

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03904

研究課題名(和文) 状態融合外乱オブザーバを応用した軸統合型広帯域加工力推定による革新的プロセス監視

研究課題名(英文) Innovative process monitoring by utilizing multi-axis integrated cutting force estimation based on state-fused disturbance observer

研究代表者

柿沼 康弘 (Kakinuma, Yasuhiro)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：70407146

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ボールねじ駆動のNC工作機械における異常加工監視を実現するために、多慣性モデルに基づく状態融合外乱オブザーバによる切削力推定技術を提案した。更に、各軸から得られる推定加工力を3次元空間で統合することで高精度なプロセス監視が可能であることを実験的に明らかにした。具体的には、複数軸からの推定切削力に基づき工具摩耗、工具欠損、びびり振動を検知できる手法の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to implement process monitoring in major machine tools with ball-screw driven mechanism, a novel cutting force estimation technology with state-fused disturbance observer based on multi-inertia model was proposed. It is experimentally clear that highly accurate process monitoring has been conducted by integrating all cutting forces estimated from each axis. In this study, tool wear and fracture detection techniques, and chatter detection technique are developed with estimated cutting force.

研究分野：生産加工

キーワード：プロセス監視 切削力推定 工作機械 センサレス技術

1. 研究開始当初の背景

工作機械は多軸化・複合化することで、インペラやインプラントに代表される複雑部品の加工精度や加工能率を飛躍的に向上させ、ものづくりに革新をもたらしたと言っても過言ではない。その一方で、動きは複雑になり、プログラムミスによる工具衝突や剛性低下に伴うびり振動などの新たな課題が生じている。そのため、CADモデルを取り込んだ工具衝突回避やプロセス監視技術に基づくびり振動回避など実用レベルでの知能化技術が、今再び脚光を浴びている。例えば、工作機械見本市 (JIMTOF2014) では、知能化技術に関するテクニカルセッション「次世代のインテリジェント工作機械」が組まれた。研究代表者は、平成20年より制御工学の観点から、リニアモータ駆動加工機を対象に、オブザーバ理論に基づくセンサレス切削力推定技術と、それを応用した工具欠損検知やびり振動の検知・抑制技術の開発に携わり、知能化工作機械に貢献する要素技術開発に貢献してきた (引用文献①~⑤)。しかしながら、主にリニアモータ駆動工作機械を対象にした技術開発であり、ボールねじ駆動の工作機械を考えた場合、一部は応用可能であるものの、力推定精度ならびに推定帯域の観点から鑑みても、全ての成果を直接的に応用することは不可能と言わざるを得ない。工作機械におけるメインの駆動機構はボールねじであり、ボールねじ駆動工作機械の知能化を実現するには、リニアモータ駆動での性能に匹敵するセンサレス加工力推定技術の確立が最重要事項である。

2. 研究の目的

(1) ボールねじ駆動の NC 工作機械におけるサステナブルな異常加工監視を実現するために、多慣性モデルに基づく状態融合外乱オブザーバを全駆動軸に搭載し、各軸から得られる推定加工力を 3 次元空間で統合することで、高精度なセンサレス加工力推定技術を確立する。

(2) 開発したセンサレス加工力推定技術を応用し、工具摩耗や工具欠損などの工具状態監視と、びり振動検知を対象とした新規なプロセスモニタリング技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) ボールねじを多慣性でモデル化し、各要素のダイナミクスを用いた状態融合外乱オブザーバの提案する。提案手法は、切削モデルと工作機械の構造モデル及びサーボ系を統合したシミュレータと、1 軸フルクロード制御ボールねじ駆動ステージを用いたエンドミル加工実験の両面から評価する。

(2) 多軸加工機における広帯域かつ高精度な加工力推定手法として、各軸から得られる推定加工力情報の軸統合型広帯域加工力推定を提案する。各ステージに状態融合外乱オブザ

ーバを適用した小型 3 軸加工機を製作し、同様に統合シミュレータと、小型 3 軸加工機によるエンドミル加工試験によって性能評価を行う。

(3) 切削力監視に基づく工具摩耗・工具欠損の工具状態監視と、高応答なびり振動の実時間検知アルゴリズムを提案する。提案手法をボールねじ駆動の NC 工作機械に実装し、高速エンドミル加工におけるプロセス監視実験を通して性能評価を行う。

4. 研究成果

(1) フルクロード制御ボールねじ駆動ステージを回転系と並進系の 2 慣性系でモデル化し、サーボ情報として利用可能なモータ電流、ステージ位置、モータ角度の 3 つの情報を用いて構築した状態融合外乱オブザーバによるセンサレスな切削力推定技術を提案した (図 1)。切削モデルと機械構造モデル、サーボ系の統合シミュレータと、1 軸フルクロード制御ボールねじ駆動ステージを用いたエンドミル加工試験から、従来の外乱オブザーバによる切削力推定技術と比較評価をした。得られた結果を以下にまとめる。

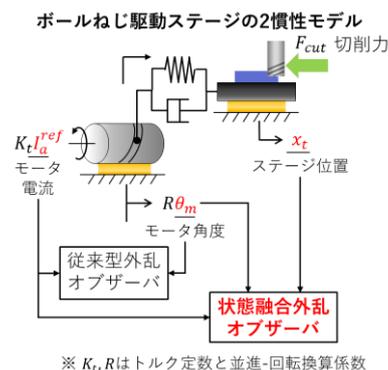


図 1 状態融合外乱オブザーバによる切削力推定の概念図

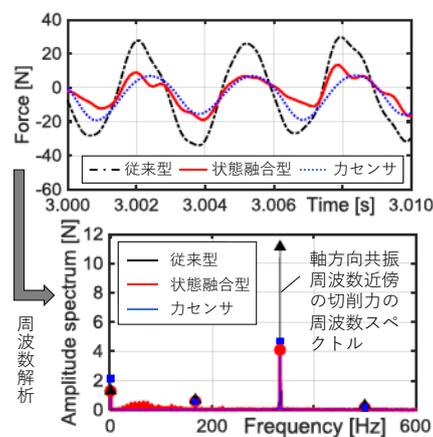


図 2 切削力推定結果の一例 (主軸回転数 10000 min^{-1}) (状態融合外乱オブザーバを用いることで、共振周波数近傍の切削力成分を高精度推定)

① 状態融合外乱オブザーバにより、回転系と並進系の相互作用により従来推定が困難であった軸方向共振点近傍においても、高精度に加工負荷を推定し、切削力推定を広帯域化できることを確認した(図2)。

② 状態融合外乱オブザーバの誤差要因について検討し、特に、送り動作時の摩擦力/トルクやサンプリング時の時間遅れ、角度/位置計測時の量子化誤差が力推定性能に与える影響を評価した。その結果、送り動作時の摩擦力/トルクに加えて、ボールねじのリード、あるいは銅球の循環に伴って生じる位置(回転)に応じたミリメートルからサブミリメートル波長の周期的なトルク変動や、エンコーダ信号周期に起因するマイクロメートルオーダー波長の高周波変動が広帯域な加工力推定において無視できないことを示した。また、サンプリング時の時間遅れによる3つの状態信号間の位相ずれが、力推定性能に影響を及ぼすことも明らかにした。

③ 解析した誤差要因の知見に基づき、摩擦力やトルクリップルの高い位置依存性と再現性を利用した外乱補償、変動周期を考慮したフィルタ処理、電流-位置/角度間の周波数応答に基づく位相遅れ補償など、誤差因子の補償方法を体系化し、これら誤差因子を考慮した切削力推定システムを構築した。一例として、図3に遅れ補償の有無による加工力推定結果の違いを示す。遅れ補償を施すことで、推定切削力を高精度化できることが分かる。誤差因子を考慮した切削力推定手法を1軸ボールねじ駆動ステージに組み込み、圧電式力センサを用いて加工力の推定精度・帯域を実験的に評価した結果、動作軸において、帯域500 Hzまで10 N以下の誤差で加工力を推定可能であることを確認した。一方、静止軸においては、切削力が静止摩擦力を下回る場合、高精度な推定が困難であることを確認した。

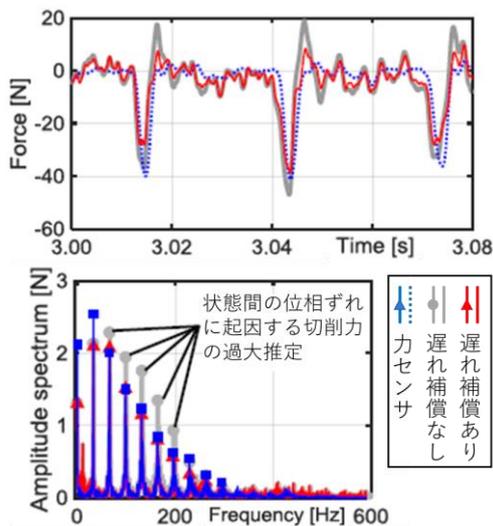


図3 遅れ補償による状態融合外乱オブザーバの加工力推定誤差の低減

(2) 上記で提案した状態融合外乱オブザーバは、動作軸においては加工力推定の高精度・広帯域化を図れるものの、静止軸においては、静止摩擦力を下回る切削力の推定は困難であった。本研究で使用したボールねじ駆動ステージの静止摩擦力は120 N程度あり、静止軸における加工力推定の感度や精度を高めるには、静止軸に適した状態融合外乱オブザーバの開発が必要であると考えた。そこで、静止状態においてはボールねじ駆動ステージの回転系と並進系が零位置固定され、切削力による回転-並進系間の弾性変形(相対運動)が支配的に生じている点に着目し、弾性変形に起因するボールねじ駆動ステージの回転-並進間内力に基づく切削力推定手法を提案した。得られた結果を以下にまとめる。

① 固有値解析に基づくモード座標変換により、ボールねじ駆動ステージ2慣性モデルの回転-並進間の相対運動に代表されるモード(振動モード)のみを抽出し、振動モード座標系における状態融合外乱オブザーバによる切削力推定理論を提案した(図4)。

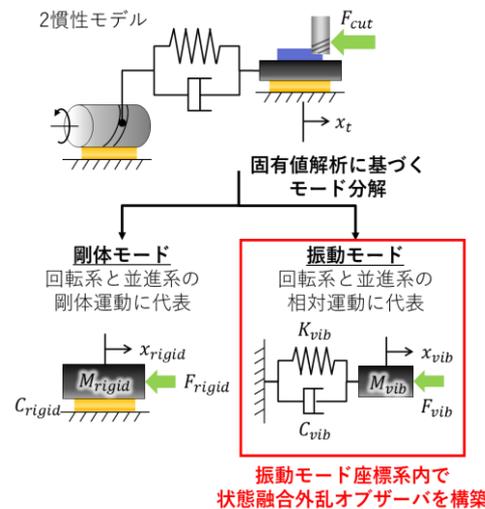


図4 モード分解を応用した振動モード状態融合外乱オブザーバの概念図

② (1)で提案した通常の物理空間座標系における状態融合外乱オブザーバと、上記で提案した振動モード状態融合外乱オブザーバを全軸に実装した3軸加工機を製作し、エンドミル加工実験を通じて切削力推定性能を評価した。その結果、振動モード状態融合外乱オブザーバを用いることで、摩擦補償無しに静止軸における切削力の推定精度を飛躍的に向上でき(図5)、圧電式力センサとの比較から、静止軸においても帯域500 Hz、推定誤差10%以下を達成した。開発した2つの状態融合外乱オブザーバを用いることで、各軸(動作軸・静止軸)統合した高精度・広帯域な切削力推定が実現できる。また、オブザーバゲインを高めることで、推定精度は低下するものの、帯域2 kHzまでの加工状態監視は可能であることを確認した。

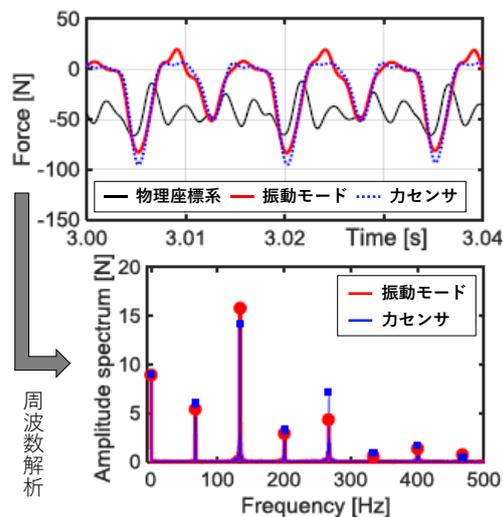


図5 ボールねじ駆動ステージの静止軸における切削力推定結果の一例（主軸回転数4000 min⁻¹）（振動モード座標系における状態融合外乱オブザーバにより、単純な物理座標系における状態融合外乱オブザーバでは困難であった静止軸における高精度な切削力推定に成功）

(3) 広帯域な軸統合加工力推定技術を応用したボールねじ駆動ステージにおけるセンサレスプロセスモニタリングの実用可能性を探るために、上記で開発を進めた状態融合外乱オブザーバをボールねじ駆動のNC工作機械の各軸に実装するとともに、切削力監視に基づく新規な工具欠損や工具摩耗、びびり振動検知アルゴリズムを開発し、高速エンドミル加工試験を通してプロセスモニタリングシステムの性能評価を行った。以下に得られた結論をまとめる。

- ① 推定切削力のピーク値を加工中に逐次抽出し、隣り合う推定切削力ピーク値のピーク値比率のばらつき（工具欠損が無い場合は、ピーク比率が1近傍に集中）を監視することで、高感度な工具欠損検知に成功した。
- ② 高速回転する電着砥石を用いた加工試験を通して、推定切削力の変動量を周波数領域で監視することで、偏摩耗を検知できることを確認した。
- ③ 電気工学における力率の概念を機械力学に応用することで、新たなびびり振動検知指標として、振動変位と切削力の位相差に関係するメカニカルエネルギーファクタ（MEF）を提案した。メカニカルエネルギーファクタは、推定切削力とサーボ情報のみから計算され、加工中に低計算負荷で逐次計算可能な指標である。びびり振動の発生原理から、びびり振動発生に伴う振動変位と切削力間の位相差変移によってメカニカルエネルギーファクタの正負が切り替わる仕組みであり、閾値設定が必要

ない。エンドミル加工におけるびびり振動検知実験を実施し、提案手法の性能評価を行った結果、閾値設定によることなく約2 kHzまでの高周波再生びびり振動の検知が可能であることを確認した（図6）。

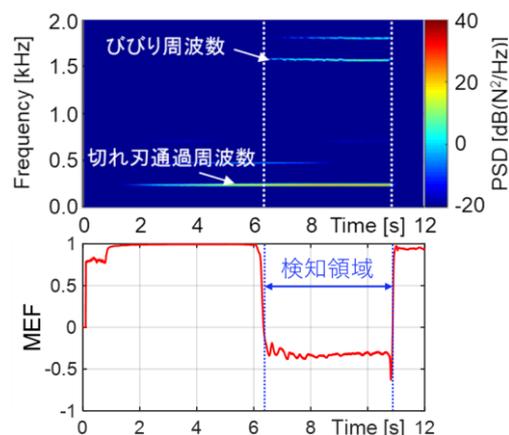


図6 メカニカルエネルギーファクタによるびびり振動検知結果の一例、上図：切削力の時間-周波数解析結果、下図：メカニカルエネルギーファクタの監視結果（MEFの正負が切り替わるところで、閾値検討なしにびびり振動を高応答に検知）

<引用文献>

- ① Y. Kakinuma, Y. Sudo, T. Aoyama, Detection of chatter vibration in end milling applying disturbance observer, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 60, No. 1, 2011, pp. 109-112
- ② T. Kamigochi, Y. Kakinuma, Development of an Intelligent stage with sensor-less cutting force and torque monitoring function, International journal of Automation Technology, Vol. 6, No. 6, 2012, pp. 736-741
- ③ Y. Kakinuma, K. Enomoto, T. Hirano, K. Ohnishi, Active chatter suppression in turning by band-limited force control, Vol. 63, No. 1, 2014, pp. 365-368
- ④ S. Tönissen, R. Koike, Y. Kakinuma, T. Aoyama, F. Klocke, Monitoring of tool collision in drilling by disturbance observer, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 7, No. 3, 2014, pp. 274-282
- ⑤ R. Koike, Y. Kakinuma, T. Aoyama, Drill fracture detection by integrating disturbance observer and rotational digital filter, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 7, No. 3, 2014, pp. 177-184

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

① YAMATO Shuntaro, HIRANO Takayuki, YAMADA Yuki, KOIKE Ryo, KAKINUMA Yasuhiro, Sensor-less on-line chatter detection in turning process based on phase monitoring using power factor theory”, Precision Engineering, 査読有, Vol. 51, 2018, pp. 103-16
DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.07.017

② 山田 雄基, 柿沼 康弘, センサレス切削力推定における誤差因子の影響, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 83, No. 851, 2017, p. 17-00098
DOI: 10.1299/transjsme.17-00098

③ 山田 雄基, 柿沼 康弘, 相対加速度を利用した帯域制限外乱/内乱相殺による振動抑制制御, 精密工学会誌, 査読有, Vol. 83, No. 11, 2017, pp. 1041-1048
DOI: 10.2493/jjspe.83.1041

④ 柿沼 康弘, センサレス切削力計測技術とその応用, 精密工学会誌, 査読有, Vol. 83, No. 3, 2017 pp. 210-213
DOI: 10.2493/jjspe.83.210

⑤ OBA Yuta, KAKINUMA Yasuhiro, Simultaneous tool posture and polishing force control of unknown curved surface using serial-parallel mechanism polishing machine, Precision Engineering, 査読有, Vol. 49, 2017, pp. 24-32
DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.006

⑥ YAMADA Yuki, KAKINUMA Yasuhiro, Sensorless cutting force estimation for full-closed controlled ball-screw-driven stage, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 査読有, Vol. 87, No. 9, 2017, pp. 3337-3348
DOI: 10.1007/s00170-016-8710-5

⑦ YAMADA Yuki, KAKINUMA Yasuhiro, ITO Takamichi, FUJITA Jun, TADA Atsushi, SAGARA Makoto, Sensorless cutting force estimation in large scale ball-screw - driven machine tool, Advanced Materials Research, 査読有, Vol. 1136, 2016, pp. 645-650
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1136.645

[学会発表] (計7件)

① YAMATO Shuntaro, YAMADA Yuki, ITO Takamichi, MATSUZAKI Hirohiko,

KAKINUMA Yasuhiro, Phase shift monitoring based on mode-decoupled disturbance observer for chatter detection, The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, Hiroshima, Japan, 2017年11月16日

② ASAGA Ryosuke, YAMATO Shuntaro, KAKINUMA Yasuhiro, Analysis of tool posture control method on curved surface using polishing machine with 5-axis serial-parallel mechanism, 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, China, 2017年10月31日

③ SUGIYAMA Akihiro, YAMADA Yuki, YAMATO Shuntaro, KAKINUMA Yasuhiro, Development of sensorless chatter detection method in ball screw drive system applying mode decoupling, 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, China, 2017年10月31日

④ YAMADA Yuki, KAKINUMA Yasuhiro, ITO Takamichi, FUJITA Jun, MATSUZAKI Hirohiko, Sensorless monitoring of cutting force variation with fractured tool under heavy cutting condition, 2016 ASME Manufacturing Science and Engineering Conference, Virginia, United States, 2016年6月29日

⑤ YAMADA Yuki, KAKINUMA Yasuhiro, Damping force-based cutting force monitoring in ball-screw-driven stage, Euspen's 16th International Conference, Nottingham, United Kingdom, 2016年6月1日~2日

⑥ YAMADA Yuki, KAKINUMA Yasuhiro, Mode decoupled cutting force monitoring by applying multi encoder based disturbance observer, 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Stuttgart, Germany, 2016年5月26日

⑦ HIRANO Takayuki, YAMADA Yuki, KAKINUMA Yasuhiro, Sensor-less chatter vibration monitoring by mechanical power factor, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, Kyoto, Japan, 2015年10月21日

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：状態推定装置，状態推定方法及びプログラム

発明者：柿沼康弘，山田雄基，大和駿太郎

権利者：同上

種類：特許

番号：特許願2016-229347

出願年月日：2016年11月25日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柿沼 康弘 (KAKINUMA, Yasuhiro)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：70407146

(2) 研究協力者

山田 雄基 (YAMADA, Yuki)

小池 綾 (KOIKE, Ryo)