

# 超音波モータと弾性要素を用いた 5 指型ロボットハンドの開発

Development of a Five-fingered Robot Hand using Ultrasonic Motors and Elastic Elements

非 山野 郁男 (慶大) 正 前野 隆司 (慶大)

Ikuo YAMANO, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama  
Takashi MAENO, Keio University

A five-fingered robot having an equal number of DOF to the human hand is developed. The robot hand is driven by a unique method using ultrasonic motors and elastic elements. The method makes use of restoring force as driving power in grasping objects, which enables the hand to perform stable and compliant grasping motion without power supply. In addition, all the components are placed inside the hand because the ultrasonic motors have characteristics of high torque at low speed and compact size. Applying the driving method to a multi-DOF mechanism, a five-fingered robot hand is designed. The robot hand has an equal number of joints and DOF to the human hand, and it is also equal in size to the hand of an average grown-up man. The robot hand is produced, and control experiments are conducted. As a result, the potential of the robot hand is confirmed.

*Key Words:* Robot hand, Ultrasonic motor, Tele-operation, Wire-driven mechanism

## 1. はじめに

これまで、ロボットに多種多様な作業を行わせることを目的として、人間の手を模倣したロボットハンドが数多く開発されてきた。高度な機能を有するロボットハンドは、ヒューマノイドロボットのエンドエフェクタとして有用である。また、マスタ・スレーブシステムを用いた遠隔操作の実現等、様々な分野への応用が期待できる。しかし、従来のロボットハンドは、アクチュエータの配置等の制約により自由度もしくは汎用性の面で問題を有しており、人間の手の機能を再現するのに十分とはいえない。このため、本研究では、人間の手と同等の寸法、形状、および自由度を有し、ハンド自体が独立した構造を持つ 5 指型ロボットハンドの開発を行う。本ハンドは、超音波モータと弾性要素を用いた独自のワイヤ駆動方式を特徴とし、柔軟で安定した効率的な動作を実現する。本研究ではこれまでに、示指ロボットフィンガを製作し、位置制御実験を行った<sup>[1]</sup>。本稿では、5 指型ロボットハンドの設計、製作、および制御実験について述べ、開発したロボットハンドの有用性を確認する。

## 2. 設計

### 2.1 基本設計

ロボットハンドに、人間に近い構造を持たせることにより、人間の生活環境に則した多種多様な把持・操り動作を実現させることができる。また、人間による直感的な動作の入力が可能となる。このため、本研究で開発するロボットハンドは、人間の手と同等の寸法、形状、および自由度を持つ 5 指構造とする。

本研究では、人間の手を模倣した従来のロボットハンドを、アクチュエータをハンド内部に設置し、ダイレクト駆動もしくはギア駆動により各関節の動作を実現する「アクチュエータ内蔵型」と、ハンドの外部に設置したアクチュエータの動力を、ワイヤにより伝達することで各関節を駆動する「ワイヤ駆動型」の 2 つに分類して考える。

WENDY ハンド<sup>[2]</sup>のようなアクチュエータ内蔵型のロボットハンドの場合、ハンドが独立した構造となるため、多種多様なロボットアームへの接続が可能であり、高い汎用性が得られる。しかし、アクチュエータや減速機、角度センサ等の全ての要素をハンド内部に設置することによる構造上の制約から、人間と同等の自由度を有するロボットハンドを実現することは難しい。一方、Utah/M.I.T. hand<sup>[3]</sup> のようなワイヤ駆動型のロボットハンドの場合、外部にアク

チュエータを配置することによりハンド内部の構造上の制約が低減され、多自由度の運動が可能となる。しかし、外部のアクチュエータと機械的に接続されている必要があるため、多様なロボットアームの先端に接続して作業を行うには弊害があり、汎用性の面で問題があるといえる。

このため、本研究で開発するロボットハンドは、手掌部にアクチュエータとして超音波モータを設置し、ワイヤ駆動機構により各関節の運動を生成する。これにより、本ロボットハンドは汎用性の高い独立した構造を持つとともに、人間とほぼ同等の計 20 自由度の運動を生成する。つまり、上述した 2 つのタイプのロボットハンドの利点を併せ持ったハンドが実現される。

超音波モータは低速高トルク特性を有するため、高減速比の減速機を必要とせず、小型であり、出力トルク重量比が大きい。また、ハンド内部に設置するアクチュエータとして適しているといえる。また、超音波モータの高応答性および静粛性は、ハンドを実現する上で利点となる。しかし、

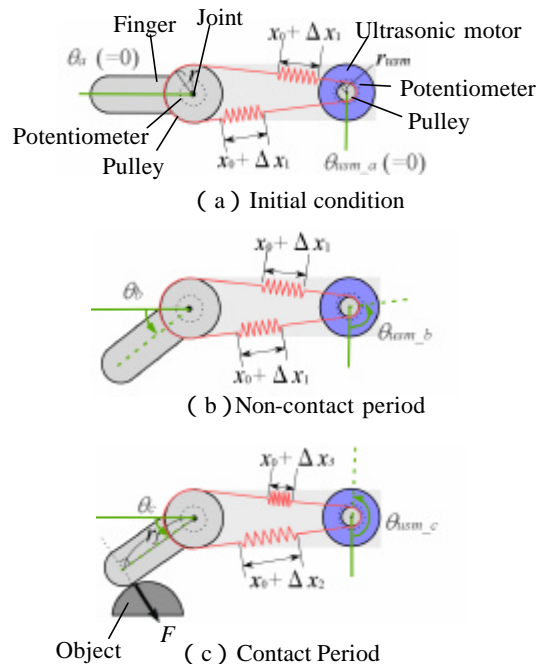


Fig. 1 Outline of driving method

超音波モータは高保持トルク特性を有するため、ロボットの駆動に用いた際に関節のバックドライバビリティが得られず、ハンドが対象物と接触あるいは衝突する際に、ハンド本体や対象物に損傷を与える危険性が高い。また、非線形なトルク特性を有するため、力制御が困難であるという問題を有する。これらの問題点を解消し、ロボットハンドに柔軟で安定した効率的な把持動作を実現させるための方法として、次節では新たなワイヤ駆動方式の提案を行う。

### 2.2 駆動方式

本ロボットハンドの各関節の駆動方式として、超音波モータと弾性要素を用いた以下のワイヤ駆動方式を用いる。駆動方式の模式図を Fig. 1 に示す。本駆動方式は、ワイヤ内部に2つの弾性要素が組み込まれている点を特徴とする。ワイヤの両端はプーリに固定されており、超音波モータと関節の角度が2つのポテンシオメータにより計測される。

Fig. 1(a)の初期状態において、2つの弾性要素はともに自由長  $x_0$  から  $\Delta x_1$  だけ伸張しており、このときのワイヤ張力は弾性要素のばね定数  $k$  を用いて  $k \cdot \Delta x_1$  と表される。よって本方式は、弾性要素の初期伸びを調整することにより、通常のワイヤ駆動方式を用いる際に問題となるワイヤの初期張力の調整を容易に行うことが可能である。また、弾性要素のはたらきにより、関節は外力に対して受動的なコンプライアンスを有する。コンプライアンスの大きさは弾性要素のばね定数によって調整される。ハンド自体が機構的なコンプライアンスを有することによって、高い衝突安全性が得られる。

超音波モータを駆動することによって、関節は同方向に変位する。Fig. 1(b)の非接触時においては、関節角度をフィードバックして超音波モータの位置決めを行うことで、位置制御が実現される。フィンガの慣性が十分小さく、慣性力による弾性要素の変形が無視できる場合には、超音波モータの回転角度を関節角度の関係は次式で表される。

$$r \cdot \mathbf{q}_b = r_{usm} \cdot \mathbf{q}_{usm\_b} \quad (1)$$

フィンガが対象物に接触した際には、弾性要素の変形により、式(1)の関係が成り立たなくなり、接触の情報が得られる。Fig. 1(c)の接触時には、2つの弾性要素の復元力の差による力  $F$  が対象物に与えられる。この間、力  $F$  と超音波モータおよび関節角度の関係は、次式のように表される。

$$\begin{aligned} F \cdot r_f &= 2 \cdot k \cdot (r_{usm} \cdot \mathbf{q}_{usm\_c} - r \cdot \mathbf{q}_c) \cdot r \\ &= 2 \cdot k \cdot \Delta \mathbf{q}_E \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $\Delta \mathbf{q}_E$  は弾性要素の変形の大きさを表す値で、4.3節で述べる力制御実験における操作量となる。式(2)より、接触時には、ポテンシオメータによって得られる角度情報から、力情報を得ることができる。そのため、本駆動方式は力センサやトルクセンサを必要とせず、システムの構成を簡便化することができる。

さらに、式(2)より、超音波モータを位置制御することにより、力制御を行うことが可能である。超音波モータは前述したように、トルクの制御が難しいことが知られている。一方で、減速ギアが不要であり高保持トルク特性を有するため、精密位置決めには有利である。本駆動方式は、この特徴を活かし、超音波モータによる高精度な力制御を実現することができる。

また、Fig. 1(c)の状態では超音波モータへの電力供給を停止した場合、モータの保持トルクにより弾性要素の長さが保持され、それにより力  $F$  が対象物に与え続けられる。つまり、本駆動方式は弾性要素の復元力を出力として用いることにより、一定の把持力を出力しつづけるようなタスク

において電力供給を必要としないため、安定かつ効率的な把持動作が実現される。

### 2.3 駆動機構

本節では、上述した駆動方式に基づき、1指につき4自由度計20自由度の運動を実現するための駆動機構について述べる。5指のうち、示指、中指、環指および小指については、同一の構造を持つこととし、母指については別の駆動機構を設計する。母指を除く4指の自由度配置および各関節の名称を Fig. 2(a) に示す。この配置および名称は、人間の指構造に対応している。次に、アクチュエータとしてリング型超音波モータを使用することを前提として、Fig. 3のような4自由度の駆動機構を設計した超音波モータ1, 2, 3はMP1, PIP, DIP関節の屈伸運動をそれぞれ生成する。また、MP2関節の側屈運動を生成する超音波モータ4は、3つのモータの上部に設置する。各関節には、上述した駆動方式が適用されている。

母指は、人間の母指と同一の構造を持つ駆動機構を実現することが設計上困難であった。しかし、Fig. 2(b)のような自由度配置とすることで、人間の母指の運動を近似的に再現することが可能である。人間の母指の重要な機能である対立の動作は、TM1関節の運動により実現される。また、Fig. 2(b)のような自由度配置をとることにより、指先力を発生させる際に根元の関節に必要となるトルクが、Fig. 2(a)のような自由度配置の場合と比較して小さくなるため、母指は他の4指よりも相対的に大きな指先力を発生させることができる。それぞれの関節に前述した駆動方式を適用することにより、Fig. 4に示すような4自由度の駆動機構を設計した。超音波モータ1, 2, 3, 4はTM1, MP, IP, TM2関節の運動をそれぞれ生成する。

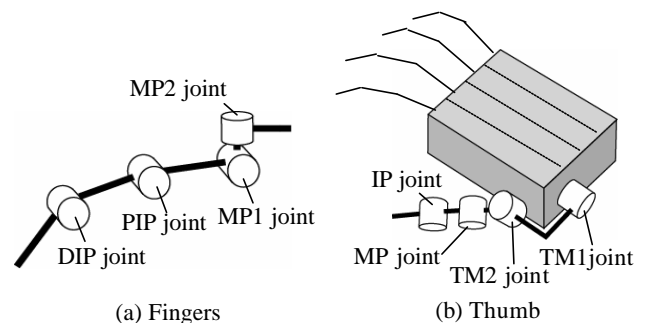


Fig. 2 Arrangement of DOF

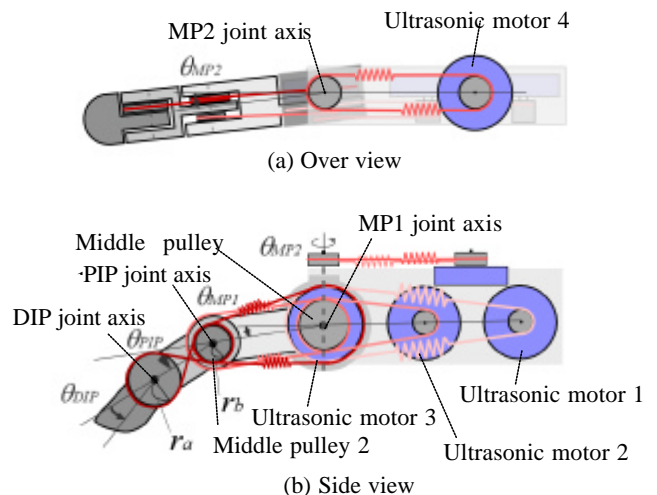


Fig. 3 Outline of driving mechanism of fingers

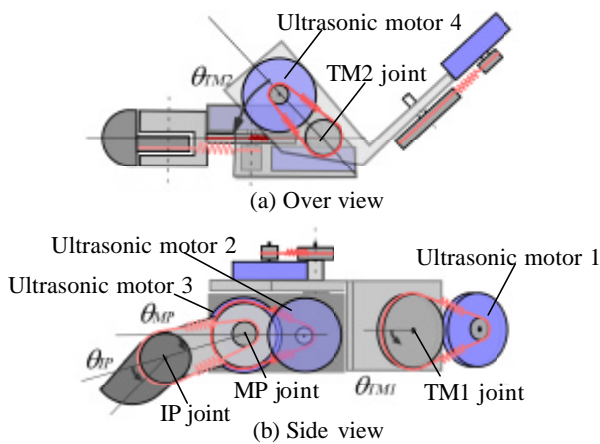


Fig. 4 Outline of driving mechanism of thumb

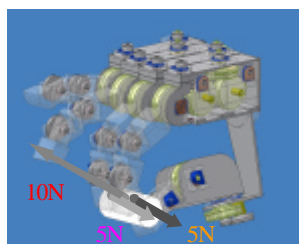


Fig. 5 Output force of robot fingers

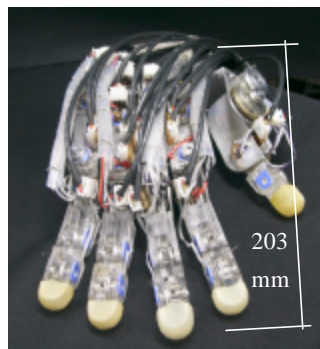


Fig. 6 Developed five-fingered robot hand

#### 2.4 詳細設計

上述した駆動機構をもとに、5 指型ロボットハンドの詳細設計を行った。日本人の成人男性の平均的な身体寸法データに合わせて、各部の寸法を決定した。各関節の可動域も、人間と同等になる設計した。また、指先力については、ハンドが Fig. 5 のように直径 25mm の円柱を精密保持した状態を基準とし、この姿勢において示指および中指の指先から 5N、母指の指先から 10N の力を対象物に与えられるように、プーリの半径を決定した。また、環指および小指も同様に、指先力が 5N となるように設計した。

#### 3. 設計

詳細設計に基づき、5 指型ロボットハンドの製作を行った。ハンドの外観を Fig. 6 に示す。超音波モータとして、新生工業製の USR30-B4 (最大出力トルク 0.1Nm) を用いた。また、角度センサとして、村田製作所製のトリマポテンシオメータ PVS1-103A01 を用いた。弾性要素としては、コイルばねを用いることが適当であると考えたが、空間的制約により設置が困難であった。このため、Fig. 1 におけるワイヤと弾性要素の機能を同一の材料により実現することによって省スペース化を行うために、弾性を持った糸状の材料をワイヤとして使用することとした。強度および弾性領域の面から材料の検討を行った結果、弾性要素として機能するワイヤとして、ナイロン糸を選定した。引張試験の結果をもとに、各指のナイロン糸は、各関節のモータの最大出力トルクに対して計測可能な大きさの弾性変形を生じるように設計されている。

ロボットハンド全体の質量は 853g であり 人間の手を模倣した従来のロボットハンドと比較して非常に軽量である。また、手掌部の幅は 86mm、指先から手根までの長さは 203mm、指を広げたときの母指指頭から小指指頭までの長

さは 190mm となり、人間の手と同等の寸法を持つロボットハンドが実現されたといえる。

次に、製作した 5 指型ロボットハンドを動作させるための制御システムを構築した。ポテンシオメータの出力値の取り込みには AD 変換ボードを用いる。また、超音波モータのドライバへの指令として、デジタル出力ボードから回転方向指令電圧を、DA 変換ボードから速度指令電圧をそれぞれ出力する。この制御システムを用いて、製作した本ロボットハンドの評価のための制御実験を行った。

#### 4. 制御実験

##### 4.1 ステップ応答

まず、示指ロボットフィンガについて、MP1、PIP および DIP 関節を 0deg とし、MP2 関節を 20deg とした状態を初期状態として、MP1、DIP、PIP および MP2 関節にそれぞれ 20, 60, 40, -20deg のステップ入力を与えた。このときのステップ応答を Fig. 7 に示す。DIP 関節の変位は、他の関節の変位による干渉の影響を受けるためオーバーシュートを伴う応答となっているが、各関節角度は 190ms 程度で目標値に収束しており、十分に高速な応答が得られたといえる。

##### 4.2 周波数応答

次に、示指ロボットフィンガの 4 つの関節に対して、入力として次式で表される正弦波状の数値入力を与え、周波数  $f$  を変化させていくことで周波数応答を得た。

$$q = A_0 \sin(2\pi ft) + q_0 \quad (3)$$

示指の屈伸運動および側屈運動が同時に実現されるように、MP1、PIP、DIP、MP2 の各関節について、 $q_0$  をそれぞれ 20, 30, 30, 15deg、 $A_0$  をそれぞれ 20, 30, 30, -5deg とした。1Hz から 10Hz まで 1Hz 間隔で入力周波数を変化させた際の周波数応答を Fig. 8 に示す。バンド幅は、最も大きい慣性の作用する MP1 関節において 5.4Hz 程度であり、他の関節では 10Hz 以上であった。また、10Hz の入力に対して安定した動作を実現可能であった。人間の手指のタッピング能力は最大 5.5Hz 程度であることから、実験結果より、本ロボットハンドは人間の手よりも高速な動作を実現できることが確認された。

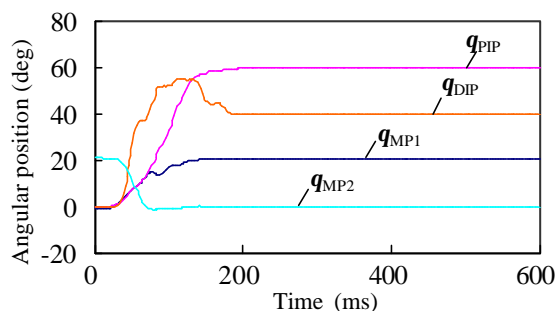


Fig. 7 Step response of robot index finger

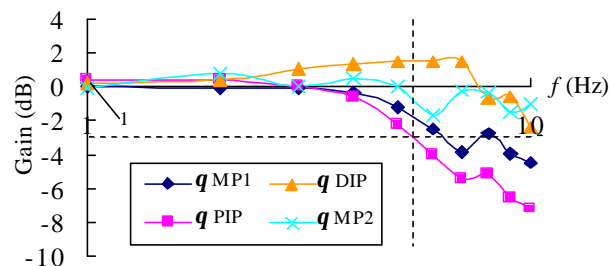


Fig. 8 Frequency response of robot index finger



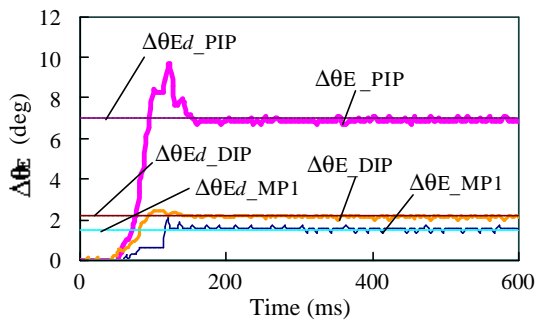
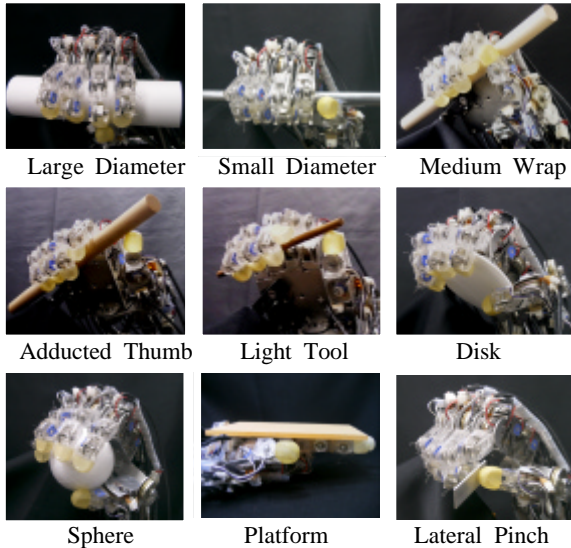


Fig. 9 Response of  $\Delta q_E$  in force control experiment

(a) Power Grasp



(b) Precision Grasp

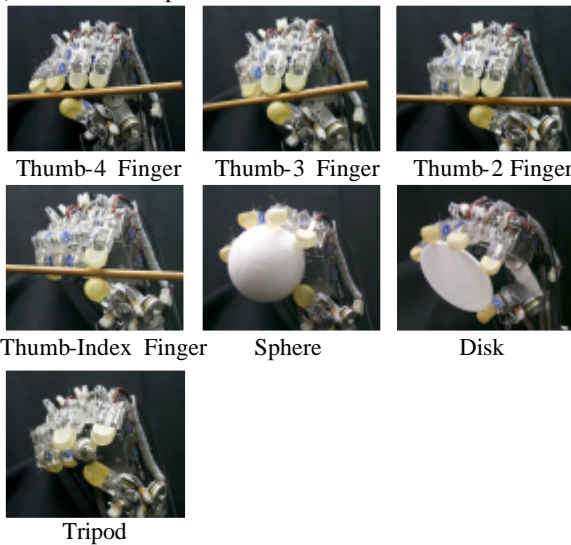


Fig. 10 Result of grasping experiment<sup>[4]</sup>

4.3 力制御実験

本ロボットハンドは、2.2 節において述べたように、超音波モータの位置決めにより弾性要素の変形量を制御することによって、力制御を実現する。製作した装置は弾性要素としてナイロン糸を用いていることから、負荷と弾性要素の変形量の関係は非線形性を有する。このため、まず、フィンガの指先に外力を与える実験を行い、2.1 節の式(2)における  $\Delta q_E$  と関節トルク  $t$  の関係を導出した。この結果をもとに、示指ロボットフィンガの力制御実験を行った。実験では、指先力の目標値  $F_{yd}$  を手掌面に対して鉛直方

向にのみ成分を持つベクトルとした。そのため、超音波モータ 4 は駆動していない。  $F_{yd}$  の値から、ヤコビ行列を用いて各関節トルクの目標値  $t_d$  を算出し、上述した関係を用いて  $\Delta q_E$  の値に換算した。  $F_{yd}$  の大きさを 1.47N として、力制御実験を行ったときの  $\Delta q_E$  の履歴を Fig. 9 に示す。図より、各  $\Delta q_E$  の値は 160ms 程度で目標値に収束しており、超音波モータの位置決め制御により弾性要素の変形量が制御されていることが確認された。このとき、出力された力の値は 1.42N となり、目標値に近い値が得られた。

次に、目標値の大きさを 0.49N, 0.98N, 1.47N, 1.96N と変化させていき、それぞれの目標値に対して 5 回の力制御実験を行った。この結果、出力値には関節軸の摩擦やナイロンのヒステリシスなどによる誤差が生じたものの、それぞれの目標値に対して誤差  $\pm 10\%$  以下となる結果が得られた。よって、本ロボットハンドが、超音波モータと弾性要素を用いた独自の駆動方式により力制御を実現可能であることが確認された。

4.4 物体把持実験

次に、製作した装置のロボットハンドとしての機能を確認するために、物体把持実験を行った。本ロボットハンドは、人間の手に準じた構造を有しているため、人間の手と同様の把持動作を実現することが可能であると考えられる。人間の把持の分類法として、Power Grasp と Precision Grasp の 2 大分類が知られており、Cutkosky らは工場内作業者の把持動作を例にとり、さらにそれらを細分化して、階層構造を有する把持分類法を構築した<sup>[4]</sup>。この分類法に基づき、本ロボットハンドにより、16 種の把持姿勢を実現する物体把持実験を行った。実験の結果を Fig. 10 に示す。図より、本ロボットハンドは人間の把持姿勢を忠実に再現しており、本ハンドが高い汎用性を有することが確認された。

5. おわりに

本稿では、人間の手と同等の寸法、形状、および自由度を有する 5 指型ロボットハンドの設計、製作および制御実験について述べた。本ロボットハンドは、自由度および質量の面で従来のロボットハンドに対して利点を有しており、人間の作業を代行するエンドエフェクタとして高い機能を有するといえる。今後、信頼性の向上のための装置の改良や、ロボットアームへの接続、触覚センサの実装等を行い、マスタ・スレーブシステムによる遠隔操作の実現をはじめとした様々な用途へ応用していく予定である。

参考文献

- [1] 山野郁男, 前野隆司: 5 指型ハンドのための超音波モータ内蔵型ロボットフィンガの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集, 1A1-1F-G6, 2003
- [2] Toshio Morita, Hiroyasu Iwata, and Shigeki sugano: "Human Symbiotic Robot Design based on Division and Unification of Functional Requiements", Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2229-2234, 2000
- [3] S.C. Jacobsen, E.K. Iversen, D.F. Knutti, R.T. Johnson, and K.B. Biggers: "Design of the Utah/MIT Dexterous Hand", Proceedings of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1520-1532, 1986
- [4] M. R. Cutkosky, P. K. Wright: "Modeling manufacturing grips and correlations with the design of robotic hands", Proceedings of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1533-1539, 1986