

超音波モータと弾性要素を用いた5指ロボットハンドの開発

山野 郁 男^{*1} 前野 隆 司^{*2}

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

Ikuo Yamano^{*1} and Takashi Maeno^{*2}

A robot hand imitating human hand is developed. The robot hand is driven by a new method proposed by authors using ultrasonic motors and elastic elements. The method utilizes restoring force of elastic element as driving power for grasping an object, so that the hand can perform the soft and stable grasping motion with no power supply. In addition, all the components are placed inside the hand thanks to the ultrasonic motors with compact size and high torque at low speed. Applying the driving method to multi-DOF mechanism, a five-fingered robot hand is designed and implemented. It has equal number of joints and DOF to human hand, and it is also equal in size to the hand of average adult male. The performance of the robot finger is confirmed by fundamental driving experiments.

Key Words: Robot Hand, Ultrasonic Motor, Passive Compliance, Grasp and Manipulation, Remote Control

1. はじめに

ロボット技術の進展に伴い、人間と同じ環境で活動するヒューマノイドロボット実現への期待が高まっている。ヒューマノイドロボットが人間と同様に多種多様なタスクを実現するためには、人間の手に相当するロボットハンドの機能が不可欠である。また、人間の手を模倣したロボットハンドは、マスタ・スレーブシステムによる遠隔操作において、人間の高度な動作を再現するために有効である。このため、これまでに数多くの優れたロボットハンドが開発されてきた[1]~[11]。しかし、これらのロボットハンドにより人間の手の高度な機能を再現するためには様々な問題点が残されており、実際の作業に適用されたロボットハンドは多くない。

本論文では、人間の手を模倣した従来のロボットハンドを、大きく二つに分類するものとする。一つめは、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」のロボットハンド、二つめは、ハンドの外部に設置した高出力アクチュエータの動力を、ワイヤにより伝達することによって各関節を駆動する「ワイヤ駆動型」のロボットハンドである。

アクチュエータ内蔵型の例としては、HRPの高機能ハンド[1]

や、MoritaらのWENDYハンド[2]、ドイツDLRのDLR hand II [3]、安川ハンド[4]、並木らの高速多指ハンド[5]などが挙げられる。これらのハンドは、ハンドが独立した構造を有するため、多様なロボットアームとの接続が可能であり、高い汎用性を有するといえる。しかし、ハンド内部の限られたスペースにすべてのアクチュエータおよび動力伝達機構を組み込むという構造上の制約により、アクチュエータ内蔵型のロボットハンドの多くは4指以下、もしくは1指当たり3自由度以下である。一方、筆者らは、人間による動作入力容易性と人間の高度な動作の再現性の観点から、ロボットハンドに人間の手と等しい構造を持たせることを目指す。この観点に立つと、従来のアクチュエータ内蔵型ロボットハンドは自由度の面で課題を残しているといえる。また、アクチュエータ内蔵型ロボットハンドの多くは質量が1[kg]以上と大きく、これを支えるために高出力のロボットアームが必要となる。さらに、指先に近い位置にアクチュエータを設置した場合、フィンガ部の慣性が増大するため、高速な手指動作の実現が困難となる。

一方、ワイヤ駆動型のロボットハンドは、アクチュエータをハンド外部に設置することにより、ハンド内部の構造上の制約が低減され、フィンガ部の慣性が軽減されるとともに、多自由度運動が可能となる。また、大型のアクチュエータを用いることができるため、高出力を有するものが多い。このタイプのハンドの例としては、Utah/MIT hand [6]やShadow hand [7]などが挙げられる。しかし、これらのハンドは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といった汎用性の面で問題

原稿受付 2004年10月20日

*1ソニー(株)

*2慶應義塾大学

*1Sony Corporation

*2Keio University

が残されている。

以上のように、人間を模倣した従来のロボットハンドは、自由度または汎用性の点で問題を有するといえる。このため、本研究では、汎用性の高い独立した構造を持ち、かつ人間と同等の形状、寸法、自由度を有する5指ロボットハンドを開発することを目的とする。すなわち、超音波モータと弾性要素を用いた新たな駆動方式および駆動機構を提案することにより、軽量、高速、受動弾性を有する、把持時の電力供給不要、力制御が容易といった特徴を有する5指ロボットハンドを実現する。

2章ではロボットハンドの設計について、3章ではロボットハンドの製作について述べる。4章では、本ハンドの性能を確認し有効性を明らかにするための制御実験について述べる。

2. 設 計

2.1 設計指針

1章で述べたように、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、人間による動作入力の容易性および人間の高度な動作の再現性などの利点が得られる。このため、開発するロボットハンドは以下のような構造と機能を満たすものとする。

- (1) サイズはヒトの手と同等とする
- (2) ヒトと同様、1指につき4自由度、計20自由度を有する構造とする
- (3) アクチュエータを内部に設置した独立構造とする
- (4) 質量はロボットアームとの接続を想定し、可能な限り小さくなるようにする
- (5) 高度・高速な物体操り動作実現を想定するため、母指の指先力は10[N]、他の指は5[N]とする

2.2 駆動方式の提案

従来のアクチュエータ内蔵型のロボットハンドは、アクチュエータとして主にDCモータやACモータを用いている。これらのモータは一般に高減速比の減速機を必要とするため、アクチュエータの占有するスペースや質量が大きくなり、その結果、自由度を削減する必要が生じる。また、モータに加わる慣性力は減速比の二乗に比例するため、相対的に大出力モータを使用する必要が生じる。さらに、減速ギアのバックラッシュは制御性能を悪化させる要因となる。

一方、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しない。また、トルク重量比が大きいため、小型化に適する。このため、超音波モータは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、超音波モータは高応答性および静粛性を有するため、高速かつ静粛なハンド実現のために適している。これらより、本ロボットハンドでは、超音波モータをハンドの掌部に設置して、ワイヤプーリー機構によって各関節を駆動するものとする。なお、モータにより関節を直接駆動するのではなく、ワイヤ駆動方式を用いるのは、構造上の制約を低減することによって人間の手と同等の20自由度の運動を実現する、若干の減速を行う、指先の慣性を軽減する、という三つの目的を実現するためである。

ワイヤ駆動方式は、N自由度に対して必要となるアクチュエータの数に応じてN型、N+1型、2N型の三つに分類される[12]。N型はモータの駆動効率、制御の容易性、省スペース化の点で

有利だが、ワイヤの初期張力を調整することが困難であり、ワイヤの伸びやたるみが問題となることが多い。一方、N+1型や2N型は、モータの出力トルクに応じてワイヤ張力を調整することが可能である。従来のロボットハンドでは、Stanford-JPL Hand [8]がN+1型を、Utah/MIT hand [6]が2N型を採用している。しかし、アクチュエータをハンド内部に設置する本ロボットハンドにおいて、これらの方式を用いることは構造的に困難である。

このため、筆者らは、Fig. 1に示す超音波モータと弾性要素を用いた新たなワイヤ駆動方式を提案する[13]。本方式は以下の特徴を有する。

- (1) 弾性要素の初期伸び調整により、ワイヤの初期張力を調整できる。
- (2) 関節は、弾性要素のばね定数により調整できる受動的なコンプライアンスを有する。
- (3) 非接触時の位置制御の際には、超音波モータへの電力供給を止めることで、モータの保持トルクによって関節角度が保持される。
- (4) 力センサやトルクセンサを必要としない。
- (5) 超音波モータを位置制御することにより、力制御を実現できる。
- (6) 接触時の力制御の際には、超音波モータへの電力供給を止めることで、対象物に一定の力を出力し続けることができる。
- (7) 超音波モータの大トルク特性を生かすセミダイレクト駆動により、高応答・高トルクを実現できる。
- (8) 減速ギアを用いないため静粛。

以下に、方式と特徴の詳細について述べる。

Fig. 1は、示指のMP関節の屈伸機構を模式化した図である。

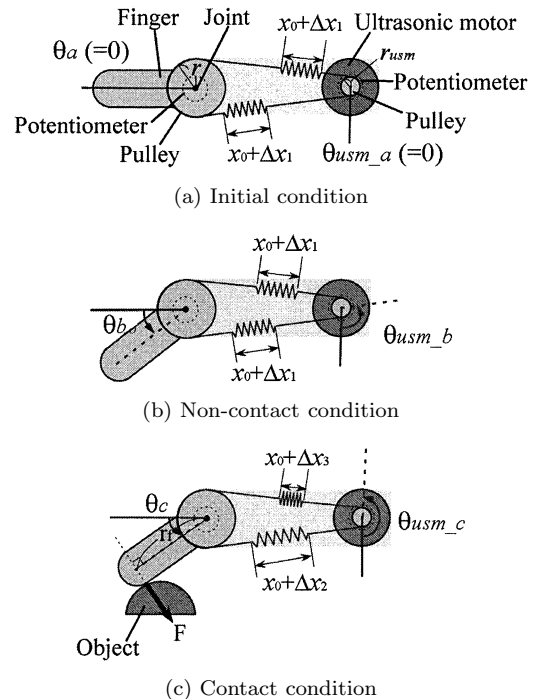


Fig. 1 Outline of driving method

ワイヤと直列にばね定数 k の二つの弾性要素が組み込まれており、ワイヤの両端はプーリに固定されている。また、二つのポテンシオメータにより、超音波モータと関節の角度が計測される。

Fig. 1 (a) の初期状態において、二つの弾性要素はともに自由長 x_0 から Δx_1 だけ伸張している。このとき、ワイヤ張力は、 $k \cdot \Delta x_1$ と表される。よって、本方式では、弾性要素の初期伸びを調整することにより、ワイヤの初期張力を容易に調整することができる (特徴 (1))。また、弾性要素の働きにより、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 (特徴 (2))。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 (特徴 (2))。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、未知の環境においてハンドが対象物と接触あるいは衝突する際に、ロボットおよび環境の双方のダメージを軽減することが可能である。

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により、位置制御を実現する。また、超音波モータへの電力供給を停止した場合には、モータの保持トルクによって関節角度が保持される (特徴 (3))。

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と関節角度の関係は、

$$r \cdot \theta_b = r_{usm} \cdot \theta_{usm_b} \quad (1)$$

と表される。

フィンガが対象物に接触した際には弾性要素の一方が伸張し、もう一方が収縮することにより式 (1) の関係が成立しなくなることから、接触状態が判別される。Fig. 1 (c) の接触時においては、二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。このとき、力 F と超音波モータおよび関節角度の関係は、

$$\begin{aligned} \tau = F \cdot r_f &= 2 \cdot k \cdot r \cdot (r_{usm} \cdot \theta_{usm_c} - r \cdot \theta_c) \\ &= 2 \cdot k \cdot r \cdot r_{usm} \cdot (\theta_{usm_c} - \theta_c \cdot r / r_{usm}) \\ &= 2 \cdot k \cdot r \cdot \Delta \theta_E \end{aligned} \quad (2)$$

と表される。ただし、 τ は関節トルクの大きさを表す。また、 $\Delta \theta_E$ は弾性要素の変形の大きさを表す値であり、4.2 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、ポテンシオメータで計測される角度情報から、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できるうえ、力センサ・トルクセンサのノイズの影響がない (特徴 (4))。

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 (特徴 (5))。超音波モータは摩擦駆動に基づくモータであり、一般にトルク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、この特徴を活かしているため、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は保持され、それにより力 F が対象物に与え続けられる (特徴 (6))。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ているため、物体を持ち続けるようなタスクにおいて、電力消費 0 の安定把持状態を実現できる。力 F 以下の外乱が加わる場合にも、弾性要素の復元力により安定性が維持できる。この点は、電磁モータを停止し続けるために電力を供給し続ける位置制御が不可欠であることと対照的である。

減速ギアを用いない本機構では、バックラッシュが生じないため、能動的なコンプライアンス制御の際にも有利である。

さらに、ギアを介さず、ワイヤとプーリにより1段の減速を行うだけなので、超音波モータの高トルク・高応答性を生かし、周波数帯域が広く指先力の大きいロボットハンドを実現できる (特徴 (7))。

2.3 駆動機構の設計

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、環指および小指は同一機構を持つものとし、母指のみ別の駆動機構とする。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

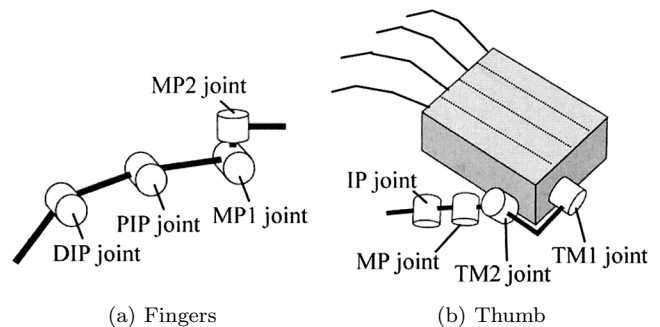


Fig. 2 Arrangement of DOF

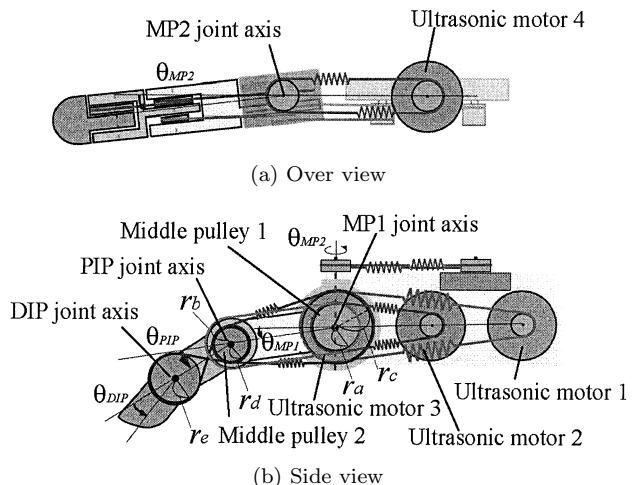


Fig. 3 Outline of driving mechanism of fingers

タ 1, 2, 3 は MP1, PIP, DIP 関節の屈伸運動をそれぞれ生成する。リング型超音波モータは軸方向に薄い構造を持つため、図のように、ユニット化されたロボットフィンガ内に、三つのモータを一行に配置することができる。また、側屈運動を生成する超音波モータ 4 は、三つのモータの上部に設置する。各関節には上述の駆動方式を適用しており、PIP および DIP 関節の駆動機構では、ワイヤを他の関節軸に経由させるための中間プーリを用いている。中間プーリはベアリングを介して関節と同軸上に設置する。

超音波モータ 2 によって PIP 関節を駆動する場合、PIP 関節と DIP 関節の間に交差して張られたワイヤの作用により、DIP 関節が PIP 関節と同方向に変位する。このとき、 $\Delta\theta_{PIP}$ と $\Delta\theta_{DIP}$ の間には、

$$r_e \cdot \Delta\theta_{DIP} = r_d \cdot \Delta\theta_{PIP} \quad (3)$$

のような関係が成り立つ。人間の母指を除く 4 指の PIP 関節と DIP 関節は、指が物体に接触していないときの動作では連動することが知られている。本駆動機構は、この従属的な二つの関節の動作を、一つのモータの駆動により実現できるため、消費エネルギーが軽減される。さらに、超音波モータ 3 を駆動することにより、DIP 関節を独立に駆動させることも可能である。また、超音波モータ 4 は、超音波モータ 3 を含むフィンガ部全体をベースに対して Fig. 3 (a) のように変位させる。このとき、MP 関節および PIP 関節を駆動するワイヤの経路長が変化するが、この影響は、それぞれの関節の二つの弾性要素が均等に伸張することにより解消されるため、MP2 関節が独立に駆動される。

次に、母指の駆動機構について述べる。人間の母指は、他の 4 指とは構造が異なるものの、中央の MP 関節の微小な旋回を省略した場合、Fig. 2 (a) と同様の 3 関節 4 自由度の構造で表すことができ、根元の TM 関節は掌内部に位置する。また、機能面では、母指は他の 4 指に対して指頭を向け合う対立運動を行うことによって、人間の手の多様な動作を実現している。

しかし、上述した Fig. 3 の駆動機構に基づき、母指を除く 4 指を設計した場合、母指の根元の関節を掌内部に設置することは設計上困難になる。このため、母指の自由度配置および名称を Fig. 2 (b) のように定めた。このような配置をとることにより、母指の根元を掌内部に設置することなく人間の母指に近い運動を実現できる。母指の対立運動は、TM1 関節の運動により実現できる。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、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。

2.4 詳細構造の設計

2.3 節で述べた駆動機構をもとに、5 指ロボットハンドの詳細構造を設計した。Autodesk 社の 3DCAD ソフト Inventor による詳細設計図を Fig. 5 に示す。リング型超音波モータとして、新生工業製の USR30-B4 (最大出力トルク 0.1 [Nm], 質量 20 [g]) を用いる。また、各関節角度およびモータ回転角度を計

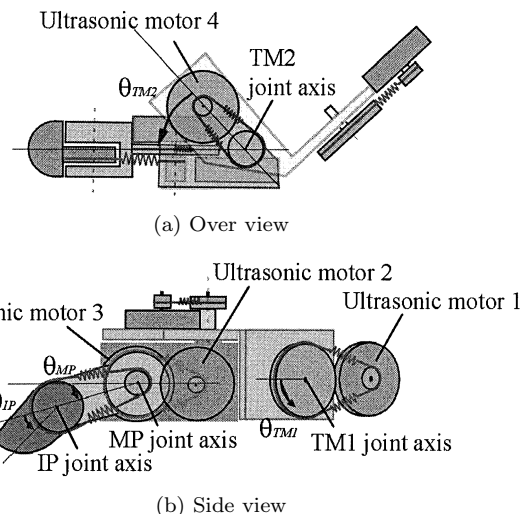


Fig. 4 Outline of driving mechanism of thumb

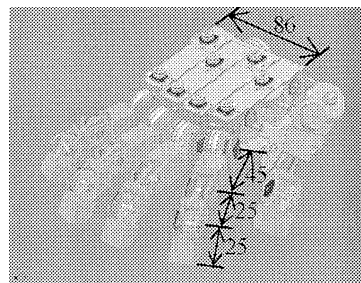


Fig. 5 Three-D CAD image of five-fingered robot hand

Table 1 Movable ranges of joints [deg]

Fingers		Thumb	
MP1 joint	-30 ~ 80	TM1 joint	-30 ~ 90
PIP joint	0 ~ 100	MP joint	-20 ~ 80
DIP joint	0 ~ 90	IP joint	-10 ~ 90
MP2 joint	0 ~ 30	TM2 joint	0 ~ 80

測するポテンシオメータとして、村田製作所製のトリマポテンシオメータ PVS1-103A01 を用いる。母指以外の 4 指の超音波モータ 1 および 2 については、回転角度がポテンシオメータの計測範囲を超えるため、タイミングプーリ・ベルト機構を用いてモータとは別の軸にポテンシオメータを設置している。各部の寸法を日本人の平均身体寸法データ [14] に基づき、成人男性の平均値に等しくなるように設計し、Fig. 5 のロボットハンドの手幅を 86 [mm] とした。指先形状は、物体の操作性および力学計算の容易さを考慮し、半径 10 [mm] の球面形状とした。また、母指の詳細設計を行うに当たって、三次元計測器を用いて人間の母指の運動計測を行った。この結果より、Fig. 4 の駆動機構によって、人間の母指の運動に最も近い動作が実現されるように、各部の寸法および TM1 関節の取り付け位置を決定した。

可動域も同様に、人間の手の構造に準じるように設計した。各関節の可動域を Table 1 に示す。各関節角度の原点および方向は、Fig. 3 および Fig. 4 に示すようにとる。ただし、TM1 関節

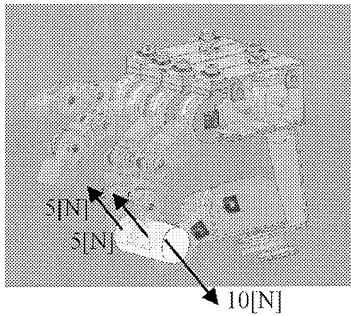


Fig. 6 Reaction force of robot fingers

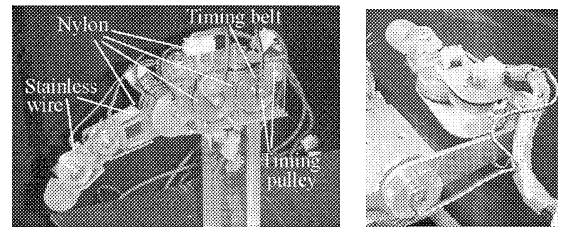
では、人間の母指の運動計測の結果をもとに、母指指頭面と掌面の角度が 72 [deg] となるような角度を 0 [deg] とした。

指先力は Fig. 6 に示すように、母指、示指および中指を用いて直径 25 [mm] の円柱を精密把握している姿勢を基準状態とし、この状態で母指の指先から 10 [N]、示指および中指の指先からそれぞれ 5 [N] の力を出力できるように、各プーリの半径を設計した。環指および小指も、示指・中指と同様に指先力が 5 [N] となるように設計した。これらの値は人間の指先力よりも小さいものの、高速・高精度に小さな物体を操るような動作の際には十分であると考えられる。また、人間の示指の運動の計測結果をもとに、Fig. 3 における r_d と r_e の比を 7:10 とした。

3. 製作

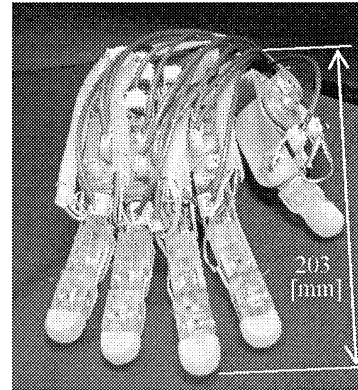
2.4 節で述べた詳細設計に基づき、5 指ロボットハンドの製作を行った。示指および母指の外観を Fig. 7 に示す。ベースプレートおよびプーリにはアルミ材を、フィンガ部および側面プレートにはアクリル材を、それぞれ使用した。また、ワイヤとして、直径 0.27 [mm] のステンレスワイヤを使用した。指先と対象物との摩擦係数を増大させるために、指先に厚さ 0.4 [mm] のゴム皮膜を被覆した。本ロボットハンドのフィンガ部は構造が単純であるため、今後、様々な触覚センサを配置することが可能である。

弾性要素としては、コイルばねを用いることを検討したが、空間的制約により設置が困難であった。このため、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。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できるため、省スペース化が達成できた。強度および弾性領域の面から材料の検討を行った結果、弾性ワイヤとして、ナイロン糸を選定した。2.2 節で述べた駆動方式を用いる本ハンドでは、弾性要素の弾性の大きさがハンドの位置制御性および力制御性に大きく影響する。ばね定数を過大に設定した場合、弾性要素による受動的なコンプライアンスの効果が小さくなるとともに、ポテンシオメータを用いた力の計測精度が悪化する。一方、ばね定数を過小に設定した場合、弾性要素の変形により位置制御性が悪化するとともに、弾性要素の変形量が増大してポテンシオメータの可計測範囲を超えてしまう。そこで、ナイロンの引張試験を行い、この結果をもとに、各指のナイロン糸が各関節のモータの最大出力トルクに対して、ポテンシオメータの可計測範囲内で最大の弾性変形を生じるようにナイロンの弾性を設定

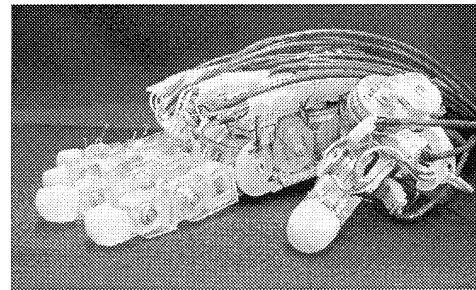


(a) Index finger of the robot hand (b) Thumb finger of the robot hand

Fig. 7 External view of developed robot finger



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 8 Developed five-fingered robot hand

した。このとき、各関節が 10 [Hz] 以下に共振周波数を持たないことを確認した。Fig. 7 の示指の質量は 165 [g]、母指の質量は 170 [g] である。

これらの各指を組み合わせることによって、5 指ロボットハンドを製作した。5 指ロボットハンドの外観を Fig. 8 に示す。全体の質量は 853 [g] である。掌部の幅は 86 [mm]、指先から手首部までの長さは 203 [mm]、指を広げたときの母指指頭から小指指頭までの長さは 190 [mm] であり、人間の手と同等の寸法であるといえる。

次に、製作した 5 指ロボットハンドを動作させるために、PC を用いた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、デジタル入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。制御プログラムの制御周期は 1 [ms] とした。本ロボットハンドは力センサを用いずに力の計測を行うため、制御シス

テムの構成が簡便化される。

4. 制 御

製作した5指ロボットハンドおよび制御システムの評価を目的として、以下に述べる制御実験を行った。

4.1 位置制御実験

本ロボットハンドに用いる超音波モータの専用ドライバは、速度指令電圧を与えることでモータの回転数を制御することが可能である。そこで、角度指令に基づく関節角度制御を行うに当たり、単純な比例制御を適用することとした。比例ゲインは、発振が生じない範囲で試行錯誤的に定めた。ロボットハンドおよび、超音波モータの動特性を考慮に入れた制御系の検討は今後の課題である。

(1) ステップ応答

示指において、MP1、PIP および DIP 関節の角度を 0 [deg] とし、MP2 関節を 20 [deg] とした状態を初期状態として、MP1、DIP、PIP および MP2 関節の目標角度をそれぞれ 20, 60, 40, 0 [deg] としたときのステップ応答を Fig. 9 に示す。ナイロンの弾性と指の慣性の影響により、各関節の角変位は振動を伴う応答を示す。また、2.2 節で述べたように、各関節の角変位はプーリの半径の比に従い、互いに他の関節の角変位に影響を与えている。なお、その影響は DIP 関節において最も大きい。しかし、すべての関節角変位は 200 [ms] 以下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。

(2) 周波数応答

次に、示指の四つの関節に対して、式 (4) で表される正弦波状の角度指令を与え、周波数 f を変化させていき、その際の応答の角変位から各関節の周波数応答特性を求めた。

$$\theta = A_0 \sin(2\pi ft) + \theta_0 \quad (4)$$

示指の屈伸運動および側屈運動が実現されるように、MP1、DIP、PIP、MP2 の各関節について、 A_0 をそれぞれ 20, 30, 30, -5 [deg]、 θ_0 をそれぞれ 20, 30, 30, 15 [deg] とした。なお、これらの振幅は、人間の示指が連続的かつ自然に精密な操り動作を行う際の各関節の振幅を十分に網羅するような値とした。1 [Hz] から 10 [Hz] まで 1 [Hz] 間隔で入力周波数 f を変化させた際の周波数応答を Fig. 10 に示す。ゲインは、すべての関節で 4 [Hz] 程度まで 0 [dB] に近い値となった。ゲインが -3 [dB] となるバンド幅は、DIP 関節および MP2 関節において 10 [Hz] 以上、MP1 関節において約 6.2 [Hz]、最も小さい PIP 関節にお

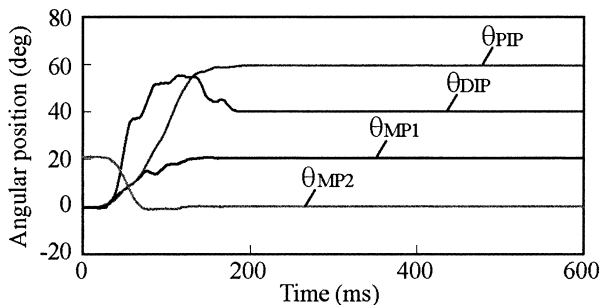


Fig. 9 Step response of robot index finger

いて約 5.4 [Hz] であった。また、10 [Hz] の入力に対しても、示指は屈伸動作を実現可能であった。なお、上述の場合よりも振幅が小さい場合についても周波数応答の計測を行った結果、ゲインが -3 [dB] となるバンド幅は、より高い周波数となった。

これに対し、人間の示指の運動計測を行った結果、実現可能な屈伸動作は最大 5.5 [Hz] 程度であった。

以上の実験結果より、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できた。

4.2 力制御実験

上述した実験により、本ロボットハンドの位置制御性が確認できた。本ロボットハンドは、2.2 節で述べたように、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ため、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、2.2 節の式 (2) における $\Delta\theta_E$ と関節トルク τ の関係を導出した。この結果をもとに、示指の力制御実験を行った。

指先力の目標値 F_{yd} は、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。出力された指先力の大きさは分解能 0.01 [N] のデジタルスケールを用いて測定した。実験では、まず、 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 τ_d を算出し、上述した関係を用いて $\Delta\theta_E$ の目標値 $\Delta\theta_{Ed}$ に換算して、拡張音波モータの位置決め制御を行った。 F_{yd} の大きさを 1.47 [N] として、力制御実験を行ったときの $\Delta\theta_E$ の履歴を Fig. 11 に示す。図より、各 $\Delta\theta_E$ の値は 160 [ms] 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を制御できることが確認できた。また、Fig. 11 において、各 $\Delta\theta_E$ の値が目標値に収束した後はモータへの電源供給が停止され、モータの保持トルクにより $\Delta\theta_E$ の値が保持されており、接触面に弾性要素の復元力による力が与えられている。このときの力の測定値は 1.42 [N] となり、目標値に近い値が得られた。

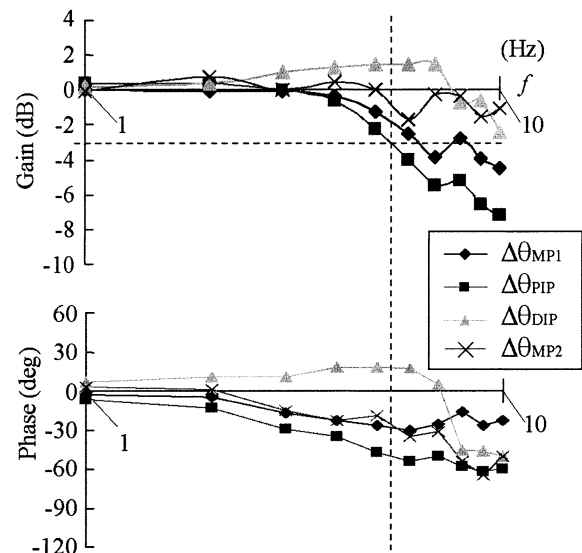


Fig. 10 Frequency response of robot index finger

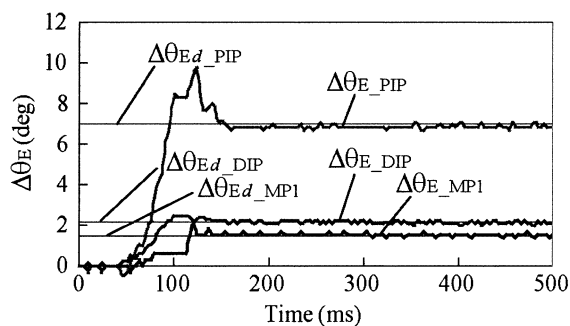


Fig. 11 Response of $\Delta\theta_E$ in force control experiment

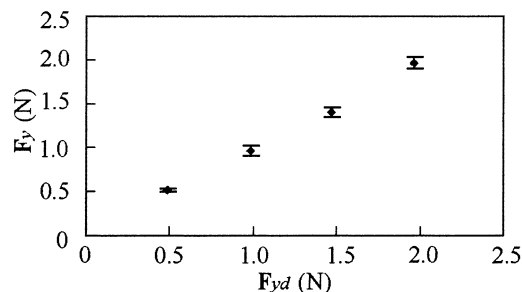


Fig. 12 Result of force control experiment

次に、目標値の大きさを 0.49, 0.98, 1.47, 1.96 [N] と変化させ、それぞれの目標値に対して 5 回の力制御実験を行ったときの目標値と出力値の関係を求めた。結果を Fig. 12 に示す。図より、関節軸の摩擦やナイロンのヒステリシスに起因する誤差が生じているものの、誤差はそれぞれの目標値に対して $\pm 10\%$ 以内となっている。これより、超音波モータと弾性要素を用いた独自の駆動方式によって力制御を実現できることが確認でき

4.3 物体把持実験

次に、製作した装置の機構がハンドとして高い機能を有することを確認するために、物体の把持実験を行った。本ロボットハンドは人間の手に準じた構造を有するため、人間の手と同様の把持動作を実現できると考えられる。人間の把持の分類法として、Napier により提案された、Power Grasp と Precision Grasp の 2 大分類が知られている [15]。Cutkosky らは、工場内作業者の把持動作を例にとり、それらをさらに細分化して、階層構造を有する把持分類法を構築した [16]。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。なお、実験ではハンドの各関節に物体形状に基づいた位置指令のみを与え、関節のコンプライアンスにより把持を実現した。実験の結果を Fig. 13 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、本ロボットハンドが人間に代わって多様な環境で作業を行うエンドエフェクタとして、高い汎用性を有することが確認できた。

5. 考 察

本ロボットハンドの仕様を、これまで開発された主要な人間型のロボットハンドと比較した結果を Table 2 に示す。

本ロボットハンドは、アクチュエータ内蔵型ハンドの中では最大の 5 指 20 自由度を有する。すなわち、アクチュエータを内

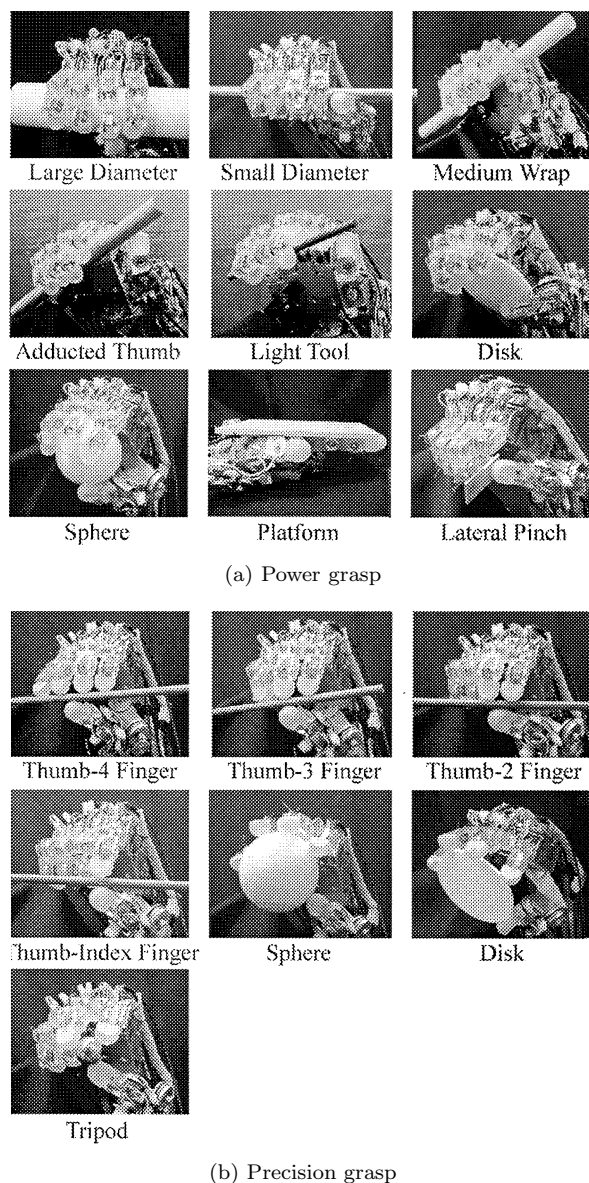


Fig. 13 Result of grasping experiment based on Cutkosky's taxonomy [16]

蔵した独立した構造でありながら、人間の手と同等の形状、寸法、自由度を有する唯一のハンドであるといえる。

また、本ハンドは、質量が 853 [g] であり、従来のロボットハンドと比較して軽量である。このため、多様なロボットアームとの接続が可能である。

さらに、前述したように、本ハンドは、ワイヤ内の弾性要素のはたきにより、受動的なコンプライアンスと、電力供給を必要としない安定な把持動作を実現している。性能面では、高応答性を有する超音波モータを用いたセミダイレクト駆動により人間以上の高速な動作を実現している。また、超音波モータの高トルク特性を生かして、高度な物体操り動作が可能な高い指先力を実現している。

これらの特長により、本ロボットハンドは、人間の動作を代行し、器用な物体把持および操作を行うロボットのエンドエフェ

Table 2 Comparison of specification of robot hands

Name	Fingers	DOF	Weight[g]	Driving mechanism
Developed robot hand	5	20	853	Built-in actuator
HRP hand[1]	4	12	910	Built-in actuator
WENDY hand[2]	4	13	1700	Built-in actuator
DLR hand II[3]	4	13	1800	Built-in actuator
Gifu hand[9]	5	16	1400	Built-in actuator
Utah/MIT hand[6]	4	16	-	Wire-driven
Shadow hand[7]	5	21	-	Wire-driven
Stanford-JPL hand[8]	3	9	-	Wire-driven
Anthrobot hand[10]	5	16	4500	Wire-driven
Robonaut hand[11]	5	12	-	Flex shaft

クタとして有効であり、ヒューマノイドロボットへの搭載やマスタ・スレーブシステムによる遠隔操作の実現など、実用的な用途への展開が可能である。特に、マスタ・スレーブシステムによる遠隔操作や、遠隔操作によって得られた情報を用いた制御を行う場合、従来のハンドが実現できなかったような高速・高精度かつ柔軟な人間の動作を実現し、技術・医術・芸術に代表される人間の高度熟練技能を再現することができると考えられる。

本ロボットハンドをマスタ・スレーブシステムとして制御した場合の遠隔操作性の検証や、動的な力制御性についての詳細な検証、自律ロボットハンドとして用いた場合の高制御性の検証は今後の課題である。また、本ハンドをさらに人間の手に近づけるためには、ロボットアームへの接続、配線の内蔵化、皮膚および触覚センサの実装を行っていく必要があると考えられる。生産性を向上し、研究用や汎用的用途に供するための研究開発を行うことも今後の課題である。

6. お わ り に

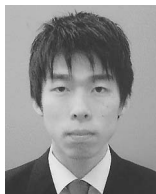
本研究では、超音波モータと弾性要素を用いた5指ロボットハンドを開発した。本ハンドの特徴は以下の通りである。

- (1) 人の手と同等のサイズを有しており、手幅は 86 [mm] である。
- (2) アクチュエータを内部に設置した独立構造を持つ。
- (3) アクチュエータ内蔵型ハンドの中では最大の5指20自由度を有する。
- (4) 質量は 853 [g] であり、従来のロボットハンドと比較して軽量である。
- (5) 弾性要素により、各関節は受動的なコンプライアンスを有する。

- (6) 力センサやトルクセンサを必要としない。
- (7) 超音波モータを位置制御することにより力制御を実現できる。
- (8) 接触時の力制御の際に、超音波モータへの電力供給を止めることで、弾性要素の復元力による力を対象物に加え続けることができる。
- (9) 示指の周波数応答における各関節のバンド幅は 5.4 [Hz] 以上であり、人間以上の高速動作を実現できる。
- (10) 減速ギアを用いないため静粛である。

参 考 文 献

- [1] 平井和雄, 仲山茂人: “ロボットプラットフォームの製作および高機能ハンドの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.8-15, 2001.
- [2] T. Morita, H. Iwata and S. Sugano: “Human Symbiotic Robot Design based on Division and Unification of Functional Requirements,” Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2229-2234, 2000.
- [3] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Lieu and G. Hirzinger: “DLR-Hand II: Next Generation of a Dextrous Robot Hand,” Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.109-114, 2001.
- [4] 鬼木清, 梅津真弓: “多指ハンドの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 講演論文集, vol.B, pp.71-72, 1992.
- [5] 並木明夫, 石川正俊, 金子真: “軽量高速多指ロボットハンドの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集 (CD-ROM), 2003.
- [6] 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.
- [7] <http://www.shadow.org.uk/products/newhand.shtml>
- [8] J.K. Salisbury and M.T. Mason: Robot Hands and the Mechanics of Manipulation. MIT Press, 1985.
- [9] 川崎晴久, 内山和直, 小松恒夫: “研究用プラットフォームをめざした分布型触覚センサを有する人間型ロボットハンド”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.66, no.651, pp.3672-3678, 2000.
- [10] K.J. Kyriakopoulos, J.V. Riper, A. Zink and H.E. Stephanou: “Kinematics Analysis and Position/Force Control of the Anthrobot Dexterous Hand,” IEEE Transactions on Systems, vol.27, no.1, pp.95-103, 1997.
- [11] C.S. Lovchic and M.A. Diftler: The Robonaut Hand: “A Dexterous Robot Hand for Space,” Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.907-912, 1999.
- [12] 前川仁: “ワイヤ駆動系の設計と制御—多指ハンド機構への応用—”, 日本機械学会第 72 期通常総会講演会資料集 (V), pp.200-201, 1995.
- [13] 山野郁男, 前野隆司: ロボットフィンガ, 4 指ロボットハンド, 及び, 5 指ロボットハンド, 特願 2003-105692.
- [14] 生命工学工業技術研究所編: 設計のための人体寸法データ集. 人間生活工学研究センター, 1996.
- [15] I. Napier: “The prehensile movements of the human hand,” J. of Bone and Joint surgery, vol.38B, no.4, pp.902-913, 1956.
- [16] M.R. Cutkosky and 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.

**山野郁男 (Ikuo Yamano)**

1979 年 12 月 17 日生。2002 年 3 月慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業。2004 年 3 月慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修士課程修了。同年、ソニー (株) 入社。在学中、マスタースレーブシステムの制御法やロボットハンドの研究に従事。
(日本ロボット学会正会員)

**前野隆司 (Takashi Maeno)**

1962 年 1 月 19 日生。1984 年東京工業大学工学部機械工学科卒業。1986 年東京工業大学機械工学専攻修士課程修了。同年キャノン (株) 入社。1990～1992 年カリフォルニア大学バークレー校 Visiting Industrial Fellow。1995 年慶應義塾大学専任講師、現在助教授。2001 年ハーバード大学 Visiting Scholar。博士 (工学)。1995 年日本音響学会技術開発賞受賞。1999 年日本機械学会賞 (論文) 受賞。2003 年日本ロボット学会論文賞受賞。2004 年ファナック FA ロボット財団論文賞受賞。超音波モータ、触覚センサ・触覚ディスプレイ、テレ・バーチャルロボティクス、ヒトとロボットとの心などの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、日本音響学会、日本バーチャルリアリティ学会、日本デザイン学会、IEEE 等の会員。
(日本ロボット学会正会員)