

指の関節トルク解析技術の開発と スパイダースプリントの新たな開発手法の提案*

翁 拓也*¹ 大森信行*² 下里直子*¹

Development of Finger Joint Torque Analysis Technology and a Proposal of a New Development Method for Spider Splints

Takuya OKINA, Nobuyuki OHMORI and Naoko SHIMOSATO

手指の伸展補助装具であるスパイダースプリントの開発に寄与するため、指の関節トルクを解析する技術を開発した。指にかかる力のセンシング機構を独自に開発し、光学式モーションキャプチャと組み合わせて実現した。開発した解析技術を用いて、装具装着時の指の関節トルクを解析した。その結果、装具の構成により、第2指と第3指のMP関節における内外転トルクの変動幅が変化することを確認した。指の関節トルクに着目した装具構成の検討が可能となった。開発した指の関節トルク解析技術を用いて、スパイダースプリントの新たな開発手法として提案する。

キーワード：指、関節トルク、スパイダースプリント、センシング、モーションキャプチャ

1 緒言

脳梗塞等により筋肉が麻痺し、痙縮状態¹⁾(筋肉が緊張し、手足が動き難くなる状態)となった手指の伸展補助装具として、スパイダースプリント²⁾と呼ばれる装具がある。自力で開けなくなった手指を、ワイヤの力で強制的に開く装具である。手指を閉じるときは患者自身の力で行う。手指の屈曲伸展を繰り返すことで、リハビリ効果を得る。

このスパイダースプリントは主に作業療法士による手作りで製作³⁾されており、モーションキャプチャ等の解析技術を用いた研究・開発事例は少ない。指の関節角度(角速度、角加速度を含む)に着目した事例⁴⁾は一部で見られるものの、指の関節トルクに着目した事例は見つけれなかった。本研究ではスパイダースプリントが手指に荷重を負荷する装具であることに着目し、スパイダースプリントの効果を検証するためには、指にかかる力、特に指の関節トルクに基づく評価が重要と考えた。そこで、指の関節トルクの解析技術の開発と、開発した解析技術を用いたスパイダースプリントの新たな開発手法を検討した。

具体的な開発内容は3段階構成となっており、1段階目は指にかかる力の計測技術の開発、2段階目は指の動きの計測方法の検討、3段階目は指の関節トルクの解析方

法の検討である。1段階目は指にかかる力を計測するためのセンシング機構を独自の方式で開発した。2段階目は指の詳細な動きを計測可能とするため、光学式モーションキャプチャを採用し、小型の反射マーカと手指の詳細な動きを正確に捉えるための赤外線カメラを、最適な距離で配置した。3段階目は手指の表面に貼付した反射マーカの表面的な動きから、動作解析ソフトウェアを用いて指の関節角度を推定し、指にかかる力の計測結果と合わせ指の関節トルクを解析した。

開発した解析技術の評価するため、実際にスパイダースプリント装着時の指の関節トルクを解析した。図1に手指の各名称を示す(第2指と第3指で内外転の定義が異なることに注意)。その結果、スパイダースプリントの構成の違いにより、第2指と第3指のMP関節における内外転関節トルクの変動幅が変化することを確認した。

スパイダースプリントの構成による変化を、指の関節

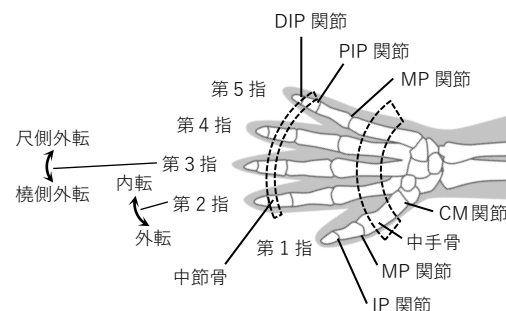


図1 手指の構造と名称

* 特別研究

*¹ 人間生活科学部

*² 人間生活科学部(現 長野県工科短期大学)

トルクの変化として、捉えることが可能となった。

2 スパイダースプリントの構造

図2に本研究で製作したスパイダースプリントの写真を示す。ワイヤ材料としては、一般的にピアノ線が用いられ、本研究においてもピアノ線を用いた。第1指を起点に、第2指から第5指にかけて4本のワイヤが張られている。大きく分けて2形態の構成が存在し、第1指中手骨上に、4本のワイヤを束ねるクランプ部材を有するものと、有しないものがある。本研究では、主要パーツを(株)アспект社製の3DプリンタであるRaFaEl II plus 150-HTにて、PP材で製作した。指のリング部分は市販のベルクロで製作した。

3 解析技術の開発

3.1 指にかかる力の計測技術の開発

スパイダースプリントのワイヤから指が受ける力を計測するためのセンシング機構を新たに開発した。開発したセンシング機構を各ワイヤと指の間に取り付けるため、取り付け可能とする装具も新たに製作した。本研究では評価対象とする第2指から第5指の中節骨上にセンシング機構を取り付けた。後述する光学式モーションキャプチャの座標系に合わせた3軸方向の分力として計測を可能とした。第1指については、スパイダースプリントの構造上、第2指から第5指に合わせて調整されたワイヤが束ねられて第1指に接続されるため、第1指に合わせたワイヤ等の最適化は困難であり、評価対象としなかった。開発したセンシング機構は特許出願予定のため、本報においては詳細を非公開とする。

3.2 指の動きの計測方法の検討

スパイダースプリント装着時の手指の動きを計測するため、光学式モーションキャプチャVicon Motion System社製VICON Vantage V5,V8(以下、VICON)を使用した。図3(a)のようにVICONの赤外線カメラを合計18台使用した。手指に貼付した小型の反射マーカを正確に捉えつつ、可能な限り広い観測域を持たせるため、図3(b)のように被験者周りに三脚式の赤外線カメラ7台を、近すぎず遠すぎない距離で最適配置した。残る11台の赤外線カ

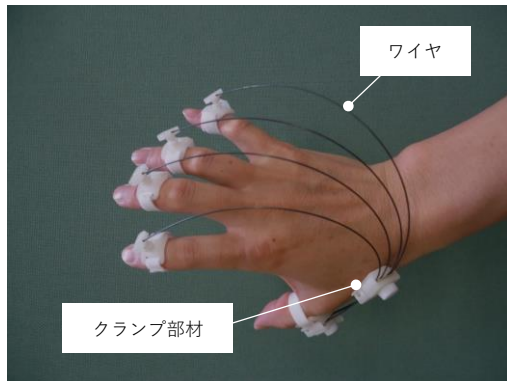


図2 スパイダースプリント例

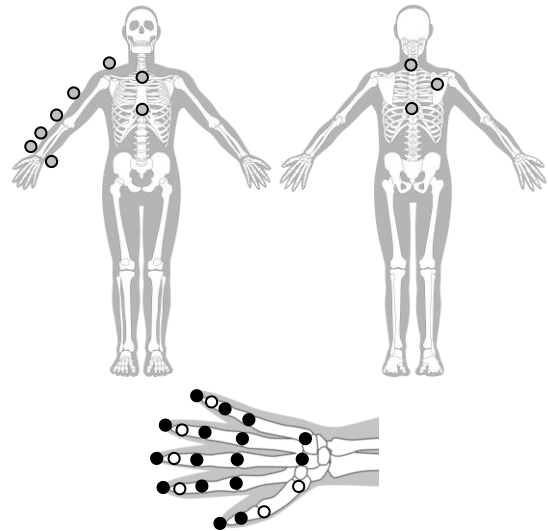


(a) 全体配置



(b) 被験者周りの配置

図3 赤外線カメラ



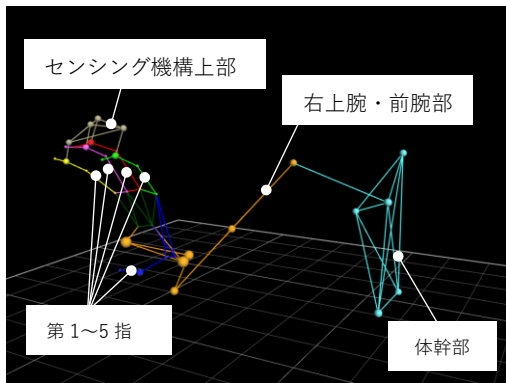
- ϕ 14mm 球形の反射マーカ(計 11 個)
- ϕ 7mm 球形の反射マーカ(計 6 個)
- ϕ 3mm 半級形の反射マーカ(計 16 個)

図4 反射マーカの貼付位置

メラは固定式であり、実験室の外周に配置した。VICONの測定サンプリング周期は100Hzとした。被験者に貼付する反射マーカは図4の位置とし、体幹部と右腕及び右手に計33個貼付した。体幹部と右腕はPlug-in-Gait⁵⁾マー



図5 手の甲に貼付した反射マーカ



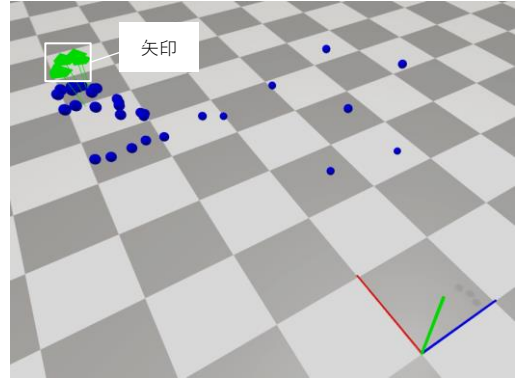
参考に各センシング機構上部にも、 $\phi 7\text{mm}$ の反射マーカを貼付している(計4個)

図6 VICON計測画面

カセットの位置とし、右手は独自の位置とした。本研究では指を研究対象としているが、後述する動作解析ソフトウェアの骨格モデルが体幹部と右腕及び右手で構成されており、それに倣い、体幹部と右腕にも反射マーカを貼付した。体幹部と右腕に $\phi 14\text{mm}$ の球形の反射マーカを11個、第1指MP関節とCM関節、及び第2指から第5指のDIP関節に $\phi 7\text{mm}$ の球形の反射マーカを計6個貼付した。ほか、手の甲の各指関節を中心に $\phi 3\text{mm}$ の半球形の反射マーカを計16個貼付した。手の甲の反射マーカは、指関節中央に正確に貼付するため、小型($\phi 3\text{mm}$)の反射マーカを使用し、装具構成部品の死角に入りやすい部分のみ、大きめ($\phi 7\text{mm}$)の反射マーカを使用した。図5に手の甲に貼付した反射マーカの写真を、図6にVICONで認識させた各反射マーカの表示画面を示す。

3.3 指の関節トルクの解析方法の検討

指にかかる力と動き(モーメントアームを導出)の計測結果から、指の関節トルクを解析する方法として、フリーの動作解析ソフトウェアであるOpenSim⁶⁾を用いた。OpenSimは多数の精度検証⁷⁾や解析事例⁸⁾が報告されており、人体動作解析の分野において、広く利用されているソフトウェアである。動作解析ソフトウェアには主に2つの方式があり、一つは各関節軸の両端に反射マーカを貼付し、その両端の反射マーカから被験者ごとの関節軸を定義した骨格モデルを構築して、解析を行うソフトウ



◇丸印：33個の反射マーカの位置

◇矢印：4つの力の測定データ(ベクトル表示)

※分かり易くするため、図は荷重100倍で表示

図7 OpenSimに取り込んだ測定データ

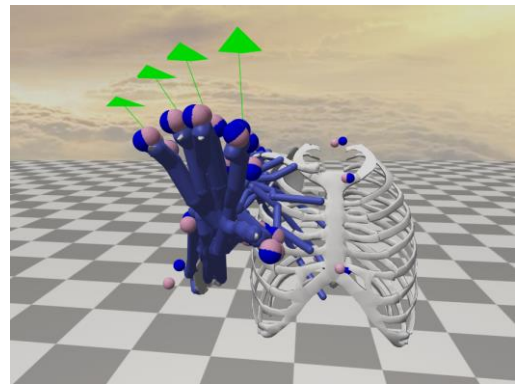


図8 OpenSimの解析画面

表1 実験に使用した装具の構成

構成No	クランプ部材	ワイヤ径(mm)	ワイヤ長さ(cm)	
1	有	$\phi 0.8\text{mm}$	第2指	25.5
			第3指	27.0
			第4指	27.0
			第5指	28.0
			第2指	25.5
2	無	$\phi 0.8\text{mm}$	第3指	27.0
			第4指	27.0
			第5指	28.0
			第2指	25.5

ェアである。代表例として、C-Motion社製Visual3Dがある。もう一つは被験者の身体寸法に合わせ、予め用意された標準骨格モデルをスケールし直した骨格モデルを構築し、解析を行うソフトウェアである。代表例として、Motion-Analysis社製SIMM⁹⁾、AnyBody-Technology社製AnyBody⁹⁾、前出のOpenSimがある。指の場合、指と指の間に反射マーカが隠れて計測が困難となるため、関節軸両端への反射マーカ貼付を必要としない、OpenSimを用いた。

OpenSimの使用にあたり、開発したセンシング機構により計測した指にかかる力の計測結果を、OpenSimのファイル形式(テキスト形式)に変換する必要があった。そこで、動作解析ソフトウェアのVisual3Dを使用し、ファイル形式をOpenSim形式に変換するパイプラインを構築

した。パイプラインでは座標系とヘッダーを変換した。指の動きの計測結果は、VICONの計測ソフトウェアVicon Nexus 2.16.0にて、OpenSimに取り込めるtrcファイル形式に変換して用いた。図7に指にかかる力と動きの計測結果をOpenSimに取り込んだ画面を示す。丸印が各反射マーカ位置で、矢印が指にかかる4つの力のベクトル表示結果である。

指にかかる力と動きの計測結果を、OpenSimの解析モデルStanford-VA-upper-limb-modelに適用し、解析した画面を図8に示す。Stanford-VA-upper-limb-modelでは、第1指と第2指の各関節軸のみが定義されており、第3指から第5指の各関節軸は定義されていない。そこで、第3指から第5指については解析モデルを編集し、各関節軸を各骨格の長手方向に対し直角に交わる形で、独自に定義を追加した。

4 被験者実験による検証

4.1 被験者

被験者は健常の成人男性1名とした。年齢40歳代、身長178.0 cm、体重65.1 kg、右利きであった。研究は人を対象とする医学系研究に関する倫理指針(文部科学省、厚生労働省)に沿って実施した。被験者に研究の目的と内容

について十分に説明を行い、事前の承諾を得た。

4.2 実験に使用した装具の構成

表1に装具の構成を示す。2構成のスパイダースプリントについて実験を行い、スパイダースプリント装着時の指の関節トルクを解析した。2構成の違いは2節で示したクランプ部材の有り無しのみで、それ以外のワイヤ径、ワイヤ長さ、ピアノ線材等は全て同一とした。

4.3 解析結果

表1の各構成でスパイダースプリントを組み立て、被験者の右手に装着した。スパイダースプリントを装着した手の屈曲伸展を3回繰り返す動作を1測定とし、これを各3回実施した。その際、第2指から第5指にかかる力と動きを計測した。計測データをOpenSimで解析し、各関節角度と関節トルクを導出した。図9に第2指のMP関節における各関節角度と関節トルクの解析結果を示す。

その結果、第2指と第3指については、スパイダースプリントのクランプ部材の有り無しで、一部の結果に違いが見られた。図9(b)と(d)、図10(b)と(d)の比較より、クランプ部材有りの方が、MP関節における内外転トルクの変動幅が大きかった。この変動幅につ

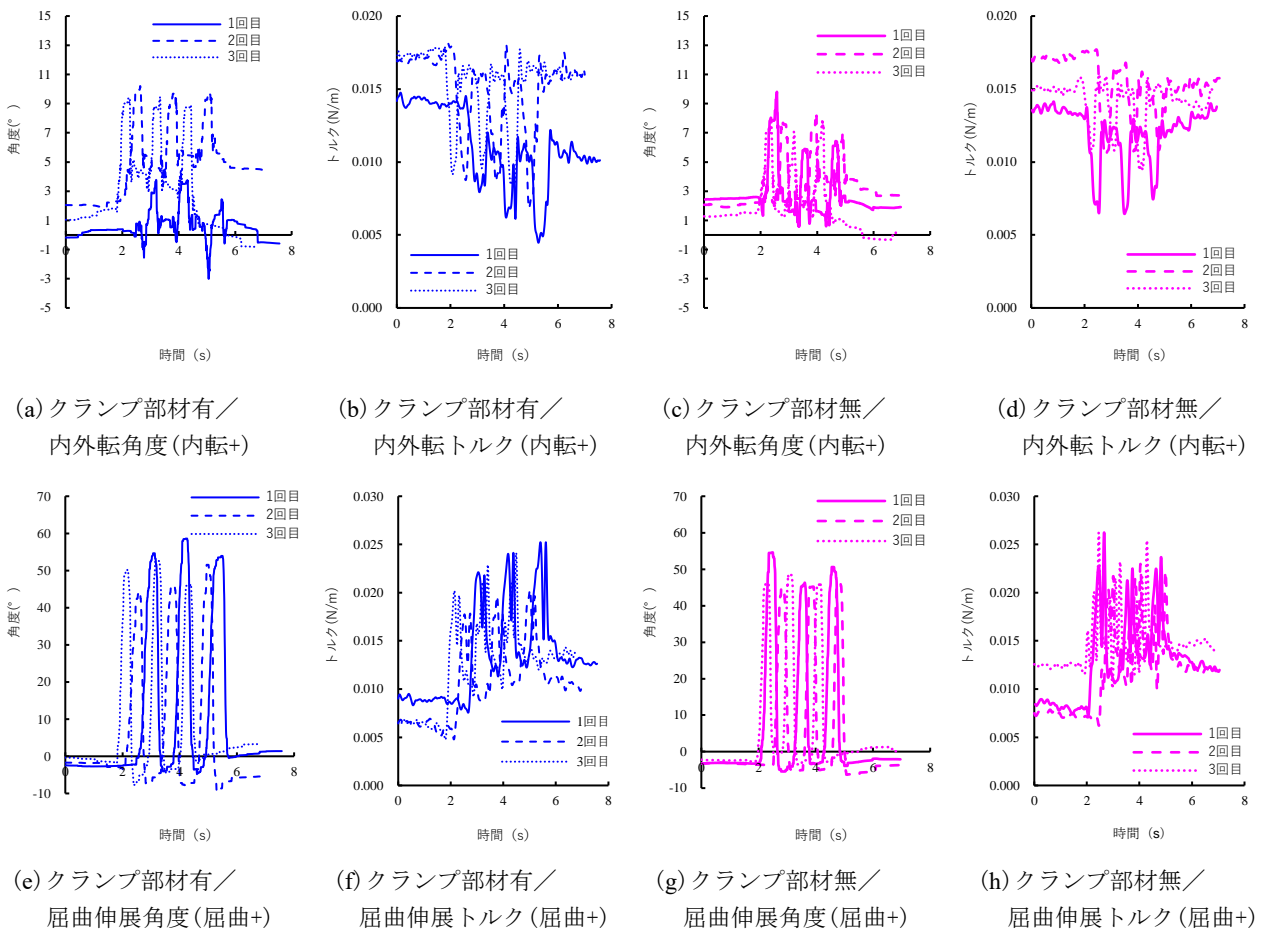


図9 第2指 MP 関節の解析結果

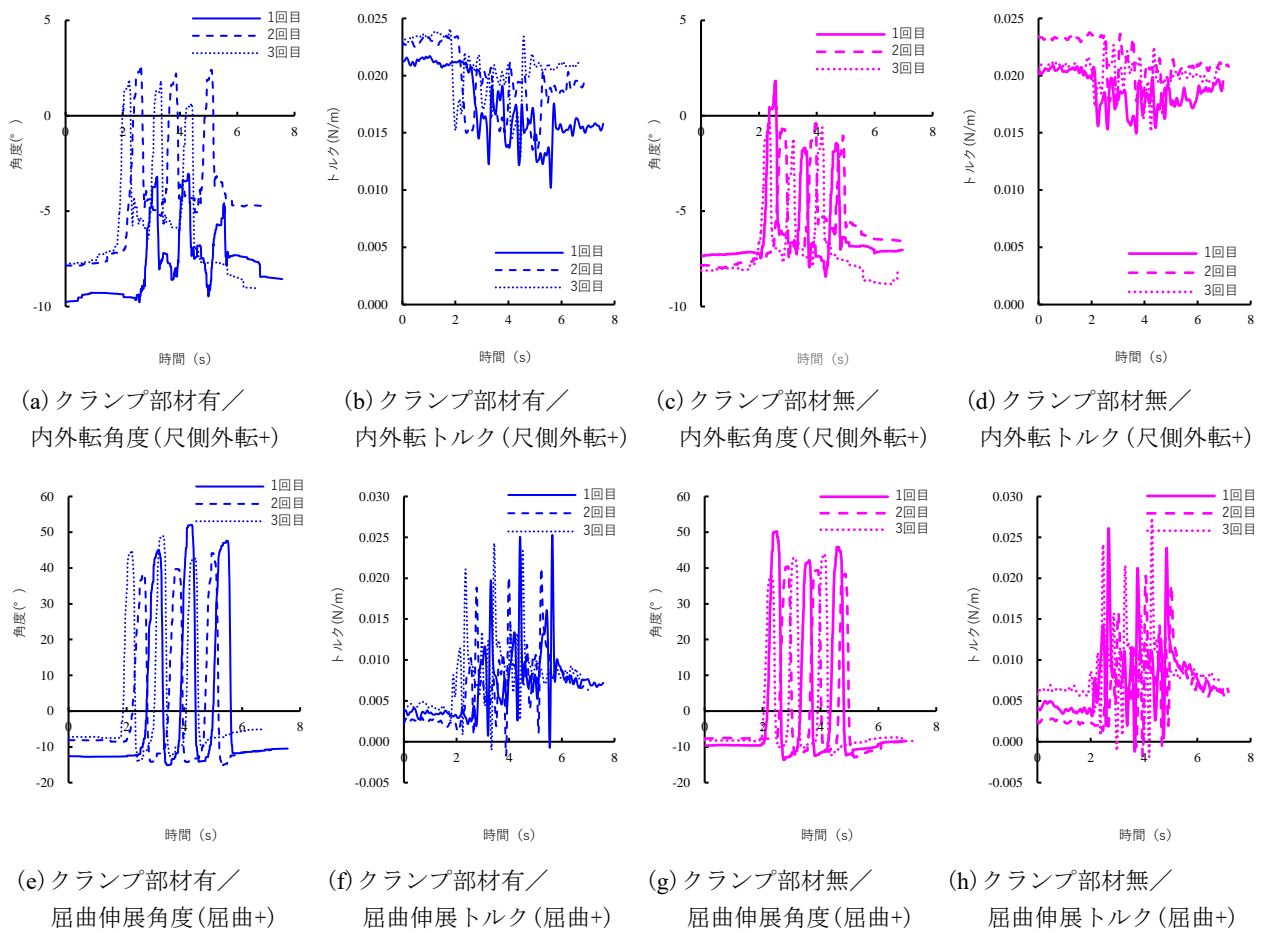


図 10 第 3 指 MP 関節の解析結果

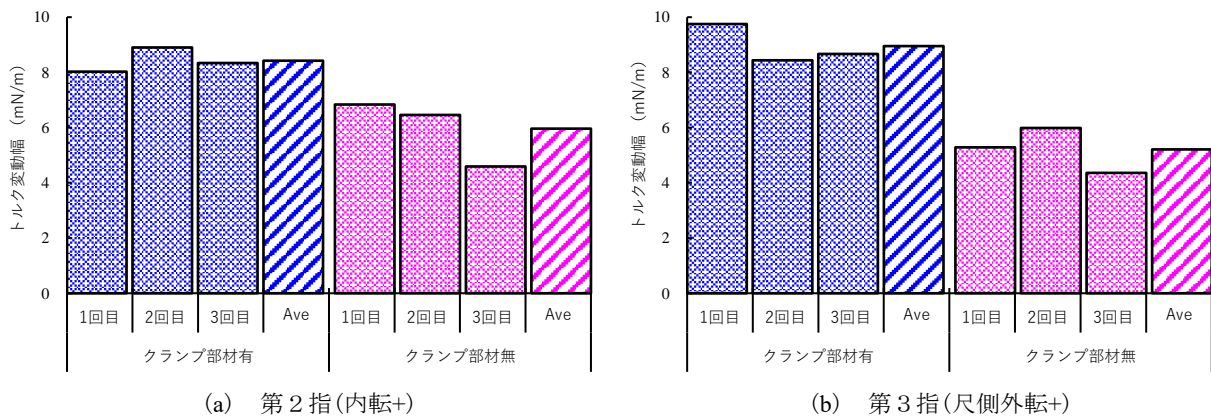


図 11 MP 関節における内外転関節トルクの変動幅

いて、更に詳細にまとめた結果を図 11 に示す。図 11 よりクランプ部材有りの方が第 2 指では変動幅が 47% 大きく、第 3 指では変動幅が 86% 大きいことが分かった(平均値の比較)。図 9 (a) と (c)、図 9 (e) と (g)、及び図 10 (a) と (c)、図 10 (e) と (g) の比較から、MP 関節における内外転角度、屈曲伸展角度は、僅かにクランプ部材有りの方がばらつきが大きい傾向は見られたものの、特に目立った変化は確認できなかった。第 4 指と第 5 指につい

てはデータの掲載は省略するが、スパイダースプリントのクランプ部材の有り無しで、各関節角度、各関節トルクともに大きな変化は見られなかった。

5 考 察

第 2 指、第 3 指については、クランプ部材有りの方が MP 関節における内外転関節トルクの変動幅が大きかった。これはクランプ部材有りの場合、手指を屈曲させた際に

クランプ部材が第1指中手骨上に当接し、指にかかる力が大きく変化するためと考えられる。内外転関節トルクの変動幅が大きいことで、リハビリ効果に影響する可能性がある。第4指、第5指については、クランプ部材の有り無しにかかわらず、MP関節における内外転関節トルクに殆ど変化は見られなかった。これは第4指、第5指ともにワイヤが長く、指にかかる力が小さかったためと考えられる。

各関節角度については、第2指から第5指の全てにおいて、スパイダースプリントの構成に関わらず、明確な変化は見られなかった。健常者を被験者としたことも理由と考えられるが、指の動き(関節角度)は被験者の意思で変えられるため、スパイダースプリントの構成を変えても、無意識的に被験者が指の位置を維持しようと関節トルクを制御し、指の位置が維持されたためと考えられる。

6 結 論

指の関節トルク解析技術の開発と、関節トルクに着目したスパイダースプリントの新たな開発手法を検討し、以下の結論を得た。

- (1) スパイダースプリント装着時の指にかかる力を計測するためのセンシング機構を独自に開発した。光学式モーションキャプチャによる動作計測結果と合わせ、指の関節トルクを解析可能とした。
- (2) スパイダースプリントの構成の違いにより、第2指と第3指のMP関節における内外転関節トルクの変動幅が変化することを確認した。指の関節トルクに着目したスパイダースプリントの構成検討が可能となった。
- (3) MP関節における各関節角度は、スパイダースプリントの構成を変えても、明確な変化は見られなかった。

MP関節における各関節角度に着目したスパイダースプリントの構成検討は困難な可能性がある。

参考文献

- 1) 正門由久. 痙縮の病理整理. リハビリテーション医学. 5(7), p.505-510(2013)
- 2) 猪狩もとみ. 痙縮に対する装具療法の最近の知見〜上肢装具を中心に〜. バイオメカニズム学会誌. 42(4), p.234(2018)
- 3) さやききよし. 手のスプリントのすべて第4版. 東京, 三輪書店, 2015
- 4) 田村昂紀. 酒井直隆. 嶋脇聡. 中林正隆. 指リハビリ運動の三次元動作解析. 茨城講演会講演論文集. 第20回, p.239-240(2012)
- 5) Vicon Motion System limited. "Marker placement for Plug-in Gait upper body model". PLUG-IN GAIT REFERENCE GUIDE, 29March2022. 2022, p.21-26
- 6) Scott L. Delp, et al.. "OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement", IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, 54(11), p.1940-1950(2007)
- 7) 家城悠馬. 伊藤利明. OpenSimにおけるRRAとCMCの検証. 数理解析研究所講研録. 第1879巻, p.192-205(2014)
- 8) Jong H. Lee, et al.. "Finger Muscle Attachments for an OpenSim Upper-Extremity Model", PLOS ONE, Journal.Pone, p.1-28(2015)
- 9) 長谷川和徳. SIMM, ARMO, AnyBodyによる動作解析. バイオメカニズム学会誌. 33(3), p.205-211(2009)