

博士論文

長さの異なるつまみ動作における示指および母
指の把持戦略の研究

秋田大学大学院 工学資源学研究科

博士後期課程 電気電子情報システム工学専攻

富岡 雅弘

〈目次〉

第1章 序論	1
1-1 研究背景	1
1-2 本研究の目的	2
1-3 本論文の構成	2
＜参考文献 第1章＞	4
第2章 高齢者における日常生活動作およびヒトの身体機能	5
2-1 高齢化の現状	5
2-1-1 高齢者の現状と推移	5
2-1-2 高齢者の家族と世帯	8
2-1-3 高齢者の日常生活	9
2-1-4 高齢者の定義	10
2-2 ヒトの視覚的到達運動と随意運動について	10
2-2-1 視覚的到達運動	10
2-2-2 随意運動	12
2-3 老化に伴う身体感覚と変化	13
2-3-1 身体機能	13
2-3-2 感覚機能	13
2-4 老化に関する既存の検査方法	14
2-4-1 ADL（日常生活動作）・IADL（手段的日常生活動作）	14
2-4-2 徒手筋力検査法	14
2-4-3 認知機能改善評価法	15
2-5 第2章のまとめ	16
＜参考文献 第2章＞	17
第3章 動作計測の基礎知識	18
3-1 モーションキャプチャ技術の種類	18
3-1-1 光学式	18

3-1-2	磁気式	19
3-1-3	その他の方式	20
3-2	磁気式手指用モーションキャプチャ装置	20
3-2-1	Liberty (Polhemus)	20
3-2-2	Hand-MoCap	24
3-3	位置および姿勢の表現方法	25
3-3-1	ワールド座標系およびローカル座標系	26
3-3-2	オイラー角と回転行列	26
3-4	第3章のまとめ	29
	<参考文献 第3章>	29
第4章	つまみ動作時の自動計測システムおよび検査手法の構築	30
4-1	システムの構成	30
4-1-1	つまみ動作計測システムの構成	30
4-1-2	つまむ対象のターゲット	31
4-2	検査手法	32
4-2-1	ADL (日常生活動作) アンケートの内容	32
4-2-2	検査条件	36
4-2-3	教示条件	36
4-2-4	被験者	37
4-3	第4章まとめ	37
	<参考文献 第4章>	38
第5章	解析アルゴリズムの考案	39
5-1	レシーバのキャリブレーション	39
5-2	座標系の定義	40
5-3	つまみ動作の解析アルゴリズム	42
5-3-1	ターゲットに対する示指および母指の姿勢の算出方法	42

5-3-2 母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置の算出方法.....	43
5-3-3 示指および母指の指腹部におけるターゲットとの接触位置（エンドポイント）の算出方法.....	44
5-4 第5章のまとめ.....	45
<参考文献 第5章>	46
第6章 若年者および高齢者におけるつまみ動作	47
6-1 若年者.....	47
6-1-1 母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置.....	47
6-1-2 ターゲットに対する示指および母指の姿勢	50
6-1-3 示指および母指の指腹部におけるエンドポイント	52
6-1-4 考察	54
6-1-4-1 母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置について.....	54
6-1-4-2 ターゲットに対する示指および母指の姿勢について	55
6-1-4-3 示指および母指の指腹部におけるエンドポイントについて	55
6-2 若年者と高齢者.....	56
6-2-1 ターゲットに対する示指および母指の姿勢の比較	56
6-2-2 母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置の比較.....	58
6-2-3 示指および母指の指腹部におけるエンドポイントの比較	60
6-2-4 考察	65
6-2-4-1 ターゲットに対する示指および母指の姿勢の検討.....	65
6-2-4-2 母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置の検討.....	65
6-2-4-3 示指および母指の指腹部におけるエンドポイントの検討.....	66
6-3 ADL アンケートとの関係.....	67

6-3-1	ADL アンケートと指腹部におけるエンドポイントの関係	67
6-3-2	ADL アンケートと母指の対立姿勢の関係	69
6-3-3	考察	70
6-3-3-1	ADL アンケートと指腹部におけるエンドポイントの関係の検討	70
6-3-3-2	ADL アンケートと母指の対立姿勢の関係の検討	70
6-4	第 6 章のまとめ	72
<参考文献 第 6 章>	73
第 7 章	結論	74
7-1	本研究の成果	74
7-2	今後の課題および展望	76
謝辞	78
研究業績	80

第1章 序論

1-1 研究背景

近年、高齢者の単身世帯が増加傾向にある。このような状況で、老化に伴い ADL (Activity of Daily Living : 日常生活動作) および IADL (Instrumental Activity of Daily Living : 手段的日常生活動作) が低下した高齢者は、自立した生活を送ることが困難となっている。そのため、日常生活を支援する技術の重要性が高まっている。高齢者が自立した生活を送るためには、「シャツのボタンの留め外し」や「靴の紐を結ぶ」などの着衣動作および「箸」や「フォーク」などを使った食事動作などの指先を使った巧緻動作が必要不可欠である。しかしながら、高齢者は指先の巧緻動作を含めた上肢機能が低下する傾向にある。Hackel らが実施した手指の日常動作に関わる一連の運動・感覚機能テストでは、老化に伴い運動・感覚機能が顕著に低下することが報告されている^[1]。また、Ranganathan らが各指と母指を対抗させたときの最大つまみ力を若年者と高齢者で比較した研究では、どの指においても高齢者で最大つまみ力が低下することが明らかとなっている^[2]。このような高齢者における手指の運動機能の低下は、QOL (Quality Of Life) の低下に直結する。そのため、「ADL および IADL の低下を緩和するためのリハビリテーション」や、着衣動作や食事動作などの「日常生活における動作を補助するための遠隔支援型ロボットハンドなどの支援技術」により QOL の向上が期待できる。

現在、指先の巧緻動作に対する検査および評価方法は、圧力センサを用いた手指筋力の測定^[3]や医療従事者がインタラクティブに可動域や筋力を評価する徒手筋力検査^[4]、「コイン型のチップを容器に入れる」、「ピンをつまんでからペグボードの穴にさす」などの課題を患者に実施し、点数化することで重症度を評価する方法^[5]、ADL・IADL アンケート評価^[6, 7, 8]などがある。しかしながら、これらの検査では、各指の位置姿勢を計測できていないため、作業に応じて指をどのように使い分けているのか明らかになっていない。「運動機能の検査・診断」および「訓練効果の高いリハビリテーション」を実現するためには、手指巧緻動作を定量的に評価する必要がある。作業に応じた手指の使い方を明らかにする必要がある。また、現在開発されている遠隔支援ロボットのほとんどは、遠くにいる家族との会話などのコミュニケーションに主眼が置かれ、日常生活の多様な作業を実際に遠隔地から支援するには至っていない。着衣や食事などの日常生活動作をロボットハンドで再現するためには、ヒトの指先の巧緻動作をロボットハンドで再現する極めて高い汎用性と把持戦略が求められる。健常者の把持戦略を模倣することで「遠隔支援ロボットハンド (マスタースレーブ方式)」な

どに役立てると期待できる。しかしながら、ヒトは体格や疾患、過去の学習経験が異なり、「物体をつまんで持ち上げる」ような簡単な動作であっても把持姿勢に個人差が生じる。その個人差は、若年者と IADL の低下した高齢者では大きくなる。自由度の高いマニピュレータでは把持戦略が無限に存在するため、健康な若年者を参考に最適な把持戦略を選択する必要がある。このような、「ヒトの個人差」を反映した把持戦略を構築する場合には、ヒトの巧緻動作を明らかにすることが最も有効な手段であると考えられている^[9]。

1-2 本研究の目的

本研究では、高齢者に対する ADL および IADL 検査における評価や効果的なリハビリテーションの指標と成りうるパラメータおよび日常生活を支援するためのロボットハンドの制御や設計に役立てることのできるパラメータの抽出が目的である。そのため、「着衣」や「食事」などの日常生活動作の中で基本となる示指および母指による「つまみ動作」に着目した。

ヒトが物体をつまむ際の指先の使い方を明らかにするために、任意の大きさ（長さ）の対象物（ターゲット）を模擬した長さの異なる棒の両端をつまむ動作を計測し、ヒトの指の把持姿勢および接触位置（エンドポイント）を解析する。本論文では、高分解能な磁気式手指用モーションキャプチャ装置を使用し、示指および母指の爪上に装着したレシーバの対象物をつまんだ瞬間における位置姿勢を自動計測する検査システムを構築する。また、計測したレシーバの対象物をつまんだ瞬間における位置姿勢を導出するための計算手法を構築する。さらに、若年者および高齢者を対象としてつまみ動作を計測し、比較することで、つまみ動作における若年者と高齢者の違いを顕在化し、巧緻動作の新たな評価指標を提案する。

1-3 本論文の構成

本論文は全 7 章で構成されている。各章の内容を以下に示す。

第 1 章では、本研究の背景、特にヒトの手指巧緻動作を定量的に評価する必要性と、作業に応じた手指の使い方を明らかにすることの重要性を述べた。さらに、本研究の最終目的と、それを達成するための手順を述べた。

第 2 章では、現在の高齢者の状況と日常生活について述べる。また、老化に伴いヒトの上肢機能がどのように低下するのかについて述べる。さらに、老化に関する既存の検査方法について述べる。

第 3 章では、基礎知識として、モーションキャプチャ技術の種類および過去

の研究で開発された磁気式手指用モーションキャプチャ装置について述べる。また、本研究で使用しているモーションキャプチャ装置のレシーバにおける位置および姿勢の表現方法について述べる。

第 4 章では、つまみ動作を計測するために構築した計測システムの構成および実施した実験の内容について述べる。

第 5 章では、レシーバで計測した位置姿勢情報から「ターゲットに対する示指および母指の姿勢」、「母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置」、「示指および母指の指腹部におけるターゲットとの接触位置（エンドポイント）」の 3 つのパラメータを算出するための解析アルゴリズムについて述べる。

第 6 章では、若年者および高齢者におけるつまみ動作の特徴について検討する。まず、第 5 章で考案した解析アルゴリズムを使用し、若年者のつまみ動作の特徴について述べる。また、若年者と高齢者のつまみ動作を比較することで、指先を使った細かな動作の違いを明らかにする。さらに、若年者と高齢者のつまみ動作の違いと ADL アンケートの関係を検討することにより、本研究で明らかとなった若年者と高齢者の差が老化によるものであり、老化を示す新たな評価指標と成りうるか検討する。

第 7 章では、本研究の結論の要約、今後の課題および展望について述べる。

＜参考文献 第1章＞

- [1] Hackel ME, Wolfe GA, Bang SM, Caneld JS: Changes in hand function in the aging adult as determined by the Jebson Test of Hand Function. : Phys Ther, 72, pp.373-377, (1992).
- [2] Ranganathan VK, Siemionow V, Sahgal V, Yue GH: Effects of aging on hand function. : J Am Geriatr Soc, 49, pp.1478-1484, (2001).
- [3] 八田美鳥, 大友英一, 吉田尚志, 高似良佳子, 大竹伸子: 高齢者における握力・ピンチ力と手指巧緻性の検討 - 年齢, 性ならびに体格因子とその関連について: 総合リハビリテーション, 21 巻 6 号, pp.489-492,(1993).
- [4] Helen J. Hislop, Dale Avers, Marybeth Brown: 新・徒手筋力検査方法 原著第9版: エルゼビア・ジャパン株式会社, pp.158-204, (2014)
- [5] Keefe RSE. Harvey PD. Goldberg TE. Gold JM. Walker TM. Et al: Norms and standardization of the Brief Assessment of Cognition in Schizophrenia (BACS): Schizophr Res 125, pp.161-168, (2008).
- [6] 伊藤利之, 鎌倉矩子: ADL とその周辺 - 評価・指導・介護の実際: 医学書院, pp.6-37, (2000).
- [7] 今田拓: 日常生活活動(動作)の概念・範囲・意義: 医歯薬出版, pp.8-12, (1992).
- [8] Donaldson SW, Wagner CC and Gresham GG: A unified ADL evaluation from.: Arch Phys Med Re-habil, 54 pp.175-180, (1973).
- [9] 中沢信明, 三浦郁奈子, 猪岡光: つまみ動作における指先の挙動と役割: 人間工学, Vol.40, No.2, pp.67-73,(2004).

第2章 高齢者における日常生活動作およびヒトの身体機能

本章では、我が国における高齢化の現状および高齢者が自立した生活を送るために必要な日常生活動作について述べる。また、ヒトの視覚的な到達運動および随意運動、老化に伴う身体と感覚機能の変化を述べる。さらに、老化に関する既存の検査方法について説明する。

2-1 高齢化の現状

2-1-1 高齢者の現状と推移

表 2-1 に高齢化の現状を示す。我が国の総人口は、平成 27 (2015) 年 10 月 1 日現在、1 億 2,711 万人となっている。その中で、65 歳以上の高齢者人口は、過去最高の 3,392 万人 (前年 3,190 万人) となり、総人口に占める割合 (高齢比率) も 26.7% (前年 25.1%) と過去最高となった。65 歳以上の高齢者人口を男女別にみると、男性は 1,466 万人、女性は 1,926 万人で、性比 (女性 100 人に対する男性人口) は 76.1 であり、男性対女性の比は約 3 対 4 となっている。また、高齢者人口のうち、「65～74 歳人口」は 1,752 万人 (男性 832 万人、女性 920 万人、性比 90.4) で総人口に占める割合は 13.8%、「75 歳以上人口」は 1,641 万人 (男性 635 万人、女性 1,006 万人、性比 63.1) で、総人口に占める割合は 12.9% である。図 2-1 に高齢者人口の対前年増加数の推移を示す。平成 26 (2014) 年は、前年に引き続き 65～74 歳人口が増加した。昭和 22 (1947)～24 (1949) 年に生まれたいわゆる「団塊の世代」が 65 歳に到達したためである。それに対し、平成 27 (2015) 年は、65～74 歳人口の対前年増加数が減少に転じた。これは、昭和 22 (1947)～24 (1949) 年に生まれた「団塊の世代」が 65 歳に達したことによる増加数に及ばないためである^[1]。

我が国の 65 歳以上の高齢者人口は、昭和 25 (1950) 年には総人口の 5% に満たなかったが、45 (1970) 年に 7% を超え、さらに、平成 6 (1994) 年には 14% を超えた。高齢化率はその後も上昇を続け、現在 26.7% に達している。また、生産年齢人口 (15～64 歳) は、平成 7 (1995) 年に 8,726 万人でピークを迎え、その後減少に転じ、平成 25 (2013) 年には 7,901 万人と昭和 56 (1981) 年以来 32 年ぶりに 8,000 万人を下回った^[1]。

高齢者人口は、「団塊の世代」が 65 歳以上となった平成 27 (2015) 年に 3,392 万人となり、「団塊の世代」が 75 歳以上となる平成 37 (2025) 年には 3,657 万人に達すると見込まれている。その後も高齢者人口は増加を続け、平成 54 (2042) 年に 3,878 万人でピークを迎え、その後は減少に転じると推計されている。総人

口が減少する中で高齢者が増加することにより高齢化率は上昇を続け、平成 47 (2035) 年に 33.4% で 3 人に 1 人となる。平成 54 (2042) 年以降は高齢者人口が減少に転じても 65 歳到達者数が出生数を上回ることから高齢化率は上昇を続け、平成 72 (2060) 年には 39.9% に達して、国民の約 2.5 人に 1 人が 65 歳以上の高齢者となる社会が到来すると推計されている。総人口に占める 75 歳以上人口の割合も上昇を続け、いわゆる「団塊ジュニア」(昭和 46 (1971) ~49 (1974) 年に生まれた人) が 75 歳以上となった後に、平成 72 (2060) 年には 26.9% となり、4 人に 1 人が 75 歳以上の高齢者となると推計されている。また、高齢者人口のうち、65~74 歳人口は「団塊の世代」が高齢期に入った後に平成 28 (2016) 年の 1,761 万人でピークを迎える。その後は、平成 43 (2031) 年まで減少傾向となるが、その後は再び増加に転じ、平成 53 (2041) 年の 1,676 万人に至った後、減少に転じると推計されている。一方、75 歳以上人口は増加を続け、平成 29 (2017) 年には 65~74 歳人口を上回り、その後も増加傾向が続くものと見込まれている^[1]。

表 2-1 高齢化の現状¹⁾

		単位：万人（人口），%（構成比）		
		平成 27 年 10 月 1 日		
		総数	男	女
人口（万人）	総人口	12,711	6,183 (性比) 94.7	6,528
	高齢者人口 (65 歳以上)	3,392	1,466 (性比) 76.1	1,926
	65～74 歳人口	1,752	832 (性比) 90.4	920
	75 歳以上人口	1,641	635 (性比) 63.1	1,006
	生産年齢人口 (15～64 歳)	7,708	3,891 (性比) 101.9	3,817
	年少人口 (0～14 歳)	1,611	825 (性比) 105.0	786
構成比	総人口	100.0	100.0	100.0
	高齢者人口（高齢化率）	26.7	23.7	29.5
	65～74 歳人口	13.8	13.5	14.1
	75 歳以上人口	12.9	10.3	15.4
	生産年齢人口	60.6	62.9	58.5
	年少人口	12.7	13.3	12.0

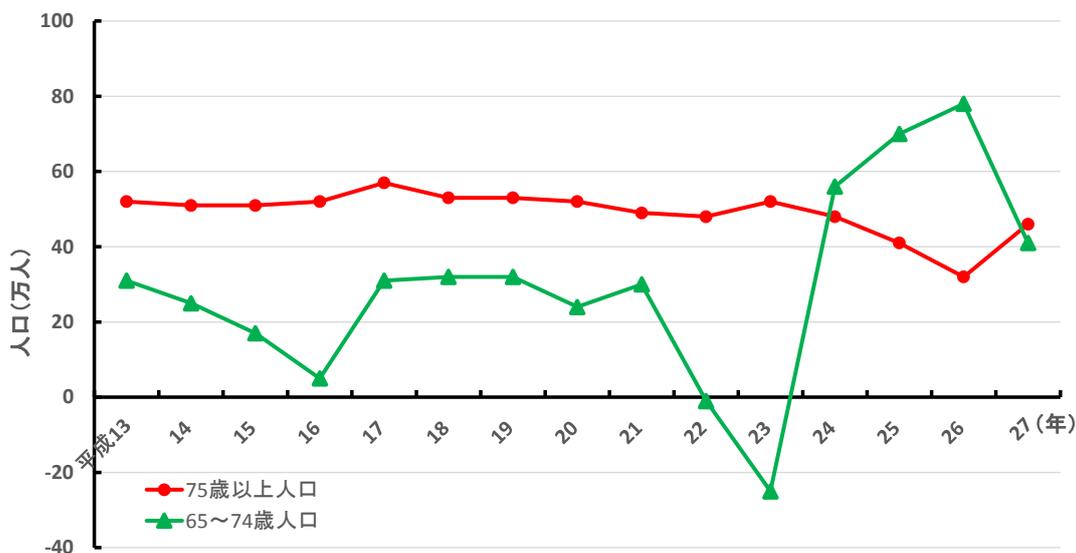


図 2-1 高齢者人口の対前年度増加数の推移^[1]

2-1-2 高齢者の家族と世帯

図 2-2 に 65 歳以上の者のいる世帯数および構成割合（世帯構造別）と全世帯に占める 65 歳以上の者がいる世帯の割合を示す。65 歳以上の高齢者のいる世帯についてみると、平成 26（2014）年現在、世帯数は 23,572 千世帯と、全世帯（50,431 万人）の 46.7%を占めている。昭和 55（1980）年では世帯構造の中で三世帯世帯の割合が一番多く、全体の半数を占めていたが、平成 26（2014）年では夫婦のみの世帯が一番多く約 3 割を占めており、単独世帯と合わせると半数を超える状況である^[1]。

65 歳以上の高齢者について子供との同居率をみると、昭和 55（1980）年にほぼ 7 割であったものが、平成 11（1999）年に 50%を割り、平成 26（2014）年には 40.6%となっており、子どもとの同居の割合は大幅に減少している。一人暮らし又は夫婦のみの世帯については、ともに大幅に増加しており、昭和 55（1980）年には合わせて 3 割弱であったものが、平成 16（2004）年には過半数を超え、平成 26（2014）年には 55.4%まで増加している^[1]。

65 歳以上の一人暮らし高齢者の増加は男女ともに顕著であり、昭和 55（1980）年には男性約 19 万人、女性約 69 万人、高齢者人口に占める割合は男性 4.3%、女性 11.2%であったが、平成 22（2010）年には男性約 139 万人、女性約 341 万人、高齢者人口に占める割合は男性 11.1%、女性 20.3%となっている。65 歳以上の高齢者の配偶関係についてみると、平成 22（2010）年における有配偶率は、男性 80.6%に対し、女性は 48.4%である。女性の高齢者の約 2 人に 1 人が配偶

者ありとなっており、その割合は上昇傾向にある。また、未婚率は男性 3.6%、女性 3.9%、離別率は男性 3.6%、女性 4.6%となっており、いずれも上昇傾向となっている^[1]。

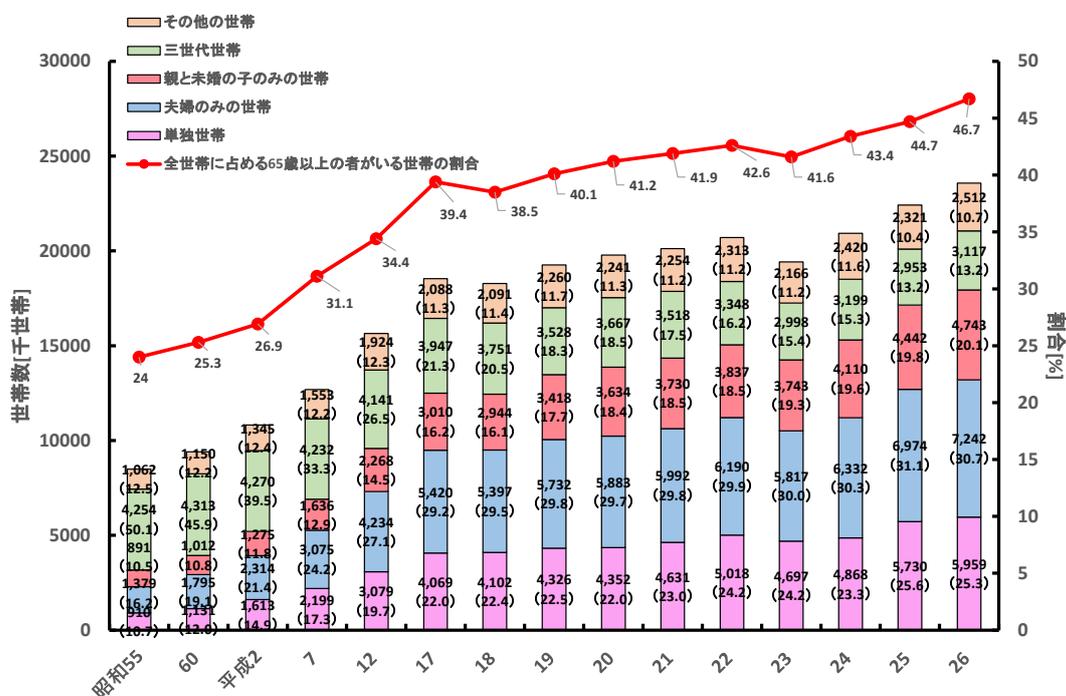


図 2-2 65 歳以上の者のいる世帯数および構成割合（世帯構造別）と全世帯に占める 65 歳以上の者がいる世帯の割合^[1]

2-1-3 高齢者の日常生活

60 歳以上の高齢者に現在の住宅の満足度について聞いてみると、「満足」又は「ある程度満足」している人は総数で 76.3%、持家で 79.1%、賃貸住宅で 56.6%となっている。さらに、現在の住宅の不満な点を聞いてみると、「住宅が古くなったりいたんだりしている」が 63.8%と最も多く、「住宅の構造や設備が使いにくい」(32.2%)、「家賃、税金、住宅維持費等の経済的負担が重い」(24.8%)と続いている。また、医療機関ネットワーク事業の参画医療機関から国民生活センターに提供された事故情報によると、65 歳以上の高齢者が 20 歳以上 65 歳未満の人より住宅内での事故発生の割合が高い。事故の発生場所は、「居室」が 45.0%と最も多く、「階段」18.7%、「台所・食堂」17.0%と続いている^[1]。

現在住んでいる地域での付き合いの程度について、60 歳以上の高齢者をみると『付き合っている』（「よく付き合っている」と「ある程度付き合っている」の

計) とする人は、女性 80.7%に対して男性 73.8%となっている。65 歳以上の一人暮らし高齢者が、病気などの時に看護や世話を頼みたいと考える相手は、子供がいる人は男女ともそれぞれ「子」が男性 41.0%と女性 58.2%と最も多い。子供がいない女性は「兄弟姉妹・親戚」(35.4%) が最も多く、次いで「当てはまる人はいない」(21.5%) となっている。一方、子供がいない男性は「当てはまる人はいない」(35.0%) が最も多く、次いで「そのことで頼りたいと思わない」(22.6%) となっており、「当てはまる人はいない」と「頼りたいと思わない」を合計すると半数を超える^[1]。

2-1-4 高齢者の定義

高齢者の定義について考える。定年を社会的引退とした場合、ほとんどの企業では、60 歳定年制を採用しており、65 歳定年制はほとんど採用されていない。しかし、再雇用制度や勤務延長制度などを考慮すると、現在の定年年齢は 65 歳またはそれ以上とするのが妥当であると考えられる。また、60～64 歳の労働力率(その年代の人口に占める労働者の割合)をみると、男性は 78.9%、女性は 38.8% (1996 年) と高い割合を示している。このため、これらに含まれる労働力となる人を高齢者と考えすることは適切ではない。次に制度的な面から考える。老人福祉法や国民年金法などによる老人福祉の対象者、年金支給の年齢が 65 歳以上となっている^[2]。また、現在の人口研究などでは、65 歳以上を高齢者として区分することが一般化している。最後に、本研究では指先の巧緻動作を評価する。ヒトは今までの経験から動作情報が学習される結果、脳内に内部モデルが構築され、各指の機能が明確化し、各指に強制的かつ規則的な動作パターンが生成される^[3]。そのため、日常的に指先の細かい作業が必要な特定の技能を有した職人のような熟練者を対象とするべきではないと考えた。

以上のことから、本論文では、65 歳以上の人を高齢者と定義し、その中でも、日常的に指先の細かな作業をしていない人を対象とした。

2-2 ヒトの視覚的到達運動と随意運動について

2-2-1 視覚的到達運動

人間は日常動作の際、視覚・聴覚・触覚・嗅覚など様々な感覚から情報を取り入れて行動を決定している。このような行動決定において特に重要な情報として視覚情報が挙げられる。視覚情報の処理は、眼球に入射した光はまず視細胞で光電変換される。信号の流れは、視細胞→双極細胞→神経節細胞であり、水平細

胞とアクアマリン細胞は横方向の信号を伝達する．そして網膜の出力細胞である神経節細胞から視神経へと信号が伝達される．この網膜からの信号は外側膝状体を経て，一次視覚野（V1野：Visual area 1）に投射する．図 2-3 に大脳半径の皮質区分の概説を示す．V1 野に投射した情報は，視覚前野へと移行する．視覚前野は，機能的に異なった多数の領域に分けられ，V2, V3, V4, MT, MST 野などに分類されている．V2 野は V1 野と同じく信号を適切な領域に分配する領野であり，MT, MST 野は運動成分を扱う領野，V4 野は色成分を扱う領野，V3 は V4 とともに形成成分を扱う領野である．さらにそれぞれの領野の細胞は相互に結合しネットワークを形成している．こうして，視覚連合野において処理された情報は，空間の認識を司る頭頂連合野，運動連合野，さらには側頭連合野や前頭連合野と呼ばれるより高次の領域へと移行していく^[4]．

このように，運動と感覚の情報処理は互いに深く絡み合っている．到達運動を達成するためには，視覚系で決められた到達点の座標を体おいた身体の座標や必要な運動指令に変換する座標変換の問題を解かなければならない．また，把持運動の実現のためには，対象物の視覚情報とそれを把持したときの手の形に関する体性感覚，運動指令の情報を統合して，三次元物体の視覚情報が与えられただけで手の形をつくるプリシェイピングの問題を解かなければならない^[5]．ヒトは得られた視覚情報から，これらの問題を瞬時に処理し，到達運動および把持運動を実行している．

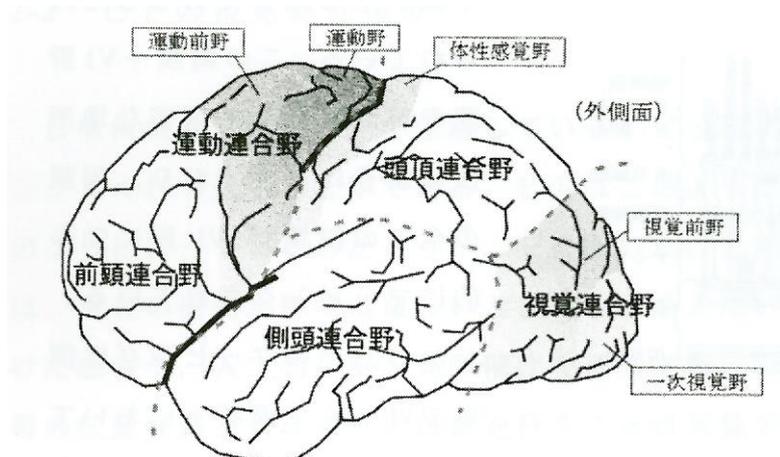


図 2-3 大脳半径の皮質区分

2-2-2 随意運動

随意運動とは、意志に従った運動のことである。随意運動の例としては、到達運動、物体を手で掴む把持運動、言葉をしゃべるための発話運動、字を書くための書字運動、物を組み立てる運動、物を研ぐための研磨運動、楽器の演奏などがあげられる。随意運動の行動計画は以下の 7 つのレベルに分けて考えられている^[3]。

1. 概念レベル：「手を伸ばす」、「持ち上げる」、「運ぶ」といったシンボルで定義されるレベル。
2. 環境空間での運動：机の表面に固定された座標系の中で、積み木や手の位置、向き、軌道などが指定される。
3. 効果器：運動のために使われる身体の一部が特定される。
4. 身体空間の運動：ヒトの体幹に対して固定された座標系の中で、積み木や手の位置、向き、軌道などが指定される。
5. 関節運動：運動が関節角、角速度、角加速度で表現される。
6. 関節トルク：各関節で発生しなければならないトルクが計算される。
7. 筋肉：筋張力と筋肉への神経入力計算される。

図 2-4 に随意運動の計算理論のモデルを示す。「机の上にある水の入ったコップを手を取る」という動作を例にこのモデルを説明する。まず、視覚系により、位置が決定されているコップの位置までの無数に存在する軌道のうちからただひとつの軌道を視覚系の作業座標で決定する。作業座標とは運動の課題、作業を表現するのに適当な座標系である。到達運動や把持運動の対象となる物体は 3 次元空間の中に位置しているので、机やコップなどの物体に取り付けた座標系、あるいはそれと直接結びつく視覚系などが作業座標として選ばれることが多い。次にこのようにして決定した軌道を、筋肉の長さや関節角度といった身体座標に変換するため座標変換しなければならない。最後に身体座標で表現された軌道を実際に実現するためのトルク、筋の張力を発生するよう制御する必要がある。以上のように随意運動の制御では、軌道決定、座標変換、制御の少なくとも 3 つの問題を処理しなければならない^[3]。

図 2-4 には、脳が軌道決定、座標変換、制御の問題を直線の矢印で示したように直列的に順次処理するのと並行して、運動の目標からいきなり運動指令を計算する手続き（破線の矢印）と、作業座標での望ましい軌道から、運動指令を直接計算する手続き（実線の曲がった矢印）も示している^[3]。

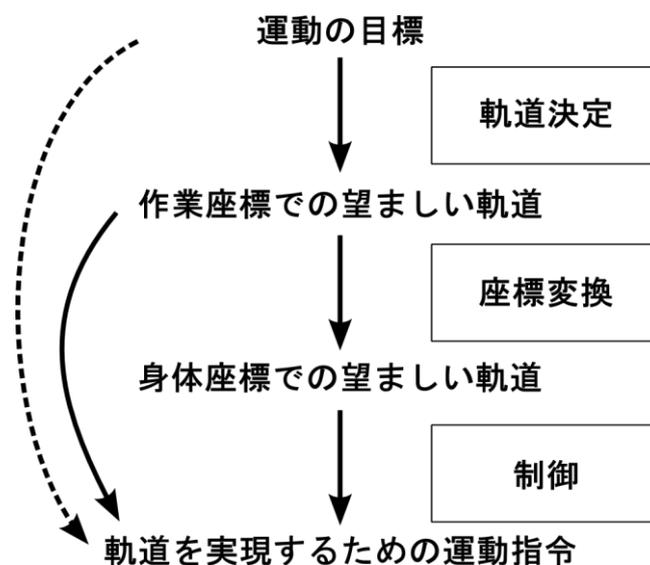


図 2-4 随意運動の計算理論のモデル^[3]

2-3 老化に伴う身体感覚と変化

2-3-1 身体機能

高齢者は、老化に伴い指先の巧緻動作を含めた上肢機能が低下する傾向にある。先行研究として、Ranganathan らは各指と母指を対向させたときの最大つまみ力を若年者と高齢者で比較している。その結果、どの指においても高齢者の最大つまみ力が低下することが示されている^[6]。さらに、ヒトは上肢のみならず、老化に伴い、視覚特性も低下する。例えば、瞳孔が小さくなるため、眼球内に入射する光が少なくなり暗所での視力が低下したり、眼球運動の鈍化により、視野が狭くなり周辺視力も低下する。これらは、老化に伴う神経系機能の低下が、生涯を通して直線的に退行していくからであると考えられている^[7]。

2-3-2 感覚機能

高齢者は、老化に伴う身体機能の低下のみならず、感覚機能も低下する。特に手指に着目すると、加齢に伴う指先の感覚受容器の減少および脳重量の減少により、末梢および中枢機能が形態的編成を起こすことが報告されている^[8,9,10,11]。高齢者はこれらが原因で手指感覚感度が低下してしまう。

2-4 老化に関する既存の検査方法

2-4-1 ADL（日常生活動作）・IADL（手段的日常生活動作）

ADLとはActivities of Daily Livingの略であり、日本語では「日常生活動作」がこれに当たり、日常生活を営む上で、普通に行っている行為および行動のことをいう。具体的には食事や排泄、整容、移動、入浴等の基本的な動作を示す。ADLの概念はもともとニューヨークの身体障害児者研究所（Institute for the Crippled and Disabled）において、医師であるDeaverと理学療法士であるBrownによって提起された。ADLはリハビリテーションや介護の場で使われている。身体機能に障害を持つ患者の機能的活動をより客観的に測定することの重要性が指摘され、関節可動域や筋力だけでは測定しえない、人間の日常的な活動能力を測定しようとする試みから提起された手法であり、要介護高齢者や障害者等が、どの程度自立した生活を送ることが可能か（生活自立度）を評価する指標として使われている^[12, 13]。

ADLと似た言葉に、IADLがある。IADLとはInstrumental Activity of Daily Livingの略であり、日本語では「手段的日常生活動作」という。日常生活を送る上で必要な動作のうち、ADLより複雑で高次な動作を示す。具体的には、買い物や洗濯、掃除等の家事全般や、金銭管理や服薬管理、外出して乗り物に乗ること等であり、最近では、趣味のための活動もIADLに含まれると考えられている^[12, 13]。

2-4-2 徒手筋力検査法

徒手筋力検査法（Manual Muscle Testing）とは、徒手によって人体中の主要な筋肉の筋力を判定する検査法である。徒手筋力検査では筋力を以下の6段階で評価する^[14]。

- 5, Normal (N) : 検査者が被験者の肢位持続力にほとんど抵抗できない。
- 4, Good (G) : 段階5の抵抗に対して、被験者が抗しきれない。
- 3, Fair (F) : 重力の抵抗だけに対して、運動範囲内を完全に動かせる。（客観的基準）
- 2, Poor (P) : 重力を取り去れば、運動範囲内を完全に動かせる
- 1, Trace (T) : 筋の収縮が微かに認められるだけで、関節運動は起こらない。
- 0, Zero (活動なし) : 視察・触知によっても、筋の収縮が確認できない。

徒手筋力検査の長所としては、器具を使わずに実施でき、臨床で筋力を大まか

に把握するのに有効である。また、短所としては、検査には熟練の技術が必要とされるため、再現性が低く、検査結果は検査者の主観になるため、検査者が変われば判定も異なる危険性がある^[14]。

2-4-3 認知機能改善評価法

認知症や統合失調症は問診、神経心理検査、画像検査等から臨床的に推定する。認知症や統合失調症の主な症状は認知機能の低下であるため、認知機能を構成する知覚、注意、学習、記憶、概念形成、推論、判断、言語活動および抽象的思考などの能力を細かく評価するために用いられる検査は神経心理検査である。近年では、認知症や統合失調症などにそれぞれ適応する神経心理検査の評価尺度が研究開発された。形式は主に評価尺度の手順にしたがって、検査される方が質問に答えたり、何かを書いたり、道具を操作したりする。検査の種類によりかかる時間はそれぞれであり、数分から数十分までかかる検査がある^[15]。

日本において認知症の認知機能評価に用いられる心理検査は認知症の分類により、「精神状態短時間検査—日本語版(MMSE-J)」、「臨床認知症評定法—日本語版(CDR-J)」、「論理的記憶検査(ウェクスラー記憶検査法—改訂版(WMS-R)の遅延再生課題)」、「高齢者用うつ尺度短縮版—日本版(GDS-S-J)」、「アルツハイマー病評定尺度—認知—日本版(ADASCOG-J)」、「神経精神目録(12項目、介護者悩み尺度付き—日本版)(NPI-12-J with NPI-D-J)」、「神経精神目録—質問票—日本版(NPI-Q-J)」および「アルツハイマー病共同研究—日常生活動作質問票(ADCS-ADL-J)」などがある。また、統合失調症やうつ病等の認知機能評価に用いられる心理検査として、「日本語版 COGNISTAT 認知機能検査」、「CAB 認知能力伸張検査(Cognitive Ability Booster)」、「SPTA 標準高次動作性検査 改訂版—失効症を中心として」、「LOI レイトン強迫性検査(Leyton Obsessional Inventory)」、「日本語版 BADS 遂行機能障害症候群の高度評価」、「包括的神経心理学テスト・バッテリー日本語版(MCCB-J)」、「統合失調症認知機能簡易評価尺度日本語版(BACS-J)」、「統合失調症認知評価尺度日本語版(SCoRS-J)」など数多く研究開発された。

上記した認知機能評価法の中に質問を解答する課題、紙に文字や図を書く課題、物体を移動する課題などが組み込まれた。各課題の完成度を基準に、認知能力のレベル評価する。それに基づいて、疾患の確診、重症度評価およびリハビリテーションの回復度を診断する。その中、器具を用いて患者の行動を観察する簡易的な運動機能検査が多く含まれる。

2-5 第2章のまとめ

本章では、高齢化の現状、高齢者の家族と世帯および日常生活について述べた。現在、我が国の高齢化の状況としては、65歳以上の高齢者の人口が過去最高となっており、推移としても増加傾向を示している。

ヒトの視覚的到達運動と随意運動についてはヒトが視覚情報を脳内でどのように処理し、行動に移しているのか述べた。さらに、老化に伴い変化する身体機能および感覚機能について述べた。

最後に老化に関する既存の検査方法としてADLおよびIADL、徒手筋力検査法、認知機能改善評価法について述べた。次章では、本研究を進めるにあたり基礎的な知識とある動作計測の基礎について述べる。

＜参考文献 第2章＞

- [1] 内閣府：高齢社会白書（平成28年度版），株式会社ぎょうせい，pp.2-47, (2016).
- [2] 嵯峨座晴夫：人口の高齢化と高齢者，大蔵省印刷局，P.5, (1977).
- [3] 川人光男：脳の計算理論：産業図書株式会社，pp.75-79, (1997).
- [4] 大山正ら：新編 感覚・知覚ハンドブック，大山正，今井省吾，和気典二（編），誠信書房，pp.287-311, (1944).
- [5] [3]と同様，pp.18-23
- [6] Ranganathan VK, Siemionow V, Sahgal V, Yue GH : Effects of aging on hand function.: J Am Geriatr Soc, 49, pp.1478-1484, (2001).
- [7] 矢部京之助：姿勢と歩行の発達 生涯にわたる変化の過程，大修館書店，pp.143-154, (1996).
- [8] Bolton CF, Winkelmann RK, Dyck PJ: A quantitative study of Meissner's corpuscles in man.: Neurology, 16 (1), pp.1-9, (1966).
- [9] Scammell RI, Frost C, Jenkins R, et al.: A longitudinal study of brain volume changes in normal aging using serial registered magnetic resonance imaging. : Arch Neurol, 60, (7), pp.989-994, (2003).
- [10] Muener EA, Moore MM, Kerr DC, et al.: Brain volume preserved in healthy elderly through the eleventh decade. : Neurology, 51, (6), pp.1555-1562, (1998).
- [11] Gur RC, Mozley PD, Resnick SM, et al. : Gender differences in age effect on brain atrophy measured by magnetic resonance imaging.: Proc Natl Acad Sci U S A, 88 (7), pp.2845-2849, (1991).
- [12] 伊藤利之，鎌倉矩子：ADL とその周辺 - 評価・指導・介護の実際：医学書院，pp.6-37, (2000).
- [13] 今田拓：日常生活活動（動作）の概念・範囲・意義：医歯薬出版，pp.8-12, (1992).
- [14] Helen J. Hislop, Dale Avers, Marybeth Brown : 新・徒手筋力検査方法 原著第9版：エルゼビア・ジャパン株式会社，pp.158-204, (2014).
- [15] 杉下守弘：認知機能評価バッテリー，日本老年医学会雑誌 Vol.48, No.5, pp.431-438, (2011).

第3章 動作計測の基礎知識

本章では、動作計測の基礎知識として、モーションキャプチャ技術の種類、過去の研究成果および本研究で使用するモーションキャプチャ装置について述べる。さらにモーションキャプチャ装置で得られたデータの位置および姿勢の数学的な表現方法について述べる。

3-1 モーションキャプチャ技術の種類

モーションキャプチャには、計測に用いる物理量の違いにより、光学式、磁気式、およびその他の方式（慣性センサ式、光ファイバ式、機械式）に大別される。以下では、各方式の原理、利点と欠点について述べる。

3-1-1 光学式

- 光学式には、赤外線を反射するマーカを測定対象に装着するマーカ式（時分割に点滅する赤外 LED を装着する場合もある）、マーカレスで画像データから動きを測定する画像式が主流である。以下に①マーカ式および②画像式の原理、利点と欠点について述べる。
- ① マーカ式は、モーションキャプチャ技術として最も普及している手法であり、身体に装着した反射マーカを複数台の（赤外線 LED の反射機能を有する）赤外線カメラで撮影することで、三角計測の原理によりマーカの 3 次元位置座標を算出している。また、カメラの解像度に比例し、小型の反射マーカを撮影できるため、一般に空間分解能も向上する。広い屋内空間での複数人のモーションキャプチャに適しており、映画やゲームの撮影に利用されている。一方、マーカがカメラの死角に入ると撮影できないためデータが欠落してしまうが、設置するカメラの台数を増やすことである程度死角を減らすことができる。一旦マーカが欠落してしまうとデータを補完する必要があり、再度、装着部位を登録し直さなければならないなど手間がかかるが、ラベリングされた LED 発光式マーカを使用する方式であれば自動的に装着部位を再登録することができる（しかしながら、反射マーカと比べ LED 発光マーカは小型化できないという問題もある）。光学式モーションキャプチャの欠点としては、「屋外のように強い光の下での計測が困難」、「計測範囲がカメラの画角で制限されているため、狭い空間での計測が困難」、「カメラを設置する際のキャリブレーション作業に時間がかかる」等がある。

- ② 画像式は、マーカを装着することなく複数台のカメラで撮影した 2 次元映像から画像認識技術により対象を切り出し、トラッキングすることで、実時間で対象の 3 次元的な動きを推定する技術である。近年急速に向上した CPU パワーおよび画像認識技術により、実時間でのモーションキャプチャが可能となった。キャプチャ対象の背景が無地でなければならないとの制限はあるが、マーカ式のように特殊な全身タイツを着る必要がない。容易に計測できる一方、計測精度はマーカ式に及ばない。

3-1-2 磁気式

- 磁場を利用したモーションキャプチャ装置には、発生する磁束の波形により、交流式・直流式に大別される。磁束を空間に放射するソースコード（トランスミッタ：3 軸直行コイル構成）およびトランスミッタに対するレシーバの対照的な位置および姿勢の各 3 自由度を計測することができる。測定部位の「位置」と「姿勢」を同時に計測できる点が他の方式にはない特徴である。また、磁束は身体を透過するため、光学式で問題となっている死角でのデータの欠落は存在せず、レシーバが衣類の下に隠れても測定でき、強い太陽光に曝される屋外での利用にも適している。一方、磁場を利用するため付近に金属が存在すると測定精度が低下する。以下に③交流式および④直流式の原理、利点と欠点について述べる。
- ③ 交流式は限られた狭い空間における高精度な計測に適している。従来、磁気式の技術はレシーバが大きく、レシーバ数に反比例してサンプリングレートが低下することが問題視されていたが、近年、技術改良が飛躍的に進み、レシーバの小型軽量化、サンプリングレートも向上している。
- ④ 直流式は、4m 使用程度の比較的広い空間でのモーションキャプチャには数 cm 大のレシーバを利用しなければならないが、0.5m 四方程度の広い空間でのモーションキャプチャであれば直径 1.5mm、長さ 8mm のニードル状の超小型レシーバを選択することもできる。交流式と比べ測定精度は 2 桁程度劣るが、直流式は導体に誘導される渦電流の影響が少ないため、強磁性体以外の金属であれば磁場の歪みを交流式の 1/5 程度に抑えることができる。

3-1-3 その他の方式

- 上述した方式以外にも⑤慣性センサ式、⑥光ファイバ式、⑦機械式などがある。これらの原理および利点と欠点について以下に述べる。
- ⑤ 慣性センサ式は、カメラやトランスミッタのような基準を設置する必要がなく、角速度センサおよび加速度センサを組み合わせた慣性センサを身体各部に装着することで、動作を計測する。測定場所の制約が少ないが、身体に合わせてボディースーツを用意する必要があり、センサのドリフトによる絶対座標のズレは避けられない。
- ⑥ 光ファイバ式は、ラミネート加工した光ファイバ内に光を通し、その光が曲がりに応じて減衰することを利用して角度を測定する曲率測定センサを利用する。これを身体に装着し、測定した各関節における関節角から身体の動作を再現する。カメラやトランスミッタのような基準が不要なため、測定範囲に制限がなく、広い空間での測定が可能である。一方、角度分解能が 0.5deg と低く、位置情報は計算で算出することになるが、原理上、端部ほどズレが蓄積・増大する。
- ⑦ 機械式は、リンク機構を備えた外殻を装着し、ロータリーエンコーダにより関節の回転角を測定し、動作を計測する。他の手法に比べ安価であるが、重量があり、リンク機構により動作に制限がある。

3-2 磁気式手指用モーションキャプチャ装置

3-2-1 Liberty (Polhemus)

本研究では、磁気式モーションキャプチャ装置として Liberty™ 16 System (Polhemus 社) (以降 Liberty とする) を採用した。図 3-1 に Liberty の構成図を示す。Liberty は 1 つのトランスミッタ、複数のレシーバおよびトランスミッタに対するレシーバの相対的な位置と姿勢の計 6 自由度を算出する電子回路で構成されている。トランスミッタとレシーバはそれぞれ 3 軸直行コイルで構成されている。このコイルの直径はトランスミッタ・レシーバ間の距離よりも非常に小さく保たれるため、各コイルは点とみなすことができる。トランスミッタに電流を流すことでその周辺には交流磁場が発生する。この磁場は遠隔フィールド要素、近接フィールド要素または誘導フィールドから成る。遠隔フィールドの強度はコイルのサイズと励磁周波数で決まり、その距離に反比例する。誘導フィール

ド要素の強度は周波数に依存せず距離の逆3乗で弱まる。

図 3-1 に示すシステムでは周波数とフェーズでの同一駆動信号によりトランスミッタのコイルが順々に励磁される。励磁のたびに 1 つの単一軸トランスミッタが生成される。トランスミッタが励磁されたことで発生したパルス磁場をレシーバが感知し、電磁誘導の法則による電流がコイルに流れる。この電流を検出回路、コンピュータおよび解析ソフトウェアを介してデジタイズすることでトランスミッタに対するレシーバの相対的な位置および姿勢を出力する。図 3-2 にトランスミッタの座標系を示す。トランスミッタおよびレシーバはいずれも右手系の座標系であり、レシーバの姿勢は ZYX 型オイラー角で表わされる。図 3-3 にオイラー角の表現範囲を示す。図 3-3 に示すようにオイラー角は各方位によって表現範囲が異なることに注意する。また、図 3-4 にトランスミッタおよびレシーバの実物を示す。図 3-4 (a) にトランスミッタ、同図 (b) にレシーバを示す。

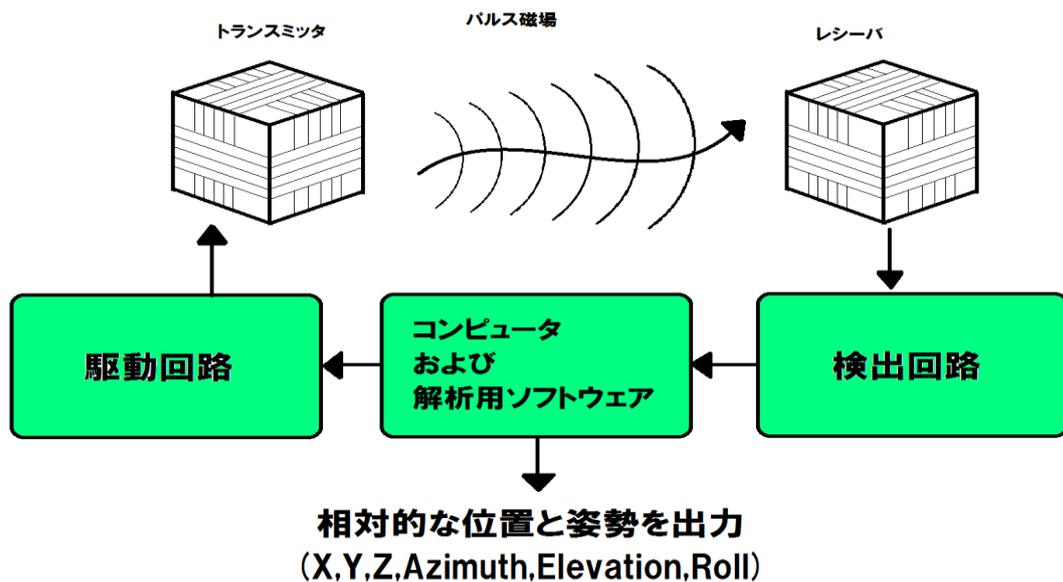


図 3-1 Liberty の構成図

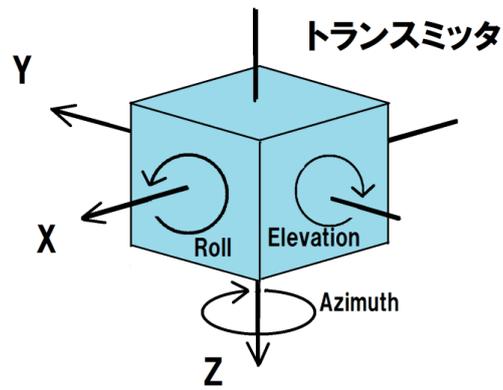


図 3-2 トランスミッタの座標系

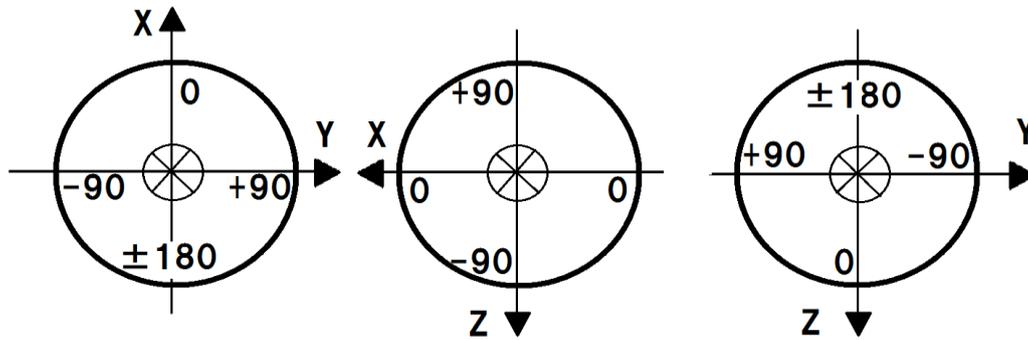
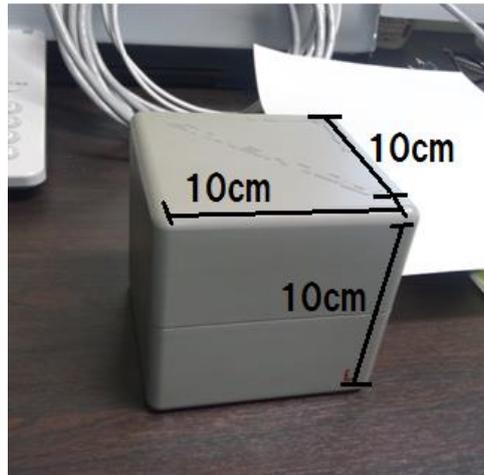


図 3-3 オイラー各の表現範囲



(a) トランスミッタ (TX4)



(b) レシーバ (RX1-D, 細線化モデル)

図 3-4 トランスミッタおよびレシーバ

3-2-2 Hand-MoCap

過去の研究において上記磁気式モーションキャプチャ装置を利用し、高精度・高分解能な手指用モーションキャプチャ技術として開発された Hand-MoCap 技術がある。図 3-5 に Hand-MoCap の構成を示す。片手あたり Liberty に接続した 16 個のレシーバおよび 1 個のトランスミッタを使用する。レシーバの配置は同図に示したように各指に 3 つ、手の甲に 1 つのレシーバを配置し、隣接するレシーバ同士の接触、関節運動の妨げにならないよう、各指骨の上に配置するレシーバは指骨の中央に配置する。制御はコンピュータに Liberty を USB 接続することで可能であり、Liberty の制御、計測データの保存が可能である。1 レシーバあたりのサンプリングレートは 240Hz であり、高速で動作データを計測可能である^[1]。表 3-1 にレシーバ 1 つあたりの検出特性を示す。

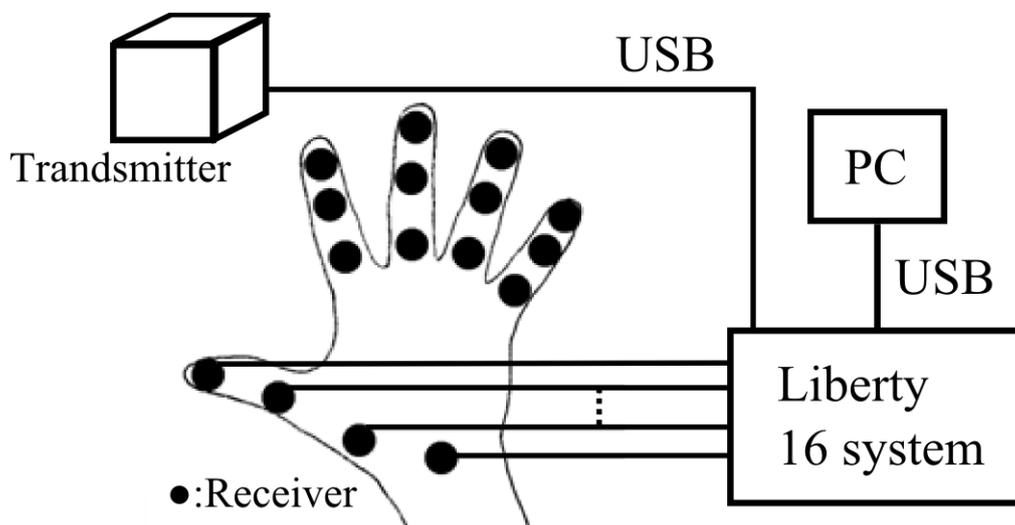


図 3-5 Hand-MoCap の構成

表 3-1 レシーバ 1 つあたりの検出特性

計測範囲[mm]	位置分解能[mm]	角度分解能[°]
304.80	0.001422	0.000415
609.60	0.007239	0.001450
1219.00	0.130600	0.011768
2438.00	1.674000	0.172060

3-3 位置および姿勢の表現方法

座標系は、ワールド座標系とローカル座標系に分類できる。図 3-6 にワールド座標系とローカル座標系の関係を示す^[2]。

- ワールド座標系

全ての物体に共通な座標系であり、物体が動いても座標系は移動しない。絶対座標系とも呼ばれる。

- ローカル座標系

各物体固有の座標系であり、物体の移動および回転に伴い、この座標系も移動および回転する。相対座標系とも呼ばれる。

本章では、ワールド座標系とローカル座標系の相互変換の手法について述べる。

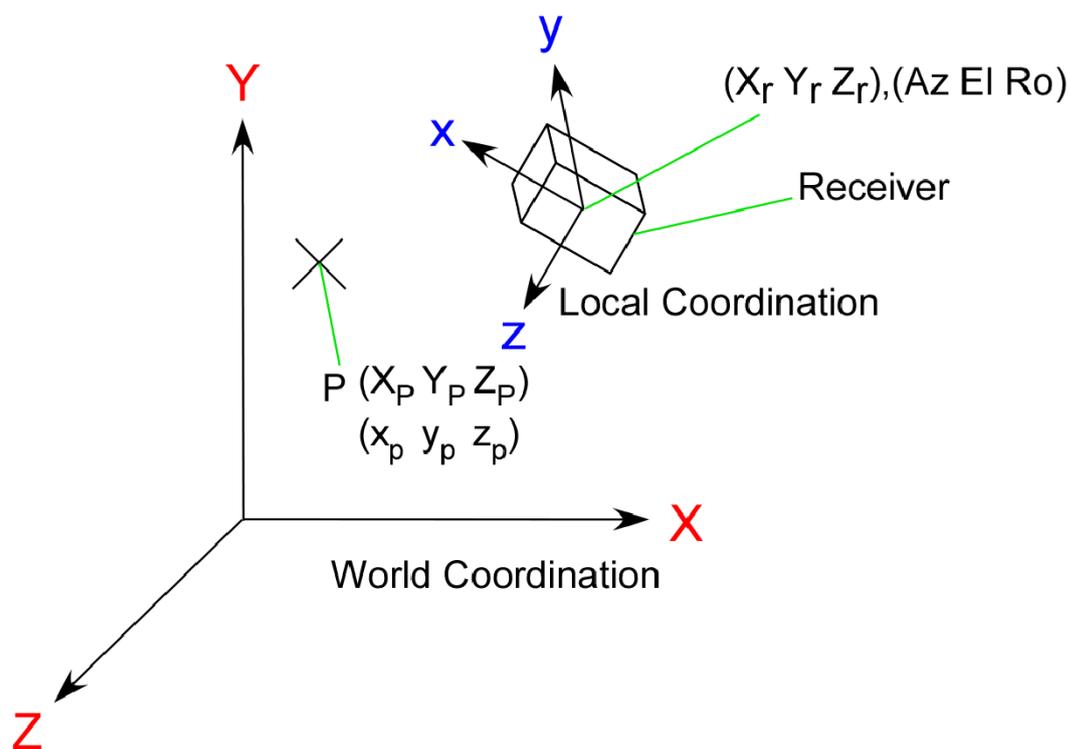


図 3-6 ワールド座標系とローカル座標系の関係

3-3-1 ワールド座標系およびローカル座標系

トランスミッタを原点としたワールド座標系と，レシーバを原点としたローカル座標系は相互に変換できる．ワールド座標系において，任意の位置に設定した点 P の位置を $(X_p Y_p Z_p)$ とし，レシーバの位置および姿勢を $(X_r Y_r Z_r)$ ， $(Az El Ro)$ とする．また，ローカル座標系における点 P の位置を $(x_p y_p z_p)$ とする．ローカル座標系における点 P をワールド座標系へ変換するためには，回転行列 \mathbf{R} を定義し，次式より算出する．

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

ここで，

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

また，ワールド座標系における点 P をローカル座標系に変換するためには，回転行列 \mathbf{R} の逆行列を定義し，次式より算出する．

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} X_p - X_r \\ Y_p - Y_r \\ Z_p - Z_r \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

3-3-2 オイラー角と回転行列

ローカル座標系であるオイラー角には，回転する軸の選び方が 12 種類ある．本研究で用いた 3 次元位置姿勢計測装置 (Liberty, Polhemus) では，レシーバの姿勢を ZYX 型オイラー角を用いて表現している．本項では，ZYX 型オイラー角について述べる．

ZYX 型オイラー角は Z, Y, X の順で回転させる．

1. Z 軸を中心に θ 回転させる．回転後の各軸を X_1, Y_1, Z_1 とする．
2. Y_1 軸を中心に β 回転させる．回転後の各軸を X_2, Y_2, Z_2 とする．
3. X_2 軸を中心に α 回転させる．回転後の各軸を X_3, Y_3, Z_3 とする．

ここでの θ , β , α は ZYX 型オイラー角における Azimuth, Elevation, Roll である。ローカル座標系である ZYX 型オイラー角を回転行列 \mathbf{R} に変換するには次式を用いる。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \mathbf{RZ}(\theta)\mathbf{RY}(\beta)\mathbf{RZ}(\alpha) \quad (3-4)$$

$$= \begin{bmatrix} C_\theta & -S_\theta & 0 \\ S_\theta & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\beta & 0 & S_\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\beta & 0 & C_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\alpha & -S_\alpha \\ 0 & S_\alpha & C_\alpha \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

$$= \begin{bmatrix} C_\theta * C_\beta & C_\theta * S_\beta * S_\alpha - S_\theta * C_\alpha & C_\theta * S_\beta * C_\alpha + S_\theta * S_\alpha \\ S_\theta * C_\beta & S_\theta * C_\alpha * S_\alpha + S_\theta * C_\alpha & S_\theta * S_\beta * C_\alpha - C_\theta * S_\alpha \\ -S_\beta & C_\beta * S_\alpha & C_\beta * C_\alpha \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

ここでの C_θ , S_θ は $\cos(\theta)$, $\sin(\theta)$, C_β , S_β は $\cos(\beta)$, $\sin(\beta)$, C_α , S_α は $\cos(\alpha)$, $\sin(\alpha)$ を示す。

また, ZYX 型の回転行列と ZYX オイラー角は相互に変換することができる。

図 3-7 に ZYX 型オイラー角における回転軸の回転順番を, 表 3-2 に ZYX 型回転行列の逆変換にける場合分けを示す。逆変換には式 (3-6) における回転行列の要素 r_{31} の値によって, 表 3-2 のような場合分けをしてオイラー角を算出する。

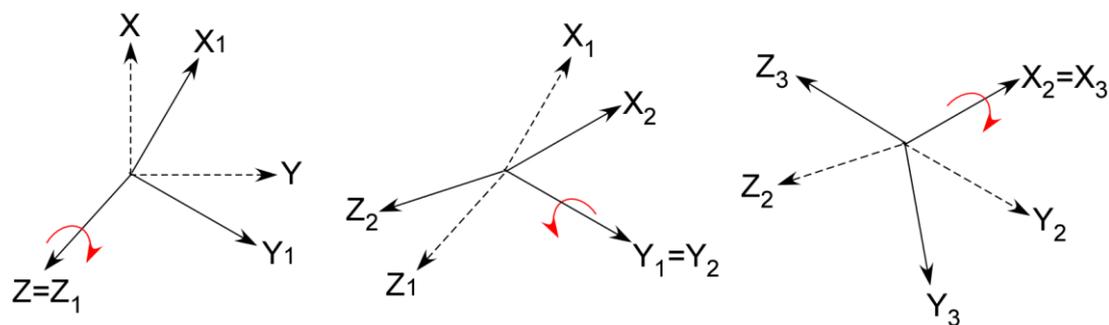


図 3-7 ZYX 型オイラー角における回転軸の回転順番

表 3-2 ZYX 型回転行列の逆変換における場合分け

	$-1 < r_{31} < 1$	$r_{31} = -1$	$r_{31} = 1$
Azimuth	$\arctan2(r_{21}, r_{11})$	$\arctan2(-r_{23}, r_{22})$	$\arctan2(-r_{23}, r_{22})$
Elevation	$\arcsin(-r_{31})$	$\pi/2$	$-\pi/2$
Roll	$\arctan2(r_{32}, r_{33})$	0	0

3-4 第3章のまとめ

本章では、研究を進めるために必要な基礎知識として、動作を計測するための工学技術であるモーションキャプチャ技術の種類、過去の研究で開発した磁気式手指用モーションキャプチャ装置について述べた。さらに、磁気式手指用モーションキャプチャ装置で計測した位置および姿勢の数学的な表現方法について述べた。次章では、磁気式手指用モーションキャプチャ装置を使用して構築したつまみ動作の自動計測システムおよび検査手法について述べる。

<参考文献 第3章>

- [1] K, Mitobe, et al: Development of the learning assist system for dexterous finger movements: ACM,SIGGRAPH ASIA2010, (2010).
- [2] Fletcher Dunn, Ian Parberry 著, 松田晃一 訳：実例で学ぶゲーム 3D 数学, オーム社, pp.97-104, (2009).

第4章 つまみ動作時の自動計測システムおよび検査手法の構築

本章では、示指および母指によるつまみ動作を計測するために構築した検査システムおよび検査手法について述べる。

4-1 システムの構成

4-1-1 つまみ動作計測システムの構成

図4-1に計測システムの構成を示す。磁気式 Hand-MoCap 装置は、デジタイザ (Liberty™16 system, Polhemus) 本体とトランスミッタ (Tx4, Polhemus), 3個のレシーバ (RX1-D 細線化モデル, Polhemus), コンピュータ (XPS14z, Dell / Latitude E6520 Dell) および USB ゲームパッド (JY-P69UW, SANWA SUP-PLY) で構成されている。本計測では、母指の爪上に1個, 示指の爪上に1個のレシーバを強力な両面テープで固定し, ケーブルの振動がレシーバに伝わらないように伸縮するマジックテープのバンドで右手首に2本のケーブルを固定した。さらに, 先端が尖った鉛筆状の木製棒の末端部にレシーバを1個固定し, 先端位置を計測するための質量が約33.3gのStylusを自作した。磁気式デジタイザは, 240Hzでトランスミッタに対するレシーバの相対的な位置情報 (x, y, z) および姿勢情報 ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) の計6自由度の計測が可能であり, 0.004mmの位置分解能, 0.0012degの角度分解能を有している。

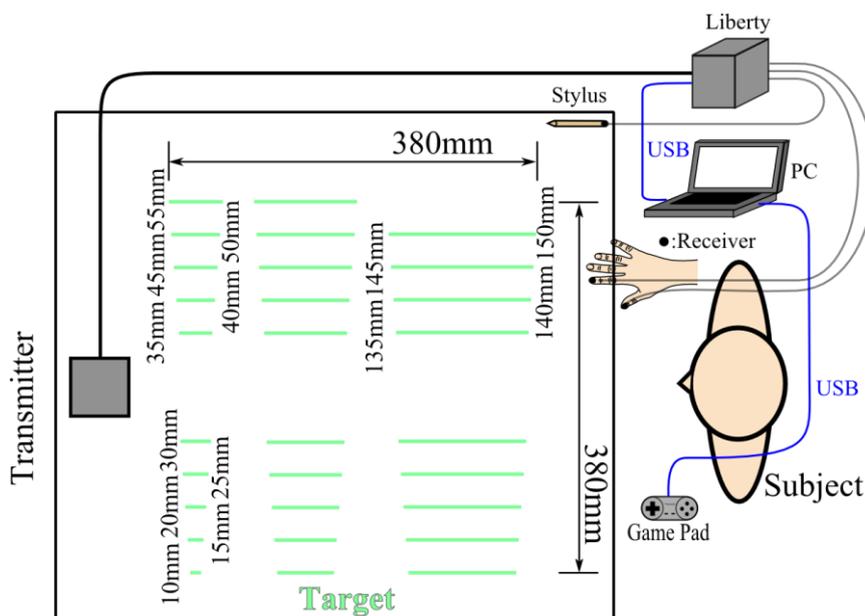
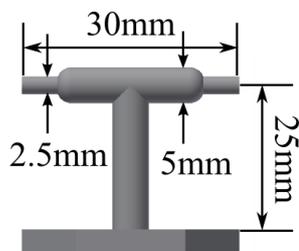


図4-1 計測システムの構成

4-1-2 つまむ対象のターゲット

計測では、任意の長さの円柱の両端を母指と示指でつまむ動作を計測する。図 4-3 に作製したつまむ対象物の外観と計測風景を示す。図 4-3 (a) につまむ対象のターゲット、同図 (b) に計測風景を示す。本計測では、任意の長さの円柱（以後、ターゲットと呼ぶ）を柱で支えており、2本の棒を組み合わせて T 字型とした。長さを 10mm から 150mm まで 5mm 間隔で計 29 パターンのターゲットを 3DCAD ソフト (Inventor2014, Autodesk) で設計し、3D プリンタ (uPrint SE, Stratasys) によって ABS 樹脂により造形した。なお、10mm から 25mm までのターゲットの直径は 2.5mm であり、長さが 30mm 以上のターゲットは強度を確保するために直径を 5.0mm とし、端部のみ直径 2.5mm（長さ 5.0mm）の円柱として製作した。25mm 間隔で配置したターゲット 5 個を 1 ブロックとし、厚さ 10mm のアクリル板 (600X600mm) にブロック間の距離を 100mm として 1 列に 2 ブロックを奥から手前に 3 列、強力な両面テープで固定した。なお、本計測では、全てのターゲット長軸方向を被験者に対して縦向きに揃えて配置した。さらに、ターゲットの両端部側面の中心を Stylus で 1 箇所あたり 3 回計測し、平均値をターゲット両端の位置座標とした。



(a) ターゲット



(b) 計測風景

図 4-3 つまむ対象のターゲットおよび計測風景

4-2 検査手法

4-2-1 ADL（日常生活動作）アンケートの内容

実施した ADL アンケート調査は、高齢被験者を評価するために、ADL 評価法の項目別一覧表^[1]を基に独自に作成した日常生活等に関する調査であり、ADL、基本的属性、視覚属性の 3 系統、総計 44 項目からなっている。実際に使用したアンケートを図 4-4、図 4-5 および図 4-6 に示す。図 4-4 に ADL アンケート、図 4-5 に基本的属性についてのアンケート、図 4-6 に視覚属性についてのアンケートを示す。そのうち、巧緻動作に関連の深い点数化可能な 7 項目を抽出し集計した。なお、アンケートは個人の主観に依存するものであり、必ずしも定量化可能なものではない。以下に抽出した 7 項目を示す。

5. テレビやエアコンのリモコンを使える。
6. ワイヤレスマウスやブラウザのボタンをはめるのは苦手である。
7. ワイヤレスマウスやブラウザのボタンを素早くはめることができる。
8. 靴紐を結ぶのは苦手である。
9. 靴紐を素早く結ぶことができる。
15. 缶飲料のふたを指であける。
16. 袋入りのお菓子を破らないで、引っ張って開封できる。

本アンケートの点数化の方法は、1 項目 1 点とし、類似した質問に対して矛盾しない回答をしていれば 1 点加算した。類似する質問に対する矛盾とは、例として「ボタンをはめるのは苦手である」という回答に対し、「ボタンを素早くはめることができる」と回答した場合である。今回、類似した質問は、問 6 および問 7、問 8 および問 9 である。よって本アンケートの最高得点は 9 点となる。以上の方法でアンケートを集計した結果、被験者 7 人中 9 点が 3 人、6 点が 1 人、5 点が 3 人という結果が得られた。この内、5 点を取った 3 人の被験者は、事前に十分に計測を練習したにも関わらず、ゲームパッドの指定したボタンを押すタイミングをミスしてしまった。このように高齢被験者の中には教示条件を守れなかった被験者が 3 名いた。解析では、ボタンを押すタイミングをミスした試行のデータは異常値として除外した。

ADL アンケート

普段の生活から考えて、以下の行動は楽にできますか。(はい・いいえ)でお答えください。

- 1 支えなしで椅子やベッドから立ち上がることができる (はい・いいえ)
- 2 正座をすることができる (はい・いいえ)
- 3 支えなしで正座から立ち上がることができる (はい・いいえ)
- 4 仰向きに寝転んだ姿勢から、そのまま立ち上がることができる (はい・いいえ)
- 5 テレビやエアコンのリモコン使える (はい・いいえ)
- 6 ワイヤレスやブラウザのボタンをはめるのは苦手である (はい・いいえ)
- 7 ワイヤレスやブラウザのボタンを素早くはめることができる (はい・いいえ)
- 8 靴紐を結ぶのは苦手である (はい・いいえ)
- 9 靴紐を素早く結ぶことができる (はい・いいえ)
- 10 ウィンクできる (はい・いいえ)
- 11 立ったままズボンやスカートがはける (はい・いいえ)
- 12 立ったままで靴下がはける (はい・いいえ)
- 13 立ったままで靴紐が結べる (はい・いいえ)
- 14 素早く着替えることができる (はい・いいえ)
- 15 缶飲料のふたを指であける (はい・いいえ)
- 16 袋入りのお菓子を破らないで、引っぱって開封できる (はい・いいえ)
- 17 敷布団を押入に片付ける (はい・いいえ)
- 18 杖を使って歩いたほうが楽である (はい・いいえ)
- 19 歩くときに杖は必要ない (はい・いいえ)
- 20 小走りで走ることがある (はい・いいえ)
- 21 歩くときに、人波に遅れることはない (はい・いいえ)
- 22 バス停ひとつくらいなら歩いてしまう (はい・いいえ)
- 23 30分程なら休憩をとらずに歩き回る (はい・いいえ)
- 24 2時間程なら休憩をとらずに歩き回る (はい・いいえ)
- 25 手すりがないと階段の昇り降りが不安である (はい・いいえ)
- 26 手すりがあっても使わないで、階段を昇り降りする (はい・いいえ)
- 27 時には走って階段の昇り降りをする (はい・いいえ)
- 28 何もつかまらずに電車で15分ほど立っている (はい・いいえ)
- 29 バスのステップの昇り降りすることは困難ではない (はい・いいえ)
- 30 滑りやすいところで、よく転ぶ (はい・いいえ)
- 31 滑りやすいところで、転びそうになる (はい・いいえ)

図 4-4 ADL アンケート

4-2-2 検査条件

本計測では、母指と示指の 2 本の指によるつまみ動作を想定しており、検査前に、質量が 10g 程度の T 字型のターゲットの両端を母指と示指でつまみ上げ、型にはめ込む巧緻動作を繰り返し 5 分程度練習させた。計測では、T 字型のターゲットを母指と示指でつまんだ際のレシーバの位置および姿勢を計測しており、持ち上げる動作は計測していない。短いターゲットから順番に 1 個ずつつまんでいき、10mm から 150mm の全 29 種類のターゲットをつまむ動作を 1 セッションとし、1 人の被験者に対して 5 セッション計測した。また、全ての検査風景をビデオカメラにより撮影した。また、Stylus を使用し、指にレシーバを装着した状態で母指および示指の指先の周囲 5 点とコア型特異点 1 点を計測した。さらに、被験者全員の母指と示指における末端の幅と厚み、指先からコア型特異点部までの長さを電子ノギス (DN-150, Niigat Seiki) と定規により計測した。

本研究は、秋田大学におけるヒトを対象とした研究に関する倫理規定第 12 条第 1 項に基づき承認をうけ、実施されたものである。なお、本研究内容に関連し、開示すべき利益相反関係にある企業等はない。

4-2-3 教示条件

本計測で被験者に教示した条件を以下に示す。

- ① 立った状態で右手を被験者自身の右大腿部に添えた状態を初期姿勢（この位置を各試行の開始位置とする）とし、つまむターゲットに対して手を真上から下ろすようにしてつまむ。
- ② つまんだ後、被験者自身が「安定してつまむ上げることができる」と思った時点で、左手に持ったゲームパッドの指定したボタンを押す。つまむ際に時間的な制約は課していない。
- ③ ボタンを押したらターゲットから右手を離し、初期姿勢の位置に右手を戻す。①から③の過程を 1 試行と定義する。
- ④ 中沢らの先行研究により、把持する対象物の位置の違いにより、腕の軌道や手首の角度が異なることが報告されている^[2,3]。この知見を考慮し、次の試行に移行する際には、必ずつまむターゲットが体の正面に来るように、体の位置を左右に移動させ調整する。

以上の条件が守られていることは、撮影したビデオ映像を基に確認した。

4-2-4 被験者

実験に協力して頂いた被験者は、若年者が 21 歳から 32 歳までの男子学生 9 名，女子学生 1 名の計 10 名，高齢者が 62 歳から 76 歳までの男性 2 名，女性 5 名の計 7 名である．なお，全ての被験者の利き手は右手であった．

4-3 第 4 章まとめ

本章では，高分解能な磁気式 Hand-MoCap 装置を使用し構築した，つまみ動作を自動計測するシステムについて述べた．また，つまむターゲットを 10mm から 150mm までの長さの円柱とし，3DCAD ソフトで設計し，3D プリンタにより造形した．このターゲットを配置し，構築したつまみ動作の計測系について述べた．さらに，設定した心理物理実験における教示条件について述べた．次章では，解析アルゴリズムについて述べる．

<参考文献 第4章>

- [1] Donaldson SW, Wagner CC and Gresham GG: A unified ADL evaluation from.: Arch Phys Med Rehabil, 54 pp.175-180, (1973).
- [2] 中沢信明, 吉原由佳, 藤ノ木あゆみ, 松井利一, 伊藤勲: 円柱物体に対するつまみ動作: 人間工学, Vol.41, No.5, pp.322-324, (2005).
- [3] 中沢信明, 吉原由佳, 藤ノ木あゆみ, 松井利一, 伊藤勲: 把持動作における指先接触位置の実験的考察: 人間工学, Vol.41, No.Supplement, pp.138-139, (2005).

第5章 解析アルゴリズムの考案

本章では、本研究で構築した検査システムにより計測したレシーバの位置・姿勢データの扱い方（キャリブレーション）について述べる。さらに、長さの異なるターゲットをつまんだ瞬間における「各指の姿勢」、「母指に対する示指の位置関係」および「各指の指腹部におけるエンドポイント」の3つのパラメータに着目し、レシーバの位置・姿勢データから各パラメータを算出する方法について述べる。

5-1 レシーバのキャリブレーション

爪に固定しレシーバは指に対して座標系が傾いた状態で装着されている。この状態でレシーバの位置および姿勢データを解析すると、本来みたい指の姿勢や位置とは異なる結果となる。そのため、レシーバの座標系を指の座標系に一致させるキャリブレーションの作業が必要となる。以下では、母指を例にキャリブレーションの過程を説明する。図5-1にキャリブレーションの方法を示す。つまみ動作の計測前にキャリブレーション用のデータを収集しており、トランスミッタから指先までの距離が約250mmの位置で、トランスミッタのX軸と平行になる様に卓上に指を置いた際のレシーバの位置姿勢（キャリブレーションデータ）を計測した。キャリブレーションデータから回転行列を作成し、計測時のレシーバの姿勢データに逆行行列を乗算することで爪上に装着したレシーバのズレを補正した任意の瞬間における回転行列 \mathbf{R}_i （示指）および \mathbf{R}_t （母指）を算出する。

$$\mathbf{R}_i^n = \mathbf{R}_{tr}^n \mathbf{R}_{i_cal}^{-1} \quad (5-1)$$

$$\mathbf{R}_t^n = \mathbf{R}_{tr}^n \mathbf{R}_{t_cal}^{-1} \quad (5-2)$$

ここで、 \mathbf{R}_{tr} は示指のレシーバの姿勢データから作成した回転行列、 \mathbf{R}_{tr} は母指のレシーバの姿勢データから作成した回転行列、 \mathbf{R}_{i_cal} は示指のキャリブレーションデータから作成した回転行列、 \mathbf{R}_{t_cal} は母指のキャリブレーションデータから作成した回転行列を示す。

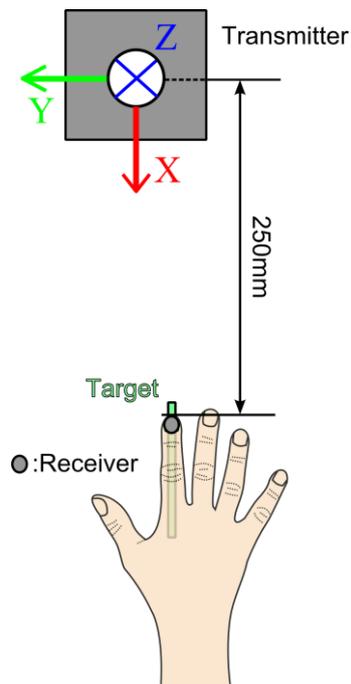


図 5-1 キャリブレーション方法

5-2 座標系の定義

図 5-2 に指とターゲットの座標系を示す。図 5-2 (a) に指に設定したローカル座標系を示し、同図 (b) に各指に設定したベクトルを示す。本研究では、指腹部におけるエンドポイントを明らかにする。そのため、各指の指腹部にローカル座標系の原点を設定する必要があると考えた。ローカル座標系の原点を設定するにあたり、指腹部における指紋に着目した。指紋は認証システムのアルゴリズムなどに用いられており、定量的な評価指標のひとつである。現在研究されている指紋分類アルゴリズムのほとんどは、指紋の特異点の位置関係を用いている^[1]。指紋の特異点とは指紋の隆線が分岐したり、途切れたりしたりする点を示し、非双対な特異点の中で端点のものをコア（渦状）型特異点、分岐点のものをデルタ（三角州）型特異点と定義されている。また、指紋は渦状紋、蹄状紋、弓状紋の 3 種類に大別され、日本人では渦状紋が 50%、蹄状紋が 40%、弓状紋が 10% の割合となっている。図 5-3 に指紋の種類を示す。渦状紋では 2 つのコアと 2 つのデルタ、蹄状紋では 1 つのコアと 1 つのデルタを有し、弓状紋ではコアやデルタを持たない^[2]。本実験では、分岐するデルタ型特異点に比べ、端点であるコア型特異点の方が分類しやすいと考え、ローカル座標系の原点をコア型特異点とした。ここで、2 つのコア型特異点を有する渦状紋の場合は、2 つのコアを直

線で結びその中心をローカル座標系の原点とし、コアを持たない弓状紋の場合は、弓状線が最も鋭いところをローカル座標系の原点とした。図 5-2 (a) のローカル座標系は、Stylus で計測した指腹部におけるコア型特異点が原点となるように座標変換した。図 5-2 (b) のベクトルは、各指に装着したレシーバの -X 軸方向に単位ベクトルを設定した。母指に設定したベクトル V_i とターゲットのなす角度を θ_i とし、示指に設定したベクトル V_t とターゲットのなす角度を θ_t とした。以降、 $\theta_i < 90^\circ$ かつ $\theta_t < 90^\circ$ の場合「指が閉じている状態」、 $\theta_i + \theta_t = 180^\circ$ の場合「示指と母指が平行な状態」、 $\theta_i > 90^\circ$ かつ $\theta_t > 90^\circ$ の場合「指が開いている状態」と定義する。母指および示指のコア型特異点の位置 P_i および P_t は、トランスミッタから指先までの距離が約 250mm の位置に、掌を上にして卓上に手をおいた状態で、Stylus により計測した。なお、ローカル座標系に変換する際に必要となる同じ瞬間の母指および示指の爪上に固定されたレシーバの位置 r_i および r_t も同時に計測した。

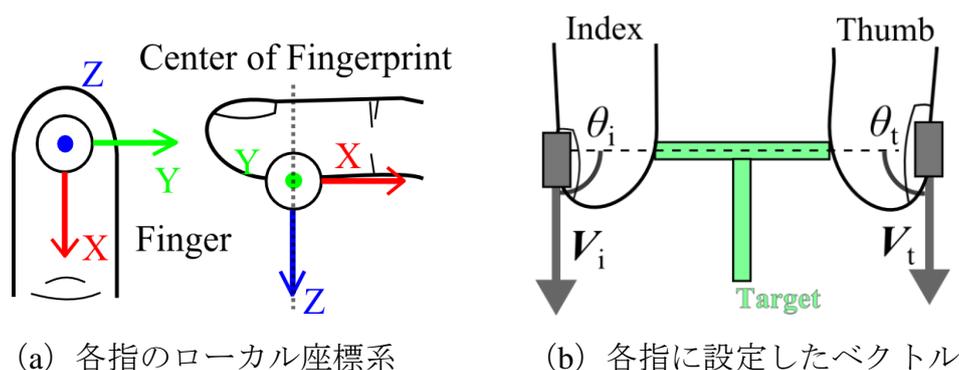


図 5-2 指の座標系とベクトル

弓状紋	蹄状紋	渦状紋
		
日本人の約10%	日本人の約40%	日本人の約50%

図 5-3 日本人の指紋の種類^[3]

5-3 つまみ動作の解析アルゴリズム

5-3-1 ターゲットに対する示指および母指の姿勢の算出方法

図 5-4 に母指および示指に沿うように設定したベクトルとターゲットのなす角度（ターゲットをつまんだ瞬間の示指および母指の姿勢）の算出方法を示す。以下では母指とターゲットの成す角度を例に説明する。まず、 n 番目のターゲットをつまんだ瞬間のベクトル a_t を次式によりキャリブレーションする。

$$a_t^n = R_t^n a_t \quad (5-3)$$

ここで、 R_t^n はキャリブレーション後の回転行列である。

Stylus で計測したターゲットの両端部の位置 P_1 および P_2 からベクトル L を算出する。さらに a と L の内積をとることによりターゲットとなす角度 θ_{at} を算出する。

$$L = P_2 - P_1 \quad (5-4)$$

$$\theta_{at} = a_t^n \cdot L \quad (5-5)$$

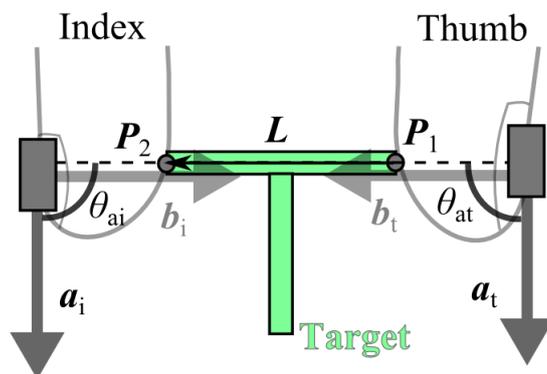


図 5-4 各指に設定したベクトルとターゲットのなす角度の算出方法

5-3-2 母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置の算出方法

図 5-5 につまみ動作時の「母指のコア型特異点を原点とした示指のコア型特異点」の位置の算出方法を示す。ここでは、レシーバで計測した位置および姿勢データをトランスミッタを原点としたワールド座標系から、Stylus で計測した指腹部のコア型特異点位置 P_t および P_i を原点とするローカル座標系へ変換し、解析する。まず、 r_t を原点とした P_t の位置 P_{tl} を次式により算出する。

$$P_{tl} = R_t^{-1}(P_t - r_t) \quad (5-5)$$

さらに、 n 番目のターゲットをつまんだ瞬間の母指におけるコア型特異点の位置 P_{tg}^n を次式により算出する。

$$P_{tg}^n = R_t^n P_{tl} + r_t^n \quad (5-6)$$

示指についても同様に処理し、 n 番目のターゲットをつまんだ瞬間の示指におけるコア型特異点の位置 P_{ig}^n を算出する。最後に P_{tg}^n を原点とした P_{ig}^n の位置 d^n を次式により算出する。

$$d^n = (R_t^n)^{-1}(P_{ig}^n - P_{tg}^n) \quad (5-7)$$

ここで、 R_t^n はキャリブレーション後の回転行列を示す。

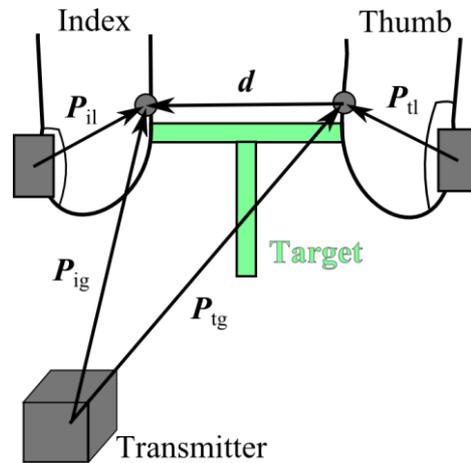


図 5-5 母指のコア型特異点を原点とした示指のコア型特異点の算出方法

5-3-3 示指および母指の指腹部におけるターゲットとの接触位置（エンドポイント）の算出方法

図 5-6 に母指の指腹部におけるターゲットとの接触位置 E_t の算出方法を示す。ここでは、各指の指腹部においてコア型特異点を原点としたエンドポイントの位置を算出する。ここでは、母指の指腹部におけるエンドポイントの算出方法を例に説明する。まず、レーザーのローカル座標系に対するコア型特異点の位置 P_{t1l} およびエンドポイントの位置 P_{t2l} を次式により算出する。

$$P_{t1l} = R_t^{-1}(P_{tl} - r_t) \quad (5-8)$$

$$P_{t2l} = R_t^{-1}(P_{t2l} - r_t) \quad (5-9)$$

次に P_{t1l} および P_{t2l} をトランスミッタのグローバル座標系に対するコア型特異点位置 P_{t1g} およびエンドポイントの位置 P_{t2g} を次式により算出する。

$$P_{t1g}^n = R_t^n P_{t1l} + r_t^n \quad (5-10)$$

$$P_{t2g}^n = R_t^n P_{t2l} + r_t^n \quad (5-11)$$

最後に、コア型特異点を原点とした指腹部のエンドポイント E_t^n を次式により算出する.

$$E_t^n = (R_t^n)^{-1}(P_{t1g}^n + P_{t2g}^n) \quad (5-12)$$

ここで、 R_t^n はキャリブレーション後の回転行列、 P_{t1} は Stylus で計測したコア型特異点位置、 P_1 は Stylus で計測したターゲットの端部の位置を示す.

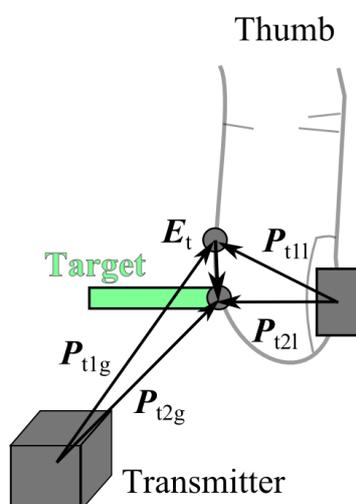


図 5-6 各指の指腹部とターゲットとの接触位置の算出方法

5-4 第 5 章のまとめ

本章では、本研究で着目した 3 つのパラメータである、長さの異なるターゲットに対するつまみ動作時の「各指の姿勢」、「母指に対する示指の位置関係」および「各指の指腹部におけるエンドポイント」の算出方法について述べた。示指および母指にベクトルを設定し、ターゲットとのなす角度を算出することでターゲットに対する各指の姿勢を求めることができる。また、母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点位置を算出することで、ターゲットをつまんだ瞬間の母指と示指の位置関係を求めることができる。さらに、各指の指腹部におけるコア型特異点をローカル座標系の原点としたターゲットの端部の位置関係を算出することにより、各指の指腹部におけるエンドポイントを求めることができる。次章では、本章で考案した解析アルゴリズムを使用し、若年者および高齢者のつまみ動作を解析することで違いを顕在化し、新たな評価指標を提案する。

<参考文献 第5章>

- [1] 伊藤康一, 森田歩, 早坂昭裕, 青木孝文: 特異点に基づくロバストな指紋分類アルゴリズム: 第17回回路とシステム軽井沢ワークショップ論文集, pp.165-170, (2004).
- [2] 亀井俊男, 新畑弘之, 内田薫, 佐藤敦, 溝口正典, 天満勉: 指紋の自動紋様分類: 電子情報通信学会,95(470), pp.17-24, (1996).
- [3] 法科学鑑定研究所, <http://u-note.me/note/47488449>

第6章 若年者および高齢者におけるつまみ動作

6-1 若年者

6-1-1 母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置

長さの異なるターゲットをつまむ際に、母指と示指の開き方がどのように変わるかを調べるため、母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした、示指のコア型特異点位置を算出した。図6-1に、被験者Eの母指のコア型特異点をローカル座標の原点としたときのサイズの異なるターゲットをつまむ際の示指のコア型特異点位置を示す。各プロット点は被験者Eの5セッション分の平均値である。図6-1(a)に鳥瞰図、同図(b)にX-Z平面、同図(c)にY-Z平面、同図(d)にY-X平面でプロットしたコア型特異点位置を示す。凡例はターゲットの長さを示しており、緑色のプロット点は短いターゲットを示し、長くなるにしたがって青色になるようにグラデーションで表現している。同様に図6-2に被験者Aの結果を示す。図6-1および図6-2に共通する傾向として、全被験者に共通した特徴であるが、ターゲットの長さに依存して示指が弧を描くように開いていくことを確認した。また、全被験者のY成分における変化量の最大値は約120mm程度であり、X、Z成分と比べて変化量が最も大きいことがわかった。さらに、X成分またはY成分の変化量の最大値に個人差が少ないのに対し、Z成分には個人差が現れた。図6-1および図6-2より、被験者AはZ成分の変化量が20mm程度と少なく、被験者BはZ成分の変化量が80mm程度と被験者Aに比べ大きいことがわかる。10人の被験者において、7人が被験者Eの様にZ成分の変化量が大きく、平均値が42.2mm (S.D.=8.40) であるのに対し、残りの3人が被験者Aのように変化量が小さく、平均値で18.0mm (S.D.=2.75) であることがわかった。

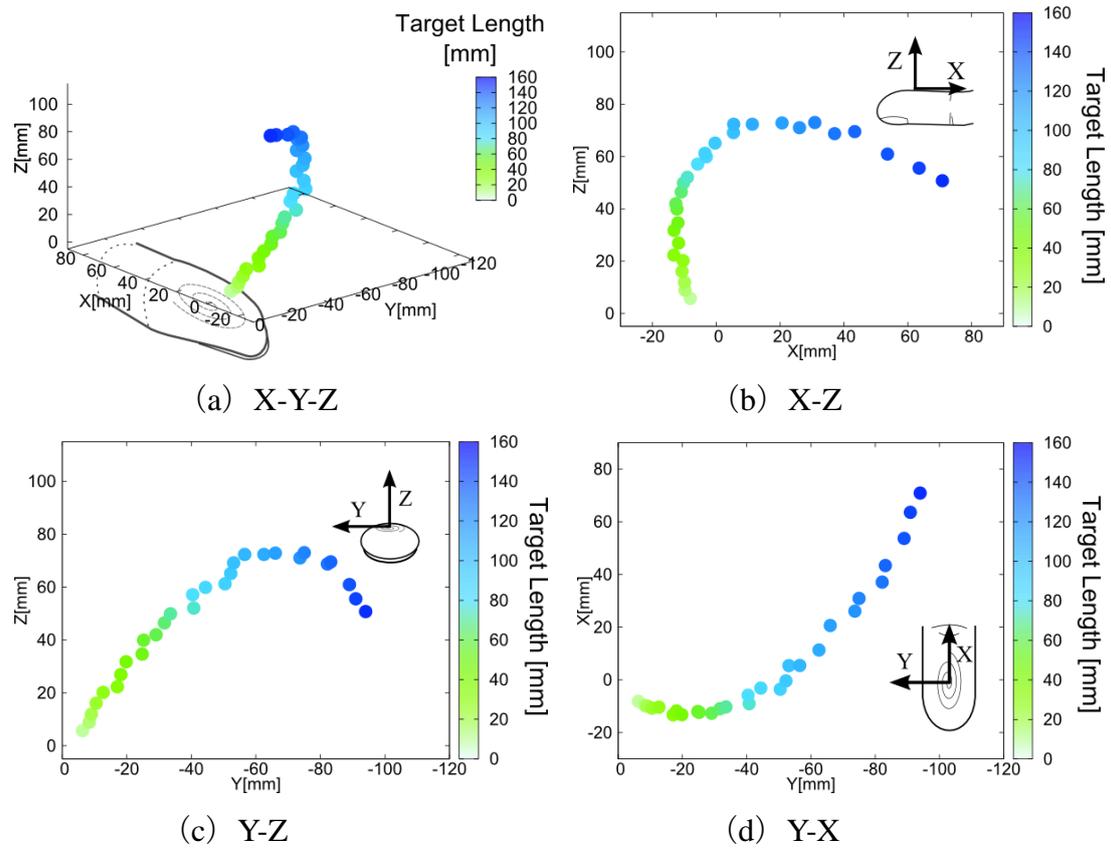


図 6-1 母指のコア型特異点からみた示指のコア型特異点位置 (被験者 E)

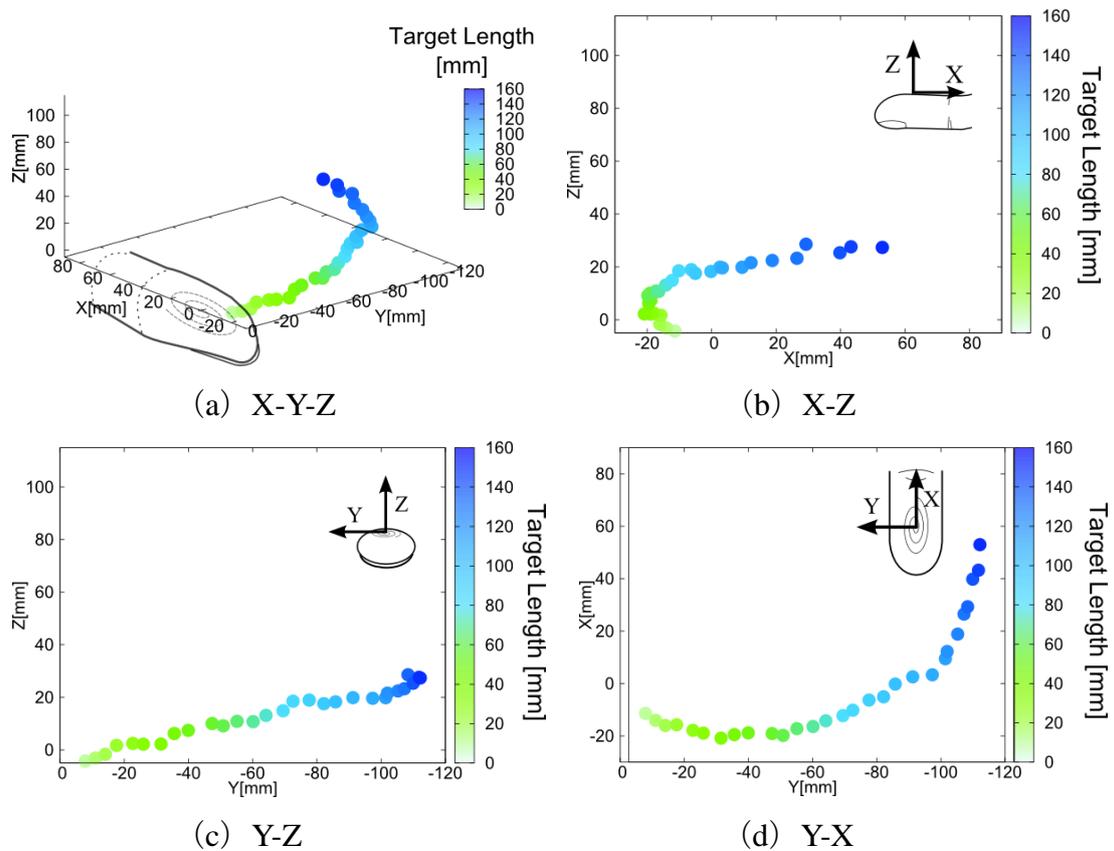


図 6-2 母指のコア型特異点からみた示指のコア型特異点位置 (被験者 A)

6-1-2 ターゲットに対する示指および母指の姿勢

長さの異なるターゲットに対する母指と示指の姿勢を解析することにより、各ターゲットをつまんだ瞬間の母指と示指の使い方の特徴を調べた。図6-3に示指および母指に設定したベクトルと各ターゲットのなす角度の関係を示す。縦軸に各指に設定したベクトルとターゲットのなす角度、横軸にターゲットの長さを示す。青丸が示指、赤丸が母指の結果を示す。本結果は被験者10人の平均値である。図6-3より、示指および母指がターゲットの長さに比例して、指とターゲットのなす角度が増加することがわかる。ここで、示指および母指と各ターゲットのなす角度の関係に近似直線を適応すると母指では決定係数 $R^2 = 0.99$ 、示指では $R^2 = 0.96$ となり、線形的な変化をすることがわかった。また、全被験者で母指とターゲットの角度より示指とターゲットの角度が大きいことがわかる。示指は最初の10mm、15mmといった短いターゲットに対して指を閉じた状態にある被験者がほとんどである。それに対して母指は、80mmまで指を閉じた状態にあることがわかる。ここで、長さが85mm以上のターゲットにおいて母指と示指が両方とも開いた状態になることがわかる。「つまむ」動作とは指先で挟む動作^[1] のことをいい、示指および母指が両方とも開いた状態になるとつまむターゲットに対して指先が触れるという状況を取りえない。また、池田らの「つまみやすさの生体力学的解析」では、太さが20mm で長さが20mm から80mm のターゲットをつまむ動作を計測している。その中で、アンケートによりつまみやすさの評価をしており、60mm のターゲットが最もつまみやすいと報告している^[2]。これらの「つまむ」動作の特徴と、過去のつまみやすさの研究結果から、以下の解析では80mm 以下のターゲットをつまんだ際のデータに着目する。

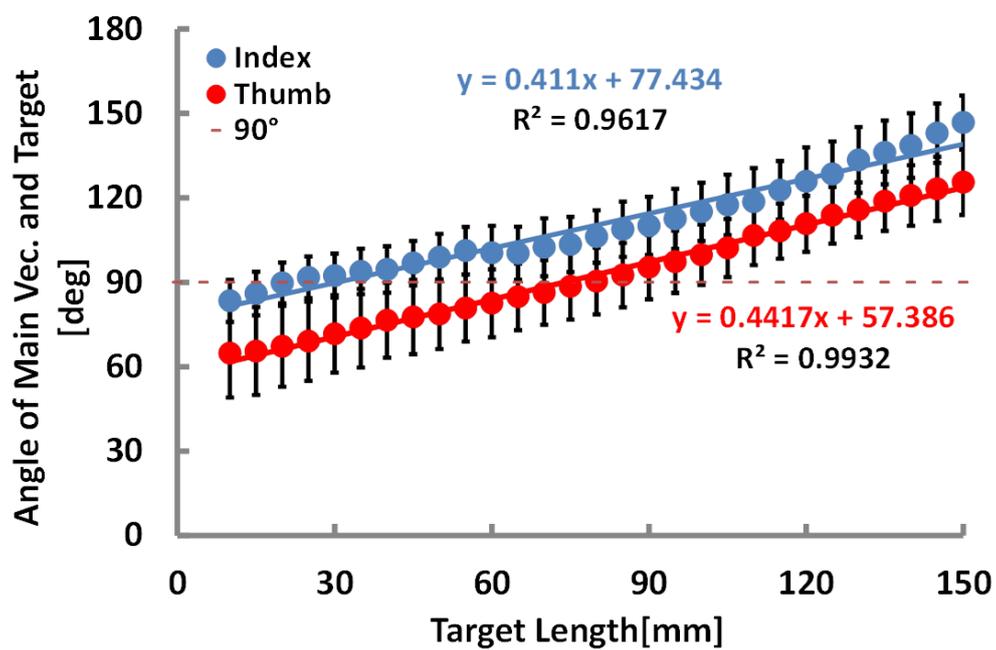


図 6-3 示指および母指と各ターゲットのなす角度

6-1-3 示指および母指の指腹部におけるエンドポイント

長さの異なるターゲットに対する各指の姿勢は明らかとなったが、つまんだ瞬間におけるターゲットと指腹部の接触位置（エンドポイント）を明らかにするため、各指の指腹部と各ターゲットとの接触位置について解析した。図6-4に母指と示指における指腹部とターゲットとの接触位置を示す。各プロット点は被験者10人分の平均値である。図6-4(a)に示指における指腹部とターゲットとの接触位置、同図(b)に母指の指腹部とターゲットとの接触位置を示す。凡例はターゲットの長さを示しており、緑色のプロット点は短いターゲットを示し、長くなるにしたがって青色になるようにグラデーションで表現している。図6-4(a)および同図(b)の縦軸はY成分、横軸はX成分を示す。図6-4(a)および同図(b)より、母指ではコア型特異点から約7mm程度、示指では約4mm程度指先寄りに分布しており、どちらの指も左右のバラツキが小さいことがわかる。また、どちらの指もX成分のバラツキが大きく、Y成分のバラツキは小さいことがわかる。f検定の結果、示指においては $p < 0.05$ となり、X成分とY成分のバラツキに有意差があり、母指においては $p > 0.05$ となり有意差がみられなかった。さらに、図6-4の結果から、長さの異なるターゲットをつまむ際に、指の姿勢に個人差が生じるのに対し、指腹部におけるターゲットとの接触位置はコア型特異点からの距離が母指では約7mm、示指では約4mm指先寄り、直径が約6mmの円に収まる範囲で分布することが明らかとなった。

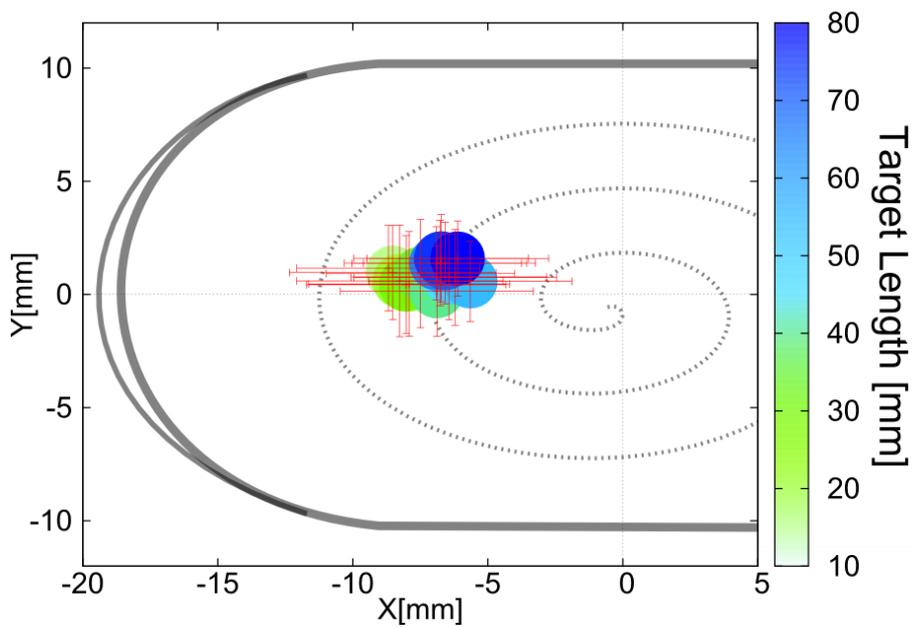
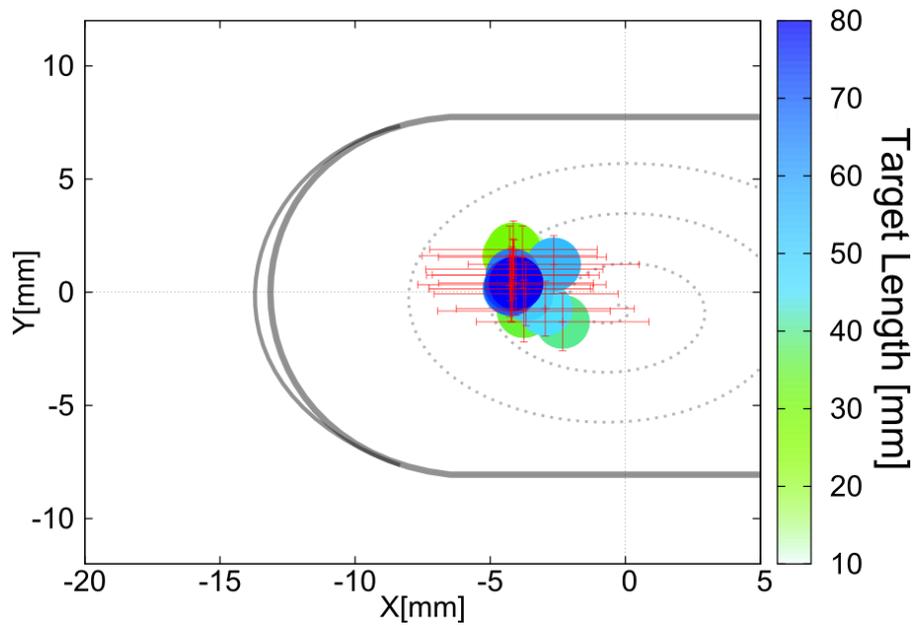
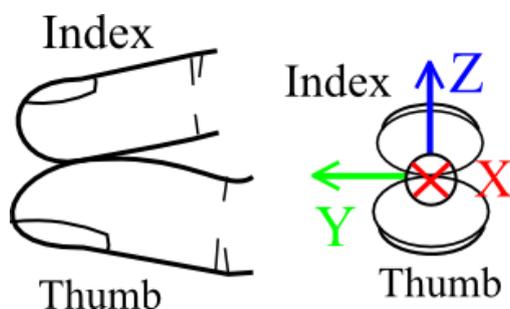


図 6-4 各指の指腹部におけるエンドポイント

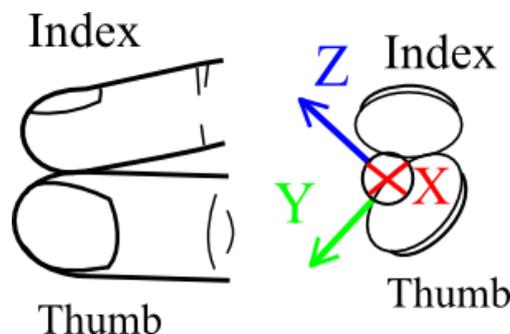
6-1-4 考察

6-1-4-1 母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置について

母指のコア型特異点をローカル座標系の原点としたときの示指のコア型特異点位置におけるZ成分の値の大きさに個人差があることが明らかとなった。本結果は、母指の対立運動に起因すると考えた。母指の対立運動とは、母指の掌側面が他の手指の掌側面と向かい合うことである^[3]。Z成分の値の大きさから示指に対する母指の対立姿勢を2パターンに分類した。図6-5に分類した母指の対立姿勢を示す。図6-5(a)に示指と母指の掌側面が向かい合うように対立している状態（以後、母指掌側示指対立）、同図(b)に示指の指腹部に対し母指が側面で対立している状態（以後、母指側面示指対立）を示す。母指掌側示指対立の場合、掌側面が向かい合うため、母指と示指を広げていくにしたがってZ成分の値の変化は大きくなる。一方、母指側面示指対立の場合、側面で対立しているため、母指と示指を広げてもZ成分の値の変化は小さくなる。このことから、10名の若年者の内7名が母指掌側示指対立に分類でき、残りの3名が母指側面示指対立に分類できると考えた。



(a) 母指掌側示指対立



(b) 母指側面示指対立

図 6-5 母指の対立姿勢

6-1-4-2 ターゲットに対する示指および母指の姿勢について

各指に定義した有顔ベクトルの主軸と各ターゲットとのなす角度の関係から、示指においては短いターゲット（10mm および15mm）を除いた長いターゲット（20mm から80mm）において「指が開いた状態」であるのに対し、母指は80mmまで「指が閉じた状態」となる被験者がほとんどである。このことから、示指と母指を使ったつまみ動作の場合、母指は閉じ、示指を開いた姿勢でターゲットをつまむ傾向が高いことがわかった。また、示指および母指と各ターゲットのなす角度の関係から求めた近似直線の傾きにおいて、近似直線の傾きが小さい場合、ターゲットの長さが変わっても指の姿勢の変化が小さいことを意味する。ここで、特徴的な指使いであった被験者HからJの3名について考察する。被験者Hに関しては、弦楽器（ベース）の演奏経験が豊富であり、ベースを演奏する際のフィンガーピッキングではあまり指のDIP関節を動かさず、MP関節を大きく動かす動作が主である。そのため、指先を使った動作の際に主にMP関節を可動させるような制御がクセになっている可能性があると考えた。一方、被験者IおよびJに関しては、日常生活で特別な作業をしているわけではなく、現段階では原因を明らかにすることは困難である。このような特徴的な指の使い方については、対象物を認識し、それに合った手指形状を選択するアフォーダンスについて解析する必要があると考えている。

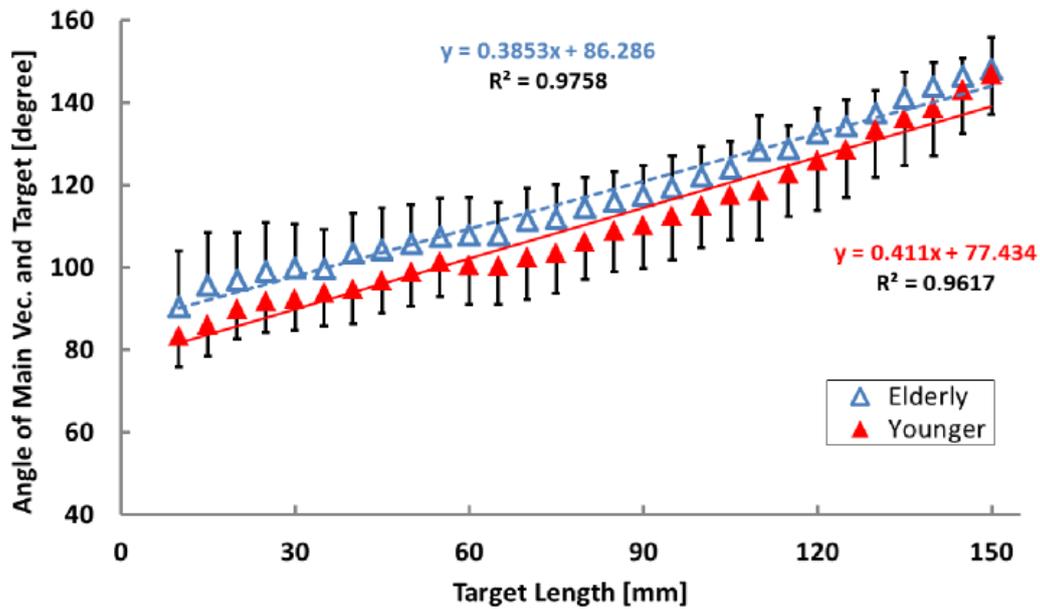
6-1-4-3 示指および母指の指腹部におけるエンドポイントについて

示指および母指のエンドポイントのX成分とY成分のバラツキについてt検定で評価した結果、示指では有意差があり、母指では有意差がないことが明らかとなった。示指で有意差がある原因として、ヒトの指先の形状、つまり、幅（Y成分）と長さ（X成分）の違いにより、ターゲットとの接触可能な範囲がY成分に比べX成分が大きくなることが反映していると考えた。一方、母指では有意差がない原因として、母指は示指に比べ指の幅が広く、接触面積も広くなる。よって、母指の指腹部の表面積に依存して、バラツキに有意差が生じなかったと考えた。さらに、長さの異なるターゲットをつまむ際に、つまんだ瞬間の指の姿勢に個人差が大きいのに対し、各指の指腹部におけるターゲットとのエンドポイントは常に指の特定の位置に分布していた。図6-4の結果から、ヒトは示指と母指でのつまみ動作の際、コア型特異点より指先寄りの位置で左右へのバラツキが小さく、直径が約6mmの円に収まる範囲で触れるように制御していることがわかった。これらの知見は、ロボットハンドでヒトの巧緻動作を模倣する際にロボットハンドの指先におけるエンドポイントと姿勢の設定に役立てることができるのではないかと期待している。

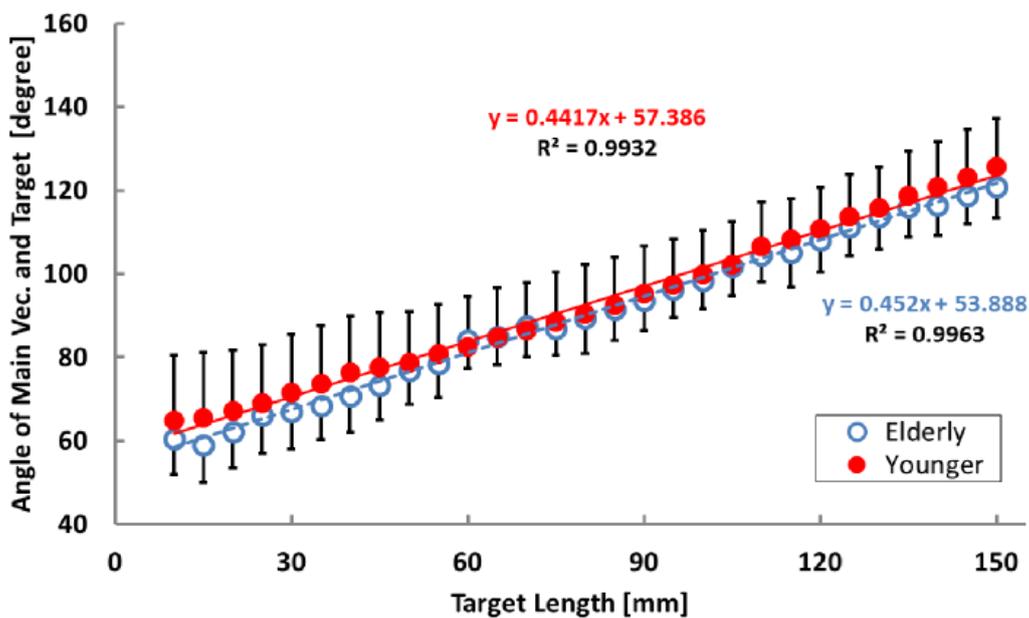
6-2 若年者と高齢者

6-2-1 ターゲットに対する示指および母指の姿勢の比較

各ターゲットをつまんだ瞬間の示指および母指の使い方について高齢者の特徴を調べるために、長さの異なるターゲットに対する示指および母指の姿勢を解析した。図6-6に長さの異なるターゲットに対する示指のベクトルおよび母指のベクトルのなす角度を示す。図6-6(a)が示指、同図(b)に母指の結果を示す。図6-6の縦軸はターゲットに対する示指または母指のなす角度、横軸はターゲット長さを示す。塗り潰しのプロット点は若年者10人の平均値、白抜きのプロット点は高齢者7人の平均値を示す。三角のプロット点が示指、丸のプロット点が母指を示す。図6-6より、母指も示指もターゲットの長さに比例してターゲットとのなす角度が増加することがわかる。母指と示指のベクトルと各ターゲットのなす角度の関係に近似直線を適応すると、若年者の示指では $R^2=0.96$ 、母指では $R^2=0.99$ 、高齢者の示指では $R^2=0.97$ 、母指では $R^2=0.99$ となり、線形的に変化することがわかった。また、若年者と高齢者で共通して、ターゲットに対して母指がなす角度より示指がなす角度の方が大きいことがわかる。ターゲットに対する示指の姿勢は短いターゲットを除いて、指を開いた状態にある。それに対して母指は、80mmまで指を閉じた状態にあることがわかる。さらに、ターゲットの長さ別に若年者と高齢者の各指に対してt検定を実施した結果、示指および母指ともに $p > 0.05$ となり、若年者と高齢者で有意差はみられなかった。したがって、若年者および高齢者における示指と母指を使用したつまみ動作において、ターゲットに対する各指の姿勢に、違いはないことを示している。



(a) 示指

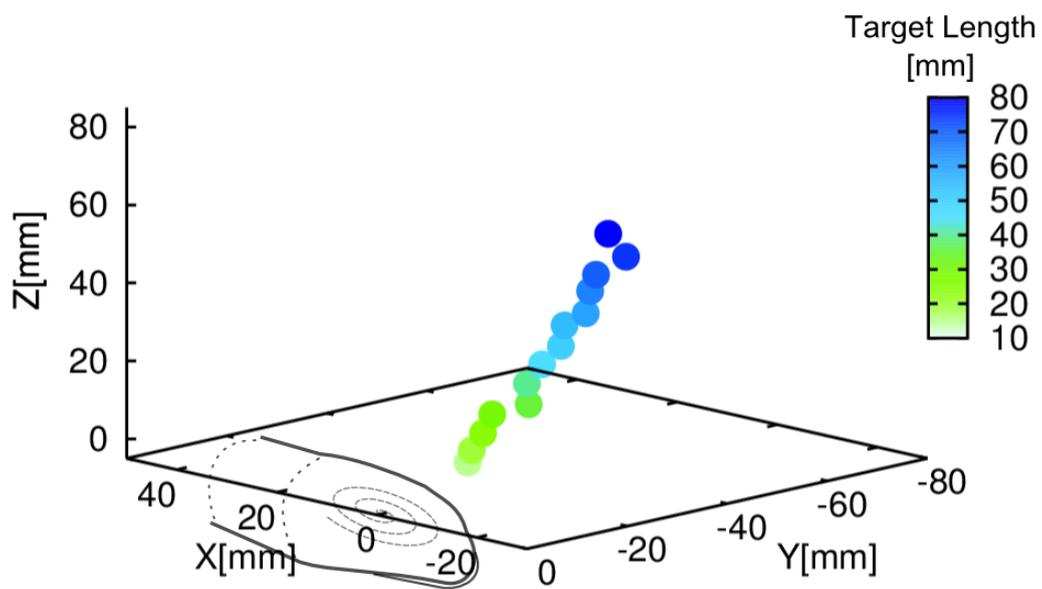


(b) 母指

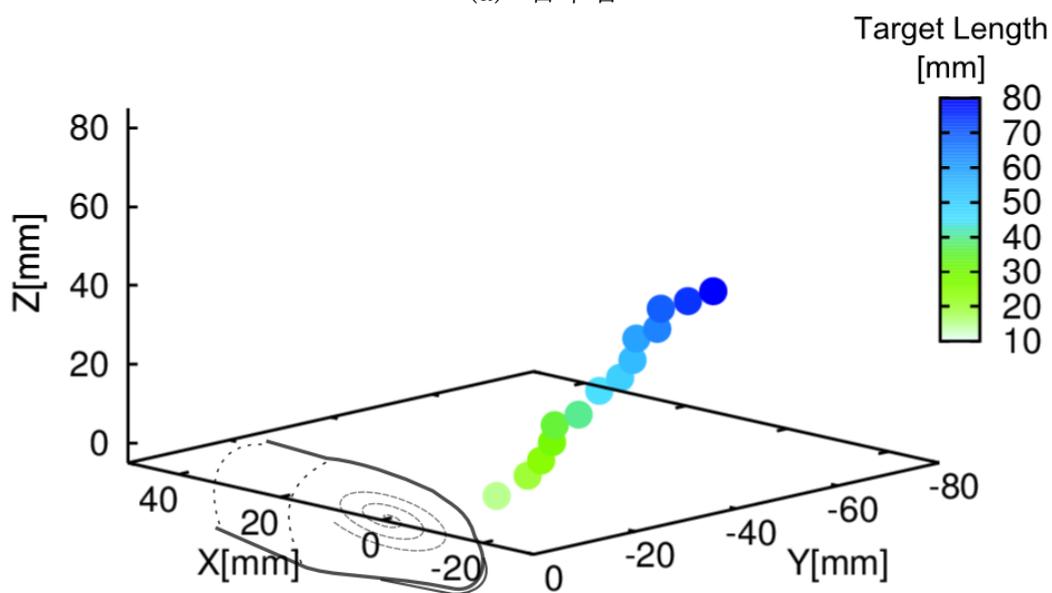
図 6-6 各ターゲットに対する示指および母指のなす角度

6-2-2 母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置の比較

長さの異なるターゲットをつまむ際に母指と示指の開き方がどのように変わるかを調べるため、母指のコア型特異点を原点としたローカル座標で表現した示指のコア型特異点位置を算出した。図6-7に母指のローカル座標系からみた示指のコア型特異点位置を示す。図6-7(a)に若年者、同図(b)に高齢者の一例を示す。図6-7(a) および同図(b) は鳥瞰図で示している。各プロット点は任意の長さのターゲットに対する5セッション分の平均位置である。凡例はターゲットの長さを示しており、短いターゲットを薄い色で示し、長くなるにしたがい濃い色になるようグラデーションで表現している。図6-7(a)において、10mmから80mmまでの長さのターゲットについて、X成分の変化が約10mm、Y成分の変化が約40mm、Z成分の変化は約60mmであった。よって、母指の指腹部に対して+Z方向への移動量が最も大きいことがわかる。一方、高齢者の示指は図6-7(b)より、X成分の変化が約10mm、Y成分の変化が約50mm、Z成分の変化は約40mmであった。よって、高齢者の場合、Y成分の移動量が最も大きいことがわかった。図6-7(a) および同図(b) より、高齢者と若年者の結果を比較すると、X成分の移動量には違いがないのに対し、Y成分とZ成分に違いがある。その中でも、Z成分が最も若年者と高齢者で差が大きかったため、以下ではZ成分を比較する。図6-8に若年者と高齢者における母指のコア型特異点を原点としたローカル座標で表現した示指のコア型特異点位置のZ成分を示す。図6-8の縦軸は示指位置のZ成分、横軸はターゲットの長さを示す。各プロット点は高齢者7人の平均値、若年者10人の平均値を示す。各プロット点は、塗り潰しが若年者、白抜きが高齢者を示す。図6-8より、若年者および高齢者のZ成分の値はターゲットが長くなるにしたがって増加傾向にあることがわかる。一方、高齢者のZ成分の値は若年者に比べ、小さいことがわかる。若年者と高齢者でt検定をかけると15mmから30mmおよび55mmのターゲットで有意差があることがわかった($p < 0.05$)。



(a) 若年者



(b) 高齢者

図 6-7 母指のローカル座標系からみた示指の位置の変化

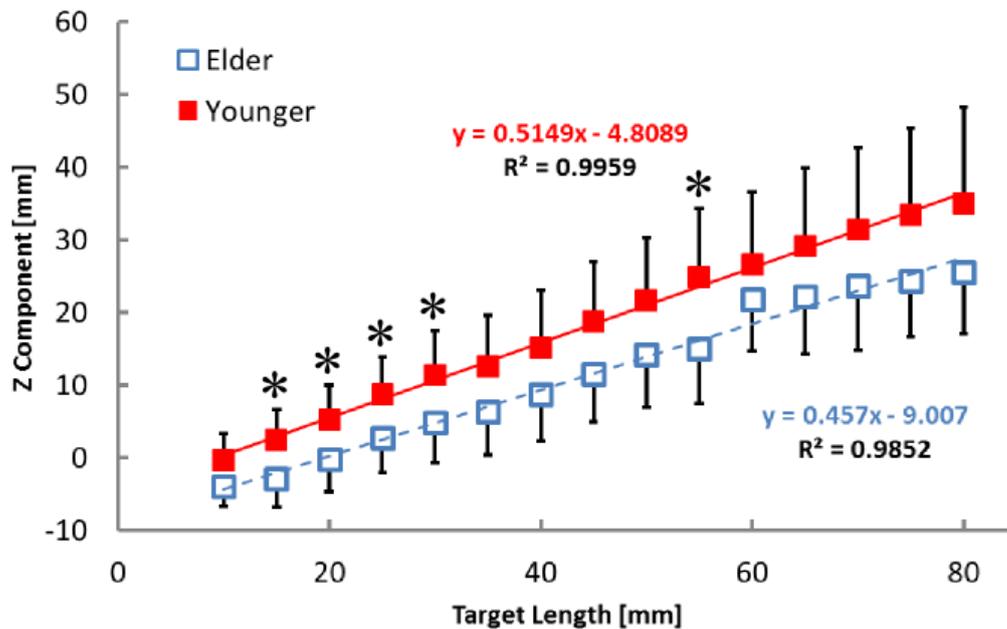


図 6-8 若年者と高齢者における Z 成分の比較

6-2-3 示指および母指の指腹部におけるエンドポイントの比較

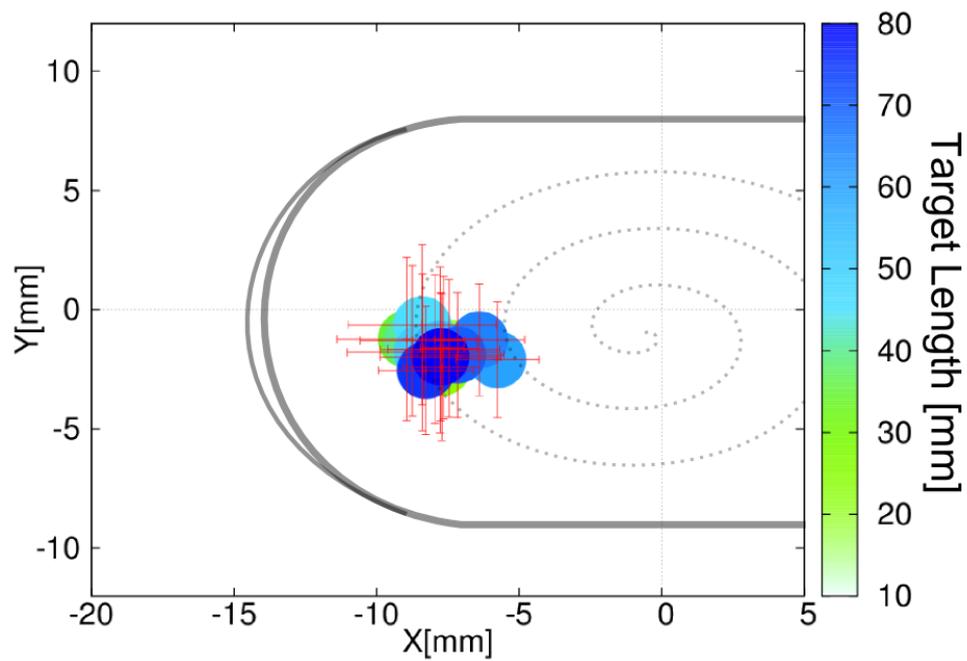
次に若年者と高齢者におけるターゲットに対する指腹部の接触位置（エンドポイント）を明らかにするため、各ターゲットに対する各指の指腹部におけるエンドポイントについて解析した。若年者の指腹部におけるエンドポイントの特徴に関しては6-1-3項で述べた通りである。

図6-9に高齢者の指腹部におけるエンドポイントを示す。図6-9(a)に示指における指腹部のエンドポイント、図6-9(b)に母指における指腹部のエンドポイントを示す。図6-9(a)および同図(b)の縦軸はY成分、横軸はX成分を示す。各プロット点は被験者7人の平均値である。凡例はターゲットの長さを示しており、短いターゲットを薄い色で示し、長くなるにしたがい濃い色になるようグラデーションで表現している。図6-9(a)および同図(b)より、高齢者におけるエンドポイントは、示指ではコア型特異点から約8mm程度、母指では約11mm程度指先寄りに分布しており、Y成分で見ると示指では指腹部の中心からみて-方向、母指では+方向にズレていることがわかる。また、指腹部におけるエンドポイントは直径が約6mmの円に収まる範囲で分布することが明らかとなった。さらに、示指および母指ともに、X成分のバラツキに対しY成分のバラツキが大きく見えるが、f検定の結果 $p > 0.05$ となり、X成分とY成分のバラツキに有意差はなかった。

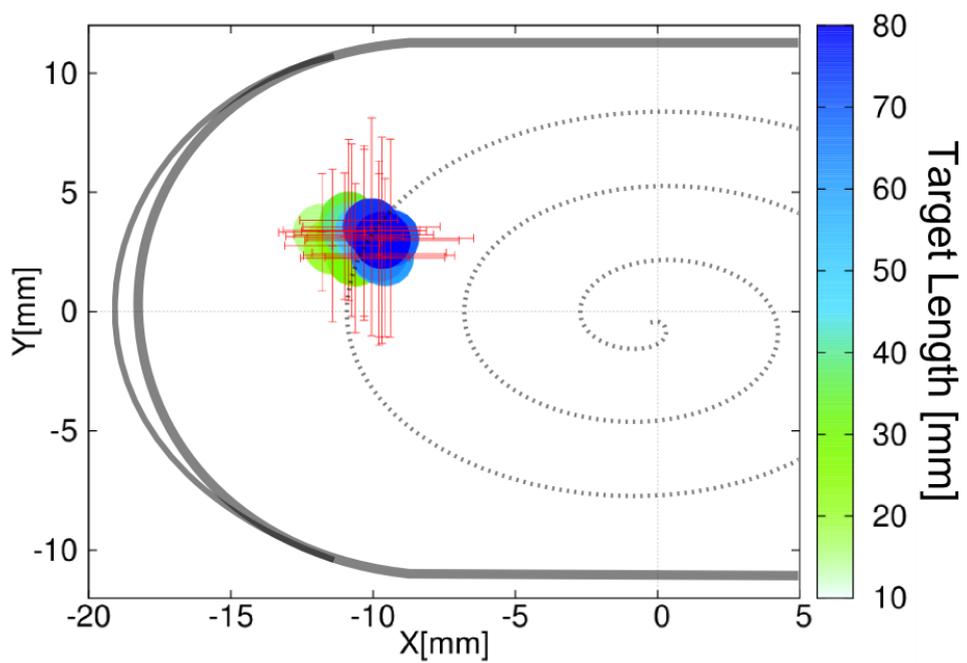
図6-4および図6-9より、若年者と高齢者のエンドポイントを比較すると、若年

者のエンドポイントはコア型特異点付近に分布するのに対し、高齢者のエンドポイントは指先に近い方に分布していることがわかる。また、若年者のエンドポイントはY成分の中心付近に分布するのに対し、高齢者のエンドポイントは示指ではY成分の-方向、母指ではY成分の+方向に分布している。

次に、若年者および高齢者における各指のエンドポイントを成分ごとと比較した。図6-10に若年者と高齢者の各指のエンドポイントにおけるX成分を比較した結果を示す。図6-10(a)に示指のX成分、同図(b)に母指のX成分を示す。図6-10の縦軸は各指におけるエンドポイントのX成分、横軸にターゲットの長さを示す。各プロット点は三角が示指、丸が母指を示し、塗り潰しが若年者、白抜きが高齢者を示す。また、図6-11に若年者と高齢者の各指のエンドポイントにおけるY成分を比較した結果を示す。図6-11 (a) に示指のY成分、同図(d)に母指のY成分を示す。図6-11の縦軸は各指におけるエンドポイントのY成分、横軸にターゲットの長さを示す。各プロット点は三角が示指、丸が母指を示し、塗り潰しが若年者、白抜きが高齢者を示す。若年者と高齢者でターゲットの長さごとf検定をかけた結果、示指のX成分では15mmから25mmのターゲットで有意差があり(f検定, $p < 0.01$), Y成分では、10mmから60mmまでのターゲットで有意差があった(f検定, $p < 0.05$)。また、母指でも同様にf検定をかけた結果、X成分では15mmおよび20mmのターゲットで有意差があり(f検定, $p < 0.05$), Y成分では有意差はみられなかった(f検定, $p > 0.05$)。さらに、若年者と高齢者でターゲットの長さごとt検定をかけた結果、図6-10(a)より、示指のX成分では15mm, 30mmか55mm および80mmのターゲットで有意差があった。また、図6-10(b)より、母指のX成分では、10mm, 15mm, 35mmから55mmおよび80mmのターゲットで有意差があった。図6-11(a)より、示指のY成分では、15mmから25mm, 60mmおよび80mmのターゲットで有意差があった。図6-11(b)より、母指のY成分では若年者と高齢者で有意差はみられなかった(t検定, $p > 0.05$)。

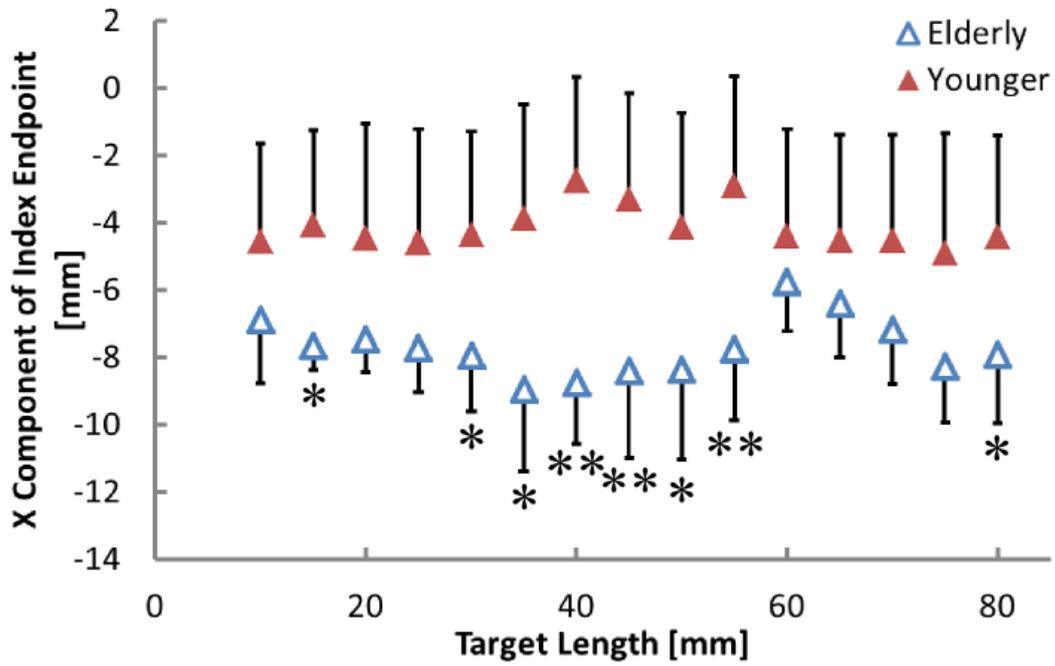


(a) 示指

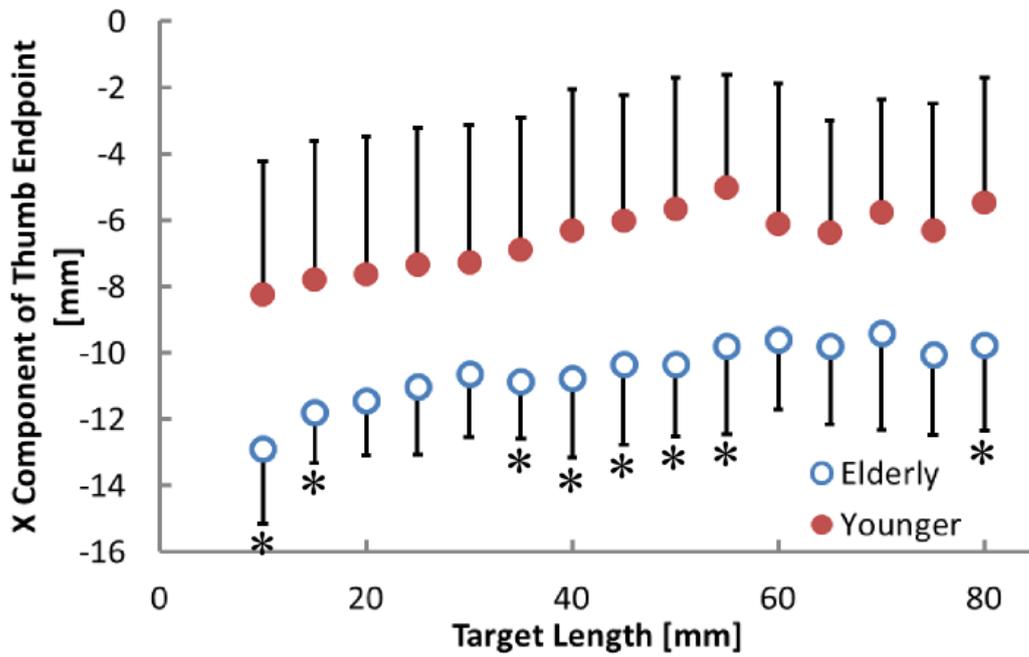


(b) 母指

図 6-9 高齢者の各指の指腹部におけるエンドポイント

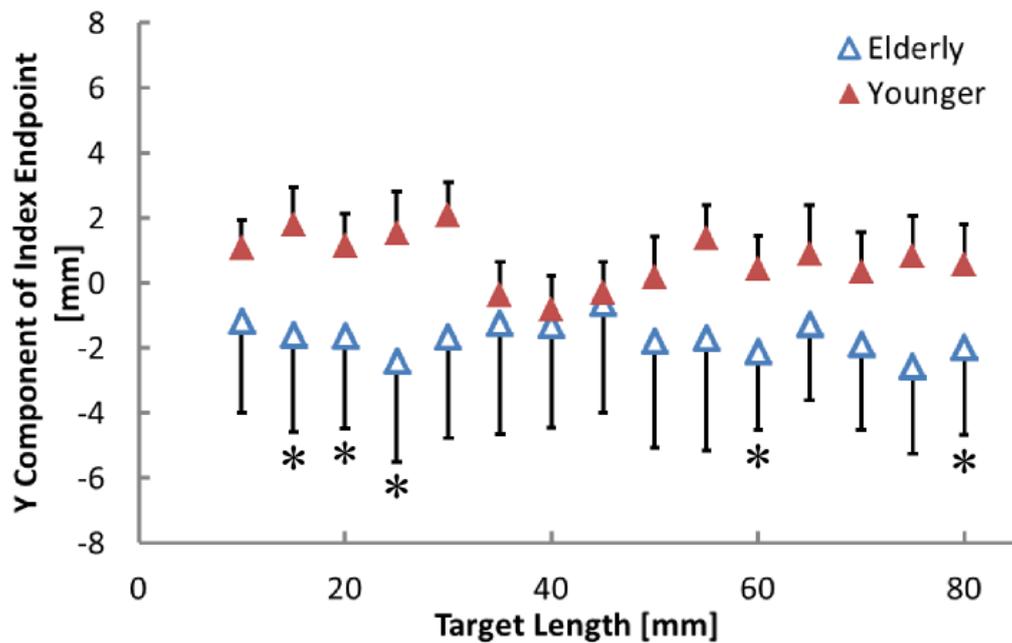


(a) 示指の X 成分

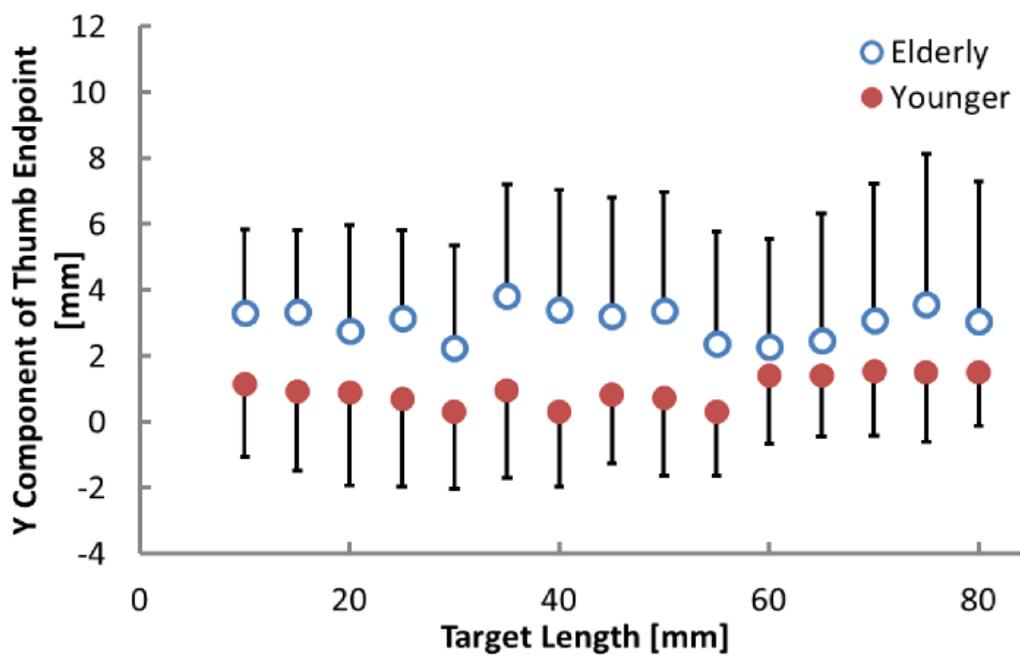


(b) 母指の X 成分

図 6-10 若年者および高齢者の各指のエンドポイントにおける X 成分の比較



(a) 示指の Y 成分



(b) 母指の Y 成分

図 6-11 若年者および高齢者の各指のエンドポイントにおける Y 成分の比較

6-2-4 考察

6-2-4-1 ターゲットに対する示指および母指の姿勢の検討

示指および母指と各ターゲットとの姿勢の関係から、若年者と高齢者で共通して、どちらの指もターゲットの長さに比例して各指とターゲットのなす角度が増加し、母指より示指がターゲットとのなす角度が大きいことが明らかとなった。また、若年者と高齢者の各指に対して検定をかけた結果、有意差がなかったことから、若年者と高齢者において長さの異なるターゲットを示指および母指でつまむ際にターゲットに対する各指の姿勢に違いがないことが明らかとなった。被験者には「安定してつまみ上げることができる」と思った時点で、左手に持ったゲームパッドの指定したボタンを押すよう教示しており、ボタンが押された瞬間の位置および姿勢データを計測している。そのため、ヒトが無意識下で決定している示指と母指における安定したつまみ姿勢は、示指は「伸展」、母指は「屈曲」した姿勢であることがわかる。現在、ロボットハンドで安定したつまみ動作を実行する際にとられる姿勢の多くは、示指および母指の各関節を屈曲させ、各指がアーチ型となるような姿勢に設定されている^[2]。しかしながら、今回得られた知見ではヒトは示指を伸展させ、母指を屈曲させる姿勢であった。今回得られた知見は、ロボットハンドで大きさが80mm以内の物体をつまむ際の把持姿勢として応用できると期待できる。

6-2-4-2 母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置の検討

母指のコア型特異点をローカル座標系の原点としたときの示指のコア型特異点位置におけるZ成分に若年者と高齢者に差が生じることが明らかとなった。本結果は、6-1-4-1で述べたように母指の対立運動に起因すると考えた。このことから、若年被験者の70%が、母指掌側示指対立に分類でき、変化が小さい残りの30%の若年被験者と全ての高齢被験者は、示指に対する母指の対立姿勢が母指側面示指対立に分類できると考えた。

母指の対立姿勢の違いが生じる原因としては、柔軟性が起因すると考えた。母指の掌側面では他の指と対立するには関節の柔軟性が必要である。荒尾らの研究では、加齢により、筋力・柔軟性が低下し、ひいてはADL、QOLの低下へ繋がれることを指摘している^[4]。母指は他の指に比べ自由度が高く、その分柔軟性も必要となる^[5]。若年者においても関節の柔軟性には個人差があるため、30%の若年者が母指側面示指対立に分類できたと考える。

6-2-4-3 示指および母指の指腹部におけるエンドポイントの検討

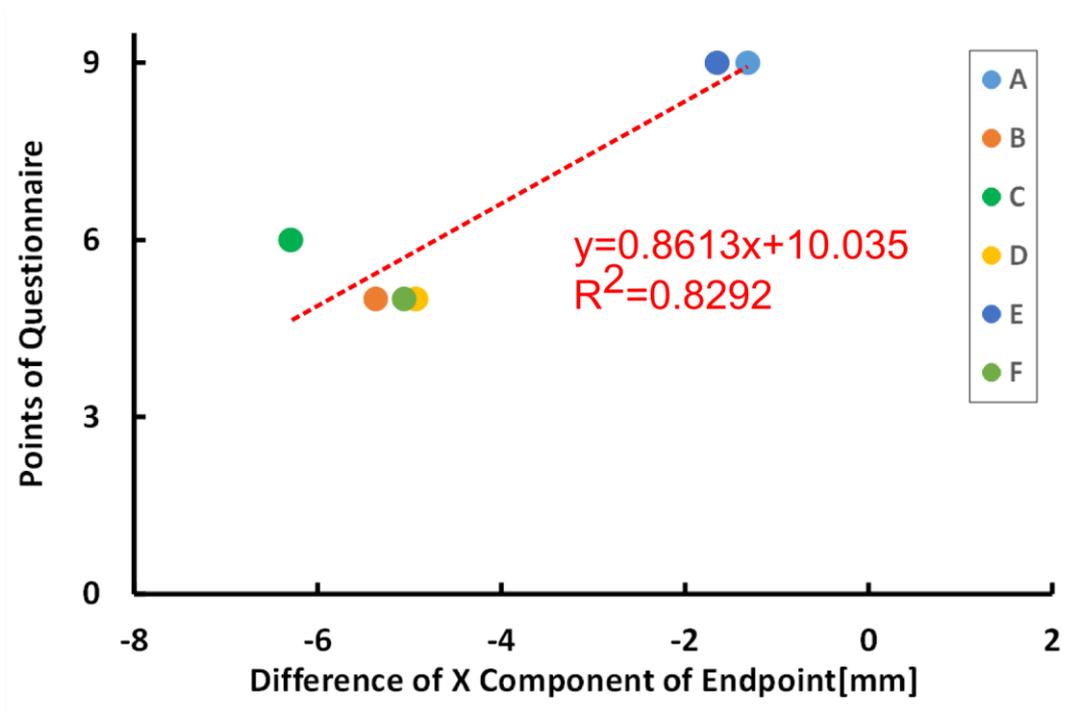
若年者の場合、示指の指腹部におけるエンドポイントのバラツキはY成分と比べX成分が有意に大きく、母指の指腹部におけるエンドポイントのバラツキに有意差はなかった。一方、高齢者の場合は、示指の指腹部におけるエンドポイントのバラツキはX成分およびY成分ともに有意差はなかった。さらに、若年者と高齢者における各指のエンドポイントを成分ごとと比較した結果、示指および母指ともに若年者に比べ、X成分は約4mm指先方向にズレ、Y成分は中心に分布していなかった。これは、ターゲットに対するアプローチの方法の違いが要因のひとつであると考えた。計測風景を撮影したビデオ映像を詳細に観察した結果、若年者は、母指からターゲットにアプローチし、その後に示指を添えるようにつまんでいることを確認した。このように、母指を基準として視覚性到達運動する場合、母指におけるエンドポイントは分散することなく任意の点に収束する。さらに、母指が最初にターゲットに触れ、そこを支点としてターゲットに示指を近づける動作に移行するため、示指の指腹部におけるエンドポイントのX成分にバラツキが発生すると考察した。これに対し、高齢者は、指をターゲット付近まで移動した後、示指と母指を同時に屈曲させることによってターゲットをつまんでいることを確認した。このつまみ動作は、ロボットのマニピュレータの動きに似ており、両方の指腹部でエンドポイントにバラツキ生じる可能性が高い。本論文では、ターゲットをつまんだ瞬間の計測に留まっており、ターゲットに対するアプローチの方法はビデオ映像による確認のみとなっている。今後、指先の軌道特性を計測することで、アプローチ方法の違いを顕在化できると考える。

6-3 ADL アンケートとの関係

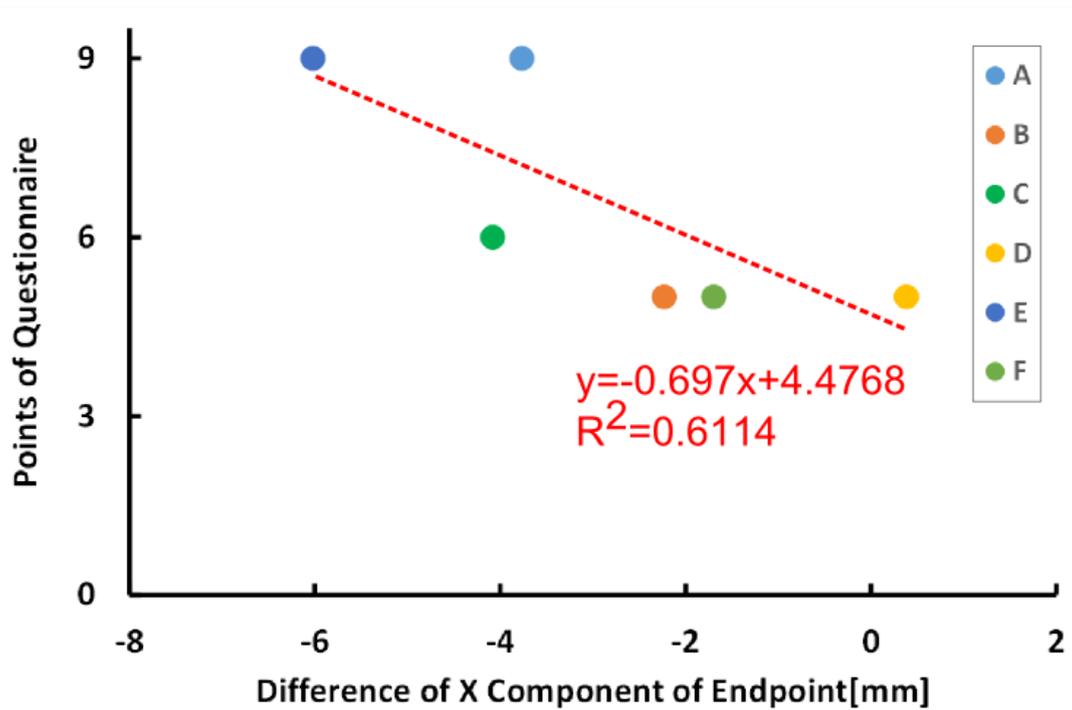
若年者と高齢者のつまみ動作を比較した結果、「指腹部におけるエンドポイント」および「母指の対立姿勢」に違いがあることが明らかとなった。しかしながら、これらの知見は老化に伴う巧緻機能の低下によるものなのか明らかとなっていない。そこで本項では、ADL アンケートとの相関を検討することにより、「指腹部におけるエンドポイント」および「母指の対立姿勢」の違いが巧緻機能の低下を示す指標と成りうるか評価する。

6-3-1 ADL アンケートと指腹部におけるエンドポイントの関係

若年者と高齢者の示指および母指の指腹部におけるエンドポイントを比較した結果、高齢者のエンドポイントが指先方向にズレるという知見が得られた。特に、示指および母指で共通して、35mmから55mmのターゲットをつまんだ際のエンドポイントのX成分で有意差がみられたことから、35mmから55mmのターゲットをつまんだ際の各指の指腹部におけるエンドポイントのX成分に着目し、ADLアンケートとの相関を調べた。図6-12に若年者のエンドポイントのX成分の平均値に対する各高齢者の示指および母指の指腹部におけるエンドポイントのX成分の平均値の差とADLアンケートの点数の関係を示す。図6-12(a)に示指、同図(b)に母指の結果を示す。図6-12(a)および同図(b)の縦軸はADLアンケートの点数、横軸は若年者に対する高齢者の各指の指腹部におけるエンドポイントのX成分の差、縦軸はADLアンケートの点数を示す。図6-12(a)より、示指のエンドポイントが指先方向にズレる被験者ほどADLアンケートの点数も低く、コア型特異点付近にエンドポイントがある被験者はADLの点数が高かった。この関係でピアソンの相関係数を検定した結果、示指の指腹部のエンドポイントとADLアンケートとの関係では $P=0.012$ となり、2変量の間に関係があることがわかった。また、この関係に近似直線を適応すると決定係数 $R^2=0.83$ となり高い相関があることが明らかとなった。さらに、図6-12(b)より、母指のエンドポイントは示指とは逆の傾向となり、ADLアンケートの点数が高い被験者のエンドポイントは指先方向にズレており、ADLアンケートの点数が低い被験者のエンドポイントはコア型特異点付近に位置していた。この関係でピアソンの相関係数を検定した結果、母指の指腹部のエンドポイントとADLアンケートの関係では、 $P=0.068$ となり相関がないことが明らかとなった。また、この関係に近似直線を適応すると決定係数 $R^2=0.61$ となり負の相関があることが明らかとなった。



(a) 示指



(b) 母指

図 6-12 若年者に対する高齢者の指腹部におけるエンドポイントの差と ADL アンケートの関係

6-3-2 ADL アンケートと母指の対立姿勢の関係

母指の対立姿勢は、示指と母指を開く際のZ成分の変化量の違いから「母指掌側示指対立」と「母指側面示指対立」の2種類に分類した。特に、ターゲットの長さが15mmから30mmおよび55mmにおけるZ成分の変化量に有意差がみられた。よって有意差の出たターゲットの長さに着目し、母指の対立姿勢が巧緻機能の低下を示す指標と成りうるかADLアンケートとの相関を調べることにより検討した。図6-13に母指の対立姿勢とADLアンケートとの関係を示す。縦軸がADLアンケートの点数、横軸が母指掌側示指対立に分類した若年者と高齢者の示指と母指の位置のZ成分の差を示す。図6-13より、ADLアンケートの点数が低い高齢者ほど、母指に対する示指の位置のZ成分の差が大きいことがわかる。この関係でピアソンの相関係数を検定した結果、 $P=0.094$ となり2変量の間に関係がないことがわかった。しかしながら、この関係に近似直線を適応すると決定係数 $R^2 = 0.54$ となり相関があることがわかった。

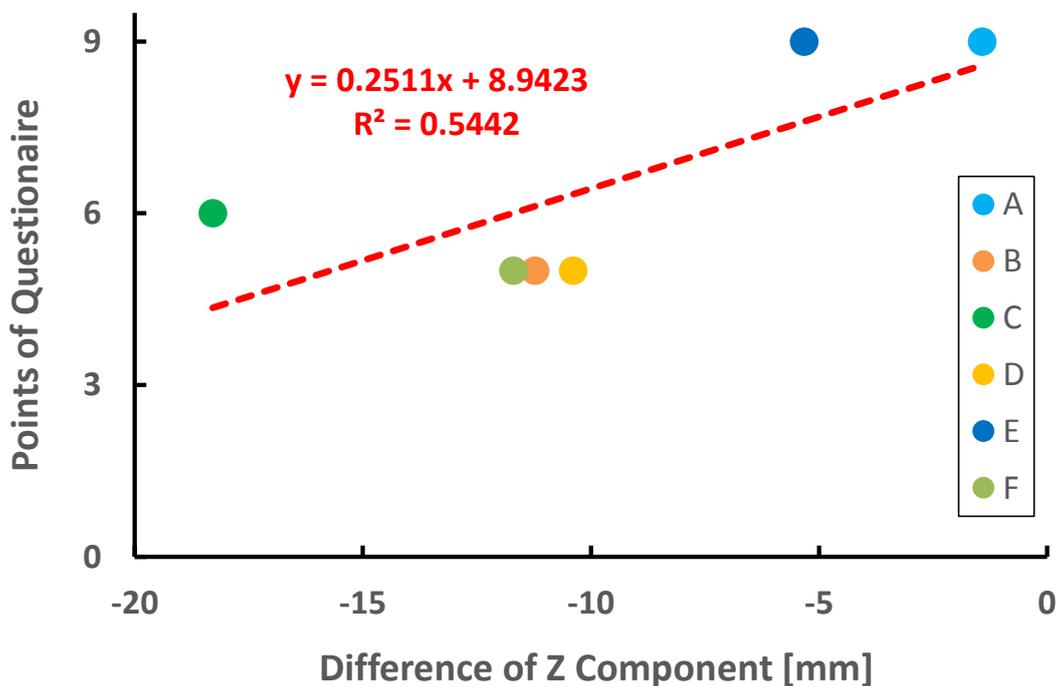


図 6-13 若年者に対する高齢者の Z 成分の差と ADL アンケートの関係

6-3-3 考察

6-3-3-1 ADL アンケートと指腹部におけるエンドポイントの関係の検討

35mmから55mmのターゲットをつまんだ際の各指の指腹部におけるエンドポイントのX成分で有意差がみられたことから、このエンドポイントとADLアンケートの関係を調べた結果、示指で高い相関、母指で負の相関があることが明らかとなった。示指に関しては、ADLアンケートの点数が低い高齢者はエンドポイントのズレも大きくなり、点数の高い高齢者は小さくなった。これは、指先の巧緻動作が苦手であると感じている被験者は対象物と触れる際により指先方向で触れていることを意味している。実際に、ボタンの留め外しなどの巧緻動作を想定した際、指先で対象物に触れると不安定で把持しづらい。「エンドポイントが指先方向にズレる」という知見において、特に、35mmから55mmのターゲットをつまんだ際の示指の指腹部におけるエンドポイントのズレを評価することにより、指先の巧緻動作の機能を評価する際の指標として役立てると考える。エンドポイントのズレを評価する方法としては、長さの異なるターゲットの両端に小型カメラを設置し、それを透明なカバーで覆い、対象物をつまんだ瞬間の指腹部を撮影できる装置を作製する。この装置で、長さが35mmから55mmのターゲットを摘んだ瞬間の示指の指腹部を小型カメラで撮影し、その画像を画像処理することでコア型特異点の位置とエンドポイントの位置関係からADLに関する巧緻動作を定量的に評価できると考えている。

6-3-3-2 ADL アンケートと母指の対立姿勢の関係の検討

15mmから30mmおよび55mmのターゲットについて、母指掌側示指対立に分類した若年者と各高齢者のZ成分の差とADLアンケートの関係を調べた結果、ピアソンの相関係数の検定では2変量の間に関係はみられなかったが、2変量の関係に近似直線を適応し、決定係数も求めた結果では相関があることが明らかとなった。医療やヒトを対象とした研究の場合、近似直線から求めた2変量の関係式から導出した決定係数の方が2変量の間に関係を表現でき、重要視されている。そのため、この2変量の間には相関があると考えた。この2変量の間に関係があるということは、指先の巧緻動作が苦手であると感じている高齢者はより、母指が示指に対して側面に対立していることを意味している。これにより、母指が示指に対してどのような姿勢で対立しているか調べることで、指先の巧緻動作の機能を評価できると考える。さらに、母指の筋肉を柔らかくし、母指が示指に対して

指腹部が向き合うようにリハビリテーションすることで、QOLを向上することができると期待している。また、本知見から、母指が示指に対して指腹部が向かい合うように対立している状態であるほど指先を使った細かな動作に不自由していないことを意味している。そのため、母指と示指の指腹部が互いに向かい合うような姿勢をとることにより、指先を使った細かな動作を実現できると考えた。そのため、本知見は、QOL向上のためのリハビリテーションのパラメータとして役立つだけでなく、ロボットハンドの母指の構造として役立つことができると考えた。母指を示指の指腹部と向かい合うような構造にすることで、ヒトの指先の細かな動作を再現することができると期待している。

6-4 第6章のまとめ

本章では、長さの異なる対象物をつまんだ瞬間の「各指の姿勢」、 「母指に対する示指の位置関係」 および「各指の指腹部におけるエンドポイント」の3つのパラメータに着目し、若年者10名、高齢者7名の計17名を対象として、つまみ動作における違いを顕在化した。さらにADLアンケートと比較することで巧緻動作を評価する際の新たな指標を提案した。以下に若年者と高齢者のつまみ動作における把持戦略の違い、提案した新たな評価指標を示す。

「ターゲットに対する示指および母指の姿勢」の比較から、若年者と高齢者で80mm以下の長さのターゲットにおいて把持姿勢に違いはなかった。このことから、各指の把持姿勢は、示指では「伸展」、母指では「屈曲」する姿勢であることが明らかとなった。

「母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置」の比較から、示指と母指の位置関係において、高齢者のZ成分の変化量が若年者と比較して顕著に小さいことが明らかとなった。特に、ターゲットの長さが15mmから30mmおよび50mmのとき有意差がみられた。これは母指の対立姿勢に起因すると考えた。Z成分の変化量の大きい被験者は、示指と母指の指腹部が互いに向かい合うように対立する母指掌側示指対立（若年被験者70%）に分類でき、Z成分の変化量が小さい被験者は、示指の指腹部に対して母指が側面に対立する母指側面示指対立（若年被験者30%と全ての高齢被験者）に分類できると考えた。母指側面示指対立に分類した全ての高齢被験者のZ成分の変化量とADLアンケートの関係を調べた結果、Z成分の変化量が小さい高齢者（示指の指腹部に対して母指がより側面に対立している状態）ほど、ADLアンケートの点数も低いことが明らかとなった。このことから、「母指の対立姿勢」を新たな評価指標として提案した。

「示指および母指の指腹部におけるエンドポイント」の比較から、高齢者は若年者に比べ、示指および母指ともにエンドポイントが指先方向にズレることが明らかとなった。特に、35mmから55mmのターゲットをつまんだ際に有意差がみられ、このエンドポイントの差とADLアンケートの関係を調べた。その結果、示指においてADLアンケートの点数が引く高齢者はエンドポイントがより指先方向にズレることが明らかとなった。このことから、「示指の指腹部におけるエンドポイント」を新たな評価指標として提案した。

<参考文献 第6章>

- [1] 新村出: 広辞苑 第6版: 岩波書店, P.1885, (2008).
- [2] 池田篤俊, 栗田雄一, 小笠原司: 腱骨格モデルを用いたつまみやすさの生体力学的解析: 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2, pp.191-199, (2010).
- [3] Richard L. Drake, A. Wayne Vogl, Adam W. M. Mitchell: グレイ解剖学 原著第2版: エルゼビア・ジャパン株式会社, P.664, (2011).
- [4] 荒尾孝, 神野宏司: 地域高齢者の生活体力とその関連要因: 日本公衆衛生雑誌, 45, pp.396-406, (1998).
- [5] 室田景久: 手の機能解剖: リハビリテーション医学, Vol.29, No.4, pp.257-261, (1992).

第7章 結論

7-1 本研究の成果

本研究の最終目的は、高齢者の ADL および IADL 検査における評価や効果的なリハビリテーションの新たな指標として活用できるパラメータ、さらには、日常生活を支援するためのロボットハンドの制御や設計に役立つパラメータを抽出することである。

日常生活動作の中で基本となる「示指および母指による物体をつまむ際の指先の使い方を明らかにするために、任意の長さのターゲットを模擬した長さの異なる棒の両端を「つまむ動作」を計測し、ヒトの指の把持姿勢およびエンドポイントを解析した。本論文では、高分解な磁気式 Hand-MoCap 装置を使用し、ターゲットをつまんだ瞬間の示指および母指の爪上に装着したレシーバの位置姿勢を自動計測するためのシステムを構築した。また、計測したレシーバの位置姿勢データからヒトの指の位置姿勢を導出するための計算手法を構築した。これらの装置および手法を用いて、若年者と高齢者を対象としてつまみ動作を計測し、長さの異なるターゲットのつまみ動作を比較することで、つまみ動作における若年者と高齢者の違いを顕在化し、巧緻動作の新たな評価指標を提案した。

本研究で構築した検査システムおよび解析手法、若年者と高齢者の巧緻動作の計測から明らかとなった知見を以下に示す。

● 構築した検査システム

示指および母指による「つまみ動作」に着目した。高分解能な磁気式 Hand-MoCap 装置（位置分解能：0.004mm，角度分解：0.0012deg）を使用し、長さの異なるターゲットをつまんだ瞬間の示指および母指の爪上に装着したレシーバの位置・姿勢データを自動計測できるシステムを構築した。その結果、「物体をつまむ」動作を成す際の手指巧緻動作自体を直接評価するために必要な位置および姿勢データを取得することが可能となった。

● 考案した解析手法

本研究で構築した検査システムにより、計測したレシーバの位置姿勢データから、ターゲットをつまむ瞬間の「示指および母指の姿勢」、「母指に対する示指の位置関係」および「示指および母指の指腹部におけるエンドポイント」の3つのパラメータを算出するアルゴリズムを考案した。

従来の評価手法では「手指で成された結果に対する間接的な評価」に留まっており、ヒトの手指巧緻動作自体を評価できていなかった。本研究で考案した解析

手法により、「物体をつまむ」際の手指巧緻動作自体を直接評価できるようになった。

- **ターゲットに対する示指および母指の姿勢から得られた知見**

長さの異なるターゲットをつまんだ瞬間の示指および母指の姿勢を若年者と高齢者で比較した結果、若年者および高齢者に共通した特徴として、80mm以下の対象物をつまむ際に示指は「伸展」、母指は「屈曲」した姿勢をとることが明らかとなった。本知見はロボットハンドの把持姿勢に応用できると考えた。従来、ロボットハンドでつまみ動作を実行する際の把持姿勢の多くは各指の関節を屈曲させ、アーチ型となるような姿勢に設定されている。今回得られた把持姿勢を応用することでよりヒトの動きを模倣でき、操作性などの向上が期待できる。

- **母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置から得られた知見**

母指のコア型特異点をローカル座標系の原点とした示指のコア型特異点の位置を比較した結果、高齢者の Z 成分の変化量は、若年者と比較して顕著に小さいことがわかった。特に、ターゲットの長さが 15mm から 30mm および 55mm において若年者と高齢者で有意差があることがわかった (t 検定: $p < 0.05$)。この結果は、母指の対立運動に起因すると考察した。Z 成分の変化量の大きい被験者は示指と母指の指腹部が向かい合うように対立している状態の母指側対立 (若年被験者の 70%)、Z 成分の変化量の小さい被験者は示指の指腹部に対し、母指が側面に対立している状態の母指側対立 (若年被験者の 30% と全ての高齢被験者) の 2 種類に大別することができると考えた。さらに、ADL アンケートとの関係を調べた結果、ADL アンケートの点数が低い高齢者ほど、示指に対して母指が側面に対立しており、相関があることが明らかとなった。このことから、「母指の対立姿勢」は手指巧緻動作の評価や訓練効果の高いリハビリテーションのための新たな指標として役立つと期待できる。また、示指に対して母指の指腹部が向かい合うように対立するようリハビリテーションにより QOL の向上が期待できる。さらに、ロボットハンドの母指の指腹部が示指に対して向かい合うような構造および制御をすることで、よりヒトの指先の細かな動作を再現することができると期待している。

- **示指および母指の指腹部におけるエンドポイントから得られた知見**

示指および母指の指腹部におけるエンドポイントを比較した結果、長さが 10mm から 80mm のターゲットをつまんだ瞬間の各指腹部におけるエンドポイントは、若年者および高齢者ともに直径約 6mm の円内に収まることが明らかと

なった。一方で、高齢者は若年者に比べ、長さが 35mm から 55mm のターゲットをつまんだ際の各指の指腹部におけるエンドポイントが指先方向にズレることが明らかとなった。エンドポイントのズレの差と ADL アンケートの関係を調べた結果、示指のエンドポイントが指先方向にズレている高齢者ほど ADL アンケートの点数も低くなり、高い相関があることが明らかとなった。このことから、「示指の指腹部におけるエンドポイント」の位置を評価することにより、手指巧緻動作の新たな評価指標として役立つことができる。具体的には、ターゲットの両端に小型カメラを設置し、摘んだ瞬間の指腹部の状態を撮影できる装置を想定している。この装置で撮影した指腹部の画像を画像処理することにより、コア型特異点とエンドポイントの位置関係が明らかとなり、ADL に関する巧緻動作を定量的に評価できると考えている。さらに、ロボットハンドで対象物と指腹部の触れるエンドポイントとして、指の先端ではなく、コア型特異点から示指では約 4mm、母指では約 7mm 指先寄りの位置に設定することでより安定した把持ができると期待している。

7-2 今後の課題および展望

本論文では、ADL アンケートとの相関を調べることにより、「示指の指腹部におけるエンドポイント」および「母子の対立姿勢」という若年者と高齢者のつまみ動作における違いを新たな評価指標として提案した。しかしながら、ADL アンケートは回答者の主観に依存してしまうため、客観的なデータとはいえない。そのため、本論文で得られた 2 つの知見と従来の評価方法である「コイン型のチップを容器に入れる」、「ピンをつまんでからペグボードの穴にさす」などの指先を使った巧緻動作評価の結果と比較することで、定量化された客観的なデータと本研究結果を関連づけることができるため、新たな評価指標としての信頼性を向上できると期待している。一方、本研究で得られた知見は、ターゲットをつまんだ瞬間のデータ解析に留まっている。そのため、ヒトがどのようにターゲットに対してアプローチしているかが明らかとなっていない。手指の軌道特性はロボットハンドの制御においても必要不可欠な技術であり、今後検討する必要があると考えている。

「示指の指腹部におけるエンドポイント」を手指巧緻動作の評価指標とした場合、特に 35mm から 55mm の長さの物を被験者につまませ、その時の示指の指腹部におけるエンドポイントの位置を評価することにより、巧緻機能の低下を定量的に評価できると期待している。さらに、「シャツのボタンの留め外し」といった着衣動作などの日常生活動作において、細かな対象物をつまむ際に指の

先ではなくコア型特異点寄りでつまむように指導することにより、ADLの改善が期待できると考えている。また、「母指の対立姿勢」を評価指標とした場合、母指の指腹部が示指の指腹部と対立するように母指周りの筋肉や関節を柔軟にするようなリハビリテーションにより、ADLの向上が期待できると考えている。さらに、示指に対する母指の対立姿勢はロボットハンドの制御や設計にも役立てることができると考えている。母指掌側示指対立の姿勢をとるようにロボットハンドの母指関節を設計したり制御したりすることにより、ヒトの巧緻動作を模倣しやすくなり、操作性も向上すると期待できる。

謝辞

本研究は、著者が秋田大学大学院工学資源学研究科博士後期課程電気電子情報システム工学専攻に在学中に、秋田大学電気情報基盤システム工学講座において、平成25年4月から平成28年12月の3年9ヶ月間に渡って行われたものである。

本研究の遂行にあたり、昼夜を問わず熱心なご指導と大変参考になるご助言を賜りました

秋田大学大学院理工学研究科数理・電気電子情報学専攻人間情報工学コース
水戸部 一孝 教授
に深く感謝致します。

本論文を完成するにあたり、副査としてご指導頂いた
秋田大学大学院理工学研究科数理・電気電子情報学専攻人間情報工学コース
西田 眞 教授

秋田大学大学院理工学研究科数理・電気電子情報学専攻人間情報工学コース
景山 陽一 教授

秋田大学大学院理工学研究科数理・電気電子情報学専攻人間情報工学コース
五十嵐 隆治 教授

秋田大学大学院理工学研究科数理・電気電子情報学専攻電気電子工学コース
故 鈴木 雅史 教授

に深く感謝致します。

本研究の遂行において、適切な御意見とご協力をいただいた
東北公益文化大学学長（元秋田大学学長）

吉村 昇 教授

に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり、ご多忙の中、大変参考になるご助言を賜りました
秋田大学 大学院理工学研究科 数理・電気電子情報学専攻

齋藤 正親 技術職員

に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり、ご多忙の中、大変参考になるご助言を賜りました
秋田大学大学院理工学研究科数理・電気電子情報学専攻人間情報工学コース
中島 佐和子 助教
に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり、ご多忙の中、大変参考になるご助言を賜りました
秋田大学大学院理工学研究科数理・電気電子情報学専攻人間情報工学コース
藤原 克哉 助教
に深く感謝致します。

被験者として協力して下さった
秋田県長寿社会復興財団（LL財団）のみなさん
平成 26 年から平成 27 年度水戸部研究室のみなさん
に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり、作業療法の観点から大変参考になる御意見をお聞かせ
頂いた
秋田大学 大学院医学系研究科 保健学専攻 作業療法学講座
久米 裕 助教
に深く感謝致します。

日頃から著者と苦楽を共にした
平成 28 年度水戸部研究室学生諸君
に深く感謝致します。

最後に、著者を育て、無償の援助を与えて下さった
父、富岡 寿雄 母、富岡 貞子
に心からの謝意を表します。

研究業績

論文

- (1) 富岡雅弘, 齋藤正親, 鈴木雅史, 吉村昇, 水戸部一孝 :
長さの異なる対象物の摘み動作における母指および示指の姿勢およびエンドポイントの解析,
ヒューマンインターフェース学会論文誌 Vol.18, No.2, pp.57-67 (2016年)
- (2) 富岡雅弘, 齋藤正親, 水戸部一孝 :
老化が摘み動作時の姿勢およびエンドポイントに及ぼす影響,
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.21, No.2, pp.217-226 (2016年)

国際学会

- (1) K.Mitobe, M.Tomioka, M.Saito, and M.Suzuki :
Development of a Ubiquitous Learning System for Dexterous Hand Operation,
IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2012,
pp.299-300 (2012)
- (2) Masahiro Tomioka, Masachika Saito, Kazutaka Mitobe :
Analysis of Index Finger and Thumb Moving Trajectory and Endpoint during
Pinching Motion for Objects of Different Length.
ASIAGRAPH2016 Conference PROCEEDINGS, pp.59-60 (2016年)

研究会資料 (技術報告)

- (1) 富岡雅弘, 齋藤正親, 鈴木雅史, 吉村昇, 水戸部一孝 :
摘み動作における対象物の長さとは指腹部の接触位置の解析,
電気学会医用・生体工学研究会, pp.61-66 (2015年)

学会発表（口頭発表）

- (1) 富岡雅弘，水戸部一孝，齋藤正親，鈴木雅史，吉村昇：
磁気式 Hand-MoCap 装置によるロボットハンドの巧緻動作再現技術の基礎的研究，
平成 24 年電気学会全国大会講演論文集，P.94（2012）
- (2) 富岡雅弘，水戸部一孝，齋藤正親，鈴木雅史，吉村昇：
Hand-MoCap データを利用した多指ロボットハンドの関節角度算出方法の検討，
第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，pp.155-156（2012）
- (3) 富岡雅弘，水戸部一孝，齋藤正親，鈴木雅史，吉村昇：
ロボットハンドによるヒトの指先の巧緻動作の再現方法の検討，
第 18 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，pp.337-338（2013 年）
- (4) 唐栄，水戸部一孝，齋藤正親，富岡雅弘，鈴木雅史，吉村昇：
簡易型磁気式手指用モーションキャプチャ装置の開発，
第 18 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，pp.482-483（2013 年）
- (5) 富岡雅弘，齋藤正親，鈴木雅史，吉村昇，水戸部一孝：
摘み動作時の指腹部における接触位置の計測と解析，
第 19 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，pp.330-333（2014 年）