

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20400

研究課題名（和文）加工振動データ同化によるバーチャル工作機械の要素境界条件の推定

研究課題名（英文）Estimation of structure boundary conditions for virtual machine tools by data assimilation of machining vibration

研究代表者

大和 駿太郎（Yamato, Shuntaro）

京都大学・工学研究科・特定助教

研究者番号：00908486

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：工作機械の構造モデルにおける境界条件（要素部品間の接触剛性、減衰など）を自動でキャリブレーションするために、加振力（切削力）と振動の実時間データを用いて境界条件を推定する研究を実施した。任意の点に設置された限られた加速度センサの時間応答と構造振動の低次元な時間領域シミュレーションを、粒子フィルタを用いてデータ同化させることで、データが入力されるたびに境界パラメータの確率分布を逐次的に更新するデジタルツインシステムを提案した。推定された境界パラメータの妥当性を実験により実証した。また、得られた確率分布の広がりや変化から、推定モデルの不確かさや重要な境界パラメータを類推できることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

測定した加工振動データを用いてバーチャル工作機械モデル上の境界条件を推定し、シミュレータを逐次更新していくための基盤技術を構築した。これは、収集した実稼働データとシミュレータが有機的に連動し、機械の使用状態に応じて適応・成長する真のデジタルツインを実現するうえで重要な技術である。また、推定された確率分布の挙動から、稼働状況に応じた重要なモデルパラメータの示唆や信頼性区間の評価、さらには機械状態異常の監視などに繋げられる可能性があり、今後更なる発展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In order to automatically calibrate the boundary conditions (contact stiffness and damping between element parts, etc.) of a machine tool structural model, a study was conducted to estimate the boundary conditions using real-time data of excitation force (cutting force) and vibration. A digital twin system that sequentially updates the probability distribution of the boundary parameters each time data is input is proposed by assimilating data from time-domain reduced-order simulations of structural vibration and the time response of a limited number of accelerometers installed at arbitrary points using a particle filter. The validity of the estimated boundary parameters was demonstrated experimentally. It was also suggested that the uncertainty of the estimated model and important boundary parameters could be inferred from the spread and change of the updated probability distribution.

研究分野：機械工学

キーワード：逐次データ同化 粒子フィルタ 境界条件推定 工作機械 デジタルツイン 時間領域シミュレーション 低次元化モデル

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

2011年にドイツがインダストリー4.0を対外発表して以降、人工知能や計算機、センサ性能の向上と相まって製造業におけるデジタル化が各国で急速に推し進められている。その中核は「デジタルツイン」であり、現実世界を模した仮想空間上で生産システムや生産工程の計画・設計・監視・改善を行うことで、エンジニアリングチェーンの大幅な効率化を図るものである。工作機械分野においても、機械構造ダイナミクスを反映したバーチャル工作機械を構築し、加工プロセスモデルとの連成解析によって仮想空間上で試し加工を行うことが試みられている。これにより、実際の加工試験なしに加工面品質の予測や加工条件の最適化を達成することができ、時間・環境資源の面で大幅な節約となる。ここで、現実の構造ダイナミクスは工作機械要素部品間の境界状態（接触剛性、減衰、摩擦など）に大きく依存するが、有限要素による構造解析（FEA）では理論的に境界条件を与えることはできない。そのため、シミュレーションに必要な構造要素部品間の接触剛性や減衰などの境界条件は、事前に実験モード解析で得られた多数の周波数応答関数（FRF）となるべく一致するように決定される。しかし、事前の実験モード解析は多大な労力とコストを必要とする。また、境界条件は加工中の力・位置・温度状態や経年などの実稼働状態に応じて変化すると考えられる。そのため、収集した実プロセスデータからバーチャル工作機械モデルの境界条件を逐次的に推定して自動キャリブレーションを行うことは、同定作業を自動化するとともに、機械の使用状態に応じて適応・成長する真のデジタルツインシステムを実現するうえで重要である。

## 2. 研究の目的

機械構造モデルにおける境界条件（要素部品間の接触剛性、減衰など）を自動でキャリブレーションするために、機械構造の連成シミュレータと機械振動の実稼働観測情報をデータ同化させることで、工作機械モデルの境界条件を推定する手法を研究する。このために、(1) 逐次データ同化を志向したシミュレーション手法を新たに開発するとともに、(2) 統計数理学に基づくデータ同化手法を組み合わせた解析手法を提案し、その有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

- (1) 小さい計算負荷で正確に機械構造の力学を再現しつつ、境界条件を逐次推定しながら繰り返し計算を行うことが可能な構造振動の時間領域シミュレーションを開発する。
- (2)-① (1)で構築したシミュレータと統計数理学に基づくデータ同化手法を組み合わせた解析手法を提案し、機械の振動状態及び境界パラメータの確率分布を推定するシステムを構築する。
- (2)-② 単純な構造モデルを模擬したテストベンチの加振実験を通して、提案手法の妥当性と有効性について検証を行う。

## 4. 研究成果

(1) 本研究で提案・構築したマルチ低次元弾性体モデル（ROMFBM）に基づく時間領域シミュレーションの概念図を図1に示す。提案システムでは、まず構造体主要パーツの有限要素モデルを、モード縮退などを用いて弾性モードを保持したまま低次元化する。このようなモデルは低次元化モデル（ROM: Reduced-order model）と呼ばれ、計算負荷の低減に大きく寄与する。さらに低次元化を行う際に、現実世界における加工力などの加振入力点と加速度センサ測定点（観測点）に加えて、図中の赤点で示されるような接触面における相互作用点を設定することで、各ボディのROMは式(1)で示すような多入力多出力系（MIMOシステム: Multi Input and Multi Output system）の状態空間モデルで表現される。

$$\begin{cases} E\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \quad (1)$$

$E, A, B, C, D$ は状態空間モデルを表現するシステム行列であり、 $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}$ はそれぞれ状態ベクトル、入力ベクトル、出力（観測）ベクトルである。各ROMの入力ベクトルと出力ベクトルは各ボディにおける加振点・センサ観測点・相互作用点の数と一致する。

各ボディのROM入出力点は、作用・反作用のフィードバック原理に基づいて、境界条件を表す仮想的なバネとダンパによって接続される。このように各ROMが作用・反作用のフィードバック原理によって明示的に接続されることで、各ROMの低次元化をやり直すことなく境界パラメータを逐次的に変更しながら時間領域シミュレーションを行うことができる。この特性は、実時間データを用いた逐次データ同化の計算負荷を低減させるうえで重要である。

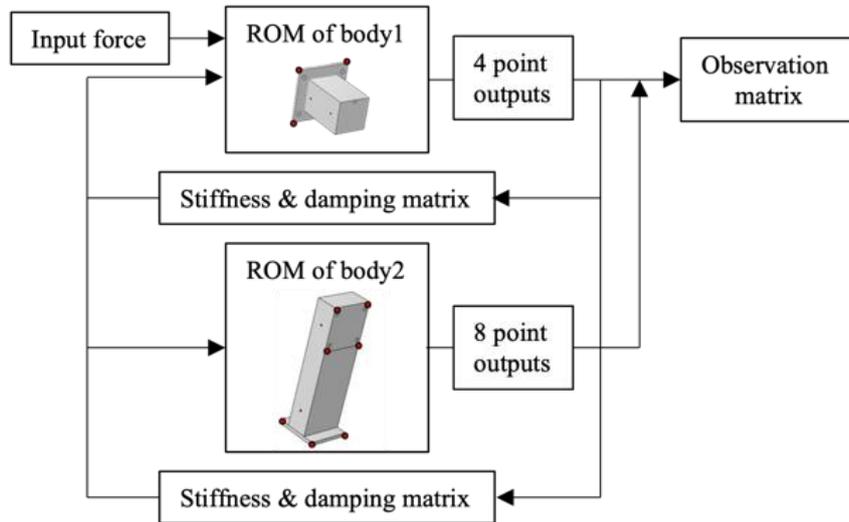


図1 マルチ低次元弾性体モデルの連成シミュレーション

(2)-① 構築したシミュレータと拡張状態空間モデルを用いた粒子フィルタに基づく境界条件推定アルゴリズムを提案した. 粒子フィルタでは, ベイズ理論を基盤として, 様々な異なる状態ベクトルを有する粒子のアンサンブル (集合) 表現によって各状態変数の確率分布を表現する. 粒子は, ある時刻における観測データと予測データの尤度に基づいてリサンプリングされることで更新され, データ観測後の状態変数の事後確率分布が推定される. その概念図を図2に示す.

本研究では, 式 (1) において振動変位と速度を示す通常の状態変数に境界パラメータを加えた拡張状態空間モデル (式 (2)) を用いて粒子フィルタを適用する.

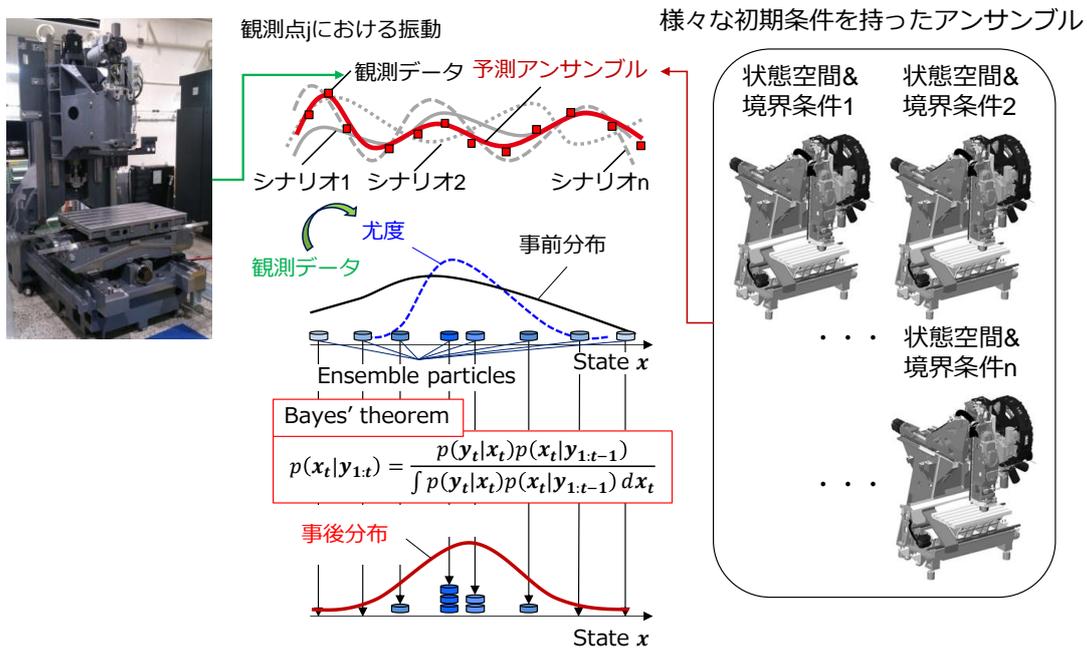


図2 粒子フィルタを用いた境界条件パラメータの事後確率分布推定の概念図

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, k_1, k_2, \dots\}^T \quad (2)$$

ここで,  $x_i$  と  $k_i$  はそれぞれ振動変位/速度を示す状態変数と相互作用点における接触剛性・減衰などに対応する境界条件を表している. これにより, 観測された時系列データに基づき拡張状態ベクトルの確率分布が更新・収束していき, 観測データを説明する尤もらしい振動状態及び境界パラメータが同時推定される. ここでいう観測データとは, 機械に設置された加速度センサによって計測される振動応答である.

(2)-② (1)および(2)-①で構築したシステムも有効性を、単純な構造モデルを模擬したテストベンチにおいて実証した (図3). 図3では、ボディ1とボディ2はボルトによって連結され、ボディ2が床に設置固定されている. 圧電アクチュエータを用いてテストベンチを加振し、取り付けられた加速度センサを用いて構造体の振動を計測した. この状況は、工作機械において、床に設置されたベースとその上に取り付けられたコラムが、切削力によって加振されて振動し、構造体に取り付けてある加速度センサを用いてセンシングしている状況に対応している. ただし、加振装置には力センサが内蔵されており、プロセス中の力は加速度センサと同期して測定可能であるとする. 加速度センサ1で観測した3方向の加速度の時間応答のみを可観測データとして、100 Hz から 1000 Hz までの間で加振周波数を離散的にいくつか変えながら、観測振動データと図1に示す時間領域シミュレーションの逐次データ同化を実施した (図4).

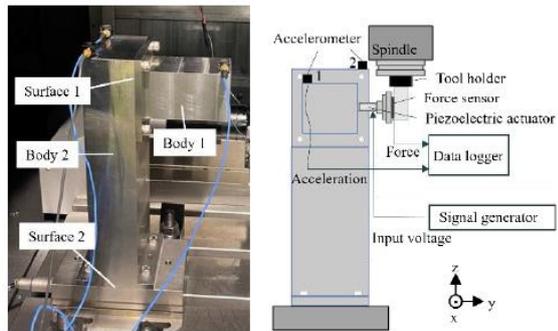


図3 実験セットアップ

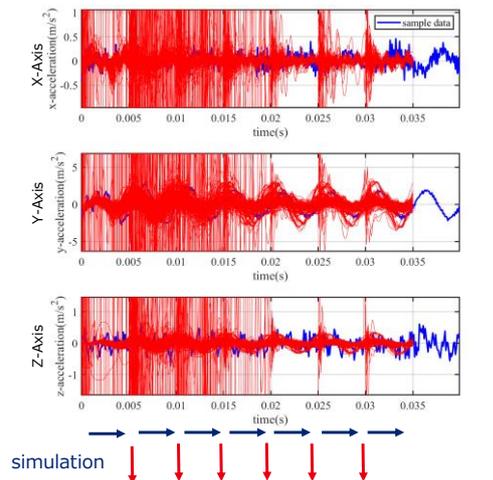


図4 逐次データ同化の様子の一例 (赤線：各粒子の予測値、青線：観測値)

一例として、200 Hz でY方向にテストスタンドが加振された際の、データ同化後の境界パラメータの事後確率分布を図5に示す. 図5より、 $k_3$ の境界パラメータが最も収束して確率密度が高くなっていることが分かる. この境界パラメータはボディ2底部の垂直方向の接触剛性を示しており、事実、200 Hz 付近における構造の振動形状は、ボディ2の根本部分から曲がるような形状であることを確認している. つまり、推定された境界パラメータの確率分布から、その稼働状態における重要な境界条件を推測できるといえる.

200 Hzにおけるモードシェイプ

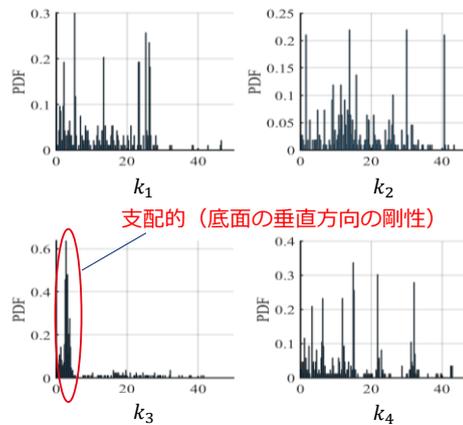
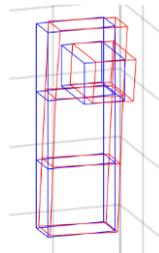


図5 200 Hz 加振後の境界パラメータの事後分布

一方で他の境界パラメータは不確かさが大きいことが分かる. そこで、拡張状態空間ベクトルの確率分布を引き継ぎながら、加振周波数などが異なる様々な振動データに対してデータ同化を行うことで、確率分布の逐次更新を行った (図6).

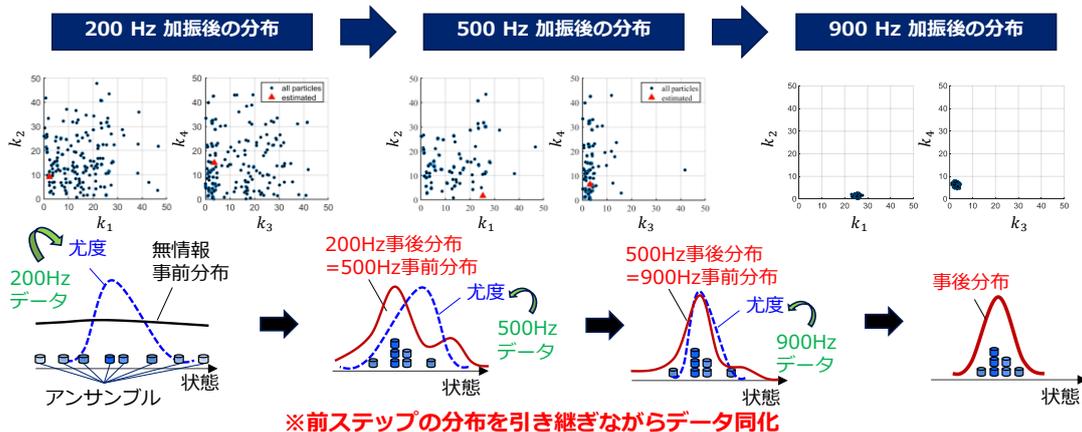


図6 異なる加振状態の観測データに基づくシーケンスな確率分布の更新

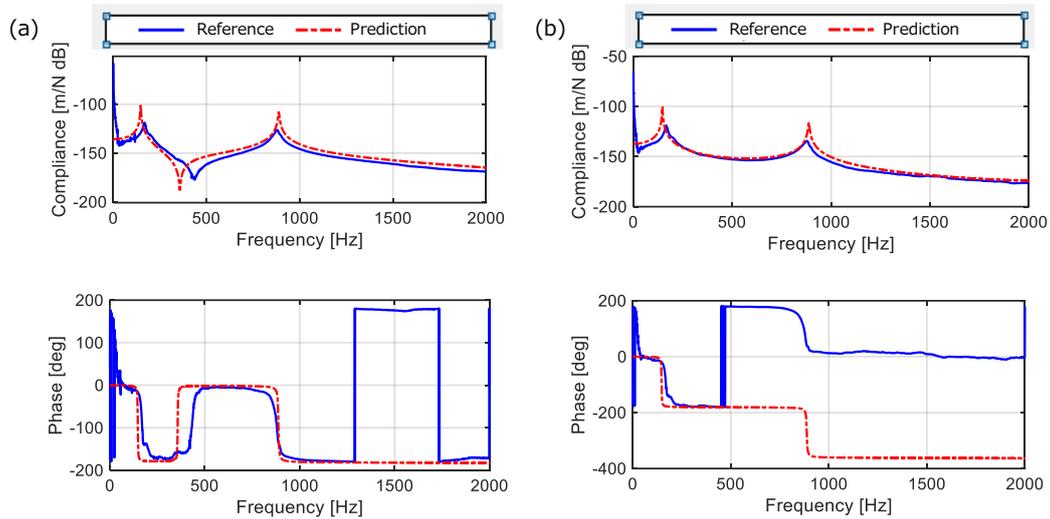


図7 900 Hz 加振後の境界パラメータ事後確率分布の平均値を用いて予測された FRF  
 (a) 観測点 (加速度センサ 1 の点), (b) 未観測点 (加速度センサ 2 の点)

図 6 より, 様々な状況における観測データが得られるたびに, 分布が更新されながら収束していく様子が見て取れる. 900 Hz 加振時の観測データに基づきデータ同化を実施した後の, 境界パラメータの事後確率分布の平均値を用いて推定した, 観測点 (加速度センサ 1 の点) と未観測点 (加速度センサ 2 の点) の FRF を図 7 (a) (b) にそれぞれ示す. 参照値として, 従来のハンマリング試験によって測定された FRF を青線で示している. 両 FRF は異なる加振状態で推定された FRF であるため必ずしも一致するとは限らないが, 推定された FRF は観測点および未観測点のどちらにおいても参照値と近い結果となっている. つまり, 機械の使用状況に応じた様々な観測データ (例えば異なる加振周波数データ) に対して確率分布を引き継ぎながらデータ同化を行うことで, それらを説明し得る妥当な境界条件を推定できるといえる.

収集した実稼働データに基づきシミュレータを逐次更新・修正していく技術は, 機械の使用状況に応じて適応・成長する真のデジタルツインを実現するうえで重要な技術と考える. また, 推定された確率分布の挙動から, 稼働状況に応じた重要なモデルパラメータの示唆やシミュレータの信頼性評価, さらには機械状態異常の監視などに繋げられる可能性がある. ほかにも, 提案するフレームワークは機械構造の境界条件だけでなく, 工作物クランプの境界条件やクランプ状態の推定などのアプリケーションにも応用できると考えられ, 今後更なる発展が期待できる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Issei Ota, Shuntaro Yamato
2. 発表標題 Modeling of machine structure based on multiple reduced-order flexible bodies for successive update of boundary parameters
3. 学会等名 euspen 's 23rd International Conference & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 太田一成, 大和駿太郎
2. 発表標題 時間応答に基づく構造モデルの接触面境界条件の逐次推定・更新システムの構築
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 横原和真, 大和駿太郎, 松原厚
2. 発表標題 小型1軸非接触加振器を用いた主軸系の時間応答の評価
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuma Yokohara, Shuntaro Yamato, Atsushi Matsubara
2. 発表標題 Evaluation of dynamic stiffness of the spindle system using Receptance Coupling method
3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE 2022 in Nara) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横原 和真, 大和 駿太郎, 松原 厚
2. 発表標題 非接触加振装置を用いた主軸・ホルダ・工具アセンブリ系のレセプタンス予測
3. 学会等名 第14回 生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学 教育研究活動データベース 大和駿太郎  
[https://kdb.iimc.kyoto-u.ac.jp/profile/ja.26cf66b2c76d9ab6.html#display-items\\_basic-information](https://kdb.iimc.kyoto-u.ac.jp/profile/ja.26cf66b2c76d9ab6.html#display-items_basic-information)  
 デジタル設計生産額寄附講座  
[https://mmc.me.kyoto-u.ac.jp/digital-design/index\\_ja](https://mmc.me.kyoto-u.ac.jp/digital-design/index_ja)

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関