

Effects of Robot Rehabilitation for Range of Motion and Balance in Ankle Sprain Patient: A Single Case Study

So Yeong Kim^{1,2}, Byeong Geun Kim³

¹Department of Physical Therapy, Graduate School, Nambu University, Gwangju, Republic of Korea; ²Gwanju 365 Rehabilitation Hospital, Gwangju, Republic of Korea; ³Department of Physical Therapy, Nambu University, Gwangju, Republic of Korea

Purpose: Recently, many studies on robotic rehabilitation have been conducted, but such studies on patients with ankle sprains are lacking. This study aimed to investigate the effects of robot-assisted rehabilitation on the range of motion of the ankle and balance in patients with ankle sprain.

METHODS: This study used the A-B-A' design and was conducted for a total of fifteen days. The subjects performed general physical therapy for five days each, during the baseline A and A' periods. In period B, robot rehabilitation was performed for five days, along with general physical therapy. The subjects were evaluated based on weight-bearing lunge test (WBLT), single leg stance (SLS), and functional reach test (FRT).

RESULTS: The WBLT, STS, and FRT showed significant improvement in periods B and A' compared to period A, but there was no significant improvement in period A' compared to period B.

Conclusion: This study confirmed that robot-assisted rehabilitation was an effective intervention for improving the function of patients with ankle sprain. In the future, a study with a control group comparison should be performed.

Keywords: Ankle sprain, Range of motion, Balance, Robot rehabilitation

서론

발목 염좌는 전문적인 운동선수뿐만 아니라 일반인들에게도 나타날 수 있는 근골격계에서 흔히 발생하는 부상 중 하나이다.^{1,2} 발목 가쪽에 있는 인대 복합체의 염좌가 가장 일반적인 유형이며, 이러한 경우 통증, 부종, 그리고 제한된 관절가동범위가 나타난다.^{3,4} 그러나 발목 염좌 후 약 50%정도의 사람들만 치료를 받는 것으로 보고되었으며, 치료하지 않은 많은 사람들은 만성 발목 불안정성이 초래된다.^{5,6} 그러므로, 발목 염좌 후에 치료는 중요하므로 관심이 필요하다.

최근 발목 염좌에 대한 임상진료지침에 따르면, 관절의 기능 회복을 위해서는 운동치료가 권장되고 있다.⁷ 체계적 문헌고찰 선행연구에서는 신경근 운동치료가 발목 관절의 기능 향상에 효과적이라고 보고하였다.⁸ 또 다른 선행연구에서는 신경근 운동치료가 발목 염좌의 재발을 예방할 수 있다고 보고하였다.⁹ 고유수용성 운동치료 또한 발목의 불안정성과 기능회복에 효과적이라고 보고하였다.¹⁰ 그러나

앞에서 보고한 체계적 문헌고찰 연구에 포함된 세부연구들은 대부분 균형 운동으로 체중지지가 필요하다. 하지만 발목 염좌 후 체중지지가 제한된 환자에게 운동치료를 적용하는 데 어려움이 있다.

환자의 체중을 보조하며 정확한 움직임을 반복적으로 증대할 수 있는 방법으로 로봇재활이 있다.¹¹ 로봇재활은 뇌졸중, 뇌성마비, 그리고 파킨슨병 등 신경계통 환자들에게 낙상을 예방하며, 반복적인 운동 효과를 줄 수 있기 때문에 많이 사용되고 있다.¹²⁻¹⁴ 발목을 재활하기에 개발된 로봇도 존재한다.^{15,16} 대표적으로 신경계 환자들에게 나타나는 마비와 발목처짐을 개선시키기 위해 발목에 대한 로봇재활이 사용되고 있다.^{16,17}

로봇재활에 사용되는 로봇들은 다양한 방법으로 환자의 체중부하를 조절해주고 있다. 환자가 서 있는 상태에서 머리 위의 줄과 환자 몸통을 연결하여 체중부하를 줄여주거나, 기울기를 통해서 환자의 체중부하를 줄여주는 방법이 있다.^{18,19} 이 방법들 중 기울기를 통한 체중부하 조절 방법을 실시하는 경우 환자의 발목관절에 발등굽힘

Received January 4, 2023 Revised January 27, 2023

Accepted February 17, 2023

Corresponding author Byeong Geun Kim

E-mail qudrms_92@naver.com

Copyright ©2023 The Korean Society of Physical Therapy

This is an Open Access article distribute under the terms of the Creative Commons Attribution Non-commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

관절가동범위를 증가시킨다고 보고되었다.²⁰ 그러므로 기울기를 이용한 로봇재활은 발목에도 영향을 미칠 수 있다.

로봇재활이 신경계 환자에게는 많은 연구가 진행된 반면, 근골격계 환자들에게 적용된 연구는 부족한 실정이다. 근골격계 수술환자의 로봇재활에 대한 메타분석 연구에서도 엉덩관절과 무릎관절은 포함되었지만, 발목관절은 포함되지 못했다.²¹ 최근에 발목 염좌 후 재활을 돕기 위해 발목 로봇재활이 개발되었으며, 향후 인간대상연구가 필요하다고 보고했다.²² 그러므로, 아직까지 발목의 근골격계 질환에 대한 로봇재활 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구의 목적은 발목 염좌 환자에게 로봇재활이 관절가동범위와 균형에 미치는 사례를 보고하는 데 있다.

연구 방법

1. 연구절차

본 연구는 단일사례설계 중 A-B-A'설계에 따라 연구되었다(Figure 1). 전체 연구기간은 15일이며, A-B-A' 각 기간에 5일씩 진행되었다. 기초선 기간(A)과 회귀기초선 기간(A')에는 일반적인 물리치료만 진행되었고, 중재기간(B)에는 일반적인 물리치료와 로봇재활이 진행되었다. 연구대상자에게 매일 평가를 실시하였다. 평가는 모든 치료가 끝난 후 실시되었다. 연구대상자는 본 연구의 내용에 대하여 충분히 설명을 듣고, 자발적 동의 후 연구에 참여하였다.

2. 연구 대상자

본 연구의 대상자는 2022년 1월경 계단에서 내려오다 왼쪽 발에 안쪽 변침으로 처음 발목 염좌가 발생하였다. 그 후 통증과 부종 증상이 나타났다. 그리고 2022년 3월경 같은 부위에 2차 발목 염좌가 발생하였다. 2차 발목 염좌 후 통증과 발을 딛고 서기가 힘들었다. 처음으로 2022년 4월경 서울특별시 S병원에서 초음파와 MRI 검사를 통해 처음으로 앞목말종아리인대가 손상받은 발목 염좌로 진단을 받았다. 진료의 추가 소견에는 근력 약화 관찰과 6주간 과도한 체중부하 제한이 필요하다고 하였다. 그 후 2022년 4월에 광주광역시 G병원에 입원하였다. 입원 당시 연구대상자는 통증이 있었고, 부종은 없었지만 움직임에 대한 두려움을 동반하고 있었다(Table 1). 발목은 고정되지 않았고, 발목 염좌로 인한 수술을 하지 않은 상태였다.

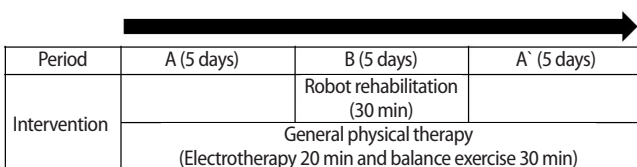


Figure 1. Case study design.

3. 측정방법 및 도구

1) 발목 관절가동범위

본 연구에서 연구대상자의 발목의 발등 굽힘 가동범위를 측정하기 위하여 체중부하 런지 검사(Weight-bearing lunge test, WBLT)를 실시하였다.^{23,24} 측정 방법은 연구대상자를 벽을 보고 서도록 지시하며, 발을 벽에 수직으로 놓고 발뒤꿈치가 바닥에 평평하게 유지한 상태에서 런지를 수행하였다. 무릎이 벽에 닿을 때까지 런지 동작을 수행하였다. 동작 중 발뒤꿈치가 바닥에서 뜨지 않고 반대측 다리가 돌아가거나 몸통에서의 회전이 나타나지 않은지 확인하였다. 측정 시 연구대상자에게 통증이나 기타 문제점이 없는 상태에서 측정하였다. 벽쪽에 있는 발의 엄지발가락 끝과 벽 사이 거리를 줄자로 3회 측정 후 평균값을 사용하였다.

2) 균형

본 연구에서 연구대상자의 정적균형과 동적균형을 측정하기 위하여 한발서기(Single Leg Stance, SLS)와 기능적 팔 뻗기(Functional Reach Test, FRT)를 실시하였다.^{25,26} SLS 측정방법은 양쪽 눈을 뜬 채로 두발을 편평한 지면에 고정된 채 바른 자세로 서 있다. 지면에서 10 cm 높이로 오른쪽 한발 들기를 시행하여 왼쪽 발에서 지지하는 시간을 측정한다. 얼마나 오래 버티는지를 측정하며 흔들림이 있더라도 발이 땅에 떨어지지 않으며 다른 사물을 잡지 않고 버틸 수 있는지를 확인한다. FRT 측정방법은 연구대상자가 거울 앞에서 서서 두 발을 어깨 넓이로 고정된 채 바른 자세로 서 있다. 양 어깨를 90° 굽힘하고 팔꿈치 관절을 펴 상태에서 손가락을 펴는 자세로 시작한다. 얼마만큼 앞으로 나아갈 수 있는지를 측정하며 몸통에서의 회전이 일어나거나 한쪽으로 기울어지거나 선상에서 균형을 잃지 않는지 확인한다. 측정된 값에서 처음 시작자세의 특정값을 빼준 값으로 사용한다. 측정 시 연구대상자에게 통증이나 기타 문제점이 없는 상태에서 측정하였다. SLS와 FRT 모두 3회 측정 후 평균값을 사용하였다.

4. 중재방법

본 연구의 연구대상자는 연구기간 동안 일반적인 물리치료와 로봇재활이 적용되었다. 일반적인 물리치료는 총 연구기간 15일 동안 매

Table 1. General characteristics of subjects

Gender	Female
Age (yr)	39
Height (cm)	167
Weight (kg)	50
Job	Art teacher
Condition	FAAM: 43/84, VAS: 5

FAAM: Foot and ankle ability measure, VAS: Visual analogue scale.

일 진행되었고, 15일 중 중간 5일에만 로봇재활이 추가로 진행되었다. 일반적인 물리치료에는 전기치료 20분과 균형운동장비(Smart balance BLC, Neofect, Korea)를 이용한 균형 운동을 30분간 실시하였다. 로봇재활은 기립경사로봇(R-BOT+, NETBLUE, Korea)을 사용하였고, 20분간 적용되었다. 로봇재활 시 기립경사로봇의 다리는 움직이고, 로봇과 연결되어 있는 비물입형 가상현실 화면을 보면서 걷게 된다. 로봇에 세부설정은 연구대상자에게 증상이 발현하지 않은 상태로 능동 모드에서 양쪽 다리 45% 보조, 속도는 분당 35 걸음, 그리고 기울기는 5도로 설정되었다(Figure 2). 기립경사로봇은 5일간 같은 설정 상태를 유지하였다.

5. 자료 분석

본 연구는 A-B-A' 설계의 사례연구 분석 방법인 표준편차 2배 방법을 사용하여 WBLT, SLS, 그리고 FRT를 분석하였다. 표준편차 2배 방법은 평균에서 표준편차 2배 이상(혹은 이하)의 차이는 비교 기간에서 98% 이외(이내)에 속한다는 의미이며, 기간을 비교할 때 통계적 유의성을 평가하기 위해서 사용된다.²⁷ 본 연구에서 통계적 유의성 해석으로는 로봇재활 중재기간(B)의 평균이 기초선 기간(A)의 평균에서 기초선 기간(A)의 표준편차의 2배 이상 차이가 나면 유의미한 것으로 분석한다.

결 과

1. 발목 관절가동범위

WBLT의 결과는 다음과 같다(Figure 3). WBLT는 기초선 기간(A) (2.2 ± 0.447 cm)에 비해 로봇재활 중재기간(B) (4.2 ± 0.447 cm)에서 유의하게 증가하였고, 회귀기초선 기간(A') (5 ± 0.707 cm)에서도 유의하게 증가



Figure 2. Robot Rehabilitation.

하였다. 회귀기초선 기간(A')은 로봇재활 중재기간(B) 이후에 유지되었다.

2. 균형

SLS의 결과는 다음과 같다(Figure 3). SLS는 기초선 기간(A) (0.95 ± 0.765 초)에 비해 로봇재활 중재기간(B) (8.47 ± 5.225 초)에서 유의하게 증가하였고, 회귀기초선 기간(A') (12.87 ± 1.099 초)에서도 유의하게 증가하였다. 회귀기초선 기간(A')은 로봇재활 중재기간(B) 이후에 유지되었다.

FRT의 결과는 다음과 같다(Figure 3). FRT는 기초선 기간(A) (15.6 ± 0.894 cm)에 비해 로봇재활 중재기간(B) (18.6 ± 1.140 cm)에서 유의하게 증가하였고, 회귀기초선 기간(A') (19.4 ± 2.408 cm)에서도 유의하게 증가하였다. 회귀기초선 기간(A')은 로봇재활 중재기간(B) 이후에 유지되었다.

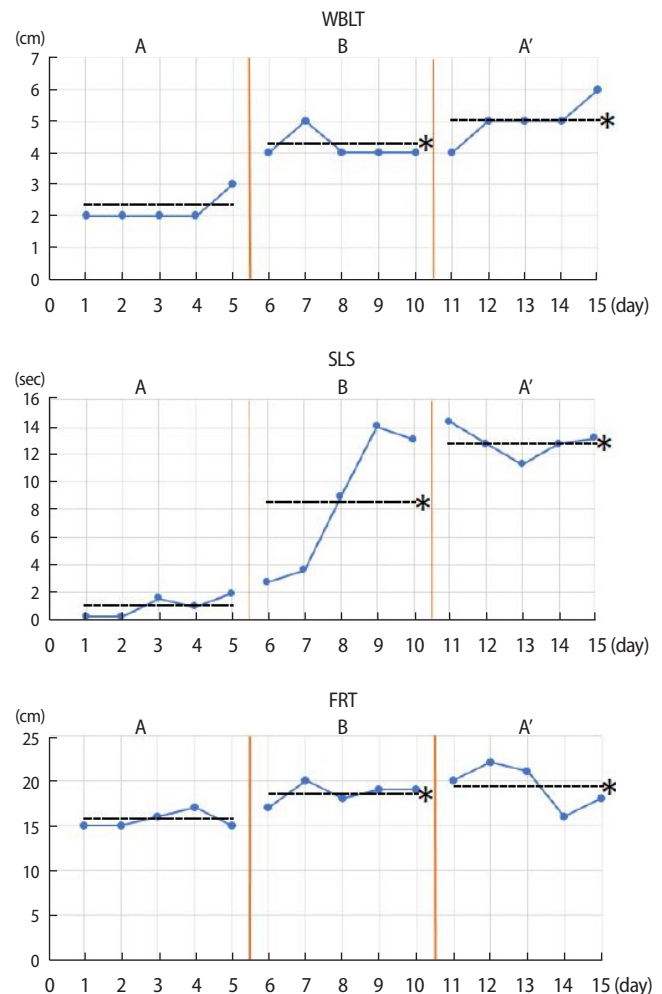


Figure 3. The difference between each period during results. WBLT: Weight-bearing lunge test, SLS: Single leg stance, FRT: Functional reach test. *Significant improvement in periods B and A' compared to period A.

고찰

본 연구는 근골격계 로봇재활 연구가 부족한 실정에 진행된, 첫 발목 염좌 환자 사례연구로 사료된다. 발목 염좌 환자에게 로봇재활이 관절가동범위와 균형에 미치는 사례를 보고하는 것이 본 연구의 목적이다.

본 연구 결과, 발목 염좌 환자의 발등굽힘 관절가동범위, 정적균형 그리고 동적균형이 기초선 기간(A)보다 로봇재활 중재기간(B)에 유의하게 향상되었다. 그리고 로봇재활을 중단시킨 회귀기초선 기간(A)에는 로봇재활 중재기간(B)에 상태를 유지하였다.

발목 염좌 환자의 발등굽힘 관절가동범위 회복은 재활지침에서 강조되고 있다.²⁸ 발등굽힘의 관절가동범위가 회복되지 않으면, 발목 염좌의 재발생 위험이 증가한다.^{29,30} 장기적으로는 통증과 기능적인 측면에도 악영향을 미친다.³¹ 본 연구에서 로봇재활 결과, 연구대상자의 발등굽힘 관절가동범위가 증가한 것이 확인되었다. 이러한 결과는 연구대상자에게 제공된 로봇의 기립경사가 체중부하를 줄여주고, 로봇이 반복적인 움직임으로 관절에 가동성을 제공했기 때문이라고 생각된다. 본 연구의 연구대상자는 짧은 시기에 발목 염좌가 반복적으로 발생하였으며, 통증을 느끼며 체중지지에 두려움을 가지고 있는 상태였다. 본 연구에서 사용된 로봇은 연구대상자의 발이 바닥에 위치하지 않고 로봇 발판에 발이 위치하게 된다. 그러므로 기립경사 각도를 조절해서 발에 체중부하를 조절할 수 있다. 본 연구와 동일한 로봇재활을 실시한 선행연구에서도 로봇이 엉덩관절 수술 환자의 체중부하를 줄여주기 때문에 안전하게 체중지지가 가능했다.¹⁹ 다른 선행연구에서는 기립경사 발판에 발을 위치하면 발바닥굽힘에 대한 흥분성 감소와 과도한 스트레칭이 되는 것을 줄여줄 수 있다고 보고했다.²⁰ 그러므로, 조절된 체중지지로 통증없이 발등굽힘 각도를 유지할 수 있다. 발목 염좌 환자의 관절에 가동성을 동반한 체중부하 운동을 실시한 실험연구에서도 발등굽힘 관절가동범위의 개선 효과를 확인하므로 본 연구와 일치한 결과를 나타냈다.^{32,33}

균형을 유지하는 데 고유수용성감각이 필요하며, 특히 발목관절의 고유수용성감각이 중요하다.^{34,35} 발목 염좌 발생 시 인대 구조 외에도 다양한 기계적 수용기가 함께 손상된다.^{36,37} 그러므로 균형조절에 필요한 구심성 정보가 영향을 받게 된다. 본 연구에서 로봇재활 결과, 연구대상자의 정적과 동적 균형 능력이 향상되었다. 본 연구의 SLS와 FRT를 유지하기 위해서 발목 전략을 사용할 때, 발목의 가동성과 고유수용성감각이 필요하다. 재활로봇은 관절에 각도를 조절하면서 반복적인 움직임을 제공하는 것이 장점이다.³⁸ 관절에 반복적인 움직임은 기계적 수용기가 자극되며 구심성 정보들은 뇌를 활성화시킨다.³⁹ 활성화된 뇌는 관절의 위치를 결정하고, 움직임을 계획하면서, 구심성 정보와 원심성 정보를 비교하여 관절의 위치감각을 제공한

다.⁴⁰ 그러므로, 본 연구에서 연구대상자에게 반복적인 움직임을 제공하므로 발목의 고유수용성감각이 향상되어 균형 능력이 향상될 수 있었다고 생각한다.

본 연구에는 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, 단일사례연구로 본 연구의 결과를 일반화하는 데 한계가 있다. 향후에 더 많은 연구대상자로 진행한 연구가 필요하다. 둘째, 본 연구에서는 발목 관절의 가동범위와 균형만 확인하였으므로 향후 연구에서는 다른 변수들에 대해 확인이 필요하다.

결론적으로, 본 연구는 발목 염좌 후 병원에 입원한 환자에게 로봇재활이 발목 관절가동범위와 균형능력 향상 효과를 확인한 사례이다. 향후에는 더 많은 연구대상자에게 로봇재활에 대한 임상시험 연구가 필요하다.

REFERENCES

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. Baumhauer JF, Alosa DM, Renstrom AF et al. A prospective study of ankle injury risk factors. *Am J Sports Med.* 1995;23(5):564-70.
4. Safran MR, Benedetti RS, Bartolozzi AR et al. Lateral ankle sprains: a comprehensive review. Part 1: etiology, pathoanatomy, histopathogenesis, and diagnosis. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31(7):S429-37.
5. Verhagen EA, van Mechelen W, de Vente W. The effect of preventive measures on the incidence of ankle sprains. *Clin J Sport Med.* 2000; 10(4):291-6.
6. van Rijn RM, van Os AG, Bernsen RMD et al. What is the clinical course of acute ankle sprains? a systematic literature review. *Am J Med.* 2008; 121(4):324-31.
7. Vuurberg G, Hoorntje A, Wink LM et al. Diagnosis, treatment and prevention of ankle sprains: update of an evidence-based clinical guideline. *Br J Sports Med.* 2018;52(15):956.
8. Zech A, Hübscher M, Vogt L et al. Neuromuscular training for rehabilitation of sports injuries: a systematic review. *Med Sci Sports Exerc.* 2009; 41(10):1831-41.
9. Bleakley CM, McDonough SM, MacAuley DC. Some conservative strategies are effective when added to controlled mobilisation with external support after acute ankle sprain: a systematic review. *Aust J Physiother.* 2008;54(1):7-20.
10. Postle K, Pak D, Smith TO. Effectiveness of proprioceptive exercises for ankle ligament injury in adults: a systematic literature and meta-analysis. *Man Ther.* 2012;17(4):285-91.
11. Chun MH, Yi JH. Recent development of rehabilitation robots. *J Korean Med Assoc.* 2013;56(1):23-9.
12. Lee HJ, Lee SH, Seo K et al. Training for walking efficiency with a wearable hip-assist robot in patients with stroke: a pilot randomized controlled

- trial. *Stroke*. 2019;50(12):3545-52.
13. Kawasaki S, Ohata K, Yoshida T et al. Gait improvements by assisting hip movements with the robot in children with cerebral palsy: a pilot randomized controlled trial. *J Neuroeng Rehabil*. 2020;17(1):87.
 14. Capecchi M, Pournajaf S, Galafate D et al. Clinical effects of robot-assisted gait training and treadmill training for Parkinson's disease: a randomized controlled trial. *Ann Phys Rehabil Med*. 2019;62(5):303-12.
 15. Alvarez-Perez MG, Garcia-Murillo MA, Cervantes-Sánchez JJ. Robot-assisted ankle rehabilitation: a review. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2020;15(4):394-408.
 16. Hussain S, Jamwal PK, Vliet PV et al. Robot assisted ankle neuro-rehabilitation: state of the art and future challenges. *Expert Rev Neurother*. 2021;21(1):111-21.
 17. Yeung LF, Lau CCY, Lai CWK et al. Effects of wearable ankle robotics for stair and over-ground training on sub-acute stroke: a randomized controlled trial. *J Neuroeng Rehabil*. 2021;18(1):19.
 18. Lee HY, Park JH, Kim TW. Comparisons between Locomat and Walkbot robotic gait training regarding balance and lower extremity function among non-ambulatory chronic acquired brain injury survivors. *Medicine*. 2021;100(18):e25125.
 19. Kim SY, Kim BG, Cho WS et al. Effects of gait training using a robot for balance in total hip arthroplasty patients after bilateral avascular necrosis: a case study. *J Kor Phys Ther*. 2021;33(5):231-7.
 20. Bohannon RW, Green MD. Neurologic and musculoskeletal effects of tilt-table standing on adults: a systematic review. *J Phys Ther Sci*. 2021; 33(9):700-6.
 21. Yoo JI, Oh MK, Lee SU et al. Robot-assisted rehabilitation for total knee or hip replacement surgery patients: a systematic review and meta-analysis. *Medicine*. 2022;101(40):e30852.
 22. Zou Y, Zhang A, Zhang Q et al. Design and experimental research of 3-RRS parallel ankle rehabilitation robot. *Micromachines*. 2022;13(6): 950.
 23. Powden CJ, Hoch JM, Hoch MC. Reliability and minimal detectable change of the weight-bearing lunge test: a systematic review. *Man Ther*. 2015;20(4):524-32.
 24. Konor MM, Morton S, Eckerson JM et al. Reliability of three measures of ankle dorsiflexion range of motion. *Int J Sports Phys Ther*. 2012;7(3): 279-87.
 25. Ageberg E, Roberts D, Holmstrom E et al. Balance in single-limb stance in healthy subjects--reliability of testing procedure and the effect of short-duration sub-maximal cycling. *BMC Musculoskelet Disord*. 2003;4:14.
 26. Liao CF, Lin S. Effects of different movement strategies on forward reach distance. *Gait Posture*. 2008;28(1):16-23.
 27. Kazdin AE. *Single-case research designs*. 2nd ed. Seoul, Sigmappress, 2016:1-522.
 28. Denegar CR, Miller SJ. Can chronic ankle instability be prevented? Rethinking management of lateral ankle sprains. *J Athl Train*. 2002;37(4): 430-5.
 29. Hertel J. Functional anatomy, pathomechanics, and pathophysiology of lateral ankle instability. *J Athl Train*. 2002;37(4):364-75.
 30. Drewes LK, McKeon PO, Kerrigan DC et al. Dorsiflexion deficit during jogging with chronic ankle instability. *J Sci Med Sport*. 2009;12(6):685-7.
 31. Dettori JR, Pearson BD, Basmania CJ et al. Early ankle mobilization, part I: the immediate effect on acute, lateral ankle sprains (a randomized clinical trial). *Mil Med*. 1994;159(1):15-20.
 32. Reid A, Birmingham TB, Alcock G. Efficacy of mobilization with movement for patients with limited dorsiflexion after ankle sprain: a crossover trial. *Physiother Can*. 2007;59(3):166-72.
 33. Vicenzino B, Branjerdporn M, Teys P et al. Initial changes in posterior talar glide and dorsiflexion of the ankle after mobilization with movement in individuals with recurrent ankle sprain. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2006;36(7):464-71.
 34. Han J, Anson J, Waddington G et al. The role of ankle proprioception for balance control in relation to sports performance and injury. *Biomed Res Int*. 2015;2015:842804.
 35. Michelson JD, Hutchins C. Mechanoreceptors in human ankle ligaments. *J Bone Joint Surg Br*. 1995;77(2):219-24.
 36. Freeman MA, Dean MR, Hanham IW. The etiology and prevention of functional instability of the foot. *J Bone Joint Surg Br*. 1965;47(4):678-85.
 38. Yakub F, Md Khudzari AZ, Mori Y. Recent trends for practical rehabilitation robotics, current challenges and the future. *Int J Rehabil Res*. 2014; 37(1):9-21.
 39. Ward NS, Brown MM, Thompson AJ et al. Longitudinal changes in cerebral response to proprioceptive input in individual patients after stroke: an fMRI study. *Neurorehabil Neural Repair*. 2006;20(3):398-405.
 40. Shumway-Cook A, Woollacott MH. *Motor control translating research into clinical practice*. Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins, 2007: 1-612.