インターネットを利用した座標測定機の トレーサビリティ体系構築*

大澤尊光**, 高辻利之**, 黒澤富蔵**, 古谷涼秋***, 柴田政典†

Traceability System of Coordinate Measuring Machines Through Internet

Sonko OSAWA, Toshiyuki TAKATSUJI, Tomizo KUROSAWA, Ryoshu FURUTANI and Masanori SHIBATA

Coordinate measuring machines (CMMs) have been widely used in various fields of science and engineering. Although CMMs are precise instruments, they have a lot of inherent geometrical errors and probing errors. Due to this reason estimation of measurement uncertainty is extremely difficult for CMM measurements. Virtual coordinate measuring machine (VCMM) which has been developed by Physikalisch-Technische Bundesanstalt (German national physical institute) is one of the methods of estimating the uncertainty of measurements using CMMs. The geometrical errors are required as an input to the VCMM software, and usually measured using a ball-plate. The measurement of the geometrical errors is a complicate task and carried out less than once a year. In this paper, we propose a new CMM calibration scheme using the Internet, which we call e-trace. National metrology institutes or calibration service providers remote-control users' CMMs and measure the geometrical errors through the Internet. The users, therefore, do not have to have ball-plates or to learn the method of the measurement of geometrical errors. The concept of e-trace and some fundamental experiments will be described.

Key words: coordinate measuring machine, traceability, Internet, uncertainty, calibration

1. 緒 言

座標測定機(以下, CMM)は, コンピュータの発達に伴い, 容易に三次元任意形状物体の寸法, 形状を測定できる万能測定機として世界中の製造メーカ等で数多く使用されている. CMMは, 21個の幾何学誤差ならびにプロービング誤差等を持ち, その校正が困難である. また, 使用している環境の影響, 被測定物のクランプの仕方や測定戦略の違いが測定結果へ影響を及ぼすと同時に, 測定された座標群から計算によって円や円筒等の形状を算出するため, 測定の不確かさを推定することが非常に困難である. 近年, コンピュータシミュレーションによる不確かさ算出法¹⁾²⁾が開発され, ISOにおいてCMM測定の不確かさについての規格³⁾が作成されてきているため, CMMにより測定された測定結果のトレーサビリティ体系の確立が可能となった.

そこで我々は, 世界に先駆けインターネットを利用した新しいCMMのトレーサビリティ体系を確立する手法を提案してきた.

CMMの校正ならびに測定の不確かさ算出のためには, ボールプレート等の2次元幾何ゲージやレーザ干渉測長器を用いて対象となるCMMの幾何学誤差を算出・評価する必要がある⁴⁾. 現在, この算出・評価を行うためには, 十分な知識をもつ熟練した技術者が前記ゲージなどを持って現地に赴き, 多大な時間, 労力を費やして測定と解析を行わなければならない. それに伴い, 依頼者にも多大な費用が課せられる.

この作業は, 頻繁に行う必要が無く, CMMユーザがそのために必要な機器や技能を必ずしも有する必要は無い. これらの作業は, 校正業務を請け負う校正ラボが代わりに行うことが可能である.

インターネットを利用した校正システムでは, CMMの校正に際して熟練者がユーザ側に出向くことなくCMMの校正および不確かさ算出のためのデータ受信, 計算, 送信ができるため, 人的, 時間的コストの削減ができる. 我々は, このようなインターネットを使用した校正システムのことを'e-trace'と呼んでいる.

本論文では, インターネットを利用した新しいCMM測定のトレーサビリティ体系とその可能性確認のための実験結果について述べる.

2. CMMトレーサビリティ体系の現状

現在, CMMを使用した測定におけるトレーサビリティ体系は存在しないといっても過言ではない. CMMユーザは, CMMが測定した結果に対して不確かさを考慮することもなく, メーカから保証されている精度を測定の不確かさと考えている. また, CMMの校正においても年1度のCMM製造メーカ等による定期検査のみで, ユーザ自身でその精度検査をしているところは少ない. CMM製造メーカ等による定期検査もJIS B 7440-2⁵⁾に従うブロックゲージやステップゲージなどの端度器を使用して行われ, 1次元の長さの情報のみによる検査にしかすぎない. そのため, CMMで測定した様々な形状(円, 球, 円筒等)測定の結果にその精度検査の結果が反映されるわけではない.

近年の製品のグローバル化において, 様々な国との間で部品や製品が取引される中, このような現状は非常に問題であ

* 原稿受付 平成15年8月1日

** 正会員 産業技術総合研究所(つくば市梅園1-1-1)

*** 正会員 東京電機大学(千代田区神田錦町2-2)

† 正会員 (株)浅沼技研(浜松市東町4079-1)

Fig.1 Image of Ball cube

る。例えば、ある機械部品の加工受注を受けた場合、その加工部品がきちんと図面どおりに製作できているのかは、測定器を用いて評価を行わなければ、取引が成立しない。その測定が正しいかどうかを判断する指標が測定の不確かさとなる。

近年、ヨーロッパにおいてもドイツ物理工学研究所 (PTB) が中心となり CMM 測定のトレーサビリティ体系の構築が徐々に進められている。PTB が開発中の 'e-Fendi' と呼ばれる手法では、図 1 に示すように低膨張ガラスやカーボンファイバー製のベースに 8 個の球を取り付けた軽量のゲージ (ボールキューブと呼ばれる) を校正ラボが CMM ユーザに定期的に送り、測定プロトコルに従ってユーザ自身が測定し、その結果を電子メールにて校正ラボのコンピュータへ送信する。受信された測定結果は、自動的にウェブ上のデータベースに入力され、校正ラボは、その結果を解析、CMM の振る舞いをチェックする。解析結果は、校正ラボからユーザにフィードバックされ、もし、結果に異常があれば、何が悪いのかを指示される。この手法を通して、ユーザ主導による定期検査を普及させることが PTB の狙いである。ゲージの輸送中、測定中の温度、湿度、ショック (振動) は、ゲージの中心に備え付けられているセンサによってモニタリングできるようになっており、ゲージ自体の変化を監視している。また、ドイツでは、ボールプレート等の 2 次元幾何ゲージの値付けの校正サービスだけでなくバーチャル CMM¹²⁾ と呼ばれる計算機シミュレーションにより測定の不確かさを算出し、1 次元長さ以外の三次元的な任意形状の測定に関しても校正サービスを開始している。PTB や認定校正ラボにより校正された三次元的任意形状をマスタゲージとし、ISO TS 15530-3³⁾ に従った手法に基づき、測定の不確かさを考慮した製造部品が流通してきている。

このようにヨーロッパでは、CMM のトレーサビリティを確立する動きが高まってきているなかで、工業国である日本においても CMM のトレーサビリティ体系を早急に確立することが強く望まれる。このような背景から、我々は、ユーザの負担なく容易に CMM のトレーサビリティ体系が確立できる手法として 'e-trace' と呼ばれるインターネットを利用したシステムを開発した。次章で、本システムの概要を述べる。

Fig.2 Accreditation system of CMM measurements

3. インターネットを利用したトレーサビリティ体系構築

インターネットを用いた CMM のトレーサビリティ体系を確立するには、次の 2 つのシステムの確立が必要とされる。

1. CMM の校正の認定システム確立
2. CMM 測定の不確かさ算出の認定システム確立

これら 2 つのシステムは、産業技術総合研究所 (NMIJ/AIST) を頂点とするシステムであり、CMM のトレーサビリティを確立するものである。インターネットの利用により人的、時間的コストが削減でき、効率のよいシステムとなる。

図 2 に認定システムの概要を示す。CMM の校正認定システムのみでは、完全にトレーサビリティを保つことはできない。なぜならば、校正された CMM で測定した対象に対して不確かさを付与することができないからである。測定の不確かさがすべての測定に対して付与されなければ、CMM のトレーサビリティ体系が確立できたとはいえない。まず、CMM 校正の認定システムを確立し、その後、CMM 測定の不確かさ算出の認定システムを確立する。

3.1 CMM の校正システム

日本では、ボールプレート・ホールプレート等の 2 次元幾何ゲージを用いた CMM の校正は、あまり普及していないがレーザ干渉測長器やステップゲージ等による手法に比べ容易に CMM の幾何学誤差を算出することができる特徴を持つ。特に、ゼロデュアのような熱膨張係数の小さい材料でできたゲージを使用すると温度慣らしの時間が必要ないため校正時間が短縮できる。そこで、我々はこれら 2 次元幾何ゲージを用いた CMM 校正法をインターネットによる CMM の校正に採用した。

これら 2 次元幾何ゲージを用いて CMM の幾何学誤差を算出することにより、CMM を校正し、さらに不確かさ算出のためのデータを作成する。

図 3 にインターネットを利用した CMM の校正の概要を示す。はじめに校正ラボは、校正されあらかじめ値の分かっている 2 次元幾何ゲージを CMM ユーザに送る。輸送中等の温度、湿度、振動の変化等は、センサによって監視され、メモリに保存される。校正ラボは、このメモリの情報を使用して、ゲージの値が狂っていないかを判断する。次に 2 次元幾何ゲージを用いてユーザの CMM の校正を行う。ゲージのセッティングは、ユーザ自身により行われ、セッティングの様子は、ネットワークカメラを用いて校正ラボの熟練者がその様子を監視する。ユーザの CMM は、校正ラボがインターネットを用いてコントロールする。測定中の温度は、校正ラボからゲ

Fig. 3 CMM calibration system using the Internet

Fig. 4 Six positions for the CMM geometrical errors estimation

ージと同時に輸送された温度計を用いて観測される。温度測定データもインターネットを使用してモニタリング、保存される。プロービングシステムのパラメータ設定や座標系作成等は、ユーザと電話もしくはインターネットカメラ等によりコンタクトを取りながら行う。幾何学誤差を算出するためには、図4に示すように4つの異なる配置で6回の測定を行う。測定が終了した後、校正ラボは、これらの測定データを用いて幾何学誤差を計算により算出する。算出された幾何学誤差は、ユーザに送られCMMの補正テーブルとしてユーザのコンピュータに保存される。多くのCMMは、指示、真直度、直角度誤差等の幾何学誤差の値を測定の際に補正できるようにパラメータごとに補正テーブルファイルをもつ。その後、その補正テーブルを使用してボールプレートや球などの測定を再度行い、幾何学誤差がきちんと算出できたかどうかチェックを行う。これら一連の作業によりCMMの校正と同時に不確かさ算出用のデータを作成することができる。インターネットを利用したCMMの校正サービスが開始されれば、1年毎など定期的なCMM校正がユーザに負担をかけることなく容易にできるようになると同時にCMM測定の信頼性が向上する。また、1ヶ月毎など定期的に校正されたブロックゲージや球などを用いてユーザがCMMを検査することは、測定の信頼性を保つ上で重要である。

3.2 不確かさ算出のシステム

CMMにおける測定の不確かさを算出することは非常に難しい。測定機の軸の移動に伴う挙動が測定値に影響を及ぼすだけでなく、環境の変化や測定対象の違い、プロービング条件の違い等様々な誤差要因が存在する。また、CMMを使用

Fig. 5 The different measurement strategy on CMM measurement

Fig. 6 Schematic diagram of VCMM

した測定誤差の原因の一つに、測定戦略の違いによるものがある。これは、CMM特有のもので、極端な例として図5のように円の中心座標を算出する際に4点の座標測定を行った場合、(a)のように測定対象に対して均等に4点測定した場合と(b)のように偏った4点測定をした場合では、測定誤差が生じると算出される中心座標に大きな違いを発生する。このような測定戦略に依存する不確かさを工業的なあらゆる場合について算出することは、とても困難である。以上のことからCMMの測定では、計測における不確かさの表現のガイド(GUM)⁹⁾に従った不確かさの算出が非常に難しい。そこで、我々は、現在最も現実的にCMM測定における不確かさを算出する手法としてPTBが提唱しているバーチャルCMM¹²⁾を採用した。バーチャルCMMは、CMMにおける測定が受ける様々な影響を計算機上に作り出し、その振る舞いをランダムにシミュレーションすることによって、不確かさの幅を算出する。現在このような計算機シミュレーションによる不確かさ算出手法は、ISO15530-4としてISOにて議論されている。図6にバーチャルCMMの概要を示す。バーチャルCMMを利用すればCMMを用いたあらゆる測定に関して不確かさを算出することができる。このバーチャルCMMの不確かさ算出において重要となるのがCMMの幾何学誤差パラメータの算出である。ユーザがバーチャルCMMのソフトウェアを購入してもCMMの幾何学誤差が算出できないと意味のないものになってしまう。そこで我々の提案するシステムによりその幾何学誤差を算出し、バーチャルCMMに必要なパラメータのひとつをユーザに提供することができる。ユーザが

Fig. 7 Experiment in AIST

バーチャル CMM のソフトウェアを所有していない場合、校正ラボがユーザのマスタゲージを測定、不確かさが付与する。ユーザはそのマスタゲージを用いて ISO TS 15530-3 に従った手法を使用し、マスタゲージの測定結果との比較により不確かさを他の測定対象に対して付与することが可能である。

4. 遠隔操作実験

我々の提案する手法を実用化する際、どのような問題が生じるのかを把握するためいくつかの実験を行った。初めに、産業技術総合研究所内で実験を行い、その後、国内、海外で実験を行った。

4.1 産業技術総合研究所内での遠隔操作

産業技術総合研究所（産総研）の所有する 2 台の CMM との間でインターネットを利用してボールプレート測定を行った。図 7 にその概要を示す。A 室にある CMM の制御用コンピュータから B 室にある CMM の制御用コンピュータをインターネット経由で遠隔操作できるようにソフトウェア環境を整備した。B 室に設置されているテレビカメラ 2 台を制御用コンピュータとは別のコンピュータでモニタしながらボールプレートを測定した。本カメラは、WEB ブラウザを利用してアクセスでき、姿勢制御や解像度の変更を行うことができる。B 室にはゲージのセッティングを行う補助者をおき、内線電話を利用して A 室にいるオペレータが補助者に指示を与えた。電話でのやり取りでも十分補助者にオペレータの意図を伝えることができた。測定中、プローブとゲージの衝突等の重大な事故は発生しなかった。

4.2 産総研外での遠隔操作

4.2.1 日本国内での遠隔操作

産総研（茨城県つくば市）から（株）浅沼技研（静岡県浜松市）の所有する CMM をインターネットを利用して制御する実験を行った。外部の会社や機関との間でネットワークを利用して CMM の制御を行う際に問題となるのは、セキュリティのためのファイアウォールである。今回の接続では、Sonicwall というソフトウェアを用いて、産総研の CMM 制御用コンピュータから浅沼技研の CMM 制御コンピュータを制御した。産総研内での実験と同様、電話により補助者に指示を送り、測定を行った。今回の遠隔操作実験では、CMM が持つすべての機能を制御することができた。つまり、2 次元幾何ゲージを測定するのに必要な動作をインターネットにより遠隔操作することが確認できた。

4.2.2 ドイツからの遠隔操作

国内からの接続実験に成功したことを受けて、海外からの接続実験を試みた。ドイツにある CMM 製造メカ社の Leitz Messtechnik 社から産総研の CMM へ接続するための整備を行い、測定実験を行った。産総研外部のネットワークからは、セキュリティのためのファイアウォールが存在するので基本的に産総研内部のネットワークには接続できない。この問題を解決する手法としてハードウェアによる VPN（Virtual Private Network）ゲートウェイサービスを利用した。ソフトウェアによる VPN も多く存在するが、OS の種類に依存することがないハードウェアによる方法を今回は選択した。VPN に必要なネットワークポートの設定を行った結果、産総研内の CMM の制御コンピュータにアクセスすることができた。ハードウェア VPN は、ルータとしての機能を有するため、複数のコンピュータが接続できるので測定機制御用のコンピュータならびに測定室監視用の WEB カメラにアクセスするためのノート型コンピュータを接続して実験を行った。産総研には、ゲージのセッティングをする補助者を配置しており、電話により指示を行った。基本的な CMM の制御実験、ならびに測定実験を行い、国内での実験同様、CMM が持つすべての機能を制御することができた。また、接続試験時のネットワークの速度は、5 kbps 程度であったが WEB カメラからの映像は、1 コマ/秒程度のリフレッシュレートであるため十分対応できるものであった。ドイツから電話による指示と WEB カメラを使用した監視により測定が十分可能であることがわかった。

5. 結 言

今回、我々は、インターネットを利用した新しい CMM 測定のトレーサビリティ体系を提案した。CMM 測定は、様々な誤差要因が複雑に結果に影響するため、不確かさを簡単に推定することは困難である。PTB の提唱する VCMM は、できる限り推定できる要因を挙げ、コンピュータシミュレーションにより不確かさを容易に算出できるものである。我々はこの技術を利用し、ユーザに負担なくかつ容易に不確かさを算出できるシステムを確立する。現在、長さ標準はヨウ素安定化レーザと定義されており、それにトレーサビリティの連鎖を経て、ボールプレートが校正されている。したがって、本システムが完成すると CMM がトレーサブルに校正されるとともに、その測定結果に不確かさを付与することができる。このことにより CMM 測定の信頼性が向上し、製品製造の高精度化、製品のグローバル化を助けるものとなる。しかし、本システムの問題点として以下のようなことがあげられる。

1. ネットワークセキュリティの問題
2. 障害物や誤動作
3. ゲージ輸送の際のゲージへのダメージ
4. ゲージの経年変化
5. 多種 CMM への対応

2 の問題は、複数台のカメラによる監視と測定補助者による監視により回避できる。3, 4 の問題点は、センサ等を取り付け、定期的なゲージの校正により回避できる。5 の問題には、DMIS（Dimensional Measuring Interface Specification）と呼ばれる CMM の共通フォーマットを用いることにより解決

できる。さらに、1 のネットワークセキュリティの問題は、今回の実験で使用した VPN という技術を用いて解決できることが分かった。

本システムは、会社単位などでも利用することが可能で、会社内の品質管理にも役立つものである。このシステムにより CMM 測定に対して不確かさやトレーサビリティといった考えが産業界に普及することが期待できる。

謝 辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による委託研究「計量器校正情報システムの研究開発」のサブテーマ「三次元測定機測定標準遠隔供給技術の開発」により行われた。本研究を進めるにあたって、ご協力いただいた

日本電産トーソク（株）榎本幹雄氏、（株）浅沼技研今澤宣幸氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) E. Trapet, et al., Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine, Final Project Report MAT1-CT94-0076, PTB-Bericht F-35, Part 1 and 2 (1999).
- 2) 高増潔：バーチャル座標測定機，計測と制御，**40**-11，p.801 (2001).
- 3) ISO TS 15530-3, Geometrical Product Specifications (GPS) -- Coordinate measuring machines (CMM) -- Techniques for determining the uncertainty of measurement -- Part 3: Use of calibrated workpieces (in future).
- 4) D. Hueser, et al., Calibration of coordinate measuring machines based on ball plates, proceedings of the IMEKO World Congress Torino, Vol. 3, 1646 (1994).
- 5) JIS B 7440-2, 製品の幾何特性仕様 (GPS) 一座標測定機 (CMM) の受入検査及び定期検査－第2部：寸法測定 (2003).
- 6) BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO (1993).