

プラスチックレンズ及び金型の計測・評価システムの開発

東京大学工学系研究科精密機械工学専攻

助教授 高増潔

(平成 8 年度研究開発助成 AF-96002)

キーワード：三次元測定，ナノメートル計測，吸気型ボールプローブ，低接触力

1. 研究の目的と背景

現在，プラスチックレンズ（特に非球面プラスチックレンズ）は，型加工により安価で高精度なものを大量生産できるようになっている。このようなレンズの検査は，生産現場では光学的な手法を利用して抜き取り検査などで行われている。しかし，レンズを開発し評価する段階では，光学的手法による評価だけでなく，レンズおよびその金型の三次元形状を接触式手法により，測定する必要がある。

ここで問題となるのは，単に，金型の表面の粗さや相対的な形状を測定するのではなく，金型の三次元的で絶対的な形状を測定する必要があることである。そのため，金型の精度に対応したナノメートルの分解能，精度を持った三次元座標測定機および，プラスチック製品の測定のためには，プラスチックを傷つけないような非常に低測定力のセンサが必要となる。

我々は，このような問題を解決するために，小形で高精度な三次元形状測定機（Nano-CMM）および形状測定用の低測定力センサの開発を行っているが，そのうちナノメートル分解能の三次元形状測定機については，開発のめどが立っている。そこで，この研究ではプラスチックレンズを評価するための，低測定力センサに中心をおいて開発を進める。

このようなセンサとして，小さなボール（直径 1 mm 以下）を空気圧によって保持し，そのボールが測定対象に接触したことを空気圧の変化および光学的な手法で検出するプローブシステムが考えられる。これを吸気型ボールプローブと呼ぶ。本研究では，このような吸気型ボールプローブの基礎実験を行い，実用的に使用できるシステムを作ることを目的としている。

2. 研究方法

研究はナノメートル分解能の三次元測定機の開発と低接触力のセンサの開発に分けて行われる。

1) ナノメートル分解能の三次元形状測定機の開発

- 現在，開発が進んでいるナノメートル分解能の三次元形状測定機に対し測定精度の評価を行う。
- 通常の一次元センサ（測定分解能 10 nm 程度）

を利用して，繰り返し精度などを評価する。

2) 低測定力センサ（吸気型ボールプローブ）の開発

- 吸気によってボールを保持したセンサーの基本特性の評価を行う。
- ボール径 1 mm 程度の吸気ボールプローブを試作して，分解能および測定力の評価を行う。

3. Nano-CMM の開発状況

3.1 Nano-CMM の基本構成

表 1 に Nano-CMM の目標スペックを示す。Nano-CMM では，基本的に従来の三次元測定機（CMM：Coordinate Measuring Machine）の各スペックを 1/100 にしたものを想定している。このため，測定範囲は 10 mm 立方と非常に小さいが，対応する測定分解能は 10 nm となっている。このため，マイクロマシンやマイクロマシンのパーツ，小型の光学素子などの三次元形状および三次元座標測定に適している。

図 1 が，Nano-CMM の基本構造である。一般的な門型の三次元測定機を小型化した構造を持っている。ステージの案内にはすべりを使うこと，位置測定にスケールを使うことで移動機構の安定性を確保している。門型の X ステージが左右に移動し，Y ステージはその下で，前後に移動する。Z ステージおよびプローブは X ステージに取り付ける構成となっている。図 2 は，プロトタイプとして製作した Nano-CMM である。これは，鉄を材料として製作したが，将来的には熱的な影響を考慮して，低熱膨張の素材などを用いることを検討している。

表 1 Nano-CMM の目標スペック

スペック	従来の CMM	Nano-CMM
測定機の大きさ	一辺 2 m	一辺 200 mm
測定機の重量	1000 kg	10 kg
測定範囲	1 m ³	(10 mm) ³
測定分解能	1 μm	10 nm
測定精度	10 μm	数 10 nm
測定力	0.1 N	10 ⁻³ N

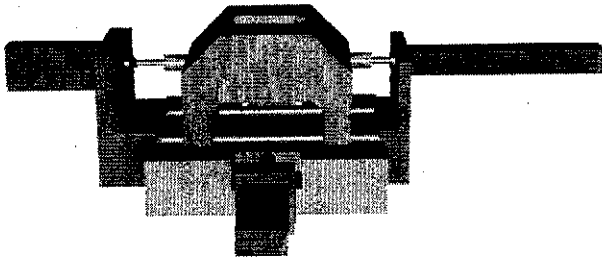


図1 Nano-CMMの基本構造

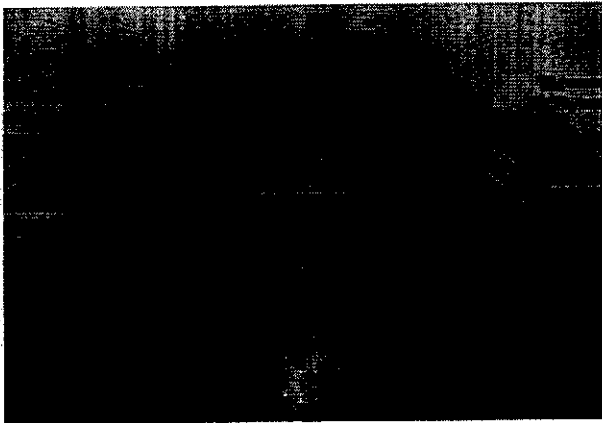


図2 Nano-CMMのプロトタイプの写真

3.2 フリクシヨンドライブの搭載

図2のプロトタイプでは、ステージの駆動にボールねじを使用したリニアアクチュエータを用いていた。しかし、ボールねじの回転モーメントがステージに伝わることで、ステージの真直度が悪くなっていた。そこで、駆動装置としてフリクシヨンドライブ機構を導入した。図3は、Xステージを駆動するためのフリクシヨンドライブの写真である。DCサーボモータをハーモニックドライブで1/100に減速し、駆動ローラを上下2つのアイドルローラで挟んで与圧をかけている。

図4は、フリクシヨンドライブを用いたNano-CMMの真直度の評価実験を示す。Xステージの移動による真直度をステージ上に置いたブロックゲージを測定することで評価している。図5および表2は、Xステージの真直度および繰り返し精度の評価例である。フリクシヨンドライブの取り付け位置を最高点、重心の高さ、最低点と変化させて、真直度と繰り返し精度を測定した。どの場合においても、ナノメートルオーダの値を示し、目標とするNano-CMMに十分利用可能なことが分かった。

3.3 Nano-CMMの利用

以上のように開発中のNano-CMMは、機構としてナノメートル計測が十分できるようになっている。次に問題となるのは、マイクロマシンや光学部品などに対応した低接触力のプローブシステムである。

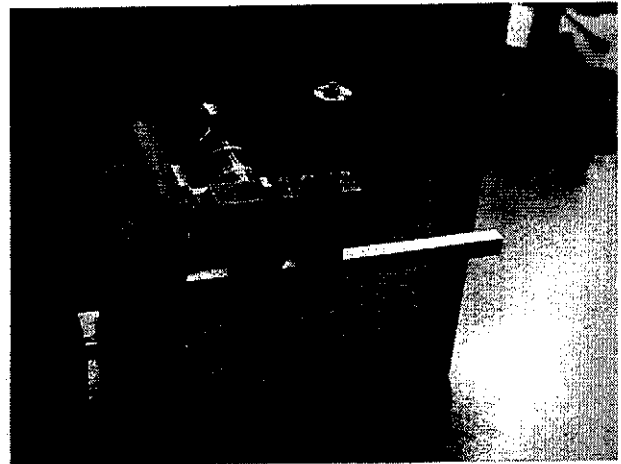


図3 フリクシヨンドライブの搭載

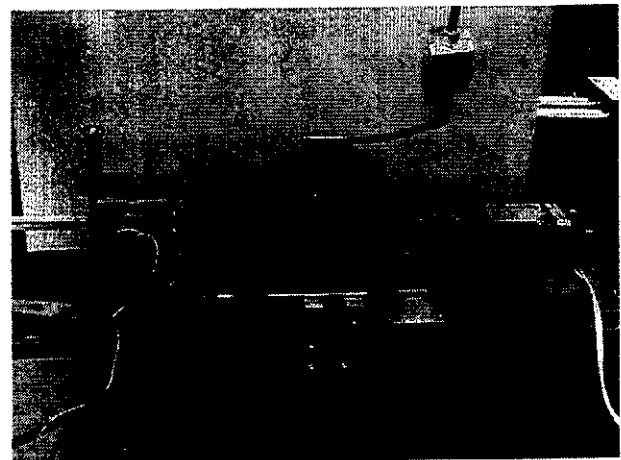


図4 真直度の評価実験 (Xステージ)

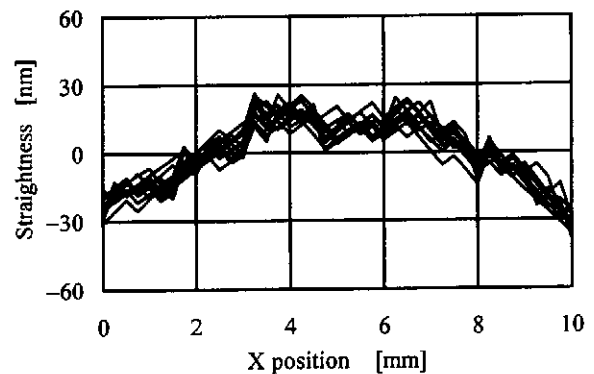


図5 真直度の評価例 (Xステージ)

表2 真直度/繰り返し精度の評価 (Xステージ)

	最高点	重心の高さ	最低点
往路	40nm/20nm	50nm/20nm	60nm/20nm
復路	60nm/20nm	60nm/20nm	60nm/20nm

4. 吸気型ボールプローブの開発

4.1 吸気型ボールプローブの基本原理

はじめに述べたように、小型光学部品などの三次元形状測定には、低接触力のプローブシステムの開発が必要となる。そこで、本研究では、空気圧を利用した接触タイプのボールプローブを提案し、その基本性能を明らかにした。

図6は、吸気型ボールプローブの基本概念を示している。吸気型ボールプローブは、細いパイプおよび小さい球から構成されている。真空発生装置による負圧によってパイプの先端に小球が保持されている。そこで、小穴や光学部品などが小球に触れると、球の位置がパイプ先端から少しだけ変位する。このとき、図6の右図に示すように、空気がパイプに流入する。この空気の流入を検出することで、吸気型ボールプローブは接触プローブとして使用することができる。

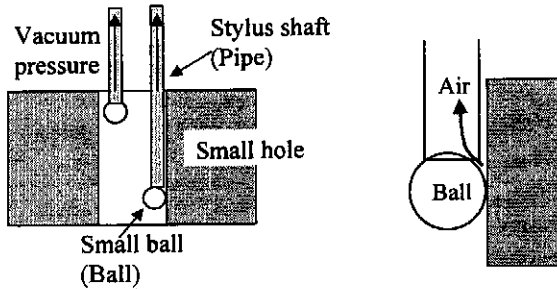


図6 吸気型ボールプローブの基本概念

4.2 接触力の評価

吸気型ボールプローブの最大の目的は、低接触力である。そこで、接触力の評価を行った。図7で、点Eにおける力とモーメントの釣り合いを考えることで、接触力 F を評価することができる。接触力は、式(1)で計算できる。

$$F = \frac{(F_p - Mg)d}{\sqrt{D^2 - d^2}} \quad (1)$$

ここで、 F_p は真空による負圧、 M は小球の質量、 d はパイプの内径、 D は小球の直径、 g は重力加速度である。

この式に基づいて、プロトタイプの実験型ボールプローブ（寸法は図12を参照）の接触力を評価すると図8のようになる。接触力は、パイプの内径 d およびボールの直径とパイプ内径の比 D/d によって変化するが、特にパイプの内径を小さくした場合、非常に小さい接触力を得ることができる。

このような解析よれば、吸気型ボールプローブでは比較的容易に、1 mN以下の接触力を達成することができ、目的とするプローブシステムとして充分利用可能であることが明らかになった。

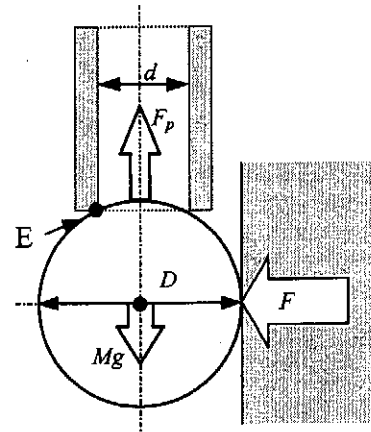


図7 測定力の解析

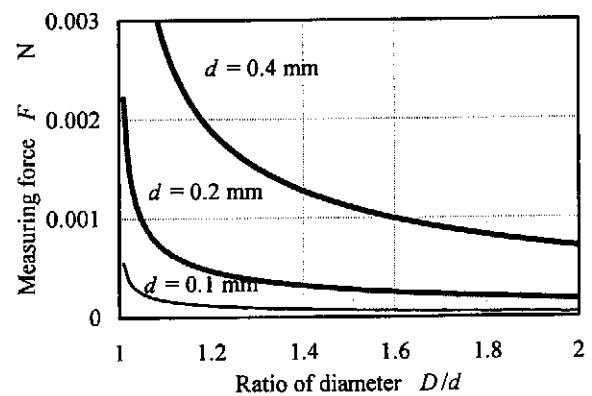


図8 プローブの半径比と測定力の関係

4.3 圧力変化の解析

図9のモデル化に従って吸気型ボールプローブの圧力変化の定式化を行った。まず、図9にベルヌーイの定理、運動量保存の法則および連続の条件を適用する。この3つの条件からセンサ部における圧力 P_A と真空圧 P_V の差圧 ΔP を式(2)のように計算できた。

$$\Delta P = P_A - P_V = \frac{2(a-s)s}{(1+h)a^2 + 2as - 2s^2} (P_0 - P_V) \quad (2)$$

ここで、 a はセンサ部の面積、 s はパイプの内側の面積、 P_A は大気圧、 h は流速の二乗に比例するエネルギー損失の係数である。

図10および図11は、式(2)に基づいてボールの変位 e と差圧 ΔP の関係を計算したものである。図10では、ボールの直径 D およびパイプの内径 d と差圧の関係を、図11は、センサ部分の内径と差圧の関係を示している。ボール変位に対する圧力変化が大きいほうが、高精度な検出が可能である。

この理論的な計算より、吸気型ボールプローブの種々のパラメータと検出される差圧との関係が明らかになった。

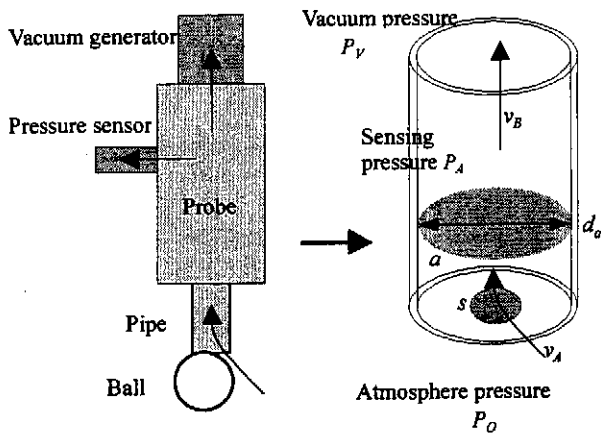


図9 圧力変化の解析

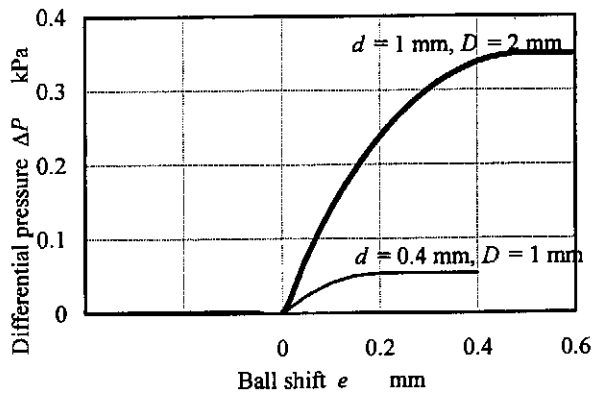


図10 ボール変位と差圧の理論的關係
(プローブ径との関係)

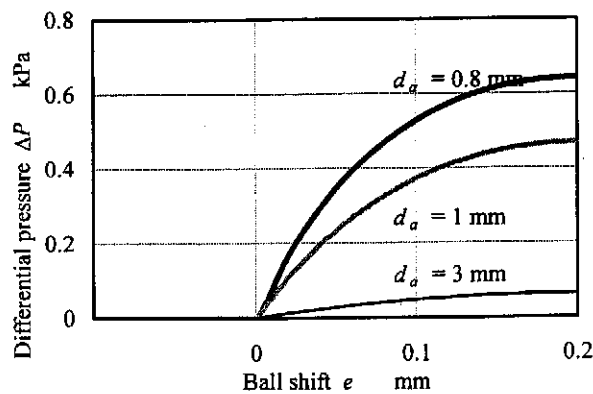


図11 ボール変位と差圧の理論的關係
(センサ部分との関係)

4.4 プロトタイプの製作とその評価

前項の検討を基に、プロトタイプを製作した。図12に製作したプロトタイプの寸法などを示す。このプロトタイプを用いて図13に示す測定システムにより評価を行った。図13では、プローブを固定しGP-IB制御によってステー

ジを移動し、ボールへ接触させボールに変位を与えた。差圧は圧力センサで計測し、そのデジタル出力を計算機に入力した。図14はボールの変位の様子を示した写真である。このようにボールはパイプの先端でかなり変位しても落ちることはない。

図15および図16は、理論計算による図10および図11と対応している。これらの図は定性的にも定量的にもよく一致しており、理論式の有効性が確認された。図13の測定システムによって、吸気型ボールプローブの測定分解能の評価を行った。表3は、分解能の評価結果である。まだ、分解能的には改善の余地が大きい。

4.5 吸気型ボールプローブの課題

以上のように、吸気型ボールプローブの基本的な理論計算を行い、プロトタイプの評価を行った。吸気型ボールプローブは理論的には、かなり低い接触力で測定できるため、小型光学部品やその金型などの測定に適していると考えられる。しかし、接触力の実験的な評価、より分解能の高性能化などが今後の課題として残っている。

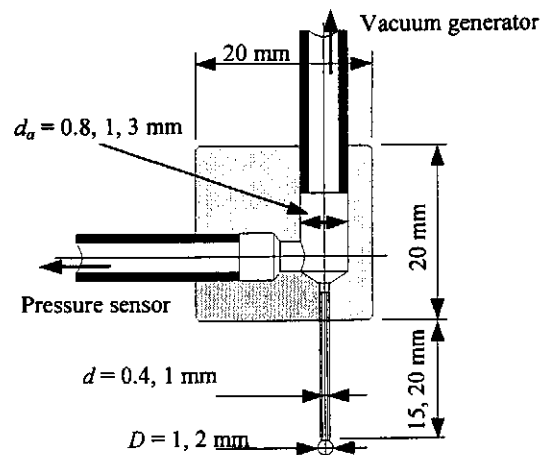


図12 プロトタイプの寸法

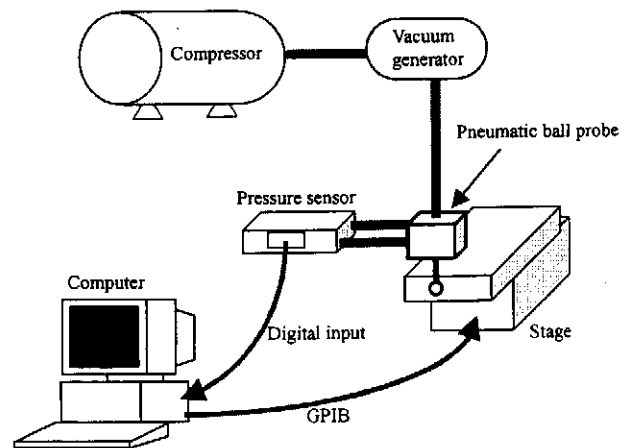


図13 測定システムの構成

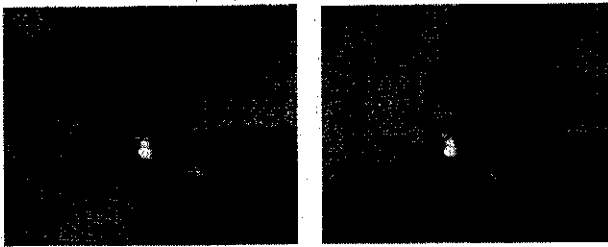


図 14 プローブボールの変位の様子

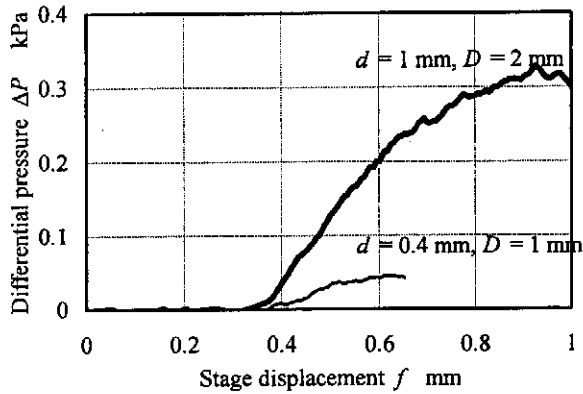


図 15 ボール変位と差圧の実験結果
(プローブ径との関係)

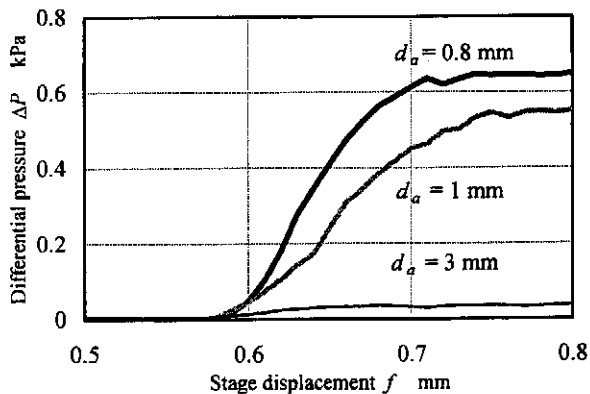


図 16 ボール変位と差圧の実験結果
(センサ部分との関係)

表 3 吸気型ボールプローブの分解能

センサ部分の内径	0.8 mm	1 mm	3 mm
平均化なし	3.8 μm	5.6 μm	12.6 μm
平均化あり	1.1 μm	1.6 μm	3.6 μm

5. まとめ

プラスチックレンズなどの小型光学部品やその金型などを高精度、低接触力で測定するためのシステムとして、Nano-CMM および吸気型ボールプローブの開発を行い、基礎的な解析およびプロトタイプの製作と評価を行うことができた。評価結果によれば、Nano-CMM はナノメートルオーダの精度、吸気型ボールプローブは 1 mN 以下の低接触力で測定することが可能である。

実用化のためには、安定性、高精度化などまだ多くの課題があるが、これらのシステムの基本的な性質および将来性を示すことができた。今後は、吸気型ボールプローブに対しては、接触力の精密な評価を行い、さらに小型することによって高分解能のプロトタイプの開発を行う予定である。

参考文献

- 1) D.J. Whitehouse, Handbook of surface metrology, IOP publishing, 1994.
- 2) S.T. Smith, D.G. Chetwynd, Foundations of ultra precision mechanical design, G and B, 1992
- 3) K. Takamasu, A. Kobaru, R. Furutani, S. Ozono, Three dimensional position measurement using critical angle prism, Proceedings of ISMQC, Finland, 1992, p. 193-201.
- 4) Kiyoshi Takamasu, Ryoshu Furutani, Shigeo Ozono: Development of Nano-CMM (Coordinate Measuring Machine with Nanometer Resolution), Proc. XIV IMEKO World Congress, Finland, 1997, 8 pp.34-39.
- 5) JIS B 7535-1982, 流量式空気マイクロメータ, (1982).
- 6) 青木保雄: 精密測定 (1), コロナ社, (1983) 177.
- 7) K. Takamasu, Kou Chi-Che, A. Suzuki, M. Hiraki, R. Furutani and S. Ozono: Development of Pneumatic Ball Probe for Measuring Small Hole, Proc. Int. Conf. Prec. Eng., Taipei, (1997) 767.
- 8) M. Frank: Fluid Mechanics, McGraw-Hill, New York, (1986).
- 9) 高増潔, 郭志徹, 鈴木昭洋, 平木雅彦, 古谷涼秋, 大園成夫: 吸気型ボールプローブの開発 (第 1 報) - 基本的構成 -, 精密工学会誌, 64 (8), 1998, pp.1153-1157.