

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 26 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760183

研究課題名（和文）チップ部品実装用自走式精密位置決め機構の開発

研究課題名（英文）Development of holonomic and omnidirectional precise inchworm mechanism for surface chip mounting technology

研究代表者

瀧脇 大海（FUCHIWAKI OHMI）

横浜国立大学・学際プロジェクト研究センター・特任教員（助教）

研究者番号：20377021

研究成果の概要（和文）：本研究では、平面上の XYθ の独立 3 自由度を有する小型精密自走機構を、チップ部品の実装作業に応用する技術を開発し、次の成果を得た。①液架橋力によりチップ部品をピック&ブレースする手法の可能性を示唆した。②電磁石の磁力を 1.5 倍向上し、速度、再現性を向上した。③圧電アクチュエーターの最適波形、エンコーダ、PID 制御を組み合わせ、30μm までの位置決め範囲で、誤差 0.05μm、整定時間 50ms を実現した。④既存技術に比べ、発生振動、電力、サイズを三桁低減できる新技術を提示した。

以上から、精密自走機構、液架橋力によるピック&ブレース手法を組み合わせれば、作業ツール、携帯基盤の自在配置が可能な作業システムが構築可能であることを示唆した。

研究成果の概要（英文）：Purpose of this research is to develop surface mounting technology used by precise 3 DOF omnidirectional inchworm mobile mechanism. Achievements of this study are summarized as below, (1) Demonstration of pick & place method used by liquid bridging force. (2) We have achieved improvement of the electromagnetic force to increase both of maximum velocity and positioning accuracy. (3) We have studied transient response of the mechanism and calculated optimal shape of the displacement of the piezoelectric actuators. We have also developed FF/FB control to get 0.05μm positioning resolution for the mechanism in 1 axis. In experiments, we get the settling time down to 0.05s when the target position is less than 30μm. We have also checked that the mechanism has good positioning repeatability, i.e. 3σ of final position is 0.09μm and average CV is 0.5%. (4) We show our method has good feasibility to decrease vibration, energy, size down to 1/1000 of conventional methods.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：精密機械システム、コンパクト生産システム、独立三自由度、圧電アクチュエーター、電磁石、表面実装技術、FF/FB 制御、過渡特性

1. 研究開始当初の背景

(1)

近年、MEMS デバイス、0402 チップ部品 ($400\mu\text{m}\times 200\mu\text{m}$) に代表されるように、超小型部品が急激に増加している。一方、既存のチップマウンタは、単軸ステージを組み合わせる構成のため、稼動部が 100kg に達する。そのため、繰返し位置決め動作の際に発生する振動のための除振装置、スペースが必要になり、消費エネルギーの増大が避けられない。リニアステージは固定して使用されるため、作業ツールの配置換えが困難であり、変量多品種に対する柔軟性に欠ける。

(2)

現在のチップ部品のピック&プレース手法は、空気を吸い込む吸着ノズルによりピックアップし、プレースする際は、予め基盤に塗られたペーストハンダとチップ部品底面とのラプラス圧によりなされている。今後、チップ部品はますます小型化することは確実である。小型になるほど静電気力の影響を強く受けるため、現在の吸着法では、静電気力の影響を回避することが困難である。空気で吸着するためには、チップ部品の上面は平坦であることが必要であり、複雑形状の微小部品をピックアップすることができない。

2. 研究の目的

本研究室では、直動三軸ステージと比較して三桁小型軽量のホロミック型全方向精密自走機構の協調作業により、変量多品種、省スペース、低コスト、省エネルギー、低振動を特長とする小型デバイス実装用“フレキシブル・マイクロロボット・ファクトリ”の研究を目指している。

本研究では、その要素技術の研究開発として、二つの研究課題を提案している。

(1) 50g と超軽量の全方向小型精密自走機構を独立三自由度で FF/FB 制御することで高速位置決め動作を実現する。

(2) チップ部品の液体を使った実装ツールの開発も行い、チップ部品の実装の際の、発生振動、消費電力、装置サイズを 1000 分の 1 に低減できる新しい実装技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 精密自走機構の FF/FB 制御

①電磁石の最適設計

磁気回路解析により電磁石の最適設計を行う。その際、できる限り大きな磁力が得られるように、電磁石コアに使用する磁性材を最

適設計する。磁力を向上することで、速度向上、再現性向上を行うことができる。

②超精密位置決め装置の開発

50nm の分解能をもつ光学式リニアエンコーダ (Mercury 3500, GSI/マイクロ E) により機構の位置を精密計測するシステムを開発する。

③モデル化

6つの圧電アクチュエータにより一方の電磁石を固定し、他方を調和振動させるモデルと等価な一軸のモデルを定義する。

④過渡特性の研究と定数の同定

吸着していない電磁石の時間 v_s 変位の過渡特性を調査するために、ステップ上の変位に対する電磁石の変位の時間応答を調べる。

(ステップ応答の調査) ④で定義したモデルで使用している圧電アクチュエータのバネ定数、ダンパー定数を同定する。

⑤最適波形の導出

③、④から得られた力学モデルを用いて、圧電アクチュエータの入力電圧の最適波形を計算する。

⑥FF 制御

⑤で得られた最適波形を実際に機構に入力することで、パラメータの微調整を行う。また、最適波形を定量評価するために、平均到達距離、平均誤差だけでなく、目標値に対する位置決め誤差が 2% 以内に収まるまでの時間 (整定時間) を取得する。また、位置決め精度を評価するため、 10 回同じ波形を入力した際の最終位置のばらつきを 3σ で評価する。

⑦FF/FB 制御

⑥の FF 制御システムに PID 制御を加えて、整定時間、位置決め誤差を取得する。

(2) 液架橋力によるピック&プレース

①液架橋力のモデル化

ニードル、チップ部品、基盤の間に働く液架橋力をモデル化し、液滴半径、接触角、上下面の間の距離、上下面の材質などをパラメータにして、上下面の間に働くラプラス圧を定式化する。

②ピック&プレース装置の開発

圧電リニアモータにより、ニードルを粗微動できる装置を開発し、光学式リニアエンコーダにより FB 制御することで、ニードルを $0.5\mu\text{m}$ の位置決め分解能、 5mm 以上のストロークで位置決めできる装置を開発する。軽

量な圧電リニアモータの使用により、(1)の精密自走機構に搭載することできる小型サイズ(4cm立法)とする。

③液架橋力によるピック&プレース実験

図1に示すように、②の装置を用いて、チップ部品、鋼球、砂鉄など様々なサイズ、形状の微小物のピック&プレース実験を行う。その際、使用する液体の粘度、ニードルの速度を変更し、①のモデルと比較することで、本手法の有効性を定量評価する。

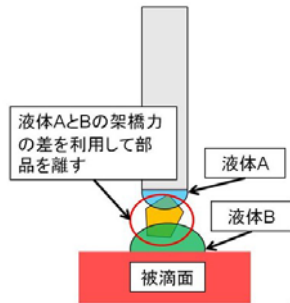


図1 液架橋力によるピック&プレース

4. 研究成果

(1) 精密自走機構のFF/FB制御

①電磁石の最適設計

図2に示すように、電磁石の最適設計を行い磁力を0.1Aの電流の時に、0.8Nから1.2Nへ向上することに成功し、速度向上、再現性向上を実現した。

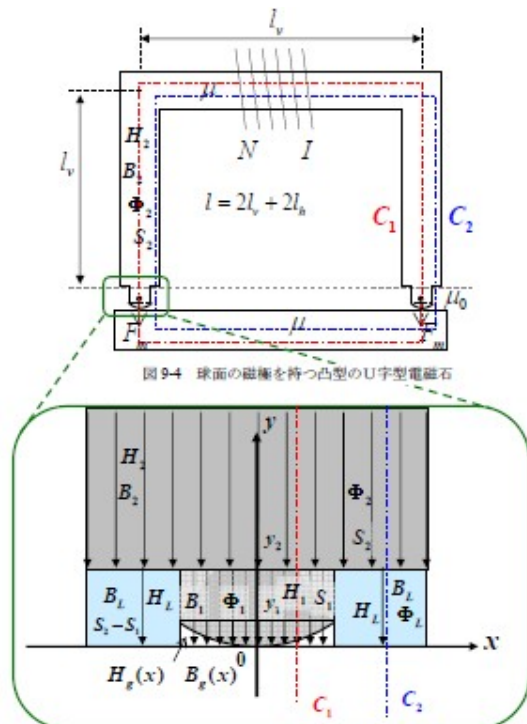


図2 電磁石の磁気回路解析

②超精密位置決め装置の開発

本機構はXY θ の独立三自由度を有する。まずはX軸のみを精密位置決めするために、Y

と θ を固定して実験を行う。図3に示すように、50nmの分解能をもつ光学式リニアエンコーダ(Mercury 3500, GSI/マイクロE)により自走機構のX軸方向の位置を精密計測するシステムを開発した。

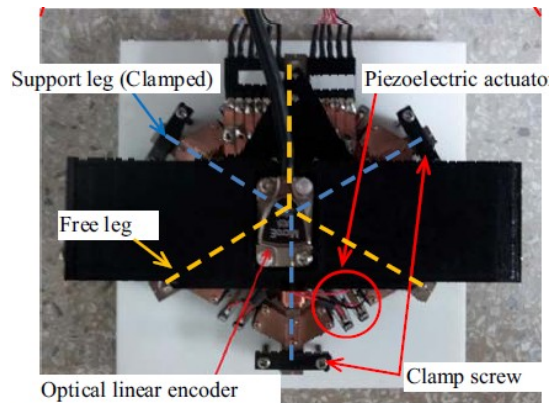


図3 精密位置決め装置

③モデル化

図4に、6つの圧電アクチュエータを、強制変位成分、せん断方向のバネ成分、伸縮方向のバネ成分、伸縮方向のダンパー成分の4つに分解し、片方の電磁石を固定し、他方を三軸に調和振動させるモデルを示す。図5にこれと等価な一軸のモデルを示す。提案した一軸モデルは、二つの線形バネ、一つの線形ダンパー、一つの強制変位で表現できたため、問題を単純化することができた。

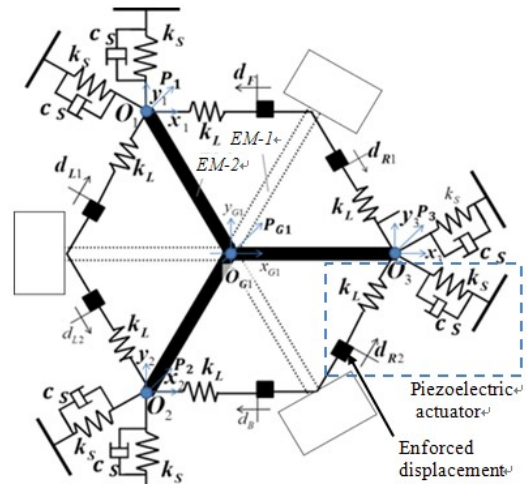


図4 三軸の調和振動モデル

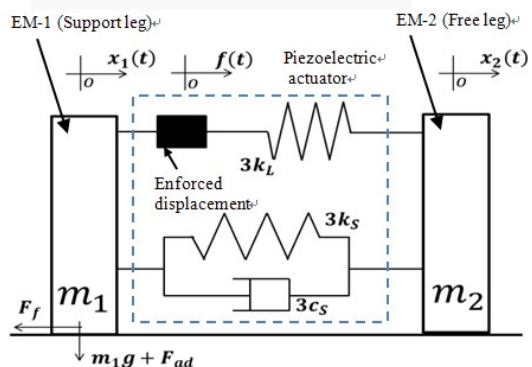


図5 一軸の調和振動モデル

④過渡特性の研究と定数の同定

図6に示すように、電磁石の時間 v s 変位の過渡特性を計測した。表1に結果を示す。せん断方向のバネ定数は伸縮方向のバネ定数に比較して誤差内に入るほど小さいため、せん断方向はダンパーのみ作用していると考えられることがわかった。

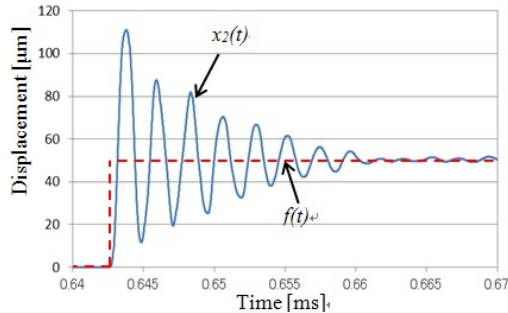


図6 ステップ応答

Symbol	Quantity (Average $\pm \sigma$)
m_1, m_2	Mass of electromagnetic leg 0.045 [kg]
$k_L + k_S$	Sum of spring constant 114700 \pm 7000 [N/m] (From step response)
k_S	Spring constant of the actuators in shear deformation Negligibly-small
k_L	Spring constant of the actuators in compression deformation 115000 [N/m] (From specification sheet)
c_S	Damping constant of the actuators in shear deformation 5.5 \pm 0.93 [Ns/m]
μ	Coefficient of static force 0.14
F_{ad}	Electromagnetic force 14.1 [N]

表1 パラメータ

⑤最適波形の導出

③、④から得られた力学モデルを用いて、吸着側の電磁石の最大摩擦力と、他方の電磁石の慣性力が一致する際に、すべりを生じることがわかったため、図7に示すような、加速度一定の曲線、すなわち放物線を組み合わせることで最適波形を得た。このとき、最適波形の時間の終端値を T とすると、 $t=0$ 、 $t=T/2$ 、 $t=T$ のときに、加速度無限大の不連続な変位が必要であることがわかった。このような無限大の加速度の表現は不可能であるため、実際には、波形生成装置の性能の許す限り大きな変化の電圧波形を使用することになり、位置決めの際の誤差要因になりうる。

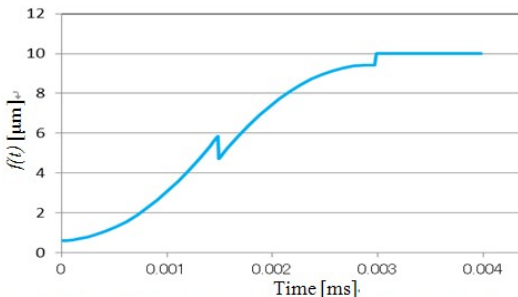


図7 圧電アクチュエータの最適波形

⑥FF制御

表2に示すように、目標到達距離 5、10、15、20、25、30 μm で各10回実験を行った。平均誤差 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 、整定時間 0.3秒、位置決め精度 (3σ) 0.14 μm (0.76%) を得た。

Table 3 Performances of feed forward control under open loop

x_m [μm]	Average displacement (l) [μm]	$\pm 3\sigma$ [μm] (CV [%])	Average error [μm] (Ratio to l [%])	Settling time [s]
5	5.02	± 0.03 (0.60)	0.02 (0.40)	0.301
10	10.10	± 0.03 (0.30)	0.10 (0.99)	0.282
15	15.14	± 0.05 (0.33)	0.13 (0.86)	0.372
20	20.18	± 0.17 (0.84)	0.18 (0.89)	0.319
25	25.11	± 0.17 (0.68)	0.11 (0.44)	0.273
30	30.30	± 0.07 (0.23)	0.29 (0.96)	0.252
Average		± 0.09 (0.50)	0.14 (0.76)	0.300

表2 FF制御の実験結果

⑦FF/FB制御

FF制御に図7のPID制御を組み合わせた。図8、図9のように、30 μm までの位置決め範囲で、位置決め誤差、0.05 μm 以下、整定時間 50ms 以下を実現した。

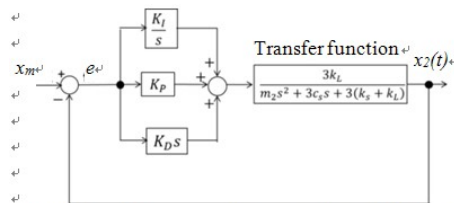


図7 FF制御のブロック線図

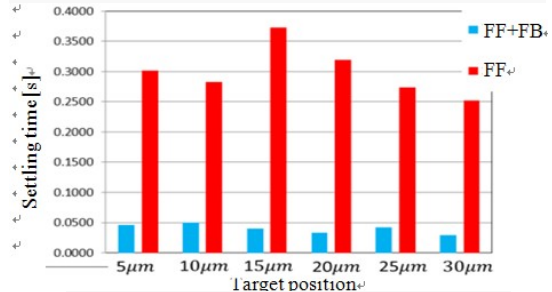


図8 目標距離と整定時間

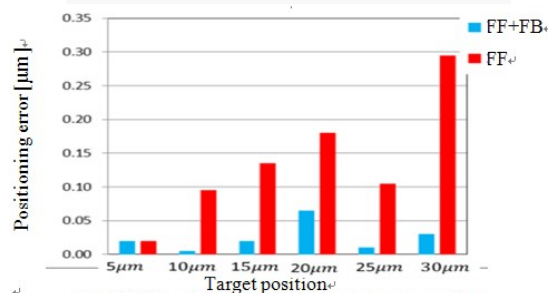


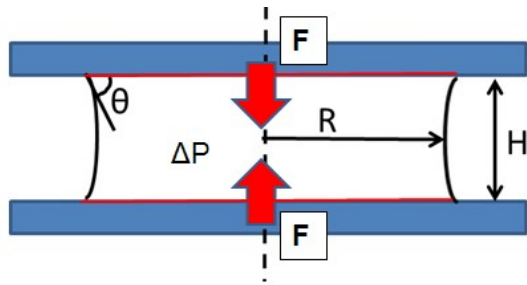
図9 目標距離と位置決め誤差

(2) 液架橋力によるピック&プレース

①液架橋力のモデル化

図10に示すように、ニードル式の微小液滴塗布ツールを用いて、液架橋力を用いてチ

チップ部品をピック&プレースする際の力学モデルより、液架橋力を定式化した。さらに、ピックアップ、プレースの条件を定式化した。



R : 液体の半径
 H : 物体間の距離
 γ : 表面張力
 θ : 接触角

$H \ll R$ のとき

$$F \approx \frac{2\pi R^2 \cos \theta}{H}$$

図10 液架橋力のモデル

②ピック&プレース装置の開発

図11に示すように、圧電リニアモータにより、ニードルを粗微動できる装置を開発した。このモータは電力供給0でも可動部分を4Nの静止摩擦力で支えることができるため、可動部分が400gを越えなければ、電力を与えず位置を一定に保つことができるので、常に重力が作用する今回の用途に適する。今回作成した装置の可動部分の重量は9g程度であるので可動部の保持が可能である。光学式リニアエンコーダ(分解能50nm)によりFB制御(PI)することで、ニードルを1 μ mの位置決め分解能、15mm以上のストローク、3mmの目標位置のとき、目標 $\pm 15\mu$ mの範囲に50ms以内で整定することができる。さらに、装置全体の重量は90g、小型サイズ(50x50x15mm)であるため、(1)の精密自走機構に搭載することができる。

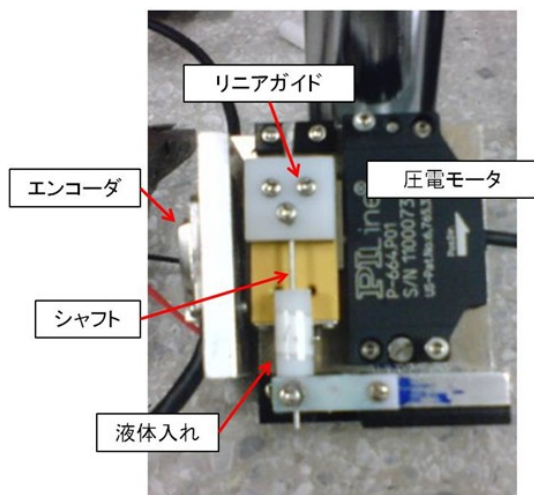


図11 ピック&プレース装置

③液架橋力によるピック&プレース実験

図12、13、14に示すように、1005チップ部品、鋼球、砂鉄など様々なサイズ、形状の微小物のピック&プレース実験を実現した。課題として、姿勢の制御方法の考案、プレース作業の成功確率の向上が挙げられる。

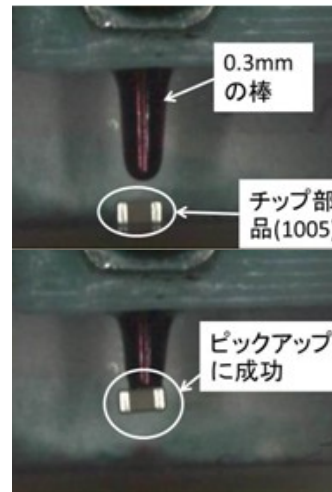


図12 1005チップ部品のピックアップ

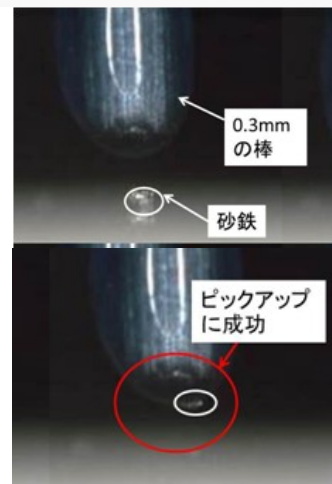


図13 砂鉄のピックアップ

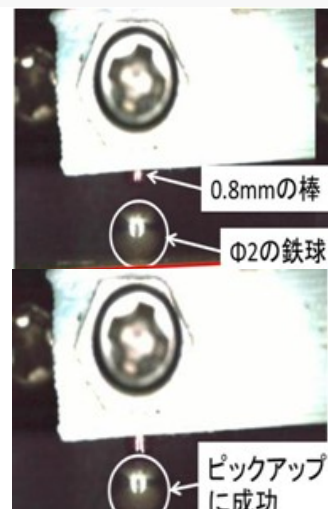


図14 鋼球のピックアップ

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計2件)

- ① Manabu Yatsurugi and Ohmi Fuchiwaki,
Development of a 3-D of Mobile
Positioning Mechanism with 6 Contact
Points, Proc. of Asian Society for
Precision Engineering and
Nanotechnology(ASPEN2011), 査読有,
0045, Hong Kong, 17th Nov. 2011, (plan
to update on Key Engineering Materials)
- ② Kazuya Kumagai and Ohmi Fuchiwaki,
Development of Dispenser for
High-Viscosity Liquid and Pick & Place
of Micro Objects Using Capillary Force,
Proc. of Asian Society for Precision
Engineering and
Nanotechnology(ASPEN2011), 0045, Hong
Kong, 17th Nov. 2011, (plan to update on
Key Engineering Materials)

[学会発表]

ホームページ等

<http://www.fuchilab.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渕脇 大海 (FUCHIWAKI OHMI)
横浜国立大学・学際プロジェクト研究セン
ター・特任教員 (助教)
研究者番号：20377021

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：