

力制御入力を必要としない把持対象物姿勢積分制御手法の提案

- 目標関節角を生成する積分制御器と関節角 PD 制御器の 2 段構成 -

井上 貴浩 (岡山県立大学)*¹ 平井 慎一 (立命館大学)*²

A New Object Orientation Control Method Generating Desired Joint Angles

Takahiro Inoue*¹ and Shinichi Hirai*²

*¹Dept. of Systems Engineering for Sports, Computer Science and Systems Engineering, Okayama Prefectural Univ.,
111 Kuboki, Soja, Okayama, 719-1197, Japan, E-mail: inoue@ss.oka-pu.ac.jp

*²Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ., E-mail: hirai@se.ritsumei.ac.jp

Abstract— This article proposes a new control method that is able to achieve the precise posture control of an object grasped by two-softfingered robot hand. This method consists of two parts: a PD controller of joint angles and an integral controller of the object orientation. The former contains gravity compensators of both fingers and a constant torque term to accomplish the stable grasping of the hand. The latter produces desired joint angles of the fingers from the deviation of the object orientation. As a result, this controller does not need force informations induced on the soft fingers. We verify the performance of the present new control method by simulating a given motion. Finally, we make a discussion in terms of the effectiveness of the control law and stable grasping and manipulation on soft-fingered hands.

Key Words: Soft finger, Posture control, Force information, Feedforward control, Input torque

1. はじめに

柔軟指 (ソフトフィンガーと同義) による把持・操り問題を弾性エネルギーの観点から議論した例は, Asadaらの研究から始まる^{1, 2, 3)}. 関数表現可能な対象物形状を幾何学的拘束と置いて, 3本の弾性指の変形によるポテンシャルエネルギーが極小になるような把握形態を求め, その結果に沿って安定把握を実現できることを示した. 浅田らの3本指ハンドはばね鋼のような弾性材料でできており, 機械的インピーダンス (コンプライアンス) の性質を持つ. 対象物への指先の最適な配置問題を把握系のポテンシャル関数の極小に関連づけ, 決定している点で画期的であった. つまり, 一種のリーチング問題に他ならない. 把持後の対象物を所望の角度に制御する問題までは検討されておらず, システム全体の運動方程式の定式化を含めた制御系設計に関する議論が求められている. また, 近年では柔軟指ハンドリングに関する研究が盛んに行われているが^{4, 5)}, 制御系設計が煩雑になる傾向があり, より簡潔なより柔軟指の力学的特徴を踏まえた設計が必要であろう.

上記に基づき筆者らは, 最小自由度を持つ柔軟指ハンドによる把持対象物の準静的操り動作, ならびに, 動的安定把持・操り動作について議論を進めてきた^{6, 7)}. 浅田らの貢献と同様に, 半球形状柔軟指の変形においても弾性エネルギーに極小値が存在することを明らかにしている⁸⁾.

本稿では, その拘束付き極小値の概念 (LMEEwC)⁷⁾を用いて把持対象物の姿勢制御を実現する, 新しい制御則の提案を行う. 本制御手法は, 対象物の位置と姿勢が LMEEwC に沿って自然に, かつ, 一意に決まるといった力学的特徴に適したものになっている. しがないながら, この力学的特徴を逆の観点から見ると, 上記した解の一意性は制御系設計においては, 欠点にもなり

得る. なぜなら, フィードバック制御における各制御量の目標値に自由度がないということになる. つまり, LMEEwC を満たす一意解を前もって解析的に求めておいて, 目標値に設定する必要がある. 仮に, システムの運動方程式が本研究で導出しているような⁷⁾, 解析的計算が困難な非線形系であると, その目標値すら決定することができない. 換言すると, 目標値の組に自由度がない以上, 代わって制御則にある種の自由度 (遊び) を設ける必要がある.

以下では, 柔軟2指ハンドと把持対象物の運動方程式を簡略形式で求め, 本稿で提案する新制御則を記述する. 本制御則は, カフィードフォワードならびにカフィードバック信号は不要であり, 両指関節角と対象物姿勢角のみを閉ループで返すことで, 表現することが可能である. 最後に, 任意動作のシミュレーション結果を示すことで, 本制御手法がエネルギー極小値を持つ柔軟指ハンドリングに最適であることを明らかにする.

2. 運動方程式の記述

柔軟に変形する指先によって把持された対象物の運動方程式を定式化するためには, その柔軟指のモデル化が重要になってくる. 筆者らは, 半球形状柔軟指の弾性モデルを2次元で定式化し, 文献7)において示している. 本研究では現在までのところ, Fig.1にあるように, 対象物の3次元運動ではなく2次元運動 (紙面平面内での運動) に限定しているため, 指先に関わる変数としては指先最大変位量 d_n , 接線方向への変位量 d_t , 対象物の姿勢角 θ_p の3つを考慮している. ただし, 対象物の運動は2次元であるが, 指先変形に起因するポテンシャルエネルギーの定式化は3次元で行っていることに注意されたい⁸⁾.

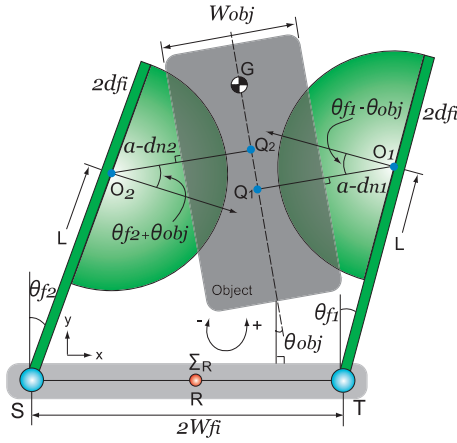


Fig.1 Soft-fingered manipulation.

2.1 位置拘束として転がり拘束の定式化

転がり半径が自由に变形し得る柔軟指上での接線方向拘束の定式化においては、厳密にはノンホロノミック拘束となる⁷⁾。しかし本稿では、転がり半径は常に指先半径 a に等しいという近似拘束モデルを用い、ホロノミック拘束として扱う。これは、準静的な対象物操り実験において⁶⁾、近似拘束モデルを採用しても対象物の軌跡がシミュレーション結果とほぼ等しいことに起因する。このとき、接線方向拘束式は以下のように記述される。

$$C_{ii} = -(x_{obj} - O_{ix}) \sin \theta_{obj} + (y_{obj} - O_{iy}) \cos \theta_{obj} + a \{ \theta_{fi} + (-1)^i \theta_{obj} \} + d_{ii} = 0 \quad (i = 1, 2). \quad (1)$$

ここで、 (O_{ix}, O_{iy}) はハンド座標系原点 R から見た第 i 指先原点 O_i の xy 座標を表す。また、 $(x_{obj}, y_{obj}, \theta_{obj})$ は対象物の位置と姿勢を意味し、 θ_{fi} は第 i 指の関節角を示している。同様に、対象物法線方向への拘束も求められ、以下のように表現できる。

$$C_{ni} = (-1)^i (x_{obj} - O_{ix}) \cos \theta_{obj} + (-1)^i (y_{obj} - O_{iy}) \sin \theta_{obj} - (a - d_{ni}) - \frac{W_{obj}}{2} = 0 \quad (i = 1, 2). \quad (2)$$

ここで、 W_{obj} は平行平面对象物の幅を示している。

2.2 ラグランジアンと運動方程式

本稿では、対象物接触面に対する法線方向と接線方向への4つの位置拘束を用いるため、システムのラグランジアンは以下のように表現される。

$$L = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^2 P_i - P_{gv} + \sum_{i=1}^2 \lambda_{ni} C_{ni} + \sum_{i=1}^2 \lambda_{ti} C_{ti}. \quad (3)$$

上式において、 P_i は第 i 指先に蓄えられる弾性エネルギーであり、第 i 指先の3変数 $(d_{ni}, d_{ti}, \theta_{pi})$ を用いて、以下のように表せる。

$$P_i = \pi E \left\{ \frac{d_{ni}^3}{3 \cos^2 \theta_{pi}} + d_{ni}^2 d_{ti} \tan \theta_{pi} + d_{ni} d_{ti}^2 \right\}. \quad (4)$$

ここで、 E は指先材料のヤング率であり、他の変数、ベクトル、行列は以下のように示される。

$$\mathbf{M} = \text{diag}(M_{obj}, M_{obj}, I_{obj}, \mathbf{I}_f^T, M_{obj}, M_{obj}, M_{obj}, M_{obj}) \in R^{9 \times 9}, \quad (5)$$

$$\mathbf{q} = [x_{obj}, y_{obj}, \theta_{obj}, \theta_f^T, d_n^T, d_t^T]^T \in R^{9 \times 1}, \quad (6)$$

$$P_{gv} = M_{obj} g y_{obj} + \sum_{i=1}^2 M_{fi} g L \cos \theta_{fi}, \quad (7)$$

$$\theta_{pi} = \theta_{fi} + (-1)^i \theta_{obj}. \quad (8)$$

(3)式からシステムの運動方程式が、一般形式で次式のように得られる。

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}_j} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}_j} = \Phi^T \boldsymbol{\lambda} \in R^{9 \times 1} \quad (j = 1, \dots, 9). \quad (9)$$

ここで、 $\boldsymbol{\lambda} \in R^{4 \times 1}$ は4つの拘束が生じている法線方向と接線方向への拘束力ベクトルを示し、 $\Phi \in R^{4 \times 9}$ は4つの拘束を一般化座標ベクトルで偏微分した行列であり、各拘束力の方向に相当する。(9)式における一般化ポテンシャル力を f_p とすると、(9)式は以下のように展開できる。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{f}_p = \Phi^T \boldsymbol{\lambda}. \quad (10)$$

上式が、対象物と両指先間の弾性力の作用反作用を含んだ運動方程式となる。(10)式における f_p が、把握系のポテンシャルエネルギー $P_1 + P_2 + P_{gv}$ を \mathbf{q} で偏微分した量 $f_p = -\partial(P_1 + P_2 + P_{gv})/\partial \mathbf{q}$ に相当することから、(10)式では f_p が系の安定点(LMEEwC)へ押し戻す力の役目を果たす。さらに、システムへの外力 f_{ext} と制御入力 u_{IN} の付加まで含めた系を以下に示す。

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1} (\Phi^T \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_{ext} + \mathbf{u}_{IN}). \quad (11)$$

3. 制御手法の提案

筆者らは文献7)において、対象物の位置・姿勢情報や力情報(把持力)を用いない関節角PID制御を(12)式のように提案してきた。

$$u_{INi} = -K_p(\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) - K_D \dot{\theta}_{fi} - K_I \int_0^t (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) d\tau. \quad (12)$$

これは、実機での制御という観点からは、エンコーダ値のみを用いて安定な把持と操りが可能であるということに他ならない。柔軟指ハンドによる対象物体の操り問題は、目標把持力を設定する従来のハンド理論とは異なることに注意されたい。カフィードバック項やフィードフォワード項を必要としない点で、柔軟指ハンドリングはまったく新しい把持・操り形態であると言える。逆言すると、力(把持力)を制御できないという意味にも解釈できる。これらの問題を、本稿で提案する新制御則と照らし合わせて詳述する。

3.1 制御入力

本稿では、把持対象物の任意姿勢への姿勢制御を実現する制御則を提案する。まず、本システムの独立変数

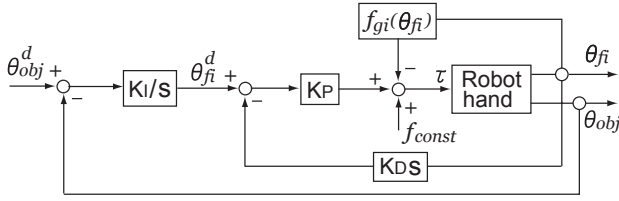


Fig.2 Block diagram of proposed control method.

を記述すると, $(x_{obj}, y_{obj}, \theta_{obj}, \theta_{f1}, \theta_{f2})$ になる. 前記したように, 2 指ハンドであっても対象物位置 (x_{obj}, y_{obj}) は LMEEwC に収束する. しかし, 所望の位置に独立に制御しようとする, ハンド自由度を 2 自由度分追加する必要がある. よって, 本稿では対象物姿勢 θ_{obj} のみを制御対象とし, 制御系の設計を行う. Fig.2 に本システムのブロック線図を示し, (13) 式, (14) 式に提案する制御則を示す.

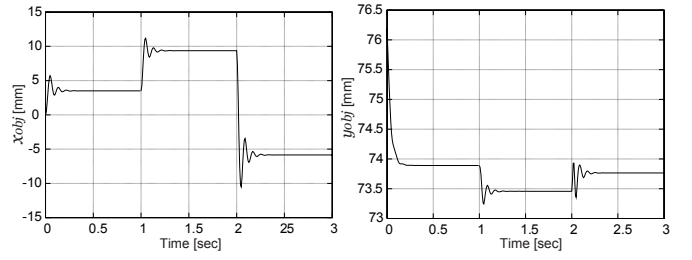
$$u_{INi} = -K_P(\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) - K_D\dot{\theta}_{fi} + f_{const} + f_{gi}, \quad (13)$$

$$\theta_{fi}^d = -(-1)^i K_I \int_0^t (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) d\tau. \quad (14)$$

上式において f_{gi} は, 第 i 指に対する重力補償項であり, リアルタイムでの計算が可能であるとしている. 本制御則の一つ目の特徴は (14) 式の対象物姿勢に対する積分制御であり, 姿勢偏差の蓄積により目標関節角を決定している点にある. このような制御則を組む理由は, 安定点 (LMEEwC) における独立変数の解の組は唯一であるためである. つまり, 目標関節角 θ_{fi}^d を任意に設定すると, 安定点ではない θ_{fi}^d を指定してしまう可能性がある. これではシミュレーションが収束しないという結果が得られている. 逆に, 運動方程式を解析的に解いて安定点の解を求めておいて, 直接目標値に設定することが考えられるが, 本システムの運動方程式は非線形, かつ, 制約付き 9 元連立方程式になるため, 解析的には解けない.

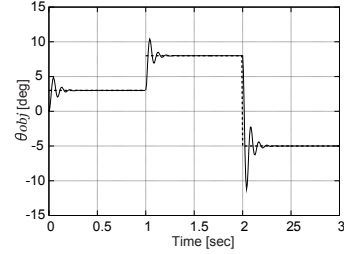
二つ目の特徴は, (13) 式のバイアス定数トルク f_{const} にある. これは一見フィードフォワードトルクにも見えるが, 指先を含めたシステムのモデルから求めた目標トルクではなく, 把持・操り動作中常に一定のある与えられた定数トルクであるという点から見て, フィードフォワードトルクではないことが理解できる. f_{const} の物理的意味は, 安定把持を成立させるための入力トルクであり, ユーザ側である程度自由に決めて良い物理量である. 仮に, 対象物姿勢の初期値を $\theta_{obj} = 0$ とした上で, (14) 式に $\theta_{obj}^d = 0$ を代入すると, (13) 式の比例制御項ではトルクを生成できない. 結果的に, $\theta_{obj} \rightarrow \theta_{obj}^d = 0$ を実現する把持トルクは f_{const} のみであることが分かる.

三つ目の特徴は, (13) 式において関節角 PID ではなく, PD 制御である点である. 上記したように, 安定点の解の組を解析的に求めることはできないため, (14) 式で生成された θ_{fi}^d でさえも, 解の組 (安定点: LMEEwC) である保証はない. したがって, (13) 式において θ_{fi} が θ_{fi}^d に精度良く収束することを避ける必要が生じる. つまり, 関節角度偏差を残したままの補償器を組む必要がある. それが, (13) 式で示した積分動作を含まない関節角 PD 制御である. (13) 式と (14) 式の組み合わせにより, 対象物が目標姿勢に収束することになる.

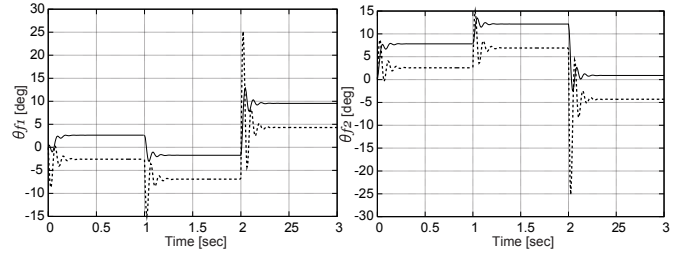


(a) x_{obj} vs. time

(b) y_{obj} vs. time



(c) θ_{obj} vs. time



(d) θ_{f1} vs. time

(e) θ_{f2} vs. time

Fig.3 Simulation results.

Table 1 Simulation parameters

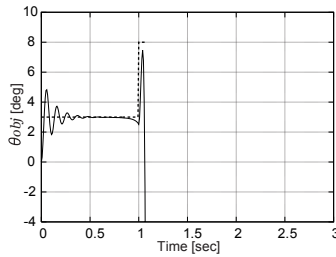
Parameters	Values
K_P	300 Nm
K_D	14 Nm·sec
K_I	1
f_{const}	30 Nm

4. 姿勢制御シミュレーション

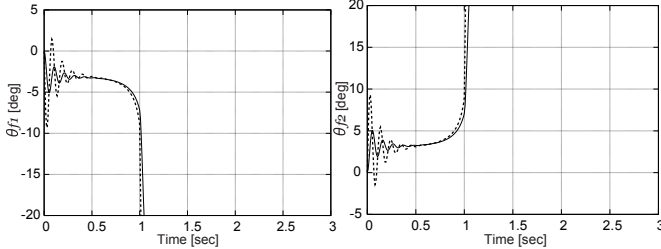
はじめにシステムの初期状態として, $\theta_{obj} = \theta_{f1} = \theta_{f2} = 0$ とし (Fig.1 参照), 両指先半球と対象物とは点接触の相対位置関係にあるとする. 次に, 対象物の目標姿勢をステップ状に変化させ, 1sec ごとに $\theta_{obj}^d = 3^\circ, 8^\circ, -5^\circ$ の順で (14) 式に代入する. Fig.3 にシミュレーション結果を示す.

Fig.3-(a), (b) に対象物位置を, Fig.3-(c) に姿勢をそれぞれプロットしている. Fig.3-(c) における点線は目標姿勢 θ_{obj}^d を示している. また, Fig.3-(d), (e) には, 角度偏差を含めた両指関節角を図示し, 同時に (14) 式で動的に生成された目標関節角を示している. 各ゲインは Table 1 に示す値とし, ハンドのメカニカルパラメータは文献 7) を参照されたい. 結果から分かるように, 両関節角に定常偏差が残っているにもかかわらず, 対象物姿勢は目標値に精度良く収束している.

次に, シミュレーション失敗例を示す. 関節角偏差



(a) θ_{obj} vs. time



(b) θ_{f1} vs. time

(c) θ_{f2} vs. time

Fig.4 Simulation results in failure.

が残らないように，(13) 式を以下のような PID 制御則に変更する．

$$u_{INI} = -K_P(\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) - K_D\dot{\theta}_{fi} - K_I \int_0^t (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) + f_{gi}. \quad (15)$$

ここで，(14) 式はそのまま利用する．このときのシミュレーション結果を Fig.4 に示す．Fig.4-(a), (b), (c) の順で，対象物姿勢，両指関節角の結果を図示し，成功例と同様に，目標姿勢と生成された目標関節角を同時にプロットしている．

Fig.4-(b), (c) から分かるように， θ_{fi} は (14) 式で動的に生成された目標関節角 θ_{fi}^d に対して追従し一旦収束する傾向が見られるが，その後，急激に偏差が増大し発散している様子が見てとれる．この理由は，前章で説明したように，動的に生成された θ_{fi}^d であっても，それが LMEEwC を満たす唯一解であるとは限らないためである．つまり，(15) 式で表した PID 制御則では I 動作の影響により，LMEEwC でない解の組に θ_{fi} を強制的に偏差なく制御しようとしている．

5. 議論

5.1 安定把持・操りと姿勢制御

本稿で提案している制御則，ならびに文献 7) の先行研究において用いた簡単な関節角制御則 (本稿では (12) 式に相当) の両方において，目標把持力に関するカフィードバック入力やカフィードフォワード入力を導入していない．にもかかわらず，文献 7) においては安定把持と安定操り動作が，任意の設定動作において実現できている．また，本稿で示したような対象物姿勢制御さえも実現できている．このように，柔軟指ハンドの制御系においては力制御を必要としない．また，柔軟指ハンドリングにおいては，柔軟指の力学モデルの導出が重要になるが，材料の非線形性により指先弾性力等の解析的定式化は困難であり，数値解析手法でしかモデル化できない⁹⁾．仮にモデル化できたとしても，

モデル化誤差を多く含むため開閉ループいずれにしても目標把持力 f^d を定めることができない．柔軟指が持つ弾性ポテンシャル極小という性質が把持力を自由に決められないという制約を引き起こすが，逆に，モデル化誤差を含む f^d を入力する必要がないため，本制御則が柔軟指ロボットハンドに適した制御手法であると言える．

また，(13) 式の f_{const} を自由に変えると，それに応じて定常状態での両指関節角は Fig.3-(d), (e) の結果とは異なる値をとる．それにもかかわらず，目標姿勢は Fig.3-(c) と同じ値にロバストに収束する．加えて， K_I を変更すると θ_{fi}^d は変化するが，実際の関節角定常値 θ_{fi} は Fig.3-(d), (e) と等しい結果となる．以上の観察より，Fig.3 で示された各変数 ($x_{obj}, y_{obj}, \theta_{obj}, \theta_{f1}, \theta_{f2}$) の収束値がシステムの安定点 LMEEwC になっていると推測される．

5.2 把持力と安定把持の定義

従来，点接触剛体指ハンドにおいて，把持対象物への法線拘束力を把持力と定義してきた．しかし，柔軟指ハンドリングにおいては，上記拘束力と共に指先弾性力が存在し，把持・操り能力に大きな影響を与える．また，従来の安定把持の概念は，目標把持力にどのように制御するか，もしくは，その安定把持を実現すると同時に対象物を所望の位置・姿勢にどのように制御するか，という問題に帰着される．しかし，柔軟指ハンドにおいては，目標把持力を設定しなくても安定的に把持し操ることができる．以上の事実から，柔軟指ハンドリング問題における把持力や安定把持の再定義が必要であろう．

参考文献

- 1) 花房，浅田，"人工指による物体把握の力学"，計測自動制御学会，Vol.12, No.5, pp.536-542, 1976.
- 2) H. Hanafusa and H. Asada, "Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers", *Proc. 7th Int. Symp. on Industrial Robots*, pp.361-368, 1977.
- 3) H. Hanafusa and H. Asada, "A Robot Hand with Elastic Fingers and Its Application to Assembly Process", *IFAC Symp. on Information and Control Problems in Manufacturing Technology*, pp.127-138, 1977.
- 4) 田原，山口，有本，"最小自由度をもつ柔軟 2 本指ロボットによる安定把持および姿勢制御のためのセンソリーフィードバック"，日本ロボット学会誌，Vol.21, No7., pp.67-73, 2003.
- 5) 長瀬，中島，早川，傍島，"ソフトフィンガーを用いた対象物の把握・操りの制御"，計測自動制御学会論文集，Vol.40, No.5, pp.518-527, 2004.
- 6) 井上，平井，"半球型ソフトフィンガを有する最小自由度 2 指回転関節ハンドによる準静的把持・操り動作"，日本ロボット学会誌，Vol.24, No.8, pp.945-953, 2006.
- 7) 井上，平井，"ソフトフィンガ - 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.
- 8) T. Inoue and S. Hirai, "Elastic Model of Deformable Fingertip for Soft-fingered Manipulation", *IEEE Transaction on Robotics*, Vol.22, No.6, pp.1273-1279, 2006.
- 9) 井上，平井，"ロボットハンドによる把持・操り動作を実現する半球型ソフトフィンガの幾何学的・材料学的非線形性を考慮した弾性力モデル"，日本ロボット学会誌，Vol.25, No.2, pp.221-230, 2007.