

筋電義手のための超弾性グローブ の開発

矢吹 佳子

電気通信大学大学院情報理工学研究科
博士（工学）の学位申請論文

2020年3月

筋電義手のための超弾性グローブ の開発

博士論文 審査委員会

主査 横井 浩史 教授

委員 明 愛国 教授

委員 青山 尚之 教授

委員 小池 卓二 教授

委員 太田 順 教授

著作権所有者

矢吹 佳子

2020

Superelastomer Glove for EMG Prosthetic Hand

A prosthetic hand has two primary functions: replacement of the non-existent grip function due to the upper limb defect, and prosthesis of the defect. Body-powered and electric prosthetic hands are made of plastic or metal, and provide an alternative to the gripping function, while the decorative gloves that cover the prosthetic hands enhances their appearance.

The primary role of the existing cosmetic gloves is to enhance the appearance of the prosthesis. However, the gloves for myoelectric prosthetic hands are required to have the functionality that assists exercise, such as following the movement and improving the gripping performance, while serving the aesthetic purposes. The cosmetic gloves do not offer such functionality.

This paper focuses on the development of superelastic gloves that fulfill the needs of myoelectric prosthetic hand users, and proposes a design and manufacturing method for an appealing appearance and smooth driving of the fingers of the robotic hand. The physical properties and performance were evaluated in comparison with other types of gloves, and the usefulness of the developed gloves and modified gloves is established for the electric prostheses.

For evaluation, the electric prosthesis was tested by the pick-and-place experiment with adult-sized gloves. Using 30 daily-use items (e.g., cups, plastic bottles, and ballpoint pens), the performance of each material was evaluated using four types of gloves, and the characteristics of the material according to the item and application were studied. Based on this result, the glove selection method according to various factors such as the user's age and lifestyle, strength requirements, object gripping characteristics, object manipulation stability, and responsiveness is provided.

筋電義手のための超弾性グローブの開発

義手は、上肢欠損者の失われた把持機能の代替と欠損部の形態の補綴という二つの役割を有する。能動義手や電動義手は、樹脂や金属で造られた手先具が把持機能の代替を実現し、それを覆うように被せられた義手用装飾グローブが外観の補綴に大きく寄与する。

現在日本で市販されている義手用装飾グローブは、塩化ビニルとシリコーンの2種類の材料が用いられており、それらは、これまで主に装飾義手、能動義手等の表皮として用いられてきた。塩化ビニルは、丈夫で接着性が良く、二次加工が容易で大量生産に向く材料であり、着色が可能であるため皮膚の色味や表面の皺など手指外観の再現性に優れている。しかし、一度着色すると汚れを落とすことができないという短所や、伸長性が低いという欠点を持つ。これらの欠点をカバーする目的でシリコーングローブが開発された。シリコーンは、塩化ビニルより引き裂き強度が低い塩化ビニルよりもさらに繊細に肌の色を再現可能であり、経年変化による変質や変色が少ないという長所をもつ。

これら既存の装飾用グローブは、外観を補綴することが主要な役割である。しかし、筋電電動義手用グローブには、外観を保ちながら動作への追従や把持性能の向上への寄与など、運動を補助する機能性が求められ、これまで、外観と機能性を両立できる装飾グローブが存在しなかった。

そこで、本研究では、超弾性材料の加工技術を持つ企業と共同で、模擬血管の製作技術をグローブ製作に転用することで、熱可塑性スチレン系エラストマー（以下「エラストマー」）、及び熱硬化性シリコーン（TTシリコーン）を原料とする超弾性材料の新素材を用いた電動義手用のグローブを開発した。また、既存の塩化ビニル製及びシリコーン（SSシリコーン）製の装飾グローブを仕様変更し電動義手用として用いられるよう、国内唯一の塩化ビニルグローブ製造業を営む企業と共同で、既存の製造方法を踏襲し手首周径や掌周径及び添加剤の添加割合について設計の変更及び成形を行い、電動義手用グローブを試作した。

本論文では、筋電義手利用者の希望を叶える超弾性グローブの開発を主題とし、外観と、ロボットハンドの指のスムーズな駆動を実現する超弾性グローブの設計と製造方法、およびそれらを既存のグローブと比較した物性評価と結果及びパフォーマンス評価とそれらの結果について述べ、開発したグローブの有用性と仕様を変更したグローブの電動義手への有用性を評価した。

論文の第1章では、はじめに、として本論文の概要を述べる。第2章では、研究背景として、義手グローブの開発の歴史と義手グローブに要求される機能について述べ、本研究目的を明らかにする。第2章4節で、関連する研究の動向をまとめる。

第3章では、研究目的に対するアプローチとして、超弾性グローブの設計と製造を提案する。グローブの製作のために超弾性材料を用いる目的と材料の選定、各材料の持つ課題と解決法について述べ、義手の要求機能を満たすための設計法、設計を実現するための製造法の検討について詳述し、各材料に対する製造法の提案と試作について述べる。

第4章では、評価実験について、その方法と結果について述べる。

評価実験では、材料力学的評価及びパフォーマンス評価を行っている。材料力学的評価では、まず、4種類の材料（塩化ビニル、エラストマー、TTシリコーン、SSシリコーン）から成るグローブの表面の引張試験による静摩擦係数を比較した。次に、それぞれのグローブにハンドを挿入し、モータを駆動させた指先で、固定した物体を把持させたときに物体が引抜かれるまでの様相の比較を行い、4種のグローブと把持させた部分の物体の材質の組み合わせによる様相の相違を比較し、それぞれの優位性を評価する。また、パフォーマンス評価では、グローブ装着の容易性の評価、姿勢維持に必要な電流量の比較評価を行ったことについて詳述し、それぞれのグローブを筋電義手に用いた際の物体把持への影響と超弾性グローブの有用性について詳述する。

電動義手をヒトに装着した評価実験では、成人用サイズ、小児用サイズ、幼児用サイズの3種類に対して、Pick-and-Place (PAP) 実験を適用し、日常生活で用いられる可能性の高いサイズの物品30品目（コップやペットボトル、ボールペンなど）に対して、4種類の材料のグローブを用いて、それぞれの性能評価を行い、物品や用途に応じた材料の特性を明らかにした。この結果に基づいて、利用者の年齢や生活様式に応じたグローブの選定方法やグローブに求められる強度特性、物体把持特性、物体操作安定性、即応性などが明らかにされている。

第5章では、超弾性材料の応用として、シリコーンを用いた導電体の製法について述べ、導電シリコーンで製作した感圧センサと歪センサの性能評価について詳述する。

第6章でまとめと今後の展望を述べる。

論文は以上のような構成で執筆されている。

目次

第1章 緒言

はじめに.....	2
-----------	---

第2章 背景と目的

2.1 義手グローブの歴史	6
2.1.1 義手開発の歴史	6
2.1.2 グローブ開発の歴史	10
2.2 要求機能	13
2.2.1 制度上の要求	13
2.2.2 意匠上の要求	16
2.2.3 対人的要求	21
2.2.4 触覚, 力覚などセンサ機能の要求	22
2.2.5 耐久性や強度など, 材料力学的要求	23
2.2.6 把持の安定性・即応性等物体の把持操りのパフォーマンス上の要求	25
2.2.7 義手利用者の要求	27
2.3 研究目的	31
2.4 関連する研究の動向	32
2.4.1 手の形, 手指の自由度, 把持と把握	32
2.4.2 ロボットハンドとグリッパ及び緩衝材	34
2.4.3 受動安定性	35
2.4.4 超弾性材料の種類	36
2.4.5 義手の性能評価の方法 (パフォーマンス評価)	37
第2章参考文献	39

第3章 超弾性グローブの設計と製造

3.1 グローブ製作に超弾性素材を用いる際の課題	46
3.1.1 義手用装飾手袋 (JIS 用語) に規定する要件	46
3.1.2 コスメティック (外観) の重要性	49
3.1.3 物体を把持する形状に即した義手の把持性能	51
3.1.4 指先の把持安定性と粘弾性の必要性	54
3.1.5 質感の重要性	56
3.1.6 関節の柔軟性への考慮	57
3.1.7 耐久性・耐摩耗性に対する要求	58
3.2 課題解決へのアプローチ	61
3.2.1 各要件を満たすグローブ材料	61
3.2.2 グローブ素材の選定	64
3.2.3 ヒトの手の外観の復元のための採型法	66
3.2.4 義手の把持力向上を担保するハンドの把持形状に追従する厚み及び指先の構造と粘弾性を考慮した指腹形状	68
3.3 プラスチック樹脂の成形法	69
3.3.1 熱可塑性樹脂 (スチレン系エラストマー) グローブの成形	71
3.3.2 熱硬化性樹脂 (シリコーン: タナック製) のグローブの成形	74
3.3.3 熱硬化性樹脂 (シリコーン: 佐藤技研製) グローブの成形	75
3.3.4 塩化ビニル製グローブの成形	76
第3章 参考文献	79

第4章 評価実験

4.1 超弾性グローブの性能評価	86
4.1.1 グローブの柔軟性の評価	87
4.1.2 グローブの電動義手への追従性の評価	90
4.1.3 グローブの筋電義手動作に対する負荷評価	91
4.2 グローブ材料の力学的評価	99
4.2.1 引裂き強度比較試験	99
4.2.2 引張試験による静止摩擦係数比較	105
4.2.3 引き抜き実験による把持操り機能評価	110
4.3 筋電義手によるパフォーマンス評価	127
4.3.1 装飾義手用塩化ビニルグローブとエラストマーグローブ	127
4.3.2 爪無しエラストマーグローブと爪ありエラストマーグローブ	129
4.3.3 エラストマーグローブと TT シリコーングローブ	131
4.3.4 エラストマー, 筋電義手用塩化ビニル, 筋電義手用 SS シリコーン	133

第4章 参考文献	135
第5章 超弾性材料を用いたセンサー一体型グローブの提案	
5.1 柔軟なセンサの提案	138
5.2 導電体の開発と超弾性材料への付与	139
5.2.1 エラストマーゲルへの導電性付与	140
5.2.2 シリコーンゲルへの導電性付与	141
5.2.3 導電性を付与したシリコーンゲルのエラストマーへの塗布	141
5.2.4 導電性シリコーンゲルの TT シリコーングローブへの塗布	142
5.3 感圧センサの開発	143
5.3.1 導電性シリコーンセンサの原理	143
5.3.2 平面上における圧力測定検証実験	143
5.3.3 全方位感圧センサのロボットハンドへの実装と検証実験	145
5.3.4 感圧センサによる把持姿勢特定	147
5.4 歪（ひずみ）センサの開発	149
5.4.1 シリコーン製歪センサ	150
5.4.2 ヒステリシス補正関数の実装と姿勢推定検証実験	152
5.5 センサー一体型グローブの提案	155
第5章 参考文献	156
第6章 まとめ, 今後の展望	
6.1 まとめ	160
6.1.1 第1章・概要のまとめ	160
6.1.2 第2章・背景と目的のまとめ	160
6.1.3 第3章・超弾性グローブの設計と製造のまとめ	161
6.1.4 第4章・評価実験のまとめ	163
6.1.5 第5章・超弾性材料を用いたセンサー一体型グローブ提案のまとめ	167
6.1.6 本論文のまとめ	168
6.2 今後の展望	170

謝辞

付録

目次

図 2-1	恩賜の義手	8
図 2-2	塩化ビニルグローブ	10
図 2-3	シリコングローブ	10
図 2-4	手指の骨格構造とロボットハンドのリンク機構	32
図 2-5	手の動作	33
図 2-6	UEC-eHand	33
図 2-7	粘弾性と安定把持可能性	35
図 2-8	高分子材料	36
図 2-9	PAP 実験環境及び把持物品	38
図 3-1	引張強さ及び切断時伸び	47
図 3-2	グローブの寸法測定箇所	50
図 3-3	手指主要動作	51
図 3-4	ヒトの物体把持に関する機能分類	53
図 3-5	指の変形と爪による安定把持効果	55
図 3-6	義指の製作モデル	55
図 3-7	型取り剤「かたとって」を利用した手形の採型	67
図 3-8	手形の採型と成人男性石膏モデル	68
図 3-9	グローブの厚みマップ	68
図 3-10	射出（インジェクション）成形機	71
図 3-11	インジェクション成形型の構造	72
図 3-12	インジェクション成形によるエラストマーグローブの製作	73
図 3-13	エラストマー製グローブ型とグローブ	73
図 3-14	注型成形による TT シリコングローブの成型方法	74
図 3-15	TT シリコングローブ	74
図 3-16	試作した SS シリコン製グローブ	75
図 3-17	塩化ビニルグローブ金型と材料, 製造工程（引抜き）	76
図 3-18	塩化ビニルグローブ	78
図 3-19	試作した塩化ビニル製グローブ	78

図 4-1	用いた手先具と被せたグローブ	88
図 4-2	指 MP 関節回転時, 母指 CM 関節回転時のグローブの開き幅	90
図 4-3	動作負荷検証に用いたロボットハンド	91
図 4-4	検証動作を行った際の各グローブ装着時の姿勢	93
図 4-5	計測環境	94
図 4-6	姿勢維持に必要な電流値	95
図 4-7	姿勢変化時に必要な電流ピーク値	96
図 4-8	「手を握る」から「手を開く」の姿勢変化時の消費電流値の時系列	97
図 4-9	手先具と手先具の様子	98
図 4-10	グローブ装着時の姿勢維持にかかる負荷評価	98
図 4-11	トラウザ型試験片	99
図 4-12	引き裂き試験	100
図 4-13	引き裂き試験結果	101
図 4-14	使用したグローブと切り出した試験片	102
図 4-15	引裂き強度試験結果	103
図 4-16	引裂き試験の切断点の様子	104
図 4-17	使用するグローブ 3 種	105
図 4-18	摩擦係数試験の様子	106
図 4-19	摩擦係数試験の例	107
図 4-20	グローブ表面の静止摩擦係数	109
図 4-21	Force Closure と Form Closure	111
図 4-22	Force Closure での物体把持	112
図 4-23	UEC-eHand	113
図 4-24	実験で使用するグローブ 3 種と試験対象物	113
図 4-25	引き抜き実験の引抜抵抗力の様相	115
図 4-26	安定把持区間の概念図	117
図 4-27	使用するグローブ	122
図 4-28	円柱状の物体の引抜試験	123
図 4-29	引き抜き実験の解析法	123
図 4-30	物体を引き抜くときの力学的特徴量	124
図 4-31	安定把持区間解析結果	125
図 4-32	使用したロボットハンドとグローブ	127
図 4-33	PAP 実験結果	128
図 4-34	エラストマーグローブの爪	129
図 4-35	グローブの爪の効果検証実験	130
図 4-36	エラストマーと TT シリコーンの比較実験	132

図 4-37	使用した手先具と付け替えたグローブ 3 種	133
図 4-38	エラストマー, 筋電義手用塩化ビニル, SS シリコーン	134
図 5-1	使用した導電性材料	139
図 5-2	導電体開発実験の様子	140
図 5-3	導電エラストマーゲルの製作	140
図 5-4	シリコーンゲル導電体開発実験の様子	141
図 5-5	エラストマーゲル断片への塗布	141
図 5-6	義手用グローブへの塗布	142
図 5-7	導電性を付与した TT シリコーングローブの試作	142
図 5-8	シリコーンセンサで圧力を検知する原理	143
図 5-9	感圧センサのモデル	143
図 5-10	圧力測定検証実験結果	144
図 5-11	計測電極を配置したロボットハンド骨格	145
図 5-12	感圧センサの全方位性の検証	145
図 5-13	感圧センサの全方向性検証実験結果	146
図 5-14	把持姿勢	147
図 5-15	把持姿勢特定の検証実験結果	147
図 5-16	CB 配合シリコンセンサ	149
図 5-17	開発した曲げ・歪センサの構成	150
図 5-18	センサの計測環境	150
図 5-19	シリコーン歪センサの特性調査	151
図 5-20	ヒステリシスの補正	152
図 5-21	ロボットハンドへの実装及び補正值追従実験の様子	152
図 5-22	補正值追従検証実験の結果	153
図 5-23	センサー体型グローブの製作	155

表 目次

表 2-1	義手グローブの先行研究	12
表 2-2	日本の法律における補装具の扱いの歴史	15
表 2-3	外観を構成する要素	19
表 2-4	材料力学的要求	24
表 2-5	操りを伴う物体操作の事例	26
表 2-6	被験者一覧	27
表 2-7	評価項目(1)動作パターンの要求	28
表 2-8	評価項目(2)重量とサイズ(型)	28
表 2-9	評価項目(2)重量とサイズ(一体型の場合)	29
表 2-10	評価項目(2)重量とサイズ(分離型の場合)	29
表 2-11	評価項目(3)最低限の把持力	30
表 2-12	評価項目(4)装飾用グローブの有無	30
表 2-13	筋電義手の主な評価方法	37
表 3-1	引張強さの性能基準	47
表 3-2	把持形状の分類	51
表 3-3	主なグローブ材料と材質特性	62
表 3-4	ヒトの手とグローブ材料の柔らかさの値	65
表 3-5	各メーカーにおける外観の再現の方法	66
表 3-6	樹脂材料の成形法	69
表 4-1	グローブの装着実験結果	89
表 4-2	各グローブにおける姿勢維持に消費される電流値	94
表 4-3	各グローブにおける姿勢変化時の電流ピーク値	95
表 4-4	引き裂き強度試験結果	103
表 4-5	実験条件	106
表 4-6	引張試験による静止摩擦係数	108
表 4-7	引き抜き実験結果	119
表 4-8	3種のグローブによる PAP 実験結果	125
表 6-1	筋電義手用グローブの要求仕様	161
表 6-2	筋電義手用グローブの要求仕様と結果	168

第1章 緒言

はじめに.....	2
-----------	---

はじめに

わが国における義手用装飾グローブの開発の歴史は、装飾義手に由来し、アメリカから塩化ビニル製の義手用装飾グローブが輸入されたことによって始まる。しかしながら、新しい材質での義手グローブは、意匠上の進化のためシリコン製の義手用装飾グローブが開発されたのみで、これまで製作されてこなかった。

本論文では、筋電義手利用者の希望を叶える超弾性グローブの開発を主題とし、外観と、ロボットハンドの指のスムーズな駆動を実現する超弾性グローブの設計と製造方法、および評価について述べる。

現在日本で市販されている義手用装飾グローブは、塩化ビニルとシリコンの2種類の材料が用いられており、それらは、これまで主に装飾義手、能動義手等の表皮として用いられてきた。塩化ビニルは、丈夫で接着性が良く、二次加工が容易で大量生産に向く材料であり、着色が可能であるため皮膚の色味や表面の皺など手指外観の再現性に優れている。しかし、一度着色すると汚れを落とすことができないという短所や、伸張性が低いという欠点を持つ。これらの欠点をカバーする目的でシリコングローブが開発された。シリコンは、塩化ビニルより引き裂き強度が低い塩化ビニルよりもさらに繊細に肌の色を再現可能であり、経年変化による変質や変色が少ないという長所をもつ。しかし、それらを電動義手用グローブとして用いた場合、その高剛性や表皮の重さがモータにかかる負荷を増大させ、電動義手の可動域を制限するなど、手袋の硬さや厚さや重みによって電動義手本来の性能を十分に発揮させられないという問題があった。

そこで、本研究では、超弾性材料の加工技術を持つ企業と共同で、模擬血管の製作技術をグローブ製作に転用することで、熱可塑性スチレン系エラストマー（以下「エラストマー」）及び熱硬化性シリコン（以下「TT シリコン」）を原料とする超弾性材料の新素材を用いた電動義手用のグローブを開発した。

また、国内唯一の塩化ビニルグローブ製造業を営む企業と共同で、塩化ビニル製及びシリコン製（以下「SS シリコン」）の装飾グローブを電動義手用グローブとして用いるため、手首周径や掌周径、及び添加剤の添加割合について設計の変更を行い、型の作成を行い、新しい電動義手用グローブを試作した。

試作開発したグローブの評価として、超弾性グローブの性能評価、グローブ材料の力学的評価及び筋電義手によるパフォーマンス評価を行い、開発したグローブの筋電電動義手の把持機能の向上への寄与の有無を評価し、4種すべてのグローブの有効性を検証した。

これらの超弾性グローブのうち、エラストマー製グローブは、2018年4月、厚生労働省義肢装具等完成用部品に新規に指定登録された。続いて2019年4月には、塩化ビニル製グローブの完成用部品の指定が決定した。義手グローブの完成用部品は、JIS規定に準じた工学的試験評価と、3名以上の被験者による90日間以上のフィールドテストを通じた、被験者の意見、製作者の意見、そして医療関係者の意見を基にした臨床的試験評価の両面から評価され、厚生労働省によって指定されるものである。

本研究の新規性は、長期にわたり置き去りにされてきたグローブ材料の研究に着目し、エラストマーやシリコンの新材料によりグローブの開発を行ったこと、また、性能評価によって、電動筋電義手の重要な機能である把持性能の向上にグローブの素材が大きく寄与するものであることを検証した点にある。

本論文の構成は、6章からなり、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、緒言として、本論文の概要及び論文構成について述べる。

第2章では、本論文の背景と目的のため、義手グローブの歴史と要求機能、研究目的、関連する研究の動向について述べる。ここで、義手グローブの要求をカテゴリ分けし、区分ごとに要求仕様を導く。その要求仕様をもとに研究目的を定め、義手や筋電義手に関連する研究動向について述べる。

第3章では、超弾性グローブの設計と製造について記述する。グローブ製作の要件と課題、それらを解決するためのアプローチについて、グローブの製作を念頭に記述する。また、グローブの成型法や製造法について述べ、製作したグローブについて報告する。

第4章では、評価実験について詳述する。評価は、超弾性グローブの性能評価、グローブ材料の力学的評価、筋電義手によるパフォーマンス評価について、評価方法と結果と考察を述べる。

第5章では、超弾性材料を用いたセンサの開発について取り組みを述べ、センサー一体型グローブの提案を行う。

第6章では、まとめと今後の展望について記述する。

第2章 背景と目的

2.1 義手グローブの歴史	6
2.1.1 義手開発の歴史	6
2.1.2 グローブ開発の歴史	10
2.2 要求機能	13
2.2.1 制度上の要求	13
2.2.2 意匠上の要求	16
2.2.3 対人的要求	21
2.2.4 触覚，力覚などセンサ機能の要求	22
2.2.5 耐久性や強度など，材料力学的要求	23
2.2.6 把持の安定性・即応性等物体の把持操りのパフォーマンス上の要求	25
2.2.7 義手利用者の要求	27
2.3 研究目的	31
2.4 関連する研究の動向	32
2.4.1 手の形，手指の自由度，把持と把握	32
2.4.2 ロボットハンドとグリッパ及び緩衝材	34
2.4.3 受動安定性	35
2.4.4 超弾性材料の種類	36
2.4.5 義手の性能評価の方法（パフォーマンス評価）	37
第2章参考文献	39

2.1 義手グローブの歴史

2.1.1 義手開発の歴史

義手グローブは、義肢装具においては、コスメチックカバーまたはコスメチックグローブと呼ばれ、その歴史は、装飾義手の歴史に由来する。

義手の古いものでは、紀元前 330 年頃のエジプトのミイラに前腕装飾義手が装着されていたものが発見されている [野坂利也, 2017] [高橋功次, 2011]のをはじめ、ローマの文筆家 Plinius (紀元後 63~113)が記した書物の中で、紀元前 219 年~201 年の第二次ポエニ戦争で、右手に鉄製の前腕義手（ロック機構付きパッシブハンド）をつけて再度戦場へ向かった Marcus Sergius 将軍の記述が残されているとされる [高橋功次, 2011] [橋本義肢製作株式会社, 2019 年 8 月 3 日確認]. 鉄製義手については、中世ドイツの騎士ベルリヒンゲン (Gottfried von Berlichingen, 1480-1562) が右手に鋼鉄の義手を着けて戦った史実を、ゲーテが戯曲「鉄の手ゲッツ・フォン・ベルリヒンゲン (Götz von Berlichingen mit der eisernen Hand)」として発表 (1773) し「ゲッツの鉄腕義手」として有名となった。ゲッツの義手は、鋼鉄でできており、掌の上部に2つの蝶番で指を模したフックが付いていて剣を握る仕掛けとなっている最初のもので、肘の部分まではめて皮のストラップで固定し、指の関節部にジョイントがありよりしっかりと掴めるように工夫された 2 代目ものが、ホルンベルク城に現存する [カラパイア, 日付不明] [Morton, 2015]. 後者は、左手で曲げると手綱を握ることができ、ラチェット機構により指の位置を固定することができるものである。この2代目の義手の仕組みは、19 世紀の版画で公開されている。これらの鉄製義手は、ゲッツ自身が機構を考え、お抱えの武器鍛冶に作らせたものだと言われている [武智秀夫, 1988]. その前後 16 世紀から 19 世紀までの諸国の義手製作への取り組みについては、武智の書籍に詳しい。

1914~1918 年の第一次世界大戦では、大量殺傷兵器により、参戦した各国に多くの切断者が生じた。そのため、義手や義足の研究が国家的なレベルで広がった。イギリスでは、1915 年ローハンプトンに義肢センターが作られ、ドイツでは、1915 年に義肢検定所（「Prufstelieliefur Ersatzglieder」）が設立され、義肢の検定や標準化が行われたことで、義肢の品質や製造技術が発展した [川村義肢株式会社, 2019 年 8 月 3 日確認]. また、その頃ドイツで製作されたブランデンブルグ義手、タンネンベルグ義手は、ベルリン工科大学教授であったシュレージンガーがエンジニアとして初めて義肢の構造、設計について工学的立場から詳しく研究した作業用義手として、その後長く用いられている [武智秀夫, 1988]. また、米国では、1912 年、自らが切断者であった Dorrance (ドーランス) によって能動フックが作られ、能動義手が広く利用されるようになった [大庭潤平ら, 2017]. また、1917 年、アメリカ義肢製作者協会が作られ、戦傷による切断者への義肢支給を円滑にさせることが試みられた [川村義肢株式会社].

第一次世界大戦後の国際的な動きとしては、第一次世界大戦で多くの切断者が出たオーストリア、フランス、ドイツ、イギリス、イタリア、ポーランドから代表が1921年ジュネーブに集まり、1919年のベルサイユ条約の結果生まれた国際連盟の国際保護機関と国際赤十字に、情報交換のための義肢に関する書物の出版、研究体制の確立、義肢展示会の開催などを依頼した。その結果、1924年国際連盟の一機関である国際労働機関（ILO）が「Artificial Limbs」を出版し[武智秀夫, 1988]、当時はそれ以外のことは実現されなかった。しかし、そのとき切断者への対応が国際レベルで考えられた意義は大きいと考えられている。[川村義肢株式会社][武智秀夫, 1988]。

第二次世界大戦後の1945年、リヒテンシュタインで、断端の筋肉の動きでスイッチを入れたり切ったりし握る感覚をフィードバックするワドゥツ義手が製作された[武智秀夫, 1988]。アメリカでは、IBMで選択スイッチ式の電動義手が考案された。筋電図をスイッチにする試みは、1955年イギリスのバッチェイらが行い、この形式の義肢は筋電義手といわれるようになった。筋電義手は、1962年にソ連で、電動モータを駆動力源とし断端の筋電位によって制御する前腕用筋電義手が実用化された。

1952年、西ドイツハイデルベルグ大学では、圧縮炭酸ガスを用いた体外力源義手が開発された[武智秀夫, 1988][川村義肢株式会社]。この義手は、管でガスをふいごに導き、弁を開いたり閉じたりすることで義手の指や肘を動かすものである。このような体外力源義手は、医師や義肢製作者のみの知識が技術では作ることが出来ず、エンジニアの参加が欠かせない。しかし、実用においては、医学側のスタッフが関与しなければならず、武智によると、このようなきっかけからリハビリテーション工学と言われる分野が生まれたとされる。

以上のように、世界史において義手の発達には紀元前から戦争と密接な関係にあり、負傷した兵士が戦いに戻るためであったり、その後の社会的な生活で機能を果たすために義手が作られてきた。しかし、第一次世界大戦後には各国で義肢装具の研究機関が設置され、戦傷者への義手支給を円滑にさせることが考えられるようになり、国際レベルで切断者への対応が考慮された。そして、第二次世界大戦後には、リハビリテーション工学の進歩により、体外に力源を置く筋電義手やその他の電動義手の実用化が進んできたのである。[大庭潤平ら, 2017]。

一方、日本では、明治35（1902）年に刊行された「義手足纂論（鈴木裕一著）」に装飾義手が掲載されていることが義肢に関する日本最古の文献とされている[高橋功次, 2011][川村義肢株式会社, 2019年8月3日確認]。

明治10（1877）年の西南戦争では、手足を切断された兵士に対してオランダから輸入した義手・義足が政府より支給された。この義手は、ヒト型をしていても動かない装飾義手であった。日清戦争（1894～95年）では、昭憲皇后（在位1869-1912年）に

よって恩賜の義肢の下賜が始まった[しょうけい館（戦傷病者史料館）,2020年3月14日確認].

製作の記録のあるものとして、日露戦争（1904～1905年）後、明治39（1906）年に、乃木希典陸軍大将により、両手を失くした兵士のために乃木式義手が考案された [橋本義肢製作株式会社,2019年8月3日確認]。乃木大将は、上肢切断者に、在来の義手よりも一層便利なものをと考えたため、これは物を掴める作業用義手の一種であり、ヤットコの原理で、柄の一方を鎗術の胴に似たもので、体幹に固定し他方の柄を前腕断端にとりつけてものをはさむようにしたものであった[川村義肢株式会社].

恩賜の義手に関しては、明治10年（1920年）の追跡調査によって、装飾義手である恩賜の義手の使用率が低いことが判明し、恩賜の義手の下賜と合わせて陸軍軍医学校内で製作された作業用義手の支給も行われた[しょうけい館].

なお、この頃に用いられていた装飾用義手の手先具は人形浄瑠璃の人形の手のように指の関節が巧みに組み込まれた木製の装飾ハンドであり、人形師が造っていた [野坂利也,2017] [川村義肢株式会社]。これらには、木肌に爪や皮膚の細工が施された型と、柔らかな皮革を貼りつけ外観を整えた型があった。図2-1は、実際に、北支事変（支那事変）の傷痍者に、昭和12（1937）年、香淳皇后（在位1926-1989年）より与えられた恩賜の義手である。指には爪部もあり、関節は第一関節、第二関節の部分を曲げることができる。外側は白桃色に塗装されているが内側は木目が見えている。



図 2-1 恩賜の義手（市原清市孫小宮友根氏所蔵）

作業用義手に類するものに関しては、昭和 15 年（1940 年），装飾用義手と作業用義手の両方の特性を具備した十五年式陸軍制式義手（作業用義手）が開発され [川村義肢株式会社][しょうけい館]，こちらも恩賜の義手として下賜されている [しょうけい館]。

装飾用義手を製作していた人形細工師がいなくなり，木製の装飾義手が作られなくなったことで，これに代わるものとして，合成樹脂製の装飾義手が使用されるようになった。これらは，内部に針金の芯を入れたり，綿やフォームラバー，スポンジなどを充填し，抑えたり引っ掛けたりする機能を持たせる工夫が行われ [澤村誠志, 1992]，日本国内では，とくに使い手の要望により，外観をよりリアルにし強度を増して形が崩れないように補強したものが独自に発展した [立花直樹, 2010]。

第二次世界大戦後，義肢・装具の知識や技術はアメリカから入ってくるようになり，1949 年に国立身体障害者センターが発足し，義肢・装具の国際的な情報交換が活発になった。

1959～62 年，サリドマイド奇形や欠損児の相次ぐ発生により筋電義手，電動義手の開発が盛んになり，1970 年代には，徳島大学の両側高位欠損児用義手（電動義手），東京大学の「Tokyo hand」，熊本大学の前腕義手，早稲田大学の「ワセダハンド 4P 型電動義手」（4 自由度上腕義手），そしてそのワセダハンド 4P 型を母型とした今仙技術研修所が作製した前腕切断者用筋電義手「WIME（Waseda Imasen Myoelectric）ハンド」などが開発された。しかし，これらの電動義手は，重量増などの課題を負っており，いずれもプロトタイプの段階 [加倉井周一, 1993] と考えられるものであった。

なお，WIME ハンドは，1975－1977 年の実用化のためのフィールドテストを経て 1979 年，国産の前腕用筋電義手として市販化されたが，公的給付制度などの問題から普及には至らなかった [東原孝典, 2012] [大塚彰, 2015] [大庭潤平ら, 2017]。

1979 年に，国立身体障害者リハビリテーションセンターが発足し，専門職研修や支給システムの整備，交付基準の設定などを行うことを始めた [三ツ本敦子, 2018]。義肢の研究機関の設置において，我が国はヨーロッパやアメリカに 40～50 年後れている。

日本の義手の開発にはこのような背景があり，澤村 [澤村誠志, 2014] が述べているように，「我が国の義肢装具の製作水準は，戦後の荒廃の中で先進国の技術の進歩や情報から隔絶された状態に置かれ」，義肢装具は国内独自の開発によって進められてきた。

2.1.2 グローブ開発の歴史

装飾手袋（コスメチックグローブ（以降、手袋を「グローブ」と言う））は、人間の手そっくりに外観を整えるために、器械の手に被せて使用する目的で開発されたゴム状弾性を持つプラスチックグローブである。我が国では、1940-60年の人形師の衰退によって装飾義手の製作の衰退が起こり、米国から塩化ビニル製の装飾グローブが輸入され使われるようになった。

塩化ビニル製の装飾グローブは、Dorranceの能動義手や筋電義手など、あらゆるハンドの外観の補綴として用いられている。その後、2000年代にシリコーン樹脂の普及により、装飾義手や装飾グローブの素材として使われるようになり、外観の向上に進展がもたらされた [澤村誠志, 2007]。

素材としての塩化ビニルは、1835年に発見され、1928年に実用化されたものである、日本で素材の実用化に至ったのは1941年とされる [株式会社アイ・メーカー, 2019]。また、シリコーンは、1901年に開発され、素材として使用されたのは1940年である。日本での素材の開発は1941年、販売は1953年とされる [株式会社アイ・メーカー, 2019]。

塩化ビニルグローブ、シリコーングローブの特徴は以下の通りである [北山一郎, 1985] [広瀬幸夫, 1988] [中島咲哉, 1989] [佐藤政博, 2004] [福永秀之, 2004] [高橋功次, 2013]。（ 内は、マイナス面の特徴を表す）

<塩化ビニルグローブ>

- ・皮膚の色合い、皺等外観の再現性に優れる
- ・耐久性が高い、二次加工が容易
- ・高い剛性が指の動きを制限
- ・汚れやすく汚れが取れない
- ・経年劣化により自然に変色



図 2-2 塩化ビニルグローブ（佐藤技研 HP）

<シリコーングローブ>

- ・肌の色や意匠を、塩化ビニルよりもさらに繊細に再現可能
- ・経年変化が起こらず変質や変色も少ない
- ・耐熱に優れる
- ・引裂き強度が低い
- ・加工が容易でない



図 2-3 シリコーングローブ（佐藤技研製，研究室所蔵）

日本におけるグローブの先行研究は、1985年北山らが、当時最も普及していた塩化ビニル製のコスメチックカバーの欠点である汚染の程度を評価する手法を示し、汚染や破損の原因を探り、耐久性等を評価したものがグローブ研究の最初の文献である[北山一郎他, 1985]。その中で、シリコンが新しいグローブの材料として注目材料であると述べた。しかし、1988年の文献では、精密印象に適するシリコンはコスメチックグローブへの利用が考えられたが、強度の低さの問題で実用化されていないと記されている[広瀬幸夫, 1988]。

その後、義手のメンテナンスや汚染に関する研究として、2004年、福永により、義肢装具の材料が塩化ビニルとシリコンであることやそれらの材質の特長[福永秀之, 2004]が記され、辻らは、開発したサイバネティックハンドを人間らしい曲線的な外観とするために、市販のコスメチックグローブから、意匠性が最も優れているシリコン製カバーを使用した [辻敏夫他, 2007]。2014年の高橋の論文 [高橋功次, 2013]では、コスメティックグローブの材質には、ポリ塩化ビニル樹脂とシリコン樹脂の「2種類」があることが明記されている。

一方、海外のグローブ研究においては、1990年 Kruit が、塩化ビニルグローブの母指と指の間の材料を手袋の内側から取り除くことで、塩化ビニルの剛性の緩和を達成した [J., Kruit, 1990]。また、Kruit と同じオランダ・デルフト工科大学のグループの Herder らは、1998年、グローブの内側に熱線と溝を配置することにより、塩化ビニルグローブの剛性とヒステリシスの緩和を行った。この実験により、塩化ビニルグローブの剛性及びヒステリシスが 50%減少したことが確かめられた [J L. Herder, et al., 1998]。また、Smit らは、義手を覆う装飾グローブには、指の関節の屈曲を妨げる正の剛性があることに注目し、らせん引張ばねを使用して、既製の剛性を補正することによって、義手の手指を動かすために必要な入力トルクを減らし剛性を緩和したことについて発表した [Gerwin Smit, et al., 2014]。この研究においては、塩化ビニルグローブで 58%、シリコングローブでは 52%の入力トルクが減少した。Bos らは、2017年、上肢義手に装飾グローブを被せることで発生する粘弾性挙動がシステムに与える剛性とヒステリシスを緩和するため、転がり剛性補正機構 (Rolling Stiffness Compensation Mechanism) を設計し実装した [Ronald A. Bos, et al., 2017]。検証には、6ケの Ottobock 社製塩化ビニルグローブ、2ケの Ottobock 社製シリコングローブ、2ケの Reagal 社製シリコングローブ (滑かなコーティングが施されている) が使用された。

新しいグローブの開発に関して、Davies は、シリコンゴムの耐汚染性が魅力的であるものの、高価であり引裂き強度が低いことを指摘し、室内加硫液体でスラッシュ成形が可能な RTV シリコングローブの開発を行ったことを報告している。RTV シリコングローブは、引裂き強度が高く作られた [Davies EW et al., 1977]。しかし、こ

れは後に、義手グローブの現状の考察を行った Bilotto によって、ラテックス、ウレタン、RTV シリコーンは不成功であったと評された。しかし、シリコーングローブは、塩化ビニルよりも耐久性と審美性が高いため、製造技術の向上が望まれることが記されている [Bilotto S., 1986].

川崎らは、筋電義手の開閉動作の妨げにならない柔軟性の高いグローブの開発のため、素材に天然ゴムを用いた。その結果として、それらの天然ゴムのグローブが従来の電動義手グローブ（OttoBock 社の塩化ビニル製インナーグローブ）より柔軟性が高く義手開閉動作の負荷になりにくいことを示した[川崎賢一郎他, 1998].

以上より、先行研究において、義手グローブには、塩化ビニル製のものとシリコーン製のもののみが存在し、どちらもそれぞれ剛性やヒステリシス、引裂き強度、コスト、汚れなどの問題があることが示されており、また、新素材のグローブの開発についての文献はこれらの他には見当たらない。

以上の先行研究を表 2-1 にまとめる。

表 2-1 義手グローブの先行研究（青字は国内の文献を示す）

	塩化ビニルグローブ	新素材グローブ	その他
目的 又は 内容	剛性の緩和 [Kruit J .1990]	RTV (※) シリコー ングローブの開発 [Davies EW et al., 1977] ※室内加硫液体	グローブの現状の考察 （「ラテックス、ウレ タン、RTVシリコー ンは不成功」）[Bilotto S., 1986]
	剛性とヒステリシス の緩和 [Herder JL et al.,1998]	天然ゴムを用いたグ ローブの開発 [川崎 1998]	塩化ビニルとシリコー ンの材質の特長[福永, 2004]
	剛性の緩和 [Gerwin Smit et al.,2014]		塩化ビニルとシリコー ングローブの比較 [Gerwin Smit et al.,2013]
	幼児用グローブの剛 性とヒステリシスの 緩和 [Ronald A. Bos, et al.,2017]		「コスメチックグロー ブには塩化ビニルとシ リコーン樹脂の2種類が 存在」[高橋2013]

2.2 要求機能

義手は、上肢欠損者の失われた把持機能を代替し、欠損部の形態を補綴するものとして開発されてきた。把持機能とは、指先の形状に応じた物体の把持操りを指し、触覚などの感覚センサや、柔軟性、粘弾性を伴う皮膚質感などがそれを向上させる。また、形態とは、形、皺、指紋、色、爪などの手指の外観を指す。義手用グローブは、義手の表面に位置し、最も人目に触れる場所にあるとともに、最初に物体に接触する部分である。義手用グローブが義手の手先具の動作を妨げずに外観の審美性を確保できるものであるならば、それは、機能的な義手が追う役割を補助するものといえる。

つまり、義手の表皮としての義手グローブの役割は、義手利用者の要望を背景として、公的支給制度の整備も進められており、制度特有の要求も存在する。義手内部の骨格や緩衝材、又は、電動義手の場合には、モータや電池、コントローラやセンサなどを包含する防御カバーとしての役割や、センサとしての機能も必要となるため、多面的な要求項目から構成される。

以降では、義手に対する要求機能をヒトの手に対する要求機能に置き換えて考察し、制度、意匠、対人、センサ機能、耐久性や強度、把持機能、被験者の要求、の順に整理し、手の代替としての義手や義手グローブが追う役割を考える。

2.2.1 制度上の要求

➤ 補装具としての義肢

筋電義手など補装具は、平成5年福祉用具法（「福祉用具の研究開発及び普及の促進に関する法律（平成5年5月6日法律第38号）」）で定められた福祉用具である [障害者の日常生活及び社会生活を総合的に支援するための法律（平成17年法律第123号）][立花直樹, 2010]。それにおいて「福祉用具とは、心身の機能が低下し日常生活を営むのに支障のある老人又は心身障害者の日常生活上の便宜を図るための用具及びこれらの者の機能訓練のための用具並びに補装具をいう」と、日本で初めて福祉用具が定義された。福祉用具はここで「日常生活上の用具」と「機能訓練のための用具並びに補装具」に分類されている。立花は、福祉用具法の目的とされた「高齢者並びに心身障害者の自立促進」「介護を行う者の負担軽減」を鑑み^{注1)}、これらの分類には、福祉用具の要素として生活的側面、介護的側面、機能代替的側面の三要素が含まれていると考え、障害当事者のQOL（生活の質）向上を図る生活的要素が強い福祉用具を「日常生活用具」、介護者の介護負担軽減を鑑みた介護的側面が強い福祉用具を「介護用品」、ADL（日常生活動作）向上などの機能代替的要素が強い福祉用具を「補装具」と位置付けている。

補装具は、平成17年、障害者自立支援法（平成17年法律第123号）によって、「補装具とは障害者等の身体機能を補完し、又は代替し、かつ、長期間にわたり継続して使用されるものその他の厚生労働省令で定める基準に該当するものとして、義肢、装具、車いすその他の厚生労働大臣が定めるもの」と具体的に定義された。同時に、義肢が補装具であるとの位置づけが確立した。その後、障害者自立支援法は、利用者負担のあり方や支給決定のあり方などが論議され、平成24年障害者総合支援法（「障害者の日常生活及び社会生活を総合的に支援するための法律」）として改正された。実務において、補装具は、障害者の生活や就労の能率向上を目的に処方され[井上剛伸他、平成28年3月]、「更生用装具」として長期にわたって使用されるものとされる。治療効果を求められる「治療用装具」と異なり、補装具は、障害の軽減や生活、就労の場での使用効果が求められる。

▶ 補装具の公費支給制度の変遷

補装具は、前述のように昭和24年、身体障害者福祉法（法律第28号）において公費の支給対象とされたが、その支給の方法は現物支給であった。その後、公費の支給について、18歳以上を対象とする身体障害者福祉法（第20条）もしくは満18歳に満たない者を対象とする児童福祉法で定められていたものが、障害者自立支援法（第76条）で一元化され、現物支給から補装具の購入または修理に要した費用（補装具費）の支給へと変更された。これらの法律の変遷と補装具の取り扱い方の相違を表2-2にまとめる。

このように、補装具は、障害の軽減、失われた機能の代替、自立、および社会参加を支援する目的で使用される。

▶ 補装具費支給制度

前節で、日本の制度における補装具の位置づけを確認した。今日、厚生省の定める補装具は、「身体の欠損又は損なわれた身体機能を補完・代替する用具」と定義され、補装具費支給制度は、障害者が日常生活を送る上で必要な移動等の確保や、就労場面における能率の向上を図ること及び障害児が将来、社会人として独立自活するための素地を育成助長することを目的として、障害者の家計の負担能力に応じた額が支給されている。補装具費支給制度を利用しての義肢装具の購入は、完成用部品の指定を受けた補装具がリストアップされたものの中から購入を希望する補装具を選び、市町村の決定によって、購入が許可されたものについて、補装具費が支給される。

これらのことより、制度上の要求は、補装具費支給制度で完成用部品の指定を受けることである。

表2-2 日本の法律における補装具の扱いの歴史

	身体障害者福祉法	障害者基本法	福祉用具の研究開発及び普及の促進に関する法律（「福祉用具法」）	障害者自立支援法	障害者総合支援法 （「障害者の日常生活及び社会生活を総合的に支援するための法律」）
制定年度	昭和24(1949)年	昭和45(1970)年	平成5(1993)年	平成17(2005)年	平成24(2012)年
法律	昭和24年法律第28号	昭和45年5月21日法律第84号	平成5年5月6日法律第38号	平成17年法律第123号	平成24年6月
目的	身体障害者の自立と社会経済活動への参加を促進するため 身体障害者を援助し、及び必要に応じて保護し、もって身体障害者の福祉の増進を図ることを目的		心身の機能が低下し日常生活を営むのに支障のある老人及び心身障害者の自立の促進並びにこれらの者の介護を行う者の負担の軽減を図るため 福祉用具の研究開発及び普及を促進し、もってこれらの者の福祉の増進に寄与し、あわせて産業技術の向上に資することを目的	障害者及び障害児が自立した日常生活又は社会生活を営むことができるよう、必要な障害福祉サービスに係る給付その他の支援を行い、もって障害者及び障害児の福祉の増進を図るとともに、障害の有無にかかわらず国民が相互に人格と個性を尊重し安心して暮らすことのできる地域社会の実現に寄与することを目的	障害者及び障害児が基本的人権を享有する個人としての尊厳にふさわしい日常生活又は社会生活を営むことができるよう、必要な障害福祉サービスに係る給付、地域生活支援事業その他の支援を総合的に行い、もって障害者及び障害児の福祉の増進を図るとともに、障害の有無にかかわらず国民が相互に人格と個性を尊重し安心して暮らすことのできる地域社会の実現に寄与することを目的
概要	身体障害者は、自ら進んでその障害を克服し、その有する能力を活用することにより、社会経済活動に参加することができるように努めなければならない。	全ての国民が、障害の有無によって分け隔てられることなく、相互に人格と個性を尊重し合いながら共生する社会を実現するため 障害者の自立及び社会参加の支援等のための施策		全ての国民が、障害の有無によって分け隔てられることなく、相互に人格と個性を尊重し合いながら共生する社会を実現するため、 全ての障害者及び障害児が可能な限りその身近な場所において必要な日常生活又は社会生活を営むための支援を受けられることにより社会参加の機会が確保されること及びどこで誰と生活するかについての選択の機会が確保され、地域社会において他の人々と共生することを妨げられないこと並びに障害者及び障害児にとって日常生活又は社会生活を営む上で障壁となるような社会における事物、制度、慣行、観念その他一切のものの除去に資することを旨とする	
実施主体	国及び地方公共団体	国及び地方公共団体	厚生労働大臣及び経済産業大臣	市町村＞都道府県＞国	
特記事項		福祉用具の給付又は貸与の必要性. 福祉用具の研究及び開発の促進の必要性	「福祉用具」が定義	「補装具」が具体的に定義	
公費の支給制度	現物支給. 市町村と補装具政策委託を締結した業者に限る.			補装具費の支給. 市町村（身体障害者更生相談所）の直接判定. 申請者と補装具政策業者間の直接契約	

2.2.2 意匠上の要求

外国では、古くから個性を尊重する文化があるが [Rounds, 1947], 日本では、見た目が突出して他人と異なることは劣等感を持つべきものとされ、いじめや差別の対象になりやすいため、身体の形状に障害がある場合、当事者やその家族は、当人の障害のある部分を隠そうとする。

手の先天異常や欠損は外観から明らかであるため、手の形状に関わる部位に障害を持つ義手利用者は、義手が人の手にそっくりであることを切望する [梶谷 他, 2001]との研究報告がある。上肢の中でも手先または掌は、身体の末端に位置し、さらには、日常生活において、最も頻繁に目に触れる場所に存在する。また、手指の所作は、職業能力や技能、すなわち、その人の経験の程度や生活能力を如実に体現するため、本能的に手指の運動を目が追いかける対象でもある。同時に、手指で触れることにより、傷や疾患を癒す場合もある。このように、手指の有無は、人の本能的な興味の対象であり、自然と意識が集中することになる。よって、他者からの視線は、時に精神的抑圧を生じさせることにつながる事が多く、そのような義手を装着することで他人の好奇な視線や関心をそらすことができ、人と異なるという劣等感からもしばし逃避できるのである。

このため、日本において、義手の外観の役割を司る装飾グローブは、限りなく人の手に似せるように、材質の質感や色が熟慮され、健常手と相違ない手指の形や皺、指紋、爪の細部まで再現されるよう開発が進化している。

ここで、義手グローブに求められる意匠上の要求、とは、人にそっくりである外観の再現を意味し、具体的には、健常手と見紛う上肢の外観をいう。 [上肢に障害を有する者に対する職業訓練の実践研究報告書～製造系職種編～]

上肢の「外観」は、手、指、手首、前腕、肘、爪、皺、色、指紋、血管、体毛、柔軟性、質感などから構成される。本論文では、義手用手袋を対象を限定するために、上腕部と肩の部分に関する記述を除いた。上肢の解剖学的記述は3章において詳述するが、ここでは、要求機能を抽出するために必要な概略的な点に注目して記述する。

- ・ 手：手とは、肩から先に延びる腕（上肢）の先端付近に位置し、数本の指部と手掌部によって構成される身体器官の一つである。掌部には、手首（手関節または手根関節）から延びる5個の骨（中手骨）によって構成され、CM関節部分で屈曲を可能とする。

- 指：指とは、腕の先端部に位置し、掌部の中手骨の先に、それぞれ5本の指が分かれて連結される。5本の指は、それぞれ、拇指、示指、中指、環指、小指と呼ばれる。各指は、3つの骨と3つの関節によって構成され、それぞれ、基節骨、中節骨、末節骨、MP関節、PIP関節、DIP関節と呼ばれる。この中で拇指のみについては、中節骨が存在せず、PIP関節とDIP関節の代わりにIP関節により、基節骨と末節骨が直接連結される。指の屈曲に関係する主要な筋は、前腕部と掌部に存在し、腱によって連結され、筋の収縮に伴って発生する牽引力が伝達されることにより指が屈曲または内外転することができる。
- 手首（手根関節）：手首部は、掌と前腕の間に位置する関節を意味し、掌背屈と橈尺屈の2つの運動自由度を有する。前腕部から掌部までの間において、最も括れた部分であり、重要な外観的特徴となっている。
- 前腕：前腕部は、肘から手首までの間に位置する円錐台状の部分の意味し、指部と手首部の筋群が収納されている。また、肘に近いほど直径が大きくなるような外観的特徴を有する。前腕部には、橈骨と尺骨が並行して配置されており、これらの二つの骨がねじれることにより、回内外の運動を実現する。一般には関節の屈曲等の運動では、関節部に皺ができるが、前腕での回内外運動においては、皺を生じることはない。
- 肘：肘部は、上肢上腕と前腕部の間に位置する関節であり、1つの運動自由度を有する。肘部には顆上骨という突起が両側に一つずつ存在し、これが外観的特徴となる。顆上骨は前腕義手の断端部ソケットを引っかけて固定するために用いられる。
- 爪：爪は、指部先端に位置する半円筒状の薄板であり、皮膚の一部である。爪の主要な機能は、指先の軟部組織を背側から支持し、軟部組織の変形を抑制する働きを有する。この機能により、物体把持において軟部組織の先端は物体に密着することを可能とする。一方で、爪は皮膚よりも硬質な材料であるため、皮膚を引っ掻いてかゆみを緩和するなどの役割も有する。また、爪の形状は、健康状態を反映しており、爪表面に波紋などが生じる場合には、何らかの疾患のシグナルにもなる。
- 皺襞：皺襞は、皮膚上に分布する細い溝状の構造である。皺には、関節運動により生じる皮膚変形の余剰部分を折りたんで、皮膚表面に収納する機能を有しており、皮膚が大きく変形した場合でも破断を防ぐ役割を有する。また、年齢を表現

する外見的特徴の代表であり、一般には、年齢を追うごとに皺が深くなる。掌の腹側には深い襞が存在し、指の屈曲時に大きく揺動する。この襞は、手相と呼ばれ、日常生活における手指の利用状態に応じて変化するため、古くから占いなどに利用される。

- ・ 色：表皮の色は、茶系の肌色を基本とするが、腹（手掌）側と背側で大きく異なり、一般には腹側は薄く、背側は濃い色調を有する。また、指部先端や掌部の腹側部は赤みを帯びており、その色調やパターンは一様ではない。皺の部分については、皺のくぼみの働きで陰になる部分が多くなるため、濃い色調となる。爪の部分については、ピンク色から薄い肌色または乳白色であるが、ネイルアートなどを施すことで、審美性を向上させることも多く行われる。
- ・ 指紋：指先端の腹側部には、渦巻き状の凹凸が存在する。この凹凸により、指先端の表面積が大きくなる。接触力の変化に応じて、指先の摩擦特性を変化させる。
- ・ 皮膚：身体の表面を覆う器官であり、表皮（上皮層）と真皮、及び、皮下組織から構成される。掌部の皮膚は、他の身体の皮膚と比較すると非常に分厚く丈夫な特徴を有している。また、身体内部と外界との境界面に位置する器官であり、外部との力学的相互作用、ガス交換や温度調整、および、感覚などの機能を果たす。
- ・ 血管：掌部の背側および腹側や指部関節には太い静脈が通っており、手の色調やパターンおよび凹凸などの外観的特徴を形成している。
- ・ 体毛：体毛は体表の保護や保湿、及び、モノに触れるとき、肌より先に体毛が触れるため、「感覚器官」としての働きがある。虫やごみの付着を検知したり、皮膚と外界の緩衝領域を維持する役割を持つ。
- ・ 柔軟性：手指は柔軟な材料により覆われており、外界との物理的相互作用では変形を伴う。手指表面の変形能には弾性と粘性の両方の性質を有する。弾性により、位置の復元を行い、粘性により衝撃的な運動エネルギーを吸収するため、物体把持において物体を適正な位置に安定的に保持する機能を有する。
- ・ 質感：皮膚を構成する表皮と真皮は、透明度が高く光をよく透過するとともに、表面での反射や散乱が起こる。一方、皮下組織は透明度が低く、特定の光しか透過せず、多くの光は皮下組織の表面において、散乱される。即ち、表面での光の反射と内部での散乱が適度にバランスしていることが肌の色合いや質感を特徴づけており、このバランスが外観の様々な印象を形成する。一般に、皮下での散

乱を持たない場合には、表皮での全反射となるが、この場合には、絵の具を表面に塗った時と同様な状態となるため、皮膚の質感とは大きく異なるものとなる。特に、化粧品メーカーを中心として、皮膚の審美性の研究は高度に発展しており、透過性を有する発色材料の開発などが盛んに行われている。義肢装具のメーカーにおいても、この皮膚の質感に着目した義手用グローブの製品も開発されており、シリコンを用いた透明表皮を有するグローブの製品が存在する。

これらを表にまとめた（表 2-3）

表 2-3. 外観を構成する要素

要素	種類	内容	外見に関する物理的特性
形	手	<ul style="list-style-type: none"> ● 肩から先に延びる腕（上肢）の先端付近に位置 ● 数本の指部と手掌部によって構成 ● 掌部には、手首（手関節または手根関節）から延びる5個の骨（中手骨）によって構成 	CM 関節部分で屈曲を可能とする
	指	<ul style="list-style-type: none"> ● 腕の先端部に位置し、掌部の中手骨の先に、それぞれ5本の指が分かれて連結される。 ● 5本の指は、それぞれ、拇指、示指、中指、環指、小指と呼ばれる。 ● 各指は、3つの骨と3つの関節によって構成され、それぞれ、基節骨、中節骨、末節骨、MP関節、PIP関節、DIP関節と呼ばれる。この中で拇指のみについては、中節骨が存在せず、PIP関節とDIP関節の代わりにIP関節により、基節骨と末節骨が直接連結される。 	指の屈曲に関係する主要な筋は、前腕部と掌部に存在し、腱によって連結され、筋の収縮に伴って発生する牽引力が伝達されることにより指が屈曲または内外転することができる。
	手首	<ul style="list-style-type: none"> ● 手首（手根関節）部は、掌と前腕の間に位置する関節を意味する ● 前腕部から掌部までの間において、最も括れた部分であり、重要な外観的特徴 	掌背屈と橈尺屈の2つの運動自由度を有する。
	前腕	<ul style="list-style-type: none"> ● 肘から手首までの間に位置する円錐台状の部分の意味し、指部と手首部の筋群が収納されている。 ● 肘に近いほど直径が大きくなるような外観的特徴 ● 一般には関節の屈曲等の運動では、関節部に皺ができるが、前腕での回内外運動においては、皺を生じることはない。 	前腕部には、橈骨と尺骨が並行して配置されており、これらの二つの骨がねじれることにより、回内外の運動を実現
	肘	<ul style="list-style-type: none"> ● 肘部には顆上骨という突起が両側に一つずつ存在し、これが外観的特徴となる。 	上肢上腕と前腕部の間に位置する関節であり、1つ

		<ul style="list-style-type: none"> ● 顎上骨は前腕義手の断端部ソケットを引っかけて固定するために用いられる。 	の運動自由度を有する。
	爪	<ul style="list-style-type: none"> ● 指部先端に位置する半円筒状の薄板 ● 皮膚の一部 ● この機能により、物体把持において軟部組織の先端は物体に密着することを可能とする。 ● 爪は皮膚よりも硬質な材料であるため、皮膚を引っ掻いてかゆみを緩和するなどの役割も有する。 ● 爪の形状は、健康状態を反映しており、爪表面に波紋などが生じる場合には、何らかの疾患のシグナルにもなる。 	爪の主要な機能は、指先の軟部組織を背側から支持し、軟部組織の変形を抑制する働きを有する。
	皺襞	<ul style="list-style-type: none"> ● 皮膚上に分布する細い溝状の構造 ● 年齢を表現する外見的特徴の代表であり、一般には、年齢を追うごとに皺が深くなる。 ● 掌の腹側には深い襞が存在し、指の屈曲時に大きく揺動する。この襞は、手相と呼ばれ、日常生活における手指の利用状態に応じて変化するため、古くから占いなどに利用される。 	関節運動により生じる皮膚変形の余剰部分を折りたんで、皮膚表面に収納する。 皮膚が大きく変形した場合でも破断を防ぐ。
色 合 い	色	<ul style="list-style-type: none"> ● 表皮の色は、茶系の肌色を基本とするが、腹側と背側で大きく異なる。一般には腹側は薄く、背側は濃い色調を有する。 ● 指部先端や掌部の腹側部は赤みを帯びており、その色調やパターンは一様ではない。 ● 皺の部分については、皺のくぼみの働きで陰になる部分が多くなるため、濃い色調となる。 ● 爪の部分については、ピンク色から薄い肌色または乳白色であるが、ネイルアートなどを施すことで、審美性を向上させることも多く行われる。 	質感の項に詳述
	指紋	<ul style="list-style-type: none"> ● 指先端の腹側部には、渦巻き状の凹凸が存在する。この凹凸により、指先端の表面積が大きくなる。 	接触力の変化に応じて、指先の摩擦特性を変化させる。
	皮膚	<ul style="list-style-type: none"> ● 身体の表面を覆う器官であり、表皮（上皮層）と真皮、及び、皮下組織から構成される。 ● 掌部の皮膚は、他の身体の皮膚と比較すると非常に分厚く丈夫な特徴を有している。 ● 身体内部と外界との境界面に位置する器官である。 	外部との力学的相互作用、ガス交換や温度調整、および、感覚などの機能を果たす
	血管	<ul style="list-style-type: none"> ● 掌部の背側および腹側や指部関節には太い静脈が 	光学的特徴により静脈が青黒い線となって見え

		通っており、手の色調やパターンおよび凹凸などの外観的特徴を形成している。	る。
触 感	体 毛	<ul style="list-style-type: none"> ● 体表の保護や保湿、および、感覚機能を担っており、虫やごみの付着を検知したり、皮膚と外界の緩衝領域を維持する役割を持つ。 	弾性により、小さい物体の付着による共振周波数などの力学的特徴が変化する。
	柔 軟 性	<ul style="list-style-type: none"> ● 手指は柔軟な材料により覆われており、外界との物理的相互作用では変形を伴う。手指表面の変形能には弾性と粘性の両方の性質を有する。 	弾性により、位置の復元。粘性により衝撃的な運動エネルギーを吸収。物体把持において物体を適正な位置に安定的に保持する機能。
	質 感	<ul style="list-style-type: none"> ● 表面での光の反射と内部での散乱が適度にバランスしていることが肌の色合いや質感を特徴づけており、このバランスが外観の様々な印象を形成する。一般に、皮下での散乱を持たない場合には、表皮での全反射となるが、この場合には、絵の具を表面に塗った時と同様な状態となるため、皮膚の質感とは大きく異なる。 ● 化粧品メーカーを中心として、皮膚の審美性の研究は高度に発展しており、透過性を有する発色材料の開発などが盛ん。 ● 義肢装具のメーカーにおいて、この皮膚の質感に着目した義用手袋の製品も開発されており、シリコンを用いた透明表皮を有する手袋の製品が存在。 	皮膚を構成する表皮と真皮は、透明度が高く光をよく透過するとともに、表面での反射や散乱が起こる。一方、皮下組織は透明度が低く、特定の光しか透過せず、多くの光は皮下組織の表面において、散乱される。

2.2.3 对人的要求

ヒトの手は、拳で壁を叩いたり殴ったりしても手の機能が崩壊するほど壊れてしまうことはなく、衝撃の大きさと比較して自身のダメージは少なく頑丈である。手の内側は、掌の握力でハンドボールやバレーボールなど大きなボールをも掴めるほどしなやかな動きをする。手首と広げた掌で作る弾みを利用すると跳び箱の上で空中に浮いた身体を支えられるほどの突っ張り力を持つことができ、また、手指は、関節の引っ掛け力と指先の摩擦力だけで自身を懸垂し鉄棒にぶら下がることができるほど強い。

手や掌や指先が持つこれらの耐衝撃性や緩衝性を对人的要求とする。

2.2.4 触覚, 力覚などセンサ機能の要求

ヒトの手は, 物を巧みに操るといった役割とともに, 対象の物理情報を取得するという役割を担っている [田中由浩, 佐野明人, 2014]. この役割を主に行うのは触覚である. 触覚は, 皮膚を通して感じる感覚であり, 圧力, 温度, 振動, 緊張などをセンシングすることが可能である. 篠田 [篠田裕之, 2000] は, 皮膚が検出する情報は, 温度, 化学的作用の他に機械変形であると述べている.

そして, 機械変形に関連して人が検出している情報は,

- ・接触の力と方向, 場所
- ・物体の滑りと滑りの予知や摩擦
- ・面の曲率, 接触が面であるか線であるか点であるかの判別
- ・硬さや柔らかさ
- ・ねとねと感やぬるぬる感
- ・テクスチャの繊細な構造

であるとする.

人は, 触れることで, 対象のこのような形状や質感を知覚することができる. 前出の田中は, この触覚は, 対象と皮膚との力学的相互作用による皮膚の変形や熱の移動を機械受容器が取得することで行われており, すなわち, 皮膚は, 機械刺激が機械受容器に到達するまでの力学的フィルタの役割を担っていると評した.

失った手の機能をロボットハンドで代替しようとしたとき議論となるのが, ロボットハンドの触覚フィードバック機能の有無である. 失われた触覚の回復は, 患者が物や人に触ったという感触と圧力を再び感じるようになることで改善する. 機械刺激が皮膚を通して身体のだこかの機械受容器に届くようにすること, つまり, ロボットハンドの表皮を通して, 身体のだこかの機械受容器にフィードバックされるようになることが望まれる [下条 誠, 2008]. 下条はまた, 触覚センサに望まれる機能について, 自由局面の被覆, 接触部位の形状特徴の検出, 指先カバーの働き, センサー一体型ハンド等を挙げている [下条誠, 2019]

このような, 触覚または力覚など感覚を検知するセンサ機能を持つことを要求仕様とする.

2.2.5 耐久性や強度など，材料力学的要求

ロボットハンドと義手は，似て非なるものである [横井浩史他, 2017]. ロボットハンドは，手の形を模してはいても重量やサイズの制限は設定されていない. また，日常生活環境での使用を想定していないため，体重を支えることや無理な方向に曲げられてしまうなどの想定は不要である.

しかし，義手の利用者は，工学の専門家ではないので，義手の骨格の脆弱さについて考えてもいない. そのため，指先で体重を支えることや，手指に無理な力をかけて指を広げようとすることも頻繁に起こす. ヒトが使用する義手は，このような力がかかることを想定する必要がある. すなわち，義手グローブは，このような無理な状況においても，日常生活レベルの耐久性を有していることが望ましく，製品開発の重要な要求項目となる.

日常生活レベルの耐久性の要求とは，例えば，オフィス業務や事務，農業，運転などの労務関係や，炊事，洗濯，掃除，整容，トイレ，入浴，就寝，着替えなどの家庭生活の関係，運動，勉強，遊び，飲食，などの学校関係，ゴルフ，楽器演奏，読書などの趣味芸能関係などがある.

- ・ 労務関係：事務作業では，紙や筆記具を用いることが多いため，指先が摩耗し指紋がなくなったりタコができたりするなど，部分的に繰り返し力が作用することが多い. また，筆記用具を用いることにより，指先や掌部には黒い色が付着しやすい. また，農業や運転においては，比較的強い力で物体を把持したり引っかけたりすることが多く，特に指先や手首部には局所的に強い圧迫力やせん断力が作用する. また，泥の付着や水の取り扱いの機会も多い. そのため，手指・掌・手首など力学的相互作用が繰り返し作用することが想定される部分については，摩耗強度，耐腐食性，防水性が要求されるとともに，洗浄できることが望ましい.
- ・ 家庭生活：家庭生活では，大きな重量を有する者を取り扱う機会は少ないため，力学的相互作用に対する強度は要求されないが，水回りの作業や飲食や整容など，手指を清潔に保つ必要のある場合が多いため，耐水性は必須であるとともに，洗浄できる必要性が大きい.
- ・ 学校生活：小学校から高校程度までにおいて，鉄棒，縄跳び，球技など，体を支えたり，ボールを打ち付けたりするなど，手先に衝撃力や強い圧迫力，摩擦力が作用する場合が多いため，力学的相互作用に対する耐久性の要求が大きい.
- ・ 趣味：趣味については，繰り返しの頻度が高いため，耐摩耗性に対する要求が大きくなる. また，技能や芸術性が要求されるものが多いため，指先の操作性や感

覚などの制御や感覚フィードバックなどの機能的要求が大きい。
これらを表 2-4 にまとめた。

表 2-4 材料力学的要求

種類	内容	要求
労務関係	<ul style="list-style-type: none"> ● 紙や筆記具を用いることが多いため、指先が摩耗し指紋がなくなったりタコができたりするなど、部分的に繰り返し力が作用することが多い。 ● 筆記用具を用いることにより、指先や掌部には黒い色が付着しやすい。 ● 農業や運転においては、比較的強い力で物体を把持したり引っかけたりすることが多く、特に指先や手首部には局所的に強い圧迫力やせん断力が作用する。 ● 泥の付着や水の取り扱いの機会も多い。そのため、手指・掌・手首など力学的相互作用が繰り返し作用することが想定される部分については、摩耗強度、耐腐食性、防水性が要求されるとともに、洗浄できることが望ましい。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 繰り返し力への耐性 ● 強い圧迫力への耐性 ● 摩耗強度 ● 耐腐食性 ● 防水性
家庭生活	<ul style="list-style-type: none"> ● 大きな重量を有する者を取り扱う機会は少ないため、力学的相互作用に対する強度は要求されない ● 水回りの作業や飲食や整容など、手指を清潔に保つ必要がある場合が多いため、耐水性は必須であるとともに、洗浄できる必要性が大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 耐水性 ● 耐薬品性
学校生活	<ul style="list-style-type: none"> ● 若年層では、鉄棒、縄跳び、球技など、体を支えたり、ボールを打ち付けたりするなど、手先に衝撃力や強い圧迫力、摩擦力が作用する場合が多いため、力学的相互作用に対する耐久性の要求が大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 耐衝撃性 ● 強い圧迫力への耐性 ● 耐摩耗性 ● 力学的相互作用に対する耐久性
趣味	<ul style="list-style-type: none"> ● 趣味については、繰り返しの頻度が高いため、耐摩耗性に対する要求が大きくなる。 ● 技能や芸術性が要求されるものが多いため、指先の操作性や感覚などの制御や感覚フィードバックなどの機能的要求が大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 耐摩耗性 ● 操作性 ● 感覚フィードバック

これらをまとめると、力学的相互作用や化学的相互作用などが主要な項目を占める。力学的相互作用においては引張強度や摩耗強度などとなり、化学的相互作用においては、耐腐食性、防水性、耐熱性などの材料力学的要求となる。

2.2.6 把持の安定性・即応性等物体の把持操りのパフォーマンス上の要求

手は、物体操作のための主要なインターフェースであり、外部の物体と身体を一体化するための接続部品としての役割を有する。特にヒトは道具を使うことにより、日常生活の利便性を向上させているため、様々な形態的特徴を有する物体との相互作用を円滑に行うことが、手に求められる主要機能となる。よって、義手には、この機能を代替することが要求項目となる。

物体操作は、把持と操りに分類され、把持は、手指のいずれかの部分を用いて物体を身体に固定することを意味し、操りは、手指のいずれかの部分を用いて物体と身体の相対運動を発生させることを意味する。

把持において、物体を身体に固定するためには、手指と物体の相対運動を急速に抑制することが必要であり、一般には、指先での挟み込みや握りなどの把握動作が用いられる。把握動作において物体と手指との接触状態は、皮膚の柔軟性を用いて物体の揺動を抑制したり、自動調心するなどの受動安定性が必要となる。また、物体把持において、指先と物体との密着性が高ければ高いほど、物体を把持するために要する力は小さくて済むため、物体把持は楽になる。しかしながら、一方で、身体から物体を解放させることも必要であり、指先を開くことにより、これを実現する。この時に、指先と物体が密着していると、指先から物体が剥がれるのに時間を要するため、物体を離そうとする運動意図とは時間差を生じる。よって、物体と指との剥離性は良い方がよくなり、相反する性質が要求される。

操作については、上記の固定と解放および移動を要素とし、物体と身体の相対運動を実現する。ヒトの日常生活において、衣食住すべてを実現するための基盤的な機能であり、その重要性は高く、非常に多岐に及ぶため、その様相は非常に複雑なものとなり、一般的に論じることは困難である。

ここでは、日常生活に現れる基礎的で簡単な操りに限定して、機能的要求を整理する。

日常生活レベルの操りの事例は、

- ・ 飲食時にコップや箸、スプーン、フォークなどを口元に運ぶ。
- ・ 炊事において、なべやヤカンなどに水や材料を入れたり、コンロに運ぶなどする。
- ・ 筆記具を持って字や記号を書く。
- ・ バットやラケットでボールを打つ。
- ・ ハンドルに力を作用させて回転させる。
- ・ 携帯電話を耳元まで運んだり、文字を入力する。

- ・バッグを肩にかける.
- ・お風呂の水道の蛇口やガスのコックをひねる.

これらを表 2-5 にまとめた.

表 2-5 操りを伴う物体操作の事例

シーン	具体例	動作	付随動作
飲食	コップや箸, スプーン, ホークなどを口元に運ぶ	移動	摘み, 握り
	食べ物を切る, 分ける, 入れる	移動	摘み, 握り
炊事	なべやヤカンなどに水や材料を入れたり, コンロに運ぶ.	移動	握り, 引っかけ
	皿やコップを洗う	保持, 移動	握り, 支持
	お風呂の水道の蛇口やガスのコックをひねるなどの操作する.	移動, 保持, 回転	摘み
掃除	掃除機などを使って部屋の清掃を行う	移動, 保持, 回転	握り, 支持
整容	櫛やブラシ, 化粧品を使って, 身だしなみを整える	移動, 保持, 回転	摘み
更衣	服を着る脱ぐ, ボタンを留める外す, ファスナーを上げる下げる	移動, 保持	摘み
事務	筆記具を持って字や記号を書く	移動, 保持	握り, 摘み, 抑える
	書類を整理する, 分類する	移動	摘み, 捲る, 数える
	解体電話を耳元まで運んだり, 文字を入力する	移動, 保持	摘み
	通勤時にバッグを肩にかける, リュックを背負う	移動	握り, 支える
運動	バットやラケットでボールを打つ	移動, 保持	握り, 引っかけ
運転	ハンドルやチェンジレバーに力を作用させて回転, 移動させる.	移動, 保持	握り, 引っかけ
	ドアを開けて乗り込む	移動, 保持	摘み, 引っかけ, 握り
	トランクを開けて荷物を積む	移動	握り
趣味	ペイント, 飾る	移動	摘み
	楽器を弾く	移動, 回転, 保持	握り, 摘み

などである. 即ち, 必要とされる機能は, 指先に固定された物体の位置と姿勢の移動であることがわかる. よって, 義手において要求される基礎的な操り機能は, 物体の位置と姿勢の移動であり, 性能評価の対象となる.

2.2.7 義手利用者の要求

義手利用者が義手に求める要件を調査するため、義手利用者アンケートを行った。

評価項目は、以下の4項目とした。

(1) 動作パターンの要求 (表 2-7)

基準金額を60万円、機能拡張による重量および値段の増加(1動作あたり+100g, +3万円)と設定し、この条件において、希望する動作の調査

(2) 重量とサイズ (表 2-8~2-10)

モータやコントローラがソケット内に収納されている一体型、ソケット外に収納される分離型の希望調査と、それぞれにおいて許容できる大きさ、重量の調査

(3) 最低限の把持力 (表 2-11)

(4) 装飾用グローブの有無 (表 2-12)

また、アンケートの形式は、はい/いいえの2択式を基本とし、選択肢外の要望について備考記入の形式で調査を行った。

その結果、まず、じゃんけんのチョキの形のようなハンドの多自由度化によって初めて実現する機能よりも、「物をつかむ」といった、より具体的な日常生活の中での動作の要求が多く寄せられた(表 2-7)。加えて乳児、幼児といった子供を対象とする場合、同年代の子供たちが普通に行う動作の中で、「あやとり」や「鉄棒」といった両手を使う動作への要望が非常に強かった。

また、健常肢と同サイズ、重量であるだけでなく、コントローラやバッテリーといった義手を構成する部品のすべてが義手本体の中に収まった一体型であり、大きさなども健常肢に似せてほしいという要望が非常に多いことが分かった(表 2-8)。

そして特に、装飾用グローブなどで外見をヒトの手に似せることを9割以上の方々が希望を寄せられており、「冬場であれば長袖で隠せるが、夏場では隠せないで困る」といった具体的な理由も寄せられた。

表 2-6 被験者一覧

被験者	性別	年齢(実施当時)	欠損部位
A	女	2	左前腕(短断端)
B	男	3	左前腕(短断端)
C	女	4	右前腕(短断端)
D	女	8	右腕前腕(短断端)
E	女	9	右上腕
F	女	11	右前腕(短断端)

G	男	34	右前腕(短断端)
H	男	40	左肩離断
I	男	46	左腕前腕
J	男	47	右腕前腕
K	女	65	右前腕(長断端)

表 2-7 評価項目(1) 動作パターンの要求

(○：希望する，×：希望しない，空白：未回答もしくは選択肢外を記入)

被験者	五指の屈伸	つまみ動作	じゃんけんのチョキ	手首回内外	手首掌背屈	拇指のみの屈伸	示指のみの屈伸	細物体のつまみ
A	○	○	×	×	×	×	×	○
B	○	○	×	×	×	×	×	○
C	○	○	×	○	○	○	×	○
D	○	○		○	○	○		○
E	○	○	○	○	○	○	○	○
F	○	○	×	○	×	×	×	○
G	○	○	×	○	○	○	○	×
H	○	○	×	×	×	×	×	×
I	○	○		○	×	○		○
J	○	○		○	○	○	×	○
K	○	○	×	○	○	○	×	○

表 2-8 評価項目(2) 重量とサイズ(一体型と分離型の希望)

(○：希望する，×：希望しない，空白：未回答もしくは選択肢外を記入)

被験者	一体型	分離型
A	○	×
B	○	×
C	○	×
D	○	×
E	○	×
F	○	×

被験者	一体型	分離型
G	○	×
H	○	×
I	×	○
J	○	×
K	○	×

※一体型：モータやコントローラを内蔵

表 2-9 評価項目(2) 一体型の場合の重量とサイズ
 (○：希望する，×：希望しない，空白：未回答もしくは選択肢外を記入)

被験者	健常肢と比較して許容できる太さ				義手の重量				
	+0cm	+1cm	+2cm	+3cm	250g	500g	750g	1kg	1.5kg
A	○	×	×	×					
B	○	○	○	×	○	×	×	×	×
C	○				○				
D	○	○	×	×	○	○	×	×	×
E	○	×	×	×	○	×	×	×	×
F		○				○			
G				○				○	
H	○	○	○	○	○	○	○	○	×
I									
J									
K	×	×	×	○	×	○	×	○	×

表 2-10 評価項目(2) 分離型の場合の重量とサイズ
 (○：希望する，×：希望しない，空白：未回答もしくは選択肢外を記入)

被験者	分離部の大きさ(ペットボトルを比較対象)			分離部の重量		
	350ml	500ml	1L	500g	1kg	2kg
A	○			○		×
B	○	×	×	○	×	○
C			○			×
D	○	○	×	○		
E	○			○		
F	○			○		
G		○			○	×
H	○	○	○	○		
I						
J						
K	○	○	×	○	○	×

表 2-11 評価項目(3) 最低限の把持力

(○：希望する，×：希望しない，空白：未回答もしくは選択肢外を記入)

被験者	200g	400g	500g	1kg	2kg
A			○		
B	○	○	○	×	×
C					○
D	○	○	○	○	○
E	○	○	○	○	○
F				○	
G	○	○	○	○	○
H	○	○	○	×	×
I	○	○	○	○	×
J	○	○	○	○	○
K	○	○	○	○	×

表 2-12 評価項目(4) 装飾用グローブの有無

(○：希望する，×：希望しない，空白：未回答もしくは選択肢外を記入)

被験者	有	無
A	○	×
B	○	×
C	○	○
D	○	×
E	○	×
F	○	×

被験者	有	無
G	○	×
H	×	○
I	○	×
J	○	×
K	○	×

アンケート調査の結果，義手利用者が希望している義手に対する要件は，第一に外観であり（表 2-12），装飾上の希望として，身体表面の色や指紋，皺などのテクスチャ情報が不可欠であり，可能な限り利用者の手指の特徴に近い外観を持つ義手の開発が望ましいということが判明した。

2.3 研究目的

2.1 で、義手グローブが開発された背景や歴史、先行文献について述べた。

2.2 で、義手や義手グローブへの要求について述べた。

これらを踏まえ、本研究の目的は、

- 塩化ビニル，シリコーンに次ぐ，新しい材料を用いるもの
- 補装具費支給制度で完成用部品の指定を受けることができるもの
- 人にそっくりである外観の再現が可能なもの
- 手や掌や指先が持つ耐衝撃性や緩衝性を備えるものであること
- 触覚，力覚など感覚を検知するセンサ機能を持つこと
- 引張強度や摩耗強度，耐腐食性，防水性，耐熱性が考慮されていること
- 物体の位置と姿勢の移動が適切にできること

上記の要求を満たす筋電義手用グローブの開発とする。

2.4 関連する研究の動向

2.4.1 手の形, 手指の自由度, 把持と把握

図 2-4 に手指の骨格構造を参考としたロボットハンドのリンク・ジョイントの構造を模式的に示す。

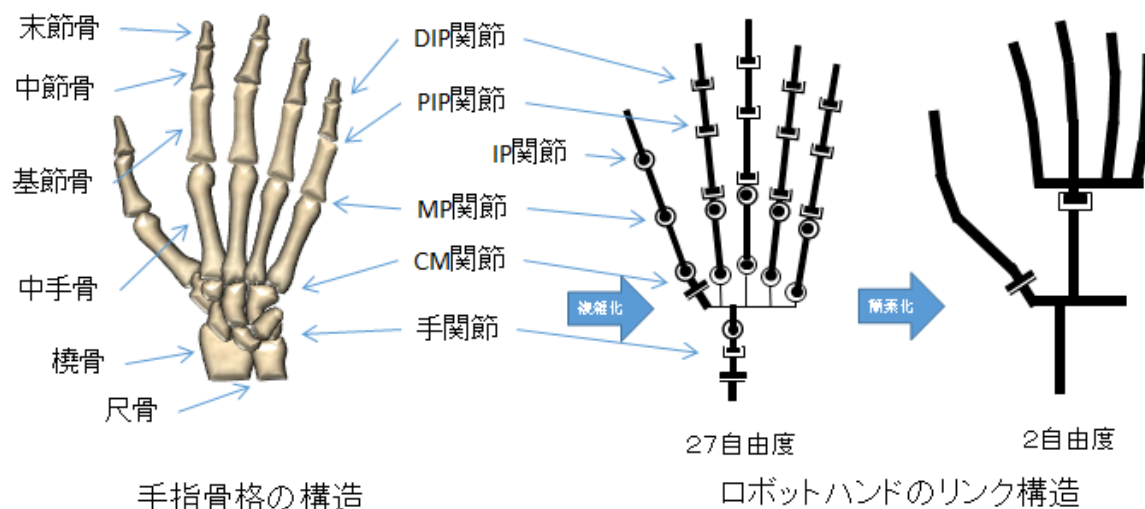


図 2-4 手指の骨格構造とロボットハンドのリンク機構 [横井浩史他, 2018]

母指には3つの屈曲関節が存在し、遠位から IP 関節 (interphalangeal joint), MP 関節 (metacarpophalangeal joint), CM 関節 (carpometacarpal joint) である。CM 関節は内外転の自由度も有しており、母指は4つの運動自由度を有する。示指から小指は、遠位から DIP 関節 (distal inter phalangeal joint), PIP 関節 (proximal interphalangeal joint), MP 関節, CM 関節から構成されるが、ここでも MP 関節には内外転の自由度を含むために、各指5つの運動自由度を有する。手首部には、橈尺骨と中手骨の間にある手根関節部の骨部より複雑な屈曲機構を有するため、ロボットハンドのリンクにおいてはまとめて3つの運動自由度とした。これらを総合すると、手掌部で27自由度が存在する (図 2-4・中) [横井浩史, 2018]。

ロボットハンドを設計するためには、用途に合わせた機構を設計することになる。

筋電義手の主要な用途は、日常生活における物体操作であり、物体操作とは、把持、把握、回転、紙めくり、書く、引っ掛ける、道具を持って叩く、潰すなどの動作をいう。手指機能の分類は、多くの研究者の研究対象となっているが、Cutkosky は、これに必要となる手指機能を16種類に分類 [M. R. Cutkosky, 1989] した。また、Cipriani は、Cutkosky の分類に基づいて、ヒトが必要とする最低限の日常生活動作 (ADL) を実現す

るには、握力把握、精密把握、側面把握、かぎ握り、3面把握、指差し、ジェスチャーが可能であればよいとしており、握力把持、精密把持、側方把持の3種類の動作により、日常生活動作の85%が行えることを確かめている(図2-5) [C.Cipriani 他, 2010].

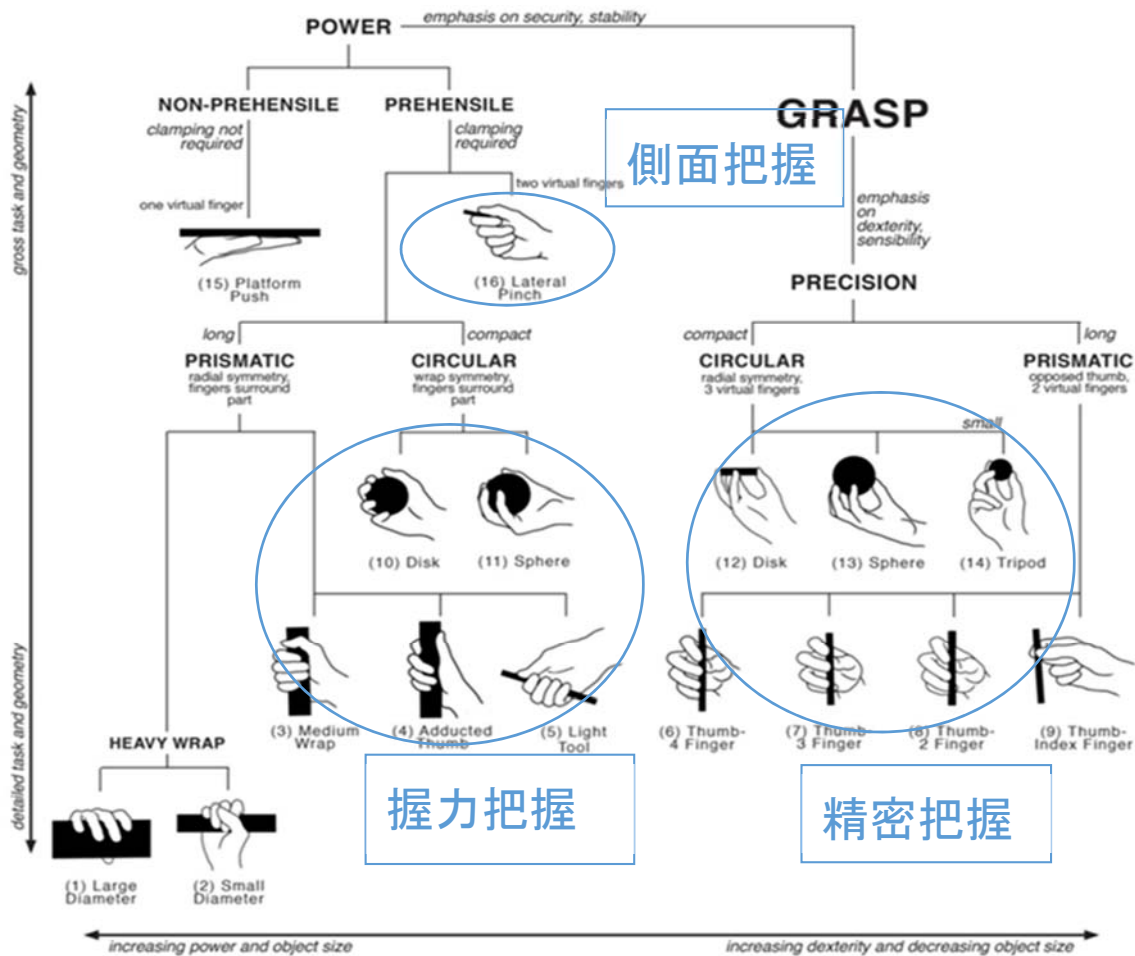


図 2-5 手の動作 [C.Cipriani 2010]

これらの動作は、母指 CM 関節の内外転と示指から小指の4指 MP 屈伸動作により実現可能である。これを図式化したものが、図 2-4 右図 であり、これに基づき、星川らが2自由度義手 (UEC-eHand) を考案した[星川英 他, 2015].

本研究の実験の実機として、この UEC-eHand (図 2-6) を用いる。

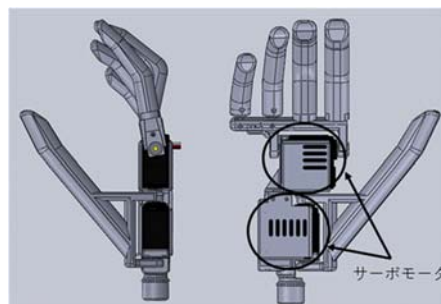


図 2-6 UEC-eHand

2.4.2 ロボットハンドとグリップ及び緩衝材

JISにおいては、ロボットハンドの定義は産業用ロボットについてのみ記述されている。産業用ロボットにおいては、「ロボットハンド」のことをエンドエフェクタといい、「グリップ」などその特徴が機械的な構造にあるハンドのことをメカニカルハンドという。以下にロボットハンドとグリップについて記述する。

▶ ロボットハンド

ハンドは、土台部分（ヒトの掌相当）と指部から構成され、指の本数は、通常、2本～5本である。2指の場合は土台から2本の対向した指が配置される。3指の場合は、各指を対向させる配置で設計され、どの指も同じ自由度構成で設計されることが多い。4指以上になると、人間の指の構造に似せて設計することが多く、その場合は母指と他の指との自由度配置や構成を変えて設計される。菅野は、4指以上の指の設計が3指以下と異なる点について、包み込みの機能を果たす役割を持つ母指球の隆起の実現のために、母指根元の自由度の配置を他の指とは屈曲する報告の角度を変えて設計する点であると述べている [菅野重樹, 2017]。

▶ グリップ

グリップは、掴むもの、つまむものという語源のとおり、対象物を掴んだり離したりする単機能を実現するロボットのエンドエフェクタである [金子真, 2017]。

多指ハンドがヒトの手のような器用な動作を実現することを目指しているのに対し、グリップは力強い把握を目指しており、必要な動きに特化した最小構成が2指となる。

ロボットハンドは金属で出来ていることが多く、そのままでは物体を把持する際に滑るため、緩衝材の役割は必須である。ロボットハンドにもグリップの先端にもゴム素材（シリコーンゴムの場合もある [株] クリエイティブテクノロジー, 2019) の緩衝材が付着されている。ただし、ピンセットや鉗子など手術用のグリップにはゴムなどの付着はない。この理由は、清浄な状態を保つことが必須条件であるためゴム等の材質がそれに向かないことが理由である。

ロボットハンド等において指や手全体にグローブをかぶせるようなことは稀である。これは、全体にグローブを被せようとする、コスト高となり、重量増となるなどさまざまな理由も考えられるが、まず「必要ない」と考えられているからである。

しかしながら、義手の場合は、必ずしも対向する指と指の間で把持操作するのではなく、義手で物を押したり引っ掛けたり、人に見せるまたは握手（コミュニケーション）等の広範な理由で使用される。この点で、義手はロボットハンドとは大きく異なる。

2.4.3 受動安定性

ロボットハンドの多くの研究では、指先と把持物体を剛体と仮定し、その接触は点接触としている。しかし、人間の指先は柔軟で、その柔軟性が安定な把持を実現している。柔軟な指は把持をする過程で変形し、接触は面接触となる [柴田瑞穂ら, 2004]。このことから、指先の動特性も安定な把持に寄与していると考えられる。

物体を把持する際の安定性に関する研究は様々なアプローチから行われている。

Arimoto らは柔軟指を有するハンドを利用して安定把持と位置制御を同時に行う制御則を提案し、受動性を用いてその安定性を検証した [S. Arimoto, 2000]。また、柴田らは、安定把持において、ピンチング動作における指先の動特性の影響を検証した。動特性を考慮することにより、指先と把持物体の接触は点接触ではありえず、面接触となることになる。実験の結果、粘弾柔軟指を有するロボットハンドを使用することにより、ある粘弾係数までは長いサンプリングタイムで安定して把持が可能であることを確かめた (図 2-7) [柴田瑞穂ら, 2004]。

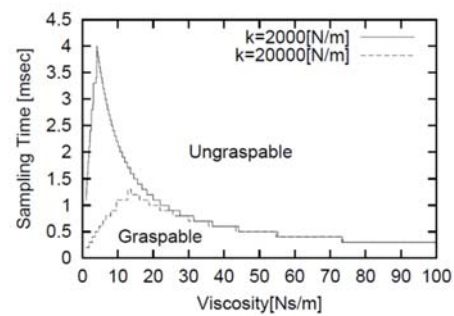


図 2-7 粘弾性と安定把持可能性 (柴田)

谷らは、国内外で行われている掌全体を利用した包み込み把握もしくは指先による指尖摘みの二つの把持姿勢による物体の安定把持の研究を踏まえ、握力把握・精密把握での物体形状に応じた安定把持を実現する関節屈伸機構を開発し、ロボットハンドに搭載した。提案機構により、把持の安定性が向上していることを実験により示した [谷直行他, 2019]。

井上らは、ゴムやシリコンなどの柔軟材料で製作した半球型柔軟指の変形に対する数式モデルから物体の把持と操りを実現する研究において用いられている弾性モデルは、半球内指先変形によって生じる弾性力を導いていると説いた [井上貴浩ほか, 2006]。

このように、柔軟指に用いられている柔軟性や弾性力は、安定した把持に欠かせない性質である。本研究では、義指に被せるグローブに柔軟性や弾性力を持たせることにより、安定した把持が期待できることとなる。

2.4.4 超弾性材料の種類

材料に対して、なんらかの外力（応力）を与えると変形するが、その外力を取り除いたときに元の形状に戻るとき、この変形は「弾性的（elastic）」であると言う [ゴム弾性].

このような弾性をもつ柔軟物のうち、

- ・ 大変形
- ・ 非圧縮性
- ・ 非線形

の特徴を持つものを、超弾性と呼ぶ。超弾性体とは、厳密には応力とひずみ（伸張比）が1対1に対応する弾性体のうち、ひずみエネルギー密度関数（変形前の単位体積当りのひずみエネルギー量）が存在する物質であり、その材料モデルはひずみエネルギー密度関数で表されるものを指す。

ゴム材料は、一般の金属材料とは異なり、硫黄を混ぜて加熱する（加硫）と大きく伸び、荷重が除荷されるとほぼ元の形状に戻るという特徴を持つ。この変形をなしうるゴム材料は、高分子材料の一種であり、液体と固体の両方の特性を持ち合わせており、エラストマーと呼ばれる。一方で、ほとんど体積変化のない非圧縮性という特徴がある [ゴム弾性].

高分子材料であるゴム材料は以下のように区分けされる。

- ・ ゴム（rubber）・・・常温でゴム状弾性を有する高分子物質あるいはその材料
- ・ エラストマー（elastomer）・・・常温でゴム状弾性を示す高分子物質。
弾性的（elastic）なポリマー（polymer）の造語。
- ・ 加硫ゴム（Natural Rubber/合成ゴム）・・・エラストマーに属する
- ・ Plastomer・・・弾性とともにも塑性を示す高分子物質。

超弾性材料である高分子物質や材料のうち、熱を与えると固体化し、その後温度変化による形状変化をしにくいものを熱硬化性、加熱すると軟化して成形しやすくなり、冷やすと再び固体化する性質をもつものを熱可塑性と言ひ、柔らかい高分子材料を、広義に、熱硬化性、熱可塑性の区別なくエラストマーと呼ぶ。広義のエラストマーのうち、天然ゴムやシリコーンは熱硬化性であり、加硫ゴムは、熱可塑性エラストマーである（図 2-8）。

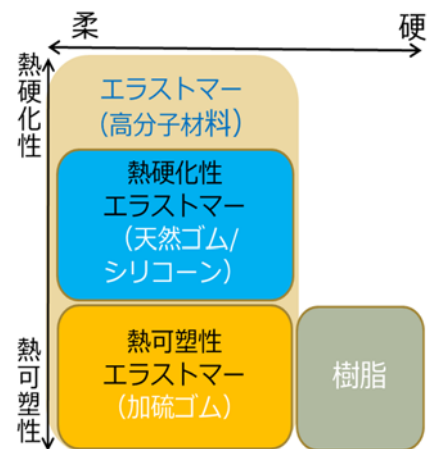


図 2-8 高分子材料

2.4.5 義手の性能評価の方法（パフォーマンス評価）

義肢等補装具専門家会議報告書 [厚生労働省, 2012]によると、前腕切断者、上腕切断者を含め筋電義手の平均装着訓練期間は 5.9 週間という結果が報告されている。また、この調査内では、筋電義手を就労または社会生活において有効活用してもらうために、装着訓練を経た後に、試用装着期間として、筋電義手を社会生活や職場で1～6か月間使用する期間を設けることが提案されている。

前腕筋電義手を使用するには、筋電位制御能力と状態判断能力が必要である [原良昭ら, 2008]。筋電位制御能力とは、前腕から取得した筋電位を適切にコントロールする能力であり、状態判断能力とは、電動の手先具を把持する対象にどのように近づければよいかを判断する能力である。原らは、筋電義手の使い方が習熟することを、筋電位制御能力や状態判断能力が向上していくことと定義し、筋電位制御能力を定量的に評価する手法を提案した。

現在、ドイツ Otto Bock 製の筋電義手が多く使われている日本国内で、筋電義手の訓練・評価の指標として利用されているものは、陳らによって提案された筋電義手操作習熟訓練評価法 [陳隆明, 2005]である。この評価法は切断者の主観的評価により行われ、少なくとも 70%以上の習熟度で筋電義手の操作技術が獲得されたと評価されると、実用的使用者と判断される。また、大庭らは、筋電義手の操作訓練方法が、義手操作能力にどのような影響を及ぼしているか、操作訓練に関する効果について検証するため、ACMC (Assessment of Capacity for Myoelectric Control) [Hermansson et.al., 2006] [Lindner, 2013]の遂行課題を対象に、健常人が模擬筋電義手を用いた際の筋電義手訓練における片手操作課題と両手操作課題が筋電義手操作能力に及ぼす影響について検証した [大庭潤平他, 2019]。

表 2-13 筋電義手の主な評価方法

	対象	検査内容	評価方法	評価基準	客観性
STEF [金子 1986]	上肢	動作能力, 動きの早さ	1～10の点数 ・左右差の合計	明記なし	+
筋電義手 習熟法 [陳 2005]	筋電義手	実用的評価 (日常生活動作)	使用者が2～0 の数値	習熟度が 70%以上	-
ACMC [Hermansson 2006] [Helen 2013]	筋電義手	手先具操作能力	検者が3～0の 数値	明記なし	-
SHAP [SHAP 2015] [Kyberd 2011]	義手・筋 電義手	手の把握型に 基づき評価	遂行時間を計測, 標準値をもとに 点数化	明記なし	+
Pick-and- Place [星川 2015]	筋電義手	把持・移動の 確かさ・速さ	30秒間の成功 回数と試行数を 記録	明記なし	+

このような上肢機能や筋電義手評価については、ACMC, SHAP (Southampton Hand Assessment Procedure) [Kyberd et al., 2011], 国内で用いられている簡易上肢機能検査 (STEF : Simple Test for Evaluating Hand Function) [金子翼, 1986], Pick and Place 評価 [星川英他, 2015]等がある. これらの特徴や評価方法について, 表 2-13 にまとめた.

本研究では, 筋電義手の把持性能の評価を目的とした Pick-and-Place (PAP) 評価法を用いて実験を行う. PAP 実験の特徴は, 義手に求められる把持動作において, アプローチの容易さ, アプローチの正確さ, 把持の安定性の 3 要素を評価できることである.

PAP 実験は, 一辺が 150 mmの正方形の領域 a,b を 500 mmの間隔を空けて配置し, 領域 a(b)に置かれている物品を義手で把持し, 領域 b(a)に移動させ, 初めに置かれた姿勢と同じ姿勢で物品を置くという一連の動作を往復で 30 秒間行い, その 30 秒間における試行数と失敗数をカウントする. 物品の移動の際に, きちんと持ち上げて移動させられるよう, a,b の領域間に障害物を設けた (図 2-9・左). また, 物品を置いた後, 一度物品から義手を離し, 物品に対して新たにアプローチを行うよう, 領域 a,b の実験者側にスイッチを設置し, 物体を置くごとにスイッチを押してカウントする. 机の上から薄い板状の物体を掴まむ場合には指で挟みこむためのきっかけとなる部分が非常に小さいまたは存在しないため, これを改善するために厚さ 3.3 mmのスポンジ状の緩衝材を机の上に敷いた. 把持した状態で物品を移動させ, 指定の領域に置くことができれば成功とし, 把持に失敗して持ち上げられないとき, または途中で物品を落としたときを失敗とし記録した. 実験で使用する把持物品は, 日常で使用する物品の中から選定したものを使用する (図 2-9・右).

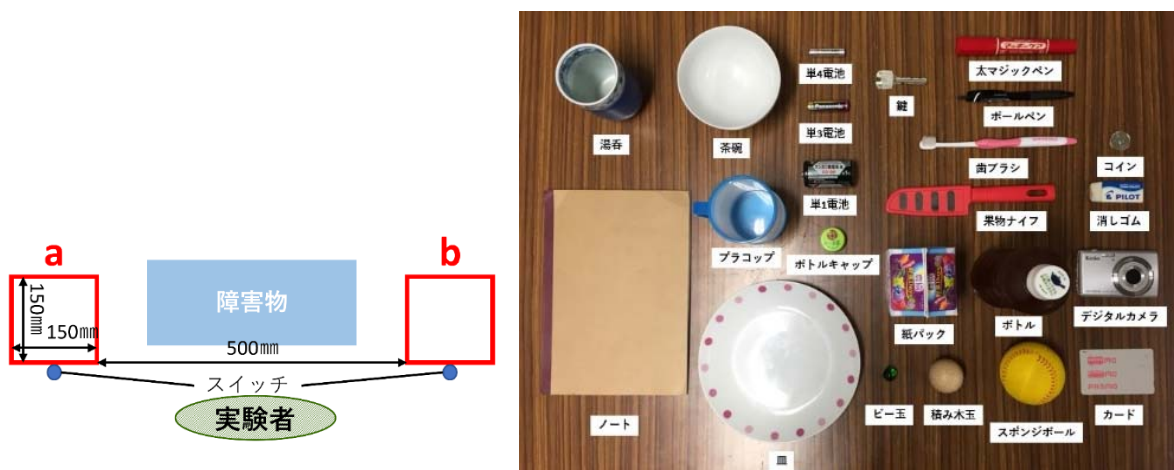


図 2-9 PAP 実験環境及び把持物品

第 2 章参考文献

[C.Cipriani 2010]

C.Cipriani, M.Controzzi and M.C.Carrozza. (2010). Objectives, criteria and methods for the design of the SmartHand transradial prosthesis. *Robotica*, 28(6), 919-927.

[Bilotto S. 1986]

Bilotto S. (1986). Upper extremity cosmetic gloves. *Clin Prosthet Orthot.*, 10(2), 87–89.

[Davies EW 1977]

Davies EW, Douglas WB, Small AD. (1977). A cosmetic functional hand incorporating a silicone rubber cosmetic glove. *Prosthet Orthot Int.*, 1(2), 89-93.

[Gerwin Smit 2014]

Gerwin Smit, Dick Plettenburg and Frans Van der Helm. (2014). A mechanism to compensate undesired stiffness in joints of prosthetic hands. *Prosthetics and Orthotics International*, 38(2), 96-102.

[Hermansson2006]

Hermansson, Liselotte M., Lennart Bodin, and Ann-Christin Eliasson. (2006). Intra-and inter-rater reliability of the assessment of capacity for myoelectric control. *Journal of rehabilitation medicine*, 38(2), 118-123.

[J., Kruit. 1990]

J., Kruit. (1990). Elbow controlled hand prosthesis for children. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology Report N336.

[J.M.Loomins 1986]

J.M.Loomins S.J.Lederman. (1986). Tactual perception. *Handbook of Perception and Human Performance*, 31, 2.

[Just L. 1998]

Just L. Herder, Jan C. Cool, Dick H. Plettenburg. (1998). Methods for reducing energy dissipation in cosmetic gloves. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 35(2), 201-209.

[Kyberd 2011]

Kyberd, Peter J. (2011). The influence of control format and hand design in single axis myoelectric hands: assessment of functionality of prosthetic hands using the Southampton Hand Assessment Procedure. *Prosthetics and orthotics international*, 35(3), 285-293.

[LindnerHelen. 2013]

LindnerHelen. (2013). The Assessment of Capacity for Myoelectric Control: Psychometric evidence and comparison with upper limb prosthetic outcome measures. Diss. Örebro universitet.

[M. R. Cutkosky. 1989]

M. R. Cutkosky. (1989). On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. IEEE Trans. Robot. Automat, 5(3), 269-279.

[MortonElla. 2015]

MortonElla. (2015). Object of Intrigue: the Prosthetic Iron Hand of a 16th-Century Knight.

[Ronald A. Bos 2017]

Ronald A. Bos , Dick H. Plettenburg. (2017). Design of a cosmetic glove stiffness compensation mechanism for toddler-sized hand prostheses. PLOS ONE, 12(8).

[RoundsW.Robert. 1947]

RoundsW.Robert. (1947). Respect for Personality. The English journal National Council of Teachers of English, 36(3), pp..126-129.

[S. Arimoto 2000]

S. Arimoto, P.T.A. Nguyen, H.Y. Han, and Z. Doulgeri. (2000). Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips. Robotica, 18(1), 71-80.

[カラパイア]

カラパイア.参照先: <http://karapaia.com/archives/52204694.html>

[ゴム弾性]

ゴム弾性. 参照先:

https://pub.nikkan.co.jp/uploads/book/pdf_file566f5fc414ed7.pdf#search=%E4%BC%B8%E5%BC%B5%E7%8E%87+%E3%82%B4%E3%83%A0

[しょうけい館（戦傷病者史料館）]

しょうけい館（戦傷病者史料館）. 参照先:

https://www.shokeikan.go.jp/sub_menu/hall.html

[井上貴浩ほか 2006]

井上貴浩ほか. (2006). ソフトフィンガー型最小自由度ハンドを用いた把持・操り動作における安定把持効果. 第7回システムインテグレーション部門講演会 (SI2006).

[井上剛伸 平成 28 年]

井上剛伸, 樫本修. (平成 28 年 3 月). 補装具費支給判定基準マニュアル -支援者のための-.

[横井浩史 2017]

横井浩史, 矢吹佳子. (2017). 義手. 著: 手の百科事典 (362-372). 朝倉書店.

[横井浩史 2018]

横井浩史, 矢吹佳子, 村井雄太, 雍旭, 景暁バイ, 東郷俊太, 白殿春, 朱笑笑, 姜銀来. (2018). 義肢ロボット開発の最新技術と今後の製品化展望. 著: 最先端医療機器の病院への普及展望と今後の製品開発 (230-249).

[下条誠. 2008]

下条誠. (2008). ヒトの触覚のメカニズム. (社)計測自動制御学会システムインテグレーション部門触覚部会「触覚技術の基礎と応用」.

[下条誠. 2019]

下条誠. (2019). これからの触覚技術. 日本ロボット学会誌, 37(5), 385-390.

[加倉井周一. 1993]

加倉井周一. (1993). 我が国における電動義手開発と実用化の歴史. 日本義肢装具学会誌, 9(4), 343-346.

[梶谷 他. 2001]

梶谷他. (2001). 筋電義手開発のための義手に対する意識調査. 電子情報通信学会技術研究報告書 信学技報, 101(130), 75-82.

[株式会社クリエイティブテクノロジー]

株式会社クリエイティブテクノロジー. (2019年9月). エンドエフェクタ IonPad 技術. 参照先: http://createch.co.jp/technology_synthesis/technology_13_ion/

[株式会社アイ・メーカー]

株式会社アイ・メーカー i-maker.inc. (2019). i-MAKER.

参照先: https://i-maker.jp/blog/silicone-9443.html?_ga=2.147426609.700291688.1578505527-629203316.1578505527

[吉元俊輔. 2019]

吉元俊輔. (2019). 導電性材料を用いたソフトな触覚センシング. 日本ロボット学会誌, 37(5), 391-394.

[橋本義肢製作株式会社]

橋本義肢製作株式会社. (2019年8月3日確認).

参照先: <http://www.hashimoto.co.jp/hashimotogisi/history2.html>

[金子真. 2017]

金子真. (2017). グリッパ. 著: 手の百科事典, バイオメカニズム学会 (337-339).

[金子翼. 1986]

金子翼. (1986). 簡易上肢機能検査 (STEF)-検査者の手引. 酒井医療株式会社カタログ.

[栗山明彦. 2013]

栗山明彦. (2013). 福祉領域における義肢装具. 心身健康科学, 9(12), pp.82-85.

[原良昭 2008]

原良昭, 松原裕幸, 柴田八衣子, 溝部二十四, 深澤喜啓, 岡本真規子, 陳隆明, 湊小太郎, 吉田正樹. (2008). 筋電義手の習熟度の定量的評価手法の開発. IEEJ Trans. EIS, 128 (8).

[厚生労働省. 2012]

厚生労働省. (2012). 義肢等補装具専門家会議報告書.

厚生労働省ホームページ. (2019年8月17日確認).

参照先:

https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/hukushi_kaigo/shougaihashukushi/sougo_ushien/index.html ,

[東原孝典. 2012]

東原孝典. (2012). 電動義手の国内外における開発研究の現状, 切断と義肢, その基本. 日本リハビリテーション医学, 49(11), 786-793.

[広瀬幸夫. 1988]

広瀬幸夫. (1988). プラスチック材料. 日本義肢装具学会誌, 4(2), 93-100.

[高橋功次. 2011]

高橋功次. (2011). 義肢装具の歴史的変遷と今後の展望. 日本義肢装具学会誌, 27(1), pp.18-20.

[高橋功次. 2013]

高橋功次. (2013). 義手のメンテナンス:故障とその対応. 日本義肢装具学会誌, 29(4), 217-221.

[佐藤政博. 2004]

佐藤政博. (2004). 今日の装飾義手. 日本義肢装具学会誌, 20(1), 30-32.

[三ツ本敦子. 2018]

三ツ本敦子. (2018). 国立障害者リハビリテーションセンターにおける筋電電動義手の普及への取り組み. 日本義肢装具学会誌 , 34(2), 102-106

[篠田裕之 2000]

篠田裕之. (2000). 器用な手の皮膚と触覚. 日本ロボット学会誌, 18(6), pp.767-771.

[柴田瑞穂 2004]

柴田瑞穂, 平井慎一. (2004). 柔軟指ハンドを用いた把持力制御における安定性と把持可能性の解析. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 04 講演論文集.

[小川敦夫. 2007]

小川敦夫. (2007). 義手装飾用手袋のための光計測とラピッドプロトタイピング. 日本義肢装具学会誌, 23 (4), 292-298.

[障害者の日常生活及び社会生活を総合的に支援するための法律]

障害者の日常生活及び社会生活を総合的に支援するための法律（平成 17 年法律第 123 号

[上肢に障害を有する者に対する職業訓練の実践研究報告書～製造系職種編～]

上肢に障害を有する者に対する職業訓練の実践研究報告書～製造系職種編～.

[菅野重樹. 2017]

菅野重樹. (2017). ロボットハンド. バイオメカニズム学会, 手の百科事典 332-336.

[星川英 2015]

星川英, 迫田辰太郎, 山野井佑介, 加藤龍, 森下壮一郎, 中村達弘, 關達也, 姜銀来, 横井浩史, . (2015). 基本把持機能を有する簡易型筋電義手の開発と評価. 知能と情報, 27(6).

[川崎賢一郎 1998]

川崎賢一郎, 奥野竜平, 吉田正樹, 赤澤堅造, 川崎敦子, 宮本芳明. (1998). 柔軟性の高い筋電義手グローブの試作. 電子情報通信学会技術研究報告(97), 109-115.

[川節拓実. 2019]

川節拓実. (2019). やわらかな素材をやわらかなまま触覚センサ化する一コイルと磁性微粒子を用いた柔軟触覚センサー. 日本ロボット学会誌, 37(5), 395-400.

[川村義肢株式会社]

川村義肢株式会社. (2019年8月3日確認). 参照先: <https://www.kawamura-gishi.co.jp/tour/history.html>

[大地陸男]

大地陸男.. 生理学テキスト. 文光堂.

[大塚彰. 2015]

大塚彰. (2015). わが国における電動義手の開発のあゆみ. 人間と科学 県立広島大学保健福祉学部誌, 15(1), 1-13.

[大庭潤平 2019]

大庭潤平, 梶谷勇, 大西健吾. (2019). 筋電義手操作訓練の片手操作課題と両手操作課題が義手操作能力に及ぼす影響-Assessment of Capacity for Myoelectric Control の分析から-. 神戸学院総合リハビリテーション研究, 14(2).

[大庭潤平 2017]

大庭潤平, 西村誠次, 柴田八衣子. (2017). 義肢装具と作業療法-評価から実践まで-.

[谷直之 2019]

谷直之, 姜銀来, 東郷俊太, 横井浩史. (2019). 握力把握・精密把握における安定把持のための筋電義手用関節屈伸機構開発. 日本ロボット学会誌, 37(2), 168-178.

[中島咲哉. 1989]

中島咲哉. (1989). 義手の現状と将来一義手に関する七不思議一 . 日本義肢装具学会誌 5 卷特別号, 1-4.

[辻敏夫 2007]

辻敏夫, 福田修, 大賀誠. (2007). サイバネティックハンド-筋電維新號を用いた義手の開発-. 精密工学会誌, 73(3), 313-316.

[田中宏太佳. 2014]

田中宏太佳. (2014). 日本における筋電電動義手の公的支給制度の現状. 日本義肢装具学会誌, 30(4), pp..219-222.

[田中由浩 2014]

田中由浩, 佐野明人. (2014). 触知覚メカニズムと指・皮膚構造. バイオメカニズム学会誌, 38(1).

[土井幸輝. 2017]

土井幸輝. (2017). 「形状知覚」. 著: 手の百科事典 (183-186).

[稗田正虎. 1983]

稗田正虎. (1983). 私の自叙伝(その2). 日本義肢装具研究会会報, 1983 (24) , pp..143-154.

[武智秀夫. 1988]

武智秀夫. (1988). 手足の不自由な人はどう歩んできたか. 医歯薬出版株式会社.

[福永秀之. 2004]

福永秀之. (2004). 義肢装具材料の将来. 日本義肢装具学会誌, 20(3), 138-140.

[北山一郎. 1985]

北山一郎. (1985). 現用義肢-義手, 日本義肢装具学会誌 , 1(2), 13-20.

[北山一郎. (1985)]

北山一郎, 雨森邦夫, 中島咲哉. (1985). 装飾手袋の材質と汚染に関する研究. 日本義肢装具学会誌, 1(1), 39-50.

[野坂利也. 2017]

野坂利也. (2017). コスメティックカバー. 著: 手の百科事典 (373). 朝倉書店.

[立花直樹. 2010]

立花直樹. (2010). 日本における福祉用具を巡る現状と課題—ソーシャルワークと制度の視点から—. 関西福祉科学大学紀要第14号.

[澤村誠志. 2007]

澤村誠志. (2007). 切断と義肢. 医歯薬出版株式会社.

[澤村誠志. 1992]

澤村誠志. (1992). リハビリテーション医学全書 18 切断と義肢 第3版. 医歯薬出版株式会社.

[澤村誠志. 2014]

澤村誠志. (2014). 我が国における義肢装具発展の歴史とこれからのあり方-次世代に期待したいこと-. 日本義肢装具学会誌, 30(1), 41-47.

[齋藤之男 1986]

齋藤之男, 大島轍, 東原孝典, 矢谷令子. (1986). CADによる機能的装飾用義手の開発に関する研究. バイオメカニズム学会, 8, 265-273.

第3章 超弾性グローブの設計と製造

3.1	グローブ製作に超弾性素材を用いる際の課題	46
3.1.1	義手用装飾手袋（JIS用語）に規定する要件	46
3.1.2	コスメティック（外観）の重要性	49
3.1.3	物体を把持する形状に即した義手の把持性能	51
3.1.4	指先の把持安定性と粘弾性の必要性	54
3.1.5	質感の重要性	56
3.1.6	関節の柔軟性への考慮	57
3.1.7	耐久性・耐摩耗性に対する要求	58
3.2	課題解決へのアプローチ	61
3.2.1	各要件を満たすグローブ材料	61
3.2.2	グローブ素材の選定	64
3.2.3	ヒトの手の外観の復元のための採型法	66
3.2.4	義手の把持力向上を担保するハンドの把持形状に追従する厚み及び指先の構造と粘弾性を考慮した指腹形状	68
3.3	プラスチック樹脂の成形法	69
3.3.1	熱可塑性樹脂（スチレン系エラストマー）グローブの成形	71
3.3.2	熱硬化性樹脂（シリコーン：タナック製）のグローブの成形	74
3.3.3	熱硬化性樹脂（シリコーン：佐藤技研製）グローブの成形	75
3.3.4	塩化ビニル製グローブの成形	76
第3章 参考文献		79

3.1 グローブ製作に超弾性素材を用いる際の課題

日本の装飾グローブに関わる研究は、第2章で述べた歴史のとおり、戦後アメリカから輸入されることによって発達したリアルな外観を有する塩化ビニル製グローブから、1960年代後半の早稲田大学と今仙技術研究所の取り組みにより電動義手 WIME-hand への応用が行われ [西岡研一, 1993], その後、塩化ビニルの欠点を補う目的でシリコーン製へと変遷し、さらなる着色法の検討など様々な取り組みが進められてきた。その結果、外観については、利用者本人の手と見紛うほどの高いレベルに到達している。しかし、電動義手の駆動系が複雑化するとともに、外観のリアルさだけでなく、動作のリアルさや物体把持性能までが求められるようになり [河村次郎ほか, 1999] 新たな課題への挑戦が必要な時代となっている。

本節では、超弾性グローブの設計と製造について、超弾性素材を用いるうえでの課題と解決法をまとめる。課題については、筋電義手に用いることの可能な義手グローブの要件を洗い出す。

3.1.1 義手用装飾手袋 (JIS 用語) に規定する要件

「義手用装飾手袋 (Cosmetic gloves for artificial hands)」は、日本工業規格 (JIS T9223 : 1995) により、装飾ハンド用と能動ハンド用 (幼児用及び小児用のものを除く) として規格が定められている [日本工業規格 JIS9223 義手用装飾手袋, 1995].

用語については、

ハンド・・・5本の指をもつ人の手の形をした義手用手先装置

装飾手袋・・・人の手の外観をできるだけ復元した軟性プラスチック製の手袋。

ハンドの外装として使用

装飾ハンド・・・機能的には動かないハンドで、外観を装飾手袋で整えたものとされている。

義手用装飾手袋に適用される工業試験規格は、

JIS K 6251 加硫ゴムの引張試験方法

JIS Z 8721 色の表示方法－三属性による表示

JIS Z 8722 色の測定方法－反射及び透過物体色

であり、これらのことから、装飾手袋が、引張強さと伸び率によって性能が規定され、色についても規定されていることが分かる。

引張強さの性能の基準は以下表 3-1 とされ、図 3-1 の求め方により算出する。

表 3-1 引張強さの性能基準

項目	性能
引張強さ MPa {kgf/cm ² }	{45.0}以上
伸び %	350 以上
永久伸び %	50 以下

$$T_B = \frac{F_B}{A}$$

ここに、 T_B ：引張強さ (MPa) {kgf/cm²}

F_B ：最大引張力 (N) {kgf}

A ：試験片の断面積 (cm²)

$$E_B = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100$$

ここに、 E_B ：切断時伸び (%)

L_0 ：標線間距離 (mm)

L_1 ：切断時の標線間の長さ (mm)

図 3-1 引張強さ及び切断時伸び

(日本工業規格：<http://kikakurui.com/t9/T9223-1995-01.html> より引用)

試験片は、JIS K 6251 に規定するダンベル状 2 号試験片を用いること、原則として装飾手袋の手首部、手背部及び手掌部の平滑面から打ち抜き、厚さについては現品のまま、とされている。4 個の試験片の測定値の平均値を求め、上記の式によって算出する。引張速度は 500±50mm/min.

色については、装飾手袋の外表面の色は、装飾手袋の手背部で、色が一樣な部位について JIS Z 8722 の方法で測定し、JIS Z 8721 に規定する表示記号によって行うこととされている。

このことについては、義手用装飾手袋の用語の定義が、「人の手の外観をできるだけ復元した軟性プラスチック製の手袋。ハンドの外装として使用する」とされていること、また、「装飾手袋の外観は、きず、気泡、はん点、凹凸など装飾性を損なうような欠点がなく、手の肌色をできるだけ再現するものでなければならない。」と記述されていることから、これらを満たす基準であると考えられる。

なお、「義手用装飾手袋」は、JIS用語であるが、本研究では、義手用装飾グローブ、または義手用グローブ、または装飾グローブと表現する。

■上記のことより、JIS規定が定めている義手用装飾グローブの要件は、

- ・人の手の外観をできるだけ復元したものであること
- ・きずや気泡、はんてん、凹凸がないものであること
- ・手の肌色をできるだけ再現したものであること
- ・基準の引張強さと伸び力と破断点があること

である。

ところで、JIS T9223 で規定されている装飾手袋の素材と種類の範囲について、「規定の解説（平成7年（1995）10月改正）」 [JIS 9223, 1995]で言及されていたのでここに記す。

➤ 素材の範囲

制定当時、一般に使用されている装飾手袋はポリ塩化ビニル製のものだけであるが、将来はシリコーン樹脂やポリウレタン樹脂を素材とする装飾手袋も登場することが予測される。このことについて討議を行ったが、素材が異なることより、物理的特性も異なることや調査研究のための対象製品がないことから、この規定では、ポリ塩化ビニル製の装飾手袋に限定して規格を作成し、それ以外の軟質プラスチックまでは含めなかったと記されている。

➤ 種類の範囲

ハンドには、装飾性の回復を主な目的とした装飾ハンドと、装飾性に加えて機能の回復も目指した能動ハンドや電動ハンドの2種類がある。

後者の機能的なハンドに使用するものは、動きを制限しないようになるべく薄手に作らなければならない。能動ハンド用の装飾手袋は、電動ハンドの外装としても、装飾ハンドの外装としても使用するものとして規定されている。

3.1.2 コスメティック（外観）の重要性

前項の JIS 規定でも示されたように、日本において義手に求められる最も重要な機能は外観であり、手指または腕の色、形状、手指姿勢の再現が必要とされる。

ヒトの手指は、手背 と 手掌 と 五本指 より構成される[岩本光雄, 2017].

手背（手の甲、表側）は腱と皮膚のみが存在し、組織が比較的薄く、つまみやすく、可動性に富んだ皮膚が手指を曲げやすくしている。指の骨を引っ張り、指を真っすぐに伸ばす役目の伸筋は、総指伸筋、長母指伸筋、示指伸筋、小指伸筋がある。収縮する筋肉部分は前腕にあり、その筋肉部分から発して腱が指に達しているのが手背で見えている。4つの腱の間に腱間結合があるために、4本の指を同時に伸ばそうとする。また、長母指伸筋、示指伸筋、小指伸筋の腱はそれぞれの指を個別に伸ばすことが可能であるが、個別の筋のない中指と薬指は単独では伸ばしにくい構造となっている。

一方、手掌（裏側）の皮膚は角質化した厚い表皮に覆われ、皮下組織も移動性が少なく、軟部組織が存在する。指を曲げるための主要な屈筋（浅指屈筋）の、第2指～5指にいく腱の4本の間には腱間結合はないため、示指～小指までの指は個々独立に曲げやすくなっている。手掌には、汗腺が多く、触覚を感じる小体が多く存在する。岩本によると、手掌表面には、掌紋や指紋の模様のもとになっている皮膚隆線が並んでおり、手で何かを握ったり、指で何かに触ったりすると隆線がゆがんで軟部組織内部の神経が感じ取りやすくなっている構造をしている。汗の出口も多く、これは、滑り止め効果の役割を果たしている。手相を見るときに使用される皺があることも手掌の特徴である。

また、指は、先端が半球状で終端する円筒形の立体形状を特徴としており、拇指は、末節骨、基節骨に、他の4指は、末節部、中節部、基節部に分類され、手背・手掌に接続している。末節部は、指の先端に位置し、指腹部と末節骨の背面に位置する爪 [木村澄子, 2017]により構成され、指腹部には渦状・蹄状・弓状の模様を有する指紋が存在する [岩本光雄, 指紋, 2017]とともに、指腹部背側を覆うように爪が配置されている。

このような自然な手の形態特徴を有する義手用装飾グローブの開発が求められる。

■ここで、自然な手の形態特徴をグローブで再現する際に考慮の必要な要素は、

- ・手背の皮膚が薄く、つまみやすく、可動性に富むことが指を曲げやすくする
- ・腱間結合がない場合、5指が独立に動く
- ・手掌部は厚い
- ・手掌表面の隆線が感覚器となり、また、汗の出口が滑り止めの役割を負う
- ・指腹部には指紋と爪が存在

であると考えられる。

➤ グローブの寸法の計測箇所

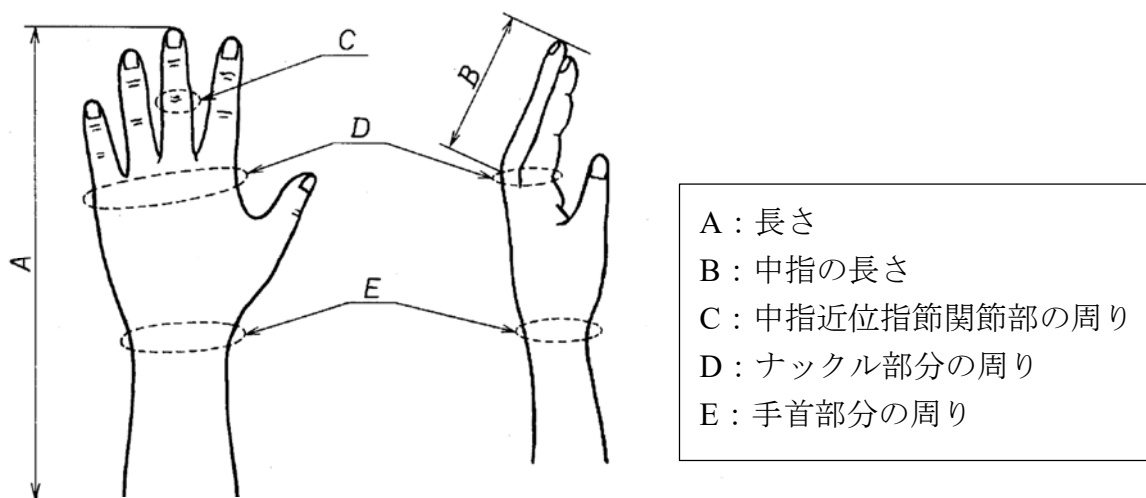


図 3-2 グローブの寸法測定箇所 [JIS9223 1995]より図引用

➤ 皮膚の厚み

前野は、ヒト指腹部の皮膚表面の指紋および皮下組織が複雑な形状を有することに着目し、指断面内の真皮、表皮の厚さ等を、ヒト新鮮屍体の示指断面を解剖し、ノギスによって計測した。その結果、指腹部の真皮、表皮の厚さはそれぞれ約 0.75mm および 1.0mm であった [前野隆司他, 1997]。傳田も、ヒトの皮膚の厚みについて、表皮は 0.06-0.2mm、真皮は 2.0~2.2mm である（掌や足の裏など場所によって異なる）と述べている [傳田光洋, 2006]。

これらをグローブで表現する指腹部の厚みの参考とする。

3.1.3 物体を把持する形状に即した義手の把持性能

ヒトが物の把持を行うときには、いくつかの手指形状を取る。ヒトは、意識せずに、それらを対象物の形や重さ、把持して何を行うかなどの運動タスクに合わせ、適切に把持形状を使い分け、巧みな把持運動を実現する。このような、ヒトが行う把持形状の分類については様々な提案がある [鎌倉矩子他, 1978] (図 3-3)。

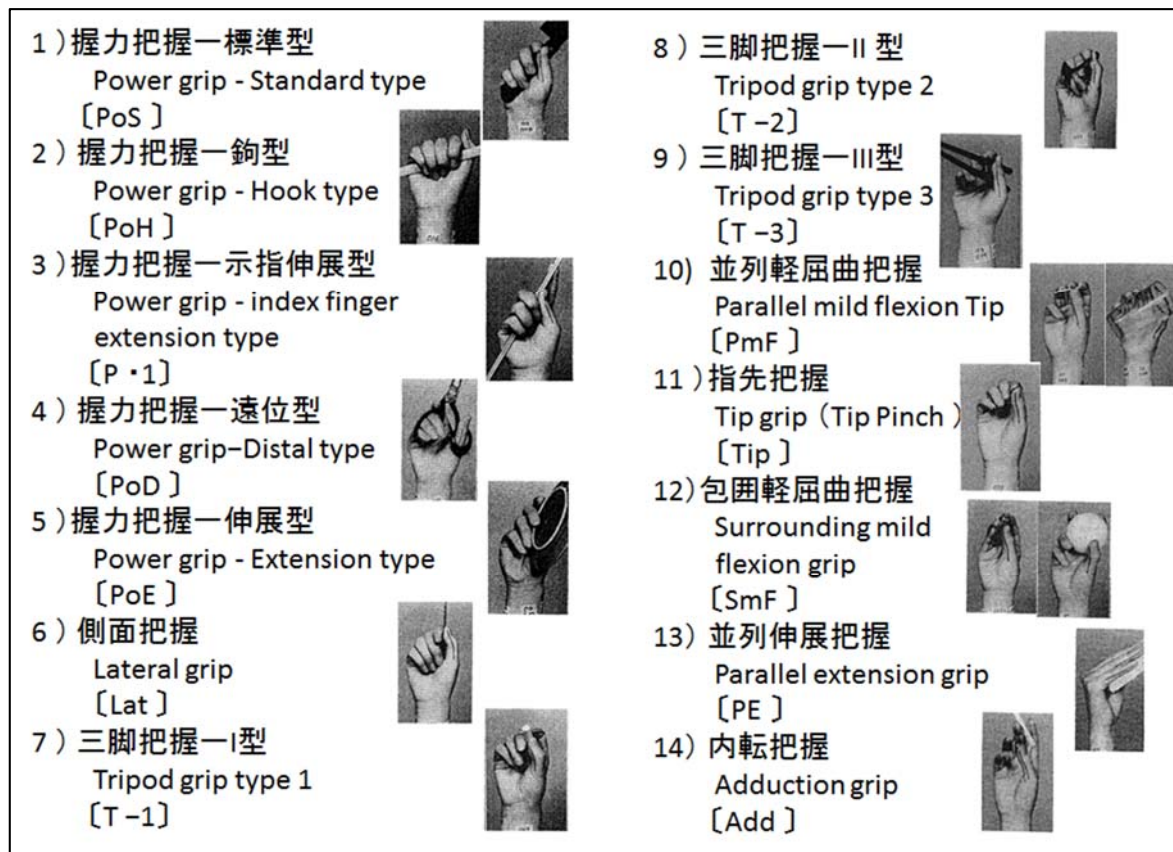


図 3-3 手指主要動作 (Kamakura の 14 種の分類) (横井浩史 [横井他, 2019]より引用)

鎌倉以外のこのような分類について表 3-2 にまとめる[福村直博, 2017][池内克史, 2000][池田直人, 平成 16 年].

表 3-2 把持形状の分類

発表年	名	把持形状分類	分類数	分類の趣旨
1919	Schlesinger	hook grasp (鉤握り) cylindrical grasp (筒握り) fist grasp (こぶし握り)	7	義手デザインの必要性より

		spherical grasp (球握り) tip prehension (指尖掴み) palmar/pulp prehension(指掌面掴み) lateral prehension (指側面掴み)		
1956	Napier	Power grip (握力把握) Precision grip (精密把握)	2	行う操作の性質が力を要求するか正確さを要求するか
1971	長尾	Power grip 10 種 Precision grip 4 種 つまみ 7 種	21	Napierを主眼に, 種々の部分特性に着目
1978	鎌倉	把握把握 (標準型/鉤型/示指伸展型/遠位型/伸展型) 側面把握 三脚把握 (I 型, II 型, III 型) 並列軽屈曲把握 指先把握 包囲軽屈曲把握 並列伸展把握 内転把握	14	作業療法士の立場から日常生活で現れる種々の把持を分類. 示指から小指に向かう MP 関節の屈曲漸増の程度の違いと, 全体的な指屈曲の強弱の違い
1980	Taylor	cylindrical grasp, tip, hook, palmar, spherical, lateral	6	Schlesinger の分類から, 持つ対象物の形状やサイズを考慮
1986	Cutkosky	Napier の分類を拡張し, 対象物の形状や大きさ, 操作の性質を考慮し分類	14	機械加工工場の作業用ロボットのハンドデザイン
1986	Iberall	手に設定された軸にどの方向から力を加えるか (opposition) と, その力を対象物にどの指もしくは掌, または指の組み合わせを使って及ぼしているか (virtual finger) を用いて分類	19	人の把持は 3 つの異なる向きの対向 (opposition: 指面(pad)対向, 手掌(palm)対向, 側面(side)対向) から成り立っていると考えた.

上記の把持に関する分類を参考に, 本研究では, 物体把持に関係する主要な機能を, 義手が取れる把持姿勢の観点から以下の図 3-2 の通り 8 通りに分類した. (各動作の右側は義手動作を示す)

側面握み	(lateral)	: 母指並立
鉤握り	(hook or snap)	: 1-2 指 MP 摘み
指先摘み	(tip)	: 1-2 指 PIP 摘み. 母指対立
ペン握り	(Palm opposition)	: 4-5 指握り
球形握り	(spherical)	: MP 握力把握
円筒型握り	(cylindrical)	: PIP 握力把握
手首掌背屈		
手首回内外		



図 3-4 ヒトの物体把持に関する機能分類
(横井浩史・矢吹佳子『手の事典』より図引用)

筋電義手グローブは、筋電電動義手が、ヒトが物体を把持する形状に即した把持形状を取れるよう、把持性能の向上に貢献するものでなければならない。また、筋電電動義手の動きに追従するものであることが求められる。

■ここに必要な筋電義手グローブの要素は、

- ・モータの負荷の軽減
- ・伸張性の高さ
- ・安定した把持形状が取れる薄さや厚みであること
- ・適切な摩擦力や粘弾性があること
- ・さらに必要な時に把持の開放が行えることが挙げられる。

3.1.4 指先の把持安定性と粘弾性の必要性

前項で、義手の把持性能の向上が期待される要件として、把持姿勢の分類を行った。しかしながら、ある把持姿勢が取れるだけでは把持の安定性は確保できない。

本項では、指先の把持の安定性の要件と、粘弾性が把持安定性に与える影響について考察し、グローブの開発の必要要件を探る。

ロボットハンドの物体への接触と安定性について、Z. Doulgeri や Arimoto らは、柔軟指を有するハンドを利用してピンチング動作を行い、安定把持と位置制御を同時に行う制御則を提案し、受動性を用いてその安定性を検証した[Z. Doulgeri et al., 1999][S. Arimoto et al., 2000][S. Arimoto et al., 2002][有本卓, 日常物理学への挑戦, 2000][有本卓, 手の巧みさと解析力学：ベルンシュタイン問題（身体運動の謎, 2004]。井上らは、指先材料と指先形状に着目し、半球型柔軟指の形状に起因する幾何学的非線形性を考慮した指先弾性モデルを提案し、指先の変形によって指先内部に蓄えられる弾性エネルギーモデルを利用した柔軟指により、対象物操りが容易に実現できることを示した[井上貴浩, 平井慎一, 2006][平井慎一, 2004]。[田原健二他, 2003][井上貴浩ほか, 2006]。また、柴田らは、柔軟指ハンドを用いた把持力制御における安定性と把持可能性をシミュレーションによって確認する中で、柔軟指が、ある粘性係数までは把持可能なサンプリングタイムが増加する傾向があることを確認し、柔軟指を有するロボットハンドを使用すれば、長いサンプリングタイムで把持が可能であることを示唆した[柴田瑞穂, 平井慎一, 2004]。

これらの先行研究より、物体の指先での安定把持には、弾性と粘性の性質が必要であることが分かる。弾性体は、エネルギーを保存し、指先を変形させることができ、粘性体は把持を安定させることができる。

また、ヒトは、皮膚の柔軟性を利用して指先と把持対象物との摩擦を任意に変化させたり、硬度の高い爪を利用して一点に集中した力を加えたりする。爪には、指先の柔軟部の変形を抑制する機能もあり、爪の有無により指と把持対象物との摩擦係数が変化する[毛利哲也, 2017]。村上らは、こうした爪の機能をロボット指で実現した。指はアルミニウム製の内殻と爪、そしてシリコン製の被覆で構成されており、爪があることでロボットハンドは柔軟指を保護し変形を抑制でき、高い剛性を有する爪に力を集中させることもできている[村上剛司, 長谷川勉, 2004]。

粘弾性体とは、弾性体と粘性体との性質を持つ物体である。粘性体とは、力が加えられたときにその力に抵抗する性質をもつ物体である。100%の粘性体では、印加された力で粘性体に変形するときに抗力が生じるが、変形後に力の印加が除去され

でも元の形状に戻らない。弾性体は、外力の印加により変形したときに元の形状に戻ろうとする復元力が働く物体である。弾性体と粘性体の性質を併せ持つ粘弾性体は、力が加えられたときにその力に対する抗力を生じさせ、外力の印加が取り除かれたときに弾性体よりもゆっくりと元の形状に復帰する。

グローブ内部に粘弾性体を含む模擬の指先で物体を抑えると、粘弾性体が変形して粘弾性体の隣り合う部位を押圧する。これにより、隣接する部位の粘弾性体も変形して、指先が把持物体を包むように変形する。物体には、粘弾性体からの抗力と、外皮との間の摩擦力がかかり大きな抵抗力を生じる。これにより、包み込み把持による把持力を持たせることができる [横井, 矢吹 特願 2019- 55195].

このように、安定を目指した指先の物体把持において、柔軟指の部分は、骨格である爪部分と物体に挟まれるため、接触部位の変形により圧力を分散し、物体と指の相対的位置関係を安定させることが必要である。つまり、高い粘弾性を有することが望ましい (図 3-5)

一方、関節部分では、屈伸動作を行う必要があるため、外側では伸び、内側では縮む必要がある (図 3-6) .

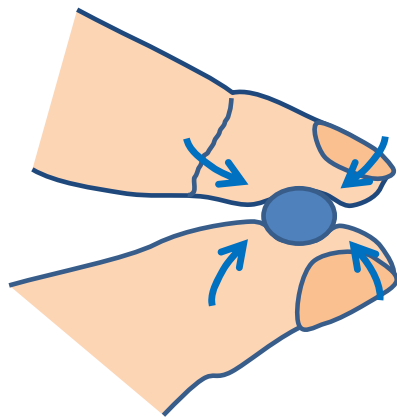


図 3-5

指の変形と爪による安定把持効果

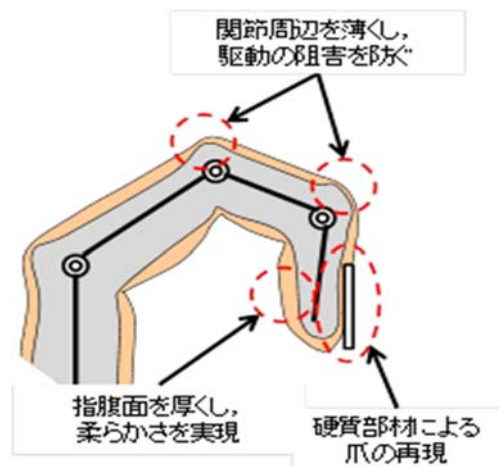


図 3-6

義手の製作モデル

グローブの設計において、このような粘弾性と関節部の皮膚の伸縮について考慮することで安定した把持が実現される。

3.1.5 質感の重要性

ヒトは、皮膚が変形することによって接触物体の力を知覚したり、皮膚のせん断力や皮膚変形によって指先が接触している物体の形状や位置の認識を行っている [森山多覇, 2017]。ヒトの指先の皮膚について詳細が明らかとなれば、ヒトと同様なグローブの指先の質感を表現できるかが分かる。

人間の指が持っている物理的特性の解明を目的として、ヒトの指腹部の組織の機械的性質は、工業技術院旧機械研のグループにより詳しく調べられてきた。前野らは、ヒト指腹部の皮膚表面の指紋及び皮下組織が複雑な形状を有することに着目し、皮膚構造をモデル化した。その調査によると、新鮮屍体より切り出した小指、中指指腹部の表皮・真皮、および、示指指腹部2カ所の表皮・真皮・皮下組織に対し、マイクロメータヘッドを 0.2mm 押し込んだときの組織への針先端の押し込みの結果から計算した表皮・真皮・皮下組織の弾性率の平均値の比は、約 8:5:2 であり、表皮・真皮・皮下組織の縦弾性係数はそれぞれ 1.36×10^{-1} [MPa], 8.0×10^{-2} [MPa], 3.4×10^{-2} [MPa] である [前野他, 1997]。

一方、単位面積当たりのせん断方向粘弾性率は、中沢らの調査 [中沢信明, 池浦良淳, 諸岡光, 1998] で詳しく調べられており、弾性率 1.7×10^{-3} [MPa], 粘性率 1×10^{-5} [MPa] である。これらの物性値に近い材料を探索することで、指が物体と接触した際の触覚受容器近傍の皮膚表面の応力やひずみ状態を再現することが可能となる。

また、山羽らは、ヒトの指がもつ柔らかさとヒトの皮膚表皮がもつ摩擦効果に着目し、ヒトの指の縦方向変形特性や摩擦特性などの物理的特性を機械工学的見地から調査した。その結果、ヒトの指が粘弾性であること、縦変形係数は応力に関する増加関数であること、応力残留歪みは時間とともに回復すること、ヒトの皮膚の摩擦係数は、接触面積によって変化するが 0.8-2.4 の範囲にあることを突き止めた。また、ヒトの指に類似した代行人工指を作るには、高い摩擦特性をもつ材料が必要とされ、さらに柔らかさという特徴を持つ構造体が必要であると結論づけた [山羽和夫, 高野英彦, 尾崎省太郎, 1975]。

■このように、指の表皮の質感は、ヒトの皮膚、せん断方向粘弾性、摩擦特性と同定されることが再現の可能性を高めることであり、また、その内側は柔らかさをもつ弾性体で作られることが望ましい。

3.1.6 関節の柔軟性への考慮

ヒトの指は DP 関節, PIP 関節, MP 関節の部分で屈曲し, 物体の大きさや形状に合わせて関節角度が変わる. 各関節部分には, 皺が形成され, 屈伸に合わせて皺がジグザグに変形することにより, 関節の外側と内側に生じる皮膚の伸縮を吸収する.

韓らは, 指先組織の法線方向の剛性を計測し, モデル化し, 指先組織から生じる非線形的な機械的特性, とくに剛性特性を明らかにすると同時に, 物体把持動作におけるヒトの指先の調節には, 指先組織だけでなく指関節の柔らかさが作用していることを示唆した [韓鉉庸, 入口克己, 川村貞夫, 1999].

また, 中沢らは, ヒトが物をつまむときの剛性を調査する目的で, 人差し指と親指の関節のインピーダンス特性を調べ, 人差し指も親指も, MP 関節部の粘性が高いこと, 人差し指の DIP, PIP 関節, 親指の IP 関節は粘性が低いことなどを計測により確かめた [中沢信明, 植北祥充, 池浦良純, 諸岡光, 2000].

これまで, 装飾用グローブは一般的に塩化ビニルかシリコン材料を用いて製造されてきた. 塩化ビニル系のは, 優れた耐摩耗性と耐衝撃性がある一方, ゴム硬度が高く変形しにくいいため, ロボットハンドの運動を阻害しアクチュエータへ大きな負荷がかかるという欠点を有しており, シリコン系材料は, 柔らかく人体形状の高い再現性が認められるが, 摩耗抵抗が大きく, また引裂きが起こるなどの原因で壊れやすいという弱点を持ち, 物体との直接的な接触には向かないなどの問題点を有していた [中村, 川崎]. また, 手指は, 人と人を結ぶ最も重要なインターフェース部分であるため, ヒトの肌の特性に近いものが望ましく, 伸縮時の皮膚の変形や弾力性に富む材料特性, 強度が必要である.

このように, グローブは, ロボットハンドの動作を阻害しない柔軟性を持つことが, 製作者側の要求であり, グローブの手指は, 人と人を結ぶ最も重要なインターフェース部分であるという点でヒトの肌の特性に近いものが望ましい. また, 壊れにくい弾力性や強度を持つ材料, さらに, 関節の屈曲の際, グローブの関節部分が自在に伸縮することで柔らかさを示すことが可能と考えられ, そのような柔軟な材料を得ることが必要である.

3.1.7 耐久性・耐摩耗性に対する要求

1985年、北山らが、新しい装飾グローブの材料としてシリコン含有の素材について汚染や摩耗性に関する試験を行った。行った試験の内容は、①屋外暴露試験、②耐汚染性試験、③対光性試験、④耐摩耗性試験、⑤耐シンナー性、耐油性、耐水性試験であった。それらの試験の結果として、シリコンの持つ耐汚染性、ゴムの持つ弾性、塩化ビニルの持つ引裂き強度特性のすべてを包括する素材を得るには至らなかったと述べている [北山一郎, 雨森邦夫, 中島咲哉, 1985].

そのため、その後も従来の筋電義手の装飾用グローブは、用途によって使い分けられており、塩化ビニル素材を用いたものは、成形性、耐摩耗性、耐衝撃性に優れているため、主に日常生活において物体把持を伴う仕事に用いられてきたが、経年劣化による変色などの問題を抱えている。一方、シリコン系の樹脂を用いたものは、成形性着色性に優れているため自然でリアリティの高い手指を再現することに向いていたが、脆性が低いため、割れ切れが発生しやすく、さらに、粘弾性が強いため、伸縮性が悪く、筋電義手の運動を阻害することから、主に装飾用義手のグローブとして使用されてきた。

完成用部品として位置づけられている義手グローブは、保険適用の観点から、耐用年数（殻構造：1年、骨格構造：1.5年）が定められており、日常生活利用で一定以上の耐久性が要求される。また、義手の表皮としてのグローブは、直接食品に触れることがあるため、耐水性および耐腐食性を担保する必要がある。

これらのことから、新しいグローブの開発には、経年劣化の面及び完成用部品という福祉用具である面から、1年または1.5年以上の耐久性を持つことが望ましく、食品に触れても安全で、耐水性を持ち、耐腐食性、耐摩耗性を考慮した材料を選定する必要がある。

以上 1)~7)から判明した筋電義手用装飾グローブの要件を列挙し、それらをグローブ製作の課題とし、解決へのアプローチを提案する。

1) 義手用装飾手袋（JIS 用語）に規定する要件としては、

- ・ヒトの手の外観をできるだけ復元したものであること
- ・きずや気泡，はんてん，凹凸がないものであること
- ・手の肌色をできるだけ再現したものであること
- ・基準の引張強さと伸び力と破断点があること

が必要である。

【課題】 ヒトの手の外観の復元，加工性，着色性，表面の滑らかさ（材質調査），伸張性，反発性

2) コスメティック（外観）の重要性としては、

- ・手背の皮膚が薄く，つまみやすく，可動性に富むことが指を曲げやすくする
- ・腱間結合がない場合，5指が独立に動く
- ・手掌部は厚い
- ・手掌表面の隆線が感覚器となり，また，汗の出口が滑り止めの役割を負う
- ・指腹部には指紋と爪が存在

することが重要である。

【課題】 成形性，厚みの調整の容易さ，意匠性，爪など加工性

3) 物体を把持する形状に即した義手の把持性能としては、

- ・モータの負荷の軽減
- ・伸張性の高さ
- ・安定した把持形状が取れる薄さや厚みであること
- ・適切な摩擦力や粘弾性があること
- ・さらに必要な時に把持の開放が行えること

が必要である。

【課題】 伸張性，厚みの調整の容易さ，材質調査，摩擦特性

4) 指先の把持安定性と粘弾性の必要性としては、

安定を目指した指先の物体把持において，柔軟指の部分は，骨格である爪部分と物体に挟まれるため，圧力を分散し，物体と手の相対的位置関係を安定させる

ことが必要であり、高い粘弾性を有することが望ましい（図 3.1-4）。一方、関節部分では、屈伸動作を行う必要があるため、外側では伸び、内側では縮む必要があり、その粘弾性はゼロであることが望ましい

【課題】粘弾性，伸張性

5) **質感の重要性**としては、

指の表皮の質感は、ヒトの皮膚，せん断方向粘弾性，摩擦特性と同定されることが再現の可能性を高めることであり、また、その内側は柔らかさをもつ弾性体で作られることが望ましい。

【課題】硬さ・柔らかさ

6) **関節の柔軟性への考慮**においては、

グローブは、ロボットハンドの動作を阻害しない柔軟性を持つことが、製作者側の要求であり、グローブの手指は、人と人を結ぶ最も重要なインターフェース部分であるという点でヒトの肌の特徴に近いものが望ましい。また、壊れにくい弾力性や強度を持つ材料、さらに、関節の屈曲の際、グローブの関節部分が自在に伸縮することで柔らかさを示すことが可能と考えられ、そのような柔軟な材料を得ることが必要である。

【課題】柔軟性

7) **耐久性・耐摩耗性に対する要求**としては、

保険適用の観点から、耐用年数（殻構造：1年，骨格構造：1.5年）が定められており、日常生活利用で一定以上の耐久性が要求される。また、義手の表皮としてのグローブは、直接食品に触れることがあるため、耐水性および耐腐食性を担保する必要がある。

【課題】耐久性，耐油性，耐熱性，耐水性，刺激性の弱さ，衛生性

3.2 課題解決へのアプローチ

3.1.1 で、グローブの要件からみたグローブ製作の課題をまとめた。そこで、これらの解決へのアプローチを提案する。

アプローチ1：各要件を満たすグローブ材料の選定 (3.2.1, 3.2.2)

アプローチ2：ヒトの手の外観の復元のための採型法(3.2.3)

アプローチ3：義手の把持力向上を担保するハンドの把持形状に追従する
厚み及び指先の構造と粘弾性を考慮した指腹形状(3.2.4)

3.2.1 各要件を満たすグローブ材料

第2章で述べたように、これまで、グローブの材料は、塩化ビニルとシリコーンが主流であった。ここで、(株)タナックより提供のあった新しい超弾性材料（熱可塑性エラストマー、商品名「クリスタルゲル」）を含め、3.1.2 で明らかになった課題の解決のため、それぞれの性質を比較した（表 3-3）。

表の作成にあたり、株式会社アイ・メーカーWeb サイト、アロン化成エラストマー製品 Web サイトを参考にした。[株式会社アイ・メーカー i-maker.inc, 2019] [アロン化成株式会社, 2019]

本調査の結果、材料の特性について、すべての要素が優れている材料はなかった。しかしながら、表 3-3 から読み取れることは、

- ・ JIS 規格 1) と外観 2) の要件に即している材料は、塩化ビニルとシリコーン
- ・ 義手の把持性能 3) の要件に即している材料は、エラストマー、
- ・ 指先の把持安定性や粘弾性 4) , 質感 5) , 柔軟 6) 性に関しては、エラストマーが優れているといえる。

表 3-3. 主なグローブ材料と材質特性 (株)タナック提供資料より改変)

要件課題	必要な性質	ポリ塩化ビニル樹脂 (塩化ビニル)	シリコーン樹脂	熱可塑性エラストマー (エラストマー)
1)	着色性	良い。着色後に透明なものを被せる2重構造も可	大変良い。成型後の着色や彩色が可能	材料(ペレット)を混ぜ合わせて彩色するが、成型後の着色は困難
1)	加飾性	二次加工が容易に可能	成型後の加飾が可能	成型後は加飾は困難
1)	反発性・衝撃性	70°C以上で耐衝撃性が低く、低温度では耐衝撃性が悪い	反発力は高くなく、衝撃に弱い	反発弾性率 51-73%
1) 2)	成形性	良い	良い	良い
1) 2)	接合性	専用の接着剤を使用	シリコーン(液体)同士で接着可能	専用の接着剤があるが、接合は困難。
1) 3)	伸張性	△	300-800%	1000%以上
2)	意匠性	高い	非常に高い	成型後の加工が不可なため高くない
2)	軽量性	比重 1.35-1.45	比重 1.06-1.10	比重 0.86-0.89
3)	摩擦特性	有	有	有
4)	粘弾性	△	○	非粘着・粘着あり
4) 5)	柔らかさ	— JIS-A 50~100°	JIS-E 10-20° JIS-A 10-30°	JIS-E 10-35° —
6)	柔軟性	△	○	◎
7)	耐摩耗性	○	劣る	△

7)	耐油性	酸・アルカリに強い	△	×
7)	耐熱性	60-80°C	-100°C～ 250°C, 高い耐寒性と耐熱性	-30°C～80°C
7)	耐久性	機械的強度が高く剛性があり耐久性に富む	引っ張り強さや引裂き強さなどでは劣る	高い衝撃吸収性、強度、伸長性がある。
7)	耐水性	耐水性に優れ水を通さない	水をはじく。 高い撥水性	優れた耐吸水特性
7)	刺激性 (弱)	○	水、酸化、酸・アルカリなど抵抗性を持つ	対候性、耐オゾン性、耐薬品性(酸、アルカリ)に優れる
7)	衛生性	△	△	◎
7)	粘着性		非粘着。 ガラスにはくつきやすい	非粘着、高粘着どちらも存在する
—	経済性 (シリコーンを100とした価格比)	80	100	50

3.2.2 グローブ素材の選定

本節で明らかであるとおおり，筋電義手用グローブの一つの大きな柱となる要件は，「人間の手にそっくり」 [梶谷, 2001]であることである．人間の手にそっくりであるグローブの製作を実現するには，色や形など外観を人間の手に近づけることが可能であり，柔軟性，粘弾性といった質感が人間の手であるように感じられる素材を選定する必要がある．

3.2.1 で，筋電義手用グローブの製作の要件を満たす材料の検討を行い，候補となる塩化ビニル，シリコーン，熱可塑性(スチレン系)エラストマー(以下「エラストマー」)の材料の特性を比較した．

その比較結果に基づき，シリコーンと熱可塑性スチレン系エラストマー素材の有意性に注目し，当該素材を用いて新しい超弾性グローブを試作することにした．

本研究で，グローブの製作や既存のグローブの改良に協力いただく企業は，国内唯一の塩化ビニル製グローブの製作を行う株式会社佐藤技研と，医療用模擬臓器等，ヒト体内の臓器の忠実な再現を追求する技術を持つ株式会社タナックである．

(株)佐藤技研のグローブは，塩化ビニル製のものも，シリコーンを原料としたものも，既に製品として流通しているため，新しいグローブの製作のための材料や製作方法は，(株)タナックが保有している熱可塑性スチレン系エラストマー材料とシリコーン材料の製品からそれぞれ選定し，それらの材料に適した製法を検討することとした．

(株)タナックが持つ，色や形などの外観を人間の手に近づける技術は，手術練習用の血管や胃袋など医療用模擬臓器の製造・販売で実証済みである．そのため，人間の手にそっくりな質感を持つ材料の選定を目的に，音叉の原理でやわらかさを測定し数値化する機器(新光電子(株)，SOFTGRAM)を用いてヒトの手背及び指先の柔らかさを測定した．そしてそれに近い測定値を持つ材料を，新しいグローブの材料として選定することにした．

SOFTGRAM (SG0305, 新光電子) は，Heinrich Rudolf Hertz の弾性接触理論に基づき，圧子の反力を測定，圧子径及び押し込み量からヤング率を算出し，測定値を表示する機器である．化粧品業界で肌の柔らかさの測定や成分のはたらきの分析，食品業界での食感や触感の数値化や標準化の決定の基準，または，スポーツ医学の分野で触診の数値化，さらに医療業界での皮膚の柔らかさの測定などで利用が期待されている．

以下に、計測した SOFTGRM の実測値（3 回平均）を示す（表 3-4）。

表 3-4 ヒトの手とグローブ材料の柔らかさの値

部位又は素材	製品品番	硬度（企業物性データ）	ヤング率測定値（単位：kPa）
ヒト手背			59.8
ヒト手指			146.4
エラストマー （クリスタルゲル）	CRG-NTM15	15±5（JIS-E）	248
	CRG-NTM20	20±5（JIS-E）	324.3
	CRG-NTM25	25±5（JIS-E）	372.5
シリコーン （タフシロンゲル）	TSG-E10	10（E 型）	134.3
	TSG-E30	15（E 型）	178
	TSG-E50	20（E 型）	197.5
	TSG-A10	33（E 型）	503.7
	TSG-A30	51（E 型）	1242.6

熱可塑性エラストマー樹脂には、スチレン系のほか、オルフィン系、アクリル系のエラストマー材料があるが、それらの材料の中で最も柔らかく伸張率が高いものが、スチレン系エラストマーである。筋電義手用グローブには、柔軟性が必要であるため、熱可塑性スチレン系エラストマー素材（クリスタルゲル）を選定した。また、クリスタルゲルには、硬さが一段階低い CRG-NTM10 という製品もあるが、べたつきが高すぎたため、選択から外した。

こうして、柔らかさの計測値から示されたヒトの手指に近い材料の製品から、新しい超弾性素材、エラストマーグローブの材料として、CRG-NTM15 を選定した。

また、シリコーン材料については、先行研究 [福永秀之, 2004] から、柔らかいことが引裂きに弱いことに直結するため、TSG-E30 ではなく TSG-E50 を新しく開発するシリコーングローブの材料として選定した。

※(株)タナックでは、医療現場での手術練習用の用途として、模擬臓器を開発している。臓器にメスを入れたときの皮が破ける「プチッ」という触感を再現するため、豚の 8 か所の表皮をレオメータで数値化し、クリスタルゲルに添加剤を混入させ貯蔵弾性率等を同定した。その研究の一環について付録に示すが、グローブの開発とは異なるアプローチであるため、本論文では説明を割愛する。

3.2.3 ヒトの手の外観の復元のための採型法

失われた身体の一部を、外見、質感などを本物と見分けがつかない様に復元することをエピテーゼという。近年、色や形状をよりリアルに再現する技術自然な手の形態特徴を有する義肢や装飾用義手のグローブの開発には、義肢装具の企業をはじめとした数多くのメーカーが取り組んできており、美しく見える手姿勢や色、テクスチャを再現する方法が明らかになってきている（表 3-5）。

表 3-5 各メーカーにおける外観の再現の方法

メーカー	材質	種類・名称	特徴	採型方法
佐藤技研	塩化ビニル	ノーマルグローブ カラーグローブ	厚みや硬さを変更可 2層構造で着色	型取り剤で採型
佐藤技研	シリコーン	シルグローブ	汚れが付きにくく、変質、変色も少ない	型取り剤で採型
愛和義肢製作所	シリコーン樹脂	エピテーゼ	薄膜加工 (0.1mm)、透明色の移行部、可動式関節部品	健指の反転技術
アヘッドラボラトリーズ	シリコーン	エピテーゼ義手「コンビニハンド」	生活道具装着アタッチメント付のエピテーゼ義手	歯科の印象剤で採型、WAX復元彫刻、3D造形モデル製作
人体アート研究所	特殊シリコーン	エピテーゼ	義肢装具ではカバーしていない身体の各部分に対応	採型方法に関して明記無し
中村ブレイス株式会社	シリコーンゴム	シリコーンゴム製人工補正具「スキルナー」	手指、マニキュア用爪付き手指、耳、鼻、手部	採型方法に関して明記無し
トーヨーポリマー株式会社	ルビーセル (微細連続気孔を持つウレタン)	ルビラー製義肢	シリコーンの約1/2の軽さ	採型方法に関して明記無し

表の通り，採型方法で明記されているものは，型取り剤を使う方法や歯科の印象剤を用いる方法などがあるが，テクスチャまで写し取るためには，型取り材を用いて，鮮明な皺や指紋の様相とともに，手指の姿勢を複製することができる（図 3-7）



図 3-7 型取り剤「かたとって」を利用した手形の採型

また，3D スキャナを用いて，残存手の特徴を写し取り，デジタルデータを反転させたのちに，機械加工で義手側を再現する方法の提案も行われており，この技術はここ数年で目覚ましく進歩している．今後，スキャナの精度と撮影速度の改善が待たれる [大西健吾, 2004].

このように，手指の形態的特徴を転写する技術は，十分に成熟し，利用者の期待に答えているが，ロボットハンドに装着して自由な関節運動を実現するためには十分な伸縮率を得られていない．また，皺の部分をもっと薄く成形し，肉厚を十分にとる技術も未だ確立されていない．

そこで，ヒトの手の外観の復元というコスメティックの課題に対しては，指紋や皺のテクスチャの再現を設計目標・仕様とし，仕様を満たすためのアプローチとして，型取り剤を利用したヒトの手の石膏モデルから指紋と皺のテクスチャの再現を試みた（図 3-8）．結果として，掌紋や指紋の模様のもとになっている皮膚隆線も，手背側の血管や毛穴の再現にも成功した．

筋電義手用のグローブの製作を目的とした手形の採型であるため，採型時の手の形は，下向きで，ハンドが駆動したときに不自然な皺が寄ったり引きつれたりしないよう，母指が自然に対向位置になる姿勢とした．

製作を予定するグローブのサイズは，成人男性用，成人女性用，小児用の3種類とし，小児用のグローブを作製するためのモデルとしての手の型取りは，倫理委員会で認められる範囲内において，本人及び保護者の同意を得た小学校の約 100 名の生徒を対象に行い，これらのうちから小児用グローブの型モデルを選定した（図 3-8），成人女性用グローブの石膏モデルは，著者自身の手から採型を行い作製した．



図 3-8 手形の採型（左・小学校）と成人石膏モデル（右）

3.2.4 義手の把持力向上を担保するハンドの把持形状に追従する厚み及び指先の構造と粘弾性を考慮した指腹形状

義手が安定した把持を行う要件として、前節で、有本と平井らの報告より受動的安定把持性能を得るには柔軟性のある指腹部が必要であり、骨格（爪）と物体に挟まれた部分に変形する弾性力と粘性力が必要であることを述べた。

義手で取れる把持姿勢を前提としたヒトの物体把持に関する機能分類図（図 3-4）で明らかであるとおり、物体への接触部位は主に手掌部の内側に集中しており、指尖、指腹、指側面、掌に位置している。一方、関節部分では、屈伸動作を行う必要があるため、外側では伸び、内側では縮む必要があり、その粘弾性はゼロであることが望ましい。

そこで、安定した把持性能を得るために、手の甲側については皺の部分の厚みを薄く設計し、指の中腹よりも指先や母指の付け根を肉厚に設計するなどして、グローブの厚み仕様マップを開発した（図 3-9）。

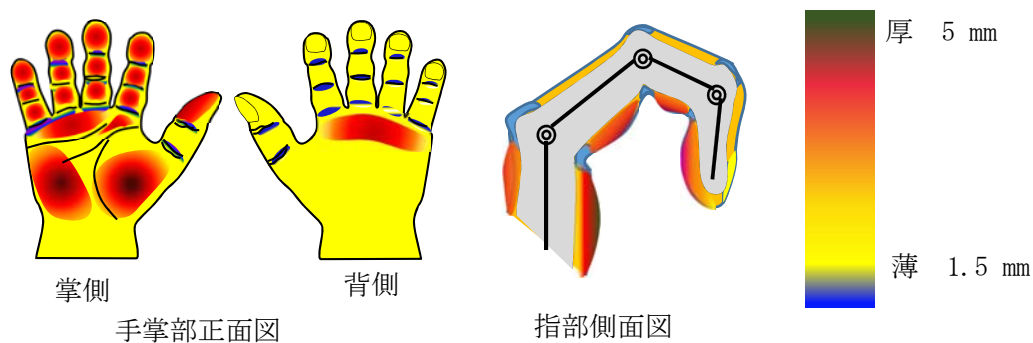


図 3-9 グローブの厚みマップ

3.3 プラスチック樹脂の成形法

プラスチック材料である樹脂は、大きく熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂に分けられる。成形法は、使用する樹脂の性質に適するように考案されたものであるため、成形する樹脂の種類によって成形方法はほぼ定まるが、共通する成形法も多くある。以下に、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂に使われる成型方法についてまとめる(表 3-6)。

(参考：Web サイト・みんなの試作広場，[株式会社日立ハイテクノロジーズ，2019] [株式会社ニップラ，2019] [キーエンス，2019] [株式会社プラポート，2019])

表 3-6 樹脂材料の成形法

(★熱可塑性樹脂に特有，◆熱硬化性樹脂特有の成形法)

成型法名称	成型方法	製品例
射出（インジェクション）成形	材料を「射出」する部分と「成形」する部分から構成されている機械で成形される。プラスチック材料を溶かし金型に流し込み、高い圧力をかけて製品を形作る。	DVD，ドライバーの取手，コントローラー
スラッシュ成形	ペースト状にしたプラスチックを金型に注入し外部から加熱し、型に直接接触している部分のみをゲル化させ中空品を得る成形法。金型構造が単純なため型代が安価であり、多品種少量生産に適する。肉厚分布を均一にできる利点を持つ。	玩具，人形，造花
注型（キャストイング）成形	液状の成形材料を適当な型に流し込み、圧力をかけないで硬化させる成形法	シート，フィルム，アクリル樹脂でできた置物
押出成形（★）	加熱溶融させた樹脂をト	パイプ，チューブ，包装用

	コロテンのように押し出して連続的に成形する方法。金型内部で樹脂を冷却・固化させず、押し口であるダイ（金型）に熔融樹脂を通過させ一定の断面形状に成形する。そして押し出されたあとに冷却・固化	フィルム
ブロー成形（★）	金型に挟み込んだプラスチック熔融体（ポリリン）に空気を吹き込んで中空品を得る成形法	ボトル
真空（圧空）成形（★）	熱可塑性樹脂版をクランプ金枠にはさみ、ヒーターで加熱軟化させた後、あらかじめ型のコーナーに真空孔を設けた雄型・雌型を突き上げて真空吸引し大気圧シートを型に密着させた後冷却硬化して成形品を得る方法	カップ麺、冷蔵庫の内装部材
積層成形（◆）	樹脂を含浸させた紙、布、ガラス不織布等を必要数量重ね合わせ、プレス鋼板によって熱と圧力をかけて目的とする形に一体化する成形法	

3.1.2 で選定した新しい超弾性グローブの材料を用いたグローブの製作法について検討した。

選定した材料は、

熱可塑性スチレン系エラストマーグローブの材料として、CRG-NTM15

シリコーンの材料として、TSG-E50

である。

3.3.1 熱可塑性樹脂（スチレン系エラストマー）グローブの成形

熱可塑性スチレン系エラストマー樹脂の成形法は、射出成形、押出成形、スラッシュ成形、発泡成形が適しており、圧縮、ブロー、真空圧空成形はあまり適していない。

本研究におけるグローブ開発の製造側の要求は、ロボットハンドの動作を阻害しない柔軟性を持つことである。このため、指関節部の屈曲伸展時の摺動抵抗を低減することが目標である。そこで、手背側の皺の部分の厚みを成形限界まで薄くすることを目指し、金型の造形によってこれが可能な、射出（インジェクション）成形法を適用する。

インジェクション成形法のコア [金型の基礎を学ぶ, 2019]は、成形品を囲んで凸部と凹部に分割される。正式には、

- ・凸部はコア(Core)
- ・凹部はキャビティー(Cavity)

というが、製造企業の株式会社タナックに倣い、凸部を内型、凹部を外型と呼ぶことにする。

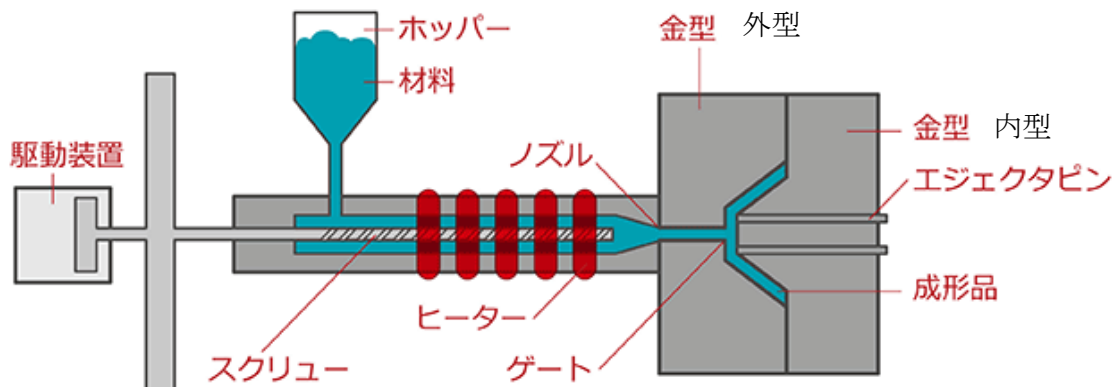


図 3-10 射出（インジェクション）成形機（みんなの試作広場より引用）

外型と内型が合わさることで空洞部ができ、その空洞部にプラスチックを注入することで成形品が完成する（図 3-10）。

外型は、一般的に成形品の外観を表す形状となり、内側の、製品として見えない部分が内型となる。外型には、金型から成形品が取り出しやすいように傾斜が付く。従って、金型が開いた瞬間に、成形品は外型から離れることになる。金型が開くと、成形品は内型に貼り付くので金型が完全に開いた後に、内型側にある成形品を突き出すピンにより金型から取り出される（図 3-11a）。

金型は入れ子構造にすることが多いが、この理由は

- ・ 金型の部品交換が容易
 - ・ 金型の加工がしやすい
 - ・ 入れ子部分のみ良い金型材質を適用できる
- という理由からである。

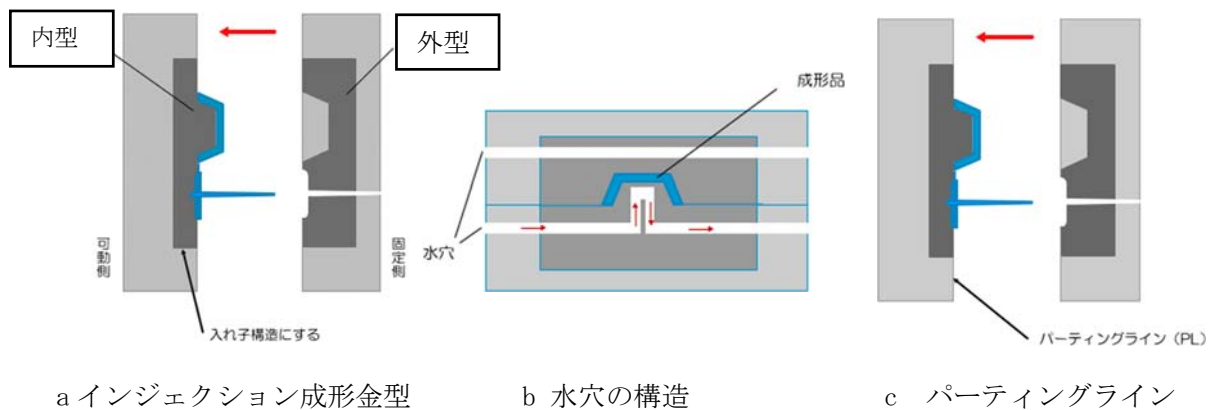


図3-11 インジェクション成形型の構造

金型に充填される樹脂（プラスチック）は、 200°C 前後と非常に高温になるため、金型に充填されたあと、一定の時間金型内で冷却される。冷却は、金型に冷却用の穴（図3-11b）を開け、その穴に水を通すことで金型全体の熱を奪い、温度をコントロールする。

金型が冷え過ぎた場合、樹脂が金型の隅まで行き渡らず、ショート不良を起こす。逆に、金型が熱くなり過ぎた場合は、樹脂が固まる時間が長くなり、生産性を落とすことになる。このため、金型を一定の温度に保つことが必要である。

成形品を金型から取り出す際に、金型を2つまたは3つに分割するが、この金型の分割ラインのことを「パーティングライン」といい（図3-11c）、金型の分割面のことを「パーティング面」という。金型から取り出された成形品には必ずパーティングラインが残る。

このため、製品として跡が残っても分かり難い場所にパーティングラインを設定するのが一般的である。金型のパーティング面が摩耗すると小さな隙間ができてしまう。その隙間に樹脂が流れ込み「バリ」という成形不良が発生することになる。

パーティングラインはできるだけ目の触れないところに、単純なラインになるよう設定することがインジェクション成形における金型製作の課題である。



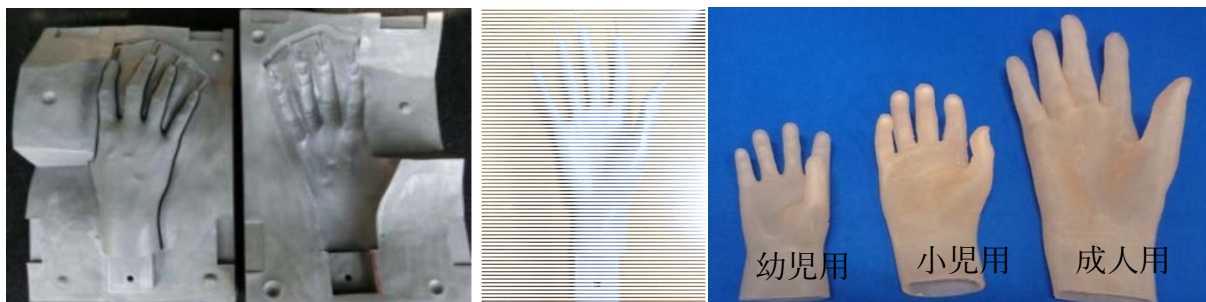
a. インジェクション成形機（撮影協力：㈱タナック） b. 樹脂材料（ペレット）

図 3-12 インジェクション成形によるエラストマーグローブの製作

本研究でも，株式会社タナックの協力（図 3-12）のもと，インジェクション成形によって，内型と外型のクリアランスを調整した．

内型の中子を削ることで材料が流し込まれる隙間に変化が生まれる．そこで，アプローチ 3 で作成した厚みマップに従って，指腹部や手背側のこぶし部部分が厚くなるよう中子を削り（削った部分は樹脂材料が流し込まれる隙間が広がるため，厚みが出る），グローブの厚みを調整した．こうしたインジェクション成形の樹脂型製作により，ディップ成型やスラッシュ成型では行えない，部分的に厚みをコントロールすることを可能とし，1.5mm～5mm 厚のエラストマーの成形に成功した（図 3-13）．

パーティングラインは，母指と示指の側面になるように樹脂型に施し，手背からはパーティングラインが見えないように型の製作を行った．こうすることで，グローブ製品は，指部の動作や物体把持の際，直接の接触が原因で摩耗することが少ない．



a. エラストマーグローブ金型 b. 中子 c. 完成したグローブ

図 3-13 エラストマー製グローブ型とグローブ

3.3.2 熱硬化性樹脂（シリコーン：タナック製）のグローブの成形

熱硬化性のシリコーン樹脂の成形法は、圧縮成形，トランスファ成形，注型成形が適しており，射出成型はあまり適していない。

（株）タナック製のシリコーン（TSG-E50，以下 TT シリコーンと呼ぶ）を用いた熱硬化性樹脂の成形は，注型成形にて行う。注型成形の利点は，型がシリコーン型や 3D プリンター製の型で成形出来るためイニシャルの負担が少ないことであり，簡易的な形状試作に向いており，使われる材料は，一般に，シリコーンやウレタンである。



図 3-14 注型成形による TT シリコーングローブの成形方法（株）タナック提供

熱可塑性スチレン系エラストマーの製作の際に使用した金型が，修正の必要なく TT シリコーンの成形型として使用可能であったため，これを用いて TT シリコーングローブの製作を行った。

エラストマーのインジェクション成形法は，大量生産に向く成型法であるが，シリコーンの注型成形は，量産には向かない。しかし，シリコーンの特性上，色付けが可能であるため，型に色を塗ったのちにシリコーンを流すことで，グローブ表面によりリアリティのある色付けができることが長所である。



図 3-15 TT シリコーングローブ

3.3.3 熱硬化性樹脂（シリコーン：佐藤技研製）グローブの成形

株式会社佐藤技研においては、装飾義手用シリコーングローブ（以下、「SS シリコーンと呼ぶ」）の製作は、塩化ビニルグローブと同じスラッシュ成形で行っているとのことであった。（スラッシュ成形法については、3.3.4 で示す。）そのため、筋電義手用の装飾グローブの製作についてもスラッシュ成形法により行う。

シリコーングローブは、塩化ビニルグローブよりもさらに色付けや表面加工の細工が繊細に行えるため外観に優れているが、比重が高く、引き裂きに弱い。そのため、電動義手用グローブとして用いた場合には、表皮の重さや高剛性がモータにかかる負荷を増大させ、電動義手本来の性能を十分に発揮させられない。また、一度裂けが発生するとそこからグローブが壊れてしまい、耐久性の面で問題がある。

そこで、SS シリコーンについては、通常より柔軟性を持たせるよう特別に配合した材料により、成人女性用のロボットハンドが収納できる大きさである男性L 8サイズの伸びの良いグローブを試作した（図 3-16）。

硬度は、ショアーA 10° 程度、伸長率は通常の 1.3 倍の 380 %のものが仕上がった。厚みは、1.6 mm～2.8 mm であるが、指先は破れから保護するため、成形時の工夫で厚みを 2.8mm 程度まで厚くしている。

通常使用されるシリコーンは、ショアーA硬度 30°，伸長率 280 %である。

重量は、通常使用される従来のものは 115g であり、今回製作したものは 110g であった。

ここで、柔らかさの測定値について述べる。測定には、JIS K 6253 準拠のタイプAで測定することが最も一般的であるが、ショアーA20 度以下を示すような柔らかい試料にはタイプEで測定する [株式会社タナック, 2019]



図 3-16 試作した SS シリコーン製グローブ

3.3.4 塩化ビニル製グローブの成形

塩化ビニル系樹脂の成形法は、射出成形、押出成形、スラッシュ（粉末）成形、ブロー成形、真空圧空 が適している [株式会社日立ハイテクノロジーズ, 2019].

本研究で用いる塩化ビニルグローブは、日本で唯一の塩化ビニルグローブの製作会社である(株)佐藤技研の製造法に委ね、スラッシュ成形により製作を依頼する。



図 3-17 塩化ビニルグローブ金型（左上）と材料（右上）
製造工程（引抜き，下）

スラッシュ成形の製造は、以下の行程で行われる(参考: [株式会社オビツ製作所, 2019].

1. 原料注入
2. 遠心機による脱泡
3. 原料の硬化
4. 不要原料の型出し
5. 本焼き
6. 冷却
7. 引き抜き
8. 成型品の完成

塩化ビニル樹脂は、ペースト状にしたプラスチックを金型に注入し、外部から加熱する。そうすると型に直接触れている部分のみがゲル化され、中空品が作られる。佐藤技研においても、職人によって材料の流し込み時にほぼ一定の厚みに調整されることで金型の凹凸に忠実な立体感を持つ装飾手袋が作製される。

図 3-17 画像下段は、180 度～200 度のバーナーを当てられた金型の中で硬化した塩化ビニルグローブを型から引き抜く（工程 7）様子である。

塩化ビニル製の義手装飾用グローブは、一般的に厚みがあり、硬く、伸びないため、ロボットハンドへの装着も困難である。この塩化ビニルグローブを筋電義手用のグローブとして使用できるようにするための提案のため、次のような試作を行った。

ロボットハンドを挿入可能な手首周径と、ロボットハンドの動きを拘束しないグローブの手掌周径を決定するため、従来の塩化ビニル製グローブを加工し試作品を作製した。ロボットハンドの大きさは、UEC-eHand 成人女性用を用いる。このロボットハンドが挿入可能な手首周径を持つ既成の塩化ビニル製手袋の大きさは、男性 L 8 サイズであった。この手袋の掌側の母指付近の手相の皺に沿って切れ込みを入れ、グローブの内側からバイアスした。塩化ビニルは専用の接着剤によって、自身を接着させることが可能である（二次加工性）。

バイアス部分が蛇腹に広がりグローブの重みによる負荷が義手の母指に集中しないようにするとともに、骨組みの周りに余裕を作り、モータの熱を逃がし易くした。

この試作品を用いて予備実験（Pick-and-Place 実験。実験方法は第 4 章で述べる）を行った際の手掌部の引き裂けや熱の籠もり具合を参考に、男性 L 8 サイズの手掌部及び手首周径を 10mm 増しにした手袋の金型を作製した。また、柔軟性を持たせるため、可塑剤を通常より 11% 多く添加した。さらに、金型に付着させる材料を加減し、厚みを、従来の 2 分の 1 の 1.0～1.5mm に変更した。このように、手袋と手先具の間に余裕をもたせ、電動手先具の運動時の手袋と手先具の抵抗（摺動抵抗）が発生しないように変更した。手袋製品の重量は従来のものが 140g、製作したものは 60g であった。

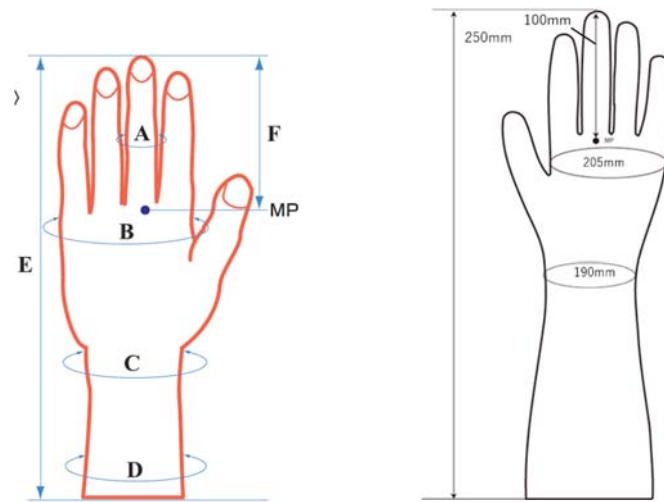


図 3-18 塩化ビニルグローブ 右：試作した周径と長さのモデル

このようにして，筋電義手用の塩化ビニル製グローブは，従来の装飾グローブと同様，スラッシュ成形法を用いて，薄く柔らかいグローブを製作した（図 3-19）．



図 3-19 試作した塩化ビニル製グローブ

第3章 参考文献

[C. Taylor 1955]

C. Taylor and R. Schwarz. (1955). The anatomy and mechanics of the human hand. *Artic. Limbs*, 2(2), 49-62.

[G. Schlesinger]

G. Schlesinger.. Der mechanische aufbau der kunstlichen glieder.

[J. Napier. 1956]

J. Napier. (1956). The prehensile movements of the human hand. *J. Bone and Joint Surgery*, 38B(4), 902-913.

[M. R. Cutkosky 1989]

M. R. Cutkosky. (1989). On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, 5(3), 269-279.

[S. Arimoto 2000]

S. Arimoto, P.T.A. Nguyen, H.Y. Han, and Z. Doulgeri. (2000). Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips. *Robotica*, 18(1), 71-80.

[S. Arimoto 2002]

S. Arimoto, Z. Doulgeri, P.T.A. Nguyen, and J. Fasoulas. (2002). Stable pinching by pair of robot fingers with soft tips under the effect of gravity. *Robotica*, 20(1), 1-11.

[T. Iberall 1987]

T. Iberall. (1987). The nature of human prehension: Three dextrous in one. *Proc. 1987 IEEE Intl.Conf. on Robotics and Automation* , pp.396-401.

[T. Iberall. 1997]

T. Iberall. (1997). Human prehension and dexterous robot hands,. *Intl. J. of Robotics Research*,16, pp. 258-299 .

[Z. Doulgeri 1999]

Z. Doulgeri and S.Arimoto. (1999). A force control for a robot finger under kinematic uncertainties. *Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1475-1480.

[アロン化成株式会社]

アロン化成株式会社. (2019年9月). アロン化成エラストマー製品サイト. 参照先: <https://www.aronkasei.co.jp/elastomer/about/>

[キーエンス]

キーエンス. (2019年9月). 押出し成形. 参照先: 基礎と事例を学び専門性を磨くサイト樹脂成形エキスパート: <https://www.keyence.co.jp/ss/products/sensor/plastic-molding/process/extrusion.jsp>

[井上貴浩 2006]

井上貴浩, 平井慎一. (2006). 半球型ソフトフィンガを有する最小自由度2指回転関節ハンドによる準静的把持・操り動作. 日本ロボット学会誌, 24(8), 945-953.

[井上貴浩 2007]

井上貴浩, 平井慎一. (2007). ソフトウインガー型最小自由度ハンドを用いた把持・操り動作における安定把持効果. 計測自動制御学会論文集, 43(2), 135-144.

[井上貴浩 2007]

井上貴浩, 平井慎一. (2007). 力制御入力を必要としない把持対象物姿勢積分制御手法の提案. 第25回日本ロボット学会学術講演会, 2M26.

[横井浩史 2019]

横井浩史, 東郷俊太, 姜銀来, 矢吹佳子, 村井雄太. (2019). 筋電制御システムに関する研究と義手への応用. 日本ロボット学会誌, 37(4), 1-6.

[横井浩史 2019]

横井浩史, 矢吹佳子, 東郷俊太, 姜銀来. (2019年3月22日). 特願 2019-55195.

[河村次郎 1999]

河村次郎ほか. (1999). 上肢切断者の現状と動向: 近畿地区におけるアンケート調査から. 日本リハビリテーション医学会誌, 36(6), 384-389.

[梶谷勇 2001]

梶谷勇, 樋口哲也. (2001). 筋電義手開発のための義手に対する意識調査. 電子情報通信学会技術研究報告書: 信学技報, 101(130), 75-82.

[株式会社アイ・メーカー]

株式会社アイ・メーカー i-maker.inc. (2019). i-MAKER. 参照先: https://i-maker.jp/blog/silicone-9443.html?_ga=2.147426609.700291688.1578505527-629203316.1578505527

[株式会社オビツ製作所]

株式会社オビツ製作所. (2019年9月). スラッシュ成形製造工程. 参照先: 株式会社オビツ製作所: <https://www.obitsu.co.jp/process/index.html>

[株式会社タナック]

株式会社タナック. (2019). 超柔軟ゲル素材のトップニッチメーカー. 参照先: TANAC MATERIAL.

[株式会社ニップラ]

株式会社ニップラ. (2019年9月). 射出成形とは. 参照先: ニッポンのプロダクトとライフを支える株式会社ニップラ: https://www.npl-jsw.co.jp/about_injection-molding/

[株式会社プラポート]

株式会社プラポート. (2019年9月). プラスチックの成型方法. 参照先: プラスチック加工・樹脂加工のことなら株式会社プラポート: <http://www.plaport.co.jp/post->

26.html

[株式会社日立ハイテクノロジーズ]

株式会社日立ハイテクノロジーズ. (2019年9月). みんなの試作広場. 参照先:
<https://minsaku.com/category01/post216/>

[鎌倉矩子. 1989]

鎌倉矩子. (1989). 手のかたち手のうごき. 医歯薬出版株式会社.

[鎌倉矩子. 1978]

鎌倉矩子, 大村道子, 石井晴美, 三星文子, 三浦頼子. (1978). 健常手の把握様式. リ
ハビリテーション医学, 15(2), 65-82.

[韓鉉庸 1999]

韓鉉庸, 入口克己, 川村貞夫. (1999). 人間の手指組織の剛性解析と人工指との比較.
日本ロボット学会誌, 17(8), 1141-1148.

[岩本光雄 2017]

岩本光雄. (2017). 指紋. 著: バイオメカニズム学会, 手の百科事典 (59-62).

[岩本光雄 2017]

岩本光雄. (2017). 体表解剖. 著: バイオメカニズム学会, 手の百科事典 (56-58).

[金型の基礎を学ぶ]

金型の基礎を学ぶ. (2019年9月). 参照先: ものづくりウェブ 機械設計エンジニア
の基礎知識 知識ゼロからものづくりを学ぶ: <http://d-engineer.com/mold/>

[山羽和夫 1975]

山羽和夫, 高野英彦, 尾崎省太郎. (1975). 人間の指の物理的特性. バイオメカニズ
ム, 3, 27-36.

[柴田瑞穂 2004]

柴田瑞穂, 平井慎一. (2004). 柔軟指ハンドを用いた把持力制御における安定性と把
持可能性の解析. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 04 講演論文集.

[森山多覇 2017]

森山多覇, 西綾花, 中村拓人, 梶本裕之. (2017). 指先の触覚を前腕に提示するウェア
ラブルデバイスの開発. 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集.

[西岡研一 1993]

西岡研一. (1993). 前腕用筋電義手ワймハンド (WIME HAND). 日本義手装具学会
誌, 9(4), 347-351.

[前野隆司 1997]

前野隆司, 小林一三, 山崎信寿. (1997). ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的
関係. 日本機械学会論文集 (C 編), 63(607), 881-888.

[村上剛司 2004]

村上剛司, 長谷川勉. (2004). 器用な多関節多指ロボットハンドのための柔軟被覆と

爪を有する指先. 日本ロボット学会誌, 22(5), 616-624.

[大西健吾. 2004]

大西健吾. (2004). 電動義手の普及, 高機能化にむけた技術の展望. 第43回日本ME学会大会, OSO3-3.

[池田直人. 平成16年].

池田直人. (平成16年). 修士学位論文; 人間からロボットへの日常の動的把持スキルの伝達.

[池内克史. 2000]

池内克史. (2000). 人間の把持行動観察によるロボットの把持戦略の生成. ロボット学会誌, 18(6), 792-797.

[中沢信明 2000]

中沢信明, 植北祥充, 池浦良純, 諸岡光. (2000). 人間の指関節のインピーダンス特性. 日本機械学会論文集(C編), 66(641), 214-219.

[中沢信明 1998]

中沢信明, 池浦良純, 諸岡光. (1998). 人間の指先のせん断方向粘弾性特性. 64(624), 3076-3082.

[田原健二 2003]

田原健二他. (2003). 最小自由度をもつ柔軟2本指ロボットによる安定把持および姿勢制御のためのセンソリーフィードバック. 日本ロボット学会誌, 21(7), 763-769.

[日本工業規格 JIS9223]

日本工業規格 JIS9223 義手用装飾手袋. (1995).

[福永秀之 2004]

福永秀之. (2004). 義肢装具材料の将来. 日本義肢装具学会誌, 20(3), 138-140.

[福村直博 2017]

福村直博. (2017). 把持. 著: バイオメカニズム学会, 手の百科事典 (164-168).

[平井慎一 2004]

平井慎一. (2004). 柔らかさが生み出す巧みな物体操作. 香川大学地域開発共同センター柔軟物はドリング技術交流グループキックオフミーティング, 1-48.

[北山一郎 1985]

北山一郎, 雨森邦夫, 中島咲哉. (1985). 装飾手袋の材質と汚染に関する研究. 日本義肢装具学会誌, 1(1), 39-50.

[毛利哲也 2017]

毛利哲也. (2017). ロボット指. 著: バイオメカニズム学会, 手の百科事典 (349-358).

[木村澄子 2017]

木村澄子. (2017). 爪の発生. 著: バイオメカニズム学会, 手の百科事典 (53-55).

[矢吹佳子 2016]

矢吹佳子, 棚橋一将, 星川英, 中村達弘, 姜銀来, 加藤龍, 横井浩史. (2016). エラストマーゲルを用いた筋電義手のための装飾手袋の開発. 日本義肢装具学会誌, 32(3), 177-185.

[有本卓. 2000]

有本卓. (2000). 日常物理学への挑戦. 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 909-910.

[有本卓. 2004]

有本卓. (2004). 手の巧みさと解析力学：ベルンシュタイン問題（身体運動の謎. 物性研究, 82(4), 625-654.

[傳田光洋 2006]

傳田光洋. (2006). 皮膚は考える. 岩波書店.

第4章 評価実験

4.1 超弾性グローブの性能評価	86
4.1.1 グローブの柔軟性の評価	87
4.1.2 グローブの電動義手への追従性の評価	90
4.1.3 グローブの筋電義手動作に対する負荷評価	91
4.2 グローブ材料の力学的評価	99
4.2.1 引裂き強度比較試験	99
4.2.2 引張試験による静止摩擦係数比較	105
4.2.3 引き抜き実験による把持操り機能評価	110
4.3 筋電義手によるパフォーマンス評価	127
4.3.1 装飾義手用塩化ビニルグローブとエラストマーグローブ	127
4.3.2 爪無しエラストマーグローブと爪ありエラストマーグローブ	129
4.3.3 エラストマーグローブと TT シリコーングローブ	131
4.3.4 エラストマー，筋電義手用塩化ビニル，筋電義手用 SS シリコーン	133
第4章 参考文献	135

4.1 超弾性グローブの性能評価

これまでの章において、日本及び海外で使われている義手グローブの素材が塩化ビニルとシリコンのみであり、それらの性質が、優れた外観を形作ることができる材質である以外の筋電義手の要件を卓越して満たすものでないことを、歴史的背景と合わせて確認した。

本論文第3章において、超弾性材料を電動筋電義手用グローブの材料として用いることを提案し、その新素材として熱可塑性スチレン系エラストマー樹脂を用いたグローブの開発と製造について述べた（エラストマーグローブ）。また同時に、熱硬化性樹脂の、商品化されていない新しいシリコン材料についても新しいグローブの成形が可能であったことから、熱硬化性シリコン樹脂を用いたグローブの製造を行ったことについて述べた（TTシリコングローブ）。

また、既に市場に出ており、従来、装飾義手や筋電義手のコスメチックカバーとして使われてきたシリコンや塩化ビニルについては、材料や電動義手側に少しの工夫を施すことで柔軟性や動力義手への追従性が増し、電動の義手や5指可動型義手に有用であると考え、第3章3節では、シリコン製、塩化ビニル製の筋電義手用グローブの仕様変更の提案を行った（SSシリコン、筋電義手用塩化ビニルグローブ）。

そこで、本節では、これら4種（エラストマー、TTシリコン、SSシリコン、塩化ビニル）の材料で製作されたグローブを用いて、柔軟性の評価、伸張性の優劣による電動義手への追従性の評価、電流負荷の影響の調査、などの性能評価について述べる。

4.1.1 グローブの柔軟性の評価

装飾義手は、その装着は、切断者（または欠損者）自身で行うことがほとんどであるが、手先具は予めソケットと一体となっているものを装着することが多いため、自身でグローブを調整する必要性やその機会はない。

しかし、筋電義手に関しては、たとえば全国に流通している市販の海外製のものなどは、塩化ビニル製のインナーグローブを被せた上にさらにアウターグローブとして塩化ビニル製グローブなどのコスメチックグローブを装着しなければならない。その際、滑りをよくするために、市販のハンドクリーム等を、予め引っ掛かりそうな場所に塗る必要がある[ottobock, 2019]。このような装着しづらい硬いグローブの扱いは、装着者及び装着者の介助者のみならず、義肢装具士や、出荷作業を担当する作業者にとっても難点のひとつである。

そこで、開発したグローブの柔軟性を評価するために、グローブの筋電電動義手への適応の可否とその作業における容易性を明らかにする。

グローブをロボットハンドに装着する際には、ロボットハンド部の各部品が組み立てられたのちに、グローブ手首部の開口部からロボットハンドを挿入する。このとき、グローブの手首開口部の伸縮性によってはロボットハンドの関節部および骨格部に過度な負荷がかかる恐れがある。このことより、任意形状のロボットハンドへのグローブの適応の可否とその作業性について評価する。

なお、本検証は、ロボットハンド構造を熟知した作業者を被験者とし、各グローブの筋電義手の手先具への装着時間を比較することにより行う。また、従来のグローブの柔軟性と比較するため、装飾義手用の塩化ビニル製グローブを比較対象とし、検証を行う。

1) 実験条件

▶ 用いたグローブ

装飾義手用塩化ビニル製グローブ (70g, 図 4-1b), 開発したエラストマー製グローブ (60g, 図 4-1c), 開発した TT シリコーン製グローブ (76.8g, 図 4-1d) .



a) 手先具 b) 塩化ビニル c) エラストマー d) TT シリコーン

図 4-1 用いた手先具と被せたグローブ

▶ 手先具

UEC-eHand (2 自由度ロボットハンド, 図 2-3) は母指 CM 関節部および母指以外の MP 関節部に駆動するサーボモータを配置した構造になっており, 拇指 CM 関節は並立位から対立位までの範囲で可動し, また拇指以外の MP 関節は伸展 30° および屈曲 90° まで可動する構造になっている. 骨格部は ABS 樹脂を用いた 3D プリントによって製造されている (図 4-1a) .

2) 実験方法

実験では, ロボットハンド構造を熟知した作業者を被験者とし, それぞれのグローブを計 5 回装着し, 装着の可否とともに装着時間を計測することで, それらのグローブのロボットハンドへの適応可能性と作業効率を評価した.

3) 実験結果

本実験において, すべての試行でグローブの装着が可能であった. 装着に要した時間及びその平均・標準偏差を表に示す. 塩化ビニル製グローブの装着には平均 $170.2(\pm 5.9)$ [s] 必要であるのに対して本研究で筋電義手用に開発したエラストマー製グローブにおいては平均 $68.4(\pm 20.3)$ [s] であった. また, 同様に筋電義手用に開発した TT シリコーン製グローブの装着時間は, 平均 $165.8(\pm 25.7)$ [s] であった (表 4-1) .

表 4-1 グローブの装着実験結果

	塩化ビニル グローブ	エラストマー グローブ	TT シリコーン グローブ
1 回目	178	51	136
2 回目	173	97	143
3 回目	169	82	173
4 回目	162	52	180
5 回目	169	60	197
平均	170.2	68.4	165.8
標準偏差	5.9	20.3	25.7

4) 考察・まとめ

本実験結果により、塩化ビニル製グローブ及び TT シリコーン製グローブが装着作業を阻害する要因はその伸縮性の低さにあると考えられる。グローブの装着は、手首開口部を広げながら手先具の可動部が動かないように固定した状態で挿入する必要があるため、塩化ビニル製グローブや TT シリコーン製グローブではその伸縮性の低さから大きな外力を加える必要があった。また、グローブの指部に手先具の指骨格を挿入する際に、径の小さいグローブ指部を伸ばすことが必要となるが、その作業が困難であった。

これらと比較してエラストマー製グローブは伸縮性に富むため、塩化ビニル製やシリコーン製グローブにおいて困難であった上記2つの作業、つまり、手首開口部を広げつつグローブを装着する作業、及び径の小さいグローブ指部を伸ばす作業を容易に行えたことが装着時間の短縮につながった。

4.1.2 グローブの電動義手への追従性の評価

次に、さらに開発したエラストマー製グローブの電動義手への追従性の評価のため、装飾義手用の塩化ビニルグローブと比較した実験を行うこととした。グローブを装着した手先具に2姿勢を取らせた際の開き幅を測定した。手先具の母指と他の4指、または母指のみを限界いっぱいを開いたとき、開き幅がそのまま保たれるかどうかを調査することで、グローブの手先具への追従性と柔軟性が評価できる。

1) 実験条件

グローブと手先具は 4.1.1 で使用したのと同じ装飾義手用塩化ビニルグローブ（「塩化ビニル」）と、熱可塑性エラストマーグローブ（「エラストマー」）を用いる。

2) 実験方法

初めに、精密把持の姿勢から4指を限界まで開いた状態の時の、母指と示指の指尖の距離を開き幅として測定を行う（図4-2上）。

次に、精密把握の姿勢から母指を限界まで開いた時の母指と示指の指尖の距離を測定する（図4-2下）

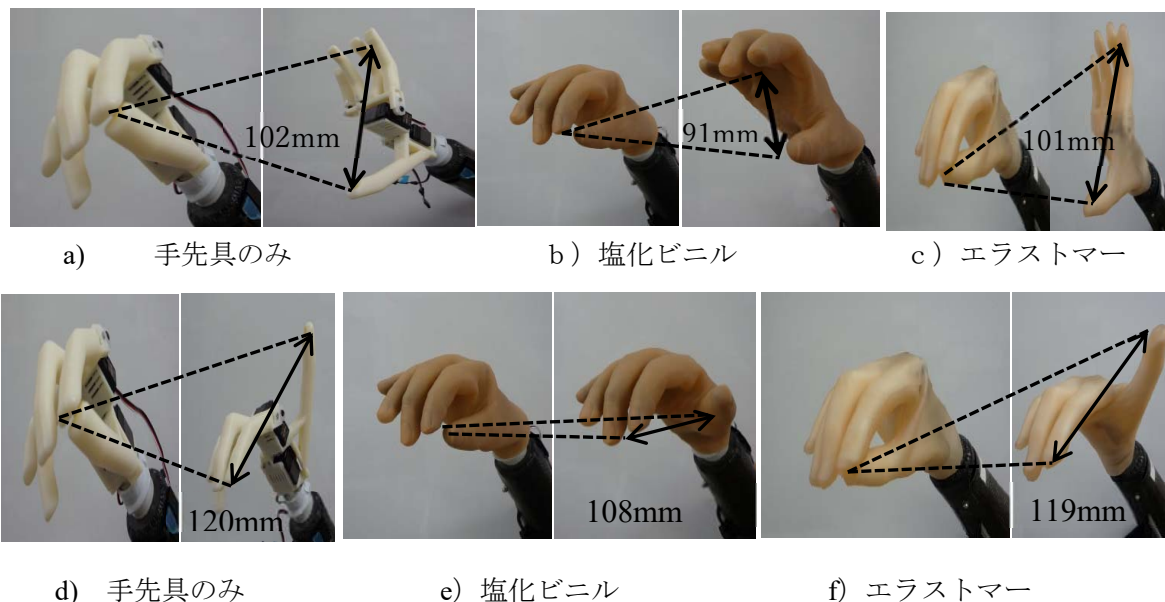


図 4-2 指 MP 関節回転時（上），母指 CM 関節回転時（下）のグローブの開き幅

3) 実験結果

実験の結果，エラストマー製のグローブの場合（図 4-2c, f）は開き幅の差はわずかであり，エラストマー製のグローブを装着した場合は，グローブ内部の手先具の開き幅を大きくしても，手先具の開き幅と差のない可動域を維持できることが分かる。

しかし，塩化ビニル製のグローブを装着した場合（図 4-2b, e）は，グローブ内部の手先具の開き幅を大きくしても開き幅は大きくなり，グローブの重みで開き幅は頭打ちとなることが明らかとなった。

4.1.3 グローブの筋電義手動作に対する負荷評価

4.1.3.1 塩化ビニル装着時，エラストマー装着時，グローブ非装着時の比較

各グローブ装着時に筋電義手を動作させた際のモータへの電流消費量を計測することで，グローブ単体での筋電義手への負荷を評価する。筋電義手は欠損した手の機能を代替するために用いられるため，筋電義手の体積および重量には欠損部位と同程度か少なくとも可搬であり作業を邪魔しない体積であることが要件として挙げられる。そのため，バッテリーの体積および重量に対する制約が厳しく，余分な負荷によるバッテリー消費を極力抑える必要がある。

そこで，本評価実験では，「塩化ビニル製グローブ装着時」，「エラストマー製グローブ装着時」，「グローブ装着なし（非装着）」のロボットハンドにおいて，「手を開く」「手を握る」「人差し・中指を曲げる」「親指を対向させる」の姿勢を維持したときそれぞれの姿勢に移行する際のロボット駆動モータにおける電流消費量を計測することにより，グローブに起因する負荷量を推定した。

実験で使用したロボットハンドは，2自由度ハンドであり，母指 CM 関節部および人差し指・中指の MP 関節部に駆動するサーボモータを配置した構造となっており，母指 CM 関節は並立位から対立位までの範囲で稼働し，また人差し指・中指の MP 関節は伸展 30°および屈曲 90°まで稼働する（図 4-3）

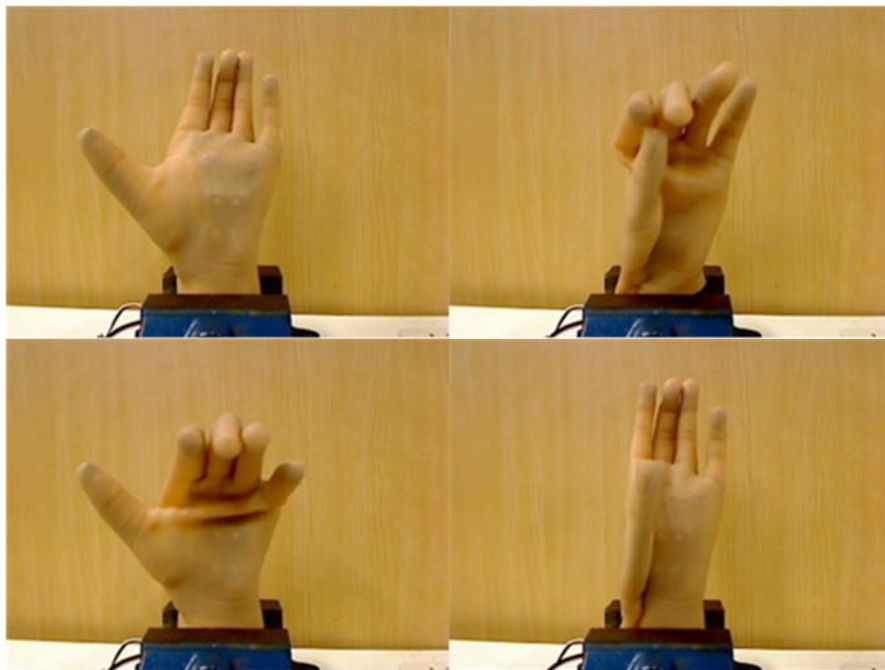


a. 塩化ビニル装着 b. エラストマー装着 c. グローブ非装着

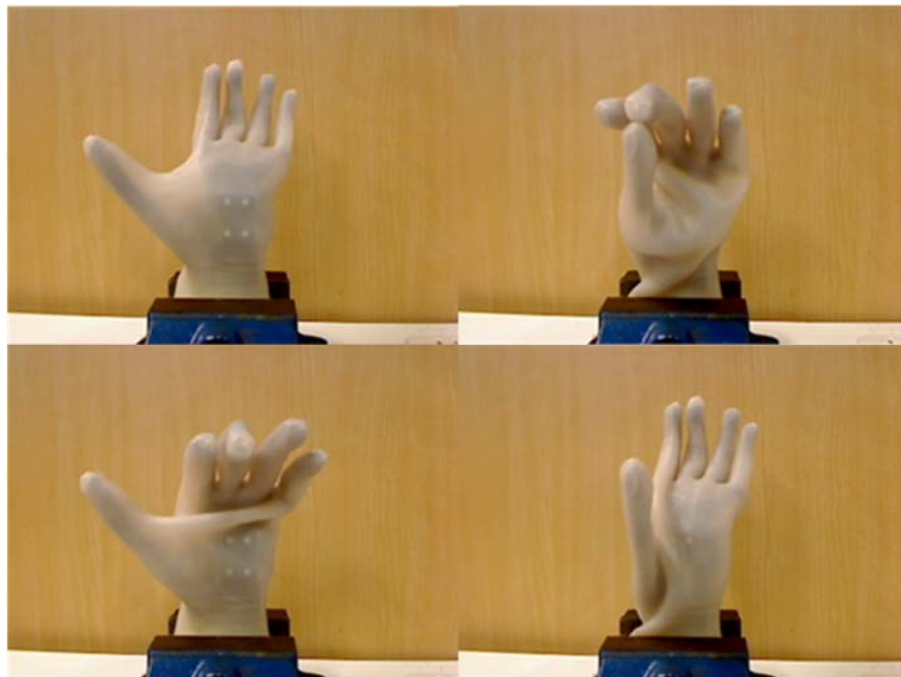
図 4-3 動作負荷検証に用いたロボットハンド

1) 実験条件

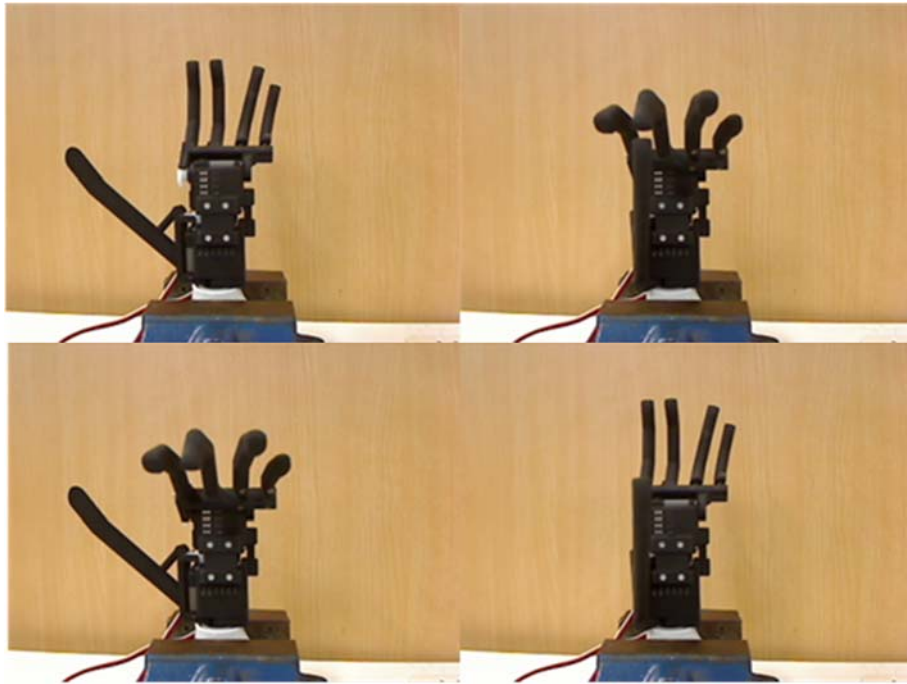
図4-4に「手を開く」「手を握る」「示指・中指(2-3指)を曲げる」「親指を対向させる」をしたときのロボットハンドの姿勢を示す。(図左上:手を開く, 右上:手を握る, 左下:示指・中指を曲げる, 右下:親指を対向させる)



a. 塩化ビニル製グローブ装着時



b. エラストマー製グローブ装着時



c.グローブ非装着時

図 4-4 検証動作を行った際の各グローブ装着時の姿勢

2) 実験方法

各ハンドの制御器として「REK-0001」MPU ボードを使用し、各種接続基板によってロボットハンドを制御した。対象動作時のモータ負荷評価にはサーボモータへの電源供給ラインに電流センサを（浅草ギ研製 AS-AM）挿入し、PC に接続された AD 変換装置（Contec 製 ADA16-8/2(CB)L）にて 1.6kHz・16bit にて記録した（図 4-5）。

計測データを移動平均フィルタ（フレーム幅：100 点）でスムージングし、姿勢維持している区間の平均電流消費値および姿勢移行時の最大電流消費値を算出した。それぞれのグローブにて各姿勢の維持および姿勢の移行を 5 試行行い、平均および標準偏差値を求めた。

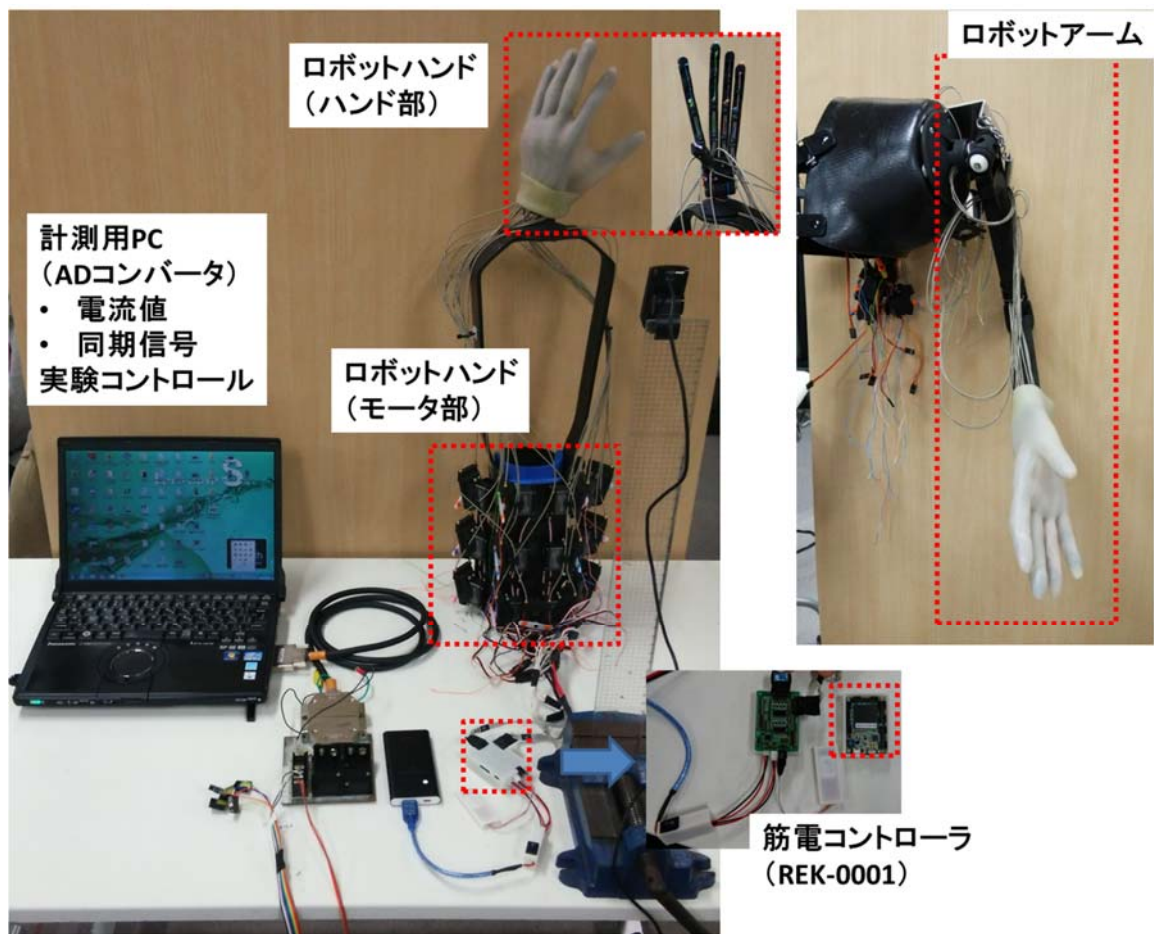


図 4-5 計測環境

3) 実験結果

表 4-2 および図 4-6 に姿勢を維持した際に消費されている電流値の平均・標準偏差を示す。

表 4-2 各グローブにおける姿勢維持に消費される電流値 (平均) 及び標準偏差 [A]

	塩化ビニル製 グローブ装着 [A]	熱可塑性エラストマー グローブ装着 [A]	グローブ非装 着 [A]
手を開く	0.220±0.021	0.053±0.000	0.053±0.000
手を握る	0.162±0.011	0.062±0.007	0.052±0.000
示指・中指 (2.3 指) を曲げる	0.153±0.007	0.054±0.002	0.052±0.000
親指を対向させる	0.243±0.029	0.061±0.007	0.053±0.000

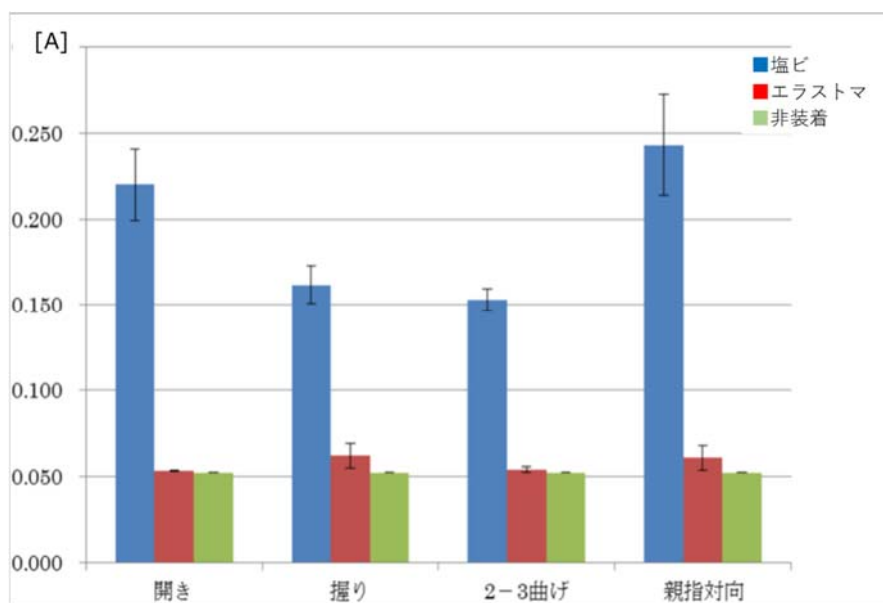


図 4-6 姿勢維持に必要な電流値 (縦軸：電流消費量[A])

塩化ビニル製グローブを装着した際のハンドの姿勢を維持する際の電流消費量は、他と比較して3倍～5倍大きく、150mAから250mA消費していることがわかる。また、熱可塑性エラストマーグローブを装着した時とグローブ非装着の場合の電流消費量には差がみられず、またそれぞれ50mA程度であった。このことから、熱可塑性エラストマーグローブでは従来の塩化ビニル製グローブと比較しモータへの負荷が格段に抑えられているのに加えて、グローブの負荷自体がほぼないことが分かる。

次に、表 4-3 および図 4-7 に、各動作を行った際に消費される電流値の最大値の平均・標準偏差を示す。

表 4-3 各グローブにおける姿勢変化時の電流ピーク値及び標準偏差 [mA]

各姿勢への移行時の最大電流値	塩化ビニル製グローブ[mA]	エラストマー製グローブ [mA]	グローブなし[mA]
「手を握る」→ 「手を開く」	383±5	310±5	322±4
「手を開く」→ 「手を握る」	281±9	285±60	332±2
人差し指・ 中指を曲げる	232±10	177±4	178±1
親指を対向させる	339±41	146±4	164±1

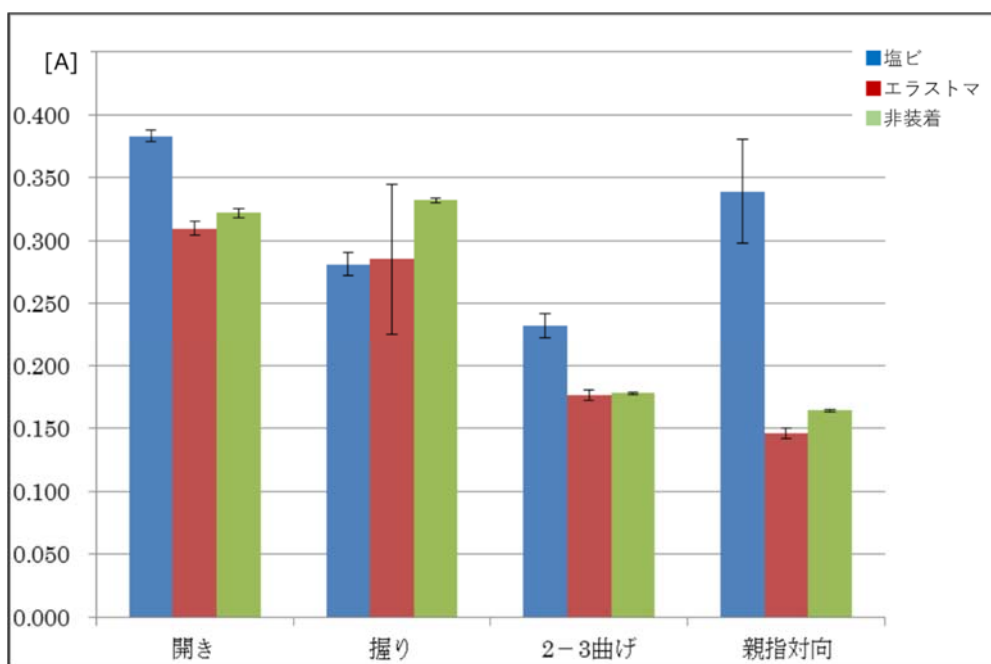


図 4-7 姿勢変化時に必要な電流ピーク値

「手を握る」以外の動作において、塩化ビニル製グローブを装着時に最大の電流ピーク値を示し、他の条件と比較して有意な差が存在する。また、「手を握る」以外において、熱可塑性エラストマーグローブとグローブ非装着の間に電流ピーク値の差はほぼない。このことから、塩化ビニル製グローブが筋電義手の姿勢変化においても他と比較して負荷が高いことと、熱可塑性エラストマーグローブにおいてはほぼ負荷がないことが分かった。

「手を握る」の姿勢の変化においては、他の姿勢変化の条件と異なる電流値の計測時系列が得られた。図 4-8 に「手を開く」の姿勢状態から「手を握る」の姿勢に変化させた時の消費電流値の時系列変化を示す。このとき、筋電義手を動作させた始めた区間において電流値が減少する区間が計測したすべての試行（5 回）確認された（赤の点線で囲んだ部分）。また、「手を開く」という状態においてモータへの電流供給をやめると、塩化ビニル製グローブにおいてのみロボットハンドが「手を握る」ときの姿勢へハンドが動いたということが観察された。このことから、この消費電流値の減少は負荷が少ないのではなく、その区間の前に「手を開く」の姿勢状態にてグローブに蓄えられた弾性エネルギーが「手を握る」という動作の際に解放されたものと考えられる。このことから、ロボットハンドの動作に対しても塩化ビニル製グローブが筋電義手動作の負荷となっていること、熱可塑性エラストマーグローブは筋電義手動作の負荷がかなり低減されていることがわかる。

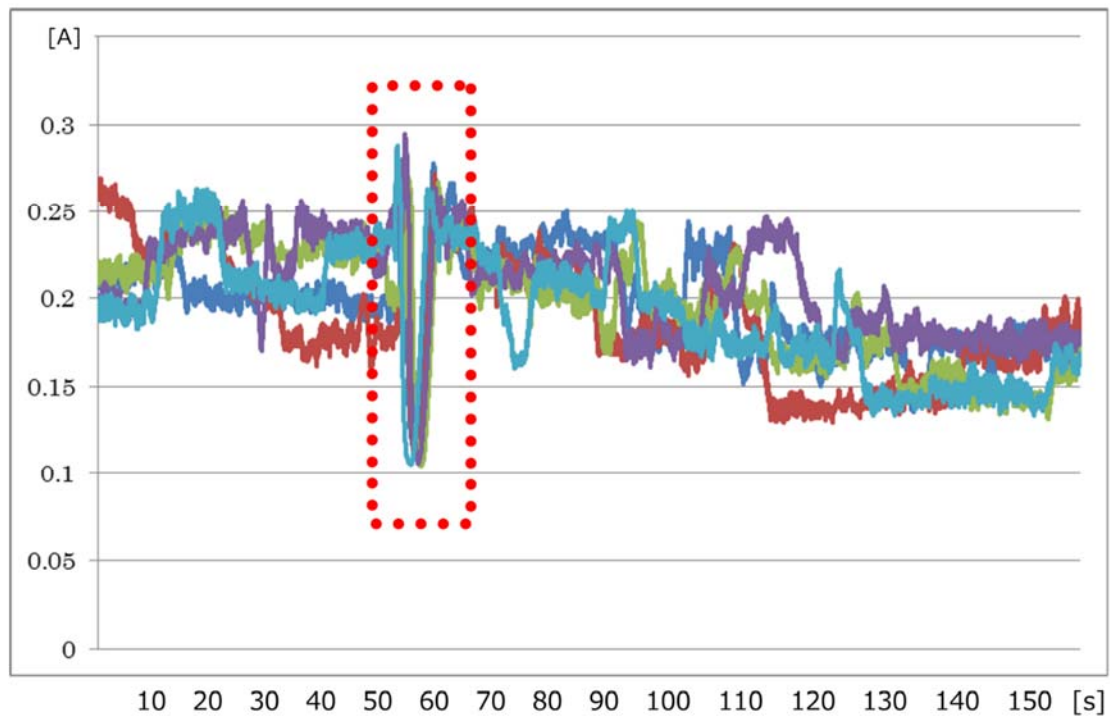


図 4-8 「手を握る」から「手を開く」の姿勢変化時の消費電流値の時系列
(縦軸：電流消費量[A])

4) 考察・まとめ

以上のことから、エラストマー製グローブを装着した際の手先具へのグローブによる負荷は低く抑えられていること、塩化ビニルグローブは、筋電義手の姿勢変化においても他と比較して負荷が高いことが明らかとなった。

4.1.3.2 塩化ビニル装着時，エラストマー装着時，TTシリコーン装着時，非装着時の比較

1) 実験条件・実験方法

4.1.3 と同様の評価実験を，以下の手先具（図 4-9a）と塩化ビニル，エラストマー（図 4-9a），TTシリコーングローブ（図 4-9a）の各グローブ装着時と，グローブ非装着時で比較した．（塩化ビニルグローブ装着時の画像なし）



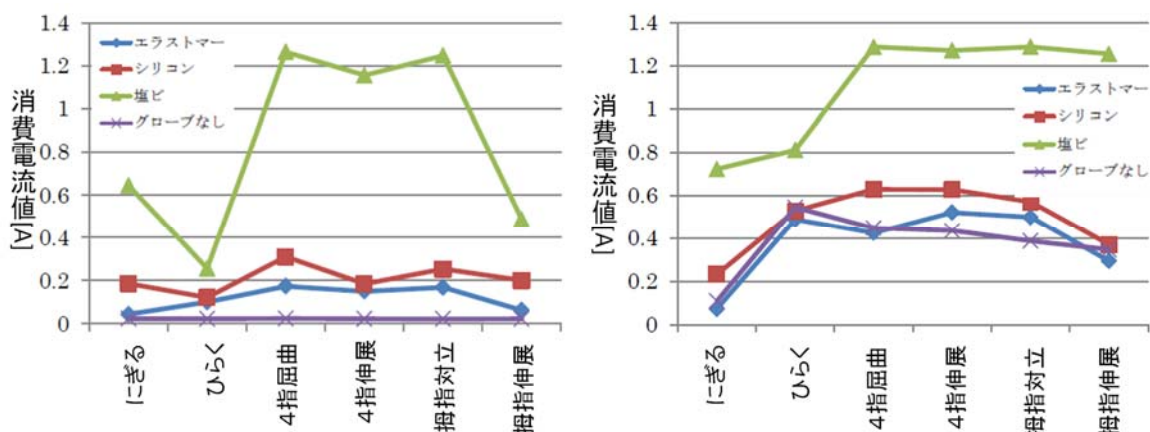
a. 手先具 b. エラストマー装着時 c. TTシリコーン装着時

図 4-9 手先具（グローブ非装着）と

（塩化ビニル）・エラストマー・TTシリコーン装着時の手先具の様子

2) 実験結果

結果をグラフ（図 4-10）に示す．姿勢維持をさせた際，TTシリコーンにかかる電流負荷は，エラストマーをわずかに上回る程度であることが分かった．



a. 各姿勢維持に必要な電流値（平均値）

b. 各姿勢維持時の最大電流値

図 4-10 グローブ装着時の姿勢維持にかかる負荷評価

4.2 グローブ材料の力学的評価

筋電義手の物体把持や保持には、手先具に被せられたグローブ表面と物体表面との摩擦力[岡本正吾][山田陽滋他 1994]や引抜抵抗力の大きさが関係する。つまり、義手の手先具が物体を把持するとき、グローブ中身の手先具の形状や、グローブと把持物体との接触面の摩擦力が、把持の容易さを決定すると考えられる。また、把持してから物体を保持可能な時間の長さや保持力の安定性は、グローブの素材と把持物体の材質との組み合わせによって、性質が異なると予想される。

本項は、このようなグローブ間の物理特性を調査することで、異なる素材のグローブの特徴を明らかにすることを目的とする

ここで物理特性とは、弾性、表面粗さ、摩擦係数、熱抵抗等を言う [岡本正吾] [永野光他 2011].

そこで、本節では、弾性調査のひとつとして、グローブ材料を試験片とした引き裂き強度試験を行い、引き裂き強度と伸び率について調査する(4.2.1)。また、表面粗さを主とする接触面の性質を定量化したものが静摩擦係数である[山田陽滋 1993]ことより、摩擦係数のうち静摩擦係数と、後に説明する引き抜き抵抗力を、それぞれ引張試験(4.2.2)、引き抜き試験(4.2.3)によって計測することで物理特性の調査を行う。

4.2.1 引裂き強度比較試験

4.2.1.1 塩化ビニルグローブ、エラストマーグローブの比較

グローブ材料の耐引裂性と伸縮性とを評価するため、卓上型精密万能試験機オートグラフ(AGS-100NX, 榊島津製作所製)を使い、JIS K 6252(近似)試験法による材料の引裂き強度を比較する。

1) 実験条件・実験方法

JIS K 6252 は、加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの引裂き強さの求め方の JIS 規格であり、トラウザ型(図 4-11, アンクル型, クレセント型など型は幾つか存在する)の試験片の切込みを起点として、引き裂くのに要する力の中央値を、試験片の厚さで除した値を求める方法である。

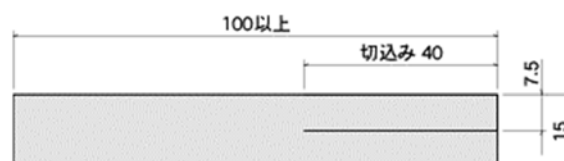


図 4-11 トラウザ型試験片(規定例)

あらかじめ試験片に入れた切込みから、引裂きが成長・伝播するのに要する力を測定する。試験片が切断に至るまでの引き裂く力と引裂時間とのグラフ（波状曲線）を記録し、このグラフから引き裂く力の中央値を求める。ほかの試験片に比べ、切込みの影響及び弾性率の影響を比較的受けにくい [日本工業規格, 2007].

そこで、具体的には以下のように試験片を用意し、実験を行った。

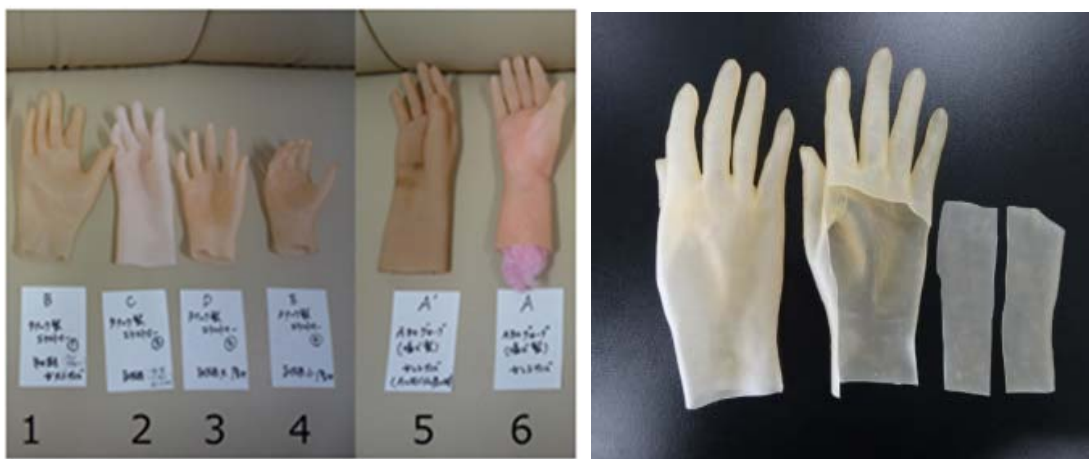
▶ 試験片

装飾義手用塩化ビニル製グローブ 2種類 (P1, P2), 各 2片

エラストマー製グローブ 4種類 (E1, E2, E3, E4), 各 2片

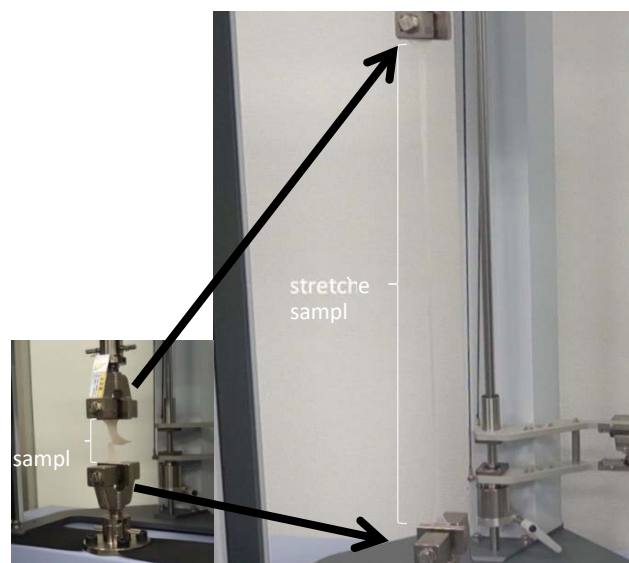
▶ サンプルサイズ 80×20mm 角

短辺中心から 40mm の切り込みを入れ、切れ端部分を 10mm オートグラフのチャックに挟み、300mm/min で破断するまで引っ張る (図 4-12a) .



a) 試験に使ったグローブ (左 E1~E4, P1,2)

b) 試験片の採取



c) 引き裂き試験の様子 (エラストマー片)

図 4-12 引き裂き試験

2) 実験結果

各資料の厚さと、断裂点における試験力、ストローク、および算出した引裂強度（引裂強度 (kN/m) = 破断点の試験力(N)/試験片の厚さ(mm)）をから割り出した各サンプルのストロークと試験力の変化を図 4-13 に示す。

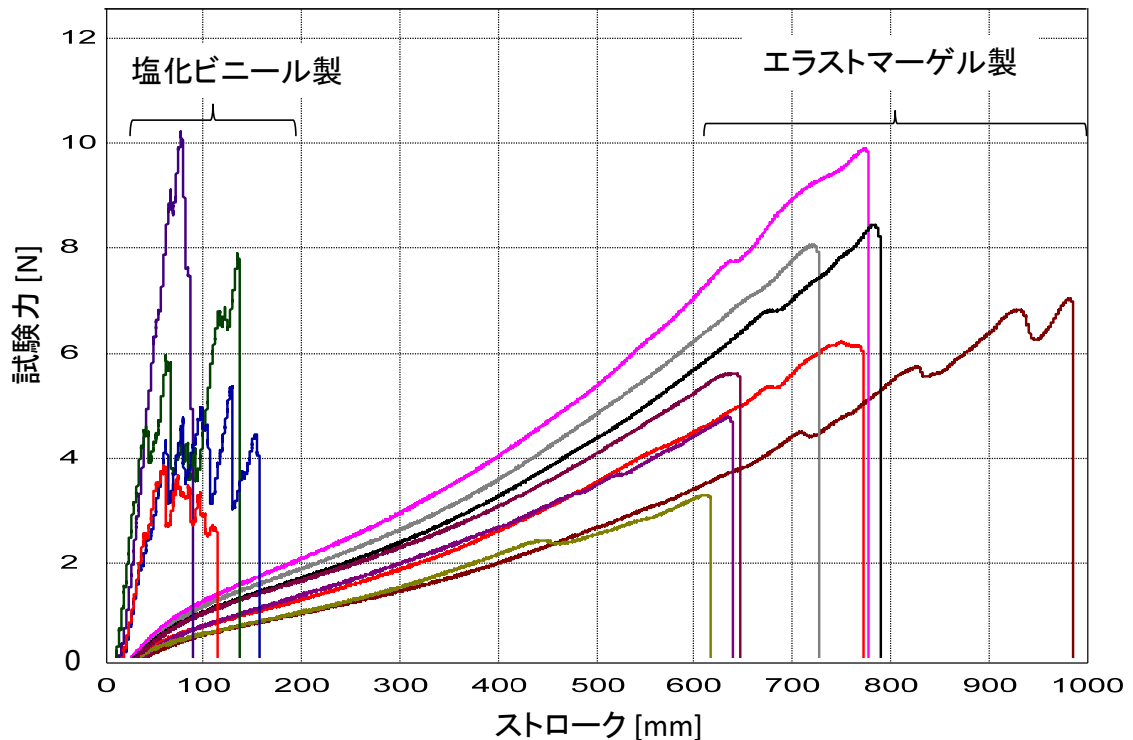


図 4-13 引き裂き試験結果
(塩化ビニール P1,P2 各 2 片, エラストマー E1~E4 各 2 片)

図 4-13 より、塩化ビニール製試験片とエラストマー製試験片が同程度の引裂強度を持つことがわかる。

一方、破断するまでのストロークは塩化ビニール製サンプルで 130~160mm, エラストマー製サンプルで 600~1000mm であり、破断までの伸縮はエラストマー製のものが圧倒的に優れている結果であった。

また、エラストマー製の試験片は引裂においても高伸長性を保っているが、塩ビ製のものは引裂きにおいてはほとんど伸びることなく裂けた。

4.2.1.2 塩化ビニル（2種）、シリコーン（3種）、エラストマーの比較

1) 実験条件・実験方法

➤ 試験片（図 4-14）

■ 塩化ビニル製グローブ 2 種類，試験片各 2 片

- ・ 装飾義手用塩化ビニルグローブ（塩①）
- ・ 筋電義手用塩化ビニルグローブ（塩②）

■ シリコーン製グローブ 3 種類，試験片各 2 片

- ・ 佐藤技研製装飾義手用グローブ「シルキーグローブ」（シ①）
- ・ 佐藤技研製筋電義手用グローブ（SS シリコーン）（シ②）
- ・ タナック製筋電義手用グローブ（TT シリコーン）（シ③）

■ エラストマー製グローブ，試験片各 2 片

- ・ エラストマーグローブ（エ）

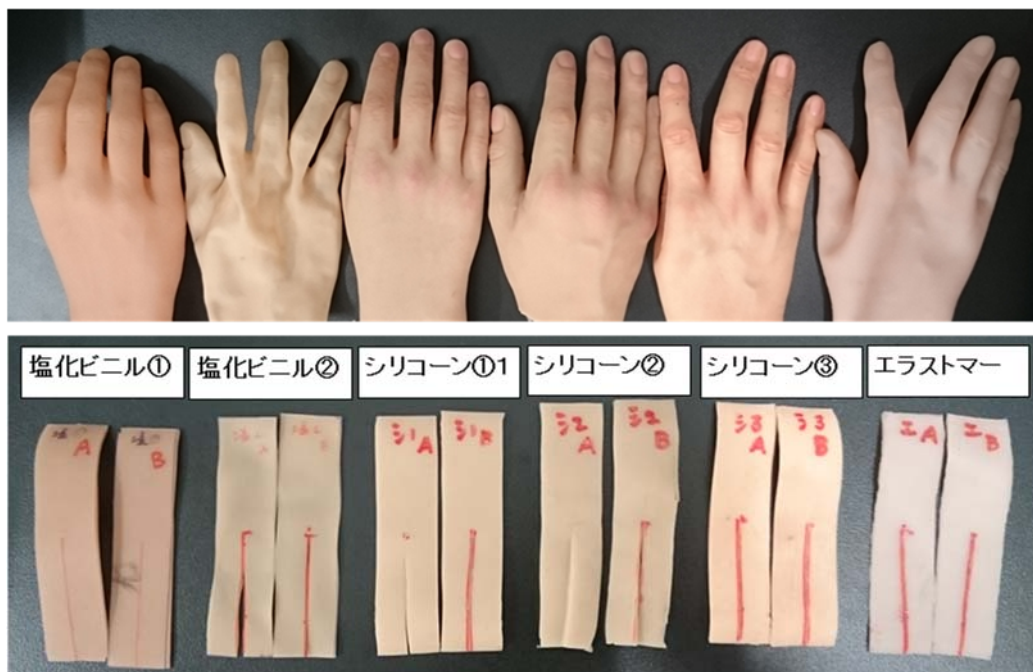


図 4-14 使用したグローブと切り出した試験片

- サンプルサイズ 80×20mm 角．各グローブの手首部からトラウザ型試験片を 2 片ずつ切り出す
- 短辺中心から 40mm の切り込みをいれ，切れ端部分を 10mm オートグラフのチャックに挟み，300mm/min で破断するまで引っ張る

2) 実験結果

実験結果を図 4-15 に示す。厚さと、断裂点における試験力、ストローク、および算出した引裂強度（引裂強度 (N/mm)=破断点の試験力(N)/試験片の厚さ(mm)）をから割り出した各サンプルのストロークと試験力の変化を表したものである。

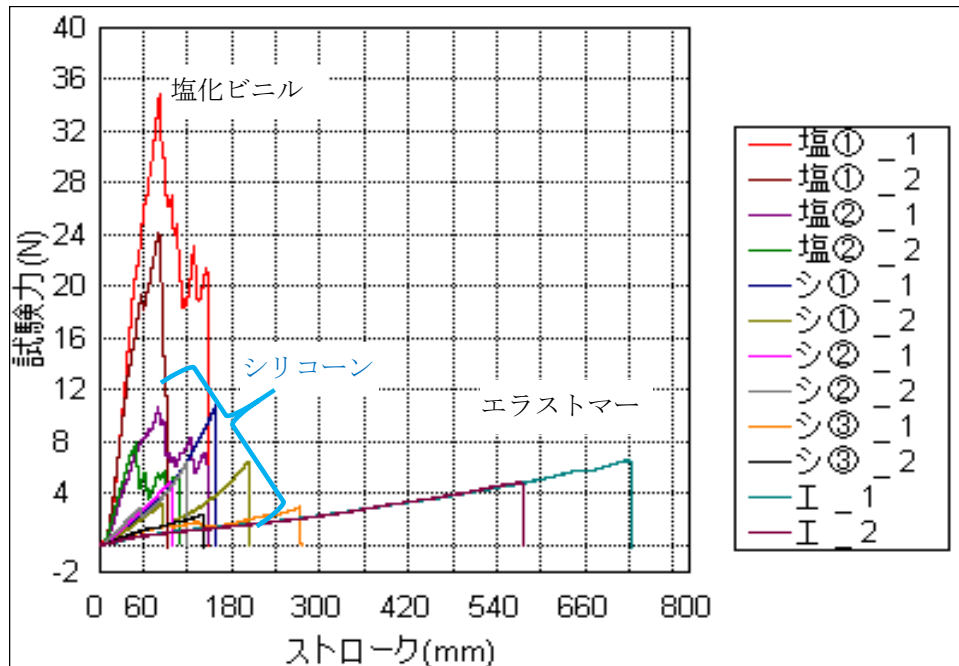


図 4-15 引裂き強度試験結果（塩ビ，シリコーン，エラストマー）

これをさらに分析した表を表 4-4 に示す。

表 4-4 引裂き強度試験結果（塩ビ，シリコーン，エラストマー）（）内は標準偏差。

名前	試験片厚さ [mm]	最大点_試験力 (平均) [N]	引裂き伸び 率※ (平均) N/mm	最大点_時間 (平均) [sec]	引裂き強さ (平均) N/mm
塩①	2.5 (0.91)	29.41 (7.62)	3.03 (0.05)	16.31 (0.40)	12.03(134)
シ①	2.49 (0.40)	8.65 (3.04)	5.54 (0.79)	36.34 (6.29)	3.42(0.68)
塩②	0.87 (0.04)	9.24 (1.94)	2.64 (0.53)	13.21 (4.26)	10.69(2.75)
シ②	2.67 (0.38)	5.63 (1.08)	3.70 (0.39)	21.68 (3.14)	2.16(0.71)
シ③	2.21 (0.01)	2.65 (0.41)	6.18 (2.35)	41.49 (18.83)	1.20(0.19)
エ	1.58 (0.06)	5.68 (1.21)	17.08 (2.56)	128.66 (20.51)	3.59(0.62)

※最大点試験力(N)を破断前の長さ (40mm) で除し、「引裂き伸び率」とした。

3) 考察

表 4-4 より，引き裂き強さが強い材質は，塩化ビニル，エラストマー，シリコーンの順であることが分かった。

また，シリコーンに関しては，シリコーン② (SS シリコーン) とシリコーン③ (TT シリコーン) では，シリコーン③の最大試験力はシリコーン②の半分くらいであるにもかかわらず，最大点への到達までに2倍の時間を要している．このことから，シリコーン③は引裂きに対する耐性が強いことが分かる。

エラストマーは，引き裂きの伸び率が17ポイントもあり，材質の引き裂き強さは，シリコーンより高いことが分かった。

表 4-4 において青く囲われている部分は，「筋電義手用」のグローブであることを示している。

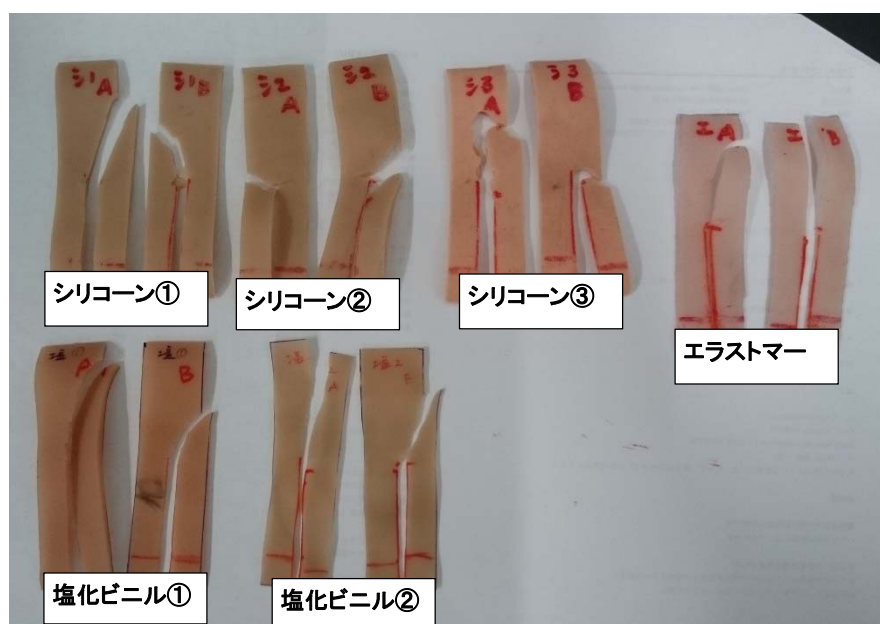


図 4-16 引裂き試験の切断点の様子

図 4-16 は，引き裂き試験後の各試験片の写真である．トラウザ型試験片（短辺 20 mm，長辺 80 mm）の真ん中（短辺 10 mm，長辺 40 mm）に切れ込みを入れたところから始まった引裂きが，どのように切断されたかの様子が表れている。

塩化ビニルとエラストマーは，引き裂きの方向に即して比較的真っすぐに裂けていくが，シリコーンは試験力の高かったシリコーン①を除き，引き裂き力の弱いものは，切れ込みのあたりから裂けてしまうことが切断面からも確認できた。

4.2.2 引張試験による静止摩擦係数比較

グローブ素材の表面粗さの特性を調べるため、引張試験によってグローブ表面の摩擦係数を比較する。評価に使うグローブは、皺のない手首の手背側の表面が試験対象物の接触面となるように配置する。

1) 実験条件

- ▶ 試料としたグローブは、エラストマー製、筋電義手用塩化ビニル製、SS シリコン製のグローブであり（図 4-17）、評価の対象とする手袋部位は、皺のない手首の手背側の表面とした。



図 4-17 使用するグローブ 3 種

- ▶ 試験機は、オートグラフ（島津製作所製，AGS-100NX）を使用，JIS K 7125 [日本工業規格]を参考とした摩擦係数試験を行う。
- ▶ 試験対象物：アクリル板，ゴムマット，アルミ板，樹脂ミラー，ガラス，木板，スポンジ，ポリエチレン袋，タオル，紙
- ▶ 引張速度：100mm/min
- ▶ グローブごと，試験対象物ごとに，それぞれ 3 回ずつ引張試験を行った（図 4-18）。

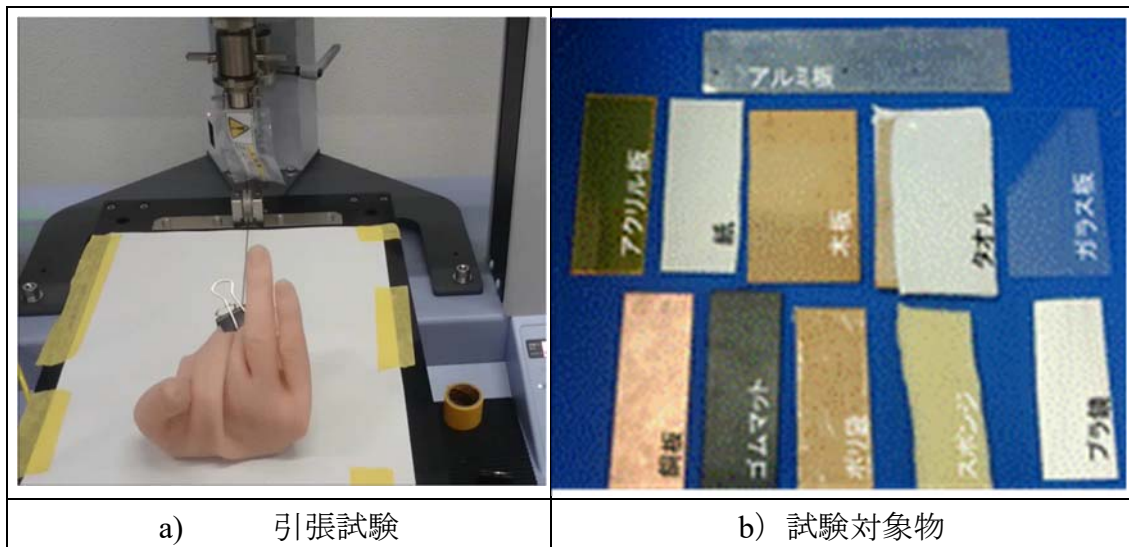


図 4-18 摩擦係数試験の様子

表 4-5 実験条件（測定順とクリップの数）

		エラストマー	塩化ビニル	SS シリコーン
物品 A	アクリル板	1 (大 1)	2 (大 1)	3 (大 1)
物品 B	ゴムマット	4 (大 1)	5 (大 1)	6 (大 1)
物品 C	アルミ板	7 (大 1)	8 (大 1)	9 (大 1)
物品 D	樹脂ミラー	10 (大 1)	11 (大 1)	12 (大 1)
物品 E	ガラスプレート	13 (大 1)	14 (大 1)	15 (大 1)
物品 F	木板	16 (大 1)	17 (大 1)	18 (大 1)
物品 G	スポンジ	19 (大 1)	20 (大 1)	21 (大 1)
物品 H	ポリエチレン	22 (大 2, 小 2)	23 (大 2, 小 2)	24 (大 2, 小 2)
物品 I	タオル	25 (大 2, 小 2)	26 (大 2, 小 2)	27 (大 2, 小 2)
物品 J	紙	28 (大 2, 小 2)	29 (大 2, 小 2)	30 (大 1, 小 2)

▶ 錘 : 200g クリップ大 : 4.969g クリップ小 : 2.92g

2) 解析方法

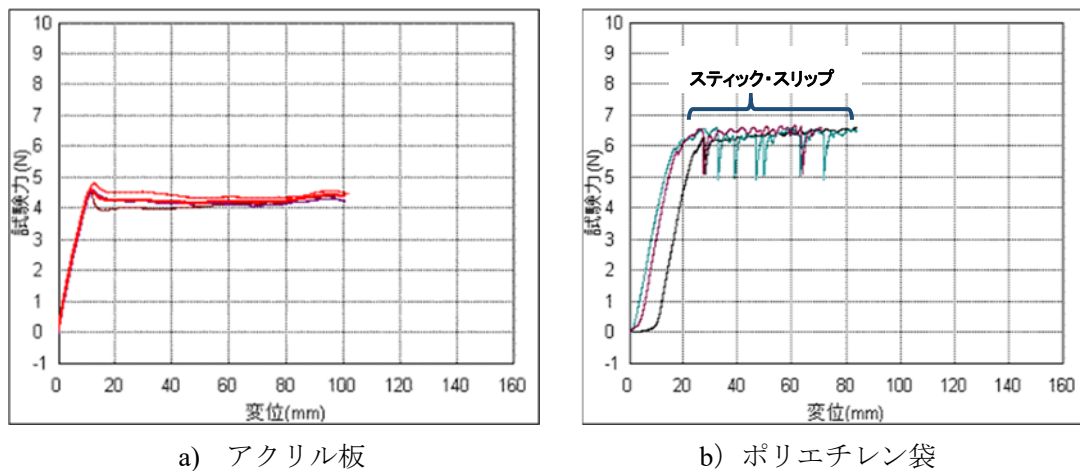


図 4-19 摩擦係数試験の例 (エラストマー)

図 4-19 に、計測した摩擦係数の例（試料：エラストマー，試験対象物：アクリル板，ポリエチレン袋）を示す。

グローブがゴム素材であるため，試験対象物によってはスティック・スリップ [山田陽滋, 1993] を起こす(図 4-19b)。

スティック・スリップとは，物体が接触面に対して固着とすべりを繰り返す振動現象である．樹脂やゴムなどのエラストマー材の場合，大きな垂直荷重がかかることによって試験片が変形して相手材が試料に食い込んだ状態となると，摩擦力は単純に垂直荷重に比例して増加する数値ではなく，それを超えて増加することになり，小さな荷重をかけた条件で測定した摩擦力での評価が必ずしも正確な評価にならない [松川宏, 2018]．

そこで，引っ張り試験によって試料を試験対象物の上に滑らせたとき，試験力が直線的に増加して摩擦を与え最大荷重に達する場合は，ピークに達した力を静摩擦力(F_s)とし，式(1)によって静止摩擦係数(μ_s)を求める．

$$\mu_s = \frac{F_s}{F_p} \quad (1)$$

F_p : すべり片の質量によって生じる法線応力

F_s : 静摩擦力

μ_s : 静摩擦係数

スティック・スリップを起こすことで試験力が直線的に増加しない場合は、線形区間と非線形区間に分け、両区間において最小二乗法を用いて近似直線を引き、2つの近似直線の交点を静摩擦力とした。試験結果ごとに静摩擦係数を求め、3回の試験の平均を算出した。

静摩擦係数は、測定時の被測定物の表面状態や潤滑物の有無等に影響を受ける点が指摘される [山田陽滋, 1993]が、本研究ではそれらを考慮しないものとする。

3) 実験結果

計測したグローブ素材ごとの静止摩擦係数の平均値と標準偏差を表 4-6、図 4-20 に示す。

表 4-6 引張試験による静摩擦係数（3回平均値）

	静止摩擦係数平均値±標準偏差 [μ]		
	エラストマー	塩化ビニル	SS シリコーン
アクリル板	1.72±0.05	1.46±0.24	1.23±0.09
ゴムマット	1.41±0.03	1.22±0.11	1.74±0.04
アルミ板	1.74±0.11	1.44±0.04	1.89±0.06
樹脂ミラー	1.82±0.08	1.30±0.16	1.59±0.03
ガラスプレート	1.97±0.15	1.86±0.13	2.99±0.07
木板	1.14±0.07	0.95±0.01	1.38±0.03
スポンジ	1.72±0.00	1.14±0.03	1.22±0.08
ポリエチレン袋	2.31±0.06	0.76±0.15	1.74±0.03
タオル	1.29±0.05	0.00±0.07	1.17±0.03
紙	1.99±0.20	1.25±0.04	1.90±0.08
平均	1.71±0.35	1.14±0.24	1.58±0.31

10種類の試験対象物の静止摩擦係数の平均値±標準偏差は、

エラストマーが $1.71 \pm 0.35 \mu$

塩化ビニルは $1.14 \pm 0.24 \mu$

SS シリコーンは $1.58 \pm 0.31 \mu$ であった。

各グローブ材質における物品毎の平均静止摩擦係数(n = 30)に対してコルモゴロフ・スミルノフ検定を行った結果、すべての要素に正規性が認められた。

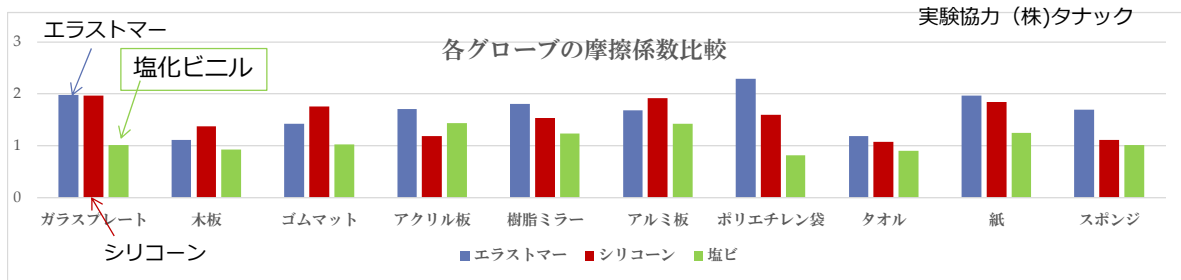


図 4-20 グローブ表面の静止摩擦係数

一元配置分散分析の結果、静止摩擦係数に対するグローブ素材の効果が有意であることが示された (p 値: $p = 0.0007 < 0.05$, F 値: $F(2,27) = 9.74$) .

Tukey-Kramer 法による多重比較を実施した結果、

エラストマーの静止摩擦係数は塩ビよりも有意に高く ($p = 7.36 \times 10^{-4} < 0.05$) ,
SS シリコンの静止摩擦係数は塩ビよりも有意に高い ($p = 0.0080 < 0.05$)

ことがわかった.

エラストマーと SS シリコンの静止摩擦係数には有意差は認められなかった
($p = 0.63$) .

4) 考察・まとめ

筋電義手の物体把持には、手先具に被せられたグローブ表面と物体表面との摩擦力の大きさが関係すると考え、グローブ間の物理特性を調査することで、素材の異なるグローブの特徴を明らかにし、把持性能を評価することを目的として、引張試験による摩擦力の計測を行った。

計測の結果を統計分析した結果、エラストマー素材のグローブ表面の静摩擦係数は塩化ビニルよりも有意に高く、SS シリコン素材のグローブ表面の静摩擦係数は塩化ビニルより有意に高いことが分かったが、エラストマーと SS シリコンの静摩擦係数には有意差は認められなかった。

これらのことより、グローブ表面と物体表面の摩擦力は、塩化ビニル素材が他の 2 種の素材と比較して有意に低いと言える。

最大静摩擦力は、摩擦限界であり[山田陽滋他 1994]、滑りに移行する手前であるので、静摩擦係数が低い塩化ビニルは、グローブ表面と物体接触面の摩擦力に関する把持性能において、他の 2 種のグローブと比較して有意に滑りやすいと評価できる。

4.2.3 引き抜き実験による把持操り機能評価

ロボットハンドの動作は、物体を安定に支持し続ける把握動作または把持動作と、物体の位置または姿勢を変化させる、物体を持ち替えるといった操り動作の2つに大きく分類される [今関一飛他 2003].

本項では、筋電電動義手の把持操り機能を、確実な把握、安定した保持、そして物体把持への素早い適応と解放という3つの要素に分類し、義手グローブが、筋電電動義手の把持操り機能の向上にどのように貢献しているかを探る。

指先が物体を把持し、その後、保持し続けるときのメカニズムを、以下、岡本の解説文の一部を引用して示す[岡本正吾].

重さ $w \text{ kgw}$ の物体を拇指と示指でつまんで持ち上げるとき、持ち上げるための必要最小限の上向きの力は $wg \text{ N}$ (g は重力加速度) である。把持力を f とし、指と物体の間の摩擦係数を μ とすると、1本の指と物体の間に働く摩擦力は $f\mu$ となる。把持は指2本で行うと考えると、物体を持ち上げて静止している時には、 $2f\mu \geq wg \text{ N}$ が成立していなければならない。すなわち、物体を滑り落とさないための必要最小限の把持力は、 $f = wg/2\mu \text{ N}$ となる。

なお、この、必要最小限の把持力とは、吉川の言う静止摩擦と指の発生トルクの制限 [吉川恒夫他 昭和 62 年] [Roth et al., 1986]を指していると考えられる。

本節では、把持力の大きさ[N]の内訳については考慮せず、指と物体に働く摩擦力を2本分まとめて考えることとする。

さて、義手で物体を安定して把持するには、手先具が、物体に対し適切に手指の進展や屈曲を行い、Force Closure や Form Closure によって物体を把持し、落下を防ぐ必要がある (図 4-21) 。また、このとき、義手グローブは、手先具の動作に柔軟に追従するか、もしくは、グローブの摩擦で手先具の物体把持を的確に補助できることが重要である。ここで、Force Closure とは、指先で物体を挟み込み、摩擦のみで物体の運動自由度を奪い物体を把持することをいい、Form Closure とは、指全体で物体を包み込むように把握し、幾何学的な拘束のみで物体の運動自由度を奪い物体を把持することをいう [谷直行他, 2019].

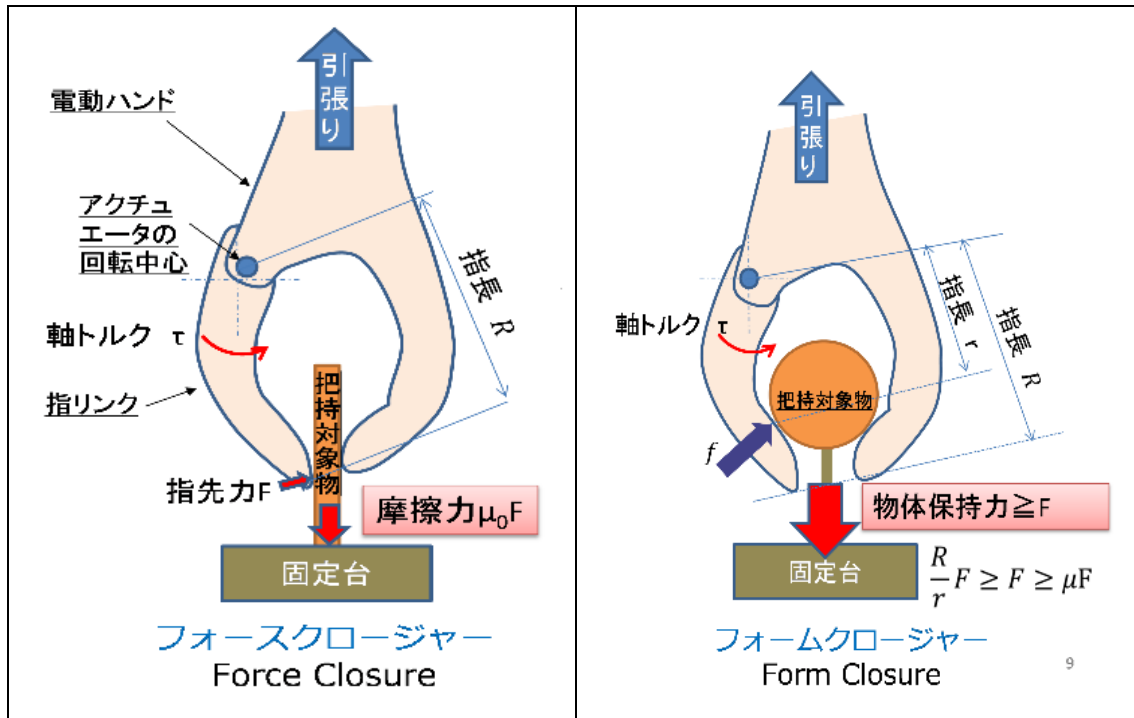


図 4-21 Force Closure と Form Closure

図4-21が示すように、Force Closureで物体を把持する場合、摩擦力で物体の運動自由度を減少させるため、義手の表面と物体の摩擦特徴により、把持状況が変わる。ここで、静止摩擦係数を μ_0 とすると、指先と物体にかかる最大摩擦力は、 $\mu_0 F$ となるため、これが最大物体保持力となる。

一方、Form Closure の場合は、幾何学的な拘束が破られない限り物体を落とすことはない。物体は指先に引っかかった状態となり、幾何学的な拘束力は、指先のピンチ力 F 以上の物体保持力を得る。従って、軸トルク τ と引っ掛かりまでの指長 r が一定であれば、義手の把持性能に影響を与える要素は義手の表面摩擦特徴と義手骨格の形状である。

本項では、まず、Force Closure で義手が物体を把持した場合の、義手表面、つまり、義手グローブと物体の摩擦特徴を調査するため、素材の異なるグローブで引き抜き実験を行う。

次に、Form Closure の場合について調査する。Form Closure では、まず、グローブの厚みを含めた形状が義手の把持性能に与える影響を調べることを目的に、引き抜き実験を行う。

4.2.3.1 Force Closure による引き抜き実験

1) 実験条件

本項では、グローブの指先の引き抜き抵抗力和各グローブの物体把持の特性を調べるため、平板の試験物を義手の指先で挟み込み、引抜き時の様相を調査する。

フォーステスター (MCT-2150, A&D 社) の下部に、平板状の試験片を万力で固定し、上部には、手袋を装着した手先具を固定した。手先具は、引っ張り上げられるにつれて自らの運動自由度に応じて把持形態が変化するように、手首、母指 MP 関節、そして母指 MP 関節から平行に掌にロープを渡した小指中手骨側面部の3点の頂点でぶら下がるように固定した (図 4-21c)。また、指先の摩擦のみで物体を把持させるよう、母指 IP 関節を起点として引っ張りが行われるように位置の調整を行った (図 4-22b)。引張速度は 100 mm/min とした。

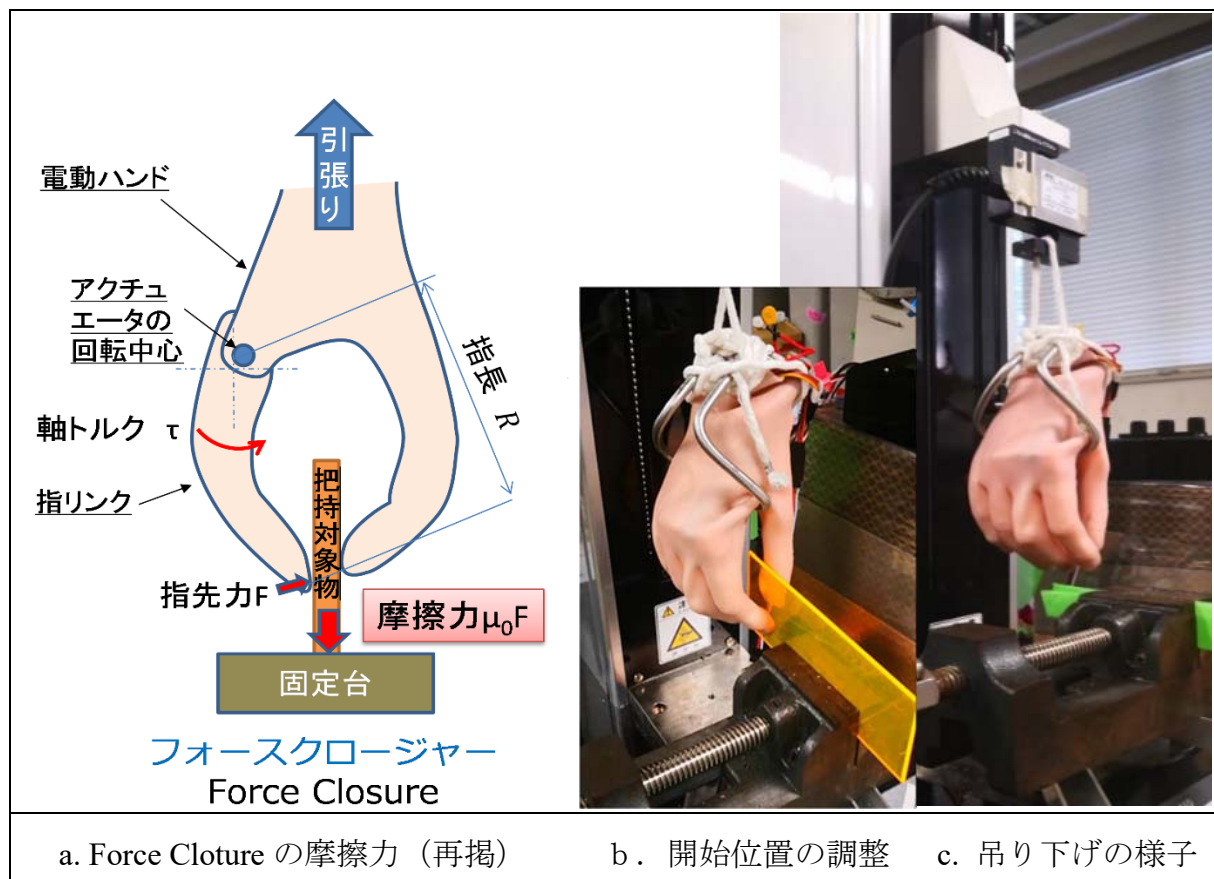


図 4-22 Force Closure での物体把持

- 試験対象物：アクリル板，ゴムマット，アルミ板，樹脂ミラー，ガラス，木板，スポンジ，ポリエチレン袋，タオル，紙，銅板
- グローブごと，試験対象物ごとに，それぞれ 10 回ずつ引抜試験を行う．
- 引張速度：100mm/min

実験に用いる筋電電動義手は，母指の並立/対立運動と，連動するその他 4 指の屈伸運動との 2 自由度で基本的な 3 種の把持形態(握力把持，精密把持，側面把持) [Cipriani, 2010]を取ることが可能な手先具を持つ筋電義手 UEC-eHand (図 4-23) である．

図 4-23a に，筋電義手のハンドの構造を，また，実験時やデモンストレーションなどで健常者が扱うための健常者用ソケットに装着した図 4-23b を示す．

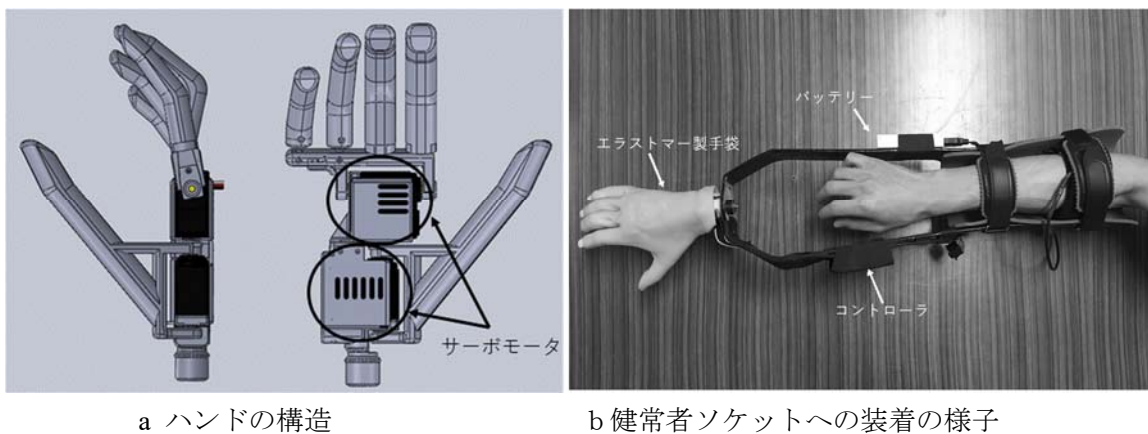


図 4-23 UEC-eHand

グローブには，エラストマー製，SS シリコーン製，塩化ビニル製の 3 種を用いる (図 4-24c)．試験対象とする平板は，4.2.2 で使用したもの及び銅板の 11 種類とし，試験対象物ごとにそれぞれ 10 回ずつ引抜実験を行い，サーボモータの電源を入れた電動手先具の指先から物体が引き抜きかれるまでの様相を評価する．





			
エラストマー製	SS シリコーン製	塩化ビニル製	
重量：62.74 g	重量：121.46 g	重量：70.17 g	
			試験対象物

図 4-24 実験で使用するグローブ 3 種と試験対象物

2) 解析方法

➤ 消費エネルギー

引抜きの様相を例で示すと、下図 4-24 のようになる。

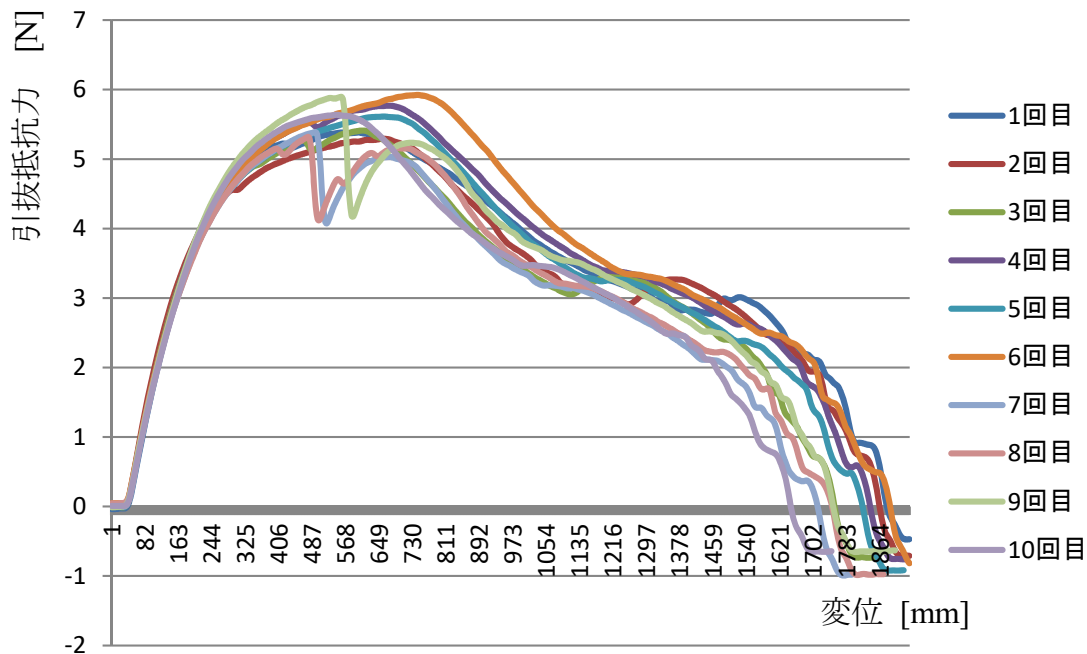
エラストマーグローブ VS アルミ板 (図 4-25 a)

SS シリコングローブ VS アルミ板 (図 4-25 b)

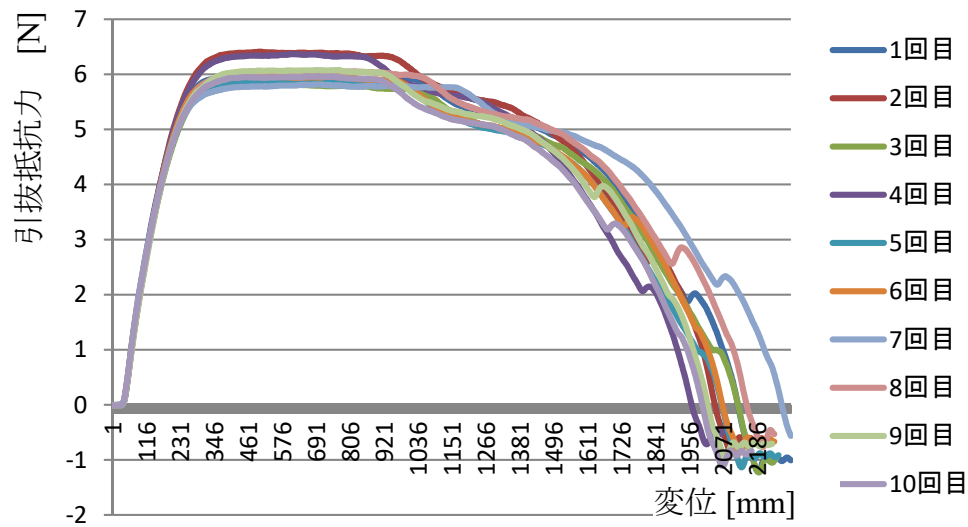
塩化ビニルグローブ VS アルミ板 (図 4-25 c)

の引抜きの様相を示している。

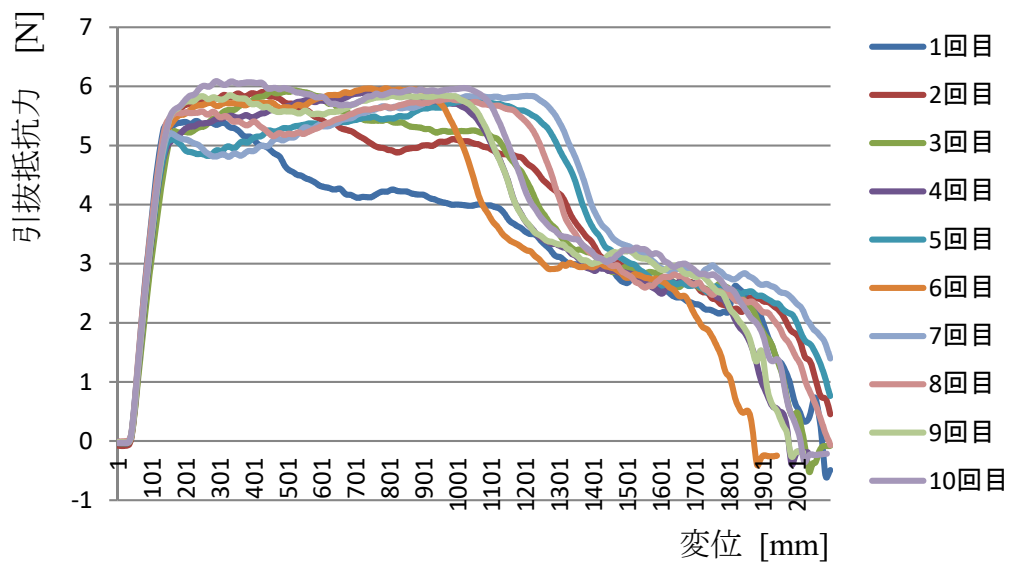
縦軸は指先の引抜き量 x に対する引抜き抵抗力[N]，横軸は変位[mm]を示す。



a エラストマーグローブ・アルミ板の場合



b SS シリコンロープ・アルミ板の場合



c 塩化ビニルグローブ・アルミ板の場合

図 4-25 引き抜き実験の引抜抵抗力の様相 (アルミの例)

このように、グローブの素材により引抜き抵抗力 $g(x)$ の変化の様相が異なる。縦軸は指先の引抜き量 x に対する引抜き抵抗力 [N]、横軸は 変位 [mm] を示す。

評価は、引抜き抵抗力の最大値 [N]、最大値到達時間 [s]、消費エネルギー [mJ] を求めることで行う。消費エネルギーは、物品の保持にかかるエネルギー量を示す。

(a) 引抜き抵抗力の最大値

$$g_{\max} = \max \{g(x)\} \quad (1)$$

$$g(x) \in \mathbb{R}$$

$g(x)$: 引抜き量 x に対する引抜き抵抗力

g_{\max} : 引抜き抵抗力の最大値

ただし, ここで g_{\max} は, グラフに最初に表れた頂点とする.

\mathbb{R} : 実数空間

(b) 最大値までの到達距離

$$x_a = \arg \max_x \{g(x)\} \quad (2)$$

x_a : 引抜き抵抗力最大時の引き抜き量

(c) 消費エネルギー

$$U = \sum_{x=0}^{x_e} \{g(x) \Delta x\} \quad (3)$$

$$\Delta x = 16.7 \mu m$$

U : 消費エネルギー

Δx : 単位引抜き量

ただし, ここで x_e は引抜き完了位置を意味する.

$$x_e = \arg \min_x \{g(x) \mid x \in \mathbb{R}, g(x) > 0\} \quad (4)$$

x_e : 総引抜き量

➤ 安定把持時間

次に、安定把持時間を求める。

引抜き力の増加が最も大きい時刻 (t) における傾きを最大傾き、

引抜き力の減少が最も大きい時刻 (t) における傾きを最小傾きと定義する。

サンプリング周期は 0.01s であるが、ノイズによる影響を防ぐため微小時間 Δt を 100data=1s として傾きを求めた。

最大傾きを取る時刻と最小傾きを取る時刻の変位の差を安定把持区間と定義した。区間が長いほど、安定して物体を把持できることが示される。安定把持区間の概念図を図 4-26 に示す。

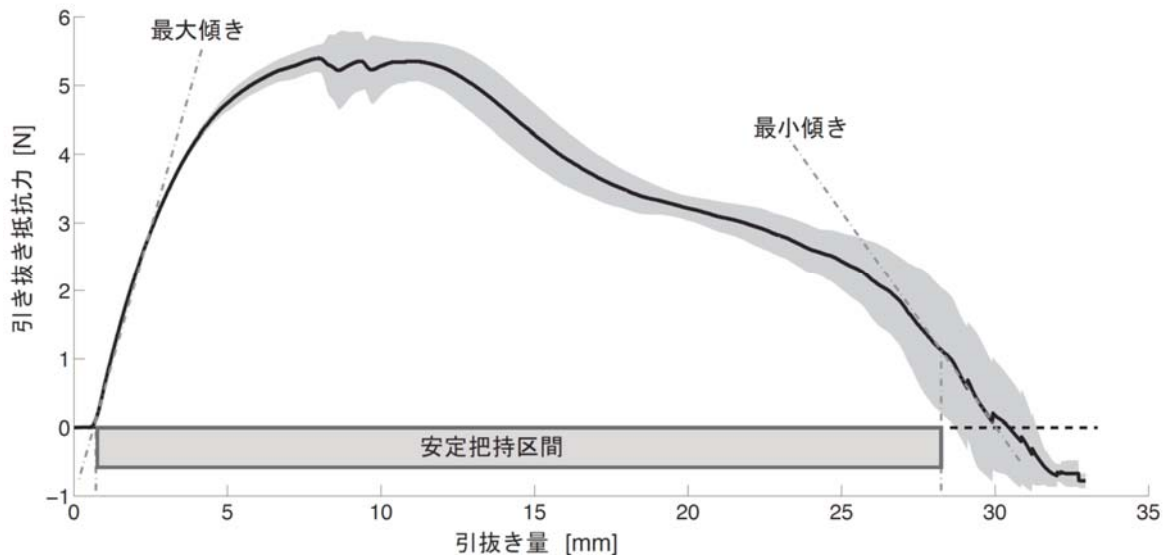


図 4-26 安定把持区間の概念図

➤ 即応性

また、引抜抵抗の最大値を最大値到達時間で除したものを即応性と定義した。即応性が高いことは、物体への把持の適応が早いことを意味する。

それぞれを求める数式は、次のとおりである。

(d) 最大傾き

$$\begin{aligned}
 K_{\max} &= \max \{K_t\} \\
 K_t &= \frac{g(t) - g(t + \Delta t)}{\Delta t}, \Delta t = 1 \text{sec} \quad (5) \\
 t &\in \mathbb{R}, 0 \leq t \leq 15
 \end{aligned}$$

K_{\max} : 最大傾き

K_t : 時刻 t における傾き

(e) 最小傾き

$$K_{\min} = \min \{K_t\} \quad (6)$$

K_{\min} : 最小傾き

(f) 安定把持区間

$$\begin{aligned}
 S &= (t_c - t_b)V \\
 t_b &= \arg \max_t \{K_t\} \\
 t_c &= \arg \min_t \{K_t\}
 \end{aligned} \quad (7)$$

S : 安定把持区間

t_b : 傾き最大時の時刻

t_c : 傾き最小時の時刻

$$V = 100 \text{mm/min} \quad (8)$$

V : 引抜き速度

3) 実験結果

表 4-7 に試験対象物 11 種の解析結果の平均値をまとめる。

表 4-7 引き抜き実験結果 (測定値の平均値±標準偏差)

グローブ材質/ 測定値	エラストマー	SS シリコーン	塩化ビニル
引き抜き抵抗力の 最大値 [N]	5.38±1.35	6.55 ± 1.41	6.54 ± 1.36
最大値到達時間 [s]	6.72 ± 2.17	9.15 ± 3.97	4.51 ± 1.64
即応性 [N/s]	0.85 ± 0.21	0.82 ± 0.33	1.55 ± 0.30
消費エネルギー [mJ]	113.39 ± 34.81	185.94 ± 72.79	174.04 ± 83.81
最大傾き [N/s] 15 [s]まで	0.024 ± 0.0031	0.029 ± 0.0077	0.045 ± 0.0084
最小傾き [N/s] 15 [s]まで	-0.0064 ± 0.0018	-0.0032 ± 0.0024	-0.0076 ± 0.0040
安定把持時間 [s] 15 [s]まで	11.83 ± 2.86	14.58 ± 0.016	10.58 ± 1.87
最大傾き [N/s] 全区間 (N=0 まで)	0.024 ± 0.0031	0.029 ± 0.0077	0.045 ± 0.0084
最小傾き [N/s] 全区間 (N=0 まで)	-0.013 ± 0.0035	-0.016 ± 0.0037	-0.014 ± 0.0048
安定把持時間 [s] 全区間 (N=0 まで)	17.43 ± 2.01	20.86 ± 3.81	17.41 ± 3.86

表 4-7 の各要素に対してコルモゴロフ・スミルノフ検定を行った結果、すべての要素に正規性が認められた。表中の標記は平均値±標準偏差である。

表中の各項目に対して一元配置分散分析を行った結果 (有意水準 $\alpha = 0.05$) ,
 最大値到達時間 (p 値 : $p = 0.0032$, F 値 : $F_{(2,30)} = 6.98$) ,
 即応性 ($p = 2.18 \times 10^{-6}$, $F_{(2,30)} = 20.77$) ,
 消費エネルギー ($p = 0.0369$, $F_{(2,30)} = 3.69$) ,
 最大傾き ($p = 2.33 \times 10^{-7}$, $F_{(2,30)} = 26.52$) ,
 最小傾き 15[s]まで ($p = 0.0061$, $F_{(2,30)} = 6.07$) ,
 安定把持時間 15[s]まで ($p = 0.0003$, $F_{(2,30)} = 10.77$) ,

安定把持時間全区間 ($p = 0.042$, $F_{(2,30)} = 3.54$)
に有意差が認められ、

最大値 ($p = 0.089$, $F_{(2,30)} = 2.63$) ,
最小傾き全区間 ($p = 0.34$, $F_{(2,30)} = 1.13$)
には有意差が認められなかった。

有意差が認められた各項目に対し Tukey-Kramer 法による多重比較を実施した結果、以下のことが分かった。

- ・ 最大値到達時間は塩化ビニルが SS シリコーンよりも有意に早い ($p = 0.0022$)
- ・ 即応性は、塩化ビニルが
エラストマー ($p = 1.81 \times 10^{-5}$) 及び SS シリコーン ($p = 9.82 \times 10^{-6}$) よりも
有意に高い
- ・ 消費エネルギーは、SS シリコーンが
エラストマーよりも有意に大きい ($p = 0.043$)
- ・ 最大傾きは、塩化ビニルが
エラストマー ($p = 3.35 \times 10^{-7}$) および SS シリコーン ($p = 1.94 \times 10^{-5}$) よりも
有意に大きく、
- ・ 最小傾き 15[s]までは、塩化ビニルが SS シリコーンよりも有意に小さい
($p = 0.0058$)
- ・ 安定把持時間 15[s]までは、SS シリコーンが
エラストマー ($p = 0.011$) および塩化ビニル ($p = 0.0002$) よりも有意に長い
- ・ 安定把持時間全区間では、SS シリコーンが
エラストマー ($p = 0.072$) および塩化ビニル ($p = 0.070$) よりも長い傾向があっ
たが有意な差ではなかった。

4) 考察・まとめ

電動義手の表皮としてのグローブの把持操作機能を評価するため、ロボットハンドに3種のグローブをそれぞれ装着した状態において、11種の平板の試験物を義手の指先で挟み込み、引っ張り上げられるまでの力と時間を計測する引抜実験を行い、グローブごとにその様相を比較した。

引抜抵抗力の最大値には有意差が認められなかったが、引抜き抵抗力の最大値到達時間が、塩化ビニルがSSシリコーンに有意に速く、即応性（最大値/到達時間）も、塩化ビニルが他の2種グローブよりも有意に高いことから、指先で物体を把持するとき、塩化ビニルが最も早く物体に適応し把持性能を発揮することが分かった。

また、SSシリコーンは、把持が安定するまでに時間がかかるが、引抜くまでに要するエネルギーが他の2種と比較して有意に高いことから、一度把持した物体は最も安定して保持することができると言える。

4.2.3.2 Form Closure による引抜実験

1) 実験条件

本項では、義手に握力把持させたときの引き抜き抵抗と各グローブの物体把持の特性を調べるため、円柱の試験物を義手に包み込み把持を行わせ、引抜き時の様相を調査する。

Form closure で物体を把持させた場合、計測する引抜抵抗は、関節の引っ掛かり力と指先の摩擦力を計測することになる。

フォーステスター (MCT-2150, A&D 社) の下部に、円柱に巻き付けた試験片を万力で固定し、上部には、グローブを装着した手先具を固定する。グローブは、筋電義手用塩化ビニル製、SS シリコーン製、エラストマー製の3種を用いた (図 4-27)。手先具は、引っ張り上げられるにつれて自らの運動自由度に応じて把持形状が変化するように、手首、母指 MP 関節、そして母指 MP 関節から平行に掌にロープを渡した小指中手骨側面部の3点の頂点でぶら下がるように固定する (図 4-28)。母指 IP 関節が起点となるように位置を調整し、引っ張りを始めた。

➤ 試験対象物

直径 55mm~70mm の円柱状の物体に各試験対象物を巻き付けたもの

ガラス、木、ゴム、アクリル板、プラスチック、アルミ板、タオル、紙、スポンジ

➤ 引張速度 100 mm/min

➤ サンプルング間隔：10 μm

➤ グローブごと、試験対象物ごとに各 10 回計測



図 4-27 使用するグローブ



図 4-28 円柱状の物体の引抜実験

2) 解析方法

4.2.3.1 Force Closure による引き抜き実験と同様に、引抜きの様相の分析を行い、10回の試行の平均値から、消費エネルギー（図 4-29a）安定把持区間（図 4-29b）を求める。

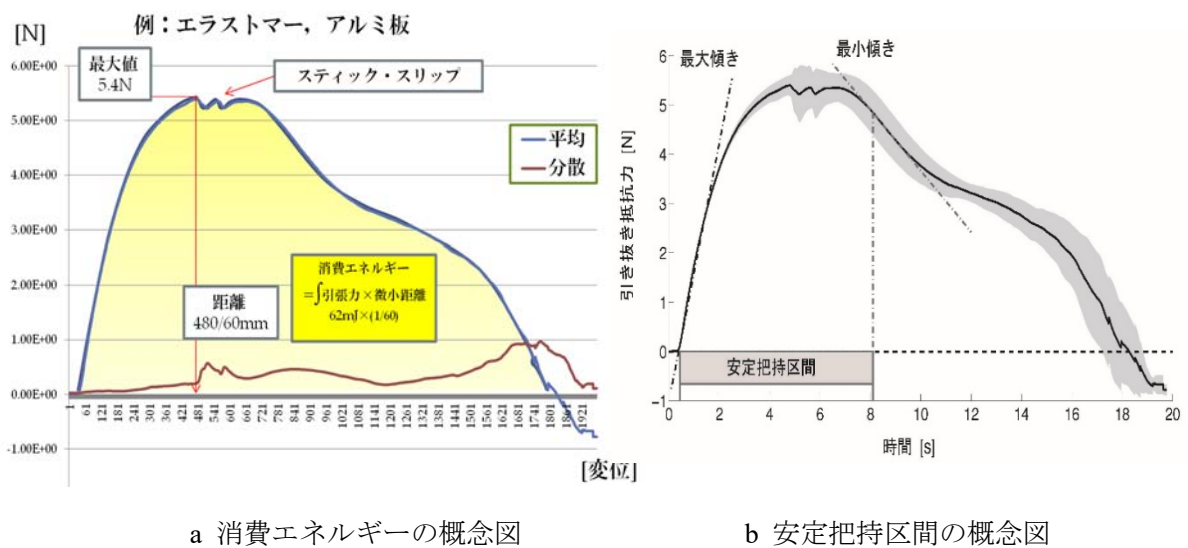


図 4-29 引き抜き実験の解析法

3) 実験結果

消費エネルギーは、計測が始まってから把持が完全に終了（引抜き完了位置）になるまでの単位引抜き量の和を示している。つまり、把持し保持し続けるのに必要なエネルギー量を表す。また、最大引抜き抵抗力は、引っ張られる力に最も大きく抵抗する力の大きさを示す。即応性は、最大引抜き抵抗力 [N]を、最大値到達時間 [S] で除したもので、物体への的確に把持するまでのアプローチの速さを示している（図 4-30）。

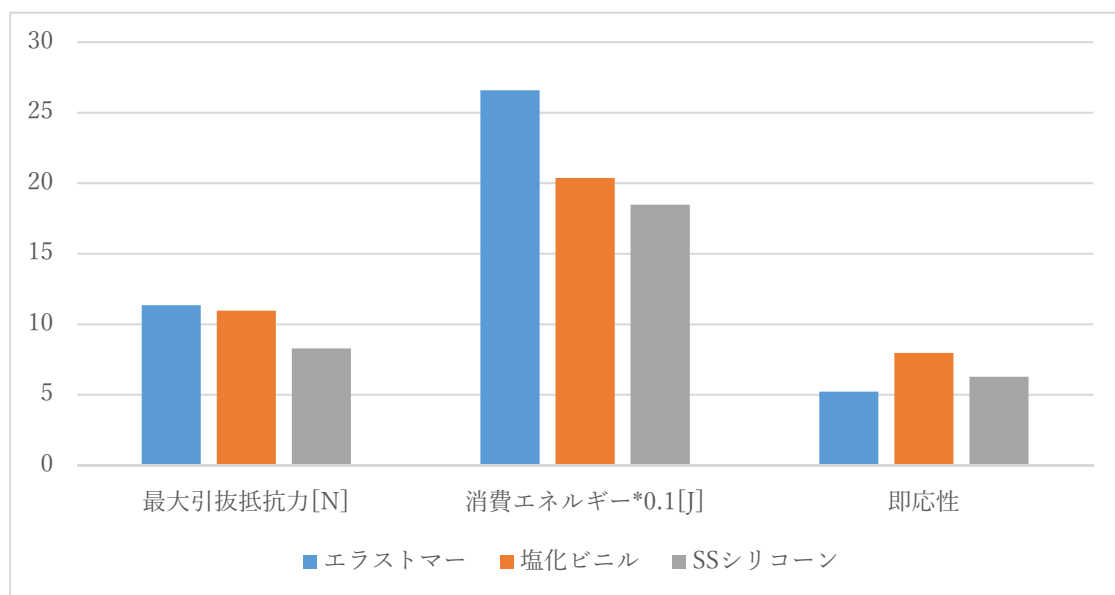


図 4-30 物体を引き抜くときの力学的特徴量

最大引抜き抵抗力は、エラストマー、塩化ビニルが高く、それらと比較して SS シリコーンは低い。

消費エネルギーは、エラストマーが高い。

即応性は、塩化ビニルが高い。

安定把持区間は、引抜き抵抗力の増加が最も大きい時刻（ t ）における傾きを最大傾き、引抜き抵抗力の減少が最も大きい時刻（ t ）における傾きを最小傾きとした場合の（図 4-29b）、最大傾きを取る時刻と最小傾きを取る時刻との差で評価する。

時刻は、手先具滑りあがり把持を行えなくなった 15 秒後までと、引抜き抵抗力が 0 になった時点の時刻までに分けて最小傾きを求めた。

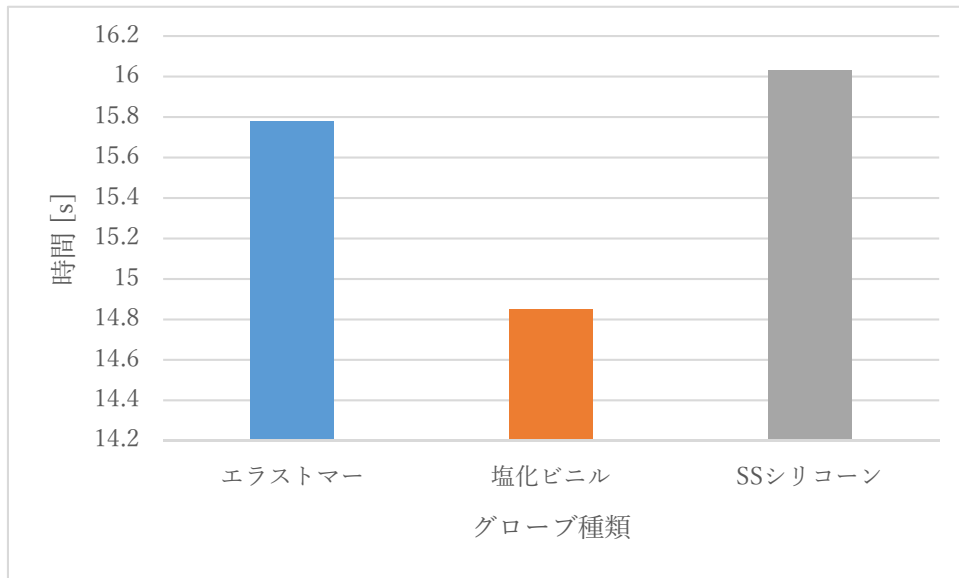


図 4-31 安定把持区間解析結果

安定把持区間は、SS シリコーン、エラストマー、塩化ビニルの順で長いことが分かる。

4) 考察・まとめ

本項では、Form closure で義手に物体を把持させた際の引抜の様相を3種のグローブで比較した。

・最大引抜抵抗力及び消費エネルギーは、エラストマー、塩化ビニル、SS シリコーンの順に高かった。

ここで、指先のみでの Force closure での把持との差分が大きいのは、エラストマー、塩化ビニル

であった。この差分は、Form closure で引抜き抵抗力を計測する際に計測される、摩擦力と引っ掛かりの、引っ掛かりの部分に相当すると考えられ、MP 関節、PIP 関節の関節部または指腹部の抵抗力が高いことを示しているといえる。

また、

・即応性は、塩化ビニル、シリコーン、エラストマーの順に高い
・安定把持区間は、シリコーン、エラストマー、塩ビの順に長い
ということから、

Force closure, Form closure の把持形態に関わらず、

・即応性が高く物体に素早く反応するのは、塩化ビニル
・安定した把持が保てるのは SS シリコーン
という材質間の特長があることが判明した。

また、Form closure では、引っ掛かりによって、塩化ビニルも安定した把持が行えるといえる。

4.3 筋電義手によるパフォーマンス評価

前節では、筋電義手グローブの材質の評価を行い、それらの材質が持つ特性を分析した。本節では、ヒトが筋電義手を使用した際の、グローブが筋電義手の把持機能に与える影響を調査する目的で、Pick-and-Place (PAP) 実験を行い、グローブのパフォーマンス評価を行う。

PAP 実験は、日常で使う 32 品目の物品を、指定された 15cm 四方の領域から 50cm 離れたもう一方の領域に、筋電義手で 30 秒間に何回把持し移動させることができたかを計測する評価試験である。筋電義手の物体へのアプローチの容易さを成功回数で、物体へのアプローチの正確さを成功率で評価する。本研究に記述した実験は、全て電気通信大学ヒトを対象とする実験に関する倫理委員会の承認を得て行われた【管理番号第 10006(4)(5)号】。

4.3.1 装飾義手用塩化ビニルグローブとエラストマーグローブ

まず初めに、装飾義手用塩化ビニルグローブと開発したエラストマーグローブを用いて PAP 実験を行った。

1) 実験条件・実験方法

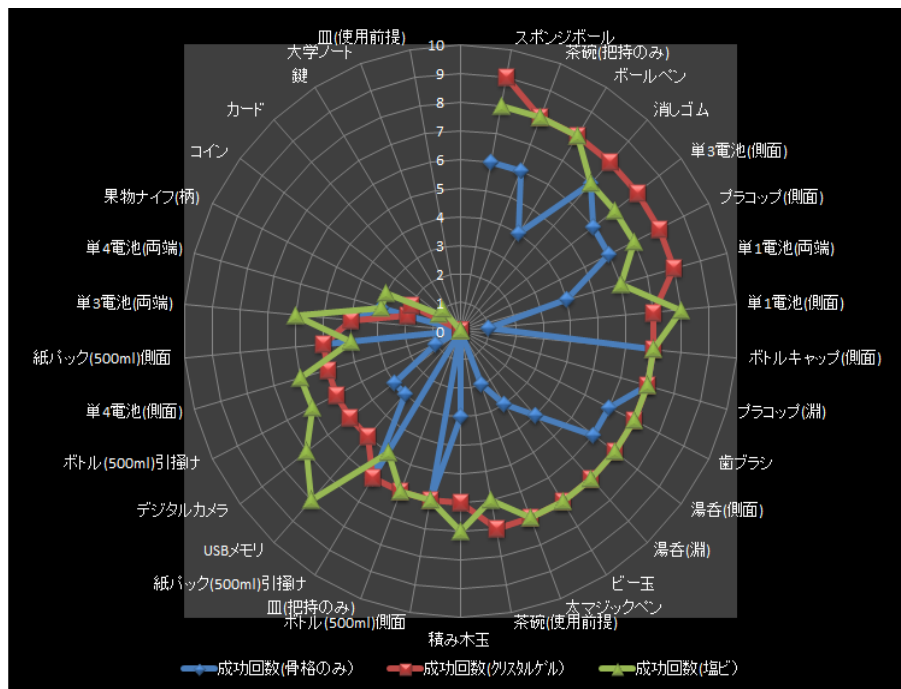
使用したロボットハンドは、母指が対向・並立運動を行い、示指から小指までの 4 指が連動し屈曲・伸展する 2 自由度ハンドであり (図 4-32a)，ロボットハンドに装着して使用したグローブは、エラストマー (同 b) 及び装飾義手用塩化ビニル (同 c) である。



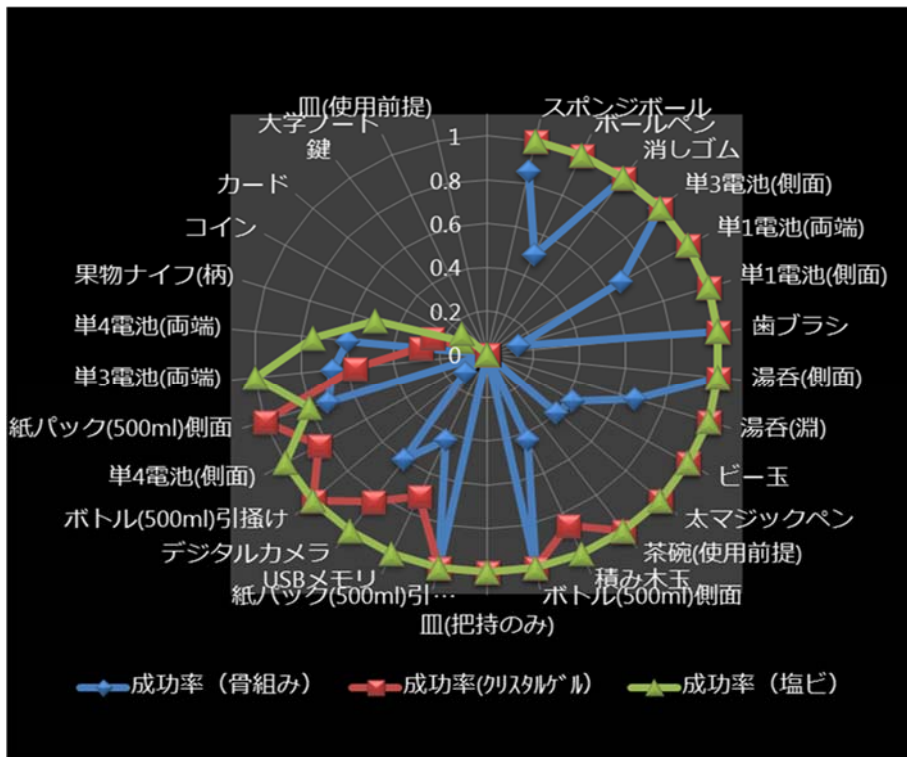
図 4-32 使用したロボットハンドとグローブ

実験は一人の被験者で各 1 回ずつ行った。被験者は、同様の実験で 5 回程度実験機を操作したことがある 20 代の健常男性である。

2) 実験結果



a. 成功回数



b. 成功率

図 4-33 PAP 実験結果 (グローブ無し: 青, エラストマー: 赤, 塩化ビニル: 黄緑)

3) 考察

成功率を示したレーダーチャート（図 4-33b）をみると、塩化ビニル製手袋を装着した場合の Pick-and Place タスクの成功率は、エラストマー製手袋装着時と同等の値を示しているが、成功回数のレーダーチャート（図 4-33a）では、エラストマー製の方が成功回数が多いことが分かる。

これは、塩化ビニル製手袋は十分なグリップ性能を有しているにもかかわらず、柔軟性に乏しいために、試行回数が少なくなってしまうこと、またその一方で、エラストマー製手袋は伸縮性が高いことから、手先具の動作を妨げないため、試行回数が多い結果となったと考えられる。

これらのことより、開発したエラストマー製手袋は、義手を動作させたとき、余計な負荷がかからず手先具に追従し動きを妨げないことが確かめられた。

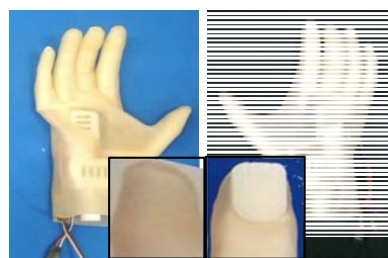
4.3.2 爪無しエラストマーグローブと爪ありエラストマーグローブ

1) 実験条件・実験方法

エラストマーグローブには、通常 3D プリンタで作製した ABS 樹脂の爪を取り付けている。爪は、無機質なロボットハンドにおいてヒトの指と同様の外観を保つというほかに、指部の骨格という重要な役割を担っている。第 3 章 3.1.4 で述べたように、爪は、安定を目指した物体把持において、指腹部にあたる柔軟指の接触部位が変形する際に圧力を分散させ、物体と指の相対的位置関係を安定させるために存在する。

また、手先具に被せたグローブがずれるのを防ぎ、ハンド骨格とグローブを固定する構造になっている。

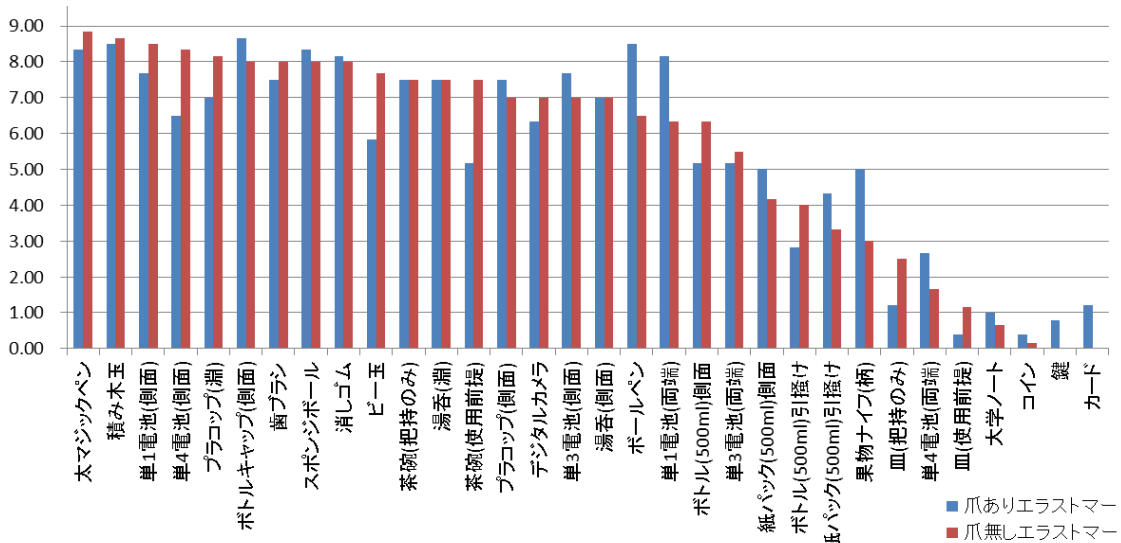
そこで、エラストマーグローブに取り付けた爪の効果の検証のため、爪無しエラストマーグローブと爪を取り付けたエラストマーグローブを手先具に被せ、PAP 実験を行った。



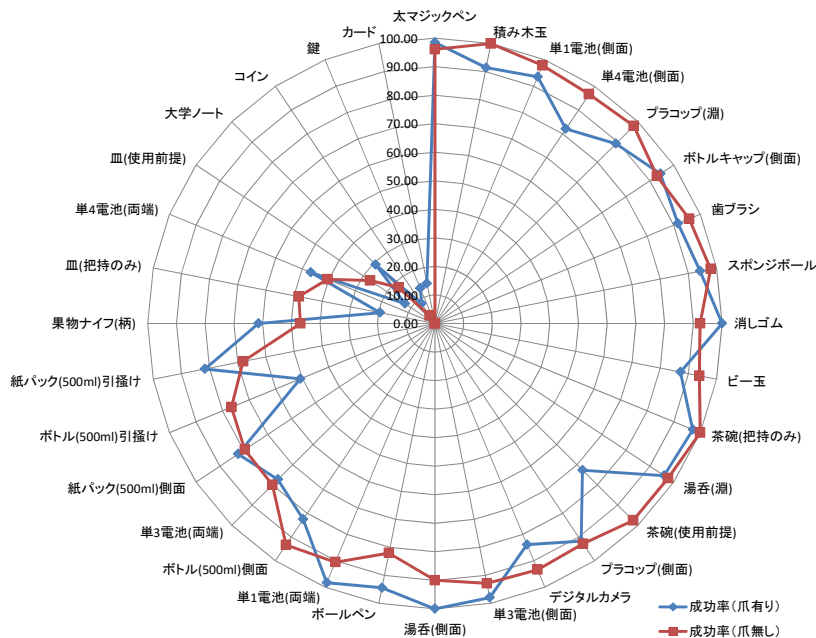
爪無し 爪有り
図 4-34 エラストマーグローブの爪

実験は、同様の実験で5回程度実験機を操作したことがある20代の健常男性と、1年以上当研究グループの筋電義手の開発に携わっている20代の健常男性の2名を被験者とし、それぞれ3回ずつ実験を行い、計数した2名の述べ6回の成功回数の平均及び標準偏差、成功率を求めた。

2) 実験結果



a. 成功回数 (爪無：赤，爪有：青)



b. 成功率 (爪無：赤，爪有：青)

図4-35 グローブの爪の効果検証実験

3) 考察

図 4-35a は、爪無しエラストマー製の成功回数を降順にソートした結果である。爪無しエラストマー製の成功回数の総数の平均は 178 回、爪有リエラストマー製は 176 回であった。爪無しエラストマー製が爪有リエラストマー製に勝るものの数は 14 品目、その逆は 15 品目、同点が 3 品目である。成功率で比較すると、爪無しエラストマー製が優位であるのは 17 品目、逆は 15 品目である。ビー玉や茶碗、ペットボトルの引掛けなど、グローブの指腹より先に爪が当たり、滑り、安定的に把持することが困難な場合があったが、爪有リエラストマー製グローブにおいて、これまで爪無しグローブでは丸みを帯びた指先が固いものに当たるとグローブの指先が潰れたり骨組みからずれたりしていたコイン、鍵、カードのような薄い物体の把持に成功した。

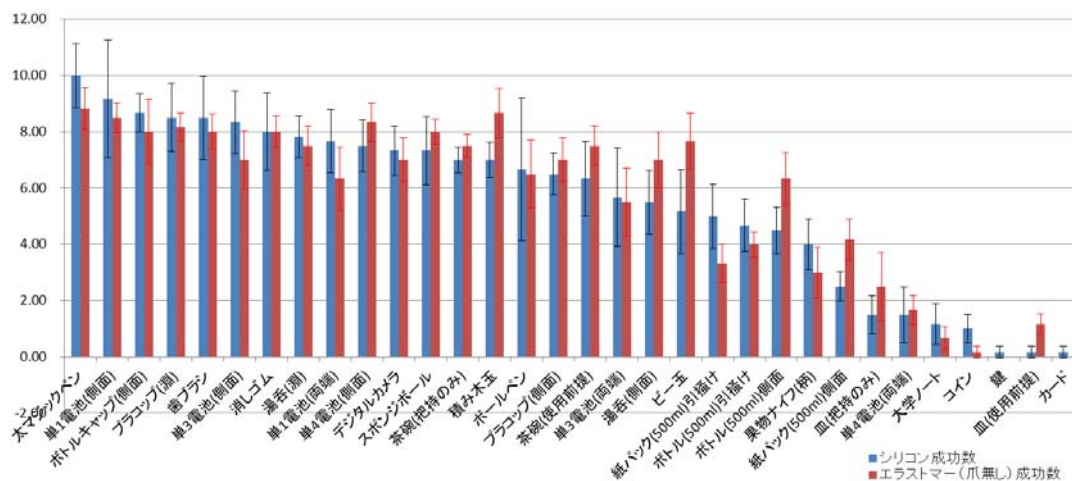
4.3.3 エラストマーグローブと TT シリコングローブ

1) 実験条件および実験方法

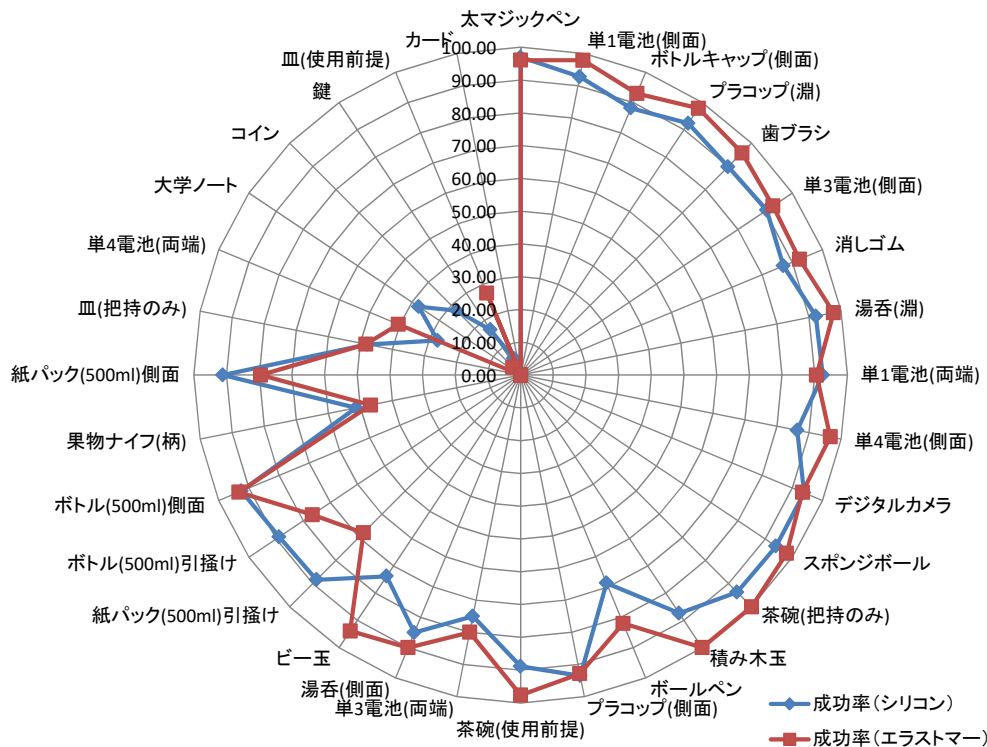
次に、エラストマーグローブと TT シリコングローブを被せたロボットハンドを使い PAP 実験を行った。TT シリコングローブには爪がつけられていないため、エラストマーグローブにも爪をつけずに実験を行った。

実験は、同様の実験で 5 回程度実験機を操作したことがある 20 代の健常男性と、1 年以上当研究グループの筋電義手の開発に携わっている 20 代の健常男性の 2 名を被験者とし、それぞれ 3 回ずつ実験を行い、計数した 2 名の述べ 6 回の成功回数の平均及び標準偏差、成功率を求めた。

2) 実験結果



a. 成功回数 (赤: エラストマー, 青: TT シリコーン)



b. 成功率

図 4-36 エラストマーと TT シリコーンの比較実験

3) 考察

図 4-36a は、TT シリコーン製グローブ装着時の成功回数を降順にソートした 2 種類のグローブ装着時の Pick-and-Place 実験の結果である。TT シリコーン製グローブの成功回数の総数の平均は 175 回、エラストマー製グローブの成功回数の総数の平均は 178 回である。筋電義手操作の慣れによるばらつきがあるが、総数で比較すると TT シリコーン製とエラストマー製の差は 3 回しかない。また、物品ごとの成功回数を比較すると、シリコーン製がエラストマー製に勝るものの数は 18 品目、その逆は 14 品目である。標準偏差については、シリコーン製がエラストマー製より大きい場合は 19 品目、その逆は 12 品目である。

一方、図 4-36b の成功率を示したレーダーチャートを見ると、TT シリコーン製と比べてエラストマー製の方が、試行数に占める成功回数の割合が高くなる場合が、18 品目となり、その逆が 7 品目、同点が 7 品目である。また、TT シリコーン製グローブの摩擦力が高いために、設定された把持姿勢の限界に近い幅の物体や、反対に、つまむ姿勢を必要とするような小さな物体を掴むことが困難であった。

4.3.4 エラストマー，筋電義手用塩化ビニル，筋電義手用 SS シリコーン

1) 実験条件および実験方法

本実験では，エラストマーグローブ，筋電義手用に仕様を変更した塩化ビニルグローブ，筋電義手用に添加剤を加え柔軟性を高めた SS シリコーングローブを用いて PAP 実験を行った。

被験者は，PAP 実験を週 1 回，半年間行った経験がある 20 代の健常男性である．筋電義手操作の熟達度による差が生じないように 1 名の被験者とした．3 種類のグローブをランダムにそれぞれ 3 回ずつ実験を行い，グローブの性能を評価する．筋電義手システムは実験を通して同一のものを使用し，グローブのみを付け替えた。



a. 手先具 b. エラストマー c. 塩化ビニル d. SS シリコーン

図 4-37 使用した手先具と付け替えたグローブ 3 種

2) 実験結果

PAP 実験の結果，32 品目の物品の 3 試行の成功数の総数の平均は，エラストマーグローブが 203.67 ± 13.80 回，塩化ビニルグローブが 200.67 ± 7.77 回，SS シリコーングローブが 170.00 ± 17.44 回であった（表 4-8）．図 4-37 には内訳を示す。

表 4-8 3 種のグローブによる PAP 実験結果

PAP 実験 結果比較（成功数総数±標準偏差）

	エラストマー	塩化ビニル	SS シリコーン
1 回目	209	192	178
2 回目	188	203	150
3 回目	214	207	182
平均	203.67 ± 13.80	200.67 ± 7.77	170.00 ± 17.44

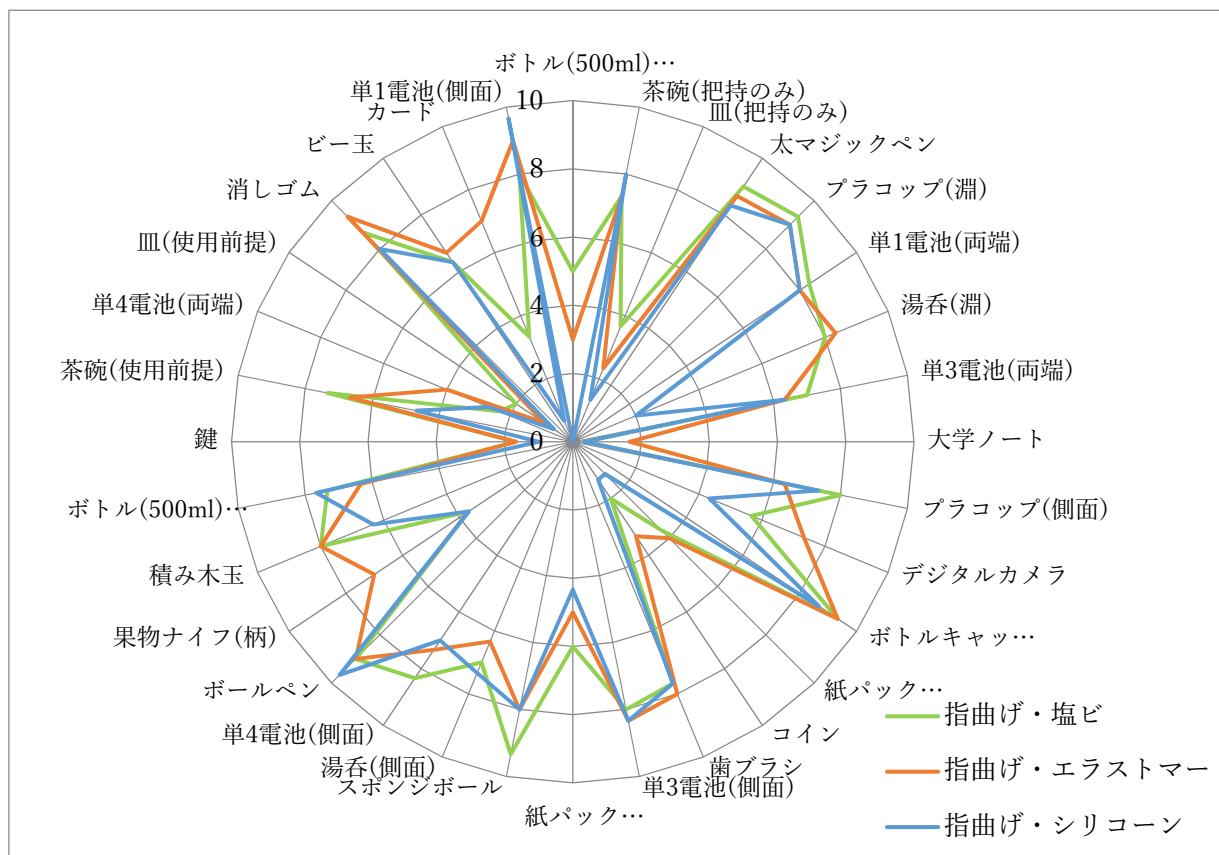


図 4-38 エラストマー（橙），筋電義手用塩化ビニル（黒），SS シリコーングローブ（青）

各グローブ材質における成功数総数（手袋材質 3×成功総数 3）に対してコルモゴロフ・スミルノフ検定を行った結果，すべての要素に正規性が認められた。

一元配置分散分析の結果，成功数総数に対するグローブ素材の効果が有意であることが示された（ p 値： $p = 0.042 < 0.05$ ， F 値： $F(2,6) = 5.63$ ）。

Tukey-Kramer 法による多重比較を実施した結果，

エラストマーの成功数総数は SS シリコーンよりも有意に高い（ $p = 0.052 < 0.1$ ）傾向があり，

塩化ビニルの成功数総数はシリコーンよりも有意に高い（ $p = 0.073 < 0.1$ ）ことがわかった。

エラストマーと塩化ビニルの成功数総数に有意差は認められなかった（ $p = 0.96$ ）。

3) 考察

筋電義手用塩化ビニルグローブの成功回数が，エラストマーの成功回数と僅差であることが注目になる。筋電義手に用いられるよう開口部を広げ，柔軟性を考慮し，薄く製作した塩化ビニルグローブの有効性が確認できた。

また，SS シリコーンは，他のグローブと比較して成功数が有意に低い結果であった。

第4章 参考文献

[K 7125]

K 7125 : 1999 (ISO 8295 : 1995) 日本工業規格. (2019年5月3日参照). 参照先: URL : <https://kikakurui.com/k7/K7125-1999-01.html>

[ottobock]

ottobock. (2019). 前腕筋電義手 (成人用) 操作マニュアルー義肢製作施設用-. 参照先:

http://www.p.ottobock.jp/pdf/manual_myobock.pdf#search=%E7%AD%8B%E9%9B%BB%E7%BE%A9%E6%89%8B%E3%82%B0%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%96+%E8%A2%AB%E3%81%9B%E3%81%AB%E3%81%8F%E3%81%84

[RothKerr 1986]

RothKerr and B.J. (1986). Analysis of Multifingered Hands. International Journal of Robotics Research, 3(17), 4-4.

[永野光 2011]

永野光, 岡本正吾, 山田陽滋. (2011). 触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 16(3), 343-353.

[岡本正吾]

岡本正吾. 粗さ・摩擦・硬軟・温冷の触知覚機序: 触感・テクスチャはこうして感じられている. 名古屋大学公開資料.

[吉川恒夫 昭和 62 年]

吉川恒夫, 永井清. (昭和 62 年). 多指ハンドの操り力と握力. 計測自動制御学会論文集, 23(11).

[今関一飛 2003]

今関一飛, 前野隆司. (2003). ロボットハンドによる把持・操り動作の階層的制御手法. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集 .

[山田陽滋 1993]

山田陽滋. (1993). 把握までのセンシング戦略その 2 : 滑りと静摩擦係数の検出～表面粗さ情報の取得. 日本ロボット学会誌, 11(7), 959-965.

[山田陽滋 1994]

山田陽滋, 三田賢志, 藤田和秀, 土田縫夫, 今井孝二. (1994). 把握力制御のための静摩擦係数のアクティブ・センシング. 計測自動制御学会論文集 , 30(10), 1188-1194.

[松川宏 2018]

松川宏. (2018). 摩擦. 著: 佐々木信也 (編), 数値解析と表面分析によるトライボロジーの解明と制御 (3-39). テクノシステム.

[谷直行 2019]

谷直行ほか. (2019). 握力把握・精密把握における安定把持のための筋電義手用関節屈伸機構の開発. 日本ロボット学会誌, 37 (2), 168-178.

[知念葉子 2013]

知念葉子, 酒井浩二, 小田明佳, 廣澤覚. (2013). 寝具カバーの素材表面における物理特性と心理量との関連. 京都光華女子大学研究紀要, 51, 61-69.

[日本工業規格 K 6252]

日本工業規格. (2007). JIS K 6252:2007 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-引裂き強さの求め方.

第5章 超弾性材料を用いたセンサ 一体型グローブの提案

5.1 柔軟なセンサの提案	138
5.2 導電体の開発と超弾性材料への付与	139
5.2.1 エラストマーゲルへの導電性付与	140
5.2.2 シリコーンゲルへの導電性付与	141
5.2.3 導電性を付与したシリコーンゲルのエラストマーへの塗布.....	141
5.2.4 導電性シリコーンゲルの TT シリコーングローブへの塗布.....	142
5.3 感圧センサの開発	143
5.3.1 導電性シリコーンセンサの原理	143
5.3.2 平面上における圧力測定検証実験	143
5.3.3 全方位感圧センサのロボットハンドへの実装と検証実験.....	145
5.3.4 感圧センサによる把持姿勢特定	147
5.4 歪（ひずみ）センサの開発	149
5.4.1 シリコーン製歪センサ	150
5.4.2 ヒステリシス補正関数の実装と姿勢推定検証実験	152
5.5 センサー一体型グローブの提案	155
第5章 参考文献.....	156

5.1 柔軟なセンサの提案

使用者が求める筋電義手への要求は、「人間の手にそっくりであること」[梶谷勇他, 2001]であるということは前章までに述べたが、それは、義手の外観がヒトの手にそっくりな形態であることを指しているとともに、義手がヒトの手と同様の機能を備えていることをも示唆している。つまり、使用者が筋電義手を使って、ヒトと同じような自然な動きで指先や掌全体で物を把持したり、手元を見なくても義手の指先が物に接触したことや手先の状況が分かり、スムーズな物体の把持や解放ができることなどが望まれている。

このような要求に応えるための触覚フィードバックに関する研究はこれまでに数多く行われている。触覚には、圧覚、伸展覚、振動覚、緊張覚、温覚、冷覚等が存在する[下条誠, 2008]が、本研究では、義手やロボットハンドの物体への接触状態を検知するため、圧覚を検知する感圧センサ、及び、ロボットハンドの手指姿勢をフィードバックさせるための角度を検知する歪センサについての検討と開発を行った。

先行研究において、圧覚を課題とした研究は、感圧導電性ゴムを用いた分布触覚センサ[中本裕之他, 2005][中本裕之他, 2007]や、同様に感圧導電性ゴムを用いながらディッピング手法によって自由局面に触覚センサを搭載したセンサ[下条誠他, 2002]、静電容量変化を利用したコンデンサを用いた感圧センサ[星貴之他, 2005]、導電性スポンジを用いた感圧センサ[山岸大亮, 2011][真辺淑江, 2013]、歪ゲージを用いたセンサ[奥野竜平他, 1996][伊藤彰人他, 2007]、光学式感圧センサ[溝田晃一他, 2003]などがある。

外観を損なうことなく感圧センサをロボットハンドに搭載するには、センサを、義手骨格に貼り付けるか装飾用グローブと義手骨格の間に挟み込む必要がある。そのため、搭載する感圧センサは小型かつ薄型であることが必要である。また、指先で圧力を検知するものであることから、自由局面に適用できる柔軟性と全方位性が要求される。また、筋電義手は、切断者の断端部に装着するものであるため、断端部への負担をできるだけ軽減する必要がある。つまり、手先部の重量は可能な限り軽くなければならない。筋電義手に使用するマイコンにも制約があり、感圧センサの情報処理は容易で、省配線であることも要求される。

これらの要件から、本研究では、グローブの製作段階でセンサを超弾性材料に塗布することでグローブにセンサ機能を付与する、柔軟な装飾用グローブ一体型のセンサの開発を提案する。

5.2 導電体の開発と超弾性材料への付与

筋電義手グローブにセンサ機能を付与するため、超弾性材料を用いた導電センサを開発した。

電気を通しにくい絶縁体であるシリコンに、カーボンブラック（スス＝炭化水素の一群）を混入させることによって導電特性を付与した導電性シリコンの存在は良く知られている。シリコンゴムに混入する導体としては、カーボンブラックの他、銀粉末、金メッキされたシリカやグラファイト、導電性亜鉛華などが存在する [信越シリコン, 2019.12 確認]。

そこで、本研究では、超弾性材料である熱可塑性エラストマーゲルに導電性を付与する方法と、同じく超弾性材料であるシリコンゲルに導電性を付与し、それをエラストマーゲル製グローブに付着させる方法の2種類の方法によって、超弾性材料に導電特性を付与する方法を探索した。

導電性材料には、製造元の異なるカーボンブラック3種類を用いた。活性炭は、事前の計測から導電性が低かったため試験から除外した（図5-1）。



図 5-1 使用した導電性材料

5.2.1 エラストマーゲルへの導電性付与

まずはじめに、エラストマーゲルに導電性を不要する方法を試す。

熱可塑性エラストマーの熱可塑性という性質を利用し、ホットプレートとバーナーでエラストマーゲルを溶かし、材料を入れながら攪拌。導電するかまたは攪拌できなくなるまで材料を添加した。



図 5-2 導電体開発実験の様子

実験の結果、エラストマーゲル（CRG-NTM15，(株)タナック）と、材料①のカーボンブラック（EC600JD，Lion Specialty Chemicals Co., Ltd.）が $0.38\text{M}\Omega$ で導電したが、抵抗が不均一で不安定であった。また、エラストマーゲルの伸縮性が低下した。

材料②及び③は、溶かした状態では導電するが、成型後は絶縁状態になった。

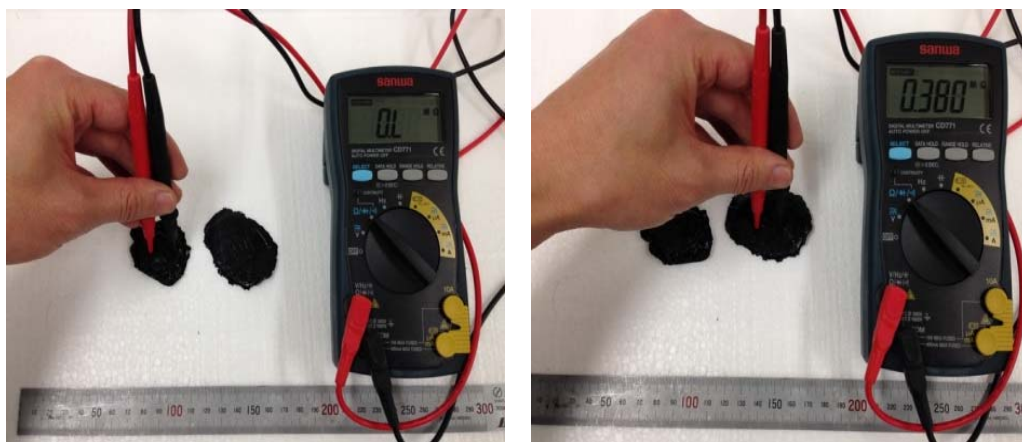


図 5-3 導電エラストマーゲルの製作（1回目： 0Ω ，2回目： $0.38\text{M}\Omega$ ）

このことより、エラストマーゲルは、絶縁性が高く、いったん導電しても、成型後、伸縮性が低下してしまうため、エラストマーゲルに導電性を付与することは困難であることが判明した。

5.2.2 シリコーンゲルへの導電性付与

次に、シリコーンゲル（TSG-E50，（株）タナック）とカーボン材料①②③を混ぜて攪拌する。導電するまでカーボン材料を添加し，その後成形した。



図 5-4 シリコーンゲル導電体開発実験の様子

実験の結果，材料①～③すべてのカーボンブラックで，TTシリコーンゲルに導電性が付与された。しかしながら，材料②と③は，導電するまでの必要量が多く，成型後は伸縮性が低く，また，カーボンが表面に出てしまうことが分かった。

最も安定した結果であったのは，材料①のカーボンブラック（EC600JD，Lion Specialty Chemicals Co. Ltd.，）であった。シリコーンゲルへのカーボンブラックの適した混入量は，質量比 3%-4%であった。

5.2.3 導電性を付与したシリコーンゲルのエラストマーへの塗布

5.2.1 の結果より，エラストマーゲルで導電体を製作するのは困難であったため，5.2.2 の導電性シリコーンゲルをエラストマー材料に塗布することでグローブ一体化を目指す。

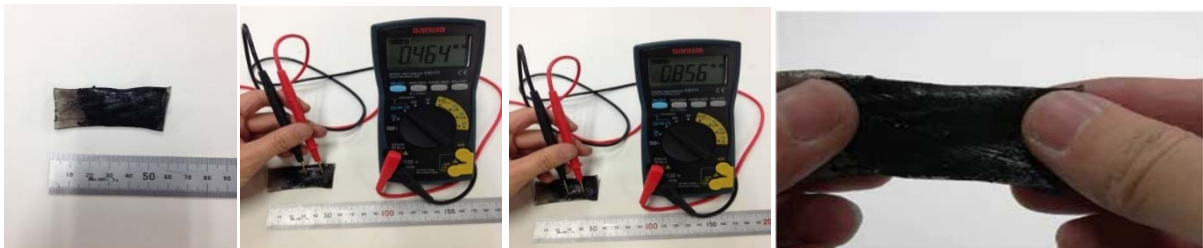


図 5-5 エラストマーゲル断片への塗布

まず、導電性シリコーンゲルを、エラストマーゲルの断片に塗布した(図5-5)。断片が強く伸ばされると剥がれてしまう。

次に、導電性シリコーンゲルをエラストマー製グローブに均一に塗布した(図5-6)。均一に塗布すれば、通常使用が可能であることが確認できたが、シリコーンは熱硬化性樹脂であり、エラストマーと相反する性質を持つため、成型後に熱可塑性エラストマーと粘着させることが難しかった。

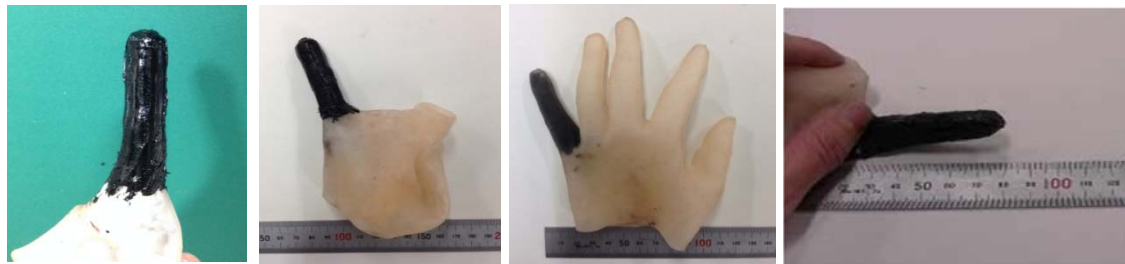


図5-6 義手用グローブへの塗布

5.2.4 導電性シリコーンゲルの TT シリコーングローブへの塗布

硬化する前のシリコーン樹脂は、シリコーン同士で接着させることが容易に可能である。この性質を利用し、導電性シリコーンゲルを成形前の金型に塗布し、グローブ内側が導電体となったTTシリコーングローブを試作した。



図5-7 導電性を付与した TT シリコーングローブの試作

このようにして、グローブ一体型の導電体が完成した(図5-7)。

5.3 感圧センサの開発

本項では、シリコンの柔軟性を利用し5.2で製作した導電性シリコンを用いて、センサを試作したことについて記述する [鈴木悠汰, 2015] [Yabuki *et al.*, 2016].

5.3.1 導電性シリコンセンサの原理

センサは、導電体と電極に圧力 P [Pa]が加わることによって導電体が電極に合わせて柔軟に変化し、導電体と電極の接触面積 S [m²]が増加することで電気抵抗値 R [Ω]が低下する。この電気抵抗値の変化を電圧の変化として検出することでセンサに加わる圧力を測定する。センサの構成図と原理を図 5-8 に示す。

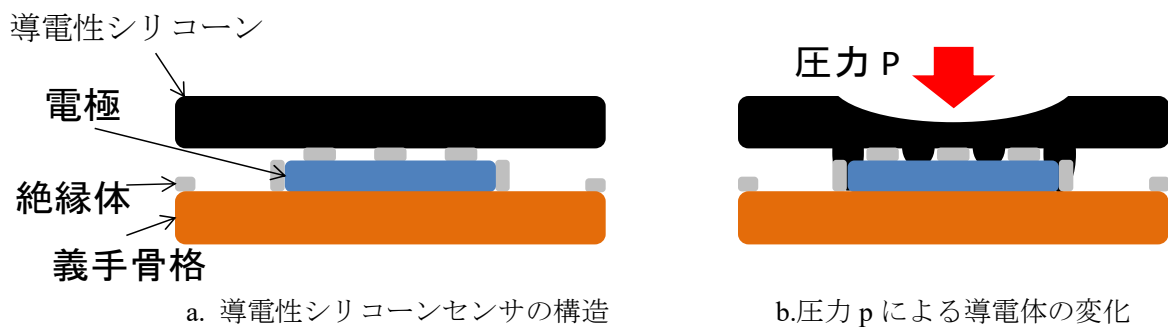


図 5-8 シリコンセンサで圧力を検知する原理

5.3.2 平面上における圧力測定検証実験

平面上で圧力を測定可能かどうかの検証を行うため、点識別実験を行った(図 4-9)。

平面上に、電極として2本のステンレスワイヤを平行に 10 mm の間隔で配置し、その上に絶縁性の包帯、シート状の導電性シリコンを重ねてセンサを構成した。

電極 1 の直上(点 A) , 電極 2 の直上(点 B), 両電極間の中央(点 C)を加圧し、その際のセンサの抵抗値 R_V を導く [鈴木, 2015]. 加圧は、点 A~C それぞれに 0g, 50g, 100g, 200g, 500g の分銅を乗せることで行った。

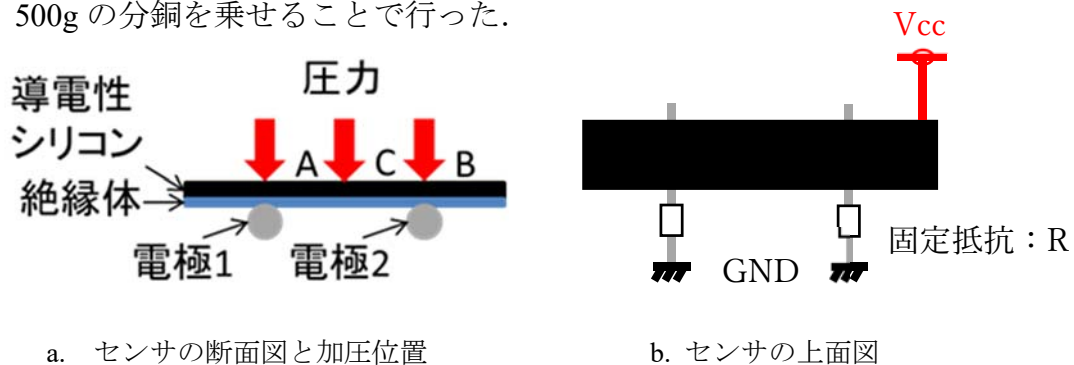


図 5-9 感圧センサのモデル

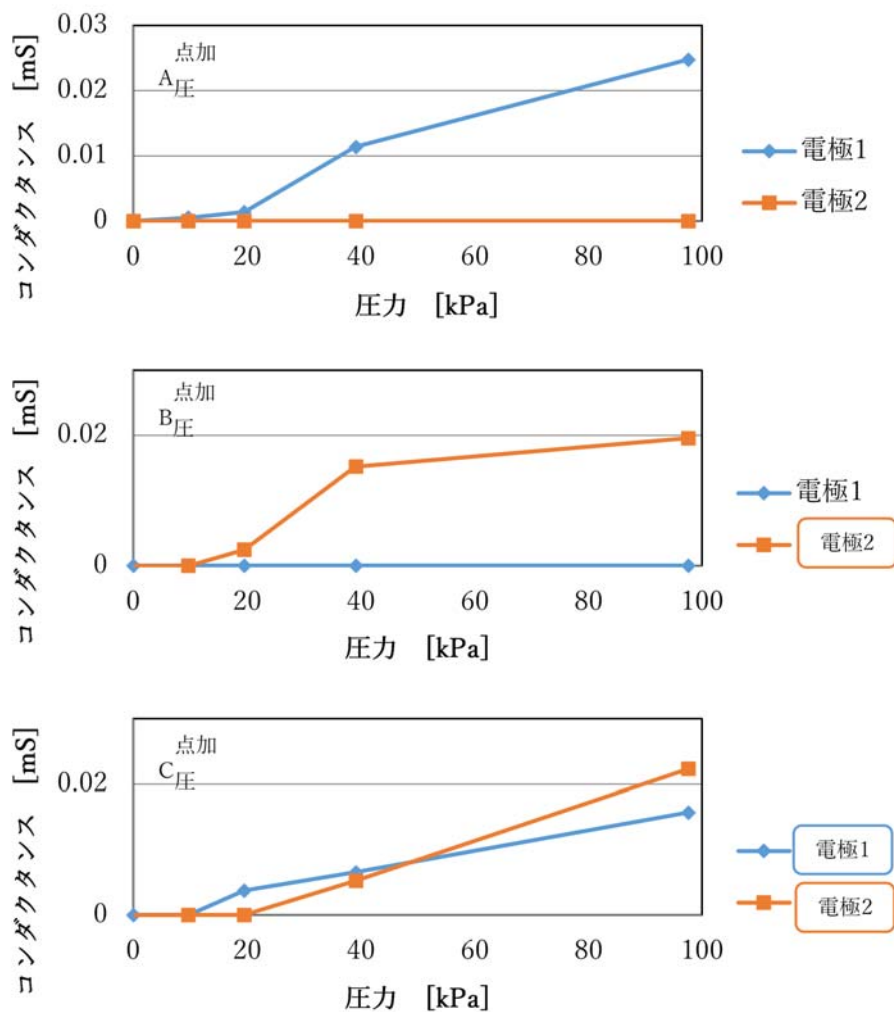


図 5-10 圧力測定検証実験結果

平面上における点識別実験の結果、電極 1 の直上 A 点を加圧した際、電極 1 のみ応答、電極 2 の直上 B 点を加圧した際、電極 2 のみ応答していることが確認できる。

さらに、両電極間の中央である C 点を加圧した際、電極 1、電極 2 のどちらの電極も応答していることが確認でき、電極直上の 2 点と両電極間の中央の計 3 点の識別が可能であることが確認できた。

5.3.3 全方位感圧センサのロボットハンドへの実装と検証実験

前項までに確認した柔軟な導電性シリコン電極を，ロボットハンド指に配置（アノード側）し，ロボットハンドに被せた導電性 TT シリコングローブ（カソード側）とで多点感圧センサを構築する。

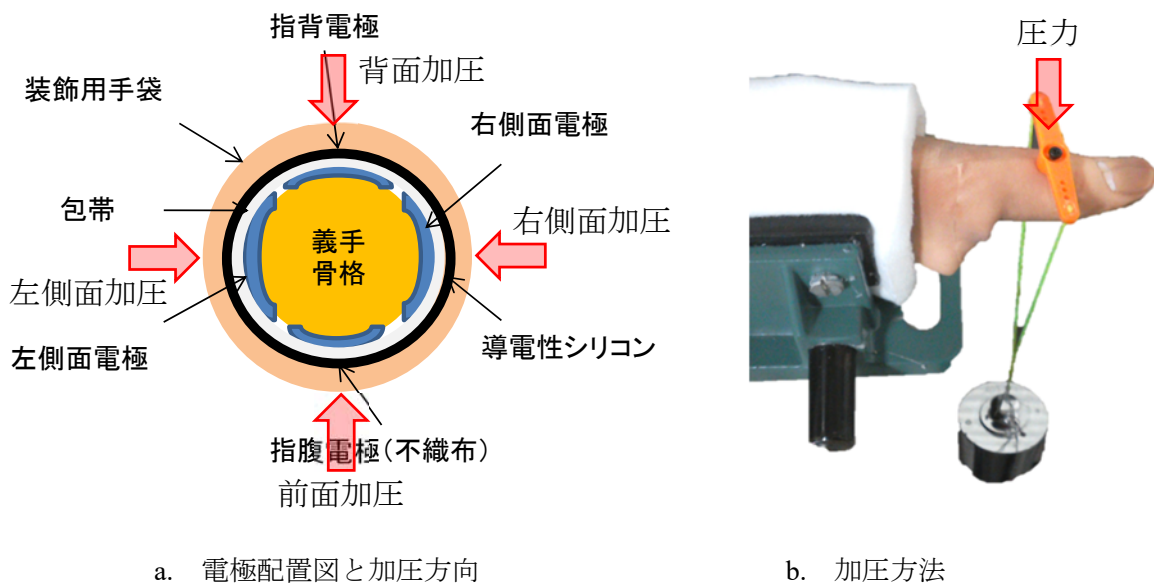


(a)前面

(b)側面

(c)背面

図 5-11 計測電極を配置したロボットハンド骨格[鈴木, 2016] [Yabuki, 2016]



a. 電極配置図と加圧方向

b. 加圧方法

図 5-12 感圧センサの全方位性の検証

図 5-11 のように，ロボットハンドの指腹（前面），指背（背面），両側面に取り付けた電極によって全方位の感圧情報を取得し，加圧面の特定が可能かどうか検証を行った。

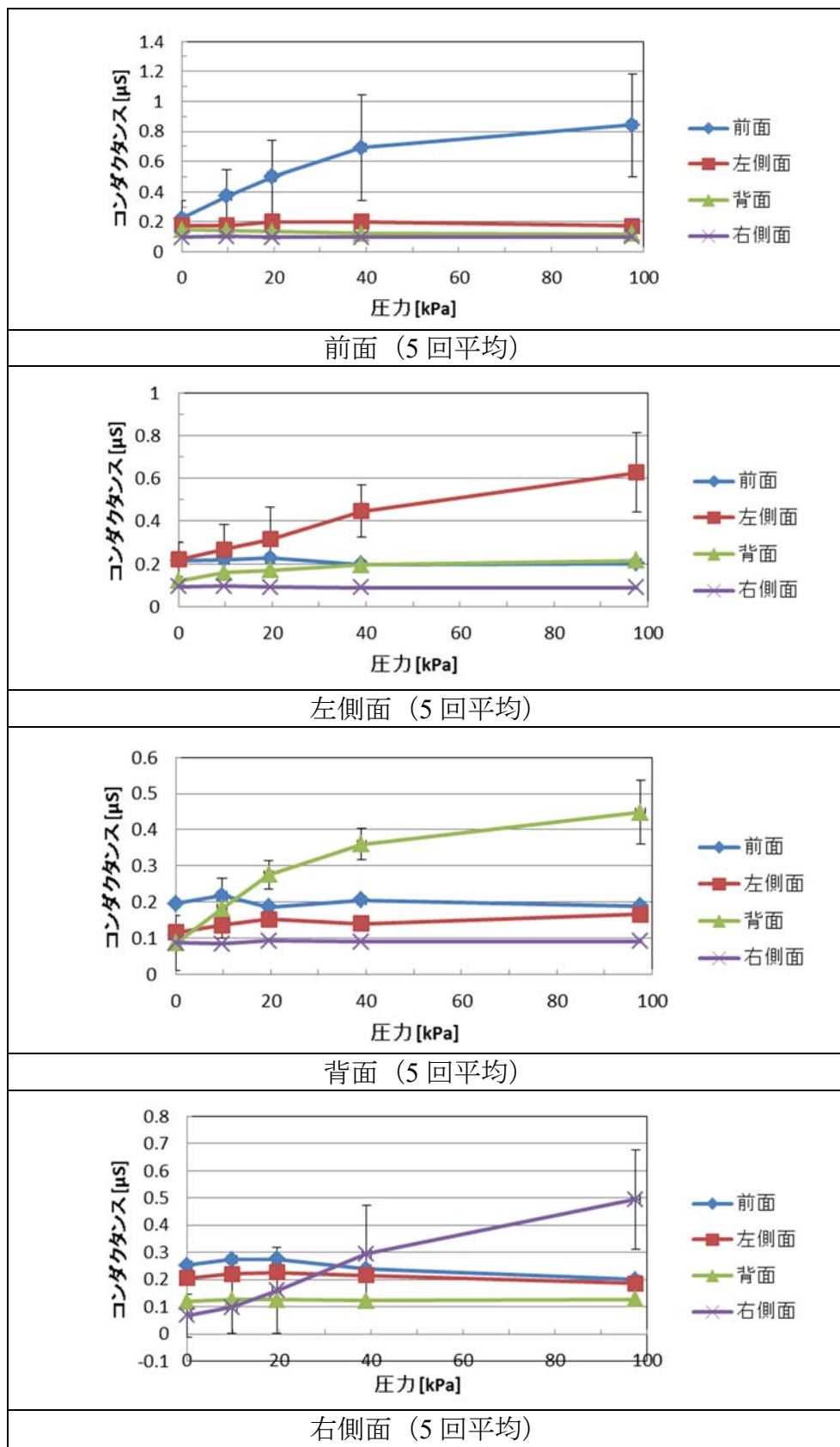


図 5-13 感圧センサの全方向性検証実験結果

図 5-13 より，前面，背面，両側面からの加圧に対してグラフに有意な傾きがあるため，圧力検知が可能であることが確認できた．また，前面を加圧した際は前面に搭載したセンサのみが応答し，他の3面を加圧したときはそれぞれの配置面のセンサのみが応答することから，4方向からの加圧に対して，センサの配置方向に対応した選択性のあるセンサであることが確認できた．

以上より，圧力の検知と加圧位置の識別が可能であるといえる．

5.3.4 感圧センサによる把持姿勢特定

提案した感圧センサで，ロボットハンドの把持姿勢の特定が可能であるかどうか検証するため，5.2.3 と同様の方法でロボットハンドの骨格（右手）に電極を取り付け，加圧した．

電極の取り付け位置は，右手母指と示指の前面及び側面である．また，取らせる把持姿勢は，安静姿勢，母指と示指の前面での摘み把持姿勢，そして母指と示指の側面で摘まむ側面把持姿勢である（図 5-14）．



図 5-14 把持姿勢

検証結果を図 5-15 に示す

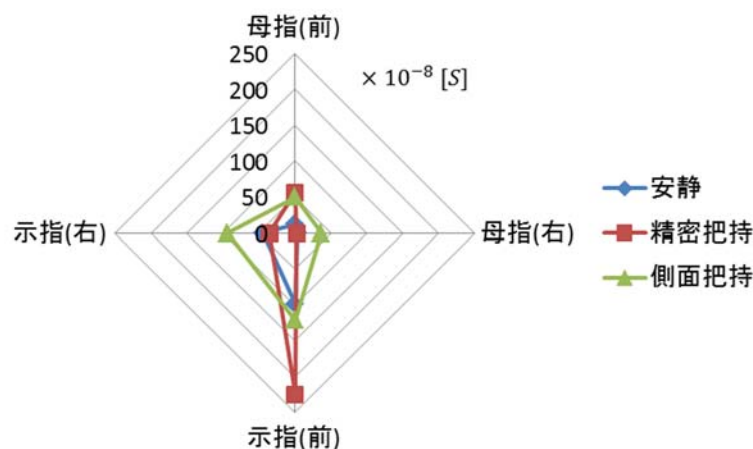


図 5-15 把持姿勢特定の検証実験結果

図 5-15 より，異なる姿勢に対して，各感圧センサが異なるコンダクタンス値を出力していることを確認した．

安静姿勢を基準とすると，精密把持の場合は母指の前面の感圧センサと示指の前面の感圧センサが応答している．側面把持の場合は，母指の前面と右側面両方の感圧センサと，示指の右側面の感圧センサが応答している．

このようにして，母指と示指に取り付けた4つの感圧センサから取得したデータにより，ロボットハンド（または義手）の把持姿勢の推定が可能であり，また把持姿勢を特定できることを検証した．

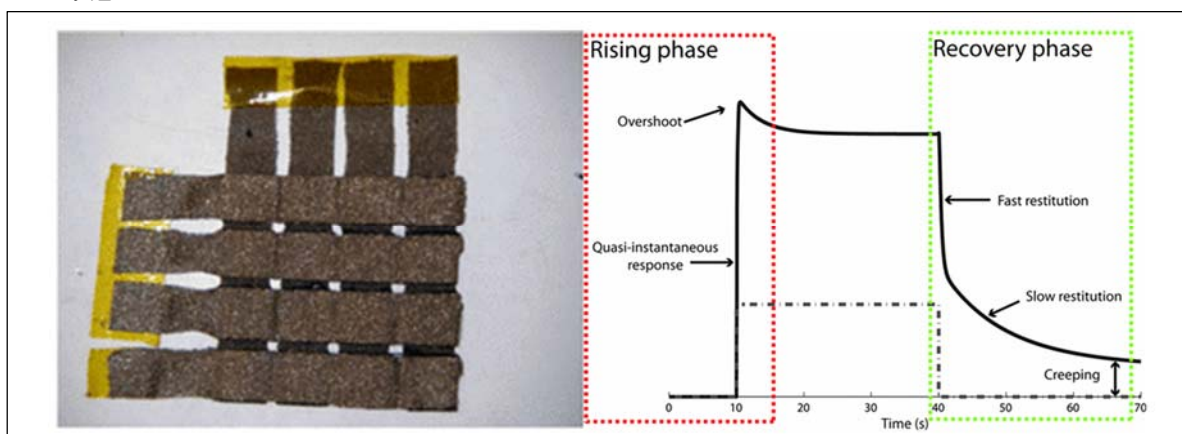
5.4 歪（ひずみ）センサの開発

5.3 で、シリコーンの持つ柔軟性を利用して、全方位性の感圧センサを開発した。本項では、シリコーンの持つ伸縮性を利用した、歪センサについて記述する [毛利保寛, 2017] [Yabuki, Mouri, et.al., 2019].

ひずみとは、材料に加わる外力に比例して材料が伸びたり縮んだりする変形量のことを言い、歪を電気信号として検出するセンサを歪センサまたは歪ゲージと呼ぶ。金属の電気抵抗の大きさは、長さに比例するため、金属線を引っ張ると長さが増加し電気抵抗が増大し、圧縮すると電気抵抗が小さくなる。つまり、電気抵抗の変化を測定することで材料や構造物の変形量 (=歪) を求めることができる [共和電業, 12月確認].

樹脂を歪センサとして用いるため、富士らはCNT（カーボンナノチューブ）配合樹脂のひずみセンサへの適応可能性を検討した[富士英輝他, 2006]. ここで、富士らは、多層CNTを分散させたゴム膜が、引張ひずみ変形に対して直線的な抵抗値の増減を示したが、伸びと縮みで異なる経路をとったこと、CNTの変形による内部ひずみが外部から与えたひずみと対応しない可能性があることを問題点として挙げている。

また、Lacasse らは、高価なCNTに代えてCB（カーボンブラック）配合シリコンを用いて歪センサを作成した。ここでは、接触による抵抗値の変化から歪センサにかかる圧力を推定する提案が行われている [Lacasse, 2010]. 当研究での問題点は、圧力の加重時と抜重時の抵抗値の変化経路が大きく異なること、センサの特性上面積や解像度を向上させると配線量が増えること、アレイが配置されている平面自体がひずむことが考慮されていないことである。



a. アレイ状に配置されたセンサ

b. 加圧時の抵抗値の変化

図 5-16 CB 配合シリコンセンサ [Lacasse, 2010]

5.4.1 シリコン製歪センサ

そこで、本研究では、筋電義手グローブのセンサー一体化の試みとして、超弾性高分子材料（シリコン）を用いた柔軟な歪センサを開発した。導電体は、シリコンゲル（TSG-E30，株式会社タナック）にカーボンブラック（EC600JD，Lion Specialty Chemicals Co. Ltd.，）を配合し、電極にはニッケルコバルト不織布を用いて作製した。

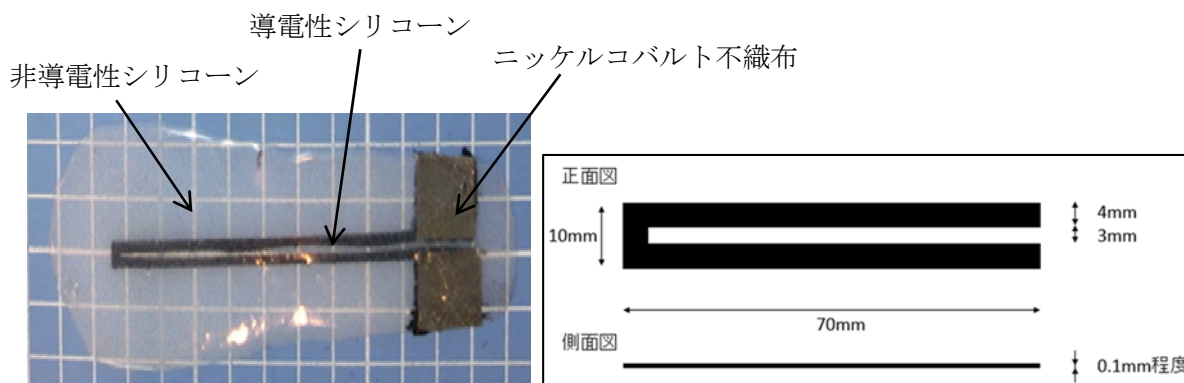


図 5-17 開発した曲げ・歪センサの構成

本シリコン歪センサの特性を、以下のような計測環境を構築して調査した。

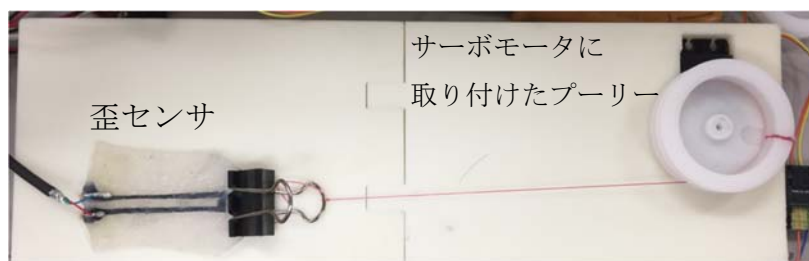


図 5-18 センサの計測環境

サーボモータ（GWS 社）にプーリー（ $\phi 40\text{mm}$ ）を取り付け、ワイヤーを伸ばし、シリコンセンサに固定した。サーボモータは 50ms の PWM 信号の幅で回転角が決まるため信号幅によって同じ変化をさせることができる。

伸び量 0 の時を基準として、4 秒ごとにサーボモータへの指令値を変化させ伸縮させる操作を 3 回行い計測した。シリコンセンサには、 $12\text{M}\Omega$ の固定抵抗を直列につなぎ、シリコンセンサにかかる分圧抵抗の電圧値、及び、サーボモータのポテンシオメータから信号線を引き出した電圧値を 16bitA/D コンバータ (CONTEC AIO160802AY-USB) で計測した。サンプリングレートは 2kHz で行った。

シリコンセンサから得られたデータは、ノイズ除去のため200点の移動平均処理を行った後、200Hzにダウンサンプリングした。ポテンショメータから得られたデータは、200点の移動平均処理、200Hzへのダウンサンプリングを行った。

ポテンショメータには巻き取った角度情報が計測されているため、その値から、歪センサとして利用する場合の理想値を推定した。

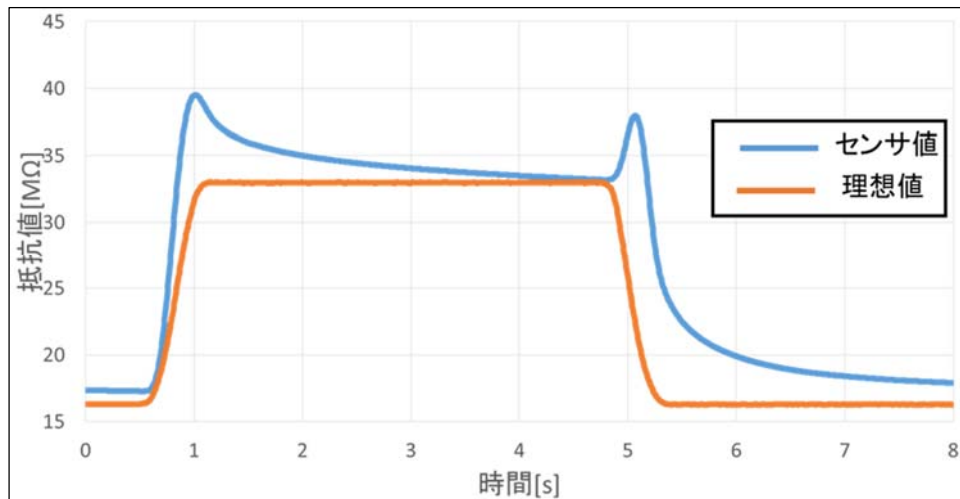


図 5-19 シリコン歪センサの特性調査（時間変化・3回平均）

本計測実験から得られたシリコン歪センサの特性は以下のとおりである(図 5-19)。

- 伸び時は線形的に値が増加するが伸び終わり時にオーバーシュートし、時間経過とともに抵抗値が下がる。
- 縮み始めに抵抗値が一度上がり、降下を始める。
- 縮み終わりの抵抗値はゆっくりと降下しており、伸び時のような線形性はない。
- 時間経過による抵抗値の低下の収束が遅く、変化幅が大きい。
- 変化経路には規則性が存在する

以上のことから、製作したシリコン歪センサには、ヒステリシスが存在すると考えられた。

5.4.2 ヒステリシス補正関数の実装と姿勢推定検証実験

ヒステリシスの存在が明らかとなったシリコン歪センサの特性を緩和する補正関数を作成した [毛利保寛, 2017].

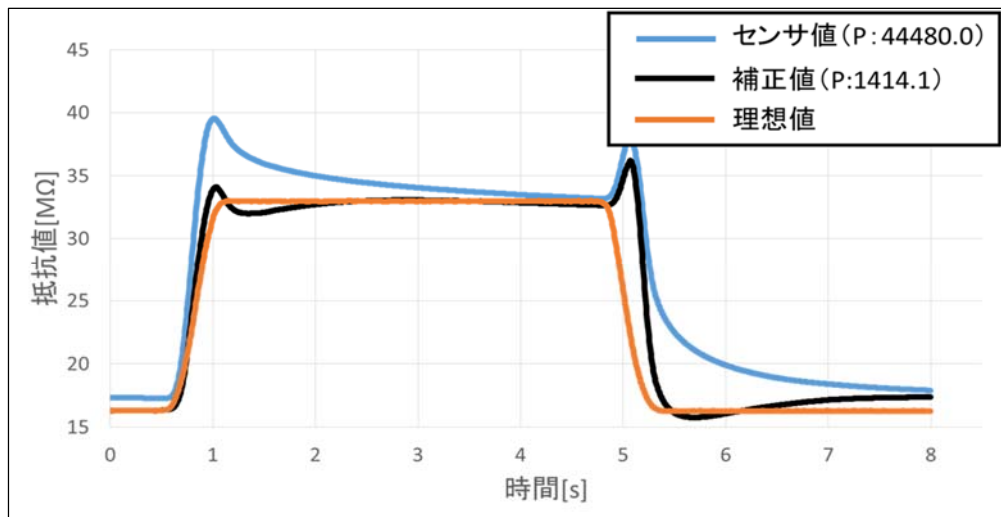


図 5-20 ヒステリシスの補正

製作した歪センサを，ロボットハンド左手骨格2か所に実装し，計測時に補正関数も考慮した（図5-21）．ロボットハンドは，母指と他4指にサーボモータが組み込まれた2自由度ハンドを使用，分圧抵抗は母指側に560k Ω ，4指側に470k Ω を使用した．

母指と4指が開いている状態を「開き」，母指と示指が触れる状態を「握り」，開きと握りの中間の角度を「中間姿勢」とし，開き→中間→握り→中間→開きの順番で動作させ，2つのセンサの抵抗値の変化を計測した．

また，各姿勢への移行速度を3パターン（A:1.5s, B:1.0s, C:0.7s/step）で変化させ，補正関数によって導出した補正値が，速度の変化に対応して，推定される真値（理想値）に追従するか検証を行った．

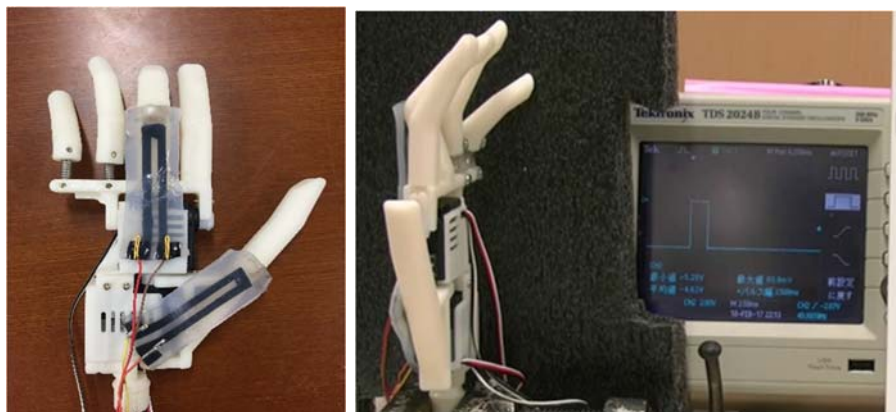
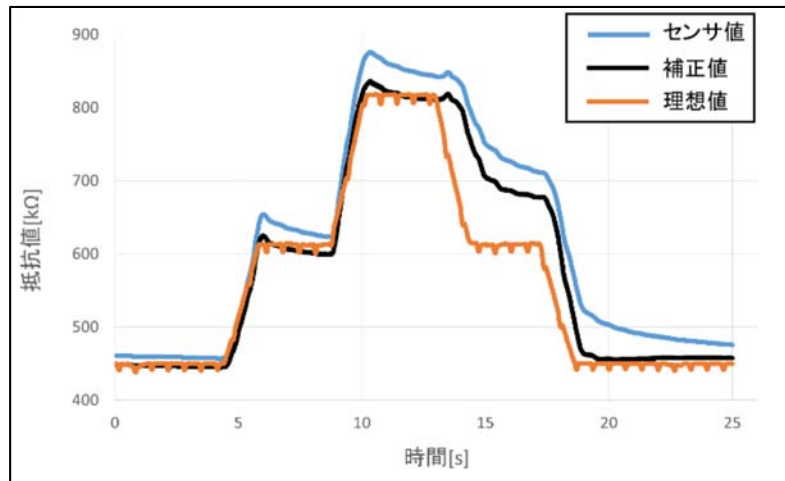
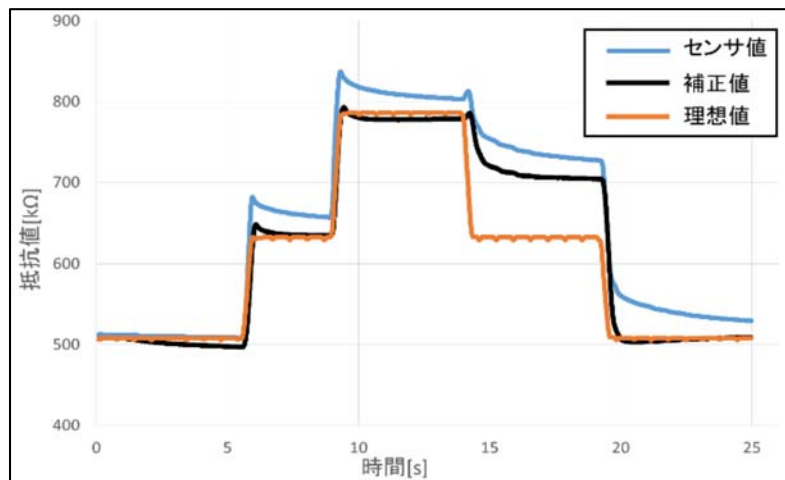


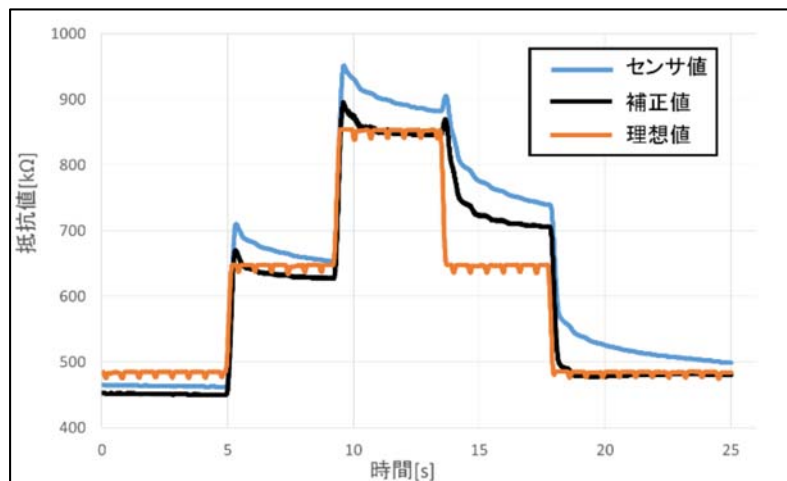
図 5-21 ロボットハンドへの実装（左）及び補正値追従実験の様子（右）



a. 速度 A (1.5s/step) の場合



b. 速度 B (1.0s/step) の場合



c. 速度 C (0.7s/step) の場合

図 5-22 補正值追従検証実験の結果（母指センサに貼付）

補正值追従検証実験の結果（図 5-22），全ての移行速度パターンにおいて，補正関数によって導出された補正值が，推定された真値（理想値）に追従することを確認した。

グラフのAの場合，0-5秒は開き姿勢，6-9秒は中間姿勢，10-12が握り姿勢を示している。開き姿勢の際には，歪センサは縮み，握り姿勢の際には，歪センサは伸びる。

<開き姿勢→中間姿勢→握り姿勢>

どの実験速度でも推定される理想値への追従を確認した。握り動作のみに識別を限定する場合は推定段階を増やすことが可能であると考えられる。AとB，Cでは抵抗値の最低値が異なるが，3段階の推定であれば開き状態の推定域を広くとることで最低値のオフセットに対応できると考えられる。

<握り姿勢→中間姿勢>

どの実験速度でも著しく抵抗値が低下しない現象が確認された。考えられる可能性としては，回転部において伸び方向に垂直な応力が発生していることである。

搭載しているセンサはひずみセンサなので伸び方向以外からの外力においても抵抗値が変化する。伸び方向と垂直な応力によって導電経路断面積が狭くなり，中間状態になっても応力が握り時と異なるために抵抗値が握り時と開き時で大きく異なるのではないかと。センサ値の変動は少ないため，時間経過による抵抗値の低下との識別が困難になることに関しては，補正関数を用いて閾値の幅を広げることができる。

<中間状態→開き状態>

センサ値には特性試験の縮み終わり時のような抵抗値減少量低下がみられるが，補正関数の適用によってすべての動作移行速度において最低値への収束が早まっていることが確認できた。

これらの補正関数出力地の推移から，適正な閾値の設定を行うことで3段階の推定が可能であるが，3動作より多くの識別は現段階では困難であることが分かった。

5.5 センサー一体型グローブの提案

5.4 で開発したシリコン歪センサを、TT シリコングローブに搭載する。グローブの内側にセンサを張り込んだセンサー一体型グローブである。シリコン同士が容易に貼り合わせられる性質を利用する。

別途一定幅で製作したシリコン歪センサを、予め、グローブ型の中子に貼り付け、その後、通常のシリコングローブ製作と同様の方法でシリコンを流し込むことでグローブを成形する。中子にシリコンセンサを貼り込んでいく際は、シリコングルを刷毛でグローブ金型に塗ってシリコンセンサを貼付する。

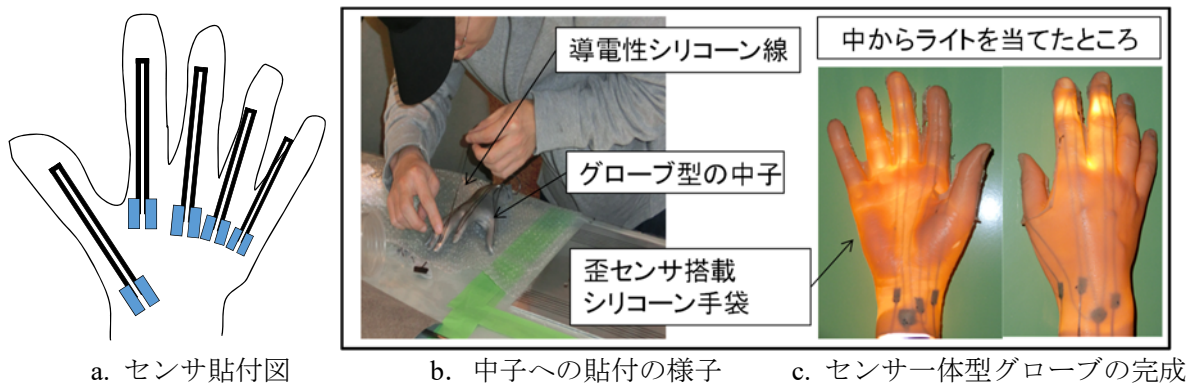


図 5-23 センサー一体型グローブの製作

上記の工程で、歪センサー一体型 TT シリコングローブの試作品が完成した（図 5-23）。本グローブは、筋電義手の指先に触覚を検知させる機能を持たせるための要件を以下のように満たした。

- ・センサは製作段階でグローブに貼り込まれており、義手骨格に取り付ける必要がない。
- ・指先で触覚を検知することが可能な、自由局面に適用する柔軟性と全方位性が確保されている
- ・手先部の重量は装飾グローブの重量を大きく上回らない

第5章 参考文献

[Marc-Antoine Lacasse 2010]

Marc-Antoine Lacasse, Vincent Duchaine and Clément Gosselin. (2010). Characterization of the Electrical Resistance of Carbon-Black-Filled Silicone: Application to a Flexible and Stretchable Robot Skin. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation , 4842-4848.

[Yoshiko Yabuki 2019]

Yoshiko Yabuki , Kazumasa Tanahashi , Yasuhiro Mouri , Yuta Murai ,Shunta Togo ,Ryu Kato , Yinlai Jiang , Hiroshi Yokoi. (2019). Development of new cosmetic gloves for myoelectric prosthetic hand using superelastic rubber. Robotics and Autonomous Systems, 111 , 31-43.

[Yoshiko Yabuki 2016]

Yoshiko Yabuki, Kazumasa Tanahashi, Yuta Suzuki, Tatsuhiro Nakamura, Ryu Kato, Yinlai Jiang and Hiroshi Yokoi. (2016). Development of Artificial Skin for the Myoelectric Prosthetic Hand by using Hyper Elastic Materials with tactile sensor. The International Workshop on modern Science and Technology 2016(IWMST2016) , 26-32.

[伊藤彰人 2007]

伊藤彰人, 辻内信好, 小泉孝之, 大島裕子. (2007). ロボット指のための分布型三軸力センサを用いた触覚情報処理. 同志社大学 理工学研究報告, 48(3), 86-94.

[奥野竜平 1996]

奥野竜平, 吉田正樹, 内山孝憲, 赤澤堅造. (1996). 皮膚振動刺激による筋電義手感覚フィードバック装置の検討. 電気学会論文誌, C116(11), 1246-1251.

[下条誠 2008]

下条誠. (2008). ヒトの触覚のメカニズム,. (社)計測自動制御学会システムインテグレーション部門 触覚部会「触覚技術の基礎と応用」.

[下条誠 2002]

下条誠, 金森克彦, 明愛国, 石川正俊. (2002). 液状感圧ゴムを用いた自由曲面型触覚センサの開発. 日本ロボット学会 学術講演会, 1G24.

[梶谷勇 2001]

梶谷勇, 樋口哲也. (2001). 筋電義手開発のための義手に対する意識調査. 電子情報通信学会技術研究報告書: 信学技報, 101(130), 75-82.

[共和電業 2019]

共和電業. (2019). KYOWA. 参照先: <https://www.kyowa-ei.com/jpn/>

[溝田晃一 2003]

溝田晃一, 神山和人, 梶本裕之, 稲見昌彦, 川上直樹, 舘嶂. (2003). 光学式分布センサの自由曲面への適用. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1A1-3F-C1.

[山岸大亮 2011]

山岸大亮. (2011). 人工指のための全方位型感圧センサの開発. 平成 23 年度電気通信大学 修士論文.

[信越シリコーン 2019]

信越シリコーン. (2019 年 12 月). Shin-Etsu Silicone.

参照先: <https://www.silicone.jp/index.shtml>

[真辺淑江 2013]

真辺淑江. (2013). 人工指のための発泡ウレタンフォームを用いた全方位型感圧センサの開発. 平成 24 年度電気通信大学 卒業論文.

[星貴之 2015]

星貴之, 篠田裕之. (2005). 非線形弾性を利用する触覚センシング. ロボティクス・メカトロニクス講演会 '05 (ROBOMECH '05) 講演論文集, 2P1-N-104.

[大崎克也 2008]

大崎克也, 大西正人, 鈴木研, 三浦英生. (2008). 多層カーボンナノチューブ分散樹脂のひずみセンサへの適用可能性の基礎検討. M&M2008 材料力学カンファレンス.

[中村隆 2011]

中村隆. (2011). 材料の基礎知識. 日本義肢装具学会誌, 27(4), 202-206.

[中本裕之 2005]

中本裕之, 才木常正, 北川洋一. (2005). 柔軟体と導電性ゴムによるロボットハンド用分布型圧力センサ. 日本ロボット学会誌, 23(3), 360-361.

[中本裕之 2007]

中本裕之, 小林太, 今村信昭, 白沢秀則, 小島史男. (2007). ユニバーサルロボットハンドのための分布型圧力センサの開発. 日本機械学会論文集, 73(733), 149-155.

[富士英輝 2006]

富士英輝, 鈴木研, 三浦英生. (2006). 多層 CNT 分散樹脂のひずみセンサーへの適用可能性の基礎検討. 日本機械学会東北支部総会・講演会 講演論文集.

[毛利保寛 2016]

毛利保寛. (2016). 導電性高分子を用いた感覚フィードバックシステムに関する基礎研究. 卒業論文, 電気通信大学.

[毛利保寛 2017]

毛利保寛, 矢吹佳子, 東郷俊太, 姜銀来, 横井浩史. (2017). 導電性高分子を用いた感覚フィードバックシステムに関する基礎研究. 第 38 回バイオメカニズム学術講演会, 171-174.

[矢吹佳子 2017]

矢吹佳子, 棚橋一将, 鈴木悠汰, 毛利保寛, 日吉祐太郎, 村井雄太, 東郷俊太, 姜銀来, 加藤龍, 横井浩史.(2017). 筋電義手用手袋の開発とその評価—センサ機能を持つ装飾手袋の実現—. 第33回日本義肢装具学会学術大会.

[矢吹佳子 2016]

矢吹佳子, 棚橋一将, 村井雄太, 毛利保寛, 叶鶴松, 中村達弘, 東郷俊太, 姜銀来, 加藤龍, 横井浩史.(2016). 筋電義手用グローブの開発と評価. 第37回バイオメカニズム学術講演会, 1C-3-3.

[鈴木悠汰 2015]

鈴木悠汰.(2015年2月). 導電性シリコンを用いた装飾用グローブ一体型全方位感圧センサの開発. 卒業論文.

第6章 まとめ, 今後の展望

6.1 まとめ.....	160
6.1.1 概要のまとめ.....	160
6.1.2 背景と目的のまとめ.....	160
6.1.3 超弾性グローブの設計と製造のまとめ.....	161
6.1.4 評価実験のまとめ.....	163
6.1.5 超弾性材料を用いたセンサー一体型グローブのまとめ.....	167
6.1.6 本論文のまとめ.....	168
6.2 今後の展望.....	170

6.1 まとめ

6.1.1 概要のまとめ

第1章では, 本研究で取り扱う筋電義手用グローブについての概要と, 本論文の構成について記述している.

6.1.2 背景と目的のまとめ

義手の歴史を紐解くと, 海外では, 戦争とともに発展し, 第一次大戦終了後には既に義肢装具の研究機関が整備され, 第二次世界大戦後には, リハビリ工学の進歩により, はや筋電義手の実用化が進んでいた. しかし, 日本においては, 第二次世界大戦後, 一時先進国の情報から隔絶された中におかれ, 筋電義手の研究も各大学や研究機関で独自に進められたため, 義肢装具の整備や統一の歩みは, 海外から30年ほど後れている.

我が国の義手グローブの開発は, 装飾義手に進化の端を發し, 人形師の衰退と入れ替わりに輸入された塩化ビニルによって始まり, 外観の補綴の追求を目的として独自に進化している. 2000年代に, シリコーン樹脂が普及し, リアリティの高い装飾グローブの素材として使われるようになり, 現在市場で販売されている義手グローブは, 塩化ビニル製かシリコーン製のものである.

筋電義手など義肢装具は, 福祉用具のうち補装具として位置づけられており, 患者が補装具を手に入れるためには, 障害者総合支援法などによる補装具費支給制度で公的補助を受ける方法がある. これまで, 公的支給の対象となる症例が限定されており支給に制限があるという問題や, 支給の可否を判断する前提として筋電義手を使いこなす訓練が必要でありその訓練に時間を要する, など, 公的支給を受けるハードルが高く, 利用希望者に比して筋電義手の普及が進んでいない. しかしながら開発者, 販売業者にとっては, 利用者に義肢装具を手に入れてもらうには, まず, 開発品を「補装具等完成用部品」の土俵に載せる必要がある.

このような公的支給の問題は別として, 近年, 海外を中心に義手の開発が盛んになっている. 日本においても, 研究では, 装飾義手に留まらず, 能動義手や筋電義手の研究が進んできている. このように義手の用途が多様化し, 電動義手の開発研究も多自由度化してきている中で, 電動義手に求めるのは外観の審美性のみならず, 電動義手を補助する機能性の役割を持つグローブの開発が必要となった.

そこで、本研究では、電動筋電義手グローブに要求される機能を

①制度上の要求, ②意匠上の要求, ③対人的要求, ④センサ機能の要求, ⑤材料力学的要求, ⑥パフォーマンス上の要求, ⑦ 材料上の要求とし, それぞれの項目から要求される機能を洗い出し, 次の項目における要求機能(表 6-1)を満たす筋電義手用グローブの開発を本研究の目的とした.

表 6-1 筋電義手用グローブの要求仕様

①	制度上の要求	補装具費支給制度で完成用部品の指定を受けること
②	意匠上の要求	人にそっくりである外観の再現が可能であること
③	対人的要求	手や掌や指先が持つ耐衝撃性や緩衝性を備えるものであること
④	センサ機能の要求	触覚など感覚を検知するセンサ機能が付与されていること
⑤	材料力学的要求	引張強度や摩耗強度, 耐腐食性, 防水性, 耐熱性が考慮されていること
⑥	パフォーマンス上の要求	物体の位置と姿勢の移動が, 素早く, 適切にできること
⑦	材料上の要求	塩化ビニル, シリコンに次ぐ新しい材料であること

6.1.3 超弾性グローブの設計と製造のまとめ

次に, グローブ製作の要件を, 次のようにまとめた.

- 1)JIS 規格に想定される要件
- 2)コスメチックの重要性
- 3)物体把持の形状に即した義手の把持性能
- 4)指先の把持安定性と粘弾性の必要性
- 5)質感の重要性
- 6)関節の柔軟性への考慮
- 7)耐久性・耐摩耗性に対する要求

さらに, その要求に対する課題を拾い, グローブ開発の課題解決のためのアプローチとして次の3項目を提案した.

- アプローチ 1. 各要件を満たすグローブ材料の選定
- アプローチ 2. ヒトの手の外観の復元のための採型法

アプローチ3. 義手の把持力向上を担保するハンドの把持形状に追従する厚み及び指先の構造と粘弾性を考慮した指腹形状

これらの提案のうち、まず、アプローチ1に対して、資料情報上、材料の比較を行った。

結果として、

- ・ JIS 規格と外観の要件に則している材料は、塩化ビニルとシリコーン
- ・ 義手の把持性能の要件に則している材料は、エラストマー
- ・ 指先の把持安定性や粘弾性、質感、柔軟性に関しては、エラストマーが優れていると分かった。

そこで、本研究では、新素材として、超弾性材料である熱硬化性シリコーンと熱可塑性エラストマーに注目し、これらの材料を用いてグローブを製作し、評価を行っていくこととした。

扱う材料について、ヒトの手にそっくりな質感を持つ熱可塑性エラストマー、及び熱硬化性シリコーンの選定には、SOFTGRAM を用いた。ヒトの手背の表皮及び指先の柔らかさと同定する材料として、

エラストマー . . . CRG-NTM15 (株タナック)

シリコーン . . . TSG-E50 (株タナック)

を選定した。

アプローチ2 ヒトの手の外観の復元のための採型法に関しては、皺や指紋まで忠実に再現できる型取り剤を使って採型し、石膏型を作り、型起こしを行う方法を提案し、ヒトの手形を採型した。

アプローチ3 ハンドの把持形状に追従する厚み及び指先の構造と粘弾性を考慮した指腹形状に関しては、手指の肉厚を制御することによって把持の性能が上がることを重視し、厚み仕様マップを制作した。

この厚みマップは、肉厚を部分的に制御させることができる成形法に有効である。

次に、プラスチックの成形法について述べ、本研究で取り扱う以下の成形法

- ・ 熱可塑性スチレン系エラストマー . . . インジェクション (射出) 成型
- ・ 熱硬化性シリコーン (TT シリコーン) . . . 注型成型
- ・ 熱硬化性シリコーン (SS シリコーン) . . . スラッシュ成型
- ・ 熱可塑性塩化ビニル . . . スラッシュ成型

について詳述した。

エラストマーの成形と TT シリコーンの成形には、同じ金型を用いることができ、厚みマップが考慮された金型によって、指腹部が厚く、手背側の皺部分は薄く作られる。エラストマーも TT シリコーンも把持性能の向上が期待されるものとなった。

6.1.4 評価実験のまとめ

第4章では、第3章で超弾性材料から新しく作られたグローブ2種(エラストマー、TTシリコーン)と、市販のシリコーン、塩化ビニルの仕様を変更して新しく作られたそれぞれのグローブ(SSシリコーン、筋電義手用塩化ビニル)の4種類を使った評価実験とその結果について記述している。比較に用いたのは、従来使われてきた装飾用の塩化ビニルグローブである。

まず初めに、新しい超弾性材料から作られたエラストマーグローブの性能を、従来の塩化ビニルグローブと比較するため、柔軟性の評価と動力義手への追従性の評価を行った(4.1.1, 4.1.2)。

柔軟性の評価として、ロボットハンドの手先具にグローブを装着する時間を計測した結果は、塩化ビニル及びTTシリコーングローブを装着するのにかかる時間は、エラストマーグローブの2.4~2.6倍であった。

エラストマーグローブの伸張率は1300%であることが分かっており、伸縮性に富むことが、手先具への装着に効果を発揮することが証明された。

続いて、電動義手への追従性の評価では、グローブを装着していないロボットハンドと、グローブ(装飾用塩化ビニル、エラストマー)を装着したロボットハンドの開き幅を計測した。

塩化ビニルグローブは、重いため、塩化ビニルを装着したロボットハンドは、塩化ビニルのもともとの仕様以上の開きを保つことはできなかった。

エラストマーは、ロボットハンドの開き幅に追従して開き幅を保つことができた。

4.1.3では、グローブの筋電義手動作に対する負荷評価を行った。

初めに装飾用塩化ビニル装着時、エラストマー装着時、グローブ非装着時のロボットハンドの動作に対するモータ電流消費量を計測したところ、塩化ビニルグローブを装着したときにハンドの姿勢を維持するために必要な電流消費量は、エラストマー装着時やグローブ非装着時と比較して3~5倍の電流消費量を必要としたが、エラストマー装着時にはほぼ電流量の負荷がないことを確かめた。

次に、装飾用塩化ビニル、エラストマー、TTシリコーンを装着した際の電流消費量の計測を、前回と同様の方法で行った。

実験結果は、TTシリコーンの電流負荷は、エラストマーを上回ったが、塩化ビニルの電流消費量の1/6から1/2であることを示した。

このように、4.1では、開発した超弾性グローブの性能評価を行い、電動筋電義手への影響を検証するため、柔軟性とモータ負荷の検証を行った。これらの評価試験からは、エラストマーの高い伸張性が、筋電電動義手に追従し、モータへの負荷が著しく低く抑えられていること、塩化ビニルは、筋電義手の姿勢変化に対して他と比較して負荷が高いこと、TTシリコーンの電流負荷は、エラストマーを上回ったが、塩化ビニルの電流消費量の1/6から1/2であることが明らかとなった。

続く4.2では、把持性能の向上への寄与を調査する目的で、グローブ材質の力学的評価を行った。

4.2.1では、引裂き強度比較実験を行い、従来の装飾用塩化ビニルとエラストマーの引裂き強度実験を行った(4.2.1.1)。

引裂き強度試験で、エラストマーは、破断までのストロークが、圧倒的に長く、塩化ビニルが130~160 mmのところ、エラストマーは600~1000 mmであった。

次の、塩化ビニル、シリコーン、エラストマーの比較(4.2.1.2)では、従来の塩化ビニルのほか、筋電義手用に仕様変更した塩化ビニルとSSシリコーン、従来のシリコーン、TTシリコーンも同時に引裂き実験を行った。

引裂き強度(平均)は、従来の塩化ビニルが12.03 [N/mm]、筋電義手用塩化ビニルが10.69 [N/mm]のところ、エラストマーは3.59 [N/mm]、SSシリコーンは2.16 [N/mm]、TTシリコーンは最も弱く、1.20 [N/mm]であった。

最大試験力に到達する時間(破断までの時間)は、筋電義手用の塩化ビニルを1とすると、SSシリコーンは1.6倍、TTシリコーンは3倍、エラストマーは10倍の時間を要した。つまり、エラストマー、TTシリコーン、SSシリコーン、筋電義手用塩化ビニルの順で、引裂きが始まってから破断するまで持ち堪えることを示した。

4.2.2では、引張試験を行い、静止摩擦係数を求め、それを比較した。引張試験による静摩擦係数比較(エラストマー、筋電義手用塩化ビニル、SSシリコーン)を行った結果は、グローブ表面と物体表面の摩擦力は、塩化ビニル素材が他の2種の素材と比較して有意に低く、塩化ビニルは、グローブ表面と物体接触面の摩

擦力に関する把持性能において、他の2種のグローブと比較して有意に滑りやすいと評価した。

4.2.3 では、引抜実験による把持操り機能評価として、各グローブ（エラストマー、筋電義手用塩化ビニル、SS シリコーン）を装着して、手先具のモータを作動させたロボットハンドが Force Closure で物体を把持した場合と、義手が Form Closure で物体を把持した場合の義手グローブと物体の摩擦特性についてそれぞれ評価した。

引き抜き実験では、主に即応性と安定把持区間に注目して評価した。

引き抜き抵抗力の最大値を最大値到達時間で除したものを「即応性」と定義し、即応性が高いことを、物体への把持の適応が早いこととして評価する。

安定把持区間は、引抜力の増加が最も大きい時刻における傾きを取る「最大傾き」と引抜力の減少が最も大きい時刻における傾きを「最小傾き」と定義し、最大傾きを取る時刻の変位と最小傾きを取る時刻の変位の差を「安定把持区間」と定義したものである。

評価実験の結果、物体を把持するとき塩化ビニルの即応性が高く、物体への適応が早いこと、

SS シリコーンは、把持が安定するまでに時間がかかるが、安定把持区間が長いことから、一度把持した物体は最も安定して保持することができることを確かめた。

なお、Form Closure で行った実験で、指先の Force Closure で物体を把持させたときの差分が大きかったのは、筋電義手用塩化ビニルとエラストマーであった。

この差分は、Form Closure で引抜抵抗力を計測する際に計測される指先の摩擦力とは別の、引っ掛かりの部分に相当すると考えられ、MP 関節と PIP 関節の関節部又は指腹部の抵抗力が高いことを示していると考えられる。

つまり、筋電義手用の薄い塩化ビニルは、ロボットハンドの骨組みの形状に追従していることが考えられ、エラストマーは、ロボットハンドの骨組みの形状に追従しているか、粘弾性を考慮した指腹部の厚みの強弱が効力を発揮していると考えられる。

4.3 では、筋電義手によるパフォーマンス評価（Pick-and-Place 実験）を行ったことを記述した。

まず、エラストマーグローブの性能を評価するため、装飾用塩化ビニルグローブとエラストマーグローブを被せた義手で（グローブを付け替えて）実験を行った。

塩化ビニルは開き幅と摩擦力の低さで、大きなものや重いもの、小さなものが把持しづらいという結果が見て取れる。成功率は高いが、それは筋電義手の手先に塩化ビニルグローブが追従せず、試行回数が少なくならざるを得ないからである。エラストマーは、義手の手先具に追従し、適度な摩擦力によって物体を把持し解放することが可能であり、義手の動きを妨げないことが確認された。

4.3.2 で、爪の効果の検証のため、エラストマーグローブを使って、爪を付けない場合と ABS 樹脂の爪を取り付けたグローブの評価実験を行った。

成功回数の総数の平均は3品目の差であったが、個々の実験結果においては、これまで爪無しグローブでは成しえなかった、コインや鍵、カードなど薄い物体の把持に成功した。一方で、爪があるために把持回数が減った項目もあり、それは爪の長さの原因があったと考えられる。

4.3.3 で、エラストマー（爪無し）と TT シリコングローブの比較実験を行った。

TT シリコーンは粘着性が高いために、把持のあと解放がうまくできない場合があったことが影響し、成功回数の総数の平均の差は、エラストマーより3回少なかった。しかし、標準偏差を見ると本実験は、被験者の熟達度の影響も大きいようであり、この実験からは、エラストマーと TT シリコーンの性能は拮抗していると考えられる。

4.3.4 で、エラストマー（爪あり）と筋電義手用塩化ビニル、SS シリコーンの比較実験を行った。

統計解析の結果、エラストマーの成功数総数はシリコーンよりも有意に高い傾向があり、塩化ビニルの成功数総数はシリコーンよりも有意に高いことがわかった。エラストマーと塩化ビニルの成功数総数に有意差は認められなかった。

本実験では、筋電義手用塩化ビニルグローブの成功回数が、エラストマーの成功回数と僅差であることが注目に値する。従来の装飾用塩化ビニルグローブでは、その自重が義手の動作の妨げになっていたものが、筋電義手に用いられるよう開口部を広げ、柔軟性を考慮し薄く製作した筋電義手用の塩化ビニルグローブの有用性が確認できた。

SS シリコーンは、他のグローブと比較して総成功数が有意に低い結果であったが、これは、スラッシュ成形で指先が厚く製作されているため、小さなものの把持が難しかったことがひとつの要因と考えられる。

6.1.5 超弾性材料を用いたセンサー体型グローブのまとめ

義手に触覚を検知する機能を付与する取り組みは、これまでに数多く行われている。しかし、センサを、ロボットハンドの骨格やグローブに貼り付けるものがほとんどで、大きさや厚み、配線などの問題がある。ロボットではなく、ヒトが使う筋電義手に取り付けるものであることから、外観を損ねるようなものは避けなければならないという制約もある。そこで、本研究では、グローブの製作段階でセンサを超弾性材料に塗布するセンサー体型グローブの開発を提案し、指先などの自由局面に適用できる全方位性を備えた柔軟なセンサの開発を行った。

5.2 では、超弾性材料であるシリコーンゲルに導電性を付与したことを記述している。シリコーンゲルにカーボンブラックを混ぜ導電体とすることに成功した。しかし、エラストマーには接着させられなかったため、シリコーン同士が接着する性質を使い、導電性シリコーンゲルをグローブ成形前の金型に塗布し、グローブ内側が導電体となった TT シリコーングローブを試作した。

このような形で、グローブ一体型の導電体が完成した。

5.3 では、5.2 で製作した導電性シリコーンを用いて感圧センサを開発した。平面上における圧力測定検証実験 (5.3.2) の結果、点識別が可能であり、ロボットハンドへの実装と検証実験 (5.3.3) の結果、ロボットハンドに取り付けた電極によって全方位の感圧情報を取得し、加圧面の特定が可能であることも検証できた。

以上の検証結果から、5.4 で、感圧センサを導電性 TT シリコーングローブに搭載し、ロボットハンドの把持姿勢の推定と把持姿勢の特定が可能であることを検証した。

次に、5.4 においては、シリコーンの持つ伸縮性を利用して歪センサを開発したことについて記述した。

上記と同じく、超弾性材料であるシリコーンをカーボンブラックと混ぜて作製した導電体を不織布に塗布し、歪センサとした。シリコーン歪センサの特性を調査したところ、ヒステリシスが存在したため、その特性を緩和する、ヒステリシス補正関数を作成し、ロボットハンドに搭載した。

その結果、補正関数によって導出された補正值が、推定される真値に追従することが検証された。

5.5 では、5.4 で開発したシリコーン歪センサを、TT シリコーングローブに搭載し、センサー体型グローブの試作品を完成させた。本グローブは、取り付けがふようであることや全方位性が確保されていること、重量の問題がないことで、筋電義手の指先に触覚を検知させる機能を持たせるための要件を備えたものとなった。

6.1.6 本論文のまとめ

以上の結果より、開発した超弾性材料を用いた筋電義手グローブによって、目的とした以下の要求仕様が満たされていることを確認した。

表 6-2 筋電義手用グローブの要求仕様と結果

要求区分	要求される仕様	開発の結果
制度上の要求	完成用部品に指定されること	エラストマーグローブ (H30.4.1) , 筋電義手用塩化ビニルグローブ (H31.4.1) が, 厚生労働省補装具等完成用部品として指定された.
意匠上の要求	人にそっくりである外観の再現が可能であること	石膏で採型したヒトの手型によるグローブ製作により, 皺や指紋, 隆線, 毛穴に至るまで鮮明に転写され, 「ヒトにそっくり」な外観を再現することができた. また, エラストマー及びTTシリコーンは, 成型において厚みに考慮を施し, 指腹部や母指の付け根などの肉厚の調整により, 立体的なグローブが完成した. SSシリコーンと塩化ビニル製グローブは, スラッシュ成形であることから, もとの金型から立体的な形が模写されている. 色彩に関しては, 使用者の性別や年齢によって好みが変わる結果にとどまっており, 今後引き続き検討が必要である.
对人的要求	手や掌や指先が持つ耐衝撃性や緩衝性を備えるものであること	エラストマーグローブ (伸長率1300%) , TTシリコーン(800%) , SSシリコーングローブ (300%) に関しては, 伸長性が考慮され, 相対的にロボットハンドへの追従が可能のため, グローブとロボットハンドの間で衝撃が掛かりにくい

		構造となった。また、厚みの調整により指先や手掌部は物体の把持を安定して行える構造とされた。
センサ機能の要求	触覚など感覚を検知するセンサ機能が付与されていること	超弾性材料を用いて導電体及びセンサを製作することに成功した。感圧センサ・歪センサの性能も確認され、義手への搭載によってセンサ機能の有効性が確認された。また、センサー一体型グローブの試作が完成した。
材料力学的要求	引張強度や摩耗強度、防水性、耐熱性が考慮されていること	引裂き試験によるストロークの長さの検証を行い、引裂きは、エラストマー、TTシリコーンが塩化ビニルの3倍以上であることを確認した。エラストマー、シリコーンは、エラストマーは耐吸水特性に優れ、シリコーンは高い撥水性を持つ。耐熱性は、シリコーンが250°C、エラストマーが80°Cである。
パフォーマンス上の要求	物体の位置と姿勢の移動が適切にできること	開発または改良したグローブで、これまで不可能だった筋電義手での把持操り機能を実現できたことをPick-and-place実験によって検証した。
材料上の要求	塩化ビニル、シリコーンに次ぐ新しい材料であること	熱可塑性スチレン系エラストマー、TT (TanacTSG) シリコーンという新しい超弾性材料で筋電義手グローブの製作を実現した。

6.2 今後の展望

本研究において開発したグローブは, 熱可塑性エラストマー, TT シリコーン, SS シリコーン, 筋電義手用塩化ビニルグローブ, 4種類ともに, Pick-and-Palce 実験の結果, 物体の把握・移動・解放に関して有効性が確かめられたが, 一部, 軽薄短小に対して性能的に不十分であることも明らかとなった.

この不十分な点の問題点は, 爪の構造方法, つまり, 二種類の異なる物体を局所的に一体化する技術が存在しないこと, もしくは開発できなかったことにある.

今後は, 上記の問題を解決する方法を探るとともに, 特長のある2種類の材質を組み合わせた2層構造の開発を検討し, より機能の高いグローブの開発を目指す.

謝辭

本論文は、著者が横井研究室で業務を始めた 2016 年から携わってきた、筋電義手の研究開発の一端を担う義手グローブの研究についてまとめた学位論文です。
本研究を遂行するにあたって多くの方に支援とご協力をいただきました。

まず、はじめに、

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

に心からの敬意と感謝を表します。

横井先生に教えていただいたことは、永遠に刻まれ絶対に無くならない宝物を自分で作る方法でした。そして、横井先生は、既に持っているものを磨く方法をも示してくださいました。決してブレない厳しさとおおらかさで導いていただき、私は多くのことを学びました。

そして、

同 機械知能システム学専攻
青山 尚之 教授、明 愛国 教授、小池 卓二 教授

に、心より感謝いたします。先生方には、指導教員として常よりご指導いただきおりましたが、博士論文審査においては、審査委員として、予備審査の折より大変貴重なご意見をいただきました。有難うございました。

また、

東京大学大学院工学系研究科人工物工学研究センター
太田 順 教授

に、心からの感謝を捧げます。

先生に率直なご意見やご指摘をいただいたことで、先生のお言葉のひとつひとつを思い出し、論文を適切に修正できたと思います。先生方に審査いただき評価いただけたことは、これからの私の大きな励みになります。

横浜国立大学大学院工学研究院 システムの創生部門 加藤 龍 准教授
に、心から御礼申し上げます。

以前のスタッフとして、そして横井研修了の大先輩として、指導と励ましをくださいました。学位論文執筆にあたって力強い応援と励ましをいただいたことに深く感謝いたします。

また、

電気通信大学脳・医工学研究センター 姜 銀来 准教授

は、いつ何どきでも、ウイットを交えた前向きな意見や感想をくださいました。また、毎回適切な助言をいただきました。

そして、

同大学院情報理工学研究科機械知能システム学専攻 東郷 俊太 助教

には、私にとって難しい理論や計算に確かなご助言とサポートをいただきました。先生方に大変感謝いたします。

同 山野井 佑介 研究員

には、同僚として、博士の先輩として、フォローやアドバイスをいただきました。博士論文に取り組んだ間、いろいろなことが起こりましたが、その期間を支えてくれた確かな力持ちは、山野井さんでした。心から感謝いたします。

電気通信大学脳・医工学研究センター

山田 幸生 客員教授, 丹羽 治樹 客員教授

には、学位取得の志を“文理融合の架け橋”と喜んで応援していただき、お会いする度に背中を押してくださったことに感謝します。

電気通信大学グローバルアライアンス・ラボ推進室

新井 健生 客員教授

は、様々な場面で学位審査の準備に集中させてくださいましたこと、論文について丁寧にご指導いただきましたことに心から感謝申し上げます。

横井研究室卒業生、修了生の

中村 達弘さん, 星川 英さん, 鈴木 悠汰さん, 毛利保寛さん

には、本論文の内容について多くの示唆とご協力をいただきました。深く感謝いたします。

株式会社タナックの皆様

にも心から感謝いたします。私の研究は、棚橋様との出逢いとプロジェクトから始まりました。論文執筆のために施設見学させていただいたり、実験を行わせていただいたり、工場がまるで研究室の分室であるかのようにいつもあたたかく受け入れて下さったことに、御礼を申し上げます。

株式会社佐藤技研 佐藤哲也様

には、グローブ開発にまつわる貴重なお話を聞かせていただいたこと、塩化ビニルの開発、シリコーンの改良にお力を貸していただいたことに心から感謝いたします。

そして、

歴代のメンバーもあわせて、横井・姜・東郷研究室の皆様
に心からお礼申し上げます。いつも、大勢の仲間たちに見守られている安心感の中で、頑張ってきた。とくに、本稿に関係する実験や型どりに協力くださった、
關達也さん、迫田辰太郎さん、村井雄太さん、馮翔さん、鎌田舞花さん、小畑承経さん、熊谷あやねさんに感謝いたします。また、本稿に載せられませんでした、
fNIRSの実験を一緒に行ってきた水落千彰さんにも感謝いたします。それから、それぞれの目標に邁進している博士の仲間たち、卒・修了生たち、現役のメンバーたちとは、見えない絆で繋がっているようでとても心強い思いをしてきました。これらのことに、またメンバー全てに、深く感謝いたします。

電気通信大学の職員の方々

にも支えていただきました。日々の業務においても、学生としても、多くの正職員や非常勤職員の方々の助けとお力をお借りし、ここまで進めてくることができました。心からの感謝を捧げます。

最後に

最愛の両親に。

きっと喜んでくれると思えるまで取り組ませてくれたことに感謝します。

2020年3月25日

矢吹 佳子

関連論文の印刷公表の方法及び時期

学術雑誌論文

1. Yoshiko Yabuki, Kazumasa Tanahashi, Yasuhiro Mouri, Yuta Murai, Shunta Togo, Ryu Kato, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, “Development of new cosmetic gloves for myoelectric prosthetic hand using superelastic rubber”, *Robotics and Autonomous Systems* , 111 (2019) 31–43, Elsevier, 2019
doi: 10.1016/j.robot.2018.09.004 [査読有]
(第3章, 第4章, 第5章に関係する)
2. 矢吹佳子, 棚橋一将, 星川英, 中村達弘, 姜銀来, 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手袋の開発”,
日本義肢装具学会誌 32 卷 3 号, pp.177-185, 2016
<https://doi.org/10.11267/jspo.32.177> [査読有]
(第3章, 第4章に関係する)

国際会議論文

1. Yoshiko Yabuki, Kazumasa Tanahashi, Suguru Hoshikawa, Tatsuhiko Nakamura, Ryu Kato, Yinlai Jiang and Hiroshi Yokoi, Development of new Cosmetic Gloves for Myoelectric Prosthetic Hand by using Thermoplastic Styrene Elastomer, The 14th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-14), pp..269-282, July 5, 2016 (口頭), [査読有]
Best Conference Paper Finalist 受賞
(第3章, 第4章に関係する)

参考論文の印刷公表の方法及び時期

国際会議論文

1. Yoshiko Yabuki, Kazumasa Tanahashi, Yuta Suzuki, Tatsuhiko Nakamura, Ryu Kato, Yinlai Jiang and Hiroshi Yokoi, Development of Artificial Skin for the Myoelectric Prosthetic Hand by using Hyper Elastic Materials with tactile sensor, The International Workshop on modern Science and Technology 2016(IWMST2016), pp.26-32, Nov.1, 2016 (口頭), [査読無]
(第3章, 第4章, 第5章に関係する)

国内学会発表

1. 矢吹 佳子, 馮 翔, 鎌田 舞花, 小畑 承経, 東郷 俊太, 姜 銀来, 横井 浩史, ”義手用装飾手袋の材質と物体把持性能に関する調査研究”, 第35回日本義肢装具学会学術大会, 仙台国際センター, 2019/7/14
(第4章に関係する)
2. 矢吹 佳子, 佐藤 洋二, 佐藤 哲也, 馮 翔, 鎌田 舞花, 小畑 承経, 東郷 俊太, 姜 銀来, 横井 浩史, ”筋電義手に適した義手用手袋の開発”, 第34回日本義肢装具学会学術大会, 名古屋国際会議場, 2018/11/10 (口頭)
(第4章に関係する)
3. 矢吹 佳子, 棚橋 一将, 鈴木 悠汰, 毛利 保寛, 日吉 祐太郎, 村井 雄太, 東郷 俊太, 姜 銀来, 加藤 龍, 横井 浩史, ”筋電義手用手袋の開発とその評価—センサ機能を持つ装飾手袋の実現—”, 東京, 第33回日本義肢装具学会学術大会, 2017/10/8 (口頭)
(第5章に関係する)
4. 矢吹 佳子, 棚橋 一将, 村井 雄太, 毛利 保寛, 叶 鶴松, 中村 達弘, 東郷 俊太, 姜 銀来, 加藤 龍, 横井 浩史, ”筋電義手用グローブの開発と評価”, 富山, 第37回バイオメカニズム学術講演会 1C-3-3, 2016/11/12 (口頭)
(第5章に関係する)
5. 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, 岡山, 2014/10/18-19. (口頭)
(第3章, 第4章に関係する)

学術雑誌論文

1. 村井雄太, 矢吹佳子, 石原正博, 高木岳彦, 高山真一郎, 東郷俊太, 加藤龍, 姜銀来, 横井浩史, ”残存指を利用できる手部筋電義手システムの開発 –設計手法の提案と試作–”, バイオメカニズム学会誌, Vol43.No.2, pp..124-133, 2019[査読有]
2. Yutaro Hiyoshi, Yuta Murai, Yoshiko Yabuki, Kenichi Takahana, Soichiro Morishita, Yinlai Jiang, Shunta Togo, Shinichiro Takayama, Hiroshi Yokoi, ”Development of a Parent Wireless Assistive Interface for Myoelectric Prosthetic Hands for Children”. *Front. Neurorobot.* 2018 doi: 10.3389/fnbot.2018.00048 [査読有]
3. 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, 高木岳彦, 高山真一郎, 横井浩史, ”個性適応型制御法を用いた幼児・子供用義手の開発”, 運動器リハビリテーション, pp..302-311, Vol.29, No.3, 2018 [査読無]
4. 高木岳彦, 高山真一郎, 矢吹佳子, 加藤龍, 横井浩史, ”上肢欠損, 切断患者における筋電義手を用いた治療の実際 -Targeted muscle reinnervation における今後の展望-“, 運動器リハビリテーション, pp..287-291, Vol.29, No.3, 2018 [査読無]

国際会議論文 [査読有]

1. Xiaobei Jing, Xu Yong, Yuankang Shi, Yoshiko Yabuki, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, “A Gear-Driven Prosthetic Hand with Major Grasp Functions for Toddlers”, 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2019), Macau, Nov.5-8, 2019 (口頭)
2. Yoshiko Yabuki, Yuta Murai, Yusuke Yamanoi, Xiaobei Jing, Xu Yong, Yuankang Shi, Shunta Togo, Yinlai Jiang, Takehiko Takagi, Shinichiro Takayama and Hiroshi Yokoi, “Development and evaluation of a myoelectric prosthetic hand adaptable to individuality for Children”, International Society for Prosthetics and Orthotics (ISPO) 17th World Congress, Kobe, Oct.8, 2019 (口頭)
3. Yasuhiro Mouri, Yuta Murai, Yoshiko Yabuki, Takumi Kato, Hideki Ohmae, Yoshihiro Tomita, Shunta Togo, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, “Development of new flexible dry electrode for myoelectric sensor using conductive silicone”, 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems, pp.478-482, Shenzhen, China, Oct.25-27, 2018 (口頭)
4. Chiaki Mizuochi, Yoshiko Yabuki, Yasunori Mouri, Shunta Togo, Soichiro Morishita, Yinlai Jiang, Ryu Kato and Hiroshi Yokoi, “Real-time cortical adaptation monitoring system for prosthetic rehabilitation based on functional near-infrared spectroscopy”, 2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS 2017), pp.. 130-135,

Beijing, China, Oct.17-19, 2017 (口頭)

5. Yuta Murai, Yoshiko Yabuki, Masahiro Ishihara, Takehiko Takagi, Shinichiro Takayama, Shunta Togo and Hiroshi Yokoi, "Designs of Tailor-Made Myoelectric Prosthetic Hand for Trans-Metacarpal Amputations with Remaining Fingers and Joint Moving Functions", 2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS 2017), pp..119-124, Beijing China ,Oct.17-19, 2017, (口頭), Best Student Paper Award 受賞
6. Yinlai Jiang, Yuta Murai, Taihei Kuwahara, Shunta Togo, Yoshiko Yabuki, and Hiroshi Yokoi, "Conductive Silicon Based sEMG Sensor for Myoelectric Control of Prosthetic Hands: Structure Design and Evaluation", The 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (IEEE RCAR 2017) , pp..383-387, Okinawa, July 14, 2017 (口頭)
7. Hesong Ye, Xiang Feng, Yoshiko Yabuki, Shunta Togo, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, "Force-Magnification Mechanism with Artificial Tendon Sheath for Myoelectric Prosthetic Hand for Children", the 2016 IEEE Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2016), pp. 533-538, Dec.7, 2016 (口頭)
8. Yuta Murai, Suguru Hoshikawa, Shintaro Sakoda, Yoshiko Yabuki, Masahiro Ishihara, Tatsuhiro Nakamura, Takehiko Takagi, Shinichiro Takayama, Yinlai Jiang and Hiroshi Yokoi, "Development of a Myoelectric Hand Incorporating a Residual Thumb for Transmetacarpal Amputees" , The 14th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-14), pp.. 977-990, July 6, 2016 (口頭)
9. Suguru Hoshikawa, Yinlai Jiang, Ryu Kato, Soichiro Morishita, Tatsuhiro Nakamura, Yoshiko Yabuki, and Hiroshi Yokoi, "Structure design for a two-DoF myoelectric prosthetic hand to realize basic hand functions in ADLs.", The 37th Annual International Conference of theIEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2015), pp.4781-4784, Aug.27, 2015 (口頭)
10. Yinlai Jiang, Shintaro Sakoda, Suguru Hoshigawa, Hesong Ye, Yoshiko Yabuki, Tatsuhiro Nakamura, Masahiro Ishihara, Takehiko Takagi, Shinichiro Takayama, and Hiroshi Yokoi, "Development and evaluation of simplified EMG prosthetic hands", 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) , pp.1368-1383, Dec.14, 2014 (口頭)

著者略歴

矢吹 佳子（やぶき よしこ）

兵庫県姫路市に生まれる

フェリス女学院大学文学部国文学科卒業

2018年4月

電気通信大学大学院情報理工学研究科博士後期課程

入学試験出願資格審査，入学試験を経て

機械知能システム学専攻入学

2020年3月

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博士後期課程 修了