

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06116

研究課題名(和文) 追尾式レーザ干渉測長器による6自由度相対運動計測・補正に基づく超精密機械システム

研究課題名(英文) Ultra-precise machine system based on 6-dof motion measurement with laser interferometry-based trackers

研究代表者

大岩 孝彰(Oiwa, Takaaki)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：00223727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：加工や計測用超精密機械システムの開発のため、ワークとツール間の6自由度相対運動を6台の追尾式レーザ干渉計(レーザトラッカ)を利用して正確に非接触で計測し機械の補正を行う。本研究計画ではトラッカを試作し、その2点間距離計測精度の検証を行った。まず球面ジョイントで支持される空間2自由度回転形パラレルメカニズムを考案した。2台のVCM(ボイスコイルモータ)直動アクチュエータを用いてレーザヘッドを2軸回りに駆動した。VCMの制御はリトロレフレクタからの戻り光を4分割フォトダイオードに導き、ビームが常に定点に戻ってくるようにPID制御した。変位計測精度が $\pm 1\mu\text{m}$ 程度であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械設計は学術的に体系化されず従来は経験的に行われてきた。精密機械では「アップの原理」や「計測フレーム」などの設計規範があったが、それらの思想に忠実に沿った例はほとんどない。本研究は前述の二つの設計原理を同時に満足し、高い学術的重要性を持つ。本研究により、内外乱によって熱的および力学的な誤差が生じても能動的な補正が可能になり、運動精度は飛躍的に向上する。また極端な高剛性化や精密な恒温環境が不要で著しい省エネ効果がある。さらにさまざまな精密機械に適用でき産業的な波及効果が高い。さらに精密工作機械等の空間精度の校正作業等にも利用でき、精密機械産業全体へ貢献できる。

研究成果の概要(英文)：This study deals with a feedback-controlled precision machine system based on six laser-interferometric length measurement laser trackers for six-degree-of-freedom relative motions between the tool and work piece. This research developed a two-degree-of-freedom spatial parallel manipulator for tilting a set of a laser light source and a detector around two axes. Two sets of slider-crank mechanisms driven by voice coil linear motors rotate a moving platform of the manipulator around x and y axes. Experiments with a PID controller based on slider-displacement feedback demonstrated that frequency response of the manipulator was up to 10 Hz. Furthermore, the manipulator was driven so that reflected beam position errors on a QPD were minimized for tracking a target retroreflector mirror. Then, the position error was less than  $\pm 0.2\text{ mm}$ . Moreover, displacement measurement error was approximately  $\pm 1\text{ micrometer p-p}$  when the target traveled 10 mm in Z direction.

研究分野：機械工学

キーワード：精密機械システム レーザトラッカ 三次元座標計測 2自由度パラレルメカニズム レーザ干渉測長器

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、半導体製造装置に代表される超精密機械産業において、10nm 以下の位置決め分解能および 100nm 以下の空間的位置決め精度が要求されている。このような超高精度な機械を実現するためには、機械要素単体の性能向上だけでなく、内・外乱（外力・振動・熱など）の影響を受けずにツールとワークの相対位置精度を保证する機械システムが要求される。しかし従来の機械では、各移動軸ごとに位置制御しているのみで、機械の本質的な運動であるツールとワーク間の 6 自由度運動精度は保証されていない。またさらに現実には様々な内外乱が存在し、高剛性化や熱変形の予測・補正は困難を窮めている。

研究代表者は基盤研究 C 一般「パラレルメカニズムにおけるジョイント回転誤差・熱変位補正フィードバックシステム」(H13~14)等の研究を通じて、弾性変形および熱的変形の影響を排除できるジョイント、リンクおよびフレーム構造体の研究を進め、6 自由度パラレルメカニズムのように 2 点間距離計測を 6 組用いることにより、内・外乱（外力・熱）の影響を受けずに 6 自由度相対運動を計測し、運動誤差をリアルタイムで計測できることを見出した。以上の計測システムを用いてワーク・ツール間の相対位置・姿勢をリアルタイムで計測しフィードバックを行えば、超精密なメカニズムが実現できる着想に至った（図 1）。

H16~18 基盤 B 一般では、リニアエンコーダと弾性変形・熱的変形補正装置を内蔵したメカニカルな受動的伸縮形ストラット（連結連鎖）を試作した。性能評価を行った結果、ストラットの等価線膨張係数は鋼の約 1/10 となり、室温変動を 0.16K 以内にすれば測長誤差が 0.1 $\mu$ m 以下になることがわかった。さらに H23~26 基盤 B 一般ではレーザ干渉計測器を内蔵した機械式のストラットを製作、長さ計測精度を調査した。しかし上述 2 種類の直動ジョイント（リニアボールガイド）を有する機械式のストラットでは、そのジョイントの弾性変形および運動誤差がリニアスケールとヘッド間の姿勢誤差に起因するアップ誤差を引き起こしたり、ストラット軸とレーザビームのミスアライメントに起因するコサイン誤差を生じさせており、長さ計測精度の悪化が避け難い。

### 2. 研究の目的

本研究では以上の成果を発展させ、直動ジョイントなどの機械要素をできるだけ用いずに 2 点間の距離の非接触計測が行える追尾式レーザ干渉計（レーザトラッカ）を開発し、計測精度や温度依存性の検証を行う。

図 2 のように、ツールとワーク間の 6 自由度運動をリアルタイムで高精度に計測できれば、内外乱によって機械構造や運動に熱的および力学的な誤差が生じても能動的な補正が可能になる。これにより機械の空間的な運動精度は 0.1 $\mu$ m 以下へと飛躍的に向上する。また機械構造物の極端な高剛性化や精密な恒温環境が不要となり、著しい省エネ効果がある。さらに加工機や測定機を問わずさまざまな精密機械に適用でき波及効果が高い。さらに開発する 6 自由度レーザトラッカシステムはフィードバックセンサとして用いる他に、精密工作機械等の空間精度の校正作業等にも利用でき、精密機械産業全体へ貢献できる。

本研究の独創性と革新性は以下の通り：

- 機械の本質的な運動すなわちワーク・ツール間の 6 自由度相対運動を 6 台の追尾式レーザ干渉計で計測しフィードバックするアイデアは国内外で他に例を見ない(特許登録済)；
- 6 自由度（3 自由度の姿勢誤差を含む）を測っているため、アップ誤差（姿勢誤差とオフセットの積）が生じない；
- 機械の構造系ループと計測系ループをほぼ完全に分離した機械システム(計測フレームの採用)である。これにより、機械の構造物の運動誤差、変形等を含むツールの相対位置誤差の計測および補正を行うことができる；
- 機械の変形や運動誤差をリアルタイムで計測するため、複雑な熱変形予測計算が不要である；
- メカニズムの系統的運動誤差だけでなく、内外力による機械構造物の弾性変形および熱的

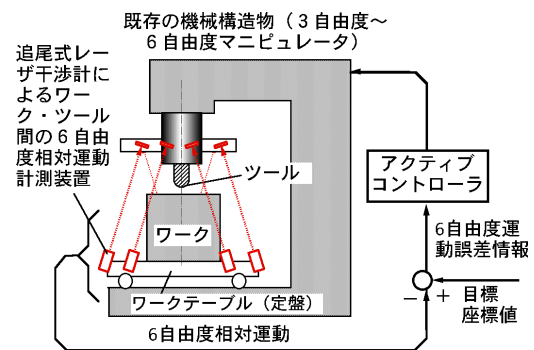


図 1 定盤から見たツールの 6 自由度運動（位置および姿勢）をダイレクトに計測・フィードバックする機械システム概要（登録特許：6 自由度位置・姿勢測定装置による機械の運動誤差補正方法、特許第 4311621 号）

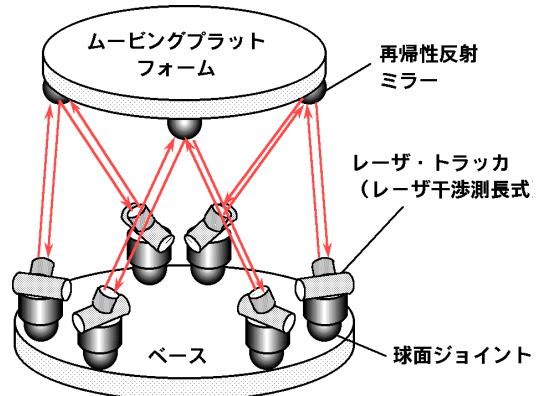


図 2 6 台のレーザトラッカによる 6 自由度運動計測装置のイメージ

- 変形を含めた補正が行える；
- 球面ジョイントおよび2自由度空間平行メカニズムを用いたレーザトラッカ開発の前例はなく、独創的な原理・構造である。

### 3. 研究の方法

#### 3-1 概要

本研究では、ワーク・ツール間の6自由度相対運動を非接触で計測するため図3に示すようなレーザ干渉測長器を内蔵したレーザトラッカを6台用い6つの距離を計測する。本研究では、まず1台のレーザトラッカを製作する。レーザの追尾は4分割フォトダイオードを戻り光位置検出センサとし、ボイスコイルモータと2自由度平行メカニズムでレーザ干渉計ヘッドの2方向の姿勢角を制御する。トラッカの計測精度の検証は、まずターゲットを固定した際の温度依存性を調査した後、ターゲットをXYZ方向に移動した場合の2点間距離計測誤差を用いて行う。

#### 3-2 目的

過去に試作した伸縮形の受動連鎖（ストラット）では直動案内としてリニアボールガイドを用いていたため、計測精度が機械要素の運動誤差の影響を受けやすかった。そこで、メカニカルな直動案内を排除した図3に示すような非接触で2点間の距離変化を計測できる追尾式レーザ干渉計（レーザトラッカ）を開発する。このトラッカでは、ターゲットとなる再帰反射ミラー（リトロレフレクタ）が移動した場合でも常に反射光が投・受光ヘッドに戻るように、ヘッドに球面ジョイント回りの2方向の姿勢角を与え、常にターゲットを追尾させる。

#### 3-3 方法

レーザ追尾にはガルバノミラー2軸を用いる方法もあるが、回転中心の移動やパラメータ同定の困難が予想されるため、レーザ干渉計ヘッド（H29 設備備品）を球面ジョイントでガイドし、回転振れを最小化する。球面ジョイントの自由度は3で冗長となるため、平行リンクを用いた空間2自由度平行メカニズムを用いて計測軸周り（ $\gamma$  方向）の運動を拘束する。この2自由度平行メカニズムは2台の直動アクチュエータ（VCM：ボイスコイルモータ）で駆動する。VCMの制御は、リトロレフレクタからの戻り光をヘッド直前に置いたビームスプリッタにて4分割フォトダイオード（QPD）に導き、ビームが常に4分割フォトダイオードの中央に戻ってくるように2台のVCMをPID制御する。これにより常にレーザヘッドがターゲットを追尾することが可能となる。

#### 3-4 数値目標

追尾精度の確認は4分割フォトダイオードから得られるビームスポットの位置偏差信号およびレーザ干渉計の受光強度信号から判定する。位置偏差が引き起こすトラッカの長さ計測誤差（コサインエラー）を $\pm 0.1\mu\text{m}$ 以内とするための位置偏差（ミスアライメント）は $\pm 0.2\text{mm}$ となるため（ターゲットまでの距離200mm以上の場合）、本研究計画では位置偏差 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内を目指す。

またターゲットを空間内に移動した場合の追尾範囲（ $\alpha$  および  $\beta$  姿勢角）についても評価する。本研究で試作するトラッカでは再帰反射可能な角度から  $\alpha\beta$  共に $\pm 20^\circ$ 程度とする。

### 4. 研究成果

#### 4-1 実験装置

図4に試作した2自由度平行メカニズムと搭載されたセンサヘッドを示す。ムービングプラットフォームは熱膨張の影響を避けるためスーパーインバー材から製作し、下部に円錐穴を加工し、ベースに固定したシャンク付き超硬球（径5/8インチ、真球度 $0.16\mu\text{m}$ 以下）と接触させた。プラットフォームと2台の直動スライダ間は両端に球面ジョイント（THKリンクボールBL4D）を配する3組の接続棒にて連結した。直動スライダはリニアボールガイド（IKO, ML7）にて案内し、VCM（テクノハンス AVM30-15, ストローク：15mm, 最大推力29.4N）にて駆動した。

レーザセンサヘッド（レニショー社レーザエンコーダ RLD, 公称測長精度： $\pm 1\text{ppm}$ , 分解

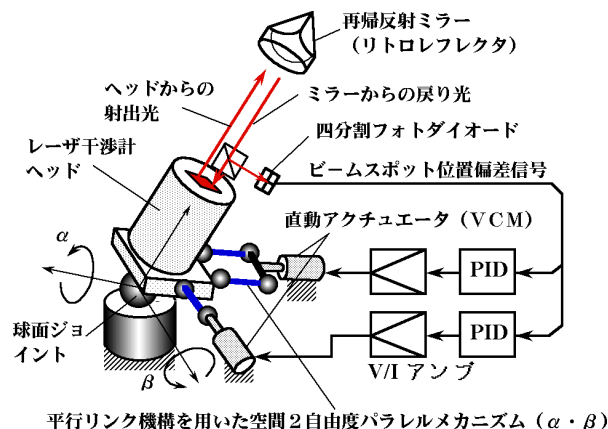


図3 レーザ干渉測長器を内蔵したトラッカの構成

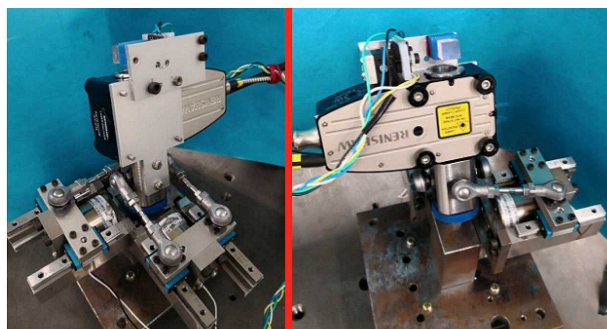


図4 2自由度空間平行メカニズムとレーザ干渉測長センサ

能：20nm) および追尾のための光学素子をムービングプラットフォームに取付けた。ヘッドからの射出ビームはリトロレフレクタで反射してヘッドに戻る。戻り光の一部をビームスプリッタ(10)を用いて QPD (浜松フォトニクス s5981, 受光面寸法: 10×10) へ導いた。また QPD の XY 方向の位置決め調整のために小形の XY ステージ(移動量: ±2mm) を用いた。QPD の電流変化は 4 台の IV 変換アンプで電圧信号に変換し, AD 変換器にて PC で取得してビーム位置の XY 座標を算出した。PC 内の PID コントローラはビーム位置座標が 0 となるように制御量を算出し, DA 変換器からの出力電圧信号を VI リニアアンプ(トラストオートメーション TA310, 出力電流: ±8A, 周波数帯域: DC~5kHz) を介してボイスコイルモータを駆動した。

#### 4-2 スライダ変位フィードバックによる駆動実験結果

まず 2 自由度パラレルマニピュレータの動作を確認するため, QPD からの信号ではなく, 各スライダの変位を三角測量式のレーザ変位センサ(パナソニック電工 SUNX HL-G105, 計測範囲: ±10mm) にて計測し, PID 制御を行った。正弦波上の位置決め目標値を与えた場合, 最大 10Hz まで追従できることを確認した。一例として, 方向の駆動を行った際のムービングプラットフォームの角度をレーザ変位センサ(同上)で計測した結果を図 5 に示す。

#### 4-3 QPD 信号を用いた追尾実験結果

次に QPD 上の戻り光位置を一定となるようにマニピュレータの PID 制御を行った。ターゲットとなるリトロレフレクタを固定した際の QPD 上のビーム位置の安定性(変動)は 3 $\mu$ m 以下であった。リトロレフレクタを手動で移動させた際のビーム位置の変動の様子を図 6 に示す。ターゲットを固定したときより変動が大きいが概ね ±0.2mm 以内となった。

次に, ターゲットを Z 軸ステージ(駿河精機 KZL06075, 移動範囲: 75mm) で z 方向に位置決めした場合のレーザ干渉変位センサの計測誤差を図 7 に示す。ステージの変位はリニアエンコーダ式変位計(ハイデンハイン ST1208, 計測範囲: 12mm, 計測精度: ±1 $\mu$ m) にて 3 回計測した。ターゲットを約 10mm 移動させた際の計測誤差が ±1 $\mu$ m ほどであることが確認できた。

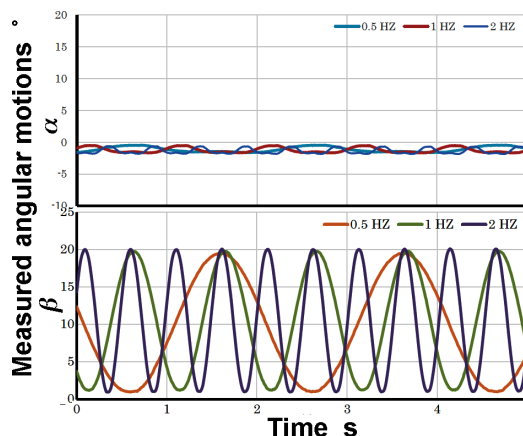


図 5 スライダ変位フィードバック時のプラットフォームの方向角度計測値

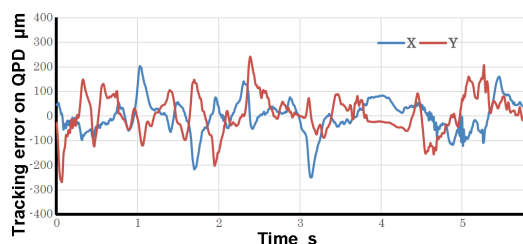


図 6 QPD 上の戻り光変位の安定性

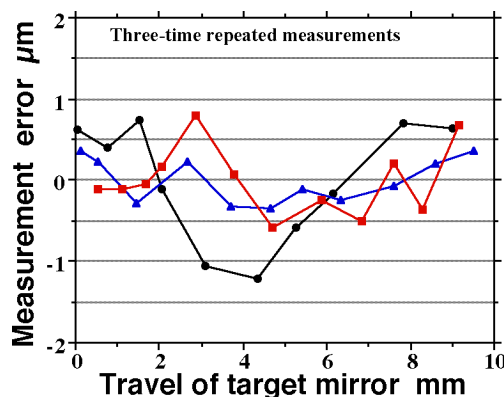


図 7 ターゲットを Z 方向に 10mm 移動させた際の変位計測誤差

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大岩孝彰, Baris Celik, 朝間淳一
2. 発表標題 レーザトラッカ用のVCM駆動される2自由度回転パラレルマニピュレータ
3. 学会等名 日本機械学会第18回機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大岩孝彰, チェリク バリシュ, 朝間淳一
2. 発表標題 2自由度空間パラレルメカニズムを用いたレーザ干渉測長追尾システム
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Baris Celik, Takaaki Oiwa and Junichi Asama
2. 発表標題 Design and Development of Two-degree-of-freedom Parallel Manipulator for Tilting Laser Interferometry Tracking System
3. 学会等名 The 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology(ASPEN2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Baris Celik, Takaaki Oiwa, Kenji.Terabayashi1 and Junichi Asama
2. 発表標題 Two-degree-of-freedom special parallel manipulator for laser interferometry-based tracker
3. 学会等名 The Fourth Conference on Mechanisms, Transmissions and Applications(MeTrApp2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大岩孝彰, 中澤行雄, 寺林賢司, 朝間淳一
2. 発表標題 ワーク・ツール間の6自由度相対運動計測と補正に基づく精密機械システム レーザ干渉計を内蔵した長さ計測用受動連結連鎖
3. 学会等名 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 肥田拓也, 大岩孝彰, 寺林賢司, 朝間淳一
2. 発表標題 パラレルメカニズムを用いた高速・高精度3次元座標計測システム(第29報)(校正点の配置が機構パラメータの推定精度に及ぼす影響)
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考