

ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定

— 計量トレーサビリティ体系の構築と標準化 —

大澤 尊光*、高辻 利之、佐藤 理

近年、製造業では効率的なものづくりを行うため、設計、製造、評価の全過程で一貫したデジタルデータによる作業が行われている。製品の形状の評価に多用される三次元測定機は製品の質を確保するための重要な要素の1つであるので、形状測定の信頼性を向上させるため、長さの国家標準にトレーサブルな校正体系を我が国に構築し、あわせて校正方法の標準化を行った。この中で産総研は高精度の国家計量標準を開発するだけでなく、三次元測定機の校正事業者のための技術基準を作成し、また地域の公設研究所に技術支援を行って我が国全体の三次元測定の信頼性を向上させた。これらの活動は、我が国産業界における三次元測定の精度を世界トップレベルとすることに貢献している。

キーワード：三次元座標計測、三次元測定機、計量標準、トレーサビリティ、デジタルものづくり

High accuracy three-dimensional shape measurements for supporting manufacturing industries

– Establishment of the traceability system and standardization –

Sonko Osawa *, Toshiyuki Takatsuji and Osamu Sato

Digital engineering technique has widely been used for speedy and effective manufacturing of industrial products. Coordinate measuring machines (CMM) are being used for measuring three-dimensional shapes of products and taking an important role to keep the quality of the products high. National Metrology Institute of Japan (NMIJ/AIST) has established the traceability system of CMM, that is, measurement results by CMM are traceable to the national standards of length. To achieve this objective, not only calibration techniques have been developed, but industrial standards (ISO and JIS) and guidelines to which accredited laboratories should conform were documented. In addition, to raise the calibration capabilities of prefectural laboratories and to contribute to the local industries, technical supports have been provided by NMIJ.

Keywords: Three-dimensional coordinate measurement, coordinate measuring machine, measurement standard, metrological traceability, digital engineering

1 はじめに

戦後の日本は製造業の発達により国富を増してきた。特に自動車をはじめとするものづくり産業は、日本経済の要を担ってきた。ものづくりにおいては、設計、製造、評価を行い、製品を完成させる。近年のものづくりは、図1のように設計、製造、評価をすべてデジタルデータにより行っている。CAD (computer aided design) 及び CAE (computer aided engineering) を利用して設計を行った後、その設計データを CAM (computer aided manufacturing) に送って、製造を行う。製造された製品は CAT (computer aided testing) を利用して測定され、その測定データを設計・製造工程にフィードバックさせ、実データに基づく解析・設計、製造プロセスの改良を行うといった一連の循環的流れが確立されている。このデジタルデータによるものづくりシステムの発達により、従来よりも試作品の製造日数を大幅に短縮

することが可能となった。このようなデジタルものづくりシステムにおいて、製造された製品の形状の評価には、三次元測定機 (coordinate measuring machine) がしばしば使用

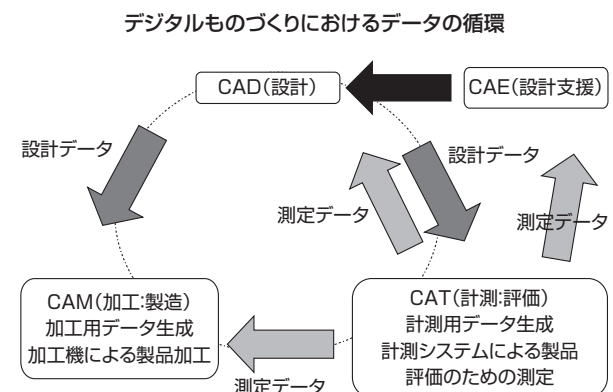


図1 デジタルデータによるものづくり

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3

National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, Umezono 1-1-1, Tsukuba 305-8563, Japan * E-mail: sonko.osawa@aist.go.jp

Received original manuscript December 12,2008, Revisions received January 27,2009, Accepted May 11,2009

される。三次元測定機は万能測定機とも呼ばれるように様々な三次元形状（位置、寸法や幾何公差（真直度、真円度、円筒度、直角度等））を測定することが可能である。

ここで三次元測定機の代表的なものについて、その概略の機能を見ておくことにする。三次元測定機は、図2に示すように、測定物の表面に接触することによりその座標値を検出するためのプロービングシステム、直交するX・Y・Zの三軸に沿ってプロービングシステムを直線移動させるためのガイド、移動量を検出するためのものさしであるスケール、座標変換や測定機を制御するためのコンピュータ等から構成されている。三次元測定機は、プロービングシステムに取り付けられた接触子（スタイラス）が接触できる範囲が測定空間であり、二点間の距離だけでなく、測定物もつ幾何形状の特徴量（例えば、円ならば直径、真円度、中心座標）を測定点群から最小二乗法ではめにより算出することも可能である。

かつて三次元測定機は高価で操作に高度な技能が必要であったため、大企業でも試作部門や品質保証部門にしか導入されていなかったが、ものづくりのデジタル化、製品への高い品質保証要求、アジア諸国の工業製品との差別化などが原因となり、現在は、製造ラインや町工場等にも次々と導入され、製品の品質保証に利用されるようになってきた。三次元測定機は測定物を設置し、測定プログラムを一度構築すると、あとはコンピュータ制御で装置を駆動するだけで測定が終了する。このため、企業によっては、ルーチ的な作業を行う測定者だけを常駐させて、プログラム作成等の高度な作業は測定機メーカーに依存し、測定コストを削減しているところが増えてきている。しかし、三次元測定に関する専門知識を持たない測定者による測定と専門知識を有する測定者による測定とでは、明らかに差が生じることが分かっている。これは、測定物の保持や配置の方法、周囲温度など、測定に影響を及ぼす要因に関する知識と対処の能力が異なるためである。このような状況の中

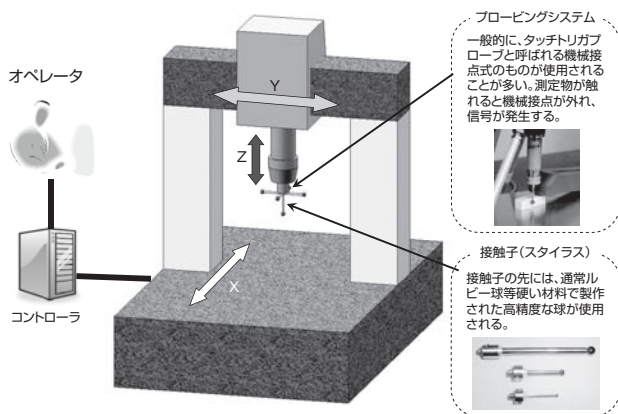


図2 三次元測定機の概略

で三次元測定の信頼性を高めるには、多量の知識と訓練を要求することなしに、測定者の技術能力を向上させられるような仕組み作りが最も重要である。

過去の日本においては、系列化された企業グループ内で製造プロセスが完結していたため、各企業グループ内で製品の信頼性確保のための体制が比較的良好に構築されていた。しかし、近年より安く良質の部品を国内外から調達したり、さらに人件費の安い海外での生産が増加したりするのに伴って、部品調達のグローバル化が進み、グループ内における信頼性確保の体制が崩れてきている。例えば、A社から納品された部品の寸法とB社から納品された部品の寸法が微妙に合わないため、組み立ての際に不具合が生じるなどの問題が起こる。このため、系列企業グループ内で構築されていた信頼性確保の体制に代わる、何らかの公的な支援体制が必要となった。

このような新しい状況の下で本研究では、ものづくり産業を支える最も基盤的な技術の1つである三次元形状測定の信頼性を高めるために必要な技術開発を行うこと、そしてそれを産業現場に波及させるための公的な仕組み作りを目標とした。

2 シナリオ

2.1 信頼性向上のシナリオ

産総研による研究開発成果をものづくり産業における広い裾野の隅々まで行き渡らせるためには、研究成果を現場まで届けるための体制作りが重要である。高精度な国家計量標準を立ち上げることをはじめとして、それを産業現場に広く展開するためのシナリオをあらかじめ作成した。図3に三次元形状測定の信頼性向上のために考案したシナリオを示す。

産総研では国家標準の整備として、標準器の開発、標準器等の校正手法の開発、さらに高精度な次世代標準の開発を行い、これらを利用してものづくり現場の三次元測定機を校正することにより、三次元測定の信頼性を向上させる。確立された国家標準は、他国の国立標準研究所との間で国際比較と呼ばれる測定値の比較を行うことにより同等性を確認し、その標準に基づく測定値の整合性が世界的に認められる。確立された標準を日本国内に普及させるために校正事業者登録制度を構築し、校正事業者による校正サービスを通してものづくり現場へと標準を展開する。地域の中小企業等の競争力向上のため各県の公設研究所等へ高精度測定のための教育や技術支援を行う。また、三次元測定機の評価法や新しい三次元形状測定法の標準化、産業現場の三次元測定機をより簡単な手順で校正するための遠隔校正技術開発等を行うことで、ものづく

り現場における三次元形状測定の信頼性を向上させる。さらに、国内だけでなく途上国に進出した日本企業への支援として、途上国の国立標準研究所への技術支援を行う。このようなシナリオを明確にすることで、国内のものづくり産業の国際競争力向上を目指した。

2.2 トレーサビリティの確保と開発目標

三次元形状測定の信頼性を客観的に示すことは、国家標準へのトレーサビリティを確保することで達成される。産総研では、10 数年前から三次元測定のトレーサビリティ体系の構築を目的として技術開発を行ってきた。これらの技術開発を長さのトレーサビリティ体系とともに示すと図4のようになる。三次元測定では、長さの国家標準であるよう素安定化ヘリウムネオンレーザにトレーサブルな体系となる。製造された製品の形状は、三次元測定機により評価され、その三次元測定機は、さかのぼると、ブロックゲージやボールプレートと呼ばれる標準器により校正され、またその標準器は安定化ヘリウムネオンレーザを使用したレーザ測長器により校正され、さらにレーザ測長器は長さの国家標準であるよう素安定化ヘリウムネオンレーザで校正されているというように上位の標準に切れ目無く連鎖する流れとなる。

このトレーサビリティ体系を産業現場において実用的に

運用するために、新たに開発を必要とする項目として、①標準器の校正システムに加えて、②民間の校正事業者の登録システム、③標準器を用いた三次元測定機の評価方法の標準化、④測定者の能力向上のための教育システムの4つを設定した。三次元測定のトレーサビリティ体系の構築にあたっては、これら4つのサブシステムの開発を目標として本格研究を行った。これらのサブシステムを開発するために産総研において行った研究内容をまとめると、以下の3つの研究テーマとなる。

- 1) 三次元測定機を校正・評価するための標準器の開発（計量標準の構築）
- 2) 三次元測定のトレーサビリティ体系構築のための技術開発（校正事業者登録システムの構築と校正方法の標準化）
- 3) 高精度の三次元形状測定技術の開発（測定技術の高度化）

いずれもものづくりのための三次元形状測定の信頼性向上に寄与する技術開発であり、特に産業現場における測定の信頼性を確保するための基盤的な技術である。3～5章では、上記技術開発に関する具体的な内容を記述する。6章では、現在産総研で三元形状測定技術に関して行っている活動内容、産業現場に計量標準を適用していくための

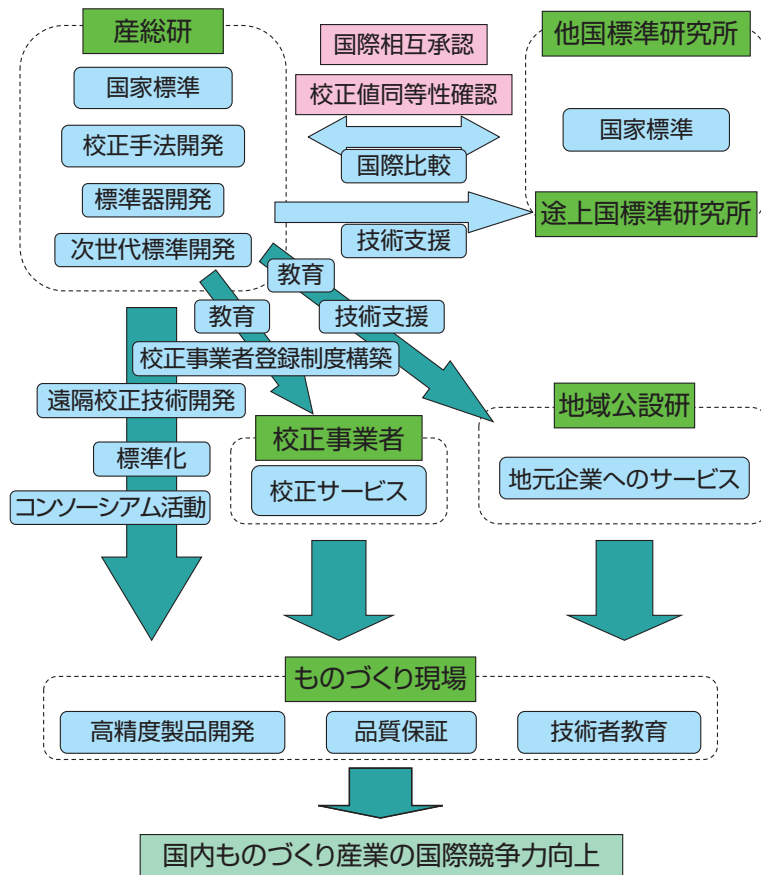


図3 三次元形状測定の信頼性向上のシナリオ

活動及び今後の展開に関して記述する。

3 三次元測定機を評価するための標準器

3.1 三次元測定における誤差

三次元測定機は非常に便利で有能な測定機であるが、信頼性に関して次のような課題がある。

- 1) 測定物の位置を検出するプローブが、スケールの基準線上に合致しておらず（すなわちプローブの位置がスケール自体から離れており）、測定誤差を生じやすい（専門的には「アップの原理を満たしていない」という）。
- 2) 上記の測定誤差のほかにも、誤差の要因が多く存在し、測定データの不確かさの評価が難しい。

1) の課題は、高精度な測定を行うにあたり、大きな問題であるが、測定機自体の剛性を高めることにより繰り返し性を良くすることで、ソフトウェアによる補正^[1]が行えるようにし、その影響を小さくしている。現在の三次元測定機のほとんどがソフトウェア補正を行う機能を有しており、この補正を適確に行うために正確な補正データをあらかじめ取得しておく必要がある。この補正データには、具体的に2種類のものがある。1つはプロービングシステム部分の補正データである。校正球と呼ばれる、あらかじめ直径の値が高精度に測定された、形状誤差の非常に小さな（真円からのずれが50 nm以下の球の測定を行うことにより、使用する接触子（スタイラス）先端球の球径、たわみ、及びそのプロービングシステムのもつ特性（具体的には球の一断面を三次元測定機で測定した場合に、測定された形状が円形ではなくプロービングシステムのもつ特性により三角形や四角形のように測定される）を求めることができる。もう1つは、スケール誤差（スケールの取付等による）、直角誤差（各軸間の直交性）、真直誤差（各軸ガイドのゆがみ等）、回転誤差（姿勢変化に伴う誤差）といった測定機の運動誤差に

についてのデータである。これらスケール誤差、直角誤差、真直誤差、回転誤差は、幾何学誤差^[2]と呼ばれ、各種の標準器を用いて算出することができる。これら2種類の補正データを正確に取得するために、次節で述べる三次元測定機用の標準器が必要になる。

2) の課題は、三次元測定機が多くの誤差要因をもつことと離散的な測定点を集合させ要素として計算し、測定データを算出する複雑な処理を行うため、不確かさ評価が難しい点にある。この課題に対してソフトウェアシミュレーションを利用した新しい不確かさ算出法に着目し、この問題解決に向けた研究を行った。本内容に関しては4.2節にて詳しく述べる。

3.2 三次元測定機のための標準器の開発

3.2.1 ステップゲージ

三次元測定機の測定精度を確認したり、ソフトウェア補正のためのデータを取得するためには、上位の国家標準（よう素安定化ヘリウムネオンレーザ）にトレーサブルな各種の標準器、例えばブロックゲージ、ボールプレート等が利用される。これらの標準器の校正が正確に行われなければ、トレーサビリティ体系の下位に位置している三次元測定機に対して、高精度な評価はできない。そのためこの標準器の校正技術開発は重要であり、各国の標準研究所も校正技術の開発や校正サービスを実施している。

産総研では、10年ほど前から本格的にこれらの標準器の校正システムの開発を行ってきた。三次元測定機の精度評価において、日本では一般に端度器（ブロックゲージ、ステップゲージ）が多用される。三次元測定機の評価には、短いブロックゲージを数多く並べた構造を持つステップゲージ（図5参照）が多種の長さの基準を実現できることから、ブロックゲージよりも多く使用される。主要な国立標準研究所ではレーザ干渉計と移動ステージを組み合わせた専用の装置を用いてステップゲージを校正している^[3]。産総

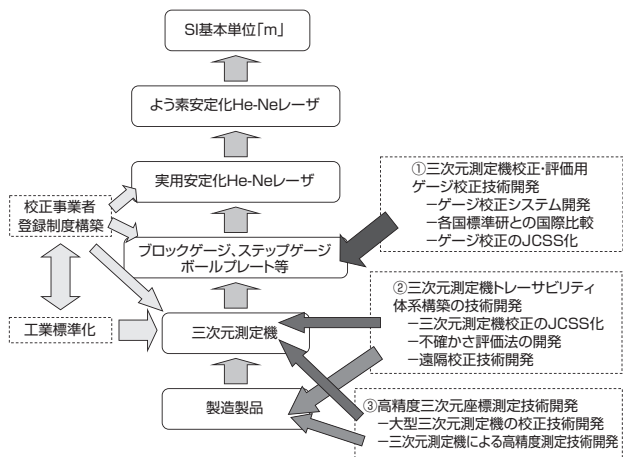


図4 トレーサビリティ体系と当該本格研究との関係

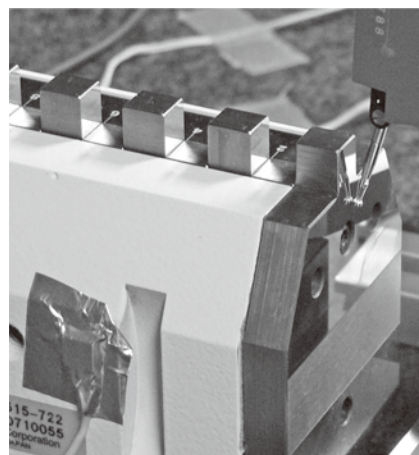


図5 ステップゲージ外観（測定面が櫛状に並んでいる）

研では、三次元測定機とレーザ干渉計を組み合わせることによりステップゲージを校正するシステムを開発した^[4]。図6は、開発したシステムの外観である。本システムは、4光路干渉計を使用することにより、接触子にピッチングやヨーイングの回転誤差が生じて、測定長は常に接触子（スタイラス）先端の球中心と干渉計との間の距離を示す。このシステムを使用し、測定長 500 mm のステップゲージを校正した場合、不確かさ 0.30 μm （95 %信頼区間）を達成した。

3.2.2 ボールプレート

ヨーロッパでは、三次元測定機の評価・校正に一次元の標準器である端度器よりも二次元的な評価ができるボールプレートやホールプレート（図7参照）が多用される。標準器に配置された球や円筒の中心座標値を決定し、この位置座標値を用いて三次元測定機の評価を行う。この場合、端度器よりも多くの情報を取得でき、測定領域内の誤差をより厳密に知ることができる。二次元の標準器を今後、日本においても利用可能にすべく、産総研ではこれら二次元標準器の校正システムを構築した^[5]。

ここでは、ボールプレートの校正システムの概要を説明する。ボールプレートは、その丸い形状から、直接的にレーザ測長器を利用して校正することは不可能である。そのた

め、三次元測定機を使用して校正するが、そのまま三次元測定機で測定した結果を使用しても、三次元測定機の精度以上の校正は不可能である。そこで、反転法と呼ばれる三次元測定機の持つ幾何学誤差を低減する手法を用いて各球の中心座標値を測定する。反転法の測定では、スケール自体が持つ誤差（通常、1次の傾き成分）のみが残ってしまうため、最後にスケール誤差を算出するために長さ標準にトレーサブルな基準器を使用してこれを補正する。通常、この補正には長さの異なる数個のブロックゲージが使用されるが、産総研ではレーザ測長器を使用してこの補正を行った。そのため、非常に高精度な補正データを得ることができた。このシステムを使用することで、測定長 500 mm のボールプレートを校正した場合の不確かさ 0.37 μm （95 %信頼区間）を達成した。図8はレーザ測長器を使用したボールプレート校正の様子を示している。現在、ボールプレートの校正に高度なレーザ測長技術を用いている機関は、世界中で産総研を含めて5機関程度である。

さらに産総研では、レーザ測長器を所有していない機関であっても高精度なボールプレートの校正ができるよう、長さ標準にトレーサブルな新たな標準器を開発した^[6]。この標準器は、ボールステップゲージと呼ばれ、ボールを一次元に配置したような形状をしている。測定対象となる球は、Hの形状をした本体プレートの断面2次モーメントの中立軸上に配置されており、上下、左右の熱変形や自重によるたわみなどで位置変化が生じた際にもその相対的位置の変動は、非常に小さくなるよう設計されている。この球間距離は、レーザ測長器を使って産総研で校正され、利用者に提供される。この標準器の有効性を確認するために、産業技術連携推進会議における活動の一環として、地域の公設研究所との間で本標準器を回送して、ボールプレートの比較測定を行った。この結果、ほぼすべての機関が産

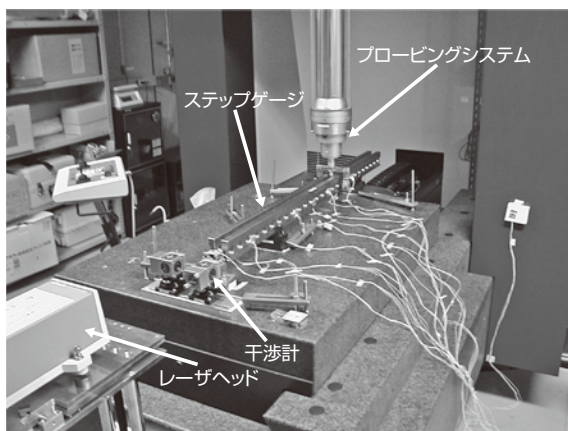


図6 ステップゲージ校正システム

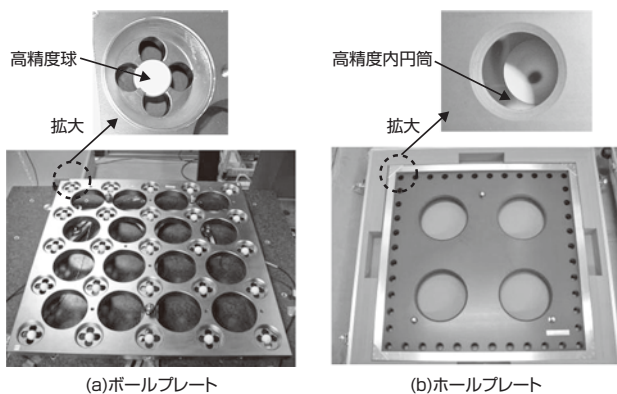


図7 二次元標準器

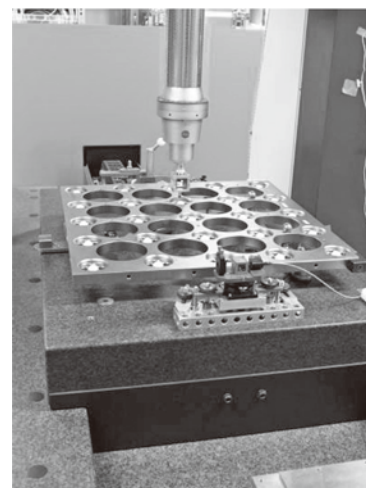


図8 ボールプレート校正の様子

総研の校正値に対し、0.5 μm 以内の偏差で一致し、本標準器が比較測定に有効であること、また各地域の公設研究所の技術水準が十分高いことが確認された^[5]。

3.3 標準器の国際比較

3.3.1 ステップゲージの国際比較

主要国の国立標準研究所が参加したステップゲージの校正に関する国際比較 (CCL-K5) が、1999～2002 年にかけて行われた。安定性に優れたステップゲージを幹事所が用意し、それを各国の標準研究所に順番に移送してブラインド測定を行い、その結果を幹事所に報告するという手順で行った。参加機関は、9 機関であった。

図 9 にその国際比較の結果を示す^[7]。国際比較では参加機関はそれぞれの国の国家標準器に基づいて独立に測定するため、どの機関の結果がもっとも真の値に近いのかわからない。そのため通常、参加した機関の測定の不確かさを考慮して重み付け平均した値を最も確からしい値（参照値）とし、そこからの各機関のデータの偏差を表示する。しかし、本国際比較では、参加したいくつかの機関の測定データが大きくばらついていることがわかり、最終的に日本（NMIJ/AIST）、アメリカ（NIST）、スイス（METAS）、ドイツ（PTB）の 4 カ国の測定データが極めて良い一致を示したため、これら 4 つの平均値を参照値とすることに決めた。図 9 の値は、この参照値からの差を各機関ごとにプロットしたものである。（産総研の値が 720 mm までしかないのは、測定システムの測定範囲によるものである。）この結果から、産総研で開発したステップゲージ校正システムの信頼性が確認できるとともに、世界における産総研の校正技術能力の高さを示すことができた。

3.3.2 ボールプレートの国際比較

ボールプレートの校正に関する国際比較 (CCL-K6) は、

2001～2004 年にかけて行われた。参加機関は、12 機関であった。図 10 に本国際比較の結果を示す。この図におけるプロット点は、1 番球から各球（2～25 番）までの距離を算出し、産総研の結果とすべての参加機関における平均値である参照値との差を示している。各球番号は、エラーバーの下に示している。エラーバー表示は、産総研の測定値に関する不確かさ（66 %信頼区間）を示しており、青線は、参照値に対する不確かさ（66 %信頼区間）を示したものである。この図から産総研の測定値と参照値とが不確かさの範囲内で一致していることがわかる。この結果より開発したシステムの信頼性が確認できるとともに、世界における産総研の校正技術能力を示すことができた。

3.4 民間企業による標準器の校正事業

上記の国際比較で確認された技術力を産業界で広く利用してもらうのが産総研の使命である。産総研が直接引き受けられる校正サービスの数は限られているので、高い校正能力もつ民間企業が校正をビジネスとして行ってトレーサビリティ体系の中位に参加することで、信頼性の高い三次元形状測定技術を広く産業界に普及できる。このとき、しかるべき校正能力をもつ民間事業者を公的に認定する仕組みとして、計量法による校正事業者登録制度 (JCSS) がある。この制度により登録された事業者は、日本の国家計量標準へのトレーサビリティが確保されていることが認定され、それを表明した校正証明書を発行することができる。この制度を利用したステップゲージの校正システムを構築するために（独）製品評価技術基盤機構の中に技術委員会が設置され、登録事業者が必要とされる技術的要求事項適用指針^[8]などの原案を産総研が中心になって作成し、ステップゲージに関するトレーサビリティ体系を整備した。整備後すぐに複数の事業者が認定され、現在トレーサビリティのと

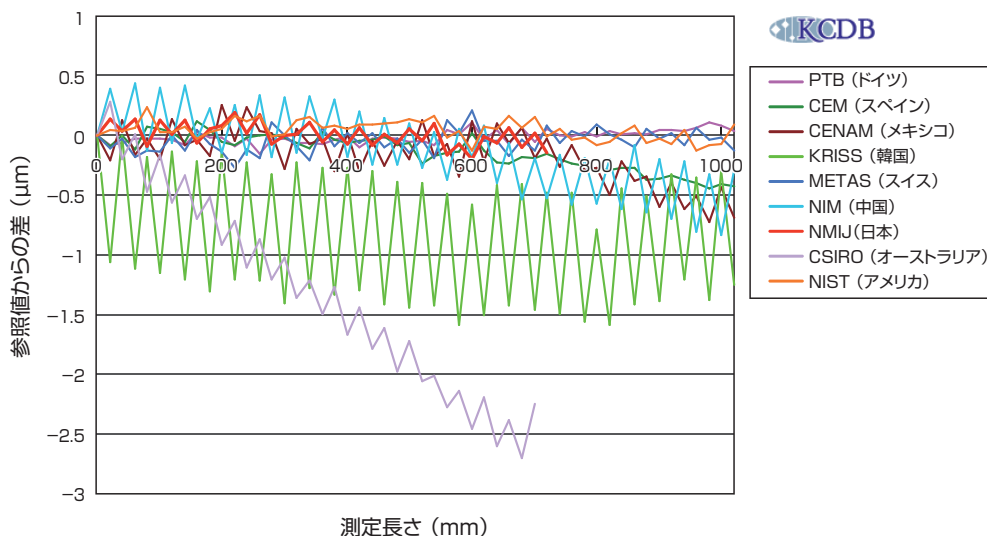


図 9 ステップゲージの国際比較 (CCL-K5) の結果

れたステップゲージが多数産業界で使用される状況を達成できた。

4 三次元測定機の信頼性評価

4.1 三次元測定機の校正事業者の認定

3章で述べたように、ステップゲージの標準器が整備されたことにより、それを用いて三次元測定機を適確に校正することが可能になった。このような状況の下、三次元測定機を所有する事業者が、国家標準にトレーサブルな三次元測定ができるという公的な証明を求めるようになった。そこで、すでに述べたステップゲージの標準器の場合と同様に、三次元測定の実業者を公的に認定するための技術委員会を（独）製品評価技術基盤機構に設置し、三次元測定機の校正に関する技術的要求事項適用指針^[9]をまとめ、現在三次元測定機に関しても複数の校正事業者が公的な認定を受けてその校正サービスを行っている。

三次元測定機は非常に多機能な装置であるため、ステップゲージを数回測定しただけではその性能の全てを適確に評価することは不可能である。より少ない手順で、より適確な評価を行えるようにすることが課題である。同じ問題は、三次元測定機の取引において購入者と販売者との間で、装置の性能検査をする際にも生じる。ISOにおいては、三次元測定機の納入時の検査方法について標準化がなされている。産総研からもISO会議へエキスパートとして参加し、標準化に参画してきた。そこで三次元測定機の校正に関する技術的要求事項適用指針を決めるに当たり、我々はこのISO規格^[10]を利用することとした。このことは、計量標準（計量トレーサビリティ体系）が工業標準（工業製品やサービスなどについての共通化や決め事）を参照していることになる。一方、このISO規格の中では国家標準にトレーサブルな標準器を使うことが規定されており、逆に、工業標準が計量標準を参照している。従来から我々

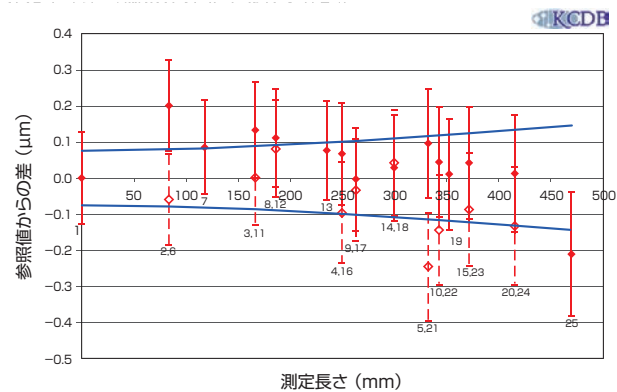


図10 ボールプレートの国際比較（CCL-K6）の結果
ボールプレート25個の球に対する産総研の値と参照値との差を示している。図中のエラーバーは産総研値の不確かさ、青線は参照値の不確かさを示している。

は計量標準と工業標準を一体的に活用することで、より効果的な制度運用が可能になり、産業界で使いやすくなるという考えのもと研究開発を進めてきたが、今回その努力の1つが実ったといえる。

4.2 三次元測定の不確かさの算出方法

三次元測定機は、1点1点のポイント測定を行い、その点データを集め、例えば円の測定であれば、最小二乗円にあてはめを行い、円の直径、真円度、中心座標等を計算により算出する。測定した点のそれぞれに測定誤差があるため、最終的に算出した円の直径や真円度がどのくらいの不確かさで算出されたのかを求めることは、かなり難しい作業である。三次元測定の不確かさの要因として、以下の項目が挙げられる（図11参照）。

- 1) プロービングに関する不確かさ
- 2) 幾何学誤差に起因する不確かさ
- 3) データ処理における不確かさ（最小二乗法等）
- 4) 測定手順に起因する不確かさ（測定点の数やその配置等）
- 5) 環境の変動に起因する不確かさ（温度、湿度等）
- 6) 測定物の保持に起因する不確かさ（固定力、自重たわみ等）
- 7) 測定物自身に起因する不確かさ（表面粗さ、形状誤差等）

このように様々な不確かさ要因が測定に関与するため、最終的な不確かさを評価することはかなり複雑である。そこで、産総研では、2001年から（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構国際共同研究助成事業（NEDO グラント）の助成を受けて、ドイツ国立物理工学研究所（PTB）、オーストラリア国立計測研究所（NMI）、東京大学等と共同で、モンテカルロシミュレーションを用いた三次元測定機による測定の不確かさに関する研究を行ってきた。この手法はバーチャル三次元測定機^[11]と呼ばれ、PTBにおいて

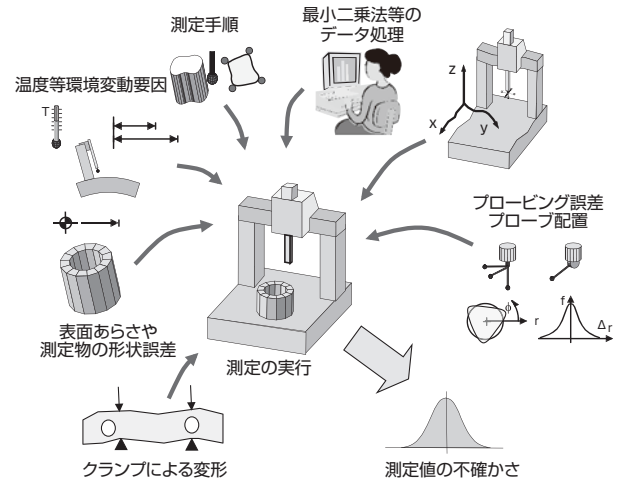


図11 三次元測定機の測定不確かさ要因

基本部分が開発されたものである。図12にバーチャル三次元測定機の概要を示す。バーチャル三次元測定機は、幾何学誤差をはじめとする重要な不確かさ要因を挙げ、これら誤差を含む三次元測定機のモデルを計算機上に作成したものである。実際の測定から得られる測定位置情報等からコンピュータ上で仮想モデルによる測定を200回程度行うことにより、その仮想的な測定から得られる測定値の標準偏差を計算し、不確かさを算出する。本研究において産総研は、通常使われる測定物を使用した比較測定を行い、バーチャル三次元測定機の実用面の評価及び普及に貢献した。このバーチャル三次元測定機技術の普及は、三次元測定のトレーサビリティ体系構築の手助けとなった。このような、シミュレーションによる不確かさ算出法は、ISO/TS 15530-4として標準化された。

4.3 三次元測定機の遠隔校正

前節で述べた方法で不確かさを算出するためには、標準器等を使用し、測定空間全体にわたって幾何学誤差のデータを取得することが必要である。三次元測定機の測定空間内の幾何学誤差のデータを取得するには極めて専門的な技術が必要のため、この作業を専門とする校正事業者が行うことが望ましい。校正事業者の専門家が産業現場に出向いて行う場合、時間的・金銭的なコストが多くなるのが予想される。そこで、産総研では、インターネットを利用し、容易にこの作業を行うためのシステム技術を開発してきた^[12]。

図13にインターネットを利用した三次元測定機の遠隔校正の概要を示す。校正事業者はまず標準器を三次元測定機のユーザに送る。輸送中の温度、湿度、振動等の変動は、同梱した記録機能を持つセンサによって監視される。校正事業者は、このセンサの記録情報を利用して、標準器が変化していないかどうかを判断する。次に二次元の標準器を用いてユーザの三次元測定機の校正を行う。標準器のセッティングは、ユーザ自身により行われるが、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事業者の専門家が

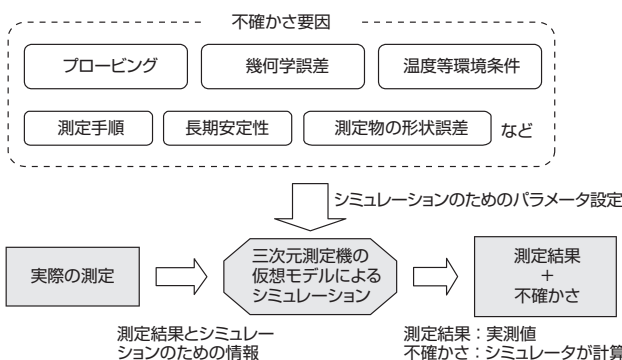


図12 バーチャル三次元測定機の概要

監視する。ユーザの三次元測定機は校正事業者がインターネットを介して制御する。校正中の周囲温度は校正事業者から標準器と同時に輸送された温度計を用いて測定される。温度測定データもインターネットを使用して送られ、校正事業者に保存される。プロービングシステムのパラメータ設定や座標系の作成等は、ユーザと電話もしくはインターネットカメラ電話等により直接コンタクトを取りながら行う。測定を終了した後、校正事業者はこれらの測定データを用いてユーザの三次元測定機の幾何学誤差を算出する。算出された幾何学誤差はユーザに送信され、誤差補正用のデータ及び不確かさ算出のためのデータとして利用される。このようにネットワークを利用した校正は校正事業者が直接校正の現場に行かなくてもよいことから、我々はこれを遠隔校正と名付けている。この技術開発は、ユーザ自ら標準器や幾何学誤差算出の知識を持たなくとも、三次元測定のトレーサビリティを容易に、かつ低コストで確保することを可能にした。

また、産総研では2005年よりこの遠隔校正手法を利用した三次元測定機校正サービスを依頼試験として行っている。このサービスは、二次元の標準器を使用するのではなく、校正事業者登録制度(JCSS)における三次元測定機の校正と同様に、ブロックゲージやステップゲージを使用して、ISO規格に基づいた評価法により行っている。

5 三次元形状測定の高度化

5.1 大型三次元測定機の校正

自動車のボディの形状測定や航空機の機体の形状測定には、測定空間が5 m × 3 m × 2 mなど大型の三次元測定機が利用される。このような大型の三次元測定機の校正には、大きな標準器を利用することも不可能ではないが、重量・時間的コストなどの点から問題がある。そこで、産総研では、標準器を使用しないで大型の三次元測定機を

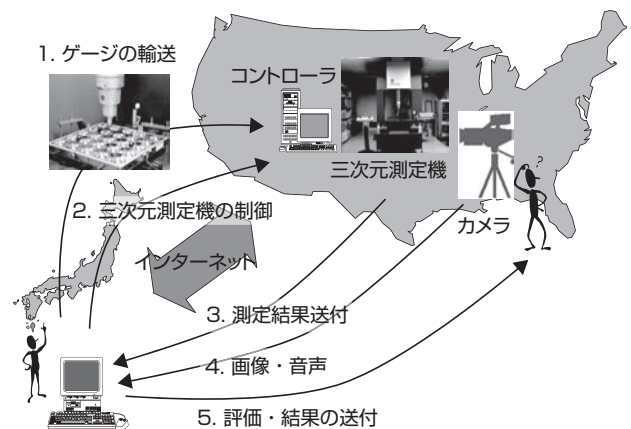


図13 三次元測定機の遠隔校正技術

校正する方法の1つとして、レーザトラッキング式レーザ干渉計（以下、レーザトラッカと呼ぶ）を使用した校正方法を提案してきた。レーザトラッカによる三次元測定機の校正システムは、イギリスの国立物理学研究所（NPL）、ドイツ国立物理工学研究所（PTB）、産総研で研究されてきた。いずれの装置も距離測定のみから三辺測量法の原理により座標値を算出するものである。NPL^[13]及びPTB^[14]は、1台のレーザトラッカを複数箇所に順次移動させて標的の位置を繰り返し測定する方法を取るが、産総研は4台のレーザトラッカを同時に設置して標的の位置を一度に測定する方法を取っている^[15]。産総研方式では、一度にすべての座標値を算出できることからNPL、PTBと比べ測定時間が短いというメリットをもつ。そのため、周囲温度の変動による測定物の座標の変化など外部環境の影響を極力抑えることが可能である。

図14は産総研で開発したレーザトラッカの外観である。本システムの特徴は、レーザ光を走査するミラーに半球を用い、トラッキングシステムの機械的な誤差を低減している点にある。通常、水平、垂直方向にレーザ光を走査する2軸を正確に合わせる必要があり、この作業は高度な技能を要する。我々の機構は、120°間隔に円上に3つの球を配置して、その3球上に半球ミラーを固定することで、安価な機械要素で、高精度なレーザ光の走査機構を実現した^[16]。このレーザトラッカを高精度三次元測定機と比較した結果、システム単体の機械的な精度は0.3 μm以下であることが確認された^[17]。また、三次元測定機の幾何学誤差をボールプレート及びレーザトラッカを使用して算出し、比較した結果、300 mm立方の測定空間内でほぼ2 μm以内で一致した^[18]。

ユーザがレーザトラッカを使用するにあたり、ハンドリングのしやすさは重要である。そこで、産総研知能システム研究部門で開発された球面モータを採用することでレーザトラッカの小型化・軽量化を実現した^[19]。これは、他分野

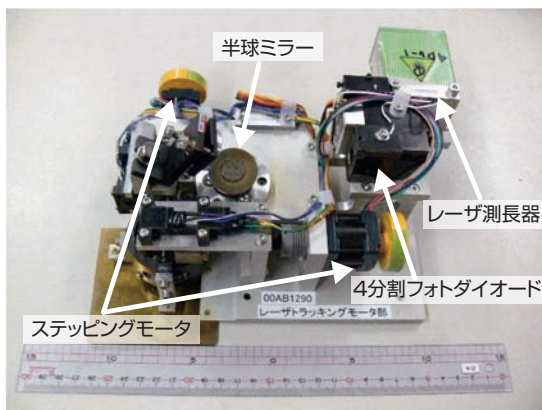


図14 レーザトラッキング干渉測長器

との融合によるよい研究成果となった。この技術開発により、大型三次元測定機の校正、産業用ロボットの手先座標位置の校正が高精度に行えるようになった。

現在、ISOの会議においてレーザトラッカの評価方法に関する標準化の議論が開始されており、本技術開発で培った知識と経験を生かし、その標準化に向けて貢献をしていく予定である。

5.2 三次元測定機による測定の高精度化

高精度なものづくりを実施している金型産業等では、測定機が固有にもつ精度よりも高い精度で評価することを必要とする場合がある。通常このような評価は不可能であるが、特別な配置と手順を取ることで、測定機のもつ誤差を互いに打ち消し合って、より高精度な測定を行うことが可能である。ボールプレートの校正に使用する反転法もこの一例である。このような高精度測定技術の開発を産総研では行ってきており、ここでは、一例として、円筒を測定する場合の成果について記述する。

図15のように、例えば等間隔8点の測定を行って円筒の真円度を測定・評価する場合、1回の測定が終了した後測定物を45度回転させ、2回目の測定を行う。同様に45度ずつ回転させ、計8つの姿勢で測定を行い、得られた8つの測定結果を平均すると、三次元測定機の幾何学誤差、2本の接触子（スタイラス）を用いたオフセット誤差、プローブの方向特性等の影響を打ち消すことができる。この方法はマルチ測定法と呼び、回転対称な形状の精密測定に利用できる^[20]。産総研では標準器の校正にあたり、このような方法を適用できるように実験計画を立て、最高精度での校正を行っている。この測定方法は、産業現場においても適用可能であり、今後、地域の公設研究所等を通して広く周知していく予定である。

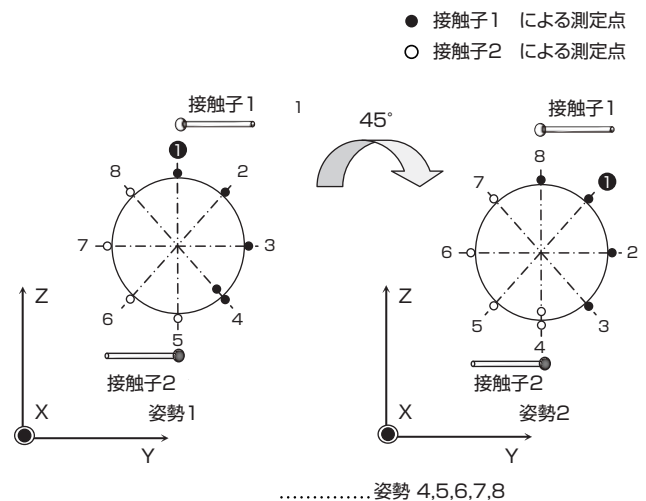


図15 円筒のマルチ測定法

6 三次元形状測定の今後

6.1 デジタルものづくりに向けた計量標準と標準化^[21]

図1のように設計、製造、評価をすべてデジタルデータにより行うデジタルエンジニアリングにおいては、設計データであるCADデータと計測した結果とを比較しなければならない。CADデータは面情報を有しており、従来からのプローブ接触式の三次元測定機の離散的な測定データでは情報量が足りない。そのため高密度な多点の測定データを一度に取得できる非接触式三次元測定機が近年多く利用されるようになってきた。これら非接触式の三次元測定機に関しては生産者がそれぞれ独自の基準で精度評価を行い、精度保証をしているのが現状であり、共通的な評価法に基づく精度保証の体系は存在していなかった。そのため、三次元測定機の利用者が製品を購入する際の統一的な指標が無く、購入したい装置の測定精度が本当にカタログ値のとおりであるのかを判断できない状況にあった。そこで産総研では、2005年度に非接触式の三次元測定機の精度評価法に関する規格作成を目標としたコンソーシアムを設立した。コンソーシアムでは、非接触式の三次元測定機の評価に使用する標準器の開発（計量標準）及びそれらの標準器を使用した評価方法を考案した。

非接触式の三次元測定機には様々な方式が存在するため、これら多種類の測定機の測定結果を同等に評価できるように標準器を製作することが重要である。光学式の測定機においては、標準器の測定部位に光沢があると測定結果に誤差が生じやすい。そのため標準器表面は、光学的に拡散面を持つことが重要となる。理想的な拡散面を選定するため、コンソーシアム会員の協力により、加工法・加工条件・表面コーティングを少しずつ変えた多くの球を製作した。図16はその一例である。100種類を超える条件の異なる加工を行い、製作した球をそれぞれ数種類の非接触式三次元測定機により測定し、すべての測定機で測定が比較的安定に行えた球を選定した。次に、選定された球を使用し、測定機の精度評価のための標準器となるボールバーを製作した（図17参照）。このボールバーはカーボンのフレームを使用し、周囲温度の変動に影響されにくいものとなっている。非接触の三次元測定機はポータブルな製



図16 異なる条件にて製作した球
（1番左：分散共析めっき（B-MOS）、サンドブラスト（左2番目：Crメッキ、中央：TiNコーティング）、右2つ：化学エッチング（FeCl₂による）

品が多く、実際に使用される環境は20℃に温度を制御された恒温室に据え置きされて使用されることは少ない。そのため、温度変動に対して安定な標準器が必要とされる。以上のようにコンソーシアムにおいて、測定機評価に使用できる国家標準にトレーサブルな標準器を製作し、これを用いた比較測定を重ねた上で、これらの標準器を使用した非接触三次元測定機の評価法をJIS化した。現在、作成したJIS原案は日本工業標準調査会でJIS B 7441として審議されている。また、同時にISOの委員会にも本成果を提案中である。非接触三次元測定機は、アプリケーションとして人体計測にも利用される。人体計測における非接触三次元測定機の評価法に関して産総研デジタルヒューマン研究センターが主体となり我々が協力し、標準化を進めている。

また以前は鋳造巣等の欠陥検査に使用されていたX線CT装置が、近年内部構造を測定できる三次元測定機として産業界で多く利用されるようになってきた。そのためX線CT装置を評価するための共通的なファントム（標準器）開発、及びそのファントムを使用した評価方法の標準化に関して、製造者及び使用者から要望が出ており、産総研ではその準備を進めつつある。

6.2 地域の公設研究所との協力

三次元測定機は高価な装置であるため、中小企業が導入するには経済的負担が大きい。そのためほぼすべての地域の公設研究所に三次元測定機が導入され、地域の企業からの依頼測定や装置開放のサービスを行っている。産総研では、産業技術連携推進会議の技術部会の1つである知的基盤部会の形状計測研究会において三次元測定技術の向上を目指した活動を行ってきた。ボールプレートの比較測定、ISOで審議されている不確かさ算出方法に関する実証実験、ビデオプローブ式の三次元測定機の評価実験等を行ってきた。また、2008年度から関東広域圏の公設研究所とともに地域イノベーション創出共同体形成事業として、三次元測定機の測定の信頼性を確保するため

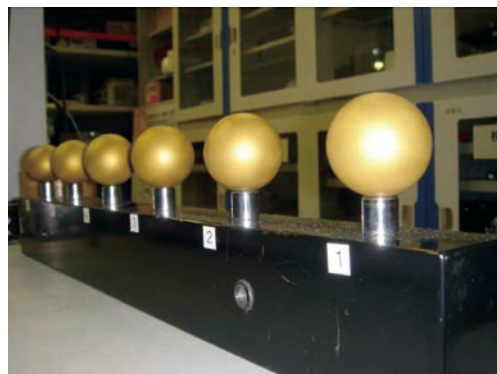


図17 非接触三次元測定機評価用ボールバー

のプロジェクトを進めている。このような活動を通して、産業現場の三次元形状測定技術の向上に貢献している。これらの技術が、公設研究所から地域の産業を担う中小企業へと伝播することで、日本のものづくり産業の活性化につながることを期待している。

6.3 技術者の教育

産総研では上記のような三次元形状測定を取り巻く技術開発や普及活動を行ってきた。計量トレーサビリティを構築する上での技術開発は、概ね整備されたと感じる。今後は三次元測定の信頼性をより向上させるために三次元測定機の日常点検方法の普及と使用者への教育に関する活動を強化していきたい。三次元測定機を含め、最近の測定機はアナログではなくデジタル処理され、測定値がディスプレイ上に出力される。そのため測定者は、その値を正しいと鵜呑みにする傾向が多い。しかし、測定においては、測定条件や測定方法等によりその値の信頼性が変化する。それを測定者が理解して使用するか、しないかで測定の信頼性に大きな差が生じる。例えば、工業製品の図面上の寸法が20℃における値であることを知らない技術者も少なからずいる。製品の信頼性を向上させるには、評価ツールを使用する技術者への教育は大変重要であると考えられる。測定者の技能向上のための教育システム構築は、産業現場に至るトレーサビリティ体系構築のための最後の要件であると考えており、測定技術力向上のための一手段として、近い将来、三次元測定の技術者認定制度を作ることを計画している。

7 おわりに

戦後の我が国は自動車産業、エレクトロニクス産業などを中心に広い裾野を持つものづくり産業を発展させてきた。三次元測定機はコンピュータの能力の向上とともに発展してきた測定機で、現在の高度なものづくり現場において重要な役割を果たしている。特にデジタル化による設計から製造、評価までの一体化した工程では欠かすことができない装置である。本論文では、ものづくり産業において必要とされる三次元測定機に関連する技術開発について述べた。

ものづくり産業の競争力強化を目標に国家標準の確立からそれをものづくり現場まで展開するためのシナリオを作成し、重要項目から順に実施してきた。現在まで、従来からの三次元測定機による三次元測定に関しては、技術者認定制度の構築を除き概ね整備できてきているが、新しい三次元測定装置や技術への対応や教育システム作りなど今後実施して行かなくてはならない課題は多く残っている。これら装置、技術に対してもシナリオを作成し、ものづくり産業へ貢献していく予定である。

参考文献

- [1] S. Sartori and G. X. Zhang: Geometric error measurement and compensation of machines, *Annals of the CIRP*, 44 (2), 599-609 (1995).
- [2] J. A. Soons, F. C. Theuws and P. H. Schellekens: Modeling the errors of multi-axis machines: a general methodology, *Precision Engineering*, 14 (1), 5-19 (1992).
- [3] P.S.Lingard, M.E.Purss, C.M.Sona and E.G. Thwaite: Length-bar and step-gauge calibration using a laser measurement system with a coordinate measuring machine, *Annals of the CIRP*, 40 (1) (1991).
- [4] 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵: ステップゲージ校正用干渉式三次元測定機の開発, *精密工学会誌*, 60 (5), 687-691 (2002).
- [5] 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵, 梅津健太: 座標測定機用二次元幾何ゲージ校正に関する技術情報, *産総研計量標準モノグラフ* 8 (2005).
- [6] S. Osawa, T. Takatsuji, H. Noguchi and T. Kurosawa: Development of a ball step-gauge and an interferometric stepper used for ball-plate calibration, *Precision Engineering*, 26 (2), 214-221 (2002).
- [7] *CIPM CCL Key Comparison: K5 Final Report*.
- [8] 製品評価技術基盤機構, 文書番号 JCT20102 技術的要求事項適用指針 (一次元寸法測定器・ブロックゲージ、各種長さ測定用校正器で測定面が平面であるもの (光波干渉測定法による)).
- [9] 製品評価技術基盤機構, 文書番号JCT20113 技術的要求事項適用指針 (座標測定機).
- [10] ISO 10360-2:2001 Geometrical product specifications (GPS) -Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)- Part 2: CMMs used for measuring size.
- [11] 高増潔: バーチャル座標測定機, *計測と制御*, 40 (11), 801 (2001).
- [12] 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵, 古谷涼秋, 柴田政典: 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, *精密工学会誌*, 70 (4), 528-532 (2004).
- [13] E.B. Hughes, A.Wilson and G. Peggs: Design of a high-accuracy CMM based on multi-lateration techniques, *Annals of the CIRP*, 49 (1), 391-394 (2000).
- [14] H. Schwenke, M. Franke and J. Hannaford.: Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer, *Annals of the CIRP*, 54 (1), 475-478 (2005).
- [15] T. Takatsuji, Y. Koseki, M. Goto and T. Kurosawa: Restriction for the arrangement of laser tracker in laser trilateration, *Measurement Science & Technology*, 9 (8), 1357-1359 (1998).
- [16] 首振り運動光てこによる光線追尾式レーザ干渉測長器 特許3427182号.
- [17] J. Hong, S. Osawa, T. Takatsuji, H. Noguchi and T. Kurosawa: A high-precision laser tracker using an articulating mirror for the calibration of coordinates measuring machine, *Optical Engineering*, 41 (3), 632-637 (2002).
- [18] K. Umetsu, R. Furutnani, S. Osawa, T. Takatsuji and T. Kurosawa: Geometric calibration of a coordinate measuring machine using a laser tracking system, *Measurement Science and Technology*, 16, 2466-2472 (2005).
- [19] 矢野智昭, 高辻利之, 大澤尊光, 鈴木健生, 本村洋一, 板部忠喜: サブミクロンの測定精度を有する小型2軸球面モータ型レーザ追尾距離測定装置の開発, *電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌)*, 126 (4), 144-149 (2006).

[20] S. Osawa, K. Busch, M. Franke and H. Schwenke: Multiple orientation technique for the calibration of cylindrical workpieces on CMMs, *Precision Engineering*, 29 (1), 56-64 (2005).

[21] 大澤尊光, 佐藤 理: 非接触座標測定機評価法の工業標準化, *計測標準と計量管理*, 57 (2), 2-6 (2007).

執筆者略歴

大澤 尊光（おおさわ そんこう）

1998年東京電機大学大学院工学研究科博士課程修了。博士（工学）。同年工業技術院計量研究所入所。2002～2003年PTB（ドイツ国立物理工学研究所）客員研究員として三次元測定の高精度化に関する研究に従事。現在まで、三次元形状計測、幾何学量計測に関する研究及びその標準化業務に従事している。本論文では、三次元形状測定標準全般の業務を担当した。



高辻 利之（たかつじ としゆき）

1990年神戸大学大学院工学研究科計測工学専攻修了。同年工業技術院計量研究所入所。1994年～1996年オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）国立計測研究所（NML）客員研究員。1999年博士（工学）取得。現在は、三次元測定機や平面度をはじめとした幾何学量計測の研究に従事している。本論文では、研究全体の統括を担当した。



佐藤 理（さとう おさむ）

2004年東京大学大学院博士後期課程修了。博士（工学）。同年産業技術総合研究所入所。測長原子間力顕微鏡、座標測定機、座標測定システムなどを用いた寸法、形状計測および座標測定機などの精度評価法標準化に従事。本論文では、遠隔校正技術開発、デジタルものづくりに向けた計量標準と工業標準化および地域公設研との協力関係構築を担当した。精密工学会アフィリエイト。



査読者との議論

議論1 全体的評価

コメント（田中 充：産総研研究コーディネータ）

当該論文は、我が国の機械工作部品の流通促進、競争力強化と技術移転にとって重要となる幾何形状測定の信頼性を保証する体制を作り上げるための本格研究として位置づけられます。豊富な内容を含んだ優れた研究成果と思います。

回答（大澤 尊光）

測定は、ものづくり産業において重要な項目であり、設計図面通りに製品が製作されているのかを検査し、その結果を製造工程に反映させて、製品の価値を向上させることができます。日本の製品の価値向上のためには、測定の信頼性を確保することが重要であり、そのための手段がトレーサビリティ体系と考えます。この体制作りは産総研のミッションであり、これの構築のためのシナリオを描き、本研究を進めてきました。

議論2 問題の背景

質問・コメント（田中 充）

かつては大きな製造会社に1つしかなかった三次元測定機が今や、下請け工場にも、製造ラインにも多数導入されているという事実があります。これら生産現場毎の信頼性への要求が拡大していること、また一方、三次元測定機の操作にかかる人のコストを避けるという専門技術離れが進んでいることについて加筆してはいかがでしょうか。

また、我が国の機械工作製造事業への当該本格研究の貢献を語る場合の背景は、単に「ものづくり」だけではありません。精密測定機器導入に際しての欧米依存信仰や工業化途上国の追い上げなどにも言及すべきではないでしょうか。

回答（大澤 尊光）

1章の「はじめに」のところに追記しました。

議論3 構成学としての記述

質問・コメント（田中 充）

要素技術を丹念に述べる一方、それをどのように構成して社会的なアウトカムに結びつけようとしたのかを語る必要があります。例えば公設研とのやり取りの中で、「公設研を介したトレーサビリティを唯一の方法として国内に根付かせる」方策はなぜ取らなかったのか。国際比較や国際相互承認についても、「産総研が参加せず登録事業者が国際試験所認定機構（ILAC）の中で技能試験に参加すれば良い」という方策はなぜとらなかったのか。

国際比較用の器物の選定についてもどのような検討があったのか、それが我が国産業界に与える影響はどうか。それぞれの要素技術との関係で記述できないでしょうか。これが構成学と考えられます。

またアブストラクトに、「計量標準と標準とをより強力に結びつけることにより長さの国家標準を製造現場までつなげることに成功した」とありますが、これは構成学の上から大切そうに見受けられますが、これに対応する記述が本文中に見えません。

回答（大澤 尊光）

経済のグローバル化に伴い計量分野における国際相互承認協定が結ばれ、各国の国立標準研究所においてその測定能力を示すことでワンストップサービスを実現しています。このような流れの中で、図3に示すようなシナリオがもっとも効率よく三次元座標計測標準をユーザに提供するものであると我々は考えております。

また、標準化と計量標準の結びつきに関しては、3.1節及び5.1節にて触れているとともに、4.1節にレーザトラッカの評価法の標準化への貢献に関して追記をしております。