

共同研究 報告書

○ 脚矯正用トレーニング器具の機能検証試験

共同研究者：きたの均整院

報告者：香川大学工学部 知能機械システム工学科

井上 恒

2014年2月28日

1. 検証の目的

きたの均整院と香川大学において、O脚矯正用器具の開発を共同で行っている。このトレーニング器具の特徴は、股関節外旋運動のトレーニングを行うことでO脚の矯正を目指している点にある。従来より多く行われてきた、膝を内反させる力を印加する矯正方法と、その基本原理が異なる。

前回の報告書では、先行研究などをもとに、平均的な日本人女性の股関節外旋における等尺性最大発揮モーメントを推定した。さらに、ヒトの股関節可動域、股関節外旋モーメント、外旋角度変化に伴うばねの影響の3者を考慮し、本トレーニング器具に適切なばね定数を算出した。

本報告書では、上記で設計されたばねを試作機に実装し、トレーニング動作を行うことにより、本トレーニング器具の機能の検証を行うことを目的とした。設計したばねが適切に機能しているのか、トレーニング動作中の下肢の力学的状態を評価することによって検討した。

2. トレーニング器具使用における力学的作用の検証

2-1 被験者

健康な成人男性1名（年齢33歳，身長169cm，体重68kg）を被験者とした。本トレーニング器具は女性向けではあるが、トレーニング動作中の下肢の力学的状態においては、性別の影響は少ない。検証実験としてのトレーニング動作を確実に行わせるため、本試験においては、あえて男性を被験者として採用した。

2-2 実施日および場所

実験は2014年2月19日に実施した。測定は香川大学医学部基礎臨床研究棟MRS室にて行った。

2-3 実験方法

トレーニング動作時の下肢の位置および姿勢と、床反力を測定した。下肢の位置および姿勢は、3次元モーションキャプチャシステム（LIBRARY社製）を用いて100Hzで記録した。撮影時には反射マーカを右脚の①つま先，②第1中足骨，③第5中足骨，④踵，⑤内果，⑥外果，⑦大腿骨内側上顆と脛骨内側顆の midpoint，⑧大腿骨外側上顆と脛骨外側顆の midpoint，⑨大転子と⑩左側の大転子に貼付した（図1）。また，⑪⑫トレーニング器具のばねの取り付け位置（左右）にも，それぞれマーカを貼付した。全てのマーカは直径7mmのものを用いた。右脚の床反力の測定は，フォースプレート（テック技販社製）を用いて1000Hzで記録し，モーションキャプチャの計測と同期させた。なお，トレーニング器具にはばね定数は0.16N/mmのばねを実装した（図2）。ばねの自然長は約22.9cmであった。

トレーニング器具を用いた股関節外旋運動は、トレーニング器具を履き、直立した状態から行い、視線は水平前方とした。踵とつま先を結んだ線が左右でほぼ平行になる状態を 0° 股関節外旋位とした。このとき左右の足部の間隔は、ばねが自然長となるようにした。記録した試技は、上記 0° 股関節外旋位と、トレーニング器具使用時の被験者の主観で 30° と 45° の股関節外旋位で動きをとめた状態の3種類とした。各股関節外旋位で2回ずつの試技を行い、記録した。後述する各データはこの2回を、それぞれ平均したものである。

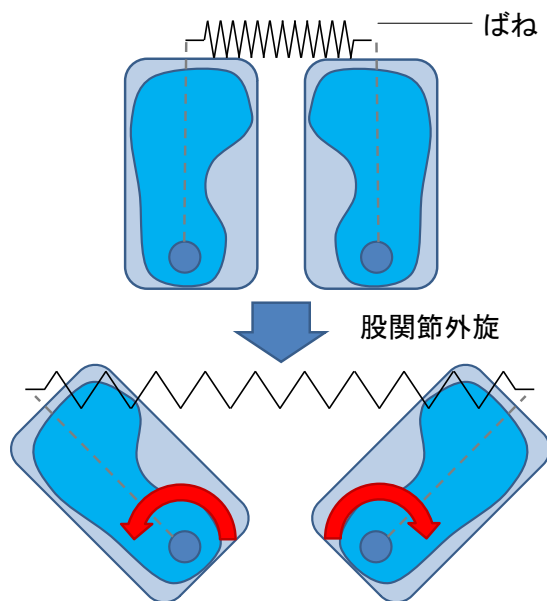


図1 トレーニング器具による股関節外旋の概念図

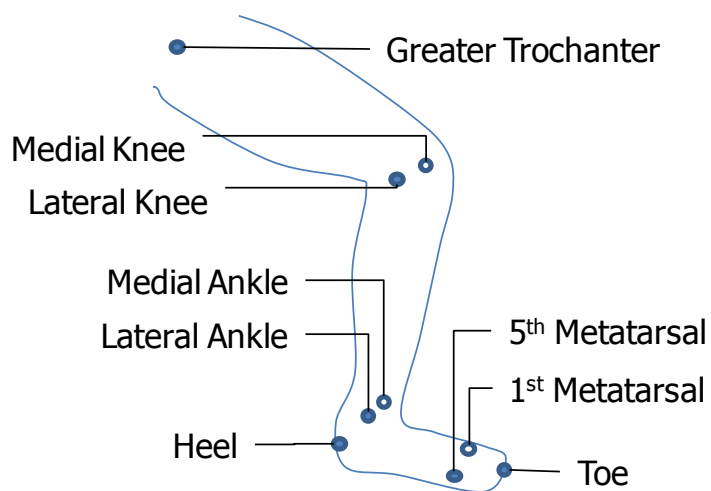


図2 モーションキャプチャにおけるマーカ貼付位置

2-4 データ解析

3次元モーションキャプチャシステムから得られた各マーカの3次元座標データを用いて、足部、下腿部、大腿部および足関節、膝関節、股関節に、図3に示したように移動座標系を設定した。

大腿、下腿、足部はそれぞれ剛体とし、それらが各関節部でリンクしている剛体-リンクモデルを用いて、下肢の座標データとフォースプレートの床反力データから、ニュートン・オイラー法による逆動力学解析を行った。その際、各試技の動作はほぼ静止していたため、加速度は0とした。各関節の関節間力と関節モーメントは、阿江ら(2002) [1] による身体部分係数を用いて算出した。

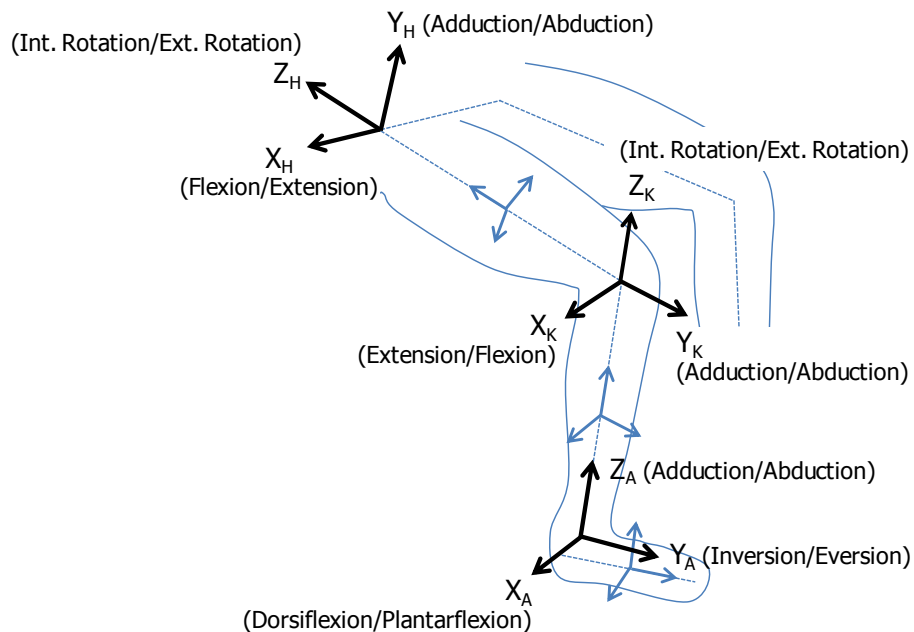


図3 下肢の体節および関節に設定した座標系

2-5 実験結果

表1に各試技における足部の回転角度を示す。足部の角度は、踵 - つま先の線分を水平面上に投影したものをを用いて算出した。基準座標系に設定した座標軸の内の一つが、被験者の前額面を前後に垂直に貫くように設定した。その軸と踵 - つま先の線分がなす角を求めた。次に、0 deg の試技からの足部の回転量を 20 deg と 40 deg で求めた。この値が、ばねの伸びを含んだ実質的な股関節の外旋角度に相当する。30 deg, 40 deg の試技でそれぞれ 31.9 deg と 45.6 deg の値が得られており、股関節外旋の試技が、概ね予定通り実行できたことが確認された。なお、表1におけるばねの伸びは、モーションキャプチャによるデータをもとに算出した。

次に、モーションキャプチャと床反力のデータを用いて逆動力学解析を行うことにより、股関節の関節モーメントを算出した。股関節の関節モーメントと大腿の長軸方向の単位ベクトルとの内積を取ることで、股関節回旋モーメントを算出した。その結果、足部の外旋に伴い、股関節外旋モーメントが増大することが示された（図 4）。30 deg の試技では 5.1 Nm、45 deg の試技では 6.1 Nm の股関節外旋モーメントが発揮された。

表 1 足部回転角度とばねの伸び

	試技		
	0 deg	30 deg	45 deg
基準座標系からの角度 [deg]	8.4	40.3	54.0
0 deg からの差分 [deg]	0	31.9	45.6
ばねの伸び [cm]	0	24.4	32.5

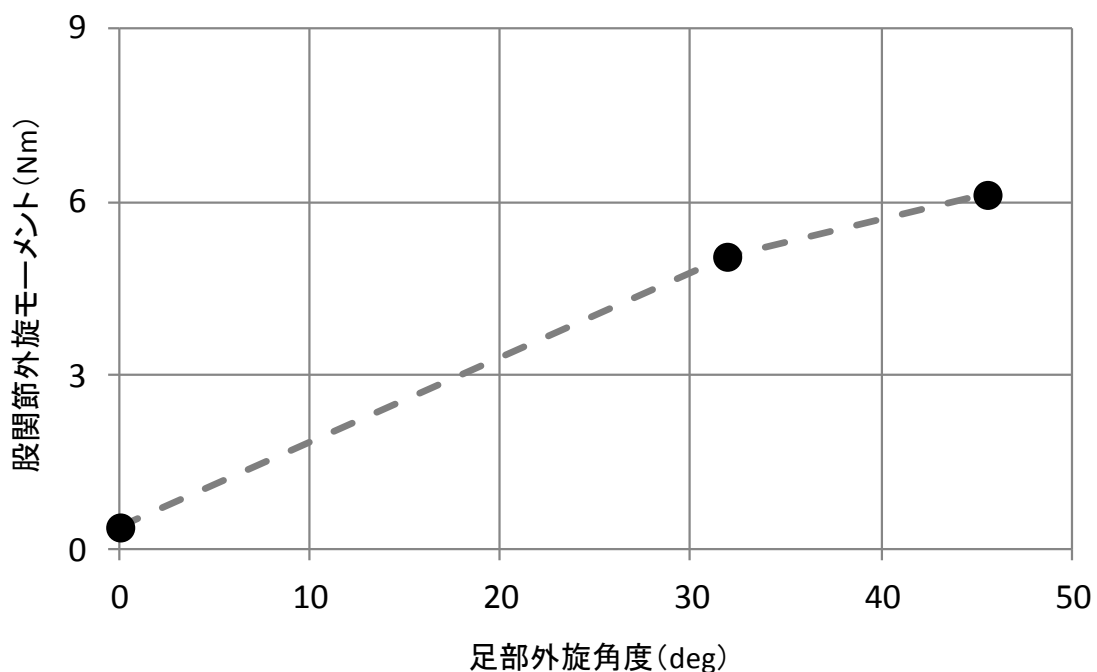


図 4 トレーニング器具使用時の足部回転角度と股関節外旋モーメントの関係

右足部に貼付したマーカ（①つま先，②第1中足骨，③第5中足骨，④踵，⑤内果，⑥外果）の位置と，足部（トレーニング器具）の床面に対する圧力中心（COP:center of pressure）の位置を水平面上に投影したものを図5に示す．また，表2に水平面上での踵とCOPの距離を試技ごとに示した．足部を外旋させるとCOPの位置が踵に近づくことが示された．

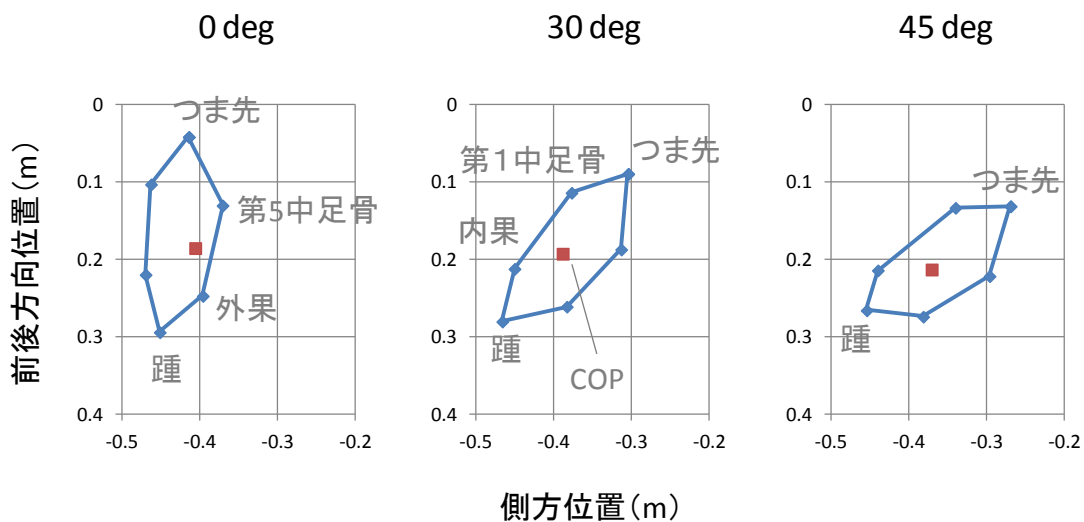


図5 を水平面上に投影した足部マーカセットとCOPの位置
 図中の青い印は足部マーカセット，青い線は足部の概形を示す．赤い印はCOPを示す．

表2 踵と足部圧力中心（COP）との水平面上の距離

	試技		
	0 deg	30 deg	45 deg
踵-COP間の距離 [cm]	11.8	11.7	9.9

3. トレーニング器具の機能評価

上記「2. トレーニング器具使用における力学的作用の検証」において、足部の外旋角度の増加に伴い、股関節の外旋モーメントが増大した。つまり、ばねを付けた足部（トレーニング器具）を回転させる動作には、股関節外旋モーメントが要求されることが示された。そして、足部の外旋角度に応じて股関節外旋モーメントが高まっていく傾向は、先の報告書「O脚矯正用トレーニング器具に用いるばねに関する人間-機械系設計」の設計通りに実現されていた。

ここで、股関節モーメントの値の大きさについて検討する。図6は設計上要求されると推定された股関節外旋モーメントと本試験における解析結果を示している（本報告書における図4の結果を、先の報告書における図3と照合した）。本試験においてばね定数 k は160 N/m (0.16 N/mm)とした。図6より、 $k=160$ の場合は、本試験の結果よりも大きな股関節外旋モーメントが発揮されると推定されているが、解析の結果、 $k=100$ 程度で推定された値となった。この原因について、主に以下の3点が挙げられる。i) 大腿部の傾き、ii) 足部（トレーニング器具）底面と床面との摩擦力、iii) 実験の測定精度である。以下に、それぞれについて検討していく。

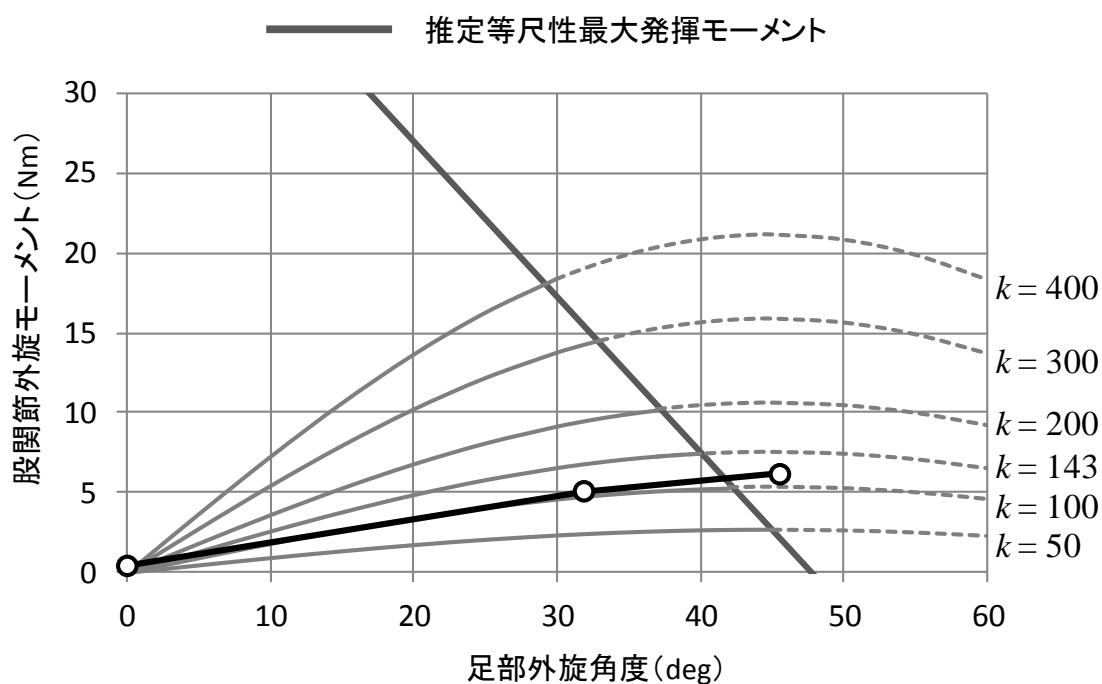


図6 推定（設計上要求される）と実測（解析結果）の外旋モーメント

図中の黒丸は本試験における解析結果を示す。灰色の線は設計上、要求される値を示す。図右側の k の値はばね定数を示し、単位はN/mである。本試験に用いたばね定数は $k=160$ [N/m]であった。

まず、i) 大腿部の傾きが股関節外旋モーメントに与える影響について検討する。トレーニング動作時、股関節ではトレーニング器具を外旋させるのに必要なモーメントに加えて、下肢の姿勢を保つモーメントが要求される。このモーメントは3次元ベクトル M として算出される。仮にこの M の向きと大きさが基準座標系に対して一定だったときに、大腿部の傾きが異なる場合を考える。股関節に働くモーメント M を、股関節の座標系で分解したものが、屈曲-伸展、内転-外転、内旋-外旋モーメントとしての意味を持つ。そして、大腿部の長軸方向の成分が内旋-外旋モーメントに相当する。つまり、基準座標系に対して M が一定であっても、大腿部の長軸の傾きが変わることによって、 M がその軸に射影される成分が変化してしまう。先の報告書の設計では、常にトレーニング器具の回転軸から鉛直に下腿と大腿が位置するモデルになっていた。しかし、実装したばねの自然長、トレーニング器具の左右の回転軸の間隔、左右股関節の間隔、これらの関係によって、トレーニング動作中の大腿部は傾いていた（股関節の外転）。これにより、トレーニング器具を外旋させるのに必要なモーメントは、別の軸（屈曲-伸展成分、または、内転-外転成分）にも射影されることになる（図3参照）。これが、設計値よりも実測の股関節外旋モーメントが減少した理由の一つとして考えられる。また、別の軸に射影されることに関しては後述する。

次に、iii) の足部（トレーニング器具）底面と床面との摩擦力iii) の足部（トレーニング器具）底面と床面との摩擦力に関しては、「2. トレーニング器具使用における力学的作用の検証」で示した COP の位置と関連する。トレーニング器具前部に体重をかけると（COP がつま先の方に移動すると）、器具底面前部の摩擦力が大きくなりすぎて、ばねによる内旋の作用を減少させてしまうと考えられる。つまり、十分な股関節外旋モーメントを発揮しなくても外旋位を保ててしまう。反対に、踵よりに体重をかければ、外旋位を保つのに必要なモーメントは、先の報告書の通りの値になると考えられる。しかし、図5で示されたように足部を外旋させると、支持基底面（足部接地面）の前後方向成分が減少し、転倒のリスクが高まる。加えて、踵よりに COP が移動すると、支持基底面のより狭いエリアに身体重心を位置させることになり、後方への転倒のリスクはさらに高まる。この摩擦力と転倒リスクの問題は、トレーニング器具の回転軸の位置が踵に位置していることに起因するものである。回転軸の位置を足部の中心などに変更すれば、この問題は改善されると推察される。

そして、ii) 実験の測定精度について検討する。モーションキャプチャの撮影状況やフォースプレートの感度を調整することによって、ある程度改善が可能と考えられる。測定精度が今回の解析結果にどの程度影響しているか定量的に検討するのは、今回の試験からは難しいが、測定環境を整えるた再実験を行うことである程度、評価することは可能である。

上記の i) に関する記述のなかで、股関節に生じるモーメントを股関節座標系の成分に分解することによって、そのモーメントの関節運動への貢献を意味づけすることができる。その際、同じ向きと大きさのモーメントが股関節に生じてても、成分に分解する

ときに、その割合が変わってしまう。上記では、これが十分な股関節外旋モーメントが生じなかった原因の一つと推察したが、反対にこれを上手に利用する術も考えられる。現在、足部（トレーニング器具）を外旋させる時の両脚の幅は、ばねの自然長によって決定されてしまう。しかし、もしばねによる足部位置の制約を受けないで、自由に足部の位置を設定できれば、股関節の内転モーメントや伸展モーメントを外旋モーメントと同時に発揮させ、O脚矯正以外の副次的な効果（太ももを細く見せる、ヒップアップなど）も期待できる可能性がある。

4. まとめ

今回の試験により、トレーニング器具の使用により、股関節外旋モーメントが生じることが明らかにされた。また、足部（トレーニング器具）の外旋量に応じて、股関節外旋モーメントも増大することが示された。これらは、概ね前回の報告書の設計通りであった。一方、当初の設計では考慮できていなかった点も示された。しかし、i) 大腿部の傾き、ii) 足部（トレーニング器具）底面と床面との摩擦力的に関しては、本トレーニング器具を改良するための有用な観点であることも示唆された。

引用文献

- [1] 阿江通良, 藤井範久. スポーツバイオメカニクス 20 講. 朝倉書店. 2002. p. 41.