



Title	マイクロハンドによる微細作業に関する研究
Author(s)	谷川, 民生
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3155581">https://doi.org/10.11501/3155581</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# マイクロハンドによる微細作業に関する研究

谷川 民生

大阪大学大学院基礎工学研究科  
博士論文

平成 10 年 10 月

## 内容梗概

電気回路が半導体集積回路技術の向上により、年々集積度を上げ微小化されることに伴い、機械工業の分野においても機械部品やそれらで構成される機械システム全体の小型化、マイクロ化が大きな流れになっている。ミリメートルオーダーやそれ以下の寸法の微小な機械やロボットを構成し、産業や医療の分野へ応用する研究開発が活発である。本研究ではこのような背景を踏まえ、小型機械システムの微小部品組立技術の確立を目指し、人間が直接操作不可能な微小部品を器用に操作し組立を行うことのできる微細作業システムの構築を目指した。

従来の微小対象物を操作するマニピュレータは、単純な開閉のみのグリッパー方式であり、このグリッパーを高精度に位置決めする事で、微小対象物の操作を行っていた。しかしながら、数十[ $\mu\text{m}$ ]以下の微小対象物の姿勢までを含む多自由度な位置決めや操作を行うことは極めて困難であった。また、表面間力が支配的な微小世界特有の物理環境の中では、微小対象物がマニピュレータやグリッパに付着し、これを放して任意の場所に位置決めすることが容易ではなかった。

本研究では、箸の操作を参考にした二本指マイクロハンドを提案することにより、各指の多自由度な動作を協調させることで、上記の問題の解決に当たった。また指の多自由度動作を実現するために、駆動機構に平行メカニズムを採用し、多自由度の高精度な動作を実現した。さらに、より高度な作業を実現するため、二本指マイクロハンドに適したヒューマンインターフェースについての提案を行い、作業性を向上させた。これにより最小2[ $\mu\text{m}$ ]の微小対象物の姿勢までを含む位置決めを可能にした。一方、微小組立に関しては、接着剤塗布による接着組立を採用し、その際問題となる微小対象物への接着剤塗布、すなわち数十[ $\mu\text{m}$ ]以下の液滴サイズをもつ極微量な接着剤塗布方法の提案を行い、この方法により立体的な微小構造物の組立を実現した。

以上の事項について本論文で言及する。

# 目次

第1章 緒言	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 微小対象物操作における従来の研究	2
1.3 本研究の方針	3
1.4 本論文の構成	4
第2章 微小環境下におけるマニピュレーションとその特徴	7
2.1 微小環境	7
2.1.1 スケール効果	8
2.1.2 微細作業における支配的な表面間力	9
2.1.3 各表面間力と重力との比較	12
2.2 2本指による微小対象物操作	13
第3章 二本指マイクロハンド用フィンガーモジュール	17
3.1 はじめに	17
3.2 パラレルメカニズムを用いたフィンガーモジュール	18
3.3 システム概要	20
3.4 アクチュエータの可調整パラメータによる $H_\infty$ 制御	21
3.4.1 圧電素子の制御系	21
3.4.2 従来の $H_\infty$ 制御の課題及び可調整パラメータを含む $H_\infty$ 制御器の有効性	24
3.4.3 可調整パラメータを含む $H_\infty$ 制御器設計	26
3.4.4 圧電素子への可調整パラメータを含む $H_\infty$ 制御器の適用	28
3.5 キャリブレーション	32
3.6 動作実験と評価	36

3.7	まとめ	38
<b>第4章</b>	<b>二本指マイクロハンド</b>	<b>39</b>
4.1	はじめに	39
4.2	並列式二本指機構の構成とその問題点	39
4.2.1	作業領域に関する考察	39
4.2.2	協調制御に関する考察	41
4.3	箸の操作に習った二本指マイクロハンド	41
4.4	微細作業実験と考察	44
4.5	まとめ	46
<b>第5章</b>	<b>微細作業用ヒューマンインターフェース</b>	<b>47</b>
5.1	はじめに	47
5.2	二本指マイクロハンド用操作システム	48
5.2.1	操作デバイスの構成	48
5.2.2	親指，人差し指による操作と二本指マイクロハンドによる操作	49
5.2.3	微細作業を考慮した二本指マイクロハンドの作業座標系	52
5.2.4	操作モードの切り替えによる作業性向上	54
5.2.5	操作システムを用いた微細作業実験	56
5.3	微細作業用視覚システム	58
5.3.1	微細作業に適した視覚システム	58
5.3.2	指先への自動焦点アルゴリズム	59
5.3.3	大局的操作における画像の提示手法	62
5.3.4	実験結果	65
5.4	まとめ	68
<b>第6章</b>	<b>接着接合による微細組立</b>	<b>69</b>
6.1	はじめに	69
6.2	微量液滴塗布技術	69
6.2.1	従来の液滴塗布方法	69

6.2.2	毛細管現象を利用した液滴抽出 . . . . .	71
6.2.3	微量液滴塗布評価実験 . . . . .	72
6.3	微小立体構造物組立 . . . . .	75
6.4	まとめ . . . . .	77
第7章	結言 . . . . .	79
7.1	結論 . . . . .	79
7.2	今後の予定 . . . . .	81
	謝辞 . . . . .	83
	参考文献 . . . . .	87
	研究業績 . . . . .	89
付録A	正規規約分解法 (NCF 法) による中心解の導出 . . . . .	93

## 目 次

1.1	Usual manipulators for the micro assembly . . . . .	3
2.1	Scale of some micro objects and range of micro fabrication . . . . .	7
2.2	Parameters in the van der Waals force between a ball and a plate . . . . .	10
2.3	Parameters in the force caused by liquid bridge between two balls . . . . .	11
2.4	Gravitational force and adhesion force between micro particles (Fvdw: van der Waals force, Ftens: surface tension force, Fei: electrostatic force between charged body and uncharged body, Fe: electrostatic force between the charged bodies) . . . . .	12
2.5	Various manipulation by using two fingers . . . . .	15
3.1	Two types of the micro finger module based on parallel mechanism . . . . .	19
3.2	Whole views of finger modules . . . . .	20
3.3	Experiment setup for motion control of the finger module . . . . .	21
3.4	Servo system to drive a piezo electric device. . . . .	22
3.5	Step responses of the error between the actual elongation of an actuator and the sensor reading . . . . .	23
3.6	Relation between the command signal to the servo system and a sensor reading which shows good linearity of the servo system with no hysteresis effect. . . . .	23
3.7	Relation between a sensitivity function $S$ , a complementary sensitivity function $T$ and a model error $r$ in a frequency response . . . . .	25
3.8	System for the normalized coprime factorization method . . . . .	26
3.9	Permitted regions of $ T(j\omega) $ and $ S(j\omega) $ . . . . .	27
3.10	Frequency responses for each value of variable parameter $\alpha$ . . . . .	30

3.11	Step responses for each value of variable parameter $\alpha$ . . . . .	30
3.12	Step responses using $H_\infty$ controller and PI one. . . . .	31
3.13	Step responses using $H_\infty$ controller and PI one with sampling time 0.8[msec].	31
3.14	Comparison of the least squares calibration workspace (allowing rotation) with the workspace for pure translational motion in the finger module . . . . .	35
3.15	3-D view of the workspaces using 6 by 3 reduced order Jacobian matrix . . .	35
3.16	Comparison between some measured sample points and their least-squares fit	36
3.17	"Micro figures" drawn by the program controlled finger module into a thin carbon layer applied onto a microscope slide . . . . .	37
4.1	In parallel two-fingered micro hand . . . . .	40
4.2	3D view of the common workspace of the two-fingered micro hand in parallel	41
4.3	Manipulation of chopsticks by a human hand . . . . .	43
4.4	A serial two-fingered micro hand . . . . .	43
4.5	Workspaces of the serial two-fingered micro hand . . . . .	44
4.6	Photograph of the two-fingered micro-hand prototype . . . . .	44
4.7	Image of the microscope showing micro manipulation of a glass ball by the two-fingered micro hand ( $1.43[\mu\text{m}/\text{div}]$ ) . . . . .	45
5.1	Picture of a master device for operation of the two-fingered micro hand . . .	49
5.2	Comparison of the micro hand motions with the actual human hand motions	50
5.3	Control flowchart for the operation of the two-fingered micro hand . . . . .	51
5.4	Coordinate system for the motion of the forefinger side chopstick . . . . .	53
5.5	Coordinate transformation from the master device to the micro hand . . . .	54
5.6	Rotational task of some micro objects by using the two-fingered micro hand and master device system . . . . .	57
5.7	Insertion of a micro stick into a micro hole . . . . .	58
5.8	Configuration between the finger tip and the microscope and the microscope image with binarization . . . . .	60
5.9	Process of the auto focusing to the finger tip . . . . .	61

5.10	Required two images in the positioning task . . . . .	62
5.11	Flow to obtain a still and a real-time images in the positioning task . . . . .	64
5.12	A system to observe micro manipulation by using HMD . . . . .	64
5.13	Relation between the index value and the finger position with auto focusing control . . . . .	65
5.14	HMD images in the process of the positioning task . . . . .	67
6.1	Methods for making micro drop . . . . .	70
6.2	The glass pipette for making micro drop . . . . .	71
6.3	Micro drop by applying a capillary phenomenon . . . . .	71
6.4	Parameters on estimation of the micro drop and relationship between the quantity in the glass pipette and the micro drop size . . . . .	72
6.5	3D image of a micro drop from the AFM . . . . .	73
6.6	Relation between the quantity in the glass pipette and the volume of the micro drop . . . . .	73
6.7	Model of the glass pipette shape . . . . .	74
6.8	A picture of the glass pipete from the microscope . . . . .	74
6.9	A configuration of the micro fabrication system setup . . . . .	75
6.10	A 3D image and a picture of the 3D structure: Micro scarecrows in different orientations . . . . .	76

# 表 目 次

2.1	Scale effect . . . . .	8
4.1	Ratio of the common workcspace to the workspace of one finger module . . .	40

# 第1章 緒言

## 1.1 本研究の背景と目的

電気回路が半導体集積回路技術の向上により、年々集積度を上げ、微小化されることに伴い、ロボットをはじめとして機械工業の分野では、機械部品やそれらで構成されるシステム全体の小型化、マイクロ化が技術的に一つの大きな流れになっている。医療分野におけるカテーテルといった低侵襲治療器具の微小化ならびに高度化、人工臓器の小型化、宇宙航空分野における衛星部品の小型化、さらには家電情報機器の小型化といったものである。

半導体集積回路技術であるフォトエッチング技術を応用し、シリコンウエハー上に数十 $[\mu\text{m}]$ のスプリング、ギヤといった機械部品を製作したという報告を皮切りに1970年頃から、機械部品と電気回路を統合し、マイクロメカニカルセンサとして実用化するという研究が始まった。80年代後半にはアクチュエータ等の研究も盛んになり微小機械システム実現への道が開けるようになった。日本でも、数々の成果が報告される中、1991年度より10年間にわたり国家プロジェクトの一つである、産業科学技術研究開発制度プロジェクトとして「発電施設用高機能メンテナンス技術開発」、通称「マイクロマシンプロジェクト」が始まっている。この中で、発電施設の細管内の検査用ロボットの実現を目標として、数ミリサイズの高機能機械システム（マイクロマシン）実現のために多くの企業、研究所が研究参加している。また研究内容は、フォトエッチング技術のみならず、様々な加工法、及び接合法を組み合わせ、より複雑な機械システムへのアプローチが試みられている。また加工技術だけでなく、マイクロ理工学、組立技術、設計技術、評価技術といった幅広い分野にわたり、マイクロマシンを実現するための基盤技術の確立を目指している。

マイクロマシンを製作するに当たり、様々な微小部品を製作する技術は蓄積されてきているが、システムとして組み上げる技術は、未だ実用化に乏しい。マイクロマシン組立の手法には、フォトエッチング技術を基本として、プロセス工程のみでシステム全体を作り上げるといった方法と、従来の産業用ロボットなどのように、各微小部品を操作して組み立てると

いった方法の二種類に研究の方向性が大きく分けられる。前者は、一括工程で作成できるため、大量生産に向いている。後者は、より複雑な機構が実現でき、部品材料にも限定されないといった特徴がある。両者の技術は、それぞれ一長一短があり、当然、実現に向けて、お互いの技術を融合することは必要になるであろう。

微小対象物を扱うという要求は、マイクロマシン実現だけに留まらず、他の分野への波及効果大きい。たとえばバイオ技術で必要とされる細胞操作などは非常に応用が期待される分野である。現在のクローン技術などで操作される受精卵は大きさが100[ $\mu\text{m}$ ]程度であり、それ以下のサイズの細胞を操作する事は非常に熟練を要する。また操作工程についても、細胞核の抽出といった単調作業を数百単位の細胞に対してこなす必要があり、この種の作業の自動化が期待される。さらに、より微小なDNA単体の操作といった期待も大きい。また、医療分野においても、血管縫合手術、鼓膜整形手術、角膜移植手術といった微細な手術を必要とされ、この分野への応用も期待される。

以上の背景から、筆者は、マイクロマシンの組立、細胞及び遺伝子操作、微細手術への応用を考えたミクロンサイズの微小対象物を容易に操作、組立可能な微細作業システムの研究を行った。

## 1.2 微小対象物操作における従来の研究

時計部品の組立工程によると、人間がピンセットなどを用いて操作できる最小のサイズは500[ $\mu\text{m}$ ]程度といわれている。微小対象物の大きさは、数ミリから数マイクロメートルのサイズであり、このサイズでは人間が直接操作を行うことは難しい。よって、人間に代わって微細操作を行うマニピュレータの開発が不可欠である。例えばH. Guckelらは、LIGAプロセスで製作した微小部品を組み立てる際に、このような技術の必要性を指摘している [1]。微細作業に関する研究は、国内外で様々な試みがなされており、T. Fukudaらは、圧電素子を組み合わせ、コンパクトで多自由度にエンドエフェクタを動作させる機構とその制御法を提案している [2][3]。また実際の微細作業の例として、T. Satoらが、直径500[ $\mu\text{m}$ ]のマイクロエアタービンの組立や、高さ100[ $\mu\text{m}$ ]のマイクロ鳥居製作の成功例を報告している [4]。以上は従来のロボット技術からのアプローチで、微小対象物に物理的な拘束をおこない操作するという、接触型のマニピュレーションとして分類できる。さらに、非接触型マニピュレー

ションとして、光の放射圧を利用するレーザーマニピュレーションの研究も進んでいる [5]. これは微小対象物にレーザーを照射することにより、対象物内の屈折における光の放射圧を制御することで微小対象物操作をおこなうものである。それ以外にも電磁波を応用したもの、音波を応用したものなど、非常に興味深く多種多様なアプローチで研究されている。

### 1.3 本研究の方針

筆者らは、基本方針として接触型のマイクロマニピュレータの研究を前提とした。ミクロな世界では、接触型のマイクロマニピュレータは、微小対象物との間に静電気力、分子間力といった様々な表面間力が働き、微細作業が困難となる。非接触型マニピュレーションでは、これらの力の影響が少ないので、微細作業は実現しやすい。しかし、接触型のマイクロマニピュレータは、微小対象物の幅広いサイズに対応できることと、操作環境を選ばないといった利点があり、その適用範囲は極めて広い。

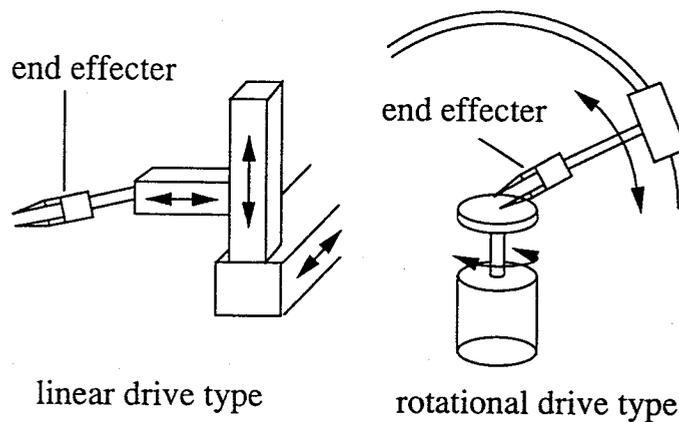


Fig. 1.1 Usual manipulators for the micro assembly

操作、加工、組立といった工程を考慮すると、微細作業に要求されるマイクロマニピュレータは、微小対象物の回転も含めた6自由度の高精度な位置決めが実現できなければならない。T. Satoらは、すべての回転機構の回転軸を、顕微鏡の視界の中央で一致させることで、微小対象物の6自由度の正確な位置決めを実現した。しかし回転機構の回転軸をすべて同一視野内に合わせるため、精度の向上に伴い、機構の剛性が要求され、大がかりな機構となる。基本的に従来のマイクロマニピュレータの機構は、グリッパーなどのエンドエフェクタを並

進、回転させて微小対象物を操作していた (Fig. 1.1). 特に回転操作においてはエンドエフェクタを操作レンジに比べ、大きく動かす必要があるため、機構的に大きくならざるを得ない。

ここで、我々が普段使っている箸の操作を見てみると、少なくとも並進3自由度の二本の動きを協調することで、対象物を容易に回転させることができる。すなわち、箸の操作ができるような2つの多自由度機構（最低3自由度）の組み合わせで、コンパクトなマイクロマニピュレータが実現できる。

高精度で多自由度な動作が可能な機構としてパラレルメカニズムが挙げられる。これはエンドエフェクタ部と、ベース部とを複数のリンクで並列に支える機構であり、高精度な位置決めができる、大きい力が出せる、加えて多自由度な動きが実現できる等の特徴を持っている。この高精度な位置決めと多自由度な動きが実現できることは、微細作業にとって重要な要素であり、マイクロマニピュレータの機構として有効と考えられる。よって本研究では、パラレルメカニズムをマニピュレータの基本機構として採用した。また、操作する際の指の数は上記に示した回転操作の必要性から最低二本指が必要である。ここでマクロな環境では、対象物の安定な把持には、最低三指が必要であるのに対し、微小環境では表面間力の影響が支配的であるため二指でも十分対象物を安定に把持できる。よって微細環境では二本指で十分であると考えられる。

以上から、本研究では微細作業組立システムの実現に向け、パラレルメカニズムを用いた二本指マイクロハンドの構成を基本方針とした。

## 1.4 本論文の構成

第一章「緒言」では、本研究の目的と背景について述べた。

第二章「微小環境下におけるマニピュレーションとその特徴」では、通常の世界と異なる微小環境についての特徴を説明し、特にマニピュレーションにおいて影響力の強い分子間力、液架橋力、静電気力を理論的に考察する。このような環境下における最適なマニピュレーションとして、箸のような二本指による微小対象物のマニピュレーションを提案し、考察を行う。

第三章「二本指マイクロハンド用フィンガーモジュール」では、第二章で要求される二本指の動きを高精度に実現するため、パラレルメカニズムを応用した指の駆動機構を提案する。加えて高精度位置決め制御を実現するため、サンプリングレートの変動や雑音に対して安定

な制御手法として  $H_{\infty}$  制御理論に基づく可調整パラメータを含んだ制御器の適用に関して述べる。更にフィンガーマジュールのキャリブレーション方法について検討を行い、最終的な指先の精度に対して評価を行う。

第四章「二本指マイクロハンド」では、第三章で試作したフィンガーマジュールを利用し各指の協調制御、及び作業領域の観点からみて最適な二本指機構について考察を行う。この考察に基づきプロトタイプを製作し、実際の微小対象物の操作実験を行い、本機構の有効性を評価する。

第五章「微細作業用ヒューマンインターフェース」では、より高度な微細作業を操作者が安定に遂行するためのヒューマンインターフェースについて検討を行う。微細作業用ヒューマンインターフェースとして重要な要素は、二本指マイクロハンドに対し容易に希望の操作を可能とする操作デバイスシステムと、高倍率による浅い焦点深度という制約の中で微細作業を確実に実行できる、より有効な視覚システムの二つである。微細作業用操作デバイスシステムでは、微細環境内の微小力を計測する有効な力センサが無いため、操作性を向上させることが非常に重要となる。本章前半で、これに対しての提案を行い、有効性を評価する。後半では、作業に合わせ、焦点面を能動的に制御することで高倍率による浅い焦点深度を補い、操作性を向上する手法について提案を行い、その有効性を評価する。

第六章「接着接合による微細組立」では、立体的な微小構造物の組立に不可欠な微小部品の接合法に関して述べる。接合方法としては、素材に限定されず比較的容易な接着剤による接着接合を採用する。その際の課題は、微小部品サイズ以下の極微量な接着剤の液滴塗布であるため、接着剤の高精度微量液滴塗布技術を中心に述べる。また、その接着効果を検証するため、二本指マイクロハンドと組み合わせた微細作業組立システムを構築し、立体的な微小構造物の組立を行い、その有効性を評価する。

第七章「結言」では、本論文で得られた成果を要約し、今後の課題について考察する。

## 第2章 微小環境下におけるマニピュレーションとその特徴

### 2.1 微小環境

多くの研究者が一般に微小環境と呼ばれる領域の多方面にわたる研究に携わっている。微小環境と言っても扱う対象物のサイズは多岐にわたる。一般に微小環境の対象物の大きさは数[mm]から数[nm]であり、このサイズの領域を微小環境(またはマイクロ環境)と呼ぶ。Fig. 2.1に主な微小対象物の大きさと、微細作業の範囲を示す。微小環境における特筆すべ

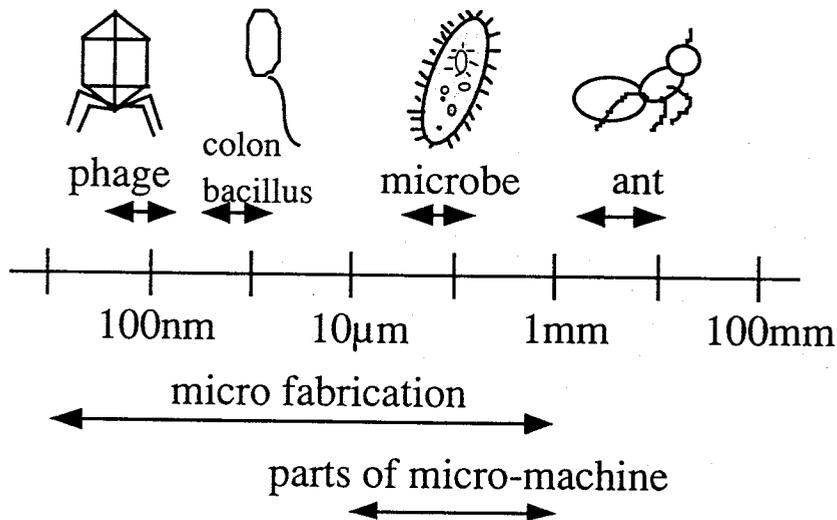


Fig. 2.1 Scale of some micro objects and range of micro fabrication

き点は、支配する物理法則が我々の住む通常環境(以下マクロ環境)と大きく異なり、マクロ環境では気にとめなかった些細なことが微小環境では問題となる。微小環境とマクロ環境の物理法則の違いはスケール効果として表されている。

## 2.1.1 スケール効果

Table 2.1には長さ  $L$  に対して様々なパラメータの微小環境における効果，すなわちスケール効果（スケーリング則）を示している [6].

Table 2.1 Scale effect

パラメータ	関係式	寸法効果
長さ $L$	$L$	$L$
表面積 $S$	$\propto L^2$	$L^2$
体積 $V$	$\propto L^3$	$L^3$
質量 $m$	$\rho V$	$L^3$
圧力 $F_p$	$SP$	$L^2$
重力 $F_g$	$mg$	$L^3$
慣性力 $F_i$	$m(\frac{d^2x}{dt^2})$	$L^4$
粘性力 $F_f$	$\mu \frac{S}{d} \frac{dx}{dt}$	$L^2$
弾性力 $F_e$	$ES \frac{\Delta L}{L}$	$L^2$
固有振動数 $\omega_0$	$\sqrt{K/M}$	$L^{-1}$
慣性モーメント $I$	$mr^2$	$L^5$
レイノルズ数 $Re$	$f_i/f_f$	$L^2$
熱伝導 $Q_c$	$\lambda \delta TA/d$	$L$
熱伝達 $Q_t$	$h \delta TS$	$L^2$
熱放射 $Q_r$	$CT^4S$	$L^2$
静電気力 $F_e$	$\frac{\epsilon}{2} SE^2$	$L^2$
電磁力 $F_m$	$\frac{\mu}{2} SH^2$	$L^4$

全ての長さが  $L$  倍になったとすると機械的なパラメータに関してはバネ定数が  $L$  倍になるため固有振動数は  $L^{-1}$  に比例し， $L$  が小さくなるほど応答が速くなることわかる。運動の際，重力は  $L^3$ ，慣性力は  $L^4$  に比例し，粘性力（摩擦力）は  $L^2$  に比例する。すなわち寸法  $L$  が小さくなると，体積が影響する力（重力・慣性力）より，面積が影響する力（粘性力・摩擦力）が相対的に大きくなる。このため微小物体の運動は摩擦が無視できず，また媒体中では大きな粘性抵抗を受ける。

慣性力の粘性力に対する割合であるレイノルズ数  $Re$  は  $L^2$  に比例する。つまり水や空気中でも粘性力が支配的となる。

運動量  $mv$  は  $L^4$  に，運動エネルギー  $mv^2/2$  は  $L^5$  に比例する。このエネルギーが小さいこ

とはわずかなエネルギーで動かせる事を意味している。また、アクチュエータとしては低エネルギーで駆動でき、センサーは高感度になることを表している。

Table 2.1 に示すように熱伝導や熱伝達の量  $Q$  は  $T$  に比例し、これから等価熱コンダクタンス  $G$  はその比例定数となるが  $G$  はそれぞれの  $Q_c, Q_t, Q_r$  に対し、 $L$  または  $L^2$  に比例する。すなわち寸法  $L$  が小さくなるほど熱絶縁が良くなり、高感度の熱型センサーや低消費電力のヒーター等が実現できる。また応答時間  $\tau$  は  $C/G$  であるが、熱容量  $C$  は体積と密度及び比熱の積で表され  $L^3$  に比例するため  $\tau$  は先に述べた熱伝導や熱伝達の場合、それぞれ  $L^3/L = (L^2)$  となり寸法  $L$  を小さくするほど高速応答が得られる。

### 2.1.2 微細作業における支配的な表面間力

対象物の大きさや作業に要求される精度が  $1[\text{mm}]$  から  $1[\text{nm}]$  の範囲にあるものは、微細作業（マイクロ/ナノ作業）として一般に呼ばれている。このような微細作業においては従来のマクロ世界における作業を前提とした加工や操作組立技術は当てはまらない。これはスケール効果等の物理現象がマクロ世界と異なるためである。従って微細作業技術を確立するには微小環境の物理現象を扱う物理学に基づいたアプローチが必要である。微細作業における支配的な表面間力として代表的なものに、分子間力（ファン・デル・ワールス力）、液体架橋力（表面張力）、静電気力が挙げられる。本節ではこれら代表的な表面間力について簡潔に述べる。

#### 分子間力

分子間力は、粒子と粒子、粒子と壁面など二物体が、ごく接近したときに生じる電磁気的な力で、主に二物体の電子の運動に依存する。Hamaker の理論では配向効果、誘電効果、分散効果と呼ばれる 3 つの要素を足し合わせたものになる。London によると電氣的に中性で対称な分子に生じる分散のエネルギー  $E_A$  は分子間の中心距離を  $r$  とすれば次式で近似される。

$$E_A = -\frac{\beta_{11}}{r^6} \quad (2.1)$$

ここで  $\beta_{11}$  は分子の性質による定数である。Hamaker は分子間の相互作用は式 (2.2) のようになるとして物体の全ての構成原子に関する相互作用を加算することで球状粒子間の相互作用

を計算した.

$$E = - \int_{v_1} \int_{v_2} \frac{n^2 \beta_{11}}{r^6} dv_1 dv_2 \quad (2.2)$$

ここで  $n$  は単位体積あたりの分子数である. 式(2.2)を計算すると結果は式(2.3)のように表される [8].

$$E = -\frac{H}{6} \left\{ \frac{2r_1 r_2}{R^2 - (r_1 + r_2)^2} + \frac{2r_1 r_2}{R^2 - (r_1 - r_2)^2} + \ln \frac{R^2 - (r_1 + r_2)^2}{R^2 - (r_1 - r_2)^2} \right\} \quad (2.3)$$

ここで  $H$  は Hamaker 定数と呼ばれる物質固有の定数である.

$$H = n^2 \pi^2 \beta_{11} \quad (2.4)$$

次に式(2.3)の  $r_2$  を  $\infty$  にすると球と平板の間の相互作用エネルギーの式になる. 但し  $d = 2r$  とする.

$$E = -\frac{H}{6} \left\{ \frac{d}{2z} + \frac{d}{2(z+d)} + \ln \frac{z}{z+d} \right\} \quad (2.5)$$

これを微分すると分子間力の式が得られる.

$$F = -\frac{H}{6} \left\{ \frac{d}{2z^2} + \frac{d}{2(z+d)^2} - \frac{1}{z} + \frac{1}{z+d} \right\} \quad (2.6)$$

また  $z$  が  $d$  に比べ十分小さいとすると次式のように近似される.

$$F = -\frac{Hd}{12z^2} \quad (2.7)$$

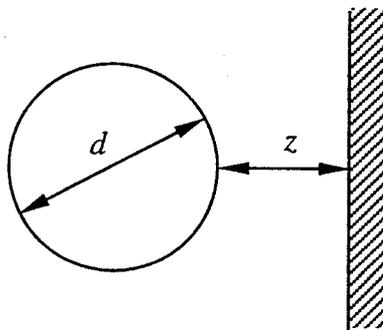


Fig. 2.2 Parameters in the van der Waals force between a ball and a plate

## 液体架橋力

粉体と固体あるいは粉体同士の接触部や狭い間隙部に液体が存在するとき、それを液体橋と呼ぶ。液体橋による付着力の大きさは湿度（水蒸気付着量）、液体橋の形状に支配される。また吸着量や液体橋の形状は粉体表面の水蒸気に対する親和性の大小、粉体の形状、接触状況にも左右される。Fig. 2.3のような同一大の2つの球状粒子の間に液体橋が形成されたとき式(2.8)のように毛管負圧に起因した力と最も細いくびれた部分の表面張力による力との和が二粒子間に働く付着力  $F$  となる。

$$F = \pi R_2^2 \sigma \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + 2\pi R_2 \sigma \quad (2.8)$$

ここで  $\sigma$  は液体の表面張力である。

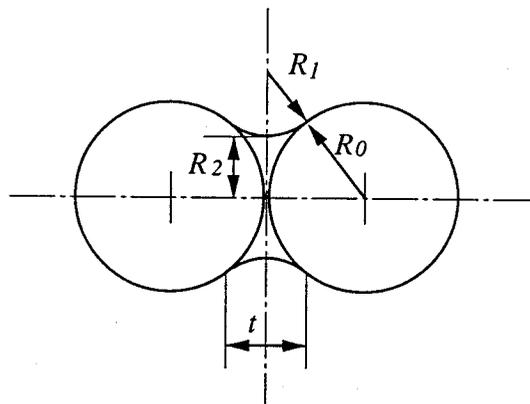


Fig. 2.3 Parameters in the force caused by liquid bridge between two balls

## 静電気力

静電気力は粒子が帯電しているか否かによって3通り考えられる [9].

帯電した粒子同士の静電気力 2球の表面電荷密度を  $\sigma_1, \sigma_2$  として、粒子間距離  $z$  が換算粒径  $d$  に比べ十分小さいとすると静電気力  $F$  は次式のようにになる。ここで  $\epsilon_0$  は媒体の誘電率である。

$$F = -\frac{\pi \sigma_1 \sigma_2 d^2}{\epsilon_0} \quad (2.9)$$

換算粒径  $d$  は  $d_1, d_2$  をそれぞれの球の直径とすると以下に定義される.

$$d = \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \tag{2.10}$$

非帯電粒子の接触帯電による静電気力 ここで  $V_c$  は接触電位差,  $z$  は粒子間距離,  $H$  は Hamaker 定数,  $k$  は弾性特定係数と呼ばれヤング率とポアソン比で決定される定数である.

$$F = -\frac{1}{2}\pi\epsilon_0 \frac{V_c^2}{z^2} \left\{ \frac{Hdk^2}{32z^2} \left( 1 + \frac{H^2 k^2 d}{108z^7} \right) \right\} \tag{2.11}$$

帯電した粒子と非帯電壁面との間の静電気力 ここで  $\epsilon$  は壁面の誘電率,  $\sigma$  は表面電解密度である.

$$F = -\frac{\pi}{4\epsilon_0} \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + \epsilon_0} d^2 \sigma^2 \tag{2.12}$$

### 2.1.3 各表面間力と重力との比較

前節で示した理論式から対象物の大きさにおける各力の大きさを Fig. 2.4 に示す. これら

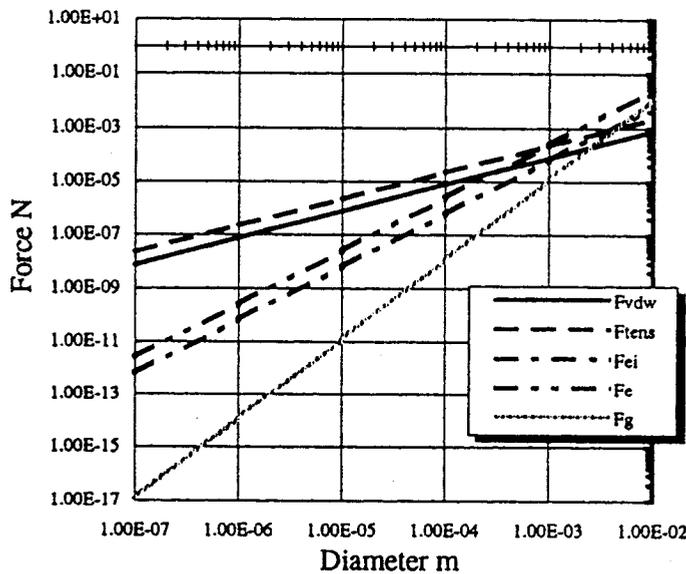


Fig. 2.4 Gravitational force and adhesion force between micro particles (Fvdw: van der Waals force, Ftens: surface tension force, Fei: electrostatic force between charged body and uncharged body, Fe: electrostatic force between the charged bodies)

表面間力は, ほぼ面積に比例して影響力が変化するため, 体積に比例して影響力を与える重

力、慣性力に対しては、対象物がある大きさ以下になると、それぞれの影響力が逆転することになる。1[mm]以下の対象物については、ほぼ同等の影響力となり、100[ $\mu\text{m}$ ]以下では、完全に表面間力が支配的になる [7]。以上から、微小環境の特異性を踏まえてマニピュレータ機構を検討することが重要である。

## 2.2 2本指による微小対象物操作

一般にマクロな世界では、対象物を把持して位置決めなどを自由に行うために、マニピュレータの先端に対象物把持用のエンドエフェクタを備える。ミクロな対象物でも、大きさがサブミリ程度であるならば、開閉型のエンドエフェクタと微細動作のマニピュレータを組み合わせて同様な操作を行うことは可能である。しかしながら、より小さな対象物、例えば大きさが数[ $\mu\text{m}$ ]程度の対象物を器用に扱うには、このような方法では実現が困難である。すなわち、大きさ数[ $\mu\text{m}$ ]の対象物を扱うのに十分小さな開閉型エンドエフェクタの実現と、把持した対象物の回転運動まで含む器用なマニピュレーションの実現が困難なことである。

そこで本節では、器用な動作が可能な2本指を有するマイクロハンドの構成を考察する。マクロな世界でのマニピュレーションでは重力などの影響を考慮すると剛体の安定把握は3指以上が必要である。一方、微小環境においては慣性力の影響が小さくなると同時に表面間力の効果が大きくなり、対象物が吸着する現象が起こるため、二指でも十分安定なマニピュレーションが可能と考えられる。この場合の指は、その先端で並進運動の3自由度が実現できるものであればよいが、回転運動も含めた6自由度が実現できるものであればなお望ましい。

人間は箸を用いて器用な操作を行なうが、このことを参考に二本指を用いてどのような微小操作が行なえるかを考察する。Fig. 2.5は二本指によるマニピュレーションを類別したものである。微小部品の組立、細胞操作などで必要とされるマニピュレーションは大別して、

- (1) 位置決め (positioning)
- (2) 力制御 (force applying)
- (3) 変形 (deforming)
- (4) その他

に分類される。(1)では対象物の並進、回転動作が、(2)では対象物の把持、対象物間の押し

つけ、また(1)(2)に関わるものとしては対象物の合わせがある。(3)は特に柔軟対象物に対するマニピュレーションで、切断、引き伸ばし、圧搾、穴開けなどが考えられる。その他に、かき混ぜやはね飛ばしなども可能である。二本指を用いることにより、微小世界であっても、このように様々な作業が期待できる。

特に微小対象物の姿勢の制御は、非常に難しい。すなわち、角度は無次元であるため微小環境であろうと通常の世界であろうと同じ姿勢角度を制御しなければならない。開閉型エンドエフェクタを用い、掴んだ微小対象物の姿勢を制御するには、顕微鏡視野内に回転中心を維持しながら開閉型エンドエフェクタを大きく回転させなければならない。このような高精度な回転中心軸合わせを維持する機構には、高精度な加工技術と頑健で大がかりな機構が要求される。しかし二本指のマニピュレーションでは各指の並進運動のみを協調させることにより、微小対象物自身を回転させることで姿勢を制御できるため、コンパクトな機構で済むといった特徴がある。以上から、微小対象物のマニピュレーションには二本指による操作が適していることが理解できる。

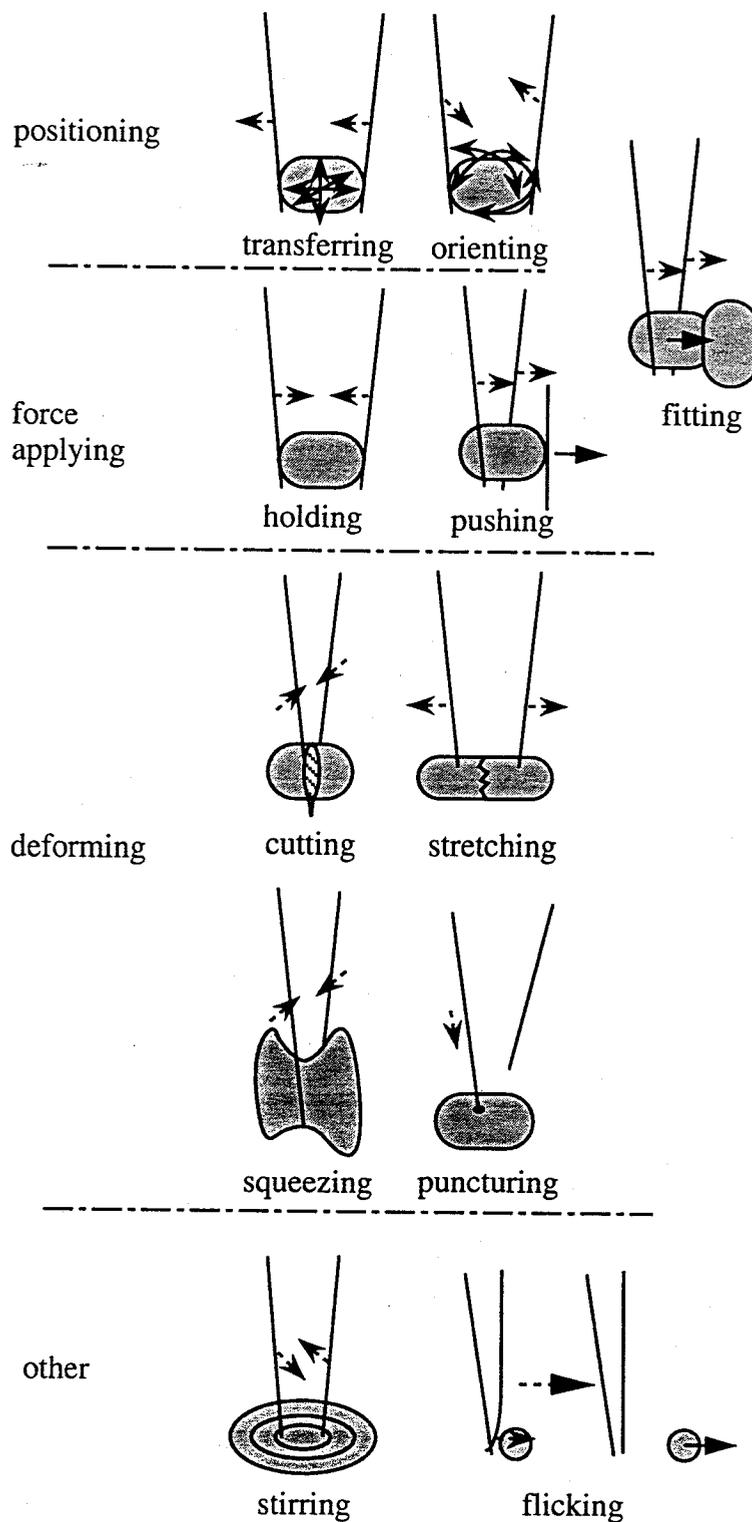


Fig. 2.5 Various manipulation by using two fingers

## 第3章 二本指マイクロハンド用フィン ガーモジュール

### 3.1 はじめに

前章では箸のような二本指操作による微小環境内での作業の可能性とその有効性を検討した。箸の動きをロボットハンドにより実現するには、機構的に各指が最低3自由度を持つ必要があり、加えて微細作業を実現できる位置決め精度が要求される。すなわち、多自由度で、かつ高精度を実現する機構が必要となる。以下に二本指マイクロハンドの指の駆動機構（以降フィンガーモジュールと呼ぶ）の具体的仕様を示す。

- (1) 指先の並進3自由度運動，ないし並進と回転の両方の運動が実現できること。
- (2) 数 $[\mu\text{m}]$ の対象物を操作できる精度を持っていること。
- (3) 微小対象物を顕微鏡下で扱うため，機構のサイズは顕微鏡に組み込める程度の寸法であること。

このような機能を実現する機構としては，以下の理由により，従来のマニピュレータに用いられている多関節型機構よりはパラレルメカニズムが適切と考えられる。パラレルメカニズムは，

- (1) 多自由度の動作がコンパクトな機構で容易に実現できる。
- (2) 位置決め精度が高い。
- (3) 逆運動学が単純で動作制御が容易。

等の長所がある。唯一の欠点である可動範囲が小さいという問題も，基本的に作業領域は顕微鏡下に限られるため，本研究の目的達成には大きな障害とならない。以上からフィンガーモジュールにはパラレルメカニズムを基本的な機構として採用することが有効であると考えられる。

さらに高精度位置決め制御には、その制御系設計も重要な要素である。通常、アクチュエータの制御には PID 制御が比較的適応しやすいことから頻繁に使われる。しかし微細作業における高精度を維持するためには、雑音などの外乱に影響を受けにくいロバストな制御系が望まれる。そこでロバスト制御手法として知られる  $H_\infty$  制御を応用した制御手法を本制御系に適用した。

加えて、高精度位置決めにおいてフィンガーモジュールのキャリブレーション技術の確立は重要な課題である。本章では顕微鏡画像と、その顕微鏡焦点により指先の三次元位置を計測し、動作制御に必要な各アクチュエータの伸びに対する指先位置の関係をキャリブレーションする手法について検討し、動作実験によって精度を評価した。

## 3.2 パラレルメカニズムを用いたフィンガーモジュール

アクチュエータについては、直動シリンダ、小型モータ、圧電素子などが候補として考えられるが、大きさの点から積層型の圧電素子（TOKIN 製 AE0203D08、外形寸法  $2 \times 3 \times 10$  [mm]）を用いることとした。したがって、直動型のアクチュエータとして用いることになり、フィンガーモジュールの構成としては、圧電素子を駆動リンクとする 6 自由度スチュワートプラットフォームを基本に設計を行うこととした。エンドエフェクタ先端部の運動特性と可動範囲を最大とするような評価指数を定め、これを最適とするようにリンクパラメータ、すなわちリンク結合点の位置を定めた [10]。

正確なスチュワートプラットフォームを構成するためには、リンクをベースプレートとエンドプレートに接続するための微小ジョイントの実現が課題となる。すなわち、極めて小さなボールジョイント、あるいはユニバーサルジョイントで対偶を構成しなければならない。しかし、本研究で必要とする程度の小さなジョイントは実現が困難であり、もちろん市販もされていない。そこで、次のような二つの機構を提案する。一つは、Fig. 3.1(a) に示すように、リンク機構の先端を鋭く尖らせ、ベースプレートとエンドプレートでは小さな窪みでこれを受け支える方式である。ただし、これだけではメカニズム全体を支えられないので、ベースプレートとエンドプレートとの間はスプリングで固定する。これをピボット・スプリング式と呼ぶことにする。試作した機構の駆動部（エンドエフェクタを除いたパラレルメカニズムの部分）の概略寸法は  $\phi 35 \times 28$  [mm] である。

もう一つの機構は、Fig. 3.1(b) に示すように、ボールジョイントをバネで置き換える方式である。リンクを支えると同時に、アクチュエータの伸び縮みによって生ずるリンクの動きに柔軟に追従させるものである。リンクの主要部分である圧電素子の剛性が極めて高いことと、リンクの変位が機構全体の大きさに比して極めて小さいこと（千分の1以下）を考慮して、バネはステンレス製（SUS304-WP）で直径0.45[mm]、長さ2[mm]のワイヤで実現することとした。積層型圧電素子では最大の伸びは全長の千分の1程度である。ワイヤの全長を2[mm]としてそのバネ定数を計算すると、先端での軸垂直方向の負荷に対して0.2 [N/ $\mu\text{m}$ ]程度である。これは、圧電素子の発生力数百 [N] に比して十分小さく、したがってワイヤ部はボールジョイントとして要求される微小な曲げやねじれが容易に実現可能である。

これをフレキシブル・ジョイント式と呼ぶことにする。試作した機構の駆動部の概略寸法は $\phi 64 \times 20.75$  [mm]である。Fig. 3.2 に両者の外観を示す。

エンドフェクタ部は細胞操作に用いられる市販の直径1[mm]の中空ガラスパイプが用いられており、先端部は市販の専用加工器により加熱引っ張り加工を施し、曲率0.1[ $\mu\text{m}$ ]以下の尖状にすることが可能である。

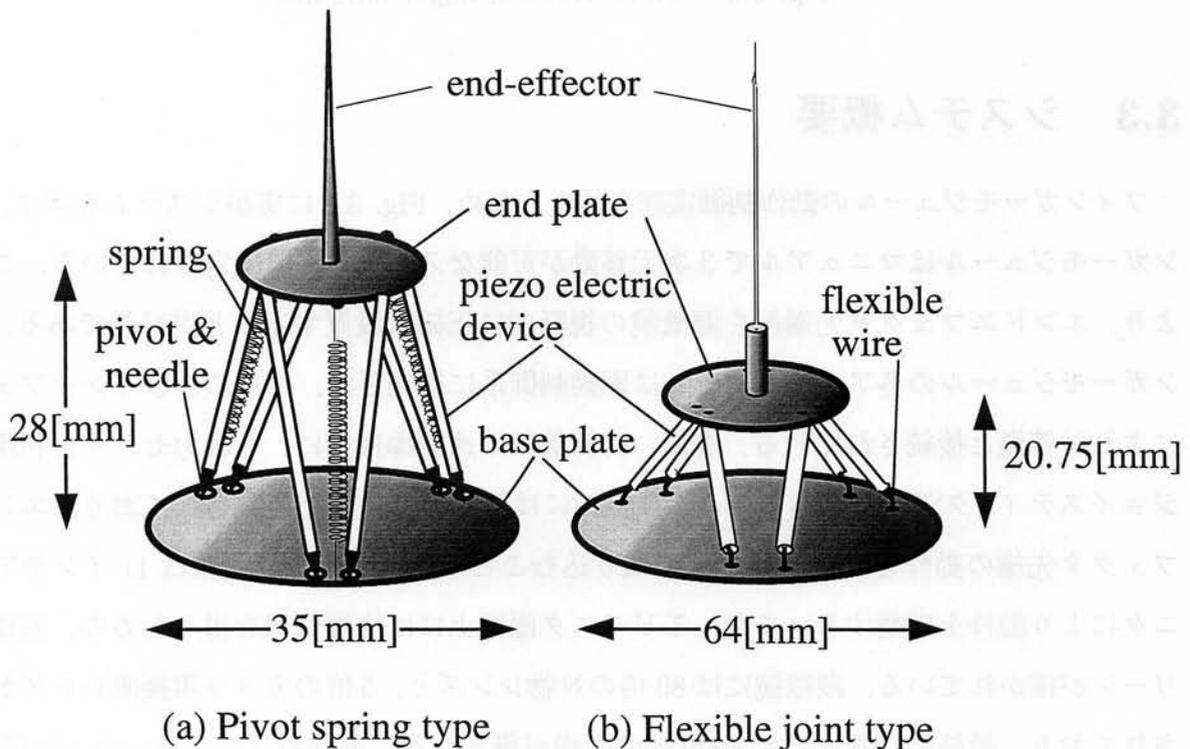


Fig. 3.1 Two types of the micro finger module based on parallel mechanism

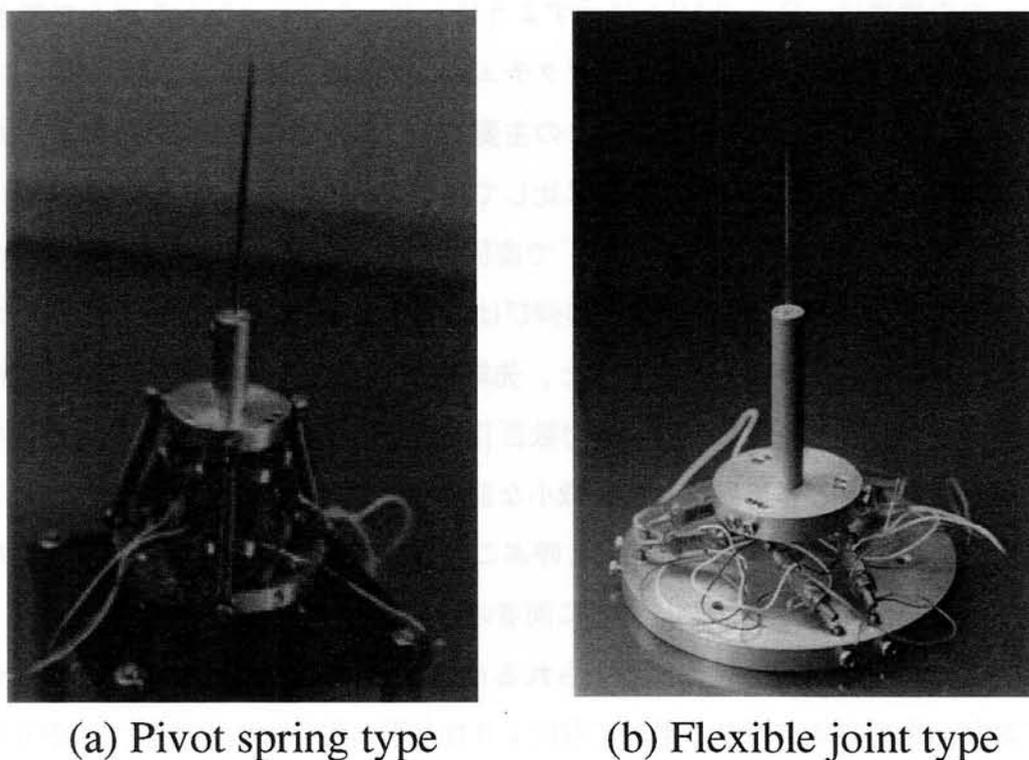


Fig. 3.2 Whole views of finger modules

### 3.3 システム概要

フィンガーモジュールの動作制御実験を行なうため、Fig. 3.3に実験システムを示す。フィンガーモジュールはマニュアルで3次元移動が可能なステージ上に固定されている。これにより、エンドエフェクタ先端部を顕微鏡の視野内に正確に設置することが可能である。フィンガーモジュールの各アクチュエータは駆動制御系に接続され、さらにI/Oインタフェースにより計算機と接続されている。また、計算機には遠隔操作用に、6軸力センサを利用したジョイスティックが接続されている。顕微鏡にはCCDカメラが搭載されており、エンドエフェクタ先端の動作を画像情報として取り込むことが可能である。通常は11インチTVモニターにより動作を確認する。また、TVモニター画面上には位置情報を得るための、座標スクリーンが描かれている。顕微鏡には80倍の対物レンズと、5倍のカメラ用接眼レンズが搭載されており、最終的に画面上で4000倍の画像が得られる。動作キャリブレーション時には、エンドエフェクタ先端のX,Y座標値を画面上で $0.1[\mu\text{m}]$ の分解能で、Z座標値はステージ駆動部に付属するマイクロメータにより $2\sim 3[\mu\text{m}]$ の分解能で計測することが可能である。

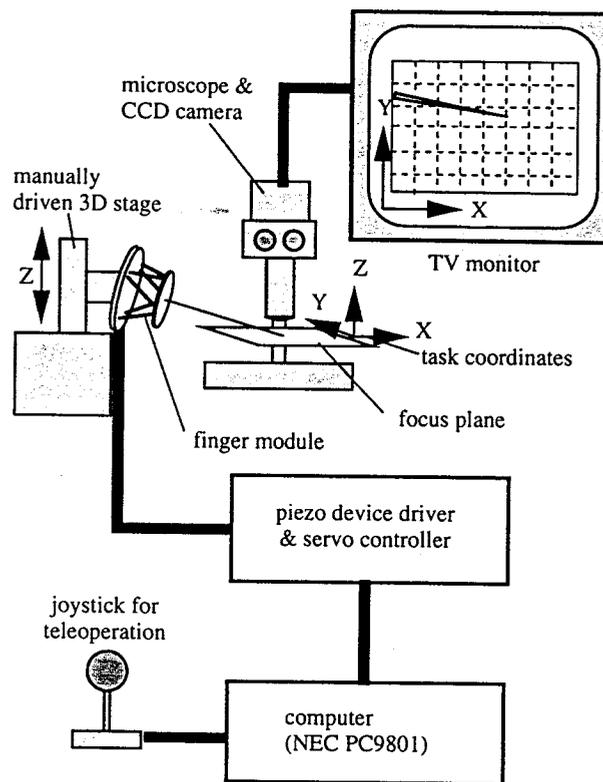


Fig. 3.3 Experiment setup for motion control of the finger module

### 3.4 アクチュエータの可調整パラメータによる $H_\infty$ 制御

#### 3.4.1 圧電素子の制御系

アクチュエータとして用いた圧電素子は大出力で応答が速く微小変位が得やすいことが特徴であるが、ヒステリシスが大きく単純な電圧駆動の制御では十分な位置決め精度が得られない。そこで、圧電素子表面にストレインゲージ (NEC 三栄 N11-FA-1-120-23) を、一枚は圧電素子の伸縮量計測用、もう一枚は温度補償用として貼り、ブリッジ回路を形成することにより、この出力から微小変位量を測定することとした。この変位量をフィードバックすることにより高精度な位置決め制御が可能となる。Fig. 3.4はアクチュエータ駆動制御系のブロック図である。圧電素子の駆動は、D/A コンバータの出力を高電圧オペアンプ (Bur Brown 3582) を用いた非反転増幅器を介して行なっている。サーボ演算はパーソナルコンピュータ (NEC PC9801RA) 上のソフトウェアにより行なっている。また、評価用としてアナログ素子によるPIコントローラも、スイッチの切り替えで設置可能となっている。

ストレインゲージの有効性ならびに圧電素子のヒステリシスを評価するためコンピュータ

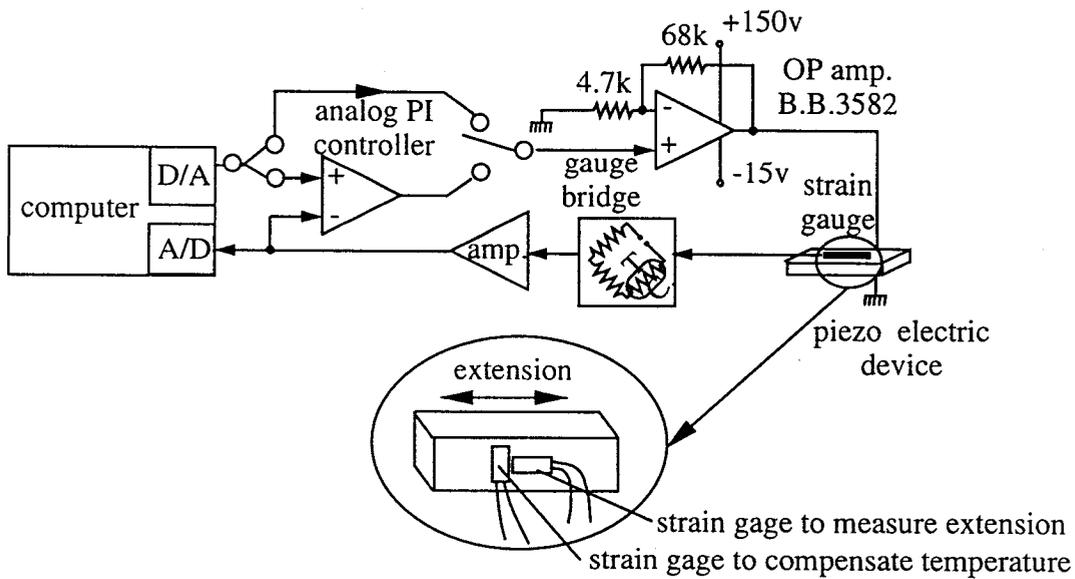


Fig. 3.4 Servo system to drive a piezo electric device.

によるデジタル PI 制御ならびにアナログ素子による PI 制御を行った。

まず、アクチュエータの変位を接触式変位計で測定し、ストレインゲージの出力と比較した。デジタル PI 制御におけるサンプリングレートは  $365[\mu\text{sec}]$  である。Fig. 3.5 はその結果であり、 $20[\text{msec}]$  程で接触式変位計との差は  $\pm 0.027[\mu\text{m}]$  以内に整定している。図中に比較のため、アナログ素子により構成したサーボ系の応答も示してある。この場合、整定時間は  $3[\text{msec}]$  以内であった。

一方、出力の線形性を調べるため、アクチュエータへ正弦波指令値を入力しストレインゲージの出力と比較した。Fig. 3.6 はその結果であり、ヒステリシスの影響が補償され、十分良好な線形性が得られていることがわかる。

以上により、比較的単純な駆動制御系により、ヒステリシスが補償されフィンガーモジュール用アクチュエータとして十分な精度を得ることがわかった。

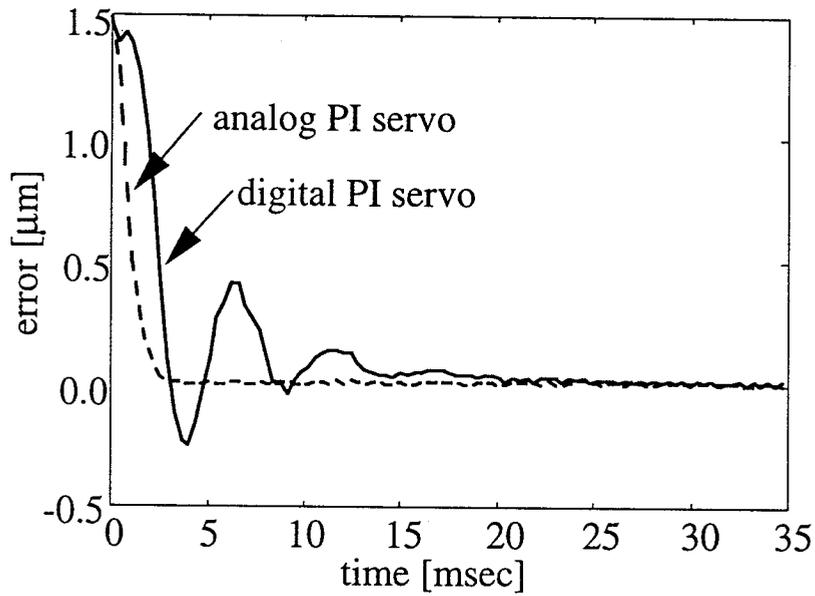


Fig. 3.5 Step responses of the error between the actual elongation of an actuator and the sensor reading

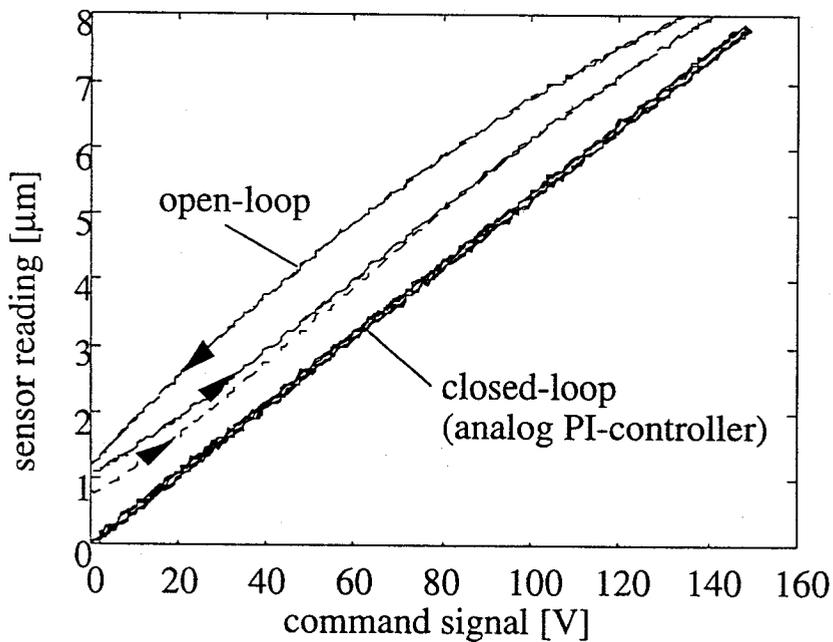


Fig. 3.6 Relation between the command signal to the servo system and a sensor reading which shows good linearity of the servo system with no hysteresis effect.

### 3.4.2 従来の $H_\infty$ 制御の課題及び可調整パラメータを含む $H_\infty$ 制御器の有効性

前節のデジタルとアナログのPI制御について比較すると、デジタルのPI制御では雑音の影響を受けにくいいため、高精度な位置決めを実現しやすい一方、即応性がサンプリングレートに大きく依存し、即応性を向上させるには比例ゲイン、積分ゲインの調整が容易でない。またサンプリングレートの変化が制御性能に大きく影響を与え、安定な制御性能を常に維持することは難しい。アナログのPI制御に関しては、アナログ素子による高速サンプリングにより即応性の良好な制御が実現できるが、雑音などの外乱に弱いという欠点がある。このような課題に対し、ロバスト制御法の一つとして知られている  $H_\infty$  制御法に基づいた可調整パラメータを含んだ制御器を圧電素子に適用し、制御性能ならびに安定性をより向上する手法について言及する。

モデル化誤差や経年変化によるパラメータの変動に対して、特性変化に頑健な制御系設計法として、 $H_\infty$ 理論に基づくロバスト制御系設計法がある。この設計法は、モデル化誤差がある一定の大きさの枠の中に含まれると仮定し、その範囲内であれば閉ループ系が常に安定になるような制御器を求めることができる。ここで述べた  $H_\infty$ 理論に基づくロバスト制御系設計法は、他の設計法と比較して、以下に示すような利点を持っている。

- (1) モデル化誤差を含んだ制御対象について常に安定であるような制御器を設計できる。
- (2) あらゆる種類の外乱に対して影響を受けにくい閉ループ系を構成することができる。
- (3) 重みの選定が従来の理論に比べ制御性能に直接結び付くため経験的なノウハウを必要とせずに体系的に制御器を求めやすい。

このように、大きく3つの特徴を持っている。しかし安定性を重視して制御器を設計するため、従来の  $H_\infty$  制御器すなわち、固定した制御ゲインの  $H_\infty$  制御器では制御性能の低い保守的な制御器が結果として求められる可能性が高い。この要因としてモデル化誤差の範囲の決定法があげられる。

モデル化誤差の範囲は正確に知ることは困難である。ある程度の範囲でさえもCADによる設計と実験の繰り返しが必要であり、その労力は多大で、装置も大がかりになる。そこでモデル化誤差を実際よりも広い範囲に見積り、これに対して制御器を設計する。このことは、その広くした分だけ安定性は増すが、制御性能が劣化することにつながる。そこで固定した

パラメータの制御器ではなく、調整可能なパラメータを制御器内に含ませることにより、実際の制御対象に制御器を付加した状態で、モデル化誤差の範囲を調整で評価できるようにする方法が有効と考えられる。これにより、前もってモデル化誤差を評価せずとも、正確なモデル化誤差の範囲を調整で評価でき、その分、制御性能を上げることができる。

具体的に述べると以下の通りである。制御系を構成する上で重要なことは感度低減化とロバスト安定化である。感度低減化は感度関数で評価し、ロバスト安定化は相補感度関数で評価する。すなわち、それぞれの関数のゲインが低いほど良好な制御系であることを示す。しかし感度関数と相補感度関数は共に下げることができない。そこで実際は低周波数域で感度関数を落とし、高周波数域で相補感度関数を落とす周波数整形を行い設計する。ここで問題になるのは、どの周波数域で感度、相補感度関数を落とし始めるかということである。これは制御対象のモデル化誤差がどの周波数域でどの程度存在しているかで決定される。すなわち Fig. 3.7 において、モデル化誤差領域  $|1/r|$  を境界とする斜線部の禁止領域に相補感度関数  $|T|$  の特性が重ならない範囲で、感度関数  $|S|$  を最小化する問題となる。以上からモデル化

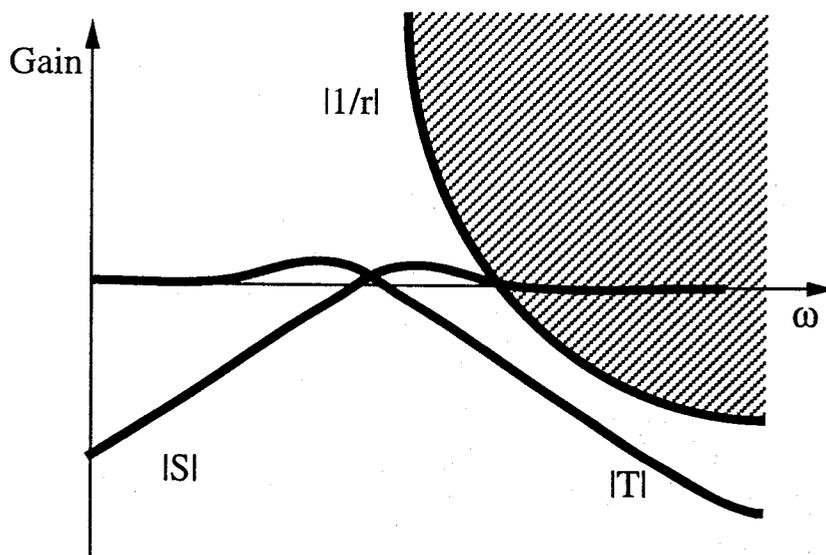


Fig. 3.7 Relation between a sensitivity function  $S$ , a complementary sensitivity function  $T$  and a model error  $r$  in a frequency response

誤差の領域の評価如何で制御系の質が決まる。だが上記で述べたようにモデル化誤差の評価は難しい。そこで感度関数、相補感度関数の形状を変えずに、周波数軸に対して平行に移動できるような調整パラメータを持った制御器を、 $H_\infty$ 理論の一手法である正規化既約

分解法 (Normalized Coprime Factorization, 以下 NCF 法)[11] を利用し, 設計することで制御器を付加した状態で調整によってモデル誤差の評価を見積もり, 同時に制御できる. NCF 法の特長は, 制御対象において虚軸に近い極が存在しても解を求めることができる. すなわち制御対象内に純粋な積分器が存在しても適用できる. また中心解  $H(s)$  を求める際, 二分法を用いて最小値の  $\gamma$  を求めるといった  $\gamma$ -反復計算法を必要としないことが挙げられる. これはパラメータを残したままで, 最適解を解析的に解くために, 重要な性質である.

### 3.4.3 可調整パラメータを含む $H_\infty$ 制御器設計

1 入力 1 出力系を考える. NCF 法では, 制御対象  $P(s)$  に対して, Fig. 3.8 のように重み  $W(s)$  を付加した拡大系  $G(s) = P(s)W(s)$  を考え,  $w = (w_1, w_2)'$  から  $z = (z_1, z_2)'$  への閉ループ伝達関数  $T_{zw}(s)$  について,  $\|T_{zw}\|_\infty$  を最小とする中心解  $H(s)$  を求め, 制御器を  $K(s) = W(s)H(s)$  とする. これにより  $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$  であれば, 感度関数  $S(j\omega)$ , 相補感度関

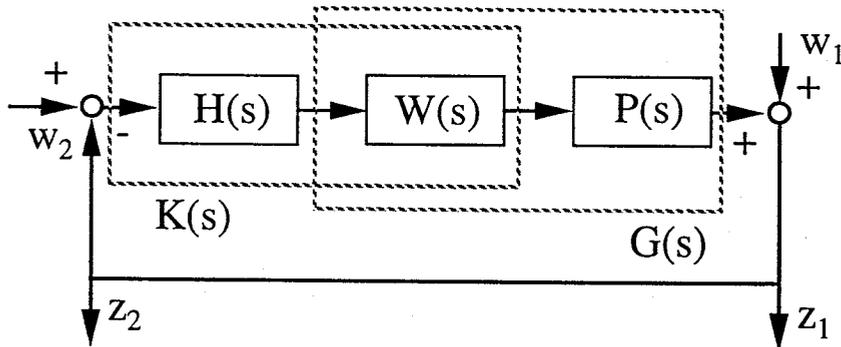


Fig. 3.8 System for the normalized coprime factorization method

数  $T(j\omega)$  は

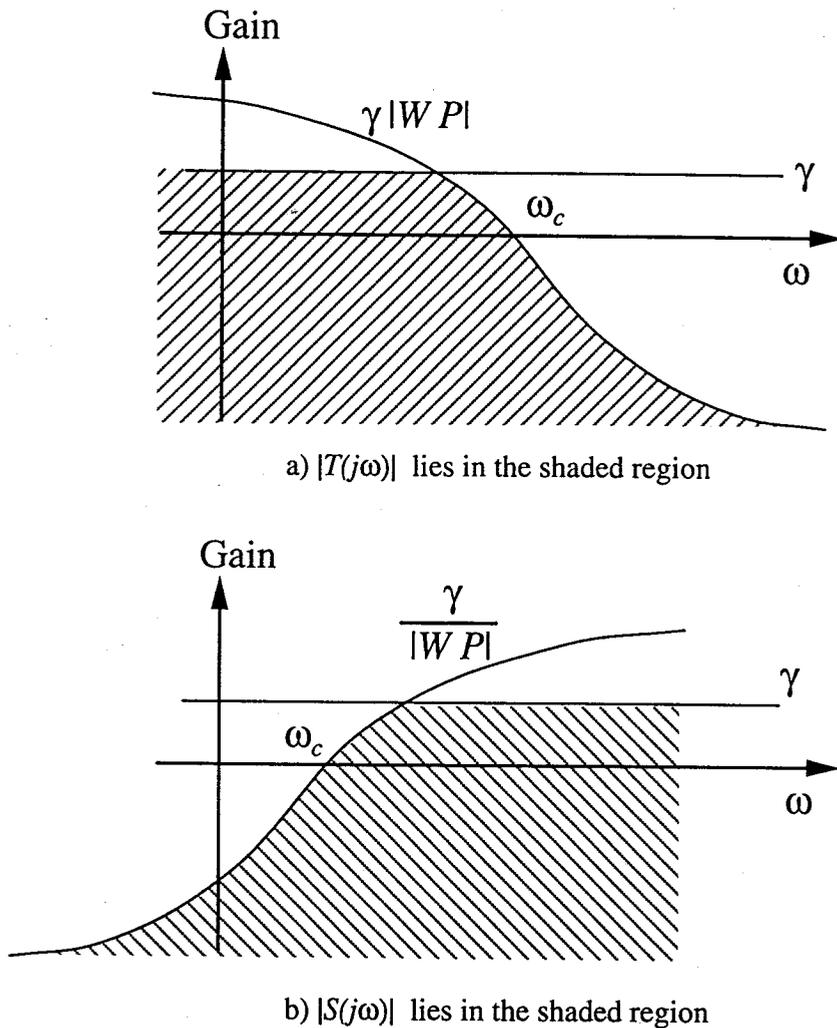
$$|T(j\omega)| < \gamma, |T(j\omega)| < \gamma|W(j\omega)P(j\omega)|, \omega \in R \quad (3.1)$$

$$|S(j\omega)| < \gamma, |S(j\omega)| < \frac{\gamma}{|W(j\omega)P(j\omega)|}, \omega \in R \quad (3.2)$$

である. ここに感度関数  $S$  と相補感度関数  $T$  は次式で与えられる.

$$S = \frac{1}{1+PK}, T = \frac{PK}{1+PK} \quad (3.3)$$

これは感度関数と相補感度関数のゲイン図がそれぞれ Fig. 3.9 の斜線部にあることを保証する. 特に感度, 相補感度関数の帯域幅は,  $W(j\omega)P(j\omega)$  のゲインが  $0[\text{dB}]$  を通るクロスオー

Fig. 3.9 Permitted regions of  $|T(j\omega)|$  and  $|S(j\omega)|$ 

バー周波数 $\omega_c$ 付近にある。これより、感度関数と相補感度関数のゲイン特性の形状は  $W(s)$  により整形でき、それらを周波数軸に沿って左右に移動させるためには、 $\alpha W(j\omega)P(j\omega)$  として定数ゲイン $\alpha$ を変えてクロスオーバー周波数を変えればよい。この観点から、制御器に含めるパラメータとして、ループゲイン $\alpha$ を採用する。 $\alpha$ を増加させれば相補感度関数の帯域幅が広がるので、この方法は高域周波数でのモデル化誤差が大きい場合の調整に適している。

通常、中心解  $H(s)$  を求める際、リッカチ方程式を解く必要があるが、一般には次数が高くなると解析的に解けない。しかし拡大プラント  $G(s)$  が次式のように比例、もしくは純粋な積分器のみからなる系では数値解を利用し、容易にパラメータを含んだ制御器を求めるこ

とができる.

$$G(s) = \alpha \frac{a}{s^n}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.4)$$

ここに  $a$  は正定数とする. まず, 変数変換  $s = (\alpha a)^{1/n} \nu$  により

$$G(\nu) = G((\alpha a)^{1/n} \nu) = \frac{1}{\nu^n} \quad (3.5)$$

のようにパラメータを含まない形式で表わす. この一般化プラントに対し, 付録AのNCF法により中心解  $H(\nu)$  を求めると, 制御器は逆変換  $\nu = (\alpha a)^{-1/n} s$  により

$$K(s) = W(s)H((\alpha a)^{-1/n} s) \quad (3.6)$$

で与えられる.

#### 3.4.4 圧電素子への可調整パラメータを含む $H_\infty$ 制御器の適用

圧電素子のモデルはゲイン  $K_p$  のみとして考える. 実際の圧電素子はヒステリシスを持っており, これをモデル化誤差と考え設計を行なう. よって圧電素子のモデル  $P(s)$  は以下で示される.

$$P(s) = K_p \quad (3.7)$$

ここで  $W(s) = \alpha/s$  としたときの拡大プラント  $G(s)$  は,

$$G(s) = \frac{\alpha K_p}{s} \quad (3.8)$$

となる. これに対し, 前節の通り変数変換を行う.

$$G(\nu) = \frac{1}{\nu} \quad \text{ここで } \nu = \frac{1}{\alpha K_p} s \quad (3.9)$$

この  $G(\nu)$  に対する数値解  $H(\nu)$  を  $s$  について再変換することにより, 容易に  $\alpha$  について解析的な中心解  $H(s)$  が求まる. NCF法での数値解  $H(\nu)$  は以下のようなになる.

$$H(\nu) = C_h(\nu I - A_h)^{-1} B_h \quad (3.10)$$

ここで各定数は以下の通りである.

$$A_h = -202.0 \quad B_h = 201.0 \quad C_h = 1$$

これよりパラメータ表現された中心解  $H(s)$  は式 (3.10) から

$$\begin{aligned} H(s) &= C_h \left( \frac{1}{\alpha K_p} sI - A_h \right)^{-1} B_h \\ &= \alpha K_p C_h (sI - \alpha K_p A_h)^{-1} B_h \end{aligned} \quad (3.11)$$

となり、目的のコントローラ  $K(s)$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} K(s) &= W(s)H(s) \\ &= \frac{\alpha^2 K_p}{s} C_h (sI - \alpha K_p A_h)^{-1} B_h \end{aligned} \quad (3.12)$$

Fig. 3.10 に上記の制御器を付加したときの各  $\alpha$  に対する閉ループ系の感度関数  $S(j\omega)$ 、相補感度関数  $T(j\omega)$  を示す。可調整パラメータ  $\alpha$  の変化に伴い、各関数が周波数軸に沿って移動していることがわかる。本制御器では一つのパラメータの容易な調整で、相補感度関数をモデル化誤差の閾値に近づけることができ、その分、制御系の感度低減化が図られる。Fig. 3.11 に圧電素子に対して、この制御器を付加したときのステップ応答を示す。ここではサンプリング時間は 0.25[msec] としている。  $\alpha$  の変化に対して速応性が変化しているのがわかる。だが、  $\alpha$  がある値以上になるとモデル化誤差の影響で系が振動的になっていく。ここでは制定期間の最も良い  $\alpha = 2200$  を最適なパラメータ値とした。

次に PI 制御器との比較として、Fig. 3.12 に提案した制御器 ( $\alpha = 2200$ ) と PI 制御器 (比例ゲイン 0.5, 積分ゲイン 3000) のステップ応答を示す。ここではサンプリング時間は 0.25[msec] としている。これを見ると 1 つの可調整パラメータの容易な調整で PI 制御器の特性に近い速応性を得ることがわかる。PI 制御器では調整パラメータが 2 つのため、自由度がある分、調整が容易ではない。また本制御器は  $H_\infty$  制御理論に基づいて設計されているため、モデル化誤差がある閾値内であれば、制御系の安定性は理論的に保証される。Fig. 3.13 でこれを示す。Fig. 3.13 では各コントローラのパラメータ値は Fig. 3.12 と同じ条件とし、サンプリング時間を 0.8[msec] でステップ応答を取ったものである。これを見ると PI 制御器が振動的になっているのに対し、本制御器は特性の変化が少なく安定性が向上されていることがわかる。

以上から次のことが言える。  $H_\infty$  制御理論による制御器は制御性能が保守的になりやすいと言われていた。これはモデル化誤差の評価が難しいために、安定性重視になってしまうためである。PID 制御器は実機に対して運転状態で調整するため、良好な制御性能が得やすい。しかしモデル化誤差を陽に考慮していないため、経年変化などによる制御対象の変化などに

対し安定性が理論的に保証されない. 可調整パラメータを含む  $H_\infty$  コントローラはその両方の長所を生かすように設計されている.

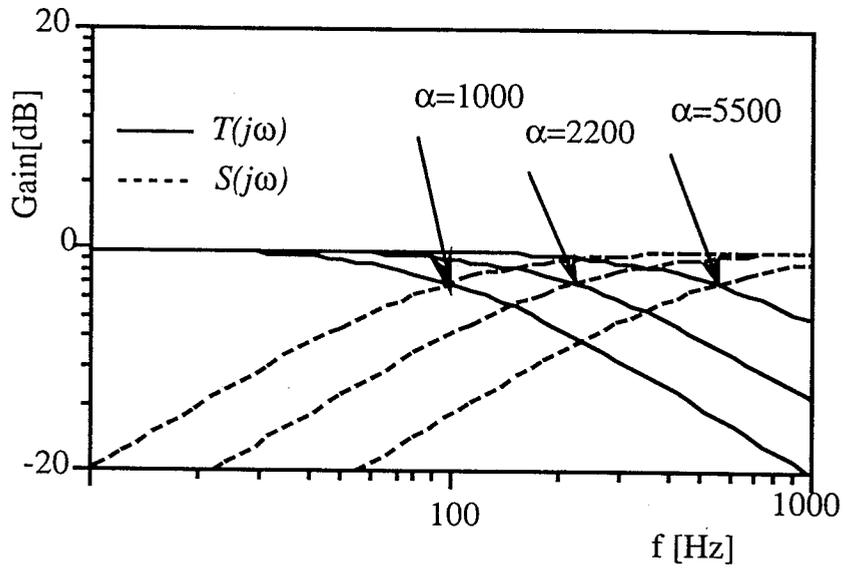


Fig. 3.10 Frequency responses for each value of variable parameter  $\alpha$ .

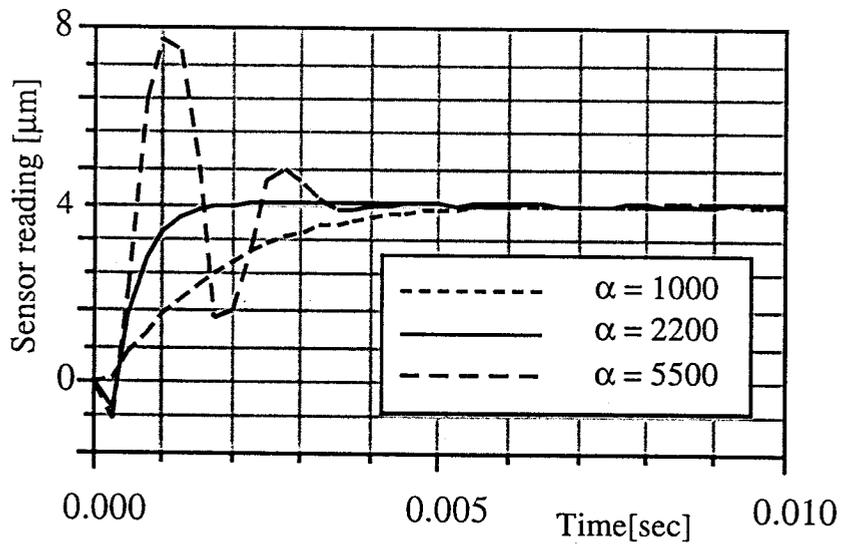


Fig. 3.11 Step responses for each value of variable parameter  $\alpha$ .

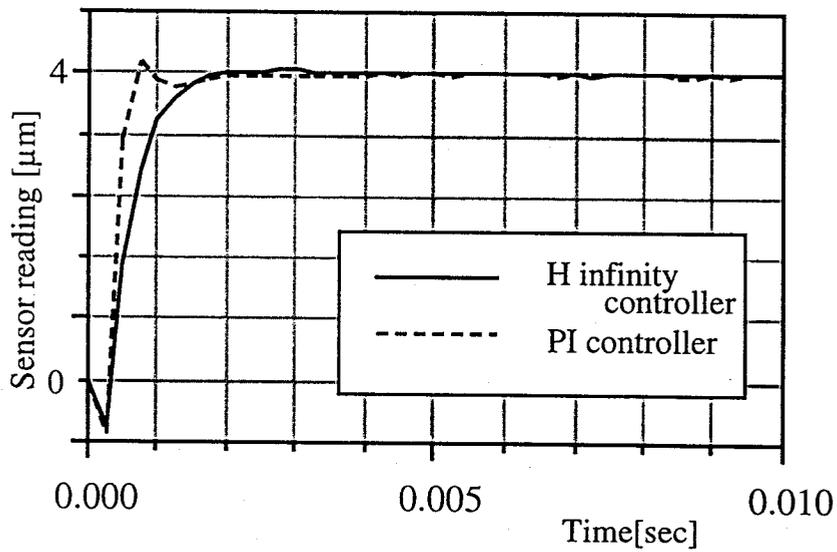


Fig. 3.12 Step responses using  $H_\infty$  controller and PI one.

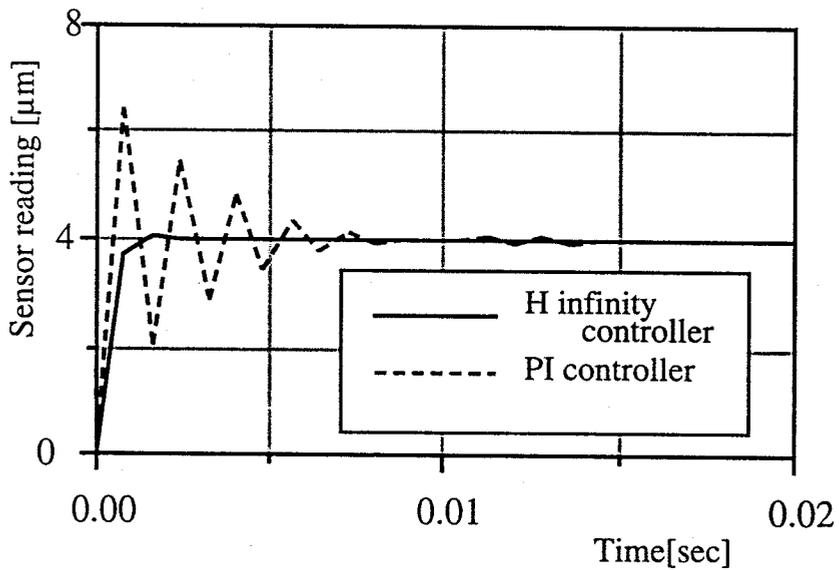


Fig. 3.13 Step responses using  $H_\infty$  controller and PI one with sampling time 0.8[msec].

### 3.5 キャリブレーション

先端部の精密な動作制御を行なうためには、計算機から各リンクへの指令値と、その時の先端部の作業空間（すなわち顕微鏡下に定義した座標系）における位置との対応付けを行なう必要がある。これらの関係は運動学を計算することにより求めることは可能である。しかしながら、機構パラメータをマイクロメートルオーダーで正確に同定しなければならず、これは実際上極めて困難である。本システムでは、次のようなキャリブレーションに基づき動作制御を行うことにした。各リンクの運動はモジュールのスケールに比して十分小さいため、リンク変位とエンドエフェクタ変位との間に次のような線形近似を適用する。モジュールは6自由度であり、先端の並進と回転の変位 $\Delta \mathbf{x}_T, \Delta \mathbf{x}_R$ 、両者を統合した変位 $\Delta \mathbf{x}$ 、並びにリンクの変位 $\Delta l$ を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}_T \in R^3, \Delta \mathbf{x}_R \in R^3 \\ \Delta \mathbf{x} \equiv \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_T \\ \Delta \mathbf{x}_R \end{bmatrix} \in R^6, \Delta l \equiv (\Delta l_1, \dots, \Delta l_6)^t \in R^6 \end{aligned} \quad (3.13)$$

$\Delta \mathbf{x}$ 、 $\Delta l$  両者の関係はヤコビ行列を用いると、逆運動学として次のようにあらわされる。

$$\Delta l = J(\mathbf{x}_0, \mathbf{p})^{-1} \Delta \mathbf{x}, J(\mathbf{x}_0, \mathbf{p})^{-1} \in R^{6 \times 6} \quad (3.14)$$

パラレルメカニズムでは、ここに示す逆運動学が機構パラメータを用いてただちに求めることができる [12]。 $\mathbf{x}_0$ はエンドエフェクタの位置、 $\mathbf{p}$ はリンクの機構パラメータを表す。リンクの変位は機構全体に比して微小なため、これらは定数として扱える。したがって、 $J(\mathbf{x}_0, \mathbf{p})^{-1}$ も定数として扱える。ところで、現在のシステムでは、顕微鏡下でモジュール先端の回転運動を計測することは非常に困難である。そこで、モジュール先端の運動は並進運動のみに着目し、この運動を制御するものとする。この時、並進変位 $\Delta \mathbf{x}_T$ を実現するリンク変位 $\Delta l$ を求めることが動作制御では必要になる。式(3.14)を並進成分 $G_T$ と回転成分 $G_R$ に分け、並進成分のみを取り出すと次のようになる。

$$J(\mathbf{x}_0, \mathbf{p})^{-1} = \begin{pmatrix} G_T & G_R \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

$$G_T, G_R \in R^{6 \times 3} \quad (3.16)$$

$$\Delta l = G_T \Delta \mathbf{x}_T \quad (3.17)$$

一方,  $J(\mathbf{x}_0, \mathbf{p})^{-1}$  の逆行列, すなわち  $J(\mathbf{x}_0, \mathbf{p})$  を用いると, 運動学は次のように表される.

$$\Delta \mathbf{x} = J(\mathbf{x}_0, \mathbf{p}) \Delta \mathbf{l} \quad (3.18)$$

これも, 同じように並進成分のみ取り出すと次のようになる.

$$J(\mathbf{x}_0, \mathbf{p}) = \begin{pmatrix} H_T \\ H_R \end{pmatrix} \in R^{6 \times 6} \quad (3.19)$$

$$H_T, H_R \in R^{3 \times 6} \quad (3.20)$$

$$\Delta \mathbf{x}_T = H_T \Delta \mathbf{l} \quad (3.21)$$

以下に示すキャリブレーションでは, 始めにこの  $H_T$  を求める. すなわち, 任意の  $\Delta \mathbf{l}^{(i)}$  を与え, この時の先端の並進座標を TV モニタとマニュアルステージの目盛により計測し, 対応する  $\Delta \mathbf{x}_T^{(i)}$  を求める. すなわち Fig. 3.3 における X, Y 座標を TV モニタ上の座標値から計測し, Z 座標はマニュアルステージを上下させて焦点を合わせ, エンドエフェクタ先端が明瞭に見えた時のステージのマイクロメータの目盛りより計測している.  $i$  番目のデータの組を  $(\Delta \mathbf{l}^{(i)}, \Delta \mathbf{x}_T^{(i)})$  とし, このようなデータを動作領域の中でできるだけ多数集める. データの総数を  $N$  とし, 最小二乗推定法を適用すると, マトリクス  $H_T$  の推定値  $\hat{H}_T$  は次式で求められる.

$$\hat{H}_T = \Delta \mathbf{x}_{TN} \Delta \mathbf{l}_N^* \quad (3.22)$$

ここで,

$$\Delta \mathbf{l}_N^* \equiv \Delta \mathbf{l}_N^t (\Delta \mathbf{l}_N \Delta \mathbf{l}_N^t)^{-1} \quad (3.23)$$

$$\Delta \mathbf{x}_{TN} \equiv \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{x}_T^{(1)} & \dots & \Delta \mathbf{x}_T^{(N)} \end{pmatrix} \in R^{3 \times N} \quad (3.24)$$

$$\Delta \mathbf{l}_N \equiv \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{l}^{(1)} & \dots & \Delta \mathbf{l}^{(N)} \end{pmatrix} \in R^{6 \times N} \quad (3.25)$$

これより,  $\hat{G}_T$  は最小二乗解として  $\hat{H}_T$  の疑似逆行列を用いることにより次のように求まる.

$$\hat{G}_T = \hat{H}_T^t (\hat{H}_T \hat{H}_T^t)^{-1} \quad (3.26)$$

以上より, 動作制御において与えられた目標値  $\Delta \mathbf{x}_T$  に対するリンクへの指令値は式 (3.26) の  $\hat{G}_T$  を用いて, 式 (3.17) により求めることができる. また, ここでの  $\hat{G}_T$  は疑似逆行列の性質

から,  $\|\Delta l\|_2$  を最小とする変換行列として求められる. これはフィンガーモジュールの純粋な並進運動だけでなく, 回転運動も許すことにより, 作業領域をより拡大させる解となる. 例として, Fig. 3.14 に純粋な並進運動のみの作業領域と, 最小二乗解による作業領域を示す. この作業領域の拡大率はフィンガーモジュールのエンドプレートにおける回転運動によるものであるためエンドプレートから指先の距離に比例して拡大される. Fig. 3.14 ではエンドプレートから指先の距離は 10[cm] としている. また, フィンガーモジュールの作業領域を立体的に図示したものを Fig. 3.15 に示す.  $X_m, Y_m$  軸方向に関しては回転運動による作業領域の拡大がみられるが,  $Z_m$  軸方向については, 並進運動のみによる作業領域であるため, 全体として平坦な作業領域になることがわかる.

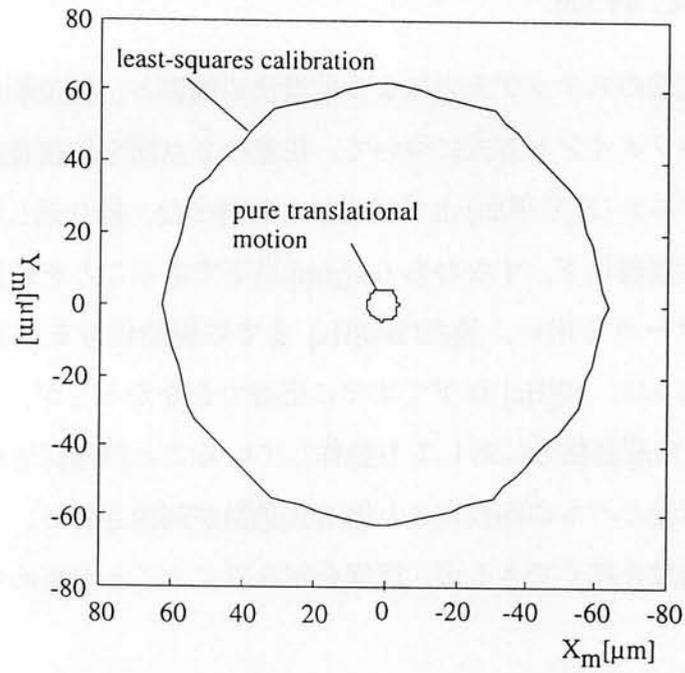


Fig. 3.14 Comparison of the least squares calibration workspace (allowing rotation) with the workspace for pure translational motion in the finger module

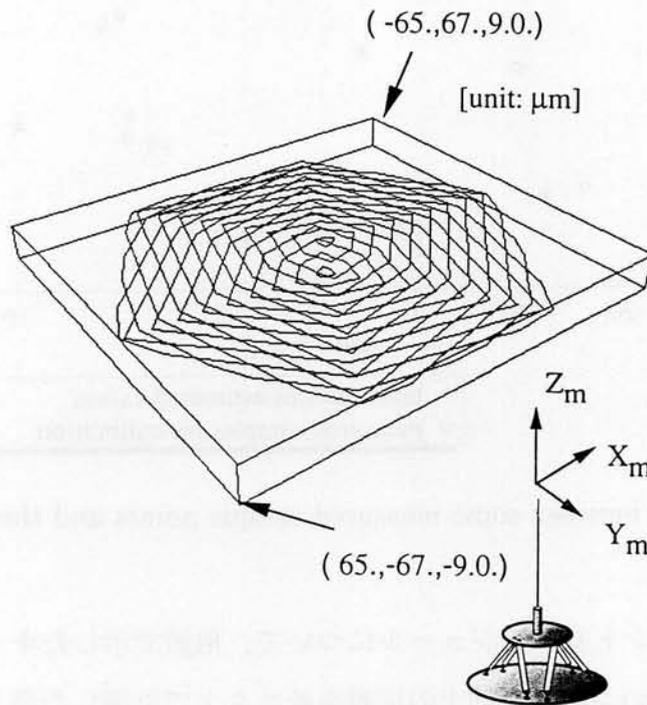


Fig. 3.15 3-D view of the workspaces using 6 by 3 reduced order Jacobian matrix

### 3.6 動作実験と評価

エンドエフェクタ先端のステップ入力による位置決め制御と、軌道制御を行った。位置決め制御では、2種類のジョイント方式について、任意の2点間を往復運動させ、繰り返し精度と応答速度をTVモニタ(X,Y平面)上で目視により調べた。繰り返し精度については、どちらの方式とも画像分解能以下、すなわち  $0.1[\mu\text{m}]$  以下であることを確認した。応答速度については、アナログサーボを用い、最高  $200[\text{Hz}]$  までの駆動信号を計算機から与えた。ピボット・スプリング式では、 $10[\text{Hz}]$  以下ですでに応答できなかったが、フレキシブル・ジョイント式では  $200[\text{Hz}]$  の駆動信号に対しても動作していることが確認された。ピボット・スプリング式は先端の質量とバネの剛性により固有振動数が制限される。また、バネを堅くすることにより固有振動数を高くできるが、機構を組み立てることが極めて難しくなることが判明した。

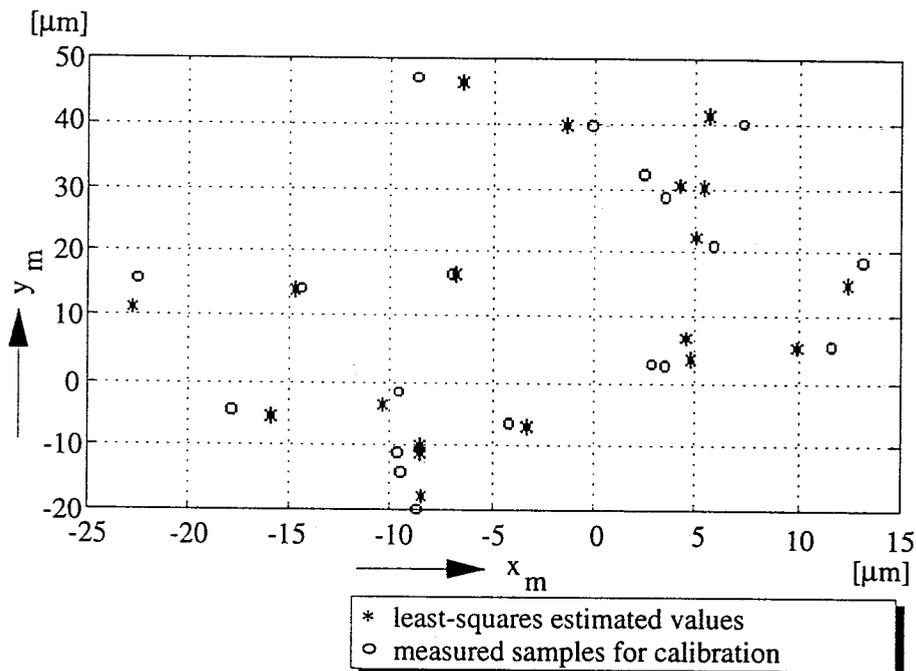


Fig. 3.16 Comparison between some measured sample points and their least-squares fit

フレキシブル・ジョイント式のモジュールについて、前節で示したキャリブレーションに基づき位置決め制御を行い、作業空間上の位置をモニタ上で計測した値と比較し、絶対位置決め精度の評価を行った。キャリブレーションに用いたデータの組は20である。Fig. 3.16は、作業空間におけるX,Y座標の指令値と実際の計測値とを比較したものである。動作空間

中心部では  $1[\mu\text{m}]$  以下の良好な精度であるが、周辺部では  $2[\mu\text{m}]$  程度に劣化している。誤差の要因として考えられることは、Z座標値の計測がマイクロメータの目視による分解能の悪さやバックラッシュなどの影響により数  $[\mu\text{m}]$  の誤差があるためと考えられる。絶対位置決め精度がよいことは望ましいが、実際にオペレータがモニタを見ながらジョイスティックで遠隔操作を行う場合には、画素に対応する精度 ( $0.1 [\mu\text{m}]$  以下) が得られているので、実用上は問題がないと考えられる。ただし、自律動作などを行う場合は、精度を上げるために、動作空間上でのエンドエフェクタの位置を画像情報などで計測し、フィードバック制御を行うことが必要となろう。

軌道制御はフレキシブル・ジョイント式モジュールのみについて行い、計算機からプログラムにより軌道を与えて、その軌跡を画面上で確認した。Fig. 3.17は円、正方形、正三角形の軌道を与え、プレパラート上のススをエンドエフェクタ先端で引っ掻くことにより描いた図である。ススの粒子が粗いため、正確な図が描けてはいないが、再現性のある動作が実現されていることが確認された。

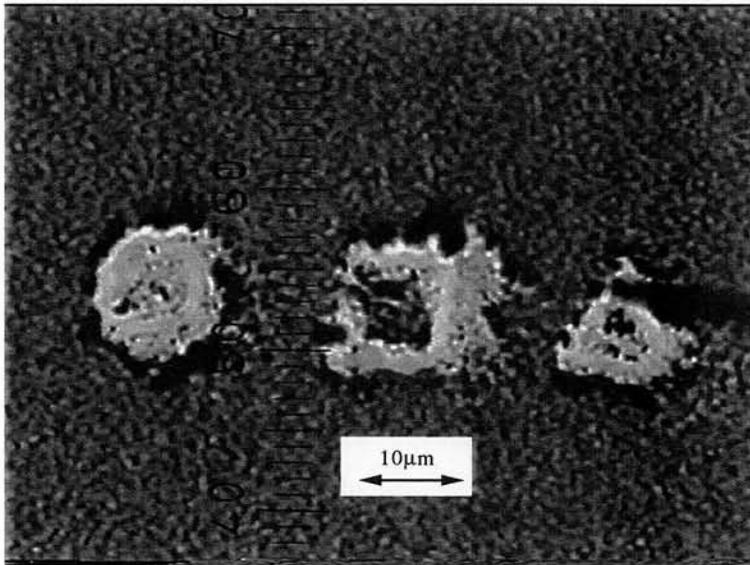


Fig. 3.17 "Micro figures" drawn by the program controlled finger module into a thin carbon layer applied onto a microscope slide

### 3.7 まとめ

マイクロマシンの組立や、細胞操作などの微細作業を実現するために、大きさが数 $\mu\text{m}$ の微小対象物を操作する二本指マイクロハンドを構成する基本機構としてパラレルメカニズムを適用したフィンガーモジュール機構を提案し、その動作性能について評価を行った。

ピボット・スプリング式とフレキシブル・ジョイント式の2種類のフィンガーモジュールを提案したが、機構の安定性、応答性の点でフレキシブル・ジョイント式が優れていることが判明した。

高精度な位置決め制御を実現するため、アクチュエータである圧電素子の表面にひずみゲージを付加し、フィードバック制御系を構築し、圧電素子のヒステシスを補償することができた。更に、サンプリングレートの変動や雑音などの外乱に強く制御性能の良好な制御系実現のため可調整パラメータを含んだ $H_\infty$ 制御器を適用し、その有効性を評価した。

顕微鏡画像情報のみを利用したフィンガーモジュールのキャリブレーション手法について検討し、本手法を用いて最終的に指先の $0.1[\mu\text{m}]$ 以下の繰り返し精度、及び $2[\mu\text{m}]$ の絶対位置決め精度を実現した。以上から、本機構を基に二本指マイクロハンド機構を構成することで、数ミクロンサイズの微小対象物の高度な操作が可能になると考えられる。

## 第4章 二本指マイクロハンド

### 4.1 はじめに

二本指マイクロハンドは平行メカニズムを基本としたフィンガーマジュール機構を二つ用いることで構成される。二本指マイクロハンドの作業領域、及び二本指としての協調制御手法は、この構成法に大きく依存する。本章では、二本指による安定な微細操作ならびに作業領域の拡大を実現する最適な二本指マイクロハンドの設計法について検討を行う。加えて本設計指針に基づきプロトタイプを製作し、実際の微細作業実験を行うことで二本指マイクロハンド機構の有効性を評価する。

### 4.2 並列式二本指機構の構成とその問題点

目的とする二本指マイクロハンドに対し、各指の駆動機構には、前章で述べたフレキシブル・ジョイント式のフィンガーマジュールを採用する。このとき、2つのフィンガーマジュールを微細作業に適した形で構成しなければならない。比較的単純な構成法として Fig. 4.1 に示すようにフィンガーマジュールを並列に並べた並列式二本指機構が挙げられる。しかし、この構成法において、いくつかの問題点が生じた。第一に二本指としての作業領域が小さいこと、第二にそれを動作させるための協調制御が困難なことである。以下、これらについて詳細に考察する。

#### 4.2.1 作業領域に関する考察

Fig. 4.1 の機構において、二本指としての作業領域は、各フィンガーマジュールの作業領域の共通領域に限定され、個々のフィンガーマジュールの作業領域と比べて非常に狭い。これを定量的に評価すると、二本指としての作業領域は、各々のフィンガーマジュールの設置角度 (Fig. 4.1 で示す  $\theta$ ) に大きく依存することがわかる。Table 4.1 は、設置角度  $\theta$  に対して、

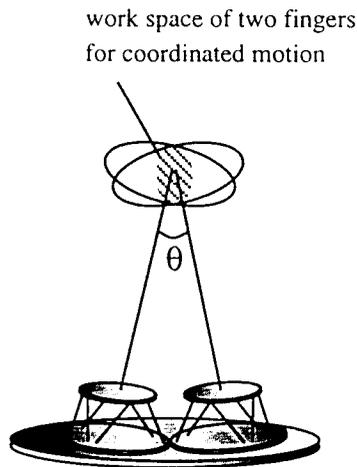


Fig. 4.1 In parallel two-fingered micro hand

二本指としての作業領域  $V_{two}$  を示したものである．ここで  $V_{two}/V_{one}$  は  $V_{one}$  を一つのフィンガーモジュールの作業領域としたとき  $V_{one}$  に対する二本指としての作業領域  $V_{two}$  の割合を示している． Fig. 4.2 をみると分かりやすいが，設置角度  $\theta$  が大きくなると，各指の作業領域

Table 4.1 Ratio of the common workspace to the workspace of one finger module

install angle $\theta[^\circ]$	volume of common workspace $V_{two}[l]$	ratio to workspace of one handmodule $V_{two}/V_{one}[\%]$
15	0.0689	21.95
20	0.0587	18.71
30	0.0501	15.95

における共通領域，すなわち二本指としての作業領域  $V_{two}$  が減少する．そこで，設置角度を小さくするためには，フィンガーモジュール本体からの指先の距離を長くすれば良い．しかし距離が長くなると，針先の位置決め分解能が劣化し，さらに指として利用しているガラス針の剛性も低下するため，振動に対する影響が無視できなくなる．以上から，並列に設置して二本指を構成する機構では，二本指としての作業領域が極端に狭く有効でないことが判明した．

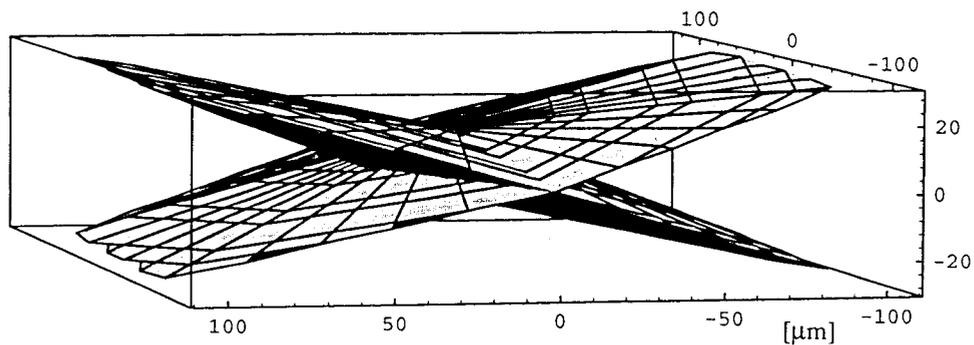


Fig. 4.2 3D view of the common workspace of the two-fingered micro hand in parallel

#### 4.2.2 協調制御に関する考察

次に二本指の協調制御について考察する。フィンガーモジュールは各リンクの圧電素子の長さ情報のみをフィードバックしており、キャリブレーション(前章参照)によって求められた変換行列により顕微鏡下の針先の位置を制御している。二本指として協調制御をする際、相手の針先との相対位置を一定に保つことが重要となる。キャリブレーション後、しばらくは相手の圧電素子の長さ情報から、変換行列に基づき針先の位置情報が推定できる。しかし、温度変化による指先の長さの変化などといった環境変化や経年変化による機構パラメータの誤差はマイクロハンドの精度に大きく影響を与える。このため、微小対象物を把持した場合、双方の指の距離を一定に保ちつつ移動するといった精度の良い協調制御を常に維持することが、並列式二本指機構では極めて困難なことが判明した。

### 4.3 箸の操作に習った二本指マイクロハンド

人間は箸を用いて様々な操作を器用にこなすことができる。始めに、実際の人間の箸の操作を観察し、二本指マイクロハンドの最適な機構について考察を行う。第二章では、二本指による基本的な対象物操作を提示した。この基本的な操作を箸で行う場合、その操作法にはある特徴が観察される。箸のほとんどの操作は、人差し指側で操作する箸が器用に動くことによって行っており、親指側の箸は手に固定された状態、すなわち手全体の動きに連動した状態になっている。具体的には、対象物の把持や回転、加工などの細かい操作では、人差し指側の箸が主に動作し、親指側の箸に対する相対運動を生成している。それに対し親指側の

箸は、固定された状態で、人差し指側の箸の補助的な役割を果たしている。また、把持した対象物の位置決めに関しては、人差し指側と親指側の箸は手全体を動かすことにより、結果的に同方向に動作している (Fig. 4.3)。このように箸の役割を分担することにより、人間は様々な操作を器用にこなすことができる。開発する二本指マイクロハンドでは、人間の箸の操作と同じように比較的単純な動作で微小対象物を器用に操作できることが望ましい。以上の考察に基づき、二本指マイクロハンドの新しい機構として、フィンガーマジュールを直列に設置した機構 (Fig. 4.4) を提案する。

3つの円盤状のプレートのそれぞれが6つの圧電素子を介して固定されている。上部プレートの中央に穴が空いており、中間プレートから親指側の箸に相当する指が伸びている。上部プレートには人差し指側の箸に相当する指が固定されている。すなわち上部フィンガーマジュールの指は、細かい操作における二本指の相対運動を生成するように動く。下部フィンガーマジュールの指は、主に微小対象物のグローバルな位置決め制御に寄与する。

具体的には微小対象物を把持する際は、まず上部フィンガーマジュールのみを制御し人差し指側の箸に相当する指で微小対象物を把持する。次に、把持した微小対象物を移動する際は、上部フィンガーマジュールはその位置を維持したまま、下部フィンガーマジュールを制御し任意の場所に微小対象物を持ち上げ移動させる。このようにそれぞれの指に対して、別の役割を持たせることができる機構のため、微小対象物をハンドリングする際の協調制御が容易に行える。さらに作業領域については、下部フィンガーマジュールの針先の作業領域がそのまま二本指の作業領域となるため、並列に設置した二本指マイクロハンドのように作業領域が極端に制限されない。

上部フィンガーマジュールの微小対象物の把持、姿勢制御に寄与する作業領域、及び下部フィンガーマジュールの微小対象物の位置決めに寄与する作業領域は Fig. 4.5 に示す通りである。試作したマイクロハンドでは、上部フィンガーマジュールに最大変位量  $8[\mu\text{m}]$  の圧電素子を用い、下部には、最大変位量  $15[\mu\text{m}]$  の圧電素子を用いている。それぞれの指の特徴を考慮して、用いる圧電素子を区別した。すなわち、人差し指側の箸に相当する上部フィンガーマジュールの指は、微小対象物の器用な操作を行うものであり、作業領域の広さよりも分解能に重点を置いた。親指側の箸に相当する下部フィンガーマジュールの指は、微小対象物の大域的な移動が主なため、作業領域の広さを優先させた。Fig. 4.6 に試作した二本指マイクロハンドの外観を示す。

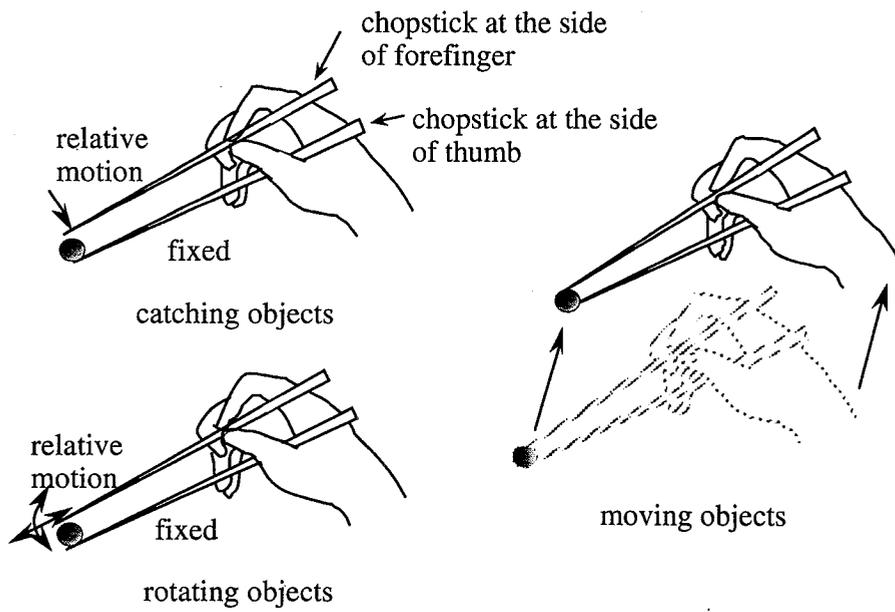


Fig. 4.3 Manipulation of chopsticks by a human hand

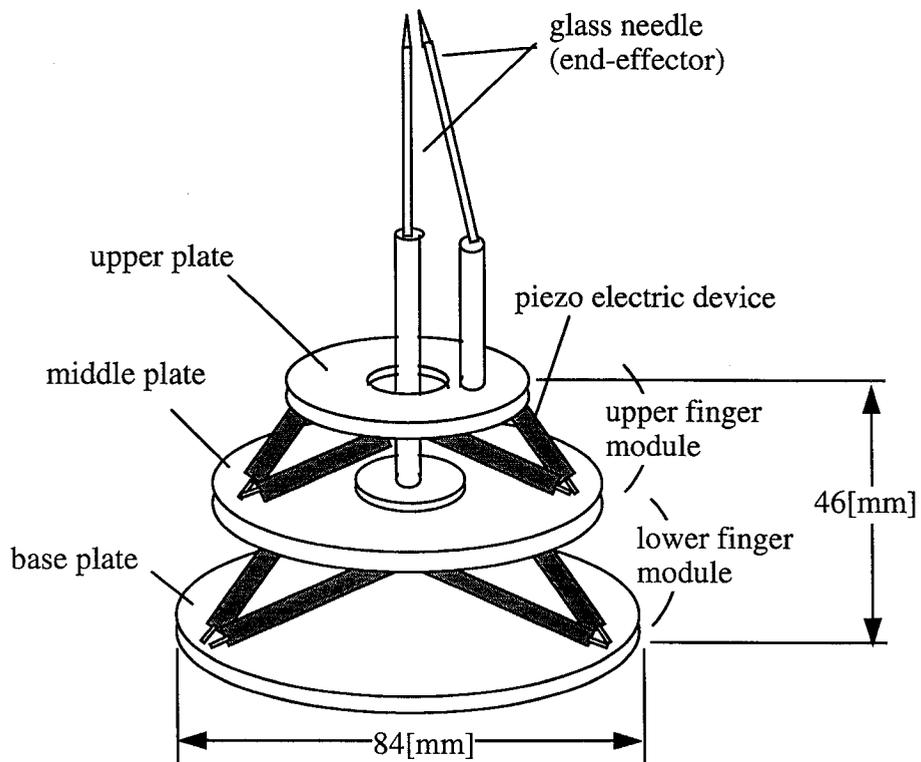


Fig. 4.4 A serial two-fingered micro hand

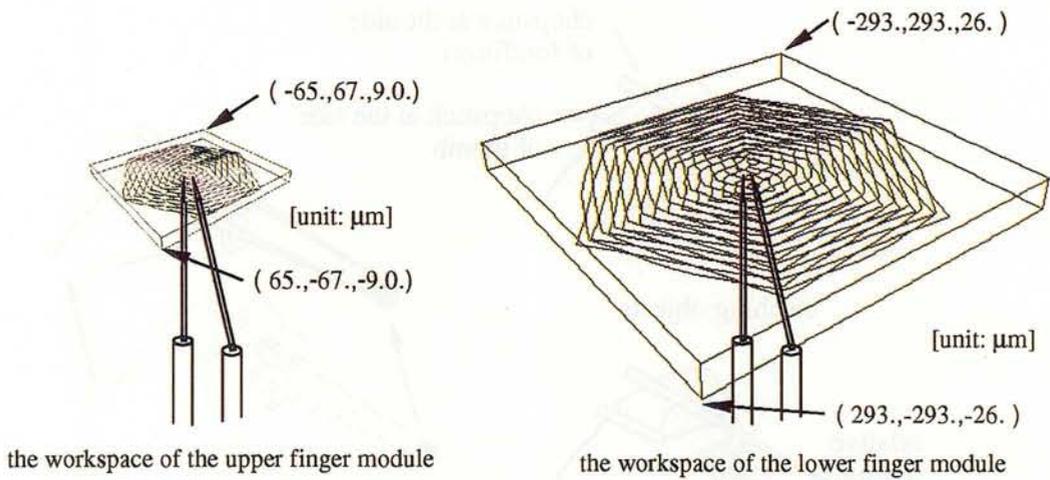


Fig. 4.5 Workspaces of the serial two-fingered micro hand

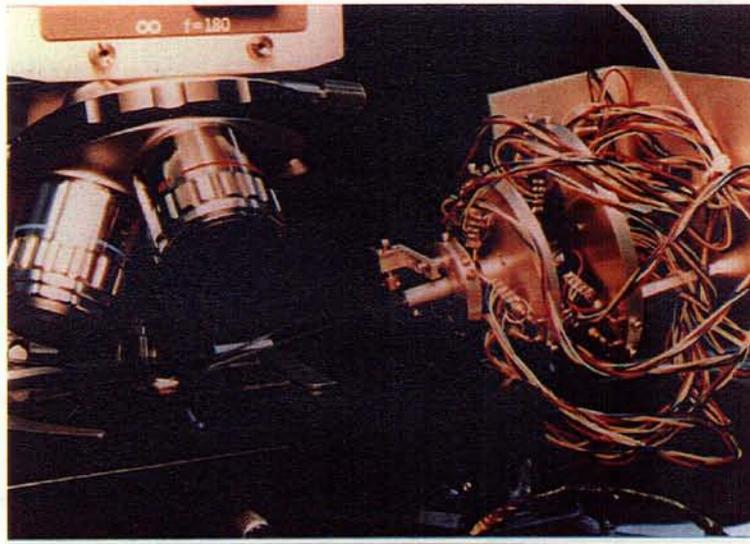


Fig. 4.6 Photograph of the two-fingered micro-hand prototype

#### 4.4 微細作業実験と考察

微細作業として、Fig. 4.7に示すようなダストの基準粒子として用いられている直径約 $2[\mu\text{m}]$ の真球状ガラス粒子のマニピュレーションを行った。基本的作業として、ガラス粒子をつかめる位置に指を位置決めし、つかんで持ち上げ、粒子を別の場所に位置決めするといっ

た一連の作業を，オペレータが顕微鏡画像を見ながら，ジョイスティックを用いたテレオペレーションにより行った．この結果，任意の位置にある微小対象物を把持し，これを移動して，所定の位置に $0.1[\mu\text{m}]$ 以下の精度で置くことが可能であった．

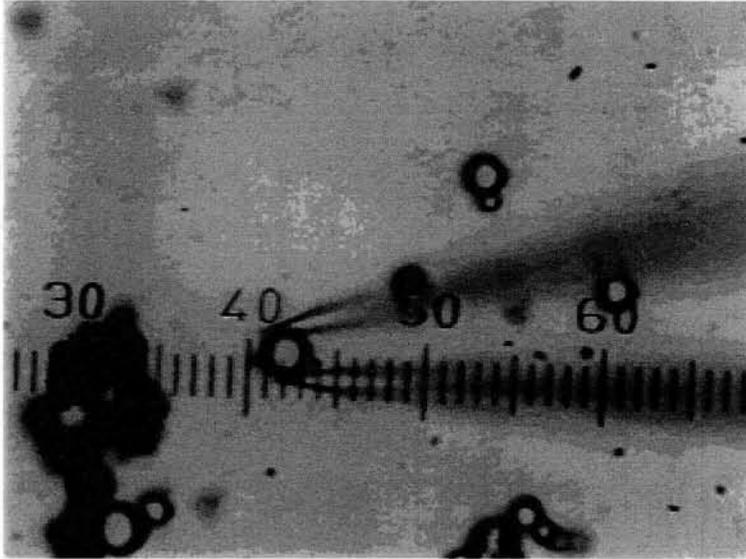


Fig. 4.7 Image of the microscope showing micro manipulation of a glass ball by the two-fingered micro hand ( $1.43[\mu\text{m}/\text{div}]$ )

この微細作業を行う上で問題となったのは，表面間力の影響である．第二章でも述べたように，数ミクロンサイズになると対象物の重さに比べて静電気力や表面張力，分子間力といった表面間力が支配的になり，指先に対象物が付着する現象や，反発して飛散する現象が起こる．その中でも特に力の大きい静電気力の影響が顕著に現れる．この対策として，指先のガラス針とプレパラートを同電位に保つことが必要となる．ガラス針に金属を蒸着し，電位をグラウンドレベルに落とすことで，影響を低減させることができた．今回はアルミを用いてその有効性を確認したが，今後，様々な金属で検討を行う必要がある．また微細作業の作業性をより向上するためには，微小環境下での定量的な静電気力や表面張力の評価を行う必要がある．

また微小対象物は，指先に付着しやすいので，対象物をつかむ操作よりも離す操作が困難であり，離すための適切な指先の動作を検討する必要がある．一般に微小環境における表面間力の大きさは，微小対象物と指との付着面積に比例することから，付着面積を減らす方向，すなわち指の先端へ対象物を移動させると，比較的容易に対象物を放すことが出来る．この

ように指先を動作させることにより、実験では容易にガラス粒子を離すことが可能であった。すなわち、微細作業においては多自由度な動きが必要とされることから、パラレルメカニズムを用いた二本指マイクロハンドは、微細作業に適した機構であると確認できる。しかし、上記の方法による微小対象物の位置決め精度は、指先先端を中心とした微小対象物の大きさの範囲に低下してしまう。今後、微小対象物の放す際の指先の軌道を十分検討し、位置決め精度を向上させる必要があると考えられる。

また、放す動作に伴い微小対象物が回転してしまい、姿勢が変化する可能性も否定できない。よって正確な微小対象物の6自由度位置決めは二つの二本指マイクロハンドを利用することが有効であると考えられる。

## 4.5 まとめ

数ミクロンサイズの微小対象物を自由に操作できる二本指マイクロハンドの機構設計に関する検討を行った。始めに、フィンガーモジュールを並列に設置した二本指について、その問題点を考察した。次に人間の箸の操作法、すなわち、操作対象物の把持、回転、解放といった操作では人差し指側の箸が、親指側の箸に対して相対的運動を生成することで実現し、位置決めにおいては腕全体の移動で実現するといった操作法を参考に、新たな二本指マイクロハンドの構成法について検討した。これを基に、パラレルメカニズムであるフィンガーモジュールを直列に配置し、上部プレートと中間プレートに各指を配置した構造で二本指マイクロハンドのプロトタイプを設計試作した。これを用い、直径2[ $\mu\text{m}$ ]の真球状ガラス粒子を把持し、任意の位置へ移動する微細作業に成功した。特に微小対象物を放す際に、試作したマイクロハンドは多自由度な指先の動きを実現できることから、摩擦力や静電気力が支配的な微細空間内においても、指先に吸着した微小対象物を容易に放すことができた。このことから、パラレルメカニズムを用いた二本指マイクロハンドの有用性が確認できた。

# 第5章 微細作業用ヒューマンインターフェース

## 5.1 はじめに

より高度な微細作業を実現するにあたって、様々な付加機器を微細作業用システムに加えていく必要がある。それに応じて、操作しなければならない付加機器も増加する可能性があるため、なるべく各機器の操作は簡略化することが望ましい。マイクロハンド以外に、微細作業システムに重要な要素は、各機器の操作を容易に行うためのヒューマンインターフェースである。特に、マイクロハンドを容易に操作できる操作デバイスと、その作業状態を常に観察できる視覚システムは重要である。本章では上記二つの要素について検討を行う。

まず、微細作業用操作システムにおける課題を述べる。通常、マニピュレータを操作するために、力フィードバック制御を付加したマスター・スレーブシステムを構成することで、良好な操作系を実現する研究が盛んに行われている [13]–[16]。しかし微細操作においては、対象となる微細環境下での操作反力があまりに微小なため、有効な力センサが実用化されていない。よって現段階では、力フィードバック制御系を微細作業用システムに付加することは困難である。そこで、従来のマスター・スレーブシステムが利用できない以上、なるべく人間本来の操作に沿った形で、マイクロハンドを操作できるシステムを構築することで操作性を向上させる必要がある。

次に、微細作業用視覚システムにおける課題を述べる。微小対象物を観察する際、主に顕微鏡を利用するが、高倍率の観察では単眼視のみの観察となる。よって、ステレオ視が実現できないため、立体的な観察が困難である。加えて、画像の焦点深度も数 [ $\mu\text{m}$ ] 程度であり、焦点面以外の対象物はボケにより観察不能となる。このため、焦点面を越えた場所に微小対象物を位置決めすることが非常に困難となる。以上から微細作業においては特有の機能を持った視覚システムが要求される。

次節以降、それぞれの節において微細作業用操作システム、微細作業用視覚システムと

いったヒューマンインターフェースに関わるシステムの検討を行う。

## 5.2 二本指マイクロハンド用操作システム

### 5.2.1 操作デバイスの構成

より高度な微細作業を実現するにあたって、様々な付加機器を微細作業用システムに加えていく必要がある。それに応じて、操作しなければならない付加機器も増加する可能性がある。よって、なるべく各機器の操作は簡略化することが望ましい。二本指マイクロハンドに関しては、二つのフィンガーモジュールを操作しなければならないため二つの操作デバイスが必要とされる。両手を使って二つの操作デバイスを操作する方法が比較的単純であるが、操作の簡略化を考慮すると、片手によるマイクロハンド操作が自然である。加えて、片手で物を操作する際、親指と人差し指を使うのが普通であるため、この二本の指を使って二本指マイクロハンドの操作が可能ならば、自然な操作感覚を実現できる。

二本指マイクロハンドは箸の動きを参考にすればわかるように、マイクロハンドの各指に最低3自由度持っていれば、箸と同様の動作をさせることができる。そこで各指の動作の検出に利用される機器としていくつか挙げられるが、少なくとも親指と人差し指それぞれの3自由度の動きを検出できなければならない。通常、遠隔操作用マスター・スレーブシステムでは多軸のマニピュレータを入力装置として用いる。これはスレーブ側に付加した力覚センサからの信号に基づいた操作反力をマスターに返すために、駆動装置を付加したマニピュレータを入力装置として用いる必要がある。しかし本システムの場合、前節で述べたように、スレーブ側に付加する微小力を検出する有効な力覚センサが存在しないため、上記のマニピュレータを使用する必要性がない。加えて、操作反力が得られない以上、対象物操作にも困難をきたす。例えば、ある微小対象物を把持し回転する際、操作者は指先の一定距離を保ちながら、回転軌道を描かなければならないが、操作反力が無いことで、操作者の指先間で対象物を持っているという擬似的な拘束力が得られず、正確な回転軌道を生み出すことができない。すなわち、マスター・スレーブ間に相互作用を生み出せない以上、マスターからの操作入力に対し、スレーブ側で整合をとるような処理を施し、擬似的に操作性向上を図る必要がある。

以上の考察をふまえ、本システムでは操作者の操作デバイスとして、一つのデバイスで多

軸入力ができる6軸もしくは3軸の力覚センサを利用した。すなわち、操作者の親指と人差し指で、二つの力覚センサにそれぞれ入力することで二本指マイクロハンドを操作する操作デバイスを構成した (Fig. 5.1)。ここで、親指、人差し指まわりの手の機構と二本指マイク

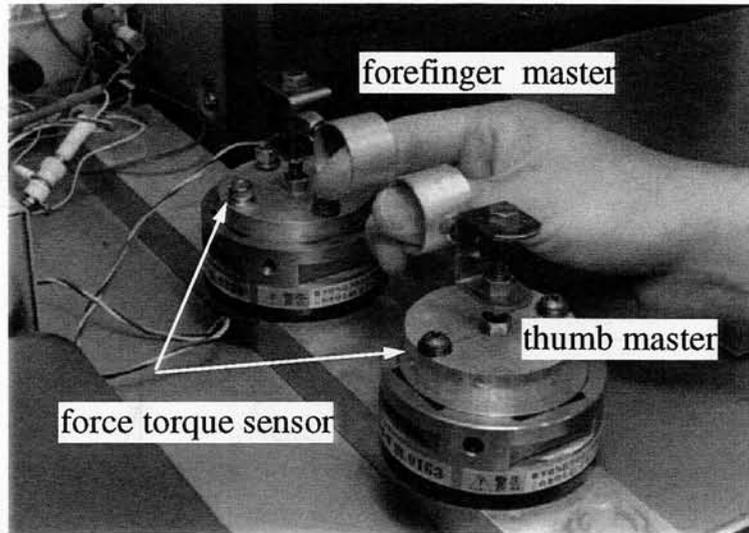


Fig. 5.1 Picture of a master device for operation of the two-fingered micro hand

ロハンド機構は異構造であるため、それぞれの指の動きをそのまま各モジュールに伝えることはできない。よって、親指、人差し指の各指の動きを検出し、その動きに整合させた動作で二本指マイクロハンドを制御する必要がある。次節では、親指、人差し指による操作と二本指マイクロハンドによる操作を比較する。

### 5.2.2 親指、人差し指による操作と二本指マイクロハンドによる操作

親指、人差し指で自然に二本指マイクロハンドを操作するためには、それぞれの動きを整合させる必要がある。前章で述べたように二本指マイクロハンドによる作業は、下部フィンガーモジュールを動作させて行う対象物の位置決めに寄与する大局的な作業と、上部フィンガーモジュールを動作させて行う対象物の把持、解放並びに回転といった姿勢変化に伴う局所的な作業の二つに分類できる。それぞれの作業について人間の親指、人差し指による二本指作業と比較してみる。

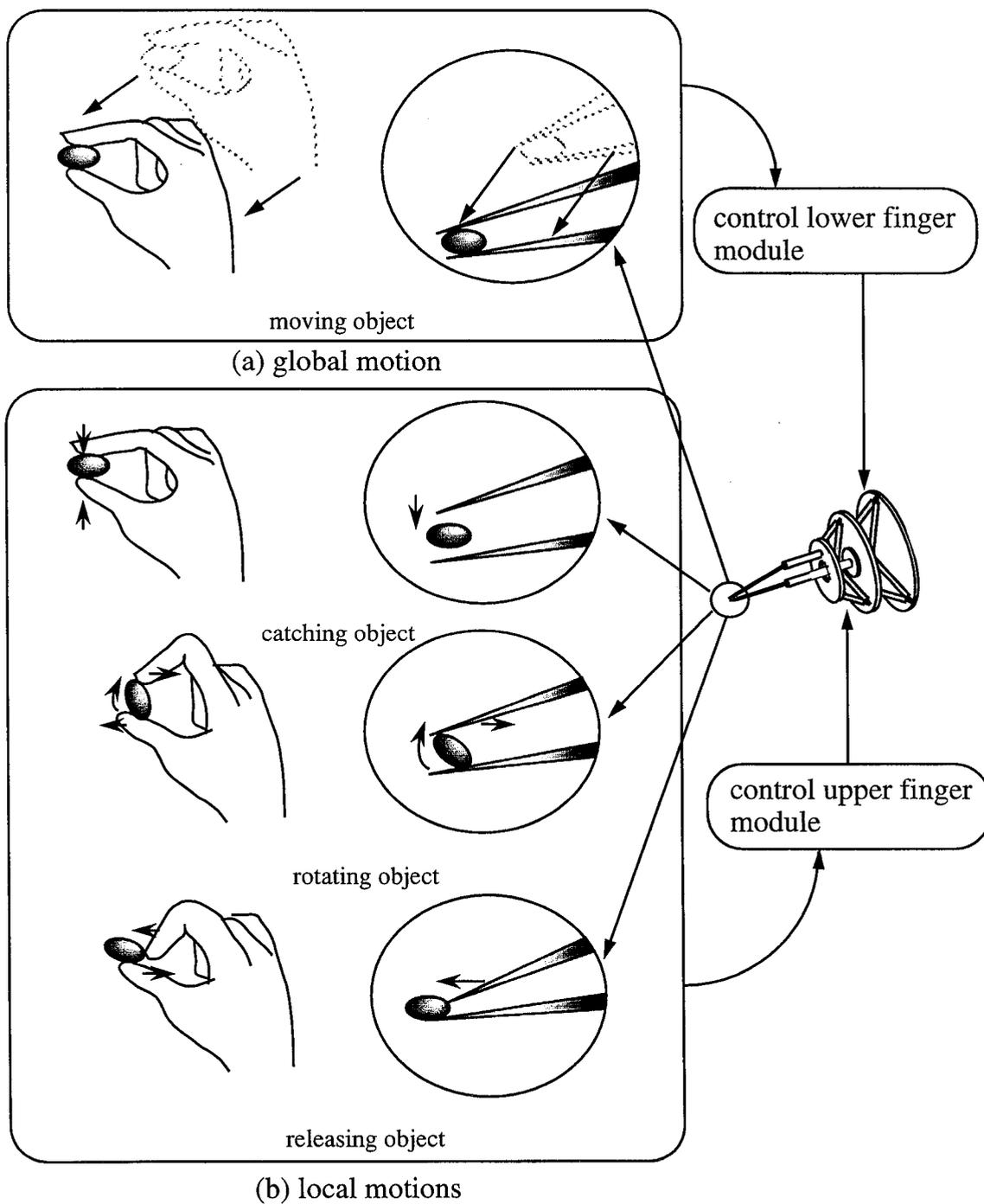


Fig. 5.2 Comparison of the micro hand motions with the actual human hand motions

Fig. 5.2(a) に大局的作業の対象物の位置決めにおける，親指，人差し指による作業例と，二本指マイクロハンドによる作業例を示す．各指の動きに注目すると，位置決め作業においては各指の運動ベクトルは同じ向きを持つことがわかる．これは位置決め作業が腕の動作によって実現されていることに寄与する．一方，マイクロハンドでは下部フィンガーモジュールの制御によって位置決め作業を実現している．次に Fig. 5.2(b) に局所的作業である対象物の把持，解放，回転における，親指，人差し指による作業例とマイクロハンドの作業例を示す．それぞれの作業に共通でいえることは，位置決め動作とは反対に，各指の運動ベクトルの向きは反対の成分を持っていることがわかる．一方，マイクロハンドでは，上部フィンガーモジュールのみを制御してそれぞれの作業を実現している．

以上より，親指，人差し指それぞれの運動ベクトルの向きを比較し，それに応じて上部もしくは下部フィンガーモジュールの動作の切り替えを行うことで，親指，人差し指の動作による，より自然な二本指マイクロハンド操作が実現できると考えられる．この制御フロチャートを Fig. 5.3 に示す．

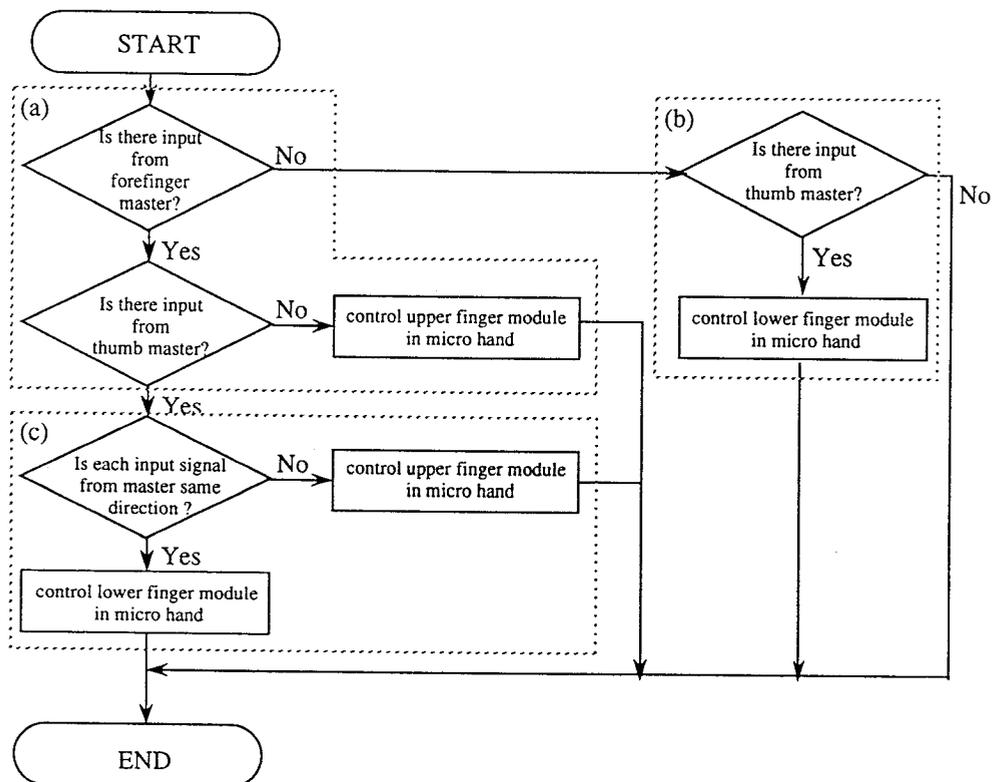


Fig. 5.3 Control flowchart for the operation of the two-fingered micro hand

まず、それぞれの操作デバイスに入力があるか否かを確認する。もし、片方の操作デバイスのみ入力であれば、それが人差し指側操作デバイスの場合、その信号を上部フィンガーマジュールの制御信号とする Fig. 5.3(a)。親指側操作デバイスの場合、その信号を下部フィンガーマジュールの制御信号とする Fig. 5.3(b)。両方の操作デバイスに入力がある場合、先ず各軸に対して二つの操作デバイスに加わる力の入力方向を評価する。入力方向が同じ場合は、位置決め作業に伴う指の動作のため親指側操作デバイスの信号入力のみを下部フィンガーマジュールへの制御信号とし、上部フィンガーマジュールは現在位置を保持する。一方、入力方向が反対であれば、局所的作業に伴う指の動作のため、人差し指側操作デバイスの信号入力のみを上部フィンガーマジュールへの制御信号とし、下部フィンガーマジュールは現在位置を保持する Fig. 5.3(c)。以上の流れで二本指マイクロハンドを制御することで人間の手による二本指操作との整合が取れ、より自然な操作感覚に近づけることが可能となる。

### 5.2.3 微細作業を考慮した二本指マイクロハンドの作業座標系

二本指マイクロハンド機構の大きな特徴として、二本指による微小対象物の大きな姿勢制御が挙げられる。各指に3自由度あれば、対象物の姿勢は最大 $\pm\pi/2$  [rad] の範囲で変化させることができる。著、すなわち二本指マイクロハンドで可能な基本的操作は、以下の通りである。

- (1) 対象物の移動
- (2) 指の開閉による対象物の把持, 解放
- (3) 対象物の箸に沿った方向への回転操作
- (4) 箸を軸とした、対象物の軸回りの回転操作

本システムでは比較的容易に多自由度の入力ができることから、力覚センサを操作デバイスとして利用しているが、問題点として各軸に対する方向と大きさのみしか制御入力として与えることができない。この問題が顕著に現れるのは、上記の(2),(4)の操作である。まず(2)における把持操作では、上部モジュールの指がどの位置にあっても常に下部モジュールの指に向かって開閉しなければ、把持が困難となる。特に微小世界では、顕微鏡からの二次元画像で観察する以上、それぞれの箸の三次元位置を認識することは困難である。そのため顕微鏡画像を利用して正確に指の開閉を行うのは熟練を要する。また(4)の回転動作を実現

するためには，上部フィンガーマジュールの指が下部フィンガーマジュールの指を中心とした円軌道を正確に軌道制御する必要がある．しかし力覚センサである操作デバイスで軌道制御を実現させることは困難であり，特に二本指マイクロハンド機構の特徴である微小対象物の大きな姿勢を制御することが困難となる．

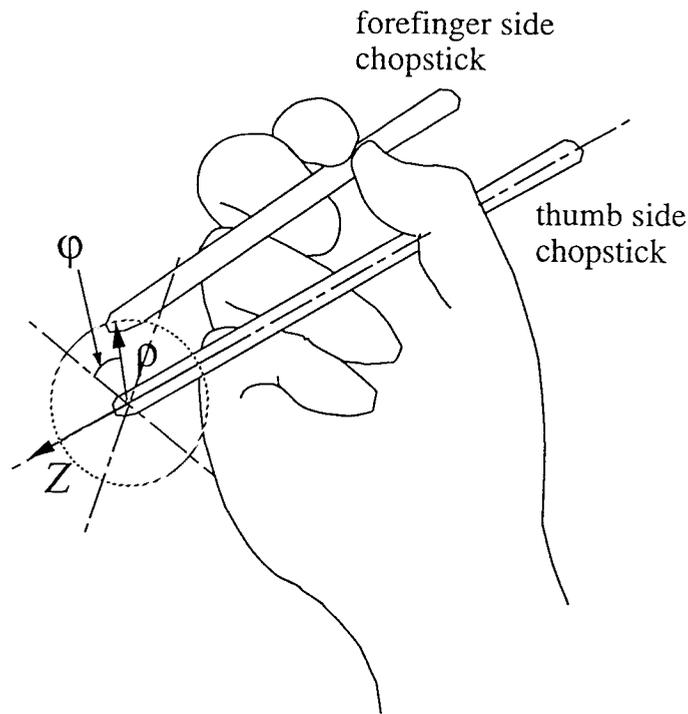


Fig. 5.4 Coordinate system for the motion of the forefinger side chopstick

ここで，箸の操作における人差し指側の箸の動作を観察する (Fig. 5.4)．人差し指側の箸の動作は，基本的に親指側の箸を基準とした相対運動を生成している．この動作の基準となる座標系は親指側の箸を基準軸とした円筒座標系として考えると，人差し指側の箸による局所的作業を制御するのに都合がよい．具体的には，人差し指側の箸の位置を親指側の箸を中心軸とした Z 軸，Z 軸からの距離  $\rho$ ，Z 軸回りの回転角  $\varphi$  で示す．そこで，人差し指側の操作デバイスにおける直交座標系を，マイクロハンドの上部モジュールにおける円筒座標系に変換する方法を提案する．具体的には，Fig. 5.5 において人差し指側操作デバイスの  $X_m$  軸方向の力の大きさをマイクロハンド側の Z 軸方向の並進運動に置き換え， $Y_m$  軸方向の力の大きさを Z 軸との距離  $\rho$  に，そして  $Z_m$  軸方向の力の大きさを Z 軸回りの回転角  $\varphi$  に置き換える．以上の座標変換を行うことで，力覚センサを用いた動作方向の指示のみでも，開閉に伴

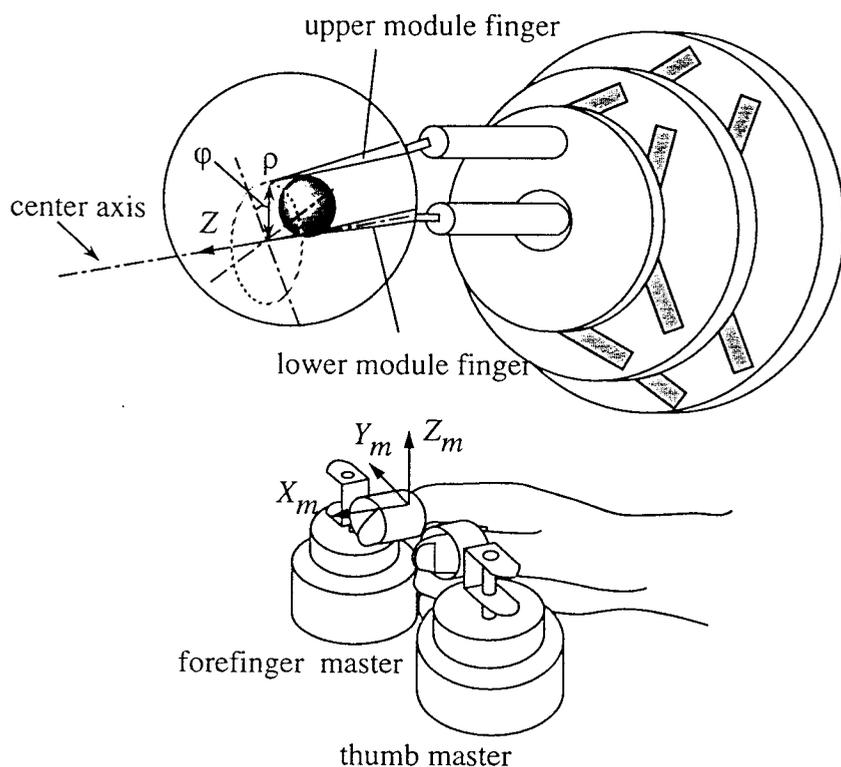


Fig. 5.5 Coordinate transformation from the master device to the micro hand

う指示は操作デバイスの  $Y_m$  軸方向の力の大きさのみで行え、軸回りの回転指示は  $Z_m$  軸方向の力の大きさのみで行えるというように、箸で行う基本的な対象物操作指示を二本指マイクロハンドに対して容易に実現させることができる。

#### 5.2.4 操作モードの切り替えによる作業性向上

力覚センサを利用した操作デバイスには二種類の操作モードが考えられる。加えられた力に比例した位置にマイクロハンドを移動させる位置指令モードと、加えられた力に比例した速度にマクロハンドを移動させる速度指令モードの二種類である。位置指令モードの特徴は、加えられた力に即応性良く反応しマイクロハンドを動作させることができる。マイクロハンドのアクチュエータである圧電素子の応答速度が速いため、操作する指の動きを高い精度で再現できる。また操作する指の力を抜くと、容易に初期位置に戻すことができる。反面、位置決めを行う時は、指の力を一定に保たねばならず操作が非常に困難となる。一方、速度指令モードの特徴は、操作する指の力を抜くと、容易に希望する位置にマイクロハンドを位置決

めできることにある。しかし、位置指令モードに比べて操作性は若干劣る。作業に応じて各操作モードの利点を活かすように制御を行うことにより操作性がさらに向上するものと推測される。

前節にも述べたが、二本指マイクロハンドの各指の基本動作は、以下のようになる。

- (1) 操作対象物の位置決めに伴う下部モジュールの3自由度の動き
- (2) 操作対象物の把持解放操作における上部モジュールによる指の開閉の動き (Fig. 5.5 における Z 軸との距離  $\rho$  の変化に伴う動き)
- (3) 操作対象物の回転操作における上部モジュールによる動き (Fig. 5.5 における Z 軸上ならびに Z 軸回り  $\varphi$  の回転動作)

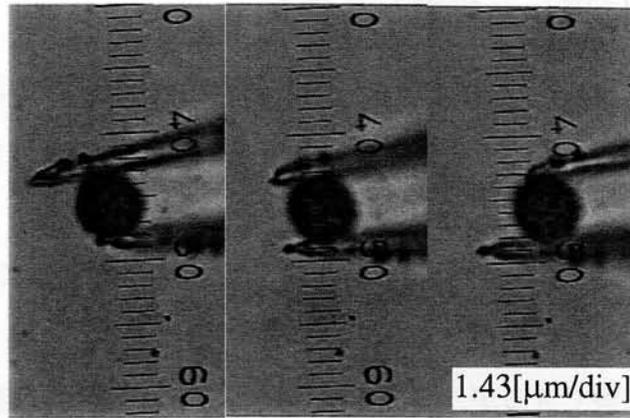
ここで、(1) に関してはマイクロハンドを任意の位置に移動させ、その位置に固定する必要があるため速度指令モードが有効である。(2) についても同様に上部モジュールの指をもう一方の指に対して一定の距離に保つ必要があるため、速度指令モードが有効である。(3) に対しては速度指令モード、位置指令モード共に利用できる。しかし、マイクロハンドの各指が画像の深さ方向に対して重なった位置では、操作デバイスが横置きで固定されているため、開閉方向が操作デバイスとマイクロハンドでは異なってしまう。また顕微鏡の焦点深度が浅いことから、マイクロハンドの各指が画像の深さ方向に対してどちらに開閉しているかの認識が困難である。よって画面上のマイクロハンドの初期状態を操作デバイスと同様の向きに設置し、操作する指の力を抜くと、容易に初期位置に戻すことができる位置指令モードが適していると考えられる。

また回転操作で重要なことは上部モジュールの指がもう一方の指を中心軸として Fig. 5.5 における Z 軸からのある距離  $\rho$  に対して正確に回転もしくは Z 軸に沿って動くことである。すなわち回転操作を行う際に指の開閉操作を行わないようにしなければならない。そこで指の開閉の際の速度指令モードにおいて、ある程度の不感帯を設定しておくことで回転操作の際、指の開閉を行う誤操作を防ぐことができる。このような意味でも指令モードを分けることの有効性が確認できる。

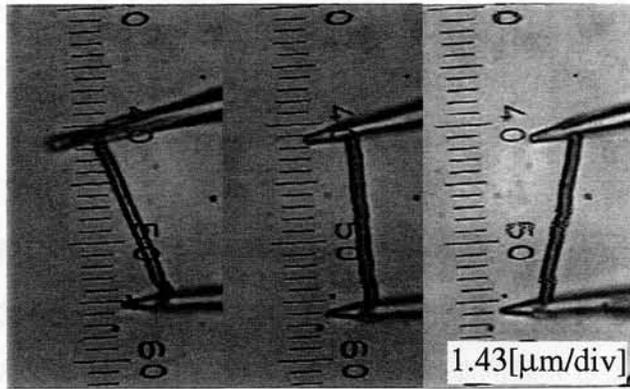
### 5.2.5 操作システムを用いた微細作業実験

提案した操作システムを用いて微小対象物の操作を行った。実験で用いた微小対象物は直径 $5[\mu\text{m}]$ のラテックス粒子，長さ $20[\mu\text{m}]$ ，直径 $1[\mu\text{m}]$ のチタン酸カリウム ( $K_2O \cdot 6TiO_2$ ) ウィスカ，直径 $10[\mu\text{m}]$ の人間の白血球の細胞を用いた。Fig. 5.6において，(a)がラテックス粒子に対する軸に沿った回転操作，(b)がチタン酸カリウムウィスカに対する軸に沿った回転操作，(c)は白血球細胞に対する軸回りの回転操作である。

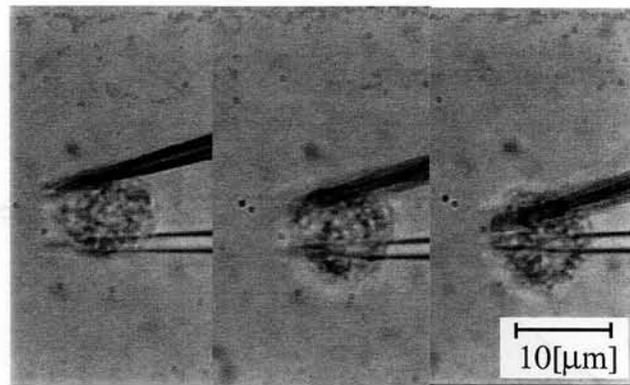
把持操作に関しては前述した作業座標系を設定することにより，上部モジュールの指が，下部モジュールの指に対して正確に開閉させることが可能となり対象物を安定に把持することができた。通常，細胞操作時に細胞を固定する場合，インジェクターを用いて細胞を吸引し固定する。直径 $100[\mu\text{m}]$ 程度の大きさの細胞に関しては安定に固定し，加工をすることが出来るが，それ以下の細胞を安定に固定し，加工を行うことは熟練を要する。提案する二本指マイクロハンドを利用することにより，両側から細胞を挟み込み，安定に固定することができるため，さらに容易な加工が期待できる。回転操作に関しては，ラテックス粒子，チタン酸カリウムウィスカの場合，剛性がマイクロハンドの指であるガラス針に比べて高いため，上部ハンドモジュールの指が他方の指に対して一定距離を保つ軌道（軸に沿った軌道ならびに軸回りの軌道）を正確に生成しなくともガラス針がある程度変形することから軌道の誤差を吸収し，回転操作を行うことができた。よって上記で述べた作業座標系設定の有効性は顕著に見られなかった。しかし，柔軟な対象物である細胞に対しては，作業座標系を設けず操作すると，ラテックス粒子等とは異なりガラス針の剛性が細胞より高いため，軌道の誤差が柔軟である対象物に影響し，誤差の分だけ変形してしまう。また軌道が他方の指から離れる方向にずれると当然，細胞は固定されず離れてしまう。以上から，柔軟な対象物ほど，作業座標系設定の有効性が確認できる。



(a) latex ball



(b) micro stick of  $K_2O \cdot 6TiO_2$  whisker



(c) white blood cell of human

Fig. 5.6 Rotational task of some micro objects by using the two-fingered micro hand and master device system

## 5.3 微細作業用視覚システム

### 5.3.1 微細作業に適した視覚システム

微細作業において、視覚システムに用いられる光学顕微鏡は、一般に高い倍率となるほど焦点深度は浅くなる。それにより微小対象物を操作する際、しばしば焦点面を越えてしまい、ぼやけて観察が困難になるといった現象が見られる。例えば、本システムに用いられている光学式顕微鏡 (IX70 オリンパス光学) では、80 倍の対物レンズと 5 倍の接眼レンズを利用し、11 インチモニターで観察すると、4000 倍の倍率が得られる。画面平面上では縦横ほぼ  $80[\mu\text{m}]$  の領域を観察できるが、画面の深さ方向すなわち焦点深度については、 $5[\mu\text{m}]$  程度しか観察できない。浅い焦点深度のもとで微細作業に必要な広い領域を観察するためには、その焦点面を作業に合わせアクティブに制御する必要がある。すなわち、常に操作対象物の観察ができるよう、その対象物に対して、焦点面を追従させるオートフォーカスシステムを構築する必要がある。

前節で示したように、二本指マイクロハンドを用いて微細作業を行う際、大きく二種類の作業形態に分けられる。すなわち、微小対象物の把持、回転、解放といった、上部フィンガーマジュールの動きによる局所的な操作と微小対象物の位置決めに伴う、下部フィンガーマジュールの動きによる大局的な操作である。微小作業用視覚システムを構築する際は、それぞれの作業に応じたシステムを考察することが望ましい。

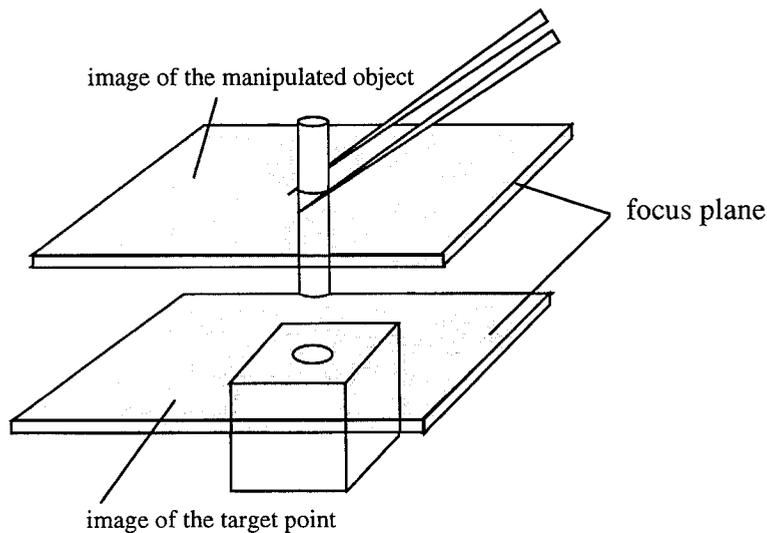


Fig. 5.7 Insertion of a micro stick into a micro hole

まず、局所的な作業に適した視覚システムを考察する。基本的な要求としては、常に操作対象物に焦点面を合わせる必要がある。しかし様々な形状の対象物を操作することが考えられるため、焦点面を合わせる位置が、対象物形状に依存してしまう。ここで二本指マイクロハンドの局所的操作における指の動作を観察すると、Fig. 5.5で示したように、局所的操作は下部モジュールの指を中心軸として、上部モジュールの指が相対運動を生成する事により実現している。すなわち、操作対象物は、常に下部ハンドモジュールの近傍で操作されることがわかる。以上から常に操作対象物に焦点面を合わせるためには下部モジュールの指先に焦点を合わせることにより、様々な対象物に対しても常に焦点を合わせることができると考えられる。

次に、大局的な操作に要求される視覚システムを考察する。対象物の位置決めに必要な画像情報は、微小対象物の操作画像とその対象物を位置決めたい場所の二つの画像が要求される。もし画像の深さ方向に対し、同じ焦点面内の位置決めであれば、一枚の画像情報で十分であるが、特にFig. 5.7のような作業においてはどうしても二枚の画像を操作者に提示する必要がある。

### 5.3.2 指先への自動焦点アルゴリズム

通常のカメラなどに用いられている自動焦点システムは画面中央に焦点を合わせることによって、自動焦点を行っている。微細作業においては、顕微鏡画像内を移動する指先を常にトラッキングし、その位置に焦点を合わせなければならない。まず指先のトラッキングのため、顕微鏡画像から指先の位置を検出する手法について述べる。通常、画像のボケを評価するには錯乱円という評価指数を利用する。焦点面から $\delta z$ 離れた時に生ずる錯乱円の半径 $r$ はレンズのF値を $F$ とすると以下の関係がある。

$$r = \frac{\delta z}{2F} \quad (5.1)$$

顕微鏡からの光量を一定とすれば、錯乱円が広がるとその照度 $L$ は低下するため、 $L$ と $\delta z$ とは以下の関係が成り立つ [17].

$$L \propto \frac{1}{r^2} \propto \frac{F^2}{\delta z^2} \quad (5.2)$$

ここで顕微鏡の焦点面とマイクロハンドの指との位置関係をFig. 5.8に示す。顕微鏡はZ軸上に設置され、X,Y平面上を観察出来るものとする。ここで焦点面位置を $F_p$ としたとき、

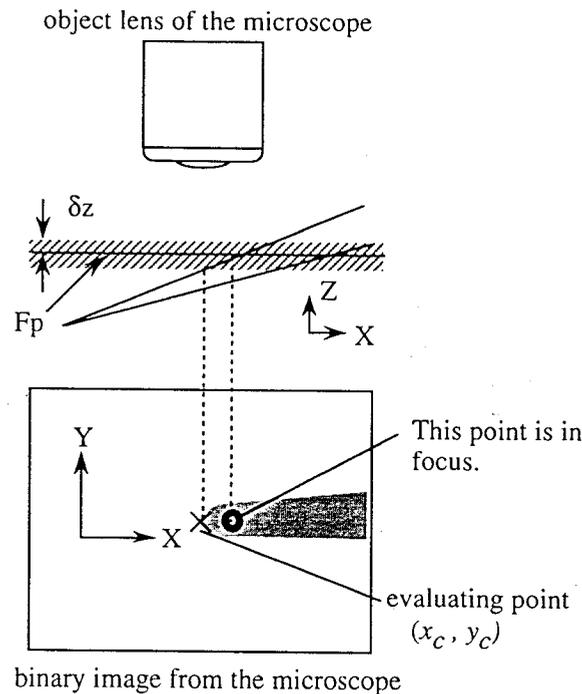


Fig. 5.8 Configuration between the finger tip and the microscope and the microscope image with binarization

顕微鏡からの画像に対し、照度に関して適当な閾値をとり、その閾値で二値化処理を施すと、式 (5.2) の関係から、処理画像は画素値 0 の領域として、斜線部分の領域と指との交差領域が得られる。Fig. 5.8 の位置関係の場合、交差領域の  $X$  軸方向に対し、画素の座標値がもっとも小さい位置 (Fig. 5.8 内  $\times$  印) を焦点を合わせるべき位置とする。この点は焦点が合っていないので、この位置で自動焦点を行うと、焦点面  $F_p$  が下がることにより、さらに  $\times$  印は実際の針先へ近づくことがわかる。よって最終的には  $\times$  印と焦点面が一致し、針先に焦点が合うことがわかる。以上の課程を Fig. 5.9 に示す。

$\times$  印における焦点の度合いを評価する方法として焦点が合ったときにコントラストが最大となることを利用したコントラスト検出方式を採用した。コントラストの評価値は、 $\times$  印近傍の  $Y$  軸に沿った  $2N$  個のピクセルの列を考え、その隣り合った照度 (画素値) の微分値の合計としている。すなわち、焦点を合わせたい位置の座標を  $(x_c, y_c)$  としたとき、その位置の画素値を  $L(x_c, y_c)$  とする。このとき評価値  $V$  は

$$V = \sum_{n=-N}^N \{|L(x_c, y_c + n) - L(x_c, y_c + (n + 1))|\} \quad (5.3)$$

で与えられ、この評価値  $V$  が最大となる焦点面  $F_p$  の  $Z$  座標位置が、マイクロハンドの指先

のZ座標位置となる.

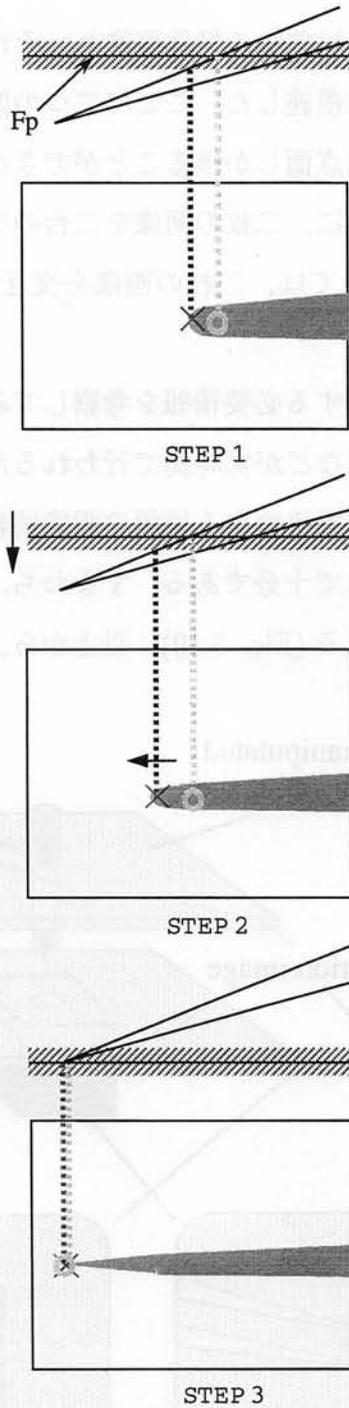


Fig. 5.9 Process of the auto focusing to the finger tip

### 5.3.3 大局的操作における画像の提示手法

大局的操作においては、微小対象物の操作画像と、それを位置決めする場所の画像の二枚の画像提示が要求されることは前述した。ここで二つの問題が生じる。第一に、顕微鏡は単眼レンズであるため、単一の焦点面しか得ることができない。よって同時に二枚の焦点面を得ることが不可能である。第二に、二枚の画像を二台のモニタを使って個々に表示することは容易であるが、操作者にとっては、二枚の画像を交互に観察しながらの作業であるため、操作性が良いとはいえない。

ここで、それぞれの画像に対する必要情報を考察してみると、微小対象物の操作画像については、操作による姿勢の変化などが実時間で行われるため操作画面の観察は実時間で提示しなければならない。一方、位置決めする場所の画像情報はその位置が実時間で変化しない限りは、画像内の位置情報のみで十分である。すなわち、前もって取り込んだ静止画像を表示するだけで十分であるといえる (Fig. 5.10)。以上から、位置決めをする際、まず前述した

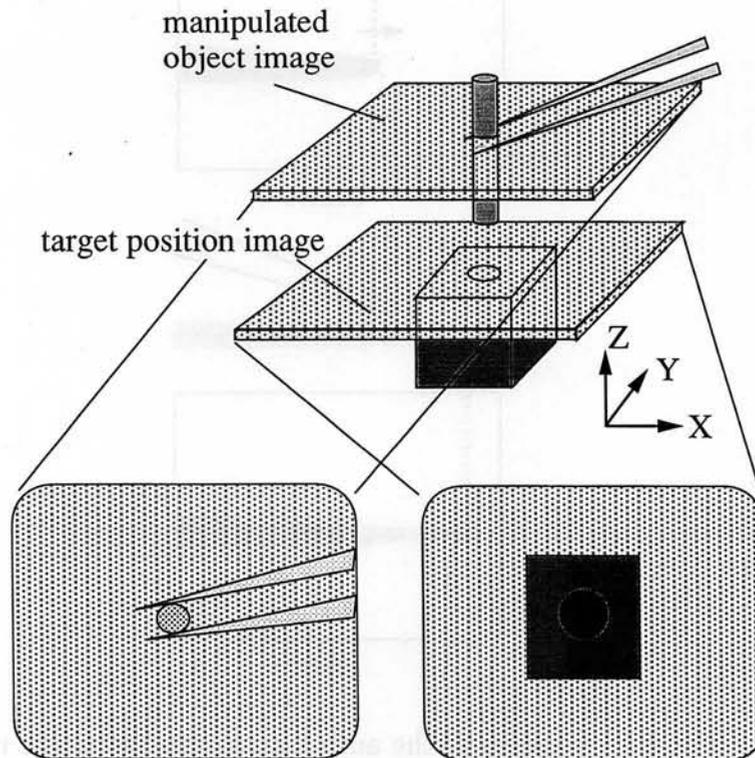


Fig. 5.10 Required two images in the positioning task

自動焦点システムを解除し、位置決め位置に焦点面を移動し、その画像情報を取り込む。次に自動焦点による実時間の操作画像に復帰し、この実時間の操作画像と、位置決め位置の静止画像の二枚の画像を利用することにより、安定した作業を遂行することが可能になると考えられる。以上の流れを Fig. 5.11 に示す。

ここで、操作者に対し二枚の映像を提示しなければならない。位置決めには、まず操作対象物を画像内の X,Y 平面上のある部分に位置決めし、その後高さを合わせるために Z 軸上を移動し、目標に位置決めするのであるが、操作対象物と位置決め位置の画像を別々に提示した場合、X,Y 平面上の位置決めを、二枚の画像を交互に見ながら、遂行しなければならず、操作性に難をきたす。位置決め操作の観点から見ると、一枚の画像として合成された画像を提示する事が有効であると考えられる。しかし単純に合成すると、奥行き感のない平面的な画像となり、操作性の向上は望めない。すなわち、別々の画像として認識でき、かつ一枚の画像として提示することが必要である。比較的単純な方法として、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いる方法がある。通常、ヘッドマウントディスプレイは視差を考慮した二枚の画像をそれぞれの目に個々に提示し、奥行きのある一枚の立体画像として認識させる。この人間の錯覚を利用し、右目に操作の動画像、左目に目標の静止画像を提示することで、二枚の画像ながらも、あたかも奥行きのある一枚の画像であるように認識することができる (Fig. 5.12)。

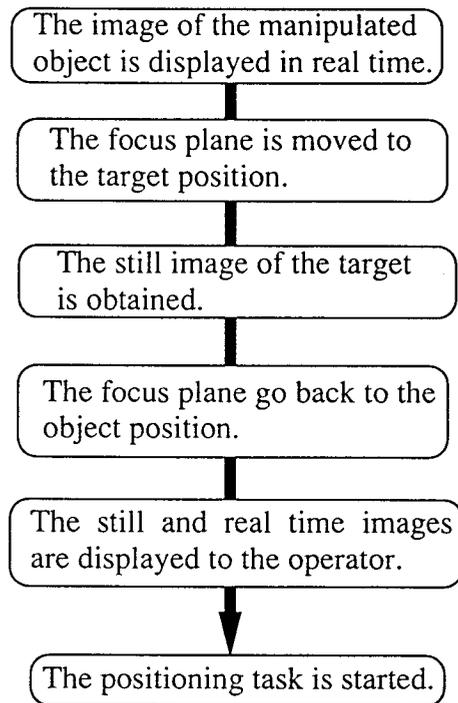


Fig. 5.11 Flow to obtain a still and a real-time images in the positioning task

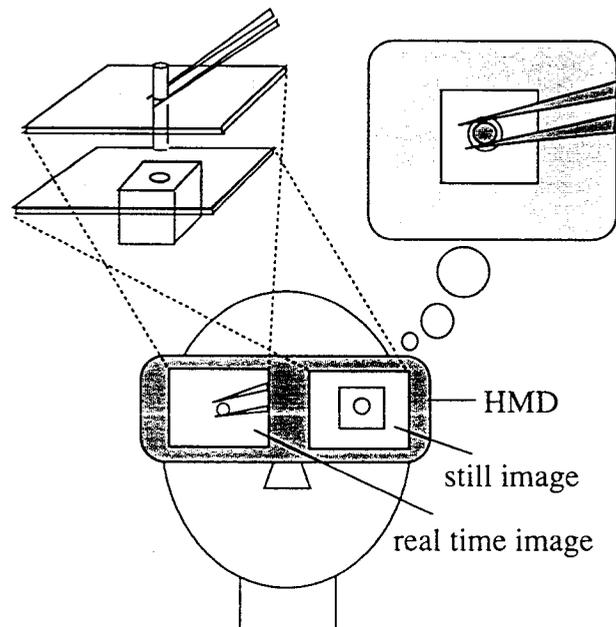


Fig. 5.12 A system to observe micro manipulation by using HMD

## 5.3.4 実験結果

まず局所的操作に必要な自動焦点について実験を行った。二本指マイクロハンドを顕微鏡下に設置し、Z軸方向（画像に対しての深さ方向）に一定の周期で上下させ、その際の評価値  $V$  を測定した。ここでの閾値は、焦点が合ったときの画像のヒストグラムから60とした。Z軸に対し  $10[\mu\text{m}]$  の振幅で上下に移動させた。画像を取り入れて式 (5.3) で示される評価値  $V$  を算出するまでの時間は  $100[\text{msec}]$  であった。Fig. 5.13 に実験結果を示す。評価値  $V$  が最大値となる点が焦点面の位置を表す。これよりマイクロハンドの座標系において  $z=-2[\mu\text{m}]$  の位置が焦点面であることがわかる。この方法により顕微鏡の焦点を自動化することが可能となる。ただし、焦点面の位置  $\pm 3[\mu\text{m}]$  以外では、指先が大きく焦点面から外れすぎ、画面情報のみでは、指先に焦点を合わせることが困難である。そこで、実際のシステムでは二本指マイクロハンドへの指先の指令値を利用し、その近傍において自動焦点を行うことで、より安定した特性を得ることができる。ちなみに二本指マイクロハンドの絶対位置決め精度は  $2[\mu\text{m}]$  程度であるため、自動焦点可能な領域  $\pm 3[\mu\text{m}]$  以内に含まれる。

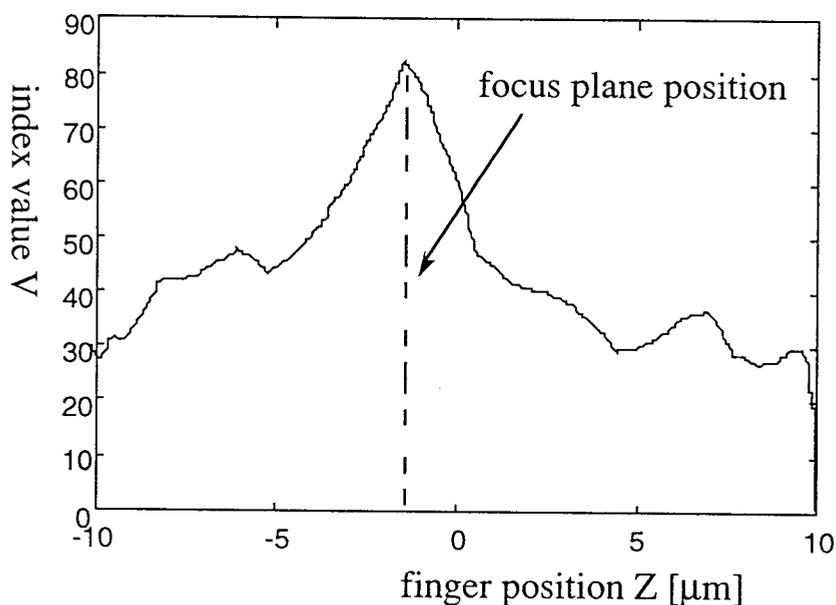
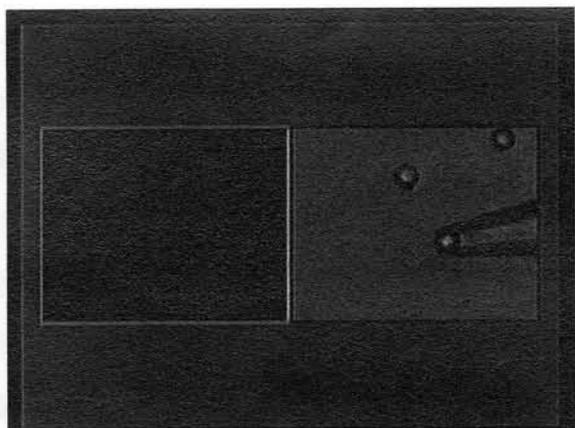


Fig. 5.13 Relation between the index value and the finger position with auto focusing control

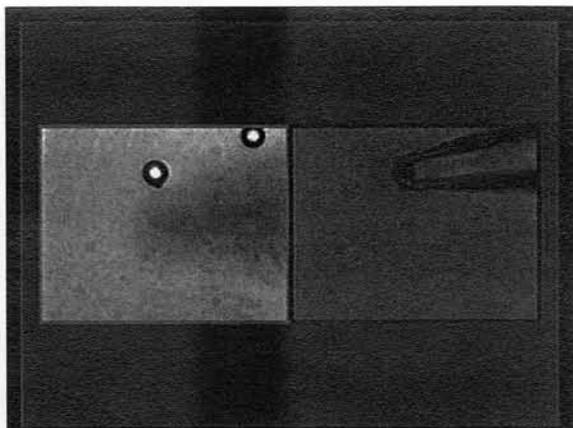
次に、大局的操作、すなわち微小対象物の位置決め操作を行った際の、ヘッドマウントディスプレイに提示する画像を行程順に Fig. 5.14 に示す。ヘッドマウントディスプレイを使う

ことにより、焦点面を越えて観察できない場所への位置決めが容易に行えることができる。このため、Fig. 5.7で示した棒状の対象物の挿入作業といった、より複雑な組立行程を容易に実行できると考えられる。

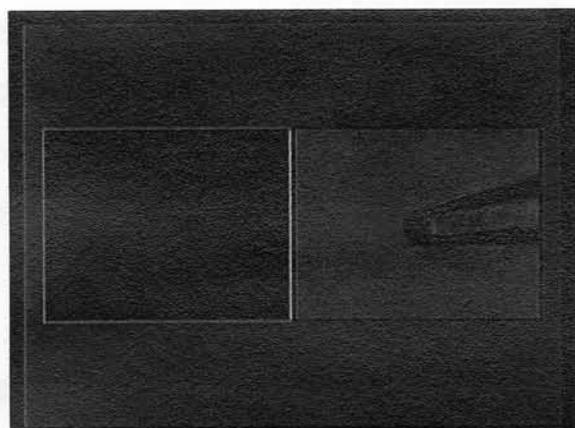
数人の被験者に本システムを使用させた結果、作業性は向上されるが、それぞれの目に違う画像を表示させるという不自然な提示法のため、通常より目の疲れが現れることが指摘された。よって今後は、それぞれを視差を考慮した二枚の画像に分け合成させる方法が自然であると考えられる。



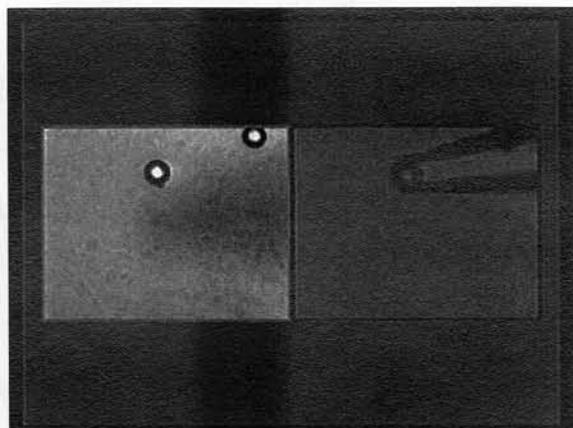
STEP 1: grasping a micro object



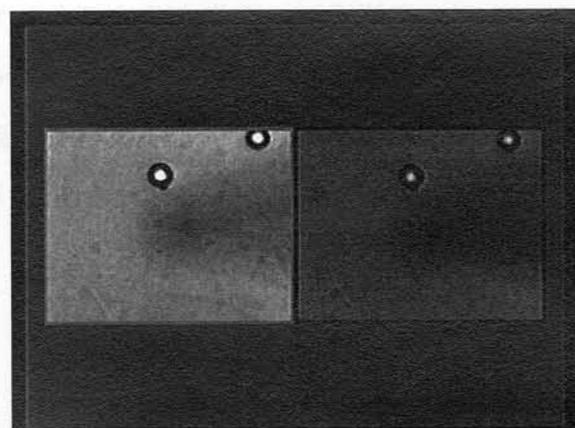
STEP 4: returning the focus to the object



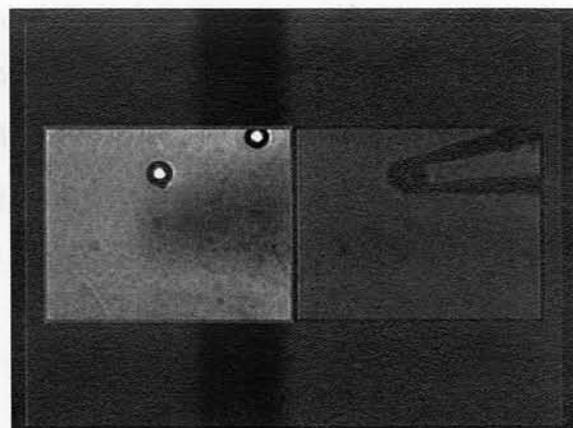
STEP 2: picking up the object



STEP 5: positioning the object



STEP 3: moving the focus to the target and getting still image of the target



STEP 6: hit on the target

Fig. 5.14 HMD images in the process of the positioning task

## 5.4 まとめ

数ミクロンサイズの微小対象物を操作する二本指マイクロハンドを容易に制御するため、操作デバイスの開発ならびに操作アルゴリズムの提案を行った。通常人間が二本指操作で用いる親指と人差し指の動きで、二本指マイクロハンドを制御する方法を提案し、多自由度の入力が可能な操作デバイスとして力覚センサを用いた。さらに、人間の自然な二本指操作でマイクロハンドを制御できるように両者の作業を比較し、整合させる操作アルゴリズムを提案した。また力覚センサでは指の加える力の大きさと方向しか入力できないため、特に微小対象物の回転操作のような正確な軌道制御を二本指マイクロハンドに指示することは困難である。そこで微細操作に適した作業座標系を二本指マイクロハンドに設け、操作デバイスの直交座標系から座標変換することにより、正確な軌道制御を行うことができた。加えて操作性向上のために、二つの指令モードを設定した。これを作業に応じて切り替えることにより、各作業を確実に指示することが可能になった。この操作デバイスシステムを利用することにより、ラテックス粒子、チタン酸カリウムウイスカ、細胞などの把持、回転、解放といった微細操作を安定に実行できた。これにより本システムの有効性が確認できた。

また、高倍率による浅い焦点深度の下で、より高度な微細作業及び操作性向上のため、下部モジュール指先へ能動的に自動焦点することで、操作者に負担をかけずに常に操作対象物の観察を可能にした。また焦点面を越えた場所への位置決めを行う際、目標場所の画像と操作対象物の画像の二枚の画像を提示する必要があるが、目標場所の画像を静止画として前もって取り込み提示することで、単眼視のみでも双方の必要な情報を提示できる。更にヘッドマウントディスプレイ内の右目、左目用ディスプレイ画面に、二枚の画像を独立に表示することで容易に一枚の画像ながらも、二枚の画像として認識できた。このシステムにより焦点面を越えた場所への位置決めを安定に実行することができた。

## 第6章 接着接合による微細組立

### 6.1 はじめに

マイクロマシンといった、微小構造物を実現するためには、微小対象物の操作技術の確立だけでなく、それぞれの部品を組み立てる接合技術の確立が求められる。微小部品を接合するため様々な方法が発表されている。接合方法で代表的なものとして陽極接合 [18][19]、共晶接合 [20][21]、直接接合 [22][23] といったものがある。しかし高温度の加熱や高電圧の印加が必要であり、その他、微小部品の物性による制約がある。一方、接着剤による接合は、高電圧印加、高温度による加熱といった必要が無く、また素材による制約を受けないといった利点がある。すなわち、微小部品と同サイズ、もしくは、それ以下の極微量な接着剤の塗布が可能ならば、様々な微小部品を使って、より複雑な微小構造物の製作が可能になる。

### 6.2 微量液滴塗布技術

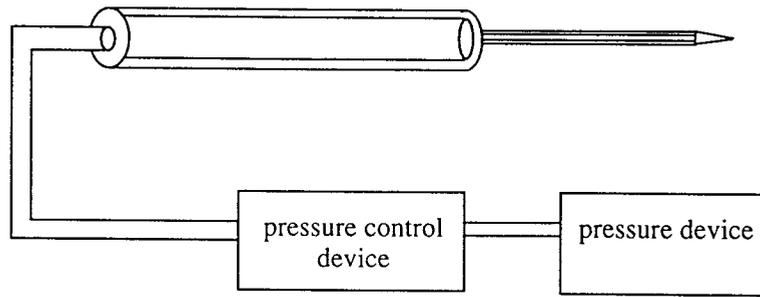
#### 6.2.1 従来の液滴塗布方法

微量な液滴を塗布する方法として、いくつかの手法が適用されている。代表的なものとして注射器のように管内に液体を満たし、他端から加圧する事により液滴を押し出すインジェクタ方式 Fig. 6.1(a) がある。しかし微量な液滴を排出するには高精度な圧力制御が必要であり、特に数ミクロンサイズの液滴塗布は困難である。

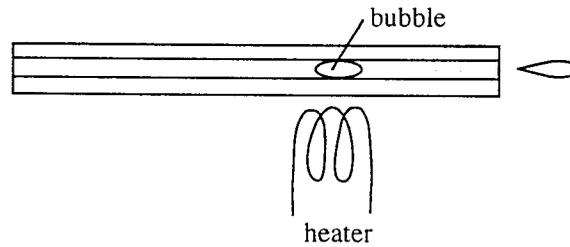
その他、プリンタに用いられているバブルジェット方式 Fig. 6.1(b) が挙げられる。これは細管の途中を加熱する事により、内部の液体が気化し、これによる圧力で微量な液滴を排出するものである。これは現在のプリンタで見られるように極微量の液滴を作り出す事ができる。しかし、機構的に複雑であるため、高精度の製作には困難を要する。また、通常インクを排出させるために開発されているため、純粋な液体を排出する機構としては、一般には使われていない。加えて、今回の接着剤塗布においては加熱により、硬化が促進される可能性

があり、適用は困難と考えられる。

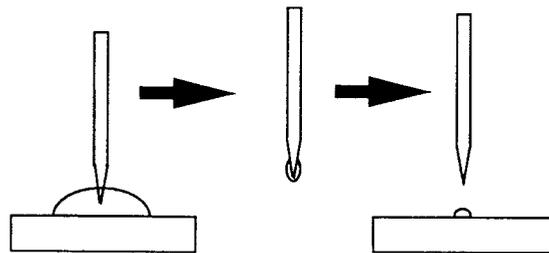
現在、最も微量な液滴塗布方法として有力なのが針状工具方式 Fig. 6.1(c) [24][25] である。これは細い針を液体中に浸し、その表面に付着した液滴を塗布したい場所に接触させ、塗布するといった極めてシンプルな方法である。しかし、温度、湿度といった環境に敏感であり、一定量の安定した塗布の実現は作業環境に大きく依存する。環境変化に対し、安定した塗布



(a) injector system



(b) bubble jet system



(c) usage of a needle

Fig. 6.1 Methods for making micro drop

を実現するためには、インジェクタ方式やバブルジェット方式のように管内の液体を排出する方式が有効である。液体で満たされた管内から極微量の液体を排出する事は困難であるが、

何らかの方法によって管内に希望量の液体を取り出す事ができれば、排出に関しては適当な加圧で排出できる。次項では、管内に希望量の液体を抽出する方法について述べる。

### 6.2.2 毛細管現象を利用した液滴抽出

我々は、希望量の液量を取り出すために毛細管現象を利用した。ただし、単なる直径数ミクロンサイズの細い管では、表面効果の影響が小さく毛細管現象は現れないため、中空で内側にガラス繊維が入っているガラス管を加熱し、引っ張り、針状にしたガラスピペットを使用した (Fig. 6.2)。この繊維による表面効果により毛細管現象が顕著になり、単に液中に浸しただけで液がガラスピペット内部に侵入する。この浸入速度は十分目視できる程度 (数  $[\mu\text{m}/\text{sec}]$ ) である。

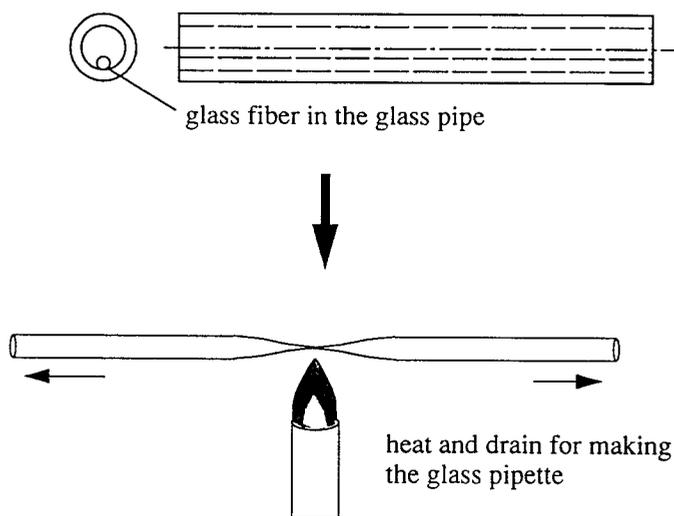


Fig. 6.2 The glass pipette for making micro drop

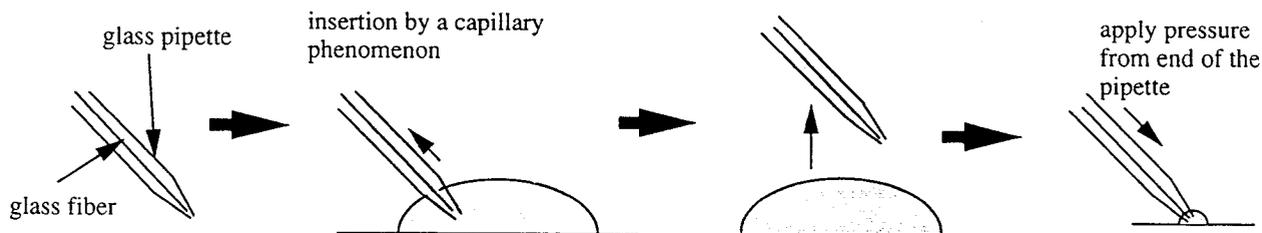


Fig. 6.3 Micro drop by applying a capillary phenomenon

顕微鏡観察により、希望量の液滴がピペット内に入ったときに液体からピペットを離せば任意の液量が得られる。その後、目的とする位置にガラスピペット先端を移動し、適当な圧力を加え、ピペット内の液体を全て押し出す (Fig. 6.3)。

### 6.2.3 微量液滴塗布評価実験

前節で提案した微量液滴塗布方法の有効性を検証するため、ピペット内部に侵入した長さ  $h$  に対する、液滴の直径  $d$  の関係を調べた (Fig. 6.4)。液体には紫外線硬化剤 (Norland Products Incorporated Norland Optical Adhesive NOA 81) を利用した。また、この時のガラスピペットの先端径は  $2[\mu\text{m}]$  であった。グラフより、それぞれの関係は、ほぼ線形関係を持

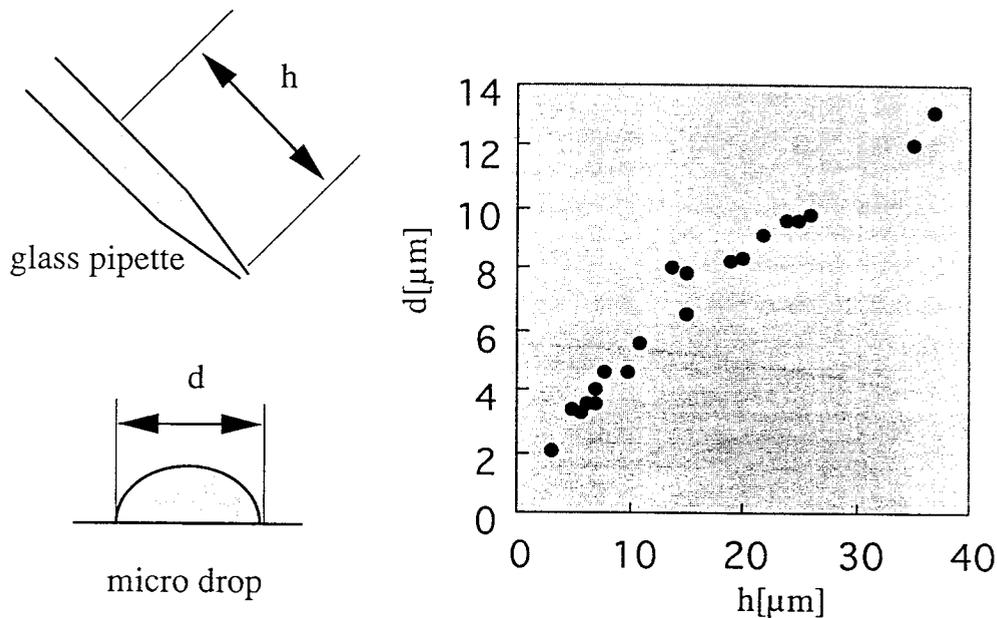


Fig. 6.4 Parameters on estimation of the micro drop and relationship between the quantity in the glass pipette and the micro drop size

つ事が分かる。すなわち侵入量を制御すれば一定の液滴を安定に塗布する事ができる。また今回の実験では、最小直径  $2[\mu\text{m}]$  の極微量な接着剤の液滴を再現性よく得ることができた。グラフ上における液滴直径のばらつきは、塗布する際のガラスピペット先端の押しつけ力のばらつきにより液滴形状がばらついたものと考えられる。より安定した塗布の実現には押しつけ力の制御が重要と言える。ただし液滴の体積においては一定した関係が得られると考え

られるため、次に、侵入量 $h$ と液滴の体積 $V$ の評価を行った。体積は原子力顕微鏡 (AFM) により硬化後の液滴の3次元形状計測を行い (Fig. 6.5), このデータから算出した。Fig. 6.6 にその結果を示す。

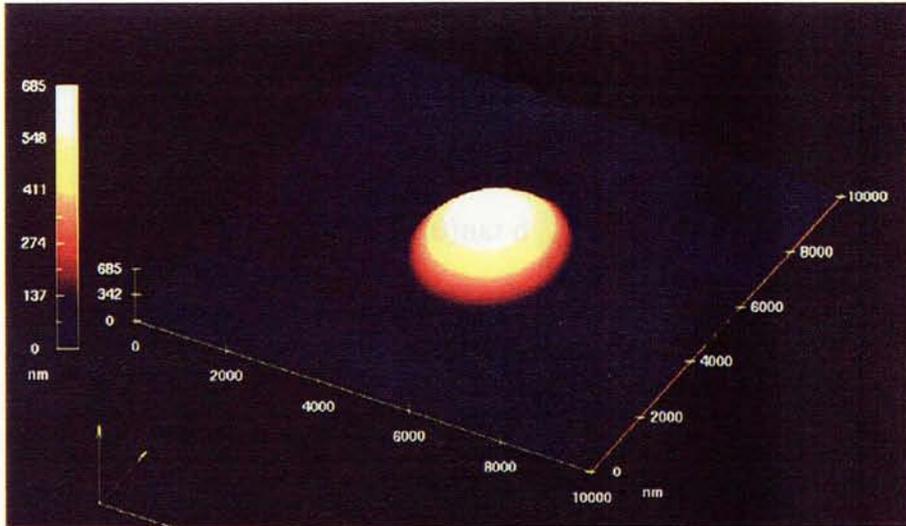


Fig. 6.5 3D image of a micro drop from the AFM

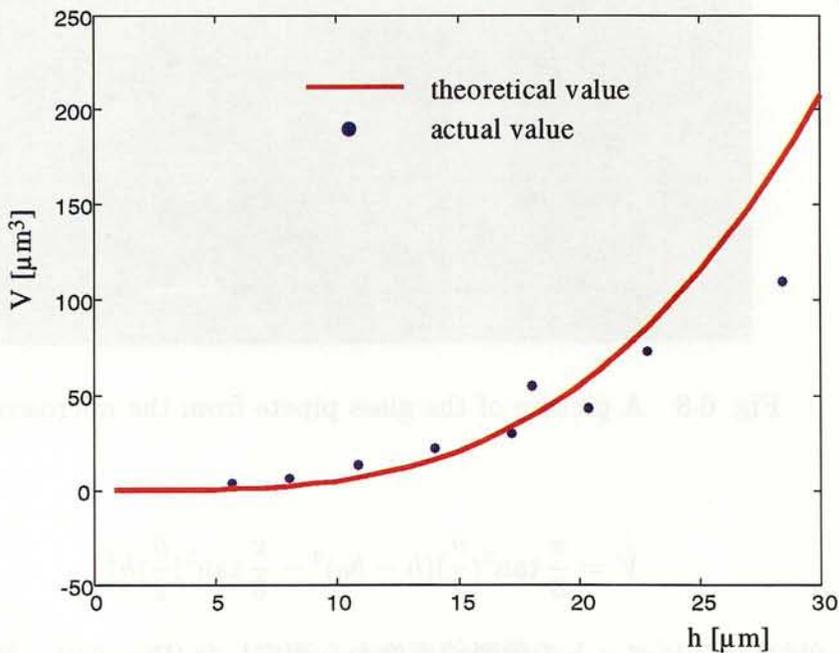


Fig. 6.6 Relation between the quantity in the glass pipette and the volume of the micro drop

ここでの理論値は、ガラスピペットの内径の形状を円錐状であると仮定しモデル化した。Fig. 6.7に詳細を示す。これから理論値は以下のように求められる。

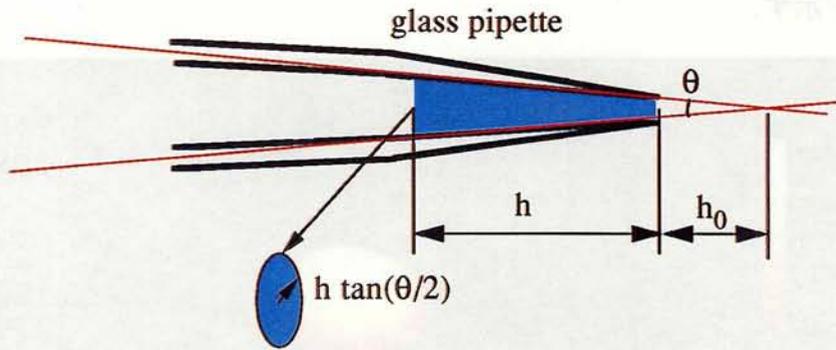


Fig. 6.7 Model of the glass pipette shape

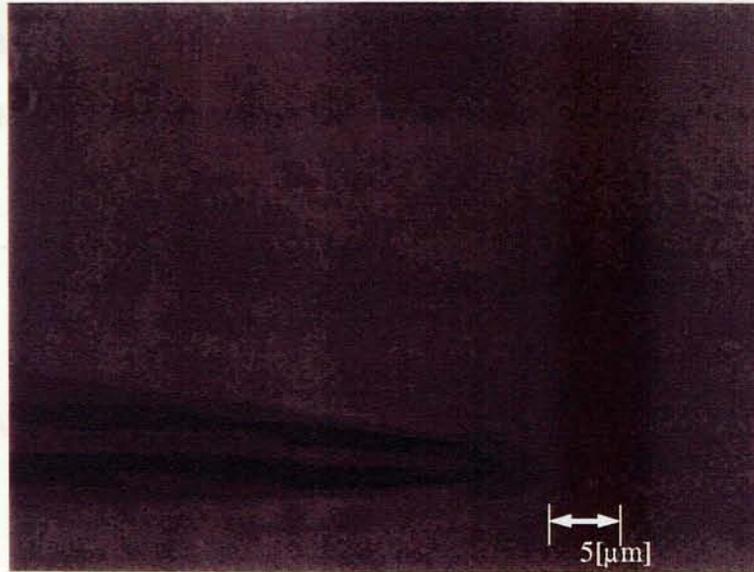


Fig. 6.8 A picture of the glass pipette from the microscope

$$V = \frac{\pi}{3} \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)(h - h_0)^3 - \frac{\pi}{3} \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)h_0^3 \quad (6.1)$$

ここでの  $h_0, \theta$  はガラスピペットの顕微鏡画像から測定した (Fig. 6.8)。侵入量と液滴体積との関係を理論値と比較すると、測定点の軌跡は、ほぼ侵入量に対して3乗の軌跡を描いていることがわかる。しかし、液滴の体積が小さいときは理論値に比べ大きい値となり、体積が大きい場合は小さい値になっている。この理由として、特に体積が小さい場合、ガラスピペッ

ト内部の液体に加え，表面に付着した液体が影響を与えていると考えられる．また，理論値算出の際のモデルは，円錐状として近似しているが，ガラスピペットの根本ほどテーパーは緩くなっている．そのため体積が大きいときは，モデル誤差により実測値のほうが少なくなったと考えられる．

### 6.3 微小立体構造物組立

微量液滴塗布装置と二本指マイクロハンドシステムを組み合わせた実験システム構成を Fig. 6.9 に示す．

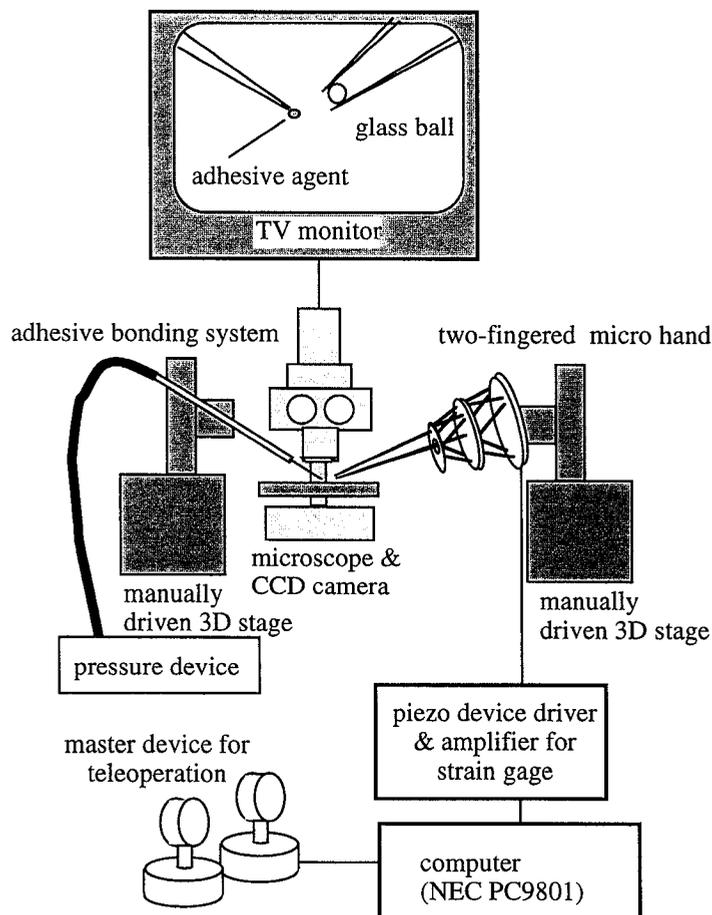
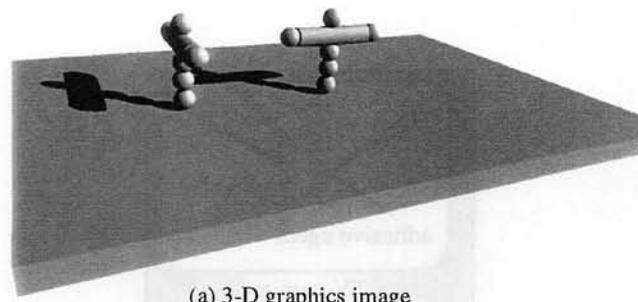


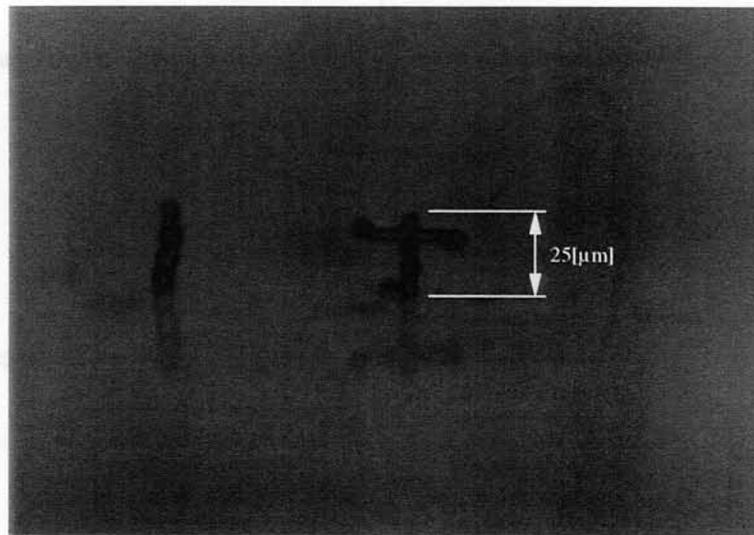
Fig. 6.9 A configuration of the micro fabrication system setup

通常の接着剤では微量の場合，硬化速度が速いため，紫外線硬化剤を用い，微小部品を組み付けたあと紫外線により硬化する方法を採用した．まず，前節の方法により微量な接着剤

を塗布する．二本指マイクロハンドで微小対象物を操作し，塗布した接着剤の位置に組み付け，紫外線を照射することにより接着剤が硬化する．その後，接着した微小対象物上に接着剤を塗布すれば，さらに積み上げ，接着することが可能となる．接着剤の塗布及び，微小対象物の組み付けの作業時間は数分程度で実行できたが，接着剤の硬化時間が1時間程度必要であった．これは，接着面が微小なため紫外線の単位面積当たりの光量が十分でないためと考えられる．



(a) 3-D graphics image



(b) A picture from the microscope

Fig. 6.10 A 3D image and a picture of the 3D structure: Micro screws in different orientations

以上の行程を繰り返し，身長 $25[\mu\text{m}]$ のマイクロかかしの作製を試みた．直径 $5[\mu\text{m}]$ のガラス粒子を3段積み上げ，棒状の繊維（チタン酸カリウムウイスカ）を腕の部品として接着する．二本指マイクロハンドにより部品の姿勢を制御できるため，棒状の物でも様々な姿勢で

る。この行程においてはマイクロな環境特有の現象が見られる。即ち、 $100[\mu\text{m}]$ 以下の微小対象物では、静電気力や液架橋力の影響が、物体の質量に伴う慣性力、重力の影響よりも支配的になる。これによりガラス粒子を横から接着しても液架橋力により、硬化前でも落ちることではなく、再度横方向に、接着し続けるといったマイクロな環境特有の組立が可能になる。最後に頭となるガラス粒子を接着し、立体的な微小構造物「マイクロかかし」を完成した (Fig. 6.10).

## 6.4 まとめ

微小構造物組立を実現するためには微小部品同士の接合技術の確立が重要である。微小部品の接合には接着剤による接着接合が有効である。そこで微小部品以下の極微量な接着剤塗布を実現するためにガラス繊維を挿入したガラスピペットを使い毛細管現象を応用した塗布方法を検討した。この方法により最小直径 $2[\mu\text{m}]$ の接着剤の液滴を再現性よく塗布することができた。またガラスピペット内の侵入量と液滴直径の関係を調べ、ほぼ線形関係があることを確認した。加えて、安定した塗布の実現には、塗布の際のピペット先端の押しつけ力の制御が必要であることを確認した。また、押しつけ力に影響されない評価法として、侵入量と液滴体積の評価を行った。体積測定には原子力間顕微鏡を用い液滴の3次元形状データから体積を算出した。これに対し、ピペット形状のモデルからの理論値との比較を行い、定量的な評価を行った。

微小部品の操作システムである二本指マイクロハンド機構と、本微量液滴塗布法を組み合わせることにより、数 $[\mu\text{m}]$ サイズの微小部品の立体的な接着組立を可能とした。従来、このサイズの立体構造物の製作には半導体製作プロセスで用いられるホットエッチング技術を用いたものが主であった。しかしプロセス技術は基本的に面上に対する加工技術であるため立体構造物ができるとはいえ、製作した構造物は2.5次元的なものに限定されていた。また素材も限定されてしまうため、多様な構造物は作ることが困難であった。本成果は、以上の問題の解決につながる一手法であると考えられる。

## 第7章 結言

### 7.1 結論

本論文ではマイクロマシンの組立，細胞遺伝子操作，微細手術への応用を考えたミクロンサイズの微小対象物を容易に操作，組立可能な微細作業システムの提案を行い，数々の微小対象物の操作組立実験を行うことで，その有効性を示した．各章で得られた結論は次の通りである．

第二章では，通常の世界と異なる微小環境についての特徴をスケール効果として説明し，特にマニピュレーションにおいて影響力の強い分子間力，液架橋力，静電気力を理論的に説明した．このような環境下においては対象物の質量による慣性力よりも上記の表面間力が支配的となるため，通常の世界で安定把握に要求される，三指による把握は必要としない．箸の操作で見られるように，各指に多自由度の動きがあれば，二本指により対象物の把握だけでなく，微小空間で困難とされる対象物の解放が容易であり，姿勢制御さえも容易に実現できると考えられる．よって本章において，最適な機構として箸のような二本指による微小対象物のマニピュレーションを提案し，研究の方向性を位置づけた．

第三章では2本指マイクロハンドを構成する基本機構としてパラレルメカニズムを適用したフィンガーマジュール機構を提案し，その動作性能について評価を行った．まず，各リンクのジョイント機構に関して，ピボット・スプリング式とフレキシブル・ジョイント式の2種類のフィンガーマジュールを提案したが，機構の安定性，応答性の点でフレキシブル・ジョイント式が優れていることが判明した．さらに，アクチュエータである圧電素子の表面にひずみゲージを付加し，このひずみ計測により圧電素子の伸びを検出し，この信号を基にフィードバック制御系を構築することで，高精度な位置決め制御を実現した．またサンプリングレートの変動や雑音などの外乱にロバストで制御性能の良好な制御系実現のため可調整パラメータを含んだ $H_{\infty}$ 制御器を適用し，その有効性を評価した．加えて，顕微鏡画像情報のみを利用したフィンガーマジュールのキャリブレーション手法について検討し，本手法を

用いて最終的に  $0.1[\mu\text{m}]$  以下の繰り返し精度，及び  $2[\mu\text{m}]$  の絶対位置決め精度を実現した。

第四章では二本指マイクロハンドの機構設計に関して，第三章におけるフィンガーモジュールの二本指としての構成に関する検討を行った。始めに，フィンガーモジュールを並列に設置した二本指について，その問題点を考察した。次に人間の箸の操作法を参考に，新たな二本指マイクロハンドの構成法について検討した。これを基に，パラレルメカニズムであるフィンガーモジュールを直列に配置し，上部プレートと中間プレートに各指を配置した構造で二本指マイクロハンドのプロトタイプを設計試作した。これを用い，直径  $2[\mu\text{m}]$  の真球状ガラス粒子を把持し，任意の位置へ移動するといった基本的な微細作業に成功することで，その有効性を検証した。微小環境における表面間力の影響で微小対象物の解放における課題を第二章で示したが，各指の多自由度の動きにより吸着した微小対象物を容易に放すことができ，パラレルメカニズムを用いた二本指マイクロハンドの有用性が確認できた。

第五章では二本指マイクロハンドの容易な操作を実現するため，ヒューマンインターフェースである操作デバイスシステム及び視覚システムの提案を行った。通常人間が二本指操作で用いる親指と人差し指の動きで，二本指マイクロハンドを制御する方法を採用し，自然な二本指操作でマイクロハンドを制御できるように両者の作業を比較し，整合させる操作アルゴリズムを提案した。また，微細操作に適した作業座標系を二本指マイクロハンドに設け，操作デバイスの直交座標系から座標変換することにより，正確な軌道制御を行うことができた。加えて操作性向上のために，二つの指令モードを設定し，作業に応じて切り替えることにより，各作業を確実に指示することを可能にした。この操作デバイスシステムを利用することにより，ラテックス粒子，チタン酸カリウムウイスカ，細胞などの把持，回転，解放といった微細操作実験に成功し，その有効性を検証した。視覚システムに関しては，高倍率による浅い焦点深度の中で，より高度な微細作業，及び操作性向上のため，下部モジュール指先へ能動的に自動焦点するシステムにより，操作者に負担をかけず，常に操作対象物の観察を維持できることを可能にした。また焦点面を越えた場所への位置決めを行う際，目標場所の画像と操作対象物の画像の二枚の画像を操作者に提示する必要があるが，目標場所の画像を静止画として前もって取り込み，更にヘッドマウントディスプレイ内の右目，左目用ディスプレイに，二枚の画像を独立に提示することで，容易に二枚の画像を，奥行きのある一枚の画像として認識でき単眼視のみでも双方の必要な情報を提示できた。このシステムにより焦点面を越えた場所への位置決めを安定に実行することができた。

第六章では微小部品以下の極微量な接着剤塗布を実現するために、ガラス繊維を挿入したガラスピペットを使い、毛細管現象を応用した塗布方法を検討した。この方法により最小直径  $2[\mu\text{m}]$  の接着剤の液滴を再現性よく塗布することができた。またガラスピペット内の侵入量と液滴直径の関係を調べ、ほぼ線形関係があることを確認した。加えて、侵入量と液滴体積の評価を行うため、原子力間顕微鏡を用い液滴の3次元形状データから体積を算出し、ピペット形状のモデルからの理論値と比較を行うことで、定量的な評価を行った。さらに、接着接合の評価を行うため、微小部品の操作システムである二本指マイクロハンド機構と、本微量液滴塗布法を組み合わせることにより、数  $[\mu\text{m}]$  サイズの微小部品の立体的な接着組立実験を行った。この中で身長  $25[\mu\text{m}]$  のマイクロかかしといった立体的な微小構造物の組立に成功し、その有効性を検証した。

## 7.2 今後の予定

本システムを利用することで、球状もしくは棒状といった比較的単純な微小対象物においては十分な操作を可能とすることができた。しかし、様々な形状の対象物に対する6自由度の位置決め制御技術が必要となるのは必然であり、実現していかなければならない。その際重要になるのが力制御であり、操作力の制御といった力制御系を付加しなければ様々な形状の対象物に対する、より安定な操作は困難である。また、現システムは操作者による遠隔操作を必要とするが、最終的には組立の自動化を目指す必要がある。これに対しても力制御の付加は重要である。通常の変位ゲージを用いた場合、力計測の分解能としては数  $[\mu\text{N}]$  程度であるが微小空間内での支配的な力の計測には、数  $[\text{nN}]$  程度の分解能が必要となる。またそのセンサを数ミクロンサイズの指先に固定する技術も必要となり、このような微小力計測技術の開発がより高度な微細作業には必須である。

また視覚システムの開発も重要である。顕微鏡は平面的には広い視野を持っているが高倍率になるほど顕微鏡の焦点深度が浅くなるため、奥行き方向の認識が困難になる。これは、操作者の熟練期間にも大きく影響を与える。すなわち、二次元の画面と焦点のボケによって操作者は擬似的に三次元情報を構築しなければならない。現システムでは、その制約の中で、より操作性を向上させるため、微細作業用の視覚システムを提案した。しかし組み立てた微小構造物の全体的な形状把握及び焦点深度を越える大きさの微小対象物把持には、やはり、

高倍率でかつ広い焦点深度を得る、もしくは立体的に微小対象物を確認できる視覚システム技術が必要と考えられる。

組立技術に関しては、接着剤の微量液滴塗布が可能になったことで、様々な微小構造物実現の可能性が見えてきた。しかし実用化に対しては、自動化を考える上でピペット内への侵入速度と液体の粘性との関係や液量に対する硬化後の接着力の強度など、いくつかの評価項目が残されている。

以上の事柄を今後の課題として進めていくことで、より高度な微細組立が可能となり、微小センサや微小ポンプといった単機能なものだけでなく、より複雑な微小システムの実現が近づくと期待できる。

## 謝辞

本研究の全体を通して、ご指導、ご教示、議論、また研究だけでなく公私にわたり、暖かいご支援をしてくださった大阪大学新井健生教授に心より深く感謝致します。また、本研究をまとめるにあたり、的確なご指摘並びにご教示くださいました大阪大学谷内田正彦教授、同大学宮崎文夫教授に感謝いたします。さらに、本論文の細部まで丁寧にご指示していただきました大阪大学井上健司講師にも感謝致します。本研究の母体である産業科学技術研究開発制度「マイクロマシンプロジェクト」を続けるにあたり、工業技術院産技室の皆様、機械技術研究所プロジェクト関係者の多数の方々のご支援を頂きました。この場を借りて感謝致します。また研究を進めていく中で、理想的な研究環境を与えていただき、さらに議論にも参加して頂きました機械技術研究所ロボット工学部自律制御研究室の小谷内範穂室長を初めとした皆様に感謝いたします。さらに研究を続けていく上で、手伝ってくださいました Pasi Ojala 博士、James Nielsen 博士、Charles Wampler 博士、橋本佳幸君に心から御礼申し上げます。また機械技術研究所入所当初から、研究の進め方やまとめ方をご教示くださいました日本福祉大学山羽和夫教授にも厚く御礼申し上げます。最後に、常日頃から研究に関する議論を含め、様々な面で協力して頂いた最愛の妻に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] H. Guckel, K. J. Skrobis, T. R. Christenson, S. H. J. Klein, B. Choi and E. G. Lovell: "Fabrication of assembled micromechanical components via deep x-ray lithography", Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, pp. 74-79 (1990).
- [2] T. Fukuda and T. Tanaka: "New mechanism and dynamic control method of micro electrostatic actuator with three degrees of freedom", Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, CA, pp. 1610-1615 (1991).
- [3] T. Fukuda, et al.: "Design and dexterous control of manipulator with 6-dof", Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, CA, pp. 1628-1633 (1991).
- [4] T. Sato, K. Koyano, M. Nakao and Y. Hatamura: "Novel manipulator for micro object handling as interface between micro and human world", Proceedings of IROS'93, pp. 1674-1681 (1993).
- [5] H. Misawa, M. Koshioka, K. Sasaki, N. Kitamura and H. Masuhara: "Three dimensional optical trapping and laser ablation of a single polymer latex particle in water", J. Appl. Phys., **70**, pp. 3829-3836 (1991).
- [6] 江刺, 藤田, 五十嵐, 杉山: "マイクロマシーニングとマイクロメカニズム", 培風館(1982).
- [7] F. Arai, D. Ando and T. Fukuda: "Adhesion forces reduction for micro manipulation on micro physics", Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, pp. 354-359 (1996).

- [8] 奥山, 増田, 東谷, 近沢, 金沢: “基礎粉体工学講座 2 粒子間相互作用”, 粉体工学会誌, **22**, 7, pp. 451-475 (1985).
- [9] 奥山, 増田, 諸岡: “新体系化学工学微粒子工学”, pp. 3-41, オーム社 (1992).
- [10] R. Stoughton and T. Arai: “A modified stewart platform manipulator with improved dexterity”, IEEE Tras. on Robotics and Automation, **9**, 2, pp. 166-173 (1993).
- [11] D. C. McFarlane and K. Glover: “Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions”, Springer-Verlag (1989).
- [12] 新井: “静力学特性に基づくパラレルリンクマニピュレータの解析と統合”, 日本ロボット学会誌, **10**, 4, pp. 100-107 (1992).
- [13] Y. Yokokohji, N. Hosotani and T. Yoshikawa: “Analysis of maneuverability of micro-teleoperation systems”, Proceedings of IEEE Intnational Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 237-242 (1994).
- [14] T. Sakaki, Y. Inoue and S. Tachi: “Tele-existence virtual dynamic display using impedance scaling with physical similarity”, Proceedings of the 1993 JSME International Conference on Advanced Mechatronics, Tokyo, Japan, pp. 127-132 (1993).
- [15] J. E. Colgate: “Power and impedance scaling in bilateral manipulation”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2292-2297 (1991).
- [16] K. Kaneko, H. Tokashiki, K. Tanie and K. Komoriya: “Impedance shaping based on force feedback bilateral control in macro-micro teleoperation system”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Mexico, U.S.A, pp. 710-715 (1997).
- [17] 小倉他: “オートフォーカス先端技術集成”, 第1章, pp. 5-7, 経営システム研究所 (1985).
- [18] H. Hebiguchi, S. Shoji and M. Esashi: “Room temperature anodic bonding with low melting point glass film”, Tech. Digest 9th Sensor Symposium, pp. 31-34 (1990).

- [19] H. Henmi, S. Shoji, K. Yoshimi and M. Esashi: "Vacuum packaging for microsensors by glass-silicon anodic bonding", Tech. Digest 7th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, pp. 597-587 (1993).
- [20] A. L. Tiensuu, M. Bexell, J. A. Schweitz, L. Smith and S. Johansson: "Assembling three-dimensional microstructures using gold-silicon eutectic bonding", Sensors and Actuators, **A45**, pp. 227-236 (1994).
- [21] R. F. Wolfrnbuttel and K. D. Wise: "Bulk-micromachined through-wafer interconnect for silicon wafer-to-wafer bonding", Tech. Digest 7th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, pp. 194-197 (1993).
- [22] M. Shimbo, K. Furukawa, K. Fukuda and K. Tanzawa: "Silicon-to-silicon direct bonding method", J. Appl. Phys., **60**, pp. 2987-2989 (1986).
- [23] K. Mitani, V. Lehmann, R. Stengl, D. Feijoo, U. M. Gosele and H. Z. Massoud: "Causes and prevention of temperature-dependent bubbles in silicon wafer bonding", Jpn. J. Appl. Phys., **30**, pp. 615-622 (1991).
- [24] 宮崎, 三由, 佐藤, 溝口: "視覚を用いたマイクロ液滴塗布システムの構築", 日本機械学会論文集 (C編), **63**, 609, pp. 168-175 (1995).
- [25] 堀江, 小林, 池上, 岡部: "マイクロ接着のための機械システムの開発 (微量接着剤の塗布技術の解析)", 日本機械学会論文集 (C編), **61**, 581, pp. 318-323 (1997).

## 研究業績

### 学術論文

- [1] 谷川民生, 佐伯正美: "ハードディスクの位置決め制御に対する可調整パラメータを含む  $H_{\infty}$  制御器の適用", 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No. 12, pp. 1962-1969, (1995)
- [2] 谷川民生, 新井健生: "二本指マイクロハンドの設計と微細作業", 日本ロボット学会誌, Vol.15, No. 2, pp. 284-289, (1997)
- [3] 新井健生, 谷川民生, Rene Larssonneur: "マイクロハンドを構成するフィンガーモジュールの機構と制御", 日本ロボット学会誌, Vol.15, No. 3, pp. 402-407, (1997)
- [4] 谷川民生, 新井健生: "二本指マイクロハンド用操作デバイスの開発とその制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 4, pp. 109-115, (1998)
- [5] Tamio Tanikawa and Tatsuo Arai: "Development of a Micro-Manipulation System Having a Two-Fingered Micro-Hand", IEEE Transaction on Robotics and Automation (採録決定)

### 国際会議

- [1] Tamio Tanikawa, Tatsuo Arai and Masami Saeki: "Two-Finger Micro Hand", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1674-1679, May 21-27, 1995
- [2] Tamio Tanikawa, Tatsuo Arai and Takanori Masuda: "Development of Micro Manipulation System with Two-Finger Micro Hand", Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 850-855, Nov. 4-8, 1996
- [3] Tatsuo Arai, Jacques M. Herve, Tamio Tanikawa: "Development of 3 DOF Micro Finger", Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and

Systems, pp. 981-987, Nov. 4-8, 1996

- [4] Tamio Tanikawa, Tatsuo Arai and Yoshiyuki Hashimoto: "Development of Vision System for Two-fingered Micro Manipulation", Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1051-1056, Sept. 7-11, 1997
- [5] Tatsuo Arai and Tamio Tanikawa: "Micro Manipulation Using Two-Finger Hand", Proceedings of Workshop on Working in the Micro- and Nano-Worlds: Systems to Enable the Manipulation and Machining of Micro-Objects(Grenoble), pp.12-19, Sept. 7-11, 1997
- [6] Tamio Tanikawa, Yoshiyuki Hashimoto and Tatsuo Arai: "Micro Drop in Adhesive Bonding for Micro Assembly and Making of Micro 3-D Structure "Micro Scarecrow"", Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Oct. 13-17, 1998(採録決定)

## 国内会議

- [1] 谷川, 佐伯: "ハードディスクの位置決め制御に対しての可調整パラメータを含む  $H_\infty$  コントローラの適用", 第22回制御理論シンポジウム, pp. 87-90, (1993)
- [2] 谷川, 新井, 佐伯: "ピエゾアクチュエータの位置決め制御に対しての可調整パラメータを含む  $H_\infty$  コントローラの適用", 第11回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1059-1060, (1993)
- [3] 谷川, P. Ojala, 新井: "マイクロマニピュレータの校正法", 第4回ロボットシンポジウム, pp. 281-286, (1994)
- [4] 谷川, 新井, P. Ojala: "二本指マイクロハンドの試作", 第12回日本ロボット学会学術講演会, pp. 545-546, (1994)
- [5] 谷川, 新井: "二本指マイクロハンドによる微細作業", ロボットイクス・メカトロニクス'95 講演会, pp. 1394-1395, (1995)
- [6] 谷川, 新井, 増田: "二本指マイクロハンド操作デバイスの開発", 第13回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1107-1108, (1995)

- [7] 谷川, 新井: "二本指マイクロハンドによる微細作業とその考察", ロボットイクス・メカトロニクス'96 講演会, pp. 530-531, (1996)
- [8] 谷川, 新井, 橋本: "二本指マイクロハンド用自動焦点システムの開発", 第14回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1125-1126, (1996)
- [9] 谷川, 新井, 橋本: "微細作業用視覚システムの開発", ロボットイクス・メカトロニクス'97 講演会, pp. 87-88, (1997)
- [10] 橋本, 谷川, 新井, 川幡: "並進3自由度マイクロハンドモジュールの動作解析", ロボットイクス・メカトロニクス'97 講演会, pp. 85-86, (1997)
- [11] 谷川, 新井, 橋本: "二本指マイクロハンドシステムと微細作業", 第41回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 611-612, (1997)
- [12] 橋本, 谷川, 小谷内, 新井, 川幡: "紫外線硬化剤を用いた微小構造物の組立", 第15回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1085-1086, (1997)
- [13] 谷川, 橋本, 谷川, 小谷内, 新井: "微量接着剤塗布による微小組立", ロボットイクス・メカトロニクス'98 講演会, pp. 1BIV1-4(1)-(4), (1998)

## 付録A 正規規約分解法(NCF法)による 中心解の導出

正規規約分解法による中心解  $H(s)$  の設計は以下の式で与えられる。いま、制御対象を  $G(s) = C(sI - A)^{-1}B$  としたとき、次のリッカチ方程式を解く。

$$A'X + XA - XBB'X + C'C = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$AZ + ZA' - ZC'CZ + BB' = 0 \quad (\text{A.2})$$

正定解  $X, Z$  に対し、中心解は

$$H = \left[ \begin{array}{c|c} \tilde{A} & \gamma^2 W_1'^{-1} ZC' \\ \hline B'X & 0 \end{array} \right] \quad (\text{A.3})$$

ここで

$$F = -B'X$$

$$\tilde{A} = A + BF + \gamma^2 W_1'^{-1} ZC'$$

$$W_1 = I + XZ - \gamma^2 I$$

$\gamma^2$  は十分に小さい  $\varepsilon > 0$  を用いて、

$$\gamma^2 = 1 + \lambda_{\max}(ZX) + \varepsilon \quad (\text{A.4})$$

で与えられる。