



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し、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。

- 操作の确实性の定量的評価

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确实性は劣る。したがって、操作の确实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	61
第 4 章	接触作業における内力の解析	63
4.1	はじめに	64
4.2	従来研究	65
4.3	力学解析上の仮定	66
4.4	内力の解析	67

---

4.5	数値例 . . . . .	72
4.6	おわりに . . . . .	78
第 5 章	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	79
5.1	はじめに . . . . .	80
5.2	従来研究 . . . . .	81
5.3	ロボット指によるグラスプレス・マニピュレーションのモデル . . . . .	82
5.4	指の制御モードの自動決定 . . . . .	85
5.5	数値例 . . . . .	90
5.6	制御モード決定手法に対する考察 . . . . .	98
5.7	おわりに . . . . .	100
第 6 章	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の計画	101
6.1	はじめに . . . . .	103
6.2	従来研究 . . . . .	104
6.3	計画の概要 . . . . .	105
6.4	同一接触状態内でのグラフ生成 . . . . .	109
6.5	グラフ間の結合による接触状態遷移の表現 . . . . .	113
6.6	グラスプレス・マニピュレーションの計画 . . . . .	114
6.7	計画例 . . . . .	121
6.8	計画手法に関する考察 . . . . .	143
6.9	おわりに . . . . .	150
第 7 章	結論	151
7.1	結論 . . . . .	152
7.2	今後の展望 . . . . .	154
謝辞		157
参考文献		159
研究業績		167
付録		175
A.1	回転を伴う接触における接触力の例 . . . . .	176
A.2	6次元単位超球の外接超多面体近似 . . . . .	185
A.3	ヒューリスティック関数の単調性 . . . . .	187

# 本論文で用いる記号

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

$$\text{diag}(A_1, \dots, A_n) := \begin{bmatrix} A_1 & & O \\ & \ddots & \\ O & & A_n \end{bmatrix}$$

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

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

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

$$\bigoplus_{i=1}^n \mathcal{A}_i := \left\{ \sum_{i=1}^n x_i \mid x_1 \in \mathcal{A}_1, \dots, x_n \in \mathcal{A}_n \right\}$$

- 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き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

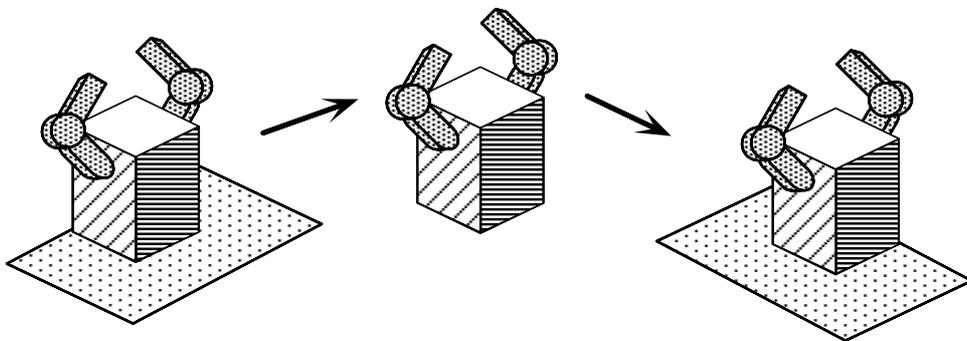


Fig. 1.1: Pick-and-Place

す，転がすなどして物体を目的の位置に動かす (Fig. 1.2).

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

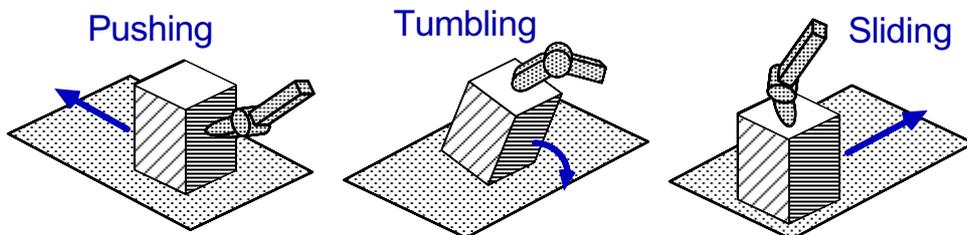


Fig. 1.2: Graspless Manipulation



(a) Carrying a Gas Bottle



(b) Picking Up a Book



(c) Sliding a Paper on a Desktop

Fig. 1.3: Human Graspless Manipulation

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

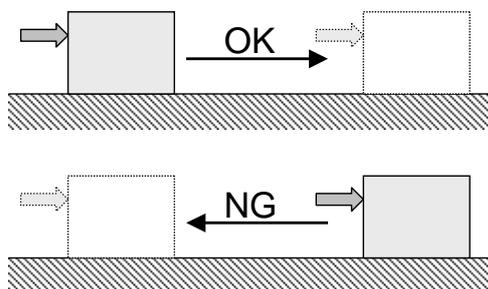


Fig. 1.4: Irreversibility in Graspless Manipulation

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には，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だけで，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係する研究を, 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

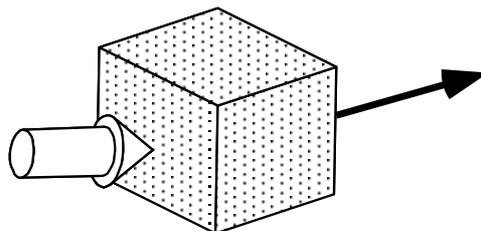


Fig. 1.5: Pushing Operation

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

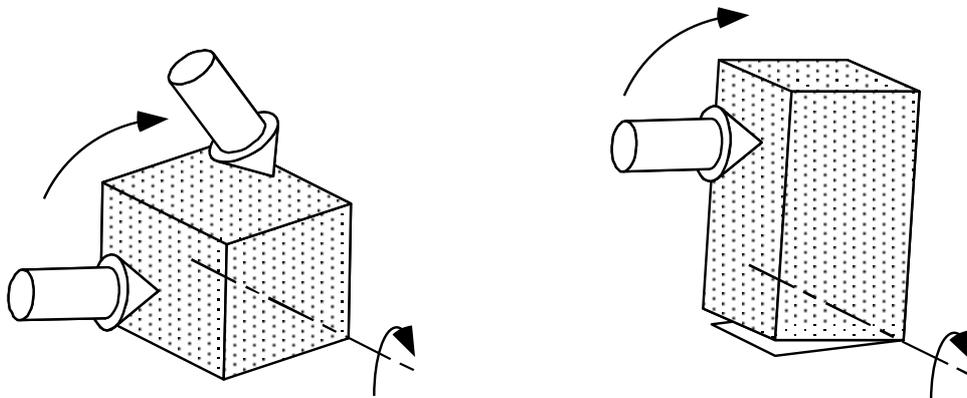


Fig. 1.6: Tumbling Operation

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]。

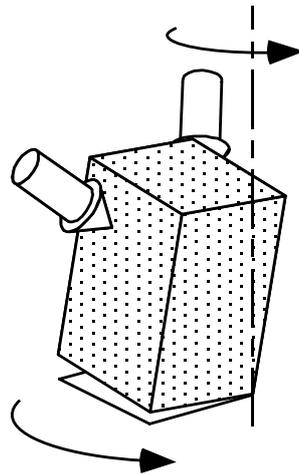


Fig. 1.7: Pivoting Operation

### 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きている [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

---

結果はガラスプレス・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、ガラスプレス・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. 操作の确实性の低さ
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确实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．

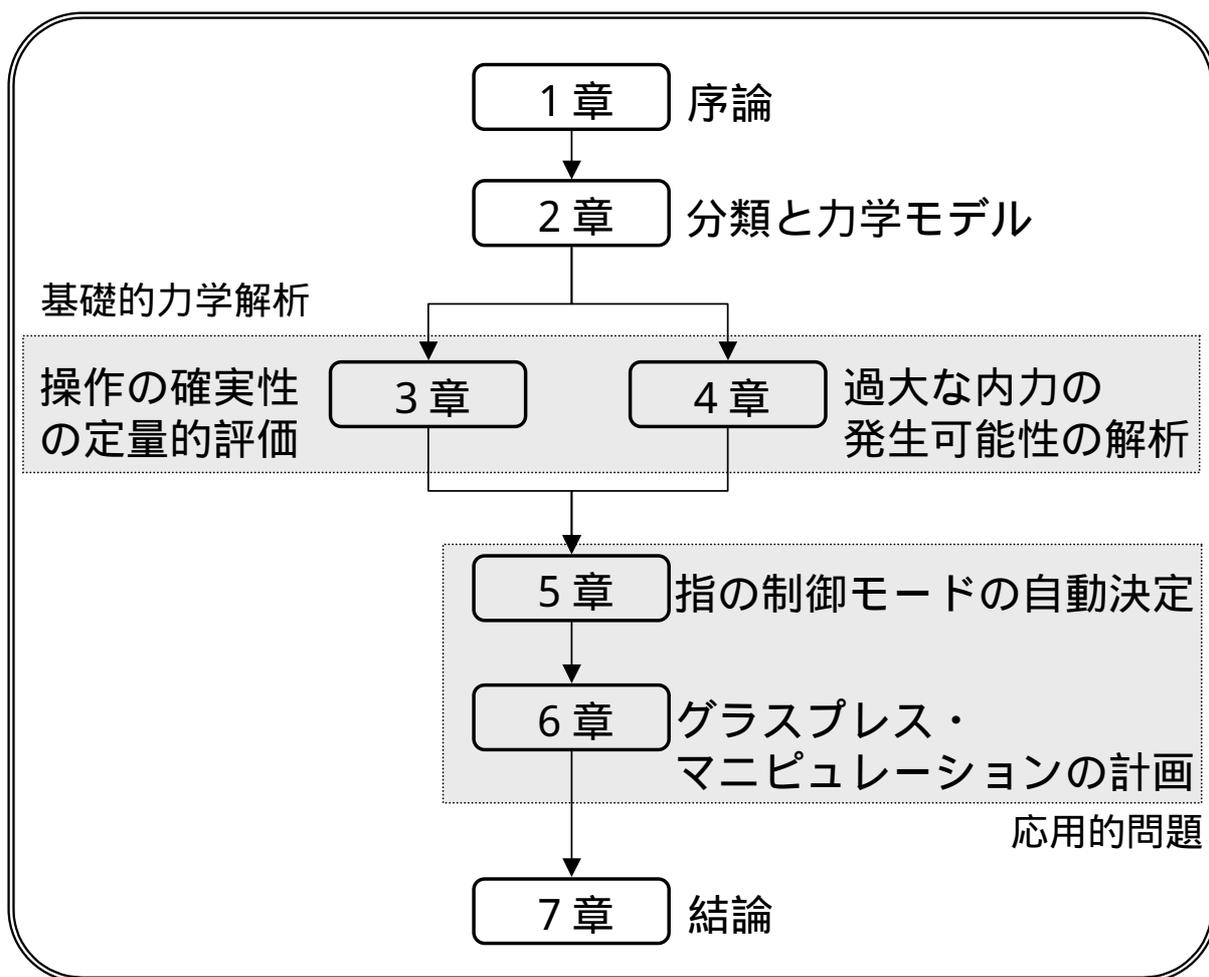


Fig. 1.8: Structure of This Thesis

## 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 . . . . .	29
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

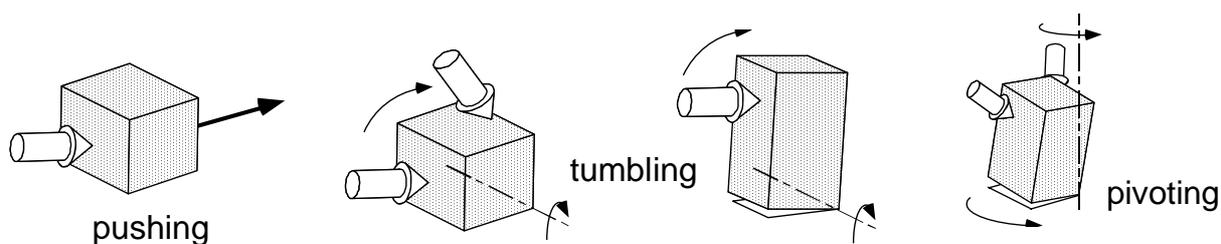


Fig. 2.1: Typical Examples of Graspless Manipulation

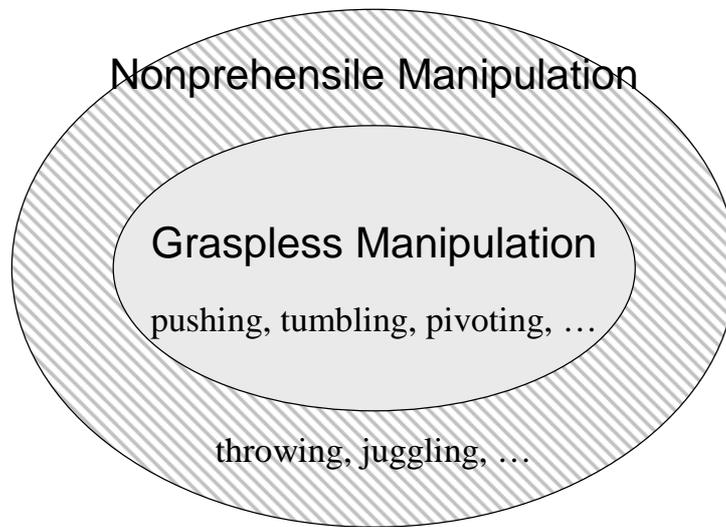


Fig. 2.2: Graspless Manipulation and Nonprehensile Manipulation

「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ブ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。

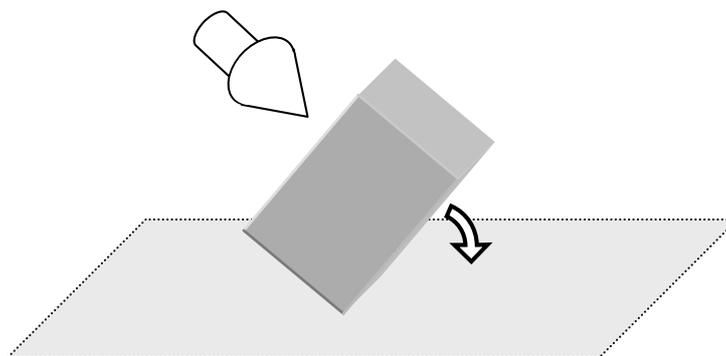


Fig. 2.3: Pushing an Object to Fall Down

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ない．例えば，平面上での押し操作の場合，対象物の重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．

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．

- 操作の确实性の低さ．

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．

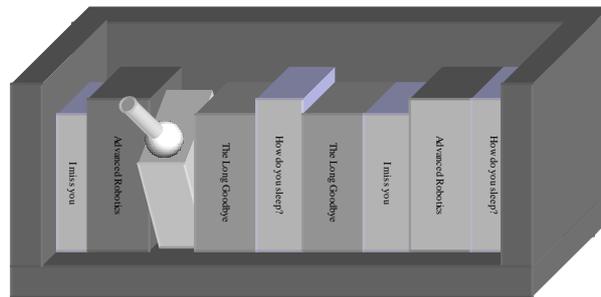


Fig. 2.4: Picking up a book

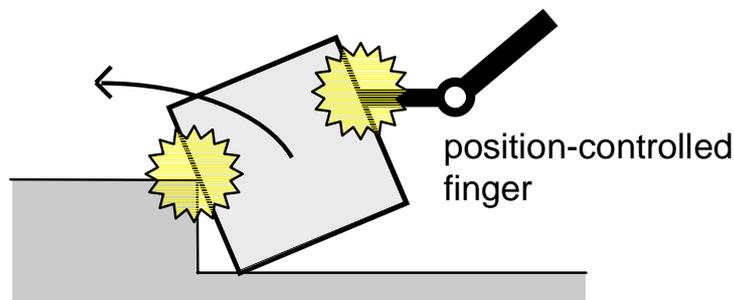


Fig. 2.5: Excessive Internal Force in Graspless Manipulation

- 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、対象物は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。

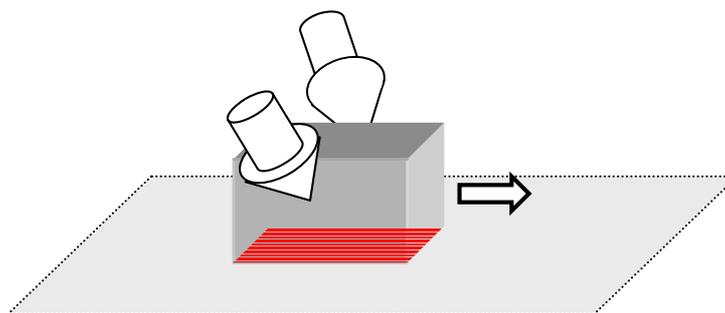
##### Type 2 (line contact) (Fig. 2.6(b))

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、対象物は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。

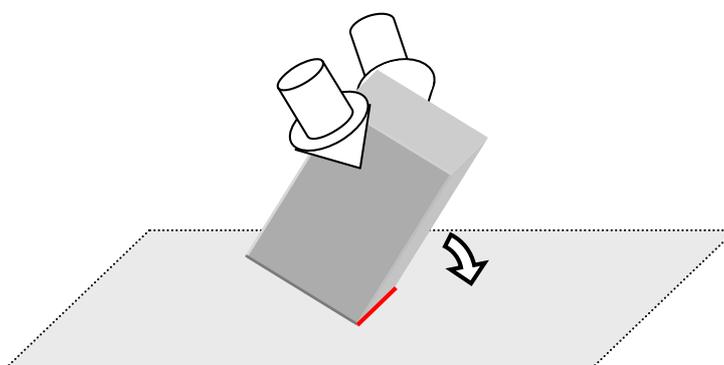
##### Type 3 (point contact) (Fig. 2.6(c))

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。

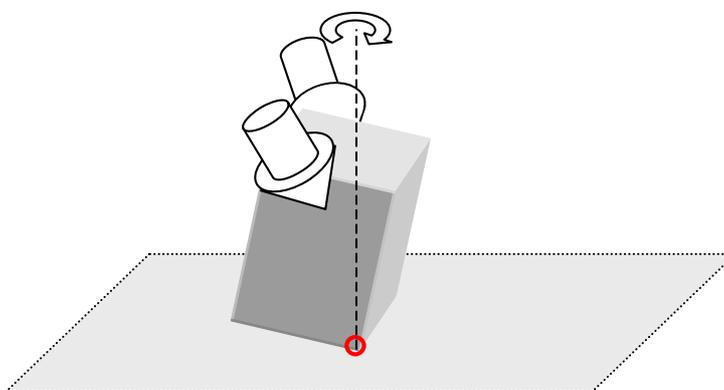
Type 4 (no contact) 操作中对象物と環境が接触しない状態であやつりが実行される場合。これは非グラスプレス・マニピュレーションであり、通常のピックアンドプレイ



(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]

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

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」を区別したものとと言える．

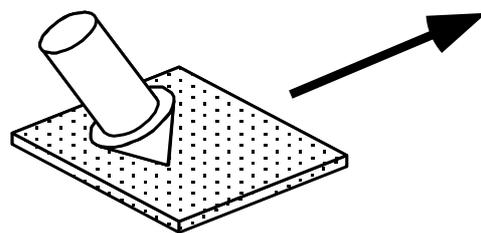
しかし、上記の分類は厳密さを欠くところがある．例えば、[相山 1996a] によれば Fig. 2.7 (a) のようなあやつりは Type A であり、Fig. 2.7 (b) のようなあやつりは Type B であるとしている．ここで、Fig. 2.7 (c) のようなあやつりは、stable push [Lynch 1996b] と同等と見なすことができ、摩擦条件を満たす限りにおいて、対象物の運動はマニピュレータの運動により決定される．しかし、この状態で対象物が rigid に把持されているわけではない．果たしてこのようなあやつりは Type A と B のいずれに分類するべきかは微妙だ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

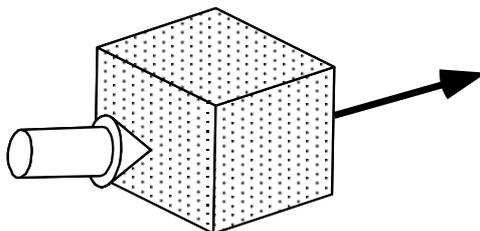
このように、Type A, B の分類については議論の余地がある．しかし、ここではこれらの定義をより精緻にすることよりも、本論文での議論に役立てることを考えて、新たなマニピュレーションの分類法を提案することとする．具体的には、環境との接触状態と、物体の拘束状態の両方を考慮して、以下のような3種類にマニピュレーションを分類する．

Type  $\alpha$  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)) ．

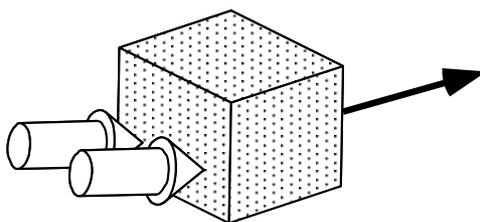
Type  $\beta$  ロボットによって対象物を完全に把持しているが、環境との接触によっても対象物の重量の一部を支持している場合 (Fig. 2.8 (b)) ．



(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]

Type  $\gamma$  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 (Fig. 2.8 (c)) .

Type  $\alpha$  はグラスプレス・マニピュレーションである．Type  $\beta$  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も呼ぶべきものである．Type  $\gamma$  は完全な把持によるマニピュレーションを指す．Type  $\beta$  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  $\alpha, \beta, \gamma$  を評価したものが Table 2.1 である．明らかに，Type  $\beta$  のマニピュレーションは，Type  $\alpha$  と

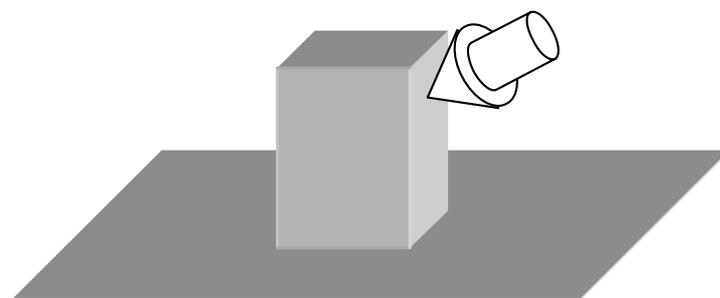
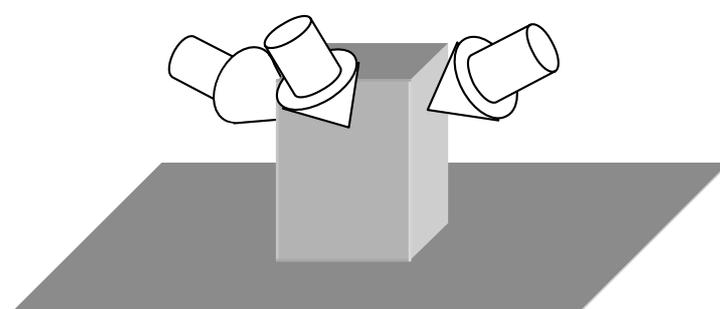
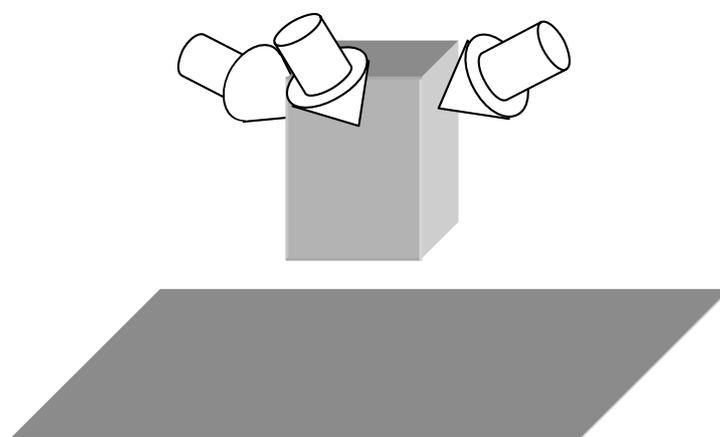
(a) Type  $\alpha$  (Graspless Manipulation)(b) Type  $\beta$  (Semi-Graspless Manipulation)(c) Type  $\gamma$  (Pick-and-Place)

Fig. 2.8: New Classification of Operations

Type  $\gamma$  の中間の性質を持つことが分かる .

本論文では Type  $\alpha$  のグラスプレス・マニピュレーションを対象とするが , Type  $\beta, \gamma$  のマニピュレーションは , Type  $\alpha$  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

Table 2.1: Evaluation of Manipulation Type  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$ 

	Type $\alpha$	Type $\beta$	Type $\gamma$
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

くはそのまま Type  $\beta, \gamma$  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  $\beta, \gamma$  を対象とする場合は、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  $\beta, \gamma$  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りうると想定する。

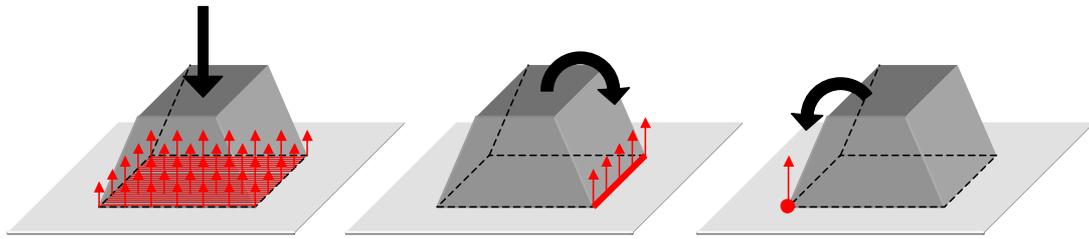


Fig. 2.9: External Disturbance and Distribution of Contact Forces

このときに、

- 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确实性の評価（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。

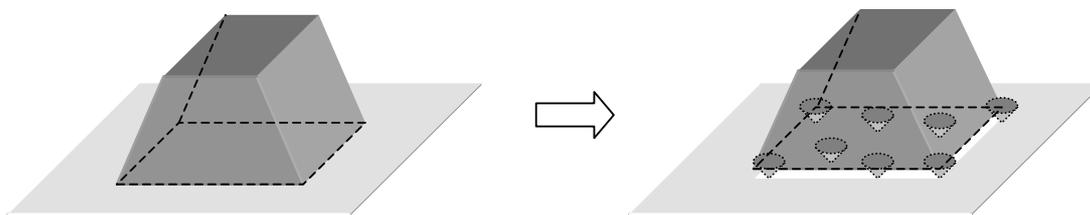


Fig. 2.10: Approximate a Surface Contact by Point Contacts

### 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．

そもそも，面接触は無数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，無数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，無数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

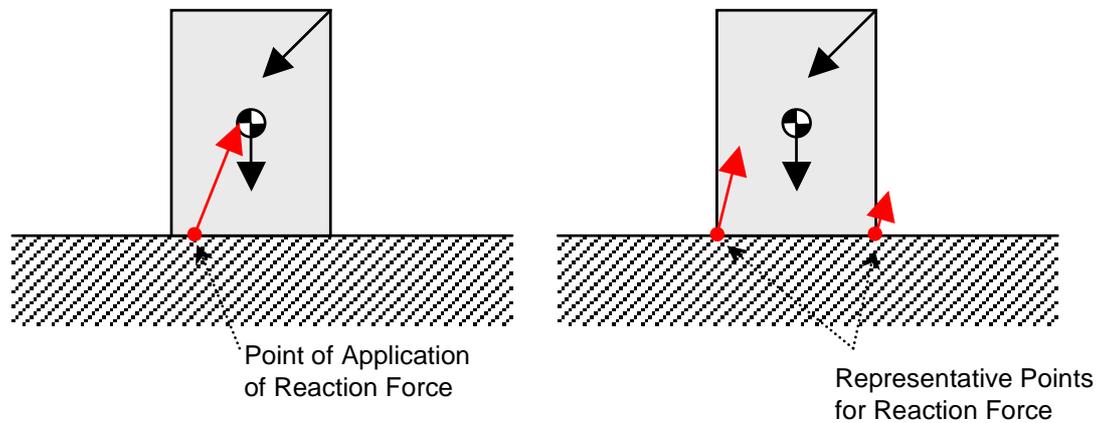


Fig. 2.11: Mechanical Analysis of Contact Reaction Forces

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．

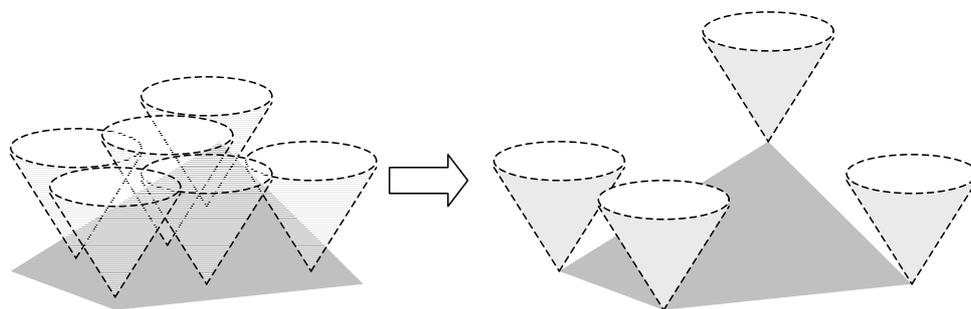


Fig. 2.12: Replace a Surface Contact with Point Contacts

#### 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」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+クーロン摩擦力）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。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）。

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

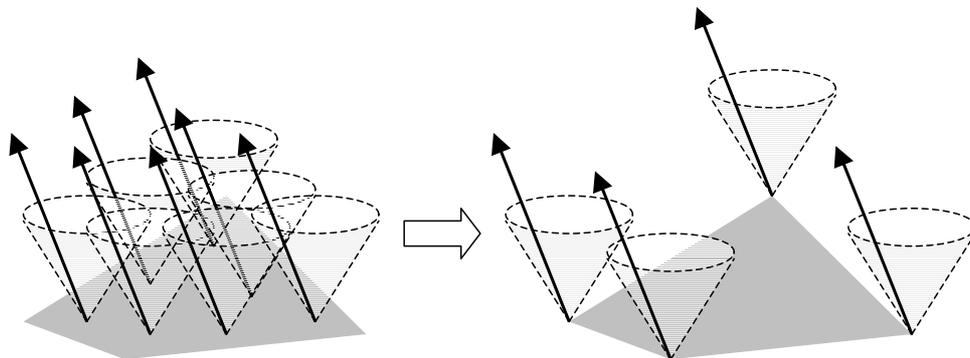


Fig. 2.13: Replace a Sliding Surface Contact with Sliding Point Contacts

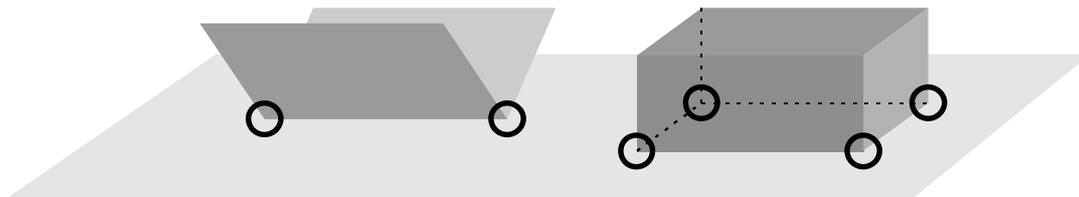


Fig. 2.14: Equivalent Contacts

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, 面接触上での各接触点において, 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  $\mathcal{C}_{\text{env}}$  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  $\mathcal{C}_{\text{rob}}$  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  $p (\in \mathcal{C})$  とおき、 $p$  での接触力 ( $f (\in \mathbb{R}^3)$  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  $\mathcal{A}(p) \subset \mathbb{R}^6$  と書く。また、接触点  $p$  での、対象物内部方向を向く単位法線ベクトルを  $n(p) (\in \mathbb{R}^3)$  とする。

各接触点での摩擦円錐を単位稜ベクトル  $c_1(p), \dots, c_s(p) \in \mathbb{R}^3$  で表される凸多面錐で近

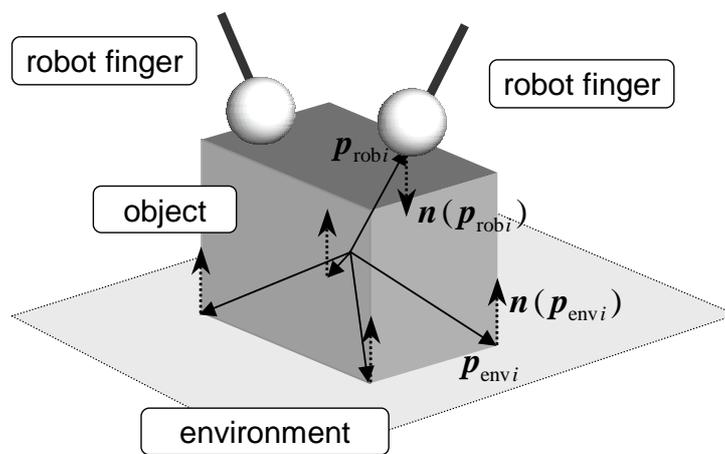


Fig. 2.15: Object in Graspless Manipulation

似すると,  $p \in \mathcal{C}_{\text{env}} \cap \mathcal{C}_{\text{stat}}$  のときは

$$\mathcal{A}(p) = \left\{ \begin{pmatrix} f \\ p \times f \end{pmatrix} \middle| f \in \text{span}\{c_1(p), \dots, c_s(p)\} \right\} \quad (2.2)$$

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],  $\mathcal{A}(p)$  も凸多面錐となる.

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

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

と表せる. ただし,  $c'(p) \in \mathbb{R}^3$  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,  $p \in \mathcal{C}_{\text{rob}} \cap \mathcal{C}_{\text{stat}}$  のときは

$$\mathcal{A}(p) = \left\{ \begin{pmatrix} f \\ p \times f \end{pmatrix} \middle| f \in \text{span}\{c_1(p), \dots, c_s(p)\}, \tau(p) = J(p)^T f \right\} \quad (2.4)$$

ただし,  $\tau(p)$ ,  $J(p)$  は, それぞれ接触点  $p$  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.  $\tau(p)$  が定ベクトルの場合,  $\mathcal{A}(p)$  は凸超多面体となる.

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

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

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  $\mathcal{A}(p)$  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.

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

ここで  $\bigoplus$  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)

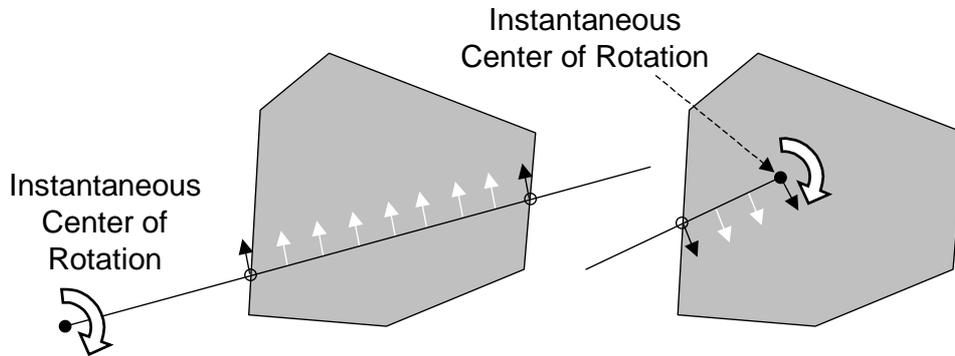


Fig. 2.16: Frictional Forces on a Half-Line in Rotation

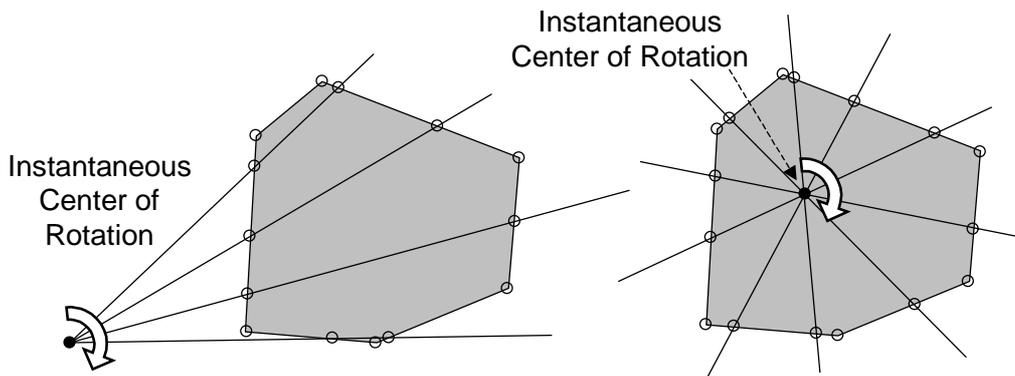


Fig. 2.17: Representative Points for Surface Contact with Rotation

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．

## 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する．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、半直線の数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  $Q_{\text{known}} \in \mathfrak{R}^6$  と書くと、対象物のつりあい方程式は

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

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．

## 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

---

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
3.5.1	評価指標 . . . . .	48
3.5.2	指標の計算法 . . . . .	49
3.5.3	評価指標に関する考察 . . . . .	52
3.6	数値例 . . . . .	54
3.6.1	平面上での押し操作 . . . . .	54
3.6.2	平面上での転がし操作 . . . . .	56
3.6.3	パラメータの変動の効果 . . . . .	57
3.7	おわりに . . . . .	61

---

### 3.1 はじめに

グラスプレス・マニピュレーションにおいては、対象物をかたく把持するわけではないので、その計画・実行において操作対象物の安定性を評価することが重要となる。対象物の安定性に関して、グラスプレス・マニピュレーションでは重力および摩擦力が大きな影響を与える。特に摩擦力は物体の滑りによって規定されるため、対象物の安定性は、その運動によって大きく変わる。例えば、Fig. 3.1 のように、摩擦のある水平面上に置かれた物体を考える。重力と摩擦力の効果により、この物体は、ある程度の外乱力が加わっても動かない。この意味において、この物体は「安定」である。さらに、この物体にロボット指が一点接触していたとしても、この物体は「安定」である。ところが、このロボット指が物体を押して運動をさせ始めた瞬間、この物体は「不安定」になる。すなわち、ごく微小の外乱力が働いただけでも、物体の動きは乱され、ふらつくことになる。一方で、ロボット指が2本になり、これらが位置制御されているとすれば、stable push [Lynch 1996b] と等価になり、物体は「安定」である。つまり、物体はロボット指の動きに 1:1 に対応した運動を行い、それはある程度までの大きさなら外乱力が加わっても乱されない。

このことは、グラスプレス・マニピュレーションにおいては、操作中（運動中）であることを考慮に入れて安定性を評価する必要があることを示している。本章では、この操作中の

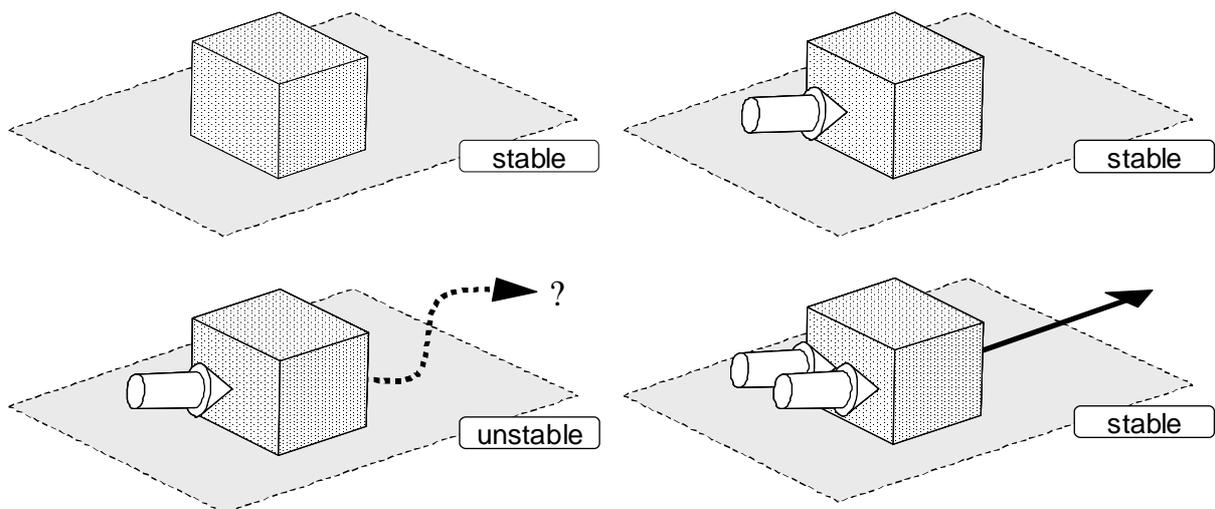


Fig. 3.1: Example: Stability of Graspless Manipulation

---

対象物の安定性を，静止状態での対象物の安定性と区別して，「操作の确实性」と呼ぶことにする．

本章では，この「操作の确实性」について，その定義を与え，また定量的に評価する手法を提案する．

## 3.2 従来研究

把持の安定性の評価に関してはきわめて多数の研究が行われている [Shimoga 1996, Bicchi 2000, Okamura 2000] が、グラスプレス・マニピュレーションの操作の確実性に適用可能なものは少ない。

中村は、環境と接触している物体の安定状態として、“work closure”を定義した [中村 1990]。任意のゼロでない可能な対象物の微小変位に対して、対象物のする仕事が負になるとき、対象物は work closure されているという。また、吉川は work closure を力受動拘束 (passive force closure) として再定義し、より詳細な解析を行った [吉川 1995]。しかし、基本的にこれらは (マニピュレーション中ではなく) 対象物が静止した状態を表しており、また、定量的な評価指標も示されていない。

Mason らは、ダイナミックマニピュレーションに関する議論の中で、“quasi-static closure”および“dynamic closure”という概念を示した [Mason 1993]。数学的な定式化が行われておらず、定義は曖昧であるが、quasi-static closure は押し操作中の物体のように、準静的な力のつりあいが保たれた状態を指している。また、dynamic closure は、例えば加速中の板の上に載せられた物体のように、動的な力のつりあいが保たれた状態を指している。

Trinkle らは、whole arm manipulation について、対象物の安定状態 “first-order stability” を定義し、その詳細な定式化を行った [Trinkle 1995]。マニピュレータの速度によって対象物の速度が完全に決まり、かつ elemental contacts (2つの物体のトポロジカルな要素の間の接触 [Desai 1989]。面-面、面-頂点など)の接触モードが無限小の一般化力によっては変化しないとき、対象物は first-order stable であると言う。First-order stability の概念は、グラスプレス・マニピュレーションの操作の確実性にも応用可能であると思われるが、定量的な評価指標は示されていない。また、定式化が極めて複雑であることも難点である。

Kijimoto らは、準静的なグラスプレス・マニピュレーションの定量的な評価指標として、各接触点での接触力の余裕の最小値を用いた [Kijimoto 1999]。これは、[Kerr 1986]において最適把持を実現するために導入された評価関数を、グラスプレス・マニピュレーションに適合するように修正したものとなっている。すなわち、拘束条件による境界から最も遠いところを最適とする評価である。しかし、この指標は「あやつりの条件 (準静的なつりあい方程式) を満たしつつ各指が滑らない」ことを評価しているだけであり、未知の外乱力が働いた場合に操作を実行できるかどうかはわからない。これは、この評価関数がそもそも指力を決定するために導入されたものであり、言わば、「与えられた条件の中で最善のものを探

す」ための評価となっているためである。また、滑りがある場合や、線接触や面接触を複数の点接触で置き換えた場合に、その指標の物理的意味が不明確になってしまうという問題もあった。

余らは環境への押し付け力の集合と指力の集合の共通部分の大きさを操作の确实性を評価する方法を提案している [余 2000]。この指標は、現在の接触状態の維持しやすさを評価する指標となっているが、重力の影響を評価に入れることができないため、重力の効果を積極的に利用することの多いグラスプレス・マニピュレーションに適用するには不適當である。

また、[Kijimoto 1999] と [余 2000] に共通して、回転を伴う辺接触や面接触での接触力の取り扱いが明らかにされていないことも問題となる（ただし、この点については 2.3.6 項に示した定式化によって解決できる）。

以上のように、グラスプレス・マニピュレーションは外乱に対する操作の确实性が低いことが問題であるにもかかわらず、それを定量的に評価して、マニピュレーションの計画・実行に役立てるための適切な指標が存在していないことがわかる。

### 3.3 グラスプレス・マニピュレーションの操作の確実性

ここでは、グラスプレス・マニピュレーションの「操作の確実性」を考える上で、どのような点を評価する必要があるのかを改めて考える。

まず第一に、グラスプレス・マニピュレーションの操作の確実性は操作中（運動中）であることを考慮に入れて評価される必要があり、この点で把持の安定性とは大きく異なる。これは3.1節でも触れた通りである。しかし、把持の安定性に関する議論は、グラスプレス・マニピュレーションの操作の確実性を考える上で大いに役立つ。そこで、ここでは把持に関する考察から始め、操作の確実性の議論へと進めることにする。

中村は、把持の「安定性」という言葉が、下記のような複数の意味で用いられていると指摘した [中村 1991]。

1. 把持物体の位置が外乱などにより変位した際に、元の静的なつりあいの位置にもどる性質
2. 把持物体に未知の外乱力が働く際に指が接触を保つ性質
3. 指が把持物体に加わる任意な外乱力をキャンセルするような指力を発生できること

また、中村らは、パワーグラスプの議論において、

4. 外力が加わったとき、関節トルク一定でも、機構内部の拘束力によって接触力を変化させ、外力をキャンセルして把持を保つ性質

を、把持の「ロバスト性」と定義した [中村 1995]。

これら4つの性質をそれぞれグラスプレス・マニピュレーションに応用してみると、以下のような異なる「操作の確実性」を考えることができるであろう。

1. 操作中の対象物の運動が外乱などにより変化した際に、外乱が取り除かれると元の運動にもどる性質
2. 操作中の対象物に未知の外乱力が働く際に指が接触を保つ性質
3. 指が操作中の対象物に加わる任意な外乱力をキャンセルするような指力を発生できること
4. 外力が加わったとき、機構や環境との間の接触力が受動的に変化することで、外力をキャンセルして元の運動を保つ性質

まず、1の性質については、グラスプレス・マニピュレーションでは実現できない場合が多い。なぜなら、対象物を完全に把持していないため、拘束していない方向に対象物が動いてしまった場合に、これを元の運動に戻すことは通常できないためである。ただし、対象物の一部の自由度（拘束している方向）については、この性質が成り立つ場合がある。

2の性質は、対象物に加わる内力と関連し、[Kijimoto 1999]の指標はこれを評価したものである。しかし、指が接触を保っていたとしても、望みのマニピュレーションを実現できているとは限らない。例えば、2本の指で対象物をつまんで持ち上げようとしたときに、2つの接触点まわりに対象物が回転をしてしまう、といったことがありうる。逆に、指の本数が多いときなどは、1本の指の接触が外乱によって失われてしまったとしても、対象物のマニピュレーションは意図したとおりに行われている、ということも十分考えられる。

3の性質については、グラスプレス・マニピュレーションでは通常実現できない。なぜなら、対象物を完全に把持していないため、拘束していない方向には能動的に力を加えることができないためである。

4の性質は、望みのマニピュレーションを外乱に対して確実に実現できるかどうか、を表すものであり、グラスプレス・マニピュレーションにおける操作の確実性を評価する上で、もっとも基本的な性質であると考えられる。Masonらのquasi-static closure [Mason 1993]もこの性質を指しているものと考えられる。

以上のことを踏まえ、本章では、4の性質、言い換えれば、「操作中の対象物が外乱力にどれくらい耐えられるか」という点に着目し、その定量的評価を行う。

### 3.4 力学解析上の仮定

操作の確実性の評価を行うにあたり，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 (Fig. 3.2)，以下の仮定をおく．

- 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．
- すべての接触は複数の点接触で近似できる (2.3 節参照)．
- 対象物は三次元空間内の多面体である．
- 位置制御されているロボット指は十分剛性が高く，環境と同等と見なせる．
- 対象物と環境もしくは位置制御されているロボットとの間の接触は，辺接触や面接触であっても良いが，接触面は多角形で近似できる．
- 対象物とロボットおよび環境との間の同一接触面 (辺) での摩擦係数は一様である．

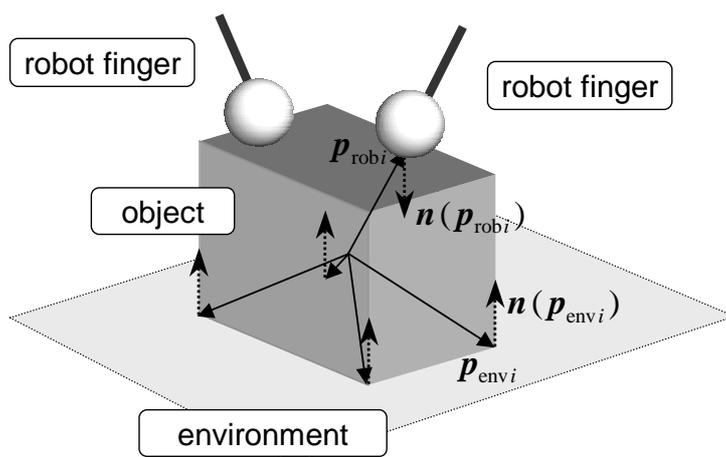


Fig. 3.2: Object in Graspless Manipulation

下線部は 2.3 節における仮定に加えて新たに導入したものである．記号等は 2.3 節で定義されたものを用いる．ただし，対象物の重心を原点とする座標系をとり， $p_{\text{env } 1}, \dots, p_{\text{env } m} \in \mathbb{R}^3$  を対象物と環境および位置制御ロボット（環境と同等と見なせる）との接触点位置とする．同様に， $p_{\text{rob } 1}, \dots, p_{\text{rob } n} \in \mathbb{R}^3$  を， $1, \dots, n$  番目の（力制御された）ロボット指と対象物との間の接触点位置とする．接触点  $p$  での対象物側への単位接触法線ベクトルを  $n(p) \in \mathbb{R}^3$  で表す．

通常の把持によるマニピュレーションにおける力学解析においては，準静的なあやつりを仮定することは，単に静的な解析を行うことを意味している．しかし，グラスプレス・マニピュレーションの力学解析においては，滑り接触における摩擦が存在するため，準静的な力学解析と静的な力学解析とでは結果が大きく異なる（3.1 節参照）ことを改めて強調しておく．

なお，以降では表記が煩雑になるのを避けるため，辺接触は面接触の特別な場合と考え，特に断らない限り「面」は「辺」を含むものとする．また，本章の議論は，適切な置き換えを行うことによって二次元平面内での問題にもそのまま適用可能である．

## 3.5 操作の確実性の評価

### 3.5.1 評価指標

ここでは、グラスプレス・マニピュレーションにおける操作の確実性を、運動中の対象物が抗することのできる一般化力の大きさを評価することを考える。同様な評価は、パワーグラスプの研究においても行われている [Mirza 1994] [中村 1995]。しかし、対象物をきつく拘束した状態であるパワーグラスプのロバスト性と、対象物をゆるく拘束するのみで環境を利用してあやつるグラスプレス・マニピュレーションの操作の確実性では、その評価における力点は自ずと違ってくる。本章の結果は、以下の点でそれらパワーグラスプの研究と異なる。

1. 本章は、物体を運動させているときの操作の確実性を扱っている。[Mirza 1994] [中村 1995] では、パワーグラスプのロバスト性を論じているため、物体が静止している際についてのみ取り扱っており、物体が動いているときと止まっているときで対象物の安定性が大きく異なるグラスプレス・マニピュレーションには、そのままでは適用できない。
2. 本章の指標は、重力の効果を評価に含めている。[中村 1995] は重力の効果を扱っておらず、また [Mirza 1994] は重力の効果を関節トルクに影響する部分としてのみ扱っており、必ずしも対象物を完全に拘束しないグラスプレス・マニピュレーションにはそのままでは適用できない。

なお、力とモーメントの両成分を同時に扱うためには何らかのスケールリングを行う必要があり、適当な正定値対称行列  $R \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  を用いて、一般化力ベクトル  $Q \in \mathbb{R}^6$  のノルムを

$$\|Q\|_R = \sqrt{Q^T R Q} \quad (3.1)$$

と定義する。  $R$  としては、例えば対象物の質量  $M_o$  と慣性テンソル  $J_o$  を用いて、

$$R := \begin{bmatrix} I_3 & O \\ O & M_o J_o^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

とすることができる。式 (3.2) を用いた場合、 $\|Q\|_R$  の値は座標系のとり方に依存しなくなる。具体的には、並進力成分については力の大きさがそのまま評価され、モーメント成分は  $M_o J_o^{-1}$  によって重み付けされて評価されることになる。このとき (3.1) 式は、物理的には、ある一般化力を一定微小時間加えた際に対象物に与えられる運動エネルギーの大きさを、そ

の一般化力の大きさを評価していることになる．同様な対象物の慣性テンソルを使ったノルム定義の例は [Doty 1993, Mattikalli 1995] などにも見られる．

ここで，重力など対象物に加わるその他の既知の外力を  $Q_{\text{known}} \in \mathbb{R}^6$ ，対象物にはたらく未知の外乱力を  $Q_{\text{dist}} \in \mathbb{R}^6$  と書くと，対象物のつりあい方程式は

$$\begin{cases} Q_{\text{known}} + Q = -Q_{\text{dist}} \\ Q \in \mathcal{A} \end{cases} \quad (3.3)$$

と書ける．そして，操作の确实性の評価指標の値  $z$  は，以下のようなミニマックス問題の解として定義できる．

$$z = \min_{\|\hat{Q}_{\text{dist}}\|_{\mathbb{R}}=1} \max_{\substack{Q \in \mathcal{A}, t > 0, \\ Q_{\text{known}} + Q = -t\hat{Q}_{\text{dist}}}} \|Q_{\text{known}} + Q\|_{\mathbb{R}} \quad (3.4)$$

大まかに言って，この評価指標は，外乱力に対して対象物の最も「弱い」方向を調べ，その方向にどれくらいの外乱力まで耐えられるかを表している．つまり， $\max$  の部分で，特定の方向の外乱力に対して，接触力によって最大どこまで耐えられるかを調べ，そして  $\min$  の部分で，それが最も小さくなる方向を調べている（そしてそこでの耐えられる限界の値を求めている）ことになる．したがって，外乱力の（(3.1) 式の意味での）大きさが  $z$  以下ならば対象物の操作を确实に行えることになる．また， $z = 0$  の場合は，無限小の外乱力によってもつりあいが維持できなくなることを意味し， $z$  の値が求められない場合は，外乱力が存在しなくとも，接触力によって対象物のつりあいを保つことが不可能であることを意味する．

滑っていない接触点に比べ，滑っている接触点では発生可能な力の領域が小さい（(2.2)～(2.5) 式）．したがって，対象物が静止している場合に比べ，対象物が滑りを伴って運動している場合は  $z$  の値は小さくなる．

ここで示した評価指標はミニマックス基準によるものであるが，それ以外の方法による評価も考えられる．例えば，パワーグラスプの評価 [中村 1997] で行われているように，耐えられる外乱力の領域の「体積」を評価指標とすることも可能である．前者はもっとも「弱い」1 方向に着目した評価となり，後者では全方向を平均的に評価することとなる．それぞれ一長一短があるが，グラスプレス・マニピュレーションは外乱に対して弱い状態であやつりを行う手法であることを考えると，まず最初に評価すべきなのは，もっとも「弱い」部分についてであると言え，したがって式 (3.4) の評価指標を用いることは妥当である．

### 3.5.2 指標の計算法

式 (3.4) の指標の値を計算するには，

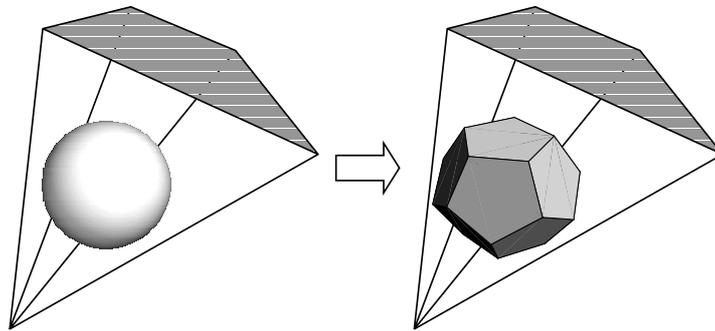


Fig. 3.3: Approximate Calculation of Stability Measure

1. 対象物に作用可能な一般化力の集合  $\mathcal{A}$  の領域を求める
2. ミニマックス問題を解く

の2つの問題を解決する必要がある。

前者については、2.3.6 項でも触れたように、各接触点で受動的に発生可能な接触力の任意の組み合わせが発生可能なわけではないことを考慮する必要がある。これについては、余らにより外力に対して発生可能な反力の集合を求める方法が提案されている [余 2000, 余 1995b]。その考え方は、大雑把に言って、「各接触点に対して押し付け方向になるような外力に対してのみ、それらの接触点は同時に反力を発生しうる」というものである。ここでは余らの方法を利用することにする。ただし、 $\mathcal{A}$  の領域を明示的に求めるのではなく、計算の中で制約条件として考慮に入れる。なお、この余らの方法では複数の接触点において同時に反力を発生する条件を扱っているが、ここでの  $p_i$  は面接触や線接触の置き換えとしての「等価」接触点を含んでいる。これら等価接触点を独立の点だと見なして余らの方法をそのまま適用すると、発生可能な接触力の領域が不当に小さく評価されてしまうため、若干の改変が必要となる。

後者のミニマックス問題の解き方はいくつか考えられるが、ここでは線形計画法により近似的に計算する手法を示す。(3.4) 式の  $z$  の値は、 $\mathcal{A}$  が表す領域に内接する、 $-Q_{\text{known}}$  を中心とする超球の((3.1) 式の意味での)半径と等しい。この超球を、それに外接する適当な凸超多面体で近似することを考える (Fig. 3.3 にイメージ図を示す) と、以下の線形計画問題



ま  $\bar{p}_{envjk}$  とおく．そして，

$$\bar{W}_{envj} = \begin{bmatrix} I_3 & \dots & I_3 \\ \bar{p}_{envj1} \times I_3 & \dots & \bar{p}_{envjm} \times I_3 \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{6 \times \bar{m}}$$

$$\bar{N}_{envj} = \text{diag}(n(\bar{p}_{envj1}), \dots, n(\bar{p}_{envjm})) \mathcal{R}^{3\bar{m} \times \bar{m}}$$

とする．これらを用いることで各接触面で反力を発生するための条件を (3.7) 式の線形計画法の制約条件(\*) 式)として記述している．これが余らによる環境反力の発生条件 [余 2000] に対応するものであり，外力  $(-z_{ij} R^{-1/2} l_i + Q_{\text{known}} + W_{\text{rob}} C_{\text{rob}} k_{\text{rob}})$  が押し付け方向の力になっていることを表す．ただし， $p_k$  についてではなく  $\bar{p}_{jk}$  に関する条件になっている点が，ここで加えた改変である．すなわち，同一接触面上にある接触点の重心で反力が発生可能ならば，それらの接触点で反力が発生可能である，となるように余らの条件を緩和している．

### 3.5.3 評価指標に関する考察

実際のグラスプレス・マニピュレーションの計画・実行において，この操作の確実性の評価指標を適用することを考えると，各種パラメータの不確実性によって指標の値がどのように影響を受けるかを考慮しておく必要がある．本章で提案した評価指標は，基本的に式 (3.7) の線形計画問題によって決定されるが，その解は，摩擦係数・接触点位置などのパラメータの連続的な変化に対しては，やはり連続的に変化する．したがって，本章の評価指標の値が，パラメータの連続的な変化に対して不連続に変化してしまうことは基本的には無い．ただし，凸頂点同士の接触などの凸接触 [吉川 1992a] が存在する場合は，微小な位置誤差によって，接触状態がまったく変わってしまう（接触点数，法線ベクトルの方向などが不連続に変わってしまう）ことがある．このような場合は，式 (3.7) のかたち自体が変わってしまうため，結果として操作の確実性の指標の値が不連続に変化することがありうる．ただし，凸接触は極めて不安定な状態である [余 1995a] ので，このような接触状態でのグラスプレス・マニピュレーションは行わないようにすべきであろう．

なお，前項では，6次元の超球を超多面体で近似することによって，式 (3.4) のミニマックス問題を一連の線形計画問題に帰着させた．このとき，超球を外接超多面体で近似したことにより， $\mathcal{A}$  が表す力の領域が凸である場合は，操作の確実性の評価を保守的に行うことができる（小さめの指標値が得られる）．実際には  $\mathcal{A}$  の領域は凸とは限らない [余 2000] が， $N_{\text{vert}}$  を十分大きく取れば，大きな問題は起こらないと考えられる．

また，ロボット指と対象物間の摩擦係数が大きければ大きいほど，操作の確実性の指標は大きくなる．なぜなら， $\mathcal{A}$  の領域が大きくなるからである．したがって，逆にロボット指

と対象物間の摩擦係数を小さめに見積もっておき、それでも操作の确实性が確保されるようなマニピュレーションを選択すれば、より「安全」にマニピュレーションが実現できるであろう。

## 3.6 数値例

前節に示した評価指標の計算手続きを C 言語によるプログラムとして実装した．ここではこのプログラムを用いて計算した，操作の確実性の定量的評価の数値例を示す．なお，計算は Pentium4-1.6GHz を搭載した Linux PC 上で行った．

ここでは 6 次元単位超球に外接する超多面体の頂点として，以下の 76 点をとった ( $N_{\text{vert}} = 76$ ) ．

$$l_i = \begin{cases} k[\pm 1, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\ k[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T \\ k[0, 0, \pm 1, 0, 0, 0]^T \\ k[0, 0, 0, \pm 1, 0, 0]^T \\ k[0, 0, 0, 0, \pm 1, 0]^T \\ k[0, 0, 0, 0, 0, \pm 1]^T \\ k \left[ \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}} \right]^T, \end{cases} \quad (3.8)$$

ここで  $k = 2\sqrt{3 - \sqrt{6}} (\approx 1.48)$  である (付録 A.2 参照)．また， $R$  として式 (3.2) を用いる．各摩擦円錐は，それに内接する正 6 角錐により近似する ( $s = 6$ )．重力加速度の大きさは 9.8 とする．

### 3.6.1 平面上での押し操作

直方体対象物のグラスプレス・マニピュレーションを考える．直方体の大きさは  $2 \times 2 \times 1$ ，重心位置を  $[0, 0, 0]^T$  とする．また，この直方体の質量は 1 ( $M_o = 1$ ) で均質であるとし， $Q_{\text{known}} = [0, 0, -9.8, 0, 0, 0]^T$ ， $J_o = \text{diag}(5/12, 5/12, 2/3)$  である．対象物と環境の間，およびロボット指と対象物との摩擦係数は，ともに 0.2 とする．問題を簡単にするため，ロボット指はすべて位置制御されているものとする ( $C_{\text{rob}} = \emptyset$ )．

Fig. 3.4 左のように対象物を 1 点 ( $[1, 0, 0]^T$  の位置) で押して  $[-1, 0, 0]^T$  方向に並進させる場合，式 (3.5) ~ (3.7) の計算を行うと，操作の確実性の指標は 0 となる．すなわち，無限小の外乱力 (例えば  $[0, 1, 0, 0, 0, 0]^T$  方向) に対しても，対象物の運動は乱されてしまうため，この操作は不安定である．なお，対象物が静止しているときの指標の値は 1.3 と正になり，最も「弱い」方向は  $[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T$  となる．これは，滑りによる摩擦力の制約条件がなくなるため，底面での摩擦力が指の押す方向と垂直な方向にも発生可能になるた

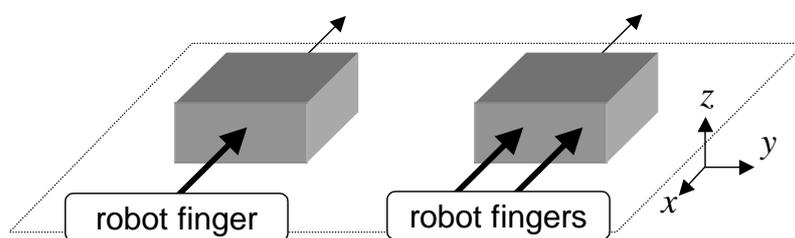


Fig. 3.4: Example: Pushing Cuboids

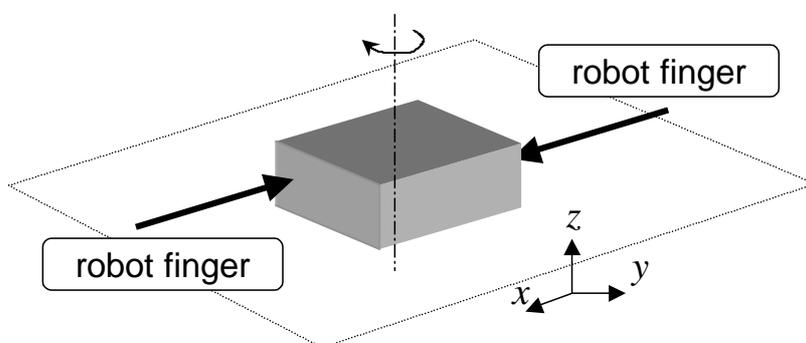


Fig. 3.5: Example: Rotating a Cuboid

めである．このことは，グラスプレス・マニピュレーションにおいて，操作中の対象物の安定性を評価することが重要であることの一例となっている．

一方，Fig. 3.4 右のように 2 点 ( $[1, \pm 1/2, 0]^T$  の位置) で押して並進させる場合は，式 (3.5) ~ (3.7) の計算を行うと，指標の値は 0.23 となる．すなわち，((3.1) 式の意味で) 0.23 までの大きさの外乱力に対しては，接触力の変化によってそれをキャンセルすることが可能であり，対象物の運動を保つことができる．これは，線接触による位置制御 pusher による stable push [Lynch 1996b] に対応する．なお，このときも最も「弱い」方向は  $[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T$  である．また，計算時間は 0.2 CPU 秒であった．

一方，Fig. 3.5 のように，対象物を 2 点 ( $[\pm 1, \mp 1/2, 0]^T$ ，複号同順) で押して重心を通る鉛直軸周りに回転させる場合，指標の値は 1.13，最も「弱い」方向は  $[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T$  である．ただし，対象物底面と環境との接触力集合を表現するために，瞬時回転中心と，接触底面の 4 頂点および周上のその他 4 点を代表点として用いた．この場合，瞬時回転中心と

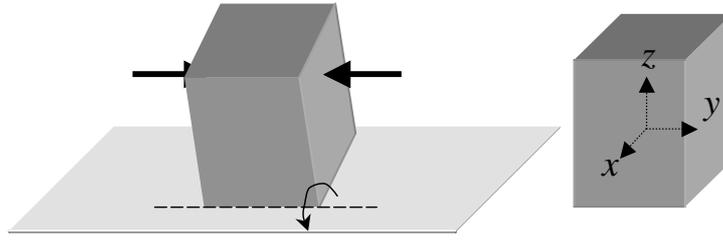


Fig. 3.6: Example: Tumbling a Cuboid

接触底面の4頂点だけで計算したときの値は1.08, 瞬時回転中心も除いて(接触底面の4頂点だけで)計算したときは0.70と小さめになる. このことから, 回転を伴う接触面がある場合は, その接触力の効果を接触面の頂点のみの効果で置き換えることは適切でないことが分かる. なお, これらの場合の計算時間は0.2~2.1 CPU秒であった(代表点の数が多いほど時間がかかる).

### 3.6.2 平面上での転がし操作

次に, Fig. 3.6のような $1 \times 1 \times 2$ の大きさの直方体の転がし操作を考える. 対象物の質量は1 ( $M_o = 1$ )で質量分布は均一とする. 図中に示すような対象物座標系を設定し, その原点は対象物の質量中心とする. この場合,  $J_o = \text{diag}(5/12, 5/12, 1/6)$ であり, 対象物の傾き角が $30[\text{deg}]$ のときなら,  $Q_{\text{known}} = [4.9, 0, -8.5, 0, 0, 0]^T$ となる. 対象物と環境の間, およびロボット指と対象物の間の摩擦係数は, とともに0.2とする. この直方体を $[0, \pm 1/2, 1/2]^T$ の位置でつまんで動かすことを考える. 左側の指を位置制御, 右側の指を力制御することにし, 力制御の指令力は $[0, -f, 0]^T$ とする ( $C_{\text{rob}} \mathbf{k}_{\text{rob}} = [0, -f, 0]^T$ ).

$f = 0$ のとき, すなわち実質的に左側の位置制御指だけで物体を操ろうとした場合は, 式(3.5)~(3.7)の計算で値を求めるのに失敗する. つまり, 左側の指だけでは, つりあいがない(マニピュレーションを実現できない)ことがわかる.

一方,  $f = 2$ としたときは, 式(3.5)~(3.7)の計算を行うと, 指標の値は0.18となった. すなわち, このように片方から押し付け力を加えた場合は, 確実に転がし操作を行えることがわかる. また, このとき最も「弱い」方向は

$$\left[ -\frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}} \right]^T$$

となり, 計算時間は0.2 CPU秒であった.

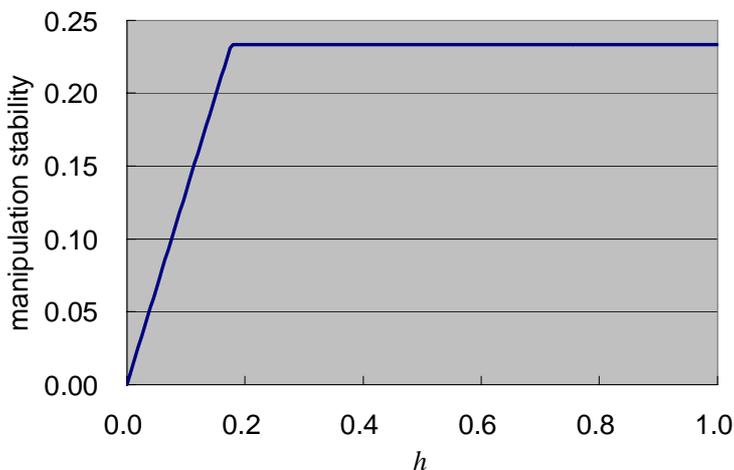


Fig. 3.7: Manipulation Stability of Two-Finger Pushing (1)

### 3.6.3 パラメータの変動の効果

ここでは、各種パラメータの変動によって、操作の确实性の指標値がどのように変化するかを、先ほどの Fig. 3.4 の押し操作を対象に見てみる。

いま、指位置を  $[1, \pm h, 0]^T$  とし、 $h$  を 0 から 1 まで変化させたときの操作の确实性の値を Fig. 3.7 に示す。 $h = 0$  のときは、1 本指で対象物を押ししているのと等価なので、操作の确实性はゼロになっている。その後、 $h$  が増えるにつれて操作の确实性も上がるが、 $h = 0.18$  付近で頭打ちになる。これは、そのあたりで最も「弱い」方向が  $[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T$  方向に変わるが、 $h$  を増やしてもその方向の外乱力には効果がないためである。

続いて、指位置を  $[1, \pm 1/2 + h, 0]^T$  とし、 $h$  を  $-1/2$  から  $1/2$  まで変化させたとき、すなわち 2 本の指を水平方向に平行移動させたときの操作の确实性の値を Fig. 3.8 に示す。幾何学的対称性より、操作の确实性のグラフも  $h = 0$  に関して対称となる。 $h = 0$  に近いほど操作の确实性は大きくなるが、 $-0.32 < h < 0.32$  付近では頭打ちになる。これも、最も「弱い」方向が  $[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T$  方向となるため、 $h = 0$  に近づけてもその方向の外乱力には効果がないためである。

次に、指位置を垂直方向にずらす場合を考える。指位置を  $[1, \pm 1/2, h]^T$  とした場合、および  $[1, \pm 1/2, \pm h]^T$  (複号同順) とした場合について、それぞれ  $h$  を  $-1/2$  から  $1/2$  まで変化させたときの操作の确实性の値は、どちらも同じく Fig. 3.9 のように一定値となる。こ

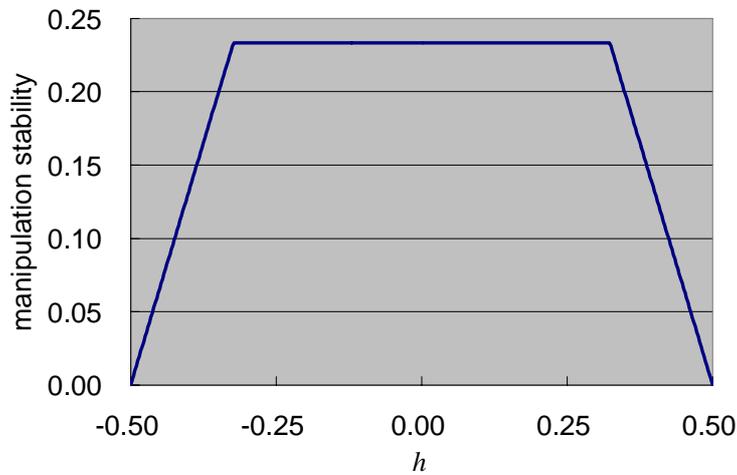


Fig. 3.8: Manipulation Stability of Two-Finger Pushing (2)

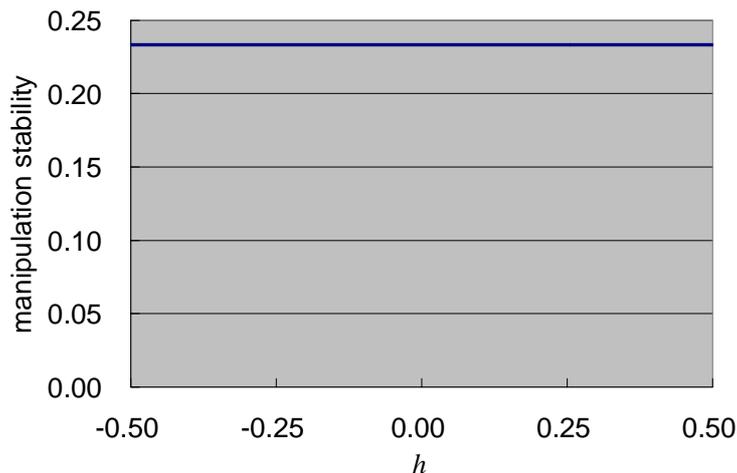


Fig. 3.9: Manipulation Stability of Two-Finger Pushing (3)

これらの場合，最も「弱い」 $[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T$ 方向の外乱力に対しては， $h$ の値の変化は一切影響しないので，結果として $h$ にかかわらず操作の確実性の値はまったく変わらない．

一方，指位置を $[1, \pm 1/2, 0]^T$ に固定し，摩擦係数を変えてみる．対象物と環境の間，およびロボット指と対象物との摩擦係数をそれぞれ $\mu_{\text{env}}, \mu_{\text{rob}}$ とし， $\mu_{\text{env}} = 0.2$ として $\mu_{\text{rob}}$ を0から1まで変化させたときの操作の確実性の値をFig. 3.10に示す．また，逆に， $\mu_{\text{rob}} = 0.2$ として $\mu_{\text{env}}$ を0から1まで変化させたときの操作の確実性の値をFig. 3.11に示す．どちらも摩擦係数が増えるにつれて操作の確実性は大きくなる．ただし， $\mu_{\text{rob}}$ を増や

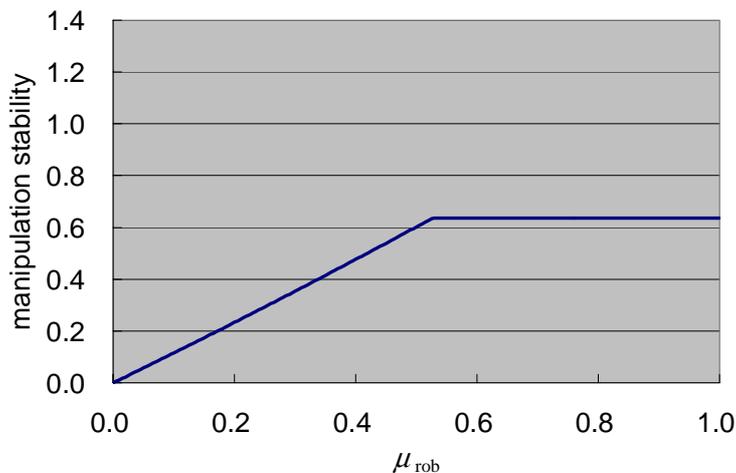


Fig. 3.10: Manipulation Stability of Two-Finger Pushing (4)

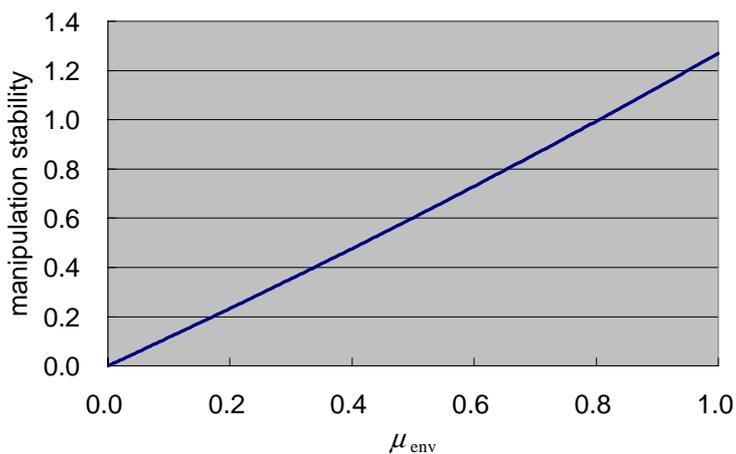


Fig. 3.11: Manipulation Stability of Two-Finger Pushing (5)

した場合は、 $\mu_{\text{rob}} = 0.53$  付近で頭打ちとなる。これは、このあたりで最も「弱い」方向が、ロボット指から逃げる方向 ( $[-1/\sqrt{6}, 1/\sqrt{6}, 1/\sqrt{6}, -1/\sqrt{6}, -1/\sqrt{6}, -1/\sqrt{6}]^T$  方向) に変わるため、ロボット指の摩擦を大きくしても効果がなくなるためである。なお、この数値例では指力の大きさに制限を設けていないが、発生可能な指力に上限値を設定した場合は、 $\mu_{\text{env}}$  が大きくなると、却って操作の確実性が減る（摩擦に打ち勝って物体を押すことが困難になる）場合もありうる。

以上の例からも、パラメータの連続的な変動に対しては、操作の確実性の指標値は連続的

に変化することが確認できた。

## 3.7 おわりに

本章では、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について議論し、「操作中の対象物が外乱にどれくらい耐えられるか」という観点からこれを評価することを提案した。また、これを定量的に評価する指標を提案し、その線形計画法による（近似的な）計算法を与えた。

本章で提案した指標を用いることにより、グラスプレス・マニピュレーションの計画を行う際に、より确实なあやつりを実現するようなロボットの動作を決定することが可能になる。これについては、5章で取り扱う。



## 第 4 章

# 接触作業における内力の解析

---

4.1	はじめに . . . . .	64
4.2	従来研究 . . . . .	65
4.3	力学解析上の仮定 . . . . .	66
4.4	内力の解析 . . . . .	67
4.4.1	過大な内力の発生可能性 . . . . .	67
4.4.2	判定手法に対する考察 . . . . .	70
4.5	数値例 . . . . .	72
4.5.1	平面の場合の例 . . . . .	72
4.5.2	応用例 1 : 転がし操作による段差の乗り越え . . . . .	73
4.5.3	応用例 2 : ペグ挿入における wedging 可能性の判定 . . . . .	75
4.6	おわりに . . . . .	78

---

## 4.1 はじめに

グラスプレス・マニピュレーションのような接触作業において問題になることとして、環境との接触が存在するために、対象物に過大な内力がかかる可能性がある点が挙げられる (Fig. 4.1)。グラスプレス・マニピュレーションでは、平面上での pushing のように、位置制御ロボットによって簡便に接触作業を実行可能な場合が存在することが一つの利点であるが、位置制御されたロボットを用いる場合には、過大な内力が発生しうるか否かを事前に判定し回避することが重要となる。また、ペグ挿入など wedging が発生する恐れのある作業の実行においても、過大な内力の発生に関する注意が必要である。

本章では、グラスプレス・マニピュレーションを含む接触作業において、対象物に過大な内力が発生する可能性を判定する方法について調べる。

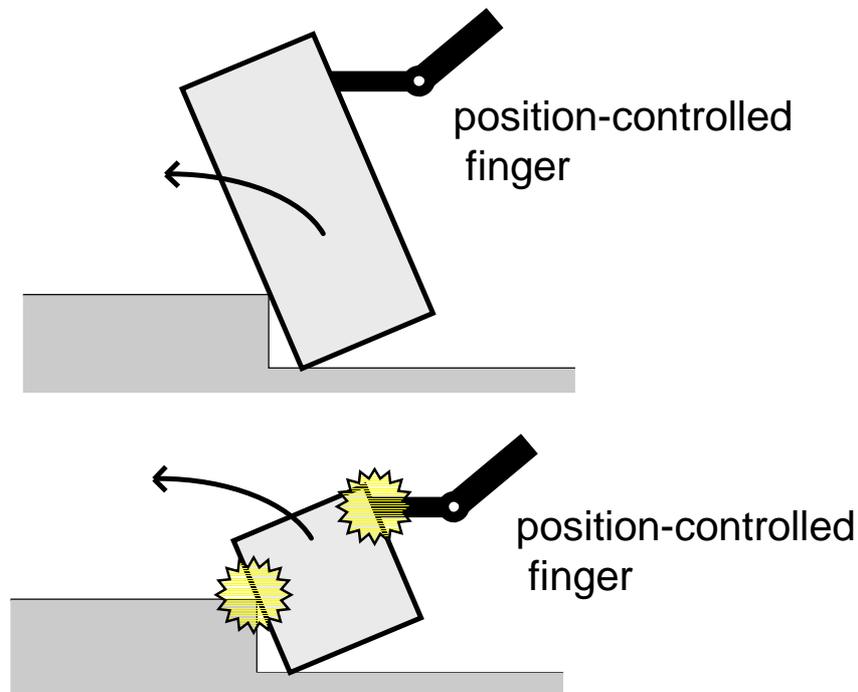


Fig. 4.1: Excessive Internal Force in Grasplless Manipulation

## 4.2 従来研究

フィクスチャリングの解析において，Asada らは bilateral constraints の概念を導入した [Asada 1985]．これは，摩擦のない場合に対象物に過大な内力が発生する可能性を表す条件となっている．なぜなら，bilateral constraints の存在する方向には，任意の大きさの向かい合う接触力が発生する可能性があるためである．また，相山はグラスプレス・マニピュレーションについて，「可動空間がボリュームを持たないこと」を過大な内力が発生しない条件としている [相山 1995] が，これは bilateral constraints が存在することと等価である．さらに，平井はこれを凸多面錐理論に基づいて判定するアルゴリズムを示している [平井 1999]．また Trinkle はやはり摩擦のない場合について，過大な内力の発生する可能性のあるつりあい状態を strong force closure と定義し，線形計画法でこれを判定する手法を提案した [Trinkle 1992]．

本章では，摩擦のある場合にも同様の判定を行う手法を提案し，グラスプレス・マニピュレーションにおける利用例を示す．また，この手法は，Whitney が丸棒丸穴の挿入について求めた wedging の条件 [Whitney 1982] を，その他の一般的な接触状態について導くための手段としても用いることができるため，それについても触れる．

### 4.3 力学解析上の仮定

過大な内力の発生可能性の解析を行うにあたり，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 (Fig. 4.2)，以下の仮定をおく．

- 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．
- 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．
- すべての接触は複数の点接触で近似できる (2.3 節参照)．
- 対象物は三次元空間内の多面体である．
- 位置制御されているロボット指は十分剛性が高く，環境と同等と見なせる．
- 対象物と環境もしくは位置制御されているロボットとの間の接触は，辺接触や面接触であっても良いが，接触面は多角形で近似できる．
- 対象物とロボットおよび環境との間の同一接触面 (辺) での摩擦係数は一様である．

下線部は 2.3 節における仮定に加えて新たに導入したものである．記号等は 2.3 節で定義されたものを用いる．

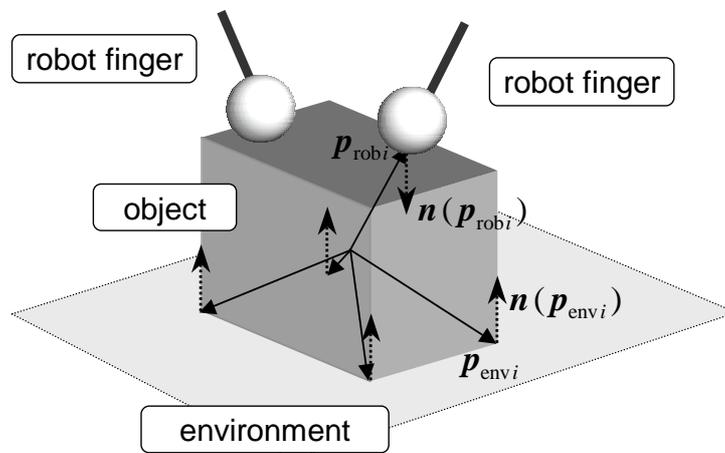


Fig. 4.2: Object in Graspless Manipulation

## 4.4 内力の解析

### 4.4.1 過大な内力の発生可能性

ロボットによる接触作業においては、対象物に過大な内力を発生してしまう可能性があり、これを回避する必要がある。ここで剛体モデルの下での「過大な内力が発生する」条件を、「無限大の内力がはたらいても、その内力の方向に関しての力・モーメントのつりあい が保たれる」条件、と定義する。ただし、過大な内力が発生するような状況では内力は不静定になるので、以下に求める条件はあくまで必要条件であることに注意されたい。

上記の定義では、過大な内力の発生可能性は、無限大の接触力を発生しうる接触のみにより決まることがわかる。したがって、環境およびそれと等価なものとの接触、そして不完全な接触 ( $J(\boldsymbol{p})$  がフルランクにならない接触 [張 1996]) の一部について考えればよい。

$\text{rank } J(\boldsymbol{p}) = 2$  の不完全な接触の場合、接触力と関節トルクの関係式

$$\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{p}) = J(\boldsymbol{p})^T \boldsymbol{f} \quad (4.1)$$

を満たす解  $\boldsymbol{f}$  は直線となる。この直線と、対応する接触点での摩擦円錐との交わりは、半直線あるいは線分となる。線分の場合は接触力は有限であるので無視できる。半直線の場合は、その単位方向ベクトルを  $\tilde{\boldsymbol{c}}_1(\boldsymbol{p})$  とすると、その方向の力は  $\text{span}\{\tilde{\boldsymbol{c}}_1(\boldsymbol{p})\}$  で表せる (Fig. 4.3(a))。  $\text{rank } J(\boldsymbol{p}) = 1$  の不完全な接触の場合、(4.1) 式を満たす解  $\boldsymbol{f}$  は平面となり、摩擦円錐との交わりは円錐曲線 (楕円, 放物線, 双曲線) で囲まれた領域となる。楕円の場合はやはり接触力が有限であるので無視できる。放物線の場合はその単位軸ベクトルを  $\tilde{\boldsymbol{c}}_1(\boldsymbol{p})$  とおくと、その方向の力は  $\text{span}\{\tilde{\boldsymbol{c}}_1(\boldsymbol{p})\}$  と表せる。双曲線の場合は、その単位漸近線ベクトルを  $\tilde{\boldsymbol{c}}_1(\boldsymbol{p}), \tilde{\boldsymbol{c}}_2(\boldsymbol{p})$  で表すと、その方向の力は、  $\text{span}\{\tilde{\boldsymbol{c}}_1(\boldsymbol{p}), \tilde{\boldsymbol{c}}_2(\boldsymbol{p})\}$  で表せる (Fig. 4.3(b))。

いま、環境およびそれと等価なものとの接触点の集合を  $\mathcal{C}_{\text{env}}$ 、不完全な接触のうち、可能な接触力が半直線で表される接触点の集合を  $\mathcal{C}_{\text{line}}$ 、放物線で表される接触点の集合を  $\mathcal{C}_{\text{para}}$ 、双曲線で表される接触点の集合を  $\mathcal{C}_{\text{hyper}}$  とする。  $\mathcal{C}_{\text{env}} \cup \mathcal{C}_{\text{line}} \cup \mathcal{C}_{\text{para}} \cup \mathcal{C}_{\text{hyper}}$  に含まれている接触点を  $\boldsymbol{p}_1, \dots, \boldsymbol{p}_{m_\infty}$  として、ここで、次のような行列  $\boldsymbol{W}$ ・行列  $\boldsymbol{C}$  を定義する。

$$\boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_3 & \dots & \boldsymbol{I}_3 \\ \boldsymbol{p}_1 \times \boldsymbol{I}_3 & \dots & \boldsymbol{p}_{m_\infty} \times \boldsymbol{I}_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3m_\infty} \quad (4.2)$$

$$\boldsymbol{C} = \text{diag}(\boldsymbol{C}_1, \dots, \boldsymbol{C}_{m_\infty}) \quad (4.3)$$

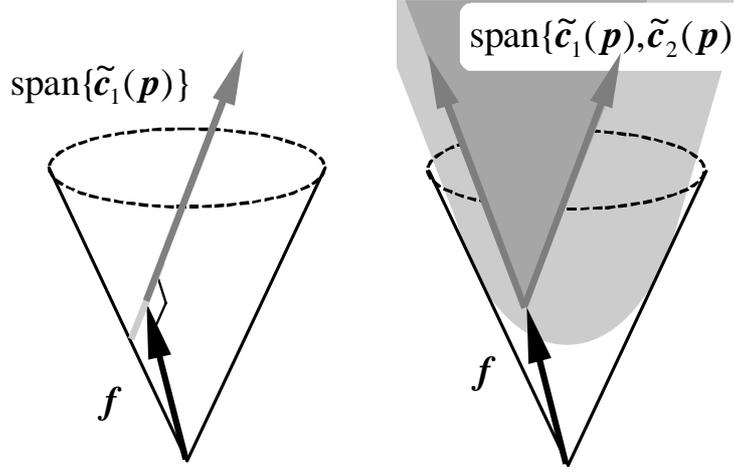


Fig. 4.3: Contact Forces at Defective Contacts

$$C_i = \begin{cases} [c_1(p_i) \dots c_s(p_i)] \in \mathfrak{R}^{3 \times s} & (p_i \in \mathcal{C}_{\text{env}} \text{ のとき}) \\ [\tilde{c}_1(p_i) \tilde{c}_2(p_i)] \in \mathfrak{R}^{3 \times 2} & (p_i \in \mathcal{C}_{\text{hyper}} \text{ のとき}) \\ [\tilde{c}_1(p_i)] \in \mathfrak{R}^{3 \times 1} & (p_i \in \mathcal{C}_{\text{line}} \cup \mathcal{C}_{\text{para}} \text{ のとき}) \end{cases} \quad (4.4)$$

これらの無限大の力を発生可能な接触によって対象物に加わる合力・合モーメントは  $WCk$  (ただし  $k \geq 0$ ) と表され, これは原点を頂点とする, 一般化力空間内の凸多面錐 [平井 1999] を形成する.

このとき, 物体に過大な内力が発生するための必要条件は, 以下のように書ける.

$$\exists Q (\neq \mathbf{0}) \forall t (\in \mathfrak{R}) \exists k (\geq 0) \text{ such that } tQ = WCk \quad (4.5)$$

これは, ある力  $Q$  の方向には, 受動的な接触力によって, 正負両方向に任意の大きさの力を発生できる, ということである. このとき,  $Q$  の方向ではどんな外力もこの接触力によってキャンセルされ, かつその接触力はいくらでも大きくなりうる. つまり, 過大な内力が生じる恐れがある. このとき対象物にはたらく力・モーメントは, この内力の方向以外ではつりあっているとは限らないことに注意されたい. Trinkle の strong force closure の条件 [Trinkle 1992] ではつりあい方程式を含めており, 本章の定式化とはこの点でも異なる.

ここで, (4.5) 式は次の式と同値である.

$$\exists k \geq \alpha \text{ (ただし } k \neq 0) \text{ such that } WCk = \mathbf{0} \quad (4.6)$$

証明. (4.5) 式が成り立てば,

$$\begin{cases} tQ = WCk_A \\ -tQ = WCk_B \end{cases} \quad (4.7)$$

となる  $k_A, k_B \geq 0$  が存在する. したがって,  $WC(k_A + k_B) = 0$  となり,  $k_A + k_B \geq 0$  なので (4.6) 式が成り立つ.

一方 (4.6) 式が成り立つならば, そのときの  $k$  を

$$k = k_C + k_D \quad (4.8)$$

とおく. ただし,  $k_C$  は  $k$  の要素のうち正のもの 1 つをそのままにして残りをゼロにしたベクトル, 逆に  $k_D$  はその正の要素のところだけをゼロにして残りをそのままにしたベクトルである. ここで,  $WC(k_C + k_D) = 0$  より

$$\begin{cases} Q' = WCk_C \\ -Q' = WCk_D \end{cases} \quad (4.9)$$

と書ける.  $WC$  は接触力を対象物座標系の基準点に関する力・モーメントに変換する行列であるから, ある 1 つの方向のゼロでない接触力による一般化力  $WCk_C$  は決してゼロベクトルにはならない. したがって,  $Q' \neq 0$  である.

よって, 任意の非負実数  $t$  に対して

$$\begin{cases} tQ' = WC(tk_C) \\ -tQ' = WC(tk_D) \end{cases} \quad (4.10)$$

が成り立ち,  $tk_C \geq 0, tk_D \geq 0$  であることから, (4.5) 式が成り立つことが分かる.  $\square$

そこで, 次のような線形計画問題を考える.

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \mathbf{1}^T \mathbf{k} \\ & \text{subject to } \begin{cases} WC\mathbf{k} = \mathbf{0} \\ \mathbf{k} \geq \mathbf{0} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.11)$$

ただし  $\mathbf{1} := [1, \dots, 1]^T$  である. (4.6) 式が成り立つとき, (4.11) の結果は  $\mathbf{1}^T \mathbf{k} \rightarrow \infty$  となり, 成り立たないときは  $\mathbf{1}^T \mathbf{k} = 0$  である. また, (4.11) がそれ以外の結果になることはありえない. したがって,  $\mathbf{k} = \mathbf{0}$  を初期実行可能解として (4.11) の線形計画問題 (シンプレックス法のフェーズ II) を解くことで, 過大な内力の発生可能性を判定できることになる.

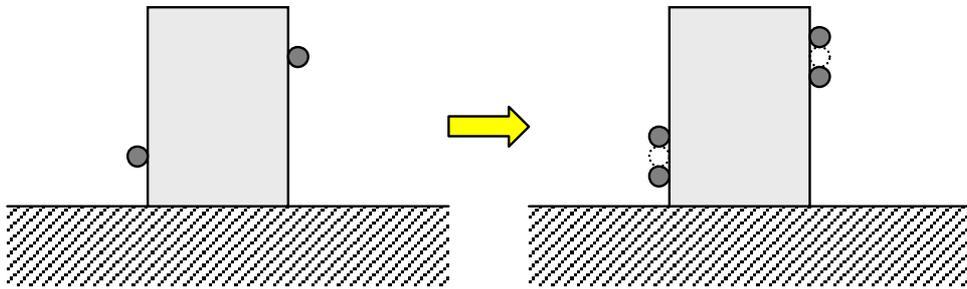


Fig. 4.4: Virtual Fingers for Internal Force Analysis

#### 4.4.2 判定手法に対する考察

まず，前節で提案した，過大な内力の判定手法の計算量について考える．シンプレックス法の繰り返しの回数は，実際的には制約行列の行数に対しほぼ線形に増加すると言われている [伊理 1995]．また，各繰り返しにおける演算の量は，制約行列の行数と列数の積に比例する．問題 (4.11) の制約行列  $WC$  のサイズは，接触点の数を  $m$  として最大で  $6 \times ms$  であるため，このアルゴリズムの計算量は  $O(6) \times O(6ms) = O(ms)$  程度と見積もられる．

次に，この判定に関するパラメータの不確実性の影響について考える．この判定手法は，過大な内力の発生可能性を Yes/No の二値で与えるものである．したがって，パラメータが変動すると，あるところで判定結果が突然変わることは原理的に避けられない．そこで，パラメータに不確実性が存在する実環境への適用に際しては，対象物に過大な内力がかかることを避けるための安全策として，式 (4.11) を適用する際に以下のような措置をとることが考えられる．

- 摩擦係数を大きめに見積もっておく．
- 一つの点接触を複数点の接触に置き換える．

前者は，摩擦が大きければ大きいほど，過大な内力の発生の危険性が増すことを利用した対処である．後者は，実際のマニピュレーションにおける（例えば指配置の）位置誤差を考慮に入れて，ずれた位置に複数の仮想指があると見なしてしまう (Fig. 4.4)，というものである．もちろんこれらの措置は，式 (4.11) の判定を行うときだけに適用する．

なお，ここでの過大な内力の発生可能性の条件の導出は，「各接触点において可能な接触

力の任意の組み合わせが起こりうる」という前提で行った。しかし、これは必ずしも成立しないことが指摘されており [小俣 1995, 余 2000, 小俣 2001]、したがって、本章で求めた条件はこの意味でも必要条件（過大な内力が発生する恐れのない場合でも、過大な内力が発生する可能性がある」と判断してしまう場合がある）になっている。

## 4.5 数値例

### 4.5.1 平面の場合の例

ここでは以上の議論を平面の場合に適用し、数値例を示す。Fig. 4.5 は対象物が平面内の正方形の場合の例で、環境と2点で、力制御されたロボットと1点で接触している。正方形の図心を基準点として、接触点の位置を

$$\mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1/2 \end{bmatrix}$$

摩擦円錐のエッジを表す単位ベクトルを

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_{11} &= \frac{1}{\sqrt{17}} \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \end{bmatrix}, & \mathbf{c}_{12} &= \frac{1}{\sqrt{17}} \begin{bmatrix} -1 \\ 4 \end{bmatrix} \\ \mathbf{c}_{21} &= \frac{1}{\sqrt{17}} \begin{bmatrix} 4 \\ 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{c}_{22} &= \frac{1}{\sqrt{17}} \begin{bmatrix} 4 \\ -1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{c}_{31} &= \frac{1}{\sqrt{17}} \begin{bmatrix} -4 \\ 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{c}_{32} &= \frac{1}{\sqrt{17}} \begin{bmatrix} -4 \\ -1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

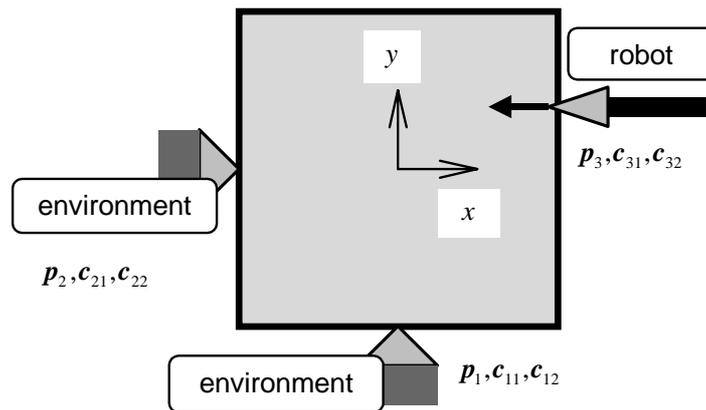


Fig. 4.5: A Planar Example for Analysis of Internal Force

とする．また，各接触点での摩擦係数は 0.25 であるとする．ロボットと対象物の接触は不完全ではないとすると，

$$W = \begin{bmatrix} I_2 & I_2 \\ p_1 \times I_2 & p_2 \times I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$C = \text{diag}([c_{11} \quad c_{12}] [c_{21} \quad c_{22}]) = \frac{1}{\sqrt{17}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

となる．これについて (4.11) の線形計画問題を解くと，目的関数の最大値はゼロであり，過大な内力は発生しないことが分かる．しかし，ロボットが力制御ではなく位置制御されているとすると，

$$W = \begin{bmatrix} I_2 & I_2 & I_2 \\ p_1 \times I_2 & p_2 \times I_2 & p_3 \times I_2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & -1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \text{diag}([c_{11} \quad c_{12}], [c_{21} \quad c_{22}], [c_{31} \quad c_{32}])$$

$$= \frac{1}{\sqrt{17}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

となる．これについて (4.11) の線形計画問題を解くと，目的関数は無限大となり，過大な内力が発生しうることが分かる．

#### 4.5.2 応用例 1：転がし操作による段差の乗り越え

提案した過大な内力の発生可能性判定アルゴリズムの応用例を示す．Fig. 4.6 は，転がし操作による長方形対象物の段差乗り越え作業を表しているが，位置制御ロボットを用いた場合，段差の高さ，摩擦係数，対象物のアスペクト比によっては，過大な内力が発生する恐れがあり，乗り越えが不可能になる．この場合各パラメータと過大な内力の発生可能性の間には単調性があり，段差が高いほど，摩擦係数が大きいほど，そして対象物が平たいほど，過大な内力の発生可能性が大きくなる．したがって，提案手法を繰り返し適用すれば，任意の精度で，安全（過大な内力は決して発生しない）／危険（過大な内力の発生の恐れあり）の境界を求めることができる．

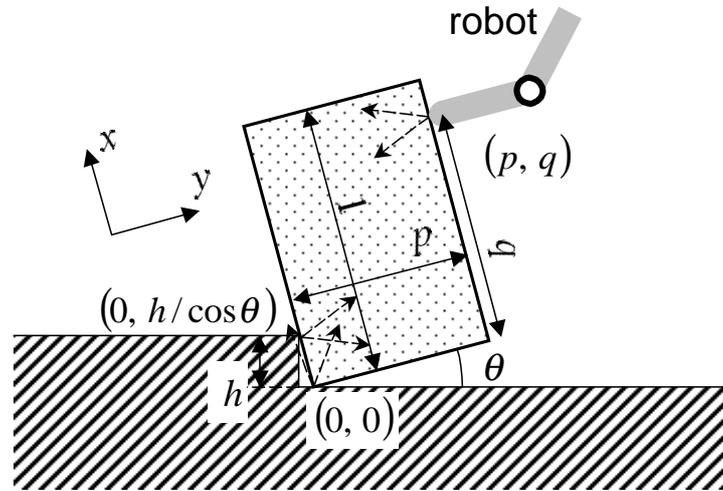


Fig. 4.6: Getting Over a Step by Tumbling

Fig. 4.6 の場合，対象物の傾き  $\theta > 0$  のとき，

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -q & p & 0 & 0 & -h/\cos\theta & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{\sqrt{1+\mu_0^2}} & \frac{-1}{\sqrt{1+\mu_0^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_0}{\sqrt{1+\mu_0^2}} & \frac{\mu_0}{\sqrt{1+\mu_0^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\mu \cos\theta + \sin\theta}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{\mu \cos\theta + \sin\theta}{\sqrt{1+\mu^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\cos\theta + \mu \sin\theta}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{\cos\theta - \mu \sin\theta}{\sqrt{1+\mu^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{-\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} \end{bmatrix}$$

$\theta = 0$  のとき

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -q & p & 0 & 0 & -h & 0 & 0 & p & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix}
 \frac{-1}{\sqrt{1+\mu_0^2}} & \frac{-1}{\sqrt{1+\mu_0^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{-\mu_0}{\sqrt{1+\mu_0^2}} & \frac{\mu_0}{\sqrt{1+\mu_0^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{-\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{-\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \\
 \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} & \frac{-\mu}{\sqrt{1+\mu^2}}
 \end{bmatrix}$$

となる．ここで， $\mu$  は対象物と環境の間の摩擦係数， $p$  は対象物の縦の長さを 1 としたときの横の長さ， $h$  は段差の高さである．また，ロボットと対象物との接触点位置の底面からの高さを  $q$ ，そこでの摩擦係数を  $\mu_0$  とする．

$\mu_0 = 0.25$ ,  $q = 0.95$  の場合について， $\mu$ ,  $\theta$  を変化させて繰り返し (4.11) による判定を行い，実際に境界を計算したのが Fig. 4.7 である．3次元グラフ内の面が，過大な内力の発生の境界面となる．摩擦係数  $\mu$  が境界面より下にあれば，過大な内力は決して発生しない．しかし，境界面より上であれば，過大な内力の発生の危険がある．このようなグラフをあらかじめ作っておくことにより，安全に転がし操作ができるかどうかを判断することができる．この手法は，位置制御マニピュレータによる転がし操作 [Aiyama 1997] の実現にも応用されている．

### 4.5.3 応用例 2：ペグ挿入における wedging 可能性の判定

Fig. 4.8 のように，径 1 の丸穴に，径  $(1 - c)$  の丸棒を挿入する場合の wedging の可能性判定について考える．丸棒丸穴の挿入では，接触点が 2 点のみになるので，平面的な解析を

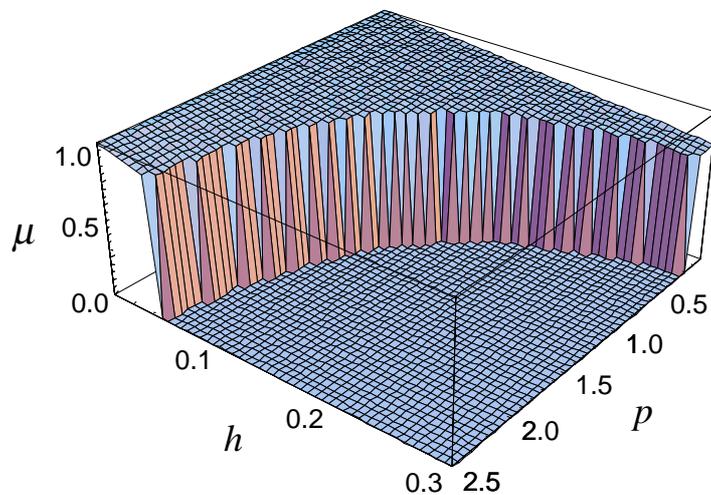


Fig. 4.7: Boundary of the Possibility of Excessive Internal Force

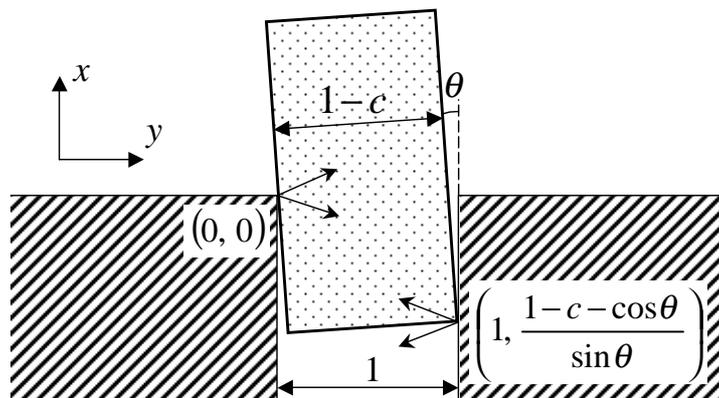


Fig. 4.8: Peg-in-Hole

行えばよい．丸棒の傾き角を  $\theta$ ，接触点での摩擦係数を  $\mu$  とすると， $\theta \ll 1, c \ll 1$  という条件の下で Whitney が求めた wedging が起こりうる境界の条件 [Whitney 1982] は，

$$\mu = c/\theta \quad (4.12)$$

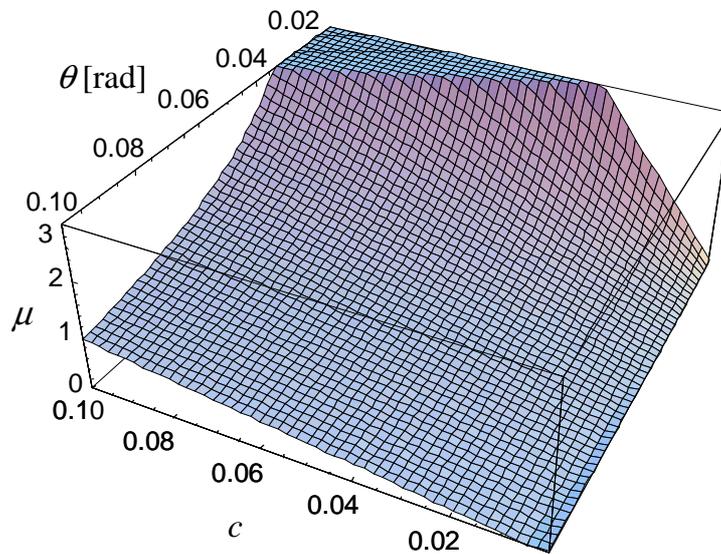


Fig. 4.9: Boundary of the Possibility of Wedging

と表せる．これはペグへの過大な内力の発生可能性を表す条件と見ることができるので，提案手法によっても同じ条件を導くことが可能である．いま，

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1-c-\cos\theta}{\sin\theta} & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ \mu & -\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -\mu & \mu \end{bmatrix}$$

であることから， $\mu$  を変化させて繰り返し (4.11) の線形計画問題を解くことにより，wedging が生じる可能性のある場合，ない場合の境界を Fig. 4.9 のように求めることができる．Fig. 4.9 の境界面より  $\mu$  が小さければ wedging は発生せず，大きければ wedging の発生の恐れがあることになる．Fig. 4.9 の境界面は， $\theta \ll 1$ ,  $c \ll 1$  の近似が入っていないことを除けば (4.12) 式と一致する．同様にして，丸棒丸穴の挿入以外の wedging の条件も求めることができる．

## 4.6 おわりに

本章では，ロボットによる接触作業における操作対象物について，過大な内力の発生可能性を判定するための，線形計画法を用いたアルゴリズムを提案した．また，数値例により，この手法がガラスプレス・マニピュレーションにおける内力の問題やペグ挿入における wedging の問題を扱えることを示した．

本章までの力学解析の結果を用いて，以降の章ではガラスプレス・マニピュレーションを計画するための方法を提案する．

## 第 5 章

# 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

---

5.1	はじめに . . . . .	80
5.2	従来研究 . . . . .	81
5.3	ロボット指によるグラスプレス・マニピュレーションのモデル . . . . .	82
5.3.1	モデル化上の仮定 . . . . .	82
5.3.2	力学モデル . . . . .	83
5.4	指の制御モードの自動決定 . . . . .	85
5.4.1	基本方針 . . . . .	85
5.4.2	操作の確実性 . . . . .	85
5.4.3	過大な内力の発生可能性 . . . . .	87
5.4.4	指の制御モードの決定手順 . . . . .	87
5.5	数値例 . . . . .	90
5.5.1	例 1：平面上での直方体の滑らせ操作 . . . . .	90
5.5.2	例 2：直方体の転がし操作 . . . . .	92
5.5.3	例 3：平面上での四角錐の滑らせ操作 . . . . .	93
5.5.4	パラメータの変動の効果 . . . . .	94
5.6	制御モード決定手法に対する考察 . . . . .	98
5.6.1	提案手法の性質 . . . . .	98
5.6.2	計算量 . . . . .	99
5.7	おわりに . . . . .	100

---

## 5.1 はじめに

前章までに、グラスプレス・マニピュレーションの問題を扱う上で重要となる、操作の確実性および過大な内力の問題について力学解析を行った。本章以降では、その結果を利用して、複数のロボット指を用いたグラスプレス・マニピュレーションの問題を取り扱う。

ロボットによる環境との接触作業においては、過大な内力の発生を避けるために通常力制御が用いられる。しかし、グラスプレス・マニピュレーションにおいては、位置制御を用いた方が望ましい場合も存在する。平面上での、位置制御ロボットでの線接触による押し操作 (“stable push” [Lynch 1996b]) はその典型例である。ここから分かることは、さまざまなグラスプレス・マニピュレーションを実行するためには、状況に応じて位置制御と力制御を適切に使い分ける必要がある、ということである。

そこで、本章では、ロボット指の制御モード（位置制御もしくは力制御モード）を決定する（力制御の場合はその目標力も含めて決定する）問題について考察する。

## 5.2 従来研究

本章で扱う、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制御モードを決定する問題については、関連研究も少ない。

沢崎らは、複数の移動ロボットによる協調物体操作を対象に、各ロボットの先端において制御をどのように行うべきかを決定する手法を提案している [沢崎 1993]。ここでは、各ロボットの先端は、位置と力のハイブリッド制御されており、具体的には、位置制御方向の力がゼロとなるように位置制御方向を回転させるようなフィードバック制御を行う。これにより、局所的な情報のみから各ロボットが自律的に動作を行うことを実現している。このことは、相互に密な通信や正確な位置決めが期待できない移動ロボットにとっては大きな利点である。しかし、多指ハンドのようなシステムでこのような制御を行うことは、操作の確実性が損われる点や、stable push のような位置制御のみによる簡便なマニピュレーションの実現が不可能になることから、適用範囲は限定される。

余らは、接触を維持可能な押し付け力の存在範囲の大きさを評価する指標を利用して、接触作業における最適な指先位置を決定する方法を示している [余 2000]。しかし、この指標には重力の効果を含めることができない（むしろ、重力を外乱と考えている）ため、重力を積極的に利用して物体操作を行うグラスプレス・マニピュレーションへの適用は適切でない。また、指力の方向のみから計算される指標であるため、指力の大きさをどうすべきかは分からない。指の制御モードについても考慮されていない。

また、渡辺らは、環境との接触作業を対象に、指定された外力の集合に対して、その中のいずれの外力にも対抗できるような指先位置と姿勢を決定する問題を扱っている [渡辺 2002]。ここではロボットへの負担を小さくすることを優先しており、最悪の場合での関節トルクが最小となるように、指先位置と姿勢を分枝限定法によって解いて決定している。ただし、指の制御モードについては考慮していないため、したがって外乱が加わった場合には、瞬時的に関節トルクを変化させてそれを打ち消すことができることが前提となっている。

## 5.3 ロボット指によるグラスプレス・マニピュレーションのモデル

### 5.3.1 モデル化上の仮定

本章では，以下の仮定をおく．

- 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．
- すべての接触は複数の点接触で近似できる (2.3 節参照)．
- 不完全な接触 [張 1996] は存在しない．
- ロボットの指力の接触法線成分には上限がある．
- ロボットの各指は位置制御モードもしくは力制御モードのどちらかに設定される．
- 位置制御モードの場合，ロボットの指は，その摩擦円錐内の任意の力を (受動的に) 発生することができる．
- 力制御モードの場合，ロボットの指は位置・力のハイブリッド制御 [Raibert 1981] される．ここでは，ロボット指は接触法線方向には指令された力を能動的に発生し，接触法線方向には摩擦円錐内の任意の力を受動的に発生できるとする．

下線部は 2.3 節における仮定に加えて新たに導入したものである．記号等は 2.3 節で定義されたものを用いる．

ここで扱うのは，実現したい対象物の運動と，そのときの指先位置が与えられたときに，そのためには各指を位置制御すべきか，力制御すべきかを定める問題である．さらに，力制御の場合は指力の指令値まで決定することとする．

## 5.3.2 力学モデル

Fig. 5.1 のようなグラスプレス・マニピュレーションを考える．対象物の重心を原点とする座標系をとり， $p_{\text{env } 1}, \dots, p_{\text{env } m} \in \mathbb{R}^3$  を対象物と環境との接触点位置とする．同様に， $p_{\text{rob } 1}, \dots, p_{\text{rob } n} \in \mathbb{R}^3$  を， $1, \dots, n$  番目のロボット指と対象物との間の接触点位置とする．接触点  $p$  での対象物側への単位接触法線ベクトルを  $n(p) \in \mathbb{R}^3$  で表す．

実現したい対象物の運動が与えられれば，そのとき  $p_{\text{env } i} \in \mathcal{C}_{\text{slide}}$  か  $p_{\text{env } i} \in \mathcal{C}_{\text{stat}}$  かは判定することができる．接触点  $p$  での摩擦円錐を，単位稜ベクトル  $c_1(p), \dots, c_s(p) \in \mathbb{R}^3$  を持つ凸多面錐で表す． $p_{\text{env } i} \in \mathcal{C}_{\text{slide}}$  の場合は， $c'(p_{\text{env } i}) \in \mathbb{R}^3$  を， $p_{\text{env } i}$  における滑りの方向と反対側の摩擦円錐のエッジとする．

接触点  $p_{\text{env } i}$  において可能な接触力  $f \in \mathbb{R}^3$  の集合は以下のように表せる．

$$\begin{cases} \{f | f \in \text{span}\{c_1(p_{\text{env } i}), \dots, c_s(p_{\text{env } i})\}\} \subset \mathbb{R}^3 & (p_{\text{env } i} \in \mathcal{C}_{\text{stat}} \text{ のとき}) \\ \{f | f \in \text{span}\{c'(p_{\text{env } i})\}\} \subset \mathbb{R}^3 & (p_{\text{env } i} \in \mathcal{C}_{\text{slide}} \text{ のとき}) \end{cases} \quad (5.1)$$

ここで  $\text{span}\{\dots\}$  は，その要素ベクトルで張られる凸多面錐である [平井 1999]．

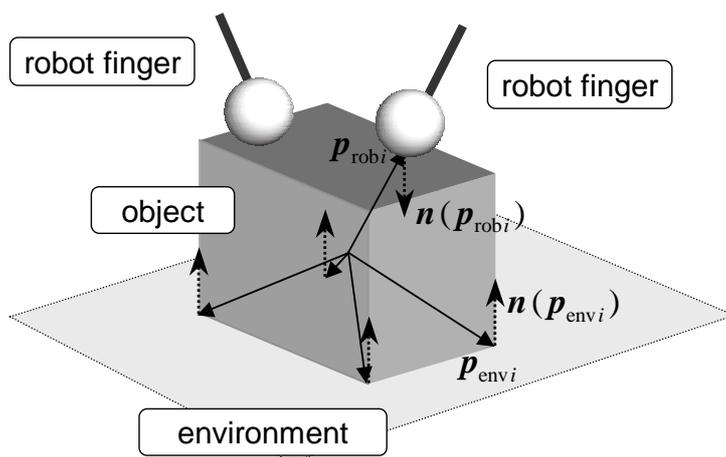


Fig. 5.1: Object in Graspless Manipulation

一方,  $\mathbf{p}_{\text{rob } i}$  における可能な接触力  $\mathbf{f}$  の集合は,

$$\left\{ \begin{array}{l} \{\mathbf{f} \mid \mathbf{f} \in \text{span}\{\mathbf{c}_1(\mathbf{p}_{\text{rob } i}) \dots \mathbf{c}_s(\mathbf{p}_{\text{rob } i})\}, \mathbf{n}(\mathbf{p}_{\text{rob } i})^T \mathbf{f} \leq f_{\max i}\} \subset \mathbb{R}^3 \\ \quad (i \text{ 番目のロボット指が位置制御のとき}) \\ \{\mathbf{f} \mid \mathbf{f} \in \text{span}\{\mathbf{c}_1(\mathbf{p}_{\text{rob } i}) \dots \mathbf{c}_s(\mathbf{p}_{\text{rob } i})\}, \mathbf{n}(\mathbf{p}_{\text{rob } i})^T \mathbf{f} = f_{\text{com } i} \leq f_{\max i}\} \subset \mathbb{R}^3 \\ \quad (i \text{ 番目の指が力制御のとき}) \end{array} \right. \quad (5.2)$$

ここで  $f_{\max i}$  は  $i$  番目のロボット指の法線方向の接触力の上限であり,  $f_{\text{com } i}$  は  $i$  番目のロボット指の (法線方向の) 指令指力である.

また, 以下の行列を定義する.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\text{env}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \dots & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{p}_{\text{env } 1} \times \mathbf{I}_3 & \dots & \mathbf{p}_{\text{env } m} \times \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3m} \\ \mathbf{C}_{\text{env}} &= \text{diag}(\mathbf{C}_{\text{env } 1}, \dots, \mathbf{C}_{\text{env } m}) \\ \mathbf{C}_{\text{env } i} &= \begin{cases} [\mathbf{c}_1(\mathbf{p}_{\text{env } i}) \dots \mathbf{c}_s(\mathbf{p}_{\text{env } i})] \in \mathbb{R}^{3 \times s} & (\mathbf{p}_{\text{env } i} \in \mathbf{C}_{\text{stat}} \text{ のとき}) \\ [\mathbf{c}'(\mathbf{p}_{\text{env } i})] \in \mathbb{R}^{3 \times 1} & (\mathbf{p}_{\text{env } i} \in \mathbf{C}_{\text{slide}} \text{ のとき}) \end{cases} \\ \mathbf{W}_{\text{rob}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \dots & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{p}_{\text{rob } 1} \times \mathbf{I}_3 & \dots & \mathbf{p}_{\text{rob } n} \times \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3n} \\ \mathbf{C}_{\text{rob}} &= \text{diag}(\mathbf{C}_{\text{rob } 1}, \dots, \mathbf{C}_{\text{rob } n}) \in \mathbb{R}^{3n \times ns} \\ \mathbf{C}_{\text{rob } i} &= [\mathbf{c}_1(\mathbf{p}_{\text{rob } i}) \dots \mathbf{c}_s(\mathbf{p}_{\text{rob } i})] \in \mathbb{R}^{3 \times s} \\ \mathbf{N}_{\text{rob}} &= \text{diag}(\mathbf{n}(\mathbf{p}_{\text{rob } 1}), \dots, \mathbf{n}(\mathbf{p}_{\text{rob } n})) \in \mathbb{R}^{3n \times n}, \end{aligned}$$

ここで  $\mathbf{I}_3$  は  $3 \times 3$  の単位行列,  $\mathbf{p} \times \mathbf{I}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は  $\mathbf{p}$  との外積と等価な歪対称行列である.

外乱力がなければ, 対象物のつりあい方程式は

$$\mathbf{Q}_{\text{known}} + \mathbf{W}_{\text{env}} \mathbf{C}_{\text{env}} \mathbf{k}_{\text{env}} + \mathbf{W}_{\text{rob}} \mathbf{C}_{\text{rob}} \mathbf{k}_{\text{rob}} = \mathbf{0} \quad (5.3)$$

となる. ここで,  $\mathbf{k}_{\text{env}} \geq \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{k}_{\text{rob}} \geq \mathbf{0}$  であり,  $\mathbf{Q}_{\text{known}} \in \mathbb{R}^6$  は重力などの既知の一般化外力である. ロボット指の法線方向力の制限は, 以下のように書ける.

$$\mathbf{N}_{\text{rob}}^T \mathbf{C}_{\text{rob}} \mathbf{k}_{\text{rob}} \leq \mathbf{f}_{\max} \quad (5.4)$$

ここで  $\mathbf{f}_{\max} = [f_{\max 1}, \dots, f_{\max n}]^T \in \mathbb{R}^n$  である.

## 5.4 指の制御モードの自動決定

### 5.4.1 基本方針

ロボット指の制御モードを「適切」に決めるためには、なんらかの指針が必要である。適切な評価関数が与えられれば、それに基づいて、「最適」な制御モードの組み合わせ（および、そのときの指力）を決めることができる。

本論文では、グラスプレス・マニピュレーションに適する指標として「操作の確実性」を3章で導入した。したがって、操作の確実性の指標を利用することによって、グラスプレス・マニピュレーションにおける最適な指の制御モードおよび指令指力を決定することができると考えられる。グラスプレス・マニピュレーションは、対象物を把持していないために、通常のピックアンドプレイス操作に比べて外乱に弱いことを考えると、操作の確実性ができるだけ高くなるようにすることは有効であると考えられる。

一般に、操作の確実性を高くする、という観点からは、力制御よりも位置制御のほうが望ましい。なぜなら、力制御された指に比べて、位置制御された指のほうが広い範囲の接触力を（受動的にはあるが）発生することができ、したがって力のつりあいが破られにくくなるからである。一方で、当然ながら不用意に位置制御を利用すると、対象物に過大な内力がかかる恐れがある (Fig. 4.1) のは4章で見たとおりである。

したがって、ここでは、「過大な内力が発生する恐れのない範囲で、操作の確実性の指標を最大化する」という方針で、各指の接触モードの組み合わせおよび（力制御指の）指力の指令値を決定することにする。

### 5.4.2 操作の確実性

3章で述べたように、操作の確実性の値は、一連の線形計画問題を解くことによって近似的に求まる。ここで、各接触点において可能な接触力の任意の組み合わせが可能であると仮定してみる（実際には、接触力の組み合わせには制限が存在する [小俣 1995, 余 2000, 小俣 2001]）。その場合、操作の確実性の値は、以下の一つの線形計画問題を解くことによ

て求めることができる．

$$\begin{aligned}
 & \text{maximize } z \\
 & \text{subject to } \left\{ \begin{array}{l}
 z\mathbf{R}^{-1/2}\mathbf{l}_1 = \mathbf{Q}_{\text{known}} + \mathbf{W}_{\text{env}}\mathbf{C}_{\text{env}}\mathbf{k}_{\text{env } 1} + \mathbf{W}_{\text{rob}}\mathbf{C}_{\text{rob}}\mathbf{k}_{\text{rob } 1} \\
 \vdots \\
 z\mathbf{R}^{-1/2}\mathbf{l}_{N_{\text{vert}}} = \mathbf{Q}_{\text{known}} + \mathbf{W}_{\text{env}}\mathbf{C}_{\text{env}}\mathbf{k}_{\text{env } N_{\text{vert}}} + \mathbf{W}_{\text{rob}}\mathbf{C}_{\text{rob}}\mathbf{k}_{\text{rob } N_{\text{vert}}} \\
 \mathbf{N}_{\text{rob}}^T\mathbf{C}_{\text{rob}}\mathbf{k}_{\text{rob } 1} \leq \mathbf{f}_{\text{max}} \\
 \vdots \\
 \mathbf{N}_{\text{rob}}^T\mathbf{C}_{\text{rob}}\mathbf{k}_{\text{rob } N_{\text{vert}}} \leq \mathbf{f}_{\text{max}} \\
 \mathbf{N}_{\text{rob}}^T\mathbf{A}_{\text{force}}\mathbf{C}_{\text{rob}}\mathbf{k}_{\text{rob } 1} = \mathbf{f}_{\text{com}} \\
 \vdots \\
 \mathbf{N}_{\text{rob}}^T\mathbf{A}_{\text{force}}\mathbf{C}_{\text{rob}}\mathbf{k}_{\text{rob } N_{\text{vert}}} = \mathbf{f}_{\text{com}} \\
 \mathbf{k}_{\text{env } 1}, \dots, \mathbf{k}_{\text{env } N_{\text{vert}}} \geq \mathbf{0} \\
 \mathbf{k}_{\text{rob } 1}, \dots, \mathbf{k}_{\text{rob } N_{\text{vert}}} \geq \mathbf{0}
 \end{array} \right. \tag{5.5}
 \end{aligned}$$

ここで， $\mathbf{f}_{\text{com}} = [f_{\text{com } 1}, \dots, f_{\text{com } n}]^T \in \mathbb{R}^n$  であり， $i$  番目の指が位置制御されている場合は  $f_{\text{com } i} = 0$  とする． $\mathbf{A}_{\text{force}}$  は以下のような選択行列である．

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_{\text{force}} &= \text{diag}(\text{diag}(a_1, a_1, a_1), \dots, \text{diag}(a_n, a_n, a_n)) \in \mathbb{R}^{3n \times 3n} \\
 a_i &= \begin{cases} 1 & (i \text{ 番目の指が力制御のとき}) \\ 0 & (i \text{ 番目の指が位置制御のとき}) \end{cases}
 \end{aligned}$$

$\mathbf{l}_1, \dots, \mathbf{l}_{N_{\text{vert}}} \in \mathbb{R}^6$  は6次元単位超球に外接する近似超多面体の頂点であり， $\mathbf{R}^{-1/2}$  は適当な正定対称行列  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  の逆行列の Cholesky 分解である（式 (3.1) 参照）．

$\mathbf{f}_{\text{com}}$  を定数ではなく変数と見なせば，線形計画問題 (5.5) を解くことで，操作の確実性を最大にする  $\mathbf{f}_{\text{com}}$  を求めることができる．つまり，各指の制御モードを適当に仮定すれば，その制御モードのパターンにおいて最適な  $\mathbf{f}_{\text{com}}$  が求まる．

ここで導入した「各接触点において可能な接触力の任意の組み合わせが可能である」という仮定は楽観的なもので，実際にはこれは成り立たない．このことは，2章，3章でも触れた．しかしながら，摩擦が比較的小さい場合は，この単純化は操作の確実性の値にあまり大きな影響を与えない．なぜなら，ある接触力の組み合わせはありえなくとも，それと同じ合力を，ありうる接触力の組み合わせで発生することが可能であることが多いためである．つまり，より正確には，「各接触点において可能な接触力の任意の組み合わせによる合力がすべて発生可能である」という条件さえ成り立てば，線形計画問題 (5.5) を利用することができる．そこで，本章では，この条件が成り立つとし，線形計画問題 (5.5) を使ってグラスプレス・マニピュレーションの操作の確実性を評価することにする．

もちろん，特に摩擦が大きい場合には，ありうる接触力の組み合わせについて，より保守的な評価が必要となる．これには [小俣 1995, 余 2000, 小俣 2001] などの結果が利用できると考えられるが，今後の課題である．ただし，計算量がかなり大きくなることは避けられないであろう．

### 5.4.3 過大な内力の発生可能性

4章で述べたように，過大な内力の発生可能性は，以下のような線形計画問題を解くことによって判定できる．

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \mathbf{b}_{\text{env}}^T \mathbf{k}_{\text{env}} + \mathbf{b}_{\text{rob}}^T \mathbf{k}_{\text{rob}} \\ \text{subject to } & \begin{cases} \mathbf{W}_{\text{env}} \mathbf{C}_{\text{env}} \mathbf{k}_{\text{env}} + \mathbf{W}_{\text{rob}} \mathbf{A}_{\text{pos}} \mathbf{C}_{\text{rob}} \mathbf{k}_{\text{rob}} = \mathbf{0} \\ \mathbf{k}_{\text{env}} \geq \mathbf{0} \\ \mathbf{k}_{\text{rob}} \geq \mathbf{0} \end{cases} \end{aligned} \quad (5.6)$$

ここで，

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_{\text{env}} &= [1, \dots, 1]^T \\ \mathbf{b}_{\text{rob}} &= [\mathbf{b}_{\text{rob } 1}^T, \dots, \mathbf{b}_{\text{rob } n}^T]^T \in \mathcal{R}^{ns} \\ \mathbf{b}_{\text{rob } i} &= \begin{cases} [1, \dots, 1]^T \in \mathcal{R}^s & (i \text{ 番目の指が位置制御のとき}) \\ [0, \dots, 0]^T \in \mathcal{R}^s & (i \text{ 番目の指が力制御のとき}) \end{cases} \\ \mathbf{A}_{\text{pos}} &= \mathbf{I}_{3n} - \mathbf{A}_{\text{force}} \in \mathcal{R}^{3n \times 3n} \end{aligned}$$

である．この線形計画問題が有界であれば，内力も有界になり，過大な内力は発生しない．そうでなければ，過大な内力の発生する恐れがある．

4章で述べたように，この判定法はあくまで必要条件を調べているだけで，過大な内力の発生の十分条件ではない．より必要十分条件に近い判定法も考えられるが，計算量が大きくなることを避けるため，ここでは線形計画問題 (5.6) を用いることにする．必要条件を用いて判定するということは，結果として安全第一の方針（過大な内力の発生可能性が否定できない場合はそれを採用しない）ということになる．

### 5.4.4 指の制御モードの決定手順

以上の準備の下で，ロボット指の「最適」な制御モードの組み合わせ，および指令指力を，以下のような手順で決定することができる．

1. 各指に制御モード（位置制御／力制御）を適当に割り当てる．
2. その状態で過大な内力の発生可能性がないかチェックする（線形計画問題 (5.6)）．過大な内力が発生する可能性がある場合はあきらめて4へ．
3. 操作の確実性が最大になるように指力 ( $f_{\text{com}}$ ) を最適化する（線形計画問題 (5.5)）．他の制御モードのパターンよりも操作の確実性が大きくなれば，これを記憶しておく．
4. まだ調べていない制御モードの組み合わせがある場合は1へ戻る．すべての組み合わせを調べ終わった場合はこれで終了．

すべての組み合わせを調べ終わったら，その中で操作の確実性の値を最大とする制御モードの組み合わせを採用する．もし，操作の確実性が正になる組み合わせが一つも存在しないならば，このマニピュレーションを確実に実現することは不可能（無限小の外乱力によっても対象物の運動が乱されてしまう）ということになる．

ただし，組み合わせの数（ $n$ 本の指に対して  $2^n$ 通り）だけの繰り返しがあるため，上記の素朴な方針では少々計算量が大きい．しかし，以下の性質を考えることで，計算量を減らすことができる．

1. ある制御モードのパターンで，過大な内力の発生可能性があるならば，そのパターンから位置制御の指を増やしたパターンでは必ず過大な内力の発生可能性がある．
2. ある制御モードのパターンにおける操作の確実性の値を，そのパターンから力制御の指を増やしたパターンでの操作の確実性の値が上回ることはない．

上記の2つの性質を利用すれば，調べる必要のないパターンを省くことができる．方針として，

- すべての指が位置制御モードのパターンから始め，順に力制御の指を増やしていく．
- 操作の確実性の値が増加する可能性が明らかでないパターンは調べない．例えば，すべての指が位置制御モードの場合に，過大な内力の発生可能性がなく，ある操作の確実性の値が得られたならば，その他のパターンは一切調べない（調べる必要がない）．

とする方法と，

- すべての指が力制御モードのパターンから始め，順に位置制御の指を増やしていく．
- 過大な内力の発生可能性が明らかにあるパターンは調べない．例えば，すべての指が力制御モードの場合に，過大な内力の発生可能性があったならば，その他のパターンは一切調べない（調べる必要がない）．

とする方法がある．ここでは前者を採用した．これは，問題 (5.5) が問題 (5.6) よりずっと複雑で時間がかかり，特に力制御モードと仮定した指が多い場合にそれが顕著になる（指力まで決定しないとイケないため）ので，前者の方針の方が早く最適な制御モードのパターンを見つけられることが多いためである．

## 5.5 数値例

前節で述べた手続きを，C言語を用いて実装した．実装にあたって，線形計画問題のソルバとしてフリーのGLPK (GNU Linear Programming Kit) [Makhorin] を用いた．GLPKは線形計画問題を解くのに，シンプレックス法と内点法（障壁法）を利用できるが，ここではシンプレックス法を用いている．

以降では，開発したプログラムを用いて，指の制御モードの決定問題の数値例を示す．

本節では，2本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考える．対象物は直方体であり，その質量分布は均一であるとする．また，重力加速度を9.8，対象物と環境との間の摩擦係数を0.2，対象物とロボット指との間の摩擦係数を0.5とした．各接点での摩擦円錐は，凸6面錐で近似 ( $s = 6$ ) し，各指の力の上限は  $f_{\max} = [10, 10]^T$  とする．

また，操作の确实性の値の計算において，6次元単位超球を，それに外接する超多面体で近似する．ここでも，この超多面体の頂点としては，以下の76点をとった ( $N_{\text{vert}} = 76$ ) ．

$$l_i = \begin{cases} k[\pm 1, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\ k[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T \\ k[0, 0, \pm 1, 0, 0, 0]^T \\ k[0, 0, 0, \pm 1, 0, 0]^T \\ k[0, 0, 0, 0, \pm 1, 0]^T \\ k[0, 0, 0, 0, 0, \pm 1]^T \\ k \left[ \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}} \right]^T, \end{cases} \quad (5.7)$$

ここで  $k = 2\sqrt{3 - \sqrt{6}} \approx 1.48$  である（付録A.2参照）．式(3.1)の  $R$  については，対象物の質量  $M_o$  と慣性テンソル  $J_o$  を使う，式(3.2)を適用した．

### 5.5.1 例1：平面上での直方体の滑らせ操作

平面上での  $2 \times 2 \times 1$  の直方体の滑らせ操作を考える (Fig. 5.2)．対象物の質量を1とする ( $M_o = 1$ )．座標系は図に示されているように，対象物の質量中心が原点になるようにとる．この場合， $J_o = \text{diag}(5/12, 5/12, 2/3)$  および  $Q_{\text{known}} = [0, 0, -9.8, 0, 0, 0]^T$  である．

2本のロボット指でこの直方体を  $[-1, 0, 0]^T$  の方向に動かすとしよう．Fig. 5.2 左のように， $[1, \pm 1/2, 0]^T$  の位置で物体を押し出す場合，本章のアルゴリズムでは，両方の指を位置制御するのが最適となり，操作の确实性の値は0.6となる．これはLynchらの“stable push”

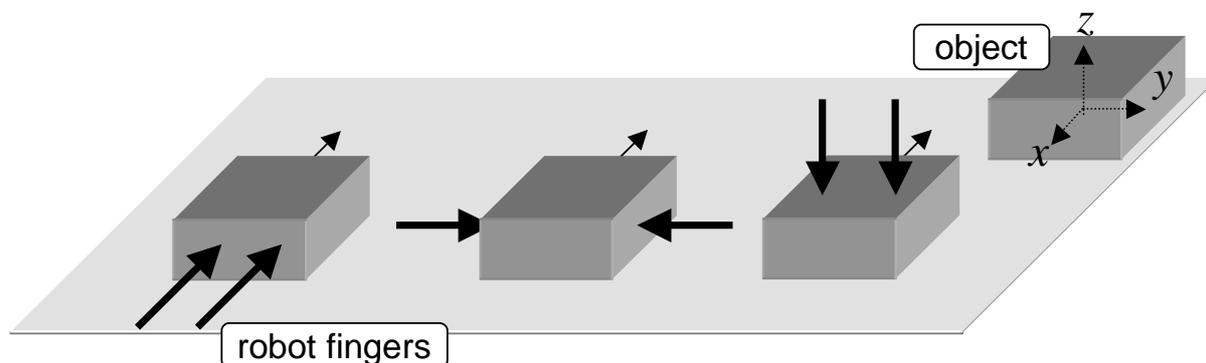


Fig. 5.2: Sliding a Cuboid

[Lynch 1996b] に対応する。

直方体を  $[0, \pm 1, 0]^T$  の位置ではさんで滑らせる場合 (Fig. 5.2 中央), 一本の指を位置制御, もう片方の指を力制御するのが最適となる。この場合是对称なので, 位置制御/力制御を入れ替えても構わない。力制御指の指令指力は  $6.5 (< f_{\max i})$  となり, 操作确实性の値は 2.4 である。この場合, 力制御指は「ほどほど」の力で対象物を押しと操作の确实性を最大にできる, ということになる。なぜなら, 目一杯の力で押ししてしまうと, それと同じ方向に外乱力が加わった際に, 位置制御指の方が耐えられなくなってしまうからである。

Fig. 5.2 右のように, 直方体の上面の  $[0, \pm 1/2, 1/2]^T$  の位置で押しながら引きずる場合, 両方の指を力制御するのが最適となる。指令指力はともに  $10 (= f_{\max i})$  となる。つまり, この場合は両方の指が目一杯の力で押すのが最適ということになる。この場合の操作の确实性の値は 1.7 である。

上記の数値例の場合, Pentium4-1.6GHz を搭載した Linux PC において, 0.02 ~ 0.7 CPU 秒を要した。もっとも時間のかかるのは, (5.5) の線形計画問題を解く部分である。

なお, 上の結果は  $f_{\max} = [10, 10]^T$  とした場合のものであったが, 今度は  $f_{\max} = [2.5, 2.5]^T$  だった場合の指の制御モードの決定を考える。このとき, Fig. 5.2 左の場合は同じく 2 本の指をともに位置制御とするのが最適となり, 操作の确实性は 0.6 と変わらない。Fig. 5.2 中央の場合は, 1 本の指を位置制御, もう片方の指を力制御する, という結果は変わらないが, 指力の制限により, 力制御指の指令指力は 2.3, そして操作の确实性は 0.2 と低下する。一方 Fig. 5.2 右の場合は, 操作が不可能という結果が得られる。このように, 本章で提案する指の制御モードの決定法は, 指の能力 (この場合は発生可能な指力の上限值) によって, 適切な制御モード (もしあれば) を決定できることがわかる。

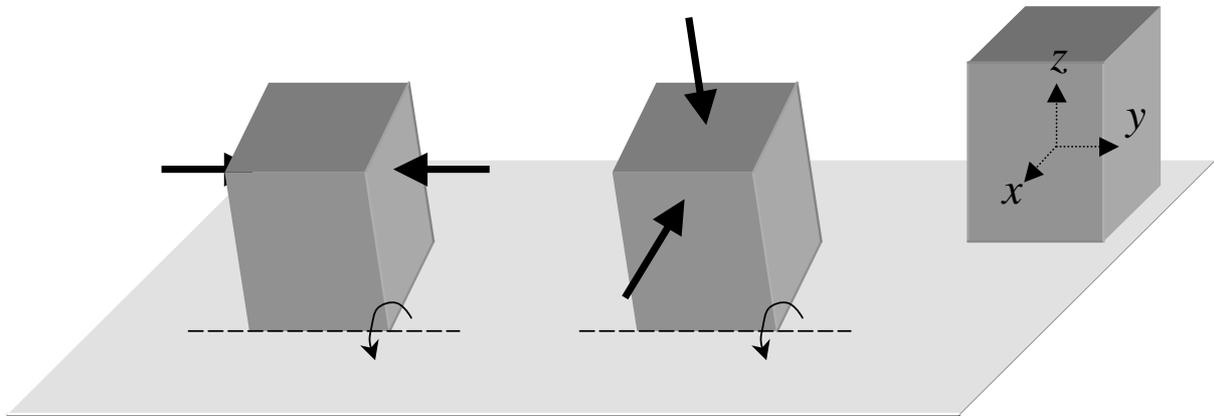


Fig. 5.3: Tumbling a Cuboid

### 5.5.2 例2：直方体の転がし操作

次に，Fig. 5.3 のような  $1 \times 1 \times 2$  の大きさの直方体の転がし操作を考える．対象物の質量は 1 とする ( $M_o = 1$ )．座標系は図中に示すようにとり，その原点は対象物の質量中心である．この場合， $J_o = \text{diag}(5/12, 5/12, 1/6)$  である．ここでは対象物の傾き角が  $30[\text{deg}]$  の瞬間を考え，このとき， $Q_{\text{known}} = [4.9, 0, -8.5, 0, 0, 0]^T$  となる．

この直方体を  $[0, \pm 1/2, 1/2]^T$  の位置でつまんで動かす場合 (Fig. 5.3 左)，片方の指を位置制御，もう片方の指を力制御するのが最適となる (ただし，これはあくまで対象物の傾き角が  $30[\text{deg}]$  の瞬間だけでの「最適」であることに注意されたい)．この場合は対称性より位置制御と力制御が入れ替わっても構わない．力制御指の指令指力は 8.8，操作の确实性の値は 2.5 となる．

一方，Fig. 5.3 右のように，指先を  $(0, 0, 1)$  および  $(1/2, 0, 1/2)$  に置いて動かす場合は，両方の指を位置制御するのが最適となる．このとき操作确实性の値は 1.2 である．

同様に Pentium4-1.6GHz を搭載した Linux PC において，計算時間は前者の場合で 1.1 CPU 秒，後者の場合で 0.01 CPU 秒未満であった．後者の計算が早いのは，すべての指を位置制御にするパターンを調べた時点でこれが最適とわかってしまうからである．一方，前者では指力を最適化する計算をしなければならないため，計算時間が長くなる．

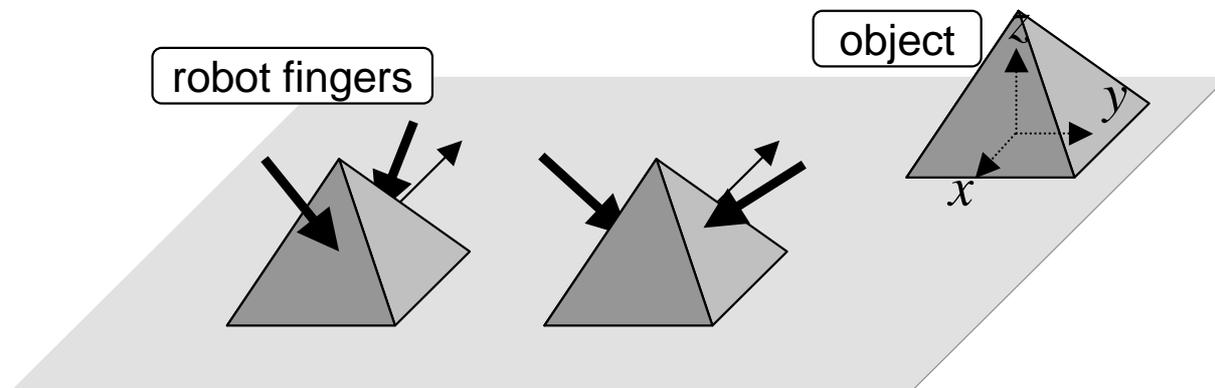


Fig. 5.4: Sliding a Pyramid

### 5.5.3 例3：平面上での四角錐の滑らせ操作

平面上での四角錐対象物の滑らせ操作を考える (Fig. 5.4) . 四角錐の底面は  $2 \times 2$  の正方形, 高さも 2 とする . また, 四角錐の質量は 1 とする ( $M_o = 1$ ) . 座標系は図のように, 対象物の質量中心が原点になるようにとる . この場合,  $J_o = \text{diag}(7/20, 7/20, 2/5)$  および  $Q_{\text{known}} = [0, 0, -9.8, 0, 0, 0]^T$  である .

2本のロボット指でこの対象物を  $[-1, 0, 0]^T$  の方向に動かすとしよう . Fig. 5.4 左のように,  $[\pm 1/2, 0, 1/2]^T$  の位置で物体を前後からはさんで動かす場合, 本章のアルゴリズムでは, 手前の指を力制御, 奥側の指を位置制御とするのが最適となった . 力制御指の指令指力は 10, 操作の確実性の値は 4.0 となる .

一方, 四角錐を  $[0, \pm 1/2, 1/2]^T$  の位置で左右からはさんで滑らせる場合 (Fig. 5.4 右) は, 一本の指を位置制御, もう片方の指を力制御するのが最適となる . この場合是对称なので, 位置制御 / 力制御を入れ替えても構わない . 力制御指の指令指力は 10 となり, 操作確実性の値は 2.9 である .

上記の数値例の場合, Pentium4-1.6GHz を搭載した Linux PC において, 1 回の計算に 0.5 ~ 0.8 CPU 秒を要した .

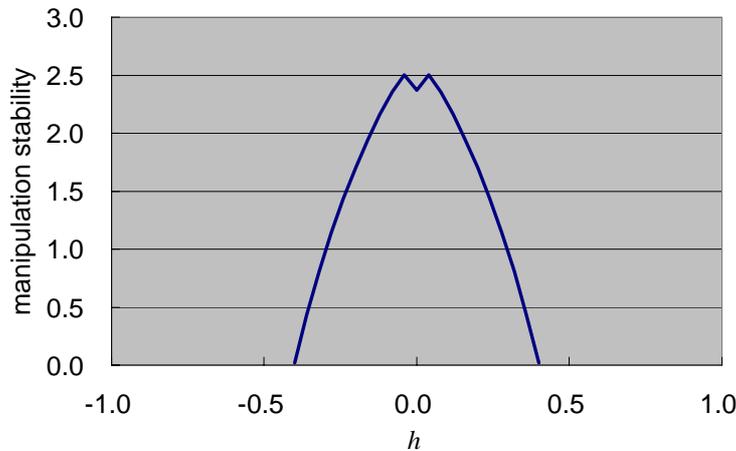


Fig. 5.5: Manipulation Stability of Two-Finger Sliding (1)

#### 5.5.4 パラメータの変動の効果

ここでは、提案した手法によって指の制御モードを決定する際に、各種パラメータの変動によって操作の确实性の指標値がどのように変化するかを、Fig. 5.2 中央の、直方体を左右からつまんで滑らせる操作を対象に見てみる。なお、指標の値の変動については、近似解法による誤差の影響も含まれているので、細かい変動を見るときは注意が必要である。

いま、指位置を  $[\pm h, \pm 1, 0]^T$ （複号同順）とし、 $h$  を  $-1$  から  $1$  まで変化させたとき、すなわち 2 本の指を前後方向にずらした場合の操作の确实性の値を Fig. 5.5 に示す。幾何学的対称性より、操作の确实性のグラフも  $h = 0$  に関して対称となる。 $h < -0.4$  もしくは  $h > 0.4$  では、操作を実現することが力学的に不可能となることがわかる。

次に、指位置を  $[h, \pm 1, 0]^T$  とし、 $h$  を  $-1$  から  $1$  まで変化させたとき、すなわち 2 本の指を前後方向に水平に平行移動させたときの操作の确实性の値を Fig. 5.6 に示す。この場合は操作の确实性の変動は比較的緩やかである。

続いて、指位置を鉛直方向にずらす場合を考える。指位置を  $[0, \pm 1, \pm h]^T$ （複号同順）とした場合、および  $[0, \pm 1, h]^T$  とした場合について、それぞれ  $h$  を  $-0.5$  から  $0.5$  まで変化させたときの操作の确实性の値を Fig. 5.7, 5.8 に示す。Fig. 5.7 は、幾何学的対称性より  $h = 0$  に関して対称となる。なお、 $h = \pm 0.45$  付近で値が急に大きくなるのは、過大な内力の発生可能性が無くなって、両方の指を位置制御モードとできるようになるためである。

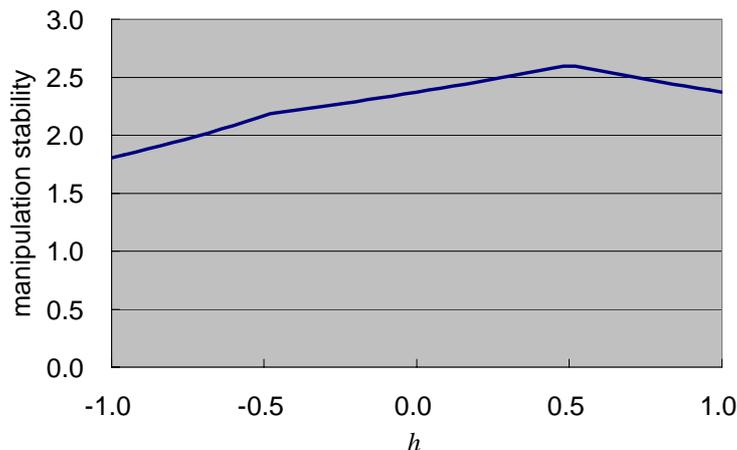


Fig. 5.6: Manipulation Stability of Two-Finger Sliding (2)

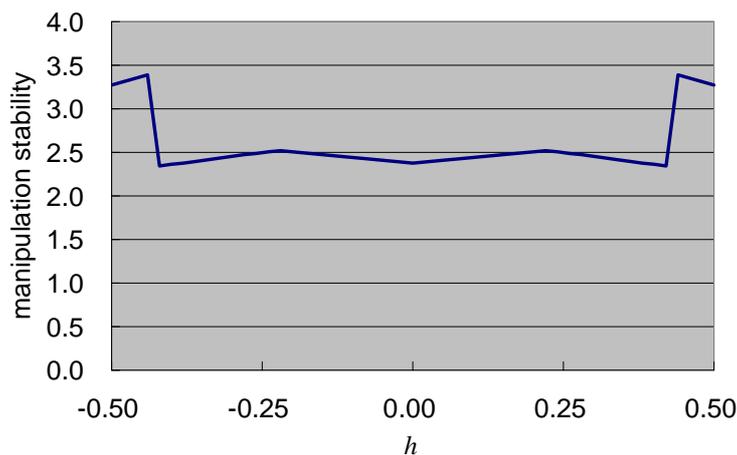


Fig. 5.7: Manipulation Stability of Two-Finger Sliding (3)

Fig. 5.8 では，操作の确实性の値に大きな変化は見られない．

一方，指位置を  $[0, \pm 1, 0]^T$  に固定し，摩擦係数を変えてみる．対象物と環境の間，およびロボット指と対象物との摩擦係数をそれぞれ  $\mu_{\text{env}}, \mu_{\text{rob}}$  とし， $\mu_{\text{env}} = 0.2$  として  $\mu_{\text{rob}}$  を 0 から 1 まで変化させたときの操作の确实性の値を Fig. 5.9 に示す．また， $\mu_{\text{rob}} = 0.5$  として  $\mu_{\text{env}}$  を 0 から 1 まで変化させたときの操作の确实性の値を Fig. 5.10 に示す． $\mu_{\text{rob}}$  については，大きければ大きいほど操作の确实性は大きくなっていることがわかる．また， $\mu_{\text{rob}} < 0.1$  では，力学的に操作が不可能であることが分かる．一方  $\mu_{\text{env}}$  については，大きければ大きいほど，この場合は摩擦に打ち勝って物体を押すことが困難になり，操作の确实

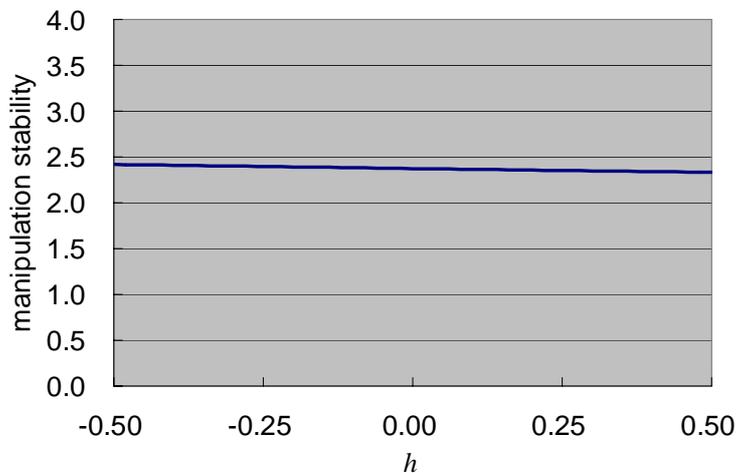


Fig. 5.8: Manipulation Stability of Two-Finger Sliding (4)

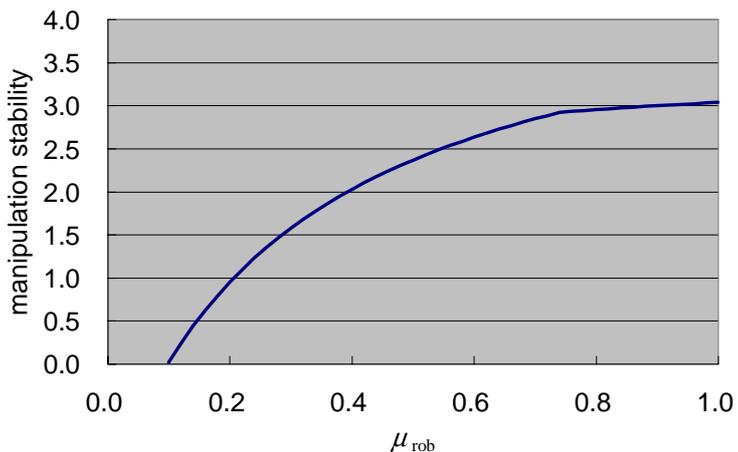


Fig. 5.9: Manipulation Stability of Two-Finger Sliding (5)

性が減ることが見てとれる。

以上の例からは、提案した手法によって指の制御モードを決定するとき、多くの場合では、パラメータの変動に対して操作の确实性の値が不連続に変化してしまうことはないと思われる。しかし、指の制御モードが切り替わる境界付近では、切り替えの結果として操作の确实性が急に变化することもありうるので、注意が必要である。

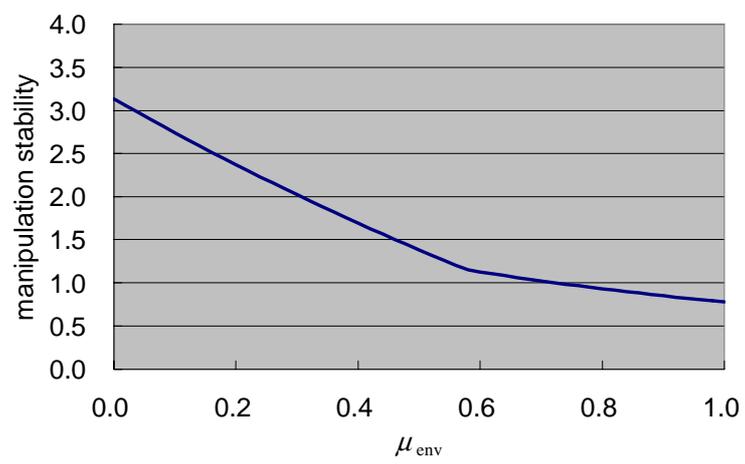


Fig. 5.10: Manipulation Stability of Two-Finger Sliding (6)

## 5.6 制御モード決定手法に対する考察

### 5.6.1 提案手法の性質

前節の数値例では、本章で提案したアルゴリズムは、おおむね適切な制御モードを決定できていると言ってよい。したがって、本章で提案した制御モード決定の方針、すなわち「過大な内力の発生の恐れがない限りにおいて、できるだけ操作の确实性の値を大きくする」という方法は、グラスプレス・マニピュレーションにおいては妥当であると考えられる。

また、この方針に従った場合、力制御よりも位置制御をできるだけ採用するようになる。このことは実機におけるマニピュレーションをより容易に実現する上でも有効である。

ただし、本章で提案した手法で用いている操作の确实性の指標(3章)は、ミニマックス基準によるものであるため、もっとも外乱に弱い方向「以外」については評価が行われない。したがって、もっとも外乱に弱い方向についての評価は同じでも、それ以外の方向についてはより外乱に対してロバストな、指の制御モードの組み合わせが存在しても、それを見落とすことがある。これが問題になる場合は、得られた操作の确实性の指標値を拘束条件として加え、もっとも外乱に弱い方向「以外」について外乱への抵抗力をさらに最適化する、などの方法をとることが考えられる。

また、5.5.1 項の結果からは、指が大きな力を出せる場合については、内力を伴うあやつり、すなわち Type A の操作 [相山 1996a] の方が、操作の确实性の評価値が高くなる傾向が見取れる。この結果自体は当然であるが、本章の手法を使ってマニピュレーションを選択する場合には、内力を大きくした状態でのマニピュレーションが選ばれやすくなる、ということには注意しておく必要がある。

なお、用途によって、本章で提案した制御モード決定のアルゴリズムに少し手を加えることも考えられる。例えば、ある外力仕様(すなわち、ある集合内の任意の外力に耐えられること)を満たすようにパワーグラスプの最適化を行った研究([余 1999, 小俣 2002])があるが、これと同様な方法で制御モードを決定してもよい。この場合、操作确实性の値を最大化するのではなく、操作确实性の値が一定値以上になることを制約条件とし、他の評価関数(例えば指力の和など)を最小化する、といった方法をとることになる。

### 5.6.2 計算量

本節では，提案した指の制御モード決定アルゴリズムの計算量を考える．

提案手法では，操作の確実性を最大化する部分 (5.5) と過大な内力の発生可能性を判別する部分 (5.6) の 2 種類の線形計画問題を解く．しかし，それぞれの制約条件の数は，前者が最大で  $(6 + 3n)N_{\text{vert}} = O(N_{\text{vert}}n)$  (標準形に変換した場合)，後者が 6 である．また，変数の数は前者が最大  $N_{\text{vert}}s(m + n) + n + 1 = O(N_{\text{vert}}s(m + n))$  (標準形に変換した場合) なのに対して，後者は  $s(m + n)$  である．つまり，問題の規模は (5.5) の線形計画問題の方が圧倒的に大きく，したがってこちらの計算量が支配的になる．

シンプレックス法によって線形計画問題を解く場合，実際的には繰り返しの回数はほぼ拘束条件の数に比例し，また各繰り返しごとの演算量は，拘束条件の数と変数の数の積に比例するとされている [伊理 1995]．したがって，(5.5) をシンプレックス法で解いた場合，その計算量はおおよそ

$$\begin{aligned} & O(N_{\text{vert}}n) \times (O(N_{\text{vert}}n) \times O(N_{\text{vert}}s(m + n))) \\ & = O(N_{\text{vert}}^3 sn^2(m + n)) \end{aligned} \quad (5.8)$$

と見積もられる．

さらに，提案手法では，最悪の場合，指の位置制御 / 力制御モードのすべての組み合わせ ( $2^n$  通り) について，(5.5) の線形計画問題を解く必要がある．したがって，提案手法の計算量は，おおよそ  $O(2^n N_{\text{vert}}^3 sn^2(m + n))$  と見積もられる．この数字は決して小さいものではないが，実際には，組み合わせを調べる回数を調べる工夫 (5.4.4 項) の効果により，すべての組み合わせを調べる必要がある場合は (特に  $n$  が大きいときには) まれである．また過大な内力の発生可能性がある場合など，すぐに計算が終了することも多い．数値例の計算時間からも，実際的な計算量はより小さいことが予想される．

## 5.7 おわりに

本章では、グラスプレス・マニピュレーションでの指の制御モード決定問題を扱った。これは把持における指力決定問題を拡張したものに相当する。本章で提案した手法により、一連の線形計画問題を解くことで、各ロボット指の制御モード（位置制御／力制御）および、指令指力（ただし力制御の指についてのみ）を決定できることが示された。

本章の内容は、グラスプレス・マニピュレーションのある瞬間について、指の制御モード・指力を最適化する問題であった。これは、グラスプレス・マニピュレーションの計画問題の中の局所的な問題を解いたことになる。

次章では、この結果を踏まえ、より大域的な計画問題を解くことを考える。すなわち、操作対象物の初期位置・姿勢と目標位置・姿勢が与えられたときに、それをグラスプレス・マニピュレーションで実現するための、各ロボット指の位置・制御モード・指力の系列を決定する問題を扱う。

## 第 6 章

# 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の計画

---

6.1	はじめに . . . . .	103
6.2	従来研究 . . . . .	104
6.3	計画の概要 . . . . .	105
6.3.1	計画の基本方針 . . . . .	105
6.3.2	問題設定 . . . . .	106
6.3.3	計画手法の概要 . . . . .	107
6.4	同一接触状態内でのグラフ生成 . . . . .	109
6.4.1	コンフィギュレーション空間の導入 . . . . .	109
6.4.2	コンフィギュレーション空間の離散化によるノード生成 . . . . .	110
6.4.3	アークの生成 . . . . .	110
6.5	グラフ間の結合による接触状態遷移の表現 . . . . .	113
6.6	グラスプレス・マニピュレーションの計画 . . . . .	114
6.6.1	操作可能性グラフの探索 . . . . .	114
6.6.2	$A^*$ 探索のためのヒューリスティクス . . . . .	116
6.6.3	$A^*$ 探索の改良 . . . . .	118
6.7	計画例 . . . . .	121
6.7.1	滑らせ操作の計画 . . . . .	121
6.7.2	転がし操作の計画 . . . . .	128
6.7.3	ピボット操作の計画 . . . . .	134
6.7.4	複合操作の計画 . . . . .	136
6.7.5	アーム・ハンド機構による計画結果の実行例 . . . . .	138
6.8	計画手法に関する考察 . . . . .	143

6.8.1	計画手法の特徴と意義 . . . . .	143
6.8.2	実際の計算時間に関する考察 . . . . .	144
6.8.3	理論的な計算量 . . . . .	146
6.8.4	計算時間の改善策 . . . . .	148
6.9	おわりに . . . . .	150

---

## 6.1 はじめに

グラスプレス・マニピュレーションの適用範囲を拡大する上での課題の1つに、対象物の操作計画問題が挙げられる。初期位置から目標位置までのあやつり (Fig. 6.1) を自動的に計画することができるようになれば、作業教示の手間の大幅な低減が期待できるが、グラスプレス・マニピュレーションでは計画を行う上でいくつかの困難な点が存在する。

通常のピックアンドプレイスの場合、いったん把持してしまえば、対象物の運動はロボットの運動と自明に1:1対応する。したがって、計画は基本的に幾何学的な障害物回避問題に帰着される。しかしながら、グラスプレス・マニピュレーションの場合、対象物を把持していないため、その運動は、ロボットの運動だけでなく、環境との接触点における摩擦など力学的条件にも影響される。したがって、計画を行うためには幾何学的条件だけではなく力学的条件をも考慮する必要がある。また、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ために操作が不可逆になる場合（押せても引けない、など）があり、これが問題をさらに複雑にしている。

本章では、前章で示した指の制御モードの決定手法を利用した、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の計画手法を提案する。これにより、多様なグラスプレス・マニピュレーションを、外乱に対してもロバストに行えるような指の動作計画の実現を目指す。

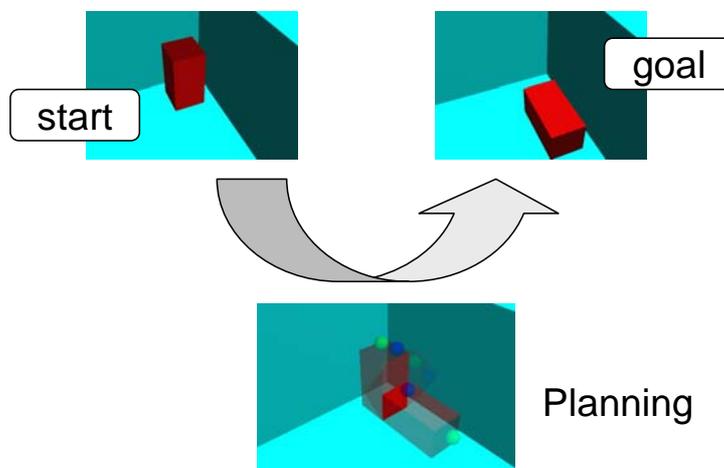


Fig. 6.1: Planning of Grasplless Manipulation

## 6.2 従来研究

現状では、一般的なグラスプレス・マニピュレーションの計画問題は、単に計算量が多いというのみならず、計画アルゴリズムを実装する上で問題をどのように表現すればよいか、という点もまだ明らかではない。そのため、実際にグラスプレス・マニピュレーションの範疇に入る計画問題を扱った研究のほとんどは、ロボットを考慮せずに対象物の運動のみの計画を扱ったもの、もしくは特定の操作方法に限定して議論をしているものである。前者の例としては、[吉川 1992a, 余 1995a, 相山 1999, 栗栖 1999, Marigo 2000, Ji 2001] が挙げられる ([栗栖 1999, Marigo 2000] は、さらに操作方法も転がしに限定している)。後者の例としては、押し操作に限定したもの [栗栖 1995, Lynch 1996b, 吉川 1996c]、転がし操作に限定したもの [沢崎 1991, 山下 2001, 栗栖 2002] がある。

寺崎らは、指先に回転機構を有する平行2指ハンドを対象に、把持による操作と押し操作(寺崎らは「滑らし操作」と呼んでいる)、および回転機構を利用した転がし操作を含む物体操作の計画を行っている [寺崎 1994, 寺崎 1995]。実装された計画手法は完成度の高いものであるが、幾何情報に基づく動作計画に重点が置かれており、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必要な力学解析は扱われていない。

Erdmann は2つの線分状の掌によるあやつり (“Two-Palm Manipulation”) を対象に、平面3自由度を持つ物体の滑らせ・転がしなどの操作を含む計画を行っている [Erdmann 1998] が、これも限定的な操作の計画だと言えるであろう。

摩擦などの力学的問題を考慮した上で、操作方法を限定しない計画問題を扱った例としては、以下の研究がある。Trinkle らは Whole Arm Manipulation を対象に接触点での滑り・転がりを考慮した安定状態 “First-Order Stability Cell (FS-cell)” を定義しており [Trinkle 1995]、FS-cell だけを通る経路の探索による計画の可能性を示唆している。これはグラスプレス・マニピュレーションにも応用が可能と考えられるが、具体的な計画の実現手法については明らかにされていない。また、実装を行うには高次元のコンフィギュレーション空間の構築が必要で計算量が問題になると思われる。Maeda らは、押し操作・転がし操作を含むグラスプレス・マニピュレーションの計画問題を扱い、平面3自由度を持つ物体の1本指での操作を対象に計画アルゴリズムの実装を行っている [Maeda 2001]。しかし、複数の指による操作の計画方法が明らかにされていないこと、指の持ち替えを直接表現できないことから、より一般的な作業に適用可能にするためにはさらなる拡張が必要である。

## 6.3 計画の概要

### 6.3.1 計画の基本方針

本章では、操作方法を限定しない一般的なグラスプレス・マニピュレーションの自動計画を行うことを目指す。しかし、素直に計画問題を実装すると、計算量が爆発することが予想される。そこで、ここでは操作を現実的な時間で計画することのできる計画器を実現するために、以下のような2段階で計画を行うアプローチをとることを考える。

1. 幾何学的情報に基づく大まかな操作コストの見積もりによって、操作の候補となる探索領域を絞る。
2. 限定された探索領域の中で、力学解析に基づく詳細な操作計画を行う。

1. は、全体の計算量を減らすために、例えば環境の幾何学的情報から、接触状態ネットワーク [平井 1988] を利用して、探索領域を限定する。この場合、まずはロボットの存在は考えず、対象物と環境の間の接触状態遷移のみを考える。接触状態ネットワークに対し、適当なコスト評価を与えて探索を行うことによって、初期状態から目標状態までの接触状態遷移の候補が得られる [余 1995a, 相山 1999]。

しかしこの接触状態遷移は、ロボットを考慮した詳細な力学解析を行わない限り、最適であるかどうかはもとより実現可能であるかどうか不明である。そこで、接触状態ネットワークから（最適解だけではなく）複数の有望な接触状態遷移候補を抽出することで、簡略化された接触状態ネットワークを得る。そして、この簡略化されたネットワークに対して、(2) の詳細な計画を行うことで、最終的な解を得る、という方法が考えられる。

以上のように接触状態ネットワークに基づいて計画を行った場合、個々の接触状態に関しては対象物の自由度が減るため、接触状態ネットワークの簡略化を適切に行うことで、全体の計算量の低減が期待できる。接触状態ネットワークの生成については [平井 1988, Xiao 2001] などの研究が、およびそれを用いた（対象物の運動のみの）計画に関しては、[吉川 1992a, 余 1995a, 相山 1999, Ji 2001] などの研究がある。また、グラフ上から複数の有望な経路を抜き出す問題は  $k$  shortest paths problem として定式化され効率的な計算アルゴリズムが提案されている [Eppstein 1998]。また、グラフから多様な経路を抜き出す方法も提案されている [藤田 2002]。したがって、ここではそれらの成果を利用することとし、本章では探索領域が限定された後の、2. の計画問題のみを扱う。

なお，一般的なロボットの動作計画問題では，幾何計算（障害物回避）が主たる問題となる [比留川 1994] が，これについてはすでに極めて多数の研究が行われている [Latombe 1991, 太田 2001]．そこで本章では，グラスプレス・マニピュレーションに特有である力学的問題の解決に焦点を絞り，通常の動作計画問題と共通する，障害物回避などの幾何学的問題の扱いは最小限にとどめることとする．

### 6.3.2 問題設定

本章で扱う計画問題では，(Fig. 6.2) のような多指ハンドによるグラスプレス・マニピュレーションを想定して，以下の条件を仮定する．

1. 対象物，ロボットの指先，環境は剛体である．
2. マニピュレーションは準静的に行われる．
3. 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．
4. 静止摩擦係数と動摩擦係数は等しい．
5. 摩擦円錐は凸多面錐 [平井 1999] によって近似できる．
6. ロボット指は対象物と摩擦あり点接触する．
7. すべての接触は複数の点接触で近似できる（2.3 節参照）．
8. 不完全な接触[張 1996]は存在しない．
9. ロボットの指力の接触法線成分には上限がある．

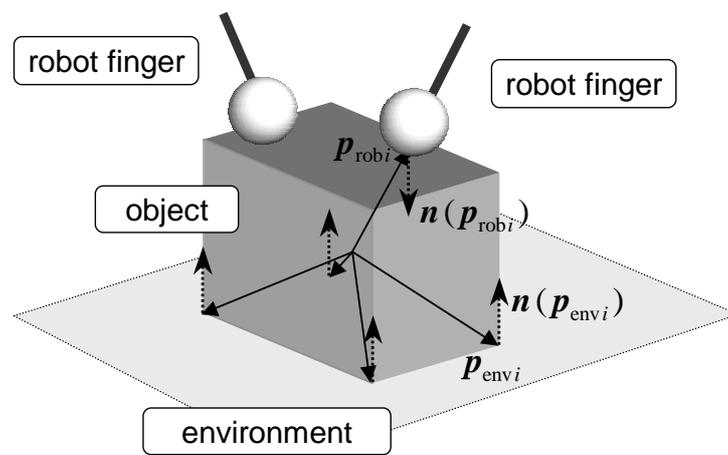


Fig. 6.2: Object in Graspless Manipulation

10. ロボットの各指は位置制御モードもしくは力制御モードのどちらかに設定される。
11. 位置制御モードの場合，ロボットの指は，その摩擦円錐内の任意の力を（受動的に）発生することができる。
12. 力制御モードの場合，ロボットの指は位置・力のハイブリッド制御[Raibert 1981]される。ここでは，ロボット指は接触法線方向には指令された力を能動的に発生し，接線方向には摩擦円錐内の任意の力を受動的に発生できるとする。
13. ロボット指は，対象物と摩擦あり点接触する球形の剛体で近似される。
14. 指の対象物上での滑り・転がりは扱わない。対象物上の指位置を変化させる場合は，持ち替えを行う。
15. 指と指の間隔はある一定距離以下であるとし（ハンドの機構による制約条件の近似），この範囲内であれば他の物体と干渉しない限り持ち替えを行うことができるとする。

下線部は 2.3 節における仮定に加えて新たに導入したものである。記号等は 2.3 節で定義されたものを用いる。

通常の動作計画手法でカバーされるような幾何学的問題の取り扱いを最小限とするため，ロボット指のリンクなどは無視し，指先だけを考える。これによって，グラスプレス・マニピュレーション特有の，力学的問題に焦点を絞る。ただし，リンクの存在を無視する代わりに，最低限の考慮として，指と指の間隔が一定距離以上にならないような制約を入れている（条件 15）。なお，指先を球で近似する（条件 13）のは，障害物との干渉判定を単純化するためである。

解くべき問題は以下の通りである。

対象物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移動させるための，指先位置および指の制御モード（位置制御／力制御）の系列を求める。

また，力制御指については目標指力も併せて求める。

### 6.3.3 計画手法の概要

提案する計画手法では，対象物と指の自由度を合わせて考えたコンフィギュレーション空間をグラフで表現することによって，最終的にマニピュレーションの計画問題を，グラフ探索問題に帰着させることとする。計画手法は以下の要素から構成される。

1. 指先位置が与えられた際の，指の制御モードを考慮した作業の确实性の評価（5 章）

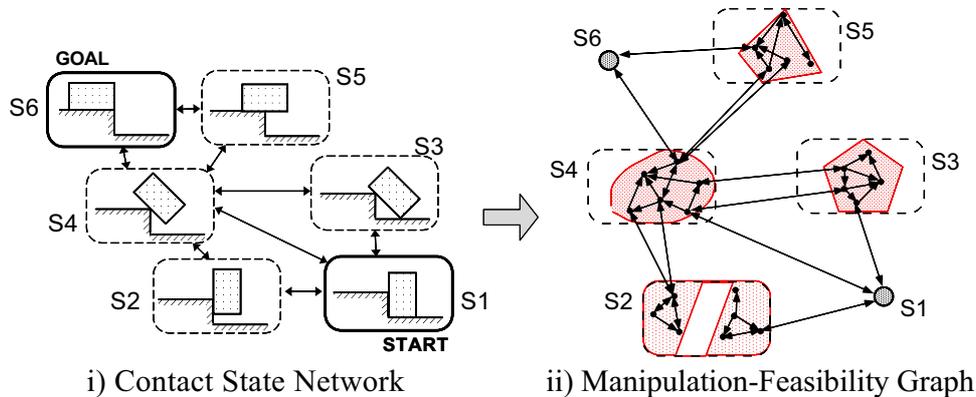


Fig. 6.3: Generation of Manipulation-Feasibility Graph

2. 同一接触状態内（以後特に明記しない限り、「接触状態」とは環境と対象物との接触状態を指すこととする）でのマニピュレーションを表現するグラフの生成（6.4 節）
3. 接触状態遷移の表現のためのグラフ間の連結（6.5 節）
4. 生成されたグラフの探索による計画の実行（6.6 節）

1. では、コンフィギュレーション空間内の 1 点に対してマニピュレーション中にその点を通り得るかどうかの判定を、操作の确实性の評価を元に行う。その際に、同時に指の制御モード（および力制御指に関しては指令指力）を決定する。これは 5 章の内容に対応する。2. では、1 つの接触状態について、コンフィギュレーション空間を離散化してノードを生成し、それらをアークで接続する。本論文ではこのようにして作られるグラフを「操作可能性グラフ」と呼ぶ。3. では、2. で生成された複数のグラフの間をさらにアークで接続して 1 つの大きなグラフにする。4. では、最終的に生成された操作可能性グラフを探索することによって計画を行う。操作可能性グラフの生成のイメージを Fig. 6.3 に示す。

## 6.4 同一接触状態内でのグラフ生成

### 6.4.1 コンフィギュレーション空間の導入

対象物と指の自由度を合わせて考えたコンフィギュレーション空間を考える．なお，ここでは説明のためにコンフィギュレーション空間の概念を用いるが，実際には陽にコンフィギュレーション障害物やコンフィギュレーション自由空間を計算することを行わない．いま，対象物の位置・姿勢が3次元空間内の  $d(\leq 6)$  自由度を持つとする．また，指の本数を  $n$  とする．本来，コンフィギュレーション空間は  $d + 3n$  次元となる（指は球と仮定していることに注意）が，これでは次元がかなり高い．そこで，計画における指のコンフィギュレーションを，対象物表面上に限定する (Fig. 6.4)．これにより，コンフィギュレーション空間の次元を  $d + 2n$  に下げることができる．

しかし，このコンフィギュレーション空間は通常の障害物回避問題の場合と同様な方法では探索することはできない．なぜなら，

- 対象物を把持していないため，コンフィギュレーション空間内のある点からある点への移動ができて，その逆が不可能であることがある．
- 持ち替えが発生するため，指の自由度に関してはコンフィギュレーション空間内での不連続な移動が生じる．

という問題があるためである．もちろん，後者の問題は，コンフィギュレーション空間の次

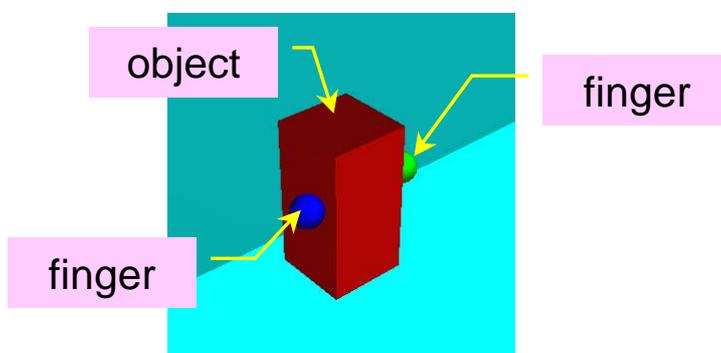


Fig. 6.4: Robot Fingers on the Object

元を下げるために、指位置を対象物平面上に限定したことに起因するものである。しかし、前者はグラスプレス・マニピュレーションにおける本質的な問題と言える。

これらの問題を解決するため、ここではコンフィギュレーション空間を離散化してグラフのノードとし、その間の遷移が可能な場合のみノード間をアークでつなぐことにより、有向グラフでコンフィギュレーション空間を近似表現することとする。

### 6.4.2 コンフィギュレーション空間の離散化によるノード生成

ここではまず、同一接触状態内でのノード生成を行う。接触状態が指定されているので、このときの対象物の自由度を  $d(\leq 6)$  とし、 $(d + 2n)$  次元の部分コンフィギュレーション空間を考えればよい。この部分コンフィギュレーション空間における対象物の座標を  $\mathbf{q}_{\text{object}} \in \mathbb{R}^d$ 、指の座標を  $\mathbf{q}_{\text{finger1}}, \dots, \mathbf{q}_{\text{finger}n} \in \mathbb{R}^2$  とおく。

まず、この部分コンフィギュレーション空間内に離散的に点を取り、これをノード候補とする。具体的には、対象物の位置・姿勢について（例えば格子状に）サンプル点を取る。また、対象物の表面上に（例えば格子状に）指配置の候補点を取る。これらの組み合わせがノード候補となる。

そして、これらのうち、物体間の干渉や指と指の間隔に関する幾何学的な制約条件（6.3.2節の仮定を参照）を満たすもののみを、ノードとして採用する (Fig. 6.5)。

### 6.4.3 アークの生成

ノード間を接続するアークとして、対象物の変位を表すアークと持ち替えを表すアークの2種類が存在する。これらのアークの生成の方法を以下に述べる。

対象物の変位を表すアークとは、対象物上の指位置を変化させずに対象物のみを動かすことに相当し、コンフィギュレーション空間上では対象物の自由度方向に隣接しているノード間を接続する。

準静的なマニピュレーションを実現するためには、過大な内力を生じさせることなく、また操作の確実性が十分あることが必要である。そこで、5章で示した指の制御モードの決定手法を用いて、適切に指の制御モード（および力制御指の指令指力）を決定したときの、操作の確実性の評価値  $z$  を調べる。この  $z$  の値が、ある基準値  $z_{\min}$  以上になるようにする。このアーク上のすべての点で  $z \geq z_{\min}$  である必要があるので、アーク上を細かく  $P$  区間に分割し、各分割点について（指の制御モードを適切に決定したときの） $z$  の値を計算し、す

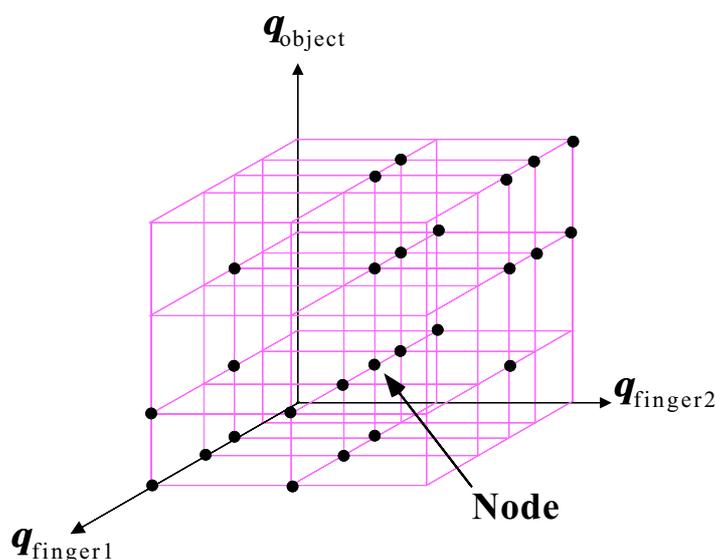


Fig. 6.5: Generation of Nodes

すべての点において  $z \geq z_{\min}$  であった場合のみ，ノード間をアークで結ぶ．滑りのない遷移の場合は双方向のアークで結んでよいが，滑りがある場合は，片方向にしか操作ができない場合（押すことはできるが引くことはできない，など）が存在するので，滑りの方向ごとに別々に調べて有向アークで結ぶ (Fig. 6.6 (a)) ．

持ち替えを表すアークとは，対象物の位置・姿勢を変化させることなく1本の指の対象物上の位置を変化させることに相当する．持ち替えによって対象物上の指位置は不連続に変化するので，アークはコンフィギュレーション空間内で隣接していないノード間にも生成する必要がある．したがって，まず持ち替えを行う指を離れた状態での操作の確実性  $z$  の値を調べる． $z \geq z_{\min}$  のときは自由に持ち替えが可能なので，このノードと，持ち替える指以外の座標が共通であるノードすべてとの間を双方向のアークで接続する (Fig. 6.6 (b)) ．

以上のようにして遷移可能なノード間すべてにアークを生成することで，1つの接触状態内でのグラスプレス・マニピュレーションを表す操作可能性グラフが生成される．

なお，指の制御モードの決定において，本論文では線形計画問題をシンプレックス法で解いているが，このような場合，シンプレックス法の特徴から，解のチャタリングが起こる可能性があることが知られている [Shimoga 1996] ．つまり，シンプレックス法は解領域の頂点を解として返すため，わずかに条件が変わっただけで，頂点から頂点への解のジャンプが発生し，不必要な不連続性を生じてしまう可能性がある．このような状況への対応策として

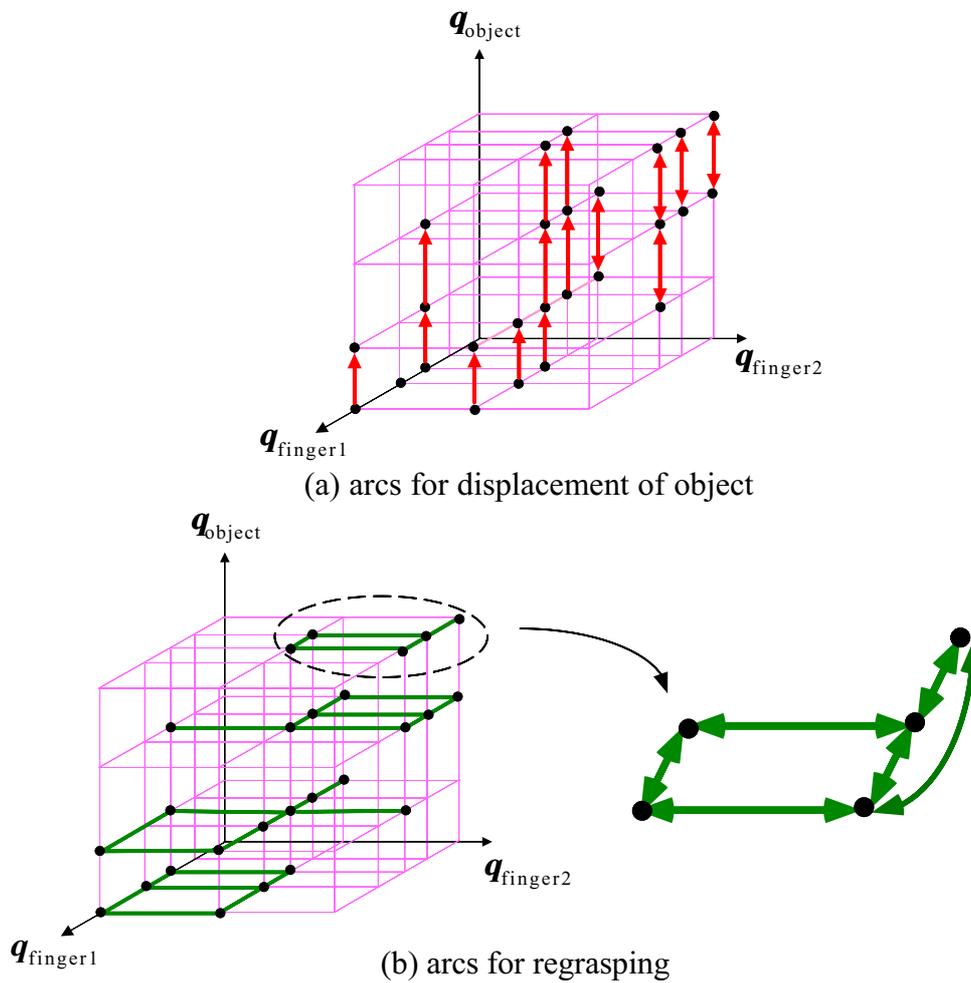


Fig. 6.6: Generation of Arcs

は、グラフ探索によりいったん解が得られた後、再度、シンプレックス法以外の安定な方法により、指の制御モード（および指令指力）の決定をやり直す、という方法が考えられる。この場合、シンプレックス法の代わりに例えば勾配射影法 (gradient projection method) を用いる方法が提案されている [Klein 1990]。

## 6.5 グラフ間の結合による接触状態遷移の表現

6.4 節で生成されたグラフは、同一接触状態内でのマニピュレーションを表現するものであった。グラスプレス・マニピュレーションは複数の接触状態間にまたがる場合があり、その計画のためには、接触状態ごとのグラフ間を連結して1つの大きな操作可能性グラフを生成する必要がある。

2つの異なる接触状態の操作可能性グラフの間で連結できるノードは、対象物および指のコンフィギュレーションが全く同じであるノードである。これらは接触状態が遷移する瞬間の全く同じ状態を表しているため、これらを一条件でコスト0の双方向のアーケで接続すればよい。

すべての操作可能性グラフの間でこの操作を行うことで、複数の接触状態にまたがる大きな操作可能性グラフが生成できる。

## 6.6 グラスプレス・マニピュレーションの計画

### 6.6.1 操作可能性グラフの探索

生成された操作可能性グラフの探索により，グラスプレス・マニピュレーションの計画を行う．計画における初期および目標コンフィギュレーションは，指位置に関しては規定しないため，操作可能性グラフ上ではそれぞれ複数のノードに対応する．このため，これらのノードにコスト0のアーキで接続された仮想的な初期ノード・目標ノードを生成する (Fig. 6.7) ．

操作計画は，初期ノードから目標ノードまでの最小コスト経路を，操作可能性グラフの探索により求めることで行える．前節までのグラフ生成は，実際には探索する前に全体を構築するのではなく，探索を行う過程で必要な部分だけグラフを生成すればよい．グラフ探索のためには，生成される各アーキに適切なコストを割り振る必要があるが，ここでは

1. 操作の確実性が低くなる場所は通らない．
2. 持ち替え回数を最少にする．
3. できるだけロボット指の移動量を小さくする．
4. できるだけ操作の確実性を大きくする．

という方針をとることにする．

グラスプレス・マニピュレーションは対象物を把持していないため，操作の確実性を十分確保することは，操作の失敗を防ぐ上で重要である．また，指の持ち替えは，操作にかかる

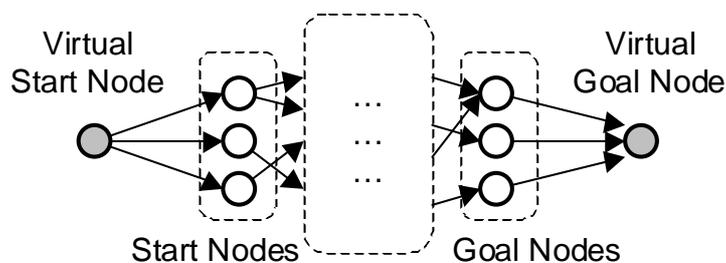


Fig. 6.7: Virtual Start/Goal Node

時間や持ち替え中の対象物の安定性の問題から、避けたほうが望ましい。アーム・ハンド機構を用いる場合は、持ち替えが無ければハンドを動かさずにあやつりを行える利点もある。指の移動量については、可動範囲や操作にかかる時間の問題を考えると、基本的には小さい方が望ましいと言える。以上のことから、上記の方針は妥当であると考えられる。ただし、上の条件から順に優先度が高いとし、ここではこれを実現するための適切なコスト設定を考える。

まず、操作の確実性については、アーク生成時に基準値  $z_{\min}$  を設定していることによつて、すでに対応済みである。

次に、ノード  $n$  と  $n'$  を結ぶ、対象物変位方向のアークに対して割り当てるコストを、

$$c(n, n') = \max_i \sum_{j=1}^P \left( 1 + \frac{X_{\text{stab}}}{z_j} \right) \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i, j}\| \quad (6.1)$$

とする。ただし  $\|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i, j}\|$  はこのアークを  $P$  区間に分割したときの、 $j$  番目の区間におけるロボットの  $i$  番目の指先の（絶対的な）変位の大きさ、 $z_j$  はそのときの（適切に制御モードを選択したときの）操作確実性の値である。また  $X_{\text{stab}}$  は、 $X_{\text{stab}}/z_{\min}$  が 1 より十分小さくなるように決めた定数である。(6.1) 式は、各指の変位が大きくなるほど、また、操作の確実性が小さくなるほど、大きな値をとることになる。

滑りのある変位に対応するアークの場合、滑りの方向によって最適な指力が変化するため、逆方向のアークでは (6.1) 式は異なる値をとる（場合によっては、その操作は不可能になる）ということに注意されたい。

また、ノード  $n$  と  $n'$  を結ぶ、持ち替え方向のアークに割り当てるコストは、

$$c(n, n') = X_{\text{regr}} \quad (6.2)$$

とする。ここで  $X_{\text{regr}}$  は持ち替えそのもののコストを表す定数とし、式 (6.1) の値より十分大きくなるようにとる。

以上のようにコストの割り当てを行うことにより、持ち替えの回数の最少化を優先し、その上で（式 (6.1) の意味で）ロボットにかかる負荷の最も小さい経路を、グラフ探索で求めることができる。

### 6.6.2 $A^*$ 探索のためのヒューリスティクス

グラフの探索をより短時間に行うため、 $A^*$  探索 [Pearl 1984, 古川 1997] を用いる。 $A^*$  探索とは、ゴールまでの見積もりコスト

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (6.3)$$

に基づいて探索を行う方法である。ここで、 $g(n)$  はスタートからノード  $n$  までの経路のコスト、 $h(n)$  はノード  $n$  からゴールまでの最短経路の見積もりコストであり、したがって  $f(n)$  はノード  $n$  を通る最短経路の見積もりコストを意味する。以下に、 $A^*$  探索の手順を示す [Pearl 1984]。

1. スタートノード  $s$  を OPEN リストに入れる。
2. OPEN リストが空ならば、探索失敗として終了。
3.  $f$  が最小となるノード  $n$  を OPEN リストから削除して CLOSED リストに入れる。
4. もし  $n$  がゴールノードならば、 $n$  から  $s$  までポインタを逆にたどって解を求め、探索成功として終了。
5. そうでなければ、 $n$  を展開してその次のノードをすべて生成し、それらのノードに  $n$  へ戻るポインタ情報を付け加える。 $n$  の次のすべてのノード  $n'$  について、
  - (a) もし  $n'$  がまだ OPEN リストにも CLOSED リストにも入っていないならば、 $h(n')$  を見積もって  $f(n') = g(n') + h(n')$  を計算し、 $n'$  を OPEN リストに入れる。
  - (b) もし  $n'$  がすでに OPEN リストもしくは CLOSED リストに入っていればそのポインタを、最小の  $g(n')$  を与える経路を指すように変更する。
  - (c) もし  $n'$  のポインタの変更が行われ、かつそれが CLOSED リスト上にあった場合は、再度  $n'$  を OPEN リストに入れる。
6. ステップ 2 に戻る。

ここで、 $h(n')$  はノード  $n'$  におけるヒューリスティック関数の値であり、ノード  $n'$  からゴールノードまでの最適経路のコストの見積もりを表す。また、 $g(n')$  はノード  $n'$  までの経路の実コストを表し、以下のように定義される。

$$\begin{aligned} g(n') &= g(n) + c(n, n') \\ g(s) &= 0 \end{aligned}$$

ただし、 $c(n, n')$  はノード  $n$  から次のノード  $n'$  へ移動するためのコストである。

$A^*$  探索では、許容的 (admissible)、すなわち実際のコストを越えないようなコストの予測 (ヒューリスティック関数) を探索に用いることで、最適性を保ったまま高速化を図ることができる。また、コストの予測が正確であればあるほど、 $A^*$  探索は効率的になる。つまり、設計するヒューリスティック関数の質いかんで、 $A^*$  探索の性能が決まることになる。

本章で扱うマニピュレーション計画問題では、持ち替えに対して大きなコストを与えている。したがって、探索の性能を上げるためには、持ち替えの必要な状態を検知し、ヒューリスティック関数によって適切なコスト予測をすることが重要であると言える。そこで、ここではヒューリスティック関数として、以下のような許容的な関数を設計した。

$$h(n) = \begin{cases} \max_i \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i}^*\| & \left( \begin{array}{l} \text{現在の指配置で目標位置に到達} \\ \text{しても指が環境と干渉しない場合} \end{array} \right) \\ n_{\text{viol}} X_{\text{regr}} & \left( \begin{array}{l} \text{現在の指配置で目標位置に到達} \\ \text{すると指が環境と必ず干渉する場合} \end{array} \right) \end{cases} \quad (6.4)$$

ここで  $\|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i}^*\|$  は、現在の指配置のまま目標位置に到達した際の、 $i$  番目の指の変位の予測値 (最小値) を表す。また、 $n_{\text{viol}}$  は、現在の指配置のまま対象物を目標位置に到達させた場合に、環境と干渉する指の本数である。現在の指配置のまま対象物を目標位置に到達させたとすると指が環境と干渉する場合は、それらの指は必ず持ち替えをしなければならない、という事実を利用して、探索の高速化を図っている。

ここで、(6.4) 式のヒューリスティック関数は単調である。すなわち、 $\text{successor}(n)$  をノード  $n$  と接続されているノードの集合としたときに、

$$h(n) \leq c(n, n') + h(n') \text{ for } \forall n, n' | n' \in \text{successor}(n) \quad (6.5)$$

である (証明は付録 A.3 参照)。したがって、経路最大 (pathmax) の式 [古川 1997] を用いずとも、 $A^*$  探索中に同じノードを複数回展開する必要がなく [Pearl 1984]、効率的に探索を行える。

なお、ヒューリスティクスを評価するための指標として、有効分岐数  $b^*$  がある。これは、ある問題に対して  $A^*$  で展開されたノードの総数が  $N$  で解の深さが  $d$  としたとき、

$$N + 1 = 1 + b^* + (b^*)^2 + \cdots + (b^*)^d \quad (6.6)$$

となる数である [古川 1997]。ヒューリスティック関数の導入によって、有効分岐数をどれくらい減らせたか (1 に近づけることができたか) が、その良し悪しを評価する 1 つの指標となる。

### 6.6.3 $A^*$ 探索の改良

本章で提案する計画アルゴリズムにおいては、各ロボット指の適切な制御モードを決定する部分(5章)の計算量がかなり大きい。 $A^*$ 探索は、ヒューリスティック関数を利用して、展開する必要のあるノード数を減らすことによって計算量を低減するものであるが、本章で扱う計画問題において計算量を低減するためには、単に展開するノード数を減らすだけでなく、制御モード決定の計算回数を減らすことが有効である。

制御モード決定の計算回数を減らすためには、ロボット指の制御モードの計算を必要とする、 $c(n, n')$ の計算の回数を抑えることが必要である。そこで、通常の $A^*$ 探索のように、展開したノードの次のノードすべてについて $f(n') = g(n) + c(n, n') + h(n')$ を計算するのではなく、必要なときだけ $f(n')$ を計算するようにすることを考える。

1. スタートノード  $s$  を OPEN リストに入れる。
2. OPEN リストおよび SEMI-OPEN リストがともに空ならば、探索失敗として終了。
3.  $f$  が最小となるノード  $n$  を OPEN リストの中から調べる。
4. SEMI-OPEN リストの中から  $f'(\tilde{n}) < f(n)$  となるすべてのノード  $\tilde{n}$  について、 $f(\tilde{n})$  を計算し、SEMI-OPEN リストから削除して OPEN リストに入れる。 $f(\tilde{n}) < f(n)$  ならば  $n \leftarrow \tilde{n}$  とする。
5.  $f$  が最小となるノード  $n$  を OPEN リストから削除して CLOSED リストに入れる。
6. もし  $n$  がゴールノードならば、 $n$  から  $s$  までポインタを逆にたどって解を求め、探索成功として終了。
7. そうでなければ、 $n$  を展開してその次のノードをすべて生成し、それらのノードに  $n$  へ戻るポインタ情報を付け加える。 $n$  の次のすべてのノード  $n'$  について、
  - (a) もし  $n'$  がまだ OPEN リストにも SEMI-OPEN リストにも CLOSED リストにも入っていないならば、 $h(n')$  を見積もって、 $f'(n') = g'(n') + h(n')$  を計算し、 $n'$  を SEMI-OPEN リストに入れる。
  - (b) もし  $n'$  がすでに OPEN リストもしくは SEMI-OPEN リストに入っていれば、そのポインタを、最小の  $g(n')$  を与える経路を指すように変更する。最小の  $g(n')$  を与える経路を決定するのに必要であれば、 $f(n')$  を計算する。このとき、 $n'$  が SEMI-OPEN リストに入っていたならば、削除して OPEN リストに入れる。
  - (c) もし  $n'$  がすでに CLOSED リストに入っていれば、(ヒューリスティック関数の単調性より) 無視する。
8. ステップ 2 に戻る。

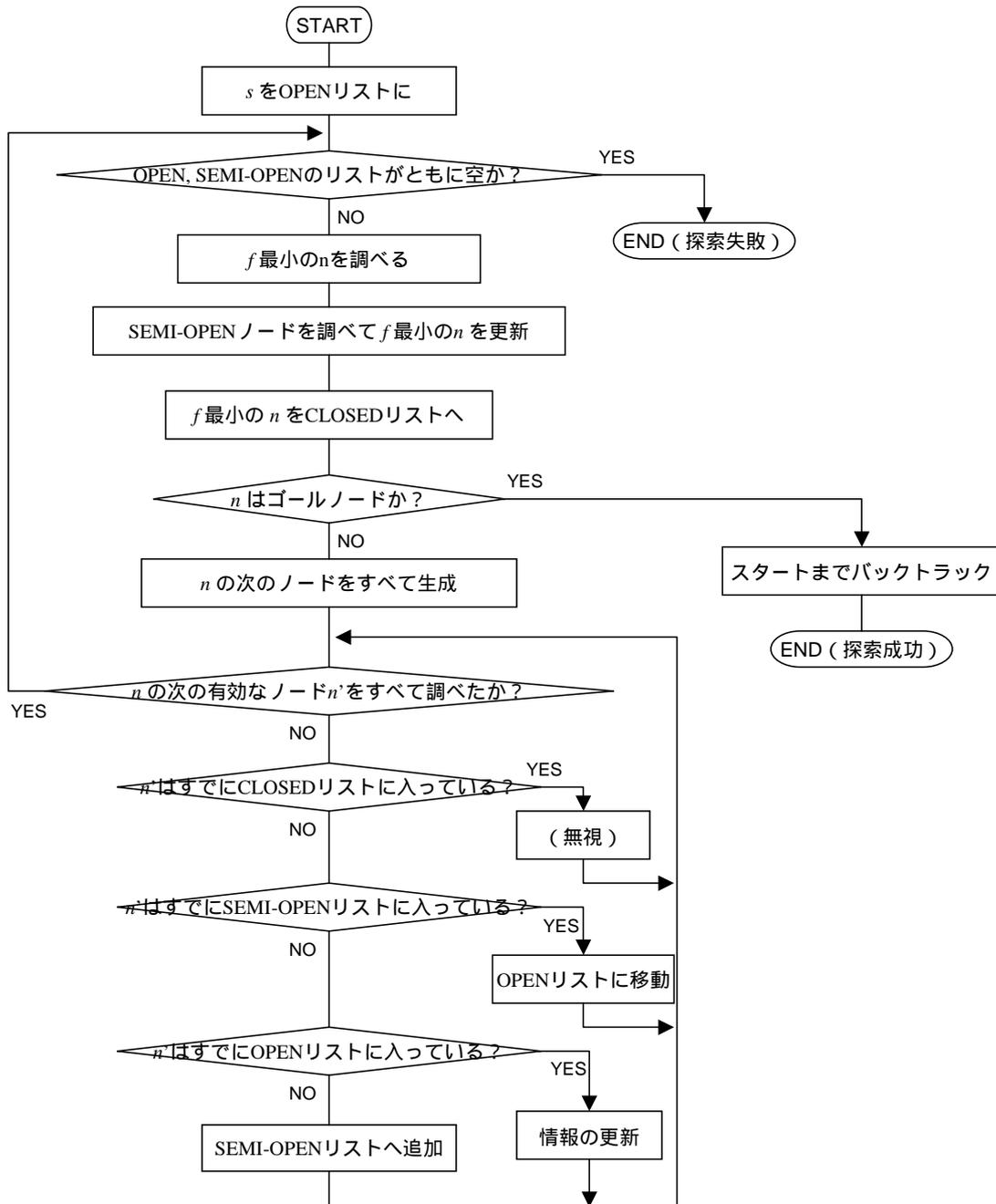
以上の手続きの概略のフローチャートを Fig. 6.8 に示す．ここで， $g'(n')$  はノード  $n'$  までの最適経路の実コストの予測値を表し，以下のように定義される．

$$\begin{aligned} g'(n') &= g(n) + c'(n, n') \\ g'(s) &= 0 \end{aligned}$$

ただし， $c'(n, n')$  はノード  $n$  から次のノード  $n'$  へ移動するためのコストの予測値であり， $c'(n, n') \leq c(n, n')$  とする．ここでは以下のように設定した．

$$c'(n, n') = \begin{cases} \max_i \sum_{j=1}^P \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i, j}\| & (\text{対象物変位に対するアークの場合}) \\ X_{\text{regr}} & (\text{持ち替えに対応するアークの場合}) \end{cases} \quad (6.7)$$

以上の手続きでは，通常は  $f'(n') = g(n) + c'(n, n') + h(n')$  のみを計算し，必要なときだけ  $f(n') = g(n) + c(n, n') + h(n')$  を計算することになる．これにより，容易に計算できる  $c'(n, n')$ ,  $h(n')$  を利用することにより，計算コストの高い  $c(n, n')$  の計算回数を抑えることができる．結果として，探索にかかる時間を低減できる．

Fig. 6.8: A Modified  $A^*$  Algorithm

## 6.7 計画例

以上の計画アルゴリズムを C 言語を用いて実装した．本節では，それを用いた計画の例を示す．なお，以下に示す計算時間は，いずれも Pentium4-2.8GHz を搭載した Linux PC 上での実行にかかった結果である．

本節では，2 本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考える．各指は半径 1 の球で表現する．また，重力加速度を 9.8，各接触点での摩擦円錐は，凸 6 面錐で近似 ( $s = 6$ ) し，各指の力の上限は  $f_{\max} = [10, 10]^T$  とする．指同士の間隔は 9 以下でなければならないとし，また，対象物と指の間の摩擦係数を 0.7，対象物と環境との間の摩擦係数を 0.5 と設定する．

また，操作の確実性の値の計算において，6 次元単位超球を，それに外接する超多面体で近似する．ここでも，この超多面体の頂点としては，以下の 76 点をとった ( $N_{\text{vert}} = 76$ ) ．

$$l_i = \begin{cases} k[\pm 1, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\ k[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T \\ k[0, 0, \pm 1, 0, 0, 0]^T \\ k[0, 0, 0, \pm 1, 0, 0]^T \\ k[0, 0, 0, 0, \pm 1, 0]^T \\ k[0, 0, 0, 0, 0, \pm 1]^T \\ k\left[\pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}\right]^T, \end{cases} \quad (6.8)$$

ここで  $k = 2\sqrt{3 - \sqrt{6}} \approx 1.48$  である (付録 A.2 参照)．式 (3.1) の  $R$  については，対象物の質量  $M_o$  と慣性テンソル  $J_o$  を使う，式 (3.2) を適用した．

また，計画に関するパラメータについては， $X_{\text{regr}} = 10^2$ ， $X_{\text{stab}} = 10^{-2}$ ， $z_{\min} = 0.5$ ， $P = 3$  とした．

### 6.7.1 滑らせ操作の計画

提案したアルゴリズムによって，Fig. 6.9 のような，平面上に置かれた立方体対象物の滑らせ動作の計画を行う．これは，対象物を初期位置から目標位置まで，1 次元の並進運動をさせるための，ロボット指の動作を求める問題である．ここでは対象物を距離 9 だけ並進させることとした．

コンフィギュレーション空間の離散化については，対象物上の各面を  $7 \times 7$  のグリッドに

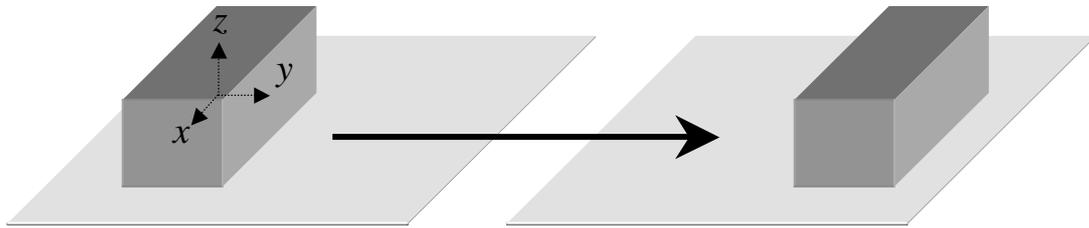


Fig. 6.9: Sliding of a Cuboid

切ることによって，配置可能点を設定した．また，対象物の自由度については 31 段階に離散化した．これにより，理論的には最大

$$7 \times 7 \times 6 C_2 \times 31 = 1,335,201$$

のノードから成る操作可能性グラフを探索することになる．

#### 直方体の滑らせ操作 (1)

操作対象物を，大きさ  $5 \times 5 \times 10$  の直方体とし，その質量は  $1 (M_o = 1)$  で均質であるとする．

横に寝かせたこの直方体を平面上で滑らせる操作の計画 (Fig. 6.9) を行った (この計画問題を Sliding 1 と呼ぶことにする)．この場合，Fig. 6.10 のように，片方の指 (指 1) で対象物の背面を位置制御で押し，もう片方の指 (指 2) で上面を力制御で押さえつけて動かす，という操作が生成された．このときの対象物上の指位置は，指 1 が  $[0, -2.5, -1.25]^T$ ，指 2 が  $[0, 0.625, 2.5]^T$  である．このとき計画された指力の指令値を Fig. 6.11 に示す．ただし，指令値がゼロの場合は，その指が位置制御モードにあることを表す (以降のグラフでも同様)．計画にかかった時間は約 533 CPU 分，探索中に展開されたノード数は 32,538，有効分岐数は 1.3374 であった．

なお，指力の上限を 5 と小さく設定して同じ操作を計画したところ (問題 Sliding 1' とする)，Fig. 6.12 のように，両方の指で，対象物の背面を位置制御で押す操作が生成された．このときの対象物上の指位置は，指 1 が  $[-3.75, -2.5, 0]^T$ ，指 2 が  $[3.75, -2.5, 0]^T$  である．生成された操作は Lynch の stable push [Lynch 1996b] に対応するものである．計画にかかった時間は約 203 CPU 分であり，探索中に展開されたノード数は 23,195，有効分岐数は 1.3213 であった．

なお，これらの例における操作の确实性の評価値の推移を Fig. 6.13 に示す．操作の确实

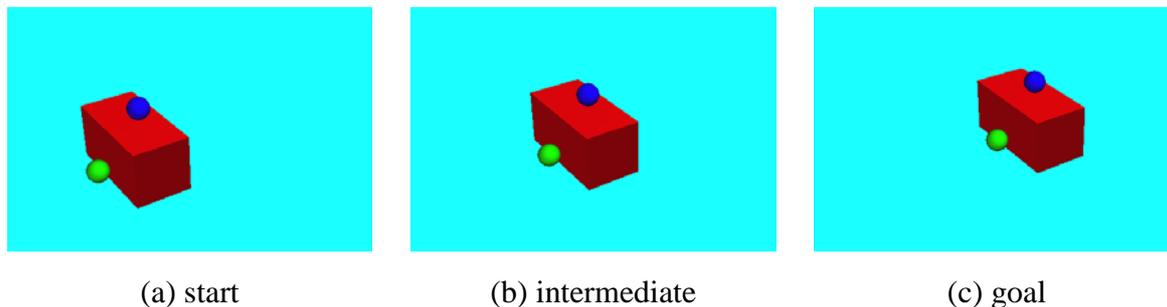


Fig. 6.10: Sliding 1: Planned Operation

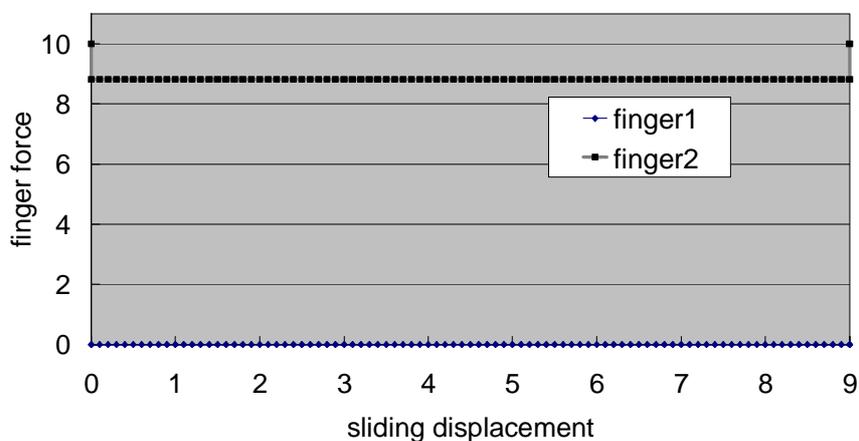


Fig. 6.11: Sliding 1: Planned Finger Forces

性の値は，対象物を滑らせ始める瞬間に小さくなり，操作が完了して静止状態になると元に戻ることが分かる．また，指力の制限が厳しい場合は，操作の確実性がより低いマニピュレーションとなっていることが見てとれる．

以上の結果からは，本章で提案している計画アルゴリズムを用いると，大きい指力を発生可能な場合は，内力を大きくして把持に近い状態を作って動かす操作（Type A の操作 [相山 1996a], 2.2.3 項を参照）が生成され，また指力が弱いときには，内力を伴わない操作（Type B の操作 [相山 1996a]）が生成されることがわかる．

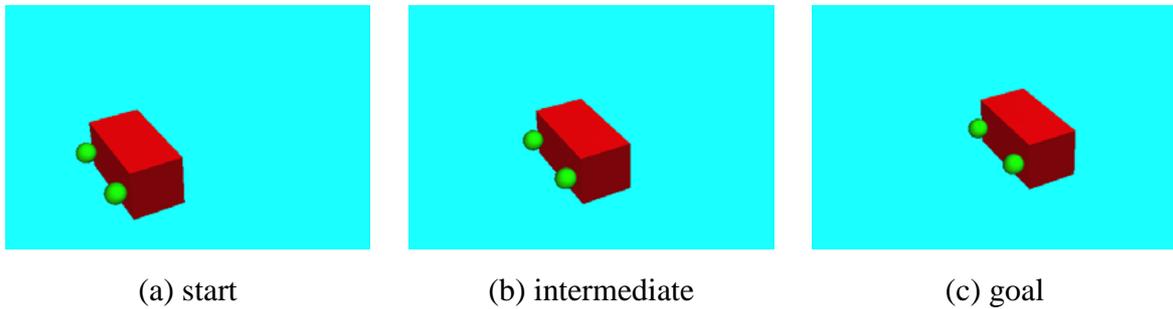


Fig. 6.12: Sliding 1': Planned Operation

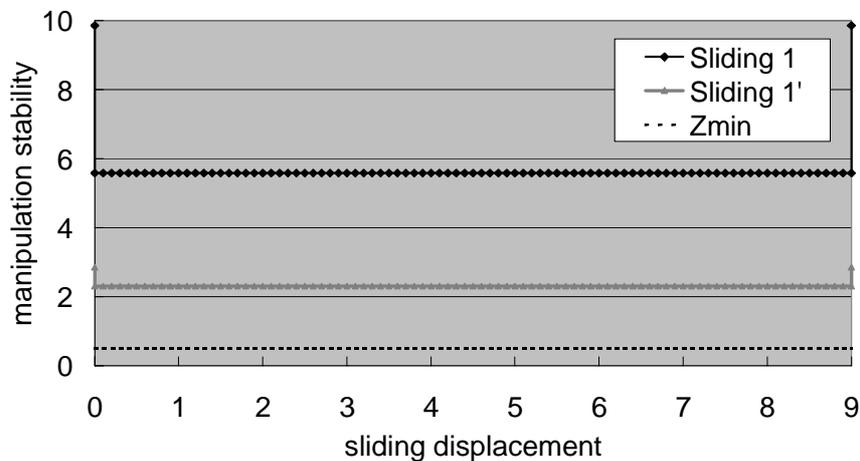


Fig. 6.13: Sliding 1: Manipulation Stability

### 直方体の滑らせ操作 (2)

次に、同じ対象物を長手方向に滑らせる操作を計画した(問題 Sliding 2)ところ, Fig. 6.14のように、片方の指(指1)で対象物の背面を位置制御で押し、もう片方の指(指2)で上面を力制御で押さえつけて動かす、という操作が生成された。このときの対象物上の指位置は、指1が  $[-0.625, -5, -1.25]^T$ 、指2が  $[-1.875, 1.25, 2.5]^T$  である。

指1, 2の  $x$  座標がゼロでなく、ずれた位置に配置されているのは、計画のための評価関数の値がまったく同じになる指配置が複数あるためである。つまり、その中でたまたま最初に見つけたのが、上記の指配置であった、ということである。評価関数が同じになる指配置が複数できてしまうのは、操作の確実性の評価指標がミニマックス解として与えられている

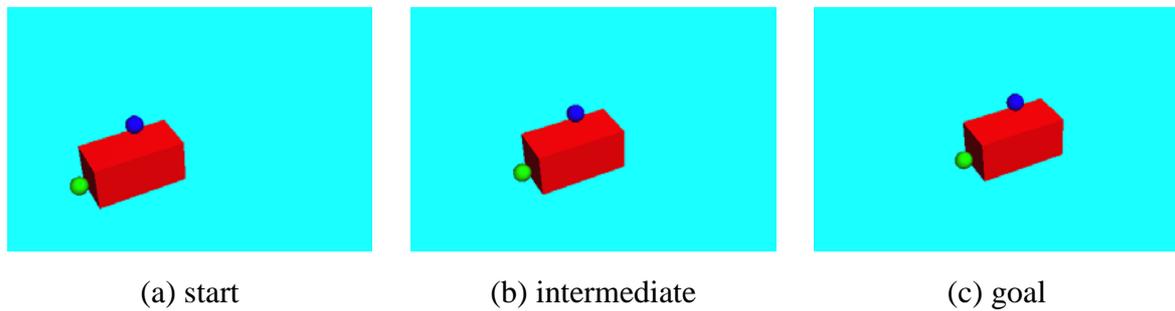


Fig. 6.14: Sliding 2: Planned Operation

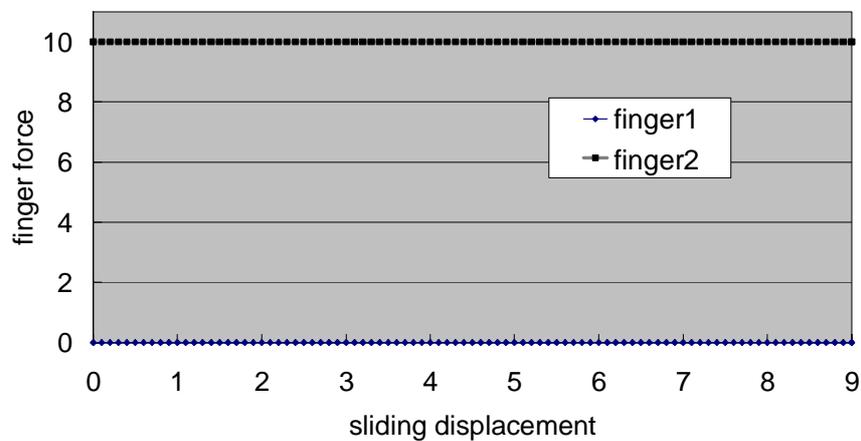


Fig. 6.15: Sliding 2: Planned Finger Forces

こと(式(3.4))に起因する。つまり、最も「弱い」方向についての外乱に対するロバスト性が同じであれば、他の方向については差があっても、指標の値に影響しないためである。

なお、このとき計画された指力の指令値を Fig. 6.15 に示す。また、操作中の操作の确实性の指標値の推移を Fig. 6.16 に示す。計画にかかった時間は約 524 CPU 分、探索中に展開されたノード数は 34,691、有効分岐数は 1.3405 であった。

### 立方体の滑らせ操作 (1)

次に、操作対象物として大きさ  $5 \times 5 \times 5$  の立方体を考え、この物体の滑らせ操作の計画を行う。この対象物の質量は  $1 (M_o = 1)$  で均質であるとする。

まず、障害物のない平面上で対象物を Fig. 6.17 のように並進させる操作の計画(問題

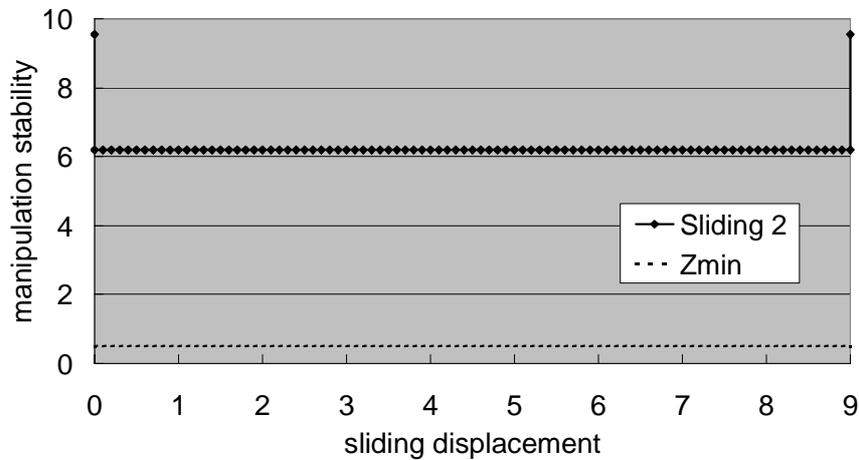


Fig. 6.16: Sliding 2: Manipulation Stability

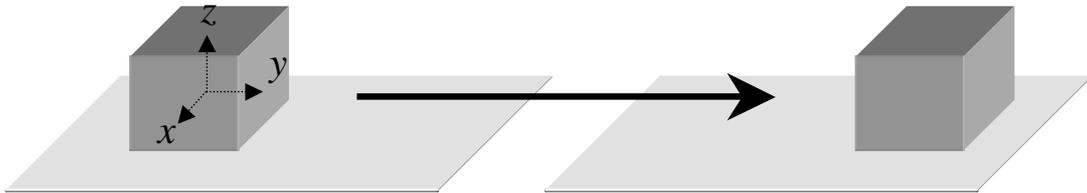


Fig. 6.17: Sliding of a Cube

Sliding 3)を行った。この場合, Fig. 6.18 のように, 片方の指(指 1)で対象物の背面を位置制御で押し, もう片方の指(指 2)で上面を力制御で押さえつけて動かす, という操作が生成された。このときの対象物上の指位置は, 指 1 が  $[0, -2.5, -1.25]^T$ , 指 2 が  $[0, 0, 2.5]^T$  である。

なお, このとき計画された指力の指令値を Fig. 6.19 に示す。また, 操作中の操作の确实性の指標値の推移を Fig. 6.20 に示す。計画にかかった時間は約 1030 CPU 分, 探索中に展開されたノード数は 63,323, 有効分岐数は 1.3694 であった。

### 立方体の滑らせ操作 (2)

次に, 対象物の背後に障害物がある場合について計画を行った(問題 Sliding 4)。この場合, 前の例のように物体の背後に指を配置することができないので, 代わりに Fig. 6.21 のように, 対象物を両側からつまんで滑らせる動作が生成された。このときの対象物上の指位

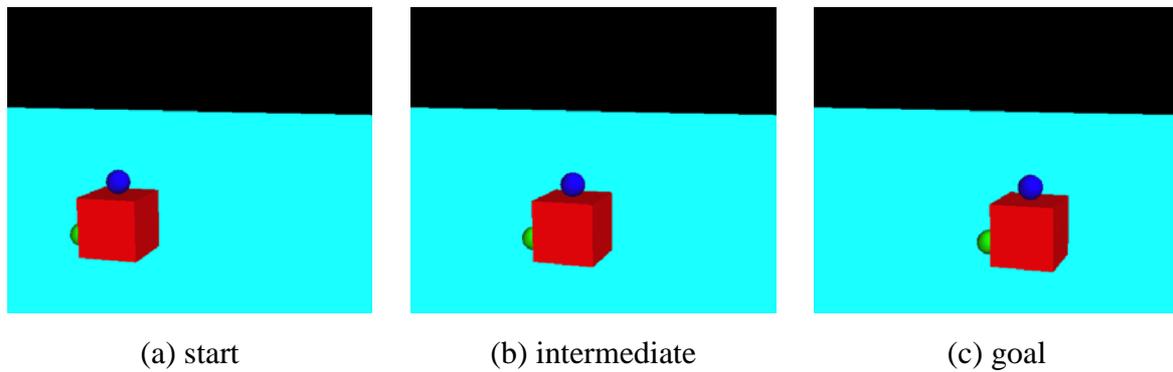


Fig. 6.18: Sliding 3: Planned Operation

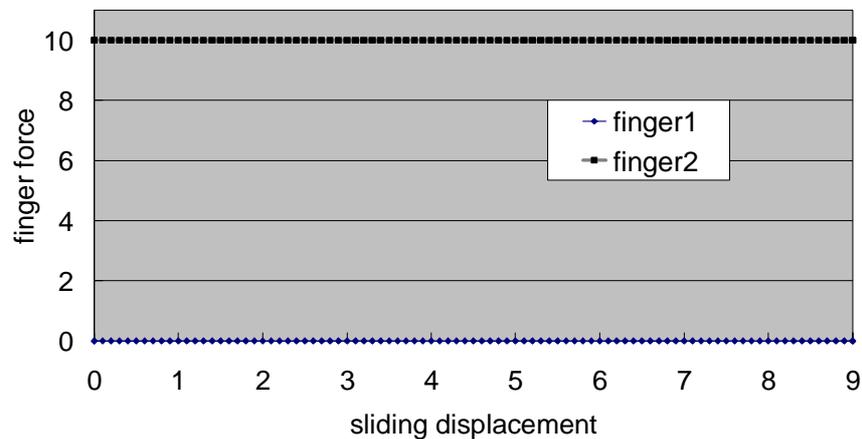


Fig. 6.19: Sliding 3: Planned Finger Forces

置は，指 1 が  $[2.5, -1.25, 0.625]^T$ ，指 2 が  $[-2.5, 0, -1.25]^T$  である．また，各指の指令力，および操作の確実性の指標の値の推移を Fig. 6.22, 6.23 に示す．この場合は，指 1 を力制御，指 2 を位置制御とするような動作が計画されている．生成された動作の指配置が対称的でないのは，操作のコストがまったく同じになる指配置が複数あり，その中の 1 つだけが探索によって返されているからである．

なお，この計画において展開されたノードの数は，1,335,201 個のうち 22,785 個で，有効分岐数は 1.3205，要した時間は 504 CPU 分であった．

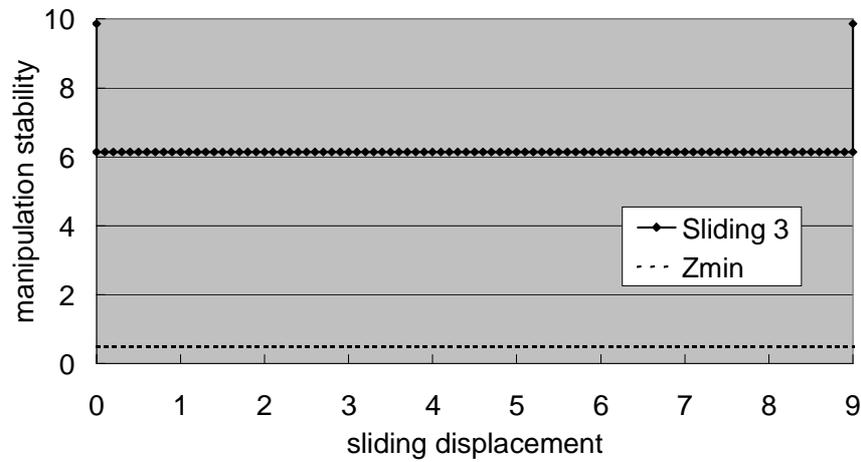


Fig. 6.20: Sliding 3: Manipulation Stability

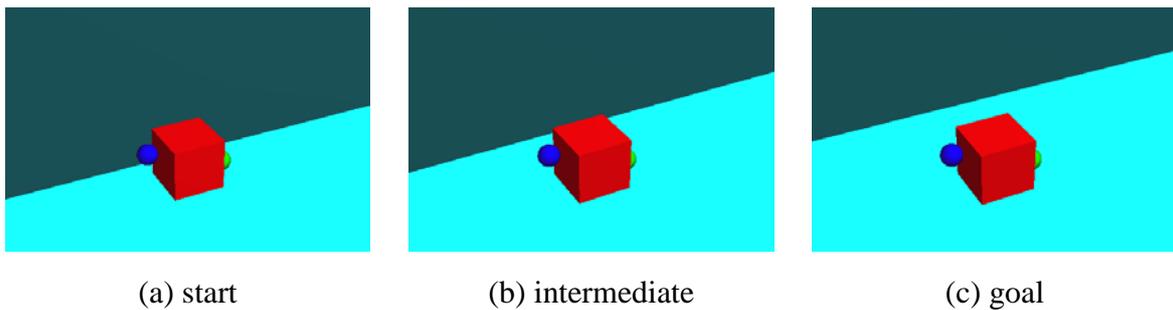


Fig. 6.21: Sliding 4: Planned Operation

### 6.7.2 転がし操作の計画

次に、ここでは平面上での直方体対象物の転がし操作 (Fig. 6.24) を考える。対象物を初期姿勢から目標姿勢まで倒す動作を実現するためのロボット指の動作を求める問題である。

滑らせ操作のときと同様、直方体の大きさは  $5 \times 5 \times 10$ 、質量は  $1 (M_o = 1)$  で均質であるとする。コンフィギュレーション空間の離散化については、前項と同様、対象物上の各面を  $7 \times 7$  のグリッドに切ることによって、配置可能点を設定し、また、対象物の自由度についても同じく 31 段階に離散化した。

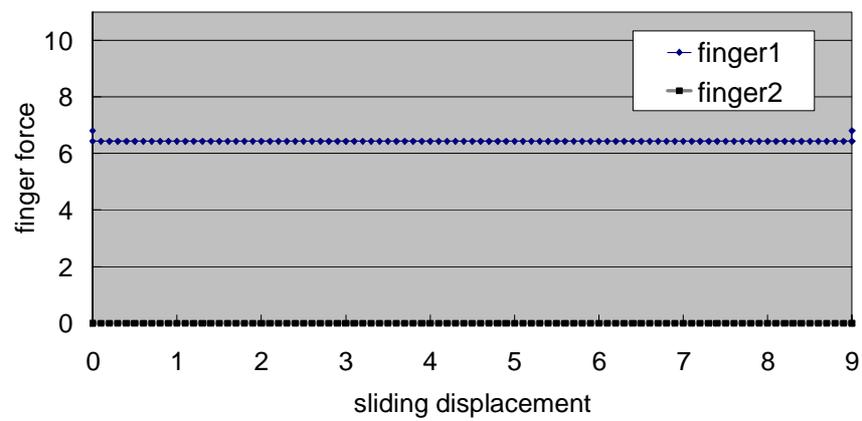


Fig. 6.22: Sliding 4: Planned Finger Forces

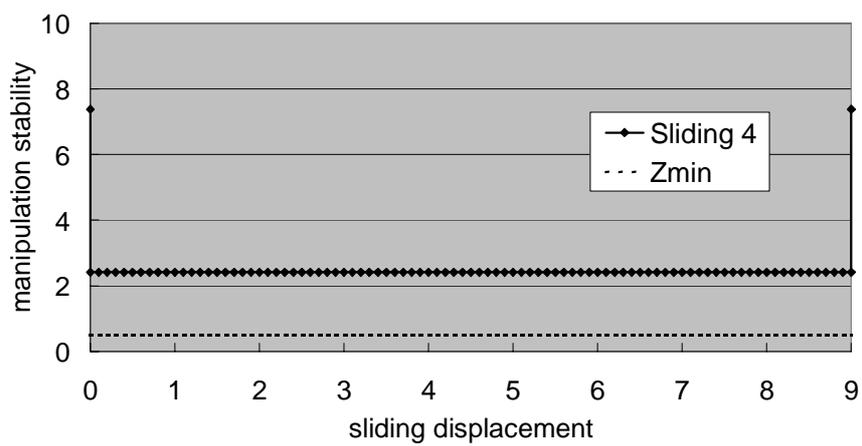


Fig. 6.23: Sliding 4: Manipulation Stability

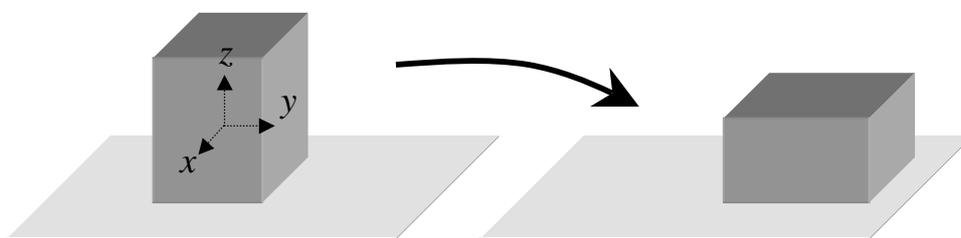


Fig. 6.24: Tumbling of a Cuboid

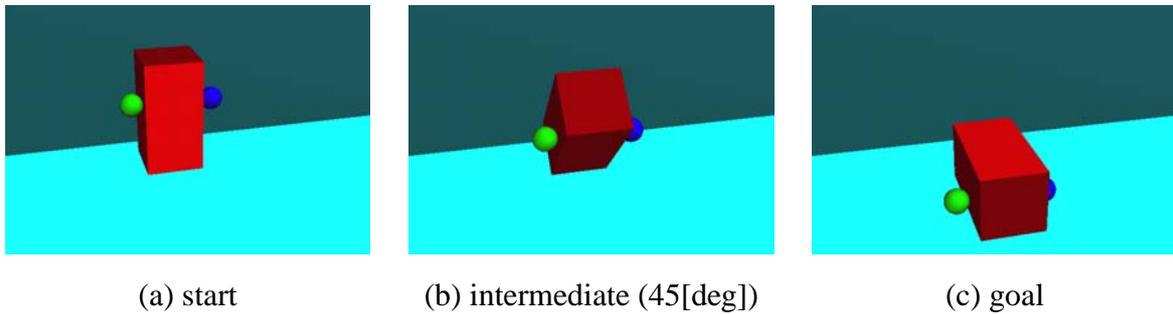


Fig. 6.25: Tumbling 1: Planned Operation

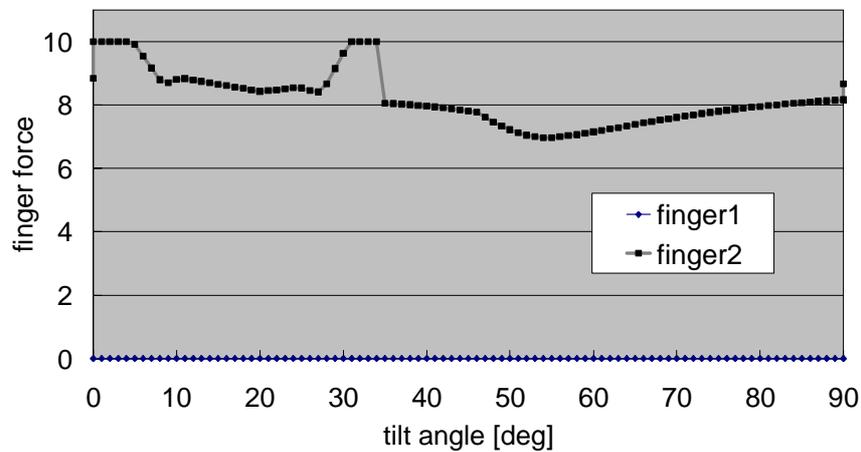


Fig. 6.26: Tumbling 1: Planned Finger Forces

### 直方体の転がし操作 (1)

平面上で対象物を転がして倒す操作の計画を行った．対象物の背後だけに障害物がある場合（問題 Tumbling 1）, Fig. 6.25 のように，両側から対象物を挟んで，持ち替えなしで転がす操作が生成された．このときの対象物上の指位置は，指 1 が  $[2.5, 1.25, 1.25]^T$ ，指 2 が  $[-2.5, 1.25, 1.25]^T$  である．また，各指の指令力を Fig. 6.26 に示す．この場合，片方の指を力制御，もう片方の指を位置制御とする結果が得られた．

なお，この計画において展開されたノードの数は，1,923 個で，有効分岐数は 1.2056，要した時間は 84 CPU 分であった．

一方，指力の上限を 5 と小さく設定して同じ操作を計画したところ（問題 Tumbling 1'）

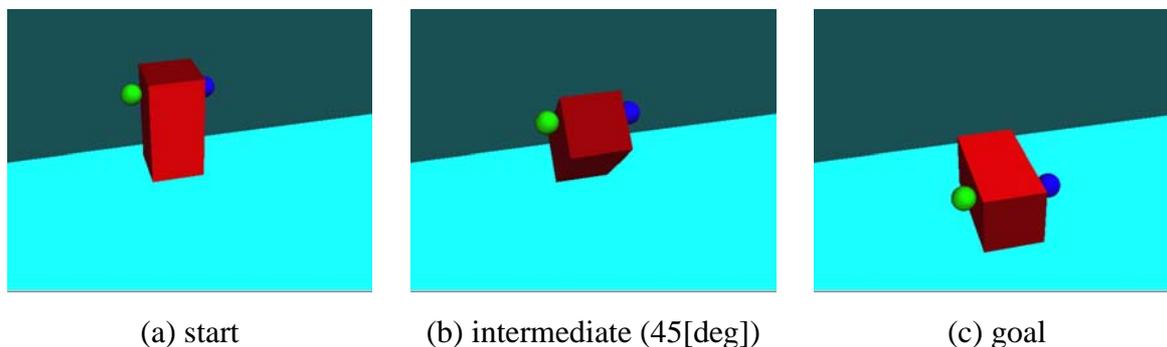


Fig. 6.27: Tumbling 1': Planned Operation

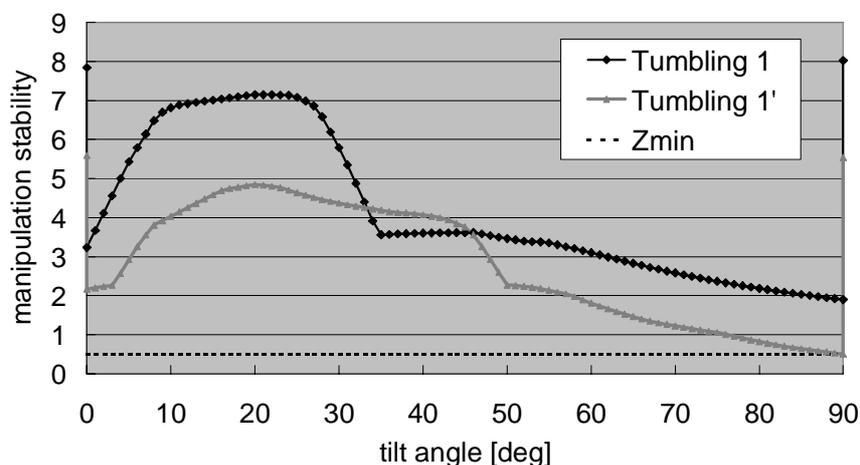


Fig. 6.28: Tumbling 1: Manipulation Stability

とする), Fig. 6.27 のように, 前の例よりも回転軸から遠いところをつまんで転がす操作が生成された. このときの対象物上の指位置は, 指 1 が  $[2.5, -1.25, 2.5]^T$ , 指 2 が  $[-2.5, -1.25, 2.5]^T$  である. これは, 発生可能な指力が小さくなったために, 重力に対抗するようなモーメントを大きく取れるよう, 指位置を変化させたものと考えられる. このとき, 計画にかかった時間は約 245 CPU 分であり, 探索中に展開されたノード数は 3,358, 有効分岐数は 1.2312 であった.

なお, これらの例における操作の确实性の評価値の推移を Fig. 6.28 に示す. 操作の确实性は, 対象物を倒し終わる瞬間が最も低くなることが分かる. また, 指力の制限が厳しい Tumbling 1' の方が, 一部を除いて操作の确实性の値がより低くなっていることが見てとれる.

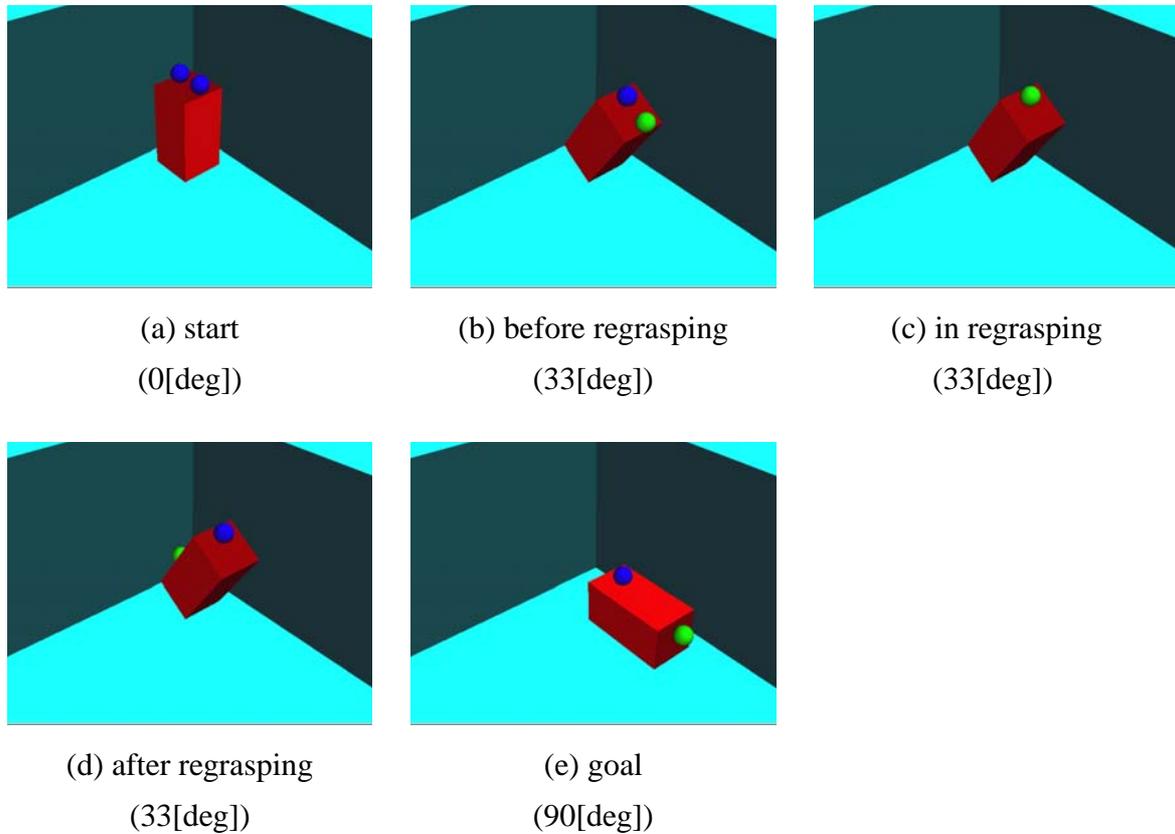


Fig. 6.29: Tumbling 2: Planned Operation

### 直方体の転がし操作 (2)

一方，対象物の背後だけでなく片方の側面にも障害物がある場合は，対象物を両側からつまむようには指を配置することができない．この場合について計画を行った（問題 Tumbling 2）ところ，Fig. 6.29 のように，途中で持ち替えを 1 回行って，対象物を転がす操作が生成された．このときの対象物上の指位置は，最初は指 1 が  $[0, -1.25, 5]^T$ ，指 2 が最初  $[0, 1.875, 5]^T$  であり，33[deg] まで対象物を傾け，そこで持ち替えにより指 2 が  $[0, -2.5, -2.5]^T$  へと移動する．また，各指の指令力，および操作の确实性の指標の値の推移を Fig. 6.30, 6.31 に示す．この場合は，各指の制御モードを数回切り替えるような計画結果が得られた．Fig. 6.31 の 33[deg] のところで一瞬操作の确实性の指標値が下がっているところは，持ち替え中で 1 本の指だけで対象物を支えているときに対応する．

なお，この計画において展開されたノードの数は 74,028 個で，有効分岐数は 1.362，計画

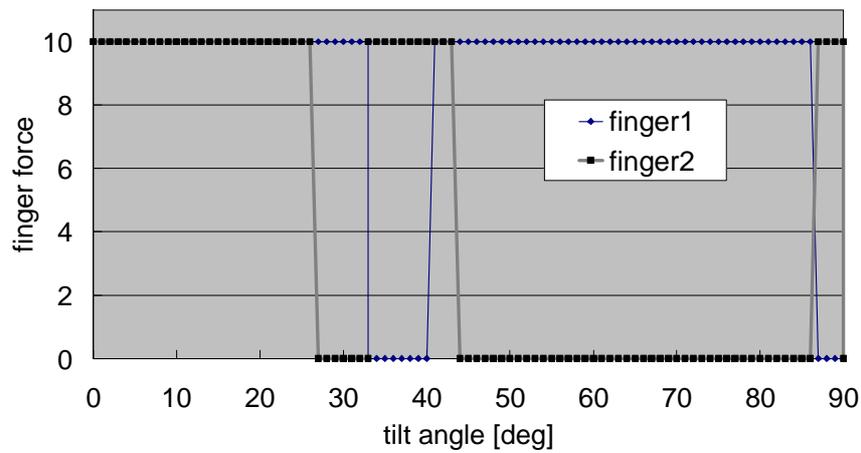


Fig. 6.30: Tumbling 2: Planned Finger Forces

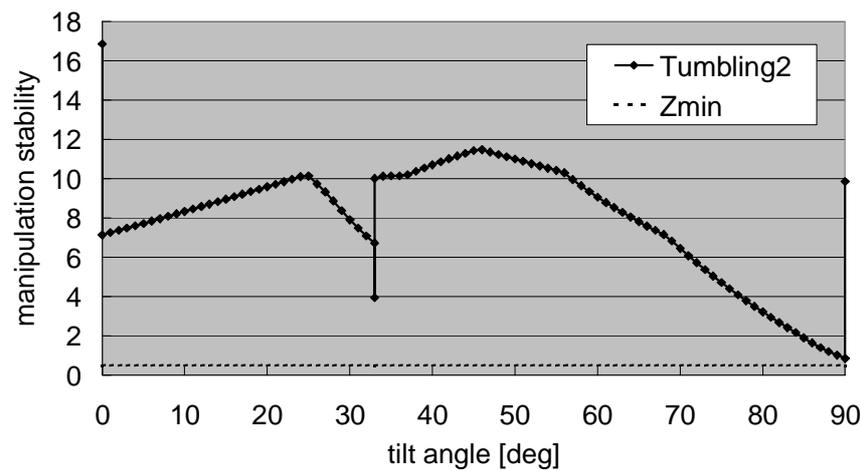


Fig. 6.31: Tumbling 2: Manipulation Stability

に要した時間は 990 CPU 分であった。

これら転がし操作の計画において、Tumbling 1 は比較的短時間で計画が終了したのに対して、Tumbling 2 はかなり長い時間を要している。この差の一因は、本章の計画アルゴリズムで用いる  $A^*$  探索において、持ち替えを要する操作の探索を後回しにするようなヒューリスティック関数が使われているためである。持ち替えの不要な前者では、 $A^*$  探索が有効に機能して、比較的高速に探索が行える。これに対して持ち替えの必要な後者の操作では、持ち替えなしの操作の探索に失敗した後で、持ち替えを伴う操作の探索を始めるために、必然

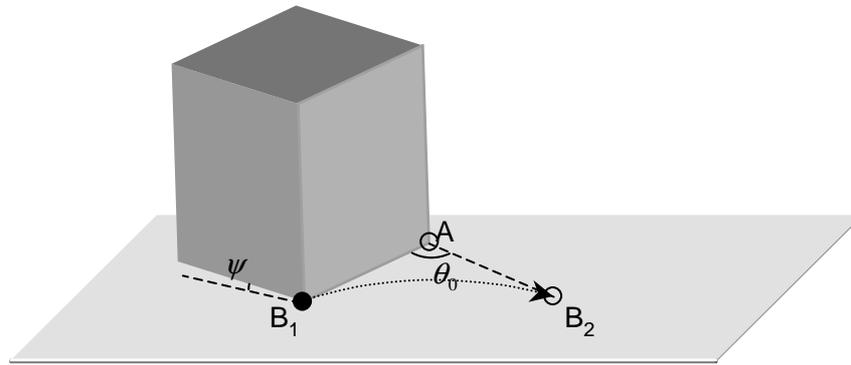


Fig. 6.32: Planning of Pivoting

的に探索時間が長くなる．ただし，この場合でも，持ち替えを2回以上行う操作の探索は後回しにされるので，その意味では  $A^*$  探索自体は有効に機能している．

### 6.7.3 ピボット操作の計画

次に，ここでは平面上での直方体および立方体のピボット操作を考える．対象物を初期位置から目標位置までピボット操作で回転させてあやつるためのロボット指の動作を求める問題である．

ここでは，対象物が  $\psi$  傾いて辺  $AB_1$  で地面と接触している状態からスタートし，ここから頂点  $A$  をピボットとして回転させ，再び  $\psi$  傾いて辺  $AB_2$  で地面と接触している状態へと遷移させる (Fig. 6.32)．このとき， $\angle B_1AB_2 = \theta_0$  とする．そして，ピボット操作中の対象物のコンフィギュレーションを  $\theta$  で表し ( $0 \leq \theta \leq \theta_0$ )，頂点  $B$  の地面からの高さ  $h$  が  $h = \phi_0 \sin(\pi\theta/\theta_0)$  となるように動かすとする．ここでは  $\theta_0 = 45[\text{deg}]$ ， $\psi = 10[\text{deg}]$ ， $\phi_0 = 5[\text{deg}]$  と設定した．

コンフィギュレーション空間の離散化については，前項と同様，対象物上の各面を  $7 \times 7$  のグリッドに切ることによって，指の配置可能点を設定し，また，対象物の自由度  $\theta$  についても同じく 31 段階に離散化した．

#### 直方体のピボット操作

まず， $5 \times 5 \times 10$  の大きさの直方体のピボット操作を考える．この対象物の質量は 1 ( $M_o = 1$ ) で均質であるとする．

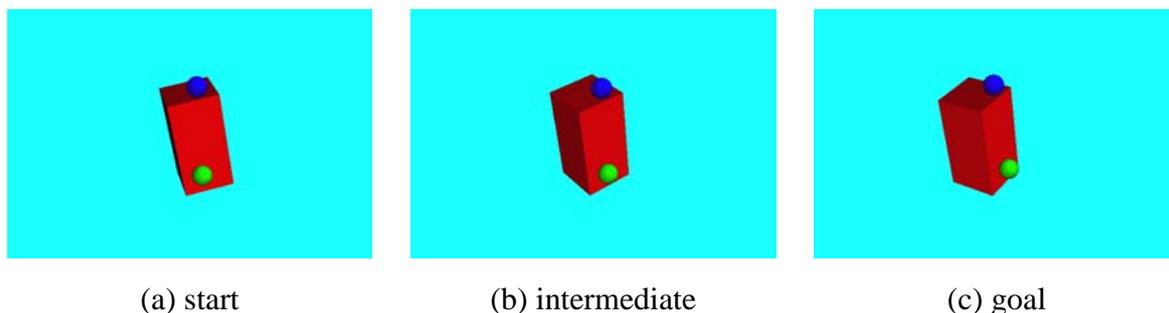


Fig. 6.33: Pivoting 1: Planned Operation

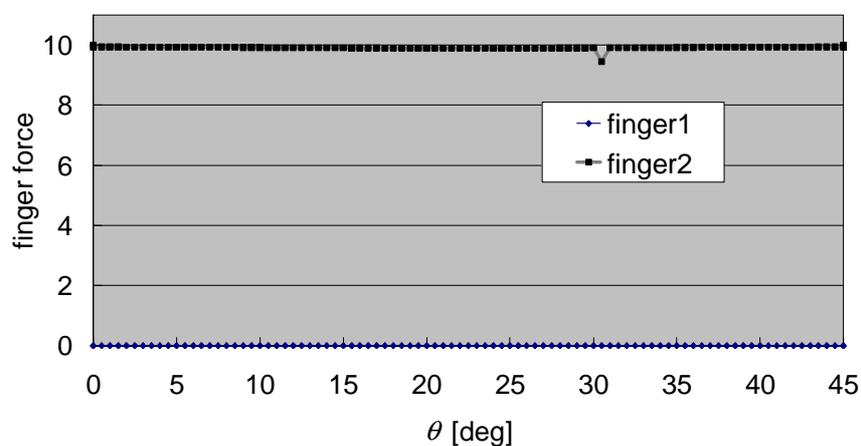


Fig. 6.34: Pivoting 1: Planned Finger Forces

この場合, Fig. 6.33 のように, 対象物の側面に片方の指(指1)を位置制御で添えて, 上面をもう片方の指(指2)が力制御で押さえながら, 対象物を旋回させる動作が生成された. このときの対象物上の指位置は, 指1が  $[-2.5, 0.625, -2.5]^T$ , 指2が  $[-1.875, -0.625, 5]^T$  である. また, 各指の指令力, および操作の确实性の指標の値の推移を Fig. 6.34, 6.35 に示す. ピボット操作が始まると, 対象物と環境との接触が辺接触から一点接触に移行するので, 操作の确实性の指標値は一気に下がる. ピボット操作が終わると指標値は元に戻る.

なお, この計画において展開されたノードの数は, 1,335,201 個のうち 837 個で, 有効分岐数は 1.1674, 計画に要した時間は 6.3 CPU 分であった.

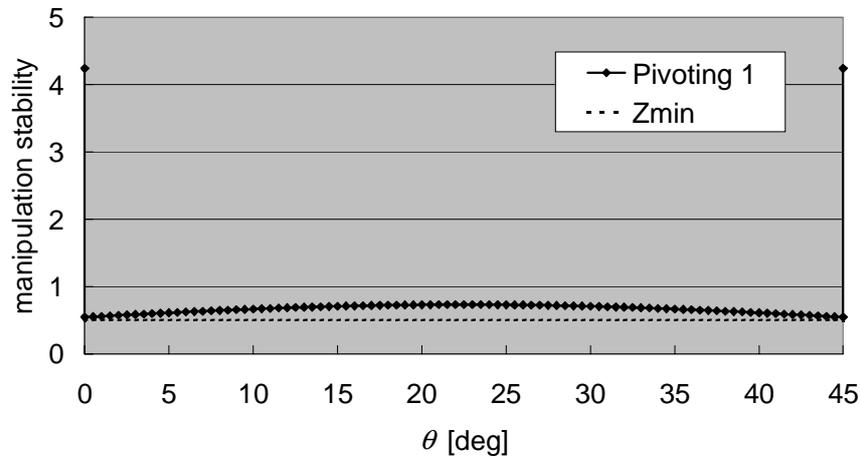


Fig. 6.35: Pivoting 1: Manipulation Stability

### 立方体のピボット操作

次に、 $5 \times 5 \times 5$  の大きさの立方体のピボット操作を考える．この対象物の質量は 1 ( $M_o = 1$ ) で均質であるとする．

この場合も，Fig. 6.36 のように，対象物の側面に片方の指（指 1）を位置制御で添えて，上面をもう片方の指（指 2）が力制御で押さえながら，対象物を旋回させる動作が生成された．このときの対象物上の指位置は，指 1 が  $[-1.875, -2.5, 1.875]^T$ ，指 2 が  $[-1.875, 1.875, 2.5]^T$  である．また，各指の指令力，および操作の确实性の指標の値の推移を Fig. 6.37，6.38 に示す．

なお，この計画において展開されたノードの数は，1,335,201 個のうち 2,182 個で，有効分岐数は 1.2114，計画に要した時間は 47 CPU 分であった．

### 6.7.4 複合操作の計画

複数の接触状態にまたがる操作の計画として，転がしと滑らせの複合操作を取り上げる．直方体対象物を，初期位置から目標位置まで，倒したのち滑らせて到達させるためのロボット指の動作を求める問題である．

直方体の大きさは  $5 \times 5 \times 10$ ，質量は 1 ( $M_o = 1$ ) で均質であるとする．

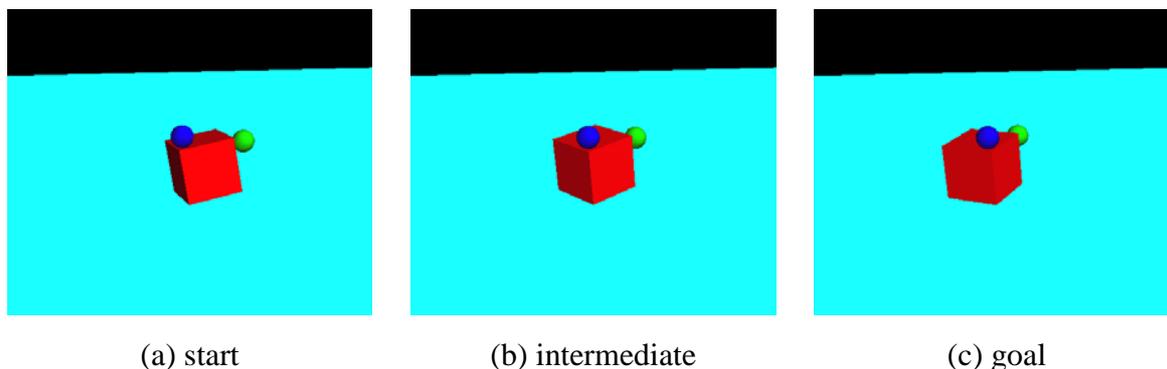


Fig. 6.36: Pivoting 2: Planned Operation

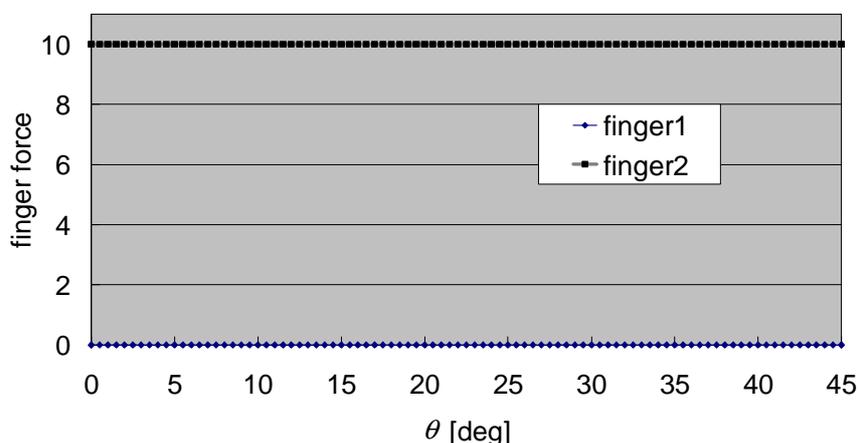


Fig. 6.37: Pivoting 2: Planned Finger Forces

コンフィギュレーション空間の離散化については、前項と同様、対象物上の各面を  $7 \times 7$  のグリッドに切ることによって、指の配置可能点を設定し、また、対象物の自由度については、転がし操作の部分を 31 段階に、滑らせ操作の区間を 10 段階に分割した。これにより、理論的には最大

$$7 \times 7 \times 6 C_2 \times (31 + 10) = 1,765,911$$

のノードから成る操作可能性グラフを探索することになる。

平面上に立てた対象物を倒してさらに滑らせる操作を計画した(問題 Tumbling + Sliding)ところ、Fig. 6.39 のように、両側から物体をつまんで倒し、そのまま持ち替え無しで滑らせる操作が生成された。このとき、片方の指(指1)が位置制御、もう片方の指(指2)が力制御となり、対象物上の指位置は、指1が  $[2.5, 1.25, 1.25]^T$ 、指2が  $[2.5, 1.25, 1.25]^T$  で

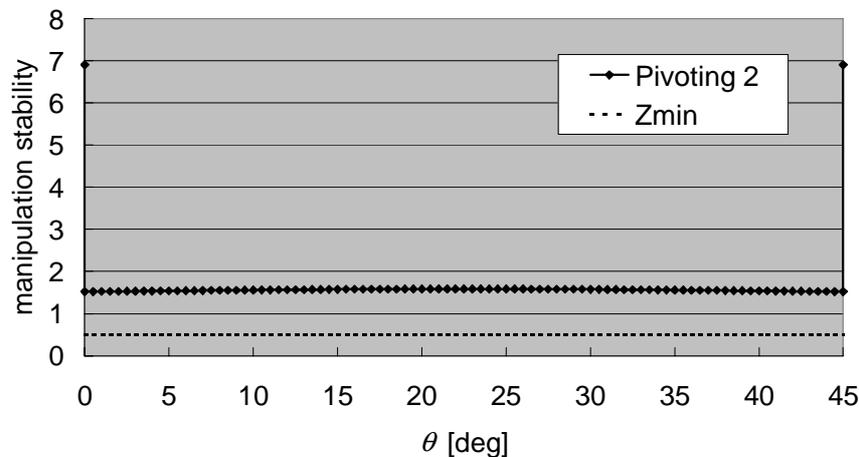


Fig. 6.38: Pivoting 2: Manipulation Stability

ある（問題 Tumbling 1 の結果と同じ）。また，各指の指令力，および操作の確実性の指標の値の推移を Fig. 6.40，6.41 に示す。

なお，この計画において展開されたノードの数は，3,133 個で，有効分岐数は 1.1595，計画に要した時間は 120 CPU 分であった。

### 6.7.5 アーム・ハンド機構による計画結果の実行例

計画アルゴリズムによって生成された計画結果を，Fig. 6.42 のアーム・ハンド機構によって実行することを試みた。この機構は，垂直多関節型の 5 自由度アーム（三菱電機・RV-M2）の手先に，3 本指 3 関節ハンド（安川電機製）を装着した構成になっている。また，指先には 6 軸の力覚センサ（BL オートテック・NANO 2.5/2）が装着されている。システム全体は，ART-Linux [石綿] を用いて PC から制御される。

ここでは  $60[\text{mm}] \times 60[\text{mm}] \times 100[\text{mm}]$  のコルク製の直方体（質量 0.092 [kg]）を対象物とし，ハンドの 3 本のうちの 2 本の指を使ってグラスプレス・マニピュレーションを行うことを考える。予備実験の結果から，対象物と指先との間の摩擦係数を 0.15，対象物と環境との間の摩擦係数を 1.2 と設定して動作計画を行い，得られた計画結果からアーム・ハンドの制御を行った。

平面上で対象物を並進させる操作について計画を行ったところ，指 1 を力制御，指 2 を位置制御として対象物を両側からはさんで滑らせる，という計画結果が得られた。その結果を

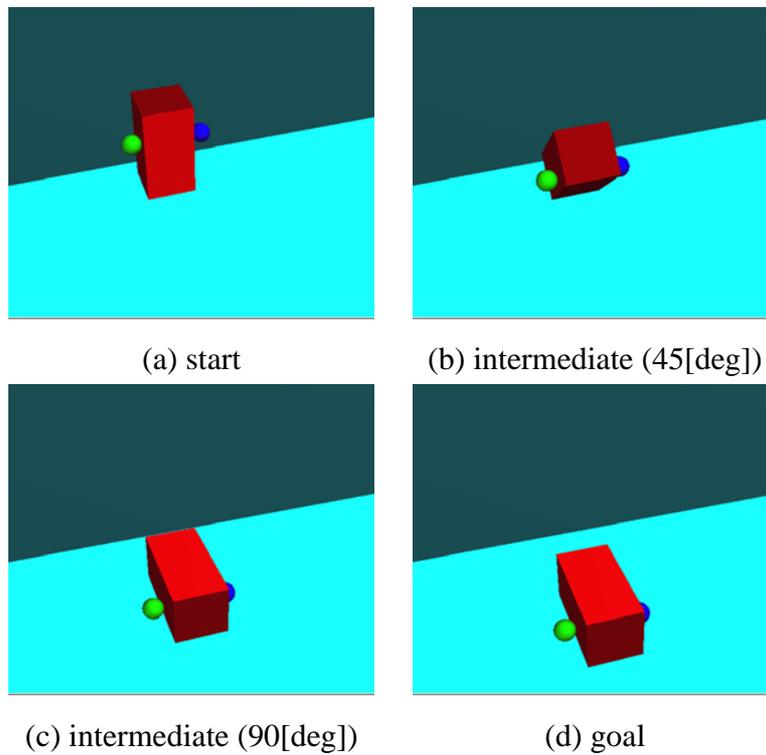


Fig. 6.39: Tumbling + Sliding: Planned Composite Operation

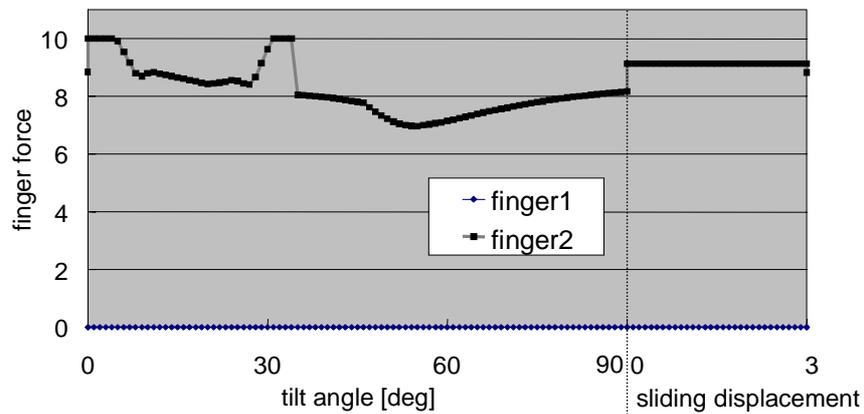


Fig. 6.40: Tumbling + Sliding: Planned Finger Forces

もとに滑らせ操作を行わせたときの様子を Fig. 6.43 に，そのときの指先の法線方向の力を Fig. 6.44 に示す。

また，転がし操作についても，同様に指 1 を力制御，指 2 を位置制御として対象物を両側

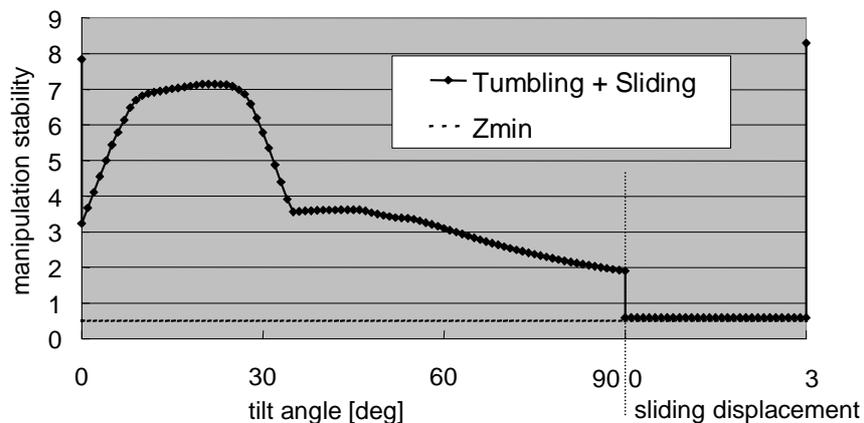


Fig. 6.41: Tumbling + Sliding: Manipulation Stability



Fig. 6.42: Arm-Hand Mechanism

からはさんで倒す，という計画結果が得られた．この結果に基づいて転がし操作を行ったときの様子を Fig. 6.45 に示す．また，そのときの指先の法線方向の力を Fig. 6.46 に示す．

どちらの場合も，若干の誤差はあるものの，おおむね計画どおりに制御が行われ，操作を実現することができている．指の制御モードまで含めて計画が行われているので，その結果を実機に適用して実行させるのは比較的容易である．

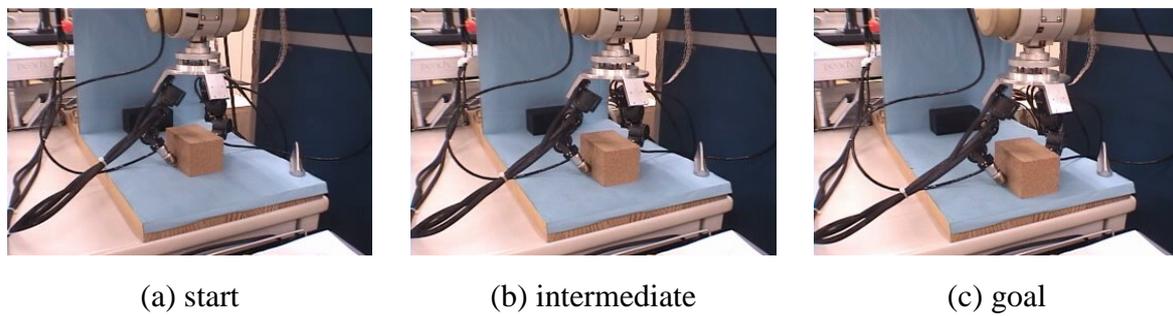


Fig. 6.43: Experiment of Sliding Operation

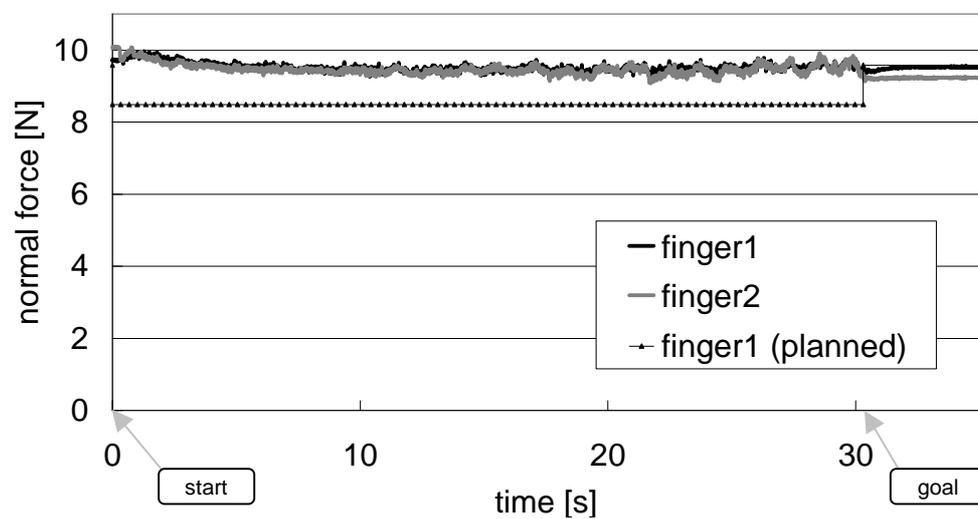


Fig. 6.44: Finger Forces in Sliding

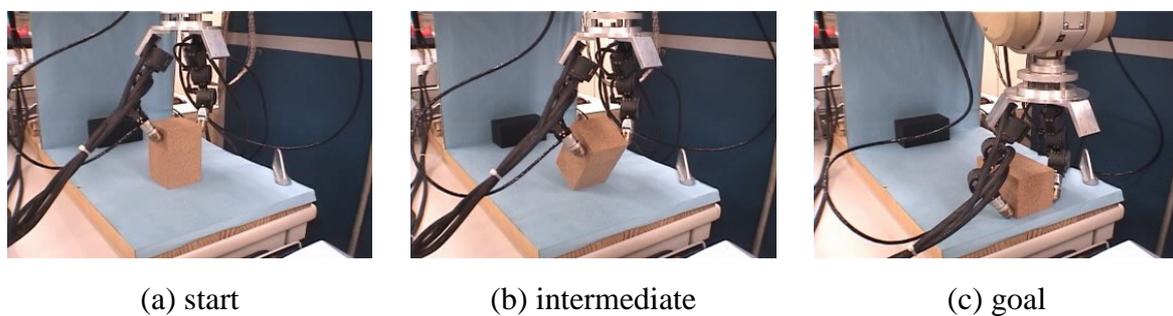


Fig. 6.45: Experiment of Tumbling Operation

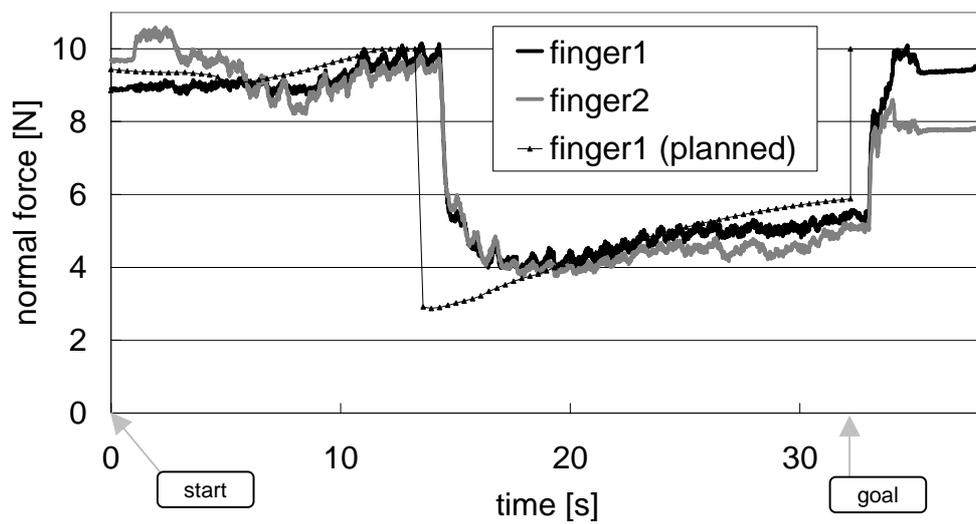


Fig. 6.46: Finger Forces in Tumbling

## 6.8 計画手法に関する考察

### 6.8.1 計画手法の特徴と意義

以上のように、本章で提案した計画手法は、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ことが可能である。滑らせ操作（押し操作を含む）・転がし操作・ピボット操作について操作の計画を行うことができるため、本手法は [相山 1996a] のグラスプレス・マニピュレーションの分類における Type 1–3 の操作（2.2.3 項参照）を網羅できたと言える。また、指の持ち替えや、転がし+滑らせた複合操作の計画例から、これらをさまざまに組み合わせることによって、多様かつ複雑なグラスプレス・マニピュレーションの計画の実現の可能性を示すことができた。このように、特定の操作手法に限定されない、一般的なグラスプレス・マニピュレーションの計画の枠組みを構築したことは、器用なマニピュレーションをロボットに実現させる上で、意義深いと考えられる。

また、本章の計画手法は、グラフのアーキに評価関数を割り当て、グラフ探索によってマニピュレーション計画を行うアプローチをとっている。望ましい評価関数は、マニピュレーションの目的や使用するロボットの仕様、環境条件等によって変わりうるが、本章で用いた評価関数（6.6.1 項）は、以下のような性質を持っている。

- 5.6.1 項でも触れたように、できるだけ位置制御を使用する操作が計画される傾向がある。具体的には、位置制御された指もしくは環境を、マニピュレーションのガイドとして用い、それに対して力制御された指もしくは重力によって予圧をかけた状態で、対象物を動かすような操作が生成されることが多い。このような操作は、対象物を望みの経路を通してあやつる、という観点からは望ましいものだと言える。なぜなら、例えばコンプライアンス制御された指だけで対象物を操作しようとする、わずかな外乱力によっても対象物は望みの経路を（一時的にせよ）外れてしまうためである。
- 操作の確実性の評価値が高いほど、グラフに割り当てるコストが小さくなるように設定されているので、ロボット指が十分強い力を出せる場合は、内力を大きめにして、外乱に対して強い状態を作って対象物を動かすような操作が生成される傾向がある。このことは、指にかかる負荷や消費エネルギーという点では不利であるが、外乱に弱いグラスプレス・マニピュレーションにおいて、このようにして操作の確実性を確保することは、正当性があると言える。もちろん、指の出せる力が大きくない場合は、内力の発生を伴わないような操作（押し操作など）が生成される。

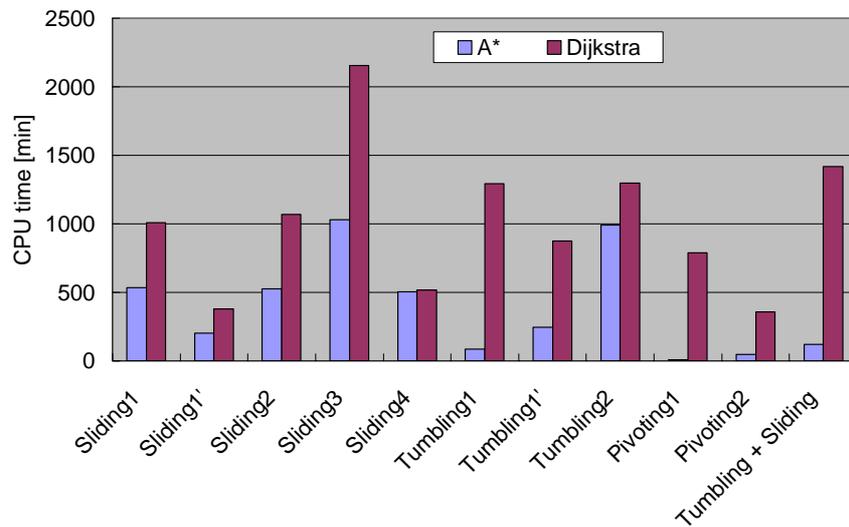


Fig. 6.47: CPU Time for Planning

- 指の制御モードの決定は、瞬時的な最適化をベースに行っているため、場合によっては頻りに制御モードを切り替えるような解が生成される可能性がある。制御モードを瞬時的に切り替えることは難しく、その切替の過程が操作に悪影響を与える可能性がある場合は、各指の制御モードを固定して計画を行うことも可能である。

以上のことから、本章で使用した評価関数は、万能ではないが多くの場合で妥当な操作を生成すると考えられる。

### 6.8.2 実際の計算時間に関する考察

前節の計画問題を、Pentium4-2.8GHz の Linux PC で実行した際にかかった計算時間を、Fig. 6.47 に示す。グラフには、 $A^*$  探索の代わりに Dijkstra のアルゴリズムを使った場合（すなわち、ヒューリスティック関数を利用せず、6.6.3 項の改良も適用しない場合）の結果も併せて載せた。また、グラフ探索中に展開したノード数を Fig. 6.48、有効分岐数を Fig. 6.49 に示す。

グラフより、探索中の展開ノード数と計算時間がおおよそ対応していることが見てとれる。そして、ヒューリスティクスを利用した  $A^*$  探索によって、すべての場合について計算時間が改善されていることがわかる。しかし、その改善の度合いについてはばらつきがかなりある。

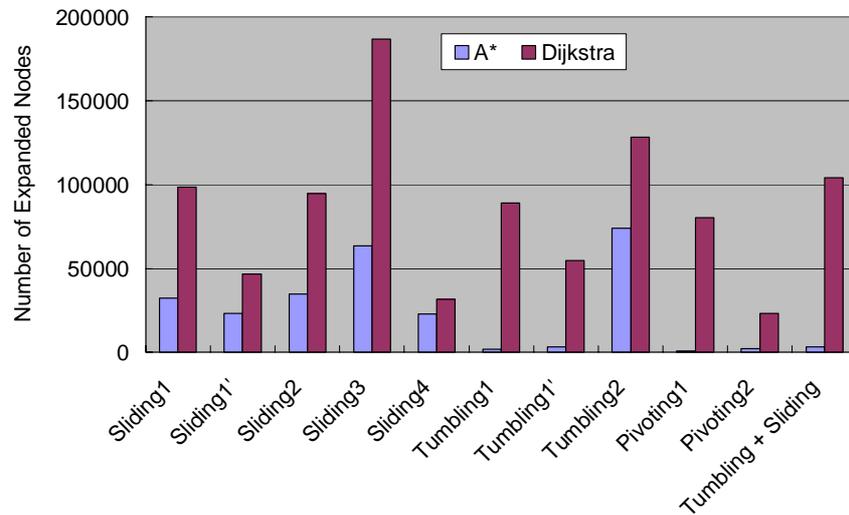


Fig. 6.48: Number of Expanded Nodes in Planning

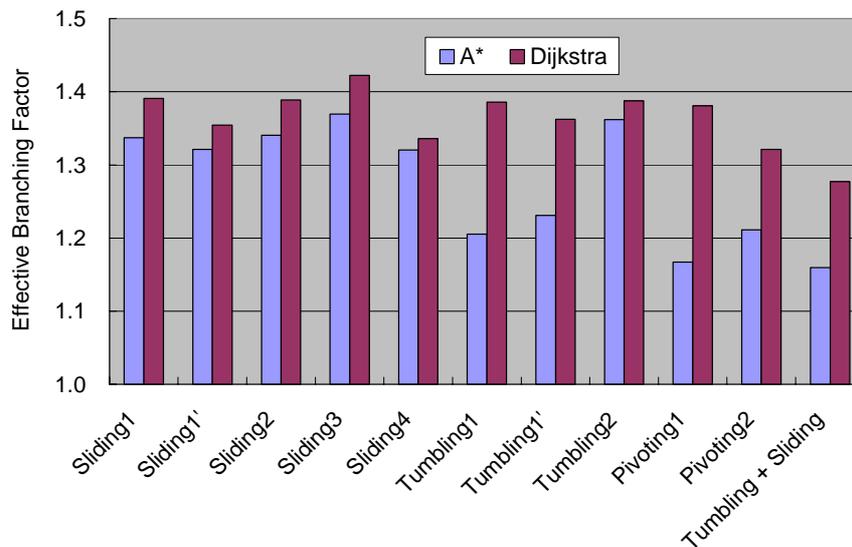


Fig. 6.49: Effective Branching Factors in Planning

比較的障害物が少ない状態での転がし操作やピボット操作では、 $A^*$  探索によって計算時間が数分の1 (Pivoting 2) ~ 100分の1以下 (Pivoting 1) と大幅に短縮されている。これらの場合には、ヒューリスティック関数によるコストの予測が有効に機能している。

一方、障害物が多く持ち替えが必要な場合の転がし操作 (Tumbling 2) ではそれほど改善

が大きくないが、これは計画問題そのものが難しい（実行可能解を見つけること自体が難しい）ことに起因するものと思われる。このような問題における計画の高速化は容易でない。

また、全般に滑らせ操作の場合の改善は小さいが、こちらは最適解および最適解に近い解が多数あるためだと考えられる。つまり、多数の候補の中から一つの解を選ぶのに時間がかかっているためである。これは、言わば、計画問題が易しい（実行可能解を見つけるのは簡単だが、多数見つかってしまう）ために計算時間がかかっていると言える。このような場合は、解の最適性を諦めれば、欲張り探索を用いることで計画の高速化が見込める。

### 6.8.3 理論的な計算量

本項では、提案した計画アルゴリズムの計算量について考察する。ただし、 $A^*$  探索におけるヒューリスティック関数（6.6.2 項）の効果を理論的な計算量の観点から一般的に議論するのは難しく、また 6.6.3 項の改良の効果についても同様である。そこでここでは、 $A^*$  探索ではなく Dijkstra のアルゴリズムを使った場合の計算量を考えることにする。

Dijkstra のアルゴリズムは  $A^*$  探索で  $h = 0$  とした場合（ヒューリスティック関数を利用しない場合）に相当する。したがって、Dijkstra のアルゴリズムの理論的な計算量は、本章で示した計画アルゴリズムの計算量の上限を与える、と考えてよい。

#### 同一接触状態内での計画

まず、1つの接触状態内での操作計画の計算量を考える。対象物の自由度は  $d (\leq 6)$ 、指は  $n$  本だから、コンフィギュレーション空間の次元は  $(d + 2n)$  次元になる。このコンフィギュレーション空間の各次元を  $X$  分割して離散的なノードを作ることとすると、ノードの数は  $O(X^{d+2n})$  個になる

一方アークについては、対象物の自由度方向のアークと持ち替え方向のアークに分けて考える。対象物の自由度方向には、各ノードは  $O(d)$  個の隣接ノードとアークで接続される。したがって、対象物の自由度方向のアークは、 $O(d) \times O(X^{d+2n}) \times 2 = O(dX^{d+2n})$  本になる（最後に2倍するのは双方向にアークを張るため）。持ち替え方向には、各ノードは  $n \times O(X^2) \times 2 = O(nX^2)$  個のノードとアークで接続されるため、アークの数は  $O(nX^2) \times O(X^{d+2n}) = O(nX^{d+2n+2})$  本になる。したがって、アークの総数は  $O(dX^{d+2n}) + O(nX^{d+2n+2}) = O((d + nX^2)X^{d+2n})$  本となるが、ここで  $X \gg d$ ,  $X \gg n$  であることを考慮すると、結局アークの総数は  $O(nX^{d+2n+2})$  と見てよい。

一般に Dijkstra のアルゴリズムは、アークの数  $n_{\text{arc}}$  とノードの数  $n_{\text{node}}$  に対して

$O(n_{\text{arc}} \log n_{\text{node}})$  の計算量である [エイホ 1987] . したがって , この場合の計算量は

$$\begin{aligned} & O(O(nX^{d+2n+2}) \times \log O(X^{d+2n})) \\ & = O(n(d+2n)X^{d+2n+2} \log X) \end{aligned} \quad (6.9)$$

となる .

しかし , 本章で提案した計画手法においては , グラフ探索中に用いられる指の制御モードの決定部分 (5 章) の計算量がかなり大きい . したがって , 計画手法の計算量としては , その分を含めた計算量で評価すべきである .

1 回の指の制御モード決定にかかる計算量は , 5.6.2 項で調べたように

$$O(2^n N_{\text{vert}}^3 s n^2 (m+n))$$

程度と見積もられる . ここで  $N_{\text{vert}}$  は , 6 次元超球を超多面体近似するときの頂点数 ,  $s$  は摩擦円錐を多角錐近似する際の稜の数 ,  $m$  は環境との接触点数であった .

グラフ探索中のコスト更新部分でこの計算が行われるため , 全体での計算量は , グラフ探索の計算量と制御モード決定の計算量の積であると考えられる . 1 回のコスト更新について , 制御モード決定の計算は , 最大で  $P$  回行われる場合があるので , 全体の計算量は

$$\begin{aligned} & O(n(d+2n)X^{d+2n+2} \log X \times P \times O(2^n N_{\text{vert}}^3 s n^2 (m+n))) \\ & = O(sPN_{\text{vert}}^3 n^3 (m+n)(d+2n)2^n X^{d+2n+2} \log X) \end{aligned} \quad (6.10)$$

程度と考えられる .

上記の計算量の式の中のパラメータのうち ,  $s, P, N_{\text{vert}}$  は近似計算の精度に関するパラメータであり ,  $d, m, n, X$  は直接計画問題の規模を表すパラメータである . 後者のうち , 非常に大きな値をとりうるのは  $X$  のみであることを考えると , この計画アルゴリズムの計算量は  $X$  に対する多項式オーダーであると言える . ただし , その次数はかなり高い .

#### 複数の接触状態にまたがる計画

次に , 複数の接触状態にまたがる計画の計算量を考える .  $A$  個の接触状態と  $B$  個の接触状態遷移からなる , 簡略化された接触状態ネットワークが与えられているとする . このグラフのノードの総数は  $O(AX^{d+2n})$  である . アークに関しては , 同一接触状態内のアークの数の和は  $O(AnX^{d+2n+2})$  本となる . また接触状態の遷移を表すアークの数の和は  $O(2BX^{d+2n}) = O(BX^{d+2n})$  本となる . したがって , アークの総数は  $O(AnX^{d+2n+2}) + O(BX^{d+2n}) = O(AnX^{d+2n+2})$  となる .

よって、Dijkstra のアルゴリズムによる探索の計算量は

$$\begin{aligned} & O(O(AnX^{d+2n+2}) \times \log O(AX^{d+2n})) \\ &= O(AnX^{d+2n+2}(\log A + (d+2n)\log X)) \\ &= O(An(d+2n)X^{d+2n+2}\log X) (\because X \gg A) \end{aligned} \quad (6.11)$$

となる．

前項と同様にして、操作の确实性の評価の部分を含めて計算量を考えると、

$$\begin{aligned} & O(An(d+2n)X^{d+2n+2}\log X \times P \times O(2^n N_{\text{vert}}^3 sn^2(m+n))) \\ &= O(sPN_{\text{vert}}^3 An^3(m+n)(d+2n)2^n X^{d+2n+2}\log X) \end{aligned} \quad (6.12)$$

となる．これは  $X$  の多項式オーダであるが、その次数はかなり大きい．ただし、提案した計画手法では、ヒューリスティック関数 (6.6.2 項) を利用した  $A^*$  探索の利用、および本計画問題の特徴を利用したその改良 (6.6.3 項) などの対策が盛り込まれている．また、操作の确实性の計算の部分では、制御モードの組み合わせを調べる回数を減らす工夫 (5.4.4 項) がされている．(6.12) 式にはこれらの効果を見捨てて求めたものであるため、実際的な計算量はそれより小さくなる可能性がある．

#### 6.8.4 計算時間の改善策

以上のように、提案した計画アルゴリズムの計算量はかなり多い．計算時間を短縮するための工夫として考えられるものを以下に挙げる．

##### 1. 双方向探索を用いる．

ここで扱う計画問題では、目標状態がはっきりしているため、双方向探索を利用することも可能である．目標状態付近では物理的に取りうる状態が少ないようなマニピュレーションの計画では、計算時間を大きく短縮できる可能性がある．

##### 2. 欲張り探索に近づける．

最適解の保証を諦め、ヒューリスティック関数の重みを大きくして欲張り探索に近づけることによって、計算時間を短縮できる可能性がある．この場合、具体的には式 (6.3) の代わりに  $f(n) = w_g g(n) + w_h h(n)$  ( $w_g, w_h$  は適当な重み係数で  $w_g < w_h$  とする) に基づいて探索を行うことになる．特に、実行可能なマニピュレーション方法が多数存在する場合 (例えば、どのような指配置でもマニピュレーションが可能の場合) には、すべての可能性を調べることなく探索を終了することで計算時間が改善されることが予想される．ただし、適切な重み係数を決定するのが難しいこと、また

問題によっては却って計算時間が悪化する可能性があることから、最適性が失われることの影響も含め、導入には注意を要する。

3. 力学的に等価なコンフィギュレーションを検出し、計算結果を再利用する。

提案した計画アルゴリズムの手続きの中で時間がかかるのは、指の制御モードを決定するために線形計画問題を解く部分である。現在の実装では、各コンフィギュレーションごとにこの計算を行っている。したがって、平面上での滑らせ操作の計画などで、周囲に障害物がない場合は、力学的には同じ状態を表すノードが多数生成され、それぞれに対してまったく同様な計算を繰り返していることになる。そこで、探索中の指の制御モードの計算結果を記憶しておき、すでに調べたノードと力学的に等価なノードを検出したら、過去の計算結果を再利用することによって、計算の重複をなくすことが考えられる。ハッシュを利用するなどして、等価なコンフィギュレーションの検出を高速に行うことができれば、大幅な計算時間の短縮が見込める。

4. ノードのサンプリングを適応的に行う。

現在はコンフィギュレーション空間を固定的な刻み幅で離散化することによってノードのサンプリングを行っている。しかし、この方法では、刻み幅を不必要に細かくし過ぎて計画が非効率的になったり、粗い刻み幅のために計画が失敗する、などの事態が起こりうる。そこで、例えば Probabilistic Roadmap (PRM) [Kavraki 1996] のような方法を利用することが考えられる。コンフィギュレーションのサンプリングを適応的に行うことにより、生成されるグラフの大きさを抑え、計算時間を短縮できる可能性がある。もちろんこの場合は解の最適性は犠牲となる。本章で扱う計画問題のコンフィギュレーション空間は素直な空間ではないため、必ずしも PRM の実装は容易ではないが、接触動作の計画に PRM を適用した例 [Ji 2001] が参考になると思われる。

## 6.9 おわりに

本章ではグラスプレス・マニピュレーションの計画問題を扱い、ロボット指の動作計画手法を提案した。滑らせ操作(押し操作を含む)・転がし操作・ピボット操作のそれぞれの計画例を示したことで、この計画アルゴリズムが、[相山 1996a]のグラスプレス・マニピュレーションの分類における Type 1-3 の操作すべてを扱うことができることを確認した。また、持ち替えや、複数の操作を組み合わせた複合的なマニピュレーションの計画例も併せて示した。これらの組み合わせによって、多様かつ複雑なグラスプレス・マニピュレーションの計画が可能になるものと考えられる。また、計画結果の実機ロボットへの適用例も示した。これにより、一般的なグラスプレス・マニピュレーションの計画を行うための、一つの基本的な枠組みを示すことができたと言える。

現状の計画手法の欠点としては、計算量が多いことが大きな問題である。提案したアルゴリズムには改良の余地が多数残っているが、6.8.4 項でも触れた Probabilistic Roadmap (PRM) [Kavraki 1996] や Rapidly-Exploring Random Trees (RRT) [LaValle 2001] などのランダム探索の手法を取り入れることも有効であると考えられる。

また、指と対象物の間の滑り・転がりを扱えない点も問題である。特に指と対象物の間の転がりの利用は、あやつりの能力を高める上で重要であることが指摘されており [吉川 1996b, 黄 1999]、これを併せて扱えるようにすることも大きな課題の1つである。

## 第7章

### 結論

---

7.1	結論 . . . . .	152
7.2	今後の展望 . . . . .	154

---

## 7.1 結論

本論文では、ロボットによるグラスプレス・マニピュレーション一般を対象とし、その力学解析およびマニピュレーション計画について研究を行った。本論文によって明らかになったことを以下にまとめる。

まず、グラスプレス・マニピュレーションの概念および、nonprehensile manipulation の概念を整理した。またグラスプレス・マニピュレーションの力学解析の準備として、回転を伴う面接触が存在する場合でも、従来の方法より正確に接触力をモデル化するための手法を提案した(2章)。

次いで、グラスプレス・マニピュレーションの計画・実行のためには、操作中(運動中)であることを考慮に入れた「操作の確実性」の評価が重要であることを示した。そして、操作の確実性を「ある大きさまでの外乱力が加わっても、対象物の運動が乱されないという性質」と定義した。また、この許容できる外乱力の大きさを操作の確実性を定量的に評価することを提案するとともに、線形計画法によるその(近似的な)計算法を示した(3章)。

さらに、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作業において重要となる、内力の問題について解析を行った。ここでは「無限大の大きさの内力が発生しうること」を過大な内力の発生可能性の定義とし、線形計画法によって過大な内力の発生可能性の有無を判定する手法を提案した(4章)。

また、以上の結果を踏まえて、「過大な内力が発生しない」かつその上で「操作の確実性を最大にする」という方針によって、グラスプレス・マニピュレーションにおいて、ロボット指の制御モード(位置制御/力制御)を適切に決定する手法を提案した。このアプローチによって、妥当な制御モードを自動的に決定できることを数値例によって確認した(5章)。

そして最後に、対象物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問題を扱った。具体的には、グラスプレス・マニピュレーションのための動作計画問題をグラフ探索に帰着させ、 $A^*$ 探索によって解く手法を提案した。この手法では、上記のロボット指の制御モードの決定手法を組み込むことにより、適切に制御モードを決定し、できるだけ外乱に強いマニピュレーションを計画するようになっている。グラスプレス・マニピュレーション一般を対象とした力学解析に基づいて計画アルゴリズムを構築することによって、押し操作や転がし操作など多様なグラスプレス・マニピュレーションの計画を、指の持ち替えも含めて統一的に実現可能であることを示した。また、実機ロボットハンドへの計画結果の適用

も行った(6章). 提案した計画アルゴリズムを用いれば, さまざまな条件の下で一般的なグラスプレス・マニピュレーションを実行させるためのロボットへの動作指令を生成することができる.

以上のように, 本論文では一般的なグラスプレス・マニピュレーションを対象に, 基礎的な力学解析(接触力のモデル化・操作の確実性の評価・過大な内力の発生可能性の判定)を行うとともに, その応用としての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の計画手法(指の制御モードの決定・指の動作計画)を示した. これらは, ロボットによって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基本的な道具立てとなるものであり, ひいてはロボットによる器用なマニピュレーションの実現に大きく資するものと期待される.

## 7.2 今後の展望

本論文において未解決の重要な問題を列挙する．

**異なる観点からの操作の确实性の評価** 本論文の3章では、グラスプレス・マニピュレーションの操作の确实性として、「ある大きさまでの外乱力が加わっても、対象物の運動が乱されないという性質」について評価を行った．この性質はグラスプレス・マニピュレーションにおいては第一義的に評価すべきものであるが、つねにこれだけの評価すればよい、というものではない．例えば、弾性指によるピボット操作などでは、いくつかの自由度に関しては「操作中の対象物に、外乱力が加わって対象物の運動が乱されても、その外乱力が取り除かれれば元の運動に戻るという性質」を評価する方が適切な場合もある．これらの複数の観点からの評価を統一的に定式化し、マニピュレーションの計画・実行に役立てることが求められる．

**過大な内力の発生可能性のより厳密な判定** 本論文の4章では過大な内力の発生可能性を判定する方法を示したが、これは必要条件であった．これをより必要十分条件に近づけるため、さらなる解析が必要である．パワーグラスプに関する力学解析の結果 [小俣 1995, 小俣 2001] が参考になると思われる．

**グラスプレス・マニピュレーション計画の高速化と適用可能範囲の拡大** 本論文の6章で一般的なグラスプレス・マニピュレーションの計画手法を提案したが、計算量がかなり大きいことから、現実的にこの計画手法を適用可能な範囲はまだ限られている．したがって、計画アルゴリズムの高速化を図ること、および対象物の動きだけを計画するような大域的な計画手法（例えば [吉川 1992a, 余 1995a, 相山 1999, Ji 2001]）との統合を行うことによって、計画可能な問題のクラスを広げていく必要がある．

**パラメータの不确实性への対応** 本論文における力学解析の結果は、パラメータの不确实性に対する考慮がまだ十分でない．特に、グラスプレス・マニピュレーションでは環境との接触が存在するため、摩擦係数の不确实性が大きな問題である．また、指位置などの誤差の問題による影響を受ける場合もある．本論文においては、操作の确实性の概念とその定量的評価を導入したことで、ある程度までこれらパラメータの不确实性に対応できると考えられるが、より詳しい解析が望まれる．

**把持によるマニピュレーション計画との融合** 本論文においては、グラスプレス・マニピュレーションの計画問題を扱ったが、把持によるマニピュレーションとグラスプレス・マニピュレーションの両方を柔軟に使い分けるような計画が実現できれば、その効果は極めて大きい．現状でも、把持によるマニピュレーションをグラスプレス・マニ

ピュレーションの特別な場合だと考えれば、本論文のアルゴリズムを把持によるマニピュレーションにそのまま適用することも可能である。しかし、計算量の点から、把持によるマニピュレーション計画手法と、グラスプレス・マニピュレーションの計画手法を別々に構築し、それらを統合するアプローチが現実的であると思われる。

近年のマニピュレーション研究には元気がないとの指摘がある [中村 2002]。必ずしも本質的とは言えない小さな問題を解くことに終始しているのではないかと、という批判である。一方で、マニピュレーション研究はボトムアップ的に進めるべき、との意見も出されている [内山 2002]。本論文の内容は、疑いようもなくボトムアップ的なものであった。今後の大きな課題としては、このようなボトムアップ的に得られた知見を、実際に使えるレベルの技術へと育てること、そして、マニピュレーションの背後にある知能の問題へとつなげる道を模索することが重要であると思われる。



# 謝辞

本論文の審査の主査を務めて下さった、

東京大学 大学院工学系研究科 精密機械工学専攻 新井民夫教授

に、心より感謝申し上げます。先生には研究指導はもとより、学生時代から公私に渡ってさまざまなご助力、ご助言を頂きました。先生の下で、自由な雰囲気の中で研究生活をスタートさせることができたことは、非常に幸運なことでした。どうもありがとうございました。

また、副査を務めて下さった、

東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 井上博允教授

東京大学 大学院工学系研究科 精密機械工学専攻 木村文彦教授

東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 中村仁彦教授

東京大学 新領域創成科学研究科 環境学専攻 佐々木健助教授

からは、厳しくも暖かいご指導を賜りました。謹んで感謝の意を表します。斯界の第一人者の先生方から貴重なご助言を多数頂くことができたことは、この上なく恵まれた環境でありました。

東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻の太田順助教授からは、動作計画手法に関する専門的な内容から研究に対する姿勢に至るまで、節目節目でたくさんの重要なことを教えて頂きました。また、研究を進める上でさまざまなご配慮および激励をいただきました。どうもありがとうございました。

前・東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授の故・湯浅秀男先生からは、研究内容についても研究者としての心構えについても極めて多くのことを教わりました。深く感謝申し上げるとともに、先生のあまりにも早いご逝去に、心より哀悼の意を表します。

筑波大学機能工学系の相山康道講師は、この研究をスタートさせるきっかけを作って下さったのみならず、東京大学ご在職中から現在に至るまで、専門的立場からのご助言を下さ

いました。また、実験設備の使用を快諾いただきました。どうもありがとうございました。

東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻の新井・湯浅・太田研究室に在籍されたメンバーの方々には、さまざまな形でお世話になりました。すべての方のお名前をここに挙げることはできませんが、深く感謝の意を表します。本当にありがとうございました。特に、本論文には木地本浩和氏（現・NTT コミュニケーションズ）および中村智久氏（現・NTT データ）と共同で行った研究の成果が反映されています。両氏の大きな貢献に心より感謝いたします。

筑波大学機能工学系相山研究室の京増司氏には、多指ハンドシステムの実験について多くのご助力を頂きました。ありがとうございました。

そのほか、本論文の研究の遂行にあたっては、日本学術振興会科学研究費補助金（奨励研究(A) / 若手研究(B), No. 13750210, 平成 13 年度～14 年度) による支援を頂きました。また、本論文の研究成果の発表に対して、(財)井上科学振興財団および(財)スズキ財団より援助を頂きました。研究活動を支援して下さった関係各位に心より御礼申し上げます。

最後に、いつも私を見守ってくれた両親、そして、傍らで明るく私を支えてくれた妻のなつきに感謝して、謝辞の結びとします。

# 参考文献

## 論文

- [相山 1992] 相山 康道, 稲葉 雅幸, 井上 博允: “ピボット操作を用いた多面体物体操作,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, pp. 93–96, 1992.
- [相山 1995] 相山 康道: “グラスプレス・マニピュレーションに関する研究,” 東京大学大学院工学系研究科 博士論文, 1995.
- [相山 1996a] 相山 康道, 稲葉 雅幸, 井上 博允: “グラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とピボット操作の実現,” 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 114–121, 1996.
- [相山 1996b] 相山 康道, 茶碗谷 健, 朱 赤, 新井 民夫: “リリース型マニピュレーションの研究: 平面運動の基礎的解析と学習による位置決め精度の向上,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 62, No. 602, pp. 34–41, 1996.
- [Aiyama 1997] Y. Aiyama and T. Arai: “Graspless Manipulation with Sensor Feedback,” Proc. of IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning, pp. 78–83, 1997.
- [相山 1999] 相山 康道, 安井 俊徳, 新井 民夫: “グラスプレス・マニピュレーションの操作計画のための接触状態遷移グラフの生成,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 65, No. 636, pp. 3239–3244, 1999.
- [Akella 1998] S. Akella and M. T. Mason: “Posing Polygonal Objects in the Plane by Pushing,” Int. J. of Robotics Research, Vol. 17, No. 1, pp. 70–88, 1998.
- [Asada 1985] H. Asada and A. B. By: “Kinematic Analysis of Workpart Fixturing for Flexible Assembly with Automatically Reconfigurable Fixtures,” IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-1, No. 2, pp. 86–94, 1985.
- [浅田 1987] 浅田 春比古: “マニピュレーションの知能,” 日本ロボット学会誌, Vol. 5, No. 6, pp. 487–494, 1987.
- [Bicchi 2000] A. Bicchi and V. Kumar: “Robotic Grasping and Contact: A Review,” Proc. of

- IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 348–353, 2000.
- [Bruyninckx 1998] H. Bruyninckx, S. Damey and V. Kumar: “Generalized Stability of Compliant Grasps,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2396–2402, 1998.
- [Desai 1989] R. S. Desai and R. A. Voltz: “Identification and Verification of Termination Conditions in Fine Motion in Presence of Sensor Errors and Geometric Uncertainties,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 800–807, 1989.
- [Doty 1993] K. L. Doty, C. Melchiorri, C. Bonivento: “A Theory of Generalized Inverses Applied to Robotics,” Int. J. of Robotics Research, Vol. 12, No. 1, pp. 1–19, 1993.
- [Donald 1997] B. R. Donald, J. Jennings and D. Rus: “Information Invariants for Distributed Manipulation,” Int. J. of Robotics Research, Vol. 16, No. 5, pp. 673–702, 1997.
- [Eppstein 1998] D. Eppstein: “Finding the k Shortest Paths,” SIAM J. on Computing, Vol. 28, No. 2, pp. 652–673, 1998.
- [Erdmann 1994] M. Erdmann: “On a Representation of Friction in Configuration Space,” Int. J. of Robotics Research, Vol. 13, No. 3, pp. 240–271, 1994.
- [Erdmann 1998] M. Erdmann: “An Exploration of Nonprehensile Two-Palm Manipulation,” Int. J. of Robotics Research, Vol. 17, No. 5, pp. 485–503, 1998.
- [藤田 2002] 藤田 悠介, 中村 仁彦, Zvi Shiller: “トポロジの異なる経路を計算するデュアルダイキストラ法,” 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, 1D22, 2002.
- [Goldberg 1993] K. Y. Goldberg: “Orienting Polygonal Parts Without Sensors,” Algorithmica, Vol. 10, pp. 201–225, 1993.
- [Goyal 1991a] S. Goyal, A. Ruina and J. Papadopoulos: “Planar sliding with dry friction Part 1. Limit surface and moment function,” Wear, Vol. 143, pp. 307–330, 1991.
- [Goyal 1991b] S. Goyal, A. Ruina and J. Papadopoulos: “Planar sliding with dry friction Part 2. Dynamics of Motion,” Wear, Vol. 143, pp. 331–352, 1991.
- [Harada 2002] K. Harada, J. Nishiyama, Y. Murakami and M. Kaneko: “Pushing Multiple Objects using Equivalent Friction Center,” Proc. 2002 of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2485–2491, 2002.
- [原田 2002] 原田 研介, 梶田 秀司, 金子 健二, 比留川 博久: “手先反力を考慮したヒューマノイドによる押し作業,” 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, 1D14, 2002.
- [長谷川 1996] 長谷川 勉: “マニピュレーションの知能,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 62, No. 602, pp. 3740–3745, 1996.
- [平井 1988] 平井 慎一, 浅田 春比古, 得丸 英勝: “組立作業における物体の接触状態遷移に関する運動学的解析とそのネットワーク表現の自動生成,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 4, pp. 406–413, 1988.

- [平井 1999] 平井 慎一: “凸多面錐理論に基づくマニピュレーションの運動学・静力学とそのマニピュレーション計画問題への応用,” 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 68–83, 1999.
- [比留川 1994] 比留川 博久: “経路探索問題 ロボットの動作計画,” 情報処理, Vol. 35, No. 8, pp. 751–760, 1994.
- [黄 1999] 黄 昶淳: “多指ハンドによる操りの運動学シミュレータの開発と動作計画への応用,” 東京大学大学院工学系研究科 博士論文, 1999.
- [Ji 2001] X. Ji and J. Xiao: “Planning Motions Compliant to Complex Contact States,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 446–465, 2001.
- [Kavraki 1996] L. Kavraki, P. Svestka, J.-C. Latombe, and M. Overmars: “Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 4, pp. 566–580, 1996.
- [金子 2002] 金子 真 ほか: “特集「マニピュレーション：21世紀に向けた新展開」,” 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 2, pp. 123–154, 2002.
- [Kerr 1986] J. Kerr and B. Roth: “Analysis of Multifingered Hands,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 4, No. 4, pp. 3–17, 1986.
- [Kijimoto 1999] H. Kijimoto, T. Arai, Y. Aiyama and T. Yamamoto: “Performance Analysis and Planning of Graspless Manipulation,” *Proc. of IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning*, pp. 238–243, 1999.
- [Klein 1990] C. A. Klein and S. Kittivatcharapong: “Optimal Force Distribution for the Legs of a Walking Machine with Friction Cone Constraints,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 1, pp. 73–85, 1990.
- [栗栖 1995] 栗栖 正充, 吉川 恒夫: “押し作業における対象物の軌道計画,” 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 8, pp. 1115–1121, 1995.
- [栗栖 1996] 栗栖 正充, 吉川 恒夫: “押し作業における対象物の軌道追従制御,” 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 8, pp. 1200–1207, 1996.
- [栗栖 1999] 栗栖 正充, 塚田 和彦, 花崎 紘一: “転がし作業における対象物の経路計画,” 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1021–1022, 1999.
- [栗栖 2002] 栗栖 正充: “連続した転がし操作における力作用点の選定,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 2P1-G08, 2002.
- [京増 2001] 京増 司, 相山 康道: “一般多面体形状物体のピボット操作計画,” 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会講演論文集, pp. 263–264, 2001.
- [LaValle 2001] S. M. LaValle and J. J. Kuffner: “Rapidly-Exploring Random Trees: Progress and Prospects,” B. R. Donald, K. M. Lynch and D. Rus, eds., *Algorithmic and Computational*

- Robotics: New Directions, pp. 293–308, A. K. Peters, 2001.
- [Lynch 1996a] K. Lynch: “Nonprehensile Robotic Manipulation: Controllability and Planning,” Technical Report, CMU-RI-TR-96-05, Carnegie Mellon University, 1996.
- [Lynch 1996b] K. Lynch and M. Mason: “Stable Pushing: Mechanics, Controllability, and Planning,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 533–556, 1996.
- [Lynch 1999a] K. Lynch and M. Mason: “Dynamic Nonprehensile Manipulation: Controllability, Planning, and Experiments,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 64–92, 1999.
- [Lynch 1999b] K. Lynch: “Locally Controllable Manipulation by Stable Pushing,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 2, pp. 318–327, 1999.
- [Maeda 2001] Y. Maeda, Y. Aiyama and T. Arai: “Planning of Quasi-Static Grasplless Manipulation,” *Proc. of 4th IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning*, pp. 98–103, 2001.
- [Marigo 2000] A. Marigo, M. Ceccarellio, S. Piccinocchi, and A. Bicchi: “Planning Motions of Polyhedral Parts by Rolling,” *Algorithmica*, Vol. 26, pp. 560–576, 2000.
- [Mason 1986] M. T. Mason: “Mechanics and Planning of Manipulator Pushing Operations,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 53–71, 1986.
- [Mason 1993] M. Mason and K. Lynch: “Dynamic Manipulation,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 152–159, 1993.
- [Mason 1999] M. T. Mason: “Progress in Nonprehensile Manipulation,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 18, No. 11, pp. 1129–1141, 1999.
- [Mattikalli 1995] R. Mattikalli, D. Baraff, P. Khosla and B. Repeto: “Gravitational Stability of Frictionless Assemblies,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 3, pp. 374–388, 1995.
- [Mirza 1994] K. Mirza and D. E. Orin: “General Formulation for Force Distribution in Power Grasp,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 880–887, 1994.
- [中村 1986] 中村 仁彦, 永井 清, 吉川 恒夫: “複数のロボット機構による協調的あやつりの力学,” *日本ロボット学会誌*, Vol. 4, No. 5, pp. 489–498, 1986.
- [中村 1990] 中村 仁彦: “把持とあやつり,” *計測と制御*, Vol. 29, No. 3, pp. 206–212, 1990.
- [中村 1991] 中村 仁彦: “指の制御,” *計測と制御*, Vol. 30, No. 5, pp. 395–399, 1991.
- [中村 1995] 中村 仁彦, 張 曉毅, 吉本 堅一: “パワーグラスブとそのロバスト性の評価法,” *日本ロボット学会誌*, Vol. 13, No. 6, pp. 866–874, 1995.
- [中村 1997] 中村 仁彦, 来島 正一郎: “多面凸集合演算を用いたパワーグラスブの限界外力空間計算,” *日本ロボット学会誌*, Vol. 15, No. 5, pp. 728–735, 1997.
- [中村 2002] 中村 仁彦: “Open Problem を探すよりも Open The Problem,” *日本ロボット学会*

- 誌, Vol. 20, No. 2, pp. 130–131, 2002.
- [Okamura 2000] A. M. Okamura, N. Smaby and M. R. Cutkosky: “An Overview of Dexterous Manipulation,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 255–262, 2000.
- [小俣 1995] 小俣 透, 永田 和之: “多指ハンドによるパワーグラスプの力学的特性,” 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 525–531, 1995.
- [小俣 2001] 小俣 透, P. Daengtamai: “パワーグラスプの不静定把持力計算法,” 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 7, pp. 874–881, 2001.
- [小俣 2002] 小俣 透: “パワーグラスプの最適関節トルク計算法,” 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 68, No. 672, pp. 2395–2401, 2002.
- [大川 1993] 大川 善邦, 横山 乾: “移動ロボットによる箱押し作業の制御,” 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 1, pp. 148–155, 1993.
- [Peshkin 1988] M. A. Peshkin and A. C. Sanderson: “Planning Robotic Manipulation Strategies for Workpieces that Slide,” IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 5, pp. 524–531, 1988.
- [Raibert 1981] M. H. Raibert and J. J. Craig: “Hybrid Position/Force Control of Manipulators,” ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 102, No. 2, pp. 126–133, 1981.
- [沢崎 1991] 沢崎 直之, 井上 博允: “多指ハンドによる物体の転がし操作,” 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 5, pp. 560–571, 1991.
- [沢崎 1993] 沢崎 直之, 井上 博允: “複数の自律ロボットによる協調物体操作,” 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 59, No. 564, pp. 2318–2325, 1993.
- [Shimoga 1996] K. B. Shimoga: “Robot Grasp and Synthesis Algorithms: A Survey,” Int. J. of Robotics Research, Vol. 15, No. 3, pp. 230–266, 1996.
- [寺崎 1994] 寺崎 肇, 長谷川 勉: “平行 2 指ハンドによる滑らし操作を利用した知的物体操作のための動作計画,” 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 7, pp. 1056–1065, 1994.
- [寺崎 1995] 寺崎 肇, 長谷川 勉: “指先に回転機構を有する平行 2 指ハンドによる知的物体操作のための動作計画,” 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 7, pp. 1044–1052, 1995.
- [Trinkle 1992] J. C. Trinkle: “On the Stability and Instantaneous Velocity of Grasped Frictionless Objects,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 5, pp. 560–572, 1992.
- [Trinkle 1993] J. C. Trinkle, R. C. Ram and A. O. Farahat: “Dexterous Manipulation Planning and Execution of an Enveloped Slippery Workpiece,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 442–448, 1993.
- [Trinkle 1995] J. Trinkle, A. Farahat and P. Stiller: “First-Order Stability Cells of Active Multi-Rigid-Body Systems,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 11, No. 4, pp. 545–557, 1995.

- [内山 1983] 内山 勝: “マニピュレーション技術の現状と将来,” 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 2, pp. 4–9, 1983.
- [内山 2002] 内山 勝: “マニピュレーション理論のフロンティア,” 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 2, pp. 132–133, 2002.
- [渡辺 2002] 渡辺 哲陽, 吉川 恒夫: “要求外力集合を用いた環境との接触を伴う物体の把持の最適化,” 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, 3E18, 2002.
- [Whitney 1982] D. E. Whitney: “Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts,” Trans. of the ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 104, No. 1, pp. 65–77, 1982.
- [Xiao 2001] J. Xiao and X. Ji: “Automatic Generation of High-Level Contact State Space,” Int. J. of Robotics Research, Vol. 20, No. 7, pp. 584–606, 2001.
- [山下 2001] 山下 淳, 太田 順, 河野 功, 福地 正樹, 新井 民夫, 浅間 一: “複数移動ロボットによる協調物体操作計画,” 電気学会論文誌 ( C 編 ), Vol. 121, No. 3, pp. 549–556, 2001.
- [吉川 1992a] 吉川 恒夫, 横小路 泰義, 余 永: “拘束状態遷移難度に基づくロボットによる組立作業の計画法,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 5, No. 7, pp. 283–293, 1992.
- [吉川 1992b] 吉川 恒夫, 栗栖 正充: “対象物押し操作にもとづく摩擦力分布の推定法,” 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 632–638, 1992.
- [吉川 1995] 吉川 恒夫: “把持と操りの基礎理論 1. 受動拘束と能動拘束,” 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 7, pp. 950–957, 1995.
- [吉川 1996a] 吉川 恒夫: “把持と操りの基礎理論 2. 指先力,” 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 48–54, 1996.
- [吉川 1996b] 吉川 恒夫: “把持と操りの基礎理論 3. 制御,” 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 505–511, 1996.
- [吉川 1996c] 吉川 恒夫, 栗栖 正充, 水野 光政: “ロボットによる対象物の押し作業の最適計画,” 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 6, pp. 846–852, 1996.
- [吉川 1998] 吉川 恒夫: “マニピュレーション,” 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 910–912, 1998.
- [Yoshikawa 2000] T. Yoshikawa and T. Watanabe: “Dynamic Control of Soft-finger Hands for Pivoting an Object in Contact with the Environment,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 324–329, 2000.
- [余 1995a] 余 永, 横小路 泰義, 吉川 恒夫: “拘束状態における二種類の運動自由度の定義と組立作業計画への応用,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 80–90, 1995.
- [余 1995b] 余 永, 横小路 泰義, 中須 信昭, 吉川 恒夫: “複数のロボット指による環境と接触している物体の準動的操作,” 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 6, pp. 875–885, 1995.

- [余 1999] 余 永, 竹内 賢一, 吉川 恒夫: “ロボットハンドによるパワーグラスブの最適化,” 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 557–566, 1999.
- [余 2000] 余 永, 吉川 恒夫: “物体間の接触の安定性に関する評価,” 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 1026–1033, 2000.
- [張 1996] 張 曉毅, 中村 仁彦, 吉本 堅一: “不完全な接触をもつ把持の力学的多面凸解析,” 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 105–113, 1996.
- [張 1997] 張 曉毅, 中村 仁彦, 吉本 堅一: “パワーグラスブを含む一般的な把持とあやつりの力学,” 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 2, pp. 207–215, 1997.

## 図書

- [エイホ 1987] A. V. エイホ, J. E. ホップクロフト, J. D. ウルマン (大野義夫 訳): “データ構造とアルゴリズム,” 培風館, 1987.  
(原著 A. V. Aho, J. E. Hopcroft and J. D. Ullman: “Data Structure and Algorithms,” Addison-Wesley, 1983.)
- [有本 2002] 有本 卓: “新版 ロボットの力学と制御,” 朝倉書店, 2002.
- [藤原 1984] 藤原 邦男: “物理学序論としての力学,” 東京大学出版会, 1984.
- [古川 1997] 古川 康一 監訳: “エージェントアプローチ 人工知能,” 共立出版, 1997.  
(原著 S. Russel and P. Norvig: “Artificial Intelligence –A Modern Approach,” Prentice-Hall, 1995.)
- [伊理 1995] 伊理 正夫, 今野 浩, 刀根 薫 監訳: “最適化ハンドブック,” 朝倉書店, 1995.  
(原著 G. L. Nemhauser, A. H. G. Rinnooy Kan, M. J. Todd eds., Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol. 1, OPTIMIZATION, Elsevier Science Publishers, 1989.)
- [小山 1980] 小山 昭雄, 森田 道也: “オペレーションズ・リサーチ,” 培風館, 1980.
- [Latombe 1991] J.-C. Latombe: “Robot Motion Planning,” Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [Murray 1994] R. M. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: “A Mathematical Introduction to ROBOTIC MANIPULATION,” CRC Press, 1994.
- [太田 2001] 太田 順, 倉林 大輔, 新井 民夫: “知能ロボット入門 —動作計画問題の解法—,” コロナ社, 2001.
- [Pearl 1984] J. Pearl: “Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving,” Addison-Wesley Publishing Company, 1984.

[丹慶 1993] 丹慶 勝市, 奥村 晴彦, 佐藤 俊郎, 小林 誠 訳: “NUMERICAL RECIPES in C [日本語版],” 技術評論社, 1993.

(原著 W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery: “Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing,” Cambridge University Press, 1992. )

[吉川 1988] 吉川 恒夫: “ロボット制御基礎論,” コロナ社, 1988.

## その他

[石綿] 石綿 陽一: ART-Linux,

<http://www.movingeye.co.jp/~you1/art-linux/download.html>

[Makhorin] A. Makhorin: GLPK (GNU Linear Programming Kit),

<http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>

# 研究業績

## 本論文に関連するもの

### 査読あり学術論文

1. 前田 雄介, 木地本 浩和, 太田 順, 相山 康道, 新井 民夫:  
複数のロボット指による平面内ガラスプレス・マニピュレーションの計画  
(日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 8, pp. 1010–1017, 2001.)
2. 前田 雄介, 相山 康道, 新井 民夫:  
ロボットによる接触作業における内力の解析  
(精密工学会誌, Vol. 67, No. 12, pp. 1996–1999, 2001.)

### 査読あり講演論文

1. Jun Sasaki, Yusuke Maeda, Yasumichi Aiyama, Jun Ota and Tamio Arai:  
Initial Grasping Strategy for an Unknown Object by Cooperative Mobile Robots  
(Proc. of 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2781–2786, 1996.)
2. Yusuke Maeda, Yasumichi Aiyama, Tamio Arai and Taiga Ozawa:  
Analysis of Object-Stability and Internal Force in Robotic Contact Tasks  
(Proc. of 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 751–756, 1996.)
3. 前田 雄介, 相山 康道, 新井 民夫:  
準静力学に基づくガラスプレス・マニピュレーションの計画  
(第5回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 128–133, 2000.)
4. Yusuke MAEDA, Hirokazu KIYIMOTO, Yasumichi AIYAMA and Tamio ARAI:  
Planning of Graspless Manipulation by Multiple Robot Fingers  
(Proc. of 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2474–2479, 2001.)
5. Yusuke MAEDA, Yasumichi AIYAMA and Tamio ARAI:  
Planning of Quasi-Static Graspless Manipulation  
(Proc. of 4th IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning, pp. 98–103, 2001.)
6. Yusuke MAEDA and Tamio ARAI:  
A Quantitative Stability Measure for Graspless Manipulation

(Proc. of 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2473–2478, 2002.)

7. 前田 雄介, 新井 民夫:  
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  
(第 8 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 391–396, 2003.)

## 口頭発表

1. 前田 雄介, 相山 康道, 新井 民夫:  
Gravity Closure による物体の安定的拘束  
(第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 125–126, 1995.)
2. 相山 康道, 小澤 大雅, 木村 和伸, 前田 雄介, 新井 民夫:  
センサ情報に基づくグラスプレス・マニピュレーションの操作切替え手法  
(1996 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 25–26, 1996.)
3. 前田 雄介, 相山 康道, 新井 民夫:  
グラスプレス・マニピュレーションにおける物体の安定性と内力の解析  
(第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 129–130, 1996.)
4. 木地本 浩和, 新井 民夫, 相山 康道, 太田 順, 山本 尚史, 前田 雄介:  
グラスプレス・マニピュレーションにおける操作計画  
(2000 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 472, 2000.)
5. 前田 雄介, 木地本 浩和, 太田 順, 相山 康道, 新井 民夫:  
複数のロボット指による準静的グラスプレス・マニピュレーションの計画  
(日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '01 講演論文集, 2P2-F3, 2001.)
6. 中村 智久, 前田 雄介, 新井 民夫:  
三次元環境におけるグラスプレス・マニピュレーションのためのロボット指の動作計画  
(第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 267–268, 2001.)
7. 前田 雄介, 新井 民夫:  
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定量的評価  
(第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 269–270, 2001.)
8. 前田 雄介, 中村 智久, 太田 順, 新井 民夫:  
操作确实性の指標を利用したグラスプレス・マニピュレーションの計画  
(日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '02 講演論文集, 2P2-F08, 2002.)

9. 前田 雄介, 新井 民夫:  
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自動決定  
(日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, 1K16, 2002.)
10. 前田 雄介, 新井 民夫:  
指の制御モードを考慮に入れたグラスプレス・マニピュレーションの計画  
(第 3 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会講演論文集,  
Vol. I, pp. 87–88, 2002.)
11. 前田 雄介, 新井 民夫:  
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の計画と実行  
(日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '03 講演論文集, 2003, 発表予定)

## 本論文に直接関連しないもの

### 査読あり学術論文

1. T. Arai, Y. Aiyama, Y. Maeda, M. Sugi, J. Ota:  
Agile Assembly System by “Plug & Produce”  
(Annals of the CIRP, Vol. 49, No. 1, pp. 1–4, 2000.)
2. 太田 順, 新井 民夫, 井上 康介, 千葉 龍介, 平野 智一, 前田 雄介:  
コンベア搭載型 AGV の協調による物体搬送システム  
(日本機械学会論文集 C 編, Vol. 67, No. 658, pp. 1905–1911, 2001.)
3. T. Arai, Y. Maeda, H. Kikuchi, M. Sugi:  
Automated Calibration of Robot Coordinates for Reconfigurable Assembly Systems  
(Annals of the CIRP, Vol. 51, No. 1, pp. 5–8, 2002.)
4. Yusuke MAEDA, Takayuki HARA and Tamio ARAI:  
Human-Robot Cooperative Handling of an Object with Motion Estimation  
(J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 14, No. 5, pp. 432–438, 2002.)
5. 前田 雄介, 原 崇之, 新井 民夫:  
躍度最小モデルを用いた動作予測に基づく人間 ロボット協調作業  
(日本機械学会論文集 C 編, Vol. 68, No. 675, pp. 3367–3372, 2002.)
6. Yusuke MAEDA, Atsushi TAKAHASHI, Takayuki HARA and Tamio ARAI:  
Human-Robot Cooperative Rope Turning —An Example of Mechanical Coordination  
through Rhythm Entrainment  
(Advanced Robotics, Vol. 17, No. 1, pp. 67–78, 2003.)
7. Haruka KIKUCHI, Yusuke MAEDA, Masao SUGI and Tamio ARAI:  
Automatic Calibration of Assembly Robots for Instantaneous Installation ‘Plug & Produce’  
(Advanced Robotics, Vol. 17, No. 1, pp. 41–52, 2003.)
8. Masao SUGI, Yusuke MAEDA, Yasumichi AIYAMA, Tomokazu HARADA and Tamio ARAI:  
A Holonic Architecture for Easy Reconfiguration of Robotic Assembly Systems  
(IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 19, No. 3, 2003, to appear)

## 査読あり講演論文

1. Masao SUGI, Yusuke MAEDA, Yasumichi AIYAMA and Tamio ARAI:  
A Flexible Robot System for Assembly with a Concept of Holon  
(Proc. of 32nd Int. Symp. on Robotics, pp. 844–849, 2001.)
2. Masao SUGI, Yusuke MAEDA, Yasumichi AIYAMA and Tamio ARAI:  
Holon Robot System: A Flexible Assembly System with High Reconfigurability  
(Proc. of 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 799–805, 2001.)
3. Yusuke MAEDA, Atsushi TAKAHASHI, Takayuki HARA and Tamio ARAI:  
Human-Robot Cooperation with Mechanical Interaction Based on Rhythm Entrainment  
—Realization of Cooperative Rope Turning—  
(Proc. of 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3477–3482, 2001.)
4. Haruka KIKUCHI, Yusuke MAEDA, Masao SUGI, and Tamio ARAI:  
Automated Calibration for Assembly Device Installation Based on Plug & Produce Concept  
(I. Inasaki ed., Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium, Kluwer Academic Publishers, pp. 729–733, 2001.)
5. Yusuke MAEDA, Takayuki HARA and Tamio ARAI:  
Human-Robot Cooperative Manipulation with Motion Estimation  
(Proc. of 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2240–2245, 2001.)
6. Yusuke MAEDA, Nanako ISHIDO, Haruka KIKUCHI and Tamio ARAI:  
Teaching of Grasp/Graspless Manipulation for Industrial Robots by Human Demonstration  
(Proc. of 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1523–1528, 2002.)
7. Yusuke MAEDA, Haruka KIKUCHI, Hidemitsu IZAWA, Masao SUGI and Tamio ARAI:  
An Easily Reconfigurable Robotic Assembly System  
(Proc. of 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2003, to appear)
8. Tamio ARAI, Hidemitsu IZAWA, Yusuke MAEDA, Haruka KIKUCHI, Hiroki OGAWA

and Masao SUGI:

Real-Time Task Decomposition and Allocation for a Multi-Agent Robotic Assembly Cell

(Proc. of 5th IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning, 2003, to appear)

## 口頭発表

1. 大隅 久, 沈 于思, 新井 民夫, 前田 雄介:  
ワイヤ懸垂系における運動制御  
(第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 799–800, 1994.)
2. 大隅 久, 前田 雄介, 沈 于思, 新井 民夫:  
ZMP を安定規範として利用するワイヤ懸垂系の運動軌道の生成  
(1995 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 585–586, 1995.)
3. 大隅 久, 前田 雄介, 沈 于思, 新井 民夫:  
ZMP を安定規範として利用するワイヤ懸垂系の運動制御  
(日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '95 講演論文集, pp. 1291–1292, 1995.)
4. 前田 雄介, 沈 于思, 大隅 久, 新井 民夫:  
複数ワイヤ懸垂系における ZMP を利用した運動軌道の生成  
(第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 67–68, 1995.)
5. 前田 雄介, 高橋 篤志, 新井 民夫:  
局所的相互作用の評価に基づく協調作業の実現 - 人とマニピュレータの協調縄回し動作 -  
(日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '00 講演論文集, 2P1-76-120, 2000.)
6. 前田 雄介, 原 崇之, 高橋 篤志, 新井 民夫:  
エネルギー授受量に基づく協調縄回しの実現とその解析  
(第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1019–1020, 2000.)
7. 山本 尚史, 前田 雄介, 菊地 悠, 新井 民夫:  
非接触インピーダンスモデルに基づいた人間のけん玉の技能解析  
(2001 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 443, 2001.)
8. 原 崇之, 前田 雄介, 新井 民夫:

- 動作予測に基づく人間 ロボット協調作業  
(第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1171–1172, 2001.)
9. 菊地 悠, 前田 雄介, 杉 正夫, 新井 民夫:  
“Plug & Produce” のためのロボット間自動キャリブレーション  
(第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1065–1066, 2001.)
10. 小河 寛揮, 前田 雄介, 菊地 悠, 井澤 秀益, 新井 民夫:  
Plug & Produce 機能を備えたホロニック組立セルの構築  
(2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 226, 2002.)
11. 前田 雄介, 新井 民夫:  
容易に再構成可能なホロニック・パーツハンドリングシステム  
(平成 14 年度 IMS 研究成果講演論文集, pp. 69-72, 2002.)
12. 井澤 秀益, 前田 雄介, 菊池 悠, 小河 寛揮, 新井 民夫:  
Plug & Produce 機能を備えたホロニック組立システム 交渉によるスケジューリング機構の提案  
(日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, 1B37, 2002.)
13. 前田 雄介, 井澤 秀益, 菊池 悠, 小河 寛揮, 新井 民夫:  
柔軟に再構成可能なホロニック組立システムの開発  
(第 3 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会講演論文集, Vol. II, pp. 375–376, 2002.)
14. 前田 雄介, 井澤 秀益, 池田 優, 新井 民夫:  
マルチエージェント・アーキテクチャによる柔軟な組立ロボットセル  
(日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '03 講演論文集, 2003, 発表予定)

# 付録

---

A.1	回転を伴う接触における接触力の例 . . . . .	176
A.1.1	辺接触の例 . . . . .	176
A.1.2	面接触の例 . . . . .	179
A.2	6次元単位超球の外接超多面体近似 . . . . .	185
A.3	ヒューリスティック関数の単調性 . . . . .	187

---

## A.1 回転を伴う接触における接触力の例

2章において、面接触・線接触の接触力のモデル化について触れ、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とはならないことを述べた(2.3.4項)。ここではその実例を挙げ、回転を伴う面接触を接触面の凸包の頂点における点接触だけでモデル化するのが不適切であることを、数値例で示す。具体的には、「典型的な荷重分布」において、面接触における接触力によって対象物に作用する一般化力を求め、これを接触面の凸包の頂点のみにおける接触力の重ね合わせでは表現できないことを示す。

### A.1.1 辺接触の例

凸包の頂点での接触によるモデル化

Fig. A.1(a) のように、水平面上に線分状の物体が置かれているとする。「線分状の物体」とは、Fig. A.1(b) のような物体をモデル化したものと考えても良い。この物体の長さは  $L$ 、質量は  $M$  で、質量分布は均一である。鉛直方向には、重力とクーロン摩擦以外の外力はは

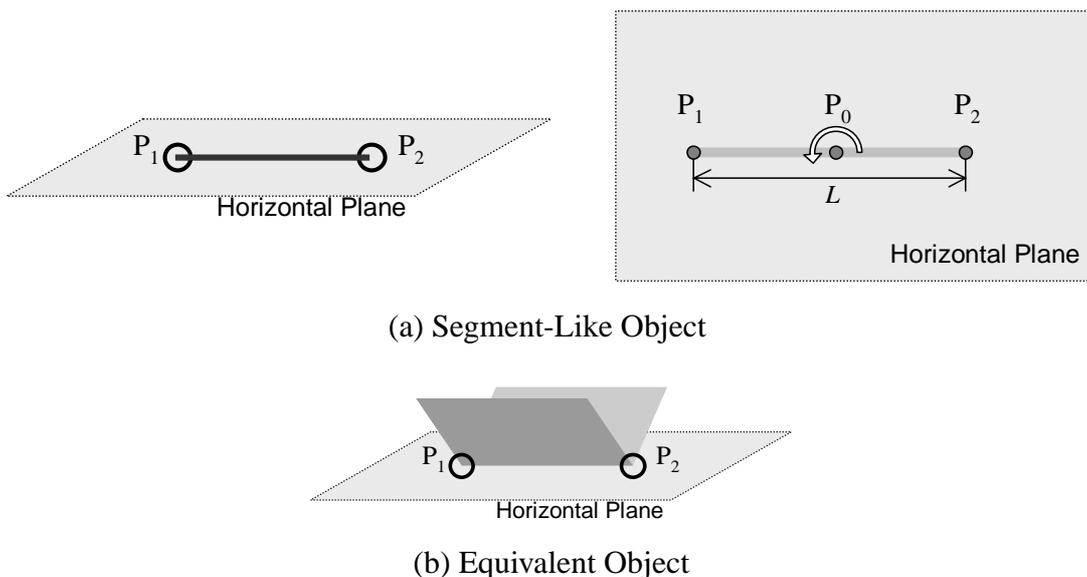


Fig. A.1: Example: A Line Contact

たっていないものとし，物体と平面の間の摩擦係数を  $\mu$  で一様，また重力加速度は  $g$  とする．

いま，この線分状の物体が，中心  $P_0$  の周りに反時計回りの準静的な等速回転運動をしているとする．典型的な荷重分布として，線分上の荷重が一様である場合を考える． $P_0$  から線分の片方の端点  $P_2$  の方向を  $x$  軸，水平面上でそれに垂直な方向を  $y$  軸，鉛直方向を  $z$  軸とすると， $x$  軸方向の接触力の合力  $F_x$  は，滑りの方向の  $x$  成分はゼロなので

$$F_x = 0$$

$y$  軸方向の接触力の合力  $F_y$  は

$$\begin{aligned} F_y &= \mu \int_{-\frac{L}{2}}^0 \frac{Mg}{L} dl + \int_0^{\frac{L}{2}} \left( -\frac{Mg}{L} \right) dl \\ &= \mu \left( \frac{Mg}{2} - \frac{Mg}{2} \right) = 0 \end{aligned}$$

$z$  軸方向の接触力の合力  $F_z$  は，重力とつりあうので

$$F_z = Mg$$

接触力による  $z$  軸まわりの合モーメント  $M_z$  は

$$\begin{aligned} M_z &= \mu \int_{-\frac{L}{2}}^0 \frac{Mg}{L} l dl + \int_0^{\frac{L}{2}} \left( -\frac{Mg}{L} l \right) dl \\ &= -\mu \left( \frac{MgL}{8} + \frac{MgL}{8} \right) = -\frac{\mu MgL}{4} \end{aligned}$$

荷重分布が一様なので，接触力による  $x$  軸， $y$  軸周りの合モーメント  $M_x, M_y$  はともに 0 である．

以上の結果から， $z$  軸周りに  $\mu MgL/4$  のモーメントを加えれば，物体を準静的に回転させることができ，そのとき接触力の合力・合モーメントが

$$[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T = \left[ 0, 0, Mg, 0, 0, -\frac{\mu MgL}{4} \right]^T \quad (\text{A.1})$$

となることがわかる．

今度は逆に，複数の点接触によって，ありうる接触力の 1 つである式 (A.1) が表現できるかを確かめる．接触辺の凸包の頂点である， $P_1, P_2$  の 2 点で接触をモデル化した場合，それ

それぞれの接触点での接触力（およびモーメント） $Q_1, Q_2$  は，

$$Q_1 = k_1 \left[ 0, \mu, 1, 0, \frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{2} \right]^T$$

$$Q_2 = k_2 \left[ 0, -\mu, 1, 0, -\frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{2} \right]^T$$

と書ける．ただし， $k_1 \geq 0, k_2 \geq 0$  である．したがって， $P_1, P_2$  の2点での接触力の合力は，

$$Q_1 + Q_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \mu(k_1 - k_2) \\ k_1 + k_2 \\ 0 \\ \frac{L(k_1 - k_2)}{2} \\ -\mu \frac{L(k_1 + k_2)}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

である．

式 (A.1) と式 (A.2) を比較すると，

$$\begin{cases} k_1 - k_2 = 0 \\ k_1 + k_2 = Mg \\ k_1 + k_2 = \frac{Mg}{2} \end{cases}$$

明らかに，この連立方程式は解を持たない．したがって， $P_1, P_2$  における接触力により対象物に作用可能な一般化力（式 (A.2)）では，面接触力における接触力により対象物に作用する一般化力（式 (A.1)）を表現できない．つまり，Fig. A.1 のような極めて簡単な場合でも，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等価とはならないことがわかる．そして，このような典型的な荷重分布における接触力でさえ表現できないため，面接触を接触面の凸包の頂点における点接触で置き換えることは不適當であると言える．

#### 回転中心での接触を加えたモデル化

一方， $P_0, P_1, P_2$  の3点で接触をモデル化することを考える． $P_0$  は，接触辺上で  $+y$  方向に滑る点と  $-y$  方向に滑る点の境界であるから，その重ね合わせだと考えて，そこでの接触力（およびモーメント） $Q_0$  は

$$Q_0 = k_{01} [0, \mu, 1, 0, 0, 0]^T + k_{02} [0, -\mu, 1, 0, 0, 0]^T$$

である．また， $P_1, P_2$  での接触力（およびモーメント） $Q_1, Q_2$  は，

$$Q_1 = k_1 \left[ 0, \mu, 1, 0, \frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{2} \right]^T$$

$$Q_2 = k_2 \left[ 0, -\mu, 1, 0, -\frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{2} \right]^T$$

と書ける．ただし， $k_{0i} \geq 0, k_1 \geq 0, k_2 \geq 0$  である．したがって， $P_0, P_1, P_2$  の3点での接触力の合力は，

$$Q_0 + Q_1 + Q_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \mu(k_{01} - k_{02} + k_1 - k_2) \\ (k_{01} + k_{02} + k_1 + k_2) \\ 0 \\ \frac{L(k_1 - k_2)}{2} \\ -\mu \frac{L(k_1 + k_2)}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

である．

式 (A.1) と式 (A.3) を比較すると，

$$\begin{cases} k_{01} - k_{02} + k_1 - k_2 = 0 \\ k_{01} + k_{02} + k_1 + k_2 = Mg \\ k_1 - k_2 = 0 \\ k_1 + k_2 = \frac{Mg}{2} \end{cases}$$

上記の方程式を解くと，

$$k_{01} = k_{02} = k_1 = k_2 = \frac{Mg}{4}$$

となり，このとき式 (A.1) と式 (A.3) が一致する．つまり，この場合，代表点として接触面の凸包の頂点に加えて回転中心での接触を追加したことによって，もとの接触力を表現することが可能になったことが分かる．言い換えれば，代表点として回転中心を追加することで，面接触のより正確なモデル化ができた，ということになる．

### A.1.2 面接触の例

凸包の頂点での接触によるモデル化

Fig. A.2 のように，水平面上に直方体が置かれており，底面（正方形）で面接触している場合を考える．この接触面の一辺の長さは  $L$ ，質量は  $M$  で，質量分布は均一である．鉛直方

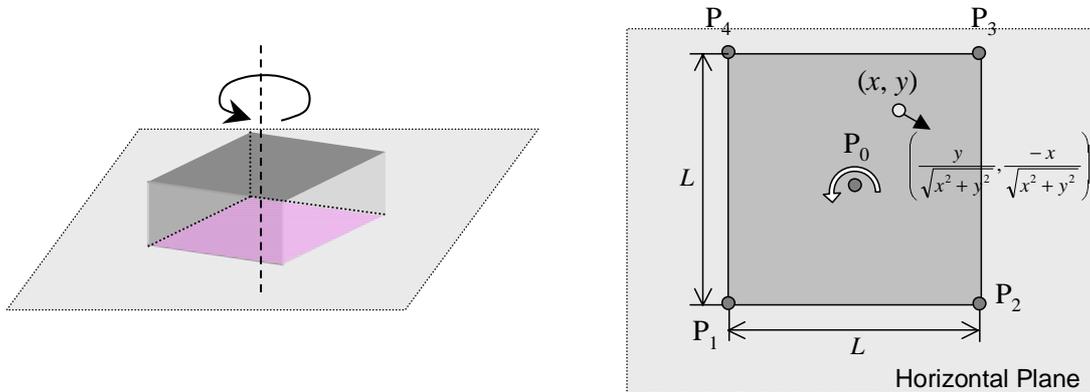


Fig. A.2: Example: A Surface Contact

向には，重力とクーロン摩擦以外の外力ははたらいっていないものとし，物体と平面の間の摩擦係数を  $\mu$  で一様，また重力加速度は  $g$  とする．

いま，この物体が，底面の図心  $P_0$  の周りに反時計回りの準静的な等速回転運動をしているとする．典型的な荷重分布として，底面での荷重が一様である場合を考える．原点を  $P_0$  とし， $P_1$  から  $P_2$  の方向を  $x$  軸， $P_1$  から  $P_4$  の方向を  $y$  軸，鉛直方向を  $z$  軸とする．

いま，点  $(x, y, 0)$  において，滑りの方向は  $(-y, x, 0)$  である．したがって，この点での接触力  $f$  は

$$\mathbf{f} = \frac{Mg dxdy}{L^2} \begin{bmatrix} \frac{\mu y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ -\mu x \\ \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ 1 \end{bmatrix}$$

と表せる．よって， $x$  軸方向の接触力の合力  $F_x$  は

$$F_x = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\mu Mg}{L^2} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} dxdy = 0$$

$y$  軸方向の接触力の合力  $F_y$  は

$$F_y = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\mu Mg}{L^2} \frac{-x}{\sqrt{x^2 + y^2}} dxdy = 0$$

$z$  軸方向の接触力の合力  $F_z$  は，重力とつりあうので

$$F_z = Mg$$

接触力による  $z$  軸まわりの合モーメント  $M_z$  は

$$\begin{aligned} M_z &= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\mu Mg}{L^2} (-\sqrt{x^2 + y^2}) dx dy \\ &= -\frac{2\sqrt{2} + \log(3 + 2\sqrt{2})}{12} \mu MgL \\ &(\approx -0.38 \mu MgL) \end{aligned}$$

荷重分布が一様なので、接触力による  $x$  軸、 $y$  軸周りの合モーメント  $M_x, M_y$  はともに 0 である。

以上の結果から、 $z$  軸周りに  $\frac{2\sqrt{2} + \log(3 + 2\sqrt{2})}{12} \mu MgL$  のモーメントを加えることにより、物体を準静的に回転させることができ、このとき接触力の合力・合モーメントが

$$[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T = \left[ 0, 0, Mg, 0, 0, -\frac{2\sqrt{2} + \log(3 + 2\sqrt{2})}{12} \mu MgL \right]^T \quad (\text{A.4})$$

となることがわかる。

今度は逆に、複数の点接触によって、ありうる接触力の 1 つである式 (A.4) が表現できるかを確かめる。接触辺の凸包の頂点である、 $P_1, \dots, P_4$  の 4 点で接触をモデル化した場合、それぞれの接触点での接触力（およびモーメント） $Q_1, \dots, Q_4$  は、

$$\begin{aligned} Q_1 &= k_1 \left[ -\frac{\mu}{\sqrt{2}}, \frac{\mu}{\sqrt{2}}, 1, -\frac{L}{2}, \frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{\sqrt{2}} \right]^T \\ Q_2 &= k_2 \left[ -\frac{\mu}{\sqrt{2}}, -\frac{\mu}{\sqrt{2}}, 1, -\frac{L}{2}, -\frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{\sqrt{2}} \right]^T \\ Q_3 &= k_3 \left[ \frac{\mu}{\sqrt{2}}, -\frac{\mu}{\sqrt{2}}, 1, \frac{L}{2}, -\frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{\sqrt{2}} \right]^T \\ Q_4 &= k_4 \left[ \frac{\mu}{\sqrt{2}}, \frac{\mu}{\sqrt{2}}, 1, \frac{L}{2}, \frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{\sqrt{2}} \right]^T \end{aligned}$$

と書ける。ただし、 $k_1, \dots, k_4 \geq 0$  である。したがって、 $P_1, \dots, P_4$  の 4 点での接触力の合

力は,

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = \begin{bmatrix} \mu \frac{-k_1 - k_2 + k_3 + k_4}{\sqrt{2}} \\ \mu \frac{k_1 - k_2 - k_3 + k_4}{\sqrt{2}} \\ L \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}{-k_1 - k_2 + k_3 + k_4} \\ L \frac{k_1 - k_2 - k_3 + k_4}{2} \\ -\mu L \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

である.

式 (A.4) と式 (A.5) を比較すると,

$$\begin{cases} -k_1 - k_2 + k_3 + k_4 = 0 \\ k_1 - k_2 - k_3 + k_4 = 0 \\ k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = Mg \\ \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2} + \log(3 + 2\sqrt{2})}{12} Mg \end{cases}$$

明らかに, この連立方程式は解を持たない. したがって,  $P_1, \dots, P_4$  における接触力により対象物に作用可能な一般化力 (式 (A.5)) では, 面接触力における接触力により対象物に作用する一般化力 (式 (A.4)) を表現できない. つまり, Fig. A.2 のような極めて簡単な場合でも, 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とはならないことがわかる. そして, このような典型的な荷重分布における接触力でさえ表現できないため, 面接触を接触面の凸包の頂点における点接触で置き換えることは不適當であると言える.

#### 回転中心での接触を加えたモデル化

一方,  $P_0, \dots, P_4$  の 5 点で接触をモデル化することを考える.  $P_0$  は回転中心なので, 滑りの方向が不連続に変わる点である (Fig. A.3). 回転中心からわずかにずれた点では, 任意の方向の滑りが存在することを考えると,  $P_0$  における接触力は, 任意の方向へ滑っている点での接触力の重ね合わせだと見ることができ, したがって  $P_0$  は静止している接触点と等価だと見なすことができる. よって,  $P_0$  での摩擦円錐をそれに内接する正四角錐で近似す

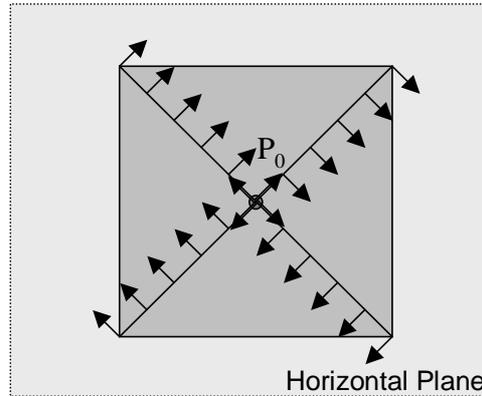


Fig. A.3: Directions of Frictional Forces

ると、そこでの接触力（およびモーメント） $Q_0$  は

$$Q_0 = k_{01} [\mu, 0, 1, 0, 0, 0]^T + k_{02} [-\mu, 0, 1, 0, 0, 0]^T \\ + k_{03} [0, \mu, 1, 0, 0, 0]^T + k_{04} [0, -\mu, 1, 0, 0, 0]^T$$

である。また、 $P_1, \dots, P_4$  での接触力（およびモーメント） $Q_1, \dots, Q_4$  は、

$$Q_1 = k_1 \left[ -\frac{\mu}{\sqrt{2}}, \frac{\mu}{\sqrt{2}}, 1, -\frac{L}{2}, \frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{\sqrt{2}} \right]^T \\ Q_2 = k_2 \left[ -\frac{\mu}{\sqrt{2}}, -\frac{\mu}{\sqrt{2}}, 1, -\frac{L}{2}, -\frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{\sqrt{2}} \right]^T \\ Q_3 = k_3 \left[ \frac{\mu}{\sqrt{2}}, -\frac{\mu}{\sqrt{2}}, 1, \frac{L}{2}, -\frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{\sqrt{2}} \right]^T \\ Q_4 = k_4 \left[ \frac{\mu}{\sqrt{2}}, \frac{\mu}{\sqrt{2}}, 1, \frac{L}{2}, \frac{L}{2}, -\mu \frac{L}{\sqrt{2}} \right]^T$$

と書ける．ただし， $k_{0i} \geq 0, k_1 \geq 0, k_2 \geq 0$  である．したがって， $P_0, \dots, P_4$  の 5 点での接触力の合力は，

$$Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = \begin{bmatrix} \mu \left( k_{01} - k_{02} + \frac{-k_1 - k_2 + k_3 + k_4}{\sqrt{2}} \right) \\ \mu \left( k_{03} - k_{04} + \frac{k_1 - k_2 - k_3 + k_4}{\sqrt{2}} \right) \\ k_{01} + k_{02} + k_{03} + k_{04} + k_1 + k_2 + k_3 + k_4 \\ L \frac{-k_1 - k_2 + k_3 + k_4}{2} \\ L \frac{k_1 - k_2 - k_3 + k_4}{2} \\ -\mu L \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

である．

式 (A.4) と式 (A.6) を比較すると，

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{01} - k_{02} + \frac{-k_1 - k_2 + k_3 + k_4}{\sqrt{2}} = 0 \\ k_{03} - k_{04} + \frac{k_1 - k_2 - k_3 + k_4}{\sqrt{2}} = 0 \\ k_{01} + k_{02} + k_{03} + k_{04} + k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = Mg \\ -k_1 - k_2 + k_3 + k_4 = 0 \\ k_1 - k_2 - k_3 + k_4 = 0 \\ \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2} + \log(3 + 2\sqrt{2})}{12} Mg \end{array} \right.$$

上記の方程式は不定だが，例えば

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{01} = k_{02} = k_{03} = k_{04} = \frac{8 - \sqrt{2} \log(3 + 2\sqrt{2})}{48} Mg \approx 0.115Mg \\ k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = \frac{4 + \sqrt{2} \log(3 + 2\sqrt{2})}{48} Mg \approx 0.135Mg \end{array} \right.$$

とすれば，式 (A.4) と式 (A.6) を一致させることができる．つまり，この場合，代表点として接触面の凸包の頂点に加えて回転中心での接触を追加したことによって，もとの接触力を表現することが可能になったことが分かる．言い換えれば，代表点として回転中心を追加することで，面接触のより正確なモデル化ができた，ということになる．

## A.2 6次元単位超球の外接超多面体近似

3章において，操作の确实性の評価指標を近似的に求めるために，6次元単位超球を，それに外接する超多面体で近似する手法を示した．そして，この超多面体の頂点として，数値例(3.6節)では以下の76点をとった ( $N_{\text{vert}} = 76$ ) ．

$$l_i = \begin{cases} k[\pm 1, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\ k[0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T \\ k[0, 0, \pm 1, 0, 0, 0]^T \\ k[0, 0, 0, \pm 1, 0, 0]^T \\ k[0, 0, 0, 0, \pm 1, 0]^T \\ k[0, 0, 0, 0, 0, \pm 1]^T \\ k\left[\pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}\right]^T \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

ここでは  $k = 2\sqrt{3 - \sqrt{6}} (\approx 1.48)$  とすれば， $l_1, \dots, l_{76}$  が外接超多面体となることを示す．

まず，以下の76点を頂点とする，6次元単位超球に内接する超多面体を考える．

$$\begin{cases} [\pm 1, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\ [0, \pm 1, 0, 0, 0, 0]^T \\ [0, 0, \pm 1, 0, 0, 0]^T \\ [0, 0, 0, \pm 1, 0, 0]^T \\ [0, 0, 0, 0, \pm 1, 0]^T \\ [0, 0, 0, 0, 0, \pm 1]^T \\ \left[\pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}, \pm \frac{1}{\sqrt{6}}\right]^T \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

これを全体に  $k$  倍に拡大することによって，外接超多面体を作る．上記の内接超多面体の表面上の点で，もっとも原点から近い点は，例えば下記の6頂点

$$\begin{cases} [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\ [0, 1, 0, 0, 0, 0]^T \\ \left[\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}\right]^T \\ \left[\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}\right]^T \\ \left[\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}\right]^T \\ \left[\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}\right]^T \end{cases}$$

から構成される超平面上に位置し，この場合は

$$\frac{\sqrt{6}}{24} [2 + \sqrt{6}, 2 + \sqrt{6}, 1, 1, 1, 1]^T$$

がその点となる．その原点からの距離は  $1/2\sqrt{3 - \sqrt{6}}$  ( $\approx 0.674$ ) である．

したがって，この内接超多面体を全体に  $2\sqrt{3 - \sqrt{6}}$  ( $\approx 1.48$ ) 倍することによって，6次元超球に外接する超多面体をつくることができる．つまり， $k = 2\sqrt{3 - \sqrt{6}}$  とすればよい．

なお，式 (A.8) を頂点とする超多面体は，例えば下記の頂点

$$\left\{ \begin{array}{l} [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\ \left[ \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}} \right]^T \\ \left[ \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}} \right]^T \\ \left[ \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}} \right]^T \\ \left[ \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}} \right]^T \\ \left[ \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}} \right]^T \end{array} \right.$$

から構成される，原点からの距離  $3/\sqrt{44 - 10\sqrt{6}}$  ( $\approx 0.679$ ) の面も持っている．つまり，ここで求めた外接超多面体は，最適なものよりわずかに大きめになっている．

### A.3 ヒューリスティック関数の単調性

6章において、マニピュレーション計画を  $A^*$  探索で実現するにあたり、ヒューリスティック関数を提案した (6.6.2 項)。ここではそのヒューリスティック関数の単調性を証明する。

隣接するノード  $n, n'$  をつなぐアークに割り当てられるコストは

$$c(n, n') = \begin{cases} \max_i \sum_{j=1}^P \left(1 + \frac{X_{\text{stab}}}{z_j}\right) \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i, j}\| & \text{(対象物変位に対応するアークの場合)} \\ X_{\text{regr}} & \text{(持ち替えに対応するアークの場合)} \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

であった。それに対して、ノード  $n$  に関するヒューリスティック関数は

$$h(n) = \begin{cases} \max_i \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i}^*(n)\| & \left( \begin{array}{l} \text{現在の指配置で目標位置に到達} \\ \text{しても指が環境と干渉しない場合} \end{array} \right) \\ n_{\text{viol}} X_{\text{regr}} & \left( \begin{array}{l} \text{現在の指配置で目標位置に到達} \\ \text{すると指が環境と必ず干渉する場合} \end{array} \right) \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

と定義されている。ここで、以下の関係が成り立つことを証明すればよい。

$$h(n) \leq c(n, n') + h(n') \text{ for } \forall n, n' | n' \in \text{successor}(n) \quad (\text{A.11})$$

証明. まず、 $h(n) = n_{\text{viol}} X_{\text{regr}}$  の場合 (現在の指配置で目標位置に到達すると指が環境と必ず干渉する場合) を考える。このとき、次のノード  $n'$  として持ち替えを行わないで到達できるノードを選んだとすると、 $n'$  でも指配置が変わっていないので、そのまま目標位置に到達した場合には、依然として同じ数の指が環境と必ず干渉する。したがって、

$$h(n') = n_{\text{viol}} X_{\text{regr}} (= h(n))$$

である。  $c(n, n') \geq 0$  だから、明らかに  $h(n) \leq c(n, n') + h(n')$  である。

一方、次のノード  $n'$  として持ち替えによって到達できるノードを選んだ場合、 $c(n, n') = X_{\text{regr}}$  である。このとき、目標位置で環境と干渉する指が1本減る可能性があるので、

$$h(n') \geq (n_{\text{viol}} - 1) X_{\text{regr}}$$

である。よって、この場合も  $h(n) = X_{\text{regr}} \leq c(n, n') + h(n')$  が成り立つ。

次に、 $h(n) = \max_i \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i}^*(n)\|$  の場合 (現在の指配置で目標位置に到達しても指が環境と干渉しない場合) を考える。次のノード  $n'$  として持ち替えを行わないで到達できるノードを選んだとすると、

$$c(n, n') + h(n') = \max_i \sum_{j=1}^P \left(1 + \frac{X_{\text{stab}}}{z_j}\right) \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i, j}\| + \max_i \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i}^*(n')\|$$

である。いま,

$$\max_i \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i}^*(n)\| \leq \max_i \sum_{j=1}^P \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i, j}\| + \max_i \|\Delta \mathbf{q}_{\text{finger } i}^*(n')\|$$

であり, また  $X_{\text{stab}}/z_j > 0$  であることから,  $h(n) < c(n, n') + h(n')$  である。

一方, 次のノード  $n'$  として持ち替えによって到達できるノードを選んだ場合,  $c(n, n') = X_{\text{regr}}$  となる。  $X_{\text{regr}}$  は十分大きい数をとるので,

$$h(n) \ll c(n, n') + h(n')$$

が成り立つ。

以上より, すべての場合において

$$h(n) \leq c(n, n') + h(n') \text{ for } \forall n, n' | n' \in \text{successor}(n)$$

が成り立つ。

□