

令和2年度 博士論文



# 主要生活動作を実現した義手用 軽量ロボットハンドの開発

Development of a lightweight robotic hand for upper limb amputees  
that realizes major motions in daily life

雍 旭

Yong Xu

学籍番号 1742016

電気通信大学 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻

博士（工学）の学位申請論文

2021年3月

# 主要生活動作を実現した義手用 軽量ロボットハンドの開発

博士論文審査委員会

主査 姜 銀来 准教授

横井 浩史 教授

明 愛国 教授

青山 尚之 教授

小泉 憲裕 准教授

著作權所有者

雍 旭

2021

---

# Development of a lightweight robotic hand for upper limb amputees that realizes major motions in daily life

## Abstract

The prosthetic hand substitutes the function of the arm of an amputee, and as a wearable devices it is often used in daily life. Unlike a general robot hand, a prosthetic hand is psychologically difficult to accept if it does not look like a human hand in appearance from the perspective of the amputee. And, if it is heavier than a human hand, it tends to become fatigued when used for a long time, which will result to rejection occurs. However, it is desirable to be able to reproduce various motions like a human hand, and practicality is required at the same time. In other words, to develop a prosthesis, the following challenges must to be overcome: to mimic the size and decorative appearance of a human hand, the less fatiguing weight limitation (under 370 g), and can achieve all frequently used motions (16 motion patterns) in daily life.

However, lightness and functionality of the prosthetic hand are in a trade-off relationship with each other. Therefore, in order to satisfy the two requirements at the same time, the required functions were extracted from the hand motion pattern, and the number of actuators is determined by function analysis and integration. Then, while reproducing the natural motions of the fingers and palm, we constructed a mechanism that considers the process from reaching to grasping of the grasped object, analyzed the motion trajectory, and analyzed the mechanical model. Finally, the usefulness of the operation function proposed in this study is confirmed by the performance evaluation experiment. Furthermore, the weight of the proposed prosthetic hand is just 190.81g, and all 16 motion patterns have be realized in the motion verification experiment. In addition, it is confirmed that the overall performance in the Pick & Place experiment is superior to that of the previous study.



---

# 主要生活動作を実現した義手用軽量ロボットハンドの開発

## 概要

義手は上肢切断者の手の機能を代替するものであり、切断者に装着され日常生活で頻繁に使用される。一般的なロボットハンドと違って、義手は切断者の視点から、外見が人間の手の形に似ていないと心理的に受け入れにくくなる。また、人間の手より重い場合、長時間に使う時に疲労になりやすく、拒絶反応が生じる。それに、人間の手のように、多様な動作が再現できることが望ましく、機能性を要求されている。つまり、義手の開発にあたって、人間の手のサイズと外観を模倣する装飾性、疲れを感じにくい人間の手に相当する 370g 以下に抑える軽量性、日常生活で多数の動作ができる機能性が、要件として挙げられる。

しかしながら、外観の補綴を除き、これまでの義手は、軽量性と機能性を両立できるものは存在せず、概ねに3種類に分けられる：

1. 軽量性を追求し、アクチュエーター数を削減して動作が少数となり、前腕切断者からの操作性が落ちる。
2. 機能性を重視し、アクチュエーターを多数に加えて義手が重量化になり、長い時間に装着すると疲労になりやすい。
3. 制約条件の間にバランスを取り、条件の一つを満たしたり、あるいは両方に近づく中間位置付けの義手は開発されたが、到底同時に条件を満足するものではない。

本論文では外観の装飾性を保ちながら、軽量性と機能性を両立することから、快適に装着できる重量の制約のもとで、三つのアクチュエーターを使用し、日常生活における 16 パターンの把持動作を全て実現できる義手用ロボットハンドの開発を目的とした。

軽量性と機能性が互いにトレードオフの関係にあり、この二つの要件を同時に満たすために、まず、手の動作パターンから所要機能の抽出、機能の解析によるアクチュエーター数の決定を行った。そして、手指と掌の自然な動きを再現しながら、把持物体に対するリーチングからグラスピングまでのプロセスを考慮したメカニズムを構築し、運動軌跡の解析、力学モデルの分析を実施した。最後に、性能評価実験によって、本研究で提案した動作機能（手指にあたる五指の自動伸展機能、拇指の回転機能と順序連動機能、四指の適応連動機能および四指の間に形成する差動屈曲機能のほか、掌に応用するくぼみ機能）の有用性を確認した。本研究で開発した義手の重量が 190.81g でありながら、動作検証実験で 16 パターンの動作が実現できた。さらに、Pick & Place

---

実験で提案した機能による総合的な把持性能のパフォーマンスは、先行研究の2種類の義手と比較し、性能がより優れたことを確認できた。本論文は以下に示す全7章から構成され、その内容の要旨は以下の通りである。

第1章では、まず本研究を行う背景として、上肢切断者の現状、および筋電義手は機能代替の技術とする重要性の位置付けについて説明する。次に、筋電義手の開発の現状について詳しく考察し、問題点を提示する。これを踏まえて、本研究で軽量性と機能性を両立する研究目的を述べ、既存の義手と比較することで、本研究の新規性と有用性を明確する。

第2章では、16パターンの動作から、各動作における各指関節の運動と使用頻度を調べて、所要の7つの動作機能を抽出する。機能の実現を前提に、すべてのアクチュエーターを手の中に内包するモジュール化を実現するため、各機能に応じたメカニズムを構築し、機能を融和させた結果、アクチュエーター数を段階的に14→7→3個までに抑えられた。機能を実現できるほか、軽量化にも効果的に反映される。この章の最後に、以降の各章において、機能の実現にあたる計算や解析などを行いやすいための各指と掌における運動境界を定義した。

第3章では、拇指の開発を説明する。まず、拇指の運動特徴に従って、必要となる順序連動機能、および対応するメカニズムを述べる。従来研究の問題も含めて、リーチングのときの運動軌跡に関わる重力、弾性力および初張力による自動伸展機能を特化する可能性を探索する。そして、順序連動機能における指関節の運動軌跡を不安定させる重力項からの影響も配慮して、指の汎用モデルを立ち上げて、適したバネのパラメータを調べる。そのため、各関節の重力などを均一化にして、バネ定数をそれぞれ最小組、均一組と超過組で検証することによって、中に超過組の結果は機能に満足したため、運動現象に基づく理論解析を行うことで、閾値駆動メカニズムの理論を立ち上げることができた。この理論に従って、拇指の製作に応用して、最後に、実験で運動軌跡の安定性を確認したほか、設けたリーチングおよびグラスピングの性能も実現できた。それに、力学モデルで出力の理論値との検証も行って、開発した拇指の有用性を確かめた。

第4章では、四指の開発を行って、それぞれ単一指の開発と四指全体の開発を分けて述べる。まず、四指の任意の指において、運動特徴に従って、従来研究の課題を含め、適応連動機能を絞り出す。相応に機能に適した摩擦クラッチのメカニズムを構築する。そして、メカニズムに使用するクラッチ機構の設計を行って、それぞれリーチングの静摩擦力モデルとグラスピングの動摩擦力モデルを立てる。静摩擦力によって、各関節の重力と相殺できるため、指関節に自動伸展機能を最適化した。それに、任

---

意の空間位置でもクラッチ機構の力が発揮できるよう、四つの象限で最大摩擦係数の理論値を探し出して、異なる材料で試作して、摩擦係数の近いものを使用した。それから、材料の摩擦係数は動摩擦力が作用するときに、最小動摩擦力より小さいことを確認し、正確性を証明した。そのうち、運動軌跡の安定性、および力学モデルによる関節の出力を検証して、設計の通りになっていることを確かめた。以上によって、四指の各指に設けた摩擦クラッチメカニズムによる適応連動機能の有用性を確認できた。一方、四指全体において、従来研究の課題を含め、運動特徴をすべて再現させるために、この章の後半では、四指全体に必要な差動屈曲機能を論じてから、機能に適したピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムを提案して、構築する。リーチングのときに静摩擦力が作用している第一層、二層、三層の解析を行った。ただし、第二層と三層に使うクラッチ機構は寸法が違うため、再び異なる材料で測って、摩擦係数が理論値に近いものを使用した。それに、摩擦係数を動摩擦力に応用して、それぞれ指1本、2本、3本をブロックされた各層の変化を調べて、検証実験で運動を確認した同時に、必要最小の出力も獲得した。以上によって、四指全体に設けたピラミッド式クラッチ機構群メカニズムによる差動屈曲機能の有用性を確かめた。

第5章では、掌に応用するくぼみ機能を解説する。従来研究の問題を含めて、まず掌の運動特徴からくぼみ機能を絞り出す。そして、軽量化のため、拇指回転機能と融和させて、拇指の回内・回外に連動させられて、アクチュエーターが不要になった。それに、連動方式において、コンプライアンスの性質を持つSEA駆動に着目して、対称SEA駆動のメカニズムを提案した。メカニズムの構築にあたって、掌のアーチ状と平面状の自動切替による馴染み把持をこなすことができた：中手骨の屈曲側と伸展側にそれぞれ2個同様なバネを付けて、拇指の回内によって、バネの長さが変わり、両側の力が釣り合いながら、アーチ状が徐々に形成する。拇指が約回内60度の境にグラスピングの領域に入って、把持物体の形状によって、アーチ状を保つままに掌の中に包み込んだり、環指と小指の指先の位置を変えて、物体に接近する補助もしたり、あるいは平面状に形成されて握り込んだりすることを実現した。これらの運動に関する変化は7つのステップで解析したほか、力学モデルで環指と小指の中手骨の出力を調べて、実験で正確性を確認した。

第6章では、義手の動作・機能の検証実験を述べる。まず、設計したCAD図に従って、義手を製作した。結果として、義手の重量は190.81gの軽さを持って、370g以下の軽量性の目標を達成した。それから、製作した義手を制御し、16パターンの動作をすべて実現できることを確かめた。それに、製作した義手をそれぞれくぼみ機能の封鎖、およびくぼみ機能の開放に分けて、健常者の筋電で義手を操作しながら、Pick & Place実験でほかの2種類の義手と比較した。実験では、物体に対する把持の成功回数

---

を記録して、開発した機能による総合的な把持性能を検証する。結果として、リーチングによる五指運動軌跡の安定性を持っているため、後からのグラスピングのプロセスにおいて、支障なく馴染み把持の形成に繋げるようになった。また、くぼみ機能の作用によって、握力把握と精密把握のときに役に立って、成功回数が向上した。よって、本研究で設けた機能による把持性能は、ほか2種類の義手より優れたことを確かめた。以上によって、本研究で開発した義手における軽量性と機能性の両立を実現でき、有用性を確認した。

第7章では、本研究の成果、結論のまとめ、今後の課題および展望について述べる。

---

# 目次

第1章. 序論.....	1
1.1 背景.....	2
1.2 従来研究.....	5
1.2.1 動作数を重視した低自由度義手.....	5
1.2.2 軽量化を追求した低自由度義手.....	8
1.2.3 バランスを取った低自由度義手.....	9
1.2.4 まとめ.....	11
1.3 研究目的.....	13
1.4 論文構成.....	14
第2章. 手の動作解析及び義手の機能設計.....	18
2.1 動作パターンの分析.....	19
2.1.1 手の構造および利用空間.....	19
2.1.2 日常動作パターンの分析.....	20
2.2 動作機能・メカニズム・アクチュエーター数の関係.....	25
2.2.1 動作パターンに基づく必要な動作機能.....	25
2.2.2 メカニズムによるアクチュエーター数の決定.....	26
2.2.3 メカニズム構築のための運動境界設定.....	29
2.3 まとめ.....	30
第3章. 順序連動機能を有する拇指の開発.....	31
3.1 拇指の運動特徴.....	32
3.2 順序連動機能による特化した自動伸展機能.....	34
3.2.1 既存研究及び課題.....	34
3.2.2 重力を配慮した指の汎用モデル.....	37

---

3.2.3 伸展バネのパラメータ解析 .....	41
3.3 拇指における順序連動機能の実現 .....	48
3.3.1 順序連動機能に適した閾値駆動メカニズム .....	48
3.3.2 順序連動機能の性能及び出力検証 .....	53
3.4 まとめ .....	62
第4章. 適応連動機能及び差動屈曲機能を持つ四指の開発 .....	63
4.1 四指の運動特徴 .....	64
4.2 四指各指における適応連動機能の実現 .....	65
4.2.1 既存研究及び課題 .....	65
4.2.2 適応連動機能に適した摩擦クラッチメカニズム .....	67
4.2.3 最適化した自動伸展機能 .....	70
4.2.4 クラッチ機構の設計 .....	73
4.2.5 適応連動機能の性能及び出力検証 .....	91
4.3 四指全体における差動屈曲機能の実現 .....	105
4.3.1 既存研究及び課題 .....	105
4.3.2 差動屈曲機能に適したピラミッド式クラッチ機構群メカニズム .....	106
4.3.3 ピラミッド式クラッチ機構群メカニズムの運動解析 .....	108
4.3.4 差動屈曲機能の運動検証 .....	125
4.4 まとめ .....	127
第5章. くぼみ機能を備える掌の開発 .....	129
5.1 掌の運動特徴 .....	130
5.2 掌におけるくぼみ機能の実現 .....	133
5.2.1 既存研究及び課題 .....	133
5.2.2 くぼみ機能に適した対称 SEA 駆動のメカニズム .....	134
5.2.3 くぼみ機能の運動・出力解析 .....	142
5.2.4 くぼみ機能の出力検証 .....	147
5.4 まとめ .....	150
第6章. 義手の動作・機能の検証実験 .....	151
6.1 開発した義手の全体像 .....	152
6.2 動作検証実験 .....	156
6.3 機能による把持性能の検証実験 .....	173

---

6.3.1 比較対象とする4種類の義手 .....	173
6.3.2 実験の条件 .....	175
6.3.3 Pick & Place 実験 .....	177
6.3 まとめ .....	181
第7章. 結論と今後の展望 .....	182
7.1 本論文の結論 .....	183
7.1.1 拇指の開発による成果 .....	184
7.1.2 四指の開発による成果 .....	185
7.1.3 掌の開発による成果 .....	186
7.2 今後の展望 .....	187
7.2.1 ワイヤの緩みにおける対策 .....	187
7.2.2 更なる巧妙なメカニズムによる機能の融和 .....	187
7.2.3 過伸展機能の追加 .....	187
7.2.4 触覚センシングによる人工皮膚 .....	187
謝辞 .....	189
参考文献 .....	192
研究業績 .....	199

# 第1章 序論

---

1.1 背景 .....	2
1.2 従来研究 .....	5
1.2.1 動作数を重視した低自由度義手 .....	5
1.2.2 軽量化を追求した低自由度義手 .....	8
1.2.3 バランスを取った低自由度義手 .....	9
1.2.4 まとめ .....	11
1.3 研究目的 .....	13
1.4 論文構成 .....	14

---



## 1.1 背景

人間の手は多様な動作を行うことができる巧みに富む非常に重要な器官である。しかし、先天的または後天的な原因で肢体を失い、仕事や生活に大きな支障が生じる障害者が大きな割合を占めている。世界中に外傷が原因で肢体を切断された障害者は2015年の一年間に約120万人件あり、うち30%はアジアの地域で生活している[C. McDonald 2017]。

そうした中、厚生労働省の調査結果によると、アジア先進国の日本では、肢体障害者は約180万人おり、うち上肢欠損者が8万人以上存在している[内閣府 2013]ことに對して、約80%の欠損者が機能性のない装飾義手を使用している[川村 2001]。

一方、日本と異なり、発展途上国かつ人口大国の中国においては、障害者はさらに大きな割合を占めている。障害者標本調査[中国残疾人連合会 2010]によると、2010年末までに障害を持つ人の数は8502万人に至り、肢体不自由者は障害種類の中で一番高い比例の29.07%を占め、約2412万人がいる。そうした中の現状としては、約930万人が義肢を求めているが、義肢の普及率は僅か9.5%である[沈 2012]。

しかしながら、国の発展の程度にもかかわらず、さらに深刻になっているのは切断された者に劣等感が生じて、メンタルヘルスに大きな影響を及ぼし、外傷後ストレス障害やうつ病などの深刻な問題に進行してしまう可能性が存在していることである[S. Bhutani 2016]。



Fig.1.1 義手の種類

これらの問題に対して、欠損した上肢の外観や運動機能を代替する技術の一つとして義手が挙げられる。義手には、目的に応じた形状のものがあリ、Fig.1.1のように、

主に下記分類されている：

- ・装飾義手：人の手の外観の再建を目的とした義手
- ・能動義手：ハーネスなどを介して装着者の身体運動を動力として開閉を行う義手
- ・作業義手：特定の作業を行うことに特化した装具を作業ごとに付け替えが可能な義手
- ・電動義手：モータなどの動力を用いて駆動する義手

特に近年では、損失した上肢の運動機能を代替するうえ、欠損者の QOL (Quality of Life) を向上させることができる筋電義手に対する期待が高まり、研究や開発が盛んに行われている。筋電義手とは、筋肉が収縮する際に生じる電気信号を制御信号として用いる、直感的な操作が可能な電動義手である。

筋電義手について行われている研究は、多自由度化することで義手の動きを滑らかにし、人の手の動きや機能に近づけることを目的としたものが大部分である。しかし、義手における駆動の自由度は、重量や操作性、耐故障性、メンテナンスの容易さなどとトレードオフの関係があるため、既存の多自由度義手において、多数のアクチュエータによる重量化、メンテナンスの困難性や、義手装着者に対する制御の複雑さなどの問題があり、実用性に欠けているものが多い。故に、義手は日常生活内で使用することが想定され、操作性、耐故障性、メンテナンスの容易さに基づいて、劣駆動で少数のアクチュエータで多数の動作を実現する低自由度義手に関する研究、商品化されたものは近年多くなる傾向がある[D. R. R. Rebollo 2017]。それに対して、日本と中国で流通している筋電義手はほぼ欧米系の製品で、アジア人種のサイズと合わないことに加え、値段的にも 5000 から 30000 ドルの高価格であり、かつ重たいものがほとんどである。こうした状況で、日本では高価格であることや支給制度などいろいろな問題によって、普及はしなかった[東原 2012]。中国では約 75% の肢体切断者は経済状況が厳しく、多数が貧困層である状況[中国国家统计局 2007]のもと、高価格の筋電義手の普及が難航となっている。

そこで、日本では、厚生労働省が平成 30 年より、障害のある人の自立や社会参加を支援する機器の実用的製品化を促すため、「障害者自立支援機器等開発促進事業」を実施している。中には、筋電義手を支援機器の開発に対する助成採択例として掲げられている[厚生労働省 2018]。中国でも、障害者の生活の改善に向けて、義肢の研究や生産を含めて、支援政策が相次ぎ掲載された[中華人民共和国国務院 2016]。このように、多自由度義手と匹敵する多数の把持動作を再現する機能性、長時間の装着による疲労の感じにくい軽量性、および安価の経済性が持つ筋電義手の開発が急務とされている。

したがって、筋電義手の開発におけるエンドフェクタとする義手の部分は、効果器として使用者に直感的に評価されるため、さまざまな性能を備えて、主な設計のコンセプトは以下のようにまとめることとした：

1. 人の手と似るうえに動作の自然さ（装飾性・機能性）
2. 疲れにくい重さ（軽量性）
3. 日常動作 ADL（Activities of Daily Living）が多数実現可能（機能性・装飾性）
4. 把持物体に柔軟性が持つ対応（機能性・装飾性）
5. アクチュエータ数が必要最小限まで削減（軽量性・機能性）
6. 劣駆動の採用（軽量性・機能性）
7. アクチュエータとハンドの一体化（装飾性・機能性）

## 1.2 従来研究

前述した設計のコンセプトに基づいて、低自由度義手の開発にあたって、動作の多様化に伴う機能性と軽量性にはトレードオフの関係が存在している。手の動作パターンが使用場面や目的などによって、いくつかの分類法が挙げられている[T. Feix 2015]が、中には最も利用されるのが動作の使用頻度によって分類された 16 パターンの把持動作[M. R. Cutkosky 1989] [J. Z. Zheng 2011]である。また、切断者が長時間に義手を装着しても疲労になりにくい理想な重さは 370g 以下[H. W. Kay 1972]とされていることから、義手における基本的な制約条件として、研究や開発の方向性が示される。

しかしながら、この制約条件のもとに、既存の低自由度義手は両立できるものは存在しない。概ね下記の 3 種類に分けられる：

1. 機能性の向上を重視し、アクチュエータの追加によって自由度が増え、実現可能な動作数も増加するが、代わりに義手が重くなってしまう。
2. 軽量性を追求するために、アクチュエータを削除し、自由度が減って動作数の減少により、機能性から離れていくことになってしまう。
3. 制約条件の間にバランスを取り、条件の一つを満たしたり、あるいは両方に近づく中間位置付けの義手を開発したが、到底同時に満足するものではない。

これからこの 3 種類の義手をいくつか挙げて紹介する。

### 1.2.1 動作数を重視した低自由度義手



Fig.1.2 Gifu Hand (16 動作, 1400g)

Gifu Hand (Fig.1.2) : 日本の岐阜大学で開発したハンドである。物体の把握や操作などを実現できるように、サイズだけではなく、幾何学的に、運動機能的にも人間の手に近い形をしているほか、人間のと同様な関節数、自由度を設けている。ハンド全体の重さは 1400g であり、16 パターンの動作はすべて実現した[T. Mouri 2002].



Fig.1.3 UW's Hand (15 動作, 942g)

UW's Hand (Fig.1.3) : アメリカのワシントン大学で開発されたハンドである。目的としては、見た目だけではなく、機能的にも人間の手とほとんど同じだと思われる義手を製作することである。リアリティーを忠実に再現できるデザインを得るために、人間の手の骨を 3D スキャンし、指関節に本物の手の柔軟性とコンプライアンスを与えるために、「Spectra」と呼ばれる材料を使用した。ハンドを動かすために、10 個のサーボモーターを使用して、ワイヤ駆動で手の自然な動きをエミュレートした結果、942g の重さが持ちながら、15 パターンの動作が実現した[Z. Xu 2016].

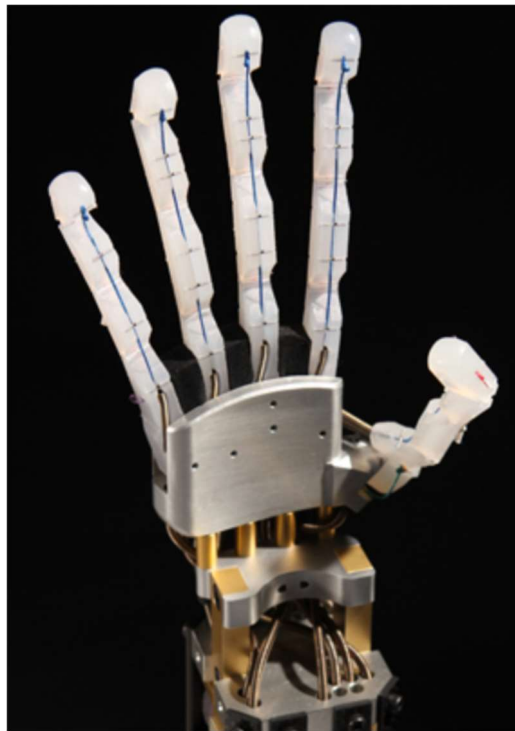


Fig.1.4 Handroid (12 動作, 725g)

Handroid (Fig.1.4) : 日本の ITK 社が開発したハンドであり, 5 本指を 5 個のアクチュエーターによるワイヤ駆動の方式で, 軽量かつ耐久性のある航空機レベルのアルミニウム材をパーツに使用し, 総重量は 725g であり, 12 パターンの動作ができる[D. R. R. Rebollo 2017].



Fig.1.5 i-limb ultra (12 動作, 725g)



i-limb ultra (Fig.1.5) : アメリカの Össur 社が開発したハンドである. 5本の指それぞれにモーターが内蔵され, 独立に駆動することによって, 自然な動きおよび多様化の動作を再現することが可能になる. 親指の位置は四指と対立位から外側の並列位まで手動で変える. また, 指ごとに取り外すことができるため, 指のみの修理, 交換が可能になる. ハンド全体が 539g の重さを持ち, 12 パターンの動作ができる[Össur 社 HP より].

### 1.2.2 軽量化を追求した低自由度義手

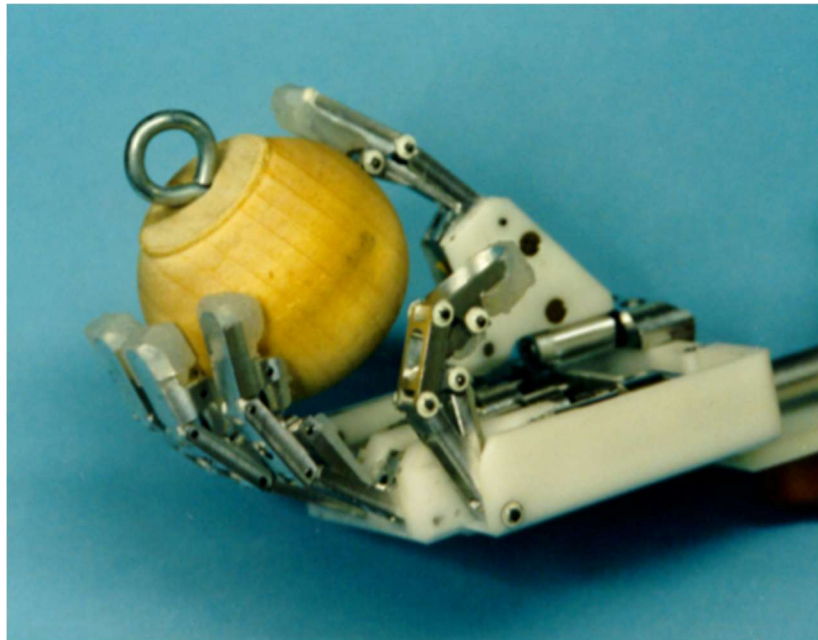


Fig.1.6 TBM Hand (6 動作, 280g)

TBM Hand (Fig.1.6) : トロント大学が開発したハンドである. 五指がそれぞれ伸展側に付けたバネを介し, 掌の中に設置したソリッドブロックに接続されて, 腕に埋め込んだ一つのアクチュエーターがブロックを引くことによって, 馴染み把持を実現する. 拇指の回内・回外は使用者が手動で角度を調整しながら, 把持動作を果たす. ハンドの重量は 280g で, 6 パターンの動作が可能である[N. Dechev 2001].



Fig.1.7 Bebionic Hand (5 動作, 588g)

Bebionic Hand (Fig.1.7) : ドイツの Ottobock 社に所属された 5 指ハンドである. 手の中に 5 個のアクチュエーターが配置され, 11DOF を持ちながら, DIP 関節の屈曲角度が固定され, 中節骨がリンク機構を介して基節骨と繋がっている. 拇指の回内・内外は手動で調整が可能である. 重量は約 588g であり, 5 パターンの動作を持つ [Ottobock 社 HP より].

### 1.2.3 バランスを取った低自由度義手

Fig.1.8 SIAT Hand  $\alpha$  (9 動作, 159g)



SIAT Hand  $\alpha$  (Fig.1.8) : 中国の中国科学院深圳先進技術研究院で開発したハンドである。手の中に2個のアクチュエーターが配置されて、拇指の回内・内外, および五指の屈曲・伸展はそれぞれ主動でコントロールができる。重量はわずか 159g の軽さでありながら, 9 パターンの動作が実現できる[X. Jing 2018].

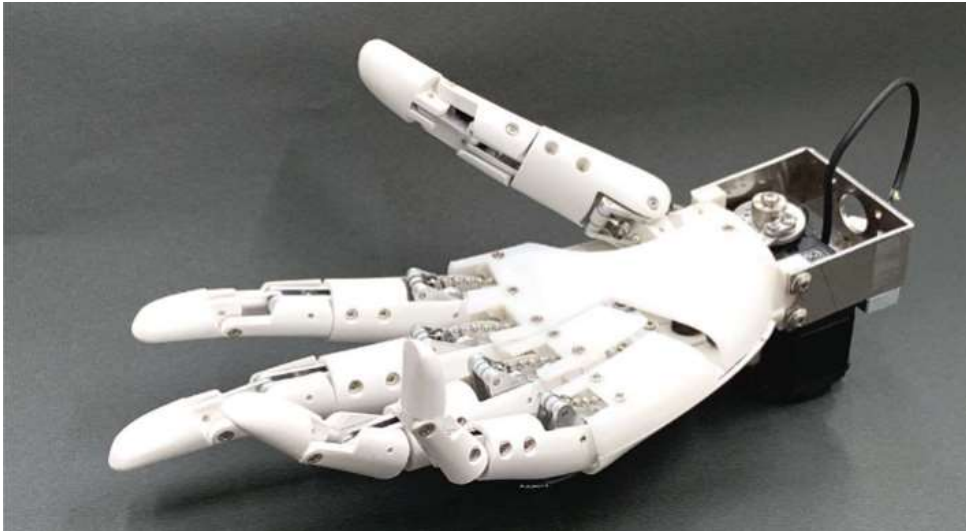


Fig.1.9 F Hand (6 動作, 705g)

F Hand (Fig.1.9) : 日本の東京都立産業技術高等専門学校の深谷研究室とダブル技研が共同で開発した5指ハンドである。指関節はリンク機構で構築され, 掌の中に配置したワイヤを介して, 前腕にある1個のアクチュエーターで把持動作を実現する。重さは705gで, 6パターンの動作が可能である[深谷 2016].



Fig.1.10 Michelangelo (8 動作, 420g)

Michelangelo (Fig.1.10) : ドイツの Ottobock 社が開発したハンドである。四指と拇指がそれぞれ独立に作動する。手の部分には二つのアクチュエーターが備えて、一つは握り動作と把持力を果たして、もう一つは拇指の回内・回外のコントロールを行う。拇指、示指および中指は使用者の意志で操作できるが、環指と小指はパッシブ的に動く。ハンドの重量は 420g で、8 パターンの動作ができる [Ottobock 社 HP より]。



Fig.1.11 IH2 Azzurra Hand (13 動作, 640g)

IH2 Azzurra Hand (Fig.1.11) : イタリアの Prensilia 社によって商品化されたハンドである。成人のサイズで、5 個のアクチュエーターを掌に埋め込んだ。拇指が主動的な回内・回外と屈曲・伸展ができるほか、示指と中指もそれぞれ独自に屈曲・伸展が可能である。薬指と小指は共に 1 個のアクチュエーターを使用し、同時に屈曲・伸展が果たしているうえ、適応機能も搭載し、把持の対象物と馴染める。ハンドの重量は 640g で、13 パターンの動作が実現できる [Prensilia 社 HP より]。

#### 1.2.4 まとめ

低自由度義手の開発にあたって、外観を模倣する装飾性を保つ前提に、基本的な制約条件から、Fig.1.12 に示したように、同時に 370g 以下の軽量性を保ちながら、日常生活で 16 パターンの動作を実現しているものは存在しない。それにおいて、370g 以下に満足するハンドは 4 つしかなく、中に最もターゲット領域に近づいているのは SIAT Hand $\beta$  であり、214g の軽さが持ちながら、12 パターンの動作が可能になっている。

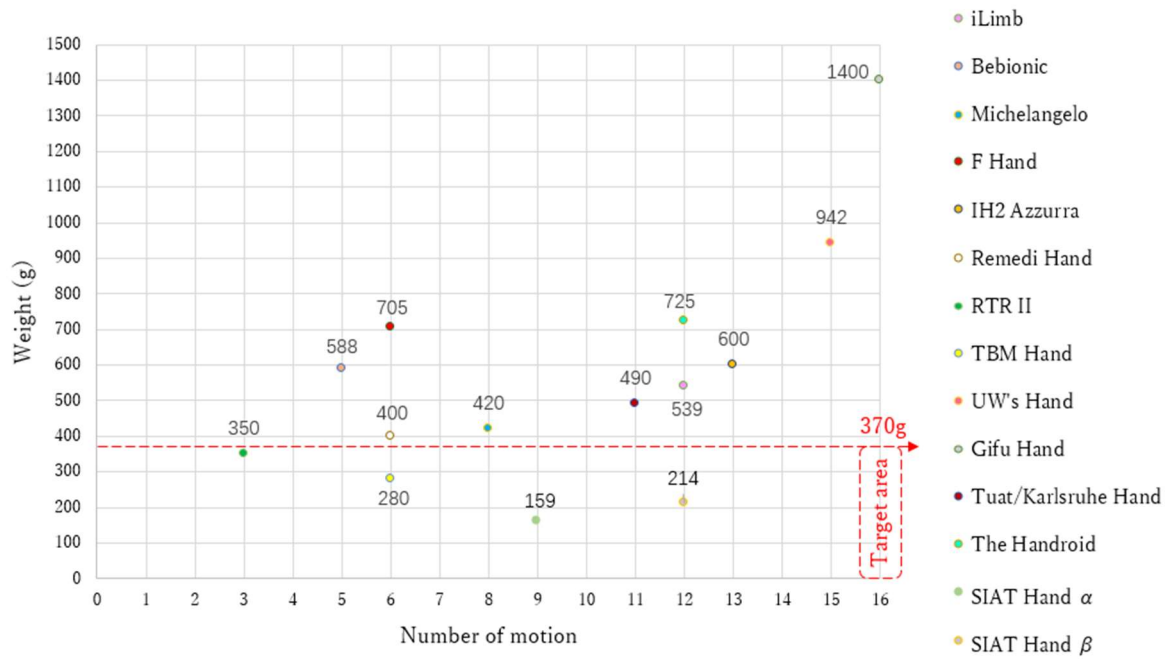


Fig.1.12 低自由度義手の重量と動作数の比較図

### 1.3 研究目的

以上によって、外観の装飾性を保つ前提に、基本的な制約条件のもとで、ターゲット領域に入れる低自由度義手の開発にあたって、義手には頻繁に使われない関節自由度を抑えることによって、有効的にアクチュエーター数の削減、および軽量化に繋がる。一方、ワイヤ劣駆動の採用をベースにして、より巧妙なメカニズムを駆使することによって、義手内に利用可能なスペースを確保しながら、少数のアクチュエーターで多数の動作を可能とし、軽量性と機能性の両立を実現させることを目標として、義手を設計する。その目標に向けて、人間らしい外観を保ちながら、スペース的にアクチュエーターをすべて掌の中に収めることを前提とし、義手の重さを 370g 以内に抑えるうえ、日常生活における手の 16 パターンの動作を実現する。さらに、目標を達成するために、複数の機能を有効的に融和させるメカニズムを構築する。それに伴い、アクチュエーター数も必要最小限に抑えられ、結果的に重量の削減に効果的に繋がる。

以上により、本研究の目的は、外観の装飾性を保ちながら、軽量性と機能性を両立すること、さらに、快適に装着できる重量の制約のもとで、3 つのアクチュエータを使用し、日常生活における 16 パターンの把持動作を全て実現できる義手用ロボットハンドの開発である。

## 1.4 論文構成

義手は上肢切断者の手の機能を代替するものであり、切断者に装着され日常生活で頻繁に使用される。一般的なロボットハンドと違って、義手は切断者の視点から、外見が人間の手の形に似ていないと心理的に受け入れにくくなる。また、人間の手より重い場合、長時間に使う時に疲労になりやすく、拒絶反応が生じる。それに、人間の手のように、多様な動作が再現できることが望ましく、機能性を要求されている。つまり、義手の開発にあたって、人間の手のサイズと外観を模倣する装飾性、疲れを感じにくい人間の手に相当する 370g 以下に抑える軽量性、日常生活で多数の動作ができる機能性が、要件として挙げられる。

しかしながら、外観の補綴を除き、これまでの義手は、軽量性と機能性を両立できるものは存在せず、概ねに3種類を分けられる：

1. 軽量性を追求し、アクチュエーター数を削減して動作が少数となり、前腕切断者からの操作性が落ちる。
2. 機能性を重視し、アクチュエーターを多数に加えて義手が重量化になり、長い時間に装着すると疲労になりやすい。
3. 制約条件の間にバランスを取り、条件の一つを満たしたり、あるいは両方に近づく中間位置付けの義手は開発されたが、到底同時に条件を満足するものではない。

本論文では外観の装飾性を保ちながら、軽量性と機能性を両立することから、快適に装着できる重量の制約のもとで、三つのアクチュエーターを使用し、日常生活における 16 パターンの把持動作を全て実現できる義手用ロボットハンドの開発を目的とした。

軽量性と機能性が互いにトレードオフの関係にあり、この二つの要件を同時に満たすために、まず、手の動作パターンから所要機能の抽出、機能の解析によるアクチュエーター数の決定を行った。そして、手指と掌の自然な動きを再現しながら、把持物体に対するリーチングからグラスピングまでのプロセスを考慮したメカニズムを構築し、運動軌跡の解析、力学モデルの分析を実施した。最後に、性能評価実験によって、本研究で提案した動作機能（手指にあたる五指の自動伸展機能、拇指の回転機能と順序連動機能、四指の適応連動機能および四指の間に形成する差動屈曲機能のほか、掌に応用するくぼみ機能）の有用性を確認した。本研究で開発した義手の重量が 190.81g でありながら、動作検証実験で 16 パターンの動作が実現できた。さらに、Pick & Place 実験で提案した機能による総合的な把持性能のパフォーマンスは、先行研究の2種類の義手と比較し、性能がより優れたことを確認できた。Fig.1.13 に示したように、本論文は以下に示す全7章から構成され、その内容の要旨は以下の通りである。

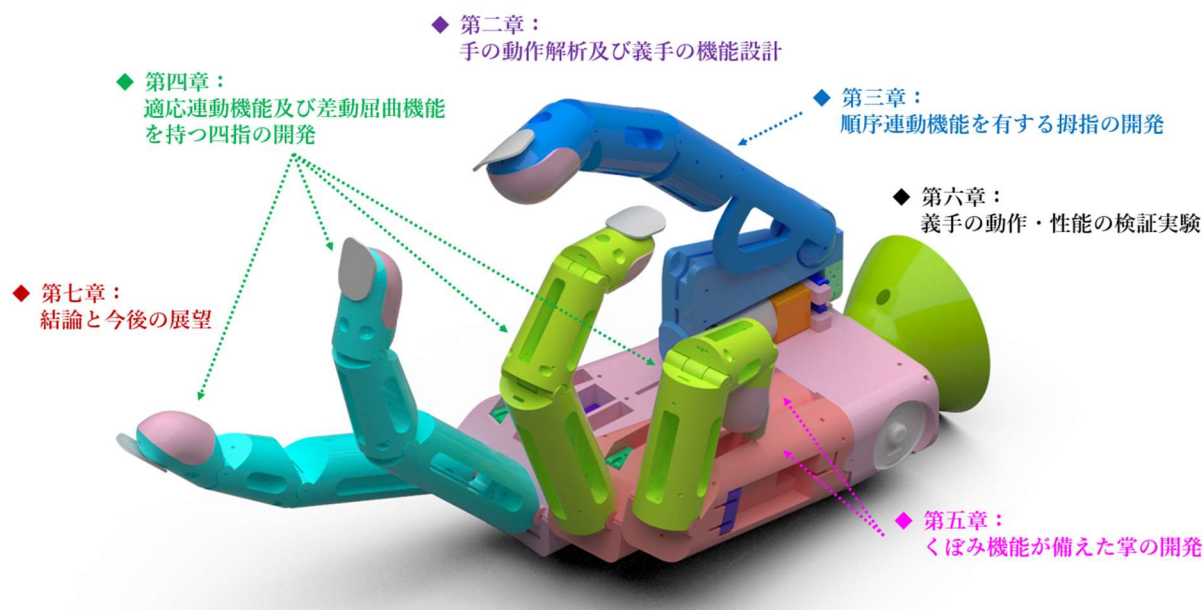


Fig.1.13 論文の構成

第1章では、まず本研究を行う背景として、上肢切断者の現状、および筋電義手は機能代替の技術とする重要性の位置付けについて説明する。次に、筋電義手の開発の現状について詳しく考察し、問題点を提示する。これを踏まえて、本研究で軽量性と機能性を両立する研究目的を述べ、既存の義手と比較することで、本研究の新規性と有用性を明確する。

第2章では、16パターンの動作から、各動作における各指関節の運動と使用頻度を調べて、所要の7つの動作機能を抽出する。機能の実現を前提に、すべてのアクチュエーターを手の中に内包するモジュール化を実現するため、各機能に応じたメカニズムを構築し、機能を融和させた結果、アクチュエーター数を段階的に14→7→3個までに抑えられた。機能を実現できるほか、軽量化にも効果的に反映される。この章の最後に、以降の各章において、機能の実現にあたる計算や解析などを行いやすいための各指と掌における運動境界を定義した。

第3章では、拇指の開発を説明する。まず、拇指の運動特徴に従って、必要となる順序連動機能、および対応するメカニズムを述べる。従来研究の問題も含めて、リーチングのときの運動軌跡に関わる重力、弾性力および初張力による自動伸展機能を特化する可能性を探索する。そして、順序連動機能における指関節の運動軌跡を不安定させる重力項からの影響も配慮して、指の汎用モデルを立ち上げて、適したバネのパラメータを調べる。そのため、各関節の重力などを均一化にして、バネ定数をそれぞれ最小組、均一組と超過組で検証することによって、中に超過組の結果は機能に満足したため、運動現象に基づく理論解析を行うことで、閾値駆動メカニズムの理論を立ち上げることができた。この理論に従って、拇指の製作に応用して、最後に、実験で

運動軌跡の安定性を確認したほか、設けたリーチングおよびグラスピングの性能も実現できた。それに、力学モデルで出力の理論値との検証も行って、開発した拇指の有用性を確かめた。

第4章では、四指の開発を行って、それぞれ単一指の開発と四指全体の開発を分けて述べる。まず、四指の任意の指において、運動特徴に従って、従来研究の課題を含め、適応連動機能を絞り出す。相応に機能に適した摩擦クラッチのメカニズムを構築する。そして、メカニズムに使用するクラッチ機構の設計を行って、それぞれリーチングの静摩擦モデルとグラスピングの動摩擦モデルを立てる。静摩擦力によって、各関節の重力と相殺できるため、指関節に自動伸展機能を最適化した。それに、任意の空間位置でもクラッチ機構の力が発揮できるように、四つの象限で最大摩擦係数の理論値を探し出して、異なる材料で試作して、摩擦係数の近いものを使用した。それから、材料の摩擦係数は動摩擦力が作用するとき、最小動摩擦力より小さいことを確認し、正確性を証明した。そのうち、運動軌跡の安定性、および力学モデルによる関節の出力を検証して、設計の通りになっていることを確かめた。以上によって、四指の各指に設けた摩擦クラッチメカニズムによる適応連動機能の有用性を確認できた。一方、四指全体において、従来研究の課題を含め、運動特徴をすべて再現させるために、この章の後半では、四指全体に必要となる差動屈曲機能を論じてから、機能に適したピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムを提案して、構築する。リーチングのときに静摩擦力が作用している第一層、二層、三層の解析を行った。ただし、第二層と三層に使うクラッチ機構は寸法が異なるため、再び異なる材料で測って、摩擦係数が理論値に近いものを使用した。それに、摩擦係数を動摩擦力に応用して、それぞれ指1本、2本、3本をブロックされた各層の変化を調べて、検証実験で運動を確認した同時に、必要最小の出力も獲得した。以上によって、四指全体に設けたピラミッド式クラッチ機構群メカニズムによる差動屈曲機能の有用性を確かめた。

第5章では、掌に応用するくぼみ機能を解説する。従来研究の問題を含めて、まず掌の運動特徴からくぼみ機能を絞り出す。そして、軽量化のため、拇指回転機能と融和させて、拇指の回内・回外に連動させられて、アクチュエーターが不要になった。それに、連動方式において、コンプライアンスの性質を持つSEA駆動に着目して、対称SEA駆動のメカニズムを提案した。メカニズムの構築にあたって、掌のアーチ状と平面状の自動切替による馴染み把持をこなすことができた：中手骨の屈曲側と伸展側にそれぞれ2個同様なバネを付けて、拇指の回内によって、バネの長さが変わり、両側の力が釣り合いながら、アーチ状が徐々に形成する。拇指が約回内60度の境にグラスピングの領域に入って、把持物体の形状によって、アーチ状を保つままに掌の中に包み込んだり、環指と小指の指先の位置を変えて、物体に接近する補助もしたり、あるいは平面状に形成されて握り込んだりすることを実現した。これらの運動に関する変化は7つのステップで解析したほか、力学モデルで環指と小指の中手骨の出力を調



べて、実験で正確性を確認した。

第6章では、義手の動作・機能の検証実験を述べる。まず、設計したCAD図に従って、義手を製作した。結果として、義手の重量は190.81gの軽さを持って、370g以下の軽量性の目標を達成した。それから、製作した義手を制御し、16パターンの動作をすべて実現できることを確かめた。それに、製作した義手をそれぞれくぼみ機能の封鎖、およびくぼみ機能の開放に分けて、健常者の筋電で義手を操作しながら、Pick & Place実験でほかの2種類の義手と比較した。実験では、物体に対する把持の成功回数を記録して、開発した機能による総合的な把持性能を検証する。結果として、リーチングによる五指運動軌跡の安定性を持っているため、後からのグラスピングのプロセスにおいて、支障なく馴染み把持の形成に繋げるようになった。また、くぼみ機能の作用によって、握力把握と精密把握のときに役に立って、成功回数が向上した。よって、本研究で設けた機能による把持性能は、ほか2種類の義手より優れたことを確かめた。以上によって、本研究で開発した義手における軽量性と機能性の両立を実現でき、有用性を確認した。

第7章では、本研究の成果、結論のまとめ、今後の課題、および展望について述べる。



# 第2章 手の動作解析及び義手の機能 設計

---

2.1 動作パターンの分析 .....	19
2.1.1 手の構造および利用空間 .....	19
2.1.2 日常動作パターンの分析 .....	20
2.2 動作機能・メカニズム・アクチュエーター数の関係 .....	25
2.2.1 動作パターンに基づく必要な動作機能 .....	25
2.2.2 メカニズムによるアクチュエーター数の決定 .....	26
2.2.3 メカニズム構築のための運動境界設定 .....	29
2.3 まとめ .....	30

---

## 2.1 動作パターンの分析

義手の設計にあたって、実現すべきである動作パターンおよび動作を駆使するメカニズム、アクチュエーターに所要な空間を明確する。このセクションでは、人間の手の構造を紹介してから、掌の中にアクチュエーターの内蔵、ワイヤ経路、機構のモジュールなどに関する利用可能な空間を定義する。それに、日常動作パターンを詳しく説明し、動作パターンごとに必要な機能、あるいはいくつかの機能での共同作業などを列挙する。

### 2.1.1 手の構造および利用空間

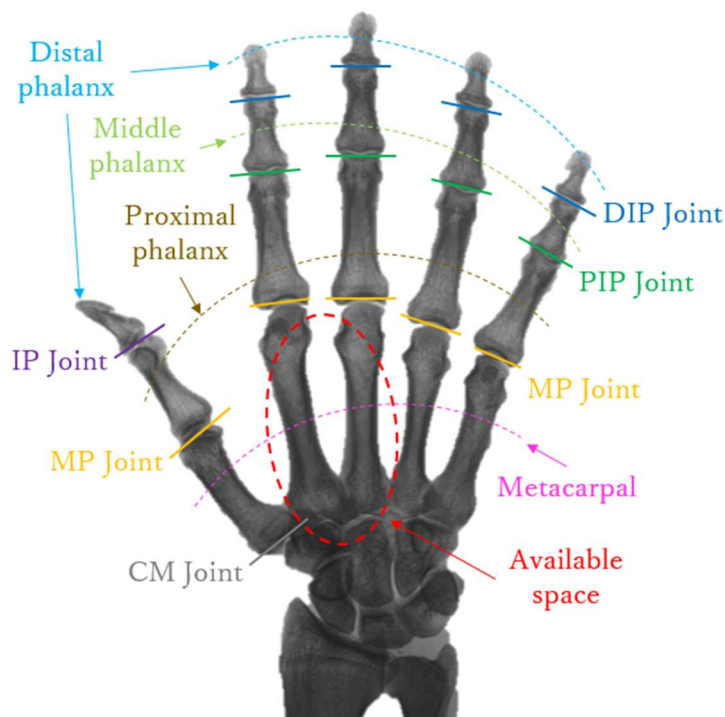


Fig.2.1 手の関節

人間の手は Fig.2.1 に示したように、全部の指関節は合計 22 個の自由度を持つ。中には、拇指の三関節において、IP(Interphalangeal Joint)、MP(Metacarpophalangeal Joint)、CM(Carpometacarpal Joint)関節は、それぞれ IP と MP 関節は屈曲・伸展の 1 個の自由度を持ち、CM 関節は屈曲・伸展以外に回内・回外も存在して 2 個の自由度を持つ。また、IP 関節は末節骨と基節骨、MP 関節は基節骨と中手骨を連結する。一方、四指には、示指、中指、環指と小指はサイズの異なる以外、指関節名称、機能が全部同様である：三つの関節はそれぞれ DIP (Distal Interphalangeal Joint)、PIP (Proximal Interphalangeal Joint)、MP 関節と呼ばれ、DIP と PIP 関節は屈曲・伸展の 1 個の自由度があつて、MP 関節は屈曲・伸展以外に内転・外転にもある 2 個の自由度が存在す

る。それに、DIP 関節は末節骨と中節骨、PIP 関節は中手骨と基節骨、MP 関節は基節骨と中手骨を連結する。ただし、掌に存在する示指と中指の CM 関節は固定され、自由度が存在しないことに対して、環指と小指の CM 関節は屈曲・伸展の1個の自由度を持つ。

また、本研究では成人男性の平均サイズによって義手を製作するため、各指関節の長さ、直径および掌の寸法は Table.2.1 のように示す。（単位：mm）

Table.2.1 成人男性の手のサイズ

	中手骨		基節骨		末節骨	
	長さ	直径	長さ	直径	長さ	直径
拇指	57	14	30	14	25	14
	基節骨		中節骨		末節骨	
	長さ	直径	長さ	直径	長さ	直径
示指	42	14	20	13	20	12
中指	46	14	25	13	22	12
環指	44	14	23	13	20	12
小指	32	14	19	13	20	12
	長さ		高さ		厚さ	
掌	52		85		20	

以上によって、可動な指関節を除き、アクチュエーターの埋め込みに関しては、利用可能な空間は掌の半分しかなくて、Fig.2.1 に示したように、示指と中指の CM 関節の部分となり、赤丸の区域に定義する。空間的な狭さと寸法の制限のもとで、より多くの動作パターンを実現するには、リンク機構の駆動方式は不向きでありながら、重量の増加にも懸念する。ゆえに、本研究では軽さ、省スペース、柔軟性を持つワイヤ駆動方式に決定する。

### 2.1.2 日常動作パターンの分析

手の日常動作パターンはさまざまである。それを分析するため、従来研究では機能や使用頻度によるいろんな分類方法を挙げる[T. Feix 2015]が、中には工場の作業による分類された16パターンの動作[M. R. Cutkosky 1989]をベースに生活場面にも応用できる[J. Z. Zheng 2011]と言われ、本研究の目的と一致するため、Fig.2.2 のように16パターンの動作分類法を基準にする。

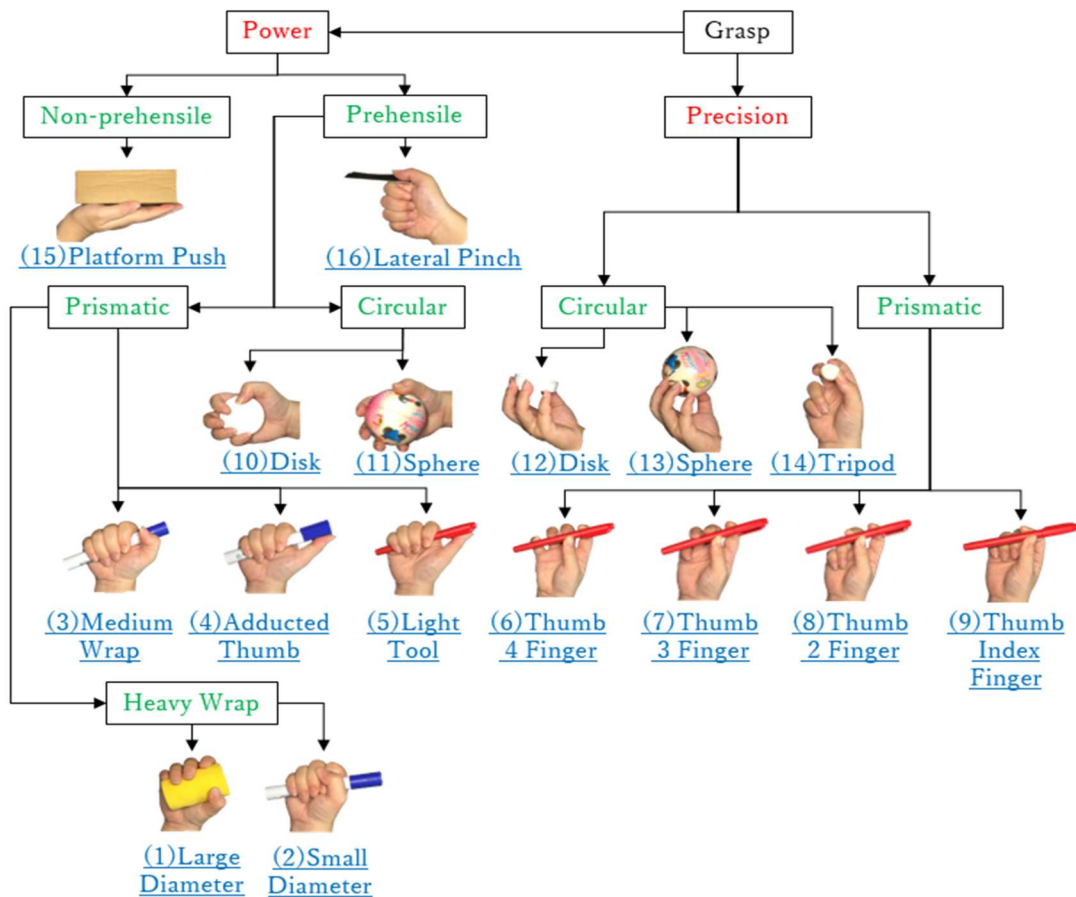


Fig.2.2 日常生活の16パターンの動作 ([X. Jing 2019]より)

この16パターンの動作に対して、把持の特徴を詳しく分析する：

1. Large Diameter：拇指が回内して、四指と対立になり、拇指と四指が共に円形の表面に沿って、屈曲状態を保ちながら、物体を把持する。
2. Small Diameter：四指が円形の表面に沿って屈曲し、物体を掌に握り込む。拇指は四指と対立し、物体と接触せずに四指のDIP関節を伸展側から押す。
3. Medium Wrap：四指が円形の表面に沿って屈曲し、物体を掌に握り込む。拇指は示指の側面にあり、回外側と物体を接触する。
4. Adducted Thumb：拇指は四指と並列した状態で、棒状の物体を押す同時に、四指も屈曲することによって、物体を手の中に少し回転し、斜めになって、新たなバランスに停止される。この際に、拇指は物体との接触は直線であるため、CM関節のみに屈曲して馴染み把持になる。四指において、物体と各指の接触断面からみると、どれも円形に沿う屈曲状態になっているが、各指がそれぞれの屈曲具合は異なって、物体の斜めの程度によって、順次に変化する。
5. Light Tool：四指が円形の表面に沿って屈曲し、物体を掌に握り込み、完全屈曲状

態に近くなる。拇指は四指と並列した状態で、CM 関節のみに屈曲して、棒状の物体を末節骨で押す。

6. Thumb-4 Finger：拇指が回内して、四指と対立になる。四指が屈曲し、拇指が CM 関節のみに屈曲して、五指の末節骨で一緒に細長い物体を掴まむ。

7. Thumb-3 Finger：拇指が回内して、四指と対立になる。四指が屈曲し、拇指が CM 関節のみに屈曲して、拇指と示指、中指、環指の末節骨で一緒に細長い物体を掴まむ。この際に、小指が引き続き屈曲していく。

8. Thumb-2 Finger：拇指が回内して、四指と対立になる。四指が屈曲し、拇指が CM 関節のみに屈曲して、拇指と示指、中指の末節骨で一緒に細長い物体を掴まむ。この際に、小指と環指が引き続き屈曲していく。

9. Thumb-Index Finger：拇指が回内して、四指と対立になる。四指が屈曲し、拇指が CM 関節のみ屈曲して、拇指と示指の末節骨で一緒に細長い物体を掴まむ。この際に、小指、環指と中指が引き続き屈曲していく。

10. Power Disk：拇指が四指と並列する位置にある。拇指が円盤状の物体の縁側に沿って屈曲して、四指の MP 関節がほぼ伸展状態のままで PIP と DIP 関節のみ屈曲させ、円盤を把持する。

11. Power Sphere：拇指は示指の側面にあり、五指が球状の表面に沿って屈曲する。五指が球体を掌に握り込む同時に、安定把持のために掌がアーチ形状に形成し、球体との接触面積を最大に図る。

12. Precision Disk：拇指が回内して、四指と対立する位置にある。それぞれ四指、拇指の CM 関節が屈曲して、五指の末節骨で円盤状の物体の縁側と接触し、掴まむ。ただし、小指、環指も物体と接触できるように、掌がアーチ形状になり、この二本指の末節骨をさらに屈曲方向に移動させる。

13. Precision Sphere：拇指が回内して、四指と対立する位置にある。それぞれ四指、拇指の CM 関節が屈曲して、五指の末節骨で球体を掴まむ。ただし、小指、環指も物体と接触できるように、掌がアーチ形状になり、この二本指の末節骨をさらに屈曲方向に移動させる。

14. Tripod：拇指が回内して、四指と対立する位置にある。それぞれ示指、中指、拇指の CM 関節が屈曲して、球体を三本指で掴まむ。この際に、小指と環指が引き続き屈曲していく。

15. Platform Push：拇指が四指と並列する位置にあって、五指が伸展状態を保ちながら、掌と共に平面状の物体をサポートする。

16. Lateral Pinch：拇指は示指の側面にあり、四指が屈曲しながら、拇指の CM 関節が屈曲して、平面状の物体を示指の中節骨の側面に押して把持する。

これらの動作パターンを Table.2.2 のように、実現にあたって、各関節、各指および掌の運動特徴によって、細かく分解して分析する。

Table.2.2 各動作の分解・特徴

Hand Motion	Grasp Motion	Characteristics		
		Four Fingers	Thumb	Palm
Hand Open	(15)	Extension	Extension Abduction	Flat
Lateral Grasp	(16)	Joints flex together	CM joint flexion Abduction	-
Power Grasp	(1), (2)	Joints flex together	Adapting flexion Adduction	Flat
	(3), (4), (5)	Joints flex together	CM joint flexion Abduction	Flat
	(10)	PIP & DIP joint flexion	Adapting flexion Abduction	Flat
	(11)	Joints flex together	Adapting flexion Abduction	Arch
Precision Grasp	(6)	Joints flex together	CM joint flexion Adduction	Arch
	(7)	Differentiation flexion	CM joint flexion Adduction	Arch
	(8), (9)	Differentiation flexion	CM joint flexion Adduction	-
	(12), (13)	Differentiation flexion	CM joint flexion Adduction	Arch
	(14)	Differentiation flexion	CM joint flexion Adduction	-

以上によって、結果を分析してまとめると：

五指：示指、中指、環指、小指の運動特徴が類似するが、拇指と四指は異なる。

四指：四指は三関節が一緒に屈曲するケースが多く（14回）、例外なのはMP関節がほぼ動かずにPIPとDIP関節のみの屈曲（1回）、および伸展状態の保持（1回）である。また、四指がそれぞれ違う運動を出す場面も多くて、異なる屈曲が存在する（6回）。すなわち、四指の任意の指にとって、規則な物体に対する三関節の同時屈曲を求めるほかに、不規則な物体に変形して馴染めるような把持も要求する。それに、四指全体にとって、物体の形状による指のそれぞれ異なる馴染み把持を望む。ただし、内転と外転はこの分類法で明示されていないが、一定の外転角度の存在によって、把持範囲の拡大に繋がる。

拇指：拇指はCM関節のみの屈曲による運動が多い（10回）が、物体と接触による全関節の馴染む屈曲も存在して（5回）、他には伸展状態の保持（1回）である。一方、拇指は四指と組み合わせて把持動作を完成するために、常に回内して四指と対立したり（9回）、回外して四指と並列あるいは側面にあったり（7回）する。要するに、拇指の回転運動を実現する以外、物体を把持する際に、指先の接触はIPとMP関節が動かずにCM関節だけの屈曲ができることと、指全体の接触の馴染み把持も同時に求め

る。

掌：掌は把持（8回）、あるいは把持の補助（4回）に欠かせない存在であり、時にアーチ形状に形成して物体を包み込んだり（1回）、指をさらに物体に近づいたり（4回）する。もしくは平面状にならして物体をサポートする（7回）。これによって、掌に小指・環指の中手骨におけるアーチの形成、およびならしになれることが共に求められる。

## 2.2 動作機能・メカニズム・アクチュエーター数の関係

このセクションは動作パターンの分析結果に基づいて、必要な機能を述べる。また、これらの機能を実現する前提に、本研究で提案したメカニズム、およびメカニズムで複数の機能を繋がって融和することによって、掌に埋めるアクチュエーターの数を効果的に減少する。最後に、メカニズムの構築のために、Table.2.1 に定義したハンドの寸法で指が運動する境界を設定する。

### 2.2.1 動作パターンに基づく必要な動作機能

2.1.2 節で述べた動作パターンの分析結果から、義手に 16 パターンの動作を再現するために、指関節の使用回数にかかわらず、使用した運動を重視する。要するに：

1. 四指に使う運動：四指の任意指における MP・PIP・DIP 関節の同時屈曲、PIP・DIP のみの屈曲（馴染み屈曲）、および四指全体の差動屈曲、伸展になる。
2. 拇指に使う運動：回内と回外の以外に、CM 関節のみの屈曲、馴染み屈曲、および伸展になる。
3. 掌に使う運動：環指・小指中手骨によって、形成したアーチ状と平面状になる。

これらの指関節の運動に基づいて、手指の運動特徴に従って、全部 7 つの機能を得られる：

**自動伸展機能：**五指の伸展において、本来なら動力で指関節を伸展側に運動させるが、把持する物体は掌の方向にあり、伸展するときには物体との接触は一切に関与しないため、アクチュエーターからの動力の配分は必要がなく、エネルギーを蓄えて自動的に回復させる機能にする。

**拇指回転機能：**拇指の回内・回外に応用して、動作パターンを果たすために、常に回転しながら、四指と組み合わせて使用するため、動力の配分が必要である。

**順序連動機能：**人間の拇指の屈曲は CM→MP→IP 関節の順に運動する特徴[川口 2009]を持つため、それを義手の拇指に再現するように、リーチングのときに、CM 関節のみを屈曲して、末節骨か中節骨を素早く物体に接近させる。また、グラスピングのときに、CM→MP→IP 関節の順に、先に物体と接触した関節が停止されても、残る関節が引き続き屈曲する。全部の関節が物体と接触になったら、物体の外形によって馴染み把持を形成する。そういった運動特徴に基づいて、順序に連動させる機能が必要である。ただし、動力の配分が必要になる。

**初期外転機能：**動作パターンの実現に影響はない限り、把持範囲を拡大するために、四指の初期位置を一定の角度で外転させて固定する。動力の配分は必要ではない。

**適応連動機能：**四指の屈曲において、人間の四指の運動特徴と同じように、PIP、DIP 関節は常に同じ角速度で連動しながら屈曲する[川崎 2009]。また、リーチングのときに MP、PIP、DIP 三関節が同時に屈曲[D. G. Kamper 2003]させて、グラスピングのとき



に、把持物体の形状によって、先に物体と接触した関節が停止されても、残る関節が継続に屈曲して、馴染み把持を実現する機能が必要となる。ただし、動力源が必要である。

差動屈曲機能：四指の全体にとって、把持物体の形状によって異なる屈曲の現象があり、それぞれの指が個別に運動が可能である。しかしながら、個別に運動する指が実際の把持には関与しない場合があるため、駆動力で把持をしている指を維持しながら、把持としない指を引き続き屈曲させる必要がある。

くぼみ機能：掌は物体と馴染み、アーチに形成したり、平面状になったりするのが球状、棒状との接触面積を常に最大にして、安定把持に役立つ。それに、駆動力を与えて、アーチ状と平面状の切り替える機能が必要になる。

### 2.2.2 メカニズムによるアクチュエーター数の決定

これらの機能に基づいて、動力源が必要としない自動伸展機能と初期外転機能を除いて、拇指、四指と掌を分けて、段階的に新しいメカニズムを与えて、機能を融和させて、アクチュエーター数を適宜に削減して、必要最少のアクチュエーター数を辿り着く。まず本来なら機能を果たすメカニズムによるアクチュエーター数を説明する：

1. 拇指：拇指回転機能には1個のアクチュエーターを与えて、回転軸による時計回り、反時計回りで回内、回外を果たす。また、順序連動機能において、CM、MP、IP関節が順次に個別な運動によって、それぞれの関節にアクチュエーターが必要で、計3個になる。このようなメカニズムを使って、全部に合わせると、拇指に使用するアクチュエーター数は4個になる。

2. 四指：四指の任意の指において、DIP関節をパッシブの構造でPIP関節と連動するうえに、PIP、CM関節には適応連動機能に従う同時屈曲と馴染み把持を両立するために、それぞれにアクチュエーターを1個与える。一方、四指の全体に対して、差動屈曲機能による各指の異なる屈曲が必要となり、指ごとに2個のアクチュエーターで駆動しているため、四本指には合計8個のアクチュエーターが必要になる。

3. 掌：くぼみ機能におけるアーチ状と平面状を切り替えるように、環指と小指中手骨にそれぞれのアクチュエーターが必要となって、合計2個のアクチュエーターを与える。

以上によって、これらの機能を全部一つの義手に組み込むには、Table.2.3に示したように、計14個のアクチュエーターが必要となって、掌に内包するのは不可能であり、外部にしか置かない状況に陥ってしまって、本研究の目的と相違である。

Table.2.3 機能に本来なら必要なアクチュエーター数

四指			拇指			掌			モーター 数合計
動作機能	メカニズム	モーター数	動作機能	メカニズム	モーター数	動作機能	メカニズム	モーター数	
自動伸展	バネ回復	0	自動伸展	バネ回復	0	自動伸展	バネ回復	0	14
初期外転	-	0	拇指回転	直接駆動	1	くぼみ	-	2	
適応連動	-	2×4=8	順序連動	-	3				
差動屈曲	-								

そのため、本研究では、機能を保つ前提に、拇指、四指、掌に対して、それぞれの既存研究の課題を踏まえて、検証、改良、進化などを行って、新しいメカニズムを提案して、アクチュエーター数を削減する：

1. 拇指：拇指回転機能には依然として1個のアクチュエーターで果たして、回転軸による時計回り、反時計回りで回内、回外を実現する。また、順序連動機能において、CM、MP、IP 関節が順次に個別な運動によって、第3章で詳しく説明するが、本研究では、各関節に伸展バネのパラメータを調整し、CM、MP、IP 関節の順にバネ定数を増加して、ワイヤ張力が一定の閾値に到達するとバネの反力を克服し、対応する関節を屈曲させるという閾値駆動のメカニズムを構築して、それぞれの関節をまとめて1個のアクチュエーターで稼働できるようになった。結果的に拇指に使用するアクチュエーター数は4個から2個までに減少した。

2. 四指：四指の任意の指において、PIP 関節と連動するパッシブのDIP 関節を変えずに、PIP、CM 関節は適応連動機能に従って、リーチングの同時屈曲、およびグラスピングの馴染み把持を両立するために、第4章で詳しく説明するが、本研究では、クラッチ機構を開発して、摩擦クラッチのメカニズムを構築する。すなわち、1本のワイヤを機構内に通して、両端がそれぞれPIP、CM 関節に連結する。結果的に、リーチングのときに、クラッチ機構内の静摩擦力が作用し、ワイヤの相対的な移動はなく、アクティブワイヤが機構の牽引によって、両端を同時に引っ張られて、ついでにPIP、CM 関節も同時に屈曲するが、グラスピングのときに、任意の関節が先に物体との接触で停止になって、クラッチ機構内の静摩擦力が一つの関節の停止によって、自動的に動摩擦力に変わって、残るもう一つの関節は継続的にアクティブワイヤが機構の牽引によって屈曲する。ゆえに、四指の任意の一本指において、アクチュエーターを1個まで抑えて、差動屈曲機能に満たす四指の全体に対して、アクチュエーター数を従来の8個から4個までに減らした。

3. 掌：くぼみ機能に関して、第5章で詳しく説明するが、本研究では、対称SEA 駆動のメカニズムを構築して、環指のCM 関節は一定の角度を空けて、連動機構を稼働して、小指のCM 関節を連れて連動する。それに、中手骨の両側に2個ずつのバネを設置して、対称となるSEA 駆動方式を構成し、物体との接触によって、アーチ状と平

面状の自動的な切り替えを果たす。結果的に、環指と小指のCM関節に使用するアクチュエーター数を2個から1個まで削減した。

Table.2.4 機能に新たなメカニズムによるアクチュエーター数の削減

四指			拇指			掌			モーター 数合計
動作機能	メカニズム	モーター数	動作機能	メカニズム	モーター数	動作機能	メカニズム	モーター数	
自動伸展	バネ回復	0	自動伸展	バネ回復	0	自動伸展	バネ回復	0	14 ↓ 7
初期外転	-	0	拇指回転	直接駆動	1	くぼみ	対称SEA 駆動	2-1	
適応連動	摩擦 クラッチ	2×4=8 ↓ 1×4=4	順序連動	閾値駆動	3-1				
差動屈曲	-								

以上によって、Table.2.4 に示したように、本来なら14個のアクチュエーターが7個まで削減したが、まだ数が多いため、手のサイズを超えて、内包できない状況になっている。結果的に本研究の目的と到底に合わなくなってしまうため、本研究では、機能を保つうえに、さらなる進化を遂行して、拇指、四指、掌の間に可能なメカニズムを有効的に融和して、アクチュエーター数をより一層に減少させる：

1. 拇指と掌：第5章で詳しく説明するが、拇指回転機能とくぼみ機能を融和して、拇指が回内するたびに、対称SEA駆動のメカニズムと連動して、アーチ状を徐々に形成する。物を把持すると外形によって掌は自動的に形状が変わり、拇指が回外すると掌が平面状に戻る。要するに、拇指回転機能とくぼみ機能の融和によって、アクチュエーター数をさらに2個から1個までに抑えることができた。

2. 四指：第4章で詳しく説明するが、四指の適応連動機能と差動屈曲機能を融和させて、摩擦クラッチのメカニズムを拡張して、ピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムに進化することによって、アクチュエーターを1本のアクティブワイヤを牽引して、第三層のクラッチ機構を引っ張って、ついでに機構内に通したワイヤが第二層の2個のクラッチ機構も引っ張る。それに、この第二層の2個のクラッチ機構はそれぞれ四本指にあるクラッチ機構を連結し、第一層として四指を駆動される。これによって、四指はリーチングのときに、関節のみならず指も同時に屈曲し、グラスピングのときに、各関節と各指は馴染み把持を果たせるようになった。結果的に、適応連動機能と差動屈曲機能の融和によって、アクチュエーター数をさらに4個から1個までに削減できた。

以上によって、Table.2.5 にピンク色の四角枠に示したように、機能を融和することで、アクチュエーター数をさらに7個から3個まで減少することができた。これで、手の中に埋め込めるサイズの範囲内に入って、モジュールとする義手の一体化は可能になり、本研究の目的と一致した。

Table.2.5 機能の融和によるさらなるアクチュエーター数の減少

四指			拇指			掌			モータ 数合計
動作機能	メカニズム	モータ数	動作機能	メカニズム	モータ数	動作機能	メカニズム	モータ数	
自動伸展	バネ回復	0	自動伸展	バネ回復	0	自動伸展	バネ回復	0	7 ↓ 3
初期外転	-	0	拇指回転	直接駆動	1	くぼみ	対称SEA 駆動	1→0	
適応連動	ピラミッド 式クラッチ 機構群	1×4=4 ↓ 1	順序連動	閾値駆動	1				
差動屈曲									

### 2.2.3 メカニズム構築のための運動境界設定

動作パターンの分析結果に基づいて、拇指、四指、掌の運動特性がそれぞれ異なるが、相違な運動で把持動作のバラエティーに貢献し、動作パターンを多様化になる。この中に共通点として、物体と接触すると形状に沿って屈曲し、最後にマーチングになって馴染み把持に変わる。ゆえに、メカニズムでより人間らしく自然な運動を再現するため、構築する際に、以下の運動境界を設定する：

拇指の屈曲・順序連動機能：リーチングとグラスピングの状態を分けて構築する。リーチングのときに、CM 関節のみの屈曲にする。グラスピングのときに、基本的に CM→MP→IP 関節の順に屈曲するが、仮に CM 関節をブロックされると MP→IP 関節の順に屈曲し、あるいは MP 関節をブロックされたら IP 関節のみの屈曲となる。

四指の屈曲・適応連動機能：同様にリーチングとグラスピングの状態を分けて構築する。リーチングの場合、三関節が同じ角速度で同時に屈曲にする。グラスピングの場合、MP 関節をブロックされると PIP、DIP 関節が引き続き同時に屈曲できる。PIP と DIP 関節は連動する性質が持っているため、PIP 関節がブロックされたら指全体の運動が停止になる。

掌・くぼみ機能：拇指回転機能と連動するため、拇指の回内と共にアーチ形状を形成する。対称 SEA 駆動のメカニズムを使用するため、アーチ形状の形成が早すぎると、拇指回内に司るアクチュエーターに余分な負荷をかかってしまう。逆に遅く形成すると、くぼみ機能が存分に発揮できず、把持動作に役立たなくなる。実際にアーチ形状に形成して把持、補助に使う動作パターンは(6) Thumb-4 Finger、(7) Thumb-3 Finger、(11) Power Sphere、(12) Precision Disk と(13) Precision Sphere となり、中に(6)と(7)は拇指が四指と対立の状態に比較して、(11)、(12)と(13)が対立する前にアーチの形成になれる。そのため、拇指が回内し始めて、最初の把持・補助動作をこなす時点、約回内 60 度を境にして、アーチの形成を完成させ、くぼみ機能をこれからの回内によって随時に作用できる。

## 2.3 まとめ

本章では、手の中に利用可能なスペースを説明してから、日常生活における 16 パターンの動作に基づいて、各動作、各関節の関連性と使用頻度を調べて、所要な 7 つの機能を抽出した：

1. 自動伸展機能：バネで五指、掌の中手骨の伸展を自動的にこなす機能である。
2. 順序連動機能：拇指の屈曲に応用し、リーチングのときに CM→MP→IP 関節の順に屈曲させて、グラスピングのときに馴染み把持を実現する機能である。
3. 拇指回転機能：拇指の回内・回外を果たす機能である。
4. 適応連動機能：四指の各指に応用し、リーチングのときに三関節を同時に屈曲させて、グラスピングのときに馴染み把持を実現する機能である。
5. 初期外転機能：四指の MP 関節を一定の外転角度で固定して、把持範囲を拡大するための機能である。
6. 差動屈曲機能：四指がそれぞれ異なる屈曲を実現する機能である。
7. くぼみ機能：掌をアーチ状と平面状の自由切替によって、リーチングの把持補助およびグラスピングの馴染み把持を実現する機能である。

本来なら、これらの機能をすべて実現すると、合計 14 個のアクチュエーターが必要となり、一体化の義手に応用できず、多数のアクチュエーターを義手の外部に置かなければならない。そのため、機能を保つ前提に、新たなメカニズムを提案し、アクチュエーター数を 7 個までに抑えられたが、義手に応用すると、まだ手の中に内包できなくて、モジュール化にならない。その原因で、さらなるアクチュエーター数の削減が必要となってくるため、機能を損失しない前提に、より巧みなメカニズムを構築し、可能な範囲内に機能を高度に融和させて、アクチュエータ数を効果的に 3 個まで減少できたほかに、義手の重量にも反映されて、軽くにできた。

そののち、以降の各章において、運動の計算領域を分画するため、指関節の運動境界を定義しておいた。

# 第3章 順序連動機能を有する拇指の 開発

---

3.1 拇指の運動特徴 .....	32
3.2 順序連動機能による特化した自動伸展機能 .....	34
3.2.1 既存研究及び課題 .....	34
3.2.2 重力を配慮した指の汎用モデル .....	37
3.2.3 伸展バネのパラメータ解析 .....	41
3.3 拇指における順序連動機能の実現 .....	48
3.3.1 順序連動機能に適した閾値駆動メカニズム .....	48
3.3.2 順序連動機能の性能及び出力検証 .....	53
3.4 まとめ .....	62

---

### 3.1 拇指の運動特徴

拇指は四指の運動と違って、CM 関節は掌の中に存在して、回内・回外と屈曲・伸展の二つの自由度が持っている。掌の外部で屈曲・伸展のみに可能とする MP と IP の二関節がある。CM 関節が回内・回外するたびに、四指との空間位置が変わるため、把持しようとする物体の位置や形状などによって、リーチングのときに計画的に動作しておく。さらに、回内・回外するとともに、屈曲・伸展による四指との接触位置も変わるため、さまざまな把持姿勢が果たす。要するに、手のいろいろな把持動作は拇指と四指の組み合わせによって実現可能になる。ゆえに、拇指は一本の指でありながら、四指の四本指と同様な重要性を持っている。

拇指における屈曲・伸展の特徴は、リーチングのときに先に CM 関節のみが屈曲して、把持物体に素早く接近する。物体と接触し始めるグラスピングの段階に入って、CM、MP、IP 関節の順に屈曲して[川口 2009]、先に物体と接触した関節が停止になって、完全に物体の外形とマッチングするまでに残る関節が引き続き屈曲していく。

本章では、拇指の屈曲・伸展の特徴に従って、三関節が順次に屈曲できる順序連動機能に閾値駆動のメカニズムを提案する。ただし、それを辿り着いて実現するためには、先に関節の運動軌跡の安定性に直ちに關わる自動伸展機能について詳しく説明する。従来研究に配慮していなかった重力の影響を含め、モデルの分析から、パラメータの解析を経て、バネ定数の選出に至る。最後に提案した閾値駆動のメカニズムに関する実験を行い、順序連動機能に応用した有用性を確かめる。

また、拇指 CM 関節の回内・回外に關与する拇指回転機能の説明については、第5章で掌の設計の部分に環指と小指のくぼみ機能とともに述べる。

本章に使う符号の表記を Table.3.1 のように示す。

Table.3.1 符号の表記

	拇指	中手骨	基節骨	末節骨
略称	$n = t$	$q = 1$	$q = 2$	$q = 3$
長さ	$L_t$	$L_{n1}$	$L_{n2}$	$L_{n3}$
重心/接触点	-	$R_{n1}$	$R_{n2}$	$R_{n3}$
質量	$m_t$	$m_{n1}$	$m_{n2}$	$m_{n3}$
重量	$G_t$	$G_{n1}$	$G_{n2}$	$G_{n3}$
バネ定数	-	$k_{n1}$	$k_{n2}$	$k_{n3}$
バネ初張力	-	$\sigma_{n1}$	$\sigma_{n2}$	$\sigma_{n3}$
伸び量	-	$x_{n1}$	$x_{n2}$	$x_{n3}$
弾性力	-	$K_{n1}$	$K_{n2}$	$K_{n3}$
ワイヤ張力	$T_t$	$T_{n1}$	$T_{n2}$	$T_{n3}$

---

ワイヤ走行距離	$s_t$	$s_{n1}$	$s_{n2}$	$s_{n3}$
屈曲側トルク	-	$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_{n3}$
伸展側トルク	-	$\kappa_{n1}$	$\kappa_{n2}$	$\kappa_{n3}$
関節トルク	-	$\tau_{n1}$	$\tau_{n1}$	$\tau_{n1}$
関節角度	-	$\theta_{n1}$	$\theta_{n2}$	$\theta_{n3}$
出力	-	$F_{n1}$	$F_{n2}$	$F_{n3}$



## 3.2 順序連動機能による特化した自動伸展機能

前述のように，順序連動機能を実現するために，先に指関節の運動軌跡を左右する自動伸展機能を議論する．このセクションでは，まず既存研究を述べるうえに残されている課題を挙げる．そして，問題を解決するために，指の汎用モデルを立ち上げ，各象限における重力の影響を明らかにする．それに基づいて，自動伸展機能を保つまま，三種のバネを比較して順序連動機能に適するバネのパラメータを算出して，選定する．

### 3.2.1 既存研究及び課題

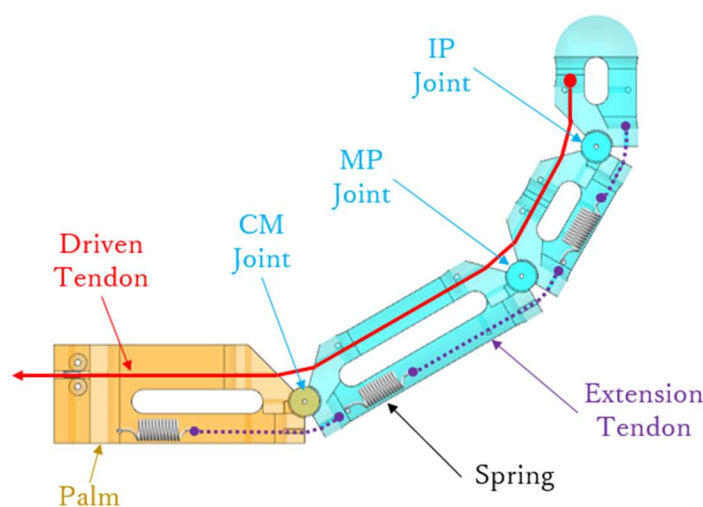


Fig.3.1 アクティブワイヤ1本の連動方式

指関節の連動において，もっとも使われるメカニズムは Fig.3.1 のように赤色のアクティブワイヤ1本で CM、MP と IP 関節を通して，一緒に連動させる方式である[Y. Liu 2014]. こういう一対三の連動は構造的に一番簡単でありながら，物体に対する馴染み把持も果たせるのは優れたポイントとして挙げられる．しかしながら，このメカニズムは冗長性を持っているため，指の姿勢が変われば重力の影響で運動軌跡も変わる．それに対して，従来研究では，常に変化する姿勢に対して重力は一意にならないため，指関節の質量を削減して重力の影響を減らす方法、あるいはバネ定数を調整しながら運動軌跡を安定させようとする方法も論じたが，実際に計算のときに重力を無視して省略されているうえに，実験のときにも指の屈曲方向に重力の影響が存在しない水平面において行っていた．結果的に実際の使用場面では重力の影響を水平面以外になくすことはなく，運動軌跡のばらつきによる制御精度が落ちる．そのため，このタイプのメカニズムを拇指に応用すると，IP→MP→CM 関節の逆順番の屈曲になり，運動特徴と相違でありながら，ワイヤの走行距離も長くて，関節を駆動するのに非効率になる以上，最重要課題になっているのは，上記の空間位置の変わりによる重力の

変化をもたらした関節の運動を一定にならず、ばらつきが存在していることである。

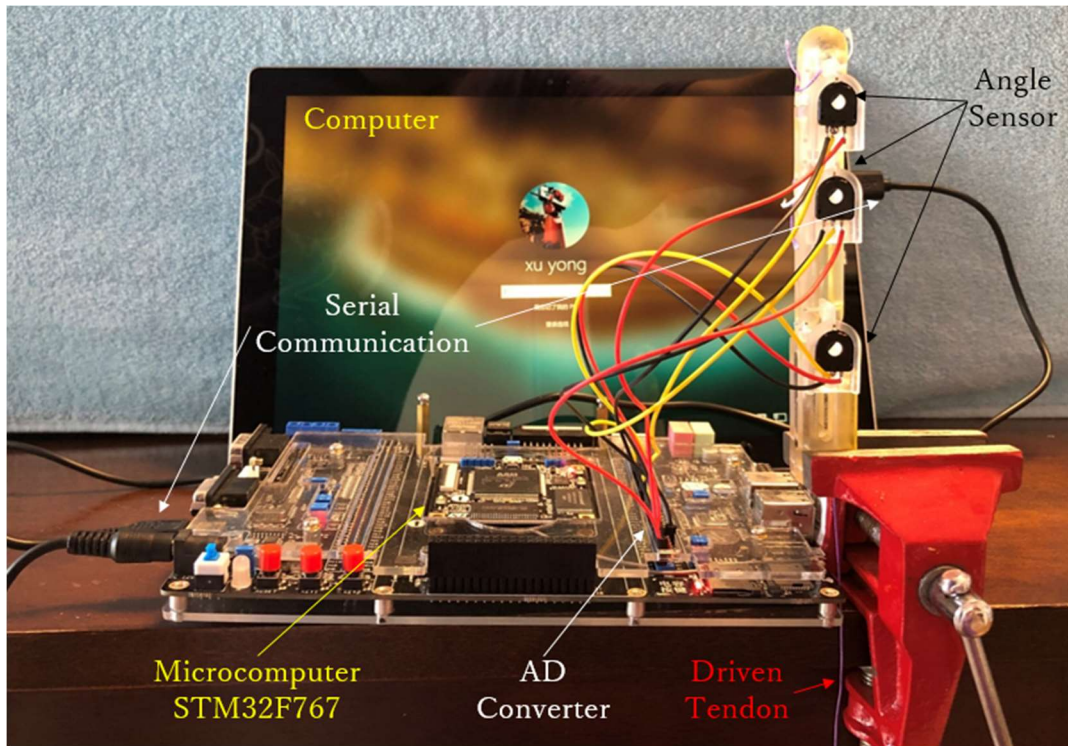


Fig.3.2 角度センサーによる関節角度のデータ読み取り

そのため、運動軌跡が重力の影響を受け、いかに変化するかを説明するために、Fig.3.2 のように実際の指関節に角度センサー（日本，アルプスアルパイン株式会社，ロータリタイプ RDC506018A）を装着して、ワイヤに分銅を吊り、重量を追加しつつ、四つの象限における重力の変化と共に、変わる角度のデータを AD コンバーターで変換し、マイコン（スイス，ST マイクロエレクトロニクス，STM32F767）で三つのチャンネルからのデータ読み取って、シリアル通信でパソコンへ転送した結果は Fig.3.3 のように示す。

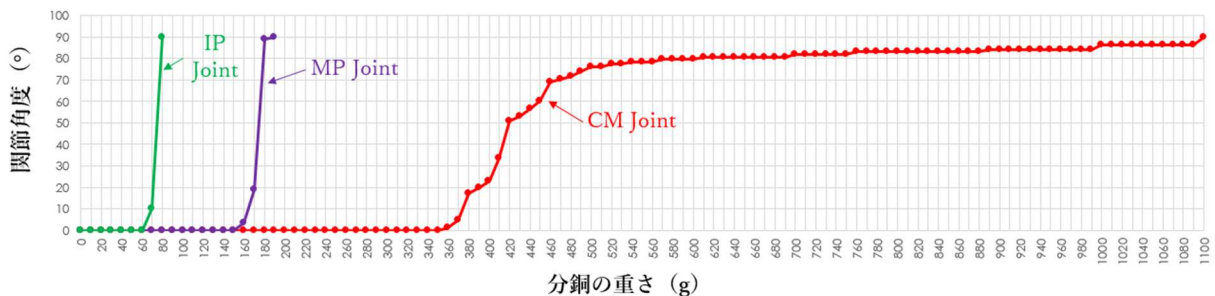


Fig.3.3.a 第一象限での角度変化

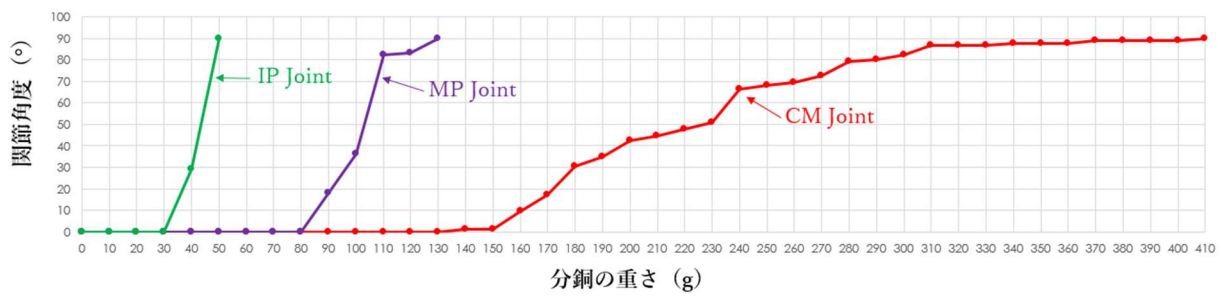


Fig.3.3.b 第二象限での角度変化

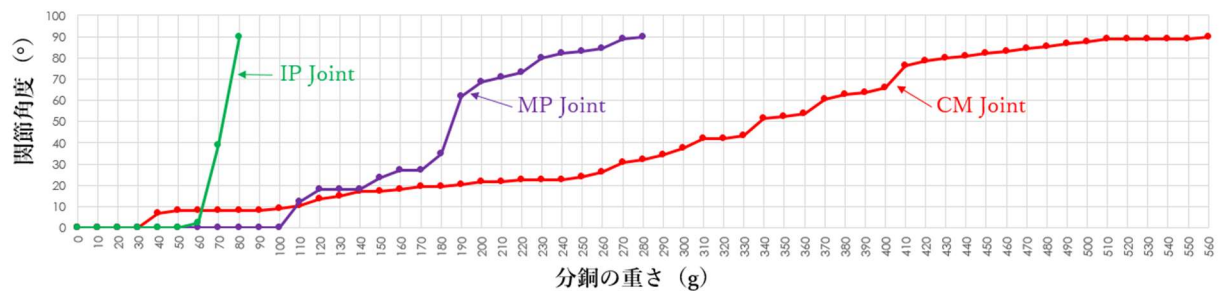


Fig.3.3.c 第三象限での角度変化

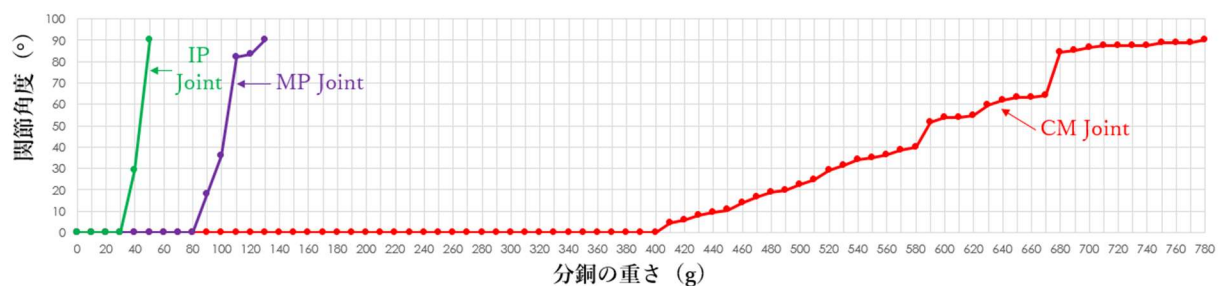


Fig.3.3.d 第四象限での角度変化

上記の結果から、象限によって指関節が受けた重力が異なるため、関節角度の変化も異なる。関節トルク項を一定にした前提で、重力項は象限の変化によって角度が変化して、指関節の運動軌跡を不安定する要因である。すなわち、指関節にかかる屈曲側のワイヤ張力トルク、伸展側の弾性力トルクと初張力トルクが変わらないが、重力が象限によって変わる。具体的に、第二、第三象限において指関節に正の仕事をして、第一、第四象限におくと負の仕事をする。そのため、弾性力トルクと初張力トルクに関わるバネがあらゆる状況においても指関節を機能できるようになる前提として、重力の影響を大きくなる張力の反力として、正の仕事をしているケースを探求する。そこで、第二象限ではワイヤの張力が増加するたびに、最初にバネの初張力を克服してから、徐々に増加してくる重力と弾性力を克服しつつあることに対して、第三象限ではワイヤの張力がゼロである時点からバネの初張力が最大の重力を克服しなければならない状況に陥り、第三象限のほうが更なる嚴重な状態である。ゆえに、これからの

解析は第三象限に絞って研究のターゲットにする。

一方、任意の関節に対して、重力のトルクは三関節の角度によって共に影響されて変化しつつある。要するに、一つの関節における重力のトルクは三つの変数に左右されることに対し、弾性力と初張力のトルクがそれぞれ対応する変数は各自の関節角度のみとなる。それに、ワイヤ張力は入力のパラメータであるため、コントロールできる一方、初張力はバネの固有特性としてバネ定数を選定するたびに定めることになるため、本研究ではバネのパラメータの探索から入手して、重力による角度変化のメカニズムを解明し、実験で検証する。

以上の課題から、一对三の連動によるメリットを保ちながら、自動伸展機能に使用するバネのパラメータを探索して、各関節を従来と一緒に屈曲から順次の屈曲に改良し、重力の影響を受けても、運動軌跡を安定させる目標とする。

### 3.2.2 重力を配慮した指の汎用モデル

手指の動作機能の実現に対して、さまざまなパラメータの探索が必要になるため、このセクションでは、空間に存在する指の位置に基づいて、四つの象限を分けて、重力を含むそれぞれの動力学モデルを立つ。ただし、このモデルは以降の第4章にも使用するため、四つの象限によってモデルを立つが、この章では拇指が第三象限のみの利用となる。

まず、Fig.3.4 に示したように、指が第一象限において、ラグランジュ法を用いてモデリングを行う。それに、ワールド座標系をCM関節の回転中心にする。ただし、数式を簡潔させるため、拇指の略称 $n = t$ を省略する。

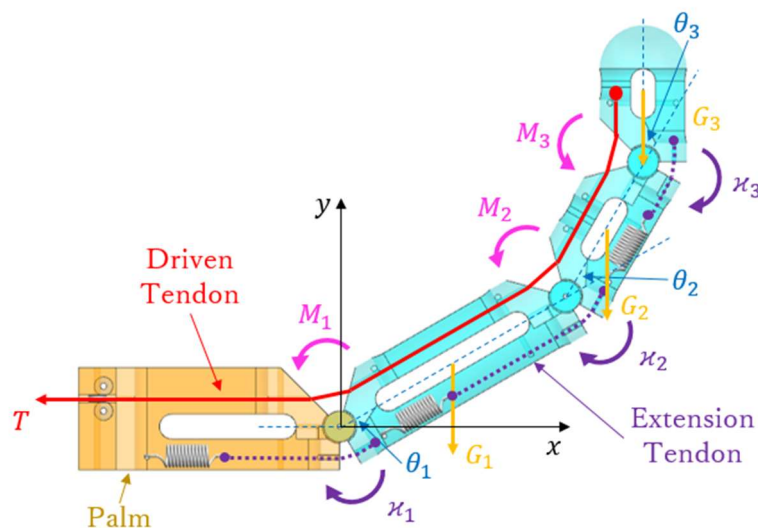


Fig.3.4 指の汎用モデル

よって、ローカル座標における各関節の重心の位置は：



$${}^q\mathbf{P} = \begin{bmatrix} R_q \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

同次変換行列は（ただし、 $C_q$ は $\cos \theta_q$ 、 $S_q$ は $\sin \theta_q$ とする）：

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & L_1 \\ S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & L_2 \\ S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

したがって、ワールド座標における各関節の回転半径の位置は下記の式で表す：

$${}^0\mathbf{P} = {}^0\mathbf{T}_1 \dots {}^{q-1}\mathbf{T}_q {}^q\mathbf{P} \quad (q = 1, 2, \dots)$$

相応に、速度は：

$${}^0\mathbf{V} = {}^0\dot{\mathbf{P}}$$

各関節の角速度と重力は下記のように：

$${}^0\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$${}^0\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}$$

$${}^0\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_q = \begin{bmatrix} 0 \\ m_q g \\ 0 \end{bmatrix}$$

それに、質点系の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーは：

$$E_K = \frac{1}{2} m_{11} {}^0\dot{\mathbf{P}}^T {}^0\dot{\mathbf{P}} + \frac{1}{2} m_{22} {}^0\dot{\mathbf{P}}^T {}^0\dot{\mathbf{P}} + \frac{1}{2} m_{33} {}^0\dot{\mathbf{P}}^T {}^0\dot{\mathbf{P}} + \frac{1}{2} I_{11} {}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}^T {}^0\dot{\boldsymbol{\omega}} + \frac{1}{2} I_{22} {}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}^T {}^0\dot{\boldsymbol{\omega}} + \frac{1}{2} I_{33} {}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}^T {}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}$$

$$E_P = \sum_{q=1}^3 \mathbf{G}_q {}^0\mathbf{P}$$

ラグランジュ関数を

$$L = E_K - E_P$$

とすると、動力学方程式は：

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_q} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_q} = \tau_q$$

よって、計算結果を得られて、簡潔に書くと：

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau}$$

ここで、 $\ddot{\boldsymbol{\theta}} = [\ddot{\theta}_1 \quad \ddot{\theta}_2 \quad \ddot{\theta}_3]^T$ 、 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T$ とする。それに、関節トルク $\boldsymbol{\tau}$ を求めるために、Fig.3.5のように各関節の幾何学による関係式を明らかにできる。

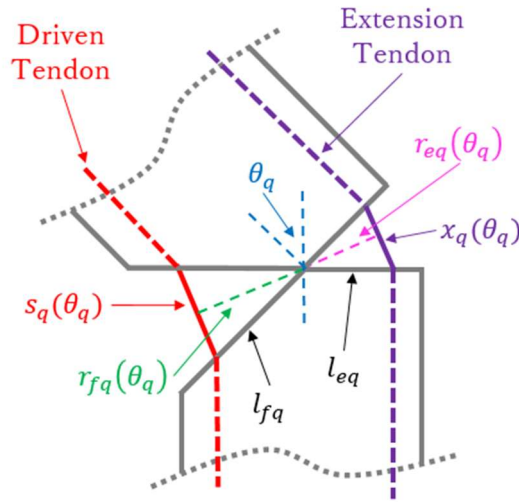


Fig.3.5 各関節の幾何学関係

よって、関係式は下記のようになる。中には、設計した構造によるパラメータ $l_{fq} = 4.5\sqrt{2}\text{mm}$ 、 $l_{eq} = 4.95\text{mm}$ を代入する：

$$\begin{cases} s_q(\theta_q) = 2l_{fq} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) = 9 \left( \cos\frac{\theta_q}{2} - \sin\frac{\theta_q}{2} \right) \\ x_q(\theta_q) = 2l_{eq} \sin\frac{\theta_q}{2} = 9.9 \sin\frac{\theta_q}{2} \\ r_{fq}(\theta_q) = l_{fq} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) = 4.5 \left( \cos\frac{\theta_q}{2} + \sin\frac{\theta_q}{2} \right) \\ r_{eq}(\theta_q) = l_{eq} \cos\frac{\theta_q}{2} = 4.95 \cos\frac{\theta_q}{2} \end{cases}$$

そこで、関節トルクを求める：

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 - \kappa_1 \\ M_2 - \kappa_2 \\ M_3 - \kappa_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.5T \left( \cos\frac{\theta_1}{2} + \sin\frac{\theta_1}{2} \right) - 24.5025k_1 \sin\theta_1 - 4.95\sigma_1 \cos\frac{\theta_1}{2} \\ 4.5T \left( \cos\frac{\theta_2}{2} + \sin\frac{\theta_2}{2} \right) - 24.5025k_2 \sin\theta_2 - 4.95\sigma_2 \cos\frac{\theta_2}{2} \\ 4.5T \left( \cos\frac{\theta_3}{2} + \sin\frac{\theta_3}{2} \right) - 24.5025k_3 \sin\theta_3 - 4.95\sigma_3 \cos\frac{\theta_3}{2} \end{bmatrix}$$

重力を受けている指関節において、各静的な状態から離散の位置ポイントによって総合的に分析する。また、各関節に対して、初期位置からある中間位置までに停止して分析を行うため、結果的に各関節の角加速度、角速度はゼロになる。そこで、動力学方程式は下記のようなになる：

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau}$$

すなわち、第一象限での重力項と関節トルク項を展開すると：

$$\begin{bmatrix} R_1 C_1 & R_2 C_{12} + L_1 C_1 & R_3 C_{123} + L_2 C_{12} + L_1 C_1 \\ 0 & R_2 C_{12} & R_3 C_{123} + L_2 C_{12} \\ 0 & 0 & R_3 C_{123} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 4.5T \left( \cos \frac{\theta_1}{2} + \sin \frac{\theta_1}{2} \right) - 24.5025k_1 \sin \theta_1 - 4.95\sigma_1 \cos \frac{\theta_1}{2} \\ 4.5T \left( \cos \frac{\theta_2}{2} + \sin \frac{\theta_2}{2} \right) - 24.5025k_2 \sin \theta_2 - 4.95\sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \\ 4.5T \left( \cos \frac{\theta_3}{2} + \sin \frac{\theta_3}{2} \right) - 24.5025k_3 \sin \theta_3 - 4.95\sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \end{bmatrix}$$

同様に、第二象限における動力学方程式は：

$$\begin{bmatrix} -R_1 S_1 & -R_2 S_{12} - L_1 S_1 & -R_3 S_{123} - L_2 S_{12} - L_1 S_1 \\ 0 & -R_2 S_{12} & -R_3 S_{123} - L_2 S_{12} \\ 0 & 0 & -R_3 S_{123} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 4.5T \left( \cos \frac{\theta_1}{2} + \sin \frac{\theta_1}{2} \right) - 24.5025k_1 \sin \theta_1 - 4.95\sigma_1 \cos \frac{\theta_1}{2} \\ 4.5T \left( \cos \frac{\theta_2}{2} + \sin \frac{\theta_2}{2} \right) - 24.5025k_2 \sin \theta_2 - 4.95\sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \\ 4.5T \left( \cos \frac{\theta_3}{2} + \sin \frac{\theta_3}{2} \right) - 24.5025k_3 \sin \theta_3 - 4.95\sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \end{bmatrix}$$

第三象限の動力学方程式は：

$$\begin{bmatrix} -R_1 C_1 & -R_2 C_{12} - L_1 C_1 & -R_3 C_{123} - L_2 C_{12} - L_1 C_1 \\ 0 & -R_2 C_{12} & -R_3 C_{123} - L_2 C_{12} \\ 0 & 0 & -R_3 C_{123} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 4.5T \left( \cos \frac{\theta_1}{2} + \sin \frac{\theta_1}{2} \right) - 24.5025k_1 \sin \theta_1 - 4.95\sigma_1 \cos \frac{\theta_1}{2} \\ 4.5T \left( \cos \frac{\theta_2}{2} + \sin \frac{\theta_2}{2} \right) - 24.5025k_2 \sin \theta_2 - 4.95\sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \\ 4.5T \left( \cos \frac{\theta_3}{2} + \sin \frac{\theta_3}{2} \right) - 24.5025k_3 \sin \theta_3 - 4.95\sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \end{bmatrix}$$

第四象限の動力学方程式は：

$$\begin{bmatrix} R_1 S_1 & R_2 S_{12} + L_1 S_1 & R_3 S_{123} + L_2 S_{12} + L_1 S_1 \\ 0 & R_2 S_{12} & R_3 S_{123} + L_2 S_{12} \\ 0 & 0 & R_3 S_{123} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 4.5T \left( \cos \frac{\theta_1}{2} + \sin \frac{\theta_1}{2} \right) - 24.5025k_1 \sin \theta_1 - 4.95\sigma_1 \cos \frac{\theta_1}{2} \\ 4.5T \left( \cos \frac{\theta_2}{2} + \sin \frac{\theta_2}{2} \right) - 24.5025k_2 \sin \theta_2 - 4.95\sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \\ 4.5T \left( \cos \frac{\theta_3}{2} + \sin \frac{\theta_3}{2} \right) - 24.5025k_3 \sin \theta_3 - 4.95\sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \end{bmatrix}$$

### 3.2.3 伸展バネのパラメータ解析

上記のモデルによって、任意の関節角度に対して、三つの関節の重力によって共に影響されているため、計算結果は一意にならず、論理的に解明するのが非常に困難である。しかし、弾性力と初張力の場合、それぞれ関節各自に所要のバネに関与しているため、冗長性はなく、計算で容易に関節角度との関係を明確できるため、バネのパラメータの探索を行う。得た第三象限の運動方程式によって、各関節の長さ、重さを設計で均一化にさせると、重力と重力のトルクも定着になる。式を洗練させて、計算もしやすくなるため、まずは設計のパラメータを変更する：

$$\begin{aligned} L_1 &= L_2 = L_3 = L \\ R_1 &= R_2 = R_3 = R \\ m_1 &= m_2 = m_3 = m \end{aligned}$$

また、バネのパラメータの設定に関して、それぞれ最小组、均一組と超過組とする。最小组は、任意の姿勢においても各関節を伸展状態に保てる必要最小のバネ定数にするグループである。均一組は、CM関節のバネ定数を依然と最小にして、MP、IP関節のバネ定数をCM関節と同様にするグループである。超過組はMP、IP関節のバネ定数を均一組より全部大きくして、IP関節のほうはMP関節よりさらに大きくするグループである。これから三つの組に対して検証を行う。

#### A. 最小组：

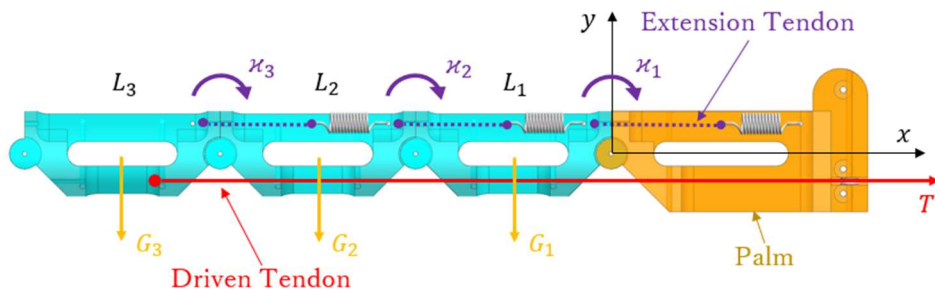


Fig.3.6 最大重力に置く均一化設計の指



まずは最小組のバネのパラメータを求める. Fig.3.6 に示すように, 指関節の重力が最大になる姿勢において, 必要最小の弾性力と釣り合う関係式は:

$$\boldsymbol{\kappa} = \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & L + R & 2L + R \\ 0 & R & L + R \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \mathbf{G}$$

ただし, 製作に使う材料の密度は  $\rho = 1.18\text{kg/m}^3$  であるため,  $m = 3.068 \times 10^{-3}\text{kg}$  を得るほか, 設計のパラメータから  $L = 32\text{mm}$ ,  $R = 16\text{mm}$  を式に代入して, 伸展側トルクを得られる (単位は Nmm) :

$$\begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.32 \\ 1.92 \\ 0.48 \end{bmatrix}$$

それに,  $l_{eq} = 4.95\text{mm}$  のため, 各関節の最小弾性力は (単位は N) :

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8727 \\ 0.3879 \\ 0.097 \end{bmatrix}$$

これを基準値として, Table.3.2 に示したように, 最小組のバネのパラメータ (日本, 株式会社アキュレイト, DE 規格引張コイルバネ) を選出できる.

Table.3.2 最小組バネのパラメータ

	中手骨	基節骨	末節骨
バネ定数 N/mm	0.471	0.1	0.043
バネ初張力 N	1.059	0.412	0.108

これらのバネを指関節に装着し, 第三象限にてワイヤの張力を増加しつつあり, 角度を測って変化の結果は Fig.3.7 のように表す.

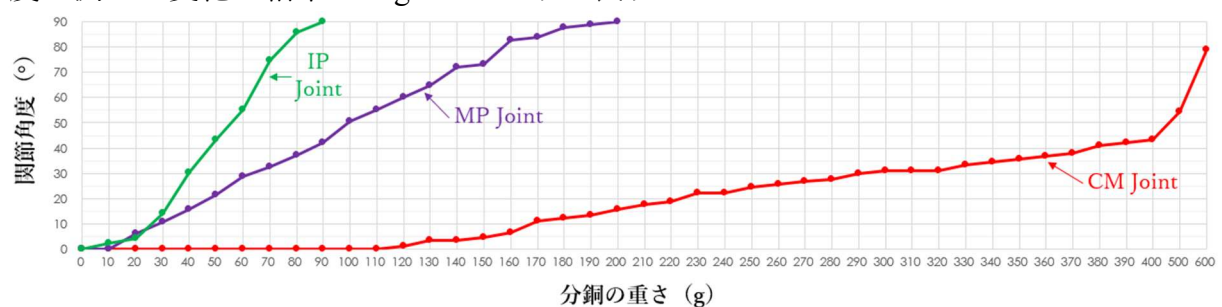


Fig.3.7 最小組の運動軌跡

結果からみると, ワイヤの張力の増加につれて, 最初に IP、MP 関節が順に屈曲し始めて, 先に IP 関節が限界の 90 度までになってから, CM 関節が屈曲し始める. 最後に MP、CM 関節が順に次々と限界の 90 度まで屈曲する. CM 関節の屈曲は三関節すべての反力, 重力, 弾性力, 初張力と釣り合っているため, 屈曲しにくくなる. 相対的に IP 関節は自身の反力を克服すれば屈曲し始めるようになり, 90 度までにされ

る間に張力は MP 関節を動かせる力が到達するため、IP と MP 関節と一緒に屈曲していく。IP 関節が先に 90 度まで屈曲してから、張力が継続的な増加によって、CM 関節も動き出す。そのため、各関節はワイヤの張力に対する反力の小ささによって、屈曲しやすさの順番が理解できる。結果的に、IP→MP→CM 関節の逆順の運動になったため、順序運動機能に満足できない。

**B. 均一組：**

引き続き、この現象をさらに探求するために、均一組は Table.3.3 に示したように、最小組の CM 関節を基準として、三関節のバネのパラメータを同様にする：

Table.3.3 均一組バネのパラメータ

	中手骨	基節骨	末節骨
バネ定数 N/mm	0.471	0.471	0.471
バネ初張力 N	1.059	1.059	1.059

最小組と同じ測り方で、得られたワイヤの張力と角度の変化関係を Fig.3.8 のように表す。

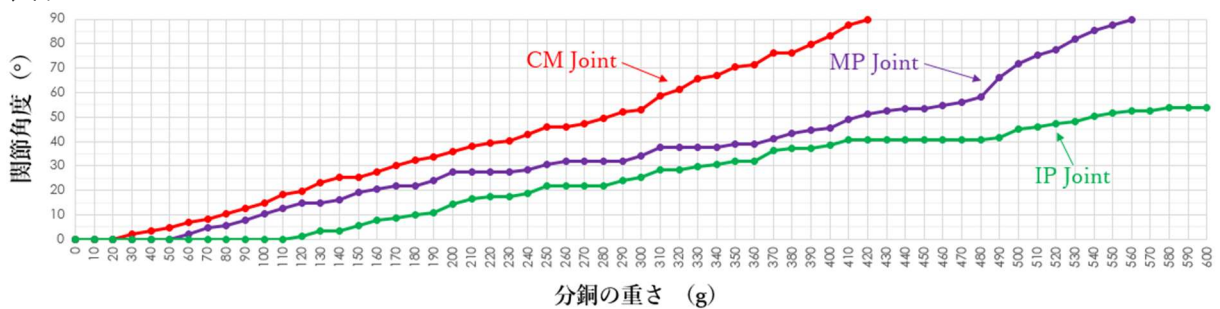


Fig.3.8 均一組の運動軌跡

結果に基づいて、始まるころは CM 関節が少し屈曲してから、MP、IP 関節が順に次々と屈曲し始まる。各関節が 90 度に至るまでに、先に動き出す関節は止まらずに、後に屈曲し始まる関節と共に運動し続ける。最後に、同様な順に CM、MP、IP 関節が次々と 90 度の限界に至る。要するに、関節が屈曲する順番が最小組と逆になる運動現象が表して、拇指に必要とする順序運動機能の特徴に合ったが、まだ中には三関節と一緒に屈曲するプロセスが存在しているため、MP、IP 関節に対応するバネのパラメータの調整が必要である。

**C. 超過組：**

引き続き、順序運動機能を完全に再現するために、均一組から関節が逆順番の運動現象をターゲットにして、CM 関節のバネ定数は依然と最小組と同様にするほか、基準として MP、IP 関節に使うのを順に増大する。よって、超過組のバネのパラメータ

を Table.3.4 のように設定する：

Table.3.4 超過組バネのパラメータ

	中手骨	基節骨	末節骨
バネ定数 N/mm	0.471	1.599	4.05
バネ初張力 N	1.059	3.609	8.865

同様に、測ったワイヤの張力と角度の変化関係を Fig.3.9 のように表す。

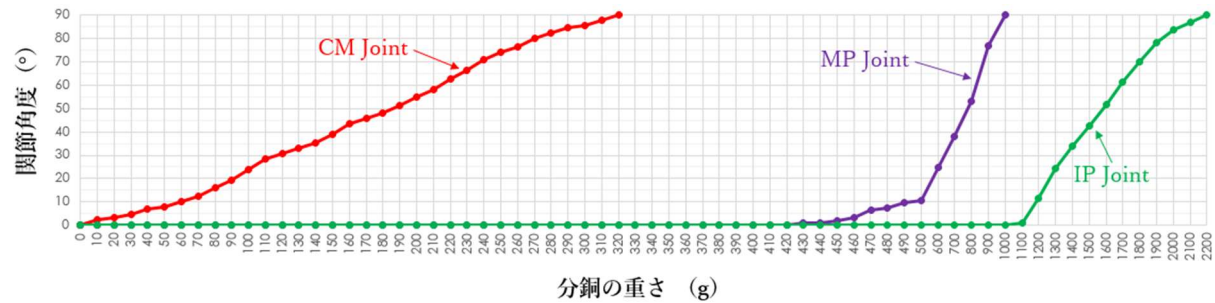


Fig.3.9 超過組の運動軌跡

グラフの結果から、張力を増やし続けることによって、指関節が CM、MP、IP の順に運動するようになった。MP、IP 関節が動かず、先に CM 関節が屈曲し始めて 90 度に至る。次に、CM 関節は 90 度の位置を維持しながら、IP 関節が動かずに MP 関節が屈曲して 90 度に至った。最後に、CM、MP 関節が 90 度の状態を保て、IP 関節のみに屈曲した。これで、屈曲は CM→MP→IP 関節の順番になったほか、段階的に前の関節が 90 度に達した後から、次の関節が屈曲し始めるため、順序連動機能に満足した。

次に運動方程式を用いて超過組の運動を解明する。ただし、CM 関節に使うバネのパラメータを基準として、MP、IP 関節を検証する。最初に屈曲する CM 関節において、角度が 0 から 90 度までの運動過程は下記の式で表す：

$$-[RC_1 \quad RC_{12} + LC_1 \quad RC_{123} + L(C_{12} + C_1)]\mathbf{G} = \boldsymbol{\tau}_1$$

張力、弾性力、初張力、および重力と  $\theta_1$  の変化を得られて、Fig.3.10 に表す。

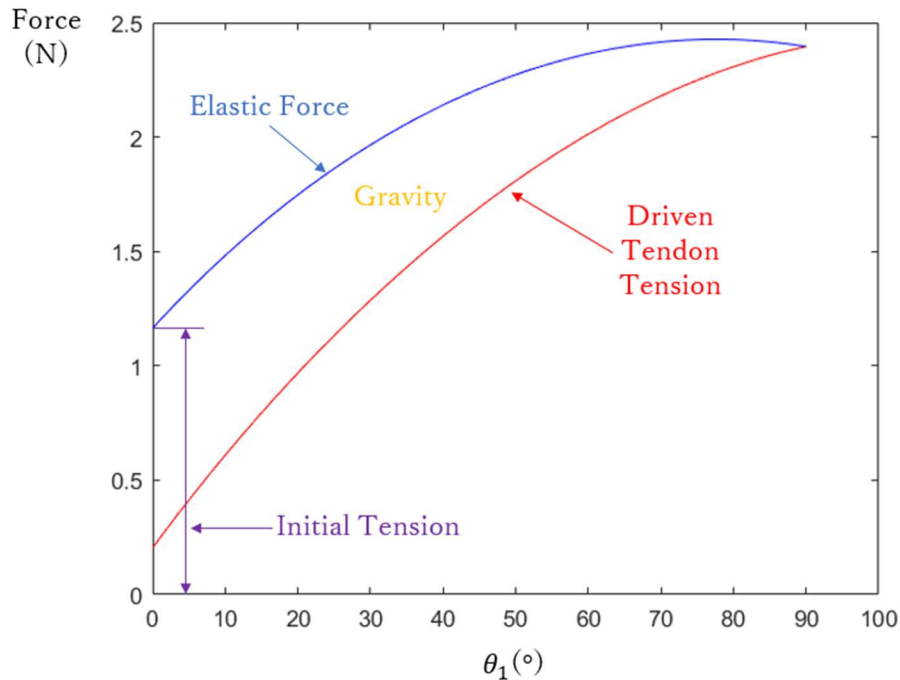


Fig.3.10 張力・弾性力・初張力・重力と CM 関節角度の変化

中には、赤色はワイヤの張力、青色はバネの弾性力、紫色はバネの初張力を示す。ただし、以降も同様に、弾性力と初張力はそれぞれ張力側に変換したものとする。グラフの結果によって、最初に張力と重力は共にバネの初張力を克服し、関節が動き始めて、角度が変化するようになっていく。そして、弾性力が重力と張力を受けながら変化しつつある。重力は赤色と青色に囲まれた領域になる。すなわち、弾性力は重力と張力の和に意味している。それに、重力が右側に行くほど減り続けて、最後にゼロになることは、CM 関節が 270 度に到達して重力が関節にかけるトルクがなくなる意味にしている。グラフから最大張力は：

$$T_1 = 2.3959\text{N}$$

ついでに、この状態における MP、IP 関節に必要な初張力を求めて、設定したパラメータが満足していることを確かめる：

$$\sigma_2 = 2.1781\text{N} < 3.609\text{N}$$

$$\sigma_3 = 2.1781\text{N} < 8.865\text{N}$$

それから、MP 関節における運動過程は：

$$-[0 \quad RC_{12} \quad RC_{123} + LC_{12}]\mathbf{G} = \tau_2$$

よって、MP 関節のバネ定数の範囲を確定できる。ただし、 $T_2 > T_1$  は条件とする：

$$k_2 > 0.2328\text{N/mm}$$

これらのパラメータと設けた設定条件を代入して、各種の力と  $\theta_2$  の関係図が Fig.3.11 に表せる。

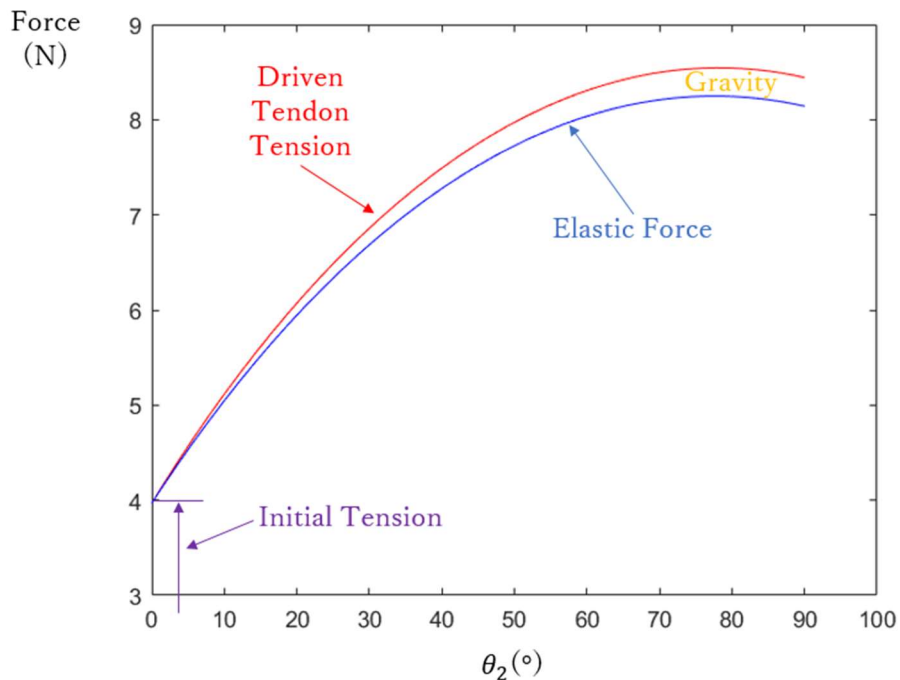


Fig.3.11 張力・弾性力・初張力・重力と MP 関節角度の変化

グラフの結果からみると、赤色の張力は逆に青色の上になる。原因として、MP 関節はワールド座標で 270 度から屈曲し始まって、重力が負の仕事をしているため、重力のトルクがゼロから徐々に増加していく。よって、この状態の最大張力と IP 関節に必要な初張力を得る：

$$T_2 = 8.4431\text{N}$$

$$\sigma_3 = 7.5786\text{N} < 8.865\text{N}$$

最後に、同じ手法で IP 関節における運動過程は：

$$-[0 \quad 0 \quad RC_{123}]\mathbf{G} = \tau_3$$

したがって、IP 関節のバネ定数の範囲を明らかにできる。ただし、 $T_3 > T_2$ の条件にする：

$$k_3 > 1.1103\text{N/mm}$$

同様に、得たパラメータと設けた設定条件を代入して、各種の力と  $\theta_3$  の関係図が Fig.3.12 に示す。

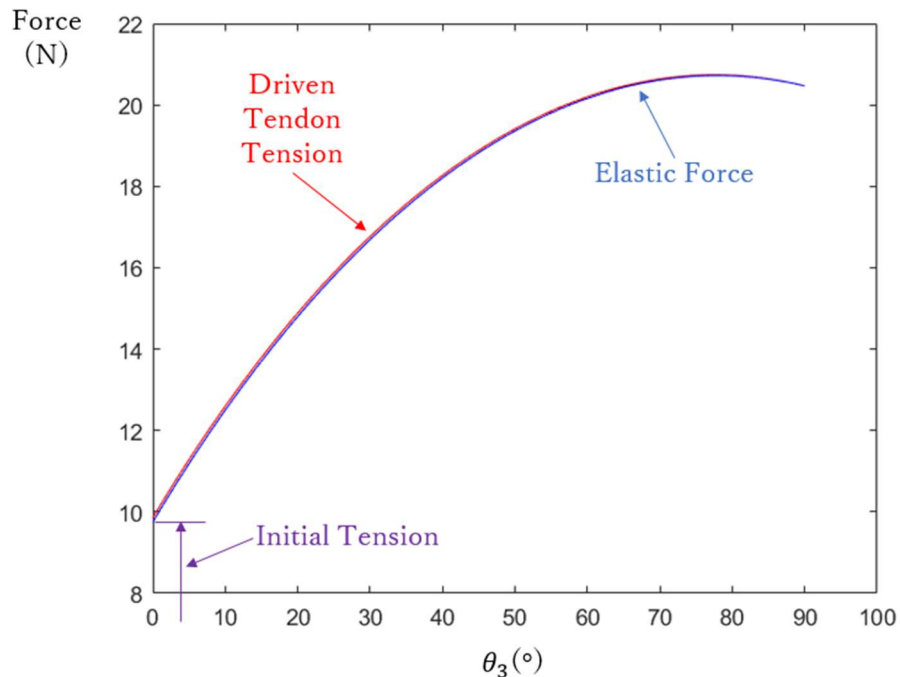


Fig.3.12 張力・弾性力・初張力・重力と IP 関節角度の変化

結果のグラフが MP 関節と類似しているが、異なるところとして、IP 関節はワールド座標で 0 度から屈曲して、重力が負の仕事をしているため、重力トルクが徐々に減少していく。この過程の最大張力は：

$$T_3 = 20.469\text{N}$$

以上の結果によって、順序連動機能に関与する各関節の運動角度を算出したほかに、関節の張力・弾性力・初張力・重力との関係を解明した。特に、特徴に満足した関節の運動軌跡は、張力の増加につれ、重力のみならず次々とバネの弾性力と初張力を克服して、屈曲していけるようになった。このように、関節を一定の力の閾値に到達してから動き始まるメカニズムは、閾値駆動のメカニズムと定義して、実際の拇指の設計に応用させて、詳しく説明する。それに、超過組に使用したバネのパラメータによって、CM と MP 関節の間に余分な弾性力が存在していて、次の力の閾値に達するまでに待ち時間が発生して、MP 関節が屈曲し始まるまでに非効率である。そのため、拇指の設計に重力を考慮した閾値駆動メカニズムの理論によって、待ち時間を消去する。



### 3.3 拇指における順序連動機能の実現

このセクションでは、前述した指関節を次々と順番に屈曲させる閾値駆動メカニズムを用いて、義手に使える拇指に応用する。そのため、拇指は必要なパラメータで設計して、バネのパラメータは重力を考慮した閾値駆動メカニズムの理論解析によって決定する。それに、拇指に対するモデル解析を行って、動作、出力の検証を実施して、有用性を確認する。

#### 3.3.1 順序連動機能に適した閾値駆動メカニズム

拇指の設計をしてから、製作、組み立った様子は Fig.3.13 のように表す。

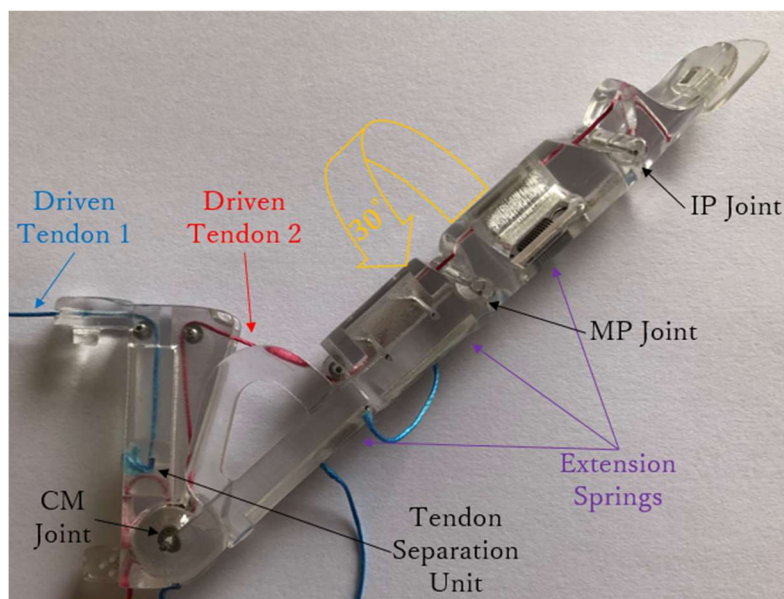


Fig.3.13 製作した拇指

中には、赤色のアクティブワイヤが IP、MP 関節を貫通し、虎口、ワイヤ二分化ユニットを経過して CM 関節の近く固定する。青色のワイヤがアクチュエーターに巻き取られ、ワイヤ二分化ユニットを牽引するたびに、赤色のワイヤも引かれて指関節を屈曲させる。ただし、赤色のワイヤによる走行距離が長いため、ワイヤ二分化ユニットを使用することで、走行距離を半分にすることができた。それに、人間の拇指と同様、示指と拇指の末節骨の夾角を 30 度[NEDO 2018]にするために、拇指の基節骨が中手骨の軸回りより 30 度回外の構造にして、末節骨も同様に回外される。

また、自動伸展バネの選択について、前述した重力を考慮した閾値駆動メカニズムの理論解析によって行う。そのため、まずは拇指の力学モデルを立ち上げ、運動方程式を求める。モデルを Fig.3.14 のように表して、ワールド座標系を CM 関節の屈曲回転中心にする。ただし、図の中に重力は明示していないが、指関節に -y 軸の方向にかけている。

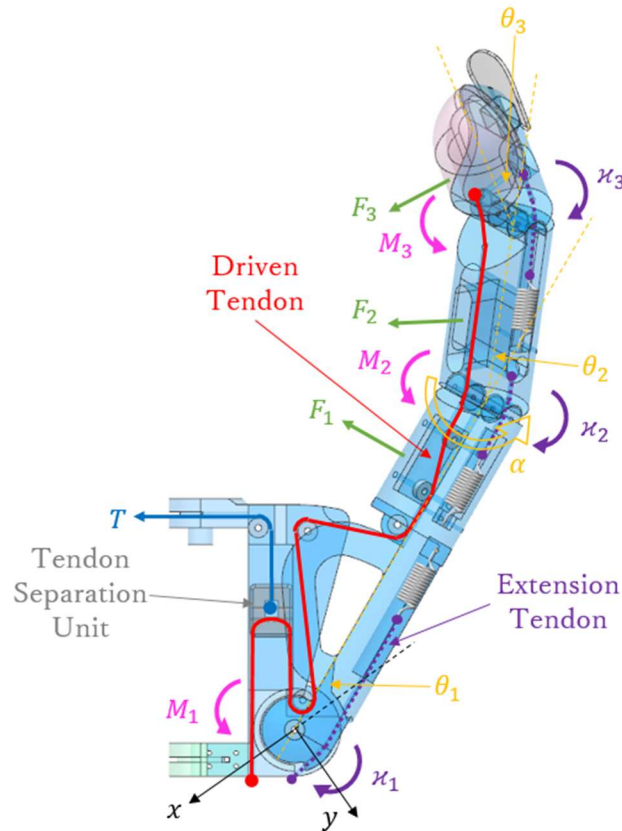


Fig.3.14 拇指の力学モデル

よって，ローカル座標における各関節の接触点の位置は：

$${}^q\mathbf{P} = \begin{bmatrix} -R_q \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

同次変換行列は（ただし， $C_q$ は $\cos \theta_q$ 、 $S_q$ は $\sin \theta_q$ 、 $\alpha = 30^\circ$ とする）：

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & -L_1 \\ C_\alpha S_2 & C_\alpha C_2 & S_\alpha & 0 \\ -S_\alpha S_2 & -S_\alpha C_2 & C_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & -L_2 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



したがって、ワールド座標における各関節の回転半径の接触点は下記の式で表す：

$${}^0\mathbf{P} = {}^0\mathbf{T} \cdots {}^{q-1}\mathbf{T}^q \mathbf{P} \quad (q = 1, 2 \cdots)$$

一方、伸展側および屈曲側トルクを求めるために、Fig.3.3 に示したように、各関節の幾何学による関係式を計算する。ただし、設計による構造のパラメータは（単位は mm）：

$$\begin{cases} l_{f1} = 32 \\ l_{f2} = 3.9 \cos^{-1} \frac{\pi}{8} \\ l_{f3} = 3.9\sqrt{2} \\ l_{e1} = 7.5 \\ l_{e2} = l_{e3} = 5 \end{cases}$$

よって、CM 関節における幾何学の関係式は：

$$\begin{cases} s_1 = 2l_{f1} \sin\left(\frac{\pi}{12} - \frac{\theta_1}{2}\right) \\ x_1 = \theta_1 r_{e1} \\ r_{f1} = l_{f1} \cos\left(\frac{\pi}{12} - \frac{\theta_1}{2}\right) \\ r_{e1} = l_{e1} \end{cases}$$

MP 関節における幾何学の関係式は：

$$\begin{cases} s_2 = 2l_{f2} \sin\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta_2}{2}\right) \\ x_2 = 2l_{e2} \sin \frac{\theta_2}{2} \\ r_{f2} = l_{f2} \cos\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta_2}{2}\right) \\ r_{e1} = l_{e2} \cos \frac{\theta_2}{2} \end{cases}$$

IP 関節における幾何学の関係式は：

$$\begin{cases} s_3 = 2l_{f3} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_3}{2}\right) \\ x_3 = 2l_{e3} \sin \frac{\theta_3}{2} \\ r_{f3} = l_{f3} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_3}{2}\right) \\ r_{e3} = l_{e3} \cos \frac{\theta_3}{2} \end{cases}$$

これらのパラメータに基づいて、関節トルクの関係式は：

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 - \kappa_1 \\ M_2 - \kappa_2 \\ M_3 - \kappa_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16T \cos\left(\frac{\pi}{12} - \frac{\theta_1}{2}\right) - 7.5^2 k_1 \theta_1 - 7.5 \sigma_1 \\ 1.95T \cos^{-1} \frac{\pi}{8} \cos\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta_2}{2}\right) - 25k_2 \sin \theta_2 - 5\sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \\ 1.95\sqrt{2}T \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_3}{2}\right) - 25k_3 \sin \theta_3 - 5\sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \end{bmatrix}$$

そして、上記の各関節の接触点を用いて、各関節の幾何学パラメータ、関節トルク項などを代入して、下記の重力を含む第三象限の力学方程式を書ける：

$$\begin{bmatrix} -R_1 C_1 & -R_2(C_1 C_2 - C_\alpha S_1 S_2) - L_1 C_1 & E_{13} \\ 0 & -R_2(S_1 C_2 + C_\alpha C_1 S_2) - L_1 S_1 & E_{23} \\ 0 & 0 & E_{33} \end{bmatrix} \mathbf{G} \begin{bmatrix} 1 \\ C_\alpha \\ C_\alpha \end{bmatrix} = \boldsymbol{\tau}$$

レイアウトが足りないため、式の中には：

$$\begin{aligned} E_{13} &= -R_3[C_3(C_1 C_2 - C_\alpha S_1 S_2) - S_3(C_1 S_2 + C_\alpha S_1 C_2)] - L_2(C_1 C_2 - C_\alpha S_1 S_2) - L_1 C_1 \\ E_{23} &= -R_3[C_3(S_1 C_2 + C_\alpha C_1 S_2) - S_3(S_1 S_2 - C_\alpha C_1 C_2)] - L_2(S_1 C_2 + C_\alpha C_1 S_2) - L_1 S_1 \\ E_{33} &= R_3 S_\alpha S_{23} + L_2 S_\alpha S_2 \end{aligned}$$

それに、CM 関節が伸展状態を保てる最小初張力を求める。ただし、CM 関節の伸展側トルクは三関節を共に伸展するため、MP 関節における 30 度回外の構造による影響を無視でき、式を簡潔になる：

$$\kappa_1 = [R_1 \quad L_1 + R_2 \quad L_1 + L_2 + R_3] \mathbf{G}$$

算出した最小弾性力を基準にして、それぞれ MP、IP 関節の運動条件を力学方程式に代入して、各関節のバネのパラメータを得られて、拇指に応用するバネを Table.3.5 に表すように選出する：

Table.3.5 順序連動機能に適したバネのパラメータ

	中手骨	基節骨	末節骨
最小弾性力 N	0.8456	0.8893	1.9081
バネ定数 N/mm	0.637	0.26	0.961
バネ初張力 N	1.0	1.01	2.403

以上のパラメータによって、各関節の変化をそれぞれ得られて、結果は Fig.3.15、Fig.3.16 および Fig.3.17 に示す。

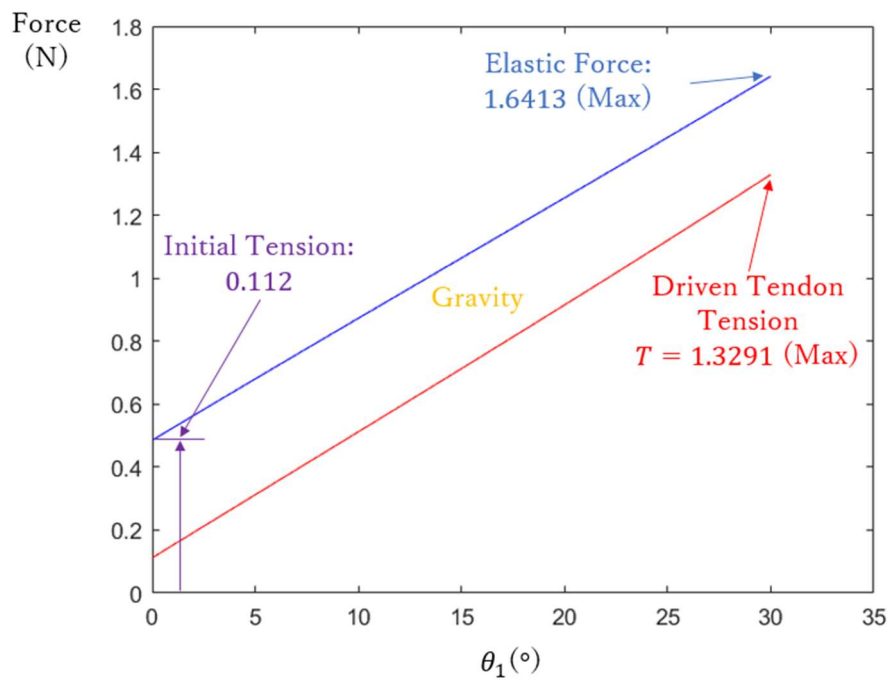


Fig.3.15 拇指 CM 関節の運動変化

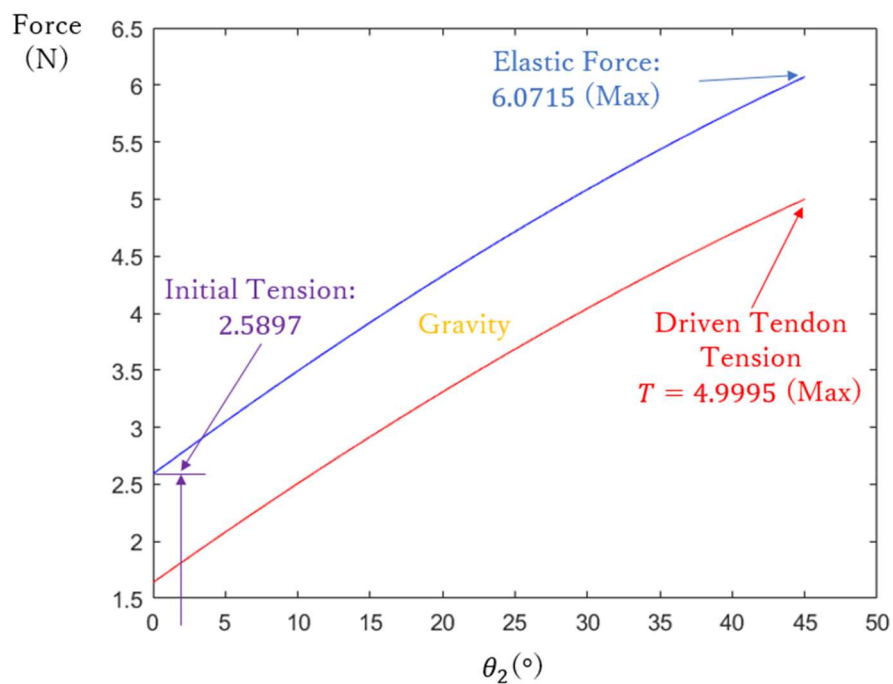


Fig.3.16 拇指 MP 関節の運動変化

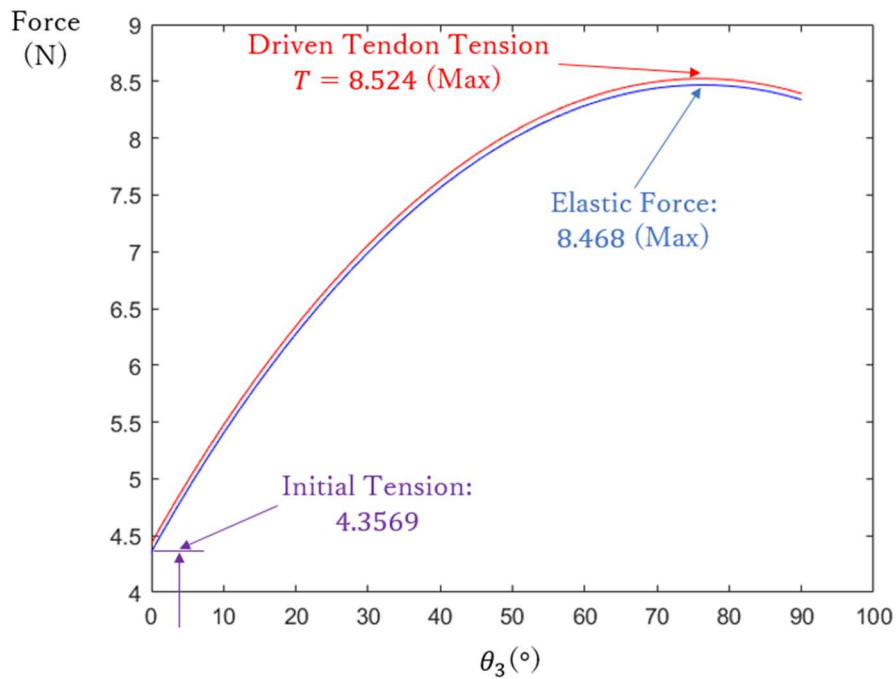


Fig.3.17 拇指 IP 関節の運動変化

### 3.3.2 順序連動機能の性能及び出力検証

前セクションで計算した拇指の運動を検証するために、計算結果に基づいて、実際に制作した拇指を用いて、バイスで各象限で固定し、アクティブワイヤに吊る分銅を追加し続けることによって、運動軌跡は全部同じく、Fig.3.18 に示したように、リーチングのときに CM 関節のみの屈曲になり、グラスピングのときに CM→MP→IP 関節の順に次々と屈曲する。これで、特化した自動伸展機能を用いて、閾値駆動メカニズムによる運動軌跡のばらつきを消去して、安定性を持つことを確認できた。

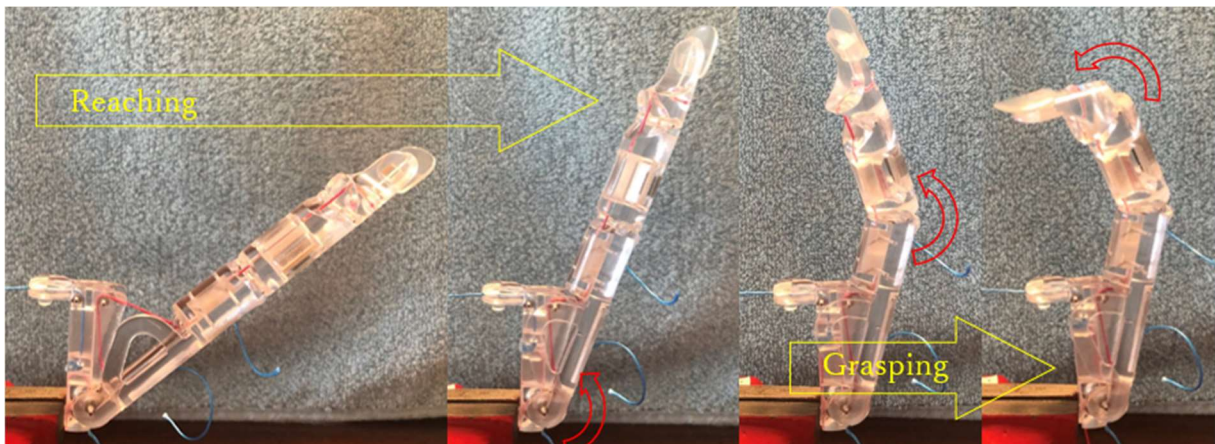


Fig.3.18 閾値駆動メカニズムによる順序連動機能の運動プロセス

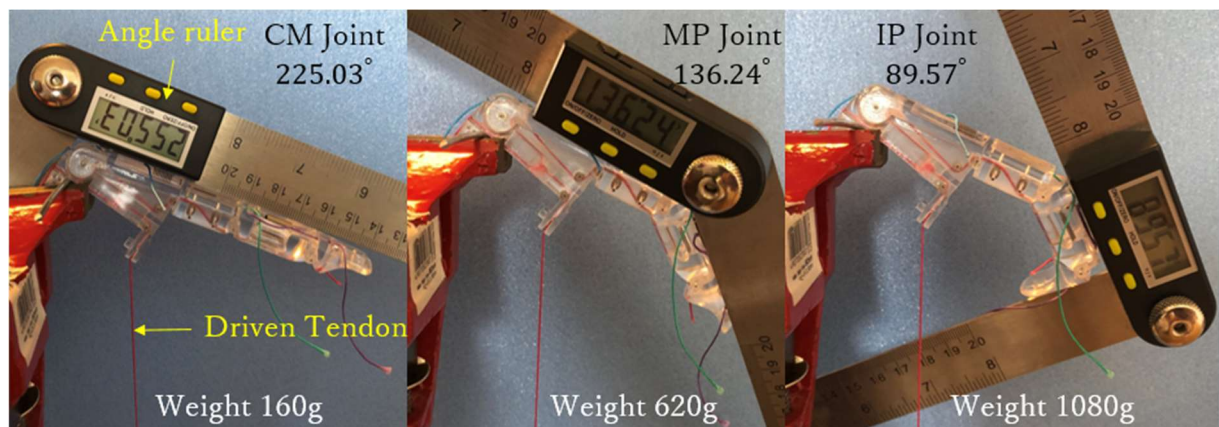


Fig.3.19 運動プロセスの動作検証

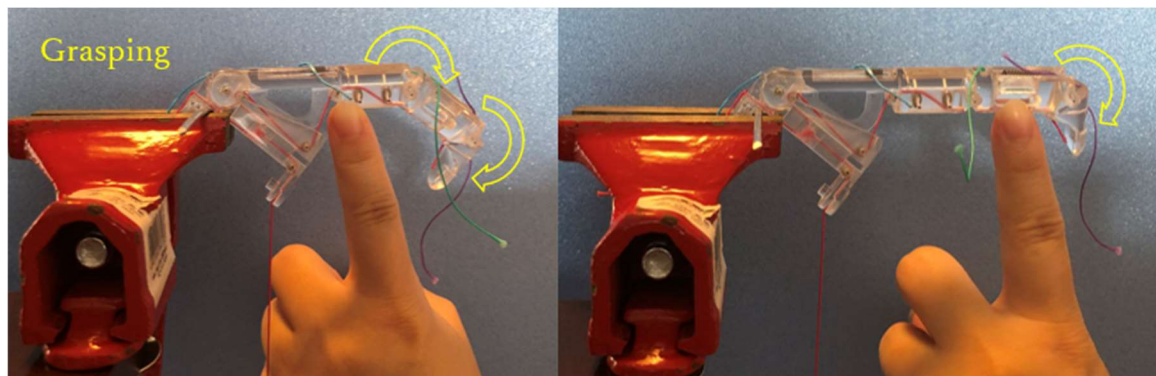


Fig.3.20 関節のブロックによるグラスピングの動作検証

そして、Fig.3.19のように、外力による関節ブロックを除いたリーチングからグラスピングまでの運動プロセスに関する検証では、拇指を第三象限において、デジタル角度定規（中国，東莞三量精密量儀有限公司，187-201）を使って、分銅による屈曲した関節角度を測る．CM関節の初期位置は45度で，走行角度は30度であり，底辺の180度から限界まで屈曲した角度は225度になる．この位置において，Fig.3.15のワイヤ張力の理論値は1.3291Nに対し，実際分銅による張力は1.568Nである．同様に，MP関節の走行角度は45度であり，この位置でワイヤ張力の理論値がFig.3.16から4.9995Nに対し，6.076Nになる．最後に，IP関節の走行角度は90度であり，ワイヤ張力の理論値がFig.3.17から8.542Nに対し，実測は10.584Nになる．以上によって，ワイヤ張力が関節を順次に屈曲させるたびに，誤差が累積して徐々に増加するが，設けたメカニズムは外乱のないときに設計通りになって，正確性を確かめた．一方，外力で関節をブロックしたグラスピングの検証において，Fig.3.20に示したように，外力によって任意の関節を停止されても，残る関節が継続的に屈曲し続けて，馴染み把持の実現を確かめた．これで，提案した閾値駆動メカニズムによる順序連動機能の実現を確かめた．

次に、Fig.3.19 の状態から各関節の出力を測る。そのため、最初は拇指の力学モデルから得た運動方程式を引き続き利用して、各関節における出力の理論値を算出してから、実際に出力を測って、理論値と比較して実測値による計算や設計の正確性を確かめる。

よって、まずは各関節の出力を仮定する：

$${}^q\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ -F_q \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

回転行列は：

$${}^0\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ C_\alpha S_2 & C_\alpha C_2 & S_\alpha & 0 \\ -S_\alpha S_2 & -S_\alpha C_2 & C_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

そこで、仮想仕事原理によって下記の式が立つ。ただし、 $\mathbf{J}^T$ はヤコビの転置行列である：

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_{q=1}^3 {}^0\mathbf{J}^T {}^0\mathbf{F}_q$$

したがって、関節の出力を算出する：

$$\left\{ \begin{array}{l}
 F_1 = -\frac{1}{R_1 R_2 R_3} (L_1 L_2 \cos \alpha \cos \theta_2 \cos \theta_3 + L_1 R_3 \cos \alpha \cos \theta_2) \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 3.9\sqrt{2}T \cos\left(\frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4}\right) - 25k_3 \sin \theta_3 - 5\sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \\
 -\frac{1}{2}G_3 \sin 2\alpha [R_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin \theta_2]
 \end{array} \right\} \\
 +\frac{1}{R_1 R_2} \cos \alpha (R_2 + L_1 \cos \theta_2) \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 2.11T \cos\left(\frac{\theta_2}{2} - \frac{\pi}{8}\right) - 25k_2 \sin \theta_2 - 5\sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \\
 +G_2 \cos \alpha [R_2 (\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \alpha \cos \theta_1 \sin \theta_2) + L_1 \sin \theta_1] \\
 +G_3 \cos \alpha \left[ \begin{array}{l}
 L_1 \sin \theta_1 + L_2 (\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \alpha \cos \theta_1 \sin \theta_2) \\
 +R_3 \left( \begin{array}{l}
 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \alpha \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\
 -\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \alpha \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3
 \end{array} \right)
 \end{array} \right]
 \end{array} \right\} \\
 +\frac{1}{R_1} \left\{ \begin{array}{l}
 16T \cos\left(\frac{\theta_1}{2} - \frac{\pi}{12}\right) - 56.25k_1 \theta_1 - 7.5\sigma_1 + G_1 R_1 \cos \theta_1 \\
 +G_2 \cos \alpha [R_2 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \cos \alpha \sin \theta_1 \sin \theta_2) + L_1 \cos \theta_1] \\
 +G_3 \cos \alpha \left[ \begin{array}{l}
 L_1 \cos \theta_1 + L_2 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \cos \alpha \sin \theta_1 \sin \theta_2) \\
 +R_3 \left( \begin{array}{l}
 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \alpha \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\
 -\cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \alpha \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3
 \end{array} \right)
 \end{array} \right]
 \end{array} \right\} \\
 F_2 = -\frac{1}{R_2 R_3} \left[ \begin{array}{l}
 3.9\sqrt{2}T \cos\left(\frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4}\right) - 25k_3 \sin \theta_3 - 5\sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \\
 -\frac{1}{2}G_3 \sin 2\alpha [R_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin \theta_2]
 \end{array} \right] \\
 +\frac{1}{R_2} \left\{ \begin{array}{l}
 2.11T \cos\left(\frac{\theta_2}{2} - \frac{\pi}{8}\right) - 25k_2 \sin \theta_2 - 5\sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \\
 +G_2 \cos \alpha [R_2 (\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \alpha \cos \theta_1 \sin \theta_2) + L_1 \sin \theta_1] \\
 +G_3 \cos \alpha \left[ \begin{array}{l}
 L_1 \sin \theta_1 + L_2 (\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \alpha \cos \theta_1 \sin \theta_2) \\
 +R_3 \left( \begin{array}{l}
 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \alpha \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\
 -\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \alpha \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3
 \end{array} \right)
 \end{array} \right]
 \end{array} \right\} \\
 F_3 = \frac{1}{R_3} \left\{ \begin{array}{l}
 3.9\sqrt{2}T \cos\left(\frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4}\right) - 25k_3 \sin \theta_3 - 5\sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \\
 -\frac{1}{2}G_3 \sin 2\alpha [R_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin \theta_2]
 \end{array} \right\}
 \end{array} \right.$$

以上の計算に基づいて、パラメータと境界条件を代入し、それぞれ $F_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, T)$ 、 $F_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3, T)$ と $F_3(\theta_2, \theta_3, T)$ の解答を得られる。

次に、 $F_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, T)$ において、物体を把持する際に、CM関節が先に屈曲して物体と接触したら停止になるため、境界条件が $\theta_2 = \theta_3 = 0$ である。よって、計算した結果は三次元グラフの Fig.3.21 で表現できる。ワイヤ張力の増加につれて、CM関節角度が増加しつつあり、出力 $F_1$ も徐々に増加していく傾向がある。



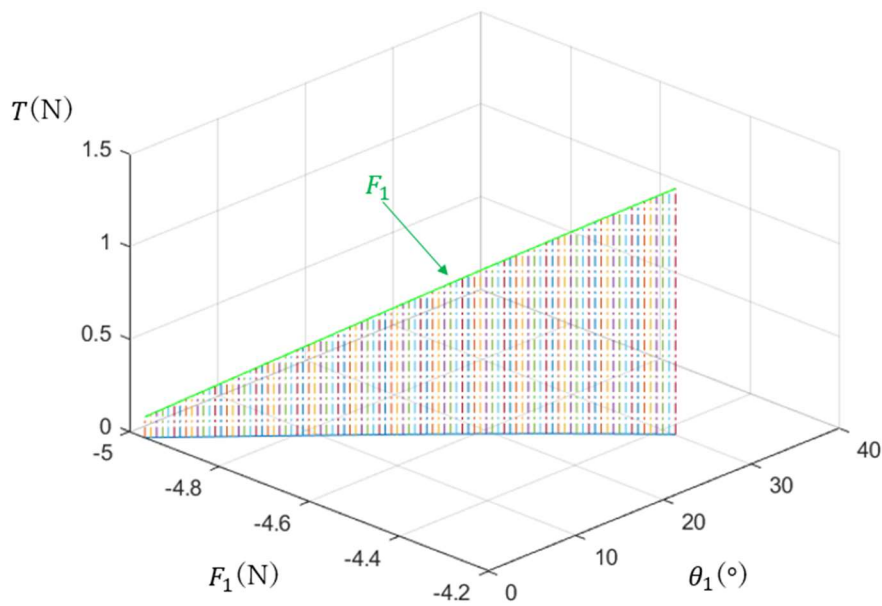


Fig.3.21 CM 関節の出力変化

それから、 $F_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3, T)$ において、CM 関節がすでに屈曲して物体との接触で停止になっている。ワイヤ張力が引き続き増加して、MP 関節が屈曲し、物体と接触して停止に至る。境界条件が $\theta_3 = 0$ を代入して、結果は三次元グラフの Fig.3.22 で表現する。ワイヤ張力の増加につれて、MP 関節角度が増えつつあり、出力 $F_2$ も徐々に増加していく傾向がある。

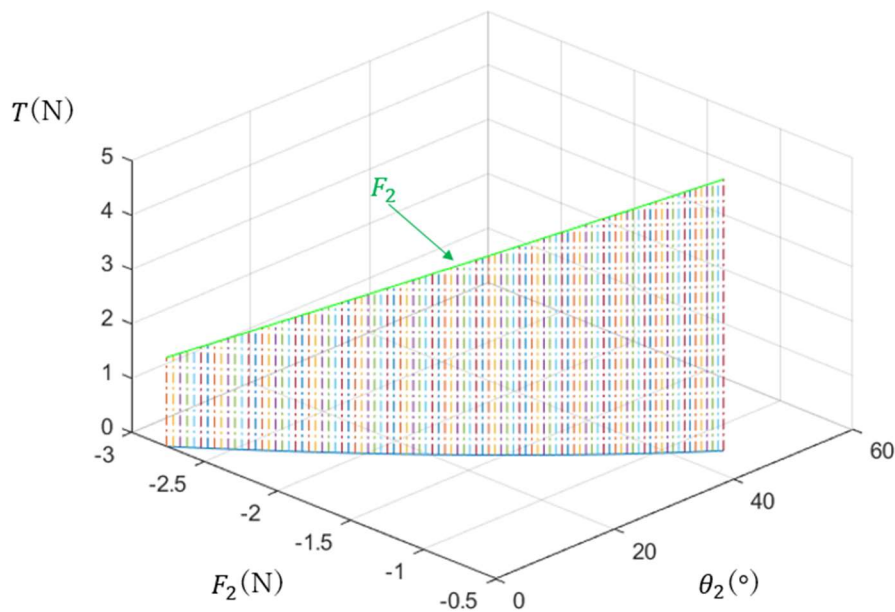


Fig.3.22 MP 関節の出力変化

最後に、 $F_3(\theta_2, \theta_3, T)$ において、CM、MP 関節がすでに屈曲して物体との接触で停止



になっている。ワイヤ張力がさらに増加して、IP 関節が屈曲し、物体と接触して停止に至り、指全体に馴染む把持の動作が完成する。結果は三次元グラフの Fig.3.23 で表現する。ワイヤ張力の増加につれて、IP 関節角度が増えつつあり、出力 $F_3$ も徐々に増加していく傾向がある。

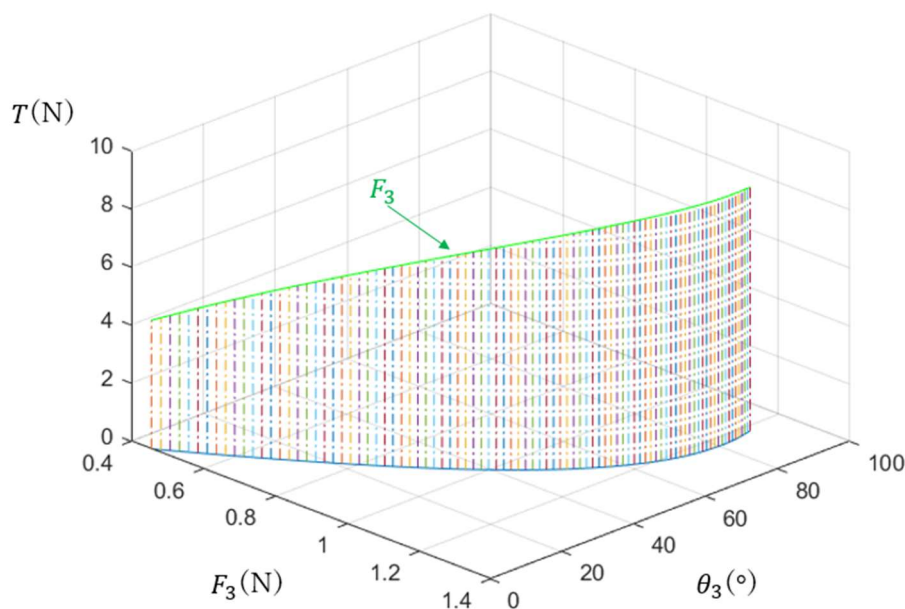


Fig.3.23 IP 関節の出力変化

以上の理論値に基づいて、Fig.3.24 のように実際の出力を測定する。実験の内容としては、製作した拇指をバイスで第三象限の位置で挟んで、Fig.3.19 と同じ重さの分銅をワイヤに吊り、各関節の出力をフォースゲージ（中国、東莞三量精密量儀有限公司、SL-50）で測る。それに、デジタル角度定規を使って、予め設定した角度でフォースゲージの測る停止位置として関節の伸展方向の運動を阻止する。任意の設定角度に対して5回ずつを測って、実測値を記録する。ただし、各関節において、事前にそれぞれの重心位置に小さい穴を開け、測るときに穴をフォースゲージの先端の押す位置として目印の役割をする。

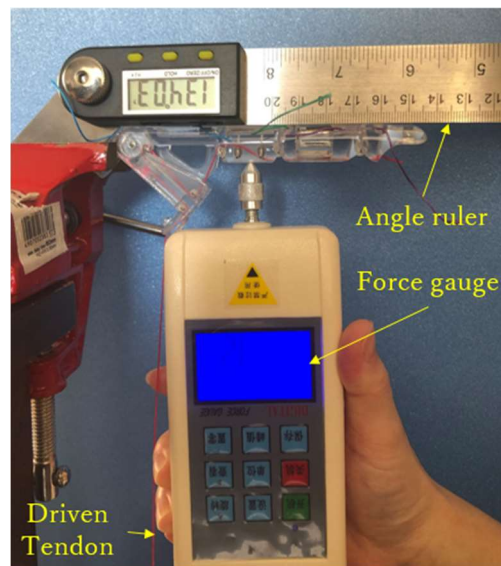


Fig.3.24 出力を測定する実験

各関節の出力を測定した結果は、それぞれ Fig.3.25、Fig.3.26、Fig.3.27 に示す。図の中に、赤色と緑色の曲線はそれぞれワイヤ張力、関節出力の理論値である。赤色の破線は Fig.3.19 から測った分銅の重さとなり、緑色の破線は赤色の破線に基づいて算出した理論の修正値になる。それに、残る離散の黒色の点は異なる角度に対応した実測値である。

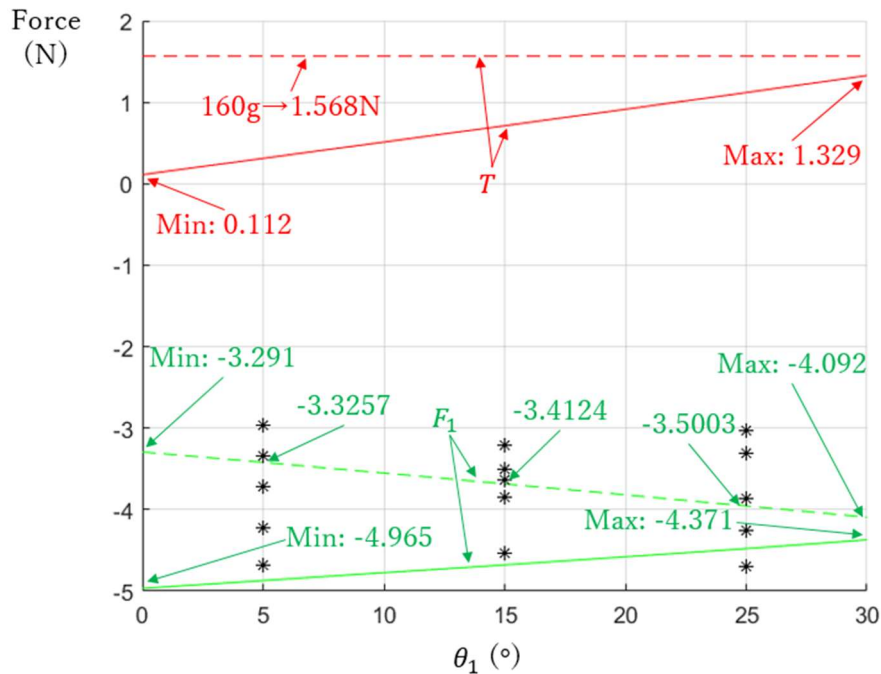


Fig.3.25 CM 関節における出力の実測値と理論値

まず、計測結果の Fig.3.25 では、CM 関節における理論値の修正値はそれぞれ 5 度

の-3.3257N、15度の-3.4124N、25度の-3.5003Nになることに対し、実測値の平均値はそれぞれの角度に-3.7848N、-3.74778、-3.82876に対応する。

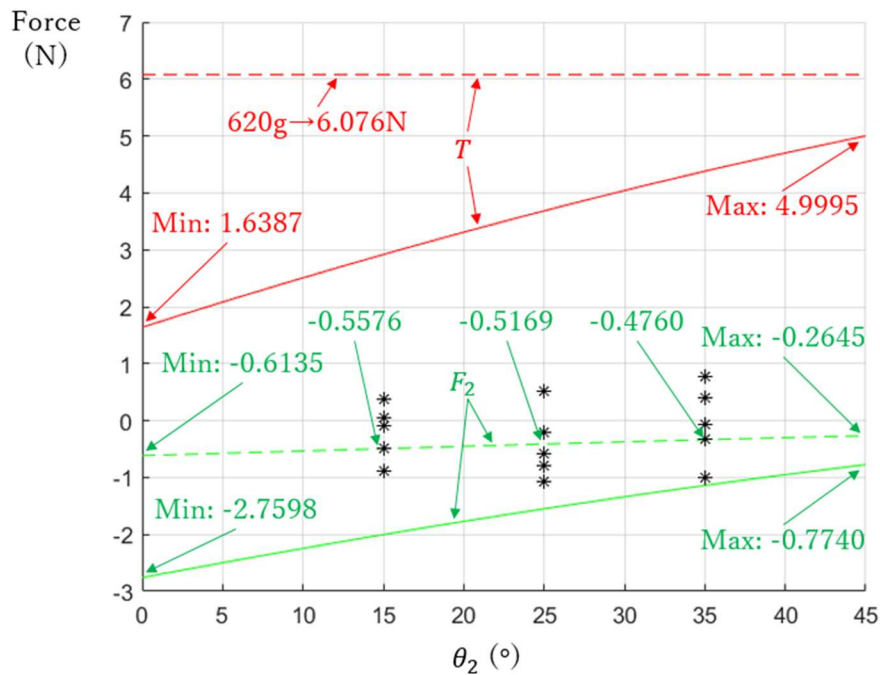


Fig.3.26 MP 関節における出力の実測値と理論値

そして、計測結果の Fig.3.26 では、MP 関節における理論値の修正値はそれぞれ 15 度の-0.5576N、25度の-0.5169N、35度の-0.4760Nになることに対し、実測値の平均値はそれぞれの角度に-0.21024N、-0.42528、-0.0474に対応する。

最後に、計測結果の Fig.3.27 では、IP 関節における理論値の修正値はそれぞれ 20 度の-0.4871N、40度の-0.0516N、60度の 0.4093Nになることに対して、実測した平均値はそれぞれの角度に対応して、-0.39592N、0.30788、0.0576になる。

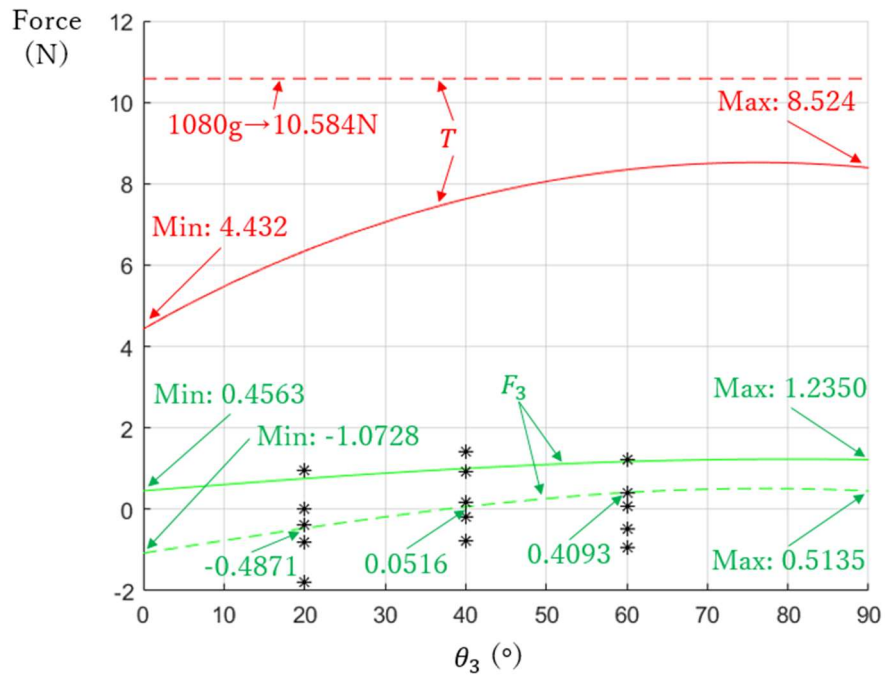


Fig.3.27 IP 関節における出力の実測値と理論値

以上の結果によって、得た実測値が理論値に近い為、拇指に関する計算や設計の正確性を確かめた。

### 3.4 まとめ

本章では、拇指の開発にあたる順序連動機能の実現について、論理的に説明を行った。特化した自動伸展機能による閾値駆動メカニズムの探索、運動解析、理論の立ち上げ、構築および検証実験を実施することによって、有用性を確認できた。

拇指の屈曲・伸展動作の特徴において、リーチングの場合、CM 関節のみの屈曲になる。それによって、把持物体に素早く接近することが可能になる。一方、グラスピングの場合では、CM→MP→IP 関節の順に屈曲していくが、先に物体と接触する関節が停止になり、物体をマッチングするまでに残る関節が継続的に屈曲し、結果的に馴染み把持に形成する。これに基づいて、従来研究では構造の一番簡単、かつ馴染み把持は可能であるアクティブワイヤ1本で三関節を駆動するという一対三のタイプをよく使用されている。しかし、このタイプのメカニズムでは劣るところも明らかであり、走行距離が長く、拇指の運動特徴と合わないほか、関節の冗長性で姿勢を変化するたびに重力の影響で運動軌跡が不安定になったりする問題が生じる。特に運動軌跡の不安定に対して、ほとんどの研究では関節が軽いため、システムへの影響はさほど大きくないと認識して、無視されてしまう。結果的に実際の使用場面ですべての状況に対応できず、義手とする実用性が下がる。

これらの問題を解決するために、本章ではまず拇指の運動特徴から順序連動機能を絞り出して、相応なメカニズムを構築する。そして、構築にあたって、運動軌跡に関わる重力、弾性力および初張力による自動伸展機能を特化する可能性を探索する。それに基づいて、指の汎用モデルを立ち上げて、適したバネのパラメータを調べるために、各関節の重力などを均一化にして、バネ定数を三つの組で検証することによって、中に超過組の結果は機能に満足したため、運動現象に基づく理論解析を行うことで、閾値駆動メカニズムの理論を立ち上げることができた。この理論に従って、拇指の製作に応用して、最後に、実験で運動軌跡の安定性を確認し、設けたリーチングおよびグラスピングの性能の実現も確かめた。それに、力学モデルで出力の理論値との検証も行って、第6章でアクチュエーターの選定に基準値として参照になる。以上によって、開発した拇指の有用性を確かめた。

# 第4章 適応連動機能及び差動屈曲機能を持つ四指の開発

---

4.1 四指の運動特徴 .....	64
4.2 四指各指における適応連動機能の実現 .....	65
4.2.1 既存研究及び課題 .....	65
4.2.2 適応連動機能に適した摩擦クラッチメカニズム .....	67
4.2.3 最適化した自動伸展機能 .....	70
4.2.4 クラッチ機構の設計 .....	73
4.2.5 適応連動機能の性能及び出力検証 .....	91
4.3 四指全体における差動屈曲機能の実現 .....	105
4.3.1 既存研究及び課題 .....	105
4.3.2 差動屈曲機能に適したピラミッド式クラッチ機構群メカニズム .....	106
4.3.3 ピラミッド式クラッチ機構群メカニズムの運動解析 .....	108
4.3.4 差動屈曲機能の運動検証 .....	125
4.4 まとめ .....	127

---

## 4.1 四指の運動特徴

四指は拇指と違って、四本の指が同じ前額面に並列している。各指が各自の矢上面では、可動範囲が指の長さによって比例的に類似しているほか、運動方向も一致である。また、物体をまだ把持していないリーチングのときに、各指の各関節が同時に屈曲して、螺旋状な軌跡を表す自然な屈曲し方になる[D. G. Kamper 2003]。それに、第2章で言及した DIP 関節は PIP 関節と連動している特徴を含み、四指を一つのグループとみなして、同様なメカニズムを導入することが可能になる。

しかし、指の三つの関節が場合によって、必ずしも一緒に連動をせず、MP 関節が停止されて他の関節は屈曲し続ける現象が存在している。さらに、把持物体の位置や形状によって、各指の屈曲具合も相違するため、四指の運動軌跡は一意にならない。そのため、各関節が把持物体の形状に沿って馴染めること、および指全体にも柔軟的に物体を包み込めるようなメカニズムが要求される。

それに、本章で使われる符号の表記を Table.4.1 のように示す。

Table.4.1 符号の表記

	示指	中指	環指	小指	基節骨	中節骨	末節骨
略称	$n = i$	$n = m$	$n = r$	$n = l$	$q = 1$	$q = 2$	$q = 3$
長さ	$L_i$	$L_m$	$L_r$	$L_l$	$L_{n1}$	$L_{n2}$	$L_{n3}$
重心/接触点	-	-	-	-	$R_{n1}$	$R_{n2}$	$R_{n3}$
質量	$m_i$	$m_m$	$m_r$	$m_l$	$m_{n1}$	$m_{n2}$	$m_{n3}$
重量	$G_i$	$G_m$	$G_r$	$G_l$	$G_{n1}$	$G_{n2}$	$G_{n3}$
バネ定数	-	-	-	-	$k_{n1}$	$k_{n2}$	$k_{n3}$
バネ初張力	-	-	-	-	$\sigma_{n1}$	$\sigma_{n2}$	$\sigma_{n3}$
伸び量	-	-	-	-	$x_{n1}$	$x_{n2}$	$x_{n3}$
弾性力	-	-	-	-	$K_{n1}$	$K_{n2}$	$K_{n3}$
ワイヤ張力	$T_i$	$T_m$	$T_r$	$T_l$	$T_{n1}$	$T_{n2}$	$T_{n3}$
ワイヤ走行距離	$s_i$	$s_m$	$s_r$	$s_l$	$s_{n1}$	$s_{n2}$	$s_{n3}$
屈曲側トルク	-	-	-	-	$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_{n3}$
伸展側トルク	-	-	-	-	$\kappa_{n1}$	$\kappa_{n2}$	$\kappa_{n3}$
関節トルク	-	-	-	-	$\tau_{n1}$	$\tau_{n1}$	$\tau_{n1}$
関節角度	-	-	-	-	$\theta_{n1}$	$\theta_{n2}$	$\theta_{n3}$
出力	-	-	-	-	$F_{n1}$	$F_{n2}$	$F_{n3}$
摩擦係数	$\mu_i$	$\mu_m$	$\mu_r$	$\mu_l$	-	-	-
静摩擦力	$f_{is}$	$f_{ms}$	$f_{rs}$	$f_{ls}$	-	-	-
動摩擦力	$f_{id}$	$f_{md}$	$f_{rd}$	$f_{ld}$	-	-	-

## 4.2 四指各指における適応連動機能の実現

前述のように、四指の任意の1本指に対して、運動特徴を再現するために、適応連動機能を応用させる。要するに、把持物体にリーチングする場合に、各関節が同じ角速度で同時に屈曲することが必要となる以外に、グラスピングする場合に、物体の形状に沿う馴染み把持も要求される。このセクションでは、これらの要求を実現するために、まずは従来研究における既存のメカニズムを述べ、残られる課題を挙げる。そして、解決策を含めて、運動特徴に従う適応連動機能を絞り出して、摩擦クラッチのメカニズムを提案する。そこで、相応にクラッチ機構の設計、最適化した自動伸展機能を説明する。最後に、四指の任意指における力学モデルを立ち上げて、実験で理論値との比較、分析を行うことによって、有用性を確かめる。

### 4.2.1 既存研究及び課題

四指の各指において、MP、PIP、DIP 関節にリーチングの一緒に屈曲、かつグラスピングの馴染み把持の要求を満たすために、従来研究ではすでにいくつかのメカニズムを挙げられている。指関節の三つの自由度に対して、アクチュエーターから直接に出力を伝達するアクティブワイヤが作用する関節数の視点からまとめると、それぞれ一対三のタイプ、一対二のタイプと一対一のタイプがあり、順番に詳しく説明する。

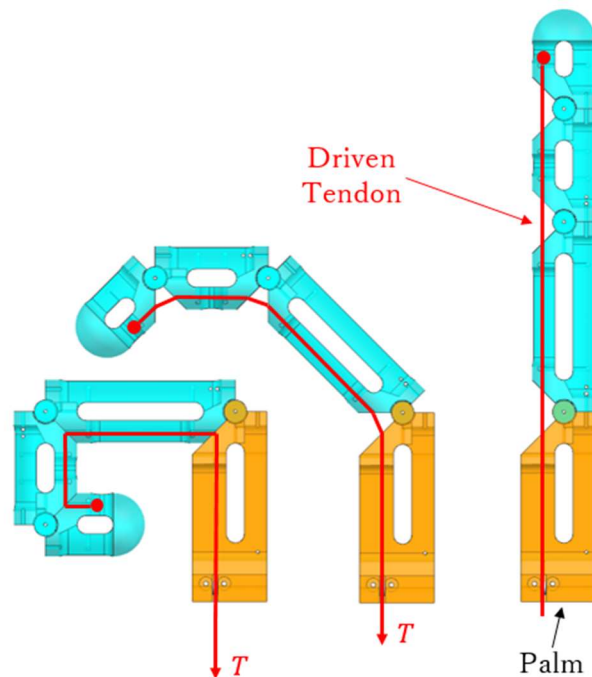


Fig.4.1 一対三のメカニズム

一対三のタイプ: Fig.4.1のように、アクティブワイヤ1本で三つの関節(MP、PIP、DIP)を通すタイプである[Y. Liu 2014]. 第3章の論証結果により、重力に大きく影響



されるため、自動伸展のバネ定数の調整によって、運動軌跡を変える。すなわち、自動伸展バネを最適（必要最小）化した場合、重力の影響がもっとも大きく、運動軌跡が安定にならない。逆にバネ定数を大きくして、弾性力の比重が重力より大きくなると、ある程度に運動軌跡が安定になっていくが、完全に消去することはできず、到底指の三関節を同時に屈曲にならないため、リーチングの運動特徴である関節の同時屈曲を満足できない。しかも、バネ定数を大きくした分は、エネルギーの消費も大きくなるほかに、ワイヤの走行距離は長くて、関節の駆動には非効率である。このタイプのメカニズムは構造的に確実に簡潔であるうえに、グラスピングのときに物体に対する馴染み把持も実現できることは優れたところであるが、デメリットも明らかである。ただし、第3章で言及したように、弾性力の比重は重力より遥かに大きくなった場合、運動軌跡のばらつきが減少し、安定化になれるが、三関節の運動は順次の屈曲になる拇指に特化したメカニズムであるため、四指の各指に適応できなくて、この章の主旨と外れている。

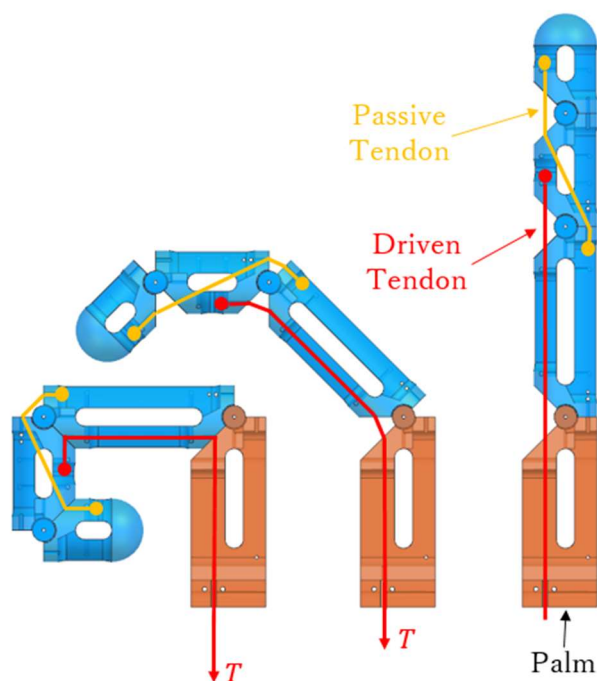


Fig.4.2 一対二のメカニズム

一対二のタイプ：Fig.4.2のように、アクティブワイヤ1本で二つの関節（MP、PIP）を通すタイプである[X. Yong 2019]。重力の影響が存在しているが、DIP関節にパッシブの構造の使用によって、リーチングのときに三関節の運動軌跡が部分的に安定になり、全体的に一対三のタイプより影響は少なくなる。同じように、バネ定数を大きくすると、運動軌跡が安定になっていく方向に調整できるが、完全に消去することはできないほか、エネルギーの消費も上がる。グラスピングのときに部分的に馴染み把持

に形成できるが、完全のマッチングにならない。結果的に、このタイプのメカニズムは運動軌跡の安定さと構造の簡潔さの折中の案であり、四指の各指に適さない。

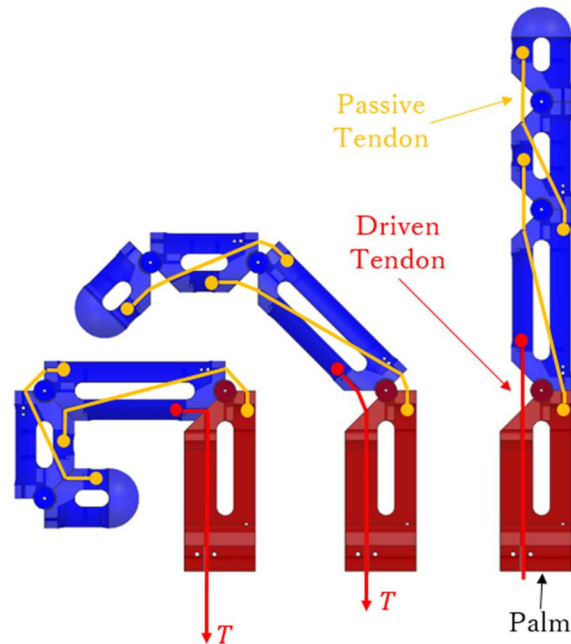


Fig.4.3 一対一のメカニズム

一対一タイプ：Fig.4.3のように、アクティブワイヤ1本で一つの関節（MP）を通すタイプである[X. Jing 2019]。DIP、PIP 関節を同じようにパッシブの構造にして、冗長性をなくして、三関節の運動軌跡が安定化されるようになり、リーチングの運動特徴に満たした。しかも、ワイヤ走行距離は最短であるほかに、自動伸展機能によるバネ定数の調整も不要になって、必要最小にして最適化できるため、エネルギーの消耗も最小に抑える。しかしながら、DIP と PIP 関節の運動は設計によって、既定のルートに制限されるため、グラスピングのときに馴染み把持の性能がなくなる。結果、四指の各指に応用できない。

#### 4.2.2 適応連動機能に適した摩擦クラッチメカニズム

従来研究に残された課題を含め、機能の実現を果たすために、本研究では適応連動機能に適した摩擦クラッチメカニズムを提案する。上記の各種のメカニズムと比較すると二対二のタイプになる。Fig.4.4のように、青色のワイヤがアクチュエーターと直結していて、アクチュエーターの巻取りによって、紫色のクラッチ機構および機構内に通す赤色のワイヤを引っ張られる。赤色のワイヤの左端がMP関節と結んで、右端がMP関節の回転中心（MP関節の屈曲側と伸展側において作用されるトルクはゼロにするため）に通過してPIP関節に固定する。クラッチ機構が移動するたびに、赤色のワイヤが2本のアクティブワイヤとしてMPとPIP関節を同時に屈曲させる。また、橙色のワイヤがDIP関節に作用してPIP関節を運動するたびに、パッシブ的に連動さ

れて同時に屈曲する。特にクラッチ機構によって指関節が自動的に同時屈曲か馴染み把持に切り替えることが可能になる。具体的にリーチングとグラスピングのケースを分けて説明する。

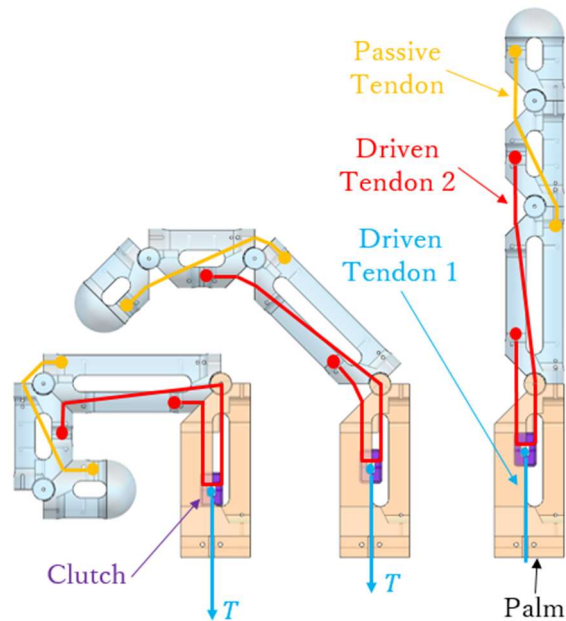


Fig.4.4 摩擦クラッチメカニズム（二対二のタイプ）によるリーチングのプロセス

リーチング：Fig.4.4 に示したように、指関節が把持物体にリーチングのときに、アクチュエーターが青色のワイヤを巻き取って、クラッチ機構も一緒に牽引されて、並進運動をする。このときに、クラッチ機構内に経過した赤色のワイヤが静摩擦力が生じる。この静摩擦力の作用によって、MP と PIP 関節の重力と相殺して重力による運動軌跡の影響がなくなって、MP、PIP 関節が同じ角速度で屈曲できるようになる。

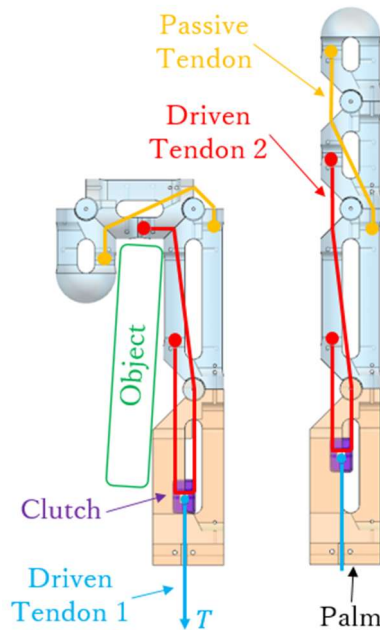


Fig.4.5 摩擦クラッチメカニズム（二対二のタイプ）によるグラスピングのプロセス

グラスピング：指関節が把持物体と接触し始まる時点から、物体の形状に沿って馴染み把持が開始する。Fig.4.5 に示したように、この際に、MP 関節がある角度で物体にブロックされて、左端の赤色のワイヤが動かなくなって、クラッチ機構が引き続き並進運動しようとしている。そうすると、赤色のワイヤはクラッチ機構の内部に受ける静摩擦力が動摩擦力に変わって、クラッチ機構が右端の赤色のワイヤのみを引っ張り続ける結果、PIP 関節を屈曲する。把持物体の形状に沿って、マッチングをしながら、馴染み把持が形成する。各関節がすべて停止となった後に、アクチュエーターがさらに出力を増加して、物体に把持力を与える。

提案した摩擦クラッチメカニズムの応用によって、指関節に対する構造を複雑になるが、摩擦力を利用して重力の影響を消去したため、運動軌跡を安定化にさせる同時に、2本のアクティブワイヤでMPとPIP関節の冗長性をなくして、リーチングするときの同時屈曲、およびグラスピングするときの馴染み把持を共に実現した。また、重力の影響をなくしたため、自動伸展機能に使用するバネ定数も無駄に大きくなり、最適化できるようになり、バネによるエネルギーの消耗も最小に抑える。さらに、ワイヤの走行距離は一つの関節の量であり、一対一のタイプと同様に最短となる。

以上によって、四指の各指に摩擦クラッチメカニズムを応用することで、必要となる適応連動機能を実現して、運動特徴を全部再現できるようになる。そして、本研究が提案した摩擦クラッチメカニズム（二対二のタイプ）を従来研究と比較して、まとめた結果はTable.4.2のように提示する。結果、提案したメカニズムは指関節の構造を複雑化にされるほか、すべての項目は従来タイプより優れたことを確認できる。

Table.4.2 各種のメカニズムの比較

	一对三	一对二	一对一	本研究の 二对二
駆動のタイプ	ワイヤ1本で 三個関節	ワイヤ1本で 二個関節	ワイヤ1本で 一個関節	ワイヤ2本で 二個関節
機械構造の 簡潔さ	簡潔	普通	複雑	繁雑
運動軌跡の 安定さ	不安定	部分的	安定	安定
馴染む把持の 可能性	可能	部分的	不可能	可能
バネエネルギーの 消耗	最大	普通	最小	最小
ワイヤ走行距離の 長さ	最長 三関節の量	普通 二関節の量	最短 一関節の量	最短 一関節の量

### 4.2.3 最適化した自動伸展機能

クラッチ機構が赤色のワイヤに摩擦力の作用によって、MP、PIP 関節の重力の影響をなくして、同じ角速度で屈曲できるという運動軌跡の安定性を持つため、四指の各指における自動伸展機能には、バネ定数を必要最小限に抑えられて、第3章で言及した最小組の定める手法で最適化することが可能になる。

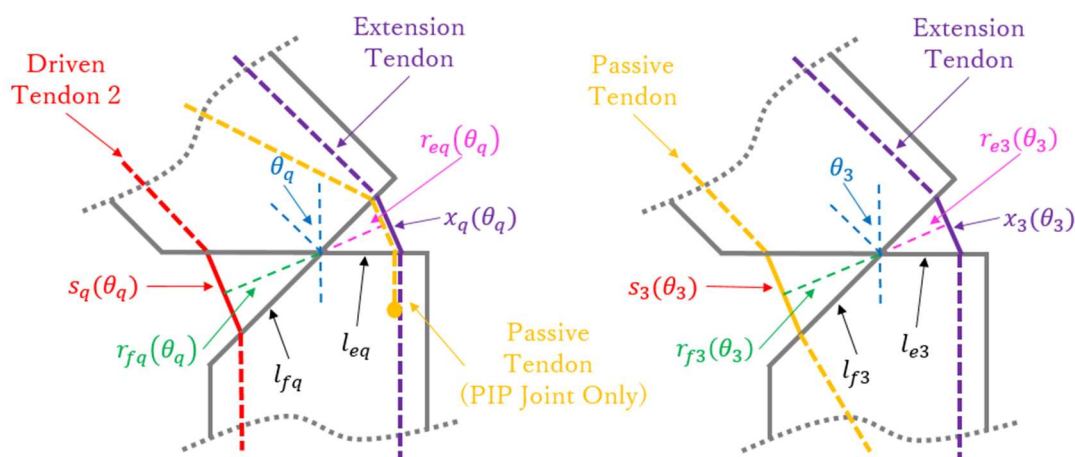


Fig.4.6 関節の幾何学関係 (左：MP と PIP 関節；右：DIP 関節)

そして、バネ定数を算出するため、Fig.4.6 に示すように、関節の構造による設計の

パラメータに基づいて、各関節の幾何学による関係式を明らかにする。ただし、四指の各指に対して、共通な式であるため、略称の  $n$  を省略して、以降の計算も同様である。

よって、幾何学の関係式を得られる：

$$\begin{cases} s_q(\theta_q) = 2l_{fq} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \\ x_q(\theta_q) = 2l_{eq} \sin\frac{\theta_q}{2} \\ r_{fq}(\theta_q) = l_{fq} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \\ r_{eq}(\theta_q) = l_{eq} \cos\frac{\theta_q}{2} \end{cases}$$

設計した関節の構造によるパラメータから（単位は mm）：

$$\begin{cases} l_{f1} = 7\sqrt{2} \\ l_{f2} = 7\sqrt{2} \\ l_{f3} = 3.5\sqrt{2} \\ l_{e1} = 4.95 \\ l_{e2} = 4.95 \\ l_{e3} = 4 \end{cases}$$

したがって、 $s_q$  は：

$$\begin{cases} s_1 = 14\sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_1}{2}\right) \\ s_2 = 14\sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_2}{2}\right) \\ s_3 = 7\sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_3}{2}\right) \end{cases}$$

$x_q$  は：

$$\begin{cases} x_1 = 10 \sin\frac{\theta_1}{2} \\ x_2 = 10 \sin\frac{\theta_2}{2} \\ x_3 = 8 \sin\frac{\theta_3}{2} \end{cases}$$

$r_{fq}$  は：



$$\begin{cases} r_{f1} = 7\sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_1}{2}\right) \\ r_{f2} = 7\sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_2}{2}\right) \\ r_{f3} = 3.5\sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_3}{2}\right) \end{cases}$$

$r_{eq}$ は：

$$\begin{cases} r_{e1} = 4.95 \cos\frac{\theta_1}{2} \\ r_{e2} = 4.95 \cos\frac{\theta_2}{2} \\ r_{e3} = 4 \cos\frac{\theta_3}{2} \end{cases}$$

これらのパラメータに基づいて、Fig.4.7に示したように、中指を例として、各関節は重力が最大になった姿勢を保てるよう、各バネ定数を計算する。

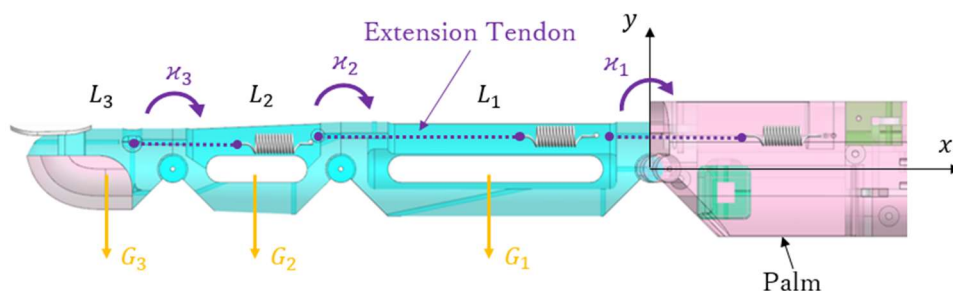


Fig.4.7 重力が最大の位置に置く中指

製作に使う材料の密度は $\rho = 1.18\text{kg/m}^3$ であるため、各指の各関節の重力を得られて、モーメントの釣り合いによって伸展側トルクを算出できる。各指の計算結果は下記のTable.4.3ようになる。

Table.4.3 四指の各指における重力と伸展側トルク

	基節骨	中節骨	末節骨
示指	$G_{i1} = 0.043\text{N}$ $\kappa_{i1} = 2.631\text{Nmm}$	$G_{i2} = 0.018\text{N}$ $\kappa_{i2} = 0.51\text{Nmm}$	$G_{i3} = 0.011\text{N}$ $\kappa_{i3} = 0.11\text{Nmm}$
中指	$G_{m1} = 0.046\text{N}$ $\kappa_{m1} = 3.329\text{Nmm}$	$G_{m2} = 0.022\text{N}$ $\kappa_{m2} = 0.707\text{Nmm}$	$G_{m3} = 0.012\text{N}$ $\kappa_{m3} = 0.132\text{Nmm}$
環指	$G_{r1} = 0.044\text{N}$ $\kappa_{r1} = 2.981\text{Nmm}$	$G_{r2} = 0.021\text{N}$ $\kappa_{r2} = 0.605\text{Nmm}$	$G_{r3} = 0.011\text{N}$ $\kappa_{r3} = 0.11\text{Nmm}$
小指	$G_{l1} = 0.034\text{N}$ $\kappa_{l1} = 1.921\text{Nmm}$	$G_{l2} = 0.017\text{N}$ $\kappa_{l2} = 0.472\text{Nmm}$	$G_{l3} = 0.011\text{N}$ $\kappa_{l3} = 0.11\text{Nmm}$

伸展状態を保てるようにするため、伸展側トルクのモーメントアームがそれぞれ DIP 関節は $l_{e3}$ 、PIP 関節は $l_{e2}$ 、MP 関節 $l_{e1}$ を代入し、各指の各関節の最小弾性力（単位は N）を得られる。結果は Table.4.4 に示す。

Table.4.4 四指の各指に必要な最小弾性力

	基節骨	中節骨	末節骨
示指	0.532	0.103	0.028
中指	0.673	0.143	0.033
環指	0.602	0.122	0.028
小指	0.388	0.095	0.028

以上の結果によって、関節を 90 度に屈曲するまでのバネ伸び量も含めて、適切なバネ（日本，株式会社アキュレイト，DE 規格引張コイルバネ）を選定できる。そこで，結果的に選択したバネのパラメータは計算の理論値に近いとため，無駄なエネルギーの消費を最小限に抑え，自動伸展機能の最適化を実現する。

#### 4.2.4 クラッチ機構の設計

摩擦クラッチメカニズムのコアであるクラッチ機構において，三つの特徴を持っている：

第一：アクチュエーターからの 1 本アクティブワイヤを 2 本に分けることが可能になって，MP と PIP 関節の冗長性をなくすほか，ワイヤの走行距離を一関節の量にし，最短となる。

第二：リーチングするときに，静摩擦力によって MP と PIP 関節の重力と相殺して各関節が同時に屈曲できるようになり，指が空間中に任意の位置においても運動軌跡は安定的である。

第三：グラスピングするときに，MP あるいは PIP 関節をブロックされたら，静摩擦力が動摩擦力に変わって，ブロックされていない関節が引き続き屈曲し，物体に対する馴染み把持ができる。

クラッチ機構から 2 本のアクティブワイヤがそれぞれ MP 関節と PIP 関節を駆動するが，反力としては，MP 関節に自身の弾性力、初張力と三関節の重力がかけていて，PIP 関節に自身の弾性力、初張力と PIP、DIP 関節の重力以外に，パッシブに連動される DIP 関節の弾性力、初張力も含む。式で表すと：

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 - \kappa_1 \\ M_2 - \kappa_2 - \frac{r_{e2}\kappa_3}{r_{f3}} \\ M_3 - \kappa_3 \end{bmatrix}$$



$$= \begin{bmatrix} 7\sqrt{2}T_1 \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_1}{2}\right) - 24.75k_1 \sin \theta_1 - 4.95\sigma_1 \cos \frac{\theta_1}{2} \\ 7\sqrt{2}T_2 \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_2}{2}\right) - 24.75k_2 \sin \theta_2 - 4.95\sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} - \frac{r_{e2}\kappa_3}{r_{f3}} \\ \frac{r_{f3}}{r_{e2}} \left[ 7\sqrt{2}T_2 \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_2}{2}\right) - 24.75k_2 \sin \theta_2 - 4.95\sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \right] - 16k_3 \sin \theta_3 - 4\sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \end{bmatrix}$$

ただし、レイアウトが足りないため、式中：

$$\frac{r_{e2}\kappa_3}{r_{f3}} = \frac{19.8\sqrt{2} \cos \frac{\theta_2}{2} (4k_3 \sin \theta_3 + \sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2})}{7 \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_3}{2}\right)}$$

$$\frac{r_{f3}}{r_{e2}} = \frac{7\sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_3}{2}\right)}{9.9 \cos \frac{\theta_2}{2}}$$

以上に基づいて、クラッチ機構の計算はリーチングとグラスピングを分けて順に説明する。ただし、どちらのケースにおいても指が伸展状態から完全屈曲状態になるまでのプロセスにする。

1. リーチング：

リーチングするときに、Fig.4.8のように、赤色のワイヤをクラッチ機構に分断されて、2本のワイヤが機構に固定されているとみなす。

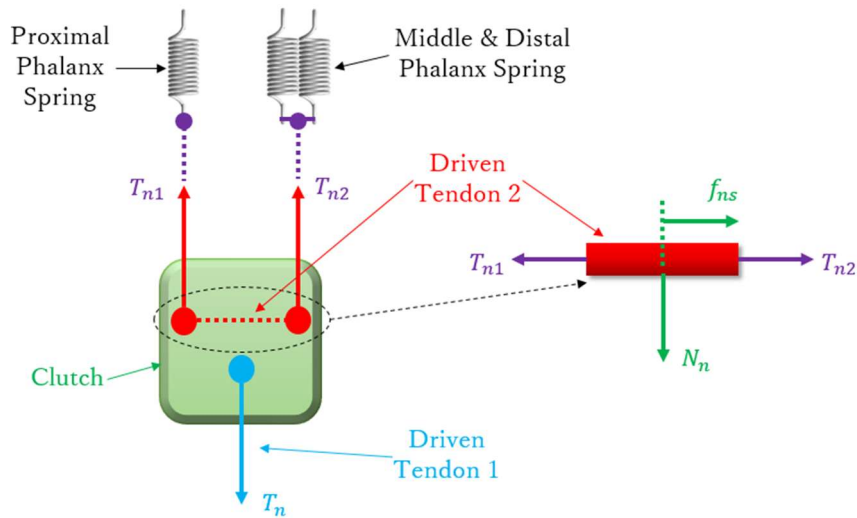


Fig.4.8 クラッチ機構の静摩擦力モデル

これによって、クラッチ機構内に閉じ込められた点線の部分も合わせて、力学分析をして、重力を除いて釣り合った数式を下記のように得る。ただし、クラッチ機構によって、MPとPIP関節同時に屈曲して常に同じ角度で運動させるため、2本の赤色のワイヤによるそれぞれのバネ伸び量が等しいである：

$$\begin{cases} T_n = T_{n1} + T_{n2} = N_n = \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{n1} + \sigma_{n1}) + \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{n3} + \sigma_{n3}) \right] \\ f_{ns} = T_{n1} - T_{n2} = \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{n1} + \sigma_{n1}) - \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{n3} + \sigma_{n3}) \right] \\ x_{n1} = x_{n2} \end{cases}$$

一方、手指が空間位置の変化によって、重力が随時に変化しつつある。クラッチ機構が任意の位置においても機能できるように、変化する重力を式に加えて、必要最小限の静摩擦力を求める。そのため、第3章で指の汎用モデルを利用し、四つの象限において、関節が屈曲していくたびに、2本のアクティブワイヤ張力と関節角度の変化を計算する。それに基づいて、静摩擦力の変化による最大値を明らかにし、存在する象限も確かめる。

まずは第一象限において、各指のクラッチ機構の力学関係式に関節の重力を加えて、式 $f_{ns}$ と $N_{ns}$ で表すと：

$$\begin{cases} f_{ns} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{n1} + \sigma_{n1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{n1}C_1 \quad R_{n2}C_{12} + L_{n1}C_1 \quad R_{n3}C_{123} + L_{n2}C_{12} + L_{n1}C_1] \mathbf{G}_n \right] \\ \quad - \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{n3} + \sigma_{n3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{n2}C_{12} \quad R_{n3}C_{123} + L_{n2}C_{12}] \mathbf{G}_n \right\} \\ N_{ns} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{n1} + \sigma_{n1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{n1}C_1 \quad R_{n2}C_{12} + L_{n1}C_1 \quad R_{n3}C_{123} + L_{n2}C_{12} + L_{n1}C_1] \mathbf{G}_n \right] \\ \quad + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{n3} + \sigma_{n3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{n2}C_{12} \quad R_{n3}C_{123} + L_{n2}C_{12}] \mathbf{G}_n \right\} \end{cases}$$

この式によって、結果はそれぞれ示指が Fig.4.9、中指が Fig.4.10、環指が Fig.4.11、小指が Fig.4.12 のように示して、関節の張力、静摩擦力の最大値および最大支持力を確かめる。ただし、DIP 関節が機構上に PIP 関節とパッシブに連動していて、赤色のアクティブワイヤに直ちに参与しないため、図表の結果には表示しない。

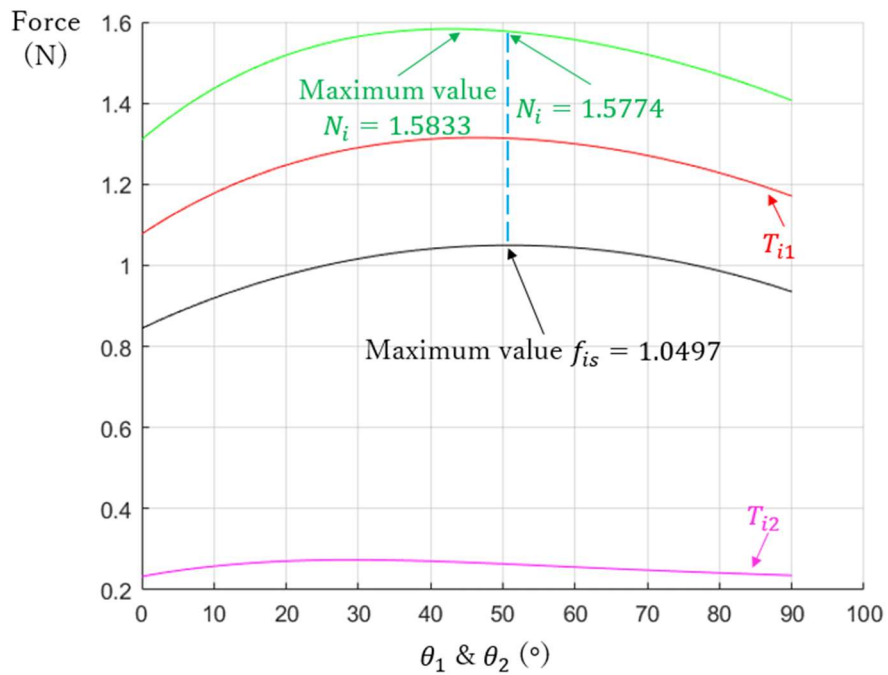


Fig.4.9 第一象限・示指・静摩擦力による変化

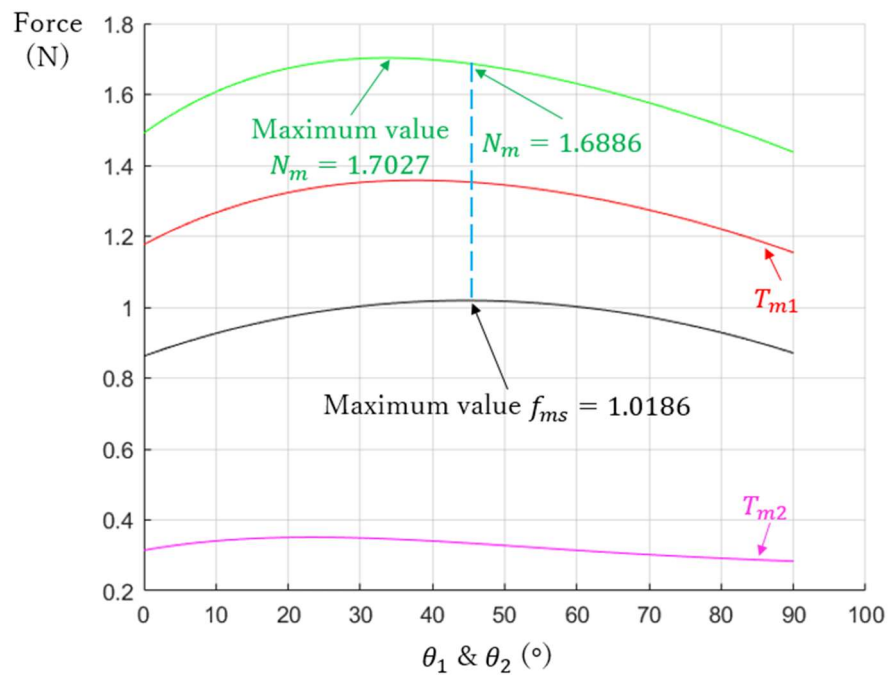


Fig.4.10 第一象限・中指・静摩擦力による変化

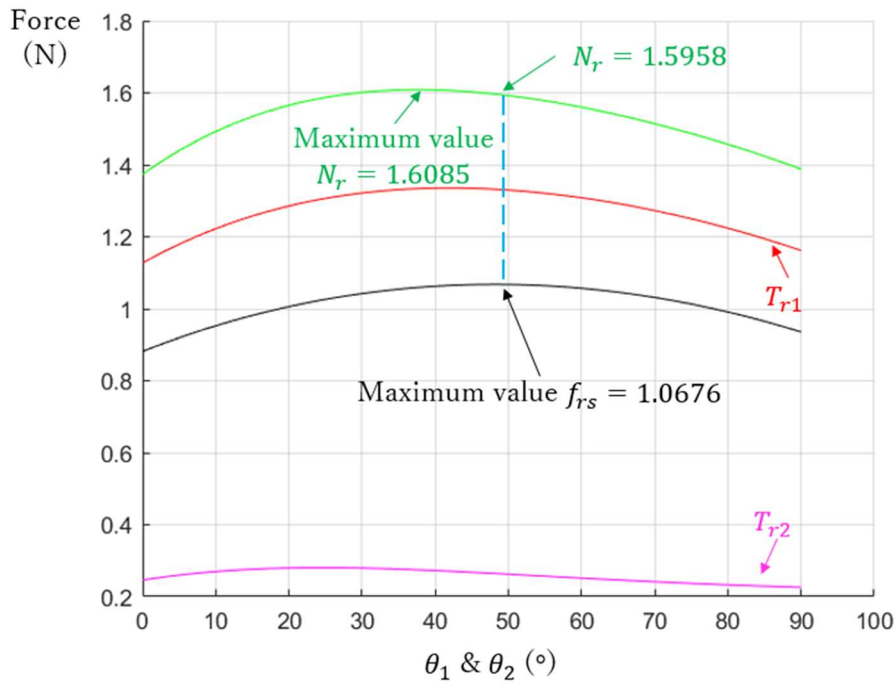


Fig.4.11 第一象限・環指・静摩擦力による変化

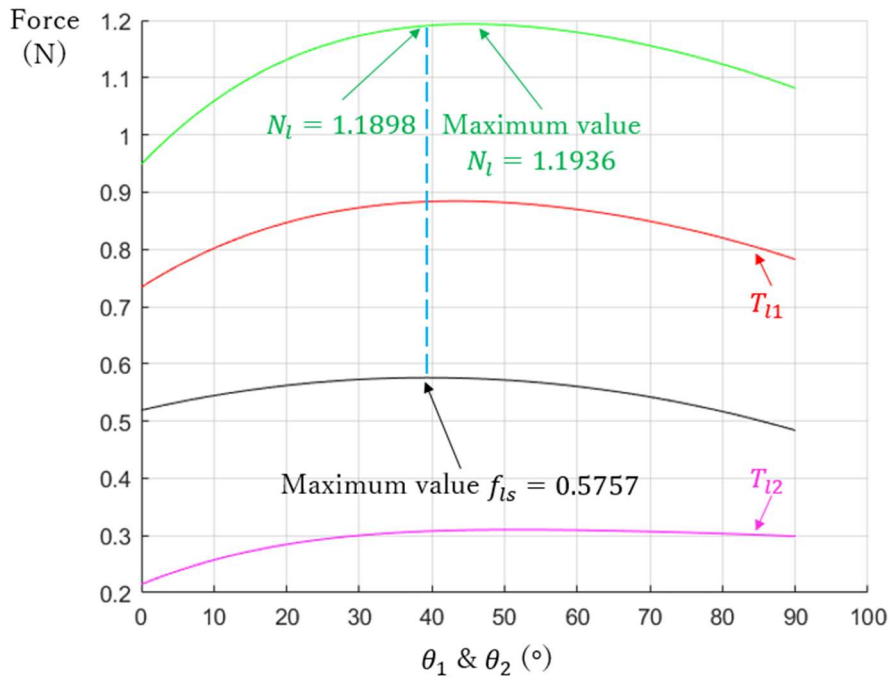


Fig.4.12 第一象限・小指・静摩擦力による変化

次に、第二象限での式は下記のように成り立つうえに、結果はそれぞれ示指が Fig.4.13、中指が Fig.4.14、環指が Fig.4.15、小指が Fig.4.16 のように表す。

$$\begin{cases}
 f_{ns} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{n1} + \sigma_{n1}) - \frac{1}{r_{f1}} [R_{n1}S_1 \quad R_{n2}S_{12} + L_{n1}S_1 \quad R_{n3}S_{123} + L_{n2}S_{12} + L_{n1}S_1] \mathbf{G}_n \right] \\
 - \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} [K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{n3} + \sigma_{n3})] - \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{n2}S_{12} \quad R_{n3}S_{123} + L_{n2}S_{12}] \mathbf{G}_n \right\} \\
 N_{ns} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{n1} + \sigma_{n1}) - \frac{1}{r_{f1}} [R_{n1}S_1 \quad R_{n2}S_{12} + L_{n1}S_1 \quad R_{n3}S_{123} + L_{n2}S_{12} + L_{n1}S_1] \mathbf{G}_n \right] \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} [K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{n3} + \sigma_{n3})] - \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{n2}S_{12} \quad R_{n3}S_{123} + L_{n2}S_{12}] \mathbf{G}_n \right\}
 \end{cases}$$

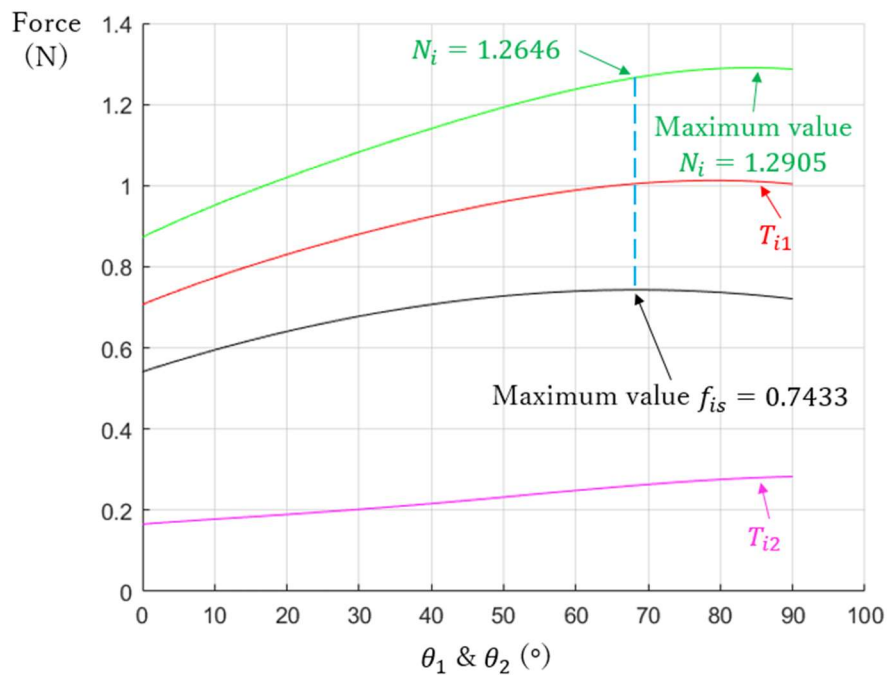


Fig.4.13 第二象限・示指・静摩擦力による変化

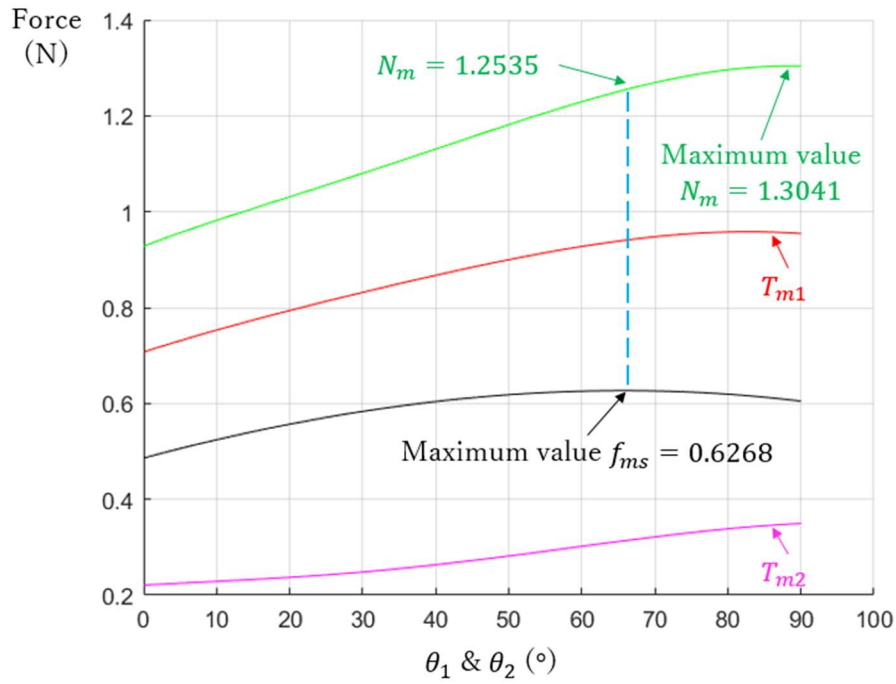


Fig.4.14 第二象限・中指・静摩擦力による変化

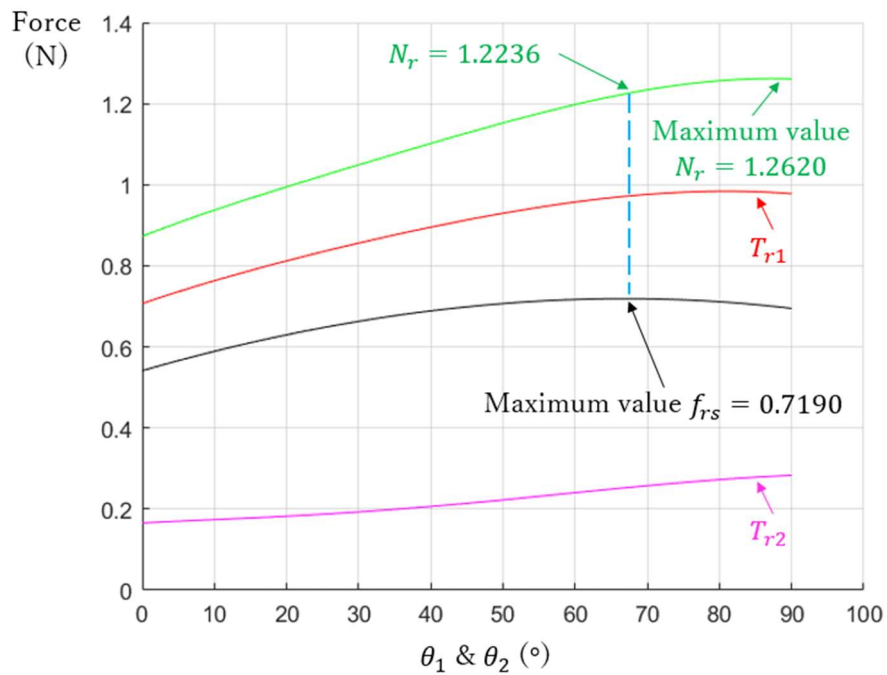


Fig.4.15 第二象限・環指・静摩擦力による変化

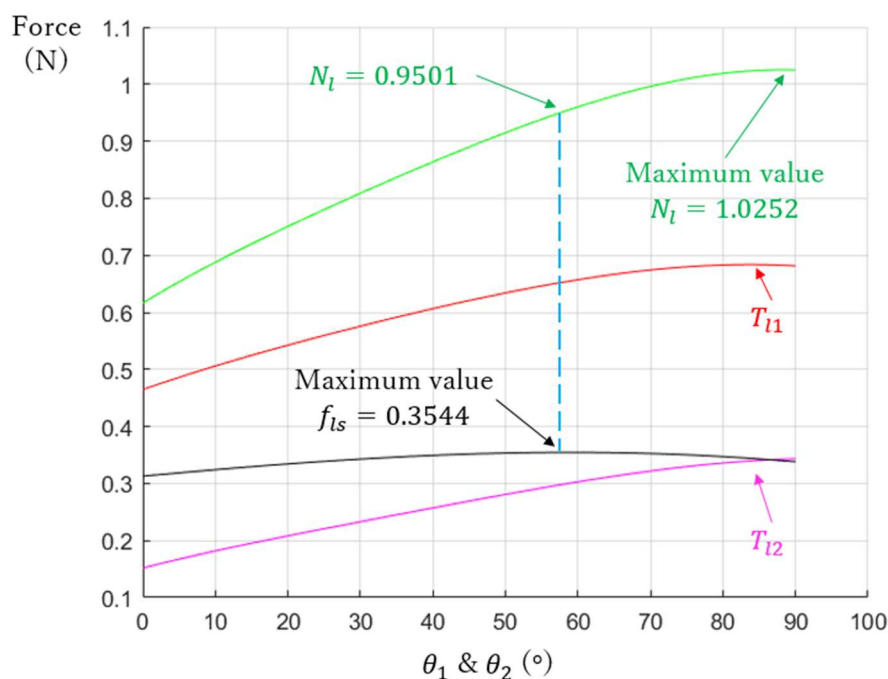


Fig.4.16 第二象限・小指・静摩擦力による変化

同様に、第三象限での式は下記のようになり、結果はそれぞれ示指が Fig.4.17、中指が Fig.4.18、環指が Fig.4.19、小指が Fig.4.20 のように表す。

$$\begin{cases}
 f_{ns} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{n1} + \sigma_{n1}) - \frac{1}{r_{f1}} [R_{n1}C_1 \quad R_{n2}C_{12} + L_{n1}C_1 \quad R_{n3}C_{123} + L_{n2}C_{12} + L_{n1}C_1] \mathbf{G}_n \right] \\
 - \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{n3} + \sigma_{n3}) \right] - \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{n2}C_{12} \quad R_{n3}C_{123} + L_{n2}C_{12}] \mathbf{G}_n \right\} \\
 N_{ns} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{n1} + \sigma_{n1}) - \frac{1}{r_{f1}} [R_{n1}C_1 \quad R_{n2}C_{12} + L_{n1}C_1 \quad R_{n3}C_{123} + L_{n2}C_{12} + L_{n1}C_1] \mathbf{G}_n \right] \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{n3} + \sigma_{n3}) \right] - \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{n2}C_{12} \quad R_{n3}C_{123} + L_{n2}C_{12}] \mathbf{G}_n \right\}
 \end{cases}$$

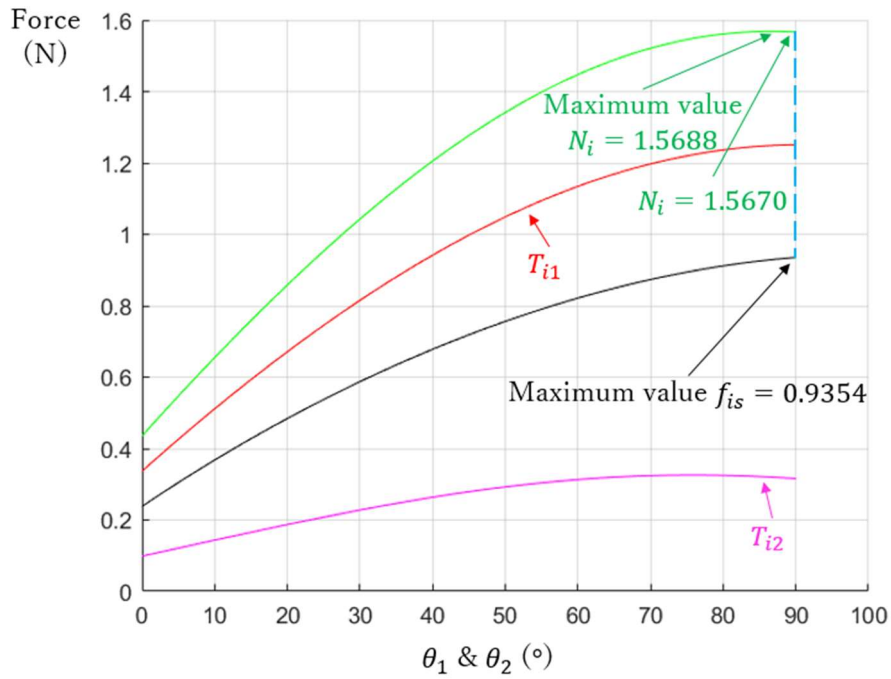


Fig.4.17 第三象限・示指・静摩擦力による変化

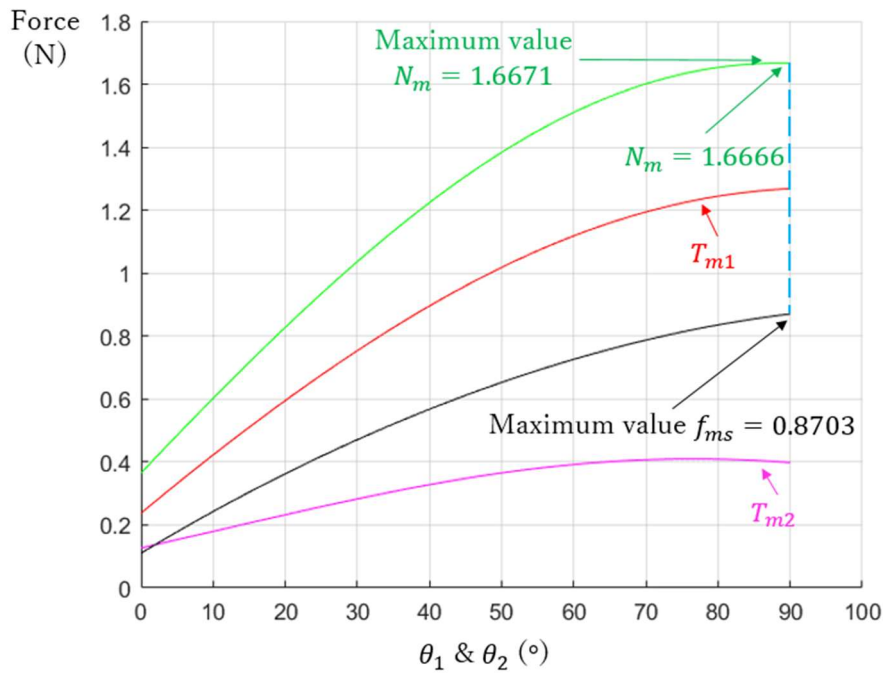


Fig.4.18 第三象限・中指・静摩擦力による変化



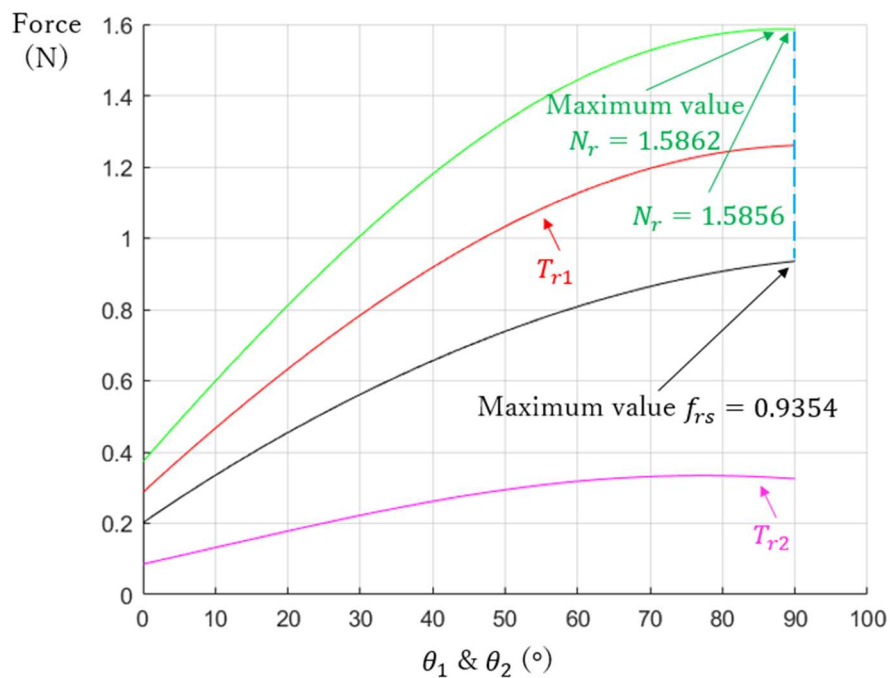


Fig.4.19 第三象限・環指・静摩擦力による変化

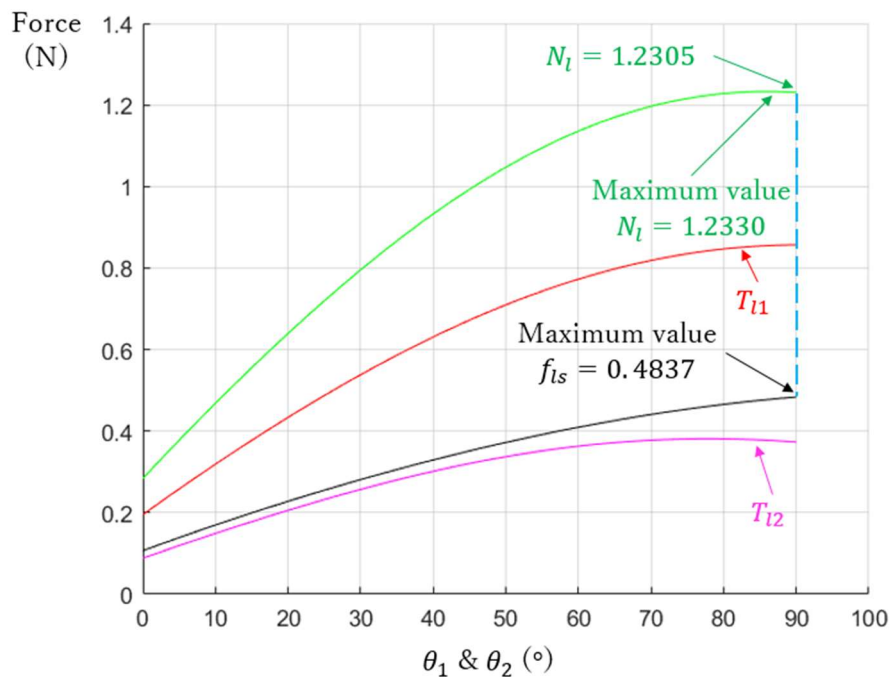


Fig.4.20 第三象限・小指・静摩擦力による変化

最後に、第四象限での式は下記のようになり、結果はそれぞれ示指が Fig.4.21、中指が Fig.4.22、環指が Fig.4.23、小指が Fig.4.24 のように表す。

$$\left\{ \begin{aligned} f_{ns} &= \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{n1} + \sigma_{n1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{n1}S_1 \quad R_{n2}S_{12} + L_{n1}S_1 \quad R_{n3}S_{123} + L_{n2}S_{12} + L_{n1}S_1] \mathbf{G}_n \right] \\ &\quad - \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} [K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{n3} + \sigma_{n3})] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{n2}S_{12} \quad R_{n3}S_{123} + L_{n2}S_{12}] \mathbf{G}_n \right\} \\ N_n &= \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{n1} + \sigma_{n1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{n1}S_1 \quad R_{n2}S_{12} + L_{n1}S_1 \quad R_{n3}S_{123} + L_{n2}S_{12} + L_{n1}S_1] \mathbf{G}_n \right] \\ &\quad + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} [K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{n3} + \sigma_{n3})] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{n2}S_{12} \quad R_{n3}S_{123} + L_{n2}S_{12}] \mathbf{G}_n \right\} \end{aligned} \right.$$

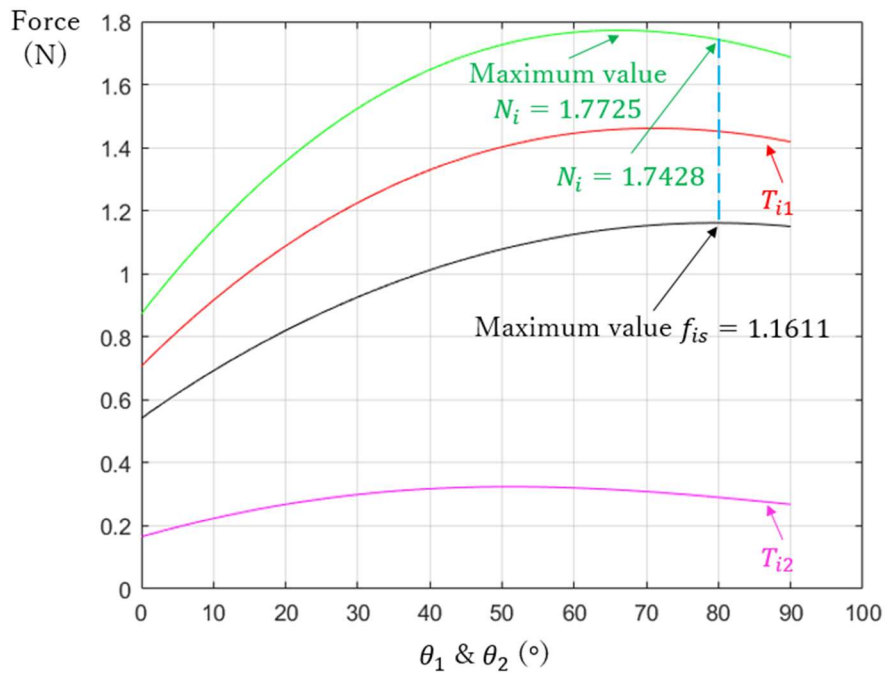


Fig.4.21 第四象限・示指・静摩擦力による変化

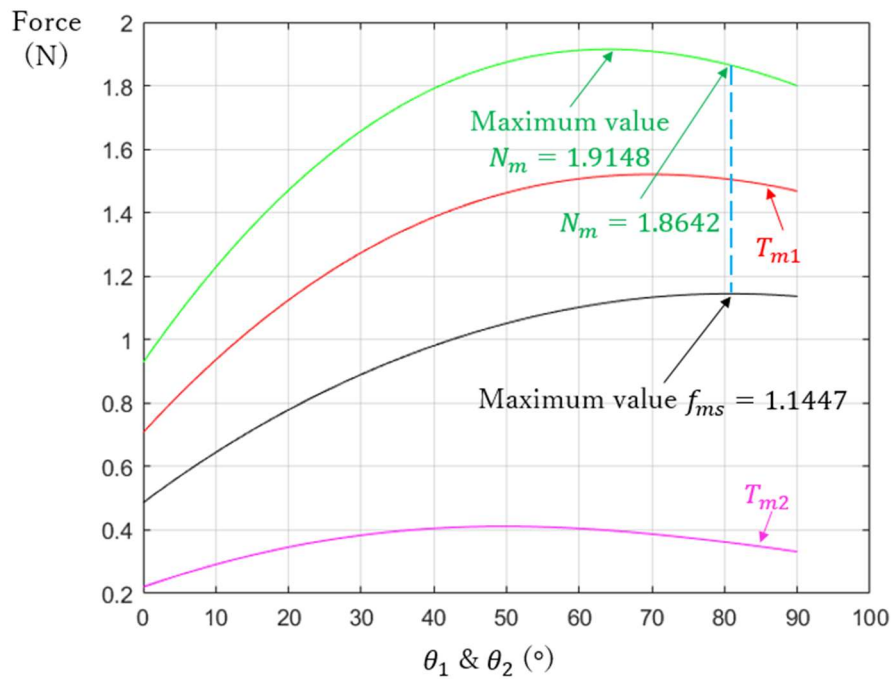


Fig.4.22 第四象限・中指・静摩擦力による変化

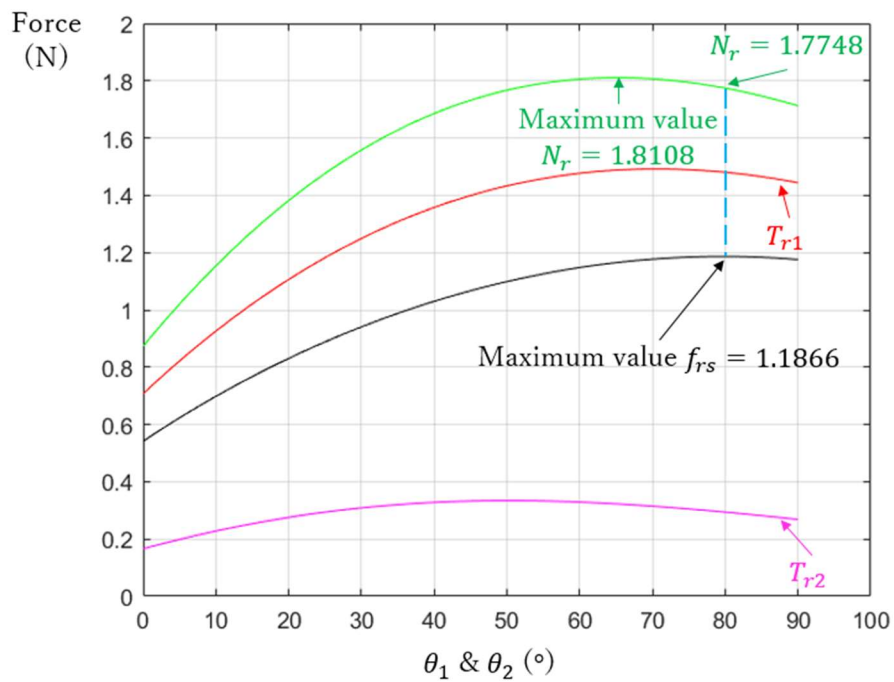


Fig.4.23 第四象限・環指・静摩擦力による変化

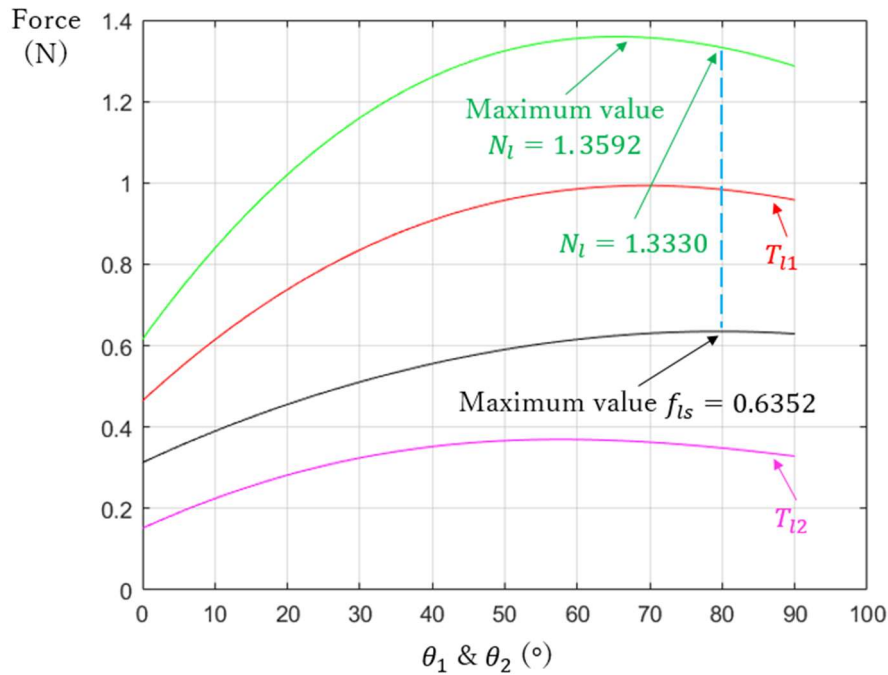


Fig.4.24 第四象限・小指・静摩擦力による変化

以上の静摩擦力および対応している支持力の計算結果に基づいて，最大静摩擦力を境とみなして，最小動摩擦力と等しいため，各象限で各指による必要な最小の動摩擦係数 $\mu_n$ を下記の式で求めて，結果を Table.4.5 に示す．

$$\mu_n = \frac{f_{nd}}{N_n} \geq \frac{f_{ns}}{N_n}$$

Table.4.5 各象限で各指の必要な最小動摩擦係数

	示指 $\mu_i$	中指 $\mu_m$	環指 $\mu_r$	小指 $\mu_l$
第一象限	0.6655	0.6032	0.6690	0.4839
第二象限	0.5877	0.5000	0.5876	0.3730
第三象限	0.5970	0.5222	0.5899	0.3931
第四象限	0.6662	0.6140	0.6686	0.4765

これらの結果から，必要な最小動摩擦係数は 0.6690 であり，第一象限の環指にて発生する．すなわち，任意の空間位置において，リーチングのときに，指関節に作用するアクティブワイヤをクラッチ機構上に固定される効果があり，そのような性能を発揮できるように，動摩擦係数を比較的に大きい数値のほうを選ぶ．結果として，必要な最小動摩擦係数が $\mu_n \geq 0.6690$ となる．

実際に制作したクラッチ機構の動摩擦係数が理論値に近いほうは望ましいため，Fig.4.25 のように，異なる材料でクラッチ機構を制作し，それぞれの動摩擦係数を測る．測定方法としては，バイスでクラッチ機構を挟んで，2本のアクティブワイヤが

地面の方向に垂直する。それに、アクティブワイヤの両端に分銅を吊らせて、片方に少しずつ重量を追加し、相対の移動が発生すると動摩擦力が作用し始めると意味するため、両端に吊る分銅の重量差を記録し、動摩擦係数を計算する。それぞれの材料について、違う重量で5回を測定し、動摩擦係数の平均値を取る。測定結果を Table.4.6 のように示す。

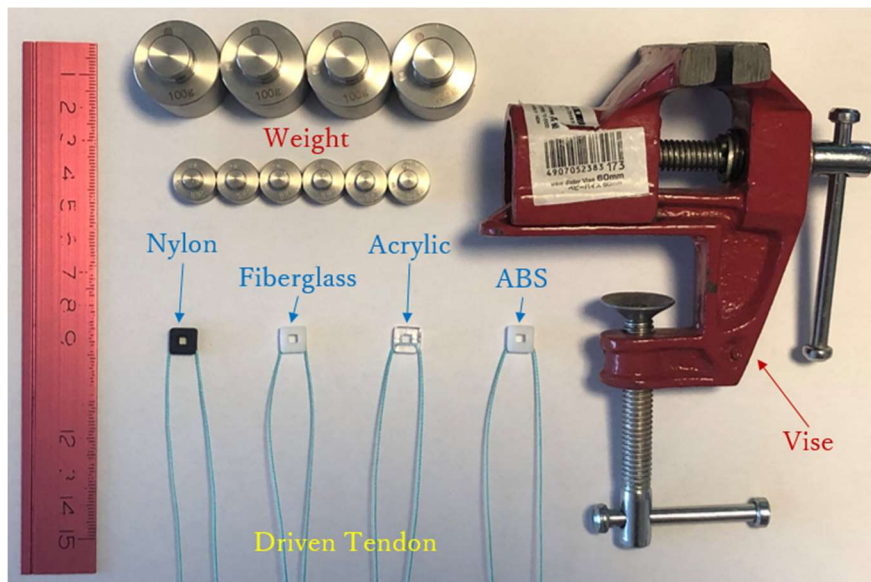


Fig.4.25 異なる材料によるクラッチ機構の動摩擦係数の測定

Table.4.5 各種の材料における動摩擦係数

	ナイロン (黒)	グラス繊維 (白)	アクリル (透明)	ABS (白)
1回目	$T_{n1}: 10g$ $T_{n2}: 60g$ $\mu_n = 0.7143$	$T_{n1}: 10g$ $T_{n2}: 135g$ $\mu_n = 0.8621$	$T_{n1}: 10g$ $T_{n2}: 65g$ $\mu_n = 0.7333$	$T_{n1}: 10g$ $T_{n2}: 45g$ $\mu_n = 0.6364$
2回目	$T_{n1}: 15g$ $T_{n2}: 75g$ $\mu_n = 0.6667$	$T_{n1}: 15g$ $T_{n2}: 140g$ $\mu_n = 0.8065$	$T_{n1}: 15g$ $T_{n2}: 80g$ $\mu_n = 0.6842$	$T_{n1}: 15g$ $T_{n2}: 60g$ $\mu_n = 0.6$
3回目	$T_{n1}: 20g$ $T_{n2}: 90g$ $\mu_n = 0.6364$	$T_{n1}: 20g$ $T_{n2}: 150g$ $\mu_n = 0.7647$	$T_{n1}: 20g$ $T_{n2}: 100g$ $\mu_n = 0.6667$	$T_{n1}: 20g$ $T_{n2}: 80g$ $\mu_n = 0.6$
4回目	$T_{n1}: 25g$ $T_{n2}: 100g$ $\mu_n = 0.6$	$T_{n1}: 25g$ $T_{n2}: 185g$ $\mu_n = 0.7619$	$T_{n1}: 25g$ $T_{n2}: 120g$ $\mu_n = 0.6552$	$T_{n1}: 25g$ $T_{n2}: 95g$ $\mu_n = 0.5833$
5回目	$T_{n1}: 30g$ $T_{n2}: 120g$ $\mu_n = 0.6$	$T_{n1}: 30g$ $T_{n2}: 190g$ $\mu_n = 0.7273$	$T_{n1}: 30g$ $T_{n2}: 130g$ $\mu_n = 0.625$	$T_{n1}: 30g$ $T_{n2}: 115g$ $\mu_n = 0.5862$
平均値	$\mu_n = 0.6435$	$\mu_n = 0.7845$	$\mu_n = 0.6729$	$\mu_n = 0.6012$

以上の結果により、アクリルがクラッチ機構の製作材料として所要な動摩擦係数に近く、機能を発揮できる。

2. グラスピング：

グラスピングの場合では、Fig.4.26のように、MP 関節がブロックされて、赤色のワイヤの左端を固定されるとみなして、PIP 関節のみを屈曲する。

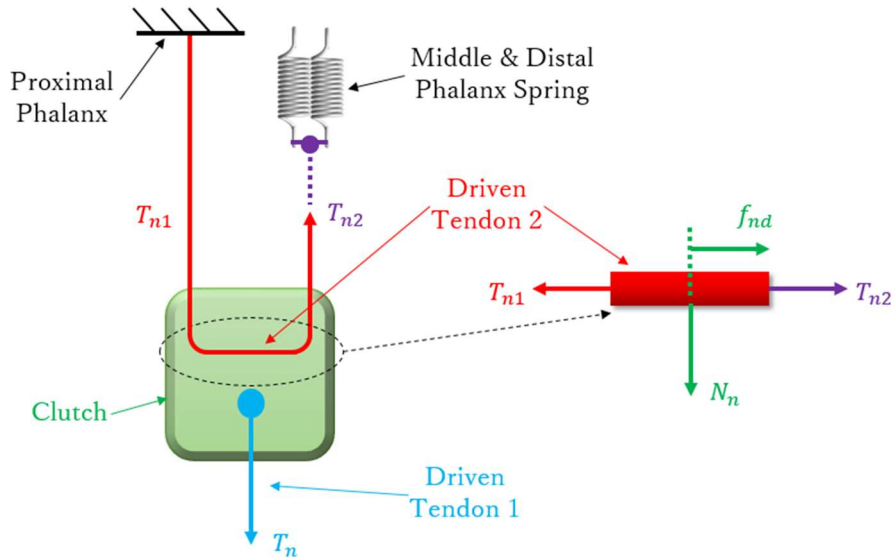


Fig.4.26 クラッチ機構の動摩擦力モデル

この状況によって、クラッチ機構が発生する静摩擦力が動摩擦力に変わって、重力を除く力学の釣り合う式は：

$$\begin{cases} T_n = T_{n1} + T_{n2} = N_n = T_{n1} + \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{n3} + \sigma_{n3}) \right] \\ f_{nd} = T_{n1} - T_{n2} = T_{n1} - \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{n2} + \sigma_{n2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{n3} + \sigma_{n3}) \right] \\ f_{nd} = \mu_n N_n \end{cases}$$

それに、残る PIP 関節を駆動するアクティブワイヤの出力がクラッチ機構の動摩擦力と釣り合う。それによって、出力はいかに変化するかを明確するために、動摩擦係数が最大である第一象限にて活動する中指を例として説明する。ただし、 $\mu_m = \mu_n = 0.6729$ を前提に、MP 関節のブロックによって、張力 $T_{m1}$ が対応すべきの関節の重力、弾性力と初張力を全部遮断されて、式には $G_{n1}$ 、 $K_{n1}$ と $\sigma_{n1}$ 項が存在しなくなる。そのため、 $T_{m1}$ を消去し、式を整理すると：

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{md} = \frac{2\mu_m}{1-\mu_m} \left\{ \begin{array}{l} \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{m2} + \sigma_{m2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{m3} + \sigma_{m3}) \right] \\ + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{m2}C_{12} \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12}] \mathbf{G}_m \end{array} \right\} \\ N_m = \frac{2}{1-\mu_m} \left\{ \begin{array}{l} \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{m2} + \sigma_{m2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{m3} + \sigma_{m3}) \right] \\ + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{m2}C_{12} \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12}] \mathbf{G}_m \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

この式に基づいて、仮に MP 関節がそれぞれ 0 度、30 度、45 度、60 度、89 度のときにブロックされる条件を設定して、各状況で動摩擦力および支持力の変化を算出する。結果は 0 度の Fig.4.27、30 度の Fig.4.28、45 度の Fig.4.29、60 度の Fig.4.30、89 度の Fig.4.31 に示す。

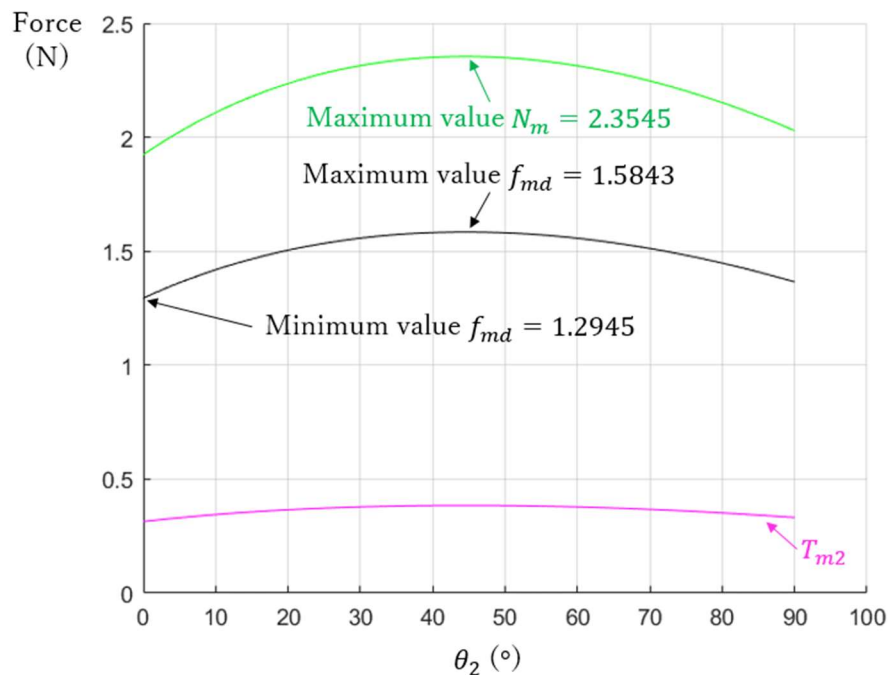


Fig.4.27 第一象限・中指 MP 関節が 0 度で停止・動摩擦力による変化



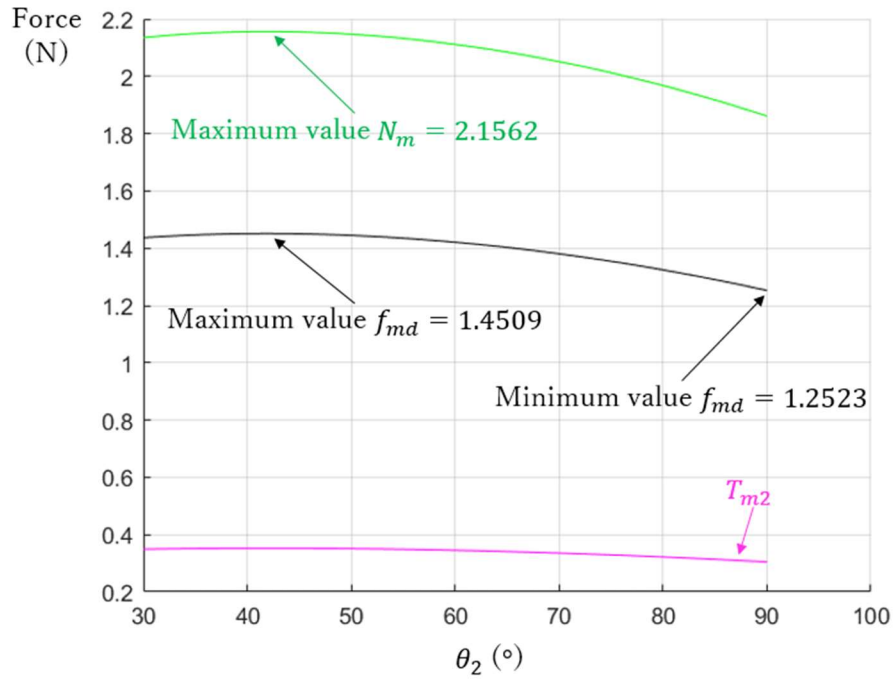


Fig.4.28 第一象限・中指 MP 関節が 30 度で停止・動摩擦力による変化

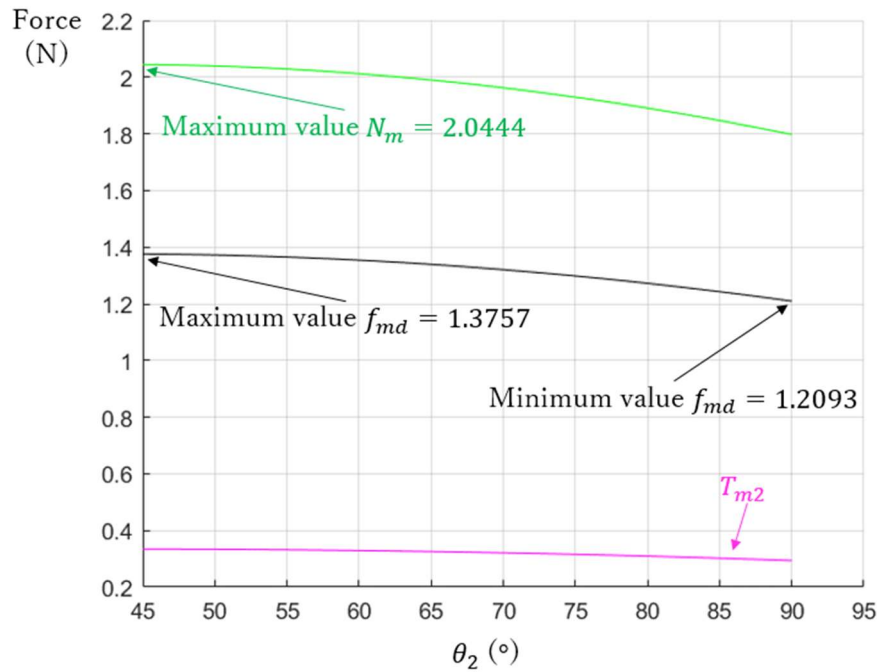


Fig.4.29 第一象限・中指 MP 関節が 45 度で停止・動摩擦力による変化



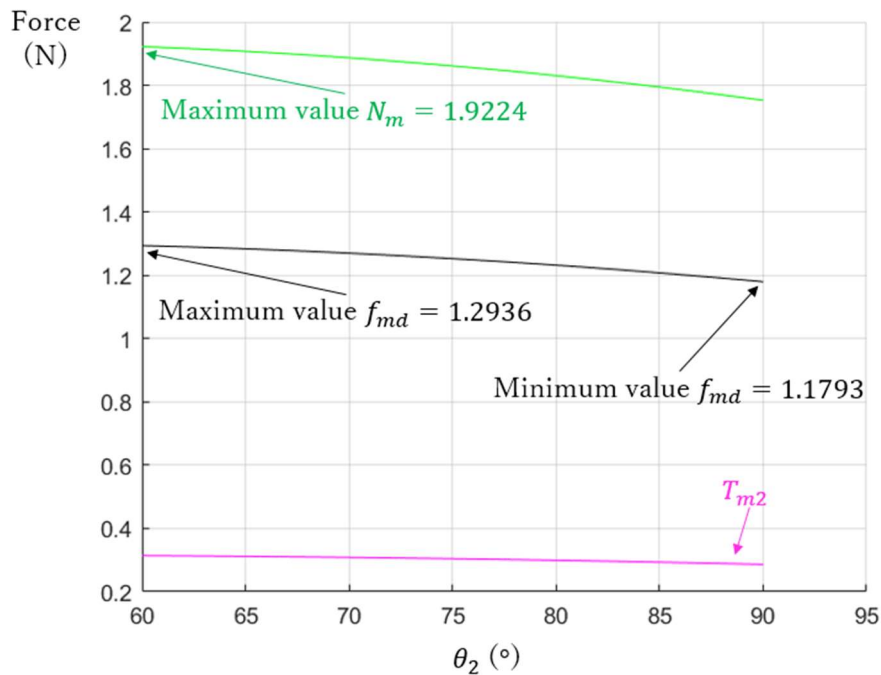


Fig.4.30 第一象限・中指 MP 関節が 60 度で停止・動摩擦力による変化

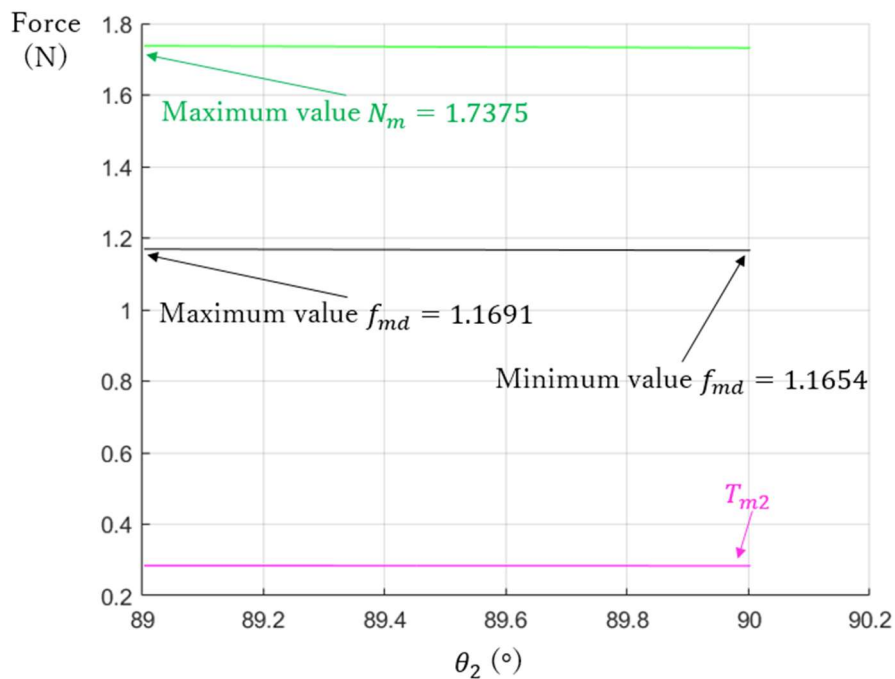


Fig.4.31 第一象限・中指 MP 関節が 89 度で停止・動摩擦力による変化

結果からみると、動摩擦力の最大値は 1.5843N、最小値は 1.1654N であり、Fig.4.10 に示した第一象限での最大静摩擦力 1.0186 より大きくになって、設けた機能を満足する。それに、最大の支持力が 2.3545N であり、MP 関節が 0 度でブロックされるとき

に発生するため、この数値は後の4.3.3節で説明するグラスピングに利用する。

#### 4.2.5 適応連動機能の性能及び出力検証

提案した適応連動機能の性能を把握するため、実際に制作した指に関して、各関節におけるリーチングの同時屈曲という運動軌跡の安定性、およびグラスピングの馴染み把持を形成した出力の測定を実施する。

まずはリーチングのときに、MP、PIP、DIP 関節が同時屈曲という運動軌跡の安定性について検証を行う。実験手法を説明すると、前述のように、適応連動機能では自動伸展バネの最適化が可能になるほか、リーチングするときの運動軌跡は重力に影響されない安定性を持っている。それに対して、義手に使う中指は本研究で提案した摩擦クラッチメカニズムの二対二のタイプを、それぞれ一對三、一對二、一對一のタイプのメカニズムと一緒に比較する。Fig.4.32 に示したように、製作した五種類の指関節は義手に使う中指を除いて、残るものは全部同じパラメータで設計されて、自動伸展機能に使用するバネも同様であり、すべて最適化に仕上げた。それに、各関節に角度センサー（日本、アルプスアルパイン株式会社、ロータリタイプ RDC506018A）を付けて、指を第一象限の位置にバイスで固定し、ベース部からのアクティブワイヤに少しずつ分銅を追加して、関節を屈曲させて角度の変化データを計測する。結果は Fig.4.33 に表示する。

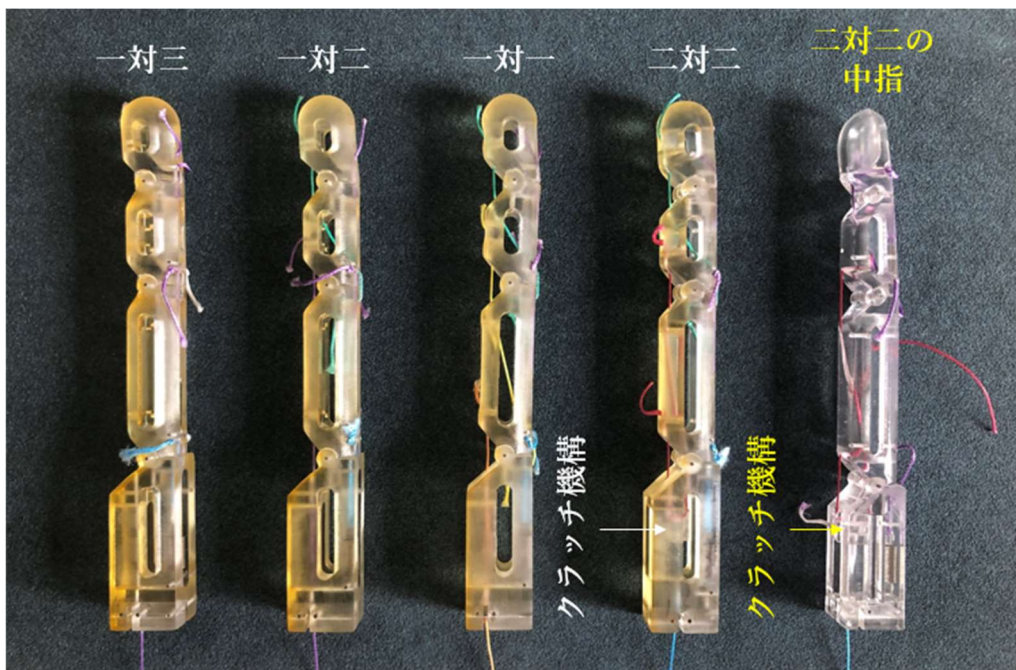


Fig.4.32 製作した五種類の指

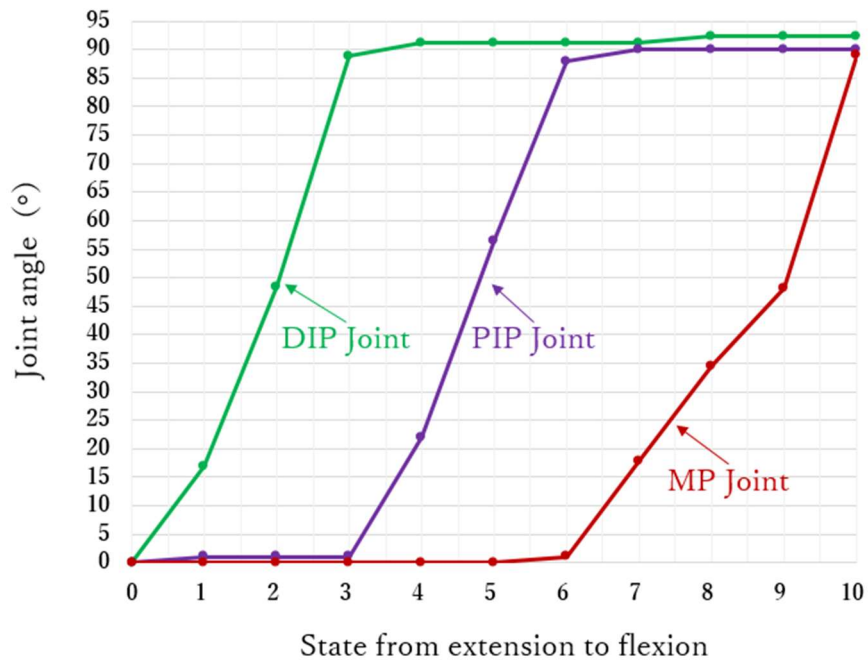


Fig.4.33.a 一対三の運動軌跡

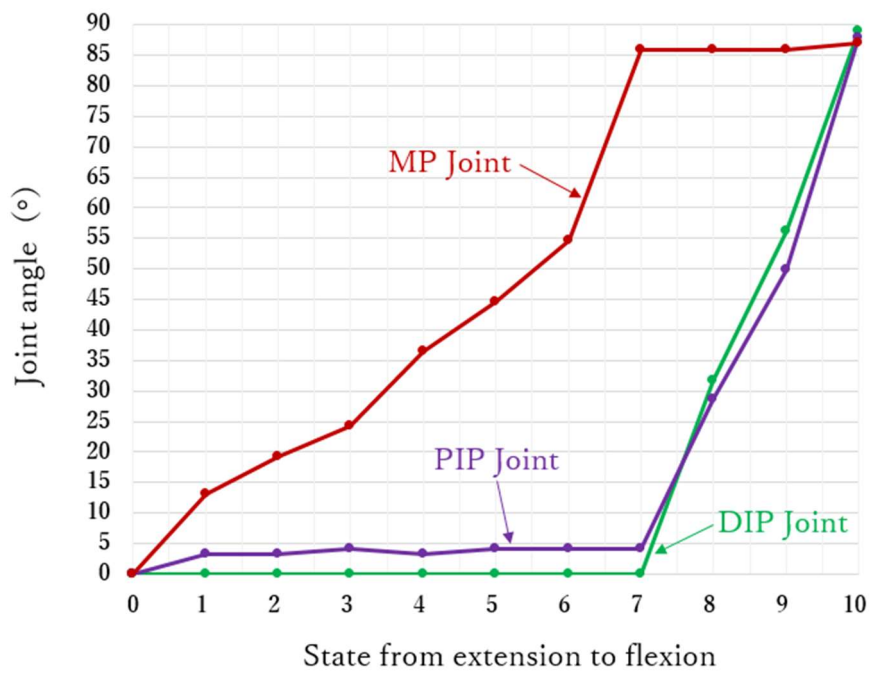


Fig.4.33.b 一対二の運動軌跡

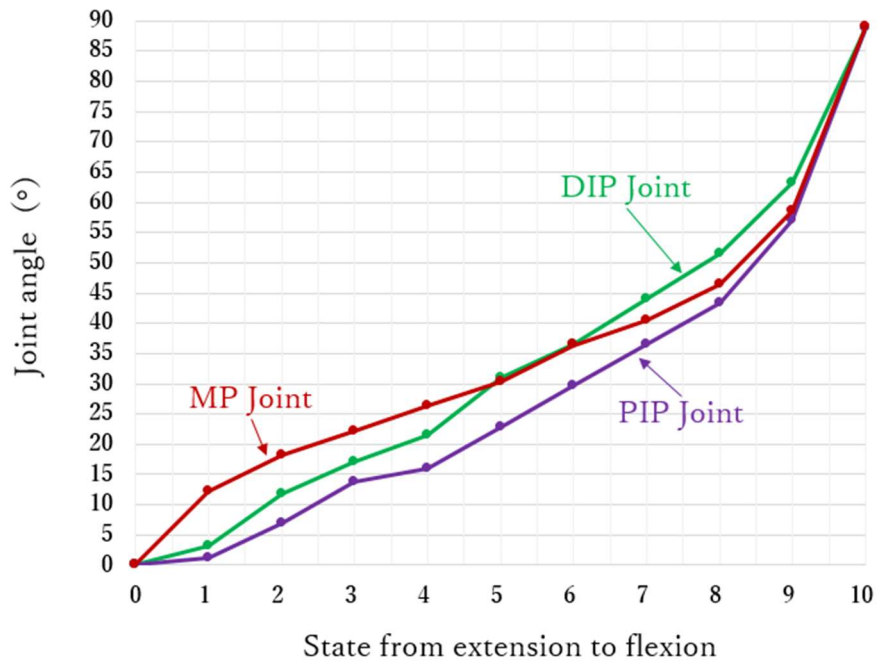


Fig.4.33.c 一対一の運動軌跡

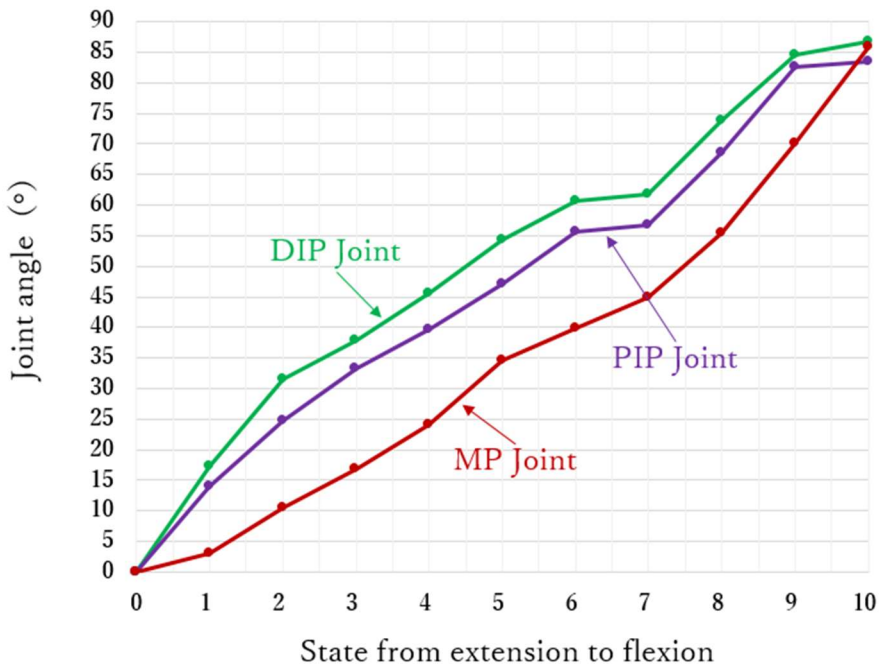


Fig.4.33.d 二対二の運動軌跡

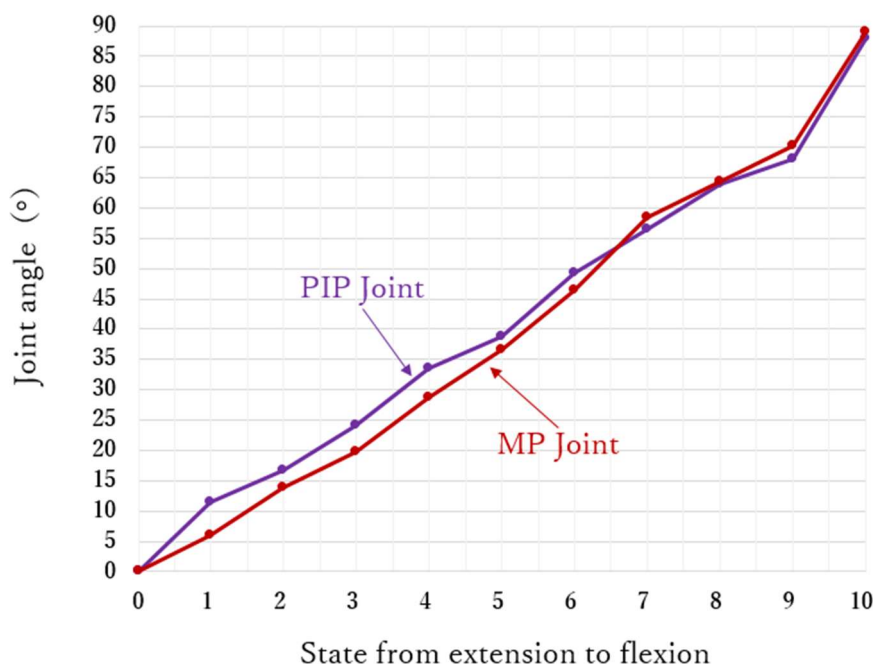


Fig.4.33.e 二対二の中指の運動軌跡

四指の各指がリーチングのときに、三関節は同時に屈曲する特徴を基準にして、上記の計測した結果から：一対三のタイプでは、DIP→PIP→MP 関節の順に屈曲して機能に満足していない。一対二のタイプでは、最初 MP 関節が動き出して、90 度になったら PIP 関節とパッシブの DIP 関節が同じ角速度で屈曲して、機能に満たさない。一対一のタイプでは、MP 関節がパッシブの PIP と DIP 関節を連れて、同じ角速度で屈曲して、運動軌跡が安定であるが、馴染み把持ができないため、機能から外れる。二対二のタイプでは、三関節が同時に屈曲しながら、一緒に屈曲の限界に到達して、運動軌跡の安定さを確かめた。二対二のタイプを基準にして、中指に応用した結果も同様になって、運動軌跡が安定であることを確認できた。

次に、グラスピングによる馴染み把持の出力を検証するために、前のセクションで立った摩擦力の関係式に基づいて、指全体にモデリングをして、理論上で各関節の出力の変化を算出する。Fig.4.34 に示したように、仮想仕事原理を用いてモデルを立ち上げた。それに、前のセクションで算出した結果を反映するために、三関節を第一象限の  $xy$  平面で 2 次元空間に任意の角度で屈曲させる。仮に各関節が把持物体との接触点  $P_n$  を関節の重心位置にする。また、ワールド座標系の原点を MP 関節の回転中心に設置する。ただし、四指の各指においてモデルは同様であるため、中指を例に説明する代わりに、ほかの指の説明を省略する。さらに、数式を洗練させるために、中指の略称  $m$  を省略する。

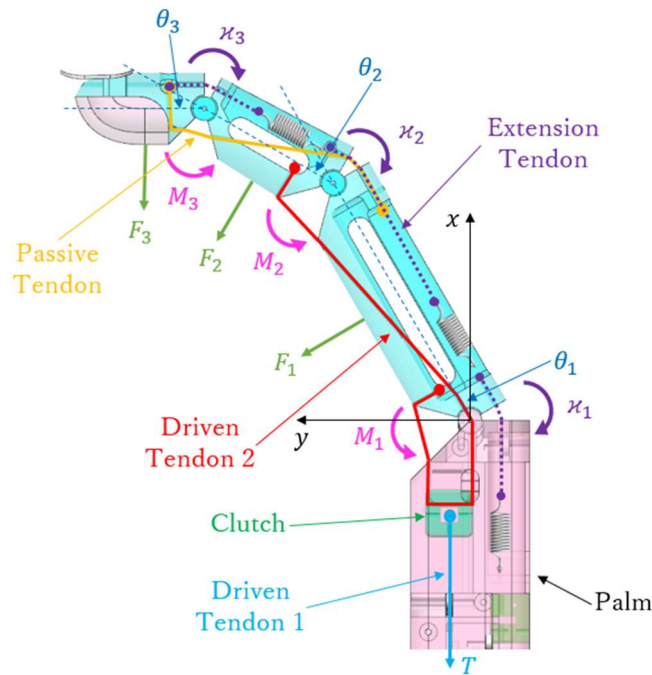


Fig.4.34 中指の力学モデル

したがって、ローカル座標において各関節の接触点は：

$${}^q\mathbf{P} = \begin{bmatrix} R_q \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

同次変換行列は（ただし、 $C_q$ は $\cos \theta_q$ 、 $S_q$ は $\sin \theta_q$ とする）：

$${}^0\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & L_1 \\ S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & L_2 \\ S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

よって、ワールド座標において各関節の接触点を算出できる：

$${}^0\mathbf{P} = {}^0\mathbf{T} \dots {}^{q-1}\mathbf{T} {}^q\mathbf{P} \quad (q = 1, 2 \dots)$$

また、各関節の出力と回転行列は：

$${}^q\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_q \\ 1 \end{bmatrix}$$



$${}^{q-1}_q\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C_q & -S_q & 0 \\ S_q & C_q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

そこで、下記の式を成り立つ。ただし、 $\mathbf{J}^T$ はヤコビの転置行列である：

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_{q=1}^3 {}^0\mathbf{J}^T {}^0\mathbf{F}$$

以上によって、関節の出力を求める：

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \frac{L_1}{R_1 R_2 R_3} [R_3 \cos \theta_2 - R_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3] \\ \left\{ \frac{7\sqrt{2} \sin\left(\frac{\theta_3}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{9.9 \cos \frac{\theta_2}{2}} \left[ 7\sqrt{2} T_2 \sin\left(\frac{\theta_2}{2} + \frac{\pi}{4}\right) - 24.75 k_2 \sin \theta_2 - 4.95 \sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \right] \right. \\ \left. - G_3 R_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 16 k_3 \sin \theta_3 - 4 \sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \right\} \\ + \frac{1}{R_1 R_2} (R_2 + L_1 \cos \theta_2) \left[ \begin{array}{l} 7\sqrt{2} T_2 \sin\left(\frac{\theta_2}{2} + \frac{\pi}{4}\right) + 24.75 k_2 \sin \theta_2 + 4.95 \sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \\ + G_3 [R_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \\ + G_2 R_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{array} \right] \\ + \frac{1}{R_1} \left[ \begin{array}{l} 7\sqrt{2} T_1 \sin\left(\frac{\theta_1}{2} + \frac{\pi}{4}\right) - 24.75 k_1 \sin \theta_1 - 4.95 \sigma_1 \cos \frac{\theta_1}{2} \\ - G_1 R_1 \cos \theta_1 - G_2 [R_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos \theta_1] \\ - G_3 [R_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos \theta_1] \end{array} \right] \\ F_2 = -\frac{1}{R_2 R_3} (R_3 + L_2 \cos \theta_3) \\ \left\{ \frac{7\sqrt{2} \sin\left(\frac{\theta_3}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{9.9 \cos \frac{\theta_2}{2}} \left[ 7\sqrt{2} T_2 \sin\left(\frac{\theta_2}{2} + \frac{\pi}{4}\right) - 24.75 k_2 \sin \theta_2 - 4.95 \sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \right] \right\} \\ \left\{ -G_3 R_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 16 k_3 \sin \theta_3 - 4 \sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \right\} \\ + \frac{1}{R_2} \left\{ \begin{array}{l} 7\sqrt{2} T_2 \sin\left(\frac{\theta_2}{2} + \frac{\pi}{4}\right) - 24.75 k_2 \sin \theta_2 - 4.95 \sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \\ - \frac{4.95\sqrt{2} \cos \frac{\theta_2}{2}}{7 \sin\left(\frac{\theta_3}{2} + \frac{\pi}{4}\right)} \left( 16 k_3 \sin \theta_3 + 4 \sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \right) - G_2 R_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ - G_3 [R_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \end{array} \right\} \\ F_3 = \frac{1}{R_3} \left\{ \begin{array}{l} \frac{7\sqrt{2} \sin\left(\frac{\theta_3}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{9.9 \cos \frac{\theta_2}{2}} \left[ 7\sqrt{2} T_2 \sin\left(\frac{\theta_2}{2} + \frac{\pi}{4}\right) - 24.75 k_2 \sin \theta_2 - 4.95 \sigma_2 \cos \frac{\theta_2}{2} \right] \\ - G_3 R_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 16 k_3 \sin \theta_3 - 4 \sigma_3 \cos \frac{\theta_3}{2} \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

式には、境界条件 $\theta_2 = \theta_3$ を代入するほか、MP 関節をそれぞれに 0 度、30 度、45 度でブロックされると想定し、条件に加える。計算結果の $F_2(\theta_2, \theta_3)$ および $F_3(\theta_2, \theta_3)$ の三次元グラフがそれぞれに Fig.4.35、Fig.4.36、Fig.4.37 のように示す。

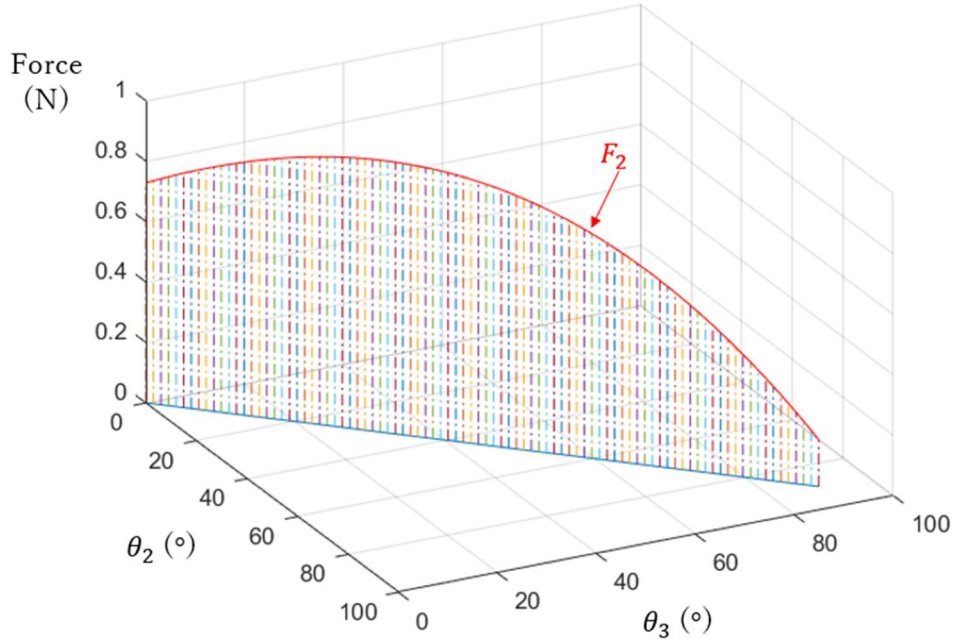


Fig.4.35.a 中指・MP 関節が 0 度で停止・PIP 関節の出力

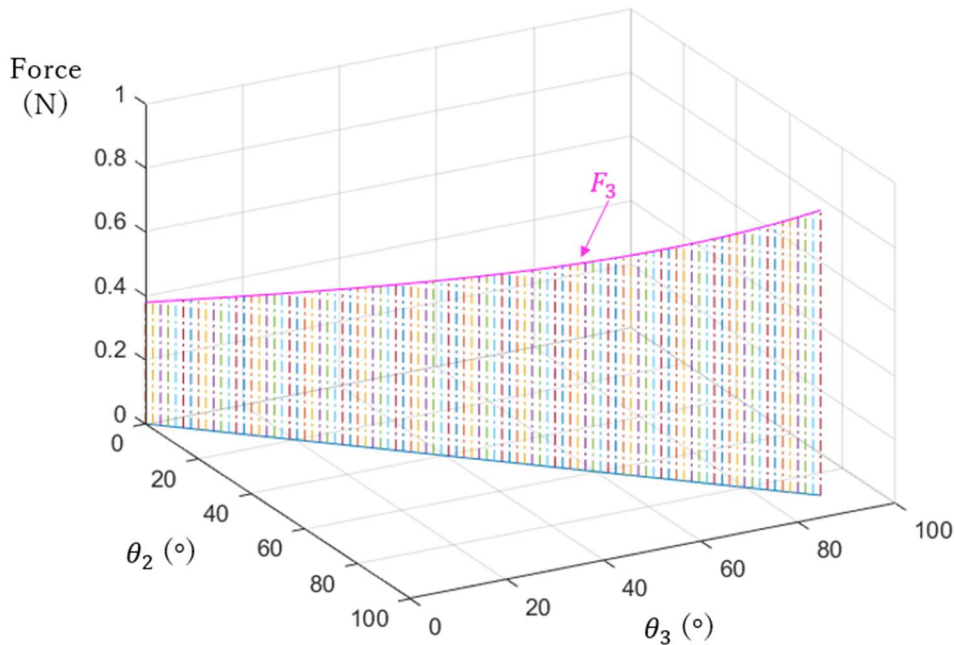


Fig.4.35.b 中指・MP 関節が 0 度で停止・DIP 関節の出力



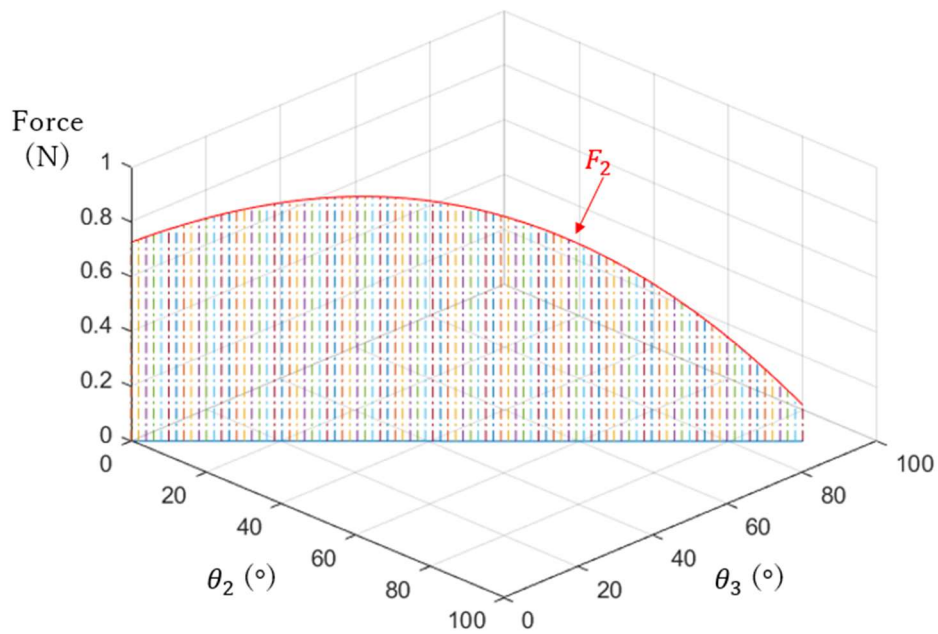


Fig.4.36.a 中指・MP 関節が 30 度で停止・PIP 関節の出力

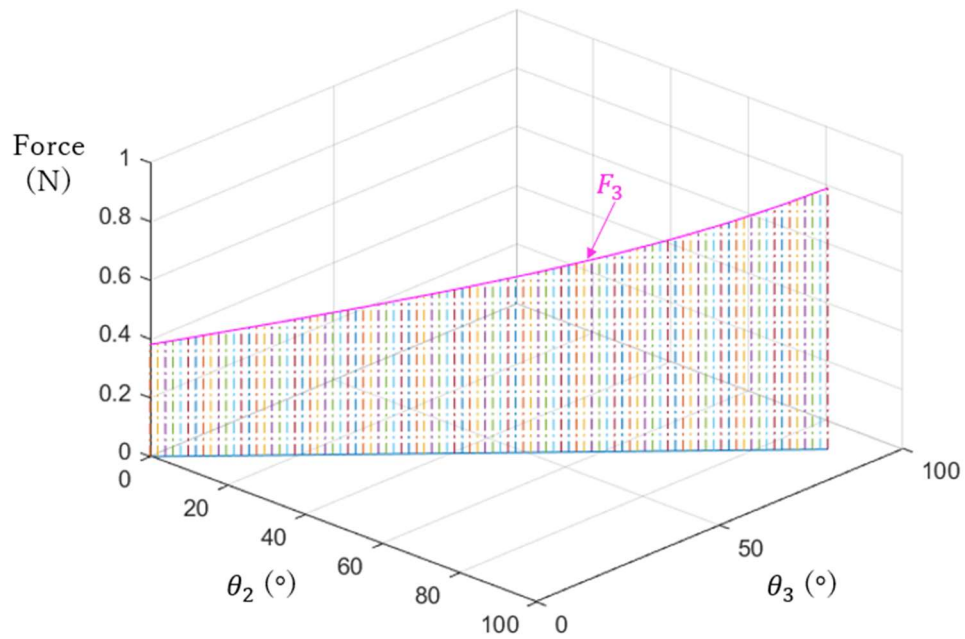


Fig.4.36.b 中指・MP 関節が 30 度で停止・DIP 関節の出力

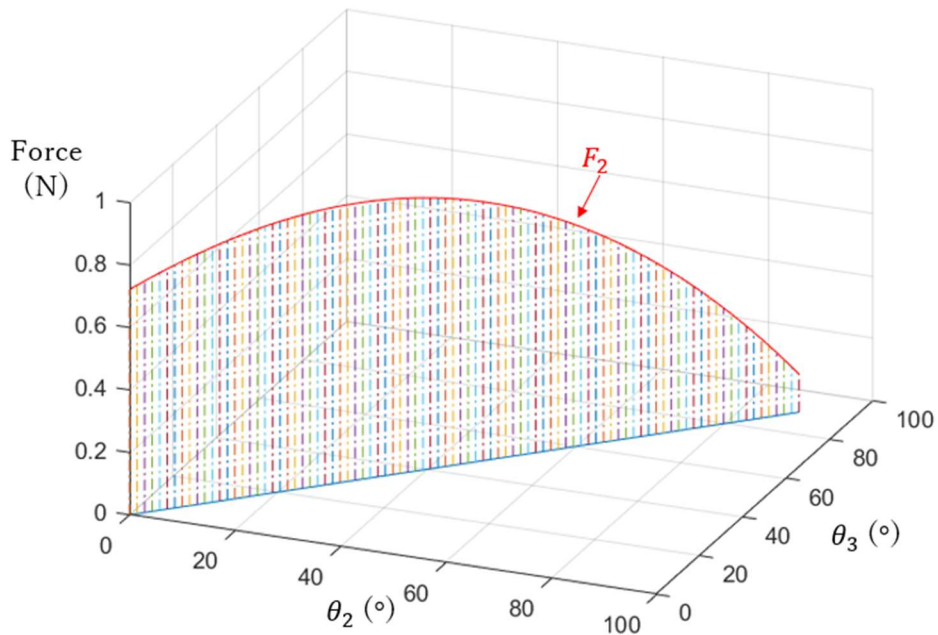


Fig.4.37.a 中指・MP 関節が 45 度で停止・PIP 関節の出力

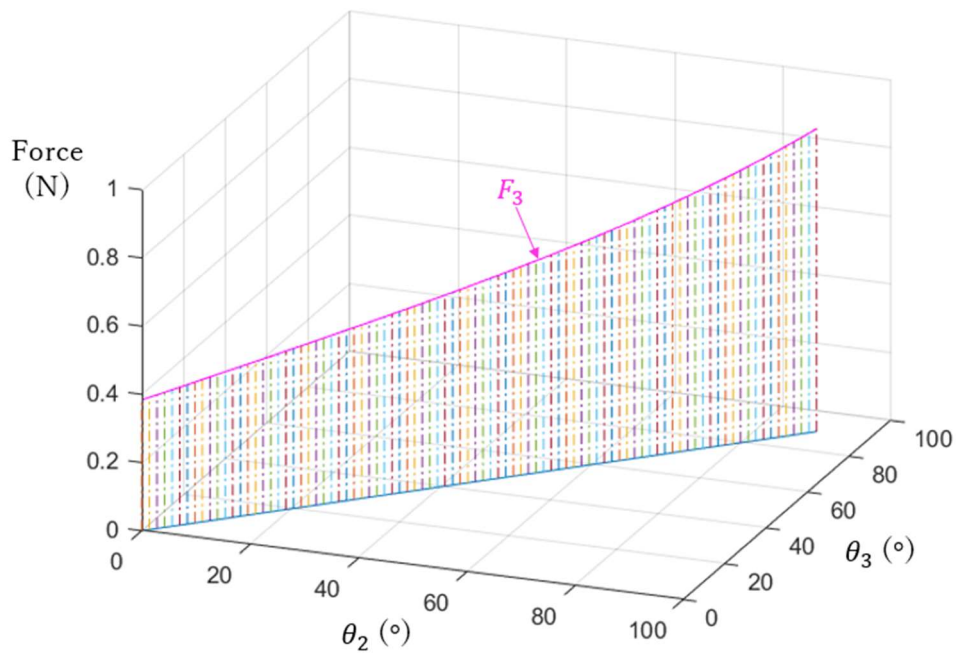


Fig.4.37.b 中指・MP 関節が 45 度で停止・DIP 関節の出力

以上の理論値を検証するために、実験を Fig.4.38 のように支度する：中指をバイスで第一象限の位置で挟んで、PIP 関節のみに角度センサーを付け（DIP 関節がパッシブな構造のため、PIP 関節の運動と一致している）、マイコンで角度の変化を読み取

る。そして、Fig.4.39 に示す異なる角度のブロックを使用して、MP 関節に付けて、運動を相応な角度で停止させる。最後に、ワイヤに 500g の分銅 (Fig.4.27 からの最大支持力より大きい数値を取る) を吊り、Fig.4.40 のようにフォースゲージ (中国, 東莞三量精密量儀有限公司, SL-50) を用いて、それぞれ PIP、DIP 関節の出力を 5 回ずつ測定する。

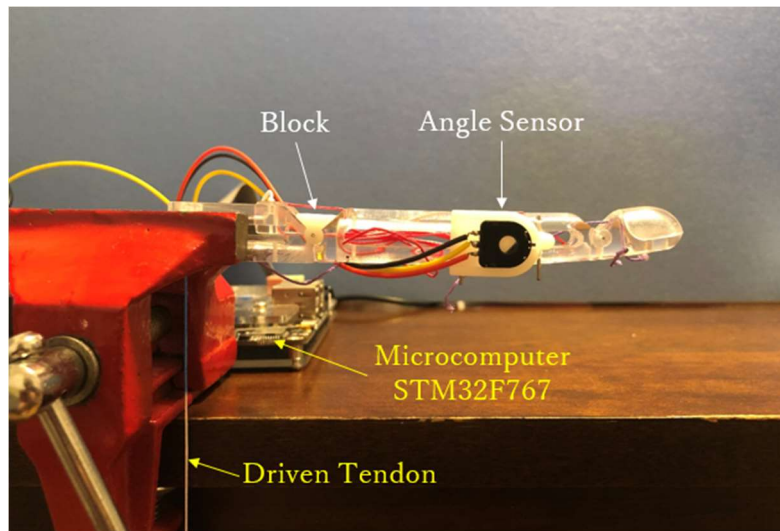


Fig.4.38 出力検証実験の装置

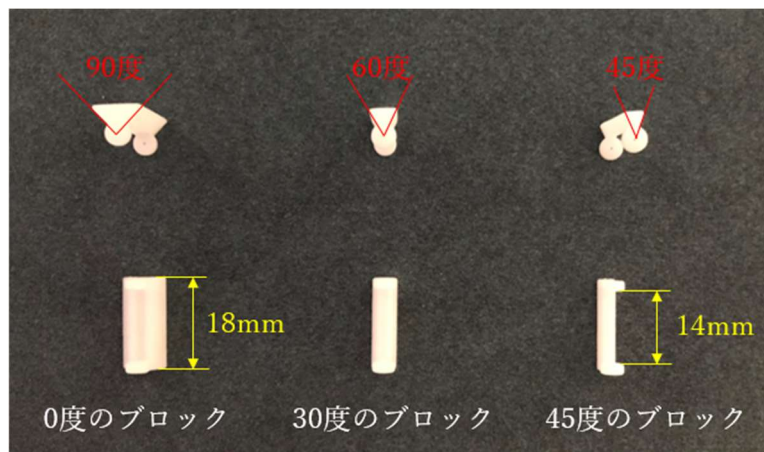


Fig.4.39 三種類の角度ブロック

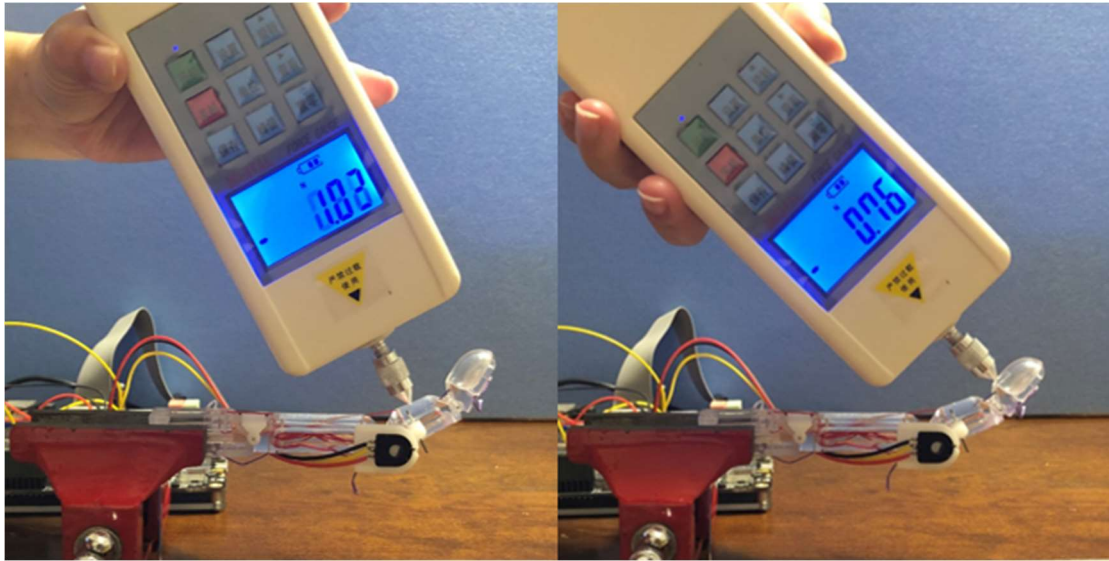


Fig.4.40 出力測定風景（左：PIP 関節，右：DIP 関節）

そこで，計測した結果は破線で表示して，それぞれ 0 度の Fig.4.41、30 度の Fig.4.42、45 度の Fig.4.43 に示している．また，赤色、ピンク色の曲線はそれぞれ PIP、DIP 関節の出力の理論値を表して，青色は弾性力を除いた出力の理論値となる．

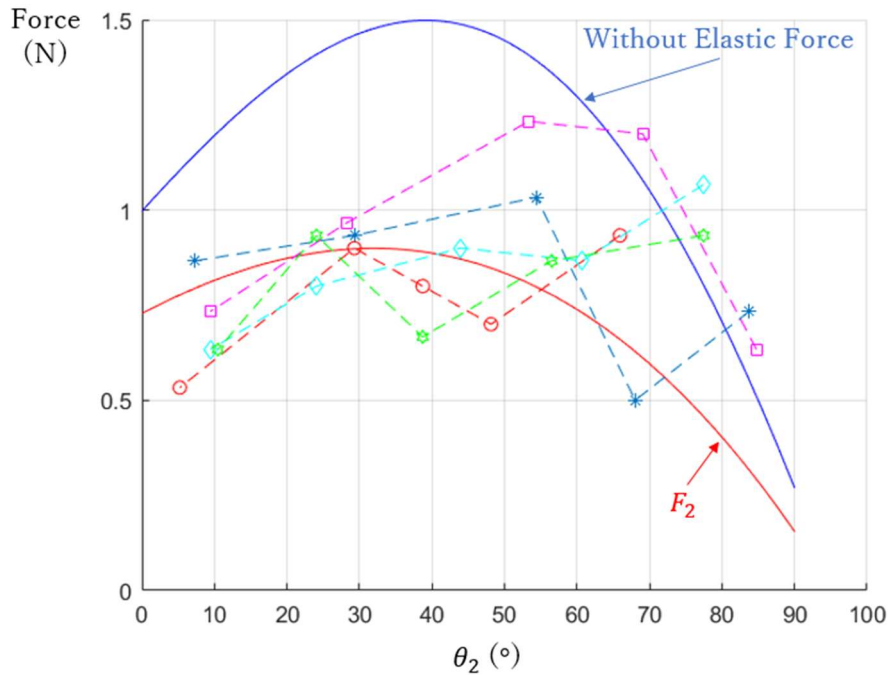


Fig.4.41.a 中指・MP 関節が 0 度で停止・PIP 関節の出力の実測値

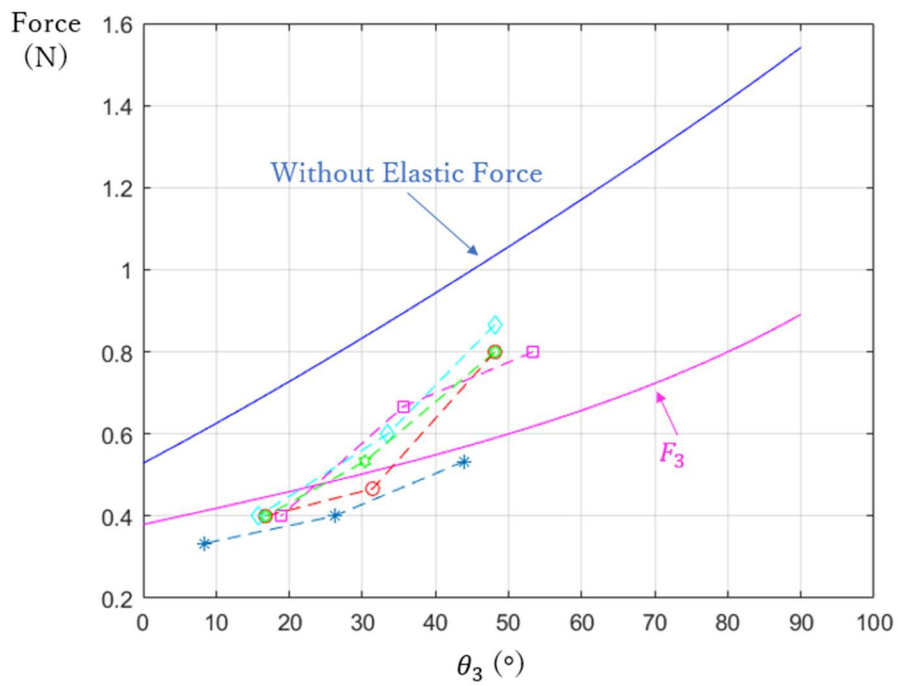


Fig.4.41.b 中指・MP 関節が 0 度で停止・DIP 関節の出力の実測値

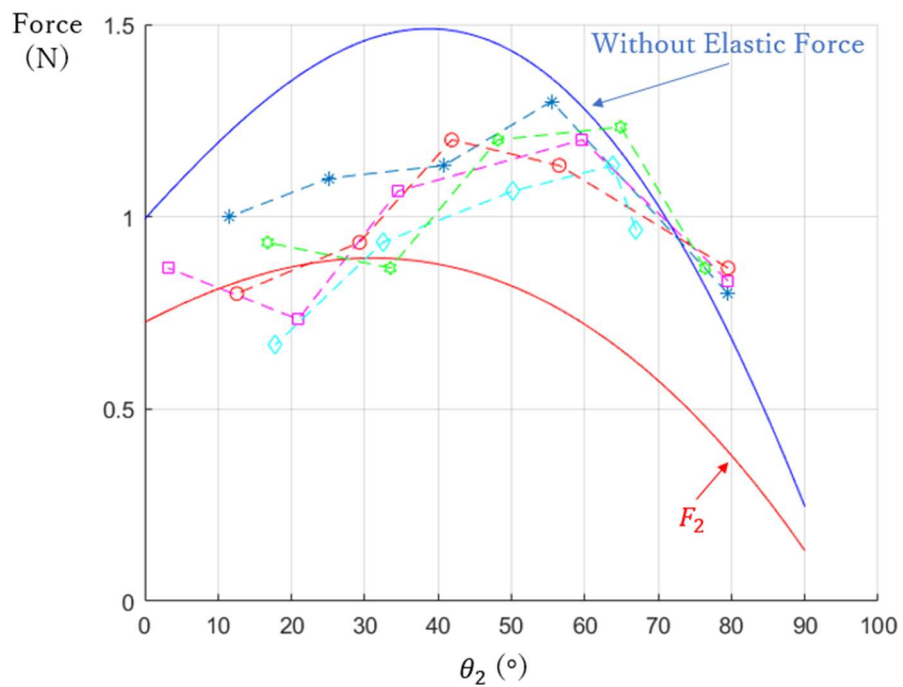


Fig.4.42.a 中指・MP 関節が 30 度で停止・PIP 関節の出力の実測値



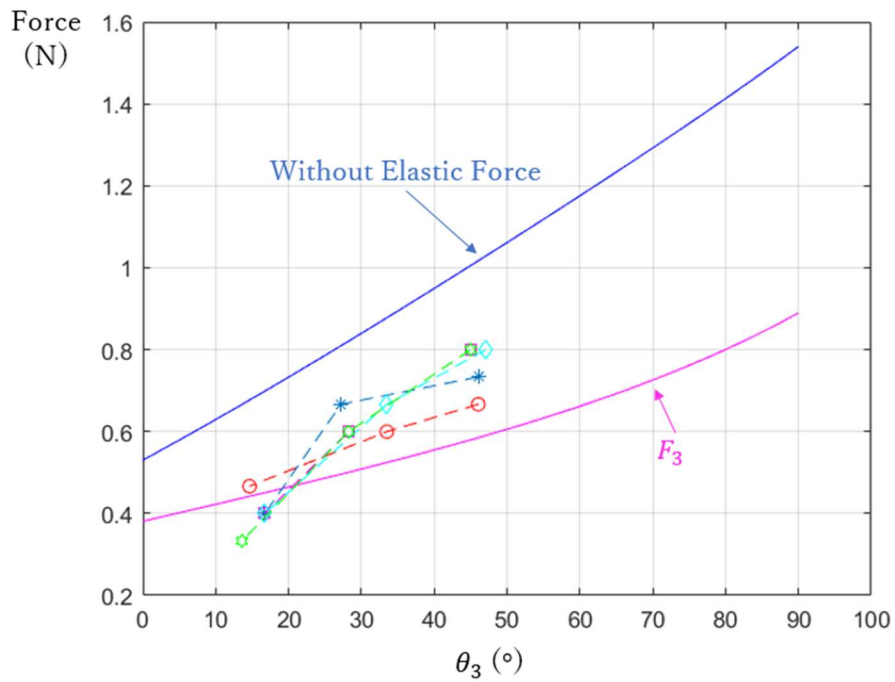


Fig.4.42.b 中指・MP 関節が 30 度で停止・DIP 関節の出力の実測値

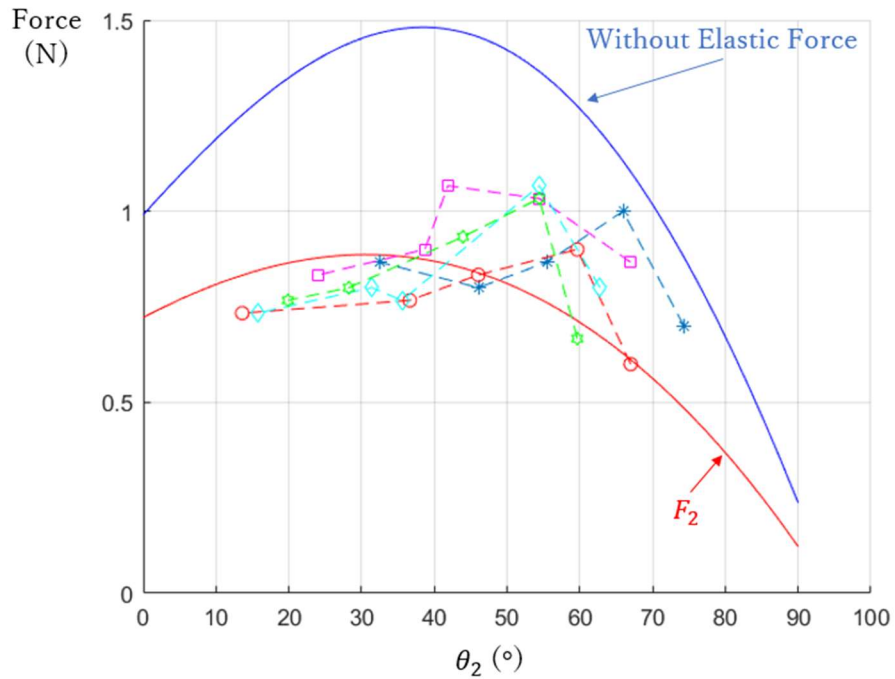


Fig.4.43.a 中指・MP 関節が 45 度で停止・PIP 関節の出力の実測値

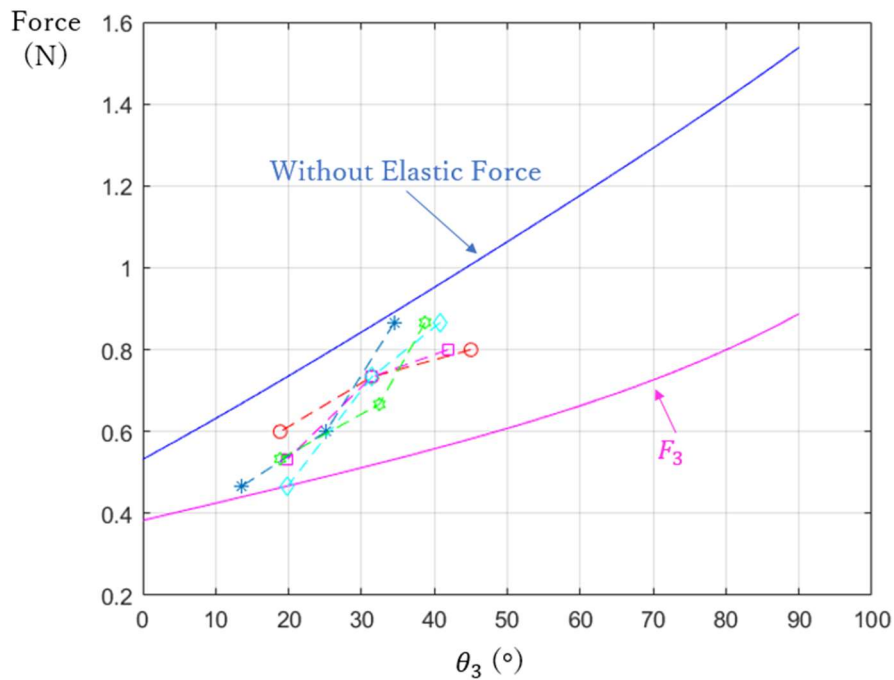


Fig.4.43.b 中指・MP 関節が 45 度で停止・DIP 関節の出力の実測値

結果から見ると，青色の曲線は指関節の伸展側におけるバネと連結したワイヤが緩んだ状況を配慮して，実測値はこのボーダーラインの以下にありながら，理論値の上下に存在していることから，正確性を判明できたうえに，設けた機能の有用性も確かめた。ただし，その反面，ワイヤの緩みが頻繁に使用するほど発生しやすくなって，最終的に機能に影響を及ぼして，把持性能が下がる。

### 4.3 四指全体における差動屈曲機能の実現

物体に対する把持は単なる指の適応連動機能に留まらなく、四指が一つのグループとみなして、物体の形状に沿う馴染み把持も必要となる。ただし、物体を把持する前に、もしある指が先に屈曲になるなら、逆に物体とぶつかる恐れがあるため、義手にとって全体的な把持性能が落ちる。ゆえに、四指に備える機能は単に馴染み把持だけではなく、リーチングのときに同時に屈曲する性能も必要となる。よって、これからの論点は単一の指と同じく、リーチングとグラスピングを分けて説明する：リーチングするときに、四指の運動が一致性を保ちながら、同時に屈曲させる。グラスピングするときに、物体の形状によって、自動的にマッチングできる性能が必要となる。このセクションでは、これら要求した性能を達成するために、冒頭は先行研究を述べてから既存の課題を挙げる。そして、運動特徴をすべて再現できる差動屈曲機能の必要性を提示する。それから、この機能を実現するために、前セクションで使用した指関節のクラッチ機構によってグレードアップして、ピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムを提案して、その構成を説明する。さらに、各種の把持パターンによる異なる屈曲の変化を解析する。最後に四指に応用する差動屈曲機能の検証実験を行って、開発したメカニズムの有用性を確認する。

#### 4.3.1 既存研究及び課題

四指全体の運動特徴を全部再現できるような差動屈曲機能の実現を目指して、先行研究では2種類のメカニズムをまとめられている。それぞれに説明する：

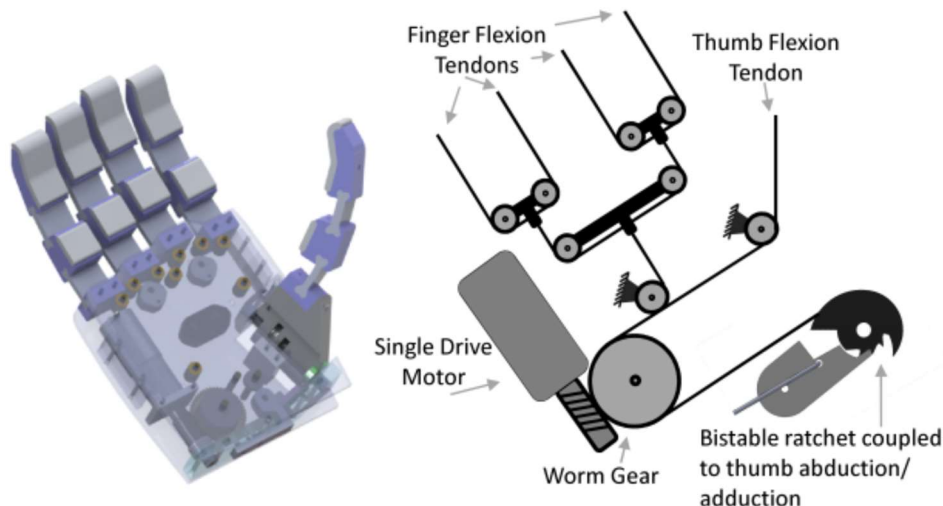


Fig.4.44 滑車式の差動屈曲機能 ([J. T. Belter 2013]より)

滑車式：Fig.4.44 に示したように、指と指の間に動滑車で連絡し合っ、リーチングの場合は動滑車の並進運動によって各指を一緒に連動する。そして、グラスピングの場合では、物体にブロックされていない指は動滑車の回転運動によってアクチュエー



ターからの出力が支障なく伝えるうえに、動滑車が引き続き並進運動をしていくたびに、該当の指は継続的に屈曲できる[J. T. Belter 2013]. しかしながら、滑車の回転運動における摩擦力が極めて小さいため、リーチングのときに各指の伸展バネが異なる原因で同時に屈曲にならず、バネ定数が比較的小さいほうから先に屈曲してしまうようになる。これに対して、四指の各指を全部同じ長さ、構造にして、伸展バネも同様にすることによって緩和策として挙げられるが、義手に相応しい人間らしさがなくなる。また、別の対策として、バネ定数を増加して、各バネが釣り合う状態にする方法もあるが、エネルギーの消耗が上がって、アクチュエーターからの出力を減らしてしまう。

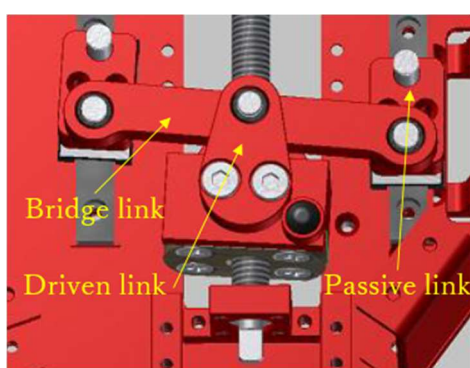


Fig.4.45 リンク式の差動屈曲機能 ([深谷 2016]より)

リンク式: Fig.4.45 に示したように、伸展バネの構造自体を取り消して、干渉駆動の方法で指と指の間にリンクで繋がって、リンクの引き、送りによって各指を一緒に屈曲、伸展させるメカニズムで差動屈曲機能を果たす。このメカニズムに使われる橋リンクは横になって、両端が指を動かせる垂直の被動リンクと連結して、中心にある垂直の動力リンクはアクチュエーターの出力をもらう役割である[N. Fukaya 2013]. しかしながら、伸展バネの取り消しによって、逆に重力の影響を吸収できる役割がなくなり、ハンドの姿勢によって、重力が大きい位置では駆動力が発動する前に、重い指が先に重力に移動される。同時に、被動リンクが変位されて、ついでに橋リンクも回転する。この原因で指の運動は常に重力に影響されながら、些細の誤差が累積していく結果、指の運動軌跡を不安定にさせてしまう。

#### 4.3.2 差動屈曲機能に適したピラミッド式クラッチ機構群メカニズム

四指の全体にとって必要となる差動屈曲機能に関して、従来研究は機能の一部しか実現していなくて、要するに、四指全体の運動特徴をすべて再現できていない。そのため、本研究では残された課題を含めて、運動特徴をすべて再現した差動屈曲機能を実現するために、Fig.4.46 のように、三層を持つピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムを提案する。

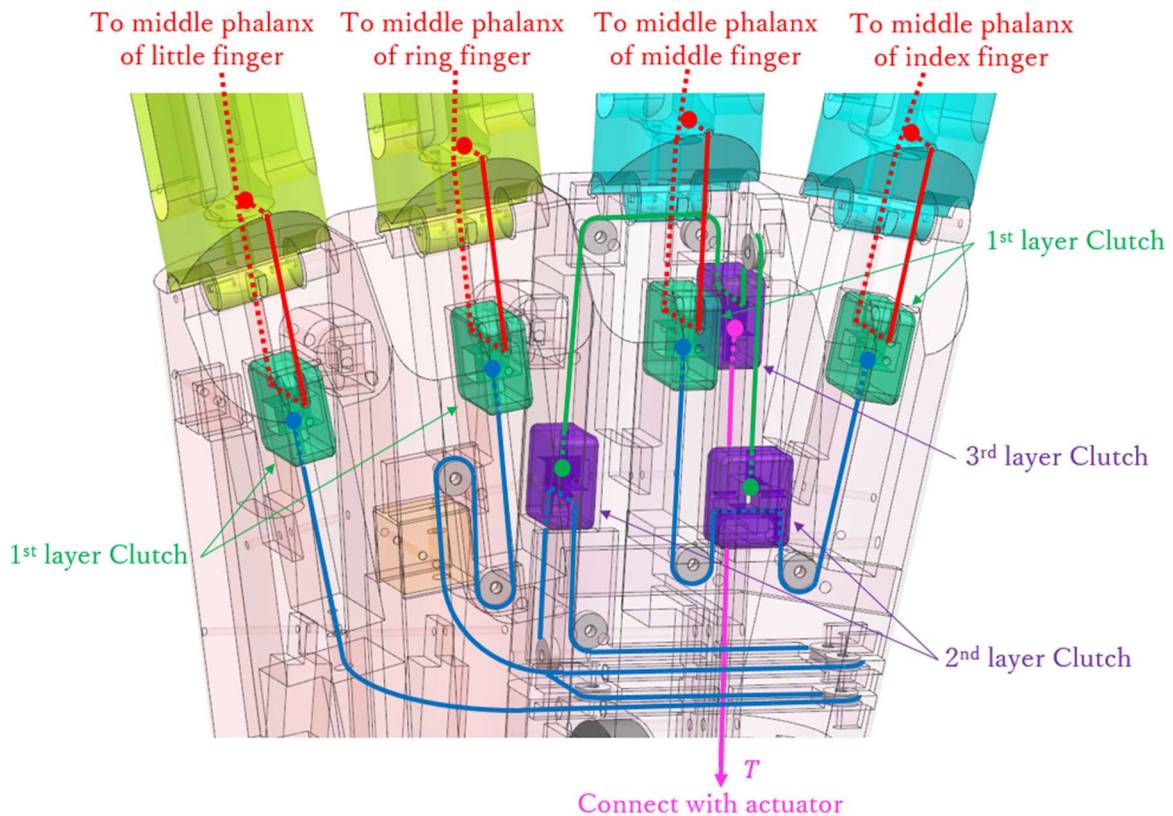


Fig.4.46 ピラミッド式クラッチ機構群のメカニズム（リーチング）

ピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムにおいて、リーチングするとき、アクチュエーターからの張力  $T$  がピンク色のワイヤを牽引し、第三層のクラッチ機構を引っ張って移動し始める。第三層の機構の稼働によって、緑色のワイヤが第二層にある 2 個のクラッチ機構も牽引する。ついでに青色のワイヤが第一層にある 4 個のクラッチ機構も引いて、赤色のワイヤが動作して指の関節を駆動する。このケースにおいて、層ごとのワイヤがクラッチ機構の静摩擦力によって固定されている効果があって、すべてのクラッチ機構が張力  $T$  と共に並進運動をして、四指全体におけるリーチングは、重力に影響されないため、同じ角速度で同時に屈曲することが可能になる。

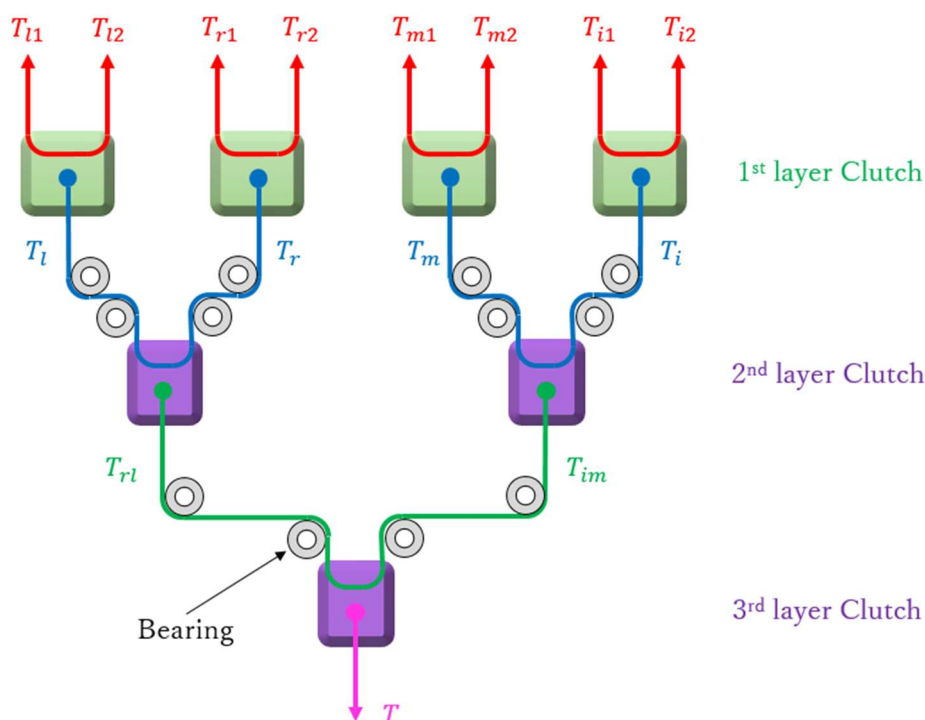


Fig.4.47 ピラミッド式クラッチ機構群のメカニズム（グラスピング）

また、グラスピングのときに、Fig.4.47のように、仮に示指が先にブロックされて、 $T_i$ が動作できなくなり、緑色のワイヤの力が中指に作用する青色のワイヤに $T_m$ で引き続き伝えて、動摩擦力を受けながら環指、小指と一緒に屈曲する。次に中指も阻止されるようになったら、 $T_{im}$ が停止して、 $T_{rl}$ が動摩擦力を抵抗しながら、環指と小指が継続的に屈曲する。さらに、環指も阻止されるなら、 $T_{rl}$ と $T_l$ がそれぞれのクラッチ機構の動摩擦力を克服して、張力 $T$ が最終的に小指のみを屈曲させる。四本の指が全部停止になったことは物体の形状に沿い、マッチングをして馴染み把持が完了したと意味している。もしアクチュエーターからの出力がこれ以上に引き続き与えると、物体を徐々に強く握っていくプロセスに入る。

このメカニズムの立ち上げによって、四指全体の運動特徴をすべて再現できるようになり、差動屈曲機能の実現を果たした。要するに、リーチングするときに同時に屈曲できるほか、グラスピングするときの馴染み把持も実現できる。指の重力の影響をなくしたため、運動軌跡が安定化になる同時に、四指の長さは人間と同じように設計できて、自動伸展バネも最適化されることを可能になる。ついでに、エネルギーの消耗も最小限に抑えられるため、指関節にはアクチュエーターの出力を最大限に保ちながら、伝える。

### 4.3.3 ピラミッド式クラッチ機構群メカニズムの運動解析

ピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムは単一のクラッチ機構に基づいて、直列

と並列の組み合わせによって発展してきた複数の機構のモジュールである。計算は4.2.4節のように、リーチングとグラスピングのケースを分けて、層ごとに説明する。ただし、どちらのケースにおいても指が伸展状態から完全屈曲状態になるまでのプロセスにする。

1. リーチング：

リーチングの場合は、Fig.4.48のように、各層のワイヤがクラッチ機構に固定されているような効果がある。第三層にあるピンク色のワイヤの牽引によって、静摩擦力の作用で第二層が相対な移動はなく、一緒に並進運動をされる。ついでに、第一層も同様に、第二層からの青色のワイヤによる牽引で、静摩擦力の作用でクラッチ機構の間に相対的な移動は表せず、ほかの層と同時に並進運動をする。また、第二層と第三層のクラッチ機構は掌に埋めるスペースの関係で、前セクションで使われる機構のサイズと異なるため、新たに最小の動摩擦係数を探求する。ただし、前セクションと同様、静摩擦力が最大になる第一象限にて説明する。

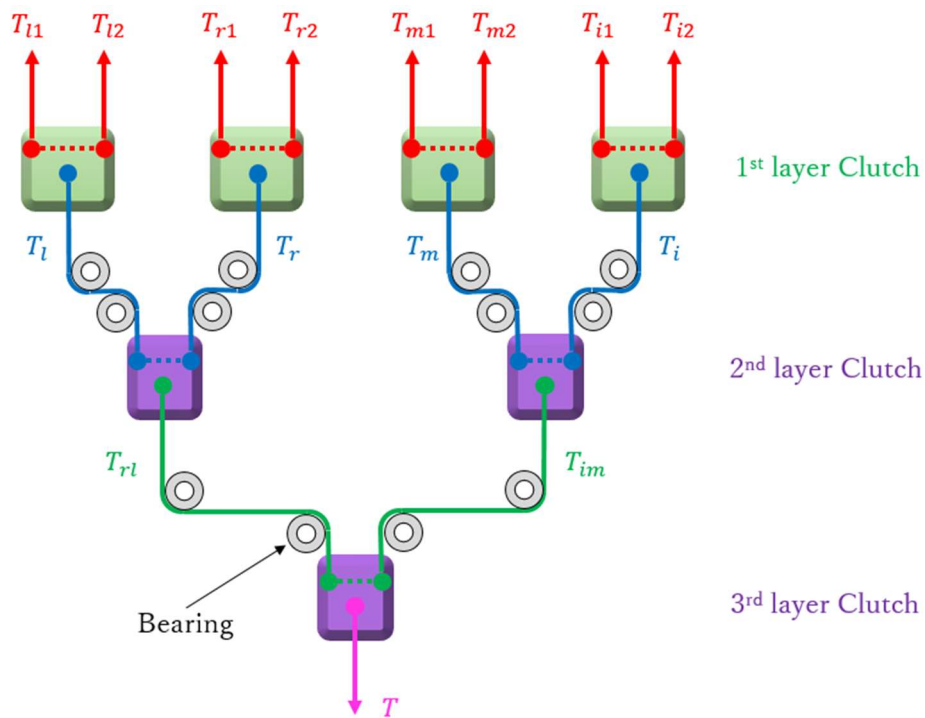


Fig.4.48 ピラミッド式クラッチ機構群の静摩擦力モデル

まず、第一層では、前セクションで立った単一クラッチ機構における静摩擦力の関係式と同じであるため、第一層の関係式は：

$$\begin{cases} N_n = T_{n1} + T_{n2} = T_n \\ f_{ns} = T_{n1} - T_{n2} \\ x_{n1} = x_{n2} \end{cases}$$

次に、第二層では、示指・中指の力学関係式を立つ：

$$\begin{cases} N_{im} = T_i + T_m = T_{im} \\ f_{ims} = T_m - T_i \\ x_{i1} = x_{i2} = x_{m1} = x_{m2} \end{cases}$$

よって、重力項を加えて、それぞれ $N_{im}$ 、 $f_{ims}$ を整理すると：

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{im} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{i1} + \sigma_{i1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}C_1 \quad R_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1 \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1] \mathbf{G}_i \right] \\ \quad + \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{m1} + \sigma_{m1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \right] \\ \quad + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{i2} + \sigma_{i2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{i3} + \sigma_{i3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{i2}C_{12} \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12}] \mathbf{G}_i \right\} \\ \quad + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{m2} + \sigma_{m2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{m3} + \sigma_{m3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{m2}C_{12} \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12}] \mathbf{G}_m \right\} \\ f_{ims} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{m1} + \sigma_{m1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \right] \\ \quad - \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{i1} + \sigma_{i1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}C_1 \quad R_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1 \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1] \mathbf{G}_i \right] \\ \quad + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{m2} + \sigma_{m2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{m3} + \sigma_{m3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{m2}C_{12} \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12}] \mathbf{G}_m \right\} \\ \quad - \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{i2} + \sigma_{i2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{i3} + \sigma_{i3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{i2}C_{12} \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12}] \mathbf{G}_i \right\} \end{array} \right.$$

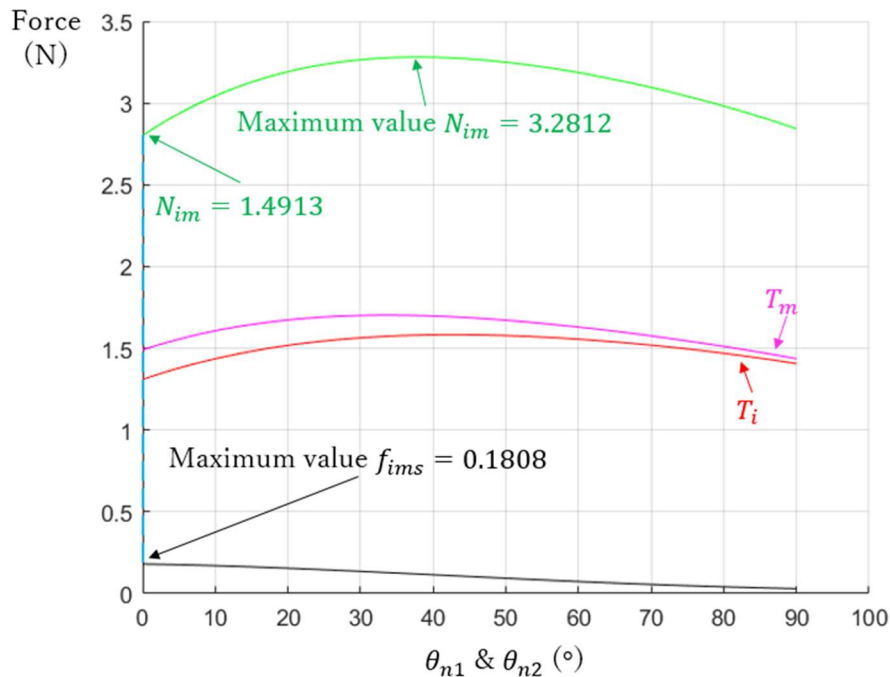


Fig.4.49 第一象限・第二層の示指と中指・静摩擦力による変化

計算結果は Fig.4.49 のように示す。それぞれ最大静摩擦力は 0.1808N、対応してい

る支持力は 1.4913N である。

したがって、摩擦係数 $\mu_{im}$ を求める：

$$\mu_{im} \geq \frac{f_{ims}}{N_{im}} = 0.1212$$

同様に、第二層で環指・小指の力学関係式を得られる：

$$\begin{cases} N_{rl} = T_r + T_l = T_{rl} \\ f_{rls} = T_r - T_l \\ x_{r1} = x_{r2} = x_{l1} = x_{l2} \end{cases}$$

$N_{rl}$ 、 $f_{rls}$ を整理すると：

$$\begin{cases} N_{rl} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{r1} + \sigma_{r1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \right] \\ \quad + \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{l1} + \sigma_{l1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \right] \\ \quad + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{r2} + \sigma_{r2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{r3} + \sigma_{r3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{r2}C_{12} \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12}] \mathbf{G}_r \right\} \\ \quad + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{l2} + \sigma_{l2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{l3} + \sigma_{l3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{l2}C_{12} \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12}] \mathbf{G}_l \right\} \\ f_{rls} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{r1} + \sigma_{r1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \right] \\ \quad - \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}}(K_{l1} + \sigma_{l1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \right] \\ \quad + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{r2} + \sigma_{r2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{r3} + \sigma_{r3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{r2}C_{12} \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12}] \mathbf{G}_r \right\} \\ \quad - \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{l2} + \sigma_{l2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}}(K_{l3} + \sigma_{l3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{l2}C_{12} \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12}] \mathbf{G}_l \right\} \end{cases}$$



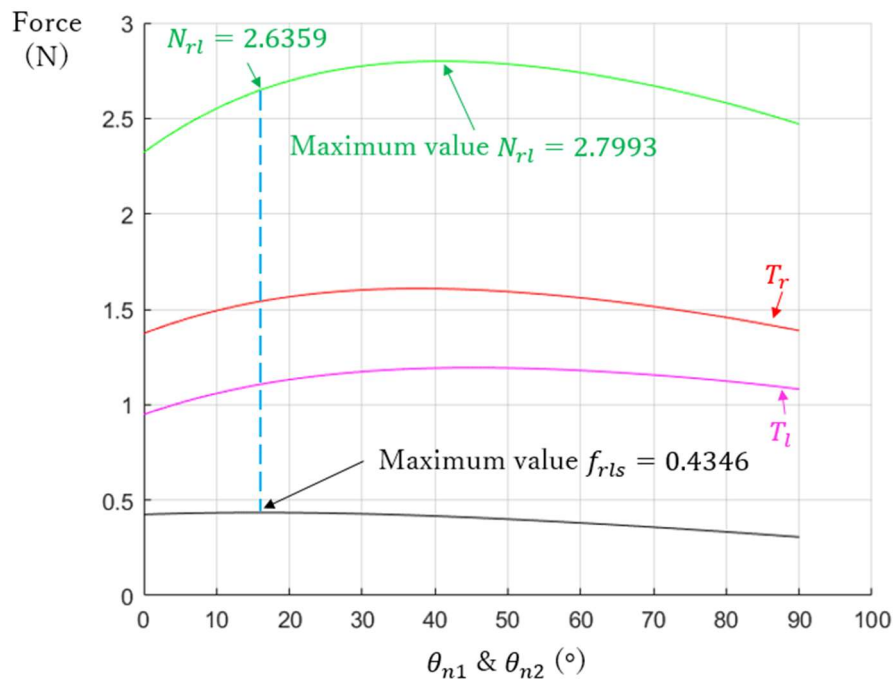


Fig.4.50 第一象限・第二層の環指と小指・静摩擦力による変化

計算結果は Fig.4.50 のように示す。それぞれ最大静摩擦力は 0.4346N、対応している 2.6359N である。

したがって、摩擦係数  $\mu_{rl}$  を求める：

$$\mu_{rl} \geq \frac{f_{rls}}{N_{rl}} = 0.1649$$

最後に、第三層で四指の力学関係式を立つ：

$$\begin{cases} N = T_{im} + T_{rl} = T \\ f_s = T_{im} - T_{rl} \\ x_{i1} = x_{i2} = x_{m1} = x_{m2} = x_{r1} = x_{r2} = x_{l1} = x_{l2} \end{cases}$$

式を展開すると：

$$\left( \begin{array}{l}
 N = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{i1} + \sigma_{i1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}C_1 \quad R_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1 \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1] \mathbf{G}_i \right] \\
 + \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{m1} + \sigma_{m1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \right] \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{i2} + \sigma_{i2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{i3} + \sigma_{i3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{i2}C_{12} \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12}] \mathbf{G}_i \right\} \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{m2} + \sigma_{m2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{m3} + \sigma_{m3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{m2}C_{12} \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12}] \mathbf{G}_m \right\} \\
 + \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{r1} + \sigma_{r1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \right] \\
 + \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{l1} + \sigma_{l1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \right] \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{r2} + \sigma_{r2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{r3} + \sigma_{r3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{r2}C_{12} \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12}] \mathbf{G}_r \right\} \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{l2} + \sigma_{l2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{l3} + \sigma_{l3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{l2}C_{12} \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12}] \mathbf{G}_l \right\} \\
 f_s = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{i1} + \sigma_{i1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}C_1 \quad R_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1 \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1] \mathbf{G}_i \right] \\
 + \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{m1} + \sigma_{m1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \right] \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{i2} + \sigma_{i2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{i3} + \sigma_{i3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{i2}C_{12} \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12}] \mathbf{G}_i \right\} \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{m2} + \sigma_{m2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{m3} + \sigma_{m3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{m2}C_{12} \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12}] \mathbf{G}_m \right\} \\
 - \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{r1} + \sigma_{r1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \right] \\
 - \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{l1} + \sigma_{l1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \right] \\
 - \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{r2} + \sigma_{r2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{r3} + \sigma_{r3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{r2}C_{12} \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12}] \mathbf{G}_r \right\} \\
 - \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{l2} + \sigma_{l2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{l3} + \sigma_{l3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{l2}C_{12} \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12}] \mathbf{G}_l \right\}
 \end{array} \right)$$



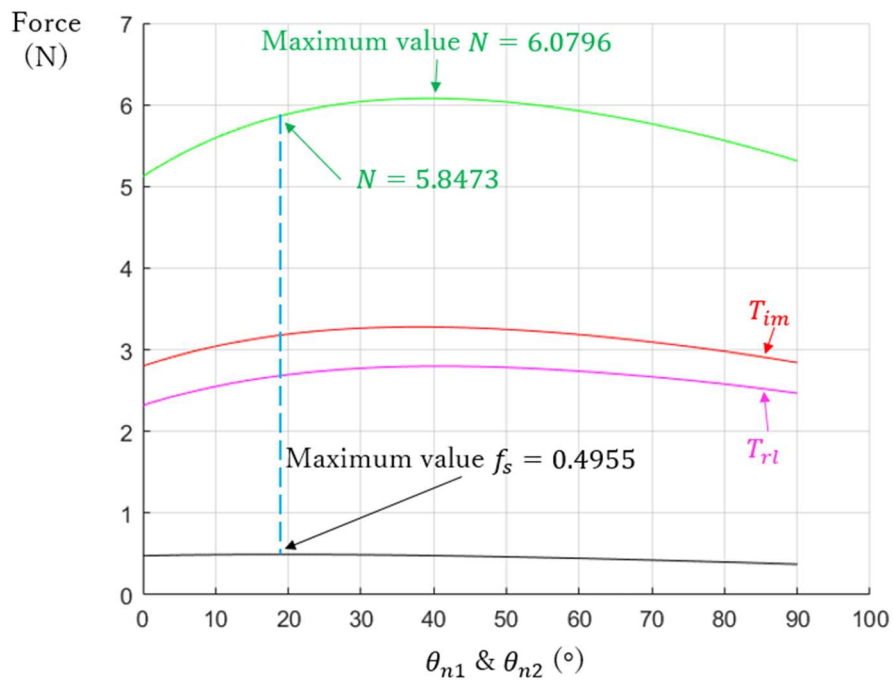


Fig.4.51 第一象限・第三層の四指・静摩擦力による変化

したがって、 $N$ 、 $f_s$ の計算結果は Fig.4.51 のように示す。それぞれ最大静摩擦力は 0.4955N、対応している支持力は 5.8473N である。

したがって、摩擦係数 $\mu$ を求める：

$$\mu \geq \frac{f_s}{N} = 0.0847$$

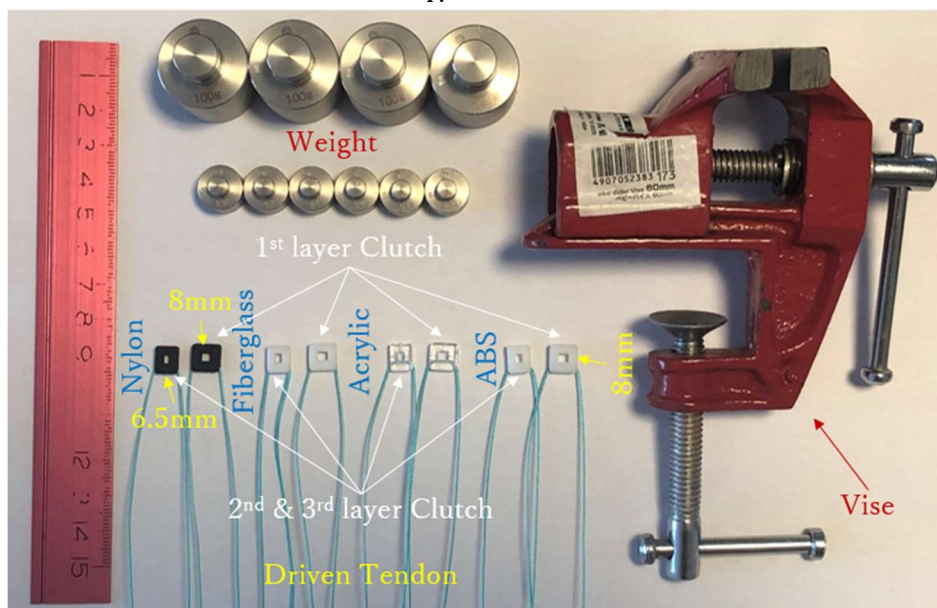


Fig.4.52 異なる材料によるクラッチ機構の動摩擦係数の測定

よって、動摩擦係数を比較的に大きい数値である 0.1649 を目安に、Fig.4.52 のように、前セクションと同様な手法で、第二、三層に使用するクラッチ機構を違う材料で製作し、測定して数値の近い材料での機構を義手に応用する。測定の結果は Table.4.5 に示す。

Table.4.5 各種の材料における動摩擦係数（第二・三層）

	ナイロン (黒)	グラス繊維 (白)	アクリル (透明)	ABS (白)
1 回目	$T_{n1}: 10g$ $T_{n2}: 70g$ $\mu_n = 0.75$	$T_{n1}: 10g$ $T_{n2}: 100g$ $\mu_n = 0.8182$	$T_{n1}: 10g$ $T_{n2}: 60g$ $\mu_n = 0.7143$	$T_{n1}: 10g$ $T_{n2}: 50g$ $\mu_n = 0.6667$
2 回目	$T_{n1}: 15g$ $T_{n2}: 90g$ $\mu_n = 0.7429$	$T_{n1}: 15g$ $T_{n2}: 120g$ $\mu_n = 0.7778$	$T_{n1}: 15g$ $T_{n2}: 75g$ $\mu_n = 0.6667$	$T_{n1}: 15g$ $T_{n2}: 65g$ $\mu_n = 0.625$
3 回目	$T_{n1}: 20g$ $T_{n2}: 105g$ $\mu_n = 0.68$	$T_{n1}: 20g$ $T_{n2}: 125g$ $\mu_n = 0.7241$	$T_{n1}: 20g$ $T_{n2}: 90g$ $\mu_n = 0.6364$	$T_{n1}: 20g$ $T_{n2}: 85g$ $\mu_n = 0.619$
4 回目	$T_{n1}: 25g$ $T_{n2}: 115g$ $\mu_n = 0.6429$	$T_{n1}: 25g$ $T_{n2}: 135g$ $\mu_n = 0.6875$	$T_{n1}: 25g$ $T_{n2}: 105g$ $\mu_n = 0.6154$	$T_{n1}: 25g$ $T_{n2}: 95g$ $\mu_n = 0.5833$
5 回目	$T_{n1}: 30g$ $T_{n2}: 130g$ $\mu_n = 0.625$	$T_{n1}: 30g$ $T_{n2}: 165g$ $\mu_n = 0.6923$	$T_{n1}: 30g$ $T_{n2}: 120g$ $\mu_n = 0.6$	$T_{n1}: 30g$ $T_{n2}: 115g$ $\mu_n = 0.5862$
平均値	$\mu_n = 0.6882$	$\mu_n = 0.74$	$\mu_n = 0.6466$	$\mu_n = 0.616$

以上の結果により、比較的に ABS がクラッチ機構の製作材料として所要な動摩擦係数に近く、機能を発揮できる。

## 2. グラスピング：

グラスピングについては、三つのケースを分けて、それぞれ一本指のブロック、二本指のブロックおよび三本指のブロックについて解析して、各層の出力の変化を調べる。それに、解析が前セクションと同様に第一象限で行う。

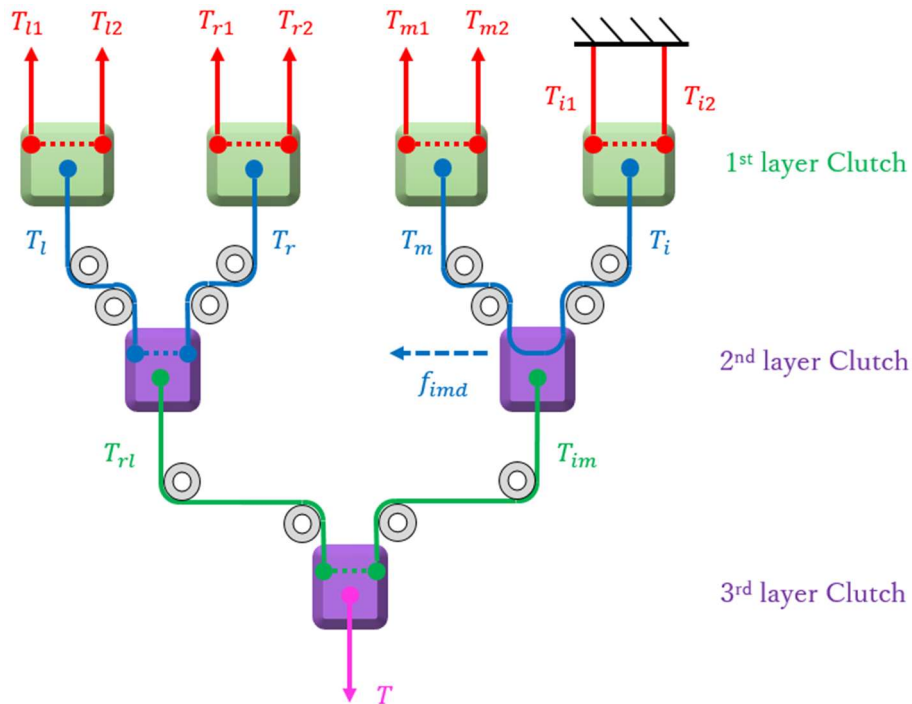


Fig.4.53 示指のブロックによる動摩擦力モデル

まずは一本指のブロックでは、任意の一本指を物体に阻止され、残る三本指が引き続き屈曲するケースである。ここで第2章の2.1.2節で分析した Thumb-Index Finger の動作を出発点として、示指をブロックさせることにする。それに、相応なモデルは Fig.4.53 のように示す。ただし、示指全体が初期位置の0度でブロックされることと仮定し、説明する。

第一層では、示指以外の力学関係式は下記のようになり、すべてはリーチングの静摩擦力が作用している：

$$\begin{cases} N_n = T_{n1} + T_{n2} = T_n \\ f_{ns} = T_{n1} - T_{n2} \\ x_{n1} = x_{n2} \end{cases}$$

式によって、各パラメータの変化は前述したものと同様に、それぞれ中指は Fig.4.10、環指は Fig.4.11、小指は Fig.4.12 に示している。

第二層では、前セクションで動摩擦力の解析に基づいて、示指・中指の力学関係式を得られる：

$$\begin{cases} N_{im} = T_i + T_m = T_{im} \\ f_{imd} = T_i - T_m \\ f_{imd} = \mu_{im} N_{im} \end{cases}$$

式を整理すると：

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{im} = \frac{2}{1 - \mu_{im}} T_m \\ f_{imd} = \frac{2\mu_{im}}{1 - \mu_{im}} T_m \\ T_m = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{m1} + \sigma_{m1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \right] \\ + \left[ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} [K_{m2} + \sigma_{m2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{m3} + \sigma_{m3})] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{m2}C_{12} \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12}] \mathbf{G}_m \right] \end{array} \right.$$

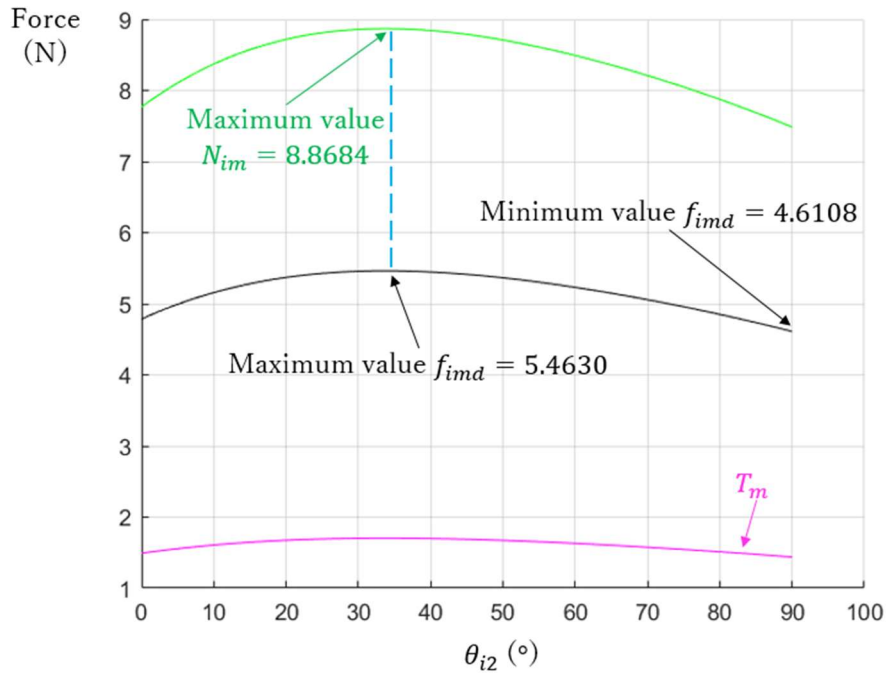


Fig.4.54 第一象限・示指の停止・第二層の示指と中指・動摩擦力による変化

式によって、計算結果は Fig.4.54 に示す。図から最小動摩擦力が 4.6108N であり、Fig.4.49 からの最大静摩擦力 0.1808N より大きいため、理論の正確性が確かめた。

この際に、環指・小指は静摩擦力によって同時に屈曲するため、力学関係式は前セクションと同様：

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{rl} = T_r + T_l = T_{rl} \\ f_{rls} = T_r - T_l \\ x_{r1} = x_{r2} = x_{l1} = x_{l2} \end{array} \right.$$

式によって、静摩擦力による各パラメータの変化は Fig.4.50 と同様である。

引き続き、第三層の力学関係式は得る：

$$\left\{ \begin{array}{l} N = T_{im} + T_{rl} = T \\ f_s = T_{im} - T_{rl} \\ x_{m1} = x_{m2} = x_{r1} = x_{r2} = x_{l1} = x_{l2} \end{array} \right.$$

式を整理すると：

$$\left\{ \begin{array}{l}
 N = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{m1} + \sigma_{m1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \right] \\
 + \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{r1} + \sigma_{r1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \right] \\
 + \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{l1} + \sigma_{l1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \right] \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{m2} + \sigma_{m2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{m3} + \sigma_{m3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{m2}C_{12} \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12}] \mathbf{G}_m \right\} \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{r2} + \sigma_{r2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{r3} + \sigma_{r3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{r2}C_{12} \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12}] \mathbf{G}_r \right\} \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{l2} + \sigma_{l2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{l3} + \sigma_{l3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{l2}C_{12} \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12}] \mathbf{G}_l \right\} \\
 f_s = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{m1} + \sigma_{m1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \right] \\
 - \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{r1} + \sigma_{r1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \right] \\
 - \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{l1} + \sigma_{l1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \right] \\
 + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{m2} + \sigma_{m2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{m3} + \sigma_{m3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{m2}C_{12} \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12}] \mathbf{G}_m \right\} \\
 - \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{r2} + \sigma_{r2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{r3} + \sigma_{r3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{r2}C_{12} \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12}] \mathbf{G}_r \right\} \\
 - \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} \left[ K_{l2} + \sigma_{l2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{l3} + \sigma_{l3}) \right] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{l2}C_{12} \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12}] \mathbf{G}_l \right\}
 \end{array} \right.$$

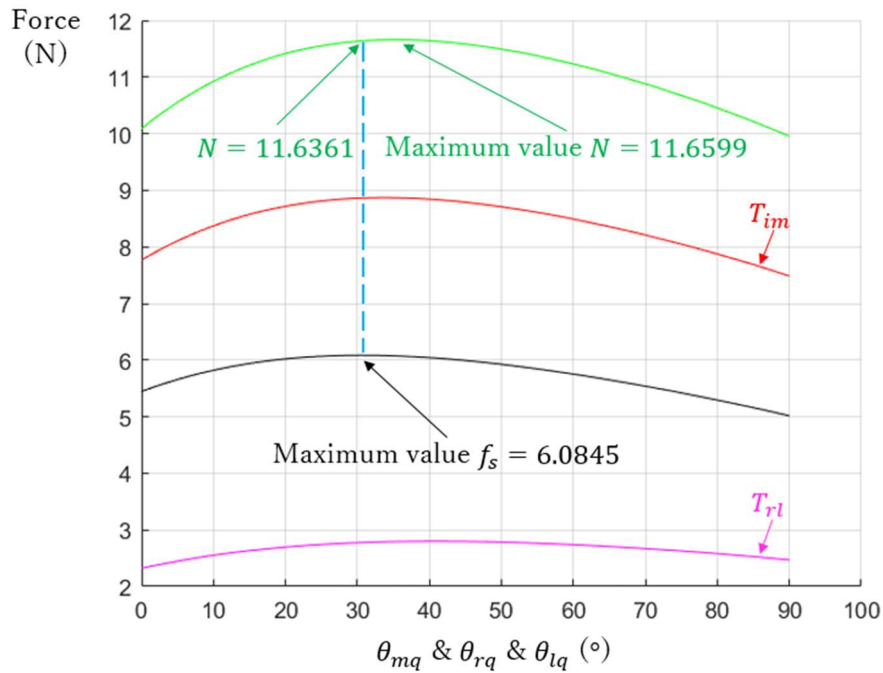


Fig.4.55 第一象限・示指の停止・第三層・静摩擦力による変化

よって、計算結果は Fig.4.55 のように表す。最大静摩擦力は 6.0845N であり、対応する支持力は 11.6361N となるため、摩擦係数 $\mu$ を求める：

$$\mu \geq \frac{f_s}{N} = 0.5229$$

この摩擦係数は製作の材料とした ABS の摩擦係数 0.616 より小さいため、第三層のワイヤが滑らなく、理論の通りに静摩擦力で対応する層の機能が実現できた。

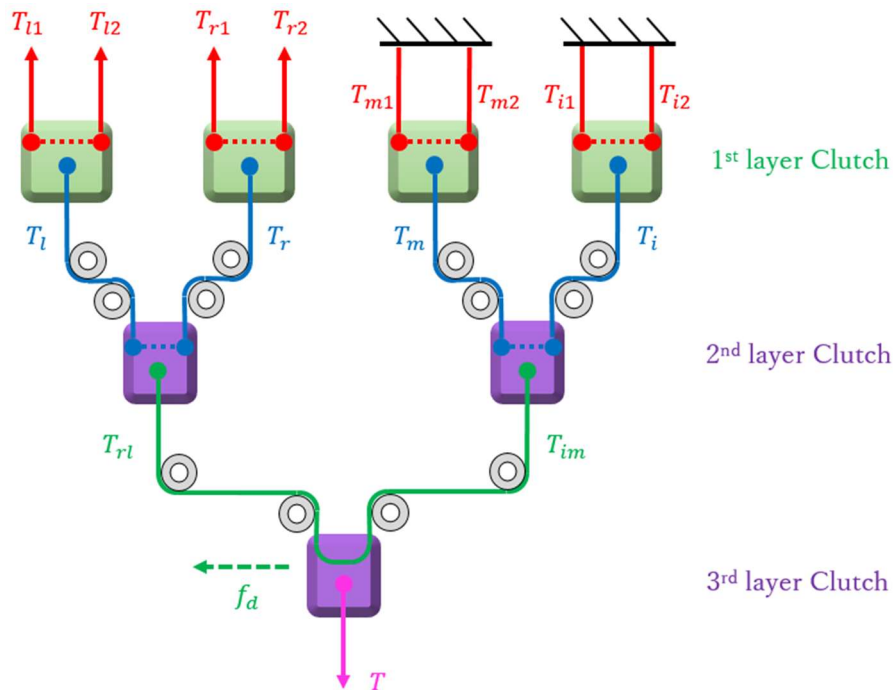


Fig.4.56 示指&中指のブロックによる動摩擦力モデル

次に、二本指のブロックでは、任意の二本指を物体に阻止され、残る二本指が引き続き屈曲するケースである。ここでも第2章の2.1.2節で分析した Thumb-2 Finger の動作を出発点として、示指と中指をブロックさせることにする。それに、相応なモデルは Fig.4.56 のように示す。ただし、示指と中指の全体が初期位置の0度でブロックされることと仮定し、説明する。

第一層では、示指と中指の力学関係式が存在しないため、環指と小指だけの力学関係式は下記のようになり、すべてはリーチングの静摩擦力が作用している。環指と小指の各パラメータの変化はそれぞれ Fig.4.11、Fig.4.12 と同様になる。

$$\begin{cases} N_n = T_{n1} + T_{n2} = T_n \\ f_{ns} = T_{n1} - T_{n2} \\ x_{n1} = x_{n2} \end{cases}$$

第二層では、示指と中指を連結するクラッチ機構の力学関係式が存在しないため、環指と小指のクラッチ機構における力学関係式は下記のようになって、リーチングの静摩擦力が作用している。相応な各パラメータの変化は Fig.4.50 と同様である。

$$\begin{cases} N_{rl} = T_r + T_l = T_{rl} \\ f_{rls} = T_r - T_l \\ x_{r1} = x_{r2} = x_{l1} = x_{l2} \end{cases}$$

第三層では、クラッチ機構内のワイヤが滑り始めて、動摩擦力が作用しているため、力学関係式は下記のように書く：



$$\begin{cases} N = T_{im} + T_{rl} = T \\ f_d = T_{im} - T_{rl} \\ f_d = \mu N \end{cases}$$

式を整理すると：

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \frac{2}{1-\mu} T_{rl} \\ f_d = \frac{2\mu}{1-\mu} T_{rl} \\ T_{rl} = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{r1} + \sigma_{r1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \right] \\ \quad + \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{l1} + \sigma_{l1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \right] \\ \quad + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} [K_{r2} + \sigma_{r2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{r3} + \sigma_{r3})] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{r2}C_{12} \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12}] \mathbf{G}_r \right\} \\ \quad + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} [K_{l2} + \sigma_{l2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{l3} + \sigma_{l3})] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{l2}C_{12} \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12}] \mathbf{G}_l \right\} \end{array} \right.$$

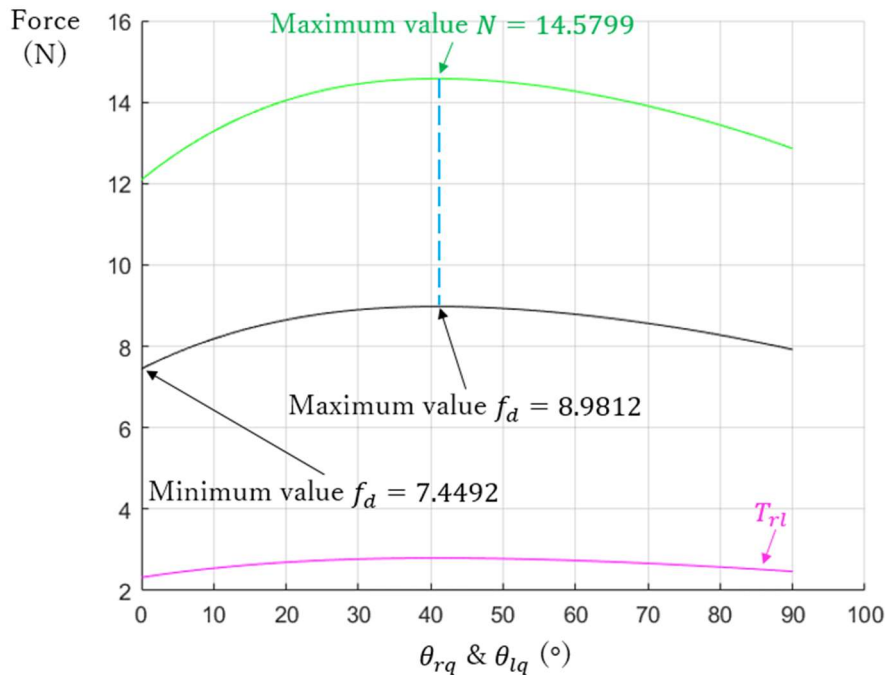


Fig.4.57 第一象限・示指&中指の停止・第三層・動摩擦力による変化

式によって、計算結果は Fig.4.57 に示す。最小動摩擦力は 7.4492N であり、Fig.4.51 に示した第三層の最大静摩擦力 0.4955N より大きいため、確実に動摩擦力が作用していることを検証できた。

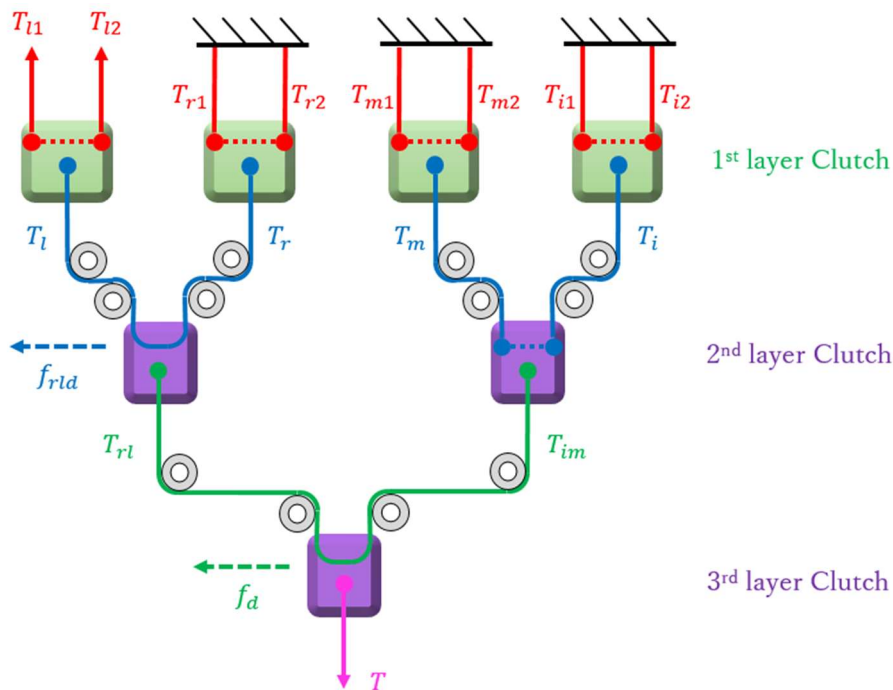


Fig.4.58 示指&中指&環指のブロックによる動摩擦力モデル

最後に、三本指のブロックでは、任意の三本指を物体に阻止され、残る一本指が引き続き屈曲するケースである。ここでも第2章の2.1.2節で分析した Thumb-3 Finger の動作を出発点として、示指、中指と環指をブロックさせることにする。それに、相応なモデルは Fig.4.58 のように示す。ただし、示指、中指と環指の全体が初期位置の0度でブロックされることと仮定し、説明する。

第一層では、示指、中指と環指の力学関係式が存在しないうえ、小指のみにリーチングの静摩擦力が作用しているため、力学関係式は下記のようなになる。小指の各パラメータの変化は Fig.4.12 と同様である。

$$\begin{cases} N_l = T_{l1} + T_{l2} = T_l \\ f_{ls} = T_{l1} - T_{l2} \\ x_{l1} = x_{l2} \end{cases}$$

第二層では、示指と中指を連結するクラッチ機構の力学関係式が存在しないうえ、環指と小指のクラッチ機構内に動摩擦力が作用しているため、力学関係式は下記のようなになる：

$$\begin{cases} N_{rl} = T_r + T_l = T_{rl} \\ f_{rld} = T_r - T_l \\ f_{rld} = \mu_{rl} N_{rl} \end{cases}$$

式を整理すると：

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{rl} = \frac{2}{1 - \mu_{rl}} T_l \\ f_{rld} = \frac{2\mu_{rl}}{1 - \mu_{rl}} T_l \\ T_l = \left[ \frac{r_{e1}}{r_{f1}} (K_{l1} + \sigma_{l1}) + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \right] \\ + \left\{ \frac{r_{e2}}{r_{f2}} [K_{l2} + \sigma_{l2} + \frac{r_{e3}}{r_{f3}} (K_{l3} + \sigma_{l3})] + \frac{1}{r_{f2}} [0 \quad R_{l2}C_{12} \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12}] \mathbf{G}_l \right\} \end{array} \right.$$

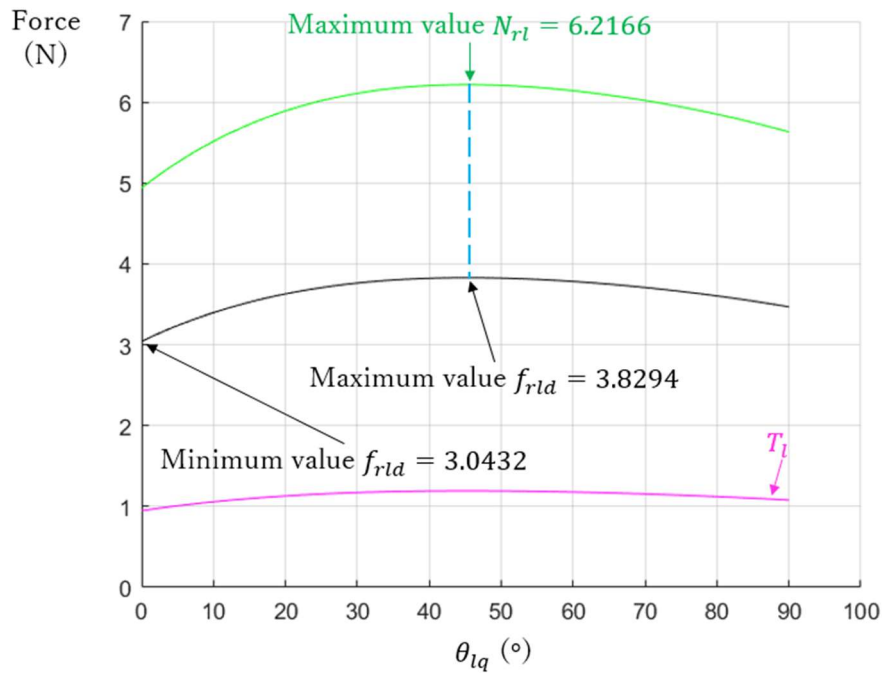


Fig.4.59 第一象限・示指&中指&環指の停止・第二層・動摩擦力による変化

式よって、計算結果は Fig.4.59 に示す。図から最小動摩擦力が 3.0432N であり、Fig.4.50 からの最大静摩擦力 0.4346N より大きいため、理論の正確性を、すなわち確実に動摩擦力が作用していることを確かめた。

第三層では、クラッチ機構内のワイヤが滑って、動摩擦力が作用しているため、力学関係式は下記のように書く：

$$\left\{ \begin{array}{l} N = T_{im} + T_{rl} = T \\ f_d = T_{im} - T_{rl} \\ f_d = \mu N \end{array} \right.$$

式を整理すると：

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \frac{2}{1 - \mu} T_{rl} \\ f_d = \frac{2\mu}{1 - \mu} T_{rl} \end{array} \right.$$

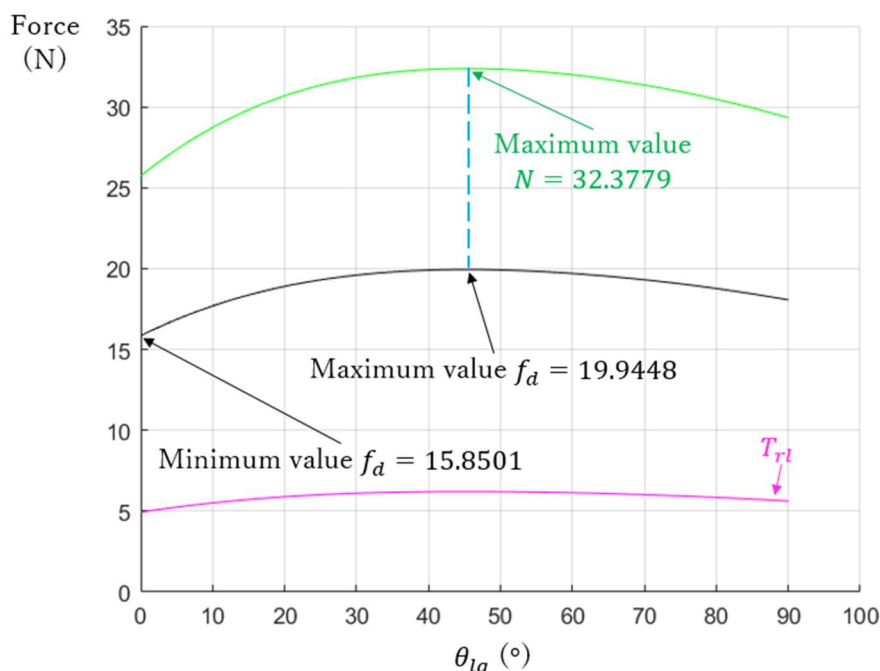


Fig.4.60 第一象限・示指&中指&環指の停止・第三層・動摩擦力による変化

式によって、計算結果は Fig.4.60 に示す。最小動摩擦力は 15.8501N であり、Fig.4.51 に示した第三層の最大静摩擦力 0.4955N より大きいため、確実に動摩擦力が作用していることを検証できた。

以上の解析によって、結果をまとめる：

まず、示指がブロックされたケースにおいて、第三層のクラッチ機構は示指以外に全部静摩擦力が作用している。第二層では、示指・中指のクラッチ機構は動摩擦力で移動している一方、環指・小指のクラッチ機構は依然と静摩擦力で運動する。第三層では、クラッチ機構内に静摩擦力で四指全体を機能させているほか、このプロセスにおける最大の支持力は 11.6599N であり、反力としてアクチュエータの牽引力に伝わる。

それから、示指と中指がブロックされたケースにおいて、第三層のクラッチ機構は示指と中指以外に全部静摩擦力が作用している。第二層では、示指・中指のクラッチ機構は動かずに、環指・小指のクラッチ機構は依然と静摩擦力で運動している。第三層では、クラッチ機構内に動摩擦力で四指全体を機能させているほか、このプロセスにおける最大の支持力は 14.5799N であり、アクチュエータに伝達する。

最後に、示指、中指と環指がブロックされたケースにおいて、第三層のクラッチ機構は小指のみ静摩擦力が作用している。第二層では、示指・中指のクラッチ機構は動かないまま、環指・小指のクラッチ機構は動摩擦力で移動している。第三層では、クラッチ機構内に動摩擦力で四指全体を機能させているほか、このプロセスにおける最大の支持力は 32.3779N であり、アクチュエータに対する反力は、三つのケースの中に

比較的に最大であるため、機能に必要な最小の出力として、第6章でアクチュエータを選定するとき、この数値より大きな動力が提供できるものを選ぶ。

#### 4.3.4 差動屈曲機能の運動検証

前セクションで算出した各状況におけるパラメータの理論値の変化に基づいて、提案したピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムによる差動屈曲機能の実現に対し、四指全体の運動を示指のブロック、示指・中指のブロックおよび示指・中指・環指のブロックによって検証する。

実験手法としては、四指を第一象限の位置でバイスで挟んで、第三層のクラッチ機構を牽引するワイヤに分銅を吊る。そして、各種のブロックの状況によって、Fig.4.39に示したように、0度のブロックを利用して、相応な指のMPとPIP関節に付けて、伸展状態のままで停止させる。最後に、分銅を少しずつ追加しながら、停止されていない指の運動を明確にする。

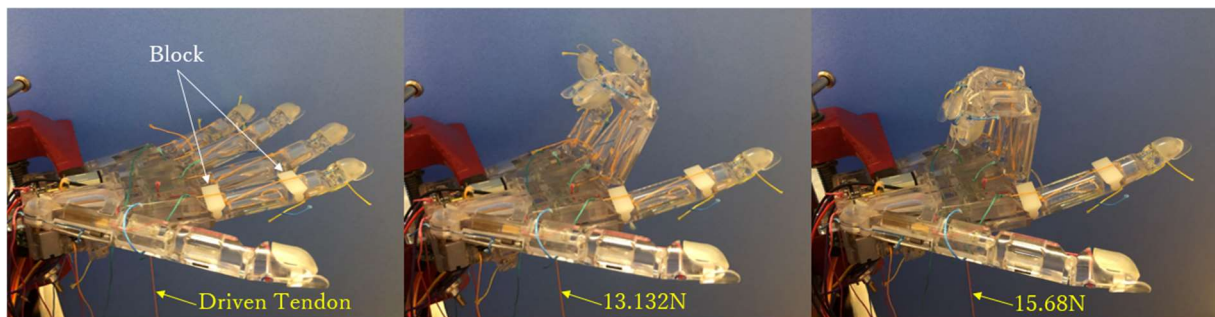


Fig.4.61 第一象限・示指の停止による運動検証

まず、示指をブロックされた運動において、Fig.4.61のように示す。中指・環指・小指をすべて90度まで屈曲させる分銅の重さは1.6kgであり、牽引力は15.68Nになる。Fig.4.55による理論値の11.6599Nと比べ、義手パーツの製造精度や組み立てによる誤差の累積が存在していることを認識するうえ、数値は接近していることを確かめた。運動には、中指の屈曲が環指・小指より早くなった。原因として、示指のブロックによって、中指のワイヤの走行は2倍に早く、第三層のクラッチ機構は中指を90度まで屈曲させた後に、理論上に環指・小指はまだ45度の屈曲になるため、引き続きの牽引によって第三層のクラッチ機構内には静摩擦力が動摩擦力に変わる。



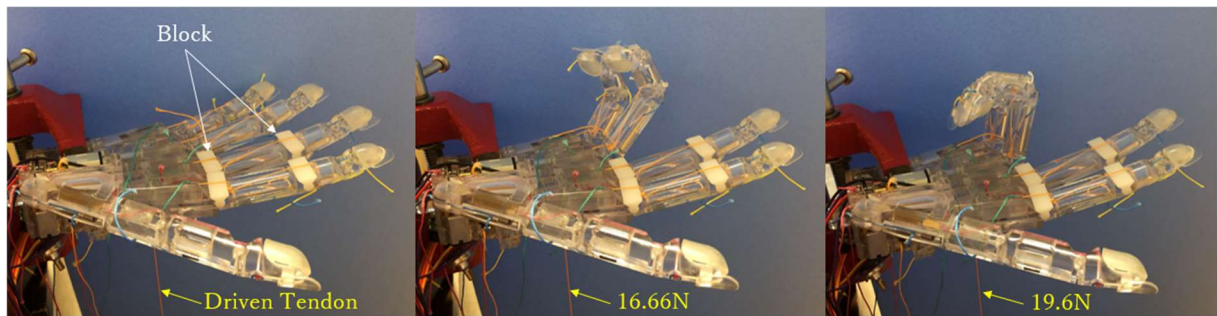


Fig.4.62 第一象限・示指&中指の停止による運動検証

次に、示指・中指をブロックされた運動において、Fig.4.62のように示す。環指・小指をすべて90度まで屈曲させる分銅の重さは2kgであり、牽引力は19.6Nになる。Fig.4.57による理論値の14.5799Nと比較して、誤差の増加を理解し、数値は接近していることを確かめた。

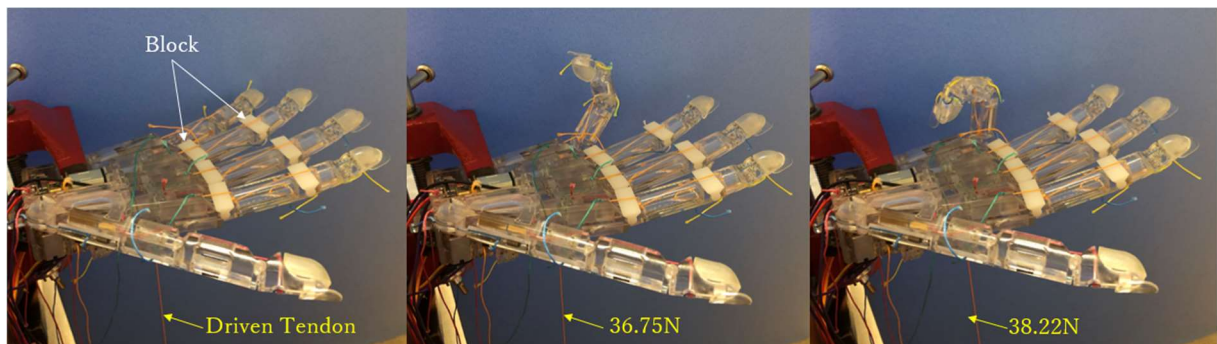


Fig.4.63 第一象限・示指&中指&環指の停止による運動検証

最後に、示指・中指・環指をブロックされた運動において、Fig.4.63のように示す。小指を90度まで屈曲させる分銅の重さは3.9kgであり、牽引力は38.22Nになる。Fig.4.60による理論値の32.3779Nと比べて、誤差が更なる累積してくることを理解したうえで、数値は接近していることを確認した。

以上によって、理論および設計の正確性を証明したうえで、ピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムが設計通りに運動して、有用性を確認できた。これで、設けたメカニズムによって、四指全体の運動特徴をすべて再現して、差動屈曲機能の実現を果たした。それ以外に、第6章で16パターンの動作検証によって、差動屈曲機能の作用も発揮して、動作パターンの実現に役立っている。

## 4.4 まとめ

本章では、四指の開発にあたって、各指に対する適応連動機能、および指全体の差動屈曲機能の実現に向けて、それぞれ摩擦クラッチメカニズムとピラミッド式クラッチ機構群メカニズムの構築、運動解析、および検証実験を行った。

四指の各指の特徴において、リーチングの場合、三関節が同時に屈曲する。グラスピングの場合では、先に物体と接触する関節が停止になり、物体をマッチングするまでに残る関節が継続的に屈曲し、結果的に馴染み把持になる。これに基づいて、従来研究では一对三、一对二、および一对一のタイプをまとめられた。しかし、これらのタイプにおけるメカニズムは劣るところが明らかであり、肝心の運動軌跡の安定さ、馴染み把持の可能性、および走行距離の短さに関して、同時に実現するものは存在していなく、すなわち、運動特徴を再現したものがない現状になっている。

これらの問題を含めて、四指各指の運動特徴をすべて再現するために、本章の前半では、まず四指各指の運動特徴から適応連動機能を絞り出して、機能に適した摩擦クラッチのメカニズムを構築する。そして、メカニズムに使用するクラッチ機構の設計を行って、それぞれリーチングの静摩擦モデルとグラスピングの動摩擦モデルを立てた。静摩擦力によって、関節の重力と相殺できるため、指関節に自動伸展機能を最適化した。それに、任意の空間位置でもクラッチ機構の力が発揮できるように、四つの象限で最大摩擦係数の理論値を探し出して、異なる材料で試作して、摩擦係数の近いものを使用した。それから、材料の摩擦係数は動摩擦力が作用するとき、最小動摩擦力より小さいことを確認し、正確性を証明した。そのうち、運動軌跡の安定性、および力学モデルによる関節の出力を検証して、設計の通りになっていることを確かめた。さらに、出力のデータを利用して、第6章でアクチュエーターの選定の基準値として、参照になる。以上によって、四指の各指に設けた摩擦クラッチメカニズムによる適応連動機能の有用性を確かめた。

一方、四指全体の特徴において、リーチングの場合、四本の指が同時に屈曲する。グラスピングの場合では、先に物体と接触する指が停止になり、物体をマッチングするまでに残る指が継続的に屈曲して、結果的に物体の全体に対する馴染み把持に形成する。これに基づいて、従来研究では滑車式、およびリンク式をまとめられた。しかしながら、これらの手法に使用したメカニズムはデメリットが存在していて、運動特徴に従うものではなく、課題が残っている。

これらの問題を含めて、四指全体の運動特徴をすべて再現するために、本章の後半では、四指全体における運動特徴から、差動屈曲機能に適したピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムを提案して、構築する。リーチングのときに静摩擦力が作用している第一層、二層、三層の解析を行った。ただし、第二層と三層に使うクラッチ機構は寸法が違いため、再び異なる材料で測って、摩擦係数が理論値に近いものを使用し



た。それに、摩擦係数を動摩擦力に応用して、それぞれ指1本、2本、3本をブロックされた各層の変化を調べて、検証実験で運動を確認し、必要最小の出力も獲得した。さらに、第6章で16パターンの動作実現を検証する同時に、差動屈曲機能の作用も発揮した。以上によって、四指全体に設けたピラミッド式クラッチ機構群メカニズムによる差動屈曲機能の有用性を確かめた。

# 第5章 くぼみ機能を備える掌の開発

---

5.1 掌の運動特徴 .....	130
5.2 掌におけるくぼみ機能の実現 .....	133
5.2.1 既存研究及び課題 .....	133
5.2.2 くぼみ機能に適した対称 SEA 駆動のメカニズム .....	134
5.2.3 くぼみ機能の運動・出力解析 .....	142
5.2.4 くぼみ機能の出力検証 .....	147
5.3 まとめ .....	150

---

## 5.1 掌の運動特徴

人間の掌は五指と異なる特徴を持ち、物体を把持する際に重要な役割を司る。五指はさまざまな物体に対して、対応的な把持姿勢の形成、維持、あるいはマニピレーションが果たしている。一方、掌に存在している可動な環指と小指の中手骨は、それぞれ屈曲、伸展の一自由度を持つCM関節によって、五指と組み合わせて同時に作用して、把持動作をより効果的に実現できる。Fig.5.1のように、右の図では、リーチングのときに、アーチ状を形成し、環指・小指の指先を物体に接近させて、物体の形に沿う接触になるように、精密把握に補助する役割になる。また、左の図では、グラスピングのときに、環指・小指の中手骨が拇指の中手骨と組み合わせて、馴染み把持を実現し、物体を包み込んだり、保持したりして、把持の役目をこなすほか、アーチ状の形成は比較的接触面積が大きくなり、把持物体に対する安定性も上がる。

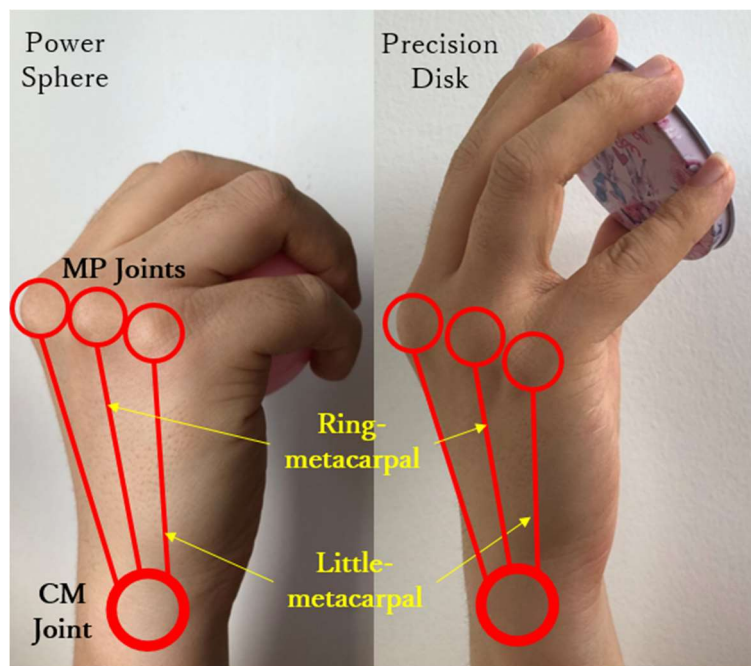


Fig.5.1 環指・小指の中手骨による把持・補助

特にグラスピングにおいて、把持するときには両中手骨の屈曲具合の違いによって、掌を全体的にアーチ状に形成させたり、平面状にさせたりにして、五指と同様な馴染み把持ができるという特徴を持っている。具体的に、Fig.5.2のように、球状のものを握る場合では、アーチ状になった掌は拇指の中手骨の回内と共に物体を挟んで包み込む。棒状の場合、拇指の握り込みによって、環指と小指の中手骨が棒に伸展状態に押し戻されて、掌が平面状になって、馴染み把持をなす遂げる。

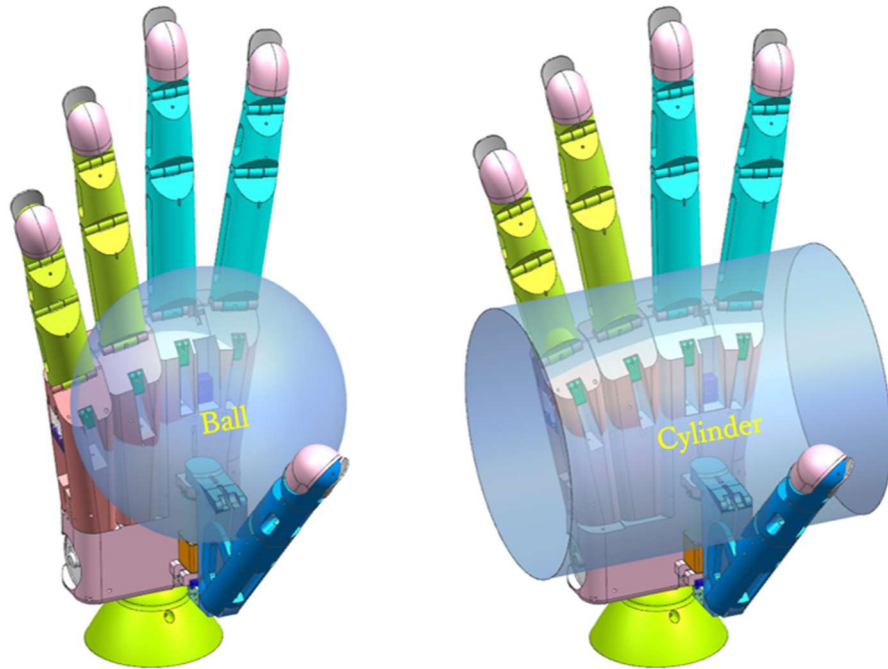


Fig.5.2 掌が球状と棒状の馴染み把持

本章に使う符号の表記を Table.5.1 のように示す.

Table.5.1 符号の表記

	拇指			環指・小指			
	中手骨	基節骨	末節骨	中手骨	基節骨	中節骨	末節骨
略称	$q = 1$	$q = 2$	$q = 3$	$q = 0$	$q = 1$	$q = 2$	$q = 3$
長さ	$L_{t1}$	$L_{t2}$	$L_{t3}$	$L_{n0}$	$L_{n1}$	$L_{n2}$	$L_{n3}$
重心/接触点	$R_{t1}$	$R_{t2}$	$R_{t3}$	$R_{n0}$	$R_{n1}$	$R_{n2}$	$R_{n3}$
質量	$m_{t1}$	$m_{t2}$	$m_{t3}$	$m_{n0}$	$m_{n1}$	$m_{n2}$	$m_{n3}$
重量	$G_{t1}$	$G_{t2}$	$G_{t3}$	$G_{n0}$	$G_{n1}$	$G_{n2}$	$G_{n3}$
バネ定数	$k_{t1}$	$k_{t2}$	$k_{t3}$	$k_{n0}$	$k_{n1}$	$k_{n2}$	$k_{n3}$
バネ初張力	$\sigma_{t1}$	$\sigma_{t2}$	$\sigma_{t3}$	$\sigma_{n0}$	$\sigma_{n1}$	$\sigma_{n2}$	$\sigma_{n3}$
伸び量	$x_{t1}$	$x_{t2}$	$x_{t3}$	$x_{n0}$	$x_{n1}$	$x_{n2}$	$x_{n3}$
弾性力	$K_{t1}$	$K_{t2}$	$K_{t3}$	$K_{n0}$	$K_{n1}$	$K_{n2}$	$K_{n3}$
ワイヤ張力	$T_{t1}$	$T_{t2}$	$T_{t3}$	$T_{n0}$	$T_{n1}$	$T_{n2}$	$T_{n3}$
ワイヤ走行距離	$s_{t1}$	$s_{t2}$	$s_{t3}$	$s_{n0}$	$s_{n1}$	$s_{n2}$	$s_{n3}$
屈曲側トルク	$M_{t1}$	$M_{t2}$	$M_{t3}$	$M_{n0}$	$M_{n1}$	$M_{n2}$	$M_{n3}$
伸展側トルク	$\varkappa_{t1}$	$\varkappa_{t2}$	$\varkappa_{t3}$	$\varkappa_{n0}$	$\varkappa_{n1}$	$\varkappa_{n2}$	$\varkappa_{n3}$
関節トルク	$\tau_{t1}$	$\tau_{t1}$	$\tau_{t1}$	$\tau_{n0}$	$\tau_{n1}$	$\tau_{n1}$	$\tau_{n1}$

関節角度	$\theta_{t1}$	$\theta_{t2}$	$\theta_{t3}$	$\theta_{n0}$	$\theta_{n1}$	$\theta_{n2}$	$\theta_{n3}$
出力	$F_{t1}$	$F_{t2}$	$F_{t3}$	$F_{n0}$	$F_{n1}$	$F_{n2}$	$F_{n3}$

## 5.2 掌におけるくぼみ機能の実現

掌にある中手骨は上記の運動特徴に基づいて、既存研究を述べて、残された課題を挙げられる。これらをまとめて、掌にある環指・小指中手骨にくぼみ機能を絞り出して、相応に機能を実現するための対称 SEA 駆動のメカニズムを提案する。このメカニズムによるくぼみ機能において、こなせることは：

1. リーチングにおける指先を物体に接近させて、把持補助を実現する。
2. グラスピングにおける球状、棒状に対して、自動的にアーチ状、平面状が切り替わる馴染み把持を実現する。
3. 環指・小指中手骨の間に連動機構を設置することで、異なる屈曲具合によるアーチ状の曲面を形成する。
4. 軽量化のため、くぼみ機能を拇指回転機能と融和して、連動されることによって、アクチュエーターが不要になる。

その実現にあたって、提案した対称 SEA 駆動のメカニズムに対して、力学モデルを立て、解析で運動、出力に関するパラメータを明確する。そして、パラメータの理論値に基づいて、出力検証を行って有用性を確かめる。さらに、第6章で説明するが、機能の有用性を判明するため、同一の義手を使って、それぞれくぼみ機能を封鎖したケース、および開放したケースを分けて、ほかのハンドと比較する。

### 5.2.1 既存研究及び課題

義手に応用するくぼみ機能に関する研究はわずかでありながら、必要な機能を一部しか実現していないのは現状である。



Fig.5.3 F hand の掌 ([深谷 2016])

Fig.5.3 のように、F hand は環指・小指の中手骨が可動できるが、劣駆動で CM、MP、PIP と DIP 関節を貫通して連動するタイプであるため、把持形態が形成すると途中の動作切替はできないほか、中手骨の間には連動機構が存在せず、関連性がなくなり、アーチ状に形成できない可能性も生じる。



Fig.5.4 Shadow Dexterous Hand の掌 ([Shadow Robot 社 HP より])

一方, Fig.5.4 のように, 義手向けではないが, Shadow Dexterous Hand は小指中手骨だけの屈曲・伸展が可能であるが, 環指の中手骨を再現できず, 掌の特徴に相応しくないほか, 小指中手骨をアクチュエーターで直接にコントロールして, 構造が複雑になるのがともかく, 重量化にも繋がって, コスパが低下になってしまう.

### 5.2.2 くぼみ機能に適した対称 SEA 駆動のメカニズム

くぼみ機能を実現するために, 本研究ではまず, より人間らしい自然な動き方を表せるリーチングからグラスピングまでの動作を再現する前提に, 軽量化を重視しながら, 機能を融和して, 拇指の回内と共に環指・小指の中手骨を順次に屈曲させる連動方式で構築する. 拇指の回内・回外に司る CM 関節は主動であるため, 環指・小指の CM 関節と連結し, 動力源として, 拇指が回内するたびに徐々に次々と屈曲させて, 共にアーチ形状に形成する. そして, SEA 駆動方式をベースに, 対称 SEA 駆動のメカニズムを立ち上げて, 拇指 CM 関節の回転自由度には, さらに柔軟性を持つ環指・小指の CM 関節の運動を加えて, アーチ状と平面状の自動切替による馴染み把持を果たせる[X. Yong 2019]. Fig.5.4 に示したように, 環指・小指の中手骨に伸展側と屈曲側において, それぞれ対称的に 2 個のバネを設置して, 球状を握る場合では CM 関節の回転によって, 環指と小指の中手骨の屈曲角度はそれぞれ 10 度、15 度[A. I. Kapandji 2005]に至る. 棒状を握る場合では, 物体が環指・小指の中手骨に外力を与えて屈曲側のバネを引っ張られ, 中手骨が一度伸展側に戻るようになる. また, 外力がなくなり次第, 中手骨が再び屈曲になれる. くぼみ機能に使用する対称 SEA 駆動メカニズムは以下の項目を分けて説明する.



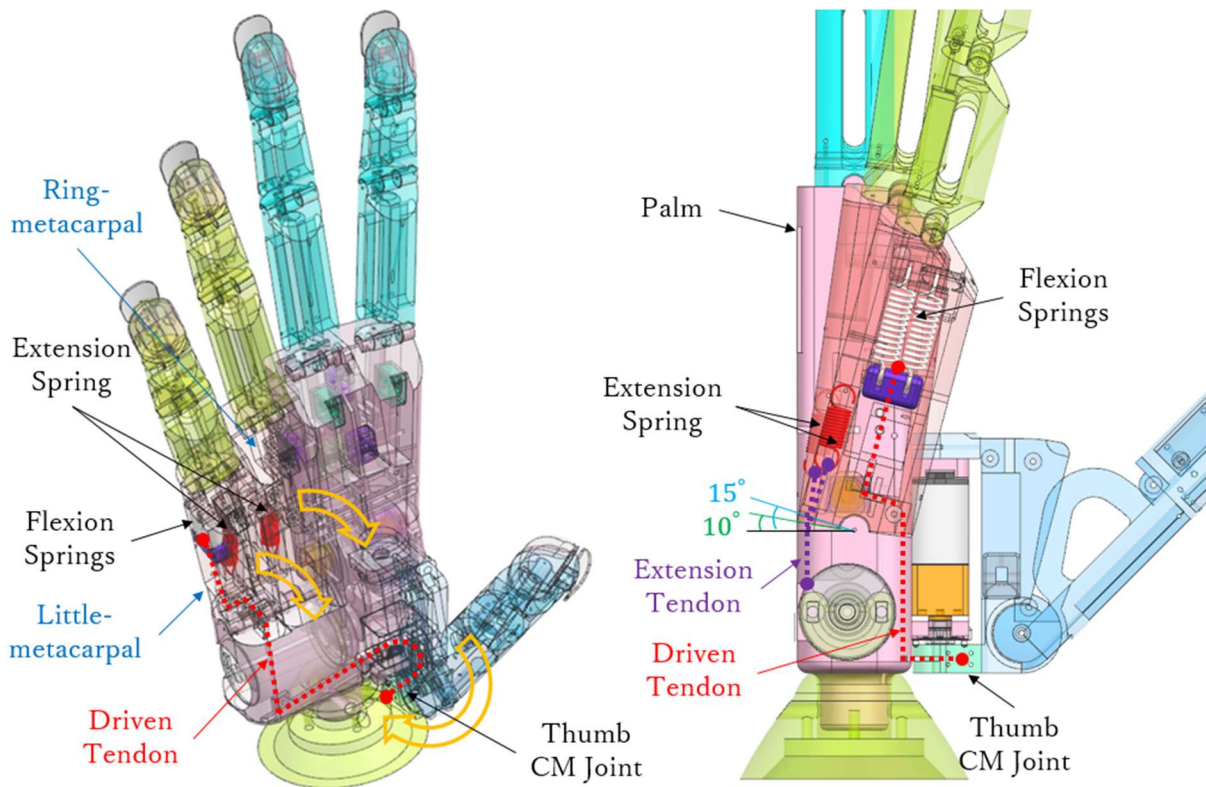


Fig.5.4 くぼみ機能に適した対称 SEA 駆動のメカニズム

1. 対称 SEA 駆動メカニズムを成り立つためのバネのパラメータ計算

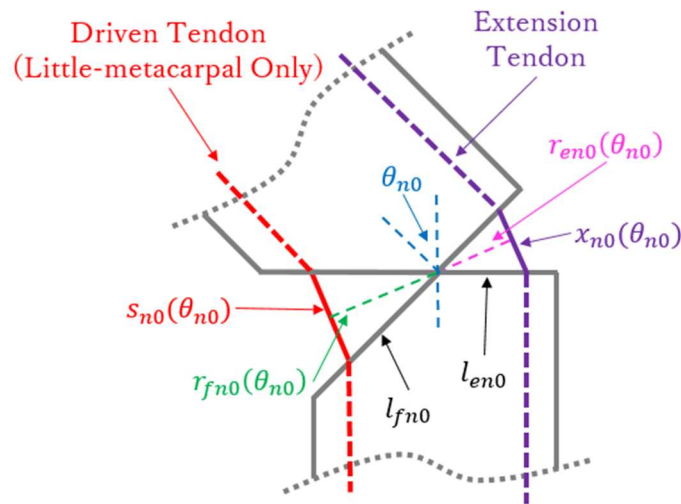


Fig.5.5 環指・小指の CM 関節における幾何学関係

環指・小指の CM 関節における幾何学の図示は Fig.5.5 に示す。対称に配置されたバネは対称 SEA 駆動のコアであるため、幾何学の関係式に基づいて、バネのパラメータを算出して、選定を行う。

まず、環指 CM 関節において幾何学の関係式を得る：

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{fr} = 8 \cos \frac{\pi}{36} \\ l_{er} = 8 \\ r_{fro} = l_{fr} \cos \left( \frac{\pi}{36} - \frac{\theta_{r0}}{2} \right) \\ r_{ero} = 8 \cos \frac{\theta_{r0}}{2} \\ s_{r0} = 2l_{fr} \sin \left( \frac{\pi}{36} - \frac{\theta_{r0}}{2} \right) \\ x_{r0} = 16 \sin \frac{\theta_{r0}}{2} \end{array} \right.$$

同様に、小指 CM 関節の関係式は：

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{f10} = 8 \cos \frac{\pi}{24} \\ l_{e10} = 8 \\ r_{f10} = l_{f10} \cos \left( \frac{\pi}{24} - \frac{\theta_{10}}{2} \right) \\ r_{e10} = 8 \cos \frac{\theta_{10}}{2} \\ s_{10} = 2l_{f10} \sin \left( \frac{\pi}{24} - \frac{\theta_{10}}{2} \right) \\ x_{10} = 16 \sin \frac{\theta_{10}}{2} \end{array} \right.$$

そして、下記の力学の関係式によって、必要最小の弾性力を求める：

$$\kappa_{n0} = [R_{n0} \quad L_{n0} + R_{n1} \quad L_{n0} + L_{n1} + R_{n2} \quad L_{n0} + L_{n1} + L_{n2} + R_{n3}] \mathbf{G}$$

ただし、 $m_{r0} = 1.345 \times 10^{-2} \text{kg}$ 、 $m_{10} = 1.108 \times 10^{-2} \text{kg}$ 、およびほかの設計パラメータを代入して、伸展側トルクを得られる（単位は Nmm）：

$$\begin{bmatrix} \kappa_{r0} \\ \kappa_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11.2107 \\ 8.317 \end{bmatrix}$$

ゆえに、各関節における最小の弾性力は（単位は N）：

$$\begin{bmatrix} K_{r0} \\ K_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.401 \\ 1.0396 \end{bmatrix}$$

したがって、伸展側を含めて、対称となる屈曲側のバネ定数を決めるときに、仮に  $k_{r0} + k_{10}$  より小さいであれば、屈曲側のバネは拇指が回内するたびに常に伸展側と釣り合うため、さらなる伸ばされることになる。すなわち、くぼみ機能のアーチ状の形成は拇指の回内に対する応答が遅くなるほか、バネの走行距離（伸び量）が更なるスペースを占めて、非効率的である。一方、 $k_{r0} + k_{10}$  より大きいであれば、くぼみ機能のアーチ状の形成が素早く完成できるが、その代わりに拇指の CM 関節に余分の負荷を与えて、結果的にアクチュエーターに過剰なエネルギーを消費されて、出力が減少する。そのため、屈曲側のバネ定数は伸展側と等しいことは適切になるため、屈曲側

のバネは上記の計算結果と同様なものを使用する。さらに、屈曲側のバネを小指の中手骨にまとめて設置することによって、くぼみ機能を保つ以上に、応答は早くになるため、その旨で設計を行う。

以上の結論により、Table.5.2 に示したように、バネのパラメータ（日本，株式会社アキュレイト，DE 規格引張コイルバネ）を選出できる。

Table.5.2 対称 SEA 駆動メカニズムに使用するバネのパラメータ

	環指伸展側	小指伸展側	小指屈曲側
バネ定数 N/mm	0.49	0.49	0.98
バネ初張力 N	1.569	1.569	3.138

2. リーチング

第2章で設定した 60 度前後になる時点でアーチ形状を形成させる境界条件に基づいて、リーチングは四つのステップを分けて述べる。

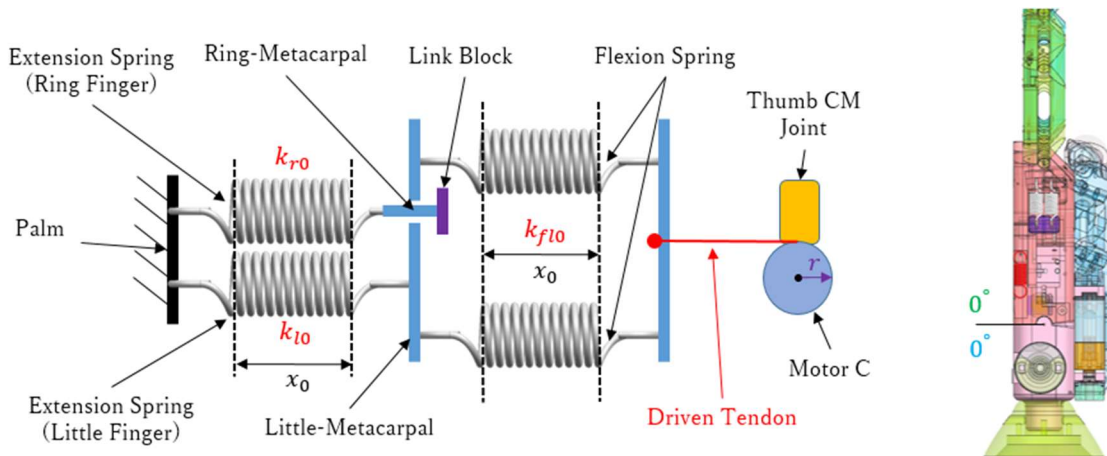


Fig.5.6 ステップ A の運動状態

ステップ A：拇指は回外の状態で、環指と小指の中手骨が伸展状態になる。指関節がすべて初期位置に存在して、拇指、四指、掌は同じ冠状面にある。Fig.5.6 に示すように、環指と小指の CM 関節は 0 度の位置にあって、伸展側と屈曲側のバネを伸ばせず、自由長さである。また、環指の紫色ブロックは小指と分離の状態になる。ただし、設計した構造による  $r = 4\text{mm}$  である。

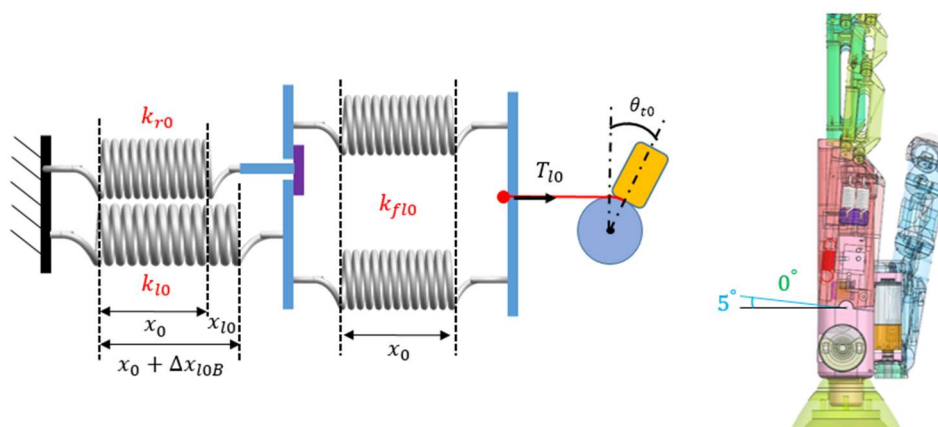


Fig.5.7 ステップ B の運動状態

ステップ B：拇指が回内し始めて，Fig.5.7 のように，赤のアクティブワイヤが拇指 CM 関節に巻き取られ，ついでに小指の屈曲側のバネも赤ワイヤに引っ張られ，結果的に小指の中手骨が屈曲する．ただし，伸ばされた伸展側の弾性力は，屈曲側バネの初張力より小さいため，屈曲側のバネが自由長さのままである．この際に，小指の中手骨が環指の紫色ブロックとかかりり接触し，環指の中手骨はまだ動いていないが，これから屈曲しようとしている．小指 CM 関節の屈曲角度は 5 度であるため，この状態の対称 SEA 駆動のバネ定数は  $k_{10}$  である．赤ワイヤの走行距離は：

$$s_B = 16 \cos \frac{\pi}{24} \left[ \sin \frac{\pi}{24} - \sin \left( \frac{\pi}{24} - \frac{\theta_{10}}{2} \right) \right] = 0.688 \text{mm}$$

よって，赤ワイヤの張力は計算できる：

$$T_{10} = 1.911 + 1.911 = 3.822 \text{N}$$

拇指の回内角度も得る：

$$\theta_{t0} = 9.85^\circ$$

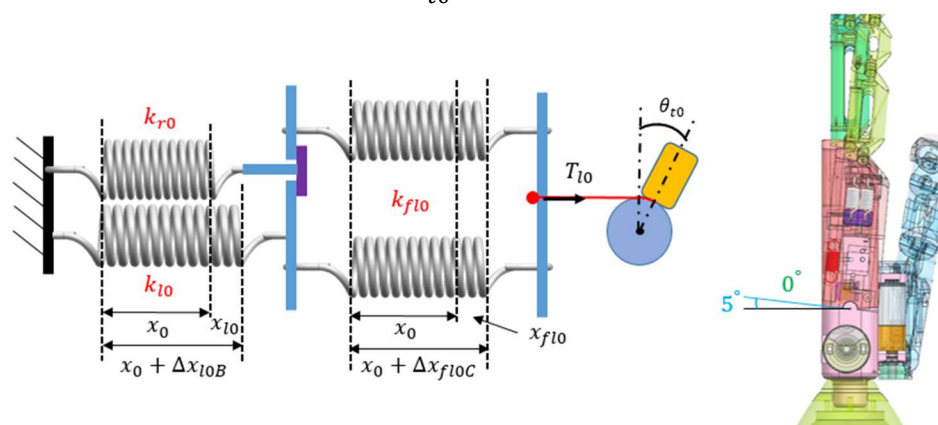


Fig.5.8 ステップ C の運動状態

ステップ C： Fig.5.8 のように，小指 CM 関節の屈曲角度は 5 度に維持しながら，

拇指が微少に回内すると、環指中手骨の紫色ブロックを押し始め、環指中手骨の伸展側バネの初張力をまだ克服していく間に、小指中手骨の屈曲側バネの初張力を超えるようになって、伸び始める。この際に、環指中手骨はまだ動かず、小指中手骨の屈曲側バネが伸びた分は赤ワイヤの走行距離に足して、拇指がステップ B より少し回内になる。この状態の対称 SEA 駆動のバネ定数は求める：

$$\frac{k_{fl} + k_{l0}}{k_{fl} k_{l0}} = 3.0612\text{N/mm}$$

赤ワイヤがステップ B からの走行距離は：

$$s_C = \frac{k_{l0}x_{l0} + \sigma_{l0} + \sigma_{r0} - \sigma_{fl0}}{k_{fl0}} = 0.349\text{mm}$$

よって、赤ワイヤの張力は計算できる：

$$T_{l0} = 6.96\text{N}$$

拇指の回内角度も得る：

$$\theta_{t0} = 5^\circ + 9.85^\circ = 14.85^\circ$$

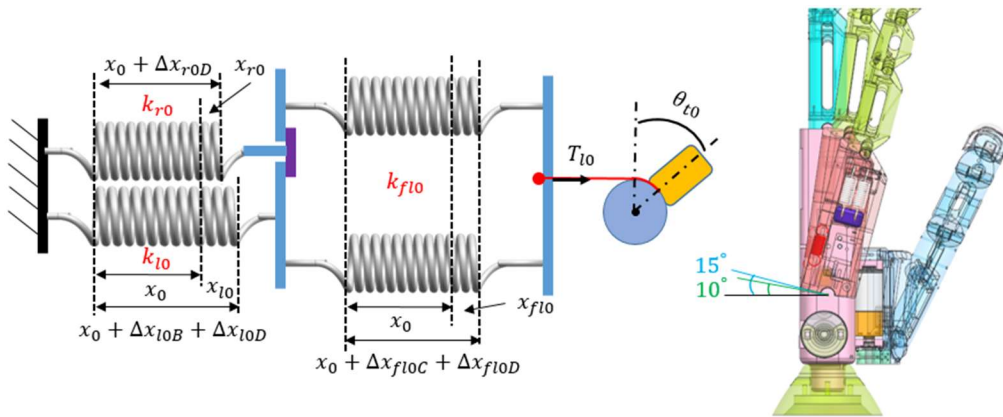


Fig.5.9 ステップ D の運動状態

ステップ D：拇指が回内し続けて、Fig.5.9 のように、赤ワイヤの巻取によって、小指の中手骨は環指の紫色ブロックを押しながら、環指の CM 関節が小指に牽引されて同時に屈曲し始める。それぞれ屈曲角度は 15 度、10 度に至り、設計したアーチ形状になる。この際に、屈曲側のバネがステップ C よりさらに伸ばされ、両関節の伸展側バネは共に最大伸び量に達した。対称 SEA 駆動のバネ定数が変わる：

$$\frac{k_{fl0} + k_{l0} + k_{r0}}{k_{fl} (k_{l0} + k_{r0})} = 2.041\text{N/mm}$$

ついでに、赤ワイヤがステップ C からの走行距離は：

$$s_D = \frac{k_{l0}x_{l0} + k_{r0}x_{r0} + \sigma_{l0} + \sigma_{r0} - \sigma_{fl}}{k_{fl}} + 16 \cos \frac{\pi}{24} \sin \frac{\pi}{36} - s_C = 2.775\text{mm}$$

赤ワイヤの張力は：

$$T_{l0} = 9.6893\text{N}$$



この状態の拇指の回内角度は：

$$\theta_{t0} = 39.75^\circ + 14.85^\circ = 54.6^\circ$$

これによって、設けた 60 度の境に達する少し前にアーチ形状に形成し、境界条件に満足する。

### 3. グラスピング

グラスピングのプロセスに入り、さらに三つのステップで説明する。

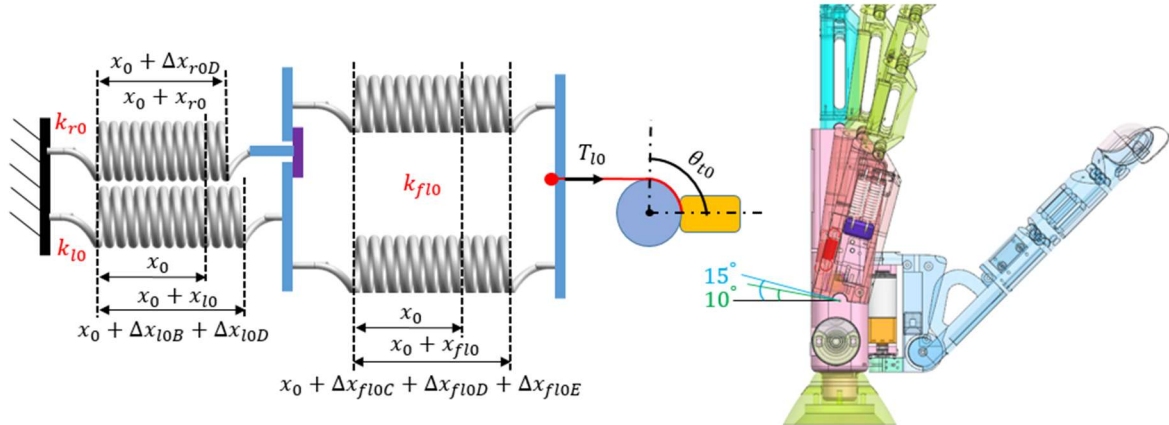


Fig.5.10 ステップ E の運動状態

ステップ E：拇指が引き続き回内して、くぼみ機能は包み込む効果を表現する段階として作用し、最終的に四指と対立する 90 度までの回内限界に至る。Fig.5.10 に示したように、両関節の伸展側バネは依然とステップ D の状態を維持している一方、赤ワイヤの巻取は限界まで引っ張る分は屈曲側のバネを継続的に伸ばせる。対称 SEA 駆動のバネ定数は  $k_{f10}$  に戻ったため、赤ワイヤがステップ D からの走行距離は求める：

$$s_E = \left( \frac{\pi}{2} - \frac{91\pi}{300} \right) r = 2.4714\text{mm}$$

赤ワイヤの張力は：

$$T_{l0} = 12.1113\text{N}$$

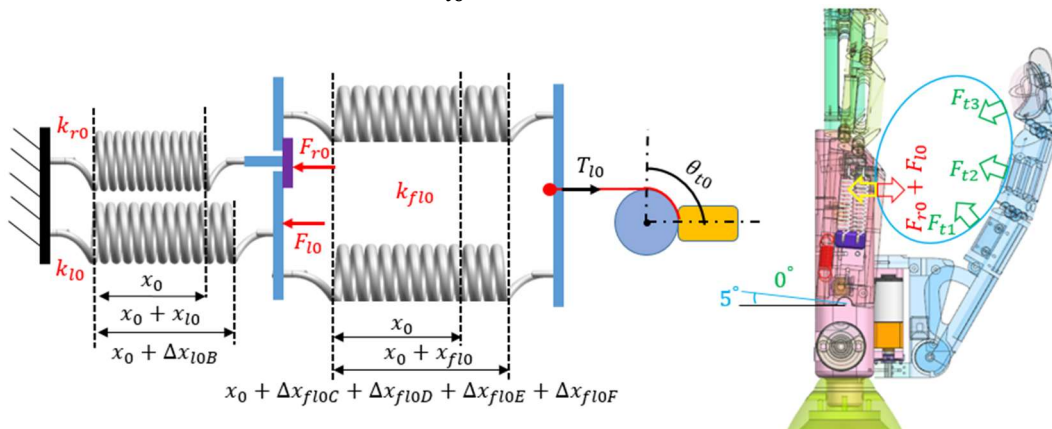


Fig.5.11 ステップ F の運動状態

ステップ F: Fig.5.11 のように、拇指が四指と対立する状態で屈曲し始める。握る物体が環指・小指の中手骨に反力を与えて、拇指の出力の増加によって、環指と小指が伸展されつつある。この状態で、赤ワイヤが動かず、反力で屈曲側のバネを反対側から伸ばされ、小指 CM 関節角度は 5 度に戻る際に、環指 CM 関節角度は 0 度になり、バネの自由長さに回復する。赤ワイヤがステップ E からの走行距離は：

$$s_F = 16 \cos \frac{\pi}{24} \sin \frac{\pi}{36} = 1.3826 \text{mm}$$

赤ワイヤの張力は：

$$T_{l0} = 10.5325 \text{N}$$

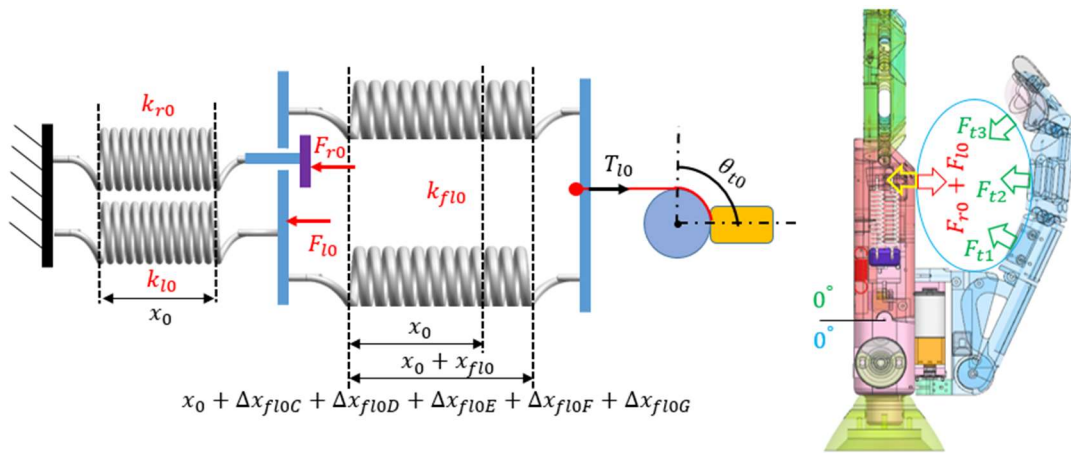


Fig.5.12 ステップ G の運動状態

ステップ G: Fig.5.12 のように、拇指が屈曲し続けて、物体が環指・小指の中手骨に与える反力を増加し、小指 CM 関節が最終的に 0 度に戻られる。この時、ステップ F から赤ワイヤの走行距離は：

$$s_G = 16 \cos \frac{\pi}{24} \left( \sin \frac{\pi}{24} - \sin \frac{\pi}{36} \right) = 0.688 \text{mm}$$

赤ワイヤの張力は：

$$T_{l0} = 9.2958 \text{N}$$

もし握る物体を外せば、環指・小指の中手骨が再び屈曲の最終位置に素早く戻り、アーチ形状に戻る。

以上による一連の運動は、対称 SEA 駆動メカニズムで果たしたものである。これによって、くぼみ機能は設計の通りに実現した。環指・小指 CM 関節による運動変化のプロセスを Fig.5.13 のように示す。



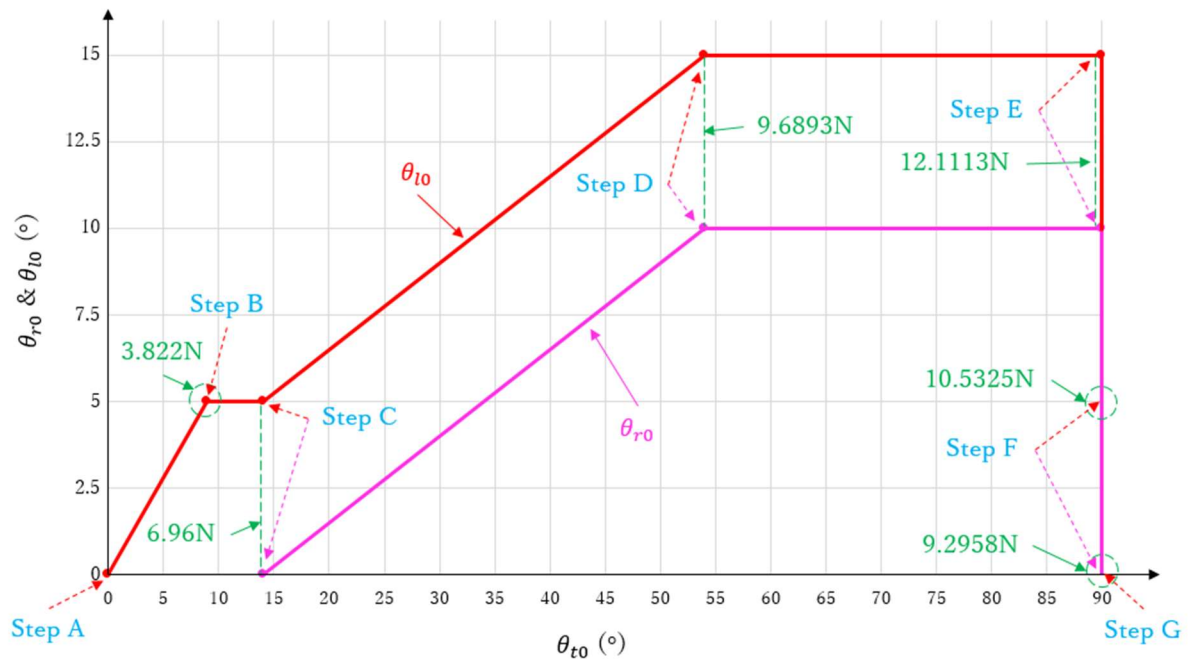


Fig.5.13 小指・環指のCM関節の運動変化

### 5.2.3 くぼみ機能の運動・出力解析

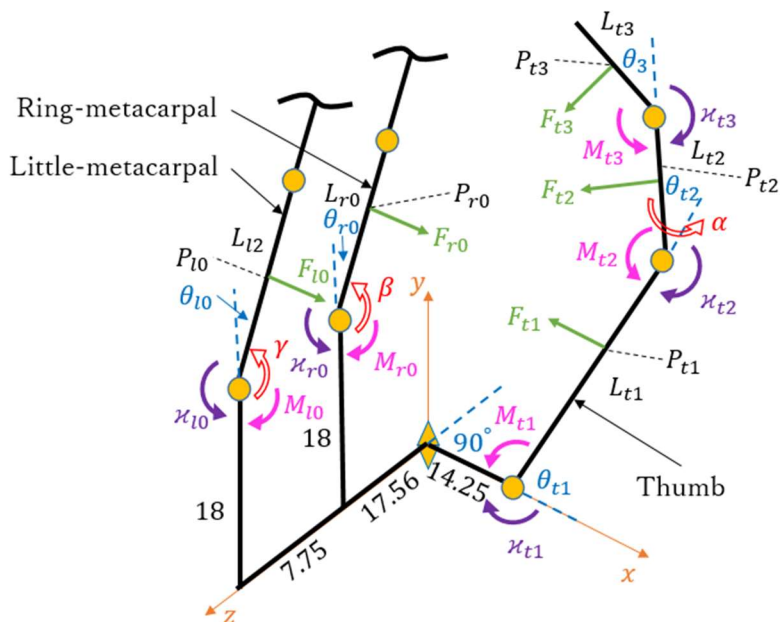


Fig.5.14 くぼみ機能の力学モデル

対称 SEA 駆動メカニズムの最終状態であるステップ G から、物体を外した状態に対して、力学モデルを Fig.5.14 のように成り立つ。ワールド座標系を拇指が回内・回外における回転中心にする。ただし、赤色の矢印はそれぞれ拇指 MP 関節が CM 関節

まわりの回転角度、環指 CM 関節が  $x_{r0}$  軸まわり外転角度、および小指 CM 関節が  $x_{t0}$  軸まわり外転角度であることを指す。それに、設計した構造のパラメータの関係で、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\beta = 10^\circ$ 、 $\gamma = 15^\circ$  である。

モデルによって、ローカル座標における各関節の重心の位置は：

$${}^{tq}\mathbf{P} = \begin{bmatrix} R_{tq} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{n0}\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ R_{n0} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

同様に、各関節の出力は：

$${}^{tq}\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_{tq} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{n0}\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{n0} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

同次変換行列は下記のように示す。ただし、回転行列を容易に得るため、省略する。それに、 $C_{nq}$  は  $\cos \theta_{nq}$ 、 $S_{nq}$  は  $\sin \theta_{nq}$  とする。

$${}^0\mathbf{T}_{t1} = \begin{bmatrix} C_{t1} & -S_{t1} & 0 & 14.25 \\ S_{t1} & C_{t1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{t1}\mathbf{T}_{t2} = \begin{bmatrix} C_{t2} & -S_{t2} & 0 & L_{t1} \\ C_\alpha S_{t2} & C_\alpha C_{t2} & -S_\alpha & 0 \\ S_\alpha S_{t2} & S_\alpha C_{t2} & C_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{t2}\mathbf{T}_{t3} = \begin{bmatrix} C_{t3} & -S_{t3} & 0 & L_{t2} \\ S_{t3} & C_{t3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0\mathbf{T}_{r0} = \begin{bmatrix} C_{r0} & S_{r0} & 0 & 0 \\ -C_\beta S_{r0} & C_\beta C_{r0} & -S_\beta & 18 \\ -S_\beta S_{r0} & S_\beta C_{r0} & C_\beta & 17.56 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T = \begin{bmatrix} C_{l0} & S_{l0} & 0 & 0 \\ -C_{\gamma}S_{l0} & C_{\gamma}C_{l0} & -S_{\gamma} & 18 \\ -S_{\gamma}S_{l0} & S_{\gamma}C_{l0} & C_{\gamma} & 25.31 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

したがって、ワールド座標における各関節の接触点は下記の式で表す：

$${}^{0q}P = {}^0T \dots {}^{tq-1}T {}^{tq}P \quad (q = 1, 2 \dots)$$

$${}^{n0}P = {}^0T {}^{n0}P$$

小指 CM 関節を参照にして、 $\theta_{l0}$ が0度から5度のプロセスにおいて、各関節トルクの関係式は：

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_{t1} \\ \tau_{t2} \\ \tau_{t3} \\ \tau_{r0} \\ \tau_{l0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{t1} - \kappa_{t1} \\ M_{t2} - \kappa_{t2} \\ M_{t3} - \kappa_{t3} \\ -\kappa_{r0} \\ M_{l0} - \kappa_{l0} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 16T_t \cos\left(\frac{\pi}{12} - \frac{\theta_{t1}}{2}\right) - 9.375\pi k_{t1} - 7.5\sigma_{t1} \\ 1.95T_t \cos^{-1}\frac{\pi}{8} \cos\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta_{t2}}{2}\right) - 25k_{t2} \sin \theta_{t2} - 5\sigma_{t2} \cos \frac{\theta_{t2}}{2} \\ 1.95\sqrt{2}T_t \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_{t3}}{2}\right) - 25k_{t3} \sin \theta_{t3} - 5\sigma_{t3} \cos \frac{\theta_{t3}}{2} \\ -64k_{r0} \sin \theta_{r0} - 8\sigma_{r0} \cos \frac{\theta_{r0}}{2} \\ r_{fl0}k_{fl0} \left[ x_{fl0} - \left(8 \sin \frac{\pi}{12} - s_{l0}\right) \right] + \sigma_{fl0} r_{fl0} - 64k_{l0} \sin \theta_{l0} - 8\sigma_{l0} \cos \frac{\theta_{l0}}{2} \end{bmatrix}$$

また、 $\theta_{l0}$ が5度から15度のプロセスにおいて、各関節トルクの関係式は：

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_{t1} \\ \tau_{t2} \\ \tau_{t3} \\ \tau_{r0} \\ \tau_{l0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{t1} - \kappa_{t1} \\ M_{t2} - \kappa_{t2} \\ M_{t3} - \kappa_{t3} \\ M_{r0} - \kappa_{r0} \\ M_{l0} - \kappa_{l0} - \kappa_{r0} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 16T_t \cos\left(\frac{\pi}{12} - \frac{\theta_{t1}}{2}\right) - 9.375\pi k_{t1} - 7.5\sigma_{t1} \\ 1.95T_t \cos^{-1}\frac{\pi}{8} \cos\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta_{t2}}{2}\right) - 25k_{t2} \sin \theta_{t2} - 5\sigma_{t2} \cos \frac{\theta_{t2}}{2} \\ 1.95\sqrt{2}T_t \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_{t3}}{2}\right) - 25k_{t3} \sin \theta_{t3} - 5\sigma_{t3} \cos \frac{\theta_{t3}}{2} \\ M_{l0} - 64(k_{r0} \sin \theta_{r0} + k_{l0} \sin \theta_{l0}) - 8\left(\sigma_{r0} \cos \frac{\theta_{r0}}{2} + \sigma_{l0} \cos \frac{\theta_{l0}}{2}\right) \\ r_{fl0}k_{fl0} \left[ x_{fl0} - \left(8 \sin \frac{\pi}{12} - 16 \cos \frac{\pi}{24} \sin \frac{\pi}{36} - s_{l0}\right) \right] + \sigma_{fl} r_{fl0} - \kappa_{l0} - \kappa_{r0} \end{bmatrix}$$

そこで、下記の関係式を立つ。ただし、 $J^T$ はヤコビの転置行列である：

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_{q=1}^3 {}^0\mathbf{J}_t^T {}^0\mathbf{F} + \sum_{n=r}^l {}^n\mathbf{J}_t^T {}^n\mathbf{F}$$

したがって、 $\theta_{10}$ が0度から5度のプロセスにおける関節の出力を算出する：

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{t1} = \frac{L_{t1} \cos \alpha}{R_{t1} R_{t2} R_{t3}} \left[ 1.95\sqrt{2}T_t \sin\left(\frac{\theta_{t3}}{2} + \frac{\pi}{4}\right) - 25k_{t3} \sin \theta_{t3} - 5\sigma_{t3} \cos \frac{\theta_{t3}}{2} \right] \\ \quad [R_{t3} \cos \theta_{t2} - R_{t2} \cos(\theta_{t2} + \theta_{t3}) + L_{t2} \cos \theta_{t2} \cos \theta_{t3}] \\ - \frac{\cos \alpha}{R_{t1} R_{t2}} \left[ 2.11T_t \sin\left(\frac{\theta_{t2}}{2} + \frac{3\pi}{8}\right) - 25k_{t2} \sin \theta_{t2} - 5\sigma_{t2} \cos \frac{\theta_{t2}}{2} \right] (R_{t2} + L_{t1} \cos \theta_{t2}) \\ \quad + \frac{1}{R_{t1}} \left[ 16T_t \cos\left(\frac{\theta_{t1}}{2} + \frac{5\pi}{12}\right) - 9.375\pi k_{t1} - 7.5\sigma_{t1} \right] \\ F_{t2} = -\frac{1}{R_{t2} R_{t3}} \left[ 1.95\sqrt{2}T_t \cos\left(\frac{\theta_{t3}}{2} - \frac{\pi}{4}\right) - 25k_{t3} \sin \theta_{t3} - 5\sigma_{t3} \cos \frac{\theta_{t3}}{2} \right] \\ (R_{t3} + L_{t2} \cos \theta_{t3}) + \frac{1}{R_{t2}} \left[ 2.11T_t \cos\left(\frac{\theta_{t2}}{2} - \frac{\pi}{8}\right) - 25k_{t2} \sin \theta_{t2} - 5\sigma_{t2} \cos \frac{\theta_{t2}}{2} \right] \\ F_{t3} = \frac{1}{R_{t3}} \left[ 1.95\sqrt{2}T_t \sin\left(\frac{\theta_{t3}}{2} + \frac{\pi}{4}\right) - 25k_{t3} \sin \theta_{t3} - 5\sigma_{t3} \cos \frac{\theta_{t3}}{2} \right] \\ F_{r0} = -\frac{1}{R_{r0}} \left( 64k_{r0} \sin \theta_{r0} + 8\sigma_{r0} \cos \frac{\theta_{r0}}{2} \right) \\ F_{l0} = -\frac{1}{R_{l0}} \left\{ \begin{array}{l} 8\sigma_{l0} \cos \frac{\theta_{l0}}{2} - 7.93\sigma_{fl} \cos\left(\frac{\theta_{l0}}{2} - \frac{\pi}{24}\right) + 64k_{l0} \sin \theta_{l0} \\ + 7.93k_{fl} \cos\left(\frac{\theta_{l0}}{2} - \frac{\pi}{24}\right) \left[ 15.86 \sin\left(\frac{\theta_{l0}}{2} - \frac{\pi}{24}\right) - x_{fl0} + 2.07 \right] \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

同様に、 $\theta_{10}$ が5度から15度のプロセスにおける関節の出力を得られる。ただし、拇指の解答が前と同じであるため、省略する。

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{r0} = -\frac{1}{R_{r0}} \left\{ \begin{array}{l} 8\left(\sigma_{r0} \cos \frac{\theta_{r0}}{2} + \sigma_{l0} \cos \frac{\theta_{l0}}{2}\right) + 64(k_{r0} \sin \theta_{r0} + k_{l0} \sin \theta_{l0}) \\ - 7.93\sigma_{fl} \cos\left(\frac{\theta_{l0}}{2} - \frac{\pi}{24}\right) \\ + 7.93k_{fl} \cos\left(\frac{\theta_{l0}}{2} - \frac{\pi}{24}\right) \left[ 15.86 \sin\left(\frac{\theta_{l0}}{2} - \frac{\pi}{24}\right) - x_{fl0} + 0.69 \right] \end{array} \right\} \\ F_{l0} = -\frac{1}{R_{l0}} \left\{ \begin{array}{l} 8\left(\sigma_{r0} \cos \frac{\theta_{r0}}{2} + \sigma_{l0} \cos \frac{\theta_{l0}}{2}\right) + 64(k_{r0} \sin \theta_{r0} + k_{l0} \sin \theta_{l0}) \\ - 7.93\sigma_{fl} \cos\left(\frac{\theta_{l0}}{2} - \frac{\pi}{24}\right) \\ + 7.93k_{fl} \cos\left(\frac{\theta_{l0}}{2} - \frac{\pi}{24}\right) \left[ 15.86 \sin\left(\frac{\theta_{l0}}{2} - \frac{\pi}{24}\right) - x_{fl0} + 0.69 \right] \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

以上の式に基づいて、パラメータを代入して、 $\theta_{10}$ が0度から5度のプロセスで $F_{l0}$ の計算結果は Fig.5.15 のように示す。すなわち、ステップ G の状態で把持していた物体

を外す瞬間,  $F_{I0}$  が 0 度の時点で出力が最大となり, 2.171N である. 屈曲側の弾性力トルクが伸展側より大きいため, 小指 CM 関節が 5 度まで屈曲していく. このたびに, 伸展側の弾性力が徐々に増加することに対して, 屈曲側の弾性力が減少し続けて, 総合的に出力が減少する傾向になって, 5 度になると 1.895N である.

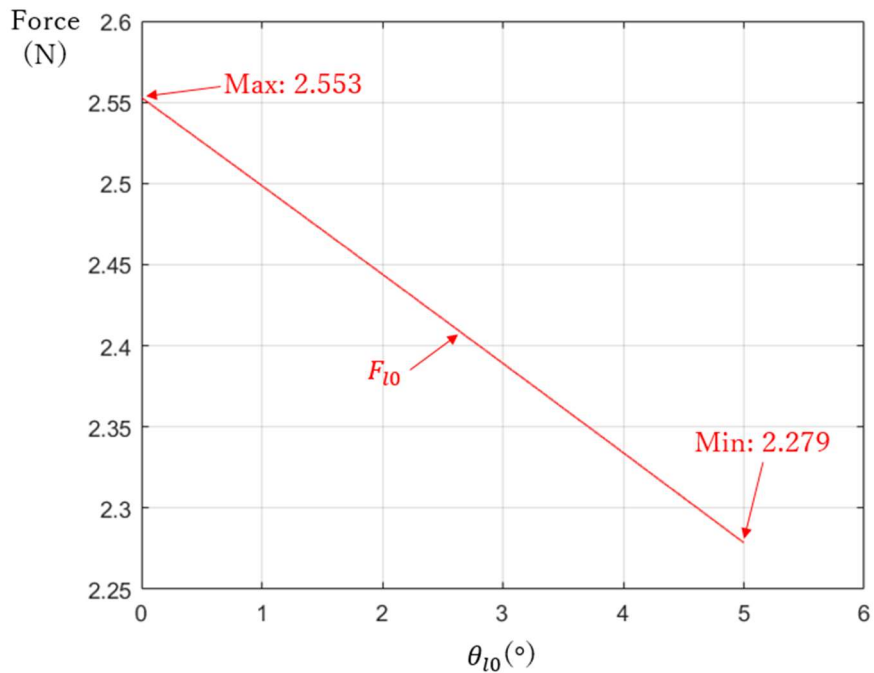


Fig.5.15 小指 CM 関節の角度による出力の変化

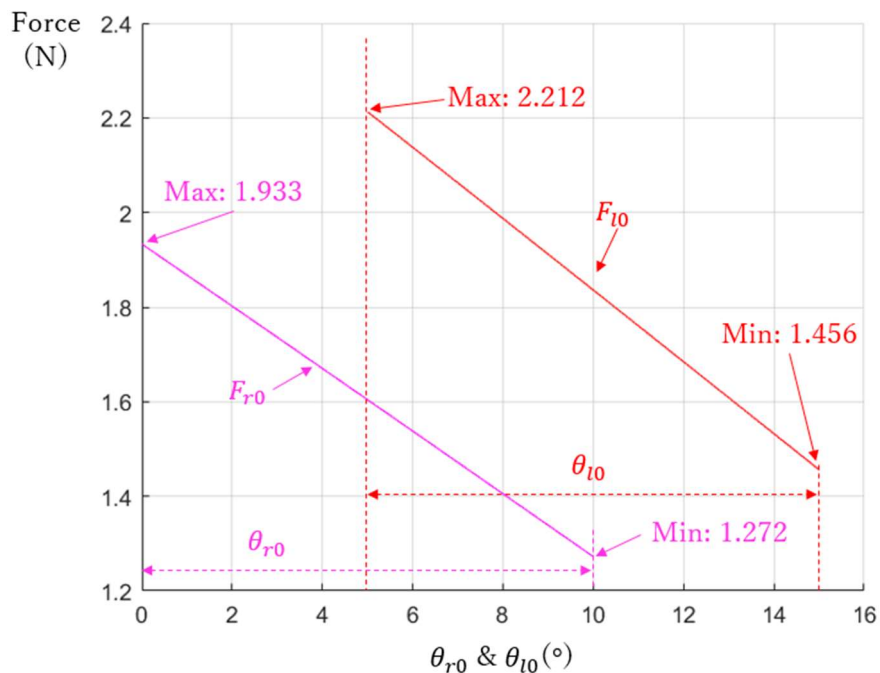


Fig.5.16 環指・小指 CM 関節の角度による出力の変化

引き続き、 $\theta_{l0}$ が5度から15度のプロセスで $F_{l0}$ 、 $F_{r0}$ と $\theta_{r0}$ の計算結果は Fig.5.16 のように示す。 $F_{l0}$ が5度の時点で出力が1.829Nであり、屈曲側の弾性力トルクが両関節の伸展側より大きいため、小指CM関節が15度まで屈曲できる。この間に、両関節の伸展側の弾性力が徐々に増加しているが、屈曲側に勝てなく、総合な出力が減少しつつあり、最後に1.071Nになる。一方、 $F_{r0}$ が小指中手骨に押されて、一緒に屈曲して、0度から10度までの間に、小指中手骨の屈曲側トルクによって、伸展側のバネが伸ばされて増えつつあるが、屈曲側トルクがずっと大きいため、小指CM関節と同様に出力が減り続けて、1.598Nから0.9357Nまで減少する。

#### 5.2.4 くぼみ機能の出力検証

上記の Fig.5.15、および Fig.5.16 から得た環指・小指中手骨における出力の理論値を検証するため、Fig.5.17のように、フォースゲージでそれぞれ屈曲状態の中手骨を0度の伸展初期位置に押し戻す。ただし、事前にそれぞれ中手骨の重心位置に小さい穴を開けて、測るときにフォースゲージの先端でそこを押す。

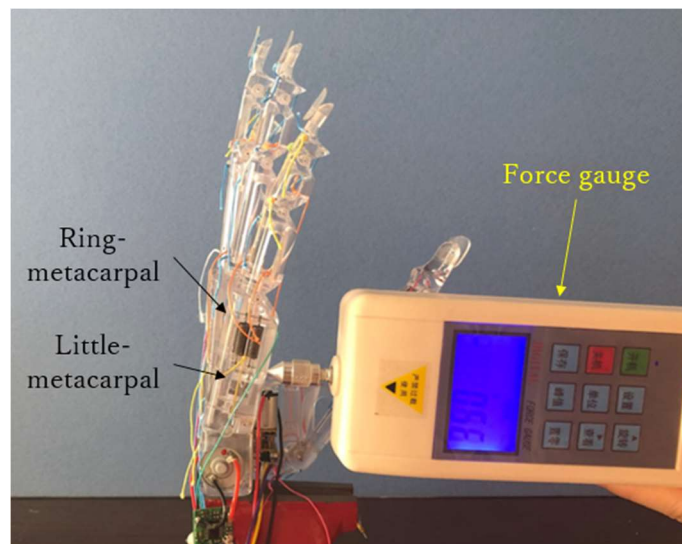


Fig.5.17 環指・小指中手骨の出力の測定

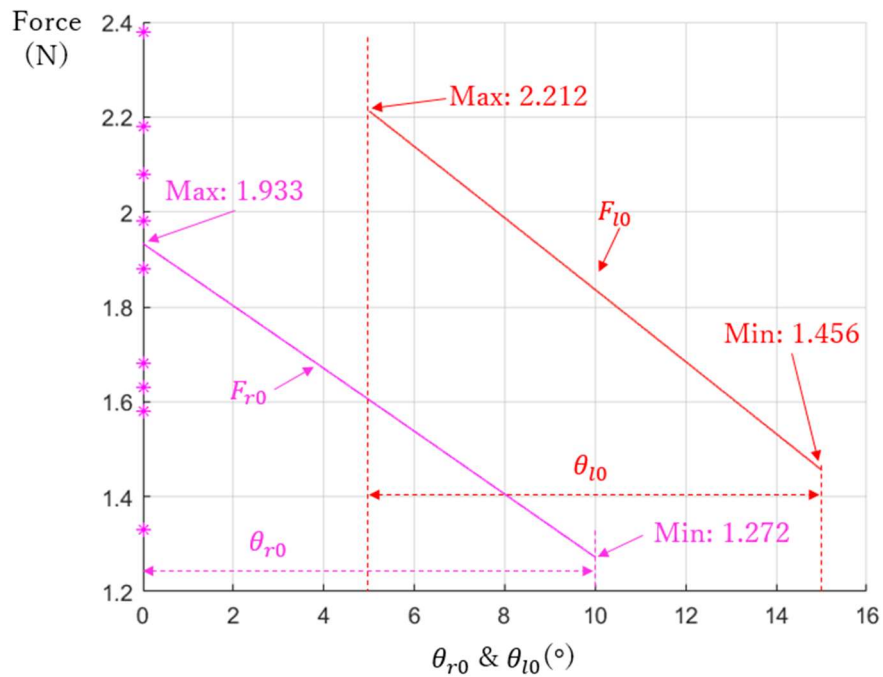


Fig.5.18 環指中手骨 0度における出力の測定

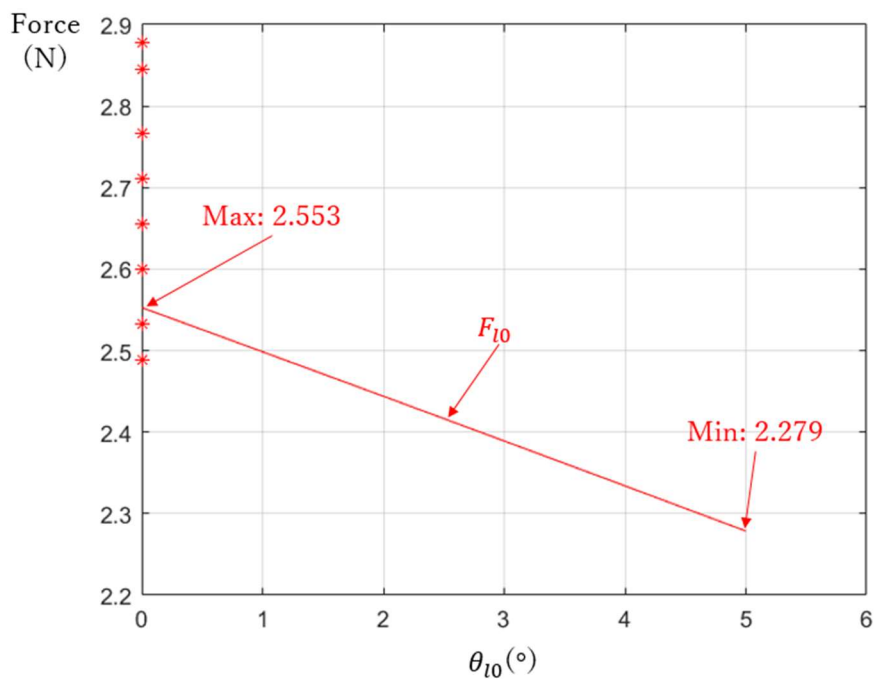


Fig.5.19 小指中手骨 0度における出力の測定

以上によって、出力の理論値が最大になる0度に戻された時点で、実際の出力を10回ずつ測った結果としては、それぞれ環指中手骨の Fig.5.18 と小指中手骨の Fig.5.19 のように示す。実測値を Table.5.3 のようにまとめた。



Table.5.3 環指・小指中手骨の出力の実測値 (単位：N)

	1回	2回	3回	4回	5回	6回	7回	8回	9回	10回	平均
$F_{r0}$	1.33	2.18	2.38	1.63	1.58	1.98	2.08	1.68	1.88	2.18	1.89
$F_{l0}$	2.84	2.53	2.60	2.71	2.87	2.60	2.76	2.48	2.65	2.71	2.67

以上の結果によって、環指・小指の中手骨がそれぞれ伸展初期位置の0度になる出力の理論値、環指中手骨は $F_{r0} = 1.933\text{N}$ 、小指中手骨は $F_{l0} = 2.553\text{N}$ と比較して、得た実測値がそれぞれ環指中手骨は1.89N、小指中手骨は2.67Nであり、数値的に近いいため、正確性を確かめた。

それに、掌に備えたくぼみ機能がどれだけの性能を発揮できるのかについて、義手の全体における一部の機能として、比較実験を実施することによって明確になるため、第6章の6.3節に詳しく説明するが、性能検証のPick & Place実験において、製作した義手に対して、それぞれくぼみ機能を封鎖したケース、およびくぼみ機能を開放したケースにしたうえで、既存の2種類の義手と比較して、ほかの機能はもちろん、くぼみ機能の有無による把持性能の変化を調べた結果、くぼみ機能の存在によって、球状の物体をより掌に包み込めて、接触面積が増加して、より安定的に把持できるようになって、結果的に把持の成功回数が上がった。それに、棒状の物体をさらなる支持力を提供できて、手の中に滑りにくくなって、把持の成功回数がほかの義手より上回って、有用性を確かめた。

### 5.3 まとめ

本章では、掌の開発にあたって、くぼみ機能に適した対称 SEA 駆動メカニズムの構築、運動解析、出力の検証実験を行った。

掌の中に、環指・小指の中手骨がそれぞれ屈曲・伸展の一自由度を持ちながら、把持物体の形状によって、アーチ状と平面状に自動的に切り替えて馴染み把持の形成、あるいは把持補助の成り立つには重要な役割を果たす。しかしながら、従来研究では掌に関する議論がそもそも少なく、既存の2種類のハンドを説明したように、どれにしても運動特徴に従ったものではなく、義手とする機能性、装飾性を再現できず、課題を残っている。

これらの問題を含めて、本章はまず掌の運動特徴からくぼみ機能を絞り出す。そして、軽量化のため、拇指回転機能と融和させて、拇指の回内・回外に連動させられて、アクチュエーターが不要になった。それに、連動方式において、コンプライアンスの性質を持つ SEA 駆動に着目して、対称 SEA 駆動のメカニズムを提案した。メカニズムの構築にあたって、掌のアーチ状と平面状の自動切替による馴染み把持をこなすことができた：中手骨の屈曲側と伸展側にそれぞれ2個同様なバネを付けて、拇指の回内によって、バネの長さが変わり、両側の力が釣り合いながら、アーチ状が徐々に形成する。拇指が約回内 60 度の境にグラスピングの領域に入ると、把持物体の形状によって、アーチ状を保つままに掌の中に包み込んだり、環指と小指の指先の位置を変えて、物体に接近する補助もしたり、あるいは平面状に形成されて握り込んだりすることを実現した。これらの運動に関する変化は7つのステップで解析したほか、力学モデルで環指と小指の中手骨の出力を調べて、実験で正確性を確認した。

ただし、機能の検証において、義手に組み込んだら検証は可能になるため、第6章にて Pick & Place 実験を実施するときに、同一の義手でくぼみ機能を封鎖したケースと開放したケースを比較して、機能の有用性を確認する。

## 第6章 義手の動作・機能の検証実験

---

6.1 開発した義手の全体像 .....	152
6.2 動作検証実験 .....	156
6.3 機能による把持性能の検証実験 .....	173
6.3.1 比較対象とする4種類の義手 .....	173
6.3.2 実験の条件 .....	175
6.3.3 Pick & Place 実験 .....	177
6.4 まとめ .....	181

---

## 6.1 開発した義手の全体像

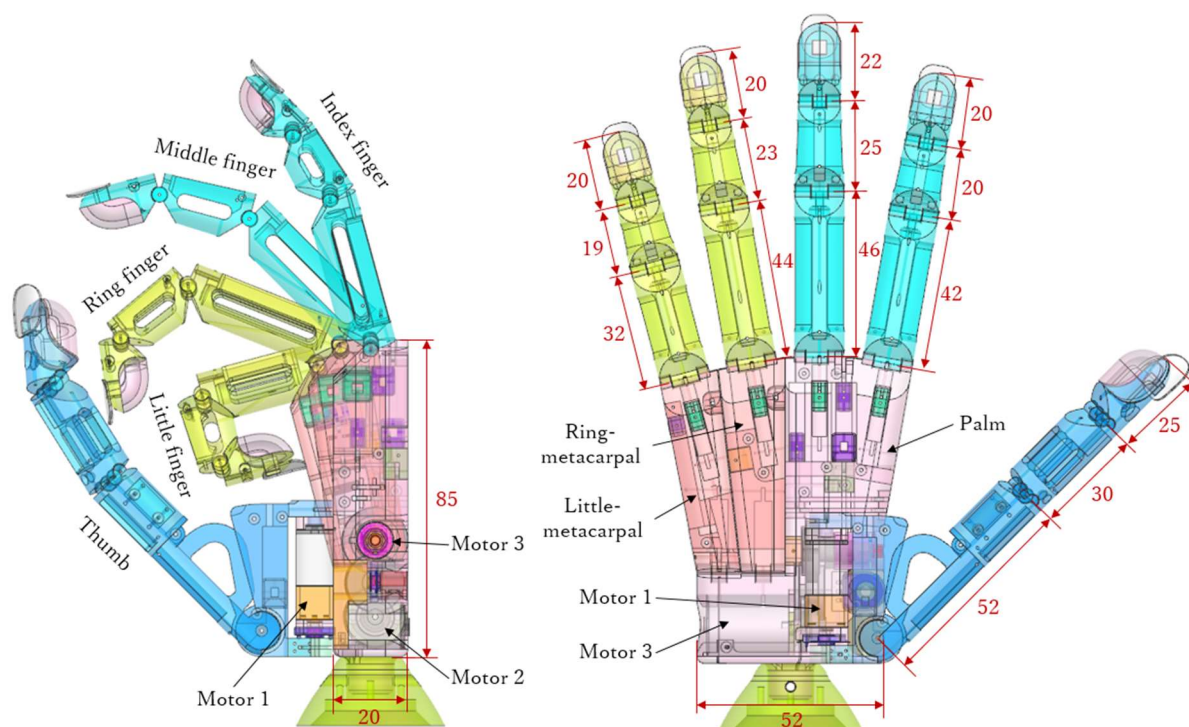


Fig.6.1 義手の設計図

前述した解析や計算などの内容に基づいて、設計した義手の CAD 図を Fig.6.1 のように表す. 寸法は第2章の Table.2.1 に従ったものになる. それに、第2章 2.2.2 節の分析内容に基づいて、アクチュエーターが必要最少の3個を使用した. すなわち、DOAはわずか3個で指関節の自由度 DOF が18個(人間の手における関節自由度は22個)を駆使できるようになった. そして、最大の握る出力は約49.5N未滿になる. また、CAD 図によって、実際に開発した義手は Fig.6.2 のように示す. 義手全身における製作の材料はアクリルにし、第三層のクラッチ機構だけを第4章の解析によって ABS にした. アクリルの密度は  $1.18\text{g/cm}^3$  であり、ABS の  $1.05\text{g/cm}^3$  より比重が大きくなったが、ほかの物理特性は上回っているため、Table.6.1 のように、義手の材料として強度などを期待できる[雍 2015]. それに、Fig.6.3 に示したように、義手全体の重量は190.81gであり、370g以下の目標を達成した.

Table.6.1 義手の製作における材料の物理特性の比較

	アクリル	ABS
密度 $\text{g/cm}^3$	1.18	1.05
引張強さ Mpa	73	39
曲げ強さ Mpa	118	64

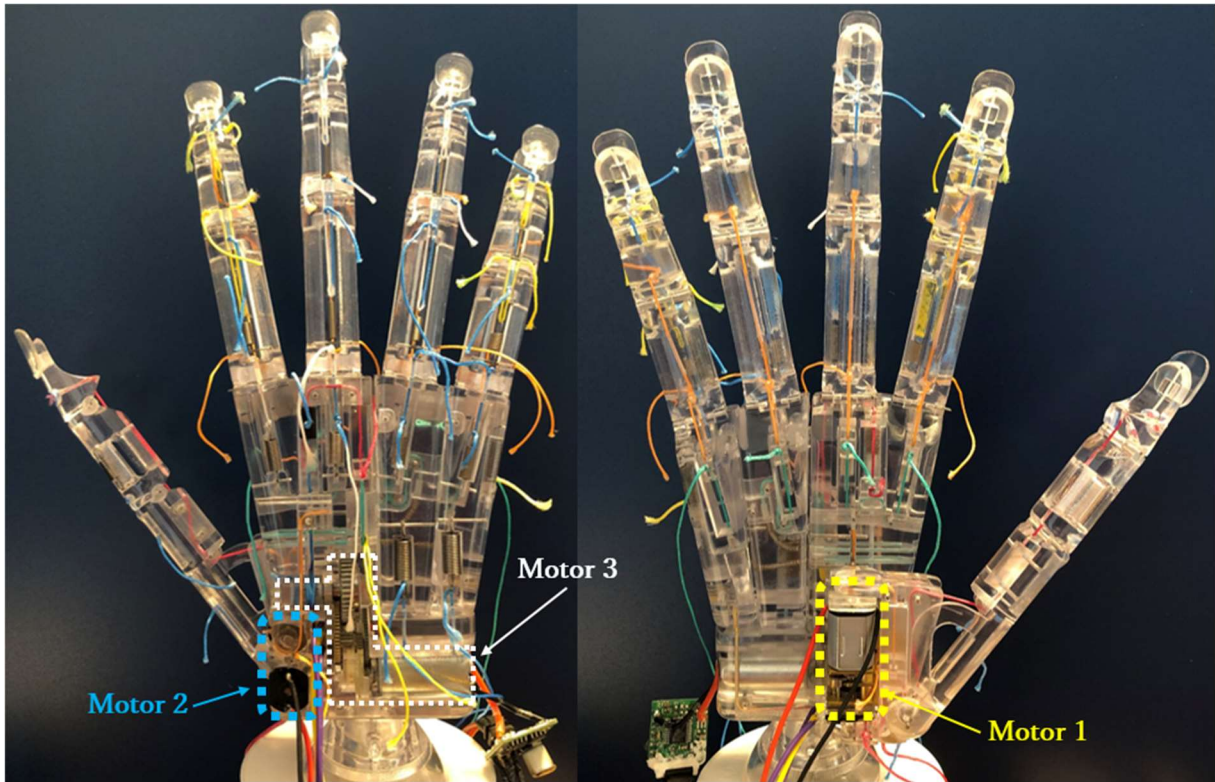


Fig.6.2 開発した義手

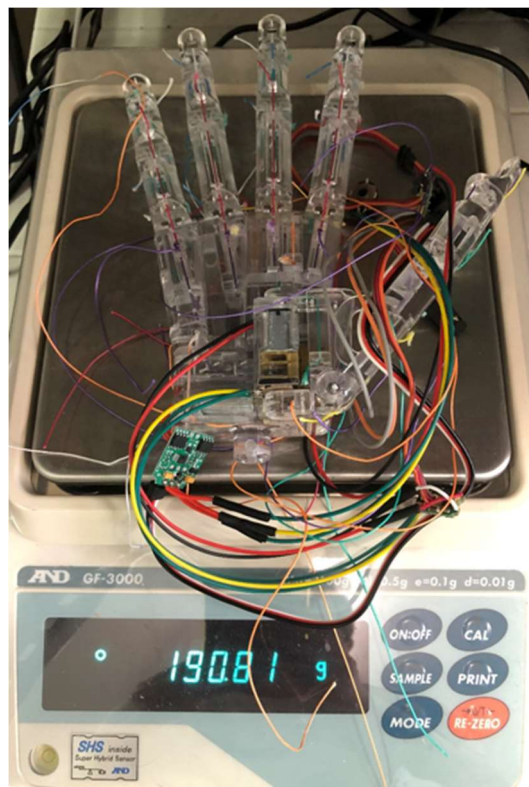


Fig.6.3 開発した義手の重量



製作した義手に使用している3個のアクチュエーターは Fig.6.2 のように、それぞれ色分けで表示する。黄色のモーター1 は直接駆動で拇指を回内・回外させながら、小指・環指の中手骨をワイヤ経由で対称 SEA 駆動のメカニズムによって連動して、拇指回転機能とくぼみ機能を同時に果たす。青色のモーター2 の回転によって、ワイヤを巻き取って拇指を屈曲させる一方、逆回転のときにワイヤを緩くする同時に、関節に付けたバネは自動的に伸展させて、順序連動機能と自動伸展機能を両立する。白色のモーター3 は掌に存在するピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムを通して、四指と繋がって、モーターの回転で屈曲させるたびに、手指の差動屈曲機能の実現のみならず、指関節の適応連動機能も実現する。それに、モーターの逆回転によってワイヤを緩くする同時に、四指の各関節に付けたバネは自動伸展機能を果たしながら、各層のクラッチ機構も初期位置に戻す。

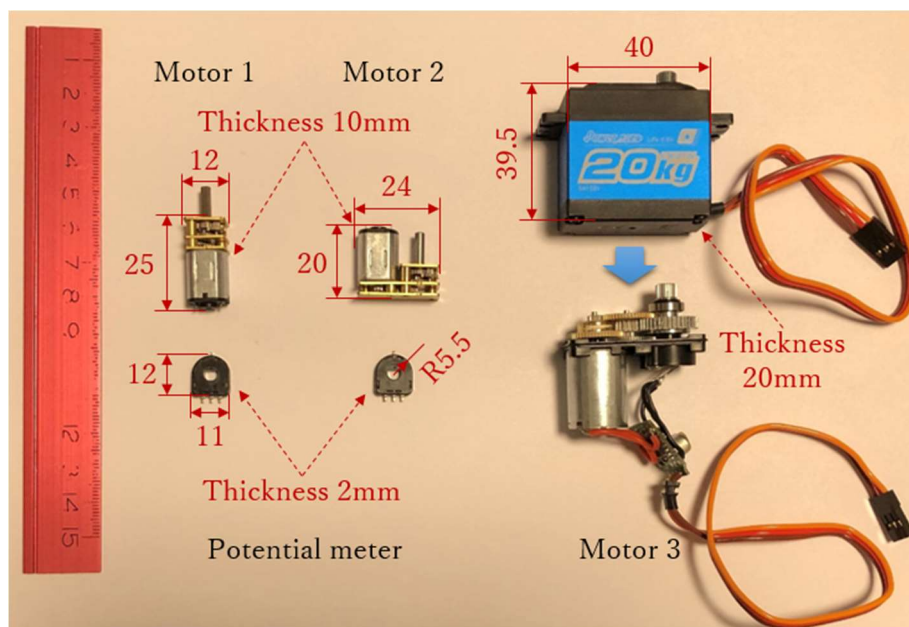


Fig.6.4 義手に使用するモーター

掌に埋め込もうとするモーターには、選択するとき、掌のスペースを配慮しながら、指関節に必要な最小限の出力を満たす要件となる。それぞれ説明する：

1. モーター1：

第5章で解析したが、拇指の回転機能とくぼみ機能を共に実現するために、必要最小のワイヤ張力  $12.1113\text{N}$  となり、設計のパラメータでは、それぞれワイヤ走行距離は  $8.354\text{mm}$ 、ポテンシャルメータの有効回転範囲は  $\pm 100$  度、ワイヤ巻取り機構半径は  $4\text{mm}$  であるため、トルクは少なくとも  $48.4452\text{Nmm}$  が必要になる。そのため、Fig.6.4 のモーター1（中国，TT Motor 電子，GM12-N20VA-09220）を選択し、電圧は  $5\text{V}$ 、減速比は  $1:380$ 、定格回転速度は  $31\text{rpm}$  となり、最大トルクは  $98\text{Nmm}$  であるため、要件に満足する。ただし、このアクチュエーターはオープンループの DC モーターであり、

コントロールのために、フィードバックには角度センサー（日本、アルプスアルパイン株式会社、ロータリタイプ RDC506018A）を付ける。

### 2. モーター2：

第3章で説明したが、拇指の順序連動機能を果たすために、必要最小のワイヤ張力は 8.392N であるが、そして、設計のパラメータがそれぞれ走行距離は 28mm、ポテンシャルメータの有効回転範囲は  $\pm 100$  度となるため、ワイヤ巻取り機構半径は 8.8mm に必要となって、掌のスペースには対応できない問題が生じる。そこで、拇指の虎口にワイヤ二分化ユニットを使用することによって、走行距離を半分の 14mm にし、ワイヤ巻取り機構半径は 4.65mm に減少できる。掌に埋め込めるようになった一方、ワイヤ張力が 16.784N に増加してしまい、トルクは少なくとも 78.0456Nmm が必要になる。そのため、Fig.6.4 のモーター2（中国、TT Motor 電子、GM24-N20VA-09220）を選択し、電圧は 5v、減速比は 1:500、定格回転速度は 25rpm となり、最大トルクは 98Nmm であるため、要件に満足する。それに、モーター1 と同様な理由で同じ角度センサーを使用する。

### 3. モーター3：

第4章で説明したが、四指の適応連動機能と差動屈曲機能を満足するために、必要最小のワイヤ張力は 32.3779N であり、設計のパラメータによって、ワイヤ走行距離は 14mm、ポテンシャルメータの有効回転範囲は  $\pm 100$  度、ワイヤ巻取り機構半径は 4.5mm であるため、トルクは少なくとも 145.70055Nmm が必要になる。そのため、Fig.6.4 のサーボモーター3（中国、HuiDa RC International Limited, Power HD LW-20mg）を選択し、電圧は 6.6v で、最大トルクは 1960Nmm であるため、要件に満足する。ただし、このサーボモーターはサイズの的に掌に埋められないため、外装を取り外して、付いてるポテンシャルメータを角度センサー（日本、アルプスアルパイン株式会社、ロータリタイプ RDC506018A）に変更し、主軸に取り付ける。



## 6.2 動作検証実験

開発した義手は 16 パターンの動作がコントローラーを介して、異なる物体を把持させて、動作パターンの再現性を検証する。第2章で Fig.2.2 に従って、表現した動作パターンを参照にして、まずは把持物体の形状をそれらに従って、棒状、球状と盤状のものに限定する。それに、把持物体のサイズを確定するため、下記の Fig.6.5 のように、把持可能な範囲を測って、握力把握（左の図および中間の図）には約最小直径の 8mm から最大直径の 80mm までのサイズ範囲内に把持対象物を選び、精密把握（右の図）にも最大直径約 100mm の円盤を使う。ただし、精密把握は指先の多点把持になるため、最小の把持範囲はゼロより大きければ特に制限をかからない。

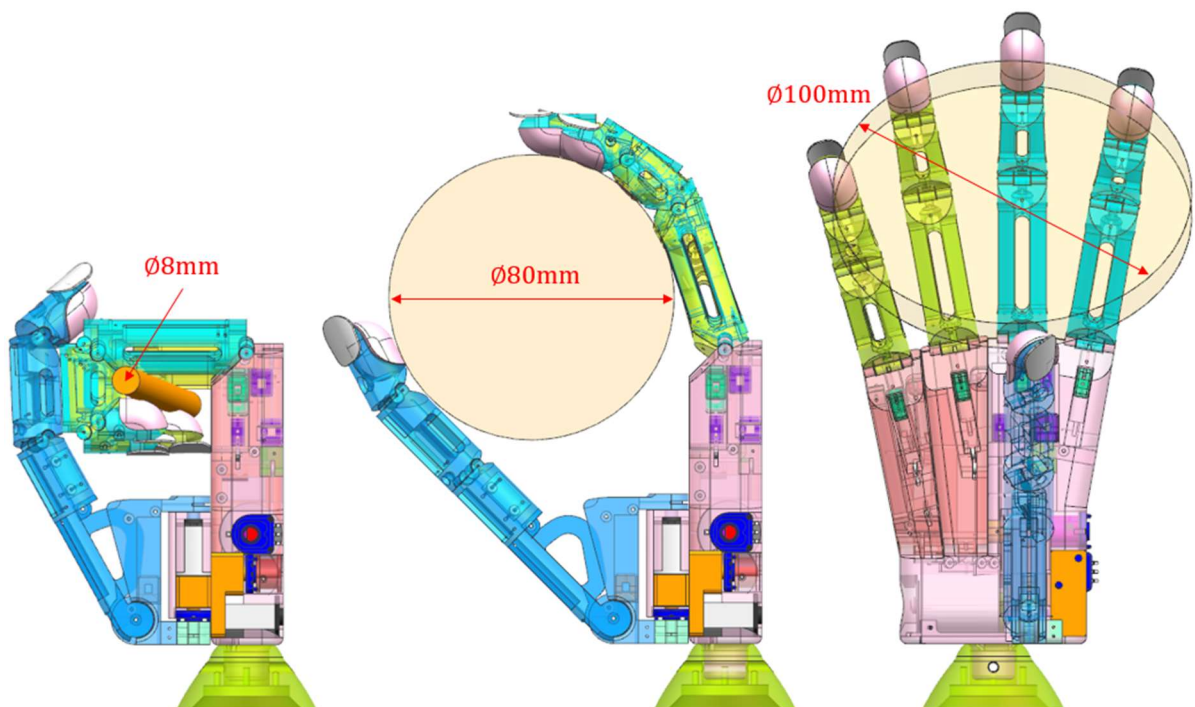


Fig.6.5 把持可能な範囲（左&中：握力把握，右：精密把握）

実験をするときに、製作した義手を地面と垂直した方向に固定して、各種類の把持の対象物を義手に渡して、コントローラーを操作し、ものを把持させる。安定した時点で写真を撮る。結果として、Fig.6.6.a から Fig.6.6.p までに示したように、目標とする 16 パターンの動作はすべて実現することを確かめた。



Fig.6.6.a 動作 1 : Large Diameter

Large Diameter : Fig.6.6.a に示したように、拇指を回内して、四指と対立の状態にさせる。そして、直径約 60mm の缶を渡して、五指を屈曲させる。拇指はまず順序連動機能によるリーチングのプロセスが開始して、CM 関節が先に屈曲し始まり、MP 関節が最初に缶と接触したため、CM 関節と共に停止になったが、順序連動機能によるグラスピングの段階に入ったため、IP 関節が引き続き屈曲し始まり、物体と接触して停止になって、拇指のマッチングが完了した。この間に、四指も屈曲し始めて、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、各関節、各指はリーチングのときに一緒に屈曲し、任意の指関節が物体と接触し始めた時点でグラスピングのプロセスに入り、次々と完全に停止になったことから、缶の形とマッチングできたことに表す。それ以外に、掌のくぼみ機能によって、環指と小指中手骨が缶に支持力も与えていた。掌と拇指と四指が缶に対する馴染み把持をこなして、把持は成功になった。



Fig.6.6.b 動作 2 : Small Diameter

Small Diameter : Fig.6.6.b に示したように、拇指を回内して、四指と対立の状態にさせる。そして、Large Diameter 動作に使用した大きい直径のものより、直径が小さめにした約 42mm の缶を渡して、五指を屈曲させる。拇指は順序連動機能によるリーチングの状態に入り、CM 関節だけが屈曲して、MP 関節が先に缶と接触したため、CM 関節と共に停止になったが、グラスピングの段階に入ったため、IP 関節が引き続き屈曲し始まり、物体と接触して停止になって、この一連の動作は拇指が缶の形に沿うマッチングが完了した。拇指が動作している間に、四指も屈曲して、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節のみならず、四指の全体にもリーチングの段階に入って、一緒に屈曲していくが、指関節が物体と接触して停止になる時点でグラスピングに入り、指関節が缶の形によって次々と停止していく。そして、全部の指関節が停止になると缶に対するマッチングは果たした。それ以外に、掌のくぼみ機能によって、環指と小指中手骨が缶に支持力も与えた。掌と拇指と四指が共に缶に対する馴染み把持の性能が発揮して、把持は成功になった。



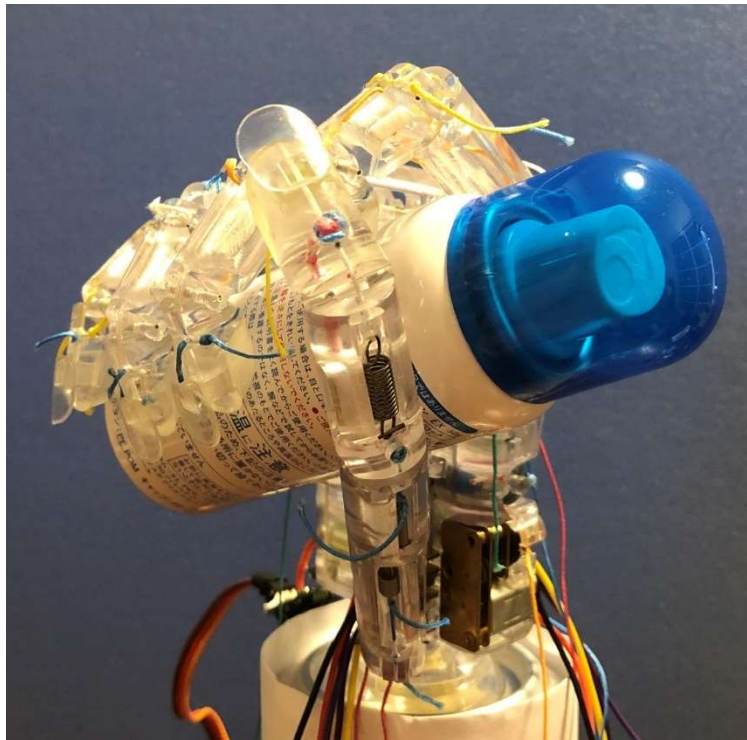


Fig.6.6.c 動作3：Medium Wrap

Medium Wrap：Fig.6.6.cに示したように、拇指を約60度ぐらいに回内して、四指の側面に位置させる。そして、直径が約38mmの缶を渡して、五指を屈曲させる。拇指は順序連動機能によって、先にリーチングの段階に入り、CM関節のみに屈曲していく。MP関節が先に缶と接触したため、CM関節と一緒に停止になる。それから、グラスピングの段階に入って、IP関節が動き出し、屈曲して物体と接触してから停止になる。これで、拇指が缶の形に沿うマッチングが完了した。拇指が動作している間に、四指が屈曲して、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節および四指の全体がリーチングの段階に進入し、同時に屈曲していくが、指関節が物体と接触して停止になったところ、グラスピングの状態に切り替わって、指関節が缶の形によって次々と停止していく。そして、全部の指関節が停止になると缶の形に沿うマッチングは完了した。それ以外に、掌のくぼみ機能によって、環指と小指中手骨が缶に支持力も与えていた。掌と五指の馴染み把持によって、最終的に缶が手の中に安定になり、把持は成功した。

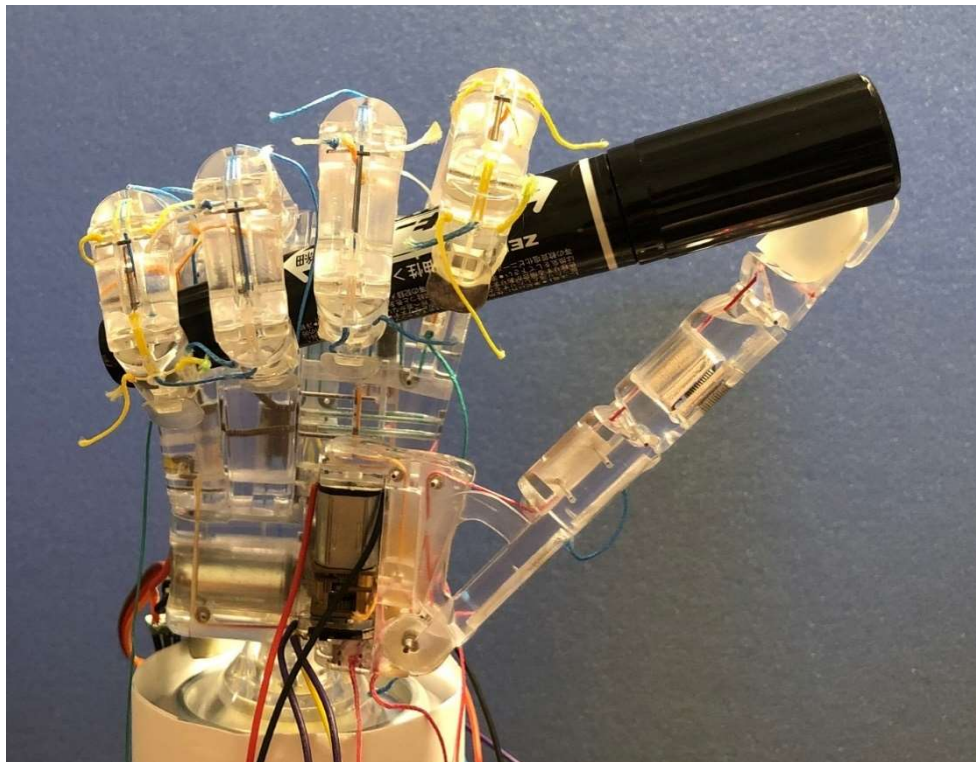


Fig.6.6.d 動作4：Adducted Thumb

**Adducted Thumb** : Fig.6.6.d に示したように、拇指は四指と並列した状態で、直径が約 20mm のペンを渡して、五指を屈曲させる。拇指は順序連動機能が作用して、先にリーチングの段階に入り、CM 関節のみに屈曲していく。IP 関節が先にペンと接触したため、MP、CM 関節と共に停止になる。それから、グラスピングの段階に入って、モーターの出力によって、IP 関節がペンの片端を支持力を与えて、支えていた。一方、拇指が動作する同時に、四指が屈曲して、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節および四指の全体がリーチングの段階に入り、同時に屈曲する。任意の指関節が物体と接触して停止になった時点で、グラスピングのプロセスが開始となり、指関節がペンの形に沿って次々と停止し、全部の指関節が停止になるまでマッチングは完了になった。四指の馴染み把持および拇指の支えによって、ペンの把持は成功した。

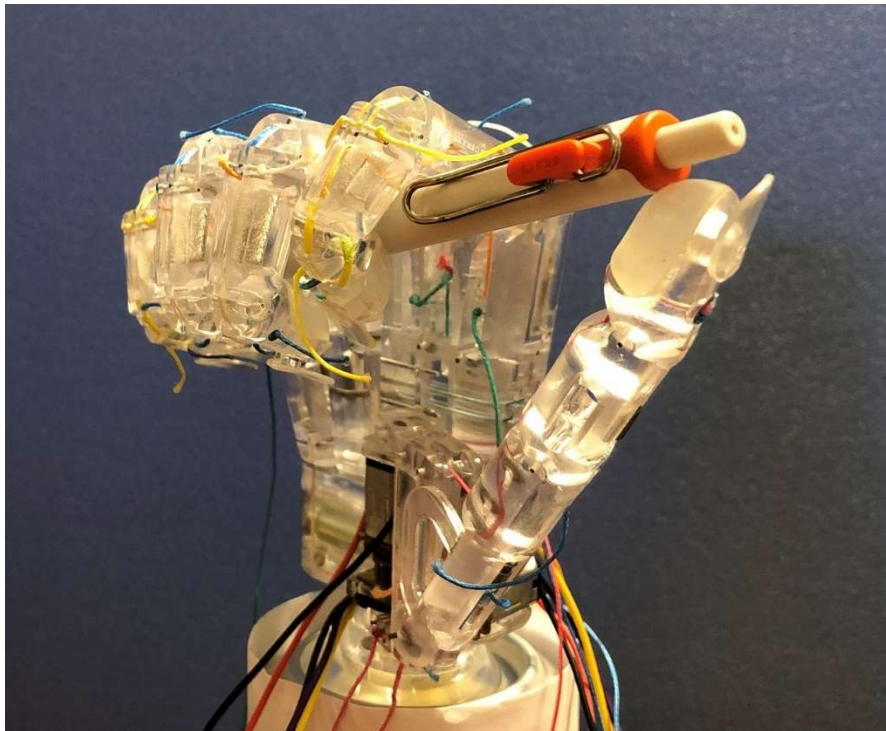


Fig.6.6.e 動作 5 : Light Tool

Light Tool : Fig.6.6.e に示したように、拇指は四指と並列した状態で、直径が約 10mm のペンを渡して、五指を屈曲させる。拇指は順序連動機能の作用によって、先にリーチングの段階に入って、CM 関節だけが屈曲していくたびに、IP 関節が先にペンと接触したため、MP、CM 関節と一緒に停止になった。それから、グラスピングの段階では、モーターの出力によって、IP 関節がペンの片端を支持力で支えていた。一方、拇指が動作している同時に、四指が屈曲して、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、先にリーチングの段階に入ったところ、四指の各指関節および四本指の全体が同時に屈曲するようになった。任意の指関節が物体と接触して停止になった時点で、グラスピングのプロセスが開始となり、ペンを握り込みながら、完全屈曲状態に近くなるたびに、指関節がペンの形に沿って次々と停止し、マッチングが完了になった。四指の馴染み把持および拇指の支えによって、ペンの把持は成功した。



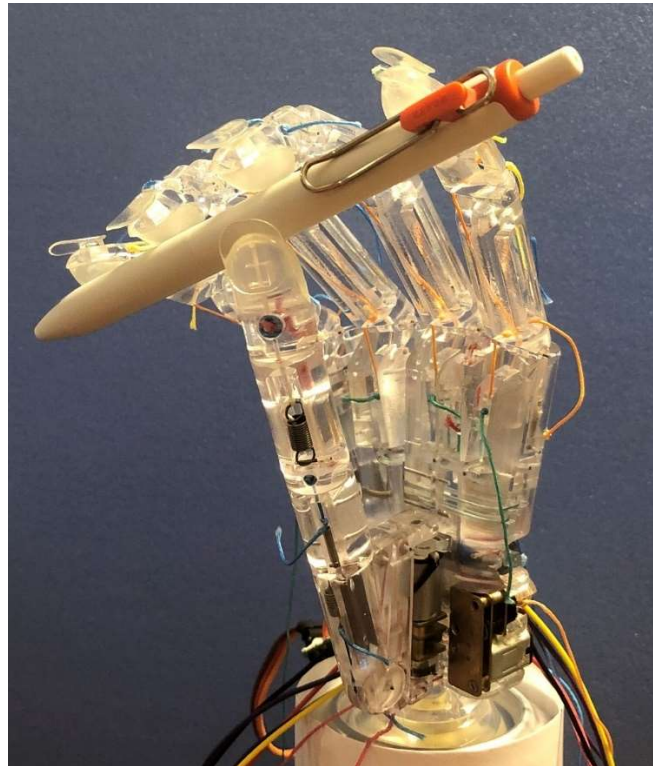


Fig.6.6.f 動作6：Thumb 4 Finger

Thumb 4 Finger：Fig.6.6.fに示したように、拇指を回内して、四指と対立の状態にさせる。そして、直径が約10mmのペンを渡して、五指を屈曲させる。拇指は順序連動機能によって、リーチングをし始めて、CM関節のみの屈曲がしつつ、IP関節が先にペンと接触したため、MP、CM関節と同時に停止になったが、グラスピングの段階に入って、モーターの出力によって、IP関節がペンの中間部位を支持力で支えていた。拇指の動作と合わせて、四指も屈曲して、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節および四指の全体にはリーチングの特徴に従って、一緒に屈曲していく。任意の一本指において、DIP関節がペンと接触して停止になった時点でグラスピングの段階に入り、ほかの指のDIP関節がペンと次々に接触して停止になった。ただし、掌のくぼみ機能の発揮によって、環指と小指のDIP関節を補助して、ペンに接近することができて、接触できるように至った。掌、拇指と四指が共に作用して、指先の五点把持でペンを精密把握にこなして、把持は成功になった。



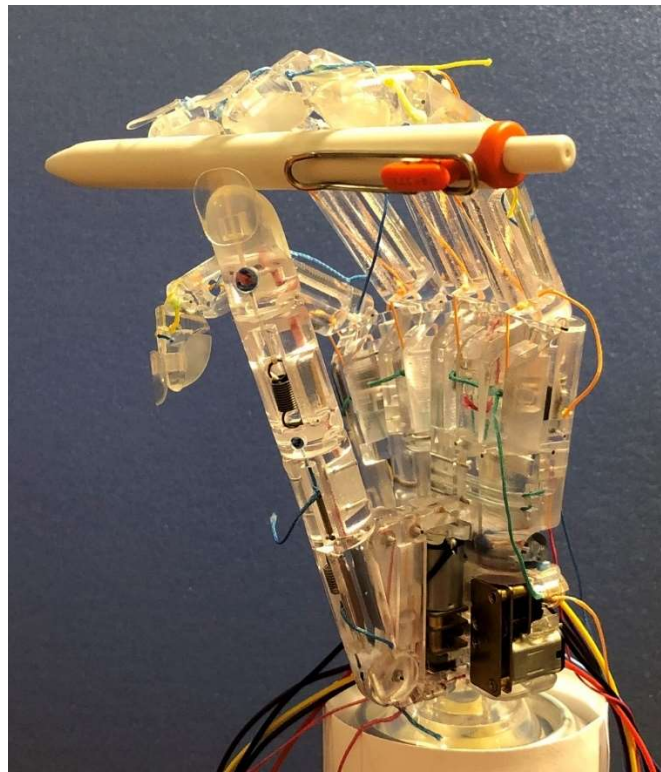


Fig.6.6.g 動作7：Thumb 3 Finger

Thumb 3 Finger：Fig.6.6.g に示したように、拇指を回内して、四指と対立の状態にする。そして、直径が約 10mm のペンを渡して、五指を屈曲させる。拇指の場合では、先に順序連動機能のリーチングをし始めて、CM 関節のみに屈曲していて、最初にペンと接触したのは IP 関節であるため、MP、CM 関節がついでに停止になった。そして、グラスピングの段階に入って、モーターの出力によって、IP 関節が概ねペンの中心部に支持力を与えて支えていた。四指が拇指と共に運動して、屈曲するたびに、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節および四指の全体にはリーチングの特徴に従って、一緒に屈曲していく。示指か、中指かあるいは環指における DIP 関節が先にペンと接触したら、停止になった時点でグラスピングの段階に入ることになり、残った指の DIP 関節も次々にペンと接触して停止になったが、ペンの空間位置によって、小指が屈曲するプロセスでは接触にならず、ほかの指よりさらに屈曲していくことになった。ただし、掌のくぼみ機能によって、環指の DIP 関節を補助し、ペンに接近することができて、接触できるように至った。掌、示指、中指、環指が拇指と共に作用しながら、指先の四点把持でペンを精密把握にこなし、把持は成功になった。

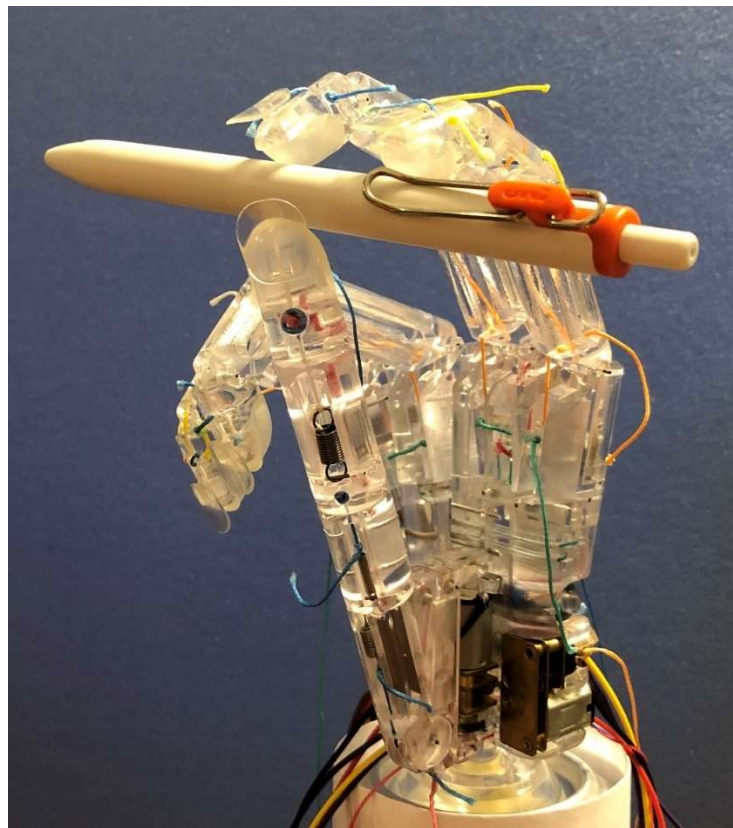


Fig.6.6.h 動作 8 : Thumb 2 Finger

Thumb 2 Finger : Fig.6.6.h に示したように、拇指を回内して、四指と対立の状態にする。そして、直径が約 10mm のペンを渡して、五指を屈曲させる。拇指の場合では、先に順序連動機能のリーチングを始まって、CM 関節のみに屈曲していて、最初にペンと接触したのは IP 関節であるため、MP、CM 関節がついでに停止になった。そして、グラスピングの段階に入って、モーターの出力によって、IP 関節が概ねペンの中心部に支持力を与えて支えていた。四指が拇指と一緒に運動して、屈曲するときに、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節、四指の全体にはリーチングによって、一緒に屈曲していく。示指か中指における DIP 関節が先にペンと接触して停止になった時点で、グラスピングの段階に入り、もう一本指の DIP 関節もペンと接触して停止になった。ペンの空間位置によって、環指と小指が屈曲するたびにペンと接触せず、ほかの指よりさらに屈曲していくことになった。示指、中指が拇指と同時に作用しながら、指先の三点把持でペンを精密把握にこなして、把持は成功になった。

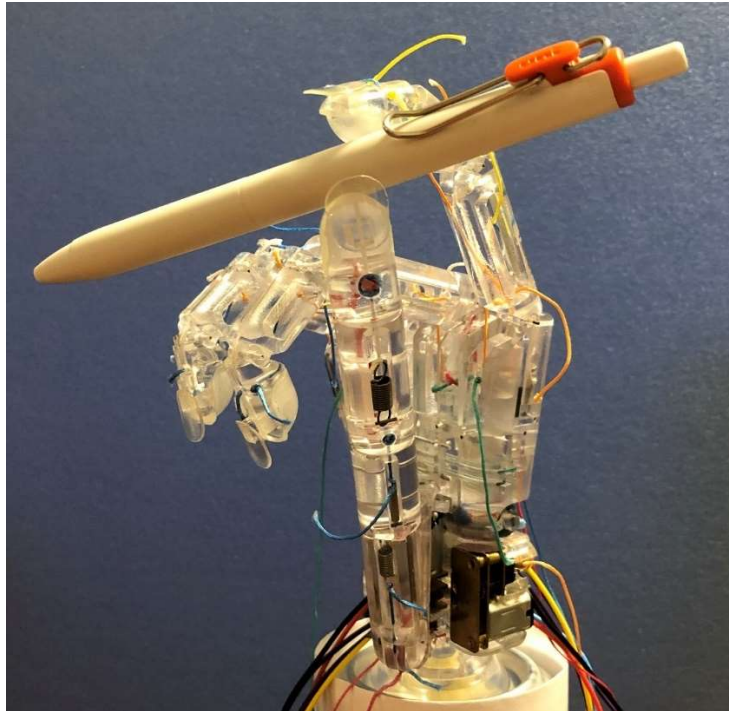


Fig.6.6.i 動作 9 : Thumb Index Finger

Thumb Index Finger : Fig.6.6.i に示したように、拇指を回内して、四指と対立の状態にする。そして、直径が約 10mm のペンを渡して、五指を屈曲させる。拇指の場合に、先に順序連動機能のリーチングを始めて、CM 関節のみに屈曲していて、最初にペンと接触したのは IP 関節であるため、MP、CM 関節がついでに停止になった。そして、グラスピングの段階に入って、モーターの出力によって、IP 関節が概ねペンの中心部に支持力を与えて支えた。一方、四指の場合、拇指と一緒に運動して、屈曲するときに、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節、四指の全体にはリーチングによって、一緒に屈曲していく。示指の DIP 関節が先にペンと接触して停止になった時点で、グラスピングの段階に入る。ペンの空間位置によって、中指、環指と小指が屈曲する過程の中にペンと接触せず、示指より引き続き屈曲していくことになった。示指が拇指と同時に作用しながら、指先の二点把持でペンを精密把握にこなして、把持は成功した。

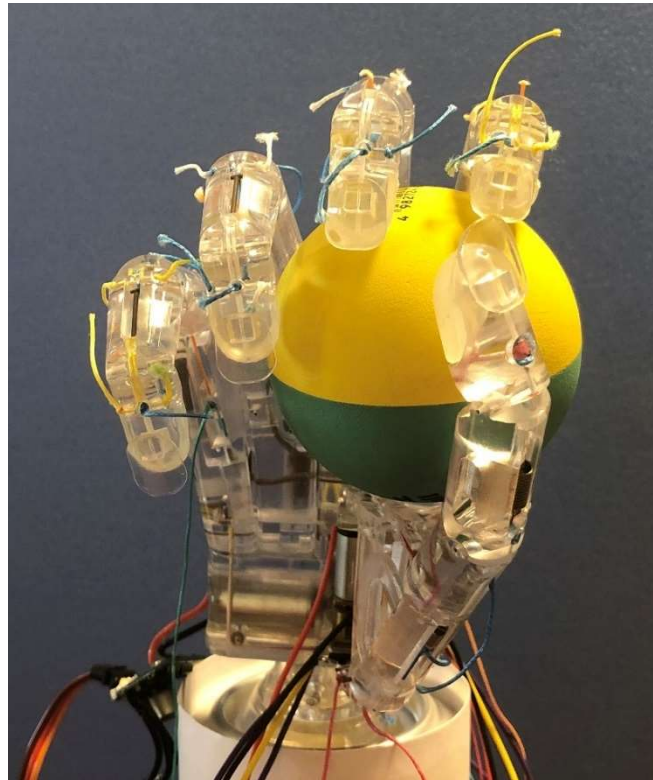


Fig.6.6.j 動作 10 : Power Disk

Power Disk : Fig.6.6.j に示したように、拇指を回内し、四指と対立の状態にさせる。そして、直径が約 55mm のボールを渡して、五指を屈曲させる。拇指は順序連動機能によるリーチングの段階に入り、CM 関節だけが屈曲して、MP 関節が先にボールと接触したため、CM 関節と共に停止になった後に、グラスピングの段階に進入して、IP 関節が引き続き屈曲し始まり、物体と接触して停止になったうえに、拇指がボールの形に沿うマッチングもついでに完了した。四指は拇指が動作している間に屈曲して、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節のみならず、四指の全体にもリーチングの段階に入って、一緒に屈曲していく。示指と中指の指関節が先にボールと接触して停止になったタイミングでグラスピングの状態に入り、次に環指がボールの外側と接触して、停止になったが、小指はボールと接触できず、ほかの指よりさらに屈曲した。それ以外に、掌のくぼみ機能は、環指と小指中手骨はボールに包囲する効果が表して、側面に支持力も与えていた。これで、ボールとのマッチングは完了し、掌、拇指と四指が共にボールに対する馴染み把持の性能が発揮して、把持は成功になった。



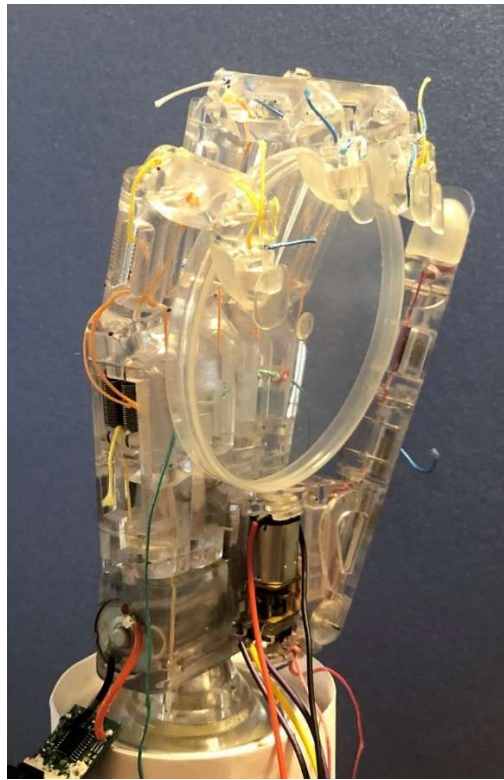


Fig.6.6.k 動作 11 : Power Sphere

**Power Sphere:** Fig.6.6.k に示したように、拇指を四指と並立の状態にさせる。そして、直径が約 100mm の円盤を渡して、五指を屈曲させる。拇指の場合では、順序連動機能によって、先にリーチングの段階に入り、CM 関節だけが屈曲して、MP 関節が先に円盤の側面と接触して、ついでに CM 関節と共に停止になった後に、グラスピングの段階で、IP 関節が引き続き屈曲し、物体と接触して停止になったことから、拇指が円盤の側面に従って、マッチングが完了した。四指の場合、拇指と同時に動き出して、屈曲するたびに、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節、四指の全体にもリーチングの特徴に従って、一緒に屈曲していく間もなく、四指の MP 関節が同時に円盤に阻止され、接触して停止になった。そして、グラスピングの状態に入り、PIP 関節と DIP 関節が引き続き屈曲して、厚さが 10mm の円盤を関節に食い込んだ後に停止になり、マッチングが完了した。これによって、拇指と四指が共に円盤に対する馴染み把持の性能が発揮して、把持は成功になった。



Fig.6.6.1 動作 12 : Precision Disk

Precision Disk : Fig.6.6.1 に示したように、拇指を回内して、四指と対立の状態にさせる。そして、直径が約 100mm の円盤を渡して、五指を屈曲させる。拇指の場合では、順序連動機能によって、先にリーチングの段階に入り、CM 関節だけが屈曲して、間もなく IP 関節が先に円盤の側面と接触して、ついでに MP、CM 関節と共に停止になった。そして、グラスピングの段階に進入して、モーターの出力を維持しながら、IP 関節の支持力で円盤を支えていた。一方、四指の場合、拇指と同時に動いて、屈曲するたびに、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節、四指の全体にもリーチングの特徴に従って同時に屈曲するが、間もなく中指の DIP 関節が先に円盤の外側と接触して停止になった。そして、グラスピングの状態に入り、示指と環指もほぼ同時に DIP 関節が円盤の外側に阻止されて、小指がさらに屈曲してから停止された。この間に、掌のくぼみ機能の補助によって、環指と小指の DIP 関節をより円盤の縁側に接近させた原因で、指先が円盤の形に沿って精密把握の多点把持にこなせた。これで、掌、拇指と四指が共に円盤に対する馴染み把持をして、把持は成功になった。

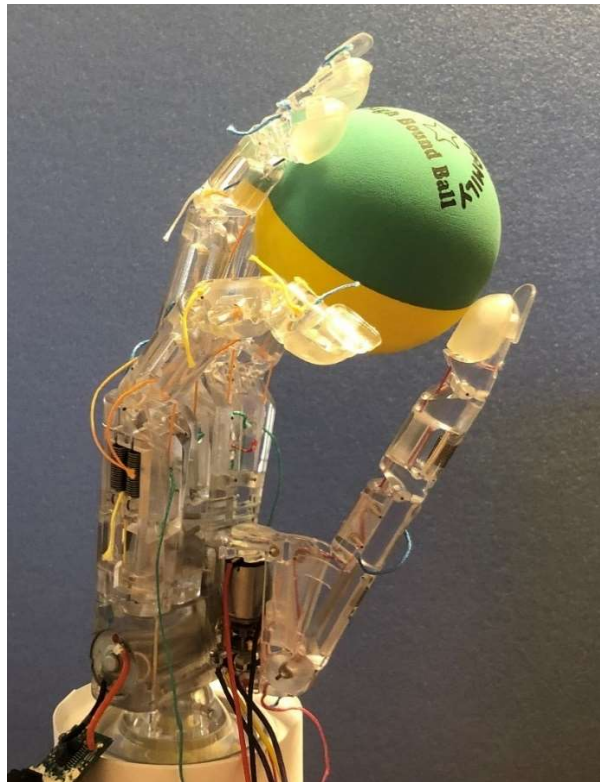


Fig.6.6.m 動作 13 : Precision Sphere

Precision Sphere : Fig.6.6.m に示したように、拇指を回内して、四指と対立の状態にさせる。そして、直径が約 55mm のボールを渡して、五指を屈曲させる。拇指は順序連動機能によって、先にリーチングで CM 関節だけが屈曲し始まって、IP 関節が先にボールと接触して、ついでに MP、CM 関節と共に停止になった。そして、グラスピングでは、モーターの出力によって、IP 関節の支持力でボールを支えていた。一方、四指では、拇指と同時に運動して、屈曲するたびに、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節および四指の全体にリーチングの特徴に従って同時に屈曲して、中指の DIP、PIP 関節が先にボールと接触して停止になった。その瞬間、グラスピングの状態に入り、間もなく示指と環指もほぼ同時に DIP、PIP 関節がボールに阻止されて、小指がボールと接触にならず、ほかの指よりさらに屈曲していた。この間に、掌のくぼみ機能の補助によって、小指を除き、環指の DIP、PIP 関節をより素早くボールに接近させ、指先がボールの形に沿って精密把握の多点把持にこなせた。これで、掌、拇指と四指が共にボールに対する馴染み把持をして、把持は成功になった。



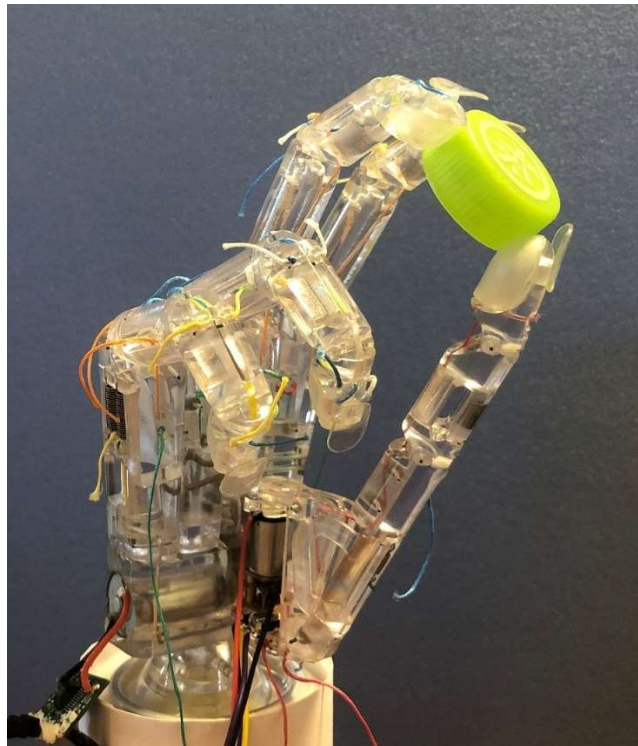


Fig.6.6.n 動作 14 : Tripod

**Tripod :** Fig.6.6.n に示したように、拇指を回内して、四指と対立の状態にさせる。そして、直径が約 30mm のキャップを渡して、五指を屈曲させる。拇指では、順序連動機能によって、先にリーチングで CM 関節だけが屈曲し始まって、先に IP 関節がキャップと接触して、ついでに MP、CM 関節と共に停止になった。そして、グラスピングでは、モーターの出力によって、IP 関節の支持力でキャップを支えていた。同時に、四指では、拇指と共に運動して、屈曲するたびに、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節および四指の全体にリーチングの特徴に従って同時に屈曲して、示指と中指の DIP 関節が先にキャップと接触して停止になった。その代わりに、グラスピングの状態に変更して、モーターの出力によって、示指と中指の DIP 関節がキャップに支持力で維持していた。また、環指と小指がキャップと接触にならず、ほかの指よりさらに屈曲していた。これによって、拇指と四指が共にキャップに対する馴染み把持をして、把持は成功になった。

**Platform Push :** Fig.6.6.o に示したように、拇指を回外して、四指と並立の状態にさせる。それに、拇指と四指が特に屈曲する必要はなく、手の開きという状態をさせて、平面状にしたままで物体を手の上に乗せる。

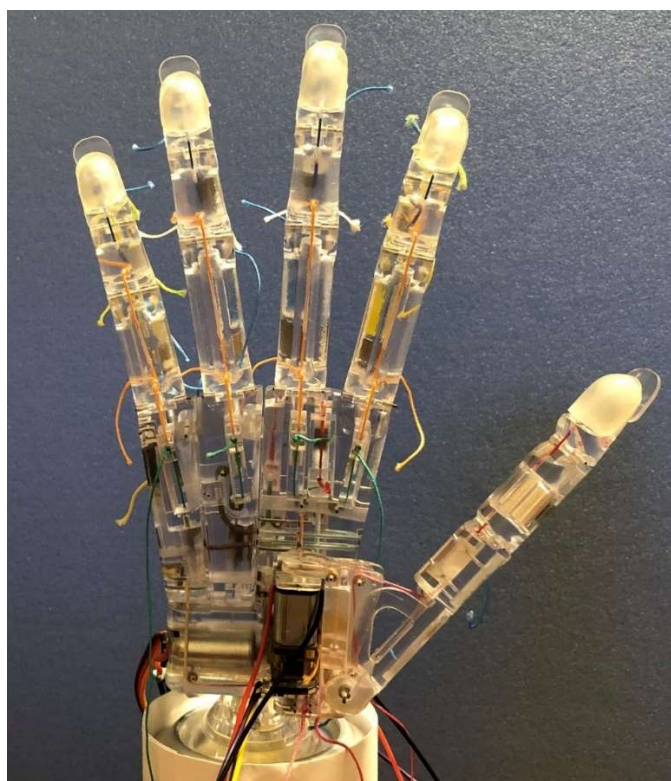


Fig.6.6.o 動作 15 : Platform Push

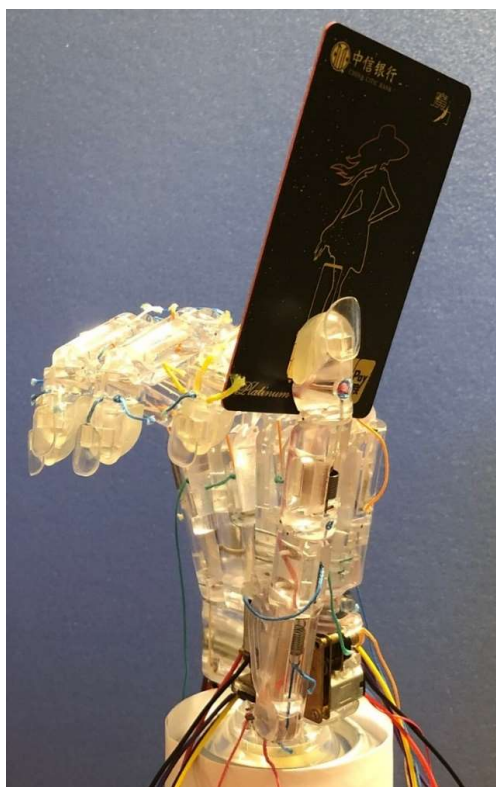


Fig.6.6.p 動作 16 : Lateral Pinch

Lateral Pinch : Fig.6.6.p に示したように、拇指を少し回内して、四指の側面に位置させる。そして、カードを渡して、先に四指を屈曲させる。四指が屈曲するたびに、適応連動機能および差動屈曲機能の共同作用によって、四指の各指関節、四指の全体にもリーチングの特徴に従って、一緒に屈曲していくが、把持するものはないため、グラスピングの状態に進入せず、おおよそ 45 度の屈曲になったら停止をさせて、拇指を動き出す。拇指では、順序連動機能によって、先にリーチングの段階に入り、CM 関節のみに屈曲して、IP 関節が先にカードの表面と接触して、ついでに MP、CM 関節と共に停止になった後に、グラスピングの段階で、モーターの出力によって、IP 関節が押す力で示指の PIP 関節の側面にカードを維持させた。これで、拇指の馴染み把持によって、四指の屈曲と共にカードに対する側面把握は成功になった。

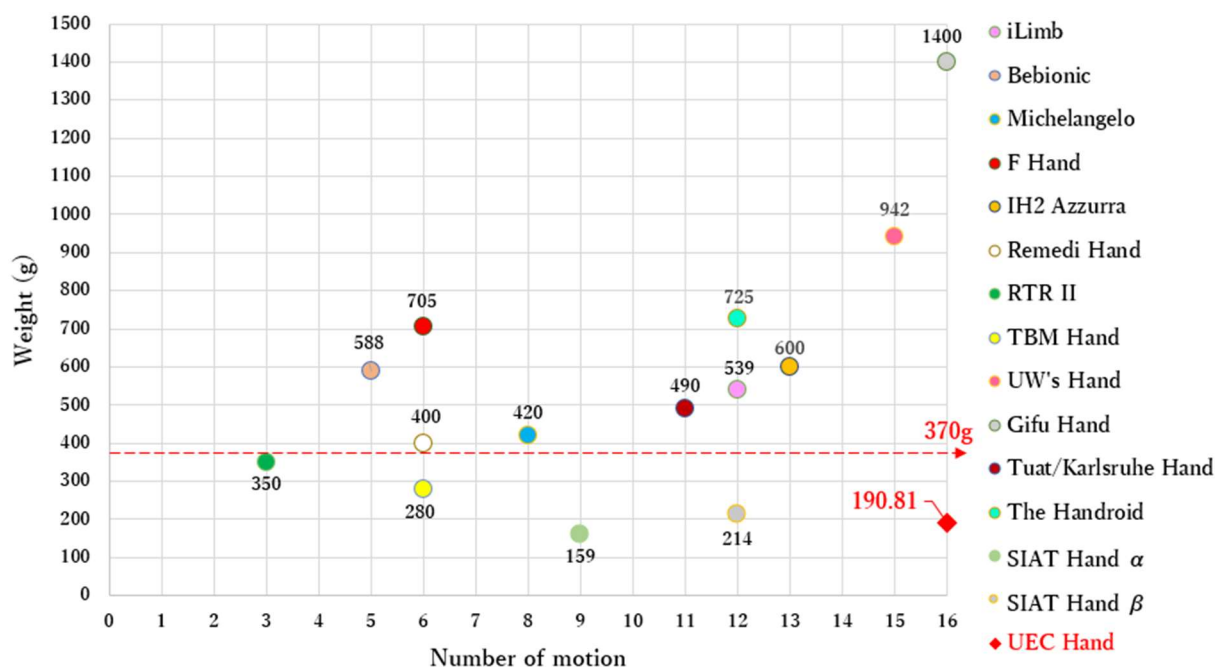


Fig.6.7 開発した UEC Hand の位置付け

以上によって、研究目標とした人間の手の運動特徴に従って、自然の動きを再現できた装飾性を保つ前提に、手の中にわずか三つのアクチュエーターを使用して、重量を 370g 以下の 190.81g までに抑えられたことから軽量性の達成、かつ 16 パターンの動作で確認できた機能性によって、開発した UEC Hand は Fig.6.7 のように、既存の義手と比較し、軽量性と機能性を両立した位置付けを実現した。



## 6.3 機能による把持性能の検証実験

このセクションでは、本研究で開発した義手を筋電制御で Pick & Place という実験を行って、機能による把持性能への影響を調べる。ついでに、第5章で言及したが、くぼみ機能の有無による把持性能の影響も調べる同時に、開発したくぼみ機能の有用性にも確かめる。そのため、まず、製作した義手について、それぞれくぼみ機能の封鎖、およびくぼみ機能の開放を分けて、2種類の義手とみなす。それから、この2種類の義手を用いて、ほかの2種類の義手製品と比較して、本研究で提案した機能は義手への実装によって、総合的な性能を検証する。最後に、4種類の義手における比較した結果をまとめて、くぼみ機能を含めて、機能の実現による把持性能への有用性を明らかにする。

### 6.3.1 比較対象とする4種類の義手

Pick & Place 実験の検証ターゲットとして、本研究で開発した義手を含めて、ほかの2種類の義手製品を紹介する。

まずは Fig.6.8 に示したように、開発した義手において、拇指回転機能とくぼみ機能の間に連結するワイヤを外し、くぼみ機能を作用できなくなるケース、およびワイヤを外さないくぼみ機能のあるケースを分ける。こうすることによって、一つの義手を2種類に仕分けて、実験のときに、くぼみ機能の有無による把持性能への影響、変化を確認できる。ついでに、くぼみ機能の有用性も確かめる。

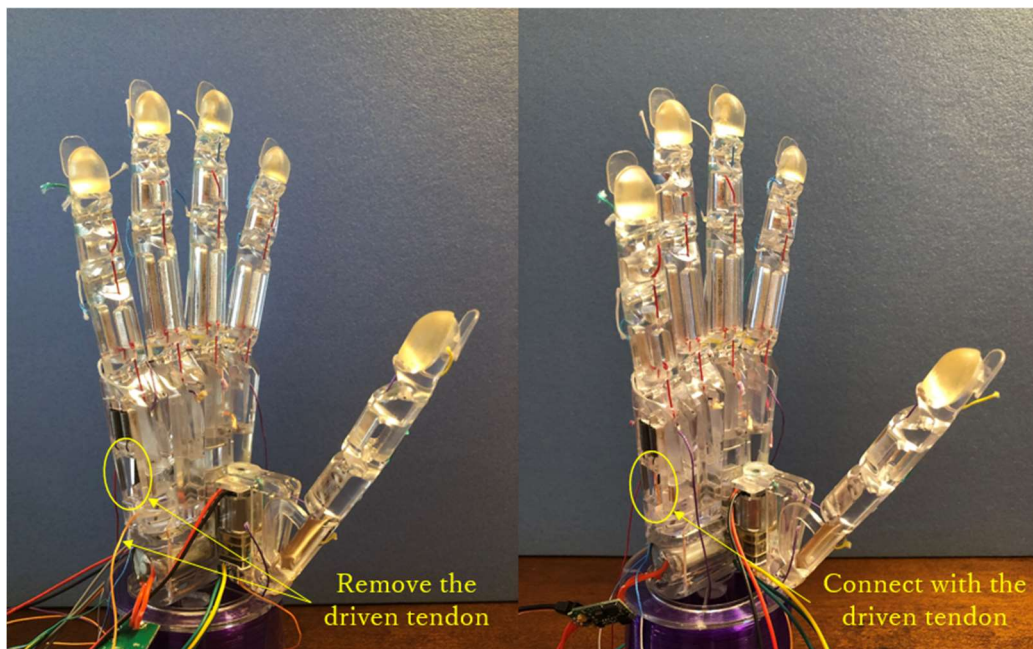


Fig.6.8 開発した義手の仕分け（左：くぼみ機能の封鎖，右：くぼみ機能の開放）

次に、既存の2種類の義手について、備えた機能から述べて、本研究の義手と区別

しながら説明する。



Fig.6.9 比較対象 1 : SIAT Hand  $\alpha$  ([X. Jing 2018]より)

SIAT Hand  $\alpha$  [中国, 中国科学院深圳先進技術研究院, SIAT Hand  $\alpha$ ] : Fig.6.9 に示したように, 2 個のモーターを用いて, 159g の軽さが持ちながら, 9 パターンの動作を実現している. 最大の握る出力は約 5N 未満である. 持っている機能の特徴としては, 四指の屈曲は一對一のタイプのメカニズムで果たして, DIP 関節を一定の角度で固定される. また, 伸展は屈曲のアクティブワイヤを利用して干渉駆動で実現する. それに, 拇指の回内・回外はモーターで直接駆動をするが, 屈曲は CM 関節のみの運動となり, 四指の屈曲に連動されている. それ以外に, 拇指の伸展はバネで自動的に果たさせているほか, 掌に機能は一切備えていない[X. Jing 2018].

Fig.6.10 比較対象2：SIAT Hand  $\beta$ 

SIAT Hand  $\beta$  [中国, 中国科学院深圳先進技術研究院, SIAT Hand  $\beta$ ] : Fig.6.10 に示したように, 3個のモーターを使用して, 214gの軽量で, 12パターンの動作を実現している. 最大の握る出力は約85Nである. 持っている機能の特徴としては, 四指の屈曲はSIAT Hand  $\alpha$ と同じく, 依然と一対一のタイプのメカニズで果たして, DIP関節を一定の角度で固定される. また, 伸展は三関節が同じバネを用いて, エネルギーを蓄えて自動的に回復する. それに, 拇指の回内・回外はモーターで直接駆動をしている同時に, 屈曲にもモーターでCM関節のみに運動させている. それ以外に, 拇指の伸展はバネでパッシブ的に果たしていて, 掌には機能が一切備えていない.

### 6.3.2 実験の条件

Pick & Place 実験で機能の有用性の把握は目的としているため, 把持の対象物においては, 形状が複雑になるほど, 義手の使用者が随意的操作によって, 毎回の把持姿勢、把持位置が変わる可能性がある以上に, 上記による4種類の義手はそれぞれ持っている機能が異なるため, 実験のときに, 機能の制限によって, さらなるそれぞれ各自の把持し方で実験を遂行する恐れがある. そのため, 実験の結果に機能の比較性を



持たせて、できる限り同様な把持姿勢で把持を行うように、同じ環境、条件のもとで、規則かつ簡単な形状を持つ対象物を選んで実験に使用する。それに、Fig.6.5 に従って、選択した把持物体のサイズを義手の把持範囲内にする。



Fig.6.11 把持の対象物

また、可能な限り握力把握と精密把握の結果をそれぞれ分かるように、把持物体の種類を分けて検証する。Fig.6.11 のように、実験による握力把握の把持能力を検証するときに、棒状のものを立ててテーブルの上に置いて、義手の掌を水平面と垂直した姿勢で棒状の側面からアプローチして握る。また、精密把握の把持能力を検証するときに、球状のものを使って、義手の掌を水平面と約45度斜めの姿勢で球状の上からアプローチしてつまむ。一方、これらの把持物体に関する重量の選択は、機能による把持性能の検証は目的であるため、把持力の最小の SIAT Hand  $\alpha$  (最大の握る出力は約5N未満) にしても把持できるように、比較的軽いものを選んだ。さらに、4種類の義手に対して、把持しやすくなる大きいサイズ、かつ柔らかい棒状(空き缶)と球状(ソフトボール)のものを選んで、Pick & Place 実験のときに、先にキャリブレーションとして検証して、把持の成功回数は互いに接近しているような結果になると、4種類の義手の把持能力が近いと意味している。その後、把持物体を敢えて硬質のものにして、4種類の義手に対する把持性能を区別する。



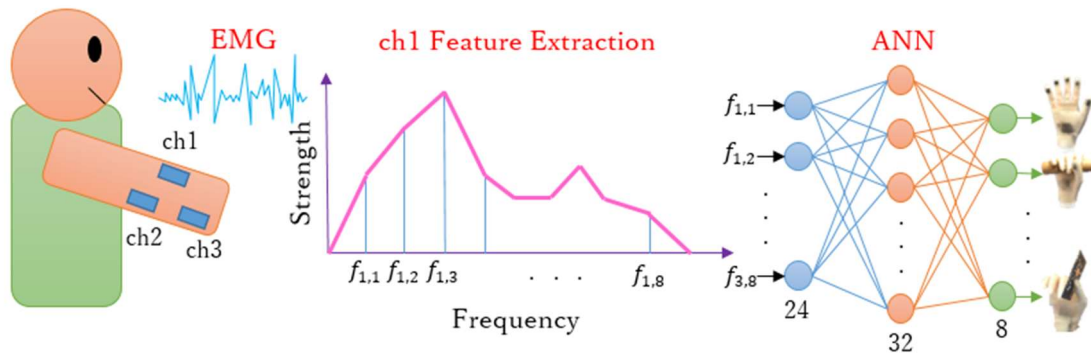


Fig.6.12 ANNによる筋電制御の流れ ([X. Yong 2019]より)

義手を操作するには、筋電のリアルタイムの制御で行う。Fig.6.12に示したように、三つの筋電センサーを被験者の前腕に貼り、筋肉を動かすたびに筋電信号（EMG）を読み取って、AD変換で2kHzのサンプリングをマイコン（日本、ルネサス エレクトロニクス株式会社、SH72544R）に送る。それから、これらの信号をFFT変換して、一つのチャンネルにあたって、8個の特徴ベクトルを獲得し、三つのチャンネルに合わせて全部24個を得られる。これらの特徴量を三層のニューラルネットワーク（ANN）に入力し、被験者の動作意図を推定して出力する。同時にマイコンからPWM信号をアクチュエータに発信し、モーターを動かして、義手に推定した動作をこなす。

### 6.3.3 Pick & Place 実験

Pick & Place 実験は、義手を筋電で操作しながら、把持の対象物に対して、指定した区域 A から 500mm の距離を空けた区域 B まで運ぶ。30 秒の間に A から B へ、引き続き B から A への往復を繰り返す。両区域への移動中に把持しているものが落ちないことを成功と記録して、逆に途中でものが手の中に落下すると失敗となる。従って、各種の把持物体に対して、30 秒の時間帯に、成功回数を測って、義手に備えた機能による把持性能の優劣を調べる。

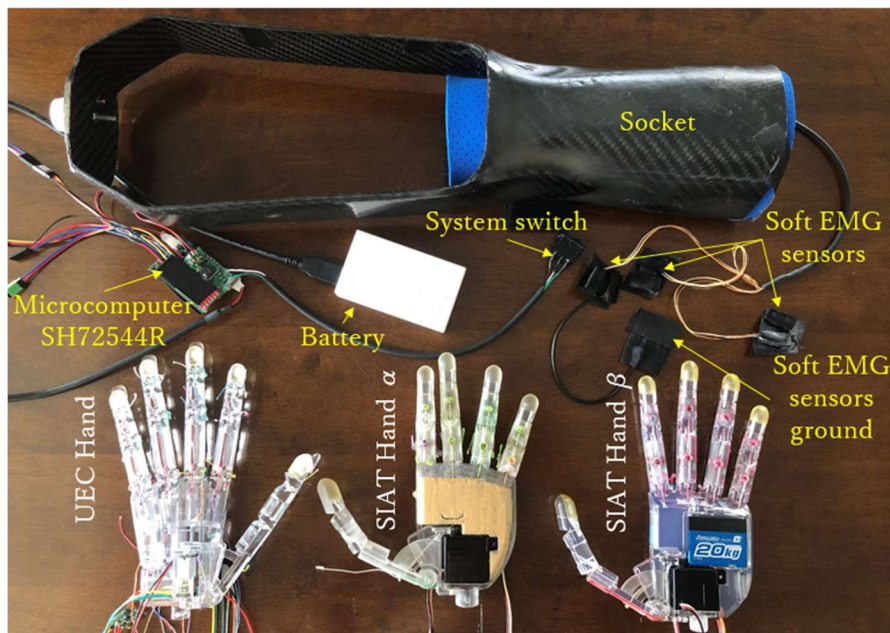


Fig.6.13 実験の装置

本実験では健常者が自分の筋電パターンを学習した後に、筋電で義手の操作を練習して熟練してから実験を行う。実験をするときに、握力把握の把持能力を検証するために、前述のように、棒状のものを立てて置く。義手を操作して、掌を水平面と垂直した姿勢で棒状の側面からアプローチして握って、姿勢を保つままに物体を目標区域に移動する。また、精密把握も同じように、把持能力を検証するために、球状のものに対して、義手の掌を水平面と約 45 度斜めの姿勢で球状の上からアプローチしてつまんで、把持の姿勢を維持しながら、物体を目標区域に移動させる。それに、使用する実験装置、健常者用ソケットなどが Fig.6.13 に示す。以上によって、実験を行った結果は Fig.6.14 にまとめる。

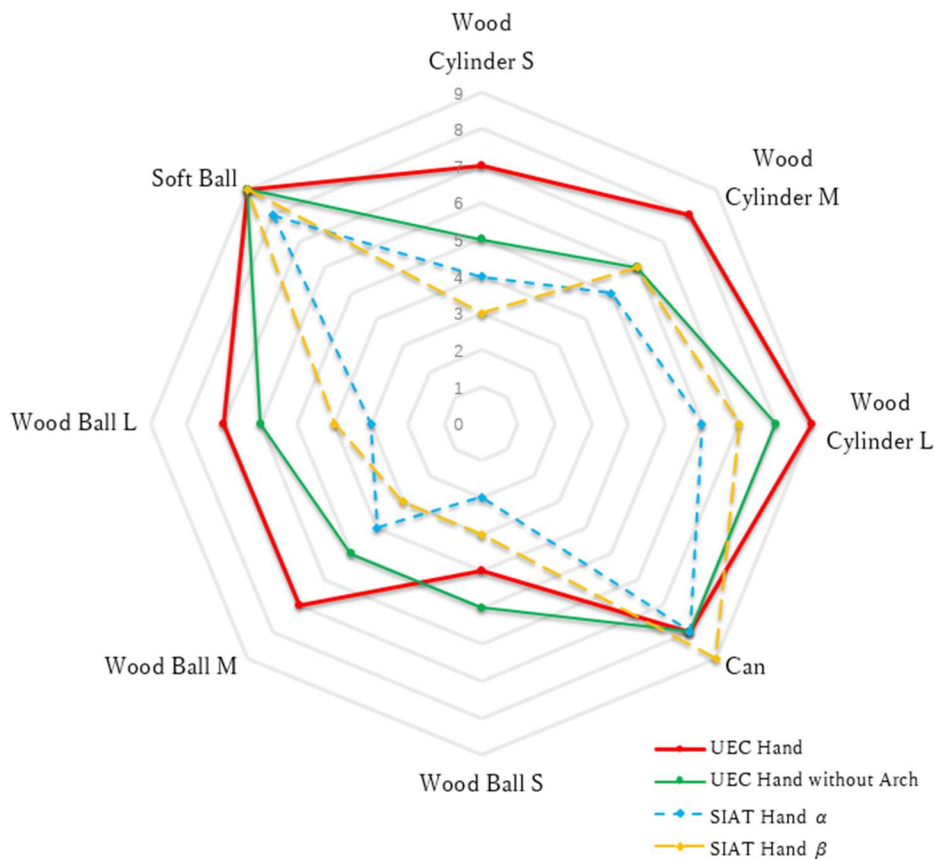


Fig.6.14 Pick &amp; Place の実験結果

結果からみると、本研究で開発した UEC Hand における総合的な把持性能は優れていることを確認できた。特に五指の馴染み把持、およびくぼみ機能の作用によって、SIAT Hand シリーズより成功回数が向上したことを確かめた。具体的な原因を判断すると：

把持対象物のソフトボールと空き缶は材質的に柔らかくて、把持ごたえがよく、どれの義手においても成功回数が高かった。

木の棒は直径の増加につれて、すべての義手は成功回数が上がる傾向に見える。特に S サイズのものに対して、SIAT Hand シリーズの DIP 関節は一定の角度で固定されているため、90 度に至らなくて、握力把握のときに、直径が小さいほど握り込むのが難しくなる。その原因で、物体が手の中から落ちやすかった。一方、くぼみ機能を封鎖された UEC Hand は指の馴染み把持が効いて、成功回数が前者より少し上がった。また、それと対照に、くぼみ機能を開放された UEC Hand は掌がアーチ状が形成した原因で、S サイズの木の棒に掌から新たな支持力を与えて、摩擦力も増加し、成功回数が向上した。

木の球に関して、直径の増加につれて、すべての義手は成功回数が上がっていく。中に S サイズのものは指先による多点の精密把握によって、ものに支持力を与えられ

る面積は握力把握よりかなり少ないため、つまむ姿勢が崩れやすく、滑りやすくなって、失敗例が多かった。その一方で、Mサイズから把持は精密把握でこなしたケースの以外に、精密把握からものを握り込まれて、握力把握に遷移したケースも存在するため、総合的に成功回数は上がった。特に馴染み把持ができる UEC Hand は、馴染み把持ができない SIAT Hand シリーズより、物体とのマッチング効果が表して、成功回数が上がった。さらに、くぼみ機能の開放によって、精密把握のときに、指先の接触点が多くなって、把持をより安定的になり、成功回数はさらに向上した。

## 6.4 まとめ

本章では、設計した CAD 図に従って、義手を製作した。結果として、義手の重量は 190.81g の軽さを持って、370g 以下の軽量性の目標を達成した。それから、製作した義手を制御し、16 パターンの動作をすべて実現できることを確かめた。それに、製作した義手をそれぞれくぼみ機能の封鎖、およびくぼみ機能の開放に分けて、健常者の筋電で義手を操作しながら、Pick & Place 実験でほかの 2 種類の義手と比較した。実験では、物体に対する把持の成功回数を記録して、開発した機能による総合的な把持性能を検証する。結果として、リーチングによる五指運動軌跡の安定性を持っているため、後からのグラスピングのプロセスにおいて、支障なく馴染み把持の形成に繋げるようになった。また、くぼみ機能の作用によって、握力把握と精密把握のときに役に立って、成功回数が向上した。よって、本研究で設けた機能による把持性能は、ほか 2 種類の義手より優れたことを確かめた。以上によって、本研究で開発した義手における軽量性と機能性の両立を実現でき、有用性を確認した。

# 第7章 結論と今後の展望

---

7.1 本論文の結論 .....	183
7.1.1 拇指の開発による成果 .....	184
7.1.2 四指の開発による成果 .....	185
7.1.3 掌の開発による成果 .....	186
7.2 今後の展望 .....	187
7.2.1 ワイヤの緩みにおける対策 .....	187
7.2.2 更なる巧妙なメカニズムによる機能の融和 .....	187
7.2.3 過伸展機能の追加 .....	187
7.2.4 触覚センシングによる人工皮膚 .....	187

---



## 7.1 本論文の結論

本論文は、外観の装飾性を保ちながら、軽量性と機能性を両立することから、快適に装着できる重量の制約のもとで、三つのアクチュエーターを使用し、日常生活における16パターンの把持動作をすべて実現できる義手用ロボットハンドの開発を目的としていた。

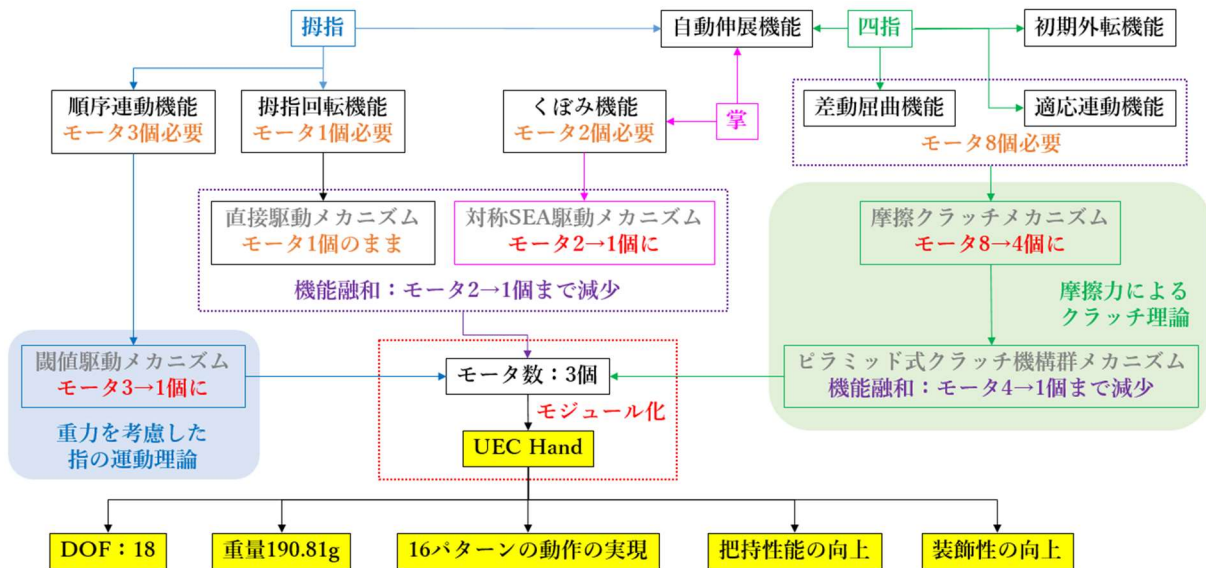


Fig.7.1 義手全体に関する結論

筋電義手は上肢切断者にとって、機能代替ができるようになり、生活の質を向上させる重要な技術である。しかし、義手の開発にあたって、370g以下の軽量性を持ちながら、日常生活で使われる16パターンの把持動作をすべて実現し、多様な機能性を持つものは存在しない。これを踏まえて、本研究では、互いにトレードオフの関係である軽量性と機能性の要件を同時に満たすために、Fig.7.1に示したように、まず、手の動作パターンから所要の7つの機能を抽出して、各自に対応するメカニズムの構築、および機能の融和によって、アクチュエーター数を最初の14個から7個にしてから、さらに3個までに抑えられることができた。そして、運動特徴に従った五指と掌を再現するために、把持物体に対して、リーチングからグラスピングまでのプロセスを考慮し、それぞれの機能に適したメカニズムを構築する。それに、相応なモデルを立ち上げて、運動の変化によるパラメータの算出、軌跡の解析、力学の分析などを実施した。最後に、設けたメカニズムによる機能の評価実験を行って、本研究で提案した動作機能（手指にあたる五指の自動伸展機能、拇指の回転機能と順序連動機能、四指の適応連動機能および四指の間に形成する差動屈曲機能のほか、掌に応用するくぼみ機能）の有用性を確認した。本研究で製作した義手の重量が190.81gでありながら、動作検証実験で16パターンの動作の実現ができた。さらに、Pick & Place実験で機能による

総合的な把持性能のパフォーマンスは、従来研究の2種類の義手と比較し、優れたことを確認できた。

### 7.1.1 拇指の開発による成果

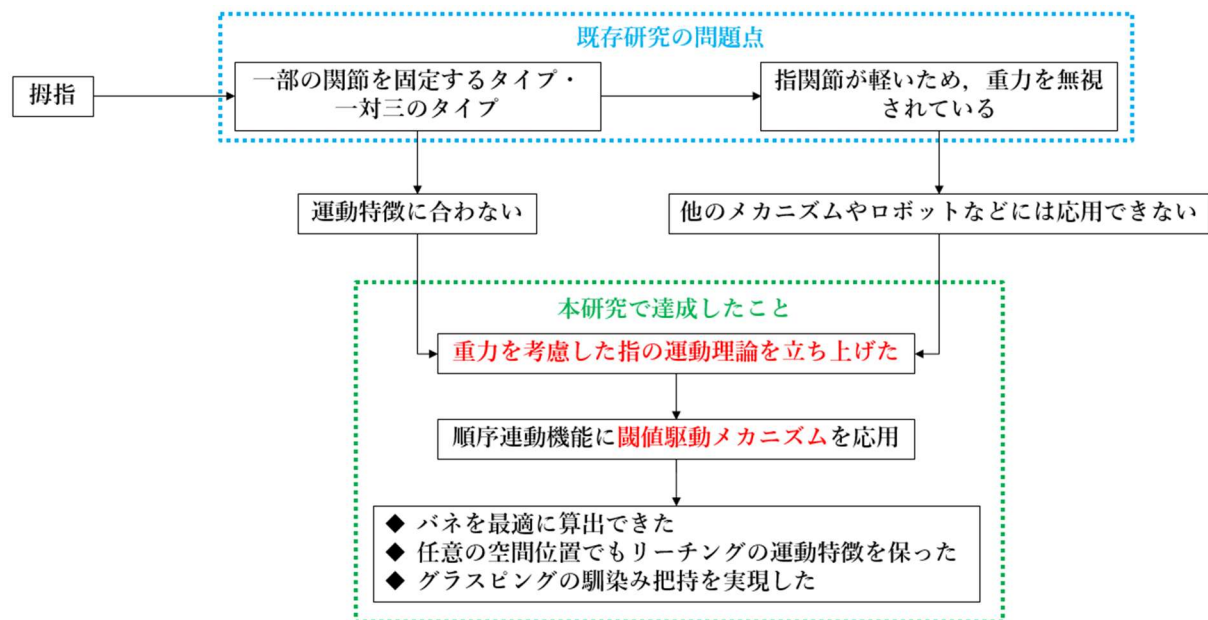


Fig.7.2 拇指の開発による成果

拇指の開発にあたって、Fig.7.2 に示したように、従来研究では構造の簡単、かつ馴染み把持ができるアクティブワイヤ1本で三関節を駆動するという一対三のタイプのメカニズムを使用している。しかし、このタイプでは劣るところが存在して、走行距離が長いほか、姿勢を変化するたびに、関節の冗長性によって、重力の影響で運動軌跡を不安定になったりする問題がある。

これらの問題を含めて、本研究では拇指の運動特徴に従って、屈曲・伸展動作に対して、それぞれ順序連動機能と自動伸展機能を絞り出した。それに、順序連動機能を実現するために、自動伸展機能を利用して、パラメータの解析を行って、バネ定数を調整することで、各関節は重力の影響を受けながら、運動軌跡を安定化させる運動理論を立ちあげ、閾値駆動メカニズムを順序連動機能に応用できた。具体的に、この理論を用いて、拇指の設計に応用し、結果として、リーチングの場合、CM関節のみを屈曲して、指先を対象物に素早く接近できるようになった。グラスピングの場合では、CM→MP→IP関節の順に次々と屈曲していったが、先に物体と接触する関節が停止になり、物体をマッチングするまでに残る関節が継続的に屈曲して、結果的に馴染み把持に形成できた。最後に、それぞれのプロセスは検証実験によって、設けたメカニズムによる機能の有用性を確かめた。

## 7.1.2 四指の開発による成果

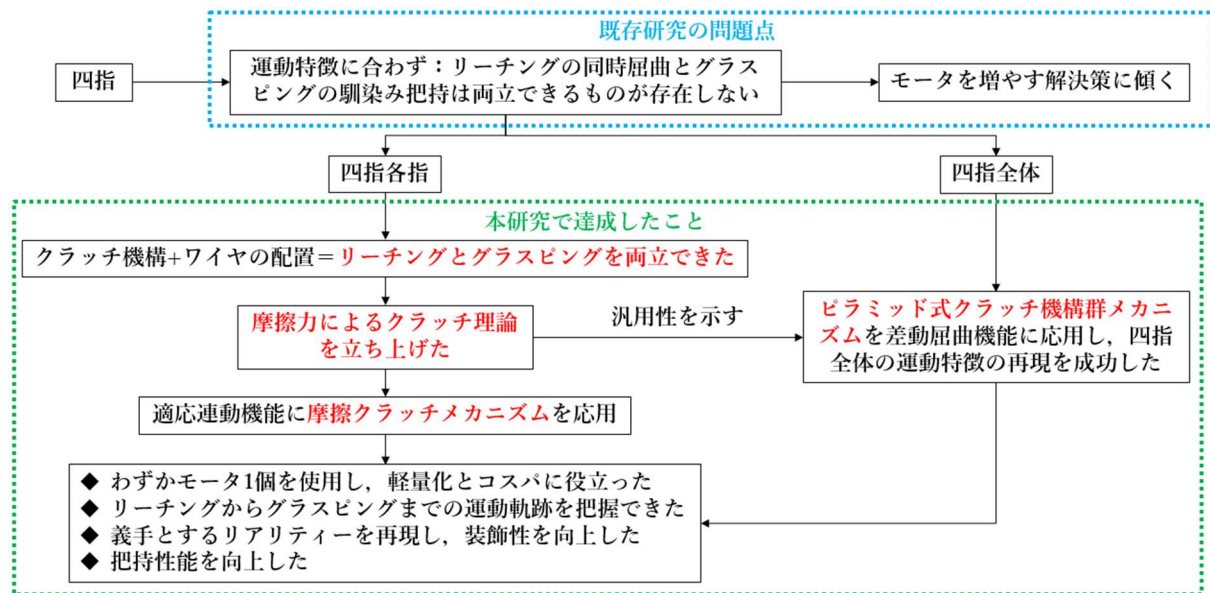


Fig.7.3 四指の開発による成果

Fig.7.3 に示したように、四指の各指の開発にあたって、従来研究では一对三、一对二、一对一のタイプのメカニズムをまとめて挙げられた。しかし、これらのタイプのメカニズムにおいて、劣るところが明らかであり、リーチングのときの同時屈曲と安定した運動軌跡、グラスピングのときの馴染み把持の可能性、および走行距離の短さに関して、同時に実現するものは存在していない。

そのため、本研究では四指の各指の特徴に従って、クラッチ機構を使用して、適応運動機能に適した摩擦クラッチのメカニズムを提案し、それぞれ静摩擦力が作用するリーチングと、動摩擦力が作用するグラスピングのプロセスを解析して、実装した結果：リーチングの場合では、静摩擦力が関節の重力と相殺できたため、三関節が同時に屈曲できたほか、運動軌跡を安定化になった。グラスピングの場合では、先に物体と接触する関節が停止になり、静摩擦力が自動的に動摩擦力に変わって、残る関節が把持物体をマッチングするまでに継続的に屈曲しつつ、馴染み把持に形成した。最後に、実験で正確性、有用性を証明した。

一方、四指の全体の開発にあたって、従来研究は滑車式、およびリンク式をまとめられた。しかしながら、これらの手法に使用したメカニズムは、リーチングのときに屈曲・伸展における運動軌跡の同期性を保たないデメリットが存在して、把持に問題が生じる。

よって、本研究では四指の全体の運動特徴に従って、ピラミッド式クラッチ機構群のメカニズムを構築して、差動屈曲機能を提案した。そして、それぞれ静摩擦力が作用するリーチングと、動摩擦力が作用するグラスピングのプロセスを解析し、実装し

た結果：リーチングの場合，四本の指を同時に屈曲させる運動軌跡の安定性を実現した．グラスピングの場合では，先に物体と接触する指が停止になり，物体とマッチングするまでに残る指が継続的に屈曲し，物体に対して，全体的に馴染み把持を形成した．そののち，検証実験によって有用性を確認した．

### 7.1.3 掌の開発による成果

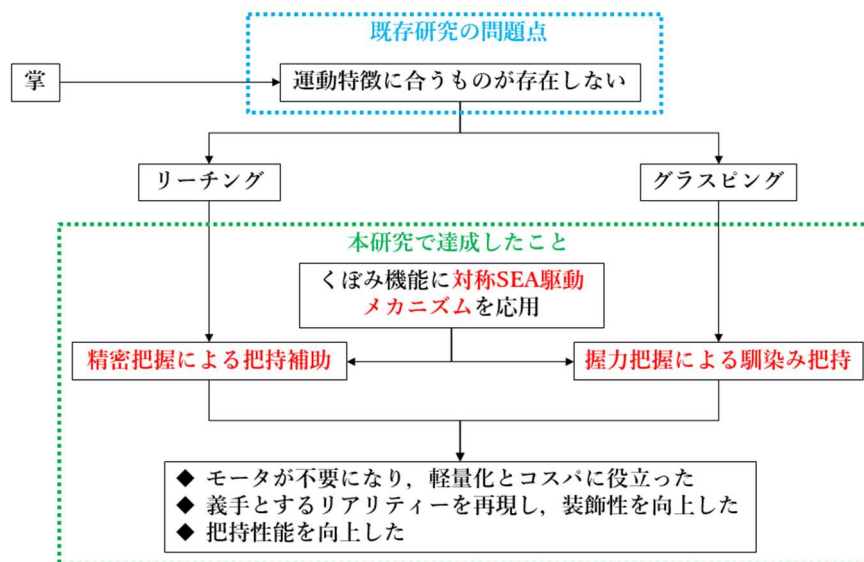


Fig.7.4 掌の開発による成果

掌の開発にあたって，Fig.7.4 に示したように，既存の 2 種類の従来研究において，どれにしても馴染み把持はならず，実用性に欠けている状態である．

ゆえに，本研究では掌の運動特徴に従って，くぼみ機能を提案して，対称 SEA 駆動のメカニズムを構築した．相応の解析、応用を行った結果として，掌の中に，環指・小指の中手骨はそれぞれ屈曲・伸展の一自由度を開放させたほか，把持物体の形状によって，アーチ状と平面状を自動的に切り替えて，馴染み把持あるいは把持補助に重要な役割を果たした．最後に，出力を検証したうえ，Pick & Place 実験で同一のハンドを用いて，くぼみ機能を封鎖したケースと開放したケースで比較して，有用性を確認できた．

## 7.2 今後の展望

提案した義手において、開発期間内に設計、製作に対して、繰り返す改良をしながら、実験も段階的に充実してきたプロセスの中、最善を尽くしたが、まだ些細な問題が残っている。それに、この期間中に新しい論文、技術と触れ合って、これを義手に応用することができたらまた新たな研究展開になる。

### 7.2.1 ワイヤの緩みにおける対策

義手に関する実験を行う際に、使用頻度の増加に伴って、ワイヤの緩みが常に発生する。そこで、随時にメンテナンスして、時間、労力をかかってしまうため、有効な対策を取る必要がある。従来研究に言及した対策を含めて、まとめると：

1. バネを利用してプリロードする：一定のワイヤ走行距離に限られている欠点がある。
2. DC モーターの回転によって、余分な緩みを吸収する：随時にキャリブレーションや位置制御の調整が要求される。

以上によって、どれにしても欠点は明らかで、一時的な対策となるため、根本的な解決策を模索する必要がある。

### 7.2.2 更なる巧妙なメカニズムによる機能の融和

本研究で16パターンの日常動作を実現したが、それ以外の場面において、さらにそれ以上の動作数が要求されて、必要な機能が増えてくる。そのため、軽量性を保つ前提に、義手の機能性をより拡大するためには、更なる巧妙なメカニズムを構築しながら、有効的に複数の機能を融和させて、アクチュエーター数を効果的に削減する。

### 7.2.3 過伸展機能の追加

人間の手指において、拇指のIP関節、示指・中指のDIP関節は伸展方向に運動して、初期位置の0度を超えて、さらに伸展できる特徴を持っている。この過伸展の運動特徴によって、精密把握のときに、指先が物体に対する多点把持から自動的に過伸展に変わって、面の接触になって、把持への安定性が向上できる。これからの研究展開にこの過伸展機能を追加する必要がある。

### 7.2.4 触覚センシングによる人工皮膚

皮膚は人体の最大かつ重要な器官であり、義手に使用することによって、外観によりリアリティーに再現のみならず、把持の安定性も格段に向上できる。しかしながら、一体化の装飾性の皮膚は型を取ったもので、関節などにおける運動の部位には正確に肉の添削が難しいため、運動の時に皮膚を圧縮したり、あるいは伸ばしたりすることによって、運動に障害が発生し、所要な位置に到達できなかつたり、余分なモーター

出力を消耗されたりすることが生じる。一方，人工皮膚には触覚フィードバックに欠かせないセンサーの種類、一定の面積内に密度のあるセンサーの数に関して重要視されている。外観と機能性を保つ前提に，いかに人工皮膚に圧力、方向、位置を測るセンサーを埋め込んで，マーピングの多元情報を得るのは今後に大きな課題となる。



# 謝辭

本論文は、電気通信大学大学院・情報理工学研究科・機械知能システム学専攻・姜研究室において行った研究をまとめたものです。執筆においては多くの方々のご指導とご協力を賜りました。

はじめに、筆者の主任指導教員である

電気通信大学大学院・情報理工学研究科・機械知能システム学専攻  
電気通信大学・医工学研究センター  
准教授 姜 銀来 先生

に心より感謝を申し上げます。日本の電気通信大学に留学して、修士を含めての5年半の間、異国の地で非常に暖かく接し、優しく自分の研究を指導しながら、自主性も尊重しつつ、研究に行き詰まったときに、議論では経験に基づく深い洞察からの貴重なご助言を賜り、研究が順調に進めました。そのおかげで、本論文を仕上げることができました。本当にありがとうございました。

そして、筆者の指導教員である

電気通信大学・大学院共同サステナビリティ研究専攻  
電気通信大学大学院・情報理工学研究科・機械知能システム学専攻  
教授 横井 浩史 先生

に心より謝意を表します。自分が修士課程に入ってから、主任指導員であった先生が研究の扉を開いてくださり、厳しくも丁寧にご指導をいただきまして、筋電義手の開発という機に成長しました。博士在籍中にも研究に関するたくさんのご助言、アドバイスを賜り、物事の考え方などを学ばせていただきました。日本に留学の間に自分の人生に大きな一歩となり、貴重な経験として将来の仕事場に活かせると思います。誠にありがとうございました。

また、同専攻の教授、明愛国先生、青山尚之先生および同専攻の准教授、小泉憲裕先生は本論文の副査を担当していただきまして、厳しくも暖かいご指導により、本論文の質を向上させることができました。感謝の意を表します。

それに、本研究室の助教、東郷俊太先生には、研究会などで研究の不足や図表の表現し方などに関する貴重なご助言をいただきました。本当にありがとうございました。

同じ本研究室の研究者である矢吹佳子様には、研究室の事務を一人で担いながら、研究を遂行していくことから、物事に対して大小にかかわらず、いつも謹厳な態度で対応すべきであることを習わせていただきました。それに、温かく優しい人柄で、常に留学生の私たちに公私ともに大変お世話になりました。誠にありがとうございました。

本研究室の後輩の孫振羽君、李文揚君、張熙君には、図表の作成、寸法の測定や Pick & Place 実験の手伝いなどにおいて、多大な助力になりました。ありがとうございました。

中国科学院深圳先進技術研究院・知能倣生研究センター、および神経工程研究センターの上司、同僚たちには、実験装置を利用させていただき、研究内容を充実になりました。さらに、秘書さんたちには、自分が不在の間に事務処理などのご協力いただきましたことをお礼申し上げます。

公益財団法人・渥美国際交流財団の皆様には、いつも優しく接していただき、毎月におもしろいイベントを開催して、博論の執筆中に唯一の楽しみになりました。それに、同期の奨学生たちは、共に博士修了の目標に向けて頑張っている姿勢に励まされまして、やる気をいただきました。コロナが蔓延している大変な時期に、奨学金をいただきました。救われたと言っても過言ではありません。心から感謝いたします。

最後に、同じ研究室で博論を執筆している妻の景暁蓓には、研究に関する論理構成や実験方針などについて、常に切磋琢磨をしながら、互いに励まして研究を進めました。それに、そろそろ4歳になる息子、雍景初には、挫折や失意になった時に、微笑む笑顔、天真爛漫な姿、笑える発言などに癒されて、何度も立ち直りました。さらに、長年に渡って日本に留学している私をずっと支えてくれて、辛労を尽くした両親を含めて、心から謝意を表します。ありがとうございました。

2020年12月

## 参考文献

## &lt;和文文献&gt;

[内閣府 2013]

内閣府: “障害者白書,” 2013.

[川村 2001]

川村 次郎, 中川 昭夫, 沢村 誠志, 森本 正治: “諸外国における筋電義手の公的支援制度,” 日本職業災害医学会会誌, 2001.

[東原 2012]

東原 孝典: “電動義手の国内外における開発研究の現状,” 日本リハビリテーション医学会, Vol. 49, No. 11, pp. 786–793, 2012.

[厚生労働省 2018]

厚生労働省: “平成 30 年度障害者自立支援機器等開発促進事業,” 2018.

[深谷 2016]

深谷 直樹: “人らしい外観を有する人間型ハンドの開発,” 科学研究費助成事業・研究成果報告書, 2016.

[川口 2009]

川口 敬介, 遠藤 維, 金井 理: “計測データに基づくデジタルハンドの高精度母指関節運動モデルの構築,” 精密工学会秋季大会学術講演会, pp. 945–946, 2009.

[川崎 2009]

川崎 晴久: “ロボットハンドマニピュレーション,” 共立出版, 2009.

[NEDO 2018]

NEDO: “単純制御でさまざまな物をつかむロボットハンドの「からくり」を開発,” 2018.

[A. I. Kapandji 2005]

A. I. Kapandji: “カパンジー機能解剖学,” 医歯薬出版株式会社, 2005

[雍 2015]

雍 旭: “手指の主要 14 動作を実現するスマートハンドの開発,” 電気通信大学・情報理工学研究科・修士論文, 2015.

<英文文献>

[C. McDonald 2017]

C. McDonald: “Global incidence of major, non-datal amputation due to traumatic causes,” Master, University of Washington, 2017.

[S. Bhutani 2016]

S. Bhutani, J. Bhutani, A. Chhabra, and R. Uppal: “Living with Amputation: Anxiety and Depression Correlates,” *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, vol. 10, pp. RC09-RC12, 2016.

[D. R. R. Rebollo 2017]

D. R. R. Rebollo, P. Ponce and A. Molina: “From 3 fingers to 5 fingers dexterous hands,” *Advanced Robotics*, vol. 31, pp. 1051-1070, 2017.

[T. Feix 2015]

T. Feix, J. Romero, H. Schmiedmayer, A. M. Dollar, and D. Kragic: “The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types,” *IEEE Transactions on human-machine systems*, vol. 46, pp. 66-77, 2015.

[M. R. Cutkosky 1989]

M. R. Cutkosky: “On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, pp. 269-279, 1989.

[J. Z. Zheng 2011]

J. Z. Zheng, S. D. L. Rosa, and A. M. Dollar: “An Investigation of GRASP Type and Frequency in Daily Household and Machine Shop Tasks,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4169-4175, 2011.

[H. W. Kay 1972]

H. W. Kay, and M. Rakic: “Specifications for Electromechanical Hands,” *The 4th International Symposium on the External Control of Human Extremities*, 1972

[T. Mouri 2002]

T. Mouri, H. Kawasaki, K. Yoshikawa, J. Takai, and M. Rakic: “Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III,” *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1288-1293, 2002.

[Z. Xu 2016]



---

Z. Xu, and E. Todorov: “Design of a Highly Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand towards Artificial Limb Regeneration,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3485-3492, 2016.

[N. Dechev 2001]

N. Dechev, W. L. Cleghorn, and S. Naumann: “Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand,” Mechanism and Machine Theory, vol. 36, pp. 1157-1173, 2001.

[X. Jing 2018]

X. Jing, X. Yong, L. Tian, S. Togo, Y. Jiang, H. Yokoi and G. Li: “Development of Tendon Driven Under-Actuated Mechanism Applied in an EMG Prosthetic Hand with Three Major Grasps for Daily Life,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2774-2779, 2018.

[D. G. Kamper 2003]

D. G. Kamper, E. G. Cruz and M. P. Siegel: “Stereotypical Fingertip Trajectories During Grasp,” Journal of Neurophysiology, vol. 90, pp. 3702-3710, 2003.

[Y. Liu 2014]

Y. Liu, F. Feng and Y. Gao: “HIT prosthetic hand based on tendon-driven mechanism,” Journal of Central South University, vol. 21, pp. 1778-1791, 2014.

[X. Yong 2019]

X. Yong, X. Jing, X. Wu, Y. Jiang, and H. Yokoi: “Design and Implementation of Arch Function for Adaptive Multi-Finger Prosthetic Hand,” Sensors, vol. 19, pp. 3539, 2019.

[X. Jing 2019]

X. Jing, X. Yong, Y. Jiang, G. Li and H. Yokoi: “Anthropomorphic Prosthetic Hand with Combination of Light Weight and Diversiform Motions,” Applied Sciences, vol. 9, pp. 4203, 2019.

[J. T. Belter 2013]

J. T. Belter, and A. M. Dollar: “Novel Differential Mechanism Enabling Two DOF from a Single Actuator: Application to a Prosthetic Hand,” IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 1-5, 2013.

[N. Fukaya 2013]

X. Fukaya, T. Asfour, R. Dillmann, and S. Toyama: “Development of a Five-Finger Dexterous Hand without Feedback control the TUAT/Karlsruhe Humanoid Hand,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4533-4540, 2013.

< 中文文献 >

[中国残疾人联合会 2010]

中国残疾人联合会: “2010 年末全国残疾人总数及各类不同残疾等级人数,” 2010.

[沈 2012]

沈 凌, 喻 洪流: “国内外假肢的发展历程,” 中国组织工程研究, 2012.

[中国国家统计局 2007]

中国国家统计局: “第二次全国残疾人抽样调查主要数据公报,” 2007.

[中华人民共和国国务院 2016]

中华人民共和国国务院: “十三五·加快残疾人小康进程规划纲要,” 中国残疾人, vol. 9, pp. 12, 2016.

<ホームページ>

[Össur 社 HP より]

i-limb ultra: <http://www.p-supply.co.jp/ossur/catalog/touch-bionics/i-limb-ultra.html>

[Ottobock 社 HP より]

Bebionic Hand:

<https://shop.ottobock.us/media/pdf/bebionicHandSpecSheetnew.pdf#search='Bebionic+hand+V2'>

[Ottobock 社 HP より]

Michelangelo: <https://www.ottobockus.com/prosthetics/upper-limb-prosthetics/solution-overview/michelangelo-prosthetic-hand/>

[Prensilia 社 HP より]

IH2 Azzurra Hand: <https://www.prensilia.com/wp-content/uploads/support/doc/DS-IH2-v02.pdf>

[Shadow Robot 社 HP より]

Shadow Dexterous Hand: <https://www.shadowrobot.com/dexterous-hand-series/>

# 研究業績

## 関連論文・学術雑誌論文

- [1] X. Yong, X. Jing, X. Wu, Y. Jiang, and H. Yokoi: “Design and Implementation of Arch Function for Adaptive Multi-Finger Prosthetic Hand,” *Sensors*, 19(16), 3539, 2019.  
(第2章, 第3章, 第4章, 第5章, 第6章に關係する)

## 関連論文・国際会議論文

- [1] X. Yong, X. Jing, X. Wu, H. Yokoi, and Y. Jiang, “Development of an Adaptive Prosthetic Hand,” 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Dali, China, pp. 2799-2804, Dec. 2019.  
(第3章, 第4章, 第5章, 第6章に關係する)

## 参考論文・学術雑誌論文

- [1] X. Jing, X. Yong, Y. Jiang, G. Li, and H. Yokoi: “Anthropomorphic Prosthetic Hand with Combination of Light Weight and Diversiform Motions,” *Applied Sciences*, 9(20), 4203, 2019. (表紙論文)
- [2] X. Yong, Z. Yan, C. Wang, C. Wang, N. Li, and X. Wu: “Ergonomic Mechanical Design and Assessment of a Waist Assist Exoskeleton for Reducing Lumbar Loads During Lifting Task,” *Micromachines*, 10(7), 463, 2019.
- [3] X. Wu, Y. Ma, X. Yong, C. Wang, Y. He and N. Li: “Locomotion Mode Identification and Gait Phase Estimation for Exoskeletons during Continuous Multi-locomotion Tasks,” *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2019.
- [4] Y. He, N. Li, C. Wang, L. Xia, X. Yong and X. Wu: “Development of a novel autonomous lower extremity exoskeleton robot for walking assistance,” *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 20(3): 318-329, 2019.
- [5] 矢吹 佳子, H. Ye, X. Yong, 日吉 祐太郎, 村井 雄太, 東郷 俊太, 姜 銀来, 加藤 龍, 高木 岳彦, 高山 真一郎, 横井 浩史: “個性適応型制御法を用いた幼児、子供用義手の開発,” *運動器リハビリテーション*, 29(3): 302-311, 2018.

## 参考論文・国際会議論文

- [1] X. Jing, X. Yong, G. Li, Y. Jiang, and H. Yokoi: “Design of a Prosthetic Hand for Multiple hand Motions,” 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Dali, China, pp. 2813-2818, Dec. 2019.

- 
- [2] X. Jing, X. Yong, Y. Shi, Y. Yabuki, Y. Jiang, H. Yokoi, and G. Li: “A Gear-Driven Prosthetic Hand with Major Grasp Functions for Toddlers,” 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Macau, China, pp. 7315-7320, Nov. 2019. (共同第一作者)
- [3] Y. Yabuki, Y. Murai, Y. Yamanoi, X. Jing, X. Yong, Y. Shi, S. Togo, Y. Jiang, T. Takagi, S. Takayama and H. Yokoi, “Development and evaluation of a myoelectric prosthetic hand adaptable to individuality for Children,” International Society for Prosthetics and Orthotics 17th World Congress (ISPO), Kobe, Japan, Oct. 2019.
- [4] X. Jing, X. Yong, T. Lan, G. Li, S. Togo, Y. Jiang, and H. Yokoi: “Development of Tendon Driven Under-Actuated Mechanism Applied in an EMG Prosthetic Hand with Three Major Grasps for Daily Life,” 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, pp. 2774-2779, Oct. 2018.
- [5] Y. Obata, Y. Murai, T. Shimura, X. Yong, X. Jing, S. Togo, Y. Jiang, and H. Yokoi: “Development of Compliance Actuation Mechanism for Wire-driven Robotic Hand using Pressure Force,” 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Kuala Lumpur, Malasia, pp.748-751, Dec. 2018.
- [6] X. Yong, C. Wang, C. Wang, W. Feng, X. Wu, and Y. Wang: “Development of a Low-power Wearable Powered Waist Exoskeleton with Mechanical Clutch,” 2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Macau, China, pp. 177-182, Jul. 2017.
- [7] X. Yong, X. Jing, Y. Jiang, H. Yokoi, and R. Kato: “Tendon drive finger mechanisms for an EMG prosthetic hand with two motors,” Proceedings of the 2014 7th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), Dalian, China, pp. 568-572, Oct. 2014.
- [8] X. Jing, X. Yong, Y. Jiang, H. Yokoi, and R. Kato: “A low-degree of freedom EMG prosthetic hand with nails and springs to improve grasp ability,” Proceedings of the 2014 7th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), Dalian, China, pp. 466-471, Oct. 2014.

## 参考論文・国内会議論文

- [1] 矢吹 佳子, 黒田 勇幹, 村井 雄太, 日吉 祐太郎, 叶 鶴松, 雍 旭, 景 暁バイ, 東郷 俊太, 姜 銀来, 横井 浩史: “個性に適應する幼児用筋電義手の開発と評価,” 第36回日本ロボット学会学術講演会, 3P2-10, 中部大学春日井キャンパス, 2018.
- [2] 矢吹 佳子, 星川 英, 雍 旭, 景 暁バイ, 中村 達弘, 棚橋 一将, 石原 正博, 關 達也, 加藤 龍, 横井 浩史: “エラストマーゲルを用いた筋電義手のための裝飾用グ



ローブの開発,” 第 30 回日本義肢装具学会学術大会講演集, p.151, 2014.

## 著書

- [1] 横井 浩史, 矢吹 佳子, 村井 雄太, 雍 旭, 景 曉蓓, 東郷 俊太, 白 殿春, 朱 笑笑, 姜 銀来: “義肢ロボット開発の最新技術と今後の製品化展望, 最先端医療機器の病院への普及展望と今後の製品開発,” (株)技術情報協会, 2018.

## 特許

- [1] 景 曉蓓, 雍 旭, 徐 睿, 鄭 悦, 田 鳳, 張 浩詩, 李 向新, 李 光林, 義手, 中国科学院深圳先進技術研究院, 特許第 6712332 号, 2019.6.2.
- [2] 横井 浩史, 景 曉蓓, 雍 旭, 矢吹 佳子, 東郷 俊太, 姜 銀来, ワイヤ駆動装置, 国立大学法人電気通信大学, 特願 2018-230625, 2018.

## 受賞

- [1] “中国人留学生研究奨励賞,” 日中科学技術交流協会, 2020.
- [2] “電気通信大学学生表彰,” 電気通信大学, 2015.

## 奨学金

- [1] 公益財団法人渥美国際交流財団, 奨学期間: 2020.4~2021.3.