

엔드 이펙터 타입의 로봇보행훈련이 뇌성마비인의 서기, 보행 기능과 보행속도에 미치는 영향

황중석[†]

바트리움 재활센터

Effect of an End-effector Type of Robotic Gait Training on Stand Capability, Locomotor Function, and Gait Speed in Individuals with Spastic Cerebral Palsy

Jongseok Hwang, PT, PhD[†]

Botrium Rehabilitation Center

Received: July 8, 2021 / Revised: July 8, 2021 / Accepted: July 27, 2021

© 2021 J Korean Soc Phys Med

| Abstract |

PURPOSE: Robotic gait training is being used increasingly to improve the gross motor performance and gait speed. The present study examined the effectiveness of a novel end-effector type of robotic gait training (RGT) system on standing, walking, running, and jumping functions, as well as the gait speed in children with spastic cerebral palsy.

METHODS: Eleven children with spastic cerebral palsy Gross Motor Function Classification System (GMFCS) levels I-III (6 males; age range, 15.09 ± 1.44 years) were examined. They underwent 24 sessions (30 minutes/sessions, one time/day, three days/week for eight consecutive weeks) of RGT. The Gross Motor Function Measure-88 D domain (GMFMD), and GMFME were assessed with a pretest and posttest of RGT. The setting was a one-group pretest-posttest design.

RESULTS: A comparison of the pre-test and post-test show that the outcomes in post-test of GMFMD ($p < .01$), GMFME ($p < .05$), and 10MWT were improved significantly after RGT intervention.

CONCLUSION: The present study provided the first evidence on the effects of an eight-weeks RGT intervention in participants with spastic CP. The outcomes of this clinical study showed that standing performance, locomotion function, and gait speed increased in after 24 sessions of the end-effector RGT system in children with spastic cerebral palsy.

Key Words: 10-meter walking test, End-effector, GMFMD, Robotic gait training, Spastic cerebral palsy

I. 서론

뇌성마비는 뇌병변으로 인한 움직임, 근긴장도, 자세에 영향을 미치는 복합적인 장애이다. 이 질환은 신경발달학적으로 3세 이전의 뇌손상으로 발생하는 비진행성 질병으로, 손상당한 뇌로 아동기와 그 이후까지 장애가 지속된다[1]. 뇌성마비는 경직성, 불수의형, 운동실조형, 저긴장형, 혼합형 뇌성마비가 있으며, 그중

[†]Corresponding Author : Jongseok Hwang
sfscfc44@naver.com, <http://orcid.org/0000-0003-3376-5619>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

경직형 뇌성마비는 뇌성마비진단율의 66~82%를 차지하는 가장 흔한 질환이다[2-4].

뇌성마비는 특정 근육의 근력감소로 근 약화, 경직, 구축[5], 그리고 피로를 일으키는 운동 손상을 특징으로 한다[6-7]. 이 운동손상은 뇌성마비아동의 관절가동범위감소[7], 근 길이 단축[8], 근 약화[9-10], 신체 분절의 자세의 변화를 일으켜 심각한 해부학적 기능적 변화를 나타낸다. 예를 들면꿈치들린발(침족, equinus foot)은 보행 시 뒤꿈치가 들린 상태이며, 초기 입각 시 발 뒤꿈치가 바닥에 닿는 것을 방해한다[11]. 게다가 뇌성마비는 선택적 움직임과 근육간 시너지에 영향을 미치며, 이러한 영향은 운동능력 수행에 필요한 근육간의 협응능력에 장애를 가져온다[12]. 그러므로 이러한 장애는 서기와 걷기 기능에 가장 흔하게 영향을 주고 75개의 신체움직임 패턴에 영향을 준다. 이 영향은 신체 분절 이동 감소[13]와 보폭감소[10,14]로 이루어지고 보행 시 불안정성 증가로 부적절한 보행패턴을 유발시켜 보행의 질[15]을 떨어뜨리고 통증을 일으킨다. 그래서 서기 기능과 걷기, 뛰기 및 도약과 보행속도 감소를 일으키며 더 나아가서는 삶의 질을 감소시킨다. 그러므로 뇌성마비 아동의 재활 프로그램의 주된 목적은 서기 기능, 걷기, 뛰기 및 도약의 운동기능을 향상시키고 보행속도를 증가시켜 독립적인 생활을 할 수 있도록 돕는 것이다[16-17].

이 문제를 해결하기 위하여 전통적으로 널리 신경발달치료가 사용되어왔다[18-19]. 신경 발달치료는 주로 손을 이용하여 치료하는 방식으로 손을 사용하여 환자에게 피부와 근육에 감각자극을 주며 움직임 가이드를 주거나 움직임의 도움주어 환자로 하여금 적절한 체중 부하 상태에서 이상적인 움직임을 경험하여 운동 학습과, 운동 발달이 이루어질 수 있도록 하는 기법이다. 예를 들면 입각기 중기부터 말기까지 엉덩관절 펌이 약한 환자의 경우, 엉덩관절 펌에 주로 동원되는 큰 불기근을 눌러서 감각자극을 준다. 이후 1-3명의 치료사가 하지부터 상지까지 몸의 정열을 맞추고 엉덩관절의 펌이 15-20도에 이르기까지 엉덩관절의 몸의 체중 부하를 치료사의 손이나 신체 일부를 사용하여 줄여주며 정상적인 움직임을 경험하게 한다. Tsorlakis 등[19]

은 신경발달치료를 16주간 38명의 경직성 뇌성마비에게 적용하였을 때 보행기능이 향상되었음을 보고했다. 그러나 이 치료는 노동집약적으로 치료사에게 육체적인 스트레스를 주고 환자에게 낙상의 위험이나 뇌가소성이 일어나기 위한 충분한 운동 횟수의 반복을 주기가 어렵다[20-21]. Lang 등[22]은 전통적 물리치료에서는 한 세션당 292회 보행주기를 훈련을 하는 것으로 보고하였다. 이와 달리 로봇보행 훈련에서는 체중지지를 기계장치에서 현수된 상태로 평균 1800회 이상의 보행 훈련을 하는 것으로 보고되었다[23-25].

이러한 전통적 물리치료의 문제를 해결하기 위하여 다양한 형태의 로봇보행훈련기기가 개발되었다. 이러한 형태는 작동방식에 대하여 외골격형(exoskeleton)과 이펙터형(end-effector)두가지로 나뉜다. 외골격형은 보행주기에 맞게 엉덩관절, 무릎관절 발목관절 등의 관절을 움직인다. 반면 엔드 이펙터)형은 신체가 지지되는 면(발판)을 통하여 발을 움직인다[26]. 발을 움직여서 보행훈련을 하는 엔드 이펙터 방식의 로봇보행훈련 기기인 Walkrite(유광정밀, 한국)가 개발되었다. 이 보행 훈련 기기는 낙상의 예방을 최소화하고 충분한 반복적인 보행주기훈련을 위하여 제작되었다. 이 기기의 장점은 작동방식은 다른 엔드 이펙터 방식의 로봇보행훈련 기기와 비슷하나 가격면에서 큰 차이가 있다. 먼저 공통점은 G-EO(Reha technology, 스위스)등 다른 엔드 이펙터 방식기기처럼 Walkriter기기도 체중을 현수하는 장치가 있고 모터에 의하여 발판이 움직이는 형태이다. 차이점은 Walkrite기기의 경우 G-EO처럼 근육자극이나 실시간으로 힘을 감지하여 모니터링하는 기능은 없다. 하지만 가격에서 저렴한 큰 장점이 있다. 로봇 회사에서의 가격을 정확하게 제시하고 있지는 않으나 보통 다른 엔드 이펙터 방식의 기기는 수천에서 수억 정도이나 이 보행기기는 천만원 이내이다. 가격적 저렴하면 많은 병원이나 센터에 보급을 하기도 쉽고 개인이 소유하여 집에서 운동하기도 용이하다. 그러나 이 Walkrite 로봇보행훈련기기의 뇌성마비와 관련된 연구는 전무한 실정이다. 이 연구는 Walkrite 로봇보행훈련기기의 뇌성마비 아동에 대한 첫번째 연구이다.

본 연구의 목적은 경직성 뇌성마비 아동에게 8주간

Table 1. General Characteristics of the Subjects (n = 11)

Variables	Subject information
Gender (male/female)	
Boys (n (%))	6 (54.55)
Girls (n (%))	5 (45.45)
GMFCS	
Level 1 (n (%))	3 (27.27)
Level 2 (n (%))	6 (54.55)
Level 3 (n (%))	2 (18.18)
Age (years)	15.09 ± 1.44
Body height (cm)	154.45 ± 9.15
Body mass (kg)	51.55 ± 7.82

GMFCS: Gross motor function classification system
 Children with GMFCS level 3 used wheel walkers in an indoor setting and outdoor setting.
 Values are presented as the mean ± standard deviation.

의 Walkrite 로봇보행훈련 후 서기와 걷기, 뛰기, 도약기능과 보행속도에 미치는 영향을 알아보는 것이다. 구체적인 연구의 가설은 다음과 같다. 첫째, 중재 전후에 실험군의 서기 기능에 유의한 차이가 있을 것이다. 둘째, 중재 전후에 실험군의 걷기, 뛰기 및 도약의 기능에 유의한 차이가 있을 것이다. 셋째, 중재 전후에 실험군의 보행속도에 유의한 차이가 있을 것이다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 강원도에 거주하는 경직성 뇌성마비 아동을 대상으로 실시하였으며, 연구의 목적과 측정방법, 중재 및 절차 등을 실험에 참여한 뇌성마비아동 및 보호자에게 설명한 뒤 동의를 구하였다. 연구에 참여의사를 밝힌 13명의 아동 중 총 11명의 뇌성마비 아동이 모집되었다. 뇌성마비 아동의 일반적인 정보는 Table 1에 표시되어 있다. 연구 대상자의 선정 조건은 첫째 경직성 뇌성마비로 진단받은 아동, 둘째 나이는 만 18세 이하의 아동, 셋째 전신운동 기능 분류시스템(gross motor function classification system, GMFCS)평가 결과 1-3 단



Fig. 1. Robotic Gait Training Device

계에 속하는 아동, 넷째 한국판 간이 정신상태 검사(Korea -mini mental state examination, K-MMSE)에서 24 점 이상을 받은 의사소통에 어려움이 없는 아동으로 하였다. 제외 기준은 첫째, 수정된 애쉬워스 척도(Modified Acworth scale, MAS)가 2점 이상으로 심각한 근긴장도 이상(spasticity)이 있는 아동, 둘째 최근 2년간 수술경력이 있거나 6개월내 보톡스(Botox) 시술을 받은 아동, 셋째 키 140 이하의 아동으로 하였다.

2. 중재도구 및 방법

뇌성마비 아동 그룹은 Walkrite(유광정밀, 한국)를 이용하여 로봇 보행 훈련하였다(Fig. 1). 이 보행로봇시스템은 고정된 현수시스템과 두개의 모터가 달린 발판으로 이루어져 있다. 발아래에 발판이 있고 종아리에는 2개의 스트랩이 채워져 있어 로봇보행시 갑작스러운 근긴장도 이상으로 발뒤꿈치가 들리는 것을 예방하여 준다. 앉은 상태에서 하네스(Harness)를 착용한 다음에 일어난 상태로 보행의 시작하며 아동의 다리길이와 키에 맞게 하네스의 길이를 조정한다. 아동은 로봇보행 훈련 시 하네스를 통하여 안전하게 보행할 수 있다. 보행속도는 0~2km/h로 조정 가능하다. 모든 아동들이 처음에는 .5 km/h로 시작을 해서 적응을 하고 익숙하여지며 비정상적인 보행패턴이 나오지 않으면 속도를

.1km/h씩 올렸다. 아동은 로봇보행훈련 중 양손으로 상호교대로 움직이는 바를 잡아서 하지가 움직이는 동안 상지도 보행패턴에 따라서 자연스럽게 움직이도록 하였다. 왼쪽 엉덩관절이 굽힘될 때 오른쪽 어깨관절이 굽힘되고 왼쪽 엉덩관절 펴이 일어날 때 왼쪽 어깨관절이 펴이 일어나서 정상적인 보행패턴에 가깝도록 움직임을 유도하도록 하였다. 모든 세션은 30분간 이루어져 있고 주 3회 8주간 총 24세션을 실시하였다.

3. 평가도구

1) 대동작 운동기능평가

대동작 운동기능평가(Gross Motor Function Measure-88, GMFM-88)는 뇌성마비아동의 대동작 운동기능평가를 위하여 만들어졌다. 대동작 운동 기능 평가는 크게 5가지로 평가하는데 A) 눕기와 구르기, B) 앉기, C) 기기와 무릎서기, D) 서기, E) 걷기, 뛰기 및 도약을 포함한 88가지 항목을 평가하였다. 대동작 운동기능평가의 D영역과 E 영역은 서기와 걷기 기능을 평가하는 영역으로 D영역과 E영역으로 사용하여 서기와 걷기를 평가하였다[22]. 대동작 운동기능평가의 신뢰도(급내상관계수, ICCs = .952~1.000)와 타당도(스피어만 계수, Spearman's coefficient = .72~.88)는 높은 것으로 보고되었다[27-28].

2) 10m 걷기 검사

10m 걷기검사(10-meter walking test)는 환자의 보행 속도를 평가한다. 걷기검사는 총 14m의 거리를 편안한 속도로 걷게 하였다. 보행 중 가속과 감속의 속도는 제외하여 보행이 시작될 때 처음의 2m와 보행을 마무리하는 마지막 2m를 제외한 10미터 구간을 이동한 소요시간을 초시계를 이용하여 검사하였다. GMFCS level 3 아동 2명은 측정전 측정후 모두 4개의 바퀴다 달린 동일한 보행기를 사용하여 보행하였다. 치료사는 이 두 아동에 대하여 직접적으로 신체에 도움을 주지 않았으며, 실험의 시작과 종료 외에 다른 구두지시를 하지 않았다. 그리고 낙상에 대비하여 치료사가 아동의 옆에서 항상 주시하였다. 측정전 1회의 연습을 하고 총 3회 반복측정 한 다음 평균값을 사용하였다. 10m 걷기검사

의 신뢰도는 $r = .89\sim 1.00$ 으로 매우 높다[29].

4. 통계 방법

11명의 측정값들의 정규분포 검사를 위하여 샤피로 윌크 정규성 검정(Shapiro-Wilk test)을 사용하였고, 그 결과 .05이상으로 정규성이 확인되었다. 대동작 운동기능평가는 각 영역별 점수는 해당 영역별 만점점수로 나눈 %값으로 환산 이후에 비모수 검정인 윌콕스 부호 순위 검정(Wilcoxon signed rank test)을 실시하여 피험자의 전후 차이를 알아보았다. 10m 걷기 검사 전후 값은 모수검정인 대응표본 t-검정(Paired t-test)를 사용하여 비교하였다. 통계학적 유의수준은 $\alpha = .05$ 로 하였다. 자료의 통계처리를 위해 상용 통계프로그램인 Window 용 SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) 21.0 version을 사용하였다.

III. 연구결과

1. 대상자의 일반적 특성

대상자의 일반적 특성은 Table 1과 같다. 연구에 참여한 뇌성마비 아동 중 남아는 6명(54.55%), 여아는 5명이었으며, 연령은 15.09 ± 1.44 세, 키는 154.45 ± 9.15 cm, 몸무게는 51.55 ± 7.82 kg였다. 전신운동기능은 GMFCS level 1인 아동이 3명(27.27%), GMFCS level 2인 아동이 6명(54.55%), GMFCS Level 3 아동이 2명(18.18%)이었다.

2. 대동작 운동기능평가 D 영역

대동작 운동기능평가 D 영역(GMFM D domain)결과는 Table 2와 같다. 대동작 운동기능평가 D 영역은 로봇보행중재 전과 비교하여 로봇보행중재 후 유의한 증가(5.83%)가 있었다($p < .01$).

3. 대동작 운동기능평가 E 영역(GMFM D domain)

대동작 운동기능평가 E 영역(GMFM D domain)결과는 Table 2와 같다. 대동작 운동기능평가 D 영역은 로봇보행중재 전과 비교하여 로봇보행중재 후 유의한 증가(5.95%)가 있었다($p < .05$).

Table 2 Comparison of Nonparametric GMFM Test

Non-parametric variables	Pre-test	Post-test	p
GMFM D (%)	71.36 ± 14.09	77.20 ± 13.44	.003**
GMFM E (%)	70.41 ± 12.74	76.36 ± 12.64	.018*

Values are presented as the mean ± standard deviation.

The data set was analyzed using a Wilcoxon signed-rank test.

*p < .05, **p < .01

GMFM D: Gross Motor Function Measure-88 D domain

GMFM E: Gross Motor Function Measure-88 E domain

Table 3 Comparison of the Parametric 10MWT

Parametric variables	Pre-test	Post-test	t	p
10MWT (m / s)	1.33 ± .38	1.56 ± .53	2.971	.014*

Values are presented as the mean ± standard deviation.

The data set was analyzed using a Paired t-test.

*p < .05

10MWT: 10-meter walking test

4. 10m 걷기 검사

10m 걷기 검사의 결과는 Table 3에 나타나 있다. 10m 걷기 검사의 결과 로봇보행중재 전과 비교하여 로봇보행중재 후 유의한 증가(.23m/s)가 있었다(p < .05).

IV. 고찰

본 연구는 8주동안 로봇보행 훈련프로그램에 참여한 경직성 뇌성마비 아동에서 대동작 운동기능과 보행 속도에 미치는 효과를 알아보고자 실시하였다. 실험 결과 대동작 운동기능 서기(D 영역)와 걷기, 뛰기 및 도약(E영역)과 보행속도에서 모두 유의한 향상을 나타냈다.

본 연구를 통하여 Walkrite 로봇보행훈련이 뇌성마비아동의 뇌성마비 아동의 서기, 걷기, 뛰기 및 도약과 보행속도를 향상시킬 수 있음을 발견하였다. 이러한 결과는 기존의 로봇보행훈련이 뇌성마비아동에게 미치는 효과와 일치한다.

먼저 대동작운동기능 검사인 D 영역인 서기 기능에서 중재후 중재전보다 5.83% 증가하며 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 이는 뇌성마비에 대한 다음의 로

봇보행훈련의 선행연구와 일치한다. Schroeder 등[30]은 13명의 뇌성마비 아동이 12세선의 로봇보행훈련 이후 서기 기능이 3.3% 증가되었음을 보고 하였다. Wallard 등[31]은 22명의 뇌성마비 아동이 20세선의 로봇보행훈련 이후 6.69% 증가되었음을 보고하였고, Meyer-Heim 등[32]은 22명의 뇌성마비 아동이 3에서 5주간의 훈련 이후에 6.3%가 증가됨을 보고하였다.

대동작 운동기능 E영역인 걷기, 뛰기 및 도약기능에서도 로봇보행훈련 후 중재 전보다 5.95% 통계적으로 유의한 증가가 있었다. 이러한 연구 결과는 다음의 로봇보행훈련 선행 연구에서도 통계적으로 유의한 증가를 확인할 수 있었다. 13명의 뇌성마비아동의 훈련 이후 걷기, 뛰기 및 도약기능이 중재후 7.54% 증가된 적이 보고되었다[31]. 이와 유사하게 Schroeder 등[30]의 연구에 따르면 12세선의 훈련 후 3.2%증가를 보고하였다.

대동작운동기능 검사의 D 영역과 E 영역 모두에서 통계적으로 유의한 결과를 나타낸 이유는 다음과 같으리라 사료된다. 일반적인 전통적 물리치료에서는 한 세션당 292회 보행주기를 훈련을 하는 것과 달리[22], 로봇보행 훈련에서는 1800회 이상의 보행훈련을 한다. 이러한 292의 반복 횟수는 뇌가소성이나 기능회복을

기대하기는 어려운 횡수이다[23-25]. 그러나 로봇보행의 충분한 반복되는 보행으로 말미암아 서기, 걷기, 뛰기, 도약에 관여하는 근육군들의 근력강화 뿐만이 아니라 뇌가소성이 일어났을 가능성도 배제할 수는 없다고 사료된다[33].

10 미터 걷기 검사에서 중재 전후 보행속도가 빨라지며 통계적으로 유의한 차이를 보였다. Smania 등[33]이 18명의 뇌성마비 아동 엔드 이펙터(End-effector) 방식의 로봇보행훈련 기기인 Gait Trainer GT 1 훈련 결과 10미터걷기 검사에서 평균속도가 .08m/s가 증가하였으며 통계적으로 유의한 증가가 있다고 보고했다. 이는 본 연구에서 결과와 일치한다. 보행 속도가 빨라진 원인으로서는 몇 가지를 유추해 볼 수 있다. 첫째로 Walkrite의 발판이 뇌성마비 아동으로 하여금 엉덩관절의 폼각도를 증가시키도록 만들어 준다[34]. 이러한 엉덩관절 폼은 시상면에서 중간 입각기에서 초기 유각기까지 사용되는데 로봇보행훈련을 통하여 회복된 엉덩관절 폼각도가 보행속도에 영향을 주었을 것이라 사료된다. 또한 중재 후 근력 증가가 보행속도에 영향을 주었으리라 사료된다.

Dias 등[35]은 신경계 환자가 엔드 이펙터 로봇보행훈련 이후 하지의 운동성 지수 시험 점수가 증가하였다 보고하였다. 그리고 또다른 선행 연구에서 훈련이후 근육의 피로도가 증가하였다 보고하였다. 이는 로봇보행훈련이 하지에서 수동적인 움직임만 일어나는 것이 아니라 하지의 근육이 능동적으로 훈련에 동원됨을 유추할 수 있다[36]. 그리하여 로봇보행훈련이 뇌성마비아동의 보행속도를 증가시키는데 효과적인 것으로 사료된다.

이번 연구의 결과로 로봇보행훈련이 뇌성마비아동의 아동의 서기, 걷기, 뛰기 및 도약과 보행 속도에 미치는 영향에 대한 근거를 제시하였다. 그러나 모든 경직성 뇌성마비 아동에게 일반화 기 몇 가지 어려운 제한점이 존재한다. 첫째, 지역사회 뇌성마비 아동들을 모집하여 아동들이 물리치료를 받고 있는 병원이 모두 달랐다. 이로 인해 모든 대상자들의 일반적인 치료를 일정하게 통제할 수 없었다. 그리고 가정형편에 따라서 병원치료 이외에 추가적으로 승마치료나 수치료를 받는

아동들을 윤리적 관점에서 치료를 받지 못하게 할 수 없었다. 둘째, 서기, 보행 기능과 보행속도를 측정하면서 결과로 양적 평가만 제시하였으나 질적인 평가는 제시하지 못하였다. 셋째, 본 연구는 로봇보행훈련을 참여하지 않은 대조군의 비교없이 실험군만으로 실험과 분석이 이루어졌다. 그리하여서 다음 후속 연구에서는 큰 표본의 뇌성마비 아동과 동일한 조건내에서 로봇보행훈련을 받지 않은 대조군의 연구가 이루어져야 하며 서기, 보행 기능과 보행속도의 양적 평가 뿐만이 아니라 질적 평가로 이루어져야 하겠다.

V. 결론

본 연구는 경직성 뇌성마비아동에 대한 엔드 이펙터 방식의 Walkrite 로봇보행효과를 검증한 첫번째 연구이다. 본 연구의 결과 Walkrite 로봇보행훈련이 뇌성마비아동의 서기, 걷기, 뛰기 및 도약 기능과 보행속도에 긍정적인 영향이 있음을 알 수 있었다. 로봇보행훈련이 전통적 형태의 물리치료를 완전히 대체하지는 못하지만, 로봇보행훈련이 대동작운동기능과 보행속도 증진에 도움을 줄 수 있을 것이다.

References

- [1] Rosenbaum P, Paneth N, Leviton A, et al. A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Dev Med Child Neurol Suppl.* 2007;109(suppl 109):8-14.
- [2] Sanger TD, Chen D, Delgado MR, et al. Definition and classification of negative motor signs in childhood. *Pediatrics.* 2006;118(5):2159-67.
- [3] Pakula AT, Braun KVN, Yeargin-Allsopp M. Cerebral palsy: classification and epidemiology. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics.* 2009;20(3):425-52.
- [4] Blondis T. *Developmental motor disorders: A neuropsychological perspective.* 2004.
- [5] Gage JR. Gait analysis. An essential tool in the treatment of cerebral palsy. *Clinical orthopaedics and related*

- research. 1993(288):126-34.
- [6] Houlihan CM. Walking function, pain, and fatigue in adults with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2009;51(5):338.
- [7] Opheim A, Jahnsen R, Olsson E, et al. Walking function, pain, and fatigue in adults with cerebral palsy: a 7-year follow-up study. *Dev Med Child Neurol.* 2009;51(5):381-8.
- [8] Böhm H, Hösl M, Schwameder H, et al. Stiff-knee gait in cerebral palsy: how do patients adapt to uneven ground? *Gait Posture.* 2014;39(4):1028-33.
- [9] Dodd KJ, Taylor NF, Graham HK. A randomized clinical trial of strength training in young people with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2003;45(10):652-7.
- [10] Novacheck TF, Gage JR. Orthopedic management of spasticity in cerebral palsy. *Childs Nerv Syst.* 2007;23(9):1015-31.
- [11] Goldstein M, Harper DC. Management of cerebral palsy: equinus gait. *Dev Med Child Neurol.* 2001;43(8):563-9.
- [12] Cahill-Rowley K, Rose J. Etiology of impaired selective motor control: emerging evidence and its implications for research and treatment in cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2014;56(6):522-8.
- [13] Pirpiris M, Wilkinson AJ, Rodda J, et al. Walking speed in children and young adults with neuromuscular disease: comparison between two assessment methods. *Journal of Pediatric Orthopaedics.* 2003;23(3):302-7.
- [14] Sutherland DH, Davids JR. Common gait abnormalities of the knee in cerebral palsy. *Clinical orthopaedics and related research.* 1993(288):139-47.
- [15] Allum JH, Carpenter MG. A speedy solution for balance and gait analysis: angular velocity measured at the centre of body mass. *Curr Opin Neurol.* 2005;18(1):15-21.
- [16] Damiano DL. Activity, activity, activity: rethinking our physical therapy approach to cerebral palsy. *Phys Ther.* 2006;86(11):1534-40.
- [17] Garvey MA, Giannetti ML, Alter KE, et al. Cerebral palsy: new approaches to therapy. *Curr Neurol Neurosci Rep.* 2007;7(2):147-55.
- [18] Eagleton M, Iams A, McDowell J, et al. The effects of strength training on gait in adolescents with cerebral palsy. *Pediatr Phys Ther.* 2004;16(1):22-30.
- [19] Tsorlakis N, Evaggelinou C, Grouios G, et al. Effect of intensive neurodevelopmental treatment in gross motor function of children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2004;46(11):740-5.
- [20] Schwartz I, Sajin A, Fisher I, et al. The effectiveness of locomotor therapy using robotic-assisted gait training in subacute stroke patients: a randomized controlled trial. *PM R.* 2009;1(6):516-23.
- [21] De Santis D, Zenzeri J, Casadio M, et al. Robot-assisted training of the kinesthetic sense: enhancing proprioception after stroke. *Front Hum Neurosci.* 2014;8:1037.
- [22] Lang CE, MacDonald JR, Grip C. Counting repetitions: an observational study of outpatient therapy for people with hemiparesis post-stroke. *J Neurol Phys Ther.* 2007;31(1):3-10.
- [23] Boyd LA, Winstein CJ. Explicit information interferes with implicit motor learning of both continuous and discrete movement tasks after stroke. *J Neurol Phys Ther.* 2006;30(2):46-57.
- [24] Fine MS, Thoroughman KA. Motor adaptation to single force pulses: sensitive to direction but insensitive to within-movement pulse placement and magnitude. *J Neurophysiol.* 2006;96(2):710-20.
- [25] Scrivener K, Sherrington C, Schurr K. Exercise dose and mobility outcome in a comprehensive stroke unit: description and prediction from a prospective cohort study. *J Rehabil Med.* 2012;44(10):824-9.
- [26] Morone G, Paolucci S, Cherubini A, et al. Robot-assisted gait training for stroke patients: current state of the art and perspectives of robotics. *Neuropsychiatr Dis Treat.* 2017;13:1303.
- [27] Ko J, Kim M. Reliability and Responsiveness of the Gross Motor Function Measure-88 in Children With Cerebral Palsy. *Physical therapy.* 2012;93.

- [28] Kenyon LK. Gross Motor Function Measure (GMFM-66 and GMFM-88) Users' Manual. Physical & Occupational Therapy In Pediatrics. 2014;34(3):341-2.
- [29] Steffen TM, Hacker TA, Mollinger L. Age-and gender-related test performance in community-dwelling elderly people: Six-Minute Walk Test, Berg Balance Scale, Timed Up & Go Test, and gait speeds. *Phys Ther.* 2002;82(2):128-37.
- [30] Schroeder A, Homburg M, Warken B, et al. Prospective controlled cohort study to evaluate changes of function, activity and participation in patients with bilateral spastic cerebral palsy after Robot-enhanced repetitive treadmill therapy. *Eur J Paediatr Neurol.* 2014;18(4):502-10.
- [31] Wallard L, Dietrich G, Kerlirzin Y, et al. Robotic-assisted gait training improves walking abilities in diplegic children with cerebral palsy. *Eur J Paediatr Neurol.* 2017;21(3): 557-64.
- [32] Meyer-Heim A, Borggraefe I, Ammann-Reiffer C, et al. Feasibility of robotic-assisted locomotor training in children with central gait impairment. *Dev Med Child Neurol.* 2007;49(12):900-6.
- [33] Berger A, Horst F, Müller S, et al. Current state and future prospects of EEG and fNIRS in robot-assisted gait rehabilitation: A brief review. *Front Hum Neurosci.* 2019;13:172.
- [34] Smania N, Bonetti P, Gandolfi M, et al. Improved gait after repetitive locomotor training in children with cerebral palsy. *Am J Phys Med Rehabil.* 2011;90(2):137-49.
- [35] Bidabe D, Barnes S, Whinnery K. MOVE: Raising expectations for individuals with severe disabilities. *Physical Disabilities: Education and Related Services.* 2001;19(2):31-48.
- [36] Dias D, Lains J, Pereira A, et al. Can we improve gait skills in chronic hemiplegics? A randomised control trial with gait trainer. *Eura Medicophys.* 2007;43(4):499.
- [37] Hesse S, Uhlenbrock D. A mechanized gait trainer for restoration of gait. *Journal of rehabilitation research and development.* 2000;37(6):701-8.