

論文の内容の要旨

論文題目 座標測定機の校正と
 その信頼性に関する研究

氏 名 阿 部 誠

本論文の目的は、座標測定機(以下 CMM)に系統的に観察される幾何学的偏差を運動学的に記述されたパラメトリックエラー表現を用いて校正するとき、校正值とともにその信頼性についても統計的に算出し得る校正方法を確立することにある。

CMM は任意の測定データムを設定し、ほぼ任意の形体の幾何計測を行い得る唯一の測定機として工業的に重要な位置を占めている。①その幾何学的な偏差を効率良く校正し、②長さの国家標準にトレーサブルな特性を持たせることは今日の幾何計測における最も重要な課題のひとつになっている。①については熟練作業員への依存性が高い 1 次元的な測定標準に代わって 2 あるいは 3 次元的な校正アーティファクトが登場したことにより一定の改善が図られている。ところが次元数の多い校正アーティファクトは測定点配置に制限が多い傾向を示すので、従来の校正手段は校正の能率と測定戦略の自由度とを両立することができなかった。②については 1970 年代からおもに 1 次元的な長さ測定の知見を延長した多くの試みが成されているが、極めて限られた測定タスクにおける信頼性が評価されるにとどまっている。最近になって計算機上に幾何学的偏差の要因をモデル化して記述し、モンテカルロシミュレーションによって自由な測定タスクの信頼性を定量化する試みも行われているが、経済的な理由などにより必ずしもコンセンサスが得られている状況にはない。

本研究ではまず，CMM の幾何学的偏差と実際に採用し得る数種類の測定方法に特有な座標変換や投影などのプロセスについて，準剛体運動学モデルに基づく線形で統一された代数表現を用いて記述することを試みた．CMM の基本的な測定値は空間中の 1 点の座標測定値であり，それをある確率密度関数としてとらえるという視点に立ち，代数，計算方法，そして実現方法の 3 つの水準を意識した統一したモデル化を実現した．これにより校正值としてのパラメトリックエラー曲線を推定するのとほぼ同時に，本研究が提案する拡張した誤差伝播則によってその統計的な信頼性幅を求めることを実現した．この成果に基づいて 2 台の CMM の直接比較測定による空間座標の比較測定法を考案した．

始めに，空間座標の比較測定法の実現可能性をシミュレーションにより検討した．シミュレーションは 1 軸 6 自由度の直線案内を対象として行った．この系は空間中での剛体の 6 自由度をすべて含むので，CMM の構造の基本的な機構要素と考えられることから選定した．観測値に分散を含まない場合，および 7 水準の異なる分散を含む場合を設定してパラメトリックエラーとその信頼性の推定を行った．いずれの条件でも，期待される信頼性でパラメトリックエラー推定を行い得るとの結果を得た．

次に，CMM の測定の不確かさに関する新しい「座標測定モデル」についての提案を行った．これは十分な知見と経験が得られている長さ測定の不確かさから，単純な分散・共分散による記述を採用することによって空間中の 1 点における座標測定の不確かさを代数的に導く新しい方法である．幾何計測において観察される偏差量は，単なるばらつきではなく何らかの空間的な拘束条件を伴った確率過程を想定するほうがより現実の現象に近い．この拘束条件を共分散として与えれば，ISO による幾何計測における不確かさ推定のガイドラインに沿った評価が可能となる点に大きな意義がある．続いて，座標測定モデルの基本的な特性を確認するための数値シミュレーションを行った．それに際して，分散・共分散で記述された確率過程に従う試行値列を代数的に生成する「特異値分解法」を提案した．シミュレーションの結果より，長さ測定の不確かさと座標測定モデルで求めた 1 点の座標測定の不確かさとの整合性を確認した．ここでの成果は空間座標の比較測定において，参照される基準 CMM の座標測定の不確かさを定量化するために適用された．また本研究に限らず，広く CMM の測定の不確かさの定量化に対して適用し得る可能性がある．

空間座標の比較測定法による校正システムを実際に試作した．基準 CMM と被校正 CMM の 2 台の CMM を直接比較することによって被校正 CMM の幾何学的偏

差を自動的に収集する方式の確立を試みた。空間的に等方な信頼性で観測値を得ることに着眼し、球形体を介した 3 次元的な並進偏差の検出を提案した。また 2 台の CMM の比較測定をを行う際に発生する系統的な誤差要因について補償方法を検討した。これらの検討結果を含めてシステムの動作手順を立案し、ソフト、ハード両面での実装を行った。

試作した校正システムを用いて実際に被校正 CMM の幾何学的偏差の校正を行った。現実の CMM においてパラメトリックエラーとその信頼性の同時推定を行うことが可能であった。また、校正結果の評価にあたって、本システムとは独立に校正されたレーザ干渉測長機を参照し、長さの標準にトレーサブルな検討を行った。レーザ干渉測長機によって推定された校正結果と、空間座標の比較測定によって推定された校正結果について、ふたつの方法における校正の不確かさを考慮した検証をパラメトリックエラー曲線において行った。これらの結果により、校正値としてのパラメトリックエラー曲線の信頼性が明らかな校正手法を他に先駆けて確立することができたと考えている。

本研究の成果は、単に 2 台の CMM の比較測定による幾何学的な校正の可能性を示したことにとどまらない。不確かさが明らかな幾何学的校正を具体化することについて、近年の校正技術に対する強い要請がある。空間座標の比較測定法はこれに応えたはじめての校正方法となった。また完全に自動化された校正システムとして、工業的にも極めて有用な校正システムを実用化した。