

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 ( 共通 )

## 科学研究費助成事業

## 研究成果報告書



平成 2 9 年 6 月 7 日現在

機関番号： 1 2 6 0 5

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2014 ~ 2016

課題番号： 2 6 8 2 0 0 1 9

研究課題名 ( 和文 ) 同時 5 軸制御による複雑形状部品創成面の誤差解析

研究課題名 ( 英文 ) Error analysis of complex shaped surface using simultaneous five-axis control motion

研究代表者

加藤 教之 ( Kato, Noriyuki )

東京農工大学・工学部・特任助教

研究者番号： 5 0 7 2 6 4 6 1

交付決定額 ( 研究期間全体 )： ( 直接経費 ) 3,100,000 円

研究成果の概要 ( 和文 )：本研究は、複雑形状部品を 5 軸マシニングセンタを用いて仕上げたときに生じる周期的かつ局所的な模様の発生原因を明らかにすることを目的としている。特に、複数の誤差が総合されて現れると考えられるこのような模様の出現する原因について、どのような誤差がどう現れるかを、シミュレーションと実験とによって明らかにする。その結果に基づいて、幾何誤差、機構誤差、サーボ系誤差のような 5 軸機に固有の誤差要因を特定し、複雑形状の加工表面に現れる周期的な模様の発生原因を診断する技術を開発する。

研究成果の概要 ( 英文 )：The purpose of this research is to clarify the cause of the occurrence of the periodic and local pattern which occurs when complicated shape parts are finished with 5 axis machining center. In particular, what kind of error will appear with regard to the cause of appearance of such a pattern thought that plural errors appear as integrated can be clarified by simulation and experiment. Based on the results, we develop a technology to identify the cause of error inherent in 5 axis machine such as geometric error, mechanism error, servo system error, and diagnose cause of pattern appearing on complicated shape processed surface.

研究分野： 生産工学・加工学

キーワード： マシニングセンタ ボールバー 幾何誤差 5 軸

## 1. 研究開始当初の背景

(1) インペラーや曲がりばかさ歯車などは、低コスト化のために専用機ではなく5軸マシニングセンタや複合加工機で加工されることが多くなってきている。ところが5軸マシニングセンタでは、加工された表面に切削現象による模様が現れることがある。また、インペラーなどの複雑形状をした部品の形状精度や寸法精度は、必ずしも高くないこともわかっている。

(2) 5軸マシニングセンタに存在する誤差は、構成部品自身の誤差や部品同士の組立誤差、旋回軸駆動系のピッチ誤差やバックラッシュ、サーボ系の追従誤差などが上げられるが、これらの誤差によって寸法や形状が狂うだけでなく、仕上げ面に局所的に特有の模様が現れたりする。そのため、軸数の少ない工作機械と比べると工作精度が低く、しかも誤差要因の特定が困難なことも問題である。

(3) 1958年に5軸マシニングセンタが市場に登場し、1969年には、代表的な工作精度試験規格である米国航空宇宙規格(NAS 979)が制定され、その規格では同時5軸制御によって円すい台を仕上げ削りし、真円度、円すい角度を評価することが要求された。その後、米国ボーイング社が工作機械の受入条件としてNAS 979を利用してきたことから、この規格は、今でも広く使われている。近年、同時5軸制御による円すい台の仕上げ切削に関する内容は、マシニングセンタ検査規格(ISO 10791)の改訂に合わせて、工作精度試験規格(ISO 10791-7)と補間運動試験規格(ISO 10791-6)とに採用された。これらの試験方法が規格として採用されても、その試験によって得られた結果を診断する技術はなく、経験に照らして機械の不具合を診断することしかできなかったのが現状である。

(4) 同時5軸制御による運動は、主として表面創成に關与する運動軸が変化し、軸の運動方向反転位置や軸のピッチ誤差などの現れ方が、工具先端点の位置や工具軸の角度によって大きく変化するため、表面の模様から、どの軸がどの程度影響しているかを判断するのは容易ではなく、高精度な部品を加工するためには、これらの課題を解決する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、同時5軸制御下で仕上げた表面に現れる周期的な模様の発生原因を診断し、工作精度を向上させるための技術を開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究で用いるのは、立形3軸マシニングセンタのテーブル上に回転軸A、C軸を

有する傾斜円テーブルを載せたテーブル旋回形5軸マシニングセンタである。この円テーブルにボールバーを取り付けて規格となる円すい台の仕上げ加工を模擬した円弧補間運動試験を行いボールバーの伸縮量をプロットして評価する。ボールバーの長さは100 mm、円すい台の半頂角は、 $\theta = 15^\circ$  と  $\theta = 45^\circ$  との二つの場合について検討している。

(2) テーブル旋回形5軸マシニングセンタが持つ固有の幾何誤差としてC軸とA軸との位置誤差 $\delta y_{CA}$ 及び角度誤差 $\beta_{CA}$ 、A軸とY軸との位置誤差 $\delta x_{AY}$ 、 $\delta y_{AY}$ 、 $\delta z_{AY}$ 及び角度誤差 $\alpha_{AY}$ 、 $\beta_{AY}$ 、 $\gamma_{AY}$ の合計8個について同定及び補正する方法を検討した。加えて、テーブル側に3個の取付誤差( $\delta x_{IC}$ 、 $\delta y_{IC}$ 、 $\delta z_{IC}$ )、主軸側には3個の仮の位置誤差( $\delta x_{ZS}$ 、 $\delta y_{ZS}$ 、 $\delta z_{ZS}$ )、計14個について検討する。なお、この仮の位置誤差とは、幾何誤差同定及び取付誤差測定の後、ワーク座標原点を変更した場合に生じる誤差である。そのため主軸側球とテーブル側球とが一致するように原点を再定義すればゼロとなり、実際の位置誤差に加算される誤差になる。なお、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は各軸間の直角度や平行度である角度誤差を表わし、 $\delta x$ 、 $\delta y$ 、 $\delta z$ は位置誤差を表わす。右下の添字はどの軸間に存在する幾何誤差かを表わす。

(3) シミュレーションは、筆者らの開発したモデルを用いて行う。主軸側球とテーブル側球との位置を幾何誤差及び取付誤差分だけ座標変換して軌跡を求める。また、各幾何誤差と取付誤差との影響を見るため、従来の補正式に取付誤差を考慮して実験とシミュレーションの指令値に使用する。

## 4. 研究成果

(1) 各軸間の同期誤差、旋回軸のギアの影響によるピッチ誤差とバックラッシュ、直進軸の摩擦の影響など図1に現れる誤差を考慮したシミュレーションは、測定結果と挙動がよく一致した。

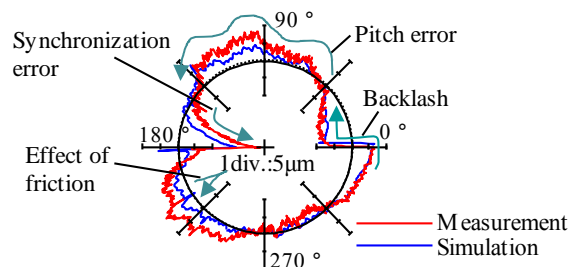


Fig.1 Effect of each error on motion trajectory ( $\theta = 15^\circ$ , Feed speed: 2.0m/min)

(2) 同定した幾何誤差と測定した取付誤差を表1に示す。調整可能な誤差である $\delta x_{AY}$ 、 $\delta y_{AY}$ 、 $\delta z_{AY}$ 、 $\alpha_{AY}$ は、補正効果を確認するため大きくしてある。幾何誤差及び取付誤差の補正前・補正後の実験並びにシミュレーションの結果を図2及び表2に示す。なお、バックラッシュは、真円度に大きな影響

を与えるためにあらかじめ補正してある．図は，基準円に対して拡大して表示してある．補正後，シミュレーションのY方向偏心量が一致していないが，それ以外の傾向はよく一致した．

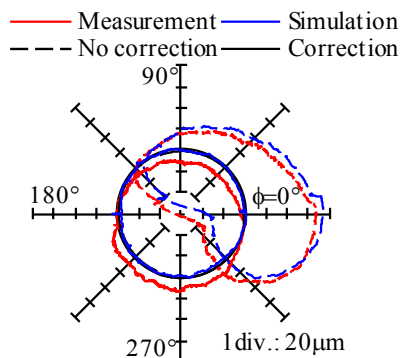


Fig. 2 Effect of compensation ( $\theta = 15^\circ$ , Feed speed: 1.0m/min)

Table 1 Identified deviations

$\alpha_{AY}$	-0.052°	$\delta x_{AY}$	-98μm
$\beta_{AY}$	-0.003°	$\delta y_{AY}$	-101μm
$\gamma_{AY}$	-0.005°	$\delta z_{AY}$	-103μm
$\beta_{CA}$	0.003°	$\delta y_{CA}$	7μm
$\delta x_{WC}$	17μm	$\delta x_{ZS}$	0
$\delta y_{WC}$	0	$\delta y_{ZS}$	0
$\delta z_{WC}$	7μm	$\delta z_{ZS}$	0

Table 2 Effectiveness of correction

	Simulation		Measurement	
	No corr.	Corr.	No corr.	Corr.
Eccentricity $e_x$ μm	59.6	0.3	52.2	-2.5
Eccentricity $e_y$ μm	16.0	0.5	10.84	-11.6
Roundness μm	64.3	11.3	62.2	11.7
Mean radius mm	99.992	100.000	99.991	100.000

(3) シミュレーションによる幾何誤差の影響を図3に示す．軌跡の形状は4つのグルー

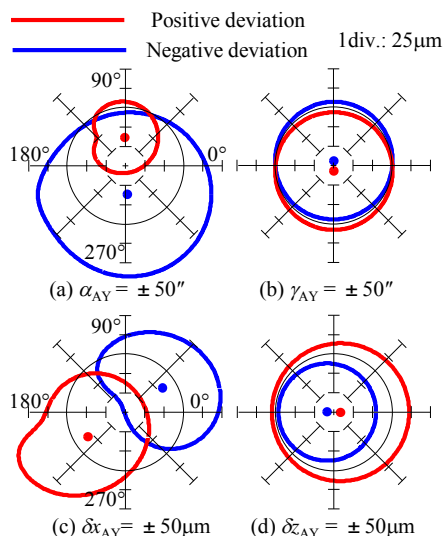


Fig. 3 Influence of geometric deviation

プに分けられることがわかった．図示はしていないが， $\delta y_{AY}$ ,  $\delta y_{CA}$  が図 3(a)と， $\beta_{AY}$ ,  $\beta_{CA}$  が図 3(c)と同様の傾向が現れる．

(4) ボールバー用のテーブル側ソケットを固定したときに現れる取付誤差と主軸側の位置誤差について検討した．幾何誤差は補正済み又はないものとする．図 4(a)～(e)にテーブル側の各取付誤差と主軸側の位置誤差とが現れたときのシミュレーションによる軌跡の変化を示す．ここで主軸のZ方向 $\delta z_{ZS}$ は，変化がないため省略する．テーブル側に誤差があっても，真円度はよく，偏心はX,Y方向 $\delta x_{WC}$ ,  $\delta y_{WC}$ のどちらかであり，平均半径はZ方向 $\delta z_{WC}$ のみ変化する．主軸側に誤差があると，真円度が悪くなり，幾何誤差の影響と似た形状が現れる．偏心はX方向 $\delta x_{ZS}$ ，平均半径はY方向 $\delta y_{ZS}$ のみに変化する．これらの傾向を図3の幾何誤差の傾向と比べると，図 3(a)は，図 4(a)と(d)の組合せ，図 3(c)は，図 4(b)と(e)の組合せとなっていることがわかる．これは，幾何誤差があれば基準位置を設定したときすでに主軸側とテーブル側が一緒にずれてしまうためである．偏心量を小さくするにはテーブル側の誤差も考慮した補正を行う必要がある．

補正した効果は図2,表2で示したとおりである．幾何誤差の同定は，取付誤差を考慮しなくてよい方法を用いて行った．補正した軌跡は真円度がよいために，ほとんどの幾何誤差の補正効果が十分に反映されていることがわかる．また，平均半径もよいことから，実験によるY方向のずれの原因は，Y方向の取

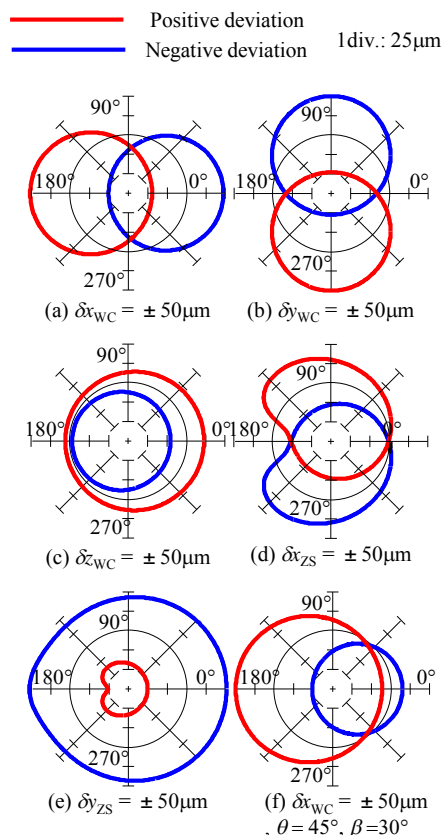


Fig. 4 Influence of errors by setting center position

付誤差 $\delta y_{wc}$ の補正効果が十分でなかったためと考えられる。

最後に、 $\theta = 45^\circ$ についても確認した。図 4(f)のように、X 方向の取付誤差 $\delta x_{wc}$ の平均半径に大きな変化が見られ、Z 方向の取付誤差 $\delta z_{wc}$ との判別が難しくなっていることがわかる。したがって幾何誤差の補正が正しく行われていれば、 $\theta = 15^\circ$ の円すい台試験の方が取付誤差の確認が容易に行えることがわかった。

#### 5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

#### 6．研究組織

##### (1)研究代表者

加藤 教之 (KATO NORIYUKI)

東京農工大学・工学部・特任助教

研究者番号：50726461