

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：57701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03813

研究課題名(和文) マシニングセンタ用ハイブリッド主軸による工具振動変位の推定

研究課題名(英文) Estimation of tool vibration displacement by using hybrid spindle system for machining center

研究代表者

島名 賢児 (Shimana, Kenji)

鹿児島工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：90353359

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、玉軸受と磁気軸受で支持される複合型主軸に組み込まれた渦電流センサにより小径エンドミル先端部のたわみ量の高精度な推定を目的としている。軸方向の切込み深さを直線的に増加させる切削実験を行い、ケイ素鋼板を取り付けたツールホルダ下端部の変位を渦電流センサにより工具先端の変位量を推定する手法について検証を行った。切削では、送り方向の加工誤差は、ダウンカットとアップカット共に垂直方向の切削抵抗と定性的にほぼ一致する傾向が見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

主軸系に通常の転がり軸受を用いたマシニングセンタを用い、電磁力によりエンドミル先端を制御し、さらにラジアル磁気軸受に取り付けた変位センサによりエンドミル先端の振動変位を推定しようとする研究はこれまでにない。また一つの装置で加工能率と加工精度の向上が可能な装置の開発を目指す研究もこれまでにない。さらに磁気軸受を用いた場合よりも装置は簡素なため、提案している制御システムを組み込んだツーリングシステムの実用化が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to highly accurately estimate the deflection at the cutting edge of a small-diameter end mill using gap sensors built into a hybrid spindle supported by ball bearings and magnetic bearings. Cutting experiments were conducted in which the axial depth of cut increased linearly. The effectiveness of the method for estimating the displacement of the tool at cutting point from the displacement of the lower end of the tool holder to which the silicon steel plate is fixed, measured by a gap sensor, was verified. In cutting tests, the machining error in the feed direction tended to qualitatively coincide with the cutting force in the vertical direction for both down-cutting and up-cutting.

研究分野：切削加工学

キーワード：振動変位 切削抵抗 小径エンドミル ハイブリッド主軸 磁気軸受

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

金型は、工業製品を安く大量生産するために欠くことのできない工具であるが、タイムリーに製品を市場に投入するため、製品の開発期間は急速に短くなっており、金型に対しても加工能率の向上(納期の短縮)が極めて重要になっている。一般に複雑な形状をした精密金型は放電加工によって作られてきたが、高速切削加工が実用化され、マシニングセンタを用いるエンドミル加工によって作られるようになった。しかし金型の深リブ溝、深隅部などは小径エンドミル工具を用いて突き出し量を大きくする必要があるため、工具のたわみやびびり振動が発生しやすく、小径エンドミルを用いた金型の高能率、高精度の加工は困難である。これまでの研究で再生びびり振動の発生限界がロープ状になることを利用した抑制方法で、主軸回転速度を制御して安定ポケットを探索し、びびり振動を抑制する方法が知られている。金型加工では主軸回転速度が速く、びびり振動を高速で検知し、適切な主軸回転速度に調整できれば、実用性の高い振動抑制の方法になる。しかし、びびり振動を抑制するために主軸回転速度が決まってしまうため、工具寿命等を考慮した場合の切削速度の最適化は困難になる。従って低切削速度でも抑制効果があり、切削条件等に影響しないびびり振動発生抑制の方法が望まれる。小径エンドミルのたわみに起因する加工誤差の低減について、研究代表者は、スクエアエンドミルによる高速切削において、エンドミル工具系の振動特性を考慮することで動的切削抵抗から工具先端(切削点)の振動変位を推定し、振動変位分のテーブル移動で加工誤差を低減する研究を進めてきた。しかしながら、ねじれ刃エンドミルの外周切削では、工具軸方向に加工面は波状の加工誤差を生じる。これはエンドミル加工では工具の回転中に切削抵抗が変化してたわみも変化することにより生じる加工誤差であり、これを低減することは困難である。上記のように、これまで小径エンドミルを用いた金型深彫り加工の加工能率と加工精度(形状精度)の向上のため、びびり振動の抑制と工具のたわみに起因する加工誤差の低減を、別々の方法で実現する研究を行ってきた。しかし、実際の小径エンドミルによる加工では、これらの問題を同時に解決することが望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、図1に示すようにスピンドルに取り付けた磁気軸受の近くに電磁石と渦電流センサを設け、電磁力でツールホルダの下端を制御し、小径エンドミル先端を制御することにより振動変位を抑制し、加工能率と加工精度の向上を目指すハイブリッド主軸システムを試作して、そのシステムを活用した高精度な振動変位の推定を実現する。

電磁力を用いた小径エンドミル先端部の振動変位を高精度で推定できる主軸の設計製作を行う。小径エンドミルは、電磁力によって変位する程度の比較的剛性が低いツールホルダで把持する必要があるため、把持部が細長い市販のツールホルダを利用する。小径エンドミル加工において、エンドミル先端の位置の振動変位の推定を行うには、電磁力によって主軸となるロータ部の振動変位を正確に測定する必要がある。主軸系に通常の転がり軸受を用いたマシニングセンタを用い、電磁力により小径エンドミル先端を制御し、さらにラジアル磁気軸受に取り付けた変位センサによりエンドミル先端の振動変位を推定しようとする研究はこれまでにない。また一つの装置で加工能率と加工精度の向上が可能な装置の開発を目指す研究もこれまでにない。

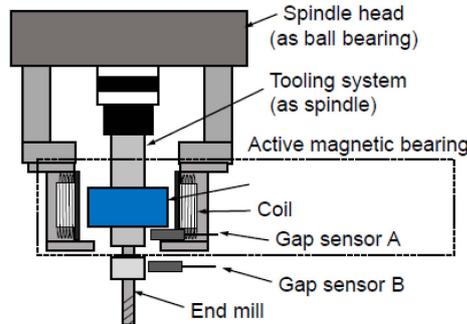


図1 ハイブリッド主軸モデル

3. 研究の方法

汎用のマシニングセンタの主軸下部に取り付けた図2に示すようなハイブリッド主軸を取り付けた実験装置を用いて切削実験を行い、圧入によってケイ素鋼板円筒が取り付けられたツールホルダ下部の切削中の変位をハイブリッド主軸下部に取り付けた渦電流センサにより測定し、テーブルに取り付けられた切削動力計の上部に治具を介して取り付けられた被削材に作用する切削中の切削抵抗を測定した。さらに、切削加工後に接触式変位計により

表1 切削実験条件

	Work	Brass
End mill	Diameter	8 (mm)
	Number of flutes	2
	Helix angle	30°
Spindle speed		3500 (rpm)
Feed rate		60 (mm/min)
Feed per revolution		0.017 (mm/rev)
Radial depth of cut		0.8(mm)
Axial depth of cut		0~5 (mm)
Cutting type		Down cut

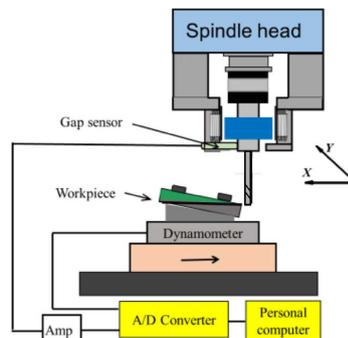


図2 切削実験装置

加工誤差を測定した。実験では図2に示すように被削材の端面(緑色部)を切削した。被削材は7°傾けて、対角線方向に溝を付けて側面切削のみが行えるようにしてあり、切削進行に伴って軸方向の切込み深さが直線的に増加するようにした。切削条件を表1に示す。今回はアップカットとダウンカットで行ったが、研究成果ではダウンカットの結果のみを示す。

#### 4. 研究成果

図3にダウンカットで切削した場合の加工後に測定した加工面形状を示す。図3(b)は切削進行方向の加工面形状である。切削距離が10mm程度まで高さが大きくなっているが、これは軸方向の切込み深さが非常に小さい段階のため、被削材が横方向に逃げたためである。切削距離が10mm程度以降では、軸方向の切込み深さの増加とともに高さも徐々に増加している。一方、図3(c)は切削進行に対して垂直方向の加工面形状である。工具先端から離れるほど高さが低下しているのは、工具先端の変位が最も大きく、工具の掴み部に近づくほど変位は小さくなるからである。

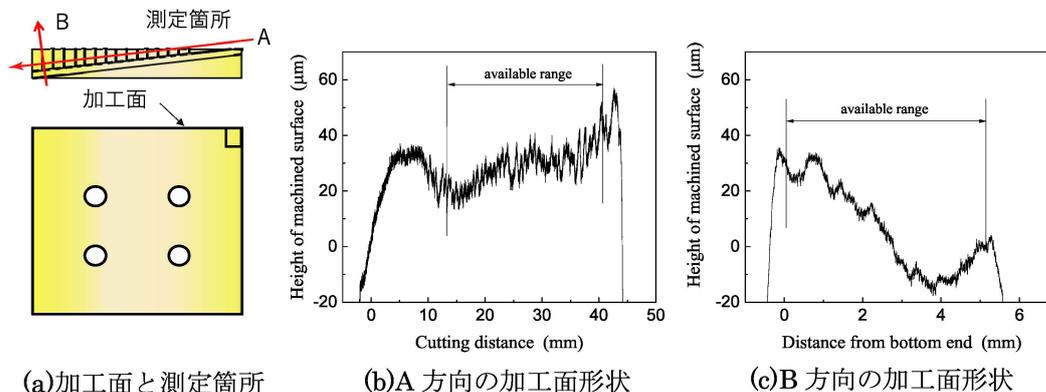


図3 加工面形状(ダウンカット)

ある。

図4にダウンカットで切削した場合の、切削中に測定した切削抵抗とツールホルダ下部の振動変位を示す。図4(a)は切削開始から切削終了までの結果であり、図4(b)は切削開始から約30秒経過したときの詳細図である。図4(a)から、軸方向の切込み深さの増加とともに、振動変位と切削抵抗のいずれも振幅が徐々に大きくなっていることがわかる。

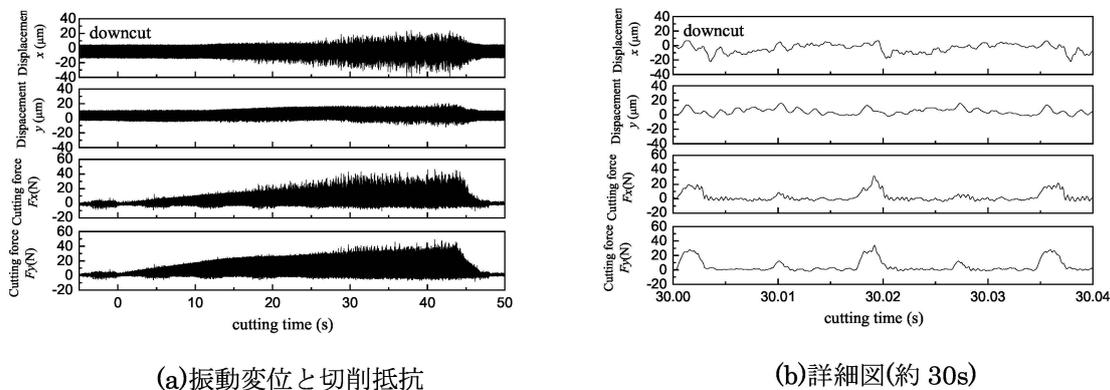
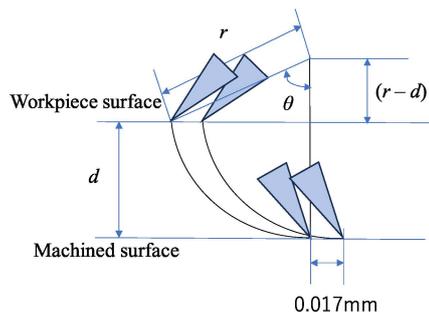


図4 振動変位と切削抵抗(ダウンカット)

そこで、切削抵抗と加工誤差の関係を求めるため、切刃が被削材に接触してから加工面に達するまでの時間を求める。図5に切刃が被削材に接触してから加工面に達するまでの概念図を示す。



$$r = 4, \quad d = 0.8 \text{ のときの切削角} \\ \theta = \cos^{-1}(1-d/r) = 36.9^\circ$$

主軸回転速度3500rpmでの切削時間

$$t = \frac{60}{N} \times \frac{\theta}{360} = \frac{60}{3500} \times \frac{36.9}{360} = 1.76 \text{ (ms)}$$

$d$ : 切り込み深さ(mm)  
 $r$ : エンドミルの半径(mm)  
 $\theta$ : 切削角( $^\circ$ )  
 $N$ : 主軸回転速度(rpm)

図5 切刃が被削材に接触してから加工面に達するまでの時間 (ダウンカット)

図6は、加工面に対して垂直方向の切削抵抗と振動変位の詳細図である。図5において、切刃が被削材に接触してから加工面に達するまでの時間が1.76msである求められた。そこで、切削抵抗と振動変位が急激に増加し始める瞬間が、切刃が被削材に接触し始めたと考え、図6中に示すように、そこから1.76ms後の切削抵抗と振動変位を求めた。

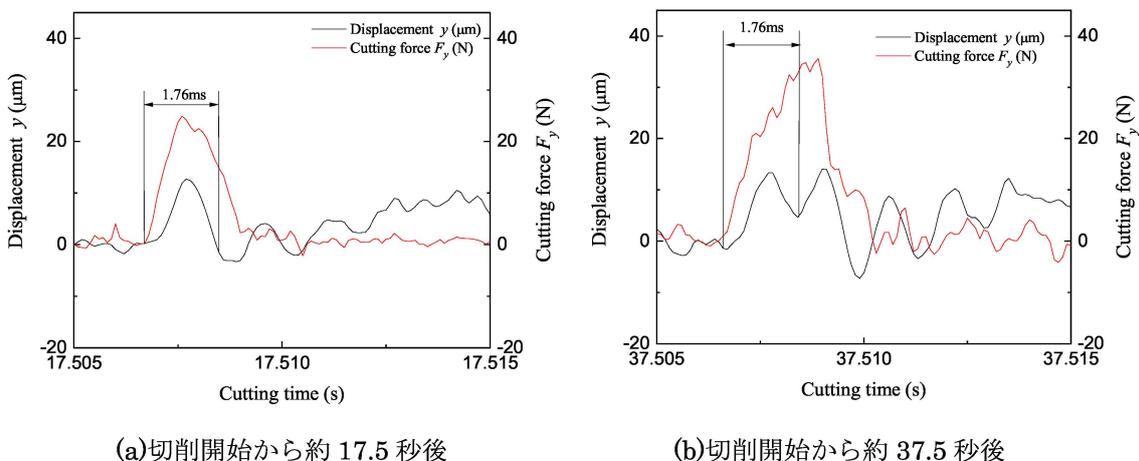


図6 加工面に対して垂直方向の切削抵抗と振動変位の詳細図（ダウンカット）

図7(a)は、切刃が加工面に達した時の切削抵抗と加工誤差の結果であり、図7(b)は図3(b)で示したA方向の加工面形状の結果である。なお、送り速度が60mm/min(1mm/s)であるため、二つの図の横軸は同じスケールとみなすことができる。安定切削領域での送り方向の加工誤差は、加工面に対して垂直方向の切削抵抗は、定性的にほぼ一致した増加傾向であることが分かる。一方、振動変位については、軸方向の切込み深さの増加に伴い、変化が小さいことが分かる。

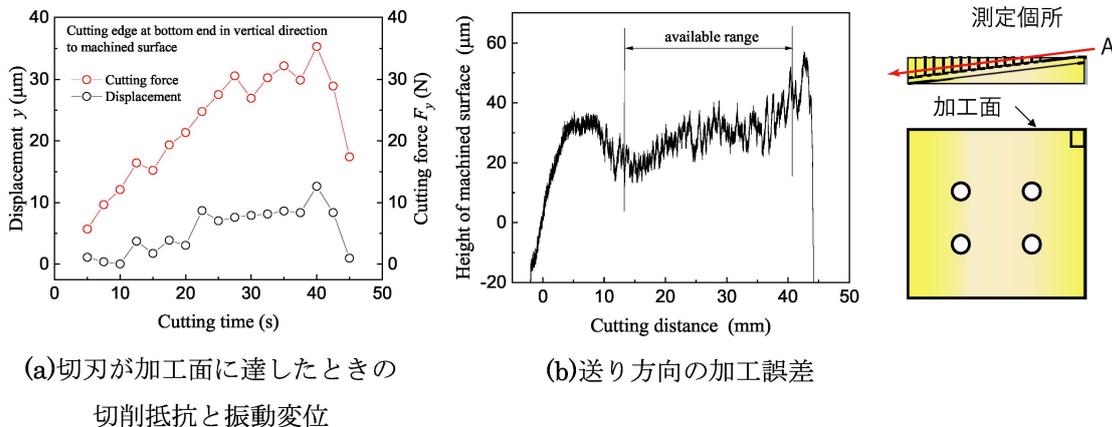


図7 切刃が加工面に達した時の切削抵抗と加工誤差（ダウンカット）

本報告書ではダウンカットの結果のみ示しているが、アップカットにおいても、送り方向の加工誤差は、加工面と垂直方向の切削抵抗と定性的にほぼ一致する傾向が見られた。

<引用文献>

- ①進士忠彦：磁気軸受 基礎と応用，精密工学会，誌 Vol. 78, No. 12, (2012)，pp. 1054-1057.
- ②進士忠彦・ほか5名：ラジアル磁気軸受の高精度制御，精密工学会，誌 Vol. 67, No. 11, (2001)，pp. 1803-1807.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------