

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03878

研究課題名(和文) 磁気軸受と玉軸受で支持されるハイブリッド主軸によるエンドミル工具のびびり振動抑制

研究課題名(英文) Suppression of chatter vibrations during milling process with end-mill by using hybrid spindle system with ball and electromagnetic bearings

研究代表者

近藤 英二 (KONDO, Eiji)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：10183352

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、主軸後方の軸受を玉軸受、前方の軸受を磁気軸受にすることによって主軸の運動を制御できるハイブリッド主軸を用い、細長い小径エンドミル先端の動コンプライアンスを改善することでびびり振動を抑制することを目的としている。実験機では首下の長いツールホルダの先端にケイ素鋼板円筒部を圧入し、その外周に電磁石を配置して制御磁気軸受とした。2次の振動モードの根の実部が3倍になるように極配置法により状態フィードバックベクトルを設計し、打撃試験により、1/3以下になることが確認できた。また切削実験では、びびり振動の発生限界は2倍以上になることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的背景はエンドミル加工におけるびびり振動の発生であり、ハイブリッド主軸を用い、制御磁気軸受により細長い小径エンドミル工具のびびり振動を抑制することができないか、というのが研究課題の核心をなす学問的「問い」である。本研究で導入するハイブリッド主軸は、旋盤などの他の工作機械への適用が可能であり、工作機械の主軸の設計方法にイノベーションをもたらすことが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to suppress chatter vibrations occurred in the end milling process with a long and small end mill by reducing the peak value of the real part of dynamic compliance at a cutting point, which is controlled by a hybrid spindle system. The spindle of the hybrid spindle system is supported with the rolling bearing at the rear end and the active electromagnetic bearing at the front end. The tool holder with an active electromagnetic bearing attached is used as a prototype hybrid spindle system. It was demonstrated by the impact test that the peak value of the real part of dynamic compliance of the end mill at the natural frequency of the second mode of the prototype hybrid spindle with an end mill was reduced to less than one-third times by the state feedback control. The state feedback coefficients were determined by using analysis for pole assignment of a control system. Furthermore, it was demonstrated in the cutting test that the stability limit increased.

研究分野：切削加工学

キーワード：びびり振動抑制 小径エンドミル 動的コンプライアンス ハイブリッド主軸 制御磁気軸受

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、深隅部や微小部分の加工は細長い小径エンドミルを用いる必要があるためびびり振動が発生しやすく、金型の高効率加工、高精度加工の障害になっている。びびり振動は多くの金属切削加工方法において避けられない物理現象であり、特に再生びびり振動（自励びびり振動）は高効率の切削加工の実現を阻害する大きな要因になっているため、古くから研究が行われてきた。初期の研究は発生機構を解明しようとするものであり、切削工具を含む工作機械構造の動剛性と動的切削過程の特性がびびり振動の発生機構に大きく影響することが明らかにされている。またびびり振動の発生を回避するため、発生する切削条件を予測するための計算モデル、びびり振動の検知、動吸振器や主軸回転速度の制御によるびびり振動の発生の抑制などの研究が行われてきた。高速エンドミル加工では、いわゆる安定ポケットと呼ばれる主軸回転速度を適応制御によって実現する方法、またエンドミル系の振動特性を計測して計算モデルにより予測する方法について、国内外で盛んに研究が行われている。一方、再生びびり振動の発生限界は、エンドミルの動的コンプライアンスの実部の極小値によって決まることが理論的に示されており、主軸に減衰器を付加することでびびり振動の発生限界を大きくすることが試みられている。しかしながら、細長い小径エンドミル加工では、切削点での動的コンプライアンスは小径エンドミルの振動特性の影響が大きくなるため、主軸の減衰を大きくするだけではエンドミルのびびり振動の抑制は困難である。

2. 研究の目的

本研究は主軸の後方を玉軸受、前方を制御磁気軸受で支えられたハイブリッド主軸を用いてエンドミル系の動的コンプライアンスを制御し、細長い小径エンドミル加工におけるびびり振動の発生を抑制することである。

従来のエンドミル加工におけるびびり振動を抑制する主な方法は、びびり振動の発生機構の根本原因の改善に基づくものではない。それに対し、本研究はハイブリッド主軸を用いてエンドミルの動的コンプライアンスを制御し、びびり振動の発生を抑制する。最も多く用いられている主軸は図1(a)に示すように転がり軸受で支えられた主軸である。図1(b)に示す制御磁気軸受を用いた主軸は、エンドミルの振動制御は可能であるが、安定した制御が困難であり、負荷容量も小さい。そこで、本研究では図1(c)に示すように主軸の主要な支持剛性は従来の転がり軸受で確保しつつ、制御磁気軸受によってエンドミルの振動を制御できるハイブリッド主軸を用いる。

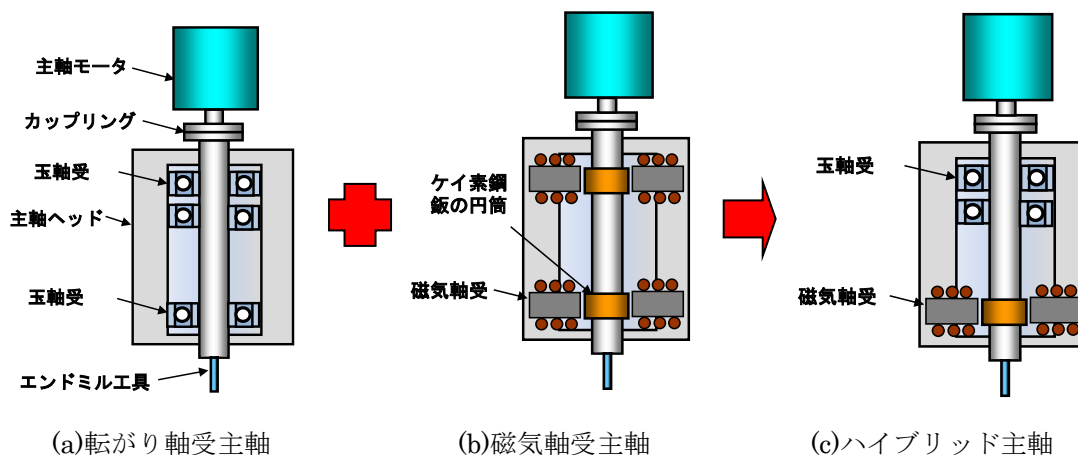


図1 従来の主軸とハイブリッド主軸

3. 研究の方法

(1) 主軸・ツールホルダ・エンドミルからなる系の振動解析とモデル化

本研究では、図1(c)に示したハイブリッド主軸の構造を模した図2のモデル実験装置を用い、細長い小径エンドミル先端の動的コンプライアンスを制御した。首下の長い比較的剛性が低い市販のツールホルダを用い、細長い小径エンドミル（直径6mm、突出し長さ65mm）を把持した。ツールホルダの首下の細い部分に制御磁気軸受のケイ素鋼鉄円筒を圧入した。制御磁気軸受によりエンドミルの動的コンプライアンスを制御するためには、主軸・ツール

ホルダ・エンドミルからなる振動系をモデル化する必要があるため、打撃次試験により振動解析を行った。

(2) 制御磁気軸受によるエンドミルの動的コンプライアンスの制御系の設計

エンドミルの動的コンプライアンスの制御は、図3に示す制御系を用いて、制御磁気軸受で行う。ここで、 A はシステムの係数行列、 x_2 はエンドミル先端の振動変位、 f_2 は切削抵抗、 K は状態フィードバックベクトルである。

動的コンプライアンスの制御は、主軸・ツールホルダ・エンドミルからなる振動系の固有振動数(システムの係数行列 A の固有値)での実部の値(負の値)が大きくなるように極配置法で状態フィードバックベクトルの値を求めた。

(3) 打撃試験によるエンドミルの動的コンプライアンスの制御性の評価

状態フィードバック制御でのエンドミルの動的コンプライアンスの有効性を検証するため、図4の実験装置を用いた。エンドミルの打撃試験では、図5に示すようにエンドミル先端の振動変位はレーザー変位センサで測定した。

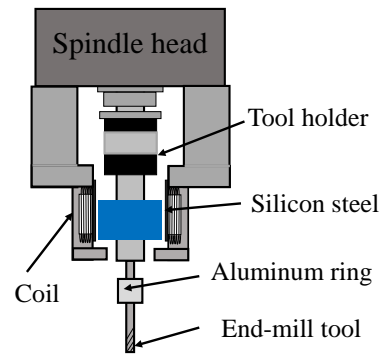


図2 ハイブリッド主軸のモデル実験装置

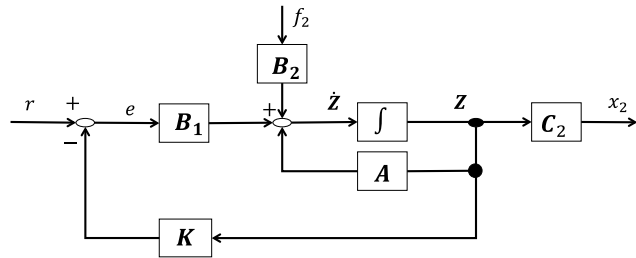


図3 制御磁気軸受の制御系の状態変数線図

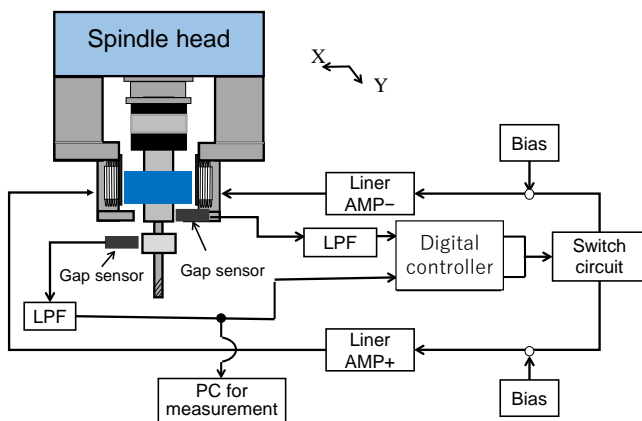


図4 モデル実験装置の制御装置の概略図

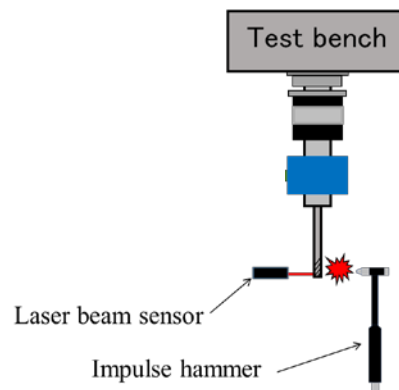


図5 エンドミルの打撃試験

(4) 切削実験によるびびり振動の抑制効果の評価

エンドミルの動的コンプライアンスの制御によるびびり振動の抑制効果を調べるため、図6に示す実験装置を用いて、びびり振動の発生限界を調べた。また切削実験条件を表1に示す。実験では図6に示すように被削材の端面を切削した。被削材は7°傾けて、また対角線方向に溝を付けてあり、切削の進行に伴って、軸方向の切込み深さが直線的に増加するようにした。切削実験では、エンドミルの振動変位、切削抵抗、デジタル制御装置から出力される電流アンプの制御信号を測定した。

表1 切削実験条件

被削材	黄銅	
エンドミル	直径	6mm
	刃数	2
回転数	2500rpm	
送り	40mm/min	
半径方向切込み深さ	2.5mm	
切削方式	Up-cut	

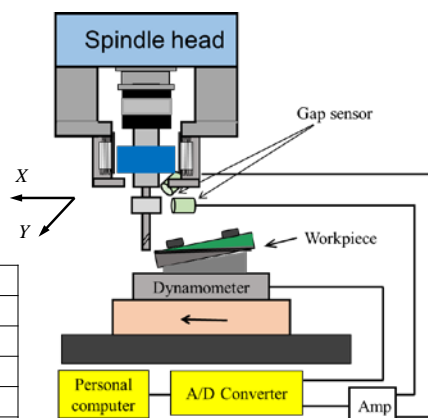


図6 切削実験装置

(5) オブザーバーを用いたエンドミルの動的コンプライアンスの制御性の評価

エンドミルの動的コンプライアンスの制御では、図4で示したようにケイ素鋼板円筒部とエンドミルの振動変位を測定する必要がある。しかし現場での実機によるエンドミル加工では、エンドミルの振動変位の測定は困難なため、オブザーバーを用い、ケイ素鋼板円筒

部の振動変位のみでエンドミルの動的コンプライアンスの制御を行う。ここではオブザーバーを設計し、有効性を評価する。

4. 研究成果

(1) 図7に示すように、ケイ素鋼板円筒部を打撃し、ケイ素鋼板円筒部とエンドミル先端の振動を測定して得られた動的コンプライアンスを求めた。得られた動的コンプライアンスを図8に示す。図中の黒い曲線が直接コンプライアンス、赤い曲線は相互コンプライアンスである。得られた結果から、振動系は2自由度であり、図9に示すように2重振り子で近似できた。また図8からツールホルダ振動系のパラメータを同定した。得られた値を表2に示す。ここで、 m_1, k_1, c_1 はケイ素鋼板円筒部のパラメータ、 m_2, k_2, c_2 はエンドミル先端でのパラメータであり、それぞれ等価集中質量、ばね定数、減衰係数である。また表2の κ は振り子の腕の長さの比 l_2/l_1 である。

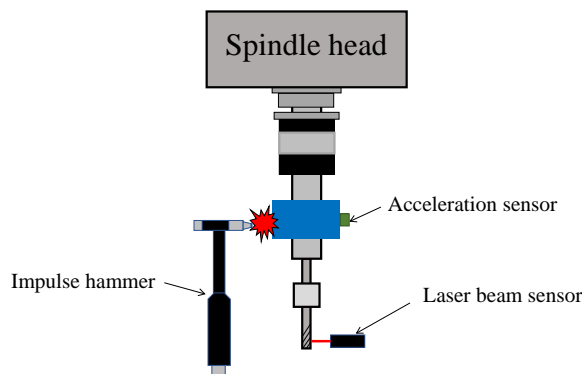


図7 ツールホルダ振動系の打撃試験

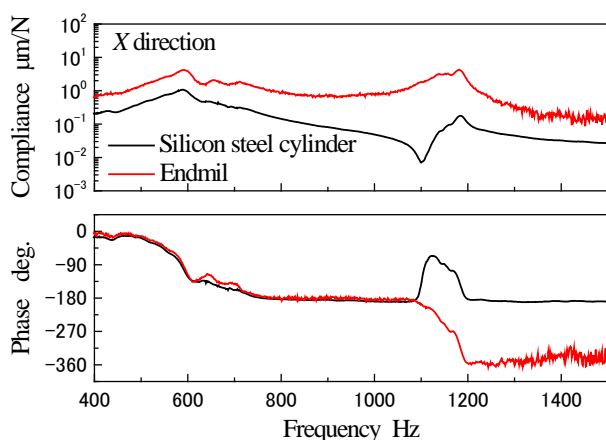


図8 ツールホルダ振動系の打撃試験結果

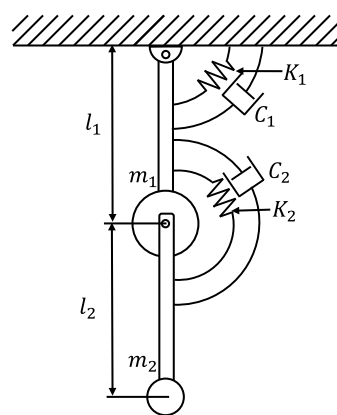


図9 ツールホルダ振動系のモデル

(2) 図4に示した実験装置において、高速度鋼のエンドミルを用い、極配置法で2次振動モードの根の実部を2倍、4倍にして状態フィードバックベクトルの値を求めて制御し、図5に示した打撃試験で得られた動的コンプライアンスのコクアド線図を図9に示す。上図の赤い曲線は根の実部を2倍にした場合の動的コンプライアンスの実部であり、極小値は黒い曲線で示した制御をしていない場合の実部の極小値に比べ、約1/2になった。また青い曲線で示した根の実部を4倍にした場合の実部の極小値は約1/5になった。

(3) 超合金のエンドミルを用いて行った打撃試験で得られた動的コンプライアンスのコクアド線図を図10に示す。上図の青い曲線は、極配置法で1次振動モードの根の実部を2倍、2次振動モードの根の実部を4倍にした場合の動的コンプライアンスの実部であり、黒い曲線で示した制御をしていない場合の実部の極小値と比べ約1/3になった。しかし、高速度鋼のエンドミルでは約1/5になったことと比べて、低下する割合は小さくなった。この原因としては、制御をしていない状態の超合金のエンドミルでの動的コンプライアンスの実部の極小値が、高速度鋼のエンドミルでの実部の極小値よりも小さかったため、大きな電磁力が必要になったが、十分な電磁力が得られな

表2 ツールホルダ振動系のパラメータ

Spring constant	Silicon steel ring	k_1	7.22×10^6 [N/m]
	Edge of end mill	k_2	2.08×10^5 [N/m]
Mass	Silicon steel ring	m_1	0.500 [kg]
	Edge of end mill	m_2	0.004 [kg]
Damping coefficient	Silicon steel ring	c_1	140 [N · s/m]
	Edge of end mill	c_2	0.500 [N · s/m]
		κ	1.37

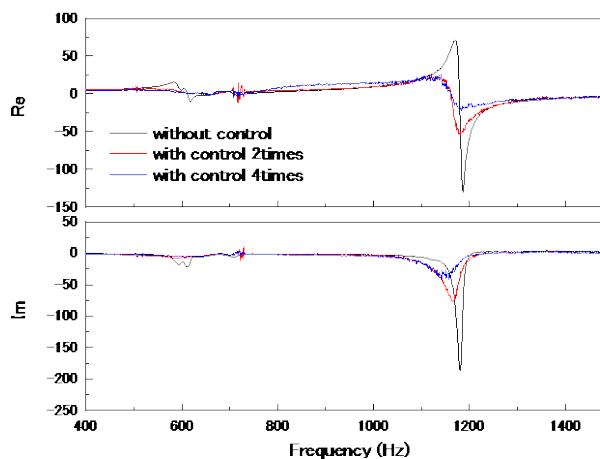


図9 高速度鋼エンドミルでの動的コンプライアンスのコクアド線図

かったためと考察された。

(4) 図6で示した実験装置を用いて得られた切削実験の結果を図11に示す。切削実験では超硬合金のエンドミルを用いた。上段の図は制御していない場合のY方向の振動変位で、切削時間が15秒ではびびり振動は発生していないが、約30秒でびびり振動が発生している。中段の図は、極配置法で2次振動モードの根の実部を2倍として得られた状態フィードバックベクトルを用いてY方向の動的コンプライアンスを制御した状態で行った切削実験で得られた振動変位で、びびり振動が発生しておらず、また約15秒での振動振幅も小さくなった。また下段は1次振動モードの根の実部を2倍、2次振動モードの根の実部を4倍とした場合の結果であり、振動振幅はさらに小さくなった。

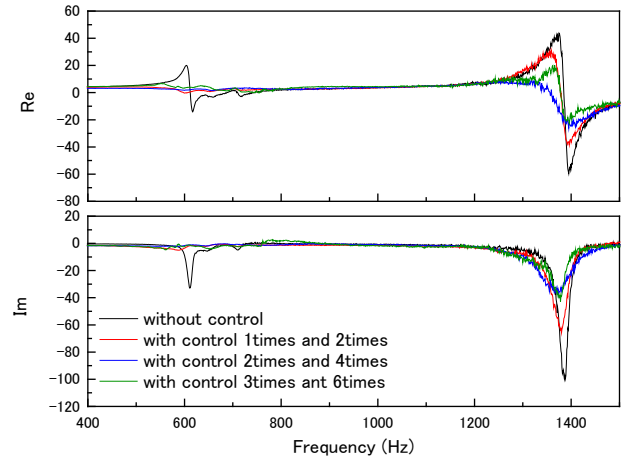


図10 超硬合金エンドミルでの動的コンプライアンスのコクアド線図

(5) 図12はシミュレーションを行ったオブザーバーを用いた場合の制御系のブロック線図で、極配置法で得られた状態フィードバックベクトルの値を求めた根の実部を100倍にすることで得られたオブザーバーのベクトルHの値を用いることで、ケイ素鋼板円筒部の変位だけで、エンドミル先端の動的コンプライアンスを制御できる可能性があることが分かった。

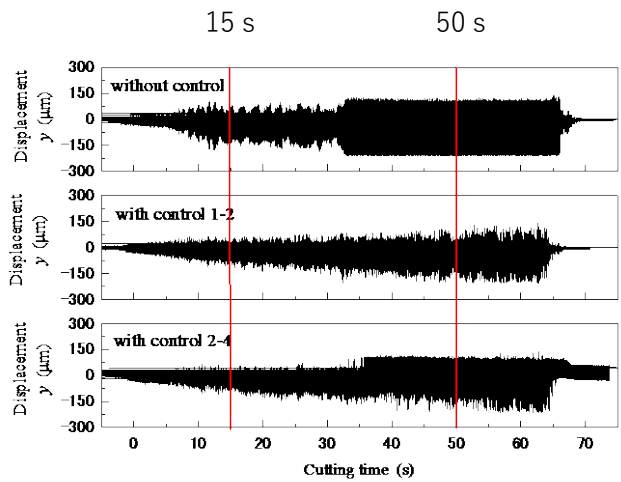


図11 切削実験でのエンドミルのY方向の振動変位

<引用文献>

- ① Guillem Quintana and Joaquim Ciurana, Chatter in machining process: A review, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 51, 2011, pp. 363-376.

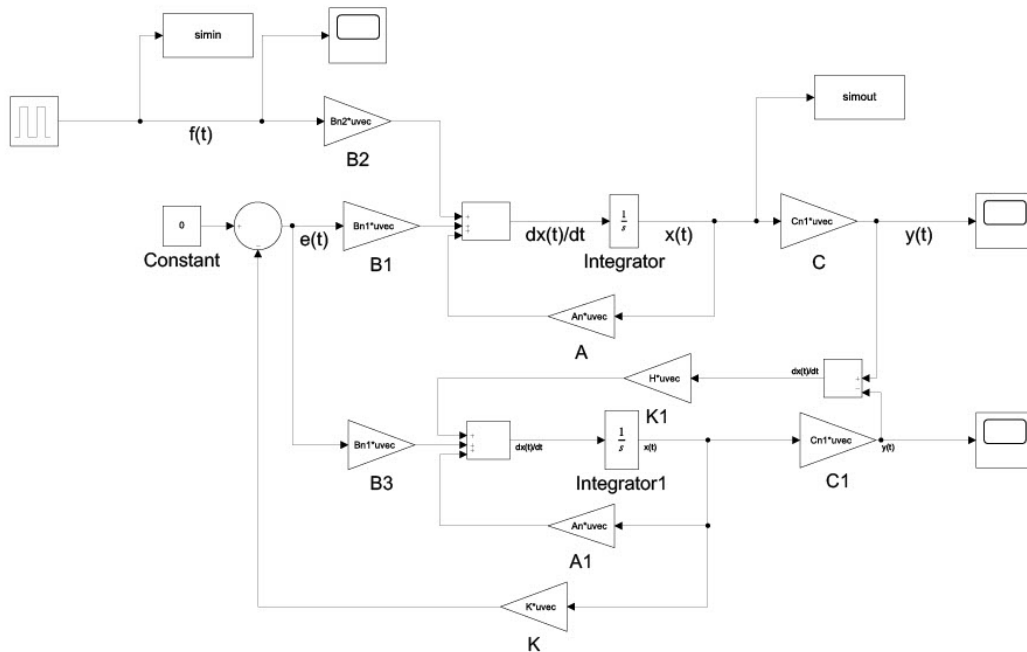


図12 オブザーバーを用いた場合の制御磁気軸受の制御系のシミュレーションモデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Eiji Kondo
2. 発表標題 Control of dynamic compliance at cutting point of small and long end mill aiming suppression of chatter by hybrid spindle system with rolling and active electromagnetic bearings
3. 学会等名 Proceedings of the 19th international Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiji Kondo
2. 発表標題 Feasibility study of hybrid spindle system with ball and electromagnetic bearings for suppression of chatter vibrations during milling with a small end mill
3. 学会等名 Proceedings of the 18th international Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 工作機械の主軸システム	発明者 近藤英二	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-184754	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 主軸装置	発明者 近藤英二、尾田光成	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-106442	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 磁気軸受けユニット及び制御パラメータ決定方法	発明者 近藤英二	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-97347	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------