

指先の滑りに基づく内力の焦点の移動による 未知物体の把持の達成

Grasping Unknown Object by Shifting the Focus of Internal Force Based on Fingertip Slip Information

大野 和俊 (阪大) 准 細田 耕 (阪大)
正 浅田 稔 (阪大)

Kazutoshi OHNO, Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka
Koh HOSODA, Osaka University
Minoru ASADA, Osaka University

This paper describes grasping an unknown object by shifting the focus of internal force based on slip information. If a fingertip force doesn't satisfy friction condition on contact point, the fingertip will slip. This slip information is used to shift the focus of internal force. Three-fingered hand attempts to grasp the unknown object again with new internal force. Repeating this procedure, all fingertips stick on contact points and the unknown object is grasped. Simulation and experimental results show the effectiveness of the proposed method.
Key Words : grasp, slip information, unknown object, three-fingered hand, robot hand

1 はじめに

多指ハンドによって物体を把持する場合、対象物上での指先位置や各指先の発生する力を把持が成立するように計画する必要がある。

従来の研究は、対象物の形状を既知として把持の計画問題を扱っているものが多い¹⁾²⁾。未知物体を把持する場合には、内力や把持位置の計画に必要な物体の形状の情報をカメラなどによる観測により獲得する必要がある³⁾。しかし、この場合、カメラからハンドへの情報の変換誤差やカメラの観測誤差による問題があり、また、カメラでは指先と物体間の静止摩擦係数は観測できない。

本報告では、未知物体の把持計画を従来研究のようにカメラからの情報を用いて行うのではなく、ハンドにより実際に把持を試み、各接触点での指先の滑り情報を利用しオンラインで行う。以下では内力の焦点を用いた把持可能な指先力の表現方法について述べ、これを利用した把持計画と強化学習によりその計画のための戦略を獲得する方法を提案する。そして、シミュレーションと実験により、提案する手法により未知物体の把持が達成されることを示す。

2 指先の滑りに基づく内力の焦点の移動

2.1 指先の発生する力と指先の滑りの関係

形状が未知の物体を把持するために把持を試みた時に発生する指先の滑りに注目する。指先の発生している力 f が摩擦条件を満たしていないときに指先に m の滑りが発生したとする (Fig.1(a))。このとき f を

$$f = f - K_m m \quad (K_m > 0) \quad (1)$$

と変更すれば、 f は摩擦条件を満たすようになり指先は滑らなくなる (Fig.1(b))。

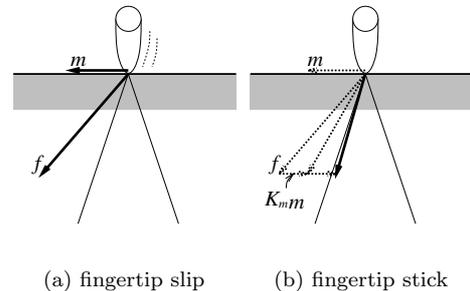


Fig.1 fingertip force and slip

3本指ハンドによる物体把持の場合、各指先の滑りの情報に基づき各指先の発生する力を変化させれば、全ての指が滑らなくなり把持が達成される。しかし、各指先の発生する力は任意に変化できるのではなく、それらが内力になるように変化させなければならない。そこで各指先の発生する力を内力として変化させやすくするために、吉川らによって提案された内力の表現方法を参考にする。⁴⁾

2.2 内力の表現方法

3本指ハンドにより物体を把持する場合を考える。この場合内力の自由度は3自由度になり、各一對の指先間での圧縮または引っ張り力の3自由度で表現される。また、このように表現される内力の性質として、1) 内力 $[f_1^T \ f_2^T \ f_3^T]^T$ は指先と物体の接触位置 r_1, r_2, r_3 を通る把持平面上に存在し、2) その作用線が1点 P (内力の焦点と呼ばれる) で交わり、また三つの f_i が閉じた三角形を構成する (Fig.2)。このとき内力の3自由度の任意性は、内力の焦点 P の把持平面上での位置の2自由度と f_i で構成する三角形の大きさの1自由度と解釈できる。性質2) と内力の

焦点位置から内力 $[f_1^T \ f_2^T \ f_3^T]^T$ の比が決まる．三角形の大きさは外力または物体操作のための力に対する把持の安定性に影響するが，ここでは把持のみを対象とするので， f_i の最大値をある一定値にすることによって大きさを決定する．

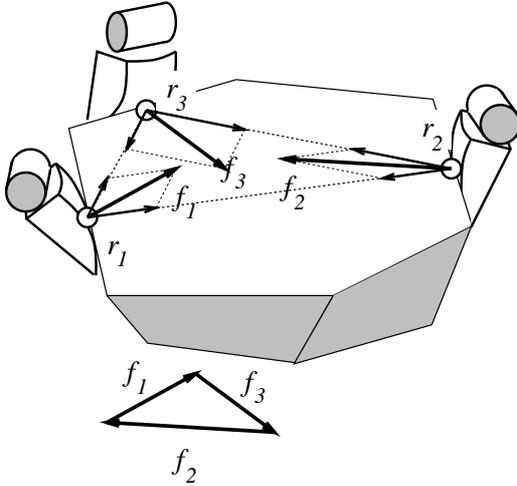


Fig.2 Representation of internal force

2.3 指先の滑りに基づく内力の焦点の移動による把持の達成

各指先の発生する力を内力として変化させることは内力の焦点を移動させることと対応するので，以下のような手順で摩擦条件を満たす内力を探索し，把持を達成させる．

まず内力の焦点を初期位置にとる．これにより初期の目標内力が決定される．決定された内力で物体の把持を試みる．そして，各指先で滑りが発生したかどうかにより，把持が達成されたか失敗したかが決まる．把持を失敗したとき指先の滑りに基づき内力の焦点を移動させ，新しい内力の焦点の位置が決まる．新しい内力の焦点が決まればこれにより新しい目標内力が決定され再び把持を試みる．以下これを把持が達成されるまで繰り返す (Fig.3)．

したがって把持を達成するには各指先の滑りに基づきいかに内力の焦点を移動させるかが重要である．3本指の各指先での滑りと内力の焦点の移動の関係を定式化することは困難である．そこでその関係を獲得するために反射的かつ適応的な行動を獲得できるとして近年注目されている強化学習を適用する．

3 強化学習による指先の滑りに基づく内力の焦点の移動方針の獲得

3.1 強化学習の基本的枠組

ロボットは環境の状態を表す集合 S を識別可能で，環境に対して行動集合 A の中の一つの行動をとることができる．ロボットはセンサにより環境から現在の状態 s を検出し，行動 a を選択する．その状態と行動に基づいて，環境は次状態 s' に遷移し，ロボットへのフィードバックとしての報酬 r を生成する．このような相互作用を通して，ロボットは与えられた目的を達成する行動を学習する (Fig.4)．

3.2 Q 学習

強化学習の代表的手法の一つとして Q 学習がある．Q 学習では，状態 $s \in S$ において行動 $a \in A$ を実行し，次状態 s' に遷移した時，行動価値関数値 $Q(s, a)$ を以下のように更新する．

$$Q(s, a) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s, a) + \alpha(r(s, a) + \gamma \max_{a' \in A} Q(s', a')) \quad (2)$$

ここで， α は学習率， γ は減衰係数である．また， $r(s, a)$ は報酬であるが局所解に陥らないようにゴール状態に対して 1，それ以外は 0 とする場合が多い．

Q 値が与えられると，各状態 s に対して $Q(s, a)$ が最大となる行動 a を選ぶことにより政策が定義される．

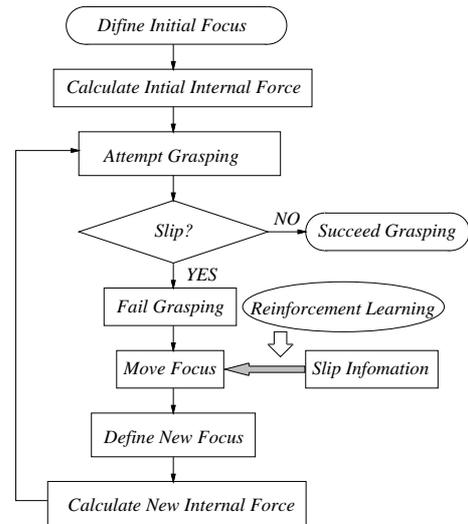


Fig.3 Flow chart

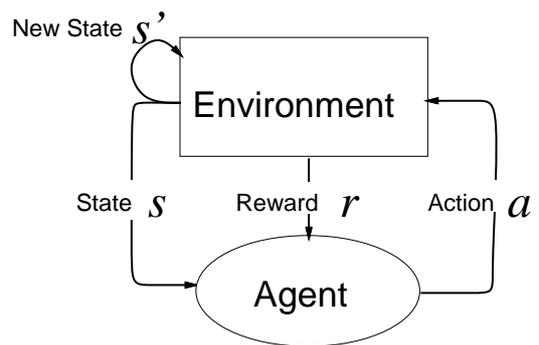


Fig.4 The basic model of robot-environment interaction

3.3 状態空間の構成

指先が左に滑った，右に滑った，物体から離れた．動かないの 4 通りとし，合わせて $4^3 = 64$ 通りを学習の状態とする (Fig.5)．

3.4 行動空間の構成

第 1 指から第 2, 3 指に向かうベクトルそれぞれ r_{12}, r_{13} とし把持平面における内力の焦点位置 r_p を

$$r_p = a_{12}r_{12} + a_{13}r_{13} \quad (3)$$

と表す．行動はこの焦点位置の移動方向とし， $a_{12}(k+1) = a_{12}(k) + \text{sgn}_{a_{12}}\Delta a_{12}$ ， $a_{13}(k+1) = a_{13}(k) + \text{sgn}_{a_{13}}\Delta a_{13}$ としたときの $\text{sgn}_{a_{12}}$ と $\text{sgn}_{a_{13}}$ がとる $-$ or 0 or $+$ とする．しかし，2ステップで行けるところ ($\text{sgn}_{a_{12}} = \text{sgn}_{a_{13}} = +$ ， $\text{sgn}_{a_{12}} = \text{sgn}_{a_{13}} = -$) と，静止状態 ($\text{sgn}_{a_{12}} = \text{sgn}_{a_{13}} = 0$) は除くので6通りとなる．焦点は把持平面上に作られた格子点を移動することになる．(Fig.5)．

3.5 ゴール

ゴール状態は全ての指先が滑らなくなり，把持が達成された状態とする．

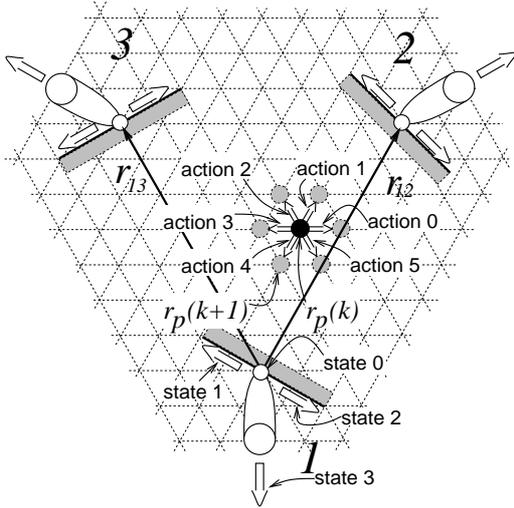
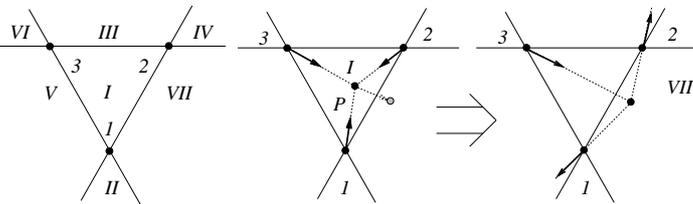


Fig.5 Action and State

3.6 内力の焦点の存在領域による学習の分割

提案する手法では，指先の滑りに基づき内力を変更するのではなく，内力の焦点位置を変更する．このため，把持平面を Fig.6(a) に示すよう2組の接触点を通る直線により7つの領域に分割する⁴⁾と，焦点がある領域から別の領域に移動するとき，指先の発生する力の向きが大きく変化する (Fig.6(b))．これにより指先の滑りの状態も大きく変化するため，把持平面全域に対して一様な学習は困難である．そこで，各領域毎に学習を適用し，各領域内に焦点があるときの指先の滑りと内力の焦点の移動の関係を獲得させる．



(a) Seven regions

(b) Discontinuity of fingertip force

Fig.6 Grasp plane

4 シミュレーション

ここで提案した手法によるシミュレーション結果を示す (Fig.7)．学習により獲得された指先の滑りと内力の焦

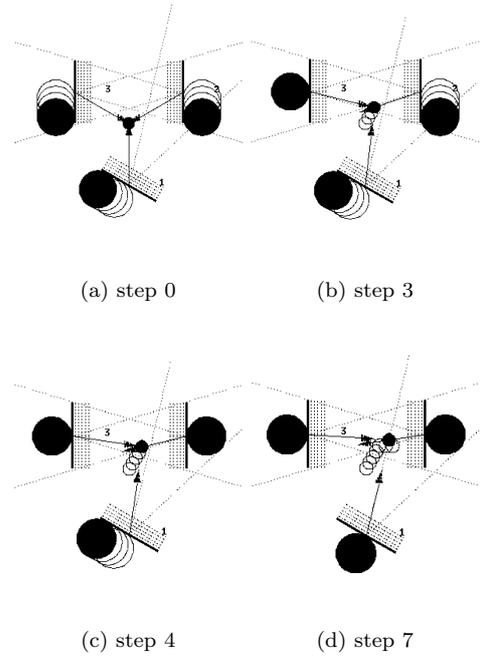


Fig.7 Simulation result

点の移動の関係を用いて内力の焦点を移動させる．初期の焦点位置では全ての指先が滑っているが，内力の焦点の移動により全ての指先が滑らなくなり把持が達成されたことがわかる．

5 実験

実験装置の概要を Fig.8 に示す．実験で用いた3本指ハンドは指のリンクに取り付けられた歪みゲージから指先で発生している力を，また関節に取り付けられたポテンシオメータから関節角度を観測できる．しかし指先での滑りを観測できるセンサがないため，関節角度から指先の動きを求め，それを指先の滑りとした．そして，指先の動きを指先での滑りとするために物体は固定して実験を行った．

各指先が初めて物体と接触位置を把持位置として把持を試みる．8秒間物体に力を加えたのち指先の滑りを調べる．指先が滑っていた場合，把持位置に指先を戻し新しい目標内力で物体に力を加える．この手順を全ての指先が滑らなくなるまで繰り返す．ここでの内力の変更は，計算機上で獲得した学習結果を利用し，指先の滑りの状態から内力の焦点を移動させることにより行われる．内力の焦点が存在する領域はあらかじめ与えて実験を行う．

Fig.9 に今回実験に用いた物体を示す．

計算機上で学習を行った後，その結果を用いて Object 1 を把持しようとしたときの把持位置と内力の焦点の動きを Fig.10 に示す．図中の S が焦点の初期位置， G が最終位置である．また，Table 1 に各指先の滑りの状態とその状態から選択される内力の焦点を移動させる行動を示す．また Object 2 に対して行った実験の結果を同様に Fig.11，Table 2 に示す．このとき Object 1 の焦点の存在領域は I ，Object 2 は III として与えた．

Table 1 に示すように trial 1~8 のときには滑っている指先があるが，内力の焦点を移動した結果，trial 9 で全ての指が滑らない状態になり，把持を達成する内力が発生された．Table 2 も同様に trial 6 で全ての指が滑らない状態になっている．

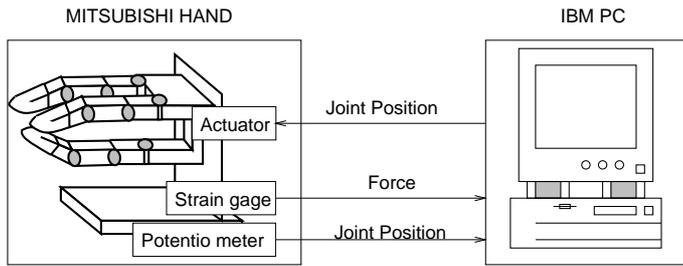
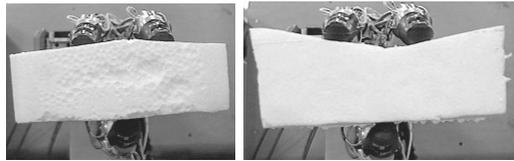


Fig.8 A robot hand control system



(a) Object 1

(b) Object 2

Fig.9 Grasped Objects

6 おわりに

未知物体を把持するために、指先の滑りに基づいて内力の焦点を移動し把持を達成する把持計画を提案し、シミュレーションと実験によりその有効性を示した。今後の課題は内力の焦点の存在領域毎に分割して行った学習結果を統合し、内力の焦点の存在領域をあらかじめ与えることなく未知物体の把持を達成させることが考えられる。

参考文献

- [1] Xanthippi Markenscoff and Christos H. Papadimitriou. Optimum Grip of a Polygon. *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 8, No. 2, pp. 17-29, 1989.
- [2] Young C. Park and Gregory P. Starr. Grasp Synthesis oh Polygonal Objects Using Three-Fingered Robot Hand. *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 163-184, 1992.
- [3] Aage Bendiksen and Greg Hager. A Vision-Based Grasping System for Unfamiliar Planar Objects. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2844-2849, 1994.
- [4] Tsuneo Yoshikawa and Kiyoshi Nagai. Manipulating and Grasping forces in Manipulation by Multifingered Robot Hand. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 1, pp. 67-77, 1991.

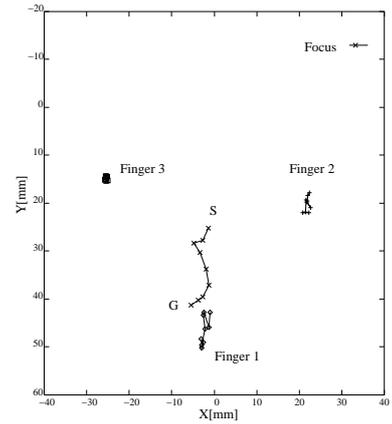


Fig.10 Movement of Focus for Object 1

Table 1 State and Action for Object 1

trial	Finger State			action
	1	2	3	
1	2	2	1	4
2	2	2	1	4
3	0	2	1	5
4	0	2	1	5
5	0	2	1	5
6	2	0	0	4
7	2	0	0	4
8	2	0	0	4
9	0	0	0	

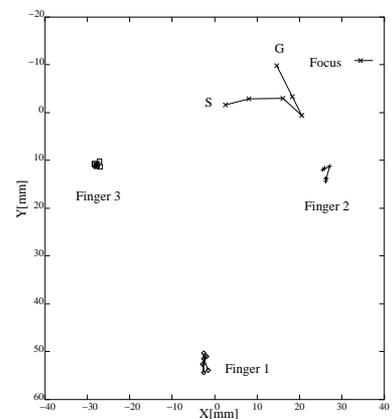


Fig.11 Movement of Focus for Object 2

Table 2 State and Action for Object 2

trial	Finger State			action
	1	2	3	
1	0	1	2	1
2	1	0	2	0
3	1	0	2	0
4	0	0	2	2
5	0	0	2	2
6	0	0	0	