

京都大学	博士 (工学)	氏名	青山 将大
論文題目	装置の構造解析のための負荷分布理論を用いた直動ガイドのモデル化手法		
(論文内容の要旨) 直動ガイドは、転動体を介してキャリッジとレール間に直線方向の自由度を与え、他の方向を支持する機械要素であり、低摩擦であること、転動体サイズと予圧により剛性が選択できること、ガイドとそれを組み込んだ機械の製造が容易であることから生産装置の位置決めユニットに広く利用されている。現在、加工装置や組立装置の設計段階での性能の予測精度を高めること、その解析コストを低減することが強く求められており、直動ガイドに対しては装置に組み込んだ状態で支持方向の力学的な解析が行える手法の確立が望まれている。本論文は、ボールを転動体とし溝との接触部分に Hertz 接触理論を適用した負荷分布モデルを装置の力学モデルと組み合わせて解析を行う方法について体系的に研究した結果についてまとめており、全 6 章からなる。 第 1 章は緒言であり、研究背景として直動ガイドに関する研究と開発の経緯を述べ、生産装置の CAE (Computer Aided Engineering) に対して直動ガイドのモデルに求められる要件についてまとめている。モデル化に関する過去の研究のレビューを行って、運動方向以外の 5 方向の自由度を持つ力学モデルの必要性について述べている。 第 2 章では、直動ガイドにおいて一つのキャリッジと一つのレールの力学モデルと負荷分布モデルを組み合わせた解析法について述べている。負荷分布理論においては、転動体それぞれに溝との Hertz 接触を仮定して、接触部荷重とキャリッジに作用する荷重・モーメントの平衡方程式、ならびに接触部弾性変形とキャリッジ・レールの溝曲率中心間距離の幾何学的関係を満たす条件を求める。キャリッジ・レールやそれらが結合している構造が弾性体である場合、負荷分布理論の応用が難しくなる。先行研究において今井が提案した逐次計算法では、キャリッジの変形は有限要素 (FE) モデルで計算し、この変形を考慮した転動体の負荷分布を計算することを繰り返す。今井は、この計算負荷を下げるために、キャリッジの変形は主に断面内で発生することを利用し、長手方向の変形を平均化する方法を用いている。しかし、レールを含んだ解析では長手方向の変形を考慮しなければならない。そこで、申請者はレールを Timoshenko 梁で近似した力学モデルを用いて負荷分布計算を行う方法を提案し、FE モデルと負荷分布モデルを用いた解析法と同等の精度が得られることを明らかにした。 第 3 章では、複数のキャリッジとレールで支持された機械構造の剛性解析を行うために考案した逐次計算法および直接計算法とその検証結果について述べている。逐次計算法では、キャリッジの変位と変位角を代表するパイロット節点を導入し、構造側を FE 解析してキャリッジへの作用荷重とモーメントを求め、負荷分布解析を行う。直接計算法においてはキャリッジとレールそれぞれにパイロット節点を導入し、あらかじめ負荷分布解析を行って節点間の 5 方向の非線形ばね剛性を計算する。この非線形ばねモデルを構造側の FE モデルに組み込むことで繰り返し計算を省略する。			

京都大学	博士（工学）	氏名	青山 将大
提案した二つの解析方法を垂直荷重下における簡易一軸テーブルの変位の計算に応用し、測定結果と逐次計算法と直接計算法の計算結果は十分近い値となることを明らかにした。また、垂直荷重とモーメント（ピッチングまたはローリング）が同時に作用する条件下において一軸テーブルの変位を直接計算法で計算してテーブルの複数の位置で測定した変位と比較し、両者が近い値となることを示した。さらに、立て形のマシニングセンタに対して、機械の全体構造をFEでモデル化し、直接計算法を用いて直動ガイドを非線形ばねでモデル化して剛性解析を行った。主軸ヘッドストックとテーブル間に荷重を与えた場合の変形を計算し、実機上でスピンドルの傾き角（ピッチング）を測定して比較した。計算結果と測定結果は比較的近い値であることから、直接計算法が実用的な精度で剛性解析に使用できると結論づけている。さらに、直動ガイドを剛体モデルで近似した場合の計算と比較することで、機械構造とガイドのどちらが機械端での剛性に寄与するのかを解析できることを示した。 第4章では、直動ガイドを含む装置の熱変形による作用荷重とモーメントを直接計算法で求める方法とその検証方法について述べている。この方法では、直接計算法で求めたガイドの非線形ばねを含む装置のFEモデルに温度分布を与えて変形と負荷分布を計算する。ケーススタディとして、一軸テーブルを熱膨張させたときの直動ガイドの姿勢変化について計算結果と測定結果を比較し、テーブルとレールの傾きが測定と解析で近い値であることを示した。また、計算と測定の変位の差から計算した直動ガイド単体への作用荷重とモーメントの解析誤差はそれぞれ約20%と約10%であると見積もった。解析結果を利用して、転動体の負荷分布を計算し、水平荷重やローリングモーメントによって、特定の条列の転動体荷重が大きくなることを示した。計算された負荷分布荷重を用いて清水らが提案した直動ガイドの理論寿命の計算を行い、テーブルやベースの温度変化に対する理論寿命の変化を計算し、テーブルとベースの温度差と理論寿命の関係について明らかにした。 第5章では、直接計算法で計算した直動ガイドの変位－負荷曲線を線形近似して求めた剛性をFEモデルに利用して動解析を行う方法を示している。提案したモデルを用いた動解析手法の検証のため、立て形マシニングセンタを模した装置において打撃加振で実験的に得られた振動モードと周波数応答解析で得られた振動モードの比較を行っている。この結果、テーブルのヨーイングモード等のガイドの特性が顕著な場合、解析と実験で得られた固有振動数やコンプライアンスが近い値であること、また、装置全体のロッキングモードやボールねじ等の他の要素部品の関与するモードに関しては解析と実験の差が大きいことを示した。さらに、直動ガイドの剛性を変化させた場合の固有振動数とコンプライアンスの計算結果を分析し、振動モード自体が大きく変化する場合があることを明らかにした。この原因は直動ガイドと構造部品や要素部品との剛性・質量バランスで装置全体の振動モードが決まるためと考察し、直接計算法により装置全体の力学的解析が可能となることの有効性を示した。 第6章は結言であり、本論文で得られた成果について要約している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ボールを転動体とし溝との接触部分に Hertz 接触理論を適用した負荷分布モデルを装置の力学モデルと組み合わせて解析を行う方法について体系的に研究した結果についてまとめており、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 一つのキャリッジと一つのレールの変形を近似した力学モデルと負荷分布モデルを組み合わせた解析法について述べ、有限要素 (FE) モデルと同等の解析精度で高能率に剛性の計算ができることを明らかにした。
2. 複数のキャリッジとレールで支持された機械構造の剛性解析を行うために考案した逐次計算法および直接計算法とその検証結果を示した。具体的には、垂直荷重下における簡易一軸テーブルの変位の計算と測定結果の比較から逐次計算法と直接計算法の計算値と実測値は十分近い値となることを明らかにした。また、垂直荷重とモーメントが同時に作用する条件下において一軸テーブルの変位を直接計算法で計算して測定結果と比較し、実用的な精度で解析に使用できることを示した。
3. 直動ガイドを含むテーブルの熱変形による作用荷重とモーメントを直接計算法で求める方法を示した。テーブル変形の計算結果と測定結果を比較して、10%～20%程度の誤差で作用荷重とモーメントを推定できると考察し、作用荷重の計算値からテーブルとベースの温度差によってガイド寿命が短くなることを明らかにした。
4. 直接計算法で計算した変位－負荷曲線を線形近似して求めた剛性を FE モデルに組み込んで動解析を行う方法を示した。解析対象とした立て形マシニングセンタの固有振動数と動コンプライアンスの計算値と測定値は近い値となること、ガイドの剛性を変更することで機械の固有モードが複雑に変化することを明らかにし、直接計算法により装置全体の力学的解析が可能となることの有効性を示した。

以上、本論文は、装置の構造解析に利用できる直動ガイドの力学モデルを体系的に研究した結果をまとめており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 7 月 31 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。