拇指示指摘み操り作業における 非ヤコビ制御に関する把持可能性の検証

Grasping Possibility of Non-Jacobian Control in Pinch Tasks by Thumb and Forefinger Robotic Hand

登録番号 1081002

研究者代表 井上 貴浩

岡山県立大学 情報工学部 スポーツシステム工学科 助教

1. 研究の目的

柔軟指による把持・操り問題を弾性エネルギー の観点から議論した例は、浅田らの研究から始 まる¹⁾. 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.しかし,浅田らの研究 は把握形態を求めるという意味で一種のリーチ ング問題であった.把持後の対象物を所望の角 度や位置に制御する問題までは検討されておら ず,柔軟指ハンドにおける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,近年では柔軟指八 ンドリングに関する研究が盛んに行われている が²⁾,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 計が必要である.

上記に基づき筆者らは,最小自由度を持つ柔軟 指先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^{3,4)}.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(Local Minimum of Elastic Potential Energy: LMEEと略す)が存在することを明らかにしてい る⁵⁾.

本稿では,実際の操り動作中に現れるエネル ギー極小値の概念を把持拘束下における弾性エネ ルギー極小値 (LMEE with Constraints:LMEEwC と略す)と定義し,把持対象物の姿勢制御を実現 するために LMEEwC に基づいた新しい制御則を 提案する.3章以降で,柔軟2指ハンドと把持対 象物の運動方程式を示し,本稿ではそれらに基 づいた把持対象物の姿勢制御を実現する,柔軟 指の力学的特徴を考慮したロボットへの適用が 容易で簡潔な新制御手法を提案する.本制御則 では,カフィードフォー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.また,提案制御則による 閉ループシステムの受動性に基づく安定解析を 行い,最終段のトルク信号と並行して配置でき る定数トルクがシステムのパフォーマンスの向 上に役立つことを明らかにする.最後に,操り 動作のシミュレーション結果と2指2自由度口 ボットハンドを使った実験結果を比較すること で本制御手法が,変形による弾性エネルギーに 極小値を持つ柔軟指ハンドリングに最適な手法 であることを明らかにする.

2. 対象物姿勢制御手法の提案

指先質量を考慮した本稿での2自由度2指ロ ボットハンドシステムは5つの独立変数と4つ の従属変数を持ち,前者と後者の順で並べたシ ステム変数ベクトルを以下のように定義する.

$$\boldsymbol{q}^{T} = [x_{obj}, y_{obj}, \boldsymbol{\theta}_{obj}, \boldsymbol{\theta}_{f}^{T}, \boldsymbol{d}_{n}^{T}, \boldsymbol{d}_{t}^{T}].$$
(1)

ここで従属変数とは,2本指が物体を把持することによって生じる幾何学的拘束式を用いて,指 先変位量 *d_n*,*d_t*が表されることを意味する.

力学的安定点 LMEEwC によって,両指関節角 が一旦決まれば対象物の姿勢は一意に決まる.そ れでは,対象物を望みの姿勢に収束させるために は,関節角に対してどのような制御が可能なので あろうか.従来なら,指先力から逆運動学を用い て各関節トルクを算出するが,柔軟指ハンドには 指先力に大きなモデル誤差が存在するため,その 手法は利用できない.一方,LMEEwCとは,入力 側の各関節角が決まれば出力側の対象物の位置と 姿勢が必然的に決まり,式(1)に準じた解の組が 力学的平衡点として一組存在することである.し たがって,その解の組を $(x_{obj}, y_{obj}, \theta_{obj}, \theta_{f1}, \theta_{f2})$ とすると,目標値として指定する θ^d_{obi} に対して, 解の組の候補 $(x'_{obi}, y'_{obi}, \theta^d_{obi}, \theta'_{f1}, \theta'_{f2})$ がひとつ, もしくはそれ以上存在するはずである.次の段階 として、この候補の中から LMEEwC を満たす関 節角の組を決定する必要が生じる.ここで考えら れる目標関節角決定法としては, θ_{obi}^d に対象物姿 勢が収束した時点で仮に, $(m{ heta}_{f1}^\prime=m{ heta}_{f1}^d,m{ heta}_{f2}^\prime=m{ heta}_{f2}^d)$ のように決定する方法が考えられる.制御器で 表すと以下のような積分器が考えられる.

$$\boldsymbol{\theta}_{fi}^{d} = -(-1)^{i} K_{I} \int_{0}^{T} (\boldsymbol{\theta}_{obj} - \boldsymbol{\theta}_{obj}^{d}) \,\mathrm{d}t.$$
 (2)

比例制御器や微分制御器では制御量が定常偏差 なく目標値に到達すると出力がゼロになる.こ れを回避すると同時に,対象物姿勢を偏差なく 目標値へ収束させるために最低限必要不可欠な 積分制御器を用いる.他方,式(2)で生成された 目標関節角がLMEEwCを満たす保証はない.

次に,生成された目標関節角を使って関節角 トルク制御を行う.制御則は以下のように記述 できる.

$$u_i = -K_P(\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) - K_D \dot{\theta}_{fi}.$$
 (3)

ここで, PD 制御を導入した理由は,上述した ように式 (2) で生成された目標関節角が決して LMEEwC を満たしているとは限らないためであ る.すなわち,任意に与えた θ_{obj}^{d} を解の要素に 持つ LMEEwC と異なる ($\theta_{f1}^{d}, \theta_{f2}^{d}$)を生成した結 果,その目標値に収束しない制御則を敢えて組



Fig.1 A block diagram of the proposed control method.

む必要がある. つまり, PID 制御による強制的な 目標値への収束は避け, 定常偏差を残し得る PD 制御則を選択しなければならないことに気づく.

一方,式(3)は最終段のロボットへのトルクを 生成しているため,PD制御のみでは仮に関節角 が目標値に収束したとして,トルクを発生でき ないという問題を生じる.また,偏差が残った 場合であっても過渡状態において瞬時的に負の トルクを発生する可能性がある.そのため,式 (3)にバイアス的に加える定数トルクを入力する. その結果,式(3)は以下のように修正される.

$$u_i = -K_P(\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) - K_D \dot{\theta}_{fi} + \tau_{bi}.$$
 (4)

以上の流れをブロック線図で示すと, Fig. 1 となる.図から分かるように,1段目制御器(式(2))の出力側と2段目制御器(式(4))の入力側が直列に繋がれている.なお,本稿ではバイアストルクを左右で同値としているため, $\tau_{b1} = \tau_{b2} = \tau_b$ としている.次章では,本制御手法を用いた閉ループ系の受動性に基づく安定性解析を行い,バイアストルクが安定把持・操り能力に深く関与していることを明らかにする.

3. 姿勢制御シミュレーション

3.1 提案制御手法による結果(成功例)

本章では,先行研究^{5,6)}において導出した指先 平行分布モデルを用いた,把持対象物の姿勢制御 シミュレーションを行う.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. 2参 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,1sごとに $\theta_{obj}^d = 3^\circ, 8, \circ -5^\circ$ の順で式(2)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 ける点線が与えた目標姿勢 θ_{obj}^d であり, Fig. 3-(d), (e) における点線は式 (2) によって操り動作



Fig.2 Soft-fingered manipulation.

Table 1 Simulation and mechanical parameters

parameters	values
K _P	50 Nm
K_D	1 Nm·s
K_I	0.01
$ au_b$	3 Nm v
M_{fi}	88 g
E	0.232 MPa

中動的に生成された目標関節角をそれぞれ示している.各ゲインとバイアストルク,指先の粘性係数,ハンドのメカニカルパラメータはTable 1に示す値とする.ここでは,指と対象物の重量をそれぞれ M_{fi} , M_{obj} とし,慣性モーメントをそれぞれ I_{fi} , I_{obj} としている.また,柔軟指のヤング率をE,半径をaとし,指長さをLとしている.結果から分かるように,両関節角に大きな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正確に収束している.また,安定点LMEEwCにより θ_{obj} が収束するのと同様に (x_{obj}, y_{obj}) も収束していることが分かる.

有本らは,2自由度対(合計4自由度)ハン ドで力とモーメントの平衡が全体として保たれ ていさえすれば良く,内力や拘束力,重力によ る合モーメント等の個々の物理量は,目標値に 対して誤差を含んでいても構わないと述べてい る.その結果として,物体情報を必要としない



Fig.3 Simulation results of object orientation control using our proposed two-phased controller: the target task of θ_{obj} is successfully done and admissible deviations of θ_{fi} can be seen all the time.

把持という意味の"blind grasping"を実現するた めには最低4自由度機構が必要であると結論づ けている.しかし,本稿で提案している簡便な 2段階制御手法を用いれば,前章での記述の通 り,システム変数(関節角)に誤差を含んだま まターゲット変数(物体姿勢)を直接制御可能 になる.つまり,1自由度対ハンドで把持のみな らず物体の姿勢制御まで実現できることが示さ れた.

3.2 バイアストルクのオープンループ制御

前節の結果を観察すると,対象物姿勢を所望 値に保持しつつ,バイアストルクを制御できるの ではないかと予測される.Fig.1の制御ループ内 でバイアストルクを連続的に変化させた場合の シミュレーション結果をFig.4に示す.Fig.4-(a) から,バイアストルクの増加指令パターン,対



(e) grasping at 1.1 s

(f) grasping at 2 s

Fig.4 Simulation results of our proposed control method when the open-loop control of biased torque τ_b is implemented.

象物姿勢,右左関節角の順で並べている.加え て, Fig. 4-(e), (f) に,約1.1 sと2.0 sにおける 把持状態をアニメーションのスナップショットと して示している.また,バイアストルクは両指 関節に対して同じ値を入力している.式(4)の τ_bが増加するにしたがって,両指関節角の内向 きへの回転角が増加していることが分かる.こ れは,バイアストルクが増加するとその増分を キャンセルするために式(3)の関節角差分が増大 するために起こる.以上のように,本節では提 案制御手法によって把持対象物の姿勢を目標値 に保持しながら,関節トルクを自由に変化させ 得ることが明らかになった.この結果は,指に よる姿勢制御タスクを実行しながら,物体に加 わるが陽に示されない指先力を関節トルクを介 して間接的に制御可能であることを示唆する.

4. 今後の研究の方向,課題

今後は,今回得られた非ヤコビ制御の概念を 多自由度ハンドに拡張し,拇指2自由度,示指3 自由度の対向把持形態においても同様の結果が 得られることを実証する.

5. 成果の発表,論文等

(著書)

T. Inoue and S. Hirai, "Mechanics and Control of Soft-fingered Manipulation", *Springer-Verlag, UK*, 2008.

(国際学会発表)

T. Inoue and S. Hirai, "Task-selection Control by Thumb and Forefinger Based on Softfinger Contact", Asia Int. Symp. on Mechatronics, pp.224– 229, 2008.

参考文献

- 1) Hanafusa,H. and Asada,H., Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers, *Proc. 7th Int. Symp. on Industrial Robots*, (1977), pp.361-368
- 2) Tahara,K., Yamaguchi,M. and Arimoto,S., Sensory Feedback for Stable Grasping and Posture Control by using a Pair of Minimum-DOF Robot Fingers with Soft Tips, *Journal of the Robotics Society of Japan (RSJ)*, Vol.21, No.7, (2003), pp.67-73
- Inoue, T. and Hirai, S., Quasi-Static Manipulation Using Hemispherical Soft Fingertips by means of Minimum D.O.F. Two-Fingered Robotic Hand, *Journal of the Robotics Society of Japan (RSJ)*, Vol.24, No.8, (2006), pp.945-953
- Inoue, T. and Hirai, S., Secure Grasping Effect of Soft-fingered Manipulating Motions with Minimum D.O.F.Robotic Hand, *The Society of Instrument and Control Engineers (SICE)*, Vol.43, No.2, (2007), pp.135-144
- Inoue, T. and Hirai, S., Elastic Model of Deformable Fingertip for Soft-fingered Manipulation, *IEEE Transaction on Robotics*, Vol.22, No.6, (2006), pp.1273-1279
- Inoue, T. and Hirai, S., Experimental Investigation of Mechanics in Soft-fingered Grasping and Manipulation, *Journal of the Robotics Society of Japan (RSJ)*, Vol.25, No.6, (2007), pp.951-959