



博士論文

グラスプレス・マニピュレーションの力学と計画

**Mechanics and Planning
of Graspless Manipulation**

前田 雄介

Yusuke MAEDA

概要

本論文では、ロボットによって物体を把持しないであやつる「グラスプレス・マニピュレーション (grasp-less manipulation)」について、力学解析および操作計画の問題を扱う。

マニピュレーション、すなわち物体をある位置からある位置まで運ぶことは、ロボットに作業をさせる上での最も基本的な要素の一つである。従来より、ロボットのマニピュレーションでは、物体をかたく把持した上であやつるピックアンドプレイス (pick-and-place) が主流であり、そのため把持の研究が精力的に行われてきた。しかし、1980 年代半ばより、把持によらないあやつり、すなわち単に物体を押す、転がすなどしてあやつる手法も研究されるようになった。これらは総称してグラスプレス・マニピュレーションと呼ばれる。ロボットに人間のような器用さを与えるためには、把持によるあやつりに加え、多様なグラスプレス・マニピュレーションを実行できるようにすることが必要不可欠であると言える。

しかし、これまでグラスプレス・マニピュレーションに関しては、押し操作 (pushing) のみ、転がし操作 (tumbling) のみ、などと対象を限定した上での研究がほとんどであり、これらを包括的に扱った研究は極めて少ない。ロボットが多様なグラスプレス・マニピュレーションを巧みに使いこなせるようにするためには、これらを統一的に扱うことのできる理論が必要である。

そこで、本論文では、グラスプレス・マニピュレーション全般を研究の対象とする。まず、グラスプレス・マニピュレーションにおける重要な基本問題として、以下の力学解析を行う。

- 操作の確実性の定量的評価

グラスプレス・マニピュレーションは、物体をかたく把持してあやつるわけではないため、一般的にピックアンドプレイスに比べると、外乱に対する操作の確実性は劣る。したがって、操作の確実性を定量的に評価する手法を新たに提案し、グラスプレス・マニピュレーションの計画・実行に役立てる。

- 過大な内力の発生可能性の判定

グラスプレス・マニピュレーションは、環境との接触を伴うため、その際に、対象物に過大な内力が発生してしまう恐れがある。そこで、この過大な内力の発生可能性を判定する手法を新たに提案し、グラスプレス・マニピュレーションの計画・実行に役立

てる。

また、応用的課題として、以下の問題に取り組む。

- ロボット指の制御モードの決定

さまざまなグラスプレス・マニピュレーションを実現するためには、状況によって位置制御と力制御を適切に使い分ける必要がある。操作の確実性の評価と過大な内力の発生可能性の判定手法を利用して、各ロボット指を位置制御すべきか、力制御すべきかを決定する手法を提案する。

- ロボット指によるグラスプレス・マニピュレーションの計画

グラスプレス・マニピュレーションでは、対象物を把持していないことにより、ロボットの動きと対象物の動きとの対応が自明ではない。そのため、一般的なグラスプレス・マニピュレーションの計画を実現するためには、障害物回避だけでなく力学解析が必要となり、通常のロボットの動作計画に比べて困難な問題となっている。ここでは上述のロボット指の制御モードの決定法をベースに、押し操作、転がし操作などさまざまなグラスプレス・マニピュレーションの計画を行うためのアルゴリズムを提案する。

以上の課題を解決することにより、本論文では、ロボットにより多様なグラスプレス・マニピュレーションを実現するための、理論的基礎を確立することを目指す。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	2
1.2	従来研究	6
1.3	研究の目的	11
1.4	本論文の構成	13
第 2 章	ガラスプレス・マニピュレーションの概要と力学モデル	15
2.1	はじめに	16
2.2	ガラスプレス・マニピュレーションの概要	17
2.3	ガラスプレス・マニピュレーションの力学モデル	27
2.4	おわりに	38
第 3 章	ガラスプレス・マニピュレーションにおける操作の確実性	39
3.1	はじめに	40
3.2	従来研究	42
3.3	ガラスプレス・マニピュレーションの操作の確実性	44
3.4	力学解析上の仮定	46
3.5	操作の確実性の評価	48
3.6	数値例	54
3.7	おわりに	60
第 4 章	接触作業における内力の解析	61
4.1	はじめに	62
4.2	従来研究	63
4.3	力学解析上の仮定	64
4.4	内力の解析	65
4.5	数値例	69
4.6	おわりに	75

第 5 章	ガラスプレス・マニピュレーションにおけるロボット指の制御モードの決定	77
5.1	はじめに	78
5.2	従来研究	79
5.3	ロボット指によるガラスプレス・マニピュレーションのモデル	80
5.4	指の制御モードの自動決定	83
5.5	数値例	88
5.6	制御モード決定手法に対する考察	96
5.7	おわりに	98
第 6 章	複数のロボット指によるガラスプレス・マニピュレーションの計画	99
6.1	はじめに	101
6.2	従来研究	102
6.3	計画の概要	103
6.4	同一接触状態内でのグラフ生成	107
6.5	グラフ間の結合による接触状態遷移の表現	111
6.6	ガラスプレス・マニピュレーションの計画	112
6.7	計画例	119
6.8	計画手法に関する考察	140
6.9	おわりに	147
第 7 章	結論	149
7.1	結論	150
7.2	今後の展望	152
謝辞		155
参考文献		157
研究業績		165
付録		173
A.1	回転を伴う接触における接触力の例	174
A.2	6 次元単位超球の外接超多面体近似	183
A.3	ヒューリスティック関数の単調性	185

本論文で用いる記号

- 零行列： O
- 零ベクトル： $\mathbf{0}$
- $n \times n$ の単位行列： I_n
- ブロック対角行列：

$$\text{diag}(\mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_n) := \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & & O \\ & \ddots & \\ O & & \mathbf{A}_n \end{bmatrix}$$

- 正定行列 \mathbf{A} の Cholesky 分解： $\mathbf{A}^{1/2}$
- 集合 \mathcal{A} と \mathcal{B} の Minkowski 和：

$$\mathcal{A} \oplus \mathcal{B} := \{\mathbf{x} + \mathbf{y} \mid \mathbf{x} \in \mathcal{A}, \mathbf{y} \in \mathcal{B}\}$$

- 集合 $\mathcal{A}_1, \dots, \mathcal{A}_n$ の Minkowski 和：

$$\bigoplus_{i=1}^n \mathcal{A}_i := \left\{ \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \mid \mathbf{x}_1 \in \mathcal{A}_1, \dots, \mathbf{x}_n \in \mathcal{A}_n \right\}$$

- 3次元ベクトル $\mathbf{p} = [p_x, p_y, p_z]^T$ との外積と等価な歪対称行列：

$$\mathbf{p} \times \mathbf{I}_3 := \begin{bmatrix} \mathbf{p} \times \mathbf{e}_x & \mathbf{p} \times \mathbf{e}_y & \mathbf{p} \times \mathbf{e}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -p_z & p_y \\ p_z & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{bmatrix}$$

ここで

$$\mathbf{e}_x := [1, 0, 0]^T, \mathbf{e}_y := [0, 1, 0]^T, \mathbf{e}_z := [0, 0, 1]^T$$

- 2次元ベクトル $\mathbf{p} = [p_x, p_y]^T$ との外積と等価な歪対称行列：

$$\mathbf{p} \times \mathbf{I}_2 := \begin{bmatrix} \mathbf{p} \times \mathbf{e}_x & \mathbf{p} \times \mathbf{e}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_y & p_x \end{bmatrix}$$

ここで

$$\mathbf{e}_x := [1, 0]^T, \mathbf{e}_y := [0, 1]^T$$

- ベクトル $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n$ で張られる凸多面錐：

$$\text{span}\{\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n\} := \left\{ \sum_{i=1}^n k_i \mathbf{a}_i \mid k_1, \dots, k_n \geq 0 \right\}$$

第 1 章

序論

1.1	研究の背景	2
1.2	従来研究	6
1.2.1	特定の操作方法を扱った研究	6
1.2.2	特定の操作を前提としない研究	9
1.3	研究の目的	11
1.4	本論文の構成	13

1.1 研究の背景

「ロボット」という言葉の定義は難しいが、「物理的にはたらしかけを外界に対して行うことができる」という性質は、多くの人がロボットにとって必要な条件であると認めるであろう。そして、外界に対しての物理的なはたらしかけとしてもっとも基本的なものの1つが、物体をあやつること、すなわちマニピュレーションである。それゆえロボットの研究において、マニピュレーションの研究は中心的なテーマの1つとして位置付けられてきた [内山 1983, 浅田 1987, 中村 1990, 長谷川 1996, 吉川 1998, Mason 1999, Okamura 2000, 金子 2002]。

産業用ロボットによるマニピュレーションでは、ほとんどが物体を把持 (grasp) して目的位置まで運ぶ、ピックアンドプレイス (pick-and-place) 操作 (Fig. 1.1) が用いられている。これはピックアンドプレイスが最も基本的かつ確実な操作であるためである。人間の行う多様なマニピュレーションを考えてみても、その基本は把持によるマニピュレーションであると言えるだろう。そのため学術分野においても、マニピュレーションの前提としての把持の研究（特に多指ハンドを対象としたもの）が、精力的に行われた [中村 1990, 吉川 1995, 吉川 1996a, 吉川 1996b, Shimoga 1996, Bicchi 2000]。

一方、1980年代から、より器用なマニピュレーションの実現を目指して、把持を伴わないマニピュレーションの研究が行われるようになった。これらは総称して「グラスプレス・マニピュレーション」 (grasp-less manipulation) [相山 1996a] もしくは “nonprehensile manipulation” [Mason 1999] と呼ばれる。これらの詳細な定義については次章で述べるが、グラスプレス・マニピュレーションでは、物体をかたく把持するのではなく、例えば単に押す、転がすなどして物体を目的の位置に動かす (Fig. 1.2)。

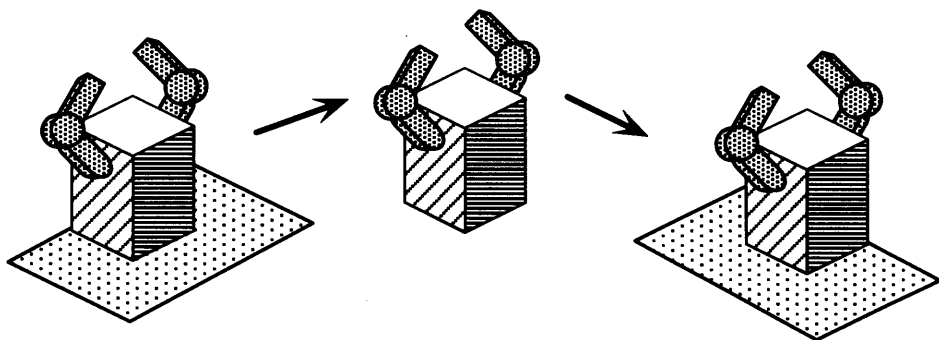


Fig. 1.1: Pick-and-Place

人間の日常の行動の中にも、多様な形態のグラスプレス・マニピュレーションを見つけることができる。例えば、重いガスボンベを転がしながら運ぶ操作 (Fig. 1.3(a)) や、本棚から本を取り出すときに指を引っ掛けて手前に引き出す操作 (Fig. 1.3(b))、あるいは、机の上の紙を指先で引きずって机の面からはみ出させ、把持できるようにする操作 (Fig. 1.3(c))、などが典型例である。人間が、把持による操作だけでなくグラスプレス・マニピュレーションをも利用するのは、

- 環境を利用することで、対象物の全重量を自分で支えずにすむ
- 直接把持できない状態でも対象物をあやつることができる

などの理由によるものである。

グラスプレス・マニピュレーションのメリットは、当然ロボットに対しても同様にあてはまる。例えば、環境をうまく利用してグラスプレス・マニピュレーションを行うことで、ロボットの可搬重量を超える重さの対象物をあやつることも可能となる。現状のロボットでは、(自重に比べて) 可搬重量が小さいことが大きな欠点であるが、ピックアンドプレイスだけでなく、グラスプレス・マニピュレーションを補完的に用いることで、ロボットを利用

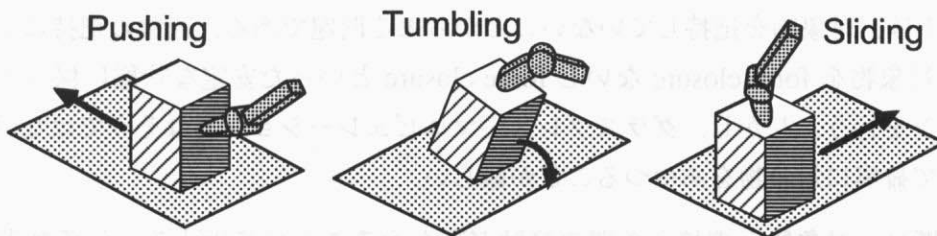


Fig. 1.2: Graspless Manipulation



(a) Carrying a Gas Bottle

(b) Picking Up a Book

(c) Sliding a Paper on a Desktop

Fig. 1.3: Human Graspless Manipulation

可能な作業が大きく増加することが期待できる。また、把持可能でない状態の物体の操作をグラスプレス・マニピュレーションで実現できれば、ロボットが作業しやすいように整備されていない環境（たとえば家庭やオフィスなど）へと、ロボットの適用可能な分野が広がることが見込める。そのほか、環境を利用して1本指のロボットで物体をあやつるなど、シンプルな構造のロボットで作業を実現させる、といったグラスプレス・マニピュレーションの応用も考えられるであろう。

このように、多種多様なグラスプレス・マニピュレーションをロボットが柔軟に実行できるようになれば、その効果は大きい。また別の言い方をすれば、人間のように柔軟で器用なマニピュレーションをロボットが実現できるようにするためには、多種多様なグラスプレス・マニピュレーションを巧みに使いこなせるようにしなければならない、ということである。

しかし、グラスプレス・マニピュレーションには、通常のピックアンドプレイス操作に比べ、以下のような問題点がある。

1. 操作の確実性の低さ
2. 過大な内力の発生可能性
3. マニピュレーション計画の困難さ

まず、1は、対象物を把持していないことから来る問題である。通常の把持によるあやつりでは、対象物を *form closure* ないし *force closure* といった安定な状態に保ってマニピュレーションを行う。しかし、グラスプレス・マニピュレーションではそうではないため、外乱に対して確実に対象物をあやつることが難しい。

2の問題は、対象物と環境との間の接触が存在することに起因する。位置制御されたロボットによって接触作業を行おうとすると、そのわずかな位置誤差によっても、対象物に対して過大な内力が発生する可能性があり、対象物およびロボットに損傷を与える恐れがある。したがって、接触作業においては力制御が用いられるのがふつうであるが、一方で、押し操作 (*pushing*) などではむしろ位置制御ロボットを用いた方が正確な軌道制御ができることが知られており [Lynch 1996b]、その簡便さが押し操作の利点となっている。つまり、内力の問題を回避しながら、位置制御と力制御を適切に使い分ける必要があるため、どのような場合に過大な内力の発生する可能性があるのかを知る必要がある。

3のマニピュレーション計画の困難さとは、対象物を初期位置・姿勢から目標位置・姿勢まで動かすためのロボットの動作を求める際の問題である。ピックアンドプレイスの場合、対象物をいったん把持してしまえば、その後はロボットの動きと対象物の動きは1:1に対応する。したがって、ロボットと把持された対象物を一体と見なして、障害物回避問題

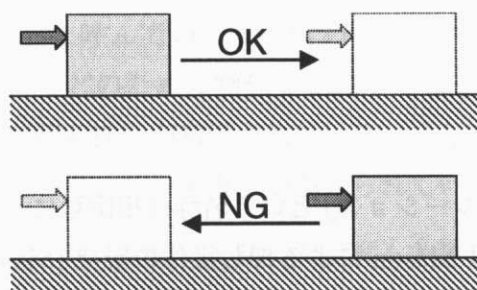


Fig. 1.4: Irreversibility in Graspless Manipulation

を考えればよい。つまり、把持を構成してしまえばその後は幾何学的な問題を解くことで、マニピュレーション計画が実現できる。しかし、グラスプレス・マニピュレーションでは、ロボットの動きと対象物の動きの関係は自明ではない。例えば、平面上で物体を押したときに、物体がそのまま滑るのか、倒れるのかは、力学的な問題を解かなければ分からない [Erdmann 1994]。また、「押すことはできても引くことはできない」というように、操作に不可逆性が存在することがある (Fig. 1.4)。このことも計画を複雑にする要因となる。

以上のような問題の解決が、ロボットによる多様なグラスプレス・マニピュレーションを実現する上での重要な課題であると言える。

1.2 従来研究

「グラスプレス・マニピュレーション」という名称は相山らによって与えられた [相山 1992, 相山 1996a] が, その研究は Mason による押し操作の研究 [Mason 1986] に始まる. ここでは, 過去のグラスプレス・マニピュレーションに関する研究を, 特定の操作方法について論じたものと, そうでないものに分けて, 概観する.

1.2.1 特定の操作方法を扱った研究

グラスプレス・マニピュレーションにはさまざまなバリエーションがあるため, 特定の操作方法に限定した上で, 解析を行っている研究が多い.

押し操作

押し操作 (pushing, Fig. 1.5) は, モデルがシンプルであり, また実現も簡単で実用性が高く, それゆえ最も研究が進んでいる. Mason は, 押し操作の有用性を主張し, その基本的な力学およびそれに基づく動作計画の指針を示した [Mason 1986].

吉川・栗栖らは, 1 本指での押し操作を扱い, 摩擦力分布の推定 [吉川 1992b], 軌道計画 [栗栖 1995, 吉川 1996c], 移動ロボットでの操作のための軌道追従制御 [栗栖 1996] の方法を提案している. 一方, Lynch らは, 1 本指での押し操作が本質的に不安定であることから, 位置制御での線接触による安定な押し操作 (“stable push”) を主に扱い, その可制御性の条件の導出や動作計画手法の提案を行っている [Lynch 1996b, Lynch 1999b].

寺崎らは, 平行2指ハンドによる物体操作において, 把持による操作だけでなく押し操

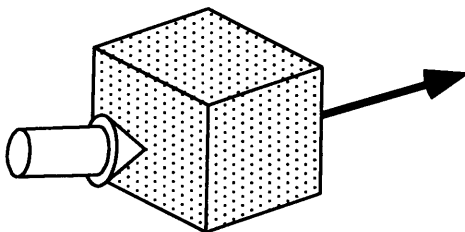


Fig. 1.5: Pushing Operation

作（寺崎らは「滑らし操作」と呼んでいる）を含めた動作計画を行っている [寺崎 1994, 寺崎 1995]. ここでは障害物などのために物体を把持できない場合に、把持できる状態に持っていくための方法として押し操作が利用されている. また、最近では原田らにより、押し操作によって複数の物体を一度に動かす方法が論じられている [Harada 2002].

押し操作の変形・応用として、部品の整列を扱った研究も多数行われている ([Peshkin 1988, Goldberg 1993, Akella 1998] など). これらはパーツフィーダなどへの応用をターゲットとしている. また、移動ロボットの研究で押し操作を扱ったものも多く（例えば [大川 1993, 栗栖 1996, Donald 1997]），ヒューマノイドロボットによる押し操作の検討も始まっている [原田 2002].

転がし操作

物体を倒しながらあやつる転がし操作 (tumbling) は、操作中に滑りが存在しないため、摩擦の大きい場合に適したあやつり手法である (Fig. 1.6). ただし、対象物の姿勢が操作中に大きく変化しても構わない場合にのみ利用できる.

沢崎らは、多指ハンドによる転がし操作を扱い、3つの典型的な転がしのパターンについて力学解析を行うとともに、転がし操作の実験を行った [沢崎 1991]. また、複数の移動ロボットを用いた転がし操作の実験も行っている [沢崎 1993]. 黄は、2本の3自由度ロボット指を用いた転がし操作を実現し、またその実現方法について詳細に論じている [黄 1999].

栗栖ら [栗栖 1999], Marigo ら [Marigo 2000] は、転がし操作によって多面体対象物を初期位置から目標位置まで操作するための計画アルゴリズムを提案している. ただし、これら

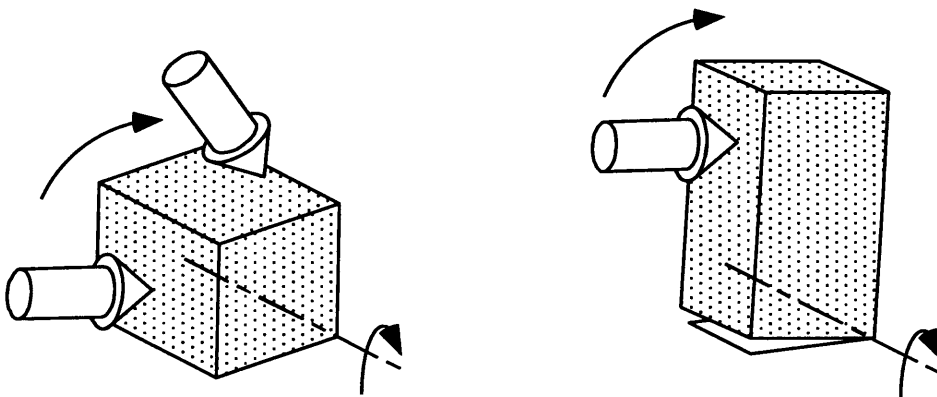


Fig. 1.6: Tumbling Operation

の研究では，個々の転がし操作を実現するためのロボットの動作の計画は行っていない（すなわち，転がし操作は常に可能であるとの前提で，対象物の動きだけの計画を行っている）．栗栖は，力制御を利用して転がし操作を行う上での力作用点の計画法についても論じている [栗栖 2002]．山下らは，棒で対象物を押して転がす問題を扱い，力制御を用いずに物体操作を行うための，ロボットの動作も含めた計画アルゴリズムを提案している [山下 2001]．

ピボット操作

相山らはピボット操作 (pivoting)，すなわち物体を一点で環境と接触させ，接触点を通る軸回りに回転しながらあやつる手法 (Fig. 1.7) を提案した [相山 1996a]．ピボット操作はあまり高速なあやつりは期待できないが，重量物を動かしたい場合には向いている．相山らは直方体のピボット操作に関して力学解析を行うとともに，2 本指ハンドによる実験も行っている．また，ピボット操作における最適な指位置の決定問題についても考察している [京増 2001]．

吉川らは，ピボット操作のためのロボットハンドの動的制御則を提案し，シミュレーションによる検証を行っている [Yoshikawa 2000]．

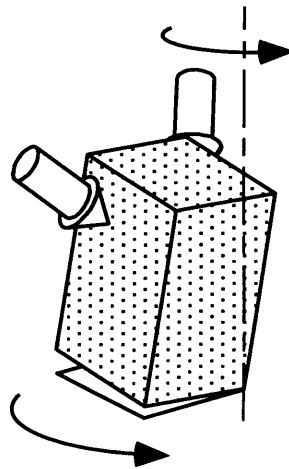


Fig. 1.7: Pivoting Operation

その他の操作

Trinkle らは、2 自由度のハンドの中で物体を動かす whole arm manipulation の計画アルゴリズムを提案し、実験による実験を行っている [Trinkle 1993]. このような、ハンド内での物体のあやつりは、指の根元との接触を環境との接触と同等と考えれば、グラスプレス・マニピュレーションの一種だと見なすことができる. また、Erdmann は “Two-Palm Manipulation” と称して、二つの平面（掌）を使って物体をあやつる問題を扱い、その計画法などを論じている [Erdmann 1998]. これもグラスプレス・マニピュレーションの変種と見ることができるであろう.

そのほか、投げる、打つなどのさまざまな方法により、把持によらないマニピュレーションを行った研究も盛んに行われるようになっている [Mason 1993, Lynch 1999a, Mason 1999].

1.2.2 特定の操作を前提としない研究

前述のとおり、グラスプレス・マニピュレーション一般を対象とした研究は極めて少ない.

Mason らは、マニピュレーションを “kinematic manipulation,” “static manipulation,” “quasi-static manipulation,” “dynamic manipulation” の 4 つに分類し、それぞれに対応する対象物の拘束状態を “kinematic closure,” “static closure,” “quasi-static closure,” “dynamic closure” と呼んだ [Mason 1993]. ただし、数学的な定義はしていない. グラスプレス・マニピュレーションは、多くの場合 static closure や quasi-static closure に基づくマニピュレーションであると見ることができる.

相山らは、グラスプレス・マニピュレーションの定義を行うとともに、環境と対象物との接触状態（面接触／線接触／点接触）によって、グラスプレス・マニピュレーションを 3 種類に分類した [相山 1996a]. また、対象物の拘束状態による別の分類法も示している（これらの分類については次章でより詳しく議論する）. 相山らはまた、押し操作・転がし操作を適切に選択してマニピュレーションを行うための計画手法も提案している [相山 1999]. ただし、それを実現するためのロボットの動作については扱っていない.

必ずしもグラスプレス・マニピュレーションを想定しているわけではないが、環境との接触作業を対象としている研究は多く存在する. 環境と接触する物体の安定性についての議論（例えば [中村 1990, 余 2000]）、接触状態の列挙とそのネットワーク表現（例えば [平井 1988, Xiao 2001]）、組立作業計画（例えば [吉川 1992a, 余 1995a]）などはその一例である. これらは把持によるマニピュレーションを前提としたものがほとんどであるが、その

結果はグラスプレス・マニピュレーションの研究においても有用である。ただし、グラスプレス・マニピュレーションへの適用にあたっては、何らかの拡張・改変を要することが多い。詳細については内容的に関連する章において改めて紹介する。

1.3 研究の目的

以上のように，グラスプレス・マニピュレーションの研究のほとんどは，操作方法を特定した上で行われている．特に水平面上での押し操作 (pushing) については，極めて詳細な解析が行われ，多くの有用な結果が得られている．しかし，グラスプレス・マニピュレーション一般を統一的に扱った研究はほとんどない．したがって，1.1 節で挙げた問題，すなわち

1. 操作の確実性の低さ
2. 過大な内力の発生可能性
3. マニピュレーション計画の困難さ

は，いずれも操作方法を限定した上で解決（もしくは無視）されている，というのが現状である．

グラスプレス・マニピュレーションを活用して，ロボットに多様なマニピュレーションを実現させようとするならば，上記のような問題を，グラスプレス・マニピュレーション全般に適用できる統一的な枠組みで論じ，解決することが必要である．そこで，本論文の研究の目的の一つを，

ロボットによるグラスプレス・マニピュレーション全般の計画・実行に必要なとなる基礎的な力学解析を行うこと

とし，具体的には，

- グラスプレス・マニピュレーションの操作の確実性の定量的評価指標の提案
- グラスプレス・マニピュレーションにおける過大な内力の発生可能性の判定法の提案

を行う．また，これらの力学解析の結果を応用して，

ロボットによる一般的なグラスプレス・マニピュレーションの計画を実現すること

をもう一つの目的とする．具体的には

- グラスプレス・マニピュレーションにおけるロボット指の制御モードの決定
(ある瞬間におけるロボット指の制御のしかたの瞬時的な計画)
- グラスプレス・マニピュレーションのためのロボット指の動作計画
(初期位置から目標位置まで対象物をあやつるために必要なロボットの動作の計画)

の問題を扱う。これらにより、ロボットに多様なグラスプレス・マニピュレーションを実現させるための基本的枠組みを確立することを目指す。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章では、序論として研究の背景と従来研究について述べ、研究の目的としてグラスプレス・マニピュレーションの力学解析とそれに基づく統一的なマニピュレーション計画の実現を据えた。

第2章では、以降の力学解析及び計画の実現のための準備となる事項を整理する。まず、グラスプレス・マニピュレーションの概念について解説し、その分類を紹介する。そして、マニピュレーションの力学モデルを導入する。

第3章では、グラスプレス・マニピュレーションにおける操作の确实性の概念を定義するとともに、その定量的な評価指標を導入する。また、数値例によってその有効性を明らかにする。

第4章では、グラスプレス・マニピュレーションのような環境との接触を伴う作業において、対象物に加わる内力の問題を解析する。対象物に過大な内力が加わる可能性があるか否かを判定するためのアルゴリズムを提案する。

第5章では、3章・4章の結果を利用して、グラスプレス・マニピュレーションにおけるロボット指の制御モードの決定法を論じる。各指を位置制御すべきか、力制御すべきか、また、そのときの目標力をどう決めるかという問題について、対象物に過大な内力が加わることを避けつつ操作の确实性を最大にするように、制御モードを決定するアルゴリズムを提案する。

第6章では、5章の結果をもとに、物体を初期コンフィギュレーションから目標コンフィギュレーションまで、グラスプレス・マニピュレーションによって動かすためのロボット指の動作計画手法を提案する。また、計画結果の実機ロボットへの適用も行う。

最後に、第7章で本論文のまとめを行う。

本論文の構成図を Fig. 1.8 に示す。

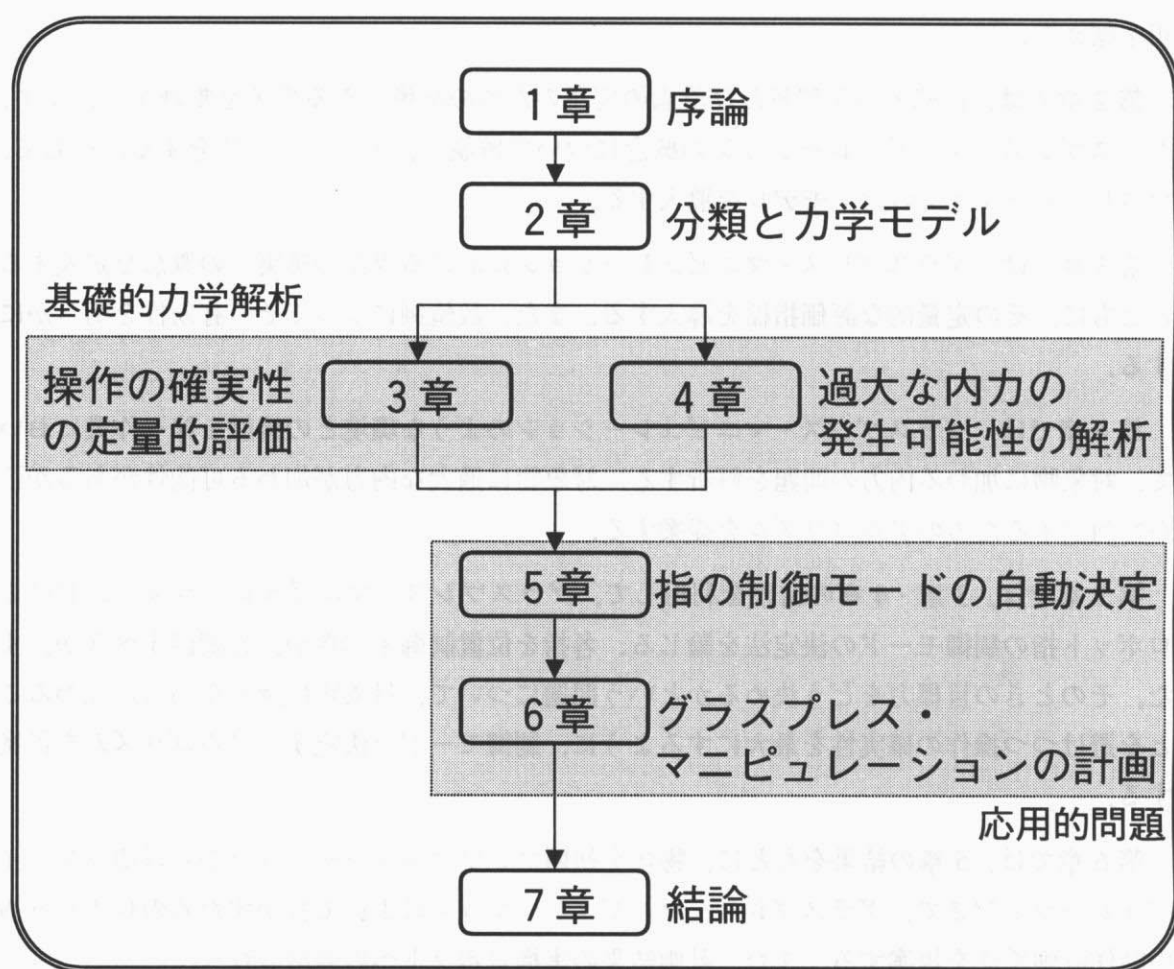


Fig. 1.8: Structure of This Thesis

第 2 章

グラスプレス・マニピュレーション
の概要と力学モデル

2.1	はじめに	16
2.2	グラスプレス・マニピュレーションの概要	17
2.2.1	グラスプレス・マニピュレーションの定義	17
2.2.2	グラスプレス・マニピュレーションの利点と欠点	18
2.2.3	マニピュレーションの分類	21
2.3	グラスプレス・マニピュレーションの力学モデル	27
2.3.1	力学解析上の仮定	27
2.3.2	接触力のモデル化とその目的	27
2.3.3	接触力のモデル化の方法	28
2.3.4	点接触による面接触の置き換え	30
2.3.5	各接触点での接触力のモデル	33
2.3.6	可能な接触力集合の表現	34
2.3.7	対象物に加わる力	37
2.4	おわりに	38

2.1 はじめに

本章では，この論文で扱う対象であるグラスプレス・マニピュレーションについて，その概要を述べる．

まず，本論文で扱うグラスプレス・マニピュレーションについて，その定義を明らかにする．また，グラスプレス・マニピュレーションの利点と欠点，およびマニピュレーション手法の分類についても紹介する．

さらに，以降の章で行う解析の準備として，グラスプレス・マニピュレーションの力学モデルを導入する．

2.2 グラスプレス・マニピュレーションの概要

2.2.1 グラスプレス・マニピュレーションの定義

相山らは、グラスプレス・マニピュレーション (graspless manipulation) を、「物体をロボットのみでは把持しないあやつり」と定義した [相山 1992, 相山 1996a]. この定義には、物体を把持してはいないが、環境との接触を利用することにより、把持に類する状態を作ってマニピュレーションを行う、というニュアンスが込められている. 押し操作 (pushing) [Mason 1986], 転がし操作 (tumbling) [沢崎 1991], ピボット操作 (pivoting) [相山 1996a] など (Fig. 2.1) は、環境との接触をロボット指の代わりに利用して擬似的な把持を実現したマニピュレーションであると考えることができ、グラスプレス・マニピュレーションに含まれる.

一方, Lynch らは, 単に把持によらない物体のあやつりのことを “nonprehensile manipulation” と呼んでいる [Lynch 1996a, Mason 1999]. こちらは, ジャグリングのようなダイナミックマニピュレーションも含め, 把持によらないあやつり (つまり, 把持によるあやつりの余集合) をすべて nonprehensile manipulation だとしている. 物体を打つ, 投げるなどの方法や, リリース型マニピュレーション [相山 1996b] もこれに含まれる.

両者の関係は Fig. 2.2 のように描くことができる (ただし, 「グラスプレス・マニピュレーション」という言葉を nonprehensile manipulation と同じ意味で用いている論文も存在することに注意されたい).

Nonprehensile manipulation は把持によるあやつりの余集合であり, そのカバーする範囲があまりにも広いため, 本論文では, [相山 1996a] の意図するところの「グラスプレス・マニピュレーション」を扱うこととする. ただし, 議論を明確にするために, 本論文において

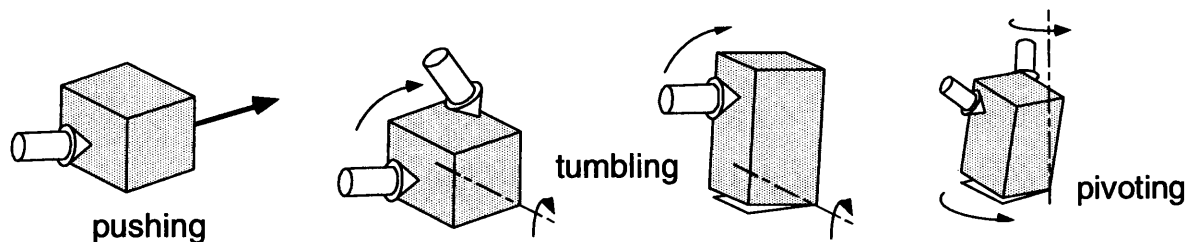


Fig. 2.1: Typical Examples of Graspless Manipulation

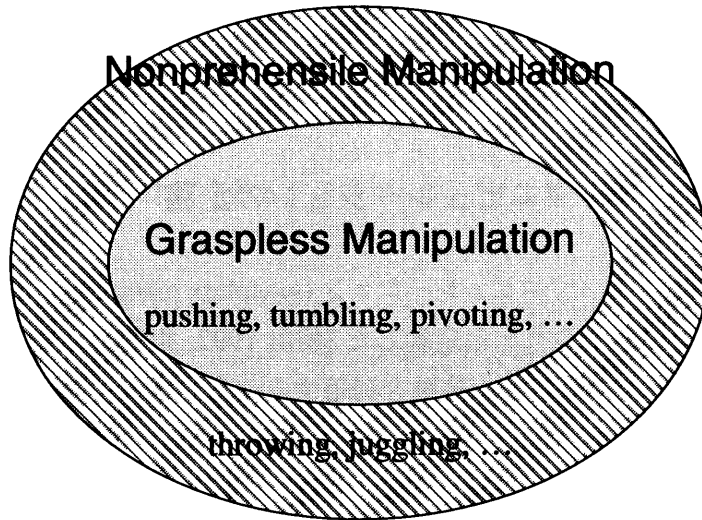


Fig. 2.2: Graspleless Manipulation and Nonprehensile Manipulation

研究の対象とするグラスプレス・マニピュレーションを、

対象物を完全には把持しないが、環境との接触を利用することによって、外乱力に抗することのできる状態をつくって動かすマニピュレーション

と定義する。この「外乱力に抗することのできる状態」については、3章で詳細に論じる。

この定義には、典型的なグラスプレス・マニピュレーションである押し操作・転がし操作・ピボット操作などの大半が含まれる。しかし、この定義による限定により、通常グラスプレス・マニピュレーションとされる操作のうちの一部は、解析の対象から外れることになる。例えば、物体を押しして転倒させる方法 (Fig. 2.3) は、物体の安定を失わせてあやつる方法なので、本論文では扱わない。

2.2.2 グラスプレス・マニピュレーションの利点と欠点

一般的なピックアンドプレイス操作に対する、グラスプレス・マニピュレーションの利点は以下のようなものが挙げられる [相山 1995, 相山 1996a]。

- マニピュレーションの省力化。

グラスプレス・マニピュレーションでは、環境との接触を利用することで、対象物をロボットのみで支持する必要がある。例えば、平面上での押し操作の場合、対象物の重

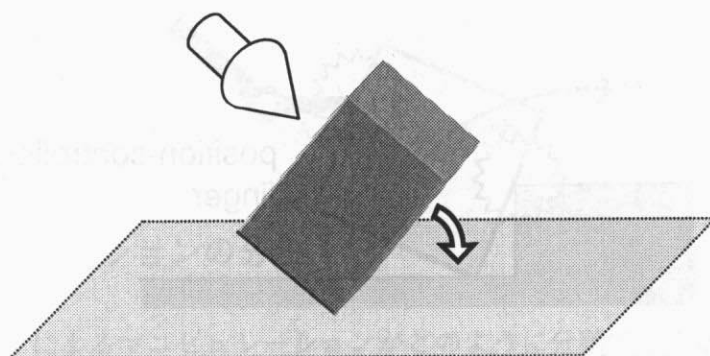


Fig. 2.3: Pushing an Object to Fall Down

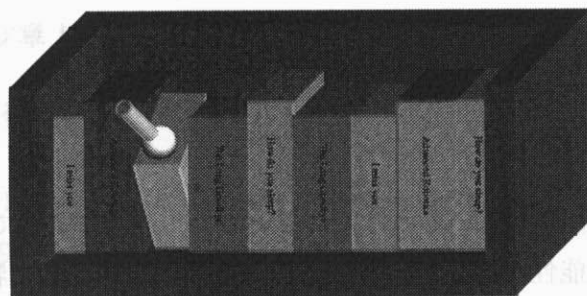


Fig. 2.4: Picking up a book

量は環境からの反力で支えられているので、ロボットは摩擦力に抗するだけの力を出しさえすればよい。したがって、把持する場合に比べて、少ない力やエネルギーでマニピュレーションを実現しうる。

- シンプルな機構・制御でのマニピュレーションの実現。

グラスプレス・マニピュレーションでは、環境との接触や重力を指の代わりとして利用することにより、よりシンプルな機構で対象物をあやつることが可能である。やはり平面上での押し操作の場合を考えると、1本の指で物体を動かすことも可能である。また、“stable push” [Lynch 1996b] のように、単純な位置制御だけでマニピュレーションを行うことが可能な場合も存在する。

- 把持が不可能な場合でのマニピュレーションの実現。

障害物などの影響により、物理的に把持が不可能な場合、というのも存在する。ぎっしり詰まった本棚から本を取り出すような場合 (Fig. 2.4) はその典型例である。このような場合は、把持によらないマニピュレーションを用いざるを得ない。

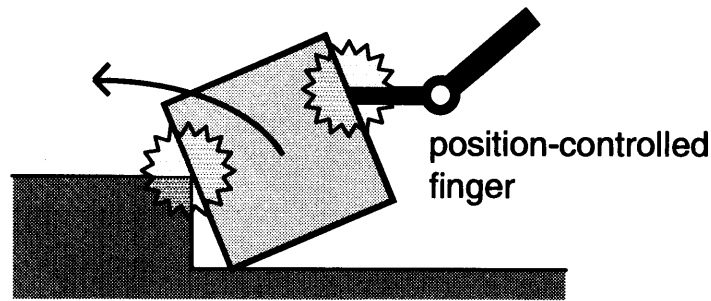


Fig. 2.5: Excessive Internal Force in Graspless Manipulation

一方、グラスプレス・マニピュレーションの欠点としては、1章でも触れたように、以下のようなことが考えられる。

- 操作の確実性の低さ。

対象物をかたく把持しているわけではないので、外乱によってマニピュレーションが失敗してしまう可能性が高い。また、環境との接触を利用して物体をあやつる関係上、環境の形状や摩擦係数の影響を受けてしまう。

- 過大な内力の発生可能性。

上述のように、位置制御を用いたグラスプレス・マニピュレーションも可能であるが、環境との接触が存在するため、位置制御を下手に適用すると、対象物に過大な内力を生じさせてしまう可能性がある (Fig. 2.5)。この場合、対象物およびロボットの変形・破損の恐れがある。

- マニピュレーション計画の困難さ。

把持によるマニピュレーションでは、対象物をどのように動かしたいかが決まれば、それによってロボットをどう動かせばよいのかも比較的容易に求まる。これは、いったん把持をしてしまえば、ロボットの動作と対象物の運動が自明に1:1対応するためである。また、マニピュレーションは可逆であり、行き過ぎても元に戻すことができる。

一方、グラスプレス・マニピュレーションでは、ロボットの動作が決まっても対象物がどのように動くかは自明ではなく、力学的な解析によって初めて明らかになる。また、「押せるけれど引けない」というように、マニピュレーションが不可逆になる場合がしばしば存在する。したがって、対象物に望みの運動をさせるための、ロボットの動作計画はより困難になる。一方で、マニピュレーションが不可逆であることは、対象物を動かしてしまうと元に戻せなくなってしまうことがあるため、事前の動作計画が重要となることも意味している。

これらの利点と欠点を踏まえて適切に利用することにより、グラスプレス・マニピュレーションは、把持によるマニピュレーション（ピックアンドプレイス操作）を補完し、ロボットに器用なあやつりを実現させる上で大きな役割を果たすと考えられる。

2.2.3 マニピュレーションの分類

ここではロボットによるマニピュレーションがどのように分類できるかについて議論を行い、それを通してグラスプレス・マニピュレーションの特徴を明らかにする。なお、本項では、投げる・打つなどの（グラスプレス・マニピュレーションには入らない）nonprehensile manipulation については考慮しない。

環境との接触状態による分類

相山らは、マニピュレーション中の対象物と環境との接触状態に着目して、以下のような分類を行った [相山 1996a]。

Type 1 (planar contact) (Fig. 2.6(a))

操作中对象物と環境が面接触（もしくは、2つの辺接触など、面接触と同等と見なせる接触）をし、対象物がその接触面上を滑ることによってあやつりが実行される場合。平面上での押し操作 (pushing) はこれに含まれる。

Type 2 (line contact) (Fig. 2.6(b))

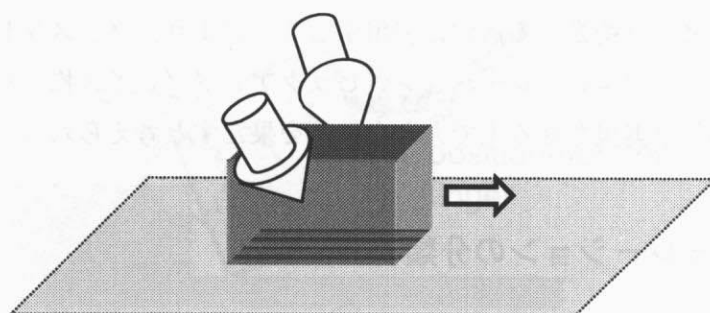
操作中对象物と環境が滑りのない線接触（もしくは、2つの点接触など、線接触と同等と見なせる接触）をし、対象物がその接触辺を軸に回転することによってあやつりが実行される場合。転がし操作 (tumbling) がこれにあたる。

Type 3 (point contact) (Fig. 2.6(c))

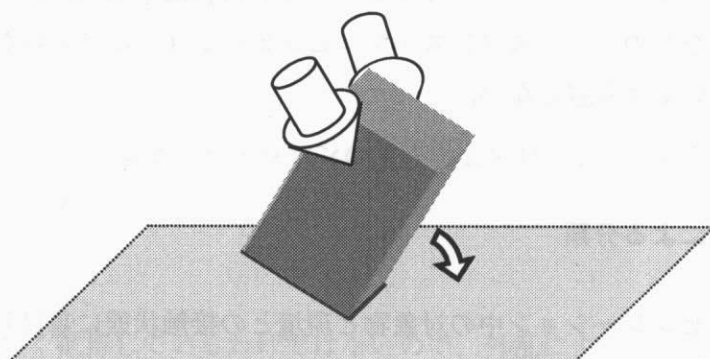
操作中对象物と環境が滑りのない点接触をしており、その接触点を通るある軸周りに対象物が回転することによってあやつりが実行される場合。ピボット操作 (pivoting) がこれにあたる。

Type 4 (no contact) 操作中对象物と環境が接触しない状態であやつりが実行される場合。これは非グラスプレス・マニピュレーションであり、通常のピックアンドプレイス操作などがこれにあたる。

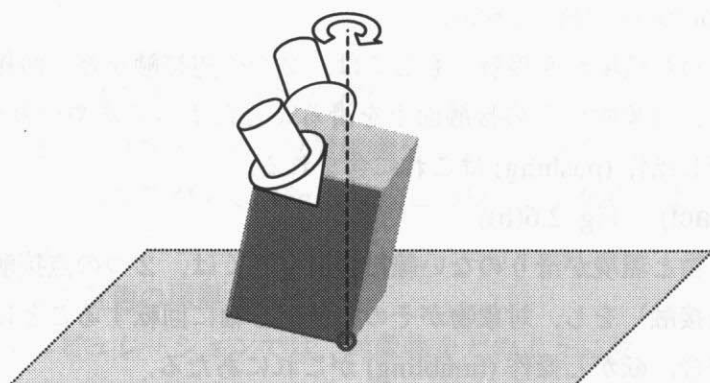
この分類は明快だが、Type 1 から Type 3 に当てはまればそれはグラスプレス・マニピュレーションである、と単純には言えないことに注意されたい。なぜなら、物体を完全に把持



(a) Type 1: Graspless Manipulation with Planar Contact



(b) Type 2: Graspless Manipulation with Line Contact



(c) Type 3: Graspless Manipulation with Point Contact

Fig. 2.6: Classification of Operations by Contact Type [相山 1996a]

した状態で、対象物を環境と面接触（あるいは線接触，点接触）させてあやつることも可能だからである。これについては以降で改めて議論する。

物体の拘束状態による分類

相山らは、物体の拘束状態に着目した分類も行っている [相山 1996a].

Type A 対象物がマニピュレータおよび環境によって rigid に把持されている場合、摩擦条件を満たす限りにおいて、対象物の運動はマニピュレータの運動により決定される。

Type B 対象物がマニピュレータおよび環境によって rigid には把持されておらず、自由に動ける方向を有している場合、マニピュレータの運動以外の要因も加味しないと対象物の運動は決まらない。

相山らは、Type A のあやつりは Type B に比べて確実性が高いが、内力の発生を伴うため、あやつりにより大きな力を要するとしている。したがって、この分類は「内力の発生を伴うあやつり」と「内力の発生を伴わないあやつり」を区別したものとも言える。

しかし、上記の分類は厳密さを欠くところがある。例えば、[相山 1996a] によれば Fig. 2.7 (a) のようなあやつりは Type A であり、Fig. 2.7 (b) のようなあやつりは Type B であるとしている。ここで、Fig. 2.7 (c) のようなあやつりは、stable push [Lynch 1996b] と同等と見なすことができ、摩擦条件を満たす限りにおいて、対象物の運動はマニピュレータの運動により決定される。しかし、この状態で対象物が rigid に把持されているわけではない。果たしてこのようなあやつりは Type A と B のいずれに分類するべきかは微妙だが、内力の発生を伴わないという点を重視すれば Type B と見なすべきであろう。

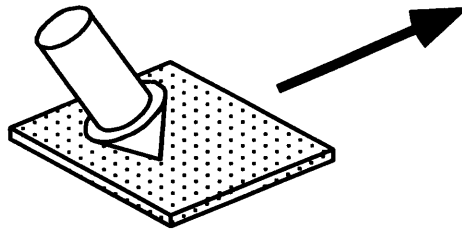
環境との接触状態と物体の拘束状態の両方による分類

このように、Type A, B の分類については議論の余地がある。しかし、ここではこれらの定義をより精緻にすることよりも、本論文での議論に役立てることを考えて、新たなマニピュレーションの分類法を提案することとする。具体的には、環境との接触状態と、物体の拘束状態の両方を考慮して、以下のような3種類にマニピュレーションを分類する。

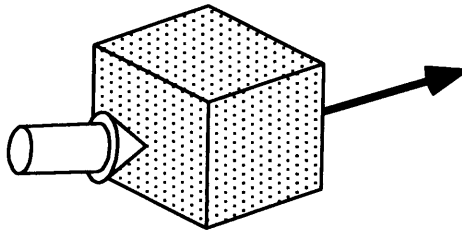
Type α ロボットのみでは対象物を把持しておらず、環境との接触を利用して対象物をあやつる場合 (Fig. 2.8 (a)).

Type β ロボットによって対象物を完全に把持しているが、環境との接触によっても対象物の重量の一部を支持している場合 (Fig. 2.8 (b)).

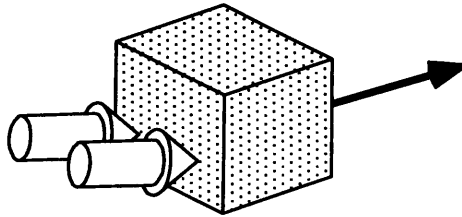
Type γ ロボットによって対象物を完全に把持し、対象物の全重量を支えている場合



(a) Sliding (Type A)



(b) Pushing (Type B)



(c) Stable Push (Type B?)

Fig. 2.7: Classification of Operations by Constraint Type [相山 1996a]

(Fig. 2.8 (c)).

Type α はグラスプレス・マニピュレーションである。Type β は本論文での定義ではグラスプレス・マニピュレーションとは呼べないが、その利点の一部を有しており、準グラスプレス・マニピュレーションとでも呼ぶべきものである。Type γ は完全な把持によるマニピュレーションを指す。Type β のあやつりに Type 1, 2, 3 のあやつりが含まれる場合があることは容易に理解できよう。つまり、先にも述べたように、Type 1, 2, 3 のあやつりはグラスプレス・マニピュレーションではないあやつりを含む。

前節で挙げたグラスプレス・マニピュレーションの利点と欠点の観点から、Type α, β, γ を評価したものが Table 2.1 である。明らかに、Type β のマニピュレーションは、Type α と Type γ の中間の性質を持つことが分かる。

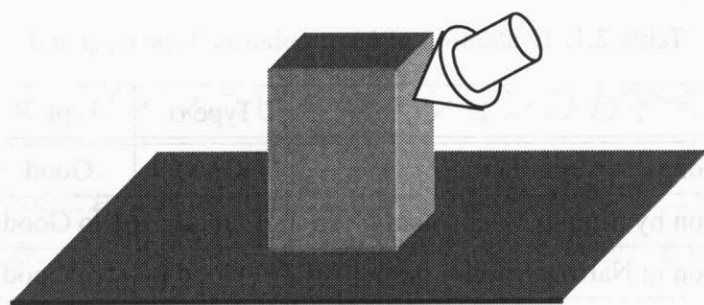
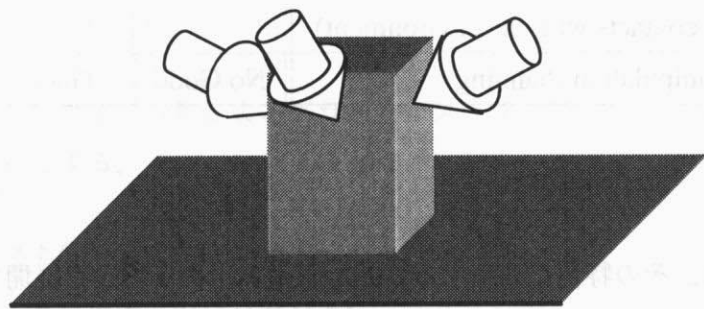
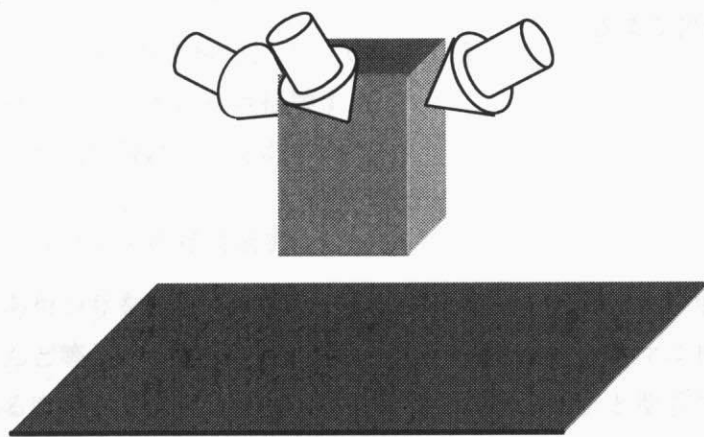
(a) Type α (Graspless Manipulation)(b) Type β (Semi-Graspless Manipulation)(c) Type γ (Pick-and-Place)

Fig. 2.8: New Classification of Operations

本論文では Type α のグラスプレス・マニピュレーションを対象とするが、Type β, γ のマニピュレーションは、Type α の特別な場合と考えることもできるため、本論文の内容の多くはそのまま Type β, γ にも当てはまることを付記しておく。つまり、原理的には、グラスプレス・マニピュレーションの理論は、把持によるマニピュレーションと把持によらないマニピュレーションを包括的に扱うことのできる理論になっている。もっとも、Type β, γ を

Table 2.1: Evaluation of Manipulation Type α , β and γ

	Type α	Type β	Type γ
Manipulation with Small Force	Good	Good	No Good
Manipulation by Simple Mechanism	Good	No Good	No Good
Manipulation in Narrow Space	Good	No Good	No Good
Manipulation Stability	No Good	Good	Good
Possibility of Excessive Internal Force (caused by contacts with the environment)	No Good	No Good	Good
Ease of Manipulation Planning	No Good	Good	Good

対象とする場合は，その特性を利用することでより実用的な理論を展開できることが多い．マニピュレーションの計画アルゴリズムはその典型例であり，Type β, γ のみを扱う場合は，ロボットの動作と対象物の動作が1 : 1に対応することを利用して，障害物回避問題に帰着させて解くのが適当である．

2.3 グラスプレス・マニピュレーションの力学モデル

ここでは、以降の章における解析の準備として、グラスプレス・マニピュレーションの力学モデルを導入する。特に、環境およびロボットから対象物に加わる接触力のモデル化を行う。

2.3.1 力学解析上の仮定

本論文では、複数のロボット指によるグラスプレス・マニピュレーションを想定して、以下の仮定をおくこととする。

- 対象物、ロボットの指先、環境は剛体である。
- マニピュレーションは準静的に行われる。
- クーロン摩擦が、対象物と環境の間、および対象物とロボット指の間に存在する。
- 静止摩擦係数と動摩擦係数は等しい。
- 摩擦円錐は凸多面錐 [平井 1999] によって近似できる。
- ロボット指は対象物と摩擦あり点接触する。
- 同一接触面内の摩擦係数は一様である。

以降の章では、追加の仮定を適宜設定する。

なお、準静的なあやつりを仮定することは、把持の研究においては、単に静的な力学解析を行うこととほとんど等価である。しかしながら、グラスプレス・マニピュレーションにおいては、滑りによる摩擦の問題が存在するため、静的な力学解析と準静的な力学解析には本質的な違いがある。このことは、2.3.4 項および3章で明らかになる。

2.3.2 接触力のモデル化とその目的

本節で行う接触力のモデル化の目的は、以下のようなものである。まず、問題設定として、

- いま、対象物がある準静的な運動をしているとする。
- この瞬間について、対象物と環境との間の、ある接触面に注目する。
- この接触面への荷重分布は、外乱力によってはあらゆる分布が起ころうと想定する。

このときに、

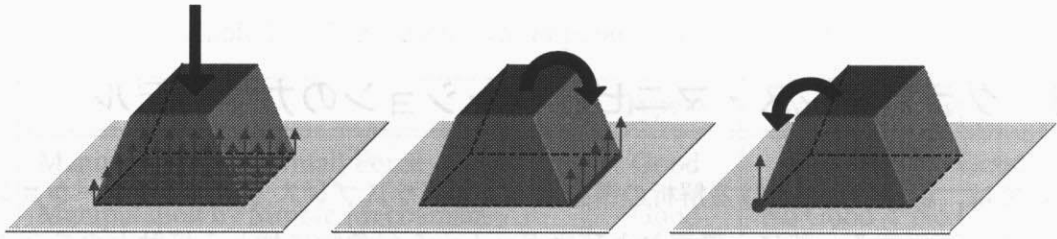


Fig. 2.9: External Disturbance and Distribution of Contact Forces

- この接触面における接触力（垂直抗力およびクーロン摩擦力）の合力により，対象物に加わる一般化力（並進力およびモーメント）がとりうる集合を求める．

というのがここでの接触力のモデル化の目的である．

「荷重分布として，あらゆる分布が起こりうる」という問題設定は，グラスプレス・マニピュレーションの操作の現実性の評価（3章）をするための準備となっている．対象物に外乱力が加わった場合，それに抵抗するために，接触面における荷重分布は受動的に変化する（Fig. 2.9）．したがって，対象物にある外乱力が加わったとしても，それによって荷重分布が変わり，接触力が変化することによって，その外乱力をキャンセルすることができるのであれば，その影響を打ち消すことができると考えられる．そこで，そのような性質を解析するための準備として，1つの荷重分布を仮定せず，任意の荷重分布がありうるとして，接触力の合力のモデル化を行うものである．任意の荷重分布に対して起こりうるすべての接触力の合力の集合をモデル化するためには，特定の条件下での特定の荷重分布については知る必要がなく，したがって不静定問題について考慮する必要がない，ということにも注意されたい．

なお，同様に特定の荷重分布を仮定しないで接触力によって対象物に加わる一般化力の集合を求めている例は，接触作業を実現するための指位置の範囲を求めた研究 [余 1995b] や接触の安定性の評価 [余 2000]，パワーグラスプの静力学解析 [張 1996, 中村 1997] などに見られる．逆に，特定の荷重分布を仮定した上で，対象物の運動と接触力によって対象物に加わる一般化力との関係を求めた例として，[Goyal 1991a] がある．

2.3.3 接触力のモデル化の方法

上述のように，接触面から対象物に作用可能な一般化力の集合を求めることがここでの目的となるが，面接触はそのままでは取り扱いが難しいため，これを点接触の集合と見なして扱うことを考える．

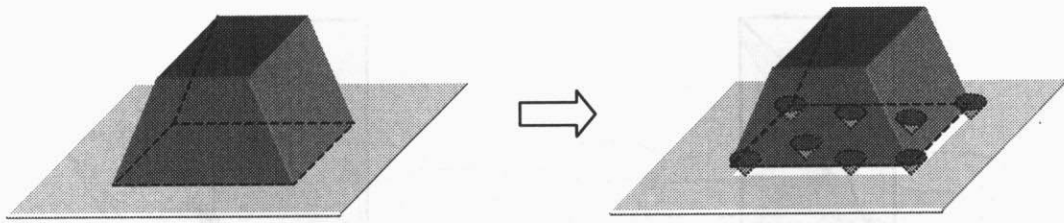


Fig. 2.10: Approximate a Surface Contact by Point Contacts

そもそも、面接触は無限個の点接触の集合である。したがって、面接触によって作用可能な接触力の集合は、無限個の点接触によって作用可能な接触力の重ね合わせとして表現できる。しかし、無限個の接触点を扱うのはやはり難しいため、ここでは有限個の接触点で置き換えることを考える。これは、Fig. 2.10 のように、環境と面接触している物体の代わりに、剣山のようなものが生えている物体を考えて、これで接触をモデル化しようとするものである。つまり、環境との間で面接触している物体を考える代わりに、複数の出っ張った点で点接触している物体を考えよう、というわけである。

この場合、接触面において荷重が面上に連続的に分布していたのが、置き換えられた接触点における離散的・集中的な荷重分布になってしまう。したがって、この置き換えによって、物理現象としての接触の状態は大きく変わる。しかしながら、ここでの目的は、接触面から対象物に作用可能な一般化力の集合を求めること、であった。したがって、この置き換えによっても、作用可能な一般化力の集合が変わらない、もしくは十分良い近似になっているのであれば、問題ないことになる。

以上のことから、本節で扱う問題は、

- 面接触における接触力によって対象物に作用可能な一般化力の集合を、有限個の点接触における接触力の合力によって対象物に作用可能な一般化力の集合で近似できるように、接触面上のいくつかの点を代表点として適切に選ぶこと

と定義できる。別の言い方をすれば、「面接触における接触力によって対象物に作用可能な一般化力の集合を近似的に求めるために、適切に選んだ有限個の点接触によって、元の面接触をモデル化する」ということである。

なお、ここで行う代表点を使ったモデル化は、初等力学の問題において環境と接触している物体に対して外力を加えた場合の挙動を調べる方法とは、少々異なることを付記しておく。環境と接触している物体にある外力が加わった際の力学解析は、外力（の合力）とつりあう反力を求め、その作用点が接触面内に存在するかどうか、そして摩擦の条件を満たして

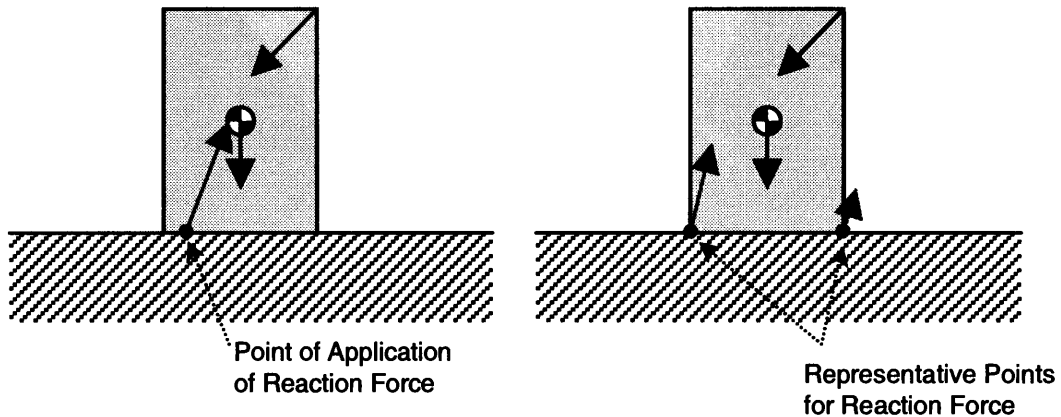


Fig. 2.11: Mechanical Analysis of Contact Reaction Forces

いるか，を調べるのが一般的である (Fig. 2.11 左)．この場合も，求めた作用点を代表点とし，そこでの接触力によって面接触全体の接触力を表現していることになる．しかし，これではさまざまな外力に対する挙動を調べる場合，外力が変化すると代表点の位置も変化してしまい，定式化がやりづらい．そこで力学解析の都合上，ここでは Fig. 2.11 右のように，あらかじめ接触を表すための代表点を複数定めておいて，それらの点での接触点での合力として接触反力を求める，という手法をとるのである．

2.3.4 点接触による面接触の置き換え

次の問題は，どのように面接触を有限個の代表点における点接触に置き換えればよいか，ということになる．ここでは，回転を伴わない面接触の場合（接触面が静止している，もしくは純粋な並進運動を行っている場合），および回転を伴う面接触の場合，の2つに分けて考える．

回転を伴わない面接触の場合

いま，接触面での摩擦係数は一様であると仮定しているので，接触面が静止している場合は，面接触のうちのどの点でも，摩擦円錐は同じである．この場合，接触面上でのある1点において可能な接触力（垂直抗力およびクーロン摩擦力）によって対象物に作用可能な一般化力は，それを囲む三角形の3頂点において可能な接触力によって対象物に作用可能な一般化力の重ね合わせによって表現することが可能である．このことから，接触面が静止してい

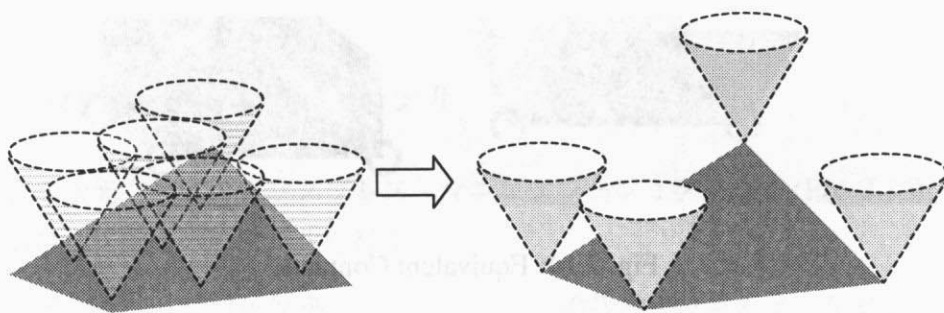


Fig. 2.12: Replace a Surface Contact with Point Contacts

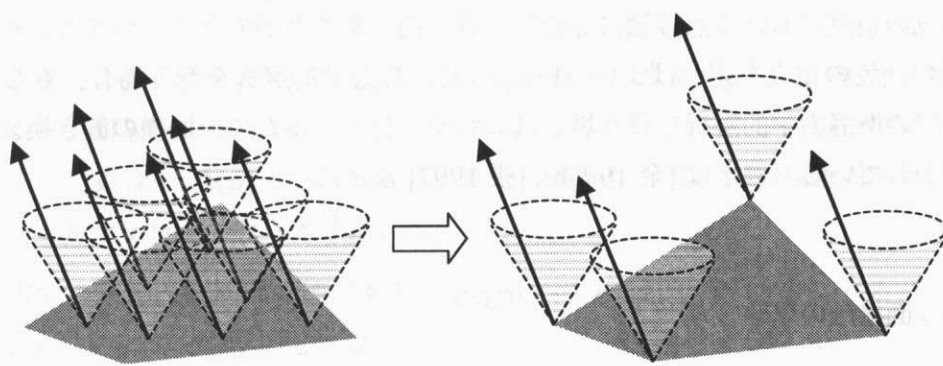


Fig. 2.13: Replace a Sliding Surface Contact with Sliding Point Contacts

る場合は、面接触における接触力によって対象物に作用可能な一般化力は、その凸包の頂点において作用可能な接触力によって作用可能な一般化力の重ね合わせとしてすべて表現できることが分かる (Fig. 2.12). したがって、面接触のうちの一部の点 (接触面の凸包の頂点) における点接触で、元の面接触を置き換えることができる (「置き換えることができる」とは、あくまで、ここでの目的である「接触面から対象物に作用可能な一般化力の集合を求める」という観点から見たときのことである)。

次に、接触面が純粋な並進運動をしている場合、接触面上のどの点でも、滑りの方向は同じである。したがって、面接触上のどの点でも、接触力 (垂直抗力 + クーロン摩擦) の方向は同じになる。この場合も、接触面上でのある 1 点において可能な接触力 (垂直抗力およびクーロン摩擦) によって対象物に作用可能な一般化力は、それを囲む三角形の 3 頂点において可能な接触力によって対象物に作用可能な一般化力の重ね合わせによって表現することが可能である。したがって、この場合も、面接触のうちの一部の点 (接触面の凸包の頂点) における点接触で、元の面接触を置き換えることができる (Fig. 2.13)。

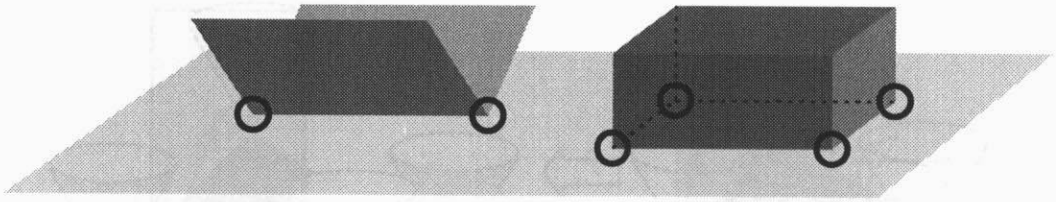


Fig. 2.14: Equivalent Contacts

以上のことから、対象物が静止もしくは純粋な並進運動をしている場合は、面接触を、接触面の凸包の頂点における点接触に等価的に置き換えることができる。つまり、代表点として接触面の凸包の頂点を選べばよい (Fig. 2.14)。静力学的解析を行う場合、もしくは2次元平面内での準静力学的解析を行う場合はこれで十分であるため、同様の置き換えが多くの研究で行われている (例えば [余 1995b], [張 1997] など)。

回転を伴う面接触の場合

しかしながら、回転を伴う面接触においては、たとえ摩擦係数が一様であっても、Fig. 2.14のように代表点として接触面の凸包の頂点を選ぶだけでは、等価な置き換えとはならない (付録 A.1 を参照)。これは、面接触上での各接点において、滑りの方向が異なるためであり、(静的でなく) 準静的な力学解析を行うことで初めて表面化する問題である。しかし、このことについては、接触力の定式化を行った従来研究 [余 1995b, 余 2000] でも触れられていない ([余 2000] には摩擦係数が一様であれば面接触を点接触で置き換え可能である旨の記述があるが、これは幾何学的拘束の表現が置き換え可能であることと、接触力の表現が置き換え可能であることが混同されたものと思われる)。また、接触面の凸包の頂点における接触力のみによって対象物に作用可能な一般化力の集合は、面接触における接触力によって対象物に作用可能な一般化力の集合に比べてかなり小さくなることが多く、近似として見ても良いとは言えない。

そこで、以降では回転を伴う面接触が存在する場合を含めて、グラスプレス・マニピュレーションにおける接触力をモデル化する方法を提案する。

2.3.5 各接触点での接触力のモデル

ここでは3次元空間内のグラスプレス・マニピュレーションを考え (Fig. 2.15), まず, 各接触点における接触力のモデル化を行う.

対象物と環境もしくは位置制御されたロボットとの接触点位置の集合を \mathcal{C}_{env} とし, 対象物と力制御されたロボットとの接触点の集合を \mathcal{C}_{rob} とする. また, 滑っている点の集合を $\mathcal{C}_{\text{slide}}$, 滑っていない点の集合を $\mathcal{C}_{\text{stat}}$ とする. ここで,

$$\mathcal{C} := \mathcal{C}_{\text{slide}} \cup \mathcal{C}_{\text{stat}} = \mathcal{C}_{\text{env}} \cup \mathcal{C}_{\text{rob}} \quad (2.1)$$

とする. 対象物の重心から見た接触点の位置を $\mathbf{p}(\in \mathcal{C})$ とおき, \mathbf{p} での接触力 ($\mathbf{f}(\in \mathbb{R}^3)$ と書く) によって対象物に作用させることのできる一般化力 (力および対象物の重心に関するモーメント) の集合を $\mathcal{A}(\mathbf{p}) \subset \mathbb{R}^6$ と書く. また, 接触点 \mathbf{p} での, 対象物内部方向を向く単位法線ベクトルを $\mathbf{n}(\mathbf{p})(\in \mathbb{R}^3)$ とする.

各接触点での摩擦円錐を単位稜ベクトル $\mathbf{c}_1(\mathbf{p}), \dots, \mathbf{c}_s(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}^3$ で表される凸多面錐で近似すると, $\mathbf{p} \in \mathcal{C}_{\text{env}} \cap \mathcal{C}_{\text{stat}}$ のときは

$$\mathcal{A}(\mathbf{p}) = \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{p} \times \mathbf{f} \end{pmatrix} \middle| \mathbf{f} \in \text{span}\{\mathbf{c}_1(\mathbf{p}), \dots, \mathbf{c}_s(\mathbf{p})\} \right\} \quad (2.2)$$

となる. ただし, $\text{span}\{\dots\}$ は, 要素ベクトルの非負結合として表される凸多面錐であり [平井 1999], $\mathcal{A}(\mathbf{p})$ も凸多面錐となる.

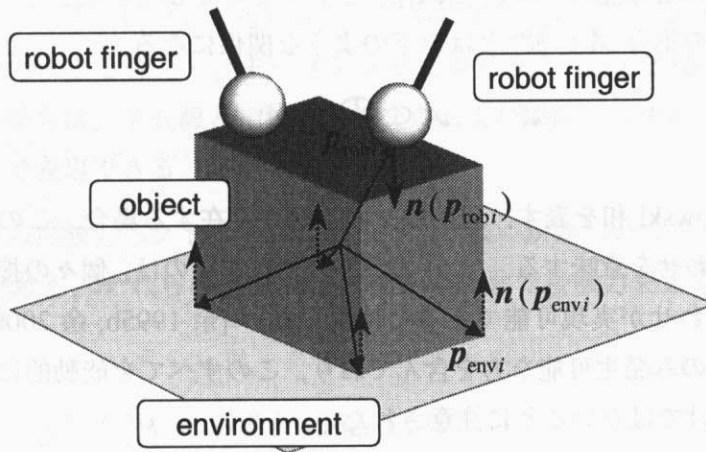


Fig. 2.15: Object in Grasplless Manipulation

一方, $\mathbf{p} \in \mathcal{C}_{\text{env}} \cap \mathcal{C}_{\text{slide}}$ のときは,

$$\mathcal{A}(\mathbf{p}) = \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{p} \times \mathbf{f} \end{pmatrix} \middle| \mathbf{f} \in \text{span}\{\mathbf{c}'(\mathbf{p})\} \right\} \quad (2.3)$$

と表せる. ただし, $\mathbf{c}'(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}^3$ は, 滑りと逆方向の摩擦円錐のエッジを表す単位ベクトルである.

次に, $\mathbf{p} \in \mathcal{C}_{\text{rob}} \cap \mathcal{C}_{\text{stat}}$ のときは

$$\mathcal{A}(\mathbf{p}) = \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{p} \times \mathbf{f} \end{pmatrix} \middle| \mathbf{f} \in \text{span}\{\mathbf{c}_1(\mathbf{p}), \dots, \mathbf{c}_s(\mathbf{p})\}, \boldsymbol{\tau}(\mathbf{p}) = \mathbf{J}(\mathbf{p})^T \mathbf{f} \right\} \quad (2.4)$$

ただし, $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{p}), \mathbf{J}(\mathbf{p})$ は, それぞれ接触点 \mathbf{p} に対応する指の関節トルクベクトルとヤコビ行列である. $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{p})$ が定ベクトルの場合, $\mathcal{A}(\mathbf{p})$ は凸超多面体となる.

同様に, $\mathbf{p} \in \mathcal{C}_{\text{rob}} \cap \mathcal{C}_{\text{slide}}$ のときは,

$$\mathcal{A}(\mathbf{p}) = \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{p} \times \mathbf{f} \end{pmatrix} \middle| \mathbf{f} \in \text{span}\{\mathbf{c}'(\mathbf{p})\}, \boldsymbol{\tau}(\mathbf{p}) = \mathbf{J}(\mathbf{p})^T \mathbf{f} \right\} \quad (2.5)$$

と書けるが, このようなマニピュレーション (ロボット指を対象物の表面上で滑らせながらあやつる) は通常行わないため, 以降では $\mathcal{C}_{\text{rob}} \cap \mathcal{C}_{\text{slide}} = \emptyset$ と考える.

2.3.6 可能な接触力集合の表現

接触力の合力・合モーメント

個々の接触点で作用可能な一般化力 $\mathcal{A}(\mathbf{p})$ とすべての接触点を通して, 対象物に対して作用可能な一般化力の集合 $\mathcal{A} \subset \mathbb{R}^6$ とは以下のような関係になる.

$$\mathcal{A} \subseteq \bigoplus_{\mathbf{p} \in \mathcal{C}} \mathcal{A}(\mathbf{p}) \quad (2.6)$$

ここで \oplus は Minkowski 和を表す. 辺接触や面接触が存在する場合, この式は無限個の点での接触力の重ね合わせを意味する. (2.6) 式が等号ではないのは, 個々の接触点における接触力の任意の組み合わせが実現可能であるとは限らない [余 1995b, 余 2000] ためである. また, \mathcal{A} は受動的にのみ発生可能な力を含んでおり, このすべてを能動的に対象物に作用させることができるわけではないことに注意されたい.

回転を伴う面接触がない場合

2.3.4 項で述べたように、式 (2.6) で表される一般化力の集合は、回転を伴う面接触や辺接触が存在しない場合は、有限個の点（面接触の場合、接触面の凸包の頂点）での接触の効果と等価となり (Fig. 2.14),

$$\mathcal{A} \subseteq \bigoplus_{p \in \mathcal{C}} \mathcal{A}(p) = \bigoplus_{i=1}^m \mathcal{A}(p_i) \quad (2.7)$$

と書ける。ここで、 $p_1, \dots, p_m \in \mathbb{R}^3$ は置き換えた等価接触点の位置である。これによって、面接触を有限個の点接触と見なして扱うことができる。

回転を伴う面接触がある場合

2.3.4 項で述べたように、接触面が回転を伴いながら滑る場合は、その接触力は接触面の凸包の頂点における接触点の効果とは等価にならない（付録 A.1 にその具体例を示す）。そこで、ここでは回転を伴う面接触を複数個の点接触に置き換えて接触力集合を表現するための具体的方法を考える。

まず、回転を伴う面接触が存在する場合でも、接触面上のすべての点の接触力を考える必要はない。接触面の周上のすべての点（無限個）および瞬時回転中心（瞬時回転中心が接触面内にある場合）での接触力について、それらの接触力ベクトルの非負結合を考えればよい。なぜなら、接触面の瞬時回転中心を通る半直線上の点は、すべて同じ方向に変位しているため、接触力も同じ方向となる。したがって、その半直線上の接触点での力およびそれによるモーメントは、瞬時回転中心が接触面の外にある場合ならば、その半直線と接触面の周との交点での接触力による合力・合モーメントで表現できる (Fig. 2.16 左)。瞬時回転中心が接触面内にある場合は、半直線と接触面との交点および瞬時回転中心での接触力による合力・合モーメントで表現できる (Fig. 2.16 右)。

しかし、無限個の接触力ベクトルを考えるのは取り扱いが難しいので、以下のように有限個の代表点のみを考え、それらの代表点での接触の効果で接触力を近似表現することを考える。

1. 瞬時回転中心が接触面外にある場合 (Fig. 2.17 左)

この場合、瞬時回転中心を通るいくつかの半直線を引き、接触面の周との交点を代表点とする。さらに、接触面の頂点も代表点とする。

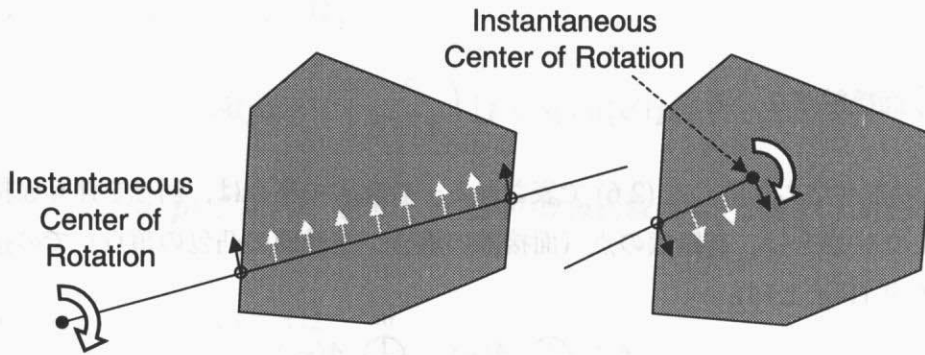


Fig. 2.16: Frictional Forces on a Half-Line in Rotation

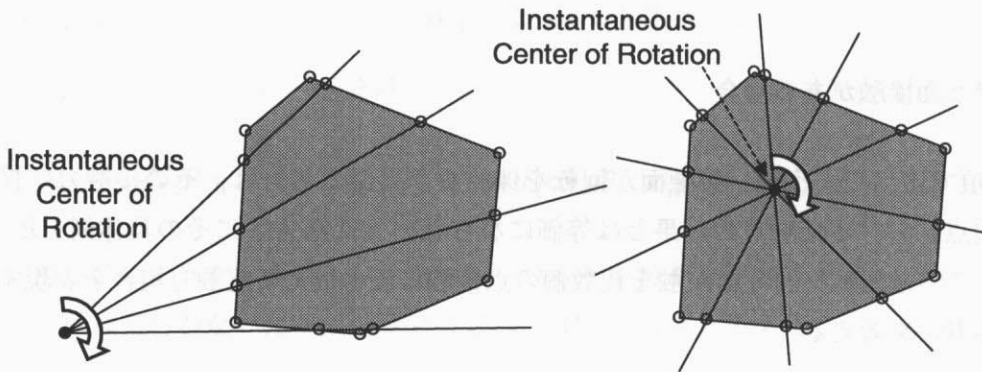


Fig. 2.17: Representative Points for Surface Contact with Rotation

2. 瞬時回転中心が接触面内にある場合 (Fig. 2.17 右)

この場合も、同様に瞬時回転中心を通るいくつかの半直線を引く。これらの半直線と接触面の周との交点、接触面の頂点、および瞬時回転中心を代表点に取る。瞬時回転中心は静止した接触点として扱う。

瞬時回転中心は、滑りの方向が不連続に変化する点であり、滑っていない接触点とも見なせる。したがって、そこでの接触力は摩擦円錐内の任意の力を発生できることになる。よって、特に瞬時回転中心が接触面内にある場合は、瞬時回転中心を代表点として選ぶことで、面接触の接触力を効果的に表現できるのである。

以上のように扱うことで、回転を伴う滑りのある場合でも、接触力の合力・合モーメントを有限個の接触点の効果に近似的に置き換えることができ、式 (2.6) のように表せる。つま

り，面接触を有限個の点接触と見なして扱うことができる。

なお，半直線を増やしてたくさんの代表点を取れば，任意の精度での近似が行える。このことは，摩擦円錐を凸多面錐で近似する際に，たくさんの稜線を持つ凸多面錐を用いることで，任意の精度での近似ができることと似ている。

2.3.7 対象物に加わる力

ここでは準静的なあやつりを仮定しているので，対象物に加わるすべての力がつりあう必要がある。対象物に働く外乱力が存在しない場合，重力など対象物に加わるその他の既知の外力を $\mathbf{Q}_{\text{known}} \in \mathbb{R}^6$ と書くと，対象物のつりあい方程式は

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_{\text{known}} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \\ \mathbf{Q} \in \mathcal{A} \end{cases} \quad (2.8)$$

と書ける。前項で示した方法によって，接触をすべて点接触に置き換えた場合は，

$$\mathcal{A} \subseteq \bigoplus_{p \in \mathcal{C}} \mathcal{A}(p) \approx \bigoplus_{i=1}^m \mathcal{A}(p_i) \quad (2.9)$$

である。

2.4 おわりに

本章では、グラスプレス・マニピュレーションの概要に関して述べた。

まず、「グラスプレス・マニピュレーション」という用語の定義について述べ、類似した概念である *nonprehensile manipulation* との違いについて議論した。その上で、本論文で扱うグラスプレス・マニピュレーションを、環境との接触を利用して対象物をあやつるマニピュレーションとすることを述べた。次に、グラスプレス・マニピュレーションの利点・欠点をまとめた。また、グラスプレス・マニピュレーションに関して従来行われてきた分類について紹介するとともに、環境との接触状態と対象物の拘束状態の両方の観点から、マニピュレーションを3種類に分類する方法を示した。

さらに、以降の章への準備として、グラスプレス・マニピュレーションの力学モデルを導入し、対象物に加わる力の関係を求めた。特に、従来触れられていなかった、回転を伴う面接触における接触力のモデル化手法を示した。

本章までは一般論を扱ったが、次章からは、グラスプレス・マニピュレーションにおけるさまざまな具体的問題を取り扱う。