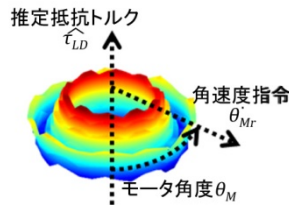


加工精度向上のための 抵抗トルク分布の可視化と回転軸の特性評価技術

Visualization of Resistive Torque Distribution and Evaluation of Rotational Axis Characteristics for Improvement of Machining Accuracy



徳山 享大*¹
Kyota Tokuyama

井川 友博*¹
Tomohiro Ikawa

栗屋 伊智郎*²
Ichiro Awaya

下脇 寿之*³
Toshiyuki Shimowaki

飯山 尚輝*³
Naoki Iiyama

小島 佑太*⁴
Yuta Kojima

工作機械など高い組立精度が求められる装置は、回転軸の健全性を評価するため、組立完了後に実加工による性能評価を要することが多い。

内蔵モータを低速で回転させた際の抵抗トルクを高精度に推定することができれば、角度、角速度に依存する回転軸抵抗トルクの大きさを評価できる。さらに、その抵抗トルクの分布を3次元的に表示することで、回転軸抵抗トルクの均一性を一目で評価できる。これは実加工を伴わず、モータ取り付け直後に検査可能である。

本報では、抵抗トルク分布を可視化して回転軸の状態を評価可能にする技術について述べる。

1. はじめに

工作機械など高い組立精度が求められる回転軸の状態を把握するためには、実加工による性能評価を要するため、組立完了後の試験が必要である。また、性能評価における要因分析や数値定量化する方法が幾つかあるが、別の計測器を取り付ける必要があり、加工精度と直結しないこともある。

この課題に対し、三菱重工工作機械(株)では、回転軸の状態を把握して機器性能の改善につなげるべく、内蔵モータによる駆動データを基に回転軸まわりの抵抗トルクを定量化・可視化する技術を開発した。

本報では、第2章に対象とする機械の構成、第3章に開発アルゴリズムの解説及び要素試験装置を用いた検証結果、第4章に歯車研削盤を対象に同技術を適用した結果を示す。

2. 対象とする機械構成と評価する状態量

図1に、対象とする機械を想定して製作した要素試験装置を示す。対象機械は歯車研削盤の主軸などと同様に、回転軸の駆動源であるモータ、軸受やシール、及び回転軸のイナーシャとなる負荷で構成される。

図1で示した機械は図2のように表現でき、低速領域であれば(1)式の運動方程式でその動特性を表現できる。ここで、 J_M :モータイナーシャ、 J_L :負荷イナーシャ、 θ_M :モータ角度、 τ_M :モータトルク、 τ_{MD} :モータ内部抵抗トルク(コギングトルクなど)、 τ_{LD} :負荷抵抗トルクである。

$$(J_M + J_L)\ddot{\theta}_M = \tau_M - \tau_{MD} - \tau_{LD} \quad (1)$$

τ_{MD} はコギングトルクとクーロン摩擦であるが、クーロン摩擦は小さく、コギングトルクが支配的である。よって、最初に、2つの抵抗トルクを以下の式の右辺から求め、

$$\tau_{MD} + \tau_{LD} = \tau_M - (J_M + J_L)\ddot{\theta}_M \quad (2)$$

*1 ICTソリューション本部 CIS 部

*2 ICTソリューション本部 CIS 部 ME 工博

*3 三菱重工工作機械(株)技術本部

*4 三菱重工工作機械(株)バリューチェーン本部

その抵抗トルク波形からコギングトルク成分 τ_{MD} を推定し、除去することで τ_{LD} が得られる。

(1)式を基に負荷抵抗トルク τ_{LD} を推定し、機械の特性を把握する。特に、軸を低速で回転させた際の運転データを用いて抵抗トルクを推定することで、機械の特徴を精度良く把握可能になる。

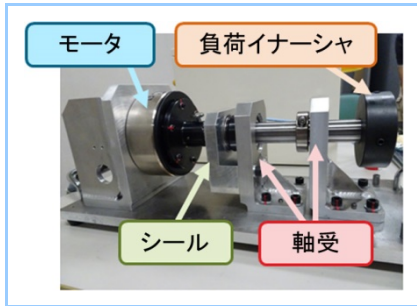


図1 対象とする機械の構成 (要素試験装置)

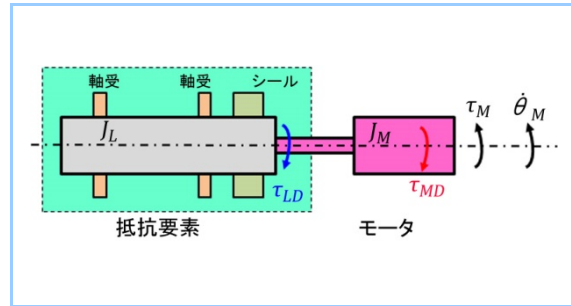


図2 機械要素の表現

3. 回転軸抵抗トルク分布の可視化・分析技術

回転軸の状態を把握するための抵抗トルク分布可視化フローを図3に示す。複数の回転数で取得した試験データを基に①～④の処理を施して抵抗トルク分布を得る。各処理内容を 3.1～3.4 節に示す。

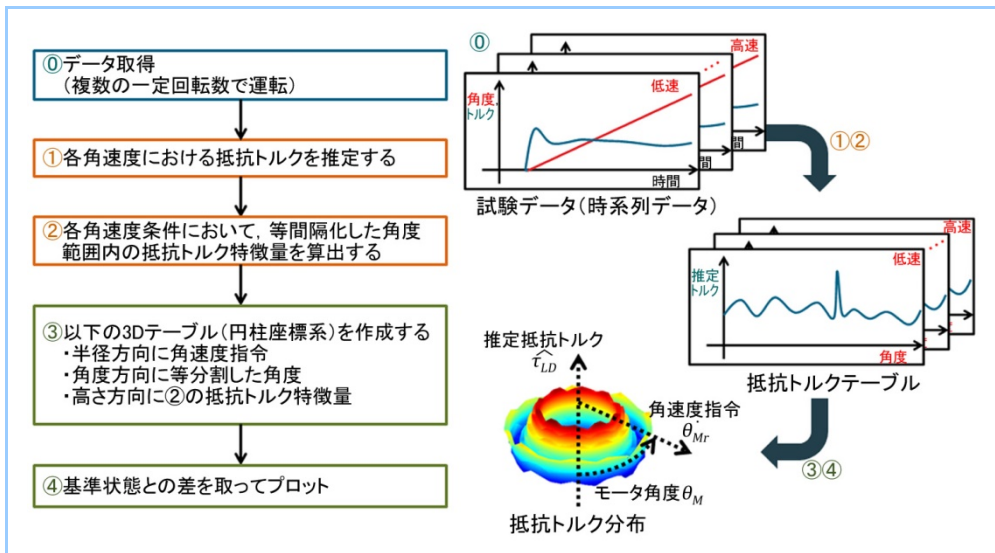


図3 抵抗トルク分布可視化フロー

3.1 抵抗トルクの推定

(1)式の運動方程式を基に、機械の抵抗要素に生じる負荷抵抗トルク τ_{LD} を推定負荷抵抗トルク $\hat{\tau}_{LD}$ として推定する。

(1)式中、イナーシャ J_M 、 J_L には設計情報、モータトルク τ_M には指令値を用いる。残るモータ内部抵抗トルク τ_{MD} 、モータ角加速度 $\ddot{\theta}_M$ を適切に推定することで、推定負荷抵抗トルク $\hat{\tau}_{LD}$ を精度よく求められる。

まず、モータ内部抵抗トルク τ_{MD} については以下のいずれかの方法で除去する。

- (1) 負荷要素をはずしてモータ単体で駆動させた際のモータトルクを代入する。
- (2) モータトルクから、あらかじめ把握している計測ノイズやコギングトルクをFFT (Fast Fourier Transform) 解析で抽出して除去する。
- (3) 3.3項で後述する3Dテーブルをモータ単体で作成し、3.4項に示す通り抵抗要素と結合した状態との差をとる。

モータ角加速度 $\ddot{\theta}_M$ については、計測したモータ角度 θ_M から、オフライン処理によりノイズを除

去しつつ位相遅れなく数値微分することで導出する。本報では、最小二乗法による関数フィッティングをベースにした Savitzky-golay フィルタ⁽¹⁾を用いた。

以上で導出した各状態量を用いて(1)式により推定負荷抵抗トルク $\hat{\tau}_{LD}$ を推定した。

3.2 抵抗トルク特徴量の算出

前項で推定した推定負荷抵抗トルク $\hat{\tau}_{LD}$ 、及び計測したモータ角度 θ_M 、角速度指令値 $\dot{\theta}_{Mr}$ を用いて、角度・角速度に対する抵抗トルク特徴量を以下の処理により算出する。

- (1) 予め用意した角速度の運転ごとに、推定負荷抵抗トルク $\hat{\tau}_{LD}$ を推定する。
- (2) 角速度運転ごとに、等間隔化した角度範囲の推定負荷抵抗トルク $\hat{\tau}_{LD}$ から特徴量を算出する。算出する特徴量は、目的に応じて最大値、p-p 値、分散、平均値などを用いる。最大値を例として、その算出方法を図4に示す。

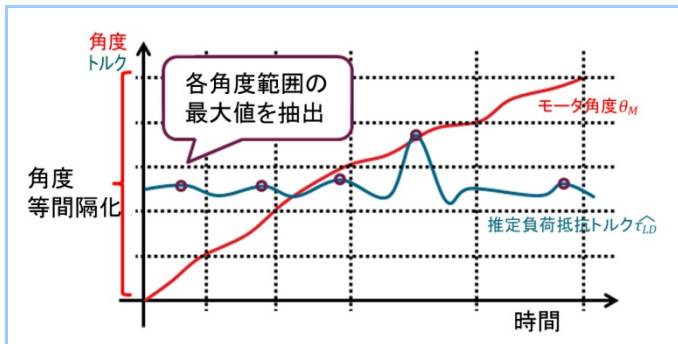


図4 抵抗トルク特徴量の算出

3.3 3D テーブルの作成

前項で算出した特徴量を基に、機械特性を表現するための抵抗トルク分布を 3D テーブルとして作成する。

本報では、特徴量に最大値を用いた際の例として、モータ絶対角と角度指令に対する推定負荷抵抗トルク最大値のテーブルを作成する。テーブルは、円柱座標系で表現するものとし、半径方向に角速度指令値 $\dot{\theta}_{Mr}$ の対数值、角度方向に等分割したモータ絶対角、高さ方向に前項で算出した推定負荷抵抗トルク最大値をとるものとする。3D テーブルの例を図5に示す。

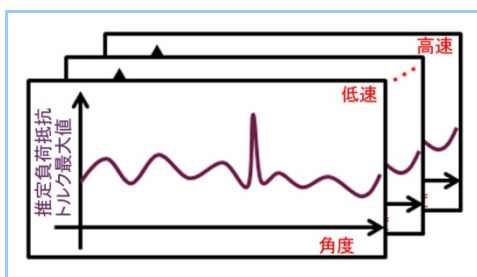


図5 3D テーブルの作成

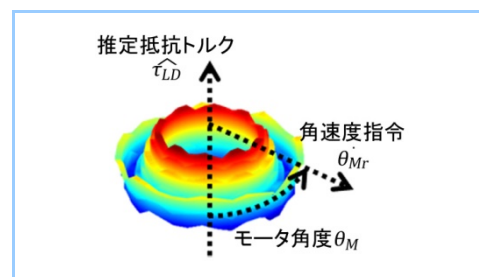


図6 抵抗トルク分布例

3.4 基準状態との差を抽出

前項で作成した 3D テーブルを3次元プロットすると、機械の抵抗トルク分布が得られる。特徴量に最大値を用いた際の抵抗トルク分布例を図6に示す。この分布より、角速度に依存する摩擦特性を角度毎に一括して評価可能である。

作成した抵抗トルク分布を用いて基準状態との差をとることで、機械の状態を把握可能になる。基準状態としては、正常な機械の抵抗トルク分布や、納入直後の抵抗トルク分布などを用いることで、正常状態との乖離や、機器の劣化具合を評価可能になる。

さらに基準状態との差の把握を容易にするため、設定回転数ごとの平均値との差をとることで、1回転中のばらつきを評価できる。図7に、ある日に取得した抵抗トルク分布と別日に取得した抵抗トルク分布の差をとった後、各角速度における平均値との差をとった分布を示す。これは装置

の日差を示すものである。

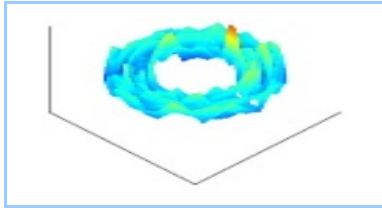


図7 1回転中のばらつき

3.5 要素試験装置を用いた有効性の検証

本手法の有効性を検証するため、図1の要素試験装置に意図的に異常を発生させた際の抵抗トルク分布を作成した。異常の例として、(1)軸受に異物混入(2)シール摺動面に勾配発生(3)シール摺動面に傷発生(4)シャフト偏芯を発生させた。その際の抵抗トルク分布を図8に示す。

発生した異常毎に異なる分布形状を有していることから、異常が発生した原因をある程度絞り込むことが可能になる。

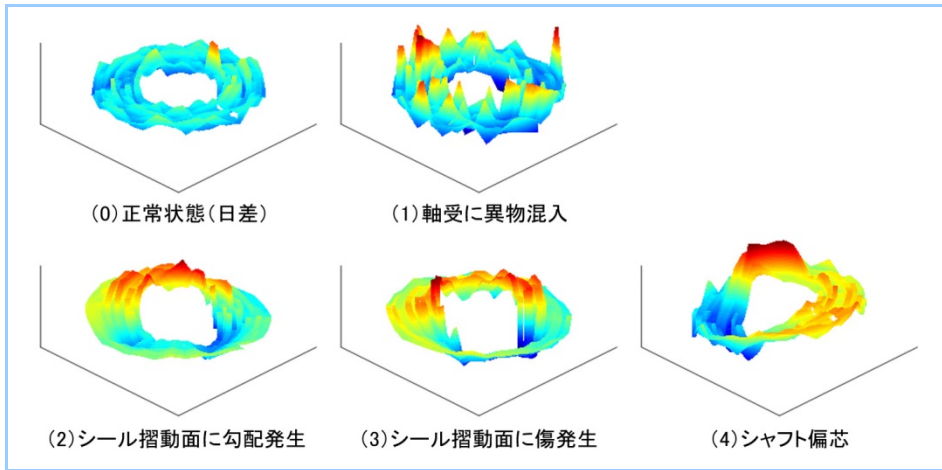


図8 各異常に対する抵抗トルク分布

4. 歯車研削盤への適用

開発した技術を歯車研削盤の主軸に適用し、抵抗トルク分布可視化の効果を確認した。

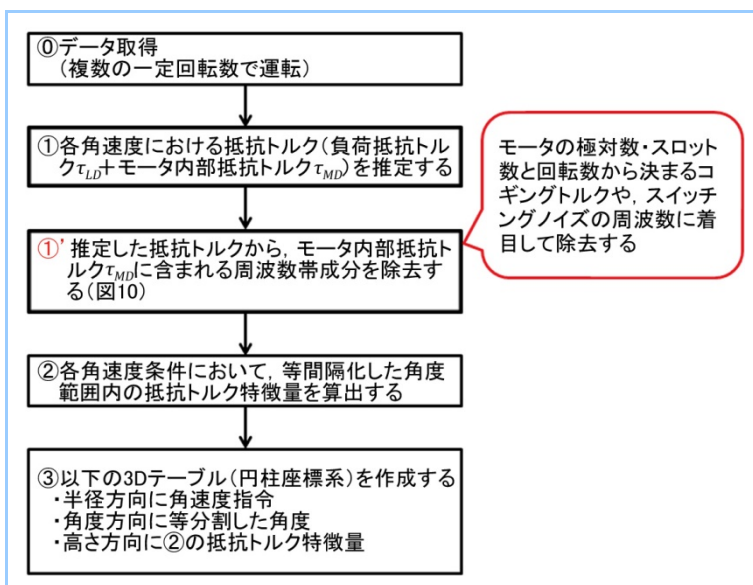


図9 歯車研削盤の抵抗トルク分布可視化フロー

歯車研削盤主軸にはビルトインモータを使用しており、モータ固有の特性を排除する際には3.1-(2)のとおり、FFT 解析によりコギングトルクやスイッチングノイズなどを除去する必要がある。本技術を歯車研削盤に適用した際のフローを図9、FFT 解析によるモータ内部抵抗トルク除去のフローを図10に示す。

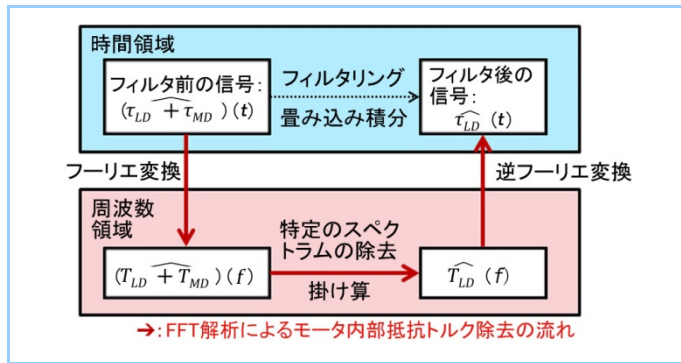


図10 FFT 解析によるモータ内部抵抗トルク除去フロー

歯車研削盤の試験データを対象にした、モータ内部抵抗トルク除去前後の抵抗トルク分布の比較を図11に示す。

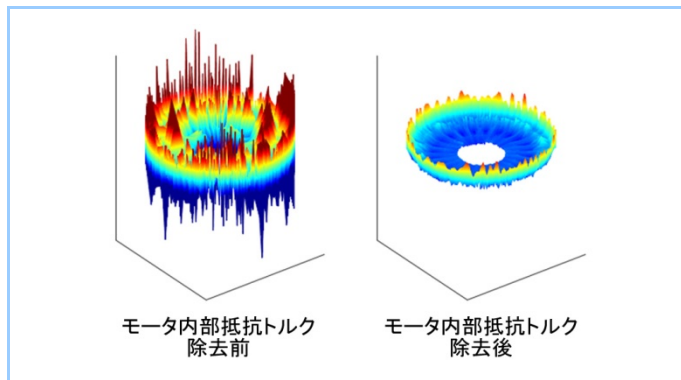


図11 FFT 解析によるモータ内部抵抗トルク除去前後の比較

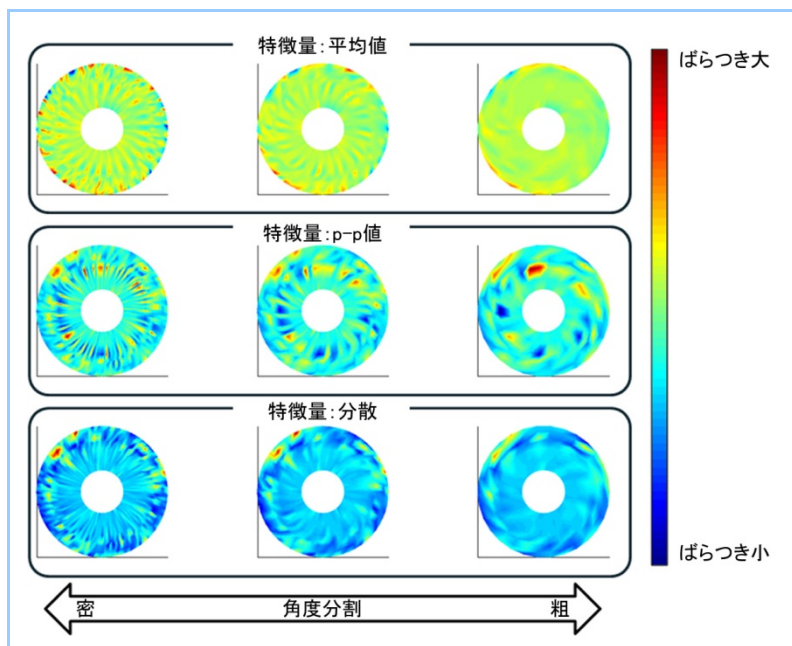


図12 歯車研削盤の抵抗トルク分布一覧

図11の右図に示すように、完全にコギング関連のトルクを除去できないが、十分小さいレベルに抑えることができ、特別大きな偏りがない状態であることが分かる。モータ内部抵抗トルク

を除去することで、粘性抵抗などの抵抗要素に生じる負荷抵抗トルク成分を抽出可能である。

抽出した負荷抵抗トルクを基に、特徴量を算出して抵抗トルク分布を作成した。例として、特徴量に平均値、p-p 値、分散をとり、角度分割幅を粗～密で3ケースにふった抵抗トルク分布の一覧を図 12 に示す。

図 12 に示すとおり、使用する特徴量と角度分割数によって、さまざまな観点で抵抗トルク分布を表現できる。例えば“特徴量:p-p 値, 角度分割:粗”の抵抗トルク分布中、中速域の同心円状にある角度領域に集中してばらつきが大きくなる区間が存在する。このばらつきと機械状態との関係を明らかにすることで、機械の健全性を評価できる。目的に応じて選択した特徴量・角度分割幅を選択し、そのばらつきを評価することで機械性能について評価が可能になる。

5. まとめ

本報では、高精度を要求される工作機械において、回転軸の抵抗トルク特性を定量化・可視化し、加工精度に与える影響を評価する技術を取り上げた。本技術の有効性を要素試験装置で検証したうえで、歯車研削盤を対象に抵抗トルク分布技術を適用して、さまざまな観点で機械特性を表現できることを確認した。

今後、この抵抗トルク分布と加工精度の関係を、蓄積した試験データから分析し、組立手法の改善を通して加工精度向上につなげていく。さらに、本技術を利用した遠隔予防保全技術への展開も図っていく。

参考文献

- (1) Savitzky, Abraham et al., Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, Analytical chemistry 36.8 (1964): 1627-1639.