

令和3年度 博士論文



# デュアル把持モードを備えた単一駆動源 による多動作・軽量型幼児用義手の開発

Development of a multi-motion, lightweight prosthetic hand  
with dual grip modes by using a single actuator for infants

景 晓蓓

Jing Xiaobei

学籍番号 1742015

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6月

# デュアル把持モードを備えた単一駆動源 による多動作・軽量型幼児用義手の開発

博士論文審査委員会

主査 横井 浩史 教授

青山 尚之 教授

姜 銀来 准教授

杉 正夫 准教授

朱 赤 教授

著作權所有者

景 曉蓓

2021

---

# 目次

第1章. 序論.....	1
1.1 背景.....	2
1.2 既存研究.....	6
1.2.1 開・閉動作しかできない幼児用筋電義手.....	6
1.2.2 動作の多様性を持つ幼児用筋電義手.....	8
1.2.3 まとめ.....	10
1.3 研究目的.....	12
1.4 論文構成.....	13
第2章. 動作の排反・独立性分析による多動作の実現・駆動源の単一化.....	16
2.1 指関節による排反性・独立性分析.....	17
2.1.1 関節自体の排反性・独立性分析.....	17
2.1.2 関節同士の排反性・独立性分析.....	20
2.2 動作の排反性・独立性分析.....	24
2.2.1 五指が共に屈伸するタイプ.....	26
2.2.2 四指が屈伸・拇指が回転するタイプ.....	29
2.2.3 排反の動作を結合するタイプ.....	32
2.3 まとめ.....	42
第3章. 安定連動及び適応差動機能を備える四指の開発.....	43
3.1 四指の運動特性.....	44
3.2 幼児の四指各指に適した受動伸展機能.....	46
3.2.1 既存研究及び課題.....	46
3.2.2 一对多伸展のメカニズム.....	47
3.2.3 受動伸展機能の省力化検証.....	51



---

3.3 四指各指に応用する安定連動機能 .....	56
3.3.1 既存研究及び課題 .....	56
3.3.2 一対一屈曲のメカニズム .....	57
3.3.3 一対一屈曲のメカニズムによる機能の実現及び出力検証 .....	58
3.4 四指全体に適した適応差動機能 .....	76
3.4.1 既存研究及び課題 .....	76
3.4.2 回転摩擦のメカニズム .....	79
3.4.3 適応差動機能の動作検証 .....	101
3.5 まとめ .....	108
第4章. デュアル把持モードの開発 .....	110
4.1 はじめに .....	111
4.2 幼児用義手における全体のモデル .....	113
4.3 対立姿勢モードにおける動作遷移の解析 .....	116
4.4 並列姿勢モードにおける動作遷移の解析 .....	124
4.5 シミュレーションによるデュアル把持モードの最適化 .....	130
4.5.1 デュアル把持モードによるシミュレーション .....	131
4.5.2 シミュレーションの結果による設計パラメータの最適化 .....	134
4.6 デュアル把持モードに合わせた拇指の設計 .....	138
4.6.1 伸展側バネの選択 .....	138
4.6.2 回外側バネの選択 .....	139
4.6.3 拇指のメカニズム .....	140
4.7 まとめ .....	143
第5章. 幼児用筋電義手に対する動作・性能の検証実験 .....	144
5.1 幼児用義手に使用するアクチュエーターの選択 .....	145
5.2 開発した幼児用義手の全貌 .....	146
5.3 動作検証実験 .....	149
5.4 Pick & Place 実験による性能評価 .....	157
5.4.1 実験の対象 .....	157
5.4.2 実験の環境 .....	159
5.4.3 実験の結果 .....	161
5.5 まとめ .....	164

---

第6章. 結論と今後の展望.....	165
6.1 本論文の結論.....	166
6.1.1 デュアル把持モードの開発による成果.....	168
6.1.2 四指の開発による成果.....	168
6.2 今後の展望.....	170
6.2.1 新たなメカニズムによる動作パターンの増加.....	170
6.2.2 ワイヤの緩み対策.....	170
6.2.3 マルチセンサによる幼児の使用習慣を学ぶ.....	171
謝辞.....	172
参考文献.....	176
研究業績.....	184

---

## 目次

Fig.1.1 中国での障害者の割合 .....	2
Fig.1.2 各種類の義手 .....	3
Fig.1.3 Electric Hand 2000[Ottobock 社 HP より] .....	6
Fig.1.4 VASI Hand Family[Technologies, Liberating 2012] .....	7
Fig.1.5 Select Myoelectric Hand[Steeper 社 HP より] .....	7
Fig.1.6 幼児用筋電義手[X. Jing 2019] .....	8
Fig.1.7 i-Limb quantum[Össur 社 HP より] .....	8
Fig.1.8 Bebionic Hand (Small)[Ottobock 社 HP より] .....	9
Fig.1.9 TBM Hand[N. Dechev 2001] .....	9
Fig.1.10 Bullock らによる頻出の 10 パターンの動作[X. Yong 2019] .....	10
Fig.1.11 既存幼児用義手の位置付け .....	11
Fig.2.1 手の中に指関節の構成[T. Feix 2011 より] .....	18
Fig.2.2 四指 MP 関節の排反性・独立性 .....	19
Fig.2.3 拇指 CM 関節の排反性・独立性 .....	20
Fig.2.4 四指の隣接の関節同士の排反性・独立性 .....	20
Fig.2.5 拇指の隣接の関節同士の排反性・独立性 .....	22
Fig.2.6 日常頻出の 10 パターンの動作[X. Yong 2019 より] .....	24
Fig.2.7 五指が共に屈曲・伸展するタイプ[X. Jing 2019] .....	26
Fig.2.8 製作した五指が共に屈曲・伸展するタイプ .....	28
Fig.2.9 五指が共に屈伸するタイプによる実現した 3 パターンの動作 .....	28
Fig.2.10 四指が屈伸・拇指が回転するタイプ[X. Jing 2019] .....	29
Fig.2.11 四指が屈伸・拇指が回転するタイプ .....	31
Fig.2.12 四指が屈伸・拇指が回転するタイプによる実現した 4 パターンの動作 .....	31
Fig.2.13 動作の排反性・独立性による動作パターンの新たな分類表 .....	32
Fig.2.14 排反の動作を結合するタイプ[X. Jing 2018] .....	33
Fig.2.15 四指のメカニズム .....	35
Fig.2.16 拇指が四指と対立姿勢の運動学モデル .....	36

Fig.2.17 拇指が四指と並列姿勢のモデル .....	37
Fig.2.18 拇指末節骨の指腹が四指側面との接触運動軌跡（単位：mm） .....	38
Fig.2.19 排反の動作を結合するタイプ .....	39
Fig.2.20 排反の動作を結合するタイプによる実現した5パターンの動作 .....	39
Fig.3.1 一対一伸展のメカニズム .....	46
Fig.3.2 一対三伸展のメカニズム .....	47
Fig.3.3 一対三伸展のメカニズムによる受動伸展機能の実現 .....	48
Fig.3.4 指関節の幾何学の関係（左：MP関節 中：PIP関節 右：DIP関節） .....	48
Fig.3.5 第三象限での力学モデル .....	50
Fig.3.6 一対一伸展のメカニズムにおける関節の幾何学の関係 .....	51
Fig.3.7 一対一・一対三伸展のメカニズムによる中指の比較（背面） .....	52
Fig.3.8.a 一対一伸展のメカニズムによる運動変化 .....	53
Fig.3.8.b 一対一伸展のメカニズムによる運動変化 .....	53
Fig.3.9.a 一対三伸展のメカニズムによる運動変化 .....	54
Fig.3.9.b 一対三伸展のメカニズムによる運動変化 .....	54
Fig.3.10 ワイヤ1本で三関節を駆動する一対三屈曲のメカニズム .....	56
Fig.3.11 一対一屈曲のメカニズム .....	57
Fig.3.12 一対一屈曲のメカニズムによる安定連動機能の実現 .....	58
Fig.3.13 三種類のメカニズムで作成した指 .....	59
Fig.3.14.a 一対三屈曲のメカニズムによる運動変化 .....	59
Fig.3.14.b 一対三屈曲のメカニズムによる運動変化 .....	60
Fig.3.15.a 一対三屈曲改良のメカニズムによる運動変化 .....	60
Fig.3.15.b 一対三屈曲改良のメカニズムによる運動変化 .....	61
Fig.3.16.a 一対一屈曲のメカニズムによる運動変化 .....	62
Fig.3.16.b 一対一屈曲のメカニズムによる運動変化 .....	62
Fig.3.17 一対一屈曲のメカニズムの力学モデル .....	63
Fig.3.18 関節の幾何学関係（左：MP関節，中：PIP関節，右：DIP関節） .....	64
Fig.3.19 一対一屈曲のメカニズムによるMP関節の出力の変化 .....	66
Fig.3.20 一対一屈曲のメカニズムによるPIP関節の出力の変化 .....	66
Fig.3.21 一対一屈曲のメカニズムによるDIP関節の出力の変化 .....	67
Fig.3.22 一対三屈曲のメカニズムの力学モデル .....	67
Fig.3.23 一対三屈曲のメカニズムによるMP関節出力の変化 .....	69
Fig.3.24 一対三屈曲のメカニズムによるPIP関節の出力の変化 .....	69
Fig.3.25 一対三屈曲のメカニズムによるDIP関節の出力の変化 .....	70
Fig.3.26 一対三屈曲改良のメカニズムの力学モデル .....	70
Fig.3.27 一対三屈曲のメカニズムによるMP関節出力の変化 .....	72

Fig.3.28 一対三屈曲のメカニズムによる PIP 関節の出力の変化 .....	72
Fig.3.29 一対三屈曲のメカニズムによる DIP 関節の出力の変化.....	73
Fig.3.30 一対一屈曲のメカニズムによる出力の計測 .....	73
Fig.3.31 出力の計測結果：MP 関節 .....	74
Fig.3.32 出力の計測結果：PIP 関節 .....	75
Fig.3.33 出力の計測結果：DIP 関節 .....	75
Fig.3.34 バネによる四指の差動機能.....	76
Fig.3.35 滑車による四指の差動機能.....	77
Fig.3.36 リンクによる四指の差動機能.....	78
Fig.3.37.a 回転摩擦のメカニズムによる適応差動機能 .....	79
Fig.3.37.b 回転摩擦のメカニズムのワイヤ配置.....	80
Fig.3.38 アプローチによる回転摩擦機構のモデル .....	81
Fig.3.39 第一象限で示指・中指の中間層における静摩擦力の変化 .....	83
Fig.3.40 第一象限で環指・小指の中間層における静摩擦力の変化 .....	84
Fig.3.41 第一象限で四指の駆動層における静摩擦力の変化 .....	85
Fig.3.42 第四象限で示指・中指の中間層における静摩擦力の変化 .....	86
Fig.3.43 第四象限で環指・小指の中間層における静摩擦力の変化 .....	87
Fig.3.44 第四象限で四指の駆動層における静摩擦力の変化 .....	89
Fig.3.45 異なる材料による回転摩擦機構の摩擦力の計測 .....	90
Fig.3.46 第一象限で示指の停止による回転摩擦機構のモデル .....	92
Fig.3.47 第一象限で示指の停止による示指・中指の中間層の変化 .....	93
Fig.3.48 第一象限で示指の停止による環指・小指の中間層の変化 .....	94
Fig.3.49 第一象限で示指の停止による四指の駆動層の変化 .....	95
Fig.3.50 第一象限で示指・中指の停止による回転摩擦機構のモデル .....	96
Fig.3.51 第一象限で示指・中指の停止による環指・小指の中間層の変化 .....	97
Fig.3.52 第一象限で示指・中指の停止による四指の駆動層の変化 .....	98
Fig.3.53 第一象限で示指・中指・環指の停止による回転摩擦機構のモデル .....	99
Fig.3.54 第一象限で示指・中指・環指の停止による環指・小指の中間層の変化 .....	100
Fig.3.55 第一象限で示指・中指・環指の停止による四指の駆動層の変化 .....	101
Fig.3.56 実験用フレームと装置.....	102
Fig.3.57 手指のブロック .....	102
Fig.3.58 実験風景.....	103
Fig.3.59.a 四指をブロックしない実測結果 .....	103
Fig.3.59.b 四指をブロックしない運動変化.....	104
Fig.3.60.a 示指をブロックした実測結果 .....	104

Fig.3.60.b 示指をブロックした運動変化.....	105
Fig.3.61.a 示指・中指をブロックした実測結果.....	105
Fig.3.61.b 示指・中指をブロックした運動変化.....	106
Fig.3.62.a 示指・中指・環指をブロックした実測結果.....	106
Fig.3.62.b 示指・中指・環指をブロックした運動変化.....	107
Fig.4.1 幼児用義手における全体のモデル.....	113
Fig.4.2 対立姿勢モードによる一回目の動作遷移.....	116
Fig.4.3 拇指・示指・中指における指先の運動軌跡.....	118
Fig.4.4 指先の運動軌跡及び投影曲線.....	119
Fig.4.5 指先の運動軌跡及び投影曲線.....	120
Fig.4.6 握力把握から五点把持の精密把握までの動作遷移.....	121
Fig.4.7 対立姿勢モードによる二回目の動作遷移.....	122
Fig.4.8 五点把持の精密把握から三点把持の精密把握までの動作遷移.....	123
Fig.4.9 並列姿勢モードによる動作遷移.....	124
Fig.4.10 並列姿勢モードに基づくモデルの更新.....	124
Fig.4.11 拇指各指関節運動軌跡.....	127
Fig.4.12 各指関節運動軌跡及び投影曲線.....	128
Fig.4.13 側面把握の動作遷移.....	129
Fig.4.14 パラメータ修正前の幼児用義手の CAD 図.....	131
Fig.4.15 対立姿勢モードの第一回目の動作遷移によるシミュレーション結果..	131
Fig.4.16 五点把持の精密把握による指関節の角度の理論値.....	132
Fig.4.17 対立姿勢モードの第二回目の動作遷移によるシミュレーション結果..	132
Fig.4.18 三点把持の精密把握による指関節の角度の理論値.....	133
Fig.4.19 並列姿勢モードの動作遷移によるシミュレーション結果.....	133
Fig.4.20 側面把握による指関節の角度の理論値.....	134
Fig.4.21 側面把握による関節角度の調整.....	135
Fig.4.22 並列姿勢モードの動作遷移による新たなシミュレーション結果.....	135
Fig.4.23 五点把持の精密把握による関節角度の調整.....	136
Fig.4.24 対立姿勢モードの第一回目の動作遷移による新たなシミュレーション結果.....	136
Fig.4.25 対立姿勢モードの第二回目の動作遷移による新たなシミュレーション結果.....	137
Fig.4.26 パラメータを最適化した幼児用義手の CAD 図.....	137
Fig.4.27 第三象限で拇指伸展の力学モデル.....	138
Fig.4.28 第三象限で拇指回外の力学モデル.....	139
Fig.4.29 拇指のメカニズム.....	140

---

Fig.4.30 第一象限で SEA バネの力学モデル .....	141
Fig.4.31 SEA バネに関与するパラメータの計算結果.....	142
Fig.5.1 幼児用義手に使用する小型モーター及びポテンシヨメータ .....	145
Fig.5.2 幼児用義手の CAD 図 .....	146
Fig.5.3 開発した幼児用義手.....	147
Fig.5.4 開発した幼児用義手の重量.....	148
Fig.5.5 把持可能な範囲（左&中：握力把握，右：精密把握） .....	149
Fig.5.6 動作 1：Lateral Pinch .....	150
Fig.5.7 動作 2：Medium Wrap .....	151
Fig.5.8 動作 3：Power Sphere.....	152
Fig.5.9 動作 4：Precision Disk .....	153
Fig.5.10 動作 5：Tripod.....	154
Fig.5.11 動作 6：Thumb 2 Finger.....	155
Fig.5.12 本研究で開発した幼児用義手の位置付け .....	156
Fig.5.13 本研究で開発した幼児用筋電義手.....	157
Fig.5.14 五指が共に屈伸するタイプの筋電義手.....	158
Fig.5.15 四指が屈伸・拇指が回転するタイプの筋電義手.....	159
Fig.5.16 把持対象物.....	160
Fig.5.17 筋電義手の ANN 制御法[X. Yong 2019 より].....	160
Fig.5.18 実験の装置.....	161
Fig.5.19 三種類の幼児用筋電義手による Pick & Place の実験結果 .....	162
Fig.6.1 本論文のアプローチ及び結論.....	167

---

# 表 目次

Table.2.1	四指の隣接の関節同士における運動の排反性・独立性 .....	21
Table.2.2	拇指の隣接の関節同士における運動の排反性・独立性 .....	23
Table.2.3	五指が共に屈曲・伸展するタイプの設計パラメータ .....	27
Table.2.4	四指が屈伸・拇指が回転するタイプの設計パラメータ .....	30
Table.2.5	排反の動作を結合するタイプの設計パラメータ .....	34
Table.2.6	試作した3種タイプの義手比較 .....	41
Table.3.1	符号の表記 .....	45
Table.3.2	バネの選定結果 .....	50
Table.3.3	一対一伸展のメカニズムにおけるバネの選定結果 .....	52
Table.3.4	第一・四象限での摩擦係数の計算結果 .....	89
Table.3.5	中間層・各種類の材料の動摩擦係数 .....	90
Table.3.6	駆動層・各種類の材料の動摩擦係数 .....	91
Table.4.1	符号の表記 .....	112
Table.5.1	義手における製作材料の物理特性の比較 .....	147



# 第1章 序論

---

1.1 背景.....	2
1.2 既存研究.....	6
1.2.1 開・閉動作しかできない幼児用筋電義手 .....	6
1.2.2 動作の多様性を持つ幼児用筋電義手 .....	8
1.2.3 まとめ .....	10
1.3 研究目的.....	12
1.4 論文構成.....	13

---

## 1.1 背景

世界保健機関（WHO）の統計によると、世界の人口の約 10%、6 億 5000 万人がさまざまな身体障害や欠損を負っている。身体障害や欠損は上肢、下肢、内蔵、知能など多岐に及ぶが、本論文ではその中で上肢、特に手の障害に着目する。手は、モノを操ったり、外部環境を感知するなど、我々の身体の最も器用な知的活動を担う部分であり、生活や仕事において広範で重要な役割を果たしている。そのため、手の障害が自立した生活を阻害するケースが多く見られる。

2015 年の一年間に、世界中に外傷の原因で肢体を切断されたのは約 120 万件あり、うち 30%はアジアの地域に生活している[C. McDonald 2017]。この背景の下、発展途上国かつ人口大国の中国において、2010 年に発表された国民サンプリング調査結果[中国国家統計局 2006][中国残疾人联合会 2010]によると、全国人口の 6.2%、おおよそ 8,502 万人が障害を持つ。Fig.1.1 に示したように、そのうち肢体障害は障害種別で一番大きな割合で、約 29.07%（2412 万人）を占めている。また、2017 年の調査報告書では、約 14 万人の障害を持つ幼児（0-6 歳）を含む合計 854.7 万人の障害児（0-14 歳）が存在していると報告された[中国残疾人联合会 2018]。それに、0-14 歳の障害児のうち、肢体障害が占める割合が一番高い分布となっている[祝 2012]。一方、アジアの先進国の日本において、厚生労働省の調査によると、上肢欠損者は約 8 万人以上と推計されている[内閣府 2013]。そのうち、小児（9 歳まで）の肢体不自由者は約 2.1 万人がいると報告されている[厚生労働省 2018]。また、先天性上肢欠損児は、1 万人につき、16 人の割合で誕生すると言われる[M. Meurs 2006]。藤原の調査によって、特に上肢欠損のある幼児は、日々の成長と発達の過程で、両手を思い通りに動作できず、身体バランスに差が出るなどの問題が生じる[藤原 2018]。身体バランスの差は両手動作の発達を阻害し、日常生活や仕事に必要な多くの機能を獲得することができなくなるため、何らかの補助手段が必要とされる。

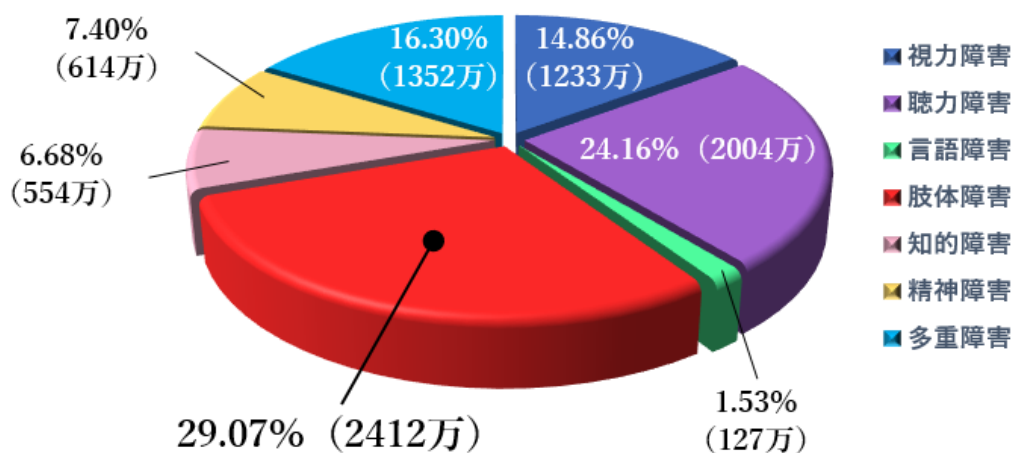


Fig.1.1 中国での障害者の割合

この問題に対して、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、使用の目的に応じた形状のものがあり、主に Fig.1.2 のように分類される：装飾義手、能動義手と筋電義手である。それぞれを説明する。

まず、装飾義手とは能動関節を持たない軽量な義手で、外観上の補綴を主目的とするが、動作の機能を持たないため、物を押したりなどの用途に限られる。

次に、能動義手とはハーネス・コントロールケーブルシステムを介して、肢体の残存部位の動きを利用することによって、手先具を機械的に動かすタイプである。手先具を用いて物体を掴んだり、放したり、押ししたりするなどの物体操作ができるため、装飾義手と比較すると仕事や日常生活における機能性は格段に大きい。この操作を行うためにはアクチュエーターなどの外部駆動源は不要になることが大きな利点であるが、利用者本人が手先具の動作と残存部位の動きとの関係を体得することに困難さが大きいと同時に、操作する際に相当の筋力や体力も必要となるなどの欠点が存在する。さらに、能動義手では体幹に装着するためハーネスによる肩甲部への束縛は避けられず、上肢への拘束で不快感が生じる[大庭 2016]。



装飾義手[Steeper社HPより]

能動義手[Ottobock社HPより]

筋電義手[Ottobock社HPより]

Fig.1.2 各種類の義手

上記のように装飾義手と能動義手には、機能的または体力的な制限が大きいため、低年齢児にとっては適応することは困難であるほか、実際の装着に最も効果のある筋電義手が評価され、期待されている[陳 2016]。さらに、筋電義手は脳からの命令によって、筋肉を収縮する際に生じた生体信号を利用して、筋電位を制御入力として、手先具のモーターを駆使しながら、手指を動かす仕組みとなっている。筋電義手は小児上肢欠損・切断者へのリハビリテーションデバイスとして、以下のように、多くの利点が挙げられる[中村 2002]：

1. 利用者本人の両手動作を促進させて、刺激を与えることができる。
2. 小児利用者の家族（両親など）にとって手先具の機能や外観などの受け入れがしやすくなる。
3. 手先具を利用者本人のボディイメージの中に受容させやすい。

4. 身体の全体バランスへの改善や上肢長さなどに慣れやすい。

また、Hubbard らによれば、小児上肢欠損・切断者に対しては、一般的に早い段階、できれば低年齢の時期から、筋電義手の使用を慣れさせることの重要性が指摘されている。その論拠は、導入し始める年齢と今後の継続率が強い関連性を持つとされ、彼らの論文では2歳の段階で継続率の高低の分かれ目となると報告されている。具体的には、2歳以前に装着を開始した場合に、筋電義手の使用に関するドロップアウト率は17%であるが、装着の時点が2歳を超えるとドロップアウト率は2倍以上に上り、48%に急増してしまったことを報じられている[S. Hubbard 1998]。そして、Scotland らも類似な結論を得ており、2歳になる前に、筋電義手を装着し始めた子のドロップアウト率は22%となり、2歳後になると50%の高さで上回ったことを明らかにした[戸田 2019]。

しかしながら、いかに研究データで幼児に筋電義手の装着最適期間を主張しても、実際に装着に至るには大きな壁が存在している。現状としては、幼児向けの筋電義手の研究や商品において、アジアの国々が欧米より遅くなっている事実にもかかわらず、相応の福祉・サポートなどの制度が一向に整備されないため、発展途上国の中国のみならず、先進国の日本でも海外から輸入したものを多く扱っている。具体的に、中国では、国内の二級病院（注1：地域性質を持つ病院である）はほぼ輸入した義手製品を使用しており、三級病院（注2：地域を含め、市、県、全国に医療サービスを提供する病院であり、教育・研究と共に行う最高レベルの医療施設である）も義手の輸入品が2/3を占めている。さらに、毎年医療機関は巨大な金額を使って、海外から筋電義手を輸入し、利用者に販売している。その輸入額は医薬品業界の輸入総額の45%を超え、各種類の製品の中で最大の割合を占めた製品である。輸入した欧米系の義手は高価であるため、肢体切断者の7割以上を占める貧困層にとっては多大な経済負担になり得るため、普及に難航している。特に、収入のない低年齢児に対しては、より一層困難である[中国国家統計局 2007]。一方、日本でも同様な問題を抱えていており、欧米系の幼児用筋電義手の製品を導入した際は、高額の仕入価格（約100万円）に加え、メンテナンスや長期的な訓練期間の必要性などの問題[東京都補装具研究所 1980]によって、幼児用筋電義手の普及はまだ様々な課題が残っている。

このような国々の政治・経済事情の影響で実際の使用率が低くなっているほか、既存の幼児用筋電義手は機能性が低く、実現可能な動作は単なる手の開・閉しかないことも使用率を下げる原因になっている。実用上必要とされる手指の動作は16パターンと分類されている[M. R. Cutkosky 1989]。さらに、Bullock らは日常生活において、最も頻出する動作を10パターン絞り込んだ[Bullock 2013]。既存の1自由度の幼児用筋電義手は、手の動作の多様性を持つことと対照的に、小児の成長に伴って、多様な動作機能への需要を徐々に満たさなくなるという問題が生じてくる。それだけに留まらず、幼児用筋電義手における動作の少なさは、使用からドロップアウトした主要

因と見られている[E. Biddiss 2007]. また, 使用率が低くなるもう一つ原因としては, 利用者の上肢断端部に付ける装具としての重量の許容範囲を超えることが挙げられる. 特に小児に対して, 手先具の重量は 180g を超えると使用する間に疲れやすくなり, 適用しにくいという報告がある[矢吹 2018]. 一方, 幼児の手の把持力に関しては, 比較的軽いものしか持たないため, 小さいおもちゃの重量にすると, 5N 以上はあったほうが望ましい.

以上のポイントを踏まえて, 多数の動作による機能性の充実, 疲れにくい軽量性かつ低コストの幼児用筋電義手の開発が必要とされ, さらに, 人の手のような外観を持つ装飾性を備えることも必要となる. すなわち, 動作パターン数を増加させるためには, 単にアクチュエーターを増加して義手の自由度を増やすことではなく, 軽量性を保ちながら, 自然な動きを再現させることを同時に達成する必要がある. したがって, 幼児用筋電義手の開発において, 設計要件を以下のとおりとする:

1. 動作パターンの多数実現 (頻出な動作をカバーする)
2. 自然な動きの再現 (手指は人間のように運動する)
3. 重量を 150g 以下に抑える (1 歳児の前腕部の推定重量に準ずる)
4. 把持力は 5N 以上がある (おもちゃを把持する)
5. 人間らしい外観を持つ (小児の手の寸法に合うサイズにする)

## 1.2 既存研究

幼児用筋電義手の研究において，世界的にも事例が少ないという報告がある[矢吹2018]．その中に，既に商品化された市販製品は Ottobock 社（ドイツ）、Steeper 社（イギリス）、Ossur 社（アイスランド）などのわずかの数社である．市販品の幼児用筋電義手のほとんどは1自由度を持ち，四指と拇指の開・閉の動作しかできない．このセクションでは，既存の幼児用筋電義手をまとめて，下記のように二種類に分けて説明する：

1. 開・閉動作しかできない幼児用筋電義手：アクチュエーターはわずか1個を使用している．重量の軽減に有利であるが，相対して動作パターンは単一となり，限られた場面にしか対応できない欠点が明らかである．

2. 動作の多様性を持つ幼児用筋電義手：アクチュエーターの追加やメカニズムに基づく機構の設置などによって，手指の自由度が増え，手先具に可能な動作数が増加するが，代わりに重量やサイズなども大きくなってしまう．

### 1.2.1 開・閉動作しかできない幼児用筋電義手



Fig.1.3 Electric Hand 2000[Ottobock 社 HP より]

Electric Hand 2000 (Fig.1.3) は Ottobock 社が生産した幼児用筋電義手であり，三本指しか持たず，できる動作は開・閉のみとなる．利用可能な対象者に対して，1歳半から13歳まで幅広く適応できるように，全部4種類のサイズを提供している．その中に一番小さいタイプでは一つのアクチュエーターを使用し，開き幅は28mmで，重さは86gである．このタイプは他のメーカーの製品と比べると，最も軽いと評価された

報告がある[小西 2002]. それと相對に, 一番大きいサイズでは, 最大 58mm の開き幅を持ち, 重さは 130g である.



Fig.1.4 VASI Hand Family[Technologies, Liberating 2012]

Fig.1.4 のように示したのは VASI 社が生産した幼児用筋電義手のシリーズである. Ottobock 社の Electric Hand 2000 と同様に, 4 種類のサイズに分けて, 11 歳までの切断者に対応できるようにしている. また, 同じく拇指が示指と中指と対立する位置で設置され, 動作は開・閉のみとなる. しかし, VASI Hand は三本指であり, かつ厚い掌を持っているため, 外観による装飾性が下がる. それに, 重量も前者より重く, 大きいサイズでは 198g がある[小西 2002].



Fig.1.5 Select Myoelectric Hand[Steeper 社 HP より]

Fig.1.5 に示しているのは Steeper 社の Select Myoelectric Hand である. ハンド自体の構造として, 拇指、示指と中指の三本指のみがある. 拇指は示指と中指の対面に固定され, 1 個のアクチュエーターが開・閉の動作を稼働させる. また, 専用のグローブ



は普通の手のように五本指があり、はめると人間の手のような外観を得られる。Select Myoelectric Hand 本体には4種類のサイズがあり、子供から成人までに対応できる。その中に一番小さいサイズは8歳から12歳までの子供に対応して、ハンド（グローブを除く）の重量は320gである。

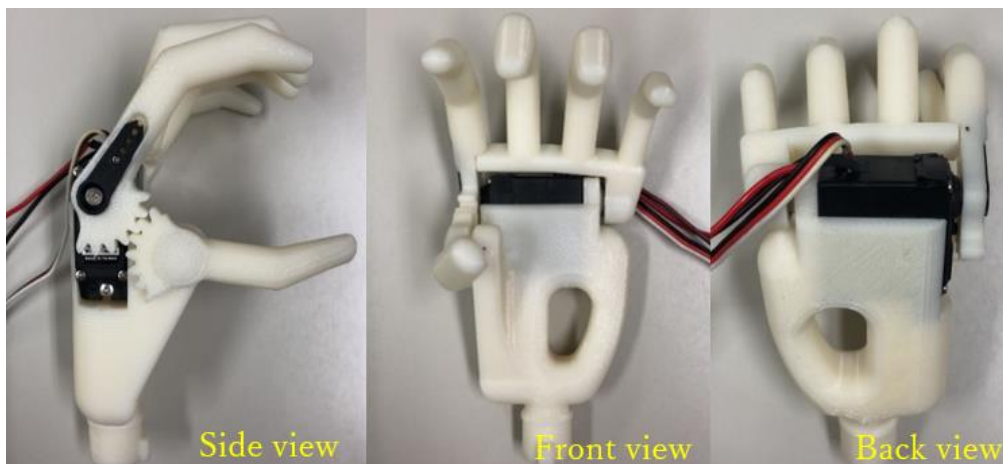


Fig.1.6 幼児用筋電義手[X. Jing 2019]

Fig.1.6 に示しているのは5歳の小児向けの筋電義手である。このハンドは5歳男児の健常側の手をモデルとして、取った型に沿って設計したものである。四指と拇指のMP関節だけは屈曲・伸展の自由度を持ち、それ以外の関節は一定の角度で固定されている構造である。掌の中に一つのアクチュエーターを設置し、四指と拇指のMP関節における歯車の構造によって開・閉の動作を果たす。重量は131.4gである。

### 1.2.2 動作の多様性を持つ幼児用筋電義手



Fig.1.7 i-Limb quantum[Össur 社 HP より]

Fig.1.7 に示したのは Össur 社の i-Limb quantum ハンドである。五本の指がそれぞれ



独立に駆動する。さらに、拇指には屈曲・伸展の自由度以外に、回内・回外の自由度も持っている。すなわち、拇指が自動的に四指と並列、あるいは対立の姿勢を調整しながら、把持動作をこなしている。そのため、あらゆる動作パターンを果たせることは、このハンドにとって最大なメリットである。しかしながら、i-Limb quantum では、全部で Extra Small、Small、Medium と Large の4種類のサイズがあり、その中、一番小さいサイズの Extra Small でも 400g 以上の重さを持っている。



Fig.1.8 Bebionic Hand (Small)[Ottobock 社 HP より]

Fig.1.8 に示したのは Ottobock 社の Bebionic Hand (Small)である。五本の指が各自に駆動し、人間の手のように自然な屈曲・伸展の動作が再現できる。一方、拇指の回内・回外の動作は能動的ではないため、工具を介して事前に位置を調整することが必要である。装着する際に、三種類の手首を選ぶことができるが、一番小さいサイズの手首を装着しても、ハンド（手首を含む）の重量は 369g に至る。

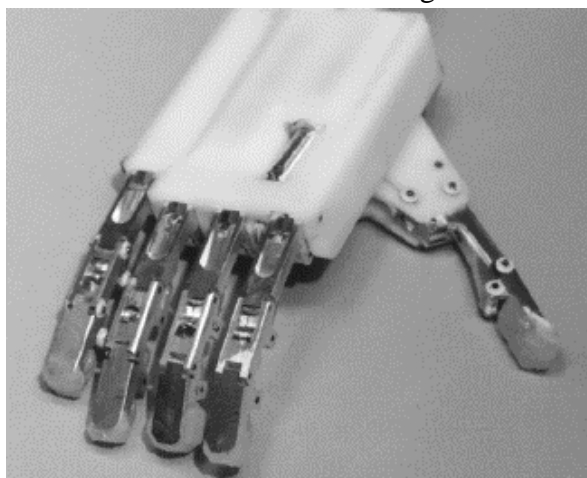


Fig.1.9 TBM Hand[N. Dechev 2001]

TBM Hand (Fig.1.9) は N. Dechev らが開発した 7 歳から 11 歳までの年齢層に向く

ハンドである。掌の中にバネとリンクで構成された差動機構を埋め込んだため、把持の時に物体の形に沿う馴染み把持ができるが、差動機構は占めたスペースが大きく、アクチュエーターを掌の中に内包できず、手首に内蔵している。また、拇指が能動的に回内・回外の動作ができず、操作する際に使用者が手動で調整することが必要である。ハンド全体（手首の駆動源を含む）の重量は 280g である。

### 1.2.3 まとめ

従来の幼児用筋電義手の開発においては、成人義手より厳しい重量、寸法に制限されるため、一方的にアクチュエーター数を削って極限の 1 個に抑えたことによって、動作パターン数の減少で機能性を失わせた開・閉動作しかできないものにするか、あるいは重量の問題を後置して、機能性の追求に応じたアクチュエーター数を増やすものにするか、という二つの方向で進行している。重量を抑えながら、動作パターンによる機能性を持つ両立させるものは存在していない。

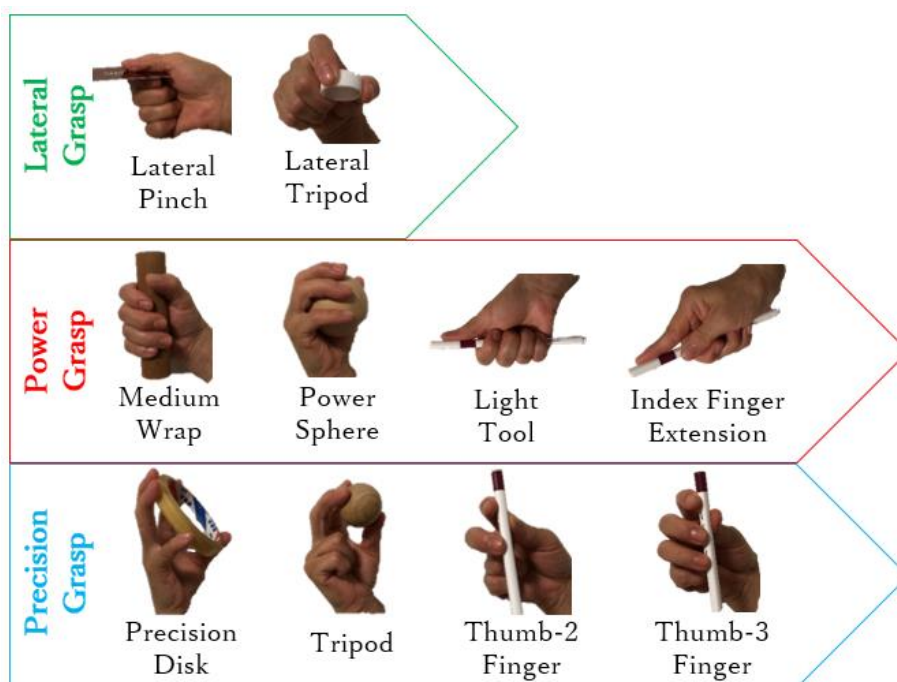


Fig.1.10 Bullock らによる頻出の 10 パターンの動作[X. Yong 2019]

それにもかかわらず、M. R. Cutkosky らは人の手がよく使うの動作を 16 パターンに分類したが、Bullock らが日常生活において最も頻出する動作を 10 パターン (Fig.1.10) に絞り出した。これらの動作パターンに準じながら、重量を 150g 以下の期待値に制限すると、既存の幼児用義手は Fig.1.11 のように位置付けることができる。レーダーチャートの中に、motion 軸の数値は高くなるほど、動作パターンが多い。また、motor と weight 軸には、数値が逆に小さいほど、使用するアクチュエーターが少数となり、

重量が軽いから、幼児用筋電義手として望ましい。

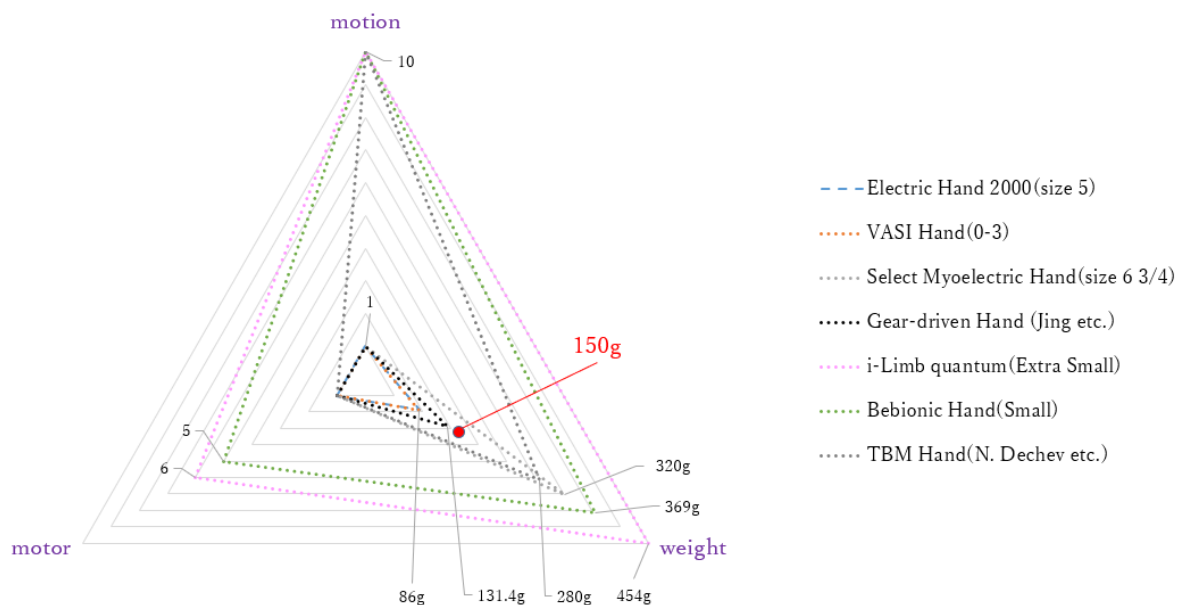


Fig.1.11 既存幼児用義手の位置付け

以上によって、既存の幼児用義手において以下の2種類に分けられる：

1. 軽量化を追求して、少数の動作しかできない機能性を失うタイプ
2. 機能性を重視して、多数の動作ができる一方、重量化になるタイプ

要するに、150g以下でありながら、過半数の動作パターンを実現する幼児用義手は存在せず、上記の2種類のタイプに進行していることを確かめる。

## 1.3 研究目的

以上の課題によって、幼児用義手の開発においては、把持力より、軽量を保ちながら、多様な把持動作の実現を重要視し、両立させる作法を模索する。よって、本研究の目的としては、装飾性を保ちながら、多数の動作パターンを実現する軽量型（150g以内）の幼児用筋電義手の開発とする。

この目的を実現するために、想定される制約や解決すべき課題は以下の通りである：

### 1. 幼児用筋電義手の装飾性と軽量性を担保するための制約

#### 1.1. 幼児手掌部の制約

手掌部は、鶏卵1個程度の体積であり、スペースの中に手先具の駆動系をすべて封入する必要がある。

#### 1.2. 指部の制約

指部は、直径10mm以下であり、物体把持において屈曲動作を行う必要があるため、指部関節に回転運動を行う機構を封入する必要がある。しかしながら、スペース的な制約が大きいため、リンクやギアなどの機械部品で動力伝達することは困難であるため、ワイヤ等の細い材料を用いて新しい機構を提案する必要がある。

### 2. 幼児用義手における従来研究の課題

#### 2.1. 制限重量内での多自由度化の課題

機構において、最も単位重量の大きな部品はアクチュエーターであるため、重量を削減するためには、アクチュエーター数を減らすことが第一選択となる。しかしながら、アクチュエーター数の抑制は、動作数の減少に直結するため、動作数を増やすためには、新しい機構の提案が必要となる。

#### 2.2. 動作パターンの増加の課題

アクチュエーター数を限定すると、同時に制御可能な動作数は、アクチュエーター数が上限となる。よって、アクチュエーター数以上の動作数を実現しようとする、アクチュエーター数の可動範囲を分割して、異なる動作に割り振るような機構を新しく提案する必要がある。

## 1.4 論文構成

本論文は幼児用筋電義手の設計開発を目的として、様々な制約条件のもとで、幼児が利用可能な軽量小型な手先具の開発を実施したものである。制約条件とは、厳しい重量とスペースの制限及び日常生活に必要な把持力のもとで、人間らしい動きを再現させるために、四指、拇指の運動特徴に特化した指部のメカニズム、それらを連動させる把持動作パターンの実現である。これらの制約条件下で目的を達成するために、新しくデュアル把持モードを開発し、動作と動作の間に、互いに排反性を定義し、拇指と四指と対立、並列の動作を結合させることによって、一つのハンドに組み込むことができた。その結果、アクチュエーター数を極限の1個に抑えることにより、重量はわずか66.88gで把持力5N以上を達成し、日常生活動作で頻出する6動作パターンを実現することに成功した。これにより、従来研究と比較し、多動作数・最軽量の義手の開発に成功した。アクチュエーター数以上の手先具の動作パターン数を確保する方法を新しく見つけ、これにより、科学的新規性および工学的有用性を示すことができた。全論文は以下に示す全6章から構成されていて、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、幼児上肢欠損・切断者に対して、開発された義肢装具、リハビリテーションの現状を述べるほか、筋電義手は幼児に失った肢体の機能を代替する重要性を説明する。そして、幼児用筋電義手に関する製品および開発の現状を考察し、問題点を提示する。さらに、本研究はこれを踏まえて、装飾性を保ちながら、アクチュエーター数を削減するほか、多動作かつ軽量化を両立させるといった研究目的を述べ、既存の幼児筋電義手と比較して新規性と有用性を有することを明示する。

第2章では、幼児用義手が基本三種類の動作（握力把握、精密把握および側面把握）によるパターン数をできる限り多数に再現できるように、関節自体、および関節同士から、動作パターンの間にも互いに独立性を持つ動作および独立性のない排反性を持つ動作を分けて分析する。従来研究では、独立性のある動作に基づいて、連動させるメカニズムを構築して、義手を製作するのはほとんどである。それに対して、排反性のある動作は同時に実現するのが難しいため、アクチュエーターを追加したり、パッシブな構造を使用して実現させているが、それぞれ重量増となったり、制限を定めた運動でしか動かないなどの欠点を持っている。そのため、本研究では、まず独立性と排反性を持つ関節自体、関節同士をそれぞれ明確化し、分類する。そして、10パターンの動作の間の排反性・独立性を調べるため、まずは五指が共に屈伸するタイプと、

四指が屈伸・拇指が回転するタイプを製作した。調査の結果は、動作パターンは、互いに排反性を持つ二つのグループに分けられる（グループ内の動作パターンは互いに独立性を持っているほか、動作の間の遷移も発見できた）：拇指が四指と対立する姿勢のグループ、および拇指が四指と並列する姿勢のグループである。この新たな分類法に従って、開発の視点を変え、さらに排反の動作を結合するタイプ（五指の屈伸・拇指の回転）を製作して、有用性を確かめた。よって、この理念から発展して、本研究のデュアル把持モードによる単一駆動源で多動作・軽量型幼児用義手の開発に導く。

第3章では、四指の開発を説明する。運動特性に従うのみならず、幼児用義手によるスペースの制限や出力に対する消耗の減少の傾向から、まず受動伸展機能を提案し、メカニズムの構築によって、四指の指ごとに一つのバネで三関節の伸展動作を果たす一方、従来研究に比較し、省力化の効果を持つことを確認した。そして、既存研究による屈曲の運動軌跡が不安定、ワイヤ走行距離が長く、屈曲速度が遅くなる課題から、出力を保つ上に、走行距離を最短にし、運動軌跡も安定させる安定連動機能を提案する。力学モデルによって、メカニズムの解析、計算を行って、比較実験で有用性を確かめた。最後に、四指全体に対する馴染み把持を実現するために、従来研究が残っている課題を含め、適応差動機能の解決策を挙げた。手の中の回転摩擦機構によって、それぞれ示指・中指と環指・小指を連結する中間層、中間層を駆使する駆動層を構成し、機構の設計、解析を実施するうえに、把持のケースを分けて、検証実験を重ねて、異なるパラメータによるメカニズムの変化を明確した。

第4章では、互いに排反性を持つ二組の動作遷移グループを同時に実現するため、デュアル把持モードを開発する。そのため、五指のモデルを立て、運動学と逆運動学によって、まずは拇指が四指と対立した姿勢グループにおける動作遷移に対する解析を行い、握力把握から五点把持の精密把握に至り、最終的に三点把持の精密把握を実現する。そして、拇指が四指と並列した姿勢グループにおける動作遷移にも解析を行い、側面把握を果たす。次に、シミュレーションによって、デュアル把持モードの理論値を修正しながら、最適化を行う。最後に、デュアル把持モードに合わせた拇指の設計を行って、バネの選択とメカニズムの構築を説明する。結果として、互いに排反性を持つ両グループを両立することができて、幼児用義手にわずか1個のアクチュエーターの組み込みが可能になると同時に、基本の三種類の動作パターンを実現できる。

第5章では、幼児用義手を製作し、66.88gの軽さを持ちながら、7.62Nの把持力が有することを確認した。そして、製作した幼児用義手を制御し、6パターンの動作の

実現を確認した。また、義手の性能の調査のため、健常者の筋電を読み取り、ANNで動作意図を推定し、義手を駆使する。Pick & Place 実験を介して、一定の時間内に物体の把持成功回数を記録し、ほかの義手と比較して、本研究で提案した幼児用義手の把持性能が優れたこと確認できた。

第6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た。

# 第2章 動作の排反・独立性分析による多動作の実現・駆動源の単一化

---

2.1 指関節による排反性・独立性分析 .....	17
2.1.1 関節自体の排反性・独立性分析 .....	17
2.1.2 関節同士の排反性・独立性分析 .....	20
2.2 動作の排反性・独立性分析 .....	24
2.2.1 五指が共に屈伸するタイプ .....	26
2.2.2 四指が屈伸・拇指が回転するタイプ .....	29
2.2.3 排反の動作を結合するタイプ .....	32
2.3 まとめ .....	42

---



## 2.1 指関節による排反性・独立性分析

従来の幼児用筋電義手の開発において、成人義手より厳しい重量、寸法に制限されるため、一方的にアクチュエーター数を削減して、1個までに減少できるが、動作パターンの減少による機能性を失ってしまった。このタイプを対照に、機能性を追求して、重量を超えてしまうタイプも仕上げていた。いわゆるアクチュエーターを少数にして、重量を抑える同時に多様な動作パターンを持つものは存在していない。言い換えると、1個のみのアクチュエーターで、重量の軽減に繋がる同時に、多数の動作パターンを実現することが望ましい。

一方、多数の動作パターンを実現するために、いかなる巧妙なメカニズムを構築しても、届かない限界は存在している。なぜかという、人間の指関節において、自身のみならず、関節同士の間にも排反性・独立性を持っている。排反性を持つ指関節に対して、同時に運動が発生できないため、従来の研究では、独立性を持つ指関節のみを劣駆動で連動しながら、動作パターンを果たしていた。結果的に、排反性のある運動は切り捨てられて、独立性のある運動を保留した。その原因で、いくら有効なメカニズムを作り上げても、実現可能な動作パターン数は限界があった。そのため、本章では、まず排反性のある関節、隣接の関節同士の運動を分析して、五指における指同士の間にも排反性・独立性によって領域を分け、それぞれ異なるメカニズムの使用を明確にする。そして、分析の結果に基づいて、多数の動作パターンを実現するために、動作と動作の間にも排反性・独立性を調べる。そのため、異なるメカニズムを持つ3種類のハンドを製作して、動作検証によって、互いに排反性を持った動作パターンが二つの動作姿勢グループを分けられる。結果的に、デュアル把持モードを用いて、この排反性を持った二つの動作姿勢グループを有効に結合して、より多くの動作パターンを実現できる同時に、アクチュエーターの数を極限の1個に抑えられて、一つのハンドに組み込むことは可能になった。

本研究で提唱した指関節の排反性、および独立性を以下のように定義する：

1. 排反性：一つの関節において、AとBの二つの運動が定義できるとき、そのAかBかどちらか一方しか出現を許さない場合と定義する。
2. 独立性：一つの関節において、AとBの二つの運動が定義できるとき、A及びBまたは、AまたはBの出現を許す場合と定義する。

### 2.1.1 関節自体の排反性・独立性分析

このセクションでは、任意の関節において、関節自体に対する排反性・独立性の分

析を行う。人間の指関節は Fig.2.1 に示しているように、掌を除いて、五本の指はいずれにしても三つの関節があり、そのうち四指（示指、中指、環指と小指の四本指）が MP、PIP と DIP 関節を持って、拇指は CM、MP と IP 関節で構成される [T. Feix 2011].

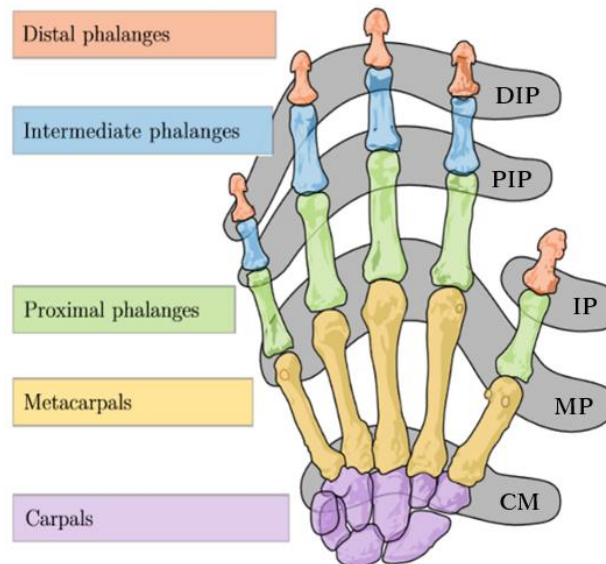


Fig.2.1 手の中に指関節の構成[T. Feix 2011 より]

まず、四指の各関節について、可能な運動は以下のように：

1. DIP 関節：屈曲・伸展
2. PIP 関節：屈曲・伸展
3. MP 関節：屈曲・伸展および外転・内転

中には、PIP 関節、あるいは DIP 関節において、屈曲・伸展という一自由度の二つの運動ができるが、任意の時刻でも一つの運動しか表せない。要するに、PIP と DIP 関節に対して、いずれの関節においても掌の方向に屈曲していくと、手の甲の方向への伸展ができない。逆に伸展するたびに、反対方向への屈曲ができない。このように同時に実現できない運動は独立性がないと理解できる。すなわち、PIP 関節、あるいは DIP 関節に対して、屈曲・伸展の運動は互いに排反性を持っている。

一方、MP 関節において、屈曲・伸展および内転・外転という二自由度の四つの運動が可能である。PIP、DIP 関節と同様な理由で、MP 関節の屈曲・伸展の運動は互いに排反性を持ちながら、内転・外転の運動もそうである。しかしながら、MP 関節における屈曲・伸展と外転・内転の運動はそれぞれ異なる回転軸があるため、屈曲するたびに外転か内転の角度は徐々に減少し、反対に伸展するとき外転か内転の角度は徐々に増大できる。この現象に基づいて、結果的に Fig.2.2 のように、屈曲あるいは伸展しながら外転か内転ができて、逆に外転あるいは内転しながら屈曲か伸展もできるため、

同時に実現できる運動と理解し、互いに独立性を持っている。

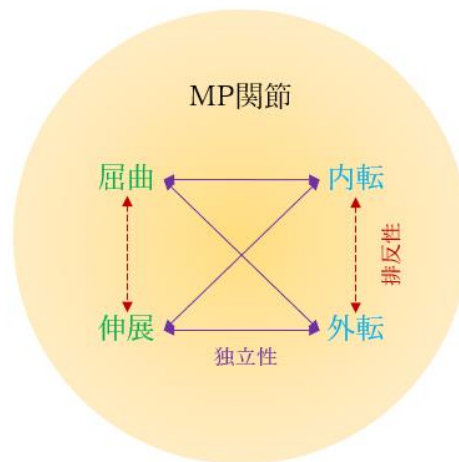


Fig.2.2 四指 MP 関節の排反性・独立性

次に、拇指の各関節について、可能な運動は以下のように：

1. IP 関節：屈曲・伸展
2. MP 関節：屈曲・伸展
3. CM 関節：屈曲・伸展および回内・回外

中には、それぞれ一自由度の IP、MP 関節は前述した四指の DIP、PIP 関節と同じように、屈曲・伸展の運動は互いに排反性を持つ。

一方、CM 関節において、二自由度を持ちながら、屈曲・伸展と回内・回外の四つの運動がある。IP、MP 関節と同様な理由で、CM 関節の屈曲・伸展の運動は互いに排反性を持ちながら、回内・回外の運動もそうである。しかしながら、CM 関節における屈曲・伸展と回内・回外の運動はそれぞれ異なる回転軸があるため、分析した結果は Fig.2.3 に示したように、屈曲あるいは伸展しながら回内か回外ができて、逆に回内あるいは回外しながら屈曲か伸展もできることから、同時に実現できる運動となり、互いに独立性を持っている。

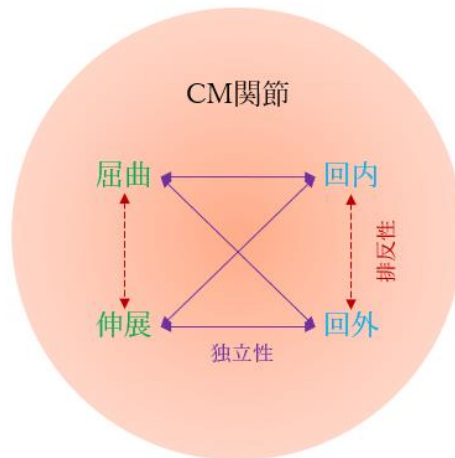


Fig.2.3 拇指 CM 関節の排反性・独立性

### 2.1.2 関節同士の排反性・独立性分析

このセクションでは、引き続き指を単位に関節と隣接の関節の間に、排反性・独立性の分析を行う。

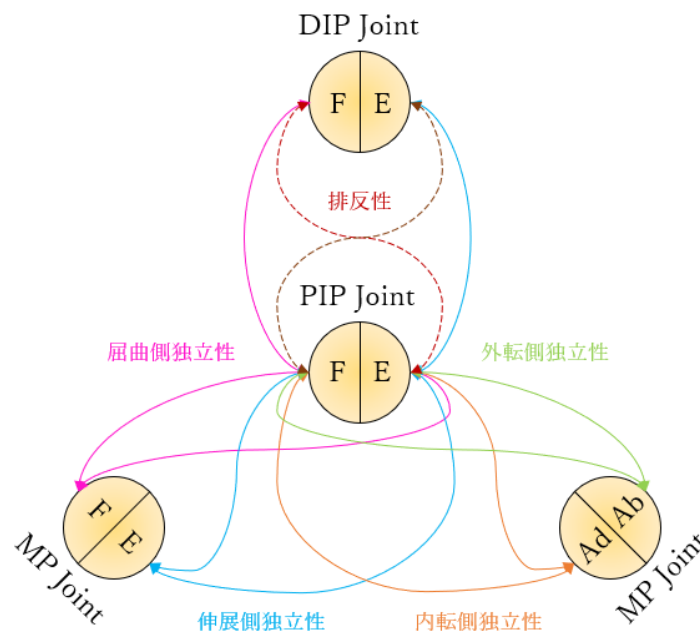


Fig.2.4 四指の隣接の関節同士の排反性・独立性

まず、四指において、MP、PIP、DIP 関節に対して、隣接の関節同士を分析して、結果は Fig.2.4 のように示している。ただし、図の中に、F、E、Ad と Ab はそれぞれ屈曲、伸展、外転と内転に意味していて、破線は互いに排反性を持ち、実線は互いに独立性を持つと意味する。結果を具体的に述べると、PIP 関節は屈曲しているときに、

DIP 関節も屈曲できる（独立性）が、伸展はできない（排反性）。逆に、PIP 関節は伸展しているときに、DIP 関節も伸展できる（独立性）が、屈曲はできない（排反性）。しかも、この二関節の間に常に同じ角速度で一緒に運動している[川崎 2009]。また、MP 関節において、屈曲・伸展と外転・内転の運動があるため、二つの関節とみなして、それぞれ PIP 関節に対して説明する。MP 関節の屈曲か伸展の運動が PIP 関節への影響はないため、互いに独立性を持っている。同様に、MP 関節の外転か内転の運動が PIP 関節への影響を及ぼさないため、互いに独立性を持っているという。以上によって、四指において隣接の関節同士の排反性・独立性を Table.2.1 にまとめた。

Table.2.1 四指の隣接の関節同士における運動の排反性・独立性

	DIP 屈曲	DIP 伸展	PIP 屈曲	PIP 伸展	MP 屈曲	MP 伸展	MP 内転	MP 外転
DIP 屈曲	-	排反	独立	排反	-	-	-	-
DIP 伸展	排反	-	排反	独立	-	-	-	-
PIP 屈曲	独立	排反	-	排反	独立	独立	独立	独立
PIP 伸展	排反	独立	排反	-	独立	独立	独立	独立
MP 屈曲	-	-	独立	独立	-	排反	独立	独立
MP 伸展	-	-	独立	独立	排反	-	独立	独立
MP 内転	-	-	独立	独立	独立	独立	-	排反
MP 外転	-	-	独立	独立	独立	独立	排反	-

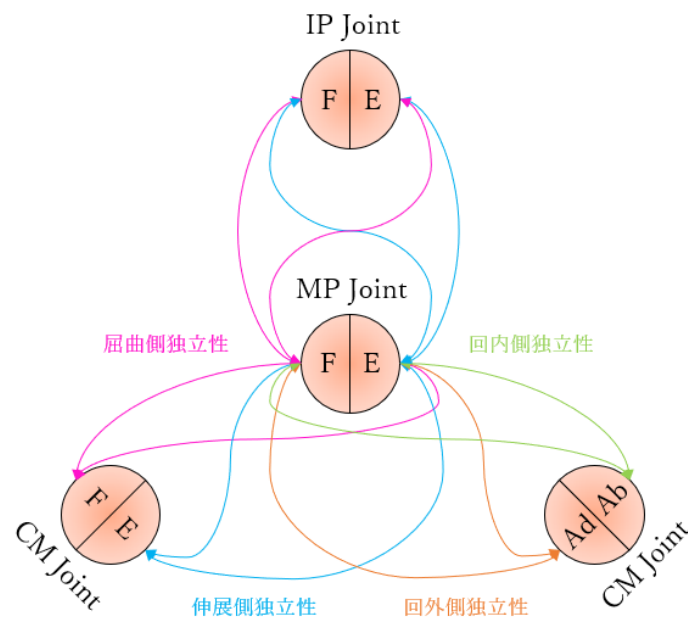


Fig.2.5 拇指の隣接の関節同士の排反性・独立性

次に、拇指において、CM、MP、IP 関節に対して、隣接の関節同士を分析して、結果は Fig.2.5 のように示している。ただし、図の中に、F、E、Ad と Ab はそれぞれ屈曲、伸展、回外と回内に意味していて、実線は互いに独立性を持つと意味する。結果を具体的に述べると、MP 関節は屈曲か伸展していることにかかわらず、IP 関節は随時に屈曲、伸展はできるため、互いに独立性を持つ。また、CM 関節において、屈曲・伸展と回内・回外の運動があるため、二つの関節とみなして、それぞれ MP 関節に対して説明すると、CM 関節の屈曲か伸展の運動が MP 関節への影響はないため、互いに独立性を持っている。同様に、CM 関節の回内か回外の運動が MP 関節への影響を及ぼさないため、互いに独立性を持っている。以上によって、拇指において隣接の関節同士の排反性・独立性を Table.2.2 にまとめた。

Table.2.2 拇指の隣接の関節同士における運動の排反性・独立性

	IP 屈曲	IP 伸展	MP 屈曲	MP 伸展	CM 屈曲	CM 伸展	CM 回内	CM 回外
IP 屈曲	-	排反	独立	排反	-	-	-	-
IP 伸展	排反	-	独立	独立	-	-	-	-
MP 屈曲	独立	独立	-	排反	独立	独立	独立	独立
MP 伸展	独立	独立	排反	-	独立	独立	独立	独立
CM 屈曲	-	-	独立	独立	-	排反	独立	独立
CM 伸展	-	-	独立	独立	排反	-	独立	独立
CM 回内	-	-	独立	独立	独立	独立	-	排反
CM 回外	-	-	独立	独立	独立	独立	排反	-

以上のように、隣接の関節同士に対する排反性・独立性の分析によって、四指が拇指と相違であることを確認できた。四指では、DIP と PIP 関節の間に排反性が存在しているが、拇指の各関節の間に排反性は存在せず、互いに独立性を持っている。客観的に拇指の性能の高さを示したため、日常頻出の動作パターンの中に常に拇指が四指と組み合わせて動作をこなした原因の一つと理解できた。ゆえに、本研究ではこの客観の事実に基づいて、五指の中から、四指と拇指を分けて考慮して、以降の内容において動作の排反性・独立性の分析に使用する。それに、第3、4章で説明するが、拇指と四指に対して、それぞれ特化のメカニズムを構築する。

## 2.2 動作の排反性・独立性分析

関節自体、および隣接の関節同士の排反性・独立性の分析結果を用いて、動作の間の排反性・独立性を明確する。そのため、まず日常頻出の10パターンの動作について詳しく説明する必要がある。

M. R. Cutkosky らは、人間の手において、よく使う動作を16パターンに分類された [M. R. Cutkosky 1989] が、Bullock らが日常生活において最も頻出する動作を Fig.2.6 のように10パターンに絞り出された [I. Bullock 2013]。

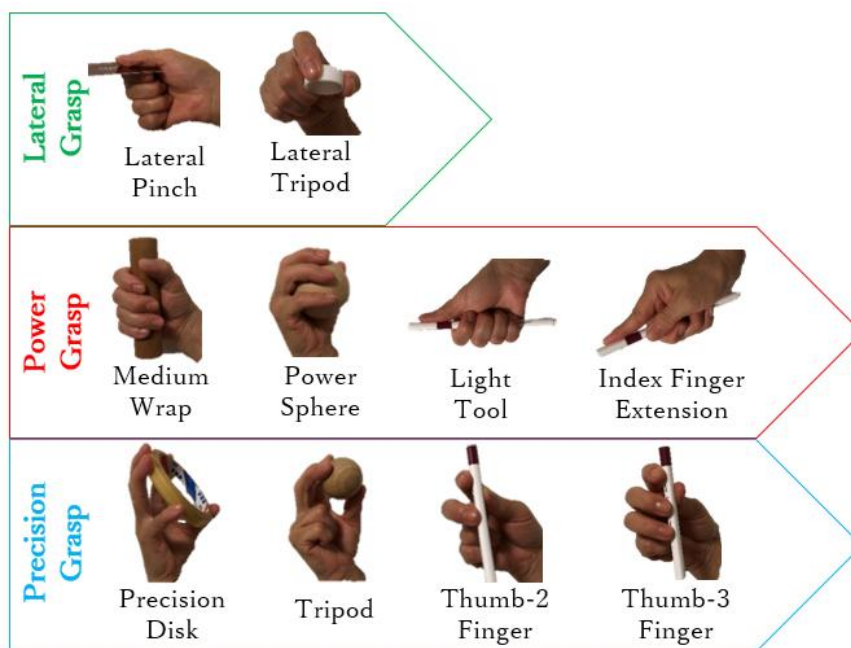


Fig.2.6 日常頻出の10パターンの動作[X. Yong 2019 より]

Fig.2.6 に示した10パターンの動作に対して、以下のようにそれぞれを分析する：

1. Lateral Pinch：拇指は四指と並列な位置にある。四指が少し屈曲してから、拇指CM関節が屈曲し始めて、拇指の指先が示指の中節骨の側面と接触して、薄い平面状の物体を挟んだ側面把握に成り立つ。

2. Lateral Tripod：拇指は四指と並列になって、拇指CM関節が四指と一緒に屈曲して、示指は物体の形状によって上から押しながら、拇指の指先が中指中節骨の側面とともに、小さい球状の物体を挟む。また、環指と小指は引き続き完全に屈曲するまでに運動する。

3. Medium Wrap：拇指は四指と対立な位置で、同時に屈曲しながら、棒状の物体を握る。



4. **Power Sphere** : 拇指は四指と対立な位置で、同時に屈曲しながら、球状の物体を包み込む姿勢を成り立つ。それに、四指が物体の形に沿って、屈曲具合は異なって、球体に馴染み把持になる。

5. **Light Tool** : 拇指は四指と並列な位置になる。拇指が伸展の姿勢を維持して、細い棒状の物体を支えながら、四指が屈曲して物体を握り込む姿勢を形成する。

6. **Index Finger Extension** : 拇指は四指と並列な位置になる。拇指と示指が伸展のまま、細い棒状の物体を支持しながら、残る指は引き続き屈曲して、異なる屈曲具合で物体を握り込む。

7. **Precision Disk** : 拇指は四指と対立な位置になる。五指が屈曲して、盤状の物体を指先で接触する。四指が物体の形に沿って、屈曲具合は異なるようになって、物体に馴染み把持をして、五点把持に形成する。

8. **Tripod** : 拇指は四指と対立な位置になる。拇指、示指と中指の指先は先に球状の物体を掴んでから、物体と接触しない小指と環指が引き続き完全に屈曲するまで運動する。

9. **Thumb-2 Finger** : 拇指は四指と対立な位置になる。五指が屈曲して、拇指、示指と中指の指先は先に細い棒状の物体と接触になってから、物体と接触しない小指と環指が引き続き完全に屈曲するまで運動して、結果的に三点把持に形成する。

10. **Thumb-3 Finger** : 拇指は四指と対立な位置になる。五指が屈曲して、拇指、示指、中指と環指の指先は先に細い棒状の物体と接触になってから、物体と接触しない小指が引き続き完全に屈曲するまで運動して、結果的に四点把持になる。

以上によって、各動作パターンは四指の屈曲・伸展と拇指の屈曲・伸展・回内・回外で成り立っているが、物体の把持に対して、四指の内転・外転は直ちに関与せず、四指の把持範囲の拡大に性能を発揮する[雍 2015]。ゆえに、幼児用義手の厳しい制限条件のもとで、本研究は優先的に各動作パターンにおける把持性能に集中して、四指 MP 関節の内転・外転の一自由度を削除する。ただし、把持範囲をできるだけ大きく保つため、MP 関節を一定の外転角度で固定する。

以上の各動作パターンの特徴に基づいて、前述したように、拇指は性能的に四指と異なって、常に四指と組み合わせていろんな動作パターンを果たしているため、拇指と四指をそれぞれ2種類の指とみなして、組み合わせの方式を変更しながら、動作パターンを多数に実現できるように、3種類のハンドを製作して、動作と動作の間の排反性・独立性を調べる同時に、実現可能な動作パターン数を明らかにする。

### 2.2.1 五指が共に屈伸するタイプ

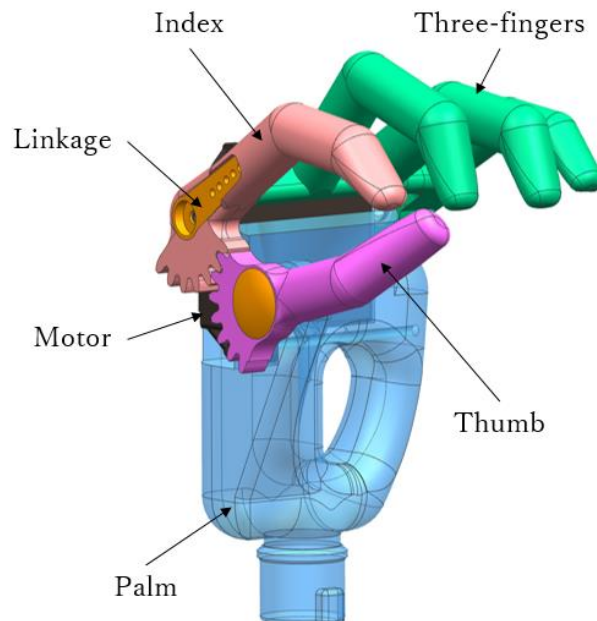


Fig.2.7 五指が共に屈伸するタイプ[X. Jing 2019]

前述したように、3種類のハンドの一つ目は多数の従来研究の同様に、1個のアクチュエーターを使用し、拇指と四指を共に屈曲・伸展するタイプである。Fig.2.7に示したように、拇指を四指と対立させて、CMとIP関節を一定の屈曲角度で固定して、MP関節の動きを開放して、屈曲・伸展ができる。四指において、示指のMP関節がリンクを介して、掌に埋め込んだ1個のアクチュエーターの回転軸を直結する。そして、他の三本指を一つのパーツとして、示指と連結する。それに、四指は全てのPIP、DIP関節を所要な角度で固定される。最後に、拇指のMP関節と示指のMP関節の間に、歯車の構造で運動の関係を築いて、メカニズムを構成する。結果的に、アクチュエーターの回転とともに、拇指と四指が同時に屈曲・伸展して、ハンド全体の開・閉動作を果たせる。ただし、設計のパラメータはTable.2.3のように示す。

Table.2.3 五指が共に屈曲・伸展するタイプの設計パラメータ

手指	関節	角度 (°)	長さ (mm)
示指	DIP	40	15
	PIP	30	18.5
	MP	-	34.5
	MP 外転	0	-
中指	DIP	65	16
	PIP	50	23
	MP	-	41
	MP 外転	0	-
環指	DIP	40	15
	PIP	55	20
	MP	-	38
	MP 外転	0	-
小指	DIP	35	13.5
	PIP	40	13
	MP	-	33.5
	MP 外転	0	-
拇指	IP	27	22
	MP	-	24
	CM	17.3	45.4
	CM 回内	90	-

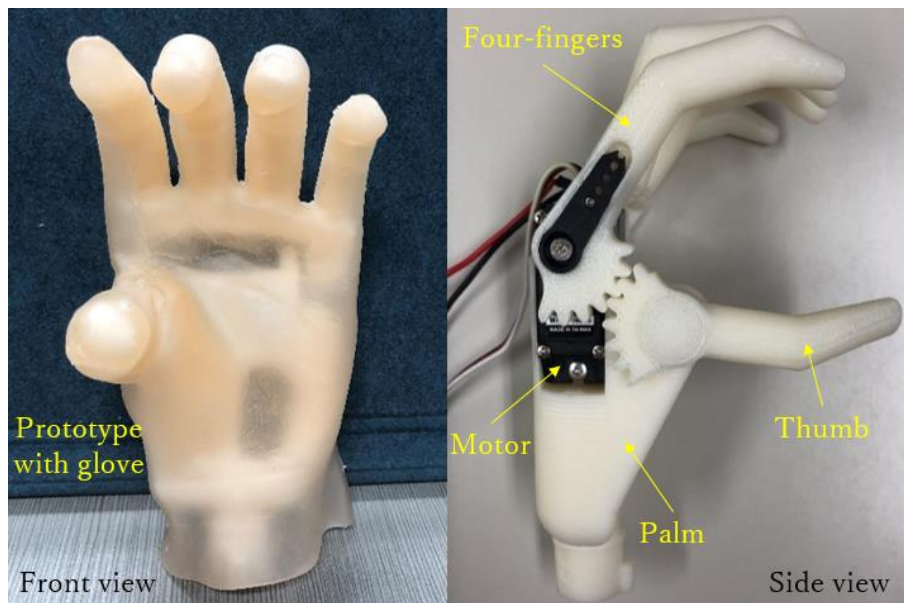


Fig.2.8 製作した五指が共に屈伸するタイプ

以上によって、製作したハンドは Fig.2.8 のように示す。このハンドを使って、動作検証実験を行って、実現可能な動作パターンを確認する。結果は Fig.2.9 のように表している。

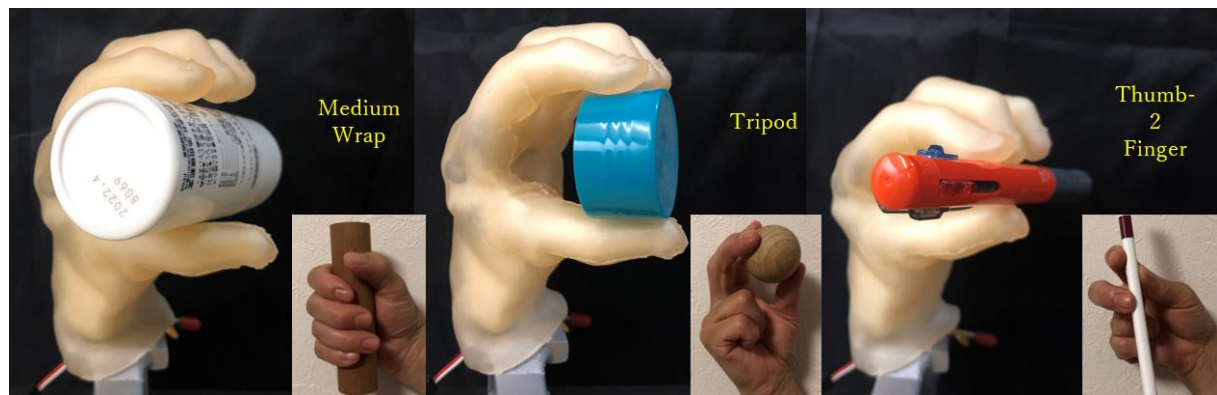


Fig.2.9 五指が共に屈伸するタイプによる実現した3パターンの動作

結果のように、拇指は四指と対立しながら、共に屈曲・伸展をして、握力把握と精密把握から、計3パターンの動作を実現できた（中には握力把握1パターン、精密把握2パターン）。中には、精密把握の Tripod、Thumb 2 finger において、拇指、示指と中指の指先による三点把持が成り立ったが、環指・小指は示指・中指の MP 関節と同じ角度になって、屈曲できない原因で、操作空間を占められて、使用者が直感的に使うと屈曲できなかった環指・小指はほかのものとぶつかったり、別の動作パターンに移ったりする問題が生じる。それに、拇指の回内・回外は存在しないため、側面把握の2パターンが実現できなかった。一方、これら実現できた動作パターンから排反性・

独立性の結果も得られる：拇指と四指が初期位置から徐々に屈曲して，握力把握の Medium wrap の把持範囲に入って，なにも把持をさせないなら，引き続き精密把握の Tripod の把持範囲に進入する．同様に，把持をさせなければ，五指がさらに屈曲して，精密把握の Thumb 2 finger の範囲内に進む．そのため，この3パターンの動作は互いに独立性を持つと理解できる同時に，同じ遷移していく動作姿勢グループにまとめられる．

### 2.2.2 四指が屈伸・拇指が回転するタイプ

次に，3種類のハンドの二つ目は四指が屈伸・拇指が回転するタイプとなり，五指が共に屈伸するタイプによって発展したものである．具体的に，四指の屈曲・伸展を変わらずに，一つ目のタイプのように，拇指の屈曲・伸展のみを開放した組み合わせから，拇指の屈曲・伸展を封鎖して回内・回外だけとの組み合わせによって，区別を明確するタイプである．本来なら，1個のアクチュエーターを使用して，運動を定めたメカニズムで拇指の回転を四指の屈伸と繋げるが，四指が屈曲しながら，拇指が回転して，四指と対立あるいは並列の姿勢を一つしか選べなくなる．要するに，実現可能な動作パターンにおいて，並列の場合では，新しい動作パターンを表せるが，対立の場合では，再び一つ目のタイプに戻り，3パターンになる．動作の排反性・独立性を調べる同時に，多数の動作パターンの実現も本研究の狙いであるため，二つ目のタイプには2個のアクチュエーターを使用し，それぞれ四指の屈曲・伸展、拇指の回内・回外を駆使する．

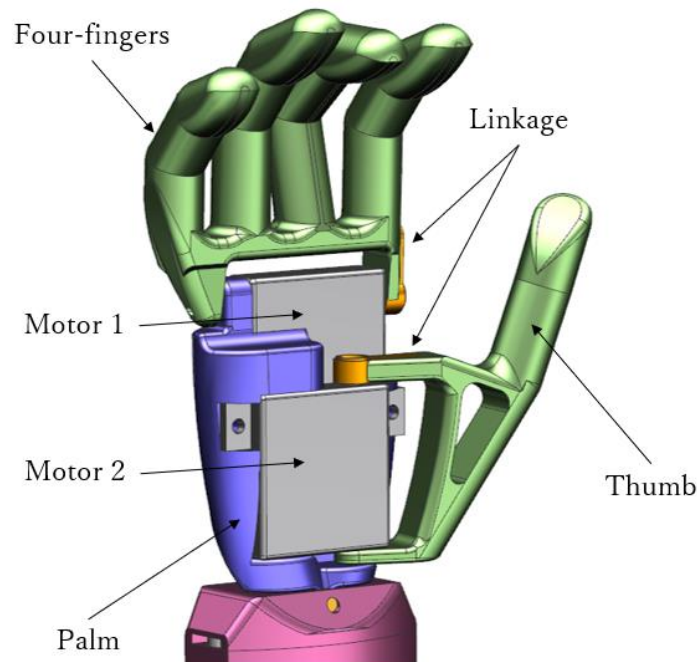


Fig.2.10 四指が屈伸・拇指が回転するタイプ[X. Jing 2019]

よって、二つ目の四指が屈伸・拇指が回転するタイプを Fig.2.10 に示したように設計した。拇指 CM 関節の回内・回外を掌にあるモータ 2 で駆動して、屈曲・伸展する CM、MP、IP 関節を一定の角度で固定する。四指において、全ての PIP、DIP 関節を所要な角度で固定されて、示指の MP 関節がリンクを介して、掌に埋め込んだモータ 1 の回転軸を直結して、四指の MP 関節を同時に屈曲・伸展する。結果的に、拇指と四指はそれぞれのモータで運動しながら、動作の排反性・独立性の分析範囲を拡大できるほか、一つ目のタイプによる実現した動作パターンを確保できる同時に、新たな動作パターンの実現を調べられる。ただし、設計のパラメータは Table.2.4 のように示す。

Table.2.4 四指が屈伸・拇指が回転するタイプの設計パラメータ

手指	関節	角度 (°)	長さ (mm)
示指	DIP	30	20
	PIP	40	15
	MP	-	35
	MP 外転	0	-
中指	DIP	41	20
	PIP	64.8	19.1
	MP	-	39.4
	MP 外転	0	-
環指	DIP	30	20
	PIP	40	17
	MP	-	38
	MP 外転	0	-
小指	DIP	30	15
	PIP	40	15
	MP	-	27.8
	MP 外転	0	-
拇指	IP	5	19
	MP	14.7	20
	CM	10	42.6
	CM 回転	-	-



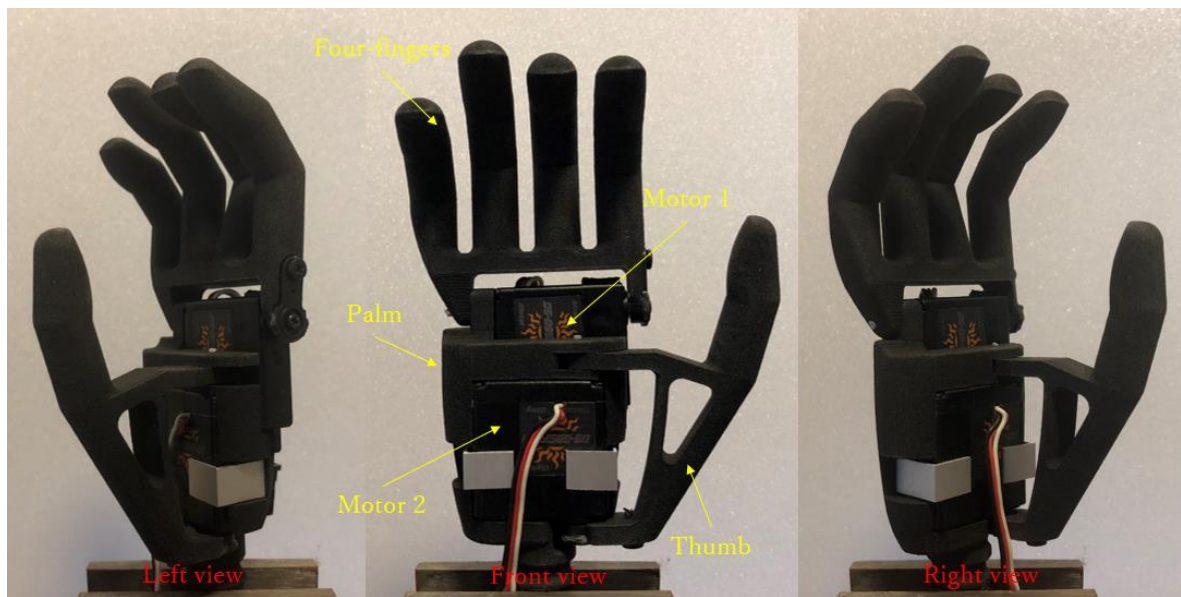


Fig.2.11 四指が屈伸・拇指が回転するタイプ

以上によって、製作した二つ目のハンドは Fig.2.11 のように示す。このハンドを使って、動作検証実験を行って、実現可能な動作パターンを確認する。結果は Fig.2.12 のように表している。

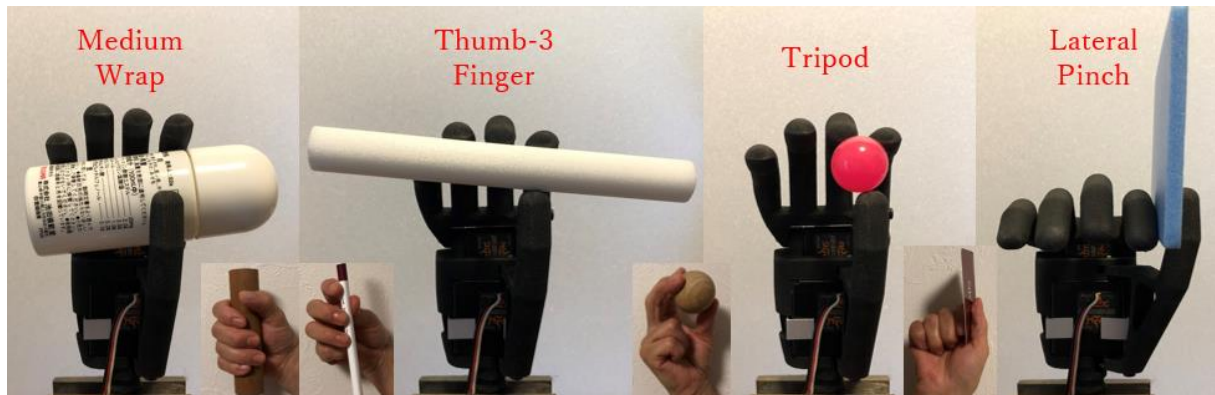


Fig.2.12 四指が屈伸・拇指が回転するタイプによる実現した4パターンの動作

結果のように、二つ目のタイプでは全部で4パターンの動作の実現を確認できた。具体的に、拇指の回転と四指の屈伸がそれぞれのモータで駆動しているため、拇指を回内して、四指と対立になると、四指を屈曲して、一つ目のタイプと同様に、握力把握の Medium wrap、精密把握の Tripod と Thumb 3 finger、計3パターンの動作を再現できて、互いに独立性を持ちながら、同じ遷移していく動作姿勢グループに入った。中には、精密把握の Tripod において、拇指、示指と中指の指先による三点把持が成り立ったが、環指・小指は示指・中指の MP 関節と同じ角度になって、屈曲できないため、完全に Tripod に成し遂げたと言えない。同じく、Thumb 3 finger において、拇指、

示指、中指と環指の指先による四点把持が形成したが、小指はほかの指の MP 関節と同じ角度になって、更なる屈曲はできないため、動作パターンに問題が残っている。

一方、四指を先に屈曲して、拇指は回外の状態から徐々に回内して、側面把握の Lateral pinch が実現できた。しかしながら、拇指の末節骨は示指 DIP 関節の側面と接触になって、物が滑り落ちやすいため、把持の安定性を懸念する。当然に拇指 CM 関節に更なる屈曲角度を与えると解決できるが、また四指と対立になるときに精密把握に影響を及ぼしてしまう。それに、使用者による直感的な操作において、側面把握は拇指が示指の PIP 関節の側面に向けて、屈曲して把持をこなしているため、使用する時に問題が生じる恐れがある。

それに、これらの動作パターンにおける排反性・独立性の結果をまとめると、拇指の CM 関節の回内と回外が互いに排反性を持っている原因で、動作パターンにも反映された。具体的に、拇指が四指と対立になるときに、実現できた握力把握の Medium wrap、精密把握の Tripod と Thumb 3 finger は互いに独立性を持っているが、拇指が四指と並列になって、実現できた側面把握の Lateral pinch は対立の3パターンの動作の間に独立性がなく、排反性を持たれた。

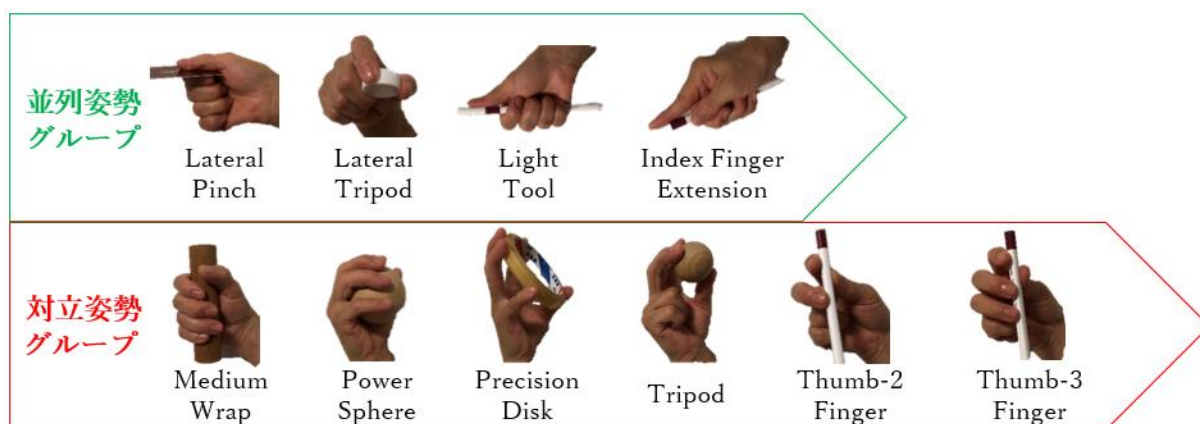


Fig.2.13 動作の排反性・独立性による動作パターンの新たな分類表

この結論に基づいて、Fig.2.6 に示した 10 パターンの動作を新たに Fig.2.13 のように分類できる。この新しい分類表によって、本研究の方向を導かれて、新しい視点からハンドの開発を行う。

### 2.2.3 排反の動作を結合するタイプ

次に、3種類のハンドの三つ目は排反の動作を結合するタイプとなり、Fig.2.14 の新しい動作パターンの分類に従って、前述した二つのタイプから発展してきたものである。具体的に、四指の DIP 関節は依然と所要な角度で固定されるが、把持物体に対する接触面積を増やすため、PIP 関節の自由度を開放する。また、拇指の IP、MP 関節は一定の角度で固定させるが、CM 関節の屈曲・伸展、および回内・回外の自由度を同



時に開放する。

一方、前述した二つのタイプによる実現できた動作パターンを保つうえに、互いに排反性を持った動作パターンを二つのグループに分けられる：

1. 拇指が四指と対立するグループ：互いに独立性を持った握力把握から精密把握までの動作パターンである。
2. 拇指が四指と並列するグループ：側面把握の動作パターンである。

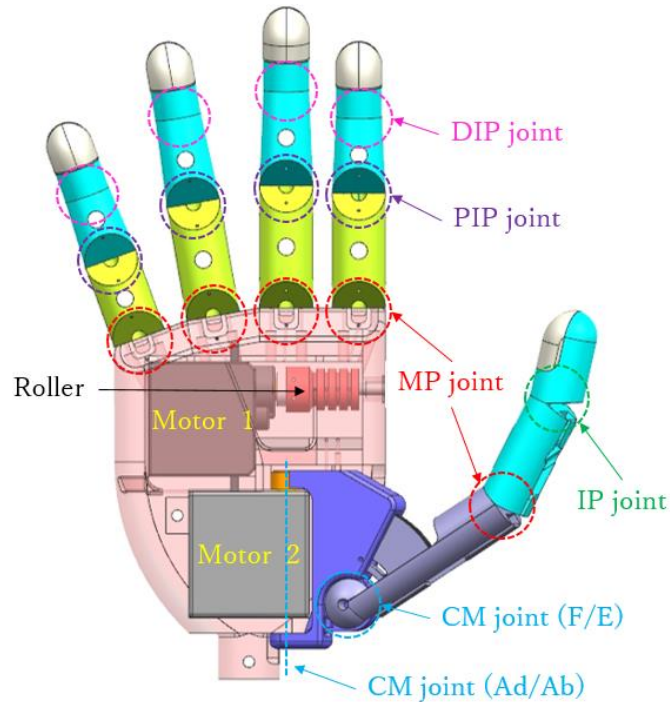


Fig.2.14 排反の動作を結合するタイプ[X. Jing 2018]

この二つのグループに基づいて、三つ目のタイプにおけるアクチュエーターの配置として、モータ1は四指のみならず、拇指も含めて一緒に屈曲・伸展させる。モータ2は変わらずに拇指の回内・回外を果たす。よって、設計した三つ目の排反の動作を結合するタイプは Fig.2.14 のように示す。

また、設計のパラメータは Table.2.5 のように表す。

Table.2.5 排反の動作を結合するタイプの設計パラメータ

手指	関節	角度 (°)	長さ (mm)
示指	DIP	10	20
	PIP	-	20
	MP	-	30
	MP 外転	0	-
中指	DIP	10	22
	PIP	-	25
	MP	-	32
	MP 外転	0	-
環指	DIP	10	20
	PIP	-	23
	MP	-	30
	MP 外転	10	-
小指	DIP	10	20
	PIP	-	18
	MP	-	22
	MP 外転	15	-
拇指	IP	15	25
	MP	30	30
	CM	-	50
	CM 回転	-	-

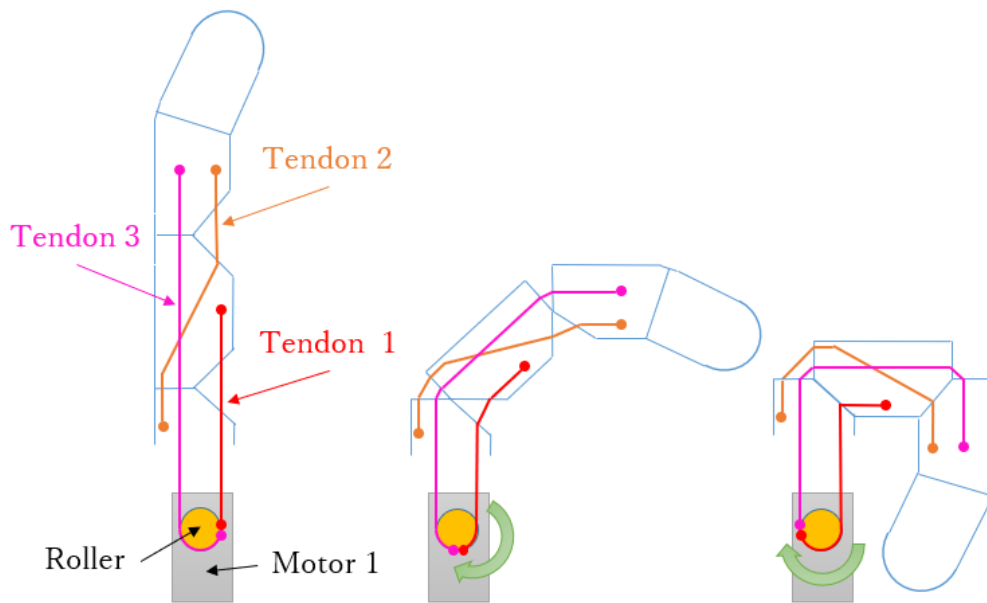


Fig.2.15 四指のメカニズム

それに、四指に使用するメカニズムは下記の Fig.2.15 に示したように、モータ 1 の回転軸を時計回りすると、赤色のワイヤ 1 を巻き取られて、MP 関節が屈曲し始まる。同時に、橙色のワイヤ 2 は MP 関節の屈曲によって、伸展側の方から徐々に出され続けるが、ワイヤ 2 の長さは一定であるため、MP 関節の伸展側に出された量は、PIP 関節の屈曲側から減少する。よって、PIP 関節も MP 関節と共に屈曲することができるようになる。さらに、この間にピンク色のワイヤ 3 も放出されて、手指を伸展させるときに、モータ 1 の逆回転によって巻き取られて、伸展を果たせる。

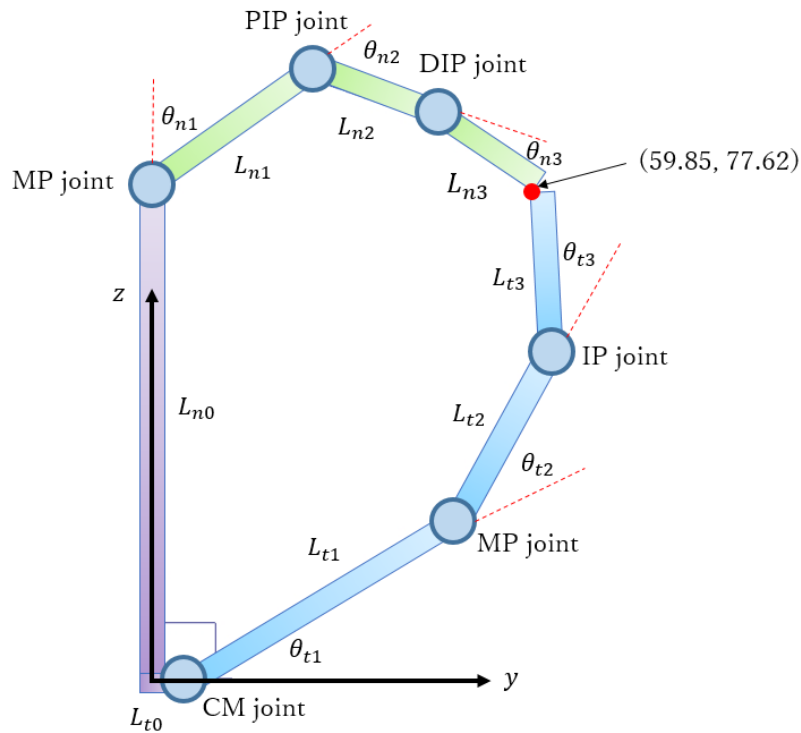


Fig.2.16 拇指が四指と対立姿勢の運動学モデル

一方、拇指の指先が同時に精密把握のときに、示指・中指の指先と接触して、側面把握のときの示指の中節骨の側面と接触するように、まずは Fig.2.16 のように、対立の姿勢で運動学モデルを立ち上げて、それぞれ四指と拇指について、下記の式を得られる：

$$\begin{bmatrix} y \\ z - L_{n0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_{n1} & \sin(\theta_{n1} + \theta_{n2}) & \sin(\theta_{n1} + \theta_{n2} + \theta_{n3}) \\ \cos \theta_{n1} & \cos(\theta_{n1} + \theta_{n2}) & \cos(\theta_{n1} + \theta_{n2} + \theta_{n3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{n1} \\ L_{n2} \\ L_{n3} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} y - L_{t0} \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{t1} & \cos(\theta_{t1} + \theta_{t2}) & \cos(\theta_{t1} + \theta_{t2} + \theta_{t3}) \\ \sin \theta_{t1} & \sin(\theta_{t1} + \theta_{t2}) & \sin(\theta_{t1} + \theta_{t2} + \theta_{t3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{t1} \\ L_{t2} \\ L_{t3} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

ただし、四指のメカニズムによって、境界条件  $\theta_{n1} = \theta_{n2}$  を使い、各設計のパラメータを代入して、拇指指先が四指指先との接触点 (59.85, 77.62) を算出できる。さらに、この姿勢での四指 MP 関節の屈曲角度は 54.66 度となり、拇指 CM 関節の屈曲角度は 31.64 度である。これによって、四指と拇指の初期位置から得た屈曲角度までの関係式を書ける：

$$0.12\theta_{n1} = \theta_{t1} - 25^\circ \quad (2.3)$$

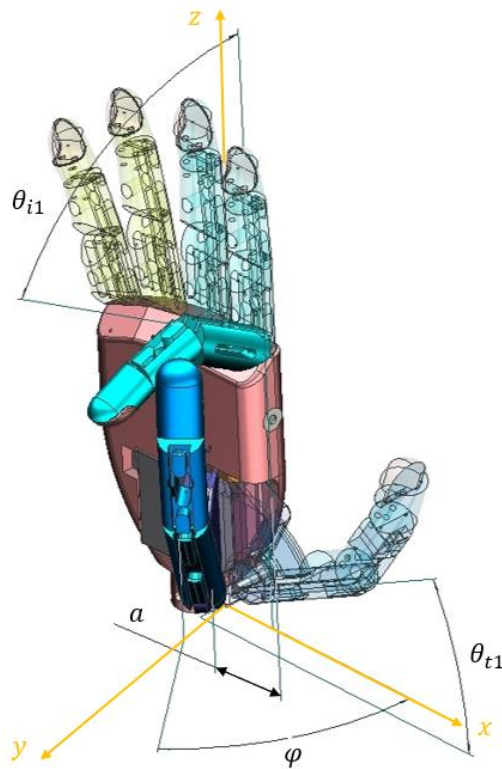


Fig.2.17 拇指が四指と並列姿勢のモデル

次に、これらの結果を用いて、Fig.2.17 に示したように、拇指が四指と並列の姿勢でもモデルを立ち上げて、拇指が回転しながら、屈曲した示指の側面で成り立った平面に対して、拇指末節骨の指腹を常に接触させて、示指中節骨の側面との適切な接触点を探し出す。ただし、モータ2の回転中心を座標原点として、 $\varphi$ は拇指の回転角度で、 $a$ はモータ2の回転中心から示指側面に存在する平面までの距離である。それに、 $L$ を座標原点から拇指末節骨の指腹の距離にして、拇指末節骨の指腹における空間位置を得る：

$$\begin{bmatrix} L_{t3x} \\ L_{t3y} \\ L_{t3z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ L \cos \theta_{t1} \sin \varphi \\ L \sin \theta_{t1} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

よって、拇指末節骨の指腹がそれぞれ示指側面の異なる位置と接触させることを仮定して、下記の接触点を得られる。ただし、 $L'$ は示指 MP 関節から接触点までの距離にする。

示指の基節骨の側面と接触する場合：

$$\begin{bmatrix} L_{i1x} \\ L_{i1y} \\ L_{i1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ L' \sin \theta_{i1} \\ L_{i0} + L' \cos \theta_{i1} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

示指の中節骨の側面と接触する場合：

$$\begin{bmatrix} L_{i2x} \\ L_{i2y} \\ L_{i2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ L_{i1} \sin \theta_{i1} + L' \sin 2\theta_{i1} \\ L_{i0} + L_{i1} \cos \theta_{i1} + L' \cos 2\theta_{i1} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

示指の末節骨の側面と接触する場合：

$$\begin{bmatrix} L_{i3x} \\ L_{i3y} \\ L_{i3z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ L_{i1} \sin \theta_{i1} + L_{i2} \sin 2\theta_{i1} + L' \sin(2\theta_{i1} + 15^\circ) \\ L_{i0} + L_{i1} \cos \theta_{i1} + L_{i2} \cos 2\theta_{i1} + L' \cos(2\theta_{i1} + 15^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

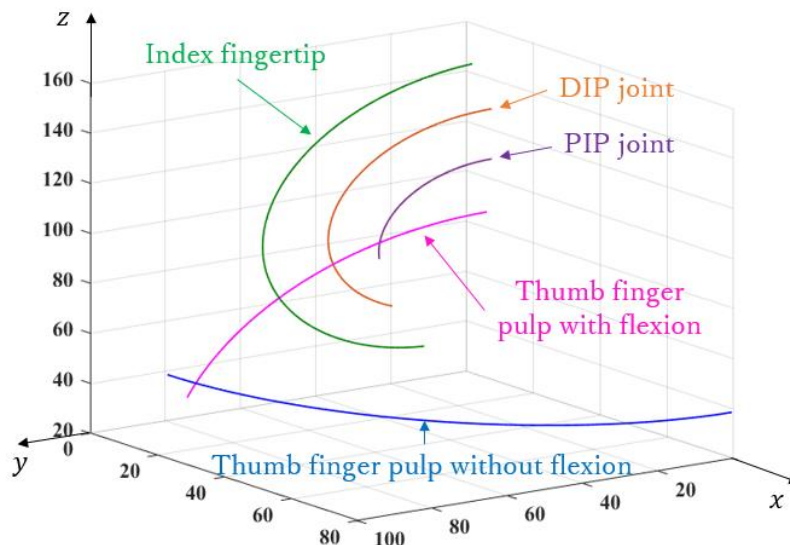


Fig.2.18 拇指末節骨の指腹が四指側面との接触運動軌跡（単位：mm）

ゆえに、拇指末節骨の指腹が示指側面に存在する平面の運動軌跡を計算できる。結果は Fig.2.18 のように示す。図の中に、示指側面において、紫色の PIP 関節側面の屈曲軌跡、橙色の DIP 関節側面の屈曲軌跡、および緑色の指先側面の軌跡は同じ平面に存在する。また、青色は拇指末節骨の指腹が伸展状態を保ちながら、回内する軌跡である。それに、ピンク色は拇指末節骨の指腹が四指側面と接触した運動軌跡になる。この中には、理想であった示指中節骨の側面にある中間の接触点を選べるようになった。

以上によって、五指を同時に屈曲させて、対立の精密把握と並列の側面把握を両立できるようになった。そして、計算の結果に従って、五指屈曲のメカニズムを構築して、ハンドを Fig.2.19 のように製作した。



Fig.2.19 排反の動作を結合するタイプ

この三つ目のタイプを用いて、動作検証実験を行って、実現可能な動作パターンを確認する。結果は Fig.2.20 のように表している。

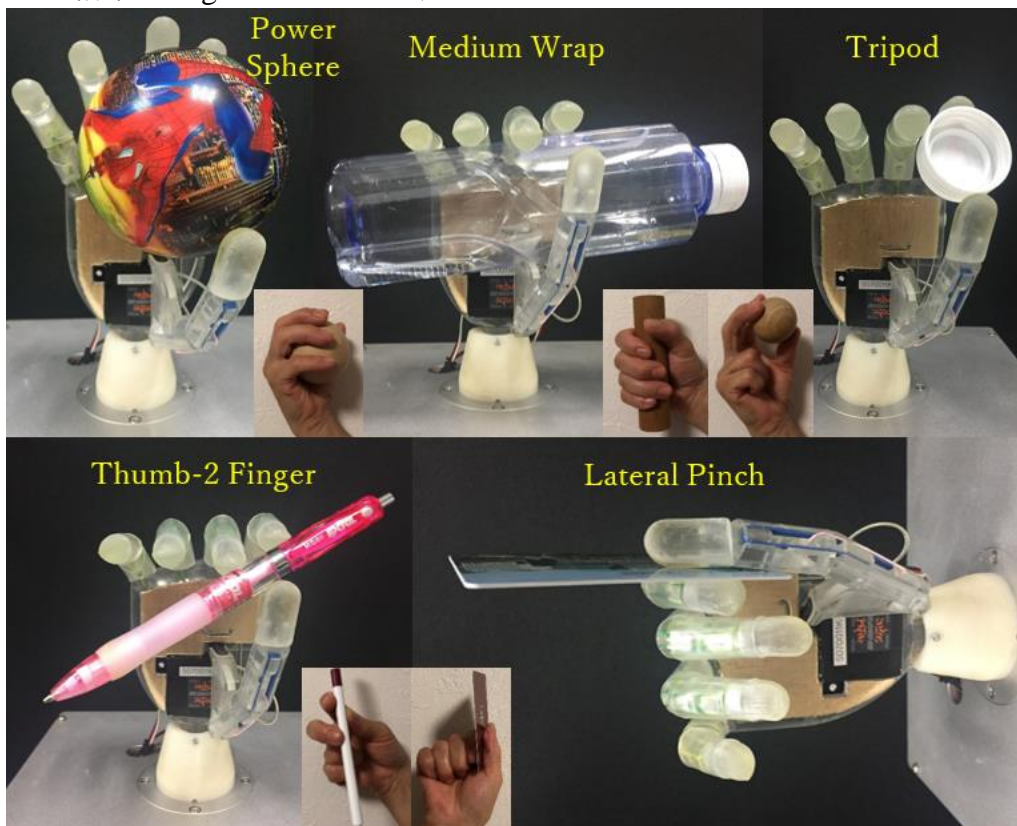


Fig.2.20 排反の動作を結合するタイプによる実現した5パターンの動作



結果のように、三つ目のタイプでは全部で5パターンの動作の実現を確認できた。具体的に、拇指が四指と対立になると、同時に屈曲していく五指は、握力把握の Power sphere と Medium wrap、精密把握の Tripod と Thumb 2 finger、計4パターンの動作を再現できた。特に新しく実現できた Power sphere は、四指 PIP 関節の自由度を開放して、球体との接触面積の増加によって、把持成功に繋がったと判断できる。これらの動作パターンは互いに独立性を持ちながら、同じ遷移していく動作姿勢グループに入った。しかしながら、握力把握の Power sphere において、環指と小指が差動機能は存在しないため、五指との接触にならず、球体の体積が小さければ滑り落ちやすくなる恐れが存在する。それに、精密把握の Tripod において、拇指、示指と中指の指先による三点把持が成り立ったが、環指・小指は示指・中指の MP 関節と同じ角度になって、屈曲できないため、完全に Tripod に成し遂げたとはいえない。同じく、Thumb 2 finger において、拇指、示指、中指と環指の指先による四点把持が形成したが、小指はほかの指の MP 関節と同じ角度になって、更なる屈曲はできないため、動作パターンに問題が残っている。

一方、拇指は回外の状態から少し回内して、四指と並列になると、五指を同時に屈曲させて、側面把握の Lateral pinch を再現できた。二つ目のタイプから進化になって、拇指末節骨の指腹は示指中節骨の側面と接触になって、安定的に物を挟めるようになった。

それに、これらの動作パターンにおける排反性・独立性の結果をまとめると、拇指の CM 関節の回内と回外が互いに排反性を持っているため、Fig.2.13 の結論と同様、動作パターンを二つの動作姿勢グループに分けられたことを再び検証できた。要するに、拇指が四指と対立になるときに、実現できた握力把握の Power sphere と Medium wrap、精密把握の Tripod と Thumb 2 finger は互いに独立性を持っているが、拇指が四指と並列になって、実現できた側面把握の Lateral pinch は対立の4パターンの動作の間に独立性がなく、排反性を持たれた。さらに、対立姿勢グループによる動作パターンにおいて、Power sphere→Medium wrap→Tripod→Thumb 2 finger の順に、把持物体のサイズが小さくなっていくと共に遷移していくことを確認できた。

最後に、この三つ目のタイプにおいて、アクチュエーター数は依然と2個使用したが、Fig.2.13 の新しい分類法によって、メカニズムを構成する理念は二つ目のタイプと異なった。この理念に従って、三つ目のタイプから踏まえて、本研究のデュアル把持モードによる単一駆動源で多動作・軽量型幼児用義手の開発に導く。

以上によって、試作した三つのハンドを下記の Table.2.6 にまとめる。



Table.2.6 試作した3種タイプの義手比較

	五指が共に屈伸するタイプ	四指が屈伸・拇指が回転するタイプ	排反の動作を結合するタイプ
仕様	幼児用	幼児用	成人用
モータ数	1	2	2
動作パターン数	3	4	5
重量	180g	159g	250g
理論把持力	37N	12N	29N
駆動方式	直接駆動	直接駆動	ワイヤ駆動

## 2.3 まとめ

本章において、研究目的の礎石となる動作の排反性・独立性を解析した。解析結果による視点から、幼児用筋電義手における従来研究の問題点をまとめると：

1. 少数のモータで重量を軽減できるが、独立性のみの動作を実現しているため、可能な動作数は少なくなる。
2. モータの増加によって、排反性の動作を加えることができたため、動作数は当然増加したが、重量がオーバーしてしまう。

この結論に至るまで、本章のアプローチとして、拇指、四指の各関節自体に対する排反性・独立性の分析をした。この概念を拡大して、関節同士の排反性・独立性の分析も実施した。さらに、動作の間に排反性・独立性を解明するために、10パターンの動作を分析して、四指と拇指が異なる性能を持つことを明らかにした。それを実証するために、それぞれ五指が共に屈伸するタイプと四指が屈伸・拇指が回転するタイプの2種類のハンドを作って比較した。結果として、10パターン動作を新たに対立姿勢グループと並列姿勢グループに分類することができた。この理念による新しい分類法に従って、排反の動作を結合するタイプのハンドを試作して、検証した結果は、単一駆動源で多動作・軽量型の幼児用義手に導く。

# 第3章 安定連動及び適応差動機能を備える四指の開発

---

3.1 四指の運動特性 .....	44
3.2 幼児の四指各指に適した受動伸展機能 .....	46
3.2.1 既存研究及び課題 .....	46
3.2.2 一対多伸展のメカニズム .....	47
3.2.3 受動伸展機能の省力化検証 .....	51
3.3 四指各指に応用する安定連動機能 .....	56
3.3.1 既存研究及び課題 .....	56
3.3.2 一対一屈曲のメカニズム .....	57
3.3.3 一対一屈曲のメカニズムによる機能の実現及び出力検証 .....	58
3.4 四指全体に適した適応差動機能 .....	76
3.4.1 既存研究及び課題 .....	76
3.4.2 回転摩擦のメカニズム .....	79
3.4.3 適応差動機能の動作検証 .....	101
3.5 まとめ .....	108

---

### 3.1 四指の運動特性

四指は掌と同じ平面に存在し、各指の長さは異なるが、関節自由度は同様である：DIP・PIP 関節は屈曲・伸展の一自由度が持ちながら、MP 関節は屈曲・伸展と外転・内転の二自由度を持つ。各指がそれぞれ独立に運動できるが、運動の特徴は類似している。物体を把持しようとする際に、手指が対象物に接近しながら、四指の各指関節が同時に屈曲して、螺旋状な軌跡を表し、自然な曲がり方になる[D. G. Kamper 2003]。物体と接触すると、先に形状に沿った馴染み把持が形成したら、加減した出力を出して、物体に把持力を与える。この一連の行為において、物体に接近するとき指関節の運動位置を把握できれば、以降の把持動作も順調に行えるようになる。すなわち、物体のアプローチにおける運動軌跡の安定性は把持行為には最も重要な一環である。

一方、四指全体が一つのグループとみなして、把持物体に対するプロセスとしては、アプローチのときに、四本の指が一緒に屈曲して、先に物体と接触した指が一時的に停止になり、残る指が継続的に運動して、次々と停止になると物体の形状に沿ったマッチングが形成し、四指全体が対象物に対する馴染み把持になる。すなわち、義手に四指全体の馴染み把持を有することによって、自然な把持し方を表せることにもかわらず、把持範囲の拡大、かつ接触面積の増加に伴う把持の安定性も向上できる。

それに、本章で使われる符号の表記を Table.3.1 のように示す。

Table.3.1 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	-	-	-	-	$K_{n1}$	$K_{n2}$	$K_{n3}$
駆動張力	$T_i$	$T_m$	$T_r$	$T_l$	$T_{n1}$	$T_{n2}$	$T_{n3}$
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	$f_{id}$	$f_{md}$	$f_{rd}$	$f_{ld}$	-	-	-

## 3.2 幼児の四指各指に適した受動伸展機能

第一章で述べたように、幼児の手指はサイズが非常に小さくて、軽量化の配慮を含め、スペース的に多くの機械要素を使用できるわけにはいかない。そのため、このセクションでは、四指の伸展動作における従来の関節ごとにバネを配置する方式に対して、一対多伸展のメカニズムを構築して、幼児に適した受動伸展機能を提案する。要するに、一つのバネで一つの関節を伸展させるたびに、残る関節が受動的に伸展することによって、必要なバネの数を最少にし、従来の三分の一に減少する。この新たな機能の実現に向けて、力学モデルで解析を行い、適切なバネを選定して、メカニズムを構築する。そして、従来のものと比較し、省エネ効果を検証して、有用性を確かめる。

### 3.2.1 既存研究及び課題

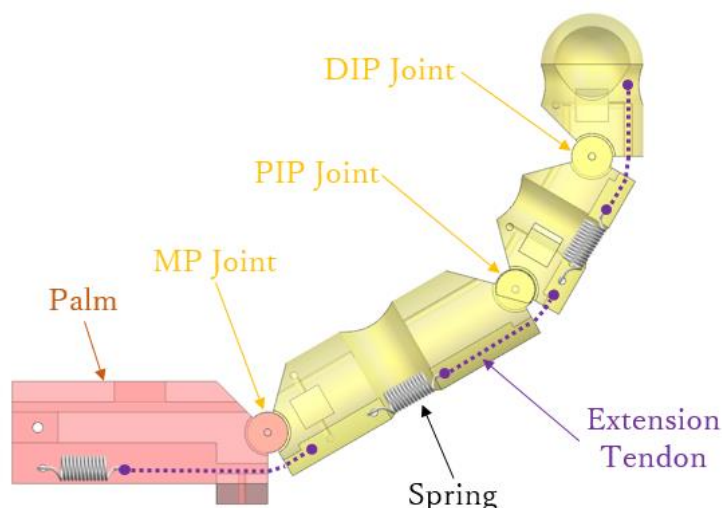


Fig.3.1 一対一伸展のメカニズム

指関節の伸展において、Fig.3.1に示したように、多くの従来研究では一つの関節に一つのバネを対応的に付けて、屈曲した関節にエネルギーを蓄えられて、伸展する際に、このエネルギーを利用し、伸展状態に自動的に回復させる一対一伸展のメカニズム[X. Yong 2019][C. D. Santina 2018][Y. Liu 2014]を使用している。このメカニズムにおいて、動力が不要する分、バネの反力によって出力を削減する。それに、最適化するために、各関節の重力と釣り合ったバネを選択するが、計算の手間がかかることはともかく、理論値と完全に合うバネはほぼ存在せず、理論値より大きいパラメータのものしか選ばない。そのため、三つのバネを重ねて、理論値より余分な弾性力がさらに出力を減らしてしまう。それ以外に、バネの弾性力は屈曲していく関節の運動軌跡にも影響を及ぼすため、みつのバネを使用することはコストパフォーマンスが低くなる課題も挙げられる。

### 3.2.2 一対多伸展のメカニズム

従来研究による挙げた課題を含め、幼児用義手の開発にあたる軽量化およびスペースの狭さの制限によって、本研究では一対多伸展のメカニズムを用いて受動伸展機能を実現する。

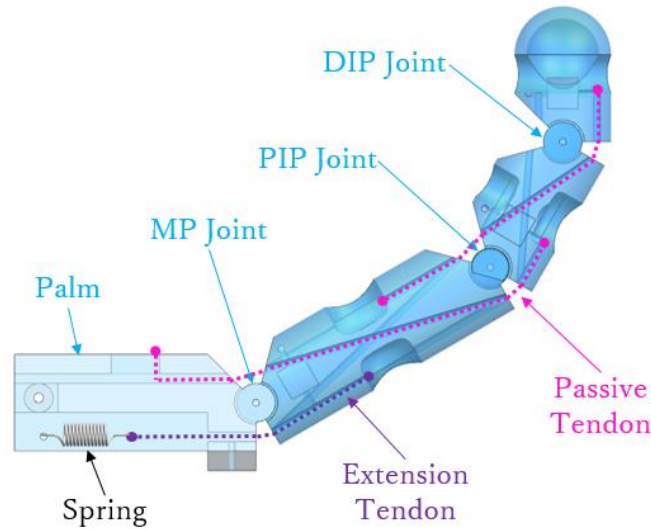


Fig.3.2 一対多伸展のメカニズム

Fig.3.2 のように、掌に埋め込む伸展側に作用する一つのバネを利用して、紫色のワイヤで基節骨と連結し、主動的に MP 関節のみを伸展させる。そして、ピンク色の 1 本のワイヤが掌から MP 関節の屈曲側を通して PIP 関節の伸展側を経て、中節骨に結ぶ。もう 1 本は中節骨から PIP 関節の屈曲側に通過して、DIP 関節の伸展側に通し、末節骨に固定する。そうすることによって、Fig.3.3 のように、紫色のワイヤが伸ばされたバネの自動回復によって、基節骨を伸展させるたびに、ピンク色のワイヤが受動的に伸展側のワイヤが対応する屈曲側に牽引され、伸展側が減少したワイヤの長さは屈曲側に足した。そのため、一つのバネで三つの関節をすべて伸展させる一対多伸展のメカニズムを果たした。

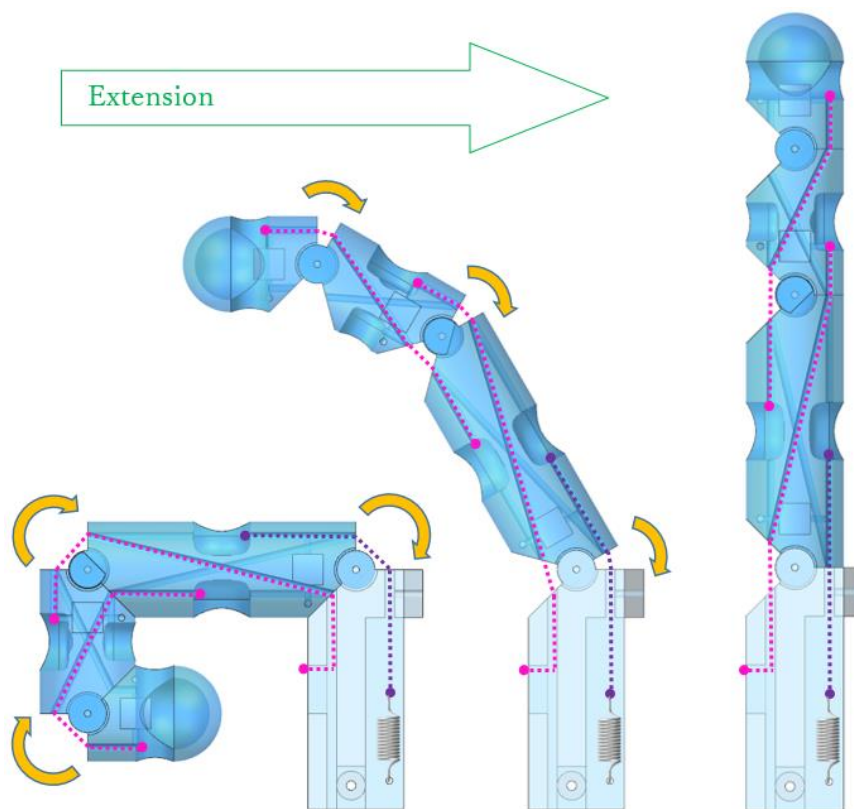


Fig.3.3 一对多伸展のメカニズムによる受動伸展機能の実現

一对多伸展のメカニズムに使用するバネを選定する際に、まずは指関節を任意の空間位置においても機能できるように、重力と釣り合う弾性力が最大の位置を調べる：ワイヤ牽引力の作用で指関節が屈曲し始めて、弾性力が相応に増加していく。しかしながら、重力の存在があったため、弾性力を最大にされるのは重力が反力として作用する第二・三象限に限る。また、第三象限の180度の位置において、重力が各関節に対するモーメントアームが最大であるため、この位置で解析を行う。

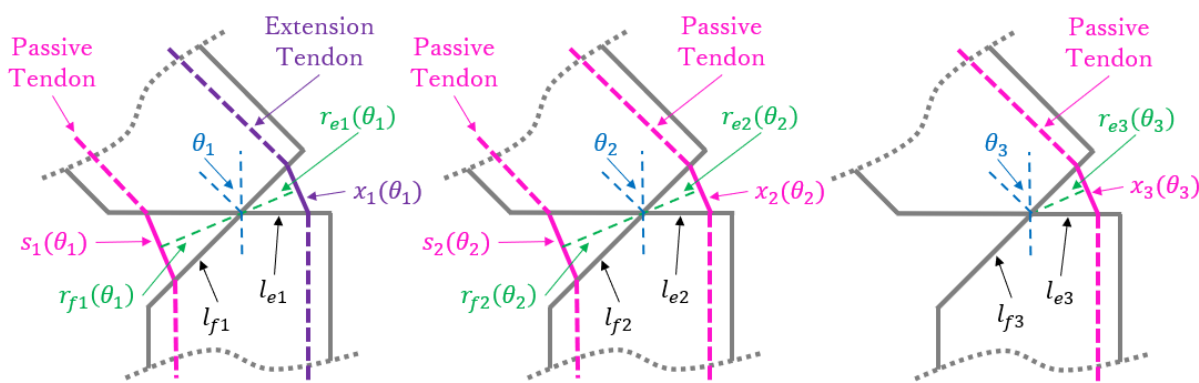


Fig.3.4 指関節の幾何学の関係 (左：MP 関節 中：PIP 関節 右：DIP 関節)



次に、第三象限で解析を行う前提に、指関節の幾何学の関係を明らかにしておく必要がある。Fig.3.4 に示したように、関節ごとのワイヤの状態を表す。ただし、以降の計算は四指の各指が同様であるため、四指の略称  $n$  を省略する。

したがって、幾何学の関係式を書ける：

$$\begin{cases} s_q(\theta_q) = 2l_{fq} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \\ x_q(\theta_q) = 2l_{eq} \sin\frac{\theta_q}{2} \\ r_{fq}(\theta_q) = l_{fq} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \\ r_{eq}(\theta_q) = l_{eq} \cos\frac{\theta_q}{2} \end{cases} \quad (3.1)$$

これに基づいて、受動のワイヤが指関節を伸展の初期位置に戻せるために、下記の式を満たさなければならない：

$$\begin{cases} s_1(0) = x_2\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ s_2(0) = x_3\left(\frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (3.2)$$

よって、設計のパラメータを求める（単位は mm）：

$$l_{fq} = l_{eq} = 2.5\sqrt{2} \quad (3.3)$$

ついでに、幾何学の関係式を算出する：

$$\begin{cases} s_q(\theta_q) = 5\sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \\ x_q(\theta_q) = 5\sqrt{2} \sin\frac{\theta_q}{2} \\ r_{fq}(\theta_q) = 2.5\sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \\ r_{eq}(\theta_q) = 2.5\sqrt{2} \cos\frac{\theta_q}{2} \end{cases} \quad (3.4)$$

そののち、第三象限で解析をし、バネの選定を行う。力学モデルが Fig.2.5 のように示す。

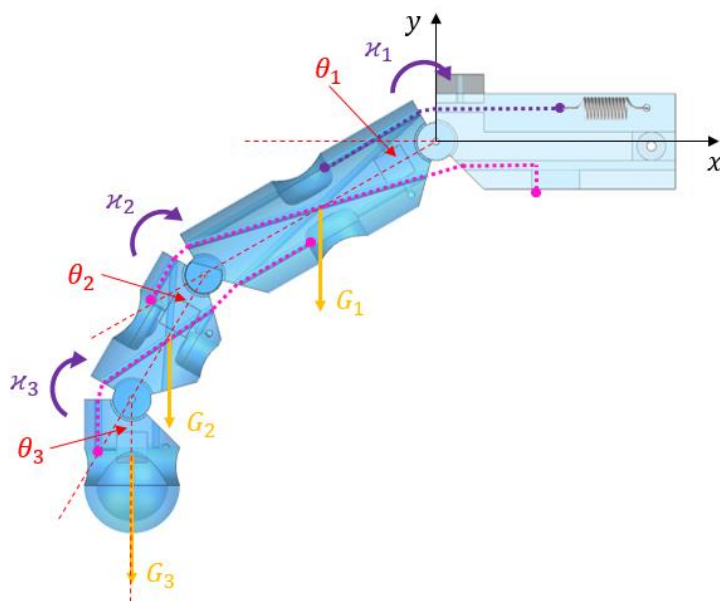


Fig.3.5 第三象限での力学モデル

したがって、力学の関係式は下記のように表す：

$$\kappa = \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (K_1 + \sigma_1)r_{e1} - \frac{\kappa_2 r_{f1}}{r_{e2}} \\ \frac{\kappa_1 r_{e2}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_3 r_{f2}}{r_{e3}} \\ \frac{\kappa_2 r_{e3}}{r_{f2}} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R_1 C_1 & L_1 C_1 + R_2 C_{12} & L_1 C_1 + L_2 C_{12} + R_3 C_{123} \\ 0 & R_2 C_{12} & L_2 C_{12} + R_3 C_{123} \\ 0 & 0 & R_3 C_{123} \end{bmatrix} \mathbf{G} \quad (3.5)$$

設定条件を代入することによって、弾性力の理論値を算出し、それと相応しいバネ（日本，株式会社アキュレイト，DE 規格引張コイルバネ）を選出する。結果は Table.3.2 に表示される。

Table.3.2 バネの選定結果

	示指	中指	環指	小指
弾性力理論値 N	0.2582	0.3162	0.3042	0.1501
選定バネ定数 N/mm	0.1710	0.1710	0.1710	0.1070
選定バネ初張力 N	0.3920	0.3920	0.3920	0.2450

以上の結果によって、バネが一つだけで DIP、PIP、MP 関節の伸展を果たして、提案した一対多伸展のメカニズムを指関節に応用できるようになり、受動伸展機能を実現する。

### 3.2.3 受動伸展機能の省力化検証

一対多伸展のメカニズムは一つのバネを使用しているが、従来研究における三つのバネで各自の関節を伸展させる一対一伸展のメカニズムと比較し、提案したメカニズムによる省力化を検証して、受動伸展機能の運動変化を確認する。

まずは従来研究の一対一伸展のメカニズムを幼児用義手に応用して、Fig.3.1 に示すように、本研究と同じく中指の寸法を例として、製作して比較する。前セクションに述べたバネの選択手法で各関節に対応するバネを選出する。一対一伸展のメカニズムにおける各関節の幾何学の関係は Fig.3.6 で表して、関係式は下記のように書ける。

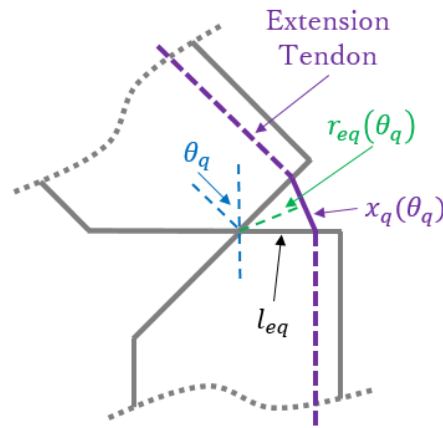


Fig.3.6 一対一伸展のメカニズムにおける関節の幾何学の関係

$$\begin{cases} x_q(\theta_q) = 2l_{eq} \sin \frac{\theta_q}{2} \\ r_{eq}(\theta_q) = l_{eq} \cos \frac{\theta_q}{2} \\ l_{eq} = 2.5\sqrt{2}\text{mm} \end{cases} \quad (3.6)$$

相応に、力学の関係式は：

$$\boldsymbol{\kappa} = \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 l_{e1}^2 \sin \theta_1 + \sigma_1 l_{e1} \cos \frac{\theta_1}{2} \\ k_2 l_{e2}^2 \sin \theta_2 + \sigma_2 l_{e2} \cos \frac{\theta_2}{2} \\ k_3 l_{e3}^2 \sin \theta_3 + \sigma_3 l_{e3} \cos \frac{\theta_3}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & L_1 + R_2 & L_1 + L_2 + R_3 \\ 0 & R_2 & L_2 + R_3 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \mathbf{G} \quad (3.7)$$

設定条件を代入することによって、弾性力の理論値を算出して、それと相応しいバネ（日本、株式会社アキュレイト、DE規格引張コイルバネ）を選出する。結果は Table.3.3 に表示される。

Table.3.3 一対一伸展のメカニズムにおけるバネの選定結果

	末節骨	中節骨	基節骨
弾性力理論値 N	0.0121	0.0658	0.2902
選定バネ定数 N/mm	0.0160	0.0450	0.1710
選定バネ初張力 N	0.0290	0.0860	0.3920

よって、選択したバネを各関節に装着して、一対一伸展のメカニズムによる中指を仕上げる同時に、本研究で提案した一対多伸展のメカニズムによる中指も作成し、Fig.3.7 に示したように、両者を比較する。

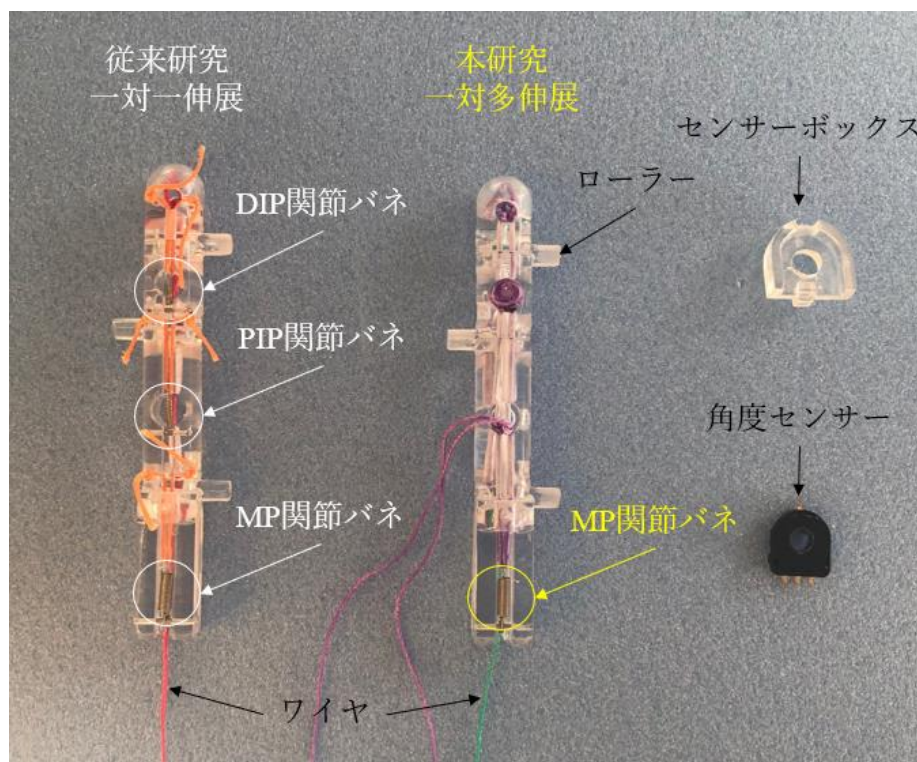


Fig.3.7 一対一・一対多伸展のメカニズムによる中指の比較（背面）

両者の異なるメカニズムに対して、エネルギーの消耗を客観的に反映するために、Fig.3.7のように制作した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）を各指関節の横からのローラーに嵌め込んで装着する。そして、バイスを使用して、指を第三象限に固定する。最後に、ワイヤに分銅を吊り、重量を追加しつつ、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それぞれ Fig.3.8（一対一伸展のメカニズム）、Fig.3.9（一対多伸展のメカニズム）のように示す。

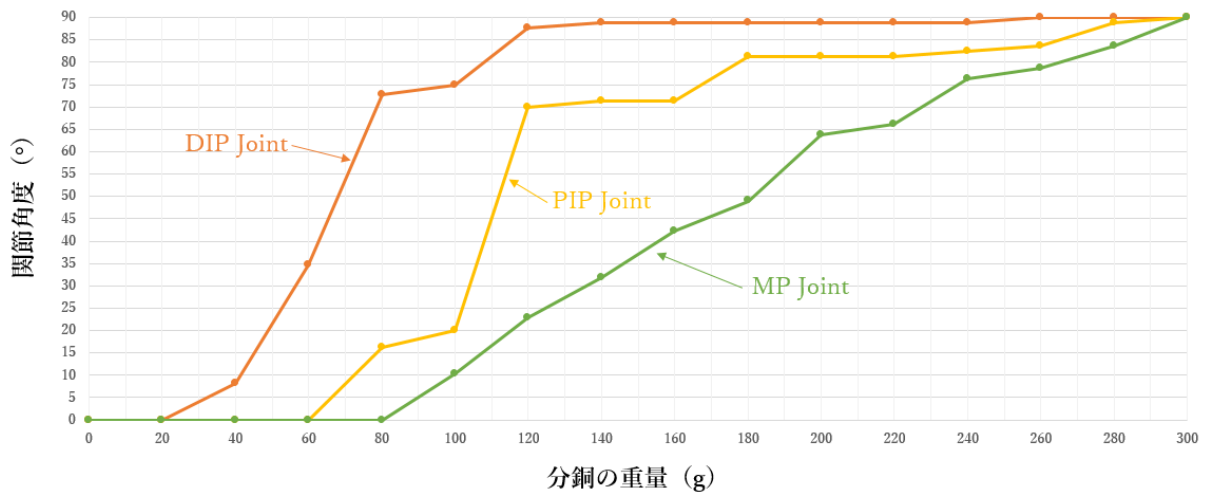


Fig.3.8.a 一対一伸展のメカニズムによる運動変化

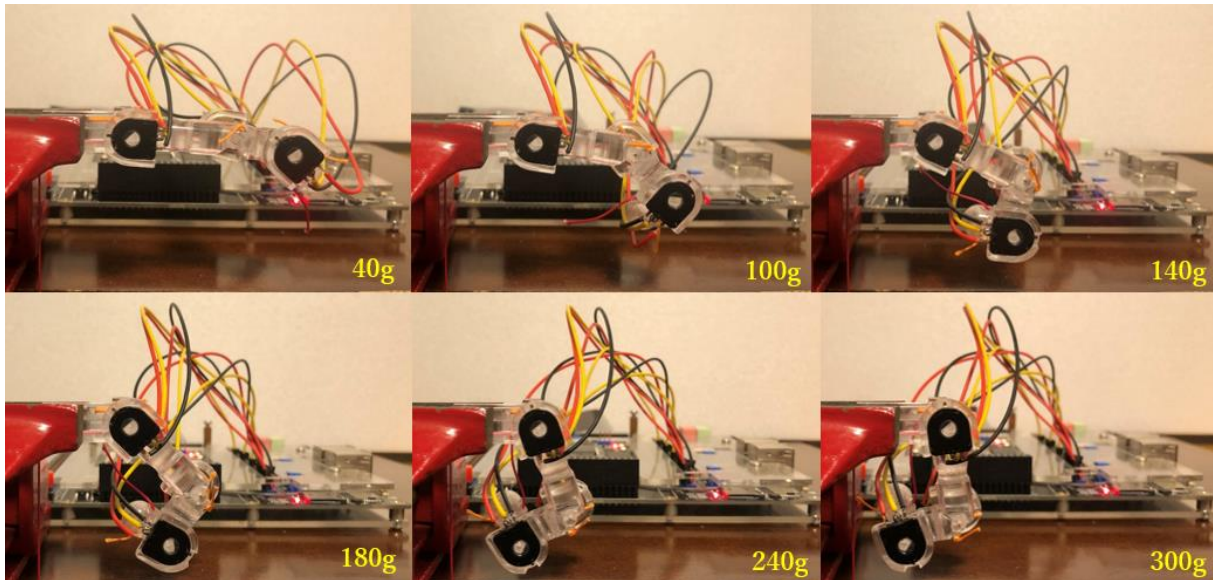


Fig.3.8.b 一対一伸展のメカニズムによる運動変化

Fig.3.8.a と Fig.3.8.b の結果によって、ワイヤに分銅を追加しながら、牽引力を増加するたびに、DIP 関節が先に屈曲して、80g になるまでに限界の 90 度に素早く近づいて、260g に至ると 90 度になった。そして、60g のときに PIP 関節が屈曲し始めて、300g になったら 90 度に到達した。最後に、MP 関節は 80g の時点で屈曲が開始して、300g で 90 度の屈曲になった。要するに、一対一伸展のメカニズムにおいて、三関節を完全に屈曲させる分銅は 300g の重量が必要である。



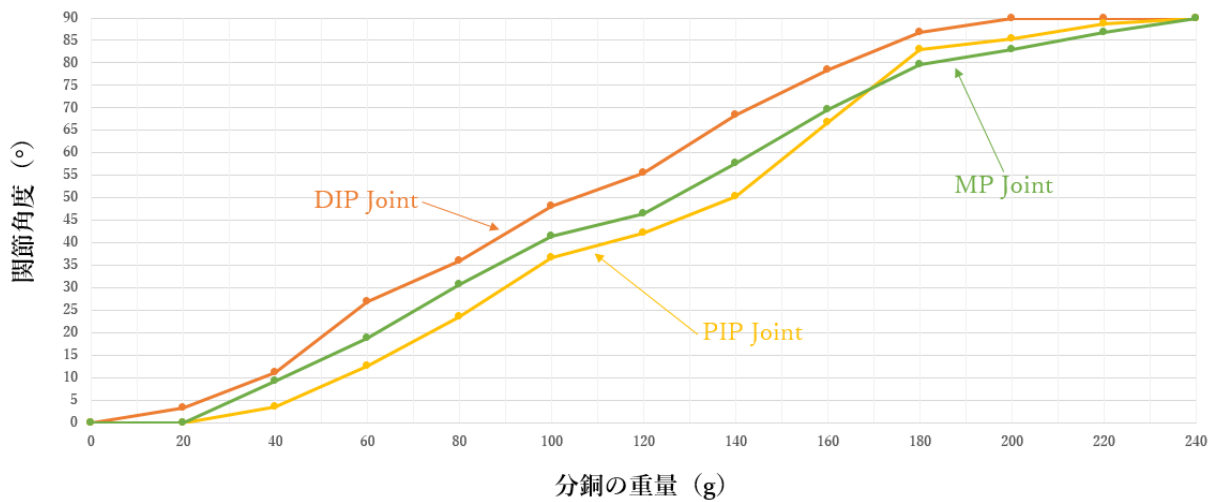


Fig.3.9.a 一對多伸展のメカニズムによる運動変化

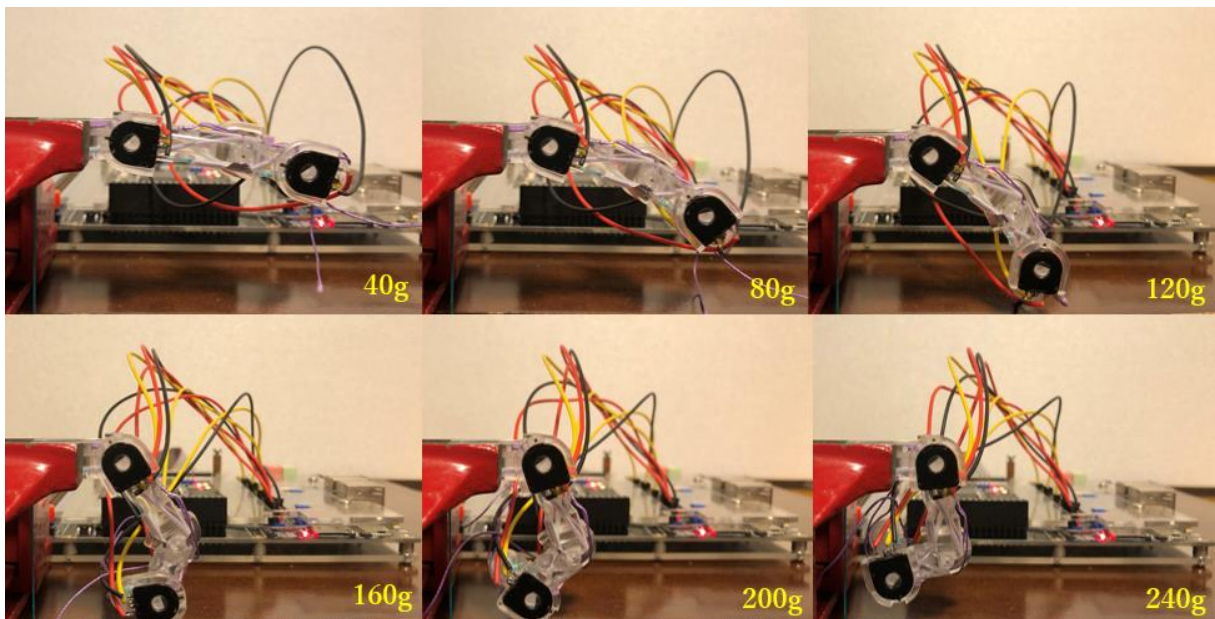


Fig.3.9.b 一對多伸展のメカニズムによる運動変化

Fig.3.9.a と Fig.3.9.b の結果によって、ワイヤに分銅を追加しながら、牽引力を増加するたびに、DIP 関節が最初から屈曲し始めて、PIP、MP 関節が 20g になる時点から一緒に屈曲し始めて、その後三関節が同時に屈曲しながら、240g に至ると三関節がすべて 90 度になった。要するに、一對多伸展のメカニズムにおいて、三関節を完全に屈曲させる分銅は 240g の重量が必要である。

以上の結果によって、本研究で提案した一對多伸展のメカニズムによる受動伸展機能において、すべての指関節を屈曲させるには、所要な牽引力は 4.5080N になり、従来研究における一対一伸展のメカニズムの 5.8800N より小さくなって、所要な駆動力

が減少され、省力化を確認できた。それ以外に、提案したメカニズムによる指関節の伸展の運動軌跡は一致性がよくなって、ばらつきを減少した。ただし、提案したメカニズムは従来研究より(一対一伸展のメカニズムに使用したバネ定数の比例は16:45:171) 比例的に牽引力の減少にならなくて、原因としては、指関節にワイヤの配置によって摩擦力の影響で牽引力を減らした。

### 3.3 四指各指に応用する安定連動機能

幼児用義手の製作にあたって、人間らしい外観を持つのは前提である。しかも、スペースの狭さに制限されているため、ワイヤ駆動による短い走行距離で機能を完成させることが要求される。既存研究では姿勢の変化による指関節の運動軌跡が同時に屈曲にならず、ばらつきの不安定性から、走行距離が長く、屈曲速度が遅くなること、あるいは走行距離を短くするための出力を犠牲してしまう問題を挙げられる。そのため、本研究では馴染み把持の代わりに、出力を変わずに走行距離を最短にするうえで、MP、PIP、DIP 関節を同時に屈曲させるという運動軌跡の安定性を持つ一対一屈曲のメカニズムを提案して、四指各指の安定連動機能に応用する。

#### 3.3.1 既存研究及び課題

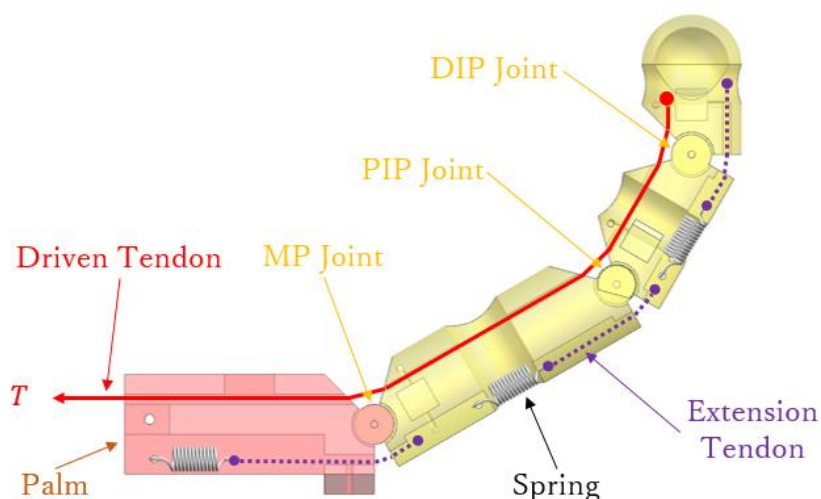


Fig.3.10 ワイヤ1本で複数の関節を駆動する一対多屈曲のメカニズム

従来研究において、指の屈曲側に使われる一対多屈曲のメカニズム[Y. Liu 2014]は、Fig.3.10のように、各指にワイヤ1本でMP、PIPとDIP関節を通し、簡単な構造で馴染み把持を実現したが、空間位置の変化によって、重力の影響で関節は屈曲の順序が変わったり、速度が変化したりする現象が存在する。その結果、指関節に対する位置制御が難しくなり、場合によって把持性能にも支障が出てくる。さらに、一対多屈曲のメカニズムはワイヤの走行距離は長くて、幼児用義手に応用すると、三関節を全部屈曲させるのに、ワイヤを巻き取るプーリーの半径は大きくなって、義手のスペースをオーバーする恐れがあるほかに、関節を屈曲する速度が遅くなり、非効率的である。それに対して、ワイヤを関節の回転中心に近づくことによって、走行距離を短くにして、屈曲速度も速くなる解決策を挙げるが、各関節の出力が犠牲になり、減少する。その分、出力の大きいアクチュエーターが必要になってきて、重量化になったり、大きなサイズでスペース的に内包できない問題は再び循環してくる。



また、従来研究において、一対多屈曲のメカニズムに基づいて発展してきたのは、ワイヤ1本でMPとPIP関節を通し、DIP関節はパッシブ的にPIP関節と連動する一対二のメカニズム[X. Yong 2019]も存在する。DIP関節を定めたルートで運動しているため、ワイヤの走行量は前者より三分の一を減らしたが、馴染み把持の性能を失ったほかに、重力の影響で必ずしもMPとPIP関節が同時に屈曲できる。よって、四指の運動特徴に合うものではなく、折中の案の一つと言える。

### 3.3.2 一対一屈曲のメカニズム

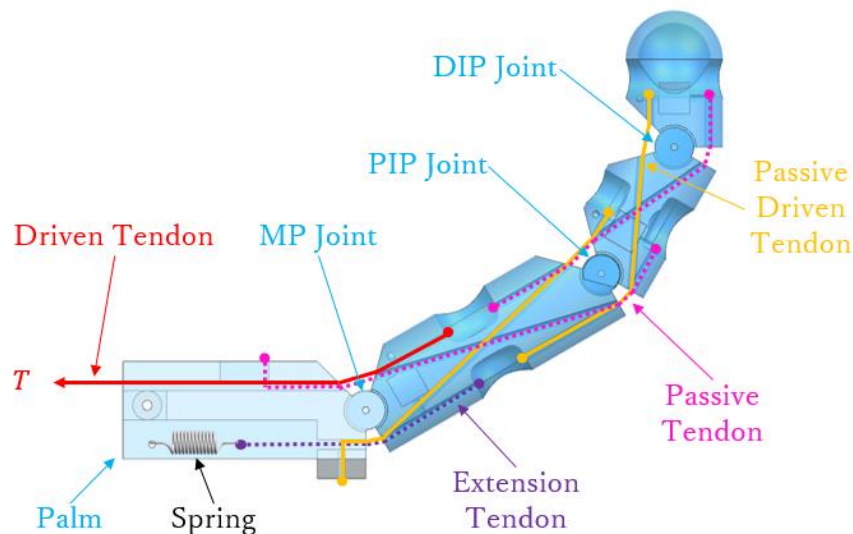


Fig.3.11 一対一屈曲のメカニズム

従来研究で残された課題によって、四指の各指に一対一屈曲のメカニズムを構築して、安定連動機能に応用する。Fig.3.11のように、赤色のアクティブワイヤがMP関節の屈曲を司る。橙色のワイヤ1がMP関節の伸展側からPIP関節の屈曲側を通過して中節骨に連結する。また、橙色のワイヤ2がPIP関節の伸展側からDIP関節の屈曲側を通して末節骨に固定する。この2本の橙色のワイヤがそれぞれパッシブ的にPIP・DIP関節を牽引しながら、MP関節と共に同時に屈曲する。Fig.3.12に示したように、このメカニズムによって、四指の各指におけるワイヤの走行距離はMP関節だけを屈曲させる赤色のアクティブワイヤの部分であり、ほかの関節がMP関節に屈曲されて、走行距離が最短になる。同じ時間帯において、屈曲する角速度は速くなり、把持物体のアプローチには効率的である。

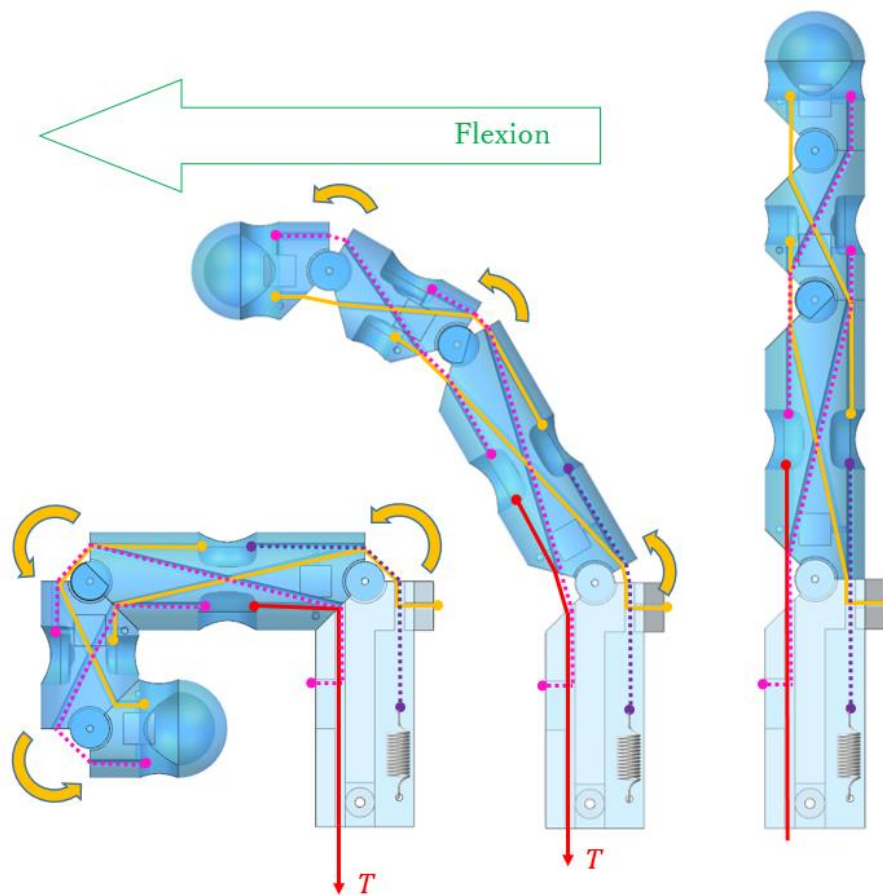


Fig.3.12 一対一屈曲のメカニズムによる安定連動機能の実現

### 3.3.3 一対一屈曲のメカニズムによる機能の実現及び出力検証

提案した一対一屈曲のメカニズムによる安定連動機能の有用性を確認するために、従来研究の一対多屈曲のメカニズム（アクティブワイヤ1本でMP・PIP・DIP関節を通すタイプ）、および一対多屈曲改良のメカニズム（アクティブワイヤ1本で三関節の回転中心に近づくタイプ）と比較して、それぞれ運動軌跡の安定性および出力の検証を行う。ただし、指関節の構造パラメータは全部同様に中指の寸法にして、各種のメカニズムを組み込んで、アクティブワイヤによる関節に作用する位置のみを変更する。それに、実験をするときに、重力が最大かつ出力の反力として作用する第一象限で比較する。さらに、数式を簡潔させるため、中指の略称  $m$  を省略する。

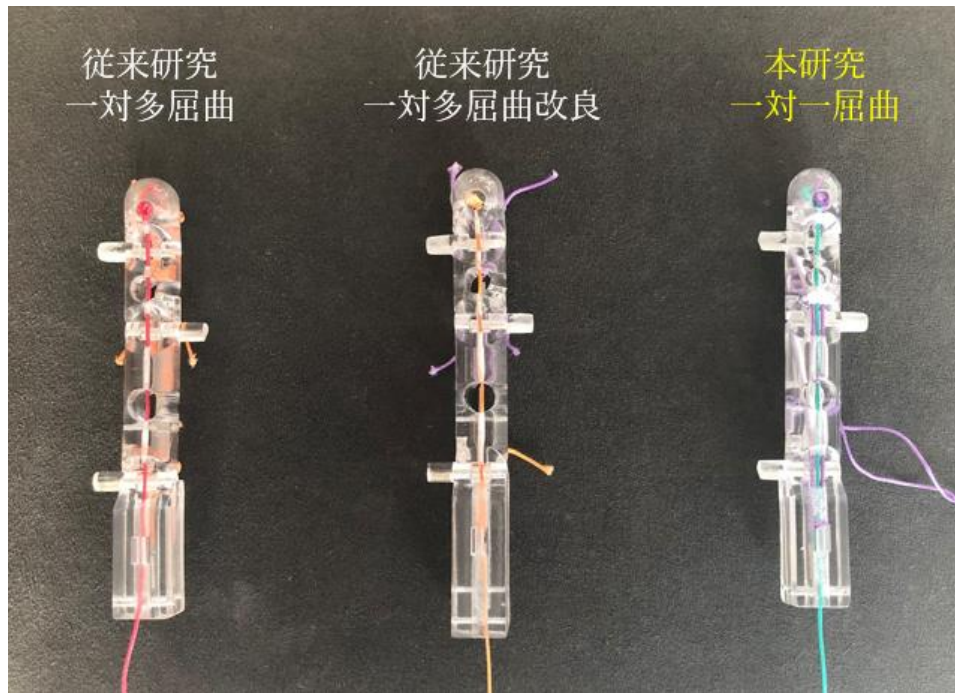


Fig.3.13 三種類のメカニズムで作成した指

まずは3種類のメカニズムによる安定連動機能の実現について検証実験を行う。Fig.3.13に示したように、各種類のメカニズムを組み込んだ指を仕上げ、3.2.3節と同じ手法で、指関節に角度センサーを付けて、バイスを各種類の指を第一象限に固定する。それに、ワイヤに分銅を吊って、重量を追加しつつ、関節角度のデータをマイコンで三つのチャンネルから読み取る。結果はそれぞれFig.3.14（一对多屈曲のメカニズム）、Fig.3.15（一对多屈曲改良のメカニズム）、Fig.3.16（本研究が提案した一对一屈曲のメカニズム）に表す。

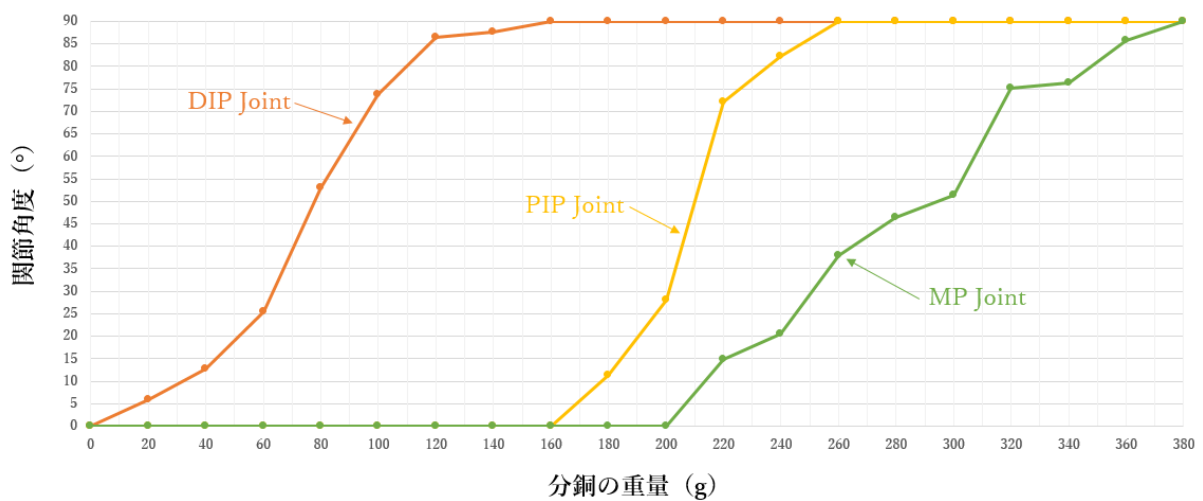


Fig.3.14.a 一对多屈曲のメカニズムによる運動変化

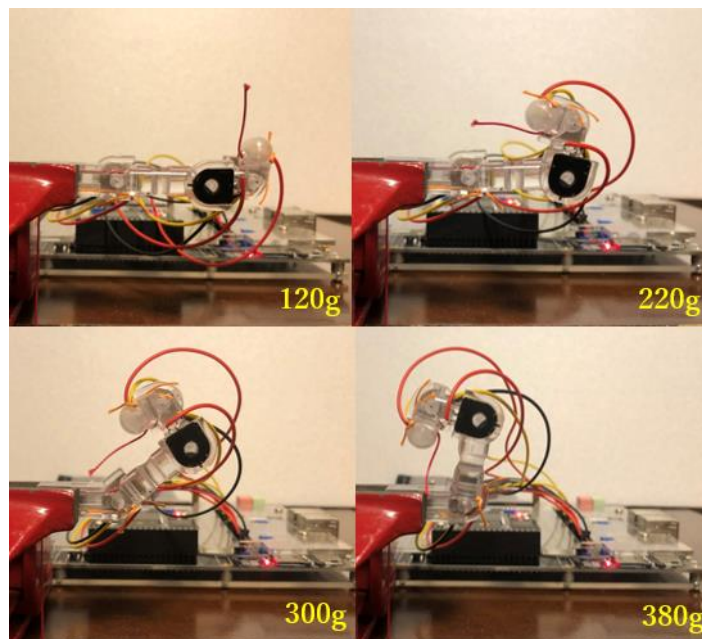


Fig.3.14.b 一對多屈曲のメカニズムによる運動変化

Fig.3.14.a と Fig.3.14.b の結果によって、ワイヤに分銅を追加しながら、牽引力を増加するたびに、DIP 関節が先に屈曲して、160g に至ると 90 度になった。そして、同じく 160g の時点で PIP 関節が屈曲し始めて、素早く運動しながら、260g になったら 90 度に到達した。最後に、MP 関節は 200g の時点で屈曲が開始して、380g で 90 度の屈曲になった。しかしながら、一対一伸展のメカニズムにおいて、ワイヤの走行距離は三関節の量を持つ長さがある以外に、三関節の運動軌跡は DIP→PIP→MP の順に次々と屈曲して、ばらつきが存在しているため、四指の各関節の同時屈曲という運動特徴と相違である。

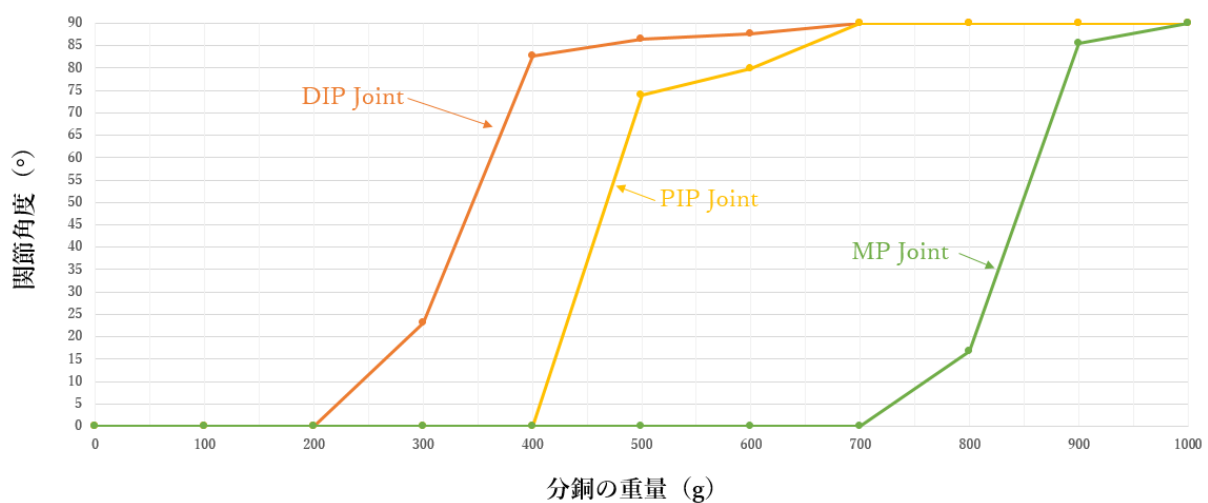


Fig.3.15.a 一對多屈曲改良のメカニズムによる運動変化



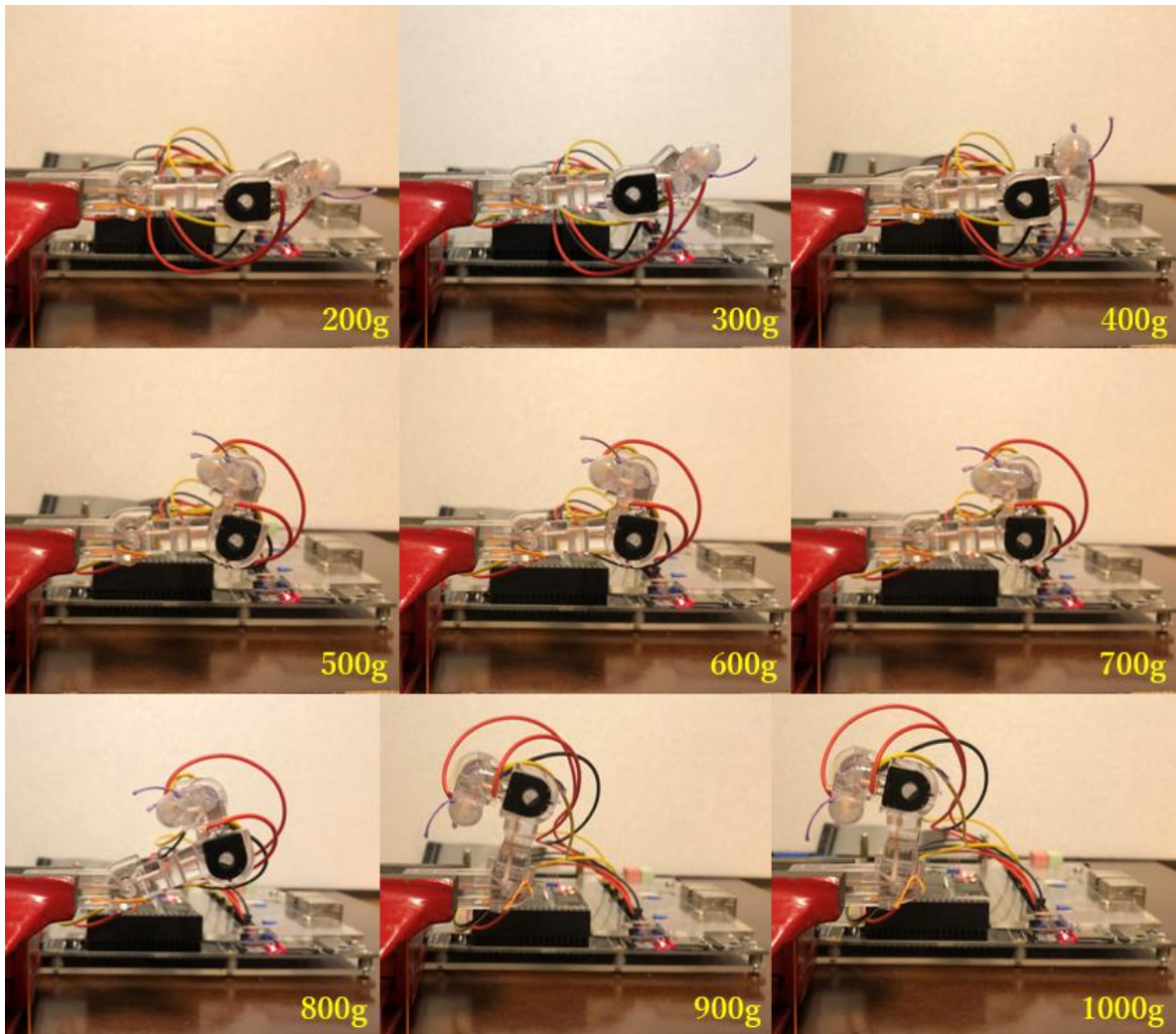


Fig.3.15.b 一対多屈曲改良のメカニズムによる運動変化

Fig.3.15.a と Fig.3.15.b の結果によって、ワイヤに分銅を追加しながら、牽引力を増加するたびに、200g のときから DIP 関節が先に屈曲して、700g に至ると 90 度になった。そして、400g の時点で PIP 関節が屈曲し始めて、同じく 700g になったら 90 度に到達した。最後に、MP 関節も 700g の時点から屈曲が開始して、1000g で 90 度の屈曲になった。しかしながら、一対一伸展改良のメカニズムにおいて、ワイヤの走行距離を三分の一に短縮したが、代わりに関節ごとに必要な駆動力は増加してしまうほか、三関節の運動軌跡は前と変わらずに、DIP→PIP→MP の順に次々と屈曲して、ばらつきが存在しているため、四指の各関節の同時屈曲という運動特徴と相違である。

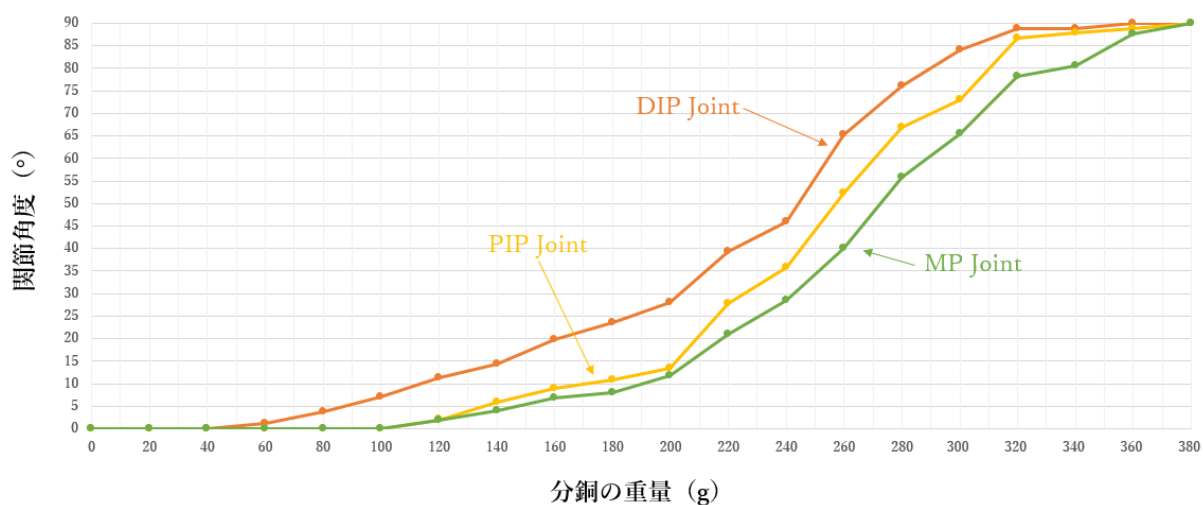


Fig.3.16.a 一対一屈曲のメカニズムによる運動変化

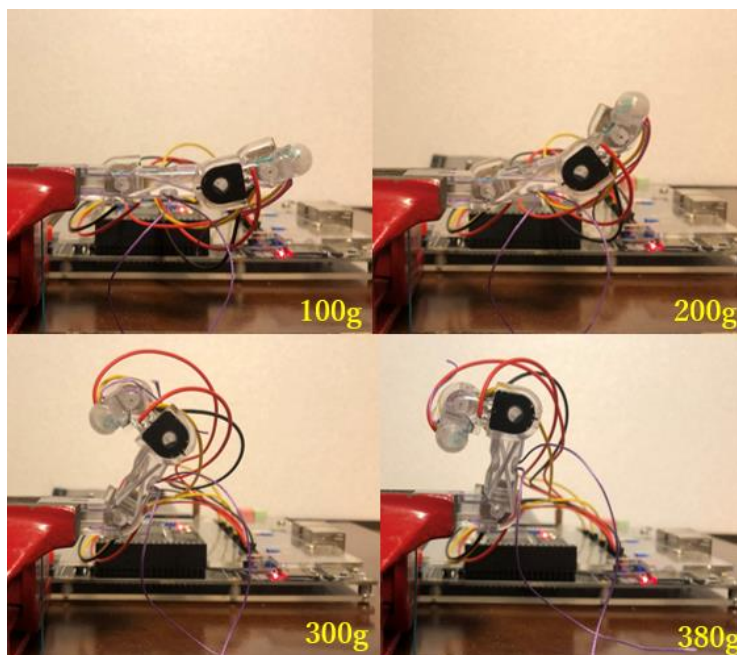


Fig.3.16.b 一対一屈曲のメカニズムによる運動変化

Fig.3.16.a と Fig.3.16.b の結果によって、ワイヤに分銅を追加しながら、牽引力を増加するたびに、DIP 関節は先に 40g のときから屈曲し始めて、PIP、MP 関節が 100g になる時点から同時に屈曲し始める。そして、三関節が一緒に運動しながら、380g に至ると同時に 90 度に至った。要するに、本研究で提案した一対一屈曲のメカニズムにおいて、ワイヤの走行距離は三分の一でありながら、関節ごとに必要な駆動力は一対多屈曲のメカニズムと同様に保ったほか、従来の三関節の運動軌跡に存在するばらつきがなくなり、DIP・PIP・MP 関節が同時に屈曲していて、四指の各関節の運動特徴に満足した。以上によって、提案した一対一屈曲のメカニズムによる安定連動機能の

有用性を確認できた。

続いて、出力検証において、比較対象となる3種類のメカニズムに対して、中には2種類の一対多のタイプでは、馴染み把持ができるため、フォースゲージで任意の一つの関節を測ると、ほかの関節が運動し続けて、フォースゲージの力を分散してしまっ  
て、測れなくなる。対照的に、提案した一対一のタイプは馴染み把持ができないため、  
任意の関節を阻止すると、ほかの関節は全部停止になって、測ることは可能になる。  
よって、出力検証の手法としては、先に各メカニズムによって、それぞれの力学モデル  
を立ち上げて、理論値を算出する。そして、一対一のタイプだけをフォースゲージ  
で実測値を採取する。最後に、実測値によって、理論値の正確率を確認して、客観的  
に2種類の一対多のタイプの正確性を反映する。

1. 一対一屈曲のメカニズム：

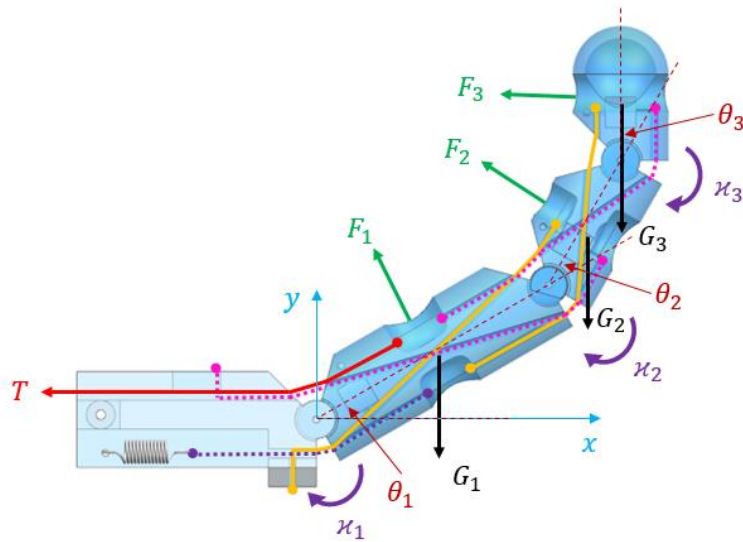


Fig.3.17 一対一屈曲のメカニズムの力学モデル

Fig.3.17 にしたがって、ローカル座標において各関節の接触点は：

$${}^qP = \begin{bmatrix} R_q \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

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）：

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & L_1 \\ S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & L_2 \\ S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

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：

$${}^0_q\mathbf{P} = {}^0_1\mathbf{T} \cdots {}^{q-1}_q\mathbf{T} {}^q\mathbf{P} \quad (q = 1, 2 \cdots) \quad (3.12)$$

ついでに、ヤコビ行列 ${}^0_q\mathbf{J}$ は計算できる：

$${}^0_1\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -R_1 S_1 & 0 & 0 \\ R_1 C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$${}^0_2\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -R_2 S_{12} - L_1 S_1 & -R_2 S_{12} & 0 \\ R_2 C_{12} + L_1 C_1 & R_2 C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$${}^0_3\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -R_3 S_{123} - L_2 S_{12} - L_1 S_1 & -R_3 S_{123} - L_2 S_{12} & -R_3 S_{123} \\ R_3 C_{123} + L_2 C_{12} + L_1 C_1 & R_3 C_{123} + L_2 C_{12} & R_3 C_{123} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

また、各関節の出力と回転行列は：

$${}^q_q\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_q \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$${}^{q-1}_q\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C_q & -S_q & 0 \\ S_q & C_q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

そこで、仮想仕事の原理による下記の式が成り立つ。ただし、 $\mathbf{J}^T$ はヤコビの転置行列である：

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_{q=1}^3 {}^0_q\mathbf{J}^T {}^q_q\mathbf{F} \quad (3.18)$$

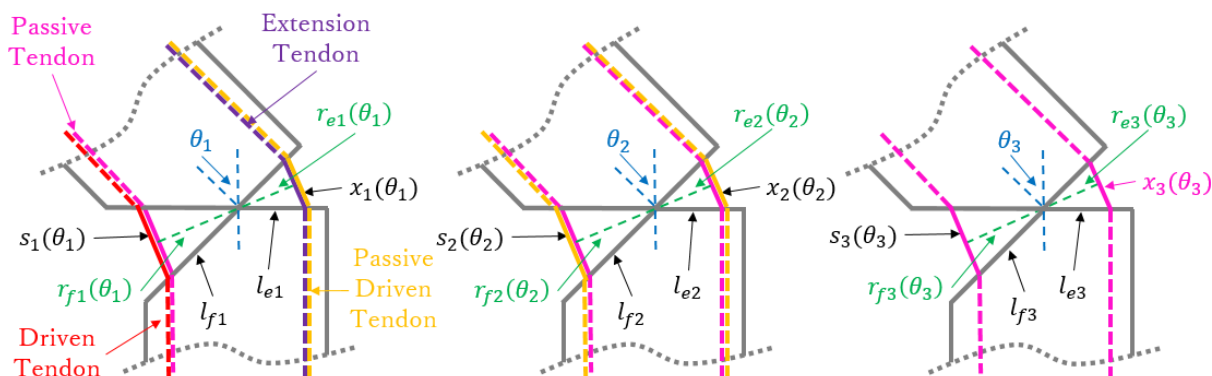


Fig.3.18 関節の幾何学関係 (左：MP 関節，中：PIP 関節，右：DIP 関節)

一方、各関節の幾何学の関係は Fig.3.18 に示したように、関係式を立つ：



$$\begin{cases} s_q(\theta_q) = 2l_{fq} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \\ x_q(\theta_q) = 2l_{eq} \sin\frac{\theta_q}{2} \\ r_{fq}(\theta_q) = l_{fq} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \\ r_{eq}(\theta_q) = l_{eq} \cos\frac{\theta_q}{2} \\ l_{fq} = l_{eq} = 2.5\sqrt{2} \end{cases} \quad (3.19)$$

よって、関節トルクの式を求める：

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 - \kappa_1 \\ M_2 - \kappa_2 \\ M_3 - \kappa_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_1 & L_1 + R_2 & L_1 + L_2 + R_3 \\ 0 & R_2 & L_2 + R_3 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \mathbf{G} \quad (3.20)$$

ただし、式には：

$$\begin{bmatrix} M_1 - \kappa_1 \\ M_2 - \kappa_2 \\ M_3 - \kappa_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}T_1 r_{f1} - (K_1 + \sigma_1)r_{e1} + \frac{\kappa_2 r_{f1}}{r_{e2}} \\ \frac{T_1 r_{f1} r_{f2}}{3r_{e1}} - \frac{\kappa_1 r_{e2}}{r_{f1}} + \frac{\kappa_3 r_{f2}}{r_{e3}} \\ \frac{T_1 r_{f1} r_{f2} r_{f3}}{3r_{e1} r_{e2}} - \frac{\kappa_2 r_{e3}}{r_{f2}} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

以上によって、関節の出力を求める：

$$\begin{cases} F_1 = -\frac{L_1}{R_1 R_2 R_3} [R_3 \cos \theta_2 - R_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3] \\ \quad \left[ G_3 R_3 - \frac{5\sqrt{2}T_1 \sin\left(\frac{\theta_1 + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_2 + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_3 + \pi}{2}\right)}{6 \cos\frac{\theta_1}{2} \cos\frac{\theta_2}{2}} \right] \\ \quad + \frac{5\sqrt{2} \cos\frac{\theta_1}{2} \cos\frac{\theta_2}{2} \cos\frac{\theta_3}{2} (2\sigma_1 + 10\sqrt{2}k_1 \sin\frac{\theta_1}{2})}{12 \sin\left(\frac{\theta_1 + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_2 + \pi}{2}\right)} \\ F_2 = \frac{1}{R_2 R_3} (R_3 + L_2 \cos \theta_3) \left[ G_3 R_3 - \frac{5\sqrt{2}T_1 \sin\left(\frac{\theta_1 + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_2 + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_3 + \pi}{2}\right)}{6 \cos\frac{\theta_1}{2} \cos\frac{\theta_2}{2}} \right] \\ \quad + \frac{5\sqrt{2} \cos\frac{\theta_1}{2} \cos\frac{\theta_2}{2} \cos\frac{\theta_3}{2} (2\sigma_1 + 10\sqrt{2}k_1 \sin\frac{\theta_1}{2})}{12 \sin\left(\frac{\theta_1 + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_2 + \pi}{2}\right)} \\ -\frac{1}{R_2} \left[ G_3 (L_2 + R_3) + G_2 R_2 - \frac{5\sqrt{2}T_1 \sin\left(\frac{\theta_1 + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_2 + \pi}{2}\right)}{6 \cos\frac{\theta_1}{2}} \right] \\ \quad + \frac{5\sqrt{2} \cos\frac{\theta_1}{2} \cos\frac{\theta_2}{2} (2\sigma_1 + 10\sqrt{2}k_1 \sin\frac{\theta_1}{2})}{12 \sin\left(\frac{\theta_1 + \pi}{2}\right)} \\ F_3 = -\frac{1}{R_3} \left[ G_3 R_3 - \frac{5\sqrt{2}T_1 \sin\left(\frac{\theta_1 + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_2 + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_3 + \pi}{2}\right)}{6 \cos\frac{\theta_1}{2} \cos\frac{\theta_2}{2}} \right] \\ \quad + \frac{5\sqrt{2} \cos\frac{\theta_1}{2} \cos\frac{\theta_2}{2} \cos\frac{\theta_3}{2} (2\sigma_1 + 10\sqrt{2}k_1 \sin\frac{\theta_1}{2})}{12 \sin\left(\frac{\theta_1 + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_2 + \pi}{2}\right)} \end{cases} \quad (3.22)$$

この計算結果には境界条件 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3$ を代入するほかに、Fig.3.14、Fig.3.15、Fig.3.16の結果に基づいて、ワイヤ牽引力は一对多屈曲改良のメカニズムを基準にし

て、三関節を90度までに屈曲させた1000gから9.8Nにする。よって、結果はそれぞれMP関節の Fig.3.19、PIP関節の Fig.3.20、DIP関節の Fig.3.21 のように示す。

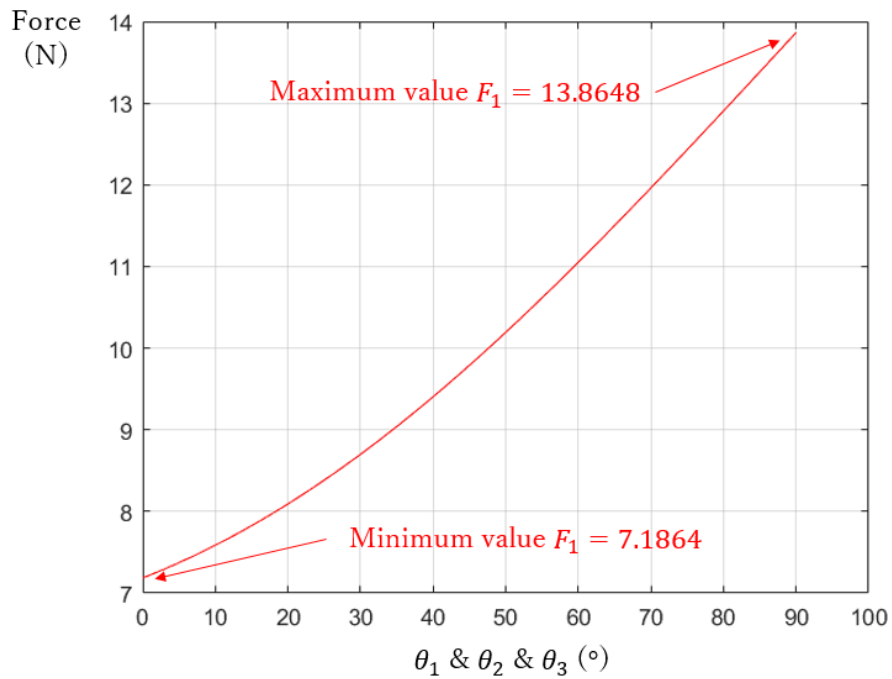


Fig.3.19 一対一屈曲のメカニズムによるMP関節の出力の変化

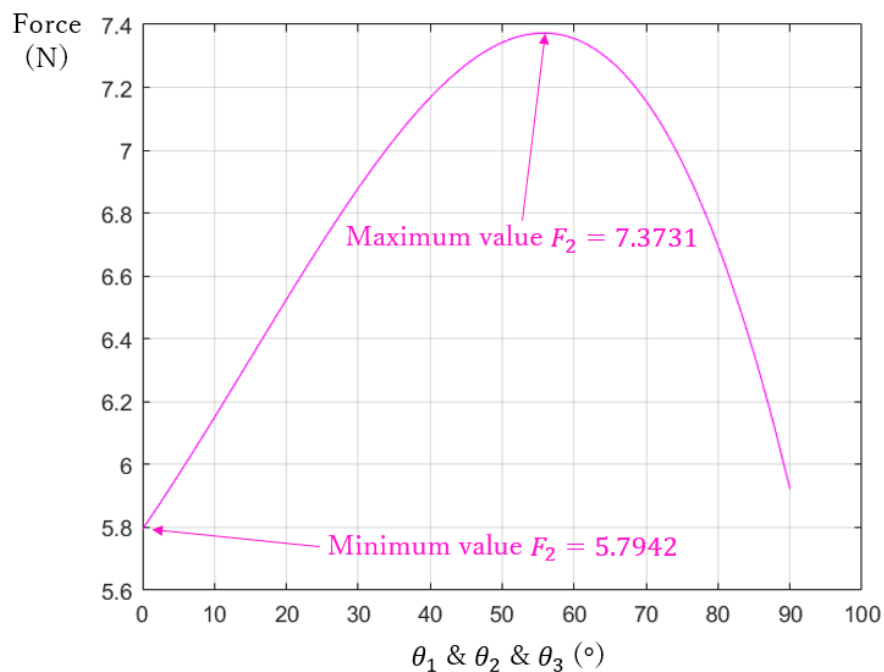


Fig.3.20 一対一屈曲のメカニズムによるPIP関節の出力の変化

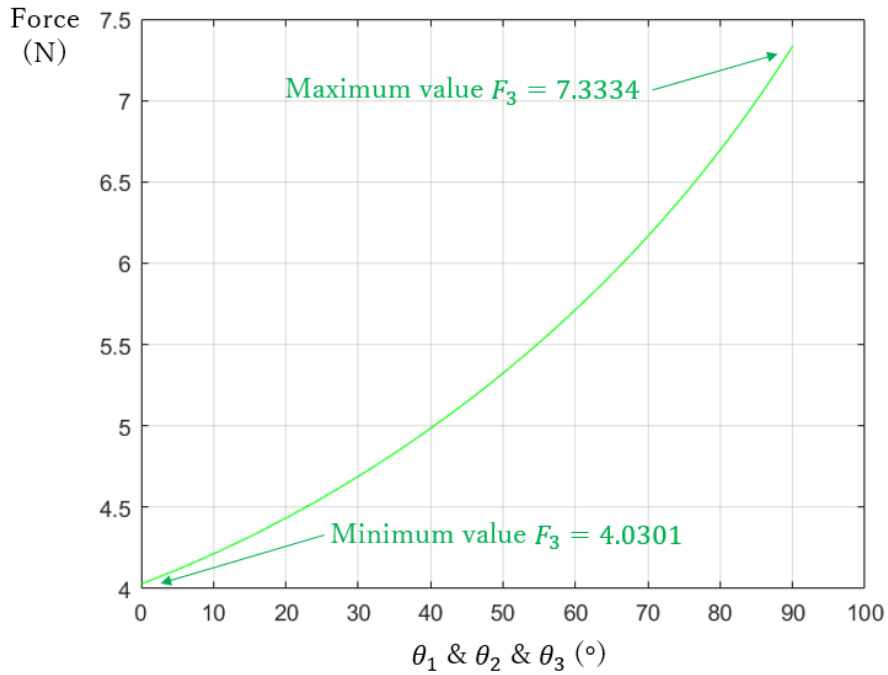


Fig.3.21 一対一屈曲のメカニズムによる DIP 関節の出力の変化

結果によって、MP 関節の出力は 7.1864N から 13.8648N まで増加する。PIP 関節の出力は 5.7942N から一旦 7.3731N まで増加して、また減少になっていく。DIP 関節の出力は 4.0301N から 7.3334N まで増加し続ける。

2. 一対多屈曲のメカニズム：

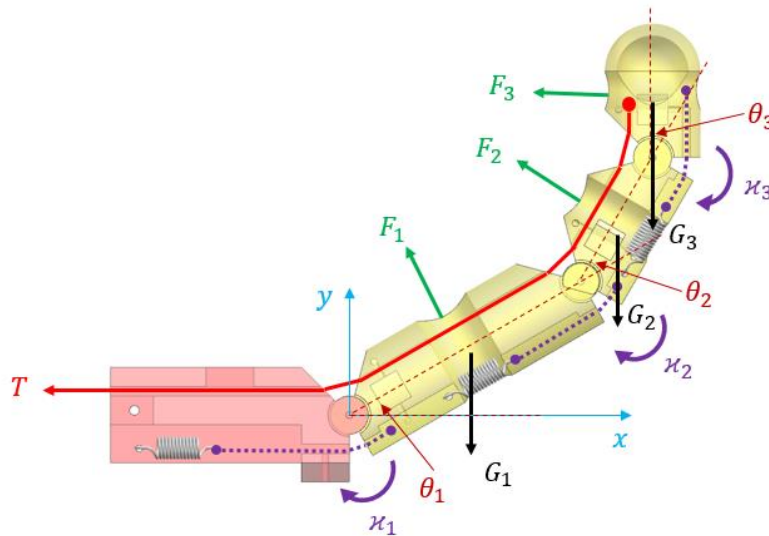


Fig.3.22 一対多屈曲のメカニズムの力学モデル

Fig.3.22 のように、力学モデルを立つ。関係式は前述した一対一屈曲のメカニズムと同じであるが、関節トルクの行列は異なる：

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 - \kappa_1 \\ M_2 - \kappa_2 \\ M_3 - \kappa_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_1 & L_1 + R_2 & L_1 + L_2 + R_3 \\ 0 & R_2 & L_2 + R_3 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \mathbf{G} \quad (3.23)$$

ただし：

$$\begin{bmatrix} M_1 - \kappa_1 \\ M_2 - \kappa_2 \\ M_3 - \kappa_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 r_{f1} - (K_1 + \sigma_1) r_{e1} \\ T_2 r_{f2} - (K_2 + \sigma_2) r_{e2} \\ T_3 r_{f3} - (K_3 + \sigma_3) r_{e3} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

以上によって、関節の出力を求める：

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = -\frac{L_1}{R_1 R_2 R_3} [R_3 \cos \theta_2 - R_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3] \\ \quad \left\{ G_3 R_3 + \frac{5\sqrt{2}}{2} \left[ \cos \frac{\theta_3}{2} (\sigma_3 + 5\sqrt{2} k_3 \sin \frac{\theta_3}{2}) - T_3 \cos \left( \frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right\} \\ \quad + \frac{1}{R_1 R_2} (R_2 + L_1 \cos \theta_2) \left\{ \begin{array}{l} G_3 (L_2 + R_3) + G_2 R_2 \\ + \frac{5\sqrt{2}}{2} \left[ \cos \frac{\theta_2}{2} (\sigma_2 + 5\sqrt{2} k_2 \sin \frac{\theta_2}{2}) - T_2 \cos \left( \frac{\theta_2}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \end{array} \right\} \\ \quad - \frac{1}{R_1} \left\{ \begin{array}{l} G_3 (L_1 + L_2 + R_3) + G_2 (L_1 + R_2) + G_1 R_1 \\ + \frac{5\sqrt{2}}{2} \left[ \cos \frac{\theta_1}{2} (\sigma_1 + 5\sqrt{2} k_1 \sin \frac{\theta_1}{2}) - T_1 \cos \left( \frac{\theta_1}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \end{array} \right\} \\ F_2 = \frac{1}{R_2 R_3} (R_3 + L_2 \cos \theta_3) \left\{ G_3 R_3 + \frac{5\sqrt{2}}{2} \left[ \cos \frac{\theta_3}{2} (\sigma_3 + 5\sqrt{2} k_3 \sin \frac{\theta_3}{2}) - T_3 \cos \left( \frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right\} \\ \quad - \frac{1}{R_2} \left\{ G_3 (L_2 + R_3) + G_2 R_2 + \frac{5\sqrt{2}}{2} \left[ \cos \frac{\theta_2}{2} (\sigma_2 + 5\sqrt{2} k_2 \sin \frac{\theta_2}{2}) - T_2 \cos \left( \frac{\theta_2}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right\} \\ F_3 = -\frac{1}{R_3} \left\{ G_3 R_3 + \frac{5\sqrt{2}}{2} \left[ \cos \frac{\theta_3}{2} (\sigma_3 + 5\sqrt{2} k_3 \sin \frac{\theta_3}{2}) - T_3 \cos \left( \frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right\} \end{array} \right. \quad (3.25)$$

この計算結果には境界条件 $T_1 = T_2 = T_3 = 9.8\text{N}$ を代入するほかに、一対一屈曲のメカニズムとの比較性を持つため、このメカニズムには仮に理想な球体を握って、三関節は同じ角度にさせる同時に接触を保つ。そのため、結果はそれぞれ MP 関節の Fig.3.23、PIP 関節の Fig.3.24、DIP 関節の Fig.3.25 のように示す。

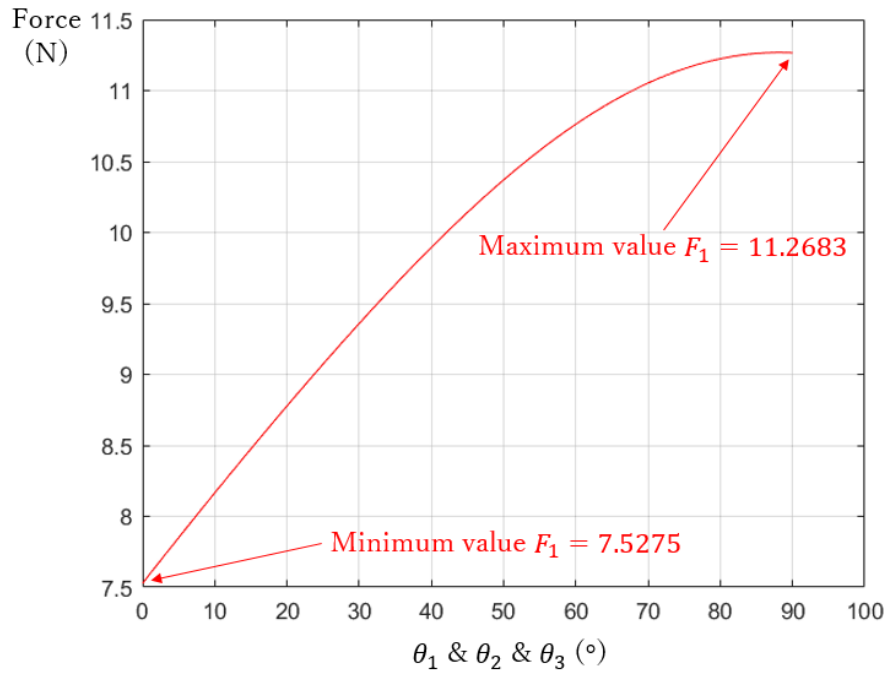


Fig.3.23 一对多屈曲のメカニズムによる MP 関節出力の変化

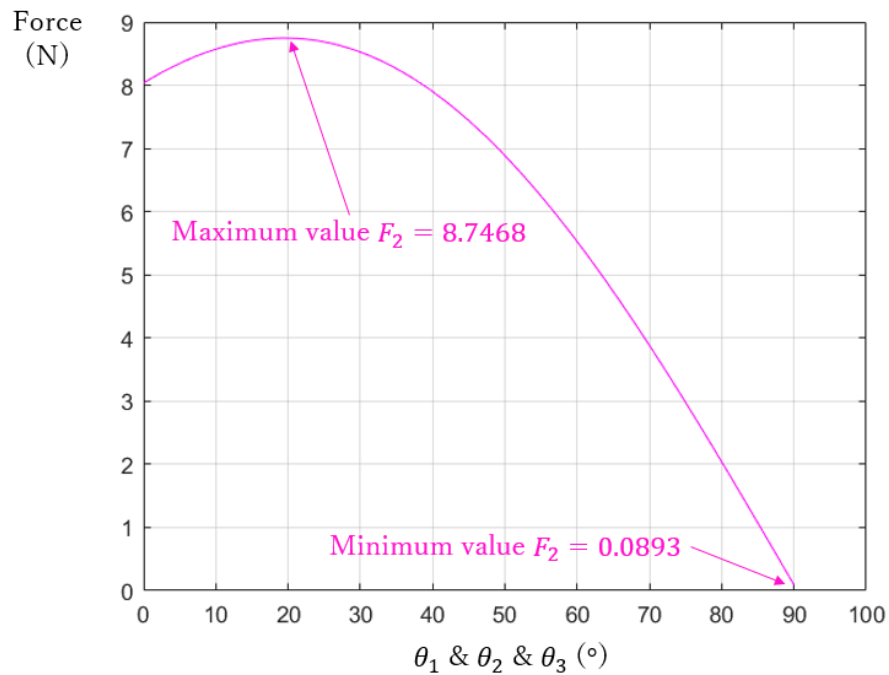


Fig.3.24 一对多屈曲のメカニズムによる PIP 関節の出力の変化

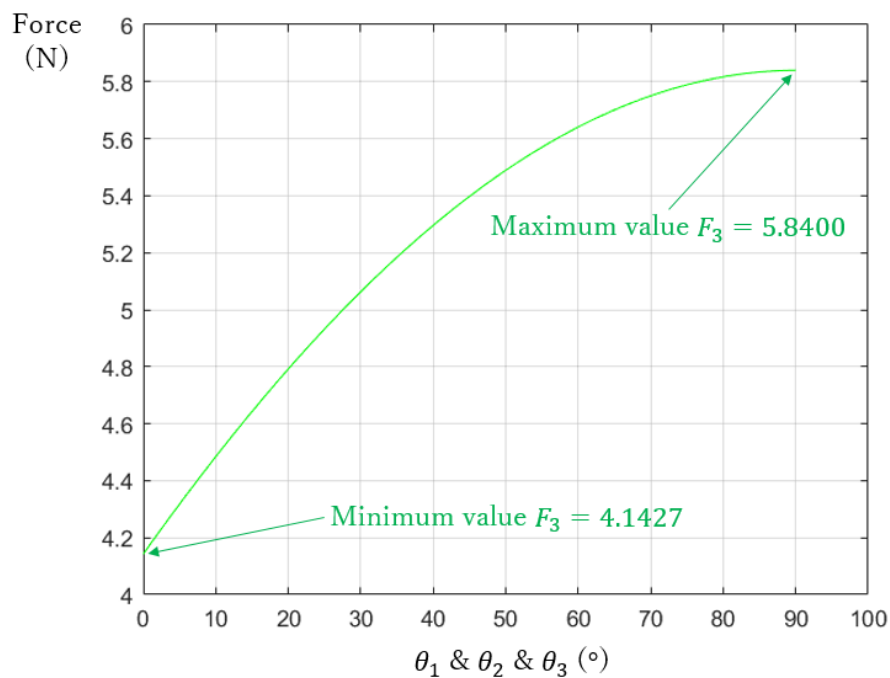


Fig.3.25 一对多屈曲のメカニズムによる DIP 関節の出力の変化

結果によって、MP 関節の出力は 7.5275N から 11.2683N まで増加する。PIP 関節の出力は一旦 8.7468N まで増加してから、また 0.0893N までに減少していく。DIP 関節の出力は 4.1427N から 5.8400N まで増加し続ける。

3. 一对多屈曲改良のメカニズム：

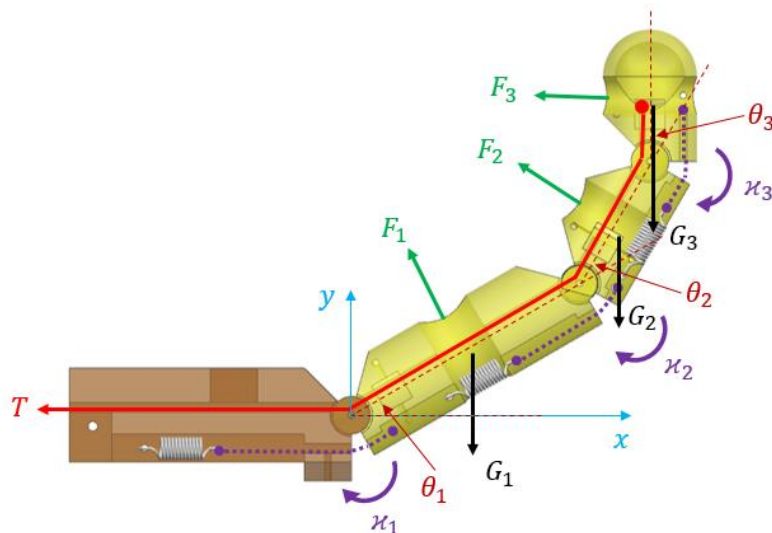


Fig.3.26 一对多屈曲改良のメカニズムの力学モデル

Fig.3.26 のように、力学モデルを立つ。仮想仕事の原理による関係式は一对多屈曲のメカニズムと同じであるが、ワイヤの走行距離を一对一屈曲のメカニズムと同様にす

ると、下記の式を立つ。要するに、ワイヤが三関節を通した走行距離は一対一屈曲のメカニズムの一関節の走行距離と等しくなる：

$$3s_q(\theta_q) = 3 \times 2l_{fq} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) = 5\sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \quad (3.26)$$

よって、 $l_{fq}$ を得られる：

$$l_{fq} = \frac{5}{6}\sqrt{2} \quad (3.27)$$

そこで、各関節の幾何学の関係式は：

$$\left\{ \begin{array}{l} s_q(\theta_q) = 2l_{fq} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \\ x_q(\theta_q) = 2l_{eq} \sin\frac{\theta_q}{2} \\ r_{fq}(\theta_q) = l_{fq} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_q}{2}\right) \\ r_{eq}(\theta_q) = l_{eq} \cos\frac{\theta_q}{2} \\ l_{fq} = \frac{5}{6}\sqrt{2} \\ l_{eq} = 2.5\sqrt{2} \end{array} \right. \quad (3.28)$$

それに、関節トルクの行列は一対多屈曲のメカニズムと同様であるため、関節の出力を求める：

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = -\frac{L_1}{R_1 R_2 R_3} [R_3 \cos \theta_2 - R_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3] \\ \quad \left\{ G_3 R_3 + \frac{5\sqrt{2}}{6} \left[ 3 \cos \frac{\theta_3}{2} \left( \sigma_3 + 5\sqrt{2} k_3 \sin \frac{\theta_3}{2} \right) - T_3 \cos \left( \frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right\} \\ \quad + \frac{1}{R_1 R_2} (R_2 + L_1 \cos \theta_2) \left\{ \begin{array}{l} G_3 (L_2 + R_3) + G_2 R_2 \\ + \frac{5\sqrt{2}}{6} \left[ 3 \cos \frac{\theta_2}{2} \left( \sigma_2 + 5\sqrt{2} k_2 \sin \frac{\theta_2}{2} \right) - T_2 \cos \left( \frac{\theta_2}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \end{array} \right\} \\ \quad - \frac{1}{R_1} \left\{ \begin{array}{l} G_3 (L_1 + L_2 + R_3) + G_2 (L_1 + R_2) + G_1 R_1 \\ + \frac{5\sqrt{2}}{6} \left[ 3 \cos \frac{\theta_1}{2} \left( \sigma_1 + 5\sqrt{2} k_1 \sin \frac{\theta_1}{2} \right) - T_1 \cos \left( \frac{\theta_1}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \end{array} \right\} \\ F_2 = \frac{1}{R_2 R_3} (R_3 + L_2 \cos \theta_3) \left\{ G_3 R_3 + \frac{5\sqrt{2}}{6} \left[ 3 \cos \frac{\theta_3}{2} \left( \sigma_3 + 5\sqrt{2} k_3 \sin \frac{\theta_3}{2} \right) - T_3 \cos \left( \frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right\} \\ \quad - \frac{1}{R_2} \left\{ G_3 (L_2 + R_3) + G_2 R_2 + \frac{5\sqrt{2}}{6} \left[ 3 \cos \frac{\theta_2}{2} \left( \sigma_2 + 5\sqrt{2} k_2 \sin \frac{\theta_2}{2} \right) - T_2 \cos \left( \frac{\theta_2}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right\} \\ F_3 = -\frac{1}{R_3} \left\{ G_3 R_3 + \frac{5\sqrt{2}}{6} \left[ 3 \cos \frac{\theta_3}{2} \left( \sigma_3 + 5\sqrt{2} k_3 \sin \frac{\theta_3}{2} \right) - T_3 \cos \left( \frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right\} \end{array} \right. \quad (3.29)$$

この計算結果には同様に境界条件 $T_1 = T_2 = T_3 = 9.8\text{N}$ を代入するほかに、一対一屈曲のメカニズムとの比較性を持つため、このメカニズムには仮に理想な球体を握って、三関節は同じ角度にさせる同時に接触を保つ。そのため、結果はそれぞれMP関節のFig.3.27、PIP関節のFig.3.28、DIP関節のFig.3.29のように示す。

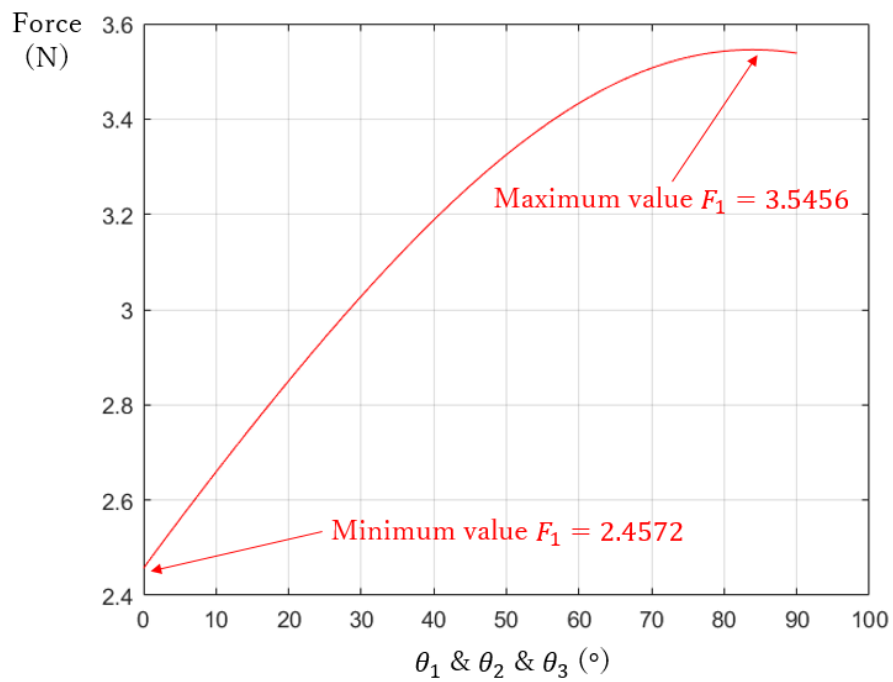


Fig.3.27 一对多屈曲のメカニズムによる MP 関節出力の変化

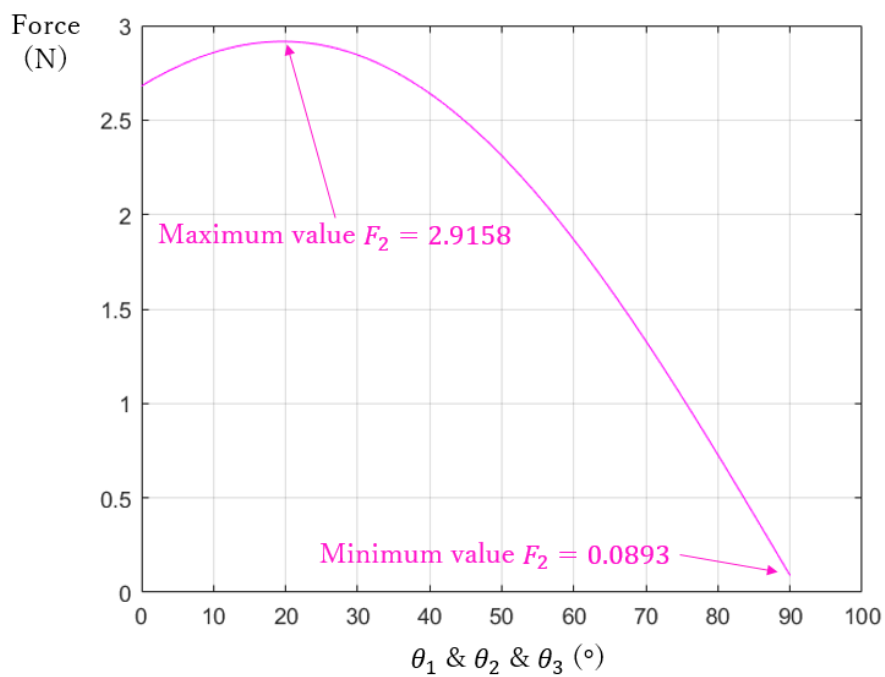


Fig.3.28 一对多屈曲のメカニズムによる PIP 関節の出力の変化



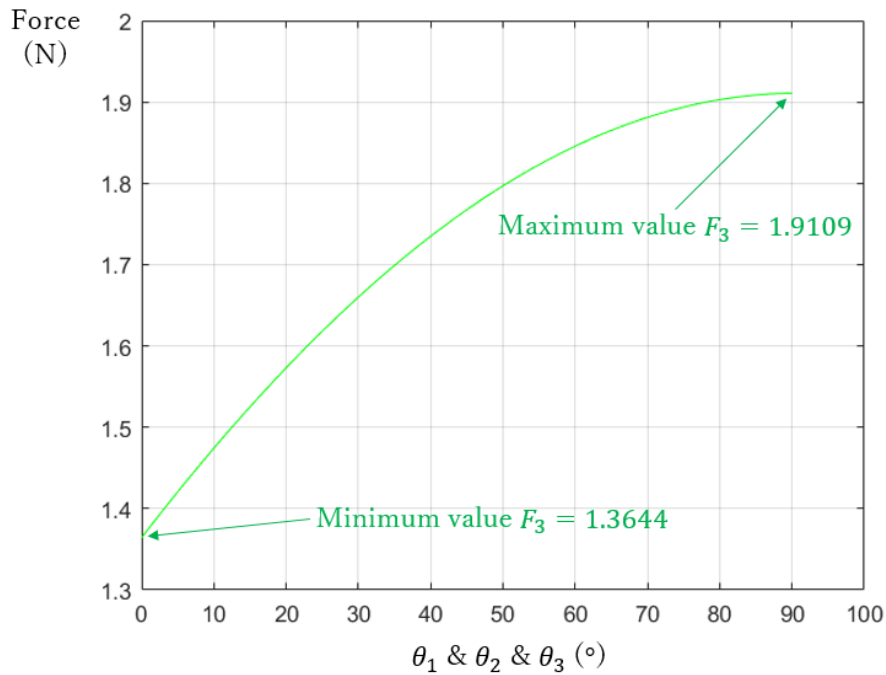


Fig.3.29 一对多屈曲のメカニズムによる DIP 関節の出力の変化

結果によって、MP 関節の出力は 2.4572N から 3.5456N まで増加する。PIP 関節の出力は一旦 2.9158N まで増加してから、また 0.0893N までに減少していく。DIP 関節の出力は 1.3644N から 1.9109N まで増加し続ける。

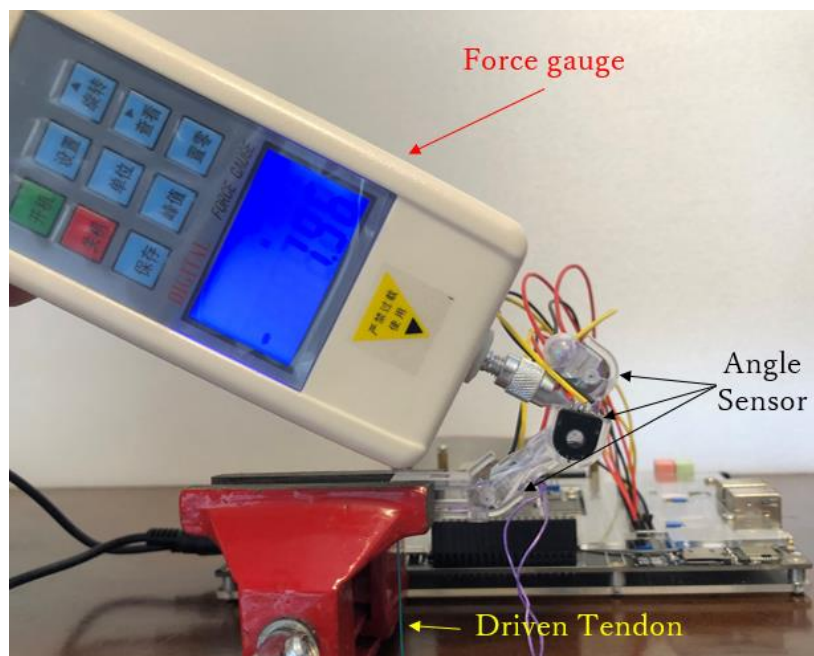


Fig.3.30 一对一屈曲のメカニズムによる出力の計測

最後に、本研究で提案した一対一屈曲のメカニズムに対して、Fig.3.30 に示したように、ワイヤに 1000g の分銅を吊って、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 MP、PIP、DIP 関節を 5 回ずつランダムに測る。出力の実測値を得る同時に、角度センサーからの関節角度のデータも読み取る。測った三関節の結果はほかの 2 種類のメカニズムの理論値を含めて、一緒に比較する。結果はそれぞれ MP 関節の Fig.3.31、PIP 関節の Fig.3.32、DIP 関節の Fig.3.33 のように示す。

結果によって、理論上には、本研究で提案した一対一屈曲のメカニズムが一対多屈曲のメカニズムと比べて、出力は接近している。それに対して、一対多屈曲改良のメカニズムにおける出力が一番小さいことが明らかであった。一方、一対一屈曲のメカニズムにおける出力の実測値は、製造誤差や機構からワイヤへの摩擦力の存在を理解し、全体的に理論値より小さくなったが、正確性を確かめられた。

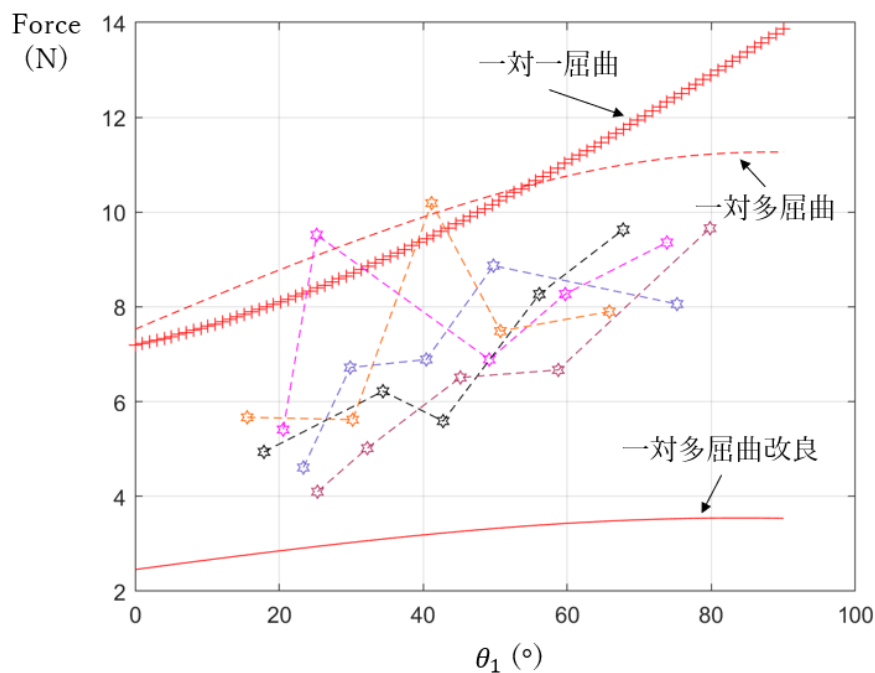


Fig.3.31 出力の計測結果：MP 関節

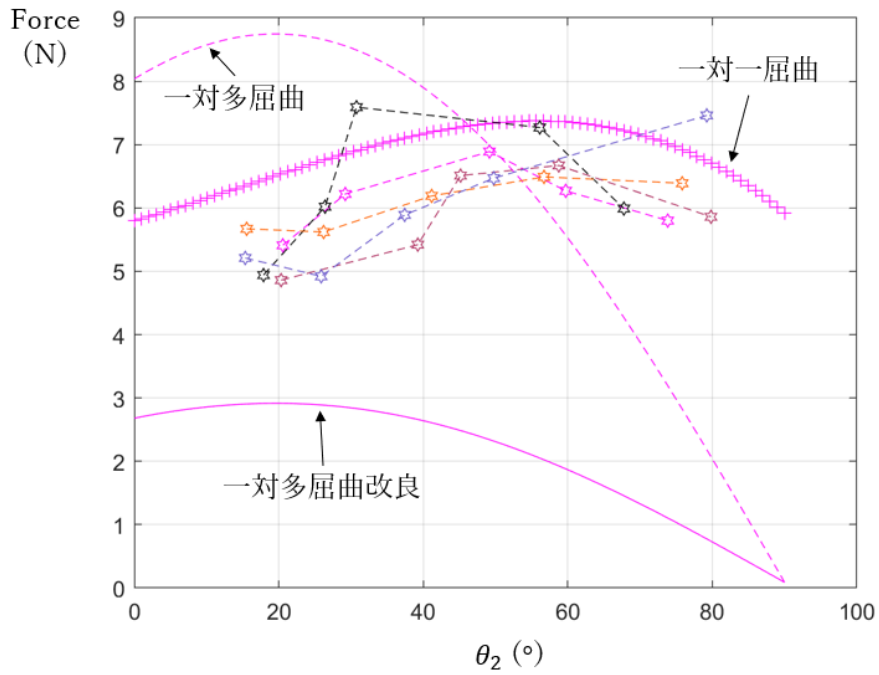


Fig.3.32 出力の計測結果：PIP 関節

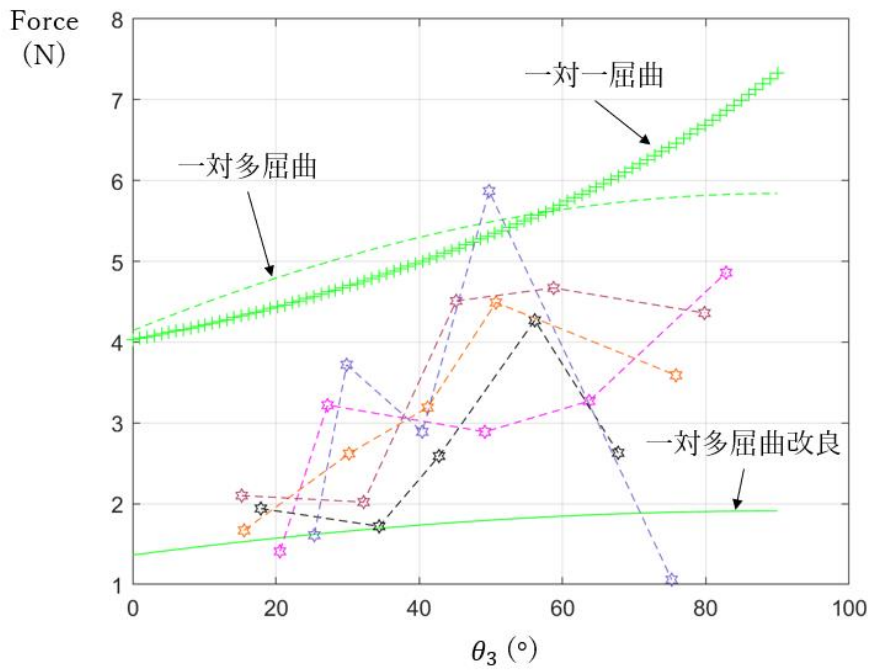


Fig.3.33 出力の計測結果：DIP 関節

### 3.4 四指全体に適した適応差動機能

このセクションでは、四指の全体にあたって、適応差動機能について説明する。物体に対する把持は単なる各指に留まらなく、四指の全体が一つの集合体とみなして、物体にアプローチするときに、一致性を持つ運動で接近して、把持するときに物体の形状に沿って、マッチングをして馴染み把持に形成する。仮に、物体を把持しようとする前に、四指が一致の運動を持たずに、任意の指が先に屈曲になってしまうなら、物体とぶつかって、ハンドの把持性能に影響を及ぼすことや、物体を倒したりすると把持は失敗になることから、アプローチするときに四指と一緒に屈曲できる機能が必要となる。すなわち、四指に備える機能としては、把持に重要視される馴染み把持のみならず、把持の可否にかかわる物体へのアプローチも重要な前動作になる。そのうえに、単一の指には馴染み把持ができない欠点から、指1本で有限な把持範囲の代わりに、四指全体における大範囲の馴染み把持の実現によって、欠点を補う。

そこで、これらの要件を実現するために、まずは既存研究を述べて、抱える課題を挙げる。それから、解決策として回転摩擦のメカニズムによる適応差動機能の実現を提案する。それに応じて、回転摩擦機構の設計、解析を行ったうえで、回転摩擦のメカニズムで駆使させた四指について検証実験を実施して、適応差動機能の有用性を確認する。

#### 3.4.1 既存研究及び課題

四指の差動機能に関する従来研究は、以下の3種類にまとめる。

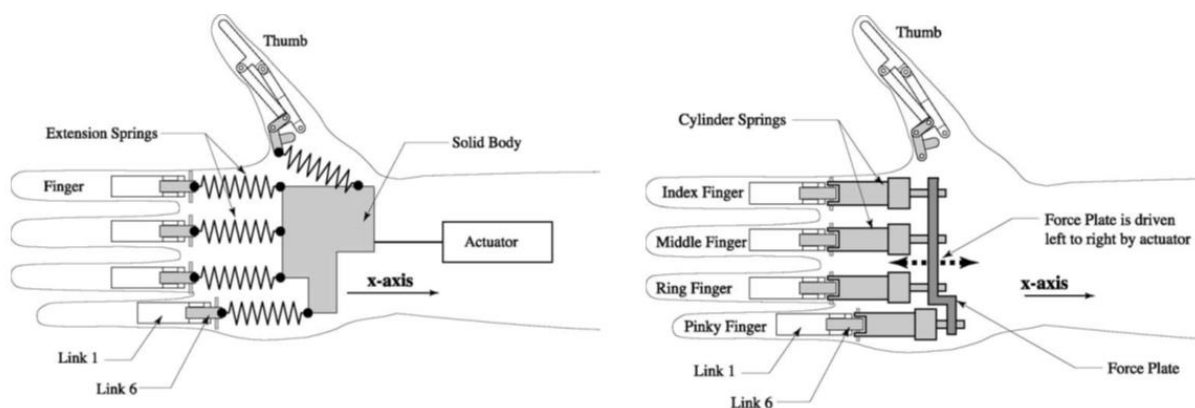


Fig.3.34 バネによる四指の差動機能

バネ式による差動機能：Fig.3.34 に示したように、四指を駆動するワイヤ、あるいはリンクにはバネを取り付けて、アクチュエーターに連結する [N. Dechev 2001][X. Jing 2014]. アクチュエーターの稼働によって、物体にアプローチするときにバネは伸びることはなく、四指が同時に屈曲する。把持するときに、物体の形状によって、先に接触した指が停止になって、ほかの指が引き続き屈曲するたびに、停止になっていた指

のバネを伸ばされて、全部の指が形とマッチングするまでアクチュエーターが動作し続ける。しかしながら、バネの伸び範囲は限定されていて、マッチングを完了しても、定めた最大伸び量に到達しないとアクチュエーターの作動は停止しなく、余分なロスが発生してしまう。場合によって、即時に出力を出して物体をしっかり把持しないと、ものが落ちたりすることも発生する。それ以外、バネの伸び量を満足する同時に、掌の中に使用されるスペースが減少になり、幼児用義手に不向きである。

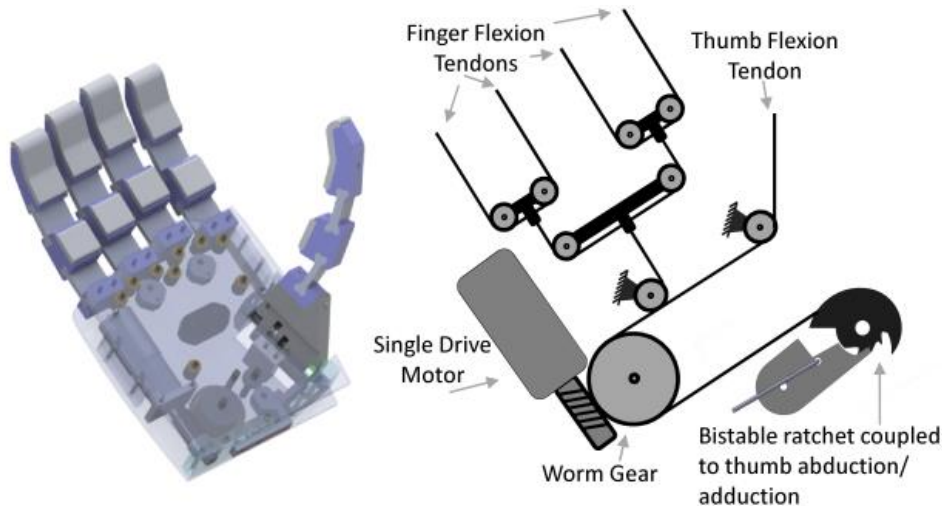


Fig.3.35 滑車による四指の差動機能

滑車式による差動機能：Fig.3.35 に示したように、両指の間に同等的に一つの動滑車で連結してから、もう一つ動滑車と繋がって、アクチュエーターの巻取りによって、ワイヤで四指を稼働させる[J. T. Belter 2013]。把持するとき、各指が物体の形にマッチングした後に、即時に出力を出して、ものを安定的に握るほか、動滑車の摩擦力が極めて小さいため、アクチュエーターへの消耗も少ないというメリットを挙げられる。しかしながら、その反面、小さい摩擦力を持つ動滑車であるこそ、物体にアプローチするとき影響を及ぼす。四指の各指の長さは相違である限り、重量は同様にならないため、屈曲するとき、各指が一致にならず、先に動き出すケースが存在する。それに、空間位置の変わりによって、動き出す指の前後も変わる。結果的に把持には支障を起こしてしまう。それ以外に、滑車の移動はスペースを占められているため、幼児用義手には使用できなくなる。

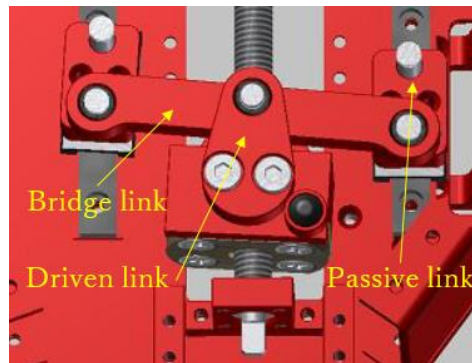


Fig.3.36 リンクによる四指の差動機能

リンク式による差動機能: Fig.3.36 に示したように、主軸が横になっている橋リンクと連結し、引き、送り運動によって、橋リンクの両側に取り付ける受動リンクがそれぞれの指を駆動させる[深谷 2016]. 滑車式と同じく、把持するときに、各指が物体の形に沿って、マッチングしてから、即時に出力を与えられて、ものを安定的に握るが、前動作のアプローチには影響を及ぼす. 四指の各指は重量が異なるため、屈曲するときに、空間の位置によって、重力は作用している方向が変わって、重い指、あるいは軽い指が先に動き出すというばらつきがある. それに、橋リンクの長さは各指のマッチング具合にもかかわるため、場合によってはものを完全にマッチングされる効果が出ないケースも存在してしまう. また、前述と同様、機能の実現にはスペースを要求されるため、幼児用義手に通用できない.



## 3.4.2 回転摩擦のメカニズム

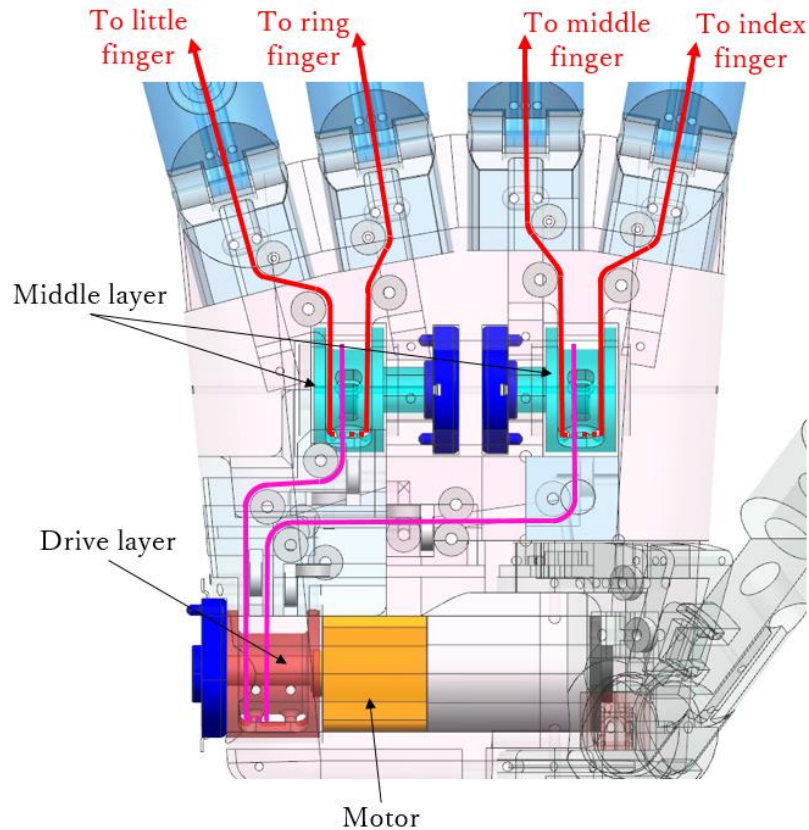


Fig.3.37.a 回転摩擦のメカニズムによる適応差動機能

四指の全体において、挙げられた課題を含めて、所要な運動特徴を実現するために、Fig.3.37.aのように、適応差動機能には、三つの回転摩擦機構で構成する回転摩擦のメカニズムを提案する。具体的に Fig.3.37.b に示したように、2本の赤色のワイヤがそれぞれ青色の機構を通して、示指と中指、環指と小指を連結する。それに、ピンク色のワイヤが1個の赤色の機構に通過して、両端はそれぞれ2個の青色の機構と繋がる。赤色の機構はアクチュエーターによって駆動し、軸の回転と共にワイヤを巻き取って、最終的に指を駆使する。ただし、ここで使用した2個の青の回転摩擦機構は中間層にし、1個の赤の機構は駆動層と呼ぶ。

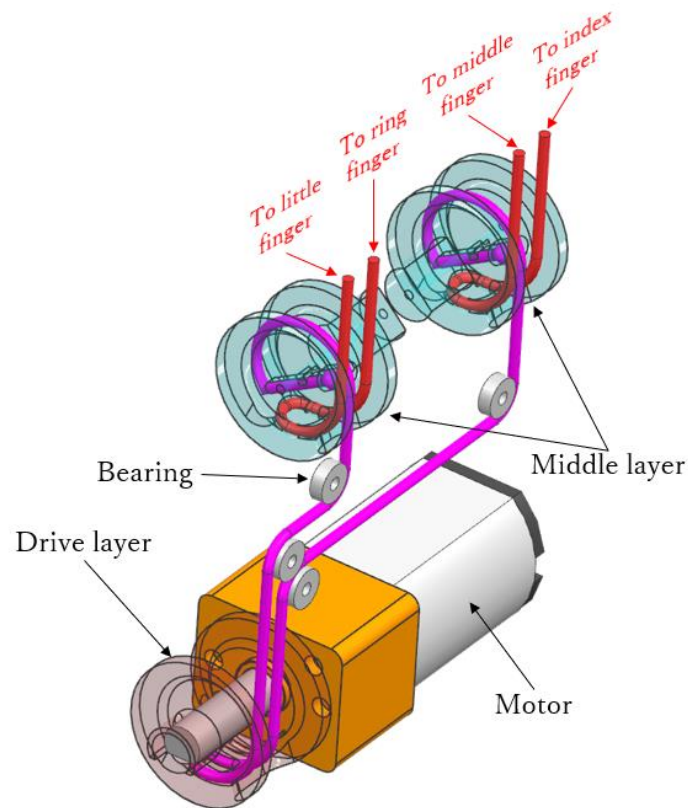


Fig.3.37.b 回転摩擦のメカニズムのワイヤ配置

物体にアプローチするとき、アクチュエーターによるワイヤの巻き取りは、各層に次々と力を伝える。そのときに、下層のワイヤが上層の機構を回転させるたびに、機構内のワイヤが静摩擦力によって互いに相対的な移動はできず、機構上に固定される効果が表して、結果的に各指が一致な運動をし、同時に屈曲するようになる。

一方、把持するとき、先に物体と接触した指は停止になって、相応にワイヤの片方、あるいは全体も動かなくなり、機構を回転されるたびに、機構内のワイヤがやむを得ずに相対的な移動をし始めて、機構はワイヤに動摩擦力をかけるようになる。最終的に動摩擦力の作用によって、物体とマッチングして、馴染み把持を果たす。

すなわち、回転摩擦機構は三つの特徴を持っている：

第一：アプローチするとき、静摩擦力の作用によって、各指が空間中に任意の位置においても運動は一致であり、同時に屈曲できる。

第二：把持するとき、動摩擦力の作用によって、物体の形に沿うマッチングができるようになり、馴染み把持を実現する。

第三：各機構は下層のワイヤの牽引によって、回転しながら性能を発揮しているため、使用するスペースは少なく、幼児用義手に適している。

一つの回転摩擦機構にあたって、2本のワイヤでそれぞれ対応する指を駆動するが、



反力としては、指に作用している弾性力（初張力を含む）と三関節の重力になるほかに、機構内の摩擦力もある。摩擦力は状況によって、静摩擦力と動摩擦力が自動的に切り替わるため、状況を分けて説明する：

1. アプローチの場合：

アプローチをするときに回転摩擦機構のモデルを下記の Fig.3.38 のように立つ。ワイヤがそれぞれ機構内の静摩擦力によって、分断されているように見なすことができるため、ワイヤを機構上に固定するような前提で計算を行う。

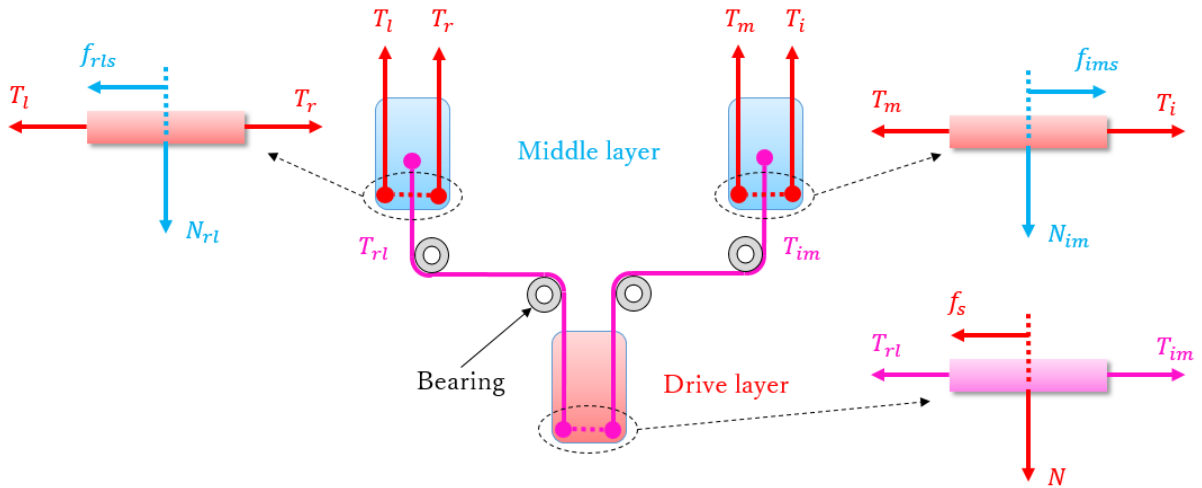


Fig.3.38 アプローチによる回転摩擦機構のモデル

このモデルによって、まずは各指が所要な牽引力の関係式を立つ。ただし、指が重力を受けていながら、空間位置の変化によって重力が作用する方向も変わるため、指を任意の空間位置においても回転摩擦機構が機能できるように、重力が最大になる位置を前提に議論する：仮に空間中の指が z 軸回りに、x 軸から y 軸方向に屈曲していくと、重力は常に -y 軸方向にあり、指にかける重力は第二、三象限では正の仕事をし、第一、四象限では負の仕事をする。そのため、第一、四象限の位置で、回転摩擦機構における最大の摩擦係数を探し出す。

よって、第一象限で各指における牽引力は：

$$T_{n1} = \frac{M_{n2}r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{n1} + \sigma_{n1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{n2}}{r_{e2}} + \frac{1}{r_{f1}} [R_{n1}C_1 \quad R_{n2}C_{12} + L_{n1}C_1 \quad R_{n3}C_{123} + L_{n2}C_{12} + L_{n1}C_1] \mathbf{G}_n \quad (3.30)$$

同様に、第四象限での牽引力は：

$$T_{n1} = \frac{M_{n2}r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{n1} + \sigma_{n1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{n2}}{r_{e2}} + \frac{1}{r_{f1}} [R_{n1}S_1 \quad R_{n2}S_{12} + L_{n1}S_1 \quad R_{n3}S_{123} + L_{n2}S_{12} + L_{n1}S_1] \mathbf{G}_n \quad (3.31)$$

ただし，式中には：

$$\kappa_{n2} = \frac{\kappa_{n1}r_{e2}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{n3}r_{f2}}{r_{e3}} \quad (3.32)$$

$$M_{n2} = \frac{M_{n1}r_{f2}}{r_{e1}} - \frac{M_{n3}r_{e2}}{r_{f3}} \quad (3.33)$$

$$\kappa_{n3} = \frac{\kappa_{n2}r_{e3}}{r_{f2}} \quad (3.34)$$

$$M_{n3} = \frac{M_{n2}r_{f3}}{r_{e2}} \quad (3.35)$$

これらの式に基づいて，それぞれ第一、四象限でモデルによって，各層の各回転摩擦機構における静摩擦力の関係式を立つ．ただし，各指関節の幾何学のパラメータは同様であるため，指の略称  $n$  を省略する．

まず，第一象限で示指・中指の中間層における静摩擦力の関係式は：

$$\begin{cases} T_m - T_i = f_{ims} \\ T_m + T_i = N_{im} = T_{im} \\ x_i = x_m \\ \theta_{i1} = \theta_{i2} = \theta_{i3} = \theta_{m1} = \theta_{m2} = \theta_{m3} \end{cases} \quad (3.36)$$

第一象限での示指と中指の牽引力を代入して，展開すると：

$$\begin{cases} f_{ims} = \frac{(M_{m2}-M_{i2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{m1}-K_{i1}+\sigma_{m1}-\sigma_{i1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{m2}-\kappa_{i2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \\ - \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}C_1 \quad R_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1 \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1] \mathbf{G}_i \\ N_{im} = T_{im} = \frac{(M_{m2}+M_{i2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{m1}+K_{i1}+\sigma_{m1}+\sigma_{i1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{m2}+\kappa_{i2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}C_1 \quad R_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1 \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1] \mathbf{G}_i \end{cases} \quad (3.37)$$

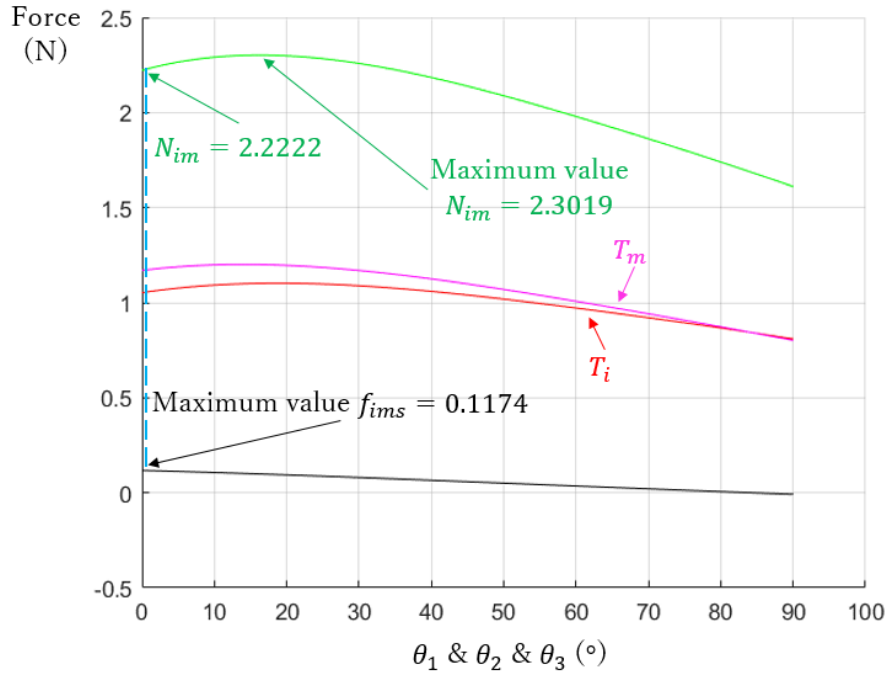


Fig.3.39 第一象限で示指・中指の中間層における静摩擦力の変化

計算した結果は Fig.3.39 のように示す. 最大静摩擦力および対応している支持力の結果に基づいて, 摩擦係数 $\mu_{im}$ を下記の式で求める:

$$\mu_{im} = \frac{f_{imd}}{N_{im}} \geq \frac{f_{ims}}{N_{im}} = 0.0528 \quad (3.38)$$

次に, 第一象限で環指・小指の中間層における静摩擦力の関係式は:

$$\begin{cases} T_r - T_l = f_{rls} \\ T_r + T_l = N_{rl} = T_{rl} \\ x_r = x_l \\ \theta_{r1} = \theta_{r2} = \theta_{r3} = \theta_{l1} = \theta_{l2} = \theta_{l3} \end{cases} \quad (3.39)$$

第一象限での環指と小指の牽引力を代入して, 展開すると:

$$\begin{cases} f_{rls} = \frac{(M_{r2}-M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{r1}-K_{l1}+\sigma_{r1}-\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{x_{r2}-x_{l2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\ - \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \\ N_{rl} = T_{rl} = \frac{(M_{r2}+M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{r1}+K_{l1}+\sigma_{r1}+\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{x_{r2}+x_{l2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \end{cases} \quad (3.40)$$

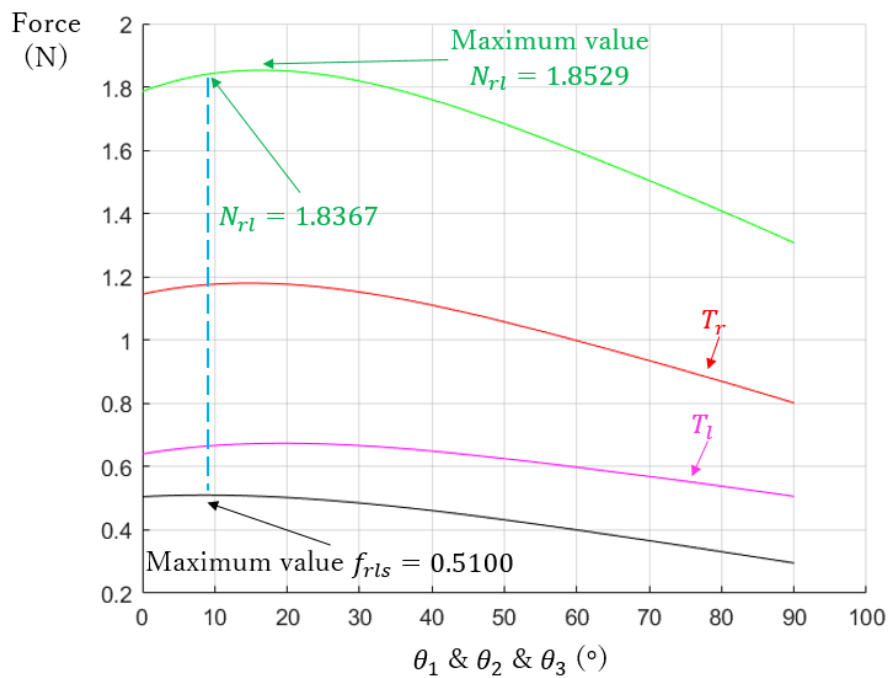


Fig.3.40 第一象限で環指・小指の中間層における静摩擦力の変化

計算した結果は Fig.3.40 のように示す. 最大静摩擦力および対応している支持力の結果に基づいて, 摩擦係数 $\mu_{rl}$ を下記の式で求める:

$$\mu_{rl} = \frac{f_{rls}}{N_{rl}} \geq \frac{f_{rls}}{N_{rl}} = 0.2777 \quad (3.41)$$

最後に, 第一象限で四指の駆動層における静摩擦力の関係式は:

$$\begin{cases} T_{im} - T_{rl} = f_s \\ T_{im} + T_{rl} = N = T \\ x_i = x_m = x_r = x_l \end{cases} \quad (3.42)$$

計算した第一象限での中間層を稼働させる牽引力を代入して, 展開すると:

$$\left\{ \begin{aligned}
 f_s &= \frac{(M_{m2}+M_{i2}-M_{r2}-M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} - \frac{\kappa_{m2}+\kappa_{i2}-\kappa_{r2}-\kappa_{l2}}{r_{e2}} \\
 &\quad + \frac{(K_{m1}+K_{i1}-K_{r1}-K_{l1}+\sigma_{m1}+\sigma_{i1}-\sigma_{r1}-\sigma_{l1})}{r_{f1}} \\
 + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \\
 + \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}C_1 \quad R_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1 \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1] \mathbf{G}_i \\
 - \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\
 - \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \\
 N = T &= \frac{(M_{m2}+M_{i2}+M_{r2}+M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} - \frac{\kappa_{m2}+\kappa_{i2}+\kappa_{r2}+\kappa_{l2}}{r_{e2}} \\
 &\quad + \frac{(K_{m1}+K_{i1}+K_{r1}+K_{l1}+\sigma_{m1}+\sigma_{i1}+\sigma_{r1}+\sigma_{l1})}{r_{f1}} \\
 + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \\
 + \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}C_1 \quad R_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1 \quad R_{i3}C_{123} + L_{i2}C_{12} + L_{i1}C_1] \mathbf{G}_i \\
 + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\
 + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l
 \end{aligned} \right. \quad (3.43)$$

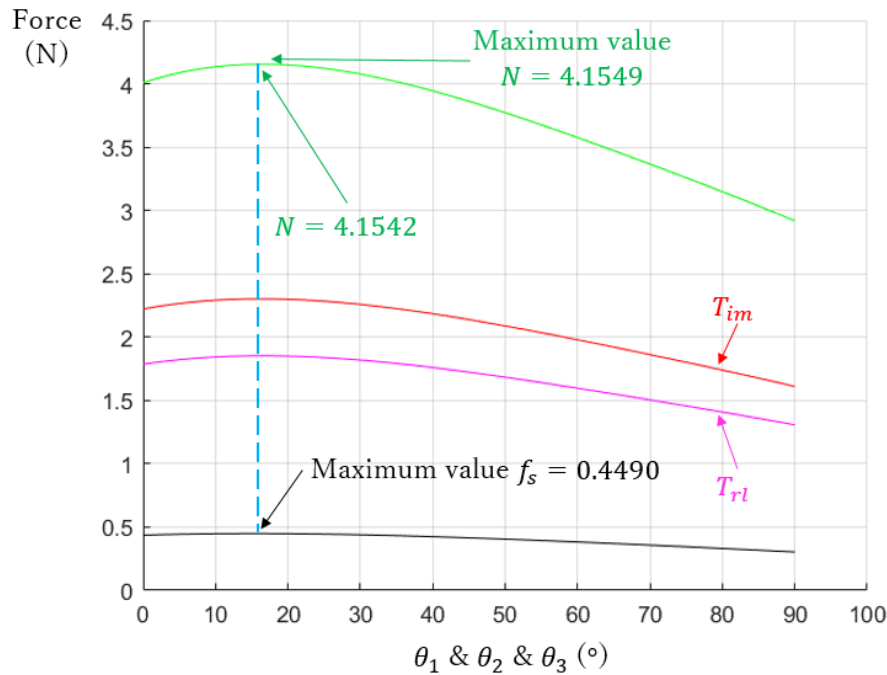


Fig.3.41 第一象限で四指の駆動層における静摩擦力の変化

計算した結果は Fig.3.41 のように示す。最大静摩擦力および対応している支持力の結果に基づいて、摩擦係数 $\mu$ を下記の式で求める：

$$\mu = \frac{f_d}{N} \geq \frac{f_s}{N} = 0.1081 \quad (3.44)$$

第一象限での計算を終えて、引き続き第四象限にて計算を行う。最初は、第四象限で示指・中指の中間層における静摩擦力の関係式は：

$$\begin{cases} T_m - T_i = f_{ims} \\ T_m + T_i = N_{im} = T_{im} \\ x_i = x_m \\ \theta_{i1} = \theta_{i2} = \theta_{i3} = \theta_{m1} = \theta_{m2} = \theta_{m3} \end{cases} \quad (3.45)$$

第四象限での示指と中指の牽引力を代入して、展開すると：

$$\begin{cases} f_{ims} = \frac{(M_{m2}-M_{i2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{m1}-K_{i1}+\sigma_{m1}-\sigma_{i1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{m2}-\kappa_{i2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}S_1 \quad R_{m2}S_{12} + L_{m1}S_1 \quad R_{m3}S_{123} + L_{m2}S_{12} + L_{m1}S_1] \mathbf{G}_m \\ - \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}S_1 \quad R_{i2}S_{12} + L_{i1}S_1 \quad R_{i3}S_{123} + L_{i2}S_{12} + L_{i1}S_1] \mathbf{G}_i \\ N_{im} = T_{im} = \frac{(M_{m2}+M_{i2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{m1}+K_{i1}+\sigma_{m1}+\sigma_{i1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{m2}+\kappa_{i2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}S_1 \quad R_{m2}S_{12} + L_{m1}S_1 \quad R_{m3}S_{123} + L_{m2}S_{12} + L_{m1}S_1] \mathbf{G}_m \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}S_1 \quad R_{i2}S_{12} + L_{i1}S_1 \quad R_{i3}S_{123} + L_{i2}S_{12} + L_{i1}S_1] \mathbf{G}_i \end{cases} \quad (3.46)$$

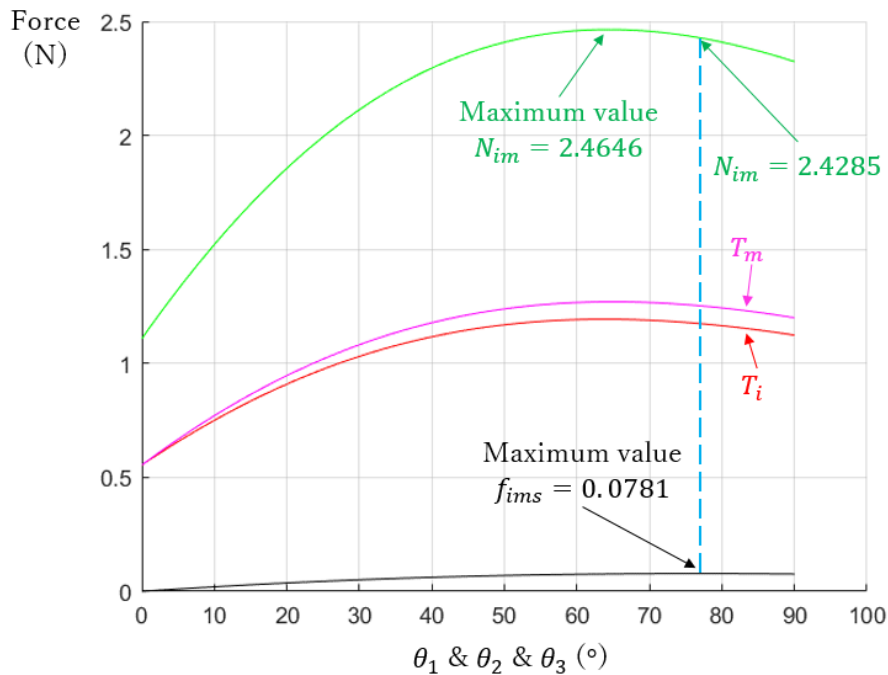


Fig.3.42 第四象限で示指・中指の中間層における静摩擦力の変化

計算した結果は Fig.3.42 のように示す。最大静摩擦力および対応している支持力の結果に基づいて、摩擦係数 $\mu_{im}$ を下記の式で求める：

$$\mu_{im} = \frac{f_{imd}}{N_{im}} \geq \frac{f_{ims}}{N_{im}} = 0.0322 \quad (3.47)$$

それから，第四象限で環指・小指の中間層における静摩擦力の関係式は：

$$\begin{cases} T_r - T_l = f_{rls} \\ T_r + T_l = N_{rl} = T_{rl} \\ x_r = x_l \\ \theta_{r1} = \theta_{r2} = \theta_{r3} = \theta_{l1} = \theta_{l2} = \theta_{l3} \end{cases} \quad (3.48)$$

第四象限での環指と小指の牽引力を代入して，展開すると：

$$\begin{cases} f_{rls} = \frac{(M_{r2}-M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{r1}-K_{l1}+\sigma_{r1}-\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{r2}-\kappa_{l2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}S_1 \quad R_{r2}S_{12} + L_{r1}S_1 \quad R_{r3}S_{123} + L_{r2}S_{12} + L_{r1}S_1] \mathbf{G}_r \\ - \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}S_1 \quad R_{l2}S_{12} + L_{l1}S_1 \quad R_{l3}S_{123} + L_{l2}S_{12} + L_{l1}S_1] \mathbf{G}_l \\ N_{rl} = T_{rl} = \frac{(M_{r2}+M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{r1}+K_{l1}+\sigma_{r1}+\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{r2}+\kappa_{l2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}S_1 \quad R_{r2}S_{12} + L_{r1}S_1 \quad R_{r3}S_{123} + L_{r2}S_{12} + L_{r1}S_1] \mathbf{G}_r \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}S_1 \quad R_{l2}S_{12} + L_{l1}S_1 \quad R_{l3}S_{123} + L_{l2}S_{12} + L_{l1}S_1] \mathbf{G}_l \end{cases} \quad (3.49)$$

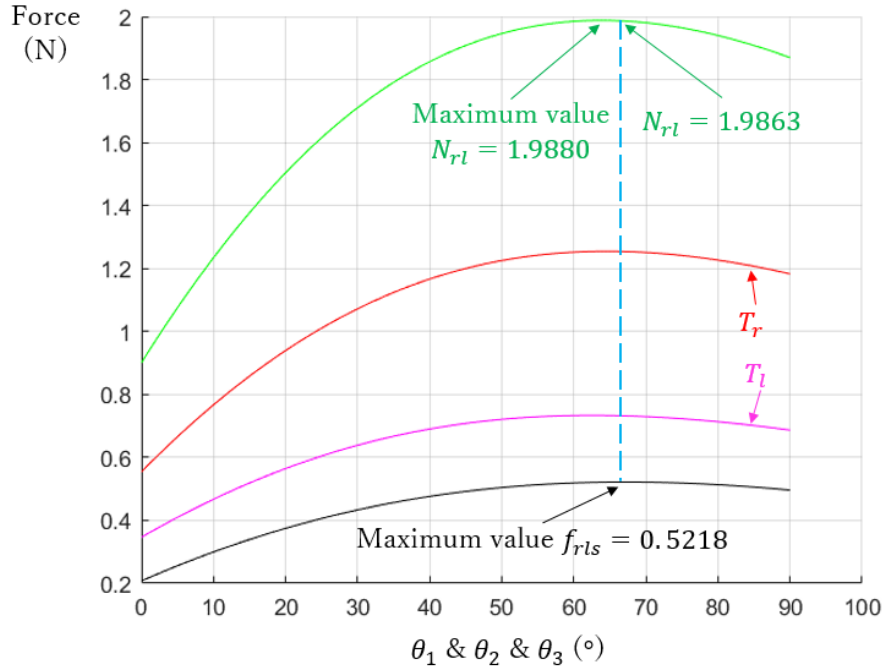


Fig.3.43 第四象限で環指・小指の中間層における静摩擦力の変化

計算した結果は Fig.3.43 のように示す．最大静摩擦力および対応している支持力の結果に基づいて，摩擦係数 $\mu_{rl}$ を下記の式で求める：

$$\mu_{rl} = \frac{f_{rld}}{N_{rl}} \geq \frac{f_{rls}}{N_{rl}} = 0.2627 \quad (3.50)$$

最後に、第四象限で四指の駆動層における静摩擦力の関係式は：

$$\begin{cases} T_{im} - T_{rl} = f_s \\ T_{im} + T_{rl} = N = T \\ x_i = x_m = x_r = x_l \end{cases} \quad (3.51)$$

計算した第四象限での中間層を稼働させる牽引力を代入して、展開すると：

$$\left\{ \begin{aligned} f_s &= \frac{(M_{m2}+M_{i2}-M_{r2}-M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} - \frac{\varkappa_{m2}+\varkappa_{i2}-\varkappa_{r2}-\varkappa_{l2}}{r_{e2}} \\ &\quad + \frac{(K_{m1}+K_{i1}-K_{r1}-K_{l1}+\sigma_{m1}+\sigma_{i1}-\sigma_{r1}-\sigma_{l1})}{r_{f1}} \\ &+ \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}S_1 \quad R_{m2}S_{12} + L_{m1}S_1 \quad R_{m3}S_{123} + L_{m2}S_{12} + L_{m1}S_1] \mathbf{G}_m \\ &\quad + \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}S_1 \quad R_{i2}S_{12} + L_{i1}S_1 \quad R_{i3}S_{123} + L_{i2}S_{12} + L_{i1}S_1] \mathbf{G}_i \\ &\quad - \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}S_1 \quad R_{r2}S_{12} + L_{r1}S_1 \quad R_{r3}S_{123} + L_{r2}S_{12} + L_{r1}S_1] \mathbf{G}_r \\ &\quad - \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}S_1 \quad R_{l2}S_{12} + L_{l1}S_1 \quad R_{l3}S_{123} + L_{l2}S_{12} + L_{l1}S_1] \mathbf{G}_l \\ N = T &= \frac{(M_{m2}+M_{i2}+M_{r2}+M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} - \frac{\varkappa_{m2}+\varkappa_{i2}+\varkappa_{r2}+\varkappa_{l2}}{r_{e2}} \\ &\quad + \frac{(K_{m1}+K_{i1}+K_{r1}+K_{l1}+\sigma_{m1}+\sigma_{i1}+\sigma_{r1}+\sigma_{l1})}{r_{f1}} \\ &+ \frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}S_1 \quad R_{m2}S_{12} + L_{m1}S_1 \quad R_{m3}S_{123} + L_{m2}S_{12} + L_{m1}S_1] \mathbf{G}_m \\ &\quad + \frac{1}{r_{f1}} [R_{i1}S_1 \quad R_{i2}S_{12} + L_{i1}S_1 \quad R_{i3}S_{123} + L_{i2}S_{12} + L_{i1}S_1] \mathbf{G}_i \\ &\quad + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}S_1 \quad R_{r2}S_{12} + L_{r1}S_1 \quad R_{r3}S_{123} + L_{r2}S_{12} + L_{r1}S_1] \mathbf{G}_r \\ &\quad + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}S_1 \quad R_{l2}S_{12} + L_{l1}S_1 \quad R_{l3}S_{123} + L_{l2}S_{12} + L_{l1}S_1] \mathbf{G}_l \end{aligned} \right. \quad (3.52)$$



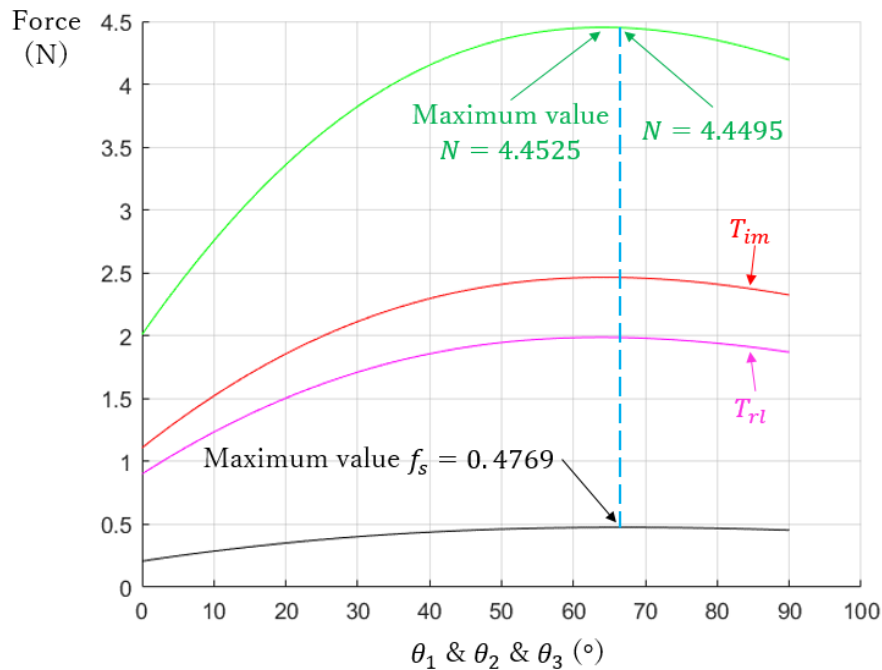


Fig.3.44 第四象限で四指の駆動層における静摩擦力の変化

計算した結果は Fig.3.44 のように示す. 最大静摩擦力および対応している支持力の結果に基づいて, 摩擦係数 $\mu$ を下記の式で求める:

$$\mu = \frac{f_d}{N} \geq \frac{f_s}{N} = 0.1072 \quad (3.53)$$

Table.3.4 第一・四象限での摩擦係数の計算結果

	中間層		駆動層
	示指・中指	環指・小指	
第一象限	0.0528	0.2777	0.1081
第四象限	0.0322	0.2627	0.1072

摩擦係数の計算結果をまとめると Table.3.4 のように示す. 中間層か駆動層にもかわらず, 最大摩擦係数が第一象限にて発生する. 回転摩擦機構に基づく実物を製作する際に, 機能を保つ前提に動摩擦力が作用するときの消耗をできる限り抑えるため, 使用する材料の摩擦係数は計算した理論値より大きくにし, かつ接近することが望ましい. そのため, 異なる材料で回転摩擦機構を製作して, 摩擦係数を測る. Fig.3.45 に示したように, 回転摩擦機構をそれぞれナイロン、グラス繊維、アクリルと ABS で仕上げ、バイスで機構を挟み、ワイヤを機構に通して地面の方向に垂れる. それに, ワイヤの両端に同じ重量の分銅を吊らせて, 片方だけに分銅を追加しつつ, ワイヤが相対な移動が発生すると動摩擦力が作用し始めると判断し, そのときの両端に吊る分銅の重量差を記録する. それによって, 計算で動摩擦係数を得られる. そして, 各種

類の材料において、異なる重量で5回ずつ測定し、動摩擦係数の平均値を取り、使用する材料を確定する。ただし、駆動層の機構は掌のスペースに制限されるため、中間層と異なる構造にする。結果はそれぞれ中間層が Table.3.5、駆動層は Table.3.6 のように表す。

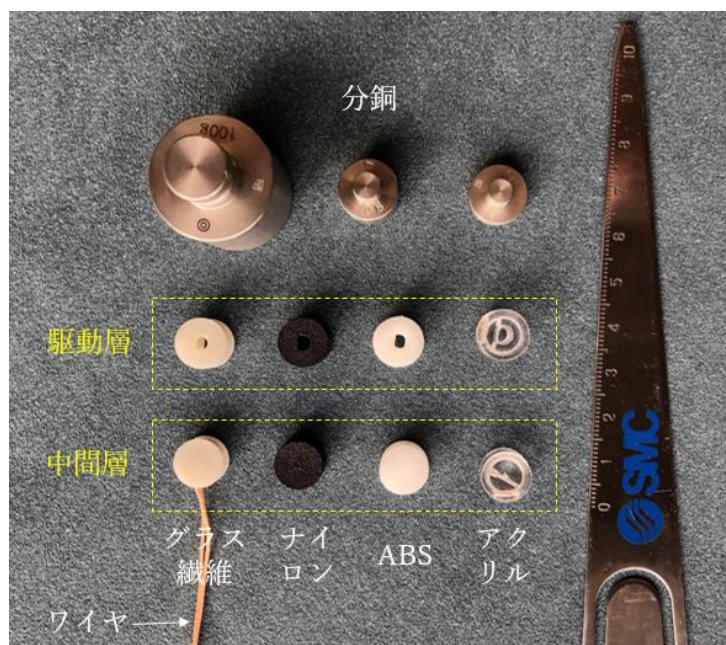


Fig.3.45 異なる材料による回転摩擦機構の摩擦力の計測

Table.3.5 中間層・各種類の材料の動摩擦係数

	ナイロン (黒)	グラス繊維 (灰)	アクリル (透明)	ABS (白)
1回目	$T_1: 10g$ $T_2: 55g$ $\mu = 0.6923$	$T_1: 10g$ $T_2: 60g$ $\mu = 0.7143$	$T_1: 10g$ $T_2: 45g$ $\mu = 0.6364$	$T_1: 10g$ $T_2: 35g$ $\mu = 0.5556$
2回目	$T_1: 15g$ $T_2: 60g$ $\mu = 0.6000$	$T_1: 15g$ $T_2: 80g$ $\mu = 0.6842$	$T_1: 15g$ $T_2: 55g$ $\mu = 0.5714$	$T_1: 15g$ $T_2: 45g$ $\mu = 0.5000$
3回目	$T_1: 20g$ $T_2: 75g$ $\mu = 0.5789$	$T_1: 20g$ $T_2: 95g$ $\mu = 0.6522$	$T_1: 20g$ $T_2: 70g$ $\mu = 0.5556$	$T_1: 20g$ $T_2: 55g$ $\mu = 0.4667$
4回目	$T_1: 25g$ $T_2: 90g$ $\mu = 0.5652$	$T_1: 25g$ $T_2: 110g$ $\mu = 0.6296$	$T_1: 25g$ $T_2: 85g$ $\mu = 0.5455$	$T_1: 25g$ $T_2: 65g$ $\mu = 0.4444$
5回目	$T_1: 30g$ $T_2: 105g$ $\mu = 0.5556$	$T_1: 30g$ $T_2: 120g$ $\mu = 0.6000$	$T_1: 30g$ $T_2: 100g$ $\mu = 0.5385$	$T_1: 30g$ $T_2: 75g$ $\mu = 0.4286$
平均値	$\mu = 0.5984$	$\mu = 0.6561$	$\mu = 0.5695$	$\mu = 0.4790$

Table.3.6 駆動層・各種類の材料の動摩擦係数

	ナイロン (黒)	ガラス繊維 (灰)	アクリル (透明)	ABS (白)
1回目	$T_1: 10g$ $T_2: 50g$ $\mu = 0.6667$	$T_1: 10g$ $T_2: 60g$ $\mu = 0.7143$	$T_1: 10g$ $T_2: 45g$ $\mu = 0.6364$	$T_1: 10g$ $T_2: 30g$ $\mu = 0.5000$
2回目	$T_1: 15g$ $T_2: 60g$ $\mu = 0.6000$	$T_1: 15g$ $T_2: 80g$ $\mu = 0.6842$	$T_1: 15g$ $T_2: 60g$ $\mu = 0.6000$	$T_1: 15g$ $T_2: 45g$ $\mu = 0.5000$
3回目	$T_1: 20g$ $T_2: 75g$ $\mu = 0.5789$	$T_1: 20g$ $T_2: 95g$ $\mu = 0.6522$	$T_1: 20g$ $T_2: 75g$ $\mu = 0.5789$	$T_1: 20g$ $T_2: 55g$ $\mu = 0.4667$
4回目	$T_1: 25g$ $T_2: 90g$ $\mu = 0.5652$	$T_1: 25g$ $T_2: 110g$ $\mu = 0.6296$	$T_1: 25g$ $T_2: 85g$ $\mu = 0.5455$	$T_1: 25g$ $T_2: 65g$ $\mu = 0.4444$
5回目	$T_1: 30g$ $T_2: 120g$ $\mu = 0.6000$	$T_1: 30g$ $T_2: 120g$ $\mu = 0.6000$	$T_1: 30g$ $T_2: 95g$ $\mu = 0.5200$	$T_1: 30g$ $T_2: 75g$ $\mu = 0.4286$
平均値	$\mu = 0.6022$	$\mu = 0.6561$	$\mu = 0.5762$	$\mu = 0.4679$

以上の結果により、中間層、および駆動層は ABS で回転摩擦機構に所要な摩擦係数の理論値より大きく、かつ接近しているため、製作材料として選定し、機能の発揮を期待できる。

2. 把持の場合：

前述の結果に基づいて、それぞれ中間層、および駆動層における ABS の摩擦係数を使用して、引き続き第一象限にて把持するときに回転摩擦機構内に生じる動摩擦力を議論して、指を停止された各種のケースを分けて四指全体における運動の変化を確かめる。

まずは示指を停止されたケースから説明する。駆動層からのワイヤの牽引によって、環指・小指の中間層は回転しながら、機構内のワイヤが変わらず静摩擦力で対応する指を稼働するが、示指・中指の中間層において、機構内のワイヤが示指と連結する端は動かなくなり、相対な移動が発生して動摩擦力が作用している。それに、駆動層のワイヤを巻き取る角速度は変わらないため、示指・中指の中間層のワイヤが2倍の走行距離になり、結果的に動摩擦力が作用している中指は環指と小指より2倍の屈曲角度で先に 90 度に到達する。この間に駆動層内に静摩擦力で作用しているのかを論理的に検証する。中指は 90 度に到達した後に、駆動層内の静摩擦力が動摩擦力に変わって作用し始まる。

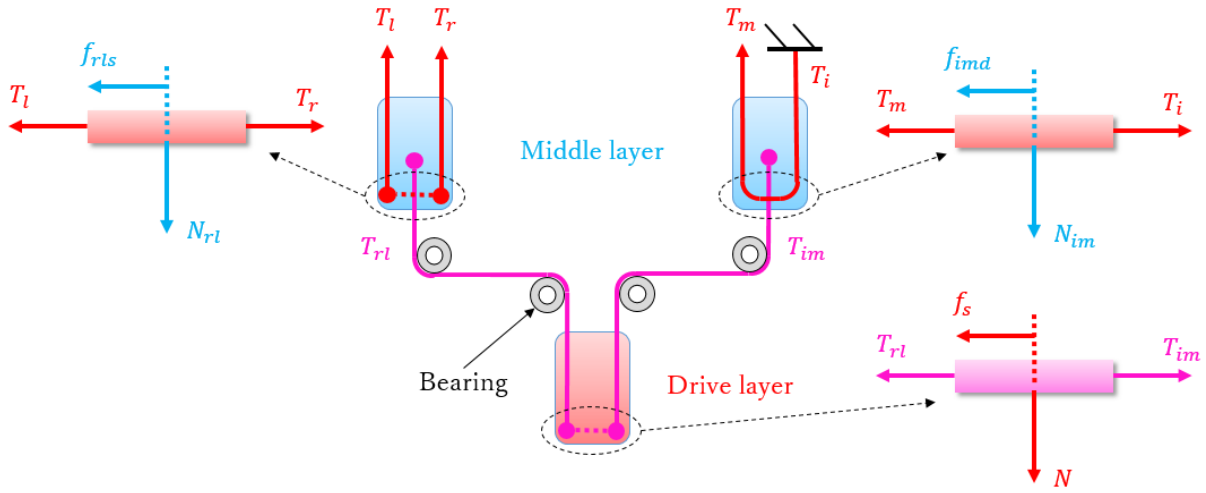


Fig.3.46 第一象限で示指の停止による回転摩擦機構のモデル

そのため、回転摩擦機構のモデルを上記の Fig.3.46 のように立つ。それによって、示指・中指の中間層における動摩擦力の関係式は：

$$\begin{cases} T_i - T_m = f_{imd} \\ T_i + T_m = N_{im} = T_{im} \\ f_{imd} = \mu_{im} N_{im} \\ \mu_{im} = 0.4790 \end{cases} \quad (3.54)$$

$T_i$ を消去し、牽引力を代入して、式を整理すると：

$$\begin{cases} f_{imd} = \frac{2\mu_{im}}{1-\mu_{im}} \left( +\frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \right) \\ N_{im} = T_{im} = \frac{2}{1-\mu_{im}} \left( +\frac{1}{r_{f1}} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \right) \end{cases} \quad (3.55)$$

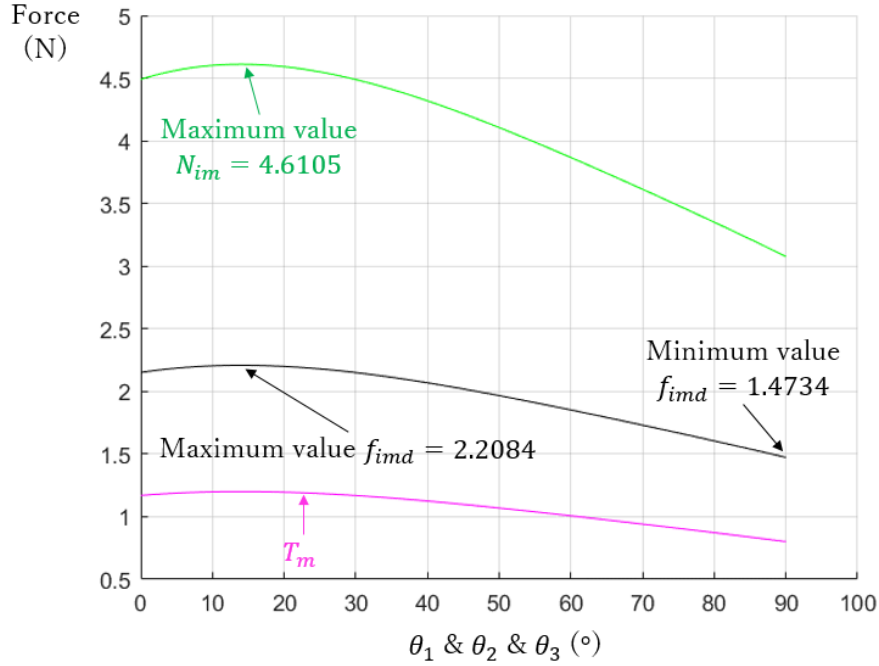


Fig.3.47 第一象限で示指の停止による示指・中指の中間層の変化

計算の結果は Fig.3.47 のように表す. 最小動摩擦力が 1.4734N であり, Fig.3.39 に示した静摩擦力のときの最大値 0.1174N より大きく, 動摩擦力が作用していることを証明した.

それから, 環指・小指の中間層における静摩擦力の関係式は:

$$\begin{cases} T_r - T_l = f_{rls} \\ T_r + T_l = N_{rl} = T_{rl} \\ x_r = x_l \\ \theta_{r1} = \theta_{r2} = \theta_{r3} = \theta_{l1} = \theta_{l2} = \theta_{l3} \end{cases} \quad (3.56)$$

環指と小指の牽引力を代入して, 展開すると:

$$\begin{cases} f_{rls} = \frac{(M_{r2}-M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{r1}-K_{l1}+\sigma_{r1}-\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{x_{r2}-x_{l2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\ - \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \\ N_{rl} = T_{rl} = \frac{(M_{r2}+M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{r1}+K_{l1}+\sigma_{r1}+\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{x_{r2}+x_{l2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \end{cases} \quad (3.57)$$

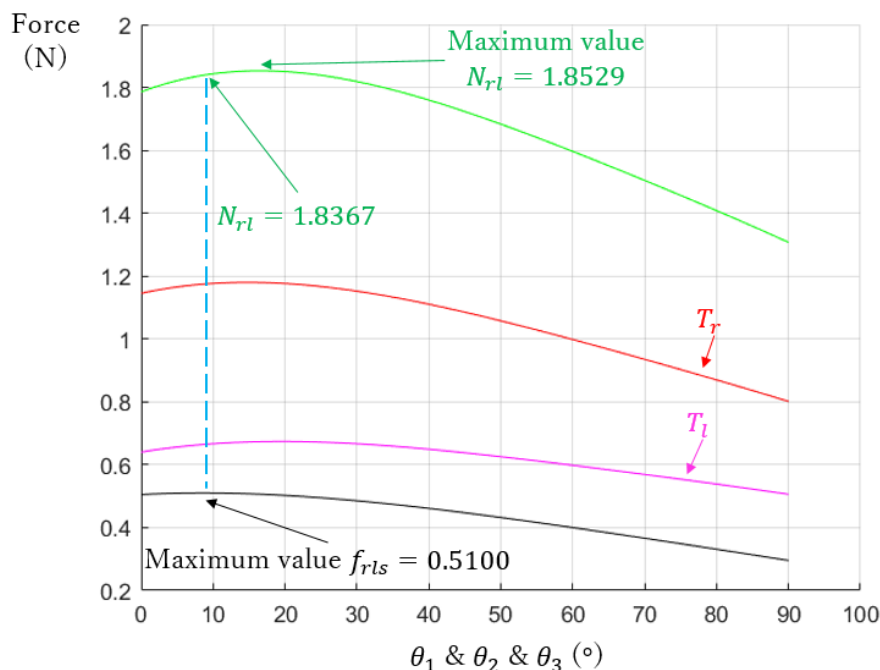


Fig.3.48 第一象限で示指の停止による環指・小指の中間層の変化

計算した結果は Fig.3.48 のように示す. 最大静摩擦力および対応している支持力の結果に基づいて, 摩擦係数を下記の式で求める:

$$\mu_{rl} = \frac{f_{rlt}}{N_{rl}} = 0.4790 \geq \frac{f_{rls}}{N_{rl}} = 0.2777 \quad (3.58)$$

よって, 中間層の ABS の摩擦係数 0.4790 を超えずに, 静摩擦力が作用していることを証明した.

引き続き, 駆動層において, 静摩擦力が作用していると仮定し, 正しいのかを検証する. そのため, 仮の関係式は下記のように:

$$\begin{cases} T_{im} - T_{rl} = f_s \\ T_{im} + T_{rl} = N = T \\ x_i = x_m = x_r = x_l \end{cases} \quad (3.59)$$

計算した中間層を稼働させる二つの牽引力を代入して, 展開すると:

$$\left\{ \begin{aligned}
 f_s &= \frac{2}{1-\mu_{im}} \left[ \frac{M_{m2}r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{m1}+\sigma_{m1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{m2}}{r_{e2}} \right] - \frac{(M_{r2}+M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} \\
 &\quad - \frac{(K_{r1}+K_{l1}+\sigma_{r1}+\sigma_{l1})}{r_{f1}} + \frac{\kappa_{r2}+\kappa_{l2}}{r_{e2}} \\
 &+ \frac{2}{r_{f1}(1-\mu_{im})} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \\
 &\quad - \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\
 &\quad - \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \\
 N = T &= \frac{2}{1-\mu_{im}} \left[ \frac{M_{m2}r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{m1}+\sigma_{m1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{m2}}{r_{e2}} \right] + \frac{(M_{r2}+M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} \\
 &\quad + \frac{(K_{r1}+K_{l1}+\sigma_{r1}+\sigma_{l1})}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{r2}+\kappa_{l2}}{r_{e2}} \\
 &+ \frac{2}{r_{f1}(1-\mu_{im})} [R_{m1}C_1 \quad R_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1 \quad R_{m3}C_{123} + L_{m2}C_{12} + L_{m1}C_1] \mathbf{G}_m \\
 &\quad + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\
 &\quad + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l
 \end{aligned} \right. \quad (3.60)$$

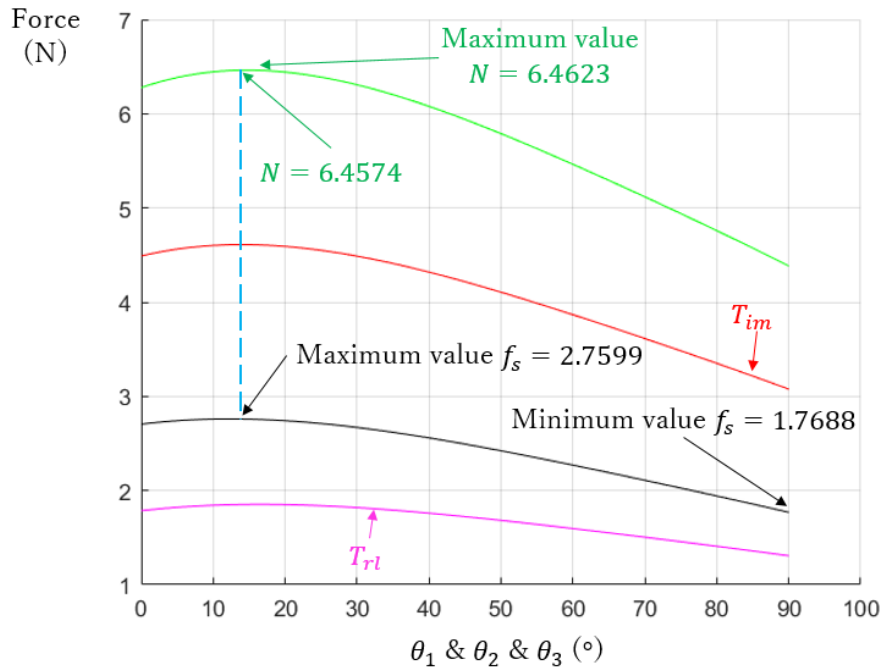


Fig.3.49 第一象限で示指の停止による四指の駆動層の変化

計算した結果は Fig.3.49 のように示す。最大静摩擦力および対応している支持力の結果に基づいて、摩擦係数を下記の式で求める：

$$\mu = \frac{f_d}{N} = 0.4679 \geq \frac{f_s}{N} = 0.4274 \quad (3.61)$$

よって、駆動層の ABS の摩擦係数 0.4679 を超えず、仮定した静摩擦力で作用して



いることを確認した。

示指を停止されたケースを説明し終え、これから示指と中指を同時に停止されたケースを述べる。駆動層からのワイヤの牽引によって、環指・小指の中間層は回転しながら、機構内のワイヤが依然に静摩擦力で対応する指を稼働しているが、示指・中指の中間層において、機構内のワイヤが停止された示指と中指に連結しているため、両端は全部動かなくなり、対応する機構も回転しなくなる。その原因で、駆動層から示指・中指の中間層と繋がるワイヤの片端も動くことができず、残る片端は環指・小指の中間層と結んでいるため、相対な移動が発生し、動摩擦力が作用している。この過程に各層に対応した異なる摩擦力を論理的に検証する。

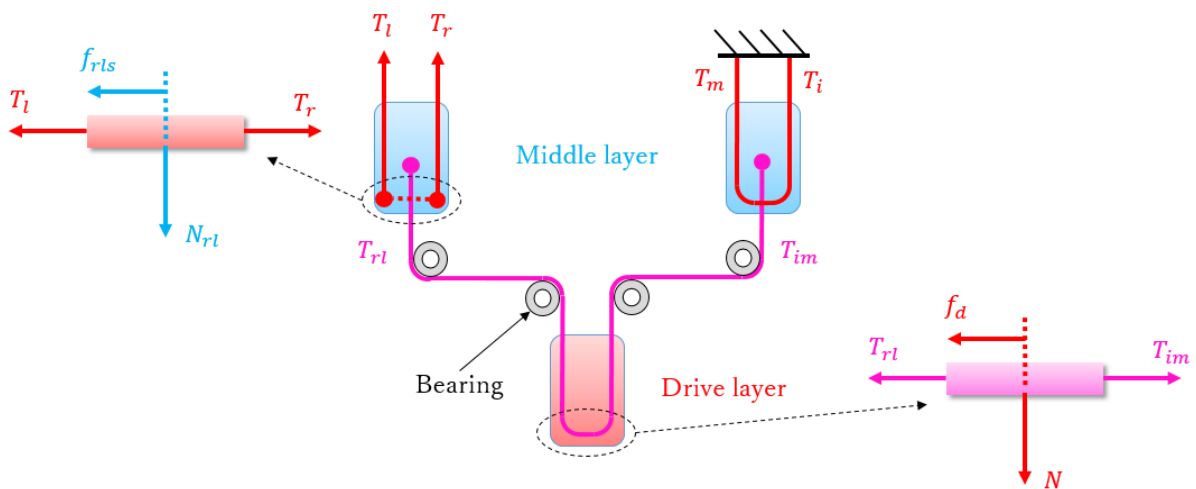


Fig.3.50 第一象限で示指・中指の停止による回転摩擦機構のモデル

そのため、回転摩擦機構のモデルを上記の Fig.3.50 のように立つ。それによって、示指・中指の中間層における関係式は存在せず、環指・小指の中間層の静摩擦力の関係式を書く：

$$\begin{cases} T_r - T_l = f_{rls} \\ T_r + T_l = N_{rl} = T_{rl} \\ x_r = x_l \\ \theta_{r1} = \theta_{r2} = \theta_{r3} = \theta_{l1} = \theta_{l2} = \theta_{l3} \end{cases} \quad (3.62)$$

環指と小指の牽引力を代入して、展開すると：

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{rls} = \frac{(M_{r2}-M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{r1}-K_{l1}+\sigma_{r1}-\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{r2}-\kappa_{l2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\ - \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \\ N_{rl} = T_{rl} = \frac{(M_{r2}+M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{r1}+K_{l1}+\sigma_{r1}+\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{r2}+\kappa_{l2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \end{array} \right. \quad (3.63)$$

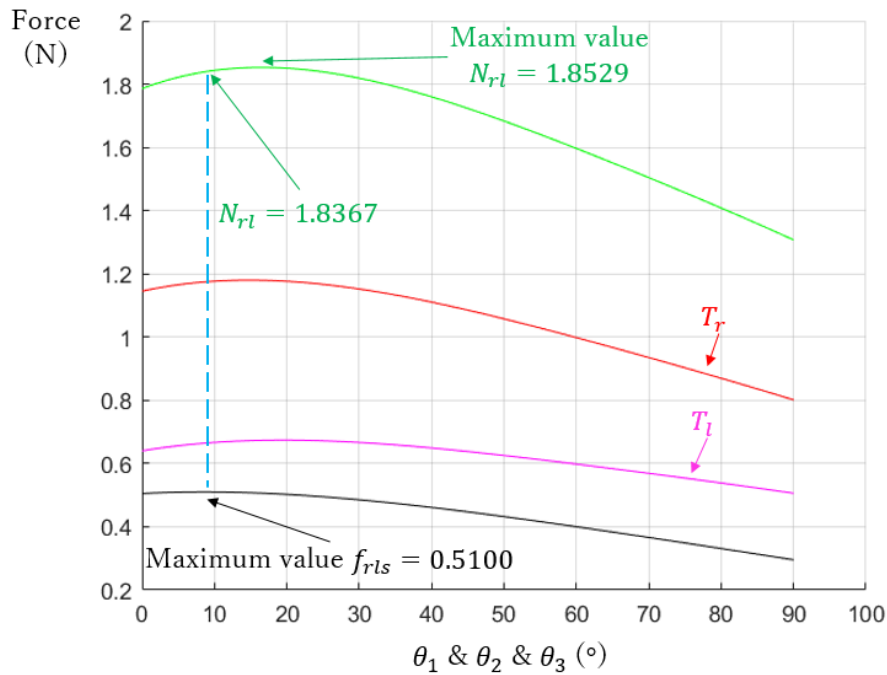


Fig.3.51 第一象限で示指・中指の停止による環指・小指の中間層の変化

計算した結果は Fig.3.51 のように示す。最大静摩擦力および対応している支持力の結果に基づいて、摩擦係数を下記の式で得られる：

$$\mu_{rl} = \frac{f_{rla}}{N_{rl}} = 0.4790 \geq \frac{f_{rls}}{N_{rl}} = 0.2777 \quad (3.64)$$

よって、中間層の ABS の摩擦係数 0.4790 を超えずに、静摩擦力が作用していることを証明した。

引き続き、駆動層において、動摩擦力が作用しているため、関係式は下記のように：

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{im} - T_{rl} = f_d \\ T_{im} + T_{rl} = N = T \\ f_d = \mu N \\ \mu = 0.4679 \end{array} \right. \quad (3.65)$$

$T_{im}$ を消去し、計算した環指・小指の中間層を稼働させた牽引力を代入して、展開すると：

$$\left\{ \begin{array}{l} f_d = \frac{2\mu}{1-\mu} \left( \begin{array}{l} \frac{(M_{r2}+M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{r1}+K_{l1}+\sigma_{r1}+\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{r2}+\kappa_{l2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \end{array} \right) \\ N = T = \frac{2}{1-\mu} \left( \begin{array}{l} \frac{(M_{r2}+M_{l2})r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{r1}+K_{l1}+\sigma_{r1}+\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{r2}+\kappa_{l2}}{r_{e2}} \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{r1}C_1 \quad R_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1 \quad R_{r3}C_{123} + L_{r2}C_{12} + L_{r1}C_1] \mathbf{G}_r \\ + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \end{array} \right) \end{array} \right. \quad (3.66)$$

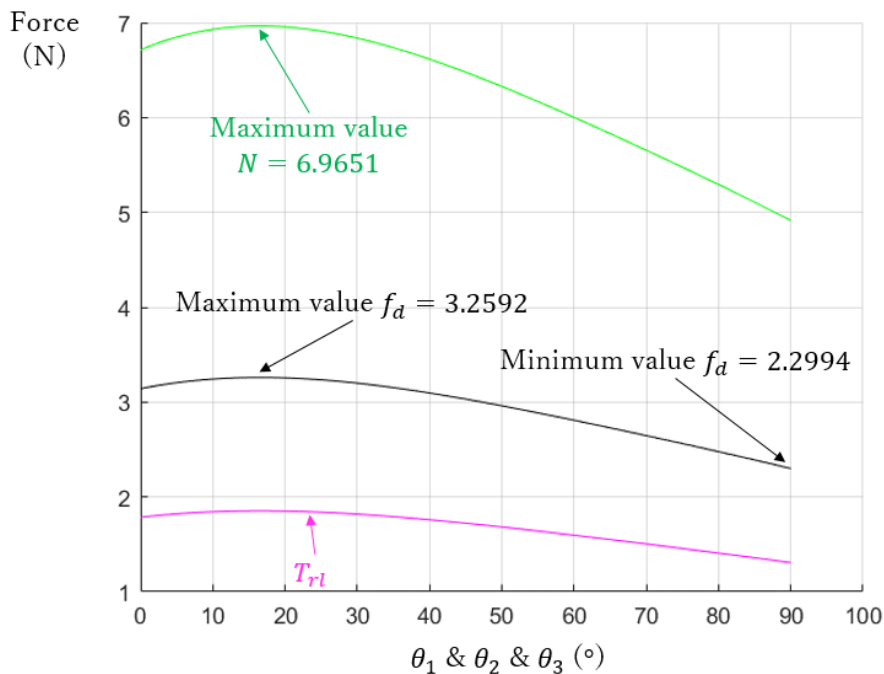


Fig.3.52 第一象限で示指・中指の停止による四指の駆動層の変化

計算した結果は Fig.3.52 のように示す。最小動摩擦力が 2.2994N であり、Fig.3.41 に示した静摩擦力のときの最大値 0.4490N より大きく、動摩擦力が作用していることを証明した。

示指と中指を共に停止されたケースの説明を完了して、引き続き示指、中指と環指を同時に停止されたケースを述べる。駆動層からのワイヤの牽引によって、環指・小指の中間層は回転させるが、機構内のワイヤが環指と連結する端は動かなくなり、相対な移動が発生して動摩擦力が作用している。一方、駆動層の機構に通したワイヤにおいて、片端は動かない示指・中指の中間層に連結しているため、動かなくなり、対応する機構も回転しなくなる。残る片端は環指・小指の中間層と結んでいるため、つい

でに相対な移動が発生し、動摩擦力が作用している。この過程に各層に対応した異なる摩擦力を論理的に検証する。

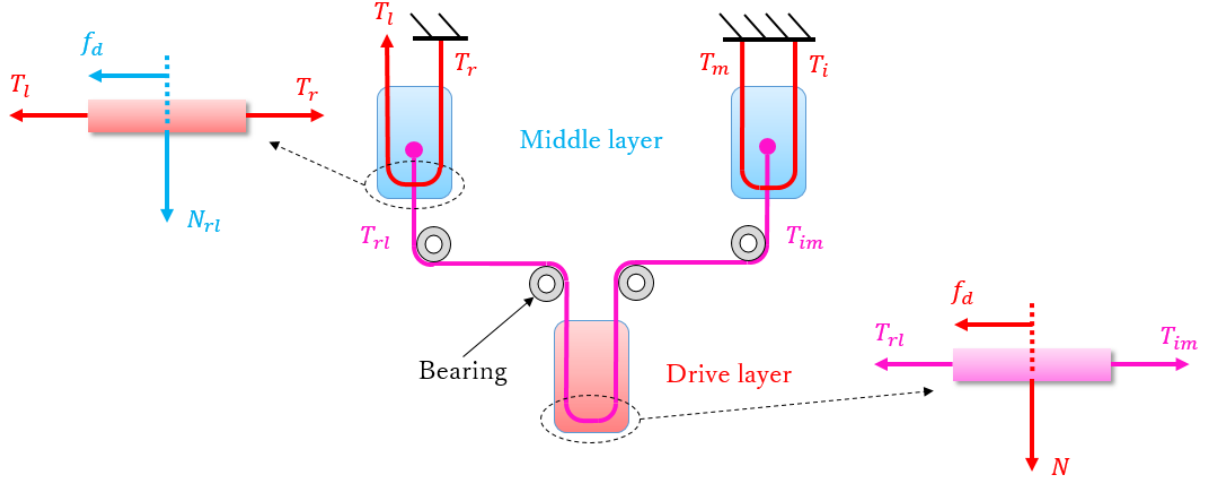


Fig.3.53 第一象限で示指・中指・環指の停止による回転摩擦機構のモデル

そのため、回転摩擦機構のモデルを上記の Fig.3.53 のように立つ。それによって、示指・中指の中間層における関係式は存在せず、環指・小指の中間層の動摩擦力の関係式を書く：

$$\begin{cases} T_r - T_l = f_{rl}d \\ T_r + T_l = N_{rl} = T_{rl} \\ f_{rl}d = \mu_{rl}N_{rl} \\ \mu_{rl} = 0.4790 \end{cases} \quad (3.67)$$

$T_r$ を消去し、小指の牽引力を代入して、式を整理すると：

$$\begin{cases} f_{rl}d = \frac{2\mu_{rl}}{1-\mu_{rl}} \left( \frac{M_{l2}r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{l1}+\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{l2}}{r_{e2}} \right) \\ N_{rl} = T_{rl} = \frac{2}{1-\mu_{rl}} \left( \frac{M_{l2}r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{l1}+\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{l2}}{r_{e2}} \right) \end{cases} \left( + \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l \right) \quad (3.68)$$

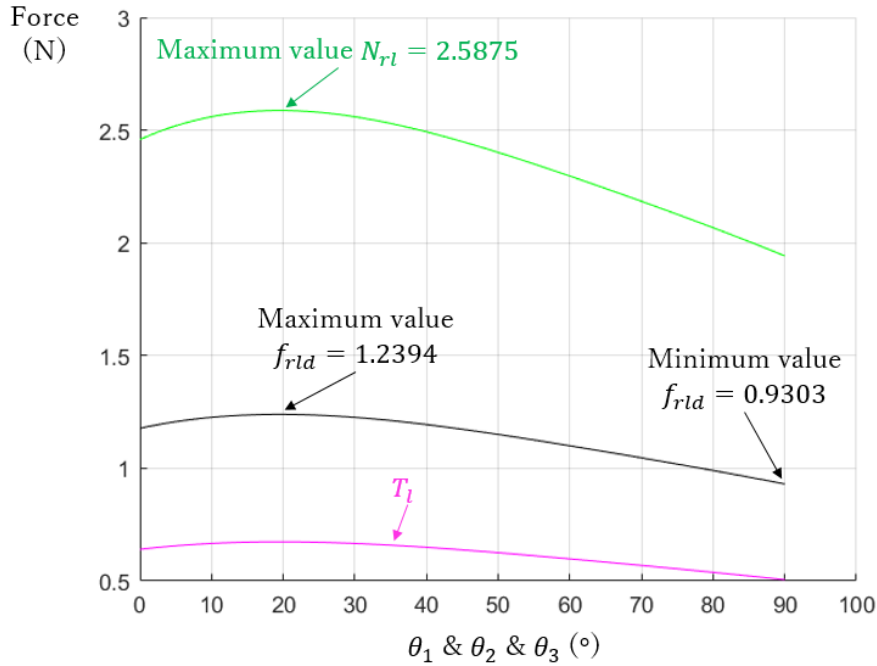


Fig.3.54 第一象限で示指・中指・環指の停止による環指・小指の中間層の変化

計算の結果は Fig.3.54 のように表す。最小動摩擦力が 0.9303N であり，Fig.3.40 に示した静摩擦力のときの最大値 0.5100N より大きく，動摩擦力が作用していることを証明した。

続いて，駆動層において，動摩擦力が作用しているため，関係式は下記のように：

$$\begin{cases} T_{im} - T_{rl} = f_d \\ T_{im} + T_{rl} = N = T \\ f_d = \mu N \\ \mu = 0.4679 \end{cases} \quad (3.69)$$

$T_{im}$  を消去し，計算した環指・小指の中間層を稼働させた牽引力を代入して，展開すると：

$$\begin{cases} f_d = \frac{4\mu}{(1-\mu)(1-\mu_{rl})} \left( \frac{\frac{M_{l2}r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{l1}+\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{l2}}{r_{e2}}}{+ \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l} \right) \\ N = T = \frac{4}{(1-\mu)(1-\mu_{rl})} \left( \frac{\frac{M_{l2}r_{e1}}{r_{f1}r_{f2}} + \frac{(K_{l1}+\sigma_{l1})r_{e1}}{r_{f1}} - \frac{\kappa_{l2}}{r_{e2}}}{+ \frac{1}{r_{f1}} [R_{l1}C_1 \quad R_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1 \quad R_{l3}C_{123} + L_{l2}C_{12} + L_{l1}C_1] \mathbf{G}_l} \right) \end{cases} \quad (3.70)$$

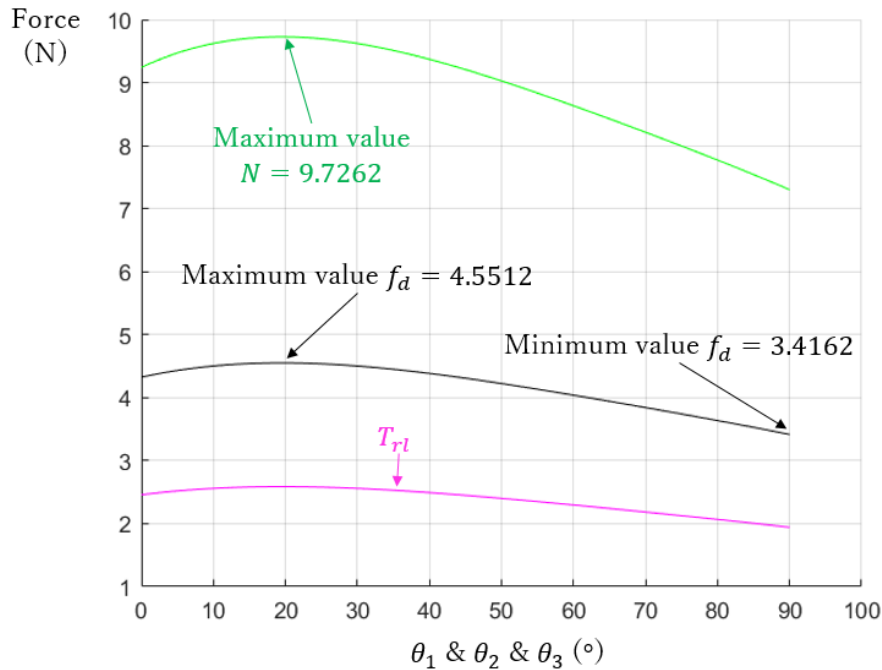


Fig.3.55 第一象限で示指・中指・環指の停止による四指の駆動層の変化

計算した結果は Fig.3.55 のように示す。最小動摩擦力が 3.4162N であり、Fig.3.41 に示した静摩擦力のときの最大値 0.4490N より大きく、動摩擦力が作用していることを証明した。

### 3.4.3 適応差動機能の動作検証

本研究で提案した回転摩擦のメカニズムによって、適応差動機能の実現を検証する。実験は四つのケースを分けて実施する：一つ目は四指をブロックせずに、アクティブワイヤの牽引によって、四本指が運動特徴に従って同時に屈曲できるかを検証する。二つ目は示指をブロックして、残る三本指の運動を確認する。三つ目は示指と中指をブロックして、残る二本指の運動を確かめる。四つ目は示指、中指と環指をブロックして、残る小指の運動を調べる。

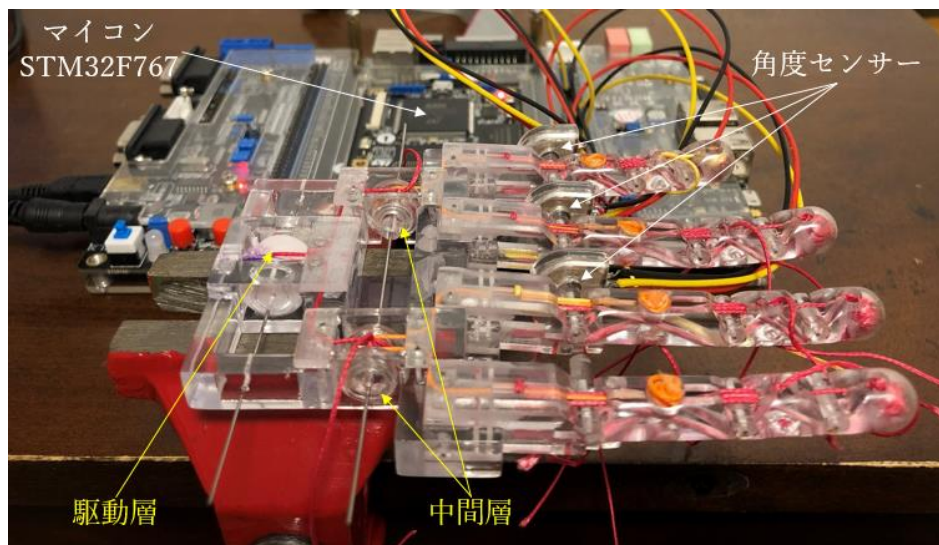


Fig.3.56 実験用フレームと装置

これに対して、実験手法としては、まず Fig.3.56 のように、フレームを製作して、四指と三つの回転摩擦機構を組み込んで、MP 関節に角度センサーを付けて、関節角度のデータを採取できるようにする。

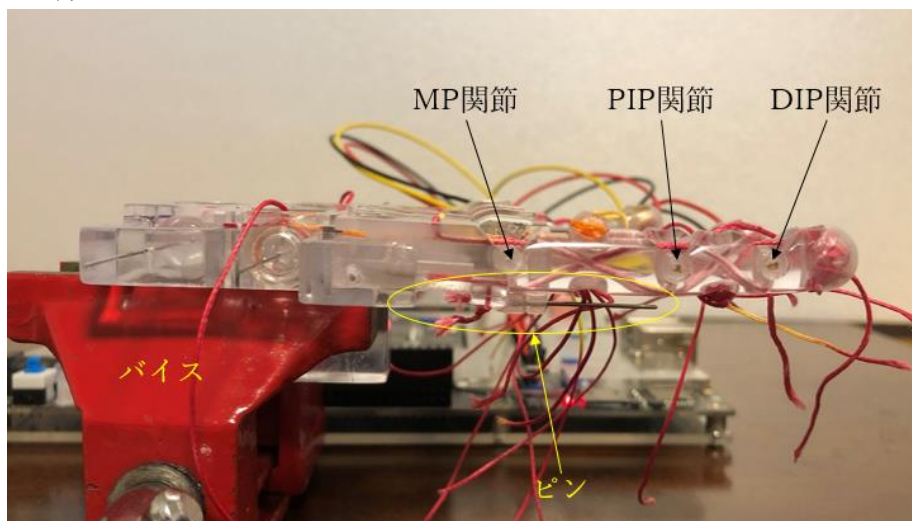


Fig.3.57 手指のブロック

そして、Fig.3.57 のように、フレームを第一象限で固定して、ブロックしようとする指には、MP 関節とフレームの間にピンを差し込んで、運動を阻止する。



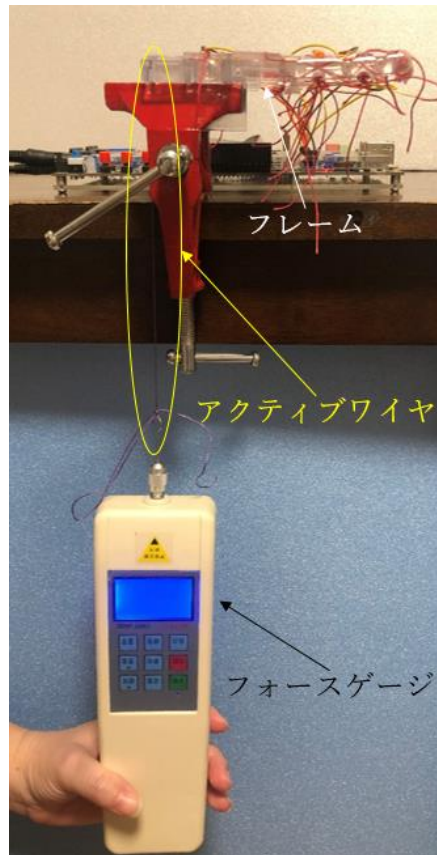


Fig.3.58 実験風景

最後に, Fig.3.58 のように, アクティブワイヤをフォースゲージと結び付けて, フォースゲージを引っ張りながら, 指を屈曲させて, 牽引力と関節角度のデータを読み取る.

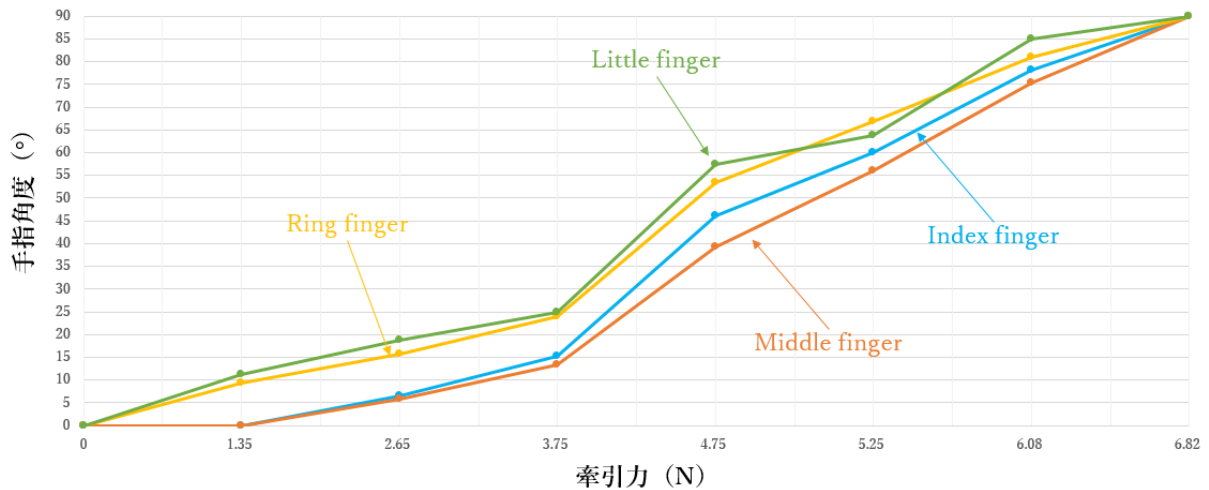


Fig.3.59.a 四指をブロックしない実測結果



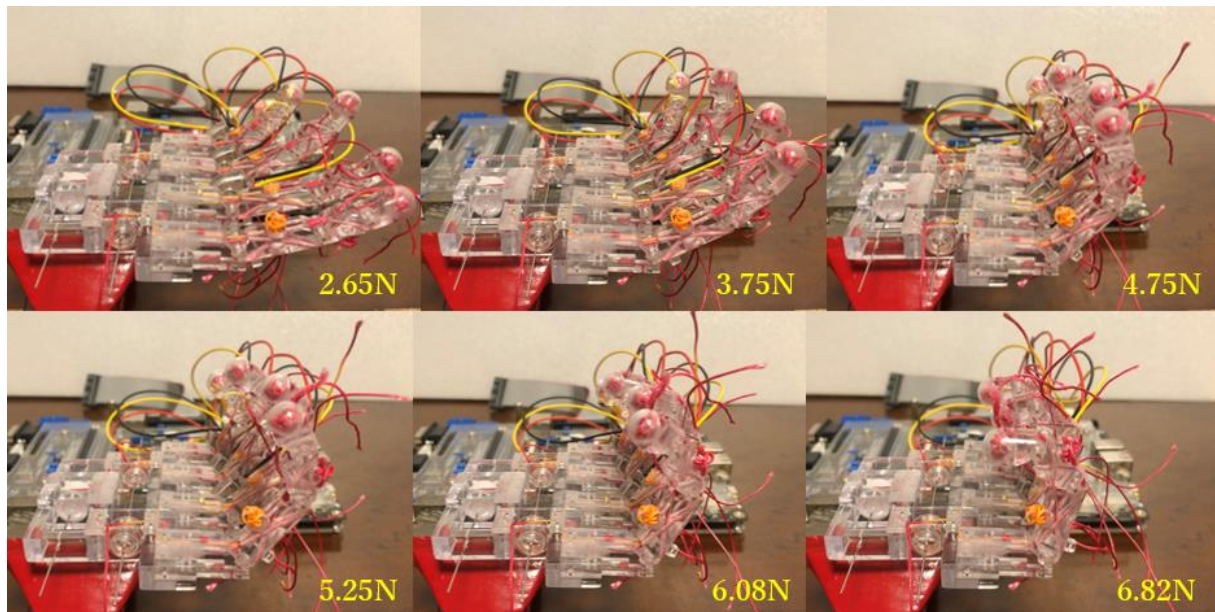


Fig.3.59.b 四指をブロックしない運動変化

以上によって、一つ目における四指をブロックしないケースの実測結果は Fig.3.59 のように示す。フォースゲージからの牽引力を増加するたびに、先に環指と小指が動き出して、1.35N から示指と中指もついでに運動し始まって、四指が同時に屈曲しながら、6.82N になった時点で全部 90 度に屈曲した。Fig.3.44 による 4.1549N の理論値と比べて、実測値には誤差が存在しているが、正確性を確かめた。一方、中間層にある二つの回転摩擦機構の静摩擦力によって、示指と中指の一致性がよく、環指と小指も一致性を持っていることを明らかにした。

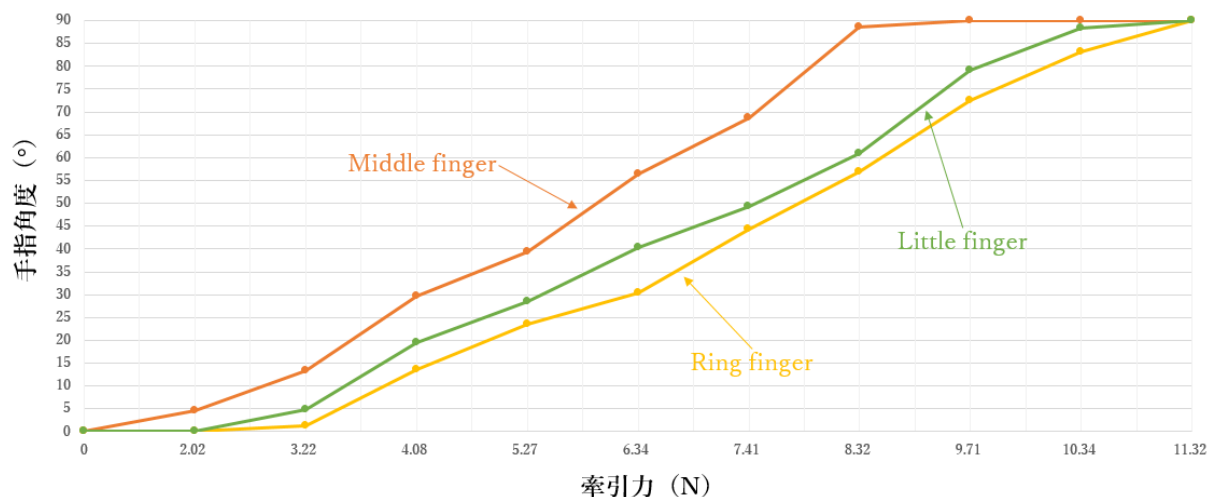


Fig.3.60.a 示指をブロックした実測結果

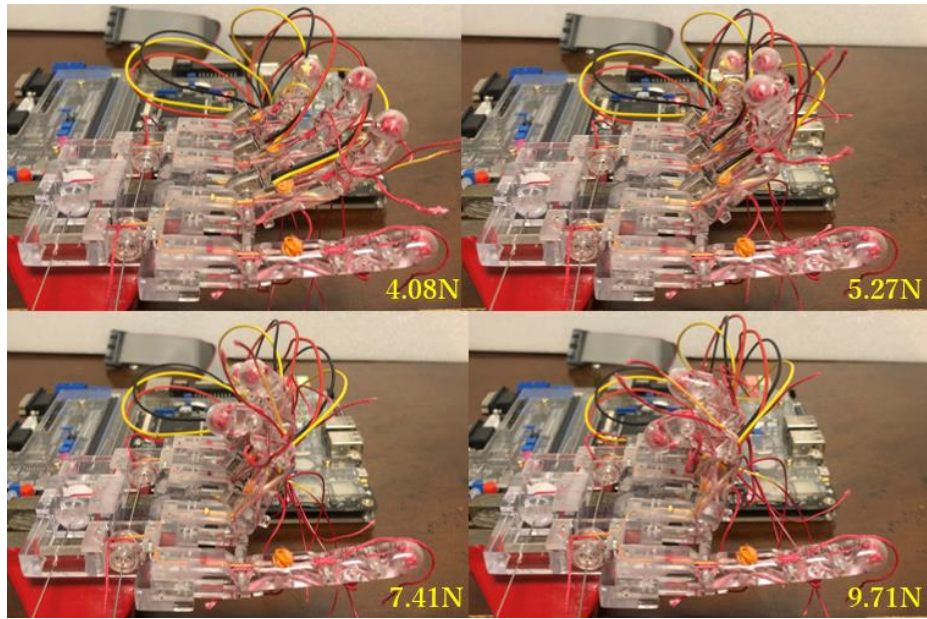


Fig.3.60.b 示指をブロックした運動変化

二つ目における示指をブロックしたケースの実測結果は Fig.3.60 のように示す。フォースゲージからの牽引力を増加するたびに、先に中指が動き出して、2.0200N から環指と小指もついでに運動し始まって、四指が同時に屈曲しながら、8.3200N になった時点で中指はほぼ 90 度に屈曲した。その後、11.32N に至ると環指と小指が 90 度になった。Fig.3.49 による 6.4623N の理論値と比べて、実測値には誤差が存在しているが、正確性を確かめた。一方、中指の屈曲が環指と小指より早くなった原因としては、示指のブロックによって、理論的に中指のワイヤの走行は環指と小指のを追いつくために、ワイヤの運動が早くなり、結果的に中指が先に屈曲するようになった。

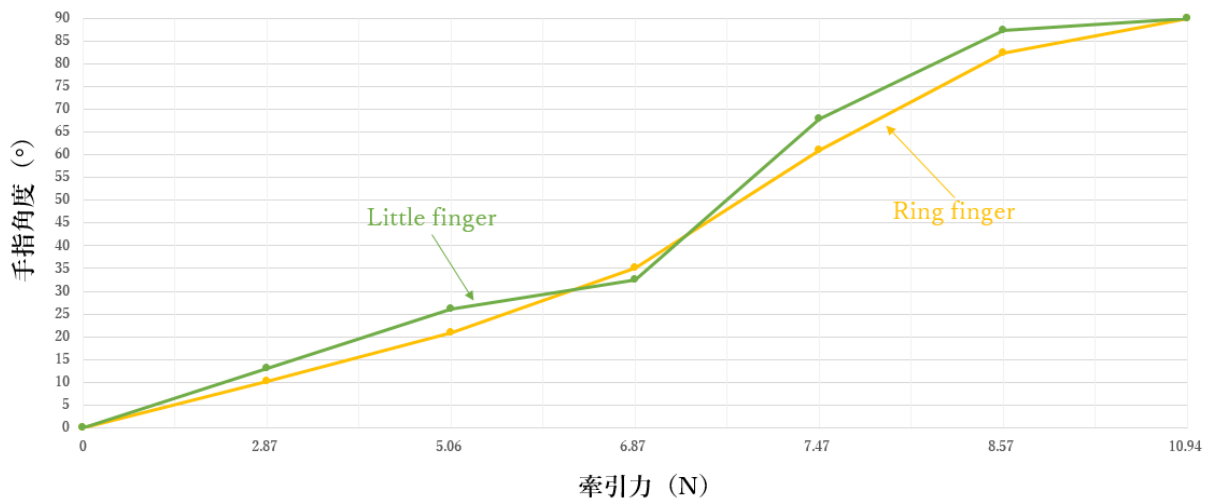


Fig.3.61.a 示指・中指をブロックした実測結果

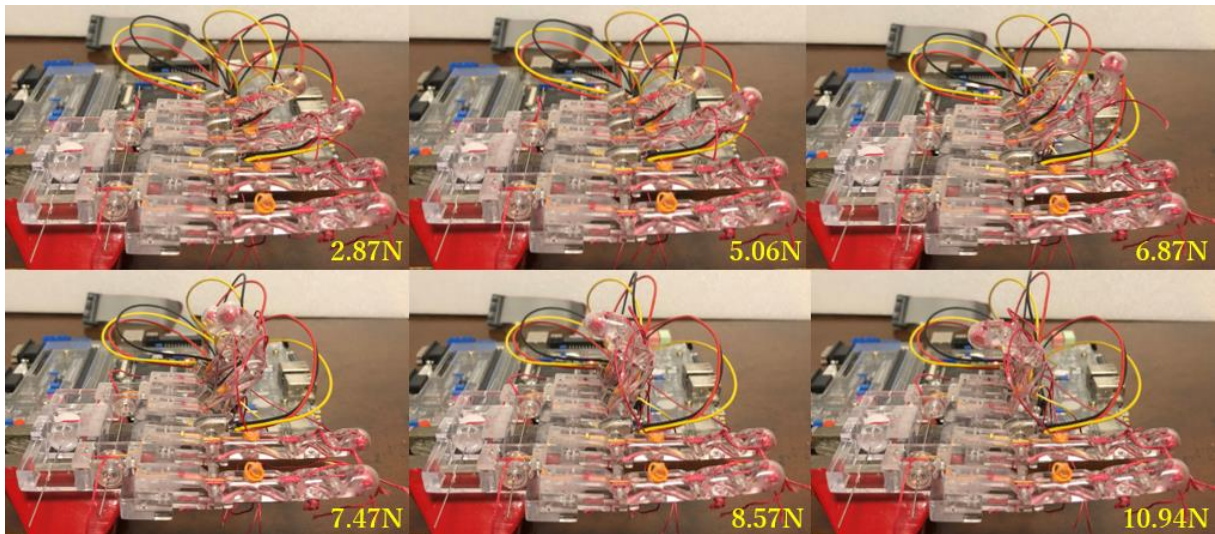


Fig.3.61.b 示指・中指をブロックした運動変化

三つ目における示指・中指をブロックしたケースの実測結果は Fig.3.61 のように示す。フォースゲージからの牽引力を増加するたびに、環指と小指が運動し始めて、同時に屈曲しながら、10.9400N になった時点で共に 90 度に屈曲した。Fig.3.52 による 6.9651N の理論値と比べて、実測値には誤差が存在しているが、正確性を確かめた。

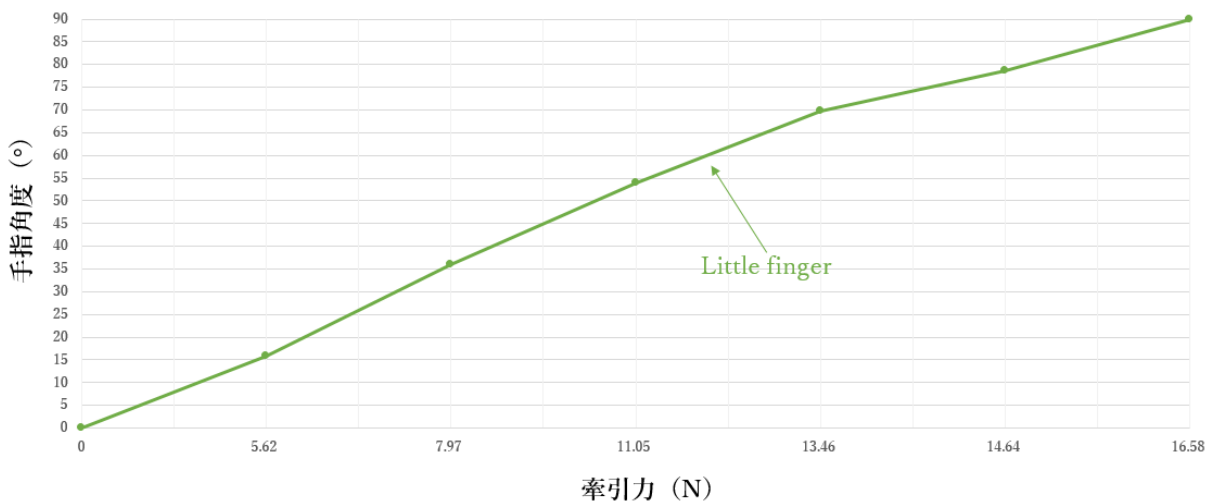


Fig.3.62.a 示指・中指・環指をブロックした実測結果



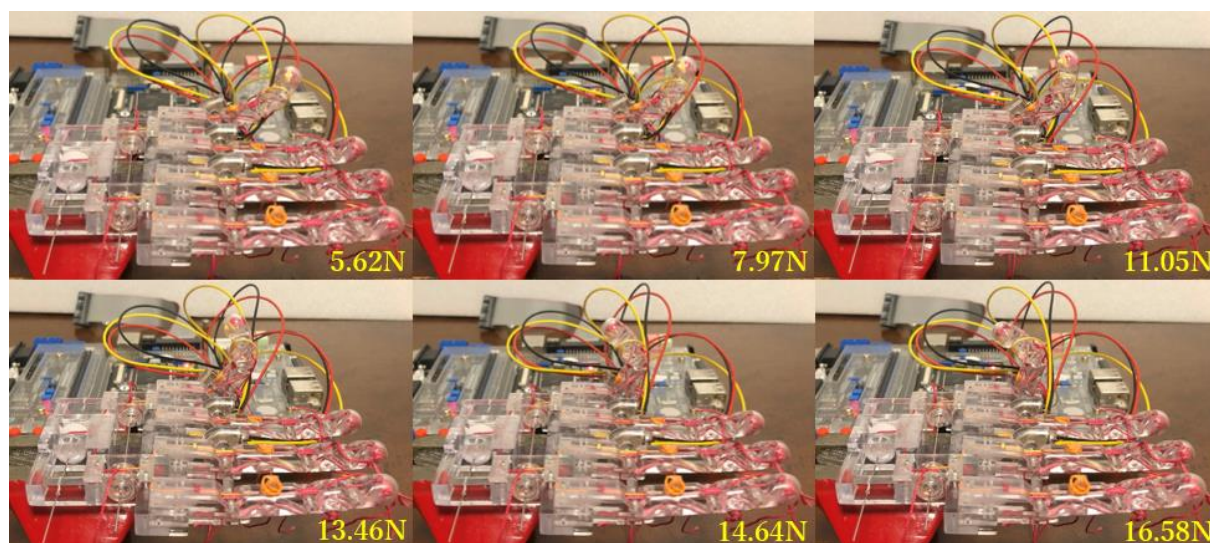


Fig.3.62.b 示指・中指・環指をブロックした運動変化

四つ目における示指・中指・環指をブロックしたケースの実測結果は Fig.3.62 のように示す。フォースゲージからの牽引力を増加するたびに、小指だけが運動し始めて、16.5800N になった時点で 90 度に屈曲した。Fig.3.55 による 9.7262N の理論値と比べて、実測値には誤差が存在しているが、正確性を確かめた。

### 3.5 まとめ

本章の前半では、四指各指の開発にあたって、伸展側に受動伸展機能、屈曲側に安定連動機能の実現に向けて、それぞれに応じる一对多伸展メカニズムと一对一屈曲メカニズムの構築、運動解析、および検証実験を行った。

具体的に、四指各指の伸展において、従来研究では一つの関節につき、一つのバネを付けて、屈曲した関節を自動的に伸展側に回復される一对多伸展のメカニズムをよく使われている。モータが不要でありながら、構造も簡単になるのはこのメカニズムのメリットであるが、デメリットも明らかである：バネを多数に使われるため、コストが高くなるほかに、余分な反力が発生して、出力を削減する問題を挙げられる。そのため、本研究では幼児用義手の厳しい重量、スペースの制限を配慮し、できる限りモータ出力への影響を最小限に抑えるために、一对多伸展のメカニズムを提案した。それに、省力化の効果を検証するために、まず力学モデルによって従来研究と共に最適なバネを選出し、指を制作する。そして、両者に比較実験を実施して、提案したものは省力化が明らかであった。結果的にモータが依然と不要でありながら、バネが一つのみで伸展を果たすことを実現した。構造が比較的やや複雑になるが、コストが低減できた。

また、四指各指の屈曲において、従来研究ではワイヤ1本で三関節を通して駆動させる一对多屈曲メカニズムをよく使用している。それに対して、構造は簡単、かつ馴染み把持は可能であることがメリットとして挙げられるが、デメリットとしては、構造的に冗長性があり、空間位置の変わりによる重力の変化は、関節の運動は一定にならず、ばらつきが生じるため、物体に接近するときに、三関節が同時に屈曲できなくて、四指各指の運動特徴と異なって、ついでに、位置制御も難しくなる。さらに、ワイヤの走行距離も長くなり、全部巻き取られるのに幼児用義手のスペースをオーバーする恐れがあるほかに、関節を屈曲する速度も遅くなり、非効率的になる。そのため、運動軌跡の不安定、ワイヤの長い走行距離の問題に対して、本研究では一对一屈曲のメカニズムを提案した。検証実験において、従来のものとの比較だけではなく、プラスにして、従来の一对多屈曲のタイプから、ワイヤをすべての関節回転中心に近づかせて、走行距離を1/3に短縮させた一对多屈曲改良のタイプも比較対象に加えた。運動の変化を検証したところ、提案したものはワイヤ走行距離が最短になる上に、必要な駆動力は一对多屈曲のタイプとほぼ同様であるが、物体に接近のときに三関節が同時屈曲になって、運動特徴と合うことを実現できた。また、三つのタイプにおいて、力学モデルによる出力の理論値を基準に、フォースゲージでの実測値から正確性も確かめた。この出力のデータを利用して、第5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。ただし、提案したものに関するデメリットとしては、構造がやや複雑になって、指自体の馴染み把持の性能が失った。

一方、本章の後半では、四指全体に対して、従来研究にバネ式、滑車式、およびリンク式をまとめられた。しかしながら、どれにしても運動特徴に従うものではなく、課題が残っている。四指全体の運動特徴は、物体に接近するときに、四本の指が同時に屈曲して、把持するときに、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。

これらの問題を踏まえて、四指全体の運動特徴をすべて再現するために、本研究では、四指全体の運動特徴から、回転摩擦のメカニズムを提案して、機構、およびワイヤ配置を構築する。そして、物体に接近するときに静摩擦力が作用している中間層と駆動層は静摩擦力のモデルによって理論解析を行って、組み込む材料は解析した摩擦係数の理論値より高い、かつ近いものを使用した。それに、検証実験で四指全体による同時屈曲を確認した。引き続き、実際の材料の摩擦係数を動摩擦力のモデルに応用して、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、ついでに必要最小の駆動力も獲得した。それぞれのケースを検証した結果正確性、および有用性を確かめた。

# 第4章 デュアル把持モードの開発

---

4.1 はじめに.....	111
4.2 幼児用義手における全体のモデル.....	113
4.3 対立姿勢モードにおける動作遷移の解析.....	116
4.4 並列姿勢モードにおける動作遷移の解析.....	124
4.5 シミュレーションによるデュアル把持モードの最適化.....	130
4.5.1 デュアル把持モードによるシミュレーション.....	131
4.5.2 シミュレーションの結果による設計パラメータの最適化.....	134
4.6 デュアル把持モードに合わせた拇指の設計.....	138
4.6.1 伸展側バネの選択.....	138
4.6.2 回外側バネの選択.....	139
4.6.3 拇指のメカニズム.....	140
4.7 まとめ.....	143

---

## 4.1 はじめに

第2章の分析によって、基本の三種類の動作パターンにおける握力把握、精密把握および側面把握から、遷移動作として排反性のある二つのグループに分けられる：握力把握と精密把握における拇指と四指が対立した対立姿勢グループ、および側面把握における拇指と四指が並立した並立姿勢グループである。すなわち、対立姿勢グループの動作遷移は並立姿勢グループとの独立性が存在せず、排反性を持つが、グループごとにおいて、遷移する動作は独立性を持っている。中には、対立姿勢グループにおける動作遷移は四指が屈曲していくたびに、拇指が回内しながら屈曲して、四指と対立の姿勢になって、握力把握の作用範囲に入る。引き続き運動すると、五指が同時に屈曲することによって、拇指の指先が四指の示指と中指の指先と接触するまでのプロセスは精密把握の作用範囲に進入する。その後、拇指と示指、中指のつまむ姿勢が変わらずに、四指の環指と小指が引き続き限界まで屈曲して、結果的に精密把握における拇指、示指、中指の三点把持に形成する。一方、並立姿勢グループにおける動作遷移は拇指が回内せず、四指と並列したまま屈曲する。同時に、四指も屈曲して、拇指の指先が示指の中節骨の側面と接触した時点で、側面把握をこなす。

対立姿勢グループと並列姿勢グループをそれぞれ実現するには、前章の四指のメカニズムと合わせて、動作遷移の特徴による拇指の運動を確定し、四指の運動との関連性を与える。そして、排反性を持つ両モードを一つのハンドに組み込み、デュアル把持モードを実現できるように、両モードにおける運動パラメータの関数を探し出して、干渉駆動という概念を拡大し、境界条件付きの両者を連結させる。結果的に、掌にアクチュエーターを限界の1個まで抑えるうえに、デュアル把持モードによる多くの動作パターンを実現する。それに、義手全体の重量も効果的に減少する。

デュアル把持モード（拇指が四指と対立姿勢モードと拇指が四指と並列姿勢モード）は、一つの幼児用筋電義手に二つの把持モードを備えることを指す。この二つの把持モードにそれぞれ所属する動作パターンは互いに排反性を持っている。また、同一の把持モードに所属している動作パターンは互いに独立性を持っている。デュアル把持モードの実現は、従来のモータの追加による排反性の動作の実現から、モータを追加せず、1個のみで果たした。よって、独立性を持つ動作パターンはもちろん、排反性のある動作パターンも実現できるようになった。

本章では、デュアル把持モードを解明するため、まず義手全体のモデルを立つ。そして、運動学と逆運動学を用いて、それぞれ対立姿勢モード、並立姿勢モードの動作遷移を解析する。解析結果によって、両者の運動パラメータの関数に境界条件を代入し、可能な理論値を得て、シミュレーションで確認する。最終的にデュアル把持モードのパラメータを確定し、条件に制限された拇指の設計も説明する。

本章に使う符号の表記を Table.4.1 のように示す。



Table.4.1 符号の表記

	拇指			四指			
	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	$F_{t1}$	$F_{t2}$	$F_{t3}$	$F_{n0}$	$F_{n1}$	$F_{n2}$	$F_{n3}$

## 4.2 幼児用義手における全体のモデル

前述のように，デュアル把持モードは互いに排反性を持つ対立姿勢モードおよび並列姿勢モードを両立させることに指している．それを実現するために，幼児用義手の全体に対するモデルを立ててから，メカニズムの解明や解析などを行う．

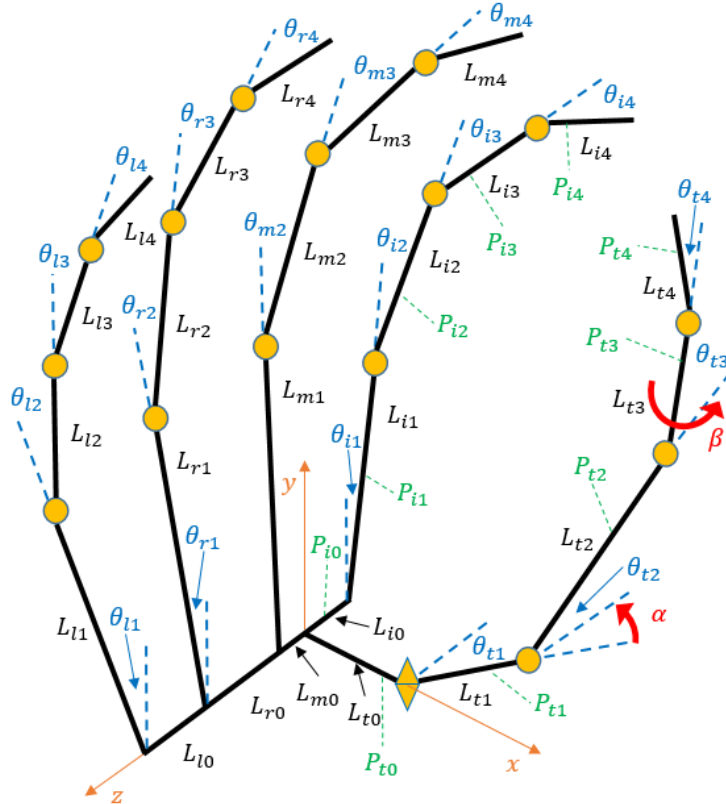


Fig. 4.1 幼児用義手における全体のモデル

義手における全体的なモデルの立ち上げにあたって，Fig.4.1のように，拇指の回内・回外を司る CM 関節の回転中心と四指にある平面の距離を x 軸にし，平面と距離の交点をワールド座標系の原点に設定する．また，y 軸は四指の平面にあり，中指の中手骨と平行している．最後に，四指の四本中手骨を連結線で連結し，z 軸と重ねる．

四指の四本指がそれぞれ MP、PIP と DIP の 3 つの関節を持ち，関節ごとに屈曲・伸展の 1 自由度を持つ．拇指が 4 つの関節を持ち，それぞれ CM 関節の回内・回外および屈曲・伸展の 2 自由度と MP、IP 関節ごとの屈曲・伸展の 1 自由度を持っている．一方，拇指の生理的な構造を模倣するために，拇指の CM 関節を初期の屈曲角度  $\alpha = 45^\circ$  にするほか，示指と拇指の末節骨の夾角は 30 度であること [NEDO 2018] によって，拇指の基節骨が中手骨の軸回りにより，回外  $\beta = 30^\circ$  度にして，末節骨も同じく回外する．それ以外に，四指の把持範囲を拡大するため，示指の外転角度  $\theta_{i1} = 10^\circ$ 、環指の外転角度  $\theta_{r1} = 10^\circ$ 、小指の外転角度  $\theta_{l1} = 15^\circ$  にする．ただし，中指の外転角度は

$\theta_{m1} = 0^\circ$ であるため、図の中に示していない。

そして、モデルによって、拇指の各関節における接触点のローカル座標による位置行列は以下のように書く：

$${}^{tq}\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -R_{tq} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

同じように、四指の各関節における接触点のローカル座標による位置行列は以下のよう：

$${}^{nq}\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ R_{nq} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

それから、同次変換行列を記述する。ただし、簡潔するため、行列中の $C_{nq}$ は $\cos \theta_{nq}$ 、 $S_{nq}$ は $\sin \theta_{nq}$ 、 $C_{\alpha+tq}$ は $\cos(\alpha + \theta_{nq})$ 、 $S_{\alpha+tq}$ は $\sin(\alpha + \theta_{nq})$ と表記する。まずは拇指に関する同次変換行列を以下のように示す：

$${}^{t1}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_{t1} & 0 & -S_{t1} & L_{t0} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ S_{t1} & 0 & C_{t1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^{t1}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\alpha+t2} & -S_{\alpha+t2} & 0 \\ 0 & S_{\alpha+t2} & C_{\alpha+t2} & -L_{t1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$${}^{t2}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_\beta & S_\beta C_{t3} & -S_\beta S_{t3} & 0 \\ -S_\beta & C_\beta C_{t3} & -C_\beta S_{t3} & 0 \\ 0 & S_{t3} & C_{t3} & -L_{t2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$${}^{t3}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{t4} & -S_{t4} & 0 \\ 0 & S_{t4} & C_{t4} & -L_{t3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

同じように、四指の同次変換行列は：

$${}^{n1}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{n1} & -S_{n1} & 0 \\ 0 & S_{n1} & C_n & L_{n0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$${}_{n(i+1)}{}^{ni}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C_{ni+1} & S_{ni+1} & 0 & 0 \\ -S_{ni+1} & C_{ni+1} & 0 & L_{ni} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (i = 1, 2, 3) \quad (4.8)$$

したがって、ワールド座標における各指関節の接触点は下記の式で表せる：

$${}_{tq}{}^0\mathbf{P} = {}_{t1}{}^0\mathbf{T} \dots {}_{tq}{}^{tq-1}\mathbf{T} {}_{tq}{}^{tq}\mathbf{P} \quad (4.9)$$

$${}_{nq}{}^0\mathbf{P} = {}_{n1}{}^0\mathbf{T} \dots {}_{nq}{}^{nq-1}\mathbf{T} {}_{nq}{}^{nq}\mathbf{P} \quad (4.10)$$

また、第三章で述べた四指のメカニズムによって、下記の境界条件を以降の解析にて使用する：

$$\theta_{n2} = \theta_{n3} = \theta_{n4} \quad (4.11)$$

### 4.3 対立姿勢モードにおける動作遷移の解析

排反性を持つ対立姿勢モードにおいて、動作の遷移としては、まず四指が屈曲している同時に、拇指が回内しながら屈曲する。この過程の中に、拇指が徐々に四指と対立の姿勢を取り、もし物体の把持をこなすと動作パターンの握力把握にあてる。逆に把持をせず、引き続き運動すると、拇指と四指が同時に屈曲することによって、拇指末節骨の先端が示指と中指末節骨の先端と接触になり、動作パターンに含まれる精密把握の五点把持（五指の指先による把持）を形成する。そのうち、拇指と示指、中指のつまみ状態が変わらないまま、アクチュエーターの継続的な出力によって、四指における適応差動機能の駆動層はワイヤを巻き取り続けて、環指と小指が引き続き限界まで屈曲されて、結果的に精密把握における拇指、示指、中指の指先による三点把持に形成する。

握力把握から五点の精密把握までの遷移によって、五指の各指関節の位置を求めるには、義手全体のモデルを用いて、拇指、示指および中指による空間の運動軌跡を計算する。ただし、環指と小指の運動状態は示指、中指と同様であるため、省略する。そのため、第一回目による遷移は握力把握から五点把持の精密把握までのプロセスに基づいて、Fig.4.2 に示したように、拇指が回内しながら屈曲し、示指と中指の指先に接近する。最終的に拇指は示指と中指の指先が一定の位置座標にて、五点把持の姿勢に到達する。この状態の環指と小指は適応差動機能によるさらなる屈曲に至らず、示指、中指と同じ屈曲角度に達する。

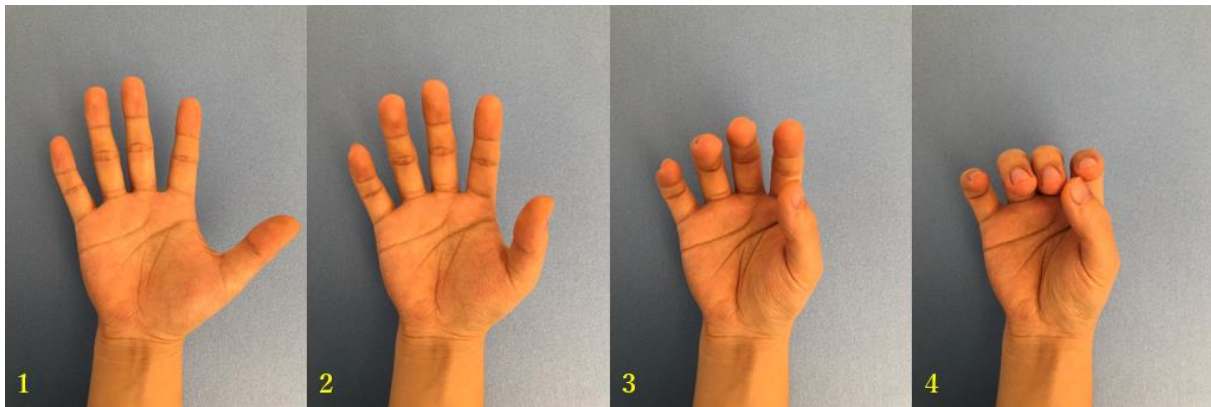


Fig.4.2 対立姿勢モードによる一回目の動作遷移

そのため、第一回目の遷移によって、拇指が示指と中指指先の空間位置を探し出すために、まずは拇指、示指および中指の軌跡座標をそれぞれ $(x_t, y_t, z_t)$ 、 $(x_i, y_i, z_i)$ 、 $(x_m, y_m, z_m)$ にして、各指の末節骨におけるワールド座標の接触点は得られる。

よって、拇指末節骨の接触点は：

$$\left\{ \begin{array}{l}
 x_t = L_{t0} + L_{t1} \sin \theta_{t1} + L_{t2} \cos(\alpha + \theta_{t2}) \sin \theta_{t1} \\
 + R_{t4} \left\{ \begin{array}{l}
 \cos \theta_{t4} \left[ \sin \theta_{t3} (\sin \beta \cos \theta_{t1} - \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t1}) \right] \\
 + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t3} \sin \theta_{t1} \\
 + \\
 \sin \theta_{t4} \left[ \cos \theta_{t3} (\sin \beta \cos \theta_{t1} - \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t1}) \right] \\
 - \cos(\alpha + \theta_{t2}) \sin \theta_{t3} \sin \theta_{t1}
 \end{array} \right\} \\
 + L_{t3} [\sin \theta_{t3} (\sin \beta \cos \theta_{t1} - \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t1}) + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t3} \sin \theta_{t1}] \\
 y_t = L_{t2} \sin(\alpha + \theta_{t2}) \\
 + L_{t3} [\sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t3} + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t3}] \\
 + R_{t4} \left\{ \begin{array}{l}
 \cos \theta_{t4} [\sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t3} + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t3}] \\
 - \\
 \sin \theta_{t4} [\sin(\alpha + \theta_{t2}) \sin \theta_{t3} - \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \cos \theta_{t3}]
 \end{array} \right\} \\
 z_t = L_{t3} \{ \sin \theta_{t3} [\sin \beta \sin \theta_{t1} + \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \cos \theta_{t1}] - \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t1} \cos \theta_{t3} \} \\
 + R_{t4} \left\{ \begin{array}{l}
 \cos \theta_{t4} \left[ \sin \theta_{t3} (\sin \beta \sin \theta_{t1} + \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \cos \theta_{t1}) \right] \\
 - \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t1} \cos \theta_{t3} \\
 + \\
 \sin \theta_{t4} \left[ \cos \theta_{t3} (\sin \beta \sin \theta_{t1} + \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \cos \theta_{t1}) \right] \\
 + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t1} \sin \theta_{t3}
 \end{array} \right\} \\
 - L_{t1} \cos \theta_{t1} - L_{t2} \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t1}
 \end{array} \right. \quad (4.12)$$

それに、示指末節骨の接触点は：

$$\left\{ \begin{array}{l}
 x_i = L_{i3} \sin(\theta_{i2} + \theta_{i3}) + L_{i2} \sin \theta_{i3} + R_{i4} \sin(\theta_{i2} + \theta_{i3} + \theta_{i4}) \\
 y_i = \cos \theta_{i1} [L_{i1} + L_{i3} \cos(\theta_{i2} + \theta_{i3}) + L_{i2} \cos \theta_{i2} + R_{i4} \cos(\theta_{i2} + \theta_{i3} + \theta_{i4})] \\
 z_i = -L_{i0} - L_{i1} \sin \theta_{i1} - L_{i3} \cos(\theta_{i2} + \theta_{i3}) \sin \theta_{i1} - L_{i2} \cos \theta_{i2} \sin \theta_{i1} \\
 - R_{i4} \cos(\theta_{i2} + \theta_{i3} + \theta_{i4}) \sin \theta_{i1}
 \end{array} \right. \quad (4.13)$$

同じく、中指末節骨の接触点は：

$$\left\{ \begin{array}{l}
 x_m = L_{m3} \sin(\theta_{m2} + \theta_{m3}) + L_{m2} \sin \theta_{m3} + R_{m4} \sin(\theta_{m2} + \theta_{m3} + \theta_{m4}) \\
 y_m = L_{m1} + L_{m3} \cos(\theta_{i2} + \theta_{i3}) + L_{m2} \cos \theta_{i2} + R_{m4} \cos(\theta_{i2} + \theta_{i3} + \theta_{m4}) \\
 z_m = L_{m0}
 \end{array} \right. \quad (4.14)$$

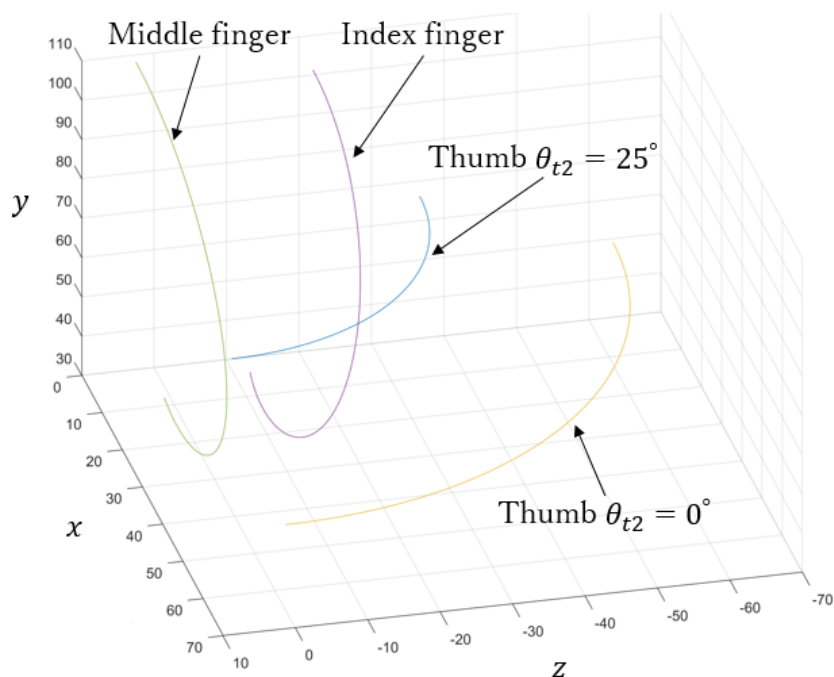


Fig.4.3 拇指・示指・中指における指先の運動軌跡

幼児の手の寸法、および前に設定した境界条件を含めて、これらの接触点の式によって、拇指、示指および中指末節骨の先端の運動軌跡を計算し、結果は Fig.4.3 のように得られる。その中に、示指と中指の MP、PIP、DIP 関節の屈曲・伸展の範囲が拇指 CM 関節の回内・回外の範囲と同じく 0~90 度になる。拇指 CM 関節の屈曲・伸展の角度において、指関節の直径を配慮し、屈曲の限界に至っても掌に食い込もうとしない構造にする必要があるため、範囲を 0~25 度にする。ただし、拇指の MP、IP 関節の屈曲角度を 0 度の初期位置と仮定し、以降の把持の解析結果によって、微調整を行う。拇指、示指、中指の指先による接触位置は Fig.4.3 に示す囲まれた軌跡空間にある。その位置座標を確定するために、以下 3 種類の状況を分けて分析できる：

1. 拇指と示指の指先の位置座標が等しい：把持物体のサイズによって、中指の指先と接触にならない場合が存在し、結果的に二点把持になるため、安定性が下がる。
2. 拇指と中指の指先の位置座標が等しい：把持物体のサイズによって、示指の指先と接触できない場合があり、結果的に同じく二点把持になるため、安定性が懸念する。
3. 拇指が示指、中指指先の間位置に存在する：把持物体が拇指、示指と中指の指先に包囲され、安定的な三点把持に形成する。

そのため、第 3 の項目に従い、拇指の指先が示指と中指の指先の間位置に接触できるように、まずは接触点が示指と中指の間平面にあると仮定する。それから、中間平面における示指と中指の中間軌跡を探し出す。最後に、拇指の指先が中間軌跡と接触させ、理論の接触点を求める。

そこで、中間軌跡の座標を  $(x_M, y_M, z_M)$  にして、下記の式を立てる：

$$\begin{cases} x_M = \frac{x_i + x_m}{2} \\ y_M = \frac{y_i + y_m}{2} \\ z_M = \frac{z_i + z_m}{2} \end{cases} \quad (4.15)$$

ここでは、前述した拇指の指先軌跡座標 $(x_t, y_t, z_t)$ 、示指の指先軌跡座標 $(x_i, y_i, z_i)$ 、中指軌跡座標 $(x_m, y_m, z_m)$ 、および中間軌跡座標 $(x_M, y_M, z_M)$ に基づいて、Fig.4.4のように、それぞれの運動軌跡が得られる。中には、x-z平面にある水色、緑色およびボルドーブラック色の実線はそれぞれ中間軌跡、拇指CM関節が25度と0度に屈曲したときの指先軌跡に対して、投影した曲線である。それに、水色と緑色によって囲む区域は拇指の指先と中間軌跡の接触点の集合になる。

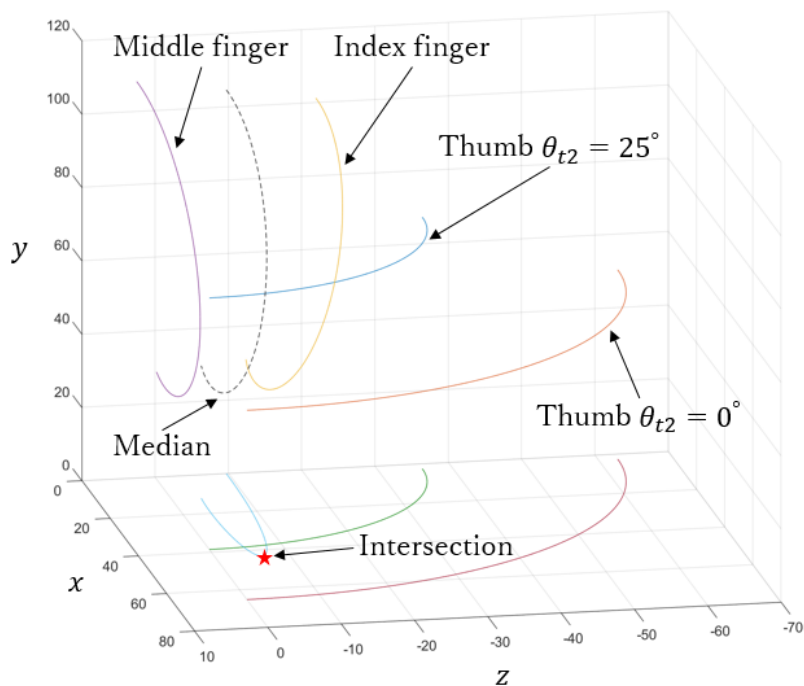


Fig. 4.4 指先の運動軌跡及び投影曲線

この囲まれた区域から接触点を確定するために、さらなる分析を行う。Fig.4.5に示したように、x-y平面の視点から、拇指指先の屈曲の軌跡を算出し、中間軌跡と交わって、唯一の接触点を得られる。要するに、拇指を屈曲するたびに、指先が初めて示指と中指の屈曲による中間軌跡と接触になる点である。この接触点はFig.4.4に表示すると水色の実線の頂点であり、星印で表している。



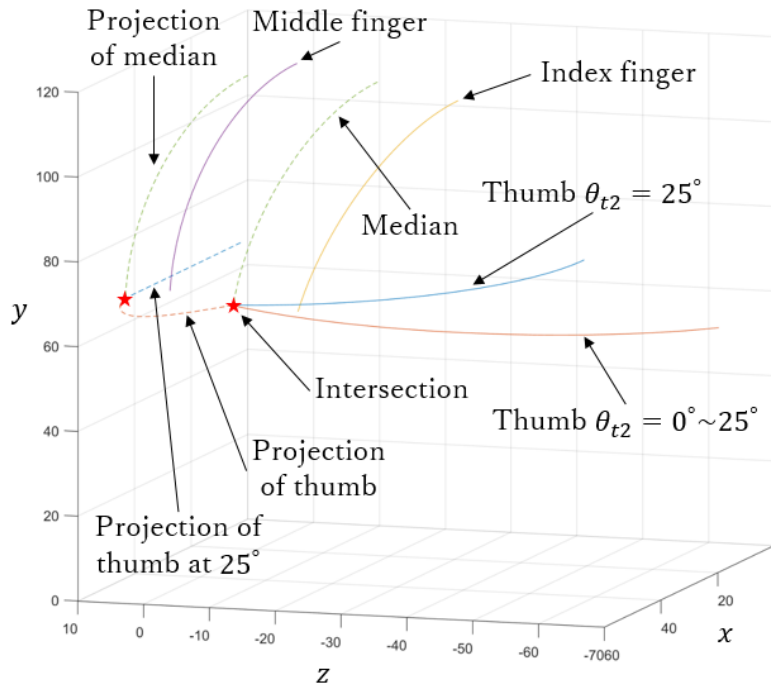


Fig. 4.5 指先の運動軌跡及び投影曲線

これで、指関節の運動学によって、遷移動作である五点把持の精密把握における接触点を求めた。次に、この接触点を利用して、逆運動学を用いて拇指の回内角度とCM関節の屈曲角度を確定する。

そのため、まずは拇指CM関節の回内角度 $\theta_{t1}$ を計算する。Fig.4.4によって、接触点の投影点の座標(43.16, -6.225)を用いて、以下の式に代入し、求める：

$$\theta_{t1} = \tan^{-1} \frac{x_M - L_{t0}}{|z_M|} = \tan^{-1} \frac{43.16 - L_{t0}}{|-6.225|} = 81.2960^\circ \quad (4.16)$$

次に、接触点に対するy軸の座標値 $y_M = 63.81$ を利用して、拇指CM関節の屈曲角度 $\theta_{t2}$ も同じよう求める：

$$\theta_{t2} = \tan^{-1} \frac{y_M}{\sqrt{z_M^2 + (x_M - L_{t0})^2} - L_{t1}} = \tan^{-1} \frac{63.81}{\sqrt{6.225^2 + (43.16 - 2.5)^2} - 11} = 19.721^\circ \quad (4.17)$$

最後に、得た接触点の座標値を用いて、中間軌跡の座標 $(x_M, y_M, z_M)$ により、示指と中指の屈曲角度 $\theta_i = \theta_m = 39.5165^\circ$ が得られる。

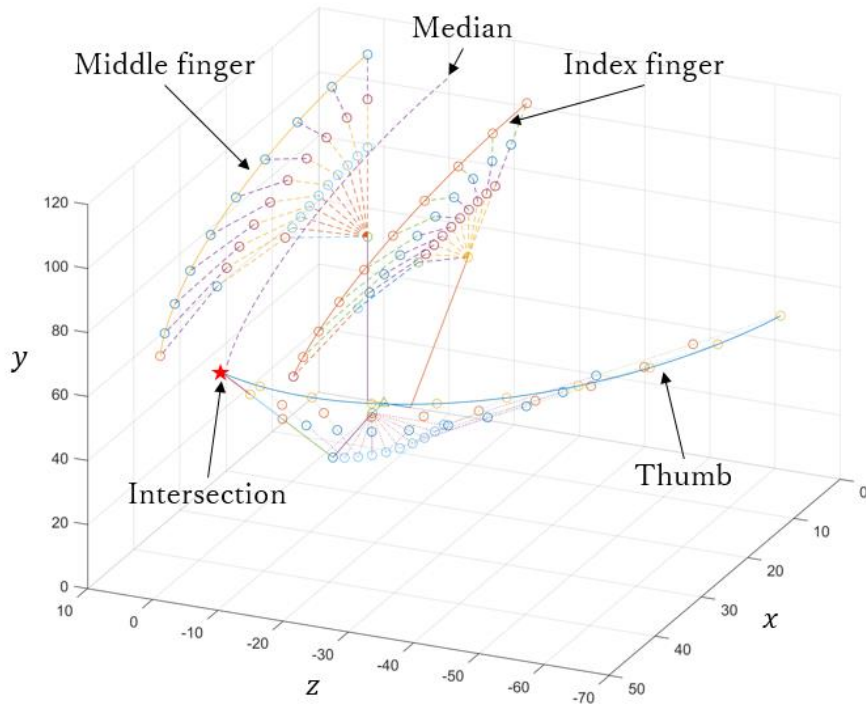


Fig.4.6 握力把握から五点把持の精密把握までの動作遷移

結果として、理論値による拇指 CM 関節の回内角度 $\theta_{t1} = 81.2960^\circ$ 、屈曲角度 $\theta_{t2} = 19.721^\circ$ 、暫定の MP 関節の屈曲角度 $\theta_{t3} = 0^\circ$ 、および IP 関節の屈曲角度 $\theta_{t4} = 0^\circ$ になるほか、示指、中指、環指と小指の屈曲角度 $\theta_i = \theta_m = \theta_r = \theta_l = 39.5165^\circ$ のときに、五点把持の精密把握が成り立つ。Fig.4.6 では、握力把握から五点把持の精密把握までの動作遷移におけるプロセスを示して、最終的に星印のところで拇指の指先が示指、中指の指先と接触する。

引き続き、第二回目による遷移は五点把持の精密把握から三点把持の精密把握までのプロセスに基づいて、Fig.4.7 に示したように、拇指の指先が示指、中指の指先の中間位置と接触したまま、アクチュエーターが継続的にワイヤを巻き取ることによって、環指と小指がさらに屈曲し、最終的に限界の 90 度に到達する。これで、三点把持の精密把握が形成する。

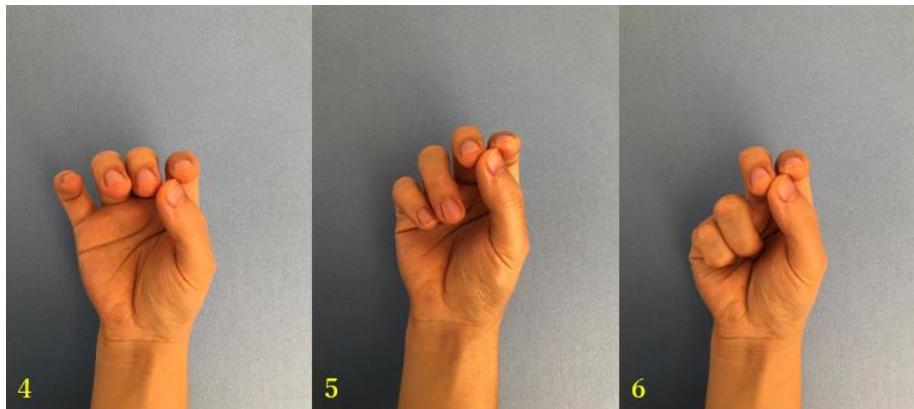


Fig.4.7 対立姿勢モードによる二回目の動作遷移

このプロセスにおいて、示指と中指が拇指のブロックによって停止になったが、環指と小指は適応差動機能が作動し始まる原因で、駆動層に通した両中間層に連結するワイヤが動摩擦力の作用によって、相対な移動が発生し、引き続き屈曲していく。

そのため、このプロセスによるワイヤの走行距離は下記のように計算できる：

$$s = \frac{(90^\circ - 39.5165^\circ)\pi}{180} \times 3.5 = 3.0823\text{mm} \quad (4.18)$$

一方、このプロセスでは、拇指は姿勢の維持が必要となるため、上記のワイヤ走行距離と相殺させる。そのため、拇指内に引張バネを付け、バネの伸び量を利用してワイヤ走行距離と帳消しをする同時に、拇指の位置を保つ。この部分に関する解析は本章の4.6.3節に説明する。

以上によって、拇指、示指と中指の接触は維持できたまま、環指と小指が限界まで屈曲し、三点把持の精密把握は成り立った。この遷移のプロセスはFig.4.8のように表示される。

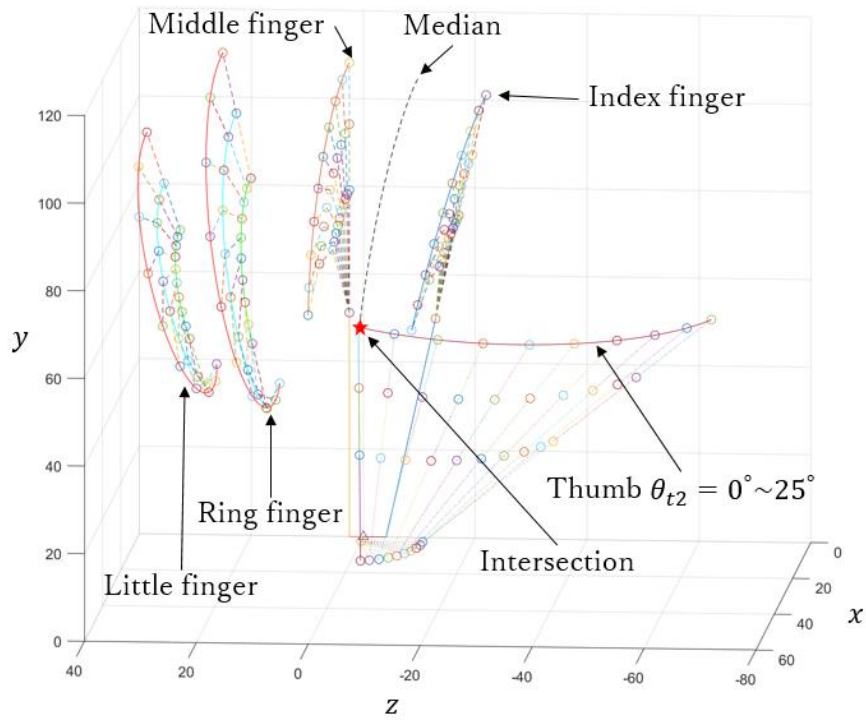


Fig.4.8 五点把持の精密把握から三点把持の精密把握までの動作遷移

以上の解析によって、対立姿勢モードによる動作遷移は幼児用義手に組み込むことが可能になった。

### 4.4 並列姿勢モードにおける動作遷移の解析

対立姿勢モードと同じように、排反性を持つ並列姿勢モードにおいて、動作の遷移は Fig.4.9 に示したように、一回のみとなり、拇指が回内せず、四指と一緒に一緒に屈曲する。最終的に、拇指の末節骨が示指の中節骨の側面と接触して、把持対象物を挟み、側面把握を形成する。

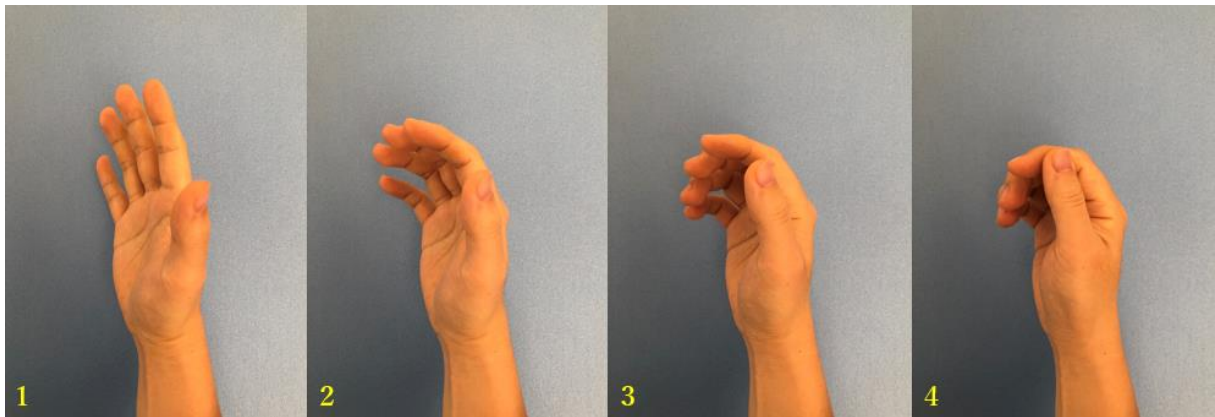


Fig.4.9 並列姿勢モードによる動作遷移

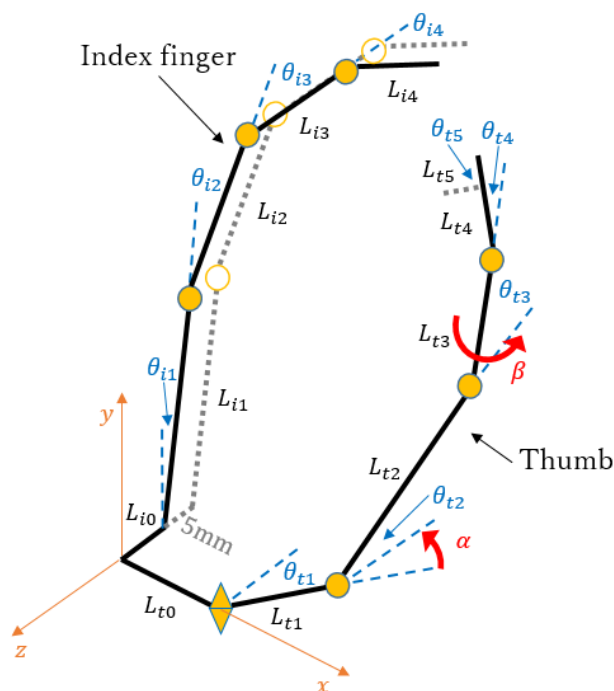


Fig.4.10 並列姿勢モードに基づくモデルの更新

側面把握の遷移によって、四指の運動は一致しているため、把持に機能する拇指と示指における各指関節の位置を求める。そして、義手全体のモデルを再び利用して、

拇指、示指による空間の運動軌跡を計算し、拇指の末節骨が示指の中節骨の側面と接触できるように、示指の屈曲角度および拇指の回内角度を求める。そのため、義手全体のモデルによって、示指の側面を配慮し、相応な拇指においても示指の側面と接触する表面を加える。Fig.4.10 に示したように、 $L_{t5}$ と $\theta_{t5}$ は拇指末節骨の指の腹を意味している。また、示指がz軸のマイナス方向に指の半径の長さ5mmで平行に移動させて、 $L_{i0}$ のパラメータを更新する。ただし、中指、環指と小指が直接に側面把握を関与していないため、省略する。

よって、この動作の遷移において、拇指末節骨の指の腹の以外に、接触点を想定した示指中節骨の側面における運動軌跡を明確するために、まずは軌跡座標をそれぞれ定義して、拇指末節骨の指の腹は $(x_{t5}, y_{t5}, z_{t5})$ 、示指PIP関節の側面は $(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ 、示指DIP関節の側面は $(x_{i3}, y_{i3}, z_{i3})$ にする。

従って、拇指末節骨の指の腹の運動軌跡は以下のように：

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 & x_{t5} = L_{t0} \sin \theta_{t0} + L_{t1} \sin \theta_{t1} + L_{t2} \cos(\alpha + \theta_{t2}) \sin \theta_{t1} \\
 & + L_{t3} \left[ \begin{array}{c} \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t3} \sin \theta_{t1} + \sin \beta \cos \theta_{t1} \sin \theta_{t3} \\ - \\ \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t1} \sin \theta_{t3} \end{array} \right] \\
 & + L_{t4} \left\{ \begin{array}{c} \cos(\alpha + \theta_{t2}) \sin \theta_{t1} (\cos \theta_{t3} \cos \theta_{t4} - \sin \theta_{t1} \sin \theta_{t3}) \\ + \\ (\cos \theta_{t3} \sin \theta_{t4} + \cos \theta_{t4} \sin \theta_{t3}) [\sin \beta \cos \theta_{t1} - \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t1}] \end{array} \right\} \\
 & + L_{t5} \left\{ \begin{array}{c} \sin \beta \cos \theta_{t1} \left[ \begin{array}{c} \sin \theta_{t3} (\cos \theta_{t4} \cos \theta_{t5} - \sin \theta_{t4} \sin \theta_{t5}) \\ + \\ \cos \theta_{t3} \cos \theta_{t4} (\cos \theta_{t5} + \sin \theta_{t5}) \end{array} \right] \\ + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \sin \theta_{t1} \cos \theta_{t3} (\cos \theta_{t4} \cos \theta_{t5} - \sin \theta_{t4} \sin \theta_{t5}) \\ + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \sin \theta_{t1} (\cos \theta_{t4} \sin \theta_{t5} + \cos \theta_{t5} \sin \theta_{t3}) \\ + \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t1} \cos \theta_{t4} (\cos \theta_{t3} \sin \theta_{t5} - \cos \theta_{t5} \sin \theta_{t3}) \\ + \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t1} \sin \theta_{t4} (\sin \theta_{t3} \sin \theta_{t5} - \cos \theta_{t3} \cos \theta_{t5}) \end{array} \right\} \\
 & y_{t5} = L_{t2} \sin(\alpha + \theta_{t2}) \\
 & + L_{t3} [\sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t3} + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t3}] \\
 & + L_{t4} \left\{ \begin{array}{c} \cos \theta_{t4} [\sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t3} + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t3}] \\ - \\ \sin \theta_{t4} [\sin(\alpha + \theta_{t2}) \sin \theta_{t3} - \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \cos \theta_{t3}] \end{array} \right\} \\
 & + L_{t5} \left\{ \begin{array}{c} \cos \theta_{t5} [\cos \theta_{t4} (\sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t3} + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t3})] \\ - \\ \cos \theta_{t5} [\sin \theta_{t4} (\sin(\alpha + \theta_{t2}) \sin \theta_{t3} - \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \cos \theta_{t3})] \end{array} \right\} \\
 & + L_{t5} \left\{ \begin{array}{c} \sin \theta_{t5} [\sin \theta_{t4} (\sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t3} + \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \sin \theta_{t3})] \\ + \\ \sin \theta_{t5} [\cos \theta_{t4} (\sin(\alpha + \theta_{t2}) \sin \theta_{t3} - \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \cos \theta_{t3})] \end{array} \right\} \\
 & z_{t5} = -L_{t0} \cos \theta_{t0} - L_{t1} \cos \theta_{t1} - L_{t2} \cos \theta_{t1} \cos(\alpha + \theta_{t2}) + L_{t3} \sin \beta \sin \theta_{t1} \sin \theta_{t3} \\
 & - L_{t3} \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t1} \cos \theta_{t3} + L_{t3} \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \cos \theta_{t1} \sin \theta_{t3} \\
 & + L_{t4} \sin \beta \sin \theta_{t1} (\cos \theta_{t3} \sin \theta_{t4} + \cos \theta_{t4} \sin \theta_{t3}) \\
 & - L_{t4} \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t1} (\cos \theta_{t3} \cos \theta_{t4} - \sin \theta_{t3} \sin \theta_{t4}) \\
 & + L_{t4} \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \cos \theta_{t1} (\cos \theta_{t3} \sin \theta_{t4} + \cos \theta_{t4} \sin \theta_{t3}) \\
 & + L_{t5} \sin \beta \sin \theta_{t1} \left[ \begin{array}{c} \cos \theta_{t4} (\cos \theta_{t3} \sin \theta_{t5} + \cos \theta_{t5} \sin \theta_{t3}) \\ \sin \theta_{t4} (\cos \theta_{t3} \cos \theta_{t5} - \sin \theta_{t3} \sin \theta_{t5}) \end{array} \right] \\
 & + L_{t5} \cos(\alpha + \theta_{t2}) \cos \theta_{t1} \left[ \begin{array}{c} \cos \theta_{t3} (\sin \theta_{t4} \sin \theta_{t5} - \cos \theta_{t4} \cos \theta_{t5}) \\ \sin \theta_{t4} (\cos \theta_{t4} \sin \theta_{t5} + \cos \theta_{t5} \sin \theta_{t4}) \end{array} \right] \\
 & + L_{t5} \sin(\alpha + \theta_{t2}) \cos \beta \cos \theta_{t1} \left[ \begin{array}{c} \cos \theta_{t3} (\cos \theta_{t4} \sin \theta_{t5} + \cos \theta_{t5} \sin \theta_{t4}) \\ \sin \theta_{t4} (\cos \theta_{t4} \cos \theta_{t5} - \sin \theta_{t4} \sin \theta_{t5}) \end{array} \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (4.19)
 \end{aligned}$$

次に、示指 PIP 関節の側面における運動軌跡は以下のように：

$$\begin{cases}
 x_{i2} = R_{i2} \sin \theta_{i2} \\
 y_{i2} = \cos \theta_{i1} (L_{i1} + R_{i2} \cos \theta_{i2}) \\
 z_{i2} = -L_{i0} - L_{i1} \sin \theta_{i1} - R_{i2} \cos \theta_{i2} \sin \theta_{i1}
 \end{cases} \quad (4.20)$$

同様に、示指 DIP 関節の側面における運動軌跡は以下のように：



$$\begin{cases} x_{i3} = R_{i3}(\sin \theta_{i2} + \sin \theta_{i3}) + L_{i2} \sin \theta_{i2} \\ y_{i3} = \cos \theta_{i1}[L_{i1} + L_{i2} \cos \theta_{i2} + R_{i3}(\cos \theta_{i2} + \cos \theta_{i3})] \\ z_{i3} = -L_{i0} - L_{i1} \sin \theta_{i1} - L_{i2} \sin \theta_{i1} \cos \theta_{i2} \\ \quad + R_{i3}(\sin \theta_{i1} \sin \theta_{i2} \sin \theta_{i3} - \cos \theta_{i2} \cos \theta_{i3} \sin \theta_{i1}) \end{cases} \quad (4.21)$$

また、示指の中節骨の midpoint 軌跡の座標  $(x_M, y_M, z_M)$  は下記のように式を立つ：

$$\begin{cases} x_M = \frac{x_{i2} + x_{i3}}{2} \\ y_M = \frac{y_{i2} + y_{i3}}{2} \\ z_M = \frac{z_{i2} + z_{i3}}{2} \end{cases} \quad (4.22)$$

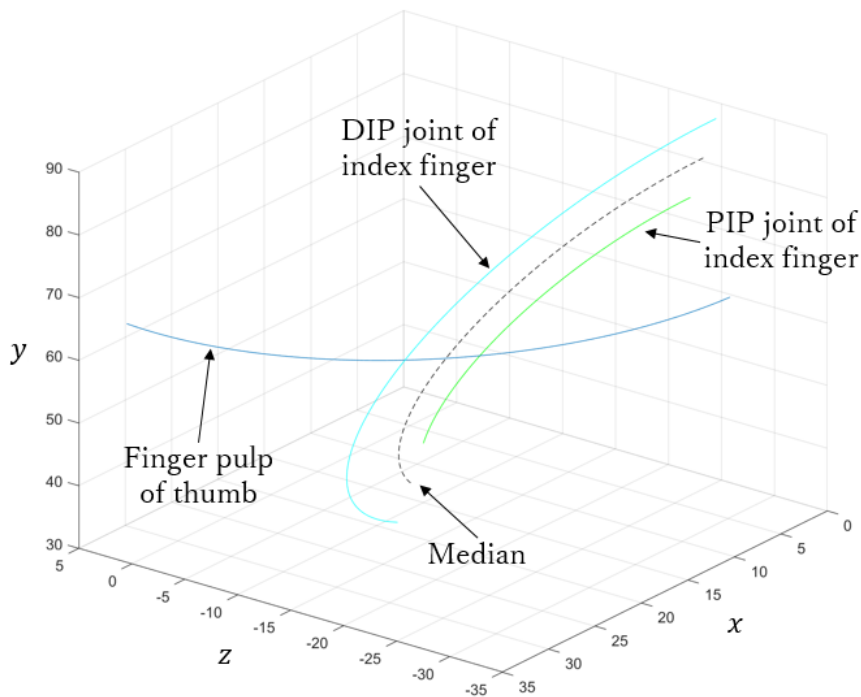


Fig.4.11 拇指各指関節運動軌跡

そして、関連するパラメータを上記の式へ代入して、運動軌跡を Fig.4.11 のように得られる。中に黒色の破線は示指の中節骨の midpoint 軌跡となる。ほかには、示指各関節の屈曲、および拇指 CM 関節の回内角度の範囲を 0~90 度にした。また、拇指 MP、IP 関節の屈曲角度  $\theta_{t3}$  と  $\theta_{t4}$  は対立姿勢モードと同様に暫定的に 0 度にして、CM 関節の屈曲角度  $\theta_{t2}$  に関しては、示指の中節骨の midpoint と接触できるように、示指の屈曲によって拇指が回内しつつ、CM 関節の角度  $\theta_{t2}$  が伸展方向に行って、増大していく。そのため、事実上に解が無数にある一方、側面把握が成り立つたびに、示指が屈曲するほど、拇指のさらなる回内が必要となり、相応に拇指 CM 関節が伸展方向に運動された分は、拇指の末節骨から示指の中節骨にかかる圧力は増加していくため、示指には余分な圧力かけられないよう、まずは、拇指 CM 関節の角度  $\theta_{t2}$  が構造に沿った 25 度と限定する。その結果、青色の実線は拇指 CM 関節が 25 度の屈曲を保つうえに、0

～90度回内した軌跡である。そして、同様な原因で拇指回内の角度も限定させる必要があるため、拇指末節骨の指の腹が示指中節骨の midpoint と接触させ、接触点を確定する同時に拇指回内の角度も得られる。

そのため、接触点を探し出すために、それぞれ拇指末節骨の指の腹と示指中節骨の midpoint 軌跡を x-z 平面に投影する。Fig.4.12 のように、黄色、オレンジ色の実線はそれぞれ midpoint 軌跡、拇指末節骨の指の腹の運動軌跡の投影曲線であり、星印でマークした点は接触している交点になる。

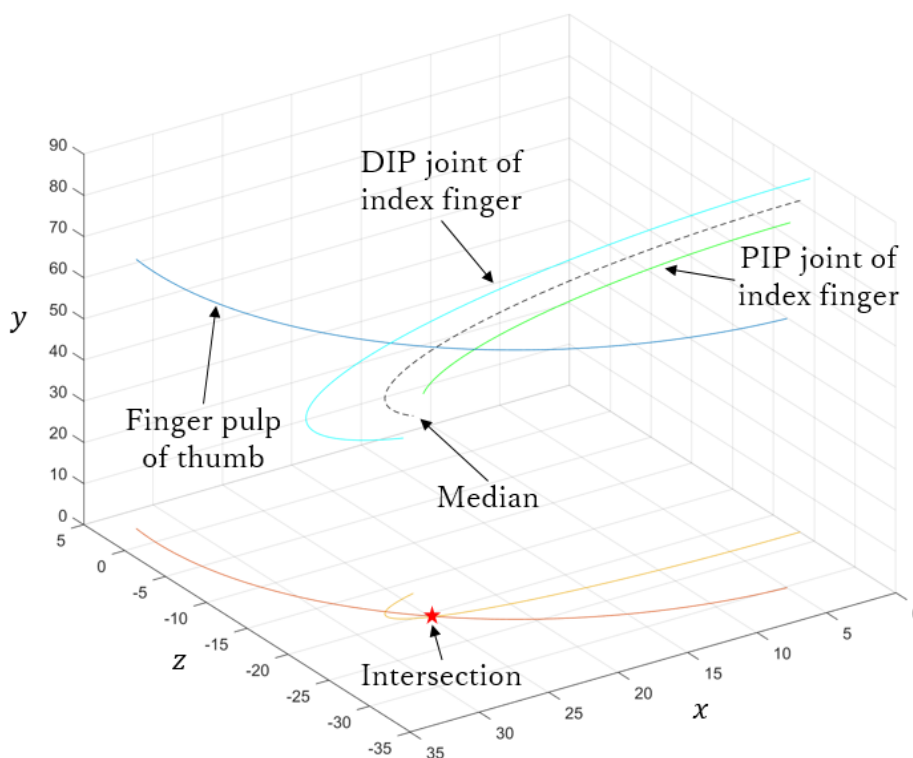


Fig.4.12 各指関節運動軌跡及び投影曲線

この投影した接触点の座標を利用して、拇指末節骨の指の腹の座標 $(x_{t5}, y_{t5}, z_{t5})$ に MP、IP 関節の 0 度の角度、および CM 関節の 25 度の屈曲角度を代入して、y 軸方向の座標値 $y_{t5} = 65.3801$ を求める。同時に midpoint 軌跡の座標 $(x_M, y_M, z_M)$ も得られて、 $y_{t5} = y_M = 65.3801$ になる。ついでに、示指の屈曲角度 $\theta_{i2}$ も計算できる：

$$y_M = 13.7873 \cos^2 \theta_{i2} + 23.6354 \cos \theta_{i2} + 43.0718 \quad (4.23)$$

$$\theta_{i2} = \theta_{i3} = \cos^{-1}(0.6766) = 47.4215^\circ \quad (4.24)$$

続いて、接触点の投影座標 $(24.6474, -20.6181)$ を $(x_{t5}, z_{t5})$ に代入して、拇指 CM 関節の回内角度 $\theta_{t1}$ を下記の式で求める：

$$\begin{cases} x_t = 2.5 \cos \theta_{t1} + 30.1884 \sin \theta_{t1} + 2.5 \\ z_t = 2.5 \sin \theta_{t1} - 30.1884 \cos \theta_{t1} \end{cases} \quad (4.25)$$

整理すると：

$$\begin{cases} \cos \theta_{t1} = 0.7387 \\ \sin \theta_{t1} = 0.6725 \end{cases} \quad (4.26)$$

よって、 $\theta_{t1}$ は：

$$\theta_{t1} = 42^\circ \quad (4.27)$$

結果的に、側面把握による接触点の位置座標(24.6474, 65.3788, -20.6181)において、求めた拇指の回内角度は $\theta_{t1} = 42^\circ$ 、屈曲角度がそれぞれ CM 関節は $\theta_{t2} = 25^\circ$ 、MP 関節は $\theta_{t3} = 0^\circ$ 、IP 関節は $\theta_{t4} = 0^\circ$ 、示指の屈曲角度は $\theta_{i2} = \theta_{i3} = \theta_{i4} = 47.4215^\circ$ である。これによって、Fig.4.13 に示したように、並列姿勢モードの動作遷移となる側面把握のプロセスは成り立って、最終的に星印のところで拇指末節骨の指の腹が示指中節骨の側面の midpoint に接触する。

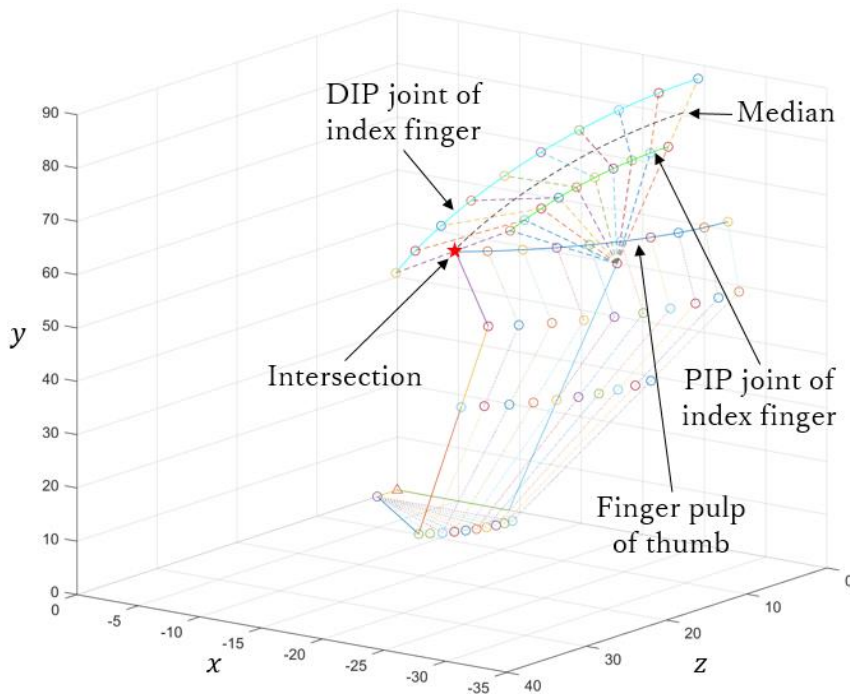


Fig.4.13 側面把握の動作遷移

以上の解析によって、並列姿勢モードによる動作遷移は幼児用義手に組み込むことが可能になった。

## 4.5 シミュレーションによるデュアル把持モードの最適化

以上によって、義手全体のモデルを用いて、順運動学と逆運動学でデュアル把持モードによる動作遷移の理論値を探し出した。まとめると、下記ようになる：

対立モードによる第一回目の動作遷移において、それぞれ拇指および四指の各関節角度のパラメータの変化は：

$$\begin{cases} \theta_{t1} = 42^\circ \sim 81.2960^\circ \\ \theta_{t2} = 0^\circ \sim 19.7210^\circ \\ \theta_{t3} = \theta_{t4} = 0^\circ \sim 0^\circ \end{cases} \quad (4.28)$$

$$\begin{cases} \theta_{ip} = 0^\circ \sim 39.5165^\circ \\ \theta_{mp} = 0^\circ \sim 39.5165^\circ \\ \theta_{rp} = 0^\circ \sim 39.5165^\circ \\ \theta_{lp} = 0^\circ \sim 39.5165^\circ \end{cases} \quad (4.29)$$

次に、対立姿勢モードによる第二回目の動作遷移において、各パラメータの変化は：

$$\begin{cases} \theta_{t1} = 81.2960^\circ \sim 81.2960^\circ \\ \theta_{t2} = 19.7210^\circ \sim 19.7210^\circ \\ \theta_{t3} = \theta_{t4} = 0^\circ \sim 0^\circ \end{cases} \quad (4.30)$$

$$\begin{cases} \theta_{ip} = 39.5165^\circ \sim 39.5165^\circ \\ \theta_{mp} = 39.5165^\circ \sim 39.5165^\circ \\ \theta_{rp} = 39.5165^\circ \sim 90^\circ \\ \theta_{lp} = 39.5165^\circ \sim 90^\circ \end{cases} \quad (4.31)$$

最後に、並列姿勢モードによる動作遷移において、拇指および四指の各関節角度のパラメータの変化は：

$$\begin{cases} \theta_{t1} = 42^\circ \\ \theta_{t2} = 0^\circ \sim 25^\circ \\ \theta_{t3} = \theta_{t4} = 0^\circ \sim 0^\circ \end{cases} \quad (4.32)$$

$$\begin{cases} \theta_{ip} = 0^\circ \sim 47.4215^\circ \\ \theta_{mp} = 0^\circ \sim 47.4215^\circ \\ \theta_{rp} = 0^\circ \sim 47.4215^\circ \\ \theta_{lp} = 0^\circ \sim 47.4215^\circ \end{cases} \quad (4.33)$$

しかしながら、この理論値に従い、作り上げた義手には、多少にすきまばめや接触位置のすれなどのアセンブリの問題を生じる恐れがあるため、Fig.4.14 のように設計した CAD 図を用いて、デュアル把持モードに対するシミュレーションを行い、理論値を検証しながら、修正して、最終的に最適な設計パラメータを確定する。

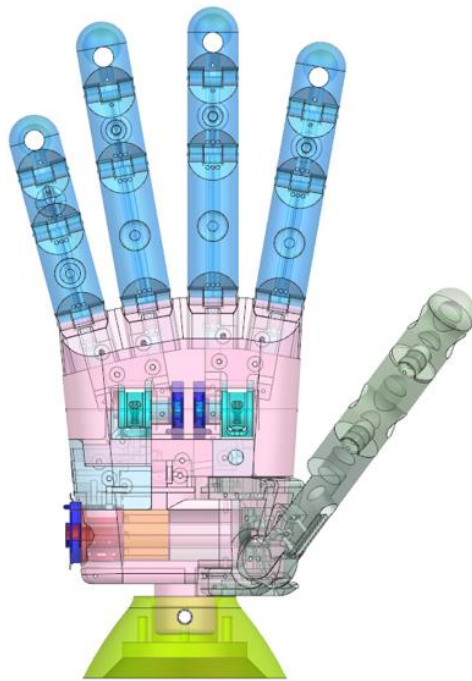


Fig.4.14 パラメータ修正前の幼児用義手の CAD 図

#### 4.5.1 デュアル把持モードによるシミュレーション

以上のデュアル把持モードに関する理論解析の結果を用いて、それぞれの動作遷移に対するシミュレーションを実施して、実際の義手に組み込んだ結果における正確性を確認するほか、指関節の微調整も行い、パラメータを最適化させる。

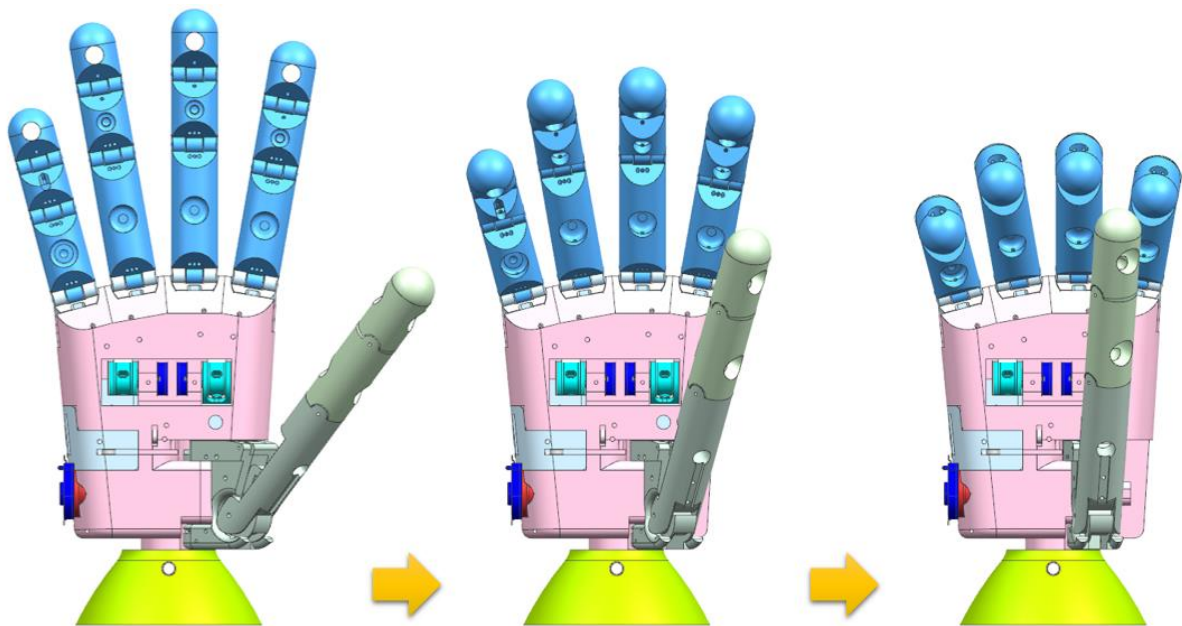


Fig.4.15 対立姿勢モードの第一回目の動作遷移によるシミュレーション結果

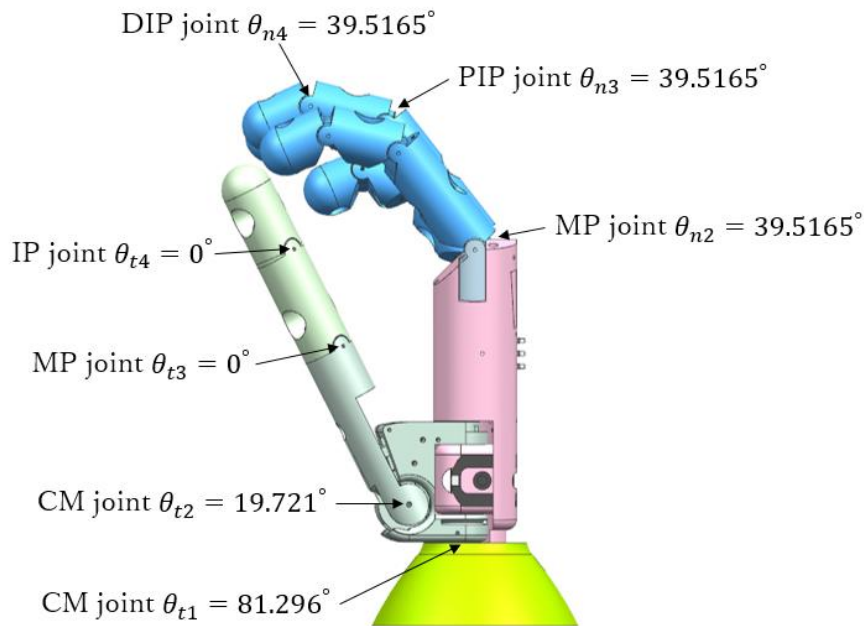


Fig.4.16 五点把持の精密把握による指関節の角度の理論値

最初に、対立姿勢モードの動作遷移によるシミュレーションを行う。五指の各関節にそれぞれ対応の理論値範囲を設定して、Fig.4.15 に示したように、第一回目の動作遷移によるシミュレーションを表して、四指を屈曲させるたびに、拇指も回内しながら屈曲して、最後に五点把持の精密把握に成り立つ。Fig.4.16 のように、五点把持の精密把握のときの関節角度のパラメータは理論値に従っていることを確認できた。

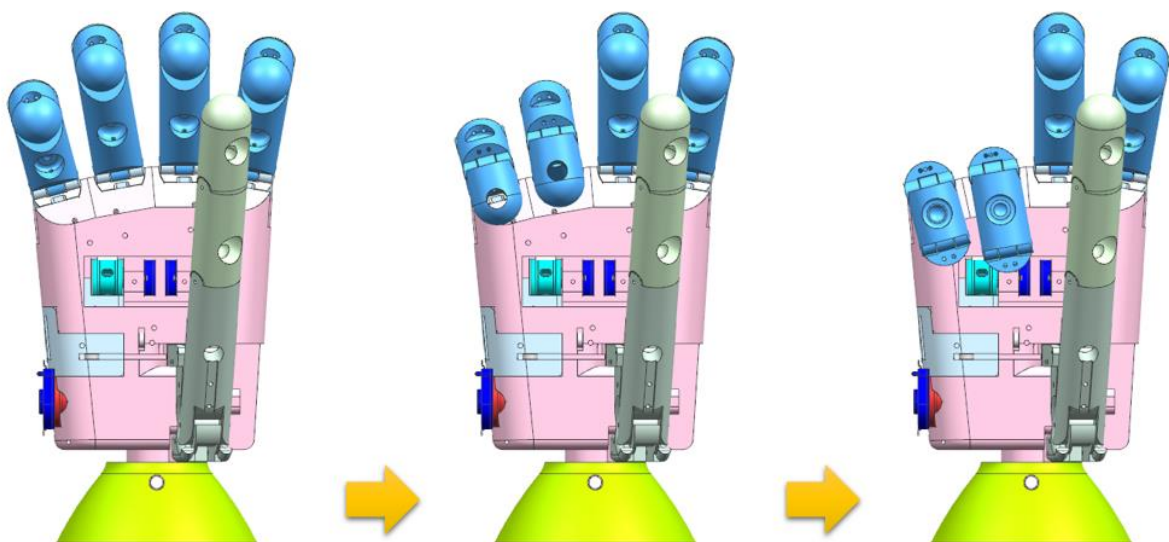


Fig.4.17 対立姿勢モードの第二回目の動作遷移によるシミュレーション結果



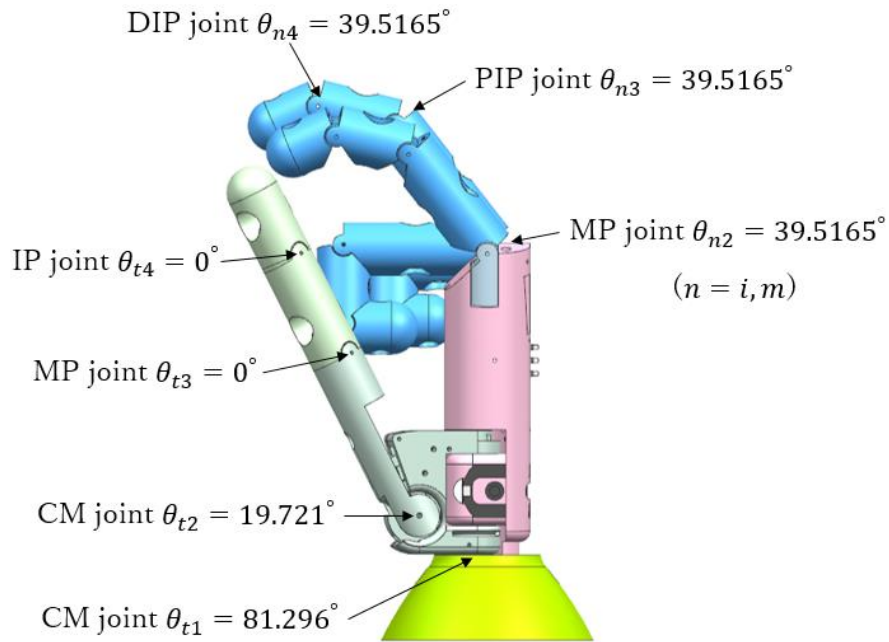


Fig.4.18 三点把持の精密把握による指関節の角度の理論値

次に、Fig.4.17 に示したように、第二回目の動作遷移によるシミュレーションを表して、五指は五点把持の精密把握の動作から、示指、中指と拇指は姿勢を保つままに、四指の環指と小指を引き続き運動して、90度まで屈曲する．要するに五点把持の精密把握から三点把持の精密把握までの関節角度のパラメータは Fig.4.18 のように、理論値に従っていることを確認できた．

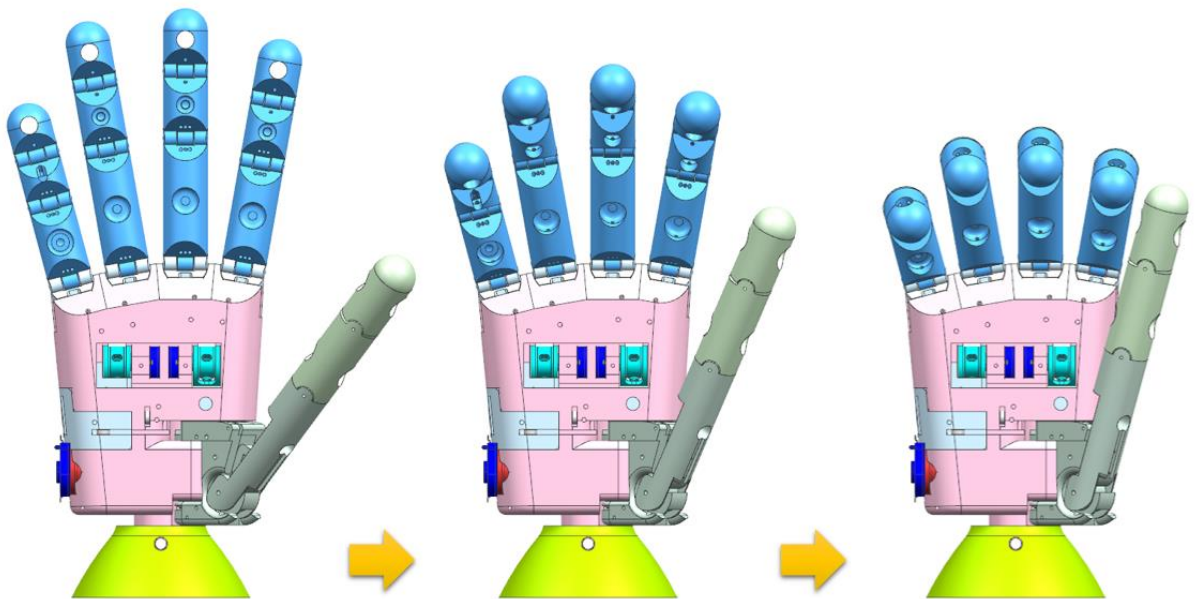


Fig.4.19 並列姿勢モードの動作遷移によるシミュレーション結果



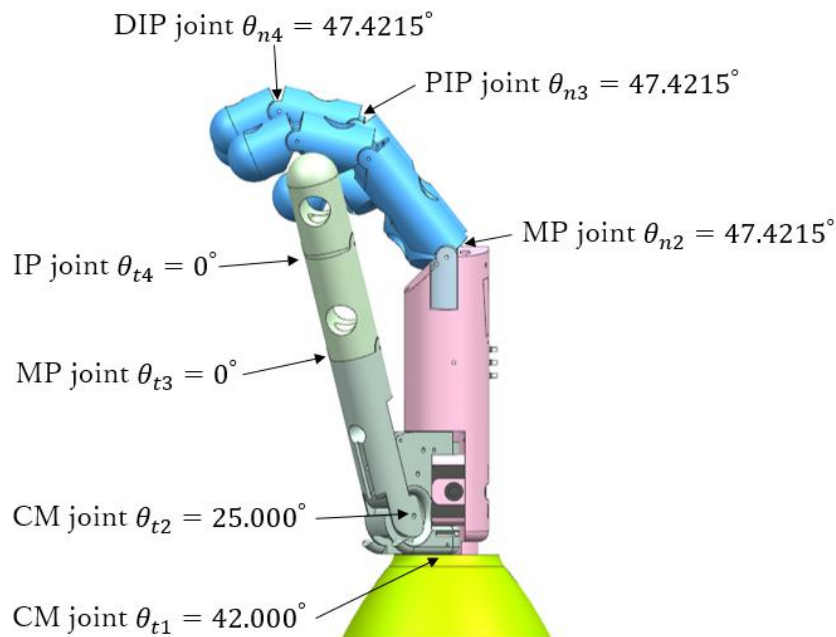


Fig.4.20 側面把握による指関節の角度の理論値

それに、同様な手法で並列姿勢モードに対して、関節角度のパラメータを用いて、動作遷移のシミュレーションを行う。五指の各関節にそれぞれ対応の理論値範囲を設定して、Fig.4.19 に示したように、動作遷移によるシミュレーションを表して、拇指を回内せず、屈曲させるたびに、四指も屈曲して、最後に側面把握に成り立つ。Fig.4.20 のように、側面把握のときの関節角度のパラメータは理論値に従っていることを確認できた。

しかしながら、Fig.4.15、Fig.4.17 に示したように、拇指の指先は示指、中指の指先と接触に至らず、まだ隙間がある。同様に、Fig.4.19 に示したように、拇指の末節骨は示指の側面と接触にならず、まだ隙間が残っていて、精密把握と側面把握の性能を発揮できない恐れがあるため、関連する指の関節角度に対して設計パラメータを調整する必要がある。

#### 4.5.2 シミュレーションの結果による設計パラメータの最適化

前述した問題に対して、精密把握と側面把握に関連する指関節の角度を調整し、それぞれ拇指の指先と示指、中指の指先を接触させる同時に、拇指の末節骨が示指の中節骨の側面と接触できるようになる。拇指の空間位置は CM、MP、IP 関節角度に左右されて、パラメータとする四つの角度  $\theta_{t1}$ 、 $\theta_{t2}$ 、 $\theta_{t3}$ 、 $\theta_{t4}$  を調整するが、中には  $\theta_{t1}$  と  $\theta_{t2}$  がすでに計算で決まったため、 $\theta_{t3}$  と  $\theta_{t4}$  だけの調整となる。さらに、精密把握と側面把握に直接に関わるのは IP 関節であるため、角度  $\theta_{t4}$  に絞ってパラメータを更新する。故に、まず Fig.4.21 のように、側面把握のときの指関節角度を調整し、並列姿勢モー

ドの動作遷移によるシミュレーション結果は Fig.4.22 のようになる。

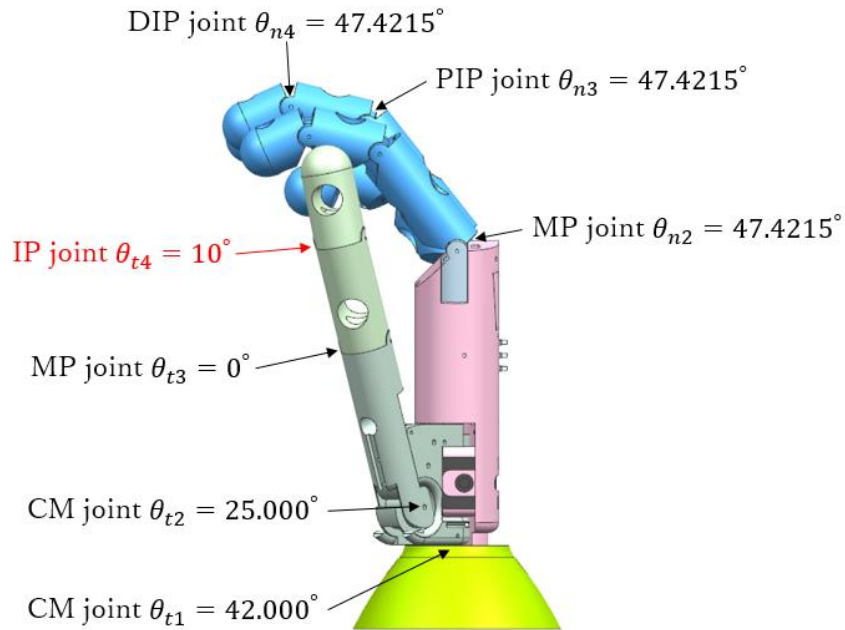


Fig.4.21 側面把握による関節角度の調整

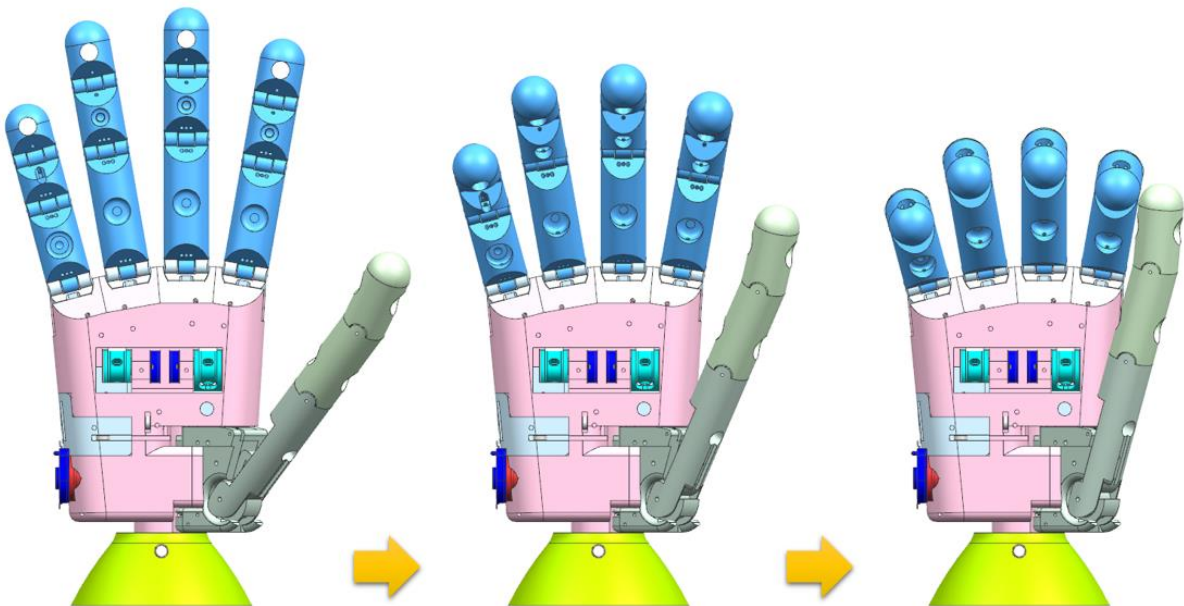


Fig.4.22 並列姿勢モードの動作遷移による新たなシミュレーション結果

よって、調整した IP 関節のパラメータを用いて、対立姿勢モードの動作遷移をシミュレーションする。Fig.4.23 に示したように、中間状態である五点把持の精密把握のときに、パラメータを代入して、初期位置からシミュレーションを行って、結果はそれぞれに第一回目の動作遷移は Fig.4.24 のように、第二回目の動作遷移は Fig.4.25 の

ように示す。

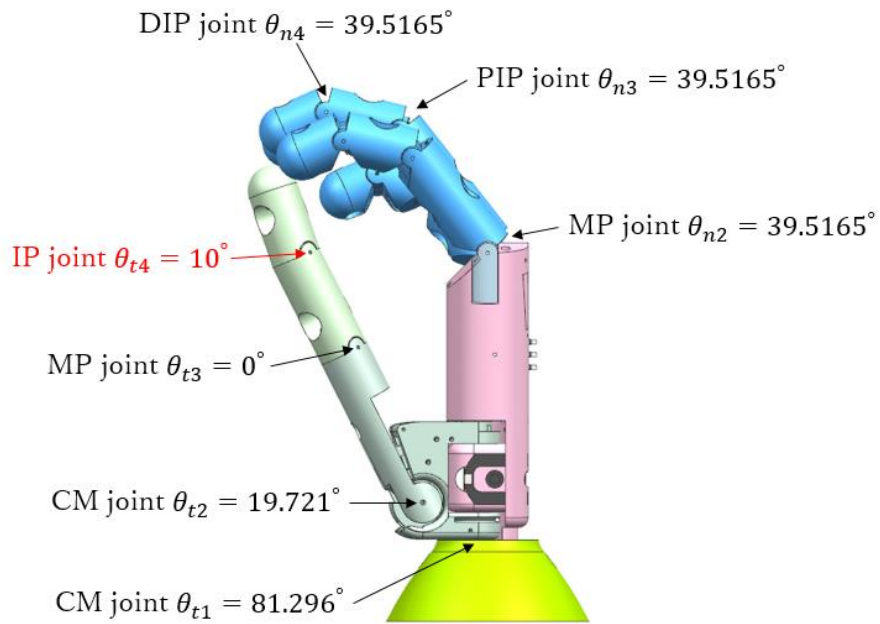


Fig.4.23 五点把持の精密把握による関節角度の調整

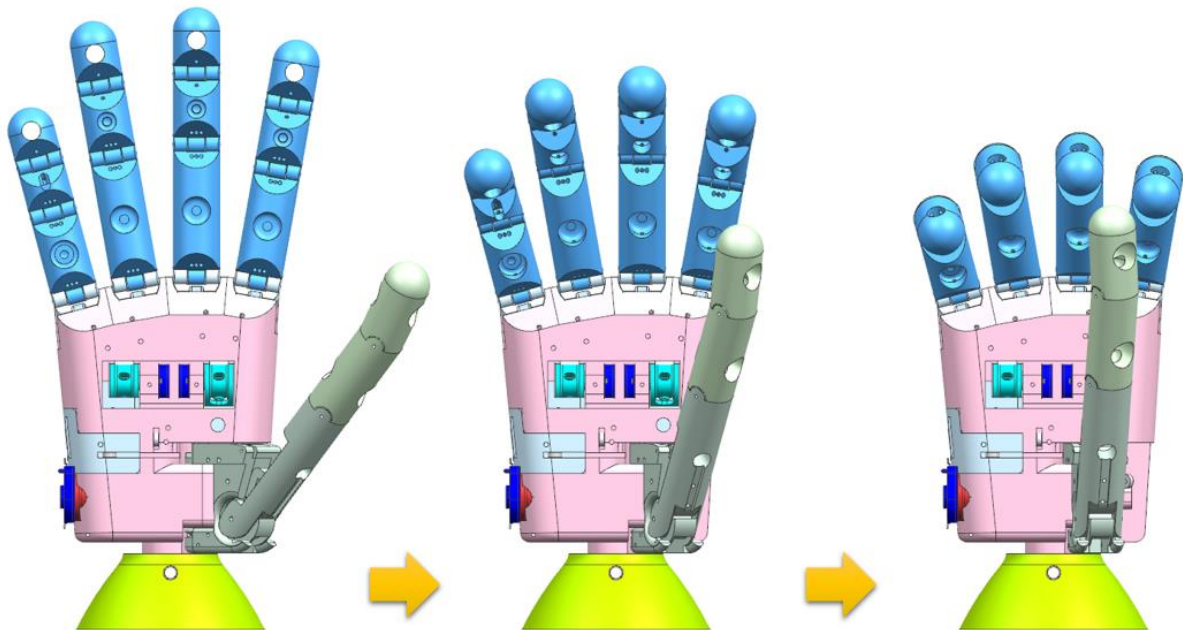


Fig.4.24 対立姿勢モードの第一回目の動作遷移による新たなシミュレーション結果

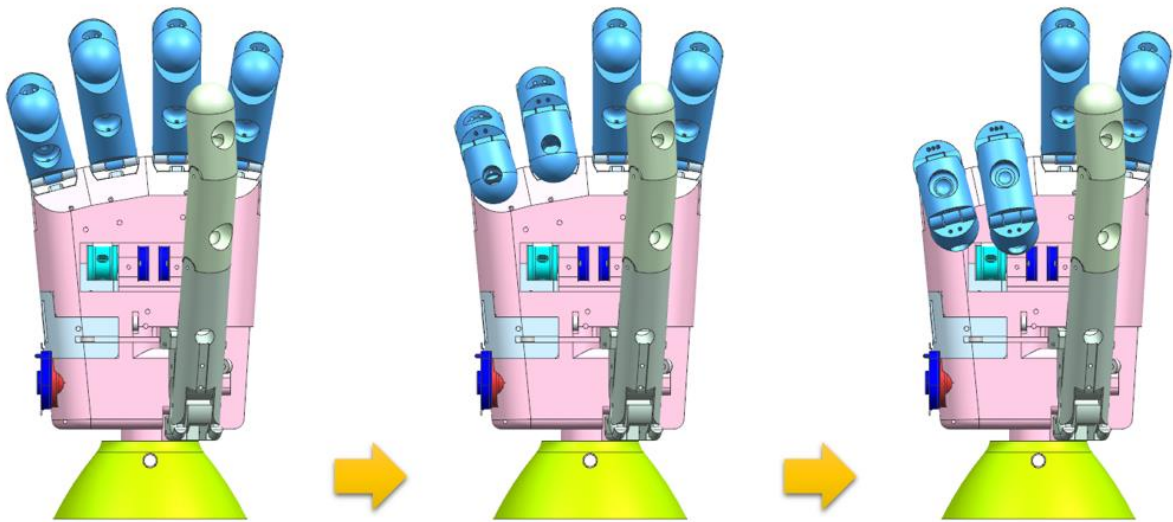


Fig.4.25 対立姿勢モードの第二回目の動作遷移による新たなシミュレーション結果

結果的に、設計パラメータを調整したことで、それぞれ拇指の指先と示指、中指の指先を接触できた同時に、拇指の末節骨が示指の中節骨の側面も接触できたことを確認できる。これで、設けた精密把握と側面把握の性能を発揮できるようになる。

ついでに、Fig.4.26 に示したように、幼児用義手の CAD 図を更新する。それに、新しいパラメータに基づいて、次のセクションで拇指の設計を述べる。

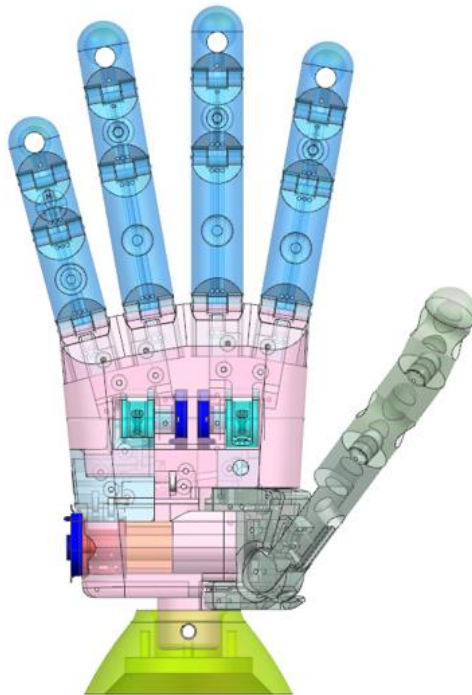


Fig.4.26 パラメータを最適化した幼児用義手の CAD 図



## 4.6 デュアル把持モードに合わせた拇指の設計

拇指はCM、MP、IP関節によって構成されて、MPとIP関節はそれぞれ屈曲・伸展の一自由度を持っているが、CM関節は屈曲・伸展、回内・回外の二自由度を持つ。特にCM関節は非利手の拇指において、使用頻度は68.98%に高く占め、MPとIP関節はそれぞれの割合が22.83%、8.19%になり、使用頻度は低い。たとえば利手の拇指においても、CM関節の使用頻度は58.78%に占めることに対し、MPとIP関節はそれぞれの割合が18.61%、22.61%になる[長尾 1971]。それに、拇指の運動特徴としては、アプローチするときCM関節だけが屈曲して、把持物体に効率よく接近する。物体と接触した後、CM関節が停止されたら、MPとIP関節が順次に屈曲し始まる[川口 2009]。

一方、本研究において、拇指はデュアル把持モードと合わせるように、運動特徴を完全に再現するのが難しく、一部であるアプローチの特徴を満たし、使用頻度の高いCM関節の自由度を開放させる。そのため、拇指の開発にあたって、それぞれ伸展側と回外側における自動的に回復できるバネを選択し、デュアル把持モードのための主動・受動の屈曲、かつ主動の回内のメカニズムを構築するほか、適応差動機能のワイヤ走行量を吸収できるバネの選定を行う。

### 4.6.1 伸展側バネの選択

Fig.4.26の結果に従って、拇指のMPとIP関節の角度を固定しているため、伸展動作にはバネでCM関節のみを初期位置に回復させれば実現できる。バネの選択にあたって、CM、MPとIP関節を任意の空間位置においても機能できる要件を満たすために、重力が弾性力の反力として、第三象限の180度の位置にさせる同時に、重力が各関節に対するモーメントアームが最大になるため、この位置で解析を行う。

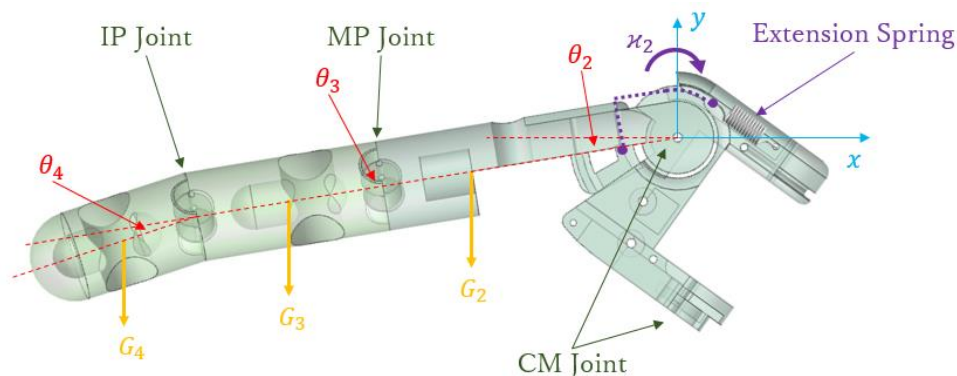


Fig.4.27 第三象限で拇指伸展の力学モデル

Fig.4.27に示したように、拇指伸展の力学モデルを立て、バネのパラメータを計算する。ただし、式を簡潔するために、拇指の略称tを省略する。そして、力学モデ

ルによる関係式を得る：

$$\boldsymbol{\kappa} = \begin{bmatrix} \kappa_2 \\ \kappa_3 \\ \kappa_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (K_2 + \sigma_2)r_{e2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_2C_2 & L_2C_2 + R_3C_{23} & L_2C_2 + L_3C_{23} + R_4C_{234} \\ 0 & R_3C_{23} & L_2C_{23} + R_4C_{234} \\ 0 & 0 & R_4C_{234} \end{bmatrix} \mathbf{G} \quad (4.34)$$

拇指の構造によって、式中に $r_{e2}$ は5.75mmであるため、関連するパラメータを代入することによって、弾性力の理論値0.2881Nを算出し、それと相応しいバネ（日本，株式会社アキュレイト，DE規格引張コイルバネ）を選出して、それぞれバネ定数は0.2710N/mm、初張力は0.3920Nである。

### 4.6.2 回外側バネの選択

回外動作にも同様に、掌にバネを付けて、CM関節のみを初期位置に回復させる。バネの選択にあたって、拇指全体につれ、CM関節を任意の空間位置においても機能できる要件を満足するために、重力が弾性力の反力として、第三象限の180度の位置にさせる同時に、重力が各関節に対するモーメントアームが最大になるため、この位置で解析を行う。

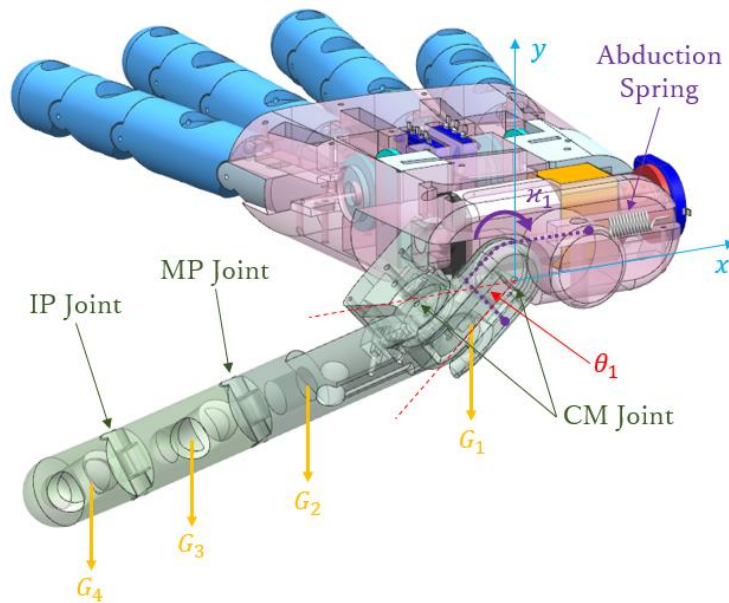


Fig.4.28 第三象限で拇指回外の力学モデル

Fig.4.28に示したように、拇指回外の力学モデルを立て、バネのパラメータを計算する。ただし、式を簡潔するために、拇指の略称tを省略する。そして、力学モデルによる関係式を得る：

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= (K_1 + \sigma_1)r_{e1} \\ &= [R_1C_1 \quad R_2S_{\frac{\pi}{4}}C_1 + L_1C_1 \quad (R_3 + L_2)S_{\frac{\pi}{4}}C_1 + L_1C_1 \quad (R_4 + L_3 + L_2)S_{\frac{\pi}{4}}C_1 + L_1C_1] \mathbf{G} \quad (4.35) \end{aligned}$$

拇指の構造によって、式の中に $r_{e1}$ は4mmであるため、関連するパラメータを代入することによって、弾性力の理論値0.4709Nを算出し、それと相応しいバネ（日本、株式会社アキュレイト、DE規格引張コイルバネ）を選出して、それぞれバネ定数は0.2600N/mm、初張力は0.5880Nである。

### 4.6.3 拇指のメカニズム

デュアル把持モードに向けて、対立姿勢モード、および並列姿勢モードの動作遷移を同時に合わせる拇指のメカニズムにおいては、Fig.4.99のように示す。

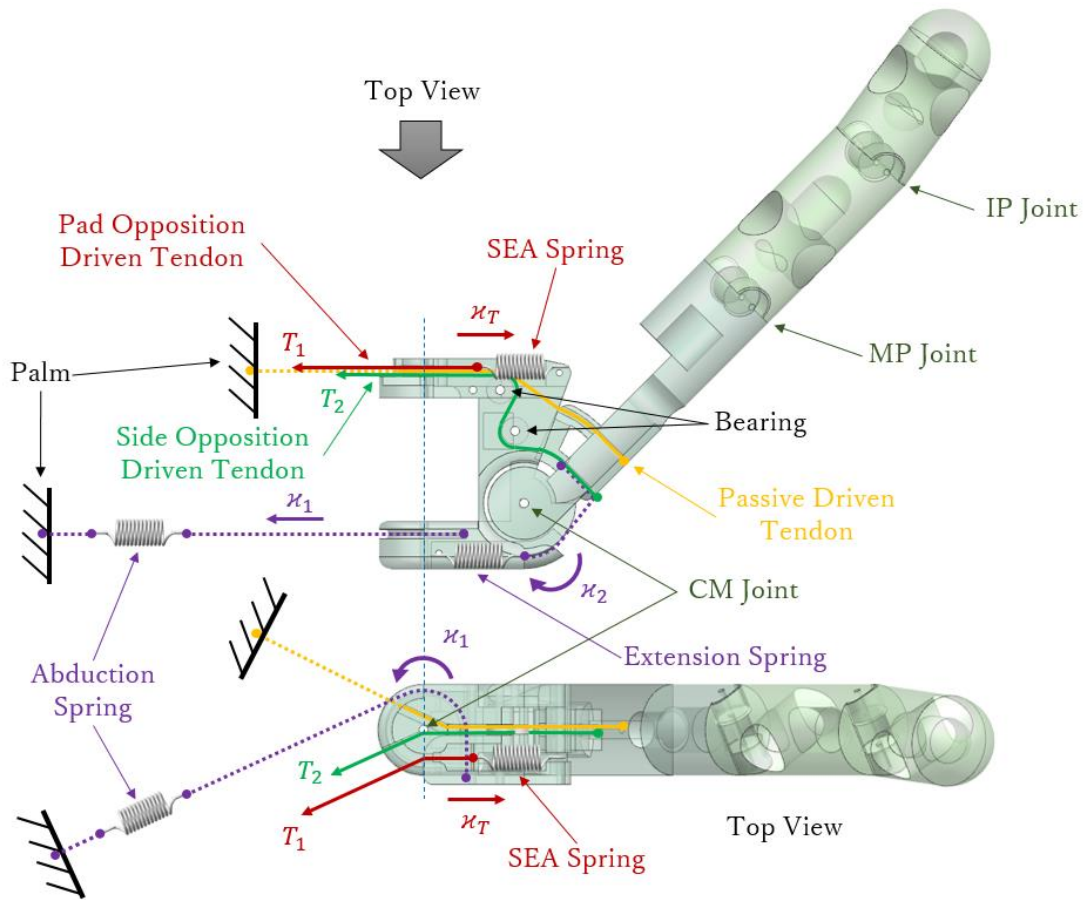


Fig.4.29 拇指のメカニズム

まずは並列姿勢モードに関与するメカニズムを説明する。手の開きから側面把握までの遷移プロセスでは、緑色のワイヤの牽引によって、CM関節の伸展バネの弾性力を克服しながら、拇指CM関節を屈曲して、25度まで運動する。

そして、対立姿勢モードに関与するメカニズムを説明する。握力把握から五点把持の精密把握までの遷移プロセスでは、赤色のワイヤの牽引によって、拇指のCM関節を42度から回内する同時に、片端は掌と結ぶ橙色のワイヤがパッシブ的に拇指のCM関節を屈曲する。それぞれCM関節に作用している回外と伸展バネの弾性力を克服し



ながら、五点把持の精密把握に達した後、橙色のワイヤ走行量を残さずに、拇指の CM 関節を限界の 25 度まで屈曲させた。引き続き、五点把持から三点把持の精密把握に移移すると、拇指、示指と中指が互いに停止されている状態で、適応差動機能による環指と小指の屈曲は継続的に運動する。四指のワイヤ走行量とイコールするため、拇指内に引張バネを付けて、SEA 駆動を構成させ、結果的にバネの伸び量を利用して四指のワイヤ走行距離と帳消しをする同時に、拇指の位置を維持する。

特にメカニズムの中、SEA 駆動に構成するバネを選択するとき、拇指を空間の任意の位置においても機能できるように、指関節の重力と回外バネの弾性力を SEA バネの反力としてかけても、SEA バネの初張力の最大値以下になる。そのため、拇指が第一象限にて 0 度の位置で解析を行う。Fig.4.30 に示すように、力学モデルを立つ。

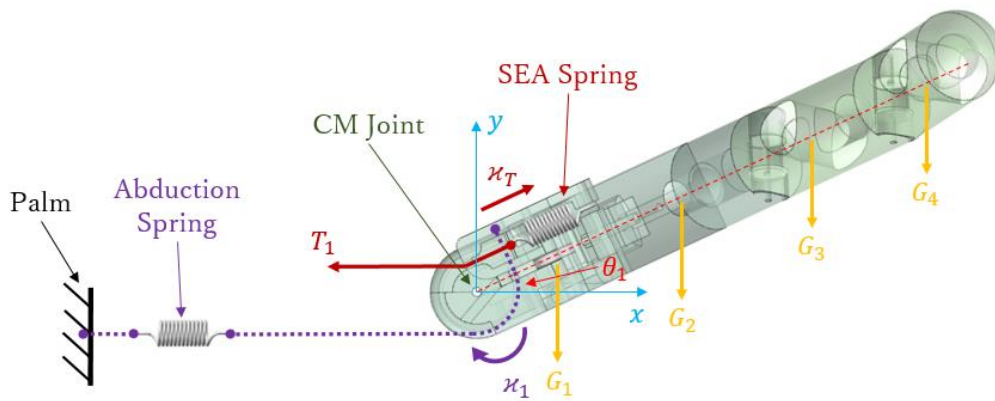


Fig.4.30 第一象限で SEA バネの力学モデル

モデルによって、力学の関係式は下記のように書く：

$$T_1 - \kappa_T = \kappa_1 + [R_1 C_1 \quad R_2 S_{\frac{\pi}{4}} C_1 + L_1 C_1 \quad (R_3 + L_2) S_{\frac{\pi}{4}} C_1 + L_1 C_1 \quad (R_4 + L_3 + L_2) S_{\frac{\pi}{4}} C_1 + L_1 C_1] \mathbf{G} \quad (4.36)$$

SEA バネが伸ばされなく、必要な初張力を求めるため、式を整理すると：

$$\sigma_T = (K_1 + \sigma_1) r_{e1} + [R_1 C_1 \quad R_2 S_{\frac{\pi}{4}} C_1 + L_1 C_1 \quad (R_3 + L_2) S_{\frac{\pi}{4}} C_1 + L_1 C_1 \quad (R_4 + L_3 + L_2) S_{\frac{\pi}{4}} C_1 + L_1 C_1] \mathbf{G} \quad (4.37)$$

4.6.2 節で選定した回外バネのパラメータを代入して、計算結果は Fig.4.31 に示すようになる。拇指が回内するたびに、重力のモーメントアームが減りつつ、重力トルクが減少していき、たとえ青色の回外バネが伸ばされて弾性力は増加しても総合的な傾きが変わらなく、SEA バネにかかる外力の変化は赤色の実線のように、一旦に上がって、拇指が回内 3 度の位置で最大値があり、4.2369N になる。そののち、減り続けて、90 度になると、重力が特異点に到達し、拇指への作用がなくなって、残る青色の回外バネが作用していて、最大値の 2.4660N になる。ただし、紫色は回外バネの初張力の範囲を示し、最大値は 2.3520N である。

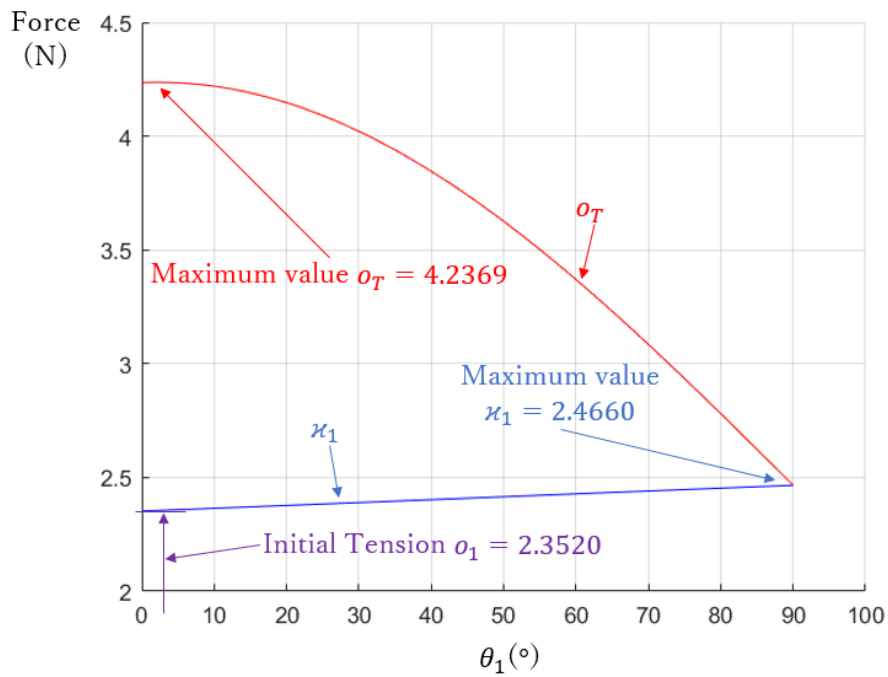


Fig.4.31 SEA バネに関するパラメータの計算結果

よって、それと相応しいバネ（日本，株式会社アキュレイト，DE 規格引張コイルバネ）を選出して，それぞれバネ定数は 4.4910N/mm、初張力は 5.4130N である。

以上によって，拇指の設計を行って，並列姿勢モードと対立姿勢モードにはそれぞれのワイヤ配置によって，どちらのモードを作動するとき，相応なワイヤが拇指を引いて，四指と組み合わせ動作を果せるようになった。また，拇指の検証に関しては，第5章に動作検証実験で幼児用義手の一部として，設けた性能を発揮できるかについて調べる。

## 4.7 まとめ

本章では、デュアル把持モードを一つの幼児用義手に応用できるように、まず幼児用義手の全体の力学モデルを立ち上げて、それぞれ拇指が四指との対立姿勢モード、並列姿勢モードにおける動作遷移を運動学、逆運動学によって解析を行った。

結果として、対立姿勢モードの第一回目の動作遷移において、拇指が四指と並列な姿勢から回内し始まって、握力把握を経て、拇指が示指と中指の指先へと接近しつつ、最終的に精密把握の五点把持の姿勢に到達できた。引き続き、第二回目の動作遷移は、精密把握の五点把持の姿勢から、拇指、示指、中指が姿勢を保つまま、環指と小指が継続的に屈曲して、最後に精密把握の三点把持に成り立った。一方、並列姿勢モードの動作遷移は、拇指が四指と並列した姿勢から、四指と同時に屈曲し始まって、最終的に、拇指の指先が示指の中節骨の側面と接触になって、側面把握を形成できた。

それから、設計図によって、実際に義手を組み立てのときに、解析通りに姿勢の形成、指の接触になれるかの問題も配慮しなくてはならないため、設計した CAD データを用いて、シミュレーションを行った。結果によって、把持姿勢を微調整して、設計パラメータを最適化した。

最後に、運動特徴に従いながら、デュアル把持モードに合わせる拇指を設計して、それぞれ伸展側、回外側、SEA バネを選定して、メカニズムの解析を行った。

ただし、本章で述べたデュアル把持モードに関する検証実験は第5章にて、義手全体と共に実施し、有用性を確かめた。

# 第5章 幼児用筋電義手に対する動作・性能の検証実験

---

5.1 幼児用義手に使用するアクチュエーターの選択 .....	145
5.2 開発した幼児用義手の全貌 .....	146
5.3 動作検証実験 .....	149
5.4 Pick & Place 実験による性能評価 .....	157
5.4.1 実験の対象 .....	157
5.4.2 実験の環境 .....	159
5.4.3 実験の結果 .....	161
5.5 まとめ .....	164

---

## 5.1 幼児用義手に使用するアクチュエーターの選択

製作した義手に使用する1個のアクチュエーターの選択において、掌に埋め込もうとするスペースの余裕を配慮しながら、指関節に必要最小限の出力を満たす要件となる。

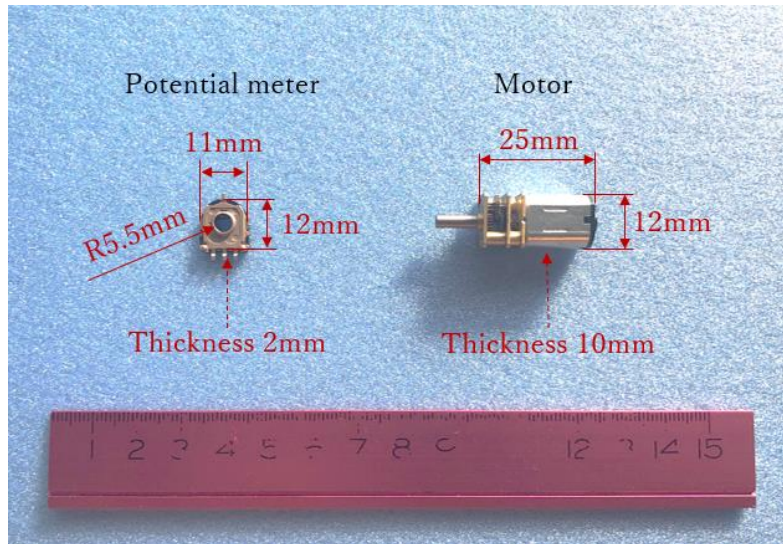


Fig.5.1 幼児用義手に使用する小型モーター及びポテンショメータ

幼児用義手には、各種の機構、機械要素やワイヤ配置などを組み込んで、残るスペース的な余裕は長さ 35mm、高さ 11.5mm、厚さ 16mm を持つ長方体になる。一方、第3章、第4章で解析したが、四指の各機能とデュアル把持モードを共に満たすために、必要最小のワイヤ張力  $16.5800+4.2369=20.8169\text{N}$  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 5mm、ポテンシャルメータの有効回転範囲は  $\pm 100$  度、駆動層にワイヤを巻き取られる半径は 3.5mm であるため、トルクは少なくとも  $72.8592\text{Nmm}$  が必要になる。そのため、Fig.5.1 のモーター（中国, TT Motor 電子, GM12-N20VA-09220）を選択し、電圧は 5v、減速比は 1:380、定格回転速度は 31rpm 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、正確にコントロールのために、フィードバックにはポテンショメータ（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。

## 5.2 開発した幼児用義手の全貌

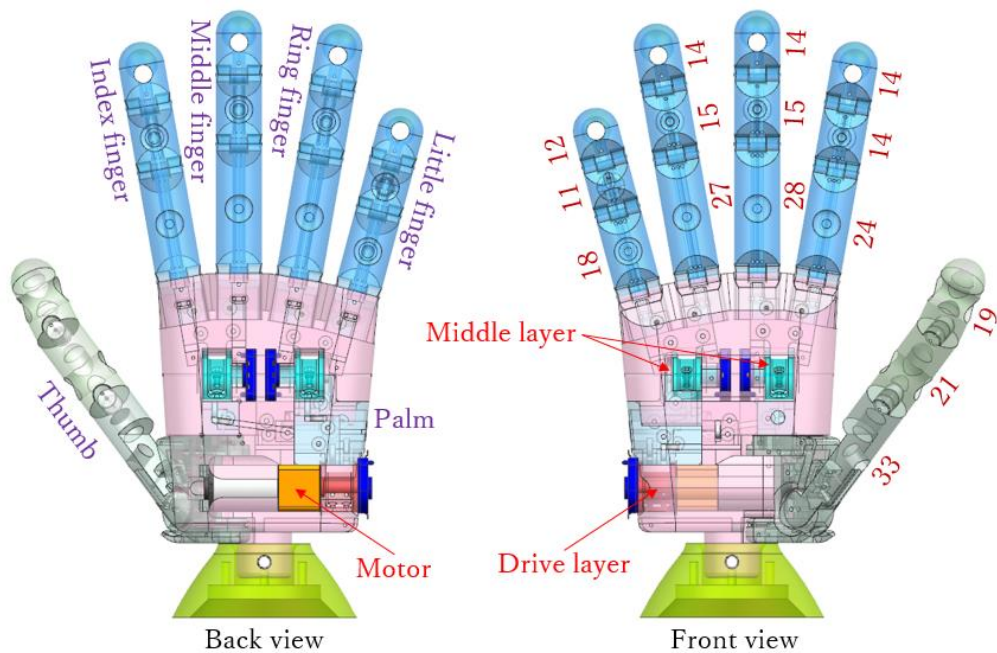


Fig.5.2 幼児用義手の CAD 図

第4章で説明したデュアル把持モードを幼児用義手に組み込んで、五指の解析や計算の結果に従って、義手における CAD 図を Fig.5.2 のように設計した。寸法は3歳子供の手に従って、選択した1個のアクチュエーターを掌に内包した。すなわち、DOAは1個だけで手指の関節自由度 DOF が14個（ヒトの手において関節自由度 DOF は22個がある）を稼働できるようになった。



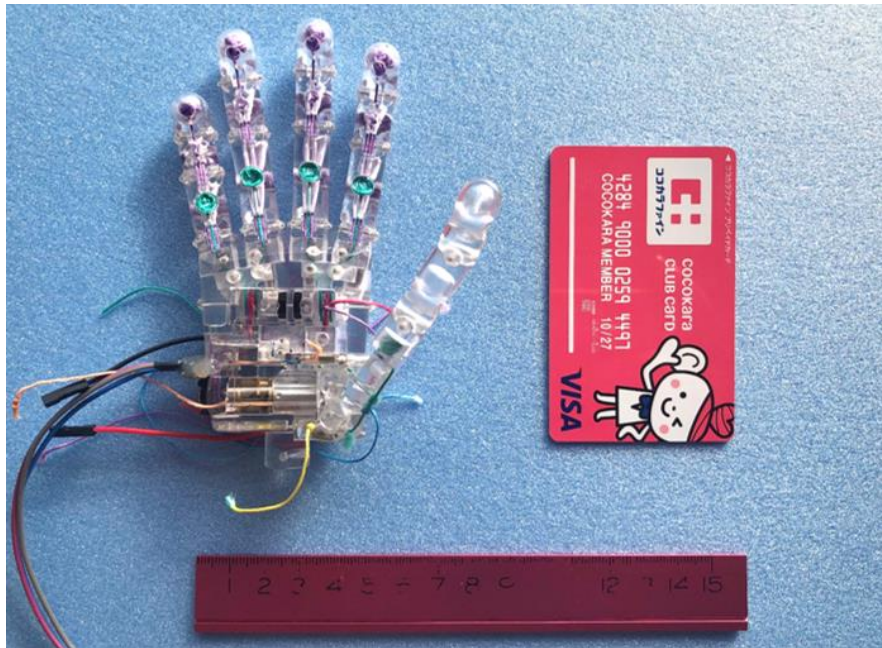


Fig.5.3 開発した幼児用義手

そして、設計した CAD 図のように、開発した幼児用義手は Fig.5.3 のように示す。義手の全体における製作材料の選択に関して、ABS の強度はすでに義手の製作に適している[雍 2015]が、3D プリントの加工技術[Shenzhen WeNext Technology Co., Ltd の HP より]により、Table.5.1 のように、ナイロンとグラス繊維も使えるが、表面の粗さによる摩擦力が大きいため、関節と関節の接触面やワイヤのルートには余計な消耗が生じる恐れがある。一方、アクリルのほうが後処理をするため、ABS より精度がよくなるほかに、物理的な特性も全部に上回っているため、義手を作る材料として期待でき、アクリルにした。ただし、第3章の3.4.2節に駆動層の回転摩擦機構は、解析によってABSの材質にした。

Table.5.1 義手における製作材料の物理特性の比較

	アクリル	ABS	ナイロン	グラス繊維
密度 g/cm <sup>3</sup>	1.18	1.05	1.12	1.48
引張強さ Mpa	73	39	67	79
曲げ強さ Mpa	118	64	59	140



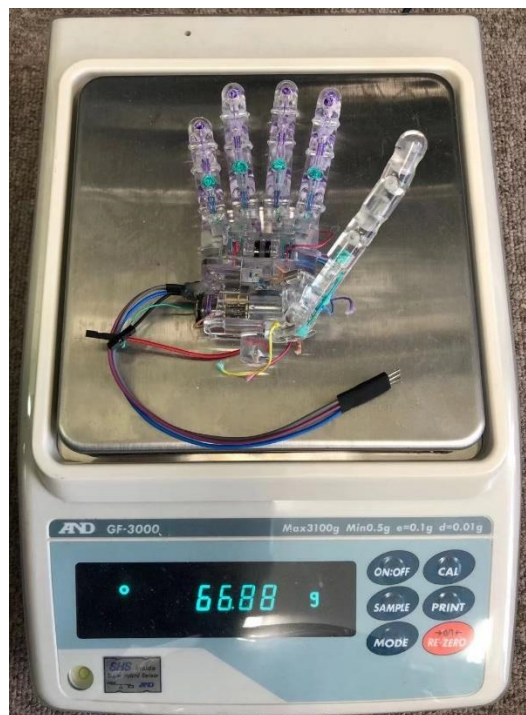


Fig.5.4 開発した幼児用義手の重量

以上によって、Fig.5.4 に示したように、製作した義手全体の重量を 66.88g の軽さに抑えられて、150g 以下の軽量化の目標を実現した。さらに、一番軽い市販品（86g, Ottobock 社の Electric Hand 2000）より 2 割以上の重量を軽減し、20g を減らしたことを明らかにした。

### 5.3 動作検証実験

開発した幼児用義手に対して、設けた機能とデュアル把持モードによる動作パターンの実現について、動作検証実験を行う。それに、動作検証のために、幼児用義手による把持対象物のサイズの範囲を決めておく必要がある。把持物体の形状をその範囲内に限って、日常生活のものを把持させる。そのため、下記の Fig.5.5 のように、幼児用義手における把持可能な範囲を調べて、把持対象物を決定する。握力把握（左の図と中間の図）には、約最小直径の 5mm から最大直径の 45mm までのサイズ範囲内に把持対象物を選んで、精密把握（右の図）には最大直径約 60mm の円盤を使用する。一方、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設けない。

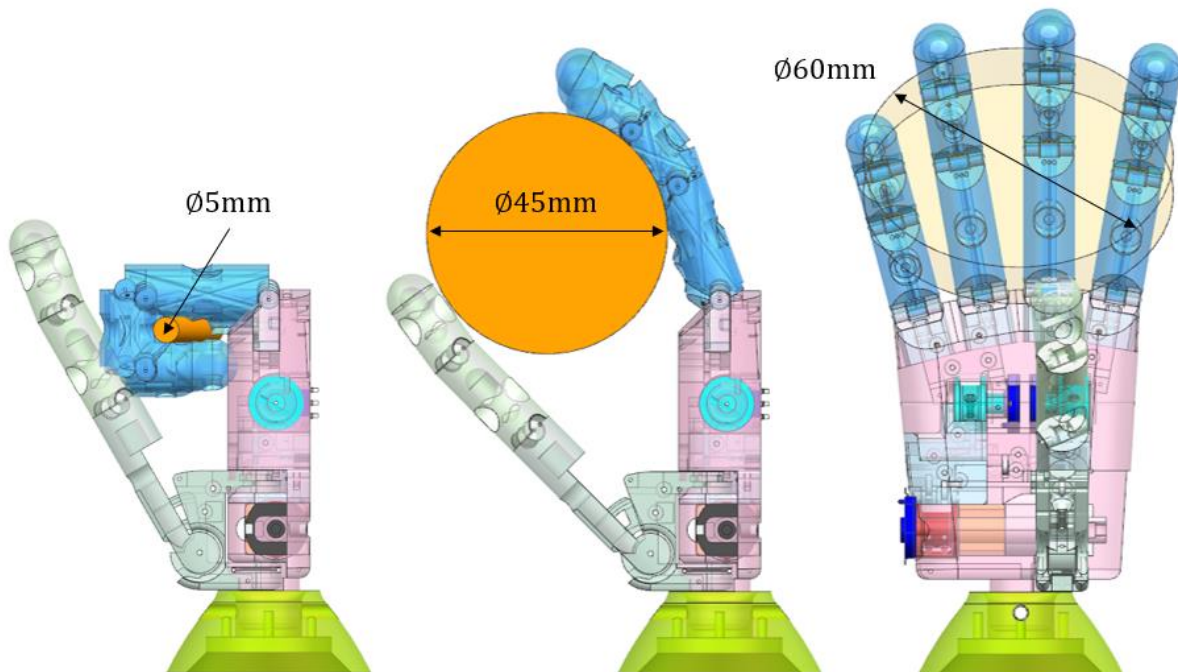


Fig.5.5 把持可能な範囲（左&中：握力把握，右：精密把握）

それに、理論の把持力によって、把持対象物の重さ範囲を決める。Fig.5.5 に示した把持が始まる最大範囲の握力把握（中間の図）を基準の例とすると、四指の各関節は約 20 度が屈曲しながら、各関節が物体と接触している状態であるため、モータの最大出力  $98\text{Nmm} \div 3.5\text{mm} = 28\text{N}$  のときに、第 3 章の出力の関係式 3.19 によって、それぞれ MP 関節は  $0.7557\text{N}$ 、PIP 関節は  $0.5426\text{N}$ 、DIP 関節は  $0.3423\text{N}$  となり、四指全体の出力は  $6.5624\text{N}$  である。それに、拇指の出力は  $1.0630\text{N}$  と得られ、義手の把持力は  $7.6254\text{N}$  となる。よって、実験のときに、把持の対象物が比較的軽いものにする。

実験をするときに、製作した幼児用義手を手首の部分で固定する。選んだ各種類の把持対象物を義手に渡して、コントローラーを用いて操作しながら、物体を安定に把

持できるようになったら，手を離して写真を撮る．結果として，Fig.5.6 から Fig.5.11 までに示したように，10 パターンの動作の中，6 パターンが実現することを確認できた．

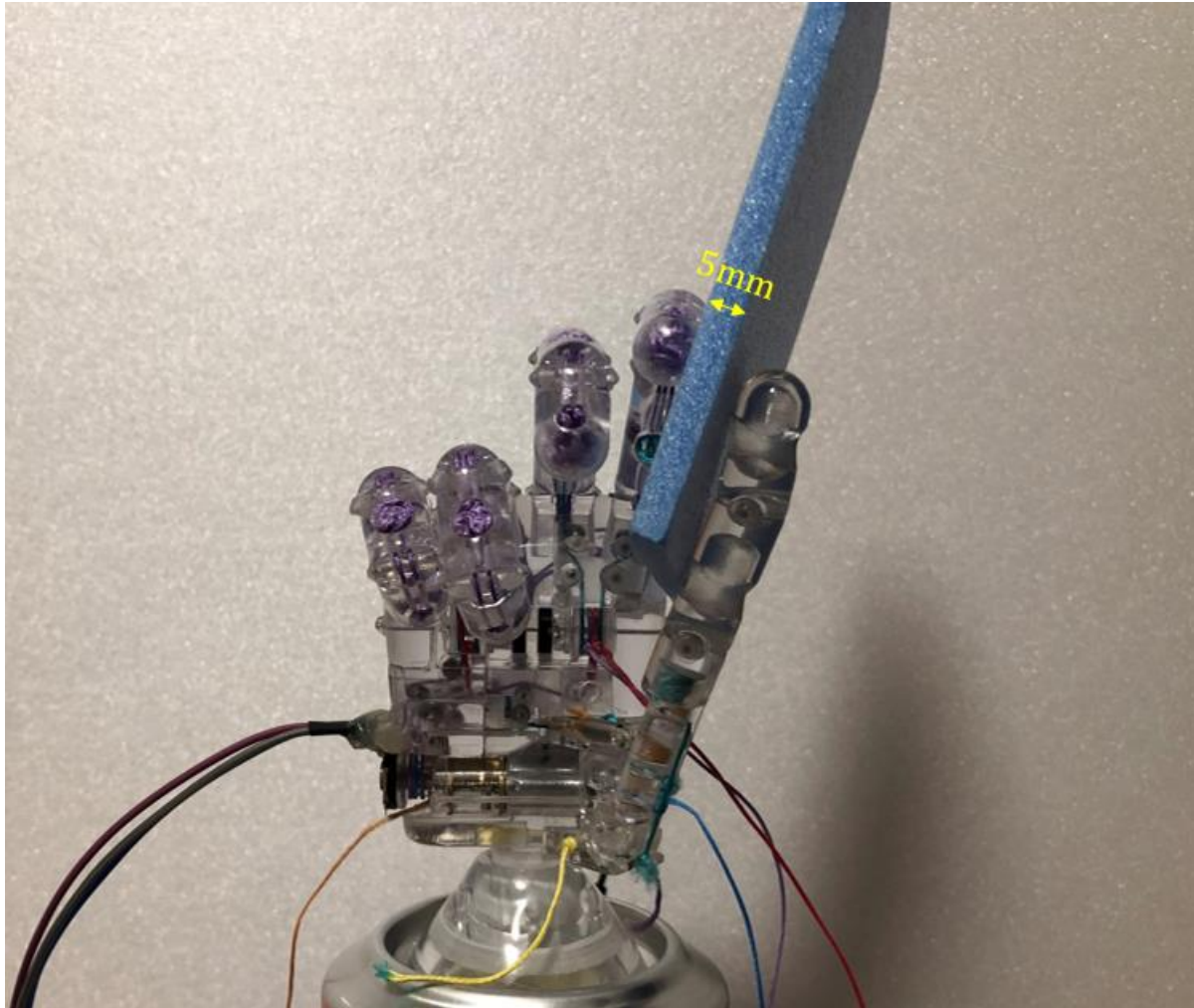


Fig.5.6 動作 1 : Lateral Pinch

**Lateral Pinch** : Fig.5.6 に示したのは幼児用義手が厚さ 5mm の長方形カード状の物体を把持している様子である．これはデュアル把持モードによる並列グループの遷移動作のひとつであることを確認できた．この動作において，拇指は初期の回内角度 42 度を保って，四指の側面の位置に維持させる．そして，長方形カードを渡して，四指を屈曲させながら，安定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、四指の全体にもアプローチの特徴に従って，一緒に屈曲していく．まだ物体と接触していないため，把持の状態にならない．四指が運動している間に，拇指も動き出して，CM 関節を屈曲して，IP 関節が先に長方形カードの表面と接触してから，四指が拇指と共に停止になった．その後、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、拇指が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。

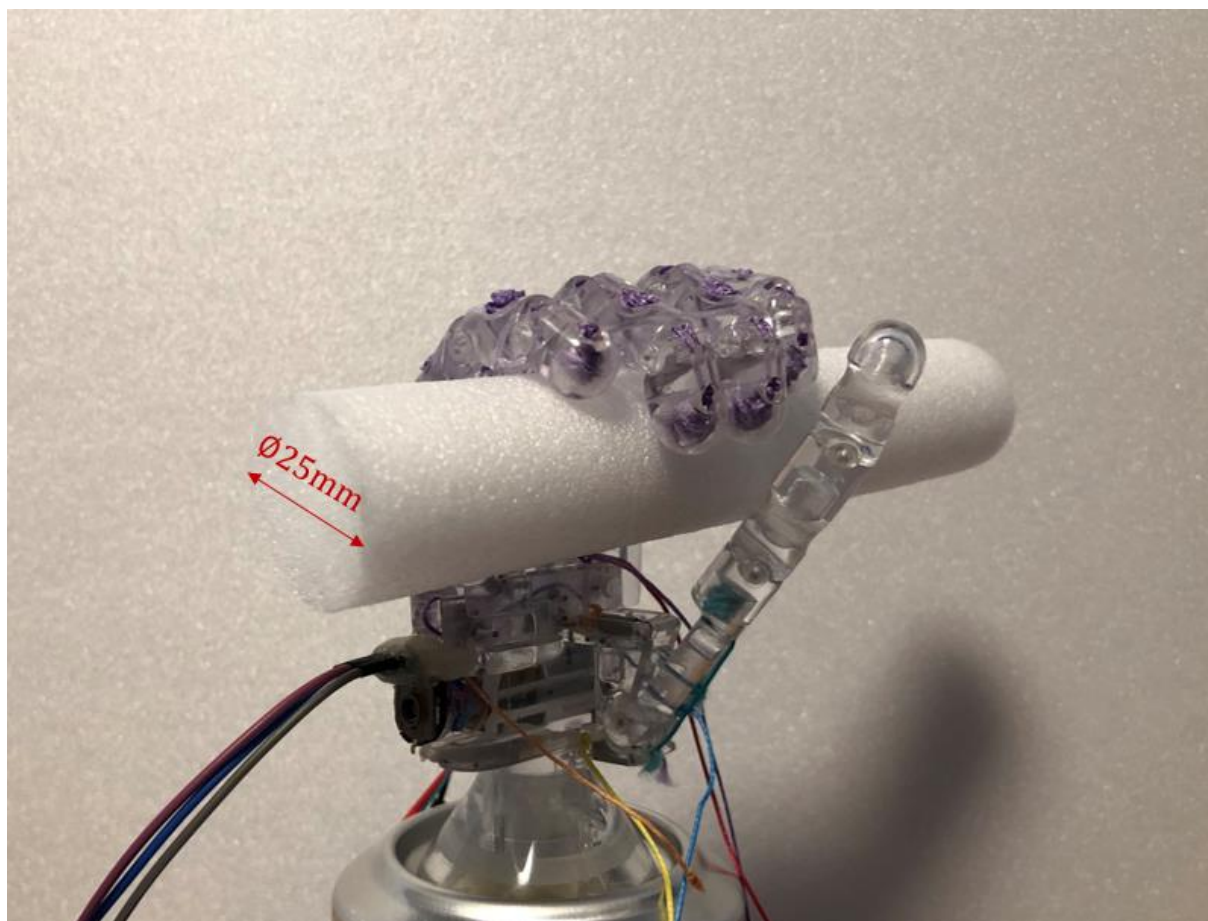


Fig.5.7 動作 2 : Medium Wrap

**Medium Wrap** : Fig.5.7 に示したのは幼児用義手が直径 25mm の棒状の物体を握っている様子である。これはデュアル把持モードによる対立グループの遷移動作のひとつであることを確認できた。この動作において、拇指を回内しながら、徐々に四指と対立の状態になる。そして、棒状の物体を渡して、五指を屈曲させる。拇指はまず CM 関節の屈曲が始まり、MP 関節が最初に物体と接触になったため、CM 関節と共に停止になったが、SEA 駆動の段階に入り、拇指が停止のままで四指が引き続き屈曲する。四指がこのプロセスの間に、安定連動機能および適応差動機能の共同作用によって、各関節、各指はアプローチのときに一緒に屈曲し、棒状の物体と接触し始まった時点で把持の状態に入って、最後に拇指と共に完全に停止になった。設けた機能による動作は成功になった。

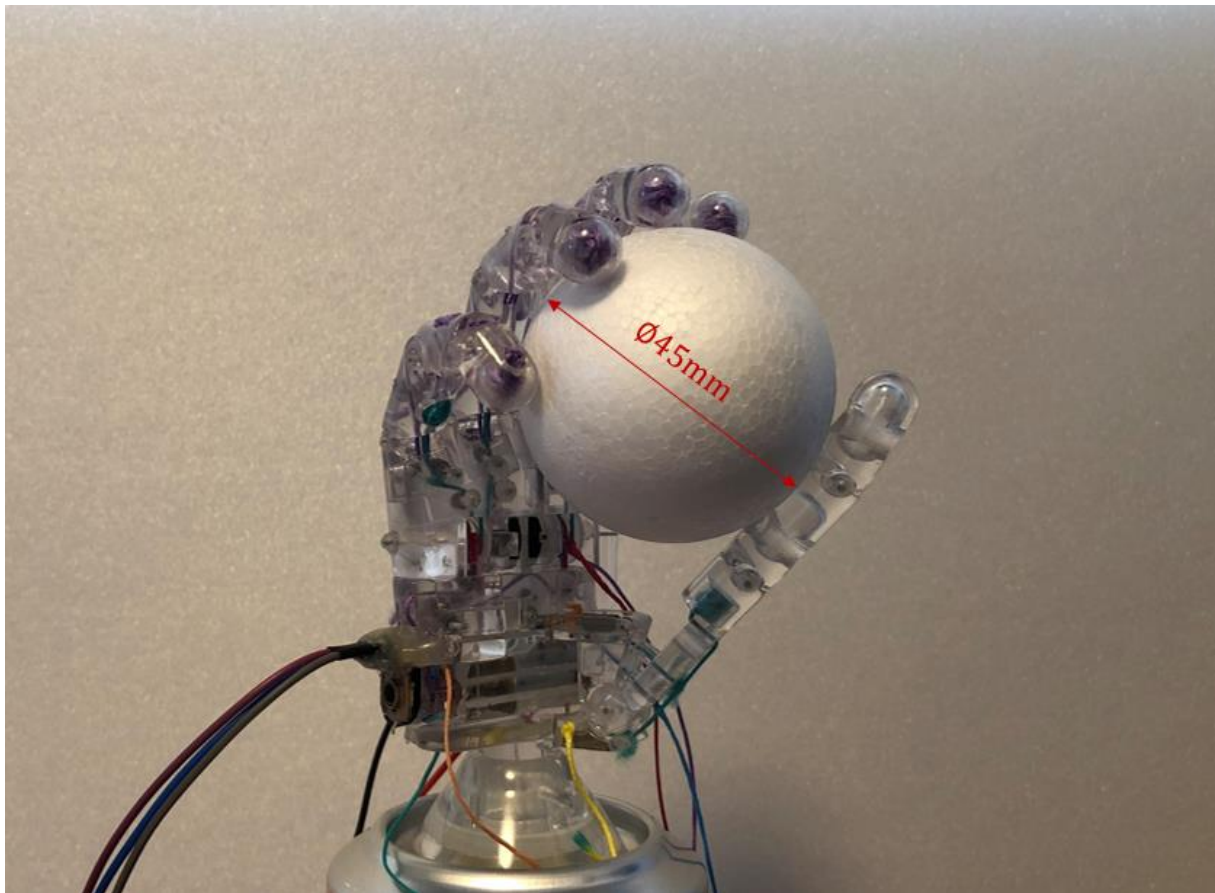


Fig.5.8 動作 3 : Power Sphere

Power Disk : Fig.5.8 に示したのは幼児用義手が直径 45mm の球状の物体を握っている様子である。これはデュアル把持モードによる対立グループの遷移動作のプロセスを確認できた。この動作において、拇指を回内し、徐々に四指と対立の状態に接近している。このときに、球状の物体を渡して、拇指は CM 関節の回内が物体にブロックされ、MP 関節も物体と接触になったため、CM 関節の屈曲も共に停止になったが、SEA 駆動によって、拇指が停止のままで四指が引き続き屈曲する。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、まず、四指の全体はアプローチの段階に入って、一緒に屈曲していく。それから、示指と中指が先にボールと接触して停止になったタイミングで、四指が把持の状態に入り、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。これで、ボールに対する馴染み把持は形成して、設けたメカニズムによる機能が発揮して、把持は成功になった。

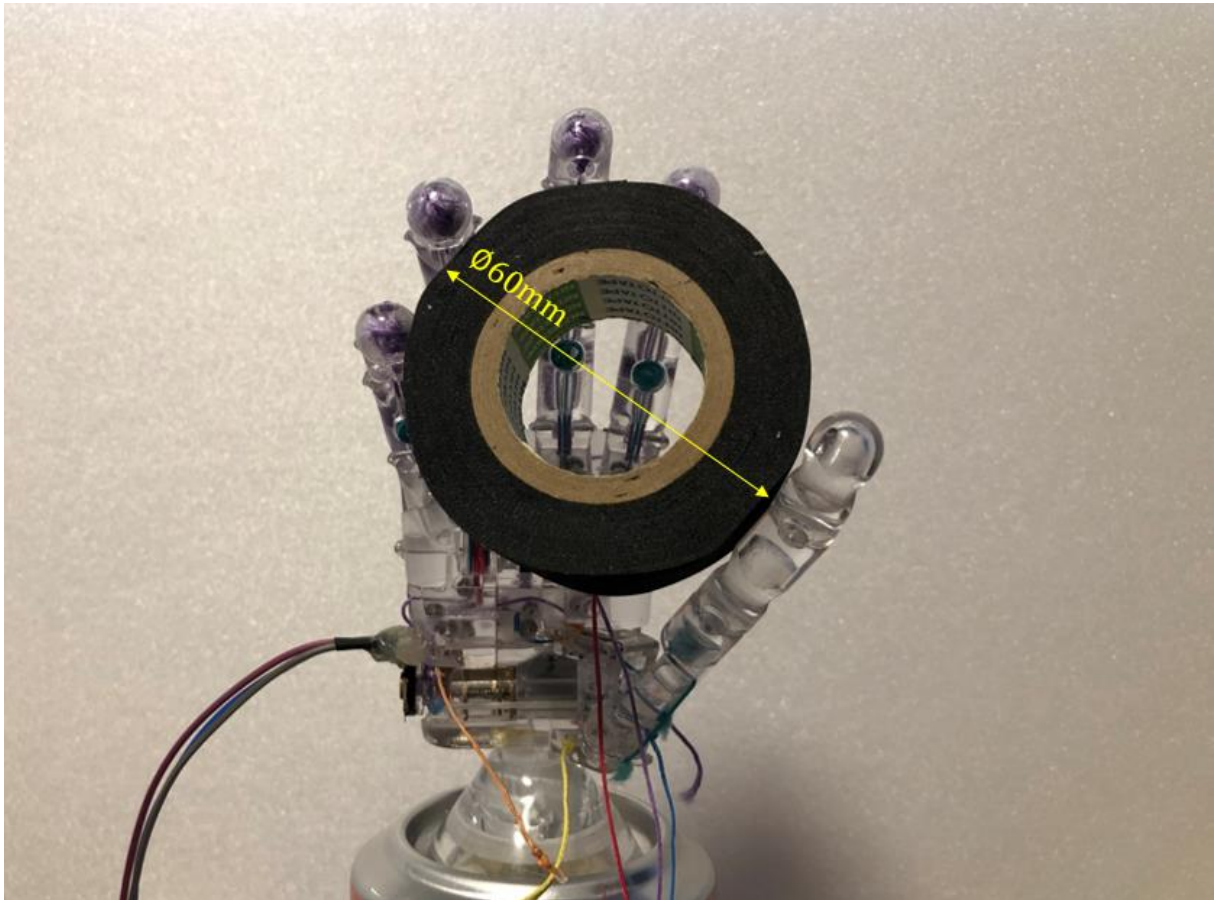


Fig.5.9 動作4：Precision Disk

**Precision Disk**：Fig.5.9に示したのは幼児用義手が直径60mmの盤状の物体を把持している様子である。これはデュアル把持モードによる対立グループの遷移動作のプロセスを確認できた。この動作において、拇指を少し回内してから、盤状の物体を渡して、拇指はCM関節の回内が物体にブロックされ、MPとIP関節も物体と接触になったため、CM関節の屈曲も共に停止になったが、SEA駆動によって、拇指が停止のままで四指が引き続き屈曲する。一方、四指の場合、拇指と同時に運動が始まって、屈曲するたびに、安定連動機能および適応差動機能の共同作用によって、四指の各指関節、四指の全体にもアプローチの特徴に従って、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、把持の状態に入り、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。これによって、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、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.5.10 動作 5 : Tripod

Tripod: Fig.5.10 に示したのは幼児用義手が直径 20mm の球状の物体を掴まんでいる様子である。これはデュアル把持モードによる対立グループの遷移動作のプロセスを確認できた。この動作において、拇指を回内して、四指と対立の状態に接近している時点から、球状の物体を渡して、五指を引き続き屈曲させる。拇指では、CM 関節が屈曲し始まって、先に IP 関節がボールと接触して、ついでに CM 関節と共に停止になった。そして、SEA 駆動の作用で四指が屈曲し続ける同時に、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。この同時に、四指では、拇指と共に運動して、屈曲するたびに、安定連動機能および適応差動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アプローチの特徴に従って同時に屈曲して、示指と中指の DIP 関節が先にボールと接触して停止になった。そのときに、把持の状態に変更して、モーターの出力によって、示指と中指の DIP 関節がボールに出力で維持していた。また、環指と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。これによって、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.5.11 動作 6 : Thumb 2 Finger

**Thumb 2 Finger** : Fig.5.11 に示したのは幼児用義手が直径 15mm の棒状の物体を掴んでいる様子である。これはデュアル把持モードによる対立グループの遷移動作のプロセスを確認できた。この動作において、拇指を回内して、四指と対立の状態にする。そして、棒状の物体を渡して、五指を屈曲し続ける。拇指の場合では、アプローチが始まって、CM 関節が屈曲していて、最初に棒状と接触したのは IP 関節であるため、CM 関節がついでに停止になった。そして、把持の段階に入って、SEA 駆動の作用で四指が屈曲し続ける同時に、モーターの出力によって、IP 関節が棒状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、安定連動機能および適応差動機能の共同作用によって、四指の各指関節、四指の全体にはアプローチによって、一緒に屈曲していく。その後、示指と中指における DIP 関節が先に棒状と接触して停止になった時点で、把持の段階に入り、棒状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、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、指先の三点把持で棒状を精密把握にこなして、把持は成功になった。

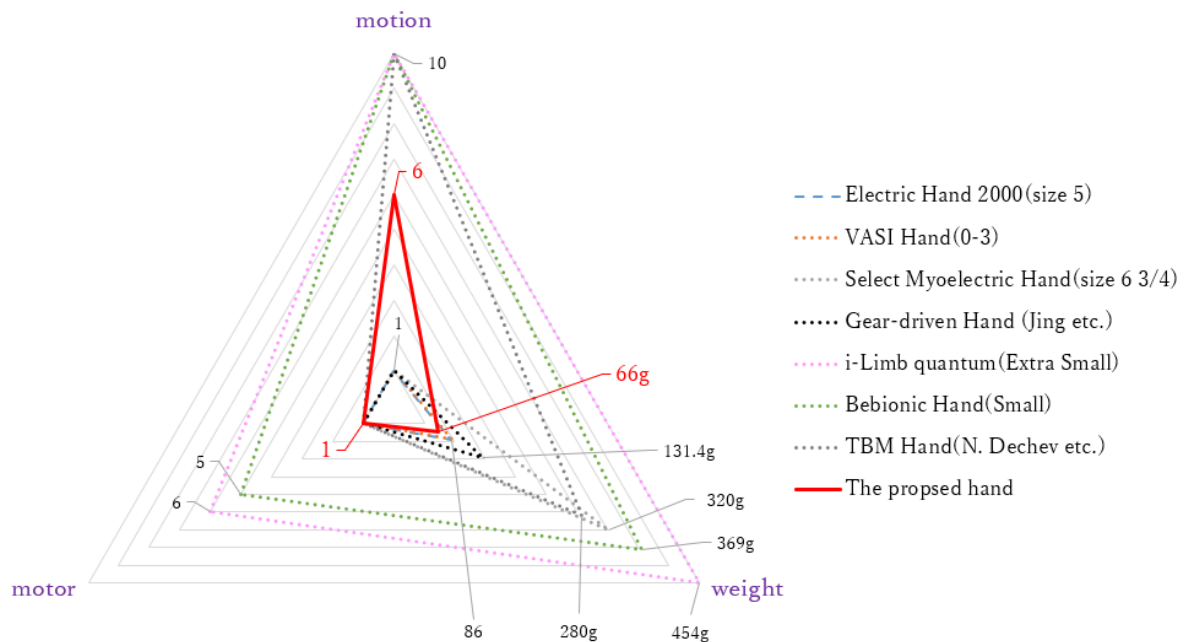


Fig.5.12 本研究で開発した幼児用義手の位置付け

以上によって、研究目標とした手の運動特徴に従って、自然の動きを再現できる装飾性を保つまま、デュアル把持モードを用いて、手の中にわずか1個のアクチュエーターを使用して、重量を150g以下の66.88gまでの軽量に抑えられた同時に、6パターンの動作を実現できた。開発した幼児用筋電義手はFig.5.12のように、既存の義手と比較し、1個のアクチュエーターで軽量化と多動作を両立した位置付けを実現できた。ただし、開発した幼児用筋電義手の把持力は7.6254Nとなり、既存のものと比べると不足している。

## 5.4 Pick & Place 実験による性能評価

Pick & Place 実験では、利用者が前腕の筋肉の収縮で発生した筋電信号を用いて、義手を操作して、対象物に対する把持、移動や放置など一連のタスクを行いながら、把持の成功回数によって、義手の把持性能を調べる実験である。よって、開発した幼児用筋電義手の把持性能を検証するため、第2章で論述したアプローチの段階で試作した2種類の幼児用筋電義手（五指が共に屈伸するタイプ、および四指が屈伸・拇指が回転するタイプ）を含めて、同一に Pick & Place 実験を実行する。最後に、各義手における実験データを比較して、本研究で提案した幼児筋電義手の有用性を確かめる。

### 5.4.1 実験の対象

本実験では全部で3種類の義手を検証対象となる：本研究で提案した幼児用筋電義手（動作パターン数：5）、第2章で試作した五指が共に屈伸するタイプの筋電義手（動作パターン数：3）、四指が屈伸・拇指が回転するタイプの筋電義手（動作パターン数：4）である。開発した四指全体の馴染み把持の効果、およびデュアル把持モードによる動作パターンの増加において、把持性能の表現を調べる。

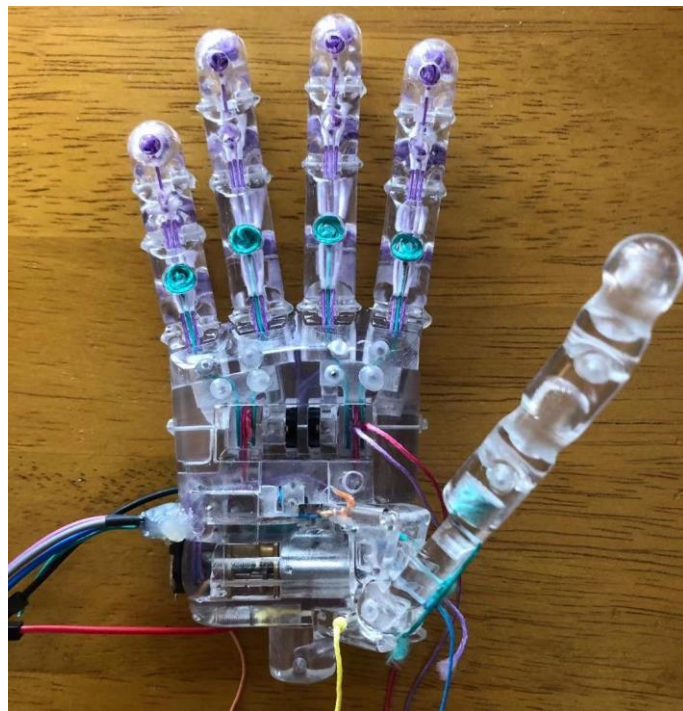


Fig.5.13 本研究で開発した幼児用筋電義手

まず、この3種類の義手に対して、それぞれの特徴をまとめる。Fig.5.13に示しているのは、本研究で提案した幼児用筋電義手（3歳子供の手のサイズ）である。手の中に1個のモーターを内蔵して、66.88gの軽量を持ちながら、把持力は7.62Nとなる。

把持の特徴としては、物体にアプローチするとき、四指の各指関節が同じ角速度で屈曲しながら、物体に接近する。そして、物体を把持するとき、四指の適応差動機能の性能が発揮して、各指が物体の形状を沿って、馴染み把持に形成する。さらに、デュアル把持モードの有することによって、拇指が四指と対立、あるいは並列な姿勢を調整できるため、多様な把持動作をこなせる。それ以外に、指の伸展は受動伸展機能が効いて、バネを介して、出力に消耗の少ない省エネな構造で性能が発揮している。



Fig.5.14 五指が共に屈伸するタイプの筋電義手

次に、Fig.5.14 に示しているのは、第2章で試作した五指が共に屈伸するタイプの筋電義手(5歳子供の手のサイズ)である。手の中に1個のモーターを使用して、131.4gの重量を持ちながら、把持力は37Nとなる。把持の特徴としては、拇指は四指と対立な位置で固定されていて、四指MP関節の屈曲・伸展と共に運動して、開・閉動作を果たす。しかしながら、四指と拇指のMP関節以外の全ての関節が一定の角度で固定されていたため、限られた把持の対象物しか把持できないほか、物体の形に沿う馴染み把持もできない。





Fig.5.15 四指が屈伸・拇指が回転するタイプの筋電義手

最後に、Fig.5.15 に示しているのは、同じく第2章で試作した四指が屈伸・拇指が回転するタイプの筋電義手（5歳子供の手のサイズ）である。手の中に2個のモーターを使用して、159.3gの重量を持ちながら、把持力は12Nとなる。把持の特徴としては、拇指の回内・回外には1個のモーターで直接駆動して、運動を果たす。もう1個のモーターを四指の屈曲・伸展を駆使する。拇指が主動的に四指と対立、あるいは並列な位置を調整できるため、対両方に関連する動作パターンを実現できる。しかしながら、四指のMP関節と拇指のCM関節以外の関節が全て一定の角度で固定されたため、限られた把持の対象物しか把持できないほか、物体の形に沿う馴染み把持もできない。

以上3種類の義手を同一の実験環境でPick & Place実験を行って、それぞれの把持性能を比較する。

#### 5.4.2 実験の環境

最初に、Pick & Place実験の環境について説明する。まず、机の上に300mmの間隔をあけて、二つの15×15mmの正方形の区域を設置する。そして、区別しやすいように、被験者の右手にある区域をAとし、反対側の区域をBとマークする。それから、被験者が自分の前腕からの筋電を用いて、右手に装着する義手を操作しながら、熟練になると実験を開始する。被験者が把持対象物をA区域から持ち上げた後に、把持しながらB区域へ運んで、B区域のマークに置く。引き続き、B区域から再び把持対象物を持ち上げて、またA区域へ運んで、置く。このように、一つの把持対象物に対し

て、30秒の時間制限内に以上のタスクを繰り返して行う。ただし、任意方向へ運ぶ途中で把持対象物が滑り落ちたら、1回の失敗と数える。逆に、物体がA、Bの間に落ちなければ、1回の成功と記録する。このように、異なる把持対象物に対して、時間制限内でタスクの成功回数は義手の把持性能を反映する。

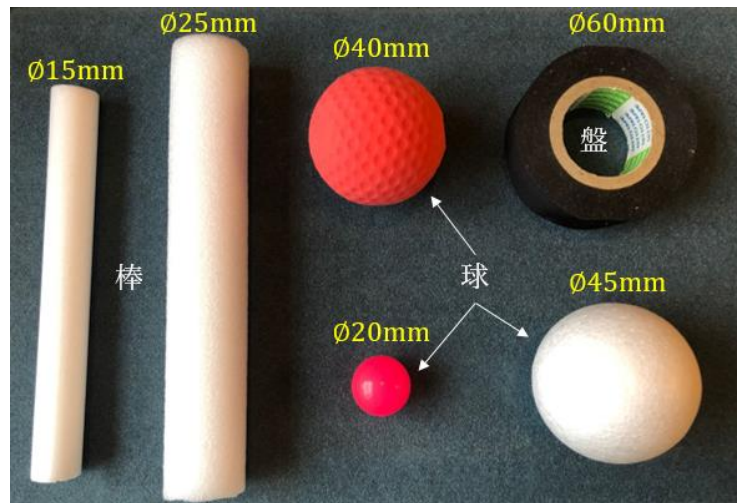


Fig.5.16 把持対象物

把持対象物に対して、全部3種類の幼児用筋電義手の把持可能な範囲 (Fig.5.5) を基準にして、対応できるサイズのものを選ぶ。また、すべての筋電義手は同一の環境の下でものを把持できるように、最小の理論把持力のハンドを基準にして、使用する把持対象物を Fig.5.16 に示したように、軽いものにした。

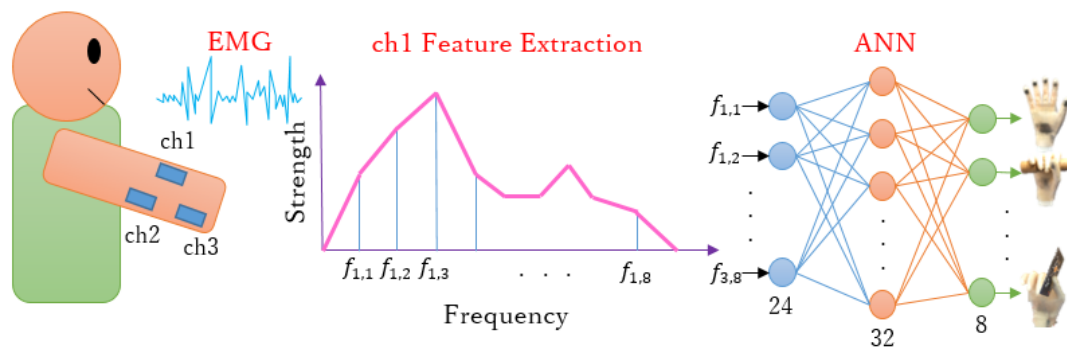


Fig.5.17 筋電義手の ANN 制御法[X. Yong 2019 より]

被験者が健常の男性1名で、右利きの人である。義手の操作を違和感なく行うため、義手を被験者の右手の前腕部に付けた。また、筋電義手の制御に関しては、Fig.5.17に示したように、筋肉の収縮による発生した筋電信号 (EMG) を被験者の前腕部に貼り付けた筋電センサーで取得して、AD変換してから、FFT変換による情報処理をする。そして、特徴ベクトルを処理後のデータから抽出して、三層のニューラルネットワーク

ク (ANN) に入力させて、被験者の動作意図を推定する。最後に、推定した結果を用いて、義手のモーターを動かして、操作する。一方、実験で使った装置は Fig.5.18 に示したようになる。

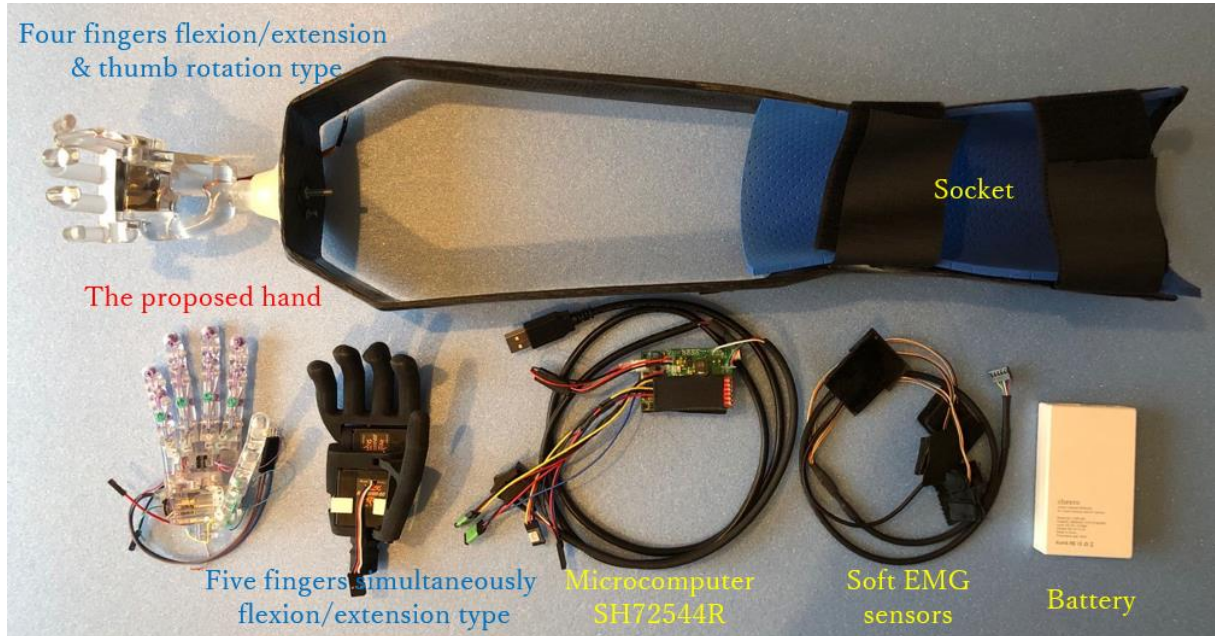


Fig.5.18 実験の装置

### 5.4.3 実験の結果

Pick & Place 実験を実施するときに、被験者が自身の筋電で義手の操作を慣れるように事前に練習させた後に、1種類のハンドにつき、5回の実験を行った。また、被験者の筋疲労にならないように、各種の義手を交換する間隔に、休憩も入れた。以上によって、それぞれ3種類の幼児用筋電義手で実施した Pick & Place 実験の結果は下記の Fig.5.19 にまとめた。実験の結果から、本研究で提案した幼児用筋電義手の把持性能は比較的に優れていることを明確できた。特に四指の適応差動機能により、把持対象物への馴染み把持の効果が明らかになって、従来に開発した2種類のタイプより、把持できないものはもちろん、把持の安定性も向上になり、成功回数は上がった。



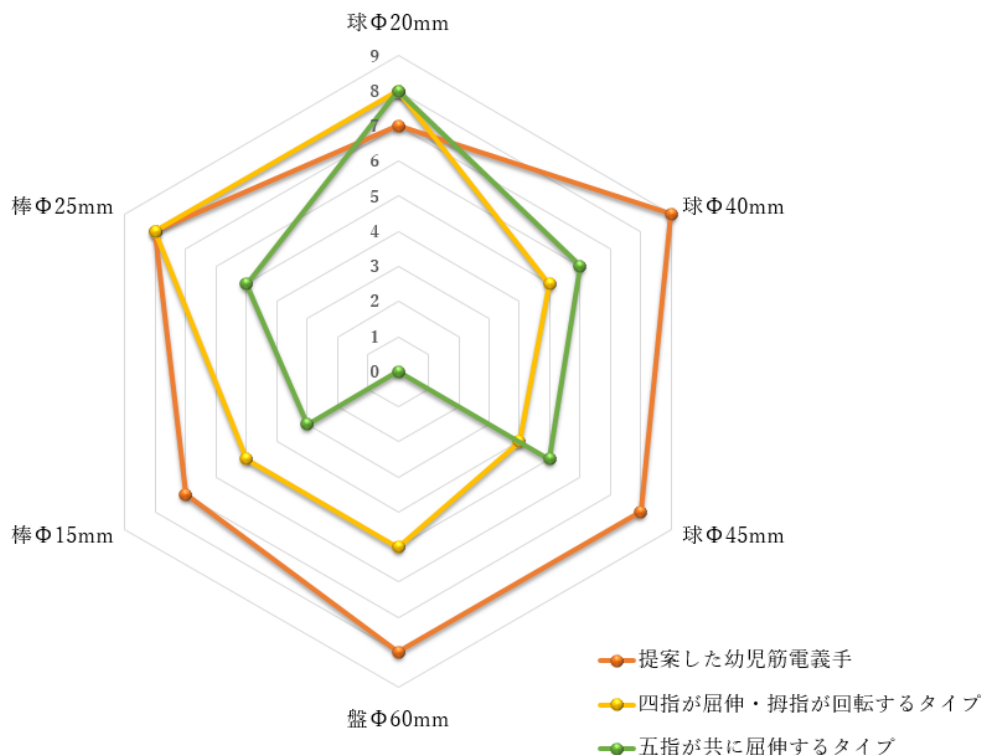


Fig.5.19 三種類の幼児用筋電義手による Pick & Place の実験結果

結果に基づいて、各義手における把持対象物に対する成功回数の異なる原因を下記のように分析する：

まず、盤状の物体に対して、最大把持範囲の  $\Phi 60\text{mm}$  に至って、成功回数の差は明らかになった：五指が共に屈伸するタイプは、拇指の回内・回外による位置調節はできないため、手の中から滑り落ちやすくなって、一回の成功もできなかった。その代わりに、四指が屈伸・拇指が回転するタイプは、拇指の回内・回外の調整ができるため、成功回数は約提案した幼児用筋電義手の半分であった。また、提案した幼児用筋電義手は四指の馴染み把持ができるため、物体との接触は安定的になって、成功回数は一番高かった。

次に、球状の物体に対して、いずれの義手においても、直径が一番小さいサイズの球 ( $\Phi 20\text{mm}$ ) への成功回数はほぼ同じであった。そして、直径が  $\Phi 40\text{mm}$  になると、それぞれの成功回数は一転が変わって、かなりの差が生じた。同様に、把持対象物の直径を  $\Phi 45\text{mm}$  にしても、提案した幼児用筋電義手の成功回数は依然とほかの2種類の義手より上回ったことが表した。これによって、把持性能の異なりに関して、要因が二つと判断できる：一つ目は、小サイズの球体に対する把持は主に拇指が四指と対立した精密把握となり、要は拇指、示指と中指の指先に形成された三点把持である。前述のように、いずれの義手においても対立な姿勢ができるため、 $\Phi 20\text{mm}$  のサイズの球体に対して、把持性能は変わらない。二つ目は、大きい直径の球体 ( $\Phi 40\text{mm}$ 、 $\Phi 45\text{mm}$ )

にすると、把持は拇指が四指と対立した握力把握に変わり、馴染み把持のできる本研究の幼児用筋電義手は比較的に性能が発揮して、成功回数が向上できた。また、四指が屈伸・拇指が回転するタイプにおいて、馴染み把持はできないが、拇指が積極的に四指との位置を調整できるため、中位の成功回数に達した。最後に、五指が共に屈伸するタイプでは、馴染み把持および拇指の回転を両方できないため、成功回数は最下位になった。

最後に、棒状の物体に対して、直径をそれぞれ  $\Phi 15\text{mm}$ 、 $\Phi 25\text{mm}$  にした結果：大きいサイズでは、提案した幼児用筋電義手と四指が屈伸・拇指が回転するタイプの成功回数は同じで、五指が共に屈伸するタイプの成功回数はほぼ半数に落ちた。一方、小さいサイズに対して、提案した幼児用筋電義手の成功回数は比較的に高く保っているが、ほかの2種類の義手は大きいサイズよりさらに下がった。このような結果に至った理由を判断すると：大きいサイズの棒が小さいサイズと比べて、指との接触範囲が広く、全体的に成功回数は高かった。一方、小さいサイズの棒に対して、提案した幼児用筋電義手は指関節が限界まで屈曲できるため、構造的ものを握り込むことが可能であり、成功回数は向上できた。

以上によって、本研究で開発した幼児用筋電義手は、構築したメカニズムの応用によって、指関節の自由度が多く持ちながら、適応差動機能による馴染み把持もできることによって、総合的な把持性能が従来の2種類の義手より優れたことを確かめた。

## 5.5 まとめ

本章では、設計した CAD 図に従って、幼児用義手を製作した。結果として、義手の重量はわずか 66.88g の軽さを持って、150g 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て、動作検証実験で 10 パターンの動作のうち、6 パターンを実現できることを確かめた。

さらに、製作した義手を用いて、健常者の筋電で義手を操作しながら、Pick & Place 実験によって、第2章で試作した五指共に屈伸のタイプと四指屈伸・拇指回転のタイプと共に比較した。実験では、物体に対する把持の成功回数を記録して、開発した幼児用義手による総合的な把持性能を検証する。結果として、本研究で提案したものは物体の接近による五指運動軌跡の安定性を持っているため、把持のプロセスに支障なく馴染み把持の形成に繋げるようになり、成功回数が向上して、性能的に優れたことを確かめた。

以上によって、本研究で開発したデュアル把持モードを備えた単一駆動源の幼児用義手は、多動作、軽量化、優れた把持性能を実現できたため、新規性および有用性を確認した。

一方、開発した幼児用筋電義手はモータを1個まで抑えたが、その反面として、拇指が並列姿勢モードで回転できず、ある初期回内位置のままに屈曲しかできないため、装飾性は欠けている。また、把持力は 7.6254N であり、設計要件を満たしたが、従来研究と比べて、まだ不足している。それに、ワイヤ駆動はモーターによる直接駆動と比べて、組み立ての簡易性が持たないことはともかく、使用するときの故障率が高くなって、主にワイヤの緩みによる把持不能となるほか、掌に内蔵しているベアリングと材料の壁の間に隙間が多くい部分は存在しているため、ワイヤが走行している間に隙間に滑り込んで、挟まれて動かなくなるケースもあった。これらの問題を将来の課題として解決する予定である。

## 第6章 結論と今後の展望

---

6.1 本論文の結論 .....	166
6.1.1 デュアル把持モードの開発による成果 .....	168
6.1.2 四指の開発による成果 .....	168
6.2 今後の展望 .....	170
6.2.1 新たなメカニズムによる動作パターンの増加 .....	170
6.2.2 ワイヤの緩み対策 .....	170
6.2.3 マルチセンサによる幼児の使用習慣を学ぶ .....	171

---

## 6.1 本論文の結論

幼児用筋電義手は上肢切断された幼児にとって、機能代替ができ、生活の質を向上させるほか、多くの利点が挙げられる：1) 利用者本人の両手動作を促進させ、刺激を与えること、2) 幼児の家族が手先具の機能や外観への受け入れはしやすくなる、3) 手先具をボディイメージの中に受容する、4) 身体全体バランスの改善や四肢長さに慣れやすい。しかし、幼児用義手の開発にあたって、既存のものは軽量化を追求し、動作パターン数を減少し、機能性を失うタイプ、あるいは機能性を重視し、動作パターン数を増加させるため、アクチュエーター数を追加した重量化になるタイプに進行している。すなわち、期待する150g以下の軽量を持つ同時に、日常生活で動作パターンを多数に実現したものは存在しない。

この問題を踏まえて、本論文は、装飾性を保ちながら、多数の動作パターンを実現する軽量型（150g以内）の幼児用筋電義手の開発とする。

この目標を達成するために、本研究では以下の手段を用いて、アプローチとして辿り着いてきた：

1. 幼児用筋電義手は重量とスペースの制限により、前提条件として、ワイヤで構成する劣駆動の方式を用いることとする。これにより、省スペースを確保できるほか、義手全体の重量も効果的に軽減できる。さらに、アクチュエーターの削減にも役立つ。

2. 幼児用義手における従来研究の問題点は二つがある：一つ目は重量を軽減するため、アクチュエーターを減らし、動作数が少なくなるタイプである。これが独立性を持つ動作のみを実現できていないと明確している。反対的に、二つ目は動作数を増やすため、アクチュエーターを増加して、重量が重くなるタイプであるが、アクチュエーターの増加しか排反性の動作を実現できないと判断する。そのため、本研究は指関節の運動特徴によって、まず関節自体の排反性・独立性を分析する。これをベースにして、五指が共に屈伸するタイプと四指が屈伸・拇指が回転するタイプのプロトタイプを製作して、関節同士の排反性・独立性が明らかにすると同時に、拇指が四指と対立姿勢・並列姿勢による動作パターンを二組のグループに再分類させる。この新しい理念に基づいて、排反の動作を結合するタイプのプロトタイプを試作して、互いに排反性を持つ二組の動作グループを両立させることが可能になり、一つのハンドに組み込むことを導く。

3. 設計する四指の各指は人間らしい動きを再現させるため、手指の運動特徴に従って、伸展側から受動伸展機能を絞り出して、一对多伸展のメカニズムを提案する。力学モデルを立て、それぞれ従来の関節ごとにバネを付ける一对一伸展メカニズム及び本研究のバネ一個を使用した一对多伸展メカニズムに対して、パラメータを計算して、バネを選出する。それから、両者を比較しながら提案したメカニズムにおける省力化の効果を検証する。次に、屈曲側には安定連動機能に適した一对一屈曲メカニズ

ムを提案して、従来の一対一屈曲と一対多屈曲改良のメカニズムと共に、それぞれ運動と出力の検証を行う。

4. 設計する四指の全体にも人間らしい動きを再現させるため、運動特徴に従って、回転摩擦のメカニズムを提案する。物体に接近する場合において、力学モデルで最大摩擦係数の理論値を探し出して、異なる材料で回転摩擦機構を作って、摩擦係数を測る。その中に理論値に近い材料を選んで、実際の機構に使用させる。最後に、四指が同時に屈曲できるかを検証する。一方、物体を把持する場合、力学モデルに選出した材料の摩擦係数を代入して、それぞれ一本指、二本指、三本指がブロックされた運動の変化を調べる。

5. 幼児用義手において、互いに排反性を持った二組の遷移動作を一つのハンドに組み込むように、デュアル把持モードは必要となる。そのため、全体の力学モデルを立ち上げて、拇指が四指とそれぞれ並列した動作姿勢グループと対立した動作姿勢グループにおける動作遷移を解析する。解析結果を踏まえ、シミュレーションも行って、設計パラメータの最適化を図る。それに、デュアル把持モードに合わせる拇指を設計して、それぞれ伸展側、回外側、SEA バネを選定し、メカニズムを解析する。以上のデュアル把持モードを開発することにより、それぞれ排反性を持った対立姿勢グループと並列姿勢グループを結合できるようになり、結果的に、指関節により多くの自由度を解放させ、実現可能な動作数が従来より多数になるほか、所要なアクチュエータ数を限界の1個まで抑えられる。

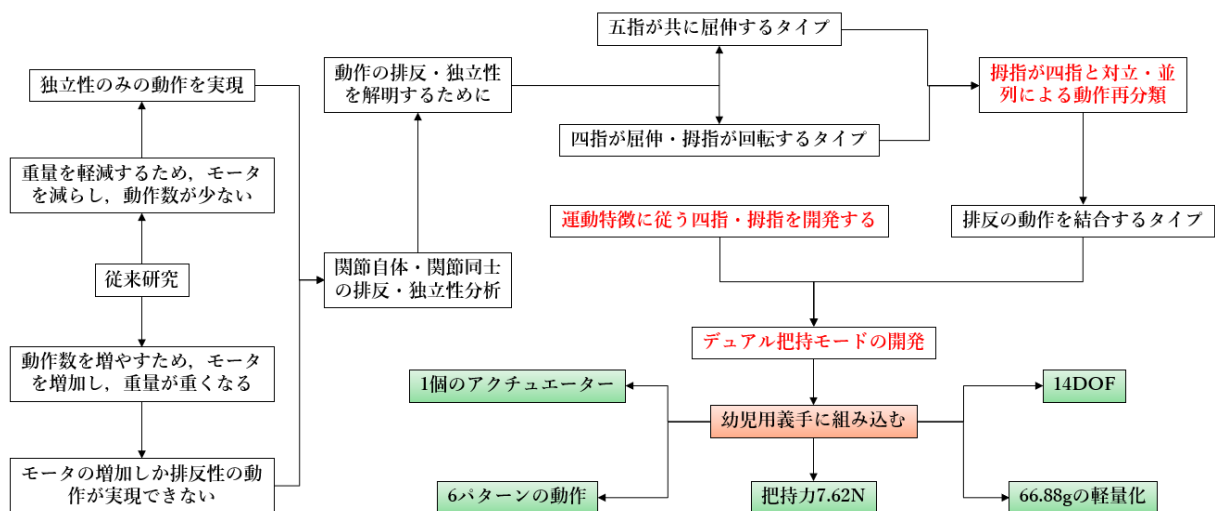


Fig.6.1 本論文のアプローチ及び結論

結果的に、Fig.6.1 に示したように、開発した幼児用筋電義手は、アクチュエータ数を極限の1個まで抑えられることによって、従来研究の中に最軽量となるわずか66.88gの重量で、14個の関節自由度を駆使して、7.62Nの把持力が有しながら、日常頻出の10パターンの動作の中に6パターンを実現できた。これによって、アクチュ



エーター数以上の手先具の動作パターン数を確保する方法を新しく見つけ、科学的新規性および工学的有用性を示すことができた。

### 6.1.1 デュアル把持モードの開発による成果

人間の手において、様々な動作パターンを持っている。義手の製作には、人間の手の動作パターンを模倣する前提に、できる限り多数かつ頻出のものを再現できるようにしている。これが義手に関する研究のコアである。動作パターンの再現にあたって、各指関節自身の動作は運動特徴に従って先に実現させる。それから、これらの関節による指をモジュールとして、五指を成り立って、相応な運動特徴に沿う指の動作も実現し、人間の自然の動きを再現することは可能になる。そんな中、関節自体、関節同士から動作と動作の間の分析にたどり、互いに独立性を持つ動作、および独立性のない排反性を持つ動作を二つのグループに分けられるが、従来研究では、独立性のある動作のみに基づいて、連動させるメカニズムを構築して、義手を製作するのはほとんどである。それに対して、排反性のある動作は同時に実現するのが難しいため、アクチュエーターを追加したり、パッシブな構造でこなしたりすることによって果たすことは可能になるが、パッシブな構造を応用するときには、定めた運動でしか動かないため、バラエティーはなくなり、把持動作に関与する指関節に応用できない。一方、アクチュエーターの追加は、幼児用義手における様々の制約条件によって現実的に不可能である。そのため、本研究では、まず排反性と独立性を持つ関節自体、関節同士をそれぞれ明確し、分類する。そして、10パターンの動作の間の排反・独立性を調べるため、まずは五指が共に屈伸するタイプと、四指が屈伸・拇指が回転するタイプを作って、調べた結果は、動作パターンは互いに排反性を持つ二つのグループに分けられる（グループ内の動作パターンは互いに独立性を持っているほか、動作の間の遷移も発見できた）：拇指が四指と対立姿勢のグループ、および拇指が四指と並列姿勢のグループである。この新たな分類法に従って、開発の視点を変えられ、さらに排反の動作を結合するタイプ（五指の屈伸・拇指の回転）を製作して、有用性を確かめた。よって、この理念から発展して、本研究のデュアル把持モードによる単一駆動源で多動作・軽量型幼児用義手の開発の基礎となって、運動学やシミュレーションなどによる解析、計算、設計パラメータの改良を経て、結果的に1個のアクチュエーターを用いて、互いに排反性を持った動作グループからの6パターンの動作を効果的に一つのハンドに封入して実現できた。

### 6.1.2 四指の開発による成果

四指の開発にあたって、運動特徴に従い、二つがある：物体に接近するとき、各指は同時に屈曲しながら、任意指の三関節は同じ角速度で屈曲する。物体を把持するとき、物体の形に沿って、各指が先に物体と接触した指は停止になって、残る指は

マッチングするまで屈曲し続けて、馴染み把持を実現することに対し、任意指の三関節も同様である。しかしながら、従来研究ではこれらの特徴を同時に実現したものはなく、義手とする装飾性が欠如してしまう。

それに対して、本研究では、まず単一の指に対して、安定連動機能を提案し、メカニズムの解析をしてから、製作して、従来研究のメカニズムと比較して、物体に接近のプロセスにおける有用性を確かめた。しかしながら、幼児の指におけるスペースの制限によって、把持するときの馴染み把持の実現は至らなかった。また、四指の全体に対して、適応差動機能を提案し、それぞれ中間層、駆動層の相互作用によって、静摩擦力が作用のときに物体に接近のプロセスを実現したほかに、把持するとき静摩擦力が動摩擦力に自動的に変わって、馴染み把持を果たした。

一方、幼児用義手において、厳しい制約条件に限られている：幼児用義手のスペースは狭くて、成人用義手のようにならず、それなりのワイヤ配置と機構を埋められないほか、多数のアクチュエーターの使用は不可能で、せいぜい2個小さいものは限界になる。それに、重量の制限も厳格であるため、義手に使う機械要素はできるだけ少なめにするほか、占める重量の比率が大きいモータはさらに減少しなければならない傾向がある。

そのため、本研究では、前述したデュアル把持モードの開発によって、モータを限界の1個に抑えるほかに、受動伸展機能の開発によって、指ごとに従来の三つのバネを使わず、ちょうど機能できるような一つの最小のバネだけで伸展動作を果たし、走行距離も効率的に最短の一関節の量になって、コストパフォーマンスの向上のみならず、軽量化に役立った。

## 6.2 今後の展望

開発した幼児用義手において、設計、試作、実験を重ねて、解析をしながら、改良を繰り返して、現在の段階に至った。最善を尽くしたが、実験中にまた些細な問題を新たに発見した。それに、開発の期間中にほかの研究チームの論文、デモンストレーションの映像などに啓発され、新しい発想をこれからの幼児用義手に応用し、さらなる新たな研究展開に繋がる。

### 6.2.1 新たなメカニズムによる動作パターンの増加

本研究で開発した幼児用義手は、デュアル把持モードを実現するために、拇指の初期回内角度を設定した。その原因で拇指の可動範囲は縮小され、運動特徴のリアリティは不足している。これからは拇指の運動を忠実に再現できるように最優先課題にする。

それに、現在四指に使用している安定連動機能のメカニズムは把持対象物に対して、アプローチ、把持のプロセスに関わらず、指の三関節がいつも同じ角速度で屈曲しているが、把持には馴染み把持の運動特徴となっているため、これからの改良はアプローチをこの機能に維持するまま、把持するとき、物体の形に沿う馴染み把持をできるようにする。

さらに、開発した幼児用義手では、目標とする基本三種類の動作パターン（握力把握、精密把握および側面把握）を満足した。この基本三種類の動作パターンが成人のベースにして作成されたものではあるが、さらにいろんな動作パターンを細かく分類されている[T. Feix 2015]。幼児には、さほど成人のように様々な物体とのやり取りは至らないが、その年齢に把持できるものをまとめるうえに、手指による把持可能な範囲に限って、動作パターンを絞り出す。そして、新しい動作パターンに対して、新たなメカニズムを構築し、動作を多様化する。

### 6.2.2 ワイヤの緩み対策

開発した幼児用義手における実験を実施するとき、使用回数の増加につれ、ワイヤが緩くなるのが常に生じる。そのため、ワイヤを改めて結び付けて、メンテナンスを行う必要になる。製作した義手を長持ちできるように、効果的な対策を取り、対応する必要がある。

対策を立つために、ワイヤが緩んだ原因から入手すべきである。素手で結び付けたワイヤの塊が到底外力、衝撃に匹敵できないため、塊がそれによって移動されてしまい、義手の機能性が下がる。それに基づいて、いくつか改良の方向として挙げられる：

1. バネを利用して余分なワイヤの緩みを吸収する。
2. 新たな緩んだワイヤを巻き取れる機構を設置する。
3. 他の材質のワイヤを探し、塊になった後に、内部の滑りが発生しにくいタイプを

選ぶ。

### 6.2.3 マルチセンサによる幼児の使用習慣を学ぶ

開発した幼児用義手は適応差動機能の中間層と駆動層には角度センサーを付け、いまの四指の安定連動機能に適応しているが、将来は四指の馴染み把持を実現すれば、指関節の運動状態を知るために、関節に角度センサー、あるいは圧力センサーなどを付けて、得たデータはフィードバックとしてニューラルネットワーク（ANN）などのアルゴリズムに入力し、使用者が義手を使う度に使用習慣や頻出動作などの情報を得られる。また、これを利用して、幼児用義手の改良、進化に繋がる。

# 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・横井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

に心より感謝を申し上げます。当初の自分が修士修了後に先生のところで研究員として働き始めてから、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ながら、深いご縁を結びました。おかげで母国に戻っても職場で筋電義手の開発は順調になりました。その後、再び博士課程に入ってから、主任指導員であった先生が研究の極意を導いてくださり、たくさんのご助言、アドバイスを賜り、物事に対して多角的な視点、考え方などを習わせていただきました。日本に就職、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に活かせると思います。誠にありがとうございました。

そして、筆者の上司である

中国科学院深圳先進技術研究院・先進集成技術研究所  
神経工程研究センター  
所長・センター長 李 光林 教授

に謹んで謝意を申し上げます。ご多忙の中、常に自分が抱えている研究の難問と挫折にたくさんご指導、ご助言をいただきました。そのお恵みで、技術面のみならず、研究者として欠かせない科学的な考え方にも深く啓発されました。結果的に、より一層に研究を精進することができました。また、仕事以外のいろいろな悩みに対しても、丁寧にご対応をしながら、アドバイスや対策などをいただきました。おかげさまで、博士号への挑戦に対して、大きな勇気と自信を付けていただきました。誠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・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

に心より謝意を表します。電気通信大学に滞在している間に、いつも優しく接していただき、研究の着眼点などに関してご意見をいただきまして、研究内容を豊富になりました。それ以外に、生活面や育児に関してたくさんのご助言、ご経験を伝授していただき、本当にありがとうございました。

また、筆者が修士期間の指導教員であった本論文の副査を担当していただきました

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 青山 尚之 先生

に深く感謝いたします。日本に留学する最初のスポットとして、慣れない異国の地で非常に温かく接していただき、不安や心配などをなくして、スムーズに研究を進行して、思う存分に行うことができました。それに、博士論文の細部にわたり、ご意見、ご指導をいただいたことを感謝いたします。これからもお体に気をつけてお過ごしください。

それに、同専攻の杉正夫准教授、および前橋工科大学・工学研究科・環境生命工学専攻・朱赤教授は本論文の副査を担当していただきまして、よりインパクトな図表の表現し方から、所々不適切な日本語による正しい書き方まで、分かりやすく教えていただきました。おかげで本論文の質を向上させることができました。心より感謝の意を表します。

本研究室の先輩でもある矢吹佳子研究員、および後輩の孫振羽君、張熙君には、日本語の修正、図表の作成、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。

最後に、同じ研究室から博士号を取得した夫の雍旭には、研究に関する論理構成や実験方針などについて、常に議論や相談を乗りながら、励ましてくれて研究を順調に進んできました。それに、そろそろ4歳になる息子、雍景初には、長い時間の離れ離れの苦しみを含め、挫折や失意になった時に、常にテレビ電話の中からかわいいえくぼの笑顔、天真爛漫な姿、ママへの歌などに癒されて、強くならなくてはいけない自分を作ってもらいました。さらに、長年に渡って日本に仕事、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と義父母を含めて、心から謝意を表します。あ



ありがとうございました。

2021年3月

## 参考文献

## ＜和文文献＞

## [藤原 2018]

藤原 清香: “上肢切断児への義手療法の有効性の評価,” 科学研究費助成事業 研究成果報告書, 2018.

## [内閣府 2013]

内閣府: “障害者白書,” 2013.

## [厚生労働省 2018]

厚生労働省: “平成 28 年生活のしづらさなどに関する調査（全国在宅障碍児・者等実態調査）結果,” 2018.

## [大庭 2016]

大庭 潤平, 柴田 八衣子, 溝部 二十四, 岡本 眞規子, 毛利 由佳, 安藤 悠: “筋電義手を使用する子供の保護者が筋電義手を体験する効果について,” 神戸学院総合リハビリテーション研究 第 11 巻第 2 号, 2016.

## [陳 2016]

陳 隆明: “筋電義手を利用した小児リハビリテーション,” *Jpn J Rehabil Med*, Vol.53, No. 5, pp. 397–384, 2016.

## [中村 2002]

中村 晴基, 柴田 八重子, 大庭 潤平: “大人と子供の筋電義手について,” *アシステック通信*, 第 35 号, 2002.

## [東京都補装具研究所 1980]

東京都補装具研究所（編）: “小児切断プロジェクト：小児切断者のすべて（II）－小児切断者のリハビリテーション,” 東京都補装具研究所, pp. 1-295, 1980.

## [戸田 2019]

戸田 光紀, 陳 隆明, 柴田 八衣子, 溝部 二十四, 高見 響: “小児筋電義手の現状と課題,” *日本義肢装具学会誌*, Vol. 35, No. 2, pp. 136–141, 2019.

## [矢吹 2018]

矢吹 佳子, Hesong Ye, Xu Yong, 日吉 祐太郎, 村井 雄太, 東郷 俊太, 姜 銀来, 加藤 龍, 高木 武彦, 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, Vol. 29, No. 302-311, pp. 136–141, 2018.

[小西 2002]

小西 克浩: “小児用筋電義手の部品とソケットの特徴,” アシステック通信, 第 35 号, 2002.

[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.

[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.

[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.

[長尾 1971]

長尾 竜郎: “手指動作の研究 : 日常生活動作における正常手指機能の分析,” リハビリテーション医学, , Vol. 8, No. 1, pp. 3–12, 1971.

[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.

<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.

[M. Meurs 2006]

M. Meurs, C. G. B. Maathuis, C. Lucas, M. Hadders-Algra, C. K. van der Sluis : Prescription of the first prosthesis and later use in children with congenital unilateral upper limb deficiency: A systematic review, *Prosthet Orthot Int* August 2006 vol. 30 no. 2 pp165-173, 2006.

[S. Hubbard 1998]

S. Hubbard: “Powered prosthetic intervention in upper extremity deficiency,” *Am. Acad. Orthop. Surg*, pp. 417-431, 1998.

[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.

[I. Bullock 2013]

I. Bullock, J. Zheng, S. Rosa, C. Guertler, and A. Dollar: “Grasp frequency and usage in daily household and machine shop tasks,” *Haptics, IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 3, pp. 296-308, 2013.

[E. Biddiss 2007]

E. Biddiss, T. Chau: “Upper-limb prosthetics: critical factors in device abandonment,” *Am. J. Phys. Med. Rehabil*, vol. 86, no. 12, pp. 977-987, 2007.

[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, no. 20, pp. 4203, 2019.

[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. 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.

[T. Feix 2011]

T. Feix: "Anthropomorphic Hand Optimization Based on a Latent Space Analysis," Master's Thesis, Technische Universitat Wien, 2011.

[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.

[C. D. Santina 2018]

C. D. Santina, C. Piazza, G. Grioli, M. G. Catalano and A. Bicchi: "Toward Dexterous Manipulation With Augmented Adaptive Synergies: The Pisa/IIT SoftHand 2," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, No. 5, pp. 1141-1156, 2018.

[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. Jing 2014]

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*, pp. 466-471, 2014.

[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.

[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, No. 1, pp.66-77, 2015.



< 中文文献 >

[中国国家統計局 2006]

中国国家統計局: “2006 年第二次全国残疾人抽樣調查主要数据公報,” 2006.

[中国残疾人連合会 2010]

中国残疾人連合会: “2010 年末全国残疾人總数及各類、不同残疾等級人数,” 2014.

[中国残疾人連合会 2018]

中国残疾人連合会: “2017 年中国残疾人事業發展統計公報,” 2018.

[祝 2012]

祝 慧萍: “残疾兒童健康与意外傷害研究,” 博士学位論文, 2012.

[中国国家統計局 2007]

中国国家統計局: “第二次全国残疾人抽樣調查主要数据公報,” 2007.

<ホームページ>

[Steeper 社 HP より]

装飾義手: <http://www.steepergroup.com/prosthetics/upper-limb-prosthetics/hands/trs-paediatric-hands>

[Ottobock 社 HP より]

能動義手、筋電義手: [https://www.ottobock.co.jp/prosthetic\\_ue/info/technical\\_term](https://www.ottobock.co.jp/prosthetic_ue/info/technical_term)

[Ottobock 社 HP より]

Electric Hand 2000: <https://www.ottobock-export.com/en/prosthetics/products-from-a-to-z/arm-prosthetics/electric-hand-2000-children>

[Technologies, Liberating 2012]

VASI Hand Family: Technologies, Liberating (2012). Products. Retrieved from Liberating Technologies. <http://www.liberatingtech.com/products/images>

[Steeper 社 HP より]

Select Myoelectric Hand: <https://www.steepergroup.com/prosthetics/upper-limb-prosthetics/hands/select-myoelectric>

[Össur 社 HP より]

i-limb quantum: <https://www.ossur.jp/prosthetic-solutions/products/touch-solutions/i-limb-quantum>

[Ottobock 社 HP より]

Bebionic Hand (Small): <https://www.ottobock-export.com/en/prosthetics/upper-limb/solution-overview/bebionic-hand>

# 研究業績

## 関連論文・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)  
(第3章, 第5章に關係する)

## 関連論文・国際会議論文

- [1] 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.  
(第2章, 第3章, 第5章に關係する)
- [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.  
(第2章に關係する)
- [3] 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.  
(第2章, 第3章, 第5章に關係する)

## 参考論文・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.

## 参考論文・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.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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装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 暁蓓, 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 暁蓓, 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 暁蓓, 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, 2021.

## 奨学金

[1] “国費外国人留学生,” 文部科学省, 奨学期間: 2017.10~2020.9.

[2] “学習奨励費,” JASSO, 奨学期間: 2021.2.