

Fig. 2: Hand bones and joints

軽量かつ、手指の精密動作と十分な発生力を実現できる麻痺手補助システムを目指した開発を行っている³⁾。開発するシステムを Fig. 1 に示す。このシステムでは、前腕部の筋による手指動作を機能的電気刺激で補助し、表面電極の設置が難しい手掌部の筋による動作を外骨格型アシスト機構で補助する。より具体的に手の骨格 (Fig. 2) を用いて説明すると、以下ようになる。本研究のシステムは、握りと摘み動作といった手指運動の補助を想定しているため、機能的電気刺激で母指 MP 関節・IP 関節の屈曲運動、母指以外の手指の屈曲・伸展運動、外骨格型アシスト機構で母指 CM 関節の屈曲・伸展、内外転運動、母指以外の手指の MP 関節の内外転運動の補助を行う。

渡辺ら⁴⁾は確動カム (以下、カム) を用いた示指、環指、小指の内外転運動の補助を行う外骨格型アシスト機構の開発を行った。しかし、開発されたカムの設計に必要な指の回転中心の計測方法に問題があった。

本稿では、指の回転中心の新たな計測方法と各指の内外転角度の導出について述べる。また計測したデータから、カムを用いた外骨格型アシスト機構を設計するためのカムの回転中心を決定し、カム機構を設計する。

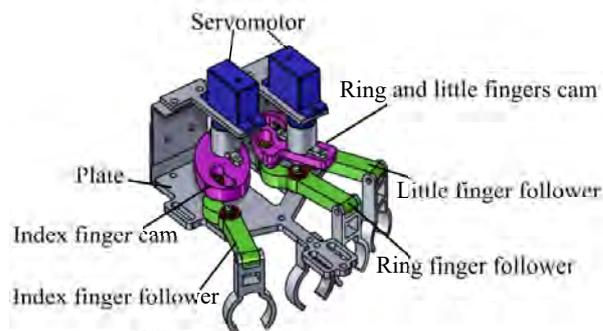


Fig. 3: Design of assist mechanism of index, ring and little finger

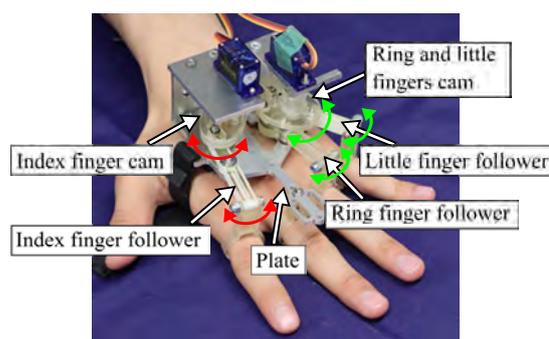


Fig. 4: Assist mechanism of index, ring and little finger

2. 先行研究の外骨格型アシスト機構

先行研究⁴⁾において開発されたカムを用いた示指、環指、小指の内外転補助機構の概略図を Fig. 3 に示す。この機構は、示指を回転させるためのカム・フォロワ、環指、小指を回転させるためのカム・フォロワ、そして、これらのカムとフォロワを固定するためのプレートで構成されている。各指の内外転動作において、中指はほとんど動かず、示指は独立して動き、環指、小指は連動して動く。そのため、Fig. 4 のように中指はプレートに固定し、示指の内外転動作を1つのカム・フォロワで補助し、環指、小指の内外転動作を1つのカム・フォロワで補助する。Fig. 4 では、示指のカム・フォロワの回転を赤色で示し、環指、小指のカム・フォロワの回転を緑色で示している。2つのカムで各指の内外転動作の補助を行うことができるため、機構がシ

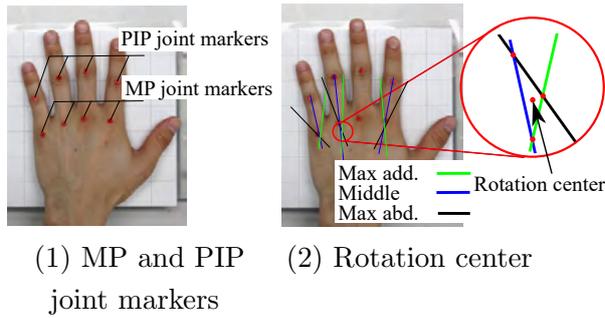


Fig. 5: Measurement of the rotation center of fingers⁴⁾

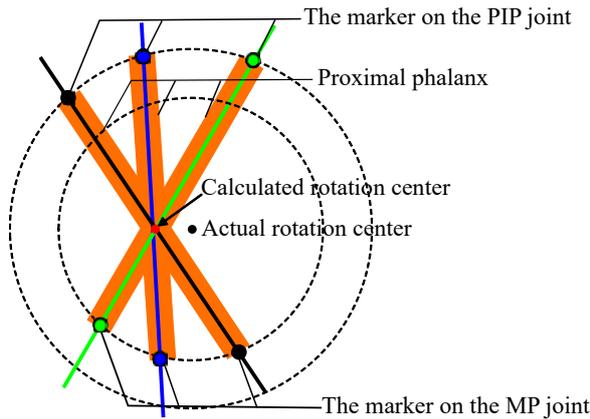


Fig. 6: An example that cannot measure the rotation center of finger

ンプルかつ小型である。

先行研究⁴⁾において、カムの設計に必要なカムの輪郭曲線とカムの回転中心を求めるために、示指、環指、小指の内外転角度と、各指の回転中心を実際の手の内外転動作から計測していた。しかし、指の回転中心の計測方法に問題があった。この研究での指の回転中心の計測方法を Fig. 5 に示す。

この研究では、Fig. 5(1) に示すように、各指の PIP 関節と MP 関節にマーカを貼りつけ、最大内転時 (Max adduction) , 最大内転時から最大外転時への動作途中 (Middle) , 最大外転時 (Max abduction) の手の画像を撮影する。次に、Fig. 5(2) に示すように、グラフィックソフト (Adobe Photoshop) で PIP 関節と MP 関節に貼り付けたマーカー間に直線を引く。そして、各画像で引いた直線の交点でつくられる三角形の重心を求め、これを各指の回転中心としていた。

しかし、この方法では、指の回転中心を正しく計測できない。Fig. 6 を用いて詳しく説明する。Fig. 6 の橙色は、最大内転時、最大内転時から最大外転時への動作途中、最大外転時の基節骨の様子を表している。また、PIP 関節と MP 関節に貼り付けたマーカーの位置について、最大内転時を緑色、動作途中を青色、最大外転時を黒色で示している。このとき、PIP 関節と MP 関節に貼り付けたマーカーを通る 2 つの円は同じ位置を中心としており、この位置を実際の回転中心とする。しかし、各関節の 3 本の直線の交点がなす三角形の重心の位置は、実際の回転中心の位置と一致しない。したがって、先ほど述べた方法では、回転中心が計測できない。

そこで、本研究では、実際の指の内外転動作をモーションキャプチャで計測し、最小二乗法による円の近似から、指の回転中心を求める方法を考えた。

3. カムの設計に必要なパラメータの決定

カムを設計するために必要な示指、環指、小指が内外転運動する際の回転中心と、各指の最大内転角度と最大外転角度を実際の指の内外転動作からモーションキャプチャを用いて導出する方法を考えた。

3.1 マーカーの配置と指の回転方法

計測には、光学式モーションキャプチャシステム (Mac3D System, Motion Analysis 社製) を用い、120 [fps] で撮影した。このシステムは、計測対象に貼付した反射マーカーの 3 次元位置データをリアルタイムに取得することができる。

マーカーの配置について述べる。Fig. 7(1) に示指、Fig. 7(2) に環指、Fig. 7(3) に小指のマーカーの配置を示す。M1, 4, 7 は DIP 関節, M2, 5, 8 は PIP 関節, M3, 6, 9 は MP 関節に配置した。M10 は中指の MP 関節, M11 は中指の

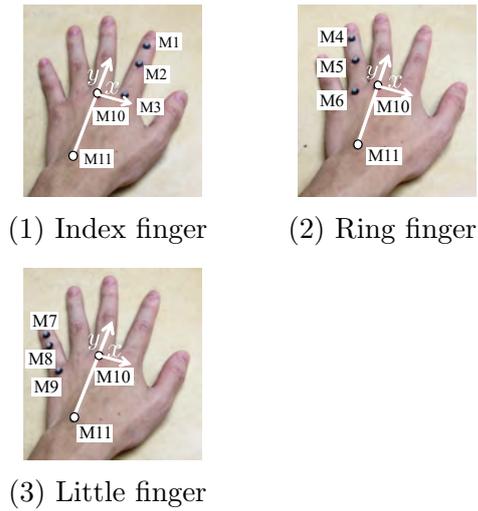


Fig. 7: Arrangement of finger markers

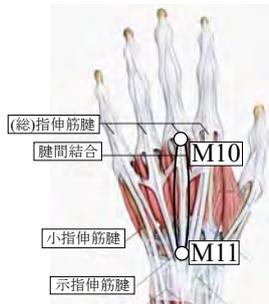


Fig. 8: M10 and M11 markers are located on the extensor digitorum tendon of the middle finger



Fig. 9: Measurement method of the finger motion

総指伸筋腱の直線上で手と手首の間に配置した。M10とM11のマーカの配置をFig. 8に示す。各指の回転中心と内外転角度を求めるため、座標系を内外転時に動かないM10を原点、M10とM11の直線を y 軸と定義した。

次に、指の回転方法について述べる。Fig. 9のように、板の上に手をのせ、計測しないほうの手で指を持ち、被験者が自分で回転させる。これは、計測する手の平が板から離れないようにするためである。また、計測において、板の上に手を置き回転させるため、 z 座標については

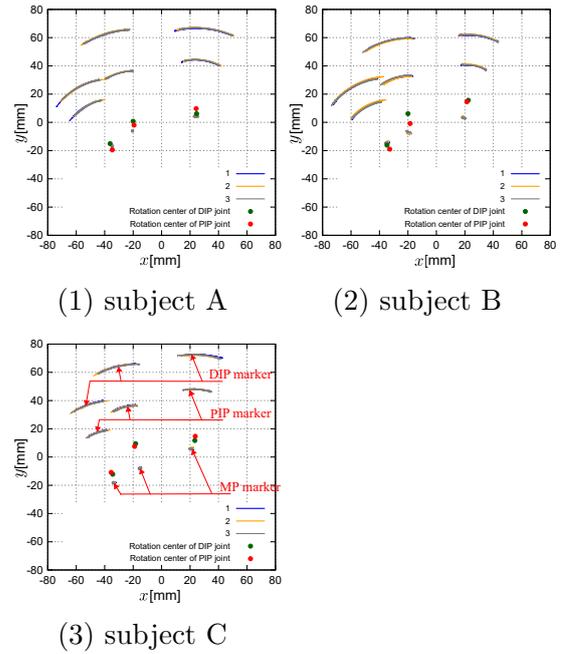


Fig. 10: Rotation center of DIP and PIP joints

考慮せずに計算を行った。計測は20代男性3名の被験者（平均21.3歳±1歳）の左手について行った。

3.2 指の回転中心の計測

各指の回転中心の計測方法について述べる。内転、外転を3回ずつ行い、回転動作中の各指のDIP、PIP関節に配置したマーカを通る円の中心を最小二乗法により求める。このときの円の中心を各関節での指の回転中心とする。計算では、内転から外転時の100フレームのデータと外転から内転時の100フレームのデータを2つずつ（2往復分）用いる。この実験を被験者3人に対して、3回ずつ行う。

Fig. 10(1), (2), (3)に被験者3人における各指の計測結果を示す。横軸が x [mm]、縦軸が y [mm]、各指の関節につけたマーカの動作について1回目を青色、2回目を橙色、3回目を灰色で示している。各指のDIP関節での回転中心を緑色の点、PIP関節での回転中心を赤色の点で示している。それぞれの回転中心の値は、3回の計測結果の平均値を用いている。

Table 1: Rotation center of subject A

Finger	Marker(Joint)	x [mm]	y [mm]
Index	M1(DIP)	24.61	6.10
	M2(PIP)	24.30	9.77
Ring	M4(DIP)	-20.03	0.78
	M5(PIP)	-19.37	-1.94
Little	M7(DIP)	-36.26	-15.10
	M8(PIP)	-34.64	-19.51

Table 2: Rotation center of subject B

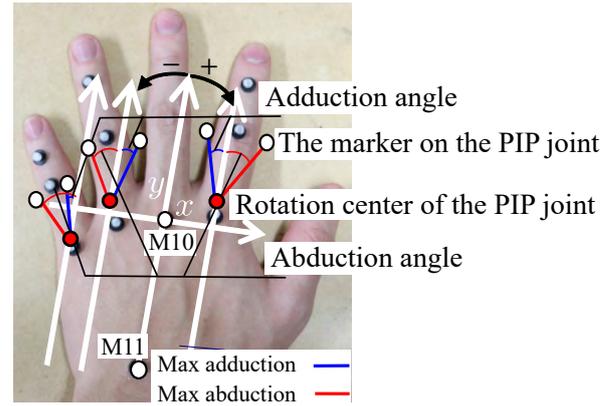
Finger	Marker(Joint)	x [mm]	y [mm]
Index	M1(DIP)	22.38	15.65
	M2(PIP)	21.42	14.60
Ring	M4(DIP)	-19.96	6.15
	M5(PIP)	-18.42	-0.83
Little	M7(DIP)	-34.71	-16.18
	M8(PIP)	-32.75	-18.98

Table 3: Rotation center of subject C

Finger	Marker(Joint)	x [mm]	y [mm]
Index	M1(DIP)	23.40	11.74
	M2(PIP)	23.66	14.72
Ring	M4(DIP)	-18.23	9.51
	M5(PIP)	-18.97	7.52
Little	M7(DIP)	-34.36	-12.18
	M8(PIP)	-35.46	-10.87

Table 1 に被験者 A, Table 2 に被験者 B, Table 3 に被験者 C の結果を示す. Table 1, 2, 3 から, 各指の DIP 関節と PIP 関節で計測された回転中心の位置が異なることが確認できる. これは, 末節骨, 中節骨, 基節骨が接触する面や形状による影響だと考えられる. アシスト機構では, PIP 関節付近で機構と指を固定し回転させることを想定しているため, PIP 関節 (M2, 5, 8) の回転中心を設計に用いることにする.

また, 3 人の被験者間での各指の回転中心の最大値と最小値の差は, x 方向で約 2[mm], y 方向で約 8[mm] である. y 方向に関しては中手骨と基節骨が接触する面や形状が被験者ごとに異なるため, 差が大きくなったと考えられる.

**Fig. 11:** Maximum angles of fingers in adduction and abduction

3.3 指の内外転角度の計測

各指の最大内転角度と最大外転角度の計測方法について述べる. 内転, 外転を 3 回ずつ行い, 最大内転時と最大外転時での各指の PIP 関節に配置したマーカーと Table 1, 2, 3 で示した PIP 関節の回転中心を結ぶ直線が, y 軸と成す角度の平均を求める. 計算では, 最大内転時と最大外転時のそれぞれ 100 フレームのデータを用いる. そのときの最大内転時の成す角度を最大内転角, 最大外転時に成す角度を最大外転角とし, y 軸を基準に時計周りの角度を正とする. この実験を被験者 3 人に対して, 3 回ずつ行う.

最大内転角と最大外転角を Fig. 11 に示す. 最大内転時における各指の PIP 関節と MP 関節に配置したマーカー間の直線を青色, 最大外転時における各指の PIP 関節と MP 関節に配置したマーカー間の直線を赤色で示している.

Table 4 に被験者 A, Table 5 に被験者 B, Table 6 に被験者 C の各指の最大内転角と最大外転角の結果を示す. それぞれの角度の値は, 3 回の計測結果の平均値を用いている.

Table 4, 5, 6 から, 被験者によって各指の最大内転角と最大外転角が異なることが確認できる. これは, 中手骨と基節骨が接触する面や形状や手指の筋や腱などの影響であると考えられる.

Table 4: Maximum adduction and abduction angles of subject A

Finger	Adduction[deg]	Abduction[deg]
Index	-13.21	27.99
Ring	-2.72	-30.03
Little	-12.96	-50.33

Table 5: Maximum adduction and abduction angles of subject B

Finger	Adduction[deg]	Abduction[deg]
Index	-6.99	30.73
Ring	0.12	-35.59
Little	-9.79	-51.72

Table 6: Maximum adduction and abduction angles of subject C

Finger	Adduction[deg]	Abduction[deg]
Index	-11.45	18.28
Ring	3.13	-32.49
Little	-2.95	-33.21

4. カムの回転中心の決定

指の内外転動作において、示指は独立して、環指と小指は連動して動くため、本研究では、示指の内外転動作を補助するカムと環指・小指の内外転動作を補助するカムを製作し、それらを用いて外骨格型アシスト機構を開発する。そのため、それぞれのカムの回転中心を決定する必要がある。

カムの回転中心の決定方法について述べる。示指と環指、小指のカムの回転中心を決定するにあたり、M10とM11の直線を一辺とする正方形を考え、各辺を等間隔に19分割して 20×20 の格子を組む。格子の交点は400点である。示指の場合の格子をFig. 12に、環指、小指の場合をFig. 13に示す。なお、モーションキャプチャで計測したM10, 11間の長さは被験者Aは68.2[mm]、被験者Bは59.7[mm]、被験者Cは70.1[mm]であった。この格子の各交点にカムの中心があったと仮定して、以下に述べる圧力角が最小となる場所を探索し、その位置をカムの回転中心とする。これは、フォロワとカムが

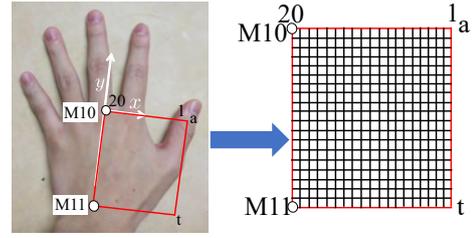


Fig. 12: Exploration for the rotation center of the index finger cam

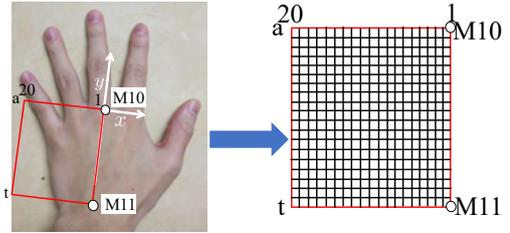


Fig. 13: Exploration for the rotation center of the ring and little fingers cam

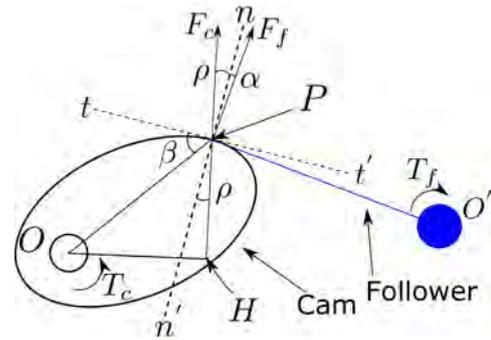


Fig. 14: Mechanical model of the cam and follower ⁵⁾

接する面にかかる荷重（面圧荷重）が小さくなるようにカムの回転中心を選ぶことにより、カムを円滑に運動させるためである。

圧力角は、先行研究の方法 ⁵⁾ を用いて計算する。カムとフォロワの概略図をFig. 14に示す。フォロワが一定のトルク T_f で回転するときの必要なカムの回転トルクを T_c 。カムの回転中心を O 、フォロワの回転中心を O' 、カムとフォロワの接触点を P 、 P におけるカム面との接線を tt' 、 P におけるカム面との法線を nn' 、 tt' と OP とのなす角を β とした。ただし、フォロワとカムの摩擦係数を μ 、法線 nn' とフォロワにかかる力 F_f とのなす角を圧力角 α とする。

	12	11	10	9	8	
	83.37	86.01	89.71	59.61	36.50	l
	81.30	89.83	76.78	42.96	25.33	m
	63.10	38.75	19.56	27.22	20.87	n
	86.48	70.70	89.72	76.53	49.19	o
	89.24	82.01	84.77	88.20	66.90	p

[deg]

Fig. 15: Pressure angle of the cam for index finger

		16	15	14	13	12
d		26.93	26.62	26.23	25.74	25.11
e		21.63	20.78	19.74	18.44	16.77
f		16.47	15.13	13.81	16.11	19.12
g		15.99	17.97	20.39	23.40	27.24
h		21.12	23.51	26.38	29.89	34.22

[deg]

Fig. 16: Pressure angle of the cam for ring finger

		20	19	18	17	16
j		33.97	32.28	30.22	27.66	24.41
k		28.89	26.78	24.24	21.14	20.13
l		24.14	21.70	18.81	22.20	26.76
m		19.75	20.33	23.66	27.61	32.32
n		21.73	24.75	28.23	32.27	36.98

[deg]

Fig. 17: Pressure angle of the cam for little finger

		6	5	4	3	2
a		1.210	0.878	0.618	0.425	0.281
b		1.208	0.658	0.379	0.201	0.079
c		1.164	0.261	0.044	0.091	0.178
d		1.020	0.979	0.583	0.504	0.489
e		1.034	1.113	1.047	0.874	0.786

[deg]

Fig. 18: Sum of the normalized pressure angles of the ring and little finger cams

計算に用いるパラメータについて述べる。まず、各指のフォロワのトルク T_f を $0.16[\text{Nm}]$ とする。この値は、リハビリテーションの際にセラピストが指にかけるトルクの値を参考にした⁶⁾。フォロワとカムの摩擦係数 μ を 0.0015 とする。これは、ローラフォロワとして使用することを考えているベアリングの摩擦係数の参考値である。そして、示指のフォロワの長さを $30[\text{mm}]$ 、環指、小指のそれぞれのフォロワの長さを $20[\text{mm}]$ とする。これは、MP 関節とカムの回転中心の相対的な位置を適切にするためである。また、それぞれのカムが $45[\text{deg}]$ 回転したとき、各指のフォロワが最大内転角から最大外転角に達するとす

Table 7: Optimal rotation center of the finger cam

Subject	Index finger cam	Ring and little fingers cam
A	10-n	4-c
B	19-m	2-a
C	1-k	20-i

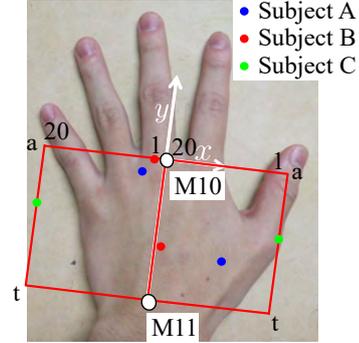


Fig. 19: Position of the rotation center for finger cam

る。計算に使用する各指の回転中心は、3.2 節の Table 1, 2, 3 の値を用い、各指の最大内転角、最大外転角は、3.3 節の Table 4, 5, 6 の値を用いる。

被験者 A において、カムの圧力角が最小となる格子点ならびにその周囲の点の結果について Fig. 15~Fig. 17 に示す。それぞれ、示指、環指、小指の結果でありカムの圧力角の最小値は赤字で示している。

Fig. 15 より、示指のカムの圧力角が最小となる点は 10-n の位置である。Fig. 16 と Fig. 17 より、環指と小指のカムの圧力角が最小となる点が一致していない。そのため、最適なカムの回転中心の位置を決定する必要がある。本研究では、環指と小指それぞれで求められた圧力角に対して、最大値を 1、最小値を 0 とする正規化を行い、その和が最小となる位置をカムの回転中心とする。正規化した圧力角 α' は、圧力角を α 、その最大値を α_{\max} 、最小値を α_{\min} とすると、以下のように定義する。

$$\alpha' = \frac{(\alpha - \alpha_{\min})}{(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})} \quad (1)$$

環指, 小指のカムの圧力角をそれぞれ正規化し, 合算した結果を Fig. 18 に示す. Fig. 18 より, 環指, 小指のカムの圧力角が最適となる点は 4-c の位置である.

被験者 A と同様な計算を被験者 B, C に対して行った. 被験者 3 人の各指のカムの回転中心を Table 7 に, その位置を Fig. 19 に示す. Fig. 19 において, カムの回転中心の位置を被験者 A は青色, 被験者 B は赤色, 被験者 C は緑色で示している.

Fig. 19 から, カム被験者 A, B に対して被験者 C の環指, 小指のカムの回転中心が大きく異なっている. これは, Table 1, 2, 3 より, 環指, 小指の PIP 関節の回転中心に大きな差があるためだと考えられる.

測定した結果から, カムの設計に必要なパラメータには, 個人差があることがわかった. そのため, その人に適したカム機構を製作する必要があると考える. 以下では, 被験者 A において, Fig. 19 の位置をカムの回転中心とし, カム機構の設計を行う.

5. カム機構の設計

以上の検討を踏まえ, 被験者 A 用に設計したカムについて述べる.

示指のカムは, 示指の回転中心を $x = 24.3[\text{mm}]$, $y = 9.8[\text{mm}]$, 最大内転角を $-13.2[\text{deg}]$, 最大外転角を $28.0[\text{deg}]$, カムの回転中心を 10-n とし, 設計を行った. 環指, 小指のカムは, 環指の回転中心を $x = -19.4[\text{mm}]$, $y = -1.9[\text{mm}]$, 最大内転角を $-2.7[\text{deg}]$, 最大外転角を $-30.0[\text{deg}]$, 小指の回転中心を $x = -34.6[\text{mm}]$, $y = -19.5[\text{mm}]$, 最大内転角を $-13.0[\text{deg}]$, 最大外転角を $-50.3[\text{deg}]$, カムの回転中心を 4-c とし, 設計を行った. 設計したカム機構を Fig. 20 に示す. この機構は, 示指を回転させるためのカム・フォロワ, 環指, 小指を回転させるためのカム・フォロワ, そして, これらのカムとフォロワを固定するための

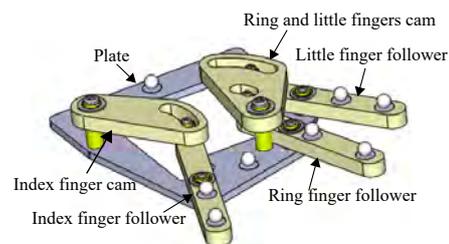


Fig. 20: The designed cam mechanism

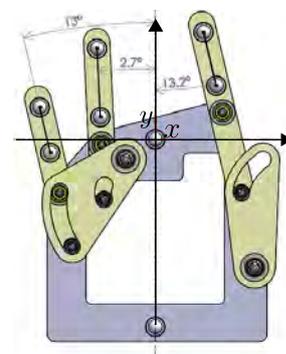


Fig. 21: Maximum adduction pose of the designed cam mechanism

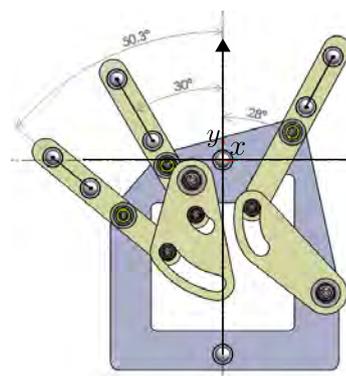


Fig. 22: Maximum abduction pose of the designed cam mechanism

プレートで構成されている. 最大内転時の様子を Fig. 21 に, 最大外転時の様子を Fig. 22 に示し, 各指のフォロワに配置したマーカー間の直線が y 軸と成す角度を調べた. y 軸を基準に時計周りの角度を正とする. Fig. 21 と Fig. 22 から, 最大内転角と最大外転角は, 設計に用いた値と一致していることがわかる. 今後, この機構の有用性について実験により検証する予定である.

6. 結言

本稿では、先行研究の問題点であった指の回転中心を求める手法について検討を行い、最小二乗法を用いて回転中心を測定することを提案した。そして、実際の指の内外転動作から各指の回転中心と内外転角度を測定した。測定した結果から、被験者毎に指の回転中心、最大内外転角度が異なることがわかった。そのため、その人に適したカムを設計し、外骨格型アシスト機構を製作する必要がある。

続いて、測定したパラメータを用いて、示指と環指・小指のカムの回転中心を決定し、被験者 A 用のカム機構を設計した。

今後の予定として、設計したカム機構を実際に製作し動作実験を行うほか、手への装着方法を考え、指の内外転動作の補助装置として完成させる。

参考文献

- 1) 坂本将史, 高橋隆行: 小型外骨格型アシスト機構と機能的電気刺激を用いた麻痺手補助システムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 3P2-C04, 2014
- 2) 川上丈弘, 山野井祐介, 加藤 龍: 麻痺手への簡易装着可能な手指運動支援装置の開発, 日本ロボット学会学術講演会, AC1E3-08, 2016
- 3) 佐々木久幸, Luis CANETE, 高橋隆行: 小型外骨格型アシスト機構を用いた麻痺手補助システムの開発 - 環指・小指の内外転動作支援 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014
- 4) 渡辺悠雄, カニエテルイス, 高橋隆行: 小型外骨格型アシスト機構を用いた麻痺手補助システムの開発 - 示指, 環指, 小指の内外転動作補助機構の検討-, 計測自動制御学会東北支部 第 319 回研究集会, 2018
- 5) 渡辺悠雄, 情野瑛, 高橋隆行: 麻痺手補助システムの開発 - カムを用いた環指, 小指の内外転動作補助機構の検討-, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A2-E03, 2020
- 6) 鎌倉矩子, 大村道子, 石井晴美, 三星文子, 三浦頼子: 健常手の把持様式-分類の試み-, 日本リハビリテーション医学会誌, Vol15, No.2, (1978)