

多指ハンドを用いた関節角の位置制御に基づく誤差に頑健な物体把持

Robust Grasping Based on Joint Angle Control by a Multi-Fingered Hand

○ 馬場 恒星* 正 辻 徳生* 河村 晃宏*
 表 允哲* 田原 健二* 正 原田 研介†
 正 長谷川 勉* 正 倉爪 亮*

Kosei BABA*, baba@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

Tokuo TSUJI*, Akihiro KAWAMURA*, Yoonseok PYO*, Kenji TAHARA*

Kensuke HARADA†, Tsutomu HASEGAWA*, Ryo KURAZUME*

This research aims to realize a service robot for grasping various objects in daily life. Therefore, this paper presents a grasping method based on joint angle control for a multi-fingered hand with soft fingertips. This method is robust to the fingertip position error and the object position/posture error. Since the soft fingertip deforms elastically when it contacts with an object, the force of the fingertip is estimated by its deformation amount. We calculate the fingertip positions which satisfy force/moment equilibrium. In addition, we develop an indicator of grasping based on the contact condition between each fingertip and the object. We demonstrate the performance of proposed method by simulations and experiments.

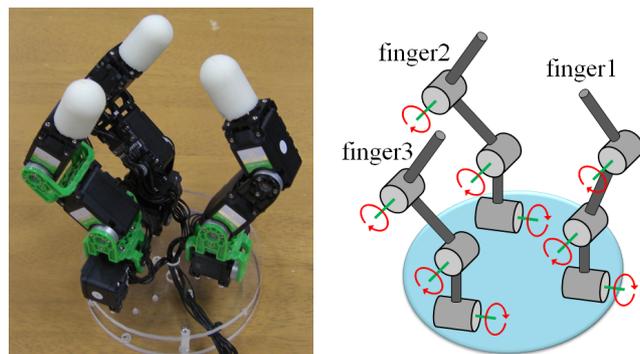
Key Words: Multi-fingered hand, Grasping, Joint angle control, Soft fingertip

1 諸言

生活支援を目的とするロボットにとって、片付けや取り寄せなど日用品を取り扱う作業は重要なタスクの一つである。これらの作業を行なうためには、グリップや多関節多指ハンドなどのロボットハンドが必要となる。グリップは簡易かつ低コストであるが、少なくとも1つの指は物体と面で接触する必要があり、安定して把持できる物体は限定的である。一方、多指ハンドは多様な物体を把持・操作できる能力を有している。しかし、多指ハンドはグリップに比べコストが高いため、生活支援ロボットの試作機にはグリップが用いられる場合も多い。

本研究は、多様な日用品の把持を用途とした、柔軟な指先を有する簡易かつ低コストな多指ハンドの開発を目的とする。そのために、指先位置や物体位置などの誤差に頑健な、関節角の位置制御に基づく把持手法を提案する。関節角の位置制御に基づく把持は従来研究 [1, 2] でも行なわれているが、誤差に対する頑健性の評価はなされていない。簡易なモータを利用しコストを抑える場合は動作精度が低下すると考えられるため、誤差の評価をすることは重要である。

提案手法では、柔軟な指先の特性を利用している。指先は物体に接触したとき弾性変形し、その変形量から物体に加わる弾性力を推定することができる。物体の大きさおよび形状が既知であるとし、力とモーメントのつりあい条件を考慮して指先位置を計画する。しかし、指の動作精度によっては指先位置に誤差が生じ、カメラなどによる物体位置・姿勢の測定値には誤差を含むため、実機において計画通りの把持ができるとは限らない。そこで、指先と物体の接触が保たれる物体位置・姿勢の範囲の広さを把持の評価指標とする。評価値を最大化する指先位置を求め、指先位置から関節角度を導き、その角度を目標値として関節角の位置制御を行なう。シミュレーションおよび実機実験により、提案手法に基づく把持について検証する。



(a) Appearance

(b) Model of DOF

Fig.1 Developed multi-fingered hand

2 従来研究

文献 [1] では、関節角の位置制御により物体の把持を実現している。しかし、把持の計画手法、すなわち目標関節角の決定法については述べられていない。文献 [2] では、幾何学的な拘束条件に基づき把持を計画し、関節角の位置制御によりそれを実現している。把持が実現される条件を示しているが、それを満たす関節角の導出は特別な場合についてのみ述べられている。文献 [3] では、低コストな多指ハンドの開発について報告されている。従来に比べ低コストな多指ハンドを実現しているが、依然としてグリップに比べコストが高い。

3 多指ハンド

本研究で開発した多指ハンドを図 1(a) に示す。各々 3 自由度を有する 3 本の指で構成され、計 9 自由度である。図 1(b) は、各指の自由度をモデルで表したものである。

関節には Dongbu Robot 社のサーボモータを用いた。コントローラや通信機能などを内蔵しており、配線や外部の

*九州大学
 †産業技術総合研究所 (AIST)

回路をコンパクトにすることができる。USB による PC との接続および電源供給のみで全ての関節が動作するようにした。

指先は柔軟な素材で制作し、先端は半径 12[mm] の半球形状とした。この半球中心点の位置を指先位置と定義する。指先は物体に接触すると弾性変形し、変形量に応じた弾性力を発する。接触モデルとして、有本らによって定式化された集中定数モデル [4] を用いる。指先が発する弾性力 f_{ni} は接触面の中央点に集中しているとし、その点を接触点と定義する。 f_{ni} は、指先の変形量 Δr_i を用いて次式で与えられる。

$$f_{ni} = k_{ei}\Delta r_i^2 + \xi_i \frac{d}{dt}\Delta r_i \quad (1)$$

ここで、 k_{ei} は正のスカラー値、 ξ_i は Δr_i によって変化する正のスカラー関数であり、これらは指先材料の物性に依存する。本研究では、指先はすべて同じ素材であるため $k_{ei} = k_e$ 、 $\xi_i = \xi$ とする。測定の結果、 $k_e \approx 4.20 \times 10^5 [\text{N/m}^2]$ という値を得た。

4 関節角の位置制御に基づく把持手法

提案手法の手順は以下のとおりである。

1. 原田らの手法 [5] を用いて、force closure を満たす接触点 P_i を決定する。
2. 1 つの指先が物体に加えている弾性力を基準とし、力のつりあい条件を満たすように全ての指の弾性力および摩擦力を計算する。基準とする指先を変えて計算を行ない、重みを付けて合計し目標弾性力 f_{ni} を決定する。ここで、弾性力が正であることおよび滑りが発生しないことを条件とし、重みを計算する。
3. 指先の目標位置 P_{ri} を決定する。
4. 目標関節角を決定し、位置制御を行なう。

4.1 前提条件

問題を簡単にするために、2次元平面内における解析問題として取り扱う。そのため、把持対象物は剛体の角柱とし、角柱底面と接触点との距離は全ての接触点において等しいと仮定する。3次元空間への拡張は、今後の課題とする。また、全ての関節が目標位置に達して静止するまで把持対象物は静止していると仮定する。

4.2 目標関節角の決定法

図 2 は、把持対象物の断面図を表している。以下のように記号を定義する。

- 指先半球の半径を r とする。
- 物体の位置を表す点を O_{obj} とする。
- $O_{obj}P_i = \mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^2$, $O_{obj}P_{ri} = \mathbf{p}_{ri} \in \mathbb{R}^2$ とする。
- $\frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{ri}}{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{ri}\|} = \hat{\mathbf{n}}_i \in \mathbb{R}^2$ とする。これは、接触面の単位法線ベクトルである。
- $\hat{\mathbf{n}}_i$ を $\frac{\pi}{2}$ [rad] 回転させたベクトルを $\hat{\mathbf{t}}_i \in \mathbb{R}^2$ とする。これは、接触面の単位接線ベクトルである。
- 指先が物体に加える $\hat{\mathbf{n}}_i$ 方向および $\hat{\mathbf{t}}_i$ 方向の力の大きさを、それぞれ n_i, t_i とする。前者は弾性力、後者は摩擦力である。

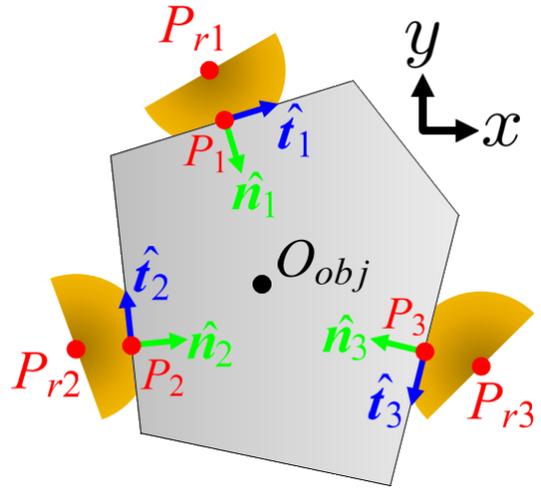


Fig.2 Cross section of the object

物体に加わる合力 $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^2$ および合モーメント $M \in \mathbb{R}$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{f} = \sum_{i=1}^3 (n_i \hat{\mathbf{n}}_i + t_i \hat{\mathbf{t}}_i) \quad M = \sum_{i=1}^3 \{\mathbf{p}_i \times (n_i \hat{\mathbf{n}}_i + t_i \hat{\mathbf{t}}_i)\} \quad (2)$$

ただし、2次元ベクトル同士の外積はスカラーとする。式 (2) より、力のつりあい条件は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}^T & M \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{n1} & \mathbf{a}_{t1} & \mathbf{a}_{n2} & \mathbf{a}_{t2} & \mathbf{a}_{n3} & \mathbf{a}_{t3} \end{bmatrix} \mathbf{f}_{all} \\ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

ただし、

$$\mathbf{a}_{ni} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{n}}_i \\ \mathbf{p}_i \times \hat{\mathbf{n}}_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad \mathbf{a}_{ti} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{t}}_i \\ \mathbf{p}_i \times \hat{\mathbf{t}}_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3 \\ \mathbf{f}_{all} = \begin{bmatrix} n_1 & t_1 & n_2 & t_2 & n_3 & t_3 \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^6$$

n_1 を定数とみなして、式 (3) を次式に変形する。

$$\mathbf{A}_{n1} \mathbf{f}_{23} = -n_1 \mathbf{a}_{n1} \quad (4)$$

ただし、

$$\mathbf{A}_{n1} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{t1} & \mathbf{a}_{n2} & \mathbf{a}_{t2} & \mathbf{a}_{n3} & \mathbf{a}_{t3} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 5} \\ \mathbf{f}_{23} = \begin{bmatrix} t_1 & n_2 & t_2 & n_3 & t_3 \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^5$$

\mathbf{A}_{n1} の疑似逆行列 $\mathbf{A}_{n1}^T (\mathbf{A}_{n1} \mathbf{A}_{n1}^T)^{-1}$ を用いると、式 (4) より、式 (3) を満たす n_i, t_i の比率を表すベクトル $\mathbf{a}_{e1} \in \mathbb{R}^6$ が次のように導かれる。

$$\mathbf{a}_{e1} = \begin{bmatrix} 1 & (-\mathbf{A}_{n1}^T (\mathbf{A}_{n1} \mathbf{A}_{n1}^T)^{-1} \mathbf{a}_{n1})^T \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

n_2 または n_3 を定数とみなして式 (3) を変形すると、 \mathbf{a}_{e1} と同様のベクトル $\mathbf{a}_{e2}, \mathbf{a}_{e3}$ が求められる。

$\mathbf{a}_{e1}, \mathbf{a}_{e2}, \mathbf{a}_{e3}$ の線形結合も式 (3) を満たす。そこで、次式より \mathbf{f}_{all} を決定する。

$$\mathbf{f}_{all} = f_{norm} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{e1} & \mathbf{a}_{e2} & \mathbf{a}_{e3} \end{bmatrix} \mathbf{a}_e \quad (6)$$

ただし, a_{ei} は重みを表す実数であり,

$$\mathbf{a}_e = [a_{e1} \ a_{e2} \ a_{e3}]^T \in \mathbb{R}^3$$

関節の出力トルク値は有限であるため, 目標弾性力の最大値は固定値 f_{max} とする. $\max\{n_i, i = 1, 2, 3\} = f_{max}$ となるように f_{norm} を定める.

f_{all} は次の条件を満たしていなければならない.

$$\begin{cases} n_i > 0 & (7) \\ -\mu_0 n_i < t_i < \mu_0 n_i & (8) \end{cases}$$

μ_0 は指先の静止摩擦係数である. 式 (7) は指先が物体を引くことはできないため生じる条件であり, 式 (8) は物体が指先を滑らないための条件である.

式 (7), (8) より, a_{e1}, a_{e2}, a_{e3} を変数とする 9 元連立線形不等式を導くことができる. a_{e1}, a_{e2}, a_{e3} を座標軸とする座標系を Σ_a とすると, 解領域は Σ_a 内の多角形となる. Σ_a の原点から解領域の各頂点に向かう単位ベクトルを全て合計したベクトルを \mathbf{s} とする. Σ_a の原点を通り方向ベクトルが \mathbf{s} である直線と解領域との交点を解とし, \mathbf{a}_e を決定する. 式 (6) より f_{all} を求め, 目標弾性力を $f_{ni} = n_i$ と決定する. 解領域が存在しなければ, 把持不可能と判定する.

f_{ni} を式 (1) に代入し, 指先の目標変形量 Δr_i を決定する. 指先変形量が Δr_i であるとき, 点 P_i と点 P_{ri} の距離は $r - \Delta r_i$ である. すなわち, 指先の目標位置 P_{ri} は次式で決定できる.

$$\mathbf{p}_{ri} = \mathbf{p}_i - (r - \Delta r_i) \hat{\mathbf{n}}_i \quad (9)$$

指先の目標位置から指の逆運動学を解き, 目標関節角を決定する.

5 誤差に対する頑健性の評価

図 2 において, 物体の位置・姿勢誤差を以下のように定義する.

- 位置誤差: $\mathbf{p}_{obj} \in \mathbb{R}^2$ で表される並進変位
- 姿勢誤差: 点 O_{obj} を中心とした角度 θ_{obj} の回転変位

5.1 指先と物体の接触条件に基づく評価指標

$\mathbf{p}_{obj} = \mathbf{0}$ のとき, 点 P_{ri} と物体表面との距離 d_i は次式で与えられる.

$$d_i = \mathbf{p}_i^T \hat{\mathbf{n}}_i + (r - \Delta r_i - \mathbf{p}_i^T \hat{\mathbf{n}}_i) \cos \theta_{obj} + (\mathbf{p}_i \times \hat{\mathbf{n}}_i) \sin \theta_{obj} \quad (10)$$

\mathbf{p}_{obj} のノルムが指先変形量より小さければ, 指先と物体の接触は保たれる. この条件は $\|\mathbf{p}_{obj}\| < r - d_i$ と表される. 接触が保たれる範囲の広さを評価するために, 指 i の接触評価関数 $\Phi(i)$ を次のように定義する. ただし, ϕ は評価対象とする θ_{obj} の最大値である.

$$\begin{aligned} \Phi(i) &= \int_{-\phi}^{\phi} (r - d_i) d\theta_{obj} \\ &= (2 \sin \phi) \Delta r_i + 2(\phi - \sin \phi)(r - \mathbf{p}_i^T \hat{\mathbf{n}}_i) \end{aligned} \quad (11)$$

すべての指先位置を定めると, 各指について接触評価値が求められる. ここで, 把持の総合評価値 Ψ を, 3 本指のうち最小の接触評価値と定義する. すなわち, $\Psi = \min\{\Phi(i), i = 1, 2, 3\}$ である.

5.2 評価値の最大化

式 (11) の右辺第 2 項は接触点を決定した段階で一意に定まる. その値が 3 本指のうち最小値をとる指を α , 他の指を β, γ とする. 目標弾性力の最大値が固定値であるため指先変形量の最大値も固定値となり, Δr_{max} とする. 次の条件を定め, $\Phi(\alpha)$ を最大化する.

$$\Delta r_\alpha = \Delta r_{max} \quad (12)$$

さらに次の条件を定め, 残る 2 本指の評価値を $\Phi(\alpha)$ より大きくする.

$$\Phi(\alpha) \leq \Phi(\beta), \Phi(\gamma) \quad (13)$$

式 (12), (13) の両方が成り立つ条件は, 次式となる.

$$\left(\frac{\phi - \sin \phi}{\Delta r_{max} \sin \phi} (\mathbf{p}_\alpha^T \hat{\mathbf{n}}_\alpha - \mathbf{p}_i^T \hat{\mathbf{n}}_i) - 1 \right)^2 \leq \frac{n_i}{n_\alpha} \leq 1 \quad (14)$$

ただし, $i = \beta, \gamma$ である. 式 (14) より, a_{e1}, a_{e2}, a_{e3} を変数とする 4 元連立線形不等式を導くことができる. 式 (7), (8) と合わせた 13 元連立線形不等式を満たす解から求める指先位置は, 把持の総合評価値 Ψ を最大化する.

6 シミュレーションおよび実験

図 3 に示す五角柱を把持対象物とする. 高さ 0.100[m], 質量 0.0481[kg], $AB = 0.0450$ [m], $BC = 0.0160$ [m], $DE = 0.0220$ [m], $EA = 0.0420$ [m] である.

6.1 指先位置の決定

接触点の位置を図 4 に示す. $\mathbf{n}_i, \mathbf{p}_i$ は以下のとおりである. ただし, P_1, P_2, P_3 を頂点とする三角形の重心位置を点 O_{obj} とした.

$$\begin{aligned} [\mathbf{n}_1 \ \mathbf{n}_2 \ \mathbf{n}_3] &= \begin{bmatrix} -0.663 & 1 & 0 \\ 0.749 & 0 & -1 \end{bmatrix} \\ [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2 \ \mathbf{p}_3] &= \begin{bmatrix} 0.0120 & -0.0137 & 0.00172 \\ -0.0180 & -0.00130 & 0.0193 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

力のつりあい条件 (式 (7), (8)) に基づき計算した結果, 指先位置 $\tilde{\mathbf{P}}_r = (\mathbf{p}_{r1}, \mathbf{p}_{r2}, \mathbf{p}_{r3}) \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ が次のように決定した. ただし, $\mu_0 = 0.5$, $f_{max} = 5.0$ [N] とした.

$$\tilde{\mathbf{P}}_r = \begin{bmatrix} 0.0172 & -0.0229 & 0.00172 \\ -0.0239 & -0.00130 & 0.0283 \end{bmatrix} \quad (15)$$

さらに, 把持の総合評価値を最大化する条件 (式 (14)) も含めて計算した結果, 指先位置 $\mathbf{P}_r = (\mathbf{p}_{r1}, \mathbf{p}_{r2}, \mathbf{p}_{r3}) \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ が次のように決定した. ただし, $\phi = 0.25$ [rad] とした.

$$\mathbf{P}_r = \begin{bmatrix} 0.0173 & -0.0223 & 0.00172 \\ -0.0239 & -0.00130 & 0.0279 \end{bmatrix} \quad (16)$$

指先位置が $\tilde{\mathbf{P}}_r$ および \mathbf{P}_r の場合, 計 6 つの指先位置について, 横軸を θ_{obj} , 縦軸を $\Delta r_i = r - d_i$ として描いたグラフを図 5 に示す. 図 5 のうち灰色で示した領域は, $\tilde{\mathbf{P}}_r$ の場合指先と物体の接触は保証されないが \mathbf{P}_r の場合接触が保証される範囲である. 評価値を最大化した結果として, \mathbf{P}_r は $\tilde{\mathbf{P}}_r$ に比べ接触が保証される範囲が広がっているといえる.

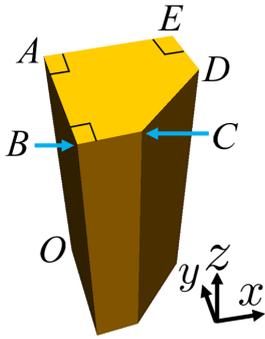


Fig.3 Object

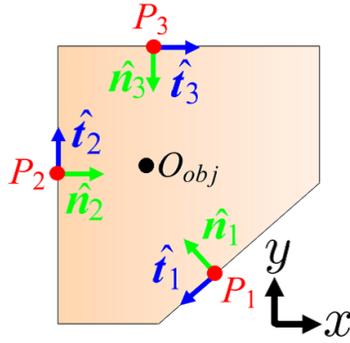


Fig.4 Contact point

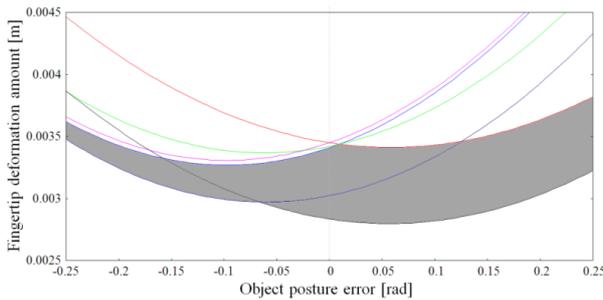


Fig.5 Difference of contact area

6.2 シミュレーション

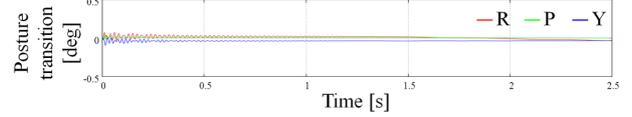
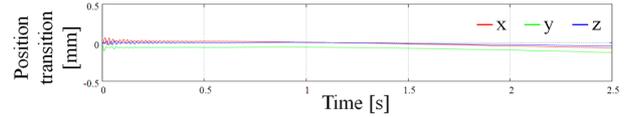
指先位置を P_r , 各接触点の z 座標を 0.0280 とした. 物体の位置・姿勢に誤差が存在しない場合および誤差が存在する場合について, すべての指先が目標位置に達した状態からシミュレーションを行なった. ただし, 式 (1) の ξ を $\pi \Delta r_i (2r - \Delta r_i)$ とした. これは指先の接触面積である. 物体は初期状態において点 O_p が慣性座標系の原点にあるとし, 姿勢はロール・ピッチ・ヨー角の全てが 0 であるとする. 点 O_p の位置および RPY 角の時系列データを, 図 6(a), 6(b) に示す. いずれの場合も物体の位置および姿勢は収束し, 安定把持が実現された.

6.3 実機実験

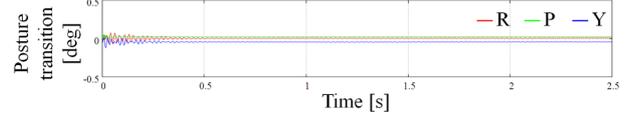
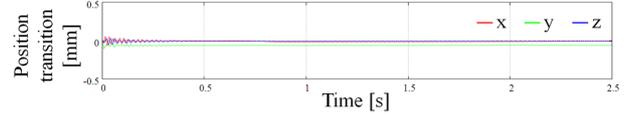
7 自由度アームに図 1(a) で示した多指ハンドを搭載し, 把持実験を行なった (図 7). 関節を目標位置へ移動させた後, 多指ハンド全体を上方向へ移動させた. シミュレーションと同じパターンについて実験を行ない, いずれの場合も安定して物体を持ち上げることに成功した.

7 結言

本研究では, 指先位置や物体位置などの誤差に頑健な, 関節角の位置制御に基づく多指ハンドによる把持手法を提案した. 指先と物体の接触が保たれる物体位置・姿勢の範囲の広さを評価指標とし, 評価値を最大にする指先位置の決定法を定式化した. 指先と物体の接触が保証される範囲が広がることを数値例により確認し, 評価の妥当性を確認した. シミュレーションおよび実機実験を行ない, 提案手法により安定把持が実現されることを確認した.



(a) When $p_{obj} = (0, 0)^T$, $\theta_{obj} = 0$



(b) When $p_{obj} = (0.001, 0.001)^T$, $\theta_{obj} = -0.1$

Fig.6 Simulation results



(a) Grasping



(b) Raising

Fig.7 Experiment

文献

- [1] T.Inoue, and S.Hirai, "Parallel-distributed Model in Three-dimensional Soft-fingered Grasping and Manipulation", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2092-2097, 2009.
- [2] Y.Maeda, N.Kodera and T.Egawa, "Caging-Based Grasping by a Robot Hand with Rigid and Soft Parts", *Proc. of 2012 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.5150-5155, 2012.
- [3] J.-H. Bae, S.-W. Park, J.-H. Park, M.-H. Baeg, D. Kim, and S.-R. Oh, "Development of a Low Cost Anthropomorphic Robot Hand with High Capability", *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.4776-4782, 2012.
- [4] 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.
- [5] 原田, 辻, 金子, 金広, 丸山, "直方体モデルに基づく多指ハンドの把握計画", *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.76, No.762, pp.331-339, 2010.