冗長トルクセンサを用いた
多自由度ロボットハンドの把握パラメータ同定*三 村 宣 治^{*1}, 舟 橋 康 行^{*2}Parameter Identification of a Grasp of a Multi-fingered Robot Hand
by redundant torque sensors

Nobuharu MIMURA and Yasuyuki FUNAHASHI

This paper discusses the identification of unknown parameters, such as external force and contact points by adding such redundant non-active joints as detecting only torque to a hand. Multi-fingered hands tend to have an unstable grasp because of their many degrees of freedom. But the grasp can be readily stabilized by a method which allows one to set the three-dimensional internal stiffness at each fingertip. Thus, when an unknown object is grasped stably, it is considered that the grasp can be made more stable if unknown parameters can be identified using data obtained during the initial grasp. It is shown that unknown parameters can be identified by adding redundant non-active joints detecting only torques to a hand. Finally, it is illustrated by simple two- and three-dimensional examples that the proposed identification algorithm of the grasping parameters is valid.

Key Words: Robot Hand, Multi-fingered Hand, Contact Point, Redundant sensor, Parameter Identification, Unknown Object

1. 結 言

自動車工業などの多種混合生産ラインのように今後ロボット化が期待される作業においては、従来の単機能のロボットハンドに代わって多くの作業が可能な多指多関節型ロボットハンドが有効と考えられている。

しかし、多指多関節型ロボットハンドは指先と対象物との間の摩擦力により対象物を拘束するため指先力の決定が重要であり、これまで多くの研究がなされている。しかし、指先に三次元的なスティフネスを設定することおよび内部スティフネスを設定すると、指先力をあらかじめそれほど正確に与えなくても安定な把握を実現できる場合の多いことが著者ら⁽¹⁾⁽²⁾の実験によって確認されている。把握できた対象物をよりよく把握したり操ったりしようとする場合には、ハンドから対象物に加わる指先力や対象物に直接加わる外力(重力等)に関する正確な情報が不可欠となる。

未知対象物の安定な把握が実現できたとき、この把握を足がかりとして把握に関する未知パラメータを同定することができればより確実な把握および操り動作

へ移行することができると考えられる。

未知対象物の把握・操りに関する研究としては、まず Fearing⁽³⁾の研究がある。彼は、平面内で運動する2本指のうちの1本を対象物表面に押当てた状態でもう1本の指先のスティフネスを小さくし、この指を可動指として対象物表面に押当てることにより、把握力が発生できる姿勢まで強制的に回転運動を与える方法を提案している。Kao⁽⁴⁾らがこの方法をさらに一般化している。しかしこれらの研究では、対象物が平面上を滑る運動に限定しており、三次元問題への拡張は困難であると考えられる。また、Dario⁽⁵⁾、Brock⁽⁶⁾および Montana⁽⁷⁾らは指先に触覚センサを取付け、そのセンサ情報を利用して対象物の形状を同定する方法を提案している。触覚センサを利用する方法は、基本的には視覚センサを用いた方法と同等と考えることができ、ハンド固有の問題ではない。一方、金子ら⁽⁸⁾は自己変形性という概念を導入しハンドのスティフネスを積極的に利用した接触点検出方法を提案している。しかし、彼らの方法は未知対象物が固定され動かないと仮定し指ごとに接触点を決定する方法であり、多指ハンドによる把握の問題とは言えない。また、同定可能な量は各指の接触点位置のみで対象物に加わっている外力などは同定できない。著者⁽⁹⁾らは未知対象物の安

* 原稿受付 平成4年11月24日。

^{*1} 正員, (株)豊田中央研究所(●480-11 愛知県愛知郡長久手町)。^{*2} 正員, 名古屋工業大学(●466 名古屋市昭和区御器所町)。

定な把握が実現しているという状況を出発点とし、各指のスティフネスとトルク分布を適切に変化させることにより接触点位置および把握している未知対象物に作用している外力を同定する方法について考察している。しかしこの方法では、把握後最小1回の微小操り動作が必要である。

本論文では、トルクを検出できるが駆動できない仮想的な関節(非能動関節)をもったハンドを考える。このようなハンドは計測値に関し冗長性を持つ。この冗長な計測値を利用し、従来のような操り動作を行うことなしに未知対象物把握に関するパラメータ同定を行う問題を扱う。

2. 問題の設定

本章では、図1に示すような3本指ハンド-対象物系を考える。問題の見通しをよくするため次の仮定を設ける。

【仮定】

- (1) ハンドの構造は $n(\geq 3)$ 本指である。第 i 指は $m_i(\geq 3, i=1, 2, \dots, n)$ 関節のシリアルリンク構造とする。 $m = \sum_{i=1}^n m_i$
- (2) 指と対象物とは点接触し、摩擦がある。
- (3) 最先端リンクでのみ対象物と接触している。
- (4) 各接触点において、指先力は静摩擦制約に対して十分余裕がある。
- (5) ハンドを構成する関節の角度、スティフネスおよびトルクは計測でき、その値は任意に設定できる。
- (6) 対象物の形状および外力は未知である。
- (7) 未知パラメータ同定過程において外力は変化しない。

仮定(1)はハンドが三次元空間において把握・操りが可能な構成であることを示している。これらの仮定の下で、接触点位置(各指の最先端リンク長)および外力を同定する問題を考える。

3. 基礎方程式

3.1 把握状態 図1において、 Σ_0 は対象物の適当な位置に固定した対象物座標系、 $r_i = [r_{ix} \ r_{iy} \ r_{iz}]^T$ は Σ_0 の原点から第 i 接触点までの位置ベクトル、 f_i は第 i 指の指先から対象物に加えられる指先力を表す。各接触点において摩擦制約条件が満足され、 Σ_0 の原点に作用する一般化外力 $F_0 = [f_0^T \ n_0^T]^T$ 、($f_0 = [f_{0x} \ f_{0y} \ f_{0z}]^T$: 外力ベクトル、 $n_0 = [n_{0x} \ n_{0y} \ n_{0z}]^T$: 外力モーメントベクトル)と指力 $f = [f_1^T \ f_2^T \ \dots \ f_n^T]^T$ とが静的釣合状態にある場合には次の関係が成立する。

$$F_0 = Wf \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 W は把握マトリックスであり、次式により定義される。

$$W = [W_1 \ W_2 \ \dots \ W_n]$$

ただし、

$$W_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -r_{iz} & r_{iy} \\ r_{iz} & 0 & -r_{ix} \\ -r_{iy} & r_{ix} & 0 \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

第 i 指の関節角度およびトルクをそれぞれ θ_i および τ_i とすると、指力 f および関節トルク $\tau = [\tau_1^T \ \tau_2^T \ \dots \ \tau_n^T]^T$ に関し次式が成立する。

$$\tau = J^T f \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

$$J = \text{quasidiag}(J_1 \ J_2 \ \dots \ J_n)$$

$$J_i = \frac{\partial X_{fi}}{\partial \theta_i} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

であり、 ∂X_{fi} は第 i 指の関節の微小変位 $\partial \theta_i$ に対する指先接触点の微小変位を、 J_i は接触点に関する Joint Jacobian マトリックスを表す。式(1)および(2)が対象物を把握しているときに成立する基礎式である。第 i 指の最先端リンクの根元から接触点に至るまでのリンク長を l_{im_i} 、その他のリンク長をそれぞれ l_{ij} 、($j=1, 2, \dots, m_i-1$)と書くと、最先端のリンク長 l_{im_i} 、($i=1, 2, \dots, n$)が未知である。ここで、本章で考える未知対象物の把握問題における既知あるいは検出可能な物理量と未知な物理量を明確にしておく。

【既知物理量】

$$\theta = [\theta_1^T \ \theta_2^T \ \dots \ \theta_n^T]^T \in R^m : \text{関節角度}$$

図1 3本指ハンドによる対象物の把握

$\tau = [\tau_1^T \tau_2^T \cdots \tau_n^T]^T \in R^m$: 関節トルク

【未知物理量】

$l_{im_i} \ (i=1, 2, \cdots, n)$: 先端リンク長

$F_0 [f_0^T n_0^T]^T \in R^6$: 一般化外力

$f = [f_1^T f_2^T \cdots f_n^T]^T \in R^{3n}$: 指先力

$W = W(l_{1m_1}, l_{2m_2}, \cdots, l_{3mn}) \in R^{6 \times 3n}$

: 把握マトリックス

$J = J(l_{1m_1}, l_{2m_2}, \cdots, l_{3mn}) \in R^{3n \times m}$

: Joint Jacobian マトリックス

ここで, W および J はリンク長 l_{im_i} , $(i=1, 2, \cdots, n)$ によって決定される従属変数である。初期静的把握状態において成立するのは式(1)および(2)のみである。

《未知変数が $4n+6$ に対し方程式は $m+6$ であるので,

$$4n \leq m \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

のときのみ式(1), (2)により上記未知物理量を決定できる。》

このように, 釣合方程式(1), (2)のみによって未知把握パラメータを決定するためには式(3)に示すような冗長度を有するハンド構造が必要となる。三次元空間において把握・操りが可能なハンドの最小構成は $n=3$, $m=9$ (各指3関節)であるが, このときには式(1), (2)のみでは未知物理量を決定できない。

3.2 冗長センサによる未知物理量同定の可能性

式(1), (2)のみによって未知把握パラメータを決定するためには式(3)の条件を満足する構造のハンドが必要であり, n_s , $(n_s=2, 3)$ 次元空間においては $m \geq (n_s+1)n$ となる。このとき m 個の関節すべてがアクチュエータをもつ能動関節である必要はなく, トルクを検出できるだけの非能動関節で十分である。把握・操りが可能な最小構成のハンドの場合には, 最小3個

の冗長なセンサを有する非能動関節をもてばよい。ここで, 能動関節および非能動関節の総数をそれぞれ m_a および m_s で表すこととする。

第 i 指が m_{ai} 個の能動関節と m_{si} 個の非能動関節で構成されるとき式(2)より,

$$\tau_i = J_i(l_{im_i})^T f_i \quad (i=1, 2, \cdots, n) \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

である。式(4)における未知物理量は l_{im_i} と f_i である。式(4)より明らかなように, $m_{si} \geq 1$ のときには式(4)のみによって未知物理量 l_{im_i} と f_i を決定できる。ただし, $m_{si} > 1$ のときには式(4)において式の数未知変数よりも多くなるので, 式(1)および(4)のみからすべての未知物理量を一意に決定できない。したがって, 《把握・操りが可能な最小構成のハンドに非能動関節を付加したとき,

$$(n_s+1)n \leq m_a + m_s$$

$$m_{ai} = n_s$$

$$m_{ai} + m_{si} = n_s + 1 \quad (i=1, 2, 3) \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

のときのみ式(1), (4)により上記未知物理量を一意に決定できる。この条件下では, l_{im_i} , f_i は式(4)のみによって決定できる。》

なお, J^T の関数形は指構造に依存しているので, 式(4)を l_{im_i} , $(i=1, 2, \cdots, n)$ に関して解くためには指構造を特定する必要がある。

4. 二次元2本指ハンド

3章までの議論は二次元平面においても同様に成立する。本章では理論を具体的に示す。図2に示すような関節配置を有する2本指6自由度ハンドを例として考察する。これは, 二次元平面において把握・操りが可能な最小構成に二つの非能動関節を付加したものである。なお, 解析の簡単化のため, 図2に示すように各指の第1関節に固定したローカル座標系 Σ_{hi} , $(i=1, 2)$

図2 二次元2本指ハンドによる対象物の把握

を導入し、この座標系で表した物理量には $\sim$ を付すものとする。 Σ_{hi} で表した物理量により式(4)を二次元の場合に書き改めると、

$$\tau = \tilde{J}^T \tilde{f} \dots\dots\dots (6)$$

$$\tilde{J}^T = \text{diag}(\tilde{J}_1^T, \tilde{J}_2^T)$$

となる。また、図2に示す指構造の場合、

$$\tilde{J}_1^T = \begin{bmatrix} a_{i1} + b_{i1} + l_{imi} & a_{i2} + b_{i2} l_{imi} \\ a_{i1} + b_{i1} l_{imi} & a_{i3} + b_{i2} l_{imi} \\ b_{i1} l_{imi} & b_{i2} l_{imi} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$$a_{i1} = -l_{i2} \sin \theta_{i2}, \quad a_{i2} = l_{i1} + l_{i2} \cos \theta_{i2}$$

$$a_{i3} = l_{i2} \cos \theta_{i2},$$

$$b_{i1} = -\sin(\theta_{i2} + \theta_{i3}), \quad b_{i2} = \cos(\theta_{i2} + \theta_{i3})$$

である。式(7)から明らかなように、式(6)は非線形方程式である。式(6)の次のよう変形できる。

$$\begin{bmatrix} \tau_{i1} - \tau_{i3} \\ \tau_{i2} - \tau_{i3} \\ \tau_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} \\ a_{i1} & a_{i3} \\ b_{i1} l_{imi} & b_{i2} l_{imi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{f}_{i1} \\ \tilde{f}_{i2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

式(8)において未知物理量は l_{i3} , $\tilde{f}_{i1}$ および $\tilde{f}_{i2}$ なので、式(8)の第1, 2式より

$$\begin{bmatrix} \tilde{f}_{i1} \\ \tilde{f}_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} \\ a_{i1} & a_{i3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tau_{i1} - \tau_{i3} \\ \tau_{i2} - \tau_{i3} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

また第3式より、

$$l_{imi} = \tau_{i3} / (b_{i1} + \tilde{f}_{i1} + b_{i2} \tilde{f}_{i2}) \dots\dots\dots (10)$$

を得る。このように、二次元2本指ハンドの場合には最先端リンクにおける接触点位置および指先力の未知物理量は線形方程式の解として一意に決定できる。

5. 三次元3本指ハンド

ここでは把握・操作が可能な最小構成である図3に示す関節配置を有する3本指12自由度ハンドを例として考える。各指は三つの能動関節と一つの非能動関

節の関節配置を表し、自由度は4である。二次元の場合と同様に、 Σ_{hi} で表した物理量により式(4)を書き改める。

$$\tau = \tilde{J}^T \tilde{f} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、

$$A = [A_1 \ A_2 \ A_3]$$

$$\tilde{J}^T = \text{diag}(\tilde{J}_1^T, \tilde{J}_2^T, \tilde{J}_3^T)$$

である。また、図3に示す指構造の場合

$$\tilde{J}_1^T = \begin{bmatrix} a_{i1} + b_{i1} l_{imi} & a_{i2} + b_{i2} l_{imi} & 0 \\ a_{i3} + b_{i1} l_{imi} & a_{i4} b_{i2} l_{imi} & 0 \\ a_{i5} + b_{i3} l_{imi} & a_{i6} b_{i4} l_{imi} & a_{i7} + b_{i7} l_{imi} \\ b_{i3} l_{imi} & b_{i4} l_{imi} & b_{i5} l_{imi} \end{bmatrix},$$

$$i = 1, 2, 3 \dots\dots\dots (12)$$

ここで、

$$a_{i1} = -(l_{i2} + l_{i3} \cos \theta_{i3}) \sin \theta_{i2}$$

$$a_{i2} = l_{i1} + (l_{i2} + l_{i3} \cos \theta_{i3}) \cos \theta_{i2}$$

$$a_{i3} = -(l_{i2} + l_{i3} \cos \theta_{i3}) \sin \theta_{i2}$$

$$a_{i4} = (l_{i2} + l_{i3} \cos \theta_{i3}) \cos \theta_{i2},$$

$$a_{i5} = -l_{i3} \sin \theta_{i3} \cos \theta_{i2},$$

$$a_{i6} = l_{i3} \sin \theta_{i3} \sin \theta_{i2},$$

$$a_{i7} = l_{i3} \cos \theta_{i3},$$

$$b_{i1} = -\cos(\theta_{i3} + \theta_{i4}) \sin \theta_{i2},$$

$$b_{i2} = \cos(\theta_{i3} + \theta_{i4}) \cos \theta_{i2},$$

$$b_{i3} = -\sin(\theta_{i3} + \theta_{i4}) \cos \theta_{i2},$$

$$b_{i4} = -\sin(\theta_{i3} + \theta_{i4}) \sin \theta_{i2},$$

$$b_{i5} = \cos(\theta_{i3} + \theta_{i4})$$

である。式(12)から明らかなように、式(11)は非線形方程式である。式(11)は次のよう変形できる。

$$\begin{bmatrix} \tau_{i1} - \tau_{i2} \\ \tau_{i2} \\ \tau_{i3} - \tau_{i4} \\ \tau_{i4} \end{bmatrix} =$$

図3 三次元3本指ハンドによる対象物の把握

$$\begin{bmatrix} 0 & l_{i1} & 0 \\ a_{i3}+b_{i1}l_{imi} & a_{i4}+b_{i2}l_{imi} & 0 \\ a_{i5} & a_{i6} & a_{i7} \\ b_{i3}l_{imi} & b_{i4}l_{imi} & b_{i5}l_{imi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{f}_{i1} \\ \hat{f}_{i2} \\ \hat{f}_{i3} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式(13)の第1, 2式より,

$$\begin{aligned} \hat{f}_{i1}(a_{i3}+b_{i1}l_{imi}) = \\ -(a_{i4}+b_{i2}l_{imi})(\tau_{i1}-\tau_{i2})/l_{i1}+\tau_{i2} \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

を得る。また第3, 4式より,

$$\begin{aligned} \hat{f}_{i1} \\ = \{ \tau_{i4}/l_{imi} + (b_{i4}-a_{i6}b_{i5}/a_{i7})(\tau_{i1}-\tau_{i2})/l_{imi} \\ + (b_{i5}/a_{i7})(\tau_{i3}-\tau_{i4}) \} / (b_{i3}+a_{i5}b_{i5}/a_{i7}) \quad \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

を得る。式(14), (15)より $\hat{f}_{i1}$ を消去すると結局, l_{imi} に関する2次方程式が得られる。

$$c_{i1}l_{imi}^2 + c_{i2}l_{imi} + c_{i3} = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

ただし,

$$\begin{aligned} c_{i1} &= b_{i1} \{ (b_{i4}-a_{i6}b_{i5}/a_{i7})(\tau_{i1}-\tau_{i2})/l_{i1} \\ &\quad + (b_{i5}/a_{i7})(\tau_{i3}-\tau_{i4}) \} / (b_{i3}+a_{i5}b_{i5}/a_{i7}) \\ c_{i2} &= a_{i3} \{ (b_{i4}-a_{i6}b_{i5}/a_{i7})(\tau_{i1}-\tau_{i2})/l_{i1} \\ &\quad + (b_{i5}/a_{i7})(\tau_{i3}-\tau_{i4}) \} / (b_{i3}+a_{i5}b_{i5}/a_{i7}) \\ &\quad + b_{i2}l_{i4}(\tau_{i1}-\tau_{i2})/l_{i1} \\ c_{i3} &= a_{i3}\tau_{i4} + a_{i4}(\tau_{i1}-\tau_{i2})/l_{i1} - \tau_{i2} \end{aligned}$$

式(16)において, c_{i1} , c_{i2} および c_{i3} は計測値より計算できるので, 式(16)より未知物理量 l_{imi} を求めることができる。

6. 結 言

本論文では未知対象物の把握を取扱い, トルク検出が可能な仮想的な関節(非能動関節)を付加することに

より接点位置などの未知パラメータを同定する方法について考察した。その結果, 非能動関節に関し未知パラメータ同定が可能となる条件を明らかにした。二次元問題において同定可能な場合, 線形の連立方程式を解く問題に帰着できることを示した。三次元問題においては, 2次方程式を解く問題に帰着できることを示した。本論文の方法は従来の触覚センサ等を用いる方法に比べ, ①センサを簡単化できる, ②冗長なセンサ情報を含まないで未知物理量を比較的少ない演算量で一意に決定できるという特徴がある。

文 献

- (1) 三村・ほか2名, 3本指多関節ハンドによる把持作業, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91, (1991), 251.
- (2) 三村, 多関節型ロボットハンドの制御技術, センサ技術, 11-12 (1991), 22.
- (3) Fearing, R. S., Simplified Grasping and Manipulation with Compliance and Sliding, *IEEE Trans. Robotics and Aut.*, 2-4 (1986), 188.
- (4) Kao, I. and Cutkosky, M. R., Dextrous Manipulation with Compliance and Sliding, *1990 IEEE Int. Conf. Robotics and Aut.*, (1990), 359.
- (5) Dario, P. and Buttazzo, G., Anthropomorphic Robot Finger for Investigating Artificial Tactile Perception, *Int. J. Robotics Research*, 6-3 (1987), 25.
- (6) Brock, D. L., and Chiu, S., Environment Perception of an Articulated Robot Hand Using Contact Sensors, *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Aut.*, (1987), 89.
- (7) Montana, D. J., The Kinematics of Contact and Grasp, *Int. J. Robotics Research*, 7-3 (1988), 17.
- (8) 金子・谷江, 自己姿勢変形性を利用した多指ロボットハンドと未知対象物との接触点検出, 日本ロボット学会誌, 8-6 (1990), 652.
- (9) 三村・舟橋, 二次元平面内における2本指ロボットハンドの把握パラメータ同定, 機論, 58-554, C (1992), 3043.