筋電義手のための 3 種の基本把持が可能で
軽量な把持機構の開発

電気・化学専攻 医用工学領域　　2281294　　若尾　海飛
（主査：和多田　雅哉 教授　副査：桃沢　愛 准教授，京相　雅樹 教授）

1.　はじめに

身体障がい者の総数のうち肢体不自由者の割合は 50%以上であり，最も多い身体障害である。また，肢体不自由者のうち上肢切断者数は 8 万 2 千人で，下肢切断者数の 6 万人より多い。さらに，上肢切断者は上肢の切断箇所によって分類され，最も多いのは前腕切断である。上肢切断者の多くは義手を利用することから，前腕義手への需要は高い。また，前腕義手の中でも前腕筋電義手の需要が高いが，重量の問題から普及していない。本研究では，筋電義手の重量の問題に着目し，筋電義手の軽量化による使用者の負担の軽減を目的とする。本稿では，軽量化のためのアプローチとして母指外転内転動作の削減等による機構の簡素化について述べる。また，母指外転内転機構を削減した 2 自由度把持試験機を用いて行った把持実験について述べる。

2.　筋電義手

2.1.　筋電義手の需要と普及

筋電義手は把持機能と外観の復元を両立した義手であり，その機能性から高い需要がある。実際に，日本国内の義手利用者に対するアンケート調査では回答者の約 80%が筋電義手の利用を希望した[1]。一方で，日本国内での筋電義手の普及率は非常に低い。先行研究によると，平成 22 年度に処方された義手の総数に占める筋電義手の割合は約 2%であった[2]。筋電義手の普及率が低い原因は，筋電義手の価格・重量・サポート体制等に課題があることである。先行研究による筋電義手使用者に対する調査では，特に重量の問題が大きいことが明らかとなった[3]。

2.2.　前腕筋電義手の構造

一般的な前腕筋電義手は，大きく分けて 4 つのパーツから構成される。図 1 に前腕筋電義手の主要パーツを示す。

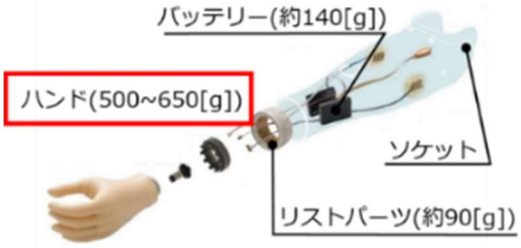


図 1　前腕筋電義手の主要パーツ

図 1 に示すように，現在流通している代表的な前腕筋電義手はソケット部を含まず約 730[g]～約 880[g]の重量がある。全パーツを合わせた重量が 500[g]～600[g]である装飾義手と比較すると重

いことがわかる。加えて，使用者は断端で筋電義手の総重量を支える必要がある。そのため，筋電義手本体の最も遠位に位置するハンドが重いと使用者の負担となる。従って，筋電義手のハンドは軽量化が必要である。

2.3.　研究目的

上肢切断者の多くは義手を利用するが，なかでも筋電義手の需要は高い。一方で，筋電義手は最も普及していないという現状がある。筋電義手が普及していない原因としては，価格が高いこと・重量が重いこと・サポート体制が不十分なこと等が挙げられる。そのなかでも特に重量の問題が大きいことが指摘されており，筋電義手本体の最も遠位に位置するハンドの重量は使用者の負担となっている。また，ハンドが重い原因はアクチュエータとしてサーボモータ等を用いた把持機構にあるため，使用者の負担軽減のためには従来の把持機構に代わる軽い把持機構の開発が必要である。従って，本研究では筋電義手軽量化による使用者の負担軽減のため，最低限の把持が可能で軽量な把持機構の開発を目的とする。

3.　筋電義手に搭載する軽量な把持機構の開発

3.1.　開発コンセプト

3.1.1.　把持機能

本研究では，目標とする把持機能を日常生活で最低限必要な把持機能である握力把持/精密把持/側面把持の 3 姿勢とする。図 2 に目標とする把持機能を示す。

図 2　目標とする把持機能

図 2 に示す握力把持・精密把持・側面把持の３姿勢が再現できれば，日常生活中の把持動作の 85%をまかなうことが可能である[4]。

3.1.2.　自由度とアクチュエータ

本研究で開発する把持機構は，図 2 に示す 3 つの把持姿勢を実現するために必要となる最低限のものとして，2 自由度-２アクチュエータを有することを目標とする。図 3 に自由度とアクチュエータを示す。

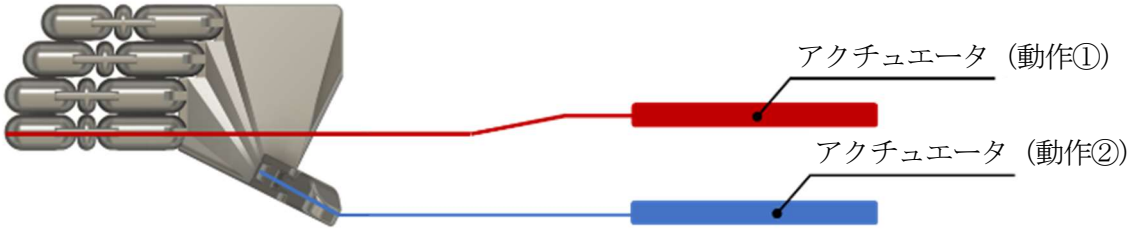


図 3　自由度とアクチュエータ

把持機構の持つ動作は，示指の屈曲伸展（動作①）と，母指の屈曲伸展（動作②）のみである。駆動方式は腱駆動型であり，アクチュエータによって腱に張力が加わると，腱が接続された指部が引っ張られ指が屈曲する。このとき，アクチュエータに拮抗する伸展動作にはゴムバンドの復元力を利用する。また，中指/環指/小指にはアクチュエータ等の動力を接続せず，示指に連動して動作させる。自由度とアクチュエータ数を削減することで，軽量な把持機構の実現が期待できる。搭載するアクチュエータには，従来のサーボモータに比べて最大で約 190 倍の出力重量比を持つ空気圧アクチュエータを採用する。表 1 に把持機構の目標数値を示す。

表 1　把持機構の目標数値

項目		従来型多機能義手	本研究
自由度		～15	2
アクチュエータ数		～15	2
指関節	関節数	～15	14
	動作	可動(独立制御)	可動(腱駆動型従動)
アクチュエータ		電動モータ	空気圧ｱｸﾁｭｴｰﾀ
義手全体の重量		1,000～1,800[g]	600[g](動力源除く)
ハンド部の重量		500～1,200[g]	300[g]

表 1 に示す通り，自由度及びアクチュエータ数の削減によってハンド部の重量を 300[g]以下とすることを目標とする。また，義手全体の重量に関しても，普及している装飾用義手と同等の重さとするため，動力源を除いて 600[g]以下とすることを目標とする。

3.2.　母指外転内転機構の削減

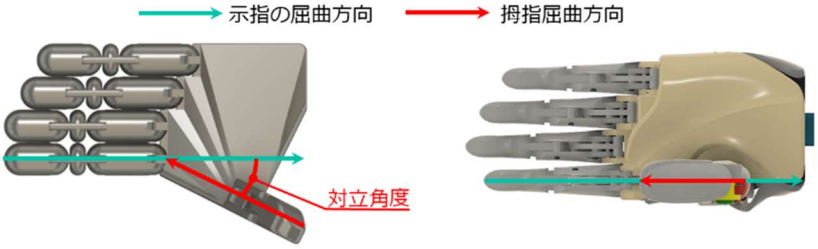
前項で述べた目標の把持機能を維持しながらも自由度とアクチュエータ数を削減し目標重量を達成するためには，把持機構を簡素化する必要がある。本研究では，母指の外転内転動作に着目し，この動作を削減しながらも把持機能を維持可能である機構を開発した。図 4 に母指の外転内転動作を示す。

a)　対立位(0deg)　　b)　外転位(90deg)

図 4　母指の外転内転動作

図 4 のように，ヒトの手は母指の示指との対立角度を約 0deg~90deg の間で変化させ，様々な物体を柔軟に把持することを可能にしている。同様に，現在流通している筋電義手の多くは，母指を外転させるための機構を持つ。母指の外転内転動作によって握力・指尖・側面把持を実現するためである。筋電義手における母指の外転内転機構には，電動のものと手動のものがある。電動の場合，母指の付け根部分に屈曲用のアクチュエータとは別に外転内転動作のための動作機構を搭載する必要がある。そのため，必要なアクチュエータ数が増え，機構の煩雑化・重量化につながる。手動の場合，外転内転動作のためのアクチュエータは不要であるが，把持姿勢を変えるたびに使用者が健側で義手を操作する必要がある。よって，使用者の操作が増えるため，筋電義手の使いづらさにつながる。以上より，母指の外転内転動作を行わずとも握力・指尖・側面把持を実現可能な母指の位置が明らかとなれば，機構の簡素化によるハンドの軽量化だけでなく，義手の使いやすさにもつながると考えられる。

母指の外転内転動作を行わずに指尖・側面把持を両立するための方法として，母指を示指に対し角度を持たせて対立させることを提案する。図 5 に示指と母指の屈曲方向を示す。



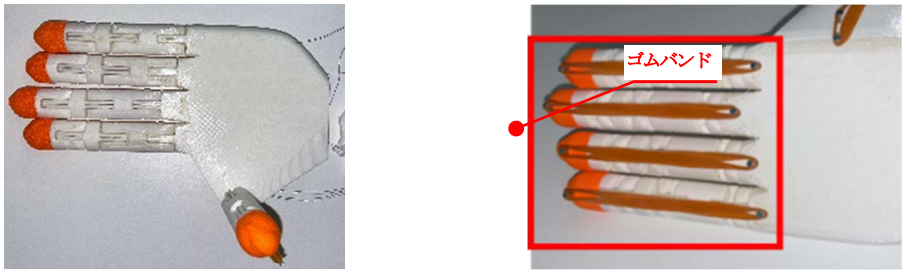
a)本研究　　b)従来型の例(HACKberry)

図 5　示指と母指の屈曲方向

図 5 に示すように，従来型義手の母指は示指に対して 0[deg]で対立している。この機構では指尖/側面把持の両立のため外転内転動作が必要となり，自由度及びアクチュエータ数の増加による重量の増加に繋がる。一方で，本研究で提案するように，母指を示指に対して角度をつけて 45[deg]に対立させることで，外転内転動作を行わずに指尖/側面把持の両立が可能となることが考えられる。これによって，自由度及びアクチュエータ数の削減による軽量化が期待できる。

3.3.　把持試験機

前項までに提案した把持機構の有用性を評価する把持実験を行うために，3.1 で述べたコンセプトに基づいて２自由度型把持試験機を製作した。図 6 に２自由度型把持試験機を示す。



a)　手掌側　　b)　手背側

図 6　２自由度把持試験機

２自由度把持試験機は，3DCAD ソフトウェア(Fusion360, Autodesk)上で設計した 3D データを 3D プリンタ(Ender-5 Pro，CREALITY)を用いて造形した。プリント材料には PLA を使用し，インフィル密度は 20%, 印刷速度は 80[mm/s]とし造形した。屈曲用の腱には SUS304 針金(φ2.8[mm])を用い，指先には天然ゴム製の指サックを装着した。また，指の伸展動作には手背側に展張したゴムバンドの復元力を利用した。

4.　把持実験

4.1.　把持評価実験

4.1.1.　実験目的

母指外転内転機構を削減した２自由度型把持試験機が握力把持/指尖把持/側面把持を鼎立可能か評価すること。

4.1.2.　実験環境及び実験方法

この実験では，2 自由度把持試験機によって把持対象物の把持を行い，設定したクリア条件に基づいて把持の有効性を評価した。把持実験で使用する把持対象物は，日用品の中から以下の通り選定した。また，先行研究を参考に把持のクリア条件を設定した。表 2 に把持対象物の寸法と把持クリア条件を示す。

表 2　把持対象物の寸法と把持クリア条件

把持姿勢	把持対象物	寸法 [mm]	クリア条件
握力把持	水入りペットボトル	φ6.5,長さ 20.5	・把持対象物を 30 秒以上保持できる ・把持対象物を保持したまま水平に 50[cm]以上移動できる
指尖把持	乾電池(単三)	φ10，長さ 43	
	ボトルキャップ	φ28，長さ 11	
側面把持	カード	85x54	

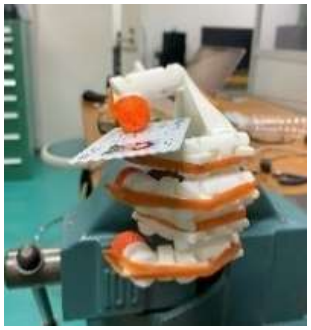
表 2 に示す各把持対象物についてそれぞれ 5 回ずつ把持を行い，把持クリア条件を満たした回数によって評価を行った。このとき，30[s]の保持を行った際には２自由度把持試験機は万力に固定した状態で，把持対象物を手動で２自由度把持試験機の手掌部まで運んだうえで把持を行った。50[cm]の移動を行った際には，左手で２自由度把持試験機を保持し，右手で腱をけん引しながら把持対象物の把持を行った。

4.1.3.　実験結果及び考察

図 7 に２自由度把持試験機での把持の様子を，表 3 にクリア条件の達成回数を示す。

a) 握力把持

b) 指尖把持



c) 側面把持

図 7　２自由度把持試験機での把持の様子

表 3　クリア条件の達成回数

	①	②	③	④	⑤	達成回数
握力把持	×	○	○	○	○	4/5
指尖把持	○	○	○	○	○	5/5
側面把持	○	○	○	○	○	5/5

表 3 に示すように，握力把持の試行①ではクリア条件を満たせず把持失敗となった。腱の牽引速度が速すぎたために指が把持対象物の輪郭に沿った屈曲姿勢を取れず，把持対象物との接触点が減少し把持対象物の保持が不可能であったことが把持失敗の要因として考えられる。一方で，屈曲の速度を過度に速めることなく適切に調整した場合には十分に安定した把持が可能でクリア条件を満たすことが可能であった。以上より，提案する把持機構において，目標とする３種の把持が可能であることが確認された。また，搭載するアクチュエータには指が把持対象物の輪郭に沿って屈曲するために牽引速度を適切に調整する性能が求められると考えられる。

4.2.　腱張力計測実験

4.2.1.　実験目的

２自由度把持試験機によって物体を把持したときに腱にかかる張力を測定すること。また，外乱による把持への影響を調査し，搭載する空気圧アクチュエータに求められる出力値を求めること。

4.2.2.　実験環境及び実験方法

図 8 に使用した実験機器を示す。

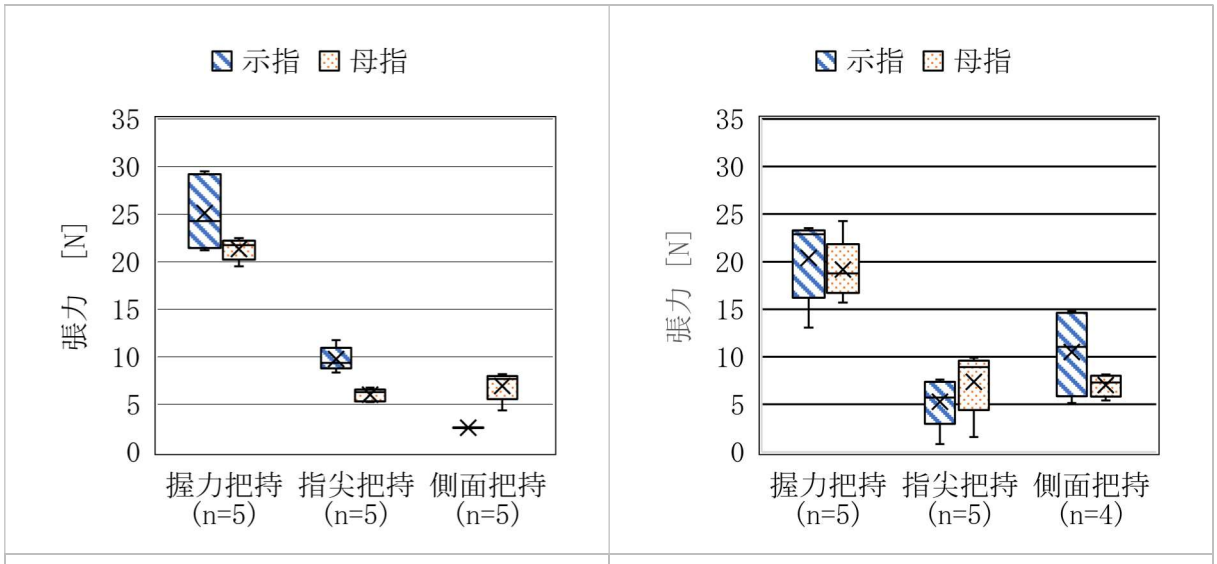
a)　実験機器　　b)　実験機器の接続

図 8　使用した実験機器

本実験で用いた把持対象物は 4.1.2 の表 2 に同じである。表 2 に示す各把持対象物についてそれぞれ5回ずつ30秒以上の把持を行い，把持を行った際に腱にかかる張力をロードセル（CLS-1KNB，東京測器研究所）により計測し，その平均値を平均張力とした。本実験で用いたセンサインタフェースは PCD-301B(共和電業)であり，データ集録にはダイナミックデータ集録ソフトウェア DCS-100A(共和電業)を使用した。本実験では，①静止時の把持と②歩行時の把持をそれぞれ行い，腱にかかった張力を比較することで外乱による把持への影響を調査した。①静止時の把持では，２自由度把持試験機を万力で固定したうえで把持対象物の把持を行った。②歩行時の把持では，２自由度把持試験機を左手で保持し右手で腱をけん引することで把持対象物の把持を 30[s]以上行った。また，２自由度把持試験機によって把持対象物を把持した状態でトレッドミル上を歩行した。歩行の速度は 3.5[km/h]であり，歩幅は 30[cm]であった。

4.2.3.　実験結果及び考察

図 9 に平均張力のばらつきを示す。



a)　静止時　　b)　歩行時

図 9　平均張力のばらつき

図 9a)，b)に示すグラフは，静止時及び歩行時にそれぞれ行った把持の平均張力のばらつきを示したものである。図 9a)，b)より，握力把持及び指尖把持では示指にかかる力が減少し母指との把持力の差が減少していることが読み取れる。よって，示指と母指の腱にバランスよく張力をかけるこ

とで外乱に強い安定した把持が可能となることが考えられる。また，示指の側面と母指の腹で把持対象物を挟む側面把持において示指は屈曲姿勢を維持するのみであり，静止時には伸展用ゴムバンドの負荷のみがかかっていた。一方で，歩行時の外乱の影響下では静止時に比べて示指の腱にかかった張力が大きくなっていることが読み取れる。従って，外乱による姿勢把持及び角度の変化による把持対象物のすべりを防止するためには母指だけでなく示指においても一定の把持力が必要である。

以上より，日常生活中において把持対象物を落下させることなく把持を行うためには，歩行時における平均張力の最大値を満たす出力を持ったアクチュエータを搭載する必要がある。従って，各把持姿勢において日常生活中の外乱の影響下でも安定した把持を行うためにアクチュエータに求められる出力は次の通りである。表 4 にアクチュエータの要求出力を示す。

表 4　アクチュエータの要求出力

把持姿勢	示指 [N]	母指 [N]
握力把持	23.5	24.3
精密把持	7.61	9.89
側面把持	14.8	8.15

5.　おわりに

本研究では，機能性の高さから高い需要がありながらも普及していない筋電義手の重量の課題に着目し，把持機構の軽量化による使用者の負担軽減を目的とした。筋電義手が重い原因はアクチュエータ等が搭載された把持機構にあると考えられる。本研究では，従来のサーボモータ等に代わる軽量で柔軟な動作特性を持つ空気圧アクチュエータの採用及び母指外転内転機構の削減による把持機構の簡素化によって把持機構の軽量化を図った。開発コンセプトに基づいて製作した２自由度把持試験機による把持実験では，目標とする３つの把持姿勢において把持有効性が確認された。また，把持を行った際にアクチュエータと指部を繋ぐ腱にかかる張力を計測した実験の結果より，日常生活中の外乱の影響下でも安定した把持を行うために要求されるアクチュエータの出力値が明らかとなった。今後は，アクチュエータの要求出力値に基づいて実際に空気圧アクチュエータの設計を行い，空気圧アクチュエータによる駆動での把持実験で把持有効性及び実際の重量を評価する必要がある。

参考文献

[1] 川村次郎　ほか，“上肢切断者の現状と動向 一近畿地区におけるアンケート調査から一”，リハビリテーション医学，36，pp.384-389，1999
[2] 樫本修，”障害者自立支援法における筋電義手の支給と課題”，
日本職業・災害医学会会誌，61 号，pp.305-308，2013 年 9 月 1 日
[3] Christian Pylatiuk ほか，“Results of an Internet survey of myoelectric prosthetic hand users”，Prosthetics and Orthotics International，Vol. 31，Issue 4，pp.362-370，2007
[4] Cipriani, Christian & Controzzi, Marco & Carrozza, Maria Chiara. (2010). Objectives, criteria and methods for the design of the SmartHand transradial prosthesis. Robotica. 28. 919-927. 10.1017/S0263574709990750.