

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「不特定形状のワークを把持可能なフレキシブル構造を有する
低コストなエンドエフェクタの開発」

研究開発成果報告書

平成24年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 ダブル技研株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 本研究開発の取り組みについて
- 1-2 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-3 実施内容
- 1-4 FA仕様エンドエフェクタの開発概要
 - 1-4-1. エンドエフェクタ仕様についての開発課題
 - 1-4-2. 3指FA仕様のエンドエフェクタについての開発成果
- 1-5 生活支援ロボット仕様のエンドエフェクタの開発概要
 - 1-5-1. フレキシブルハンドの生活支援ロボット用途としての実用化開発
 - 1-5-2. 義手用途としての適用・実用化開発
- 1-6 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1-7 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 1) 初年度に於けるフレキシブルハンドの把持性能の向上についての開発・成果報告
- 2) 最終年度に於けるFA仕様及び生活支援ロボット仕様エンドエフェクタの開発・成果報告

第3章 全体総括

- 3-1. 全年度（2年間）を通しての研究開発成果総括
- 3-2. 研究開発後の課題・事業化展開

第1章 研究開発の概要

1-1 本研究開発の取り組みについて

本研究開発では、多種多様なワークを扱う多品種生産ラインや搬送ラインなどにおける産業用ロボットに必要とされる設備導入費やランニングコストを抑える低コストなハンド、グリップとして、また、産業化が期待されている生活支援ロボットなどに適用可能なエンドエフェクタの開発を行った。

開発したエンドエフェクタは、従来の多指ハンドなどのエンドエフェクタと比較して必要とするアクチュエータやセンサの数を大幅に削減することができ、更に、複雑な制御を必要としないため、ティーチング時の工数を削減し、誤入力などによる人為的なミスを抑えることで、設備導入費やランニングコストを低減し、且つ安全性を向上させるものである。

前年度(平成22年度)には上記の把持性能向上のための“手のひら機構”を確立するにあたり、3タイプの機構を考案し、開発を行った。最終年度においてはこれらの開発成果を集約・反映し、市場ニーズに適合した仕様、機構、構造とすべく、その定量化した目標値として把持力を1.5Kg以上、サイズ・重量140[mm]×220[mm]×45[mm](手首部分を除く)、2Kg以下と設定して開発を進めた。

上記のエンドエフェクタを実用化し、先ずFA用途(生産ライン、搬送ライン用など)を対象としたエンドエフェクタの事業化に着手しており、将来には生活支援ロボット、極限環境化用ロボットへの適用などへの適用も範疇に入れた事業を計画している。

本研究開発ではこれらを念頭に、FA用途としての開発を主とし、後に生活支援ロボットなどへの事業展開が速やかに行える様、これらへの適用を見据え、以下をサブテーマとして研究開発を行った。

[開発サブテーマ]

- ①持動作時及び把持後の把持安定性の向上
- ②フレキシブルハンドへの人体の「手のひらの機構」(母指を他の指と対向させる、把持対象物を包み込む様に把持する動作のための機構)の追加
- ③ヒューマノイド型ロボットハンドとしての容姿の維持(軽量・コンパクト化、義手適用開発)

1-2 研究開発の背景・研究目的及び目標

生産ラインの現場から日常生活の場まで、様々な形状の物を把持することのできる装置が必要となる。例えば、生産の現場では、対象物を仕分けしたり、加工のために持ち上げたりする必要があるが、それを自動化するには、対象物に合わせて都度、専用の装置のために設備投資しなければならない。また、我が国の新規産業として期待されている生活支援ロボットについても把持対象物に合わせて都度変更する必要のないエンドエフェクタが必要となる。

本事業では、これらの課題解決のため、様々な形状の物を把持することができる安価なエンドエフェクタの実用化を目的とし、開発を行った。

その定量的な目標として、把持力の目標値を1.5kg以上、軽量・コンパクトの目標値としてアクチュエータ部を除くエンドエフェクタ機構部のサイズを140mm×220mm×45mm以内(義手用途の場合)として掲げ、初年度に確立した機構を基に目標値を網羅し、1つのアクチュエータにて様々な形状の物を把持可能なエンドエフェクタを実用化した。

本委託事業の最終年度となる最終年度では、上記の実用化においてエンドエフェクタの仕様を現在及び将来における市場ニーズを鑑みてFA仕様及び、生活支援ロボット仕様に絞り開発を進めて来た。以下に実施内容とともに、これら2つの仕様のエンドエフェクタの開発概要について説明する。

1-3 実施内容

本委託事業の初年度には、本事業にて開発したエンドエフェクタの把持性能の向上のため、既存のフレキシブルハンドに対して、人体にての母指を他の指に対向させたり、手のひらで包みこんで把持する様な機構を数種試作し、その評価を行った。この際、生活支援ロボットへの適用を考慮し、ハンドの仕様を5指として開発を進めて上記の機構を確立し、その次年度より、生活支援ロボット用のハンドの開発と並行し、この機構を応用したFA用途のハンドの開発を行った。以下にその実施内容を記す。

I. FA用途（生産ライン、搬送ライン用など）フレキシブルハンドの開発

- ① フレキシブルハンドの把持動作及び把持の安定性向上
- ② フレキシブルハンドへの「手のひら機構」の追加
(実施：ダブル技研株式会社、東京都立産業技術専門学校)

初年度に5指仕様にて②の機構を確立し、次年度よりFA用ハンドとしての実用化開発を行った。市場ニーズを反映し、FA仕様のハンドについては実用化まで完了し、製品化に着手している。

I-1. FA仕様ハンドの試作・評価：

I-1-1. FA用途に特化したフレキシブルハンドの機構・構造設計

FA用ハンドとして必要とされる前述の定量化目標値を含む仕様の実現のため、初年度開発の成果を反映したFA用ハンドの設計を行った。

I-1-2. 部分試作・評価

設計した機構・構造について試作し、その評価を行う。試作については開発スピードを速めるため、初年度本事業にて導入したRP造形機、切削加工機を用いてラピッドプロトタイピングの手法にての試作を行い、それについての必要な評価を得た。

I-1-3. 電装系・制御系設計

初年度に検討し採用に至ったコントロールボードにより、FA用途に特化し開発するハンドについて電装系ハード、ソフトを含め、その制御方法について都度の改良を行った。

I-1-4. FA仕様ハンド試作機評価

試作機完成後、エンドエフェクタ単体としての評価を行う。エンドエフェクタ単体としての目標仕様満足した。

I-2. ロボットアーム実装にての実証試験・評価及び改良

I-2-1. ロボットアーム実装評価

上記フェーズ(I-1)にて試作したハンドについて、FA用途としての実装形態として頻度の高いロボットアームへ実装しての実証試験評価を行い、必要な情報を得た。

I-2-2. 機構・構造設計、試作、実装評価

上記評価により顕在化した機構・構造における課題に対し、該当部位について再設計、試作、実装評価を行い、都度、課題解決した。

I-2-3. 電装系・制御系設計

上記評価により顕在化した電装系・制御系における課題に対し、実装評価を行い、都度、課題解決した。

I-2-4. 最終評価

上記課題を解決した評価機を製作し、ロボットアーム実装にての最終試験・評価確認し、要求仕様を満足した。

II. 生活支援ロボット用フレキシブルハンドの開発

③ ヒューマノイド型ロボットハンドとしての容姿の維持（コンパクト・軽量化、義手適用開発）

（実施：ダブル技研株式会社、東京都立産業技術専門学校）

事業化時におけるラインナップ戦略・バリエーション展開のため、本開発におけるフレキシブルハンドの義手を含めた生活支援ロボットへの適用を念頭に、初年度の研究開発成果を反映し、コンパクト・軽量化を含め、実用化のための開発を行い、その要求仕様を満足した。

II-1. フレキシブルハンドの生活支援ロボット用途としての実用化開発

初年度評価により顕在化した機構・構造における課題に対し、該当部位について再設計、試作、実証評価の工程を必要に応じ繰り返し、課題解決した。

II-2. 義手用途としての適用・実用化開発

義手適用についてはその形態が多岐に渡るため、本開発のフレキシブルハンドについて、人体における代表とする表面筋電位信号による把持操作試験にて、その適用性についての検証を行い、義手用途としての展望を確認した。

II-2-1. 義手用途ハンド試作

上記フェーズにて機構・構造を確立したハンドについて、義手適用のための機構・構造、インターフェース設計、試作評価を行った。

II-2-2. 実証試験・実用化手法の確認

上記試作機により、表面筋電位信号による把持操作の検証試験を行い、事業化時のバリエーション展開時に活用するため、その実用化の可能性について確認した。

III. プロジェクトの管理・運営（実施：ダブル技研株式会社）

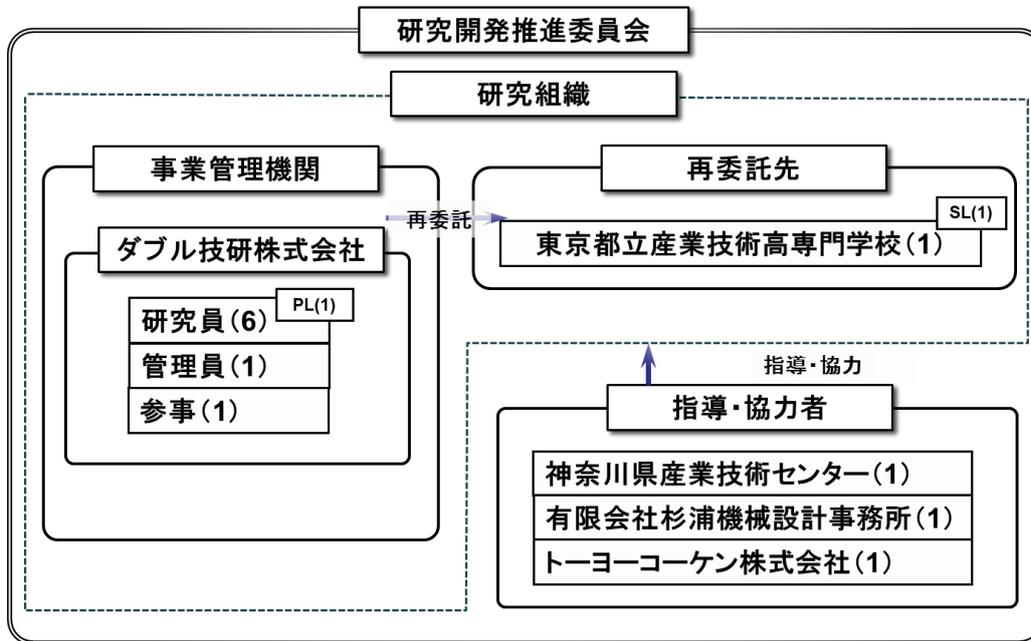
④ プロジェクトの管理・運営（実施：ダブル技研株式会社）

III-1. プロジェクトの管理・運営

- ・事業管理機関のダブル技研株式会社にて、本プロジェクトの管理を行う。プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、本報告書を作成した。
- ・本研究の実用化に向けた到達の度合いを検証するとともに、事業化に向け、市場にて必要とされる仕様等について調査し、これを本開発のエンドエフェクタへ反映した。
- ・再委託先事業者が作成する証憑書類について、都度、指導・確認を行った。
- ・研究開発推進委員会を定期的開催した。

1-6 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

下記に本事業における研究組織及び管理体制についての組織図を示す。
事業管理機関及び再委託先から成る研究組織は協力者からアドバイスを受け、また、これら各機関の代表により構成される研究開発推進委員会によりその運営が管理されている。



括弧内は構成人数

各機関における構成員は下記の通り。

〔事業管理機関〕 ダブル技研株式会社

〈構成員〉

- ・和田 博 (PL)
- ・松野 暁 (管理員, 業務管理者)
- ・池上 英文 (参事)
- ・山田 賢 (主任研究員)
- ・大堀 有礼 (副主任研究員)
- ・有光 豊範 (研究員) 事業開始～H22.9月迄
- ・植野 一政 (研究員) H22.9月～H23.9月迄
- ・松田 和之 (研究員) H23.9月～事業終了迄
- ・和田 実 (研究員)
- ・松元 則夫 (研究員)

〔再委託先〕 公立大学法人首都大学東京 東京都立産業技術高等専門学校

〈構成員〉

- ・深谷 直樹 (SL)

[協力者]

1) 神奈川県産業技術センター

〈構成員〉

・安部 顕一 (アドバイザー)

2) 有限会社杉浦機械設計事務所

〈構成員〉

・杉浦 富夫 (アドバイザー)

3) トーヨーコーケン株式会社

〈構成員〉

・小澤 昭男 (アドバイザー)

1-7 当該研究開発の連絡窓口

・事業総括窓口

〈担当〉

- ・所属：ダブル技研株式会社／代表取締役
- ・氏名：和田 博
- ・電話：046-206-5611
- ・FAX.：046-253-7711
- ・E-mail：pwada@j-d.co.jp

・研究開発内容に関する窓口

〈担当〉

- ・所属：ダブル技研株式会社／開発・設計グループ
- ・氏名：山田 賢
- ・電話：046-206-5611
- ・FAX.：046-253-7711
- ・E-mail：s-yamada@j-d.co.jp

第2章 本論

開発したエンドエフェクタについて、初年度は把持性能を向上させるため、人体における母指を他の指と対向させたり、手のひらで把持対象物を包む様な動作を可能とする“手のひら機構”の開発を主として行い、これを確立した。本委託事業の最終年度には、この確立した機構によるその仕様を現在及び将来における市場ニーズを鑑みてFA仕様及び、生活支援ロボット仕様に絞り、開発を進め、その実用化に至った。本章では、これらの仕様のエンドエフェクタの開発内容、成果について説明する。

1) 初年度に於けるフレキシブルハンドの把持性能の向上についての開発・成果報告

初年度に於いては3案（A案、B案、C案）のエンドエフェクタについて平行して開発を行った。

以下に各案についての研究内容及び成果等を記す。

I. A案 研究内容及び成果報告

I-1. はじめに

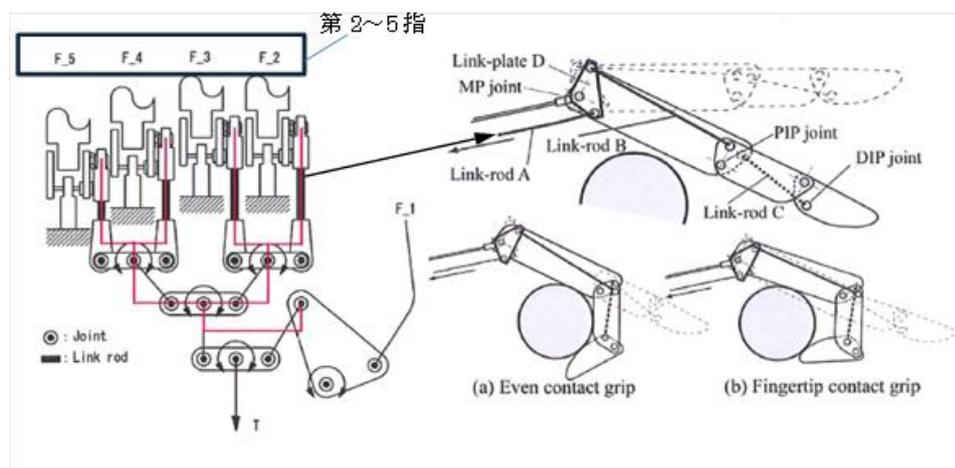
本案では従来のフレキシブルハンドに対して把持性能の向上を低コストにて実現するとともに、次年度のテーマの一つである義手用途等を考慮した「容姿の維持」の実現も見据え、人体の手の構造・機構を取り入れての開発を行った。これらの実現のための方策として、従来のフレキシブルハンドの1つのアクチュエータのみにて駆動する方式を踏襲しつつ、把持対象物の形状に応じた指の姿勢（握む、摘む等の姿勢）をとることのできる機構とすることとした。その具体的な方法として、人体での母指に相当するユニット（あるいは指先）を他の指に対峙させるために人体の母指CM関節にて司っている運動の内、本案のエンドエフェクタに必要な、指の姿勢をとるための機構及び、母指と他の指（第2、3指）と対峙させる機構の開発を行った。開発は上記の機能を実現するための機構について、これを構成するユニット毎にシミュレーション、原理試作、実装用部分試作の工程をラピッドプロトタイピングを用いてのトライアンドエラーにより試作・評価し、改良を進める方法にて行ってきた。（具体的には、各ユニットの原理試作、部分試作を1次試作、それをアセンブリしたトータルでの試作を2次試作として位置付けている。）

本A案の開発により、1つのアクチュエータにて、上記の母指CM関節の運動を従来のフレキシブルハンドに実装し、把持性能を向上するための「手のひら機構」を確立した。次年度に本開発により顕在化した後述の課題を解決し、更なる実用化開発を進める。

また、本開発の過程にて、本アクチュエータに採用している機構を応用したエンドエフェクタの発明に至ったのでこれを特許出願した。

I-2. A案開発の方針について

本案の開発にあたり、上記の機構を実現する上で後述の機構とした経緯について説明する。
既存のフレキシブルハンドでは図I-1の様に1つのアクチュエータの直動運動にて駆動させる
協調リンク機構により把持を行っている。

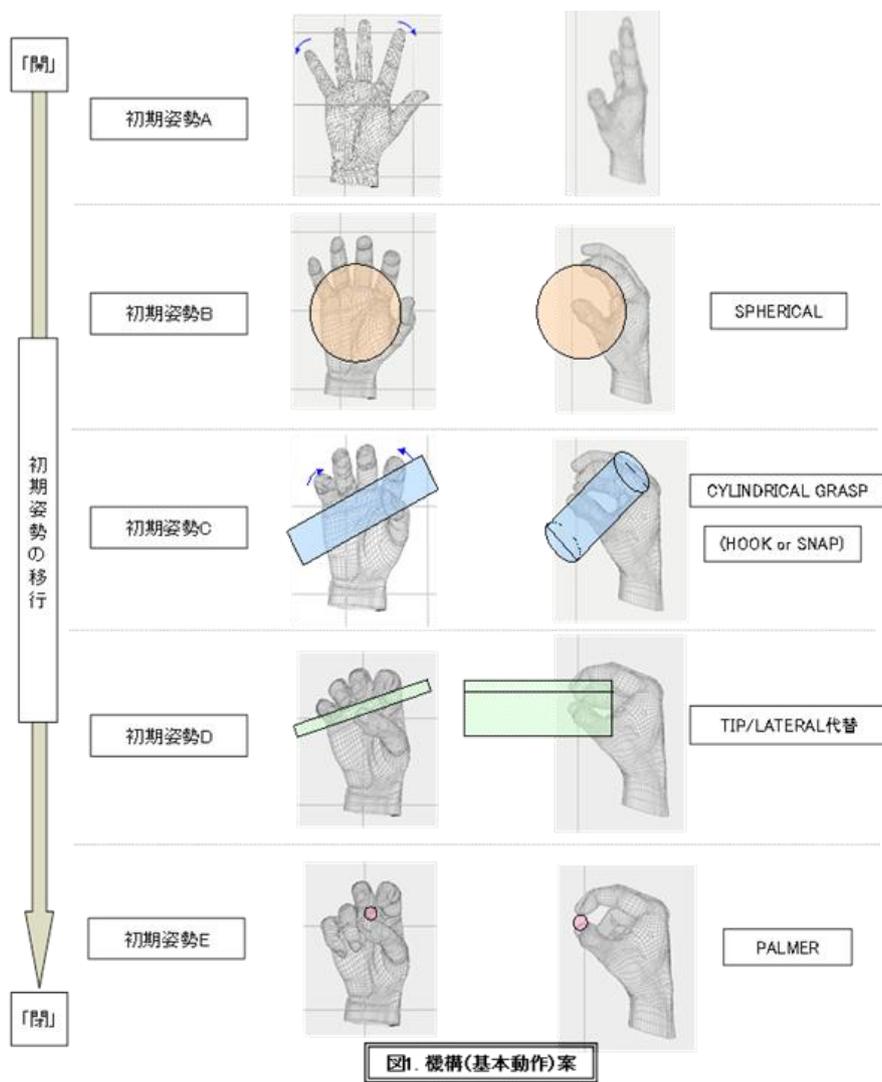


把持する際は、Aに作用する直動駆動系により、各Jointを介して各指のLink rodAが引かれる。
これにより、各指が把持対象物に逐次接触、拘束されることによって、対象物の形状に指が
馴染む形で把持することができる。

図I-1. 既存フレキシブルハンドの協調リンク機構

この既存のフレキシブルハンドでは拇指に相当する部位を他の指と対向させることができないため、把持は主に第2～5指により行っており、この拇指の運動に相当する機能を追加することで把持性能を向上させることができると考え、これを本事業のテーマの一つとしている。本案の開発では、把持性能向上のために、このフレキシブルハンドに『拇指を他の指に対向させた“摘む”ための姿勢』や、『“握る”または“掴む”などの拇指、拇指球などにより把持対象物を支えるための姿勢』をとるための機構を考案し、実装するための開発を主として行ってきた。

そこで、本案ではまず、低コスト、コンパクト化を念頭に、これらの追加機能についても元来の1つのアクチュエータにて行うことを考えた。これを実現するにあたり、強調リンク機構を用いたフレキシブルハンドの特徴である様々な把持対象物の形状に指が馴染んで把持できるという機能を維持しつつ、“掴む”、“握る”、“摘む”などの姿勢をとることができ、且つこれを1つのアクチュエータで行うために、図I-2の様にハンドが開いた状態から閉じた状態となる過程でこれらの各々の姿勢を作ることができれば、元来の駆動系の起点は1自由度の直動運動であるので、その各姿勢に相当する位置についての単純なインデックス制御でコントロールすることができると考え、これを本案の基本方針とした。



図I-2. ハンドを開いた状態から閉じた状態までに各把持姿勢をとる過程

I-3. 一次試作（実施計画書にての項目①, ②）

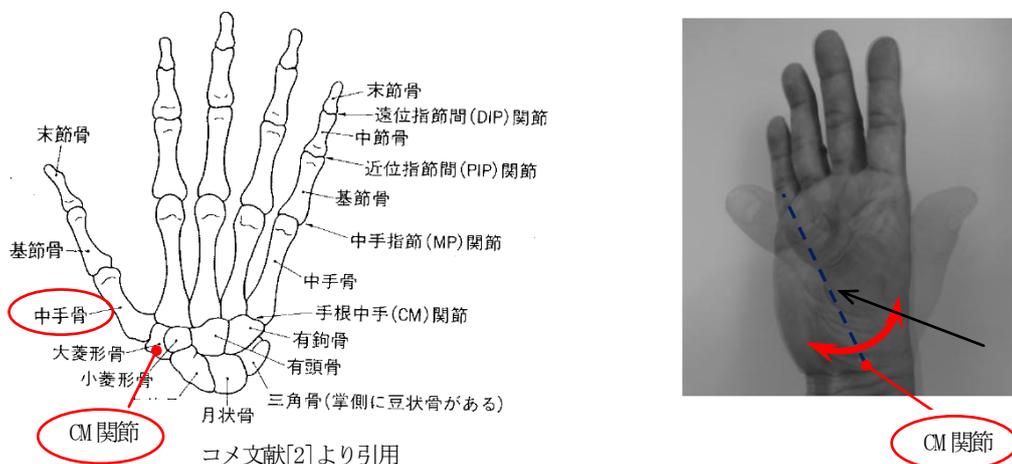
一次試作においては、協調リンク機構による把持動作と、本開発により追加する「手のひら機構」とを1つのアクチュエータにて行う機構の実現のため、主に下記の2つの機構についてモーションシミュレーション等による検討、機構・部品設計、原理試作、実装検討のためのユニットの部分試作を行った。

《上記目的のために主として考案し、開発を行った機構》

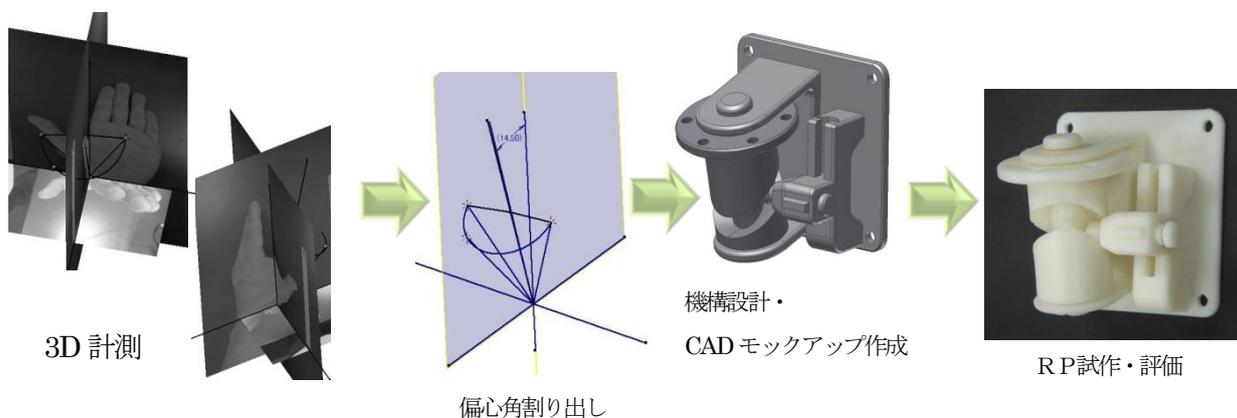
1) 「手のひら機構」

従来のフレキシブルハンドの駆動用の直動運動を利用して拇指を他の指に対向させるための機構を考案し開発を進めた。

具体的には、本開発のロボットハンドに必要な「手のひらの機構」すなわち、人体の拇指CM関節（下図A参照）により拇指が他の指と対向する際の観測点の座標を計測し、これを基にCM関節を中心として拇指の中手骨（下図A参照）を回転させる運動を近似的に再現させる機構を開発することとした（図B参照）。

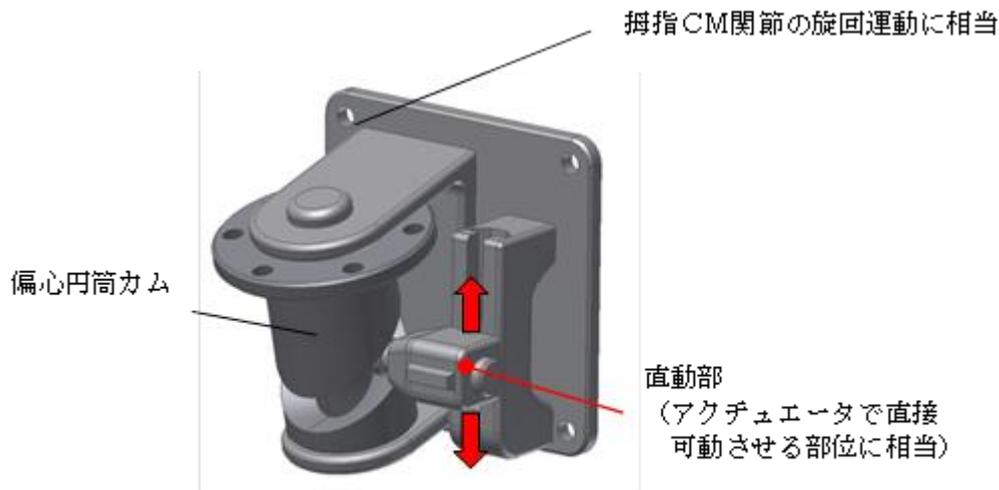


図A 拇指CM関節及び中手骨及びCM関節による拇指旋回運動の説明



図B 拇指CM関節運動の近似化プロセス（原理試作までの工程）

拇指に拇指対向性及び各把持姿勢のために必要な軌跡をとる旋回運動をさせるためには、前述の直動運動をその方向に対して偏角を持った回転運動に変換する必要があった。このため、図 I-3 に示す様な偏心円筒カムをシミュレーションを経て設計・試作し、拇指CM関節の近似的な旋回運動の再現についての評価を行い、直動駆動系からの意図する旋回運動の抽出可能なことを確認し、本機構を採用することとした。



原理試作用データ (CAD 上での動作確認のためのシミュレーション兼 RP 用) データ

図 I-3. 拇指CM関節の旋回運動を近似的に再現するための機構

2) 「各把持姿勢をとるための機構」

様々な形状の対象物を把持可能とするには、把持する形態に合わせた手の姿勢をとれる事が必要となる。例えば“摘む”、“掴む”、“握る”動作などは各々の動作を行うための初期姿勢をとれることが必要となり、これには本案のハンドにおいては、少なくとも前述1)の「手のひら機構」の他、I-2図の工程にある様な第4, 5指を第2, 3指に対して相対的に屈曲させた姿勢をとることができる機構が必要となり、更には図 I-4 に示す様な指の離開に相当する機構を追加することで把持可能となる対象を拡張することができる。と考える。

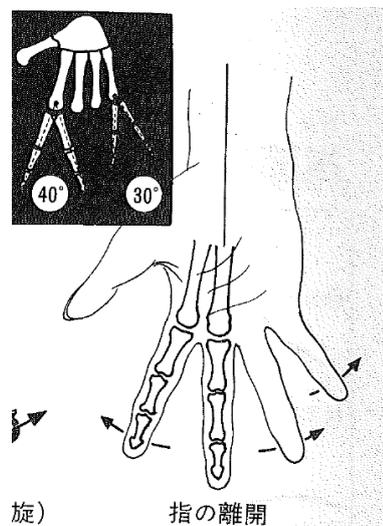
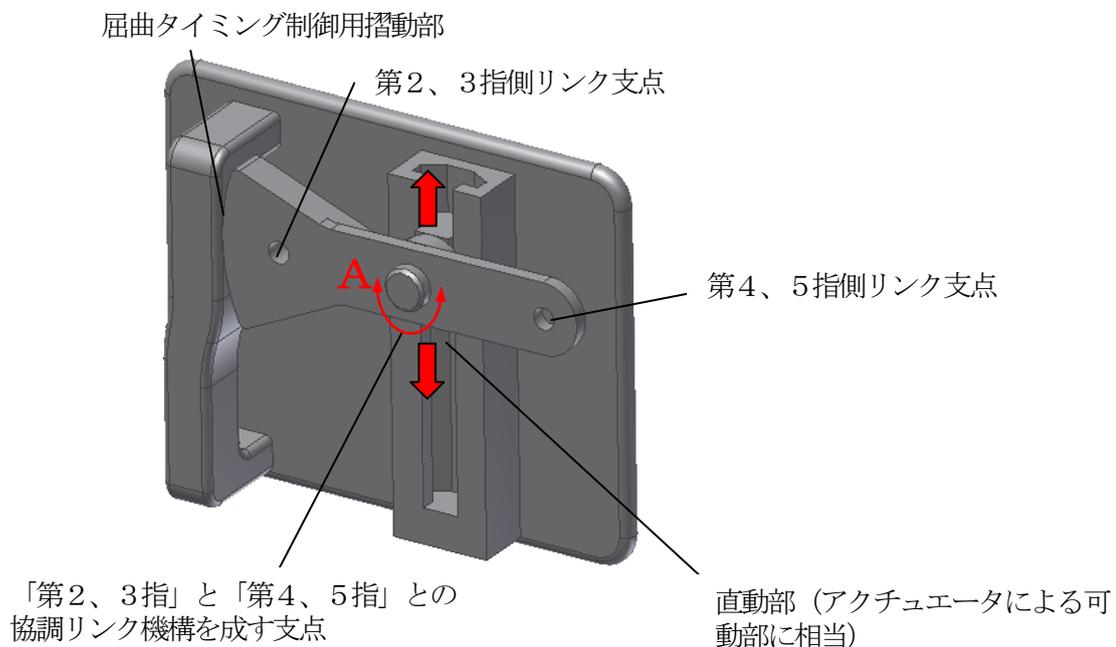


図 I-4. 指の離開 (※文献[1]より引用)

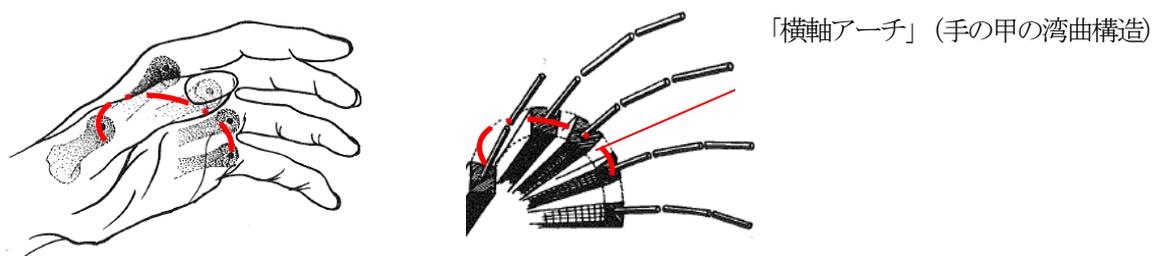
この内、第4、5指を第2、3指に対して相対的に屈曲させた姿勢をとるための機構について、これについても1つのアクチュエータにて行い、且つ協調リンク機構を損なわずに成立させる一つの方法として、一部の指の屈曲のタイミングを遅延させる機構を考案し、この一次試作では、その設計から原理試作、評価までを行った。考案した機構を図I-5の原理試作時の概要図にて説明する。

図中の支点Aは前述の既存ハンドにおける強調リンク機構の説明図（図I-1）での支点Aに相当する。直動駆動系により強調リンクの支点Aが下がり、「第2、3指」側若しくは「第4、5指」側の指のいずれかが把持対象物に接触することにより拘束された後、Aが更に下がると、拘束されていない側の支点が相対的に下がり、他の指が順次把持対象物に接触するまで稼動する。ここで、図I-5に示す「屈曲タイミング制御用摺動部」を設けることで、ハンドが開いた状態から閉じた状態に至る過程で指が把持対象物に接触しなければ、摺動部の摩擦により、「第4、5指側」に対して「第2、3側」の指の屈曲に遅延が生じることになる。いずれかの指が把持対象物に接触する場合には、摺動部は完全に拘束されてはいないため、強調リンクとしての機能を損なわずに対象物の形状に沿った形での把持が可能となる。この摺動部の形状により、上記の指の相対的な屈曲のタイミングを調整可能となり、例えば“摘む”ための「第4、5指」を屈曲させ、「第2、3指」を伸展側に近い姿勢をとることを可能とする。



図I-5. 指の伸展・屈曲のタイミング調整のための機構の原理試作データ

その他、把持性能向上のための構造・機構として、前述の「指の離開機構」や、人体における把持のための構造の一つである「横軸アーチ構造」(図I-6参照)を取り入れている。



図I-6. 横軸アーチ構造 (※文献[1]より引用)

図 I-7 に「指の離開機構」及び「横軸アーチ構造」についての原理試作時のデータ，試作品を示す。



図 I-7. 「指の離開機構」及び「横軸アーチ構造」についての原理試作品

I-4. 二次試作概要 (実施計画書にての項目①, ②)

前述の一次試作にて試作した各ユニットの構造を反映したハンドの設計，試作評価を行った。

(図 I-8 に試作したハンドの外観写真を示す。)

今回の試作では把持動作のための直動駆動系は従来のフレキシブルハンド同様、ボールネジを採用しているが、「手のひら機構」の運動のための伝達系統について、第2～5指の強調リンク用のボールナットと分離した別系統を設けることで把持動作の際の拇指の他の指との対向のタイミングを調整可能とした。(図 I-9)

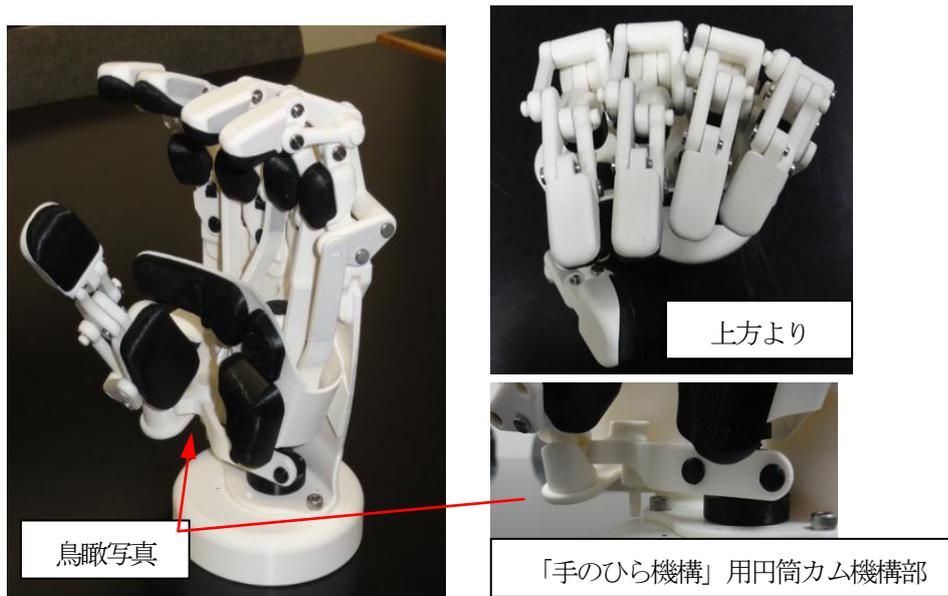


図 I-8. 二次試作ハンド外観

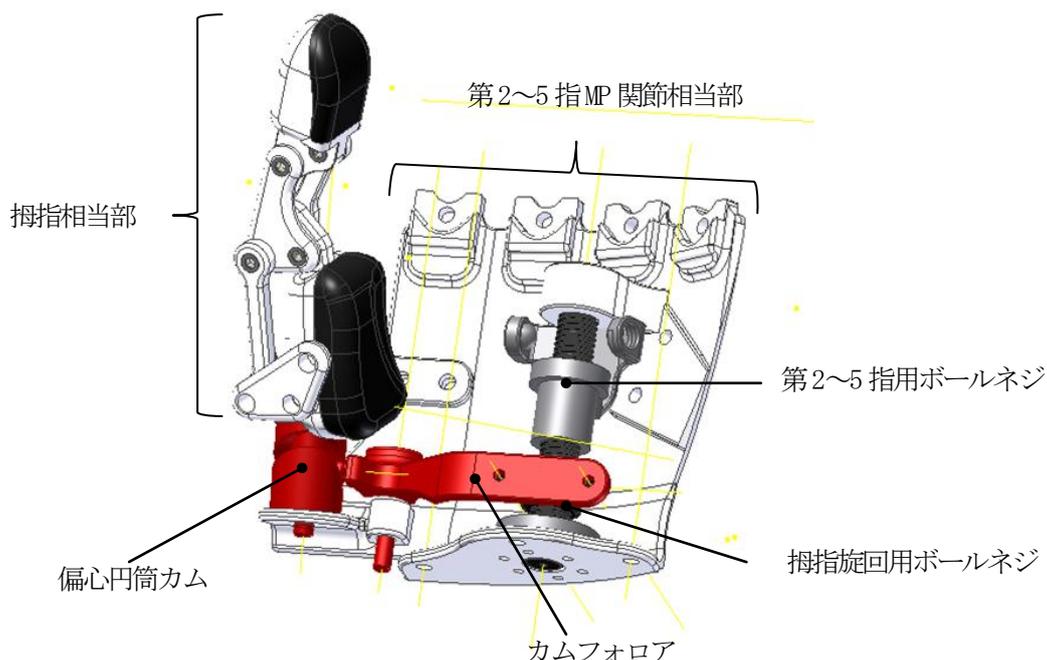


図 I - 9. 「手のひら機構」の駆動系統

I-5. 課題について

本案のハンド開発において、以下の課題が顕在化した。次年度の開発については、A、B、C各案の技術・ノウハウを集結しての開発、或いは実用化時のバリエーションを考慮しての各個別の開発を続行するかなどを熟考し、開発方針を決定することになるが、個別の開発を選択した場合に本案にては、これらが次年度の解決すべき課題となると位置付けている。

《本案にて顕在化した課題》

①フレキシブルハンドの把持動作及び把持後の安定性向上について

①-1 :

把持のための指の姿勢をとるタイミングの調整機構の確立。

当該部位には樹脂部品の摩擦を利用した摺動機構を用いているが、その調整の方法の確立には至らなかった。課題解決の方策としては、摺動部の摩擦係数と指の姿勢との相関の関数の確立または、摺動部の可動による調整機構の追加を検討している。

②-2 :

第2～5指の内外転について、指自体の自重等による姿勢に対しての外乱抑制機構(重力補償機構)の確立。方策としてダンパ追加等による補償を検討している。

②フレキシブルハンドへの「手のひら機構」の追加について

②-1 :

上記 1-1, 1-2 の項目及びコンパクト化とのトレードオフ問題の解決。

駆動系が少ない分、これらを含むトータルでのエンドエフェクタとしての占有体積は抑えられているが、その分、機構部品がハンドに集約される形となるため、コンパクト化の阻害となっている。解決のための方策として、レイアウトの再考及び構成部品形状の最適化を検討している。

②-2 :

各把持姿勢の最適化。

本案のハンドは、複数のアクチュエータを使用するハンドと比較して把持のためにとることのできる姿勢が限られるが、例えば用途(FA 用、生活支援ロボット用等)に応じてバリエーションを持たせるための形状、姿勢の設計手法の確立までには至っていない。次年度より、今回開発し確立した機構について、実用における必要な形状、把持姿勢について改めて調査するとともに、その最適化を行う。

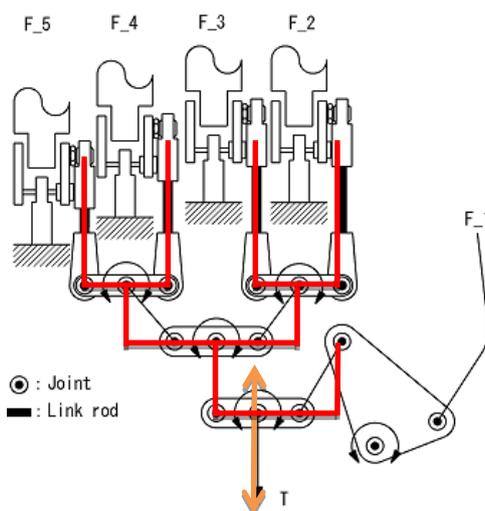
I-6. 参考文献

- [1] 中村隆一, 齋藤宏, 長崎浩 共著(2010)『基礎運動学 第6版』医歯薬出版株式会社
- [2] J. CASTAING, J. J. STANTINI 共著 /井原秀俊, 中山彰一, 井原和彦 共訳(1986)
『図解 関節・運動器の機能解剖 上肢・脊柱編』共同医書出版社

II. B 案 研究内容及び成果報告

II-1. 緒言

開発機関であるダブル技研株式会社が開発を行なっているロボットハンドは各指関節へ繋がる駆動伝達経路を天秤型のリンクで拘束することにより1個のアクチュエータで“握る”動作を実現するロボットハンドである。駆動経路中に天秤型リンク（図II-1 協調リンク機構・概略図参照）を挿入することで、把持対象物の形状に沿って均一な把持力で把持することができる。この協調リンク機構は図II-1 に示すように各指への駆動伝達を逆ピラミッド形状に拘束し、逆ピラミッドの頂点部を直線運動させることによって“握る”という把持動作を実現することができる。これにより、従来の把持計画、制御プログラムが必要なくなり、最小減のアクチュエータ数なので低価格を実現することができる特徴を有する。



図II-1. 協調リンク機構・概略図

昨今までに開発を終えているロボットハンドは人指し指（Fin2）から小指（Fin5）までの各指に複合四節リンク機構を用いることで各々3関節を持つ。またこの複合四節リンク機構を用いることで各関節を同期動作させる構造である。また、親指（Fin1）については先に述べた協調リンク機構の一端に接合し1関節のみ微小回転動作を行なうが“握る”という把持動作における支点として把持動作を担っている。（図II-2）



図II-2. Flexible Hand

II-2. 開発課題の提起

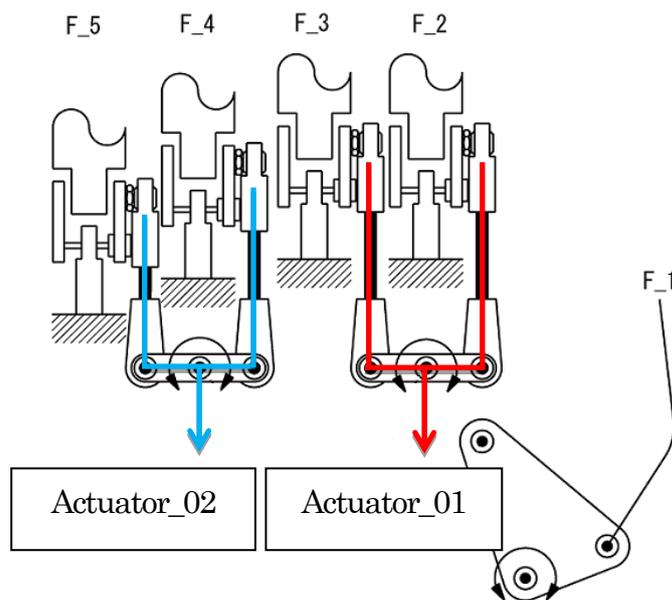
昨今までに私達が開発を行ってきたロボットハンドは小形物体や球体の把持動作および把持後の安定性に課題が残る。そこで、本開発では従来のロボットハンドの持つ特徴をそのままに、上記の課題を次の3項目を課題とし解決することを目標とする。本年度の開発においては下記の1)、2)について開発を行なうこととする。

- 1) ロボットハンドの把持動作及び把持後の安定性向上
- 2) ロボットハンドへの「手のひら機構」の追加
- 3) ヒューマノイド型ロボットハンドとしての容姿の維持

上記1)の『ロボットハンドの把持動作及び把持後の安定性向上』の課題を解決するために具体的に次に示すような解決策を検討した。

1-1) 人指し指 (Fin2) から小指 (Fin5) の4指・2自由度化

人指し指 (Fin2) & 中指 (Fin3) の組、薬指 (Fin4) & 小指 (Fin5) の組の各指を協調リンクで拘束し、各々にアクチュエータから駆動を伝達することで4指2自由度化する。この構造では従来の“握る”把持動作の時には5指で把持姿勢を取り、“摘む”把持動作を行なう場合には3指で把持姿勢を行なうように把持姿勢を2パターンに分けることにより小形物体の“摘む”把持動作を実現することができる。(図II-3)



図II-3. 4指2自由度の協調リンク機構

1-2) 指先部品の硬度と爪機能の確立

上記の“摘む”動作を実現するために人体同様、指先が柔らかくなければ床面に置かれた小形物体を摘み上げ把持することはできない。そのため、人体の肉球と同様に指先部品を柔軟な材料で製作し、床面に接触した時に床反力を受けて反り返ってしまわないように爪機能を追加する。この時、肉球の役割を果たす指先柔軟材部品の部品硬度と形状の関係、また爪機能の役割についても最適な機構を開発する必要がある。この機構によって、紙状の対象物であってもページを捲るような動作で把持動作を実現することができる。

1-3) 原点復帰機能の確立

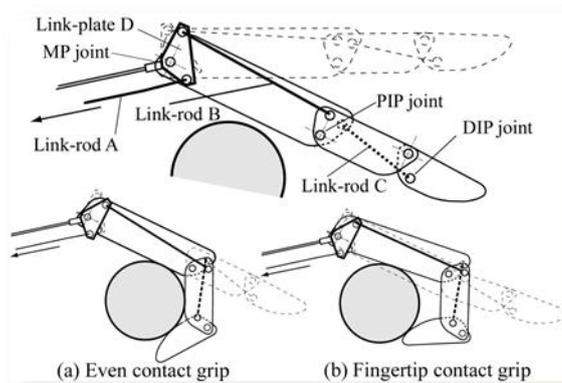
先に述べたロボットハンドは最小限のアクチュエータで“握る”把持動作を実現した。また、天秤型の協調リンク機構によって把持対象物体の形状に沿って各指が追従動作をするため、従来の把持計画が不要となる特徴を有する。その反面、ロボットハンドが手を開いた動作（原点位置）を行なった場合、各指の駆動伝達部品に繋がれた協調リンク機構は指関節の摺動摩擦抵抗のバラつきによってリンク拘束された協調リンクの天秤が傾き原点位置が定まらないという課題が残る。

そこで、この協調リンク機構の持つ『把持対象物の形状に各指が追従し物体形状に馴染む』という利点をそのままに、原点復帰の機能を確立し課題の解決を行なう。

1-4) 指構造の強度アップ

従来のロボットハンドは四節リンク機構を繋ぎ合わせた複合四節リンク機構を用いて人体構造と同様に1指あたり3関節を持つ。また片持ち支持機構によって人体と同程度の指幅を実現している。しかし、可搬重量、把持力を増加し把持特性試験を行なった結果、把持動作時に指関節を構成するリンク部品が撓むなどの現象が見られた。

本開発では課題の1つに『把持動作の安定性』を目標にしているため、指関節・及び手のひらと把持対象物の接触面積の増加を図る必要がある。そこで従来、片持ち支持機構で構成されていた指関節を両端支持機構に変更し、指関節の強度アップを実現する。



図II-4. 複合四節リンク機構

1-5) 拇指の多自由度化

従来のロボットハンドでは拇指のCM関節のみ可動関節としている。そのCM関節が協調リンクの一端に接合され1関節のみ微小な回転運動を行なうが“握る”という把持動作における支点として把持動作を担っている。

先に述べた“握る”把持動作と“摘む”把持動作では5指・3指での把持動作となり、それらの把持動作を行なう際に支点となる拇指は異なる位置にある。具体的には5指で“握る”把持動作時、拇指は中指・薬指の中間位置と対峙することになる。対して3指で人指し指・中指の中間位置と対峙する。これはIP関節を固定してCM関節が同様の軌跡を描きながら回転運動した場合である。通常、“握る”と“摘む”の動作に限らずロボットハンドの性能を考えた場合、拇指IP関節も可動関節とした方がより性能が上がるが、拇指と対峙する指との拮抗把持力の制御が複雑となり従来のロボットハンドの有する特長を相殺してしまうと考えた。

本開発では上記に記載した内容からIP関節については手動式の段換え機構を持たせ、MP関節・CM関節はそれぞれ独立制御可能な機構とした。

先述した本開発の課題2)『ロボットハンドの「手のひら機構」の追加』を解決するために具体的には次に示すような解決策を検討した。

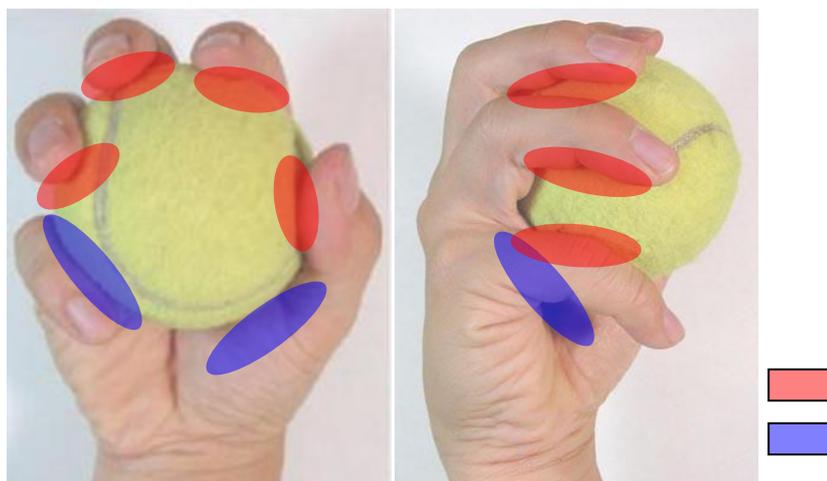
2-1) 薬指・小指の折れ曲がり機構（手のひら機構）の追加

開発機関であるダブル技研が従来開発を行ってきたロボットハンドは各指を固定する「手のひら」を平板状の部品で構成され完全に固定されたロボットハンドである。このロボットハンドだけでなく昨今、様々なメーカーや研究機関において研究・開発が進められているロボットハンドの多くは同じように平板状の物やケース状の手のひらで完全に固定したタイプが主流となっている。

しかし、ダブル技研の所有する従来型ロボットハンドの把持特性実験の結果から、「手のひら」が固定で指のみの把持動作では対象物体に接触する各指の力の分散が難しく、把持力を分散し均一な力で把持動作を行なうには、各指の接触面に圧力センサが必要となることが分かっている。

また、「手のひら」が平面形状で折れ曲がらないことで各指の回転方向は一軸方向にのみ限定されるので把持対象物との接触面積が小さく、把持可能な物体のサイズが限られてしまい把持不可、または把持できても不安定な把持になることが分かっている。

そこで本開発で課題とする「手のひら」機構を追加することで、可動関節を持つ各指は従来の機構以上に深く屈曲するので把持対象物体のサイズが限定されることはなく球体などの対象物に“握る”把持動作を行った場合においても、深く屈曲した指の側壁が対象物体と接触し結果的に接触面積が増加する。また「手のひら」が折れ曲がる（内転）することで対象物体を包み込むような動作が可能になり、従来のロボットハンドでは使用できなかった部分で接触面積が増加し把持後の安定性を向上させることができる。下記の図II-5における青色部分が增加する接触部分である。



図II-5. 手のひらの接触面積

本開発ではこの「手のひら機構」の特徴と従来の協調リンクが持つ対象物体の形状に追従する機構を合わせることによって、センサレスで把持計画のいらぬロボットハンド機構の開発を目標とする。

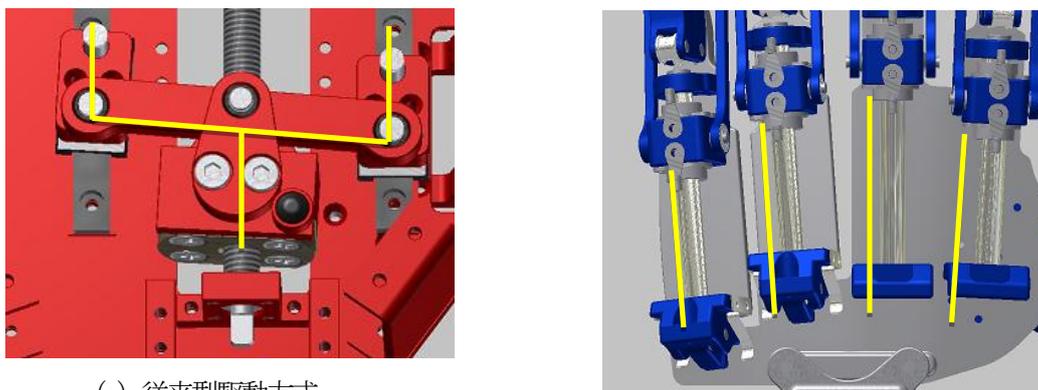
II-3. 課題の解決方法

本項目では先に述べた課題について、本年度の具体的な解決手段と実施した開発結果について記載する。

1-1) Fin2 から Fin5 の4指・2自由度化の解決策

先に述べた「手のひら機構」は Fin 4 および Fin 5 をそれぞれ独立可動で把持物体の形状に沿った形で折れ曲がる機構である。従来のロボットハンドでは、平面形状の「手のひら」であったので“手の甲”に駆動伝達機構と協調リンク機構を収納することが可能であった。しかし、本開発においては、「手のひら機構」の特性上、“手の甲”に協調リンク機構を収納することは難しい。

そこで本年度は、従来のリンクロッドでの駆動伝達方法をワイヤ駆動に変更した。各指に駆動伝達のリンク機構を設けてアクチュエータからの駆動はワイヤで伝達することにした。下記図 II-6 に駆動方式の比較図を示す。



(a) 従来型駆動方式

図 II-6. 駆動伝達方法の比較

また、協調リンク機構は手首より下側に配置されるアクチュエータ付近に配置することにした。従来の天秤型のリンク構造ではなく線形バネとプーリを用いた協調機構に変更し、従来のロボットハンドが持つ物体形状に馴染む特性を維持した。(図 II-7 参照)

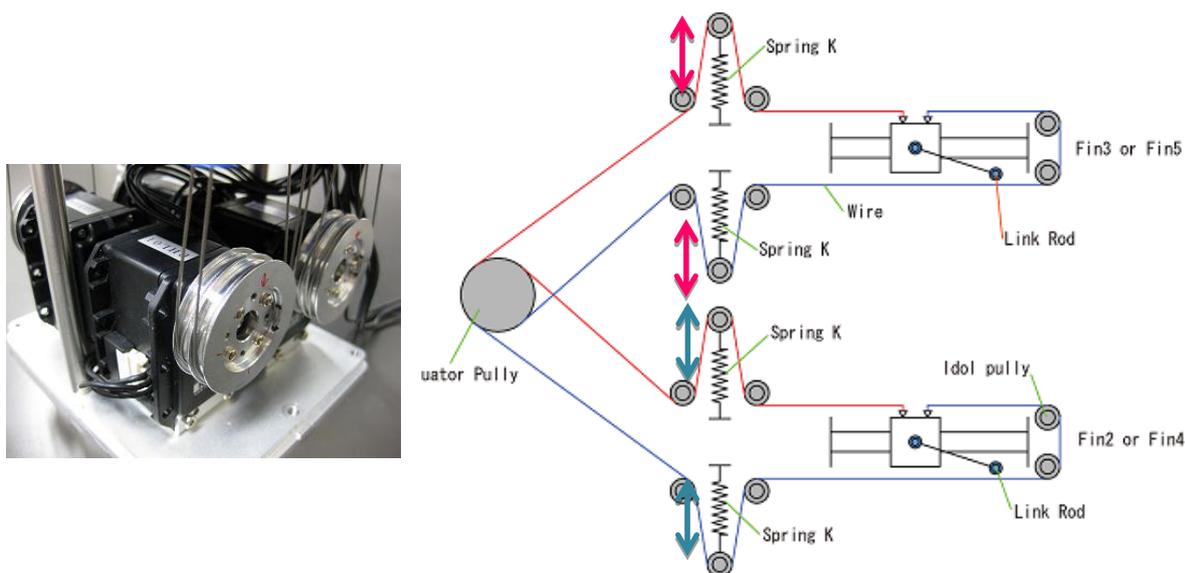


図 II-7. ワイヤ駆動における協調機構

この機構は上記 2B-2 にて記載したように Fin 2 & Fin 3 の組と Fin 4 & Fin 5 の組に各々配置する。この機構は 1 組に対して 1 個のアクチュエータを配置し、ワイヤ 1 本を 1 指の機構に引き回すことで成り立つ。従って、1 組のアクチュエータ出力軸には 2 個のプーリと 2 本のワイヤが存在する。このワイヤの引き回しによって各指駆動用のリニアガイドが前後に可動することによってリンクロッドが複合四節リンク機構の一端に駆動を伝達し、各指が開閉動作を行なう。

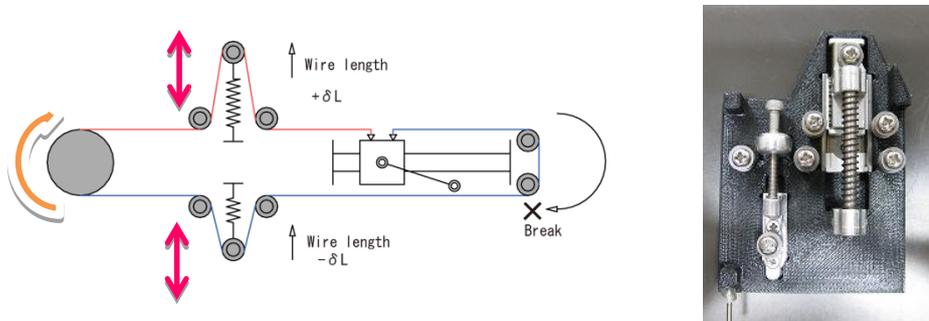


図 II - 8. 協調機構の概略図と写真

上記図 II - 7 は指 1 本に取付ける協調機構の概略図である。これに示すように各指が把持対象に干渉した場合、アクチュエータ側が回転する限り「引き」「送り」のワイヤ長は変わるがリニアガイドは動かない。そこで、変化するワイヤ長をこの協調機構で吸収する仕組みである。上記の青い線（引き）のワイヤはリニアガイドが動かないとワイヤ長が短くなる。逆に赤い線（送り）側のワイヤ長は長くなってしまふ。このワイヤ駆動経路中に線形バネとアイドラープーリから成る協調機構を挿入し、ワイヤ長の変化分を協調機構で吸収することで、従来の協調リンク機構と同様の馴染み動作が実現できる。

1-2) 指先部品の硬さと爪機能の確立化

先に記載したが“摘む”動作を実現するために人体同様に指先が柔らかくなければ床面に置かれた小形物体を摘み上げ把持することはできない。また人体構造と同様に柔軟な指先部品と把持物体に接触した時に反らないに爪機能を追加した。この時の肉球の役割を果たす指先柔軟材部品の部品硬さと形状の関係が重要になるが、今年度は材質をポリウレタンとし、硬度をショア A20、A30 の 2 種類で製作した。柔軟材部品は注形型にて製作したがショア A20 の硬度であると型から剥離する時に部品端が切れてしまうため、加工方法についても考慮しながら部品形状を決定する必要がある。この硬度についてはショア A20 の硬度の方がより人体の肉球に近い硬度であり、把持特性の向上についても期待が持てる。次年度に予定している把持特性試験によって評価・検討する。

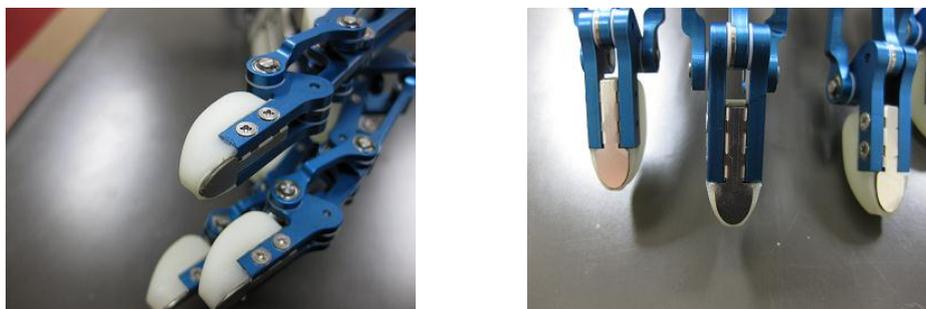
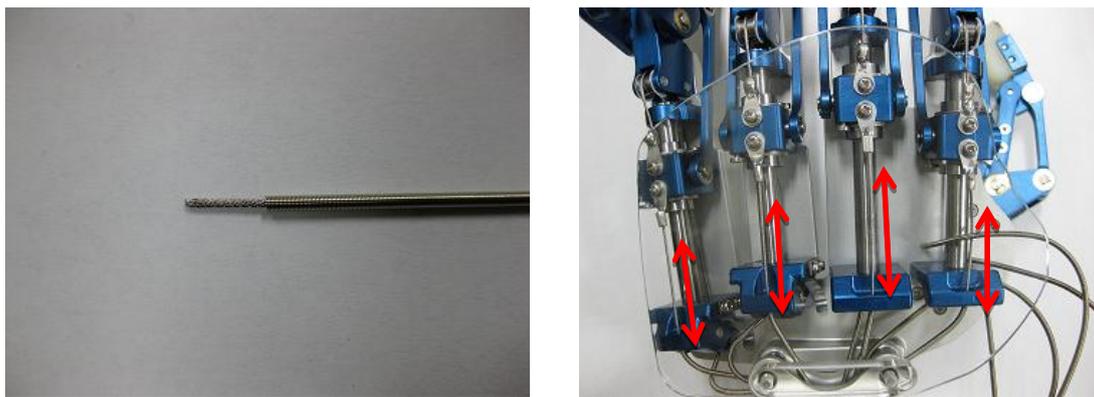


図 II - 9. 指先柔軟部品と爪機構

1-3) 原点復帰機能の確立化

本開発におけるロボットハンドの協調機構は先に記載した図Ⅱ-6に示す通り、ワイヤ駆動方式を用いた機構である。この機構は、対となる指関節の一端にリンク部品を取付けることで駆動伝達を図る。また、従来の天秤型協調リンクの代わりにワイヤの伝達経路中に挿入する強調機構は線形バネとアイドラーパーリで構成される機構である。この時、対になる指駆動伝達ワイヤを1個のアクチュエータに接続し、「引き」・「送り」の両引き機構(図Ⅱ-10(b)参照)で駆動を行ない強調機構の線形バネがテンショナーの役目も果たすため、確実な原点復帰を実現することができる。

本開発で製作したロボットハンドは手とアクチュエータを収納する手首部が離れているためにワイヤガイドに密着バネをアウターチューブ(図Ⅱ-10(a)参照)として使用した。これによって、各指ユニットの可動部とアクチュエータプーリの間を接続し駆動伝達を可能とした。



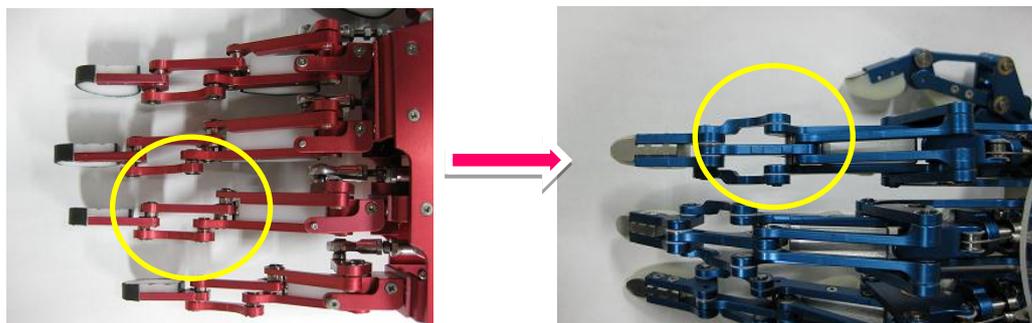
(a) アウターチューブ

(b) 両引き機構

図Ⅱ-10. アウターチューブと両引き機構

1-4) 指構造の強度アップ課題への解決策

従来のロボットハンドは四節リンク機構を繋ぎ合わせた複合四節リンク機構を用いて人体構造と同様に1指あたり3関節を持つ。また片持ち支持機構によって人体と同程度の指幅を実現している。しかし、把持特性試験を行なった結果、指を構成する複合四節リンク部品の強度アップが課題として挙げられた。そこで従来のロボットハンドは各指関節を片持ち支持機構で構成していたが、これを両端支持機構に変更し、従来と変わらない指幅で指関節の強度アップを実現した。次年度初頭に把持特性評価を行い、強度の確認を行なう。

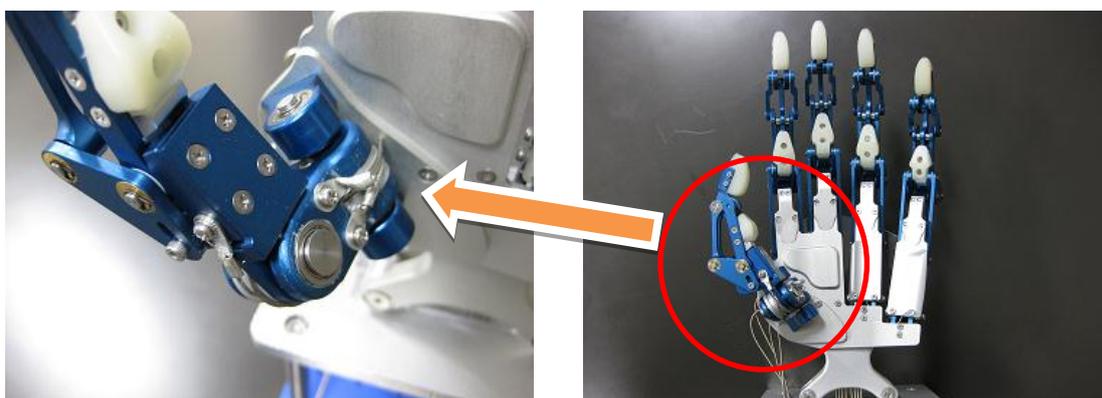


図Ⅱ-11. 両端支持機構の指

1-5) 拇指の多自由度化課題への解決策

従来のロボットハンドでは拇指のCM関節1関節のみ微小な回転運動を行ない“握る”という把持動作における支点として把持動作の補助を行なっていた。これは逆ピラミッド型の協調リンク機構の一端に接合し、駆動を分岐させて成し得ていた動作である。しかし、本開発の課題である“握る”把持動作と“摘む”把持動作の両立では、それぞれ5指・3指での把持動作となり、それらの把持動作を行なう際に支点となる拇指は異なる位置にある。具体的には5指で“握る”把持動作時、拇指は中指・薬指の中間位置と対峙することになる。対して3指では人指し指・中指の中間位置と対峙する。これはI P関節を固定してCM関節が同様の軌跡を描きながら回転運動した場合である。通常、“握る”と“摘む”の動作に限らずロボットハンドの性能を考えた場合、拇指I P関節も可動関節とした方がより性能が上がるが、拇指と対峙する指との拮抗把持力の制御が複雑となり従来のロボットハンドの有する特長を相殺してしまうと考えた。

そこで本開発では、上記に記載した理由からI P関節については手動式の段換え構造の回転軸機構を持たせ、各々の角度での把持特性を評価し、最終的に角度を固定にする方法を取った。また、MP関節・CM関節はそれぞれ独立にアクチュエータを持ち、独立制御可能な機構とした。このMP関節については、制御方法として3指・5指の把持を選択しその把持方法に応じて角度を変更するような制御方法とするため、自動運転での把持動作では2パターンの角度しか存在させないようにする。(単動【JOG運転】時には任意の角度に変更可能)



図II-12. 拇指の多自由度化

2-1) 薬指・小指の折れ曲がり機構(手のひら機構)の追加方法

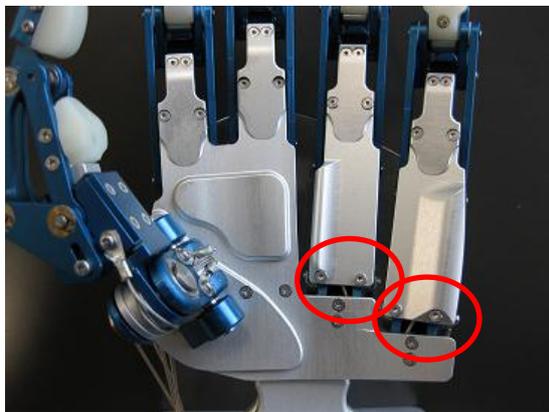
従来開発を行なってきたロボットハンドは各指を固定する「手のひら」を平面板状の部品で固定されたロボットハンドである。昨今、様々なメーカーや研究機関において研究・開発が進められているロボットハンドの多くも同形状のタイプが主流となっている。

しかし、ダブル技研の所有する従来型ロボットハンドの把持特性実験の結果、圧力センサを使用せずに指のみの把持動作では対象物体に接触する各指の力の分散が難しいことが分かっている。また、「手のひら」が平面形状であることで把持対象物との接触面積が小さく、把持可能な物体のサイズが限られてしまうことが分かっている。

そこで「手のひら」機構を追加し、各指を従来の機構以上に深く屈曲させることで把持対象物のサイズが限定されることはなく球体などの対象物に“握る”把持動作を行った場合においても、深く屈曲した指の側壁が対象物体と接触し結果的に接触面積が増加する。また「手のひら」が折れ曲がる(内転)することで対象物体を包み込むような動作が可能になり、接触面積が増加し把持後の安定性を向上させることができる考えた。

本年度の開発では薬指(Fin4)、小指(Fin5)の2指の駆動ユニットを個別プレートで拘束し、各々のユニットが把持対象物との接触によって可動し馴染む機構とした。また、可動軸には把持物体との接触がない場合には原点位置に復帰させるために、特殊形状の板バネを取付けた。この時、バネ形状とバネ定数の課題もある。

また、人体構造で「手を開く」動作に見られるMP関節の内転・外転機構は取り入れず、次年度に予定している把持特性試験の結果によって機構の有無を判断する予定である。



(a)手のひら機構



(b)原点復帰機構

図II-13. 手のひら・折れ曲がり機構図

II-4. 結言

本年度の開発を終えて、以下の課題が出た。下記の改善策の内容で次年度の課題解決を行なう。

○Fin2~Fin5 への駆動伝達をワイヤからロッドへ変更

- (手のひら部は薄くなるが、手首部が大きくなる。また、ワイヤのフリクション低減が困難)
- 強調機構(線形バネによる協調リンク機構)を廃止し、ロッドで協調リンク機構を再現。
- ⇒従来同様に天秤型の機構に変更。ただし、原点復帰用の戻りバネを取り入れ原点復帰させる。
- 手首部のコンパクト化(バネによる協調機構を廃止により実現可能)

○親指部へのアウターチューブの剛性を高める

- 本年度の密着バネを用いたアウターチューブでは駆動伝達時に座屈してしまう現象が見られる。
- (アウターチューブとして、剛性不足)
- アウターの管内フリクション(バネの巻きとワイヤ)を軽減させる
- 親指の長さを短縮化(対時の角度制御を簡略化)

○Fin4・Fin5の手のひら機構の見直し

- 内転・外転機構の必要性を確認(Fin2・Fin3は固定)
- 上記の原点復帰機構(バネ)の形状を再検討(本試作機では原点復帰の機能が実現できてない)

○ハンドの小型化

- 駆動方式の変更により、アイドラーが不必要になる→小型化を実現
- 指(Fin2~Fin5)への駆動伝達リンクのレバー比を再検討
- (現状では実動回転角度内に負荷が掛かる角度が存在する)
- 駆動伝達のためのストローク機構(手の甲)の短縮化を行うことで手のひらのサイズダウン

○手のひら表面の改良

→手のひら表面に柔軟材の貼り付けを行い、対象物への接触面積を増加させる。

また、次年度は本開発の課題として挙げた【3）ヒューマノイド型ロボットハンドとしての容姿の維持】についても併せて開発を行なう予定である。

Ⅲ. C 案 研究内容及び成果報告

Ⅲ-1. はじめに

C案では、東京都立産業技術高等専門学校の深谷准教授のグループが中心となって、研究シードとなった従来のハンドを基本とし、実施計画書で目的とした「①フレキシブルハンドの把持動作及び把持の安定性向上」及び「②フレキシブルハンドへの「手のひら機構」の追加」の実現に取り組んだ。

上記課題を解決するために、同グループは同校の有するノウハウと知識、設備を以て先進的な研究を担う、いわば本プロジェクトの開拓者として位置づけ、様々な面からハンドの可能性について、上記①および②のテーマに関する研究開発・結果等を相互に反映させつつ、一次・二次試作を通して目的を実現するハンドの研究・分析・開発を行った。

また同時にハンドの適切な機能評価を行うための環境整備についても取り組み、自らが設計、開発したハンド用テストベンチ装置の製作についても行った。

Ⅲ-2. C案実施内容について

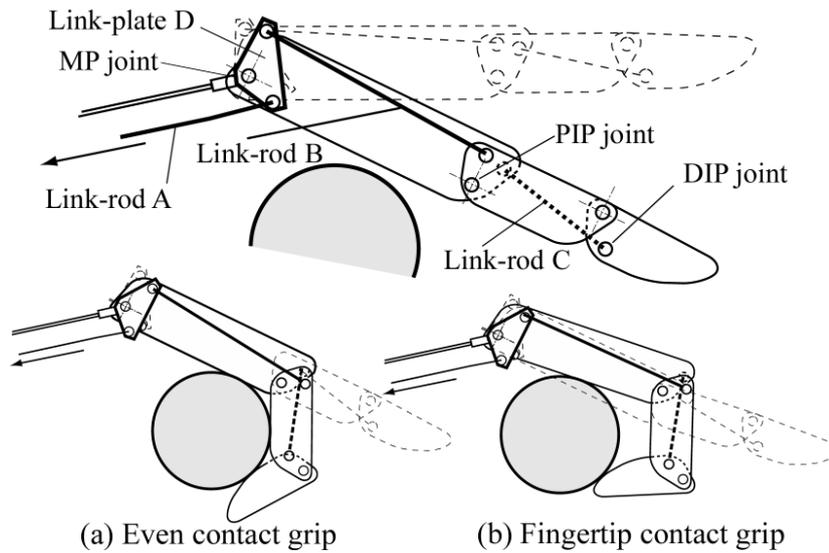
一次試作モデルについては、具体的には、ハンドの動作を従来のメインサーボモータの補助を目的としたサブサーボモータによるハイブリッド型の検証、拇指の2自由度化、手掌機構の改良の3点について研究・開発を行い、Cutkoskyの把持分類表に基づく把持機能分析を行うことで目的達成度を検証した。

二次試作モデルでは、平成23年度に予定する製品候補版ハンドの開発に向けたプロトタイプ構築を目的として、機能性、生産性の2面から2タイプのハンドを設計し、ハンドの適切な試験環境を実現するためのテストベンチに搭載した。

Ⅲ-3. 一次試作モデル

Ⅲ-3-1 構造

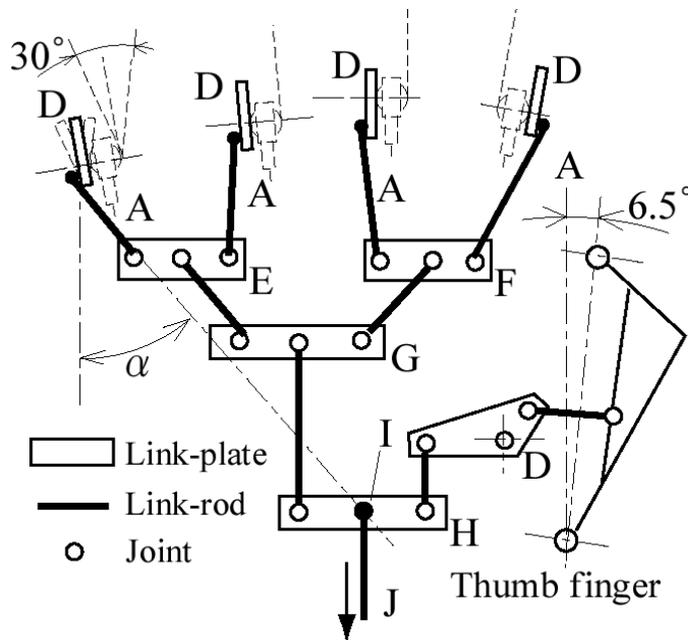
ハンドの主構造は手掌も含めた内骨格形状を基本とし、成人男子を参考に指先から手掌付け根まで170[mm]、全幅140[mm]で5指を有するものを目標としている。各指のリンク構造を図Ⅲ-1に示す。節Aが節Dを引くと、指は中手指節関節のみが曲がりつつ、対象物に接近していく。基節骨が物体に接触した時、節Dは独立的に動き出し、節Bを介して中節骨を屈曲させ、節Cを介して末節骨も屈曲させていく。すなわち指はそれぞれ基節骨を始点に順に物体に接触していくため、指は各関節に均等に力が分散するように指節関節の屈曲角を調整しつつ、把持状態を維持し続ける。仮に突発的な衝撃などで握りがずれても、それぞれの屈曲角力は自動的に調整されるため、最小の把持力で物体を掴み続けることになる。この動作は入力を節Dに限定したことによって得られるもので、コップなどの把持に有用である。また強く握ろうと入力を更に増やすと、リンク構造の作用により我々が行うのと同様に指先が自動的につま立てるように変形する。



図III-1. 指の構造

III-3-2 協調リンク機構

指節関節の屈曲/伸展, 内外転および手掌の変形は図III-2に示す協調的に動作するリンク機構により実現される. 節Dは, 節Jからの入力 (メインサーボモータ) に応じて各指節関節を屈曲させつつ, 全ての指が対象物に接触し把持するまで, それぞれに均等に力が分散されるよう自動的に作用しながら動き続ける. また示指-小指のMP関節はボールジョイントにより外転・内転方向への自由度を有する. これにより各指は内転/外転しつつ対象物の形状に沿って適切に接触したのち, 入力がかかる節Jに向かうように内転方向へ動作するため, 屈曲と同時に内転方向への把持力も発生する.



図III-2. 協調リンク機構

III-3-3 手掌の構造

手掌は中手骨を表す4本のフレームで構成される。示指、中指側は手首側の固定板へ固定される。環指、小指側はボールジョイントを端点に持ち自由に動くフレームで連結され、かつそれぞれの間もまたボールジョイントロッドで結合してある。このロッドはいわば腱に相当するもので、これらの働きによって環指、小指の中手骨が物体を包むように柔軟に動くことにより、手掌の機能を果たす。

さらに小指および環指の中手骨は、物体に接触した際に手掌の内側に引き込むように動く(図III-2)。これによって指のみならず、手掌も把持時に物体に対し形状合わせ密接に接触するように形状を変化させ、より広い面積で接触することが可能になる。

III-3-4 サブサーボモータによるハイブリッド型制御

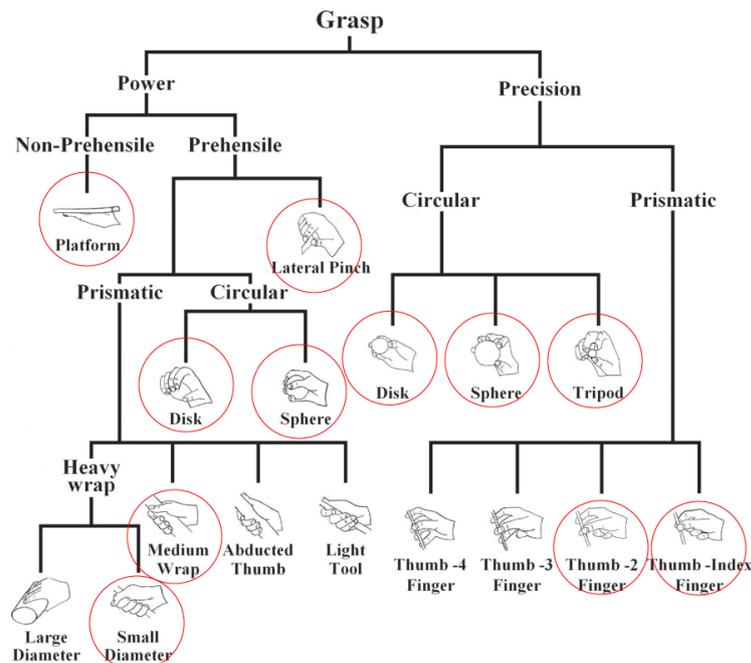
フレキシブルハンドの特徴は、メインサーボと呼称される1個のアクチュエータの操作のみで各種把持動作を実現することにある。上記ハンドは各指から手掌に至るまでが連動して動作する協調リンク機構によって、対象とする物体に対し自動的に適切な把持形状を形成する。この特徴により1入力のみで様々な把持を、センサ類を用いずに実現することが可能となっている。

しかしながら上記ハンドでは5指を任意に動作できないため、可能な把持動作に制約がある。そこで上記ハンドのための多指の独立動作を目的とした機構を新たに開発し、従来の協調リンク機構と拇指の2自由度化を並立させたハイブリッド型を開発することとした。またこの構造に相応しい、手掌機構についても開発を行い、これらの効果によって把持機能向上を実現することとした。

III-4. 拇指関節の2自由度化

III-4-1 把持分類表に基づく拇指CM関節の機能の分析

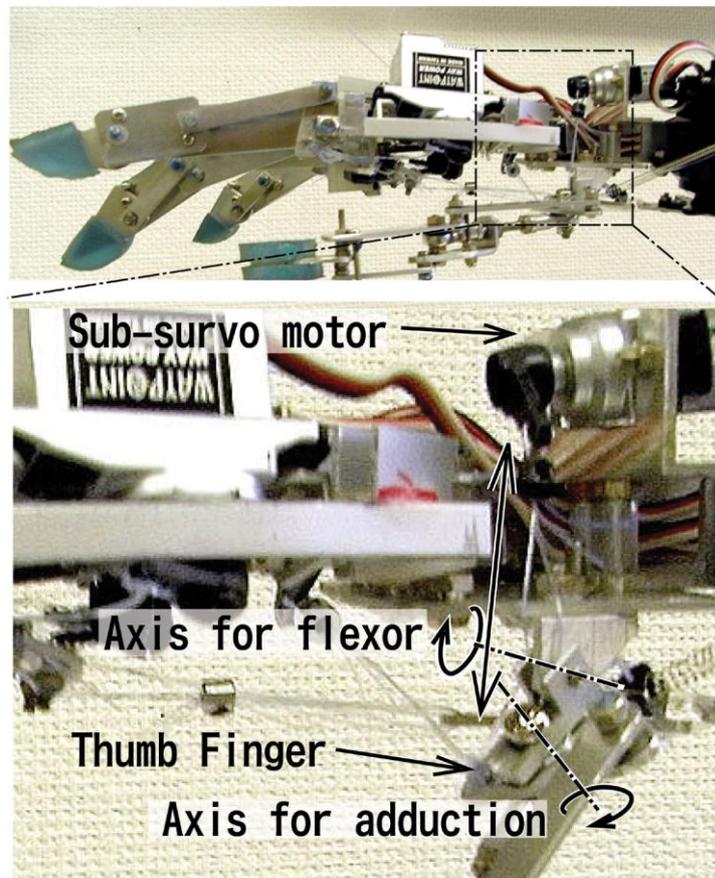
ロボットハンドの機能評価手法として Cutkosky らの把持分類法 (M. R. Cutkosky: "On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 3, pp. 269- 279, 1989.) を用いる方法がある。この分析手法に従い、従来のハンドが実現可能な把持動作を確認したところ、丸で囲んだ15動作は可、それ以外の5動作は不可であった。



図III-3. Cutkoskyの把持分類表に基づくハンドの把持性能評価結果 (赤丸が従来モデルで可能な把持動作)

不可となった動作を分析したところ、拇指が重要な役割を果たす動作であった。拇指の CM 関節は内転/外転、屈曲/伸展の2自由度を有し、示指や中指などと対抗させることができる。また対象物の大きさによって、拇指の外転/内転方向の角度は変化する。しかし従来のハンドは1個のアクチュエータのみでの図1に示すような代表的な動作実現に最適化するために、物体把持時の拇指の働きは主に支点としての役割が多いことに着目して、拇指は IP 関節、MP 関節は固定し、CM 関節のみ1自由度としていた。だが、精密把持までを対象範囲とするにはこれでは可動範囲は不十分である。

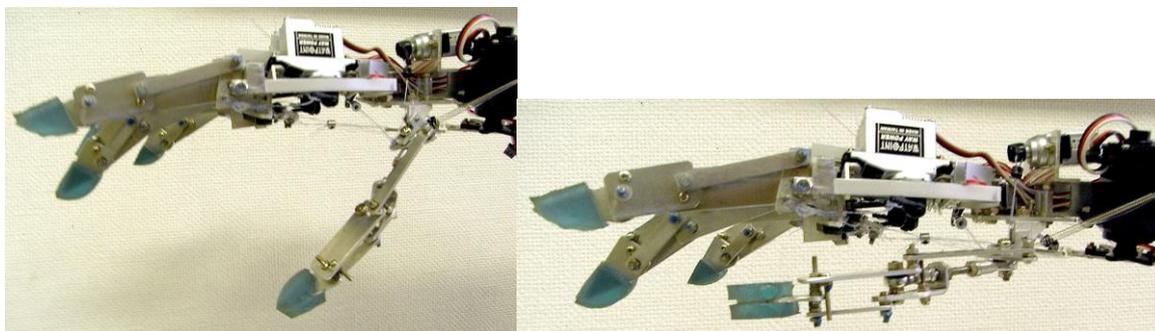
よって拇指 IP 関節、MP 関節に自由度を与え、さらに CM 関節を2自由度に拡張し、サブサーボモータを2個配することで示指、中指、環指との対抗動作の実現を試みた。作成した CM 関節を以下の図III-4に示す。屈曲方向は従来通りの牽引方法に基づきサブサーボモータが牽引する。外転/内転方向については、新たに関節軸を設けた。外転方向へは張力が掛かるよう巻バネを内包し、手掌背面に取り付けたサブサーボモータが手掌方向へ牽引することで内転方向への角度制御を行う。



図III-4. 拇指CM関節の2自由度化

ストローの把持など繊細な操作を必要とする場合には、拇指のサブサーボモータで拇指の指先を微調整し、その後1個のメインサーボの力のみ操作すれば、後はハンドが自動的に各指に適切な力を分散してくれるため、極めて容易に目的とする把持を実現できる。すなわち、従来からの簡便性を何ら損なうことなく、拇指を個別操作できるため、把持後の安定性が向上するとともに、小形物体の把持動作も可能になる。また多種多様な形状の対象物への追従性も従来通りである。

拇指のサブサーボモータによる外転/内転方向の動作範囲は、各指との対向が実現できるよう、下図のように手掌面に対し 20~60 度とした。なお、外力を受けることで拇指は最大で手掌面に対し-5 度まで可動することができるようにしてある。このような可動範囲は把持動作には必要がないため、サブサーボモータではこのような操作は行わない。



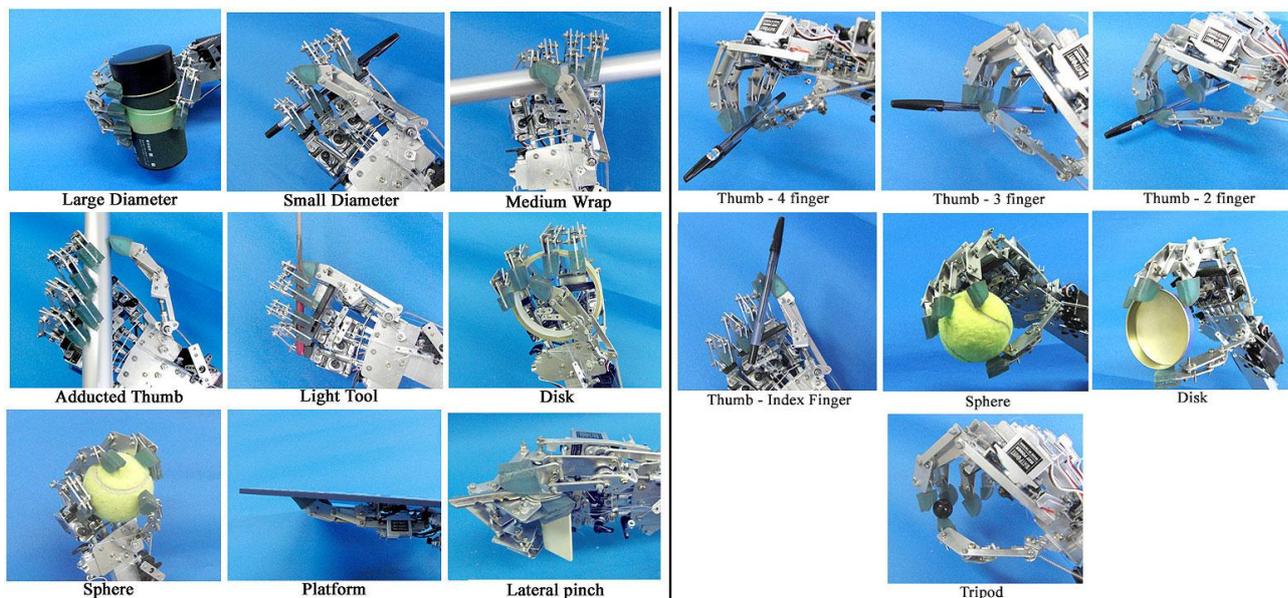
図III-5. 拇指CM関節の外転・内転範囲

この可動範囲を設定した理由は、これは我々の生活における動作を分析した結果によるものである。拇指に限らず、指は多くの場合、対象物に対し脱力してその形状に馴染むように変形している。中でも拇指は機能の重要性に比例してそのような場面が多い。例えば人の背中を押す、といった動作を行う場合、相手の形状に合わせてなじむように手掌全体が弓反りするように変形する。この際に拇指は手掌側面まで外転することが求められる。このような対象物へのなじみ変形が確実に実現できるよう、CM関節の可動範囲を決定している。

III-4-2 把持動作実験結果

実際に Cutkosky の把持分類に従って動作させた結果を下図に示す。拇指の2自由度によって、従来のハンドでは把持が不可であった動作についても図のように実現できるようになった。

しかしながら、全ての動作において容易に把持動作が実現できるようになったわけではない。特に精密把持の幾つかの把持動作（拇指-4指把持、円盤、球体など）では、把持物体を中に浮かせる、机の上に指などを押しつけるといった、特定の条件下で把持を行わねばならなかった。この主要因の一つが、マニュアルモードでは手掌が屈曲しないため、他より短い小指を目的の位置に設定できないというものである。この部分については改良が必要であると考えられる。



図III-6. 第一次試作モデルによる、Cutkosky の把持分類表動作実施結果 (すべての把持動作を実現)

III-5. 爪および手掌機能の向上

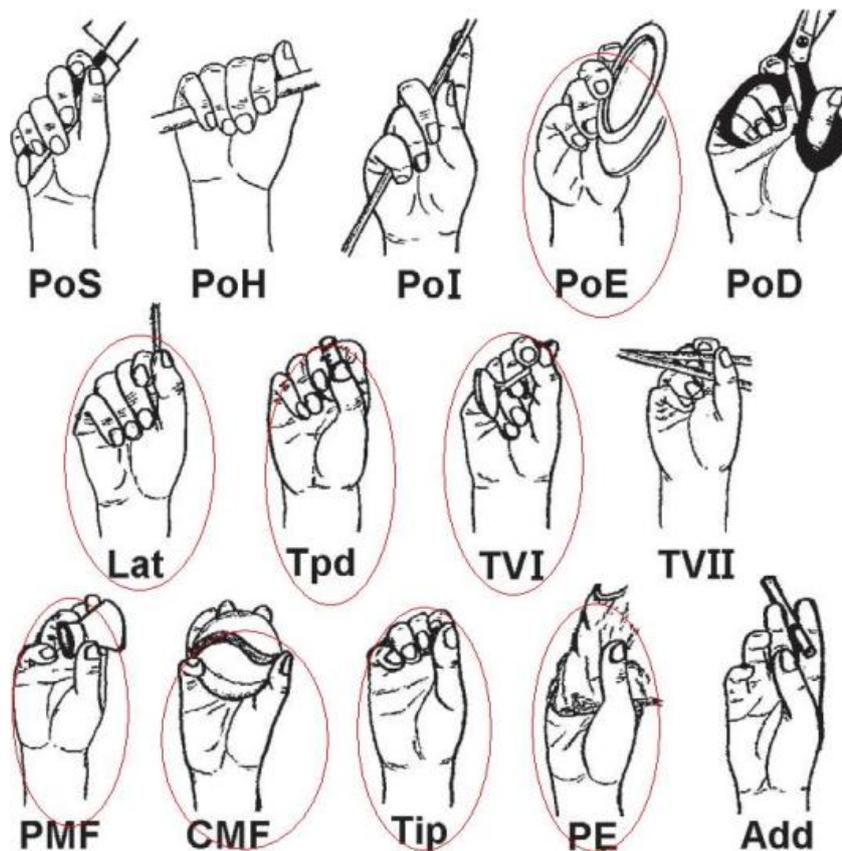
前節では工場での作業を中心とした把持分類によるハンドの機能開発を行った。これに対し、本提案のハンドは生活支援ロボットや義手など、日常生活を対象とした機器を開発するユーザも販売対象と考えることができる。

よってこの章では、日常生活における作業を対象に、ハンドの研究を行った成果を示す。

III-5-1 鎌倉の把持分類による手掌機能の評価

日常生活の作業を中心とした把持分類については、鎌倉らの把持分類がある。鎌倉らはリハビリを行う作業療法士の観点から、日常生活に現れる把握に基づいた“鎌倉の把握分類”として提案している（鎌倉 矩子 他、“健常手の把握様式：分類の試み”、日本リハビリテーション医学会誌 15(2), 65-82, 1978-06-18）。

この把持分類について、実際に現在のフレキシブルハンドを対象に把持実験を行ったところ、図III-7に示すように赤丸が付いていない把持については、安定的な把持が実現できなかった。

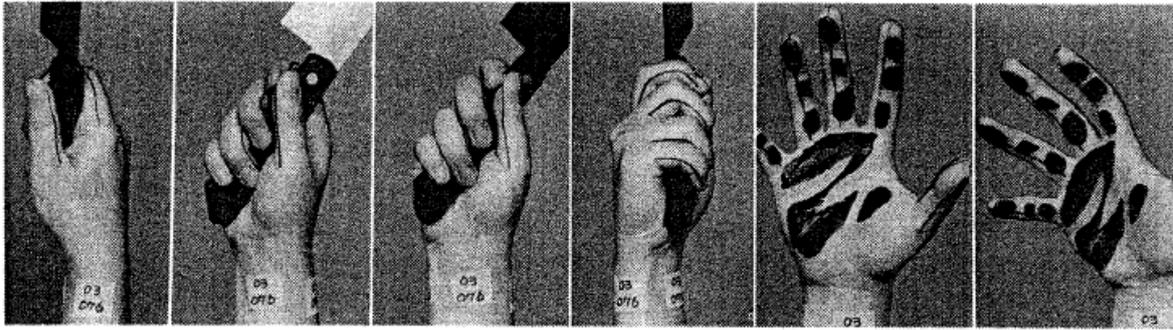


図Ⅲ－7. 鎌倉の把持分類表に基づく動作結果（赤丸が実現できた把持動作）

赤丸が付かない把持について分析する。

- ・ Add：示指と中指の内転方向のみが可動せねばならないため、本ハンドは対応できない（各指を内転・外転方向のみに動かす機能は無いため）。
- ・ TVII：箸の操作は相当に複雑な拇指、示指、中指の個別操作が必要。本ハンドの設計要求には適合しないので対象外とする。
- ・ PoD：示指～小指と拇指とが独立して動くこと、またその動きはハサミが有する自由度に倣って動くことが求められるため、現在のハンドでは実現が難しい。
- ・ PoS、PoH、PoI：マニュアルモードを併用すれば、拇指や示指の位置を再現することは可能である。しかしながら、荷重が掛かった際に把持対象がずれる、はずれるなど安定的な把持ができない。これは、拇指付け根の肉が大きな作用を及ぼしていると考えられる。

上記分析結果の理解を深めるため、図Ⅲ－8に PoS 時に対象物に対し、どの部位が接触したかについて示す。手の表面に黒く付いた部位が、把持時に対象物と接触した部位である。この図から分かるように、手掌部、特に拇指付け根が、示指～小指の対向として対象物（柄の部分）を押さえ込んでいることが分かる。つまり、拇指は指先端のみならず、付け根に至るまでが指として機能し、この付け根の肉は平らな状態から必要に応じて盛り上がるように、拇指の屈曲状態に応じて盛り上がらねばならない。

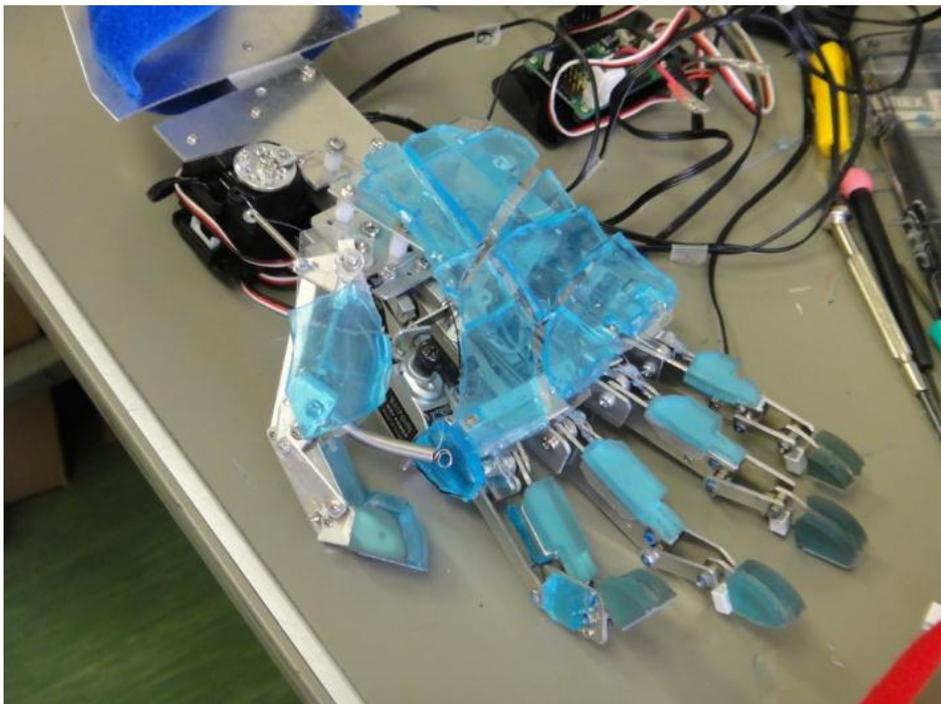


握力把握一標準型 (PoS)

図III-8. PoS における対象物との接触部位

上記の問題を受け、手掌部の構造を変更した。示指～小指が接合する手掌部について、人の中手骨と同じフレーム構造とし、かつ、環指と小指の中手骨に相当する部位を可動構造とした。この際にこの可動構造を回転拘束リンクによって結合することで、ハンドを地面と平行にし、指先から見た際に円弧を描くため、対象物を包み込むような積極的な動作を、何ら制御等行わずともハンド自身が行うような、能動的な動作を実現している。

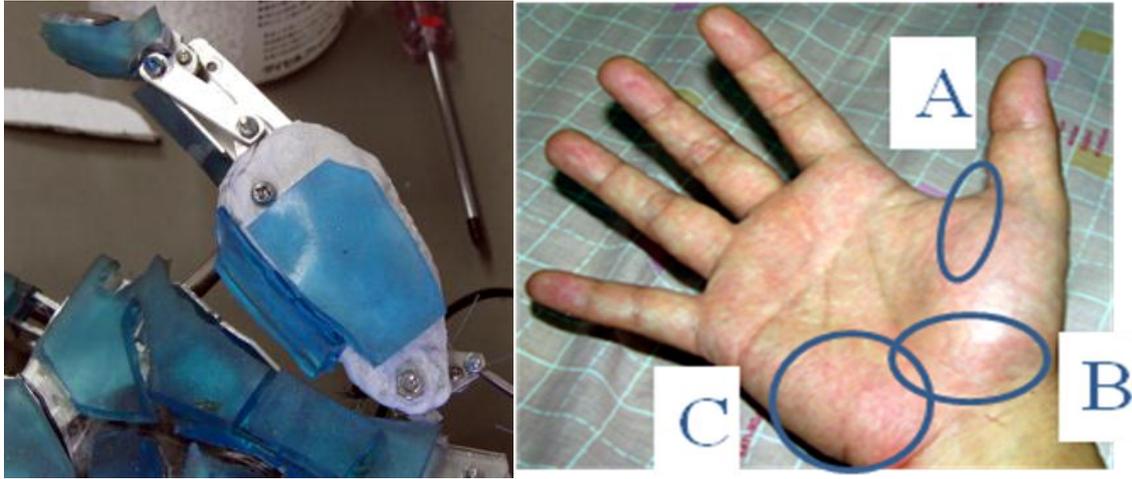
また手掌表面についても改良を行った。手掌表面には肉を模したゲルシートを添付し、対象物との安定接触が行えるよう、屈曲時に対象物との接触面積を拡大できるようにした。



図III-9. 手掌表面の改良結果 (ゲルシートにより安定接触を実現)

また拇指については、指の根本 (CM 関節～DIP 関節まで) を熱可塑性プラスチックにより人の指の形状を模した形にて下図 A の部位を包み、その周囲にやはり同様に肉を模したゲルシートを添付した。

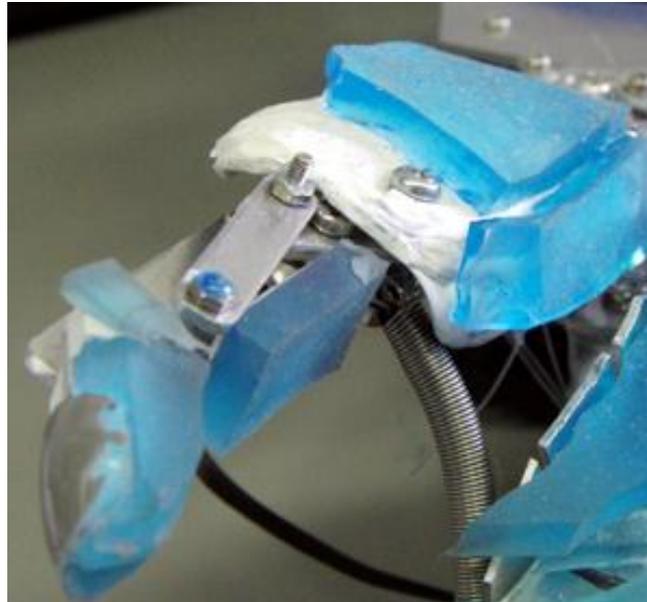
この結果、把持対象に対しても手掌が積極的に作用するようになり、結果として把持の安定化向上に繋がった。特に円筒物の把持は安定性が高くなり、従来と比較しても明らかに把持安定性が向上する結果となった。その一方で、下図に示す B, C の部位については検証が必要であることが分かった。



図Ⅲ－１０．熱可塑性プラスチックによる改良、手掌部位の説明

Ⅲ－５－２ 爪の効果について

手掌部で用いたゲルシートを指先先端にも登用した。この際、ただゲルシートを添付するとどうしても指先の変形が大きく、対象物と接触した際にどうしても適切な力が加えられないという問題が生じる。そこで、下図に示すように指先には爪を模したプレートを添付した。この爪により、対象物への接触初期は極めてソフトに指先は変形し、接触中期になるとゲルシートの変形により生じた力が爪へ伝達され、ゲルシートの逃げをこの爪が押しえるようになる。そして接触後期では、爪がしっかりとゲルシートを押しえ込むことで指先の変形が終了し、力がしっかりと対象物に伝達するようになる。この効果により、特にペンやスプーンといった小径物、消しゴムなどの柔軟物の把持性能が向上した。

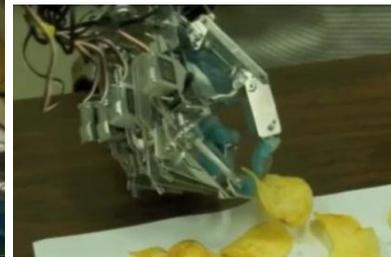
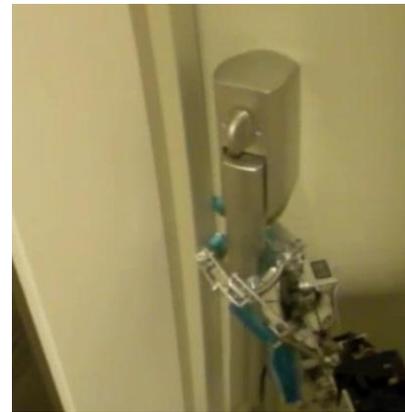


図Ⅲ－１１．指先のゲルシートおよび爪

III-5-3. 把持実験動作の例

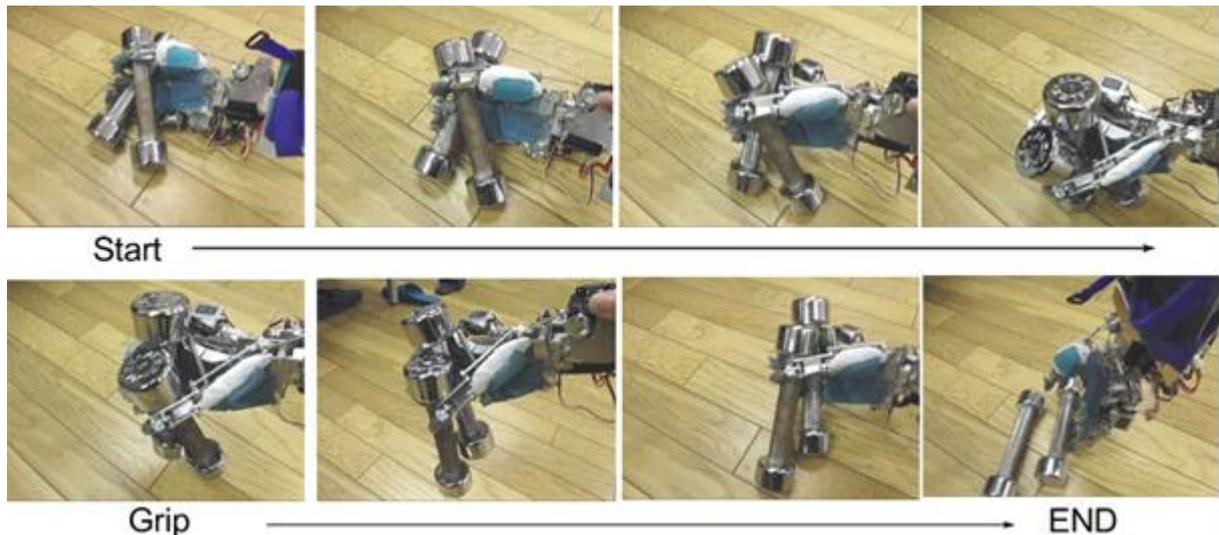
III-5-3-1 日常生活における把持実験結果

これまでの研究成果をもとに、いくつかの把持実験動作を行った。以下に実際に第一次モデルによる、日常生活における把持動作実験の様子を示す。下図で示されるような動作を実際に行い、簡潔に再現することができた。



III-5-3-2 重量物の把持

ハンドの把持性能の指針として、重量物の把持もある。よって 1kg の鉄アレイを保持し持ち上げることが可能かについて実験した。その結果、容易に保持できることが明らかとなった。次にこの鉄アレイを2本に増やし、計 2kg を保持させた。これについても保持できた。しかしながら、この鉄アレイを3本にしたところ、ハンドを動作させるメインサーボモータの出力が足りず、十分に把持できなかった。これまでのハンドは主に日常の一般的な作業を対象として評価してきたため、重量物を対象とした作業も視野に入れるには、アクチュエータとして搭載するサーボモータの性能評価も重要である。製品候補版ハンドを構築するには、この点についても留意する必要がある。



図Ⅲ-12. 1kg 鉄アレイ 2本 (計2kg) を把持し持ち上げた状態

Ⅲ-6. 二次試作モデル

一次試作モデルは研究の過程で様々な改良や追加、変更等が後から加えられたため、構造的にこれ以上の発展は難しい状態となっていた。そこで一次試作モデルのコンセプトを尊重しつつ、テストで得られた各種ノウハウを設計に反映した「第1プロトタイプ案」の設計・試作を行った。またその一方で、ユーザのニーズによっては、高機能を有さず限定した動作のみであっても低コストで購入できる製品が望まれることも予想される。そこで製品価格低減を目的として、部品点数を少なくし、製作性に優れた設計をコンセプトとした「第2プロトタイプ案」の2種類について設計、試作を行った。

Ⅲ-6-1 第一プロトタイプ案

一次試作モデルのコンセプトを踏襲し、設計を基本から見直したモデルである。関節には軸受を積極的に利用し、動作時の滑らかさと安定性を実現しつつ、ジュラルミン等剛性の高い部材による強固でしなやかな内骨格形状を基本とする。一次試作において得られた様々な知見を設計時に反映することで、同様の機能を有しつつ、義手や生活支援ロボット等、実施計画書で目的とした、横 140[mm]、縦 220[mm]、厚さ 45[mm]以内(手首部分を除く)、総重量(アクチュエータを含む)を 2[kg]以下とし、コンパクト化・軽量化を図ったモデルである。

Ⅲ-6-2 一次試作モデルと二次試作モデルの相違

一次試作モデルとの違いは以下の通りである。

1) 手掌部のサイズ低減

第一プロトタイプでは、サーボモータを手掌内に内包したため、手掌部を大きくせざるを得なかった。これは実際のヒトのジオメトリとは違うため、幾つかの把持動作時に問題が発生。また手が大きくなるため、把持のために手を差し込んでうまく把持できない時があったため、人のサイズと同一になるように構造をコンパクト化した。

2) 指部のサイズ低減

義手などへの応用を考えた際に、指のサイズをスリムにする必要がある。これにより、コスメティックグローブを嵌めることができ、義手などへの応用が可能となる。また手袋などを直接嵌めることも可能である。これにより、ハンドの部材が直接把持対象に触れることがなくなるため食品生産工場など、従来ロボットハンドが進出しづらかったユーザにも利用が可能となる。またこの手袋が例えばゴム手袋などであれば、製作コストを押し上げる要因となるゲルシートなどを省略することも可能と考えられる。

3) 関節部の動作向上

各関節にベアリング、アルミ製ボールエンドを装填。回転精度の向上を図る。同時に部材をジュラルミン等剛性の高い部材を採用することにより、全体の強度が向上可能となる。

4) 製作性を考慮した設計

基本構造は板材を中心に構成されており、プレス加工など生産コストの安い生産手法によって大部分の部品が製作できるよう配慮している。

5) 拇指をより人に近く

拇指付け根を人の関節と同様の位置に移し、極力人に近い回転半径と動作を実現するように配慮している。

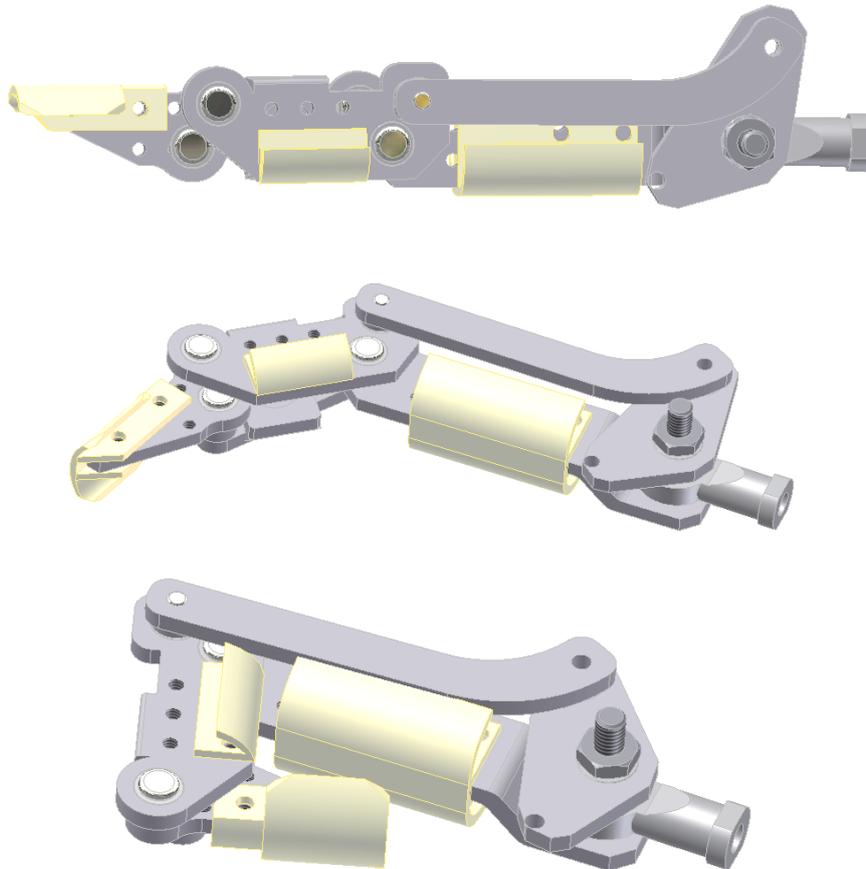
6) 指先の肉や爪の装備を前提とする設計

第一次試作モデルにより、指先の爪や肉の有用性が実証されている。このため肉を模したゲルシートを添付するためのスペース、爪を搭載するための指先形状など、一次試作モデルで得られた様々なノウハウを設計に反映している。

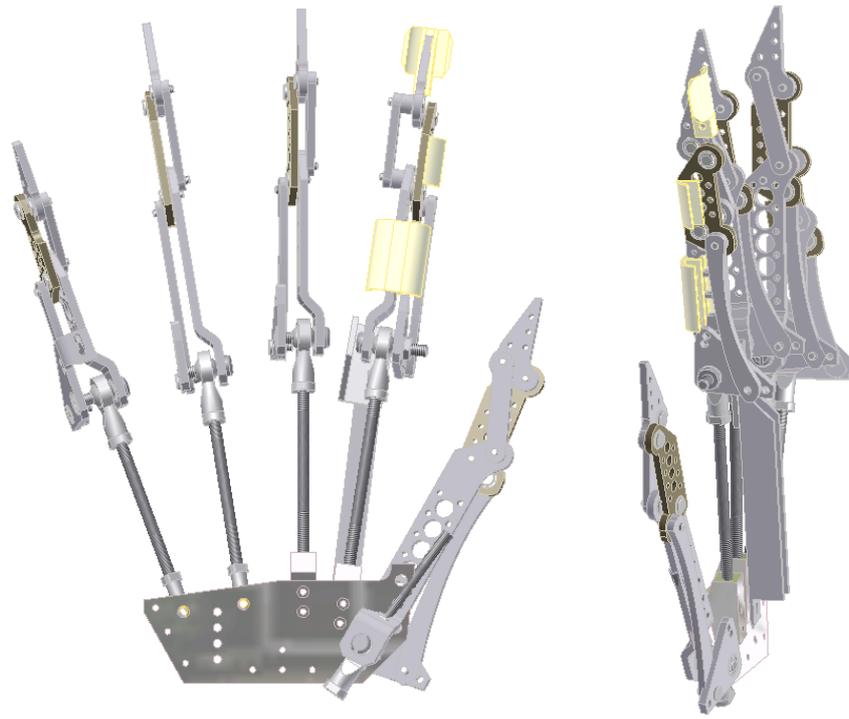
7) 手掌部機能の実装

第一次試作モデルにより、手掌部の機能を確立するための手法が分かっているため、この機能を実現する構造を実装している。得られた知見を元に、手掌部の構造は、人の中手骨と同じフレーム構造とし、環指、小指はアーチ型に変形するようにしてある。

下図に第一プロトタイプ的设计案を示す。図からもわかるように、従来のコンセプトを踏襲しつつ、上記相違を達成できるように配慮して設計してある。



図III-13. 第一プロトタイプ 示指設計案



図III-14. 第一プロトタイプ全体図概略

Ⅲ-6-3 第一プロトタイプ案製作結果

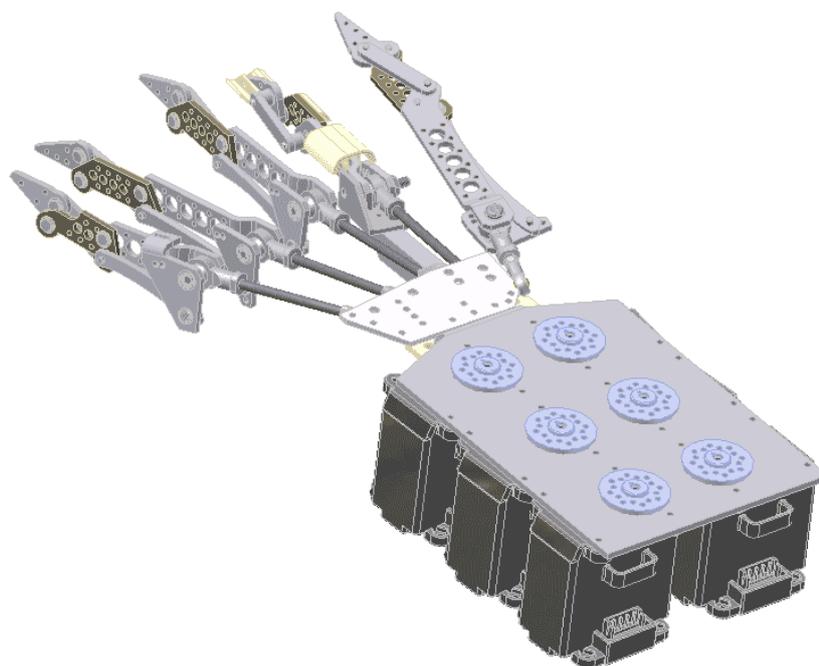
設計例に基づき、実際に製作を行った。図Ⅲ-15に一次試作モデルとの比較を示す。図からも分かるように、指の長さは大きく変わらないものの、ハンド全体のサイズは小型化し、より人に近いサイズになったことが分かる。また動作自体もベアリングやアルミ製ボールエンドを実装したことで滑らかかつ剛性の高い動作を実現することが出来ている。また拇指付け根を人の関節と同様の位置に移し、極力人に近い回転半径と動作を実現するように検証。その結果、2自由度を与える際、取り付け位置を50度程度、長手方向から外転方向に傾けるのが良好であることが判明した。これは製品候補版を製作する上で大きな知見と言える。



図Ⅲ-15. 一次試作モデルとの比較

Ⅲ-6-4 第一プロトタイプ型テストヘッド

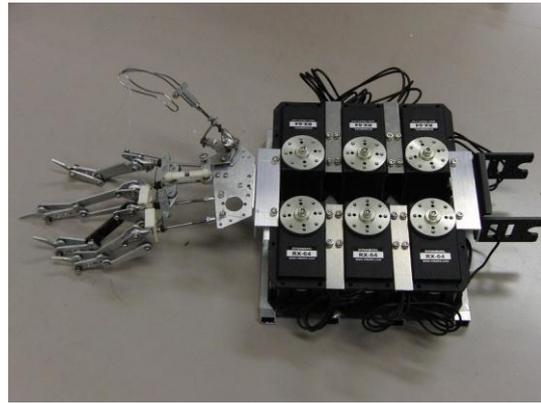
第一プロトタイプは従来型の延長であるため、汎用性が高い。このため、この形状を対称に製品候補版に採用を検討するモータの性能を評価するために、第一プロトタイプ型ハンドを基本としたテストヘッドの試作を行った。以下に試作を行った5種類を示す。またそれぞれのハンド端部の接合部は全て共通形状としているため、任意の角度で固定するための角度可変装置とも任意で組み合わせられる。また後述するテストベンチとも取り付け可能である。



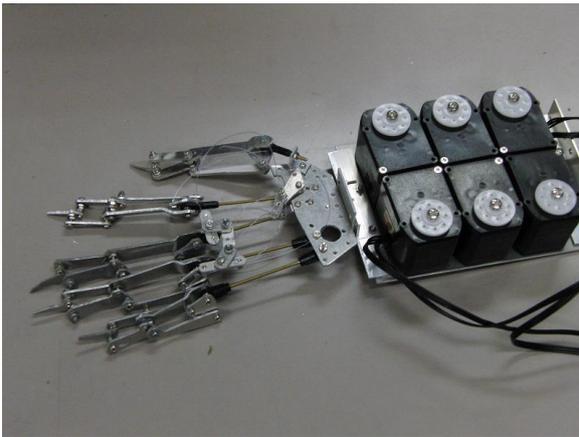
図Ⅲ-16. 第一プロトタイプ型テストヘッドのイメージ



図Ⅲ-17. 第一プロトタイプ No.1



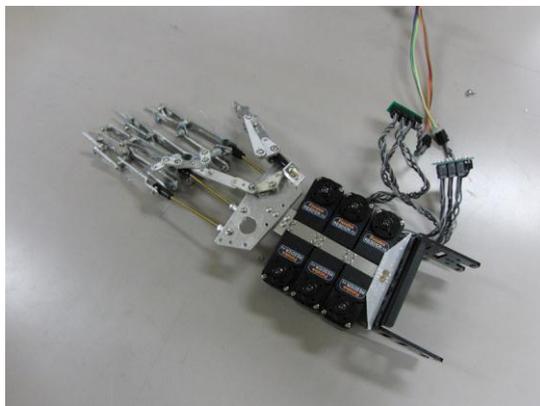
図Ⅲ-18. 第一プロトタイプ No.2



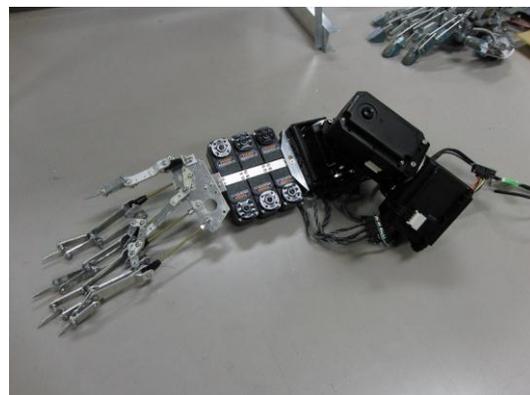
図Ⅲ-19. 第一プロトタイプ No.3



図Ⅲ-20. 第一プロトタイプ No.4



図Ⅲ-21. 第一プロトタイプ No.5



図Ⅲ-22. 角度調節機構との組み合わせ例

Ⅲ-6-5 第二プロトタイプ案

人間の形状に近いハンドという主旨に添い、予めカバーリングを施した状態で構築したモデルである。このモデルのコンセプトは、第一次試作モデルでは、フレーム構造に指の表面の肉を模したゲルシートなどを貼り付けていたため、どうしても部品点数が多くなり、製作工程が多かつ複雑になるという難点があった。ハンドの魅力をより多くのユーザに理解し、購入して戴くには、第一次試作モデルの様な多種多様な物体の把持を実現するという高機能版の対局となる、数種類の把持のみしかできない低機能版であっても安価に購入可能なモデルのラインナップも必須であると考えられる。

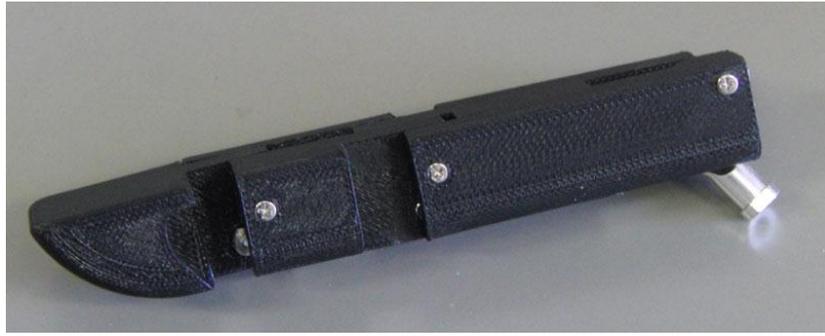
そこで、第二プロトタイプ案として、低コストで生産可能な設計について検証することとした。

このモデルの最大の特徴は指の構造にある。下図に示すように、DIP を屈曲させるためのレバーを、カバーそのものに行っている点である。これにより、従来の指と同様に動作しつつ、これがそのまま指のカバー（指の表面）を形成することになり、部品点数が大幅に削減できると考えられる。その一方で、DIP の屈曲角が増えるとこのレバー部分の部位が指の腹側に押し出出てくるため、これが把持を行う際に対象物と接触して悪影響を及ぼす懸念もある。このため、この部位については設計・試作を行い、ギリギリのラインを模索する必要がある。



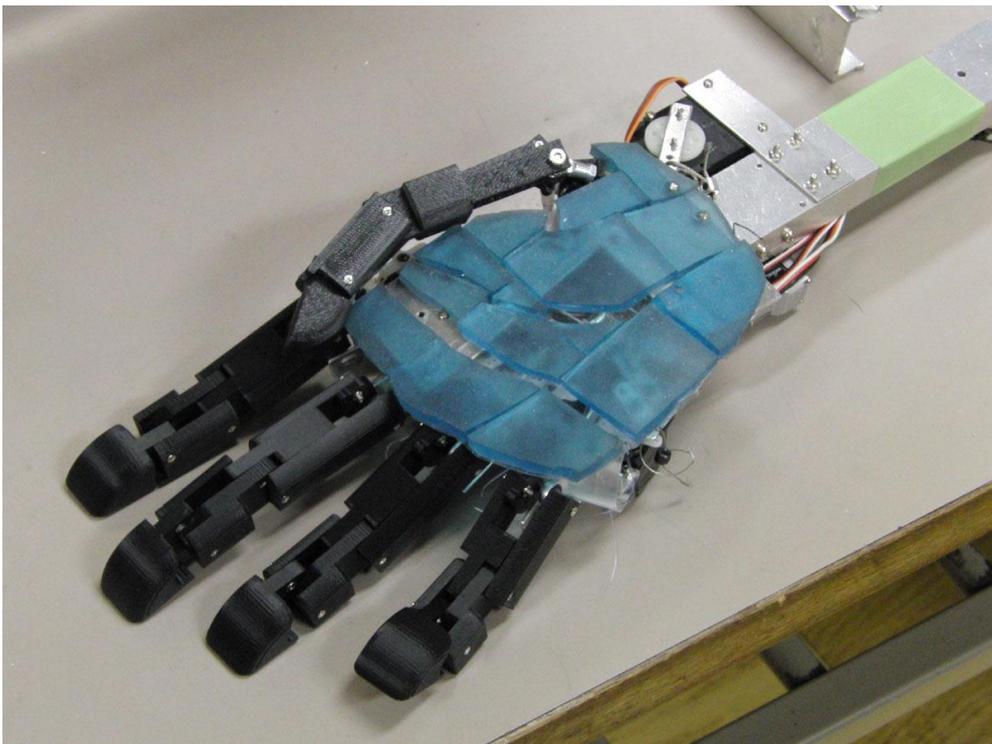
図Ⅲ-23. 第二プロトタイプ 示指動作概略

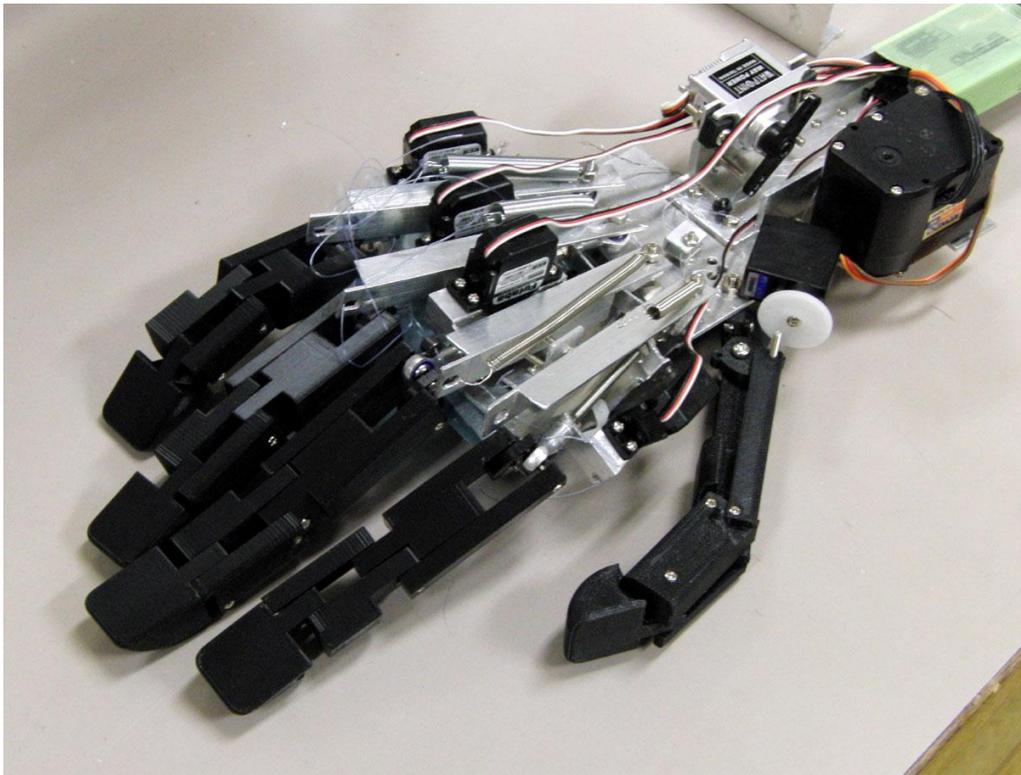
CAD によりハンドの全体設計を行った後、実際に試作を行った。指については図に示すように目的とする屈曲を行うことが出来ており、かつ懸念されたレバー部分の突き出しも僅かな量に収まっている。接触用の弾性体を用いれば解消は可能と考えられる。



図Ⅲ-24. 第二プロトタイプ 示指動作結果

また指の各部材がカバーとして作用して対象物に接触するため、目的とする対象物との接触も良好になると考えられる。手掌部については、柔軟な動作を実現するために、同様の手法での再現は難しいのが現状である。このため、一次試作モデルの手法を流用してハンド全体を構築した。下図に全体形状を示す。従来と同様の構造を採用しているため、その動作自体には何ら問題はない。しかしながら、このハンドが目的とする生産コスト低減には繋がらないため、今後の改良点として検討が必要である。





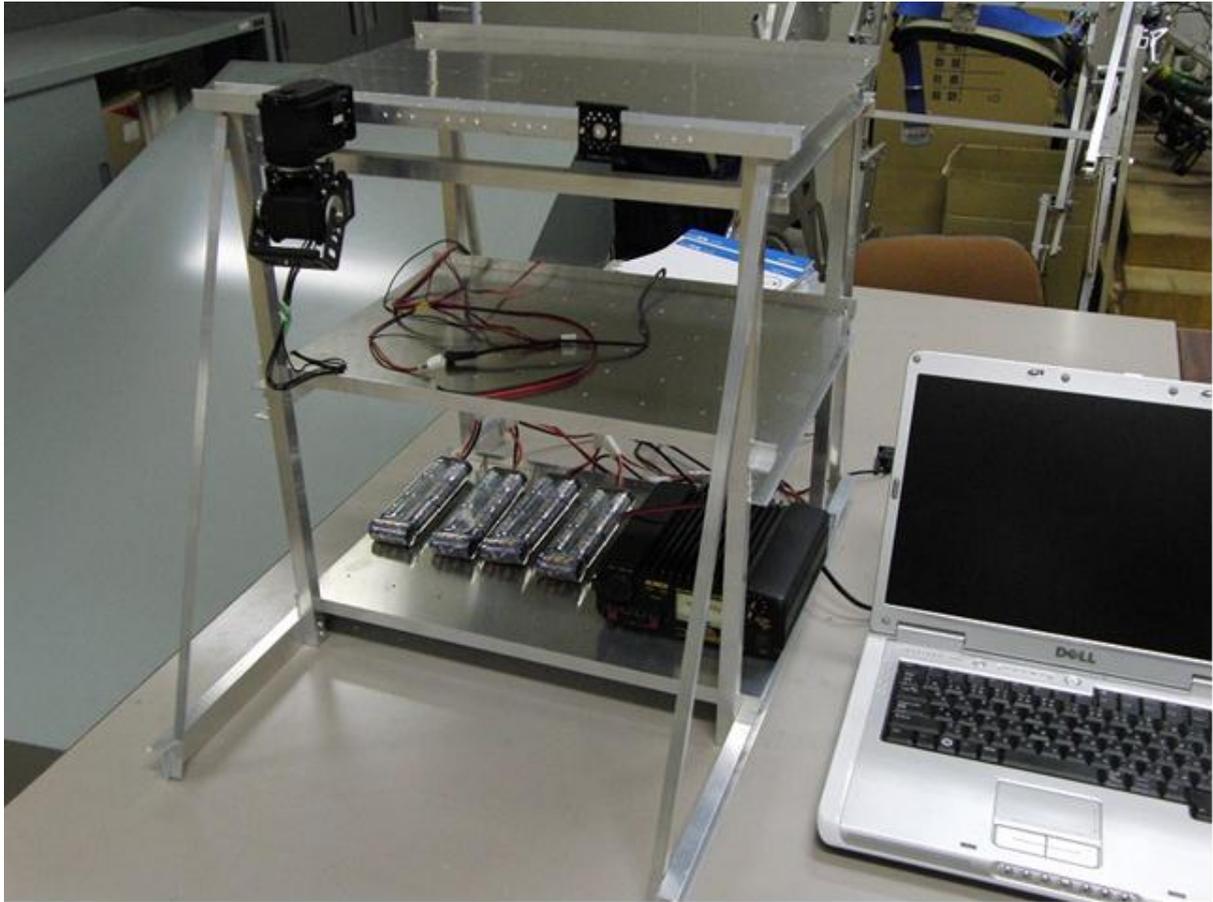
図Ⅲ-25. 第二プロトタイプモデル全体図

Ⅲ-7. テストベンチ

従来のハンドの機能評価は、ハンドを試験者が手で持ち、対象物に対して近づけて握む、というもので、常に同じ位置、同じ角度で対象物に接近できるとは限らず、均一な試験結果を得にくいという問題があった。このため、これまで試作してきたハンドを固定して動作させるための、テストベンチ（試験台）を製作した。

下図に製作したテストベンチを示す。第一プロトタイプ型テストヘッドや第二プロトタイプ型ハンドを固定可能である。またハンドのテスト目的に応じ、上段は汎用形式を採用することで各種装置を任意に固定できるようにしてある。中段は各アクチュエータを動作させるための回路を設置するためのスペースである。下段には動力系が設置できるようになっており、ロボットや義手などへの利用を踏まえたバッテリー駆動環境、工場など外部電源による駆動を前提としたAC-DC変換器による駆動環境を搭載している。

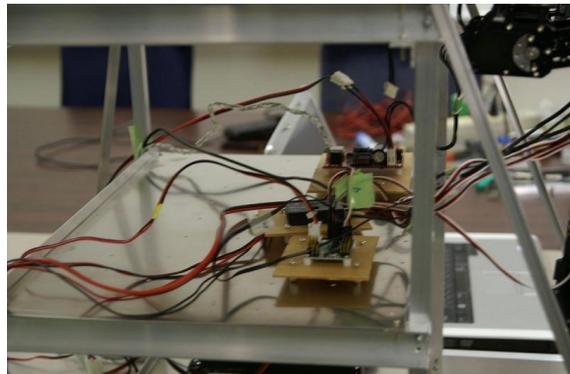
この構造により、製品候補版のハンドを開発する際にも、様々な環境を想定したテストを繰り返し行うことができる。次年度はこの台を利用して各種試験を行う。



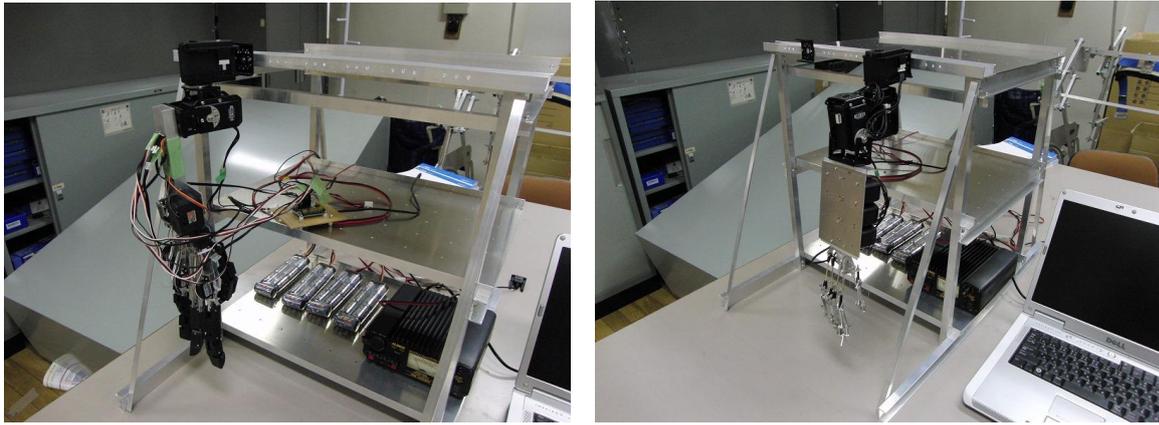
図Ⅲ-26. ハンドテストベンチ全体概略図



図Ⅲ-27 下段電源ユニット置き台



図Ⅲ-28 中段 駆動回路の設置例



図Ⅲ－２９ ハンドの固定例

Ⅲ－８．課題について

C 案は産技高専の有するノウハウと知識、設備を以て先進的な研究を担う、いわば本プロジェクトの開拓者として位置づけ、様々な面からハンドの可能性について、研究開発・結果等を相互に反映させつつ、一次・二次試作を通して目的を実現するハンドの研究・分析・開発を行った。また同時にハンドの適切な機能評価を行うための環境整備についても取り組み、自らが設計したハンド用テストベンチ装置も製作した。

本案件における課題は以下の通りである。

1) 動作精度の向上、駆動試験の実施

一次試作モデルでは、指が常に同じ初期位置に復帰しないという状態が生じた。通常、指の初期位置への復帰は引きバネにより行われる。その張力は常に一定であるが、適切な位置に戻らないことがあった。これは、指の各関節に配置された軸の回転抵抗が高いためと考えられる。一次試作モデルでは、軸とフレームとは滑り軸受状態で固定されているため、軸ごとに回転抵抗が異なってくる。そこで、この回転抵抗を均一化するためにベアリング等を用いた設計を中心に行う。また回転部位以外にもフレームの剛性が低ければ全体がたわみ、適切な回転が得られない。このためフレーム肉厚の増加、アルミ製ボールエンドの採用等によりフレームの剛性の向上を図る。

2) 爪、肉の材質選定

試作モデルを対象とした実験を行った結果、指先の爪、肉の重要性が明らかとなった。これは指先端への力が適切に加わるためであり、本案件がターゲットとする義手や生活支援ロボットへの展開を実現するためにも重要な技術である。しかしながら、現在の爪や指先の肉は、市販品を流用したものでしかない。このため、製品化を鑑みる為には、我々が常に安定して入手・提供できるような部材に転換することが望ましい。

3) 把持重量の向上

実験により、2kg の重量物把持は実現可能であることが分かった。その一方で、3kg の重量物は安定して把持できなかった。この理由は 1) 指を牽引する経路の剛性不足 2) ワイヤの強度不足 3) これらを牽引し指や掌部を屈曲させるサーボモータのトルク不足 が挙げられる。特に、サーボモータは、その性能がダイレクトにハンドの性能を決定づけるため、極めて重要なファクターといえる。このため、本案件に適切なサーボモータの選定をおこなうため、試作したテストヘッドやテストベッドを用いてサーボモータの選定を実施する必要がある。

4) 掌部材料の選定

今年度の実験により、安定把持に有用な掌部の形状、材質、構築方法が明らかとなった。しかしながら、これらは爪や指先の肉と同様に市販品の流用である。製品化を鑑みるためには、この部位についても我々が安定して入手・提供できるような部材に転換することが望ましい。

2) 最終年度に於けるFA仕様及び生活支援ロボット仕様エンドエフェクタの開発・成果報告

2-II-1. FA仕様のエンドエフェクタの開発・成果報告

2-II-1-1. 緒言

初年度より開発を行なっているロボットハンドの各指関節は四節リンクを重ね合わせた複合四節リンク機構により構成され最少となる1個のアクチュエータで“把持”動作を実現するロボットハンドである。

また、駆動経路中に配置した協調リンク機構によって、把持対象物の形状に沿って均一な把持力で把持することができる特徴を有する。この協調リンク機構は各指への駆動伝達をジンバル形状の球体関節状に拘束し、このリンク機構の一端を直線運動させることによって“握る”という把持動作を実現することができる。これにより、従来の把持計画、制御プログラムが必要なくなり、1個のアクチュエータで駆動することができるため、従来よりも低価格で多形状の物体把持を実現することができる。

2-II-1-2. 開発課題

生産ラインでのワーク搬送などFA機器として使用する場合、物体把持は2指～3指で実現することができる。従来、使用されてきたワーク形状に専用設計されたチャッキングハンドは固有のワーク形状のみハンドリングとなるが、本ロボットハンドが持つ協調リンク機構では、その特徴を生かし複数種のワーク把持を実現することができる。そこで、本開発では協調リンク機構の持つ特徴をそのままに、下記の2項目の課題を解決するFA向けに特化した3指型ロボットハンドの開発を目標とする。

- 1) FA仕様ハンドの試作・評価
- 2) ロボットアーム実装での実装試験・評価および改良



2-II-1-3. 課題の解決方法及びまとめ

1) 3D協調リンク機構

初年度、開発を行なった5指型ロボットハンドは各指関節へ繋がる駆動伝達経路を天秤型のリンクで拘束し把持動作を実現するものである。駆動経路中に天秤型リンクを挿入することで、把持対象物の形状に沿って均一な把持力を掛けることができる。しかし今年度、目標にした3指型ロボットハンドでは各々の指が3次元状に配列されるため、協調リンク機構を従来の天秤型で再現することができない。

そこで、下図(図2-1参照)に示したように球面関節を用いることで、従来と同じ協調リンク機構の特性を再現した。この球面関節状の部品が接続されるベースプレートに上下方向にストロークされることで、従来通り1個のアクチュエータで把持動作を実現することができる。

また、把持対象物の形状によって把持動作時に外乱が掛からない場合、常にセンターリング(初期姿勢)を維持できるようにスタビライザー機構も併せて付け加えた。

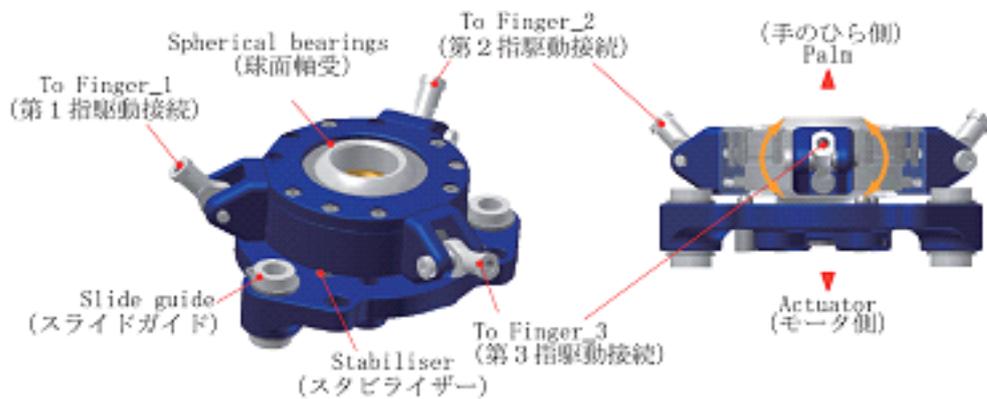


図2-1 3D協調リンク機構

2) 手のひら機構

従来のロボットハンドの多くは各指を固定する『手のひら』は平面状の部品で構成され手のひら部が可動しないロボットハンドである。

しかし、ダブル技研が行なった従来型ロボットハンドの把持特性実験の結果から、『手のひら』が固定で指のみの把持動作では対象物に接触する各指の力の分散が難しく、把持力を分散し均一な力で把持動作を行なうには、各指の接触面に圧力センサが必要となることが分かっている。

また、『手のひら』が平面形状で折れ曲がらないことで各指の回転方向は一軸方向にのみ限定されるので把持対象物との接触面積が小さく、把持可能な物体のサイズが限られてしまい把持不可、または把持できても不安定な把持になることが分かっている。

そこで本開発で課題とする『手のひら』機構を追加することで、把持対象物に“握る”把持動作を行った場合において、指の側壁が対象物体と接触し結果的に接触面積が増加する。

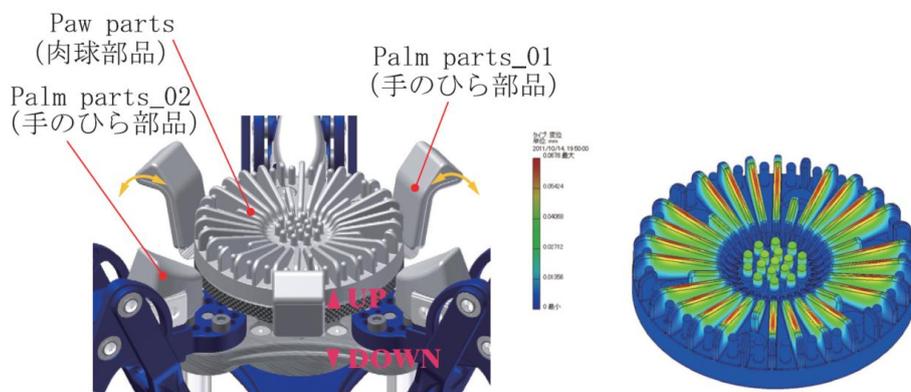


図2-2 手のひら機構

2-II-1-4. ロボットアーム実装での実装試験・評価

本開発では初年度、開発を行なった5指型の手のひら機構をベースに3指型に拡張し、受動可動式の手のひら機構を持たせることで、把持対象物との接触面積を増加し把持後の安定性向上を実現した。

製作した試作機を実際にロボットアームに実装し把持特性試験を行なった(図2-3参照)。また、連続耐久試験を行い試作機の100万回連続稼働の耐久性を確認し、その実用化の目処が立ったと考える。

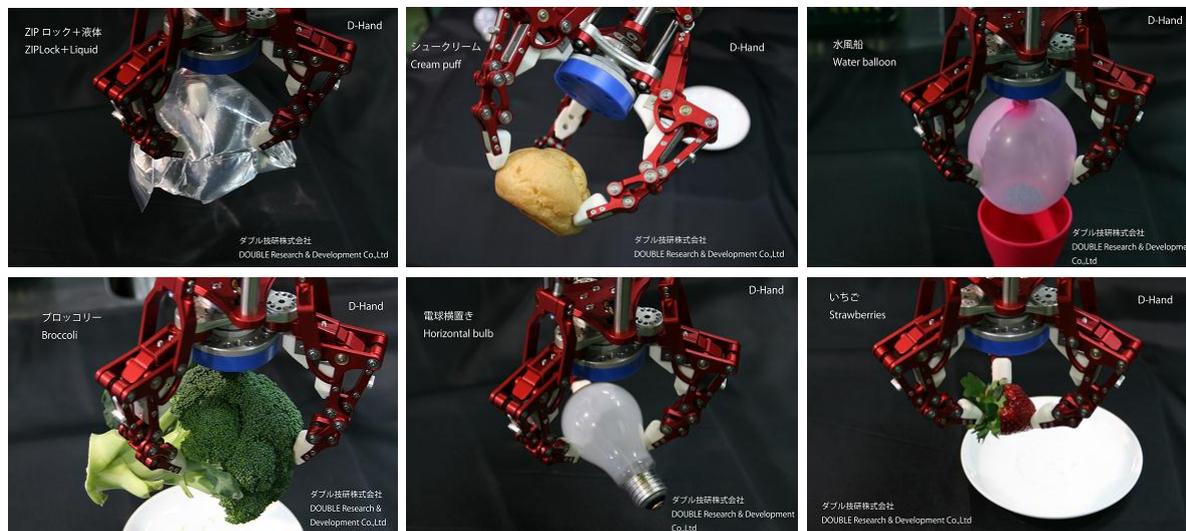


図2-3 把持特性試験

2-1-5. ① 2指仕様のハンド（グリッパ）の開発

事業化時における市場ニーズへの更なる適用のため、オプション展開の戦略を念頭に、協調リンク機構の構成を最小限として成立させた2指のハンド（以下グリッパと呼ぶ）の開発を行った。

現在の市場における産業用ロボットのエンドエフェクタとしてグリッパの採用される機会は多く、本開発のエンドエフェクタについてもユーザの立場からの選択肢として、グリッパのオプションを用意する意義は大きい。

この協調リンク機構を採用したグリッパは、初年度に特許申請を行った機構を具現化したものであり、従来の対称開閉型のグリッパが単に把持対象物を挟み込む様に“摘む”動作のみが行えるのに対し、“摘む”動作に加え、馴染み把持により“掴む”動作を可能とし、これを1つのアクチュエータにて行えることを大きな特徴とするものである。

このグリッパはピンセットで物を“摘む”様な精密把持と、把持対象物の形状に指を馴染ませて”掴む”様な握力把持を単独で行い、“摘む”動作のみを行う従来の開閉型グリッパ単独では成し得なかった把持を可能とする物である。

2-1-5. ② 開発した2指仕様のハンド（グリッパ）の概要

本グリッパを開発するにあたり、先ず協調リンク機構を成す最小限の構成として馴染み把持の内、“摘む”動作を行えるグリッパ（タイプA）の試作評価を行い馴染み把持可能な事を確認した。次に“掴む”馴染み把持を行うための指関節及びリンクを追加したグリッパ（タイプB）の開発を行い、これを試作評価した。以下に試作したグリッパの構成と、その動作および課題について説明する。

《グリッパの構成と動作》

① グリッパ（タイプA）

図2-4にタイプAのグリッパの構成の概略とその動作の様子を示す。

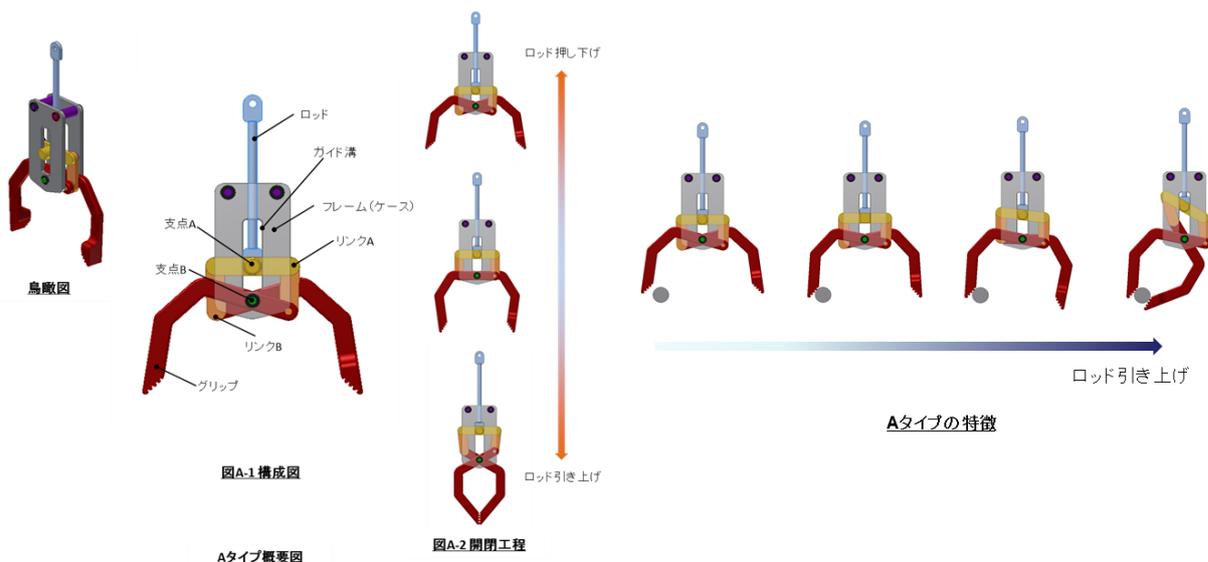


図2-4 グリッパ（タイプA）

グリップは図2-4左に示す様に直動アクチュエータによって上下するロッドとAを支点とするリンクA、グリップ、リンクAとグリップを連結するリンクB及びこれらを設置するフレームで構成される。支点Aはロッドとともに上下し、ロッドが引き上げられることによってグリップが閉じられる。このとき、図2-4右に示す様な位置に把持対象物があり、対象物を水平に動かすことが困難であったり、図の様にグリップを把持対象物に対してオフセットさせた姿勢でのアプローチが余儀なくされた場合、従来の対称開閉型グリップであれば片側のグリップ

(指)が拘束されることで、それ以上グリップを閉じることが不可能となる。しかし、本開発のグリップであれば、図2-4右に示す動作工程の様により一方の指が拘束されると他方の指が迎えに行きグリップを閉じるため、把持が可能となる。

② グリップ (タイプB)

上記①の機構のグリップでは、物を把持する際に“摘む(挟む)”動作のみとなる。

これに“掴む”動作を可能とする機構を追加し、且つ本開発のエンドエフェクタの特徴である1つのアクチュエータのみで駆動させるという条件を満たすグリップ (タイプB) を考案し、試作評価した。

図2-5にこのタイプBのグリップの構成の概略と動作の様子を示す。

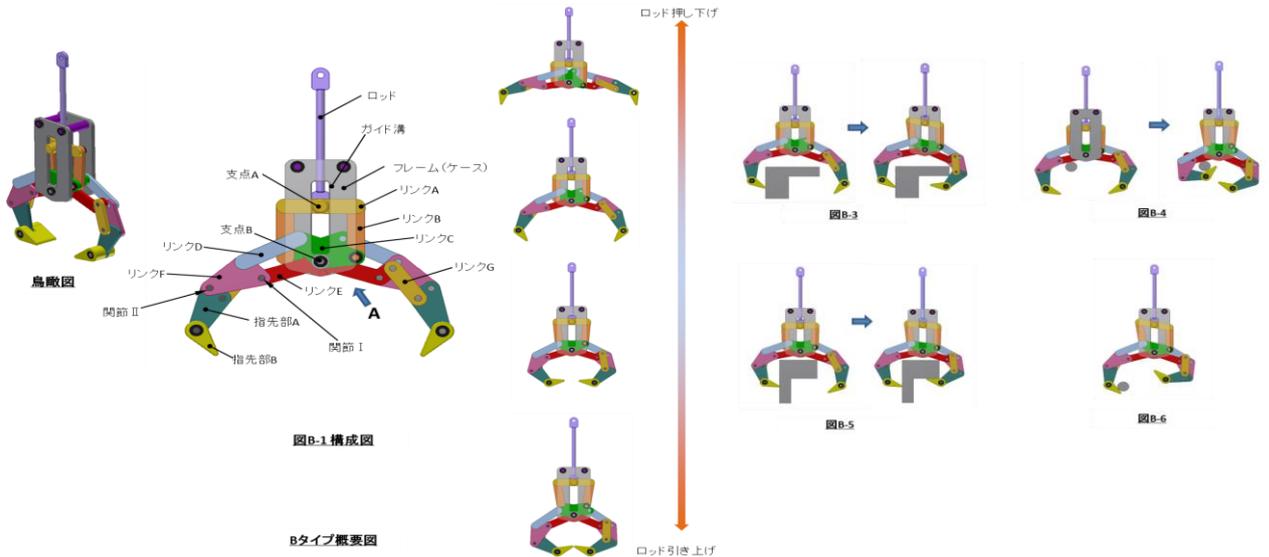


図2-5 グリップ (タイプB)

左図の構成でロッドの上下によりグリップが開閉する機構までは上記②のタイプAと同様であるが、タイプAの“グリップ”にあたる部位に初年度までに開発した馴染み把持のための指の屈曲の機構と、指を対向させてものを包み込むように“掴む”ための“手のひら機構”を追加することにより、1つのアクチュエータにて“摘む”動作と“掴む”動作とを行うことが可能となる。その動作は図2-5右の(1)～(3)に示す様に把持対象物の形状に馴染む様に把持する形となる。

このとき、図2-5右の(4)の様に把持対象物の初めにグリップの指に当たる位置によっては一方の指が把持対象物によって拘束された後、他方の指が空振りする様な形となり、把持することができない条件のあることが一つの課題として挙げたが、これについては後述の様に意図しないタイミングで指の関節が屈曲しない様、スプリングを設けて指の姿勢を調節することで解決している。

2-1-6. グリッパの試作及び評価

① グリッパ (タイプA)

上記のグリッパを試作し、その動作と把持性能を確認した。先ずタイプAのグリッパについての試作品にての把持の様子を図 2-6 に示す。図 2-6 の写真は試作したタイプAのグリッパのアクチュエータを除く部分を手動にて稼働させ、目標の一つとして掲げている把持力 1.5kg 以上の性能を実証するために目標サイズ以内のグリッパにて 2.0kg の重量の把持対象物を馴染み把持する様子を示すものである。

ここで、本来アクチュエータにて動作させる前述の“ロッド”部分を手動にて上下稼働させてグリッパの開閉を行っているが、実際にロボットアームなどへ実装して使用する際にはこのアクチュエータ部は直動系であれば、電動モータ、エアあるいは油圧シリンダなど、その種類は問わない。

また、図 2-6 の左の写真はグリッパの把持前の様子を示すとともに、試作したグリッパにストップを設けて馴染み把持の動作を拘束して従来の対称開閉式のグリッパと同等の動作をする様にし、従来のグリッパでは、グリッパとある程度重量のある把持対象物をオフセットさせた初期姿勢をとる場合、把持のできないことを確認したものである。

然る後、ストップを外し、開発したグリッパの動作を行える様にして把持させた様子が右の写真である。写真の様に、開発したグリッパでは従来のグリッパでは把持できない条件の元でも把持対象物の形状に馴染む形で把持することが可能となる。

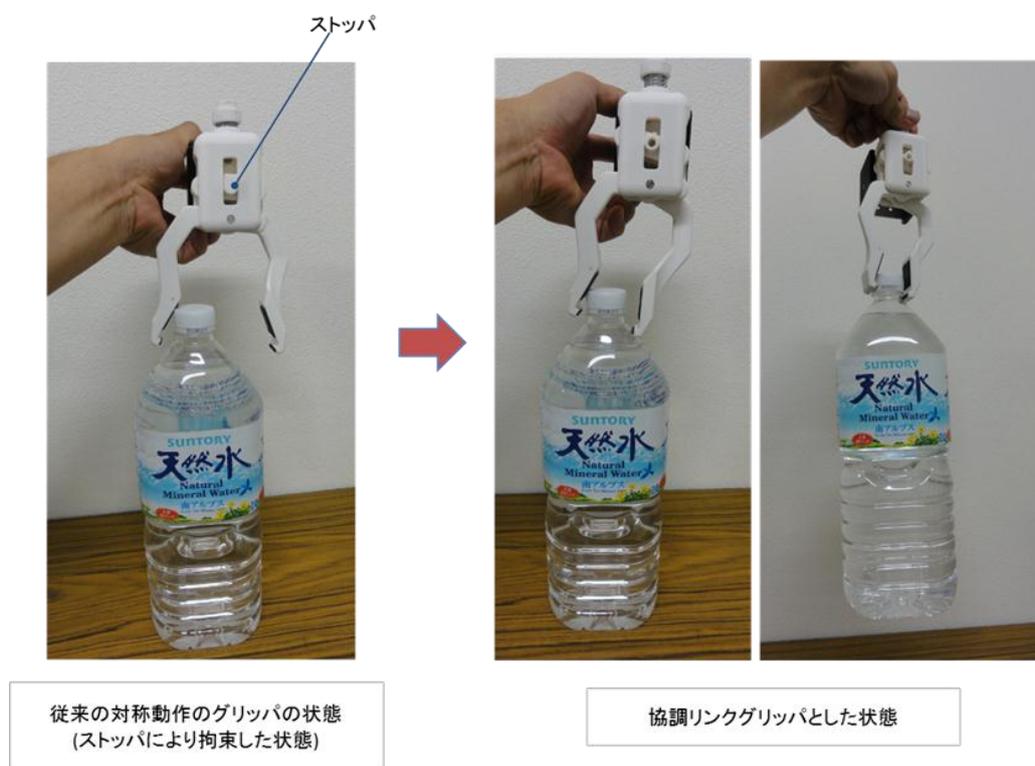


図2-6 グリッパ (タイプA) の把持の様子

② グリッパ (タイプB)

図2-7にタイプBのグリッパの試作機による把持の例の様子を示す。

写真左側はピンセットの様に小径のネジを“摘む”動作の様子であり、写真右側は缶を“掴む”様子である。把持するためにグリッパが閉じられる過程で、指の関節より下の部位のみに把持対象物が接触する様な場合は写真左の様に“摘む”様な把持となる。また、指の関節より上の部分に把持対象物が接触し、指の接触した部分が拘束されると、指の関節が屈曲方向へ曲がる機構となっており、写真右の様な“掴む”様な把持となる。

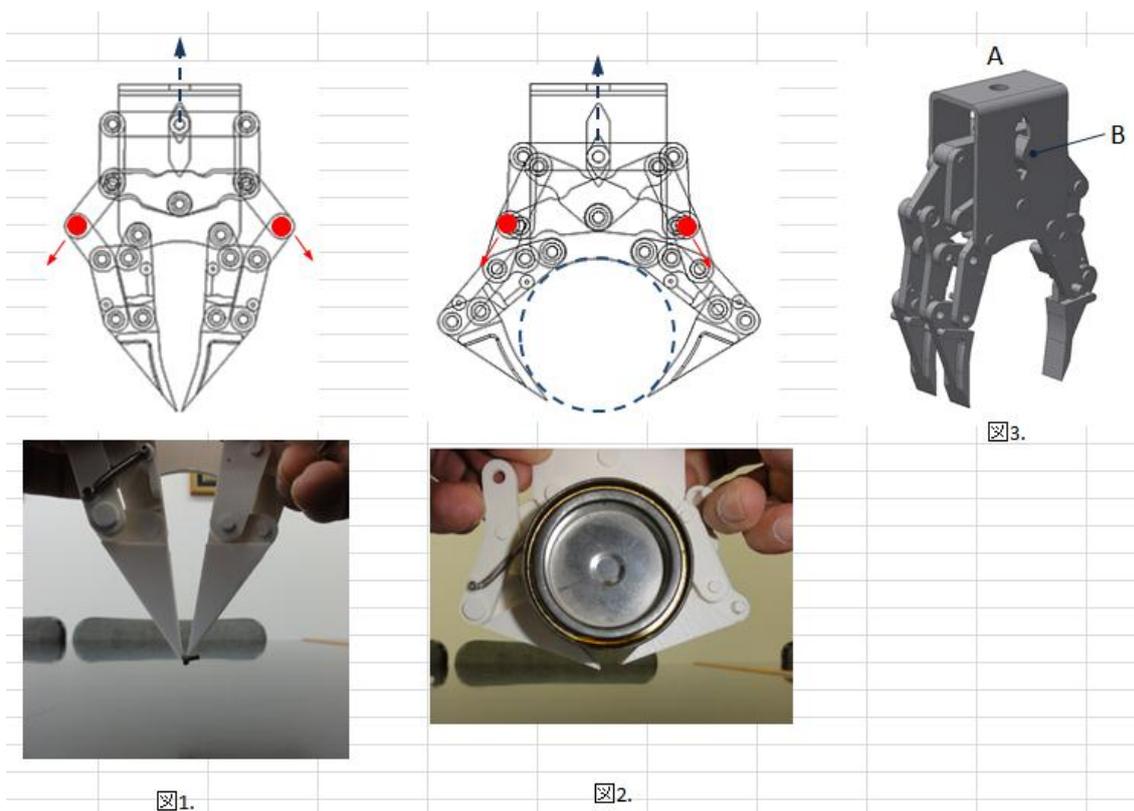


図2-7 グリッパ (タイプB) の把持の様子

以上の様に、1つのアクチュエータにて、指を対向させる機能に絞った“手のひら機構”を有し、馴染み把持を行うことが可能で巧緻性と強把持の双方の機能を併せ持ち、当初の把持力、軽量・コンパクト化の目標値を達成するグリッパの機構を確立した。

この2指のグリッパについての課題として、より実際の用途に合わせた仕様の精査や耐久試験を含む試験評価や実証試験の反映などを残すが、事業化時のバリエーション展開に於いて有効となる機構確立としての開発フェーズを終えたと考える。

2-II-2. 生活支援ロボット仕様のエンドエフェクタの開発・成果報告

2-II-2-1. ヒューマノイド型ロボットハンドとしての容姿の維持 (コンパクト・軽量化・義手適用開発)

事業化時におけるラインナップ戦略・バリエーション展開のため、本開発におけるフレキシブルハンドの義手を含めた生活支援ロボットへの適用を念頭に、初年度の研究開発成果を反映し、コンパクト・軽量化を含め、実用化のための開発を行った。実施項目は以下の2項目である。

A) フレキシブルハンドの生活支援ロボット用途としての実用化開発

初年度評価により顕在化した機構・構造における課題に対し、該当部位について再設計、試作、実証評価の工程を必要に応じ繰り返し、課題解決を図る。

B) 義手用途としての適用・実用化開発

義手適用についてはその形態が多岐に渡るため、本開発のフレキシブルハンドについて、人体における代表とする表面筋電位信号により把持操作可能なことを確認し、実用化についての手法とその論拠をアウトプットとする。

上記フェーズにて機構・構造を確立したハンドについて、義手適用のための機構・構造、インターフェース設計、試作評価を行う。上記試作機により、表面筋電位信号による把持動作の実証試験を行い、事業化時のバリエーション展開時に活用するため、その実用化手法について纏めたドキュメントを作成する。

2-II-2-2. フレキシブルハンドの生活支援ロボット用途としての実用化開発

初年度の成果を元に、実用化に向けた開発を行った。

I. テストベンチを用いたモータ調査について

ハンド適用に適したサーボモータ選定のために、テストベンチを用いてそれぞれの特性調査を行った。サーボモータは (A) メインサーボ用 (B) サブサーボ用 に大別し、それぞれの特性について検証した。次頁の表1に各項目の結果を表記する。

表1 各モータの特性調査結果
メインサーボ用モータ

		サイズ	質量	トルク	回転速度	バックラッシ	制御	寿命	消費電力	発熱	コスト
1	Dinamixel EX-106+	×	×	◎	△	○	RS485	○	×	×	×
2	Dinamixel RX-64	△	△	◎	◎	○	RS485	○	×	×	△
3	RS405CB	◎	○	○	△	○	PWM/コマンド	◎	○	○	○
4	RS601CB	○	△	×	◎	△	コマンド	○	◎	○	○
5	KRS-4034HV ICS	○	◎	○	△	×	シリアル	×	△	△	◎
6	KRS-4033HV ICS	○	◎	○	◎	×	シリアル	×	△	×	◎

サブサーボ用モータ

		サイズ	質量	トルク	回転速度	バックラッシ	制御	寿命	消費電力	発熱	コスト
1	S3156	◎	◎	△	○	○	PWM	△	◎	△	◎
2	VS-S020A	○	◎	△	○	○	PWM	△	◎	○	◎
3	RS301CR-H2	×	×	◎	◎	◎	PWM/コマンド	◎	△	◎	×

モータにより特性の違いが多く生じている。評価のために、各モータの特性調査の結果を一覧に纏めた。

メインサーボモータで特に重用されるのはトルクと耐久性である。トルクはモータのサイズに比例する傾向があるため、ハンドの搭載スペースとの兼ね合いを鑑みて検討する必要がある。1～4番は耐久性に優れている一方、サイズおよび質量の点では好ましくない。一方、5～6番はサイズ、コストの面で優れている。またコストは駆動回路の値段も加味せねばならないが、その点でも5、6番は低コストでの運用が可能である。サブサーボ用モータでは、第一に優先するのはサイズである。この点から発熱などの安全性を多少犠牲にしても1番2番を利用することが望ましい。

どのモータを採用するかについては、ユーザのニーズに沿って検討することが必要である。本ハンドでは、メインサーボモータにはトルクと寿命を重視して、1ないしは3番が、サブサーボモータはサイズを優先して1または2番の適用が望ましいことが分かった。

II. 鎌倉の把持分類表の実現

初年度の報告で示すように、従来のハンドでは鎌倉の把持分類表に示される全ての把持動作を実現できず、達成度は57.1%に留まっていた。これは、拇指周辺の機能が不十分であることが要因である。

例えば我々が物体を把持する際、意識せず指以外の部位を利用していることが多い。図2-7のPoS, PoIでは柄の下端に拇指球が接触することで、PoHでは示指～小指の対向として拇指球が作用することで安定把持が実現されている。

この拇指球は4種類の筋肉から構成され、拇指動作時に硬直化し隆起する。すなわち、力を発生する際には盛り上がり、通常時は柔軟にといった複雑な動作を適切に再現するのは極めて難しい。このため、拇指球をエラストマーシートが添付されたフィルムシートで構築し、内部に接触バンパーを設置した。通常時はヒトと同様にフィルムシートが柔軟に屈曲する。拇指の節Dに力が加わった際は、拇指中手骨とバンパーとが近接し、フィルムシートを介して対象物に接触することで擬似的に拇指球の硬直化を表現することが可能となった。

III. 拇指MP関節2自由度化

ヒトの拇指MP関節は、屈曲・伸展に加え、内転・外転方向にも自由度を有している。この内外転方向の自由度は指先を用いた摘み把持に大きな効果をもたらしている。例えば図 2-7 の TIP では内転することで、示指と拇指とが対向するように接している。一方、PoD では MP 関節が外転することで示指と拇指の指先がほぼ平行に並び、鉗を安定して操作していることが分かる。つまり、拇指の指先は位置のみならずその姿勢もまた重要な意味を持つ。

一方、本ハンドの拇指は他の指同様、拇指付け根のリンクプレートが中関節を押し込むことで MP 関節を屈曲させるのみであった。よってこの構造を改良し、関節部をボールジョイントへ置換することで、MP 関節が屈曲に加え外転するよう構築した。図 2-9 に構造を示す。外転角度は 15 度である。なお屈曲方向へは従来同様に動作するため把持性能に影響は生じない。

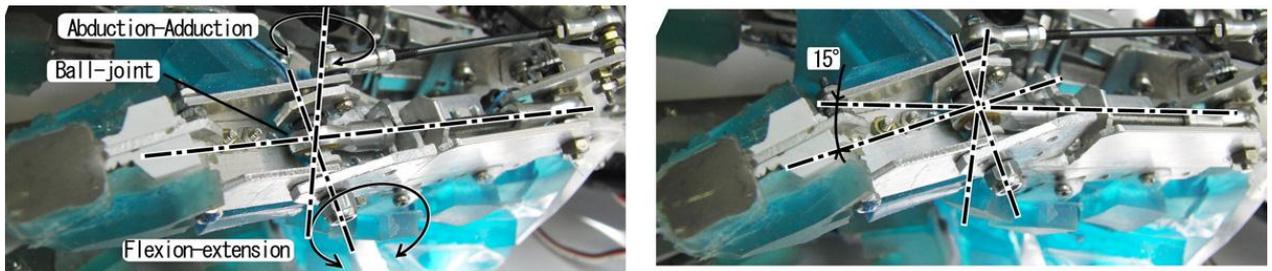


図 2-9 拇指 MP 関節の 2 自由度構造（伸展屈曲・内転外転の 2 方向に可動。外転方向には 15 度の可動域）

IV. 鎌倉の把持分類実施結果

MP 関節の 2 自由度化、拇指球の表現を実現したことにより、箸を除く全ての把持が安定して実現できた。なお TVII はヒトでも指を複雑に動かさねば操作できない。このため福祉用箸を利用することで把持ならびに操作を実現している。結果を図 2-10 に示す。

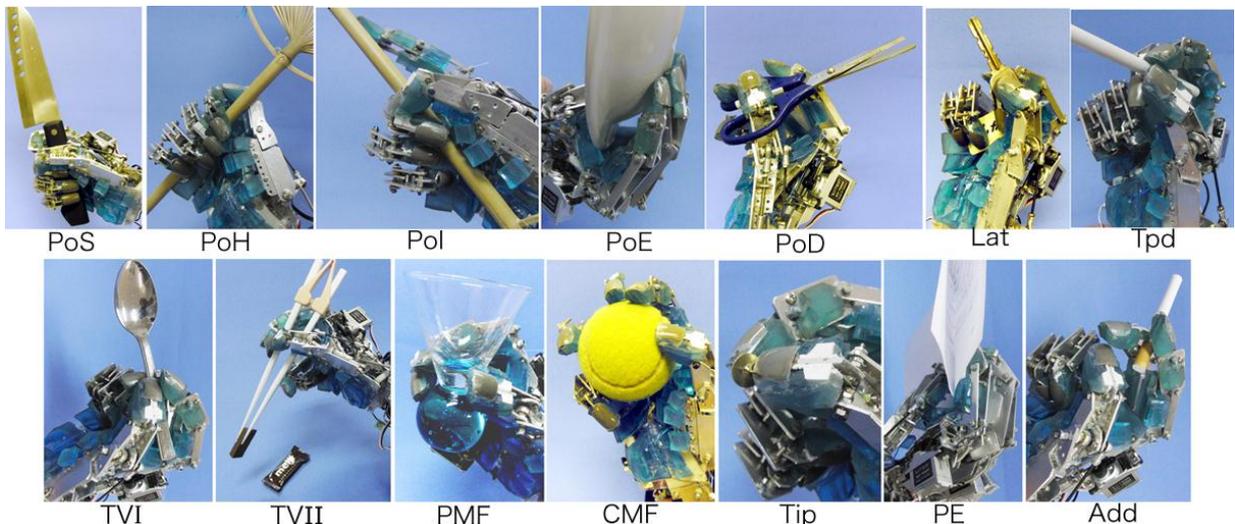


図 2-10 鎌倉の把持分類 実施結果

V. 手掌皺および指間腔

ヒトの手掌表面は手掌を構成する骨格、内部の筋肉類の動作と比例し変形する部分が多く、通常電動アクチュエータを用いるロボットハンドでの再現は極めて難しい。

このため、手掌表面はフィルムシートで構築し、筋肉等の弾性を再現するためのエラストマー樹脂を添付することで同様の機能を表現するよう配慮した。エラストマー樹脂は、ヒトの手掌皺を参考に指および手掌の屈曲状態を鑑みて配置した。実際に構築した結果を図 2-11 に示す。フィルムシートやエラストマー

樹脂はある程度の剛性を有するが、この剛性が図 2-10 に示すような手掌の変形を阻害する場合がある。このため手掌の屈曲を阻害せず、かつ安定した接触が実現できるよう、遠位手掌皺、近位手掌線を境に分割した構造としている。

円筒物を把持する際、我々の手は示指-小指に加え、手相の線にそって手掌を屈曲させ、対象物を包み込むように接触させている。さらに拇指は、指部分に加え拇指球を対象物に接触させることで安定性を高めている。また示指-拇指 MP 関節近傍間の指間腔は示指、拇指の動作に連動してアーチを描く。このアーチは円筒物やペン等の摘み把持において、対象物に接触することで指との相対的な位置を固定する、重要な役割を果たしている。よって拇指球に加え、この指間腔についても再現を試みた。手掌と同様にフィルムシートにエラストマーシートを添付し、かつワイヤにより固定点をつなぐことによって対象物との安定接触を表現した。図 2-12 に形状を示す。

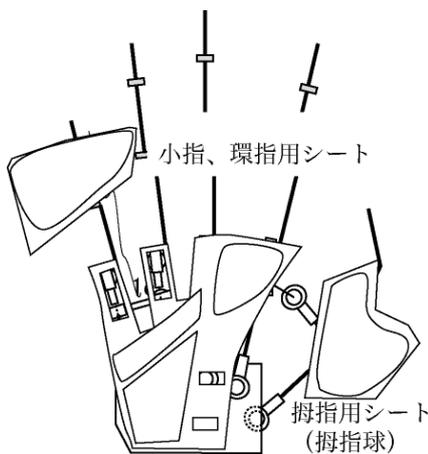


図 2-11 手掌皺の構成 (フィルムシートによる多重積層構造)

図 2-12 指間腔の構造

VI. 実験結果

構築した手掌部を搭載したハンドにより、主に手掌を利用する把持動作について実験を行った。把持実験結果を図 2-13 に示す。

(a) は日常生活で最も多く利用される円筒把持である。ここでは代表例としてテニスラケット、包丁把持について実験した。双方ともある程度の衝撃が加わる把持であるが、構築した手掌が均等に接触することで安定した把持を実現している。

(b) は重量物に対する把持である。掌部および指部が対象物に対してなじむように接触するため、より広い面積で接触するようになった。この結果、握力が弱くとも重量物を確実に保持でき、電動ドリルや、1.5kg 程度のペットボトルなどを掴んだまま振り回したり傾けるなど姿勢を変化させたりしても把持を継続し続けることが可能となった。

(c) は手のひらを中心に対象物を絞るように把持する動作である。ドアノブは滑りやすく、かつ複雑な曲面で構成されているため、極めて把持が難しい対象である。これに対し、手掌皺を設けたことでこの複雑形状に対しても手掌は適切に屈曲し安定接触するようになった結果、ノブを回してドアを開けることが可能となった。ラジオペンチについては、拇指球を設けたことで柄をこの部位に押し付けて、他方の柄を指で握り締めて先端を閉じるといったヒトと同様な動作を実現できるようになった。

(d) に示す皿などの食器は複雑な形状をしている物が多い。これに対しても掌部を中心に接触させることで安定把持が実現できた。また自転車のハンドルなど、複雑な形状であっても掌部および指が巻き付けるように接触するため、問題なく把持が実現されている。

(e) 拇指と示指等を利用した挟み把持の一例である。拇指付け根の指間腔を再現したことによって、指での把持のみならずこの指間腔が対象物に接触することにより把持が安定される。なお箸は通常各指を極めて微細に操作して位置がずれないようににせねばならない。このような動作は対応できないため、把持は福祉用箸を利用することで実現している。



図2-13 日常生活の把持動作結果

VII. 手掌部材質の検証

これまでの実験により、指及び掌部の接触状態が把持状態の適性表現に重要であることが分かっている。このため把持状態の向上に効果的な材質について検討を行った。検討対象としたのは以下に示す3種類の樹脂である。

1) 従来適用の弾性体（熱可塑性エラストマーシート）

衝撃吸収性が高く、適度な粘性と摩擦係数を持ち、生体の感触に近い。一方で硬度は一定であり、またシート状のみであること、切断が難しいことから直線的なカットしかできず、任意の箇所任意の形で利用することが困難。形状形成の点で扱いにくいのが難点である。

2) 候補弾性体1（スーパーゲル）

エラストマーシートの一種。透明、上記（1）より硬度が高い。しかしながら他の性質は（1）に準じる。このため、切断が難しく直線的な形状となり、任意の箇所に任意の形で利用することが困難。形状形成の点で扱いにくい。

3) 候補弾性体2（人肌ゲル）

エクシールコーポレーション製。ウレタン系の弾性体、硬度がアスカーC硬度で、0、5、15から選択可。シート状の物と、2液混合式による自由形成方式がある。自由形成方式を用いれば、ヒトの手のような複雑形状の形成にも利用できると思われる。

このため、候補弾性体2について、2液混合型を用いて実際に手掌部を構築した。

1) 構築方法

手掌部：予め2液混合型（アスカーC硬度0）を用いて塊状に構築。その後自由形状にカットし、ポリプロピレンシートの上に添付。

指先端部：ヒトの指を型取りし、2液混合後流し込み。硬化後取り出し。

2) 結果

従来の熱可塑性エラストマーシートよりも、よりヒトに近い柔軟性と質感の表現が可能になった。

しかしながら、塊状では弾性変形領域が大きいため、アスカ-C硬度0では柔らかすぎる（赤子の頬ほど）。実際に掌部、指部に形成した結果を図2-14に示す。

一方、指先部は内部に骨格があるため弾性変形領域が狭くなり、適度な反力を生む結果となった。

以上より、構築する部位を適切に判断し、適宜使用する事で必要な形状形成と接触状態の表現を達成できるようになった。

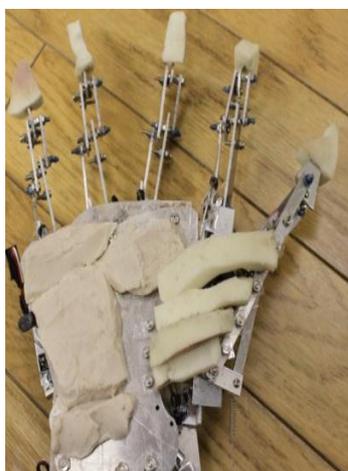


図 2-14 人肌ゲルによる指・手掌部構築結果

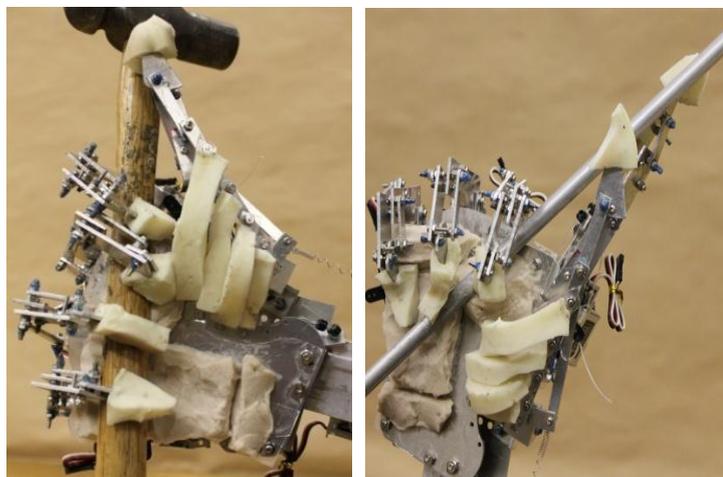


図 2-15 把持実験結果

2-II-2-3. 義手用途としての適用・実用化開発

義手用途のための外装による質量増加分が装着者の段端部への負担増とならないよう、初年度までのハンド質量 700g に対しハンド部の質量は 80%を実現する。義手として利用するために、表面筋電位による操作のための技術検証を行う。

I. 製品候補モデルの構築

初年度の第一プロトタイプで得られた知見を元に、軽量かつ内骨格構造を実現する。骨格構造に関しては初年度の成果を元とし、義手や生活支援ロボットのための製品候補モデルを構成した。外装は候補弾性体 1 を利用した。

II. 構成モデルのポイント

- 1) 内骨格構造として表皮の装着を可とする
- 2) 簡易に組み立て可能な構造とする
- 3) 全体をスリムにし、より人の形状に近づける
- 4) 軽量化を進める
- 5) ベアリングを多用し滑らかな動作を実現する

最終年度購入した資材（アルミ材、モータ、ベアリング、候補弾性体等）を用いて構築した。図 2-16、17 に構築中の評価モデルの概略を示す。

III. 製作結果

- 1) 全長（指～掌部下端）：170mm 全幅（通常時）：100mm、（最大時）130mm
- 2) 質量：（バッテリー除く）370g、（バッテリー含む）450g ※初年度モデル：695g
- 3) 動作電圧：6V～12V、操作系：無線コントローラによるシーケンス制御

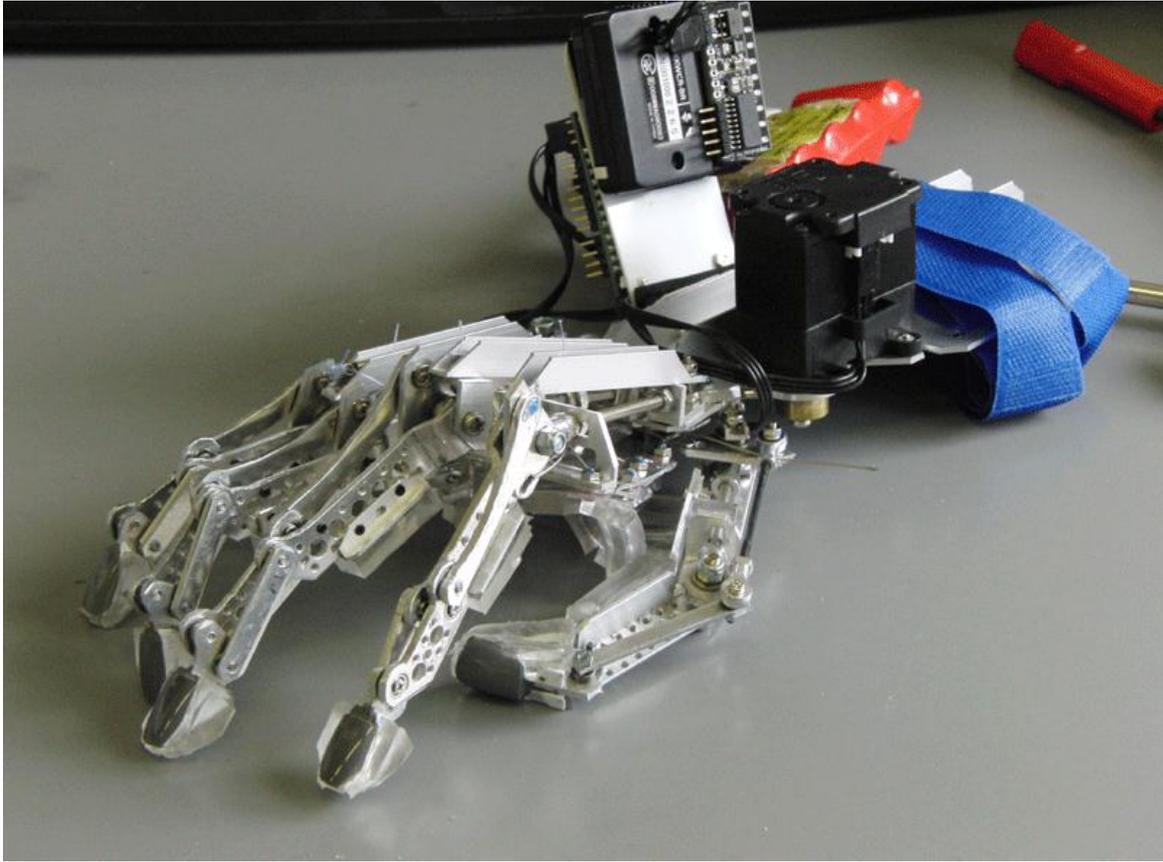


図2-16 義手等用製品候補モデル

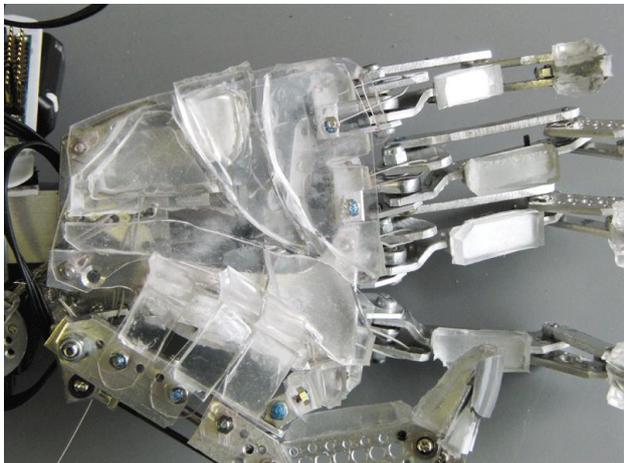
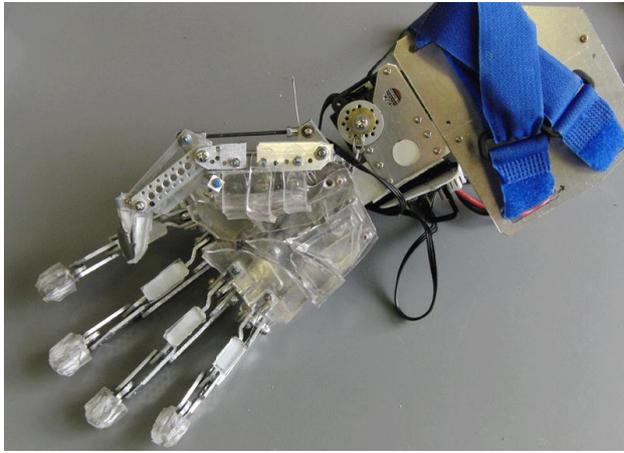


図2-17 外観および掌部の形状

IV. 構成結果

乾燥重量で 450g、初年度に対し質量は 64.7%となり、目標を達成した。基本構成は前述の開発した構成を積極的に取り入れることにより、同様の動作範囲と機能を実現している。また板状材質を基本構成としたことにより、加工性は極めて高く、生産時の製作コストの点でも有利なものとなっている。

V. コスメティックグローブによる義手モデルの開発

義手を装用する装着者の多くは、ヒトの手に近い外観の再現を要望することが多い。このため、ヒトの手の質感と形状を再現することを目的に、コスメティックグローブの装用実験を行うこととした。コスメティックグローブは、通常シリコン等で構成されたもので、皮膚の色や質感、形状は勿論のこと、爪や血管が浮き出る様子をも表現することが必要である。このため従来のハンド用外装と異なり、設計時の制約条件は極めて高いと言える。また耐久性の問題からグローブはある程度の厚みを持つことが必要となり、内部空間は見た目よりも大幅に狭く、質量も 120g 程度と、あるのが通常である。

このため、これまで開発を行ってきた製品候補モデルの構造を参考に、コスメティックグローブの装用実験を行った。図2-18に、コスメティックグローブの外観を示す。



図2-18 コスメティックグローブ外観

図2-18に示したコスメティックグローブの特徴を以下に示す。

- ・シリコンにより全体が構成。材質の特性上、切り込みに過度の負荷が掛かると裂ける。このため、切断後は端部に破断防止処理を施すことが望ましい。
- ・高い柔軟性を持ち、人に近い感触を実現しているが、伸び率はそれほど大きくない。このためハンドに装着するには掌部の一部を切断し差し込めるようにする必要がある。
- ・指先及び爪部は肉厚があり、ある程度の硬度を実現。ハンドの爪構造と複合するため、ハンドの指先構造についても検討が必要。

図2-19に示すように、外観はハンドとほぼ同程度のサイズだが、内部は一部狭小の部位があり（例：指先は爪の固さを表現するため肉厚がある）。よって内包させるためにハンドの細部を調整する必要がある。

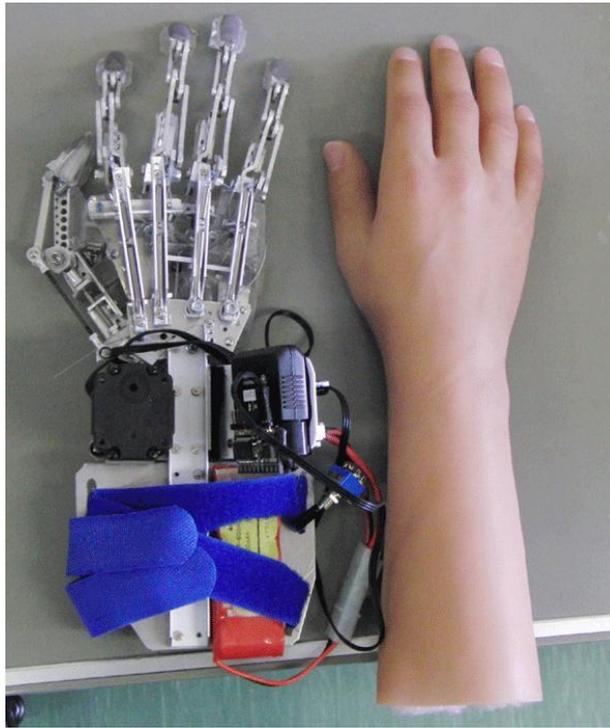


図2-19 ハンドとコスメティックグローブ比較

質量に関しては、製品候補モデルで達成した軽量化により得られた質量マージンを利用し、コスメティックグローブの質量を相殺できる。コスメティックグローブの質量は 119g である。結果合計質量は 569g となり、グローブを装着してもなお初年度に対し質量は 81.9%と軽量である。

VI. コスメティックグローブ装着実験

コスメティックグローブを加工し、ハンドを挿入するための検証を行った。実施項目は以下の3点である。

- 1) グローブの加工手法について実際に切削し試験
- 2) グローブの開き方について検証
- 3) 内部に挿入するためのハンドの形状、動作形状、機能の検証

得られた結果を以下に示す。

- 1) グローブ内部にメッシュ状の補強材を添付することで切削後に裂ける状態はある程度回避
- 2) グローブは剛性が高く、さほど伸展しない
- 3) 手首部はくびれているため、腕部の左右を切り開かねば挿入は難しい
- 4) ハンドの各種突起が影響し、挿入時に抵抗となる
- 5) グローブの肉厚のため、指部の内部容積はかなり少ない。指先は従来よりもかなり細身にする必要あり
- 6) 手掌部はリンクが稼働するため、プレート等を設けリンクとグローブとが接触しないようにする工夫必要
- 7) 外部からの感触はゴツゴツとした感触はあるものの、比較的良好

以下に、コスメティックグローブを装着した結果を示す。

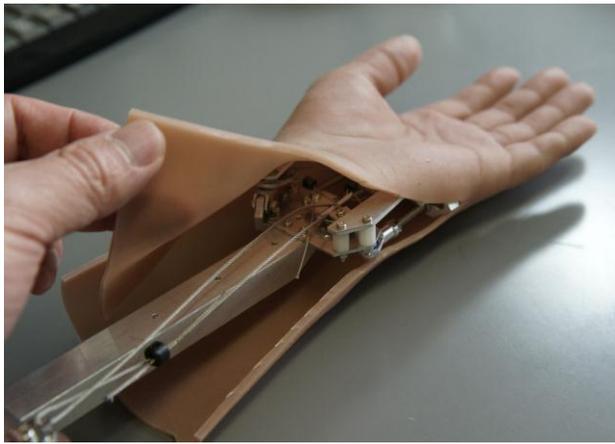


図2-20 コスメティックグローブ 装用結果

実際に挿入した結果、一部の構造がグローブと強く接触する状態が見られた。これは、ハンド指先の縮小化、グローブ内部を傷つけないための内部突起処理を更に行わねばならない状態を示している。しかしな

がら、これらは機構に起因する問題ではなく、各部の形状に寄る問題であるため、対象部位の見直しにより十分対処可能であると考えられる。

VII. 表面筋電位の測定

義手として利用するためには前腕部の表面筋電位を計測する必要がある。このため、購入した備品 (P-EMG plus) を用い、前腕部の表面筋電位を測定した。この結果、前腕の浅指屈筋及び深指屈筋が応答性の面から計測対象として良好であることが分かった。一方で手首の回内・回外時にも電位が生じる事も分かったため、これらに対する対処の必要性も明らかとなった。

このため、前腕部内転・外転時における筋電位への対応を行うための機器について実験を行った。手首の内転検出にはホール素子を用いたガウスメータを使用した。磁石は上腕の動きに連動する。ホール IC はケーブルを介して肘関節に連動するように配置される。この結果、内外転動作時に磁石とホール IC との距離変動が磁束の変化として検出される。ホール IC は東芝製の THS119, 磁石には磁束密度 180mT の希土類永久磁石を用いている。

磁石はゴムチューブ内に 2 個、20mm の距離をおいて固定した。ねじりが無い状態ではホール IC が 2 個の磁石の中心にホール素子が来るように調整した。

内外転時の検出結果を図 2-21 に示す。この結果より、ガウスメータを用いることによってねじりの有無の判別が可能であり、また検出した値によって外転・内転などねじりの方向の判別にも利用が可能であると考えられる。

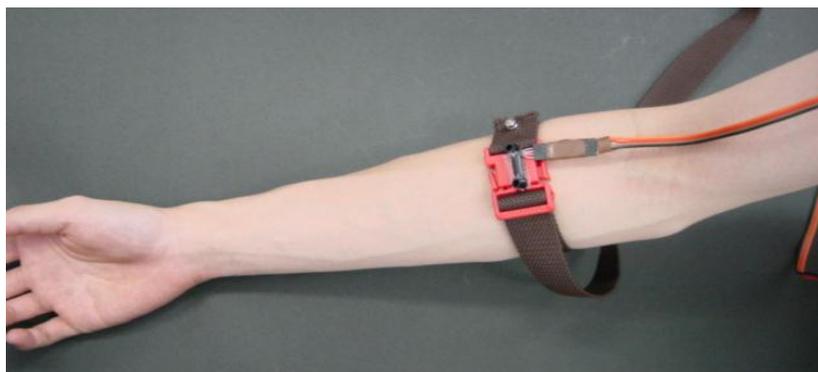
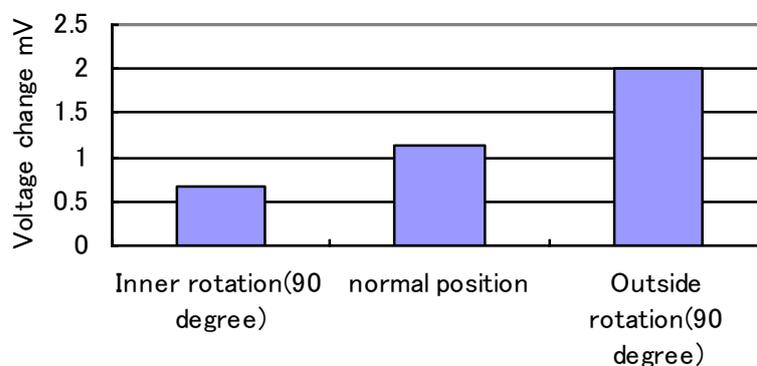


図 2-21 ねじり検出機構



Arm position

上記に示すように、表面筋電位の検出、および筋電位による操作の実現は単純ではない。加えて筋電位信号そのものも極めて微弱なため、僅かなノイズなどによる影響も受けやすいことが分かった。また表面筋電位測定法では、上腕の内部に存在する複数の筋肉の信号が皮膚全面に広がる。このため装着者が任意

の筋肉への指令（例えば示指、拇指のみ、小指のみを動かすことを意図した筋肉への指令）を行ったとしても、それらを性格に分類して取得できず、電位の高さ、低さのみでしか判断できない。

一方、本ハンドは1個のアクチュエータによる動作を主たる特徴とするため、このような表面筋電位による指令でもメインサーボモータのみの駆動ならば対応は可能である。しかしながらサブサーボモータを用いた各種動作を行うには、表面筋電位の更なる有用な活用は必要であると考えられる。今後はこの点についての改善を行うことで、より多くの使用者にとって有用な義手構築が達成できると考えられる。

第3章 全体総括

3-1. 全年度（2年間）を通しての研究開発成果総括

今回委託を受けた事業の主な目的は、形状の定められていない対象物を把持することのできるエンドエフェクタを開発することであり、且つこれを事業化時に低コスト、軽量・コンパクト、制御が容易などの条件を兼ね揃えた仕様のものとして機構を確立し、実用化することであった。

この実現のため、従来の複数の指を有するエンドエフェクタの多くが複数のアクチュエータやセンサを必要とするのに対して、本エンドエフェクタはたった1つのアクチュエータにより、しかもセンサを用いずに複数の指を稼働させ、把持対象物にその形状に馴染む形で各指を接触させて把持を行うという大胆な構想の元で開発を始めた。

その定量的な目標値として前述の把持力やコンパクト・軽量化(サイズ, 重量)を掲げ、上記の機構の確立とともにこれらを達成した。

このエンドエフェクタの実現のため、本開発のエンドエフェクタの基礎となる“協調リンク機構”を用いたフレキシブルハンドへ人体での“手のひら”の役割をする機構を追加することに重きを置き、これを確立した。その機構の確立には幾通りかの手法が考えられたため、1つの機構に絞ってしまう事で有益なアイデアを逃す様な機会損失を避けるために、本事業の初年度(H22年度)には機構の異なる3タイプのエンドエフェクタを並行して開発し、各々の優れた要素を取り入れ、最終的な仕様として確立すると言う手段をとった。この手段による開発は功を奏し、各々で機構を確立し、異なるタイプにて2件の特許出願に至っている。また、後述の最終年度に開発したエンドエフェクタにての目標達成の基礎を築き、初年度に要求された成果を上げることができたと考える。

最終年度となる H23 年度には前年度までに確立した機構を用い、事業化時における具体的な仕様と、その戦略を念頭に市場ニーズを鑑みた具体的な仕様としてFA仕様及び生活支援ロボット仕様のエンドエフェクタに絞って開発を進め、FA仕様については、そのバリエーション展開をも見込んだ開発を行った。

開発したFA仕様のエンドエフェクタについては、当初の把持力の目標値以上の性能を得ることが出来、軽量・コンパクト化の目標値については市場ニーズを反映させた上で一部敢えてオーバーさせた部分もあるが、バリエーションを含む場合、目標値を全て満たしている。

また、生活支援ロボット仕様については、把持力、軽量・コンパクト化に加え、義手用途時における容姿の維持への適合に対する要求仕様、目標値を網羅した上で一般的な日常生活における幾多の把持形態を可能なものとしている。

上記の様に本研究開発では、開発したエンドエフェクタにおいて、“手のひら機構”を追加しての把持性能の向上、義手用途としての容姿の維持などの当初より要求されていた目標を達成し、更にFA仕様にてはその量産仕様に至るまでの開発成果を得ている。

3-2. 研究開発後の課題・事業化展開

前述の様に、特に開発したFA仕様のエンドエフェクタについては既に量産仕様としての開発を終える段階に在り、計画を前倒しとして川下ユーザ数社に評価機を提供している。その評価を反映してパイロット生産を行い、H24年度より量産開始の計画として既に事業化に着手している。

事業化への着手に関して、事前にユーザによる直接の評価を得るため、H23年の国際ロボット展へ本エンドエフェクタを出展した。この際に数件の引合いを受け、現在既に商談遂行中となっている。また、この出展以降、本エンドエフェクタが専門誌やテレビなどに掲載・放映され、これを機会とした引き合いも数件受けており、総じて好評価を得ていると考えられる。

上記の展示会への出展や具体的な引き合いを受ける中で、製品化についての課題も顕在化してきている。主な課題としては、次の2点が挙げられる。一つはアクチュエータ部を含むエンドエフェクタ駆動の起点となる直動機構部のサイズの縮小化であり、もう一つはエンドエフェクタの量産における仕様決定についてである。各ユーザの希望する用途・仕様は区々であり、全ての仕様を網羅することはオーダーメイドとしての対応でないと不可能であるが、これは採算を採ることが困難であり、標準仕様を定めねばならず、この標準仕様とオプション、バリエーションの方針の決定が課題となる。

上記の様な課題を残すが、既に事業化展開には着手しており、H24年度より開始予定の国内量産販売を経た後、その実績と照らし合わせて原価低減、海外向け販売を含む拡販、バリエーション展開を含めて事業戦略をブラッシュアップして行く。