人間型ロボットハンドによる握り反射を模擬した 未知形状物体の把持*

毛利 哲也^{*1}, 川崎 晴久^{*1}, 伊藤 聡^{*2}

Unknown Object Grasping Strategy Imitating Human Grasping Reflex for Anthropomorphic Robot Hand

Tetsuya MOURI, Haruhisa KAWASAKI^{*3} and Satoshi ITO

^{*3} Faculty of Engineering, Gifu University,
1-1 Yanagido, Gifu shi, Gifu, 501 1193 Japan

This paper presents a grasping strategy for unknown objects that imitating human grasping reflex for the anthropomorphic robot hands. A 10 months baby may bend his/her thumb and 4 fingers trying to grasp an object when it is in contact with the palm. After grasping it, if the object is plucked from the baby's hand, the baby holds the object more strongly. In addition, the hand approaches the object by only touching the palm lightly. The reaction of the hand is called a grasping reflex. In the proposed grasping strategy, each joint of the thumb and the fingers is controlled independently using the contact force affecting its adjacent fingertip side link to imitate the grasping reflex. By setting a suitable contact force, both fingertip grasping and enveloped grasping with uniform grasping force are executable. Experimental results of grasping three dimensional unknown objects by using an anthropomorphic robot hand called Gifu Hand III are shown.

Key Words: Anthropomorphic Robot Hand, Multi-fingered Hand, Grasping of Unknown Object, Thumb Opposability, Tactile Sensor

1. 緒 言

宇宙や医療福祉の分野で利用されるロボットには、人間とコミュニケーションを図りながら複雑で多様な作業を行うことが要求される。このようなロボットには人間の手に類似した人間型ロボットハンドが求められ、未知形状物体の把持・操作が期待される。

人間は広範囲にわたる触覚受容器から得る情報に基づいて物体を把持し操ることができる。こうした人間の触覚に対応する力覚センサ、触覚センサ情報を利用した多指ロボットハンドによる未知形状物体の把持に関する研究が工学的なアプローチで様々なされている^{(1)~(6)}。遠藤ら⁽¹⁾は、ローカルな触覚情報に基づく把持動作制御を提案し、前川ら⁽²⁾は、指先接触の安定性を維持する動的な握力の制御を提案し、近野ら⁽⁵⁾は、手探りによる未知物体の把握について述べている。一方、人間の把持動作をモデル化した把持力の制御を前野ら⁽⁷⁾が提案している。しかし、これらの研究では球や直方体など単純な形状の物体を把持している。また、

物体の把持開始から外力への対処まで一連の把持戦略については考察されていない。ここで、生後 10ヶ月程までの乳児の把持動作に着目すると、指や掌に物体が触れると、物体形状を知らずとも拇指とその他の 4 本の指を屈曲させ物体を把持する(把握動作)。さらに、把持した物体を引き離そうとするとさらに強く握りしめる(保持動作)。これらの動作は握り反射と呼ばれ、乳児が生き残るための重要な動作の一つである。単純な反射動作であるが、触覚のみで様々な形状の物体を把持している。そこで、物体の幾何学形状を知り得ない場合でも、この握り反射の技能を有するロボットハンドであれば容易に様々な物体の把持が可能となると考える⁽⁸⁾。

本論文では、ロボットにより未知形状物体を把持するため、乳児の握り反射を模擬した把持戦略を考察する。はじめに、指先把持のみでなく包み込み把握の実現も目指して開発した人間型ロボットハンド Gifu Hand III の諸特性を述べ、物体の把持・操作に重要な拇指対向性の評価指標を提案する。次に、種々の未知物体を把持するために人間の握り反射を模擬し、把握位置の補正から把握動作、保持動作までの把持戦略を

* 原稿受付 2004 年 5 月 6 日。

^{*1} 正員、岐阜大学工学部 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1 1)。

^{*2} 岐阜大学工学部。

E-mail: h_kawasa@cc.gifu-u.ac.jp

Fig. 1 The developed Gifu Hand III

提案する。最後に、提案する把持戦略を Gifu Hand III を用いた実験によりその有効性を検証する。

2. 人間型ロボットハンド Gifu Hand III

近年、力覚センサを内蔵して器用な物体操作が可能なロボットハンドが開発^{(9)~(11)}されている。しかし、これらのハンドは人間の手と比較して自由度が少ない、人間の手と異なる動きをするなど問題がある。そこで、著者らのグループは5指20関節16自由度を有し、ハンド機構内に全てのサーボモータを内蔵した人間型ロボットハンドを開発^{(12) (13)}してきた。しかし、器用な物体の把持・操作を実現するためには長時間の駆動によるバックラッシュの増加、拇指対向性が低い等の改善すべき課題があり、今回、図1に示す Gifu Hand III を開発した。左右のロボットハンドは対称であり、各ハンドは拇指と指4本から構成される。拇指は4関節4自由度、指は4関節3自由度、片手で合計20関節16自由度を有する。その機構を図2に示す。関節やサーボモータの番号は、掌から指先へと順に番号を付与している。なお、第1関節は内転・外転、第2から第4関節までは屈曲・伸展の運動を可能としている。Gifu Hand IIIの諸特性を表1に示す。その設計概念は Gifu Hand II⁽¹³⁾に従う。

Gifu Hand IIと比較し、Gifu Hand IIIは、長時間の駆動においてもそのバックラッシュを最大1度以下となるように減速機構を改良し、第2から第4関節は指が10度反ることができるように、指の可動範囲を拡大して人間とほぼ同程度の可動範囲⁽¹⁴⁾を実現した。また、各関節の応答周波数は 7.4Hz 以上あり、人間の指のタッピング能力は 5.5Hz 程とされているので、人間より早い動作が可能である。

2.1 拇指対向性 人間の拇指は全ての指と対向する。この拇指対向性により、物体を単に「つかむ(握力把握)」だけでなく「つまむ(精密把握)」ことを可能にし、器用な物体の把持・操作を実現している⁽¹⁵⁾。

Fig. 2 Mechanism of the thumb and the fingers

Table 1 Specifications of the Gifu Hand III

Weight [kgf]	Thumb	0.25
	Finger	0.20
	Total	1.40
Operating angle of joints [deg]	1st joint	-28 ~ 28 (Thumb)
		-20 ~ 20 (Finger)
	2nd joint	-10 ~ 90
	3rd joint	-10 ~ 90
Output force at fingertip [N]	Thumb	2.8
	Finger	1.8
Output torque of the thumb [Nm]	1st joint	1.03
	2nd joint	0.58
	3rd joint	0.25
	4th joint	0.02
Gear ratio of the thumb	1st joint	713.43:1
	2nd joint	384.69:1
	3rd joint	148.48:1
	4th joint	80.00:1
Band width of the thumb [Hz]	1st joint	10.4
	2nd joint	12.3
	3rd joint	7.4
	4th joint	9.5

人間型ロボットハンドでも同等な機能が求められるが、この評価方法はない。そこで、拇指対向性を定量的に評価するため、次の評価関数を定義する。

$$J = \frac{1}{d^3} \sum_{i=1}^k w_i v_i \quad (1)$$

ただし、 v_i は拇指と第 i 指との可動範囲の積空間の体積、 k は拇指以外の指の本数、 d は拇指と指とを比較して長い方の全長、 w_i は重みとする。

人間の指は、物体把持において拇指が大きな役割をはたすが、拇指に対向する各指は、示指、中指、薬指、小指の順に物体の把持・操作に寄与しているものと推測される。そこで、示指から小指の4本でそれぞれ拇指との物体のつまみ動作において発生する指先力を10人の成人男性を対象に計測した。その結果、示指の平均値は $15.67N$ 、分散は $3.76N$ であった。示指を基準とすると各指の平均値は示指、中指、薬指、小指の順に約 $1.0 : 0.9 : 0.5 : 0.4$ の比となった。拇指対向性の重み w_i は、これらの比に比例させることは、妥当性があると考えられる。そこで、これらの比を適用すると、評価関数 J の値は Gifu Hand II (0.0050) と比較して Gifu Hand III (0.0355) は 7.1 倍である。このように Gifu Hand III は広範囲の指先位置での物体把持・操作が可能である。

2.2 4 節リンク機構 人間の指は、第4関節 q_{i4} が第3関節 q_{i3} に従属し、ほぼ同角度回転する。Gifu Hand III も同様に、図3(a)に示す第4関節 q_{i4} は4節リンク機構により第3関節 q_{i3} とほぼ線形の関係で駆動する。このとき、リンクの長さ l_i と関節角度には、次の関係がある。

$$l_i = \left\{ \left[r_{i3} S_{q_{i30}+q_{i3}} + r_{i4} S_{q_{i40}+q_{i4}} \right]^2 + \left[a_i + r_{i3} C_{q_{i30}+q_{i3}} - r_{i4} C_{q_{i40}+q_{i4}} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ただし、 a_i は第2リンクの長さ、 r_{i3} 、 r_{i4} は第3、4関節におけるリンクの回転半径、 q_{i30} 、 q_{i40} は4節リンク機構の初期角度、 $C_q = \cos q$ 、 $S_q = \sin q$ とする。これまででは、式(2)より繰り返しの数値計算により第4関節の角度を求めていた⁽¹²⁾。しかし、器用な物体の把持・操作を実現するためには計算量の軽減は重大な課題である。そこで、本論文ではこれらの厳密な関係を明確にする。

式(2)において、 l_i は一定値であり、任意の q_{i3} 、 q_{i4} で成立することを考慮すると、第4関節は a_i 、 r_{i3} 、 r_{i4} 、 q_{i3} 、 q_{i4} をパラメータとする関数として表すことができる。

$$q_{i4} = f_i(a_i, r_{i3}, r_{i4}, q_{i30}, q_{i40}, q_{i3})$$

(a) Skeleton

(b) Relation between the third and the fourth joints angle

Fig. 3 Planar four-bar linkage mechanism

$$= \sin^{-1} \left(\frac{\alpha_i}{\sqrt{\beta_i^2 + \gamma_i^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\beta_i}{\gamma_i} \right) - q_{i40} \quad (3)$$

ただし、

$$\alpha_i = -2 \{ r_{i4} (r_{i3} C_{q_{i30}+q_{i40}} + a_i C_{q_{i40}}) + a_i r_{i3} (C_{q_{i30}+q_{i3}} - C_{q_{i30}}) \}, \quad (4)$$

$$\beta_i = -2 r_{i4} (a_i + r_{i3} C_{q_{i30}+q_{i3}}), \quad (5)$$

$$\gamma_i = 2 r_{i3} r_{i4} S_{q_{i30}+q_{i3}}, \quad (6)$$

である。なお、Gifu Hand III では $a_i = 32mm$ 、 $r_{i3} = r_{i4} = 7mm$ 、 $q_{i30} = 70^\circ$ 、 $q_{i40} = 30^\circ$ と設計している。また、 q_{i3} 、 q_{i4} の可動範囲はそれぞれ -10 度から 90 度である。 $q_{i3} \approx q_{i4}$ と近似した場合と式(3)で求める厳密な角度の場合との誤差を

$$\Delta q_{i4} = q_{i4}(a_i, r_{i3}, r_{i4}, q_{i30}, q_{i40}, q_{i3}) - q_{i3} \quad (7)$$

とし、図3(b)に計算結果を示す。 $q_{i3} = 40.63^\circ$ のとき、最大 1.27 度となる。この結果より本ハンドの第3、4関節はほぼ線形の関係で駆動することが確認できる。

2.3 分布型触覚センサ Gifu Hand III は、指先だけでなく包み込み把握も実現するため、掌や指腹部

Fig. 4 The developed distributed tactile sensor

にハンド表面の法線成分の接触力を検出できる分布型触覚センサを装着することができる。しかし、文献[13]のセンサでは、センサの1計測点当たりの有効感圧面積（本センサは行電極と列電極との交点の接触力を検出）が全面積の16.7%と小さく、物体との接触を計測できないことがあり、図4に示すGifu Hand III用センサシートを新たに開発した。この特性を表2に示す。センサシートの行電極幅、列電極幅、行ピッチ、列ピッチを変更することで、センサの1計測点当たりの有効感圧面積の比率を59.1%へと増加させている。また、計測点数は、掌は313点、拇指は126点、指は105点、合計859点ある。Gifu Hand II用と比較して、計測点数が235点増加している。これらの改善で、より正確な触覚情報が検出可能となった。

開発した触覚センサの有効性を確認する。Gifu Hand II用とGifu Hand III用触覚センサを重ね、直方体の稜線40mmを掌部で回転させた時の一連のセンサ出力を図5に示す。このときの接触を検出したcellの平均値はGifu Hand II用、Gifu Hand III用でそれぞれ6.40, 9.80であった。cellは行電極と列電極の交点数を示す。Gifu Hand III用はGifu Hand II用と比較して1cell当たりの面積は縮小しているため、より正確に接触部を検出している。

指先には市販の6軸力覚センサ（ビー・エル・オートテック(株) NANO センサ）を装着でき、指先による柔軟な物体操作やコンプライアンス制御も可能である。

3. 握り反射を模擬した把持戦略

未知形状の対象物を把持するため、乳児が行う握り反射を模擬した把持戦略を提案する。握り反射とは、生後間もない乳児は掌に棒を当てると5本の指を屈曲させ、棒を強固に把握し、棒を引き離そうとすると、さらに強固に把握することである。このように、握り反射は2つの動作⁽¹⁶⁾から構成される。

1) 手が物体に接触すると発生する把握動作。

Fig. 5 Output of the distributed tactile sensor

Table 2 Specifications of the distributed tactile sensor

Number of detecting points	
Total	859
Palm	313
Thumb	126
Finger	105
Maximum load [N/m ²]	2.2×10^{-3}
Electrode column width [mm]	3.0
Electrode row width [mm]	3.7
Column pitch [mm]	4.0
Row pitch [mm]	4.7
Sampling cycle [ms/frame]	10
Resolution [bit]	8
Thickness of sensor sheet [mm]	0.2
Weight [gf]	18

2) 物体を引き離そうとすると発生する保持動作。

本章では、この2つの動作を模擬した把持戦略を考察する。

3.1 把持位置補正動作 ロボットハンドによる物体把持では、把持が成功するか否かは、把持する初期位置に大きく依存する。そこで、安定把持の実現性を向上させるため、ロボットアームを用いて指や掌部に物体が接触すれば、接触点の法線方向には力制御、直交する面内は位置制御とする作業空間におけるハイブリッド制御により、把持位置 r_{cp} を初期位置から掌中心へと移動させる。なお、物体位置は外部環境に一定の位置で固定する。

3.2 把握動作 把握動作では、接触点数を最大化し物体を拇指と指で包み込み、未知形状物体を把握する可能性をより高くする。また、包み込み把握により物体の頑丈な把握が期待できる。以下、その把持戦略を示す。

3.2.1 屈曲・伸展 把握物体がロボットハンドに接触すると、拇指と指の第2関節から第4関節の関節が、各関節に隣接する指先側リンク（例：第3関節の場合には第2リンク）の接触力を目標値に一致するように各関節を独立に制御する。図6は*i*番目の指と把握物体との間の接触状態を示す。ただし、 q_{ij} と F_{ik} はそれぞれ第*i*指第*j*関節の関節角度とリンク $k(=j-1)$ の接触力の総和を表す。指と物体とが非接触時には速度制御、接触時には力制御とする。そこで、第*i*指第*j*関節の関節トルク τ_{ij} を次式で求める。

$$\tau_{ij} = -K_{vij}(\dot{q}_{ij} - \dot{q}_{dij}) \quad (8)$$

ただし、 K_{vij} は第*i*指第*j*関節の速度フィードバックゲイン、 $\dot{q}_{dij}$ は第*i*指第*j*関節の目標関節速度とする。 $\dot{q}_{dij}$ は、触覚センサより得た接触情報をもとに、物体に対して非接触時には速度制御、接触時には力制御となるように次のように設定する。なお、文献[8]では接触点位置を考慮せず接触力のみをフィードバックしていたため接触点位置に依存した制御特性となっていた。この改良のため、本論文では接触点位置も考慮して接触力に等価なトルクをフィードバックすることとした。

$$\dot{q}_{dij} = \begin{cases} \dot{q}_{cij} & : \text{non-contact state} \\ -K_{fij} J_{cik}^T (\mathbf{F}_{ik} - \mathbf{F}_{dik}) - K_{fIij} \int J_{cik}^T (\mathbf{F}_{ik} - \mathbf{F}_{dik}) dt & : \text{contact state} \end{cases} \quad (9)$$

ただし、 $\dot{q}_{cij}$ は一定な目標関節速度、 K_{fik} は力フィードバックゲイン、 K_{fIik} は力積分ゲイン、 $\mathbf{F}_{dik}$ は目標接触力、 J_{cik} は接触点位置を $\mathbf{r}_{cik}$ とすると

$$\dot{\mathbf{r}}_{cik} = J_{cik} \dot{q}_{ij} \quad (10)$$

を満たすヤコビ行列である。各関節の目標速度は指の根元部ほど相対的に大きな値とし、指先側ほど相対的に小さい値とする。これにより、一般的に指の根元側リンクから物体に接触する。また、物体を一樣な接触力で把握するためには、全ての目標接触力を同値にすればよい。なお、Gifu Hand IIIでは指の第4関節は第3関節に連動して駆動するため、接触力 F_{i2} と F_{i3} のうち大きな値を第3関節の制御に用いる。本手法は、指表面の触覚情報を利用して指関節を個別に制御する。このため、指先側の関節の目標速度を大きく設定すれば、包み込み把握のみならず指先把握も実現可能である。

3.2.2 内転・外転 内転・外転の運動をする第1関節は、物体の大きさに合わせて駆動するように位

Fig. 6 Links and contact forces

Fig. 7 Desired first joint angle

置制御する。

$$\tau_{i1} = -K_{Pi1}(q_{i1} - q_{d11}) - K_{Vi1} \dot{q}_{i1} \quad (11)$$

ただし、 K_{Pi1} は位置フィードバックゲイン、 q_{d11} は目標関節角度である。目標関節角度 q_{d11} は図7に示すように、指の中心線と分布して存在する接触点の最小二乗近似直線が一致するように決定する。なお、この最小二乗近似直線は、関節1の回転軸と直交する。この制御によると、指の側面にある接触点を指の中央線に近づける動きが生じるため、指と物体との片当たりを避けて指のほぼ中央線に沿った把持となりより安定な把持ができると期待される。

3.3 保持動作 保持動作では、ロボットハンドにより物体が把握された状態から物体をハンドから引き離そうとした場合を考察する。把持対象物に外力が加わると、式(9)のように目標接触力 $\mathbf{F}_{dik}$ が一定 $\mathbf{F}_{dik_const}$ では物体の把握が維持できない。そこで、外力に抵抗し物体把持を維持するため、接触点の移動速度のユークリッドノルム $\|v_c\|_2$ に比例した値を目標接触力 $\mathbf{F}_{dik}$ に加える。

$$\mathbf{F}_{dik} = (1 + K_{VCik} \|v_c\|_2) \mathbf{F}_{dik_const} \quad (12)$$

ただし、 K_{VCik} は定数とする。

Fig. 8 The control system

以上の三つの動作が本論文で提案する把持戦略である。本手法は非常に単純であるが、物体の幾何学的情報を必要としないので3次元の未知物体の把持も可能である。

4. 実験

4.1 実験装置 本論文で提案した把持戦略の有効性を確認するため、人間型ロボットハンドGifu Hand IIIを用いて実験を行う。実験装置の概略を図8に示す。3台のPCにはリアルタイムOS (ART-Linux)を導入し、Gifu Hand IIIの制御 (Pentium III 550MHz)、6関節ロボットアーム ((株)デンソー製 VS 6354B)の制御 (Pentium II 266MHz)、分布型触覚センサ情報の検出 (Pentium II 266MHz)をそれぞれ行う。TCP/IPにより各PC間で位置情報および触覚情報を共有する。なお、制御周期はGifu Hand IIIは1msec、ロボットアームは2msec、触覚情報は10msecである。分布型触覚センサは行電極と列電極の回路パターンに起因し、ロボットアームのACサーボモータからのノイズを受けやすい。このため、触覚情報にはソフトウェア上でカットオフ周波数10.0kHzの低域通過フィルタを施す。

4.2 実験結果 図9に直径110mmの球における一連の把持動作を示す。把持位置、接触力の目標値は $r_{cp,d} = [-15.0, 17.0, 80.0]mm$, 10.0Nとする。なお、把持位置補正動作から把握動作へは、把持位置誤差を $\Delta r_{cp} = \|r_{cp} - r_{cp,d}\|_2$ とし、次式を満たしたときに制御を移行する。

$$\Delta r_{cp} \leq 10.0 \quad (13)$$

図10に掌上の把持位置および接触力を示す。図より把持位置は目標値近傍へと移動、接触力も目標値へと近づき、把握動作へと移行した。

把握動作における指の内転・外転の制御は、把持対象物が小さい場合や複雑な形状のときにその効果が顕著に現れる。ここでは、直径90mmの球を把持した場合の実験結果を示す。図11(a)には内転・外転の制御を適用しない場合、(b)には適用した場合の把持の概観を示す。物体の大きさが変化しても内転・外転の効果により物体を落とすことなく物体把持を実現している。(b)の場合の5指の把持力を図12に示す。指が物体に接触した瞬間は、式(9)の目標速度 $\dot{q}_{di,j}$ がステップ状に変化するため接触力が振動的になるが、時間の経過と共に目標接触力0.5Nへと収束している。なお、本図の横軸は把握動作開始からの時間を示す。

保持動作の有効性を確認するため、直径80mm、高さ220mm、質量101gの円柱を把握し、この円柱に重り302gを内部に付加することで、等価的な外力を加え円柱に滑りを生じさせる実験をした。このときの初期の把握状態、外力が作用したときの保持状態の概観を図13に、接触点の移動速度、接触力(指1, 指3, 拇指)を図14に示す。なお、接触点の移動速度は、全接触点の重心の変化量を用いた。3指以外は触覚センサの未装着部分で円柱と接触した。把握動作と保持動作との遷移は、閾値10mm/secを設定した。これらの図より接触点の移動速度の増加に伴い接触力が増加し、外力による物体の滑りを妨げて物体の把持を継続している。

種々の物体(円柱、直方体、曲面形状、任意形状)を同一条件で把持したときの概観を図15に示す。このように、物体の形状、大きさが変化しても本手法により物体把持が実現できた。

以上の結果より、人間型ロボットハンドを用いて握り反射を模擬した把持戦略が未知形状物体の把持実現に有効なことを確認した。

5. 結 言

本論文では、触覚情報を用いた未知形状物体の把持について考察した。把持の実験ではロボットハンドの性能が大きく影響するため、指先だけでなく掌や指腹部でも器用な物体の把持・操作の実現を目的に開発した人間型ロボットハンドGifu Hand IIIの諸特性を示し、物体の把持・操作の際に重要な拇指対向性の評価指標を提案した。本ハンドには有効感圧面積が増加した859の計測点を有する分布型触覚センサを指腹部や掌に装着することができ、より器用な物体の把持・操

Fig. 9 The process of spherical object grasping

(a) Position error on the palm

(b) Contact force on the palm

Fig. 10 Modification of initial grasping position

(a) Without control (b) With control

Fig. 11 Effectiveness of adduction/abduction

作を可能とした。さらに、乳児が行う握り反射を模擬し、把持位置の補正、把握動作、保持動作の把持戦略を提案し、実機によりその有効性を確認した。

本論文で提案する把持戦略は物体の幾何学的形状を必要としないため、未知形状の物体を把持可能である。その応用としては、医療福祉の分野において介護者を

(a) Finger 1

(b) Finger 2

(c) Finger 3

(d) Finger 4

(e) Thumb

Fig. 12 Grasping force

(a) Initial grasping state (b) Holding state

Fig. 13 Grasping at acting of external force

Fig. 14 Grasping force

優しく抱きかかえる等が考えられる。

最後に、本研究の一部は文部科学省科学研究費 (No. 14550443) で実施し、また岐阜ロボットハンド研究会の協力を得ており、ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 遠藤博史, 和田充雄, “触覚情報に基づいたシリアルリンクハンドの把持動作制御”, 機論, **59**-559, C(1993), pp.205-210
- (2) 前川仁 他 2 名, “多指ハンド把持における触覚フィードバックを用いた動的握力制御”, 計測自動制御学会論文集, **32**-11(1997), pp.1526-1534
- (3) Fischer M. and G. Hirzinger, “Fast Planning of Precision Grasp for 3D Objects”, *Proc. of IROS 97*, (1997), pp.120-126

(a) Cylindrical object (b) Rectangular object

(c) Curved object (d) Human hand

Fig. 15 Grasping state of various objects

- (4) 中村仁彦, 山崎友敬, “反射行動の重ね合わせ理論とその多指ハンドの反射的把握動作への応用”, 日本ロボット学会誌, **15**-3(1997), pp.448-459
- (5) 近野敦 他 4 名, “人間型多指ハンドの開発および手探りによる未知物体の把持実験”, 機論, **65**-638, C(1999), pp.4070-4075
- (6) 多田充徳 他 2 名, “接触位置変化の連続推定に基づく未知物体把持の実現”, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1999), pp.179-180
- (7) 前野隆司 他 2 名, “曲面状弾性フィンガの固着・滑り分布推定に基づく把持力の制御”, 日本ロボット学会誌, **19**-1(2001), pp.91-99
- (8) H. Kawasaki, et al, “Grasping of Unknown Object Imitating Human Grasping Reflex”, *CD-ROM of 15th IFAC Congress on Automatic Control*, (2002)
- (9) J. Butterfass, et al., “DLR-Hand II: Next Generation of a Dextrous Robot Hand”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robo. and Automa.*, (2001), pp.109-114
- (10) M. C. Carrozza, et al., “Experimental analysis of an innovative prosthetic hand with proprioceptive sensors”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robo. and Automa.*, (2003), pp.2230-2235
- (11) A. Namiki, et al., “Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching”, *Proc. of IROS 2003*, (2003), pp.2666-2671
- (12) H. Kawasaki, et al, “A Mechanism Design of Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand I”, *J. Robot. and Mech.*, **11**-4(1999), pp.269-273
- (13) 川崎晴久 他 2 名, “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”, 機論, **66**-651, C(2000), pp.3672-3678
- (14) 日本整形外科学会身体障害委員会編, “関節可動域ならびに測定法”, リハビリテーション医学, **22**-2(1974), pp.127-132
- (15) 鈴木良次, 手の中の脳, (1994) pp.6-8, 東京大学出版会
- (16) 濱島関朗, “成熟新生児の反射”, 印刷局医報, **33**-2(1987), pp.25-36