

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)(一般)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360063

研究課題名(和文) 同時5軸制御加工による工作精度の予測と診断

研究課題名(英文) Estimation and diagnosis of accuracy of workpiece machined by simultaneous five-axis control

研究代表者 堤 正臣 (TSUTSUMI MASAOMI)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90108217

研究成果の概要(和文)：回転軸のピッチ誤差、バックラッシを考慮した5軸制御マシニングセンタのモデルを開発し、円すい台の仕上げ切削を想定したシミュレーションを行い、ボールバーによる測定結果と種々条件を変えて比較したところ、両者はよく一致することがわかった。このモデルを四角すい台に応用したところ、ほぼ同様の結果を得ることができるとを示した。このモデルを使えば、工作精度を予測でき誤差を診断することが可能なことを示した。

研究成果の概要(英文)：A simulation model introducing the pitch errors and backlash of rotational axes was developed for five-axis machining center. The simulation that assumes a fine cutting of the cone-frustum was conducted by using the model. As a result, it was confirmed that the simulation results are in agreement with the results measured by means of the ball bar instrument. When the simulation model was applied to the simulation of the truncated square pyramid, the surface profile curve measured by CMM was also in agreement with the simulation results. Therefore, if we use this simulation model, it is possible to predict the machining accuracy and to diagnose the errors.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2009年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：工作機械・生産工学・シミュレーション工学・精密部品加工・機械力学・制御

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 年々形状が複雑化・高精度化する自動車部品や航空機部品の加工には、5軸制御マシニングセンタが広く使われ出している。しかも、EU、アジアを中心として5軸機の生産は拡大の一途をたどっている。しかし、5軸制御マシニングセンタは、直交3軸のほかに旋回2軸を有するために、製造・組立に起因する幾何学的な偏差が数多く存在

し、工作精度は余り高くないといった問題点が指摘されている。

(2) この問題を解決するために、Mayerら(カナダ)が位置決め誤差を含む誤差の同定方法について報告し、時を同じくして研究代表者らが観測方程式を使って幾何偏差を同定する方法を提案した。その後、Lei(台湾)らは、新たな測定器を開発し、誤差を測定しようと試みた。また、Knapp(スイス)を

中心とするグループが **R-test** と呼ばれる独自の測定器で幾何偏差を同定する方法を提案した。

(3) これらの研究以前に坂本・稲崎らが **Portman** の形状創成理論をもとに誤差の種類と決定方法とについて検討し、3種類の構造形態に対応した合理的な決定方法を提案した。研究代表者らは、その成果を活用して5軸機に特有の偏差を整理し、ボールバー測定器を使って精度よく幾何偏差を測定する方法を提案した。しかし、いずれもサーボ系の影響や回転軸系のピッチ誤差については注目していなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、5軸制御マシニングセンタに固有の幾何学的な誤差、すなわち、直進軸と回転軸との平行度や直角度、回転軸間の直角度などが、実際に加工された工作物にどのように影響するかを明らかにする。

特に円すい台と四角すい台のシミュレーション、ボールバーによる測定及び仕上げ切削の結果を評価し、5軸制御マシニングセンタの工具と工作物との間の相対距離変化に対して、幾何学的な誤差がどのように影響するか、また、サーボ系の追従遅れ、バックラッシュやピッチ誤差などの機構の誤差がその距離変化に対してどのように影響するかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

研究は、同時5軸制御運動のシミュレーション、ボールバーによる機上測定、工作物の仕上げ切削によって行った。研究対象は円すい台と四角すい台の二つとした。それは、一方が空間内における任意の位置における円弧であり、もう一方が空間内における任意の位置の直線だからである。

円すい台については、シミュレーションのほかに、ボールバーによる測定を行った。一方で、四角すい台については、適当な測定装置がないために、シミュレーションを行うと

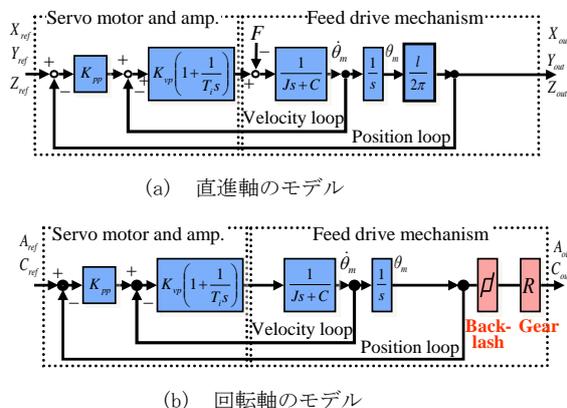


図1 送り駆動系のブロック線図

ともに仕上げ切削を行い、機上測定及び3次元測定機による測定を行い、サーボ系を含めた機械のもつ誤差がどのように工具・工作物間の相対変位に影響を及ぼすかについて検討した。

### (1) シミュレーションモデル

図1にシミュレーションモデルを示す。この図に示すブロック線図は、一般の送り駆動系のもと同じであるが、直進軸には、摩擦力  $F$  を考慮し、象限突起を再現できるようにしてあり、回転軸については、バックラッシュとピッチ誤差を考慮できるようにしているところが新しい点である。

### (2) ボールバーによる測定

ボールバーは、空間内にある工具と工作物とを、常に一定の相対距離を保って運動させたときの、理想位置からの相対距離の偏差を検出することができる測定器である。本研究では、図2に示すようにテーブル上の球が円すい台の底面の円弧状を運動する場合についてボールバーで測定している。測定条件は図2に示すように半頂角を  $15^\circ$  と  $45^\circ$  の2種類について検討している。

### (3) 仕上げ削りした工作物の測定

仕上げ削りは、四角すい台についてのみ行った。仕上げた四角すい台を5軸制御マシニングセンタのテーブル上に置いて、電気マイクロメータで辺の輪郭曲線を測定した場合と、3次元測定機で測定した場合について比較している。四角すい台の仕上げ削りの方法については、改めて後段で述べる。

## 4. 研究成果

### (1) 円すい台の仕上げ削りによる誤差

円すい台の仕上げ削りに関係する研究では、円すい台の半頂角を  $15^\circ$  と  $45^\circ$  の2種類を選び、オフセット位置を変えてシミュレーションを行った。

本研究では、より詳細なシミュレーションを行うためにA軸とC軸のピッチ誤差モデルを単純なモデルからより高次の誤差成分までを考慮できるモデルを改良した。その改良では、ボールバーを用いて同時3軸制御運動させたときに得られるA軸とC軸のピッチ誤差を周波数分析し、振幅の大きいものを  $i$  個選び、その成分を考慮した式(1)を導入し

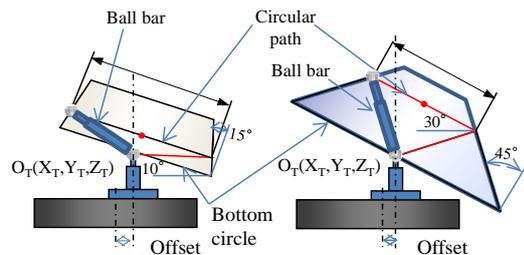


図2 2種類の円すい台と記号の定義 (ボールバー長さ100mm)

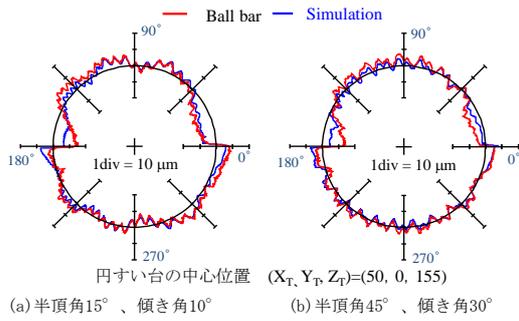


図3 ボールバーによる測定結果とシミュレーション結果との比較 (送り速度  $F=500$  mm/min)

た。振幅  $W_i$  及び位相  $\phi_i$  は、測定結果に合うように同定した。

$$\text{式(1)} \quad R = \sum W_i \sin(N_i R_{all} \theta_m + \phi_i)$$

ここで、 $R$  はピッチ誤差による減速比の変化、 $W_i$  は回転むらの振幅、 $N_i$  は周波数係数、 $R_{all}$  は機構の総減速比、 $\theta_m$  はモータ回転角、 $\phi_i$  は位相である。周波数分析の結果から、A軸のピッチ誤差は  $i=8$  で、C軸は  $i=1$  で再現できた。

シミュレーションによる軌跡とボールバーによる測定結果を合わせて図3に示す。シミュレーションと測定結果とはほぼ一致していることがわかる。図3(a)に示す結果は、半頂角が  $15^\circ$  の場合の結果である。この曲線上に見られる波状の誤差は、長周期、短周期とも全て式(1)で表されるA軸のピッチ誤差である。 $0^\circ$  と  $180^\circ$  の位置に現れる段差状の誤差は、A軸の反転による影響、すな

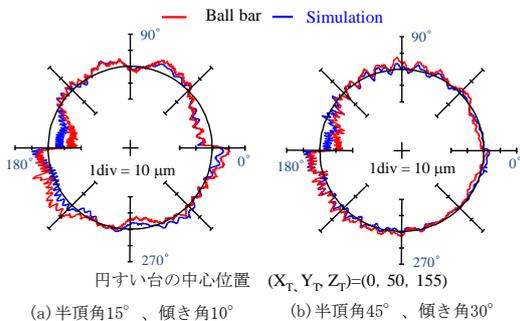


図4 ボールバーによる測定結果とシミュレーション結果との比較 (送り速度  $F=500$  mm/min)

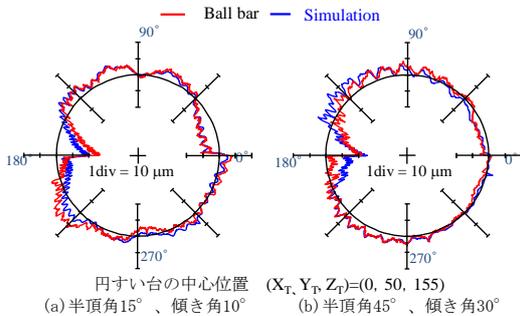


図5 ボールバーによる測定結果とシミュレーション結果との比較 (送り速度  $F=2000$  mm/min)

わち、A軸のバックラッシュが現れている。

図3(b)に示す結果は、半頂角  $45^\circ$  の場合の結果であり、この結果でもシミュレーションと測定結果とはよく一致している。また、半頂角  $15^\circ$  の場合と同様に短周期の軌跡が目立つものの、 $0^\circ$  の位置における段差は小さくなっている。この二つの結果から円すい台の軌跡については、図1及び式(1)に示したシミュレーションモデルで表せることがわかる。

次に、図2に示すテーブル側球の中心位置をY方向にオフセットさせると軌跡がどのように変化するかを調べた。その結果を図4に示す。

この図に示すように、 $180^\circ$  近傍における周期の短い波形が大きくなっているのがわかる。 $0^\circ$  の位置では、半頂角が  $45^\circ$  の場合にほとんど段差が認められなくなる。

サーボ系の影響をみるために速度を  $F=2000$  mm/min と4倍に上げると、軌跡がどのように変化するかを調べた。その結果を図5に示す。図示したように、 $180^\circ$  付近における軌跡形状全体が大きくなり、 $180^\circ$  から  $270^\circ$  に向かうところでの変化が大きい。これは、サーボ系の追従遅れによるものである。

以上、示したように図1に示したモデルは、中心位置を変えても、また送り速度を変えても、測定した形状と一致する形状を得ることができることがわかる。

従って、このモデルを使って形状を予測することが可能なことがわかる。また、得られた軌跡形状から逆にどの誤差要因が大きいかを見極めるためのツールとしても利用可能である。

次に幾何偏差が軌跡形状に影響をどの程度及ぼすかをシミュレーションで調べた。考慮した幾何偏差は、テーブル旋回形5軸制御マシニングセンタに存在する10個の偏差について調べた。

と直交3軸機にも存在する偏差3個についてもシミュレーションで調べた。その結果を図6に示す。

図示したように、偏差が存在しても円形状を保つのが、 $\gamma_{YA}$  と  $\delta_{ZYA}$  である。これは、Z軸回りの回転角度誤差とZ軸方向の位置の誤差である。

次に  $180^\circ$  付近が膨らんだり、凹んだりするのが、 $\alpha_{XY}$ 、 $\alpha_{YA}$ 、 $\delta_{YVA}$ 、 $\delta_{VAC}$  である。このうち、 $\alpha_{XY}$  は、直交3軸のうちのY軸とZ軸との直角度であり、 $\alpha_{YA}$  は、ボールバーをセットしたときのA軸の初期位置の狂い、 $\delta_{YVA}$  は、機械座標系とA軸座標系のY方向の誤差である。これらはいずれも調整が可能である。ところが  $\delta_{VAC}$  は、A軸とC軸の中心のオフセットであり、この値は製造し直さなければ修正はできない誤差である。

三つ目の特徴ある形状は、下側が膨らんだ形で、 $\beta_{YA}$ 、 $\beta_{AC}$ 、 $\delta_{xYA}$ 、の三つの偏差は、すべて同じ形にある。

四つ目は、 $\gamma_{XY}$ である。この誤差はX軸とY軸との直角度の誤差である。

以上のように4種類の特徴的形状が存在することから、どの偏差が軌跡形状に与える影響が大きいかは即座に判断できない。

図6に示した軌跡は、一目盛 $5\mu\text{m}$ で表示してあるので、ピッチ誤差やサーボ系の誤差のほうが遙かに大きいことがいえる。逆に言えば、ピッチ誤差がほとんどなく、サーボ系の追従遅れのない状態であれば、これらの幾何偏差の影響が現れることになる。

なお、新たな5軸制御マシニングセンタを用いてボールバーによる測定を行った結果

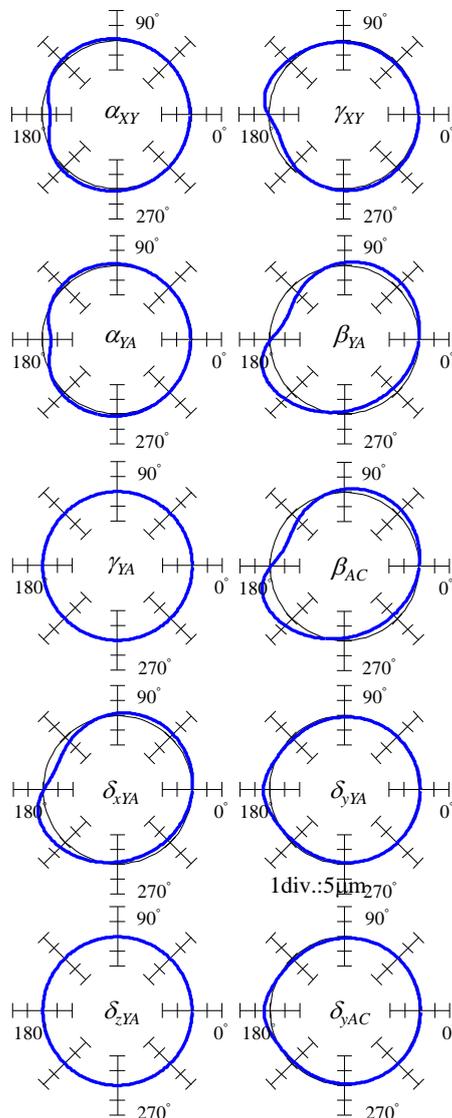


図6 幾何偏差の影響 (位置偏差には $0.01\text{mm}$ 、角度偏差には $0.005^\circ$ をそれぞれ独立して入れた。) (半頂角 $15^\circ$ 、傾き角 $10^\circ$ 、中心位置 $(0, 0, 155)$ 、送り速度 $F=500\text{mm/min}$ )

を図7に示す。図示した結果は、一目盛2

$\mu\text{m}$ と小さい。この図に示すように、ピッチ誤差のほとんど現れない機械において、上で述べたような下が膨らんだような形が得られるのがわかる。

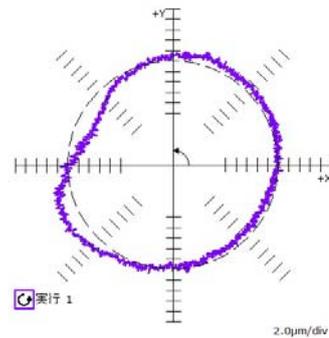


図7 ピッチ誤差が小さく、サーボ遅れのない実機によるボールバー試験の結果

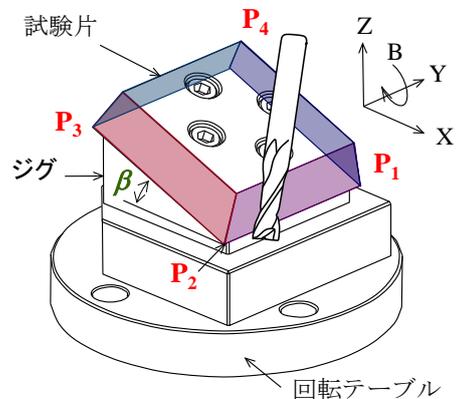


図8 四角すい台とその取付方法 (一辺の長さは約 $100\text{mm}$ 、厚さは $25\text{mm}$ ) (送り速度 $F=400\text{mm/min}$ )

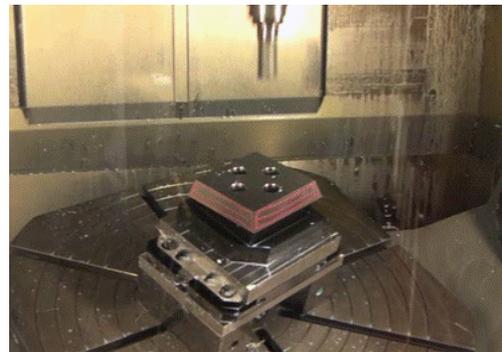


図9 四角すい台を切削する直前

(2) 四角すい台の仕上げ削りによる誤差次に同時5軸制御で四角すい台の仕上げ削りを行った。その試験方法を図8に示す。図示したように、傾斜角 $\beta$ の斜面をもつジグの上に四角すい台を取り付けて、図に示すP1点からP2、P3、P4点と順次右回りに送りをかけて仕上げ切削を行った。そのときの様子を図9に示す。この写真の場合には傾斜角は $10^\circ$ とし、四角すい台の半頂角は円すい台と同様に $15^\circ$ とした。

この仕上げられた四角すい台の四つの辺

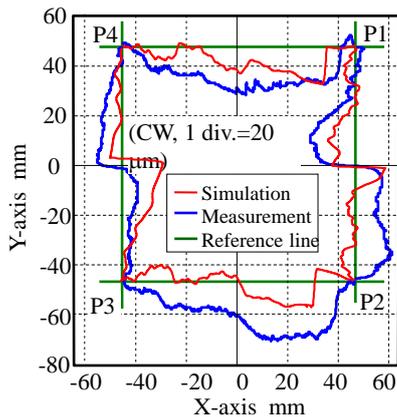


図10 仕上げ削りをした四角すい台の輪郭形状とシミュレーションの結果（傾斜角 $10^\circ$ 、送り速度  $F=400$  mm/min）

の輪郭形状を測定した。その結果を図10に示す。図には、図1に示したモデルを用いて行ったシミュレーション結果を示す。円すい台の結果ほどには一致していないが、シミュレーションによってほぼ形状を表現できていることがわかる。

このシミュレーション結果から、軸の動きの不具合、特に軸の反転時のバックラッシュの大きさや、幾何精度の影響が明確に現れるものと思われる、今後継続してこの研究を行う必要がある。

#### 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5件）

- ① 堤正臣、深山直記、崔成日、佐伯智之、齋藤明德、主軸頭テーブル旋回形5軸制御マシニングセンタの幾何偏差同定方法の一般化、日本機械学会論文集、査読あり、77巻、2011、1597-1608.
- ② 山本通、堤正臣、テーブル旋回形5軸マシニングセンタの回転軸中心線推定方法、精密工学会誌、査読あり、77巻、2011、316-321.
- ③ 山本通、長谷部孝男、堤正臣、微細溝切削による5軸制御マシニングセンタの工作精度試験方法の開発、精密工学会誌、査読あり、77巻、2011、405-410.
- ④ 深山直記、佐伯智之、崔成日、堤正臣、テーブル旋回形5軸制御マシニングセンタの幾何偏差同定方法の一般化、日本機械学会論文集（C編）、査読あり、75巻、2009、2335-2342
- ⑤ 崔成日、東山憲司、堤正臣、K.M. M. DASSANAYAKE、旋盤形複合加工機に存在する幾何偏差同定方法、日本機械学会論文集（C編）、査読あり、75巻、2009、476-483

〔学会発表〕（計16件）

- ① 加藤教之、土橋祐、堤正臣、弓座大輔、井原之敏、円すい台を模擬した3次元円弧補間運動による5軸制御マシニングセンタの性能評価、2011年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、2011年3月15日、東京都
- ② 土橋祐、堤正臣、加藤教之、5軸制御マシニングセンタの3次元円弧補間運動軌跡に及ぼす検査条件の影響、第18回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集、2011年3月14日、東京都
- ③ 登根慎太郎、堤正臣、崔成日、工作物座標系を基準とした測定方法による5軸制御マシニングセンタの幾何偏差の同定、生産と加工に関する学術講演会2010、2010年11月19日、岡山県
- ④ 堤正臣、土橋祐、加藤教之、崔成日、5軸マシニングセンタにおける3次元円弧補間運動の誤差曲線及ぼす検査条件の影響、2010年11月19日、生産と加工に関する学術講演会2010、岡山県
- ⑤ K. Tajima、D. Muditha、C. Cui、M. Tsutsumi、Development of 3D-probe for measuring rotational accuracy of tilting rotary tables、Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting、2010年10月25日、Gifu.
- ⑥ 深山直記、崔成日、堤正臣、佐伯智之、傾斜した旋回主軸頭をもつ5軸制御マシニングセンタの幾何偏差測定方法、2010年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、2010年3月16日、1027-1028、埼玉県
- ⑦ 崔成日、堤正臣、茨木創一、井原之敏、清水伸二、三島望、5軸制御マシニングセンタにおける同時3軸制御測定装置の互換性、2010年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、2010年3月16日、埼玉県
- ⑧ 木落清志郎、堤正臣、佐伯智之、崔成日、四角すい台を用いた5軸マシニングセンタの工作精度試験方法の開発、2010年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集、2010年9月27日、愛知県
- ⑨ N. MIYAMA、T. SAIKI、C. CUI、M. TSUTSUMI、Generalization of Identification Method of Geometric Deviations for Five-axis Machining Centers with a Tilting-rotary Table : The 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century、2009

年12月3日、Osaka

(3)連携研究者  
なし

- ⑩ C. CUI、M. TSUTSUMI、K. HIGASHIYAMA、Identification Methods of Geometric Deviations Suitable to Multi Tasking Turning Centers : The 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century、2009年12月3日、Osaka
- ⑪ M. Dassanayake、C. CUI、K. HIGASHIYAMA、M. TSUTSUMI、A method for estimating the inherent deviations of multi-tasking turning center、The 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century、2009年12月3日、Osaka
- ⑫ 深山 直記、佐伯 智之、崔 成日、堤 正臣、傾斜した旋回軸をもつテーブル旋回形5軸制御マシニングセンタの幾何偏差測定方法、生産と加工に関する学術講演会2008、2008年11月21日、岐阜県
- ⑬ 中村 聡、高橋 耕太郎、M. Dassanayake、堤 正臣、5軸制御マシニングセンタ回転テーブルの数学モデルの開発、生産と加工に関する学術講演会2008、2008年11月21日、岐阜県
- ⑭ 鈴木 宏祐、堤 正臣、佐伯 智之、5軸制御工作機械の3次元円弧補間軌跡に及ぼすNCデータの影響、生産と加工に関する学術講演会2008、2008年11月21日、岐阜県
- ⑮ 東山 憲司、山川 泰祐、崔 成日、堤 正臣、旋盤形複合加工機の運動精度評価方法の開発、生産と加工に関する学術講演会2008、2008年11月21日、岐阜県
- ⑯ 崔 成日、東山 憲司、M. Dassanayake、堤 正臣、旋盤形複合加工機に存在する幾何偏差同定方法、生産と加工に関する学術講演会2008、2008年11月21日、岐阜県

[その他]

ホームページ等

[http://www.tuat.ac.jp/~tllab/research\\_1.html](http://www.tuat.ac.jp/~tllab/research_1.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

堤 正臣 (TSUTSUMI MASAOMI)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90108217

### (2)研究分担者

笹原 弘之 (SASAHARA HIROYUKI)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00205882