

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420060

研究課題名(和文) マシニングセンタの精度低下予防のための日常検査方法の開発

研究課題名(英文) Development of daily performance test for degradation prevention of machining centers

研究代表者

齋藤 明德 (SAITO, Akinori)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：10334476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)： 工作機械を精度良く保つためには、定期的に精度検査を行うことが望ましい。直進軸を有するマシニングセンタでは、位置決め精度試験が最も基本となる試験であるが、ほとんどのユーザは、据付後に位置決め精度検査を行うことはない。そこで、本研究では、CMOSカメラを用いた画像照合による位置決め精度の簡便な測定方法を開発することを目的として研究を行った。

CMOSカメラによるレーザスペckルの撮影方向とターゲットの変位との関係を調べ、2台のカメラを用いてターゲットの3次元位置を測定する方法を提案し、この提案方法によって、マシニングセンタの位置決め精度が3次元で詳細に測定できることを確認した。

研究成果の概要(英文)： Machine tools are needed to regularly conduct the accuracy testing in order to keep a high performance. In the test conditions for the machining centers having a linear axis, positioning tests are most basic. However almost all of the users haven't conducted the positioning test after the delivery. In this study, the goal is to develop a convenient method for the positioning tests of machining centers using laser speckle patterns captured by a CMOS camera.

The relation between the capture direction of the camera and the position change of the target in horizontal, vertical is investigated. And the method for resolving the target position change in X, Y, Z direction is proposed by using the two cameras. In addition, the positional test of a linear axis has been conducted. As the results, the positioning accuracy can be measured in three dimensions using the proposed method.

研究分野：工作機械

キーワード：工作機械 位置決め 画像照合 マシニングセンタ レーザスペckル

1. 研究開始当初の背景

マシニングセンタの受け入れ検査は、ISO規格にしたがって行われる。現在、精度検査規格は、静的精度、直進及び回転運動軸の位置決め精度、補間運動精度、工作精度などから成り立っている。この中で、補間運動精度については、垣野らの研究を通して広まったボールバーを用いることによって、簡単に直進3軸のマシニングセンタの精度が測定できる。また、5軸マシニングセンタでは旋回軸を含めた精度も測定できる。

ところが、位置決め精度検査については、1軸の直進軸や回転軸の位置決め精度の場合、誤差がわかればNC装置で簡単に補正が行えるものの、高価なレーザ測長器を使わずには、測定が行えない。また、レーザ測長器については、測定環境への配慮など、経験が必要とされ、測定では、装置のセットアップなどに時間を要する。

この他に、工作機械の試験方法通則には、対角位置決め精度試験として、作業空間の立方体の対角線上の位置決め精度をレーザ測長器で測定することが規定されているが、直進1軸の位置決め精度の測定と異なり、その光軸の調整を含むセットアップには、かなり時間がかかる。また、レーザトラッカを用いて、作業空間全体へ位置決めして3次元のくりいを測定する方法がSchwenkeらによって提案され、NC装置へスムーズに、測定値から求めた補正值を入力できるシステムが販売されている。この測定システムは、マシニングセンタ1台と同等、もしくは、それ以上の価格となっており、非常に高価である。

このように、位置決め精度を検査する装置や方法は、定期的に簡単に実施することは考えられていない。

2. 研究の目的

測定装置のセットアップに時間を必要としない測定装置と簡易的な測定方法を考案し、通常マシニングセンタにおいて、暖機運転後の15分間程度で位置決め精度の検査を行う「日常検査」の方法を提案することを目的とする。

具体的には、次の3項目を主な研究課題とする。

- (1) CMOSカメラを用いた画像照合による2次元位置測定方法の開発
- (2) 画像照合による3次元位置測定方法の開発
- (3) 直進軸の位置決め精度の日常検査方法の開発

3. 研究の方法

3.1 画像照合による2次元位置測定の精度評価

図1に実験装置の概略を示す。装置は、表1に示したCMOSカメラ、レーザポインタおよびターゲットで構成されており、ジグを用いて、マシニングセンタの主軸に取り付ける。

CMOSカメラの画素ピッチは、画像のX軸方向が1.124 μm/pixel、Y軸方向が1.125 μm/pixelとなっている。

Table 1 Specification of CMOS camera

Type	Misumi EMVC-IUC300A
Image sensor	1/2" CMOS color
Resolution	2048 × 1536 pixel

Table 2 Laser pointer specification

Type	RX-9
Laser device	Visible red semiconductor laser
Laser output	1mW (Class 2)
Wavelength	650~655nm
Beam diameter	Long dia. 6~9mm (At 5m)

Table 3 Specification of laser displacement sensor

Type	Keyence LK-G30, LK-G3000
Repeatability	± 0.05 μm
Linearity	± 0.05% of F.S.

測定ではCMOSカメラの横に設置されたレーザポインタから、テーブルに固定したターゲットに対して、レーザ光を照射する。その時のスペックルパターンをCMOSカメラで撮影し、PCへ取り込んだ画像から主軸に対するテーブルのX、Y方向の位置を測定する。この測定方法を評価するために、測定装置のジグにはターゲットとしてJIS 0級の平面度0.1 μmのブロックゲージを取り付け、テーブルに固定した表3のレーザ変位計を用いて1方向の位置を同時に測定する。

また、ターゲットには、ミツトヨの2次元エンコーダMICSYS-SA1に付属するターゲットを標準とし、それに加えて、アルミの自作ターゲットとして素材のままのアルミターゲット、#60(荒目)および#1500(細目)の紙やすりで研磨したアルミターゲット、そして、マシニングセンタのテーブル上面もタ

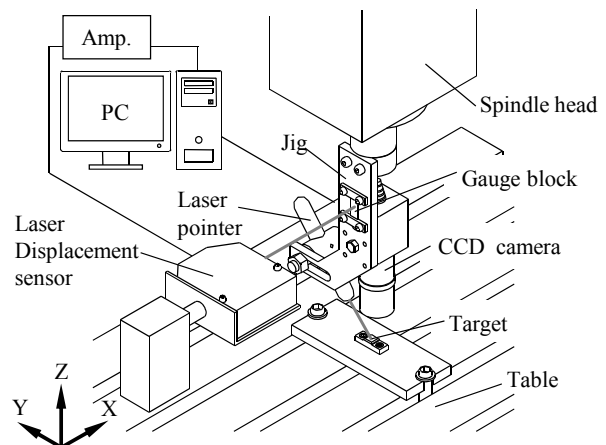


Fig.1 Experimental setup

ターゲットとして使用する。レーザポインタは、表 2 の赤色を使用する。

測定では、入力画像を撮影し、あらかじめ撮影した基準となるテンプレート画像との比較を行うことによって、位置を測定する。具体的には、撮影した画像に対して、テンプレート画像と一致している部分を画像相関によって求め、二つの画像の X 方向と Y 方向のずれを画素数で算出する。さらに、測定精度を画素ピッチ以上に向上させるため、3 次スプライン曲線を用いて、ピッチ間の類似度が最大となる点を測定値とする。

### 3.2 画像照合による 3 次元の位置測定の精度評価

3.1 の実験装置では、ターゲットに対してのカメラの角度を任意の値に設定することができなかつたため、回転ステージを使用し、ターゲットに対してのカメラの撮影角度を容易に設定できる実験装置を試作した。試作した実験装置の概略を図 2 に示す。実験装置に用いた XZ ステージの仕様を表 4 に示す。カメラの位置を他の測定器の測定結果と比較しなくても済むように、最小移動量 1nm の XZ ステージを使用した。また、XZ ステージは光学定盤に設置した。

この実験装置によって、ターゲットの撮影角度を任意に設定することが出来る。また、ターゲットと CMOS カメラの距離は、XZ ステージのテーブルの位置、回転ステージを固定しているジグの設置位置、ターゲットの固定位置を変更することで自由に設定することができる。

XZ ステージについては、レーザ干渉計を用いて、その位置決め精度を調べた。レーザ

Table 4 Specification of XZ stage

Maker	AEROTECH
Type	ANT130-060-XY
Table dimension	180 × 120mm
X-axis stroke	66mm
Y-axis stroke	66mm
Bi directional repeatability	± 75nm
Uni directional repeatability	± 25nm
Linearity	± 1.5μm

Table 5 Specification of laser interferometer

Maker	Renishaw
Type	XL-80
Linear range as standard	80m
Linear measurement accuracy	±0.5ppm
Linear resolution	1nm
Max. travel velocity	4m/s
Dynamic capture rate	10Hz ~ 50Hz

干渉計には、表 5 のレニショーの XL-80 を用いた。

測定結果は、X 方向、Z 方向共に大きな偏差が現れる位置はなく、正、負の方向の全ての位置決め偏差をみても、±0.15μm 以内となった。そのため、実験では、カメラに対して、XZ ステージに取り付けたターゲットは、XZ ステージが ±0.15μm の精度で目標位置へ移動しているとし、レーザ変位計などで実位置を測定することなく、本研究で提案する画像照合を用いた方法の測定結果を評価した。

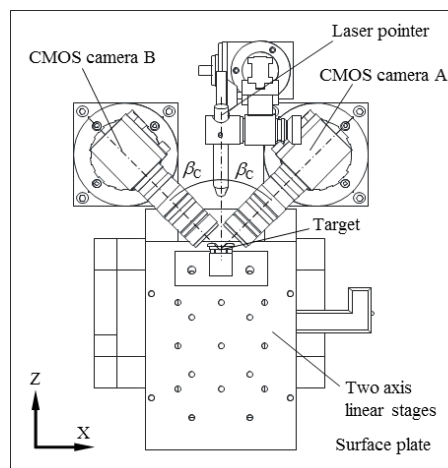


Fig.2 Experimental setup

### 3.3 マシニングセンタ直進軸の位置決め精度測定への提案方法の適用

図 3 にマシニングセンタへの測定装置の取付方法を示す。主軸にジグを介して 2 台の CMOS カメラとレーザポインタを設置し、テーブルにアルミターゲットを固定して測定を行う。アルミターゲットは 600mm の長さのアルミニウム板を用いて表面を # 1500 の紙やすりによって縦と横、2 方向よりそれぞれ 10 回ずつやすりがけを行ったものを使用した。CMOS カメラの取付け角度はデジタルレベルメータを用いて、 $\beta_c=45^\circ$  に設定をした。位置決め精度試験ではアルミターゲット表面にレーザを照射し 2 台の CMOS カメラでスペクルパターンを撮影し、画像照合を行った。測定対象は、表 6 の仕様の立形マシニングセンタとした。

Table 6 Specifications of MC

Maker	Makino seiki
Type	MSA30
Table dimension	800×350mm
X-axis stroke	600mm
Y-axis stroke	300mm
Z-axis stroke	400mm
Min. command feed unit	0.001mm
Max. feed speed	10000mm/min
NC	FANUC 15-M

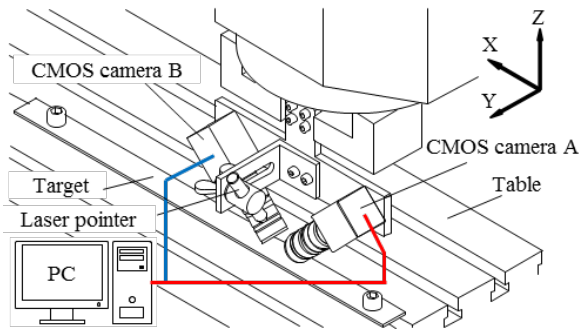


Fig.3 Setup for positioning test of MC

画像照合によって測定したマシニングセンタの X 方向の位置決め精度は、レーザ干渉計と同時に測定を行うことで評価する。レーザ干渉計は、表 5 に示したものを使用した。図 4 にレーザ干渉計と同時に測定する場合の測定装置の配置を示す。レーザ干渉計はマグネットスタンドを用いて主軸に干渉計、テーブルに反射鏡を固定し、テーブル移動による相対距離の変化を記録する。

画像照合による方法では、目標位置ごとに撮影したテンプレート画像を使用することから、その画像間の距離は把握できない。そのため、JIS B 6190-2 工作機械 - 数値制御による位置決め精度試験方法通則に定められている評価項目のうち、一方向位置決め繰返し性、両方向位置決め繰返し性、軸の反転値、軸の平均反転値のみだけが評価できる。

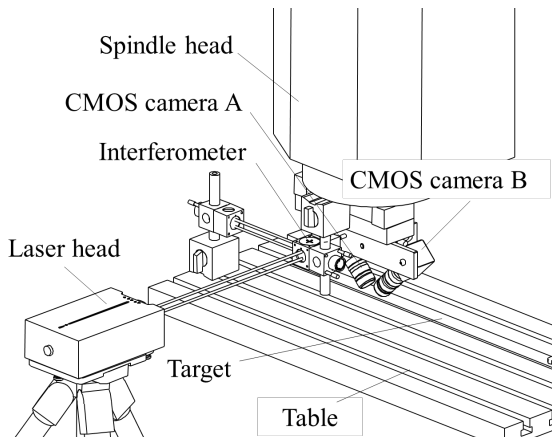


Fig.4 Setup for proposed method and laser interferometer

マシニングセンタの位置決め精度測定は、JIS B 6190-2 に準拠して行った。測定対象のマシニングセンタの直進軸は、600mm と 2000mm 以下に該当するため、全体にわたって最小 5 か所の目標位置を設定し、各目標位置でそれぞれの向きに 5 回の測定を行う。測定サイクルは 5 サイクルとされている。試験軸は X 軸とし、送り速度は 1000mm/min とした。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 画像照合の 2 次元位置測定の特

画像照合による 2 次元の位置測定について、

実験結果より、次の特性があることがわかった。

- (1) CMOS カメラとターゲットとの距離設定が容易である。
- (2) ターゲットとして、マシニングセンタのテーブル表面など、様々なものを使用できる可能性がある。
- (3) 測定範囲 0~40 $\mu\text{m}$  において、 $\pm 0.5\mu\text{m}$  の高い精度で位置を測定できる。

##### 4.2 画像照合の 3 次元位置測定の精度

画像照合による位置の測定では、画面に平行な XY 方向のターゲットの位置の変化が測定できる。さらに、画面に垂直な Z 方向の位置の変化が測定できれば、位置決め精度を 3 次元で評価できる。

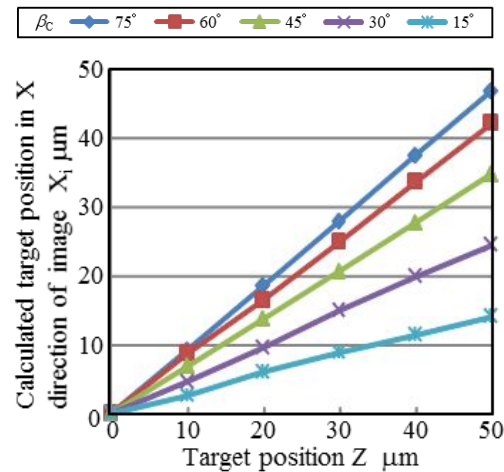


Fig.5 Relationship between target position and calculated target position on image

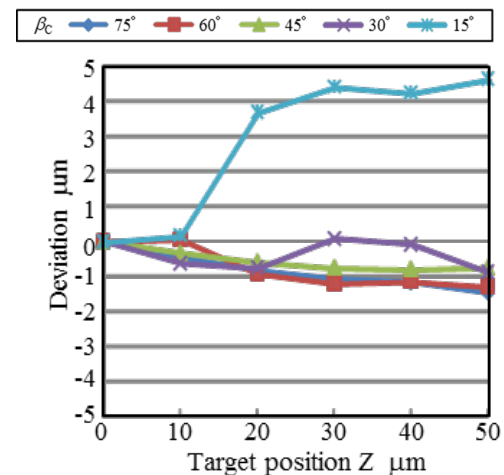


Fig.6 Relationship between target position and deviation

そこで、図 2 の実験装置において、1 台の CMOS カメラ B を Z 方向に対して  $\beta_c$  傾けて設置し、ターゲットを Z 方向に移動させて、CMOS カメラを傾けない場合と同様に位置を求めた。その結果を図 5 に示す。ターゲットの Z 方向の移動が、画面の  $X_i$  方向にスペクルパターンが移動したものと撮影さ

れ、 $\beta_c$ が大きくなるほど、ターゲットが移動した距離に近い値が算出されている。そこで、 $\beta_c$ の傾きによって、単純に測定値  $X_i$  は、Z方向の移動距離が  $\sin\beta_c$  倍されたと仮定して補正した。この補正した値とZ方向の位置との偏差を図6に示す。CMOSカメラが画面に垂直に近い $\beta_c=15^\circ$ の場合を除いて、 $1.5\mu\text{m}$ 以内の精度でZ方向の位置が測定できる。

ここで、ターゲットがZ方向だけでなく、X方向にも移動する場合には、どちらもCMOSカメラの測定値には、画面のX方向として値が検出されるため、方向が判別できない。すなわち3次元の位置決め精度を評価するためには、CMOSカメラ1台では、得られる情報に限界がある。そこで、CMOSカメラを2台用いることで、X、Z方向の変位を判別する。

図2のカメラの配置では、CMOSカメラAのX方向の算出値  $M_{xA}$  には、式(1)、カメラBの算出値  $M_{xB}$  には、式(2)のように関係が成り立つと考えられる。

$$M_{xA}=D_x\cos\beta_c - D_z\sin\beta_c \quad \dots (1)$$

$$M_{xB}=D_x\cos\beta_c + D_z\sin\beta_c \quad \dots (2)$$

この2式において、CMOSカメラの撮影角度の $\beta_c=45^\circ$ を代入し、連立方程式を解くことで、ターゲットのX方向の位置  $D_x$  とZ方向の位置  $D_z$  を算出することができる。

以上の結果をまとめると、次のようになる。

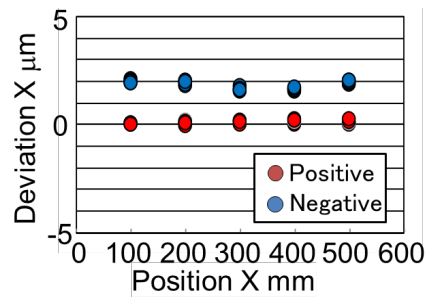
- (1) ターゲット面に対してCMOSカメラを傾けて、スペックルパターンを撮影することによって、ターゲットの垂直方向の位置の変化を画像照合で測定することができる。
- (2) 2台のCMOSカメラを傾けて、ターゲットに垂直な面に対称に設置することによって、画像照合でターゲット面に平行な位置の変化と垂直な位置の変化とを分離して測定できる。

#### 4.3 マシニングセンタ直進軸の位置決め精度測定への提案方法の適用効果

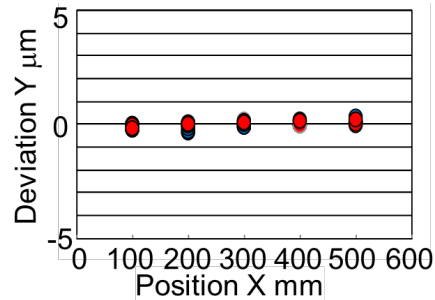
測定対象としたマシニングセンタにおいて、X軸の位置決め精度をレーザ干渉計と本研究で提案する方法で測定した。X、Y方向の位置決め精度を図7に示す。図8にZ方向の位置決め精度を示す。

X方向の測定結果を見ると、目標位置ごとに、正の向きと負の向きとに約 $2\mu\text{m}$ の差があり、バックラッシュが測定できていることがわかる。Y方向を見ると偏差がほとんど現れていない。これに対して、Z方向では、最大で $0.9\mu\text{m}$ の差が、正の向きと負の向きで現れている。これは、実際に位置決めの向きによって、主軸に対するテーブルの位置がZ方向に僅かに変わっていると考えられる。

提案する方法によって評価できる位置決め精度試験の4つの評価項目をレーザ干渉計



a) X direction



b) Y direction

Fig.7 Positional accuracy of X-axis measured by proposed method

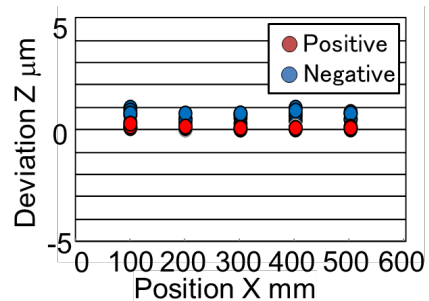
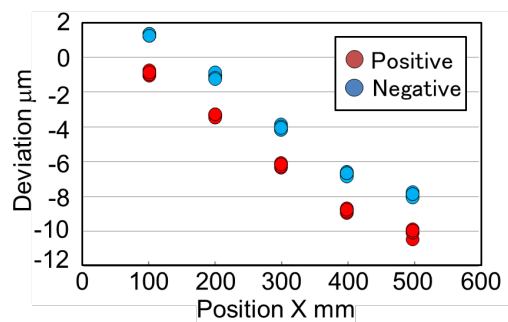
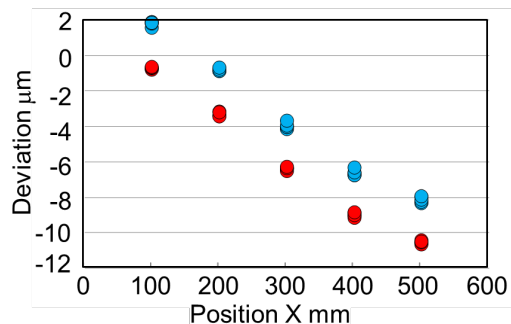


Fig.8 Positional accuracy of X-axis on Z direction



a) Laser interferometer



b) Compensated calculation results of proposed method

Fig.9 Positioning accuracy of X-axis



と比較すると、両方向位置決め繰り返し性がレーザ干渉計に比べて大きいものの、両者はほぼ同じ値となった

ここで、提案方法では絶対的な位置を測定することができない。そのため、テンプレート画像を撮影した1サイクル目であるレーザ干渉計の測定結果の値を目標位置ごとに提案する方法の X 方向の測定結果に加えることで補正を試みた。補正した結果をレーザ干渉計の結果と併せて、図9に示す。レーザ干渉計の測定結果と同様の右下がりの傾向となっている。

このように提案する方法は、レーザ変位計とほぼ同等の評価ができる。

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 画像照合による測定方法によって、マシニングセンタの直進軸の位置決め精度を簡便に測定することができる。
- (2) 直進軸の位置決め精度を3次元で評価することによって、詳細に直進軸の挙動を把握することができる。

#### 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)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計5件)

Yousuke Shiota, Yoshiki Kobayashi, Youji Jinba, Akinori Saito, 3-dimensional Measurement of Positioning Accuracy of Machine Tools by using Image Matching, International Machine Tool Engineer's Conference, Tokyo big sight (Tokyo・Koto-ku), 2016.11.19.

齋藤 明德, 権田隼, 画像照合による工作機械の3次元測定, 精密工学会秋季大会, 茨城大学(茨城県水戸市), 2016.9.6.

齋藤 明德, 権田隼, 画像照合による工作機械の位置決め精度の簡易測定, 精密工学会秋季大会, 東北大学(宮城県仙台市), 2015.9.5.

齋藤 明德, 画像照合による工作機械の位置決め精度測定の試み, 精密工学会生産自動化専門委員会, 中央大学(東京都文京区), 2015.1.30.

Harunobu Kasama, Takeshi Kanno, Akinori Saito, Measurement of the Positioning Accuracy of Machine Tools using Image Matching, International Machine Tool Engineer's Conference, Tokyo big sight (Tokyo・Koto-ku), 2014.11.1.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

齋藤 明德 (SAITO Akinori)

日本大学・工学部・教授

研究者番号: 10334476