

理学療法士の介入技能を再現する足底部の刺激装置の開発 —健常児に与える効果の検証—

Development of stimulation device of foot sole imitating intervention skills of physical therapist
-Verification of effects on healthy children-

○学 古賀 洋平 (九大) 正 An Qi (東大)
正 倉爪 亮 (九大)

Yohei Koga, Kyushu Univ.

Qi An, Univ. of Tokyo

Ryo kurazume, Kyushu Univ.

This study is developing a device replicating the intervention skills of physical therapist (PT) that enables children with cerebral palsy to receive rehabilitation at home. Previous studies have measured the PT's intervention skills and examined the effects of intervention on motor function. This paper describes the development of a stimulation device that replicates the PT's skills identified in the previous study and experiments to verify the performance of the device. We developed a device that stimulates foot sole using a pneumatic actuator. It was tested whether the device could intervene with the same force as PT on a healthy child. The results showed that the device exerted less force than PT. We also examined the change in motor function before and after the intervention by the device. The results showed that the device tended to improve motor function after the intervention, with a decrease in foot pressure center sway and a decrease in lower limb muscle activity.

Key Words: Rehabilitation, 3D printe, Orthosis

1 背景

医療技術の発達や晩婚化などの影響で高齢出産の割合は近年増加傾向にある。高齢出産では低出生体重の子どもの生まれやすさ、低出生体重の子どもはそうでない子どもと比較して脳性麻痺を抱えるリスクが増加する傾向にある [1]。脳性麻痺を持つ子どもの中には下肢などに運動障害が現れるケースもあり、このような子どもの運動機能の向上は重要な課題である。

脳性麻痺の子どもは運動機能の向上を促す方法の一つに理学療法士によるリハビリテーション（リハビリ）が挙げられる。しかし、このようなリハビリは病院に通院することでしか受けられないため、運動障害を持つ子どもが運動能力を向上させる機会は現状限られている。そこで我々は病院以外でもリハビリを受けられる機会があれば、運動障害を持つ子どもの運動能力の向上の機会を増加させることができると考え、自宅でもリハビリが行える装置の開発を目的として研究を行っている。

これまでの研究 [2] では、理学療法士の介入技能の計測と介入が健常児の運動機能に対して与える効果の検証を行った。技能の計測では健常児の足底部にインソール型の圧センサを敷いてその上から理学療法士に介入を行ってもらい、その際に足底部に加えられる力を計測した。その結果、足底部の内在筋が多く存在する中足骨や縦アーチに対して刺激を与える動作が見られ、介入の際の足底部の各部分に加えられる力の大きさが得られた。介入による運動機能の変化の検証では、理学療法士による介入の前後で健常児に立位姿勢をとってもらい、その際の足の圧中心の動揺と下肢の外在筋の筋活動を計測した。その結果、介入後では圧中心の動揺が減少し、下肢の多くの筋で活動が低下することを確認した。しかし、開発した装置が理学療法士と同じ力で刺激を与えられるかの検証や装置の介入によって運動機能にどのような変化が見られるかの調査は行っていない。そこで本論文では計測した理学療法士の介入技能を再現できる足部の支援装置の開発と開発した装置の性能検証実験について述べる。

2 理学療法士の介入技能を再現する装置の開発

理学療法士は足の内在筋に対して刺激を与えることで運動機能の向上を促している。内在筋は足底部に多く存在し、足底部に力を与えることで内在筋に対してより良い刺激を与えることができる。また、前述の実験の結果より、足底部に加えられる力は時間や動作によって変化するため、加える力の強さや力を与える時間

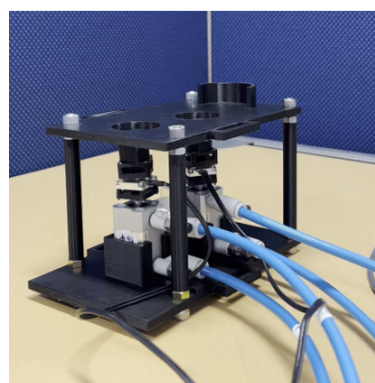


Fig.1 Developed device

の長さなどを調節できる必要がある。さらに、使用者の家庭の経済への負担を軽減するためにできるだけ安価に製作や作り直しができる必要がある。そのため本研究では以下の3つの要件を満たす装置の開発を試みる。

- 足底部にある内在筋を刺激できる
- 刺激する強さと時間を調節できる
- 部品を安価に製作できる

要件を踏まえて開発した装置を図1に示す。穴が空いた台座の上に足を乗せ下から突起が上下することで足底部を刺激する構造をしている。穴は使用者の中足骨と土踏まずである縦アーチの位置に空いている。アクチュエータには複動型のエアシリンダ (smc 社 CQB12-25D) を使用し、空気によって制御を行う。エアシリンダのロッドの先端には1軸力覚センサ技術 (USL06-H5-50N-D-FZ) を配置し、足底部を刺激する力の大きさを計測する。また開発した装置の部品は3Dプリンタによって製作しており、図2のように使用者の足のサイズやアーチ、中足骨の穴の位置を調整することで安価に作り直すことができる。

開発した装置のシステム図を図3に示す。このシステムは力センサの計測値によって電磁弁を切り替えて制御を行うフィードバック制御を行っている。フィードバック制御の目標値は0.1秒

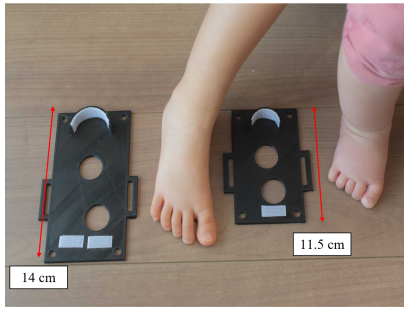


Fig.2 Remaking parts of device fitting the size of foot

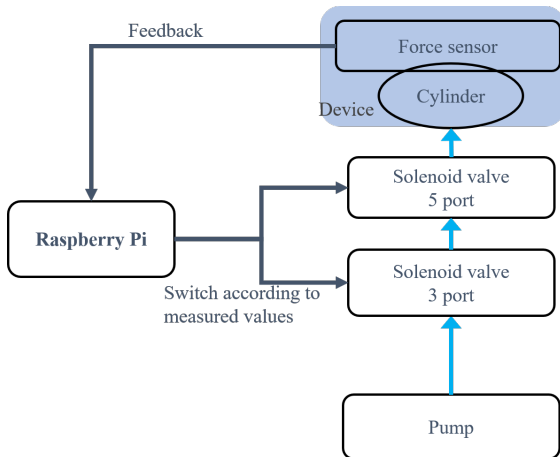


Fig.3 Device system

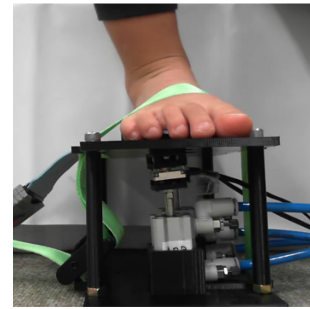


Fig.4 Performance verification experiment of developed device

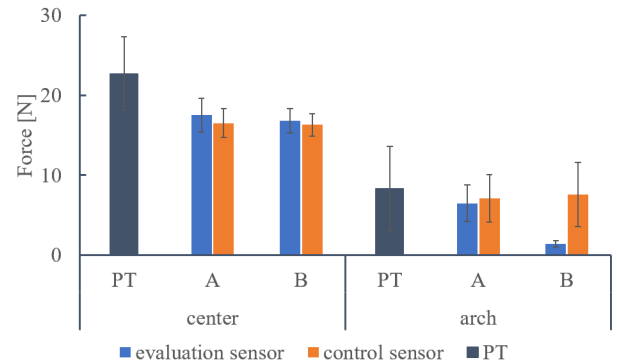


Fig.5 Force applied to foot sole by the device

ごとに設定しており、力センサは 20 Hz で力の計測を行っている。ポンプとエアシリンダの間に 2 つの電磁弁が配置してあり、ポンプ側の電磁弁は 3 ポート、シリンダ側の電磁弁は 5 ポートのものを使用している。設定した目標値と計測値を比較しその結果に応じて電磁弁を切り替えてシリンダの制御を行っている。

3 開発した装具の性能検証

3.1 実験

本章では前章で開発した装具の性能検証実験について述べる。実験には健常児 2 名 (A: 4 歳, B: 2 歳) が参加した。実験の様子を図 4 に示す。装具を健常児の足に装着し左右それぞれ 90 秒間ずつ刺激を与え、介入中に健常児の足底部に加える力を装具に内蔵された制御用の力センサ、ならびに評価用のインソール型圧センサ (Novel 社 Pedar) で計測した。計測の直前に制御用センサ、評価用センサのキャリブレーションを行い、計測中は力センサは 20 Hz、圧センサは健常児 A では 100 Hz、健常児 B では 50 Hz で計測を行った。また、装具の介入が健常児の運動機能に与える効果を検証するために、装具による介入の前後で足の圧中心と下肢の外在筋の活動を計測した。介入の前後で実験参加者には立位をとってもらい、足元に敷いた 2 枚の床反力計で左右それぞれの足の圧中心を 1,000 Hz で計測した。また、下肢の前脛骨筋 (TA)、腓腹筋 (GAS)、大腿四頭筋 (VAL)、大腿二頭筋 (BFL) の 4 か所の表面筋電図を 1,000 Hz で計測した。計測後、圧中心に関しては先行研究 [3][4] に基づいて、中心点の 95% が含まれる 95% 信頼性楕円を算出し、介入の前後で面積の変化を調べた。筋活動の結果は先行研究 [5][6] に従って、4 次のバターワースの 40-400 Hz のバンドパスフィルタをかけ、基線を合わせたのちに、整流化を行い 4 Hz のローパスフィルタをかけた。フィルタリング後の 10 秒間の筋活動の平均を算出し介入の前後で比較を行った。実験で用いるフィードバック制御の目標値には先行研究 [2] 中の理学療法士の技能の計測で明らかになった、理学療法士が健常児の足の横アーチの形を整える動作の際に中足骨の中央と縦アーチに加えられる力を用いた。

3.2 実験結果

装具に内蔵された制御用センサと評価用の圧センサの計測結果を図 5 に示す。フィードバック制御の目標値として用いた理学療法士のデータは、中足骨の中央を刺激する力のピークの平均と標準偏差は 22.7 ± 4.6 N、縦アーチに加えられる力の平均と標準偏差は 8.3 ± 5.3 N であった。制御用のセンサで計測した結果に関して、健常児 A の中足骨の中央と縦アーチに加えられる力の平均と標準偏差はそれぞれ 16.5 ± 1.8 N、 7.1 ± 3.0 N であり、健常児 B の中足骨の中央と縦アーチに加えられる力の平均と標準偏差はそれぞれ 16.3 ± 1.4 N、 7.6 ± 4.0 N であった。縦アーチ部分では理学療法士の結果と同等の力で刺激できていたが、中足骨の中央部分では理学療法士の結果を下回っていた。

評価用の圧センサで計測した結果は図 5 中の青色で示されたデータである。健常児 A の中足骨の中央に加えられる力のピークの平均と標準偏差は 17.5 ± 2.1 N、縦アーチに加えられる力の平均と標準偏差は 6.5 ± 2.3 N であった。健常児 B の中足骨の中央に加えられる力のピークの平均と標準偏差、縦アーチに加えられる力の平均と標準偏差はそれぞれ 16.8 ± 1.5 N、 1.4 ± 0.4 N であった。上記の制御用センサの結果と比較して、大部分で近い結果が得られたが、健常児 B の縦アーチの結果に関して制御用センサの結果との間に大きな誤差が生じた。

装具での刺激力が理学療法士の刺激力を下回る原因について実験後に検証を行った結果、ポンプからシリンダの間の空気の供給経路が長すぎることでシステムの応答性が低下していたことがわかった。そのため空気の供給経路を短縮し再度検証を実施したところ結果が改善し図 6 のように理学療法士が刺激するのと同程度の力で刺激できるようになったことを確認した。制御用センサと評価用センサの間に大きな誤差が見られた原因は現状では明らかになっていない。

装具による介入の前後での健常児 A の左足の圧中心の変化を図 7、下肢の筋活動の変化を図 8 に示す。足の圧中心に関して左足では介入前は信頼性楕円の面積が 35.0 mm^2 であったのに対し、介入後では 10.0 mm^2 に減少していた。右足では、介入前の信頼性楕円の面積が 48.8 mm^2 であったのに対し、介入後では 22.9 mm^2 に減少した。また、下肢の筋活動に関しては、大腿二頭筋 (BFL) は介入後は介入前と比較して増加していたが、それ以外

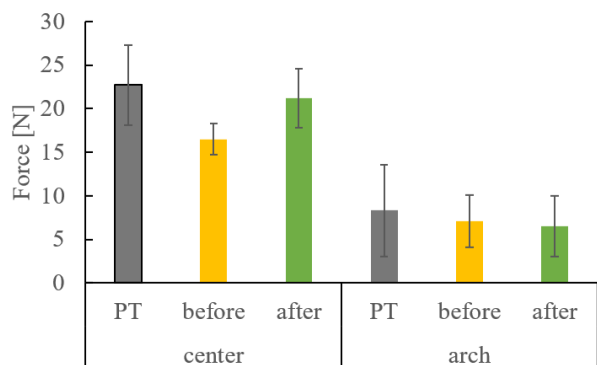


Fig.6 Force applied to foot by the device after improvement

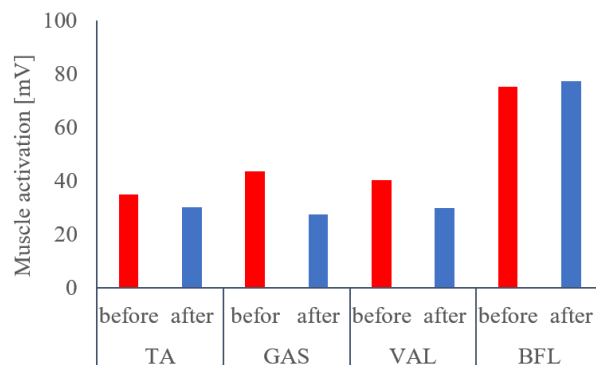


Fig.8 Change of muscle activation due to intraervention of the device

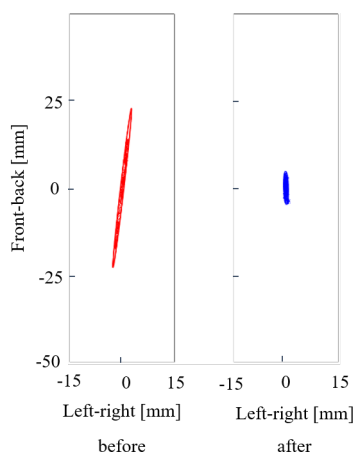


Fig.7 Change of COP due to intraervention of the device

の前脛骨筋 (TA), 腓腹筋 (GAS), 大腿四頭筋 (VAL) は介入後に活動が低下していることが分かった。このように装具による介入で健常児の立位姿勢が安定する傾向が見られることから, 提案した装具による介入には使用者の運動機能向上の効果があると考えられる。理学療法士は介入の際, 内在筋を刺激することと中足骨にある横アーチや土踏まずにある内側縦アーチの形を作することを重要視している。開発した装具は使用者の足底部の中足骨の中央部分と内側縦アーチの部分に力を加える構造をしており, 装具による介入で横アーチと縦アーチの形が整えられたことによって立位時の姿勢が安定したことが考えられる。

4 結論

本論文では理学療法士の押す技能を再現する装具の開発について述べた。以前の研究 [2] で理学療法士の介入中の押す技能の計測と介入による運動機能への効果の検証を行い, その結果介入中に足底部の各部分に加えられる力の大きさが得られ, また介入によって立位時の足底圧中心の動揺は減少し, 下肢の筋活動は低下することを確認した。この計測で明らかになった理学療法士が足底部を刺激する力を再現する装具の開発を行った。開発した装具は空気圧によって動作するアクチュエータを用いた足底部を刺激する機構となっている。この装具は力センサを用いたフィードバック制御を行っている。この装具を用いた性能検証実験では目標とする理学療法士の力を下回る結果となったが, 介入後に健常児の立位時の足底圧中心の動揺が減少し, 外在筋の活動が低下していたことから装具による介入に運動機能向上の効果があることが確認できた。また計測後, 装具の改良を行い結果の改善に成功した。今後は押す以外の介入動作や足の変形にも対応した装具の改良を行い, 脳性麻痺児に対する介入の効果を検証する予定である。

参考文献

- [1] 古谷純朗, 脳性麻痺リハビリテーションガイドライン第2版, 金原出版株式会社, p.20, 2014.
- [2] Yohei. Koga, Qi. An, Ryo. Kurazume, "Analysis of physical therapists' intervention for infants and evaluation of effects on plantar pressure and muscle activity during standing posture", LIFE2022 講演論文集, 2022.
- [3] F. Quijoux, A. Nicolai, I. Chairi, I. Bargiotas, D. Ricard, A. Yelnik, L. Oudre, F. Bertin-Hugault, P. Vidal, N. Vayatis, S. Buffat, J. Audiffren, "A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code", Physiological Reports, vol. 9, e215067, 2021.
- [4] P. Schubert, and M. Kirchner, "Ellipse area calculations and their applicability in posturography", Gait and Posture, vol. 39, pp. 518-522, 2014.
- [5] L. Gizzi, J. F. Nielsen, F. Felici, Y. P. Ivanenko, and D. Farina, "Impulses of activation but not motor modules are preserved in the locomotion of subacute stroke patients", Journal of Neurophysiology, vol.106, no.1, pp.202-210, 2011.
- [6] D. J. Clark, L. H. Ting, F. E. Zajac, R. R. Neptune, and S. A. Kautz, "Merging of healthy motor modules predicts reduced locomotor performance and muscle coordination complexity post-stroke", Journal of Neurophysiology, vol.103, no.2, pp. 844-857, 2010.