식으로 우리가 대수적으로 풀 수는 없었다. 그렇나 장력 T 가 질량 m , 무게중심과 발의 거리 b , 중력가속도 g 와 같은 상수를 제외하면 오로지 각도 θ 에 의해 변화한다는 점에서 우리가 이후의 탐구에서 사용할 유의미한 모델을 얻어내었다고 생각할 수 있다.

나. 반동에 따른 장력 변화 수치적 시뮬레이션

$$T = m\csc\theta(b\sec\theta \frac{d^2\theta}{dt^2} + 2 \frac{d\theta}{dt} + g\cos\theta) \quad \text{수식 11}$$

수식 11은 비선형 2차 미분방정식으로써, 대수적인 해를 구하기에는 어려움이 많다. 따라서 수식적으로 해를 구하지 않고, 엑셀을 통해 수치적인 해석을 진행하였다.

우리가 임의로 만든 시간에 따른 각도 함수 $\theta(t)$ 를 수식 11에 대입하여 시간에 따른 장력의 변화 $T(t)$ 를 알아보았다.

시뮬레이션을 위한 시간 간격 Δt 는 0.01초 설정하였고, 각속도 ω 와 각가속도 α 는 각각 수식 12 및 수식 13과 같이 적용하였다.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} \quad \text{수식 12}$$

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} \quad \text{수식 13}$$

시간에 따른 각도 변화 $\theta(t)$ 는 각도를 유지하다가 무게중심을 내렸다 올리는 상황을 표현하고자 다음 수식 14와 같이 정의하였다.

$$\theta(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{3} + 0.05\cos(2\pi t), & 2n < t < 2n+1 \quad (n=0,1,2,\dots) \\ \frac{\pi}{3} + 0.05, & 2n+1 < t < 2n+2 \quad (n=0,1,2,\dots) \end{cases} \quad \text{수식 14}$$

수식 14를 수식 11에 대입한 시뮬레이션 결과는 다음 그림과 같다.

각도 변화에 따른 장력 변화 시뮬레이션

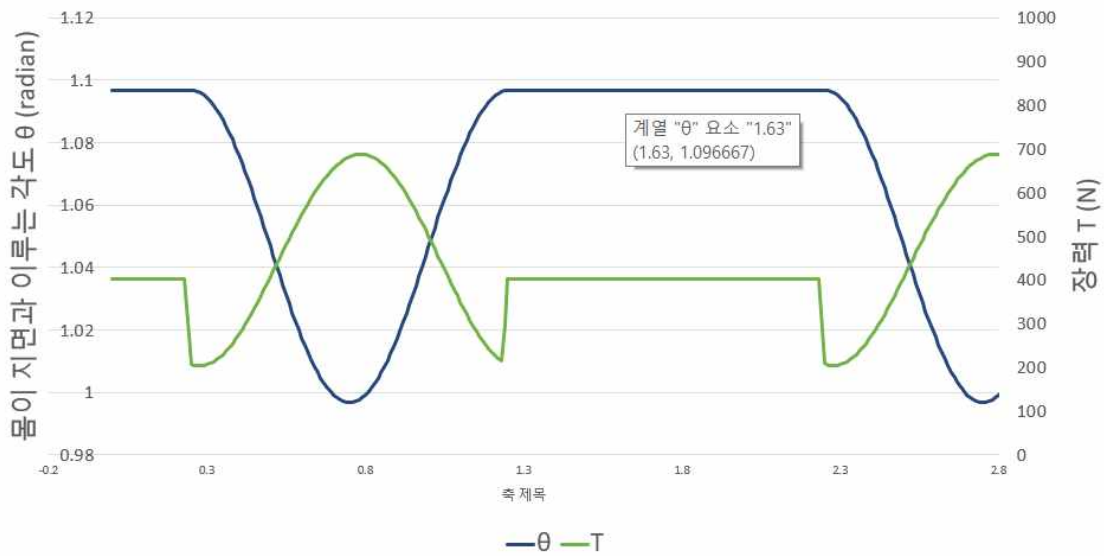


그림 21 각도 변화에 따른 장력 변화 시뮬레이션 결과

위 결과에 대한 우리의 해석은 다음과 같다.

- 1) 반동을 주기 위해 무게중심을 아래로 움직이는 순간 장력이 약해진다.
- 2) 무게중심을 위 방향으로 가속하는 과정에서 장력이 강해진다.
- 3) 무게중심을 원래 위치로 놓기 위해 감속하는 과정에서 다시 장력이 약해진다.
- 4) θ 의 minimum과 장력의 maximum이 나타나는 시각이 일치하지 않는다. 즉, 위상차가 발생한다. 각도를 먼저 내리고 뒤로 힘을 주는 느낌이다.

이러한 시뮬레이션 결과는 우리가 경험을 통해 정성적으로 추측했던 내용과 일치하는 것이기 때문에 우리의 반동 모델이 줄다리기 반동을 잘 표현하고 있음을 확인할 수 있었다.

다. 반동에 따른 장력 변화 실험 탐구

수치 시뮬레이션에 이어서 실제로 사람이 줄을 잡고 반동을 주면서 각도 변화에 따른 장력 변화를 측정하는 실험을 실시하였다.

실험을 통해 수집한 사람의 각도 데이터를 우리의 반동 모델에 대입했을 때 나오는 장력의 예측값과 실제 측정된 장력 값을 비교하여 우리가 제안한 반동 모델과 수식이 타당한지 한 번 더 검증하고자 하였다.

장력(수평력)의 데이터는 기초탐구와 같은 방법으로 2축 플랫폼 센서를 이용하여 수집하였으며, 시간에 따른 각도 데이터를 얻기 위해 Tracker 프로그램을 이용하였다.(줄을 잡은 손목에 질점을 잡고 트래킹 하여 질점의 시간에 따른 x, y 위치 값을 얻고 $\theta = \tan^{-1}(\frac{y}{x})$ 의 관계를 이용해 θ 의 값을 구하였다.)

선수들의 반동 방식과 최대한 유사하도록 팔을 몸에 고정하고 수직 방향의 움직임만 있도록 통제하며 반동을 주었다.

이렇게 실험하여 얻은 각도 $\theta(t)$ 와 이 각도를 수식 11에 대입하여 얻은 장력 T 의 예측값은 다음과 같다.

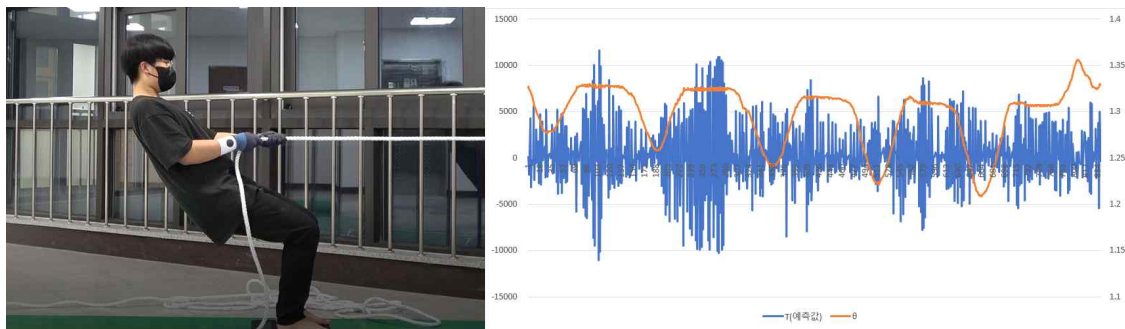


그림 22 반동을 주는 사람의 각도와 장력 변화 측정하는 모습 및 결과

보이는 것처럼 장력 예측값의 노이즈가 너무 심해 제대로 된 경향성을 파악하기 어려웠다. 이에 노이즈를 제거하기 위해 저역통과필터(Low Pass Filter, 이하 LPF)를 이용하여 예측값의 경향성을 보고자 하였다.

$$y_n = \frac{\tau}{\tau + t_s} y_{n-1} + \frac{t_s}{\tau + t_s} x_n$$

그림 23 LPF 함수

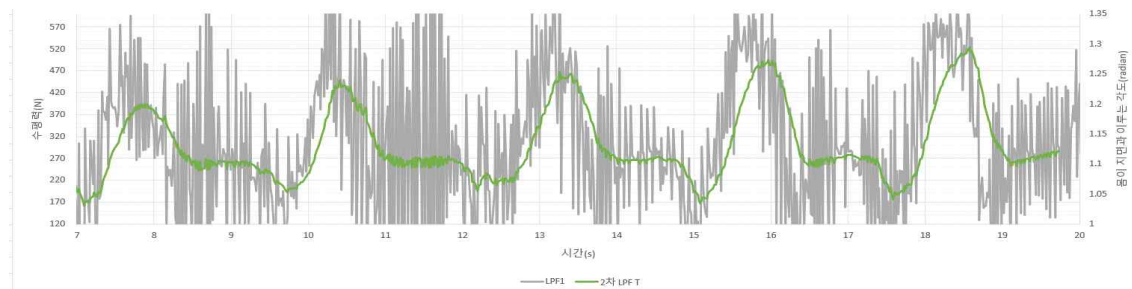


그림 24 저역 통과 필터(LP)가 2번 적용된 장력 데이터

위 그림처럼 총 두 번의 LPF를 통하여 노이즈가 거의 제거 된 장력 예측값과(초록색) 실제로 측정한 장력의 값(갈색)을 각도 변화(주황색)와 함께 나타낸 결과는 다음 그림과 같다. (LPF 필터링 과정에서 발생하는 시간 지연은 수동으로 보정 하였다.)



그림 25 반동의 동역학적 모델 시뮬레이션과 측정값 비교

위의 그래프에서 장력 예측값(초록색)과 측정값(갈색)의 모습이 거의 일치하여 나타나는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 우리가 제안한 반동의 동역학적 모델이 타당함을 검증하였다.

또한 반동의 시작과 끝 구간에 작아지는 장력을, 중간 가속하는 구간에 큰 장력을 나타내는 것을 발견할 수 있었다. θ 와 장력의 위상차 역시 관찰 가능하다.

반동을 줄 때 시간에 따른 각도변화,
수평력 시뮬레이션 결과, 수평력 실제 측정값

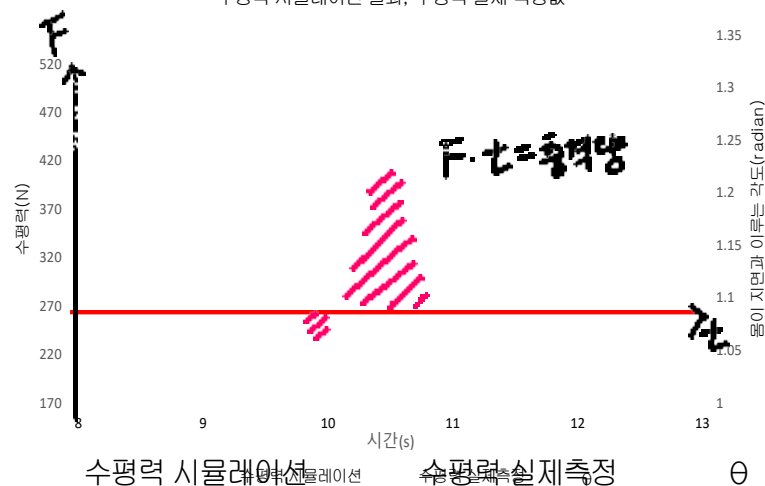


그림 26 반동을 주었을 때 장력(수평력) 변화와 충격량

그러나 가장 유의미한 결과는 반동을 줌으로써 장력의 평균값이 증가했다는 점이다. 위 그림 26의 빨간 빗금 친 부분의 넓이는 사람이 받은 수평 방향의 충격량을 의미한다. 그런데 그림에서 보다시피 반동에 의해 받은 음의 충격량(빨간 수평선 아래부분)보다 양의 충격량(빨간 수평선 위부분)이 크다. 이는 반동을 주는 한 주기 동안 수평방향으로 알짜 충격량을 받았음을 나타내고, 이는 반동이 상대방을 끌어

오는 데 효과가 있다는 점을 증명하는 것이다. 더 간단히 설명하면 반동에 의해 장력이 감소하는 구간에 비해 장력이 증가하는 구간이 더 크기 때문에 반동을 주면 평균 장력이 커진다는 점을 확인했다고 할 수 있다.

이러한 일련의 심화탐구 과정을 통해 우리가 예측하고 확인한 결과는 다음과 같다.

“반동을 주면 장력을 크게 하면서도 미끄러지지 않을 수 있다.”

3. 응용 탐구(로봇 개발) - 줄다리기 핵심 메커니즘을 반영한 로봇 개발

기초탐구와 심화탐구를 진행하면서 정역학, 동역학적으로 줄다리기의 메커니즘을 규명하였다. 하지만 사람이 직접 하는 실험으로는 변인 통제가 어려워서 더 다양한 실험을 진행하기에 어려움이 있었다. 그래서 줄다리기 로봇을 만들어 확실하게 변인을 통제하면서 실험을 한다면 줄다리기에 대해 더 많은 것을 알아낼 수 있지 않을까 생각하고 줄다리기 로봇을 개발하였다.

가. 줄다리기의 핵심 메커니즘

줄다리기 로봇을 개발하기 위해서는 줄다리기 로봇이 표현해야 할 줄다리기의 핵심 메커니즘을 정의할 필요가 있었다. 기초탐구와 심화탐구를 진행하면서 알아낸 최적의 각도 유지와 반동 메커니즘도 신기하고 재미있었지만, 이것만으로는 줄다리기의 승패가 갈리는 과정을 온전히 설명할 수 없었다.

제대로 설명 하지 못하는 가장 큰 이유는 사람 발의 움직임이었다. 실제 줄다리기는 발을 땅에 고정시키고 하는 것이 아니라 상황에 끌려가기도 하고 상대방을 끌고 오기도 하는 과정이 포함되어 있는데 이 끌려가고, 끌고 오는 발의 움직임을 어떤 물리적 원리로 표현할지 알 수 없었다.

그러다가 선수들의 경기 영상에서 선수들이 상대방의 강한 끌림에 이끌려 발을 주춤주춤 내딛는 모습을 볼 수 있었다.



그림 27 파란색 팀의 강한 공격에 초록색 팀의 몸이 들리자 초록색 팀은 발을 앞으로 주춤주춤 내딛고 파란색 팀은 뒤로 물러서서 다시 최적의 각도를 만들어내는 모습

이 장면에서 영감을 얻어 알아낸 줄다리기의 핵심 메커니즘은 줄을 당기기 위해 최적의 각도를 유지하고 버티던 사람이 어떤 변수에 의해 몸이 들리게 되면(각도가 커지면) 다시 최적의 각도를 맞추기 위해 발을 앞으로 이동하여 각도를 낮추고, 몸이 눕게 되면(각도가 작아지면) 미끄러지지 않기 위해 발을 뒤로 이동하여 각도를 높인다는 것이다.

이 내용과 기초탐구 심화탐구를 통해 알아낸 내용을 종합한 줄다리기의 핵심 메커니즘은 다음과 같다.

- 1) 미끄러지지 않으면서 가장 큰 장력을 만들기 위해 최적의 각도를 유지한다.
- 2) 몸이 들리면 발이 앞으로 가고 몸이 누우면 발이 뒤로 가서 최적의 각도로 복귀한다.
- 3) 더 큰 장력을 만들어 상대방을 끌어오기 위해 반동을 준다.

나. 줄다리기 로봇 ‘줄줄이’ 개발

1) 줄줄이의 탄생

줄다리기 로봇에서 필요한 기능을 위에서 설명한 핵심 메커니즘 세 가지로 정의했다.

이 중 첫 번째와 두 번째 메커니즘 즉, 최적의 각도를 유지하다가 각도가 커지면 앞으로 가고 각도가 작아지면 뒤로 가는 메커니즘이 세그웨이로 많이 알려진 셀프 밸런싱 휠의 원리와 같다는 생각을 하게 되었다.

세그웨이는 지면과 90도의 각도를 유지하다가 앞으로 밀면 직진하고, 뒤로 당기면 후진하는 기능을 통해 90도라는 각도를 유지하기 위해서 움직인다.

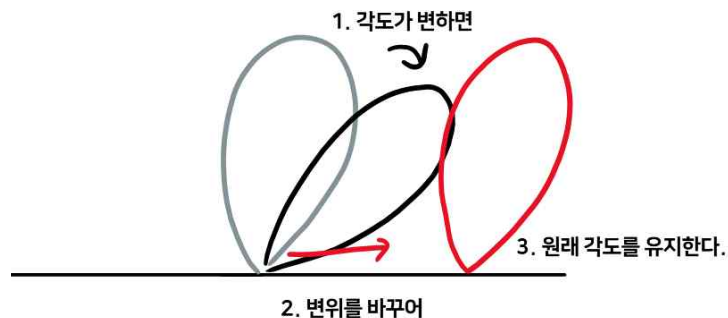


그림 28 세그웨이가 각도를 유지하기 위해 움직이는 모식도

이러한 셀프 밸런싱 휠의 원리를 적용하여 줄다리기 로봇 ‘줄줄이 1호’를 개발하였다. 이후에서 우리가 개발한 줄다리기 로봇을 ‘줄줄이’로 부르겠다.

줄줄이 1호는 기본적인 90도의 각도를 유지하는 셀프 밸런싱 휠로 제작하였다. 아두이노 기본 DC모터와 기울기 센서인 MPU6050을 이용하여 각도 유지 기능을 구현해보았다. IMU인 MPU6050을 통해서 각속도와 각가속도 값을 센싱하고, 센싱한 값

을 기본적인 칼만 필터를 통해서 yaw, pitch, roll 값으로 변환시켜준다. 변환시킨 값을 목표 값과 비교하여 모터를 돌리는 기본적인 로봇을 개발하였다.

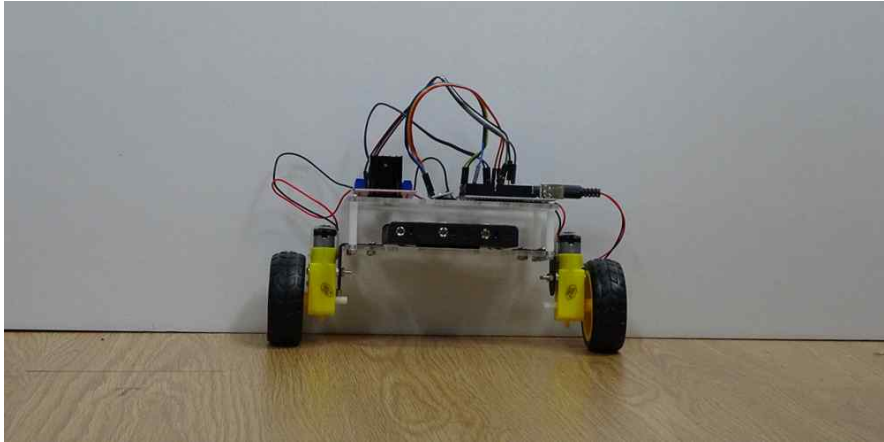


그림 29 세그웨이의 기능을 활용해 제작한 줄다리기 로봇(줄줄이 1호)
 하지만 좌우로 퍼진 모형으로 인해서 각도의 측정이 잘되지 않고, 무게중심의 변화가 적다는 문제점이 발생했다. 이런 문제를 해결하기 위해서 여러 줄줄이를 만들며 업그레이드시켜 실험에 사용할 수 있도록 하였다.

2) 줄줄이의 진화

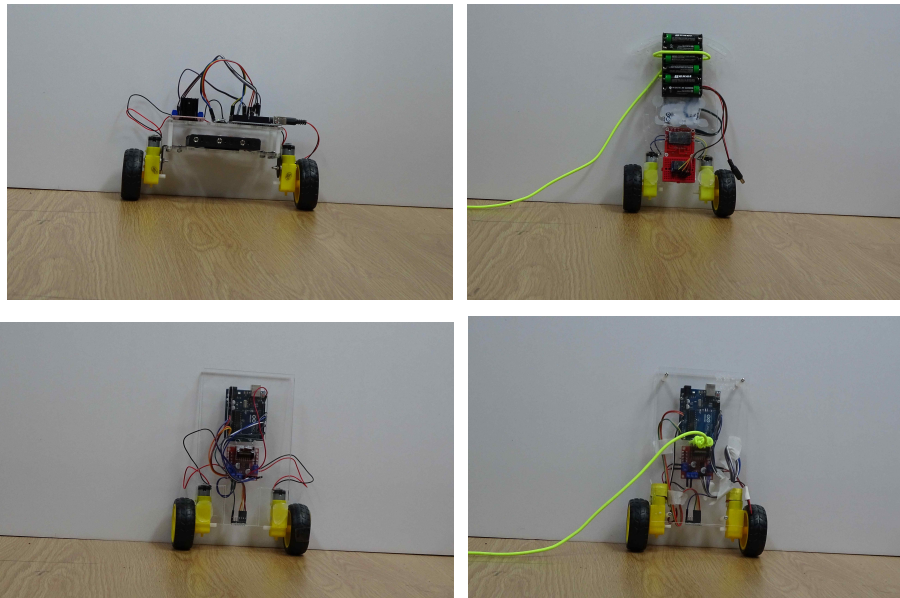


그림 30 줄줄이 1호~4호 사진

줄줄이 1호에서 발생한 옆으로 퍼져 각도 유지가 잘되지 않는 문제점을 해결하기 위해서 줄줄이 2호에서 조금 더 사람과 비슷한 모형으로 바꾸게 되었다. 줄줄이 2호에서는 배터리가 아래에 있어서 무게중심이 아래에 위치하게 되었다. 무게중심이 아래에 있어서 각도 유지에 있어서 많은 진동이 생기게 되었다. 줄줄이 2호의 문제점을 해결하기 위해서 줄줄이 3호에서는 무게중심을 위로 올리게 되었다. 추후 줄

의 설치 문제와 전원장치의 사용 등을 개선하면서 줄줄이 4호를 통한 각도 유지를 성공하였다.

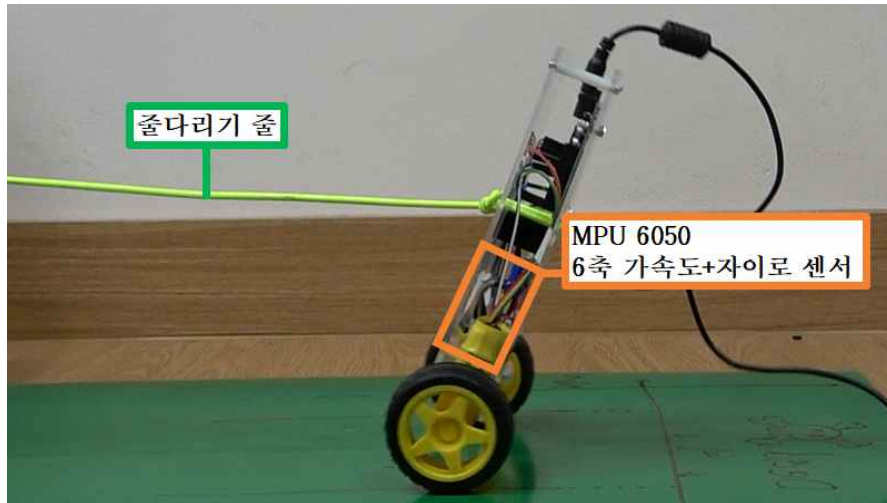


그림 31 각도 유지 기능 수행을 하는 줄줄이(4호)의 모습

각도 유지에 있어서 성공하였지만, 고질적인 아두이노의 기본 모터의 성능의 문제와 바퀴 크기에 따른 마찰력 문제와 관성 모멘트가 작은 문제점을 해결하기 위해서 줄줄이 5호를 제작하게 되었다.

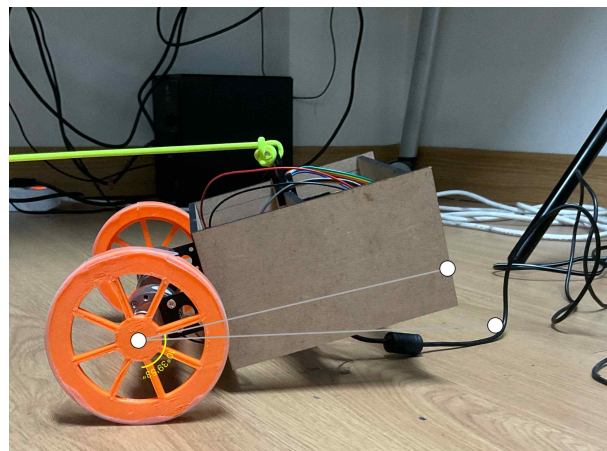


그림 32 줄줄이 5호가 10도의 각도를 유지하면서 버티는 모습

줄줄이 5호는 성능을 높인 DC 모터와 큰 바퀴를 이용하여 안정적으로 각도를 유지할 수 있게 되었다.

줄줄이 5호는 하드웨어 뿐만 아니라 제어 알고리즘에도 개선이 있었는데, 줄줄이의 각도 제어 방식은 PID 제어 방식이다. 90도를 유지하는 세그웨이와는 달리 기울어진 각도를 안정적으로 유지하기 위해서는 일정 각도에서 PID 계수가 달라져야 함을 알 수 있었고 30도를 기준으로 PID 계수를 다르게 적용하도록 코딩함으로써 아주 안정적으로 각도를 유지할 수 있었다. 또한 기본적인 줄줄이에서 질량을 추가하

기 위한 윗 공간을 제작하여 향후 실험 과정을 고려하였다.

줄줄이 6호는 반동을 줄 수 있는 알고리즘을 추가하였으며, 반동을 줄 때 줄을 묶은 위치가 상하 운동만 할 수 있도록 줄을 묶는 위치를 변경하였다.

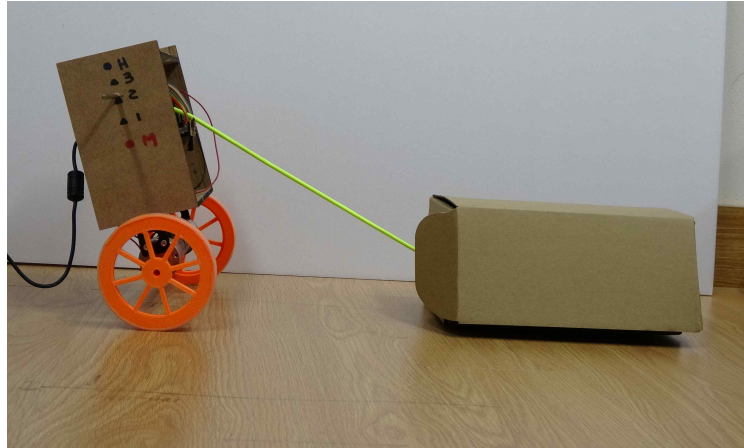


그림 33 반동을 주면서 상자를 당기는 줄줄이 6호

3) 줄줄이의 제어 알고리즘

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

수식 57 제어식을 통한 각속도와 각가속도의 ypr 값 변환

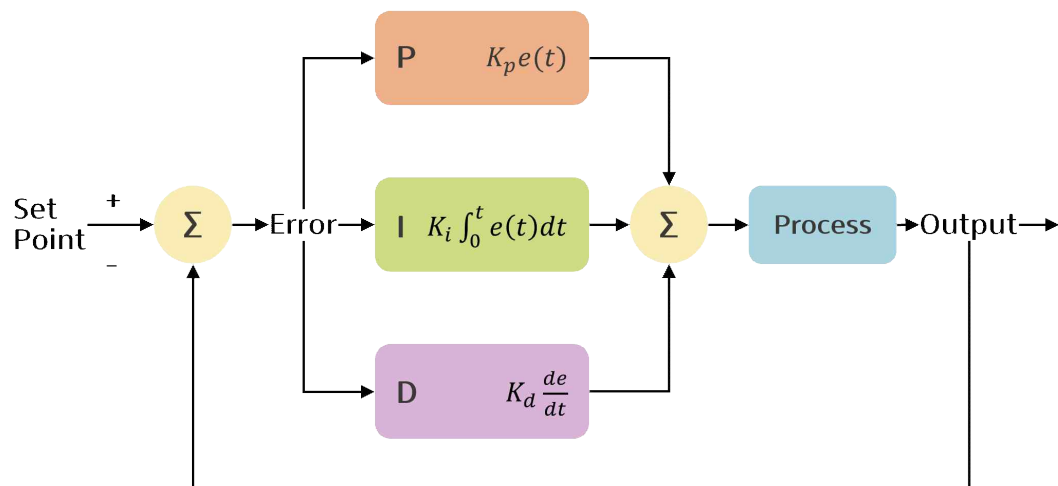


그림 34 세팅 값과 e 값을 통한 PID 피드백 묘사

4) 줄줄이의 반동

줄줄이 5호에서 각도를 유지하던 상황에서 탐구의 핵심인 반동을 표현하고자 하였다. 아래의 그림은 줄줄이 6호가 반동을 주는 모습이다.

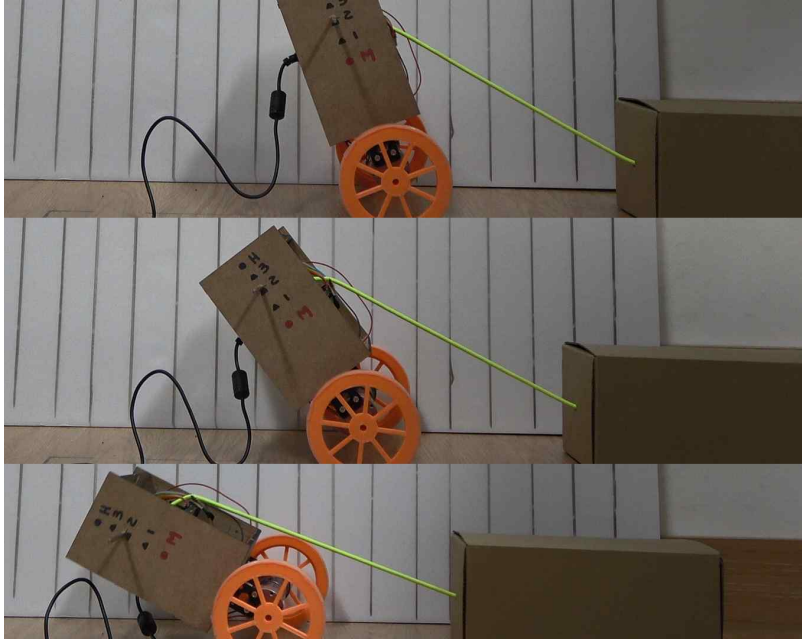


그림 35 자랑스러운 줄줄이 6호(모터를 통한 반동)

먼저 PID 계수의 변화를 통한 안정적인 각도 유지 상황에서 세팅 각도를 시간에 따른 함수화하였다. 시간에 따른 각 변화를 코드를 통해서 구현하였다.

```
void Rebound(double theta_0, double theta_b, unsigned long time_start, unsigned long time_b, unsigned long T)
// theta_0는 기본 세팅 각도, theta_b는 바운드 될 각도, time_start는 반동 시작 타이밍, time_b는 바운드 될 각도의 유지 시간, T은 주기
{
    timer = millis();
    setpoint = theta_0;          // degree(90) = 0, degree(60) = -30
    if(timer >= time_start && timer <= time_start + time_b)
    {
        setpoint = theta_b;
    }
    if(timer >= T)
    {
        timer0_millis=0;
    }
}
```

다. 줄줄이를 이용한 줄다리기 정역학 모델 검증

기초탐구에서 제안한 줄다리기 정역학 모델을 줄다리기 로봇 줄줄이를 통하여 검증하고자 하였다.

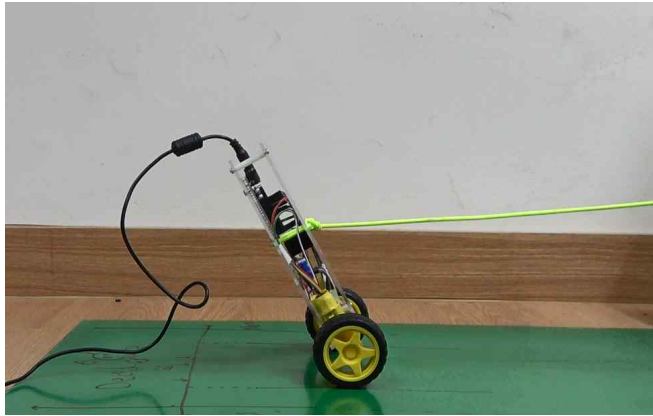


그림 37 줄줄이 각도 세팅 60도

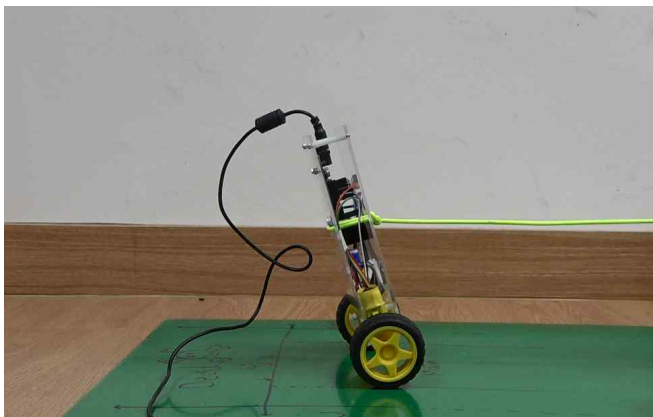


그림 38 줄줄이 각도 세팅 80도

60도부터 80도까지 각도를 설정하고 힘 센서 줄에 연결해 각도별 평균 장력을 구하였다.

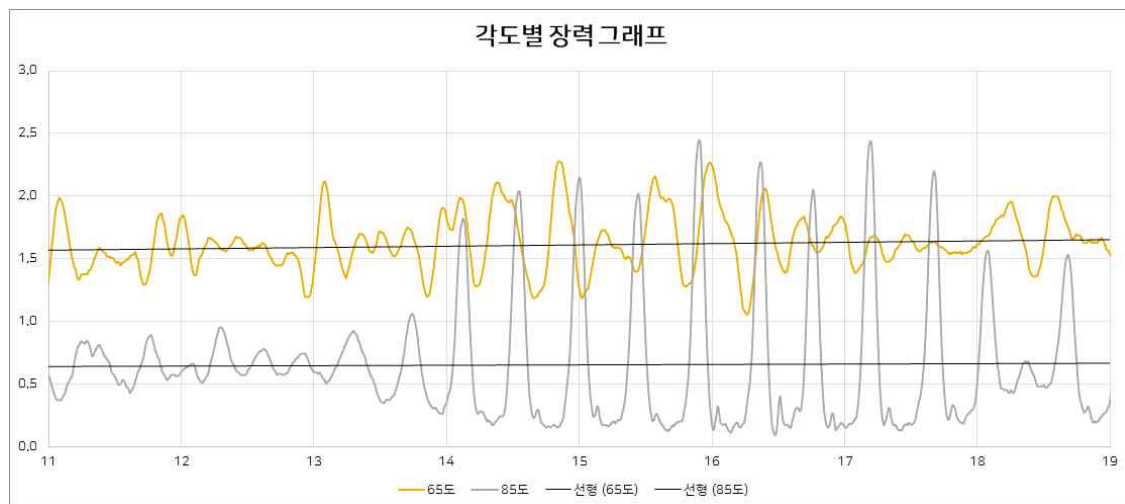


그림 39 각도 65도랑 85도 장력 비교

위 65도와 85도의 각도별 장력 평균을 비교하더라도 65도는 평균 장력이 1.6N, 85도는 평균 장력이 0.7N임을 알 수 있다. 65도부터 85도까지 5도 간격으로 3번의 실험을 한 결과는 다음과 같다.

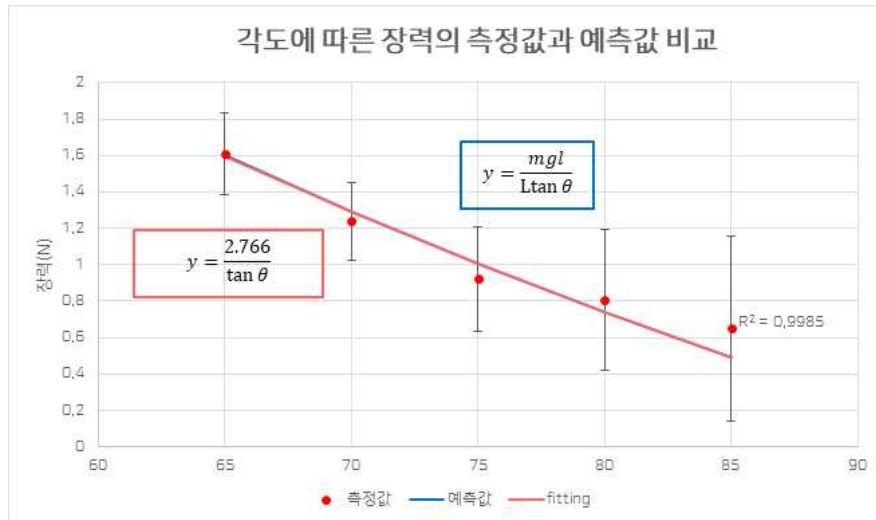


그림 40 각도에 따른 장력의 측정값과 예측값 비교

측정 각도	60	65	70	75	80
장력(N)	1.61129	1.23837	0.92225	0.80773	0.65173
표준편차	0.22407	0.21458	0.2867	0.38905	0.5068

m	0.32
l	0.12341
L	0.13983
g	9.8
mg*/L	2.76774

그림 41 측정 각도에 따른 장력과 표준편차

기초탐구의 결과와 같이 각도가 커짐에 따라 장력이 작아지는 경향을 보였는데 커브 피팅을 해 본 결과 이론적인 예측값과 놀라울 정도로 일치하는 결과를 얻었다. 이 결과를 통해 우리가 개발한 줄다리기 로봇 줄줄이가 줄다리기 원리 탐구를 위한 실험에 사용할 수 있을 정도의 성능임을 확인할 수 있었다.

라. 줄줄이를 이용한 줄다리기 동역학 모델 검증

줄다리기 핵심 메커니즘 중 하나인 반동에 대해 심화탐구를 통해 밝혀낸 내용을 줄줄이를 통해서 검증하는 탐구를 진행하고자 하였다.

반동은 줄의 높이 변화와 코딩을 통해서 진행하였다. 이때, 힘 센서로 측정한 줄줄이의 장력은 줄의 탄성으로 인한 떨림 때문에 노이즈가 많이 졌다. 따라서 추후 줄의 질량을 줄이고 적절한 탄성을 가진 줄을 사용하여 노이즈를 줄이고자 한다. 줄줄이의 시간에 따른 장력은 다음 그림과 같다.

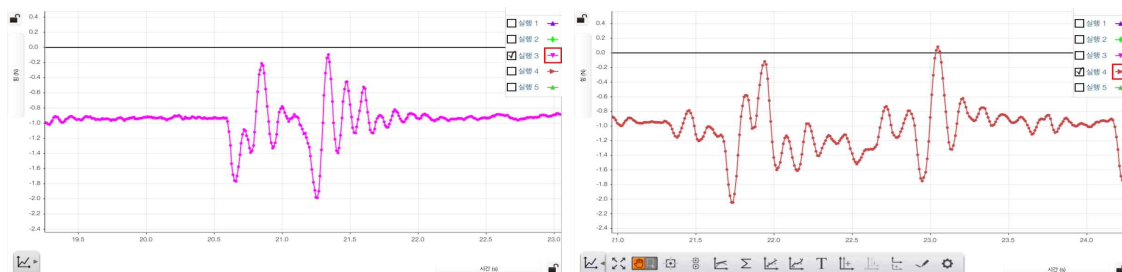


그림 43 각도 변화를 한 장력 그래프(좌), 줄의 반동으로 인해서 노이즈가 낀 그래프(우)

줄줄이의 반동 제어는 줄을 묶는 위치와 코딩의 시간에 따른 각도 변화를 통해 가

능하도록 개발하였다.

그림 43의 좌측 그래프처럼 반동을 주도록 설정한 줄줄이는 각도를 유지하던 자세에서는 끌어오지 못하던 1kg의 박스를 반동을 주면서 끌어오는 모습을 보이게 되었다.

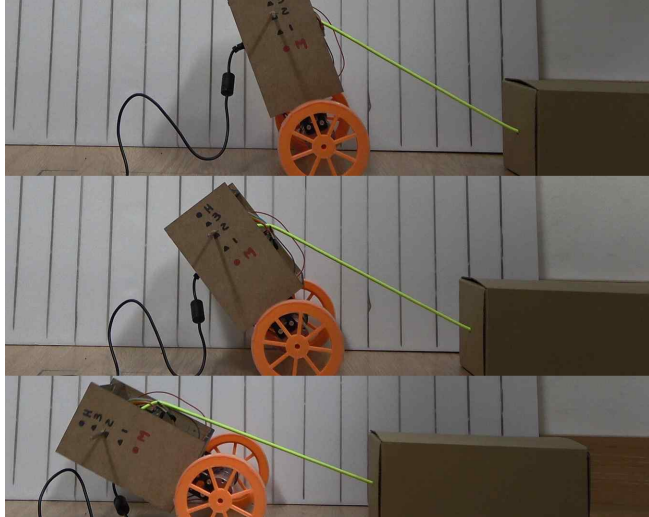


그림 44 반동 주면서 상자를 끌어오는 줄줄이 6호

V

결론 및 활용 방안

1. 결론 및 향후 탐구 계획

가. 줄다리기의 승패를 결정하는 핵심 메커니즘을 밝혀내었다.

1) 최적의 각도를 유지하다가 끌려가고 끌려오는 상황을 셀프 밸런싱 휠의 원리로 설명하였다.

2) 반동을 주면 버티고 있을 때보다 더 큰 힘으로 상대방을 끌어올 수 있다는 사실을 이론적, 실험적 방법으로 밝혀냈다.

나. 밝혀낸 핵심 메커니즘을 표현할 수 있는 줄다리기 로봇을 개발하였다.

다. 개발한 줄다리기 로봇을 이용하여 최적의 줄다리기 전략을 찾아내고자 한다.

라. 개발한 줄다리기 로봇을 이용하여 전문 선수의 줄다리기 전략과 아마추어 일반인의 줄다리기 전략이 다른 이유를

알아내고자 한다.

2. 활용 방안

- 가. 우리가 알아낸 줄다리기의 핵심 메커니즘 및 반동 모델은 이전에는 전혀 존재하지 않던 줄다리기의 물리 모델이다. 따라서 우리의 모델을 활용하면 더 다양하고 심도 있는 줄다리기 연구가 시작될 수 있을 것이다.
- 나. 우리가 알아낸 반동 메커니즘은 재난 구조 로봇, 행성 탐사 로봇 등이 자신의 한계를 초과하는 물체를 끌어당기는 알고리즘으로 활용될 수 있을 것이다.
- 다. 우리가 알아낸 반동 메커니즘을 전인차에 적용하면 눈이나 진흙에 빠져 헛바퀴가 도는 상황에서 순간적으로 큰 힘을 내 빠져나올 수 있을 것이다.

VI 참고문헌

- [1] Ken Zetie (2013). Forces Tug of war. BSB학술지
<https://ebsb.britishschool.be/resource.aspx?id=136476>
- [2] Kaveh, A. (2016). Tug of War Optimization. Advances in Metaheuristic Algorithms for Optimal Design of Structures, 451-487. doi:10.1007/978-3-319-46173-1_15
- [3] Kaveh A, Zolghadr A. (2017). A NOVEL META-HEURISTIC ALGORITHM: TUG OF WAR OPTIMIZATION. International Journal of Optimization in Civil Engineering. 6 (4) :469-492
- [4] 양 팀이 최적의 각도를 유지하면서 평형을 유지하고 있는 모습 자료. (2019).
<https://www.youtube.com/watch?v=Po-8kyhV2cU>
- [5] 마찰계수가 극대화된 상황에서 각도를 낮춰 장력을 최대로 한 상황 자료 (2019).
<https://www.youtube.com/watch?v=VYjvh40UWVo>
- [6] 줄다리기 민간 속설의 물리학적 검토 줄다리기 이기는 방법. (2006). 네이버 블로그
<https://m.blog.naver.com/PostView.naver?isHttpsRedirect=true&blogId=edusang&logNo=50011791004>
- [7] 김성필. (2019). 칼만 필터는 어렵지 않아 with MATLAB Examples. 한빛아카데미(주).