

—修士学位論文—

転がり接触を伴う対象物の操りのための短時間  
指先力決定

A Short Time Determination Method of Fingertip  
Force for Object Manipulation with Rolling Contact



平成 19 年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 電気電子工学専攻

小堀 裕一郎

# 目次

第 1 章 緒言 .....	1
1.1 研究の背景と目的.....	1
1.2 論文の構成.....	2
第 2 章 把持・操りの基礎 .....	3
2.1 指先力.....	3
2.2 操り力と把持力.....	4
2.3 摩擦条件.....	5
第 3 章 最適指先力の導出 .....	9
3.1 把持対象物操作のための最適指先力.....	9
3.2 把持力の表現.....	9
3.3 短時間での最適指先力決定.....	11
3.3.1 評価関数と勾配法.....	11
3.3.2 数値例.....	13
第 4 章 切り替えシステム .....	16
4.1 実際の制御への適用のための切り替えシステム.....	16
4.2 指先力が摩擦円錐を外れた場合の把持力方向.....	18
4.3 過大な指先力を導出しないための把持力方向.....	19
4.3.1 把持可能領域.....	19
4.3.2 補助ループによる把持力方向の更新.....	20
4.3.3 把持力絶対値の導出.....	21
4.4 提案システム.....	25
第 5 章 シミュレーション .....	27
5.1 正六角形の把持.....	27
5.2 長方形の把持.....	29
5.3 把持可能領域が狭い場合でのシミュレーション.....	31
第 6 章 結言 .....	36
付録 .....	37
A 把持力方向と最適指先力.....	37
参考文献 .....	39
論文目録 .....	41
謝辞 .....	42

# 第1章 緒言

## 1.1 研究の背景と目的

近年、産業界だけではなく福祉や医療、さらには家庭環境といった様々な分野においてロボットが身近な存在となり、その各分野において人間に代わって作業をするロボットの活躍が期待されている。その実現に向けて要となるのが、人間の指先のように複雑で多様な操りを行うことができる多指ロボットハンドの存在である。産業界においては多品種少量生産を行うロボットのエンドエフェクタとして活躍し、オートメーション化によるさらなる効率化が期待でき、また、少子高齢化社会においては、人間の生活空間の中で家事や介助など、身の回りの世話をしてくれるロボットへの適用が期待できる。しかし、多指ロボットハンドでは実用範囲で対象物を操ることができないのが現状である。

この問題を複雑なものとする原因の一つに転がり接触というものが挙げられる[1]。これは、ロボットハンドの指先形状を半球状とすることで人間のように器用な操りが期待できる反面、対象物操作を行ったときに、指先が対象物上を転がりながら接触するために指先の接触点位置が変化するため、望みの操りを行うことが困難になるといったものである。この転がり接触を考慮した対象物の操りについて取り組まれてきた研究[2], [3]では、転がり接触により生じる指先位置の微小変化に対する、接触点位置の微小移動量を線形近似により導出し、それらの関係から位置制御ベースによる把持対象物の操りを実現している。しかしこの手法では、指先が対象物に対して発生する力である指先力を陽に指定することができないため、対象物に対して過大な力を加えてしまい、把持対象物の変形や破壊を招く可能性が大きくなる。逆に、指先力が過小であると対象物を安定に把持することができず、落下させてしまうことも考えられる。すなわち、対象物の操りには適切な指先力を決定することが求められる。

ここで適切な指先力とは、指先と対象物の間に滑りを生じさせないための摩擦条件や、対象物に加えられる指先力と対象物に加わる力との関係を表した平衡条件、さらには対象物に加えられる力は小さいほうが望ましいといった指先力の制約など、これらの条件を満たした

指先力のことを指す。適切な指先力を求める際には一般的に[4]で示されているように、非線形条件付きの最適化問題を解かなくてはならない。また、[5]、[6]ではこれらの条件を解析・定式化することでLMIを用いた最適指先力の導出法を提案しているが、この手法による指先力の導出にはある程度の時間が必要であり、転がり接触を伴う実際の制御においては制御周期ごとに検出される把持配置に応じて最適な指先力を導出しなければならないため、リアルタイムで把持対象物の操りを実現することは困難であると考えられる。

そこで本稿では、望みの対象物操作を行うために与えられた対象物操作力指令に対して、対象物を落下させることなく、さらにより小さな指先力を制御周期ごとに導出する手法を提案する。また、実際の制御において考えられる、対象物操作力指令の変化や外乱による急変、さらに各種センサノイズの影響に対しても適切な指先力を導出するシステムを構築する。それによって、転がり接触を伴う対象物の操りに対して適切な指先力指令の導出を行うことを目的とする。

その実現のために、指先力の冗長成分である把持力の表現法に着目し、制御周期ごとの更新を行うために勾配法を用いて最適指先力の導出を行う。また、転がり接触によって変化する接触点位置や摩擦条件などの動的な変動および外乱やノイズに対しては、把持力決定に関する切り替えを行うことで適切な指先力の導出を行う。構築したシステムを用いて、実際の操り制御を模擬したシミュレーションを行うことにより本提案手法の有効性を確認する。

## 1.2 論文の構成

以下に本論文の構成を示す。

2章では、多指ロボットハンドの基礎論として指先力の概念および、その指先力を構成する操り力と把持力について示す。また、把持の安定性を議論する上で重要となる、指先と対象物との間の摩擦条件についても示す。合わせて転がり接触による影響を述べる。

3章では、提案する把持対象物の操りのための最適指先力導出方法について述べ、数値例を用いてその有効性を確認する。

4章では、転がり接触による動的な変化や、実際の操り制御に適用する上で考慮しなければならない外乱およびセンサノイズの影響に対して、新たな把持力の決定を行う切り替えシステムを付加した構成について示す。

5章において、転がり接触を伴う実際の操り制御を模擬したシミュレーションを行うことによって本提案手法の有効性を示す。

付録では、今後の課題に対する調査結果を示す。

## 第2章 把持・操りの基礎

### 2.1 指先力

対象物を望み通りに操るためには、外部から対象物へ力とモーメントを与えなくてはならない。それを実現するための力が各指先の発生する指先力である[7]。指先力を  $\mathbf{f}$ 、対象物に加わる合力・合モーメントを  $\mathbf{t}$  とすると、これらの間には以下の関係式が成立する。

$$\mathbf{t} = \mathbf{G}\mathbf{f} \quad (2.1)$$

式(2.1)について、指の数を  $n$  本とすると、指先力  $\mathbf{f}$ 、合力・合モーメント  $\mathbf{t}$  はそれぞれ

$$\mathbf{f} = [\mathbf{f}_1^T \quad \mathbf{f}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{f}_n^T]^T \quad (2.2)$$

$$\mathbf{t} = [F_{ox} \quad F_{oy} \quad F_{oz} \quad m_{ox} \quad m_{oy} \quad m_{oz}]^T \quad (2.3)$$

となる。またこのとき、 $\mathbf{G}$  は把持行列と呼ばれ、

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 & \dots & \mathbf{I}_3 & \dots & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 & \dots & \mathbf{R}_i & \dots & \mathbf{R}_n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

で与えられる。式(2.4)中の  $\mathbf{I}_3$  は三次元単位行列である。また、 $\mathbf{R}_i$  は歪対称行列であり、式(2.5)となる。

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 0 & -r_{iz} & r_{iy} \\ r_{iz} & 0 & -r_{ix} \\ -r_{iy} & r_{ix} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

式(2.5)中の  $r_{ix}$  ,  $r_{iy}$  ,  $r_{iz}$  は, 図 2.1 に示す対象物座標系での, 把持対象物の重心位置から finger  $i$  での接触点に向かう接触点位置ベクトル  $r_i$  の各成分であり,

$$r_i = [r_{ix} \quad r_{iy} \quad r_{iz}]^T \quad (2.6)$$

となる.

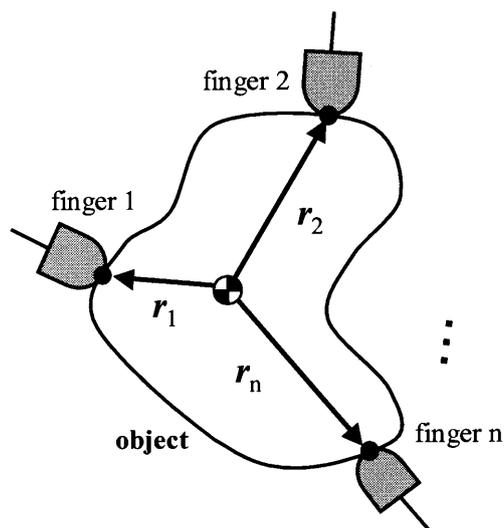


図 2.1 接触点位置ベクトル

## 2.2 操り力と把持力

各指先が発生する指先力  $f$  は, 操り力と把持力により構成される. 式(2.1)より  $f$  を 1 つ指定すると  $t$  が一意に決定されるが,  $f$  の次元数は一般的に  $t$  の次元数よりも大きいため, 逆に  $t$  を一つ指定しても  $f$  は一意に決定されない. その冗長性を表すのが把持力と呼ばれるものである.

式(2.1)の  $f$  に関する一般解を求めると式(2.7)となる.

$$\mathbf{f} = \mathbf{G}^+ \mathbf{t} + [\mathbf{I} - \mathbf{G}^+ \mathbf{G}] \mathbf{k} \quad (2.7)$$

ただし、 $\mathbf{G}^+$ は行列 $\mathbf{G}$ の擬似逆行列であり、 $\mathbf{k}$ は任意の定数ベクトルである。式(2.7)において右辺第1項は把持対象物を運動させるための力である操り力を表し、対象物操作に必要な指先力ノルムを最小にする特殊解である。第2項は対象物の運動には影響を与えない、対象物を把持するための力である把持力を表す。ここで、第2項は任意性を表す項であり、この任意性を利用して指先が対象物表面上を滑らないなどの制約を満たしたり、何らかの意味で最適となる指先力を決定することができる。各指先が発生する操り力、把持力をそれぞれ $\mathbf{f}_m$ 、 $\mathbf{f}_g$ とすると

$$\mathbf{f}_m = \mathbf{G}^+ \mathbf{t} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{G} \mathbf{f}_g = \mathbf{0} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_m + \mathbf{f}_g \quad (2.10)$$

が成立する。このとき式(2.9)は、対象物に働く把持力の合力・合モーメントが0となることを表し、これを平衡条件という。

各指の指先力 $\mathbf{f}$ が把持力 $\mathbf{f}_g$ であるとき、すなわち対象物に対して操作力指令 $\mathbf{t}$ が与えられていないとき、対象物は静止しているため対象物と指先との間に転がり接触は生じない。一方対象物に対して操作力指令 $\mathbf{t}$ が与えられたとき、そのときの接触点位置における把持行列 $\mathbf{G}$ より各指先に操り力指令 $\mathbf{f}_m$ が与えられ、対象物の操りを実現できる力が発生できるとともに、そのときの指先姿勢によって転がり接触が生じる。したがって、操作力指令 $\mathbf{t}$ が転がり接触の生じる一つの原因となることがわかる。また、転がり接触によって各指先の接触点位置は変化するので、一定の操作力指令 $\mathbf{t}$ が対象物に対して与えられている状態であっても、求められる把持行列 $\mathbf{G}$ が変化するため各指先に与えられる操り力指令 $\mathbf{f}_m$ は変化することがわかる。以上のように、転がり接触が生じる状況下では、式(2.10)によって求められる指先力がそれに伴って変化してしまう。さらに、このように変化する指先力 $\mathbf{f}$ は以下に説明する摩擦条件を満たさなければならない。

## 2.3 摩擦条件

指先と対象物との接触は摩擦によってのみ維持されるので、滑りを発生させずに把持・操りを行うためには、指先が接触点において摩擦条件を満たす必要がある。

図 2.2 に示すように,  $i$  番目( $=1,2,\dots,n$ )の指先が対象物に対して指先力  $f_i$  を発生させている状況を考える. 指先力  $f_i$  を対象物表面の法線方向成分  $f_{ni}$  と接線方向成分  $f_{ti}$  に分解すると,  $f_{ni}$  の大きさに対する  $f_{ti}$  の大きさの比が, 最大静止摩擦係数  $\mu_i$  以下でなくてはならないことから,

$$\frac{f_{ti}}{f_{ni}} \leq \mu_i \quad (2.11)$$

と表すことができる.

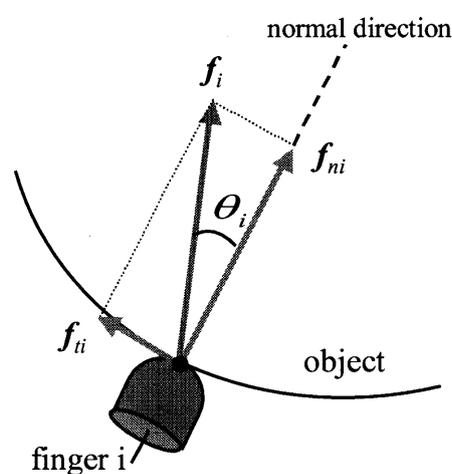


図 2.2 指先力の分解

一方,  $i$  番目( $=1,2,\dots,n$ )の接触点における内向き単位法線ベクトル  $n_i = [n_{ix} \ n_{iy} \ n_{iz}]^T$  と指先力  $f_i$  との内積は

$$\frac{n_i^T f_i}{\sqrt{f_i^T f_i}} = \cos \theta_i \quad (2.12)$$

と表すことができる. ただし  $\theta_i$  は内向き単位法線ベクトル  $n_i$  と指先力ベクトル  $f_i$  とのなす角である (図 2.3). また, 最大静止摩擦係数  $\mu_i$  が与えられたとき, 摩擦角  $\alpha_i$  を次のように定義することができる.

$$\alpha_i = \tan^{-1} \mu_i \quad (2.13)$$

ここで摩擦角 $\alpha_i$ を用いると、接触点を頂点とし、接触点における法線方向を中心軸とした一つの円錐を描くことができる。これをここでは摩擦円錐と呼ぶ(図 2.3)。式(2.12),(2.13)から、この摩擦円錐内に接触点位置を始点とする指先力ベクトルの終点が存在するとき摩擦条件は満たされる。ただし、実際の制御において最大静止摩擦係数の不確かさや変動に対応するためには、最大静止摩擦係数の推定値に対して、ある程度の安全率を見込んだ値を最大静止摩擦係数とみなし、摩擦条件を定義すればよい。以後、本研究で用いる最大静止摩擦係数 $\mu_i$ はこの安全率を見込んだ値であるとする。

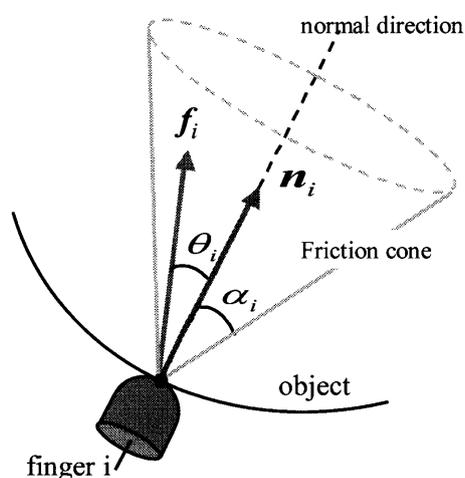


図 2.3 摩擦円錐

また、 $i$  番目の接触点における摩擦角 $\alpha_i$ の余弦は以下のように表すことができる。

$$\cos \alpha_i = \left( \frac{1}{1 + \tan^2 \alpha_i} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_i^2}} \quad (2.14)$$

よって、摩擦条件を満たすためには図 2.3 の関係から

$$\cos \alpha_i \leq \cos \theta_i \quad (2.15)$$

を満たさなくてはならない。したがって式(2.12), (2.14), (2.15)より摩擦条件は

$$\frac{\mathbf{n}_i^T \mathbf{f}_i}{\sqrt{\mathbf{f}_i^T \mathbf{f}_i}} \geq \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_i^2}} \quad (2.16)$$

と書き換えることができ、指先力の表現を法線方向成分と接線方向成分に変更する必要がないことがいえる。なお、本節で述べた摩擦条件は対象物の面に対して指先を配置し、把持を行った場合に適用できる条件である。例えば面と面の角を持つ対象物において、その角を把持するような場合、接触法線方向ベクトル  $\mathbf{n}_i$  を定義することができないためにまた別の考え方が必要となる。しかし本稿では、転がり接触を行う中で各指先が対象物の角に達したときは把持配置を変更するというを前提とし、常に接触法線方向ベクトル  $\mathbf{n}_i$  を定義できる状況とする。

以上のように、各指での指先力は各接触点において式(2.16)を満たす必要がある。すなわち、転がり接触によって接触点位置が変化した場合、その接触点における摩擦条件が定義される。2.2でも述べたように、転がり接触によって接触点位置が変化した場合、導出される操り力指令の変化から生成される指先力も変化するが、さらにその接触点位置における摩擦条件も考慮しなければならないため、その都度最適な指先力を決定しなければならない。これは対象物操作を実現する指先力の中で任意性を表す把持力を適切に決定することが必要となるのだが、把持配置決定などに用いられる最適化問題を解いて導出を行う方法では[4]、このような転がり接触による動的な変化に対応することができない。そこで、接触点位置や摩擦条件の動的な変化に対応して十分短時間でさらに適切な指先力を導出する手法が必要となる。

それを実現する本提案手法を次章から述べる。

## 第3章 最適指先力の導出

### 3.1 把持対象物操作のための最適指先力

最適指先力を求める際には、一般的に把持配置決定に用いられているように非線形条件付きの最適化問題を解くことにより求められるが、制御ステップ毎に非線形計画問題を解き最適解を導出することは困難であると考えられる。ここで、把持対象物に加えられる各指先力は対象物を操るための力である操り力と、対象物の運動に影響を与えない力である把持力からなることは第2章ですでに述べた。さらに、そのうちの把持力が対象物操作に必要な指先力のうちで任意性を表すものとなっていることから、把持力を適切に設定することで指先力を最適化できると考えられる。そこで本研究では把持力の表現法に着目し、勾配法を用いることで制御周期ごとに最適な指先力を更新することを考える。このとき、本研究では最適指先力を以下のように定義する。

(定義 i) 指先力ノルムが最小となる。

(定義 ii) 各指先力が摩擦条件を満たす。

(定義 i) は、対象物に加えられる指先力の大きさを最小にすることで、対象物の変形や破壊の可能性を最小にすることを意味する。また、(定義 ii) は対象物操作中に更新・導出される指先力が摩擦条件を満たし、把持対象物を落下させず、安定な操作を実現する指先力のことを意味する。本章では、連続的に変化する、望みの軌道を実現するため対象物に与えられる操作力指令  $\boldsymbol{t}$  に対して、(定義 i・ii) のように定義された最適指先力の短時間決定法を示す。なお、本稿での議論は三次元空間、三本指ハンドでの対象物操作を例に行う。

### 3.2 把持力の表現

対象物操作を実現する指先力のうちで任意性を表す把持力について、その表現法と性質に

ついて述べる[7][8]. 図 3.1 に示すように, 三次元空間, 三本指ハンドで対象物を静止把持している状態を考える. このとき, ある接触点から他の接触点へ向かう単位ベクトル  $e_{ij}$  ( $i=1,2,3, j=1,2,3, i \neq j$ ) を設定する. ただし,  $e_{ij} = -e_{ji}$  である. 式(2.9)に示すように, 把持力  $f_g$  の合力・合モーメントは 0 であり, 対象物操作に影響をしない力であることから, それぞれ逆方向で向かい合う単位ベクトル  $e_{ij}$  にかかる係数  $k$  を用いて, 把持力  $f_g$  を式(3.1)のように表現することができる.

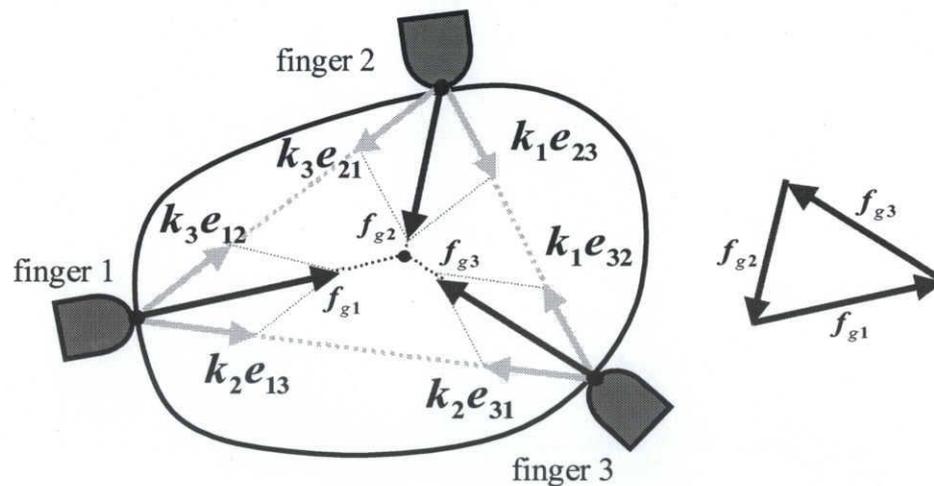


図 3.1 三本指ハンドにおける把持力の表現

$$f_g = [I - G^+G]k = \begin{bmatrix} 0 & e_{13} & e_{12} \\ e_{23} & 0 & e_{21} \\ e_{32} & e_{31} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

すなわち把持力は各一对の指先間での圧縮力または引っ張り力の 3 自由度で表現される. また, このように表現される把持力の性質として, 把持力は各指先の接触点を通る把持平面上に存在し, その作用線が一点 (把持力焦点と呼ばれる) で交わるか, すべて平行である (無限遠点で交わると解釈できる) ことが示せる. また, この把持力焦点の存在領域は, 対象物形状と各接触点位置によって決定される[9]. さらに, 対象物を把持するためには各指の摩擦円錐の共通領域を考慮しなければならないが, このような把持可能領域については第 4 章の 4.3 節で述べることとし, ここでは把持対象物形状とそのときの接触点位置による把持力の表現と, 把持力焦点位置の例を図 3.2 に示す.

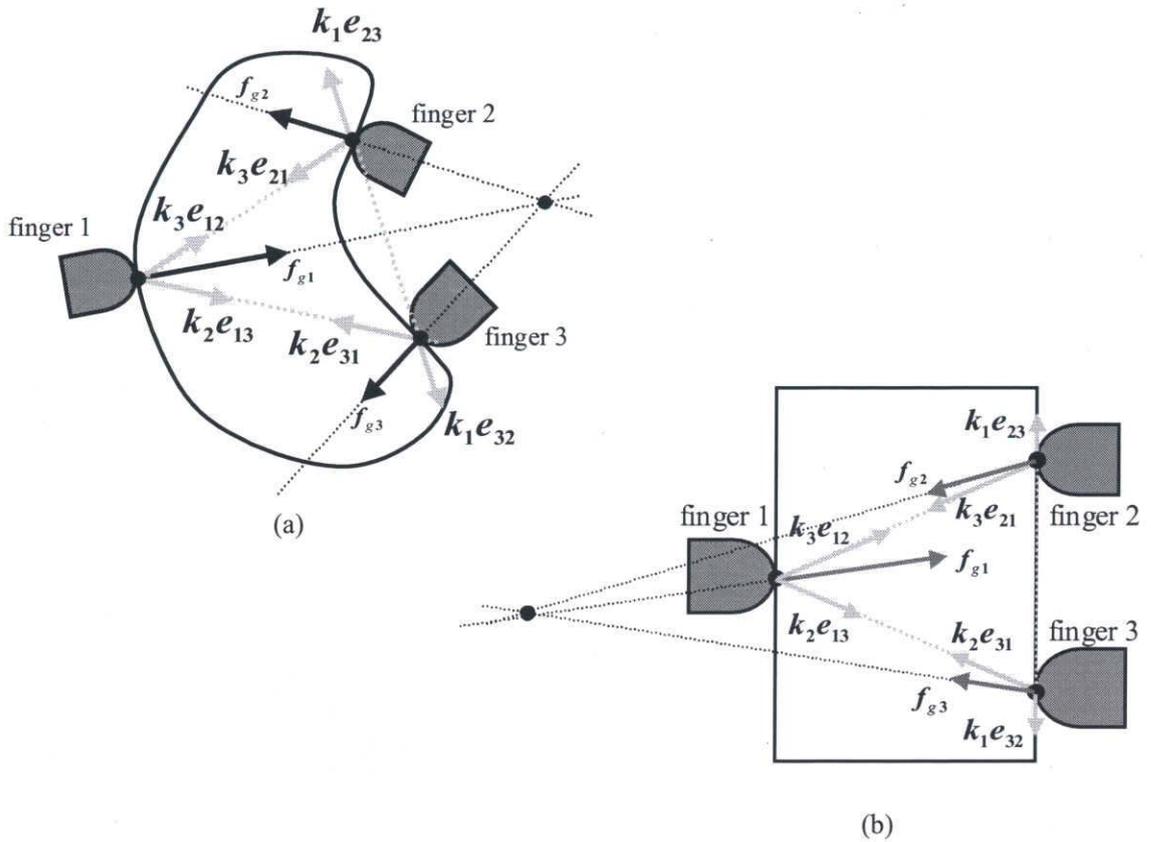


図 3.2  $k$  の押し引きの組み合わせと把持力焦点位置

図 3.1, 3.2 より, 把持力焦点の位置はその対象物形状および接触点位置によって変化し, その把持力焦点位置によって式(3.1)の係数  $k$  は正や負となることがわかる. 以上のことから,  $k$  をどのように与えても把持力の合力・合モーメントは 0 となることを満たすので,  $k$  をパラメータとして更新を行えば最適な指先力の導出が可能であると考えられる. 本研究では制御周期ごとに指先力の更新を行うことを目的としていることから, 勾配法を用いた手法を提案する.

### 3.3 短時間での最適指先力決定

#### 3.3.1 評価関数と勾配法

提案する評価関数を式(3.2)のように設定する.

$$W = \|\mathbf{f}\| - w_a \cdot \sum_{i=1}^3 \log(\cos \theta_i - \cos \alpha_i) \quad (3.2)$$

上式の第一項は、次式(3.3)で表される指先力のノルムを表している。また、指先力  $f$  は式(2.8), (2.10), (3.1)から式(3.4)によって求められる。

$$\|f\| = \left( \|f_1\|^2 + \|f_2\|^2 + \|f_3\|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

$$f = G^+ t + \begin{bmatrix} 0 & e_{13} & e_{12} \\ e_{23} & 0 & e_{21} \\ e_{32} & e_{31} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

式(3.2)の第二項は指先力の摩擦条件に関する項を表す。第二章で述べたように、摩擦条件とは最大静止摩擦係数によってつくられる摩擦円錐の中に指先力ベクトルの終点が存在することと等価であるので、指先力が摩擦円錐の中であればどのように決定されてもよいと考えることができる。しかし、短時間での導出のため、勾配法によって連続的に最適指先力の更新を行うことから、指先力が摩擦円錐を外れるかどうかの評価も連続的に行うことが要求される。そこで対数関数を用いて摩擦条件に関する項を表現した。すなわち、指先力が摩擦円錐の境界に近いほど評価が悪くなり、逆にある程度離れている状態では評価に影響しなくなる。このとき、指先力がどれほど摩擦円錐の境界に近づくことを許すのかを重み  $w_a$  によって決定することができる。

また、式(3.2)中の  $\theta_i$  ( $i=1,2,3$ )は各接触点位置における内向き法線方向ベクトル  $n_i$  ( $i=1,2,3$ )と各指先力  $f$  の成す角度であり、 $\alpha_i$  ( $i=1,2,3$ )は各接触点位置における摩擦角を表す。それぞれの余弦は式(2.12),(2.14)によって求められる。各接触点における内向き法線方向単位ベクトル  $n_i$  および各指先の接触点位置は、指先に取り付けられた力センサにより導出することができるので[11], 式(3.2)において  $k_i$  ( $i=1,2,3$ )のみが変数となり得る。したがって  $k_i$  について、式(3.2)で表された評価関数を制御周期ごとに最急降下法を解くことで、最適な指先力を導出することができる。式(3.5)に最急降下法の更新則を示す。ただし、 $k_i$  の初期値は初期静止把持状態において、把持力焦点が把持可能領域内に存在するときの値ならばどのように与えてもよい。把持可能領域については第4章の4.3節で述べる。

$$k_i(t+1) = k_i(t) - K_{gra} \left( \frac{\partial W}{\partial k_i} \right) \quad (3.5)$$

ここで、 $K_{gra}$ はゲイン係数を表す。ゲイン $K_{gra}$ は式(3.2)の重み $w_a$ とともに考慮される。摩擦条件に関する重み $w_a$ が小さいほど、指先力は摩擦条件の境界に近づくことを許され、より最適解に近い値となるが、勾配法による指先力の導出となるため、更新の変化率が大きいと導出される指先力が摩擦条件を満たさない場合がある。つまり $w_a$ が小さいほどゲイン $K_{gra}$ も対応して小さくしなければならず、求める最適指先力への収束が遅くなる。したがって指先力ノルムの最小化と収束の早さはトレードオフの関係となる。以上を考慮し、設計者の指標に合わせて重み $w_a$ とゲイン $K_{gra}$ を設定すればよい。

式(3.5)の右辺第二項は、評価関数の式(3.2)を、式(2.12)、(3.4)によってパラメータ $k$ で表し、 $k_i(i=1,2,3)$ それぞれについて偏微分を行う。式(3.5)によって、制御周期ごとに $k_i$ の更新を行う。最適指先力指令の導出および $k_i$ の更新を行うループを図3.3に示す。

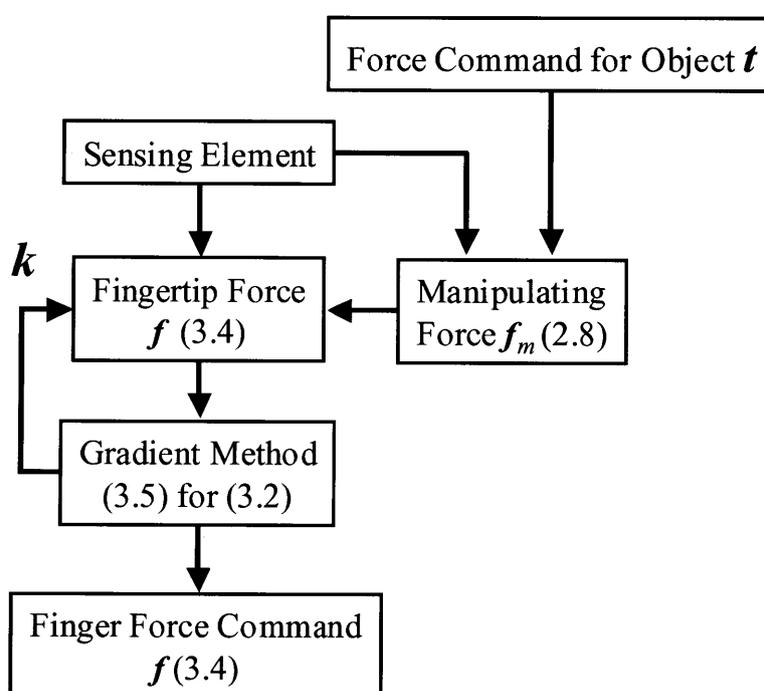


図 3.3 指先力最適化ループ

図 3.3 において、対象物操作力指令 $t$ は式(2.1)で示される、対象物を望み通りに操るために必要な対象物に加える力指令を表す。センサから得られる情報とは、接触法線方向ベクトル $n_i$ および接触点位置である。操り力指令 $f_m$ は接触点位置をもとに生成される把持行列 $G$ と、対象物操作力指令 $t$ から導出される。

### 3.3.2 数値例

図 3.3 の指先力最適化ループに関する数値例および指先力の導出時間を示す。把持対象物は図 3.4 に示すような正六角形とする。対象物重心位置は幾何学的中心である[3.46 0.0 0.0]

に設定し, 最大静止摩擦係数  $\mu=1.0$  とする. ただしこのときに与える最大静止摩擦係数  $\mu$  は, 2.3 節で述べたようにセンサノイズを考慮してある程度の安定率を見込んだ値であるとする. 初期把持配置は, [2]の手法により決定された接触点位置である. 本研究では把持配置を求めることは目的としていないため, この配置をそのまま適用する. またこのとき, 各指先における法線方向単位ベクトル  $\mathbf{n}_i$  はそれぞれ重心方向を向く.

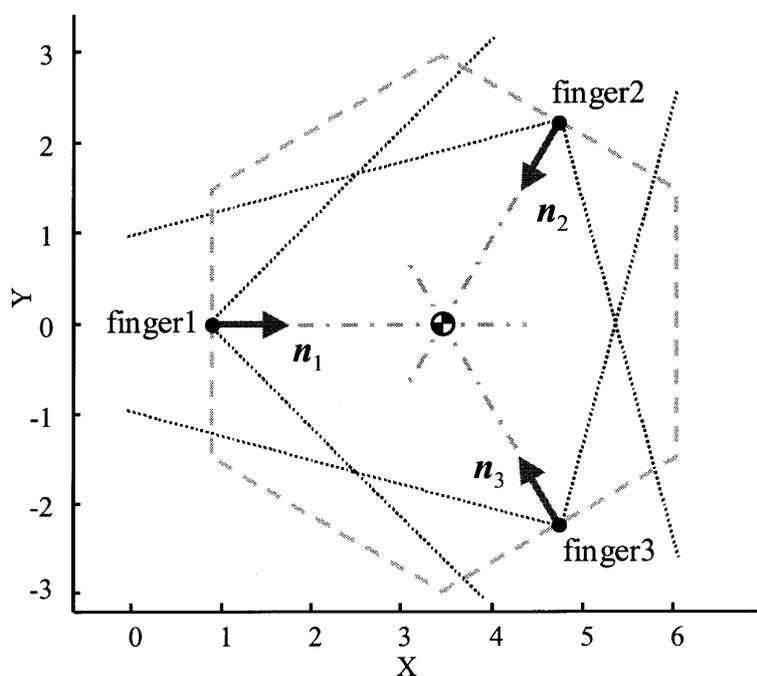


図 3.4 初期状態

図 3.4 の把持状態において, 対象物に対して操作力指令  $\mathbf{t} = [F_{ox}, F_{oy}, F_{oz}, m_{ox}, m_{oy}, m_{oz}] = [0.5, 1, 0, 0.3, 0, -0.5]$  を加えることとする.  $k_i$  の初期値は, 把持力焦点が対象物の重心位置に存在することとし,  $\mathbf{k} = [k_1, k_2, k_3] = [0.5, 0.5, 0.5]$  とした. また, 式(3.2)の評価関数における摩擦条件の重み  $w_a$  は, 最適指先力の 3% まで近づけることを指標として試行錯誤的に  $w_a = 0.01$  とし,  $w_a$  に対して適切に更新が行えるように最急降下法の勾配ゲイン  $K_{gra} = 0.007$  とした. また, 摩擦条件に関する重みが多い場合として  $w_a = 0.1$ , 勾配ゲイン  $K_{gra} = 0.007$  と同じで設定したものを示す. 比較に用いた最適化手法は, 指先力ノルムが最小となることを指標として解の導出を行ったものである. このとき, 本手法において指先力の更新を 300 回行ったときの指先力ノルムの変化を図 3.5 に示す.

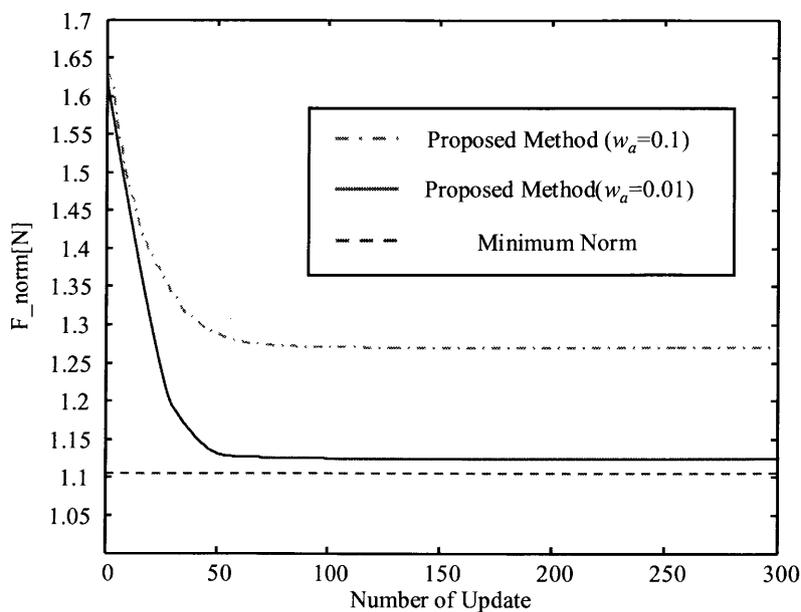


図 3.5 指先力導出結果

図 3.5 の結果より，本提案手法で更新を行った指先力ノルムが収束しているのがわかる．また，摩擦条件に対する重み  $w_a$  が小さいほど最小ノルムに近づいているのがわかる．また，計算時間に関しては，最適化手法を用いて解を導出した場合一度の計算で数百～数十[ms]の時間を要するのに対し[2][3]，本手法を用いて 1000 回更新を行い指先力の導出を行った場合，1.671[ms]であった．このことから，最適指先力の導出の短時間化が行えていることがわかる．なお，提案手法でのこの結果は CPU: Intel 社 Pentium 4, 3.00GHz を使用した．

## 第4章 切り替えシステム

### 4.1 実際の制御への適用のための切り替えシステム

実際の対象物操作においては、対象物を望みどおりに操るために対象物操作力指令  $\boldsymbol{t}$  を時々刻々と変化させる。また、外乱の影響で対象物操作力指令  $\boldsymbol{t}$  が急変する場合も考えられる。そのような場合、新たに与えられた操り力指令  $\boldsymbol{f}_m$  と 1 制御周期前に更新された  $\boldsymbol{k}$  によって式(3.4)で導出される指先力  $\boldsymbol{f}$  が摩擦円錐を外れてしまう可能性がある。また、ノイズを含むセンサ情報は法線方向ベクトルを変化させるため、同様に指先力  $\boldsymbol{f}$  が摩擦円錐を外れてしまう可能性がある。これを図で示したものが図 4.1 である。図 4.1 の(a)は、勾配法によって更新された  $\boldsymbol{k}$  を用いて導出された指先力を表す。(b)は、(a)において更新された  $\boldsymbol{k}$  を用いて得られる把持力と、新たに与えられた操り力指令によって生成される指先力が摩擦円錐を外れてしまう場合を表す。(c)は、(a)と同じ操り力指令が与えられているがノイズを含むセンサ情報による摩擦円錐の変化によって指先力が摩擦円錐を外れてしまった場合を表す。(b),(c)の場合、式(3.5)の勾配法によって導出される指先力が摩擦条件を満たさなくなる。

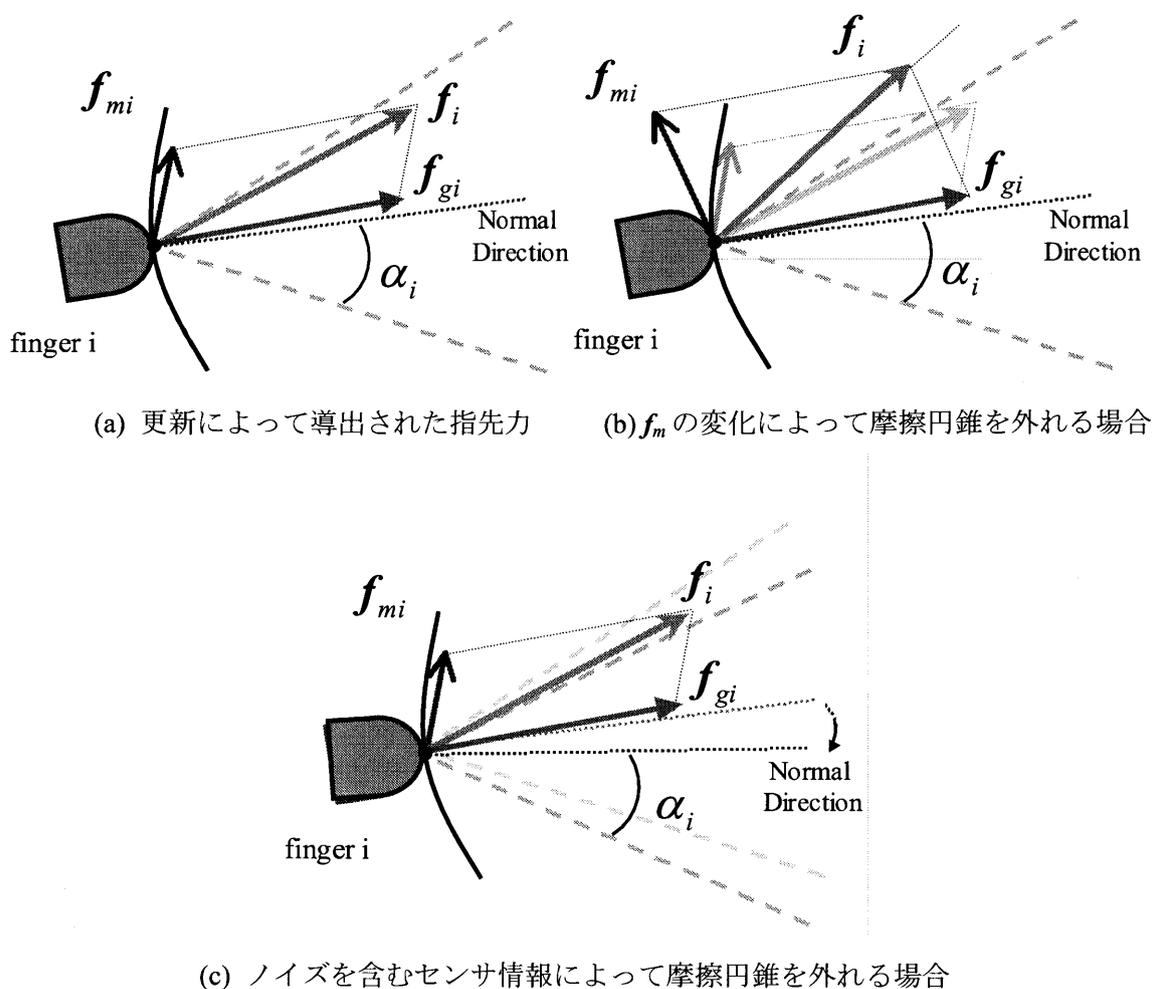


図 4.1 指先力が摩擦円錐を外れる状況

この状況を防ぐ一つの手法として、与えられる対象物操作力指令  $t$  の変動やノイズを含むセンサ情報を考慮した上で、式(3.2)で示した摩擦条件に関する重み  $w_a$  の調整を行うことが挙げられるが、その場合指先力の更新が保守的にならざるを得ず、指先力ノルムが大きくなってしまふ。つまり最適な指先力の導出を行うことができない。

そこで、指先力が摩擦円錐を外れた場合に、新たな把持力による指先力の導出を行う。これを切り替え  $SW1$  と定義する。本研究では短時間での指先力導出を目的としているため、新たな把持力の決定を把持力方向決定と把持力絶対値決定の2ステップにわけることによって短時間化を実現する[10]。ここで各指先において、それぞれの把持力方向は与えられた操り力指令に対して効率よく設定することで、導出される指先力を小さくすることができることから、把持力方向の決定は重要な問題となる(図 4.2 参照)。

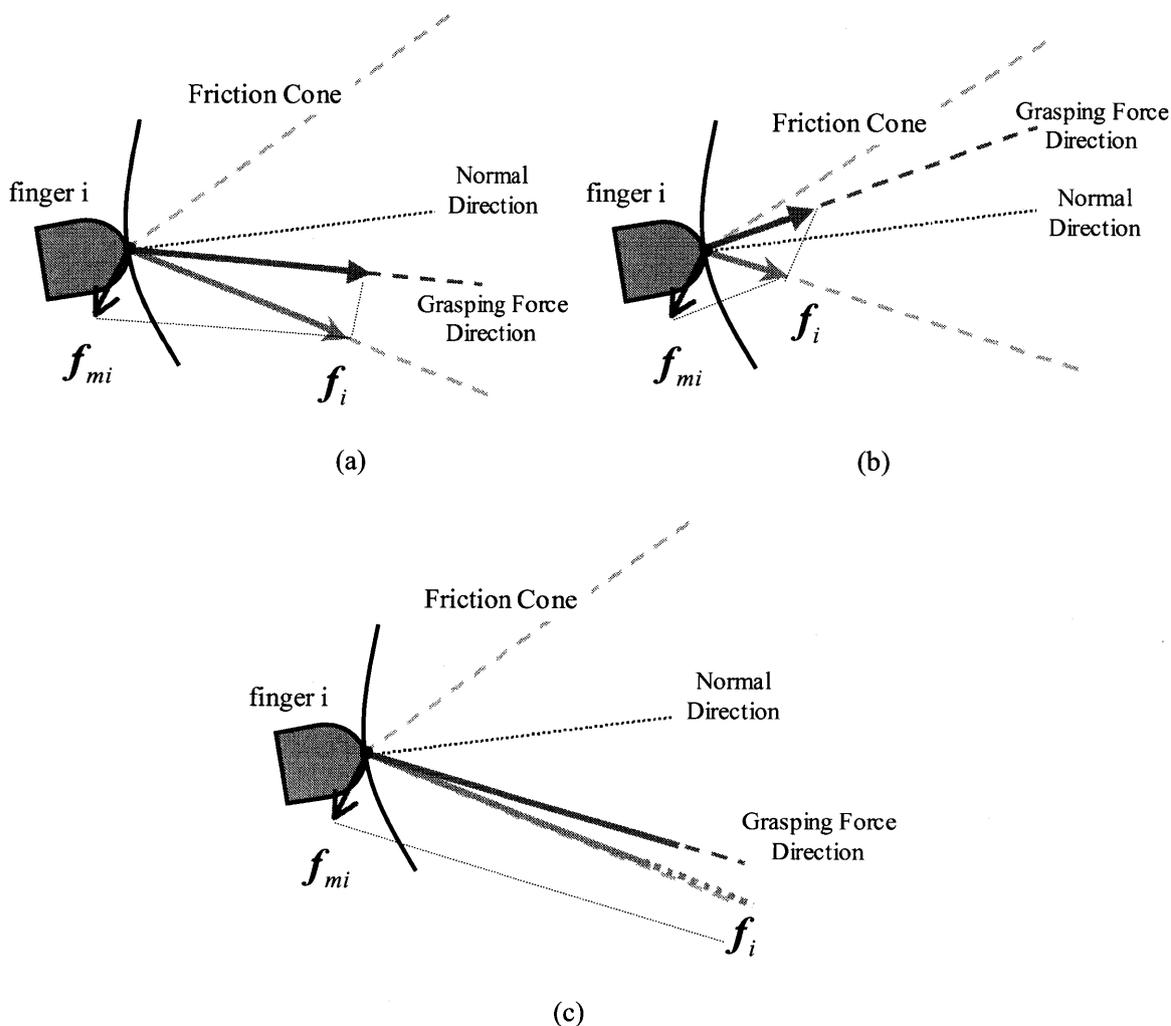


図 4.2 把持力方向による指先力の違い

## 4.2 指先力が摩擦円錐を外れた場合の把持力方向

図 4.1 に示すように、与えられた操り力指令  $f_m$  やノイズを含むセンサ情報の影響で指先力が摩擦円錐を外れた場合、より最適に近い指先力の導出を行うという観点から、1 制御周期前に決定された把持力方向を用いる。これによって連続的に与えられる対象物操作力指令  $t$  に対して、導出される指先力の変化も小さくなることが期待できる。把持力方向は式(4.1)で表される。

$$p_i = \frac{f_{gi}}{\sqrt{f_{gi}^T \cdot f_{gi}}} \quad (4.1)$$

このとき  $f_{gi}$  は位置制御周期前の把持力を示す。したがって、操作力指令  $t$  の変化およびノイズを含むセンサ情報の影響によって指先力が摩擦円錐を外れた場合、式(4.1)の把持力方向  $p_i$  を用いることで最適指先力に近い値を導出できると考えられる。

### 4.3 過大な指先力を導出しないための把持力方向

#### 4.3.1 把持可能領域

ノイズを含むセンサ情報による摩擦円錐の変化は把持力方向決定問題に対しても影響を及ぼす。

ここで再び図 4.2 の(c)について見てみると、導出される指先力が過大になっているのがわかる。これは把持力方向が摩擦円錐の境界に近い場合、与えられた操り力指令に対して指先力を摩擦円錐に引き込むために導出される把持力絶対値が過大になるからである。式(4.1)で求められた把持力方向に関して、摩擦円錐の変化によってその把持力方向が摩擦円錐の境界に近い場合が考えられる。指先力が過大になるような把持力方向は最適ではないため、決定できる把持力方向に幅、すなわち余裕がある場合にはノイズを含むセンサ情報の影響を受け難いが、決定できる把持力方向に余裕がない場合にはノイズを含むセンサ情報の影響を受けやすくなると考えられる。ここで、決定できる把持力方向の余裕を把持可能領域と呼び、どのような場合に摩擦円錐の変化の影響を受けやすいかについて、把持可能領域とあわせて説明する。

図 4.3 に示すような把持配置において、操り力が 0 であるような静止把持を行う場合を考える。

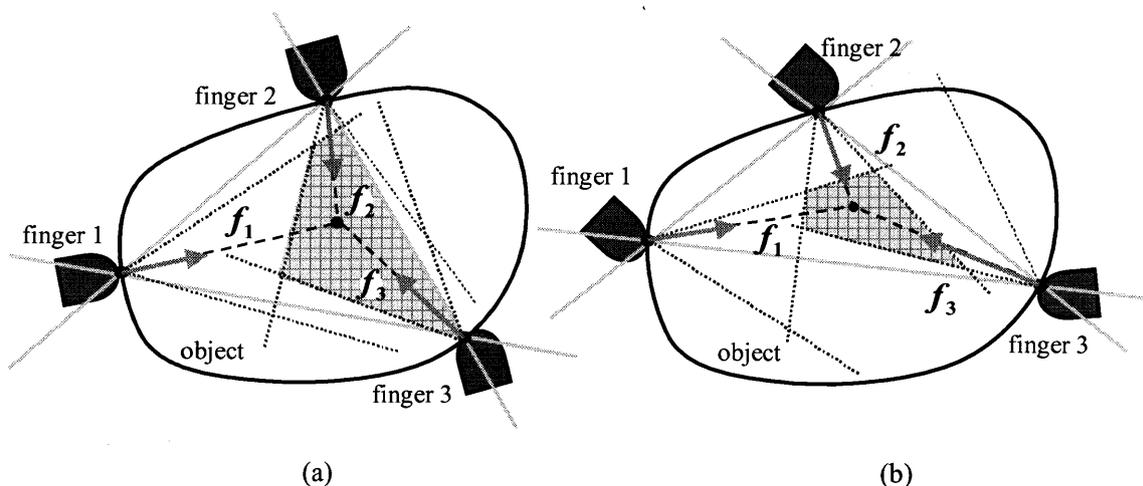


図 4.3 把持可能領域

このとき、指先力は摩擦条件を満たさなければならないため、各指先力は摩擦円錐内に存

在しなければならない。また、操り力が0で対象物を静止させていることから指先力は把持力であるといえるので、3.1節で述べたように把持力の作用線は一点（把持力焦点という）で交わらなければならない。さらに把持力の合力・合モーメントが0を満たすために把持力焦点が存在しなければならない領域は、各指先の接触点を結ぶ直線で境界付けされる領域となる[9][12]。つまり、図4.3の場合、把持力焦点は各指先の接触点位置における摩擦円錐の共通領域に存在し、かつ、それぞれの接触点の組を通る直線の内側に存在しなければならない。したがって、把持力焦点が存在できるこの領域が把持可能領域となる。以上のことから、摩擦角が小さな場合や、各指先の接触点位置における法線ベクトルの方向によって摩擦円錐の共通領域が小さくなる時、決定できる把持力方向に余裕がなくなるため、摩擦円錐の変化によって、把持力焦点が摩擦円錐の境界に近づき過ぎる状況が生まれやすいと考えられる。

実際の対象物の操りでは、転がりによって接触点位置が変化するため、把持可能領域もそれに伴って変化する。したがって、ノイズを含むセンサ情報による摩擦円錐の変化によって過大な指先力を導出する恐れがある。過大な指先力は対象物の破壊や指先に取り付けられた力センサの故障を招く恐れがあるため適切な指先力ではない。

そこで本研究では、把持力方向が摩擦円錐の境界に近づいた場合、新たな把持力方向を用いて指先力の導出を行う。これを切り替え  $SW2$  と定義する。切り替え  $SW2$  によって用いられる把持力方向は、法線ベクトルや接触点位置の変化に応じて過大な指先力を発生しないことを指標として更新される。この更新則を補助ループと呼ぶ。

#### 4.3.2 補助ループによる把持力方向の更新

補助ループで更新される把持力方向を用いることによって、把持不可能な状態を回避し、かつ過大ではない指先力の導出を行うことを目的とする。補助ループでは式(3.1)の  $k_i$  と同じ性質を持つ新たなパラメータ  $k_{gi}$  を用いて、把持力の更新を行う。求める把持力方向は常に摩擦円錐内に存在し、かつ摩擦円錐の境界から遠ざかる必要がある。そこで対数関数を用いて、把持力に関する評価関数  $W_g$  を設定する

$$W_g = \sum_{i=1}^3 \log(\cos \theta_{gi} - \cos \alpha_i) \quad (4.2)$$

$$\cos \theta_{gi} = \frac{\mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{f}_{gi}^{sub}}{\sqrt{\mathbf{f}_{gi}^{sub T} \cdot \mathbf{f}_{gi}^{sub}}} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{f}^{sub}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{f}^{sub}_{g1} \\ \mathbf{f}^{sub}_{g2} \\ \mathbf{f}^{sub}_{g3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{e}_{13} & \mathbf{e}_{12} \\ \mathbf{e}_{23} & \mathbf{0} & \mathbf{e}_{21} \\ \mathbf{e}_{32} & \mathbf{e}_{31} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{g1} \\ k_{g2} \\ k_{g3} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

ここで $\theta_{gi}$ は、 $i$ 指における把持力ベクトル $\mathbf{f}^{sub}_{gi}$ と接触法線単位ベクトル $\mathbf{n}_i$ の成す角であることに注意する。また、式(4.4)中の $\mathbf{e}_{ij}$ ( $i=1,2,3, j=1,2,3, i \neq j$ )は、3.2節で述べた把持力表現に用いる、ある接触点から他の接触点へ向かう単位ベクトルを表す。対数関数を用いたことで摩擦条件の境界に近づかないような振る舞いを期待できる。すなわち、式(4.1)の評価が大きいくほど、安定把持が可能であることを意味する。本研究では、この評価関数による把持力の更新を補助ループとして、どのような状況でも把持をし続けるアルゴリズムとすることを目的とする。したがって、制御周期ごとに安定把持のための把持力方向を更新するために、勾配法を用いる。最大勾配法の更新則を式(4.5)に示す。

$$k_{gi}(t+1) = k_{gi}(t) + K^{g}_{gra} \cdot \left( \frac{\partial W_g}{\partial k_{gi}} \right) \quad (4.5)$$

また、 $k_{gi}$ の初期値は式(3.5)と同様に、初期把持配置において把持力焦点が把持可能領域内に存在するときの値ならばどのように与えてもよい。式(4.5)中の右辺第二項は、把持力の評価関数の式(4.2)を式(4.3),(4.4)によって $k_{gi}$ に関する式で表し、 $k_{gi}$ ( $i=1,2,3$ )についてそれぞれ偏微分を行い導出する。 $K^{g}_{gra}$ は勾配法ゲインである。式(4.5)によって更新された $k_{gi}$ を用いて、式(4.4)から把持力方向単位ベクトル $\mathbf{p}_i$ を次式のように導出する。

$$\mathbf{p}_i = \frac{\mathbf{f}^{sub}_{gi}}{\sqrt{\mathbf{f}^{sub}_{gi} \cdot \mathbf{f}^{sub}_{gi}}} \quad (4.6)$$

式(4.6)によって求められる把持力方向は、式(4.1)の把持力方向が摩擦円錐の境界に近い場合に用いられる。

### 4.3.3 把持力絶対値の導出

式(4.1),または式(4.6)で求められた把持力方向において、摩擦条件を満たす最小の指先力を導出するための把持力絶対値決定を行う。まず、与えられた操り力指令 $\mathbf{f}_m$ に対して指先力が摩擦条件を満たすために最低限必要となる把持力絶対値を求める。

finger  $i$  における把持力の大きさを  $h_i$  とし, 与えられる操り力の方向単位ベクトルを  $\mathbf{m}_i$ , 大きさを  $l_i$  とすると, finger  $i$  の指先力は式(4.7)となる.

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{f}_{mi} + \mathbf{f}_{gi} = l_i \mathbf{m}_i + h_i \mathbf{p}_i \quad (4.7)$$

したがって, 指先力の摩擦条件の式(2.16)から, 式(4.8)を得る.

$$\frac{l_i \mathbf{m}_i^T \mathbf{n}_i + h_i \mathbf{p}_i^T \mathbf{n}_i}{\sqrt{h_i^2 + l_i^2 + 2l_i h_i \mathbf{m}_i^T \mathbf{p}_i}} \geq \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_i^2}} \quad (4.8)$$

また, 把持力は対象物に対して押しの力となることから, 把持力絶対値は0以上であるので,

$$h_i \geq 0 \quad (4.9)$$

を得る. ここで, 式(4.7)の両辺を2乗して展開すると

$$\begin{aligned} & \left\{ (\mathbf{p}_i^T \mathbf{n}_i)^2 \cdot (1 + \mu_i^2) - 1 \right\} h_i^2 \\ & + 2l_i \cdot \left\{ (\mathbf{m}_i^T \mathbf{n}_i) \cdot (\mathbf{p}_i^T \mathbf{n}_i) \cdot (1 + \mu_i^2) - (\mathbf{m}_i^T \mathbf{p}_i) \right\} h_i \\ & + l_i^2 \left\{ (\mathbf{m}_i^T \mathbf{n}_i)^2 (1 + \mu_i^2) - 1 \right\} \geq 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

となる. 式(4.10)の左辺において操り力  $\mathbf{f}_m$  に関する各項は式(2.8)から, 単位法線ベクトル  $\mathbf{n}_i$  については6軸力センサ出力情報から導出することができる. つまり, 式(4.10)の左辺において未知となるのは  $h_i$  のみであるため, 最大静止摩擦係数  $\mu_i$  を与えれば各接触点で摩擦条件を満たす最小の把持力の大きさを式(4.11)より求めることができる.

$$h_{i\min} = \min_{(3.6),(3.7)} h_i \quad (4.11)$$

また、把持力は対象物の運動に影響を与えない力であるため、把持力の合力・合モーメントは0でなければならない。ここで、3.2節において把持力の作用線は一点で交わることが示されているので、合力・合モーメントが0となる把持力の組み合わせは存在することが言える。このような把持力を以下のように求める。

図4.4に示すように、ある指での把持力は残り2指の把持力の合力と釣り合う力となる。

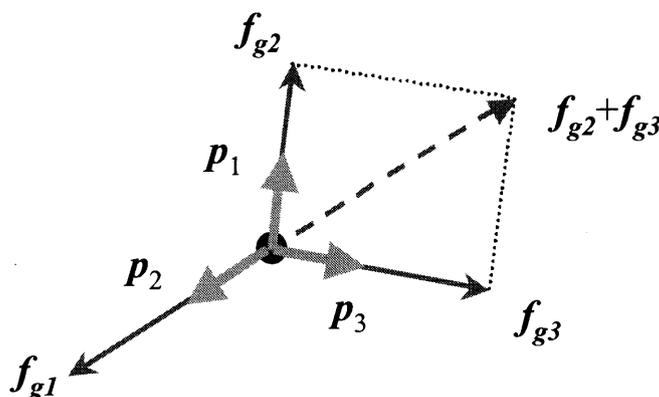


図4.4 把持力の釣り合い

finger  $i$  の単位把持力ベクトル  $p_i$  の基準座標系における  $x, y$  成分をそれぞれ  $p_{ix}, p_{iy}$  とすると、図4.4より  $f_{g1}$  と  $f_{g2}+f_{g3}$  の傾きが等しくなる。よって、式(4.12),(4.13)の関係が成り立つ。

$$\frac{p_{1y}}{p_{1x}} = \frac{p_{2y} + A_1 p_{3y}}{p_{2x} + A_1 p_{3x}} \quad (4.12)$$

$$A_1 = \frac{h_3}{h_2} = \frac{p_{1x} p_{2y} - p_{2x} p_{1y}}{p_{3x} p_{1y} - p_{1x} p_{3y}} \quad (4.13)$$

つまり各指の把持力は、指先力の摩擦条件を表す式(4.8),(4.9)と、平衡条件を示す式(4.12), (4.13)を満たす必要がある。これを図で表現したものが図4.5である。

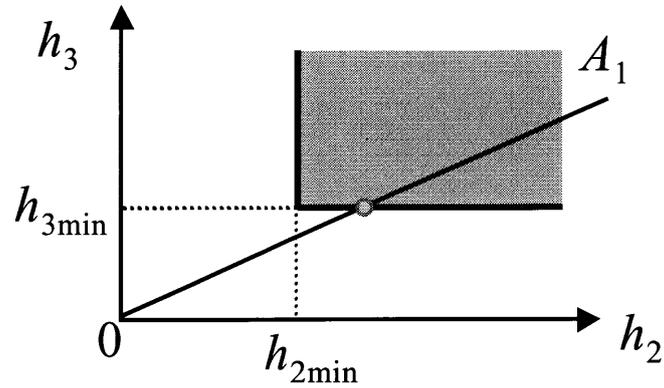


図 4.5 把持力絶対値決定

図 4.5 は横軸に finger2 の把持力の大きさ  $h_2$ ，縦軸に finger3 の把持力の大きさ  $h_3$  を表したものである．図中の塗りつぶした部分が摩擦条件を満たす領域となる．ここで  $A_1$  と摩擦条件を満たす領域との交点が条件を満たす最小の把持力となり，この値を解とする．これを式で表すと式(4.14)～(4.16)となる．

$$A_1 \geq \left( \frac{h_{3\min}}{h_{2\min}} \right) \text{ のとき } h_2 = h_{2\min}, h_3 = A_1 h_{2\min} \quad (4.14)$$

$$A_1 < \left( \frac{h_{3\min}}{h_{2\min}} \right) \text{ のとき } h_3 = h_{3\min}, h_2 = \frac{h_{3\min}}{A_1} \quad (4.15)$$

$$h_1 = \|h_2 \mathbf{p}_2 + h_3 \mathbf{p}_3\| \quad (4.16)$$

上記したことは  $f_{g1}$  の傾きに対して解を求める手法であり， $f_{g2}$ ， $f_{g3}$  の傾きに対しても同様に解を求められるため，合計で 3 組の条件を満たす指先力の解が求まる．この解の中から，すべての指先力が摩擦条件を満たし，さらに指先力ノルムが最小となるものを解と決定する．求められた把持力から指先力を導出し，そのときの  $k_i$  の値を更新する．

## 4.4 提案システム

提案するシステムを図 4.6 示す.

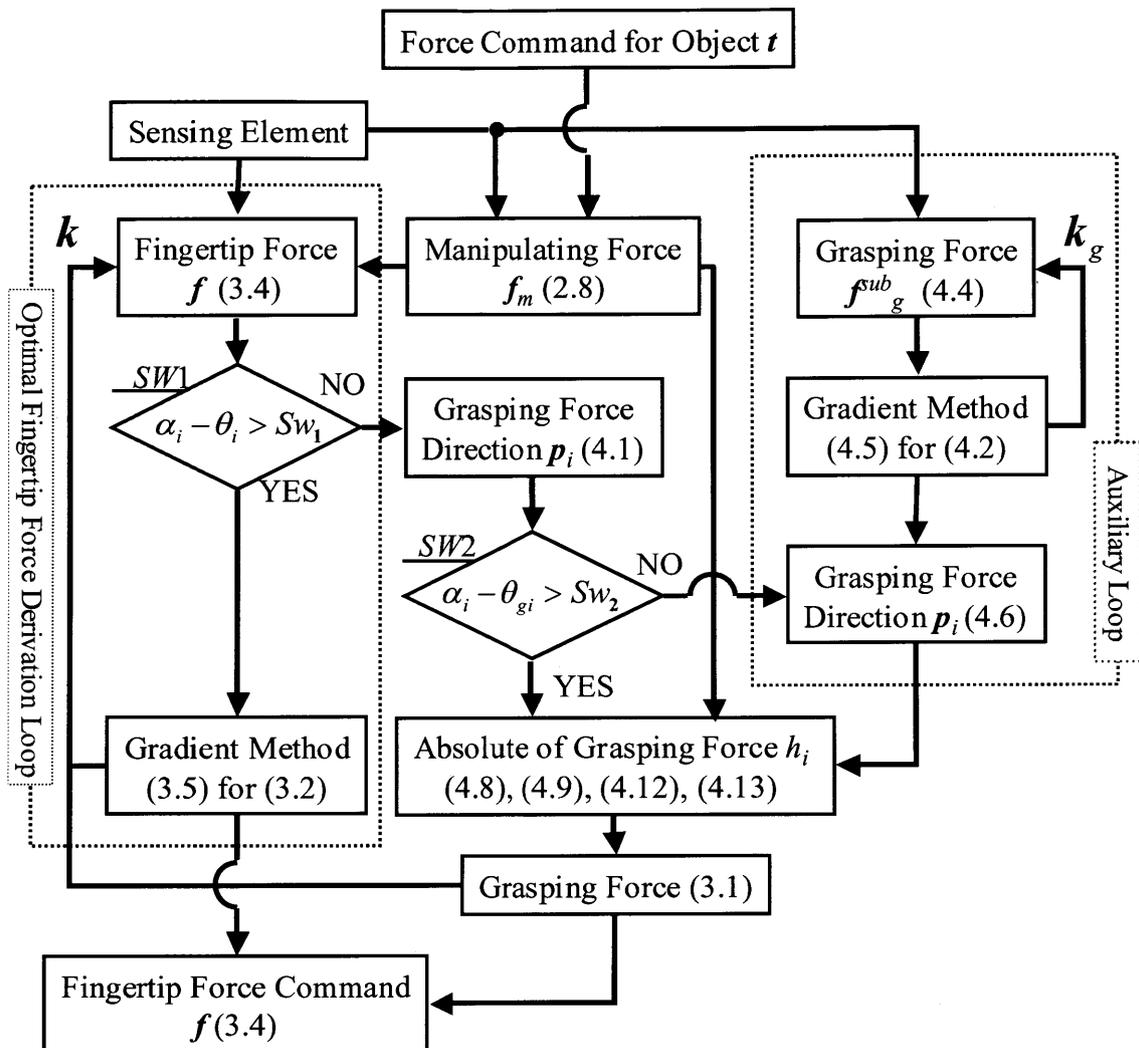


図 4.6 提案するシステム

図 4.6 において、切り替え  $SW1$  を設定し新たな把持力決定を行うことにより、式(3.4)で表される指先力  $f$  が摩擦円錐を外れた場合にも最適に近い指先力を導出することができると考えられる。また、切り替え  $SW2$  を設定し新たな把持力方向を用いることで、指先が発生できる力の制約を超えた過大な指先力を発生するのを防ぐ。ここで切り替え  $SW1$  において、指先力と摩擦円錐の境界がどれほどまで近づくことを許すのかを閾値  $SW1$  で設定する。閾値  $SW1$  は、評価関数  $W$  の式(3.2)で設定した摩擦条件に関する重み  $w_a$  に応じて決定される。閾値  $SW1$

が 0 に近い値であるほど最適指先力の更新を行えるが、閾値  $Sw_1$  が摩擦円錐の境界に近すぎると、切り替えが生じて更新される  $k_f$  の値と新しく与えられる操り力指令によって生成される指先力の評価が、式(3.2)の摩擦条件の項に関して悪くなり、指先力ノルムの急変を起こしてしまう。そこで例えば、摩擦角の 1% の範囲まで摩擦条件の境界に近づくのを許すように  $w_a$  によって決定した場合、切り替え条件である閾値  $Sw_1$  もまた摩擦角の 1% とすることで、評価関数に従う指先力の更新を行うことができる。また、切り替え  $SW2$  において、把持力方向と摩擦円錐の境界がどれほどまで近づくことを許すのかを閾値  $Sw_2$  で設定する。閾値  $Sw_2$  は与えられる対象物操作力指令  $t$  における最大ノルム  $t_{\max}$  が既知情報であることと、指先力の発生できる最大ノルムの制約  $force_{\max}$  より、式(4.17)で把持力方向と摩擦条件が作る角度の最小値を求めることができる。

$$Sw_2 > \sin^{-1} \left( \frac{t_{\max}}{force_{\max}} \right) \quad (4.17)$$

また、これを図で説明すると図 4.7 で表される。

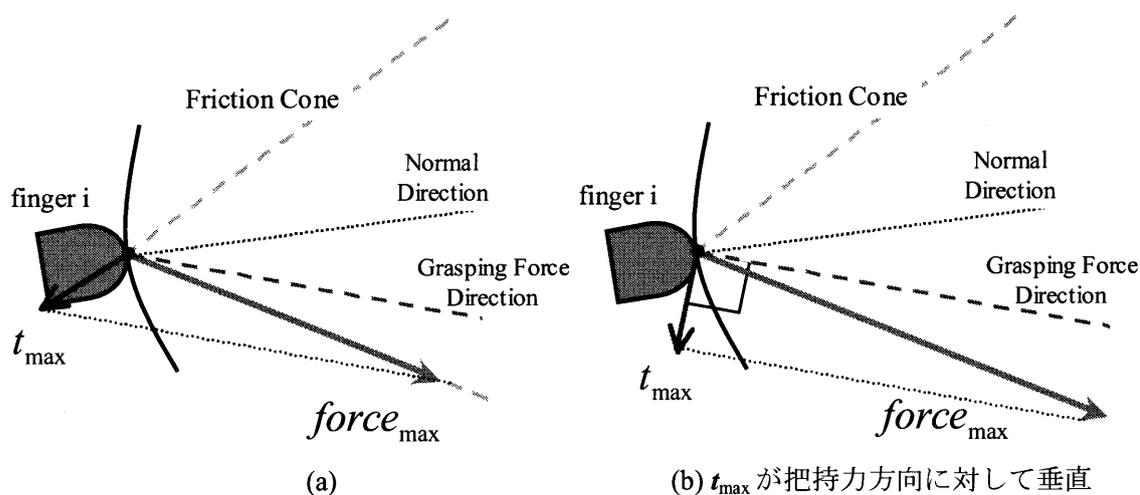


図 4.7 摩擦条件を満たす最小の指先力が最大になるとき

図 4.7 に示すように、ある把持力方向に対して垂直に操り力が与えられたとき(図 4.7(b)), 摩擦条件を満たす最小の指先力は最大になる。したがって、そのような指先力が各指先での力の制約を満たすようにすればよいことから、把持力方向に関する切り替え  $SW2$  における閾値  $Sw_2$  の最小値は式(4.17)のように与えられる。閾値  $Sw_2$  が大きいほど導出される指先力は過大になりにくいですが、図 4.6 中の切り替え  $SW2$  において頻繁に式(4.6)で表される把持力方向を用いることになり、導出される指先力が保守的な値になりやすいことに注意する。

## 第5章 シミュレーション

### 5.1 正六角形の把持

本章では、より実機に近い環境でシミュレーションを行うことで、本提案手法が実際の転がり接触を伴う対象物の操りに適用できることを確認する。なお、説明の簡単化のため x-y 平面において対象物を並進方向にのみ操る場合について示す。

対象物形状および初期把持配置，ならびに初期法線方向ベクトル  $\boldsymbol{n}_i$  は図 3.4 に示すものとする。また，最大静止摩擦係数は 1 とする。対象物重量は紙面垂直の z 方向に発生し，一定の対象物操作力指令  $\boldsymbol{t}$  の z 成分によって維持されるものとする。ここでは 1[N] を与えた。対象物操作力指令  $\boldsymbol{t}$  は 30[s] 間与え，x-y 成分に関して変化するものとし，さらに外乱の影響を想定して 25[s] において対象物操作力指令を急変させた。これを図 5.1 に示す。

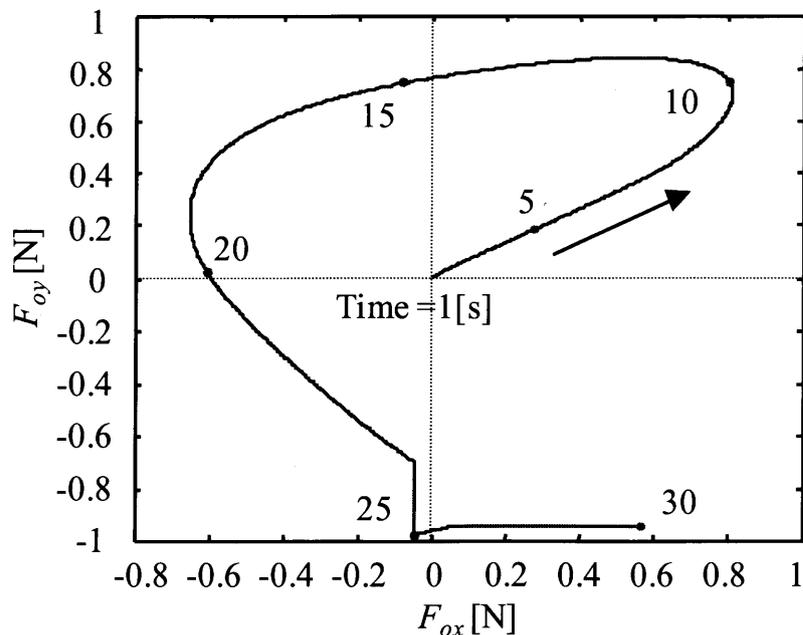


図 5.1 対象物操作力指令  $\boldsymbol{t}$

各指先の法線方向  $n_i$  には初期法線ベクトルを中心に  $\pm 3^\circ$  の範囲で振れるように白色ノイズを加え、また、接触点位置についても白色ノイズを加えた。図 5.1 と、得られるセンサ情報にノイズを加えることにより、転がり接触による動的な環境を模擬する。このとき、式(3.2)の評価関数における摩擦条件の重み  $w_a$ 、勾配ゲイン  $K_{gra}$  は 3.3.2 節の数値例と同様とし、切り替え  $SW1$  の閾値  $Sw_1$  は摩擦角の 1% とした。なお、 $k_i, k_{gi}$  の初期値に関しては、初期把持配置において把持可能となる適当な値、 $[0.5, 0.5, 0.5]$  を与えた。また、式(4.6)の勾配ゲイン  $K_{gra}^g$  は、摩擦条件の厳しい状況における把持力方向を決定するものであることから小さな値でよいことを指標に、0.0003 と設定した。また、切り替え  $SW2$  の閾値  $Sw_2$  は、与える操り力指令の最大ノルム  $t_{max}=1.4870$  と力センサの制約である  $force_{max}=12[N]$  より、式(4.7)から  $Sw_2=0.1242$  とした。制御中における指先力ノルムの変化を図 5.2、切り替えのタイミングを図 5.3 に示す。

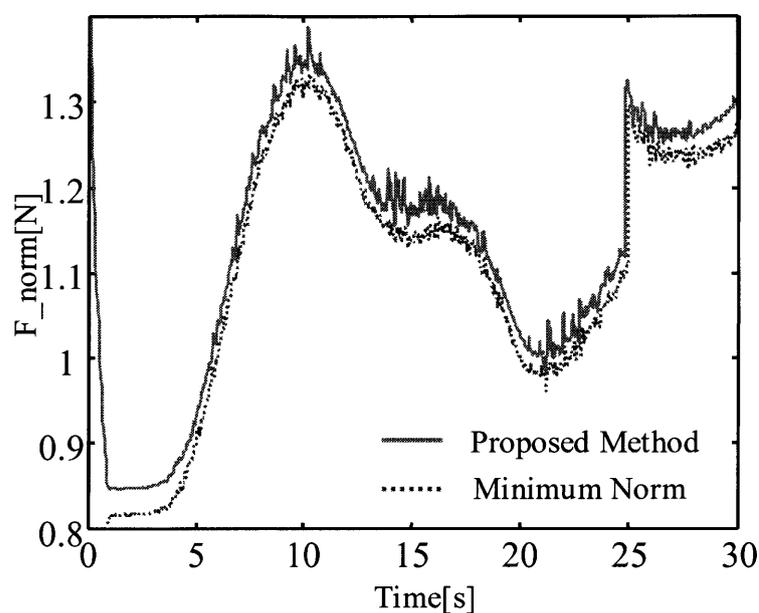


図 5.2 指先力ノルム

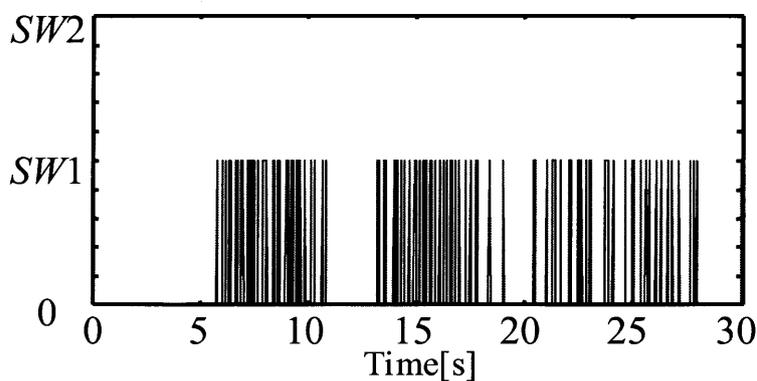


図 5.3 切り替えのタイミング

図 5.2, 5.3 の結果から, 対象物操作力指令  $t$  の変化の影響によって切り替え  $SW1$  が生じているが, 導出される指先力ノルムは最小値に追従しているのがわかる。

一方, 本提案手法を用いてパラメータの更新を 1000 回行って指先力を導出したときに必要となった時間を表 5.1 に示す。

表 5.1 1000 回更新に必要な時間

	No Switch	Switching Always
Compute Time[ms]	5.593	7.343

表 5.1 において, 切り替えなしというのは最適指先力の更新ループのみを用いて計算を行った結果である。また, 常に切り替えとは, 新たな把持力決定への切り替えを常に行ったときに必要となる時間を表す。この結果から, 常に切り替えが起こった場合でも十分に導出時間が短いため, 転がりによる接触点位置に応じて適切な指先力を導出することができる。

## 5.2 長方形の把持

図 5.4 のような長方形に対しても本手法を適用し, その有効性を示す。このような対象物を把持した場合, 3.2 節で示した把持力焦点の存在領域は複数存在することに注意してほしい。シミュレーション条件は同じであるとし, 指先力ノルムの変化を図 5.5 に, また, そのときの切り替えのタイミングを図 5.6 にそれぞれ示す。

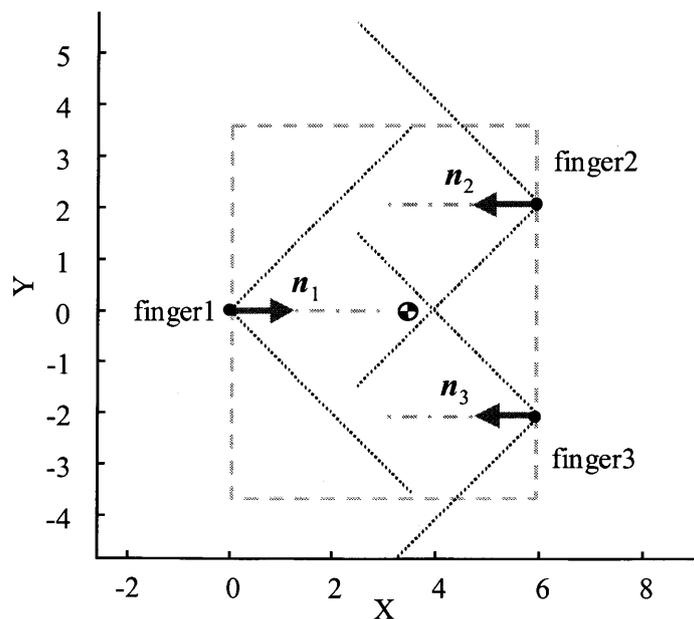


図 5.4 長方形の把持対象物

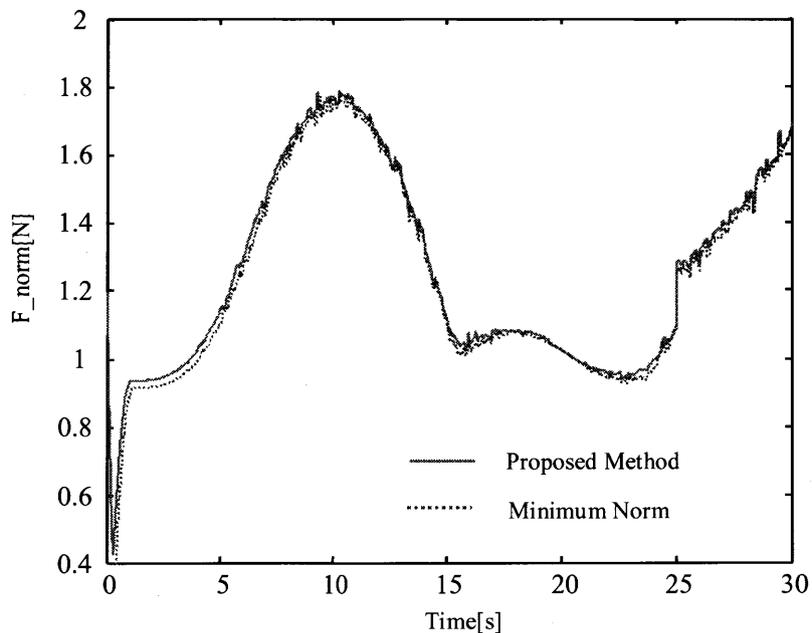


図 5.5 指先力ノルム

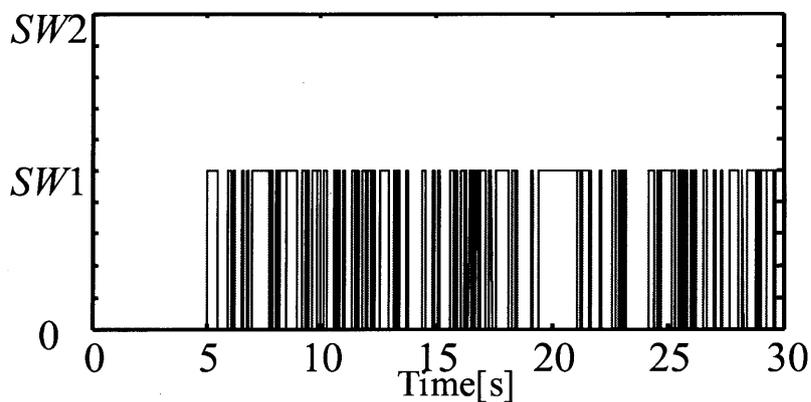


図 5.6 切り替えのタイミング

図 5.5, 5.6 の結果より、把持力焦点が存在する領域が複数ある場合でも、指先力の最適化更新が行えているのがわかる。さらに、存在領域が複数あることで制限に余裕があることから、正六角形の把持よりもより最小値に近い指先力の導出が行えていると考えられる。参考までに把持力焦点の位置を図 5.7 に示す。点で描かれているのが把持力焦点の軌跡である。紙面の関係上無限遠に近い把持力焦点は省略してある。把持力焦点の初期値は長方形の内側に存在し、そこから対象物操作力指令に応じて変化していることがわかる。なお、図中の破線は摩擦円錐を表し、太い破線で描かれた摩擦円錐は摩擦の共通領域の境界を表す。

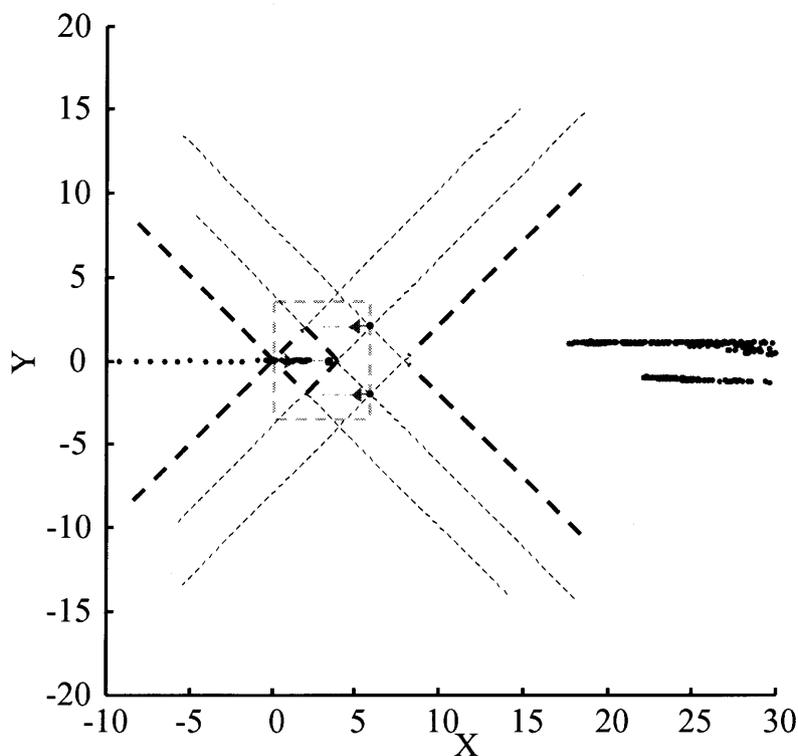


図 5.7 把持力焦点位置

### 5.3 把持可能領域が狭い場合でのシミュレーション

本節では、対象物操作により転がりによる接触点位置の変動が起こり、各指先がつくる摩擦円錐の共通領域が狭くなった場合を想定したシミュレーションを行う。把持対象物は 3.3.2 節と同様のものを用いるが、最大静止摩擦係数をここでは 0.4 と設定し、より把持可能条件が厳しい場合とする。初期把持状態を図 5.8 に示す。与える対象物操作力指令  $\boldsymbol{t}$  は図 5.1 とする。法線方向ベクトルおよび接触点位置に加えるノイズの条件は 5.1 節と同様である。なお、本研究では発生できる指先力の制約は、指先に取り付けられた小型 6 軸力覚センサの制約である 12[N]としているため、導出される指先力ノルムがこれを超える値である場合は過大な指先力であるとし、把持不可能と判断する。

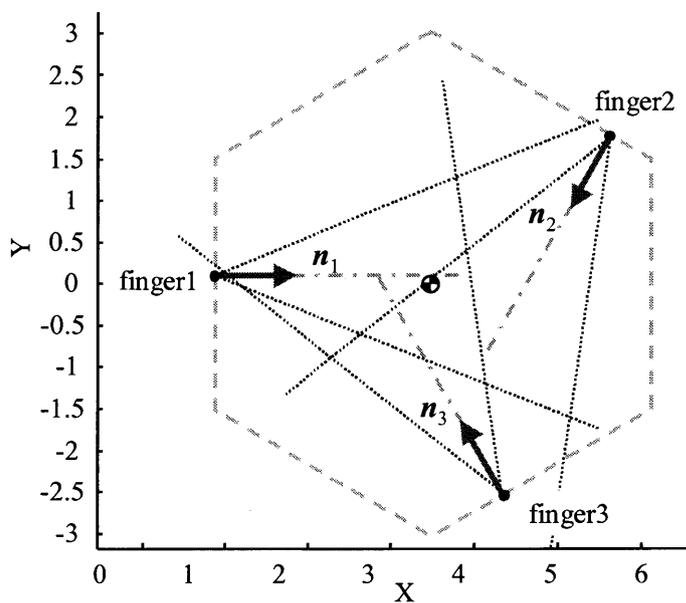


図 5.8 把持可能領域が狭い場合での初期把持状態

シミュレーション結果を図 5.9, 5.10 に示す.

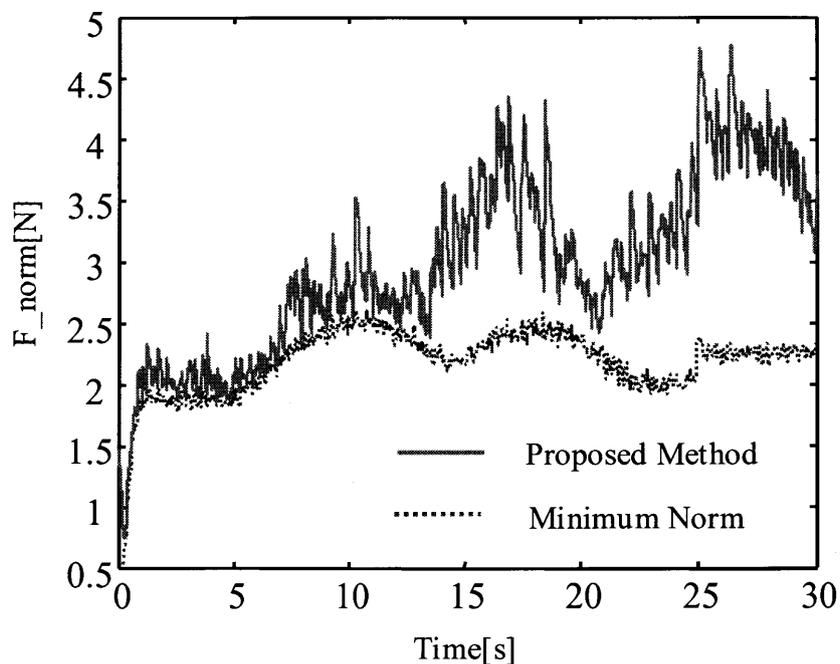


図 5.9 指先力ノルム

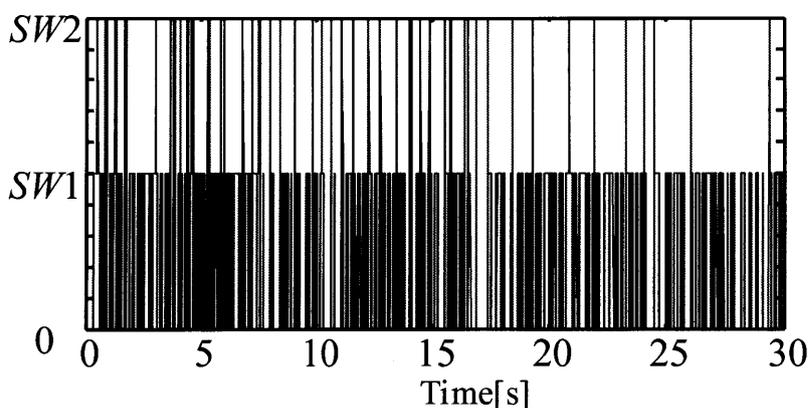


図 5.10 切り替えのタイミング

図 5.9, 5.10 の結果より, 把持可能領域が狭い場合では摩擦円錐の変動の影響を受けやすいため, 図 5.2, 5.5 の結果に比べて目標とする指先力ノルムの最小値との差が広がっているが, 切り替え  $SW2$  によって式(4.6)の把持力方向を用いていることから, 指先力の制約である 12[N]からは遠く安定な指先力が導出され, 把持不可能な状況を回避し, 最適指先力の更新を続けられていることがわかる.

ここで再び 3.3.2 節の数値例に着目すると, 指先力最適化ループを 1000 回行うために必要となる時間は 1.671[ms], さらに今回のようにパラメータを設定した場合, 40 回ほどの更新で解は収束していることがわかるので, 実際の制御系において指先力の導出にある程度の時

間的余裕が許されるのならば、切り替え  $SW1$ ,  $SW2$  が生じて導出される指先力をさらに指先力最適化ループにおいて更新を行えばさらにより結果を得ることができると考えられる。参考までに、本節の把持可能領域が狭い場合を例に、切り替え  $SW1$ ,  $SW2$  が生じたときにさらに指先力最適化ループを 40 回行って導出した結果を図 5.11 に、そのときの切り替えのタイミングを図 5.12 にそれぞれ示す。

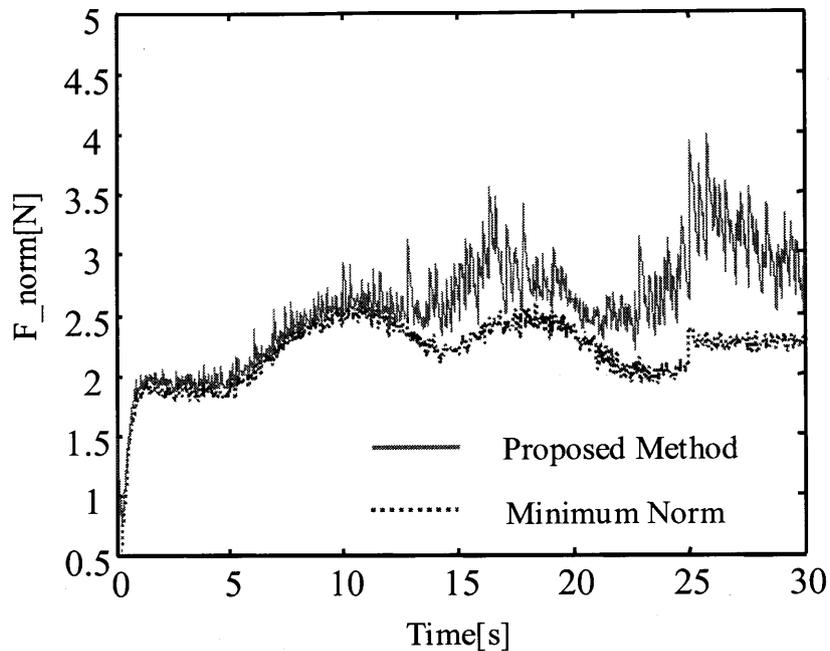


図 5.11 指先力ノルム

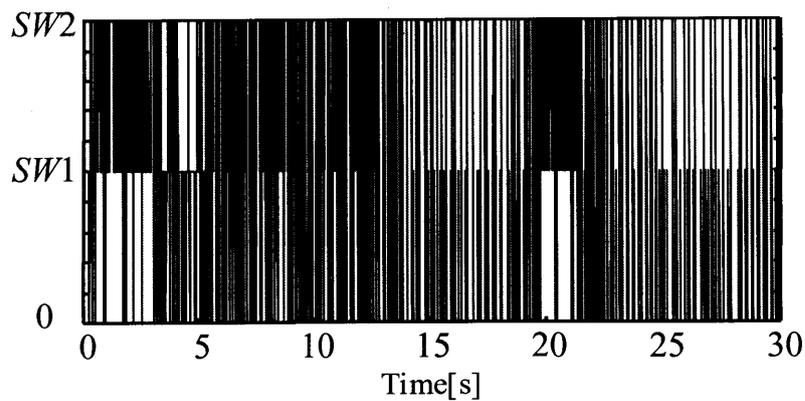


図 5.12 切り替えのタイミング

図 5.11 より、図 5.9 に比べてさらに目標とする最小値に近づいているのがわかる。今回の例は把持可能条件が厳しいために摩擦条件の変動を受けやすい状況であるため、収束すべき

---

値が影響を受けて振動していると考えられる。ノイズを含むセンサ情報がどの程度のものかがあらかじめ判っている状態であるならば、式(3.2)の摩擦条件に関する重み  $w_a$  を調整することで振動は回避できる。またそのとき、導出される指先力は最小値から離れるが、指令として導出される指先力の振動は少なくなることから、最適性よりも安全性、確実性を重視する状態であるといえる。

以上の結果から、本提案手法は転がりによる接触点位置の変動や摩擦条件の変化に対応して十分に短時間化が行われており、さらに適切な指先力を導出することができるといえる。

## 第6章 結言

本論文では、転がりによる接触点位置変動が起こる実際の三次元対象物の操り制御を実現するために、最適指先力の導出を短時間化するシステムを提案した。指先力の冗長成分である把持力に着目し、指先力ノルムが最小でありかつ摩擦条件を満たす指先力を最適とした評価関数を設定し、最急降下法を用いることで短時間化を実現した。また、実際の制御において生じる各種センサノイズや、対象物を操るための力指令の変動、転がり接触による動的な変化を考慮するため、把持力決定に関しての切り替えを行った。さらにそのうちの把持力方向決定に関して、適切な切り替えを行うことにより3つのループからなるシステムを構成した。構築されたシステムにおいて、指先力の導出時間は従来研究によるものと比べて十分に早く、また、転がり接触による接触点位置の変動や摩擦条件の変化など、動的に変化する実際の制御に適用できることを示した。

今後の課題の一つ目としては、実機による検証が挙げられる。本提案手法は得られたセンサ情報および対象物に加える操作力指令  $t$  をもとに指先力指令を導出するものであるため、実際の対象物操り制御においてはその制御系の一部を担うものとなる。したがって実機検証を行うためには全体の制御系を構築し、対象物操作力指令  $t$  を与えての対象物操作が必要となる。また、二つ目の課題としては、導出される指先力の変動を抑えることが挙げられる。今回のシステムは実際の対象物操作を行うための指先力指令生成システムであるため、急変するような指令が導出された場合アクチュエータに対して過負荷がかかり、指先に取り付けられた力センサにおいても故障の原因となることから、あまり望ましいこととはいえない。この問題を解決する手段としては、急変する指令に対しても対象物操作を行うことのできる制御系を構築することが一つ挙げられる。また、本システムにおいては切り替えを用いることが指先力導出の不連続性を伴わせていると考えられることから、切り替えに用いる把持力方向と最適指先力の関係を見出すことも一つであろう。しかし、これまでに把持力方向と最適指先力の関係性についての調査を行ってきたが、付録に示すように未だ見出せていないのが現状である。

# 付録

## A 把持力方向と最適指先力

把持力が対象物操作のために必要となる指先力のうちで任意性を表すことは第2章で述べた。つまり、把持力を適切に決定することができれば最適な指先力の導出は可能であると考えられるが、実際には非線形計画問題を解かなければならないためにリアルタイム性は失われてしまう。そこで、把持力の決定を把持力方向決定と把持力絶対値決定に分けて考える。このとき、把持力方向が決まれば摩擦条件と平衡条件を満たす中で最小となる把持力絶対値を求めることができることから、把持力方向の決定は重要な問題であると考えられる。

また、与えられた操り力指令  $f_m$  に対して指先力  $f$  が最小となるような把持力方向は、直感的に図 A.1 のように操り力方向から遠ければよいと考えられることから、把持力方向と最適指先力の間になにかしらの関係があると考えられる。

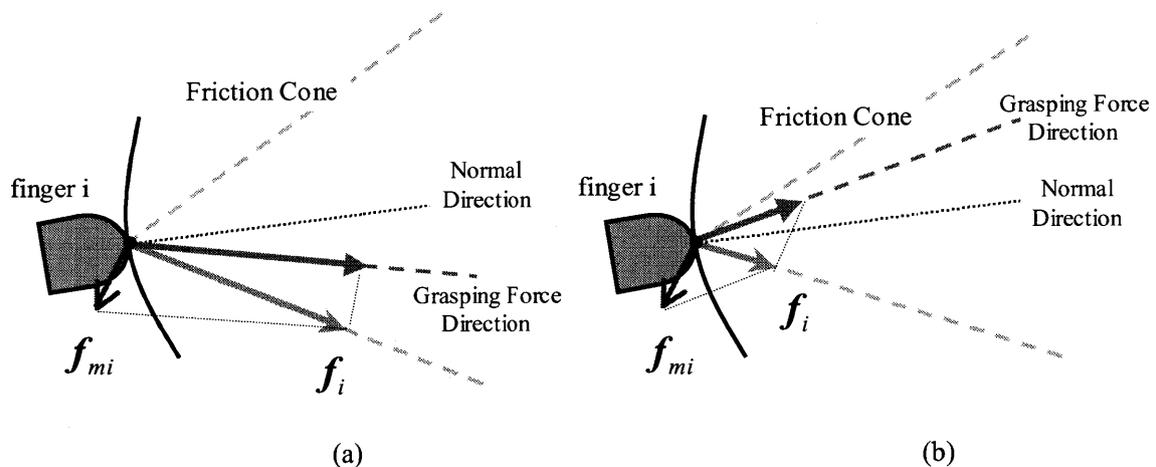


図 A.1 把持力方向による指先力の違い

そこで、さまざまな方向の対象物操作力指令を包含した要求外力集合[2]を8角形近似したその端点を指令とし、指先力  $f$  のノルムが最小となるときの把持力焦点位置を最適把持力焦点とし、それぞれの位置を調べた。図 A.2 に要求外力集合を、図 A.3 にそのときの結果を示す。なお、把持対象物、把持配置、接触法線方向は任意のものとする。また、最大静止摩擦係数は 1.0 である。このとき、図 A.2 と図 A.3 の番号①～⑧はそれぞれ対応している。

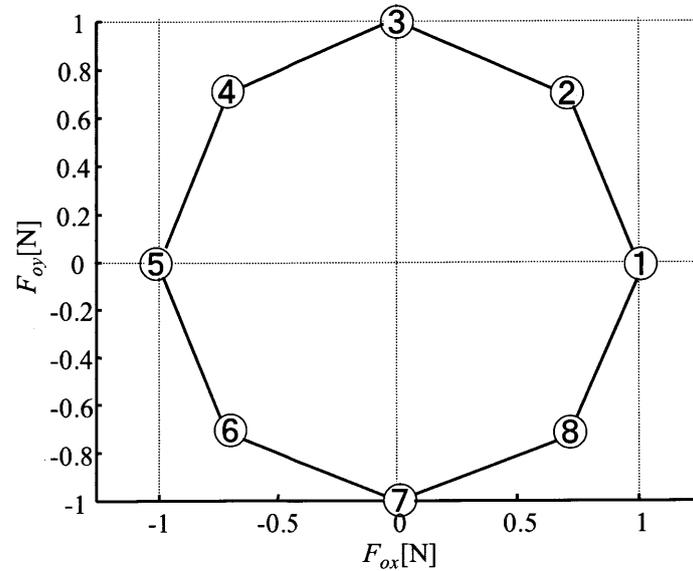


図 A.2 要求外力集合

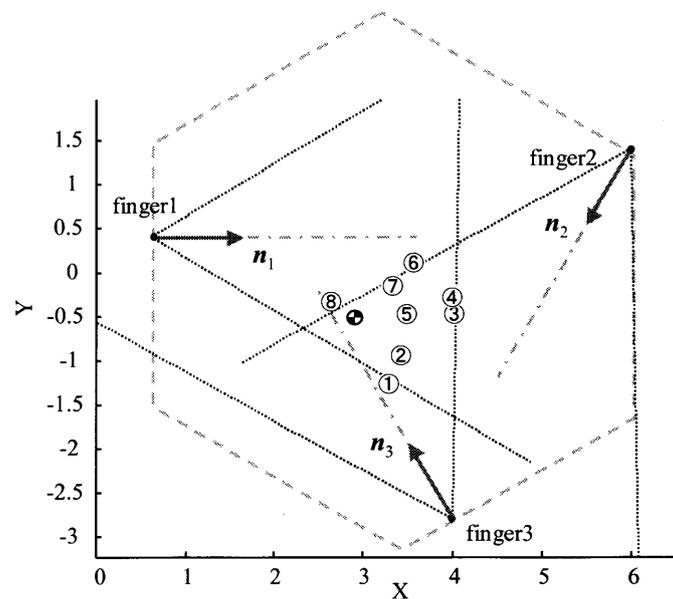


図 A.3 最適把持力焦点位置

図 A.2 の要求外力の規則的な変化に対して、図 A.3 では不規則な変化をしていることが分かる。最大静止摩擦係数の違いや把持配置の違いによってもこの変化は変わるので、この結果から規則性を見出すのは困難であると考えられる。

## 参考文献

- [1]吉川：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, pp505-511, 1996
- [2]Maekawa.H., K. Tanie, and K. Komoriya, : Tactile Sensor Based Manipulation of an Unknown Object by a Multifingered Hand with Rolling Contact, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 743-750, 1995.
- [3]前川, 谷江, 小森谷：指先での転がり接触を考慮した多指ハンドによる三次元把握の運動学・静力学および剛性効果, 日本ロボット学会誌, Vol.16, no.2, pp205-213, 1998
- [4]渡辺, 吉川：要求外力集合を用いた把持の最適化,日本ロボット学会誌, vol.21, no.3, pp321-326, 2003
- [5]Li Han , Jeff C. Trinkle , Zexiang X. Li : Grasp Analysis as Linear Matrix Inequality Problems, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL.16, NO6, DECEMBER 2000
- [6]Guanfeng Liu, Zexiang Li : Real-Time Grasping-Force Optimization for Multifingered Manipulation: Theory and Experiments, IEEE ASME TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL.9, NO1, MARCH 2004
- [7]吉川：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,pp48-54,1996
- [8]吉川, 横小路, 永山：3本指ハンドによる対象物の操りにおける滑り運動の解析,日本ロボット学会誌, vol.10, no.3, pp394-401, 1992

- 
- [9]Tsuneo Yoshikawa, Kiyoshi Nagai : Manipulating and Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL.7, NO1, pp67-77, FEBRUARY 1991
- [10]向, 駒田, 平井 : 安定把持制御を付加したロボットハンドによる把持物体の操り, 平成17年度, 三重大学大学院工学研究科修士論文
- [11]永田, 津村, 小俣 : 指先力覚センサの開発と接触点検出誤差評価, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.8, pp.1221-1228, 1996
- [12]吉川 : 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, pp950-957, 1995

## 論文目録

- [1]小堀，駒田，平井：「転がりによる接触点位置変化を考慮した多指ロボットハンドのリアルタイムでの指先力決定法」，平成 18 年 三重地区計測制御研究講演会講演論文集，pp.P26-1-P26-4, 2006.11
- [2]小堀，駒田，平井：「転がり接触を伴う対象物の操りのための短時間指先力決定」，平成 19 年 三重地区計測制御研究講演会講演論文集，pp.B12-1-B12-4, 2007.12
- [3]小堀，駒田，平井：「転がり接触を伴う対象物の操りのための短時間指先力決定」，平成 20 年 産業計測研究講演会講演論文集，IIC-08-81, 2008.3

## 謝辞

本研究の遂行および修士論文や学会論文の作成にあたり、丁寧かつ親切なご指導を賜りました、三重大学工学部教授 平井淳之 先生に心より感謝致します。

本研究の遂行にあたり、一貫してご指導を頂きました、同大学准教授 駒田諭 先生に心より感謝致します。

本研究の遂行にあたり、貴重なご意見を頂きました、同大学助教 弓場井一裕 先生に心より感謝致します。

また修士論文作成にあたり、適切なご指導を頂きました、同大学講師 山村直紀 先生に深く感謝致します。

日頃より親しくして戴き、公私にわたり大変お世話になりました技術職員 中村勝 氏に心より感謝致します。

研究活動全体を通し、同じ研究グループとして共に協力し貴重な経験を頂いた 三宅圭二 君、小塩直哉 君に心より感謝いたします。今後のご活躍を心より期待しております。

研究室生活を共にした 前川悠生 氏、同期である 池田康太郎 君、遠藤広志 君、片岡典剛 君、黒田朋伸 君、橋本陽介 君、蛭川達彦 君、別曾大輔 君、ならびに電気システム研究室の皆様には研究室での生活が楽しく有意義に過ごせたことを心より感謝いたします。

最後に何不自由なく大学生活を送らせて頂いた両親に心より深く感謝いたします。