

学位論文の要旨	
氏名	尾田 光成
学位論文題目	小径エンドミル加工用ハイブリッド主軸に関する研究
<p>本論文は、高精度な切削加工を行う小径エンドミル加工における象限突起とびびり振動発生の低減を目的とし、その解決のために新たに玉軸受と磁気軸受で支持されるハイブリッド主軸を提案し、ハイブリッド主軸のモデル実験機を用いて、磁気軸受の電磁力の制御による象限突起とびびり振動発生の低減の効果についてまとめたものである。</p> <p>第1章は、マシニングセンタの主軸、および生産現場で大きな問題になっている象限突起とびびり振動について調査し、課題をまとめた。</p> <p>転がり軸受、特に玉軸受は安価で信頼性も高いため、マシニングセンタの主軸として一般に広く用いられている。しかし、転がり軸受は、高速回転、高回転精度への対応が難しいため、静圧軸受、動圧軸受、磁気軸受が用途に応じて用いられている。ここで、磁気軸受は他の軸受にない特長として位置制御機能があり、主軸の回転中心のオフセット量、主軸系の剛性や減衰を電磁力により制御することが可能である。しかし、転がり軸受に比べて負荷容量が小さく、制御系による性能向上に限界があり、またコストが高いといった問題も指摘されている。</p> <p>象限突起は、工作機械の送り軸が方向を反転する時に発生する運動誤差により生じる加工誤差であり、送り軸で象限突起を補正する方法が数多く研究されている。しかし、この運動誤差の主な原因であるねじのバックラッシュや摩擦力などは、環境の変化や時間経過により変化するため、送り軸による補正のロバスト性が課題とされている。</p> <p>びびり振動は、小径エンドミル加工において発生し易く、加工精度や加工能率、また工具寿命にも影響するため、動吸振器の適用、主軸回転速度の適応制御などによりびびり振動の発生を抑制する方法が提案されている。しかし、動吸振器は工作機械への取り付け位置やスペースの確保の点で実用化が難しく、また主軸回転速度の適応制御は適用できる主軸回転速度が高速域に限られるという問題がある。</p> <p>第2章は、小径エンドミル加工における象限突起の低減を目的として、転がり軸受主軸の安価で信頼性が高いという特長、また磁気軸受主軸の位置制御性を有するという特長を併せ持った主軸として、転がり軸受と磁気軸受で支持されるハイブリッド主軸を提案し、モデル実験機を用いて磁気軸受の電磁力のPID制御によりエンドミル工具先端での象限突起形状のトレースを行った。その結果、ハイブリッド主軸を用いることにより、象限突起の大きさは1/3以下に低減できる可能性があることをシミュレーションと実験により確認した。</p> <p>第3章は、小径エンドミル加工におけるびびり振動の抑制を目的とし、電磁力を受けるケイ素鋼板円筒部と小径エンドミル先端部に集中質量を持つ2自由度の振動系のモデルを提案し、磁気軸受の電磁力による状態フィードバック制御系を構築した。またこの制御系を適用しない場合と適用した場合の小径エンドミル先端でのコンプライアンス（周波数応答関数）の計算値を求め、極配置法により求めた状態フィードバック係数により、コンプライアンスの特性を任意に設定できることを示した。さらに、エンドミル工具先端のコンプライアンスを打撃試験により求め、電磁力による状態フィードバック制御により、エンドミル工具先端のコンプライアンスのピーク値は大きく低下し、びびり振動の発生が大幅に抑制される可能性があることを確認した。</p> <p>第4章は、小径エンドミル加工における象限突起とびびり振動の低減のために考案したハイブリッド主軸の適用の効果と今後の課題について総括した。</p>	

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Study on hybrid spindle system for milling with small end mill

Name: Mitsunari Oda

This thesis mainly proposes an novel hybrid spindle system with a ball bearing at one end an active magnetic bearing at the other to reduce the quadrant glitch and the occurrence of chatter vibrations during high precision machining with a small end mill, and gives theoretical and experimental results to verify effects of electromagnetic controlling force of the hybrid spindle system on reduction of the quadrant glitch and the occurrence of chatter vibrations on a model experiment device for the hybrid spindle system.

Chapter 1 gives investigation results of spindles machine tools and problems about quadrant glitch and chatter vibrations during milling with a small end mill. Rolling bearings, particularly ball bearings, are widely adopted for spindle of machine tool because of their fine cost performance and high reliability but it is difficult for the rolling bearings to correspond to higher spindle speed and rotational accuracy. Consequently, hydrostatic bearings, hydrodynamic bearings or active magnetic bearings are used as bearings of spindle with higher spindle speed and rotational accuracy to correspond to application of spindle. The active magnetic bearings have superior function beyond other type of bearings that spindle supported with the active magnetic bearings could control the offset of rotary axis and the stiffness and damping of spindle system. However, active magnetic bearings have some demerits like as smaller load capacity compared to rolling bearings, limits of performance improved by control system, and high price.

Quadrant glitches are machining error caused by the motion error when a feed axis of machine tool turns to reverse direction. There are numerous studies and patents about compensation for the quadrant glitches. However, robustness of compensation of motion error of a feed axis is important problem since backlash and friction of a feed axis will change with environmental change and passage of time.

Chatter vibrations are serious problem in metal cutting process since they are likely to occur during milling with a small end mill and they can cause reduction of machining accuracy, production efficiency, and tool lives. Consequently, some methods for suppression of chatter vibration such as applying dynamic vibration absorber, adaptive control for rotary speed of spindle and so on are proposed. However, it is difficult to install dynamic vibration absorber on machine tools in practical use since there is not suitable position and enough space for dynamic vibration absorbers. And effectiveness of adaptive control of rotational speed of spindle for suppression of chatter is limited within high rotational speed of spindle.

Chapter 2 describes a hybrid spindle system proposed for reduction of quadrant glitches during milling with a small end mill. The proposed hybrid spindle system has some merits like as fine cost performance and high reliability of rolling bearing spindle, and the ability to control the offset of rotary axis and the stiffness and damping of spindle system of the active magnetic bearing spindle because the spindle of the hybrid spindle system is supported with a ball bearing at one end and active magnetic bearing at other. Capability of the hybrid spindle system to reduce the quadrant glitches is verified by simulation and experiments of trace of a shape of quadrant glitch with the end mill controlled by electromagnetic controlling force of active magnetic bearing including a PID controller on a model experiment device for the hybrid spindle system. As a result, it is demonstrated through the simulations and experiments that the proposed hybrid spindle system could reduce one-third of the quadrant glitch by electromagnetic controlling force of active magnetic bearing.

Chapter 3 describes state feedback control system of the hybrid spindle system to control characteristics of compliance of an end mill at cutting point for suppression of chatter vibrations. The state equation of the hybrid spindle system is derived on the assumption that the spindle has 2-degree-of-freedom having concentrated masses at a silicon steel cylinder subjected to an electromagnetic force of an active magnetic bearing. Ability of the proposed state feedback control system for the hybrid spindle system, which the state feedback coefficients are determined by the pole assignment of the control system, it verified by the theoretical compliance controlled by electromagnetic controlling force of active magnetic bearing with state feedback compared to the compliance without the state feedback control. Furthermore, ability of the proposed state feedback control system for the hybrid spindle system was verified by impact test of end mill at cutting point with electromagnetic force of active magnetic bearing compared to the impact test without the state feedback control. The results of this study indicated that hybrid spindle system with electromagnetic controlling force controlled by the state feedback could fairly suppress occurrence of chatter during milling with small end mill.

Chapter 4 summarizes results of thesis that capability of the proposed novel hybrid spindle system on reducing quadrant glitch and occurrence of chatter vibrations during milling with a small end mill and problems about them in the future.