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*

堀江 三喜男^{*1}, 内田 亨^{*2}, 神谷 大揮^{*1}A Pantograph Mechanism with Large-deflective Hinges
for Miniature Surface Mount SystemsMikio HORIE^{*3}, Toru UCHIDA, and Daiki KAMIYA^{*3} Tokyo Institute of Technology, Precision and Intelligence, Laboratory,
4259, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 Japan

In this paper, a new surface mount system with parallel arrangement miniature manipulators is proposed for use in system downsizing. The miniature manipulator consists of a molded pantograph mechanism, which is composed of large deflective hinges and links, both made of the same materials. In order to create such systems, first, durability of the pantograph mechanism is to be confirmed by fatigue tests. Next, 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: Large-deflective Hinge, Molded Pantograph Mechanism, Fatigue, Surface Mount System, Machine Element, High Polymer Materials

1. 緒 言

近年, 携帯電話に代表される携帯用電子機器は, 小形化に伴い急速な普及をとげ, 生産が需要に追いついていないのが現状である. そこで, 基板実装の現場においては実装システムのさらなる高速化と小形化が強く望まれている. 従来の実装システム開発はシステムの高速化を中心に行われてきたが, これに伴う装置の大形化により, 現在ではこれ以上の高速化が難しくなりつつある. そこで今後は, 個々の装置を小形化し, 空間内に多くの装置を配置することで生産量を増加させることが重要であると思われる.

本研究では, まず, ヒンジとリンクの一体化パンタグラフ機構により小形化されたマニピュレータ群から構成される実装システムを提案する. ついで, 微小で大きな角度変位の得られる大変形ヒンジを一体化パンタグラフ機構に用いる場合の繰り返し変位入力に対する耐久性を確認する. さらに, 試作した一体化パンタ

グラフ機構の入出力変位特性を実験により明らかにし, 提案した実装システムによるシステム小形化の可能性について論じる.

2. 小形マニピュレータ群から構成される
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. そこで本研究では, 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,

Fig. 1 Proposed surface mount system

* 原稿受付 1999年11月4日.

^{*1} 東京工業大学大学院総合理工学研究科/精密工学研究所(学内兼務)(〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259).^{*2} 東京工業大学大学院.

E-mail: mhorie@pi.titech.ac.jp

図1に示す実装システムを提案する。この実装システムでは、並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けを行う。マニピュレータの小形化には高分子材料からなる一体化パンタグラフ機構を用いる。一体化パンタグラフ機構は射出成形により、リンク部とヒンジ部を一体成形するため組立の必要がなく、小形化した場合でも製作が容易である。また、従来形のマニピュレータがアクチュエータを動節上に配置するため、小形化が困難であるのに対して、一体化パンタグラフ機構ではアクチュエータを静止節上に配置するため、アーム部の小形・軽量化が可能となる。このため、複数のマニピュレータによる同時作業において、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。

一体化パンタグラフ機構は対偶部に板ばね状のヒンジを用い、材料の変形を利用して角度変位を得る。これまでに製作された一体化パンタグラフ機構⁽¹⁾は機構の動作によりヒンジ表面に生じるひずみを弾性域に限定して使用しているため、ヒンジ部で得られる角度変位が小さく、機構の大きさに対して大きな作業領域が得られないという問題点があった。ヒンジ部で大きな角度変位を得るためにはヒンジの厚さに対して長さを長くとり、ヒンジのアスペクト比を大きくすれば良い。ところが、このようなヒンジは、パンタグラフ機構の機構剛性を低下させ、変位拡大機構としての入出力変位関係を悪化させる可能性がある。そこで本研究では、弾性域を越えるひずみを生じさせることで大きな角度変位を得る大変形ヒンジを試作する。さらに、一体化パンタグラフ機構のヒンジ部として大変形ヒンジを用いる場合の繰返し変位入力に対する耐久性を確認する。図2の上図は、ひずみを弾性域に限定して使用している従来の大変形弾性ヒンジを表し、下図は本

研究で取り上げるアスペクト比の小さな大変形ヒンジの一部を表す。マニピュレータの作業対象を小形電子機器の基板実装とし、その基板寸法から機構の作業領域を $50 \times 40 \text{ mm}$ と定め、作業領域の境界におけるヒンジ部の角度変位が 45° となるように機構寸法を決定する。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 mm とする。試作した一体化パンタグラフ機構の形状と寸法を図3に示す。図2の下図に対応する大変形ヒンジは、図3中の点 A, B, C, D, F_1 および F_2 すべてにある。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⁽²⁾⁽³⁾。

3. 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

大変形ヒンジは材料に弾性域を越えるひずみを生じさせることで大きな角度変位を得るものであり、パンタグラフ機構のヒンジ部として用いる場合、繰返し大きな変形をするような使用状態においては疲労により材料が破壊する可能性がある。そこで図4に示す装置により、試作した一体化パンタグラフ機構の疲労試験

Fig. 3 Dimension of pantograph mechanism

Fig. 2 Dimension of large-deflective elastic hinge and large-deflective hinge

Fig. 4 Experimental apparatus

Table 1 Result of fatigue test

Group	A					B			
Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hinge thickness [μm]	60	90	90	90	100	110	110	115	120
Input frequency [Hz]	19.4	15	15	20	22.2	5	20	18	15
Number of cycles	100	—	153900	3140	100	—	3900	30600	—
Failed hinge	D	—	C,D	B,C,D	F ₂ ,D	—	C,D	D	—

Group	B				C			
Exp. No.	10	11	12	13	14	15	16	17
Hinge thickness [μm]	125	125	130	135	150	165	225	260
Input frequency [Hz]	17	20	26	20	26.8	17	10	20
Number of cycles	—	6040	100	8600	100	—	—	—
Failed hinge	—	F ₂ ,D	F ₂ ,D	A	F ₂ ,D	—	—	—

を行った。試験後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。試験は振動発生機によりパンタグラフ機構の X 方向入力部に振幅 7.5 mm の正弦波状変位入力を与え，入出力端の変位をレーザー変位計により測定して行う。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求めた。加振周波数の設定は入力変位の波形を観察し，モータへの入力電圧を調節することで行ったが，高い周波数での試験は非常に短い時間で破断が起こり，繰返し数の測定が困難であった。そこで，入力の加振周波数を 5 Hz から毎秒 1 Hz 程度で徐々に増加させ，ヒンジ部が破断する周波数を測定し，この周波数を 100 回の繰返しで破域する周波数とした。各試験における一体化パンタグラフ機構のヒンジ部の厚さ，加振周波数，破壊繰返し数，および破断したヒンジ部を表 1 に示す。

表 1 中の—はパンタグラフ機構が 10^6 回の繰返しにおいても破断しなかったことを表す。ヒンジ部の名称は図 2 に示すとおりである。はじめに，入出力変位の応答波形を図 5 に示す。図 5(a) に示すパンタグラフ機構は 10^6 回の繰返しにおいても破壊せず，繰返しによる波形の変化は見られなかった。図 5(b) に示すパンタグラフ機構は 30 600 回の繰返しで破壊したもので，繰返し数に伴い出力変位の波形に乱れが見られる。これは，繰返しによりヒンジ部が伸びたことによるものと考えられる。破壊したパンタグラフ機構ではすべて，このような波形の乱れが確認された。次に，試験に使用したパンタグラフ機構をヒンジ部の厚さにより表 1 に示す三つのグループに分類し，入力変位の加振周波数と破壊繰返し数との関係から，各グループのパンタグラフ機構について 10^6 回の繰返し使用に耐え得る周波数を求めた。その結果を図 6 に示す。A 群のパンタグラフ機構では 15 Hz，B 群では 17.5 Hz，C

(a) Exp. No. 16

(b) Exp. No. 8

Fig. 5 Waves of input and output displacement

群では 20 Hz であった。試験を行った範囲内では，ヒンジ部の厚さが厚いほど，高速での使用に耐え得ることがわかった。また，表 1 からパンタグラフ機構の破壊は実験 B の 13 を除いてすべてヒンジ部 D で起こっている。そこで，表 1 において 10^6 回の試験で破壊しなかったヒンジ部 D を顕微鏡観察した結果，厚さ 200 μm 以上のヒンジでは，小さな裂が生じていたものの，残っているヒンジ部の厚さはいずれの試料も 180 μm であった。また，その変形状態は両振り曲げ変形状態ではなく，ヒンジ部のアスペクト比が小さいことならびに高分子材料であることに起因する複雑な変形状態となっていた。そこで，本研究では，表 1 中の周波数とヒンジ厚さをもとに，簡易的に，パンタグラフ機構の運動時にヒンジ部 D に生じる作用力を計算で求め，これをヒンジ部 D の断面積(ヒンジ厚さ $t \times 5 \text{ mm}$)で除した値を等価応力とし，この等価応力と破壊までの繰返し回数との関係を図 7 に示す。図 7 中

(a) Group A ($t \leq 100 \mu\text{m}$) (b) Group B ($100 < t \leq 150 \mu\text{m}$) (c) Group C ($150 \leq t \mu\text{m}$)

Fig. 6 Results of fatigue test for frequency characteristics

のデータの内、左から 10 個のデータ(破壊した試料データ)をもとに、最小二乗近似して求めた回帰直線 $\sigma = -0.78 \log N + 5.97$ を図 7 内に細実線で示す。図中の各記号は図 6 における分類(A 群, B 群, および C 群)に対応する。さらに、図 6 および図 7 中の記号 $\rightarrow$ はパンタグラフ機構が 10^6 回の繰返しにおいても破壊せず、その時点で試験を終了したことを表す。図 7 は通常の疲労試験の S - N 曲線と似た傾向を示している。図 7 中の細実線から、本実験では、 10^6 サイクルに対応する破壊応力は約 1.3 MPa と考えられる。

Fig. 7 S - N curve

Fig. 8 Experimental apparatus

4. 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、図 8 に示す実験装置により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プモータにより 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。入力に使用したステップモータは位置決め精度 $\pm 10 \mu\text{m}$ 、ステップ分解能 $1.02 \mu\text{m}$ である。また、この実験における出力変位の測定分解能は $10 \mu\text{m}$ である。入力変位は図 9 に示すように X 軸, Z 軸, および作業領域の境界をたどるように 1 mm 間隔で与えた。はじめに、 Z 方向入力部を固定し、 X 方向入力のみを与えた場合の出力変位誤差を図 10 に示す。誤差はパンタグラフ機構を理想的な変位拡大機構と考えた場合の出力変位からのずれとして求めた。記号 $\bigcirc$ は X 方向の変位誤差を、

Fig. 9 Input displacement

(a) $Z_{in}=0$ (b) $Z_{in}=4$ (c) $Z_{in}=-4$ Fig. 10 Output displacement error
(Moving direction is horizontal)

$\triangle$ は Z 方向の変位誤差を, $\bullet$ は誤差の絶対値 $\sqrt{\circ^2 + \triangle^2}$ を表す. 三つのグラフは X 軸および上下の動作領域の境界上を動かした場合についての測定結

(a) $X_{in}=0$ (b) $X_{in}=6.25$ (c) $X_{in}=-6.25$ Fig. 11 Output displacement error
(Moving direction is vertical) Fig. 12 Experimental trajectory
(Suppose surface mount job)

果を表す。次に、 X 方向入力部を固定し、 Z 方向入力のみを与えた場合の出力変位誤差を図 11 に示す。同様に、 Z 軸および作業領域の境界上を動かした場合について測定を行った。また、測定は一つの線上について $+$ 方向と $-$ 方向への移動について行い、図 10 および図 11 における二つの測定点の縦軸方向の差がこのときのヒステリシス誤差を表す。この結果から X 方向、 Z 方向とも変位拡大率が設計値よりもわずかに低いこと、変位誤差はヒンジ部における角度変位が大きくなる作業領域境界付近で大きくなることなどが得られた。この一体化パンタグラフ機構の出力変位誤差は最大 $340\text{ }\mu\text{m}$ であり、ヒステリシス誤差は最大 $130\text{ }\mu\text{m}$ であった。また、図 12 に示す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 $\pm 9\text{ }\mu\text{m}$ 、 E_2 点では $\pm 11\text{ }\mu\text{m}$ であった。

このパンタグラフ機構を実装システムとして用いる場合、位置繰返し精度は極めて高く、現状の実装機の位置決め精度が $\pm 100\text{ }\mu\text{m}$ であることを考えれば、開ループ制御で十分に使用可能であると考えられる。また、出力端に最大 0.5 gf の電子部品を把持すると仮定すれば、ヒンジ部の疲労限度から基板上に部品を搬送するのに要する時間は 0.1 秒となる。また、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。試作したパンタグラフ機構は極めて小形で、現状の実装機のロータリヘッド部に対して 0.1% 以下の空間しか占有せず、適当なアクチュエータを選定すれば複数台のマニピュレータを配置する場合でも、十分

に現状の実装システムを小形化する可能性があることが示された。

5. 結 言

本研究は実装システム小形化のため、小形マニピュレータ群から構成される実装システムを提案し、その小形マニピュレータとして用いる大変形ヒンジからなる一体化パンタグラフ機構を試作し、その耐久性および入出力変位特性を明らかにしたものである。本研究により得られたおもな結果は以下のとおりである。

(1) 長さ $200\text{ }\mu\text{m}$ 、厚さ $180\text{ }\mu\text{m}$ 、幅 5 mm の大変形ヒンジからなる一体化パンタグラフ機構は疲労試験において 10^6 回の繰返し変位入力に対しても壊れなかった。この試験でヒンジに与えた角度変位は 45° である。

(2) この大変形ヒンジからなる一体化パンタグラフ機構は $50\times 40\text{ mm}$ の作業領域において出力変位誤差 $340\text{ }\mu\text{m}$ 、ヒステリシス誤差 $130\text{ }\mu\text{m}$ であることを明らかにした。

(3) 実際の実装作業を想定した位置決め実験において、この一体化パンタグラフ機構の位置繰返し精度は $\pm 11\text{ }\mu\text{m}$ であることを明らかにした。この結果から、この一体化パンタグラフ機構を実装機として用いる場合の評価を行い、提案したシステムによる実装システム小形化の可能性を示した。

文 献

- (1) 堀江三喜男・高山大樹・池上皓三, 大変形ヒンジとリンクの一体化微小マニピュレータに関する研究, 日本機械学会第 73 期全国大会講演論文集 IV, 95-10 (1995), 339-340.
- (2) 根本紀夫・高原淳, 高分子学会・編集, 高分子の力学物性, (1996), 67-96, 共立出版.
- (3) 金丸競, 高分子材料概説一新版一, (1981), 233-284, 日刊工業新聞社.