

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360110

研究課題名(和文) ワークと工具間の6自由度相対運動計測と補正フィードバックによる超精密機械システム

研究課題名(英文) Ultra-precision machine system feedback-controlled with measurement device for six-degree-of-freedom relative motions between tool and workpiece

研究代表者

大岩 孝彰(Oiwa, Takaaki)

静岡大学・工学研究科・教授

研究者番号：00223727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：ヘキサポッド形パラレルメカニズムを用いてワークとツール間の6自由度運動の計測と補正を行う機械システムを開発するため、まずパラレルメカニズムの連結連鎖の測長器をリアスケールユニットからレーザ干渉測長器によるものに改良した。次に、この連結連鎖の長さ測定精度を評価するため、1軸ステージを用いて連結連鎖を伸縮させ、内蔵の測長器の計測値とレーザ干渉測長器の計測値とを比較し、デッドパスエラーとステージの姿勢誤差の影響を受けないように装置の改良を行った。さらに6自由度パラレルメカニズムの機構校正について、校正器上のボールの距離誤差を用いる方法の数値シミュレーションを行い、妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：This research aims to realize a feedback-controlled precision machine system based on a hexapod-type measurement device for six-degree-of-freedom relative motions between the tool and work piece. The hexpod consisting of six extensible struts accurately measures the motions for the feedback control of the machine regardless with temperature fluctuation and external forces because each strut has a compensation device for elastic and thermal deformations of the joints and links. First, an improved strut equipped with a laser interferometer length measurement system has been developed instead of the strut with a linear encoder. Second, a test apparatus has been improved to shorten a dead path of the interferometer system to reduce the influence of temperature and air pressure fluctuation. Finally, the research deals with kinematic parameter identification based on distance errors among spheres on a three-dimensional ball plate calibrated by a coordinate measurement machine.

研究分野：精密メカトロニクス，精密機構，精密計測，精密位置決め装置，パラレルメカニズム

キーワード：精密機械システム 6自由度運動誤差補正 パラレルメカニズム 工作機械 超精密加工機 三次元座標測定機

### 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50nm 以下の空間的絶対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証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影響を予測・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てきた。この補正システムを搭載した6自由度パラレルメカニズムを用いることにより、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が分かった。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)。

### 2. 研究の目的

H16~18に実施した基盤B一般「ワーク・ツール間の6自由度完全相対運動を実現するナノメートル精度超精密機械の創成」の研究では、図2に示すリニアスケールユニットと弾性変形・熱的変形補正装置を内蔵したパラレルメカニズム用受動的ストラット(連結連鎖)を試作した。両端の球面ジョイント間距離は390~670mm(測長範囲270mm)、分解能2nmである。性能評価を行った結果、ストラットの等価線膨張係数は1.21ppm/K程度であり、室温変動を0.16K以内にすれば測長誤差が0.1μm以下になることがわかった。

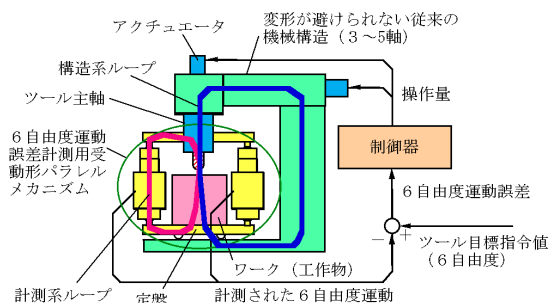


図1 提案する精密機械システム

本研究計画では以上の成果を発展させ、よ

り高剛性・高精度なストラットを開発し、実機に搭載して6自由度相対運動の計測およびフィードバック補正を実現させる(図1)。

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することができれば、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および安定性は1μm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、このシステムは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るため、波及効果が高い。

### 3. 研究の方法

(1)誤差補正システムを内蔵した受動的ストラット(連結連鎖)の設計・開発と性能評価

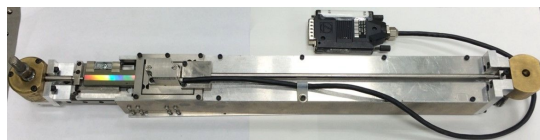
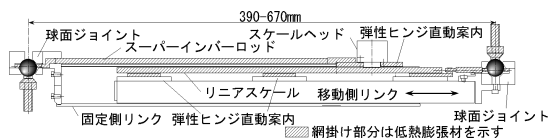


図2 過去に試作した連結連鎖

過去に試作したストラットは測長器のスケールと読み取りヘッドの走り精度(運動精度)を得るためにストラットの剛性や直動ジョイントの運動精度を確保する必要があったため重量が増え、この結果、ジョイントやリンクの弾性変形が避けられなかった。そこで、より軽量・高精度なストラットを試作する。そこで、開発する受動的ストラットは、球面ジョイント、直動ジョイント、レーザ干渉測長器(レーザエンコーダ・備品)から構成される。従来のスケールユニットの長いガラス製スケールとそれを載せる金属部品が不要となり、より軽量化が見込まれる。さらに、室温変動や弾性変形の影響を受けずに球面ジョイント間の相対変位を高精度に計測するために、ジョイント内部の基準球表面と変位計システム間を極低膨張材であるスーパーインバー材で連結する。同時に球面ジョイントの運動誤差およびリンクの変形の補正をメカニカルに行うシステムを組み込む。

(2)ストラット単体での長さ計測精度評価装置の試作と改良

組み立てた受動的なストラットをテストベッドに搭載し、その長さ測定精度・計測分解能・熱的安定性などの試験を行い、組み込んだ補正装置の性能評価を行う。過去の研究で試作したテストベッド(低熱膨張鉄製:

線膨張係数：1ppm/K 前後)は熱膨張の影響を受けやすかったが、本研究計画では影響を受けにくい配置とする。受動ストラット単体をテストベッド上に取り付け、直動ステージに連結する。直動ステージの変位はレーザ干渉測長システムで計測し、受動ジョイント内の測長システムの計測値と比較する。実験においては、意図的にストラットに室温変動および外力を加え、その影響を調査する。一般のストラットではリンクの熱膨張やジョイントの弾性変形が生ずるため二つの計測値は一致しないが、前述の補正システムを組み込んだストラットにおいて、補正を働かせた場合とさせない場合について調査し、性能を比較検討する。従来の装置では計測対象であるストラットとレーザ干渉測長システムの計測軸が一直線上にある、つまり精密計測の基本原則であるアッペの原理を満たしているために、いわゆるアッペ誤差が発生しない。しかし新装置では、両軸間にオフセットがあるため、ステージのピッチング誤差(姿勢誤差)に起因するアッペ誤差(オフセット量×ピッチング誤差)が発生する可能性がある。これをキャンセルするために、レーザ干渉測長システムをさらに1台使用してステージのピッチング誤差を計測し補正することによりアッペ誤差を排除する。

### (3) パラレルメカニズムの機構パラメータ校正

6本の連結連鎖からなるパラレルメカニズムを組み立てた場合、6自由度運動計測精度を得るためには、各連結連鎖の長さ計測精度を保証するだけでなく、ジョイントの位置や連鎖の初期長さなどの機構パラメータを正しく同定する必要すなわち機構パラメータの校正を行う必要がある。一般的には、パラレルメカニズムの出力節(エンドエフェクタ)の運動誤差を計測し、それが最小となるように機構パラメータを修正・繰り返し計算を行う手法が用いられている。エンドエフェクタの運動誤差を取得する方法としては、あらかじめ値付けをした校正器(アーティファクト)を用いる方法や機構に追加のセンサを取り付け、計測の冗長性を用いてパラメータを推定する方法などがある。

## 4. 研究成果

### (1) 誤差補正システムを内蔵した受動的ストラット(連結連鎖)の設計・開発と性能評価

#### 概要

新たに設計したレーザ干渉測長器を内蔵した受動形連結連鎖の構造を図 3 に示す。

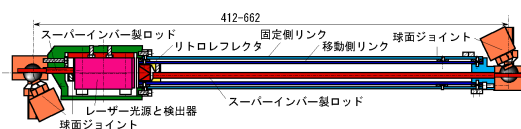


図3 レーザ干渉計を内蔵した新形連結連鎖

計測系にレーザエンコーダ®(レニショー、RLE 光ファイバー式レーザエンコーダ、精度： $\pm 1\text{ppm}$ )を使用した。これにより、過去に搭載されていた長いガラス製スケールとそれを載せる金属部品が不要となり、324gの軽量化が実現でき、重量は1278gとなった。また、レーザエンコーダはディテクタヘッドに対するリフレクタの姿勢誤差の影響を受けにくいいため、よりシンプルな設計を実現した。

ジョイント内部の基準球と上記ヘッドおよびリフレクタはスーパーインバー材(線膨張係数：約 $0.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ )のリング、ロッドおよび低膨張材で製作された弾性ヒンジなどの部品で連結した。また、リングはボールホルダに設置されたバネの復元力により、基準球に密着している。よって、リンクやジョイントに熱膨張や弾性変形が生じた場合でも、計測ループへの影響はほとんどなく、ジョイント間の相対変位を高精度に計測できる。

#### 姿勢変化に対する安定性評価実験

機上において受動形連結連鎖は傾きが変化して使用される。そこで、角度変化に対する安定性評価実験を行った。割り出し盤と連鎖の球面ジョイントが低膨張材で製作されたブラケットを介して取り付けられている。また、2本の電気マイクロ(マール、ミリトン1201 IC、測定誤差 $\leq 0.05\ \mu\text{m}$ )を用いて、熱膨張や弾性変形が生じるリンクおよびジョイントの軸方向変位を計測した。2つの計測値の平均を求めることで、連鎖の折れ曲がりによる影響を除去した。

計測は5°間隔で、連鎖の傾き30°から60°の間を行き戻り方向で行った。レーザエンコーダの計測値の変化から安定性を評価した。

実験の結果、レーザエンコーダの計測値の変動は $\pm 0.08\ \mu\text{m}$ となっており、十分な安定性を確認することができた。また、電気マイクロの計測値は最大で $0.27\ \mu\text{m}$ の変位が生じていた。これは、装置の熱膨張や自重による弾性変形が原因と考えられ、そのような変形がリンクおよびジョイントで生じてても、連鎖の計測系(レーザエンコーダ)ではその影響をほとんど受けないことが確認できた。

#### 室温変動に対する安定性評価実験

室温変化に対する安定性評価実験を行った。実験は上述の実験装置に新たに4つのサーミスタ温度計(立山科学工業 D642, 分解能  $0.01^{\circ}\text{C}$ , 精度  $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ )を設置して行った。固定側および移動側リンク上に物体温度計を、連鎖のそれぞれの球面ジョイント付近に気温計を取り付け、温度変化を計測した。また、角度変化実験と同様に2本の電気マイクロでリンクの軸方向変位を計測した。気温、物体温度、電気マイクロおよびレーザエンコーダについて1時間計測を行い、測定開始時に実験室の設定温度を  $3^{\circ}\text{C}$  上昇させ、30分後、設定温度を  $3^{\circ}\text{C}$  低下させた。レーザエンコーダの計測値から温度変化に対する安定性を評価した。

実験中に気温は最大で  $8^{\circ}\text{C}$  変化しており、レーザエンコーダの計測値の変動は  $17.2\mu\text{m}_{\text{p-p}}$ 、電気マイクロでは  $36.2\mu\text{m}_{\text{p-p}}$  の変化が生じていることが分かった。このことから、電気マイクロと比べてレーザエンコーダの変位は半分程度となっており、受動形連鎖連鎖の計測系ではリンクやジョイントに生じる熱膨張や自重による弾性変形の影響を、低減できていることが分かった。しかし、球面ジョイントのガタや部品の加工不良によって計測系におけるリンクやジョイントの変形の影響を排除する機構が不完全な可能性が高く、調整を行うことでさらに安定性の向上が図れると思われる。

## (2) ストラット単体での長さ計測精度評価装置の試作と改良

図4に示すストラットの長さ計測精度を評価する装置を製作し、伸縮時の長さ計測精度を計測した。

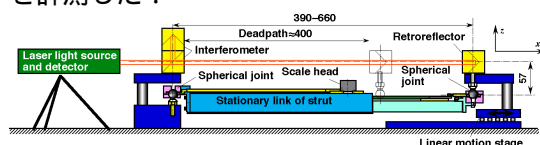


図4 ストラット長さ計測評価装置

恒温環境での実験の結果、測定長  $250\text{mm}$  の範囲で行き戻りさせた時最大  $1.5\mu\text{m}$  程度の計測精度(誤差を測定長で除した相対精度で表すと  $6 \times 10^{-6}$ )であり、目標の  $1\mu\text{m}$  に届かないが、概ね満足できる結果を得た。次に実験室の室温を最大で  $8.4^{\circ}$  変化させた場合について計測を行ったが、測定誤差は約  $6\mu\text{m}$  へ増大した。これは図4の装置におけるレーザ干渉測長システムのデッドパスが約  $400\text{mm}$  もあるためであり、このデッドパス上の空気の屈折率の変動が数  $\mu\text{m}$  のデッドパスエラーを引き起こしたと思われる。

そこで、デッドパス長をできるだけ短くした評価装置を設計・製作した。

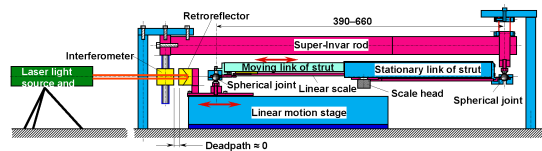


図5 改良した評価装置

装置を図5に示す。レーザ干渉計と連鎖端を低膨張材で連結する必要はあるが、デッドパス長はほぼ0となり、さらに、レーザ光軸と連鎖連鎖の計測軸を同軸としてアッペのオフセットをほぼ0とした結果、装置に使用されている1軸ステージの姿勢誤差(ピッチ)の影響を受けない構成が可能となった。室温変動が装置の計測精度に及ぼす影響を調査した結果、図4の装置では  $0.77\mu\text{m}/\text{K}$  であった影響係数が新しい装置では  $0.015\mu\text{m}/\text{K}$  へと2%以下にまで減少した。しかし連鎖連鎖自体の長さ計測精度を調査したところ、以前に  $250\text{mm}$  の測定長で  $1.5\mu\text{m}$  だった誤差が  $2.5\mu\text{m}$  まで増大していた。この原因は連鎖連鎖中央部の直動ジョイント運動誤差(折れ曲がり、ピッチ)が引き起こすアッペエラーであることが予想された。ピッチ誤差は計測の結果  $0.8\text{mrad}$  に達しており、スケールユニットのオフセット  $1.2\text{mm}$  から約  $1\mu\text{m}$  程度のアッペエラーが発生していると推測される。今後、連鎖連鎖中央部の直動ジョイントの運動誤差低減を図る必要がある。

## (3) パラレルメカニズムの機構パラメータ校正

まず、姿勢を測定せず、空間内に複数の校正球を立体的に配置したボールプレートのボールの位置誤差およびボール間の距離誤差を用いた校正方法について数値シミュレーションにて検討した。距離誤差を用いた場合、機構パラメータ誤差は  $72\mu\text{m}_{\text{RMS}}$  (92.0%減)、位置誤差は  $2.6\mu\text{m}_{\text{RMS}}$  (99.2%減)、姿勢誤差は  $30\mu\text{rad}_{\text{RMS}}$  (96.1%減)に低減した。複数の姿勢時の位置誤差を用いた場合、機構パラメータ誤差は  $47\mu\text{m}_{\text{RMS}}$  (94.8%減)、位置誤差は  $3.4\mu\text{m}_{\text{RMS}}$  (98.3%減)、姿勢誤差は  $14\mu\text{rad}_{\text{RMS}}$  (98.3%減)に低減した。これにより距離誤差を用いた場合と複数の姿勢時の位置誤差を用いた場合、共にワーク座標系の位置誤差を最小化する校正方法よりも著しく精度が向上し、機械座標系の位置誤差を最小化する校正方法と同程度まで精度が向上した。この結果より、高精度な外部測定機を用いずに低コストな校正が可能であると考えられる。今後は、実機の校正を予定している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5件)

大岩 孝彰, 寺澤 祐哉: パラレルメカニズム形機械のフレームの変形補正に関する研究(アッペの原理に基づく補正装置の改良), 日本機械学会論文集 C 編, 査読有り, 79 巻 808 号 (2013) pp.5103-5116.

T. OIWA and H. IKUMA: A Calibration Method for a Six-degree-of-freedom Parallel Manipulator with a Redundant Passive Chain, Mechanisms and Machine Science, Vol. 17, New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications, Springer, 査読有り, (2013), pp-349-356.

Takaaki OIWA, Harunaho Daido and Junichi Asama: A Calibration Method for a Three-degrees-of-freedom Parallel Manipulator with a Redundant Passive Chain, Applied Mechanics and Materials, 査読有り, Vol. 162 (2012), pp. 171-178.

大岩孝彰: 研究展望「パラレルメカニズムの工業応用」, 日本機械学会論文集 C 編, 査読無し, Vol. 77 (2011), No. 778, pp. 2420-2429.

大岩孝彰: 解説「パラレルメカニズムを利用した三次元座標測定機」, 日本ロボット学会誌, 査読無し, 30 巻 2 号 (2012) pp.139-143.

[学会発表](計 16 件)

Kazuki Kobayashi, Takaaki OIWA, Junichi Asama and Kenji Terabayashi: Investigation on accuracy improvement in hexapod-type measurement device for six degreeof-freedom relative motions (P2-29MS), The 6th International Conference on Positioning Technology ICPT2014, Nov. 18-21, 2014, Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu-shi, Fukuoka, Japan.

Keita Otaki, Takaaki OIWA, Junichi Asama and Kenji Terabayashi: Kinematic calibration for three-degree of freedom parallel manipulator based on doubleended ball bar and touch probe (P1-28MS), The 6th International Conference on Positioning Technology ICPT2014, Nov. 18-21, 2014, Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu-shi, Fukuoka, Japan.

大岩孝彰, 出野真敏, 寺林賢司, 朝間淳一: ワイヤ遠隔操作によるマスタ・スレーブ・マイクロパラレルマニピュレータ, 日本機械学会第 14 回機素潤滑設計部門講演会, 1105, pp27-28, 2014 年 4/21-22, 信州松代ロイヤルホテル, 長野県・長野市

船戸慶彦, 大岩孝彰, 寺林賢司, 朝間淳一: 6 自由度パラレルメカニズムの校正に関する研究(第 12 報)-位置誤差を用いた校正シミュレーション-, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014 年 3 月 20 日, 東京大学, 東京都文京区.

小里武史, 大岩孝彰, 寺林賢司, 朝間淳一: 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 27 報)-3 D ボールプレートを想定した校正シミュレーション-, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2014 年 3 月 20 日, 東京大学, 東京都文京区.

T. OIWA and H. IKUMA: A calibration method for a six-degree-of-freedom parallel manipulator with a redundant passive chain, The Second Conference on Mechanisms, Transmissions and Applications (MeTrApp2013), October 2-4, (2013) Bilbao, Spain

大岩孝彰, 田澤直也, 朝間淳一: 6 自由度パラレルメカニズムの校正に関する研究(第 11 報)-位置測定誤差を用いる校正-, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 8 日~11 日, 岡山大学, 岡山県・岡山市.

大滝啓太, 大岩孝彰, 朝間淳一, 寺林賢司: 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 26 報)(ダブルボールバーを用いた校正), 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 8 日~11 日, 岡山大学, 岡山県・岡山市.

Takaaki OIWA, WenBo YAO and Junichi ASAMA: Ultra-precision machine system feedback-controlled using hexapod-type measurement device for six-degree-of-freedom relative motions between tool and workpiece, euspenn Lamdamap 10th International Conference, 20th-21st March, 2013, Kavli Royal Society International Centre, Buckinghamshire, 連合王国.

Hiroshi Suzukawa, Takaaki OIWA, Kenji Terabayashi and Junichi Asama: A Calibration Method Based on Inverse Kinematics Model for Six-degree-of-freedom Parallel Kinematic Machine, The 5th International Conference on Positioning Technology 2012, November 14-16, 2012, Garden Villa, Kaohsiung City, Taiwan.

Harunaho Daido, Takaaki OIWA, Kenji Terabayashi and Junichi Asama: Parameter

Identification Based on for Three-degree-of-freedom Parallel Mechanism a Redundant Passive chain, The 5th International Conference on Positioning Technology 2012, November 14-16, 2012, Garden Villa, Kaohsiung City, Taiwan .

Naoya Tazawa, Takaaki Oiwa, Kenji Terabayashi and Junichi Asama: A Kinematic Calibration Method for Coordinate Measuring Machine based on Parallel Mechanism with Seven Chains, The 5th International Conference on Positioning Technology 2012, November 14-16, 2012, Garden Villa, Kaohsiung City, Taiwan .

船戸慶彦, 大岩孝彰, 朝間淳一: 6自由度パラレルメカニズムの校正に関する研究(微小角度計測器を想定した校正シミュレーション), 日本機械学会 2012年度年次大会 2012年9月10日, 金沢大学, 石川県・金沢市 .

小里武史, 大岩孝彰, 朝間淳一: 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(フレーム変形補正とボールプレートを用いた校正, 日本機械学会 2012年度年次大会, 2012年9月10日, 金沢大学, 石川県・金沢市 .

Takaaki Oiwa, Hiroshi Tanaka and Junichi Asama: Improvement in Positioning Repeatability of Kinematic Coupling Based on Ultrasonic Oscillation, The 2nd IFToMM Asian Conference on Mechanisms and Machine Science, Nov. 7-10, 2012, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京都 .

Takaaki Oiwa, Harunaho Daido and Junichi Asama: A Calibration Method for a Three-degrees-of-freedom Parallel Manipulator with a Redundant Passive Chain, The Joint International Conference of the XI International Conference on Mechanisms and Mechanical Transmissions (MTM) and the International Conference on Robotics (Robotics ' 12), June 6th-8th, (2012) , クレルモンフェラン, フランス

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕  
ホームページ等

<http://oiwa.eng.shizuoka.ac.jp/field/6dof/6dof.htm>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

大岩 孝彰 (OIWA TAKAAKI)  
静岡大学・工学研究科・教授  
研究者番号：00223727

### (2)研究分担者

朝間 淳一 (ASAMA JUNICHI)  
静岡大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：70447522