

仕上げ加工面に及ぼす 5 軸制御工作機械の幾何誤差および動的同期精度の影響

神戸大学 ○長谷川正悟, 柏木洋慶, ◎佐藤隆太, 白瀬敬一

要 旨

多軸制御工作機械を用いて加工を行うと、加工面に予期せぬ不具合が生じることがある。本研究では、加工面に生じる不具合の主な要因である幾何誤差および動的同期精度が加工面に及ぼす影響を調査した。多軸制御工作機械の回転軸に特有の 8 種類の幾何誤差を個別に考慮した場合や、位置ループゲインを変更した場合の加工面をシミュレーションするとともに、実加工試験を行い加工面の観察および形状測定を行った。その結果、同じ大きさの幾何誤差が存在した場合でも機械の運動との関係により加工面に及ぼす影響は異なるということ、および運動軸の速度が急激に変化する場合には加工面に動的同期精度による影響が生じることが明らかとなった。

1. 緒 言

5 軸制御工作機械を用いた加工においては、機械を構成する軸間の幾何誤差や、複数の運動軸を同期制御した場合に生じる動的同期誤差の影響により、加工面に予期せぬ不具合が生じることがある。幾何誤差を測定して補正する方法や、5 軸制御工作機械の直進軸と回転軸の動的同期精度については多くの研究が行われてきた¹⁾²⁾。しかし、幾何誤差や動的同期精度が加工面に及ぼす影響について詳細に検討した例は見当たらなかった。そこで本研究では、5 軸制御工作機械特有の回転軸に存在する幾何誤差および直進軸と回転軸の動的同期精度が加工面に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、幾何誤差を個別に考慮した場合や動的同期精度に影響するパラメータである送り駆動系の位置ループゲインを変更した場合の加工試験およびそのシミュレーションを行った。

2. 実験およびシミュレーション方法

実験は、テーブル側に回転 2 軸 (B 軸と C 軸) を持つ立て形 5 軸制御マシニングセンタを用いて行った。本研究では、**図 1(a)**に示すように、半径 20 mm の球体のうち上部 6 mm を加工する。工具経路は**図 1(b)**に示すような X 軸に沿った走査線の一方送りとする。そのときの工具姿勢はチルト角が 0 度、リード角が 20 度となるように同時 5 軸制御加工を行う。加工後の形状は**図 2(a)**に示すようにレーザ変位計により机上計測³⁾するとともに、見た目を評価するために加工面の撮影を行った (**図 2(b)**)。机上計測結果には工作機械の運動誤差による影響も含まれるが、本研究では回転軸を含む同時 5 軸制御運動による加工結果を直進軸のみを用いて机上計測した。

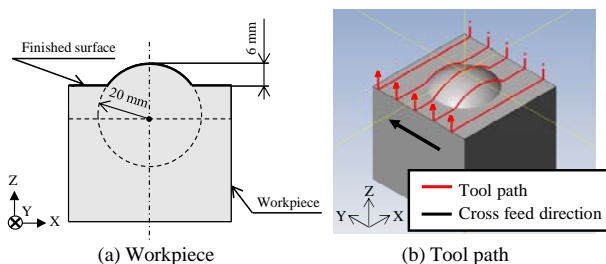


Fig.1 Workpiece and tool path

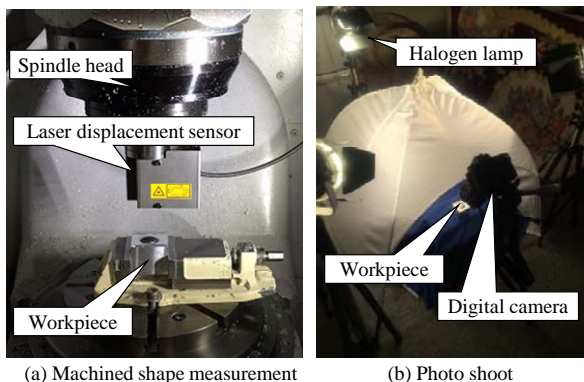


Fig.2 Evaluation of machined result

Table 1 Cutting conditions

	Condition A	Condition B
Tool shape	φ6 Ball-end mill	
Number of flute	2	
Workpiece	Aluminum alloy (A5052P)	
Feed rate	60 mm/min	2000 mm/min
Spindle speed	600 rpm	20000 rpm
Axial depth of cut	0.5 mm	1.0 mm
Radial depth of cut	0.2 mm	0.05 mm

よって、机上計測結果には回転軸の運動による影響は含まれない。また、写真撮影時には、映り込みをさけるため、白色布を介して 3 台のハロゲンランプにより照明した状態で撮影を行った。

加工条件を表 1 に示す。条件 A は幾何誤差による影響を調査する場合であり、動的同期精度による影響を排除するために送り速度を低く設定した。条件 B は動的同期精度による影響を調査する場合であり、逆に送り速度を高く設定した。実験に使用した 5 軸制御マシニングセンタの幾何精度は十分に高く、幾何誤差の影響による形状誤差が現れなかったため、本研究では幾何誤差が存在するものとして NC プログラムを生成することで幾何誤差を模擬的に表現した。同様に、送り駆動系の位置ループゲインを故意に小さく設定することで、動的同期精度による影響を調査した。実加工試験と同じ条件での加工形状および加工面のシミュレーションについても、別途開発された方法⁴⁾により行った。

3. 幾何誤差の影響

B 軸回転中心の X 方向位置誤差 δ_{xBy} のみが 0.1 mm である場合の形状および加工面を**図 3(a)**に、B 軸回転中心の Z 方向位置誤差 δ_{zBy} のみが 0.1 mm である場合の形状および加工面を**図 3(b)**にそれぞれ示す。また、同様の条件でシミュレーションを行った場合の形状および加工面を**図 4(a)**および**図 4(b)**にそれぞれ示す。形状は、法線方向の形状誤差を 50 倍に拡大して表示している。

図 3および**図 4**によると、回転中心の X 方向位置誤差である δ_{xBy} のみが存在する場合には、球の右側中腹付近に形状のへこみが存在し、それが加工面上に視認される。しかし、回転中心の Z 方向位置誤差 δ_{zBy} のみが存在する場合の加工形状および加工面には、このようなへこみは確認できない。このように、同じ大きさの幾何誤差が存在しても、その向きと加工形状との関係によって加工面に及ぼす影響は異なり、そのことがシミュレーションにより的確に表現できている。

加工面にへこみが生じる原因を明らかにするために、回転中心の X 方向位置誤差 δ_{xBy} のみが存在する場合について、へこみが生じる付近の運動軌跡のシミュレーション結果を機械座標系およびテーブル座標系における軌跡として**図 5(a)**および**(b)**に示す。**図 5(a)**に示すように、この付近では回転軸である C 軸が 180 度回転しており、それに追従するように直進軸が運動している。このとき回転中心位置が X または Y 方向

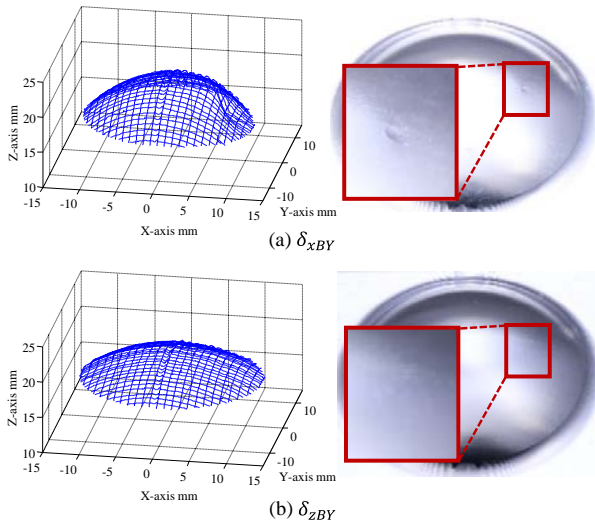


Fig.3 Comparison of influence of geometrical errors (Experiment)

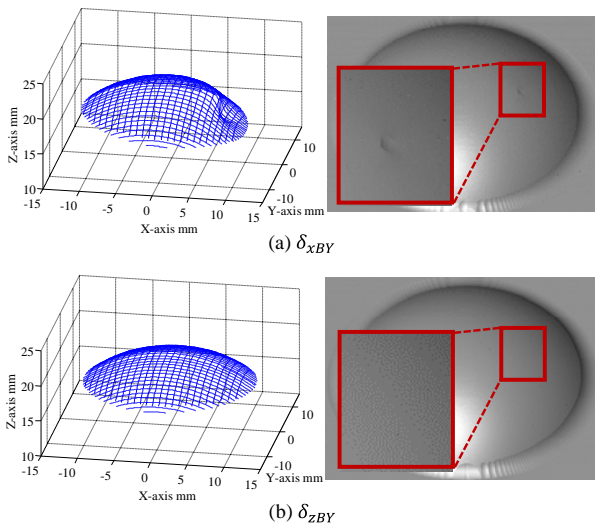
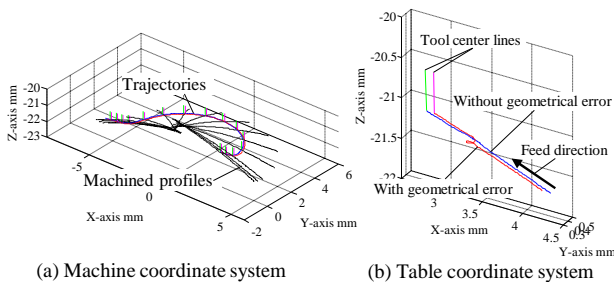


Fig.4 Comparison of influence of geometrical errors (Simulation)

Fig.5 Influence of geometrical error δ_{xBY} on motion trajectory

にずれていると、図 5(b)に示すようにテーブル座標系上では工具が一方所で円弧状に運動することとなり、これが形状にへこみを生じさせる原因となる。一方、本研究で加工した形状の場合、回転中心位置が Z 方向にずれていても、テーブル座標系上での運動軌跡に大きな誤差は生じない。

4. 動的同期精度の影響

動的同期精度が加工面に及ぼす影響を明らかにするため、各軸送り駆動系の追従性能を左右する位置ループゲイン G_p の設定を変えて加工試験とそのシミュレーションとを行った。実験結果を図 6 に、シミュレーション結果を図 7 にそれぞれ示す。図 6 (a)、図 7 (a)は位置ループゲインを既定値の 120、図 6 (b)、図 7 (b)は 30 とした場合の結果である。図によると、とくに位置ループゲインを 30 とした場合の結果において、球左側中腹付近にへこみ状の様子が観察される。

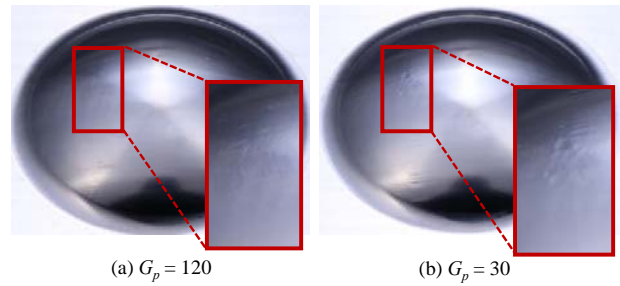


Fig.6 Influence of dynamic synchronous accuracy (Experiment)

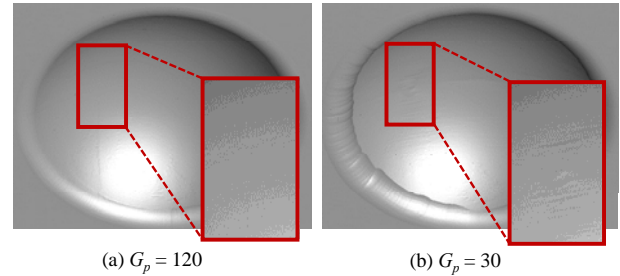


Fig.7 Influence of dynamic synchronous accuracy (Simulation)

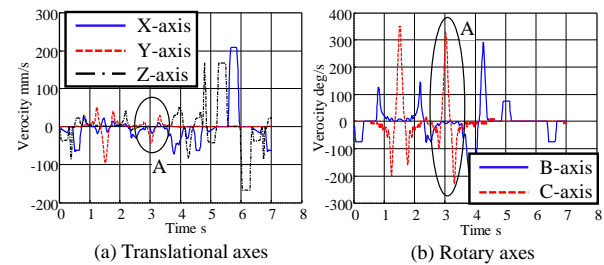


Fig.8 Velocity profile

図 8 は、1 パス分の工具経路における各軸の速度変化である。加工面上にへこみが生じているのは図 8 の時間軸上約 3 秒付近であり、C 軸と Y 軸の速度が大きく変化しており（図中 A）、急激な速度変化に対する追従性の悪化が加工面にへこみを生じさせた原因である。また、位置ループゲインが小さい場合に加工面上のへこみが大きく現れており、このことから加工面上のへこみは動的同期精度による影響であるといえる。

5. 結 言

本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 同じ大きさの幾何誤差でも、機械の運動との関係により加工面に及ぼす影響は異なる。
- (2) 各軸の速度が急激に変化する場合には、加工面に動的同期精度による影響があらわれる。
- (3) 各幾何誤差および動的同期精度が加工面に及ぼす影響を的確にシミュレーションすることができる。

謝 辞

本研究において使用した工作機械は MTTRF より貸与されたものであり、関係各位に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 登根慎太郎, 加藤教之, 堤正臣, 幾何偏差の測定及び補正による 5 軸制御マシニングセンタの工具経路精度の向上, 日本機械学会論文集 C 編, 78 巻, 794 号, (2012), pp.3557-3568.
- 2) 佐藤隆大, 横堀祐也, 堤正臣, 5 軸制御マシニングセンタにおける直進軸と旋回軸の動的同期精度, 機械工学会誌, Vol.72, No.1, (2006), pp.73-78.
- 3) 西川静雄, レーザ変位計による機内計測システム「S-Quad」のご紹介, 精密工学会超精密位置決め専門委員会定例会講演前刷集, (2012), pp.39-55.
- 4) R. Sato, Y. Sato, K. Shirase, G. Campatelli, and A. Scippa, Finished Surface Simulation Method to Predicting the Effects of Machine Tool Motion Errors, International Journal of Automation Technology, Vol.8, No.6, (2014), pp. 801-810.