

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	工作機械用転がり軸受主軸における工具回転非同期振れによる加工面への影響の低減
Title(English)	
著者(和文)	正和裕太
Author(English)	Yuta Showa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11918号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:吉岡 勇人,吉田 和弘,進士 忠彦,松村 茂樹,田中 智久
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11918号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

論文要約

THESIS OUTLINE

工作機械用転がり軸受主軸における工具回転非同期振れによる加工面への影響の低減

正和 裕太

要約

Thesis Outline

近年、主に光学機器や医療機器といった分野の金型において、製品の高機能化や高デザイン化に伴う面品位の向上が求められている。また、磨き作業の難しい複雑形状を有する金型の需要も増大しており、切削加工による高品位な仕上げ面の創成への期待が高まっている。切削加工による高品位な仕上げ面を実現するためには、工具回転非同期振れ(NRRO)に代表される微小振動が加工面へ与える影響を低減する必要がある。工作機械用主軸の軸受として広く採用されている転がり軸受には、転動体公転運動に起因する NRRO が存在するが、この NRRO による加工面への影響を低減する方法についてはまだ実現されていない。本研究では、NRRO による加工面への影響の低減を目的として、NRRO に対して相対振動を励起する加振システムを提案した。

本論文は全 5 章で構成され、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章では、工具回転振れを測定しながらの加工実験を行い、一枚刃の工具を使用した切削加工においては、回転同期振れ(RRO)は加工面へ影響を与えず、NRRO は加工面へ影響を与えていることを確認し、NRRO 低減の重要性を示した。また、工作機械用転がり軸受主軸においては、転がり軸受の転動体公転運動に起因する NRRO の影響が大きいことを示した。

第 2 章では、本研究で提案する加振システムのコンセプトならびに工具と被削材との相対変位における NRRO(NRRO_T)の評価方法について述べた。加振システムのコンセプトは、以下である。(i)加振システムは、主軸頭を加振することにより NRRO_Tを低減するシステムであり、既存のマシニングセンタおよび主軸に大きな改造をほどこすことなく組み込み可能である。(ii)マシニングセンタに組み込んだセンサにより測定した NRRO を加振装置への入力信号とすることにより、NRRO の大きさや周波数の変化に追従可能である。(iii)加振力および加振位相は、主軸回転速度に応じて任意に調整可能である。(iv)直交する二軸方向に同時加振を行うことにより、XY 平面上において NRRO_Tを低減可能である。NRRO_Tの評価方法として、テーブル上に固定した変位センサにより測定した工具回転振れをフーリエスペクトルへ変換し、該当する周波数ピークに着目する方法を提案した。また、バンドパスフィルタ(BPF)の使用により、RRO と NRRO が混在した工具回転振れから NRRO 成分を抽出可能であることを示した。さらに、三つの転がり軸受を組み込んだ主軸の NRRO を評価した結果、フーリエスペクトルにおける該当周波数付近に三つのピークが存在し、それぞれのピークが主軸回転開始からの時間経過によって変化することを確認した。次に、加振システムの概要を示し、加振システムの構成要素である加振装置および信号調整回路の設計および基本特性評価について述べた。加振装置はアクチュエータとしてボイスコイルモータを組み込んでおり、加速度のコントロールにより任意の加振力を発生可能である。実際に加振装置を製作し、加振周波数は 225 Hz から 400 Hz の範囲、加振力は 0 N から 14 N の範囲において、任意に出力可能であることを確認した。信号調整回路は加振対象である主軸頭の動剛性に応じて加振力および加振位相を調整する回路である。実際に信号調整回路を製作し、振幅は 0.1 倍から 100 倍の範囲、位相は+20°から+180°の範囲において、任意に調整可能であることを確認した。

第 3 章では、加振システムの評価について述べた。まず加振システムによる NRRO_T低減のシミュレーションを行い、本研究で提案する加振システムの有効性を示した。また、実際に加振実験を行った結果、NRRO_Tに関する周波数ピークのうち、一つのピークのみが大きい状態では NRRO_Tの低減効果が得られるが、複数のピークが混在する状態では NRRO_Tの低減効果は不十分または低減効果が得られないことから、NRRO_Tを低減するためには、複数のピークを考慮した加振システムが必要であることを確認した。次に、主軸回転開始から 600 秒間の工具回転振れを測定し、主軸回転開始からの時間経過に対する NRRO の変化を詳細に評価した。各ピークの周波数は主軸回転開始から連続的に変化していること、主軸回転開始から一定時間経過後に変化しなくなること、周波数が一定になり始めるタイミングと熱変位が一定になり始めるタイミングがおおよそ同じであることなどから、NRRO の状態変化は、主軸回転による発熱の影響であると考えられる。仕上げ加工の際には、熱変位が安定するまで主軸の暖気運転を行うことが一般であるため、主軸回転開始から十分に時間が経過した後の定常状態についてのみ加振システムの評価を行うこととした。次に、主軸の NRRO(NRRO_{SP})と主軸頭の NRRO(NRRO_{SH})をそれぞれ測定し、NRRO_Tは NRRO_{SP}と NRRO_{SH}とを合算したものであることを確認した。また、NRRO_{SP}または NRRO_{SH}を低減する加振システムによる NRRO_Tの低減効果を評価し、予測した低減効果とおおよそ同じ傾向の結果を得た。主軸回転速度 30,000 min⁻¹において、NRRO_{SP}を低減する加振システムによる低減効果は 35 %、NRRO_{SH}を低減する加振システムによる低減効果は 30 %である。40,000 min⁻¹において、NRRO_{SP}を低減する加振システムによる低減効果は-63 %、NRRO_{SH}を低減する加振システムによる低減効果は 11 %である。さらに、実際に加工実験を行い、加工面の断面プロファイルのフーリエスペクトルにより、NRRO による加工面への影響(NRRO_M)の低減効果を評価した。30,000 min⁻¹において、NRRO_{SP}を低減する加振システムによる低減効果は 36 %、NRRO_{SH}を低減する加振システムによる低減効果は 43 %である。また、40,000 min⁻¹において、NRRO_{SP}を低減する加振システムによる低減効果は 23 %である。NRRO_Tの低減効果と NRRO_Mの低減効果の間には相関関係があり、工具と被削材との相対変位における NRRO の測定により、NRRO による加工面への影響が予測可能であることを示した。フーリエスペクトル以外の NRRO_Mの低減効果の評価方法としては、断面プロファイルにおける隣接するカスプ高さの差による評価が考えられる。この場合、30,000 min⁻¹において、NRRO_{SP}を低減する加振システムによる低減効果は 11 %、NRRO_{SH}を低減する加振システムによる低減効果は 14 %である。また、40,000 min⁻¹において、NRRO_{SH}を低減する加振システムによる低減効果は 5 %である。隣接するカスプ高さの差による評価においても加振システムによる NRRO_Mの低減効果は確認できたが、フーリエスペクトルにより評価した NRRO_Mの低減効果よりも低い結果となった。これは、加工面は構造体の振動、送り軸の振動、加工面のうねり、バリ、キズ、コンタミならびに測定器起因の誤

差など様々な要因を含んでおり、転動体公転運動に起因する $NRRO$ を低減しても、他の周波数成分は大きく低減しないためである。よって、隣接するカスプ高さの差による評価において、 $NRRO_M$ の低減効果を明示するためには、より高い低減効果が必要となる。そのためには、 $NRRO_{SP}$ および $NRRO_{SH}$ を同時に考慮する必要がある。そこで、 $NRRO_{SP}$ および $NRRO_{SH}$ を同時に考慮した加振システムを提案し、いずれか一方を低減する加振システムよりも高い $NRRO_T$ の低減効果が得られることを示した。

第4章では、二軸同時加振システムによる加工面品位の改善について述べた。まず X 軸方向について一軸加振システムによる $NRRO_T$ の低減効果の評価を行った。その結果として、主軸頭側に送り軸が存在する X 軸方向についても、主軸頭側に送り軸が存在しない Y 軸方向と同様に加振システムによる $NRRO_T$ の低減効果が得られることを示した。X 軸方向における低減効果と Y 軸方向における低減効果との差は、主軸頭の動剛性の異方性に起因する。また、工具回転振れに代えて工具ホルダテーパ部回転振れから $NRRO_{SP}$ を抽出することにより、加工の自由度を低下させることなく加振システムをマシニングセンタへ組み込み可能であることを示した。次に、二つの加振装置を Y 軸方向および X 軸方向に直交配置した二軸同時加振システムを提案し、 $40,000 \text{ min}^{-1}$ について $NRRO_T$ の低減効果の評価を行った。フーリエスペクトルにより評価した Y 軸方向における低減効果は 60 %、X 軸方向における低減効果は 41 % であり、XY 平面上における $NRRO_T$ の低減が可能であることを示した。また、二軸同時加振システムの評価は一軸加振システムの評価とは同型別個体の主軸およびマシニングセンタに対して行っているが、低減効果はほぼ同等である。よって、本加振システムは主軸の個体差により $NRRO$ が変化したとしても十分に追従可能であり、第2章で示したコンセプトを全て満たしていることを示した。フーリエスペクトル以外の評価方法として、リサージュ波形により $NRRO_T$ の低減効果の評価した。リサージュ波形により評価した Y 軸方向における低減効果は 31 %、X 軸方向における低減効果は 12 % であり、リサージュ波形においても、 $NRRO_T$ の低減効果が確認できることを示した。リサージュ波形により評価した低減効果がフーリエスペクトルにより評価した低減効果よりも低くなる理由は、リサージュ波形は加工面と同様に転動体公転運動に起因する $NRRO$ 以外の様々な要因を含んでいるためである。さらに、実際に加工実験を行い、二軸同時加振システムによる $NRRO_M$ の低減効果の評価した。フーリエスペクトルにより評価した X 軸平行面における低減効果は 55 %、Y 軸平行面における低減効果は 41 % であり、フーリエスペクトルにより評価した $NRRO_T$ の低減効果とほぼ同等の低減効果が得られることを示した。また、断面プロファイルにおける隣接するカスプ高さの差による $NRRO_M$ の低減効果の評価を行った。加工パス毎に隣接するカスプ高さの差の上位 10 点を抽出し、その平均値による評価を行った場合、X 軸平行面における低減効果は 32 %、Y 軸平行面における低減効果は 20 % である。隣接するカスプ高さの最大値による評価を行った場合、X 軸平行面における低減効果は 28 %、Y 軸平行面における低減効果は 19 % である。いずれの評価方法においても、二軸同時加振システムにより加工面品位を改善できていることを示した。最後に、BPF により断面プロファイルから $NRRO_M$ を抽出し、 $NRRO_M$ の大きさの評価および $NRRO_T$ との比較を行った。Y 軸方向(X 軸平行面)については、最大値で評価した場合、 $NRRO_T$ は $0.22 \mu\text{m}$ 、低減後の $NRRO_T$ は $0.11 \mu\text{m}$ 、 $NRRO_M$ は $0.19 \mu\text{m}$ 、低減後の $NRRO_M$ は $0.12 \mu\text{m}$ であり、平均値で評価した場合、 $NRRO_T$ は $0.06 \mu\text{m}$ 、低減後の $NRRO_T$ は $0.03 \mu\text{m}$ 、 $NRRO_M$ は $0.06 \mu\text{m}$ 、低減後の $NRRO_M$ は $0.03 \mu\text{m}$ である。X 軸方向(Y 軸平行面)については、最大値で評価した場合、 $NRRO_T$ は $0.19 \mu\text{m}$ 、低減後の $NRRO_T$ は $0.12 \mu\text{m}$ 、 $NRRO_M$ は $0.14 \mu\text{m}$ 、低減後の $NRRO_M$ は $0.1 \mu\text{m}$ であり、平均値で評価した場合、 $NRRO_T$ は $0.05 \mu\text{m}$ 、低減後の $NRRO_T$ は $0.03 \mu\text{m}$ 、 $NRRO_M$ は $0.04 \mu\text{m}$ 、低減後の $NRRO_M$ は $0.03 \mu\text{m}$ である。 $NRRO_M$ の最大値としては、まだ目標値である 50 nm を達成していないが、 $NRRO_M$ の平均値としては、目標を達成した。

第5章では、工作機械用転がり軸受主軸における $NRRO$ による加工面への影響の低減について総括した。

以上の結果から、本研究の成果はマシニングセンタによる加工面品位の改善に寄与し、その結果として、工業製品の生産性向上に貢献できるものと考えられる。