

背屈・外反動作を独立に支援可能な

内反尖足患者のための下腿フィッティング型足関節支援 RT の開発

The development of the lower leg fitting type ankle assistance RT for equinovarus patients

which can control dorsiflexion and valgus separately

○ 田中元基 (早大) 福嶋勇太 (早大) 安田和弘 (早大) 保科智啓 (早大)

鈴木慈 (早大) 大橋洋輝 (東京慈恵会医科大) 岩田浩康 (早大)

Genki TANAKA, Waseda University
Yuta FUKUSHIMA, Waseda University
Kazuhiro YASUDA, Waseda University
Tomohiro HOSHINA, Waseda University
Shigeru SUZUKI, Waseda University
Hiroki OHASHI, Jikei University School of Medicine
Hiroyasu IWATA, Waseda University

Abstract: The equinovarus foot patients who are hemiplegic by the cerebrovascular accident have the risk of rollover and mistaken learning of gait. To cure the equinovarus foot, we aimed development of the orthosis that can support dorsiflexion and valgus by the tow with strings. This orthosis is able to actively support in a suitable walking phase. It also has a shape which fits the lower leg so that it can be used without shoes. The maximum dorsiflexion angle and valgus angle by this orthosis are 23.2 and 15.0 degree enough to support the equinovarus foot patients. Moreover, the gait with this orthosis was compared with the gait without it in a simulated hemiplegic walking by physical therapist. In the result, a significant improvement was observed in each maximum displacement of the vertical and horizontal components of the COP trajectories.

Key Words: Ankle-foot orthosis, Gait, Dorsiflexion, Valgus

1. 緒言

我々はこれまで内反尖足を呈する急性期の脳卒中片麻痺患者の歩容改善を目的とし、人工筋肉を用いて遊脚期の背屈と立脚期の踵ロッカーを支援する高背屈支援 RT (以下、HDRT)を開発した⁽¹⁾。しかし HDRT では内反足に対応するため人工筋肉の固定点を前足部の第 5 趾側に設けたが、人工筋肉が一本であり背屈支援と同フェーズにしか外反支援を行うことができない。支援動作では背屈支援を優先して制御を行うため外反方向の足関節の拘束が必要以上に持続し、立脚中の足圧中心 (Center of pressure: 以下 COP) が適切な軌跡を取らないことから重心を支持基底面上に留めることが困難になるため重心移動が不安定になり、歩行全体の安定性が減少する恐れがある⁽²⁾。

そこで本研究では、つま先離地から足底接地までの背屈支援と、つま先離地から踵接地までの外反支援を行うアクチュエータを独立させることで適切な歩行フェーズに合わせた動作支援を行うことができる足関節支援 RT の開発を目的とした。

2. 足関節支援 RT システム

2.1 要求機能

開発する装具の要求機能を検討するに当たり、内反尖足の症状を尖足と内反足の二つに分けて考える。

まず尖足の症状に関して、健常歩行では初期接地時に踵接地を行うことで踵を中心に下腿が回転し、前方への推進力を維持する踵ロッカーの機能がある。一方で内反尖足患者では遊脚期に足部が底屈状態となるため初期接地時につ

つま先から接地し、踵ロッカーが機能しないことで歩行時の推進力を減少させるという問題がある。そのため、初期接地の際の踵からの接地とその後の踵ロッカーを補助するために、遊脚期から荷重応答期が終了するまでの背屈方向への支援が必要であるといえる。

次に内反足の症状に関して、健常歩行では初期接地の際に少量の内反角度を維持したまま接地するため荷重応答期に自重により徐々に足裏全体での接地を行い、安定した歩行を行うことができる。しかし、内反尖足患者では初期接地の際に足部が過度に内反した状態で接地を行うため、荷重応答期に急激に内反角度が減少し、安定性を損なう可能性がある。さらに、弛緩性や筋緊張の度合いの高い患者では内反状態のまま外足部のみで立脚期を通過するため、捻挫や骨折の危険性がある。そのため、内反足の症状に対しては初期接地の際の LHA(Leg Heel Angle)を外反方向へ支援することが必要となり、この機能は遊脚期から初期接地の間に求められる。

また、上述の背屈・外反支援は目的の差異により支援が求められる歩行フェーズが異なるため、それぞれの支援を独立して行う必要がある。

さらに、既存の短下肢装具では足底部に 10[mm]ほどの厚みを有しており、また足部と膝部を繋ぐフレームなどにより装着者は左右足で靴のサイズを変更する必要もある場合があるため、左右足の接地高さが異なり、歩行時の左右バランスを崩壊させる恐れがある。そこで、足底部に厚みを有さず、靴の種類に依らないようにフィット性の高い形状であることが求められる。

2.2 足関節支援 RT の設計・製作

製作した提案装具を Fig. 1 に示す．全体の構造としてソックスをベースにすることで靴の有無に依らずに使用できる構造とした．踝の上部前面に背屈支援用モータボックス (①) を，上部外側に外反支援用モータボックス (②) を搭載し，これらを連結し，モータユニットとしてソックスに固定した．足部の正中線上に沿ったストリングガイド (③) の内部のアウトチューブ内を通ることでソックスに沿うように配置された背屈支援ストリング (④) が第 2 趾の付け根に固定されており，背屈支援用モータボックスが下腿方向へ牽引することで距腿関節まわりの背屈モーメントが発生し，背屈動作を行う．同様に，外反支援用モータボックスが外反支援ストリング (⑤) を第 5 趾の付け根から牽引することで距骨下関節まわりの外反モーメントが発生し，外反動作を行う．なお，モータを決定する際，外反支援に必要なモータトルクと比較して背屈支援に必要なモータトルクが大きくなるため，必要背屈モータトルクを外反支援モータにも適用した．モータの要求トルクは簡易的に足関節をモデル化し 4.3[Nm]を得た．

背屈・外反の支援動作は，足底に設けた足圧センサから判別された歩行フェーズに基づいて行われる．背屈支援は踵接地を促して踵ロッカーを補助する目的があるためつま先離地から足底接地まで行い，外反支援は踵接地時の接地面積の増加を促す目的があるためつま先離地から踵接地まで行う．背屈，外反支援モータボックスは独立しているため，それぞれ任意のフェーズ下で支援を行うことができる．目標支援角度は健常成人 1 名のデータを基にし，遊脚期底屈状態からの背屈角度を 20[deg]，外反支援時の LHA を内反 5.2[deg]とした．

実際に装具を製作したところ，下肢部分重量は 1040[g]であり，各モータボックスのサイズは 75×100×50[mm]となった．健常成人に本装具を適用したところ，最大背屈角度は 23.2[deg] (SE:±0.3)が得られ，目標値を上回った．また，模擬内反尖足歩行に適用したところ，踵接地直前の LHA は内反 4.9[deg] (SE:±0.7)と目標値に近い値となり，装具なし(内反 30.9[deg])に対して有意差を認めた．

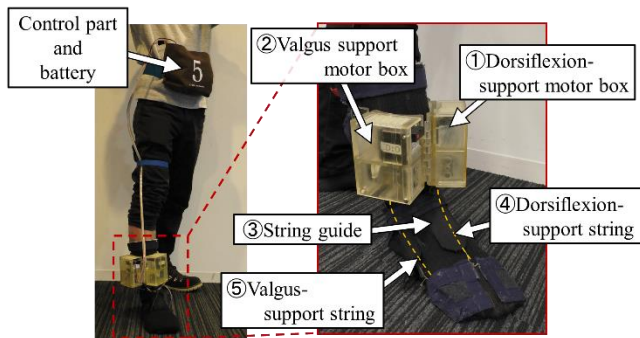


Fig. 1 The ankle support RT

3. フィット性による左右対称性への影響評価

3.1 実験方法

装具のフィット性の評価として本装具を健常成人 1 名に適用し歩行した際の重心加速度左右シンメトリインデックス⁽³⁾を以下の 3 条件で比較した．

- (a) 装具なし
- (b) 短下肢装具 (ゲイトソリューション) 適用
- (c) 足関節支援 RT 適用(支援なし)

5[m]歩行を行い，歩行時の重心加速度左右シンメトリインデックスを慣性センサ (バルテック社: G-WALK)により

測定した．データ数を N ，データ最小値を x_{lj} ，データ最大値を x_{hj} とすれば，シンメトリインデックスを示す式は以下の通りである．

$$SI_x = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{x_{lj}}{x_{hj}} \quad (1)$$

測定は 10 試行を行い，測定データは Tukey の多重比較検定を用いて統計処理を行った．今回は装具の形状による歩容への影響を評価するため，足関節支援 RT 適用時にモータによる支援は行わないものとした．

3.2 実験結果

実験結果を Fig. 2 に示す．装具なしの健常歩行では左右シンメトリインデックスは 97.6[%]であり，ゲイトソリューションを適用した場合には 83.5[%]まで低下した．一方で，足関節支援 RT を適用した際には 92.9[%]まで左右シンメトリインデックスは向上し，ゲイトソリューションを適用した場合に対して $p<0.01$ で有意差を認めた．また，健常歩行と足関節支援 RT 適用時では有意差が見られなかった．

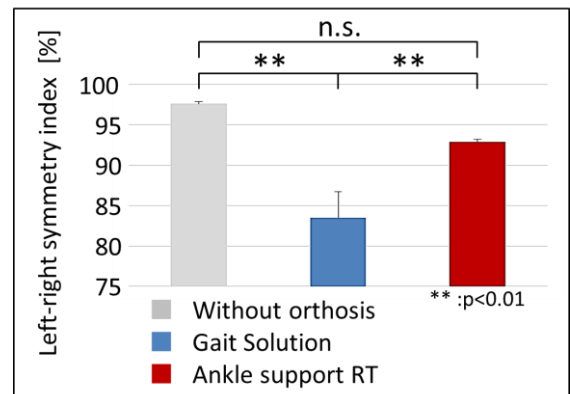


Fig. 2 The result of fit evaluation test

3.3 考察

装具なしに対してゲイトソリューションを適用した場合に左右シンメトリインデックスが減少したのは，ゲイトソリューションの足底部の厚みが 10[mm]ほどあることで左右足の接地高さが異なり，また構造として内外反方向の自由度が小さいという点が障害になっていると考えられる．一方で，足関節支援 RT を適用した際に装具なしに対して有意差が認められたことに関しては，ソックスをベースとした構造にしたことで左右足の接地高さになんとも差異がなかったためであると考えられる．また，装具なしに対して足関節支援 RT 適用時に左右シンメトリインデックスが減少したのは装具の重量が影響していると考えられる．

4. 足圧中心軌跡の評価

4.1 実験方法

理学療法士 1 名による模擬内反尖足歩行を対象とし，以下の 4 条件において歩行時の COP 軌跡を測定し，上下成分最大変位差と左右成分最大変位差を比較した．

- (a) 健常歩行
- (b) 模擬内反尖足歩行
- (c) 背屈支援のみ
- (d) 背屈と外反を同時支援

5[m]歩行を行い，歩行時の COP 軌跡を足底圧分布計測システム P-WALK (バルテック社) により測定した．測定は各条件ごとに 5 試行を行い，測定データは Tukey の多重比較

検定を用いて統計処理を行った。

4.2 実験結果

各歩行条件における代表的な COP 軌跡を Fig. 3 に示す。また、各条件での COP 軌跡上下成分最大変位差を示したものを Fig. 4 に、左右成分最大変位差を示したものを Fig. 5 に示す (Fig. 3～Fig. 5 の(a)～(d)は対応している)。

上下成分に関して、(b)と(c)に有意差が認められ、また、(a)と(d)の間に有意差は見られなかった。左右成分に関しては、(c)と(d)で有意差が認められ、(a)と(d)の間に有意差は見られなかった。

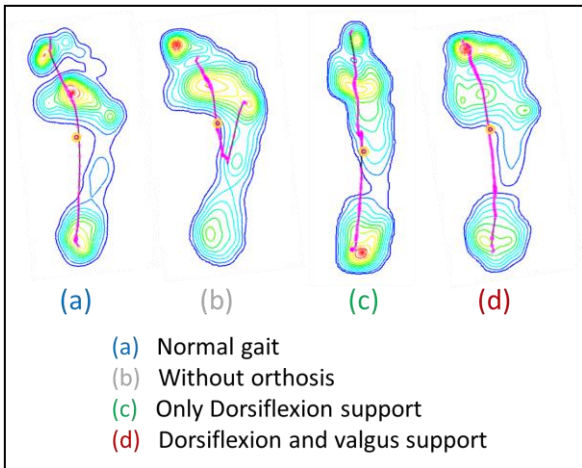


Fig. 3 Center of pressure trajectories of each walking conditions

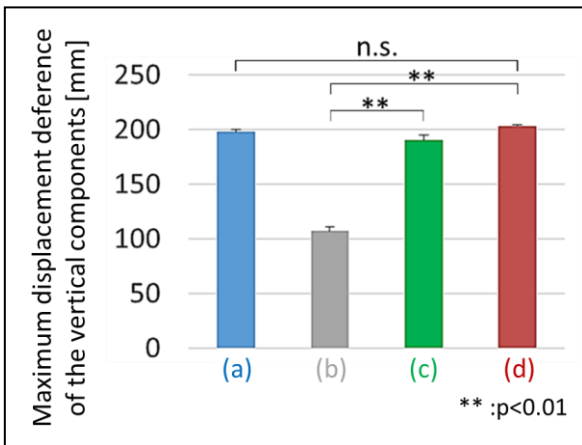


Fig. 4 Maximum displacement difference of the vertical components of center of pressure trajectories

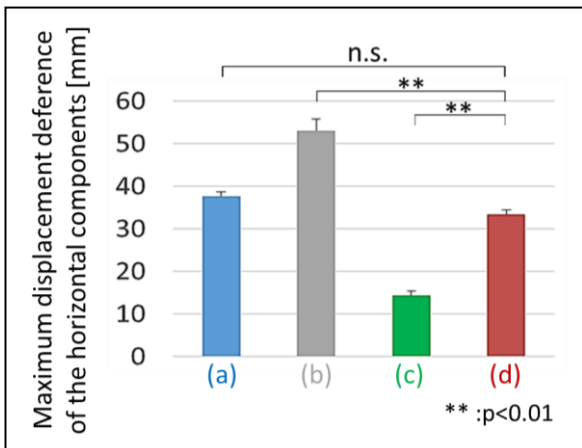


Fig. 5 Maximum displacement difference of the horizontal components of center of pressure trajectories

4.3 考察

まず上下成分について、(b)では踵での接地は行わずに第5趾の付け根付近で初期接地を行っていることがわかる。ここで背屈支援を行った結果、(c)のように踵から接地出来ており、(b)と(c)の間に有意差が見られたことから上下成分の改善効果がわかる。しかし(c)では内反足に対するアプローチを行っていないため、母趾で接地することなく外足部のみで歩行を行っており、背屈支援のみでは支援が不十分であることがわかる。ここで背屈支援に加え外反支援も同時に行った結果、(d)のように踵接地を踵の中心で行った後にCOP軌跡が母趾を抜けていることがわかり、(c)と(d)の間に左右成分に有意差が認められた。また、(a)と(d)のCOP軌跡の各成分を比較した際、上下・左右成分ともに有意差が見られなかった。以上のことから、足関節支援 RT を適用することで歩容が改善されたといえる。

5. 結言

本研究では、十分な背屈・外反支援を独立して行うことで両支援を適当な歩行フェーズ中に行うことが可能な足関節支援 RT の開発を目的とした。装具の構造として歩行時の左右バランスに悪影響を与えないためにフィット性の高い構造とし、評価の結果従来の短下肢装具と比較して左右バランスに与える影響が小さいことが示された。また、模擬内反尖足歩行に本装具を適用したところ歩容を示す主要な指標である COP 軌跡の改善効果も確認された。

一方で、内反尖足患者に見られる痙性麻痺によって発生する背屈抵抗に関しては十分な考慮がなされていないため、今後は痙性麻痺に対するアプローチも考慮し、その上で臨床試験を行い、本装具が脳卒中片麻痺患者の歩容に与える影響などを検証する予定である。

謝辞

本研究は科研費基盤研究 B の支援の下に実施されました。また、ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 鈴木 慈, 低剛性ばねによりケイデンス対応可能な高背屈支援RTの開発, 早稲田大学, 2014.
- (2) 桐山 希一, 足底圧の動的変化を指標とした健常成人の歩行制御および片麻痺歩行に関する研究, 医療保健学研究, つくば交際大学紀要(3), pp.1-40, 2012
- (3) V.Macellari, C.Giacomozzi, R.Saggini, Spatial-temporal parameters of gait: reference data and a statistical method for normality assessment, Gait and Posture, Vol.10, pp.171-181, 1999