

RECSコンセプトに基づく福祉ロボットの開発 洗濯作業の自動化

メカトロニクス研究室

管98-14 喜志田 真也

1. 研究背景および目的

現在急速に進んでいる高齢化社会において、高齢者や障害者の自立を支援し、介護者の肉体的負担を軽減するための介護・福祉ロボットの開発が期待されている。しかし完全な自律性、汎用性を有するロボットの実現は技術的に先のことであり、また、家庭内や病院では人間とロボットの共存が不可欠であり、コストも増大する為、環境を完全にロボットのために改変することは難しい。そこで作業環境を最小限に改変し現状のロボットの技術で目的を達成するというRECS(Robot Environment Compromise System)コンセプトに基づいて上記の問題を解決し福祉ロボットの早期実現を目指す。本研究室において昨年末まで研究されて実現された「RECSコンセプトに基づいた食器後片付け」の次の課題として介護者・高齢者が家庭内で行う作業のうち自動化の要望の高い洗濯作業に着目し、「RECSコンセプトに基づいた洗濯作業の自動化」を目的とする。これまで行われてきた様々な研究を考慮して本研究ではまだ研究されていない洗濯作業の前半部分である「衣類の山から衣類を識別・認識し、衣類をロボットハンドによりハンドリングし洗濯機に搬入して衣類の種類ごとに洗濯を行い取り出す」という洗う動作そのものについてのシステムの構築を目指す。

2. 洗濯作業の流れと実験システム

本研究におけるロボットによる衣類の洗濯作業を図1に示す。ここで、下図の作業のうち、衣類の認識に関して衣類にバーコードマークを付与するというRECSコンセプトに基づく環境改変を行った。将来的には衣類かごや洗濯機にも改変が必要であると思われる。

また、図2に本研究のシステムの全構成を示す。

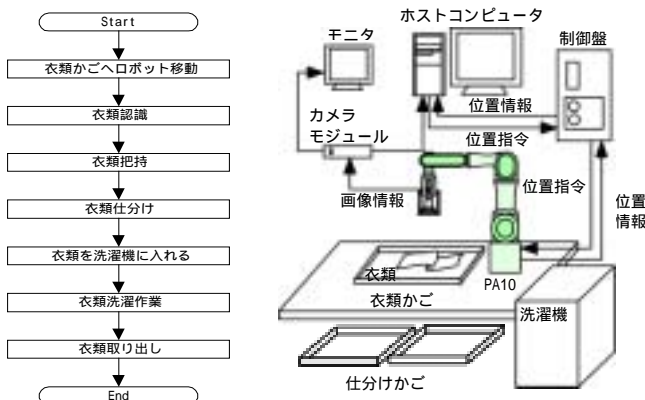


図1 洗濯作業の流れ

図2 システムの全体構成

3. バーコードマークを用いた衣類認識システム

従来、画像処理において対象物体のみを抽出するためには高度で複雑な計算処理を必要とする技術課題が多数存在する。これら生画像を処理する手法の問題点を解決するものとして、RECSコンセプトを適用し、物体にマークをつけてそのみを画像処理する手法を用いた。本研究では4bitの情報を含んだバーコードマークを衣類に付与し、そのマークを認識することにより対象物の位置・種類を認識している。なお、今回は衣類のデザインを損なわないように、マークは衣類の内側に貼り付け、衣類を裏返しの状態でも認識させた。

4. 衣類把握ロボットハンド

人間が衣類の把持を行う場合、衣類の縁を見つけ出して両手でこれを把握するか、もしくは縁が発見できない場合には指を衣類に押し当てて布地に曲げを発生させて、曲げ部分を引き出して1枚1枚把握する動作を行う。同様の作業をロボットが行うにはかなり高度な技術が要求される。人間のように汎用性が高く自在にハンドリングする機器・システムを制御することは大変難しく未だ発展途上である。そこで、このような動作を簡単なシステムで実現させるためにハンドの2指の間に掃除機のような吸引機を搭載させた吸引利用式開閉ハンドを作成した。このハンドは開閉機能のみのハンドの長所である把握力の強さと、吸引機能のみの長所である衣類の形状にとらわれずに把握可能という双方の特徴を併せ持つハンドとして衣類把握に有効であると考えられる。図3に開発したロボットハンドの概念図を示す。

このロボットハンドは2指の把握部分とその中間にリンクにより連結された吸引部から構成される。衣類を把握する際、衣類表面にハンドの吸引部を接触させ(図3)、吸引による衣類の吸い上げを利用して衣類に曲げ部分を発生させる(図3)。そして2指を閉じれば、リ

ンクにより連結された吸引部が上昇し、曲げ部分を2指により挟み把握する事ができる(図3)。

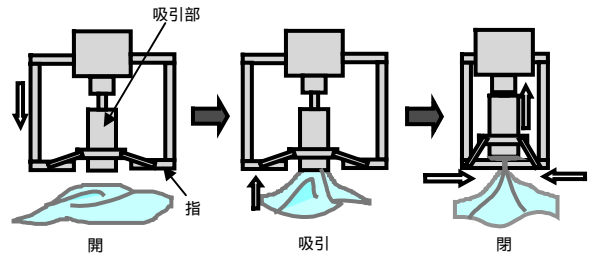


図3 衣類把握動作

5. 本研究でのロボットハンドの有効性

今回作成したロボットハンドの把握性能を検証するために1枚把握、及び2枚重ねの衣類からの1枚を把握する実験を行った。表1に2枚重ね時の実験結果を示す。

表1 それぞれの組み合わせ時の単体把握確率

衣類の組み合わせ		重量(g)		Aが上の時の把握確率(%)	Bが上の時の把握確率(%)
A	B	A	B		
ハンカチ	タオル	40	70	100	40
タオル	ズボン	70	540	100	100
ズボン	ハンカチ	540	40	100	100

衣類1枚の時の把握は、衣類の種類によらず確実に把握できた。しかし、衣類が2枚重なった時にそれぞれ20回の把握動作を行わせたと結果、表1に示すように重量が小さく通気性の良いもの同士の間には吸引力が強いため2枚同時に把握してしまった。よって吸引力を調整する必要が考えられる。

6. 衣類認識把握実験

以下の手順でロボットによる衣類認識及び仕分けの実験を行った。複数の衣類が混在した衣類かごの上方へハンドを移動。衣類に貼り付けたバーコードマークを上部から撮影・認識。認識より得たバーコードマークの位置へハンドを下ろす。衣類をハンドにより把握。

バーコードから判別した種類に対応した仕分けかごへ入れる。この結果、衣類のしわや影によるマークの変形・欠損がなかった場合は衣類認識及び仕分けに成功した。しかし、変形・欠損によってマークが正しく認識されなかった場合は、衣類の判別及び位置の検出が行えず衣類の仕分けを行うことができなかった。このようなマーク認識が行えない場合には、衣類をハンドによって一度把握し再度マークが見えるように衣類を置き直すなどの対策が考えられる。また、この実験では衣類からロボットハンドまでの高さを既知としたが、把握及び認識の精度を向上させるためには、高さを正確に読み取れるシステムを開発する必要がある。

7. 結論

本研究ではRECSコンセプトに基づく福祉ロボットの開発を目的として、洗濯作業の自動化の実現を目指し、衣類認識・ハンドリングシステムの開発を行った。結果を以下に示す。衣類にバーコードマークを付与し、そのマークのみを画像処理することにより、比較的簡単な画像処理技術での衣類の種別・位置認識システムを提案・開発した。今回開発したロボットハンドにより、洗濯作業に必要な多種多様な衣類の把握が可能であることを確認した。

8. 今後の課題

実際の洗濯作業のロボット化では洗濯物の認識が最大の問題となる。特にマークが隠れて見えない場合等の洗濯物の認識には以下のような方法が考えられる。

- ・ 素材の質感の認識
- ・ 色の違いによる認識
- ・ 物体の重なり合いの認識

また人間には目立たずロボットには目立つマークの開発。そして、本研究の実用化には、人間がマーキングされた衣類を容認し、メーカーも衣類の製造時にマーキングを行う必要があり、RECSコンセプトに基づく人間・ロボット共存社会における社会の整備も重要な課題である。

RECSコンセプトに基づくテレビ解体作業の効率化 - ねじ取り外し作業 -

メカトロニクス研究室

管98-19 乗村 尚志

<1.研究背景及び目的>

我が国は1960年以来、目ざましい経済発展をとげてきた。しかし、その一方で、「大量生産、大量消費」によって生み出された廃棄物は増加の一途を辿り、私たちの生活環境を圧迫する大きな問題の原因となっている。そのため、近年になってリサイクル対応がクローズアップされ始め、2001年4月には特定家庭用機器再商品化法（家電リサイクル法）が施行された。現在、各家電メーカーでは家電製品のリサイクルが行われているが、その解体工程では、コストや技術的な問題から自動化が行われず、手作業に依存している。

そこで本研究では、製品解体の自動化技術手法としてRECS（Robot Environment Compromise System）コンセプトに基づくロボットによるテレビ解体作業システムを提案し、テレビ解体作業の自動化を目指す。中でもねじ取り外し作業に着目し、ねじ取り外し作業用ロボットハンドの開発と、画像認識システムを用いたねじ取り外し作業における本ロボットハンドの有効性の検討を目的とする。

<2.RECSコンセプトに基づく本システムの特徴>

RECSコンセプトとは、ロボットによる作業の自動化が困難な場合、作業環境を最小限に改変することにより現状のロボット技術で目的作業を達成しようとする考え方である。回収されるテレビは多種多様であるためねじ取り外し作業においてねじの画像処理による自動認識は非常に困難である。そこで本研究ではRECSコンセプトに基づいた図1のテレビのねじ取り外し作業システムを提案する。

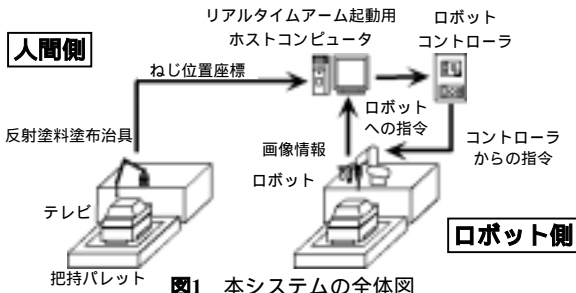


図1 本システムの全体図

まず前述したロボットの技術的課題を補う環境整備として、作業者が、4自由度リンク機構を備えた反射塗料塗布治具を用いてねじ周辺に反射塗料を塗布する。この作業時にリンク機構により計測されたねじ位置座標がロボット側に与えられる。作業者の負担はこれのみで、この情報を基にロボット側で画像処理によるマーク認識を行い、ねじ位置座標を計測し、ねじ取り外し作業を行う。

<3.ロボットハンドの開発>

本研究で開発したロボットハンドには、テレビのねじ取り外し作業を行うため、電動ドライバーを搭載した。また、本システムによるねじ位置座標の計測に誤差が生じた場合でも、その誤差を吸収してねじ取り外し作業が行えるように、芯ずれを吸収するねじガイドと軸方向の誤差を吸収する伸縮機構を備えていることが特徴である。ドライバーハンドの構造を図2に示す。

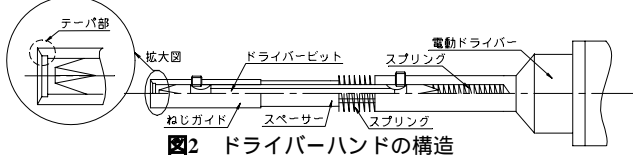


図2 ドライバーハンドの構造

ねじガイドは先端内部がテーパーになっており、ドライバービットがねじ中心からずれた場合でも、ねじガイドがねじ頭に沿ってドライバービットをねじ中心に誘導するので、芯ずれを吸収することができる。(図3)また、ねじガイドは軸方向に可動するので、種類の異なるねじに対応することができる。ドライバービットの長さを変更する場合には、スペーサーを取り替えることにより、ねじガイドを流用することができる。また、ドライバービットは軸方向の伸縮機構により、±4mmの誤差を吸収することができる。

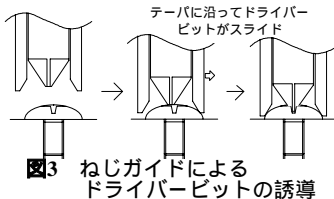


図3 ねじガイドによるドライバービットの誘導

<4.ロボットハンドによるねじ取り外し性能評価実験>

本研究で開発したロボットハンドによるねじ取り外し性能評価実験を行った。ここではテレビで主に使用されているM4のねじを対象とした。実験結果の一例を図4、図5に示す。図中の斜線部分がねじ取り外し位置許容範囲である。

まず、ねじ取り外し作業方向によるねじ取り外し位置許容範囲の違いを検討するため、垂直方向、水平方向、斜め45°方向からのねじ取り外し実験を行った。その結果、ねじ取り外し位置許容範囲は±3mmであり、この許容範囲でねじ取り外しが可能であるためのねじ取り外し角度許容範囲は±3°であった。水平方向からのねじ取り外し作業において-y方向のねじ取り外し位置許容範囲が垂直方向の場合と比べて狭くなったのは、ドライバービットが重力により傾き、下側へ逃げやすいためである。

次に、ねじの種類、状態によるねじ取り外し許容範囲の違いを検討するため、M3、M5のねじ及び錆びたねじの取り外し実験を行った。その結果、M5のねじ、錆びたねじではM4のねじと同様の結果が得られたが、M3のねじではねじ取り外し位置許容範囲が±1mmとなり、他のねじに比べて狭くなった。これはM3のねじはねじ頭部が他のねじに比べて小さいので、ねじガイドがうまく誤差を吸収できないためである。

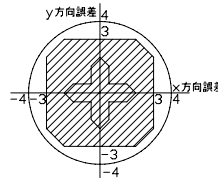


図4 ねじ取り外し位置許容範囲 M4垂直方向（傾きなし）

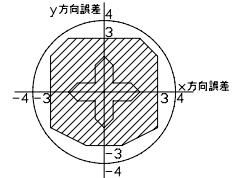


図5 ねじ取り外し位置許容範囲 M4水平方向（傾きなし）

<5.本システムにおけるロボットハンドの有効性の検討>

本研究で開発したロボットハンドのねじ取り外し許容範囲は（x方向：±3mm、y方向：±3mm、z方向：±4mm）であり、認識システムを用いたロボットハンドの位置決め平均誤差（x方向：±0.8mm、y方向：±1.2mm、z方向：±0.9mm）よりも広い。ゆえに、本ロボットハンドは認識システムを用いたねじ取り外し作業において有効であると考えられる。また、実際に本システムによる後部キャビネットのねじ取り外し作業を行った結果、ねじ取り外し作業を行うことができ、本ロボットハンドの有効性を確認することができた。

<6.結論>

本研究では、RECSコンセプトに基づくロボットによるテレビ解体作業の自動化を目指し、ねじ取り外し作業用ロボットハンドの開発とその有効性の検討を行った。結果を以下に示す。

- (1) 開発したロボットハンドによる垂直方向、水平方向、斜め45°方向からのねじ取り外し作業を行い、水平方向からのねじ取り外し作業では重力による影響があることを確認した。また、M3、M5のねじ及び錆びたねじの取り外し作業を行い、M5のねじ及び錆びたねじの取り外し作業においても本ロボットハンドが有効であることを確認した。
- (2) 本システムによるねじ位置座標の計測誤差に伴うロボットハンドの位置決め誤差が生じた場合でも、開発したロボットハンドによりねじ取り外し作業が可能であることを確認した。また、実際にテレビの後部キャビネットのねじ取り外し作業を行い、開発したロボットハンドが本システムにおいて有効であることを確認した。

<7.今後の課題>

本研究で開発したロボットハンドは、#2のドライバービットに対応するM3～M5のねじのうち、M3のねじ取り外し作業が十分ではなかった。これは、例えば、ねじガイド先端が開閉するような、より汎用性の高いねじガイドを開発することにより、十分なねじ取り外し作業が行えるようになると思われる。

バーコード認識による移動ロボットの位置姿勢の計測

メカトロニクス研究室

管97-58 庄野 和明

1. はじめに

わが国において急激に進行している少子高齢化社会にとって高齢者特に寝たきり老人や身体障害者の介護・介助に要する医師や看護師の人員が今後急激に減少するのは目に見えている。そのための介護・医療要員の人材獲得は今後の重要な課題かつ大きな問題である。そのためこの問題に対応する手段として近年医療・福祉ホームロボット早期実現が望まれている。

本研究の目的は室内における医療・福祉ロボットの開発のために移動ロボットとコンピュータを搭載させCCDカメラによる画像処理を行う事により位置姿勢を計測し目標地点へ移動して作業を行うシステムの開発である。今年度は重量増加への対策として移動台車の強度改善と移動時の傾斜計出力のフィルタリングを行う。

2. システムの改良



Fig.1 構築したシステム

本研究は星型車輪により最大50[mm]の段差を乗り越える事が可能な移動ロボット"TO-ROVER"を使用し、目標位置での作業の事を考慮してCCDカメラを冗長マニピュレータの先端部分に搭載し作業時も使用可能な環境を整備した。(Fig.1)しかしマニピュレータの搭載による重量増加が原因となり星型車輪への負荷が問題となった。そこでキャスター側にラジアル・アキシャル方向のモーメントおよび荷重に強いクロスローラーベアリングへの交換、および車輪を支えるアームの材質をアルミから構造用炭素鋼へ変更し、機械的強度の向上を図った。

3. 移動ロボットの位置姿勢計測

3.1 位置姿勢の計測原理

移動ロボットは環境側(天井)に設置した位置姿勢情報を持つバーコードランドマークを撮影しCCDカメラとランドマークとの相対的位置関係よりの位置姿勢の計測を行い目標位置へ移動する。このためCCDカメラによるバーコード認識においては常に天井とカメラが垂直になっている必要がある。しかし段差や路面のうねりにより移動ロボットの位置姿勢が変化する状態においてCCDカメラを垂直に保つ機構を持たせるのは難しい。そこで傾斜角センサーを用いて以下の式で補正する事により精度を向上させる。(Fig.2)

$$X_G = \frac{p_z}{h} \left(\frac{k \cdot x_G}{\cos \theta_p} + h \cdot \tan \theta_p \right) \quad Y_G = \frac{p_z}{h} \left(k \cdot x_G \cdot \tan \theta_p \cdot \tan \theta_r + \frac{k \cdot y_G}{\cos \theta_r} - h \cdot \frac{\tan \theta_r}{\cos \theta_p} \right)$$

$$\frac{p_z}{h} = \left(\frac{\tan 15^\circ}{320} (\mp x_G \sin \theta_p \pm y_G \cos \theta_p \sin \theta_r) + \cos \theta_p \cos \theta_r \right)^{-1} \quad k = \frac{\tan 15^\circ}{320} \cdot p_z$$

ここで、 (x_G, y_G) は画像での重心位置、 (θ_p, θ_r) はカメラのロール角・ピッチ角、 h は天井までの高さ、 p_z は傾いたカメラを基準とした座標系での天井までの高さ、 (X_G, Y_G) はランドマークと移動台車の相対的位置関係を表す。

この補正式を用いた計測手法では昨年度の研究で、静的な状態において位置計測誤差が誤差ノルムの平均で4.81[mm]、最大値は14.86[mm]、姿勢計測誤差は絶対値平均で0.57[deg]、最大値は1.51[deg]であり段差乗り越え等をしない動的な状態では最大で位置誤差が30.0[mm]、姿勢誤差が4.0[deg]程度であることが分かっている。

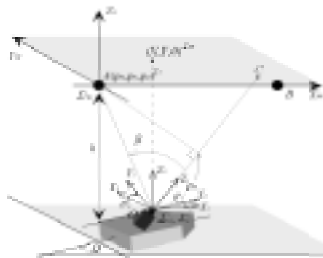


Fig.2 傾きの影響

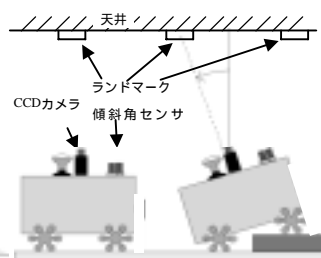


Fig.3 TO-ROVER 段差乗り越え

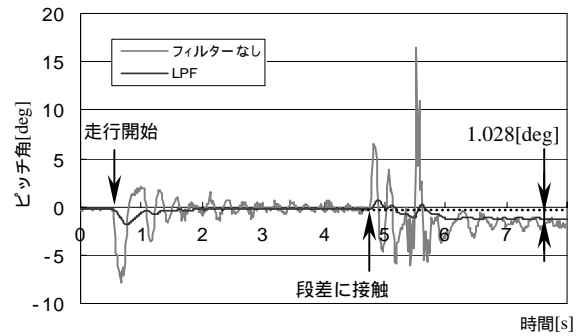


Fig.4 LPFの有無によるロボットの傾斜角計測

3.2 傾斜計の防振対策

本研究で使用したサーボ傾斜計は重力方向に対する傾きを検出する仕組みであるため移動ロボットによる加速度の影響を受けてしまう。またロボットの振動および電源ノイズによる外乱などで高いSN比が得られない。

そこで防振材による振動の除去を試みたが防振材による対策は傾斜計が38gと軽量であり防振が難しく十分な効果が発揮されなかったためカットオフ周波数2[Hz]のLPF(ローパスフィルタ)を用いた信号処理により対策を行った。

TO-ROVERに高さ10mmの段差を乗り越えさせた時(Fig.3)における傾斜計出力データを調べるため、LPFの信号処理を行った場合の計測精度を平面から段差に乗り越えた状態の傾斜角の差を計測値と理論値で計算した。(Fig.4)

その結果理論値は0.931[deg]となり計測値との誤差は0.097[deg]となる。これはCCDカメラにより認識するランドマークまでの高さ1750[mm]を想定すると±2.9[mm]の誤差がある。

LPF使用時の傾斜角センサーの計測結果を見ると、ロボット走行開始時や段差乗り越え時に急激な傾斜角の変化が見られる。そこでサンプリングごとの傾斜角出力変化量が一定の数値(0.005[rad])を越えるとロボットの傾斜以外の影響と判断しフィルタ処理を行うプログラムを実装し、TO-ROVERにおいてCCDカメラ計測システムを搭載できるように対応させた。

4. 走行実験

本実験ではTO-ROVERに一定の速度指令を与え25[mm]の段差を乗り越える動的な状態で傾斜角補正をした位置姿勢計測実験を行う。ここで同時に計測した3次元位置計測装置Vicon370の計測結果を評価基準とした。(Fig.3)実験の計測結果をFig.5に示す。

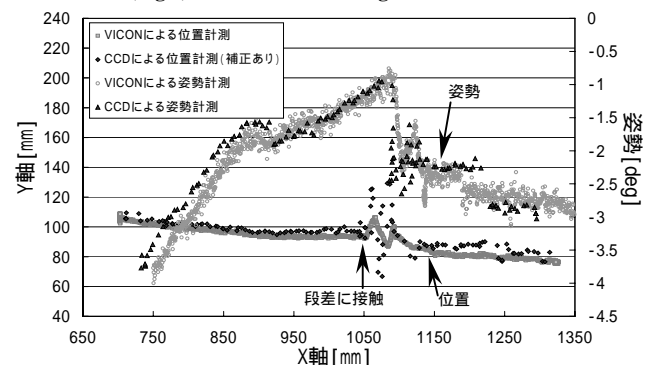


Fig.5 実験結果

5. 結果および考察

走行実験の結果よりCCDカメラとViconによる計測データを比較すると傾斜角センサーにより補正をした場合、位置の最大誤差は段差乗り越え時に約20[mm]、姿勢の最大誤差は約0.5[deg]となり傾斜角補正を行う事により精度を向上させたシステムを構築した。

6. 今後の展望

医療・福祉ホームロボット開発のためにTO-ROVERにマニピュレータを搭載した。今後はマニピュレータにハンドを装着し、目標地点まで移動して作業するシステムの構築を行う。

8自由度冗長ロボットによる障害物回避運動の軌道計画

メカトロニクス研究室

管98-65 森田 昌道

1. 研究背景および目的

現在までの産業用ロボットというものは、ロボットの周りに障害物が一切ない空間の中での高速作業を行うものであり、主に工場内の生産ラインを活躍の場としてきた。その産業用ロボットも今日では、成熟段階に達してきたと言え、関心は障害物の存在する局面での作業を可能とする次世代ロボットへと移りつつある。

本研究では冗長ロボットによる障害物を回避しながらの位置決め、逆運動学問題において、8自由度冗長ロボットによる狭い2壁間を通り抜ける軌道生成を行うシミュレータの開発を目的とする。

2. ロボットモデル

本研究では8自由度冗長ロボット(RPP'PP'RPR型)を用い、障害物は厚みのある2つの壁とする。

2壁間の隙間幅はロボットアームの半径の5倍、壁の厚みはロボットアームの半径の4倍とする。また関節およびワークピースはいかなる姿勢をとっても壁の隙間幅よりは小さいものとする。図1にロボットのモデルを示す。

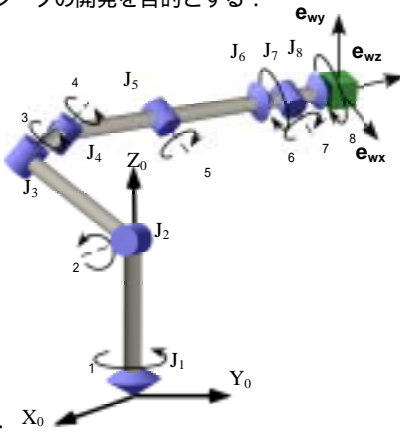


図1 ロボットのモデル

3. 逆運動学問題

逆運動学問題とはロボットのハンドが把持するワークピースの位置と姿勢からロボットの関節角を得るための問題である。従来の逆運動学にはヤコビ法が使われてきたが、解を得るための計算時間(計算回数)が多く、さらに解が1つしか求まらないため、ロボットの運動や作業に対して、最適な解が得られない場合があり、その場合もう一度計算をやり直さなければならないという欠点を持つ。

そこで本研究では位置と姿勢の逆運動学をそれぞれ解析的に解く方法を用いる。この方法による計算時間はヤコビ法の約10分の1であり、解も最大で8通り求めることができる。

4. 衝突回避

障害物を通り抜ける方法として、初期位置から目標位置の間に中間点を3箇所設定し、そのときの各関節変位を求め、初期値から中間点を通して目標値まで連続となるように関節を変位させていく。中間点の設定は通り抜けを考慮して、第1中間点はJ5, J6が隙間内に、第2中間点はJ4, J5が隙間内に、第3中間点はJ3, J4, J5, J6が隙間内に存在するような点とする。

中間点に向けてロボットを動かしていく際に関節が障害物に近づくとき、その関節より根元側の関節を用いて、壁の隙間の中心線上に持って行くようにする。そして障害物の間を通り抜けるまで、できるだけ線上を保つようにする。これにより障害物とロボットの距離をなるべく大きく取る。(図2参照)

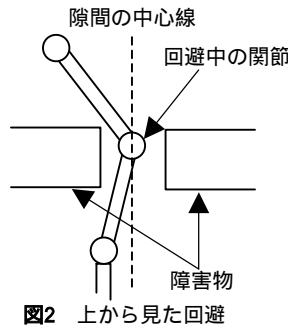


図2 上から見た回避

しかし上述の方法だけでは、関節角が大きく変位した場合などにロボットアームと障害物との衝突が発生する場合がある。そこで、障害物の周りに、ロボットと障害物とが接触する限界線を示す衝突危険域を設定する。ロボットの関節の位置座標は順運動学により求められる。また関節の座標値よりアームの中心線の座標も求められるので、それもちいて危険域に入ったかどうかを判断できる。ロボットの関節またはアームが領域内に入ったと判断すると、図3のようにJ1(Z軸周りに回転)を衝突を回避する方向に回転させる。これにより障害物との衝突を回避する。

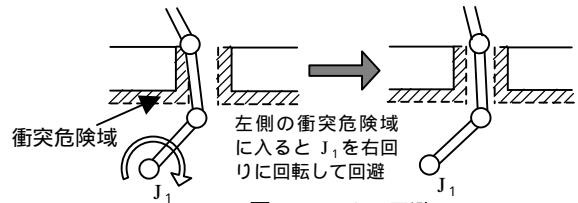


図3 J1による回避

5. 軌道生成

図4に本研究の軌道生成プログラムのフローチャートを示す。

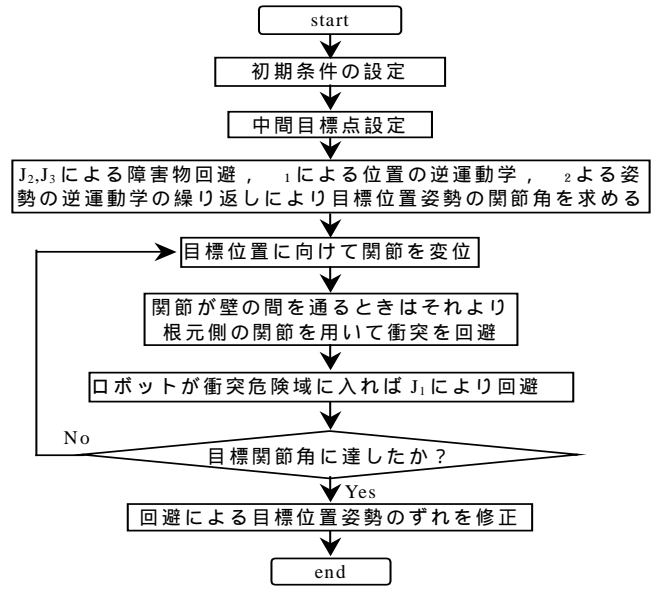


図4 フローチャート

6. シミュレーション結果

目標位置 $r_w^{(0)} = (-1.0, 2.0, 2.0)$

目標姿勢(オイラー角) $E_w^{(0)} = (-90, -90, 0)$

に設定してのシミュレーション結果を図5に示す。

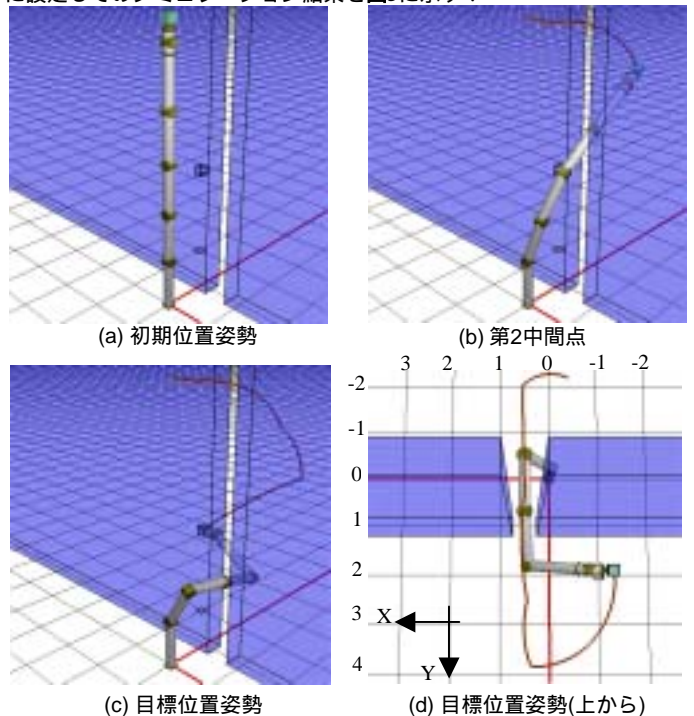


図5 シミュレーション結果

7. 今後の課題

9自由度以上のロボットによる穴の通り抜け、迷路の通り抜けなどの軌道を求めるシミュレータを開発する。

移動しながらのピン挿入作業の高速化 - ピンの横向き挿入 -

メカトロニクス研究室

管98-20 古賀 純也

1. 研究背景および目的

現在、産業用ロボットを用いて、移動している作業対象に対して横方向の組立作業をするときは、作業対象自体を回転させ、組立を容易にすることで実現されている。しかし作業対象の向きを変えられない場合での高速に移動している組立作業は達成されていない。その理由として、ロボットアームが重力の影響を受けるため、正確な位置決めができないことが考えられる。そこでSTS制御及び治具を用いることで重力の影響がある環境においても組立作業が可能である手法を提唱する。本研究では一定の回転速度で回転している作業対象にピンの横方向からの挿入実験を行い、重力の働く環境であってもSTS制御を用いることで、リアルタイムに作業対象の状態を認識できることを検証する。

2. STS制御について

STS制御を使用してロボットを制御するには目標位置・時刻を指定し、制御開始時刻から指定時刻までの位置と速度を時間に関する関数で表し、近似させることで目標位置曲線を作成している。目標位置曲線に従ってロボットに指令を与えるが、ロボット各軸には減速器などの固体摩擦等の外乱さらに重力の影響により目標値に対して必ず偏差を生じてしまう。そこで目標位置曲線を新たに更新する考えがある。目標位置曲線を更新することで外乱を受ける環境においても位置偏差を最小限にすることができる。(本研究では40[msec]ごとに更新)

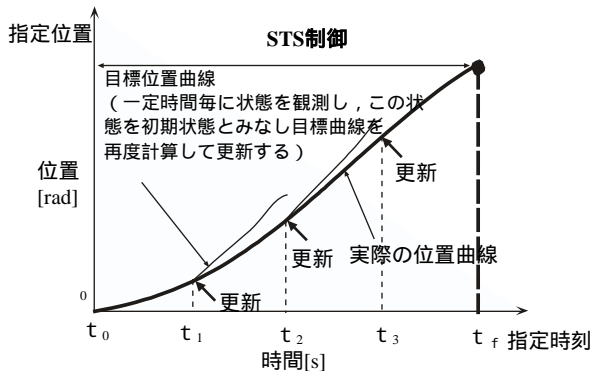


図1 目標曲線を一定時間毎に更新した場合

3. 実験システム

本研究の実験システムは図2のようにロボットと回転テーブルを横方向に設置しロボットに重力が働く環境で実験を行う。ロボットはSCARA型で制御用のパソコンを用いて、各関節のエンコーダの値を読み取りリアルタイムにサーボモータを制御する。回転テーブルはサーボアンプにより速度制御されており、原点センサ及びエンコーダによりテーブルの位置を知ることができる。アームに重力の働く環境を作るためロボット固定盤を取り入れた。図3に治具の拡大図を示す。ロボットの先端、及び回転テーブルのホルルの横には大小2個の治具がある。この2個の治具によりピンとホルルの位置関係を一致させることができる。ロボット側の治具には接触センサを有しており、両方の大小の治具が接触を感知することでピン挿入を開始する。

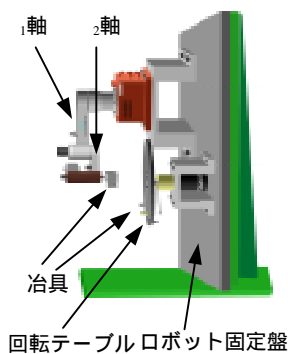


図2 実験システム

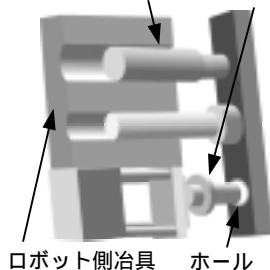


図3 治具拡大図

4. ロボットアーム軌道比較実験

指定状態までの軌道を更新する場合と更新を行わない場合でのアームの関節角 1軸, 2軸の軌道の位置偏差の比較を行った。実験条件として回転テーブルの原点からの指定位置1.0[rad], 指定時刻1.0[s], テーブル回転速度1.0[rad/s]で行った。目標位置曲線更新有りとしの場合の 1軸の位置偏差を図4に示す。また、STS制御の指定状態(テーブル位置1.0[rad], 指定時刻1.0[s])での実際の目標位置曲線との位置偏差の比較を表1に示す。

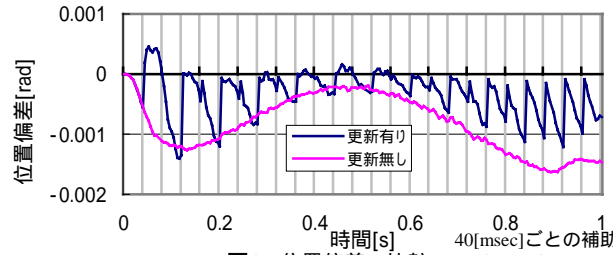


図4 位置偏差の比較
40[msec]ごとの補助目標り線は更新されている点を示す。

表1 指定状態での各関節の位置偏差

	1軸[mm]	2軸[mm]
更新有り	-0.21	-0.34
更新無し	-0.44	-0.58

図4及び表1より、重力の働く環境であっても、STS制御の目標位置曲線の更新が指定位置での位置偏差を減少させるのに有効であることが確認できた。

5. 横挿入の問題点について

下方向へのピン挿入では鉛直下向きに重力を受けるので挿入が容易である。しかし本研究では横方向からの挿入であるためピンを完全に挿入するには、ロボットが押し込み動作を完了するまで追従しなければならない。治具を一致させたまま追従させるには、従来はSTS制御で目標状態を一致させた後の追従制御で28[msec]先の指令を与えることでピン挿入に成功していたが、本研究では重力の影響を考慮して44[msec]先の指令値を与えることで重力の補償を行った。

6. ピン挿入実験結果

図2に示した実験システムを用いて回転移動するテーブル上にある直径10.01[mm]のホールに対して直径9.98[mm]のピンの挿入実験を行った。テーブル回転速度を1.0, 1.5, 2.0[rad/s]の速さで目標位置曲線更新有りとしの比較実験をそれぞれ10回試行した。その結果を表2に示す。ピンの根元まで完全に挿入した状態を成功とした。更新無しでは治具を一致させた後、十分に追従できないため、ピン先しか挿入できなかった。更新有りでは追従制御時に治具を接触させた状態を長く保つことができ、深い挿入が可能となった。テーブルの回転速度が速くなると接触状態を保つ事が困難になり、完全な挿入の成功確率が下がった。

表2 ピン挿入実験結果

	1.0[rad/s]	1.5[rad/s]	2.0[rad/s]
更新有り	9/10	6/10	2/10
更新無し	5/10	1/10	0/10

(成功回数/試行回数)

7. 結論

STS制御の特徴である目標位置曲線の更新を用いることで指定状態での位置偏差を減少させることができた。さらに治具を用いてピンとホルルの位置を一致させた後、先の目標値を与えて押付けすることで位置関係を一致させ続けることができ横穴のピン挿入を可能とした。重力に逆らう環境での移動中の挿入作業では、目標位置曲線の更新により追従性のよい押付け制御が可能となり、完全な挿入につながったと考えられる。

センサー付ロボットによるピン挿入作業の高速化

メカトロニクス研究室

管 99-2001 幸田 利之

< 1. 研究背景と目的 >

近年社会における需要は多様化し、製品のライフサイクルの縮小は著しい。その結果、作業内容の変更に対して、柔軟かつ速やかに対応できる生産システムが求められるようになってきた。このようにフレキシブルな生産システムの確立の中でロボットは不可欠となり、その導入が進められつつある。

現在生産現場で活躍しているロボットは、精密な組立作業を行おうとしても、ロボットや作業対象物の位置の不確かさによってその作業を遂行できない。また、未だにセンサ制御技術は研究段階にあり、その動作を高速に行うことができないため、力制御による組立作業を実用化している例は少ない。

そこで本研究では、ロボットの先端部に力覚センサを取り付けて、センサ制御によるピン挿入作業を行い、その高速化を図ることを目的とする。

< 2. 実験システム >

本研究で用いたロボットは、スカラ型ロボット(セイコーエプソン社製 SSR-H554-BN)であり、その先端部に6軸力覚センサ(ニッタ社製 IFS-70M35A25-M50B)が取り付けられている。力覚センサから得られる力情報を基にピンの移動すべき方向を計算し、その移動を行う。力覚センサから得られる力情報はリアルタイムにコンピュータに読み込まれる。さらに、この力情報をもとにロボット各軸のとるべき動作をコンピュータ上で計算し、ロボットコントローラにその指令を与える。

< 3. ピン挿入用ロボットハンド >

ピン挿入作業に代表されるような精密はめあい作業の研究では多くの場合、部品間の水平誤差を修正するものとして、RCC (Remote Center Compliance) デバイスが用いられてきた。しかし従来の RCC デバイスでは、部品間の位置ズレを修正するために水平方向の作用力が必要であり、この水平方向への作用力は組み付け部品が組み付け対象部品の面取り部に接触してはじめて発生する。組み付け対象部品に面取りが施されていない場合には、水平方向への作用力が発生せず、部品間の位置ズレを修正できないという問題があった。そこで今回は組み付け部品であるピン

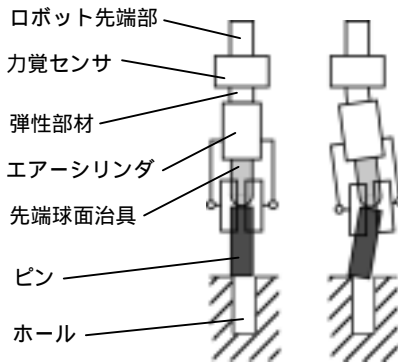


図1 ロボットハンドシステム

に対して、その上部から力を加えることによりピンを積極的に傾けることができなかつた。これによりピン上部を押さえられている先端球面治具が、ホールのある方向へと移動し、その移動量に応じた力が容易に検出できると考えた。つまりピンとホールとの位置ズレ方向の推定精度が向上するはずである。この考えを基にして本研究では図1に示すピン挿入用ロボットハンドの開発を行った。

< 4. ピンとホールの位置誤差検出実験 >

ピンとホールとの接触時に力覚センサの検出した力情報によって位置ズレ方向を推定するが、これと実際の位置ズレ方向とが、どの程度異なるのかを比較した。ピンとホールの接触方向は図2に示すように、1から8までの45度間隔(8方向)に限定してある。ピンとホールの接触回数は、1から8までの各方向においてそれぞれ5回ずつ、計40回とした。表1より、昨年度までの旧システムでの推定角度誤差に比べて、今回の新システムではその誤差が減少している。これより、新システムにおける位置ズレ方向の推定精度は向上しているといえる。

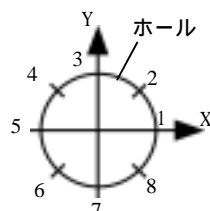


図2 ピンとホールの接触方向

表1 位置ズレの推定方向と実際との比較

接触方向		1	2	3	4	5	6	7	8
最大誤差 [度]	新	17.57	32.56	1.29	18.24	5.90	21.13	9.15	21.82
	旧	24.93	31.13	22.15	14.46	30.32	63.33	47.08	27.00

< 5. ピン挿入実験 >

人間のピン挿入作業時の動きを基にして、ロボットに挿入作業を行わせた。図3にその作業手順を示す。また、挿入実験に用いたピンとホールは、いずれも鋼製(S45C)である。ピンは直径11.97[mm]、長さ40[mm]であり、ホールは直径20.01[mm]、深さ30[mm]である。ピン、ホールともに面取りは施していない。また、ホールのおおまかな位置はロボットに教示してある。

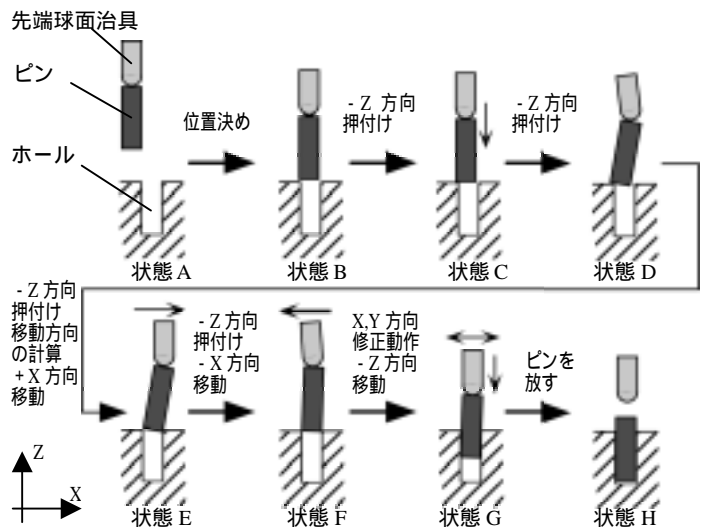


図3 ピン挿入作業手順

初期状態(状態A)

ピンをホール付近へ位置決めする。(状態Bへ)

ピンを垂直方向に降ろし、ホールと接触させる。(状態Cへ)

ピンをZ方向に1.5kgfの力が加わるまで押し付ける。その時点でのX、Y方向の力情報を基に移動方向を計算する。(状態Dへ)

ピンを-Z方向に押し付けながら+X方向に移動させる。移動続けるとピンはZ方向の力から開放される。(状態Eへ)

ピンは+X方向に大きく傾いているので、ハンドを-X方向に移動させ、X方向の力が開放されるまで、その傾きを緩める。(状態Fへ)

ピンに加わるX、Y方向の力情報を基に、ピンのかじり現象を避ける修正動作を行いながらピンの挿入作業を開始する。(状態Gへ)

十分押し込まれたところでピンを放す。(状態H)

表2 ピン挿入時間

接触位置のズレ量	約1mm	
成功回数 / 試行回数	39 / 40	
挿入成功率 [%]	97.5	
挿入時間 [sec]	平均	0.310
	標準偏差	0.024

表2にピン挿入作業にかかった時間を示す。ただし今回のピン挿入作業は、位置誤差検出実験と同様にピンとホールの接触方向を1から8までの45度間隔(8方向)に限定し、その接触回数は、各方向においてそれぞれ5回ずつ、計40回とした。またピンは、その中心軸がホールの中心軸より約1[mm]ずらして、ホール付近に接触するようにしてある。表1に示した挿入時間に関しては、従来のピン挿入作業では実現されていなかったものであり、十分高速化が図れたと考える。また今後は、ピンのかじり現象を避ける動作の見直しによって、ピン挿入時間の短縮が図れるものと考えている。

< 6. 結論 >

本研究では、ロボットによる精密なピン挿入作業において、その作業性を向上させるロボットハンドの開発を行った。これによりピンとホールとの位置誤差を修正し、両者が接触してから1[s]未満でのピン挿入動作を実現した。

箱へのブロック積み込み作業の状態予測による高速化

メカトロニクス研究室

管 97-149 渡邊裕太

1. 研究背景

今日、日本を代表する製造業の主要な組み立て生産現場では、少品種大量生産型製品の需要から多品種少量生産型製品への急激な需要変化に伴う早急な対応が迫られている。そこで、具体的な解決策のひとつとして、現在注目されているのが、作業内容に対象物の変化による柔軟な対応を可能にするセンサ制御を用いたロボットの知能化である。従来まで大量生産型オートメーションに於いて、主に用いられてきたティーチングプレイバック方式のロボット制御では、対象物の変化への柔軟な対応は、不可能であった。ロボットハンドに力覚センサを用いることで、ハンド先端部に生じる接触力を計測し、そのデータ分析により対象物変化に応じた各作業の実行を可能とさせる。しかしながら、センサ制御技術は研究段階であり、その動作を高速に行うことができない。

2. 目的

本研究では、生産ラインの製造プロセスのひとつである箱への積み込み作業を、代表的なロボット動作として取り上げ、センサ制御によるロボット作業の高速化を目指す。ブロック積み込みシミュレータを作成し、積み込みプロセスにおけるブロックの接触状態や接触力変化について状態遷移図を基に予測する。シミュレーションを通じて得られたデータを分析することでロボットを用いた積み込み作業の高速化を目指す。

3. ブロック接触状態の分類

接触時のブロックに対して生じる力情報に基づいた接触状態を次のように分類する。状態 a を 1 点接触(環境側の面とブロック側の角)、状態 b を 1 点接触(環境側の角とブロック側の面)、状態 c を 2 点接触(環境側の角とブロック側の面)、状態 d を 2 点接触(環境側の 2 面とブロックの 2 つの角)状態 e を 1 面接触、状態 f を 2 面接触と全 6 種類に分類する。

4. シミュレーションシステム

ブロックの積込作業のシミュレータを、Microsoft Visual Studio 6.0 上に C++ 言語を用いて作成した。シミュレーションの流れを図 1 に示す。なお問題は、2 次元問題に限定し、同型のブロックを敷き詰めることが可能な外箱に積み込むとする。ブロックと外箱の大きさは既知とし、外箱とすでに積込まれている位置は未知とする。

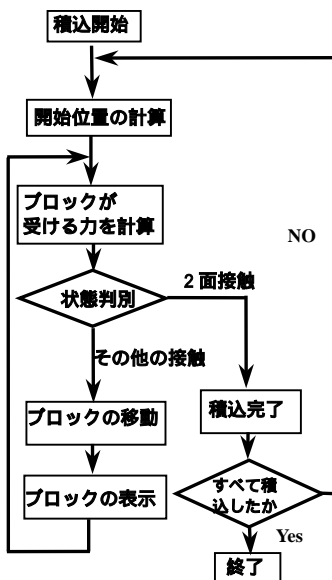


図 1 シミュレーションの流れ

それぞれの接触状態に於いてブロックを微小に動かす運動を与えたとき、微小変位に比例する反力が観測される。力情報 (f_x, f_y) は、ばね係数 k 、微小変位 (δ_x, δ_y) を用いて、

$$\begin{cases} f_x = k \cdot \delta_x \\ f_y = k \cdot \delta_y \end{cases} \quad (1)$$

と表す。ブロックに生じるモーメントは、力情報 (f_x, f_y) と接触状態より算出される。

次にシミュレーション上で用いられている判別アルゴリズムを示す。まず、判別を容易にするために、ブロックを傾けた状態で接触させる。

状態 a を判別するために評価関数 H を、実際のモーメント M_r と力情報 (f_x, f_y) により推定されるモーメント M_e を用いて、

$$H = |M_r - M_e| \quad (2)$$

と定義する。状態 b を判別するために、ブロックが受ける力情報 (f_x, f_y) 及びモーメント M_r より接触点の位置を推定する。

図 2 に判別アルゴリズムを示す。箱積みシミュレータでは、図 2 の状態判別アルゴリズムと状態遷移図に基づき接触状態の判別とブロックの積込プロセスが管理されている。

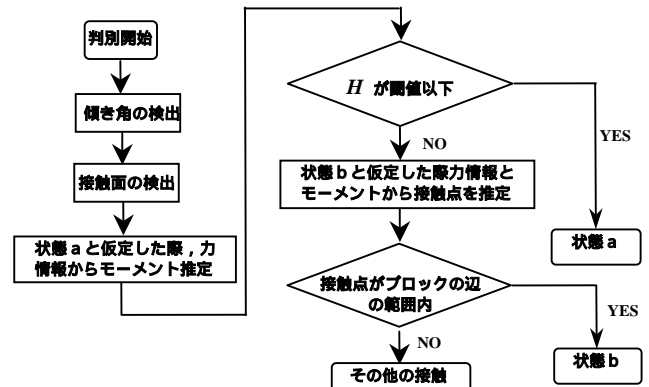


図 2 接触状態判別アルゴリズム

5. シミュレーション例

ブロックの積み込みプロセスの例を図 3 に示す。その際のシミュレーション結果を図 4、図 5 に示す。

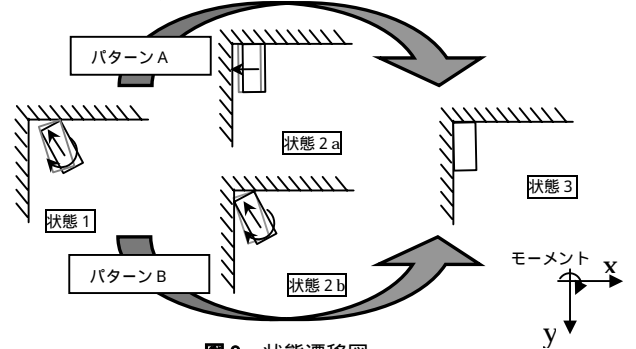


図 3 状態遷移図

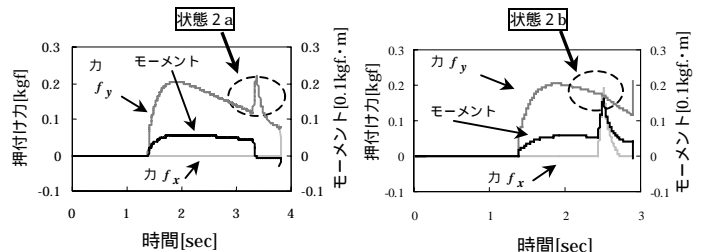


図 4 パターン A での力・モーメントの変化

図 5 パターン B での力・モーメントの変化

6. 考察

先に挙げたシミュレーション例では、状態 1 から状態 2 へ推移する際、2 点接触へと推移した場合と環境側の面とブロックの角との 2 点接触の場合との判別は、モーメントの正負逆転と x 軸方向の力が閾値を越えるかどうかで容易に判別可能であった。一方、シミュレーション上で判別困難であった図 6 に示す接触状態について、実際のロボット作業では、力情報検出の際のノイズ等によりさらに判別困難であると考えられる。そこで、状態 A から状態 B への推移の瞬間は、力情報からでは困難であることから、ブロックをさらに回転運動させ、判別可能な状態 C にすることで、正確な接触状態判別が実際のロボット作業でも応用できると考える。

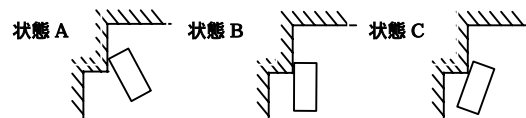


図 6 判別困難な接触状態

7. 結論

シミュレータの作成により、実際のロボットによる積込作業の際に用いるブロック接触状態判別アルゴリズムと高速化を目指した状態遷移の評価が可能となった。

教育用機械運動学ソフトの開発とその3次元表示

メカトロニクス研究室

管98-66 森本 教之

1. 研究背景および目的

学生が教育現場で受ける講義は、そのほとんどが話し言葉とプリントやテキストで行われるものが中心である。しかし初学者にとって時間ごとに状態が変化する物理現象などを教科書の文字や挿絵だけでその動きを理解することは難しい。中でも特にリンク機構は代表的な不等速運動機構であり、動きを想像することは容易でない。

現在リンク機構の動きをアニメーション化するソフトはいくつか存在するがそれらは2次元での表示である。これは複雑なリンク機構の動きだと、リンク同士の交差が多くなり、人間の認知負荷が高くなる。そこでリンク機構を3次元表示するとリンク同士の交差を回避することが可能となり、表現力が向上し、リアリティを増すことができるのでリンク機構の動きは理解しやすくなる。また自分でデータを設定した機構がどんな動きをするのか確認することができるので勉強にもなる。そこで本研究ではこのようなソフトを開発することを目的とする。

2. リンク機構の運動解析

リンクの位置姿勢は平面三角形の解法を用いることによって、対偶点の座標や回転角を順次求めることができるので、リンク機構の運動を解析することが可能である。

図1において、各リンクの長さや駆動角 a 、リンクADが固定リンクであることが既知であれば、次の手順で全てのリンクの位置座標がわかる。

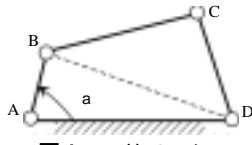


図1 4節リンク

ABDにおいて2辺狭角の関係からBの位置、 $\angle ABD$ 、 $\angle ADB$ 、対角線BDの長さがわかる。

BCDにおいて3辺既知の関係から全ての角がわかり関節Cの位置もわかる。

3. リンク機構の3次元表示

2次元のデータから3次元のリンクの位置姿勢を決定する順序を以下に示す。(駆動角は b である。状態Aの数字はジョイント番号を、太線は3次元の位置座標にすでに設定されていることを表す。)

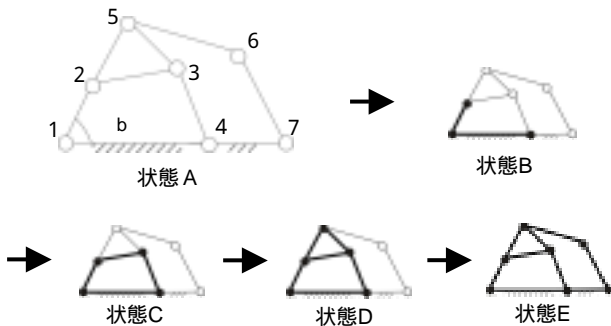


図2 リンクの位置姿勢決定順序

未設定の状態(状態A)

駆動角の設定のデータより駆動リンクと固定リンクを探す。状態Bのリンク12と14がこれに相当。

最初に、その駆動リンクと固定リンクを含んで構成される最小限の連鎖を見つける。(状態C)

次に図3のように各リンクのz座標が重ならないように、リンクごとに異なるz座標を定める。

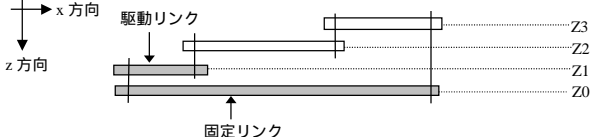


図3 状態cの太線部を上から見た図

まだ3次元のリンクの位置座標を決定していないリンクが存在するか調べる。存在するならば図4の5種類のどの場合に相当するか判断して、リンクの位置座標を決定する。(状態C-D)



図4 5種類の連鎖(自由度0)

全てのリンクについて3次元の位置座標が確定するまでの処理を繰り返す。(状態D-E)

4. 機械運動学ソフト

図5に教育用機構運動学ソフトのフローチャートを示す。

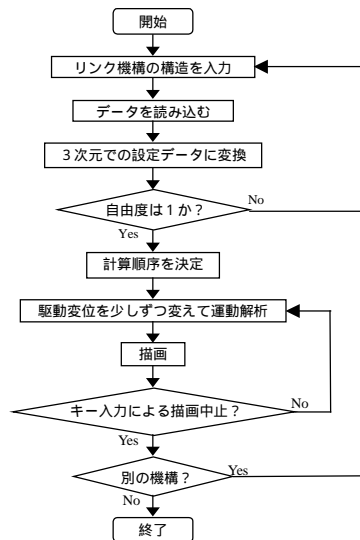


図5 フローチャート

このプログラムでは自由度の計算、計算順序の決定、運動解析は全て2次元で設定されたデータを元に行う。3次元で設定されたデータは描画時にのみ利用する。

各リンクの一端(3次元の設定データ)はそれぞれ以下の情報をもつ。
 ・自分を示す番号
 ・2次元でのジョイント番号
 ・z座標の値
 ・形状(回転、スライダなど)
 ・スライダを通るリンクの終端はどれか。

OpenGLでは描画の終了はプログラムが終了を意味するので、描画を終了せずに中断してデータを変更することで別の機構に変更できるようにした。

5. 実行結果

図2の機構を以下のように設定したときの出力結果を図6に示す。
 関節数と各関節のタイプ: 7, 全て回転

固定関節とその座標: 1(0,0), 4(2.0,0), 7(2.8,0)

固定リンク: 14, 47

リンク長: 12=0.5, 23=1.6, 34=1.0, 25=1.5, 35=1.0, 56=1.2, 67=1.3

駆動方式: 回転

駆動角とその初期値: 412=-120°

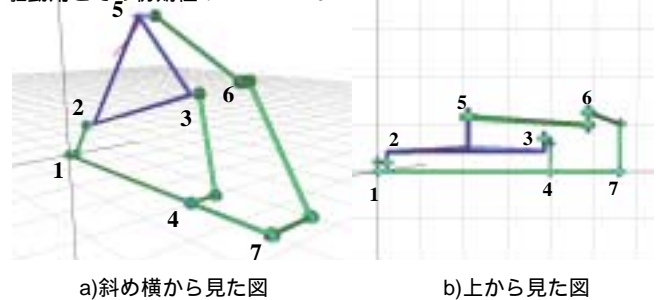


図6 3次元表示した図2の機構

6. 結論

3次元でリンク機構を表示することにより、リンク同士の見かけ上の交差を回避することができ、リンク機構の動きを理解することが容易になった。また2次元データだけで3次元のリンク機構の位置座標を作成できるので、3次元表示のリンク機構を簡単に作成できるようになった。

7. 今後の課題

入力角や出力角の関係が表示できればさらにリンク機構を理解する手助けになってくれる。軌跡を構造入力で設定するようにしているが、画面を見ながら対話形式にどの点の軌跡を描くのか指定できるようにすると便利である。

参考図書

高野政晴, "機械運動学", コロナ社, 1978

PZT薄膜を用いたマイクロダイヤフラム構造の製作

メカトロニクス研究室

管97-114 堀井 広治

1. 研究背景および目的

マイクロマシンの研究分野において現在、静電型のセンサ、アクチュエータが主流であるが、ギャップ間隔と力の関係が非線形であるという問題がある。このため電圧と力の関係が線形である圧電型のセンサ、アクチュエータの開発が重要である。

本研究では圧電薄膜をスパッタ法、ゾルゲル法で作製し、その特性評価を行うことを目的とする。その評価として、1.結晶配向性、2.強誘電性、3.圧電特がある。1,2については基板上に成膜したサンプルで評価可能であるが3についてはダイヤフラム構造を作製し、電圧を掛けその変位を測定する必要がある。そのため本研究ではダイヤフラム構造を作製し電圧をかけて変位を測定するというのも目的の一つである。

2. PZT薄膜の作製

圧電薄膜の作製はゾルゲル法、スパッタ法に大別できる。ゾルゲル法はPZT混合溶液をウエハに塗布しブリーク、ポストブリークするという作業である。

本研究で用いる溶液は本学部、材料工学科のものを使用し、その特性としては一回のコートで比較的厚い膜を得るものである。

一方スパッタ法は高エネルギー原子をPZT固体ターゲットに衝突させて、逆の方向に飛び出す原子を薄膜として形成する方法である。表1にスパッタ法の条件、表2にゾルゲル法の条件を示す。成膜プロセスとしてはSiO₂基板上にTi/Ptをスパッタ蒸着しその上にPZTをそれぞれの方法で成膜した。

3. PZT薄膜の評価

(1) X線回折による評価

図1、図2に結果を示す。図1がスパッタ法によるもので図2がゾルゲル法によるものである。

両者ともわずかではあるが、ペロブスカイト相(111)面の配向を表す回折線が観察された。ペロブスカイト相(111)面は原子配列上、特に強誘電性が強い。強誘電体は必ず圧電性も示す。現段階では他の結晶の配向も多数出ておりそれらを抑える事が将来的な課題である。

(2) 電気的评价

作製したPZTの上面にメタルマスクを用い250μmの上部電極(Pt)をスパッタ法により堆積させ、印加電圧を加えて分極率を計測した結果が図3である。

スパッタ法で作製したものの電気特性は理想的なヒステリシスループを描いており残留分極値P_sも10(μC/cm²)という値が出たがゾルゲル法で作製したものは理想的なループを描いておらず残留分極値もほぼ0という結果になった。ゾルゲル法の場合、液の劣化という問題とさらに湿度による影響が出るためこのような結果になったと考えられる。

表1 スパッタリング条件

ルルターゲット組成	Pb _{1.5} La _{0.03} Zr _{0.58} Ti _{0.42} O ₃
印加電力	200W
基板温度	200
スパッタレート	Ar(3.0nm/min)
熱処理条件	550 60min

表2 スピンコート条件

スピンコート	300rpm 5s
	1000rpm 60s
バーク	80 10min
	300 10min
	700 10min
ポストバーク	700 60min

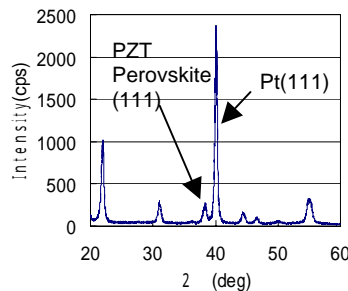


図1 X線回折パターン (スパッタ法)

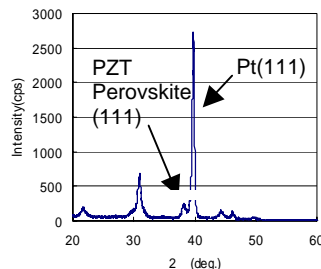
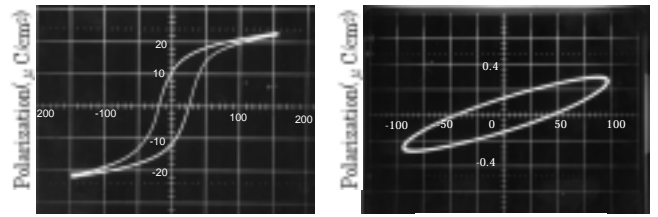


図2 X線回折パターン (ゾルゲル法)



(a)スパッタ法

(b)ゾルゲル法

図3 ヒステリシス特性

4. ダイヤフラム作製プロセス

図4にダイヤフラム作製プロセスを示す。このプロセスは大阪府立産業研究所の装置を主に使い行われていたものであるが、今回は関西大学の装置を使い行ったものである。

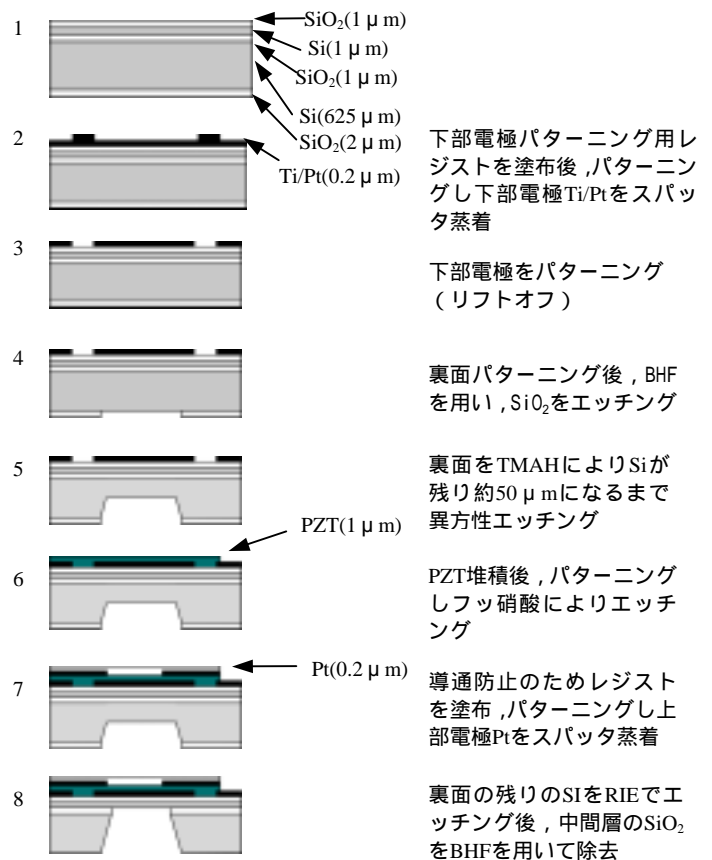


図4 ダイヤフラム作製プロセス

6の工程でのPZT堆積には特性の良かったスパッタ法を用いた。作製したダイヤフラムの画像を以下に示す。

5. 結論と今後の課題

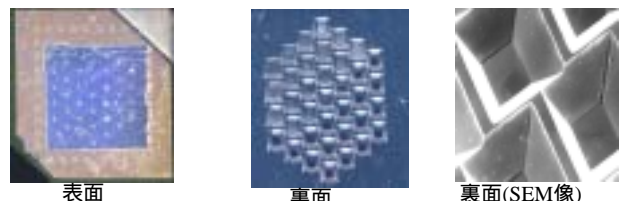


図5 作製したダイヤフラム

作製されたダイヤフラムに正弦波電圧を掛けてダイヤフラムを動かして変位を求め、圧電d定数を求めようとしたが残念ながら今回はデータが得られなかった。今後は実際に可動するダイヤフラムを作製することが課題である。またPZT自体の特性もあまり良いとはいえずより良い特性の条件だしが必要である。

アレイ型超音波センサによる物体認識のソフトウェアシミュレーション

メカトロニクス研究室

管98-55 堀田 康孝

1. 研究の背景および目的

超音波センサは視覚センサなどと比較して処理時間が短く、安価で手軽に扱える。また、小型・軽量である。超音波センサは小型化することにより、指向が広がることと、走査角が広がるメリットがある。また、アレイ化することにより指向角を電気的に制御できることと、素子の出力を足し合わせることで、音圧の低下を防げる。そこで本研究では、アレイ型超音波の複数物体に対する空間分解能をソフトウェアシミュレーションによって検討し、物体認識のソフトウェアシミュレーションを行う。

2. 電子走査による物体認識の原理

遅延時間を制御し、遅延加算すると、音波の受信方向の走査を電子的に行うことが可能となる。図1にこの原理を示す。図1に示す遅延時間 t を設け $R_1 \sim R_4$ の受信信号を加算すると q の方向で音圧が最大となる。

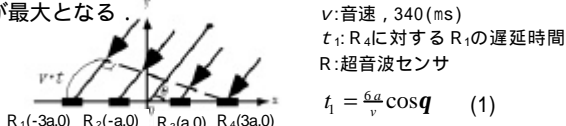


図1 アレイ型センサの指向特性原理

3. シミュレーションの構成

アレイ型超音波センサを用いた物体認識シミュレーションを行う。センサとしては、各素子間隔が d 、センサの長さが D のリニア型のものを用い、2次元でのシミュレーションを行う。実際の物体認識法は図2のように発信機から超音波を発射し、測定物体からの反射波をセンサが受信するが、シミュレーションでは図3のように物体からの反射波の代わりに、発信機を用いシミュレーションを行った。図4にシミュレーションの座標系を示す。x-y座標空間の原点にセンサを配置する。センサ正面方向を 0° とし、そこからの傾きを β とする。検出物体からの反射波を仮定した発信機を任意に配置する。発信機から信号を発射し、各センサ素子が式(2)で表される信号を受信する。図5に式(2)の波形を示す。各素子に入力された信号に遅延時間を加算し、ある角度の位相が整合される信号が大きくなる。その角度を物体のある方向として認識する。

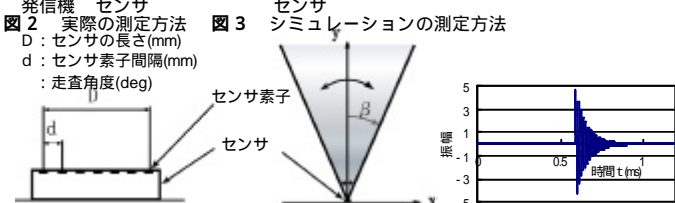


図2 実際の測定方法 図3 シミュレーションの測定方法 図4 シミュレーションの座標系 図5 シミュレーション波形

$$\frac{1}{r} \cdot \sin(2p \cdot f \cdot t) \cdot \exp(-15000 t) \quad (2)$$

r : 発信機までの距離(mm)
 f : 共振周波数
 t : 発信してから経過時間(s)

4. アレイ型超音波センサ

物体認識の際に高い分解能を持つためには、鋭い指向性が必要となる。アレイ型超音波センサの場合、指向性の鋭さは音圧が受信の正面方向に対して半分になる角度で表す。これを半減角という。この角度が小さいほど鋭い指向性を持つことになる。指向性はセンサの長さ・センサの共振周波数により決定される。それらの関係をソフトウェアでシミュレーションした結果を図6、図7に示す。図6・図7の結果から最小自乗法により式(3)が求められる。また、指向性はセンサ正面を 0° とした場合、図4で示す角度 β が大きくなると半減角は大きくなる。図8に発信機を配置した角度による指向性の変化を示す。また、その関係を図9に示す。図9は縦軸に正面からの半減角と発信機を配置した角度での半減角をとの比を、横軸に発信機の配置した角度を示す。図9の結果から最小自乗法により式(4)が求められる。

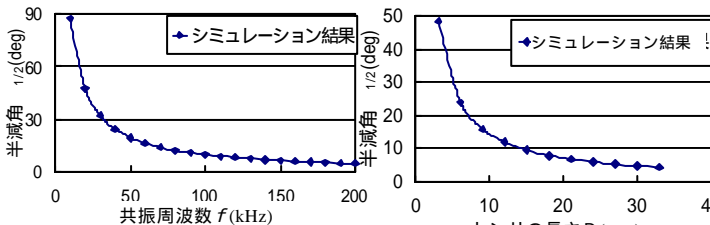


図6 共振周波数と半減角 図7 センサの長さDと半減角

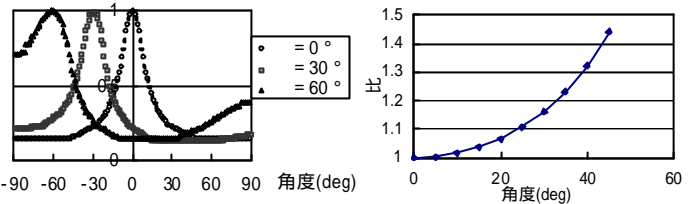


図8 物体のある角度と指向性の関係 図9 物体のある角度と半減角の関係

$$q_{1/2} = 43.2 \frac{v}{f \cdot D} \quad (3)$$

v : 音速, 340 (ms)
 f : 共振周波数
 D : センサの長さ

$$q_{(1/2, \beta)} = q_{1/2} (k \cdot \beta^{2.3} + 1) \quad (4)$$

β : 時の半減角
 k : $\beta = 0$ の時の半減角
 $k: 6.75 \times 10^{-5}$

5. アレイ型超音波センサの分解能

センサの物体認識能力を知るうえで最も重要なことは分解能である。分解能とは、識別できる2点間の最小距離のこと、距離分解能と方位分解能とがある。一般的に距離分解能は $1/\lambda$ であることが知られている。方位分解能は同一円周上に配置した2点の角度を狭めることで測定する。図10(a)は角度 β_1, β_2 の2つ方位に配置された発信機から指向特性であるが、信号は合成し、センサが実際に受信するものは図10(b)のような指向特性である。そのため、角度 β に本来物体がない場所に虚像が発生する。よって、虚像が発生しないための条件は $C < a+b$ であり、 $C = a+b$ が限界と考えられる。式(3)・(4)より方位分解能を表した式(5)が導出される。本研究室で開発しているセンサの共振周波数は60 (kHz)、センサの長さは10.2 (mm) で、物体認識範囲は $\pm 45^\circ$ を目標としている。よって、式(5)より方位分解能は 34.28° となる。

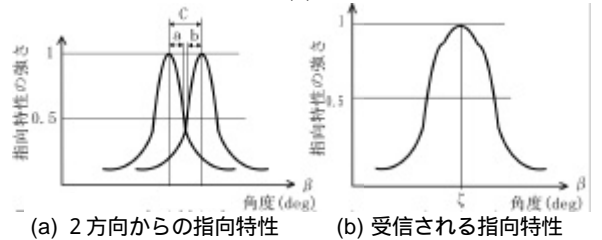


図10 2方向から来た指向特性 (5)

$$C = 43.2 \frac{v}{f \cdot D} (k \cdot \beta^{2.3} + 1) \quad (5)$$

C : 方位分解能

6. 物体認識シミュレーション結果

本研究室で開発しているセンサは共振周波数60 (kHz)、センサの長さ10.2 (mm) である。図11にその条件でシミュレーションした実行結果を示す。

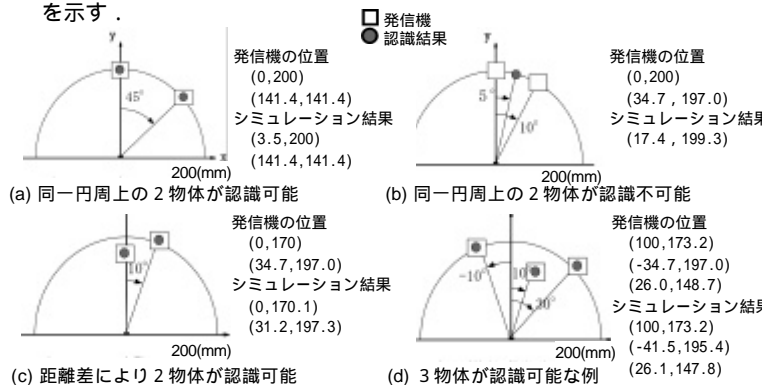


図11 シミュレーションの実行結果

図11(a)のように2物体の角度が方位分解能より大きければ、同一円周上に配置された物体の認識が可能だが、図11(b)のように方位分解能より小さくなると認識できず、虚像が発生する。図11(c)は方位分解能より小さいが、2物体の距離差があるので検出できる。また図11(d)に3物体認識可能例を示す。よって、アレイ型超音波センサを用いた電子走査法での物体認識は、2物体の距離差がある、または同じ距離(同一円周上)でも方位分解能より大きい場所に物体があるという条件下で多物体認識が可能である。

7. 結論と今後の展望

今回行った物体認識のソフトウェアシミュレーションにより、電子走査による物体認識の方位分解能を導出し、多物体認識を行うことができた。今後は実際のセンサを用い多物体認識を行う。

櫛歯型静電アクチュエータの運動挙動のソフトウェアシミュレーション

メカトロニクス研究室

管 97-137 山田 教敬

1. 研究背景および目的

近年、様々な機械の微細化が進められており、マイクロオダのアクチュエータやセンサの開発が行われている。これらマイクロマシンの形状設計を行うにあたり、試作・実験を繰り返すのは、膨大な人と時間を要する。そこで、これらの運動挙動をコンピュータ上でシミュレーションすることが重要となる。本研究の目的は、有限要素法ソフトANSYSを使用して櫛歯型アクチュエータの運動挙動を解析することである。図1に櫛歯型アクチュエータの模式図を示す。

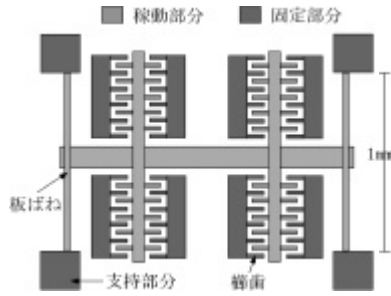


図1 櫛歯型アクチュエータ

2. 電磁気学および材料力学による解析

櫛歯型アクチュエータに発生する力や、板ばねのたわみを電磁気学と材料力学により数式化し、手計算により解析する。

・アクチュエータに発生する力

櫛歯型アクチュエータは電圧を加えると、歯の部分でコンデンサーとなり静電引力を発生し、板ばねをたわませる。この力は図2のように f_1, f_2 との二つがあり、発生する力はその和で表される。

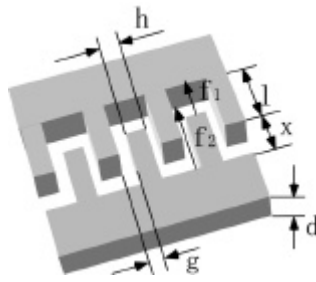


図2 櫛歯の形状

$$f_1 = \frac{1}{2} \epsilon_0 d \frac{h}{x^2} V^2 \quad \dots (1)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 d \frac{g}{(x+l)^2} V^2 \quad \dots (2)$$

発生する力 F は櫛歯の数を n 、真空の誘電率を ϵ_0 、電圧を V 、高さを d とすると

$$F = \frac{n}{2} \epsilon_0 d \left\{ \frac{h}{x^2} + \frac{g}{(x+l)^2} \right\} V^2 \quad \dots (3)$$

この式(3)から発生する力は、櫛歯の数 n 、高さ d 、櫛歯の幅 h に比例し、歯の先からの距離 x の二乗に反比例することがわかる。

・板ばねの弾性

図3のように板ばねの解析は、両端を固定した梁の中央に集中荷重が加わるものとする。中央の最大たわみを d 、板ばねの厚さを b 、長さを L 、高さを a とし、ヤング率を E 、櫛歯に発生する力を F とすると

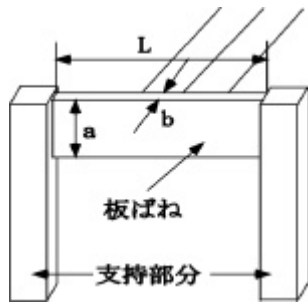


図3 板ばねの形状

$$d = \frac{FL^3}{4b^3 aE} \quad \dots (4)$$

と表される。

3. 有限要素法による解析

理工学分野で取り扱う現象は、連続体モデルによって微分方程式で記述されることが多い。この微分方程式を種々の条件の下で解くことにより、現象を理解するとともに、その将来を予測することが出来る。しかし、この微分方程式の解析解を求めることは容易ではない。有限要素法を使えば、“離散化解析”という方法によって微分方程式を有限個の代数方程式を解く問題に帰着し、数値的に解くことが出来る。

図3の各パラメータ(櫛歯の長さ l 、幅 h 、歯の先からの距離 x 、歯と歯の間のギャップ幅 g)の数値を変えて ANSYS による解析を行った。図4は、ANSYSにて要素分割後の解析モデルである。櫛歯の歯の長さ l を変えた時の発生する力 F と、電圧との関係を示したのが図5である。

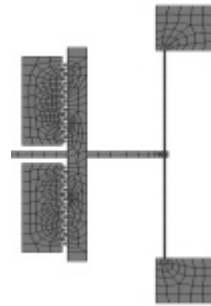


図4 解析モデル

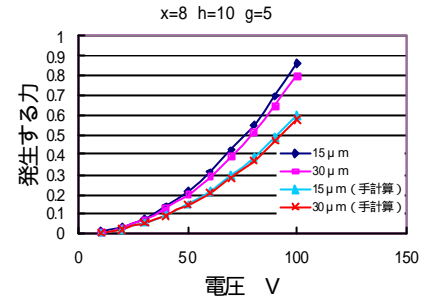


図5 各電圧の発生する力

図5のグラフを見ると、歯の長さ l が小さい方が少しだけ大きな値を示しているが、櫛歯の長さは発生する力にはあまり影響を与えない。電圧が大きくなれば、二次曲線を描き大きくくなっていることから電圧の二乗に比例していることがわかる。また、図6を見ると、 F は櫛歯の先からの距離 x によって大きく変化しているのがわかる。 x が0に近づくと急激に F が増加していることから、 x に反比例していると思われる。図7は櫛歯のギャップ幅 g と F について調べたものである。 g が大きくなれば F は小さくなっているが、規則的な変化は見られなかった。図8からは、櫛歯の幅 h を大きくすると、それに比例して F も大きくなるのがわかる。図9は変位(板ばねの最大たわみ)のグラフであるが、変位についても力と同様のことが言える。

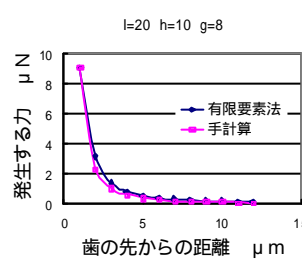


図6 歯の先からの距離 x と力

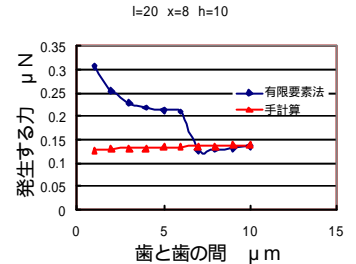


図7 歯と歯の間の距離と力

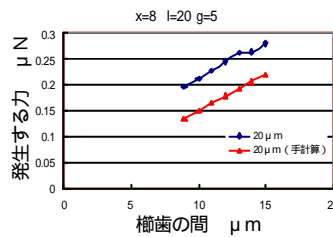


図8 歯の幅と力

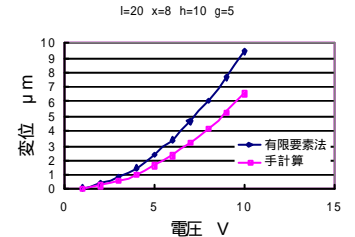


図9 電圧と変位

手計算による解析と有限要素法

による解析結果を比較すると、有限要素法による解析結果の方が大きな値を示した。これは、手計算による解析では静電引力が垂直に働いている力しか考慮しておらず、図10に書いた、斜めに引き合う力を無視しているためと考えられる。この計算外の力が有限要素法との差になっていると思われる。これらの計算結果に違いがあることから、有限要素法による解析は不可欠なものであると言える。

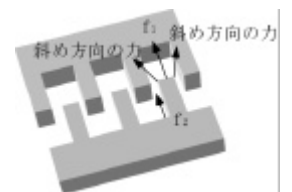


図10 計算外の力

4. 結果と今後の展望

結果として、櫛歯の各部分の寸法が発生する力にどのような影響を与えるかがわかった。本研究では櫛歯型アクチュエータについて解析を行ったが、今後の展望としては、他のマイクロアクチュエータやマイクロセンサについての解析に応用していくことや、実際に櫛歯型アクチュエータで実験を行い、有限要素法による解析の正当性を証明することが挙げられる。

生分解性材料PLAのマイクロマシンへの適用可能性の基礎的評価

メカトロニクス研究室

管97-105 樋口 学

1. 研究背景および目的

マイクロマシンに期待されるものとして、医療への応用が挙げられる。何故ならば、生体の臓器や組織は、その大半のものの寸法が1mm以下の細胞や、細胞内部の1mm以下の細胞小器官といった構成要素から成り立っているからである。例えばマイクロマシンが体内に入って直接的に種々の処置ができるようになれば、手術の際に大きく切開する必要がなく、患者は苦痛から解放される。

現在のマイクロマシンではSiを主な材料として研究が進められているが、医療用材料としてSiを用いることは安全であるとは言えない。そこで生体内で分解されて無害化される「生分解性」という特性を持った材料をマイクロマシンに応用することを本研究では提案する。

生分解性材料としてポリ乳酸 (Poly-L-Lactic Acid 以下PLAと略す) を用いてマイクロマシン加工を行うために、その性質を把握しておく必要がある、この材料の基礎的性質の評価を行う。

2. ポリ乳酸について

ポリ乳酸は、医療分野で薬物放出デバイス(DDS)や手術用縫合糸、体内での止血・接着・癒着防止用材料などに利用されている。この材料が医療用として使用される大きな理由として「生分解性」という特徴をもつからである。この特徴は、ポリ乳酸を加水分解により低分子化した乳酸に分解する。これは生体内にもともと存在するものであり、安全性の観点から非常に好ましい。また乳酸は生体内で酵素の助けを借りずに二酸化炭素と水になり、生成物は尿の形で体外に排出される。これらの特徴をもつ生体適合材料としてポリ乳酸は生体に対する適応性・安全性ともに非常に優れているため、新しい医療用材料として大いに期待されている。

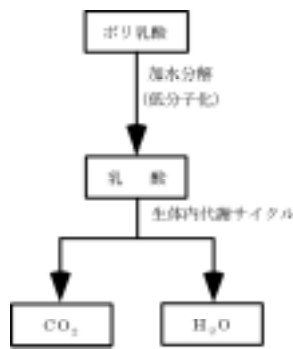


図1 ポリ乳酸の代謝サイクル

3. マイクロマシン素材としてポリ乳酸の材料評価

ポリ乳酸はさまざまな分野で利用されているが、マイクロマシン分野として使用された例がなく、その素材としての材料特性は明らかにされていない。そこで、マイクロマシン素材として用いた時、どのような特性があるかを調べる。

ポリ乳酸は融点が172℃で常温では固体であり、ペレットの形で供給されている。これを融点以上に熱して膜付けすると、粘性が高いために、膜が均一にならない。そこでクロロホルムに溶解させる方法をとることで膜の粘性を落とし、この溶液を使って膜付けすると均一な膜を形成することができる。

またマイクロマシン加工は、数μmの薄膜を堆積し、これをフォトリソグラフィ技術でパターンングした後、薬品によるウェットエッチングまたはガスによるドライエッチングで除去加工を行うものであり、これらの工程を繰り返すことで複雑なマイクロ構造が形成できる。このマイクロマシン加工の際に必要な3つの工程についてポリ乳酸がどのような特性を示すか調査し、マイクロマシン技術がポリ乳酸に適用可能であるかどうか、以下の4点から評価を行った。

- (a) 加熱溶融によるポリ乳酸の膜付け
この方法は固体のポリ乳酸を加熱溶融させた後、常温放置冷却して固体に戻すことでポリ乳酸の薄膜形成をする。
ここでは基板の上にポリ乳酸をのせホットプレートで250℃に加熱し、溶解させて膜付けを行った。
(結果) 加熱溶融により膜付けすることができたが、膜の粘性が非常に高いため均一な膜にはならなかった。
(結論) 膜の粘性が高いために膜厚は均一にはならなかったが、膜自体は非常に厚いので構造物作製には適している。
- (b) 溶媒溶融によるポリ乳酸の膜付け
この方法はクロロホルムにポリ乳酸を溶解させたものを膜付けし、加熱して溶媒を完全に蒸発させて、ポリ乳酸の薄膜形成をする。そのためクロロホルムに対するポリ乳酸の溶解度を調べた。
クロロホルム50ccに対してポリ乳酸をそれぞれ0.5g, 2.0g, 5.0gずつ溶かして溶解度を調べる。

表1 ポリ乳酸の溶解度の結果

ポリ乳酸 0.5g	ポリ乳酸 2.0g	ポリ乳酸 5.0g
完全に溶解し、比較的粘性も低い液体であった。	完全に溶解したが、粘度の高い液体であった。	2時間以上放置したが、完全には溶解しなかった。

(結論) クロロホルム50ccに対するポリ乳酸の溶解度は2gから3gであると考えられる。このことより、基板に膜付けする際には、この溶解度以下で濃度を変えることで、膜厚のコントロールができる。

(c) 基板への膜付け条件

Si基板とSiO₂基板への膜付けを調べた。

(結果) 両基板ともに、膜付け時には概観の違いは見られなかったが、現像時にSi基板ではポリ乳酸の膜が剥離した。

(結論) Si基板・ポリ乳酸ともに現像液(強アルカリ性)にエッチングされたために、膜が剥離している。よってSiO₂基板へ膜付けを行うほうが良い。

(d) ポリ乳酸のガスや液体へのエッチング条件

表2 ポリ乳酸のエッチング条件の結果

エッチング	ドライエッチング			ウェットエッチング		
	SF ₆	CHF ₃	CF ₄	HF	リン酸	TMAH
		×			×	

(結論) SF₆, CF₄, HF, TMAHでパターンングが可能であることがわかった。またCHF₃, リン酸でエッチングされないことを利用してパターンングすることが可能である。

4. ポリ乳酸円柱状構造物作製プロセス

材料評価より得られた特性を利用して、マイクロマシン技術を用いて、円柱状構造物の作製を行う。またここでは3の(b)で示したポリ乳酸を加熱溶融させる方法で膜付けする。

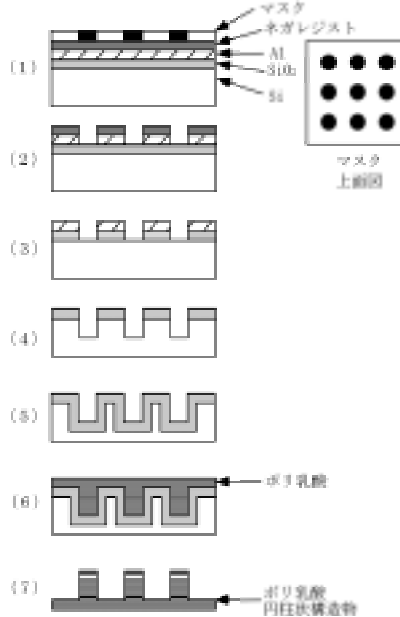


図2 ポリ乳酸円柱状構造物作製プロセス

5. 作製結果と評価



図3 ポリ乳酸円柱状構造物

作製結果を図3に示す。ポリ乳酸の円柱状構造物の作製に成功した。しかし、垂直な円柱構造を目指したが、円柱の上面部の端が湾曲しており、完全な垂直構造物の作製はできなかった。

6. 今後の展望

これらの材料評価の実験より得られたポリ乳酸の基礎的性質をもとに、プロセス中での条件出しを行う。これらの条件出しをもとにいろいろなポリ乳酸の構造物の作製し、最終目標である微小医療デバイスの作製を目指す。

マイクロ触覚センサ作製のための新しいシリコンのドライエッチング加工

メカトロニクス研究室

管96-93 前田 行紀

1. 研究背景

今後ヒューマノイドなどの人間型ロボットの進化に向けて、ロボットハンドの開発が必須となる。その際人間と同じようにロボットの指先に触覚を持たせるため、マイクロサイズの触覚センサの開発が将来的に望まれる。本研究ではピラー形状のセンサをマイクロマシニング技術を用いて作成し、それらをアレイ状に並べ、ロボットなどの指先に使用されるマイクロ触覚センサを開発する。図1に示したようにシリコンを使いダイアフラム形状にし、ピラーの周囲に歪みゲージをつける事によって、ピラーに触れた時の歪みゲージの電圧の変化で人間の感覚を再現する。この触覚センサ作成にあたり、シリコンの深堀が必要不可欠になる。今年度は触覚センサを作るための基礎段階としてICP-RIEを用いて、今までにない新しい方法（連続ガスのパルス変換による深堀）で高アスペクト比が出せるよう検討する。

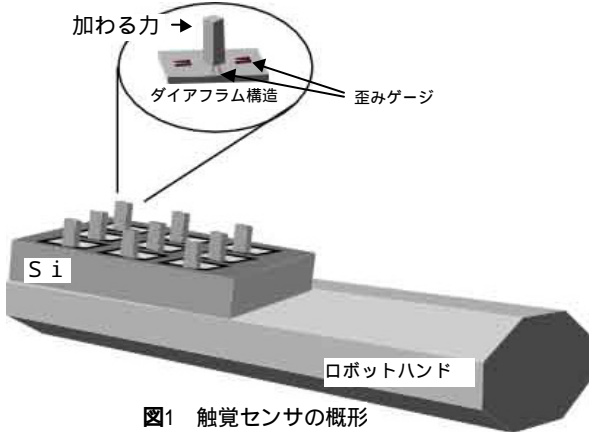


図1 触覚センサの概形

2. ICP-RIEとBoschプロセス

ICP-RIEとは(Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching)の略で他にエッチング装置のRIEに比べ一般的にプラズマ密度を高くする事が出来る。これによりRIEでは10 μ m、Siをエッチングするのも一苦労であったが、ICP-RIEに至っては数百 μ mのエッチングが可能となっている。ICP-RIEの原理を図2に示す。このICP-RIEでの一般的に行われているエッチング方法にBosch社のプロセスがある。これはエッチングガス(SF₆など)とデポジションガス(C₄F₈など)を周期的に切り変える事によりエッチングを行ってはデポジションさせるという過程を繰り返す。この

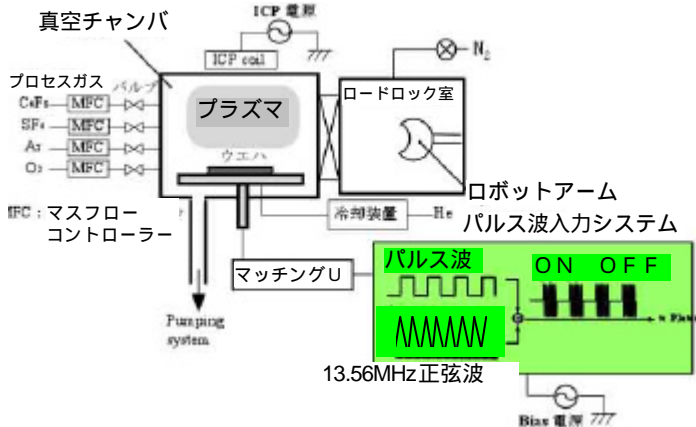


図2 ICP-RIEと外部パルス入力システムの簡略図

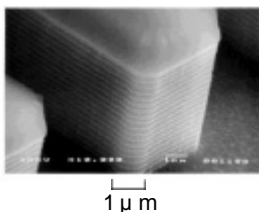


図3 Boschプロセスによるエッチング

プロセスの欠点としては、ガスを切替えるためにどんなに早くても数秒かかってしまい、図3のように側壁に段が出来てしまう事である。このエッチングとデポジションの関係を図4にBoschプロセスの概念を図5に示す。

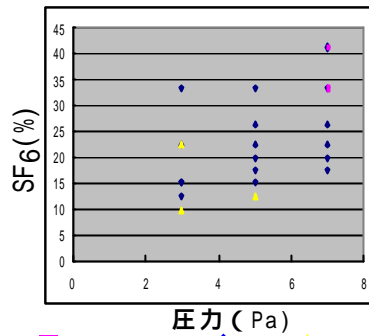


図4 BIAS30w時のSF6とPaの関係

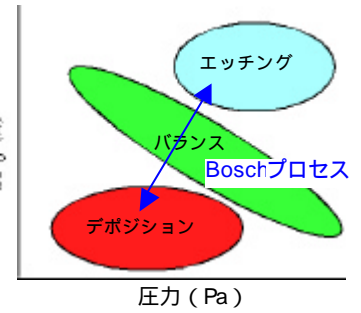


図5 Bosch概念図

3. BIAS電圧のパルス変調による新しいエッチング方法

本研究ではBoschのプロセスの欠点を解決する為、エッチングガスとデポジションガスを絶えず流したままにしておき、図2に示す外部パルス波入力によってBIASを切替えたり、入力波のDUTY比を変える事によってBoschプロセスでは不可能であった、エッチングとデポジションの高速切替えにより側壁を滑らかにする。

4. 結果

図6、図7はそれぞれBIASを切替えた時とDUTY比を変化させた時の様子である。BIASをあげる事によって膜が硬くなりエッチングされにくくなる事が分かる、図5のDUTY比をあげる事はバイアスをかけている時間を長くすると同じな事なので同様の結果が得られる。これらを変化させることによってアンダーエッチングとデポジションをコントロールする事が出来る。図8、図9に今年度

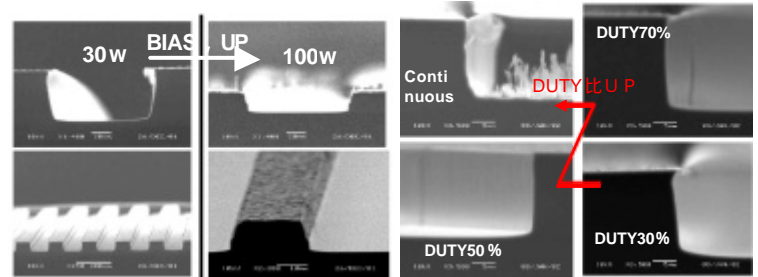


図6 BIASを変化させた時のエッチング状態
SF₆ : 35sccm
C₄F₈ : 100sccm
ICP : 700W
圧力 : 5Pa
パルス : 1Hz
時間 : 60分

図7 DUTYを変化させた時のエッチング状態

図7 DUTYを変化させた時のエッチング状態
SF₆ : 40sccm
C₄F₈ : 100sccm
BIAS : 100w
ICP : 700w
圧力 : 7Pa
パルス : 10Hz
時間 : 20min

のBIASのパルス変換によるエッチング結果を示す。条件としてはICP電圧700w, SF₆(40sccm), C₄F₈(100sccm), Ar(0sccm), PULSE(10Hz, 50%)で、60分である。これを図3で示すBoschで行ったものと比較してみると側壁の滑らかさは改善されている。

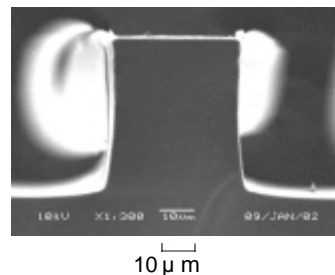


図8 ピラー形状

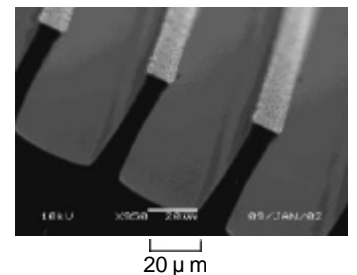


図9 溝構造

5. 結論と今後の展望

パルス変換による新しいシリコンのドライエッチング加工について今年度目標としていたエッチング深さ50 μ mは得られた。側壁も図8に示すBoschプロセスで作成したものに比べ滑らかな面が得られた。今後はさらにプロセス中にパルスを切替え、エッチングとデポジションの状態を操作し更に数百 μ mの深堀を目指す。

マイクロカンチレバーの振動における空気減衰の影響

メカトロニクス研究室

管98-56 前田 雄亮

1. 研究背景

パソコンの普及発展には目覚ましいものがあり、それを牽引しているのが磁気ディスク装置である。パソコンに接続されている磁気ディスクの容量は、飛躍的に伸びてきたが、物理的に限界に達してきている。その原因としては、微小プローブヘッドの限界などがあり、その物理的限界を超えるため、プローブ顕微鏡技術が期待される。本研究では光導波路を設置したカンチレバーを複数本取り付けたヘッド構造(図1)を想定し、SNOM信号を得るものとする。高密度な読み書きを実現させるためにはプローブと記憶媒体との距離を小さくする必要があり本プローブの構想上安定した振動を得られるための各種のパラメータの把握が必要になってくる。

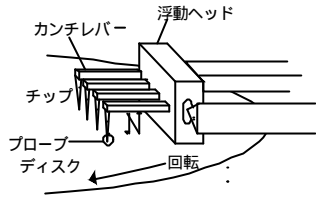


図1 ヘッドの模式図

2. 微小梁に働く減衰の理論解析

文献1)によれば、1次固有振動数 w_1 は、次式で表される。

$$w_1 = \frac{l^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{rA}} \quad (1)$$

となる。 $l = 1.875$ 、 l は代表長さ、 E はヤング率、 I は断面2次モーメント、 r_b は梁密度、 A は断面積である。

流体抵抗を考慮した梁の運動方程式は次式で表される。

$$r_b b h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{b_1}{2b} \frac{\partial w}{\partial t} + EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^4} = f e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$b_1 = 3\pi n b + \frac{3}{4} \rho_a b^2 \sqrt{2r_a \nu w_1} \quad (3)$$

m は空気の粘性定数、 r_a は空気の密度、 f は外力振幅である。(2)より空気粘性による減衰比 V_1 は次式で表される。

$$V_1 = \frac{b_1}{2r_b w_1 b^2 h} \quad (4)$$

内部摩擦は、による減衰比 V_2 は次式で表される。

$$V_2 = \frac{h}{2} \quad (5)$$

となる。 h は構造減衰係数と呼ばれ、材料にのみ依存する。

支持部損失による減衰比 V_3 は次式で表される。

$$V_3 = \frac{0.23h^3}{l^3} \quad (6)$$

本実験で使用するカンチレバー(サイズ $200 \times 50 \times 0.83 \mu\text{m}$)で求めると、空気減衰は 2.02398×10^{-2} 、内部減衰は 5.0×10^{-5} 、支持部減衰 1.64389×10^{-8} となる。よってこれらの合計は 2.02898×10^{-2} となる。

これらの結果よりカンチレバーの振動減衰の中で空気減衰の割合は99.7%であり、減衰のほとんどが空気減衰に起因するものである。

3. 研究の目的

プローブとして利用されるマイクロカンチレバーは、理論解析によれば、空気減衰が99.7%という結果が得られたが、果たして本当にマイクロカンチレバーに効いてくる減衰のほとんどが空気減衰によるものであるのか強制振動実験を行い、実験的に確認する。

4. マイクロカンチレバー

本研究では、カンチレバーの強制振動実験で使用する SiO_2 静電型マイクロカンチレバー(サイズ $200 \times 50 \times 0.83 \mu\text{m}$)を作製した。作製結果を図2、図3に示す。

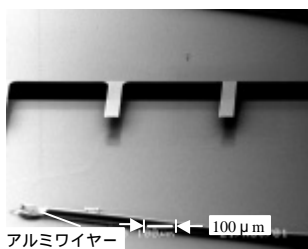


図2 カンチレバーの作製結果

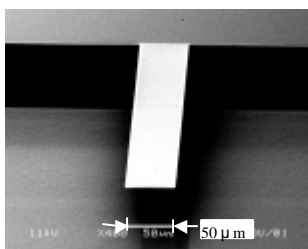


図3 カンチレバーの作製結果

カンチレバーの上部にはAlを堆積させている。この部分が上部電極となる。また、下部のSi上にも同様にAlを堆積させ、この部分を下部電極としている。そしてそれぞれの電極に電圧をかけることができるようにアルミのワイヤーを取り付けた。カンチレバーの両電極間にアルミのワイヤーを通して交流電圧をかけることによって、静電力を働かせてカンチレバーを振動させる。

5. マイクロカンチレバーの強制振動実験

空気粘性について影響を調べるため、気圧を調整できる真空装置(図4)を作製した。

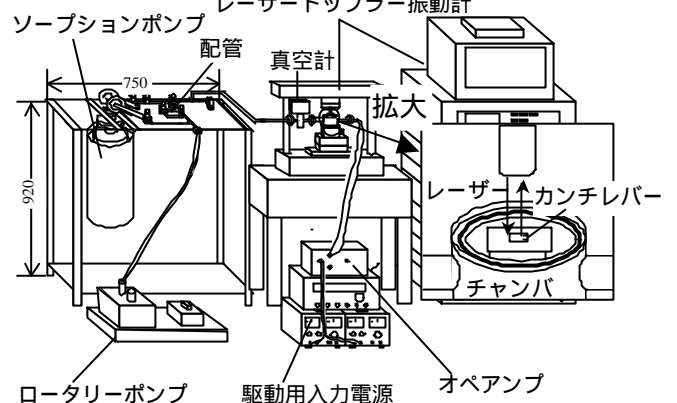


図4 真空装置及びレーザードップラー振動計

図4で示すように、真空装置のチャンバ内にカンチレバーを取り付け、ロータリーポンプ(粗引き)とソープションポンプ(本引き)で2段階に排気を行い、段階的に気圧を調整する。駆動用入力電源より交流電圧を与えてカンチレバーを振動させ、レーザードップラー振動計を用いてその振動について測定を行った。カンチレバーの周波数特性を求め、それより求めた各気圧における減衰比、Q値は図5に示す。

6. 実験結果

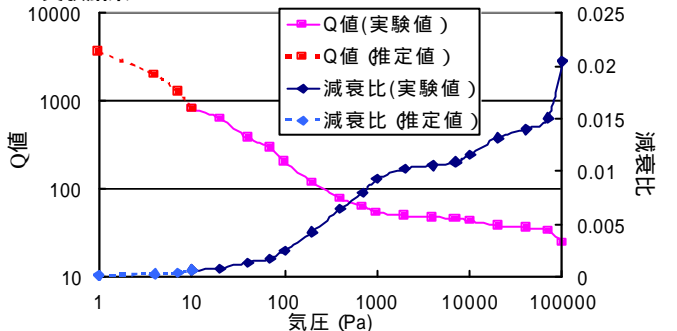


図5 気圧と減衰比、Q値の関係(実験)

図5の減衰比の実験値より空気減衰を求めると、全振動減衰に対する空気減衰の割合は、現段階で97%が空気減衰であるという結果が得られた。本来は、さらに気圧を下げ、ほとんど空気による影響を受けない状態にすると、その時の減衰比は一定の値に収束すると思われる、その収束した減衰比の値より空気減衰を求めると良いが、真空装置のリークなどの問題があるため、これ以上気圧を下げる事ができなかった。そのため、図5の実験値よりこのままの傾向で続くとして、10(Pa)以下の気圧における減衰比の推定値を求めると、1(Pa)の時点で空気減衰は99.3%であると推定できた。以上の結果より、カンチレバーに影響する減衰はほぼ空気減衰のみであるといえる。

7. 結論

カンチレバーに効いてくる空気減衰は、理論解析によれば99.7%、強制振動実験によると97%という結果が得られ、推定値からは99.3%と推定できた。これらからわかることは少なくとも97%以上が空気減衰によるものであることが分かる。よって、カンチレバーに効いてくる減衰のほとんどが空気減衰であり、内部減衰、支持部減衰のような空気減衰に比べ、大幅に小さい減衰に関しては、場合によっては無視してもよい。

参考文献

1) 板生 清, 保坂 寛, 片桐 祥雅: 光メカトロニクス, 共立出版, 1999