

# 多指ハンドを有するハンドアームシステムを用いた動的多面体把持

Dynamic Grasping for an Arbitrary Polyhedral Object  
by a Multi-Fingered Hand-Arm System

○ 学 河村 晃宏 (九大)      正 田原 健二 (九大)  
正 倉爪 亮 (九大)      正 長谷川 勉 (九大)

Akihiro KAWAMURA, Kyushu University, kawamura@irvs.is.kyushu-u.ac.jp  
Kenji TAHARA, Kyushu University Ryo KURAZUME, Kyushu University  
Tsutomu HASEGAWA, Kyushu University

This paper proposes a novel control method for stable grasping using a multi-fingered hand-arm system. The proposed method is simple and easily achieves stable grasping of an arbitrary polyhedral object using an arbitrary number of fingers. Firstly, we model nonholonomic rolling constraints between a multi-fingered hand-arm system and an object, and derive a condition for stable grasping through stability analysis. A new index for evaluating the possibility of stable grasping is proposed and efficient initial contact positions are analyzed. The stability of the proposed system and the validity of the index are verified through numerical simulations.

**Key Words:** dexterous grasping, dual-arm manipulator, multi-fingered hand

## 1 緒言

人間は、その腕と5本指の手を同時に巧みに操ることで多様なタスクの実現を可能にしている。多関節多指ハンドを有するハンドアームシステムは、人の腕・手と似た構造から、人のような物体の巧みな把持・操りが期待できる。このシステムを用いることで、未知の環境下で、多様な形状の物体に対するタスクを、より安全に実現する可能性が高まる。そのため、このシステムを用いた任意形状の物体に対する数多くの研究が行われてきた [1]。その中で指先と物体の力学的相互作用にまで言及したものとして、回転接触拘束を考慮し、物体の動的把持を取り扱ったものが幾つかある。しかし、それらの多くは逆運動学や逆動力学の実時間計算および物体の質量や形状などの物体情報 [1, 2], またはビジョンセンサやタクタイルセンサを用いた外界センシング [3, 4] が必要であった。

一方で、物体情報と外界センシングを共に必要としない、任意形状の物体に対する動的把持手法も Wimboeck らによって提案されている [5]。しかし、この手法ではシステム全体の閉ループダイナミクスの収束性について議論されておらず、指先と物体間の回転接触拘束も考慮されていない。同様に Arimoto ら [6-8] によって物体情報と外界センシングを共に必要としない動的把持手法が提案されている。これらの手法では把持対象物が平行な2平面を持つ物体に限定されているが、閉ループダイナミクスの収束解析により、システム全体の安定性が保証されている。

本稿では多関節多指ハンドを有するハンドアームシステムによる任意多面体の動的把持手法を提案する。本手法は物体情報や外界センシングを必要とせず、簡便な制御入力によって物体の安定把持を実現するものである。まず、指先-物体間の回転接触拘束を考慮した、ロボットと把持物体を含むシステム全体のモデル化を行う。ここで用いる回転接触拘束モデルは非ホロノミックな拘束モデルであり、Arimoto ら [6-8] によって提案されているモデルを任意多面体・任意の指の本数に対応できるよう拡張したものである。次に、安定把持のための制御入力を提案し、制御入力を含んだシステム全体の閉ループダイナミクスの収束性を解析する。この

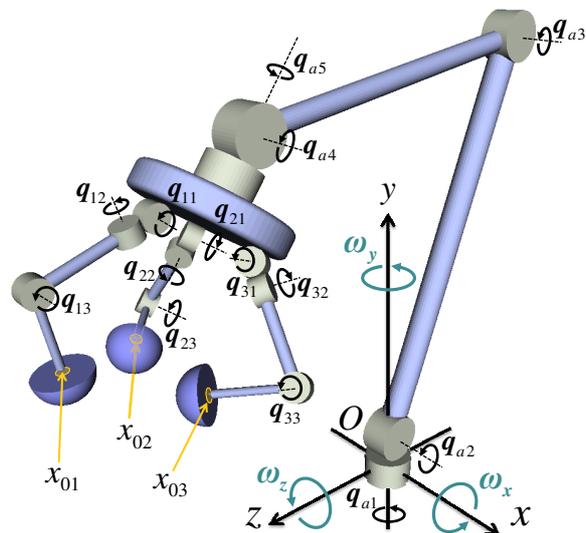


Fig.1 Multi-fingered hand-arm system

収束解析から、システム全体の安定性を評価する新しい指標を提案する。最後にシステムの安定性と提案する指標の有効性を数値シミュレーションによって検証する。

## 2 多関節多指ハンドを有するハンドアームシステムのモデルとダイナミクス

本論文で扱うハンドアームシステムを図1に示す。把持対象物は指先と物体の接触面が平面で構成される任意形状の物体とする。全ての指先は柔軟で半球形状とし、物体表面上で滑ることなく面接触を伴った回転接触を行う。本論文では、物体と指との力学的な相互作用およびシステムの安定性についての議論を見通し易くするため、重力の影響についてはあえて考慮しない。図1において、 $x_{0i} \in \mathbb{R}^3$  は接触面中心の位置を示す。以降、 $i$  は  $i$  番目の指を意味する。また、腕部と  $i$  番目の指はそれぞれ  $N_a$  と  $N_i$  の自由度を持つ。腕部の関節角は  $q_a \in \mathbb{R}^{N_a}$ 、 $i$  番目の指の関節角は  $q_{0i} \in \mathbb{R}^{N_i}$  と表し、ハンドアームシステム全体の関節角ベクトルである

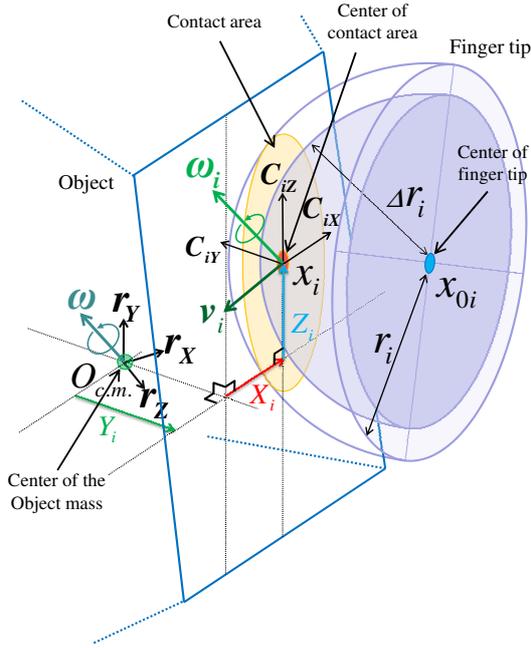


Fig.2 Contact model at the center of the contact area

$q$  は  $N$  本の指を持つ時、 $(= (q_a^T, q_{01}^T, q_{02}^T, \dots, q_{0N}^T)^T)$  のように表す。図 2 は把持対象物と指先との関係を示しており、 $O_{c.m.}$  は物体の質量中心を示す。 $x = (x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3$  は質量中心  $O_{c.m.}$  の位置を、 $\omega$  は  $O_{c.m.}$  における物体の姿勢角速度ベクトルを示す。

### 2.1 拘束条件

慣性座標系からみた接触面中心  $x_i$  における座標を以下のように定義する。

$$R_{ob} R_{Ci} = (C_{iX}, C_{iY}, C_{iZ}), \quad (1)$$

ここで、 $R_{ob}$  は慣性座標系における把持物体の姿勢を示す回転行列であり、 $R_{Ci}$  は物体座標系における接触面中心の姿勢を示す回転行列である。このとき、指先-把持物体間の滑りの起こらない回転接触は非ホロノミックな拘束であり、以下の式で表される。

$$X_{iq} \dot{q} + X_{ix} \dot{x} + X_{i\omega} \omega = 0 \quad (2)$$

$$Z_{iq} \dot{q} + Z_{ix} \dot{x} + Z_{i\omega} \omega = 0, \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{cases} X_{iq} = \Delta r_i C_{iZ}^T J_{\Omega i} - C_{iX}^T J_{0i} \\ X_{ix} = C_{iX}^T \\ X_{i\omega} = \{C_{iX} \times (x - x_{0i})\}^T - \Delta r_i C_{iZ}^T \\ Z_{iq} = -\Delta r_i C_{iX}^T J_{\Omega i} - C_{iZ}^T J_{0i} \\ Z_{ix} = C_{iZ}^T \\ Z_{i\omega} = \{C_{iZ} \times (x - x_{0i})\}^T + \Delta r_i C_{iX}^T, \end{cases} \quad (4)$$

$\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T \in \mathbb{R}^3$  は物体の瞬時回転軸ベクトル、 $J_{\Omega i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$  は各指の接触面中心における姿勢角速度ベクトルの各関節角  $q \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$  に関するヤコビ行列、 $J_{0i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$  は各指の接触面中心の位置  $x_{0i}$  の各関節角  $q \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$  に関するヤコビ行列、 $\Delta r_i$  は指先中心と接触面中心との距離である。

### 2.2 柔軟指の接触モデル

柔軟な指先の変位と力の関係を表す接触モデルとして、Arimoto らによって定式化された集中定数モデルを導入する [6]。指先接触面中心位置における最大変位量  $r_i - \Delta r_i$  によって発生する反力を  $f_i(\Delta r)$  とすると、以下の様に表される。

$$\begin{cases} f_i = \bar{f}_i + \xi_i \frac{d}{dt}(r_i - \Delta r_i) \\ f_i = k(r_i - \Delta r_i)^2, \end{cases} \quad (5)$$

ここで  $k$  は正のスカラー量、 $\xi_i$  は指先の最大変位量  $r_i - \Delta r_i$  に伴って変化する正のスカラー関数であり、両者とも指先の物性に依存した値である。

### 2.3 ダイナミクス

式 (2)(3) 示した拘束条件と柔軟指の接触モデルを用いて、ロボットと把持対象物の運動方程式は以下のように表せる。

For the multi-fingered hand-arm system:

$$H(q) \ddot{q} + \left\{ \frac{1}{2} \dot{H}(q) + S(q, \dot{q}) \right\} \dot{q} + \sum_{i=1}^N \left( J_{0i}^T C_{iY} f_i + X_{iq}^T \lambda_{iX} + Z_{iq}^T \lambda_{iZ} \right) = u, \quad (6)$$

For the object:

$$M \ddot{x} + \sum_{i=1}^N \left( -f_i C_{iY} + X_{ix}^T \lambda_{iX} + Z_{ix}^T \lambda_{iZ} \right) = 0 \quad (7)$$

$$I \dot{\omega} + \left\{ \frac{1}{2} \dot{I} + S \right\} \omega - \sum_{i=1}^N \{ C_{iY} \times (x - x_{0i}) \} f_i + \sum_{i=1}^N \left( X_{i\omega}^T \lambda_{iX} + Z_{i\omega}^T \lambda_{iZ} \right) = 0, \quad (8)$$

ただし、 $H$  はロボットの慣性行列、 $M = \text{diag}(m, m, m)$  は把持物体の質量、 $I$  は把持物体の慣性テンソル、 $S(q, \dot{q})$  はコリオリ力、遠心力などを含む歪対称行列、 $u$  は入力トルクベクトル、 $\lambda_{iX}$  と  $\lambda_{iZ}$  はラグランジュ乗数である。

### 3 制御入力

提案する把持手法は以下の簡単な制御入力によって実現される。

$$u = \frac{f_d}{\sum_{i=1}^N r_i} \sum_{j=1}^N J_{0j} (x_d - x_{0j}) - C \dot{q} \quad (9)$$

$$x_d = \frac{\sum_{i=1}^N x_{0i}}{N}, \quad (10)$$

ただし、 $C > 0$  は関節粘性係数を表す正定対角行列、 $f_d$  は目標把持力である。この制御入力は田原ら [8] によって提案された制御入力を基にしており、それぞれの指先が全ての指先の中心の重心に向かうような制御になっている。ここで、出力ベクトルを以下のように表す。

$$\dot{\Lambda} = (\dot{q}^T, \dot{x}^T, \dot{\omega}^T)^T. \quad (11)$$

(9) で表される制御入力をロボットの運動方程式 (6) に代入し, (6)–(8) で表される閉ループダイナミクスと出力ベクトル (11) の内積和を取ると, 以下の式を得る.

$$\frac{d}{dt}E = -\dot{q}^T C \dot{q} - \sum_{i=1}^N \xi \Delta \dot{r}_i^2 \leq 0 \quad (12)$$

$$E = K + V + \Delta P \geq 0 \quad (13)$$

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T H \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{x}^T M \dot{x} + \frac{1}{2} \omega^T I \omega \quad (14)$$

$$V = \frac{A}{2} (x_{01} - x_{02})^2 + (x_{02} - x_{03})^2 + \dots + (x_{0N} - x_{01})^2 \quad (15)$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N \int_0^{\delta r_i} \{f_i(\Delta r_{di} + \phi) - \bar{f}_i(\Delta r_{di})\} d\phi, \quad (16)$$

ただし,

$$\delta r_i = \Delta r_{di} - \Delta r_i \quad (17)$$

$$A = \frac{f_d}{N \left( \sum_{i=1}^N r_i \right)}. \quad (18)$$

$\Delta r_{di}$  は  $\Delta r_i$  の  $\Delta f_d$  を満たす時の値であり,  $0 \leq \Delta r_{di} - \delta r_i < r_i$  が満たされる限り  $\Delta P$  は正の値をとる. 更に,  $K$  と  $V$  も正なので指先が動いている間,  $E$  は常に正の値となる (13). また, 式 (12) と (13) から以下のような式が得られる.

$$\int_0^\infty \left( \dot{q}^T C \dot{q} + \sum_{i=1}^N \xi \Delta \dot{r}_i^2 \right) dt \leq E(0) - E(t) \leq E(0), \quad (19)$$

式 (19) は, 各関節角速度  $\dot{q}(t)$  が時間  $t \in (0, \infty)$  において 2 乗可積分となることを示しており, これは  $\dot{q}(t) \in L^2(0, \infty)$  となることを表している. また, 式とで表された拘束条件を考慮することにより, 物体の並進速度および姿勢速度もそれぞれ,  $\dot{x} \in L^2(0, \infty)$ ,  $\omega \in L^2(0, \infty)$  となることはいえる. よって, 全システム出力ベクトル  $\dot{\Lambda}(t)$  は時間  $t$  について一様連続となり, 結果として  $t \rightarrow \infty$  の時  $\dot{\Lambda} \rightarrow 0$  および  $\ddot{\Lambda} \rightarrow 0$  となることはいえる [7]. したがって, それぞれの指にかかる力の合力と把持物体にかかる力の合力がゼロに収束することがいえる.

$$\Delta \lambda_\infty = \left( \Delta \lambda_q^T, \Delta \lambda_x^T, \Delta \lambda_\omega^T \right)^T \rightarrow 0 \quad (20)$$

ただし,  $\Delta \lambda_q$  はロボットにかかる全ての外力の合力を示し, 同様に  $\Delta \lambda_x$  と  $\Delta \lambda_\omega$  はそれぞれ把持物体の並進と回転に作用する全ての外力の合力を示す. 結果として, 全ての外力とそれぞれの速度がゼロに収束することから物体を不動化するための力/トルクの平衡条件が動的な意味で満たされていることがいえる. しかし, これらの安定解析は数値的なものに過ぎず, 物理的観点から見れば矛盾を含んでいる場合がある. よって, 次節では任意多面体の一例として任意多角柱を把持する時のシステム全体の安定性を満たすための条件を明らかにする. ただし, この条件はシステム全体の動作が収束した状態, つまり  $E$  が最小値  $E_{\min}$  となった状態についてのものであり, 初期状態からシステム全体の動作が収束するまでの過程については考慮しない.

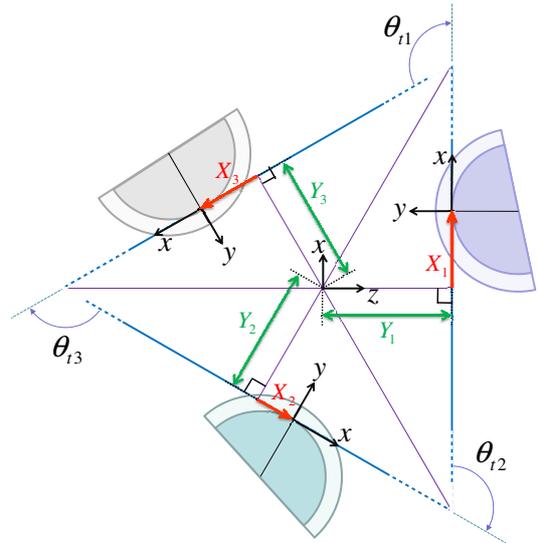


Fig.3 Cross-section view of polygonal column

#### 4 任意多角柱の把持

$E = E_{\min}$  となる時の指先の位置は  $V$  が最小のとき ( $= V_{\min}$ ) の指の位置に等しい. つまり,  $V = V_{\min}$  となる時の指先の位置を解析することで物体不動化の可否が明らかとなる. 把持物体が任意多角柱の場合の  $V$  は以下のようになる.

$$V = A \left[ (X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_N^2) + (D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_N^2) - \{(D_1 X_2 - X_1 D_2) \sin \theta_{t2} + (D_2 X_3 - X_2 D_3) \sin \theta_{t3} + \dots + (D_N X_1 - X_N D_1) \sin \theta_{t1}\} - \{(X_1 X_2 + D_1 D_2) \cos \theta_{t2} + (X_2 X_3 + D_2 D_3) \cos \theta_{t3} + \dots + (X_N X_1 + D_N D_1) \cos \theta_{t1}\} + \frac{A}{2} \left\{ (Z_1 - Z_2)^2 + (Z_2 - Z_3)^2 + \dots + (Z_N - Z_1)^2 \right\} \right], \quad (21)$$

ただし,

$$\theta_{ti} = \theta_{si} - \theta_{s(i-1)} \quad (i \neq 1) \quad (22)$$

$$\theta_{ti} = \theta_{si} - \theta_{sN} \quad (i = 1) \quad (23)$$

$$D_i = Y_i + \Delta r_i. \quad (24)$$

図 3 からわかるように,  $\theta_{ti}$  は底面と平行な断面における外角であり,  $Y_i$  は物体の質量中心から  $i$  番目の指先が接触している物体表面までの距離である. この結果から  $V = V_{\min}$  となる必要条件の一つに以下の式が挙げられる.

$$Z_1 = Z_2 = \dots = Z_N. \quad (25)$$

また, 把持物体が任意多角柱である場合,  $X_i$  の値を見ることが物体不動化の可否を調べることができる. つまり,  $V$  が最小値をとるとき,  $X_i$  が接触面に入っていればシステム全体が安定に収束するといえる. ここで, 式 (21) は 3 つのパラメータ  $X_i$ ,  $D_i$  と  $\theta_{ti}$  を持つ. よって  $X_i$  の挙動を調べるために,  $V = V_{\min}$  となる時の具体例として三角柱にお

Table 1 Relationship between  $\theta_{ti}$  and  $X_i$

	$\theta_{t1}$ [rad]	$\theta_{t2}$ [rad]	$\theta_{t3}$ [rad]	$X_1$ [m]	$X_2$ [m]	$X_3$ [m]	
A	2.84	2.84	0.60	0.00	-0.0601	0.0601	IN
B	2.54	2.54	1.20	0.00	-0.0122	0.0122	IN
C	2.24	2.24	1.80	0.00	-0.0094	0.0094	IN
D	1.94	1.94	2.40	0.00	0.0190	-0.0190	IN
E	1.64	1.64	3.00	0.00	0.1137	-0.1137	OUT

$$(r_j = 0.03 \text{ [m]}, \Delta r_{\min} = 0.02 \text{ [m]}, S = 6.38 \times 10^3 \text{ [m}^2])$$

Table 2 Relationship between  $r_i$  and  $X_i$

	$r$ [m]	$\Delta r_{\min}$ [m]	$X_1$ [m]	$X_2$ [m]	$X_3$ [m]	
F	0.030	0.020	0.00	0.0504	-0.0504	IN
G	0.050	0.040	0.00	0.0605	-0.0605	IN
H	0.070	0.060	0.00	0.0705	-0.0705	OUT

$$((\theta_{t1}, \theta_{t2}, \theta_{t3}) = (1.79, 1.79, 2.70) \text{ [rad]}, S = 6.38 \times 10^3 \text{ [m}^2])$$

ける  $X_i$  と  $\theta_{ti}$  の関係を表 1 に、 $X_i$  と  $D_i$  の関係を表すために  $X_i$  と指先半球の半径  $r_i$  との関係を表 2 に示す。ただし、それぞれの値は底面積  $S$  によって正規化されている。表 1, 2 中の "IN" は  $X_i$  が接触面内に収まっている、つまり安定把持が実現できることを示し、"OUT" は  $X_i$  が接触面外、つまり指先が物体表面上に無い状態であり、安定把持が実現できないことを示す。表 1, 2 から、システム全体の安定性が物体形状および指先半球の半径に依存していることがわかる。同時に指先の初期接触位置が  $V = V_{\min}$  となる時の指先の位置の近傍であれば、安定把持を実現する可能性が高いといえる。したがって、 $V$  の解析は安定把持の可能性を評価する指標となる。

## 5 数値シミュレーション

図 1 のような 5 自由度の腕と 3 自由度の 3 本の指で構成されるハンドアームシステムで三角柱の物体を把持するシミュレーションを行った。このときの  $X_i$  と  $Z_i$  の時系列データを図 4 に示す。この図から  $X_i$  が  $V = V_{\min}$  のときの  $X_i$  に収束していることがわかる。また、 $Z_i$  もそれぞれ同じ値に収束しており、式 (25) の条件を満たしているといえる。つまり  $X_i$  と  $Z_i$  については  $V = V_{\min}$  となる時の  $X_i$  と  $Z_i$  の値に収束しており、 $V$  の解析がシステム全体の安定性を評価する有効な指標であることが示されている。更に、紙面の都合により図を省略するが、 $\Delta \lambda_{\infty}$  の全ての要素と、全ての角速度  $\dot{q}$ ,  $\dot{x}$  と  $\omega$  がゼロに収束することを確認した。これらの結果より、本論文で提案した手法を用いることにより、把持物体を不動化するための力/トルク平衡が動的な意味で実現できることを示した。

## 6 結言

本論文では多指ハンドを有するハンドアームシステムを用いた任意多面体の安定把持手法を提案した。まず本手法で提案する簡便な制御入力によって、物体の不動化を行うための力/トルク平衡を動的な意味で実現できることを、収束性の解析および数値シミュレーションによって示した。更にシステム全体の安定性の評価指標としての  $V$  の解析を提案し、数値シミュレーションによって  $V$  の有効性を示した。また、この論文では物体の位置・姿勢制御手法については議論していないが、田原ら [8] や Bae ら [9] の提案手法を参考にすることで容易に実現できると考えられる。次回の論

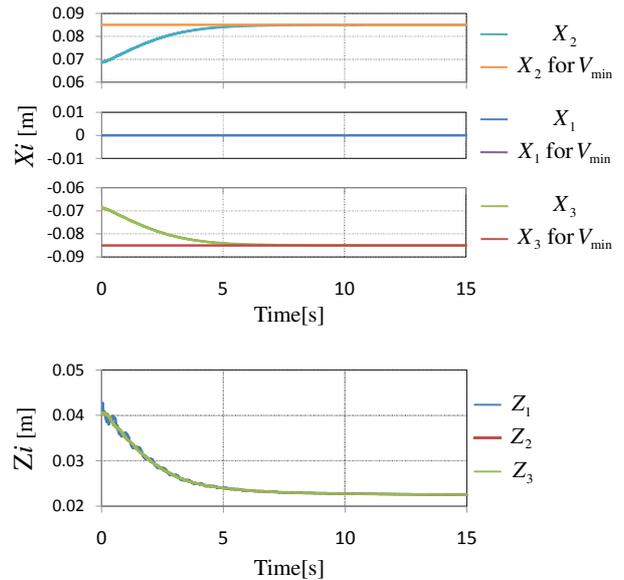


Fig.4 History of  $X_i$  reach to  $X_i$  for  $V_{\min}$  and history of  $Z_i$  satisfies (25)

文では把持対象物を曲面を持つ物体にまで拡張する予定である。

## 文献

- [1] A. Bicchi, "Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road towards simplicity," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 16, no. 6, pp. 652–662, 2000.
- [2] D. Montana, "The kinematics of contact and grasp," *Int. J. Robot. Res.*, vol.7, no. 3, pp. 17–32, 1988.
- [3] Y. Yokokohji, M. Sakamoto and T. Yoshikawa, "Vision-aided object manipulation by a multifingered hand with soft fingertips," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 3202–3208, 1999.
- [4] T. Takahashi, T. Tsuboi, T. Kishida, Y. Kawanami, S. Shimizu, M. Iribe, T. Fukushima and M. Fujita, "Adaptive grasping by multi fingered hand with tactile sensor based on robust force and position control," *IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 264–271, Pasadena, CA, 2008.
- [5] T. Wimboeck, C. Ott, and G. Hirzinger, "Passivity-based Object-Level Impedance Control for a Multifingered Hand," *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4621–4627, Beijing, China, 2006.
- [6] S. Arimoto, P.T.A. Nguyen, H.-Y. Han and Z. Doulgeri, "Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips," *Robotica*, vol. 18, no. 1, pp. 71–80, 2000.
- [7] S. Arimoto, "A differential-geometric approach for 2-D and 3-D object grasping and manipulation," *Annual Review in Control*, Vol. 31, pp. 189–209, 2007.
- [8] K. Tahara, S. Arimoto and M. Yoshida, "Dynamic object grasping by a triple-fingered robotic hand," *2008 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems.*, pp. 2685–2690, Nice, France, 2008.
- [9] J.-H. Bae, S. Arimoto, R. Ozawa, M. Sekimoto and M. Yoshida, "A unified control scheme for a whole robotic arm-fingers system in grasping and manipulation", *Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 2131–2136, Orlando, Florida, 2006.