

외측 인대 손상 환자들을 위한 발목 운동 보조
로봇

Ankle Exercise Assistive Robot for Patients with Lateral
Collateral Ligament Injuries

상명대학교

휴먼지능로봇공학과

000

2023년 10월

2023년 10월

외측 인대 손상 환자들을 위한 발목 운동 보조
로봇

Ankle Exercise Assistive Robot for Patients with Lateral
Collateral Ligament Injuries

지도교수 최 현 진

본 논문을 학사학위 논문으로 제출함

상명대학교

휴먼지능로봇공학과

000

2023년 10월

0 0 0의
학사학위 논문을 인준함

심사위원 염 기 원 ①

심사위원 봉 재 환 ①

심사위원 정 성 균 ①

상명대학교

2023년 10월

차 례

그림 차례	i
표 차례	ii
국문 요약	iii
1. 서론	1
2. 발목 운동 보조 로봇	4
2.1. 발목 운동 보조 로봇 구성	6
2.2. 발목 운동 보조 로봇 설계	6
2.2.1. 발목 운동 보조 로봇의 착용구	6
2.2.2. 발목 운동 보조 로봇의 받침대	9
2.2.3. 전체 발목 운동 보조 로봇	12
2.3. 발목 운동 보조 로봇의 전장부	14
2.3.1. 발목 운동 메커니즘	14
2.3.2. 각도 측정 제어기 설계	14
2.3.3. 발목 운동 보조 로봇의 제어 흐름도	15
2.3.4. PID 제어	18
3. 발목 재활 보조 로봇의 실험	19
3.1. 실험 환경	19
3.2. 실험 내용 및 결과	21
4. 결론	22
참고 문헌	23
ABSTRACT	25

그림 차례

<그림 1> 발목 운동 보드 경사대[14]	2
<그림 2> 전동 스트레칭 발목 재활기[15]	2
<그림 3> 발목의 정상적인 움직임	4
<그림 4> 발목의 배측굴곡과 저측굴곡	4
<그림 5> Thera-Band strengthening exercises for the lower leg	5
<그림 6> 발목 운동 보조 로봇 구성도	6
<그림 7> 발의 각 구간 분류	7
<그림 8> 발목 재활 보조 로봇의 착용구	7
<그림 9> 발목 재활 보조 로봇의 착용구	8
<그림 10> FSR센서	9
<그림 11> 차압센서	9
<그림 12> FSR센서(a)와 차압센서에 연결된 공압튜브(b)	9
<그림 13> 발목 재활 보조 로봇의 받침대	10
<그림 14> 로봇의 가변저항과 모터	11
<그림 15> 가변저항	12
<그림 16> 가변저항의 브라켓	12
<그림 17> 기어	12
<그림 18> 기어와 모터 브라켓	12
<그림 19> 발목 운동 보조 로봇	13
<그림 20> 실제로 착용한 발목 운동 보조 로봇	13
<그림 21> 전체 회로도	14
<그림 22> 발목 재활 로봇 시스템	17

<그림 23> 발목 재활 보조 로봇의 기본 자세	18
<그림 24> 발목 재활 보조 로봇의 전장부	20
<그림 25> 하단부 공압튜브	20
<그림 26> 상단부 FSR 센서	20
<그림 27> 상단부 FSR 센서	21

표 차례

<제목 차례>

<표 1> 스위치 동작에 따른 모드 6

국 문 요 약

외측 인대 손상 환자들을 위한 발목 운동 로봇

발목 염좌는 일상생활에서 자주 접할 수 있는 질환으로, 발목을 제자리에 유지하는 인대의 파열이다. 주로 발목이 뒤틀리는 경우 발생하게 되는데, 초기 재활 치료가 제대로 되지 않을 경우 만성 질환으로 발전할 수 있기 때문에 지속적인 재활 치료가 중요시된다. 발목 재활을 위한 다양한 기기가 개발되고 있으나, 시중에 나와있는 운동 기기는 수동적이거나 가격의 부담이 커 흥미 부족이나 접근성이 안 좋다는 단점이 있다. 본 논문에서는 압력센서와 엔코더 모터를 활용한 발목 운동 보조 로봇을 제안한다. 로봇은 사용자가 압력센서에 힘을 가할 경우 모터가 사용자가 운동 방향과 동일한 방향으로 회전하면서 근력운동을 보조한다. 근력 운동 시 인간의 발목 상하운동 가동 범위를 고려하여 적절한 운동을 할 수 있도록 설계했다. 저가형 발목 운동 보조 로봇은 병원에 가지 않아도 가정에서 간단한 상하운동을 통해 지속적인 발목 운동을 지원한다.

1. 서론

발목 염좌는 스포츠 활동 뿐만 아니라 일상 생활 중에도 흔히 발생하는 부상으로, 전문적인 운동선수 뿐만 아니라 일반인들에게도 흔하게 나타나는 근골격계 부상 중 하나이다[1][2]. 발목 염좌는 관절 주위에 있는 다양한 인대의 손상을 야기하며 해부학적으로 크게 경비 인대 염좌(tibiofibular syndesmosis, high ankle sprain), 내측 발목 염좌(deltoid ligament), 외측 발목 염좌로 구분할 수 있다. 이 중에서 가장 흔한 경우는 발목의 족저 굴곡 자세에서 내번력(in-version)에 의해 외측 인대 복합체의 손상을 일으키는 외측 발목 염좌로, 전체 발목 염좌의 약 90~95% 정도를 차지한다고 보고되고 있다[3,4]. 일반적으로는 수상 후 3주 이내에 발생한 발목 인대 손상을 급성 염좌로 분류한다[5]. 급성 외측 발목 염좌의 약 20~30% 정도는 재손상이나 만성 발목 관절 불안정증으로 이행된다고 보고되어 있다[6]. 또한 염좌 시 동반될 수 있는 비골건 손상, 경비골 인대결합부 손상, 발목 주위 신경 건인 손상 등으로 인한 만성 통증이 발생할 수도 있기 때문에[7,8] 발목 염좌에 대한 적절한 초기 치료와 재발 예방 조치는 만성 불안정증을 예방하는 중요한 역할을 한다[9,10]. 급성 발목 염좌에 대한 치료는 현재 다양한 치료법과 임상결과가 시행되고 있다. 특히 비수술적 치료는 대부분의 급성 외측 발목 염좌에서 가장 주된 치료 방법이다. 최근 발목 염좌에 대한 임상진료지침에 따르면, 관절의 기능 회복을 위해서는 운동치료가 권장되고 있다. 발목 관절 주위의 근력 강화 운동을 시행함으로써 향후 발생할 수 있는 근력 약화, 자세 조정능력 저하 등을 예방하여 재손상이나 만성 불안정증을 방지할 수 있다[11]. 그러나 아직까지도 급성 발목 염좌는 대수롭지 않은 질환으로 간주하는 경향이 있어 제대로 된 치료를 받지 못하여 만성 불안정성으로 이행되는 경우가 많아 다양한 저자들이 급성 발목 염좌 후의 가장 중요한 예후인자는 효율적인 재활치료를 제시하고 있다[12,13]. 이에 따라, 환자 상태에 따라 병원 또는 가정에서 지속적으로 활용할 수 있는 발목 운동 기기의

필요성이 점차 부각되고 있다.

현재 판매중인 운동 기구들을 살펴보면, <그림 1>에서 나타난 것과 같이 사용자가 직접 운동을 주도하고 수행해야 하는 수동적인 기구들이 주를 이루고 있다. 한편, <그림 2>처럼 모터의 동력을 이용해 스트레칭을 돕는 제품들은 높은 가격대를 지닌 경우가 대부분이다. 이러한 제품들은 50만원대를 웃도는 가격대로 판매되고 있어 소비자들에게 경제적 부담을 줄 수 있다.



<그림 1> 발목 운동 보드 경사대[14]

(출처:<https://eonecare.co.kr/index.html>)



<그림 2> 전동 스트레칭 발목 재활기[15]

(출처:<https://ko.aliexpress.com/>)

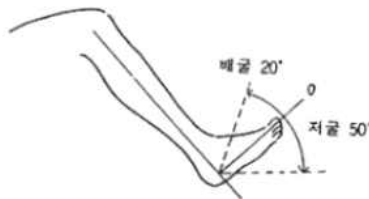
수동적 운동은 사용자의 의지와 노력에 의존하는 특성을 지녀, 이로 인해 운동에 대한 동기 부여가 어려워지고 지속적인 운동이 어려울 수 있다. 특히 현대사

회에서는 바쁜 일정, 운동에 대한 흥미 부족 등으로 수동적인 운동을 규칙적으로 꾸준히 진행하는 것이 어렵다. 모터의 동력을 이용하는 제품들은 이러한 수동적인 특성을 극복하고자 개발된 제품들이지만, 대부분 높은 가격대를 유지하고 있어 소비자들에게 접근성을 제한할 수 있다는 단점이 있다.

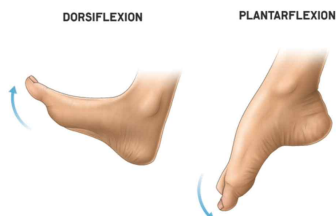
따라서 본 연구에서는 다양한 발목 운동 기기들의 단점을 보완하여 가정에서 사용하기 쉬운 발목 운동 기기를 개발하였다. 기존의 운동 기기들은 사용자가 직접 운동을 주도하고 수행해야 하는 반면, 본 연구에서 제안하는 로봇은 사용자의 발 힘과 모터 동력을 결합하여 운동의 효과를 극대화한다. 모터를 통해 발목 운동을 동적으로 제어해 사용자는 운동에 적극적으로 참여할 수 있으며, 모터가 제공하는 저항성을 통해 운동효과를 증가시킬 수 있다. 이를 통해 사용자는 효과적으로 발목 근육의 강화 및 유연성을 향상시킬 수 있다. 또한, 3D 프린팅 기술을 활용하여 제작된 로봇은 사용자의 하지 사이즈에 맞게 조절이 가능하므로, 신체적 특성과 상태를 고려한 맞춤형 로봇을 제작할 수 있다. ABS 소재로 경량화된 로봇은 가정에서 운동기구를 자유롭게 사용할 수 있도록 하여 사용자가 운동을 지속적으로 수행할 수 있도록 한다.

2. 발목 운동 보조 로봇

족관절의 정상가동범위는 <그림 3>에 나타냈다. <그림 4>에서 나타낸 배측굴곡(dorsiflexion)은 발의 등쪽 측면과 경골의 전방 측면이 가까워지게 움직이는 움직임을 의미한다. 이 동작은 다양한 기능적 움직임 및 전체 운동 사슬의 올바른 기능을 위아래로 제공하는 중요한 부분이다. 배측 굴곡은 일상생활에서 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 의자에 앉았다가 서거나 계단을 오르내리는 것과 같은 간단한 일상적인 활동에서도 발목의 적절한 굴곡이 필요하다. 또한, 이 동작은 전반적인 균형과 안정성을 유지하는 데에도 기여한다. 족저굴곡(plantarflexion)은 다른 말로 신전(extension)이라고도 불리며, 발의 등쪽 면을 경골에서 멀어지게 하는 움직임을 의미한다. 이 동작은 빠르게 걷거나 달리기와 같은 움직임에서 중요한 역할을 한다. 이러한 족관절의 정상 가동 범위를 유지하고 향상시키는 것은 일상 생활에서의 편의성과 운동 능력을 향상시키는 데 도움이 되며, 또한 부상 예방과 근육 및 인대의 유연성 유지에 기여한다.



<그림 3> 발목의 정상적인 움직임



<그림 4> 발목의 배측굴곡과 저측굴곡

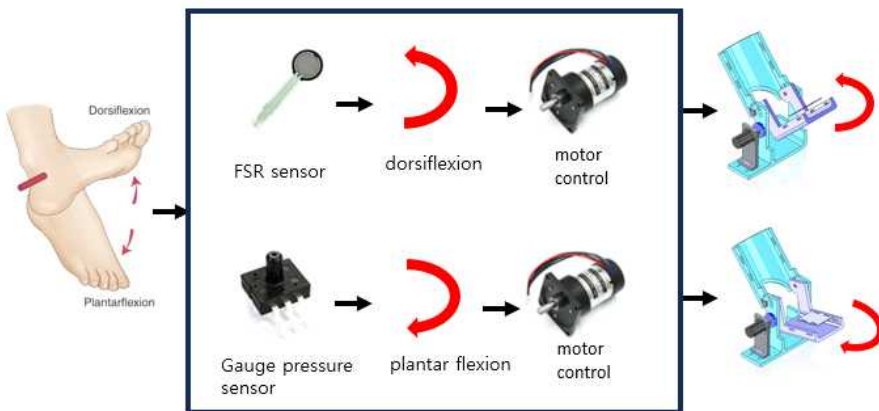
외측 인대 손상 환자들을 위한 발목 재활 운동은 다양하다. 그중에서도 본 연구에서는 배측굴곡과 족저굴곡 움직임을 이용한 발목 근력 운동을 보조를 연구 목표로 진행하였다. <그림 5>에서 나타낸 세라밴드를 활용한 근력 강화 스트레칭의 단계는 다음과 같다. 먼저 A의 운동을 진행하고 할 때는 운동하려는 발을 선택한 후 해당하는 발에 세라밴드를 연결한다. 이때 세라밴드는 다른 물체에 고정되어 있어야 한다. 이때 세라밴드가 저항력을 제공하는 상태에서 발을 얼굴 쪽으로 당긴다. 운동 B는 운동 A와 반대로, 세라밴드의 끝을 손에 쥐고 아래로 부드럽게 누르며 저항력을 느낀다. 본 논문에서 제안하는 로봇은 A와 B 운동을 이용하여 발목 운동이 가능하도록 설계하였다.



<그림 5> Thera-Band strengthening exercises for the lower leg
(출처:<https://www.andorrapediatrics.com/shin-splints>)

2.1. 발목 운동 보조 로봇 구성

<그림 6>은 발목 운동 보조 로봇의 시스템 구성도를 나타냈다. 이 시스템은 사용자의 발목 움직임을 감지하고, 그에 맞춰 모터를 제어하여 발목 운동을 보조한다. 사용자가 로봇에 부착된 압력 센서와 FSR 센서에 압력을 가하면, 이 센서들은 발목에서 발생하는 압력을 감지한다. 이후 시스템은 수집된 데이터를 이용하여 사용자가 시도하려는 발목 운동 알고리즘을 사용하여 배측굴곡, 족저굴곡 운동을 식별한다. 시스템은 판단된 사용자의 발목 운동 방향과 일치하도록 모터를 제어한다. 모터는 발목을 움직이는데 필요한 힘을 생성하여 사용자의 발목 운동을 보조한다.



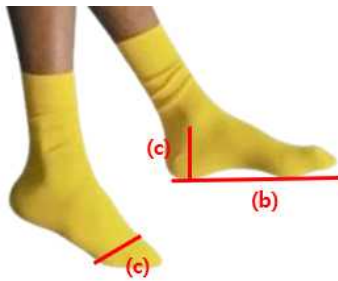
<그림 6> 발목 운동 보조 로봇 구성도

2.2. 발목 운동 보조 로봇 설계

2.2.1. 발목 운동 보조 로봇의 착용구

<그림 7>에서는 발에 대한 각 구간의 분류를 보여준다. (a)는 거골뼈까지의 길이, (b)는 발의 가로 길이, (c)는 발볼의 넓이를 나타냈다. 피실험자의 발의 규격

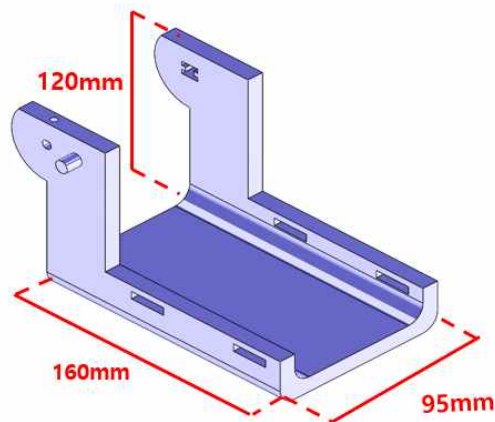
은 (a)는 85mm, (b)는 233mm, (C)는 88mm로 측정되었다.



- (a)-바닥에서 거골뼈까지의 길이
- (b)-발길이
- (c)-발볼의 넓이

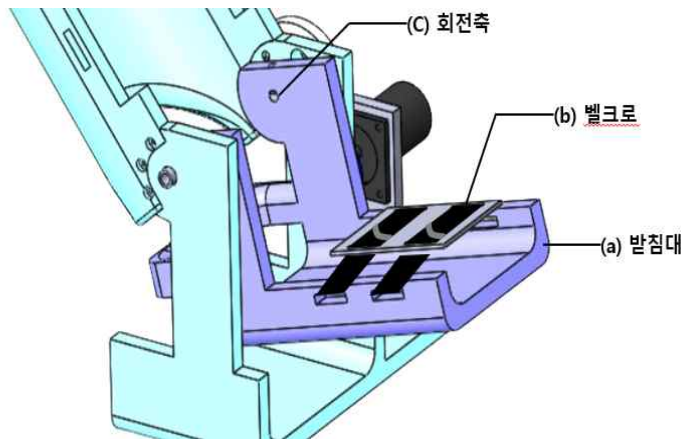
<그림 7> 발의 각 구간 분류

이 연구에서 사용된 착용구는 사용자의 다양한 발 크기와 형태를 고려하여 설계되었다. 특히, 피실험자의 개별 발 크기에 따라 맞춤 제작되었으며, 추후에는 사용자의 개별적인 발 크기에 맞게 조절하여 제작할 수 있는 유연성을 갖췄다. 이를 나타내기 위해 <그림 8>은 사용자의 발 치수에 따라 설계된 로봇의 치수를 시각적으로 보여주고 있다.



<그림 8> 발목 재활 보조 로봇의 착용구

사용자가 로봇을 착용했을 때 발을 안정적으로 고정하기 위해 벨크로가 사용되었으며, (<그림 9>의 a와 b 참고) 착용구의 뒷부분은 사용자의 발 뒤꿈치를 거치하여 사용자의 발이 목표한 위치에 안정적으로 놓이도록 설계하였다. 착용구의 설계 중 <그림 9>의 c는 사용자의 거골뼈 위치를 기반으로 설정한 회전축을 의미한다. 이 회전축은 로봇이 사용자의 발에 맞도록 하며, 이는 착용자가 안정적으로 운동을 수행할 수 있도록 도와준다.



<그림 9> 발목 재활 보조 로봇의 착용구

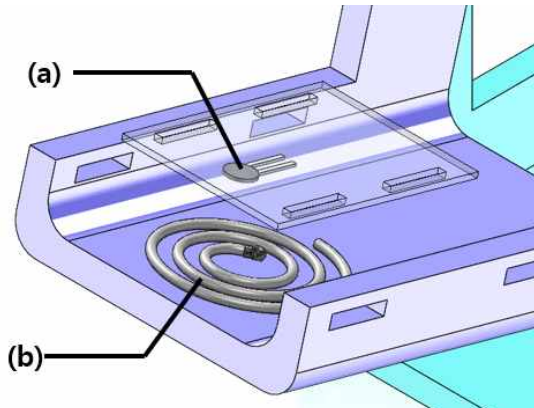
<그림 10>에서 나타내고 있는 FSR 센서는 착용구의 위쪽에 위치한 판에 부착되었으며, <그림 11>에서 나타낸 차압센서는 <그림 12>가 나타내는 것처럼 공압튜브를 착용구의 하단에 부착하여 압력 변화를 감지한다. 상단과 하단 부위에서 모두 차압센서로 운동을 감지하려는 시도를 하였으나, 발등을 들어 올릴 때 공압튜브에 압력이 제대로 전달되지 않아 정확한 감지가 어려웠다. 이에 따라, 상단부에서는 FSR 센서로의 전환을 결정하게 되었다. FSR 센서는 발등과의 직접적인 접촉을 통해 압력 변화를 감지하므로, 사용자의 발등 동작을 더욱 정밀하게 감지할 수 있다. FSR과 차압센서를 함께 사용함으로써, 두 센서의 조합을 통해 운동의 더욱 정확한 감지를 하도록 하였다.



<그림 10> FSR 센서



<그림 11> 차압 센서



<그림 12> FSR 센서(a)와 차압 센서에 연결된 공압튜브(b)

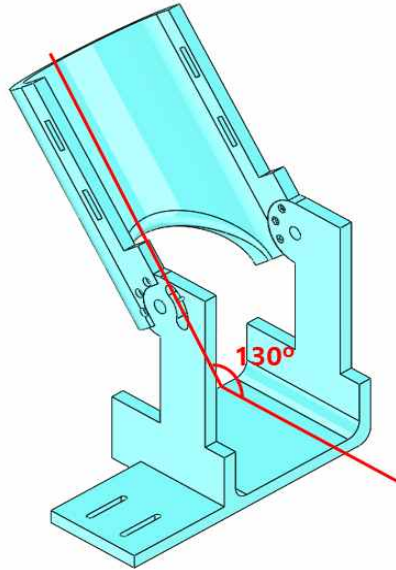
2.2.2. 발목 운동 보조 로봇의 받침대

<그림 13>은 발목 운동 보조 로봇의 받침대를 세부적으로 나타낸 부분이다. 이 받침대는 발목 염좌로 고생하는 환자들이 소파나 의자에 편안히 앉아서 사용할 수 있도록 고려하여 설계되었다. 실험 결과를 기반으로 받침대와 바닥 간의 각도는 130도로 설정되었다. 이 각도는 피험자들이 편안하게 느껴졌던 각도로 판단되었다.

발목 운동 중 발목과 종아리 부분이 닿을 때의 불편함을 최소화하기 위해, 받침대의 모서리는 필렛엣지 처리되어 부드럽고 둥글게 깎였다. 이를 통해 사용자가

운동 로봇을 사용할 때 발목 부분에서 발생할 수 있는 불편함을 최소화하였다.

받침대의 종아리 부분은 종아리 둘레의 절반을 감싸도록 설계되어, 종아리에 적절한 지지를 제공하면서도 사용자의 편의성을 고려하였다.

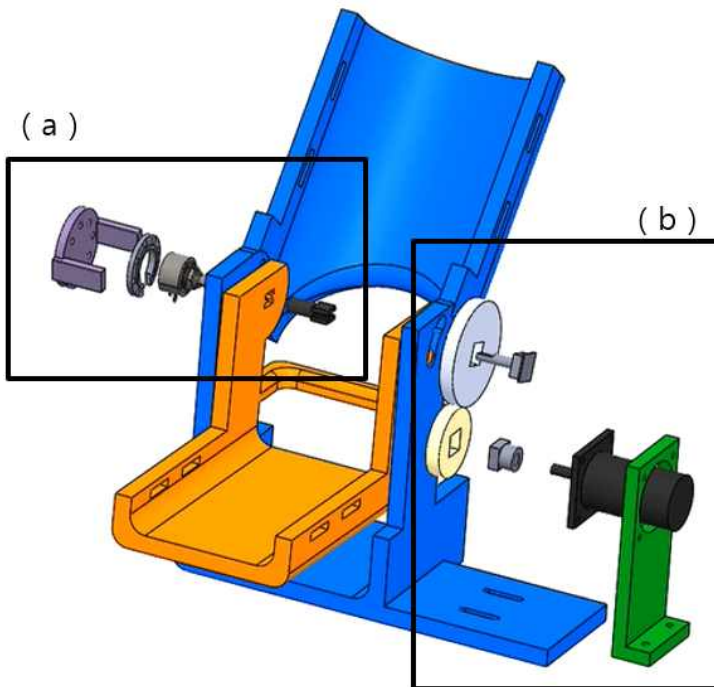


<그림 13> 발목 재활 보조 로봇의 받침대

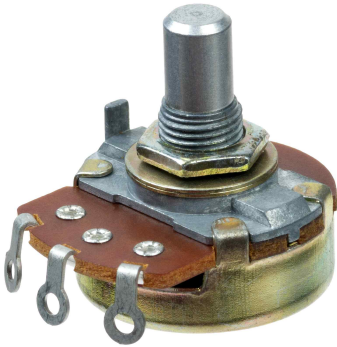
<그림 14>의 (a)는 가변저항(<그림 15> 참고)과 그것을 고정하기 위한 브라켓이다(<그림 16> 참고). 해당 로봇은 모터의 회전을 통해 착용구의 회전각을 제어하는 것이 중요하다. 이를 위해 착용구의 위치 파악은 필수적이다. 하지만 모터에 부착된 엔코더는 모터의 상대적인 위치만을 측정할 수 있을 뿐, 착용구의 절대적인 위치를 파악하는 것이 불가능하다. 그럴 경우, 착용구의 위치 파악 오류가 발생할 시 모터가 발목관절의 허용 가능한 회전 범위를 초과하여 회전할 가능성이 있다. 모터의 엔코더는 전원이 인가될 때 모터의 초기 위치를 0으로 설정하고, 이 위치에서부터 엔코더 채널을 이용해 모터의 현재 위치를 감지한다. 반면 가변저항은 부피가 작고 저렴하며, 소량의 배선으로도 각도에 대응하는 아날로그 전압 출력을 통해

절대 각도를 검출할 수 있다.[5] 이러한 가변저항의 특성을 이용하여, 착용구의 절대적인 위치를 도출하여 더욱 정밀한 제어를 하기 위해 발목의 복숭아뼈 위치를 기준으로 포텐서 미터를 사용하여 발의 움직임을 측정하였다.

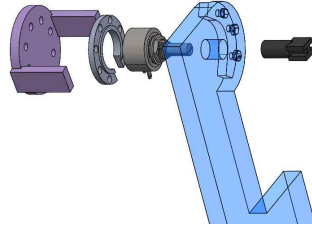
<그림 14>의 (b)에는 착용구와 모터를 연결하기 위해 기어(<그림 17> 참고)와 브라켓을 사용하였다(<그림 18> 참고). 기어는 감속기어를 사용하여 착용구의 회전 속도를 줄이고 모터를 보조하여 안정적인 운동이 가능하도록 하였다.



<그림 14> 로봇의 가변저항과 모터



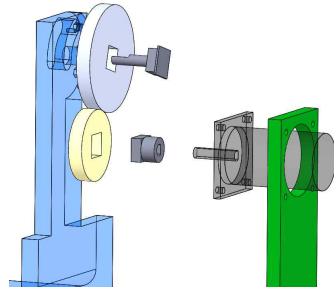
<그림 15> 가변저항



<그림 16> 가변저항의 브라켓



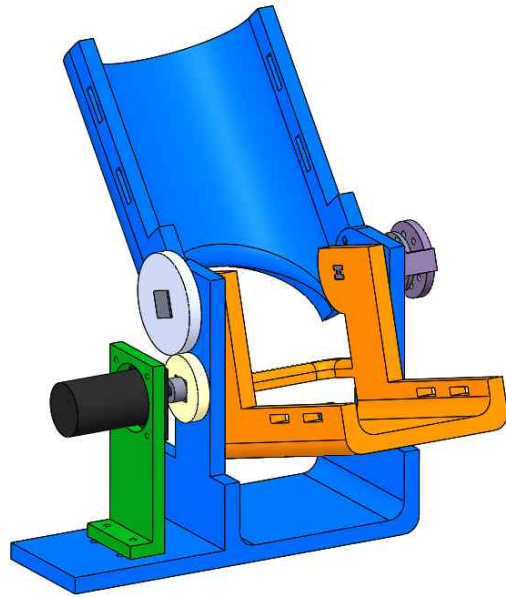
<그림 17> 기어



<그림 18> 기어와 모터 브라켓

2.2.3. 전체 발목 운동 보조 로봇

앞의 2.3.1에서부터 2.3.3까지는 각 부분별 설계 및 제작에 대해서 기술하였다. 전체 기구 설계는 <그림 19>에서 나타내었다. <그림 20>은 제작을 완료하여 실제로 착용한 사진이다.



<그림 19> 발목 운동 보조 로봇



<그림 20> 실제로 착용한 발목 운동 보조 로봇

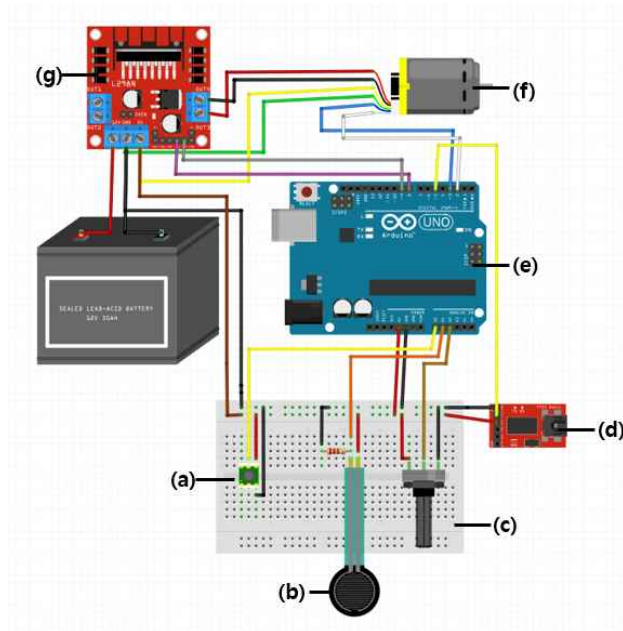
2.3. 발목 운동 보조 로봇의 전장부

2.3.1. 발목 운동 메커니즘

발목 운동은 압력센서와 모터 간의 상호작용을 기반으로 한다. 본 논문에서 개발한 발목 운동 로봇의 주요 목표는 특정 압력을 일정하게 유지하는 것이다. 이를 위해 시스템은 목표값과 비교하여 압력센서에 강한 힘이 가해질 경우, 사용자의 발이 힘을 가하는 방향으로 모터를 조절하여 압력 값을 목표 압력 값으로 유지하도록 한다. 사용자의 발이 특정 압력을 가하려 할 때 모터는 이러한 사용자의 의도를 감지한 후, 압력센서의 측정치와 목표 압력 값을 일치시키는 데 필요한 힘을 가하게 된다.

2.3.2. 각도 측정 제어기 설계

제안하는 시스템의 전체 흐름도는 <그림 21>에서 나타냈다.



<그림 21> 전체 회로도

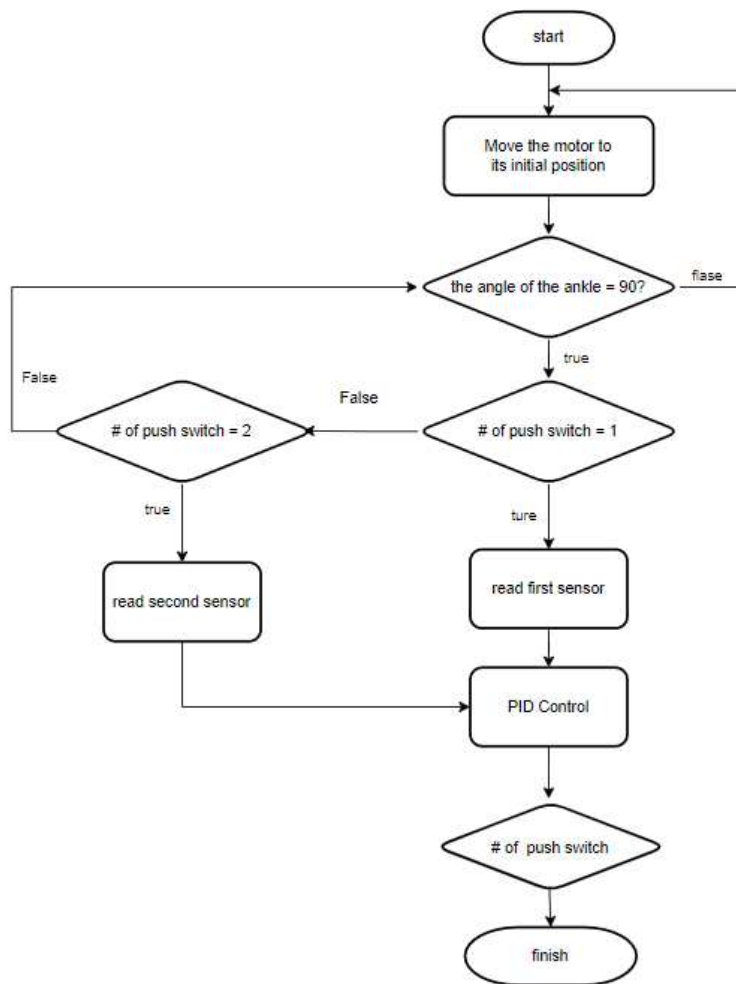
<그림 21>의 (a)는 차압센서이며, 착용구에서 사용자의 발바닥과 맞닿는 부분에 부착된 공압튜브를 통해 발바닥과의 압력 변화를 감지한다. (b)는 FSR 센서이며, 착용구에서 사용자의 발등과 맞닿는 부분에 부착된 센서이다. 사용자의 발등 동작을 감지하는 역할을 수행한다. 차압센서와 FSR 센서는 아날로그 센서이며, 아두이노에 연결되어 센서 값을 전달한다. (c)는 가변저항이며, 발목의 움직임을 측정하기 위해 사용된다. 발목의 위치에 따라 가변저항의 회전값이 변경되어 아두이노에 입력된다. (d)는 스위치이며, 사용자의 의도에 따라 다른 발목 운동 모드를 선택할 수 있도록 한다. 스위치 1번 누를 시 배측굴곡 운동, 2번 누를 시 저측굴곡 운동 모드로 전환한다. (e)는 아두이노이며, 센서들의 입력값을 받아와 로봇의 동작을 제어한다. 프로그램된 알고리즘에 따라 차압센서, FSR 센서, 가변저항의 값을 해석하여 모터 드라이버를 통해 모터를 제어한다. (f)는 DC 모터는 발목 운동을 제어하기 위해 사용된다. 아두이노와 모터 드라이버에 연결되어, 아두이노 명령에 따라 발목을 움직인다. (g)는 모터 드라이버이며, 모터에 전원을 공급하고 회전방향과 속도를 제어한다.

2.3.3. 발목 운동 보조 로봇의 제어 흐름도

<그림 22>은 발목 재활 보조 로봇의 제어 알고리즘 순서도이다. 스위치를 통해 사용자가 선택한 운동 방향에 따라 모터를 동작시키고, 센서들의 감지 정보를 기반으로 발목 운동을 도와주는 시스템으로 구성되어 있다. <표 1>은 스위치의 누른 횟수에 따라 하고자 하는 재활 운동 방향을 나타낸다. 로봇의 초기 상태는 <그림 22>에서 나타냈다. 스위치를 한 번 누르면 로봇은 상단부 재활 운동을 시작한다. FSR 압력센서의 값을 읽어오고, PID 제어를 활용하여 압력을 일정한 수준으로 유지하도록 모터를 반시계 방향으로 회전한다. 또한 PID 제어 도중 가변저항을 통해 모터의 현재 위치를 파악하며, 안전 범위를 벗어나는 경우 모터를 정지시킨다. 스위치를 한번 더 누르면 로봇은 하단부 재활 운동을 시작한다. 차압센서의 값을

읽어오고, 상단부와 동일한 방식으로 모터를 제어하여 안정적인 운동을 제공한다.

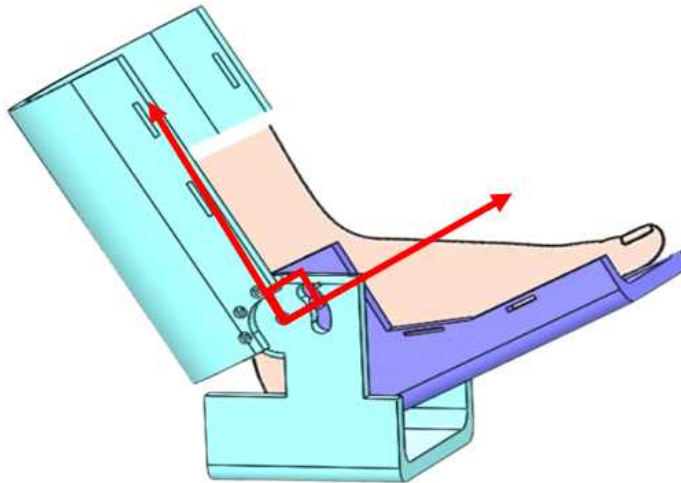
사용자의 발목 운동이 지속되는 동안 센서는 운동 방향과 압력을 감지하여 모터를 조절한다. 사용자가 스위치를 한번 더 눌러 운동을 중지하면 시스템은 모터를 정지시켜 초기 상태로 돌아간다. 이후 다음 운동을 위해 초기화 상태로 전환된다.



<그림 22> 발목 재활 로봇 시스템

<표 1> 스위치 동작에 따른 모드

SWITCH	0	1	2
MODE	모터 초기화	상단부 운동	하단부 운동



<그림 23> 발목 재활 보조 로봇의 기본 자세

2.3.4. PID 제어

모터의 방향 제어는 PID 제어로 이루어진다. 제어는 제어 대상의 출력을 측정하고 목표값과 비교하여 계산한 오차값을 이용해 제어에 필요한 제어량을 계산하여 출력값이 목표값에 가까워지도록 하는 제어 방식이다. 제어기는 플랜트의 특성에 따라 P, PI, PD, PID 등과 같이 각 제어 동작이 선형적으로 결합되어 사용된다. PID 제어기 출력 즉 플랜트 제어 입력 $u(t)$ 는 사용자가 설정하는 목표값과 센서를 통해 피드백되는 플랜트 변수 사이의 오차에 대해 비례, 적분 및 미분 동작을 결합하면 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
u(t) &= K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} + u_0 \\
&= K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] + u_0
\end{aligned}
\tag{1}$$

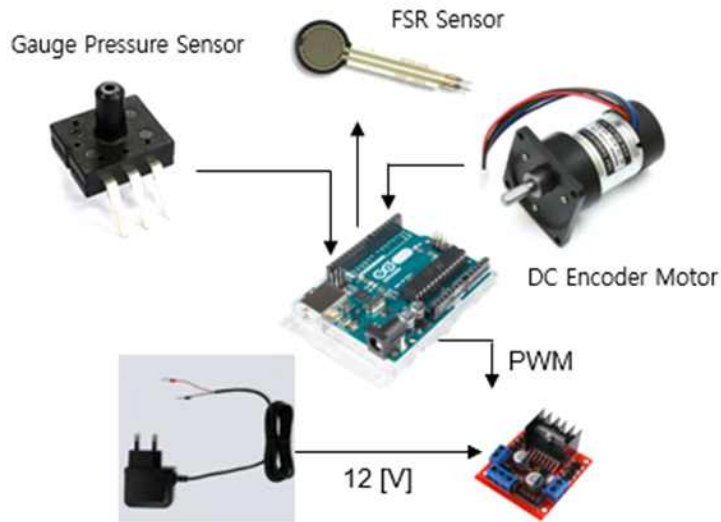
여기서 $e(t)$ 는 오차, K_p, K_i, K_d 는 각각 비례, 적분, 미분이득, T_i, T_d 는 적분 및 미분시간을 의미한다.

본 논문에서는 목표값을 센서의 압력 값으로 설정하여 목표 압력 값을 유지하는 방향으로 모터를 제어하여 근력 운동을 보조하도록 하였다.

3. 발목 재활 보조 로봇의 실험

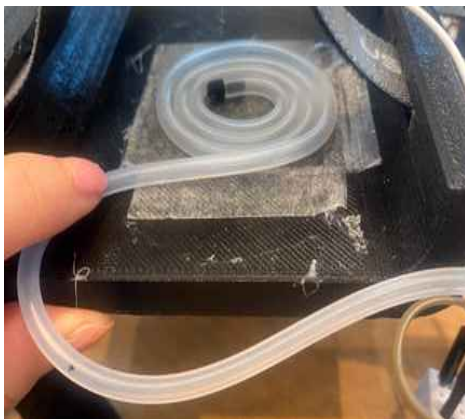
3.1. 실험 환경

<그림 24>는 발목 재활 보조 로봇 전장부의 전체 회로도를 나타냈다. 센서와 모터 제어를 위해 아두이노 우노 R3를 사용하였다. 모터는 모터의 회전수와 속도를 감지할 수 있으며 로봇을 통해 사용자의 근력 운동을 보조하기 위해 엔코더 모터(RB-35GM+Encoder 21TYPE)를 사용하였다. 상단부의 압력을 측정하기 위해 FSR 센서를 하단부의 압력을 측정하기 위해 차압센서(53A-L15H-2210)를 사용하였다. 엔코더 모터를 구동하기 위해 12V의 전압을 인가하였다.



<그림 24> 발목 재활 보조 로봇의 전장부

차압센서에는 직경이 3mm, 길이가 50cm인 실리콘 튜브를 연결하고 끝을 막은 후 동그란 원의 형태로 <그림 25>과 같이 착용구의 발판 부분에 부착하여 사용자가 하단부 재활 운동을 할 때 튜브 내의 압력을 측정하도록 하였다. FSR 센서 또한 <그림 26>과 같이 부착하였다.

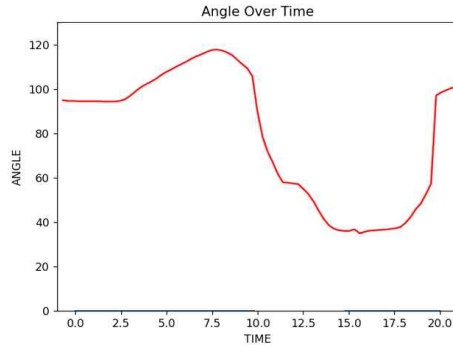


<그림 25> 하단부 공압튜브

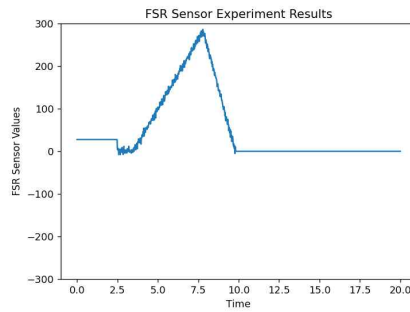


<그림 26> 상단부 FSR 센서

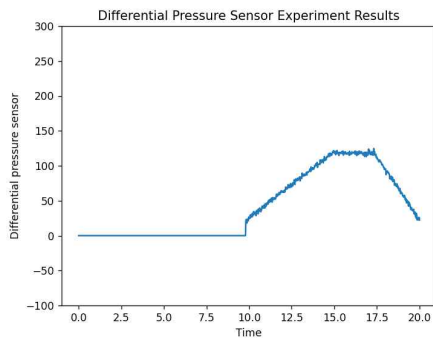
3.2. 실험 내용 및 결과



(a)



(b)



(c)

<그림 27> (a)-발목 운동 보조 로봇의 발목 각도

(b)-FSR 센서 출력 값

(c.)-차압센서 출력 값

실험 결과는 세 가지 주요 측면에서 나타났다. <그림 27>의 (a) 그래프에서는 발목 운동의 동작을 시각적으로 보여준다. 초기 자세는 발목의 각도를 90도로 설정했기 때문에 그래프는 90도에서 시작한다. 로봇의 스위치를 한번 누르면 발등을 들어올리는 배측굴곡 운동이 시작되어 발목의 각도가 반시계 방향으로 회전하면서 그래프가 상승한다. 이는 발목이 위로 올라가는 동작을 의미한다. 발목 운동 중 발등을 들어올릴 때 발생하는 각도의 변화는 약 20도이다. 상승 운동을 한 후에는 다시 초기 위치인 90도로 돌아오게 되는데, 이때 스위치를 한 번 더 누르면 발바닥에 압력을 주는 저측굴곡 운동이 시작된다. 발바닥을 밀어내릴 때 발생하는 각도의 변화는 약 40도이다. 마지막으로 하강 동작을 완료하면 다시 초기위치로 돌아와 그래프가 다시 90도로 올라갔다.

<그림 27>의 (b)그래프에서는 FSR 센서의 응답을 나타낸다. 그래프에서 관찰되는 FSR 센서 값의 상승과 하강은 발목 운동에 따른 변화를 나타낸다. 발등을 들어올리는 운동 시 센서 값이 상승하고, 발을 발바닥쪽으로 끌어내릴 때 센서 값이 하강한다. 이를 통해 발등을 들어올리는 운동인 배측굴곡 운동을 판단할 수 있음을 확인할 수 있다.

<그림 27>의 (c)그래프에서는 차압 센서의 반응을 설명한다. 생성된 그래프에서 차압 센서의 값의 상승과 하강은 발목 운동에 따른 변화를 나타낸다. 발바닥을 아래로 내리는 운동을 했을 때 센서 값이 상승하고, 공압튜브에서 발을 멀리하려 할 때 센서값이 하강한다. 이를 통해 발바닥을 내리는 운동인 저측굴곡 운동을 판단할 수 있음을 확인할 수 있다.

발등을 들어 올리는 운동 시 센서값이 상승하고, 발을 발바닥 쪽으로 끌어내릴 때 센서값이 하강함으로써 발목의 동작이 센서에 반영됨을 확인했다. 이러한 결과는 로봇이 사용자의 발목 움직임을 효과적으로 감지하고 해석할 수 있다는 것을 시사한다. 따라서 이 로봇은 사용자의 운동 방향을 파악하여 제어할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 발목 염좌 등의 질환으로 인해 재활 운동이 필요한 사람들을 위한 가정용 발목 운동 로봇을 개발하였다. 압력 센서와 모터를 활용해 로봇이 사용자가 가하는 힘의 크기에 따라 모터를 회전시켜 일정 힘을 유지하도록 만들어 근력 운동을 보조할 수 있도록 하였다. 실험 결과, 발목 재활 로봇이 발목 회전에 부하를 가함으로써 사용자의 재활 운동을 돕는 효과를 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 로봇은 비교적 저렴하게 제작할 수 있으며, 사용자는 집에서 별도의 비용 부담 없이 지속적인 발목 운동을 수행할 수 있다. 하지만 현재 제작된 로봇은 발목 상하 운동만 가능한 구조로 이루어져 있어, 다음에는 다양한 발목 재활 운동을 보조할 수 있도록 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 이 연구를 통해 개발한 로봇이 M.C. Hoch[16], H.S.Na[17]의 선행 연구에서 나타낸 만성 뇌졸중 환자의 발목관절에 적용된 관절 가동술과 유사한 효과를 제공할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서 제안한 로봇이 족하수 치료에 도움이 될 수 있는 동작을 수행하며, 추후에는 족하수 치료에 중점을 두어 맞춤형 치료를 제공하는 프로그램을 수행할 수 있도록 개발한다면 높은 효율성과 정교한 치료 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Waterman BR, Owens BD, Davey S et al. The epidemiology of ankle sprains in the United States. *J Bone Joint Surg Am.* 2010;92(13):2279-84.
- [2] Gribble PA, Bleakley CM, Caulfield BM et al. Evidence review for the 2016 international ankle consortium consensus statement on the prevalence, impact and long-term consequences of lateral ankle sprains. *Br J Sports Med.* 2016;50(24):1496-505.
- [3] Kerkhoffs GM / 2007 / Surgical versus conservative treatment for acute injuries of the lateral ligament complex of the ankle in adults / *Cochrane Database Syst Rev* 2 : CD000380~
- [4] van den Bekerom MP / 2013 / Management of acute lateral ankle ligament injury in the athlete / *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21 : 1390~1395
- [5] Sung KS / 2016 / Acute ankle sprains / *Arthrosc Orthop Sports Med* 3 : 11~17
- [6] Hubbard TJ / 2008 / Ligament laxity following inversion injury with and without chronic ankle instability / *Foot Ankle Int* 29 : 305~311
- [7] Patrick J. O'Neill / 2007 / Excursion and Strain of the Superficial Peroneal Nerve During Inversion Ankle Sprain / *The Journal of Bone & Joint Surgery* 89 (5) : 979-986
- [8] Konradsen L / 2002 / Factors contributing to chronic ankle instability : kinesthesia and joint position sense / *J Athl Train* 37 : 381~385
- [9] 김학준 / 2014 / 족관절 염좌의 보존적 치료 / *대한정형외과학회지* 49 (1) : 07~12
- [10] O' Neill PJ / 2007 / Excursion and strain of the superficial peroneal nerve during inversion ankle sprain / *J Bone Joint Surg Am* 89 : 979-986
- [11] Kerkhoffs GM / 2012 / Diagnosis, treatment and prevention of ankle sprains : an evidence-based clinical guideline / *Br J Sports Med* 46 : 854~860
- [12] Al-Mohrej OA / 2016 / Acute ankle sprain : conservative or surgical approach? / *EFORT Open Rev* 1 : 34~44
- [13] Seah R / 2011 / Managing ankle sprains in primary care : what is best practice? A systematic review of the last 10 years of evidence / *Br Med Bull* 97 : 105~135
- [14] eonecare.<https://eonecare.co.kr/index.html>(accessed Nov. 24, 2023).
- [15] Carry mechanical equipment Store.<https://ko.aliexpress.com/>(accessed Nov. 24, 2023).
- [16] M.C.Hoch, P.O.McKeon, “Joint mobilization improves spatiotemporal postural control and range of motion in those with chronic ankle instability” ,

Journal of Orthopaedic Research, 29(3), 326-332, 2011.

- [17] H.S.Na, J.G.Her, T. S. Ko, J.S.Lee, J. GH. Woo, Y. Y. You, Y.E.Choi, “The Effects of Manual Therapy and Stretching on middle Aged Female Balance and Center of Pressure” , Hanyang University journal of aging society, 3, 17-31, 2012.

ABSTRACT

Ankle motion assist robot for patients with external ligament injury

Shin, YuJin

Dept. of Human Intelligence Robot Engineering

Sangmyung University

Ankle sprain is a disease that is often encountered in everyday life, and is a rupture of ligaments that keep the ankle in place. It usually occurs when the ankle is twisted, and continuous rehabilitation treatment is important because it can develop into chronic diseases if initial rehabilitation treatment is not done properly. Various devices are being developed for ankle rehabilitation, but sports devices on the market are passive or have a high price burden, which has the disadvantage of lack of interest or poor accessibility. In this paper, we propose an ankle motion assistance robot using a pressure sensor and an encoder motor. When a user applies a force to a pressure sensor, the robot assists in muscle strength exercise by rotating the motor in the same direction as the user's motion direction. It is designed so that appropriate exercise can be performed in consideration of the range of motion of the human ankle up and down during muscle exercise. Low-cost ankle exercise

assist robots support continuous ankle exercise through simple up-and-down exercises at home without going to the hospital.