

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：32619

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K21036

研究課題名（和文）転動体の接触剛性を考慮した工作機械送り駆動機構の高度動解析システムの開発

研究課題名（英文）Development of prediction system for the vibration characteristics of machine tool feed drive considering contact stiffness of rolling elements

研究代表者

酒井 康德 (Yasunori, Sakai)

芝浦工業大学・システム理工学部・助教

研究者番号：70774769

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：工作機械の高性能化のためには高性能な送り駆動系を設計する必要があり、その実現には、送り駆動機構の周波数応答の定量的な予測技術の確立が不可欠である。本研究では、工作機械で広く使用される転がり案内が組み込まれた送り駆動機構の周波数応答を高精度に予測できる技術を開発した。転がり案内内部に多数存在する転動体の剛性・減衰が、転がり案内単体やそれが組み込まれた送り駆動機構の周波数応答に及ぼす影響を解明できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が達成されると、送り駆動系の設計を制御系及び機構の相互作用を検討しながら行える。これまでは機構設計が先行していた送り駆動系設計を、制御系・機構の側面から試作レスで同時に検討でき、送り駆動系全体の最適設計、ひいては工作機械の高性能化が図れる。また、転動体の接触応力変動の測定技術は、加工中の異常振動のモニタリング技術としても応用可能である。さらに、転動体の剛性・減衰特性を解明できれば、転がり軸受やボールねじなど、案内以外の転がり機械要素やそれらが組み込まれた工作機械の設計開発技術の高度化に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：The effects of the stiffness and damping of rolling elements in the rolling guide carriage on the frequency response of the rolling guide carriage and the feed drive mechanism supported by the guideway are clarified.

研究分野：加工学および生産工学関連

キーワード：工作機械 転がり機械要素 接触剛性・減衰 周波数応答 送り駆動系 非線形振動 トライボダイナミクス リニアガイド

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、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

工業製品の生産能率を向上させるためには工作機械の高性能化が不可欠であり、指令通りに動作する高精度・高安定かつ制振性に優れた送り駆動系の開発が必要となる。しかし、周期的な加工力が作用することで、送り駆動系のテーブルに動的な姿勢誤差が生じる(図1)。この姿勢誤差は、テーブルに固定された位置センサ(リニアエンコーダ)の読み取り誤差を発生させ、位置決め精度や制御安定性を低下させる。また、テーブルに取り付けられた工具・主軸と工作物との間で相対的な振動が発生してしまうため、加工精度の低下を招く。

既存研究では、テーブルの姿勢誤差を補償できる制御系設計手法が開発されている[1]。しかし、この方法は送り駆動機構の周波数応答が既知であることを前提としており、制御系設計を行う前に送り駆動機構を試作しなければならない。試作を伴うため、現状では制御系の設計仕様に合わせて後から機構設計の変更を行うことが困難である。もし、試作レスで送り駆動機構の周波数応答を予測できる有限要素解析技術が確立できれば、送り駆動系の設計を機構及び制御の観点から相補的に行えるため、設計の自由度が高まる。これが実現すれば、送り駆動系の高性能化、ひいては工業製品の生産能率及び品質の向上が可能となる(図1)。

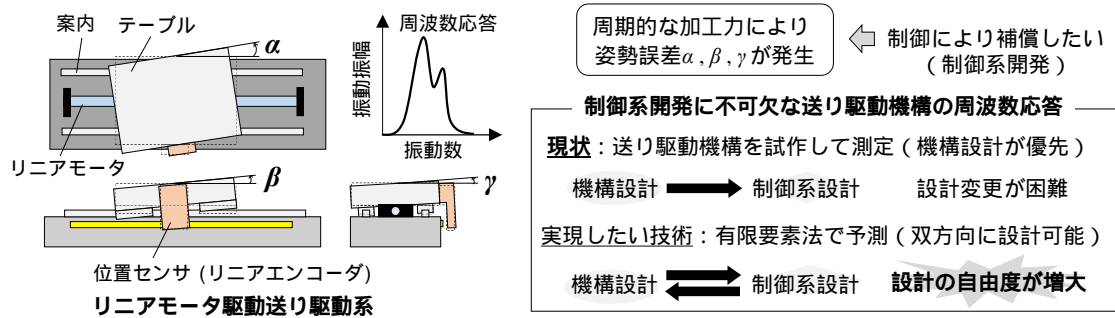


図1 送り駆動機構の周波数応答予測技術の必要性

2. 研究の目的

本研究の目的は、一般的な工作機械に使用される転がり案内が組み込まれた送り駆動機構の周波数応答を定量的に予測できる技術の確立である。

送り駆動機構の周波数応答は、転がり案内の剛性・減衰の影響を大きく受ける。また、近年、テーブルを非接触で駆動できるリニアモータの使用が拡大しており、その場合は機械的接触部が案内のみとなるため、転がり案内の剛性・減衰の影響がますます大きくなる。したがって、転がり案内の剛性・減衰特性を解明することが周波数応答予測技術の確立には不可欠である。

転がり案内のキャリッジ内部には数十個の転動体が組み込まれている。転動体と転送面との接触部で生じる剛性・減衰が転がり案内単体の剛性・減衰特性を支配する。つまり、送り駆動機構の周波数応答を予測するためには、各転動体接触部で生じる剛性・減衰特性を明らかにする必要がある(図2・図3)。

本研究の位置付けは、転がり案内に組み込まれた転動体の剛性・減衰を実験及び理論解析によって解明し、送り駆動機構の周波数応答を予測するための理論体系を構築することである。



図2 転動体の剛性・減衰と送り駆動機構の周波数応答の関係

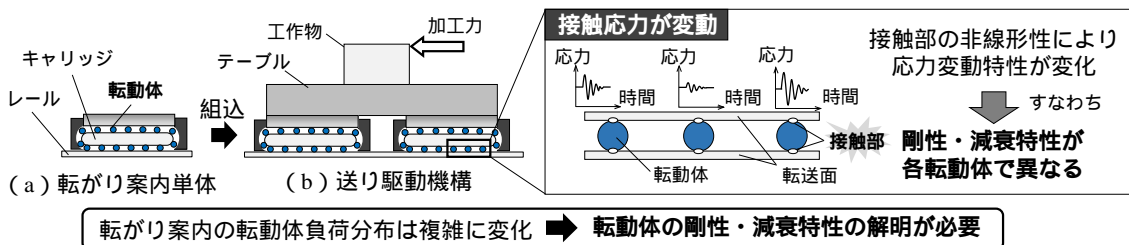


図3 研究目的を達成するために解明すべき事項

3. 研究の方法

(1) 実験装置

実験に用いた試作装置を図4に示す。本装置は主に、上下プレートとそれを支えるための支柱、既製品の転がり案内を模擬したキャリッジ、上下レール及び転動体によって構成されている。上側ベースに設置したクランプボルトの締め付けトルクを調整することで上側レールに圧力がかかり、転動体にかかる予圧荷重を調整することができる。なお、その値はワッシャ型ロードセルによって管理する。既製品の転がり案内では、用途によって様々な予圧荷重がかかることか

ら、予圧荷重を数段階に変化させ、各予圧荷重において玉径及び玉数の差異が動特性へ及ぼす影響を調べた。

動特性の評価は、外力に対する周波数応答関数を測定し、共振振動数及び減衰比を算出することで行った。周波数応答関数の測定は、キャリッジに圧電型加速度計を取り付け、インパルスハンマで加振して行った。図4において、キャリッジのロール方向振動およびピッチ方向振動が励振される位置をそれぞれ加振し、加振点近傍での加速度を測定することで、周波数応答関数を得た。図5に周波数応答関数を得るプロセスを示してある。加速度計で得られた信号はチャージアンプを通し、インパルスハンマで得られた信号は整流器を通し、それぞれFFTアナライザに入力し、パーソナルコンピュータ(PC)でデータ解析を行った。

表1に本研究で用いた実験条件を示す。予圧荷重は、商用転がり案内がとりうる範囲を参考にし、玉1個あたりにかかる力がその範囲内の値となるように選定した。また、本研究では潤滑剤の影響を除外するために、接触面の油分を脱脂洗浄剤で除去した後、アセトンを用いて拭き取った。

(2) 転動体荷重の測定方法

転がり案内の転動体通過振動をセンシングするための方法について検討した。圧電センサを用いて外部から検出する方法と、転動体内部にひずみセンサを埋没してセンシングする方法とが考えられる。ここでは、光ファイバひずみセンサを転動体内部に埋没してセンシングする方法を応用して、図6に示すように光ファイバひずみセンサ(以下、“転動体センサ”と呼ぶ)を試作した。この転動体センサは放電加工によって軸受鋼製の直径4mmのローラに1mm程度の貫通孔を設け、そこに光ファイバひずみセンサを挿入し、貫通孔を低融点金属で埋めることで実現した。従来の研究では貫通孔を樹脂で埋めていたが、本研究では密度変化による転動体内部のひずみ分布の変化を最小限に抑制するため低融点金属を用いた。低融点金属には、融点79のMn-Sn合金を使用した。また、光ファイバセンサは動作温度範囲の最大値が200のDTGファイバセンサを用いた。

本実験では、リテーナをキャリッジとレールの間に組み込み、1条あたり13個の転動体をリテーナに配置した。図7に本実験で用いたリテーナを示す。リテーナを用いることで、スキューを防止し、転動体を等間隔に配置することができる。転動体センサは、図7に示す、の位置に配置した。

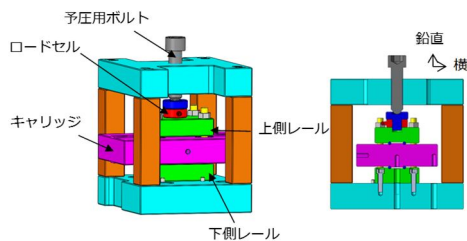


図4 実験装置

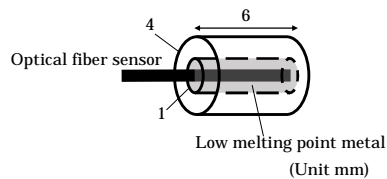


図6 転動体センサ

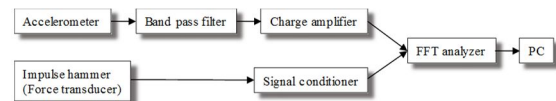


図5 周波数応答関数の算出プロセス

表1 実験条件

Parameters	Unit	Value
Preload	N	500 ~ 6000
Number of balls in a row	-	5, 7, 13
Diameter of balls	mm	2.381, 3.969
Contact angle	degree	90

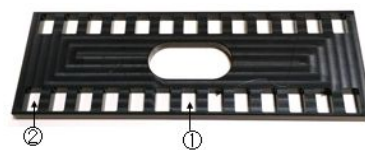


図7 ローラ保持器

4. 研究成果

(1) 接触条件がキャリッジの周波数応答に及ぼす影響

まず、キャリッジの固有振動数および振動モードを確認するために周波数応答関数を測定した。この時の実験条件は表1のうち、予圧荷重を6000N、玉数を13個、玉径を3.969mmとした。図8に、ロール方向加振とピッチ方向加振によって得られた周波数応答関数を示す。図中には、転動体をキャリッジとレールの間に組み込まないで測定した周波数応答関数も合わせて示してある。

図示したように、それぞれの周波数応答関数にピークが確認でき、これらの振動モードはそれぞれ、キャリッジのローリングモードとピッチングモードに起因するものであることが実験モード形によって確認できている。以下ではこれらのモードを単に‘ロール’、‘ピッチ’と呼び、共振振動数及び半値幅法2)によって算出した減衰比が接触状態の差異によってどのように変化するかを検討した。図9および図10に、玉の個数および直径を変えたときの固有振動特性の変化を示す。

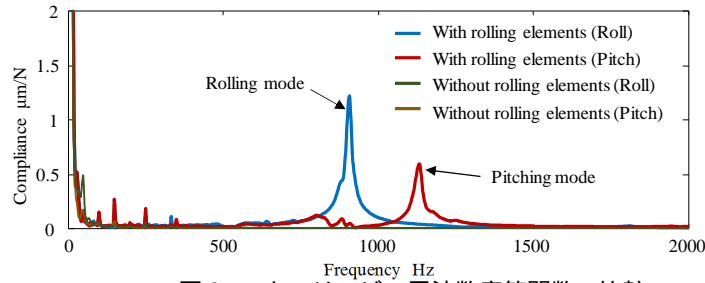


図8 キャリッジの周波数応答関数の比較

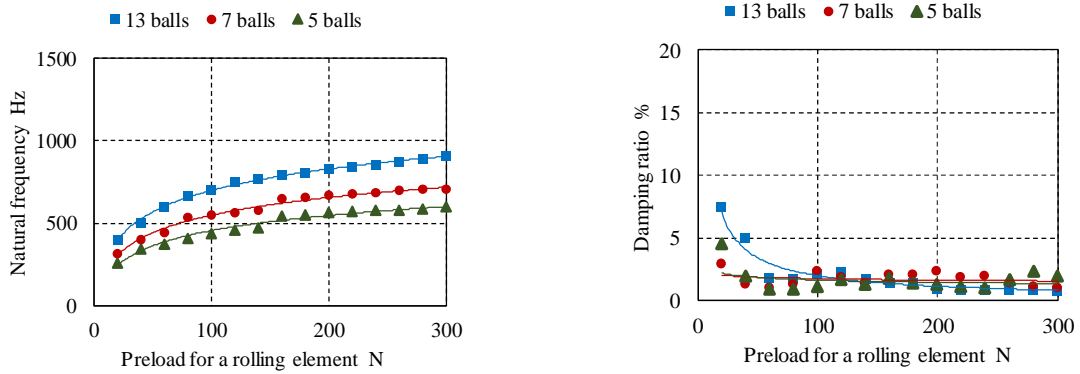


図9 転動体個数がキャリッジの固有振動に及ぼす影響（玉直径 3.969 mm）

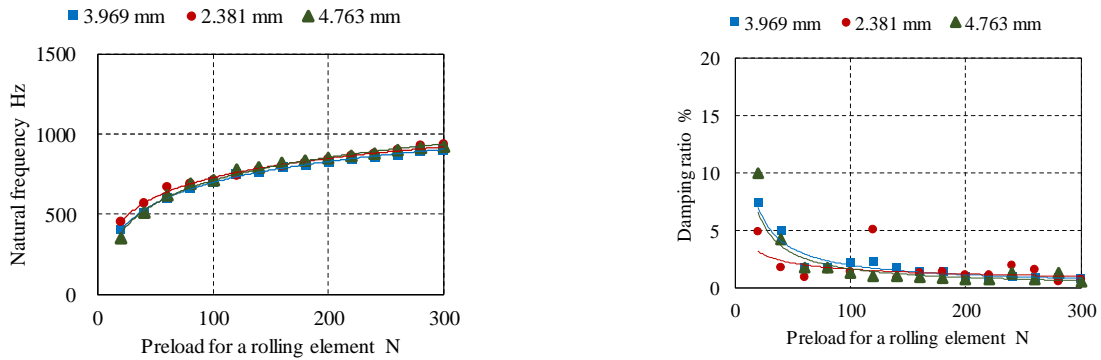


図10 転動体直径がキャリッジの固有振動に及ぼす影響（玉個数：7個）

図9に示すように、玉個数が多いほど固有振動数が高い。これは玉個数の増大に合わせてキャリッジの接触剛性が高くなったことを意味している。一方で、減衰比は予圧が低い場合に個数が多いほど高い傾向にあるものの、予圧が高くなると個数による影響をほとんど受けていない。接触面積の違いにより減衰比に差異が生じると予想されたが、実際には予圧荷重による高くなると、その差異はほとんどなかった。

図10に示すように玉直径を変えてもほとんど固有振動数に差異は見られなかった。接触剛性の変化は少ないためだと考えられる。減衰比も直径による差異はほとんど見られなかった。

(2) 転動体負荷分布の測定

転動体センサを2個試作し、センサ感度を測定するための予備実験を行ったところ、以下の結果を得た。

1. 2個のセンサでは光ファイバセンサで検出されるひずみの大きさが異なる
2. キャリッジに挿入する際の配置が異なると、同じ転動体センサを用いた場合でもひずみの大きさが変化する

これらは、光ファイバセンサを転動体に埋め込む際に、転動体の軸中心からずれてしまったことや、熔融再凝固した低融点合金に空洞や圧縮応力が残留したことに起因するセンサの製作誤差によるものと考えられる。そこで、これらを補正するために転動体センサのひずみ感度の校正を行った。

校正は、図4に示した装置の上側レールとキャリッジとの間のみ転動体センサ1個とセンサが組み込まれていない転動体2個を組み込み入れて静的に鉛直方向荷重を作用させて行った。このとき、転動体センサ側面の一か所に基準線を設け、この線が常にキャリッジの転送面に接触するように転動体センサを配置した状態で行った。また以下の実験でもすべて、基準線をキャリッジ転送面に接触させるように転動体センサを配置している。

転動体荷重と各転動体センサで検出されるひずみの関係を、図11に示す。同図には、Hertzの接触理論から導いた転動体荷重とひずみの関係も示してある。図示したように、転動体センサ1

のひずみ感度は、理論値よりも高い。これは、ひずみ感度の理論値を計算する際に転動体センサ内部の低融点金属のヤング率を考慮しなかったことが要因だと考えられる。一方、転動体センサ2のひずみ感度は理論値よりも低い。これは、転動体センサを製作する工程で光ファイバひずみセンサ自体のひずみ感度が低下してしまったことに起因する。

図11に示した結果をもとに、転動体センサの校正を行い、転動体センサごとのばらつきを低減することができた。

図4に示す装置のキャリッジと下側のレールの間に1条あたり13個、計26個の普通の転動体を配置し、キャリッジと上側レールの間には転動体センサを2個とセンサを組み込んでいない転動体を24個配置した。転動体センサは図7の位置に組み込んである。

また、装置の予圧調整ボルトを用いて6500 Nの鉛直方向荷重を作用させ、各転動体には理論上平均250 Nの予圧荷重が与えている。この状態で、2つの異なる箇所に組み込んだ転動体センサで生じるひずみ測定し、配置による転動体負荷分布の差異を評価した。

図12に各転動体センサに作用する荷重を示す。図には、同一条件で複数回行った結果の平均値を示してあり、エラーバーで標準誤差を示してある。

この図から、予圧調整ボルトに近い位置に組み込んだ転動体センサには、250 N（理論値）よりも大きな転動体荷重が作用していることが確認でき、予圧調整ボルトから最も遠い位置に組み込んだ転動体センサでは250 Nより小さい転動体荷重が作用している。また、測定誤差は位置の方が高いことが分かる。

以上の結果より、キャリッジと上側レールの間に配置した26個の転動体は、上側レール上部から与えられた予圧荷重を均等に受けておらず、予圧調整ボルトに近い中央の転動体と端の転動体ではその負荷分布に差異が生じていることが明らかとなった。この差異は、予圧荷重が上側レールの一点に加えられていることに起因すると推察されるため、予圧荷重方法を変更する必要があると考えられる。

また、今後、動的な状態での転動体負荷分布や接触剛性・減衰の評価を行う場合、転動体負荷分布の差異や評価対象とする振動モードを考慮して、転動体ひずみセンサの組込位置を検討する必要がある。

(3) 数値解析について

転動体接触荷重分布と動的状態での接触荷重変動を元に、転動体の剛性および比例粘性減衰係数を同定し、それを用いて転動体負荷分布理論に基づいた転がり案内キャリッジおよび送り駆動テーブルの動特性解析モデルを構築した。これについては、今後投稿予定の学術論文にて詳細に示す予定である。

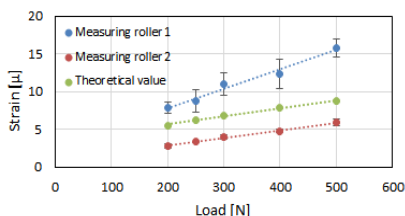


図11 荷重に対するセンサの感度

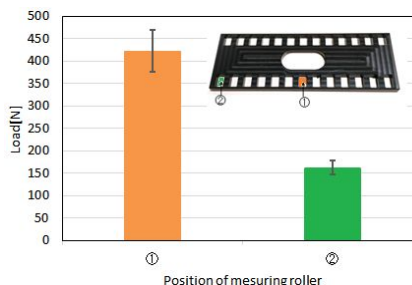


図12 転動体荷重のセンシング結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 酒井康德, 田中智久	4. 巻 62
2. 論文標題 工作機械の動剛性に影響する転がり案内の振動特性の評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 トライボロジスト	6. 最初と最後の頁 566-574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.18914/tribologist.62.09_566	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 酒井康德, 田中智久, 朱彊	4. 巻
2. 論文標題 異方剛性設計により振動モード制御を実現したパッシブ構造体ダンパ「P-DACS」の制振性能評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会 生産システム部門講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 吳境瑩, 田中智久, 朱彊, 酒井康德	4. 巻
2. 論文標題 膜形成モード制御によるチタンへのレーザカラーリング	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会 2018年度春季大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 小林俊矢, 酒井康德, 田中智久, 朱彊	4. 巻
2. 論文標題 金属と樹脂を複合した異方剛性を有するパッシブダンパの動特性に及ぼす幾何形状の影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会 2018年度春季大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Yasunori、Tanaka Tomohisa	4. 巻 144
2. 論文標題 Influence of lubricant on nonlinear vibration characteristics of linear rolling guideway	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 106124 ~ 106124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2019.106124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Yasunori、Tanaka Tomohisa	4. 巻 24
2. 論文標題 Structural damper for auto-damping mechanical components	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Structures	6. 最初と最後の頁 864 ~ 868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.istruc.2020.02.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Yasunori、Ichikawa Wataru、Tanaka Tomohisa	4. 巻 25
2. 論文標題 Novel laser melting stir process for microwelding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Manufacturing Letters	6. 最初と最後の頁 6 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mfglet.2020.05.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 市川 渉, 酒井康徳, 田中 智久,
2. 発表標題 レーザーによる局所温度制御を応用した微細攪拌接合技術「SPLASH」の開発,
3. 学会等名 精密工学会2019年度春季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千賀俊哉, 酒井康徳, 田中智久,
2. 発表標題 振動モード制御による回転モータ不要な微細穴あけ加工技術の開発
3. 学会等名 精密工学会2019年度春季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木 繁, 酒井康徳, 田中智久,
2. 発表標題 機械加工における超音波振動の応用例と今後の展望
3. 学会等名 電子情報通信学会 超音波研究会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒井康徳, 田中智久, 朱疆
2. 発表標題 異方剛性設計により振動モード制御を実現したパッシブ構造体ダンパ「P-DACS」の制振性能評価
3. 学会等名 日本機械学会 生産システム部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 呉境瑩, 田中智久, 朱疆, 酒井康徳
2. 発表標題 膜形成モード制御によるチタンへのレーザカラーリング
3. 学会等名 精密工学会 2018年度春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林俊矢, 酒井康徳, 田中智久, 朱疆
2. 発表標題 金属と樹脂を複合した異方剛性を有するパッシブダンパの動特性に及ぼす幾何形状の影響
3. 学会等名 精密工学会 2018年度春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasunori Sakai, So Fukasawa, Zhu Jiang, Hayato Yoshioka, Tomohisa Tanaka, Kaoru Hoshide and Ryuji Furusawa
2. 発表標題 Influence of Designing Parameters on Vibration Damping of Rolling Guideway
3. 学会等名 The 16th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 酒井康徳, 深澤奏, 朱疆, 吉岡勇人, 田中智久, 星出薫, 古澤竜二
2. 発表標題 試作評価装置を用いた転がり案内の接触減衰特性の解明
3. 学会等名 トライボロジー会議2016春
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 酒井康徳, 田中智久, 朱疆
2. 発表標題 熱硬化性樹脂の制振性に及ぼすフィラー条件の影響
3. 学会等名 第11回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 酒井康德
2. 発表標題 転がり案内における接触部の静剛性・減衰特性とCAD/CAEを用いたそのモデリング手法
3. 学会等名 日本設計工学会 CAD/CAE研究会（招待講演）
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 加工ツール及びこれを用いた穴加工機,	発明者 酒井康德, 田中智久	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、新願T-862	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 制振ダンバ	発明者 酒井康德, 田中智久	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2019-2441	取得年 2019年	国内・外国の別 国内

〔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
---------------------------	-----------------------	----