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 (加振システムによる加工面品位の改善)

正和 裕太^{*1}, 吉岡 勇人^{*2}

Reduction of the influence on machining surface caused by tool non-repeatable run-out of rolling bearing spindle for machine tools (Improvement of machining surface quality with an excitation system)

Yuta SHOWA^{*1} and Hayato YOSHIOKA^{*2}^{*1} Makino Milling Machine CO., LTD.

4023 Nakatsu, Aikawa-machi, Aiko-gun, Kanagawa 243-0303, Japan

^{*2} Laboratory for Future Interdisciplinary Research of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology
4259-G2-19 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 226-8503, Japan

Received: 28 September 2020; Revised: 14 December 2020; Accepted: 18 January 2021

Abstract

In recent years, the demands for mirror finishing by cutting have increased, because the surface quality requirement in die and mold has become severer. In order to realize mirror surface finish by cutting, it is necessary to reduce the influence of tool non-repeatable run-out (NRRO) on machining surface. Rolling bearings used in a spindle for machine tools may cause NRRO of cutting tool due to rolling element revolution. In order to reduce the influence of NRRO on machining surface, an excitation system which can generate counter excitation force has been proposed in this study. The gradual change of multiple peaks of NRRO in frequency domain was observed. Excitation experiment results confirmed that the proposed excitation system can reduce NRRO from the relative displacement between the table and the tool. Furthermore, actual cutting results confirmed a correlation between NRRO reduction of the relative displacement and NRRO reduction on the machined surface.

Keywords : NRRO, Rolling bearing, Spindle, Machine tools, Excitation, Machining surface

1. 緒 論

近年、主に光学機器および医療機器分野の金型において、製品の高機能化や意匠デザインの高度化に伴う面品位の向上が求められている。また、表面に微細な形状パターンが求められるケースでは磨き作業による仕上げが難しく、また金型製作コスト削減の面からも磨きレスでの仕上げの要求が増えている。磨きレスを実現するためには、切削加工により高品位な面、いわゆる鏡面を達成しなければならず、そのためにはこれまでは問題とならなかった加工機内の様々な微小振動を抑制しなければならない。

加工機内の振動としては、外部環境に起因する構造体の振動、主軸や送り軸の動力として使用されるモータの振動、加工の際に発生するびびり振動などが挙げられるが、その一つとして、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おいて、転動体公転運動に起因する回転非同期振れ(Non-Repeatable Run-Out, 以下NRRO)が存在することが知られている(野口他, 2012)。工具回転振れと加工面との関係性についてはこれまでも議論されているが、NRRO について言及しているものは少ない。例えば柴原ら(柴原他, 2009)は工具回転振れ量の増加に伴い表面粗さが増加すること、1 枚の切れ刃により加工面が生成される場合、工具回転振れは表面粗さ

No.20-00343 [DOI:10.1299/transjsme.20-00343], J-STAGE Advance Publication date : 27 January, 2021

^{*1} 正員, (株) 牧野フライス製作所 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4023)^{*2} 正員, 東京工業大学 未来産業技術研究所 (〒226-8503 神奈川県横浜市長津田町 4259-G2-19)

E-mail of corresponding author: showa@makino.co.jp

に影響を与えないことを確認しているが、この工具回転振れには NRRO は含まれない。根深ら(根深他, 2009)は NRRO が加工面に影響を与えることを確認しているが、この NRRO には転がり軸受の転動体公転運動に起因する NRRO は含まれておらず、また NRRO が加工面へ与える影響を低減する方法についても検討されていない。

従来, NRRO の影響について議論されていたのは、ハードディスクのように、特に高い回転精度が要求される精密機器が中心であった(瀧井, 2001)。しかしながら、年々要求が高まっている金型の高面品位化に応じていくためには、工作機械の主軸系においてもこの NRRO の影響を考慮しなければならない。具体的にどれだけの面品位が求められるかは製品によって様々であるが、近年では算術平均粗さ R_a で数 nm～数十 nm の表面粗さが求められることが増えており、少なくとも NRRO は数十 nm に抑える必要がある。

転がり軸受を構成する部品の加工精度向上や転動体保持器の高性能化など、転がり軸受単体における NRRO の低減に対する取り組みは継続的に行われているが、回転同期振れ(Repeatable Run-Out, 以下 RRO)に対するバランス調整などのように、転がり軸受の外部から NRRO を低減する方法はまだ提案されていない。そこで、筆者らは主軸頭にボイスコイルモータ(Voice Coil Motor, 以下 VCM)を付与し、相対振動を励起することでテーブル・工具間の相対変位から NRRO 成分を低減する加振システムを提案し、主軸回転速度 $30,000 \text{ min}^{-1}$ の条件において、加工に直接的に影響を与えるテーブル・工具間の NRRO を低減可能であることを変位センサにて確認した(正和他, 2020)。しかしながら、 $40,000 \text{ min}^{-1}$ のような高速回転の条件では NRRO を低減できないという課題があった。

本報では、主軸回転速度 $40,000 \text{ min}^{-1}$ で NRRO を低減できなかった原因の考察と加振システムの再検討を行った。また、変位センサによる評価だけではなく、加振システムにより振動を抑制した状態で実際に加工実験を行い、NRRO が加工面へ与える影響の評価を行った。

2. 転がり軸受の転動体公転運動に起因する NRRO

2・1 転がり軸受の転動体公転運動に起因する NRRO の経時変化

本研究で使用する主軸は、同じ諸元のアンギュラ玉軸受をフロントに背面組合せで二列、リアに一列組み込んでおり、潤滑はアンダーレース方式を採用している。主軸の断面図を図 1 に示す、また、アンギュラ玉軸受の諸元を表 1 に示す。

Fig. 1 Sectional view of the spindle. This spindle uses three angular contact ball bearings and underlance lubrication.

Table 1 Specification of the angular contact ball bearing.
Specification of three bearings are same.

Bearing bore diameter [mm]	40
Bearing outside diameter [mm]	68

加振システムによる NRRO の低減効果を評価する前に、まず非接触変位センサ(6504-01 および 6810, MICROSENS)を立て形マシニングセンタのテーブル上に固定して工具回転振れを測定し、NRRO の評価を行った。工具と変位センサの位置関係を図 2 に示す。工具回転振れを評価する場合、一般的にノイズ除去を目的としたローパスフィルタ(Low Pass Filter, 以下 LPF)を使用するが、代わりにバンドパスフィルタ(Band Pass Filter, 以下 BPF)を使用すれば、任意の周波数成分を抽出することが可能である。転がり軸受の転動体公転運動に起因する NRRO の周波数は、転がり軸受の諸元から計算で求められる(野口, 畔柳, 2007)。そのため、該当周波数を中心周波数と

する BPF を使用すれば、転がり軸受の転動体公転運動に起因する NRRO のみを抽出評価することが可能となる。前報では、同じ主軸回転速度を維持しているにも関わらず、主軸回転開始からの時間経過によって NRRO の状態が変化することを確認した。この NRRO の状態変化は BPF を使用することにより時間軸波形で確認可能であるが、本報では主軸回転開始からの時間経過に対する NRRO の変化を詳細に観察するため、長時間の測定を行った。

NRRO は本来 RRO 以外の全ての周波数成分を指すが、本報では以降、転がり軸受の転動体公転運動に起因する NRRO を単純に NRRO と記述する。

Fig. 2 Setup for NRRO measurement from the table to the tool.

NRRO in tool run-out can be extracted by BPF.

主軸回転速度は $30,000 \text{ min}^{-1}$ および $40,000 \text{ min}^{-1}$ とし、測定時間は主軸回転開始から 600 秒間とした。BPF の中央周波数として設定する NRRO の周波数は、 $30,000 \text{ min}^{-1}$ の場合は 225 Hz、 $40,000 \text{ min}^{-1}$ の場合は 300 Hz である。サンプリング周波数は 10 kHz とした。また、測定開始前には 600 秒間主軸を停止させ、直前の主軸回転の影響を受けないように配慮した。図 3 に $30,000 \text{ min}^{-1}$ における NRRO の測定結果を示す。図 3(a) は主軸回転開始から 600 秒間の NRRO を示しているが、同じ主軸回転速度を維持しているにも関わらず、NRRO の状態が変化、具体的には主軸回転開始後約 20 秒で一度安定した後、主軸回転開始から約 120 秒で唐突に大きくなっていることがわかる。図 3(b) は主軸回転開始から 90 秒～100 秒の NRRO、図 3(c) は主軸回転開始から 590 秒～600 秒の NRRO をそれぞれ示している。両者を比較すると、単純に NRRO の大きさが異なるだけではなく、図 3(b) では NRRO がおよそ一定となっているのに対し、図 3(c) では NRRO が約 2 Hz の周波数で振幅が変動している。NRRO を抽出するために BPF を使用していることから、2 Hz の周波数成分はほぼ存在しないはずであるため、この現象は、近接する複数の周波数成分が存在することによって発生する“うなり”と呼ばれる現象である可能性が高い。しかしながら、時間領域のデータからはこれ以上の周波数分析は困難である。

一般的な周波数分析の手法として、時間領域データから周波数領域データに変換するフーリエ変換が広く用いられているが、これは工具回転振れから RRO と NRRO を識別する方法としても有効である (Grejda et al., 2005)。測定データを一括でフーリエ変換しても時間経過に対する変化は観察できないが、一定時間毎の時間領域データをフーリエ変換し、順に並べることにより、時間経過に対する変化の観察が可能となる (野口, 小野, 2000)。

図 4 に主軸回転速度 $30,000 \text{ min}^{-1}$ における NRRO のフーリエスペクトルを示す。図 4(a) は主軸回転開始から 10 秒毎のフーリエスペクトルを 600 秒分並べたものを示しており、図 3(a) と同じように NRRO の変化が確認できるが、ピークは一つではなく三つ存在していることがわかる。また、三つのピークを周波数が低い順にピーク A、ピーク B、ピーク C とすると、ピーク B およびピーク C は主軸回転開始からの時間経過に伴って変化していることがわかる。図 4(b) は主軸回転開始から 90 秒～100 秒のフーリエスペクトル、図 4(c) は主軸回転開始から 590 秒～600 秒のフーリエスペクトルをそれぞれ示している。両者を比較すると、図 4(b) ではピーク B がほぼ支配的であるのに対し、図 4(c) ではピーク C がピーク B と同程度の大きさになっている。すなわち複数のピークが混在する状態となっていることがわかる。このとき、ピーク B とピーク C の周波数の差は約 2 Hz であることから、図 3(c) における (2 Hz の周波数に見える) NRRO の変動は、ピーク B とピーク C によるうなりであることがわかる。フーリエスペクトルにおける縦軸の値は時間領域データにおける片振幅に相当するため、各ピークの大きさを合計することにより、NRRO の大きさが評価できる。

図 5 に主軸回転速度 $40,000 \text{ min}^{-1}$ における NRRO のフーリエスペクトルを示す。 $30,000 \text{ min}^{-1}$ と同様にピークが三つ存在し、各ピークは主軸回転開始からの時間経過に伴って変化していることがわかる。図 5(b) は主軸回転開始から 190 秒～200 秒のフーリエスペクトル、図 5(c) は主軸回転開始から 590 秒～600 秒のフーリエスペクトルをそれぞれ示している。両者を比較すると、図 5(b) ではピーク B がほぼ支配的であるのに対し、図 5(c) ではピーク A が中程度に大きくなっている。すなわち、複数のピークが混在する状態となっていることがわかる。

各ピークの周波数は主軸回転開始からの時間経過によって変化するが、その傾向はピークによって異なる。よって、三つのピークは異なる発生源、具体的には主軸に組み込んでいる三つのアンギュラ玉軸受に起因するものと考えられる。各ピークが変化の原因は種々考えられるが、周波数の変化が連続的であり、かつ一定時間経過後に変化しなくなることで、 $30,000 \text{ min}^{-1}$ より $40,000 \text{ min}^{-1}$ の方が定常状態に移移するまで時間を要すること、5 回の繰り返し測定により時間に対する再現性がある程度確認できたことから、温度との関連性が高いと考えられる。前報では遷移状態と定常状態の両方について評価を行っていたが、仕上げ加工の際には主軸の暖気運転を行うことが一般的であるため、基本的には十分に時間が経過した後の定常状態のみを評価すればよいと考えられる。

以上から、主軸回転速度によってピーク A とピーク C の挙動に差はあるものの、NRRO に該当する周波数付近にピークが三つ存在し、各ピークの周波数や大きさが主軸回転開始から時間経過によって変化するという点については同じである。よって、加振システムによる NRRO の低減効果は、以下に基づいて評価することとする。

- (1) 主軸回転開始から 600 秒以上経過し、各ピークが変化しなくなった定常状態で評価を行う。
- (2) 加振によるフーリエスペクトルにおける三つのピークの合計値の低減割合で評価を行う。

Fig. 3 NRRO measurement result at the spindle rotation speed of $30,000 \text{ min}^{-1}$. The Spindle rotation speed is constant, but the state of NRRO is changing by overtime.

Fig. 4 Fourier spectrum of NRRO measurement result at the spindle rotation speed of $30,000 \text{ min}^{-1}$. About peak A, it almost unchanged. About Peak B, its frequency changed to higher. About peak C, it suddenly increased at 120 seconds after spindle rotation start.

Fig. 5 Fourier spectrum of NRRO measurement result at the spindle rotation speed of $40,000 \text{ min}^{-1}$. About peak A, it suddenly increased at 290 seconds after spindle rotation start. About peak B, its frequency changed to higher. About peak C, its frequency changed to higher and it suddenly decreased at 140 seconds from spindle rotation start.

2・2 主軸のNRROと主軸頭のNRRO

前報で提案した加振システムの概要図を図6に示す。本加振システムは、主軸頭に固定した変位センサによって測定された工具回転振れからBPFにてNRROを抽出し、信号調整回路にて振幅および位相を調整した上で加振装置に入力し、相対振動を励起することでテーブル工具間の相対変位からNRRO成分を低減するものである。

前報では、図4(b)および5(b)のようにピークBが支配的な状態、または図4(c)のようにピークBとピークCが混在する場合にはNRROの低減効果が得られたが、図5(c)のようにピークAとピークBが混在する状態では、ピークBを低減するとともにピークAを増大することになったため、結果としてNRROの低減効果は得られなかった。その理由は、入力信号(主軸頭に固定した変位センサで測定したNRRO, 以下NRRO_S)と評価基準(テーブル上に固定した変位センサで測定したNRRO, 以下NRRO_T)との位相関係がピークAとピークBで異なるためであると考えられる。本節では、その原因について詳細な考察を行った。

Fig. 6 An outline of an excitation system. This system consists of a displacement sensor, a BPF, a signal conditioner, a linear amp. and an excitation unit.

図7に主軸回転速度 $40,000 \text{ min}^{-1}$ におけるNRROのフーリエスペクトルを示す。図7(a)はNRRO_S、図7(b)はNRRO_Tをそれぞれ示しているが、各ピークの大きさの比率が異なっている。NRRO_SとNRRO_Tの測定場所はほぼ同じであるため、両者の違いはセンサの固定場所、すなわち測定基準点に起因するものと考えられる。NRRO_Sは

主軸頭に固定した変位センサにより測定しているため、主軸(回転部)の $NRRO$ のみを測定していることになるが、 $NRRO_T$ はテーブル上に固定した変位センサにより測定しているため、主軸頭(非回転部)の振動の $NRRO$ 成分(以下 $NRRO_{SH}$)も含むことになる。フーリエスペクトルでは $NRRO_S$ と $NRRO_T$ との位相関係はわからないため、 $NRRO_S$ を入力、 $NRRO_T$ を出力として作成した伝達関数を図 8 に示す。二つの変位センサは測定上の都合により対向配置となっているが、 $NRRO_T$ に -1 を乗算し、平行配置で測定したものとして扱っている。また、 $NRRO_S$ におけるピーク C はピーク形状が判別できるほどの大きさでないため、評価の対象外としている。図 8(a) は位相線図を示しており、ピーク A は約 $+80^\circ$ 、ピーク B は約 -75° となっている。両者はおおよそ反対位相となるため、ピーク B を低減するように加振すると、ピーク A は逆に増大してしまう結果になると考えられる。図 8(b) はゲイン線図を示しており、ピーク A は 0.4、ピーク B は 4.8 となっている。これは加振による影響がピーク B よりもピーク A の方がはるかに大きいことを意味しており、このような状態では、信号調整回路にて $NRRO_S$ の振幅をどのように調整したとしても、 $NRRO_T$ の低減効果を得ることはできない。

Fig. 7 Fourier spectrum of NRRO at the spindle rotation speed of $40,000 \text{ min}^{-1}$.

It must be considered that $NRRO_S$ and $NRRO_T$ are different.

Fig. 8 Transfer function from $NRRO_S$ to $NRRO_T$.

Peak A and Peak B have different phase relationship and gain relationship.

次に別途 $NRRO_{SH}$ を測定し、比較を行った。それぞれの測定方法を図 9 に示す。測定の都合上 X 位置、Y 位置は数 mm ずれているが、Z 位置はほぼ同じ位置で測定している。図 10 に主軸回転速度 $40,000 \text{ min}^{-1}$ における $NRRO$ のフーリエスペクトルを示す。図 10(a) は $NRRO_S$ を示しており、当然ながら図 7(a) とほぼ同じ結果である。図 10(b) は $NRRO_{SH}$ を示しており、 $NRRO_S$ 、 $NRRO_T$ いずれとも異なっていることがわかる。ここで、 $NRRO_T$ が $NRRO_S$ と $NRRO_{SH}$ を含んだものであるとするならば、 $NRRO_S$ と $NRRO_{SH}$ を個別に測定し、合算することによっても $NRRO_T$ が得られることになる。図 10(c) は $NRRO_S$ と $NRRO_{SH}$ を合算することによって得られた $NRRO_T$ (以下 $NRRO_T'$) を示しており、おおよそ図 7(b) と同等であることが確認できた。また、ピーク A については $NRRO_S$ または $NRRO_{SH}$ よりも合算値である $NRRO_T'$ の方が小さくなっていることから、これらは合算することによって一部打ち消しあう位相関係となっていることがわかる。よって、 $NRRO_S$ を入力信号とした場合の加振結果は、加振によって $NRRO_T$ のピーク A が増大するというよりは、 $NRRO_T$ から $NRRO_S$ を低減した結果、 $NRRO_{SH}$ が残ったと考える方が適切である。

図 11 に $NRRO_S$ を入力, $NRRO_T'$ を出力として作成した伝達関数を示す. 図 11(a) は位相線図を示しており, ピーク A は約 $+65^\circ$, ピーク B は約 -87° である. 図 11(b) はゲイン線図を示しており, ピーク A は約 0.5, ピーク B は約 4.4 である. 図 8 から得られた位相およびゲインに近い値となっており, $NRRO_T'$ が $NRRO_T$ とほぼ同等であることが確認できる.

以上の結果より, $NRRO$ による加工面への影響, すなわち $NRRO_T$ を低減するためには $NRRO_S$ および $NRRO_{SH}$ の二つを考慮しなければならない, $NRRO_S$ のみを考慮した加振システムでは低減効果は限定的であり, 場合によっては低減効果が全く得られないということが明らかになった.

Fig. 9 Difference of measurement for $NRRO_S$, $NRRO_{SH}$ and $NRRO_T$. $NRRO_S$ is $NRRO$ of spindle. $NRRO_{SH}$ is $NRRO$ of spindle head. $NRRO_T$ includes $NRRO_S$ and $NRRO_{SH}$.

Fig.10 Fourier spectrum of $NRRO$ at the spindle rotation speed of $40,000 \text{ min}^{-1}$. $NRRO_T'$ obtained by adding $NRRO_S$ and $NRRO_{SH}$ is equivalent to $NRRO_T$.

Fig. 11 Transfer function from $NRRO_S$ to $NRRO_T'$. This result confirmed that $NRRO_T'$ and $NRRO_T$ are equivalent in the phase diagram and the gain diagram.

3. 加振システムによる NRRO の低減

2・2 節より, NRRO_T を低減するためには NRRO_S および NRRO_{SH} の二つを考慮しなければならないことがわかったが, テーブル上に固定した変位センサによる NRRO_T もしくは NRRO_{SH} の測定とテーブル上の被削材の加工とを両立することは困難である. しかしながら, 加速度センサによる NRRO_{SH} の測定であれば, 加工との両立が可能であると考えられる. そこで, 本節では加速度センサ(KH-314 および SK-500, SENTEC)により測定した NRRO_{SH} を加振装置への入力信号とした場合の NRRO_T の低減効果を確認した. 加振システムの概要図を図 12 に示す. 図 6 の加振システムに加速度センサを追加し, NRRO_S または NRRO_{SH} のいずれか一つを加振装置への入力信号として使用できるようにしている.

これまでの結果から, NRRO_{SH} のみを考慮した場合の NRRO_T の低減効果は限定的であり, NRRO_T から NRRO_{SH} を低減した結果, NRRO_S が残ると考えられる. 仮に NRRO_S または NRRO_{SH} を完全に低減できるとすると, 図 10 から予測できる NRRO_T の低減効果は表 2 のようになる. NRRO_T の低減効果を $100 \times (1 - (\text{加振中の } \text{NRRO}_T / \text{加振前の } \text{NRRO}_T))$ % で評価すると, NRRO_S を入力信号とした場合には -38 % となる. 負の低減効果は増大を意味するため, NRRO_T の低減効果は得られない. しかし, NRRO_{SH} を入力信号とした場合には最大で 13 % の低減効果が得られることになる.

以上, 主軸回転速度 $40,000 \text{ min}^{-1}$ の場合について考察したが, $30,000 \text{ min}^{-1}$ の場合も同様の考察が可能である. 予測した低減効果を図 13 に示す. $30,000 \text{ min}^{-1}$ の場合は, NRRO_S と NRRO_{SH} のいずれを入力信号とした場合でも低減効果は同程度, 最大で 40~50% の NRRO_T の低減効果が得られると考えられる. これは, $40,000 \text{ min}^{-1}$ の場合に NRRO_T の低減を難しくしている主原因であるピーク A が, $30,000 \text{ min}^{-1}$ の場合はそれほど大きくないためである.

Fig. 12 An outline of the excitation system with additional acceleration sensor. In case of this system, either NRRO_S or NRRO_{SH} can be used as input signal.

Table 2 Expected effectiveness of NRRO_T reduction at the spindle rotation speed of $40,000 \text{ min}^{-1}$.

If NRRO_S is used as input signal, effectiveness of NRRO_T reduction cannot be obtained. However, if NRRO_{SH} is used as input signal, a slight effectiveness of NRRO_T reduction can be obtained.

Input signal	NRRO_T without excitation [μm]	NRRO_T with excitation [μm]	NRRO_T reduction ratio [%]
NRRO_S	0.111	0.153	-38
NRRO_{SH}	0.111	0.097	13

Fig. 13 Expected effectiveness of NRRO_T reduction. In case of the spindle rotation speed of $30,000 \text{ min}^{-1}$, even if either NRRO_S or NRRO_{SH} is used as input signal, some of effectiveness of NRRO reduction can be obtained.

しかし、図 12 の加振システムにより加振実験を行ったが、主軸回転速度 $40,000 \text{ min}^{-1}$ の場合においては、予測していたほどの NRRO_T の低減効果が得られなかった。そのため、加振システムの位相遅れを信号調整回路にて補償することとした。加振システムの遅れは、ファンクションジェネレータ(WF1968, NF 回路設計ブロック)にて発生させた掃引正弦波信号($\pm 0.3 \text{ V}$, $200 \sim 400 \text{ Hz}$)を加振装置への入力信号として加振を行い、加速度センサの周波数応答として確認した。本測定によって得られた位相線図を図 14 に示す。 $40,000 \text{ min}^{-1}$ の場合、 NRRO の周波数は約 300 Hz であるので、遅れ位相は約 35° となる。この遅れ位相を信号調整回路にて進めることにより、補償が可能となる。信号調整回路の構成を図 15 に示す。本加振システムで用いている信号調整回路はアナログ回路にて作製したもので、振幅調整回路、位相調整回路ならびに信号反転回路から構成されており、振幅調整量および位相調整量は、多回転型の可変抵抗にて任意に設定可能である。位相調整回路は加振システムの遅れを調整することを目的としているため、入力信号に対して出力信号の位相を進める必要がある。しかしながら、アナログ回路での実現は不可能であるため、位相調整回路と信号反転回路との組合せにより、位相を進めた信号と近似の出力信号を得ている。

加振実験によって得られた NRRO_T の低減効果を図 16 に示す。主軸回転速度 $30,000 \text{ min}^{-1}$ において、 NRRO_S を入力信号とした場合は 35% 、 NRRO_{SH} を入力信号とした場合は 30% の低減効果となった。また、 $40,000 \text{ min}^{-1}$ において、 NRRO_S を入力信号とした場合は 63% の増大効果、 NRRO_{SH} を入力信号とした場合は 11% の低減効果となった。加振によって NRRO_S または NRRO_{SH} を完全に低減できるわけではないため、必ずしも一致するものではないが、図 13 に予測した低減効果とおおよそ同じ傾向となっていることが確認できた。

Fig. 14 Phase diagram of the excitation system. Input is sweep signal generated by a function generator, output is the acceleration sensor attached to the spindle head.

Fig. 15 An outline of the signal conditioner. Phase delay obtained from Fig. 14 can be compensated by the phase shift circuit and the inversion circuit.

Fig. 16 Effectiveness of NRRO_T reduction by the excitation system.

It was confirmed that effectiveness of NRRO_T reduction had same tendency as expected one.

4. NRRO が加工面に与える影響の低減効果の確認

4・1 加工実験概要

本章では、実際に加工面に対する NRRO の低減効果を確認するため、振動を抑制した状態で加工を行い、被削材加工面を三次元プロファイラ(Nexview, Zygo)にて評価した。工具、変位センサ、加速度センサ、加振装置ならびに被削材の位置関係を図 17 に、加工条件を表 3 にそれぞれ示す。加工条件は仕上げ加工を想定しており、加工負荷が加工面へ与える影響は十分小さい条件となっている。主軸回転速度は $30,000 \text{ min}^{-1}$ および $40,000 \text{ min}^{-1}$ とし、主軸回転速度が変わってもカusp 高さが一定となるように送り速度を変更している。加工条件は、加振なし、加振あり(入力信号: NRRO_S)および加振あり(入力信号: NRRO_{SH})とし、各条件について 10 パス分の加工を行った。送り方向の加工長さは X 方向 30 mm, 1 パスあたりの加工幅は Z 方向 0.05 mm である。なお、変位センサによる評価である NRRO_T と区別するため、NRRO が加工面へ与える影響を NRRO_M とする。

Fig. 17 Setup for cutting experiment. Effectiveness of NRRO_M reduction by the excitation system was evaluated by machined surface with three-dimensional profiler.

Table 3 Cutting conditions for cutting experiment. These conditions are used for finishing process.

Feed speed is changed so that cusp height is the same regardless of spindle rotation speed.

Spindle rotation speed [min ⁻¹]	30,000	40,000
Feed speed (X-axis) [mm/min]	1,500	2,000
Cutting depth (Y-axis) [mm]	0.01	0.002
Tool	R0.984 Ball endmill (Single crystal diamond, 1 flute)	
Workpiece	A5052	

4・2 等高線マップによる評価

図 18 に主軸回転速度 $30,000 \text{ min}^{-1}$ における加工面のうち、X 方向 0.9 mm 分を抽出した等高線マップを示す。等高線マップ上で丸形に見えるものがカスプに該当しており、この丸の大きさが均一であるほど、 NRRO_M が小さいと判断できる。図 18(a)は加振なし、図 18(b)は加振あり(入力信号： NRRO_S)、図 18(c)は加振あり(入力信号： NRRO_{SH})の条件で加工した加工面の表面形状をそれぞれ示しているが、図から直接 NRRO_M の低減効果を定量的に評価することは困難である。

図 19 に主軸回転速度 $40,000 \text{ min}^{-1}$ における加工面のうち、X 方向 0.9 mm 分を抽出した等高線マップを示す。図 18 に示した $30,000 \text{ min}^{-1}$ の加工面の等高線マップと比較して丸の大きさが不揃いになっており、 NRRO_M が大きくなっていることがわかる。図 19(a)は加振なし、図 19(b)は加振あり(入力信号： NRRO_{SH})の条件で加工した加工面の表面形状をそれぞれ示しているが、 $30,000 \text{ min}^{-1}$ における加工面と同様に、図から直接 NRRO_M の低減効果を定量的に評価することは困難である。なお、 $40,000 \text{ min}^{-1}$ の場合は加振あり(入力信号： NRRO_S)の条件では NRRO_M の低減効果は見込めないため、加工は実施していない。

Fig. 18 Topography of the machined surface at the spindle rotation speed of $30,000 \text{ min}^{-1}$. If NRRO_M is small, the size of the circle will be uniform. However, it is difficult to discuss about effectiveness of NRRO_M reduction.

Fig. 19 Topography of the machined surface at the spindle rotation speed of $40,000 \text{ min}^{-1}$.

It is difficult to discuss about effectiveness of NRRO_M reduction, also.

4・3 断面プロファイルのフーリエスペクトルによる評価

三次元プロファイラは、等高線マップの他に断面プロファイルの出力も可能であり、断面プロファイルは、送り速度がわかっている場合時間領域データに変換可能である。そこからさらにフーリエ変換すれば、第2章と同様に周波数領域での評価が可能となる(Cheung and Lee, 2000)。そこで、図 18、図 19 に示す加工面について、図中の

パス 1 からパス 15 までの 15 パス分の断面プロファイルを測定し、フーリエスペクトルによる評価を行った。断面プロファイルのフーリエスペクトルにより評価した $NRRO_M$ の低減効果を図 20 に示す。主軸回転速度 $30,000 \text{ min}^{-1}$ において、 $NRRO_S$ を入力信号とした場合は 36%， $NRRO_{SH}$ を入力信号とした場合は 43% の低減効果となった。また、 $40,000 \text{ min}^{-1}$ において、 $NRRO_{SH}$ を入力信号とした場合に 23% の低減効果となった。パス毎のばらつき誤差が大きい、図 16 に示している $NRRO_T$ の低減効果とおおよそ同じ傾向であることが確認できた。よって、テーブル上に固定した変位センサによる評価は、 $NRRO$ が加工面に与える影響を評価する手段として有効であると考えられる。金型を実際に加工し、加工面の評価を行うには時間がかかる。そのため、試行錯誤にかかるコストを削減することを目的として、機械の測定データから加工結果を予測する方法が提案されている(Brecher et al., 2019)。加工結果を予測するために必要な要素は加工の内容によって異なり、一般的には切削力による工具のたわみやびり振動などが考慮されることが多いが、今回のように切削により鏡面を達成するような場合には、 $NRRO$ の影響を考慮する必要があると考えられる。

Fig. 20 Effectiveness of $NRRO_M$ reduction by the excitation system evaluated from Fourier spectrum of cross-sectional profile. It was confirmed that effectiveness of $NRRO_M$ reduction had same tendency as effectiveness of $NRRO_T$ reduction evaluated with displacement sensor.

4・4 断面プロファイルにおける隣接カスプの差による評価

図 18(a)におけるパス 1 の断面プロファイルを図 21 に示す。断面プロファイルには、構造体の振動、送り軸の振動、加工面のうねり、加工面のバリ・キズ・コンタミ、測定器起因の誤差など様々な要因を含むため、 $NRRO_M$ のみを議論するのは困難である。しかしながら、本研究にて使用している転がり軸受の場合、 $NRRO$ の周波数は RRO の約 0.45 倍であるため、隣接したカスプの底の差からおおよそその $NRRO_M$ の大きさを知ることができると考えられる。 $NRRO$ のピークが単一で、かつ RRO の 0.5 倍の周波数であれば、隣接するカスプの底部の差は一定になるはずであるが、実際には $NRRO$ には複数のピークが存在し、かつ周波数も約 0.45 倍であるため、隣接するカスプの底部の差は一定にはならない。そこで、図 18、図 19 に示す加工面について、図中のパス 1 からパス 15 までの 15 パス分の断面プロファイルを測定し、それぞれの断面プロファイルにおいて隣接するカスプの底部の差が最大になる箇所を 10 点ずつ抽出し、その平均値にて比較を行った。比較結果を図 22 に示す。主軸回転速度 $30,000 \text{ min}^{-1}$ において、 $NRRO_S$ を入力信号とした場合は 11% の低減効果、 $NRRO_{SH}$ を入力信号とした場合は 14% の低減効果となった。また、 $40,000 \text{ min}^{-1}$ において、 $NRRO_{SH}$ を入力信号とした場合に 5% の低減効果となった。隣接するカスプの底部の差が加振によって低減できていることは確認できたが、十分な低減効果は得られてない。これは、前述した様々な要因のうち、加振システムによって低減可能であるのは転がり軸受の転動体公転運動に起因する $NRRO$ のみだからである。この方法でも $NRRO_M$ の低減効果は評価可能であると考えられるが、加振システムによる低減効果があると明言するためには、低減効果自体を向上させる必要があると考えられる。

Fig. 21 Cross-sectional profile of Path1. Approximate $NRRO_M$ can be estimated from difference between neighboring cusps.

Fig. 22 Effectiveness of $NRRO_M$ reduction by the excitation system evaluated from difference between neighboring cusps of cross-sectional profile. It is very small, because cross-sectional profile includes various factors that cannot be reduced by the excitation system.

5. $NRRO_S$ および $NRRO_{SH}$ を同時に考慮した加振システム

第1章において、 $NRRO$ は少なくとも数十 nm に抑える必要があると述べた。今回使用した主軸において、主軸回転速度 $40,000 \text{ min}^{-1}$ における三つのピークの合計値は、表2に示しているとおり $0.111 \mu\text{m}$ であった。このピーク高さは位相が完全に一致した瞬間の正弦波における片振幅に相当するため、 $NRRO$ の大きさとしては $0.222 \mu\text{m}$ となる。よって、 $40,000 \text{ min}^{-1}$ において $NRRO$ を数十 nm に抑えるためには、55%以上の低減効果が必要となるため、現状の加振システムでは不十分である。

これまでの結果から、 $NRRO_T$ または $NRRO_M$ を低減するためには、 $NRRO_S$ および $NRRO_{SH}$ の両方を考慮しなければならないことがわかった。図12に示した加振システムでは、入力信号として使用できるのは $NRRO_S$ または $NRRO_{SH}$ のいずれか一つであるが、2.2節において、 $NRRO_S$ と $NRRO_{SH}$ を個別に測定し、合算することによって $NRRO_T$ とほぼ同等である $NRRO_T'$ が得られることがわかっている。 $NRRO_S$ は変位センサによって測定されており、 $NRRO_{SH}$ は加速度センサによって測定されているため、物理量としては別物である。しかしながら、センサから出力されているのはどちらも電圧であるため、合算することが可能である。そこで、図23に示すように $NRRO_S$ と $NRRO_{SH}$ を個別に測定し、振幅および位相を調整した後に合算すれば、 $NRRO_S$ および $NRRO_{SH}$ を同時に考慮した加振システムになると考えられる。

Fig. 23 An outline of the excitation system considering $NRRO_S$ and $NRRO_{SH}$. $NRRO_S$ and $NRRO_{SH}$ are mixed by a signal mixer after each signal conditioner.

NRRO_S および NRRO_{SH} を同時に考慮した加振システムによる NRRO_T の低減効果を図 24 に示す. 主軸回転速度 30,000 min⁻¹ および 40,000 min⁻¹ の両方の場合において, NRRO_S または NRRO_{SH} のいずれか一つを入力信号と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確認した. 図 12 の加振システムでは, NRRO_S を低減した結果 NRRO_{SH} が残る, もしくは, NRRO_{SH} を低減した結果 NRRO_S が残るといったように, NRRO_T を低減するシステムとしては不十分であった. しかしながら, 本加振システムでは両方を低減することが可能である. また, 40,000 min⁻¹ においては NRRO_S のピーク A と NRRO_{SH} のピーク A が互いに一部打ち消しあうような位相関係となっているため, いずれか一つを低減すると NRRO_T のピーク A は逆に増大してしまうが, 本加振システムでは両方を低減可能であるため, このような結果にはならない. 以上の理由により, 高い NRRO_T の低減効果が得られたと考えられる. 加振装置の諸元については適切な設計が必要であるが, 加振システムの考え方自体は, 他の転がり軸受主軸, 工作機械にも適用可能であると考えられる.

Fig. 24 Effectiveness of NRRO_T reduction by the excitation system considering NRRO_S and NRRO_{SH}.

It was obtained that higher effectiveness of NRRO_T reduction than the excitation system using either NRRO_S or NRRO_{SH} as input signal.

6. 結 論

本報では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を低減する加振システムを用いて加工実験を行うことにより, 以下の結論を得た.

- (1) 変位センサにより測定したテーブル基準の NRRO(NRRO_T)は, 主軸の NRRO(NRRO_S)と主軸頭の NRRO(NRRO_{SH})を合算したものである. そのため, いずれか一方を低減する加振システムでは不十分である. NRRO_S および NRRO_{SH} を同時に考慮する加振システムとすることで, より高い NRRO_T の低減効果を得ることが可能である.
- (2) 変位センサにより評価した NRRO_T の低減効果と, 加工面の断面プロファイルにより評価した NRRO が加工面に与える影響(NRRO_M)の低減効果との間には相関関係が確認できた. よって, 実際に加工を行わずとも, 変位センサにより加振システムを評価することが可能である. ただし, これは精密切削仕上げ加工のように, NRRO が直接的に加工面へ影響を与える加工条件であることが前提となる.

文 献

- Brecher, C., Eckel, H., Motschke, T., Fey, M. and Eppe, A., Estimation of the virtual workpiece quality by the use of a spindle-integrated process force measurement, CIRP Annals, Vol.68, No.1 (2019), pp.381-384.
- Cheung, C. F. and Lee, W. B., A multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra-precision machining, Precision Engineering, Vol.24, No.1 (2000), pp.77-87.
- Grejda, R., Marsh, E. and Vallance, R., Technics for calibrating spindles with nanometer error motion, Precision Engineering, Vol.29, No.1 (2005), pp.113-123.
- 根深鉄平, 田中秀岳, 柳和久, 小径エンドミルの回転振れ軌跡と切れ刃プロファイルに基づく加工面性状の推定 (第 1 報) -解析モデルと回転振れ成分の転写性-, 精密工学会誌, Vol.75, No.5 (2009), pp.645-649.

- 野口昭治, 小野京右, 磁気ディスクスピンドルモータ用玉軸受の回転非同期振れの低減(第3報, 回転非同期振れに及ぼす潤滑の影響), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.642 (2000), pp.648-653.
- 野口昭治, 畔柳雄太, 玉軸受の転動体公転挙動に及ぼすラジアル荷重の影響, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.73, No.735 (2007), pp.3063-3068.
- 野口昭治, 佐藤優太, 野木高, 金田徹, 玉軸受単体の回転非同期振れに及ぼす傾斜誤差の影響, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.785 (2012), pp.272-281.
- 柴原豪紀, 熊谷幹人, 幸田盛堂, 奥田考一, 工具回転精度が金型加工面テクスチャに及ぼす影響, 砥粒加工学会誌, Vol.53, No.4 (2009), pp.230-235.
- 正和裕太, 吉岡勇人, 新野秀憲, 工作機械用転がり軸受主軸の工具回転非同期振れによる加工面影響の低減(加振システムの開発), 日本機械学会論文集, Vol.86, No.884 (2020), DOI: 10.1299/transjsme.19-00450.
- 瀧井裕一, 高速スピンドル用玉軸受の現状と将来, 精密工学会誌, Vol.67, No.7 (2001), pp.1083-1085.

References

- Brecher, C., Eckel, H., Motschke, T., Fey, M. and Epple, A., Estimation of the virtual workpiece quality by the use of a spindle-integrated process force measurement, CIRP Annals, Vol.68, No.1 (2019), pp.381-384.
- Cheung, C. F. and Lee, W. B., A multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra-precision machining, Precision Engineering, Vol.24, No.1 (2000), pp.77-87.
- Grejda, R., Marsh, E. and Vallance, R., Technics for calibrating spindles with nanometer error motion, Precision Engineering, Vol.29, No.1 (2005), pp.113-123.
- Nebuka, T., Tanaka, H. and Yanagi, K., Estimation of machined surface texture being based on cutter run-out trajectory and cutting edge profile of small diameter end-mill (1st report) -analytical model and geometrical transfer of run-out components-, Journal of the JSPE, Vol.75, No.5 (2009), pp.645-649 (in Japanese).
- Noguchi, S. and Ono, K., Reduction of NRRO in a ball bearing for HDD spindle motors (3rd report, influence of lubrication on NRRO of a ball bearing), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.66, No.642 (2000), pp.648-653 (in Japanese).
- Noguchi, S. and Azeyanagi, Y., The Influence of radial loads on the ball revolution behavior in ball bearing, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.73, No.735 (2007), pp.3063-3068 (in Japanese).
- Noguchi, S., Sato, Y., Nogi, T. and Kanada, T., Influence of inclination error on non repetitive run-out of the single ball bearing, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.78, No.785 (2012), pp.272-281 (in Japanese).
- Shibahara, H., Kumagai, M., Kohda, S. and Okuda, K., Influence of tool run-out on mold surface texture, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, Vol.53, No.4 (2009), pp.230-235 (in Japanese).
- Showa, Y., Yoshioka, H. and Shinno, H., Reduction of the influence on machining surface caused by tool non-repeatable run-out of rolling bearing spindle for machine tools (development of an excitation system), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.86, No.884 (2020), DOI: 10.1299/transjsme.19-00450.
- Takii, H., The present state and the future of ball bearings for high speed application, Journal of the JSPE, Vol.67, No.7 (2001), pp.1083-1085 (in Japanese).