

[招待論文] 人型ロボットハンドの機構 — 指先つまみ機能の実現まで —

○川渕一郎[†] 星野 聖[‡]

[†](株)テック・エキスパート 〒143-8564 東京都大田区大森西 4-15-5

[‡]筑波大学大学院 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: [†] ichiro_kawabuchi@post.pioneer.co.jp , [‡] hoshino@esys.tsukuba.ac.jp

あらまし 人間の並みの外観, 大きさ, 質量, 運動機能を有する人型ロボットハンドの開発を著者らは重ねており, 指先つまみ機能の実現に至ったので, これまでの開発過程やその機構を解説する.

キーワード ロボットハンド, つまみと把持, ロボット機構, 自由度

Mechanisms of a Humanoid Robot Hand

— History of Developing Artful Mechanisms to Achieve a Pinching Function —

Ichiro KAWABUCHI[†] and Kiyoshi HOSHINO[‡]

[†] TechExperts, Inc. 4-15-5 OHMORI-NISHI OHTA-KU TOKYO, 143-8564, JAPAN

[‡] University of Tsukuba 1-1-1 TENNOH-DAI TSUKUBA-SHI IBARAKI, 305-8573, JAPAN

E-mail: [†] ichiro_kawabuchi@post.pioneer.co.jp , [‡] hoshino@esys.tsukuba.ac.jp

Abstract We have been developing a humanoid robot hand that is expected to acquire shape, size, mass and functions all equal to humans. In this proceeding, we explain the history of the developing to achieve a pinching function.

Keyword humanoid robot hand, universal hand, pinching and grasping, robot mechanism, degree of freedom

1. 諸言

ヒューマノイドに対する期待には大きく分けて二つの側面がある. 一つは, 一般的な生活環境や道具などへの高い適応性が求められる日常的な作業について, 例えば煩雑, 危険なものを人間に代わってする実用的貢献であり, 他方は, ヒューマノイドの開発を通して新規な機構や運動制御則を発明したり, さらには人間自身の身体を伴う認知機能などを研究したりするためのテストベッドになる貢献である. 機構の分野に限って云うが, いずれにしても, 形状, 大きさ, 質量, 運動範囲, 出力および耐久性など全てが人間に等しいヒューマノイドを構築することが究極の開発目標である.

ところが, ホンダのASIMOを筆頭に, 多くの大学や企業などにおいて精力的に研究開発されているヒューマノイド^{(1)~(3)}は, 人間全身の形状や, 2足歩行など全身的な運動機能を模すことに主眼が置かれ, 人間特有の手や指先を用いた細かな作業の実現は未だ見られない. もちろん指先を用いた作業の重要性は一般的に認識されていることであり, 人間の手の機能を高度に模擬する多くの人型ロボットハンドが開発されているが^{(4)~(10)}, 大きさや重さにおいて人間並みのヒューマノイドとの結合はなされていない.

著者らはその根源的理由を, 実用的なアクチュエータが回転式の電動モータに限られる点にあると考える. ロボットハンドの運動性能の高さはおよそモータの数と出力に比例するから, その設計目標に人間並みの運動性能を盛り込むと, 現状のモータや減速機を用いる限り, ロボットハンドは大きく重くなり勝ちであり, ヒューマノイドがそれを保持することは困難となる.

ハンドのみを小形軽量化するのが目的であれば, モータを腕や胴体へ内蔵し, ワイヤや油圧ホースなどを用いてその動力をハンドへ伝達する方法が考えられる. しかし, 手首内に多チャンネルの動力を通過させることは, その周囲の機構が極端に複雑化し, システム全体としては小形軽量化に逆行したり, 手首の運動角度を大きく削いだりする可能性が高い. さらに, 動力伝達距離が長いことは, 機構のガタや摩擦の増加, そして運動精度, 効率およびバックドライバビリティの低下など, 運動制御で問題となる要因を招き易い. バックドライバビリティとは能動関節を外力によって受動的に動かすことが出来る性能のことであり, 外界との接触を伴う力制御に極めて有用である. よって, 極力全てのモータをハンドに内蔵する形式が現実的であると著者らは考える.

以上より、人間並みのヒューマノイドへ適用可能な大きさと質量であることを前提条件として、できるだけ多く、かつ出来るだけ高出力のモータを内蔵する観点から、人型ロボットハンド機構の工夫を著者らは重ねて来た。本稿では、著者らが 2001 年初頭から段階的に発展させてきたもの(以後、“**Universal_Hand_****”と呼ぶ)について解説する。

2. 基礎的な要求仕様と機構構成

Universal_Hand の確実な実現のために、基礎的な要求仕様を絞り、合理的な機構の基本構成を検討した。

2.1. 要求仕様の方向性

一般的なロボットハンドの研究開発を概観すると、要求仕様の設定の方向性が大きく四つに分けられ、それぞれに特化したものが開発されていると考えられる。
[方向性 1] 専門機能を目指とする

限定された機能へ最大限適応するように構築されることから、構造や制御性が堅牢、かつ安定で実用的な運用が可能となる。工業用ロボットハンドや作業用義手が相当する。ただし、形状がヒューマノイドとして異様であることや、汎用性が低い問題点を持つ。この種の中で最も汎用性の高いものの一つが Barrett 社⁽¹¹⁾のものであろう。

[方向性 2] 人間に近い豊かな運動性能を目指とする

運動性能の豊かさが重視された研究用テストベッドが相当する。大きく重くなりがちである。

[方向性 3] 人間に近い形状と大きさを目指とする

装飾用義手やコミュニケーション用のもの(例えば ASIMO の手)が相当する。作業性は、副次的に得られるもの以上には、強く求められない。

[方向性 4] 人工筋肉の発展を目指とする

もし小型軽量なわりに発生力と変位が大きく、その応答性と分解能が高く、さらに柔軟な直動アクチュエータが在れば、骨格模型にそれを筋肉のように取り付けること⁽¹²⁾が、人間に似たロボットハンドを構築する究極的な手法になることは論を待たない。そこで、そのような人工筋肉を発展させることが試みられている。人工筋肉の例には、記憶形状合金、空気圧人工筋、高分子アクチュエータなど多種ある。ただし、いずれも実用化にはまだ時間が掛かりそうである。

さて、多くの人型ロボットハンドの研究開発においては、[方向性 2]を基幹として[方向性 3]の特徴を出来る限りそれに加えるアプローチが一般的と思われる。モータ、減速機や電装系などの技術要素が社会的な技術の進歩とともに高性能かつ小型化することで[方向性 3]の特徴は自ずと実現されるとみなせば、高い合理性を持つ。著者らはそれに対抗して、[方向性 3]を基幹として[方向性 2]の特徴を出来る限りそれに加える

アプローチを採る。それには次のような理由がある。諸言で述べたとおり、ヒューマノイドへの適用を大前提とする。さらに、人型ロボットハンドの研究開発は発展途上の分野なので、ユニークな方向性を提案し、試行錯誤することが極めて有意義であると考えられる。

2.2. 基礎的な要求仕様

Universal_Hand への基礎的な要求仕様を整理する。まず 5 指を有し、人間と同様の全体形状であることが必須である。質量が 500g 以下、指を伸ばした状態における掌の下辺から中指先端までが 180mm 前後となることも同じく必須である。これは、日本人成人の平均的な手の大きさに相当する。なお、質量にはモータ、減速機などの機械要素、およびエンコーダなどの必須センサ全てを含む。その上で、必要最小限の運動性能(自由度および運動可動域)の指標として、物体の大きかな把持や、ジャンケン、手話などの実現を要求する。これらの要求仕様をまとめて表 1 へ示す。

表 1 基礎的な要求仕様

1. 人間と同様の全体形状、大きさおよび重さを有すること。掌の下辺から中指先端までの長さが 180 mm 前後、質量が 500g 以下であること。
2. 物体の大きかな把持や、ジャンケン、手話などが可能であること。
具体的には、各指の屈伸機能、拇指を他の指と向き合わせる対立機能、指同士の開閉(アブダクション abduction) 機能を有すること。
その運動可動域が十分であり、例えば、5 指を握り締めたり、拇指と他の 4 指それぞれの指先とで、輪を作ったりすることが可能であること。
3. 以上を満足した上で、出きる限り大きなモータと、堅牢な減速機を内蔵すること。具体的な性能の一例として、伸ばした状態の指 1 本が先端で発揮する力は 500gf 以上が望まれる。
4. さらに、掌内部や指先に、制御回路や力センサを埋めこむための空間を極力獲得すること。

2.3. 能動関節の数と配置

ロボットハンドの機構空間を最も非妥協的に占有するのが、モータ、減速機およびエンコーダなどの必須センサである。よって、**Universal_Hand** を大胆に小型軽量化するためには、それらの僅少化が必須である。そこで、要求仕様を満たしつつ最少となる能動関節の数と配置を検討する。

まず、拇指を除く 4 指の関節について述べる。4 指それぞれには、三つの関節(根元から MP 関節、PIP 関節、DIP 関節と呼ぶ)がある。MP 関節は、指の屈伸とアブダクション機能のための 2 自由度を有し、他の二つは、指の屈伸のためのそれぞれ 1 自由度を有する。人間の PIP 関節と DIP 関節は通常運動するから、多くのヒト型ロボットハンドにおいても、両者が一つの

モータで連動されている。著者らはこの考え方を推し進めて、**Universal_Hand** では屈伸のために 3 関節全てを連動させる。弊害として、指先の方向を自由に制御できず、指先で物体をつまむことが困難となる問題が生ずる。しかしながら、手の運動表現について要求仕様を満足するとみなして許容する。

同様に、運動表現能力に大きな問題を与えないという見地から、アブダクション機能も全指で 1 自由度とする。さらに、人間のアブダクションの際に中指が掌に対してあまり動かないから、**Universal_Hand** ではそれを掌に固定とする。

拇指には、三つの関節(根元から、CM 関節、MP 関節、IP 関節と呼ぶ)がある。人間の MP 関節と IP 関節は、通常連動するから、**Universal_Hand** でもそうさせる。人間の CM 関節は 2 自由度以上を有する複雑な鞍関節 **Saddle Joint** であるが、その形式を小さな機構で構成することは困難なので、二つの 1 自由度回転関節の組合せで実現する。

全関節の配置をスケルトン図 1 に示す。特定の関節を示す場合は本図中の記号を用いることにする。なお、**J1,4** は第 3 段階の形式 **Universal_Hand_03** において初めて付加されるものである。各モータに対応する能動関節または関節群を整理して表 2 示す。

表 2 能動関節の一覧

	能動関節または関節群	記号
1	拇指 CM(根元から 1 番目)	J1,0
2	拇指 CM(根元から 2 番目)	J1,1
3	拇指 MP+IP	J1,2+J1,3
4	示指 MP+PIP+DIP	J2,1+J2,2+J2,3
5	中指 MP+PIP+DIP	J3,1+J3,2+J3,3
6	薬指 MP+PIP+DIP	J4,1+J4,2+J4,3
7	子指 MP+PIP+DIP	J5,1+J5,2+J5,3
8	アブダクション	J2,0+J4,0+J5,0

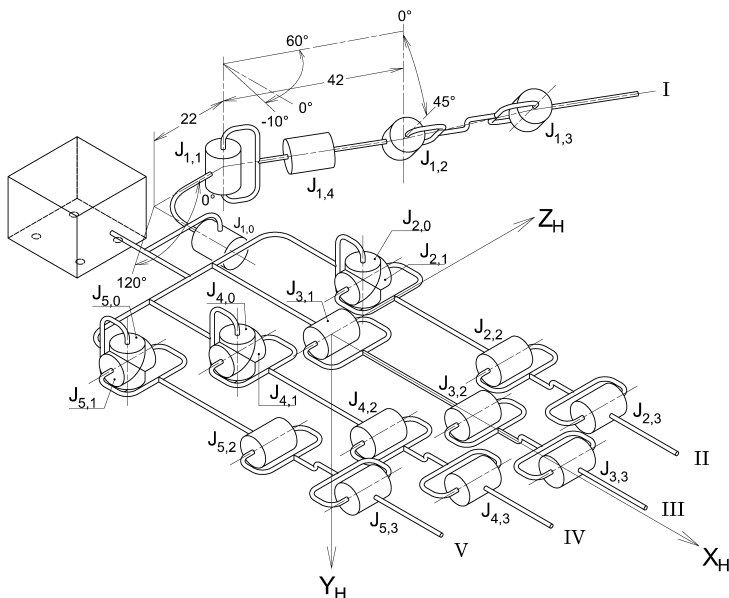


図 1 スケルトン全体図

2.4. 指の屈伸機構

拇指を除く 4 指の機構設計における大きな課題が、二つの回転軸が直交する MP 関節周りの機構の合理性である。指機構にモータとエンコーダを内蔵するから、MP 関節に少なくとも 6 本の配線を通させねばならない。関節の大きな回転によって配線が突っ張らぬために、配線の経路が 2 軸の交点を通することが理想である。そこで、MP 関節に駆動機構を配せず、2 軸の交点周りは配線通過用の空間として空ける。代わりに、2 軸の回転動力はワイヤやリンク機構で離れたところから伝達される方式を提案する。

拇指を除く 4 指の内部構造を図 2 に示す。符号 **n** は指番号を意味する。4 指は同構造である。指を構成する骨部を、根元から中手節骨 Metacarpal, 基節骨 Proximal Phalanx, 中節骨 Middle Phalanx, 末節骨 Distal Phalanx と呼ぶ。内蔵できる限り大きなモータとして、エンコーダ付き DC モータ [Minimotor⁽¹³⁾: 1516SR](最大出力:0.52W) を基節骨に内蔵する。減速機は **Jn,2** 部に内蔵されてその関節を駆動する。**Jn,2** 部に減速機を内蔵することは、次の三つの利点を持つ。

1. **Jn,2** は **Jn,1** に次いで外形が太いため、減速機の内蔵用空間が得られ易い。
2. **Jn,2** は連動する 3 関節の中間なので、前後の被駆動関節への動力伝達経路が最短となり、ガタや剛性低下の悪影響が生じにくい。
3. **Jn,2** は連動する 3 関節の中で最も回転角が大きいので、被駆動関節への伝達機構が減速効果を発揮する。よって、それらを強力かつ安定に駆動するのに有利である。

減速機はクラウンギアと 2 段の遊星歯車機構とした。出来る限り大きなモータを内蔵するための最適な配置はモータ軸を指の軸に対して平行とすることだから、モータの回転軸と **Jn,2** 軸が直交する。一般的に直交用の歯車機構は剛性が低くてガタが現われやすい。そこで、モータから見た 1 段目は最も負荷が低いから、そこへクラウンギア機構を配して直交した動力を取り出す。実現した減速比は 1/350 であり、最大関節トルクは 5.5[kgf-cm] 以上となる。

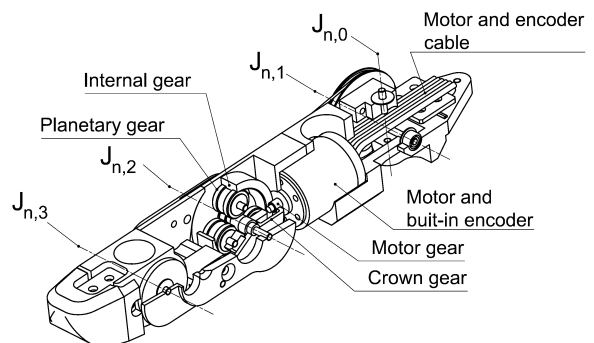


図 2 指の駆動機構

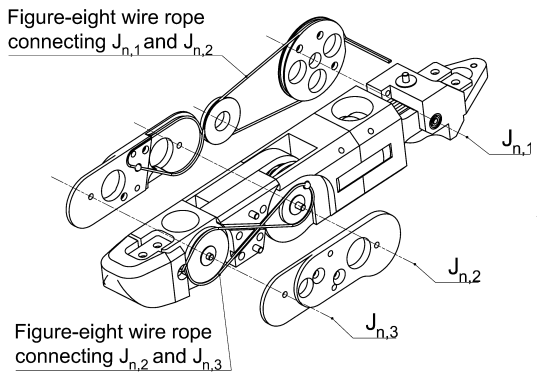


図3 ワイヤ・プーリ機構

動力伝達機構にワイヤ・プーリ機構を採用し、指の側面にプーリの形状を掘り込んで構成する(図3)。その機構を指の側面に薄く配置したことで、指機構内部の多くをセンサや電装系の内臓のために利用可能となる。人間の指の曲がり具合に似るように、回転角の伝達比率を、 $J_{n,2}$ から $J_{n,1}$ に対して $7/10$ 、 $J_{n,2}$ から $J_{n,3}$ に対して $5/7$ とした。

最大曲げ状態を図4に示す。十分な可動域を実現することが分かる。また、減速機がスムーズに回転するように、多少のバックラッシュ(ガタ)を与えたので、指先に数十 gf の力を与えることで軽く受動運動させることが可能なバックドライバビリティを実現した。なお、人型ロボットハンドでは扱う力が比較的小さく、運動の絶対精度の要求も低いから、ガタが小さい代わりに関節が固いよりも、バックドライバビリティが高くて力制御に適することの方が有利と考える。

紙幅の関係から省略するが、拇指の根元には、この減速機を有する二つの能動関節を、コンパクトに配置する。図8に示すように、拇指と小指の先端で輪を作ることも可能な、十分な運動可動域を実現した。

2.5. アブダクション駆動機構

$J_{2,0}$ 、 $J_{4,0}$ 、 $J_{5,0}$ の連動機構としてリンク機構を採用する。掌の甲側から見たそのリンク機構と運動可動域を図5に示す。前節のワイヤ・プーリ機構と同じ理由で、モータで駆動する関節を中間の $J_{4,0}$ とする。

少ない歯車列の段数で大きな減速比を得るために、図6に示すようにできる限り大きな半径の円弧歯車を薬指に固定し、それを小歯車で駆動する。実現した減速比は $1/400$ である。また、円弧歯車の半径の距離を有効に用いて、駆動用モータを掌の外縁に寄せることで、掌内空間の多くを電装系用空間として獲得する。

図4に示した各指を最大に曲げた状態においても、その指先と掌との間のクリアランスを確保してアブダクション運動を独立に可能とする。薬指と小指を最大限曲げていても示指と中指間の開閉が可能なので、じゃんけんのチョキなどの運動が自在である。

以上の機構構成に基づき、基礎的な要求仕様を満足

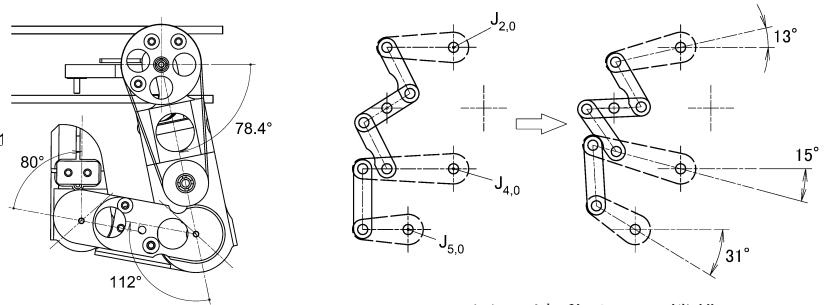


図4 最大曲げ状態

図5 連動リンク機構

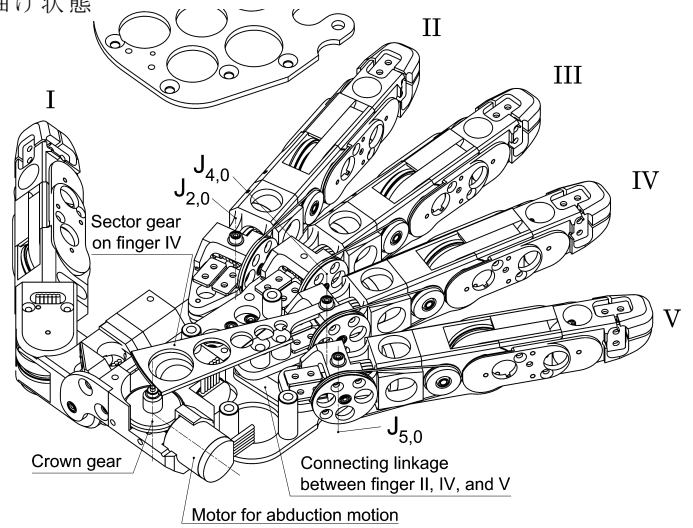


図6 掌部の内部機構

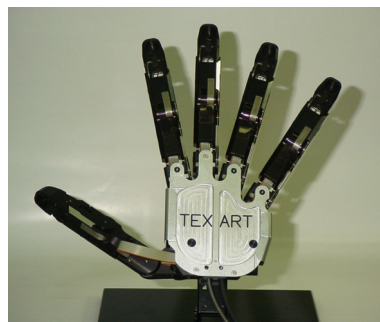


図7 Universal_Hand_02



図8 運動例

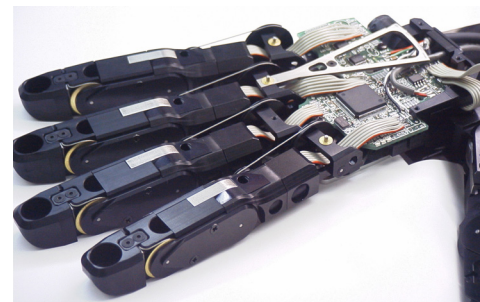


図9 内部電装系

する第1段階の形式として **Universal_Hand_01** を実現した。さらに、それが余裕のある内部空間を持つ結果となったので、モータ制御系およびアンプなど電装回路一式を内蔵する **Universal_Hand_02** を実現した。その全体像および内蔵された電装系を図7~9に示す。

3. 指先つまみ機能の実現

基礎的な要求仕様(表 1)において指先で物をつまむ機能を求めなかった弊害は大きく、実用的作業を行わせるには意外と物足りないものになってしまった。そこで、**Universal_Hand_02**の特長を維持しつつ、指先つまみ機能の付加を検討した。

3.1. 末節駆動機構の導入

全関節のうちの $J_{n,0} \sim J_{n,2}$ は負担すべきトルクが大きいため、その駆動機構には前記した1/350のように大きな減速比を有する減速機が必須である。そして、駆動機構の一般的特徴として発生トルクの分解能に限界があるから、発生力の大きなそれらの駆動機構を用いてつまみ機能用の微小な指先力を安定に発揮させることは困難である。ここで $J_{n,3}$ を独立に駆動する駆動機構を想像すれば、それは小さな末節骨の質量のみを負担すればよいため必要なトルク容量が小さく、繊細な指先力の発生が比較的容易であろう。さらに $J_{n,3}$ 用の駆動機構から指先への力伝達ロスが零であることも有利もある。そこで、 $J_{n,3}$ を独立に駆動する駆動機構(末節駆動機構と呼ぶ)を付加することを提案する。

末節駆動機構は微小な力の制御性が特に優れなければならないから、高効率な平歯車のみからなる歯車列を採用する。モータの回転軸が $J_{n,3}$ と平行となるようにそれを指へ内蔵するから、モータの長さは指の幅に制限される。そのような非常に小さいモータのトルクを出来る限り有効に生かすために、2段の平歯車列で3/250の高い減速比を有する駆動機構を開発した。図10に末節駆動機構の構造を示す。指機構内のセン

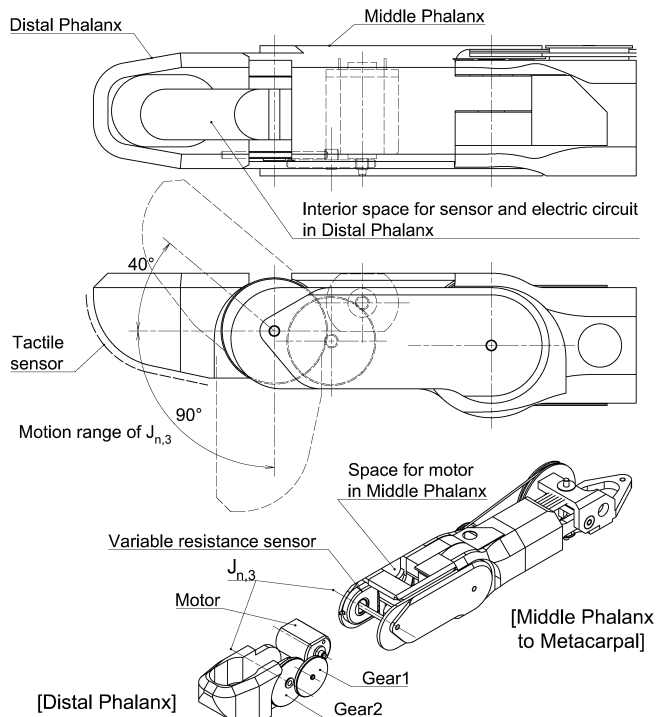


図10 末節駆動機構

サや電装系用空間を保つために、ワイヤ・プーリ機構を取り除いた場所へ微細な歯車列を薄く配置した。実装したモータの最大トルクは約0.5Nmmと非常に小さいが、高い減速比の効果と、末節骨の長さが約20mmと短い効果のため、最大の指先力は約2Nとなり、ものをつまむために充分な力が得られる。

3.2. 指先つまみ機能と把持機能の両立法

末節駆動機構の発生トルクは小さいから、それのみでは強い指先力を発揮することができない。 $J_{n,3}$ の可動回転範囲の端で機械的な当て止めを起こせば指先力が支えられるので、 $J_{n,3}$ の回転角がその位置に限られる欠点を許容する限り、末節駆動機構以外の能動関節が発揮する強いトルクを用いて把持の際に必要な強い指先力を発揮させることが可能である。この方法が指先つまみ機能と把持機能の単純な両立法であるが、せっかく存在する末節駆動機構の自由度と高い力制御機能が把持の際に無効となる欠点を持つ。そこで把持の際も末節駆動機構の機能を生かす工夫を提案する。

新しい把持の方法を図11に示す。強い把持力を中節骨や基節骨上の面を対象物に伝達させ、弱い把持力のみを指先が伝達する。その弱いが柔軟な指先力には、滑りを防ぐ大きな役割が期待できる。ここで、 $J_{n,3}$ の当て止めが生じぬように、その可動範囲において指先が対象物から離れる方向の充分な余裕範囲を設けておく(図10)。また中節骨や基節骨の内側の面が対象物と接触しやすいようにその形状を整えておく。

3.3. 拇指ねじり機構の導入

人間の拇指の先と他の指先が対向して接触する場合、両者間の接触部位は、拇指は指の腹であるが、他の指は指の腹からずれた脇の位置になることが多い。人間は各指先における運動と力の制御性能が高いから、その状態でも安定なつまみ機能を実現する。ところが現状のモータ駆動機構では、人間と比べて大変低い運動と力の制御性能しか期待できない。この問題を解消するために導入された末節駆動機構は一方向の力制御機能のみを発揮するから、その能力を最大限に生かす

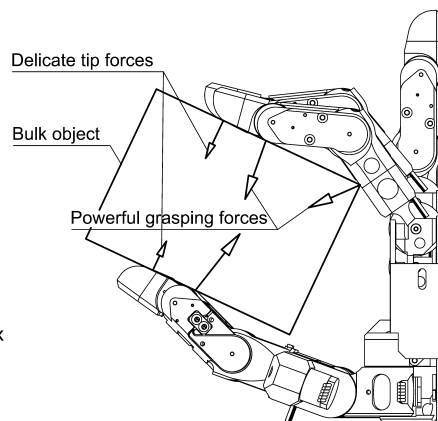


図11 安定な把持方法

ためには、両指先の末節駆動機構が生ずる指先力が正対すること、すなわち両指先の腹同士が正対して物をつまめることが望ましい。そこで、それを実現するために、人間には無い拇指のねじり機能を付加することを提案する。

ねじり機能を有する拇指の構造を図 12 に示す。元来一体であった基節骨を二分して、その間に新規な回転関節 $J_{1,4}$ が挿入されている。 $J_{1,4}$ の駆動機構を極力小型に構成するために、基節骨 1 および基節骨 2 にわたって内蔵されていた $J_{1,2}$ 駆動用モータの円筒形外装を $J_{1,4}$ の回転軸として流用した。

以上の付加的機構を有する形式として **Universal_Hand_03** を実現した。図 13 に全体図を示す。全質量は約 480g、全自由度は 15 である。5 指の平らな腹を広く対象物へ接触させることが出来るため、紙の様な薄い対象物や、さらに一般的なペンなどを安定につまんだり、保持したりすることが出来る(図 14, 15)。

4. 結言

本研究では、ヒューマノイドに適用可能な小形軽量の人型ロボットハンドを実現するために、まず必要最小限の運動機能を抽出して実装する方針を取り、初代ロボットハンド **Universal_Hand_01** を実現した。さらに、その形式において掌部内に十分な空間が獲得されたので、そこにモータ制御系およびアンプが内蔵された形式 **Universal_Hand_02** を実現した。ただし、最初に設定した要求仕様において指先で物をつまむ機能を求めなかった弊害は意外と大きく、実用的作業を行わせるには物足りないものになってしまった。そこで最新型として、指先つまみ機能が付加された形式 **Universal_Hand_03** (15 自由度) を実現した。

文 献

- [1] (ASIMO) <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- [2] (HRP) <http://www.kawada.co.jp/ams/promet/index.html>
- [3] (SARCOS) <http://www.sarcos.com/telespec.dexhand.html>

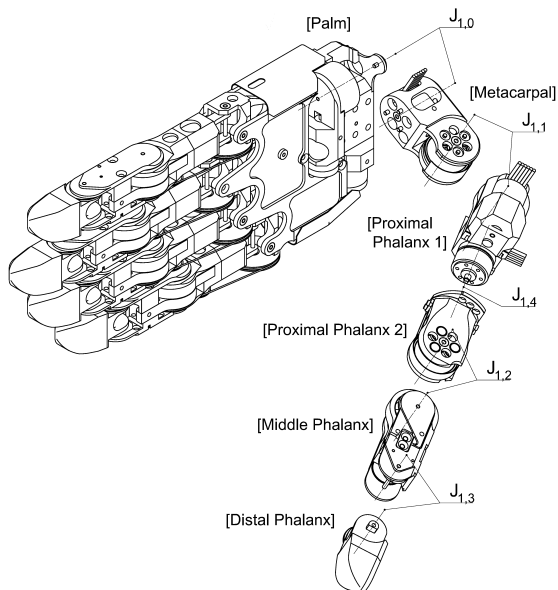


図 12 拇指の節構成

- [4] (Utah/MIT Hand) S.C.Jacobsen et al, "Design of the Utah/MIT Dextrous Hand", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1986
- [5] (NASA Robonaut) http://vesuvius.jsc.nasa.gov/er_er/html/robonaut/robonaut.html
- [6] (DLR Hand) <http://www.robotic.dlr.de/HAND/>
- [7] H.Kawasaki, T.Mouri and S.Ito, Toward Next Stage of Kinematic Humanoid Hand, Int. Symp. on Robotics with Applications, 2004
- [8] I.Yamano and T.Maeno, Five-fingered Robot Hand using Ultrasonic Motors and Elastic Elements, Proc. ICRA, pp.2684-2689, 2005
- [9] 長谷川 勉, 「コンポーネントとしての多指ロボットハンド」, 日本ロボット学会誌, 21-1, pp.25-26, 2003
- [10] 長谷川 勉, 多指ロボットハンドによる器用な操作-研究動向と展望-, SICE システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2004), 1H4-1, 2004
- [11] (Barrett Hand) <http://www.barrett.com/robot/products/hand/handfram.htm>
- [12] M.Vande Weghe1, et al, The ACT Hand: Design of the Skeletal Structure, IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3375-3379, 2004
- [13] (Minimotor) <http://www.minimotor.ch/uk/>

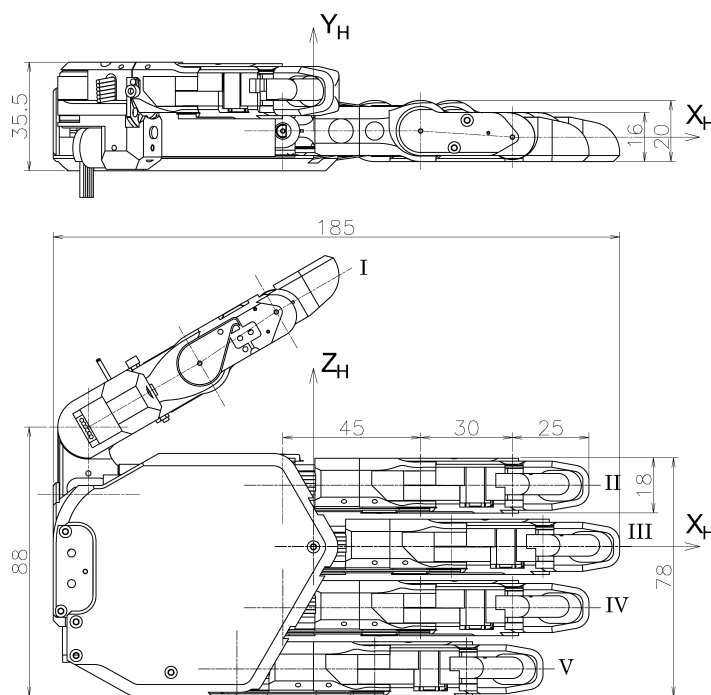


図 13 Universal_Hand_03 全体像

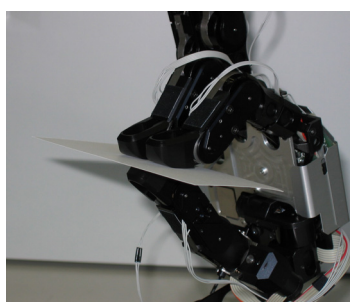


図 14 カードつまみ状態

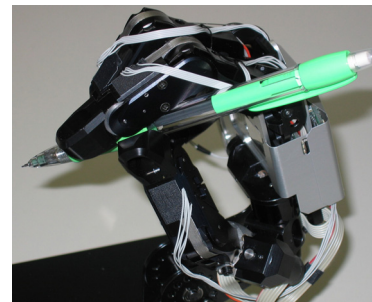


図 15 ペン保持状態