

令和元年6月21日現在

機関番号：32206

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01371

研究課題名(和文) 手内筋麻痺指に対する指機能再建法の生体工学的検討

研究課題名(英文) Reconstruction of the intrinsic minus finger: A biomechanical study

研究代表者

中村 俊康 (Nakamura, Toshiyasu)

国際医療福祉大学・医学部・教授

研究者番号：70265859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：手指巧緻性を司る手内筋の麻痺とその再建術が手指の運動に与える影響を生体工学的手法で検討した。さらに既存の代表的な再建法であるFowler法、ZancolliのLasso法、Omer変法によって指先軌跡とMP関節不安定性がどの程度解消するのかを研究した。未固定屍体標本に3つの再建手術を行い、シミュレーションし、データの収集を行った。手内筋麻痺指では指先軌跡の狭小化とMP関節の不安定性が生じること、関節の安定化と軌跡の正常化が期待できるFowler法が優れること、ZancolliのLasso法よりはOmer変法の方が指先軌跡の改善が得られるもののMP関節の不安定性は改善しないことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により手内筋麻痺により指先軌跡の狭小化とMP関節不安定性が生じ、実際の尺骨神経麻痺患者が大きな物体を把持できないことが再現できた。既存の再建法ではFowler法が指先軌跡の正常化と関節安定性が得られること、Lasso法やその変法では関節安定化が得られないことがわかった。本研究結果から麻痺手患者の治療においてFowler法が第一選択であるものの、新たな移行腱を探索する必要性があることが判明した。これらの点は臨床に非常に有意義と考えられた。

研究成果の概要(英文)：In the present study, the fingertip trajectory of normal index finger and intrinsic minus index finger were analyzed using fresh frozen cadaver specimens. Reconstruction methods, such as Fowler tendon transfer, Zancolli's FDS lasso procedure to A1 pulley, and Omer modification of lasso procedure (FDS lasso to A2 pulley) were performed in the cadavers to analyze recovery of fingertip trajectory and stabilization effect to the metacarpophalangeal (MP) joint. In the intrinsic minus finger, narrowing of the fingertip trajectory and unstable MP joint were noted. Fowler tendon transfer indicated normal fingertip trajectory at least with 0.392N and MP stabilization at least with 0.98N tension. Zancolli's lasso procedure and Omer modification reconstructed fingertip trajectory with similar FDS tendon tensions, while both methods could not re-stabilize the MP joint. Omer modification effected with more weaker muscle power to re-gain the finger tip trajectory.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：バイオメカニクス 手内筋 麻痺手 シミュレーション 再建手術 指先軌跡 関節安定性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒトが有する繊細な手指の動きは複雑な筋腱ネットワークの協調的動作から生み出され、その動きには6-7の筋腱が関与している。過去に行われた解剖学的研究により、各筋腱の幾何学的な構造や、それぞれが駆動する関節については明らかになっているものの、実際の生体において複数の筋腱が協調的に動作する際の相互作用、特に虫様筋が手指の運動に与える影響についてはほとんど明らかにされていなかった。

ヒトにおける解剖学的研究において、虫様筋は一部の破格を除いて深指屈筋腱に起始し、指背腱膜に停止することがわかっている。その構造からは指の屈筋と伸筋とのバランスを取る役割をすると考えられている。ヒトの巧緻性は他の霊長類と比べ圧倒的であるが、これは虫様筋が重要な役割を演ずると考えられている。このことは虫様筋の麻痺が生じる正中・尺骨神経の麻痺患者に重大な指の巧緻性障害が生じることから容易に推測できる。他の霊長類、たとえばチンパンジー、オランウータンなどに比べ、ヒトの虫様筋はきわめて大きな筋腹を持つことがわかっている。

一方で尺骨神経麻痺に由来する手内在筋(手内筋)麻痺は深刻な障害を生じ、最終的に腱移行術や腱固定術を行う場合、至適な張力を発生する移行筋として何を選択し、どのような方向に移行するかはきわめて経験的に決められてきた。手内在筋麻痺手(尺骨神経麻痺)においては、大きな物体の把握と安定した指運動が可能になる上でどのような再建を行うと物体の把握含めた指のコントロールが改善されるかは非常に重要である。

2. 研究の目的

本研究では尺骨神経麻痺によって生じるヒトの手指巧緻性を司る手内筋の麻痺とその再建術が手指の運動および手指の力に与える影響を明らかにすることを目的とした。

手内筋麻痺手に対する再建術としてはFowler法腱移行術とZancolliによるLasso腱固定術(A1 pulleyに浅指屈筋腱を巻きつける)、その改善法であるOmer変法(A2 pulleyに浅指屈筋腱を前進させて巻きつける)を選択し、指尖運動範囲とMP関節の安定化について虫様筋麻痺時の喪失の程度と、それぞれの再建法による改善を測定し、至適な虫様筋麻痺に対する再建法を明らかにすることを目的とした。

3. 方法

(1) 未固定屍体標本を用いたバイオメカ実験

まず、未固定屍体標本に対して手指機能解剖を行い、筋の起始、停止部位、筋腱の走行を3D-CT上にマッピングし、手術での移行腱の走行を妨げない位置と縫合場所を決定した。未固定屍体手は母指を上固定し、示指以下は重力により自然にMP関節で尺屈する位置に固定台に固定した(図1)。その後、示指の基節骨、中節骨、末節骨のそれぞれに光学マーカーを固定した未固定屍体標本のCT撮影を行い、3D-CTデータから示指の基節骨、中節骨、末節骨と光学マーカーと位置関係を確定した(図2)。複数の筋の運動を制御できるサーボモータ付きシミュレータに固定し、示指の正常運動および手内筋麻痺を既存の光学式モーションキャプチャー装置でシミュレーションした(図2)。正常運動については外在筋にはサーボモータで1Nの張力下で毎秒2mmで最大屈曲位から最大伸展位または最大伸展位から最大屈曲位への運動を加え、虫様筋への張力は0.98Nの重錘を付加し、測定した。一方、手内筋麻痺は虫様筋の張力を0Nとして、同様に最大屈曲位から伸展、最大伸展位から屈曲させ、各関節の運動と指先軌跡を計測した。次に、既存の代表的な再建法であるFowler法、ZancolliのLasso法、A1 pulleyに浅指屈筋腱を巻きつけるLasso法をA2 pulleyに前進させるOmer変法(図3)を行い、手内筋麻痺指で生じる指先軌跡(指尖運動)の狭小化とMP関節不安定性を正常と比較してどの程度解消するのかを研究した。Fowler法では移行筋の張力を変化させ、どの程度の張力により指先軌跡が改善し、MP関節の

安定化が得られるかを検討した。また、長掌筋腱を移行腱に用いるoriginal Fowler法は弱い張力を、短橈側手根伸筋腱を移行腱に用いるfour tail Fowler法は0.98N以上の強い張力で表現した。Lasso法では浅指屈筋腱の張力をサーボモータで変化させ、指先軌跡とMP関節安定化について解析した。

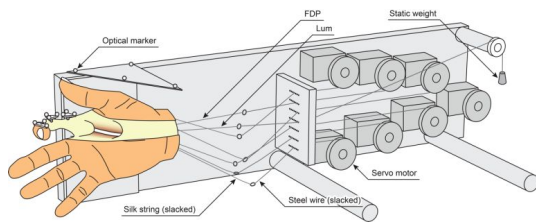


図1 実験設定図

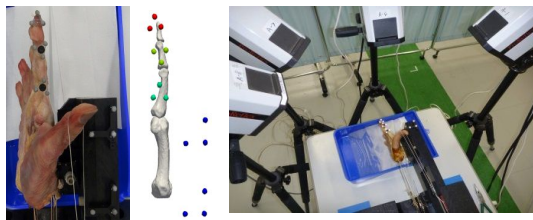


図2 光学マーカーの固定と3D-CTでの骨モデルとマーカーの位置関係(左)と実験光景(右)

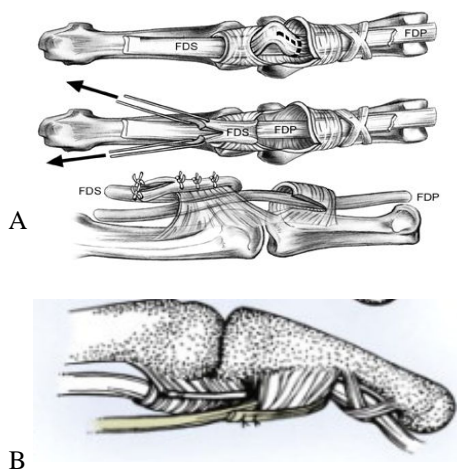


図3 ZancolliのLasso法(A)とOmer変法(B)

(2) データ解析

得られた光学式モーションキャプチャーデータを3D-CTでのマーカーと各骨との相対位置から3D-CTでの運動に変換し、指先軌跡の解析を行った。また、各関節の位置が重力に抗し、直線的に運動できるか否かでMP関節安定性の検討を行った。

4. 研究の成果

(1) 正常運動と手内筋麻痺

正常指では側面での大きな指先軌跡と正面での直線的な軌跡が得られた(図4)。一方、手内筋麻痺では指先軌跡の縮小と最大伸展位のみでのMP関節の整復が生じることがわかった(図5の0Nの軌跡)。

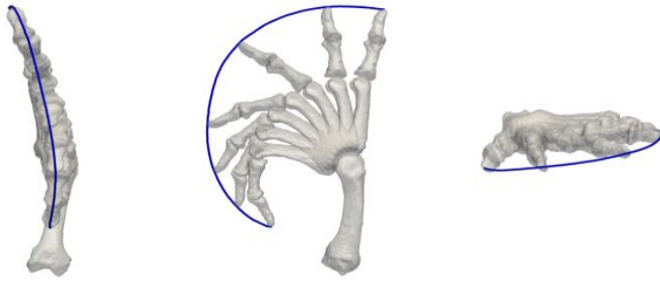


図4 正常指先軌跡．側面での大きな指先軌跡と正面での直線的な軌跡が得られた．

(2) Fowler法での指先軌跡とMP関節安定化

Fowler法モデルでは0.396Nの張力により指尖の軌跡がほぼ正常化し(大きな物体の把持が可能になる), 0.98Nの張力によってMP関節が安定化した(重力に抗して指全体を安定化できる．黄色, オレンジ, 赤の軌跡)(図4)．つまり, 指先軌跡の正常化はPL腱を移行するoriginalのFowler法で十分であるが, 関節安定化を得ようとするFour tail Fowler法を用いる必要があるとわかった．

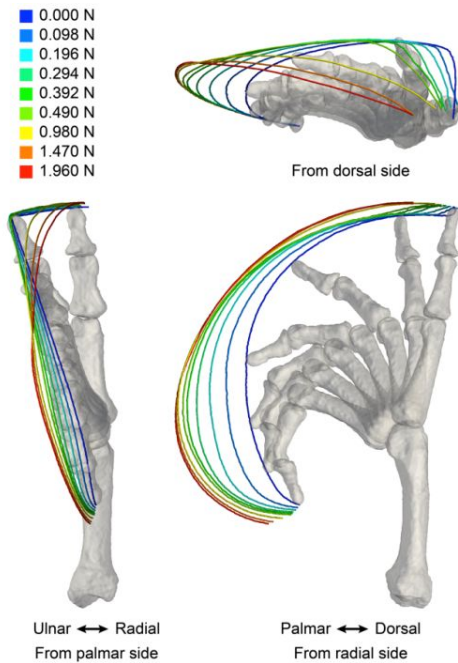


図5 Fowler法を想定した指先軌跡 0.392Nの張力で指先軌跡が正常化し, 0.98Nの張力でMP関節の安定化が得られている．0Nは手内筋麻痺の軌跡．

(3) ZancolliのLasso法とOmer変法での指先軌跡とMP関節安定化

Zancolli法, Omer変法のどちらも手内筋麻痺による縮小した指先軌跡の改善が得られた．Zancolli, Omer法ともに0.39Nの負荷によって指先軌跡が拡大し, 0.98Nの負荷でほぼ正常化した．Omer法の方が弱い力での軌跡の正常化が得られた(図6)．一方, 両再建法は指先軌跡の改善が得られるもののMP関節の安定化には寄与しないことがわかった．

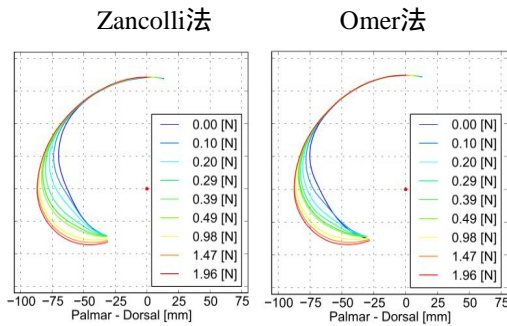


図6 Zancolli法とOmer法の指先軌跡 Omer法の方がより弱い張力で指先軌跡の拡大が得られている。

(4) 手内筋麻痺指に対する至適再建法

以上の結果より、手内筋麻痺手では正常と比較して指尖軌跡の狭小化とMP関節の不安定化が生じること、麻痺再建にはMP関節の安定化と指先軌跡の正常化が期待できるFowler法が優れることがわかった。指先軌跡の拡大とMP関節の安定化のためには移行筋の力は最低1N分必要あるものの、four tail Fowler法で用いる短橈側手根伸筋腱は張力は十分であるものの滑走量が少なく、PL腱は滑走量は十分であるものの筋力が弱いため、新しい移行筋の模索が必要であることがわかった。一方、ZancolliのLasso法、Omer変法は手術が容易であり、良好な指先軌跡の改善が得られることがわかったが、両法ともにMP関節の安定化には寄与しないことが判明した。

本研究により既存の再建法の優劣とその限界が明らかになったことは今後の麻痺手再建手術法の開発に有効で、麻痺手患者の治療において非常に有意義と考えられた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

Kawano Y, Nakamura T, Tada M, Nagura T, Matsumoto M, Nakamura M, Sato K. Influence of the trapeziometacarpal joint fusion on thumb muscles and thumb-tip movement: A cadaveric study. Clin Biomech 2019; 67: 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2019.04.013>

[学会発表] (計4件)

Nakamura T, Kamata Y, Tada M, Nagura T. The Lasso procedure for intrinsic minus fingertip: A three-dimensional biomechanical study. 2019 Annual Meeting of American Association of Hand Surgery. (2019. 1.30-2. 2 – Palm Desert, CA, USA)

Nakamura T, Kamata Y, Tada M, Nagura T: The reconstruction procedure for intrinsic minus fingertip: a biomechanical study. 2018 Annual meeting of American Society for Surgery of the Hand (2018. 9. 13-15 – Boston, MA. USA).

Nakamura T, Kamata Y, Tada M, Nagura T: The lasso procedure for intrinsic minus fingertip: A three dimensional study. 2017 International Society of Biomechanics, 2017 Hand and Wrist Biomechanics International: Podium presentation (2017. 7. 24-27, Brisbane, Australia)

Nakamura T, Abe Y: Reduction of the thumb-tip trajectory area after trapeziometacarpal joint fusion: a cadaveric study. 2017 Annual meeting of American Association for Hand Surgery: E-poster presentation (2017. 1. 10-14, Hawaii, Hawaii, USA)

8. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 多田 充徳

ローマ字氏名: (Tada, Mitsunori)

所属研究機関名: 国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名: 情報・人間工学領域

職名: 研究グループ長

研究者番号: 70392628

研究分担者氏名: 名倉 武雄

ローマ字氏名: (Nagura, Takeo)

所属研究機関名: 慶應義塾大学

部局名: 医学部

職名: 講師

研究者番号: 90306746

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 鎌田 雄策

ローマ字氏名: (Kamata, Yusaku)

研究協力者氏名: 河野 友祐

ローマ字氏名: (Kawano, Yusuke)