コインマジックを実現する自律型ロボットハンドの研究

Study of an Autonomous Robot Hand Realizing Coin Magic

○学 山崎 哲也 (法政大院) 高島 俊 (法政大)

Tetsuya YAMASAKI, Hosei University
Suguru TAKASHIMA, Hosei University

Magic is a performance unique to humans that makes use of hand's skills to its maximum extent. It needs enormous efforts to acquire the skills of magic for a skillful man. In this study, a robot hand that can handle a small object in the palm and perform coin magic making full use of its palm and fingers. It is said that the coin magic is one of the most difficult kinds of magic. Therefore, we expect that a robot that can do coin magic may be able to do any magic successfully. In this paper, a mechanism of the robot hand is studied and the control methods of handling coins for the magic is discussed. The robot is assumed to use a Japanese 500 yen coin during the performance and it is assumed that the robot controls the hand by using only the information from the palm sensors. It is the problem how to design the skilful hand, how to construct a control algorithm, and what sensors should be used to sense the state variables of the coin.

Key Word: Robot Hand, Magic, Coin, Manipulation

1. 緒 言

マジックは、手先の器用さを最大限に利用した人間独自の技術であり、その技術の習得には、人間でも多大な努力を必要とする。本研究では、もっとも技量が必要とされるコインマジックを基にし、小さな対象物を掌中で操作するロボットハンドを開発する。それが実現出来れば多くのマジックを行うことが出来る。本稿では、マジックを行うためのコインの操作方法とロボットハンドの機構について述べる。ロボットハンドは500円硬貨の使用し、掌上のセンサからのみの情報を元にコインマジックを行う。

2. マジックについて

本研究で扱うコインマジックは、一般に市販されている本に記載されているマジックであり、プロが演じるマジックと必ずしも同一のものではない。本研究では、あくまでも一般の人が得られるマジックの技術のみに絞って研究している。

2.1 コインマジック

コインマジックは、数種類の技法で構成されている。それらを単体で、もしくは織り交ぜることで、華麗なマジックを披露できる。これら技法は、コインのみならずボール、布など他の道具でも転用される。

2.2 コインマジックの基本技法

コインマジックの基本は、パーム、コインバニッシュ、フレイッシュ、その他の技法と大きく分けて4つに分類される。その構成を図1に示す。マジシャンはこれらを組み合わせ、もしくは創造し、独自のマジックを披露する。コインバニッシュは、両手だけを主として使用し、コインを消失させる代表的な方法である。そしてコインバニッシュを含め、コインマジックを構成する技法の全ての基本となるのが、パームという技法である。

パームは本来「掌」という名詞だが、マジックでは、「掌に物を隠し持つこと」という意味で使われる。中でも、コインバニッシュの基本技の多くを演技することが可能な代表

的なパームとして、クラシックパーム、フィンガーパーム、サムパームなどがある。例としてサムパームとクラシックパームを図2に示す。

Fig.1 Configuration diagram of Coin Magic

Fig.2 The Thumb Palm(left) and The Classic Palm(right)

両手を使用するコインバニッシュの実現が可能になれば、それを応用して、様々なコインマジックの演技が可能になる。そこで、コインのバニッシュの基本となり、その重要性和応用性から、本研究ではまず一つのコイン、アーム、ハンドでのパームの再現を目指す。パームの基本となるクラシックパーム、フィンガーパーム、サムパームを基準とし、その他パームの再現も視野に入れる。

3. 操作作業の記述

パームの把握状態を明確にし、操作作業を分類すること

でロボットハンドの設計条件の指針にする。把握の記述法は、多く提案されているが、本研究では、齋藤ら[3]によって提案された物体操作作業の記述法を用い、コインマジック用に応用した把握面を用いて表す。齋藤ら[3]は、把握や操作が接触している面の作用によって成り立っている点に着目して、それらの面に仮定する機能のつりあい関係によって把握を抽象化し、体系的に記述する方法を導入している。この場合、把握(grasping)の定義を、“ハンドと物体の接触によって物体をその状態空間における目標領域に拘束すること”，とした上で、把握を評価する。この把握状態の記述は、一意に解釈できない場合もある。しかし、これはハンドの設計者が作業目的や適用可能な機構に基づいた、設計者自身の意図的な判断に委ねられる。本稿では、一意に解釈できない把握は、考えられる把握状態すべてを記述している。

3.1 GSD における把握の定義

先に述べた GSD による把握の定義は、一般的な把握の概念よりも広い範囲を含んでいる。すなわち、この定義ではハンドと物体との間に何らかの接触があり、それが物体を目標状態に拘束するのに貢献しているのであれば把握と考えるとよいことになる。

3.2 把握面 s とその記述法

把握面の条件

- ある時点で実際に接触していないハンドの部位でも作業上接触の可能性がある
- すでに接触している部分と連動して同じ機能を行うと考えられる場合

ハンドの部位は本研究では、図3で示した基本部位を用いる。

Fig.3 Primitive regions of a human hand

Virtual Fingers 仮想指とは、Arbib ら[4]が提案した概念である。これは同じ向きの力を発生する実際の指の一つの実体として扱う考え方であり、人の手による把握を解釈しやすくしている。

3.3 把握面の基本機能

把握面は三つの基本機能、支え、押え、巻き付きのいずれかを行なっていると仮定する。これを把握面機能の仮定という。

- 支え機能 (supporting function)
ある把握面が被把持物体から受け支える機能、すなわち被把持物体から受ける力に応じて受動的に力を発生する機能。把握面 s が支え要素であることを $S(s)$ と表す。
- 押え機能 (pressing function)
ある把握面が被把持物体に対して能動的に押さえ力を発生する機能を押え機能。把握面 s が押え要素であることを $P(s)$ と表す。
- 巻き付き機能 (wrapping function)
ある把握面が能動的に変形しながら被把持物体に対して巻きつこうとする力を発生する機能を巻き付き機能。把握面

s が巻き付き要素であることを $W(s)$ と表す。

三種類のうち、能動的に力を発生する押え機能と巻き付き機能を力要素と呼ぶ。

3.4 基礎把握モデル G_{nml} の定義

基礎的な把握状態 (prime grasp) を、それ以上分解すると解釈が不適切になるという単位と捉え、前節で述べた把握面の基本機能を考えたとき、それらの機能の釣り合いで表現できる。

把握を構成する押さえ把握面の数を n 、巻き付き把握面の数を m 、支え把握面の数を l とし、基礎把握状態を G_{nml} と表す。

各把握面機能について、押え把握を P 、巻き付き機能を W 、支え機能を S とし、相互作用し合っている把握面機能は・(ドット) を挟んで連記する。

基礎把握面 G_{nml} は力要素の数 ($n+m$) に応じて展開できる。

3.5 一般的な把握状態 (Grasp) の定義

より一般的な把握状態は、次の二つの原理により基礎把握状態の組み合わせから構成することができると仮定する (これは「一般的把握構成の仮定」と称する)。

- 把握の組み合わせ
ある把握状態に陽に力を及ぼしあわない独立した把握を付け足しても把握は成り立つ。このとき二つの把握を/ (スラッシュ) によって示す。
- 把握状態の機能化
ある把握状態自体が、押え機能や支え機能を実現することで、押え把握面や支え把握面の代わりとして別の把握状態を構成することが出来る。

これらを式で表すと、一般的な把握 (Grasp) は次のように定義できる。

$$\langle \text{Grasp} \rangle = G_{nml} \mid n, m \geq 0, l = \{0, 1\}, n + m + l \geq 1$$

$$\langle \text{Grasp} \rangle = \langle \text{Grasp} \rangle / \langle \text{Grasp} \rangle$$

$$P = \{P(s), P(\langle \text{Grasp} \rangle)\}$$

$$S = \{S(s), S(\langle \text{Grasp} \rangle)\}$$

$$W = \{W(s)\}$$

ここで s は把握面を表す。

3.6 操作の分類 M_{VD}

ここでは物体操作 (object manipulation) を、“ハンドと物体の接触によって物体をその状態空間における目標領域の軌道に拘束すること。”と定義する。

操作中に把握面での接触状態が変化するかどうか、また操作の過程において対象物の動的運動状態が含まれるかどうかで分類する。操作 (manipulation) を表す記号 M に、把握一定 (invariable) の場合 i 、把握変更 (variable) のある場合 v 、また静的 (static) な場合 s 、動的 (dynamic) な場合 d という添字をつけて、それぞれの操作を Mis , Mid , Mvs , Mvd , というように区別する。また、把握変更操作の場合、接触条件を表す記号を把握面に付加して記述する。把握面 s が転がり接触している場合は $\tilde{s}$ 、すべり接触の並進成分がある場合は $\bar{s}$ 、すべり接触の回転成分がある場合は $\dot{s}$ という記号を用いる。これらの接触は同時に起こる場合は重ねて表記する。

3.7 一般的な操作作業 M_{VD} の定義

あらゆる一般的な物体操作作業は以下の二つの原理によって物体操作と非操作状態とを組み合わせで構成できるものと仮定する (これを「操作作業構成の仮定」と称する)。

- 連接性
物体操作あるいは非操作状態をシーケンシャルに連接させる。このとき連接を+によって表す。
- 並列性
同時に異なる操作を実行する。このとき並列せる操作を/によって表す。

ここで物体操作の接続は把握が瞬時に切り換わるか、ある程度オーバーラップしながら切り換わることを前提としている。もしそうでない場合には途中で非操作状態が存在することになる。非操作状態を介する場合、あるいは介して良い場合はそれを…+N, +…というように接続によって明記しておく必要がある。

以上を式で表すと、一般的な物体操作作業〈Task〉は次のように定義できる。

$$\langle \text{Task} \rangle = \{ G(\langle \text{Grasp} \rangle), M_{VD}(\langle \text{Grasp} \rangle), N_D | V = \{i, v\}, D = \{s, d\} \}$$

$$\langle \text{Task} \rangle = \langle \text{Task} \rangle + \langle \text{Task} \rangle$$

$$\langle \text{Task} \rangle = \langle \text{Task} \rangle / \langle \text{Task} \rangle$$

後は利用する把握〈Grasp〉を展開することで一般的な物体操作作業をGSDによって記述することが可能である。

4 パームの操作作業の記述

4.1 記述の条件

パームは様々な状態で行われるが、もっとも多い動作として、手首を基本的に、掌を下に向けた状態、もしくは、下向きに移行しながら行われる。これは、コインが観客から見えない状態で、任意のパームを行うためであり、掌を上に向けた上体では行われない。よって、パームを記述するにあたり、掌を下に向けた状態での記述を行った。また、演技によってコインを最初から掴んだ状態や、テーブルに置かれたコインを拾ってから始めるものがある。どちらも初期把握を共通とし、各パームに移行する場合の過程を図4に示す。

Fig.4 Shift process to each palm

図4中の①を共通の初期把握とし、それからクラシックパーム、フィンガーパームの初期把握②、サムパームの初期把握③へと移行する。

4.2 把握状態の記述

初期把握①, ②, ③のGSDを用い、それぞれ M_{is00} , M_{is02} , M_{is03} とし、次のように記述できる。

$$M_{is00}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is00}(P(T_{t_2}) \cdot S(X_{t_2})) \text{ or } M_{is00}(P(T_{t_2}) \cdot P(X_{t_2})) \quad (1)$$

$$M_{is02}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is02}(P(T_{t_2}) \cdot S(Y_{t_2})) \text{ or } M_{is02}(P(T_{t_2}) \cdot P(Y_{t_2})) \quad (2)$$

$$M_{is03}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is03}(P(T_{t_2}) \cdot S(I_{t_2})) \text{ or } M_{is03}(P(T_{t_2}) \cdot P(I_{t_2})) \quad (3)$$

また、各パームは、クラシックパーム、フィンガーパーム、サムパームをそれぞれ M_{isC} , M_{isF} , M_{isT} とし、次のように記述できる。

$$M_{isC}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{isC}(P(T_3) \cdot S(P)) \text{ or } M_{isC}(P(T_3) \cdot P(P)) \quad (4)$$

$$M_{isF}(G_{101}) = M_{isF}(P(Y_{2p}) \cdot S(Y_{4p}))$$

or

(5)

$$M_{isF}(G_{101} / G_{001}) = M_{isF}(P(Y_{2p}) \cdot S(Y_{4p}) / S(Y_{3p}))$$

$$M_{isT}(G_{101}) = M_{isT}(P(T_{li}) \cdot S(I_{5i})) \quad (6)$$

M_{is00} から M_{is02} , M_{is03} まで、各パームの初期把握から、パーム完了までをまとめた操作作業は次のように、記述でき、各GSDでの接触面をそれぞれ図示する。

・初期把握①→初期把握②

$$M_{is00} \rightarrow M_{is02}$$

Fig.5 Grasping surface of transition of initial grasp2

$$\langle \text{Palm_initial1_initial2} \rangle$$

$$= M_{is00}(G_{101} \text{ or } G_{200}) + M_{is1}(G_{101} \text{ or } G_{200}) + M_{is02}(G_{101} \text{ or } G_{200})$$

$$M_{is00}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is00}(P(T_{t_2}) \cdot S(X_{t_2})) \text{ or } M_{is00}(P(T_{t_2}) \cdot P(X_{t_2}))$$

$$M_{is1}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is1}(P(T_{t_2}) \cdot S(\bar{V}_{t_2})) \text{ or } M_{is1}(P(T_{t_2}) \cdot P(\bar{V}_{t_2}))$$

$$M_{is02}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is02}(P(T_{t_2}) \cdot S(Y_{t_2})) \text{ or } M_{is02}(P(T_{t_2}) \cdot P(Y_{t_2})) \quad (7)$$

・初期把握①→初期把握③

$$M_{is00} \rightarrow M_{is03}$$

Fig.6 Grasping surface of transition of initial grasp3

$$\langle \text{Palm_initial1_initial3} \rangle$$

$$= M_{is00}(G_{101} \text{ or } G_{200}) + M_{is2}(G_{101} \text{ or } G_{200}) + M_{is03}(G_{101} \text{ or } G_{200})$$

$$M_{is00}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is00}(P(T_{t_2}) \cdot S(X_{t_2})) \text{ or } M_{is00}(P(T_{t_2}) \cdot P(X_{t_2}))$$

$$M_{is2}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is2}(P(T_{t_2}) \cdot S(\bar{X}_{t_2})) \text{ or } M_{is2}(P(T_{t_2}) \cdot P(\bar{X}_{t_2}))$$

$$M_{is03}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is03}(P(T_{t_2}) \cdot S(I_{t_2})) \text{ or } M_{is03}(P(T_{t_2}) \cdot P(I_{t_2})) \quad (8)$$

・クラシックパーム

$$M_{is02} \rightarrow M_{isc}$$

Fig.7 Grasping surface of transition of Classic Palm
 $\langle \text{Classic_Palm_basic} \rangle$

$$= M_{is02}(G_{101} \text{ or } G_{200}) + M_{is3}(G_{001}) + M_{is4}(G_{101}) + M_{isc}(G_{101} \text{ or } G_{200})$$

$$M_{is02}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is02}(P(T_{i2}) \cdot S(Y_{i2})) \text{ or } M_{is02}(P(T_{i2}) \cdot P(Y_{i2}))$$

$$M_{is3}(G_{001}) = M_{is3}(S(Y_{i2}))$$

$$M_{is4}(G_{101}) = M_{is4}(P(Y_{i2}) \cdot S(P))$$

$$M_{isc}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{isc}(P(T_{i3}) \cdot S(P)) \text{ or } M_{isc}(P(T_{i3}) \cdot P(P)) \quad (9)$$

・フィンガーパーム

$$M_{is02} \rightarrow M_{isF}$$

Fig.8 Grasping surface of transition of Finger Palm

$$\langle \text{Finger_Palm_basic} \rangle$$

$$= M_{is02}(G_{101} \text{ or } G_{200}) + M_{vs1}(G_{101}) + M_{isF}(G_{101}) \text{ or } M_{isF}(G_{101} / G_{001})$$

$$M_{is02}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is02}(P(T_{i2}) \cdot S(Y_{i2})) \text{ or } M_{is02}(P(T_{i2}) \cdot P(Y_{i2}))$$

$$M_{vs1}(G_{101}) = M_{vs1}(P(T_{i2}) \cdot S(\bar{Y}_{ap}))$$

$$M_{isF}(G_{101}) = M_{isF}(P(Y_{2p}) \cdot S(Y_{4p}))$$

or

$$M_{isF}(G_{101} / G_{001}) = M_{isF}(P(Y_{2p}) \cdot S(Y_{4p}) / S(Y_{3p})) \quad (10)$$

・サムパーム

$$M_{is03} \rightarrow M_{isT}$$

Fig.9 Grasping surface of transition of Thumb Palm

$$\langle \text{Thum_Palm_basic} \rangle$$

$$= M_{is03}(G_{101} \text{ or } G_{200}) +$$

$$M_{is5}(G_{001}) + M_{is6}(G_{101}) + M_{vs2}(G_{101}) + M_{isT}(G_{101})$$

$$M_{is03}(G_{101} \text{ or } G_{200}) = M_{is03}(P(T_{i2}) \cdot S(I_{i2})) \text{ or } M_{is02}(P(T_{i2}) \cdot P(I_{i2}))$$

$$M_{is5}(G_{001}) = M_{is5}(S(I_{i2}))$$

$$M_{is6}(G_{101}) = M_{is6}(P(I_{i2}) \cdot S(I_{5p}))$$

$$M_{vs2}(G_{101}) = M_{vs2}(P(T_{ii}) \cdot S(\bar{I}_{5i}))$$

$$M_{isT}(G_{101}) = M_{isT}(P(T_{ii}) \cdot S(I_{5i})) \quad (11)$$

各パームの操作作業から、基本的に静的把持の連続であることが分かる。だが、クラシックパームを除く操作作業には、すべり操作が含まれ、ハンドの各指の形状が、操作に大きく影響を与えると分かる。また、クラシックパームにおいては、母指球、小指球（把握面 T_3 と P ）だけで、コインを挟む特殊な把握であり場合、見た目に極端に不自然にならないか、自由度を含め実現には設計の工夫が必要である。

5. 結 言

マジックとして成り立たせるために、観客に何をしているのか分からせてはいけない。人は自分の物差しで考え、マジックに感動するので、人が持ち得ない機構を持ったロボットハンドを使用しては、コインマジックではなくただの作業である。これらコインマジックの実現に必要な条件を考慮し、次の条件を設定した。

- ・使用するコインは、500 円硬貨。
- ・ロボットハンドの自由度は、人間の同じか、それ以下。マジック用のギミックは設けない。
- ・コインの位置、姿勢は把握した状態では、掌上のセンサからのみとする。

次に、本研究でまず実現する動作、開発するロボットハンドに関して次のようにまとめる。

- ・一本のロボットハンドで、クラシック、フィンガー、サムパームを実現する。
- ・掌中のセンサからの情報のみで各パーム時の物体操作作業を実現する。
- ・クラシックパームの実現のために、掌の形状の工夫、人間同様、掌の弓上の変形も取り入れる。
- ・支え把握面と押え把握面の二つの解釈が出来た箇所は、支え把握面として、利用できるように機構を設計する。

今後は、設定した条件、記述した操作作業からロボットハンドの形状を導いていく。また、コインの位置、姿勢を制御するためのセンサの情報の処理方法も研究していく必要がある。

参考文献

- [1] コインマジック事典 高木重朗/二川滋夫 東京堂出版
- [2] 華麗に決める本格マジック, カズ・カタヤマ, ナツメ社
- [3] 齋藤, 永田, 把握操作の記述とロボットハンドの設計手法, (2001), 日本ロボット学会誌, vol.19, No.3, pp.333-344, 2001
- [4] M.A.Arbib, T.Iberall and D.Lyous: "Coordinated control programs for movements of the hand," A.W.Goodwin and I.Darian-Smith, editors, Hand Function and the Neocortex, pp.111-129, Berlin: Springer-Verlag, 1985.