

## [研究助成 (A)]

## ポタリングサイクリングのための下腿義足の開発

## Development of a Transtibial Prosthesis for Puttering Cycling

2211026



研究代表者	九州大学 大学院芸術工学研究院	教授	村木里志
共同研究者	広島国際大学 総合リハビリテーション学部	助教	森永浩介

## [研究の目的]

下肢切断により義足を利用する者にとって、サイクリングは一部の者、特に競技選手に限定されている現状がある。散歩の感覚のように手軽にサイクリングを行うこと、つまりポタリングサイクリングが身近になれば、行動範囲や通勤・通学等の利便性が広がるだけでなく、サイクリングの様々な楽しみや健康上のメリットが享受できる。そこで我々は、片側に下腿義足(膝下切断者用)を装着する者を対象とし、ポタリングサイクリングを可能とするために必要な方策の要件を整理・提案・実現することに取り組んでいる。

サイクリングを行うためには、左右のペダルを足底にて交互に押し、クランクを回転させる動作、すなわちペダリングが必要となる。その動作は左右の股関節(伸展-屈曲)、膝関節(伸展-屈曲)、足関節(背屈-底屈)の運動によって成立する。効率的なペダリングを行うためには、足底がペダルから離れないだけでなく、脚部の関節運動の力がクランクの回転に効率的に伝達されるよう、クランクの角度に応じたペダルの向きの調整も重要となる。

片側の脚が義足の場合、ペダリングを行うと様々な問題が生じることが予想される。下腿義足の場合、足関節の運動が働かないことは大きなハンディキャップとなる。足関節の底屈運動

(つま先が下に向かう動き)が使えないことからペダルを押しパワーが弱くなる。それに加え、ペダルの向きの調節が難しく、股および膝関節の運動による力を効率良く伝えられない問題も生じる。これらの問題は一部であり、他にも様々な問題が起こると予想される。

このような背景から本研究課題では、下腿義足利用者(片側のみ義足)がペダリングする際に生じる問題点や原因を実験から明らかにし、それらを解決する方策を提案することを目的とした。

## [研究の内容, 成果]

実験課題：足関節運動制限がペダリングに及ぼす影響

## 【背景・目的】

片脚の足関節の運動が働かない、つまり制限される影響を把握するためには、下腿義足を利用する当事者を対象に検討することも考えられる。しかし、個々によって義足の種類や性能が異なることから、足関節の運動制限の影響のみを抽出することは難しいと考えられる。

そこで本実験では両下肢が正常な健常者を対象とし、足関節の運動の制限の影響に絞って検討が行えるように、足関節の運動がペダルに作用しない模擬義足(以下、実験用義足)を実験



図送信機 (ZB-150H, 日本光電) にて計測した。筋電図信号はクランク角度計測と同期させて収録した。

#### 動作解析

右脚の股関節 (大転子点), 膝関節 (膝関節列隙), 足関節 (外果) に半球マーカを貼付し, 被験者の側面から動画撮影した。マーカ位置より, 矢状面上の股関節, 膝関節, 足関節の角度を計測した。また, 腰部左右にも半球マーカを貼付し, 被験者の後方より動画撮影し, 両マーカの上下動幅を計測した。

#### ペダルフォース

左右のペダルにペダルフォースセンサー (Assioma Duo, Favero) を装着し, ケイデンス, パワー, 左右バランス等を計測した。

#### 【結果・考察】

義足有り (義足 M・T 条件) と無し (対照条件) の比較 (足関節運動制限の影響)

義足有りの場合, 健常足側の下肢筋電図振幅平均値が対照条件と比べてより大きくなった (図 2)。本実験のペダリングでは, 一定の負荷量 (40 W) を維持することを求めた。義足側のパワーが劣ったため, それを健常足側で補ったと考えられる。義足側のパワーが劣った原因としては次の二つが考えられる。一つ目は, 義足側においては足関節の底屈によって力を発揮できなくなることである。二つ目は, ペダルの角度を適切に調節できなく, 健常足側のように効率的に股および膝関節運動による力をクランクの回転に伝達できなかったことである。後者については下肢関節動態が義足有りと無し条件にて異なったことから支持される。

一方, 義足有り条件において, 義足側と健常足側では下肢の筋活動動態が異なった。残念ながら義足を装着しない側 (左側) の下肢関節動態は測定していなかったが, 義足側 (右側) の下肢関節動態は義足無し条件と異なった。このことは義足有り条件の場合, 左右の下肢関節動態も異なることを示唆する。つまり義足有り条

件では, 左右の下肢の筋活動動態および下肢関節動態が非対称でなくなった。実際に腰部左右に貼付したマーカの上下動幅は義足有り条件にて大きくなった。ペダルフォースセンターによって計測した左右バランス性も低下した。このように義足有り条件の場合, 左右異なる動作および筋活動が求められ, スムーズなペダリングが困難になると考えられる。

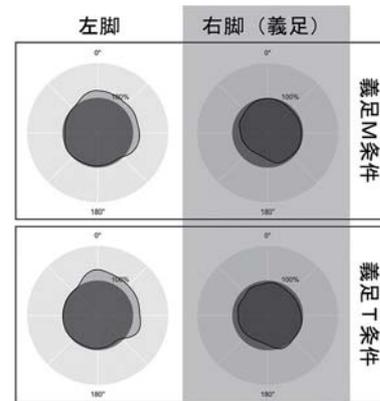


図 2 ペダル角度に対する外側広筋の筋電図  
義足なし条件 (正円 100%) に対する相対値

義足 M 条件と義足 T 条件の比較 (足底とペダルの接続位置の影響)

義足 M 条件は義足 T 条件および対照条件と比べて, 義足側 (右側) の膝関節角度の平均値が大きくなった。つまりより伸展していたということになる。これはペダルの接続位置の関係にて, ペダルが最低位付近に位置する際に膝をより伸展させる必要があったからと考えられる。一方, 義足 T 条件は義足 M 条件と比べて, 股関節角度の平均値が小さくなった。つまりより屈曲していたことになる。ペダルが最高位付近に位置する際, 足関節の背屈動作が行える場合, つま先側を挙げ, 踵部側を下げることにより, その分, 股関節の屈曲を抑えることができる。またこの動作によってペダルが押し込みやすくなる。しかし, 義足 T 条件では, つま先側でペダルに接続し, 足関節の背屈が使えないために踵部を下げられず, その結果, 膝がより上がり, 股関節がより屈曲したと考えられる。

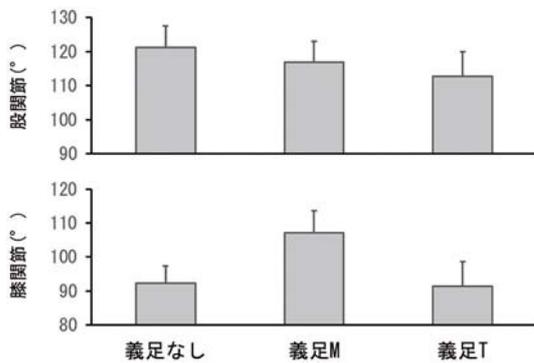


図3 腰・膝関節角度 (ペダリング時の平均値)

#### ポタリングサイクリング用の下腿義足の要件

本実験の結果に基づいて、サイクリング用の下腿義足の要件を整理する。

- ・義足側においては、足関節運動が働かず、膝および股関節運動によってクランクを回転させる。それらのパワーがロスなく、ペダルに伝達されること。
- ・その伝達には、クランクの角度に対するペダルの角度も重要となる。
- ・義足足底とペダルの位置が異なると、下肢関節も異なる動きが求められる。ポタリングを想定した平地の軽走行において足底中央部の方がポジティブな結果を示したが、健全足と比較すると違いは大きく、これで解決するものでない。
- ・理想としては、左右の下肢筋活動と関節運動がより対称になるようなサイクリング用下腿義足が望まれる。

以上はまだ開発に向けた一部の要件にしか過ぎないが、ポタリングサイクリングのための下腿義足の要件を科学研究から提案したことは、大きな前進と考えられる。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本成果報告書においては、平地走行を想定した負荷での知見を報告した。坂道走行を想定した実験も実施している。また、今回報告した成果については世界に発信するために、国際学術誌への論文投稿を準備している。

一方、本研究の実施と平行して、本研究の当事者の実状やニーズを踏まえた義足開発を進めるために、また今後の研究の方向性を検討するために、下腿義足利用者に対して、サイクリングに対するインタビュー調査を行った。義足利用前後のサイクリングの状況を尋ねたところ、義足後には自転車走行の実施は少なくなっていた（もしくは皆無）。また、全員ではないがサイクリングを再度実施したいというニーズが確認できた。しかし、短距離移動のためのサイクリングにおいては、専用の義足に交換するのではなく、日常の義足のままで行いたい（長距離の場合などは専用の義足に交換することは構わない）というニーズも高かった。その一方で、転倒などの危険性に対する心配も大きかった。

このようなニーズを踏まえ、サイクリング用義足の開発に加え、ペダルおよびペダルと義足のアタッチメントの開発も進めている。まずは下腿義足利用者でもサイクリングが可能であることが体験でき、サイクリング実施の動機づけになるように、日常の義足にてペダリングできるようなペダルおよびアタッチメントの開発を先行して行っている。

サイクリング用義足自体については複数のアイデアがあり、イメージ図なども作成している（知財保護から本報告書での公開は差し控える）。足関節運動が働かない不利な条件を義足の弾性力を使って補うなどの方策を考えている。上述したペダルおよびアタッチメントとの併用になると思われるが、健全脚と近いペダリングが可能となり、左右脚の非対称性を軽減することが期待される。

なお、これまでの研究は下肢エルゴメーターを用いて行ってきたが、実際の自転車を用いて（安全確保のためにローラー上の走行となる）、またタイプが異なる自転車を用いての検討も進めている。また、将来的には路面での実走に進め、発進、加速、減速、停止、方向転換などの場面にて起こる問題にも取り組み、ポタリングサイクリングの実現を目指す。

[謝 辞]

実験用義足の製作およびインタビュー調査にご協力頂きました株式会社有菌製作所開発室・千々和直樹様, 小田堯人様, ならびに実験用義足の設計についてご助言頂きました株式会社 JST Fit 代表取締役・森本哲平様に感謝申し上げます。

[付 記]

本研究は Heloísa Seratiuk Flores (九州大学大学院芸術工学府) および Yeoh Wen Liang (九州大学大学院芸術工学研究院特任助教, 現佐賀大学工学部助教) とともに実施した。

[成果の発表, 論文等]

学会発表

- 1) Heloísa Seratiuk Flores, Wen Liang Yeoh, Satoshi Muraki. Biomechanics of cycling applied to the design of transtibial leg prostheses. 日本人間工学会九州・沖縄支部会第 42 回大会. 2021 年 12 月 17~18 日
- 2) Heloísa Seratiuk Flores, Wen Liang Yeoh, Kosuke Morinaga, Satoshi Muraki. Transtibial leg prostheses: Applications to the practice of cycling. 日本人間工学会第 63 回大会. 2022 年 7 月 30~31 日
- 3) 国際誌へ投稿準備中