

ら本稿では、ロボット制御に特有のヤコビ行列に着目し、柔軟指ハンドによる操りタスクにおいてヤコビ行列を排した制御系設計が可能であることを数値シミュレーションにより明らかにする。また、ロボットには2本指ハンドを想定し、各指を1自由度構造に限定する。現在までこの最小自由度の単純なメカニズムを採用し解析している理由は、「与えられたタスクに対してハンド全体で何自由度必要か？」という問いよりむしろ、「与えられたハンド自由度でどのようなタスクが可能か？」というアプローチの方が、柔軟指ハンドの操り能力やその機能を明確にする上で、より近道であると考えているためである。言い換えると、「たった2自由度で把持物体の位置や姿勢、把持力（トルク）の内のどの制御が可能か」、また「それらの可能な組み合わせ」を明らかにする目的で本研究は行われている。また、二つ目の理由として、本稿で明らかになる結果と深く関係するのだが、従来とは異なり本稿では2指ハンドの各指で独立した個別の制御ループを組む。したがって、得られた解析結果に基づく制御性能の定性的解釈を適切に論じるためには、系の冗長性の影響を省く必要があると考えている。近年では、冗長性を有する筋骨格構造のシナジー効果 [10] によってタスクごとに必要自由度が異なるという報告がなされている [1]。また、マニピュレーションのような特に複雑なタスクを実行する場合、神経筋システム全体の協調として決定される、タスクに最低限必要な「実効的（機能的）自由度」の推定が長年の未解決の問題であると述べられている [1]。以上のように、冗長性問題では運動生理学やバイオメカニズムとの密接な関係が指摘され、現在でも継続的に議論されている。これらの事実を踏まえ、本稿ではハンドロボットに機構学的冗長性を持たない最も単純な最小自由度の2自由度構造を採用し解析を行う。その結果、各指の並進関節構造と回転関節構造の違いにより、人指による操作では可能な、「タスクの役割分担」が行えることを明らかにする。特に、2指回転関節機構において制御対象を巧みに切り替えることで、把持対象物を自由に操ることのできる「タスク選択制御」が可能であることを示す。また、本稿で提案するすべての制御則にはヤコビ行列は使われておらず、そのような制御が可能であることを数値シミュレーションによって明確にする。

3. シミュレーション

本稿では、Fig. 2のような2種類の左関節機構と1種類の右関節機構で構成されたロボットハンドを取り扱う。これは、右指を人差し指（示指）、左指を親指（拇指）として考えているためである。したがって、本稿で取り扱うメカニズムは2種類であり、一つ目（パターン1）は両指関節が回転関節である場合、二つ目（パターン2）は左右関節で関節運動が異なる場合の機構を扱う。人指で例えるならば、Fig. 2の左指1自由度が拇指の末節骨（distal phalange）を模擬したものであり、一方で右指1自由度は示指を1自由度モデルとして単純化したものである。このような機構を想定している理由は、示指に比べて拇指は指の腹を示指方向に平行に動かしやすいためである。加えて、拇指は指関節間関節を大きく回転させることで指先端を上下に移

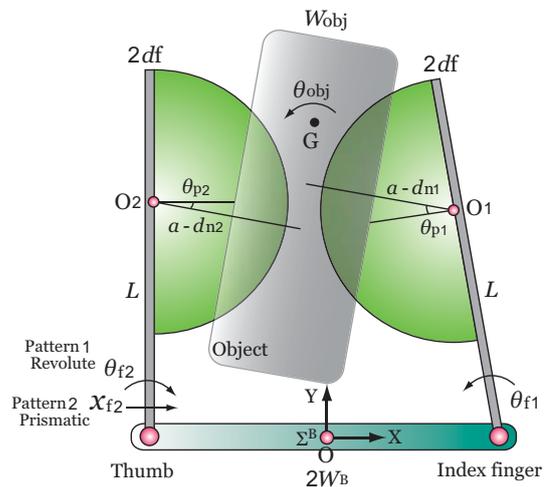


Fig.2 Soft-fingered manipulation.

動させることも可能である。この二つの異なる方向の動作をロボットで模擬するために、本稿では上記の二つの動作パターンを実現できるメカニズムを採用している。このようなことから、本稿では2指操りタスクにおける拇指の機能性に焦点をあて、その異なる関節機構が実タスクの実現可能性にどのように影響するかを検討する。また、パターン1の場合、把持物体の情報（位置と姿勢）の中から制御しようとするターゲットを選択的に決定し制御する手法（ターゲット選択制御）について詳述する。さらに、パターン2の場合においては、拇指と示指とで完全に独立した制御ループを組めることを示し、拇指は物体の位置を、示指は物体の姿勢を個別に制御可能であることを明らかにする。この手法を「拇指示指役割分担制御」と呼ぶ。これらの手法を採れば、最小自由度ハンドにおいてはヤコビ行列を用いない制御則が組めることを以下に示す。

3.1 位置姿勢制御のための直列2段制御則

筆者らは、先行研究 [11] において、柔軟指が潜在的に持つ LMEE という力学特性 [12] をうまく利用して把持物体の姿勢をロバストに制御し得る、以下の直列2段制御則を提案した。

$$\theta_{fi}^d = -(-1)^i K_I \int_0^t (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) d\tau, \quad (1)$$

$$u_i = -K_P(\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) - K_D \dot{\theta}_{fi} + \tau_b. \quad (2)$$

本制御系は、物体姿勢の積分制御によって目標関節角が操り動作中動的に生成される1段目の制御則と、得られた目標関節角を入力するPD制御とバイアトルク τ_b を組み合わせた2段目制御則によって構成されている。本制御手法は、筆者らの先行研究において把持物体の姿勢を制御する目的として利用されてきた。本稿では、本手法を様々に変更することで、人指が可能な巧みで器用な操り能力をロボットが獲得できることを示す。以下で、その手法とシミュレーション結果を示す。

3.2 ターゲット選択制御（パターン1）

本節で取り扱うハンドメカニズムは、Fig. 2において左関節が回転関節の場合である。ここでターゲットと

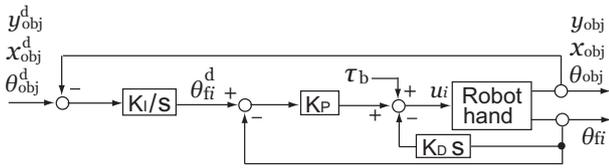


Fig.3 A block diagram of the *target-selection control*.

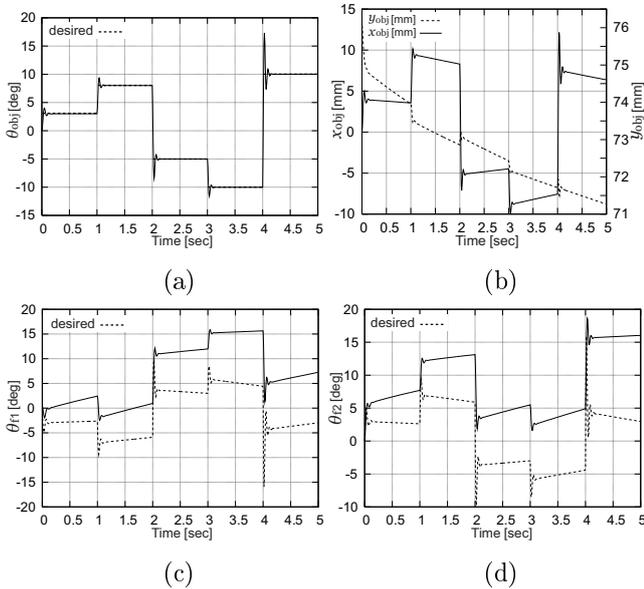


Fig.4 Simulation results of the θ_{obj} control in the case of the pattern 1.

は、1 段目の積分制御器内の制御量を意味する。つまり、式 (1) では物体姿勢角 θ_{obj} である。したがって「ターゲット選択制御」とは、1 段目の制御量（ターゲット）を他の物体変数で置き換え、それを制御するという制御手法である。物体変数には他に位置 (x_{obj}, y_{obj}) がある。物体に関わるこれら三つのターゲットを自由にかつ選択的に切り換えることで、与えられたタスクを実現する手法である。本手法のブロック線図を Fig. 3 に示す。また、修正した 1 段目積分制御器を以下に示す。

$$\theta_{fi}^d = -(-1)^i K_I \int_0^t (q_{obj} - q_{obj}^d) d\tau. \quad (3)$$

ここで、 q_{obj} は上記 3 変数ベクトル $[x_{obj}, y_{obj}, \theta_{obj}]^T$ を意味する。これらのターゲットを巧みに切り換えることで、何らかのタスクを実現するという手法である。まず、ターゲットを θ_{obj} としたときのシミュレーション結果を Fig. 4 に示す。また、本節のシミュレーションでは式 (2) のバイアストルクを一定割合で増加させ、「把持力」を徐々に大きくしている。

Fig. 4(a), (b) から分かるように、物体姿勢 θ_{obj} がロバストに目標値に収束している間、 τ_b の増大によって物体位置 x_{obj}, y_{obj} は常に変化し続けている。その間、両指回転関節角は仮想目標関節角に対して偏差を生じ続け消えることはない。これを「許容偏差」(admissible deviation) と呼んでいる。この関節角偏差がターゲットの収束性に影響を与えないことが理解できる。また、 τ_b の増大によって両指関節角が徐々に内側に回転し把持力が増大していることが予想されるが、そのときで

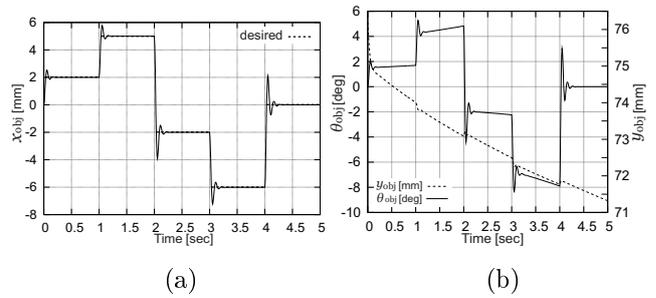


Fig.5 Simulation results of the x_{obj} control in the case of the pattern 1.

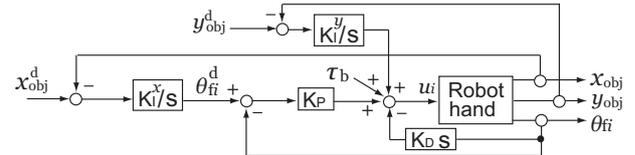


Fig.6 A block diagram of the simultaneous control of x_{obj} and y_{obj} .

さえもターゲット（物体姿勢）は目標値に収束したままで維持される。

次に、 x_{obj} をターゲットとして制御した場合の結果を Fig. 5 に示す。結果から分かるように、 x_{obj} が目標値に収束する一方で、残りの 2 変数 y_{obj}, θ_{obj} は τ_b の増大によって徐々に変化している。このように、ターゲットを θ_{obj} から x_{obj} に切り換えることで、与えられたタスクに応じた制御が可能になる。この制御手法を「ターゲット選択制御」という。本手法の注目すべき点は、このような選択制御が 1 自由度対ハンドで実現可能であるということである。有本らは最小自由度の 2 指ロボットハンドでは安定把持はできても操り制御は不可能であると述べている [13]。

本節最後に、本稿での直列 2 段制御手法をさらに改良することで、物体の位置 x_{obj}, y_{obj} を同時に制御できることを示し、その手法と結果を詳述する。改良された新制御手法を以下に示し、そのブロック線図を Fig. 6 に図示する。

$$\theta_{fi}^d = -(-1)^i K_I^x \int_0^t (x_{obj} - x_{obj}^d) d\tau, \quad (4)$$

$$u_i = -K_P(\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) - K_D \dot{\theta}_{fi} + K_I^y \int_0^t (y_{obj} - y_{obj}^d) d\tau + \tau_b. \quad (5)$$

ここでは、まず式 (3) において第 1 ターゲットとして x_{obj} を選択し、改良点は式 (2) に第 2 ターゲットを y_{obj} と置いた積分制御器を新たに加えていることである。また、式 (5) における τ_b は定数トルクであり、前回のよう操り動作中自由に変更（増減）することはできない。積分ゲイン (K_I^x, K_I^y) は x_{obj}, y_{obj} 用ゲインとして右肩にそれぞれ x, y を添えている。したがって、式 (5) から分かるように、バイアストルクと新規追加された 2 段目の積分制御器によるトルクは、左右両指で大きさが等しい。このように非常にシンプルな制御構造になっている。シミュレーション結果を Fig. 7 に示す。

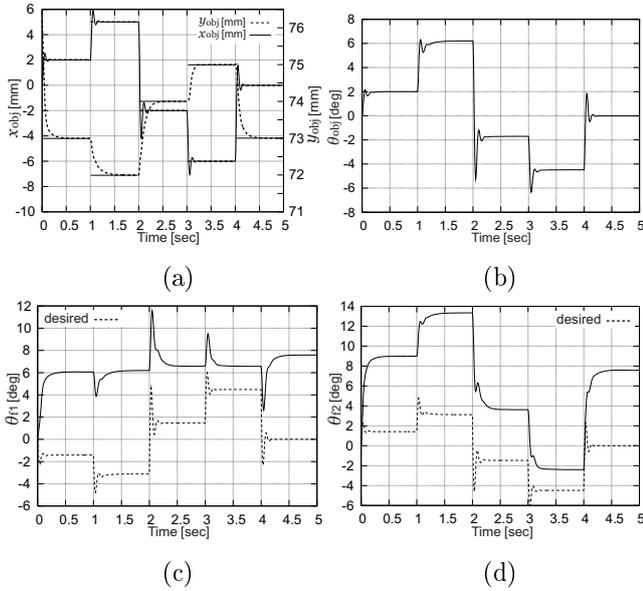


Fig.7 Simulation results of the simultaneous control of x_{obj} and y_{obj} in the case of the pattern 1.

Fig. 7-(a) に x_{obj}, y_{obj} の軌道と、目標軌道をそれぞれプロットしている． x_{obj} の目標軌道は点線で、 y_{obj} の目標軌道は実線で加えている．結果から分かるように、 x_{obj} と y_{obj} が共に任意に与えられた目標値に対してロバストに収束している．その間、物体姿勢 θ_{obj} は Fig. 7-(b) のように、ある安定な姿勢に落ち着いている．また、両指関節角は 1 段目で仮想的に生成される目標値に対して収束せず “安定的な定常偏差” を維持している．Fig. 4 と同様、これは許容偏差 (admissible deviation) と言える．前でも述べたが、本制御手法ではバイアストルクを一定値として入力している．したがって、Fig. 4 のような関節角の変動は現れない．仮にバイアストルクを増加させると、2 段目で制御しようとしている y_{obj} が目標値に収束しないという結果になる．この理由は、本稿で取り扱っている手のメカニズムにある．つまり、合計自由度が 2 自由度であるために、 x_{obj}, y_{obj} に加えて τ_b まで自由に制御しようとする、2 自由度機構で 3 変数を同時に制御しようとしていることと等価になるため、 y_{obj} の軌道に誤差を生じることになる．この観察から Fig. 4 と Fig. 5 の結果を再考すると、それぞれのシミュレーションでは実は、 θ_{obj} と τ_b 、もしくは x_{obj} と τ_b のようにそれぞれのターゲットを組み合わせた制御を行っており、「2 自由度で 2 変数を制御」という Fig. 7 と同様の制御を行っていることが分かる．このようなことから「ターゲット選択制御」を再定義すると、制御可能な物理量は $(x_{obj}, y_{obj}, \theta_{obj}, \tau_b)$ であり、その中から手の 2 自由度に合わせて二つのターゲットを選択し制御するという概念であると結論できる．

3.3 拇指指役割分担制御 (パターン 2)

本節では、左指 (拇指) が並進関節を、右指 (示指) が回転関節を有するメカニズムにおいて、拇指が把持物体の並進運動を、示指が把持物体の回転運動をそれぞれ担う「役割分担制御」が可能であることを明らかにする．

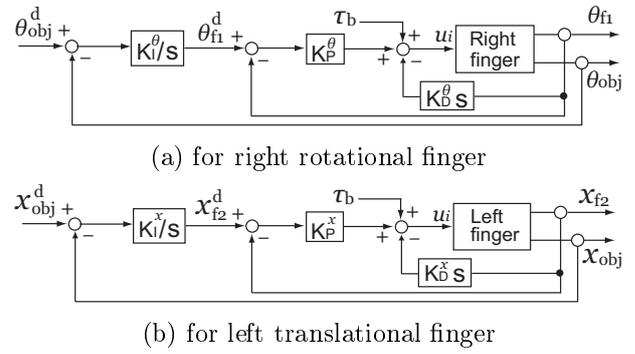


Fig.8 A block diagram of the *role-sharing* control of the index finger and thumb.

まず、右関節への制御則を以下に示す．

$$\theta_{f1}^d = K_I^\theta \int_0^t (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) d\tau, \quad (6)$$

$$u_1 = -K_P^\theta (\theta_{f1} - \theta_{f1}^d) - K_D^\theta \dot{\theta}_{f1} + \tau_b. \quad (7)$$

これは、式 (1)、式 (2) と同様であるが、物体姿勢の制御を担う意味で各ゲインの右肩に θ を付けている．加えて、左関節への制御則を以下に示す．

$$x_{f2}^d = -K_I^x \int_0^t (x_{obj} - x_{obj}^d) d\tau, \quad (8)$$

$$u_2 = -K_P^x (x_{f2} - x_{f2}^d) - K_D^x \dot{x}_{f2} + \tau_b. \quad (9)$$

左関節は並進関節であるため、式 (6) と式 (7) の θ_{f1} を x_{f2} に変更することで得られる．また、当然ながらターゲットを x_{obj} とし、各ゲインの右肩に x を添えている．このように、左右独立の制御ループを組むことができる．本手法を「拇指指役割分担制御」(Role-sharing control) と呼んでいる．本制御則のブロック線図を Fig. 8 に図示する．Fig. 8-(a) での制御量が θ_{obj} と θ_{f1} であり、Fig. 8-(b) での制御量が x_{obj} と x_{f2} であることから、左右の指で独立な制御が施されることが理解できる．またここでは、右関節にはトルク量 τ_b を入力しているが、左関節は並進運動であるためトルクではなく力を入力していることに注意されたい．結果的に本制御則は、左関節の並進運動が物体の並進位置を制御し、右関節の回転運動が物体の回転姿勢を制御するという構造になっている．本制御則によるシミュレーション結果を Fig. 9 に示し、左右の各ゲインとバイアストルクを Table 1 に示す．その他の物理パラメータは、文献 [14] に記載している．

結果から分かるように、両制御ループにおいて物体の位置と姿勢がロバストに目標値に収束している．このときでさえも、両指関節は大きな定常偏差を残しそれが “安定な” 状態で推移している．つまり、これは「許容偏差」であり、ターゲットの収束性にはまったく影響を与えないことを意味する．本結果が示唆する重要な知見は、物体の位置と姿勢の 2 変数を 2 自由度ハンドによって独立に制御可能であるということである．従来研究では、2 自由度機構では操り動作を代表する物体情報の制御は不可能であり、安定把持に限っては可能であると報告されている [13, 15]．本節のように

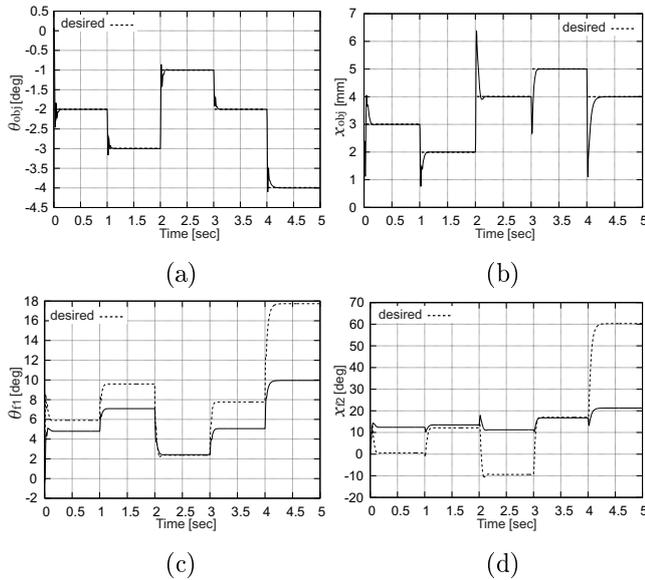


Fig.9 Simulation results of the simultaneous control of x_{obj} and θ_{obj} in the case of the pattern 2.

Table 1 Simulation parameters.

K_P^θ	100	K_P^x	3000
K_D^θ	1	K_D^x	1
K_I^θ	0.03	K_I^x	0.03
τ_b	3 Nm	τ_b	100 N

物体位置と姿勢を同時に制御しようとする場合、最低でもハンド合計で4自由度必要であると言われている。しかも、本提案手法においては重力補償を必要としない。その理由は、重力が加わる垂直2次元面内での操り動作を考慮した場合、柔軟指ハンドリングにおけるLMEEが重力ポテンシャルを含めたポテンシャルエネルギーの極小に遷移するためである。つまり、重力の有無によってLMEEがわずかに変化するがLMEEの存在自体を消すものではないために、特別な重力補償を入れる必要はないのである。

本手法のもうひとつの特徴は、ヤコビ行列を用いていない点である。2章でも述べたが、従来ヤコビ行列を必要とする理由は、指先端位置と関節角間の微小変化(時間変化)、指先力と関節トルク間の微小変化の関係を記述するためである。前者は機構のダイナミクスの導出に不可欠であり、後者は指リンク機構の制御系設計に無くてはならないものである。しかし、本稿での提案制御則には、前者の導出に必要な厳密な接触点位置や逆運動学モデルは不必要であり、把持物体の操り制御に限っては後者に必要な指先力をセンシングする必要がない。したがって、全体としてヤコビ行列は不要であるが、本稿で取り扱う機構が最小自由度であることを考慮すると、多自由度ハンドによる制御に向けた制御系の改良が必要であろう。

4. おわりに

本稿では、最小自由度ロボットハンドによる把持物体の操り制御において、ヤコビ行列を必要としない制御則が組めることをはじめて明らかにした。今後は、こ

の概念を発展させることで、1指多自由度メカニズムにおける「非ヤコビ制御」を実現できる制御系の開発に取り組みたい。

謝辞

本研究の一部は、財団法人立石科学技術振興財団の助成を受けて行われました。

- [1] R.H.Clewley, J.M.Guckenheimer, and F.J.Valero-Cuevas, "Estimating Effective Degrees of Freedom in Motor Systems", *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, Vol.55, No.2, pp.430-442, 2008.
- [2] F.J.Valero-Cuevas, M.E.Johanson, and J.D.Towles, "Towards a realistic biomechanical model of the thumb: the choice of kinematic description may be more critical than the solution method or the variability/uncertainty of musculoskeletal parameters", *Journal of Biomechanics*, Vol.36, pp.1019-1030, 2003.
- [3] W.P.Cooney and M.J.Lucca and E.Y.S.Chao and R.L.Linscheid, "The Kinesiology of the Thumb Trapeziometacarpal Joint", *Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol.63, No.9, pp.1371-1381, 1981.
- [4] D.J.Giurintano, A.M.Hollister, W.L.Buford, D.E.Thompson, and L.M.Myers, "A virtual five-link model of the thumb", *Medical Engineering and Physics*, Vol.17, No.4, pp.297-303, 1995.
- [5] D.E.Whitney, "Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses", *IEEE Transaction on Manmachine Systems*, Vol.MMS-10, pp.47-53, 1969.
- [6] D.E.Whitney, "The mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators", *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.94, pp.303-309, 1972.
- [7] M.Raibert and J.Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.103, pp.126-133, 1981.
- [8] J.Salisbury, "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates", *Proc. IEEE Int. Conf. on Decision and Control*, pp.95-100, 1980.
- [9] C.C.Cheah, M.Hirano, S.Kawamura, and S.Arimoto, "Approximate Jacobian Control for Robots with Uncertain Kinematics and Dynamics", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.19, No.4, pp.692-702, 2003.
- [10] N.A.Bernstein, "The Coordination and Regulation of Movements", *Pergamon Press London*, 1967.
- [11] T.Inoue and S.Hirai, "A Two-Phased Object Orientation Controller on Soft Finger Operations", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2528-2533, 2007.
- [12] T.Inoue and S.Hirai, "Elastic model of deformable fingertip for soft-fingered manipulation", *IEEE Trans. Robotics*, Vol.22, No.6, pp.1273-1279, 2006.
- [13] 有本, "新版 ロボットの力学と制御", システム制御情報ライブラリー, 朝倉書店, 2002.
- [14] 井上, 平井, "ソフトウイング - 型最小自由度ハンドを用いた把持・操り動作における安定把持効果", 計測自動制御学会論文集, Vol.43, No.2, pp.135-144, 2007.
- [15] H.Y.Han, S.Arimoto, M.Yamaguchi, K.Tahara, and P.Nguyen, "Robotic pinching by means of a pair of soft fingers with sensory feedback", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.97-102, 2001.