

## B-13 マイクロメカニズム設計技術と材料特性

Design Technologies and Material Characteristics of Micromechanisms

正 堀江三喜男 (東京工業大学)

Mikio HORIE, Tokyo Institute of Technology,

4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, 226-8503 Yokohama [mhorie@pi.titech.ac.jp]

This report not only introduces a researching trend concerning micromachines from a point of view of the mechanisms but also proposes new mechanical elements adaptable enough for micromechanisms, and furthermore describes the characteristics concerning the pantograph mechanism and PRRRP-mechanism. First with the pair composed of the conventional axis and hole, government of the frictional force overwhelms that of the inertia when minimization is made. Therefore as new mechanical elements, thin-plate-shaped large deflective elastic hinges are proposed. These hinges are applied onto the pantograph mechanism aligned on a link-center line of the link to explain the input-output displacement characteristics. Secondly introduction is made with an example with which the mechanism is applied onto a mechanical system for spreading a proper quantity of the slightest amounts of adhesives. And with the 2-DOF 5-link PRRRP-mechanism obtained by allowing the hinges to be offset not onto the link center line but in a direction to be lowered, raised, and lowered, the input-output displacement / dynamic characteristics are explained including the matter whether loads can be applied or not. (DOF stands for degree of freedom.) Furthermore a new surface mount system with parallel arrangement miniature manipulators is proposed, and the input and output displacement characteristics of the pantograph mechanism are to be experimentally discussed. Finally, propriety of the proposed system should be confirmed.

**Key Words** : Mechanism, Superelastic Hinge, Large-Deflective Elastic Hinge, Pantograph Mechanism, Three-Dimensional Micromechanism, Motion Convert Mechanism, Surface Mount System

### 1. 緒言

1999年9月から2002年9月までの3か年の予定で、「マイクロデバイス設計・製造・実装に関する研究分科会」(A-TS 03-17; 堀江三喜男主査, 川上崇幹事)が発足した。本会は、「電子デバイスの材料力学的問題」(調査研究分科会 P-SC275; 池上皓三主査, 初田俊雄幹事)を進展させ、動かないデバイスや材料力学的問題に限ることなく、マイクロマシン・マイクロメカニズムまでも範疇に入れてのマイクロデバイスの設計・製造・実装まで広く捉えた研究会である。

本稿は、マイクロメカニズムに関する設計技術と材料特性について報告するものである。

小さな量の仕事には小さな機械システムを用いることが理にかなっており、この観点でサイズの小さい機械システムを実現するための方法の一つとして、機械要素の単純化、特に、軸受の単純化が重要である。また、マイクロメカニズムでは、機構全体の微小化にともない、慣性力の支配から面積力の支配へ移行し、摩擦力の増大をさけるために、純粋な回転運動を行う箇所でない対偶(主に揺動運動を行う対偶)では、軸と穴で対偶を構成せずに、弾性ヒンジを利用するのが有用な一つの方法のように思われる。

そこで、本稿では、この弾性ヒンジ、特に従来のような円弧切り欠きタイプのように一つでは微小角しか変位しないタイプではなく、一つで大きく変位する大変形弾性ヒンジを取り上げ、その特性を明らかにし、その応用について述べる。

### 2. 新たな機械要素 "大変形弾性ヒンジ"

従来の弾性ヒンジは、図1のように円弧切り欠きタイプであり、一つのヒンジでは相対角変位が微小なため、複数使用して変位拡大機構を構成して使用される場合が多い。

本章では、これに比べて、一つのヒンジで大きな変位を

得ることができ、微小化に適した新しい機械要素を示す。図2がその一例である大変形弾性ヒンジ(材質として、超弾性部材たとえば形状記憶合金(SMA)を用いたヒンジを、従来の円弧切り欠きタイプのヒンジと区別し、超弾性ヒンジ<sup>(1)(2)</sup>と呼ぶ)であり、その特性について述べる。

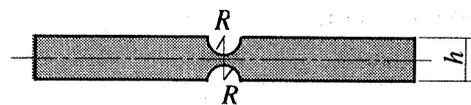


Fig. 1 Conventional elastic hinge

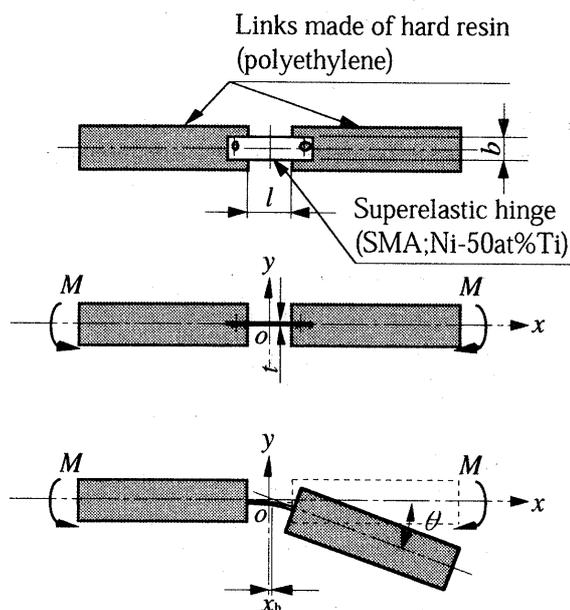


Fig. 2 An example of large deflective elastic hinge (Hinge materials: Shape memory alloy)

図3および図4は、大たわみ非線形曲げ理論による変位解析結果を表す。四点曲げによるモーメントに対するたわみ角および回転中心移動量に関して、理論値と実験値との良い一致がみられ、超弾性ヒンジの静的特性は、大たわみ非線形曲げ理論によって説明できることが分かる。

### 3. 大変形弾性ヒンジのパンタグラフ機構への応用

ここで扱うパンタグラフ機構とは図5に示すものであり、入力点Aが水平運動、もう一つの入力点Fが垂直運動するとき、出力点EがXY平面内を運動する機構を表す<sup>(2)</sup>。

**3.1 超弾性ヒンジを用いた場合** パンタグラフ機構内の軸受を超弾性ヒンジで置き換えて、超弾性ヒンジの設計チャートおよび設計指針<sup>(1)</sup>に基づいて、各ヒンジを含むパンタグラフ機構を設計したものが図6のパンタグラフ機構である。ヒンジ部分の拡大図も図6内に合わせて示す。図6に示す超弾性ヒンジからなるマニピュレータを小形射出成形機により、ヒンジ部にあたる形状記憶合金と節にあたるポリエチレン樹脂とを一体成形で製作し、変位拡大機構付圧電アクチュエータを用いて、開ループ制御により、点Aおよび点Fをそれぞれ水平および垂直に駆動した。このときの針先(点E)をCCDカメラを用いて計測し、点Eの水

平方方向移動時の水平方向および垂直方向移動時の垂直方向の位置繰り返し精度を求めたところ、それぞれ0.04 mmおよび0.08 mmとなった。図5に示すパンタグラフ機構の作業領域は8mm×8mm ( $S_{XE} \times S_{YE}$ )である。本機構の具体的な応用として、ハードディスク内のアームとスライダ間の接着を行う適量の接着剤を塗布する機械システムを開発した。まず、図7に示す針先だけに接着剤をつける新しい塗布方法を考案した。この方法では、塗布量の制御が針の直径(図8の場合0.3 mmを使用)の制御により可能である。この針をパンタグラフ機構の点Eの位置に取付け塗布量のばらつきを測定したところ、図8の結果を得た。これより針先だけに接着剤をつけて塗布する方法の有用性を確認した。

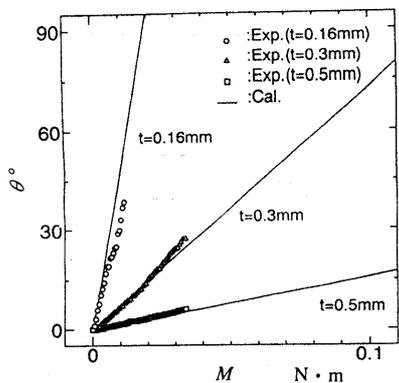


Fig. 3 Relation between bending moment and slope of superelastic hinge obtained by four-point bending hinge

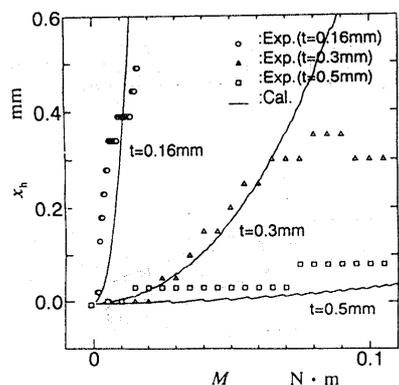


Fig. 4 Relation between bending moment and amount of movement of rotation center of superelastic hinge

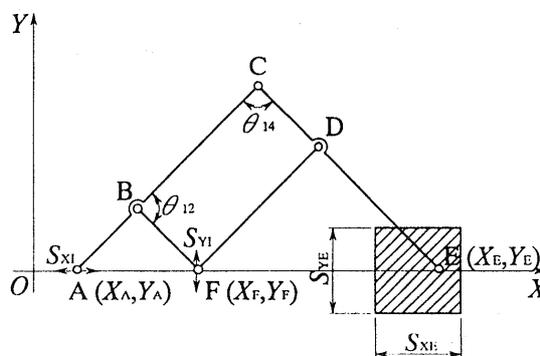


Fig. 5 Working space of pantograph mechanism

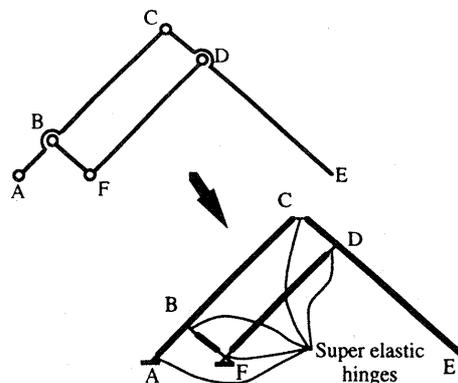


Fig. 6 Replacing a revolute pair with the superelastic hinge

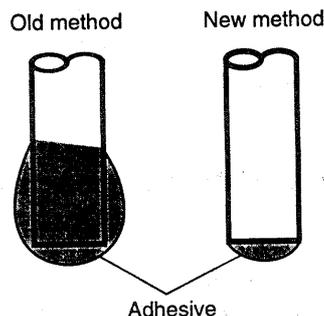


Fig. 7 Old and new methods for spreading the adhesive

3. 2 大変形弾性ヒンジを用いた場合 同一材料である大変形弾性ヒンジとリンクからなる一体化パンタグラフ機構を図9に示す<sup>(3)</sup>。材質には、高分子材料の中からポリプロピレン、ポリエチレン、ポリカーボネート、エポキシ樹脂およびABS樹脂の5種類を取りあげ、その最大弾性ひずみについて検討し、ポリプロピレンが最も大きなひずみを得られるのでここではポリプロピレンを採用した。

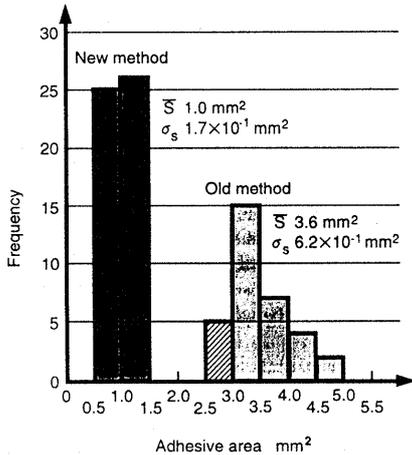


Fig. 8 Frequency distribution, which shows the difference between new and old methods for spreading amount of adhesive and its deviation

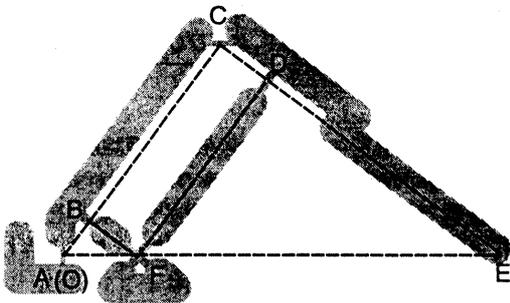


Fig. 9 Mold curing pantograph mechanism composed of large deflective elastic hinges and links with same material

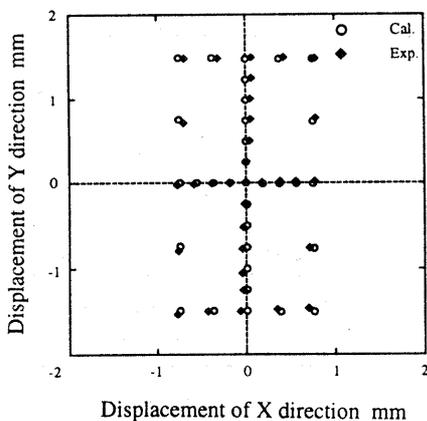


Fig. 10 Comparison between theoretical results and experimental results

理論解析を行う上で、パンタグラフ機構をヒンジとリンクの要素に分割し、各要素の節点には軸力、せん断力および曲げモーメントが作用するものとする。x方向変位をu、y方向変位をv、角変位をθとすれば、力と変位間の関係式が求められる。それを各要素について求め、機構全体の全体剛性マトリックスを作る。そして、入力変位や固定端を考慮して連立方程式を解くことにより各節点変位および出力変位を計算できる。

実験では、入力を正確に行うため、マイクロメータを一体化微小パンタグラフ機構の入力端に接続し、出力をCCDカメラで撮影し、それをビデオスコープに取り込み出力変位を測定した。

実験方法は、x方向の作業領域が±0.75mmで、変位拡大率が4なので入力は0.2mmであれば十分であり、入力変位の移動刻み幅を0.05mmとする。y方向は作業領域が±1.5mmで、拡大率は5より入力は0.3mmで、刻み幅0.05mmで行う。また、作業領域の境界をx方向へ刻み幅0.1mm、y方向は0.15mm移動し、作業領域の境界での出力の様子を見る。

表1に示すパラメータを有するパンタグラフ機構の出力点Eの変位について、理論解析結果および実験結果を図10に示す。

実験結果を見ると、ほぼ線形的に出力していて、入出力変位関係が線形であるパンタグラフ機構の特徴が出ている。機構への入力変位が、x方向入力 $x_{in} = \pm 0.2\text{mm}$ 、y方向入力 $y_{in} = 0.0\text{mm}$ および $x_{in} = 0.0$ 、 $y_{in} = \pm 0.3\text{mm}$ のときの出力をそれぞれ表2に示す。同じ入力変位を回転対偶からなるパンタグラフ機構に与えたときは、 $x_{in} = \pm 0.2\text{mm}$ 、 $y_{in} = 0.0\text{mm}$ のとき、 $x_{out} = \pm 0.8\text{mm}$ 、 $y_{out} = 0.0\text{mm}$ であり、 $x_{in} = 0.0\text{mm}$ 、 $y_{in} = \pm 0.3\text{mm}$ のとき、 $x_{out} = 0.0\text{mm}$ 、 $y_{out} = \pm 1.5\text{mm}$ であり、それらの相対誤差を括弧内の数字として表す。このパンタグラフ機構を先の微小接着用機械システムとして使用する上では、小さな相対誤差であると考えられる。

#### 4. 大変形弾性ヒンジの 三次元マイクロ運動変換機構への応用

前章では、ヒンジが節の中心線とほぼ同じ場所に位置する機構について論じた。このヒンジの位置を節の厚さ方向に移動させるとたいへん有用な機構が得られる。以下、そのような機構について述べる。

本章では、シリコン基板上(XY平面上)のアクチュエータからの入力運動を基板平面外(Z方向)の出力運動として取り出すための三次元マイクロ運動変換機構を提案し、その特性を論じる<sup>(4)</sup>。

##### 4. 1 数の総合に基づく形式の決定および運動変換機構の提案

式(1)は、低次対偶で構成される平面機構の自由度の式を表す。

$$M = 3(N - 1) - 2J_1 - J_2 \quad (1)$$

ここに、MおよびNはそれぞれ機構の自由度および節数を表す。機構内の $J_i$ は自由度iの対偶の数を表す。今 $J_2 = 0$ として、 $M = 2$ の場合を式(1)に適用すると、Nと $J_1$ の関係式が得られ、この式を満たすNと $J_1$ の組は次式のように

無限に存在する。

$$(N, J_1) = (3, 2), (5, 5), (7, 8), \dots \quad (2)$$

このうち、 $N=5$ 、 $J_1=5$ の場合を考え、しかも $J_1=5$ の内容を回転対偶の数3、直進対偶の数2とすると、図11に示

Table 1 Parameters of pantograph mechanism

Representative link length $l_0$ ( $=AE$ )	30 mm
Horizontal magnification factor $k_x$	4
Width of mechanism $b_h, b_l$	4.0 mm
Thickness of link $t_l$	2.0 mm
Thickness of hinge $t_h$	0.10 mm
Length of hinge $l_h$	1.0 mm

Table 2 Output errors of mold curing pantograph mechanism

Input mm		Output mm	
$x_{in}$	$y_{in}$	$X_{out}$	$Y_{out}$
-0.2	0.0	-0.775 (3.13 %)	-0.027
+0.2	0.0	0.766 (4.25 %)	0.021
0.0	+0.3	0.068	1.51 (0.33 %)
0.0	-0.3	-0.068	1.50 (0.0 %)

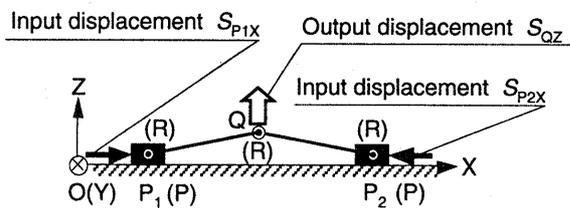


Fig. 11 2-DOF 5-link PRRRP mechanism

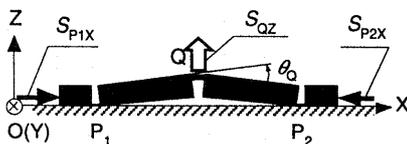


Fig. 12 Three-dimensional motion convert mechanism with large deflective elastic hinges

Table 3 Mechanism parameters of macromodel (Unit: mm)

$L_0 = 10.5$	$l_p = 1.0$
$k = 0.2$	$L_z = 2.0$
$b = 3.0$	$t = 0.2$

す2自由度5節PRRRP機構が得られる。この機構を半導体プロセスで製作することを前提として、回転対偶(R)を大変形弾性ヒンジに置き換えたモデルを図12に示す。このとき、機構にオフセットを与えるため三つの弾性ヒンジを節中心線に対して下上下下に互い違いに配することで、基板平面内のアクチュエータからの相反する方向からの直線入力運動をZ方向の出力運動として取り出すことが可能となっている。また、入力運動が同一方向の場合には、出力運動は水平運動として取り出せる運動変換機構となっている。さらに、点 $P_1, P_2$ および $Q$ は三角形を構成するために剛性が高いことが期待される。

#### 4.2 三次元マイクロ運動変換機構の理論解析および実験

4.2.1 理論解析 前章の理論解析式を用いて、表3の機構パラメータを持つマクロモデルに対して理論解析を行った。表3の数値は、ヒンジ長さ $l_p$ と節の長さ $L_0$ の比は1:10、ヒンジ厚さ $t$ と長さ $l_p$ の比は1:5を想定したものである。なお材質はポリエチレンを想定し、ヤング率は実際の引張試験から、1.24 GPaとした。

図13および図14の実線は上述の理論による解析結果の一部であり、それぞれ入力変位 $S_x$ と出力変位 $S_z$ との関係、

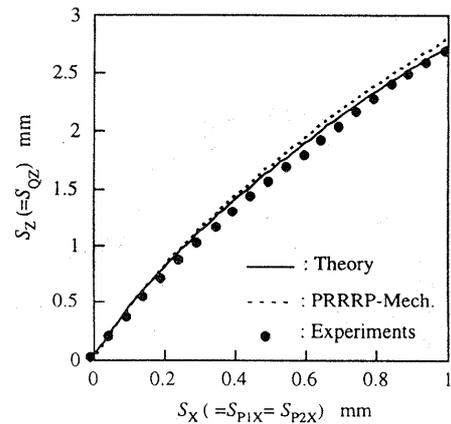


Fig. 13 Relationship between input displacement and output displacement

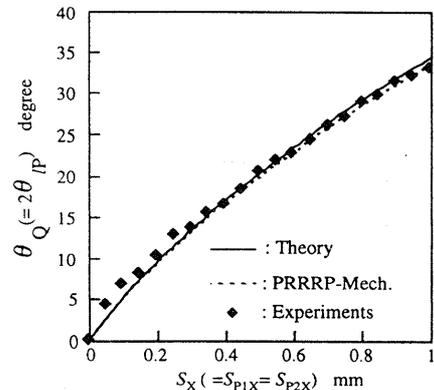


Fig. 14 Relationship between input displacement and angular displacement of link

入力変位 $S_x$ と節間の相対角変位 $\theta_Q$ との関係を表している。また、破線は回転対偶からなるPRRRP機構の変位解析結果を表す。

**4. 2. 2 実験および検討** ポリエチレンを素材として小形射出成形機を用いた表3の諸元を有するマクロモデルを試作した。この試作モデルを用いて、出力点Qの変位をCCDカメラでコンピュータに取り込み、それを画像処理することで出力点Qの変位および節の角変位を測定した。それぞれの結果を図13および図14の●印および◆印で表す。この実験結果とPRRRP機構とした場合の理論結果とを比較すると両者は一致しておらず、これはヒンジでは運動途中でその回転中心が変動することを意味している。また、実験結果と4.2.1で求めた大たわみ非線形曲げ理論による理論結果はほぼ一致しており、理論式の妥当性が確認される。

**4. 3 運動変換機構の入出力特性・力特性** 4.2の結果から理論の妥当性が確認されたので、理論式を用いて、点Qに作用する負荷の有無を含めて、機構の入出力変位・力特性について検討する。図15および図16は、それぞれヒンジの厚さ $t$  および長さ $l_p$  をパラメータとしたときの入力変位 $S_x$ と出力変位 $S_z$ 間の関係を表す。図中、×印は弾性限界を表し、その位置が各パラメータのときの最大変位を表す。

図17および図18は点Qに負荷が作用するときの理論解析

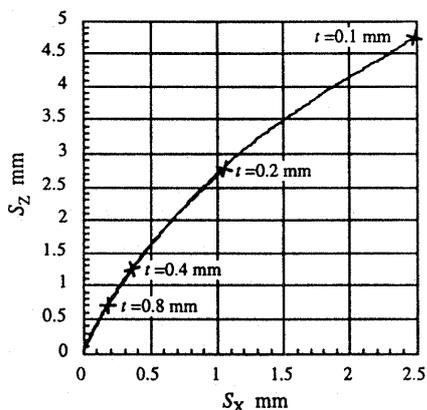


Fig. 15 Relationship between input displacement  $S_x$  and output displacement  $S_z$  when hinge thickness  $t$  is varied without loads

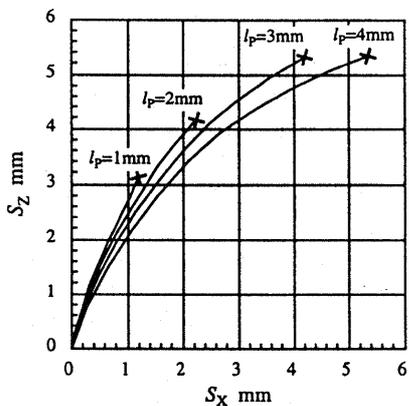


Fig. 16 Relationship between input displacement  $S_x$  and output displacement  $S_z$  when hinge length  $l_p$  is varied without loads

結果を表す。図17は点Qに力 $F_z$ が作用する場合と作用しない場合に対する入出力変位関係を表す。この結果から、負荷が零から0.49Nの範囲では、負荷の有る場合の入出力変位関係は無負荷の場合のそれとほぼ同じであることがわかった。これは、点 $P_1$ ,  $P_2$ およびQが三角形を構成しており高い剛性を有していることに起因すると考えられる。また、約100Hzまでは共振のないことを加振実験により確認している。図18は、点Qに作用する力 $F_z$ をパラメータとして入力変位 $S_x$ に対する作用力 $F_x$ を表し、負荷の大小に対する力特性が把握される。図19は、東京工業大学・創造研究棟・真空加工システム室において、半導体微細加工技術を用いて製作した機構を示す。

**5. 表面実装システム用 マルチ並列配置パンタグラフ機構への応用**

**5. 1 マルチ並列配置パンタグラフ機構からなる表面実装システムの提案**

現在の実装システムは実装作業の高速化を実現するため高い機構剛性を必要とし、装置が大形化する傾向にある。そこで、小形マニピュレータを作業空間内に高密度に多数配置することで現状の生産量を保ちながら装置の小形化を図ることが可能と考え、図20に示す実装システムを提案する<sup>(6)</sup>。この実装システムでは、並

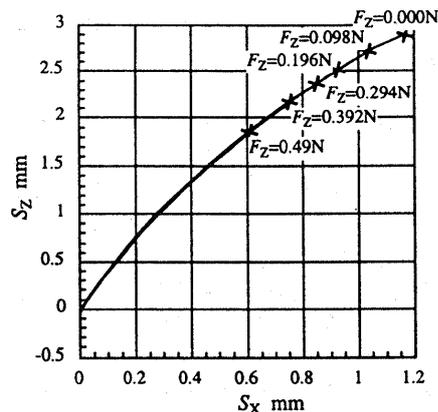


Fig. 17 Relationship between input displacement  $S_x$  and output displacement  $S_z$  when an acting force  $F_z$  is varied

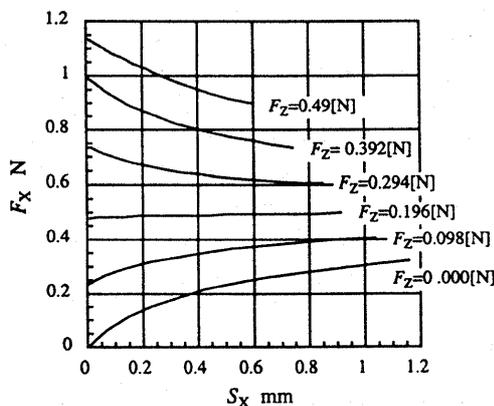


Fig. 18 Relationship between input displacement  $S_x$  and acting force  $F_x$  when an acting force  $F_z$  is unloaded or loaded

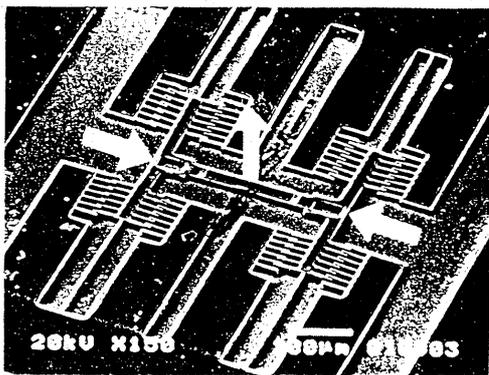


Fig. 19 An example of micromodel manufactured by several semiconductor manufacturing process

列に配置された複数の小形マニピュレータがベルト上を流れる基板に対して同時に部品の組付を行う。マニピュレータには3章で述べた小形化に有利な一体化パンタグラフ機構を用いる。このマニピュレータを用いると、複数同時作業により作業空間におけるアーム同士の干渉を避けることができる。なお材料としては、高分子材料の中でも特に大きなひずみが得られ、成形の容易なポリプロピレンを使用した。パンタグラフ機構の変位拡大率はX方向入力に対して4倍、Z方向入力に対して5倍とする。ヒンジ部は長さ $200\mu\text{m}$ 、厚さは金型の調節により $30\mu\text{m}$ から $300\mu\text{m}$ まで調節可能とした。また、リンク部の厚さおよび機構の幅は $5\text{mm}$ である。

### 5. 2 大変形ヒンジからなる一体化パンタグラフ機構の疲労試験

試作した一体化パンタグラフ機構の疲労試験を行った。試験機はスライダクランク機構による振動発生機、レーザー変位計およびオシロスコープによって構成される。ヒンジ厚さの異なる一体化パンタグラフ機構について試験を行い、入力の加振周波数とヒンジ部が破断するまでの繰返し数との関係を求めた。パンタグラフ機構は $10^6$ 回以上の繰返しにおいても破壊しないヒンジの厚さと入力運動の繰返し周波数の組み合わせのあることを見出した。

### 5. 3 一体化パンタグラフ機構の入出力変位特性

試作した一体化パンタグラフ機構を実装システムの小形マニピュレータとして用いる場合の評価を行うため、実験装置を試作し入出力変位特性を求めた。実験に用いたパンタグラフ機構のヒンジ部の長さは $200\mu\text{m}$ 、厚さは $180\mu\text{m}$ とした。実験はリニアステッピングモータによりX方向、Z方向それぞれに変位入力を与え、出力端をCCDカメラで撮影し、画像処理装置により変位を測定した。実装作業を想定した軌跡を繰返し往復させ、両端点 $E_1$ および $E_2$ における位置繰返し精度を測定した。15回の測定で $E_1$ 点における位置繰返し精度は $\pm 9\mu\text{m}$ 、 $E_2$ 点では $\pm 11\mu\text{m}$ であった。部品の検出、認識、把持、回転、装着、不良品排出などに要する時間をそれぞれ現状のシステムと同じ $0.1$ 秒とすれば、小形マニピュレータの部品装着時間は $0.8$ 秒となり、8台以上のマニピュレータの同時作業により現状の実装機と同等以上の生産量を実現することが可能となることがわかった。

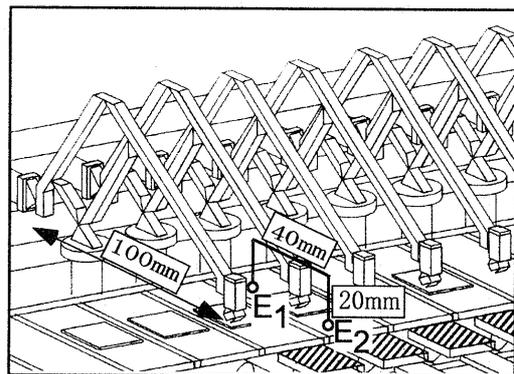


Fig. 20 Proposed new surface mount system

## 6. 結 言

本報告では、軸と穴から構成される対偶ではなく一枚の板である大変形弾性ヒンジについて論じるとともに、そのマイクロメカニズムへの応用について述べた。

得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 形状記憶合金からなる超弾性ヒンジの特性を明らかにし、そのヒンジを含むマイクロパンタグラフ機構およびヒンジと節の一体化マイクロパンタグラフ機構の入出力変位特性を明らかにした。

(2) マイクロ接着をマイクロパンタグラフ機構の具体的な応用例として取り上げ、微小接着剤の適量を塗布する機械システムについて論じた。

(3) 機構の自由度、機械運動学の立場から、大変形弾性ヒンジからなる三次元マイクロ運動変換機構を提案し、基板平面内の水平運動を基板に垂直な運動に変換する機構について、入出力変位特性を理論的ならびに実験的に検討し、理論式の妥当性を確認するとともに、入出力変位特性・力特性を明らかにした。

(4) 複数の並列配置されたヒンジとリンクの高分子性一体化パンタグラフ機構からなる新しい表面実装機械システムを提案し、その入出力変位特性を明らかにした。

## 文 献

- (1) 堀江三喜男, 野崎貴司, 池上皓三, 小林太: 超弾性ヒンジの設計システムとその微小マニピュレータへの応用, 日本機械学会論文集, 61-586, C(1995), 2630-2635.
- (2) 堀江三喜男, 小林太, 池上皓三, 岡部信次: 超弾性ヒンジからなるパンタグラフ機構の特性解析; 日本機械学会論文集(C編), 62, [598] 2403~2408(1996)
- (3) 堀江三喜男, 神谷大揮, 高山大樹, 池上皓三: 大変形弾性ヒンジとリンクの一体化微小パンタグラフ機構の研究; 日本機械学会機素潤滑設計部門100周年記念講演会(IMPT-100)講演論文集, [97-14], 719-722(1997)
- (4) Mikio HORIE, Daiki KAMIYA, and Kozo IKEGAMI: Characteristic Analysis of Basic Mechanisms with Large Deflective Elastic Hinges for Three-Dimensional Micro-mechanisms; Proc. of SPIE, Micromachined Devices and Components III, 3224, 332-343(1997)
- (5) 堀江三喜男, 内田亨, 神谷大揮: 小形実装システムのための大変形ヒンジからなるパンタグラフ機構, 日本機械学会・年次大会講演論文集, V, [99-1], 375~376(1999)