

ナノ CMM におけるナノプローブシステムの開発

高 増 潔* 古 谷 涼 秋**

Development of Nano-Probe System for Nano-CMM (Coordinate Measuring Machine with nanometer Resolution)

Kiyoshi TAKAMASU* and Ryoshu FURUTANI**

ABSTRACT: Recently industrial parts have been smaller in size of sub-micrometer order. Therefore it is needed to measure small mechanical parts in high accuracy. For this purpose, we have developed Nano-CMM (nanometer Coordinate Measuring Machine). For probe system on Nano-CMM, a novel optical sensing system has been developed to measure 2D position of a spherical target. It measures the displacement of the sphere center by non-contact method. The series of tests shows that the optical sensing system reliably ensures 2D movement of the spherical target as small as 10 nm. Using the optical sensing system, Nano-Probe system has been developed to be used for Nano-CMM.

Keywords: Nano Metrology, Coordinate Measuring Machine, Probe System

1. はじめに

マイクロマシンや小型光学素子の開発のためには、マイクロマシンやその部品、光学素子などをトレーサブルかつナノメートル分解能で三次元的に計測を行う必要がある。表面形状をトレーサブルにナノメートルで測定する技術は、STM や AFM など実用化されてい

*東京大学大学院工学系研究科 精密機械工学専攻

教授 高増潔

(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Kiyoshi TAKAMASU, Professor

Department of Precision Engineering, The University of Tokyo (Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN)

**東京電機大学工学部 機械情報工学科

教授 古谷涼秋

(〒101-8457 東京都千代田区神田錦町2-2-2)

Ryoshu FURUTANI, Professor

Department of Precision Engineering, Tokyo Denki University (Kanda-Nishiki-cho 2-2-2, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457, JAPAN)

る¹⁾⁻³⁾が、三次元的な寸法や位置などを測定する測定機の開発はまだ充分ではない。しかし、産業界での要求に答えるためには、ナノメートル分解能の三次元測定機（CMM: Coordinate Measuring Machine）を開発することが必要となる。このような三次元測定機をナノCMMとして開発を行っている。

図1は、三次元測定機と表面測定機を比較したイメージである。触針式粗さ測定機やSTM、AFMのような表面測定機は、表面は測定できても、穴の直径、横に空いた穴や穴の軸のベクトルなどは測定できない。このような寸法や座標を測定するのが三次元座標測定機である。ナノCMMは、マイクロマシンやマイクロマシンの部品の寸法や座標を測定するための、ナノメートル分解能の三次元座標測定機となる。

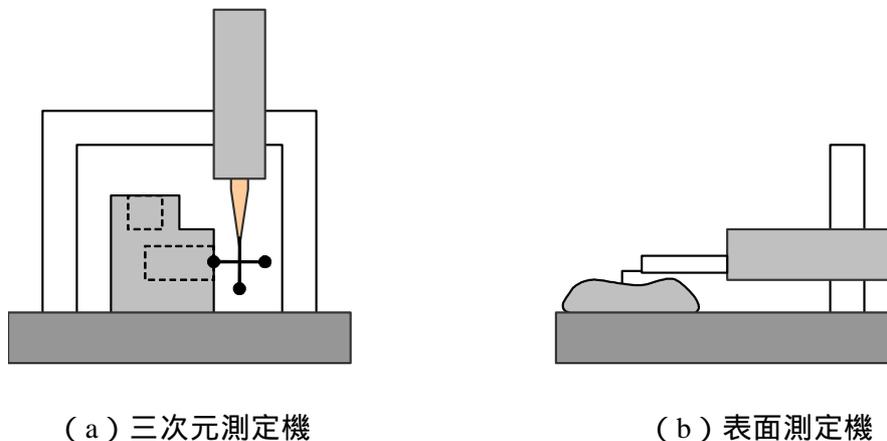


図1 三次元測定機と表面測定機の違い

2. ナノCMMの開発

図2は、自動車産業などを中心として複雑な三次元形状を測定するための、三次元測定機の例である。測定機の大きさが2m程度で、1mくらいまでの測定物を数 μm の精度で測定できる。図3のような複雑な三次元形状の寸法や形状は、三次元測定機でしか測定できないため、製造現場、特に自動車産業を中心とした機械産業において非常に重要な測定機となっている。

この三次元測定機をナノメートルの分解能へ拡張するのが、ナノメートル分解能で三次元的な測定を行うための三次元測定機「ナノCMM」である。将来のマイクロマシンなどの開発においては、基本的なツールとしてナノメートルオーダで三次元的な寸法や位置などの形状を測定する測定機は不可欠なものと考えられる。このような研究は、最初に我々の研究室で必要性を提案し、開発をはじめたが、最近では、ドイツ、オランダ、イギリスなどの多くの国で開発が行われている^{1) 5) 6)}。図4はナノCMMの考え方で、図2に示し

たような一般的な三次元測定機のすべての仕様を100分の1にすることで、その実現を目指している。表1は、ナノCMMの目標仕様である。



図2 一般的な三次元測定機

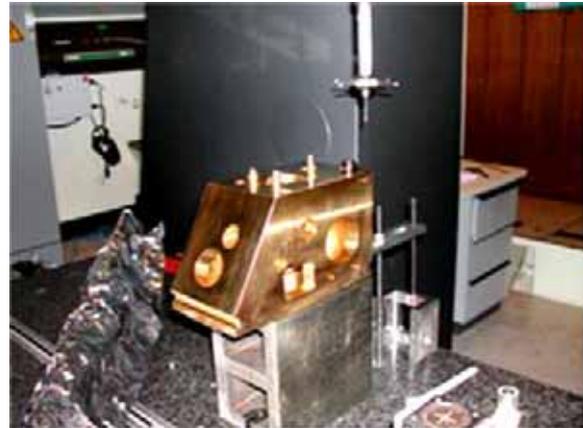


図3 三次元測定機による複雑な形状の測定

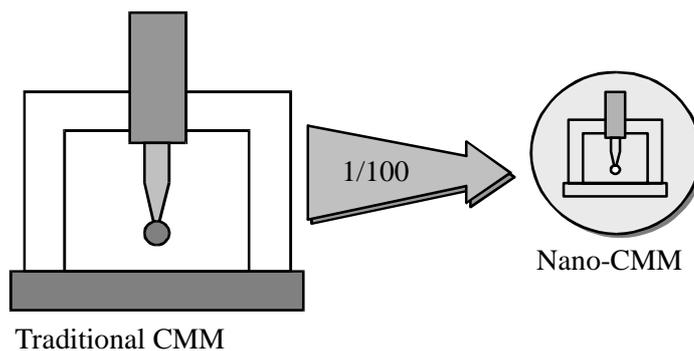


図4 一般的な測定機からナノCMMへ

表1 ナノCMMの目標仕様

| | Traditional CMM | Nano-CMM |
|-------------------|-----------------------|----------------------|
| Size of machine | $(2000 \text{ mm})^3$ | $(200 \text{ mm})^3$ |
| Measuring range | 1 m^3 | $(10 \text{ mm})^3$ |
| Resolution | $1 \mu\text{m}$ | 10 nm |
| Accuracy | $5 \mu\text{m}$ | 50 nm |
| Diameter of probe | 5 mm | $50 \mu\text{m}$ |
| Measuring force | 10^{-1} N | 10^{-3} N |

図5は、ナノCMMの構成図である⁷⁾⁻⁹⁾。大きさは300 mm×300 mm×200 mm程度、測定範囲は10 mm×10 mm×10 mm、分解能は10 nmとなっている。この測定機は、対称構造、二重V溝の案内機構、光スケールを使った位置検出方法で安定性の高い測定機を作っている。図6は、ナノCMMのプロトタイプである。ナノメートルオーダーの形状や寸法を絶対的に測定する場合、温度ドリフトが最大の誤差要因となる。100 mmの鉄は温度が1度変化すると1 μmの熱膨張が起こり、その影響が直接測定値に現れる。このプロトタイプでは、全体を低熱膨張材料で作ることや、温度の影響を受けにくい構造にすることで、0.1度程度の温度環境で10 nm程度の温度ドリフトに抑えることができています。

図7は、ナノCMMのX軸の真直度を評価した例である。この例では、真直度として50 nm、繰り返しとして10 nm程度を達成している。温度ドリフトなどを含めて、総合的には、50 nm以下の精度がテーブルとしては達成されている。

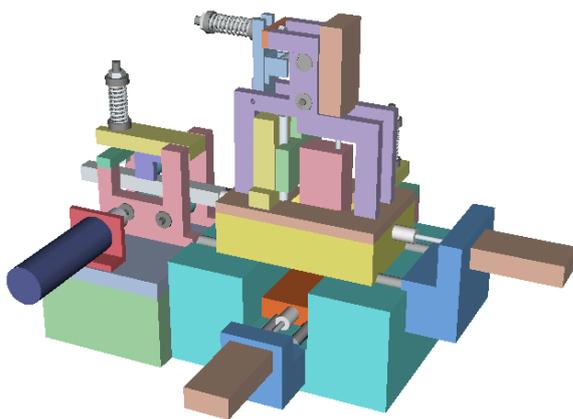


図5 ナノCMMの構成図



図6 ナノCMMのプロトタイプ

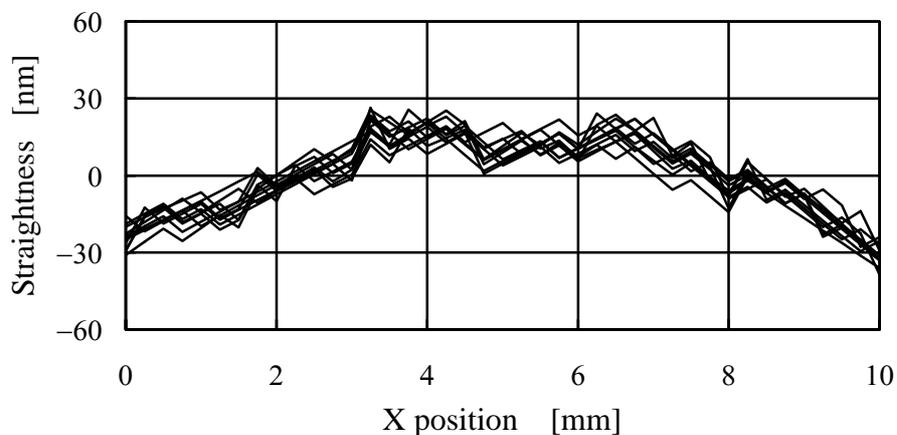


図7 X軸の真直度評価

3. ナノプローブシステムの開発

ナノ CMM の世界的な研究において，最大の問題点とされているのがプローブシステムである^{10) 11)}．三次元測定機では，種々の材料や表面状態の測定物の三次元的な位置や寸法を安定に測定するために，接触式のプローブシステムが多く用いられている．ナノ CMM でも，接触式でナノメートルオーダの分解能で，二次元もしくは三次元の検出能力を持つナノプローブが必要となる．

ナノプローブは，ナノ CMM の Z ステージに組み込んで使用するため，以下のスペックが必要となる．

- プローブ部分（Z ステージへ組み込む部分）の大きさが，直径 100 mm，長さ 200 mm 程度に収まること．
- プローブの分解能が 10 nm 程度，測定精度が 50 nm 以下であること．
- プローブが 2 次元もしくは 3 次元の測定が可能であること．
- オーバートラベル（プローブが壊れずに変形できる量）が 1 μm 程度以上あること．
- 熱や振動などの外乱を発生しないこと．

このような制約を考えると，図 8 で示すようないくつかの基本アイデアを考えた．これらの方法は以下の特徴を持つ．

- スタイラスチップ（測定子）としては，球を用いる．
- スタイラスチップを運動学（キネマチック）に支持する．
- スタイラスチップの変位（2 次元または 3 次元）を光センサで測定する．

図 9 は，図 8 の（b）に示した方法を採用して，開発しているナノプローブの構成である^{12) - 14)}．また，図 10 は実際に開発したプロトタイプである．直径が 0.5 mm 以下の小さい球によって測定物に接触し，そのときの球の動きをレーザーによる光学センサで検出する．このように接触式と光学センサを組み合わせることで，安定で高分解能なナノプローブが実現できる．

図 11 は，プロトタイプのナノプロービングシステムの分解能を評価した例である．分解能として 10 nm 以下が達成できている．図 12 は，2 次元測定を行った場合である．X 軸と Y 軸のクロストークなどがあるが，分解能としては 10 nm 程度を達成しているために，ナノ CMM のプローブシステムとして使用可能なプローブシステムとなっている．

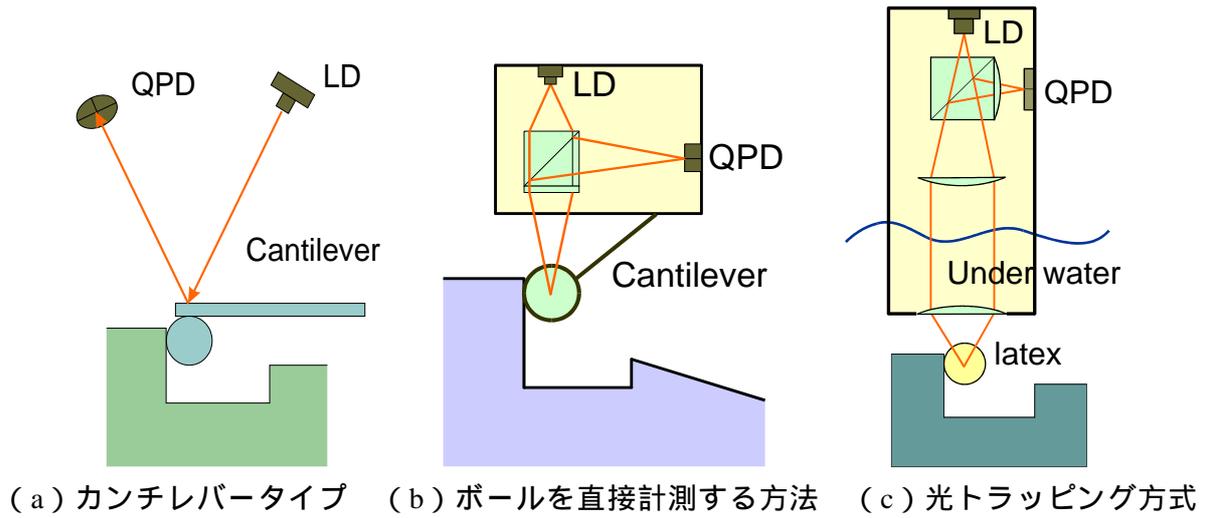


図8 ナノプローブシステムの構成例

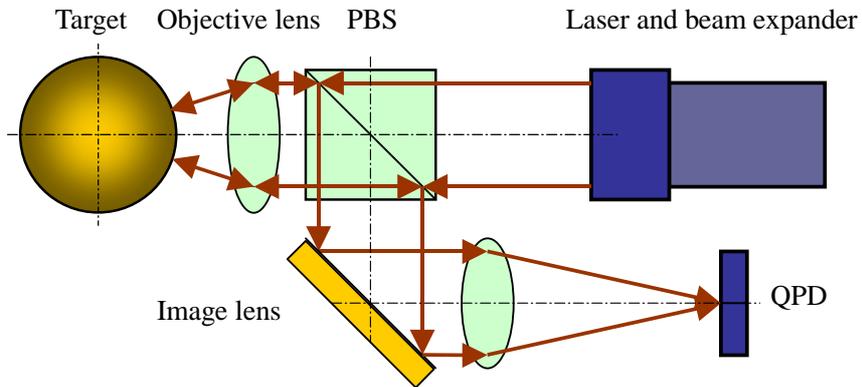


図9 ナノプローブシステムの光センシングの基本原則

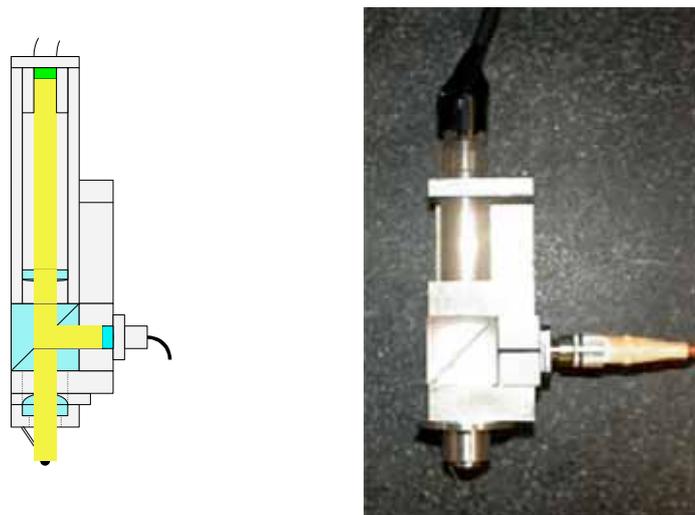


図10 ナノプローブの構成とプロトタイプ

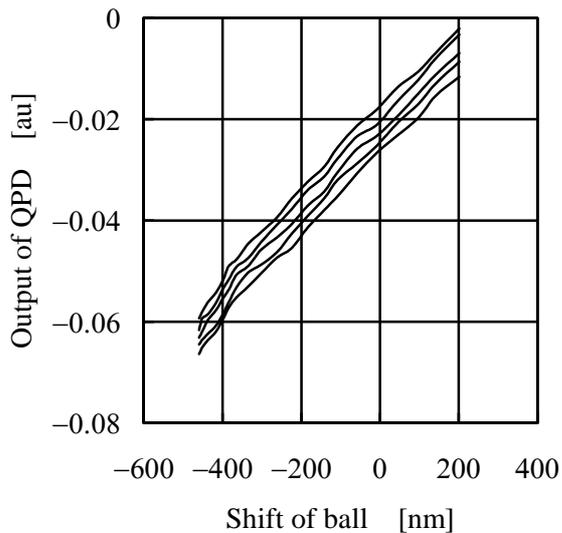


図 11 1次元の繰り返し測定

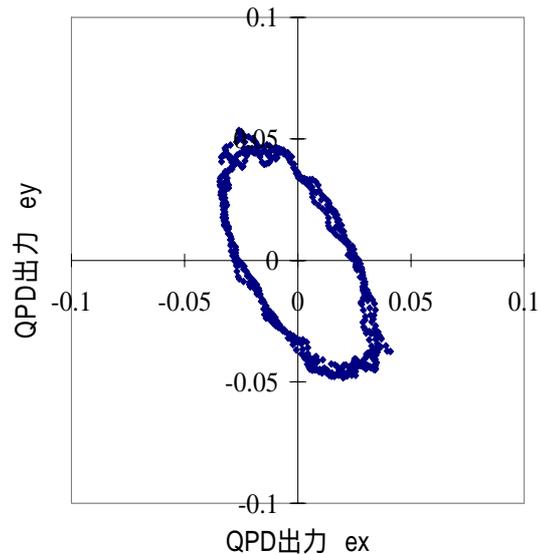


図 12 2次元の測定（100 nm の円）

4. おわりに

以上のように、今後のマイクロマシンの開発の基礎的なツールとなるナノ CMM とナノプローブシステムの開発が行われている。しかし、実際に使うためには、測定機のキャリブレーション方法の確立、測定の信頼性、装置の経年変化の評価など多くの課題が残されている。

5. 謝 辞

本研究は（財）マイクロマシンセンターの研究助成によって推進されたものであり、ここに深く感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 1) Richard Leach, Jane Haycocks, Keith Jackson, Andrew Lewis, Simon Oldfield and Andrew Yacoot: Advances in traceable nanometrology at the National Physical Laboratory, Nanotechnology 12 (2001) R1-R6
- 2) Misumi, S. Gonda, T. Kurosowa, Y. Tanimura, N.Ochiai, J. Kitta, F. Kubota, M. Yamada, Y. Fujiwara, Y. Nakayama, K. Takamasu: Comparing measurements of 1D-grating samples using optical diffraction technique, CD-SEM and nanometrological AFM, euspen2002, Eindhoven, 2002, 517-520
- 3) Kramar, J.A.; Jun, J.; Penzes, W.B.; Scheuerman, V.P.; Scire, F.E.; Teague, E.C.: Molecular Measuring Machine Design and Performance, Proc. ASPE 25: 19-22; 2001.

- 5) Hisashi SHIOZAWA, Yasushi FUKUTOMI, Tamotu USHIODA and Susumu YOSHIMURA: Development of Ultra-Precision 3D-CMM Based on 3-D Metrology Frame, Proc. ASME 1999, 1999.
- 6) 3D-MME, PTB Homepage, http://www.ptb.de/en/org/5/51/51101/seite_2e.ttm
- 7) K. Takamasu, M. Fujiwara, A. Yamaguchi, M. Hiraki and S. Ozono: Evaluation of Thermal Drift of Nano-CMM, Euspen2001, 306-309
- 8) M. Fujiwara, A. Yamaguchi, K. Takamasu and S. Ozono: Evaluation of Stages of Nano-CMM, Initiatives of precision engineering at the beginning of a millennium, Kluwer Academic Publishers (Netherlands), 2001, 634-638
- 9) K. Takamasu, M. Fujiwara, H. Naoi, S. Ozono: Friction Drive System for Nano-CMM Proc. Mechatronics 2000, 2000, 565-568
- 10) Micro probe development, PTB Homepage, http://www.ptb.de/en/org/5/51/5101/seite_3e.htm
- 11) Heinrich Schwenke, Frank Härtig, Klaus Wendt, Franz Wäldele: Future Challenges in Coordinate Metrology Addressing Metrological Problems for Very Small and Very Large Parts, IDW Conference, Knoxville, 1999
- 12) Kiyoshi Takamasu, Kenji Nogami, Kazuhiro Enami, Shigeo Ozono: Development of Nano-Probe System for Nano-CMM, Proc. China-Japan Bilateral Symposium on Advanced Manufacturing Engineering, China, 1998, 124-129
- 13) K. Enami, C. Kuo, T. Nogami, M. Hiraki, K. Takamasu, S. Ozono: Development of nano-Probe System Using Optical Sensing, IMEKO-XV World Congress, 1999, 189-192
- 14) K. Enami, M. Hiraki, K. Takamasu: Nano-Probe Using Optical Sensing, IMEKO-XVI World Congress, 2000, 345-348