

NREH: 다양한 운동과 데이터 수집이 가능한 가정용 상지재활로봇

NREH: Upper Extremity Rehabilitation Robot for Various Exercises and Data Collection at Home

송준용¹ · 이성훈¹ · 송원경[†]

Jun-Yong Song¹, Seong-Hoon Lee¹, Won-Kyung Song[†]

Abstract: In this paper, we introduce an upper extremity rehabilitation robot, NREH (NRC End-effector based Rehabilitation arm at Home). Through NREH, stroke survivors could continuously exercise their upper extremities at home. NREH allows a user to hold the handle of the end-effector of the robot arm. NREH is a end-effector-based robot that moves the arm on a two-dimensional plane, but the tilt angle can be adjusted to mimic a movement similar to that in a three-dimensional space. Depending on the tilting angle, it is possible to perform customized exercises that can adjust the difficulty for each user. The user can sit down facing the robot and perform exercises such as arm reaching. When the user sits 90 degrees sideways, the user can also exercise their arms on a plane parallel to the sagittal plane. NREH was designed to be as simple as possible considering its use at home. By applying error augmentation, the exercise effect can be increased, and assistance force or resistance force can be applied as needed. Using an encoder on two actuators and a force/torque sensor on the end-effector, NREH can continuously collect and analyze the user's movement data.

Keywords: Upper Extremity, Rehabilitation Robot, End-effector-based, Tilting Angle, Home, Error Augmentation, Display, Assist-as-needed, Data

1. 서 론

뇌졸중으로 인한 장애인은 가족들의 도움이 제공되거나 기타 다양한 이유로 마비된 팔을 잘 사용하지 않게 된다^[1]. 이는 마비된 근육의 약화를 초래한다. 환측 팔을 더 사용하지 않게 되는 악순환으로 이어지고 건측만 사용하는 학습된 미사용 현상을 유발한다^[2]. 또한, 운동재활을 하는 데 있어서 환자에게 어색한 환경보다는 친숙한 환경에서 재활훈련을 할 경우 더욱 효과적

이기 때문에 가정에서도 지속적인 상지 운동이 필요하다^[3].

운동을 하고자 하는 개인의 의지도 중요하지만 가정에서 사용하기에 적합하고 일상생활에 도움이 될만한 상지재활로봇의 부재도 그 원인이 된다. Armeo Power나 Armeo Spring^[4]과 같이 3차원 공간에서 상지 운동을 할 수 있도록 도움을 주는 로봇은 가격이 비싸고 가정에서 사용하기에는 부피가 큰 단점이 있다. 이에 비해 구조가 조금 더 간단한 2차원 평면에서 운동을 할 수 있는 로봇장치도 많이 개발되고 있지만 일상생활과 관련된 다양한 작업에 대한 훈련을 제공하는데 한계가 있다.

국립재활원에서는 2016년도까지 편마비나 척수손상 등으로 상지의 근력이 없거나 약한 사람을 위해 일상생활과 관련된 동작이나 상지 운동을 도와줄 수 있는 상지재활로봇(NREX, NRC Robotic Exoskeleton)을 개발하였다^[5]. NREX는 경량형 외골격 로봇으로 3차원 공간상의 움직임이 가능하고 시판되고 있는 상지 외골격 로봇에 비해 최소한의 모터를 사용하여 간단하게 만들었다. 간단한 구조로 고장의 위험을 줄이고 부

Received : Aug. 4, 2023; Revised : Sep. 22, 2023; Accepted : Oct. 20, 2023

※ This project was supported by the Research Program of National Rehabilitation Research Institute, Korea National Rehabilitation Center [NRCTR-IN18006, NRCTR-IN19006, NRCTR-IN20006, NRCTR-IN21005, NRCTR-IN22004]

1. Researcher, Department of Rehabilitative & Assistive Technology, National Rehabilitation Center, 58 Samgaksan-ro, Gangbuk-gu, Seoul, 01022, Korea (swjli, lsh1799@korea.kr)

† Director, Corresponding author: Department of Rehabilitative & Assistive Technology, National Rehabilitation Center, 58 Samgaksan-ro, Gangbuk-gu, Seoul, 01022, Korea (wksong@nrc.go.kr)

피도 작기 때문에 보관이 용이하다. 저렴하고 작동 방법이 간단하여 다양한 사용자가 사용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 NREH의 경우 항중력 시스템 및 어깨 관절의 움직임은 보조하기 위한 자유도가 높은 외골격 타입의 로봇으로 크기를 줄이는 데 한계가 있고, 착용 등 가정에서 사용자가 혼자 사용하기에는 힘든 부분이 있다.

상기의 여러 가지 문제들을 해결하기 위해 국립재활원에서는 가정에서 일상생활과 관련된 다양한 동작의 상지 운동을 하기에 적합한 말단자(End-effector) 기반의 가정용 상지재활로봇 NREH (NRC End-effector based Rehabilitation arm at Home)를 개발하였다⁶⁾. NREH는 말단자를 기반으로 하는 평면 상지 운동을 지원하며, 상지 운동 평면의 기울기 조절이 가능하고, 사용자 피드백 조절 및 데이터 수집과 같은 다양한 소프트웨어적 대응 능력을 갖추고 있다. 따라서, 본 연구의 가설은 가정에서 사용할 수 있는 재활로봇으로 사용자의 운동능력을 유지/향상할 수 있고, 데이터 수집을 통해 개인화된 운동과 피드백을 제공할 수 있다는 점이다.

NREH는 다음과 같은 특성을 가진다. 첫째, 평면 운동을 하는 로봇 팔을 틸팅(Tilting)하여 움직임 난이도를 조절할 수 있어 사용자 맞춤형 운동이 가능하다. 둘째, 사용자가 실제 위치 오차보다 위치 오차를 크게 느끼도록 왜곡하여 상지 운동의 효과를 높일 수 있는 오차증강(Error Augmentation)^{17,8)}을 적용하는 등 다양한 조건 하에서 상지 운동이 가능하다. 셋째, 간단한 구성과 작은 크기로 가정에서의 사용에 적합하다. 넷째, 다양한 데이터 수집 및 응용을 지원한다. 2장에서는 NREH의 기구 및 제어의 설계, 3장에서는 사용성 평가를 통한 데이터 수집에 대해 설명하고, 4장에서는 NREH에 대한 다양한 의견을 정리하고, 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대해 논의한다.

2. 로봇 설계

2.1 가정에서 사용

NREH는 병원뿐만 아니라 가정에서도 사용할 수 있도록 만든 상지재활로봇이다. 병원에서 사용하는 로봇은 다양한 유형의 장애를 가지고 신체 크기가 다른 대부분의 사용자가 이용할 수 있어야 하기 때문에 크기 변경, 기능 등 여러 가지 변수에 대한 대응이 가능해야 한다. 또한, 공간이 가정에 비해 상대적으로 크기 때문에 크기에 대한 제약이 많지 않다. 반면에 가정용 로봇은 맞춤형 치료를 제공하고, 안전하고, 사용하기 쉽고, 작아야 하는 등의 여러 가지 요구 사항을 충족해야 한다⁹⁾.

가정에서 사용하기에 적합하도록 좌우 폭은 806 mm, 전후 길이는 771 mm로 크기가 작아서 보관이 편리하다. 모니터 앞으로 디스플레이를 고정하기 때문에 디스플레이가 추가되어도 전체 크기에 거의 영향을 주지 않는다. Armeo Spring의 경우 디스플레이 부분을 제외하면 좌우 폭은 750 mm, 전후 길이는 810 mm로 NREH와 비슷하지만 디스플레이를 배치할 공간이 추가적으로 필요하기 때문에 실제 사용시 더 넓은 공간이 필요하다.

NREH 하단에는 캐스터가 부착되어 있어서 필요할 때 언제나 쉽게 이동이 가능하며 상지 운동시에는 기구가 움직이지 않도록 캐스터의 고정도 쉽게 할 수 있다. 그리고 구조가 간단하여 고장이 날 가능성이 적고 누구나 사용할 수 있도록 조작이 간단하여 더 많고 다양한 사용자가 이용할 수 있도록 제작하였다. 디스플레이의 경우 가정의 TV를 이용하는 것도 가능하여 별도의 디스플레이를 부착하지 않으면 가격적인 부담도 줄일 수 있는 장점이 있다.

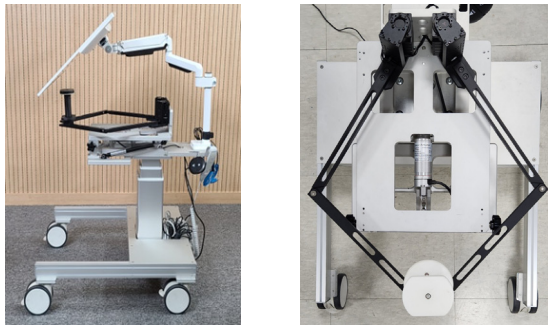
2.2 상지재활로봇 기구 구성

NREH는 5개의 링크로 구성된 2자유도 평면 운동 메커니즘을 가지며, 이는 틸팅이 가능한 구조로 되어 있다. 로봇 말단부에는 손잡이가 위치하는데, 뇌졸중으로 인해 손이나 팔이 불편한 장애인이 환측 손으로 잡을 수 있도록 설계되었다. 손잡이 바로 아래에는 힘/토크 센서가 부착되어 있어, 손잡이에 작용하는 힘을 측정하여 제어에 활용한다. 이 장치에는 로봇 팔이 움직이는 평면을 제어하는 두 개의 모터, 그 평면을 틸팅하는 한 개의 모터, 높이 조절이 가능한 한 개 모터가 장착되어 있다. 로봇 팔을 틸팅하는 기능으로 운동의 난이도를 조절할 수 있고 높낮이를 조절할 수 있어서 사용자의 신체 사이즈에 대응할 수 있다. 이동의 편의성을 위하여 잠금이 가능한 4개의 캐스터(Caster)를 가진다. 사용자에게 시각적 피드백을 제공할 수 있는 시각 디스플레이를 가진다. 시각 디스플레이는 위치와 각도를 사용자에게 맞게 조정할 수 있다.

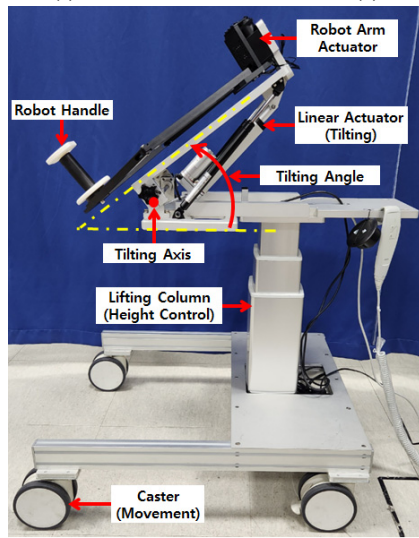
[Fig. 1(a)]는 측면에서 본 모습, [Fig. 1(b)]는 5-bar 링크를 위에서 내려다 본 모습이다. [Fig. 1(c)]는 각 부분에 대한 설명, [Fig. 1(d)]는 로봇 팔의 틸팅 각도에 따른 측면에서 바라본 모습을 나타내었다.

2.3 평면 운동을 하는 로봇 팔의 틸팅

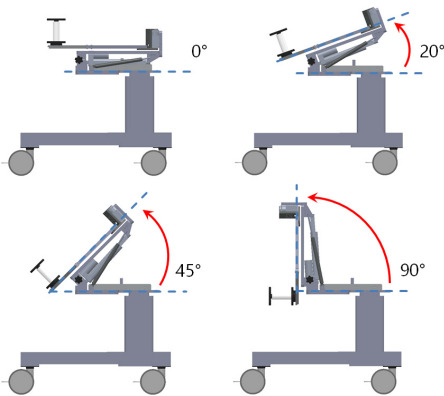
NREH의 가장 큰 특징은 로봇 팔이 움직이는 평면의 틸팅 기능이다. 기구의 크기와 제작비를 줄이기 위하여 최소한의 구동기를 사용한다. 3차원 공간의 일상생활 동작과 비슷한 팔



(a) (b)



(c)



(d)

[Fig. 1] NREH (a) Side view, (b) Top view (5-bar linkage), (c) Description of each part, (d) Tilting angle

의 움직임을 구현하기 위해 틸팅 가능한 2차원 평면상의 움직임으로 기구를 단순화하였다.

[Fig. 2]와 같이 사용자가 원하는 각도로 로봇 팔의 각도를 변경하고 기구를 고정시킨 후 다양한 상지 운동이 가능하다. 틸팅 각도가 커질수록 사용자가 팔을 뻗을 때 자신의 팔 뿐만 아니라 로봇 팔의 무게까지 추가된 무게를 밀기 위해서는 더 큰 힘이 필요하기 때문에 난이도가 증가한다. 이 점을 이용하



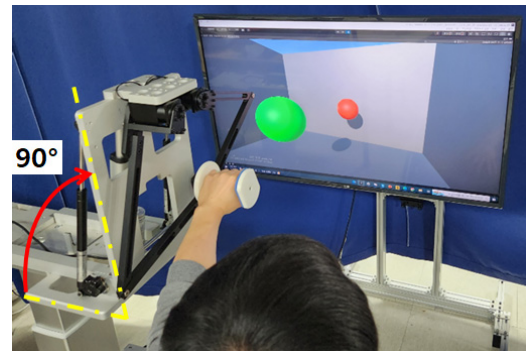
(a) (b)

[Fig. 2] Robot arm relative to tilting angle (a) 0°, (b) 45°



(a) (b)

[Fig. 3] Examples of activities of daily living (ADL): (a) transfer of an object (b) cleaning of a table



[Fig. 4] Configuration for use at a 90° tilt angle

여 사용자의 상지 기능에 따라 자신에게 적합한 각도로 조절을 하여 난이도를 변경할 수 있고 난이도에 따른 사용자 맞춤형 운동이 가능하다. 예를 들어 처음에는 틸팅 각도를 0도로 설정[Fig. 2(a)]한 뒤 운동을 하다가 근력이 증가하여 운동이 쉬워지면 각도를 변경[Fig. 2(b)]한 후 운동을 할 수 있다.

로봇 팔의 제어를 통해 필요한 만큼의 도움을 주거나 저항을 줄 수도 있다. 상지의 근력이 부족한 상태에서는 로봇 팔에 부착된 모터의 도움을 받아서 근력을 키우는 훈련이 가능하다. 반대로 근력이 충분한 경우 모터가 저항하도록 제어하여 훈련할 수도 있다.

앞에서 언급한 다양한 운동은 일상생활과 관련된 여러 상지의 움직임을 훈련하는 것을 말한다. 예를 들어 찬장의 물건을 이동시키기는 움직임을 연습하기 위한 팔을 위에서 아래로 내리기[Fig. 3(a)], 아래에서 위로 올리기, 테이블 청소[Fig. 3(b)]

를 하는 움직임 연습하기 위한 팔을 전후좌우 사방으로 뻗고 당기기, 원 그리기 등이 있을 수 있다.

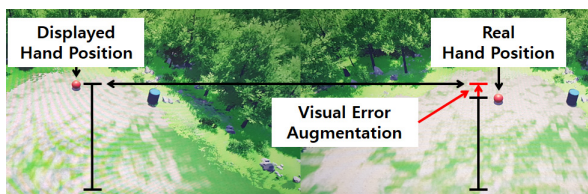
로봇 팔에 회전축을 하나 더 추가하는 것은 기구적으로도 많이 복잡해지고 제작비도 증가하며 전체적인 크기가 커진다. 또한 그만큼 무게가 증가하여 원하는 각도에서 고정하는 것도 쉽지 않으며 이로 인한 내구성에도 문제가 발생할 소지가 크다. [Fig. 4]와 같이 로봇을 90도로 틸팅시킨 후에 사용자가 90도 시계방향이나 반시계방향으로 돌아왔고 디스플레이를 사용자 앞쪽에 배치한 후 사용자는 기구의 변경 없이 옆에 있는 로봇 손잡이를 잡고 시상면(Sagittal Plane)과 평행한 평면 상에서 팔을 위아래나 앞뒤로 움직이는 운동을 할 수 있다.

2.4 시각정보에 대한 오차증강

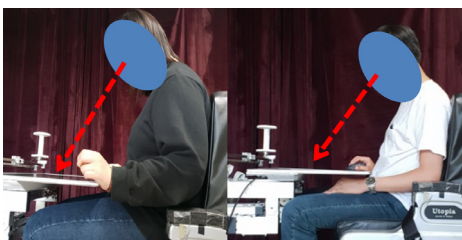
NREH에 시각적 오차증강을 적용하여 상지 운동의 효과를 높이고자 하였고, 사용자가 착각을 일으킬 수 있도록 디스플레이가 손잡이를 가려 보이지 않게 배치하였다. 시각적 오차증강은 디스플레이에 나타나는 물체의 위치를 실제 위치와 다르게 표시하여 사용자가 착각을 일으키도록 하는 것이다. [Fig. 5]와 같이 실제 손의 위치는 왼쪽 그림과 같지만 초기에는 목표지점까지 도달하지 않아도 시각적으로는 도달한 것처럼 나타낸다. 운동을 통해 근력이 나아지면 시각적 오차증강의 정도를 조금씩 줄이면서 실제 위치와 비슷하게 조정을 하였다.

2.5 디스플레이 위치

디스플레이의 위치 설정도 중요하다. [Fig. 6]과 같이 디스플레이의 위치가 너무 낮으면 사용자가 지속적으로 사용하는



[Fig. 5] Visual error augmentation



[Fig. 6] Neck pain resulting from display position



[Fig. 7] Positioning of NREH display: frontal view vs. tilted upwards from the horizontal plane^[10]

동안 목을 과도하게 아래로 굽히게 되어 통증이 발생한다. 오차증강을 적용하기 위해 디스플레이를 손잡이 위로 배치해보아도 결과는 크게 다르지 않았다.

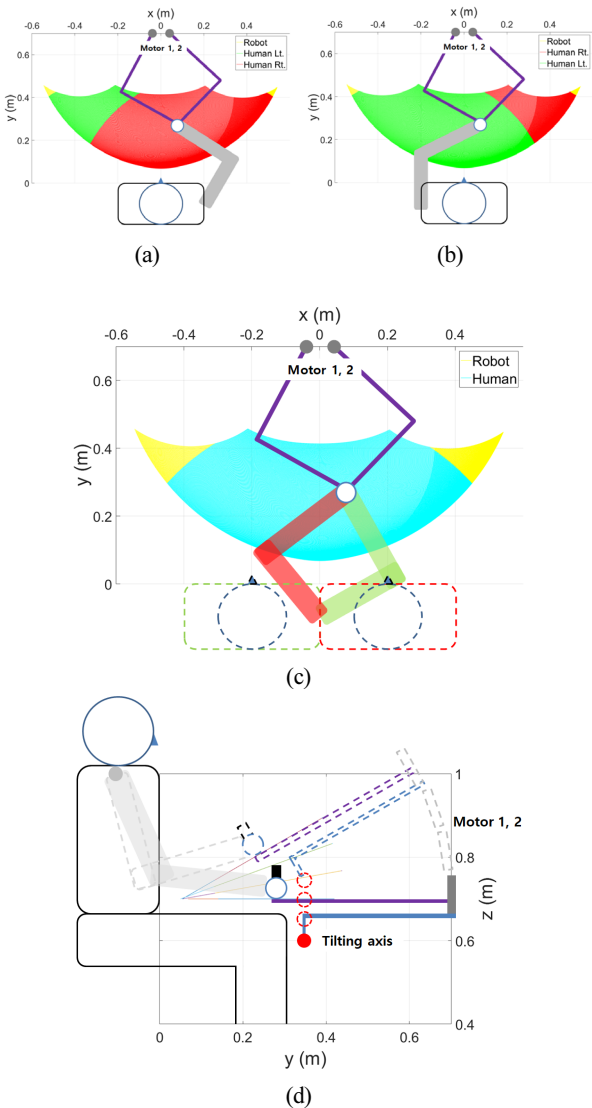
두 가지 시각 디스플레이 위치에 따른 테스트 [Fig. 7] 결과 대부분의 일반 상지재활로봇과 같이 디스플레이가 사용자 정면에 위치할 때는 사용자가 체간의 곧게 선 자세(Upright position)를 유지하며 상지 운동을 할 수 있다. 하지만 로봇 팔의 작업평면과 디스플레이의 평면이 거의 수직을 이루고 있어서 직관성이 떨어지고 사용자가 자신의 손 위치를 확인할 수 있어서 오차증강을 적용하기 어려운 문제가 발생한다.

디스플레이를 약간 틸팅시킨 후 사용자와 가깝게 배치하면 로봇 팔의 작업평면과 디스플레이의 평면이 평행에 가까워 직관성이 높아진다. 사용자가 자신의 손 위치를 볼 수 없어서 오차증강이 가능한 장점도 있다. 그러나 디스플레이가 눈과 너무 가깝고 밝으면 장시간 사용 시 사용자 눈에 피로도를 증가시켰다. 이 두 가지 문제를 해결하기 위해 모니터 암(Monitor Arm)을 이용하여 사용자의 눈과 적절한 위치에 수평면에서 위쪽으로 디스플레이를 틸팅시켜 배치하였다.

2.6 작업공간 분석

NREH는 환측 손으로 로봇 손잡이를 잡고 팔 운동을 하는 상지재활로봇이다. 양팔 중에 어떤 팔을 이용하여 운동을 하느냐에 상관없이 동일하게 적용할 수 있도록 로봇 팔 링크는 좌우 대칭이 되도록 제작을 하였다. 작업공간 분석을 하는데 있어서 중요한 것이 로봇 기구와 사용자와의 상대적 위치이다. 즉, 기구의 링크 위치와 사람의 관절 위치가 얼마나 어떻게 떨어져 있는지에 따라 작업공간이 달라진다.

신장이 167 cm인 사람의 신체 치수를 참고하여 NREH 작업 공간을 분석해 보았다. 위에서 내려 보았을 때 사용자는 Motor 1, 2의 중간지점에서 0.7 m 떨어진 곳에 앉아서 운동을 하는 것으로 가정하여 작업공간을 분석하였다 [Fig. 8(a)], [Fig. 8(b)]. 양쪽 어깨는 몸의 중심에서 각각 0.2 m 떨어졌으며, 사용자의 팔 길이는 어깨부터 로봇 손잡이까지 0.6 m로 계산하였다. (a)와 (b)는 로봇 손잡이의 작업공간, 그리고 사용자 몸의 중심을



[Fig. 8] Workspace of NREH: (a) Body-centered right arm, (b) Body-centered left arm, (c) Shoulder-centered, (d) Side view

로봇 기구의 중앙에 맞추어 앉아서 오른팔과 왼팔을 사용할 경우의 작업공간을 동시에 나타낸 그림이다. (c)는 로봇 손잡이의 작업공간, 그리고 사용자의 어깨를 로봇 기구의 중앙에 맞추어 앉아서 로봇을 사용할 경우의 작업공간을 동시에 나타낸 그림으로 오른팔 왼팔 상관없이 작업공간이 동일하다. 로봇 기구와 사용자의 위치는 어떤 동작을 훈련하느냐에 따라 달라질 수 있으므로 각각의 훈련에 적합한 위치를 선정하여 훈련을 하면 된다.

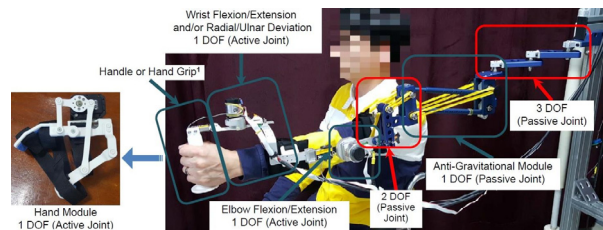
(d)는 옆에서 본 모습으로 틸팅 각도를 0도에서 30도까지 10도씩 증가시키며 틸팅 축(Tilting axis)을 중심으로 틸팅한 값을 그래프로 나타내었다. 로봇 팔 틸팅 각이 커지면 모터의 위치(회색 점선)는 상승하지만 로봇 손잡이의 높이는 낮아져 사용자의 무릎과 충돌하게 된다. 로봇 기구와 사용자와의 충

돌 방지를 위해 로봇 손잡이의 최저 높이를 0.7 m로 설정하여 로봇 팔 손잡이가 0.7 m보다 낮아지면 그 높이만큼 리프팅칼럼을 이용하여 로봇 팔 기구를 전체적으로 올려야 한다(빨간색 점선). 사용자 팔의 길이, 어깨너비, 손잡이 높이 기준 등은 사용자의 신체 사이즈에 맞게 변경하여 원하는 작업공간이 충분한지 분석할 수 있다.

2.7 NREH와 NREX 비교

[Fig. 9]는 국립재활원에서 개발한 NREX이며 [Table 1]은 NREH와의 특징을 비교한 표이다.

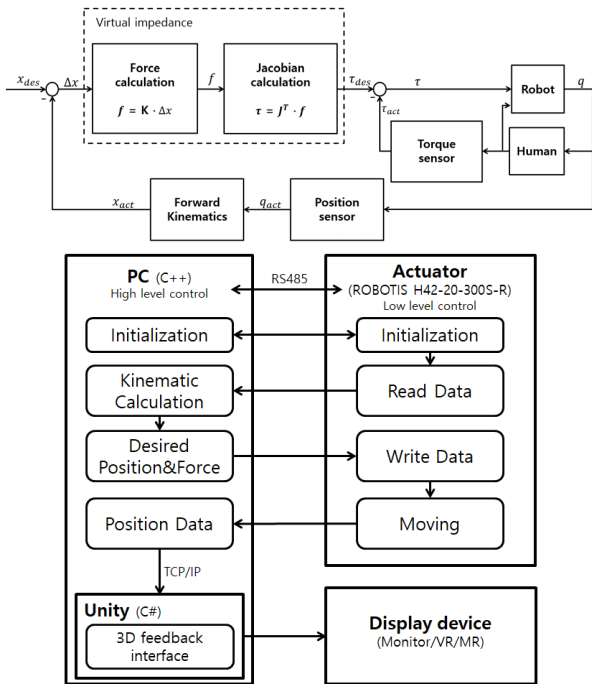
NREH는 뇌졸중으로 인한 편마비장애인이 병원에서 정해진 스케줄에 따라 상지 운동을 하다가 집으로 돌아가면 운동을 하지 않아 환측 팔을 더 사용하지 못하게 되는 현상을 방지하기 위해 개발하게 되었다. 현재 상용 제품에 비해 간단하면서도 로봇 팔 틸팅을 통해 사용자의 상지 기능에 맞춰 다양한 운동을 할 수 있다. 운동시 시각이나 힘 등에 대한 오차증강을 적용하여 상지 운동의 효과를 높일 수 있고, 필요에 따라 상지의 힘이 부족할 때는 로봇의 도움을 받거나 저항 운동도 할 수



[Fig. 9] NREX equipped with anti-gravitational module^[11]

[Table 1] NREH vs NREX

Robot	NREH	NREX
Type	End-effector	Exoskeleton
Motion	2 Dimension	3 Dimension
DOF	4 (Active)	2 (Active) + 6 (Passive)
Feature	<ul style="list-style-type: none"> - During upper limb exercises, NREH has a smaller range of motion (ROM) in the trunk and the shoulder compared to NREX. - The ability to adjust the difficulty level while exercising is beneficial. - Exercising with interesting games makes it enjoyable. 	<ul style="list-style-type: none"> - With NREX, due to the user's significant physical constraints, there is compensation in the user's trunk during upper limb exercises. - The ability to easily support the weight of the arm and the equipment with a simple rubber band is advantageous. - Seems suitable for patients in the initial stages of rehabilitation.



[Fig. 10] Block diagram of NREH control

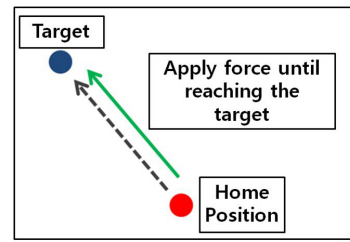
있는 등 다양한 운동이 가능하다. 기능에 비해 크기가 작아서 가정에서 보관하기 편리하며 사용자가 혼자서도 사용할 수 있도록 시스템이 간단한 장점이 있다.

2.8 NREH 제어시스템 구성

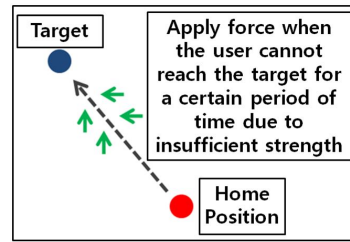
NREH 로봇은 2개의 액추에이터를 사용하여 제어하는데 액추에이터는 ROBOTIS사의 H42-20-300S-R이다. 액추에이터는 [Fig. 8]에서 확인할 수 있으며 PC에서 제어한다. 로봇 손잡이의 위치는 Forward Kinematics를 계산하여 좌표 데이터를 소켓 통신으로 Unity 게임 프로그램에 보내면 그 좌표 데이터를 이용하여 게임을 진행한다. [Fig. 10]은 NREH 제어의 전체 블록도이다.

전체적인 제어 방법은 Mass-spring-damper 시스템을 기반으로 한 토크 제어 모드이며, 필요시 타겟 위치에 따른 Assistive force를 제공한다. 5-bar linkages 구조의 끝점 및 각 joint의 위치는 정기구학을 통해 계산되며, 사용자가 목표 타겟까지 뺄지 못할 경우 모터에서 제공하는 힘으로 도달하게 된다. 이때 목표 위치(Desired position)와 현재 위치의 거리에 따라 목표 힘(Desired force)이 계산되며, Jacobian matrix를 통해 토크로 변환하여 액추에이터에 입력으로 전달된다.

Unity를 사용한 게임은 사용자가 운동시 참여도를 높여 조금 더 게임에 집중할 수 있도록 6가지 게임(자동차 운전, 양초 켜기(VR 전용), 벽돌 깨기, 불꽃 쏘기, 드럼통 폭파, 버티기)을 만들어 사용자가 원하는 게임을 선택하여 적용할 수 있다.



Continuous passive motion mode



Assist-as-needed mode

[Fig. 11] Control mode of NREH

2.9 제어 모드

기본적인 로봇의 제어는 토크제어를 기반으로 구현되어 있다. 로봇 팔 링크의 길이와 모터의 각도를 통해 로봇 손잡이의 위치를 계산하는 정기구학(Forward Kinematics), 원하는 위치로 손잡이를 이동시키기 위해서 역기구학(Inverse Kinematics)을 통해 모터의 각도를 계산하고 모터의 속도는 자코비안을 이용하여 계산한다^[12]. 제어 방식은 위치제어, 속도제어, 토크제어가 모두 가능하다.

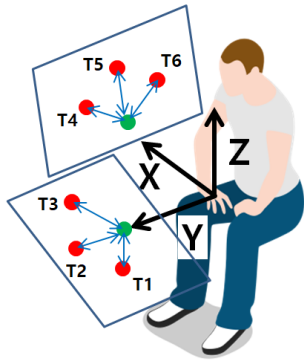
NREH 구동 모드는 CPM (Continuous Passive Motion)과 AAN (Assist-as-needed) 두 가지 모드가 있다[Fig. 11]. CPM 모드는 스스로 팔 운동을 할 수 없거나 힘이 약한 사용자에게 반복 운동을 통해 근력 증가 및 유지, 관절의 굳어짐을 방지하기 위한 목적으로 사용한다. AAN 모드는 기본적으로 사용자가 자신의 힘으로 운동을 하다가 힘의 보조가 필요할 때 모터가 힘을 제공하는 방식으로 사용한다.

3. 데이터 수집

3.1 다양한 데이터 수집 및 활용

손잡이 아래에는 ATI 사의 6축 Force/Torque 센서인 mini45를 부착하여 상지 운동시 필요한 데이터를 획득하고 그 데이터를 로봇 제어에 적용할 수 있다.

2개의 액추에이터와 1개의 Force/Torque 센서를 통해 수집된 데이터를 이용하여 속도, 궤적 등 상지 운동에 대한 다양한 정량적인 분석이 가능하다. NREH를 이용한 상지 운동시 저장된 사용자 데이터를 이용하여 모션 하나하나에 대한 체계적이고 구



[Fig. 12] Arm reaching and returning test

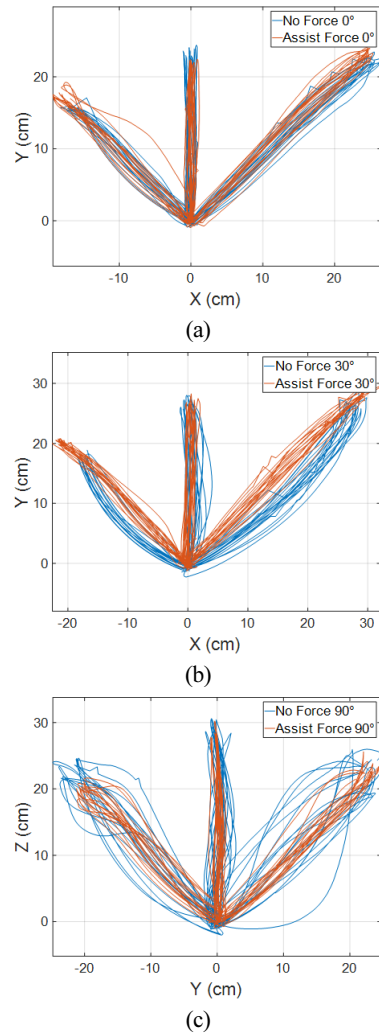
체적인 분석을 통해 사용자의 운동을 상세하게 해석할 수 있다. 또한, 운동시 사용자의 팔이나 몸에 IMU 센서 등을 부착하여 체간 움직임에 대한 데이터를 수집하면 운동 시에 몸이 얼마나 움직였는지 분석하여 사용자에게 피드백을 통해 움직임을 개선하는데 활용된다.

3.2 사용성 평가 설계

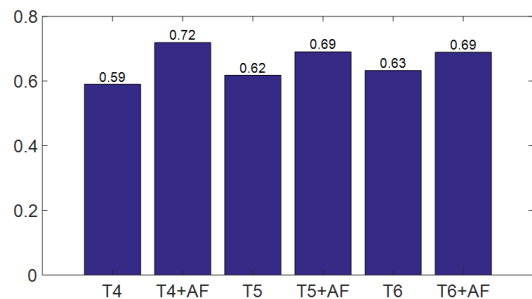
수평면을 0° 라고 할 때 로봇 팔의 틸팅 각도를 0° , 30° , 90° 의 3가지 조건으로 조정하며 로봇의 보조력 유무에 따른 결과를 확인하고자 하였다. 4명의 임상전문가가 참여한 사용성 평가를 진행하였다. 로봇의 손잡이를 잡고 운동하는 동안 사용자의 손 위치 데이터를 수집하였다. 오른손으로 로봇 손잡이를 잡고 직진성을 비교하기 위해 3가지 방향(전방, 좌/우 45°)의 목표물에 대한 팔 뻗기 및 복귀 동작 테스트를 수행하였다[Fig. 12]. 로봇의 보조력이 없이 진행한 경우와 움직이는 속도에 비례하여 움직이는 방향으로 보조력을 추가한 경우를 비교하였다. 초기 손잡이의 위치가 원점이며 로봇 팔의 틸팅 각도가 0° , 30° 인 경우 X축은 좌우, Y축은 전후 방향이며 피험자 몸의 중심이 X축의 0에 위치한다. 로봇 팔의 틸팅 각도가 90° 인 경우에는 로봇 팔이 움직이는 평면이 XY평면에서 YZ평면으로 변경된다.

3.3 사용성 평가 결과

로봇 팔의 틸팅 각도가 0° 에서 30° 로 증가하면서 난이도가 높아졌다. [Fig. 13(b)]의 궤적을 살펴보면 로봇의 보조력이 팔 운동을 하는데 직진성 향상에 도움이 된 것을 확인할 수 있었다. 틸팅각이 90° 가 되면 작업평면이 변경되면서 난이도가 많이 증가한다. [Fig. 13(c)]의 궤적을 살펴보면 보조력이 없을 때 보다 보조력이 있을 때 목표물에 도달하기 위해 이동시 직진성이 많이 증가함을 쉽게 확인할 수 있었다.



[Fig. 13] Trajectory comparison according to assist force at a (a) 0° tilt angle (b) 30° tilt angle (c) 90° tilt angle



[Fig. 14] Linearity ratio at a 90° tilt angle. T4, T5, T6 represent the front upper, top upper, and rear upper targets, respectively, while AF stands for assist force. Linearity ratio refers to the ratio of the traveling distance to the straight-line distance

로봇의 보조력으로 직진성이 가장 많이 향상된 틸팅 각도가 90° 의 경우 몸통 뒤쪽(T6)보다는 앞쪽 방향(T4)으로 움직였을 때 직진성이 가장 크게 차이가 났음을 확인할 수 있다[Fig. 14].

NREH는 손잡이를 잡고 움직이면 기본적으로 손잡이의 위치 및 손잡이에 작용하는 힘 데이터가 저장된다. 위의 두 가지 간단한 실험을 통해 획득한 데이터만으로도 각 조건에 대해 어떤 차이가 있는지 Smoothness, Velocity, Velocity peak 등 다양한 추가적인 분석이 가능하다. Force/Torque 센서를 통해 획득할 수 있는 힘과 토크 데이터로 더 구체적인 분석이 가능하고, 이를 활용하면 더 다양한 운동의 적용이 가능하다.

가정에서 수많은 장애인들이 NREH를 사용하면서 수집할 수 있는 데이터를 모아 분석을 하면 장애인 상지 운동에 대한 데이터 기반 맞춤형 운동¹³⁾으로의 활용도 가능할 것으로 생각된다.

4. 토 론

NREH에 대해 3회 동안 6명의 전문가(물리/작업치료사)를 대상으로 자문회의를 진행하였고 뇌졸중으로 인한 편마비 장애인 4명을 대상으로 포커스그룹 회의를 통해 NREH를 직접 사용하게 한 후 다음과 같은 의견을 들을 수 있었다[Table 2].

자문 의견을 바탕으로 NREH를 이용한 운동시 사용자가 체간 보상을 하지 않고 팔만 움직이면서 운동을 할 수 있도록 디스플레이의 위치도 중요하지만 다른 방법으로 체간 보상을 하지 않도록 유도하는 것도 고려하고자 한다. 또한 로봇 팔의 틸팅 각도를 조정하고 기구의 높낮이를 조절하는 방법은 수동으로 변경하여 사용자에게 가격적인 부담을 덜 수 있도록 하고자 한다. 집에서 누가 시키지 않아도 운동을 스스로 할 수 있도록 동기부여를 해줄 오차증강을 포함한 흥미있는 게임을 제작하여 적용하고자 한다. 디자인 전문가의 자문을 통해 조금 더 기구의 완성도를 높이고자 한다.

가정에서 상지재활로봇으로 지속적인 운동을 하면 사용자 상지의 운동능력을 유지하거나 향상할 수 있고, 사용성 평가 데이터를 통해 임상적인 의의를 확인할 수 있었다. 본 논문에서 진행한 사용성 평가의 경우 실제 사용자가 아닌 비장애인을 대상으로 실험한 결과라 실제 장애인에게 적용했을 때 다른 결과가 도출될 수도 있다. 또한, 장애인의 경우 장애의 정도

나 상태가 다르기 때문에 보조력을 적용하는 데 있어서 언제 어떻게 어느 정도의 보조력을 적용할지 등의 추가 테스트가 필요하다. 테스트를 통해 사용자에게 적합한 보조력을 적용해 줄 수 있도록 다양한 옵션을 만들어 장애인이 상지 운동을 하는데 많은 도움이 될 수 있도록 하고자 한다.

5. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 뇌졸중으로 인한 장애인이 병원에서 퇴원한 후 지역사회에서도 지속적인 상지 운동을 할 수 있는 상지재활로봇 NREH를 개발하게 된 계기, 개발 과정과 틸팅, 오차증강 적용 가능 등의 특징에 대해 기술하였다.

향후 NREH는 양팔/양손 운동을 할 수 있는 로봇인 NREH Bimanual로 확장이 필요하다. 또한, 시각 디스플레이는 HMD 및 혼합현실(Mixed Reality) 기술의 발전으로 NREH에 MR 적용이 가능할 것으로 예상된다. 센서를 추가한 다양한 손잡이를 제작하여 상황에 따라 적절한 손잡이를 교체 적용하여 사용할 수 있도록 모듈화하는 작업이 필요하다.

NREH를 사용하여 뇌졸중장애인들이 집에서 지속적인 상지 운동으로 상지 기능이 회복되면 자신감 상승으로 이어져 더 많은 야외 활동과 사회 활동에 참여함으로써 삶의 질이 나아질 것을 기대해 본다.

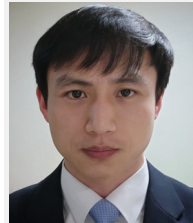
References

- [1] C. E. Han, S. Kim, S. Chen, Y.-H. Lai, J.-Y. Lee, R. Osu, C. J. Winstein, and N. Schweighofer, "Quantifying arm nonuse in individuals poststroke," *Neurorehabilitation and neural repair*, vol. 27, no. 5, pp. 439-447, Jun., 2013, DOI: 10.1177/1545968312471904.
- [2] A. C. Plummer, "Constraint-induced therapy and the motor learning literature that underpins its application," *Physical therapy reviews*, vol. 8, no. 3, pp. 143-149, Jul., 2003, DOI: 10.1179/108331903225002498.
- [3] G. Kwakkel, R. Peppen, R. C. Wagenaar, S. W. Dauphinee, C. Richards, A. Ashburn, K. Miller, N. Lincoln, C. Partridge, I. Wellwood, and P. Langhorne, "Effects of augmented exercise therapy time after stroke: a meta-analysis," *Stroke*, vol. 35, no. 11, pp. 2529-2539, Oct., 2004, DOI: 10.1161/01.STR.0000143153.76460.7d.
- [4] DIH Medical Group, Hocoma, [Online], <https://www.hocoma.com/us/solutions/arm-hand/>, Accessed: Mar. 24, 2023.
- [5] J.-Y. Song, S.-H. Lee, and W.-K. Song, "Improved Wearability of the Upper Limb Rehabilitation Robot NREX with respect to Shoulder Motion," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 14, no. 4, pp. 318-325, Nov., 2019, DOI: 10.7746/jkros.2019.14.4.318.

[Table 2] Opinions on NREH

Opinions	<ul style="list-style-type: none"> - When the monitor is positioned far and directly ahead, significant trunk compensation occurs. - During clinical trials, maintaining the trunk upright position is crucial; therefore, the placement of the visual display should be considered. - Appears to be useful for subacute patients in hospitals. - The ability to adjust the tilting angle and height of the robot arm is advantageous. - Applying visual error augmentation is highly beneficial. - Content that can engage users and motivate them for exercise is needed.
----------	---

- [6] J.-Y. Song and W.-K. Song, "Improvement of Upper Limb Rehabilitation Robot NREH Device at Home," *The 15th Korea Robotics Society Annual Conference*, Pyeongchang, Gangwon-do, Republic of Korea, 2020, [Online], <https://www.nl.go.kr/>.
- [7] Y. Wei, J. Patton, P. Bajaj, and R. Scheidt, "A real-time haptic/graphic demonstration of how error augmentation can enhance learning," *IEEE international conference on robotics and automation*, Barcelona, Spain, pp. 4406-4411, Apr., 2005, DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570798.
- [8] F. Abdollahi, E. D. C. Lazzaro, M. Listenberger, R. V. Kenyon, M. Kovic, R. A. Bogey, D. Hedeker, B. D. Jovanovic, and J. L. Patton, "Error augmentation enhancing arm recovery in individuals with chronic stroke: a randomized crossover design," *Neurorehabilitation and neural repair*, vol. 28, no. 2, pp. 120-128, Aug., 2013, DOI: 10.1177/1545968313498649.
- [9] L. Li, Q. Fu, S. Tyson, N. Preston, and A. Weightman, "A scoping review of design requirements for a home-based upper limb rehabilitation robot for stroke," *Topics in Stroke Rehabilitation*, vol. 29, no. 6, pp. 449-463, Jul., 2021, DOI: 10.1080/10749357.2021.1943797.
- [10] M.-R. Hong and W.-K. Song, "Usability Test of Upper limb Rehabilitation Robot NREH using Visual Error Augmentation," *The 14th Korea Robotics Society Annual Conference*, Pyeongchang, Gangwon-do, Republic of Korea, 2019, [Online], <https://www.nl.go.kr/>.
- [11] W.-K. Song and J. Song, "Improvement of upper extremity rehabilitation Robotic Exoskeleton, NREX," *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Jeju, Republic of Korea, 2017, DOI: 10.1109/URAI.2017.7992674.
- [12] S.-H. Lee, J.-Y. Song, and W.-K. Song, "Control of Upper Limb Rehabilitation Robot NREH using Force Sensor," *The 15th Korea Robotics Society Annual Conference*, Pyeongchang, Gangwon-do, Republic of Korea, 2020, [Online], <https://www.nl.go.kr/>.
- [13] T. B. Dijkhuis, F. J. Blaauw, M. W. V. Ittersum, H. Velthuisen, and M. Aiello, "Personalized physical activity coaching: a machine learning approach," *Sensors*, vol. 18, no. 2, Feb., 2018, DOI: 10.3390/s18020623.



송 준 용

2009 인하대학교 항공우주공학과(공학사)
2009~현재 국립재활원 재활연구소 재활
보조기술연구과 연구원

관심분야: 로봇시스템 설계 및 제작, 3D프린팅



이 성 훈

2018 대구대학교 재활공학과(공학사)
2018~현재 국립재활원 재활연구소 재활
보조기술연구과 연구원

관심분야: 로봇시스템 제어



송 원 경

2001 KAIST 전기및전자공학과(공학박사)
2001~2008 삼성SDI 책임연구원
2008~2014 국립재활원 재활연구소 재활
보조기술연구과 공업연구원
2014~현재 국립재활원 재활연구소 재활
보조기술연구과장

관심분야: 재활로봇, 보조로봇, 돌봄로봇, 재활공학, 중개연구, 융합
제품, 디자인, 인간-로봇 상호작용