

令和元年6月12日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06178

研究課題名(和文) 小型自走ロボットとロボットアームによる分散協調型フレキシブル精密生産法の創出

研究課題名(英文) Study of flexible manufacturing method by collaboration of a mobile miniature robot and an robotic arm

研究代表者

淵脇 大海 (FUCHIWAKI, Ohmi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20377021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：[1]四つのエンコーダと二次元スケールにより構成される三軸エンコーダにより、自走ロボットのXY変位を、15mm×15mmの範囲、0.1μmの分解能で、並列計測する基礎技術を確立した。[2]ロボットアームのXY軸の位置決め誤差を、自走ロボットが補正して微小部品を0.1μmの分解能で配置する事が可能である。[3]ピストンポンプ型液架橋力グリップを開発し、既存のエアノズルではピックアップ困難な、半円柱、円錐の自動ピック&プレースを実現した。[4]既存のロボットアーム・三軸直動ステージの誤差補正、軽量部品の位置決め自走ロボットを使用すれば、慣性力、電力を原理的に3桁削減できる事を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自走ロボットのXY変位を広域かつ精密に、並列計測する基礎技術を確立した。この技術を発展させ、様々な作業ツールを搭載した自走ロボット群の軌道制御を実現すれば、フレキシブルな作業ツールの配置変更が可能となるため、実現できる精密作業の種類が飛躍的に増大することが期待できる。

ホロノミック小型自走ロボットをロボットアームや直動三軸ステージなどの産業用ロボットと分散協調作業させることで、精密生産設備の小型軽量化、省エネ化、変量多品種化に効果があるといえる。今後の課題として、携帯電子機器、MEMS、マイクロロボットなどの小型軽量物の組み立てに応用する事などが挙げられる。

研究成果の概要(英文)：[1] Development of 3-axis displacement sensor organized by 4 optical linear encoders with 0.1 micro meter positioning resolution and 15mm x 15mm positioning range.[2] Confirmation of the compensation of X, Y, theta axes positioning errors of a robotic arm by a holonomic inchworm robot[3] Development of capillary Force Gripper for Complex Shaped Micro Objects with fast droplet forming by on-off control of a piston slider. We have realized automatic pick-and-place of cube, cone, and semicircular cylinder shaped samples. [4] We confirm that we can save energy and miniaturize the pick and place device by use of the holonomic inchworm robots for chip parts positioning.

研究分野：機構・制御

キーワード：分散協調 ロボットアーム 精密位置決め 自走ロボット 圧電アクチュエータ ボールねじ型直動ステージ 省エネ化 軽量化

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19, CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

最近では、携帯機器、MEMS の普及にみられるように、異種異形の小型部品の実装がますます重要になっている。その反面、既存の SMT 実装機、ステッパ等の精密生産機器では、高精度・高速度・高耐荷重を重視し、直動ステージを積層して多軸化している。そのため可動部の質量は 100kg に達し、1mg のチップ部品、50g の 6 インチウエハに比べると超過大な慣性力を発生し、周囲に大振動を与えている。質量 m の増化により、共振周波数 $f_{res}=2\pi \sqrt{k/m}$ は、10~30Hz 程度まで減少しているため、10 チップ/秒 (ステップ&リピートの周波数 10Hz に相当) 以上の高タクトを維持するためには、工場の剛性 k の向上による共振周波数 f_{res} の向上に加え、除振設備が必要となり、建築コストが指数関数的に増大する。この悪循環を断ち切るためには、10g 以下の軽量部品に特化した、新コンセプトの超軽量多軸位置決め技術が必要である。しかし「精密、高精度、高効率を実現するためには、ステージの軌道を拘束する精密ガイドは必須であり、可動部の質量増加は避けられない」という固定観念が根強い。申請者らは従来の直動ステージを拘束している精密ガイドを取り払い、位置決め機能を全域に解放し、複数の自走ロボットを同一ステージ上に分散させる事で精密生産システムの軽量化・フレキシブル化を試みている。mm~ μ m サイズの超小型部品を組み立てる小型自走ロボット群と、cm サイズの部品を組み立てるロボットアームの協調作業を実現し精密生産設備の超軽量化・フレキシブル化への突破口を開く事が本研究の目的である。

2. 研究の目的

本研究では、従来比で 1000 分の 1 の省エネ、省スペース、省振動を実現できる超軽量ホロノミック自走ロボット群と汎用性の高いロボットアームの分散協調型の作業手法を研究する事で、半導体・精密機械工場のミニファブ化とクリーンルームの飛躍的な小型化への解決法を示す事を目的とする。現在の精密生産設備は、固定型の多軸ステージにより構成されるため大型化・重量化が避けられない。そのため工場やクリーンルームの大型化、高剛性化、除振設備の付与が必須となり建築・維持コストが爆発的に増大する。本研究により mm~ μ m サイズの超小型部品を組み立てる小型自走ロボット群と、cm サイズの部品を組み立てるロボットアームの世界初の分散協調型精密生産システムを顕在化し、精密生産設備の超軽量化・フレキシブル化への突破口を開く。

3. 研究の方法

平成 28 年度は、小型自走ロボットの 広域誘導のために CCD カメラによる画像フィードバック (FB) 制御と、精密誘導のために顕微画像による画像 FB 制御と内界センサのエンコーダを併用した誘導技術を研究する。平成 29 年度は 広域誘導と精密誘導の融合を行う。エンコーダおよび画像フィードバックと三軸並列ナノスケールサーボ制御を融合し、自動制御法、さらに機構の個体差による位置決め誤差を最小化するための入力波形の自動補正法の研究を行う。また ロボットアームと自走ロボットの協調作業法について研究する。

平成 30 年度は、分散協調型・超軽量ロボットファクトリのテストベンチとして、微小部品の自動組立、分散協調型フレキシブル精密生産システムについて研究する。複数の小型自走ロボット、XYZ 直動ステージ、ロボットアームにより、1mm~10 μ m の微小部品と cm サイズの部品の組立を適材適所で行う作業法を研究する。想定する応用作業として、携帯型電子機器の組立実験などが挙げられる。評価手法として単位体積当たりの生産効率、エネルギー効率を従来技術と比較し研究成果をまとめる。

4. 研究成果

本研究で予定していた以下の 6 つの各課題の成果の概要を示す。

広域誘導

外界センサとして二次元エンコーダを開発することとした。この理由として CCD カメラよりも高い時間分解能、距離分解能を有するからである。特殊な二次元格子を設計開発し、四つの光学式リニアエンコーダを組み合わせることで、15mm x 46mm 程度の範囲を XY 二軸で 0.1 μ m の分解能で誘導できることを直動 XY ステージの機械座標との比較により確認した。±3 度程度ならば 軸の変位検出も可能である。実験では尺取虫ロボットの電磁石のクランプと、圧電アクチュエータの正弦波形状の変位の同期エラーを検出し、歩幅の拡大、誤差の低減に成功した。今後の課題としては 0 点の検出が挙げられる。

精密誘導

内界エンコーダとして、上記の広域誘導用の二次元エンコーダと同じ構成であるが、尺取虫ロボットの二つの脚の XY 軸の相対変位を計測することで、ロボットの一步内の精密誘導、精密計測を研究した。一步内の制御では、パンバン制御と状態 FB 制御により、単軸の FB 制御の場合は、目標値 ±0.5 μ m、姿勢 ±0.005x10mrad の範囲に、静定時間 10ms で XY 三軸変位を静定することに成功した。しかし 2 軸、3 軸ではモデル誤差の影響により軸の相互干渉が生じ、サーボ制御を安定して行うことが出来なかった。しかし、精密自走ロボットで本研究成果のような三軸サーボ制御の事例はなく、当該ロボットの精密高速制御の可能性を示したと言える。また原理的に、スケールの加工精度を十分に高くすることが出来れば、スケール

の範囲内であれば 0.1 μm 程度の分解能で自走ロボットを誘導できる技術を確立したといえる。内界エンコーダの測定誤差が想定外に大きかったため、その削減に取り組んだ。差動計測によりノイズを大幅削減し、4つのエンコーダの組立誤差と計測変位との関係をモデル化し、校正式を導出・適用し、測定誤差を約半分に削減した。

広域誘導と精密誘導の融合

内界エンコーダの三軸並列ナノスケールサーボ制御では状態FB制御の実験結果をスペクトル解析する事で、圧電アクチュエータのゼロシフトの影響をゲイン曲線の変化として定量評価する事に成功した。1～5サイクルのゼロシフトは、モデル誤差として扱う必要があるため、H 制御を数値シミュレーションし、モデル変動が $\pm 10\%$ ある場合でも目標値に収束する事が可能であることを確認した。

ロボットアームと自走ロボットの協調作業法

H29 に導入した垂直多関節型ロボットアームの繰り返し誤差を顕微カメラ、エンコーダにより定量評価し、初期と終端の位置姿勢が同じならば、偏差は 10 μm 以内に収まるが、位置決め誤差は、初期位置姿勢により最大 40 μm 程となる結果を得た。さらに精密自走ロボットによるロボットアームの XY 軸の誤差補正法を検討した結果、ホロノミック精密自走ロボットにより XY z 軸の補正を行い、本研究室で開発済みの球面型三軸ステージを自走ロボットに搭載すれば、x 軸、y 軸の補正が可能であることを確認した。残りの z 軸の補正は、ロボットアームの手先に z 軸ステージを設置する事等の方法が考えられる。

微小部品の自動組立

既存技術であるボールねじ型 XYZ 直動ステージを用いて、ピストンポンプ型液架橋力マニピュレータにより、半円柱、円錐、正方形の自動ピック&プレースを実現した。汎用技術のエアノズルではピックアップが困難な複雑形状物のピック&プレースが可能であることを示した。今後の課題として、姿勢誤差の削減が挙げられたが、ホロノミック精密自走ロボットにより z 軸に関しては補正する予定である。また、本研究室で開発済みの球面ステージを自走ロボットに搭載すれば、x 軸、y 軸の補正も可能であることを確認した。

分散協調型フレキシブル精密生産システム

ホロノミック自走ロボットに球面型精密ステージを搭載することで、既存の精密ステージであるロボットアームおよび XYZ 直動ステージの X 軸、Y 軸、z 軸、x 軸、y 軸の 5 軸の補正を行うことで、システムの小型軽量化、慣性力の低減、省エネ効果を確認した。特に軽量部品の XY 軸の $\text{cm} \sim \text{サブ}\mu\text{m}$ の精密位置決めで 0.1kg の自走ロボットを使用する事で、可動部の質量に比例する慣性力を 3 桁削減する事が可能となる。自走ロボットに球面型精密ステージを搭載する等して、3 軸自走ロボットを 5 軸化する事で、既存ステージにより位置決めされる微小部品の位置決め誤差を低減する効果が高くなると結論できる。

今後も携帯型電子機器、MEMS、微小部品の組み立て作業を、理論・実験の両面から、ホロノミック自走ロボット、XYZ 直動ステージ、ロボットアームとで協調作業する手法について研究を進めていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

- [1]萩原 航,伊藤 貴俊,瀧脇 大海,毛管現象による自動液体補充機能を付与したピストンポンプ型液架橋力マニピュレータの開発,マイクロ・ナノ工学シンポジウム,発表番号 31pm2-PN-100,札幌市民交流プラザ,10/31,2018
- [2]徳井 良多,萩原 航,瀧脇 大海,FEM 解析による逆パンタグラフ構造を用いた XY ステージの設計,ROBOMECH2018,北九州国際コンベンションゾーン,2P1-F18, 6/5, 2018
- [3]福元 健太,庄野郁矢,瀧脇 大海,ホロノミック自走機構の nm スケールの XY 三軸並列サーボ制御法の開発,ロボット学会,東洋大学,2017
- [4]船津 仁志,瀧脇 大海,4つのエンコーダによる二次元エンコーダの開発と自走ロボットの XY 軸の変位測定の試み,関東学生会第 56 回学生員卒業研究発表講演会論文集,講演番号 1710,東京理科大学,2017
- [5]萩原 航,瀧脇 大海,多段型圧電変位拡大機構の設計と XY 精密ステージの変位拡大の研究,関東学生会第 56 回学生員卒業研究発表講演会論文集,講演番号 1603,東京理科大学,2017

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.fuchilab.ynu.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：田中 良巳
ローマ字氏名：TANAKA, Yoshimi
所属研究機関名：横浜国立大学
部局名：大学院環境情報研究院
職名：准教授
研究者番号（8桁）：10315830

研究分担者氏名：樋口 丈浩
ローマ字氏名：HIGUCHI, Takehiro
所属研究機関名：横浜国立大学
部局名：大学院環境情報研究院
職名：准教授
研究者番号（8桁）：20403652

研究分担者氏名：前田 雄介
ローマ字氏名：MAEDA, Yusuke
所属研究機関名：横浜国立大学
部局名：大学院工学研究院
職名：准教授
研究者番号（8桁）：50313036

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。