

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12760

研究課題名(和文) 母指・手関節機能指向設計にもとづく義手・手指装具の開発と評価

研究課題名(英文) Development and Evaluation of Upper Limb Prosthesis and Orthosis based on Carpal Articular Function Oriented Design

研究代表者

大西 謙吾 (Ohnishi, Kengo)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：70336254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：義手や人間形ハンドでは主体的に制御すべきは母指と手関節とし、母指・手関節機能指向設計の効果を検証した。母指CM関節と橈骨手根関節を一連帯とする機構の手先具・ハンドのデザインを進め、操作インタフェースを構築した。電動義手ハンドとして空間リンク機構式の母指、母指のCM関節に回内外と屈伸・内外転の運動を付与して他指に掌背屈運動を付与した5指ハンドを開発した。側面把持と3指把持が可能なケーブル制御式の3指手先具を開発した。5指ハンドと3指手先具の把持能力評価、掴み持ち上げ能力を評価した。電動義手用に自動感度調整式のパターン識別筋電制御系のインタフェースを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パターン識別式の義手開発は続いており、手指装具の研究開発も盛んであるが、制御対象であるハンド、手先具や手指装具の機能設計が不十分ではアルゴリズムによる制御性への効果は十分期待することはできない。また、手先具は3Dプリンタで製造するための設計が報告されているが、製造コスト重視で、母指は運動機能がほとんどない。これらのことから、本研究で目標とする母指・手関節に着目した設計アプローチは従来の義手手先具や手指装具とは一線を画し、また義手・上肢装具としての実用性を重視し、作業性がある機構とインタフェースの開発とこの義手を評価できる試験装置も合わせて研究を進めるところが特徴である。

研究成果の概要(英文)：We proposed thumb-wrist-function oriented design, which mainly targets independent motion control or the thumb and wrist joint of prosthetic terminal devices and anthropomorphic robotic hands and assessed the effect of this design approach. A terminal device and a servomotor-embedded hand with mechanisms and control for cooperated thumb carpometacarpal and radiocarpal joints were designed, and their interfaces were developed. A spatial linkage for powered prosthetic hand's thumb was designed. A 5-digit hand with 2-DOF thumb CM-joint and radial-ulnar rotating joint was developed. 3-digit terminal device with tripod & lateral grasp was developed. Automatic sensitivity adjusted pattern recognition myoelectric controller was developed and tested.

研究分野：リハビリテーションロボティクス

キーワード：義手 手指装具 手根関節 操作インタフェース 機構 筋電パターン識別 自動調整

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

長年の筋電制御式電動義手のパターン識別の研究と神経電極や神経再支配術の研究が進み、切断者が多自由度の義手をより直感的に操作できる可能性が見出された。これらの技術の進展に合わせて2010年には、第2-5指を独立に動かすモータを内蔵した5指電動義手ハンドの市販化が行われた。それから約10年が経過したものの、第2-5指が多自由度化され多様な把持形態を可能とした義手ハンドを用いても、旧来の3指単自由度の義手ハンドより優れた作業能力が得られる、または多様な把持形態が生活の改善に寄与しているとのエビデンスは臨床から報告されていない。また、Cybathlon2016大会多機能義手部門においてもケーブル制御の単関節のフック手先具の選手が多自由度義手ハンドの選手を抑えて優勝している。これらからは、現状の市販の5指義手ハンドの多自由度の駆動機構と筋電制御方式は、多様な把持形態と人間らしい形状・動きを可能としても、上肢切断者の作業能力を向上し、効果・効率・満足度の向上に十分寄与できないのではとの疑念が生じる。さらに、動力手指装具は、ソフトロボティクスの研究により把持力増強と治療用の動作呈示用の機構の研究は進められているものの、母指部は他指と同機構でしかない場合が多く、手機能を補填できていないといえない。

これらの義手も手指装具も、第2-5指のMP・PIP関節を駆動する機構と前腕の筋活動を表面筋電信号のパターンとして識別し制御するコントローラが導入されているものの、人間と動物の大きな違いである母指は、機構・筋電制御のいずれも積極的に専用の運動機能と操作インタフェースを構築する試みは十分とはいえない。

2. 研究の目的

本研究では、第2-5指の形態は対象物体の特性により受動的に決まるものであり、主体的に制御すべきは母指と手関節と考える。このため、第2-5指の機構を簡素化し、母指中手手根(CM)関節と橈骨手根関節とを一連体とした多自由度化機構とし、母指・手関節機能を中心とした義手手先具と手指装具のメカニズムと操作インタフェースの構築が作業能力の再現に寄与するとの仮説を立てた。母指・手関節の機能を主体とした手先具・装具に適したケーブル制御系とパターン識別筋電制御系を開発し、市販の3指・5指筋電義手ハンド、ならびにケーブル制御式のフックより優れた把持・操作能力のある人工の手足り得るかを定量的に検証する。

そのため、

1) 母指と手関節主体の人工の手のデザインとして、母指と手関節を一連帯とした多自由度機構に、第2-5指の屈伸と内外転機構が付与された手のメカニズムを設計

2) メカニズムを実装した義手手先具と手指装具の機構設計、これらに適したケーブル制御系、ならびにパターン識別筋電制御系の2つの操作インタフェースの構築、

3) 提案する義手手先具と操作インタフェースの作業能力評価を被検者実験により定量的に行い、作業療法の視点からも有用性を検証、

4) 提案する手指装具と操作インタフェースの作業能力評価を、麻痺手指の運動・感覚機能の再建・補填を促しうる支援機器としての可能性を検証、

を進める。さらには、母指中心の義手手先具・手指装具のデザインの、ユーザビリティ(効果・効率・満足度)を模擬義手・手指装具で体験した際の身体機能拡張性を議論する。

感染症拡大抑制による作業制限から2)の手指装具の機構設計、ならびに3)の作業療法の視点からも有用性を検証、4)は期間内の実施を見送ることとした。

3. 研究の方法

(1) 電動義手ハンドとして空間リンク機構式の母指

母指の屈曲・掌側外転運動により、母指指腹と他指の指腹が向き合うように回旋する。設計する空間リンク機構では、母指末節指腹面が示指末節側面と対向した後、示指の指腹面と対向しながら、示指MP関節最大屈曲位にて指腹面間距離が0になるような運動軌跡を描くようリンクの設計因子をシミュレーションにより調整、比較決定した。

(2) 母指のCM関節に回内外と屈伸・内外転の運動を付与し、他指に掌背屈運動を付与した5指ハンドの開発

補助手としての作業性と操作性の向上を目的とし、母指と手関節の多自由度化を目指した電動義手ハンドの開発を目標とした。従来の独立可動5指電動義手に代表される、指の運動機能向上のデザインが把持形態数の最大化を目的とした多自由度化であるのに対し、本研究では、把握対象物の姿勢と腕との姿勢から把握面が定まることに着目し、対象物の把握面2面とハンドの指と掌が対向するよう、母指ならびに手関節の運動機能最大化によって握り上げ能力の最大化を設計の主たる目的とした。

(3) 側面把持と3指把持が可能なケーブル制御式の3指手先具の開発

動的審美性と機能を備えたDaviesらのハンドやWilmer Passive Hand Prosthesis for

Toddlers を参考にし、母指の CM 関節の屈伸軸に傾斜角度を設けるのに加え、内外転機構を設けることで母指の可動域を増やし、他指の対立面を増加させた。

(4) 電動義手用に RT 法を用いた自動調整式のパターン識別筋電制御系のインタフェース構築

感度の自動調整機能として品質工学のパターン識別法 Recognition Taguchi Method (RT 法) を適用した。RT 法の単位空間形成データ (学習データ) に計測対象筋の安静時筋電信号 (以下、MES)、テストデータに筋活動レベルに応じて得られる計測対象筋の MES を各々用いた。これにより RT 法は計測対象筋の安静時に対する筋の活動レベルを相違度として出力し、動作の閾値判定信号に用いる。この方法により筋電義手使用者は従来のように訓練支援者から指導を受けながら感度調整を行うのではなく、感度調整を始めたら測定対象筋を安静にするだけで、自動で感度調整が可能となる。生活の中では筋電義手には精密さと正確さが必要であり、筋電センサは筋活動レベルに応じた操作信号を高い再現性で出力することが望まれ、これを維持するためには高い識別精度につながる信号の質が求められる。そこで様々な外乱に対して高い堅牢性を持ち、高い識別精度が得られ、筋活動レベルに応じた操作信号が得られる制御因子を選定することで、ロバストに動作する MES 信号処理法として RT 法のパラメータ設計を行った。

4. 研究成果

(1) 電動義手ハンドとして空間リンク機構式の母指

義手の把持機能向上のため、母指の 3 関節を模倣する 7 節閉ループ機構を提案した。この機構を DH 法で表記し、リンク長 a とリンクの関節回転軸角度 α の組合せによる、機構末端部軌道のシミュレーションを行った。{ $a_3=30$, $a_4=95$ mm, $\alpha=100$ deg.} が評価関数 f_1 と f_2 の最良条件が一致し、1 自由度で複数の把持形態をとることが可能な 7 節閉ループ機構のパラメータを導いた。

(2) 母指の CM 関節に回内外と屈伸・内外転の運動を付与し、他指に掌背屈運動を付与した 5 指ハンドの開発

指の寸法は成人男性の 90 パーセントイルとし、初期姿勢時のハンド概略寸法は、全長 185 mm、全幅 136 mm、母指 CM 関節での屈伸は、サーボ駆動軸に直結した。手関節の掌背屈軸と撓尺屈軸、母指 CM 関節の内外転軸、屈伸軸、4 指 MP 関節の屈伸軸の 5 軸にアクチュエータを配置した。

母指は、示指から小指までとの 4 指との対向、母指指先と示指撓側面との側面把持の両方を可能とするため、母指 CM 関節の内外転軸を、撓側面から見て背側へ 30 deg、母指 CM 関節軸を、撓側面から見て掌側外転方向へ 5 deg、手関節側から見て 15 deg 傾けた。4 指は、ウィップルツリー構造を参考に⁵⁾、示指と小指、中指と環指をケーブルでつなぎ、滑車を介しスライダにつないだ。スライダを近位に動かすことで MP 関節が屈曲する構造とし、指の伸展は弾性体の復元力を用いるものとした。手関節撓尺屈の軸は、母指と示指の指先間距離拡大のために搭載し、母指内外転機構との干渉を避けるため、小指球付近に配置した。

初期姿勢は、4 指 MP 関節は、撓側面から見て基節骨部が掌の水平面と平行になる位置、母指 CM 関節は、示指撓側面から指先が離れる方向へ 45 deg、母指内外転軸は、先述の母指 CM 関節軸が手関節側視点で外転方向へ 15 deg となる位置、手関節掌背屈は撓側面から見て掌の水平面が x 平面と平行になる位置、手関節撓尺屈は、掌側面から見て示指・中指 MP 関節軸が y 軸と平行になる位置とした。関節可動域は、母指内外転は初期姿勢から内転 60 deg、外転 30 deg、4 指 MP 関節は初期姿勢から屈曲 60 deg とした。手関節は初期姿勢から掌屈 70 deg、背屈 80 deg、尺屈 20 deg とした。4 指の取り付け角度は、CAD 図面上で外観と機能性を考慮した結果、母指対示指・中指による 3 指先把持の対向のため、示指と中指の長軸は平行とした。環指、小指は撓側の指に対し 5 deg 外転位とした。示指/小指の PIP/DIP 関節は各々 36, 24 deg 屈曲位、中指/環指の PIP/DIP 関節は各々 42, 30 deg 屈曲位、母指の MP/IP 関節は各々 15, 6 deg 屈曲位とした。

ハンドの試作として、指部と筐体、機構の部品は熱溶解積層方式の 3D プリンタで製作した。フィラメント材は、強度部品として手関節などにポリ乳酸 (PLA)、把持対象になじむように、しなりのある強度部品として指芯材や掌などにアクリロニトリル・ブタジエン・スチレン樹脂 (ABS)、変形によって接触面積を大きくするため、柔軟性がある部品として指外装に熱可塑性ポリウレタン (TPU) を使い、軸は金属製とした。ギア付 DC モータ (日本ミニモーター) を手関節に、サーボモータ (TowerPro, マイクロサーボ MG92B) を 4 指屈曲、母指 CM 関節、母指内外転軸、手関節撓尺屈に使用した。4 指の屈曲動作の伝導ケーブルにはテグス (ポリエステル製)、弾性体は線径 1.1mm 天然ゴム製バンドを用いた。

(3) 側面把持と 3 指把持が可能なケーブル制御式の 3 指手先具の開発

指は摘み上げのため母指・示指・中指の 3 指構造とし、IP 関節は固定角、示指・中指の MP 関節と母指 CM 関節のみ駆動関節とした。VC 構造とし、指の伸展・外転は輪ゴムを示指・中指駆動リンク背側、母指軸各々に設け、屈曲・内転は線径 0.75mm のテグスを手関節プレートの中心部孔を通り、示指・中指駆動スライダ、母指屈曲・内転の各駆動レバーに各々取り付け操作を行う。指の概略寸法は、指長は成人男性の 90 パーセントイル値とし、最大指幅は示指・中指は 16 mm、母指は 18 mm、最大指高は全指 18 mm、指腹側半径は示指・中指は 8mm、母指は 9mm の円形とした。IP 関節角度は 3 指対向が可能となるよう調整した。掌甲部フレームと駆動機構は PLA、指は

2次モデルはABSとTPU、3次モデルはPLAとTPUで2モデル製作した。

(4)電動義手用にRT法を用いた自動調整式のパターン識別筋電制御系のインタフェース構築
筋電義手コントローラ使用時に想定される外乱を拮抗筋のMES入力、筋電センサの位置のズレ、使用者毎の最大随意収縮の大きさの違いとした。この外乱に対して高い堅牢性を持ち、高い識別率がえられ、筋活動レベルに応じた開閉操作信号が得られるMES信号処理法としてRT法のパラメータ設計を行った。制御因子には、MES特徴量、学習データのメンバー数、学習データの重複時間、ハムノイズフィルタ、RT法の閾値、操作信号に適用するローパスフィルタのカットオフ周波数、操作信号に適用する増幅度をそれぞれ設定した。結果、設定した制御因子の最適な水準を選定した。各制御因子の水準にて、開操作システムでは最適条件に再現性が得られ、外乱に対してロバスト化を行うことができた。閉操作システムでは最良の制御因子を選べず、最適条件では再現性が得られなかった。しかしながら、最適条件のSN比は改善され、筋活動レベルを反映した操作信号が得られ理想システムに近づく制御因子を選定することができた。このことからRT法を適用しパラメータ設計にて調整した堅牢かつ精密な操作信号が得られるMES処理系の開発がなされた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大西謙吾
2. 発表標題 義手の適合性評価の工学技術
3. 学会等名 LIFE2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 若林大樹, 大西謙吾, 斎藤之男
2. 発表標題 把持に適する母指の対向復位運動軌道をなす空間リンク機構の数値解析的考察
3. 学会等名 LIFE2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内藤賢宏, 大西謙吾
2. 発表標題 RT法による筋電信号識別における学習データのスライド窓の効果
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村佳大, 大西謙吾
2. 発表標題 母指CM 関節内外転を付与した開閉動作の3 指能動義手ハンドの摘まみ上げ動作評価
3. 学会等名 第38回日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村佳大, 大西謙吾
2. 発表標題 母指内外転・手関節掌背屈/撓尺屈機構を有する5指電動義手の機能テスト
3. 学会等名 第43回バイオメカニズム学術講演会 SOBIM2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 若林大樹, 大西謙吾, 斎藤之男
2. 発表標題 数値解析による母指の対向運動軌道に適した7節閉ループ機構の設計
3. 学会等名 日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会 IIP2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 内藤賢宏, 大西謙吾, 趙崇貴
2. 発表標題 筋電義手コントローラの自動調整法の堅牢性因子のパラメータ設計
3. 学会等名 日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会 IIP2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田村佳大, 大西謙吾
2. 発表標題 3指義手ハンドの母指CM関節主体設計
3. 学会等名 第31回ライフサポート学会フロンティア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 若林大樹, 大西謙吾, 斎藤之男
2. 発表標題 母指の対向-復位運動用空間リンク機構
3. 学会等名 第31回ライフサポート学会フロンティア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内藤賢宏, 大西謙吾
2. 発表標題 RT法による筋電信号識別における特徴の効果
3. 学会等名 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西謙吾
2. 発表標題 標準化周期がRT法を用いた筋電波形パターン識別に及ぼす影響の分析
3. 学会等名 第26回知能メカトロニクスワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西謙吾
2. 発表標題 電動義手の筋電信号処理・制御と訓練
3. 学会等名 日本機械学会 第33回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 パターン識別を用いた筋電信号自動調整処理の効果
2. 発表標題 内藤賢宏, 大西謙吾
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西謙吾
2. 発表標題 義肢装具開発の視点
3. 学会等名 第36回日本義肢装具学会学術大会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内藤賢宏, 大西謙吾
2. 発表標題 パターン識別を用いた筋電信号自動調整処理の効果
3. 学会等名 第30回ライフサポート学会フロンティア講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------