



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	法線ベクトル検出による形状測定と評価法に関する研究
Author(s)	青山, 英樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第4063号
Issue Date	1992-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3060728
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51161
Type	doctoral thesis
File Information	000000249693.pdf



法線ベクトル検出による
形状測定と評価法に関する研究

青山英樹

①

博士論文

法線ベクトル検出による 形状測定と評価法に関する研究

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 関連する研究の概要	2
1.3 研究の目的	3
1.4 論文の構成	4
第2章 法線ベクトル検出の原理	10
2.1 法線ベクトル検出の原理	10
2.2 法線ベクトル検出のアルゴリズム	12
2.3 法線ベクトル検出の精度評価	15
2.4 法線ベクトル検出の実験結果	18
2.5 法線ベクトル検出の応用	20
第3章 法線ベクトル検出を用いた形状測定	25
3.1 法線ベクトル検出を用いた形状測定の原理	25
3.2 法線ベクトル検出を用いた形状測定のアルゴリズム	28
3.3 法線ベクトル検出を用いた形状測定の精度評価	32
3.4 法線ベクトル検出を用いた形状測定の応用	35
第4章 法線ベクトル検出を用いた形状評価	40
4.1 法線ベクトル検出を用いた形状評価の原理	40
4.2 法線ベクトル検出を用いた形状評価のアルゴリズム	43
4.3 法線ベクトル検出を用いた形状評価の精度評価	47
4.4 法線ベクトル検出を用いた形状評価の応用	50
第5章 結論	55
5.1 研究のまとめ	55
5.2 今後の研究の方向性	57

平成3年7月29日

青山英樹

法線ベクトル検出による形状測定と評価法に関する研究

目 次

第1章 緒論	1
1. 1 本研究の背景と目的	1
1. 1. 1 本研究の背景	1
1. 1. 2 本研究の目的	11
1. 2 関連する従来の研究と問題点	13
1. 2. 1 位置ベクトルと法線ベクトルの検出	13
1. 2. 2 機械部品基礎形状の測定評価	14
1. 2. 3 自由曲面加工形状の測定評価	19
1. 2. 4 自由曲面計算機モデルの構築	21
1. 3 本論文の概要	22
謝辞	27
参考文献	29
第2章 法線ベクトル検出プローブ	39
2. 1 法線ベクトル検出の意義	39
2. 2 法線ベクトルの検出原理とプローブの構造	42
2. 3 法線ベクトル検出プローブの設計	47
2. 3. 1 球面座標系 (r, θ, ϕ) の定義	47
2. 3. 2 法線ベクトル検出プローブの設計	47
2. 3. 3 設計結果	53
2. 4 基礎プローブの試作とキャリブレーション実験	57
2. 4. 1 基礎プローブの試作	57

2. 4. 2	キャリブレーション実験の方法と装置	58
2. 4. 3	キャリブレーション結果	62
2. 5	法線ベクトルの算出方法と基礎プローブの測定精度	63
2. 5. 1	法線ベクトルの算出方法	63
2. 5. 2	基礎プローブの測定精度	69
2. 6	曲面形状の測定基礎実験	70
2. 7	本章の総括と結論	71
	参考文献	76

第3章 位置ベクトルと法線ベクトルの測定システム 79

3. 1	法線ベクトル検出実用プローブ	79
3. 1. 1	実用プローブの有すべき機能	80
3. 1. 2	実用プローブの試作	83
3. 2	三次元座標測定機を基にした位置ベクトルと 法線ベクトルの測定システム	85
3. 2. 1	法線ベクトル測定システム	85
3. 2. 2	測定システムの電氣的動特性	89
3. 2. 3	プローブヘッド機構	91
3. 2. 4	位置ベクトルと法線ベクトルの 測定システム	93
3. 3	キャリブレーション実験と測定精度	97
3. 3. 1	キャリブレーション実験	97
3. 3. 2	測定精度	98
3. 4	本章の総括と結論	101
	参考文献	105

第4章 機械部品基礎形状の測定評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・106

- 4. 1 従来の機械部品基礎形状の
測定評価におけるの問題点・・・・・・・・・・・・・・・・107
- 4. 1. 1 平面の測定評価・・・・・・・・・・・・・・・・107
- 4. 1. 2 円筒の測定評価・・・・・・・・・・・・・・・・109
- 4. 1. 3 球の測定評価・・・・・・・・・・・・・・・・113
- 4. 2 位置ベクトルと法線ベクトルの検出に
基づく機械部品基礎形状の測定評価法の提案・・・・・・・・115
- 4. 2. 1 平面の測定評価法・・・・・・・・・・・・・・・・115
- 4. 2. 2 円筒の測定評価法・・・・・・・・・・・・・・・・117
- 4. 2. 3 球の測定評価法・・・・・・・・・・・・・・・・120
- 4. 3 従来の測定評価法と提案した測定評価法の比較・・・・122
- 4. 4 測定評価実験と結果・・・・・・・・・・・・・・・・123
- 4. 5 本章の総括と結論・・・・・・・・・・・・・・・・124
- 参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・128

第5章 自由曲面加工形状の測定評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・130

- 5. 1 自由曲面加工形状の測定評価の基本的考え方・・・・130
- 5. 1. 1 意匠曲面と機能曲面・・・・・・・・・・・・・・・・130
- 5. 1. 2 評価の基本的考え方と評価項目・・・・・・・・131
- 5. 2 設計形状から加工形状への変換モデル・・・・・・・・133
- 5. 2. 1 座標変換モデル・・・・・・・・・・・・・・・・133
- 5. 2. 2 座標変換モデルと加工形状評価・・・・・・・・133
- 5. 2. 3 従来の測定評価法と
提案した測定評価法の比較・・・・・・・・・・・・・・・・137

5. 3	位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく	
	自由曲面加工形状の評価法	1 3 8
5. 3. 1	評価法の概要	1 3 8
5. 3. 2	測定点のパラメータ値の必要性和算出法	1 4 1
5. 3. 3	評価手順	1 4 4
5. 4	計算機シミュレーション実験	1 4 7
5. 5	本章の総括と結論	1 5 1
	参考文献	1 5 4

第6章 位置ベクトルと法線ベクトルに基づく

	自由曲面形状計算機モデル	1 5 6
6. 1	従来の自由曲面計算機モデルの構築における	
	問題点と本章の目的	1 5 6
6. 1. 1	従来の自由曲面計算機モデルの	
	構築における問題点	1 5 6
6. 1. 2	本章の目的	1 5 8
6. 2	位置ベクトルと法線ベクトルに基づく	
	P N曲面パッチ	1 5 9
6. 2. 1	P Nパッチの提案と概要	1 5 9
6. 2. 2	制御点要素	1 6 0
6. 2. 3	P N曲面パッチ定義式	1 6 2
6. 3	P Nパッチ間の連続性の数式的確認	1 6 4
6. 3. 1	連続するP N曲面パッチ	1 6 4
6. 3. 2	位置ベクトルの連続性	1 6 6
6. 3. 3	接線ベクトルの連続性	1 6 7
6. 4	P Nパッチの連続性の実験的確認	1 6 9

第1章 緒 論

本章は、本研究の背景と目的、関連する従来の研究と問題点、本論文の概要について述べる。

すなわち、三次元座標測定機が開発されるとともに広く普及してきている状況の中で、三次元座標測定機の開発経過と現状について述べ、三次元座標測定機による測定とその測定データの応用に関する問題点を指摘する。また本研究の目的が、三次元座標測定機に関する問題点を解決するための方法論の提案とその実験的確認であることを示す。

関連する従来の研究と問題点として、三次元座標測定機による測定とその測定データの応用に関して、（１）位置ベクトルと単位法線ベクトルの検出法、（２）機械部品基礎形状の測定評価法、（３）自由曲面加工形状の測定評価法、（４）自由曲面計算機モデルの構築法について、従来の研究を紹介し、それらの問題点を指摘する。

本章の終わりに、本論文の概要として、論文の全体構成を示しながら内容について簡単に述べる。

1. 1 本研究の背景と目的

1. 1. 1 本研究の背景

三次元座標測定機は、1959年に英国のフェランティ(Ferranti)社によって発表されて以来、現在では広く普及してきており、物理モデルを測定し評価するための有効な道具として高い評価を得ている。物理モデルとは、実空間に存在する物体であり、デザイナーにより形成された自動車等

のクレイモデルや機械加工その他の生産手段により生成された加工製品等を意味している。一方、物理モデルに対して、コンピュータのメモリ空間に数値データ等により構築されるモデルは、計算機モデルと称される。

三次元座標測定機が急速に普及してきている主な理由は、次の5項目にまとめられる。

- (1) 三次元座標測定機は、熟練技術者でなくとも、高精度・高能率測定を行うことを可能とする。
- (2) 三次元座標測定機は、ノギスやマイクロメータによる測定では困難であった複雑な形状の物理モデル形状の測定および評価を可能とする。
- (3) 三次元座標測定機は、コンピュータとシステマティックに組み合わせることにより（CNC化）、測定データの高速処理・データベース化を可能とする。
- (4) 三次元座標測定機は、コンピュータ援用設計（CAD）データ、すなわち計算機モデルデータを基礎とすることにより、物理モデルの自動測定を可能とする。
- (5) 三次元座標測定機は、FMSに組み入れ[1- 1]～[1- 3]、測定データをFMSホストコンピュータで統一的に処理することにより、製品の測定評価結果を生産工程および生産計画へフィードバックすることを可能とする。

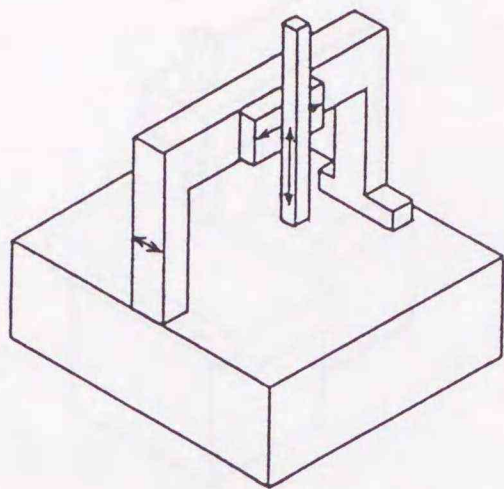
三次元座標測定機は、上記に示されたような効果が期待され、現在も高機能化・高精度化が進められている。三次元座標測定機の主要な構成要素は、本体、検出器（プローブ、スケール）、制御部、データ処理部となっている。

三次元座標測定機本体の構造は、操作性と測定精度の観点から、各種の

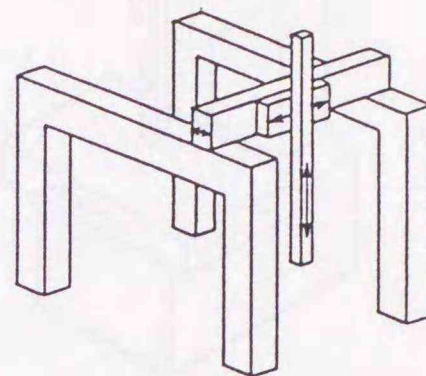
形式が提案されており、図1-1(a)~(l)に示されているように、(a)ブリッジ・門移動形、(b)ブリッジ・フロア形(ガントリー形)、(c)固定ブリッジ形、(d)ブリッジ・ベッド形、(e)L形ブリッジ形、(f)カンチレバーY軸移動形、(g)シングルコラム・コラム移動形、(h)シングルコラム・XYテーブル形、(i)水平ゾンタルアーム・テーブル移動形、(j)水平ゾンタルアーム・固定テーブル形、(k)水平ゾンタルアーム形、(l)多関節形などに分類[1-4]されている。また、構造と操作性、測定精度に関する研究[1-5]~[1-25]も数多くなされており、三次元座標測定機を導入する際には、使用目的・測定対象などを基準として操作性や測定精度を考慮し、その構造を決定する必要がある。

三次元座標測定機の構成要素において、測定点を検出するプローブとその座標値を読み取る座標検出器(エンコーダ、スケール)が、測定点座標値の検出に関し最も直接的に関係している要素である[1-26]~[1-27]。座標検出器は光学式や電磁式のものがあり、 $0.1\mu\text{m}$ の分解能を有する高精度なエンコーダやスケールが開発されている。測定点検出器は、接触子を被測定物に直接当てて検出する接触式プローブと、光などを用いて間接的に被測定物に接触することにより検出する非接触式プローブがある。現在では接触式プローブが一般的に用いられているが、測定の自動化・高速化や接触圧による傷を避けるなどの目的から、非接触プローブの要求も高くなってきている。

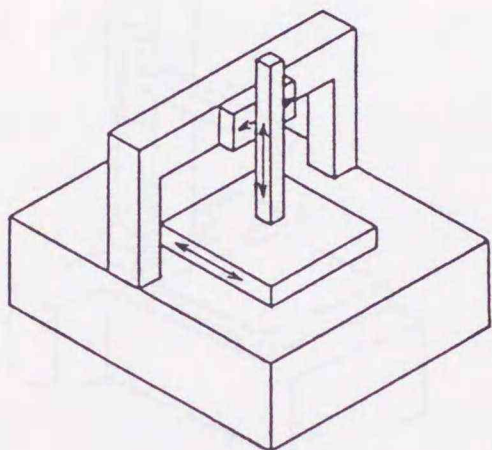
接触式プローブはいくつかの形状が提案されており、測定目的や測定対象により、適当なプローブ形状を使い分けなければならない。その形状は、図1-2(a)~(f)[1-27]に示されているように、(a)テーパプローブ、(b)円筒プローブ、(c)ディスクプローブ、(d)ボールプローブ、(e)ポイントプローブ、(f)回転半径プローブに分類されており、一般的にはボール



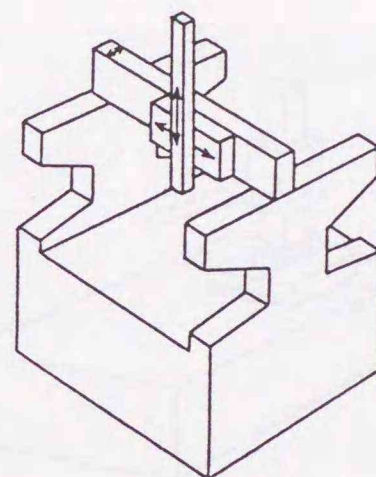
(a) ブリッジ・門移動形



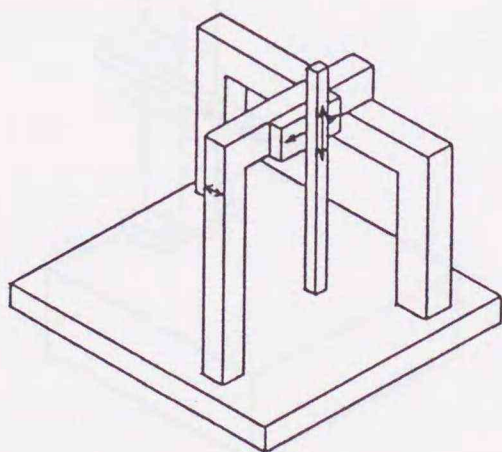
(b)ブリッジ・フロア形
(ガントリー形)



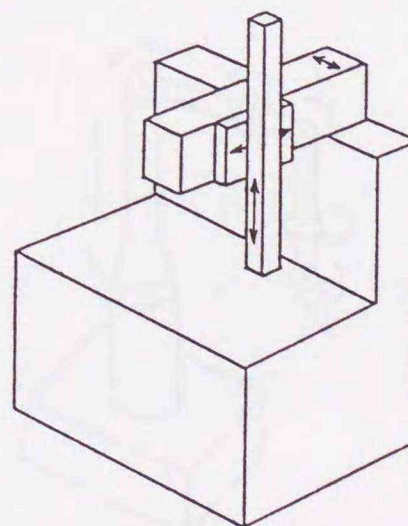
(c)固定ブリッジ形



(d)ブリッジ・ベッド形

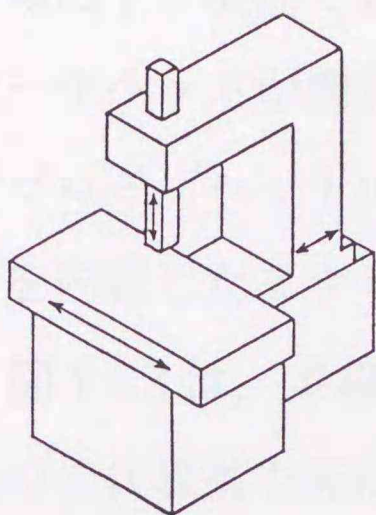


(e) L 形ブリッジ形

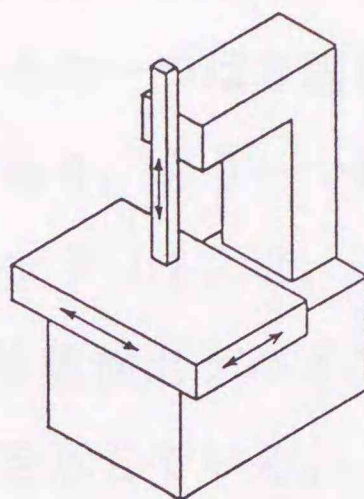


(f)カンチレバー Y 軸移動形

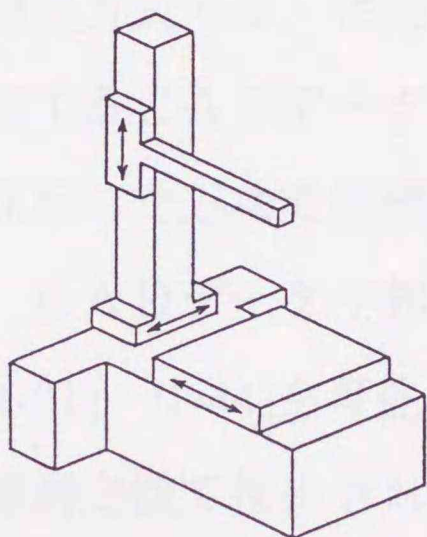
図 1-1 (その 1) 三次元座標測定機の構造 ([1-4]より)



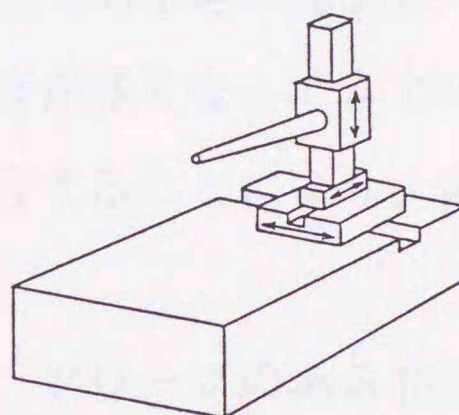
(g) シングルコラム・
コラム移動形



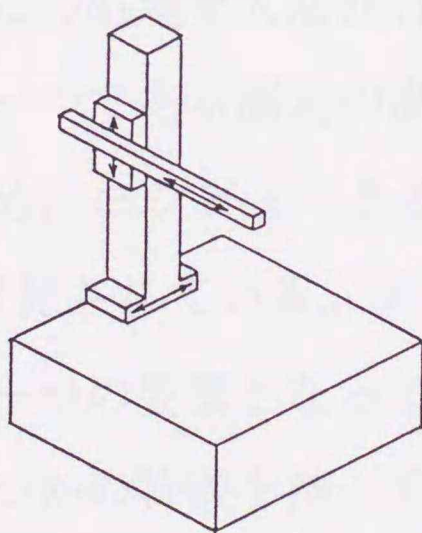
(h) シングルコラム・
X Y テーブル形



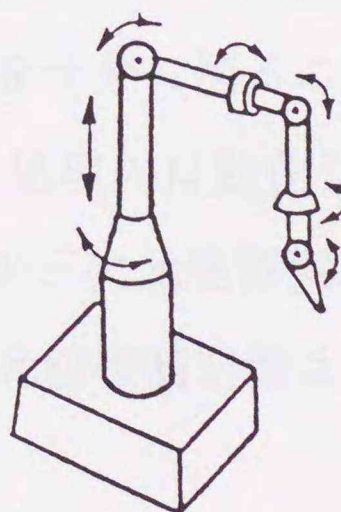
(i) ホリゾンタルアーム・
テーブル移動形



(j) ホリゾンタルアーム・
固定テーブル形



(k) ホリゾンタルアーム形



(l) 多関節形

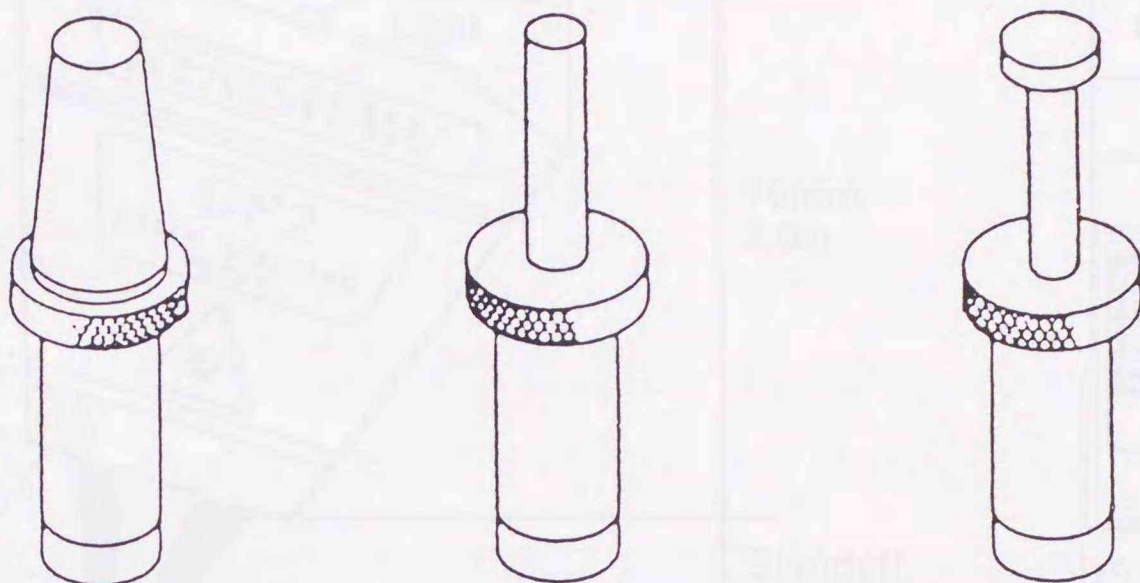
図1-1 (その2) 三次元座標測定機の構造 ([1-4]より)

プローブが多く用いられている。プローブを被測定物に接触させる際に、接触の瞬間を検出する機能と必要以上の衝突圧力を回避する機能を付加するため、プローブヘッドが開発されている。その一つは3箇所の電気接点を持つタッチプローブヘッド[1-28]－[1-30]であり、もう一つは内部にトランスデューサを内蔵したアナログプローブヘッド（1. 2. 1で詳述）である。また、図1-3は、半導体レーザと光位置検出デバイスを用いた三角測量法に基づく代表的な非接触式プローブを示している。

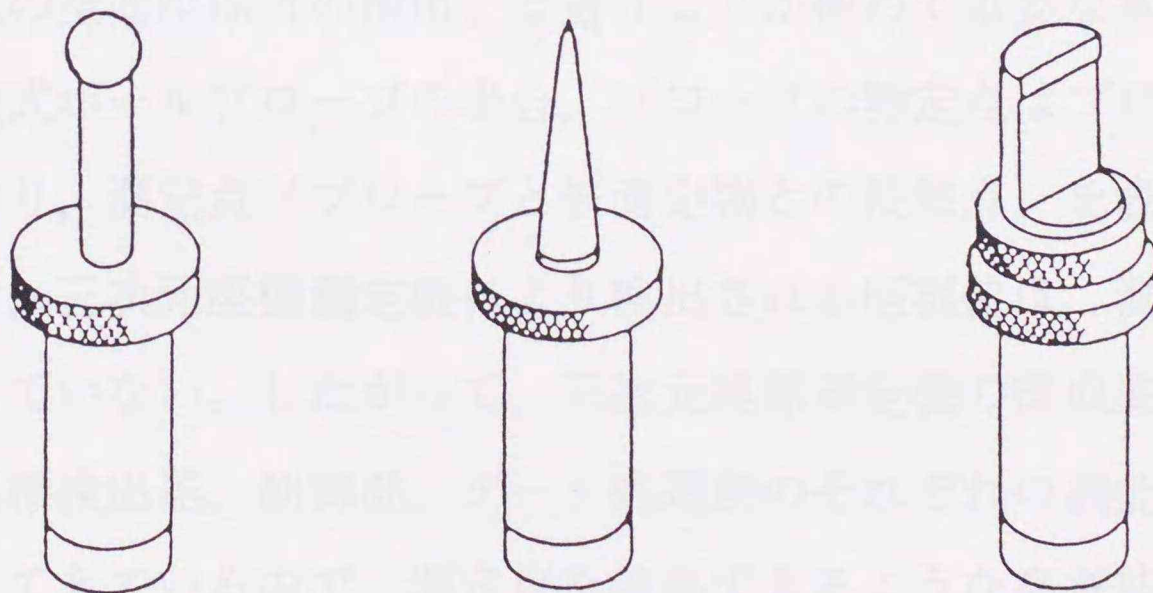
三次元座標測定機制御部に関し、初期の制御方式は、作業者が直接被測定物にプローブを移動し接触させて測定する手動制御であった。しかし、このような測定方式では、作業者が熟練を要する、高速測定が困難である、測定作業に対するCADデータの活用が困難である等の理由から、CNC制御方式を採用した三次元座標測定機の割合が多くなってきている。さらに最近では、CADデータや知識工学を結合することにより、高速高精度な自動測定[1-31]－[1-44]を可能としている。

三次元座標測定機で検出されるデータは、プローブのある特定点（球形状プローブの場合はプローブ球の中心点）の三次元空間座標値である。この座標値データを基に、測定目的を達成するためのデータ処理を行う必要があるが、この処理を人間が行っていたのでは、三次元座標測定機を導入する目的の一つである測定の高速度化・省人化を十分に図ることは困難である。このため、コンピュータを用いたデータ処理の自動化システム[1-45]－[1-48]が開発されている。データ処理機能が三次元座標測定機の付加価値を高める一つの要素となっており、各三次元座標測定機はデータ処理に関していくつかの特徴を持っている。

このように三次元座標測定機は、測定点検出器（プローブ）の特定点の空間座標値を高精度で高速に検出することを可能にしている。ここで、「プ



(a)テーパプローブ (b)円筒プローブ (c)ディスクプローブ



(d)ボールプローブ (e)ポイントプローブ (f)回転半径プローブ

図1-2 接触式プローブ ([1-24]より)

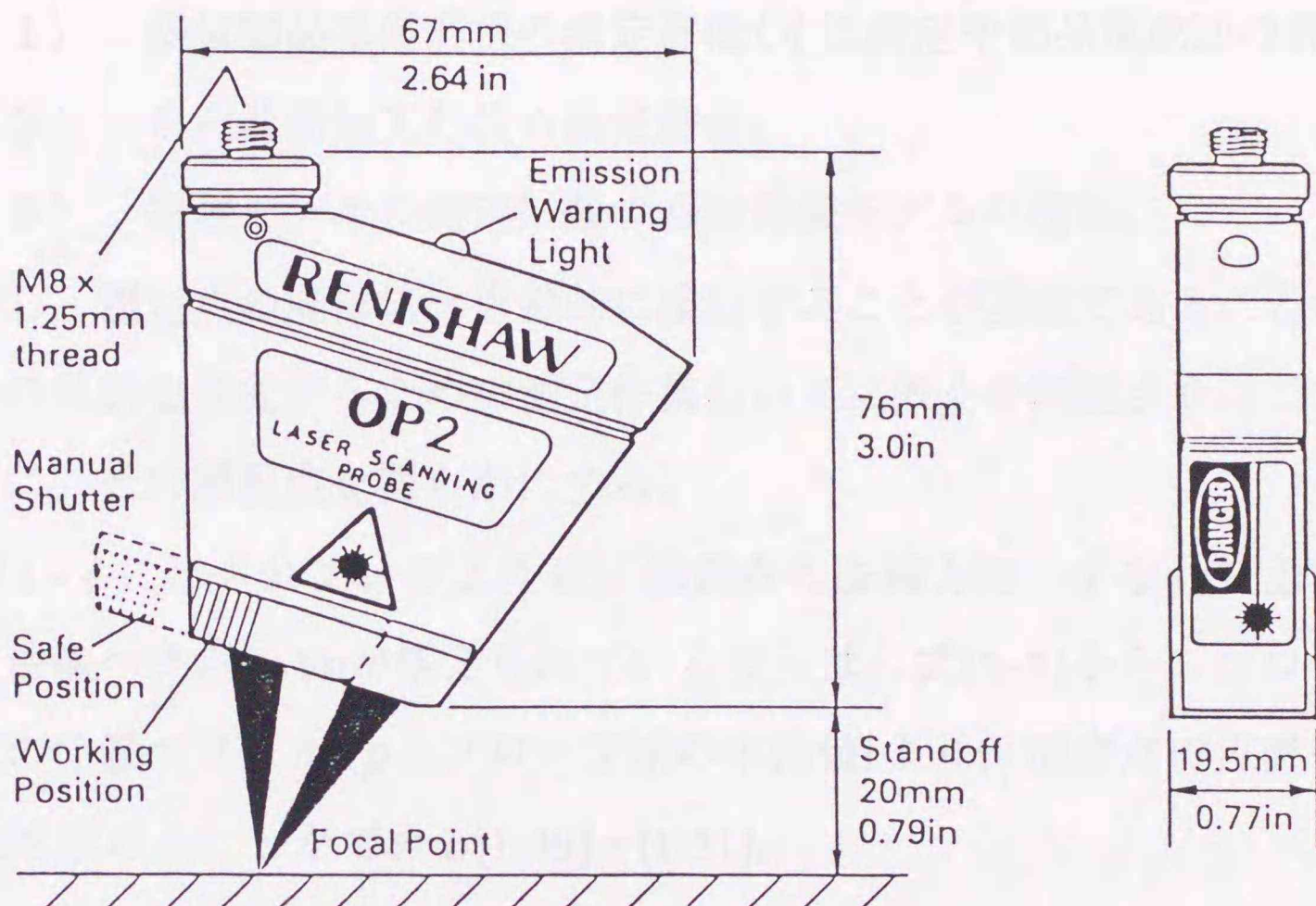


図1-3 代表的非接触プローブ
(RENISHAWカタログより)

プローブ特定点の空間座標値の検出」と言うことが極めて重要な意味を持っている。接触式ボールプローブの場合、プローブの特定点はプローブ中心点となっており、測定点（プローブと被測定物との接触点）を表していない。すなわち、三次元座標測定機により検出される座標値は、測定点の座標値を意味していない。したがって、三次元座標測定機の構成要素において、本体、座標検出器、制御部、データ処理部のそれぞれの機能レベルが高水準に達してきている中で、測定点を検出できるような高機能な測定点検出器（プローブ）の開発が望まれている。

以上述べてきたように、三次元座標測定機は、測定点の座標値を直接検

出することが容易ではない現状にありながらも、次の3つの目的を達成するため広く導入されてきている。

- (1) 機械部品基礎形状の測定評価(寸法測定や部品構成面の評価等)。
- (2) 自由曲面加工形状の測定評価。
- (3) 物理モデルの測定に基づく計算機モデルの構築。

しかし、測定点の座標値を直接的に検出することが困難であることから、上記の目的を達成するための測定作業において、多くの問題点を生じている。以下に、その問題点を明らかにする。

図1-4に示されているように、測定点の法線方向、すなわち測定点の単位法線ベクトル V_n が与えられているならば、式(1-1)から、プローブ中心点の位置ベクトル V_p とプローブ球の半径値 r より、測定点の位置ベクトル V_o を求めることができる[1-49]—[1-51]。

$$V_o = V_p - r \cdot V_n \quad (1-1)$$

しかし、一般に、測定点の単位法線ベクトルは与えられていない。したがって、機械部品基礎形状の測定評価として、平行平面間の距離測定や円筒・球の半径測定等を行う場合には、平面測定では平面の向きの指示、円筒面測定では内径・外径測定の指示、球面測定では凹球・凸球測定の指示を作業者が操作盤やキーボードなどから与えることなしには、測定目的を達成することができない。すなわち、三次元座標測定機により検出されるプローブ中心座標値を基に測定目的を達成するためのデータ処理を行う中で、プローブ半径値を補正するための情報を与える必要がある[1-52]。また、従来の測定方法では、厳密な意味において、円筒の測定評価(認識)を行うことは困難である(4.1.2で詳述)。

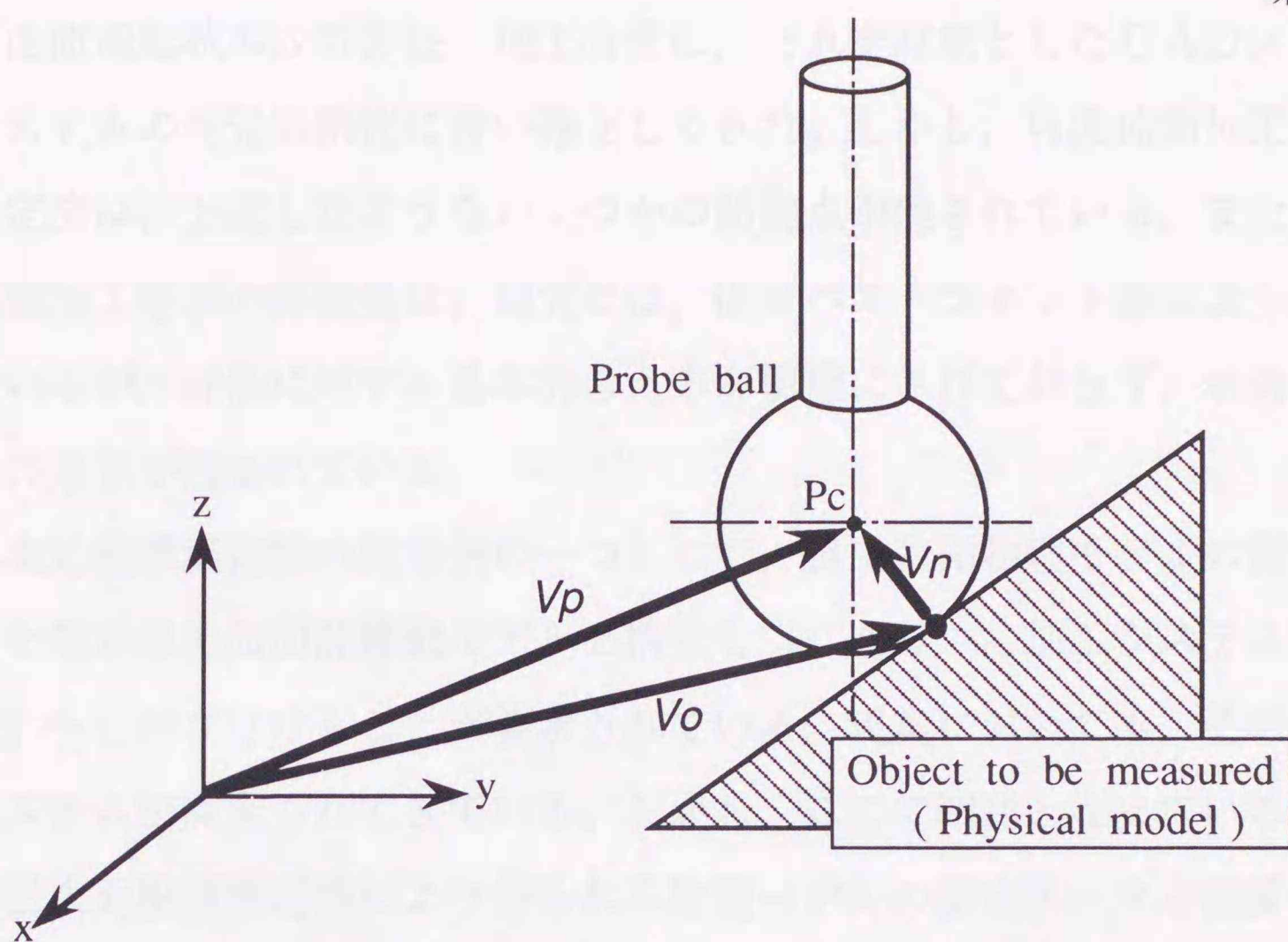


図1-4 測定点と検出点（プローブ中心点）の関係

機械部品基礎形状の測定評価においては，平面，円筒面，球面など，測定対象となっている形状を指定することにより，データ処理においてプローブ中心座標値に対するプローブ半径値補正のための情報を与えることが可能であった。しかし，自由曲面形状の測定では，プローブ中心座標値に対するプローブ半径値の補正情報を与えることが困難であるため，多点測定データから測定点座標値を推定する方法（1.2.1にて詳述）や，見かけ上半径ゼロのプローブを実現する方法（1.2.1にて詳述）が提案されている。しかし，実用上問題点もあり，新たな解決方法が望まれている。また，接触式プローブの測定点と検出点異なる問題を解決し高速測定を可能とする非接触プローブ[1-53]－[1-54]が提案されているが，被測定面の面性状が限定されている，測定精度が十分ではない，シャドー効果がある，などの問題点がある。

自由曲面形状の設計方法・加工方法は、それを対象としたCAD/CAMシステムの開発実用化に伴い確立してきた。しかし、自由曲面加工形状の測定法は、上述したようないくつかの問題点が残されている。また、自由曲面加工形状の評価法は、現実には、従来ベストフィット法により行われているが、評価に対する基本的考え方が明確にされておらず、有効な評価法の確立が望まれている。

三次元座標測定機の利用法の一つとして、自由曲面物理モデルの測定データを基に自由曲面計算機モデルを構築し（CAD）、加工システム（CAM）へと結び付けることが要求されている。現実においても、そのようなシステムが開発されてきている。しかし、ここで問題となっていることは、三次元座標測定機により得られる物理モデルの測定データと計算機モデルを構築するための自由曲面定義データが直接的に関連づけられていないため、計算機モデルの構築が容易ではないことである。

1. 1. 2 本研究の目的

前項（1. 1. 1）において、本研究の背景として、三次元座標測定機について、普及してきた理由、導入目的、構成要素について述べ、三次元座標測定機を用いた測定と測定データの応用におけるいくつかの問題点を指摘した。それらの問題点は次の4点にまとめることができる。

- （1） 測定点（プローブと被測定物の接触点）と検出点（プローブ中心点）が一致していない。すなわち、三次元座標測定機は、測定点からその法線方向にプローブ半径値だけオフセットされた点の検出を行っている。
- （2） 機械部品基礎形状の測定評価において、三次元座標測定機によ

り検出されるプローブ中心座標値に対してプローブ半径値を補正するための情報を与える必要がある。また、円筒の厳密な測定評価が困難である。

(3) 自由曲面物理モデルの測定法、および自由曲面加工形状の評価法が確立していない。

(4) 自由曲面物理モデルの測定データから、自由曲面計算機モデルを構築するための定義データを直接導くことが困難であるため、物理モデルの測定に基づく計算機モデル構築が容易ではない。

上記の(2)と(3)の問題は、(1)で示されたプローブと被測定物の接触点(測定点)位置の座標値を直接的に検出することが困難であることに主な原因がある。また、(4)の問題は、測定データに直接基づく曲面補間式を導くことで解決できる。

本研究は、上記の三次元座標測定機による測定とその測定データの応用に関する問題点を解決するため、三次元座標測定機の位置ベクトル検出機能に単位法線ベクトル検出機能を付加することにより、以下の5つの項目内容を実現することを目的としている。本研究では、以後、単位法線ベクトルを法線ベクトルと記することとする。

(1) 法線ベクトルの検出について：測定点の法線ベクトルの直接的検出を可能とする面法線プローブを提案し試作する。

(2) 位置ベクトルと法線ベクトルの測定について：法線ベクトル検出プローブを基にし、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを開発する。

(3) 機械部品基礎形状の測定評価について：位置ベクトルと単位法線ベクトルの検出に基づく機械部品基礎形状の測定評価法を提案し、基礎実験によりその有効性を確認する。

- (4) 自由曲面加工形状の測定評価について：位置ベクトルと単位法線ベクトルの検出に基づく自由曲面加工形状の評価法を提案し、計算機シミュレーションによりその有効性を確認する。
- (5) 自由曲面計算機モデルの構築について：位置ベクトルと単位法線ベクトルに基づく曲面パッチ定義式を提案し、同定義式により形成される曲面パッチの接続状態を検討する。

1. 2 関連する従来の研究と問題点

本研究は、前節で述べたような三次元座標測定機による物理モデル測定とその測定データの応用に関する問題点を解決するため、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルを直接的に検出可能とする測定システムを開発し、同システムを用いた応用計測として、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく機械部品基礎形状の測定評価法、自由曲面加工形状の測定評価法、自由曲面計算機モデルの構築法について提案している。本節は、本研究に関連する従来の研究の概要とその問題点について述べる。

1. 2. 1 位置ベクトルと法線ベクトルの検出

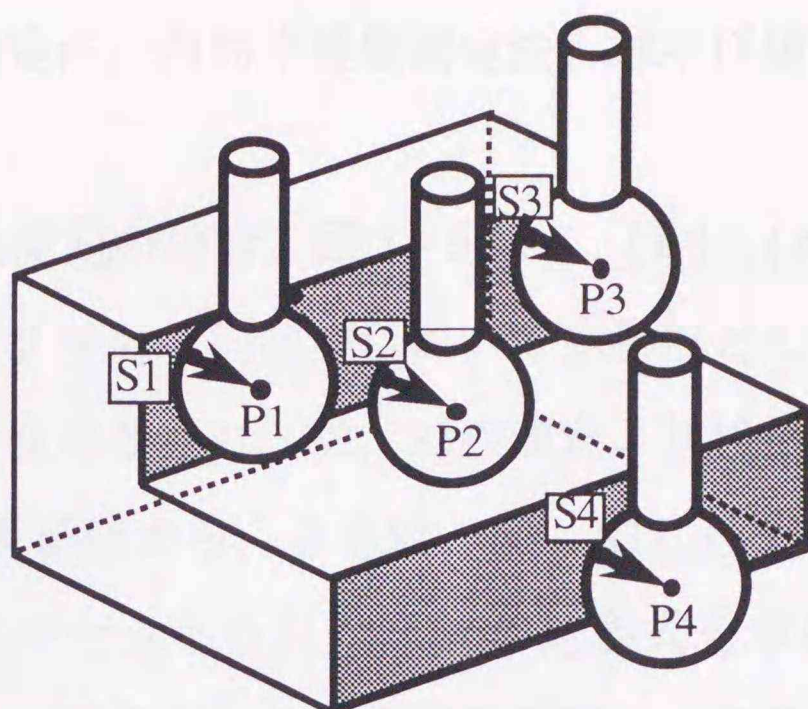
位置ベクトルと法線ベクトルの検出法は、間接的方法と直接的方法に大別できる。間接的方法とは、三次元座標測定機により、測定点からその点の法線方向にプローブ球の半径値だけオフセット（移動）された点の座標値を検出し、同座標値に対してプローブ球の半径値補正を行い、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルを推定する方法[1-55]－[1-56]である。しかしこの方法は、直接的に測定点の座標値を検出しておらず、プローブ半径値

補正のために多くの点の測定を必要とし、測定作業とデータ処理のために多大な時間を要し、複雑なソフトウェアを必要とするなどの問題を抱えている。

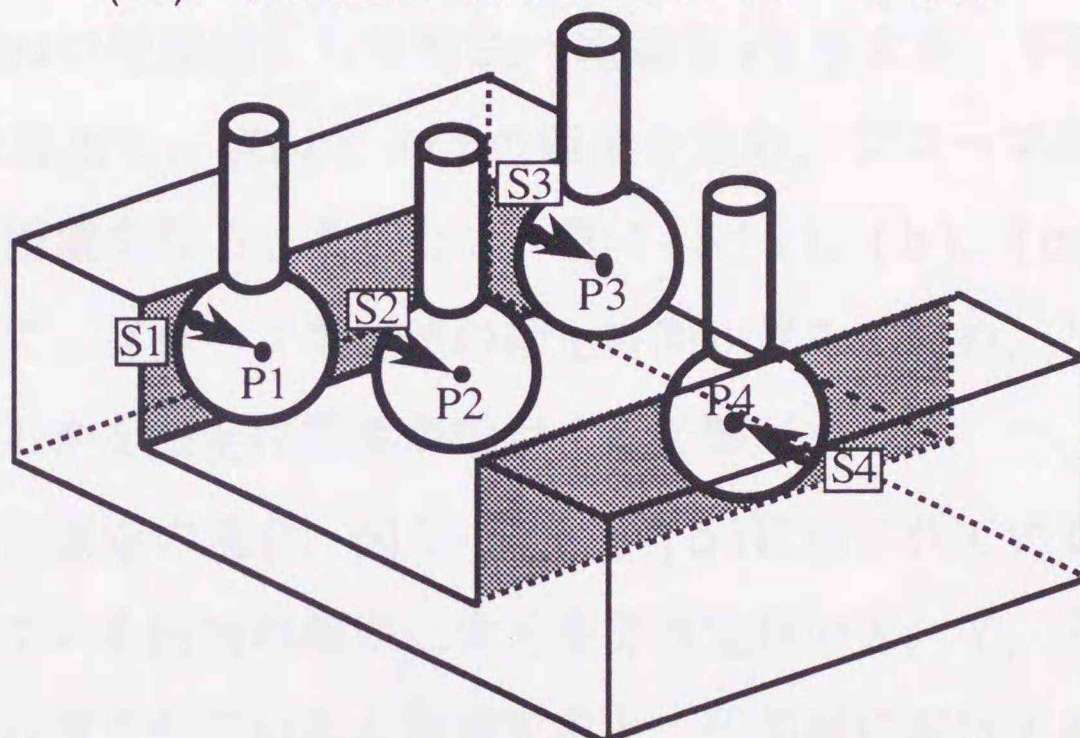
測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの直接的検出方法は二つある。その一つは、X、Y、Z方向へのプローブの微小移動を可能とした三次元アナログプローブヘッドにより見かけ上半径ゼロのプローブを実現すると同時に、X、Y、Z方向へのプローブの微小移動量から法線ベクトルを検出し、三次元座標測定機によりプローブ仮想点の位置ベクトルを検出する方法[1-57]～[1-74]である。もう一つは、測定時に被測定物よりプローブが受ける接触圧のX、Y、Z方向の分力から法線ベクトルを検出し、三次元座標測定機より得られるプローブ中心座標値を用いて、1. 1. 1において示した式(1-1)に基づき測定点の位置ベクトルを算出する方法[1-75]～[1-78]である。三次元アナログプローブヘッドを用いる方法は、その構造が複雑で小型化が困難であり、またプローブを支持する方向に制限があるなどの欠点がある。接触圧に基づく方法では、適当な大きさの接触圧を必要とするため、測定時において被測定物に接触圧によるプローブの接触傷を形成する、あるいは接触方向により接触圧によるプローブ軸のたわみ量が異なり測定誤差の原因となるなどの問題点がある。

1. 2. 2 機械部品基礎形状の測定評価

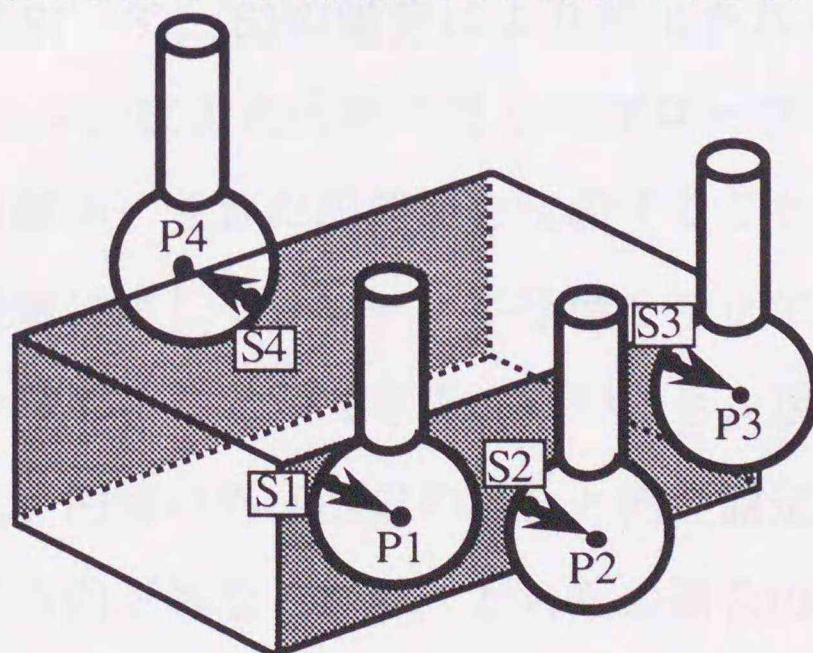
三次元座標測定機の制御部にあらかじめ内蔵されている機械部品基礎形状の測定評価のためのデータ処理プログラムは、何らかの測定条件を必要としている。ここでは、代表的な機械部品基礎形状の測定評価法として、



(a) 被測定面の法線方向が同一の場合



(b) 被測定面の法線方向が内側に向き合う場合



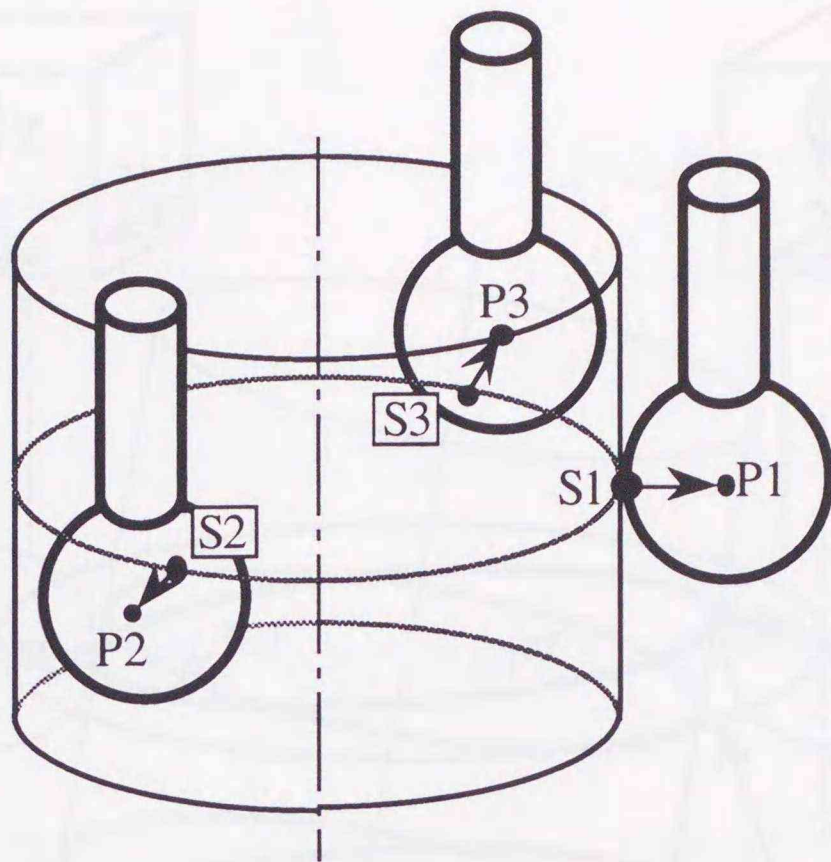
(c) 被測定面の法線方向が外側に反対向きの場合

図1-5 平行平面間距離測定

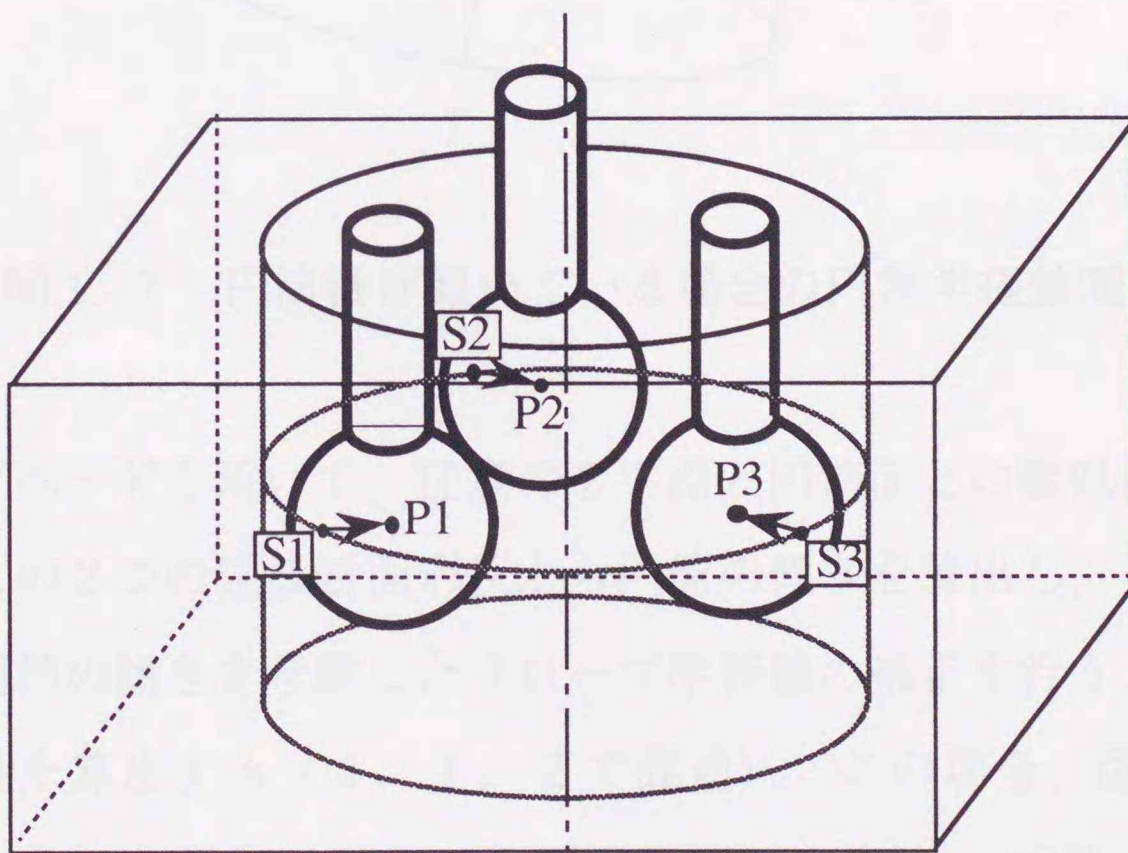
平行平面間距離測定法，円筒半径値測定法，球半径値測定法を取り上げ検討を行う。

平行平面間距離測定の場合，図1-5(a)，(b)，(c)に示されているように，測定対象の2平面（同図中において陰影部として表示）に関して，その1平面上の任意の3点 S_1 ， S_2 ， S_3 の測定より検出されるプローブ中心点 P_1 ， P_2 ， P_3 の座標値から，3点 S_1 ， S_2 ， S_3 に対して，法線方向にプローブ半径値だけオフセットされた面 So の定義式を求める。次に測定対象となっているもう一方の平面の1点 S_4 を測定し，これより検出されるプローブ中心点 P_4 の座標値から平面 So へ垂線 L_n を与える。平面 So と直線 L_n の交点 C_p を算出し，点 P_4 と点 C_p の距離を求め，プローブ半径値を補正し平行平面間距離を得る。このとき，図1-5(a)，(b)，(c)のそれぞれの場合において，プローブ半径値の補正方向が異なるため，どの場合の測定を行っているかを測定作業者が指示する必要がある。

円筒半径値測定の場合，図1-6(a)，(b)に示されているように，測定対象となっている円筒の軸が三次元座標測定機の X ， Y ， Z のいずれかの軸に平行に設置されていると仮定すると，円筒軸に直行する平面内で円筒面上の任意の3点 S_1 ， S_2 ， S_3 の測定により検出されるプローブ中心点 P_1 ， P_2 ， P_3 の座標値から，被測定円筒に対してプローブ半径値だけオフセット（拡大あるいは縮小）された円筒面を定義することができる。これより得られた円筒半径値に対してプローブ半径値を補正することにより，被測定円筒の半径値を求めることができる。このとき，図1-6(a)，(b)に示されているように，円筒の外径測定の場合と内径測定の場合により，プローブ半径値の補正方向が異なるため，どちらの場合の測定を行っているかを測定作業者が指示しなければならない。また，被測定円筒の軸の傾きが特定できない条件においては，図1-7に示されているように，アナロ



(a) 外径測定の場合



(b) 内径測定の場合

図 1 - 6 円筒半径値測定

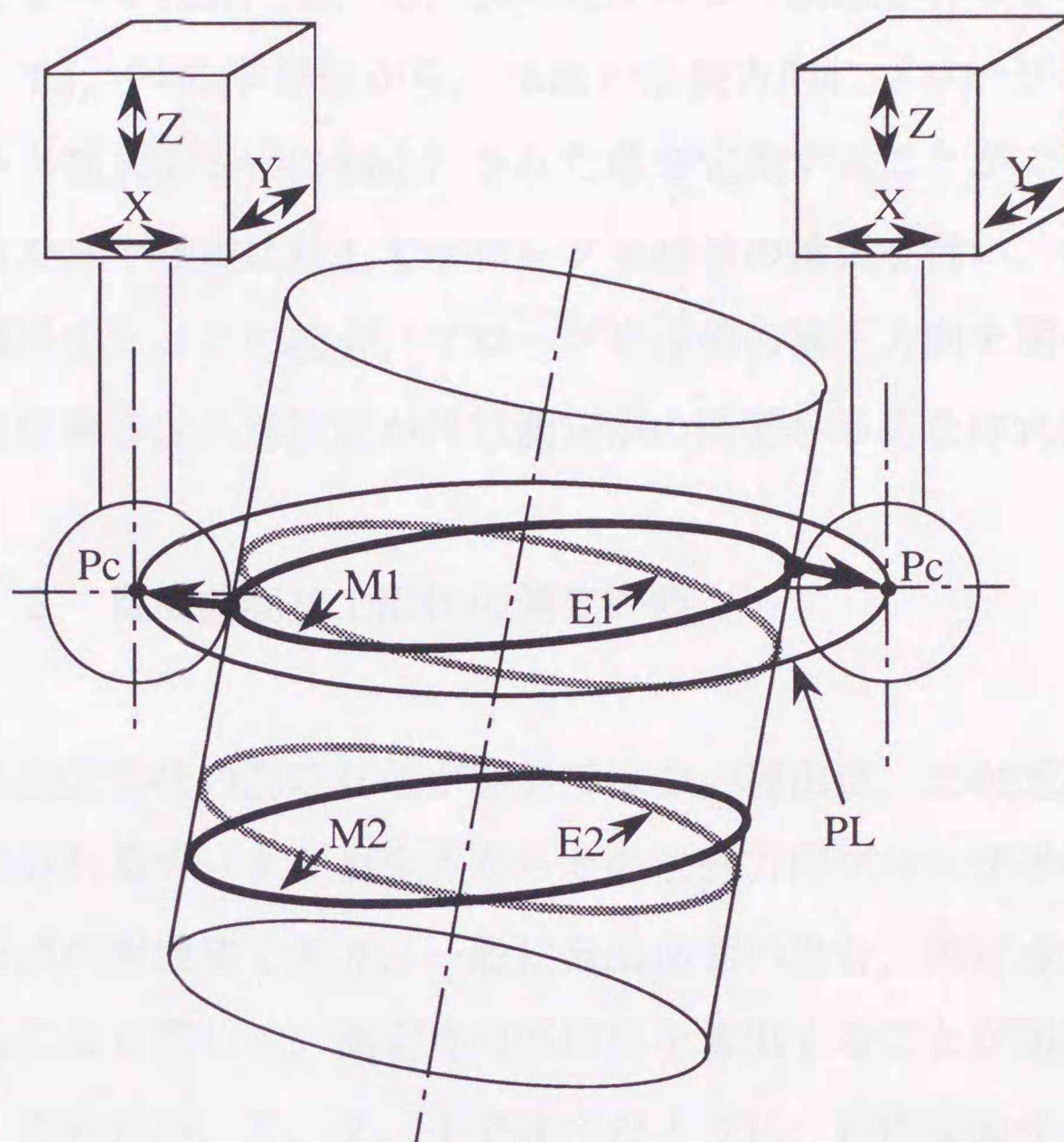


図1-7 円筒軸が傾いている場合の円筒半径値測定

グローブヘッドを用いて、任意の2平面と円筒面との疑似断面形状を測定する。この2つの疑似断面形状から円筒の傾きを算出し、疑似断面形状に対して円筒の傾きを考慮したプローブ半径値の補正を行うことにより、円筒半径値を算出する（4.1.2で詳述）。この場合、図1-7に示されているように、測定されるべき断面形状E1, E2は、円筒の傾きにより疑似断面形状M1, M2として得られるため、複雑なデータ処理アルゴリズムが必要となる。また、プローブ半径値補正を行うため、内径測定か外径測定かの情報を与えなければならない問題も残されている。

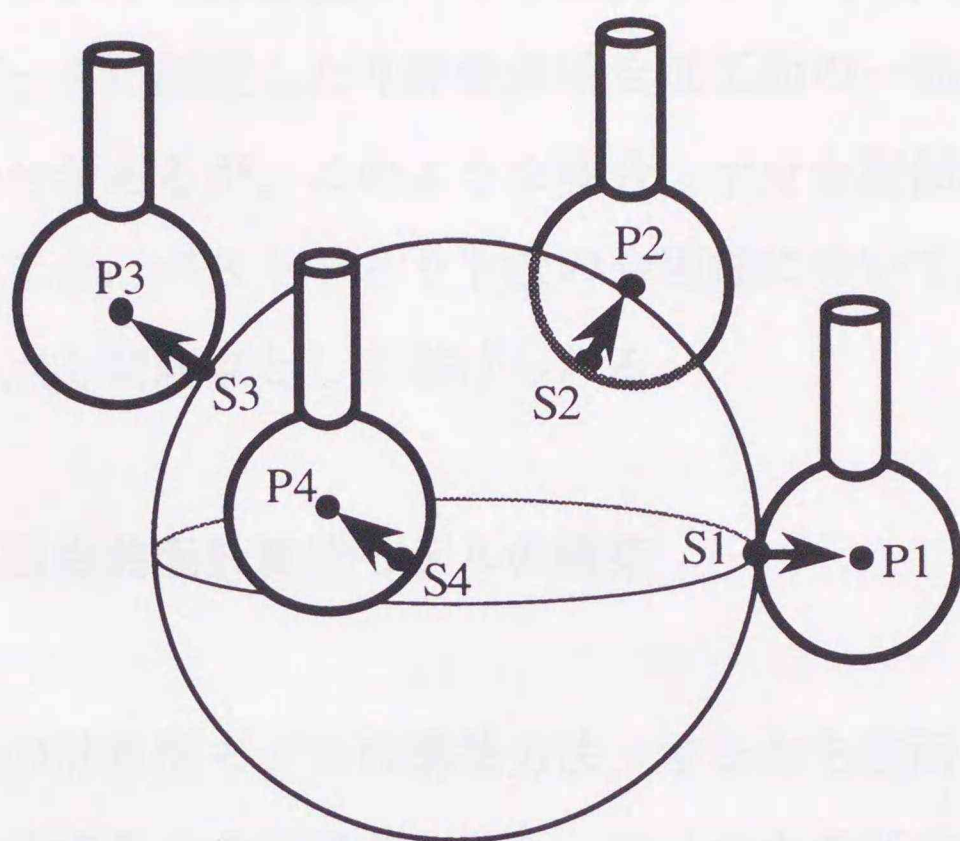
球半径値測定の場合、図1-8(a), (b)に示されているように、測定対

象面上の任意の4点 S_1, S_2, S_3, S_4 の測定により検出されるプローブ中心点 P_1, P_2, P_3, P_4 の座標値から、球面の法線方向にプローブ半径量だけオフセット（拡大あるいは縮小）された球を定義することができる。これより得られた球半径値に対してプローブ半径値の補正を行い、被測定球の半径値を算出する。この場合、プローブ半径値の補正方向を明らかにするため、測定作業者は凸球測定か凹球測定かの情報を与えなければならない。

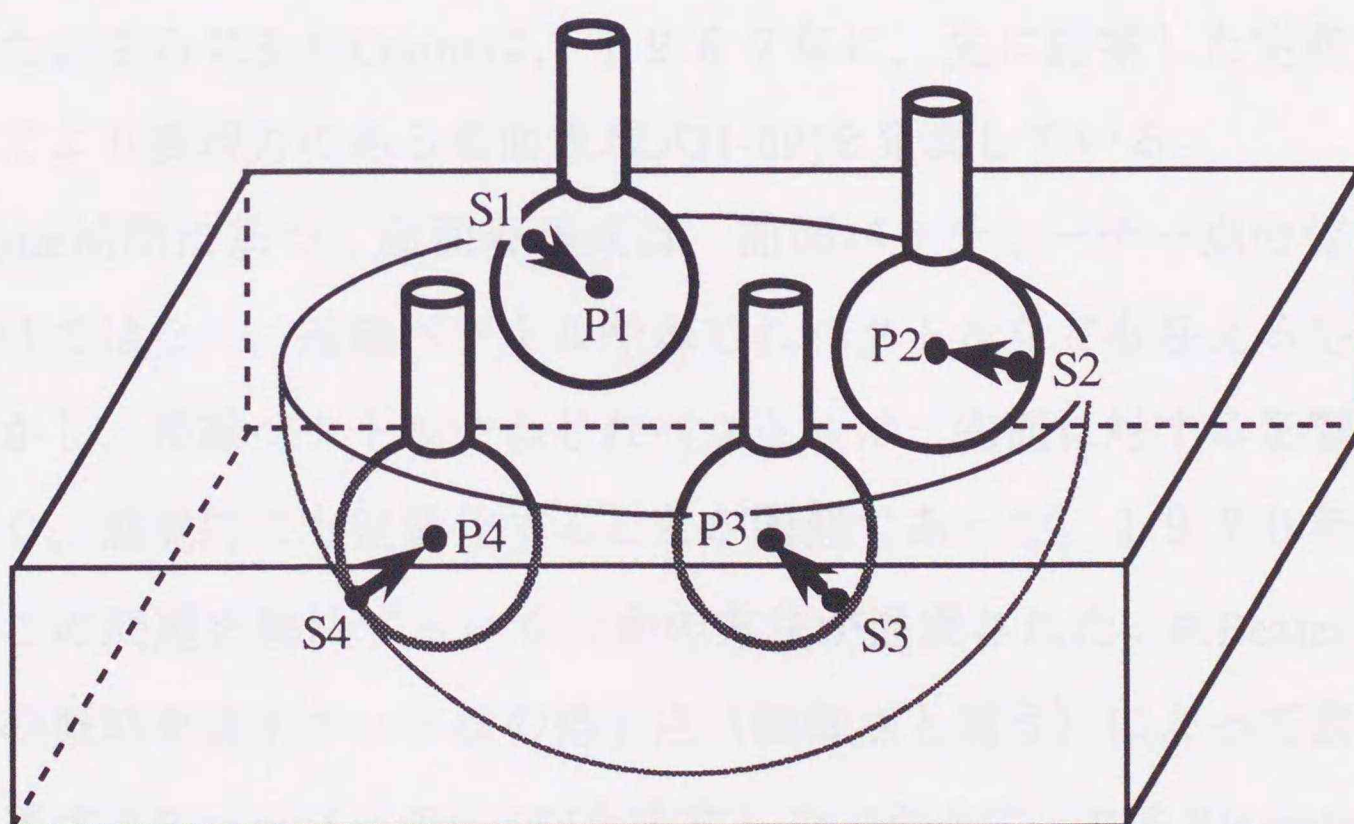
1. 2. 3 自由曲面加工形状の測定評価

自由曲面加工形状の測定評価が容易ではない理由は、三次元座標測定機により検出されるデータが測定点からその法線方向プローブ半径値オフセットされた点の座標値であり、一般に自由曲面の場合、測定点の法線方向を特定することが難しく、測定点の座標値を算出することが困難であることである。このため、1. 2. 1で述べたように、被測定面からプローブ半径値だけオフセットされた面の多点測定データから推定する方法や、アナログプローブヘッドを用いる方法により、自由曲面加工形状面の位置ベクトルの測定が行われている。

このようにして得られた加工面の多点位置ベクトルデータを基にした自由曲面加工形状の評価方法として、従来、ベストフィット法[1-79]—[1-86]が採用されている。ベストフィット法は、設計形状に対して加工形状の並進移動と回転移動を許容している。すなわち同評価法は、その評価手順において、多点測定位置ベクトル値に対して並進変換および回転変換を行いながら、設計形状に最接近させたときの加工形状の測定位置ベクトル値と設計形状の位置ベクトル値の差を求め、これより加工形状の評価を行っている。このとき、測定データに対して並進変換と回転変換を行う際、評価



(a) 凸球測定の場合



(b) 凹球測定の場合

図 1 - 8 球半径値測定

対象データ（評価対象測定点）を測定位置ベクトルの全データとした場合、多大な計算時間と多くの計算機メモリを必要とするため、評価対象データを一部の点列データに限定したり評価領域を加工面的一部分に限定したりして行われる場合があるが、このような場合、十分な評価が行われたとは判断しがたい。また、ベストフィット法の合理性について、十分な検討がなされていない点も問題点として挙げられる。

1. 2. 4 自由曲面計算機モデルの構築

自由曲面形状の計算機モデルの構築方法、すなわち曲面パッチの定義式に関して、これまで多くの研究がなされ、いくつかの形式が提案されてきた。1964年、J.C.Ferguson, S.A.Coonsは、曲面パッチの概念を導入し、Hermite補間関数を用いたパラメトリックな曲面の表現式[1-87]—[1-88]を考案した。さらにS.A.Coonsは、1967年に、先に提案した定義式を基礎としてより表現力のある曲面表現式[1-89]を発表している。

Hermite補間に基づく曲面表現式は、曲面パッチコーナー点の位置ベクトルだけではなく、接線ベクトルやねじれベクトルなども与える必要がある。しかし、接線ベクトルやねじれベクトルは、曲面に対する影響の予測が難しく、感覚的にも定量化することが困難であった。1970年代になると、この問題を解決するいくつかの方法が提案された。P.Bezierは、曲面形状の概略を表すネット状の格子点（制御点と言う）によって曲面パッチを定義するBezierパッチ[1-90]を提案した。さらに、R.F.Riesenfeldは、パッチの部分的微小制御を容易にしたB-splineパッチ[1-91]を提案した。

Bezierパッチ、B-splineパッチは、FergusonやCoonsの曲面パッチと比較し、ダイナミックな曲面形状の構築を容易にしているが、いずれにしても、

その定義式には接線ベクトルやねじれベクトルに等価な制御点を含んでいる。特に、ねじれベクトルは、その定量化が困難であったため、Forrest[1-92], Adini, Brown[1-93], Gregory[1-94], 千代倉[1-95]らは、ねじれベクトルを自動的に決定あるいは推定する方法を提案した。

しかしながら、接線ベクトルを定量化するという困難な問題は、解決されず以前として残されている。接線ベクトルとねじれベクトルは、設計図面から読み取ることも、物理モデルから直接観察（測定）することも困難である。したがって、自由曲面パッチの定義式が接線ベクトルやねじれベクトルにより定義されることは、設計図面の読み取り値や自由曲面形状物理モデルの測定値から直接計算機モデルを構築することを困難にしている。物理モデル測定値から直接計算機モデルを構築することに対する要求は極めて高く、未だに解決されない問題点として残されている。

1. 3 本論文の概要

本論文は、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく加工形状の測定法と評価法に関する研究について述べている。全体の構成は、図1-9に示している通りである。第1章は緒論であり、本研究の背景と目的、関連する従来の研究と問題点などについて述べている。第2章と第3章は、位置ベクトルと法線ベクトルの検出方法を述べており、第4章、第5章および第6章は、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく応用計測として、機械部品基礎形状の測定評価、自由曲面加工形状測定評価、自由曲面計算機モデル構築についてそれぞれ述べている。第7章は結論であり、本研究で得られた結果を総括している。第2章から第6章の概要は、以下に示す通りである。

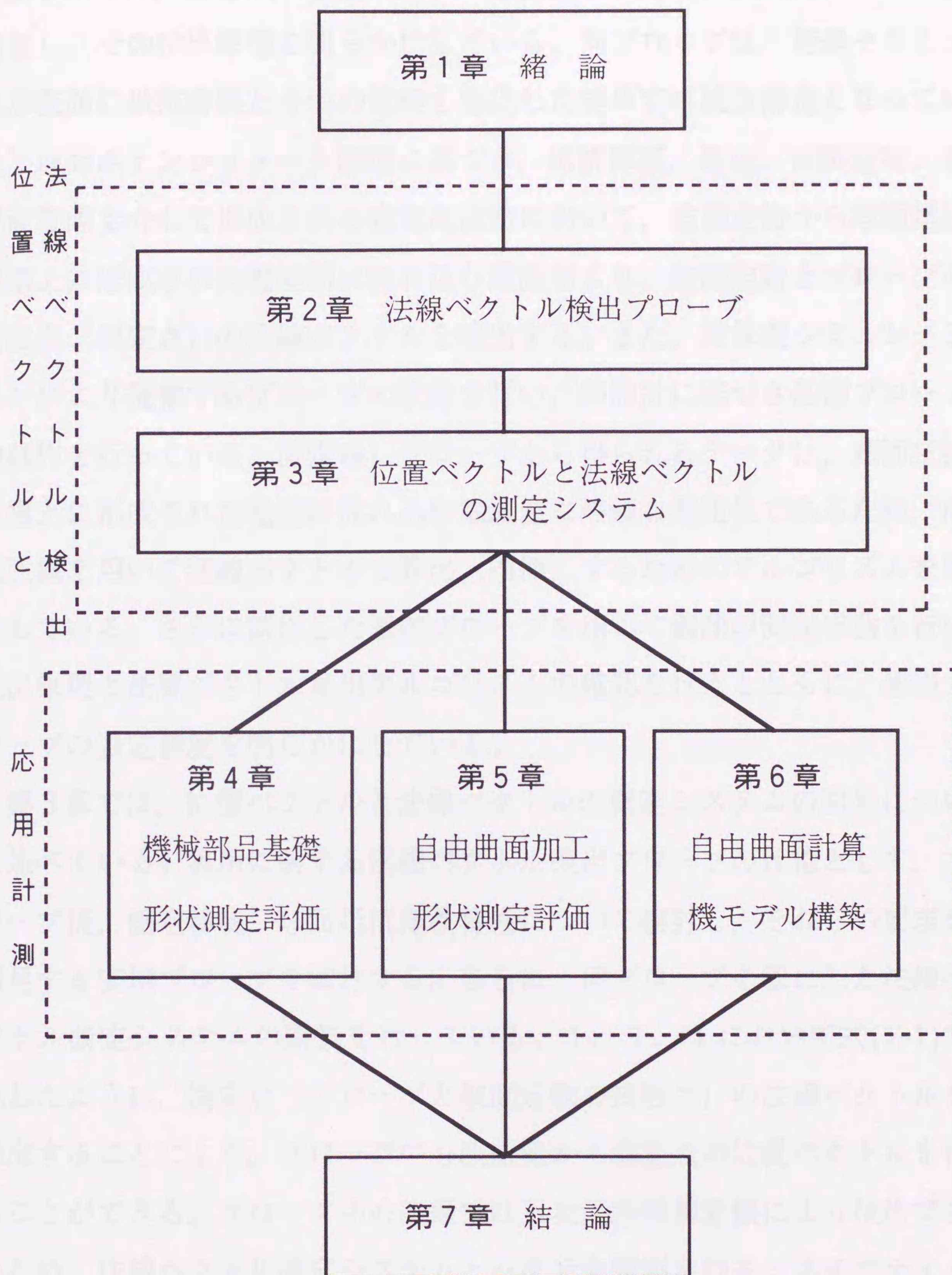


図1-9 本論文の全体構成

第2章では、測定点の法線ベクトルを検出するための接触式プローブを提案し、その検出原理を明らかにしている。同プローブは、絶縁セラミック球表面に抵抗薄膜と4つの電極を形成した極めて単純な構造となっている。球面ポテンショメータ原理に基づき、抵抗薄膜、電極、被測定物、定電流電源を介して形成される定電流回路において、被測定物から球面抵抗薄膜上に形成された電極間に流れ込む電流値より、被測定物とプローブの接触点（測定点）の法線ベクトルを検出する。また、計算機シミュレーションにより提案するプローブの設計を行い、同設計に基づき基礎プローブの試作を行っている。測定時にプローブから得られるデータは、球面抵抗薄膜上に形成された電極に流れ込む電流値に等価な電圧値であるため、同電圧値を用いて法線ベクトルを算出（内挿）するためのアルゴリズムを提案している。さらに試作した基礎プローブを用いて鋼球の測定実験を行い、検出原理と法線ベクトル算出アルゴリズムの確認を行うとともに、基礎プローブの測定精度を明らかにしている。

第3章では、位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムの開発について述べている。実用に適する法線ベクトル検出プローブの仕様として、プローブ径、測定精度、球面抵抗薄膜特性について検討し、それらの要求を満足する実用プローブを試作する。さらに、同プローブを基にした法線ベクトル測定システムの開発を行っている。1. 1. 1において式(1-1)で示したように、測定点（プローブと被測定物の接触点）の法線ベクトルを検出することにより、プローブ中心座標値から測定点の位置ベクトルを得ることができる。プローブ中心座標値は三次元座標測定機により検出できるため、法線ベクトル測定システムと三次元座標測定機をシステムティックに結合することにより、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを開発している。また、開発した測定システムの測定精度を明らか

にしている。

第4章では、第3章で開発した位置・法線ベクトルの測定システムによる応用計測（その1）として、機械部品の主要な構成要素である平面、円筒、球の位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく測定評価法の提案を行っている。同時に、従来の位置ベクトル検出に基づく平面、円筒、球の測定評価における問題点を明らかにし、提案する測定評価法と従来の測定評価法の比較を行っている。また、同測定システムを用いて平面、円筒、球の測定評価実験を行い、測定精度について検討し、提案する測定評価法の有効性について確認を行っている。

第5章では、位置・法線ベクトルの測定システムを用いた応用計測（その2）として、自由曲面加工形状の測定評価法の提案を行っている。提案の中で、自由曲面加工形状の測定評価における基本的な考え方を明らかにしている。また、自由曲面を意匠曲面と機能曲面に分類し、それぞれの曲面の評価項目を明らかにしている。設計形状から加工形状への写像を座標変換としてモデル化し、加工形状の評価と座標変換の関係を明らかにするとともに、従来自由曲面加工形状の評価法として採用されているベストフィット法と提案する評価法との比較を行い、その違いを明らかにしている。また、測定評価の基本的な考え方を実現するための評価手順を提案し、計算機シミュレーション実験により、提案した評価手順の有効性を確認している。

第6章では、位置・法線ベクトルの測定システムを用いた応用計測（その3）として、位置ベクトルと法線ベクトルに基づく自由曲面形状計算機モデルの構築法の提案を行っている。従来の曲面パッチ定義式は、パッチコーナー点の位置ベクトルのみならず、接線ベクトルやねじれベクトル、あるいはこれらのベクトルに等価な制御点を必要としていた。したがって、

物理モデルの測定データ（位置ベクトル）を直接用いて計算機モデルを構築することが困難であり，自由曲面計算機モデルを構築することが容易ではなかった。この問題を解決するため，本研究で開発した測定システムにより得られる位置ベクトルと法線ベクトルを直接用いて定義可能な曲面パッチ定義式を提案している。また，同曲面パッチ定義式により構築される自由曲面計算機モデルの曲面パッチ間における位置ベクトルと接線ベクトルの連続性について数式的に検討するとともに，同曲面パッチの加工面（物理モデル）を切削加工により形成し，その観察からパッチ間の接続状態が滑らかであることを確認している。

謝 辞

本論文は、筆者が昭和60年5月から昭和61年2月に、文部省内地研究員として、北海道大学工学部精密工学科精密加工学第一講座で行った研究を基礎としてその後発展させてきた研究をまとめた結果であります。この間、多くの諸先生、友人、知人、関係各位から御指導、御助言を賜りました。

とりわけ、北海道大学工学部教授 岸浪建史 博士からは、本研究の遂行ならびに本論文のまとめにあたり、文部省内地研究員としてお世話になって以来、研究に対する心構えや姿勢、研究の方法、研究論文の書き方など研究の基礎から終始御指導、御鞭撻を賜りました。また、北海道大学工学部教授 斎藤勝政 博士からは、本研究の意義や重要性の観点から、本研究に対して極めて有用な示唆と激励を頂きました。ここに、両先生に対しまして謹んで感謝の意を表し、厚く御礼申し上げる次第であります。

本論文に対しまして詳細な御検討を賜り、有益な御教示と御助言を頂きました北海道大学工学部教授 池田正幸 博士、鵜飼隆好 博士に厚く御礼申し上げます。

また、本研究に対しまして多大な励ましを頂き、今日まで公私にわたり一方ならず御指導、御援助を賜りました北海道大学工学部助教授 三好隆志 博士（平成3年10月より大阪大学工学部教授）に心から感謝申し上げます。また、実験を行うにあたり、北海道大学工学部精密工学科精密加工学第一講座および精密機器学第二講座の皆様、特に金井理氏（現在、東京工業大学工学部助教授）、榎原弘之氏、近藤司氏、田中文基氏には多くの御助言と御協力を頂きました。皆様に厚く御礼申し上げます。

最後に、実験を進めるにあたり御助言を賜りました株式会社東京精密

坂井真氏に感謝いたします。また、株式会社ニコン 河合正治氏、笹川孝市氏には、プローブの試作と実験機器の御協力を頂くとともに、貴重な御指導を賜りました。この場をお借りして深く感謝申し上げる次第であります。

- 11-2) 佐藤文雄, 地球物理学的な重力測定, 地球物理, Vol.30, No.13, 1986年, p87.
- 11-3) 伊藤真樹, 重力測定, 地球物理, Vol.35, No.10, 1987年, p85.
- 11-4) 佐藤文雄, 重力測定, 地球物理, Vol.34, No.10, 1986年, p85.
- 11-5) K. J. van, C. J. van, Gravity Measurements, HENDON TECHNICAL JOURNAL, 1971年, p78.
- 11-6) 坂井真, 重力測定, 地球物理, Vol.39, No.7, 1973年, p75.
- 11-7) 坂井真樹, 重力測定, 地球物理, Vol.39, No.7, 1973年, p75.
- 11-8) 坂井真樹, 重力測定, 地球物理, Vol.39, No.7, 1973年, p75.
- 11-9) 坂井真樹, 重力測定, 地球物理, Vol.39, No.7, 1973年, p75.
- 11-10) 坂井真樹, 重力測定, 地球物理, Vol.39, No.7, 1973年, p75.

参 考 文 献

- [1- 1] 中野義平：生産現場（F A 工場）における三次元測定機の役割，機械と工具，Vol.30, No.12, 1986年，p65.
- [1- 2] 藤岡慶宣：三次元測定機によるインライン測定の実際，機械と工具，Vol.30, No.12, 1986年，p87.
- [1- 3] 伊藤嘉朗：三次元測定機のシステム化，機械技術，Vol.35, No.16, 1987年，p26.
- [1- 4] 日本規格協会：三次元座標測定機の精度試験方法，JIS B 7440, 1987年.
- [1- 5] R.B.Zipin, G.L.Tumbush：Effects of Geometry Errors on the Performance of Precision Coordinate Measuring Machines, BENDIX TECHNICAL JOURNAL, SPRING 1971年，p28.
- [1- 6] 横山豊，谷口正美：工業用三次元測定器の現状，精密機械，Vol. 39, No.7, 1973年，p664.
- [1- 7] 味岡成康：三次元測定器の機構，精密機械，Vol.39, No.7, 1973年，p25.
- [1- 8] 宮本克己：三次元座標測定機の精度表示と総合精度との関連，精密機械，Vol.39, No.7, 1973年，p710.
- [1- 9] 広瀬藤司，宮本克己：三次元測定機の精度試験と測定環境，精密機械，Vol.39, No.7, 1973年，p718.
- [1-10] 横山豊：工業用三次元測定器一覧表，精密機械，Vol.39, No.7, 1973年，p741.

- [1-11] Tilo PFEIFER, Manfred BAMBACH, Arnold FURST : Ermittlung der Meßunsicherheit von 3-D-Meßsystemen, Technisches Messen tm, No.2, 1979年, p47.
- [1-12] 小美濃武久 : 三次元測定のリック(腕)について一腕を用いた極座標(多関節)型三次元測定器一, 計量管理, Vol.31, No.10, 1982年, p31.
- [1-13] H.Kunzman, F.Waldele : On Testing Coordinate Measuring Machines(CMM) with Kinematic Reference Standards(KRS), Annals of the CIRP, Vol.32, No.1, 1983年, p465.
- [1-14] 水原清司, 宮島勇, 浅野雄, 竜江義孝, 藤川昭雄 : 三次元測定機の測定精度向上について, 機械技術研究所所報, Vol.37, No.3, 1983年, p1.
- [1-15] Ben Nagler : Measuring up: Coordinate measuring machine survey, Tooling & Production, May, 1983年, p40.
- [1-16] 水原清司 : 3次元測定機の精度試験と精密測定, 応用機械工学, Vol.24, No.10, 1983年, p56.
- [1-17] ジュン 軍, 大園成夫, 高増潔 : 三次元座標測定機の案内精度の測定試験と精度検討, 精密機械, Vol.50, No.3, 1984年, p556.
- [1-18] 小美濃武久 : 多関節型三次元測定器の機能と性能評価, 標準化と品質管理, Vol.37, No.5, 1984年, p26.
- [1-19] G.Zhang, R.Veale, T.Charlton, B.Borchardt, R.Hochen : Error Compensation of Coordinate Measuring Machines, Annals of the CIRP, Vol.34, No.1, 1985年, p445.

- [1-20] 垣野義昭, 岩本祐一, 井原之敏, 亀井明敏, 伊勢徹: 誤差ベクトルによる3次元測定機の補正とD B B検査法の評価, 精密機械, Vol.51, No.6, 1985年, p1244.
- [1-21] 松田次郎, 矢野宏: 三次元座標測定機における誤差解析, 精密工学会, Vol.52, No.8, 1986年, p1313.
- [1-22] 深海義雄: 三次元測定機の精度と表示, 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p77.
- [1-23] 小美濃武久: 多関節形三次元測定機の機能と使用例, 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p52.
- [1-24] 日本機械学会: 機械加工計測技術, 朝倉書店, 1986年, p105.
- [1-25] 日本工業規格: 三次元座標測定機の精度試験方法 B 7440, 1987年.
- [1-26] 戸塚泰: 三次元測定器の検出器, 精密機械, Vol.39, No.7, 1973年, p676.
- [1-27] 福井三郎兵衛: 三次元測定機用プローブの機能: 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p91.
- [1-28] 日本機械学会: 機械加工計測技術, 朝倉書店, 1986年, p106.
- [1-29] 福井三郎兵衛: 三次元測定機用プローブの機能: 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p91.
- [1-30] 丸山六男: 三次元測定機の測定誤差に関する考察, 長野県精密工業試験場事業紀要, Vol.37, No.42, 1984年, p37.
- [1-31] Shinji KAWABE, Fumihiko KIMURA, Toshio SATA: Automatic Genaration of NC Commands for 3-Coordinate, Proceeding of the 4th International Conference on Production Engineering, 1980年, p941.

- [1-32] 杉達雄, 生駒敏郎: 3次元計測機のCNC化・ソフトウェアの動向, 機械設計, Vol.31, No.1, 1987年, p37.
- [1-33] 中谷忠雄: 三次元測定機における構造と精度, 応用機械工学, No. 328, p76.
- [1-34] 河合正治, 岡本英明, 佐々木豊春, 岩越朗, 佐野雄一: エキスパートシステムによる三次元測定機 —測定戦略決定システムの実現(第一報)—, 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p787.
- [1-35] 岡本英明, 佐々木豊春, 佐野雄一, 岩越朗, 河合正治, 原田年康: エキスパートシステムによる三次元測定機 —測定戦略システムの実現(第二法)—, 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p789.
- [1-36] 佐野雄一, 岡本英明, 岩越朗, 佐々木豊春, 河合正治: 三次元測定機による測定経路生成について, 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p791.
- [1-37] 岩野秀夫, 門脇聰一: 三次元自動測定支援システム(MCAT), ファクトリー・オートメーション, Vol.5, No.6, 1987年, p57.
- [1-38] 竹内芳美: 三次元測定機とCAD/CAM, 機械と工具, Vol.32, No.10, 1988年, p18.
- [1-39] 上田圭志: CAD—三次元測定機間の相互データ交換の有効性, 機械と工具, Vol.32, No.10, 1988年, p25.
- [1-40] 松本智: CIMへの参入をめざすLEITZ QUINDOS, 機械と工具, Vol.32, No.10, 1988年, p33.
- [1-41] 生駒敏郎: ザイザックスPAシリーズとCAD/CAMとの対応, 機械と工具, Vol.32, No.10, 1988年, p38.

- [1-42] オフラインティーチングのためのT-CAD, TEXシステム, 機械と工具, Vol.32, No.10, 1988年, p45.
- [1-43] 門脇聰一: 計測支援システムMCATと自由曲面測定評価システムMSURF, 機械と工具, Vol.32, No.10, 1988年, p51.
- [1-44] 岩野秀夫, 門脇聰一: 3次元測定機の自動化とCAD対応, 応用機械工学, Vol.29, No5, 1988年, p68.
- [1-45] 石神政司: 三次元測定におけるデータ処理, 精密機械, Vol.39, No.7, 1973年, p693.
- [1-46] 高増潔: 三次元測定の自動化とデータ処理, 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p38.
- [1-47] 宿利浩章: 三次元測定機の自動化とデータ処理, 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p43.
- [1-48] 松本智: 三次元測定機におけるソフトウェア技術, 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p60.
- [1-49] 岸浪建史, 中村久, 斎藤勝政, 亀井明敏: 新開発の三次元触覚プローブを利用した三次元曲面の計測, 東京精密技法, Vol.5, No.15, 1985年, p2.
- [1-50] H.Aoyama, M.Kawai, T.Kishinami: A New Method for Detecting the Contact Point between a Touch Probe and a Surface, Annals of the CIRP, Vol.38, No.1, 1989年, p517.
- [1-51] 青山英樹, 岸浪建史, 斎藤勝政, 河合正治: 位置ベクトルと単位法線ベクトルの検出に基づく寸法測定システムの開発, Vol.57, No.5, 1991年, p807.
- [1-52] George Schaffer: Taking the measure of CMMs, AMERICAN MACHINIST Special Report 749, October, 1982年, p145.

- [1-53] 三好隆志：非接触センサを用いた3次元形状の高速計測技術，応用機械工学，No.335，1988年，p130.
- [1-54] 三好隆志，中村智彦，近藤司，斎藤勝政：金型用模型の非接触自動形状測定装置の開発，精密工学会誌，Vol.55，No.2，1989年，p393.
- [1-55] Klaus Herzog：TODAY'S THREE DIMENSIONAL PRECISION MEASUREMENT, proceeding of 3rd ICPE, Kyoto, 1977年，p335.
- [1-56] Lu Jie-chi, N.A.Duffie, J.G.Bollinger：Two Dimensional Tracing and Measurement Using Touch Trigger Probes, Annals of the CIRP, Vol.31, No.1, 1982年，p415.
- [1-57] 日本特許公報，4 9 - 6 5 8 5 7 .
- [1-58] 日本特許公報：5 4 - 6 2 1 8 .
- [1-59] 西ドイツ特許公報：2 2 4 2 3 5 5 .
- [1-60] イギリス特許公報：1 4 2 9 9 7 3 .
- [1-61] 西ドイツ公開特許公報：2 7 1 2 1 8 1 .
- [1-62] 西ドイツ登録特許：2 3 5 6 0 3 0 .
- [1-63] イギリス特許公報：1 4 6 7 7 0 4 .
- [1-64] 日本特許公報：5 3 - 3 9 3 5 .
- [1-65] 西ドイツ登録特許：2 4 4 0 6 9 2 .
- [1-66] M.Wock, P.Bagh, R.Holler：Measuring Gears with a Numeric Controlled 3-Axis Measuring Machine, Annals of the CIRP, Vol.24, No.1, 1975年，p375.

- [1-67] Hans Joachim Neumann : Gear inspection on a multi-coordinate measuring machine, Reprint of lecture held during the 5th International Conference on Automated and Product Control (12th IPA Meeting in Stuttgart), 1980年.
- [1-68] M.Bambach, A.Furst : Bestimmung der Antastunsicherheit elektronischer 3-D-Tastsysteme, VDI-Berichte, No.378, 1980年, p15.
- [1-69] 伊藤嘉朗 : カールツァイス三次元測定機 : 計測技術, No.3, 1981年, p80.
- [1-70] Diane Kaylor : Metrology — CMMs Go the Distance (CMMs measure up to the ultimate machine tool manufacturing dream), MECHANICAL ENGINEERING, February, 1983年, p37.
- [1-71] 佐久間健三, 中村哲夫 : 寸法・形状測定における測定ヘッド, 精密工学会誌, Vol.52, No.4, 1986年, p605.
- [1-72] N.A.Duffie, S.J.Malmberg : Error Diagnosis and Compensation Using Kinematic Models and Position Error Data, Annals of the CIRP, Vol.36, No.1, 1987年, p355.
- [1-73] 中村哲夫 : 三次元測定機による新しい形状測定システム, 合成樹脂, Vol.33, No.7, 1987年, p13.
- [1-74] 丸山六男 : 三次元検出器の動作特性, 機械の研究, Vol.39, No.3, 1987年, p39.
- [1-75] 斯波信雄 : 三次元座標補正回路の試作について, 呉工業試験所報告, No.28, 1980年, p6.

- [1-76] T.Kishinami, H.Nakamura, K.Saito, A.Kamei : Three Dimensional Curved Surface Measurement using Newly Developed Three Dimensional Tactile Sensing Probe, Proceeding of the International Symposium on Metrology for Quality Control in Production, 1984年, p288.
- [1-77] 岸浪建史, 中村久, 斎藤勝政, 亀井明敏 : 新開発の三次元触覚プローブを利用した三次元曲面の計測, 東京精密技法, Vol.5, No.15, 1985年, p2.
- [1-78] 岸浪建史, 中村久, 斎藤勝政, 亀井明敏 : 三次元曲面形状測定プローブの基礎的研究, 精密工学会誌, Vol.52, No.8, 1986年, p142.
- [1-79] 宿利浩章 : 三次元測定機による金型計測 : 機械と工具, Vol.29, No.3, 1985年, p65.
- [1-80] 松本智 : 三次元測定機におけるソフトウェア技術, 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p60.
- [1-81] 伊勢徹 : 三次元測定機による金型と成形品の精度評価の実際, 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p70.
- [1-82] 杉達雄, 生駒敏郎 : 3次元計測機のCNC化・ソフトウェアの動向, 機械設計, Vol.31, No.1, 1987年, p37.
- [1-83] 山本清二 : 三次元計測のソフトウェアの問題点, 合成樹脂, Vol.33, No.7, 1987年, p20.
- [1-84] 中村哲夫 : 三次元測定機による新しい形状測定システム, 合成樹脂, Vol.33, No.7, 1987年, p13.
- [1-85] 中村哲夫 : 三次元測定システムにおける形状測定の高精度化, 機械と工具, Vol.31, No.11, 1987年, p67.

- [1-86] 萱場義隆：三次元測定機による非球面形状測定，光技術コンタクト，Vol.27, No.5, 1989年，p249.
- [1-87] J.C.Ferguson：Multivariate Curve Interpolation, Journal of the ACM, Vol.11, 1964年，p221.
- [1-88] S.A.Coons：Surface for computer-aided design of space figures, M.I.T. ESL 9442-M-139, January, 1964年.
- [1-89] S.A.Coons：Surface for Computer Aided Design of Space Forms, MIT Project MAC, TR-41, June, 1967.
- [1-90] P.Bezier：How Renault uses Numerical Control for Car Body Design and Tooling, SAE 680010, Soc. Automobile Enggrs., 1968年.
- [1-91] R.F.Riesenfeld：Applications of B-spline Approximation to Geometric Problems of Computer Aided Design, Univ. of Utah UTEC-CSc-73-126, 1973年.
- [1-92] A.R.Forrest：The Computation of Bicubic Twist Terms, Computer-Aided Design Group Document 20, Cambridge University, 1969年.
- [1-93] R.E.Barnhill, J.H.Brown, I.M.Klucwicz：A New Twist in Computer Aided Geometric Design, Computer Graphics and Image Processing, Vol.8, 1978年，p78.
- [1-94] J.A.Gregory：Smooth Interpolation Without Twist Constraints in Computer Aided Geometric Design (R.E.Barnhill and R.F.Riesenfeld, Eds), Academic Press (New York), 1974年，p71.

- [1-95] H.Chiyokura and F.Kimura : A New Surface Interpolation Method for Irregular Curve Model, Computer Graphics Forum (J. Eurographics), Vol.3, No.3, 1984年, p209.

第2章 法線ベクトル検出プローブ

第1章において、三次元座標測定機が普及してきた背景を述べ、従来の三次元座標測定機による測定とその測定データの応用に関する問題点を指摘した。そして、その問題点の解決にあたり、三次元座標測定機の位置ベクトル検出機能に法線ベクトル検出機能を付加し、位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを開発することが基礎となることを示した。

本章では、三次元座標測定機に法線ベクトル検出機能を付加するため、測定点の法線ベクトルを直接検出する接触式プローブを提案し、その試作について述べる。初めに、法線ベクトルの検出の意義について考察する。そして、法線ベクトルの検出原理を示し、その原理に基づいた法線ベクトル検出プローブの構造を明らかにする。また、計算機シミュレーションによりプローブの設計を行い、同設計に基づき基礎プローブの試作を行う。さらに、法線ベクトルの算出手順（アルゴリズム）を提案し、基礎実験により算出手順と試作した基礎プローブの測定精度を明らかにする。最後に、同プローブを用いた応用測定として、曲面形状の測定基礎実験を行い、形状測定における法線ベクトル検出の有意性について確認する。

2. 1 法線ベクトル検出の意義

プローブと被測定物との接触点、すなわち測定点は、ミクロ的に見た場合、測定微小平面と考えることができる。したがって、物理モデル形状を認識（測定・評価）する観点において、測定点（微小平面）の持つ情報として、その位置（座標値、位置ベクトル）と向き（法線方向、法線ベクトル）が重要な要素であると考えられる。すなわち、測定点を微小平面と理

解するならば、物理モデル形状を測定評価するうえで、測定点の物理的意味から、その位置ベクトルと法線ベクトルを検出することは極めて意義深いと考えられる。

通常、従来の三次元座標測定機による測定では、測定微小平面の法線方向にプローブ半径値だけ移動した点、すなわちプローブ中心点の座標値が検出される。したがって、測定微小平面（測定点）の座標値も法線方向も検出していないことになる。このことが、三次元座標測定機を用いた機械部品基礎形状の測定評価や自由曲面形状の測定評価において、いくつかの問題を生じている原因となっている。

機械部品は、平面、円筒、球など基本的な幾何要素により構成されている場合が多い。このような幾何要素の測定評価（平行平面間の距離測定、円筒の半径値測定、球の半径値測定などの寸法測定）では、三次元座標測定機により検出されるプローブ中心座標値を基にして、要求されている寸法を算出することは比較的容易である。これは測定時において、測定評価対象を限定し、その測定条件に関するいくつかの情報を与えることにより、プローブ半径値の補正を行うことを可能にしているためである。しかし、1. 2. 2で述べたように、いくつかの問題点も指摘されている。

自由曲面形状の測定評価においては、測定点の座標値を直接検出できないことが、その作業を困難なものにしている。この原因は、自由曲面の場合、測定点（測定微小平面）の法線方向が任意に変化するため、プローブ中心座標値に対するプローブ半径値の補正が容易ではないことにある。この問題を解決するため、多点測定データに基づく補正予測法[2- 1]ー[2- 2], アナログプローブヘッドを用いる方法[2- 3]ー[2-11], 測定圧分力の検出から法線方向を求めプローブ半径値を補正する方法[2-12]ー[2-15]などが提案されているが、1. 2. 1で述べたように、これらの方法には解決すべき

問題点が残されている。

このように、機械部品基礎形状や自由曲面形状の測定評価を困難にしている原因は、測定点の位置ベクトルを直接検出できないことにある。現状において、三次元座標測定機によりプローブ中心点の位置ベクトルの検出が可能であるため、測定点の法線ベクトルの検出が可能であるならば、1.1.1で示した式(1-1)に基づき、測定点の位置ベクトルを求めることができる。したがって、法線ベクトルを検出することが従来の三次元座標測定機による測定の問題点を解決することとなり、その有意性が認識される。

また、自動車のボディーなどの自由曲面の設計形状は、法線ベクトルにより評価が行われている[2-16]—[2-17]。このことから、その加工形状も法線ベクトルに基づき評価されるべきであると考えるのが適当である。これより、自由曲面加工形状の測定評価においても、法線ベクトルを検出することの意義を認識することができる。

従来、自由曲面形状計算機モデルを構築する技術として、パラメータに基づく曲面パッチによる方法が一般に採用されている。代表的な曲面パッチとして、双3次CoonsパッチやBezierパッチ、そしてこれらの曲面パッチを応用したいくつかの曲面パッチが提案されている(1.2.4)。また最近では、部分的形状制御を容易にしたB-spline曲面パッチも実用システムにおいて多く用いられるようになってきた。物理モデルの測定により得られるデータは、プローブ中心点あるいは物理モデル上の点の位置ベクトルである。しかし、従来提案されている曲面パッチは、パッチコーナ点の位置ベクトル、接線ベクトル、ねじれベクトル(あるいはこれらのベクトルに等価な制御点)により定義されている。したがって、物理モデルの測定データを直接用いて曲面パッチを定義し、計算機モデルを構築することが困難となっている。位置ベクトルを基にして直接定義することので

きる曲面パッチとして双1次パッチ[2-18]が提案されているが、このパッチを用いた場合、物理モデル測定データから直接計算機モデルを構築することが可能であるが、曲面の表現力の点から問題がある。したがって、位置ベクトルと法線ベクトルに基づく表現力の高い曲面パッチ定義式を提案することにより、前述したような測定データから自由曲面計算機モデルを構築する際の問題点を解決することが期待できる。この点においても、法線ベクトル検出の意義が認められる。

2. 2 法線ベクトルの検出原理とプローブの構造

図2-1は、1次元光位置検出器（Position Sensitive Device：以下P S Dと記す）[2-19]－[2-21]の断面構造を示している。同図に示されているように、P S Dは高抵抗半導体基盤上の両端に電極が形成された単純な構造となっている。P S Dの高抵抗半導体はP N接合を形成しており、光電効果を有している。したがって、P S D面の任意点に光が入射したとき、入射光の位置において、光の入射エネルギーに比例した電荷が発生し、その電荷は電流となってそれぞれの電極に到達する。P S Dの電極Aと電極Bの距離を L 、その間の電気抵抗を RL とし、電極Aから光入射位置までの距離を x 、電極Aと光入射位置との間の電気抵抗を R_x とすると、入射光位置に生じた電流 I_0 は、入射光位置とそれぞれの電極間の抵抗値に反比例して分流するため、電極Aおよび電極Bに流れ込む電流 I_A 、 I_B は、式(2-1)で表される。

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_0 \frac{RL - RX}{RL} \\ I_B &= I_0 \frac{RX}{RL} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

高抵抗半導体層は均一であり，長さと電気抵抗値が比例するとすると式(2-1)は式(2-2)として表される。

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_0 \frac{L-x}{L} \\ I_B &= I_0 \frac{x}{L} \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

式(2-2)より， I_A および I_B の比を求めることにより，次式(2-3)が得られる。

$$x = \frac{I_B \cdot L}{I_A \cdot I_B + 1} \quad (2-3)$$

式(2-3)より，入射エネルギーに関係なく，電極A，Bに流れ込む電流値 I_A ， I_B より，光の入射位置 x を求めることができる。

図2-2は，2次元P S Dの電極構造を示している。4辺にそれぞれ電極X,X'および電極Y,Y'が形成されており，1次元P S Dと同様にX軸方向の光入射点の位置は電極X,X'に流れ込む電流値より検出でき，またY軸方向の光入射点の位置は電極Y,Y'に流れ込む電流値より検出できる。

本研究で提案する法線ベクトル検出プローブは，P S Dの光位置検出原理を球面抵抗薄膜に対して応用することにより，測定点の法線ベクトルの検出を可能にしている。すなわち，P S Dの位置検出原理を球面に対して適用し，プローブと被測定物の接触点の位置を検出する。球形状プローブを用いた測定において，プローブ中心点を座標原点としたときのプローブと被測定物の接触点の座標値（位置）を検出できるならば，同座標値を正規化することにより，接触点（測定点）の法線ベクトルを求めることができる。

図2-3は，2次元P S Dの検出原理を球面に適用することにより，測定点の法線ベクトルの検出を可能としたプローブ[2-22]の構造を示してい

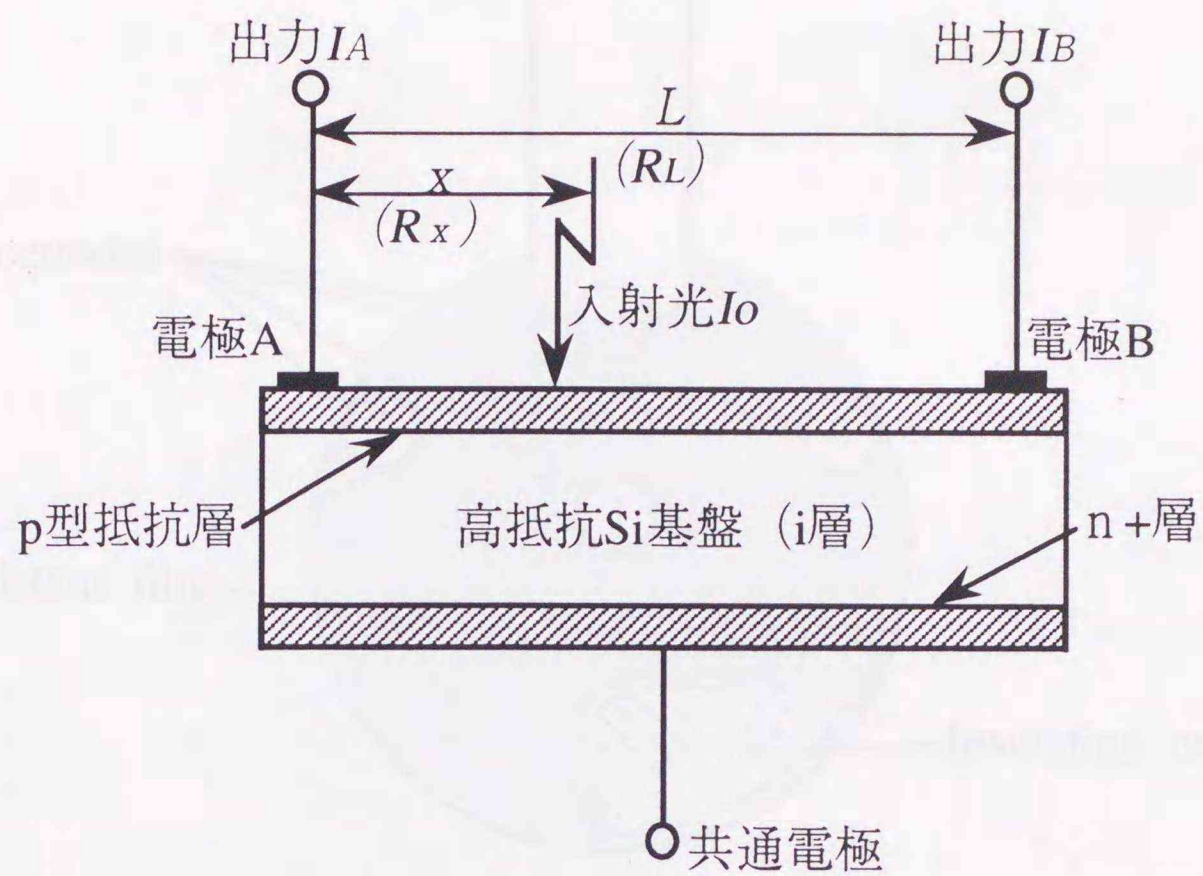


図2-1 PSDの断面構造 ([2-19]-[2-21]より)

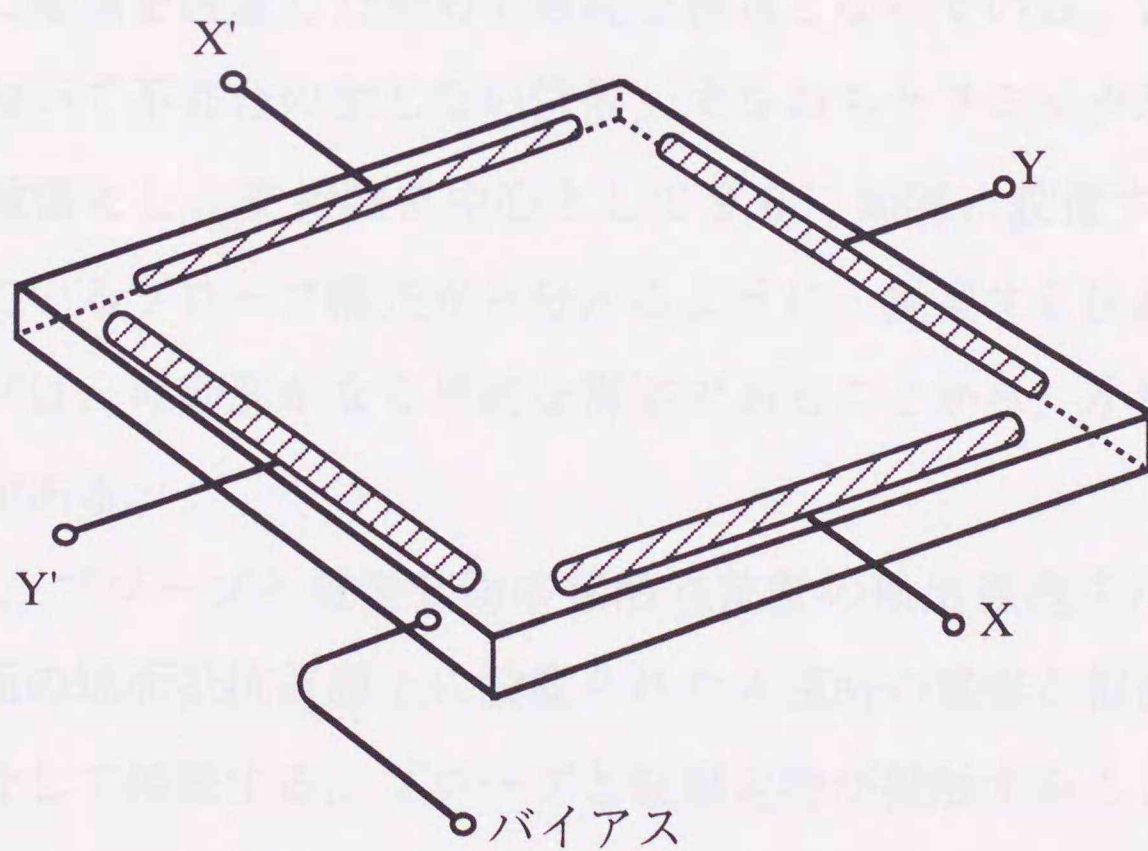


図2-2 2次元PSD電極構造 ([2-19]-[2-21]より)

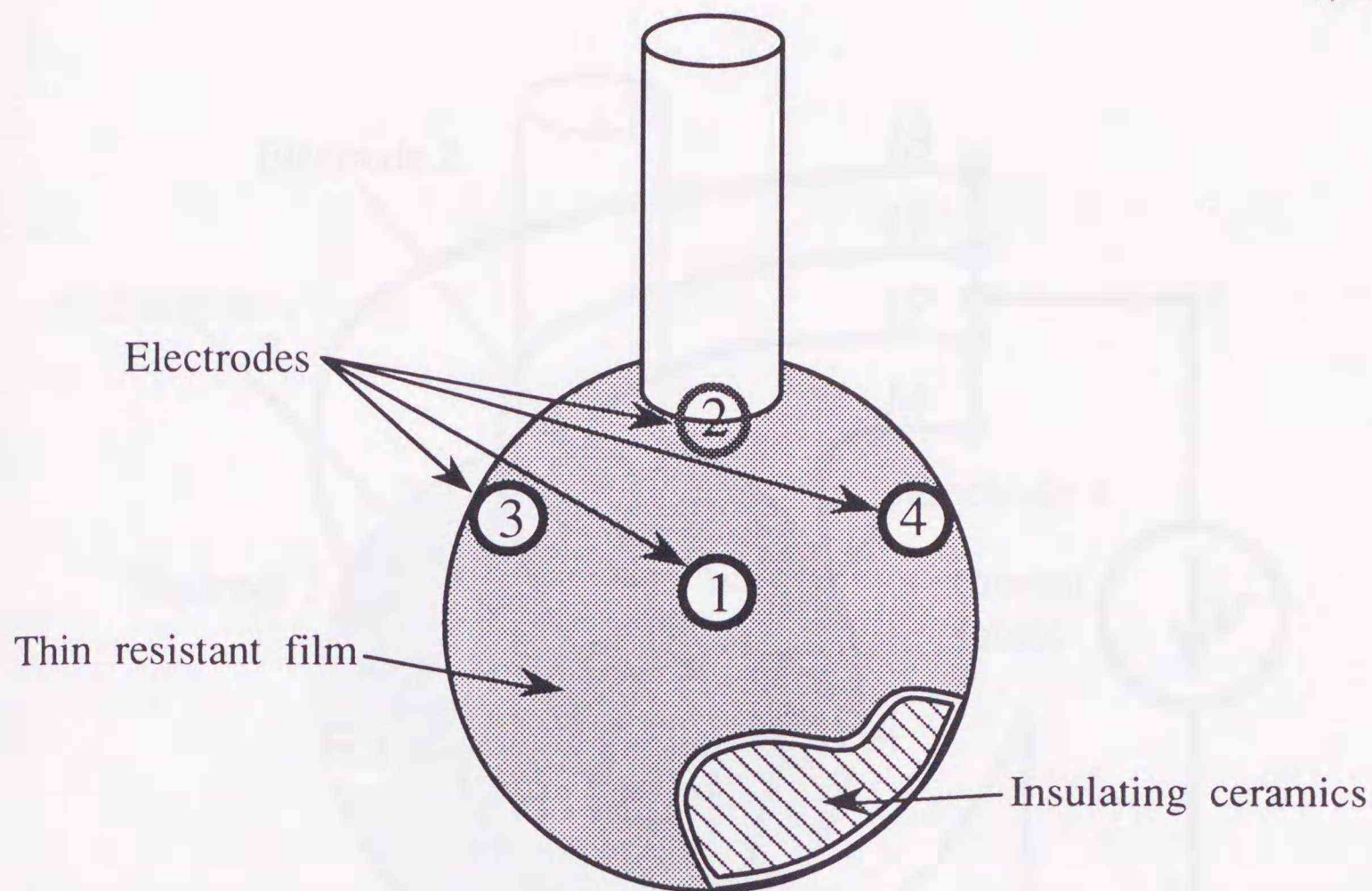


図2-3 法線ベクトル検出プローブの構造

る。同プローブは、絶縁セラミック球表面に抵抗薄膜を形成し、抵抗薄膜上の4箇所 electrodes を設置した極めて単純な構造となっている。電極の位置は、測定において不都合の生じない位置、すなわちセラミック球を支持している上半球側とし、支持軸を中心として 90° 間隔に設置する。図2-3に示されているプローブ構造から分かるように、提案する法線ベクトル検出プローブは、可動部がなく単純な構造であることから、小型化を可能とする特徴がある。

図2-4は、プローブと被測定物の接触点位置の検出原理を示している。プローブ表面の球面抵抗薄膜上に設置された4箇所の電極と被測定物を定電流電源を介して接続する。プローブと被測定物が接触することにより定電流回路が形成され、接触点（測定点）から4箇所の電極1，電極2，電極3，電極4へ、それぞれ電流 I_1 ， I_2 ， I_3 ， I_4 が流れる。このとき電流 I_1 ，

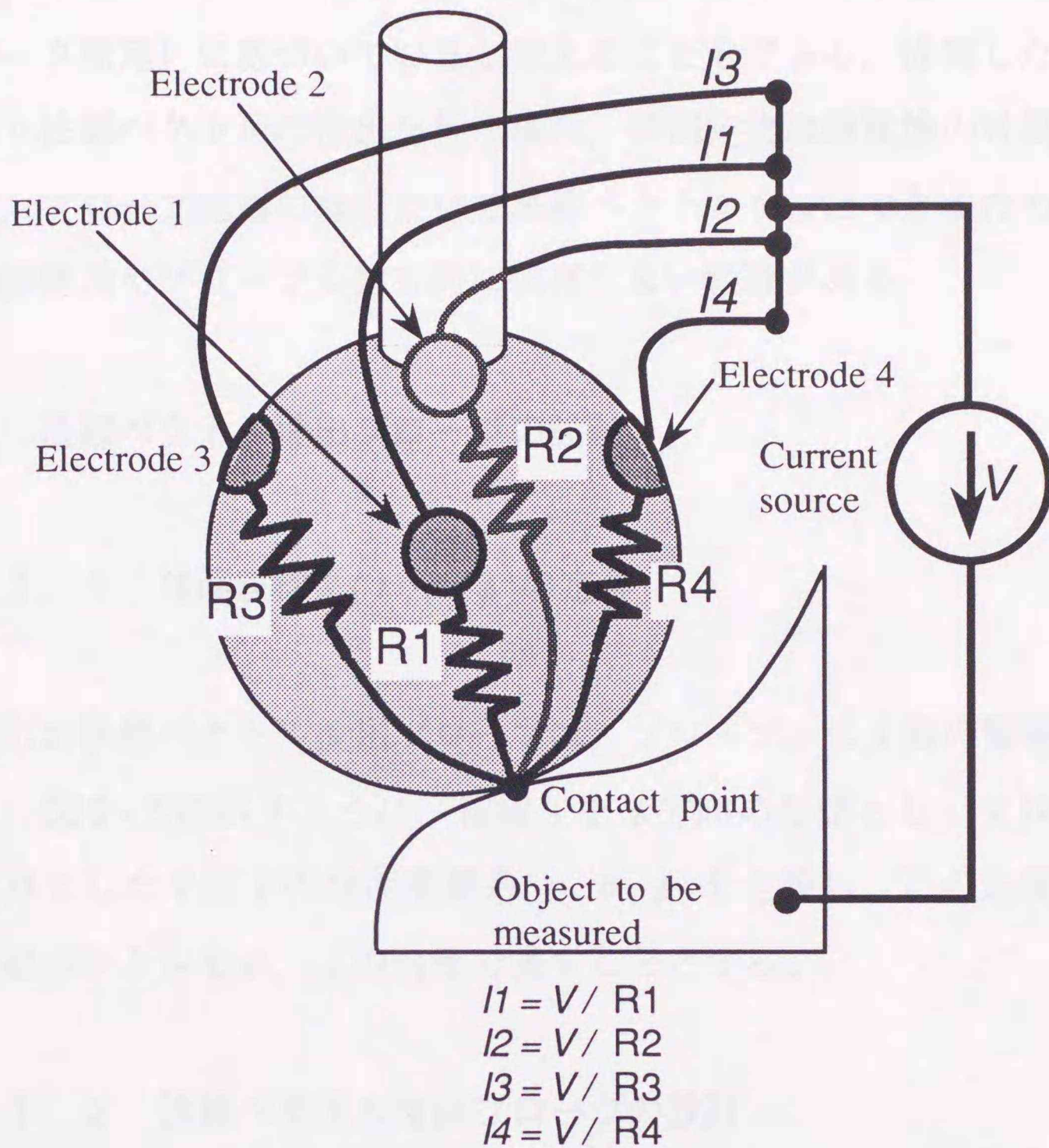


図 2 - 4 法線ベクトル検出原理

$I2$, $I3$, $I4$ は、接触点と各電極間の電気抵抗値 $R1$, $R2$, $R3$, $R4$ に反比例して分流するため、各電極に流れ込む電流値 $I1$, $I2$, $I3$, $I4$ より、プローブ中心を座標原点とした接触点座標値を検出できる。プローブが球形状であることから、プローブ中心点は測定点の法線上に存在している。したがって、接触点座標値の正規化された値が、測定点の法線ベクトル値となる。

法線ベクトル検出の原理は、P S Dの光位置検出原理を応用したもので

あるが、ポテンシオメータ原理[2-23]を球面へ応用した原理（球面ポテンシオメータ原理）に基づいていると考えることもできる。提案したプローブにより法線ベクトルの検出を行う場合、被測定物は導電性の材質に限られるが、プローブ先端の機能だけで法線ベクトルを検出できるため、プローブ支持構造やプローブ支持方向に依存しない特徴がある。

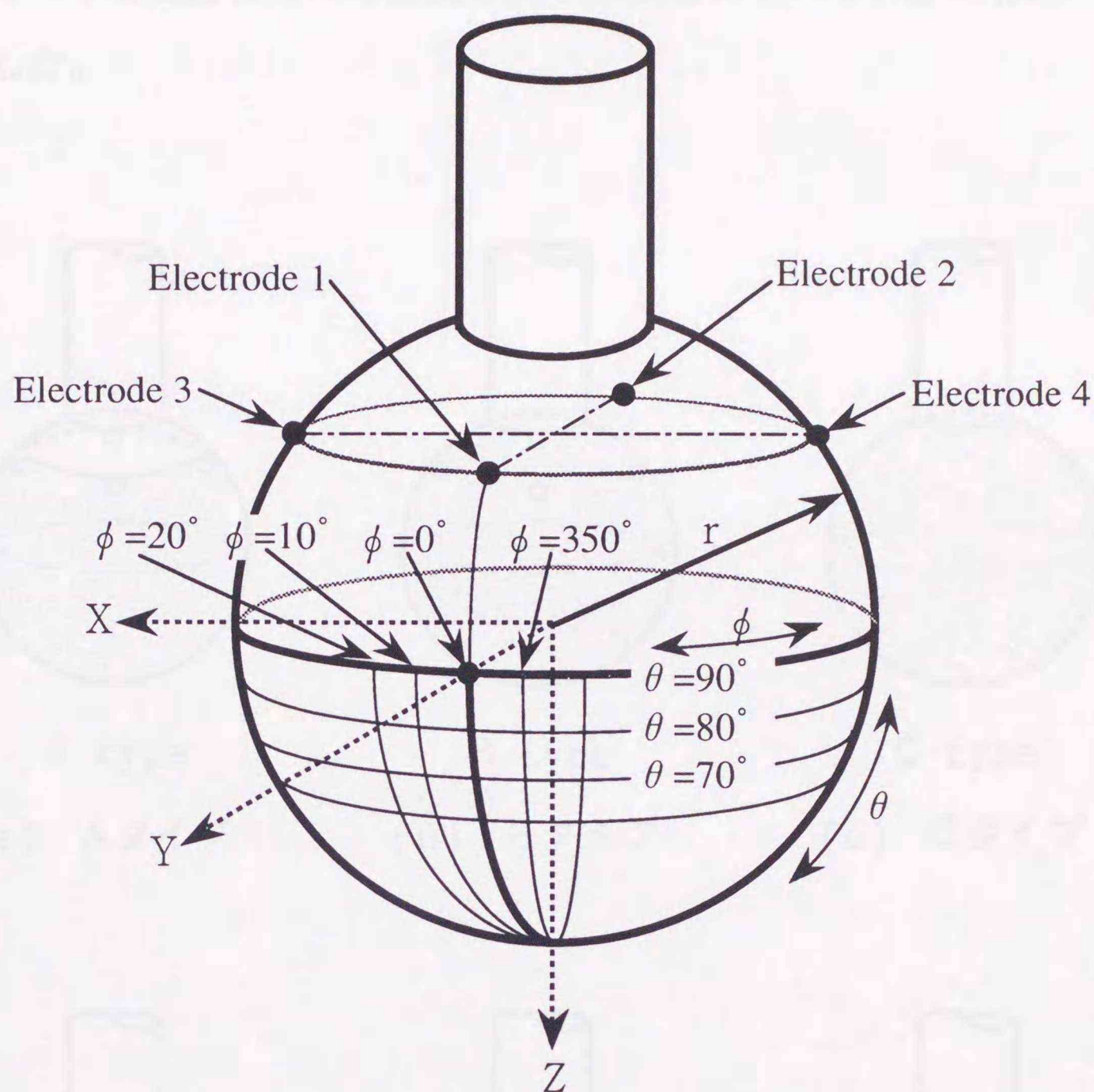
2.3 法線ベクトル検出プローブの設計

2.3.1 球面座標系(r, θ, ϕ)の定義

提案した法線ベクトル検出プローブは、プローブ上に4個の電極を有しており、図2-5に示すように、電極1を ϕ 方向の基準とし、プローブ中心を原点とした半径 r の球面座標系(r, θ, ϕ)を定義し、この定義に基づき、法線ベクトルを θ, ϕ の角度で表すこととする。

2.3.2 法線ベクトル検出プローブの設計

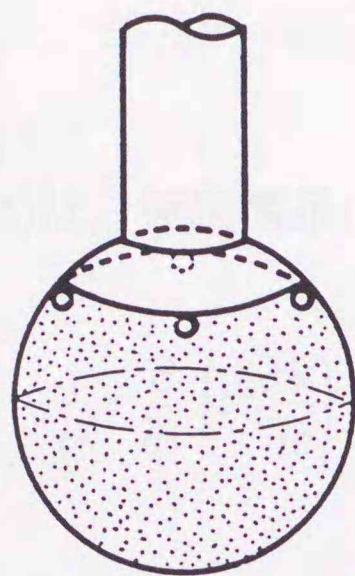
プローブの設計手段として、電極位置、電極形状および球面抵抗薄膜形状が異なるプローブモデルに関して、計算機シミュレーションにより抵抗薄膜体の電位分布を算出し、その電位分布よりプローブと被測定物の接触点位置（法線ベクトル）と接触点から各電極へ流れ込む電流値の関係を求め、最も高分解能が得られるプローブモデルを明らかにする方法を採用する。計算機シミュレーションにおけるプローブモデルの電極の ϕ 方向位置は、プローブ支持軸の回りに 90° 間隔と一定とした。すなわち、電極の ϕ 方向位置は、電極1が $\phi = 0^\circ$ 、電極2が $\phi = 180^\circ$ 、電極3が $\phi =$

図2-5 球面座標系(r, θ, ϕ)

90° ，電極4が $\phi = 270^\circ$ となっている。電極の θ 方向位置と電極形状および球面抵抗薄膜の形状はいくつかのタイプを採用した。

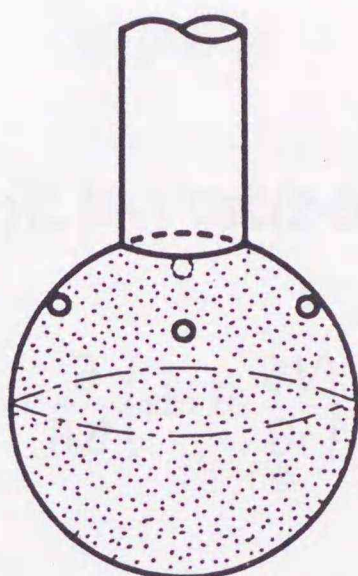
図2-6は，計算機シミュレーションの対象としたプローブモデル形状を示している。電極形状は，点形状（A～Cタイプ）と帯形状（D，Eタイプ）および円形状（Fタイプ）とした。電極中心の θ 方向位置は， $\theta = 100^\circ$ （C，Eタイプ）， $\theta = 140^\circ$ （A，B，Dタイプ），および $\theta = 120^\circ$ （Fタイプ）とした。また，球面抵抗薄膜形状として，プローブ球の全面に抵抗薄膜が形成されている形状（B～Fタイプ）と，電極

からプローブ球支持棒側には抵抗薄膜が形成されていない形状(Aタイプ)を採用した。



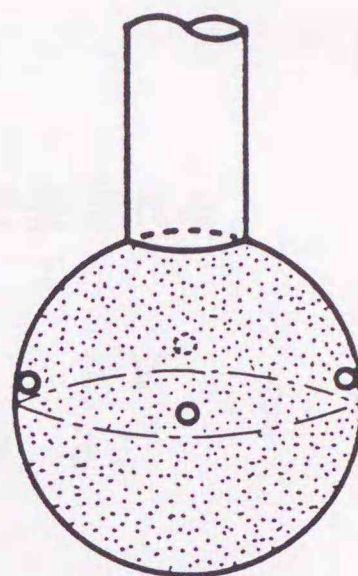
A type

(a) Aタイプ



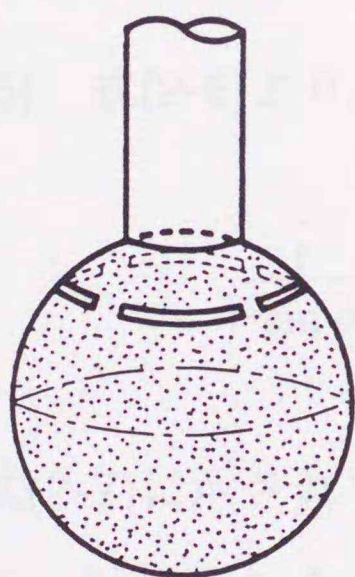
B type

(b) Bタイプ



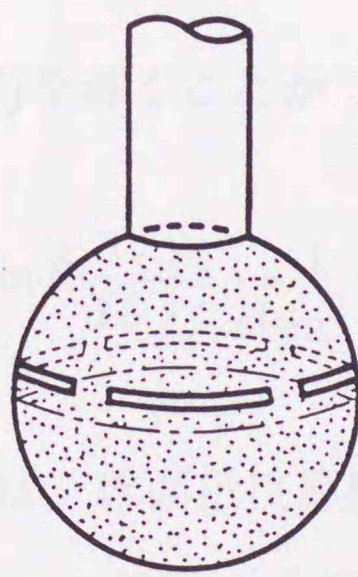
C type

(c) Cタイプ



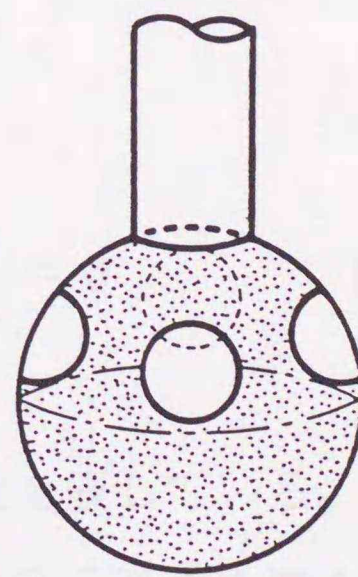
D type

(d) Dタイプ



E type

(e) Eタイプ



F type

(f) Fタイプ

図2-6 計算機シミュレーションプローブモデル

プローブと被測定物の接触により定電流回路が形成され、球面抵抗薄膜体の電位 V が定常状態にあるとき、その電位 V は式(2-4)のラプラスの方程式[2-24]を満足する。

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2-4)$$

式(2-4)は、極座標系 (r, θ, ϕ) において式(2-5)[2-25]で表される。

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (2-5)$$

球面抵抗薄膜体の r 方向の距離、すなわちその厚さは、極めて薄いと仮定すると、式(2-6)を導くことができる。

$$\frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (2-6)$$

式(2-5)、式(2-6)より、式(2-7)を導くことができる。

$$\frac{1}{r^2 \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (2-7)$$

上式(2-7)に示されている V は、球面抵抗薄膜の電位を表している。したがって、計算機シミュレーションでは、式(2-7)の差分近似式を導き、境界条件をあてはめ、電位 V に関して繰り返し計算を行う。その計算過程において、電位 V が収束判定基準を満足した結果として、 θ および ϕ 方向に設定した差分格子点の電位 V の近似解が得られる。境界条件は、プローブと被測定物の接触点位置の電圧を 1 V、各電極の電圧を 0 V とした。また、A タイプのプローブモデルの場合、抵抗薄膜体が形成されている領域と形

成されていない領域の境界条件として、式(2-8)を用いた。

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 \quad (2-8)$$

電位 V の収束判定基準は、繰り返し計算中における全ての差分格子点の電位 V の解が、式(2-9)を満足するものとした。

$$|(N \text{ 回目の解}) - (N - 1 \text{ 回目の解})| \leq 10^{-4} \quad (2-9)$$

計算機シミュレーションにおいて、接触点位置（法線ベクトル）と電極に流れ込む電流値の関係を求めるため、プローブと被測定物の接触点位置

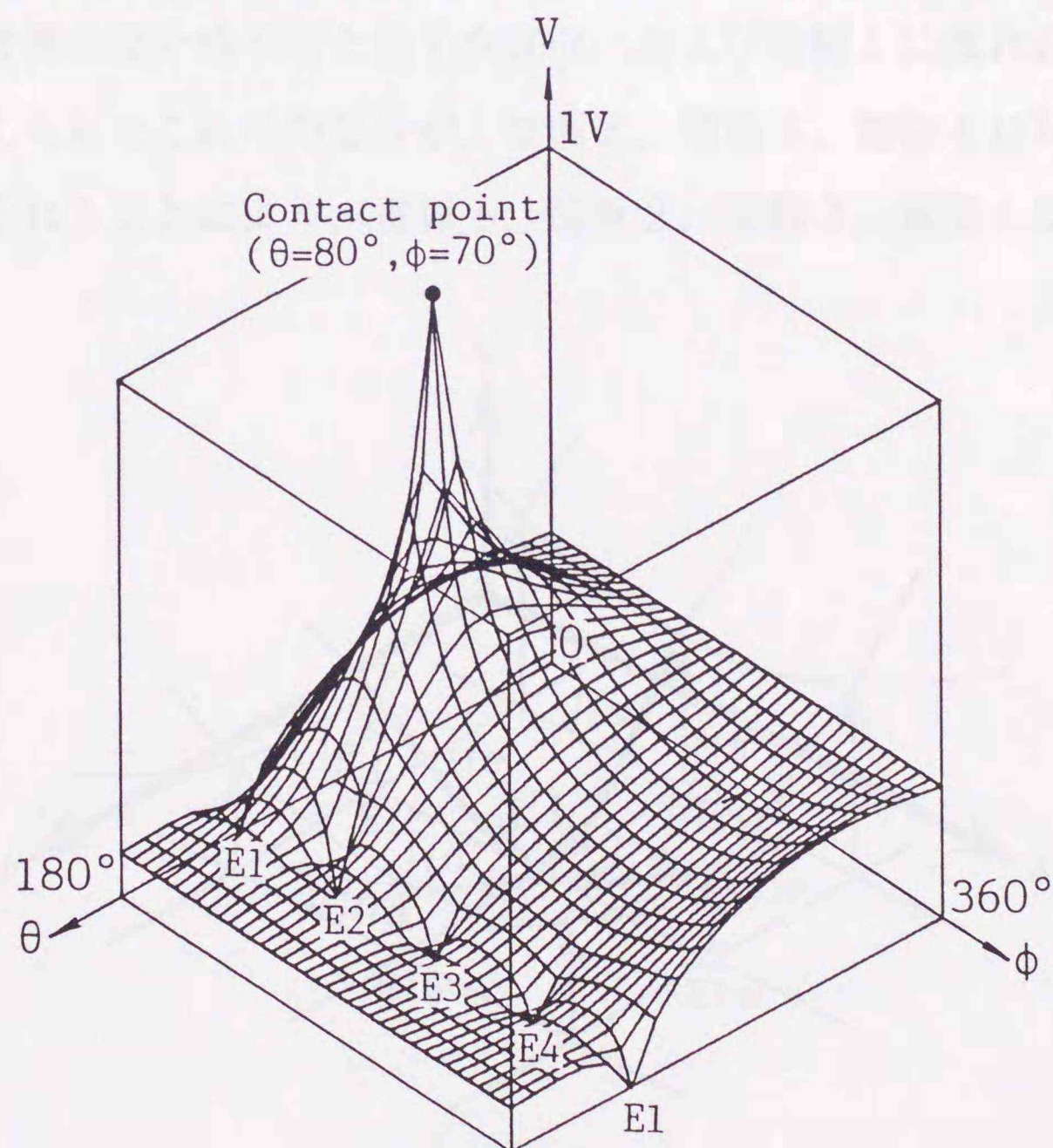


図2-7 球面抵抗薄膜体の電位分布例

を、 θ 方向に関して $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を 10° 間隔に、また ϕ 方向に関して $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲を 10° 間隔に設定し、式(2-7)の電位 V に関する差分近似解から、各々の状態における球面抵抗薄膜体の電位分布を得た。図2-7は、その1例として、プローブモデルBタイプに関して、接触点位置が $\theta = 80^\circ$ 、 $\phi = 70^\circ$ の場合の球面抵抗薄膜体の電位分布を示している。また、図2-8は、電極1近傍の電位分布の概念図を示している。図2-8において、 $E1$ は電極1を、 $V1e$ 、 $V1w$ 、 $V1n$ 、 $V1s$ は電極1 ($E1$)に隣接する差分格子点 $E1e$ 、 $E1w$ 、 $E1n$ 、 $E1s$ の電位を表している。また、 $I1e$ 、 $I1w$ 、 $I1n$ 、 $I1s$ は、格子点 $E1e$ 、 $E1w$ 、 $E1n$ 、 $E1s$ から電極1 ($E1$)へ流れ込む電流値を表している。

電極1近傍の差分格子点と格子点電位、および電極1に流れ込む電流に対して与えられたこれらの記号が、電極2、電極3、電極4に対しても同様に与えられることにより、電極1、電極2、電極3、電極4に流れ込む

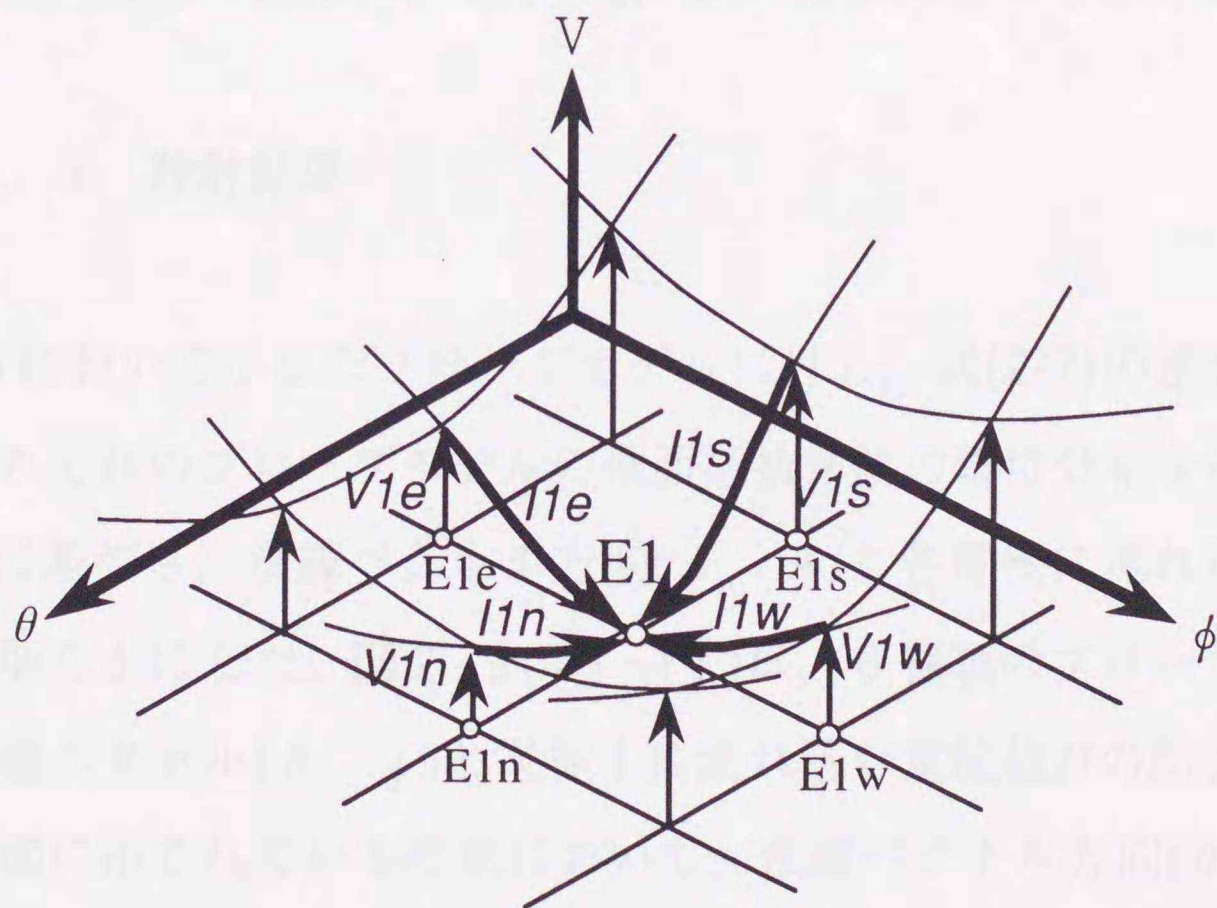


図2-8 電極1近傍の電位分布

電流値 I_1, I_2, I_3, I_4 を式(2-10)により求めることができる。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} V1e+V1w+V1n+V1s \\ V2e+V2w+V2n+V2s \\ V3e+V3w+V3n+V3s \\ V4e+V4w+V4n+V4s \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \\ V4 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

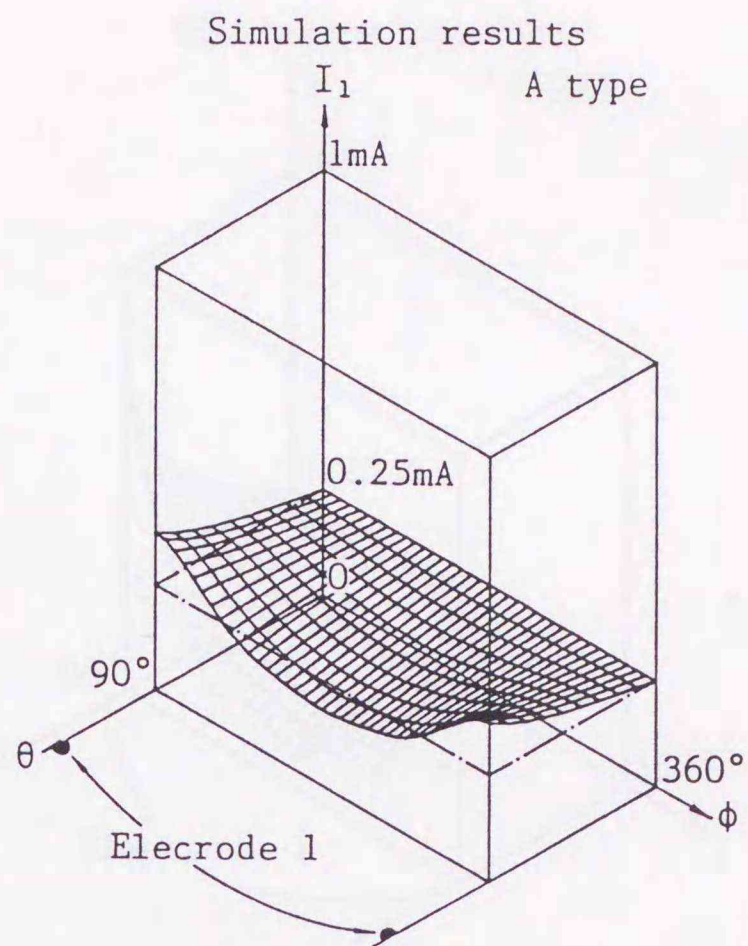
式(2-10)において、 $V1, V2, V3, V4$ は、それぞれ電極1、電極2、電極3、電極4に隣接する格子点の電位の総和を表している。定電流電源の定電流値が I_0 (1 mA) であるとき、 I_0 は各電極に流れ込む電流値 I_1, I_2, I_3, I_4 の総和となり、式(2-10)より式(2-11)が得られる。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \frac{I_0}{V1+V2+V3+V4} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \\ V4 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

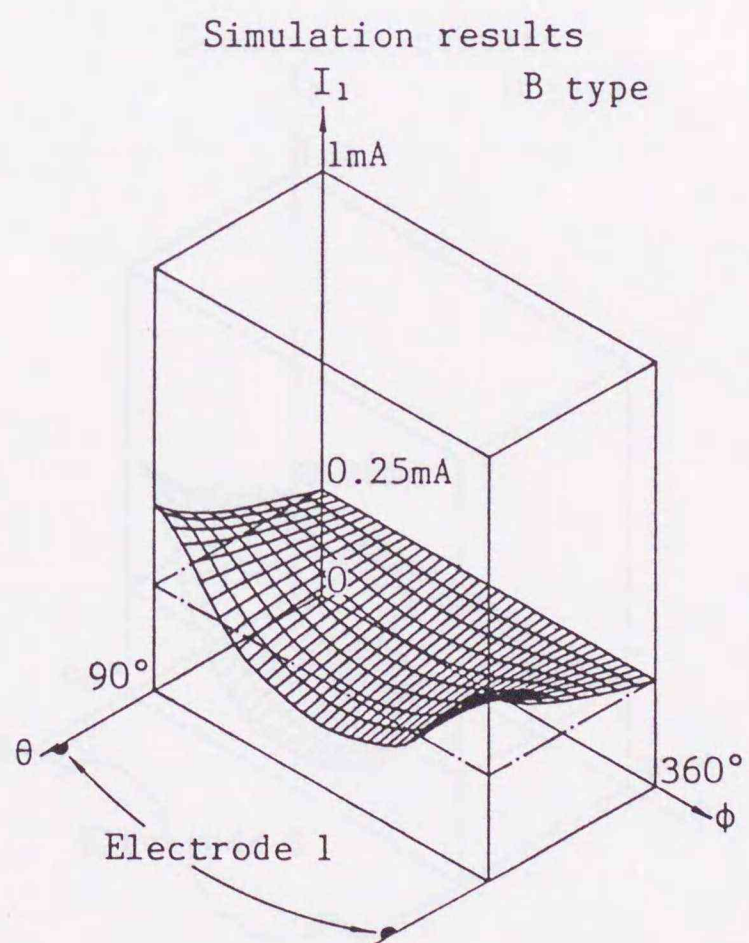
したがって、各電極に流れ込む電流値 I_1, I_2, I_3, I_4 は、各電極に隣接する格子点の電位の総和 $V1, V2, V3, V4$ より求めることができる。

2. 3. 3 設計結果

図2-6において示したプローブモデルに対し、式(2-7)の差分式の解を求め、それぞれのプローブモデルの球面抵抗薄膜の電位分布を明らかにし、式(2-11)に基づき、法線ベクトル方向(θ, ϕ)と各電極に流れ込む電流値の関係を明らかにした。図2-9(a)~(f)は、6種類のプローブモデルに関する法線ベクトル(θ, ϕ)と電極1に流れ込む電流値 I_1 の関係を示している。同図に示されている結果において、法線ベクトル方向(θ, ϕ)の変化に対し、電極に流れ込む電流値の変化が大きいプローブモデルが高分解能を有していることになる。また、式(2-7)には、抵抗薄膜の電気抵抗率



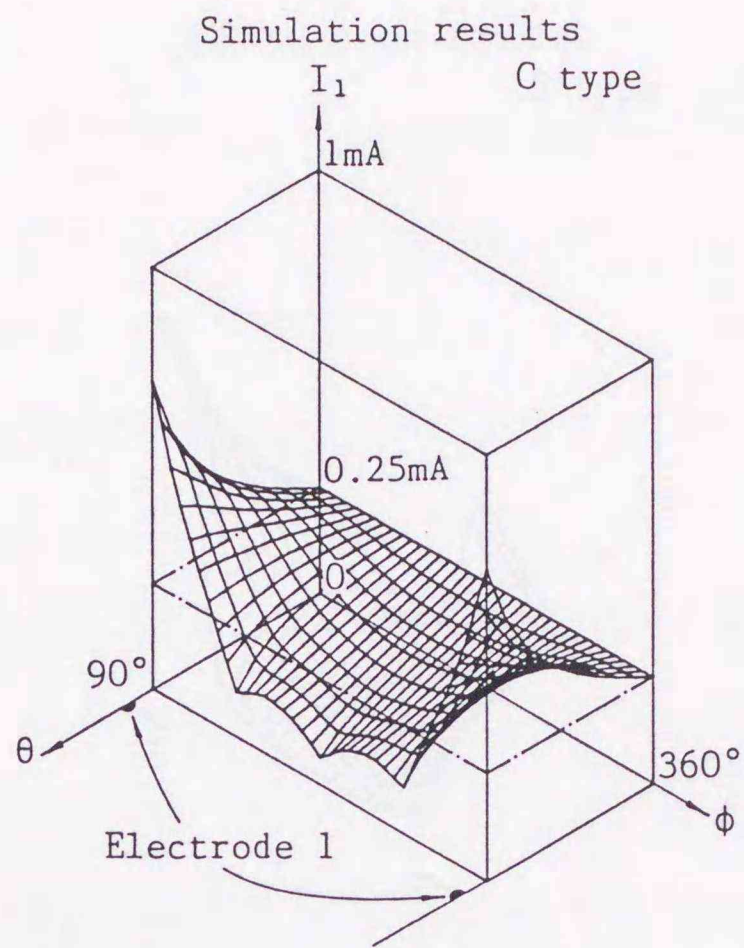
(a) A タイプ



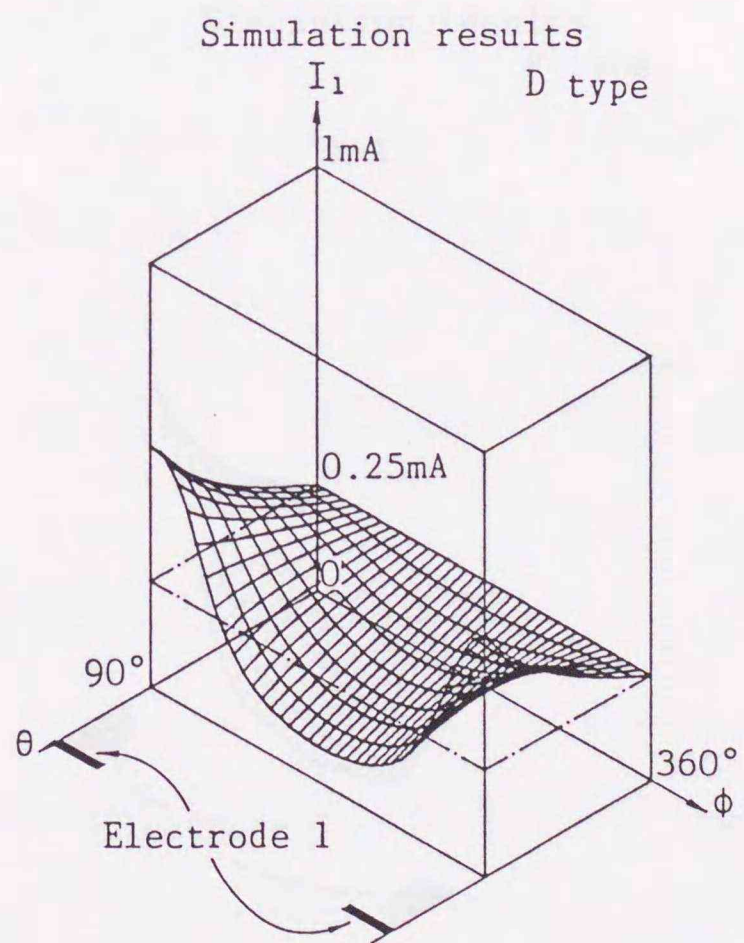
(b) B タイプ

図2-9 シミュレーション結果 (その1)

(法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電極1に流れ込む電流値 I_1 の関係)



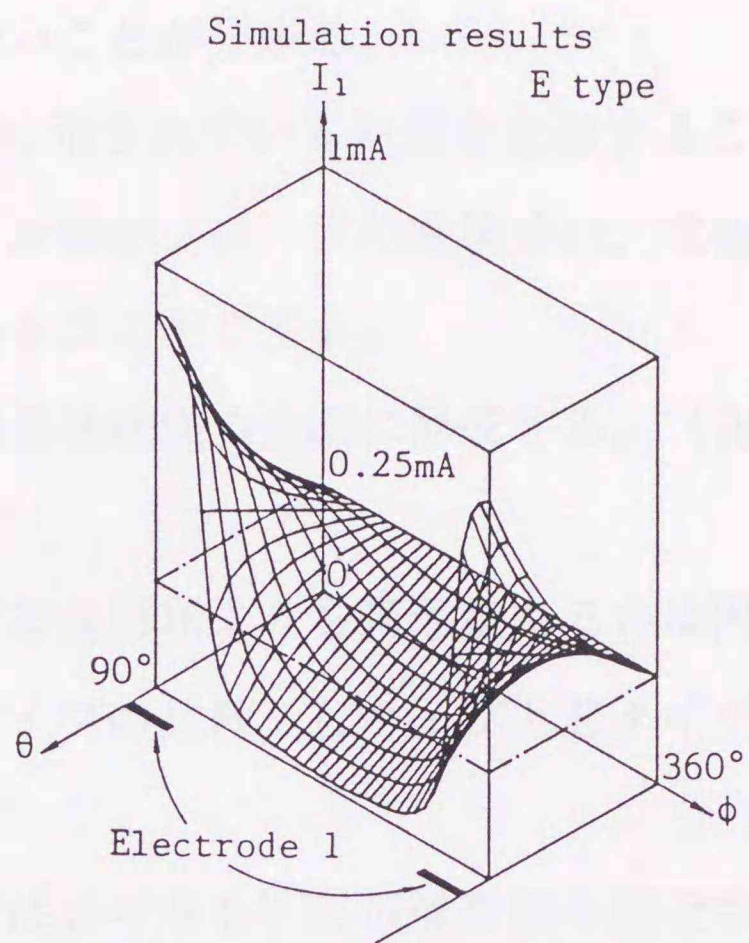
(c) C タイプ



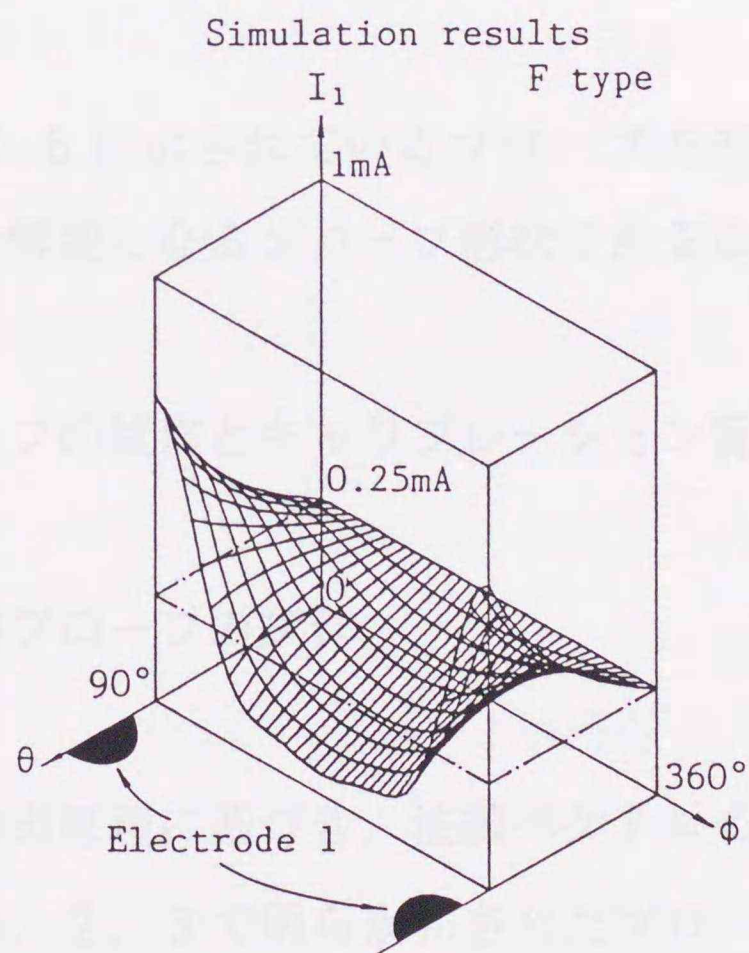
(d) D タイプ

図2-9 シミュレーション結果 (その2)

(法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電極1に流れ込む電流値 I_1 の関係)



(e) E タイプ



(f) F タイプ

図2-9 シミュレーション結果 (その3)

(法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電極1に流れ込む電流値 I_1 の関係)

が含まれていないことから，理論的には，球面抵抗薄膜の抵抗値は分解能には影響を及ぼさないことが分かる。

図2-9(a)～(f)に示されている結果を比較することにより，高分解能を有する法線ベクトル検出プローブの電極形状，電極位置の設計仕様として次のようにまとめることができる。

- (1) 抵抗薄膜体は球体の全面に形成する。(AタイプとBタイプの比較より)
- (2) 電極形状は点形状よりも帯形状あるいは円形状とする。(BタイプとDタイプの比較，CタイプとEタイプの比較，Fタイプの参照より)
- (3) 電極位置は $\theta = 90^\circ$ に可能な限り接近させる。(BタイプとCタイプの比較，DタイプとEタイプの比較，Fタイプの参照より)

したがって，図2-6に示されているプローブモデルにおいて，EタイプとFタイプが高分解能となるプローブ形状であることが分かる。

2. 4 基礎プローブの試作とキャリブレーション実験

2. 4. 1 基礎プローブの試作

2. 2で示した検出原理に基づき，法線ベクトルの検出が可能であることを確認するため，2. 3で明らかにされたプローブの設計仕様に基づき，法線ベクトル検出基礎プローブを試作した。電極形状は，形成の容易さから円形状（図2-6に示したFタイプ）とした。

プローブと被測定物の接触点と電極の間の電気抵抗値に反比例して，接

触点からそれぞれ4個の電極に電流が分流するため、理論的には、球面抵抗薄膜の電気抵抗値は、法線ベクトルの検出精度には影響を及ぼさない。このことは、式(2-7)に電気抵抗率が含まれないことから理解できる。しかし、抵抗薄膜材料の電気抵抗の温度係数(TCR)を低くすることにより、測定精度が向上することが実験的に確認されている。これは、TCRが大きい場合、環境の温度変化により、球面抵抗薄膜の抵抗値が部分的に変化するためと考えられる。

したがって、TCRが小さく、電子部品の電気抵抗材料として一般的に広く用いられており、その薄膜の形成も容易であるNi-Crを抵抗薄膜材料として採用し、基礎プローブの試作を行った。絶縁セラミック球の表面にNi-Crを蒸着し、球面抵抗薄膜を形成した。形成された球面抵抗薄膜のTCRは $\pm 50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ であり、その直径は 30.2 mm であった。電極は、球面抵抗薄膜上の電極以外の部分を保護し、その上からNiを析出することにより形成した。電極間の平均抵抗値は約 100Ω であった。図2-10は試作した面法線検出プローブの外観を示している。4箇所の電極からは、リード線が導かれている。

2.4.2 キャリブレーション実験の方法と装置

提案した法線ベクトル検出プローブは、被測定物との接触点から4つの電極に流れ込むそれぞれの電流値から法線ベクトルを算出する。PSDのように抵抗層が平面の場合、2.2において述べたように、電極に流れ込む電流値と光位置の関係が線形であり、電流値から直接光位置を算出できるため、あらかじめ電流値と光位置の関係を求めておく必要がなかった。しかし、抵抗層が球面薄膜である場合、計算機シミュレーションにより得



図2-10 試作した法線ベクトル検出基礎プローブ

られた法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電極1に流れ込む電流値の関係(図2-9)より明かなように、接触点を意味する法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電極に流れ込む電流値は1対1の関係ではない。したがって、あらかじめ法線方向の角度を割り出した基準面の測定を行い、各電極に流れ込む電流値を検出し、キャリブレーションデータとして法線方向(法線ベクトル)と電流値の関係を求めておくこととする。実際の測定では、キャリブレーションデータを用いて、検出された電流値より被測定面の法線ベクトルを算出する手続きが必要になる。

図2-11はキャリブレーション実験の方法を示している。図2-10に示している基礎プローブをNCフライス盤の主軸に設置し、ベッド上に固

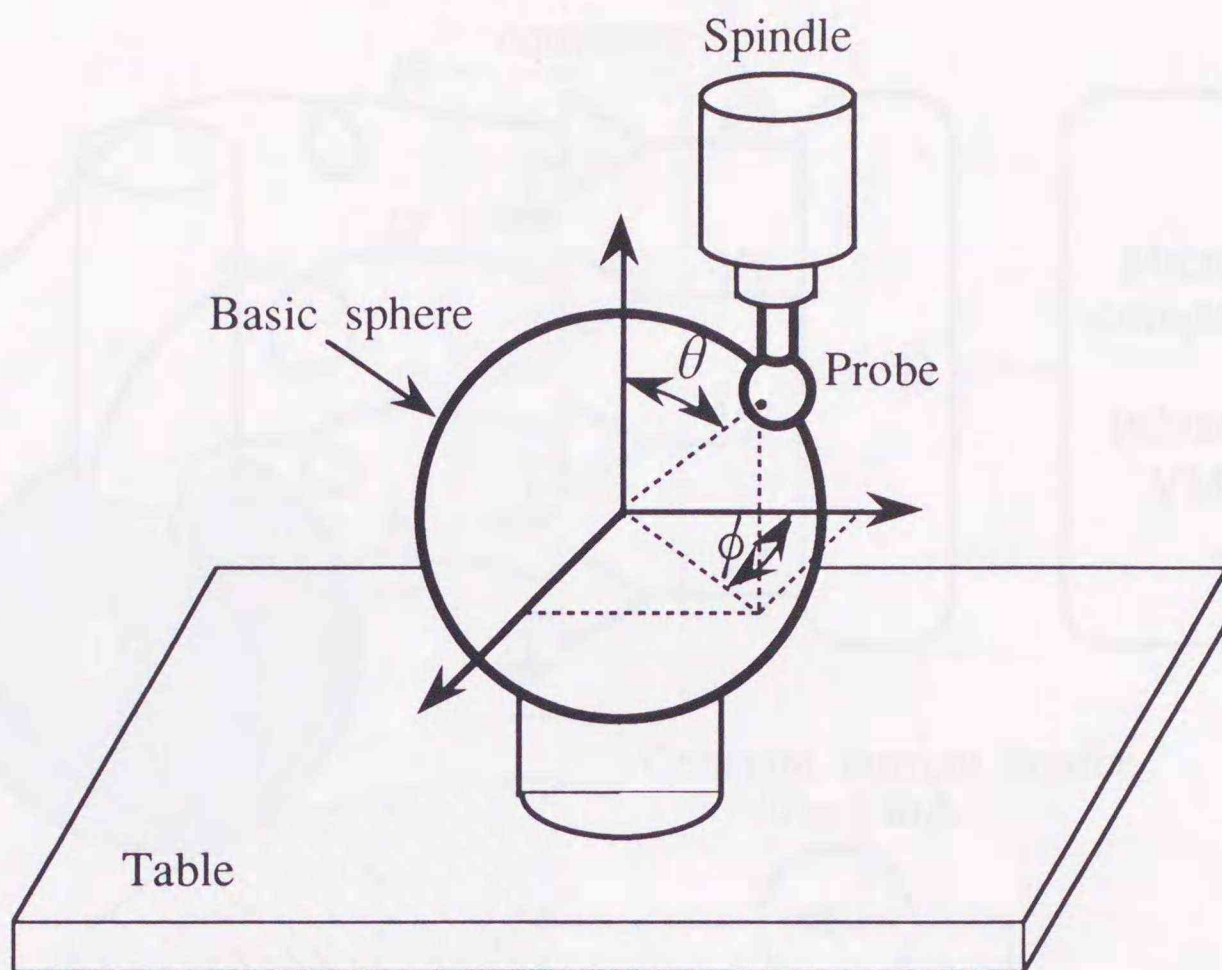


図2-11 キャリブレーション実験

定した直径3インチの基準球（スチールボール）の測定を行った。その測定において、基準球の中心点の位置を認識することにより、基準球面上の任意の点の法線ベクトルを割り出すことができる。これにより測定基準面の法線方向の設定を行った。キャリブレーション実験では、法線ベクトル方向を、 θ 方向に関し $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を 10° 間隔に、また、 ϕ 方向に関し、 $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲を 10° 間隔に設定し、それぞれの法線ベクトルを有する基準球上の点の測定を行い、法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電極に流れ込む電流値の関係を得た。

プローブ上の電極に流れ込む電流値は、図2-12に示されているように、OPアンプを基礎として試作された電流－電圧変換回路により電圧値に変換され、12ビットA/Dコンバータを介して16ビットマイクロコ

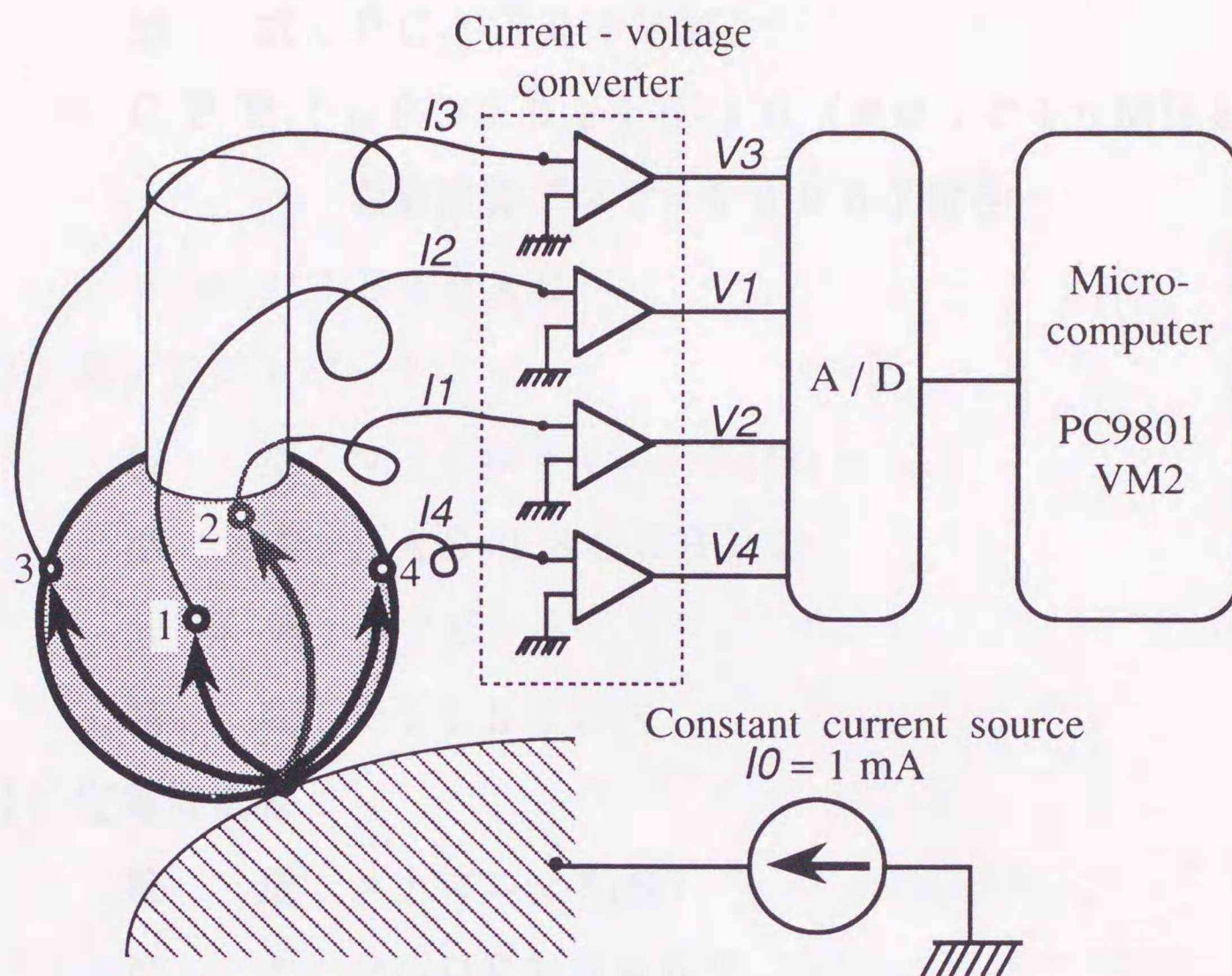


図 2-1-2 実験装置

ンピュータへ入力される。このとき、定電流電源の定電流値は 1 mA に設定されている。また、 1 mA の電流値は、電流-電圧変換回路により 10 V の電圧値に変換される。

キャリブレーション実験に使用した NC フライス盤、マイクロコンピュータ、A/D コンバータ、定電流電源の基本仕様は以下に示す通りである。

(1) NC フライス盤

製 造：(株)牧野フライス製作所

型 式：KSNCC-70

制御装置として NEDAC-M (NEC 製) 使用

(2) マイクロコンピュータ

製 造：日本電気(株)

型 式：PC-9801VM2

CPU： μ PD70116-10（クロック10MHz）

数値演算プロセッサ8087付き

メモリ：640kB

(3) A/Dコンバータ

製 造：マイクロサイエンス(株)

型 式：DAS-1898BPC

分 解 能：12ビット

精 度： ± 5 LSB以内

(4) 定電流電源

製 造：メトロニクス(株)

型 式：MODEL5962

出力電流：1～100mA（0～20V）

電流変動： $0.05\% + 1\mu\text{A}$

リップル： $(0.05\% + 1\mu\text{A})\text{pp}$

2.4.3 キャリブレーション結果

キャリブレーション実験により、法線ベクトル方向(θ , ϕ)と各電極に流れ込む電流値の関係が得られた。図2-13は、同実験より得られた法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電極1へ流れ込む電流値 I_1 の関係を示している。キャリブレーション実験結果（図2-13）と計算機シミュレーション結果（図2-9(f)）は極めて良く一致しており、これより計算機シミュレーションの手法が適切であったことが確認できる。

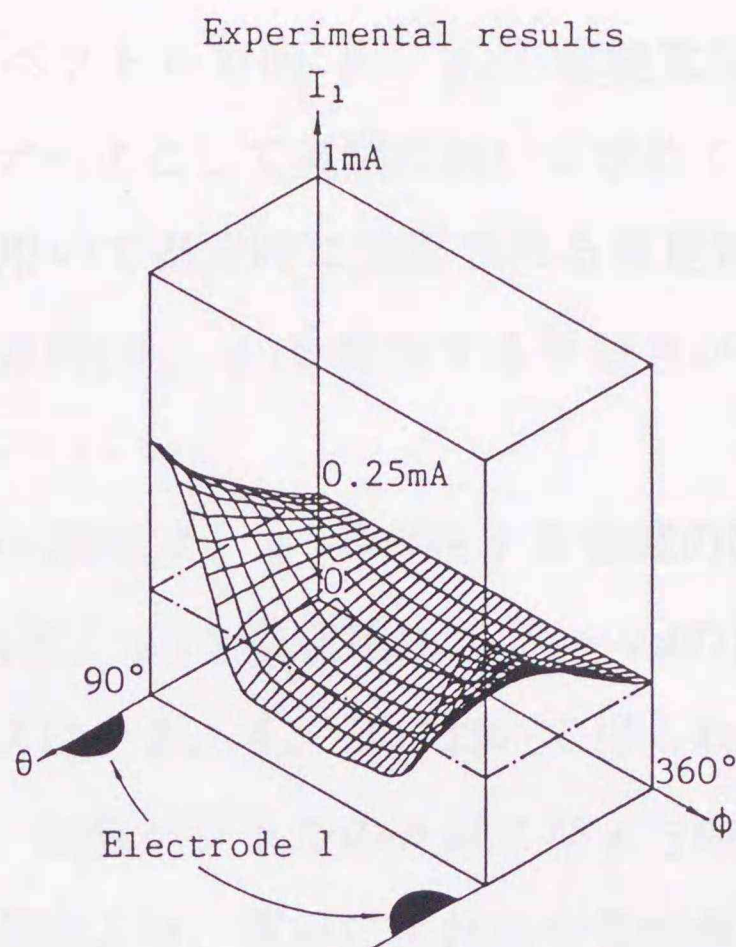


図2-13 キャリブレーション実験結果
(法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電流値 I_1 の関係)

2.5 法線ベクトルの算出方法と基礎プローブの測定精度

2.5.1 法線ベクトルの算出方法

2.4.2で述べたように、法線ベクトル検出プローブによる測定で検出されるデータは、プローブ上に形成された4個の各電極へ流れ込む電流値 $I_1 \sim I_4$ に等価な電圧値 $V_1 \sim V_4$ である。これらの電圧値 $V_1 \sim V_4$ を電極電圧値と呼ぶこととする。法線ベクトル方向(θ , ϕ)に対して唯一の電極電圧値 $V_1 \sim V_4$ の組み合わせが検出されるが、法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電極電圧値 $V_1 \sim V_4$ の関係が非線形であるため、法線ベクトル方向(θ , ϕ)は、測定電極電圧値 $V_1 \sim V_4$ から単純には決定できない。したがって、電極電圧値 $V_1 \sim V_4$ より測定点の法線ベクトル方向(θ , ϕ)を求めるために

は、あらかじめ法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電極電圧値 $V1 \sim V4$ の関係をキャリブレーションデータとして実験において求めておき、このキャリブレーションデータを用いて測定時に検出される電極電圧値 $V1 \sim V4$ より測定点の法線ベクトル方向(θ , ϕ)を算出する手続きが必要となる。この手続きを以下に述べる。

(1) 法線ベクトル方向(θ , ϕ)の存在する領域の限定

法線ベクトル方向(θ , ϕ)と電極電圧値 $V1 \sim V4$ の関係、すなわちキャリブレーションデータは、2.4.3において得られている。同キャリブレーションデータは、法線ベクトルの θ および ϕ 方向がそれぞれ 10° 間隔に異なる基準面の測定より、電極に流れ込む電流値を電圧値に変換し求められた。

したがって、キャリブレーションデータは、 θ および ϕ 方向がそれぞれ 10° 間隔に異なる法線ベクトル方向に対する電極電圧値となっている。ここで、法線ベクトルの θ および ϕ 方向が次式(2-12)の領域に着目する。

$$\left. \begin{array}{l} m \times 10^\circ \leq \theta \leq (m+1) \times 10^\circ \\ n \times 10^\circ \leq \phi \leq (n+1) \times 10^\circ \end{array} \right\} \quad (2-12)$$

ただし、 $m=0 \sim 8$, $n=0 \sim 35$ である。この領域において、それぞれの4つの電極電圧値 $V1 \sim V4$ に関して、キャリブレーションデータと測定データを比較し、測定データ値以上のキャリブレーションデータ値が存在し、かつ測定データ値以下のキャリブレーションデータ値が存在する領域を全領域($\theta=0 \sim 90^\circ$, $\phi=0 \sim 360^\circ$)の中から検索する。図2-14は、 $\theta=38^\circ$, $\phi=22^\circ$ の法線ベクトルを有する面の測定において得られた測定データにより検索された領域を示している。同図中において、○は電極1電圧値 $V1$ を基に検索された領域を示しており、同様に、

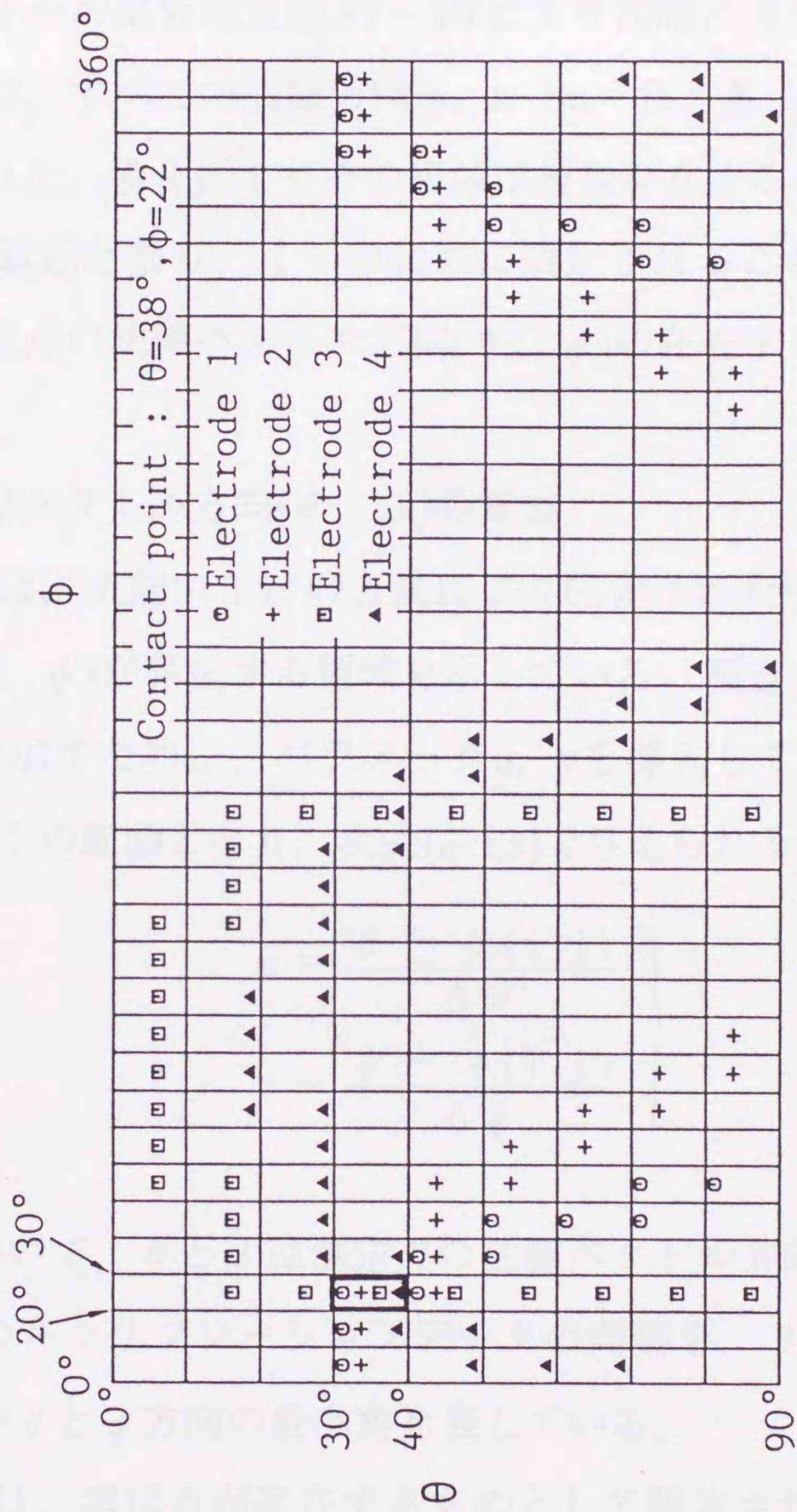


図2-14 各電極電圧値により検索された領域

+, □, △は, それぞれ電極2電圧値 V_2 , 電極3電圧値 V_3 , 電極4電圧値 V_4 により検索された領域を示している。同図より, 4つの電極電圧値 $V_1 \sim V_4$ により同時に検索される領域は, 唯一となることが確認できる。このように4つの電極電圧値 $V_1 \sim V_4$ により同時に検索される領域が唯一になることは, すべての法線方向 m, n ($m=0 \sim 8, n=0 \sim 35$) について確認された。場合によりその領域は複数存在することもあるが, 連続した m, n の範囲となり, 1つの領域に限定されることになる。この手順により, 測定点の法線ベクトル方向 (θ, ϕ) の存在する領域を1箇所限定する。

(2) 法線ベクトル方向 (θ, ϕ) の算出

図2-15は, 上記(1)の方法により限定された測定点の法線ベクトル方向 $C_p(\theta, \phi)$ が存在する領域を示している。測定点の法線ベクトル方向 (θ, ϕ) を示すために, パラメータ u, v を導入している。パラメータ u, v の値は $0 \sim 1$ の範囲となり, 次式(2-13)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{\theta - \theta(i, j)}{\Delta \theta} \\ v &= \frac{\phi - \phi(i, j)}{\Delta \phi} \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

式(2-13)において, θ と ϕ は測定点の法線ベクトル方向を, $\Delta \theta$ と $\Delta \phi$ は θ と ϕ 方向のキャリブレーションデータの間隔を, $\theta(i, j)$ と $\phi(i, j)$ は限定された領域の θ と ϕ 方向の最小角を表している。

図2-16は, 測定点が存在するものとして限定された領域のキャリブレーションデータを基に, 測定電極電圧値 MV_1, MV_2, MV_3, MV_4 から測定点の法線ベクトル方向 (θ, ϕ) を算出する方法を示している。電極1に関するキャリブレーションデータとして, 領域コーナ一点の電極1電圧

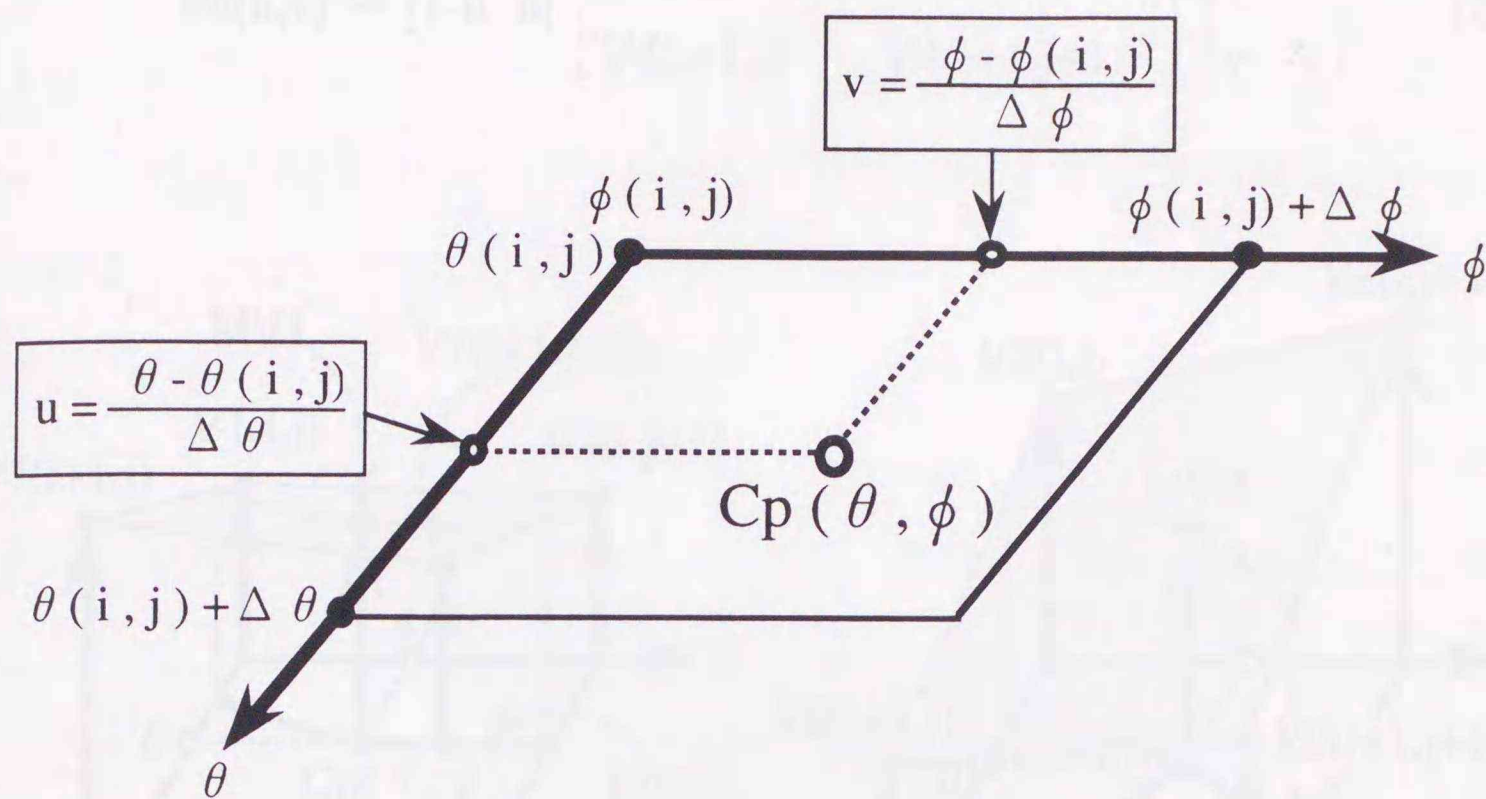


図2-15 法線ベクトル方向が存在する限定された領域式

値 $V1(i,j)$, $V1(i+1,j)$, $V1(i,j+1)$, $V1(i+1,j+1)$ が与えられている。同様に、電極2, 電極3, 電極4に関しても、領域コーナ一点のキャリブレーションデータが与えられている。同図に示されているように、パラメータ u , v とキャリブレーションデータにより、直線補間に基づく双1次パッチ $V1(u,v)$, $V2(u,v)$, $V3(u,v)$, $V4(u,v)$ を定義する。双1次パッチは式(2-14)~式(2-17)で表される。

$$V1(u,v) = \begin{bmatrix} 1-u & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1(i,j) & V1(i,j+1) \\ V1(i+1,j) & V1(i+1,j+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-v \\ v \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

$$V2(u,v) = \begin{bmatrix} 1-u & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V2(i,j) & V2(i,j+1) \\ V2(i+1,j) & V2(i+1,j+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-v \\ v \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

$$V3(u,v) = \begin{bmatrix} 1-u & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V3(i,j) & V3(i,j+1) \\ V3(i+1,j) & V3(i+1,j+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-v \\ v \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

$$V4(u,v) = \begin{bmatrix} 1-u & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V4(i,j) & V4(i,j+1) \\ V4(i+1,j) & V4(i+1,j+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-v \\ v \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

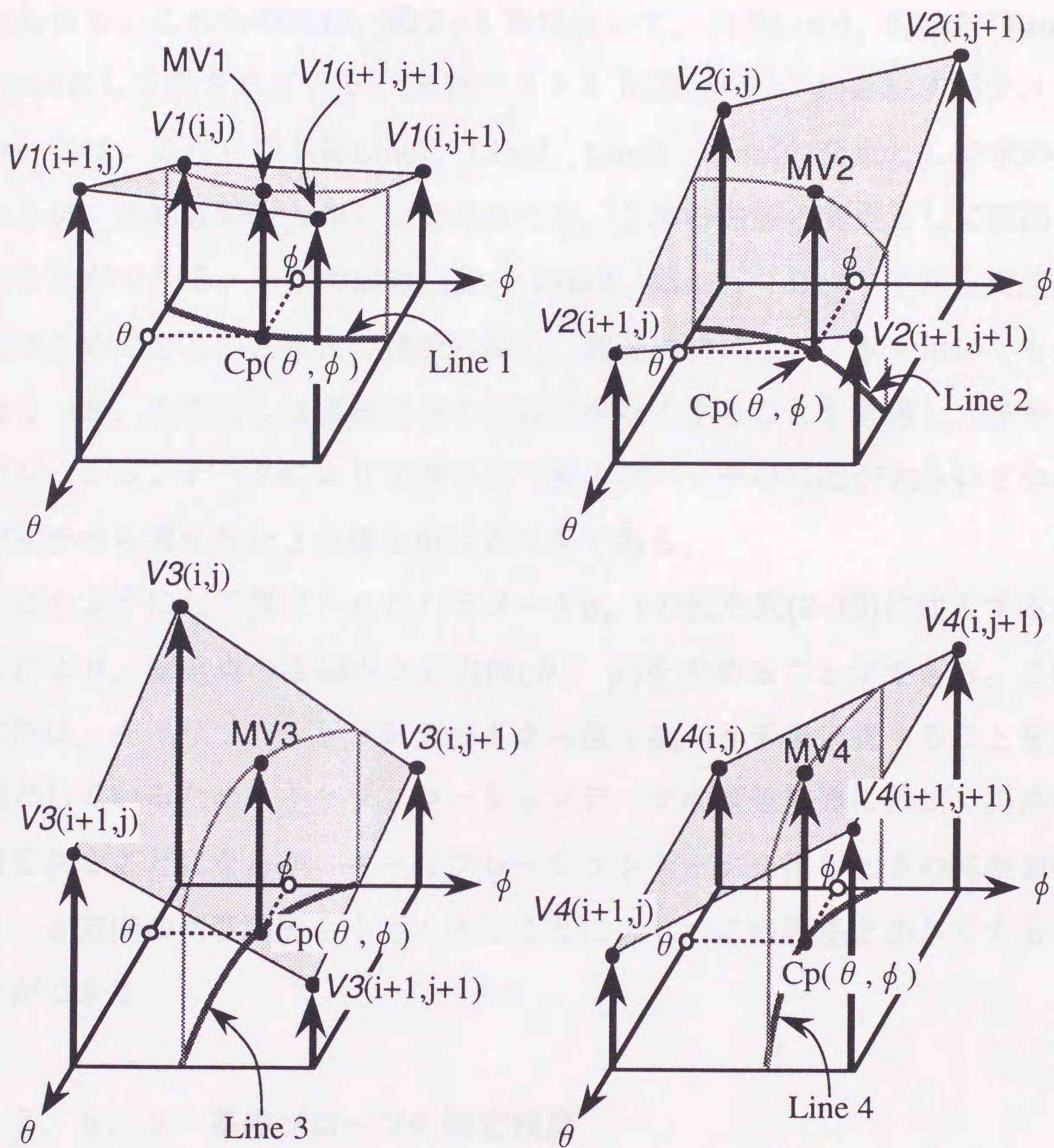


図 2-16 法線ベクトルの算出法

測定電極電圧値 $MV1$, $MV2$, $MV3$, $MV4$ を,それぞれ双1次パッチ式(2-14)~式(2-17)の $V1(u,v)$, $V2(u,v)$, $V3(u,v)$, $V4(u,v)$ に代入することにより,測定点の法線ベクトル方向を表すパラメータ u , v の満足すべき式が得られる。これらの式は,図2-16において,曲線Line1, Line2, Line3, Line4として表されている。法線ベクトル方向 $Cp(\theta, \phi)$ を示すパラメータ u , v は,これらの曲線Line1, Line2, Line3, Line4の交点として求められるが,未知数が u と v の2つであるため,2本の曲線の交点として算出することができる。4本の曲線Line1, Line2, Line3, Line4の中から交点算出のための2本の曲線式の選択に関し,理論的にはどの2本を用いても差はないが,実際的には測定誤差の影響を少なくすることを考慮し,キャリブレーションデータにより定義された双1次パッチの勾配が大きい2つのパッチから導かれた2曲線を用いるべきである。

このようにして算出されたパラメータ u , v の値を式(2-13)に代入することにより,測定点の法線ベクトル方向 (θ, ϕ) を求めることができる。この方法は,キャリブレーションデータから双1次パッチを定義することを基礎としているため,キャリブレーションデータの直線補間に基づく誤差が含まれることになるが,キャリブレーションデータを得るときの基準面の θ , ϕ 方向の角度間隔を小さくすることにより,この誤差を小さくすることができる。

2. 5. 2 基礎プローブの測定精度

試作した基礎プローブの法線ベクトル方向 (θ, ϕ) の測定精度を明らかにするため,直径8.5 mm,真円度 $0.2 \mu m$ の鋼球の測定を行った。図2-17は,鋼球の測定位置とその位置における法線ベクトル方向 (θ, ϕ) の

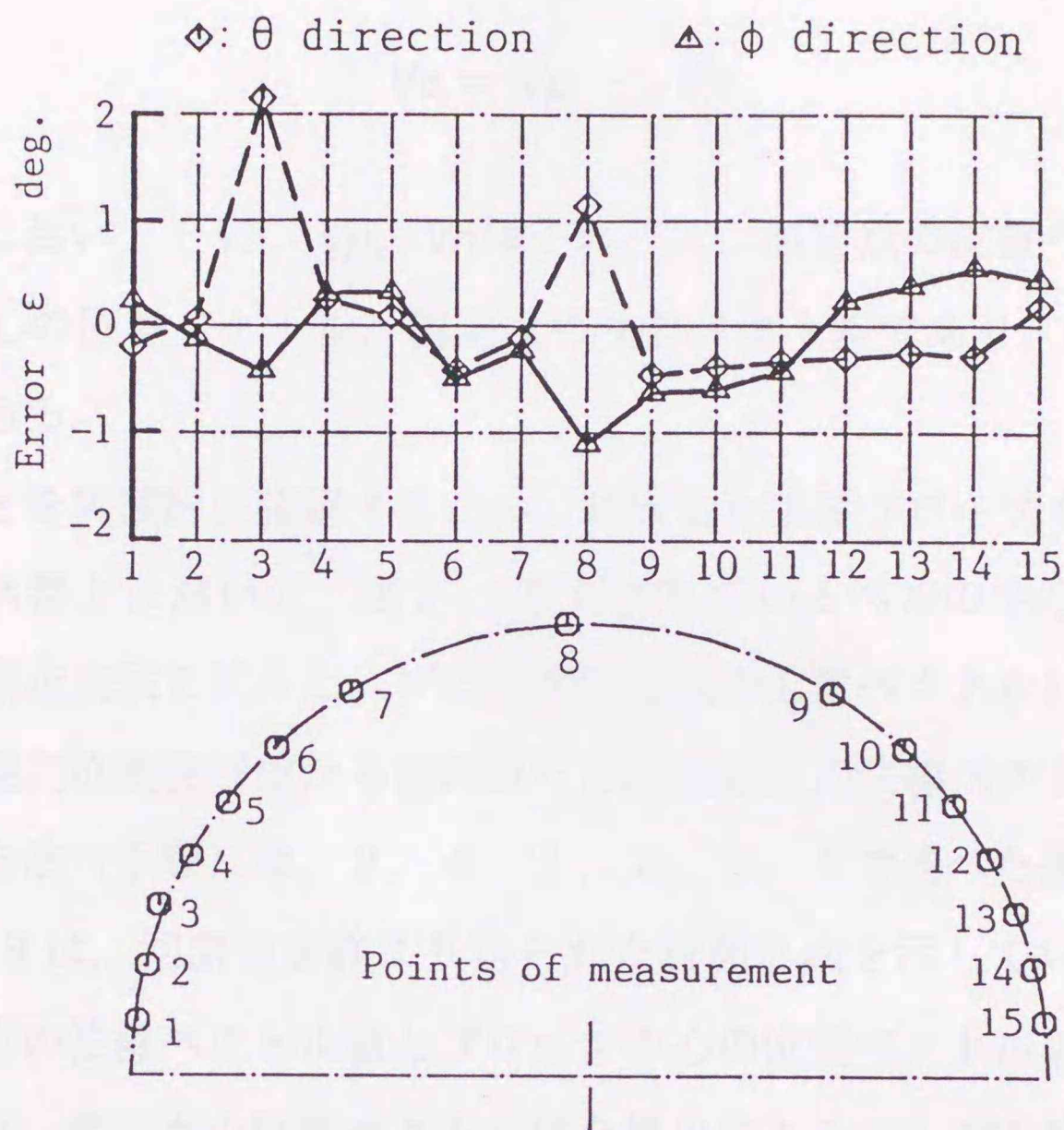


図2-17 基礎プローブの測定精度

測定誤差を示している。同図より、測定位置3における結果を除くと、測定位置8，すなわち $\theta = 0^\circ$ において測定誤差が 1.1° となっている以外は、 θ および ϕ 方向とも測定誤差は 0.7° 以内であることが確認できる。

2. 6 曲面形状の測定基礎実験

1. 1. 1において示したように、測定点の法線ベクトル値とプローブ中心の位置ベクトル値を検出することにより、式(2-18) (式(1-1)と同式)

から測定点の位置ベクトル値を算出することができる。

$$V_o = V_p - r \cdot V_n \quad (2-18)$$

式(2-18)において、 V_o 、 V_p 、 V_n はそれぞれ、測定点の位置ベクトル、プローブ中心の位置ベクトル、測定点の法線ベクトルであり、 r はプローブ半径値である。

このことを実験的に確認するため、試作した基礎プローブを用いて、NCフライス盤上において、図2-18に示しているベルの中心点を通る断面形状の測定実験を試みた。プローブ中心点の位置ベクトルは、NCフライス盤の現在位置表示盤から読み取った。測定点の法線ベクトルの検出装置、検出方法（手順）は、2.4.2、2.5.1で述べた通りである。

図2-19は、同測定実験より得られた断面形状を示している。これより、測定点の法線ベクトル値とプローブ中心の位置ベクトル値を検出することにより、測定点の位置ベクトル値を算出できることが実験的に確認でき、形状測定における法線ベクトルの有意性が認められた。

2.7 本章の総括と結論

本章では、測定点の法線ベクトルの直接測定を可能とするプローブを提案し、その基礎プローブの試作を行った。その結果として、以下の通りにまとめられる。

- (1) 機械部品基礎形状の測定評価、自由曲面加工形状の測定評価、自由曲面計算機モデル構築のための物理モデル測定評価において、三次元座標測定機により検出されるデータがプローブ中心点の座標値であり、測定点（プローブと被測定物の接触点）の位置ベク

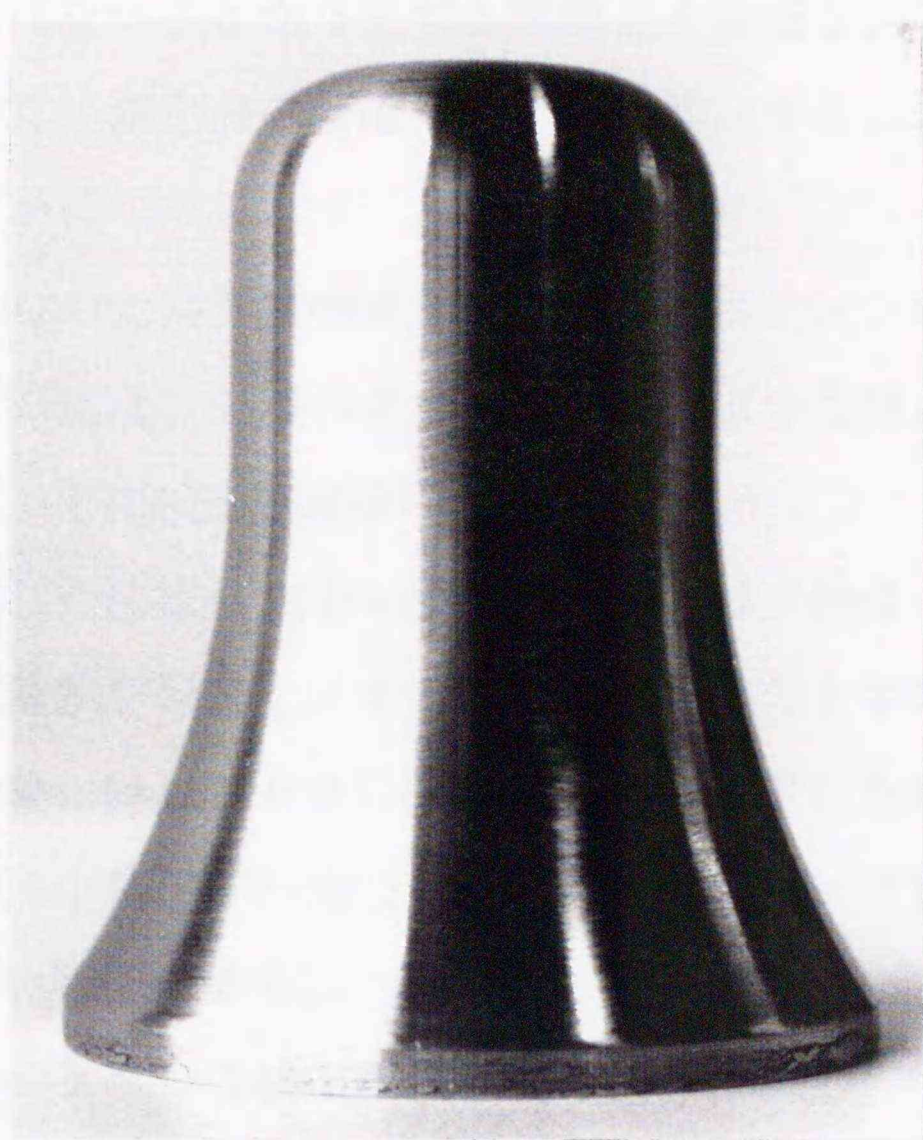


図 2 - 1 8 測定対象

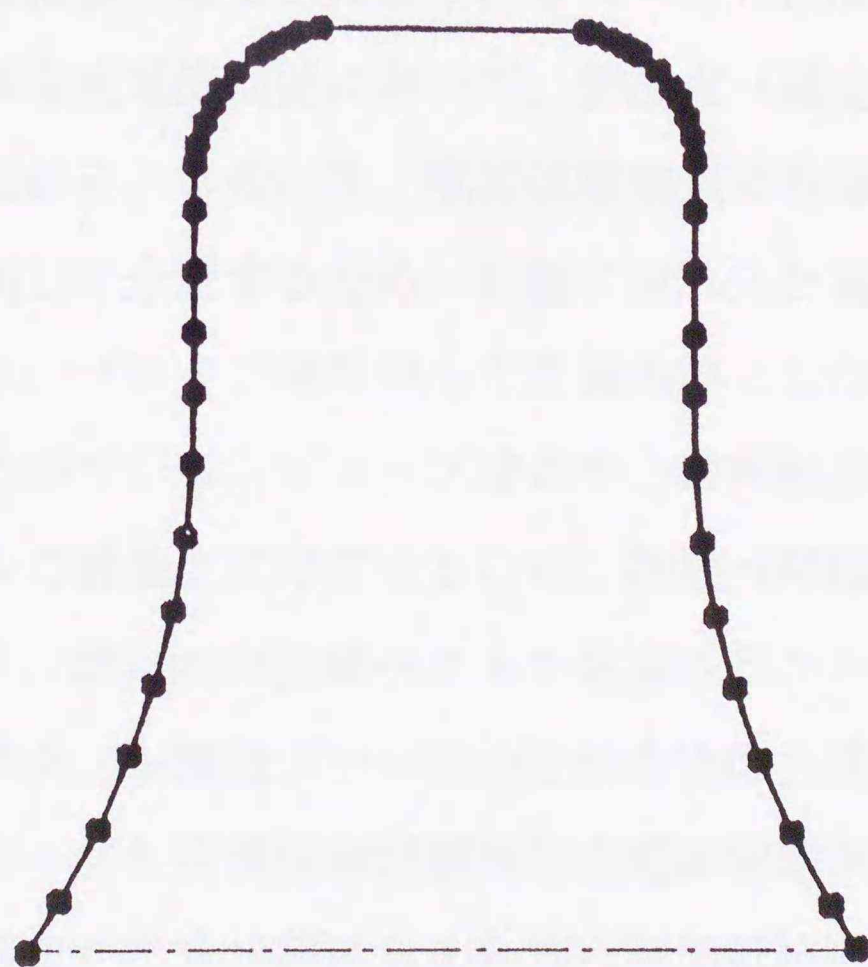


図 2 - 1 9 測定結果（断面形状）

トルではないことから生ずる問題点を指摘し、これらの測定評価において、測定点の法線ベクトルを検出することの意義と必要性を明らかにした。

- (2) PSDの光位置検出原理および球面ポテンショメータ原理に基づき、測定点の法線ベクトルの直接検出を可能とするプローブを提案し、その検出原理を明らかにした。
- (3) 提案した法線ベクトル検出プローブは、絶縁セラミック球表面に抵抗薄膜を形成し、その球面抵抗薄膜の上半球上に4個の電極を支持軸に対して 90° 間隔に対象に設置した単純な構造となっており、小型化が可能であるとともにプローブ支持方向に制限を受けない特徴がある。
- (4) 法線ベクトルの検出原理は次の通りである。すなわち、プローブ（球面抵抗薄膜）上に設置された電極と被測定物を定電流電源を介して接続することにより、プローブと被測定物の接触により形成される定電流回路において、接触点（測定点）から各電極へ電流が流れる。このとき、電流は接触点と各電極間の電気抵抗値に反比例して分流するため、電極に流れ込む電流値を検出することにより、プローブ球の中心を座標基準とした接触点座標値を求めることができる。プローブ球の中心は接触点（測定点）の法線ベクトルの延長上に存在するため、接触点座標値を正規化することにより、測定点の法線ベクトルを求めることができる。
- (5) 法線ベクトル検出プローブの設計を次の方法で行った。すなわち、プローブと被測定物が接触し定電流回路が形成され、回路内の電位分布が定常状態にあるとき、球面抵抗薄膜の電位分布はラプラスの式を満足している。したがって、同式の電位に関する差

分式を反復計算により解き球面抵抗薄膜の電位分布を明らかにすることにより、接触点位置（法線ベクトル）と各電極に流れ込む電流値の関係を求めた。これより、電極形状、電極位置、球面抵抗薄膜形状が異なる代表的な6タイプのプローブモデルに関する法線ベクトルと電極に流れ込む電流値の関係を求め、法線ベクトルを検出するうえで高分解能が得られるプローブ電極の位置と形状および球面抵抗薄膜形状を明らかにした。

- (6) 計算機シミュレーションに基づいたプローブ設計より、法線ベクトル検出の分解能の観点から、同プローブは抵抗薄膜を球面全体に形成し、電極形状を帯形状あるいは円形状とし、電極位置をプローブ球の上半球において可能な限り下半球に接近させるべきであることが明らかになった。この設計に基づき、絶縁セラミック球上にNi-Crの抵抗薄膜を蒸着し、その上半球に円形状のNiを析出して電極を形成し、法線ベクトル検出基礎プローブとしての試作を行った。
- (7) 法線ベクトルの測定システムとして、プローブ電極に流れ込む電流値を電流-電圧変換回路により電圧値に変換し、12ビットA/Dコンバータを介して16ビットマイクロコンピュータに入力するシステムを構築した。
- (8) 法線ベクトルの測定において検出されるデータは、プローブ電極に流れ込む電流値に等価な電圧値（電極電圧値）である。電極電圧値と法線ベクトルの関係は線形ではないため、あらかじめキャリブレーションデータとして電極電圧値と法線ベクトルの関係を求めておき、この関係より、測定時に得られる電極電圧値から法線ベクトルを算出する手続きが必要となる。このため、キャリ

ブレーションデータを基に双1次パッチを定義し，この双1次パッチと測定電極電圧値から測定点の法線ベクトルを算出する方法を提案した。

- (9) 試作した基礎プローブをNCフライス盤主軸に設置し，NCフライス盤ベッド上に固定された基準球を基に測定点の法線方向を割り出し，同点の測定から法線方向（単位法線ベクトル）と電極電圧値の関係としてキャリブレーションデータを求めた。プローブならびに基準球の中心座標値はNCフライス盤の現在位置表示盤より得た。
- (10) キャリブレーションデータを基にして鋼球の測定実験を行った。その測定誤差から，試作した基礎プローブの測定精度が $\pm 0.7^\circ$ ($\theta = 0^\circ$ では 1.1°) であることを明かにした。
- (11) 曲面形状の測定実験を行い，プローブ中心点の位置ベクトルと測定点の法線ベクトルを検出することにより，測定点の位置ベクトルの算出が可能であることを実験的に確認し，形状測定における法線ベクトル検出の有意性を示した。

参 考 文 献

- [2- 1] Klaus Herzog : TODAY'S THREE DIMENSIONAL PRECISION MEASUREMENT, proceeding of 3rd ICPE, Kyoto, 1977年, p335. ([1-55])
- [2- 2] Lu Jie-chi, N.A.Duffie, J.G.Bollinger : Two Dimensional Tracing and Measurement Using Touch Trigger Probes, Annals of the CIRP, Vol.31, No.1, 1982年, p415. ([1-56])
- [2- 3] M.Wock, P.Bagh, R.Holler : Measuring Gears with a Numeric Controlled 3-Axis Measuring Machine, Annals of the CIRP, Vol.24, No.1, 1975年, p375. ([1-66])
- [2- 4] Hans Joachim Neumann : Gear inspection on a multi-coordinate measuring machine, Reprint of lecture held during the 5th International Conference on Automated and Product Control (12th IPA Meeting in Stuttgart), 1980年. ([1-67])
- [2- 5] M.Bambach, A.Furst : Bestimmung der Antastunsicherheit elektronischer 3-D-Tastsysteme, VDI-Berichte, No.378, 1980年, p15. ([1-68])
- [2- 6] 伊藤嘉朗 : カールツァイス三次元測定機 : 計測技術, No.3, 1981年, p80. ([1-69])
- [2- 7] Diane Kaylor : Metrology — CMMs Go the Distance (CMMs measure up to the ultimate machine tool manufacturing dream), MECHANICAL ENGINEERING, February, 1983年, p37. ([1-70])
- [2- 8] 佐久間健三, 中村哲夫 : 寸法・形状測定における測定ヘッド, 精密工学会誌, Vol.52, No.4, 1986年, p605. ([1-71])

- [2- 9] N.A.Duffie, S.J.Malmberg : Error Diagnosis and Compensation Using Kinematic Models and Position Error Data, Annals of the CIRP, Vol.36, No.1, 1987年, p355. ([1-72])
- [2-10] 中村哲夫 : 三次元測定機による新しい形状測定システム, 合成樹脂, Vol.33, No.7, 1987年, p13. ([1-73])
- [2-11] 丸山六男 : 三次元検出器の動作特性, 機械の研究, Vol.39, No.3, 1987年, p39. ([1-74])
- [2-12] 斯波信雄 : 三次元座標補正回路の試作について, 呉工業試験所報告, No.28, 1980年, p6. ([1-75])
- [2-13] T.Kishinami, H.Nakamura, K.Saito, A.Kamei : Three Dimensional Curved Surface Measurement using Newly Developed Three Dimensional Tactile Sensing Probe, Proceeding of the International Symposium on Metrology for Quality Control in Production, 1984年, p288. ([1-76])
- [2-14] 岸浪建史, 中村久, 斎藤勝政, 亀井明敏 : 新開発の三次元触覚プローブを利用した三次元曲面の計測, 東京精密技法, Vol.5, No.15, 1985年, p2. ([1-77])
- [2-15] 岸浪建史, 中村久, 斎藤勝政, 亀井明敏 : 三次元曲面形状測定プローブの基礎的研究, 精密工学会誌, Vol.52, No.8, 1986年, p142. ([1-78])
- [2-16] M.Higashi, I.Kohzen, J.Nagasaka : AN INTERACTIVE CAD SYSTEM FOR CONSTRUCTION OF SHAPES WITH HIGH-QUALITY SURFACE, Computer applications in Production and Engineering, 1983年, p371.

- [2-17] M.Higashi, T.Kushimoto, M.Hosaka : On Formulation and Display for Visualizing Features and Evaluating Quality of Free-form Surfaces, EUROGRAPHICS '90, 1990年, p299.
- [2-18] 大野義夫 : C A G D入門ー曲面 (1) ー, b i t, Vol.13, No.14, 1981年, p1784.
- [2-19] 大橋義春, 山本晃永 : 半導体位置検出器とその応用, 電子材料, Vol.19, No.2, 1980年, p119.
- [2-20] 倉沢一男, 山本晃永 : 非走査形ポジションセンサー, O plus E, No.16, 1981年, p79.
- [2-21] 倉沢一男 : 位置測定における P S Dの応用, 精密機械, Vol.51, No.4, 1985年, p730.
- [2-22] 青山英樹, 岸浪建史, 斎藤勝政 : 球面抵抗薄膜を用いた接触式面法線検出プローブの基礎的研究, 精密工学会誌, Vol.54, No.10, 1988年, p1957.
- [2-23] 村上和男 : ポテンショメータの位置センサへの応用, センサ・インターフェーシング No.3〜メカトロニクス・センサ活用編PART-2~, C Q出版者, 1983年, p68.
- [2-24] 二村忠元 : 電磁気学, 丸善株式会社, 昭和51年10月20日, p29.
- [2-25] 二村忠元 : 電磁気学, 丸善株式会社, 昭和51年10月20日, p34.

第3章 位置ベクトルと法線ベクトルの測定システム

第2章において、法線ベクトルの検出意義を示し、PSD原理に基づく法線ベクトル検出プローブを提案するとともに、検出原理およびプローブ構造を明かにした。また、プローブ表面の抵抗薄膜の電位を計算機シミュレーションにより求め、高分解能となるプローブモデルの電極位置と電極形状を明らかにし、プローブの設計を行った。同設計に基づき直径30.2mmの法線ベクトル検出基礎プローブの試作を行った。さらに、法線方向（法線ベクトル）と電極電圧値の関係としてキャリブレーションデータを求め、同データを基に測定データ（電極電圧値）から法線ベクトルを算出する方法を提案した。また、測定実験により、試作した基礎プローブの測定精度が $\pm 0.7^\circ$ であることを明らかにするとともに、同プローブを用いて曲面形状の測定が可能であることを示した。

本章では、法線ベクトル検出プローブが実用において要求される機能を明らかにし、同機能を持つ実用プローブの試作[3- 1]を行う。また、試作した実用プローブを三次元座標測定機に組み込み、位置ベクトルと法線ベクトルの測定システム[3- 1]–[3- 2]を構築する。さらに、構築したシステムの法線ベクトルの測定精度について明らかにする。

3. 1 法線ベクトル検出実用プローブ

第2章では、基礎プローブの提案と試作を行い、同プローブにより法線ベクトルの検出が可能であることを理論的および実験的に明らかにした。本節（3. 1）では、実用プローブが有すべき機能について検討するとと

もに、実用プローブの試作について述べる。

3. 1. 1 実用プローブの有すべき機能

法線ベクトル検出プローブの実用において有すべき機能を明かにするとき、次の3項目に関する検討が必要である。

- (1) プローブ径について。
- (2) 法線ベクトルの測定精度について。
- (3) 球面抵抗薄膜の特性について。

上記(1)と(2)の検討項目であるプローブ径と測定精度は、位置ベクトルの測定精度を基準としたとき相反する要素であるため、同時に検討しなければならない。すなわち、図3-1に示されているように、測定点の真の法線ベクトル方向が θ 、 ϕ であるとき、その測定値として法線ベクトル方向が θ' 、 ϕ' として得られたとすると、プローブの半径が R であるとき、位置ベクトルの測定誤差 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ は、式(3-1)で表される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= R\{\sin(\theta) \cdot \sin(\phi) - \sin(\theta') \cdot \sin(\phi')\} \\ \Delta y &= R\{\sin(\theta) \cdot \cos(\phi) - \sin(\theta') \cdot \cos(\phi')\} \\ \Delta z &= R\{\cos(\theta) - \cos(\theta')\} \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

法線ベクトルの測定誤差を $\Delta \theta, \Delta \phi$ とすると、 $\Delta \theta, \Delta \phi$ は次式(3-2)で表される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \theta &= \theta - \theta' \\ \Delta \phi &= \phi - \phi' \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

このとき、法線ベクトルの測定誤差 $\Delta \theta, \Delta \phi$ が十分小さいと仮定すると、

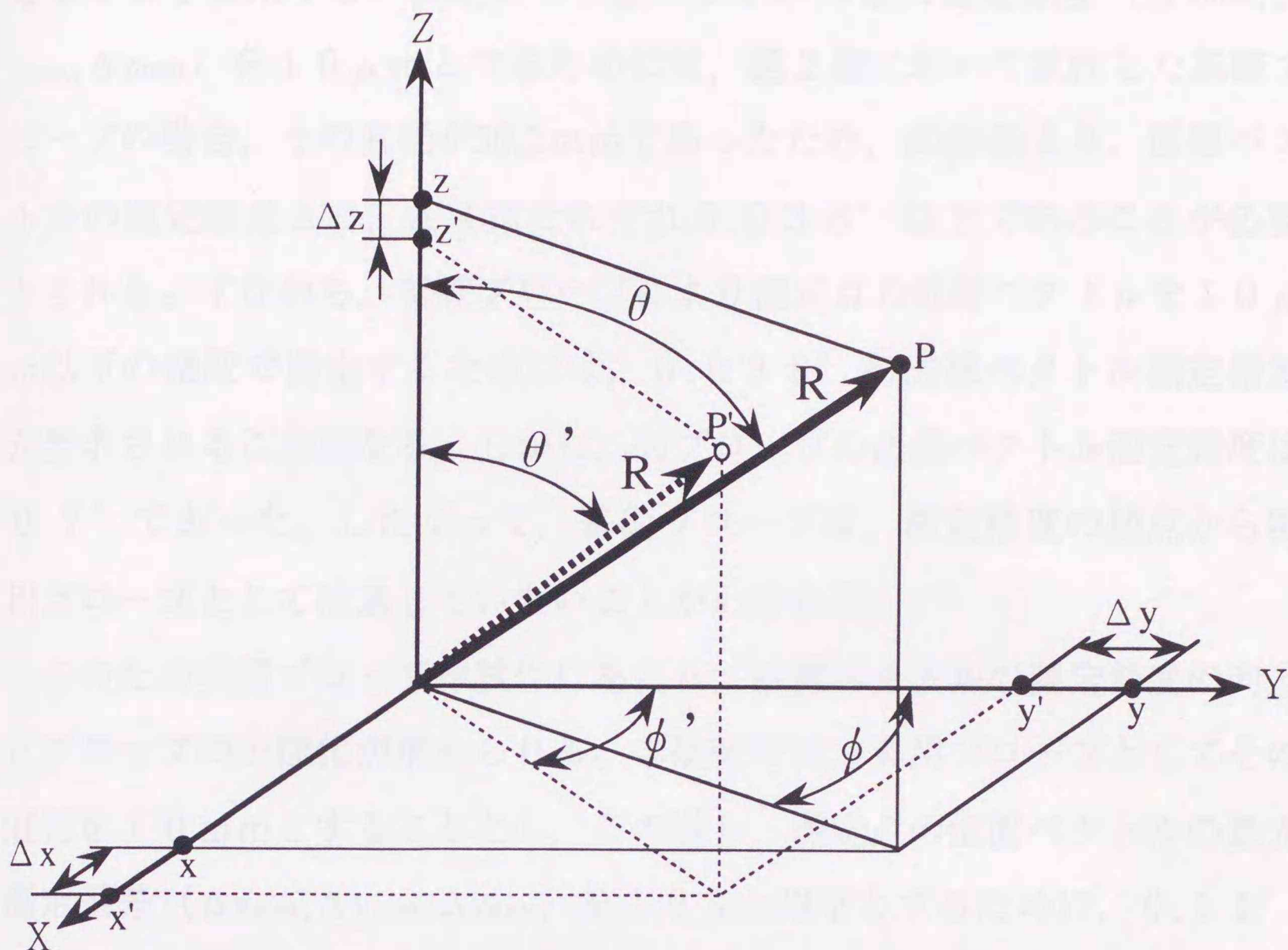


図3-1 法線ベクトル誤差と位置ベクトル誤差

測定点の位置ベクトル測定誤差 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) の最大値 ($\Delta x_{\max}, \Delta y_{\max}, \Delta z_{\max}$) は、式(3-3)で求められる。

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta x_{\max} &= R \cdot \sin(\Delta \phi) \\
 &\quad (\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ \text{ or } \phi = 180^\circ) \\
 \Delta y_{\max} &= R \cdot \sin(\Delta \phi) \\
 &\quad (\theta = 90^\circ, \phi = 90^\circ \text{ or } \phi = 270^\circ) \\
 \Delta z_{\max} &= R \cdot \sin(\Delta \theta) \\
 &\quad (\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ \sim 360^\circ)
 \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

実用プローブとして、測定点の位置ベクトルの測定誤差が $10 \mu\text{m}$ 以下と

なることを要求する。測定点の位置ベクトルの最大測定誤差 ($\Delta x_{\max}, \Delta y_{\max}, \Delta z_{\max}$) を $10 \mu\text{m}$ とするためには、第2章において試作した基礎プローブの場合、その直径が 30.2 mm であったため、式(3-3)より、法線ベクトルの測定誤差 $\Delta \theta$, $\Delta \phi$ はそれぞれ 0.038° 以下であることが必要とされる。すなわち、基礎プローブにより測定点の位置ベクトルを $10 \mu\text{m}$ 以下の精度で測定するためには、 0.038° の法線ベクトル測定精度が要求されることになる。しかし、同プローブの法線ベクトル測定精度は 0.7° であった。したがって、基礎プローブは、測定精度の観点から実用プローブとしては適していないことがわかる。

このため実用プローブの試作にあたり、法線ベクトルの測定精度の向上とプローブの小径化が求められる。本研究では、実用プローブとしてその直径を 10 mm とすることとし、この場合、測定点の位置ベクトルの最大測定誤差 ($\Delta x_{\max}, \Delta y_{\max}, \Delta z_{\max}$) を $10 \mu\text{m}$ 以下とするために、 0.11° の法線ベクトルの測定精度が要求される。

次に、実用プローブが有すべき機能として、検討事項の(3)に挙げていた抵抗薄膜の特性について検討する。提案するプローブは接触式であるため、測定時にプローブと被測定物との接触は避けられない。したがって、プローブ表面に形成された抵抗薄膜は、接触に対する耐摩耗性を有することが要求される。試作した基礎プローブの抵抗薄膜はNi-Crにより形成されていたが、Ni-Crには十分な耐摩耗性は認められていない。また、基礎プローブの試作段階において、抵抗薄膜のTCRは小さいことが望ましいことが確認されていた。したがって、実用プローブの抵抗薄膜は、TCRの小さな耐摩耗性材料により形成されることが要求される。

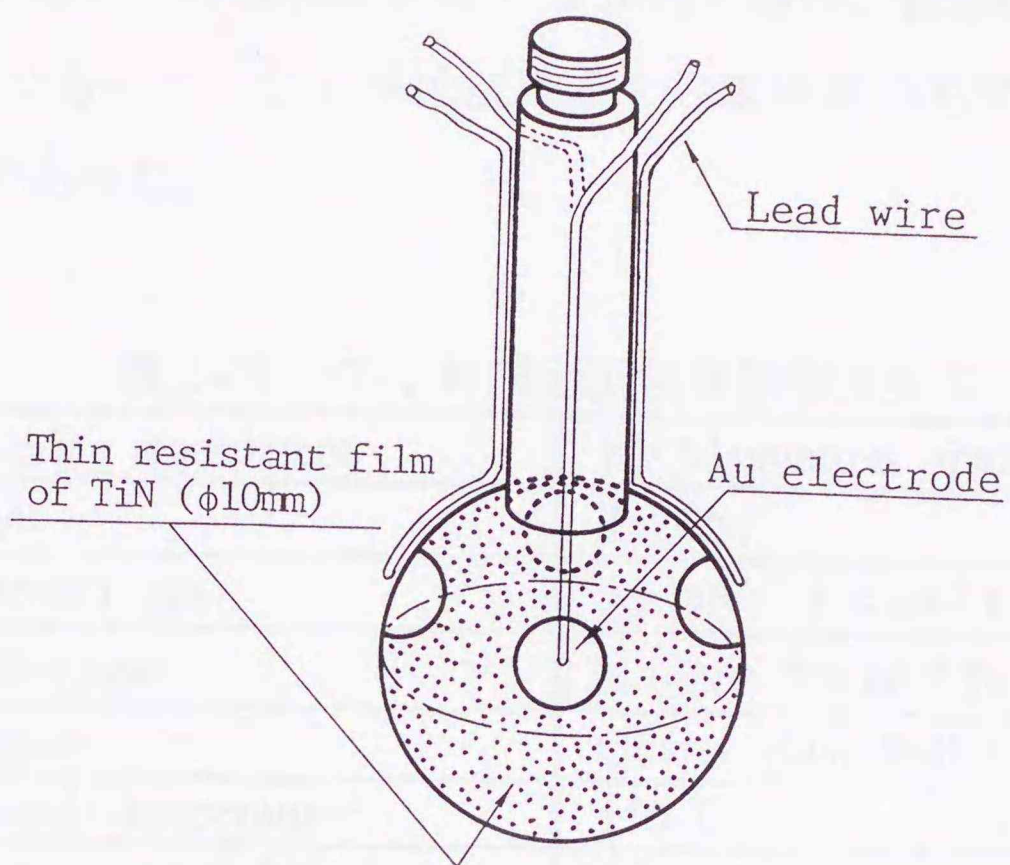
以上の検討の結果、実用プローブを試作するうえで要求される事項として、次のようにまとめることができる。

- (1) プローブ球の直径は10 mmとする。
- (2) 法線ベクトルの測定精度は、 θ 、 ϕ 方向とも $\pm 0.1^\circ$ 以下とする。
- (3) プローブの抵抗薄膜は、TCRが小さく、耐摩耗性を有するものとする。

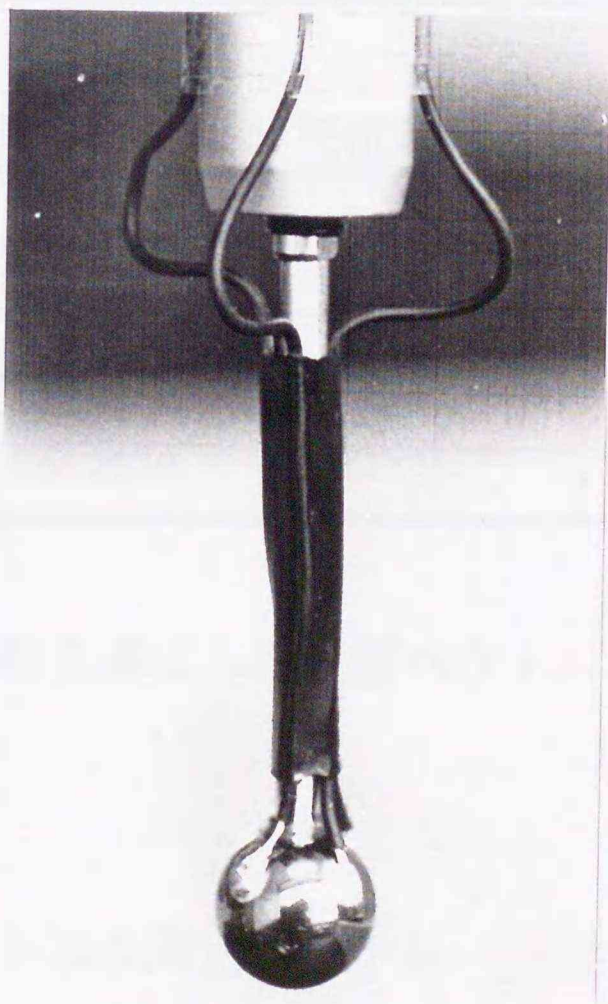
3. 1. 2 実用プローブの試作

前項(3. 1. 1)において、実用プローブの試作にあたり、TCRが小さく耐摩耗性が高い球面抵抗薄膜を形成することが要求された。この要求を満足する抵抗薄膜材料として、TiN[3- 3]—[3- 4]を採用することとした。TiNは、切削工具の耐摩耗用コーティング材として利用されており、耐摩耗性材料としての機能は十分に評価されている。またTiNは、形成条件によりTCRを小さくすることができるため、電気抵抗器材料としても用いられている。

プローブの試作において、法線ベクトル検出を高分解能とするため、抵抗薄膜はプローブ球の全面に形成し、電極は円形状あるいは帯形状として可能な限り $\theta = 90^\circ$ に接近させるべきであることが、2. 3. 3において明らかにされている。このことに基づき、球面抵抗薄膜として直径10 mmの石英ガラス球表面にTiN薄膜をスパッタにより形成し、さらにその上半球上に、支持軸に対して対称に 90° 間隔に4個の円形のAu電極をスパッタにより形成した。また、TiN抵抗薄膜上に形成されたAu電極からは、電極電圧検出のためのリード線が導かれている。図3-2(a)、(b)は試作した法線ベクトル検出実用プローブの概略図と外観を示している。



(a) 概略図



(b) 外観

図3-2 試作した法線ベクトル検出実用プローブ

石英ガラス球表面に対するTiN抵抗薄膜のスputタ条件は、表3-1に示している通りである。また表3-2は形成されたTiN抵抗薄膜の特性を示している。その薄膜厚さは $1.5\ \mu\text{m}$ であり、表面粗さ(最大高さ)は $0.17\ \mu\text{m}$ であった。TiN抵抗薄膜上の電極間の電気抵抗値は、 $80\sim 100\ \Omega$ であった。

表3-1 TiN球面抵抗薄膜形成条件

Sputtering equipment	RF-Magnetron sputtering
Target	Ti (4N)
Sputtering gas	Ar (4N) 1×10^{-3} Torr
Reactive gas	N (4N) 3×10^{-4} Torr
Substrate	Quartz glass ball (10 mm)
Forming temperature	$150\ ^\circ\text{C}$
Sputtering electric power	0.8 kW
Sputtering time	3.5 h

表3-2 TiN抵抗薄膜の特性

Composition	TiN
Thickness	$1.5\ \mu\text{m}$
Temperature coefficient of resistivity (TCR)	$650\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$
Surface roughness	$R_{\text{max}} = 0.17\ \mu\text{m}$

3. 2 三次元座標測定機を基にした位置ベクトルと法線ベクトルの測定システム

3. 2. 1 法線ベクトルの測定システム

実用プローブの試作において、法線ベクトルの測定精度を向上し θ 、 ϕ

方向とも $\pm 0.1^\circ$ とすることが要求事項の一つとして挙げられていた。法線ベクトルの測定精度を向上する一つの方法として、法線ベクトルの測定システムで使用されているそれぞれの機器の精度および安定性を高めることが考えられる。

法線ベクトルの測定では、球面抵抗薄膜、プローブ電極、被測定物、定電流電源を介し形成される定電流回路において、被測定物からプローブ電極へ流れ込む電流値を検出する。このとき、電極へ流れ込む電流値は電圧値に変換され、A/Dコンバータによりマイクロコンピュータへ入力される。したがって測定精度を向上するため、電氣的に安定した定電流電源、電流-電圧変換器と分解能の高いA/Dコンバータを実用測定システムにおいて採用する。

特に、基礎プローブの測定システムで用いられた電流-電圧変換器の温度変化に対する安定性が低かったため、電流-電圧変換器の安定性を高めることは、測定精度を向上させる上で効果的である。実用プローブでは、電流-電圧変換器として、 $10\ \Omega$ の基準電気抵抗器と直流増幅器を用いることとした。すなわち、各電極と定電流電源の間に $10\ \Omega$ の基準電気抵抗器を接続し、各電極に流れ込んだ電流が基準電気抵抗器を通過するとき、その両端で発生する電圧値を直流増幅器により1000倍に増幅することにより、1 mAの電流を10 Vの電圧に変換できる。また、定電流電源も電氣的に安定性の高い機器を採用した。A/Dコンバータの分解能は、基礎プローブ用測定システムでは12ビットであったが、実用プローブ用システムでは18ビットとした。

図3-3は、実用プローブを用いて構築された法線ベクトル測定システムの構成図を示している。同システムにおいて用いられている各機器の仕様は、以下に示す通りである。

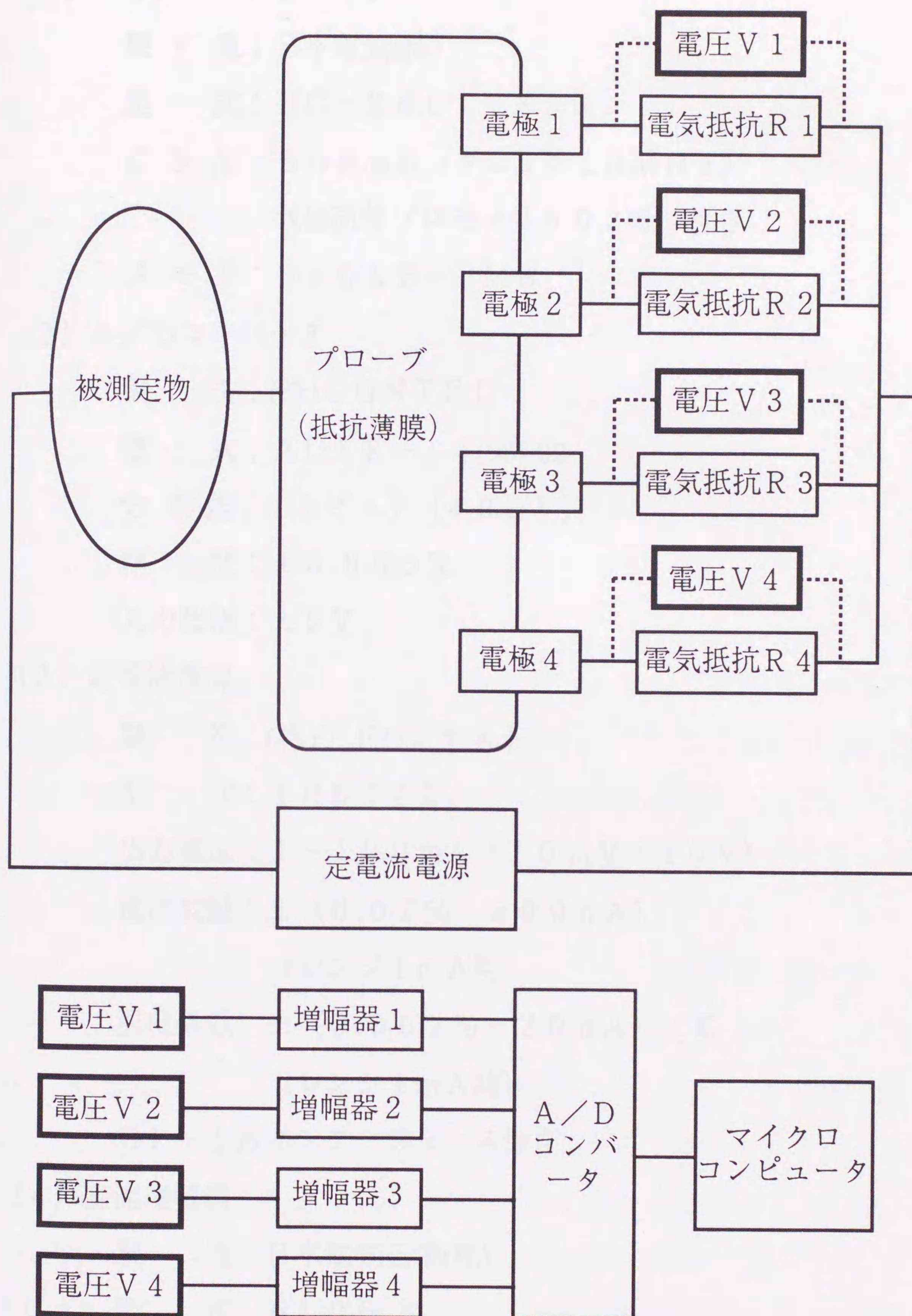


図 3-3 法線ベクトル測定実用システム

(1) マイクロコンピュータ

製 造：日本電気(株)

型 式：PC-9801VX21

CPU：80286 (クロック10MHz)

数値演算プロセッサ80287付き

メモリ：640kB+2MB

(2) A/Dコンバータ

製 造：(株)CONTEC

型 式：AD18-14(98)02

分解能：18ビット ($40\mu\text{V}$)

精 度： $\pm 0.005\%$

入力仕様： $\pm 5\text{V}$

(3) 定電流電源

製 造：(株)アドバンテスト

型 式：TR6142

出力電流：1~100mA (10mV ~ 10V)

電流変動： $\pm (0.02\% + 200\text{nA})$

(レンジ1mA時)

温度係数： $\pm (0.002\% + 20\text{nA})/^{\circ}\text{C}$

(レンジ1mA時)

GP-IBインターフェース付き

(4) 直流増幅器

製 造：日本電気三栄(株)

型 式：6L06

利 得： $\times 1$ ~ $\times 2000$

精 度： $\pm 0.1\%$

周 波 数： $DC \sim 10\text{ kHz}$

安 定 度： $\pm 0.01\%/^{\circ}\text{C}$

直 線 性： $\pm 0.025\%/F.S$

(5) 基準電気抵抗器

種 類：金属皮膜抵抗器

抵 抗 値： $10\Omega \pm 1\%$

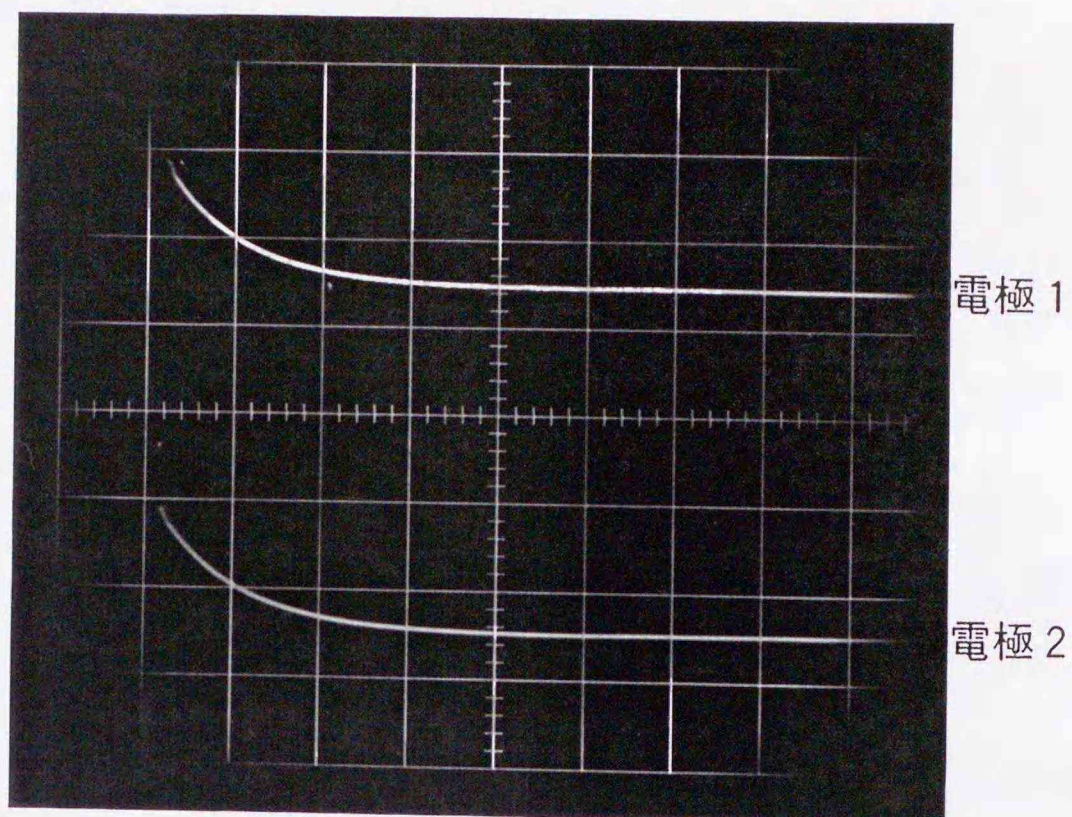
型 式： $1/2\text{ W}$ 型

温度特性： $50\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$

3. 2. 2 測定システムの電氣的動特性

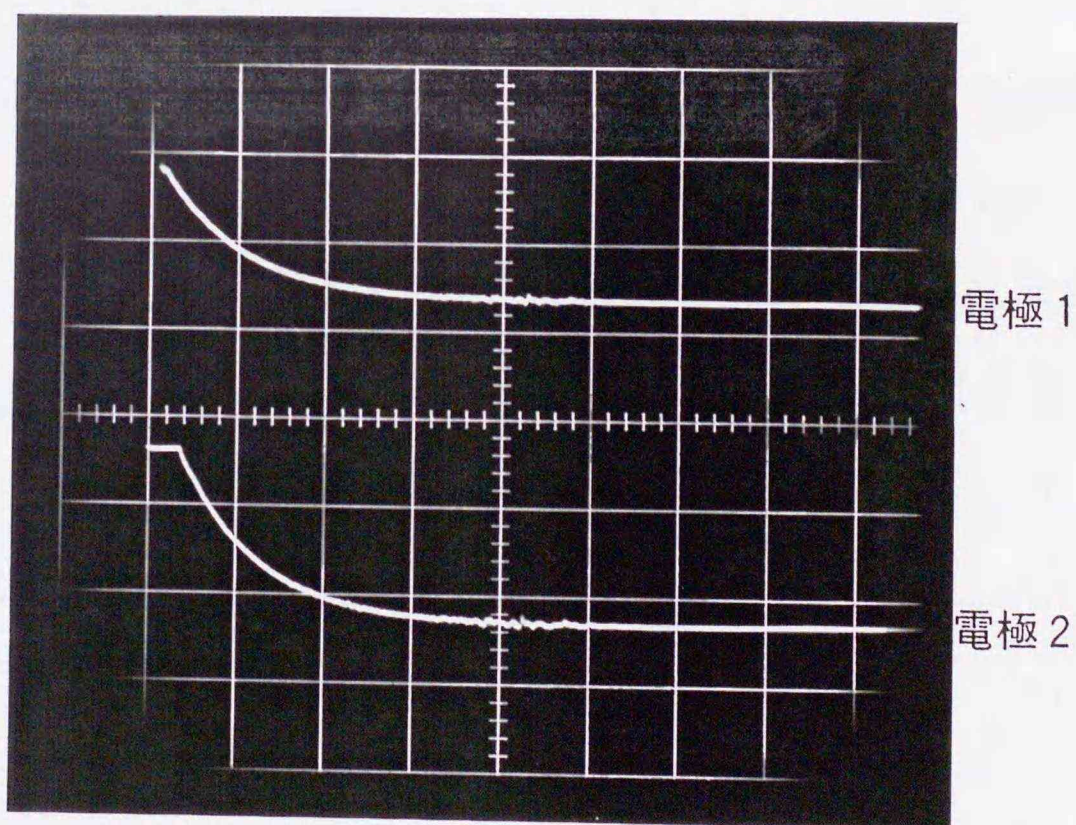
3. 2. 1で構築された法線ベクトル測定システムの電氣的動特性について検討を行った。プローブと被測定物が接触した瞬間に定電流回路が形成され、接触点からプローブ電極へ電流が流れる。同測定システムでは、この電流が各電極に接続された 10Ω の基準電気抵抗器を通過するときに、基準電気抵抗器の両端で発生する電圧値の検出を行っている。したがって、測定システムの電氣的動特性として、プローブと被測定物の接触に伴う基準電気抵抗器の両端の電圧値の動的变化について調査を行った。

図3-4(a)は、 $\theta = 0^{\circ}$ ， $\phi = 0^{\circ}$ の法線ベクトルを有する面の測定において、プローブと被測定面が接触した瞬間後の、電極1および電極2に接続されている基準電気抵抗器の両端の電圧値の変化を示している。また、同図(b)は $\theta = 50^{\circ}$ ， $\phi = 140^{\circ}$ に対する同様の結果である。これらの結果から、プローブと被測物の接触に伴い各電極に流れ込む電流により生ずる基準電気抵抗器の両端の電圧値は、接触後、 15 msec 後に



(a) その1 (測定点が $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$ の場合)

(横軸: 1 d i v. = 5 m s e c , 縦軸: 1 d i v. = 5 V)



(b) その2 (測定点が $\theta = 50^\circ$, $\phi = 140^\circ$ の場合)

(横軸: 1 d i v. = 5 m s e c , 縦軸: 1 d i v. = 5 V)

図3-4 電極1 および電極2の基準電気抵抗器両端の電圧挙動

一定値となることが分かる。したがって、電圧値の検出は、接触した瞬間より15 msec後に行わなければならない。

3. 2. 3 プローブヘッド機構

法線ベクトル検出プローブを実用において用いる場合、同プローブを固定するプローブヘッド部には、次の2つの機能が要求される。

- (1) プローブと被測定物の必要以上の接触圧による衝突回避機能。
- (2) プローブ姿勢の制御機能。

また、次項(3. 2. 4)で述べるように、プローブ中心の位置ベクトルの検出は三次元座標測定機を用いて行うため、プローブヘッド部は三次元座標測定機に設置可能でなければならない。

このことから、3点支持構造となっているタッチトリガプローブヘッド[3- 3]を用いて上記(1)に示したプローブと被測定物との衝突を回避する機能を持たせ、そして、電動プローブヘッド[3- 5]を用いて上記(2)に示したプローブの測定姿勢を制御する機能をもたせることとした。図3-5(a)はプローブヘッドの構成図を、同図(b)はその外観を示している。また、用いたタッチトリガプローブヘッドと電動プローブヘッドの仕様は次の通りである。

(1) タッチトリガプローブヘッド

製 造：RENISHAW K. K.

型 式：TP 2

繰返し精度： $\pm 0.35 \mu\text{m}$ (2σ)

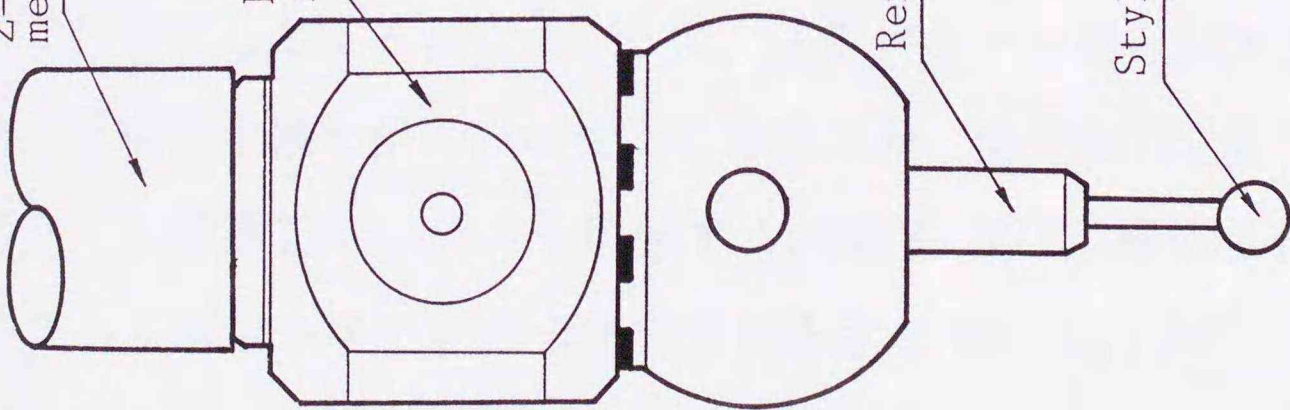
測定圧力：7～15 gf (調整可能)

Z-axis of 3-d coordinate
measuring machine

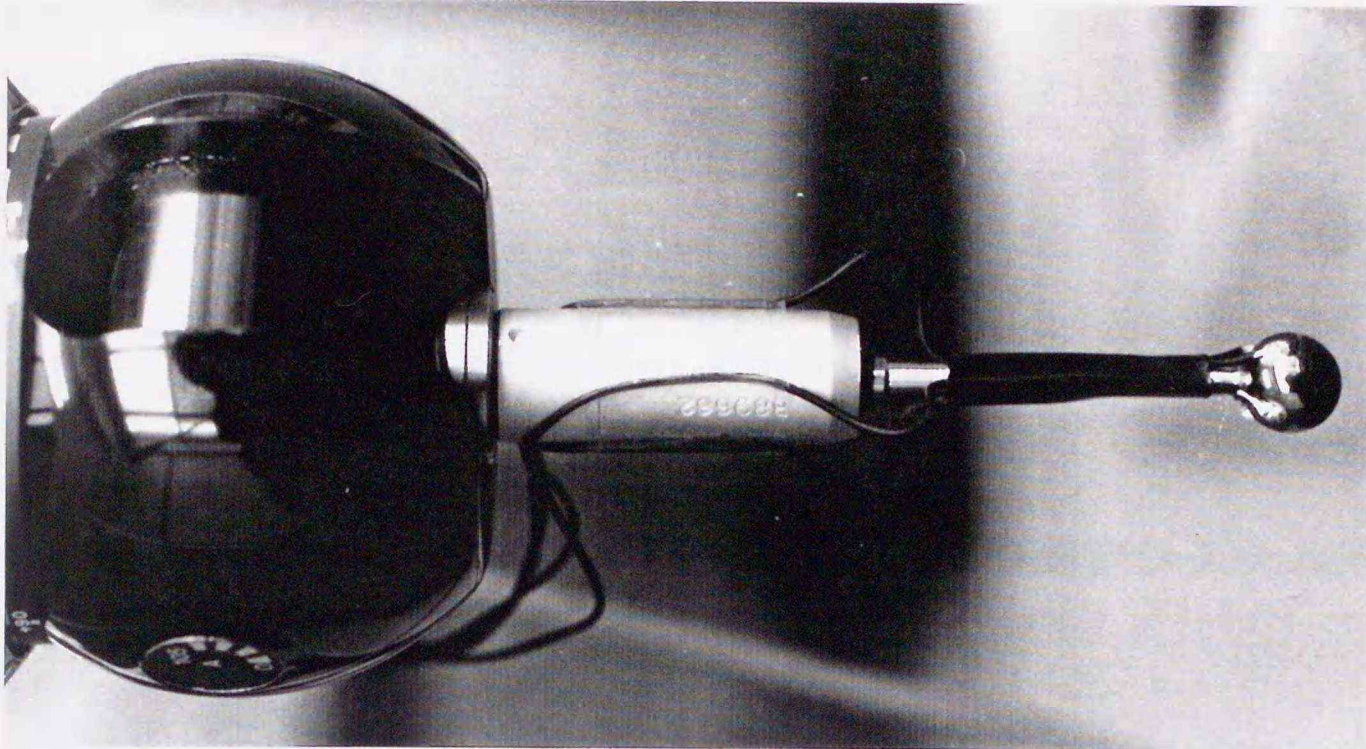
Renishaw PH9
motorised probe head

Renishaw TP2 probe

Stylus (Sensor)



(a) 構成図



(b) 外観

図3-5 プローブヘッド機構

(2) 電動プローブヘッド

製 造：RENISHAW K. K.

型 式：PH9

位置決め角度：水平方向 $\pm 180^\circ$ ， 7.5° STEP垂直方向 $+105^\circ \sim 0^\circ$ ， 7.5° STEP繰返し位置決め精度： $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 最大位置決め時間： 360° で5.5 sec

3. 2. 4 位置ベクトルと法線ベクトルの測定システム

本研究は、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルを検出することを基礎としている。2. 6で示したように、測定点の法線ベクトルとプローブ中心の位置ベクトルを求めることにより、測定点の位置ベクトルを求めることが可能となる。測定点の法線ベクトルの検出は、これまで述べてきたように、PSD原理と球面ポテンショメータ原理に基づく法線ベクトル検出プローブと同プローブを基にした測定システムを提案し試作することにより可能となった。このため、次のステップとして、プローブ中心の位置ベクトルを検出することが要求されるが、これはCNC三次元座標測定機を用いて行うこととする。したがって、法線ベクトル測定システムとCNC三次元座標測定機を組み合わせることにより、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを構築する。図3-6は、構築された位置・法線ベクトル測定システムの全体構成図を示している。また、図3-7は主要部分のブロック線図を示している。同システムにおいて、CNC三次元座標測定機以外の仕様は、3. 2. 1と3. 2. 3において示している。CNC三次元座標測定機の仕様は次の通りである。

(1) CNC三次元座標測定機

製 造：(株)ニコン

型 式：TST600-CNC (トラisstेशन
600M)

測定範囲：600×500×400

最小表示：0.0005mm

空間測定精度U95：5μm以内

ホストコンピュータ：ヒューレットパカード製

HP9000/300

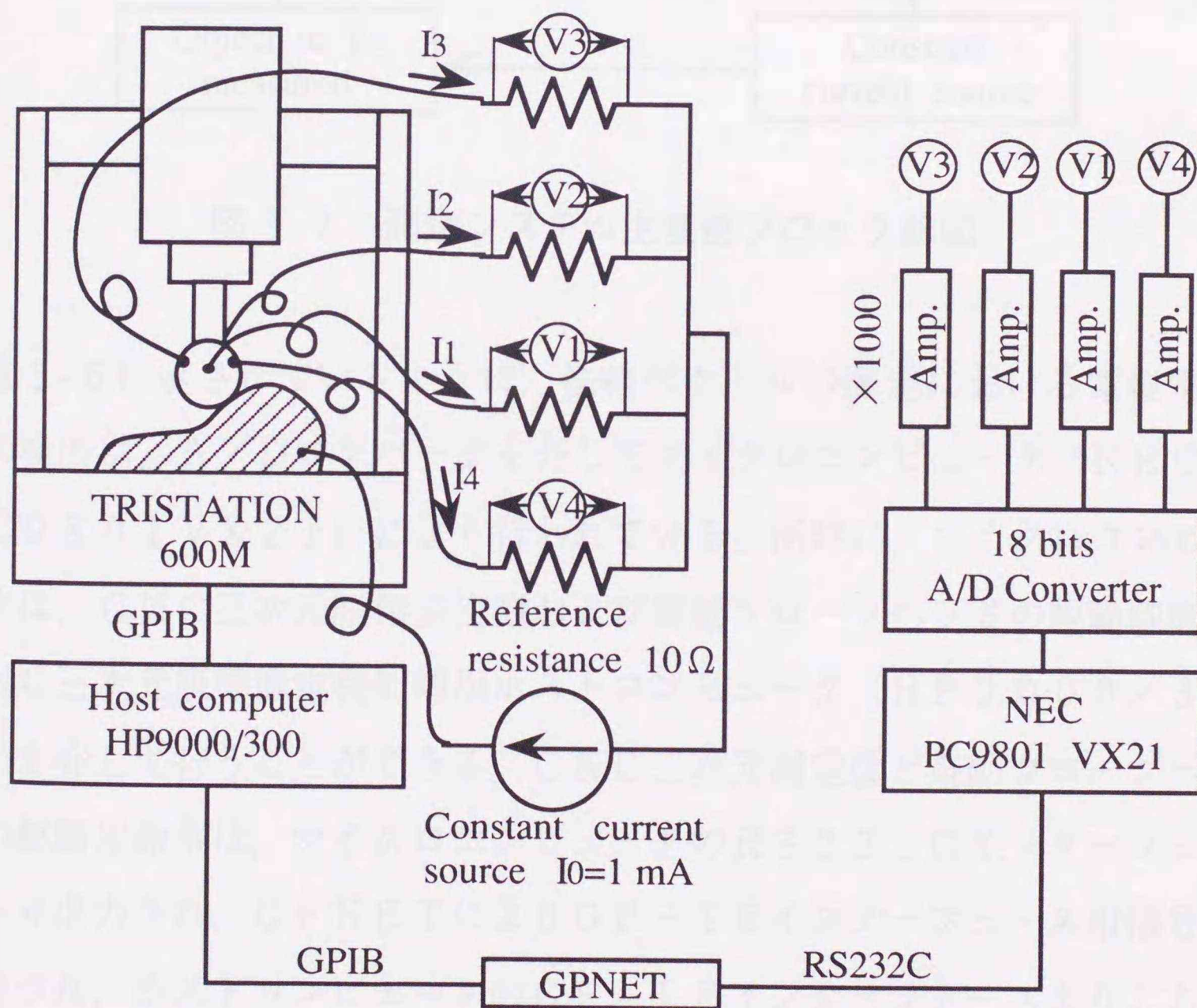


図3-6 測定システム全体構成図

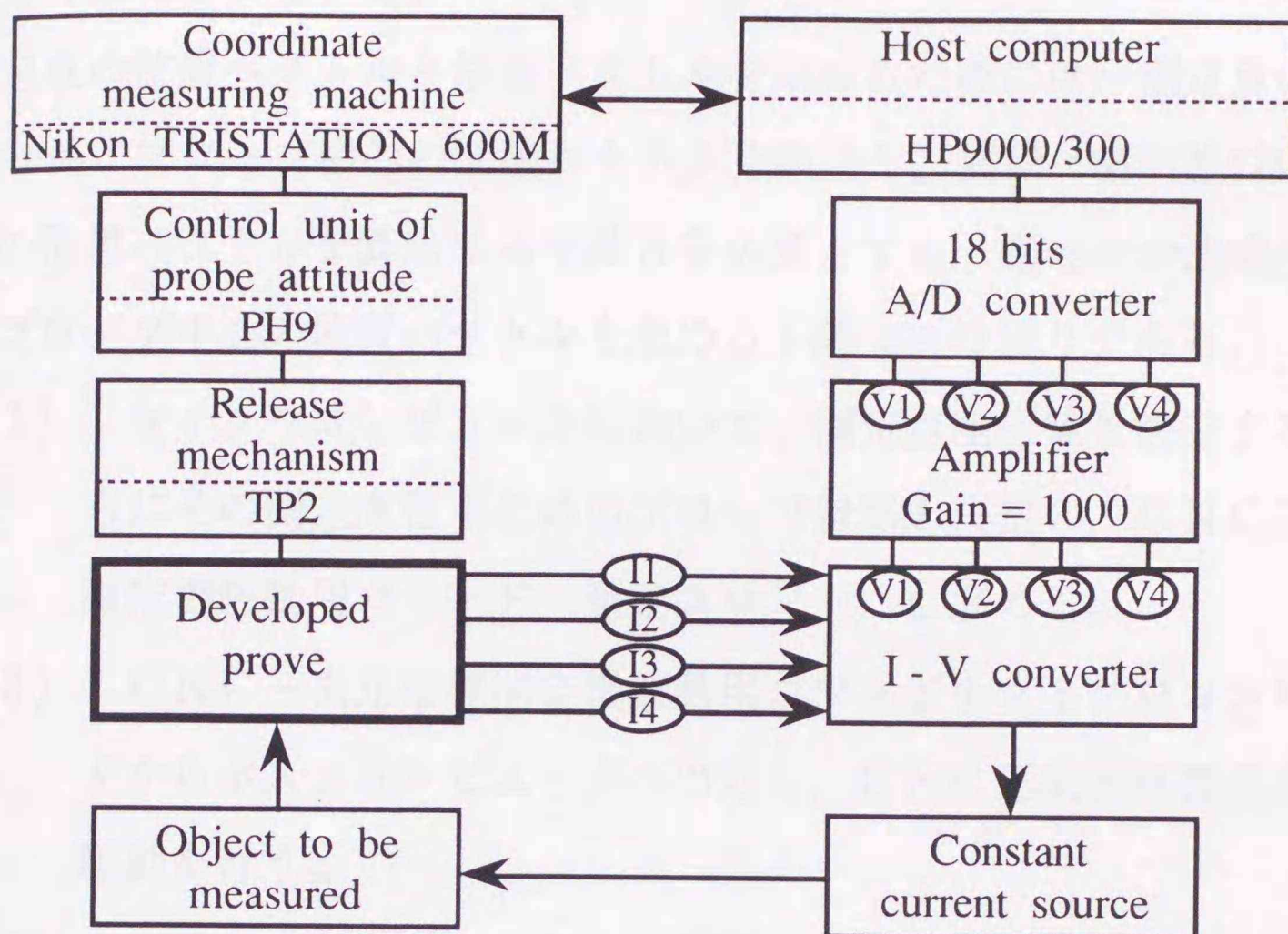


図3-7 測定システム主要部ブロック線図

図3-6に示されているように、法線ベクトルの測定における電極電圧値の検出は、A/Dコンバータを介してマイクロコンピュータ（NEC/PC9801VX21）により行われている。同時に、マイクロコンピュータは、CNC三次元座標測定機および電動プローブヘッドの駆動制御をCNC三次元座標測定機制御用ホストコンピュータ（HP9000/300）を介して行うことができる。CNC三次元測定機と電動プローブヘッドの駆動用命令は、マイクロコンピュータのRS232Cインターフェースより出力され、GPNETによりGP-IBインターフェース用信号へ変換され、ホストコンピュータのGP-IBインターフェースより入力される。また、逆に、ホストコンピュータは、CNC三次元座標測定機からの情報（プローブ中心座標値など）を、マイクロコンピュータへ入力する。

ことも可能となっている。

測定点の位置ベクトルと法線ベクトルを求めるためには、測定点の法線ベクトルとプローブ中心の位置ベクトルを検出し、式(2-18)に基づいて測定点の位置ベクトルを算出する手続きを必要とする。測定点の法線ベクトルとプローブ中心の位置ベクトルを求める手順は次の通りである。

- (1) マイクロコンピュータにおいて、測定点座標値を決定するとともにその測定を行うためのプローブ経路を決定し、CNC三次元測定機駆動用コマンド（測定コマンド）を求める。
- (2) CNC三次元座標測定機駆動用コマンドをマイクロコンピュータからホストコンピュータへ出力し、CNC三次元座標測定機の駆動を行う。
- (3) マイクロコンピュータにより駆動コマンドを与えられたCNC三次元座標測定機は、測定作業を開始しプローブを被測定物に接近させていく。さらに同機は、プローブと被測定物が接触した瞬間にタッチバック（駆動した経路を数mm戻ること）を行うと同時に、接触した瞬間のプローブ中心座標値をホストコンピュータに出力する。
- (4) ホストコンピュータは、三次元座標測定機からプローブ中心座標値が与えられると、マイクロコンピュータへ直ちにプローブ中心座標値を出力する。マイクロコンピュータは、そのプローブ中心座標値（プローブと被測定物が接触する座標値）までプローブを再移動するコマンドを求め、同移動コマンドをホストコンピュータへ与える。
- (5) 再移動コマンドがホストコンピュータからCNC三次元座標測定機に送られ、同コマンドが実行されプローブの移動が終了した

とき、プローブと被測定物は接触状態となる。このときのプローブ電極電圧値をマイクロコンピュータにより検出する。

- (6) 検出された電極電圧値とあらかじめ求められているキャリブレーションデータを用いて、2.5.1で提案した補間法に基づき、測定点の法線ベクトルを求める。
- (7) このように求められた測定点の法線ベクトルと、測定点にプローブが接触しているときのプローブ中心座標値から、式(2-18)より、測定点の位置ベクトルを算出する。
- (8) 上記(1)～(7)を作業を必要な測定点数だけ繰り返す。

3.3 キャリブレーション実験と測定精度

3.3.1 キャリブレーション実験

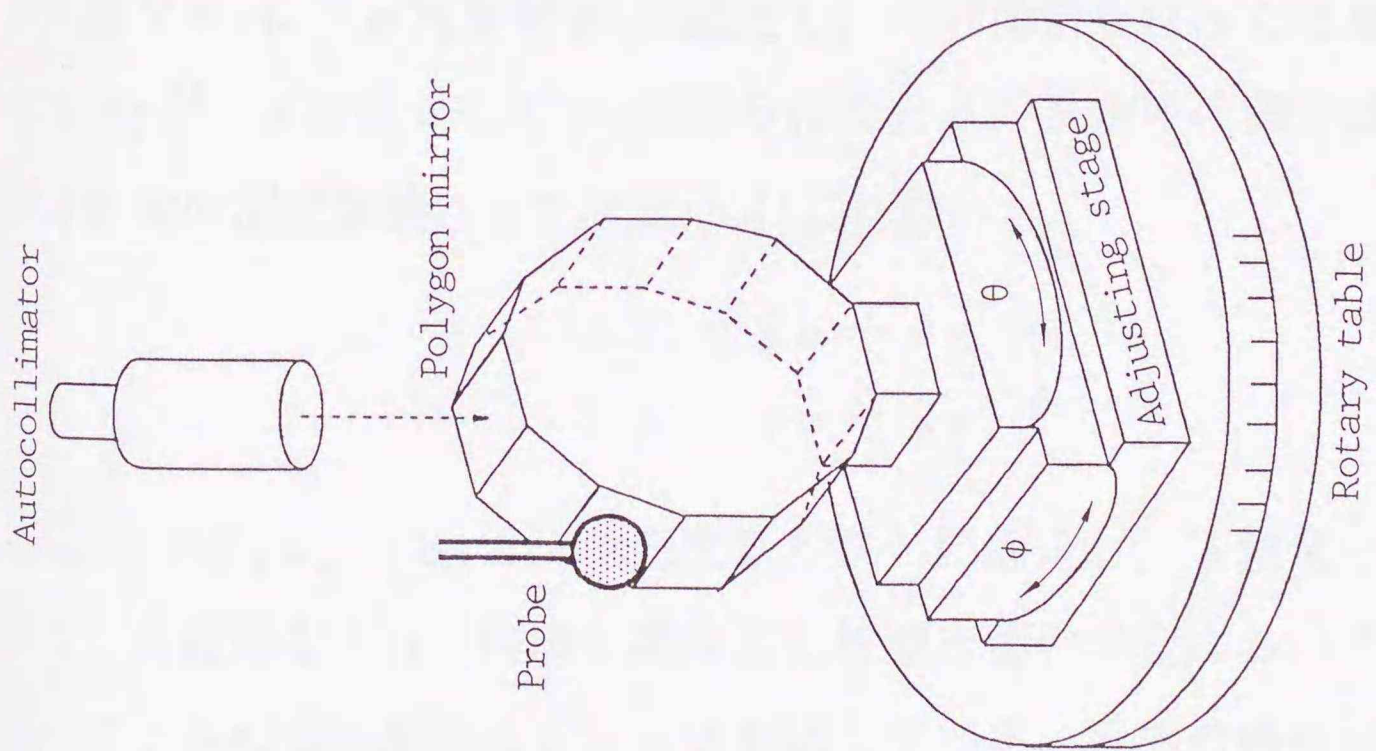
法線ベクトルの測定では、2.4.2で述べたように、あらかじめ、測定基準面の法線方向（法線ベクトル）を割り出し、その基準面の測定を行い接触点から各電極に流れ込む電流により生ずる基準電気抵抗器両端の電圧値を電極電圧値として検出し、法線ベクトルと電極電圧値の関係をキャリブレーションデータとして求めておく。実際の測定では、キャリブレーションデータを基礎として、測定において検出された電極電圧値から、測定面の法線ベクトルを算出する手続きを必要としている。その算出方法は、2.5.1において提案したように、キャリブレーションデータを基にした双1次補間式を基礎としている。したがって、法線ベクトルの測定にあたり、キャリブレーションデータとして、離散的な法線ベクトルと電極電圧値の関係を求めることが必須となっている。

基礎プローブのキャリブレーション実験では、基準鋼球を用いて測定基準面の法線方向（法線ベクトル）の割り出しを行った。しかしながら鋼球を用いた場合、プローブの位置決め誤差が測定基準面の法線ベクトルの割り出し誤差の原因になった。したがって、実用プローブのキャリブレーション実験では、測定基準面の法線方向の割り出しに対するプローブの位置決め誤差の影響を排除するため、基準面として平面を用いることとした。

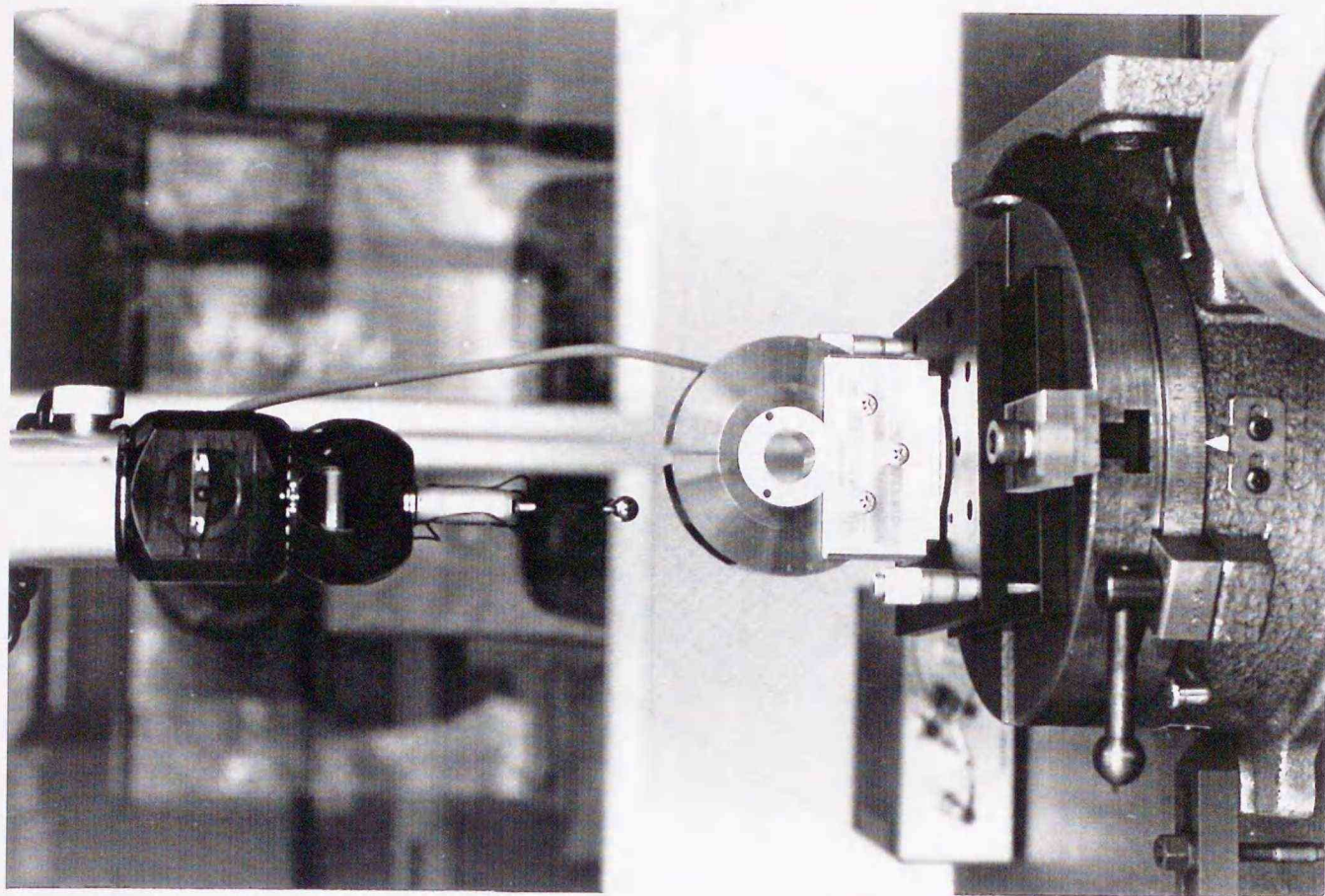
図3-8(a)は、キャリブレーション実験装置の概略図を、また同図(b)はその外観を示している。キャリブレーション実験では、 θ 角度に関して $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を 10° 間隔に、 ϕ 角度に関して $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲を 10° 間隔に測定基準面の法線方向を設定し、その測定から法線ベクトルと電極電圧値の関係を得た。測定基準面の法線ベクトル方向の θ および ϕ 角度の割り出しにおいては、36面ポリゴンミラー（分割角度誤差：最大3秒）を用いることにより、 θ 角度に対して 10° 間隔に割り出された測定基準面を得た。また、ポリゴンミラー面（測定基準面）の ϕ 角度に対する 10° 間隔の割り出しは、円テーブル（最小読み取り目盛り：1分）により行った。ポリゴンミラーは、 $\theta - \phi$ 方向微調整ステージに取り付けられ、円テーブル中央に固定されている。ポリゴンミラーを設置する際には、オートコリメータ（測定精度： ± 2 秒）により θ 角度が0度のポリゴンミラー面を観察しながら、 ϕ 角度全域に対して θ 角度が $0^\circ \pm 2$ 秒以内になるように $\theta - \phi$ 方向微調整ステージを調整した。図3-9は同実験により得られた本システムのキャリブレーション結果を示している。

3. 3. 2 測定精度

本システムの法線ベクトルの測定精度を明らかにするため、被測定面の



(a) 装置概略図



(b) 外観

図3-8 キャリブレーションシヨン実験

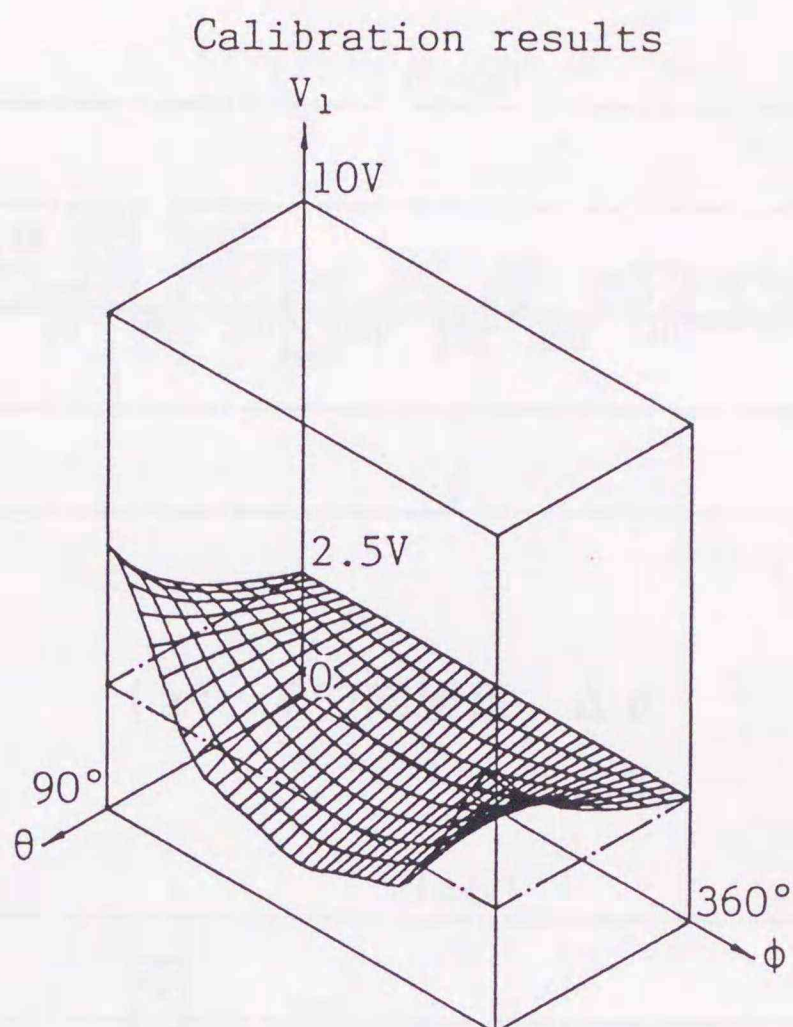


図3-9 キャリブレーション実験結果

θ 角度を θ_0 に, ϕ 角度を ϕ_0 に設定し, その測定を行った結果, θ 角度として θ_p が, ϕ 角度として ϕ_p が得られたとき, θ 角度の測定誤差 $\Delta\theta$ および ϕ 角度の測定誤差 $\Delta\phi$ を次式(3-4)より求めた。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta &= \theta_0 - \theta_p \\ \Delta\phi &= \phi_0 - \phi_p \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

図3-10(a), (b)は, θ 角度を 60° に固定し, ϕ 角度を $180 \sim 360^\circ$ の範囲を 10° 間隔に設定した被測定面の測定において得られた法線ベクトルの測定誤差 $\Delta\theta$, $\Delta\phi$ を示している。同様の結果が, キャリブレーションデータを求めた θ , ϕ 角度に関する全格子点 (θ 角度に関して $0^\circ \sim 90^\circ$, ϕ 角度に関して $0^\circ \sim 360^\circ$) において得られており, 本測定システムの法線ベクトルの測定精度は, キャリブレーションデータ

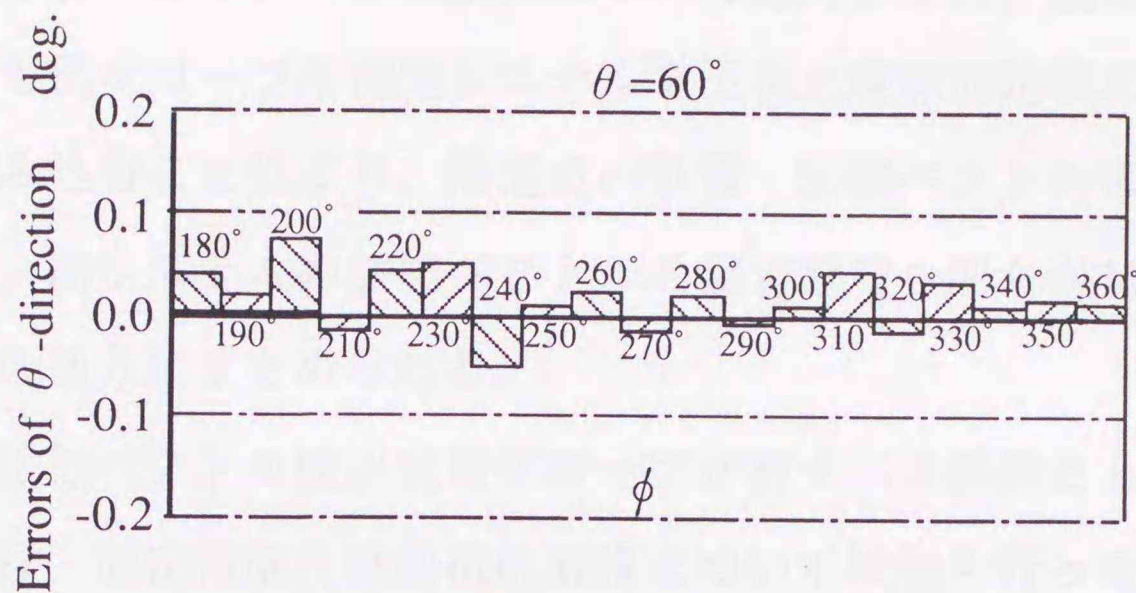
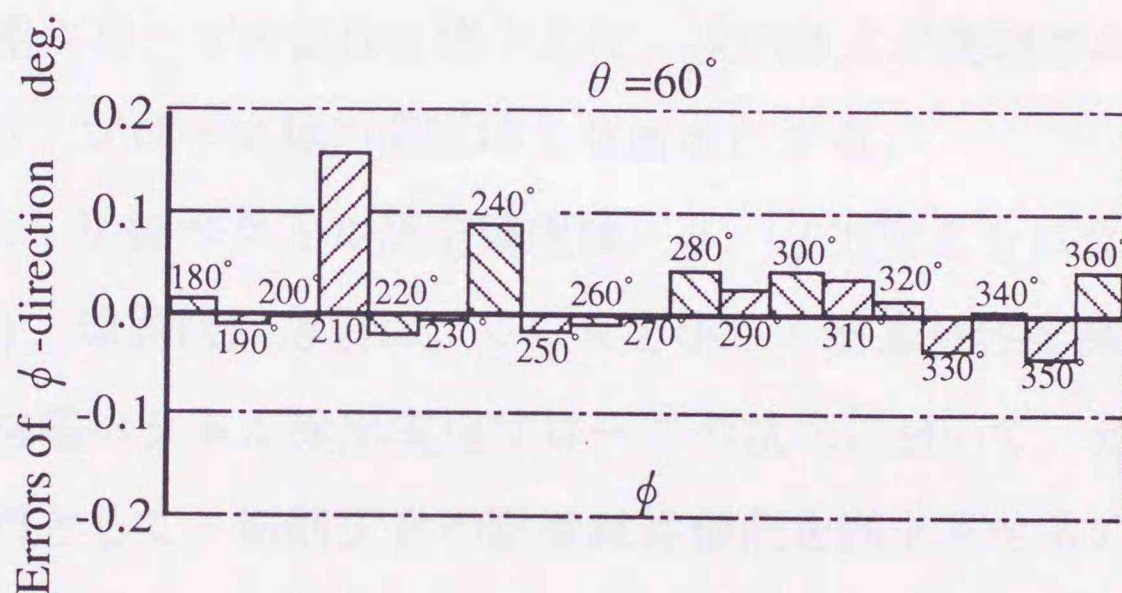
(a) θ 方向誤差 $\Delta\theta$ (b) ϕ 方向誤差 $\Delta\phi$

図 3-10 法線ベクトル測定精度

を求めた格子点近傍において、 θ 、 ϕ 角度に対して $\pm 0.1^\circ$ であることが明らかになった。

3.4 本章の総括と結論

本章では、法線ベクトル検出実用プローブに要求される機能を明らかに

し、同機能を有するプローブの試作について述べた。また、法線ベクトル検出プローブと同プローブ用測定システムを三次元座標測定機にシステムティックに組み込むことにより、測定点の位置・法線ベクトルの測定システムを構築し、同システムの法線ベクトルの測定精度を明らかにした。結果として以下の通りにまとめられる。

- (1) 法線ベクトル検出実用プローブが有すべき機能として、プローブ径、測定精度、球面抵抗薄膜について検討を行った。その結果、位置ベクトルの測定精度を $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下とすること、およびプローブと被測定物との接触は避けられないことを基礎としたとき、実用プローブの試作仕様として、次の3点が要求される。
 - (a) プローブ球の直径は 10mm とする。
 - (b) 法線ベクトル測定精度は、 θ 、 ϕ 方向ともに 0.1° とする。
 - (c) 球面抵抗薄膜は、TCRを小さく耐摩耗性を高くする。
- (2) 法線ベクトル検出実用プローブの試作において、球面抵抗薄膜材料として、切削工具の耐摩耗性機能を向上させるためのコーティング材として採用されており、形成条件によりTCRを小さくでき抵抗材料として電気抵抗器にも用いられているTiNを採用した。TiN薄膜をスパッタにより直径 10mm の石英ガラス球面に形成し、実用プローブの試作を行った。
- (3) 基礎プローブ用の測定システムに用いられていた機器と比較して、定電流電源を電氣的により安定性の高い機器とし、A/Dコンバータを高分解能とするとともに、電流-電圧変換器を基準電気抵抗器と直流増幅器により構成することにより、法線ベクトルの測定精度の向上を図った。
- (4) 法線ベクトル検出実用プローブの測定システムの電気特性とし

て、プローブと被測定物の接触に伴い接触点からプローブ電極に流れる電流の動特性を検討し、同電流が接触した瞬間から15 msec後に定常状態となることを明らかにした。

- (5) 法線ベクトル検出実用プローブと同プローブ用測定システムをCNC三次元座標測定機にシステムティックに組み合わせ、プローブ中心位置ベクトルと測定点の法線ベクトルの測定システムを構築した。同位置ベクトルと法線ベクトルに基づき測定点の位置ベクトルを算出する手順が示され、測定点の位置ベクトルおよび法線ベクトルの検出を可能とした。
- (6) 法線ベクトル検出実用プローブは、プローブヘッド部を介して三次元座標測定機に設置された。プローブヘッド部は、タッチトリガプローブヘッドと電動プローブヘッドにより構成され、プローブと被測定物との衝突回避機能とプローブの姿勢制御機能としての役割を果たした。
- (7) 法線ベクトルの測定では、電極に流れ込む電流値に等価な電極電圧値が検出される。しかし、法線ベクトルと電極電圧値との関係が非線形であるため、あらかじめキャリブレーションデータとして法線ベクトルと電極電圧値の関係を求めておく必要がある。基礎プローブのキャリブレーション実験では、基準鋼球を用いて測定基準面の法線方向の割り出しを行っていた。しかし、この場合、プローブの位置決め誤差が測定基準面の法線方向の割り出し誤差の原因となった。したがって、実用プローブのキャリブレーション実験では、測定基準面として平面を用いることにより、測定基準面の法線方向の割り出しに対するプローブ位置決めの影響を排除した。

- (8) 測定基準面としてポリゴンミラーを採用し、同ミラー面の法線方向の割り出しの方法を示した。ポリゴンミラーを用いたキャリブレーション実験を行い、法線ベクトルと電極電圧値との関係を得た。
- (9) 構築した位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムの法線ベクトル測定精度が $\pm 0.1^\circ$ であることを明らかにした。

参 考 文 献

- [3- 1] H.Aoyama, M.Kawai, T.Kishinami : A New Method for Detecting the Contact Point between a Touch Probe and a Surface, Annals of the CIRP, Vol.38/1, 1989年, p517.
- [3- 2] 青山英樹, 岸浪建史, 斎藤勝政, 河合正治 : 位置ベクトルと単位法線ベクトルの検出に基づく寸法測定システムの開発, 精密工学会誌, Vol.57, No.5, 1991年, p807.
- [3- 3] 日本学術振興会薄膜第131委員会 : 薄膜ハンドブック, オーム社, 昭和61年, p867.
- [3- 4] 早川茂, 和佐清孝 : 薄膜化技術, 共立出版株式会社, 1985年, p146.
- [3- 5] 福井三郎兵衛 : 三次元測定機用プローブの機能 : 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p91. ([1-29])

第4章 機械部品基礎形状の測定評価

第1章において、三次元座標測定機による測定とその応用における問題点を明らかにし、その原因として、測定点の位置ベクトルの直接検出が困難であることを指摘した。また、三次元座標測定機はプローブ中心点の位置ベクトルの検出を行っていることから、測定点の法線ベクトルを検出することにより、測定点の位置ベクトルを求めることができることを明らかにした。第2章では、測定点の法線ベクトルの直接検出を可能とするプローブを提案し、その検出原理とプローブの構造を明らかにするとともに、計算機シミュレーションにより設計を行い、同設計に基づき基礎プローブを試作した。また、法線ベクトルを求めるための手順（アルゴリズム）を提案し、基礎実験によりその確認を行った。第3章では、実用プローブとしての機能を明らかにし、同機能を有するプローブの試作を行った。また、実用プローブを基にした法線ベクトル測定システムをCNC三次元座標測定機に組み込むことにより、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルを測定するシステムを構築した。

本章では、位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを用いた応用計測として、機械部品基礎形状の測定と評価について検討を行っている。機械部品基礎形状の要素として、平面、円筒、球を対象としている。これらの幾何要素形状の測定評価において、従来行われているプローブ中心点の位置ベクトル検出に基づく方法の問題点を明らかにし、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく新たな測定評価法を提案するとともに、従来の方法との比較検討を行う。

4. 1 従来の機械部品基礎形状の測定評価における問題点

機械部品の多くは、平面、円筒、球を基礎としてその形状が構成されているため、本章において測定評価の対象とする機械部品形状要素として、平面、円筒、球を考える。従来、これらの機械部品基礎形状の測定評価を三次元測定機により行う場合、一般にプローブ中心点の座標値の検出を基礎としているが、以下に示されるようないくつかの問題点が指摘されている。

4. 1. 1 平面の測定評価

平面の測定において要求される主な評価目的[4- 1]は、次の通りである。

- (1) 幾何要素定義
 - ・ 平面の法線方向を求める。
 - ・ 平面の定義式（方程式）を求める。
- (2) 交差要素計算
 - ・ 平面と直線の交点を求める。
 - ・ 2平面の交線を求める。
 - ・ 3平面の交点を求める。
- (3) 距離計算
 - ・ 平面と点の距離を求める。
 - ・ 平行な2平面の距離を求める。
- (4) 角度計算
 - ・ 平面と直線の交角を求める。
 - ・ 2平面の交角を求める。
- (5) 幾何偏差計算
 - ・ 平面の傾斜度を求める。

これらの平面測定における評価目的を達成するためには、測定評価の対象となっている平面の定義式（方程式）を求めることが基礎となっている。

従来、三次元座標測定機により平面を測定し、その定義式を求めるため

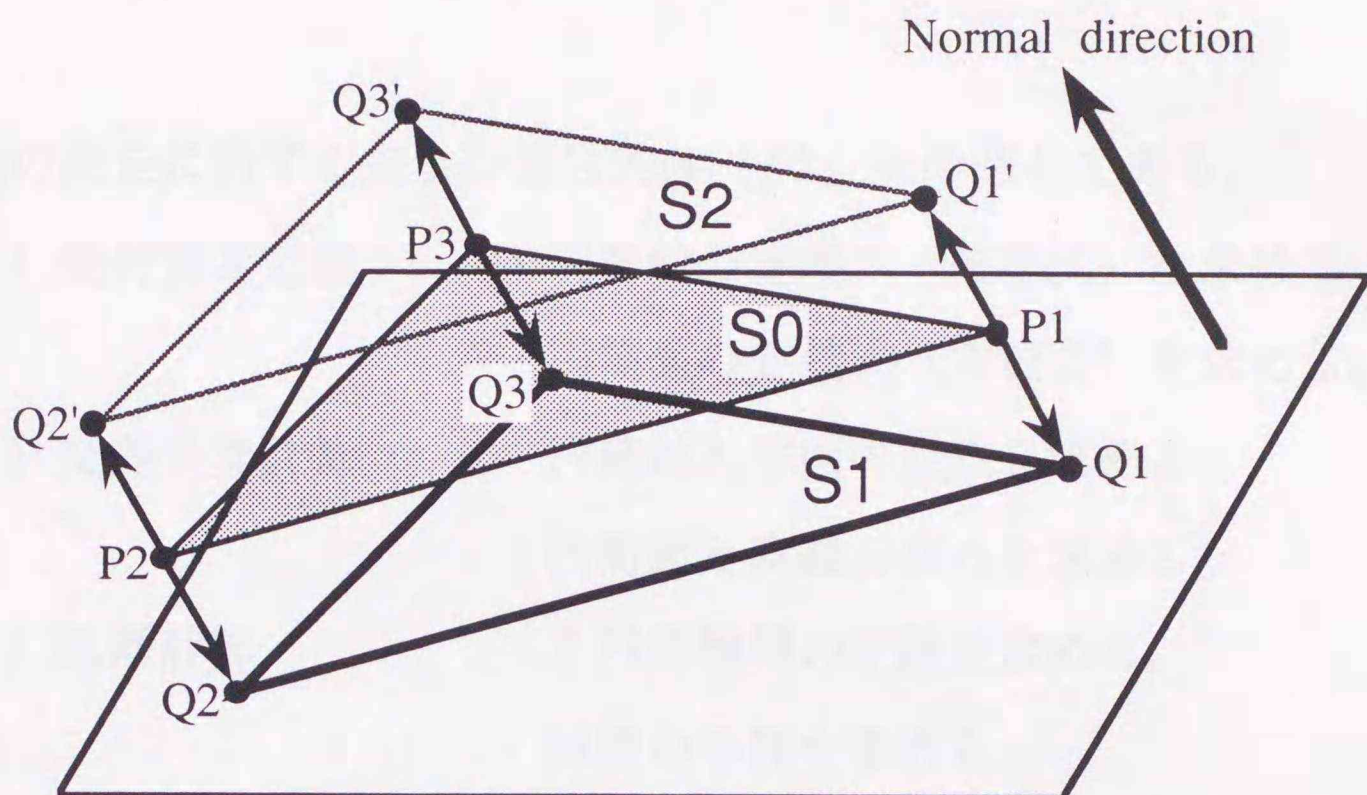


図4-1 平面の定義式（方程式）の求め方

には、図4-1に示しているように、測定対象となっている平面 S_1 上の任意の3点 Q_1 , Q_2 , Q_3 の測定を行い、このときプローブ中心点 P_1 , P_2 , P_3 の座標値を検出し、その座標値から平面 S_0 の定義式を求める。平面 S_0 は、測定対象平面 S_1 に対して、法線方向にプローブ半径値だけオフセット（平行移動）された平面を表している。したがって、平面 S_1 の定義式を求めるためには、平面 S_0 に対して、その法線方向に平行移動（補正）を行う必要がある。しかし平行移動の方向、すなわち平面 S_0 の法線方向が、点 Q_1 , Q_2 , Q_3 で定義される平面 S_1 の方向と、点 Q_1' , Q_2' , Q_3' で定義される平面 S_2 の方向の2通り存在するため、オペレータに対してその補正方向を指示する作業が要求される。このことが、三次元座標測定機による平面の測定評価作業を単純化していない原因となっている。平面に関する測定評価の1例として、1. 2. 2において平行な2平面間の距離測定について述べている。

4. 1. 2 円筒の測定評価

円筒の測定に関する主な評価目的[4- 1]は、次の通りである。

- | | |
|------------|---|
| (1) 幾何要素定義 | ・ 円筒軸の定義式（方程式）を求める。
・ 円筒面の定義式（方程式）を求める。 |
| (2) 交差要素計算 | ・ 円筒軸と平面の交点を求める。
・ 円筒面と直線の交点を求める。 |
| (3) 距離計算 | ・ 2円筒軸間の距離を求める。
・ 円筒の半径を求める。
・ 点と円筒軸の距離を求める。 |
| (4) 角度計算 | ・ 円筒軸と平面の交角を求める。 |
| (5) 幾何偏差計算 | ・ 2つの円筒軸の同軸度を求める。
・ 円筒軸と平面の直角度を求める。
・ 円筒軸と平面の平行度を求める。 |

これら円筒の測定における評価目的を達成するためには、測定評価対象となっている円筒面と円筒軸の方程式を求めることが基礎となっている。

図4-2に示されているように、円筒軸が認識されている場合には、円筒軸Aに垂直な任意の仮想平面Sを想定し、平面Sと測定対象となっている円筒面C1との交線（円）に存在する3点Q1, Q2, Q3の測定を行い、そのプローブ中心座標値P1, P2, P3を検出する。このプローブ中心座標値P1, P2, P3から円を定義し、その円を円筒軸Aに沿って平行に移動することにより、測定対象円筒面C1を円筒面の法線方向にオフセット（拡大縮小）した円筒面Coを求めることができる。測定対象円筒面C1の定義式を求めるためには、円筒面Coに対してその法線方向にプローブ半径値だけ拡大あるいは縮小する必要がある。このとき、拡大する場合と縮小する場合に

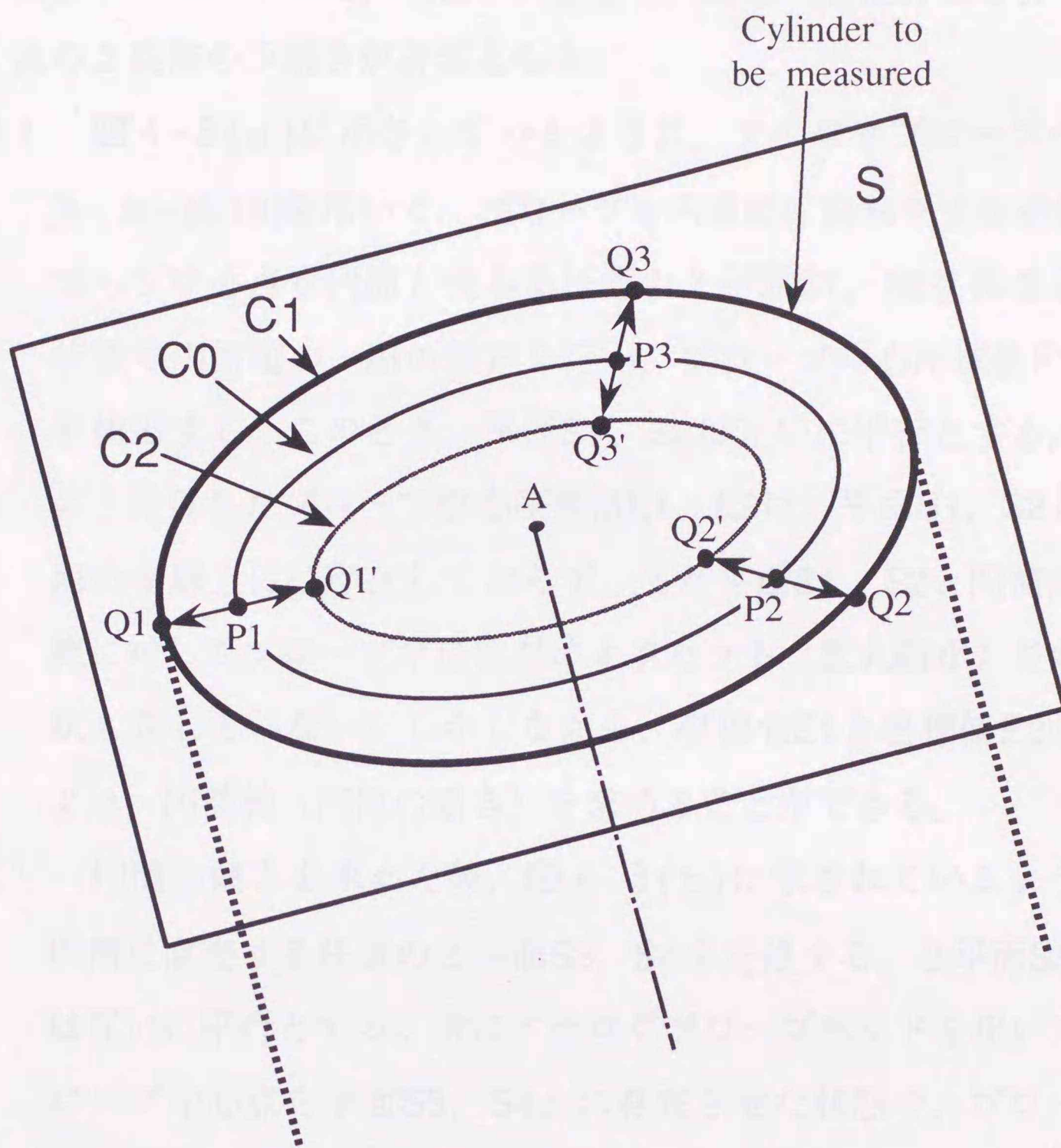


図4-2 円筒の定義式（方程式）の求め方

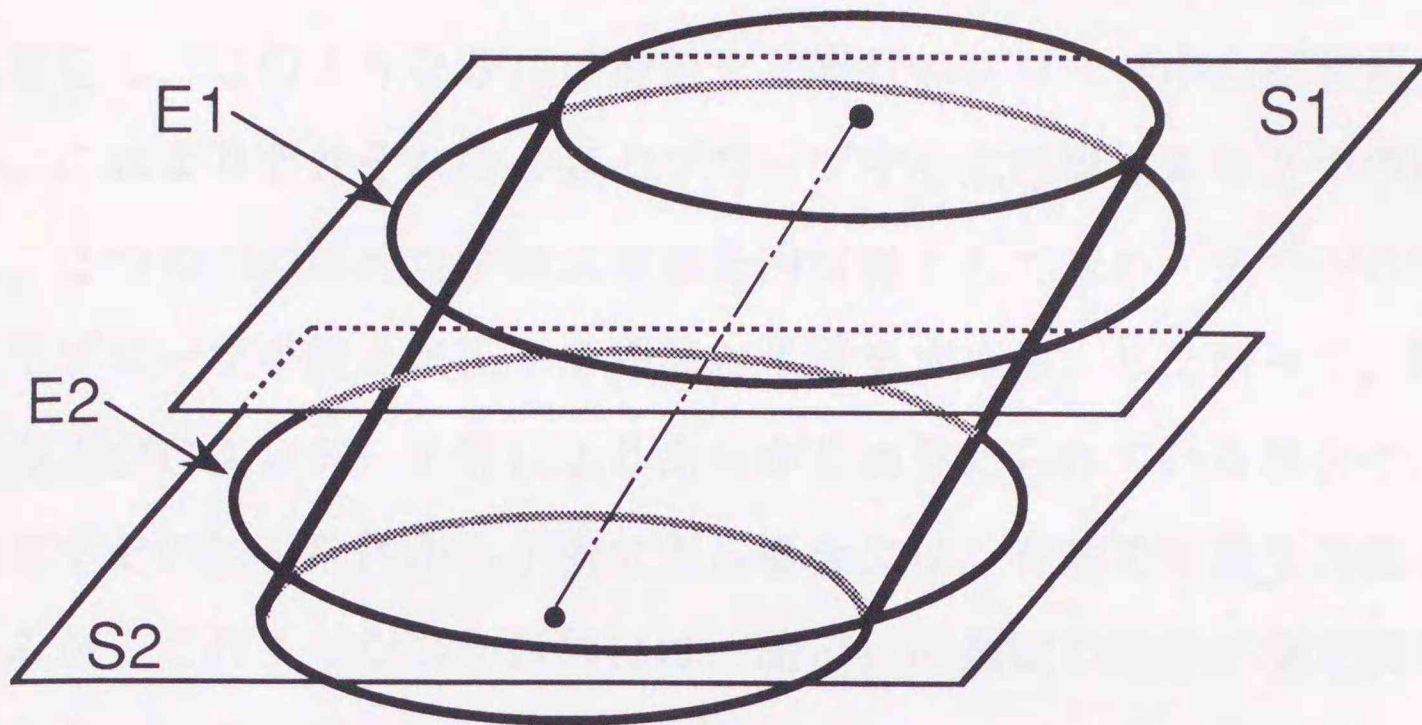
より，円筒面C1と円筒面C2が求められるため，オペレータはその補正方向（内径測定の場合は拡大，外径測定の場合は縮小）を指示する必要がある。この作業が，三次元座標測定機による円筒面の測定評価を単純化していない。

また，円筒面の測定評価において円筒軸が認識されていない場合には，円筒面および円筒軸の定義式を求めることは容易ではない。すなわち，円

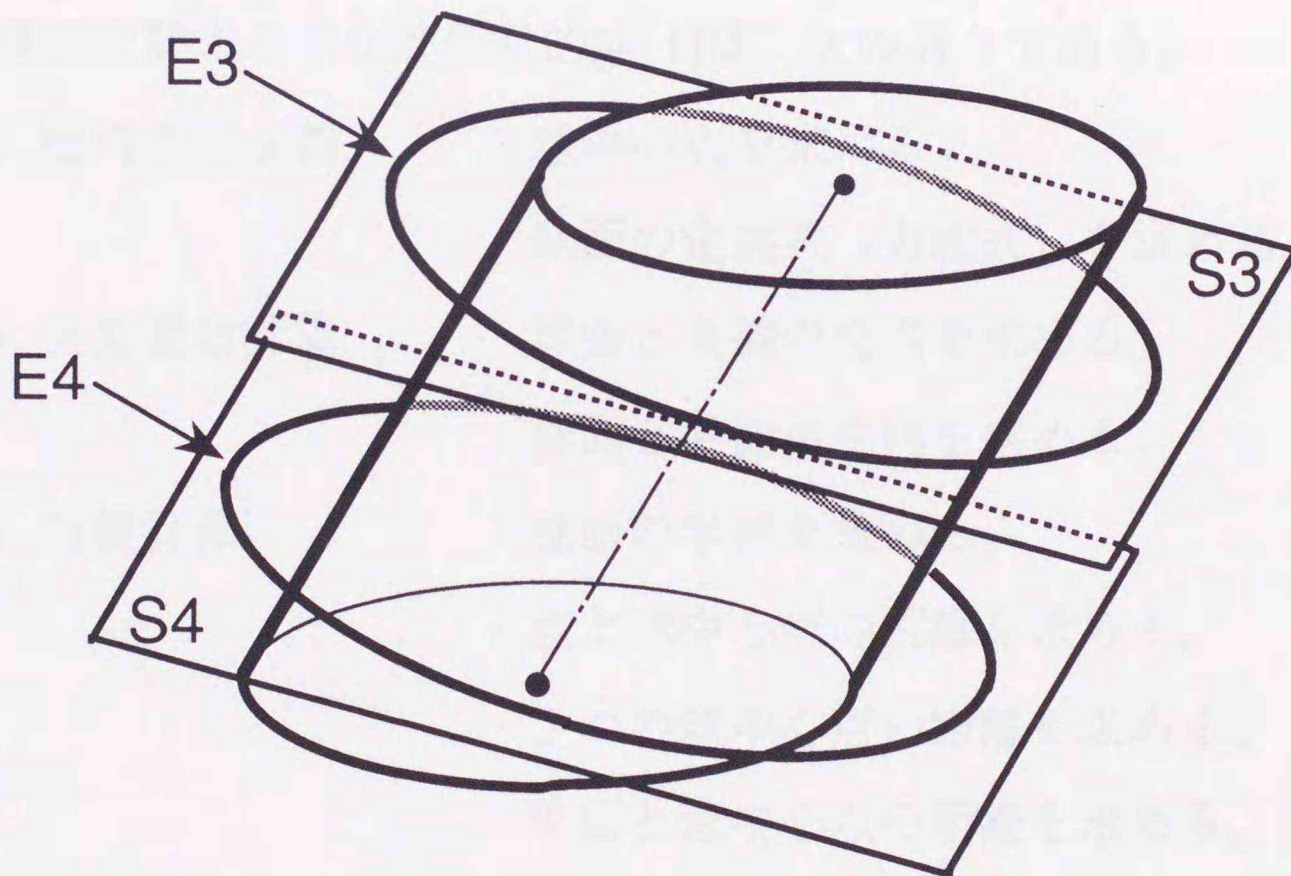
筒軸が認識されていない時，厳密に円筒面と円筒軸の測定評価を行うためには，次の2段階の手続きが必要となる。

- (1) 図4-3(a)に示されているように，アナログプローブヘッド[4-2]～[4-10]を用いて，プローブを円筒面に接触させながら，プローブ中心点を円筒と交わる任意の2平面 S_1 ， S_2 に存在させた状態で円筒面の一周の測定を行い，プローブ中心座標値 E_1 ， E_2 を検出する。このとき，平面 S_1 ， S_2 は互いに平行とする。これより得られたプローブ中心座標値 E_1 ， E_2 は，平面 S_1 ， S_2 と円筒面の交線上には存在しておらず，また平面 S_1 ， S_2 と円筒面の交線に対してプローブ半径値だけオフセット（拡大縮小）された形状も表していない。しかしながら，座標値 E_1 と座標値 E_2 の相関より，円筒軸（円筒の傾き）を求めることができる。
- (2) 円筒の傾きを求めた後，図4-3(b)に示されているように，円筒に直交する任意の2平面 S_3 ， S_4 を定義する。2平面 S_3 ， S_4 は互いに平行とする。次にアナログプローブヘッドを用いて，プローブ中心点を平面 S_3 ， S_4 上に存在させた状態で，プローブを円筒面に接触させながら円筒面の一周の測定を行い，プローブ中心点の座標値を検出する。この座標値より，円筒の断面形状に対してプローブ半径値だけオフセット（拡大縮小）された円形状 E_3 ， E_4 を求めることができる。円形状 E_3 ， E_4 に対してプローブ半径値を補正し円筒の断面形状（円）の定義式を求め，同定義式を円筒軸方向に平行移動し，円筒面の定義式を求める。

このように，円筒の測定評価を厳密に行うためには，高価なアナログプローブヘッドが必要であり，その測定手続きも極めて複雑であるため，一般的には次のような簡易的な測定法[2-11]が採用されている。すなわち，



(a) 円筒の厳密な測定手順その1



(b) 円筒の厳密な測定手順その2

図4-3 円筒の厳密な測定法

円筒軸に垂直な平面上に存在する円筒面上の任意の3点を可能なかぎり正確に選定し、このような3点の測定を2組行いプローブ中心座標値を検出する。これよりそれぞれの3点のプローブ中心点座標値より2つの円を定義し、2つの円の中心点を結ぶ直線を円筒軸として求め、また円の半径に対してプローブ半径を補正して円筒の半径を求める。したがって、円筒軸の定義式がCADデータ等によりあらかじめ与えられている場合や、円筒の傾きをその加工条件から予測できる場合には、有効で簡易な方法と考えられるが、このような場合以外には、測定点の選定の適否が測定誤差に直接関係すると言う問題がある。

4. 1. 3 球の測定評価

球の測定に関する主な評価目的[4-1]は、次の通りである。

- | | |
|------------|--------------------|
| (1) 幾何要素定義 | ・ 球中心点を求める。 |
| | ・ 球面の定義式（方程式）を求める。 |
| (2) 交差要素計算 | ・ 球面と直線の交点を求める。 |
| | ・ 球面と平面の交円を求める。 |
| (3) 距離計算 | ・ 球面の半径を求める。 |
| | ・ 点と球中心点の距離を求める。 |
| | ・ 2つの球中心点の距離を求める。 |
| | ・ 平面と球中心点の距離を求める。 |

これら球の測定における評価目的を達成するためには、測定評価対象となっている球の方程式と中心点を求めることが基礎となっている。

球の測定評価においても、平面と円筒の測定評価において指摘された同様の問題点がある。すなわち、図4-4に示されているように、測定対象

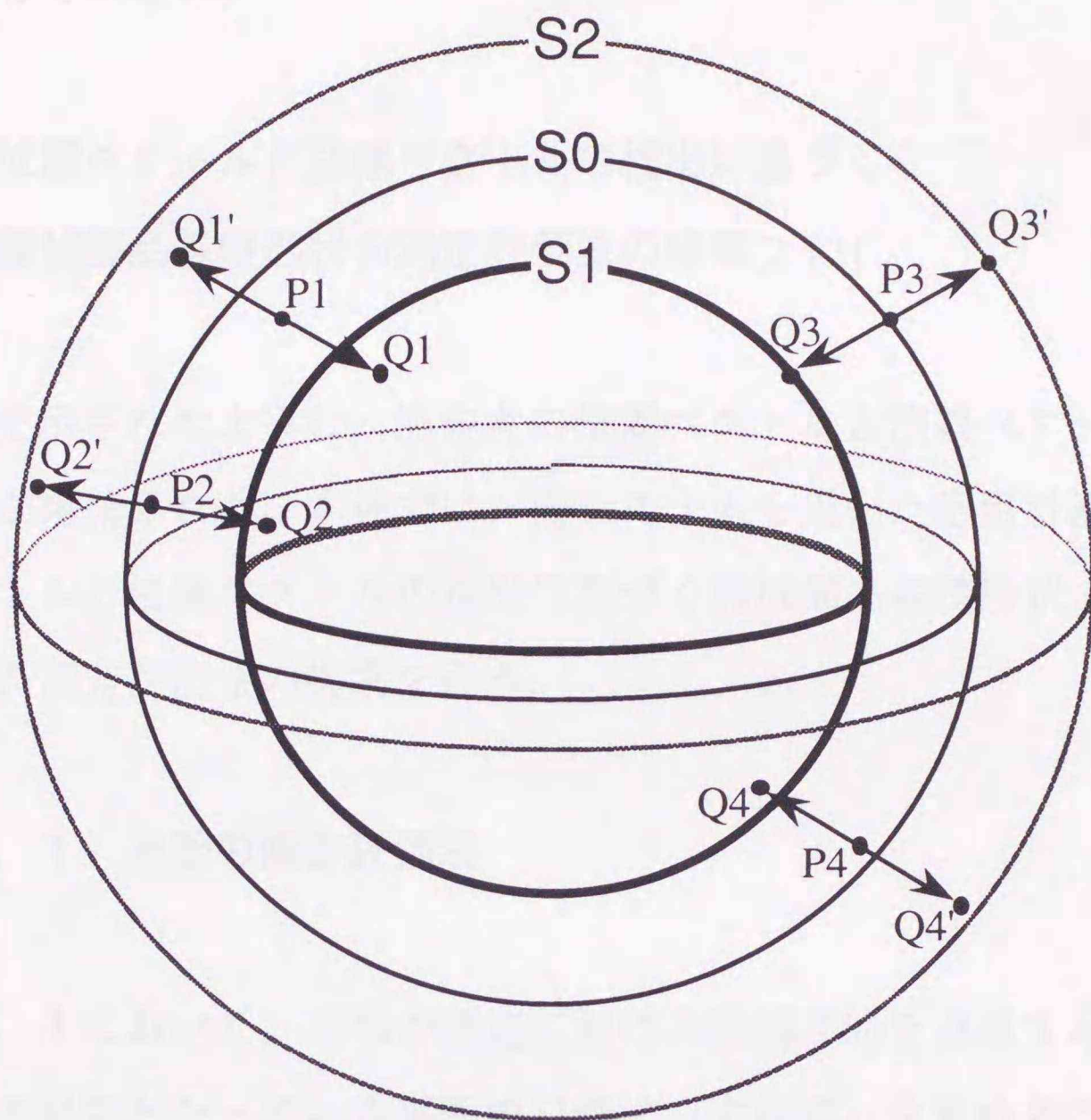


図4-4 球の定義式（方程式）の求め方

となっている球面 $S1$ 上の任意の4点 $Q1$, $Q2$, $Q3$, $Q4$ の測定を行い, このときのプローブ中心座標値 $P1$, $P2$, $P3$, $P4$ から球面 $S0$ の定義式を求める。これより定義された球面 $S0$ は, 測定対象である球面 $S1$ に対してプローブ半径値だけオフセット（拡大縮小）された球面となっている。測定対象球面 $S1$ の定義式を求めるためには, 球面 $S0$ に対してプローブ半径値だけ拡大あるいは縮小を行う必要がある。このとき, 拡大する場合と縮小する場合により球面 $S1$ と球面 $S2$ が求められるため, オペレータはプローブ半径値の補正方向（凹球測定の場合は拡大, 凸球測定の場合は縮小）を指示する必要がある。この作業が, 三次元座標測定機による球面の測定評価

を単純化していない。

4. 2 位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく

機械部品基礎形状の測定評価法の提案[2-12]

第3章で示されたように、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムが構築された。本節では、同システムを用いた応用計測として、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく機械部品基礎形状（平面，円筒，球）の測定評価法の提案を行う。

4. 2. 1 平面の測定評価法

4. 1. 1において、平面の測定における評価目的を達成するためには、測定評価の対象となっている平面の定義式（方程式）を求めることが基礎になっていることを示した。

第3章で構築された測定システムは、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの検出を可能としている。このため、同システムにより平面上の任意の1点の位置ベクトル p と法線ベクトル n を検出することにより、その平面の位置ベクトル x を、式(4-1)により定義することができる。

$$(x - p) \cdot n = 0 \quad (4-1)$$

平面測定において、平行な2平面間の距離を求めることを目的とする場合が多い。したがって、平行な2平面上の任意の1点の位置ベクトルと法線ベクトルをそれぞれ検出することにより、平行平面間の距離を求める方

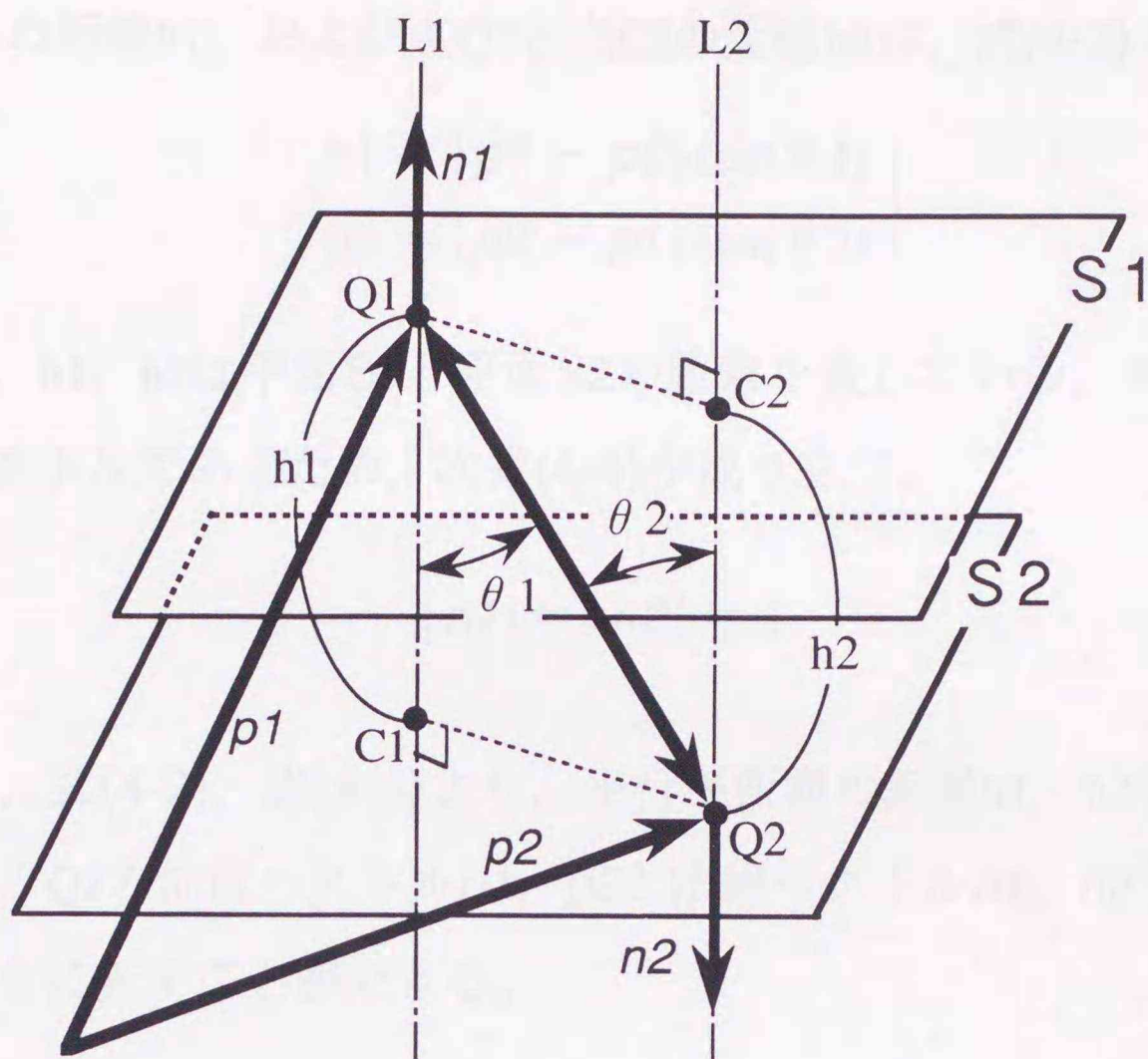


図4-5 平行平面間距離測定法

法を提案する。

図4-5に示されているように、互いに平行な平面S1と平面S2について、平面S1上の任意点Q1を測定することにより点Q1の位置ベクトル $p1$ と法線ベクトル $n1$ を、また平面S2上の任意点Q2の測定よりその位置ベクトル $p2$ と法線ベクトル $n2$ を得る。このとき、点Q1を通り法線ベクトル $n1$ に平行な直線L1とベクトル $(p1-p2)$ のなす角を $\theta 1$ 、点Q2を通り法線ベクトル $n2$ に平行な直線L2とベクトル $(p2-p1)$ のなす角を $\theta 2$ とすると、式(4-2)が成り立つ。

$$\begin{aligned} n1 \cdot (p1 - p2) &= |n1| \cdot |p1 - p2| \cdot \cos(\theta 1) \\ n2 \cdot (p2 - p1) &= |n2| \cdot |p2 - p1| \cdot \cos(\theta 2) \end{aligned} \quad (4-2)$$

直線L1と平面S2の交点をC1、直線L2と平面S1の交点をC2とすると、点

Q1と点C1の距離 h_1 ，および点Q2と点C2の距離 h_2 は，式(4-3)より得られる。

$$\begin{cases} h_1 = |p_1 - p_2| \cdot \cos(\theta_1) \\ h_2 = |p_2 - p_1| \cdot \cos(\theta_2) \end{cases} \quad (4-3)$$

このとき， h_1 ， h_2 は平面S1と平面S2の距離を表している。また， n_1 ， n_2 は単位ベクトルであるため，次式(4-4)が成り立つ。

$$|n_1| = |n_2| = 1 \quad (4-4)$$

式(4-2)，式(4-3)，式(4-4)より，平行平面間の距離 h_1 ， h_2 は，平面上の任意点Q1，Q2の位置ベクトル p_1 ， p_2 と法線ベクトル n_1 ， n_2 を用いて，式(4-5)のように表すことができる。

$$\begin{cases} h_1 = |n_1 \cdot (p_1 - p_2)| \\ h_2 = |n_2 \cdot (p_2 - p_1)| \end{cases} \quad (4-5)$$

面の加工誤差や測定誤差により，距離 h_1 と距離 h_2 が異なる場合は，それらの平均値を平行平面間距離とする。

以上より，平行な2平面の任意の1点の位置ベクトル p_1 ， p_2 と法線ベクトル n_1 ， n_2 をそれぞれ検出することにより，式(4-5)を用いて，平行平面間距離が求められることが示された。

4. 2. 2 円筒の測定評価法

4. 1. 2において，円筒の測定における評価目的を達成するためには，測定評価の対象となっている円筒面の定義式（方程式）を求めることが基礎になっていることを示した。円筒面の定義式は，円筒軸と円筒半径を求

めることにより決定できる。以下において、円筒面上の任意の2点の位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づき、円筒軸と円筒半径を求める方法を提案する。

図4-6に示されているように、円筒面上の任意点 Q_1 の測定からその点の位置ベクトル p_1 と法線ベクトル n_1 を、また、筒面上の任意点 Q_2 の測定からその点の位置ベクトル p_2 と法線ベクトル n_2 を得る。このとき、点 Q_1 を通り法線ベクトル n_1 に平行な直線と円筒中心軸との交点を Q_0 とし、点 Q_2 を通り法線ベクトル n_2 に平行な直線と円筒中心軸との交点を Q_3 とする。点 Q_0 の位置ベクトル p_0 と点 Q_3 の位置ベクトル p_3 は、円筒の半径を r とすると、式(4-6)、式(4-7)より得られる。

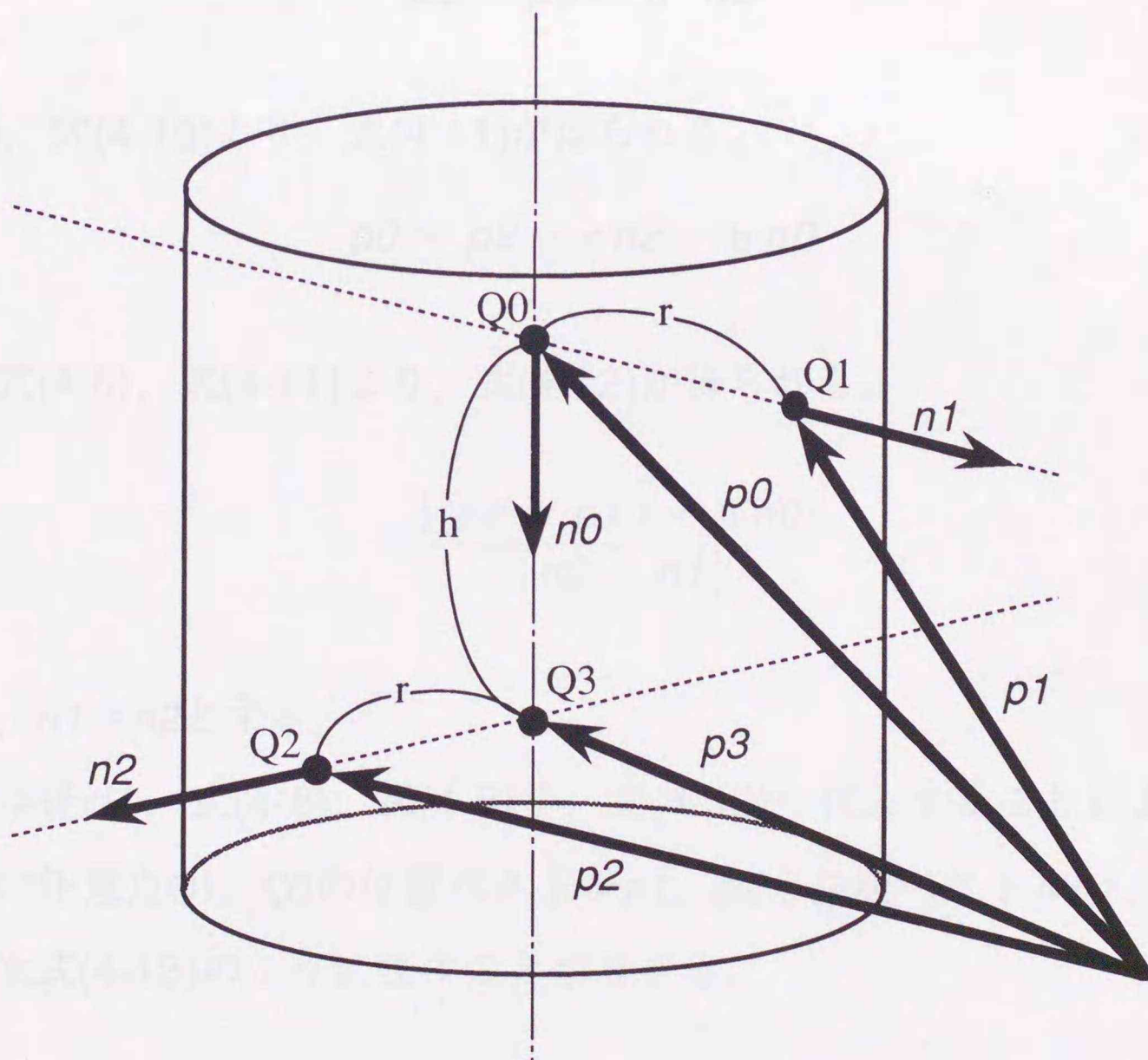


図 4-6 円筒測定法

$$p_0 = p_1 - r \cdot n_1 \quad (4-6)$$

$$p_3 = p_2 - r \cdot n_2 \quad (4-7)$$

円筒中心軸に平行な単位ベクトル n_0 は、式(4-8)より求めることができる。

$$n_0 = n_1 \times n_2 \quad (4-8)$$

点 Q_0 と点 Q_3 の距離 h は、式(4-9)より得られる。

$$h = n_0 \cdot (p_1 - p_2) \quad (4-9)$$

また、点 Q_3 の位置ベクトル p_3 は、式(4-10)のように表すこともできる。

$$p_3 = p_0 + h \cdot n_0 \quad (4-10)$$

式(4-7)、式(4-10)より、式(4-11)が得られる。

$$p_0 = p_2 - r \cdot n_2 - h \cdot n_0 \quad (4-11)$$

また、式(4-6)、式(4-11)より、式(4-12)が得られる。

$$r = \frac{|(p_2 - p_1) - h \cdot n_0|}{|n_2 - n_1|} \quad (4-12)$$

ただし、 $n_1 \neq n_2$ とする。

円筒半径 r は、式(4-8)、式(4-9)を、式(4-12)へ代入することにより、円筒面上の任意点 Q_1 、 Q_2 の位置ベクトル p_1 、 p_2 と法線ベクトル n_1 、 n_2 を用いて、次式(4-13)のように表すことができる。

$$r = \frac{|p_2 - p_1 - \{(n_1 \times n_2) \cdot (p_1 - p_2)\}(n_1 \times n_2)|}{|n_2 - n_1|} \quad (4-13)$$

また、円筒軸の方程式 p は、式(4-6)、式(4-8)より、パラメータ t を用いて式(4-14)のように表すことができる。

$$p = p1 - r \cdot n1 + t \cdot (n1 \times n2) \quad (4-14)$$

以上より、円筒面上の任意の2点の位置ベクトル $p1$, $p2$ と法線ベクトル $n1$, $n2$ を検出することにより、式(4-13)、式(4-14)より、円筒半径と円筒軸の方程式が求められることが示された。これより、円筒面の定義式を得ることができる。

4. 2. 3 球の測定評価法

4. 1. 3において、球の測定における評価目的を達成するためには、測定評価の対象となっている球面の定義式（方程式）を求めることが基礎になっていることを示した。球の定義式は、中心点と半径を求めることにより決定できる。以下において、球面上の任意の2点の位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づき、球の中心点と半径を算出し、球の定義式を求める方法を提案する。

図4-7に示されているように、球面上の任意点 $Q1$ の測定よりその点の位置ベクトル $p1$ と法線ベクトル $n1$ を得る。球の半径を r とすると、球の中心点 Oc の位置ベクトル pc は、式(4-15)で与えられる。

$$pc = p1 - r \cdot n1 \quad (4-15)$$

同様に、球面上の任意点 $Q2$ の測定よりその点の位置ベクトル $p2$ と法線ベクトル $n2$ を得たならば、球の中心点 Oc の位置ベクトル pc は、式(4-16)で与えられる。

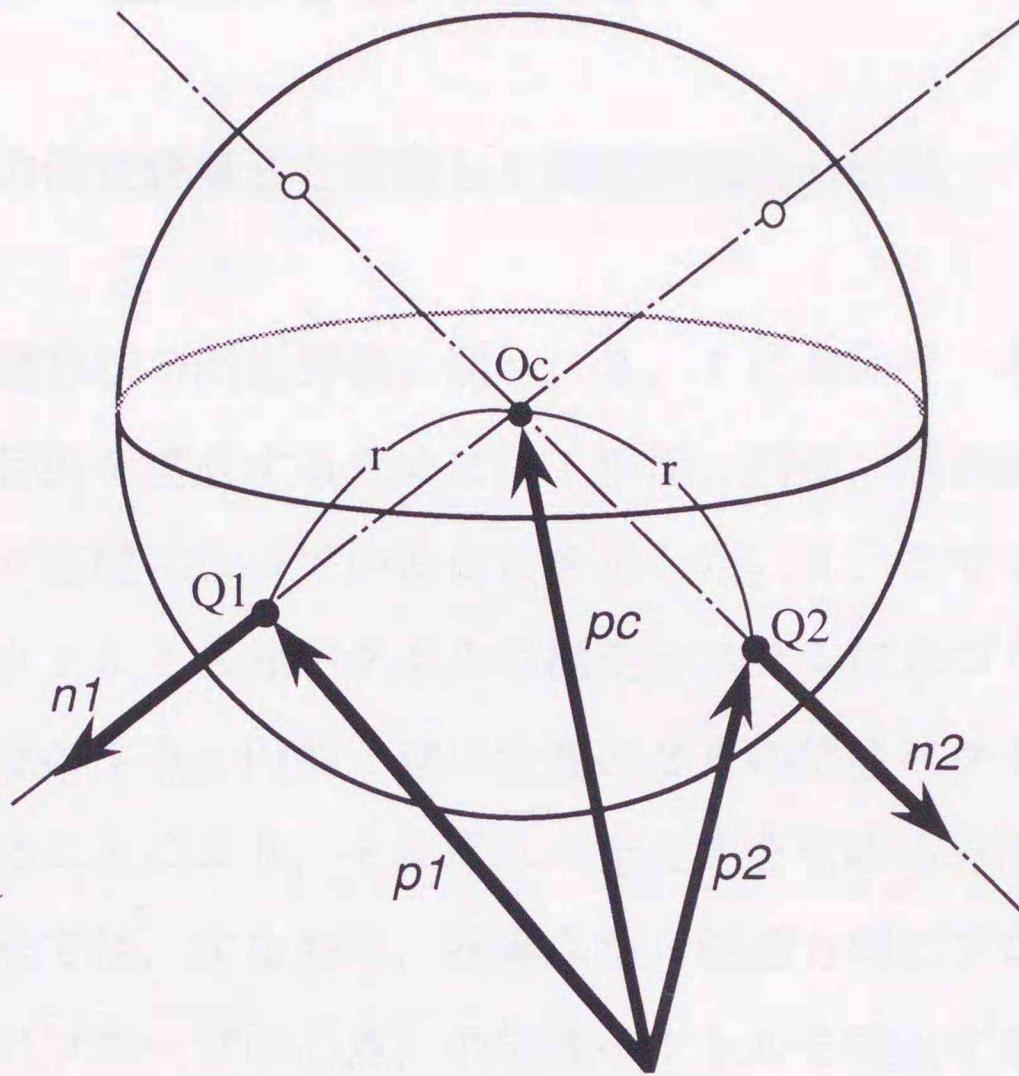


図4-7 球測定法

$$pc = p2 - r \cdot n2 \quad (4-16)$$

式(4-15), 式(4-16)より, 球の半径 r は, 球面上の任意点 $Q1$, $Q2$ の位置ベクトル $p1$, $p2$ と法線ベクトル $n1$, $n2$ を用いて, 式(4-17)のように表すことができる。

$$r = \frac{|p2 - p1|}{|n2 - n1|} \quad (4-17)$$

ただし, $n1 \neq n2$ とする。

以上より, 球面上の任意の2点の位置ベクトル $p1$, $p2$ と法線ベクトル $n1$, $n2$ を検出することにより, 式(4-15), 式(4-17)から, 球の中心点の座標値と球の半径値が求められることが示された。球の中心点座標値と球半

径値より，球面の定義式は容易に決定できる。

4. 3 従来の測定評価法と提案した測定評価法の比較

機械部品基礎形状の測定評価に関し，4. 1において，平面，円筒，球の測定評価の目的を達成するためには，平面，円筒，球の定義式(方程式)を求めることが基礎になっていることを示した。4. 2では，第3章で構築した位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムに基づく応用測定として，平面は任意の1点，円筒と球は任意の2点の位置ベクトルと法線ベクトルを測定することにより，それぞれの定義式を求める方法を提案した。

従来の測定法では，すなわち，測定点から法線方向にプローブ半径値だけ移動した点（プローブ中心点）の位置ベクトルを検出する方法では，少なくとも，平面では3点，円筒では6点，球では4点の測定を行うことが必要とされていた[4-11]。さらにプローブ半径値を補正するための情報を，別途に与えることが要求されていた。表4-1は，4. 2で提案した方法と従来の方法について，平面，円筒，球を定義するために必要な測定点数を示している。同表より，平面，円筒，球の各定義式を求めるにあたり，測定点数の観点から判断して，提案した方法は従来の方法に比べて2～3倍の測定効率が得られていることが分かる。

また，提案した測定評価法は，平面測定において平面の法線ベクトルを，円筒測定において外径測定か内径測定かを，および球測定において凹球測定か凸球測定かを意識せずに，測定データのみからそれぞれの形状の定義式を求めることができる特徴がある。

従来の円筒の測定評価法では，円筒の傾きを特定したり，測定箇所を限定するなど，測定における制約条件があった。また，厳密な円筒の測定評

価を行うことは容易ではなかった。しかし、提案した円筒測定評価法は、法線ベクトルが等しい場合を除き、任意の2点の位置ベクトルと法線ベクトルを測定することにより、円筒面と円筒軸の定義式を求めることを可能にしている。

表4-1 提案する方法と従来の方法の測定点数の比較

Dimension to be measured	The number of measuring times in a usual method	The number of measuring times in the proposed method	Efficiency of the proposed method
Distance between two planes	4	2	200%
Radius of a cylinder	6	2	300%
Radius of a sphere	4	2	200%

4.4 測定評価実験と結果

第3章において構築した測定システムを用いて、提案した位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく平行平面間距離、円筒半径値、球半径値の測定実験を試みた。測定対象として、平行平面間距離測定実験では面間距離が75mmのブロックゲージ（寸法公差 $0.30\mu\text{m}$ ）を、円筒半径測定実験では半径が25mmのシリンダーゲージ（寸法公差 $20.0\mu\text{m}$ ）を、そして球半径測定実験では半径が50mmのスチールボール（寸法公差 $12.5\mu\text{m}$ ）を用いた。

表4-2は、測定評価実験の結果を示している。公称寸法に対して、平行平面間距離測定では $+1.0\mu\text{m}$ 、円筒半径測定では $+1.3\mu\text{m}$ 、球半径測定では $-72.0\mu\text{m}$ の誤差を生じている。用いた測定システムの同

一点の19回の繰り返し測定におけるばらつき（19回の測定座標値の最大値と最小値の差）が位置ベクトルで3～4 μm であり、三次元座標測定機の測定精度が空間精度で5 μm であることを考慮するならば、平行平面間距離測定、円筒半径値測定では実用的精度が得られており、提案した測定法の実用性・有効性が確認できた。

表4-2 測定評価実験結果

Dimension to be measured	Object to be measured	Tolerance (μm)	Measured value (mm)	Error (μm)
Distance between two planes	Block gauge with a diameter of 75 mm	0.30	75.0010	+1.0
Radius of a cylinder	Cylinder gauge with a radius of 25 mm	20.0	25.0013	+1.3
Radius of a sphere	Steel ball with a radius of 50 mm	12.5	49.9276	-72

4.5 本章の総括と結論

本章は、機械部品基礎形状の基本要素として平面、円筒、球を対象とし、これらの測定評価を行うための従来の方法の問題点を明らかにするとともに、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく独自の測定評価法を提案した。また、提案した方法と従来の方法の比較を行い、提案した方法の測定評価実験を試みた。その結果、以下の通りにまとめられる。

- (1) 平面、円筒、球の測定において要求される主な評価目的を明らかにし、それらの評価目的を達成するためには、それぞれの測定において平面、円筒、球の定義式（方程式）を求めることが基本となることを示した。
- (2) 従来の測定評価法、すなわち、測定点から法線方向にプローブ

半径値だけオフセットされた点（プローブの中心点）の座標値を検出し、平面、円筒、球の定義式を求める方法における問題点は次の通りである。

- (a) 平面測定評価：平面の任意の3点の測定値（プローブ中心点座標値）より平面の定義式を求め、この平面を平面の法線方向にプローブ半径値だけ平行移動することにより、対象平面の定義式を求める。このとき、平行移動の方向を与える必要がある。
- (b) 円筒測定評価：円筒軸が与えられている場合、円筒軸に直交する任意の平面と円筒面との交線（円）上に存在する任意の3点の測定を行い、プローブ中心座標値を検出する。この座標値より、対象円筒面に対してプローブ半径値だけ拡大あるいは縮小された円筒面の定義式を求めることができる。求められた定義式に対してプローブ半径値の補正（拡大あるいは縮小）を行い、対象円筒面の定義式を求める。しかし、円筒軸が与えられていない場合には、円筒軸に直交する平面と円筒面との交線上に存在する3点を選定することが極めて困難である。この場合、円筒軸を仮定したり予測したりして測定点を選定しているが、円筒軸の予測誤差が測定誤差の直接の原因となる。また、プローブ半径値の補正を行うために補正方向を与える必要がある。すなわち、円筒の外径測定か内径測定かを指示する必要がある。
- (c) 球測定評価：球面上の任意の4点の測定よりプローブ中心座標値を検出し、これより球の定義式を求める。求められた球の定義式は、測定評価対象である球に対してプローブ半径

値だけ拡大あるいは縮小された球となっている。したがって、同定義式より得られた球面に対しプローブ半径値の補正（拡大あるいは縮小）を行い、測定評価対象球の定義式を求める。このとき、補正の方向、すなわち、拡大するのか縮小するのかを示す必要がある。このことは、凸球の測定行っているのか、凹球の測定を行っているのかを示すことと等しい。

- (3) 位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく平面、円筒、球の独自の定義方法を提案した。同方法は、従来の測定評価法において指摘されていた問題点を解決しており、以下の通りにまとめられる。
- (a) 平面測定評価：平面上の任意の1点の位置ベクトルと単位法線ベクトルを検出することにより、測定評価対象平面を直接定義することが可能となった。また、平面の測定評価において最も要求度が高い平行平面間距離を求める手順を明らかにした。
 - (b) 円筒測定評価：円筒面上の任意の2点の位置ベクトルと法線ベクトルを検出することにより円筒軸と円筒半径を求め、円筒の定義式を求める方法を明らかにした。
 - (c) 球測定評価：球面上の任意の2点の位置ベクトルと法線ベクトルを検出することにより球の中心点と半径を求め、球の定義式を求める方法を明らかにした。
- (4) 提案した位置ベクトルと法線ベクトルに基づく測定評価法と従来の測定法を比較し、測定点数の観点から、提案した測定評価法は2～3倍の測定効率が得られることを明らかにした。また提案した方法は、測定評価目的を達成するためのアルゴリズムが単純

であり，厳密に円筒面の定義が可能である特徴を示した。

- (5) 第3章で構築した位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを用いて，平行平面間距離，円筒半径，球半径の測定評価実験を行った。その結果として，平行平面間距離測定では $+1.0\ \mu\text{m}$ ，円筒半径値測定では $+1.3\ \mu\text{m}$ ，球半径値測定では $-72.0\ \mu\text{m}$ の誤差が認められたが，測定システムの測定精度を考慮し，提案した測定法の実用性・有効性を確認できた。

参 考 文 献

- [4- 1] 日本機械学会：機械加工計測技術，朝倉書店，1986年，p113.
- [4- 2] M.Wock, P.Bagh, R.Holler：Measuring Gears with a Numeric Controlled 3-Axis Measuring Machine, Annals of the CIRP, Vol.24, No.1, 1975年，p375. ([1-66])
- [4- 3] Hans Joachim Neumann：Gear inspection on a multi-coordinate measuring machine, Reprint of lecture held during the 5th International Conference on Automated and Product Control (12th IPA Meeting in Stuttgart), 1980年. ([1-67])
- [4- 4] M.Bambach, A.Furst：Bestimmung der Antastunsicherheit elektronischer 3-D-Tastsysteme, VDI-Berichte, No.378, 1980年，p15. ([1-68])
- [4- 5] 伊藤嘉朗：カールツァイス三次元測定機：計測技術，No.3, 1981年，p80. ([1-69])
- [4- 6] Diane Kaylor：Metrology-CMMs Go the Distance (CMMs measure up to the ultimate machine tool manufacturing dream), MECHANICAL ENGINEERING, February, 1983年，p37. ([1-70])
- [4- 7] 佐久間健三，中村哲夫：寸法・形状測定における測定ヘッド，精密工学会誌，Vol.52, No.4, 1986年，p605. ([1-71])
- [4- 8] N.A.Duffie, S.J.Malmberg：Error Diagnosis and Compensation Using Kinematic Models and Position Error Data, Annals of the CIRP, Vol.36, No.1, 1987年，p355. ([1-72])
- [4- 9] 中村哲夫：三次元測定機による新しい形状測定システム，合成樹脂，Vol.33, No.7, 1987年，p13. ([1-73])

- [4-10] 丸山六男：三次元検出器の動作特性，機械の研究，Vol.39，No.3，1987年，p39. ([1-74])
- [4-11] 株式会社ニコン：三次元座標測定機TRISTATION測定コード機能一覧表＜寸法測定用プログラム 操作説明書 別冊＞，p10.
- [4-12] 青山英樹，岸浪建史，斎藤勝政，河合正治：位置ベクトルと単位法線ベクトルの検出に基づく寸法測定システムの開発，精密工学会誌，Vol.57，No.5，p807. ([3- 2])

第5章 自由曲面加工形状の測定評価

本章では、位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムに基づく応用計測として、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく自由曲面加工形状の評価法を提案[5- 1]し、自由曲面加工形状の測定評価における基本的考え方と、その考え方に基づく評価項目を明らかにする。また、設計形状(計算機モデル)から加工形状(物理モデル)への変換を座標変換としてモデル化し、提案する評価法と従来自由曲面加工形状の評価法として採用されているベストフィット法[5- 2]～[5- 9]について、自由曲面加工形状を評価するうえで許容される座標変換を明らかにするとともに、提案する評価法とベストフィット法の評価に対する考え方と評価結果の違いについて検討する。さらに、計算機シミュレーションにより、提案する評価法の妥当性を確認する。

5. 1 自由曲面加工形状の測定評価の基本的考え方

5. 1. 1 意匠曲面と機能曲面

自由曲面は、意匠性の向上を目的として用いられる場合が多い。意匠性の向上を目的とする自由曲面の設計、すなわち、スタイルデザインにおいて、その設計形状の評価はシルエット曲線あるいはハイライト曲線[5-10]～[5-11]を基に、視覚(感覚)により行われている。式(5-1)は観測点を無限遠点としたときのシルエット曲線式を、また式(5-2)はハイライト曲線式を表している。

$$a \cdot N = 0 \quad (5-1)$$

$$-2(a \cdot N)(b \cdot N) + (a \cdot b) = \text{const.}$$

ただし、 N は設計曲面の法線ベクトルを表しており、 a 、 b はそれぞれ入射光線と視線の方向を表す単位ベクトルである。式(5-1)、式(5-2)より、意匠性の向上を目的とする自由曲面の設計形状の評価は、法線ベクトル N に基づき行われていることが分かる。このような意匠性の向上を目的とする自由曲面を意匠曲面と呼ぶこととする。

しかし、金型のキャビティブロックとコアブロックの分かれ面であるパーティング面[5-12]に自由曲面を用いるような場合、キャビティブロックとコアブロックの間に隙間が存在しないことが加工面（パーティング面）の有すべき最大の機能となる。このような機能を有すべき自由曲面を機能曲面と呼ぶこととする。

5. 1. 2 評価の基本的考え方と評価項目

前項（5. 1. 1）において、曲面が有する機能を基に、自由曲面を意匠曲面と機能曲面に分類した。意匠曲面の設計では法線ベクトルにより形状の評価が行われており、機能曲面の設計では曲面上の点の位置によりその機能を決定していることを示した。したがって、自由曲面加工形状の測定評価の基本的考え方として、意匠曲面の場合、法線ベクトルにより評価が行われるべきであり、機能曲面の場合、位置ベクトルにより評価が行われるべきであると提案する。この考え方に基づくならば、自由曲面加工形状の評価項目は表5-1に示す通りとなる。表5-1は、意匠曲面と機能曲面の加工形状の評価項目が、それぞれ法線ベクトルと位置ベクトルであることを示している。

表5-1 自由曲面の分類と評価項目

Type of free-form surface	Evaluation item
Style surface	Unit normal vector
Function surface	Position vector

したがって、意匠曲面ならびに機能曲面の測定評価において、設計形状と加工形状の法線ベクトルあるいは位置ベクトルの比較を行うことになる。法線ベクトルと位置ベクトルが有意義であるためには、計算機モデル空間と物理モデル空間の座標系が認識され、それらの絶対的位置関係が明らかになっている必要がある。このことは、提案した自由曲面加工形状評価の基本的考え方を実現するための基礎となっている。

一方、従来自由曲面加工形状の測定評価法として採用されているベストフィット法[5- 2]～[5- 9]は、物理モデル空間に任意に設定された測定座標系を基準として得られた加工形状の測定座標値に対して、並進変換および回転変換を施すことにより、測定座標値を設計形状に可能な限り接近させたときの設計値に対する測定座標値の差（誤差）から、評価を行っている。したがって、ベストフィット法は、測定座標値の相対的位置関係と設計形状との相関から加工形状を評価する方法である。このように同評価法は、計算機モデルと物理モデルの座標系の関係を明確には意識しておらず、提案する自由曲面の意匠性評価および機能性評価の概念と基本的に異なっている。

5. 2 設計形状から加工形状への変換モデル

5. 2. 1 座標変換モデル

自由曲面の設計形状は、一般に、CADシステムにおいてパラメータ u , v の重み関数を用いた補間式により、計算機モデルとして構築されている。その加工形状は、CAMシステムにより設計座標空間から加工座標空間へと写像され、物理モデルとして生成される。本章では、計算機モデルから物理モデルへの写像を設計座標空間（計算機モデル空間）から加工座標空間（物理モデル空間）への座標変換としてモデル化し、座標変換と加工形状評価の関係について検討する。計算機モデルから物理モデルへの写像を、座標変換モデルと呼ぶこととする。

本章では、3次Bezier補間式に基づく計算機モデルを対象として検討を行っているが、双3次Coons補間式、あるいは3次Bezier補間式や双3次Coons補間式を応用した補間式、またこれらの補間式と補間次数が異なる補間式に基づく計算機モデルに対しても、同様の議論の展開が可能である。ただし、補間式の次数が3次と異なる場合には、5. 3で述べている評価に必要とされる測定点数が、その次数に応じて増減することとなる。

5. 2. 2 座標変換モデルと加工形状評価

3次Bezier補間式を基礎として構築された設計形状（計算機モデル）の位置ベクトル（ $P_x(u,v)$, $P_y(u,v)$, $P_z(u,v)$ ）は、式(5-3)で表されるように16個の制御点（ $Q_{0x}, \dots, Q_{15x}$, $Q_{0y}, \dots, Q_{15y}$, $Q_{0z}, \dots, Q_{15z}$ ）に基づくパラメータ u , v の補間式で与えられている。

$$\left. \begin{aligned} P_x(u,v) &= f(u,v, Q_{0x}, \dots, Q_{15x}) \\ P_y(u,v) &= f(u,v, Q_{0y}, \dots, Q_{15y}) \\ P_z(u,v) &= f(u,v, Q_{0z}, \dots, Q_{15z}) \end{aligned} \right\} \quad (5-3)$$

設計形状の法線ベクトル $(N_x(u,v), N_y(u,v), N_z(u,v))$ は、式(5-3)に示されている位置ベクトル補間式のパラメータ u, v 方向の接線ベクトルの外積から、式(5-4)のように導くことができる。

$$\left. \begin{aligned} N_x(u,v) &= (P_y^u \cdot P_z^v - P_z^u \cdot P_y^v) / N_v \\ N_y(u,v) &= (P_z^u \cdot P_x^v - P_x^u \cdot P_z^v) / N_v \\ N_z(u,v) &= (P_x^u \cdot P_y^v - P_y^u \cdot P_x^v) / N_v \end{aligned} \right\} \quad (5-4)$$

式(5-4)において、 N_v は、次式(5-5)で与えられる。

$$N_v = \sqrt{(N_x(u,v))^2 + (N_y(u,v))^2 + (N_z(u,v))^2} \quad (5-5)$$

また、式(5-4)における記号 Pa^b (a は x, y, z を、 b は u, v を表している)は、次式(5-6)を表しており、同記号は、本章において以下同様に用いられる。

$$Pa^b = \frac{\partial Pa(u,v)}{\partial b} \quad (5-6)$$

座標変換モデルの変換マトリックス M を式(5-7)とする。

$$M = \begin{bmatrix} a & d & g & t_x \\ b & e & h & t_y \\ c & f & i & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

式(5-7)において、 $a \sim i, t_x, t_y, t_z$ は実定数である。このとき、加工形状の位置ベクトル $(P'_x(u,v), P'_y(u,v), P'_z(u,v))$ は、式(5-8)により表すことができ

る。

$$\begin{bmatrix} P'x(u,v) \\ P'y(u,v) \\ P'z(u,v) \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} Px(u,v) \\ Py(u,v) \\ Pz(u,v) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

これより，加工形状の法線ベクトル $(N'x(u,v), N'y(u,v), N'z(u,v))$ は，式(5-3)，式(5-4)，式(5-7)，式(5-8)より，次式(5-9)のように導くことができる。

$$\left. \begin{aligned} N'x(u,v) &= \{(b \cdot Px^u + e \cdot Py^u + h \cdot Pz^u)(c \cdot Px^v + f \cdot Py^v + i \cdot Pz^v) \\ &\quad - (c \cdot Px^u + f \cdot Py^u + i \cdot Pz^u)(b \cdot Px^v + e \cdot Py^v + h \cdot Pz^v)\} / N'v \\ N'y(u,v) &= \{(c \cdot Px^u + f \cdot Py^u + i \cdot Pz^u)(a \cdot Px^v + d \cdot Py^v + g \cdot Pz^v) \\ &\quad - (a \cdot Px^u + d \cdot Py^u + g \cdot Pz^u)(c \cdot Px^v + f \cdot Py^v + i \cdot Pz^v)\} / N'v \\ N'z(u,v) &= \{(a \cdot Px^u + d \cdot Py^u + g \cdot Pz^u)(b \cdot Px^v + e \cdot Py^v + h \cdot Pz^v) \\ &\quad - (b \cdot Px^u + e \cdot Py^u + h \cdot Pz^u)(a \cdot Px^v + d \cdot Py^v + g \cdot Pz^v)\} / N'v \end{aligned} \right\} \quad (5-9)$$

式(5-9)において， $N'v$ は，式(5-10)で与えられる。

$$N'v = \sqrt{(N'x(u,v))^2 + (N'y(u,v))^2 + (N'z(u,v))^2} \quad (5-10)$$

5. 1. 2で述べた自由曲面加工形状の測定評価の基本的考え方に基づくならば，自由曲面が意匠曲面の場合，加工形状の法線ベクトルが設計形状のそれと等価である時，その加工形状は適当であると評価できる。また，自由曲面が機能曲面の場合，加工形状の位置ベクトルが設計形状のそれと等しい時，その加工形状は適当であると評価できる。したがって，意匠曲面が適当であると判断できる条件は式(5-11)で表すことができ，機能曲面が適当であると判断できる条件は式(5-12)で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} N'x(u,v) &= Nx(u,v) \\ N'y(u,v) &= Ny(u,v) \\ N'z(u,v) &= Nz(u,v) \end{aligned} \right\} \quad (5-11)$$

$$\left. \begin{aligned} P'x(u,v) &= Px(u,v) \\ P'y(u,v) &= Py(u,v) \\ P'z(u,v) &= Pz(u,v) \end{aligned} \right\} \quad (5-12)$$

式(5-4)と式(5-9)より，式(5-11)を満足する変換マトリックスMの十分条件は式(5-13)で表され，また式(5-7)と式(5-8)より，式(5-12)を満足する変換マトリックスMの必要十分条件は式(5-14)で表すことができる。また，式(5-12)は式(5-11)の十分条件であるため，機能曲面であるならば意匠曲面としての条件を満足していることが分かる。

$$\left. \begin{aligned} b &= c = d = f = g = h = 0 \\ a &= e = i = s \end{aligned} \right\} \quad (5-13)$$

$$\left. \begin{aligned} b &= c = d = f = g = h = 0 \\ tx &= ty = tz = 0 \\ a &= e = i = 1 \end{aligned} \right\} \quad (5-14)$$

したがって，式(5-13)，式(5-14)より，変換マトリックスMが式(5-15)で表されるならば，その加工形状は設計形状の意匠性を満足していると評価でき，変換マトリックスMが式(5-16)で表されるならば，その加工形状は設計形状の機能性を満足していると評価できる。

$$M = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & tx \\ 0 & s & 0 & ty \\ 0 & 0 & s & tz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-15)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-16)$$

式(5-15)で表される変換マトリックス M は、設計形状から加工形状への写像において、 X, Y, Z 方向に等倍率（ s 倍）の拡大縮小変換と、 X, Y, Z 方向にそれぞれ tx, ty, tz の並進変換を許容している。また、式(5-16)で表される変換マトリックス M は単位マトリックスであり、設計形状と加工形状の完全な一致を要求している。

一方、従来行われているベストフィット法は、設計形状に対して加工形状の並進変換、回転変換を許容しており、自由曲面の持つ意匠性・機能性を明確には意識していない。この点において、ベストフィット法は、提案する意匠曲面評価、機能曲面評価のどちらの考え方とも一致していない。

5. 2. 3 従来の測定評価法と提案した測定評価法の比較

設計形状から加工形状への代表的な座標変換モデルに関して、座標変換モデルの原因となる主な加工誤差要因、および本研究で提案した意匠曲面評価、機能曲面評価とベストフィット法に基づく評価について定性的な検討を行った。表5-2は、その検討結果を示している。座標変換モデル、その原因となる主な加工誤差要因、およびその座標変換により生成された加工形状の評価結果（○印は適、×印は不適を表す）を表している。

表5-2に示されているように、提案した意匠曲面評価は、並進変換と拡大縮小変換（ x, y, z 方向等倍）の原因となる加工誤差に対して寛容であり、機能曲面評価は、いかなる加工誤差も寛容としていない。一方、ベストフィット法による評価は、並進変換と回転変換の原因となる加工誤差に対して寛容となっており、ベストフィット法と提案した意匠曲面評価法では拡大縮小変換と回転変換に対して逆の評価結果が得られている。

表5-2 座標変換モデルと加工形状評価の関係

Model of coordinate transformation	Machining errors causing coordinate transformation	Position vector	Unit normal vector	Best-fit method	Proposed method Style surface	Proposed method Function surface
Identity matrix	Nothing	Constant	Constant	○	○	○
Translation	Deflection of cutting tool, Errors of reference planes, Short rigidity of machine tool	Change	Constant	○	○	×
Scaling (with equal ratios)	Tool wear, Radius error of cutting tool, Uniform expansion of work by heat	Change	Constant	×	○	×
Scaling (with different ratios)	Deflection of cutting tool, Un-uniform expansion of work by heat	Change	Change	×	×	×
Rotation	Errors of reference planes, Short rigidity of machine tool	Change	Change	○	×	×
Shear	Short rigidity of machine tool, Deflection of cutting tool	Change	Change	×	×	×

5.3 位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく

自由曲面加工形状の評価法

5.3.1 評価法の概要

図5-1は、自由曲面形状の設計、加工、評価の一連の関係を示してい

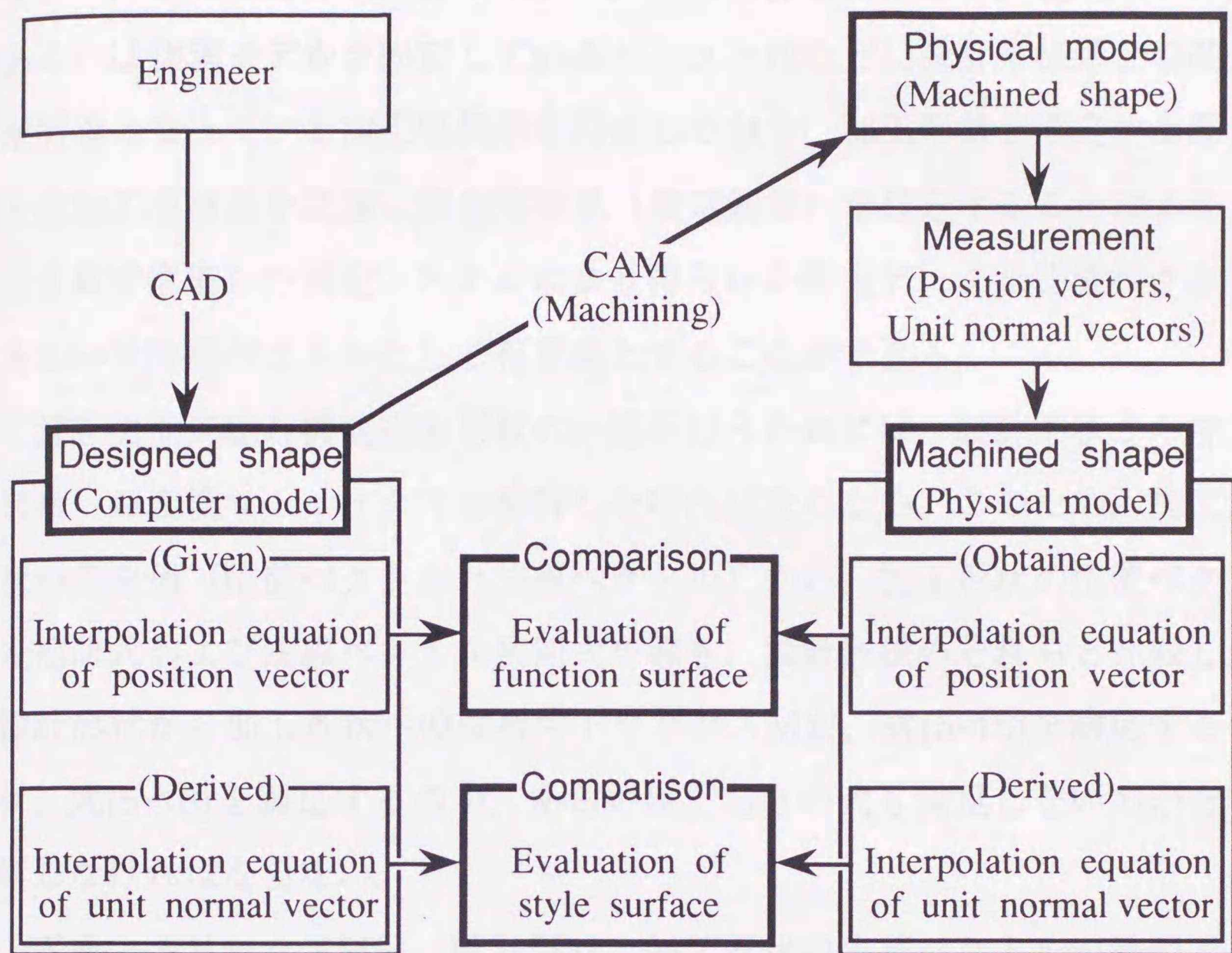


図 5 - 1 自由曲面加工形状評価法の概要

る。設計形状は、CADシステムにおいて設計者によりその位置ベクトル補間式が与えられ、計算機モデルとして構築される。同時に、設計者により与えられた位置ベクトル補間式より、設計形状の法線ベクトル補間式が導かれる。加工形状は、CAMシステムにより設計形状である計算機モデルから物理モデルへと写象され形成される。

5. 1. 2で述べたように、意匠曲面評価では設計形状と加工形状の法線ベクトルの比較を、機能曲面評価では設計形状と加工形状の位置ベクトルの比較を行う。したがって、測定データを位置ベクトルあるいは法線ベクトルとして有意義としなければならない。このため、設計形状（計算機

モデル) から加工形状 (物理モデル) への写像を行う際に, 物理モデル内あるいは物理モデルを固定しているパレット内などに設計座標系との関係が明確となっている加工座標系を形成しておき, 加工形状を測定する際にその加工座標系を認識し測定座標系 (測定基準) を設定することにより, 第3章で構築した測定システムにより得られる測定データを位置ベクトルあるいは法線ベクトルとして有意義とすることができる。

意匠曲面形状と機能曲面形状の評価を行うためには, 設計形状から加工形状への変換マトリックスを検討しなければならない。このため, 加工形状の測定値 (位置ベクトルと法線ベクトル) から, 加工形状の位置ベクトル補間式および法線ベクトル補間式を導き, 設計形状のそれらと比較し, 設計形状から加工形状への変換マトリックス M が, 式(5-15)を満足するのか, 式(5-16)を満足するのか, あるいはどちらの式も満足しないのかを判断しなければならない。

変換マトリックス M は, 設計形状と加工形状の法線ベクトルが等価である場合には式(5-15)を満足し, 設計形状と加工形状の位置ベクトルが等しい場合には式(5-16)を満足する。したがって, 表5-3に示されているように, 加工形状は, 変換マトリックス M が式(5-15)で表される場合には意匠曲面として適当であり, 変換マトリックス M が式(5-16)で表される場合には機能曲面として適当であると評価できる。また, 変換マトリックス M が式(5-15), 式(5-16)のどちらでも表されない場合, その加工形状は, 意匠曲面としても機能曲面としても適当であるとは評価できない。

表 5 - 3 変換マトリックスMと加工形状評価の関係

Transformation matrix M	Evaluation
Equation (5-15)	Suitable for style surface
Equation (5-16)	Suitable for function surface
Not Equation (5-15) and (5-16)	Un-suitable for style surface and function surface

5. 3. 2 測定点のパラメータ値の必要性和算出法

設計形状と加工形状について、それらの位置ベクトルと法線ベクトルを比較するためには、加工形状の位置ベクトル補間式と法線ベクトル補間式を求めなければならない。

加工形状が意匠曲面あるいは機能曲面として適当であると仮定することにより、設計形状から加工形状への変換マトリックスMは、式(5-15)あるいは式(5-16)を満足する。すなわち、加工形状を表す位置ベクトル補間式および法線ベクトル補間式のパラメータ u , v の重み関数は、それぞれ設計形状の補間式の重み関数と等しくなる。したがって、この仮定において加工形状の位置ベクトル補間式および法線ベクトル補間式のパラメータ u , v の重み関数が既知となる。これより、重み関数が3次の場合、加工面上の1曲面パッチ上に存在する任意の16点の位置ベクトル値とそれらの点のパラメータ値 u , v が得られるならば、その加工面パッチの位置ベクトル補間式を求めることができる。

変換マトリックスMが式(5-16)を満足する時、すなわち設計形状と加工形状が完全に一致している時、図5-2に示されているように、「設計形状の位置ベクトル補間式に基づく加工面の測定位置ベクトル値に対する反復計算法」により、測定点のパラメータ値 u , v を算出できる。「設計位置ベクトル補間式に基づく測定位置ベクトル値に対する反復計算法」とは、

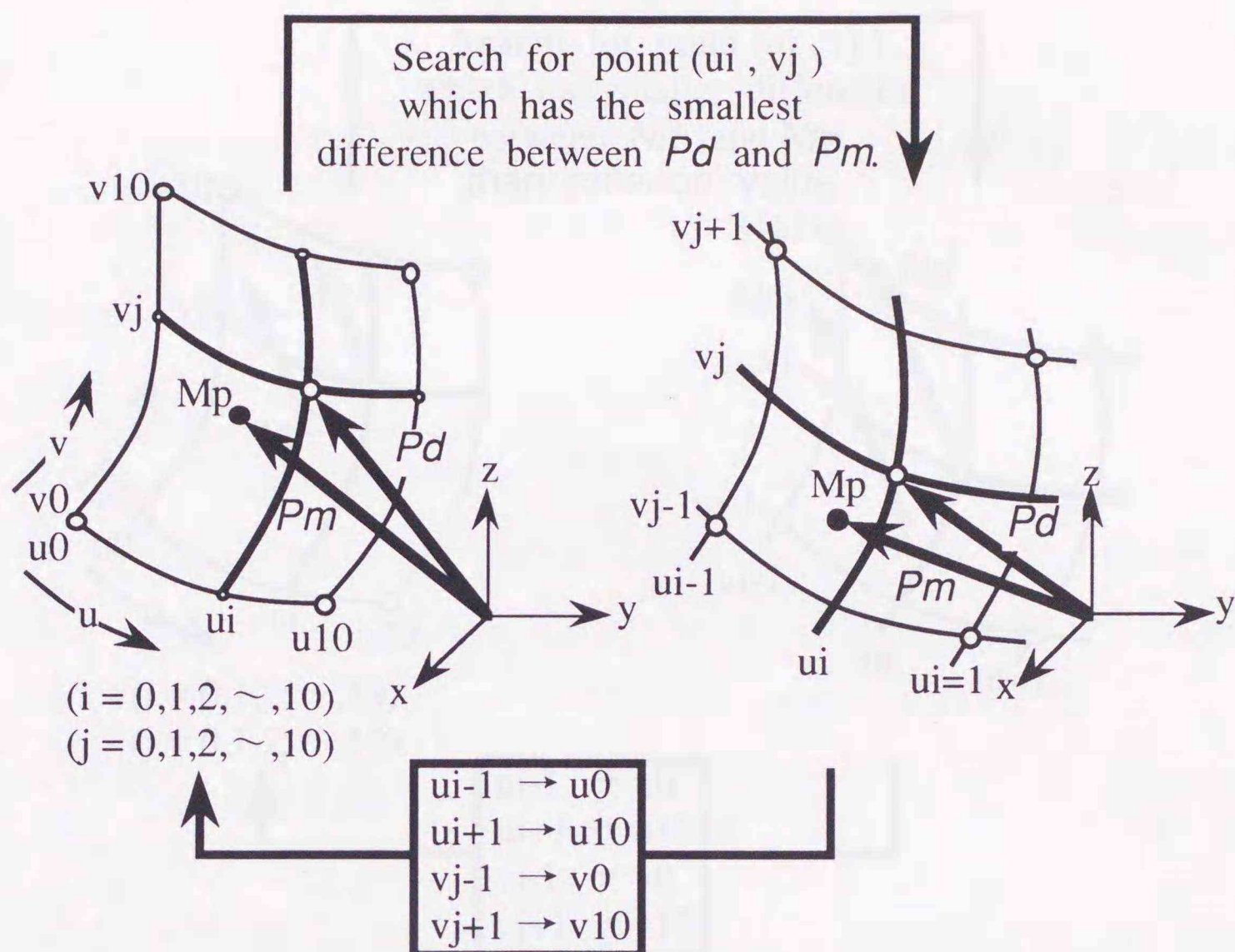


図5-2 位置ベクトルに基づく反復計算法

評価対象となっている曲面パッチ全域において、パラメータ u 、 v に関してそれぞれ10分割して得られるパラメータ格子点の位置ベクトル値 P_d と測定点 M_p の測定位置ベクトル値 P_m との差が最小となる格子点 (u_i, v_j) を検索し、次にこの格子点 (u_i, v_j) を取り囲む格子領域($u = u_{i-1} \sim u_{i+1}$, $v = v_{j-1} \sim v_{j+1}$)を1曲面パッチと見なして同様の手続きを繰り返し、パラメータ値が必要精度に達した時に反復計算を終了し、測定点 M_p のパラメータ値 u 、 v を決定する方法である。

しかしながら、変換マトリックス M が式(5-15)で表される場合には、位置ベクトルに基づく反復計算法から測定点のパラメータ値 u 、 v を算出することは困難である。変換マトリックス M が式(5-15)を満足する時、設計形

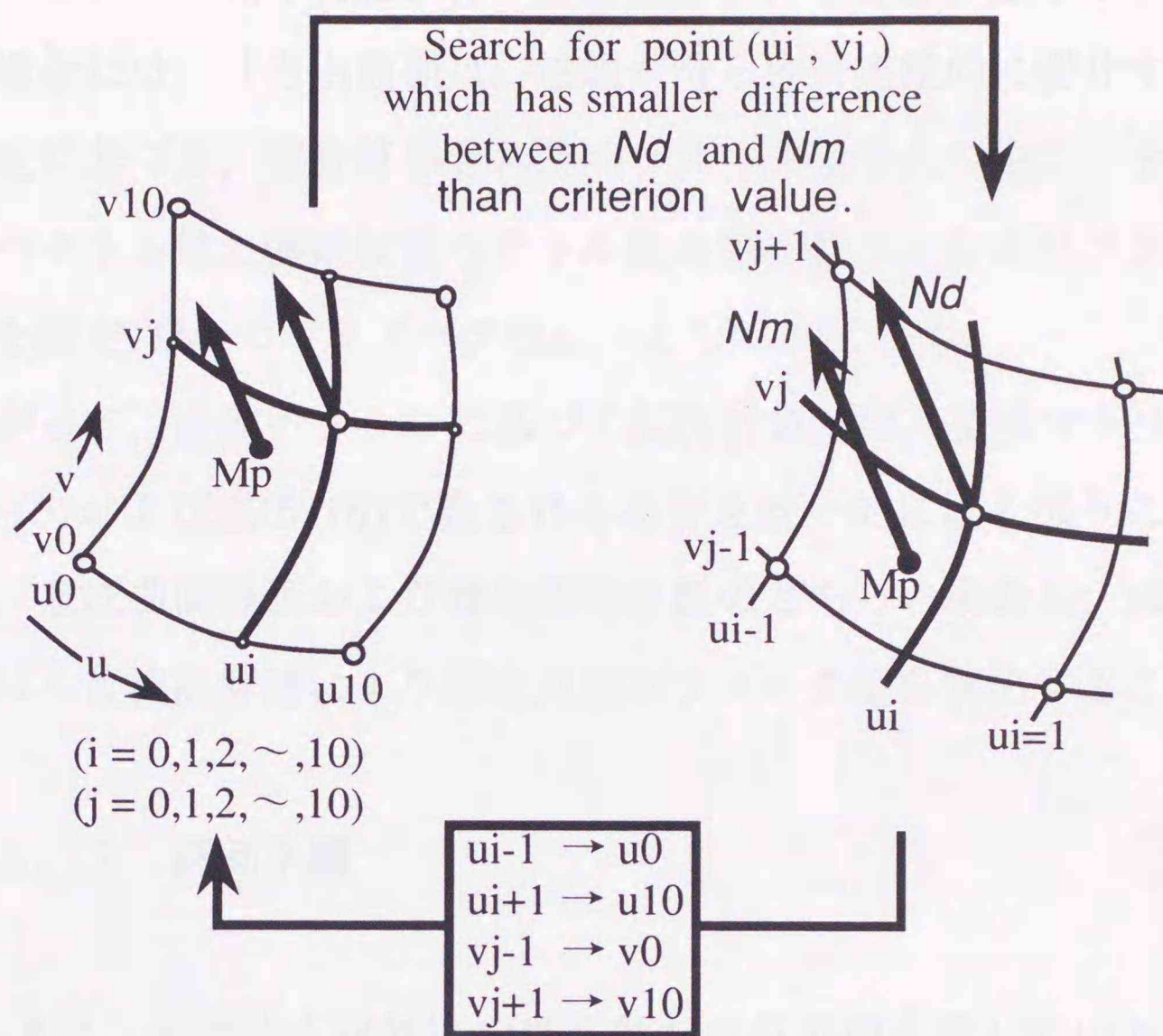


図5-3 法線ベクトルに基づく反復計算法

状と加工形状の法線ベクトルは等価であり，設計形状と加工形状のパラメータ u , v の重み関数が等しいことは前述した。すなわち，変換マトリックス M が式(5-15)の場合には，図5-3に示されているように，「設計形状の法線ベクトル補間式に基づく加工面の測定法線ベクトル値に対する反復計算法」により，測定点のパラメータ値 u , v を算出することができる。「設計法線ベクトル補間式に基づく測定法線ベクトル値に対する反復計算法」とは，測定法線ベクトル値 N_m との差が基準値以下となるパラメータ格子点 (u_i, v_j) を検索することを基礎としており，基本的には，前述した位置ベクトルに基づく反復計算法と同様の手順である。しかし，この法線ベクトルに基づく反復計算法では，測定法線ベクトル値 N_m との差が基準値以下

となるパラメータ格子点(u_i, v_j)が複数検索される場合が認められる。このような場合には、「自由曲面は、法線が滑らかに連続的に変化する。」と言う仮定に基づき、複数算出されたパラメータ格子点の中で、その格子点の位置ベクトル値と測定位置ベクトル値の差が最小となるパラメータ格子点の値を測定点 M_p のパラメータ値 u, v として決定する。

したがって、法線ベクトルに基づく反復計算法は、変換マトリックス M が式(5-15)および式(5-16)で表される場合を統一的に取り扱うことができるため、意匠曲面評価および機能曲面評価のどちらの場合も、法線ベクトルに基づく反復計算法により測定点のパラメータ値を算出することとする。

5. 3. 3 評価手順

図5-4は、提案する評価法の具体的な実行手順を示している。以下に、同図中に示されているStep番号と対応させ、その手順を説明する。

Step 1: 設計形状から加工形状へ写像が行われる際に形成された物理モデル内あるいは物理モデルを固定しているパレット内の加工座標系を認識（測定）することにより、計算機モデル座標系と物理モデル座標系の関係を明かにする。これより、第3章で構築された測定システムにより得られる測定データを、位置ベクトルおよび法線ベクトルとして有意義とすることができる。次に、加工面上の評価対象と考えている1パッチ上に存在することが認められる任意の16点の測定を行い、その位置ベクトル($x_k, y_k, z_k : k=0 \sim 15$)と法線ベクトル($l_k, m_k, n_k : k=0 \sim 15$)を得る。

Step 2: 5. 3. 2で述べられている法線ベクトルに基づく反復計算法に基づき、CADにおいて導かれている法線ベクトル補間式 N

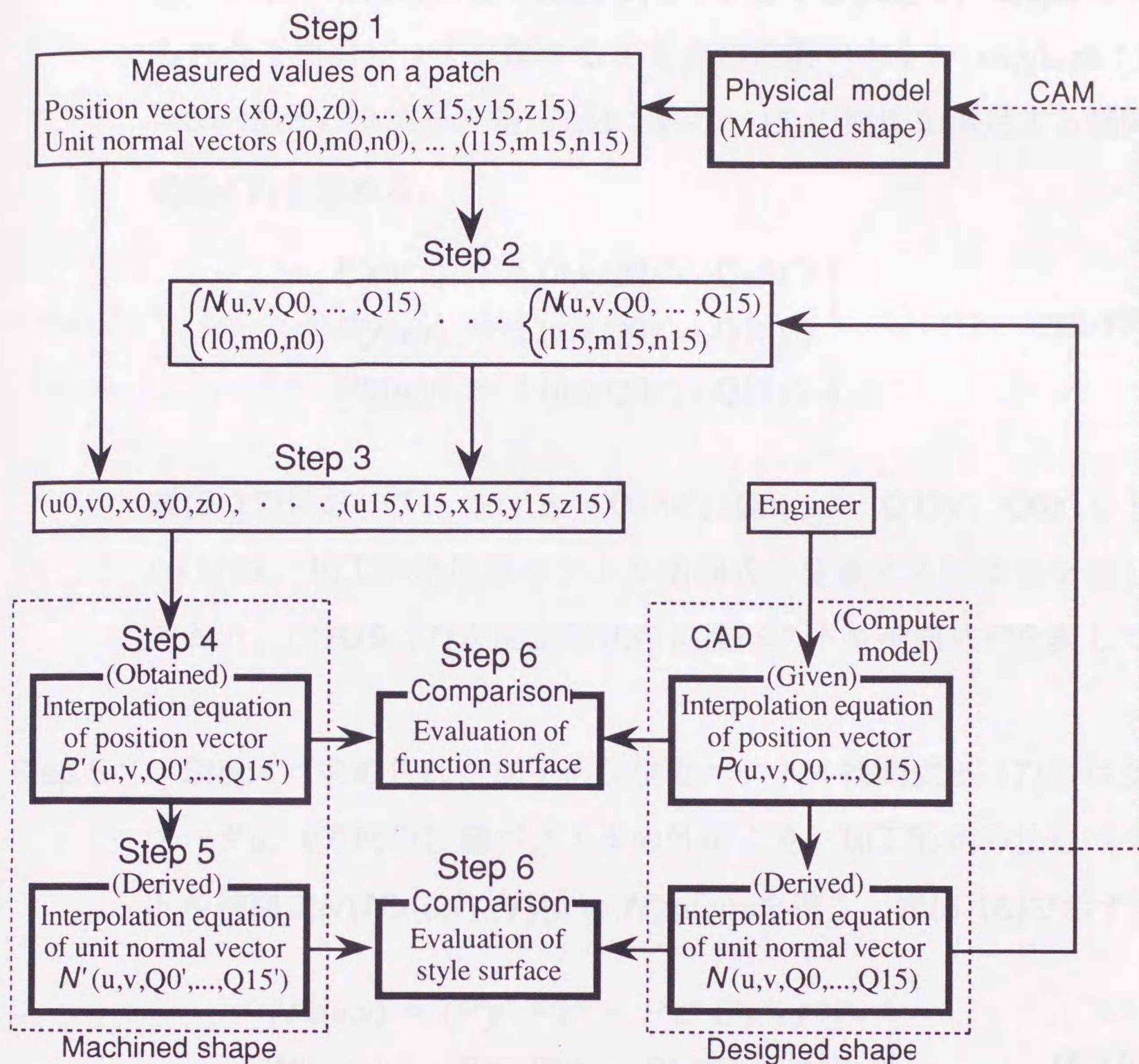


図5-4 自由曲面加工形状の評価手順

とStep1で得られた測定法線ベクトル($l_k, m_k, n_k : k=0 \sim 15$)を用いて、測定された16点のパラメータ値($u_k, v_k : k=0 \sim 15$)を求める。

Step 3: Step1において得られた位置ベクトル($x_k, y_k, z_k : k=0 \sim 15$)と、Step2で算出されたパラメータ値($u_k, v_k : k=0 \sim 15$)との組み合わせを得る。

Step 4: 加工形状の位置ベクトル補間式の重み関数は、設計形状の位

置ベクトル補間式の重み関数と同一であると仮定し、Step3で得られた1曲面パッチに関する16点の位置ベクトル($x_k, y_k, z_k : k = 0 \sim 15$)とパラメータ値($u_k, v_k : k = 0 \sim 15$)の関係を満足する補間式(5-17)を求める。

$$\left. \begin{aligned} P'x(u,v) &= f(u,v, Q0x', \dots, Q15x') \\ P'y(u,v) &= f(u,v, Q0y', \dots, Q15y') \\ P'z(u,v) &= f(u,v, Q0z', \dots, Q15z') \end{aligned} \right\} \quad (5-17)$$

式(5-17)において、 $Q0x', \dots, Q15x', Q0y', \dots, Q15y', Q0z', \dots, Q15z'$ は、加工形状位置ベクトル補間式を定義する制御点を表しており、同式(5-17)が加工形状の位置ベクトル補間式 P' を表している。

Step 5: Step4で求められた加工形状位置ベクトル補間式(5-17)のパラメータ u, v 方向の接線ベクトルの外積より、加工形状の法線ベクトル補間式 $N'(N'x(u,v), N'y(u,v), N'z(u,v))$ を導き、式(5-18)で示す。

$$\left. \begin{aligned} N'x(u,v) &= (P'y^u \cdot P'z^v - P'z^u \cdot P'y^v) / N'v \\ N'y(u,v) &= (P'z^u \cdot P'x^v - P'x^u \cdot P'z^v) / N'v \\ N'z(u,v) &= (P'x^u \cdot P'y^v - P'y^u \cdot P'x^v) / N'v \end{aligned} \right\} \quad (5-18)$$

Step 6: 評価対象の自由曲面が意匠曲面の場合、設計形状と加工形状の法線ベクトル補間式 N, N' を比較し、それらが一致しているならば、変換マトリックス M は式(5-15)を満足していることとなり、意匠曲面として適当であると評価する。また、評価対象の自由曲面が機能曲面の場合、設計形状と加工形状の位置ベクトル補間式 P, P' を比較し、それらが一致しているならば、変換マトリックス M は式(5-16)を満足していることとなり、機能曲面として適当

であると評価する。

5. 4 計算機シミュレーション実験

提案した位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく自由曲面加工形状評価法の妥当性を確認するため、計算機シミュレーションによる測定評価実験を試みた。設計形状として、3次Bezier補間式に基づく1曲面パッチにより計算機モデルとして構築された長さ150 mm、半径100 mmの1/4近似円筒面（斜線）を用いた。図5-5は、その設計形状（計算機モデル）を示している。評価対象とした加工形状は、設計形状に対してX, Y, Z方向に等倍率で設計座標値の1%の拡大変換と、X, Y, Z方向にそれぞれ100 μ m, 150 μ m, 50 μ mの並進変換を施すことにより形成した。

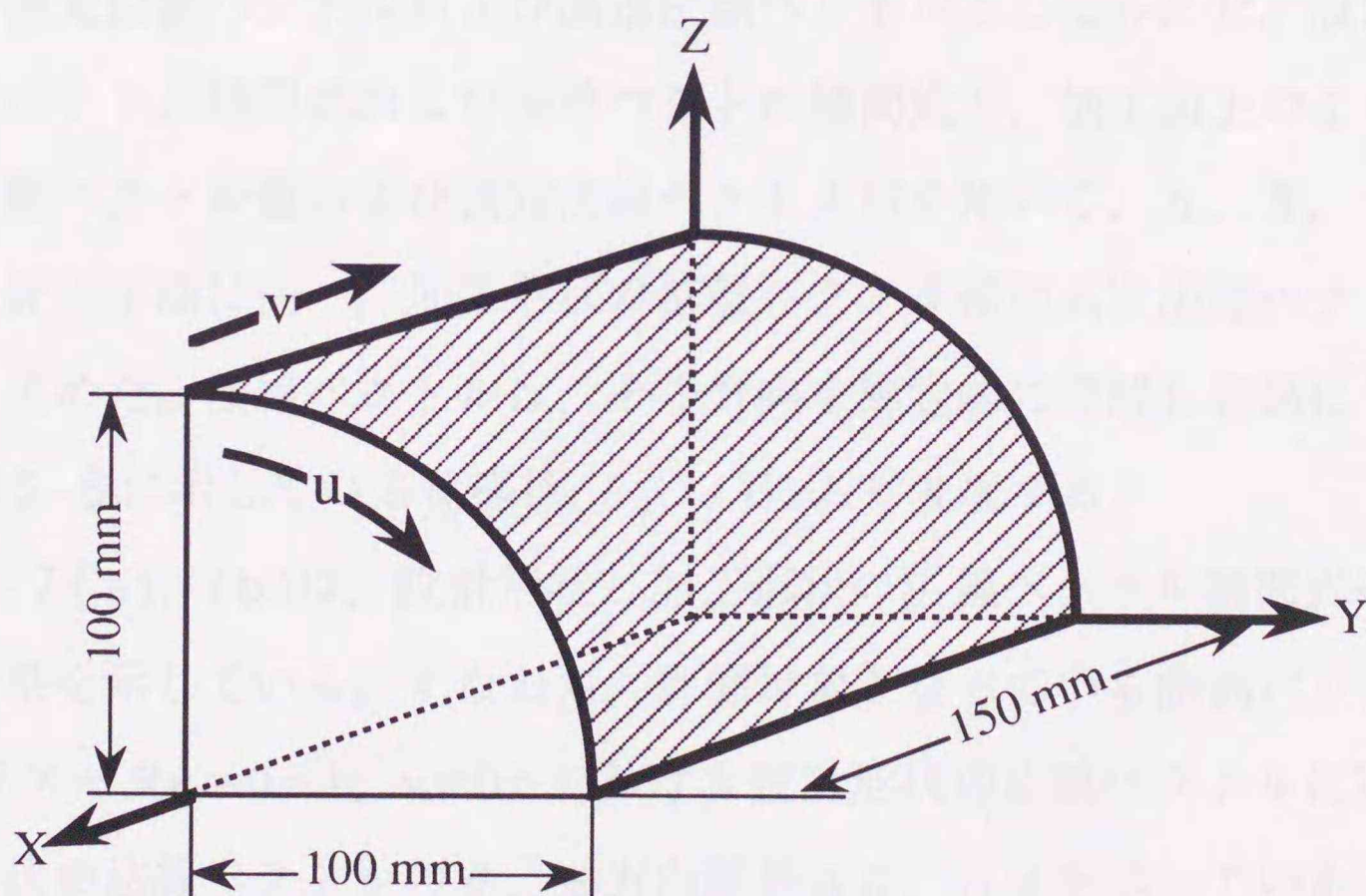
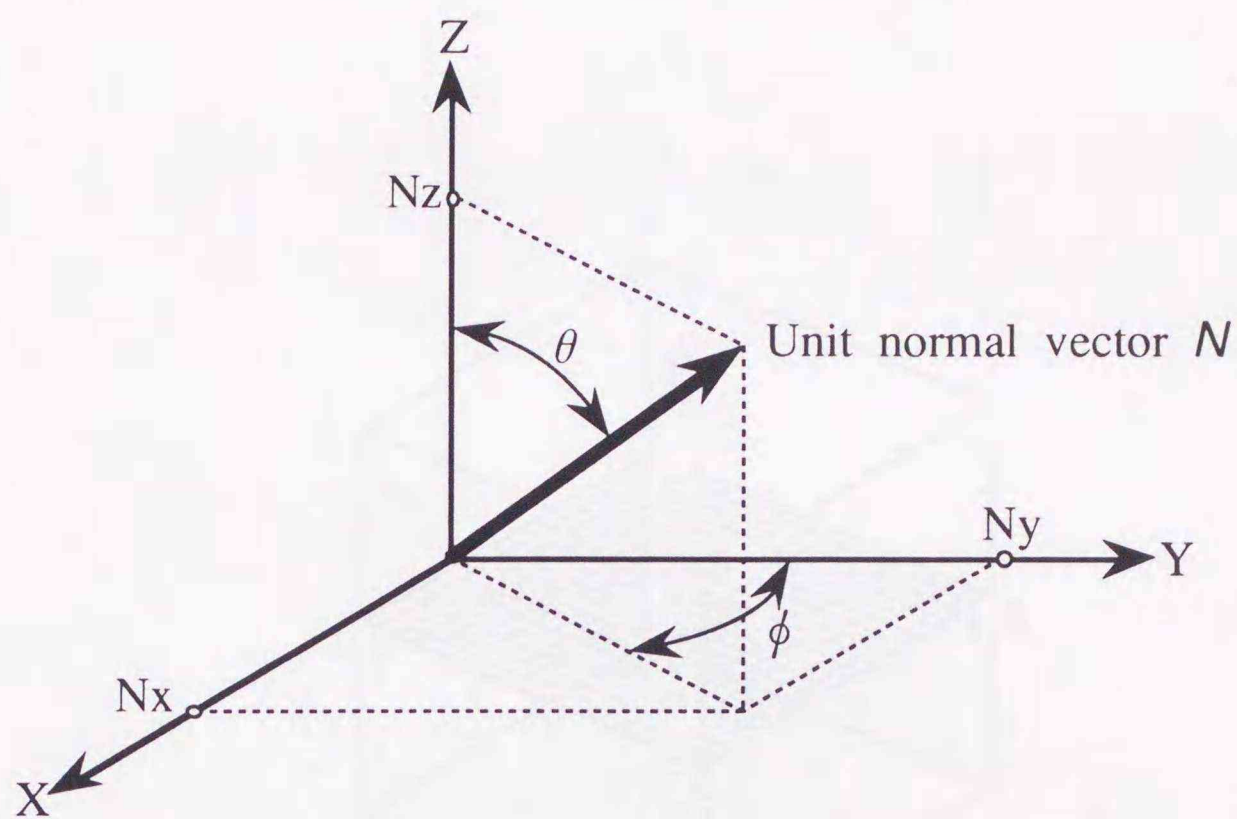
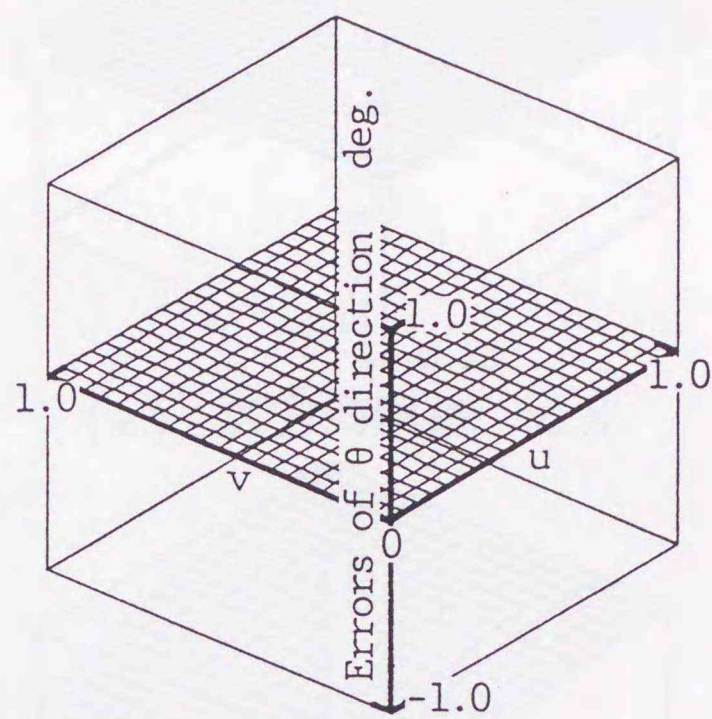


図5-5 設計形状

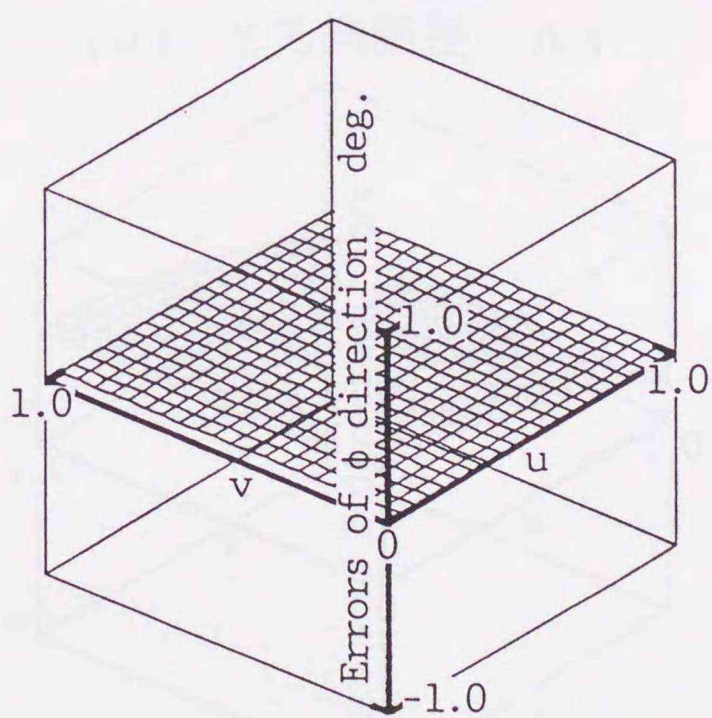
図 5-6 法線ベクトル表示用極座標系(θ , ϕ)

加工面上の任意の16点の位置ベクトルと法線ベクトルを算出し、加工形状の測定位置ベクトルおよび測定法線ベクトルとして与えた。設計形状の位置ベクトル補間式および法線ベクトル補間式と、加工面上の16点の測定位置ベクトル値および測定法線ベクトル値を用いて、5.3.3で提案した評価手順に従い、加工形状の位置ベクトル補間式と法線ベクトル補間式を求めた。法線ベクトルは、その方向を感覚的に理解を容易にするため、図5-6に示している極座標(θ , ϕ)により表現する。

図5-7(a), (b)は、設計形状と加工形状の法線ベクトル補間式を比較した結果を示している。すなわち、評価対象となっている曲面パッチの全域(パラメータ $u=0\sim1$, $v=0\sim1$)における設計形状の法線ベクトルに対する加工形状の法線ベクトルの θ , ϕ 方向誤差 $\Delta\theta$, $\Delta\phi$ を示している。また、図5-8(a), (b), (c)は、設計形状と加工形状の位置ベクトル補間式を比較した結果を示している。すなわち、評価対象となっている曲面パッチ

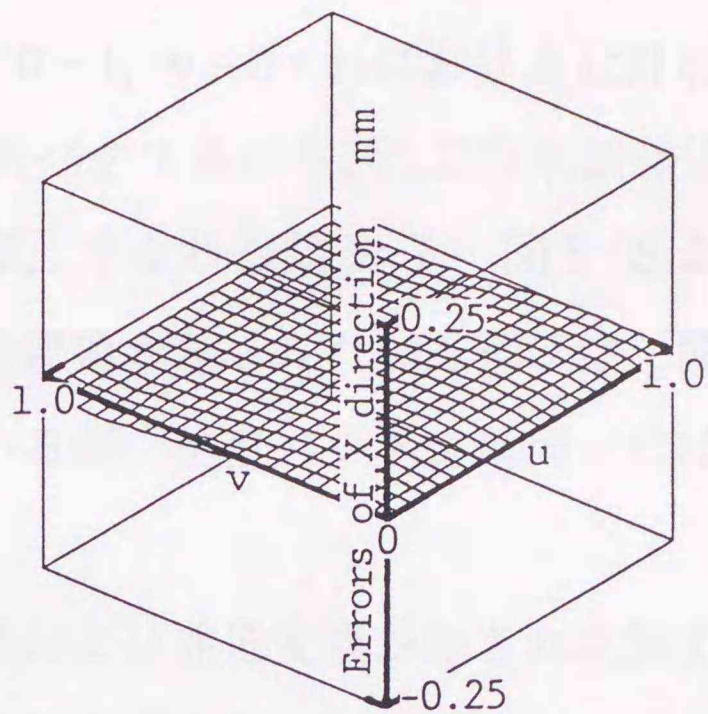


(a) θ 方向誤差 $\Delta \theta$

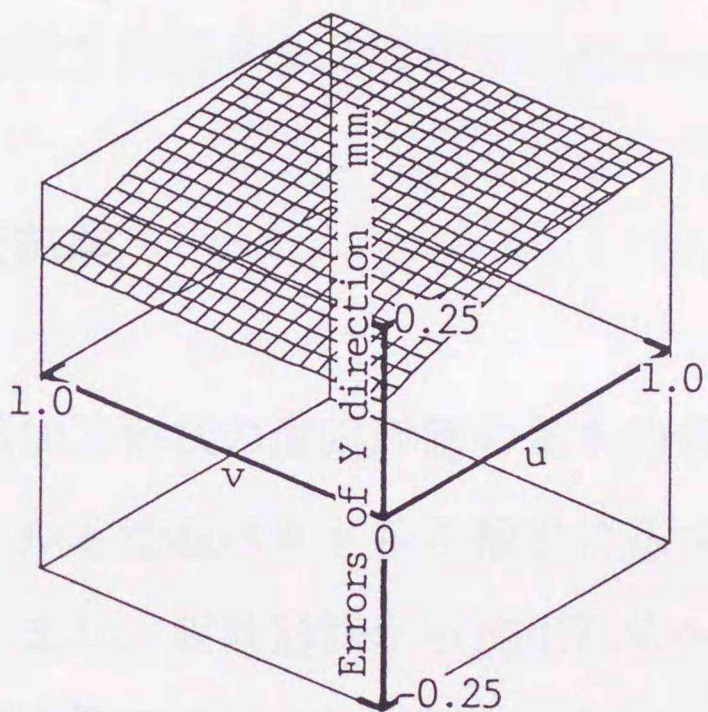


(b) ϕ 方向誤差 $\Delta \phi$

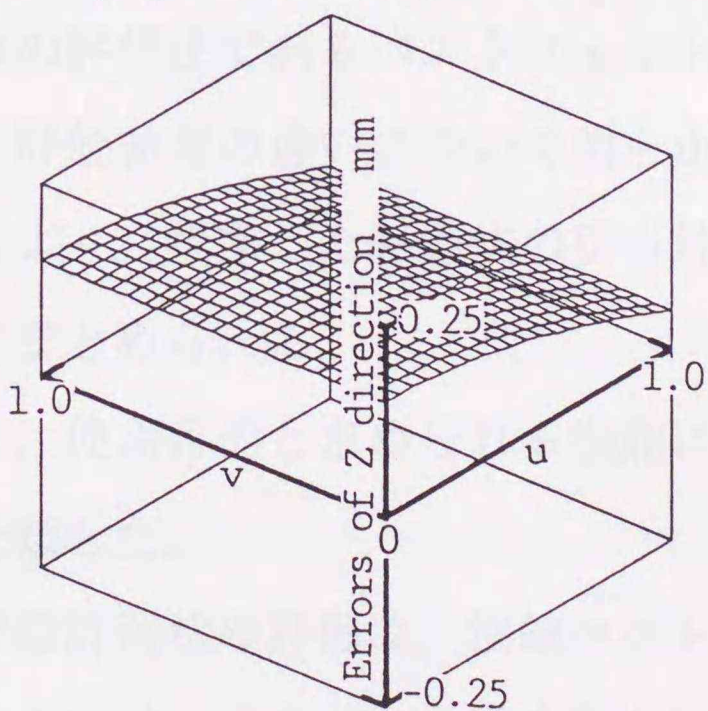
図5-7 法線ベクトル誤差



(a) X方向誤差 ΔX



(b) Y方向誤差 ΔY



(c) Z方向誤差 ΔZ

図5-8 位置ベクトル誤差

の全域(パラメータ $u=0\sim 1$, $v=0\sim 1$)における設計形状の位置ベクトルに対する加工形状の位置ベクトルの X, Y, Z 方向誤差 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ を示している。これらの結果, すなわち図5-7, 図5-8より, 設計形状に対して拡大変換および並進変換が施された加工形状は, 設計形状と等価な法線ベクトルが得られているが, 位置ベクトルは同一にはなっていないことが分かる。

これより, 拡大変換および並進変換が施された加工形状は, 意匠曲面としては適当であるが機能曲面としては適当でないと判断することができ, 提案した評価法の妥当性を確認することができた。

5. 5 本章の総括と結論

本章では, 自由曲面加工形状の測定評価の基本的考え方とその評価項目を検討し, 位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく自由曲面加工形状の評価法を提案した。また, 設計形状から加工形状への変換を座標変換としてモデル化し, 座標変換モデルと加工形状評価の関係を示すとともに, 提案した評価法と従来の評価法であるベストフィット法について, 評価に対する考え方の違いと評価結果の違いについて明らかにした。さらに計算機シミュレーションにより, 提案した評価法の妥当性の確認を行った。その結果, 以下の通りにまとめられる。

- (1) 自由曲面を, 使用目的と求められる機能に基づき, 意匠曲面と機能曲面に分類した。
- (2) 意匠曲面の設計形状の評価は, 法線ベクトルを基礎としたシルエット曲線あるいはハイライト曲線を基に行われている。したがって, 意匠曲面の加工形状の評価も法線ベクトルに基づき行われ

るべきであると提案した。

機能曲面の設計では、曲面上の点の位置によりその機能が決定されている。したがって、機能曲面の加工形状の評価も位置ベクトルに基づき行われるべきであると提案した。

これより、自由曲面加工形状の評価項目として、意匠曲面に対して法線ベクトルが、また機能曲面に対して位置ベクトルが示された。

- (3) 設計形状（計算機モデル）から加工形状（物理モデル）への変換を座標変換としてモデル化し、その座標変換モデルと加工形状評価の関係について検討した。その結果、座標変換モデルは、意匠曲面の評価の場合には並進変換と拡大縮小変換を許容し、機能曲面の評価の場合には単位マトリックス変換でなければならないことを示した。
- (4) 従来、自由曲面加工形状の評価法として採用されているベストフィット法は、設計形状から加工形状への変換において並進変換と回転変換を許容しており、提案した意匠曲面・機能曲面の評価の考え方と基本的に異なることを明らかにした。また、ベストフィット法は、自由曲面の持つ意匠性・機能性を明確に意識して評価していないことを示した。
- (5) 第3章で構築した測定システムにより加工形状の位置ベクトルと法線ベクトルを検出し、加工形状の位置ベクトル補間式と法線ベクトル補間式を求め、設計形状と加工形状の位置ベクトル補間式の比較、および設計形状と加工形状の法線ベクトル補間式の比較を行う。これより、設計形状から加工形状への座標変換が、「並進・拡大縮小変換」と判断できる場合には加工形状は意匠曲面と

して適当であると評価でき、「単位マトリックス変換」と判断できる場合には加工形状は機能曲面として適当であると評価できる。また、どちらの変換形式でもない場合には、加工形状は意匠曲面としても機能曲面としても適当ではないと評価する。

- (6) 加工面を形成する1曲面パッチ上の任意の16点の測定を行い、それらの点の位置ベクトル値と法線ベクトル値を求め、加工形状の位置ベクトル補間式と法線ベクトル補間式を求める方法を示した。同方法では、設計形状の法線ベクトル補間式に基づく測定点の法線ベクトル値に対する反復計算法により、測定点のパラメータ値を算出し、16組の位置ベクトル値とパラメータ値の関係から、加工形状の位置ベクトル補間式と法線ベクトル補間式を求めている。
- (7) 計算機シミュレーションにより、提案した位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく自由曲面加工形状の評価法の妥当性の確認を行った。

参 考 文 献

- [5- 1] 青山英樹, 岸浪建史, 斎藤勝政: 位置ベクトルと単位法線ベクトルの検出に基づく自由曲面加工形状の評価法に関する基礎研究, 精密工学会誌, Vol.57, No.9, 1991年, p1651.
- [5- 2] 宿利浩章: 三次元測定機による金型計測: 機械と工具, Vol.29, No.3, 1985年, p65. ([1-79])
- [5- 3] 松本智: 三次元測定機におけるソフトウェア技術, 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p60. ([1-80])
- [5- 4] 伊勢徹: 三次元測定機による金型と成形品の精度評価の実際, 機械と工具, Vol.30, No.12, 1986年, p70. ([1-81])
- [5- 5] 杉達雄, 生駒敏郎: 3次元計測機のCNC化・ソフトウェアの動向, 機械設計, Vol.31, No.1, 1987年, p37. ([1-82])
- [5- 6] 山本清二: 三次元計測のソフトウェアの問題点, 合成樹脂, Vol.33, No.7, 1987年, p20. ([1-83])
- [5- 7] 中村哲夫: 三次元測定機による新しい形状測定システム, 合成樹脂, Vol.33, No.7, 1987年, p13. ([1-84])
- [5- 8] 中村哲夫: 三次元測定システムにおける形状測定の高精度化, 機械と工具, Vol.31, No.11, 1987年, p67. ([1-85])
- [5- 9] 萱場義隆: 三次元測定機による非球面形状測定, 光技術コンタクト, Vol.27, No.5, 1989年, p249. ([1-86])
- [5-10] M.Higashi, I.Kohzen, J.Nagasaka: AN INTERACTIVE CAD SYSTEM FOR CONSTRUCTION OF SHAPES WITH HIGH-QUALITY SURFACE, Computer Applications in Production and Engineering, 1983年, p371.

- [5-11] M.Higashi, T.Kushimoto, M.Hosaka : On Fomulation and Dis-play
for Visualizing Features and Evaluating Quality of Free-form Surfaces,
EUROGRAPHICS '90, 1990年, p299.
- [5-12] 倉賀野哲造, 鈴木章, 佐々木伸夫 : 高品位形状の射出成形品に対
するパーティング面の設計とその工具経路生成, 精密工学会誌,
Vol.56, No.7, 1990年, p1256.

第6章 位置ベクトルと法線ベクトルに基づく 自由曲面形状計算機モデル

本章では、第3章で構築された位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムにより得られる測定データの応用として、測定データから直接自由曲面形状計算機モデルの構築を可能にすることを目的とした位置ベクトルと法線ベクトルに基づく曲面パッチの定義式を提案する[6- 1]。加えて、同定義式により定義された曲面パッチ（以後、PN曲面パッチと呼ぶ）は、パッチ間の接続境界において、位置ベクトルと接線ベクトルの連続条件を満足していることを数式的に証明する。また、PN曲面パッチにより計算機モデルを構築し、切削加工により同計算機モデルを物理モデルへと写像し、その加工面の観察に基づき、PN曲面パッチのパッチ間の接続状態を調査する。

6. 1 従来の自由曲面計算機モデルの構築における 問題点と本章の目的

6. 1. 1 従来の自由曲面計算機モデルの構築における問題点

1. 2. 4で述べたように、自由曲面計算機モデルを構築する方法として、1960年代にJ.C.FergusonやS.A.Coonsにより、パラメータを基にした補間関数を用いた表現式[6- 2]－[6- 4]が提案された。また1970年代になると、P.BezierやR.F.Riesenfeldにより、形状制御をより柔軟に行える表現式[6- 5]－[6- 6]が提案され、ともに実用システムに用いられた。これらの表現式は、曲面パッチと呼ばれる四辺形（あるいは三辺形）の曲面要素

を定義することができ、Coons曲面パッチあるいはBezier曲面パッチ、B-splineパッチなどと呼ばれている。自由曲面計算機モデルは、いくつかの曲面パッチを定義し、滑らかに接続することにより構築される。その後も、Forrest, Adini, Brown, Gregory, 千代倉らによって、Coons曲面パッチやBezier曲面パッチを基にした改良型曲面パッチ定義式[6-7]—[6-10]が提案されてきた。1980年代になると、自由曲面形状を対象としたCAD/CAMシステム[6-11]—[6-16]の開発実用化が進められ、これに伴い自由曲面も工業製品へ広く適用されるようになってきた。

Coons曲面パッチは、その定義において、曲面パッチコーナ一点の位置ベクトル、接線ベクトル、およびねじれベクトルを必要としている。また、Bezier曲面パッチの定義においても、Coons曲面パッチの定義において必要とされたベクトルと等価な16個の制御点位置ベクトルが要求されている。Forrest, Adini, Brown, Gregory, 千代倉らによって提案された改良型曲面パッチは、曲面パッチコーナ一点の位置ベクトルと接線ベクトル（あるいは等価な制御点）により、ねじれベクトル（あるいは等価な制御点）を自動的に決定あるいは推定する方法を導入しているが、その定義において、パッチコーナ一点の位置ベクトルと接線ベクトル（あるいは等価な制御点）を与える必要がある。

このように、従来提案されてきた曲面パッチは、その定義において、曲面パッチコーナ一点の位置ベクトル、接線ベクトル、ねじれベクトル（あるいはこれらのベクトルと等価な制御点位置ベクトル）を決定しなければならない。しかし、接線ベクトルやねじれベクトルは、微係数ベクトルであるため、図面や物理モデルを基にそれらのベクトルを定量化することは容易ではなく、直観的にも定量化することは困難である。また、自由曲面計算機モデルは、曲面パッチを滑らかに接続することにより構築されるが、

曲面パッチを滑らかに接続するため、少なくともパッチの境界において隣接するパッチの接線ベクトルを連続とする必要がある。同条件を満足させながら接線ベクトルやねじれベクトルを決定する際、これらのベクトルは接線ベクトル連続の条件により隣接するパッチからの拘束を受けるため任意に決定することができず、意図する形状を得ることを困難にしている。

位置ベクトルは、図面から読み取ることができ物理モデルの測定値としても定量化が可能である。位置ベクトルのみに基づくパッチの定義式として、パッチコーナー点の位置ベクトルの1次内挿で補間される双1次式パッチ[6-17]が提案されている。しかし同パッチは、滑らかな曲面を形成できず、必要精度内で曲面を形成するためには極めて多くのパッチを必要とするため、自由曲面計算機モデルを構築するためのパッチとしては有効ではない。

6. 1. 2 本章の目的

曲面パッチを定義するために必要とされる接線ベクトルやねじれベクトル（あるいはこれらのベクトルに等価な制御点）を、図面や物理モデルから決定することを困難にしている理由は、これらのベクトル値を図面から直接読み取ることができない、あるいは物理モデルの観測（測定）値として得ることができないことにある。したがって、本章は、上述した自由曲面形状計算機モデルの構築における問題点を解決するため、図面あるいは物理モデルから直接定量化でき、人間の直観により定量化が容易である要素（ベクトル値）を基にした曲面パッチの定義式を提案することを目的としている。また、同定義式により定義される曲面パッチは、滑らかな接続状態が得られるものとする。

従来の三次元座標測定機による物理モデルの測定では、プローブ中心の位置ベクトルが測定値として得られていた。しかし、第3章で構築した測定システムを用いることにより、物理モデル上の任意点の位置ベクトルと法線ベクトルの直接観測が可能となった。また、位置ベクトルと法線ベクトルは、図面から直接読み取ることも可能であり、人間が直観的に定量化することも容易である。

これより、位置ベクトルと法線ベクトルには、次の2つの特徴が認められる。

- (1) 位置ベクトルと法線ベクトルは、図面や物理モデルから直接定量化できる。
- (2) 位置ベクトルと法線ベクトルは、人間の直観に基づき定量化が容易である。

したがって本章では、位置ベクトルと法線ベクトルに基づき滑らかな接続が容易に得られる曲面パッチの定義式を提案することを目的とする。

6. 2 位置ベクトルと法線ベクトルに基づくPN曲面パッチ

6. 2. 1 PN曲面パッチの提案と概要

位置ベクトルと法線ベクトルは、図面から直接読み取ることが可能であり、物理モデルからも直接測定でき、また人間の直観からも容易に定量化できるとの認識に基づき、位置ベクトルと法線ベクトルに基づく曲面パッチ定義式を提案する。同定義式により得られる曲面パッチは、PN曲面パッチと呼ばれ、滑らかな接続状態が得られことを前提とする。

提案するPN曲面パッチは、パッチコーナー点の位置ベクトルと法線ベ

クトルを基にして、2次Bezierパッチを導くことにより定義される。またPN曲面パッチは、曲面パッチの接続境界において位置ベクトルと接線ベクトルの連続条件を満足する特徴がある。2次Bezierパッチを定義するために、パッチコーナ一点の位置ベクトルと法線ベクトルから、2次Bezierパッチ定義式の制御点を算出しなければならない。このため独自の制御点要素を提案し、これより2次Bezierパッチ制御点を決定している。以下の6.2.2と6.2.3において、制御点要素とPN曲面パッチ定義式について述べる。

6.2.2 制御点要素

制御点要素とは、パッチコーナ一点の位置ベクトルと法線ベクトルから2次Bezierパッチを定義するための制御点を決定するために導入した独自の要素である。図6-1に示されているように、5点 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 の位置ベクトル Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 および法線ベクトル N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 が与えられている時、点 Q_2 に関する制御点要素の算出方法について述べる。

図6-1において、直線 L_{21} は、位置ベクトル Q_2 と法線ベクトル N_2 により定義される平面と、位置ベクトル Q_1 と法線ベクトル N_1 により定義される平面との交線である。同様に、直線 L_{23} は、位置ベクトル Q_2 と法線ベクトル N_2 により定義される平面と、位置ベクトル Q_3 と法線ベクトル N_3 により定義される平面との交線である。また、直線 L_{24} は、位置ベクトル Q_2 と法線ベクトル N_2 により定義される平面と、位置ベクトル Q_4 と法線ベクトル N_4 により定義される平面との交線であり、直線 L_{25} は、位置ベクトル Q_2 と法線ベクトル N_2 により定義される平面と、位置ベクトル Q_5 と法線ベ

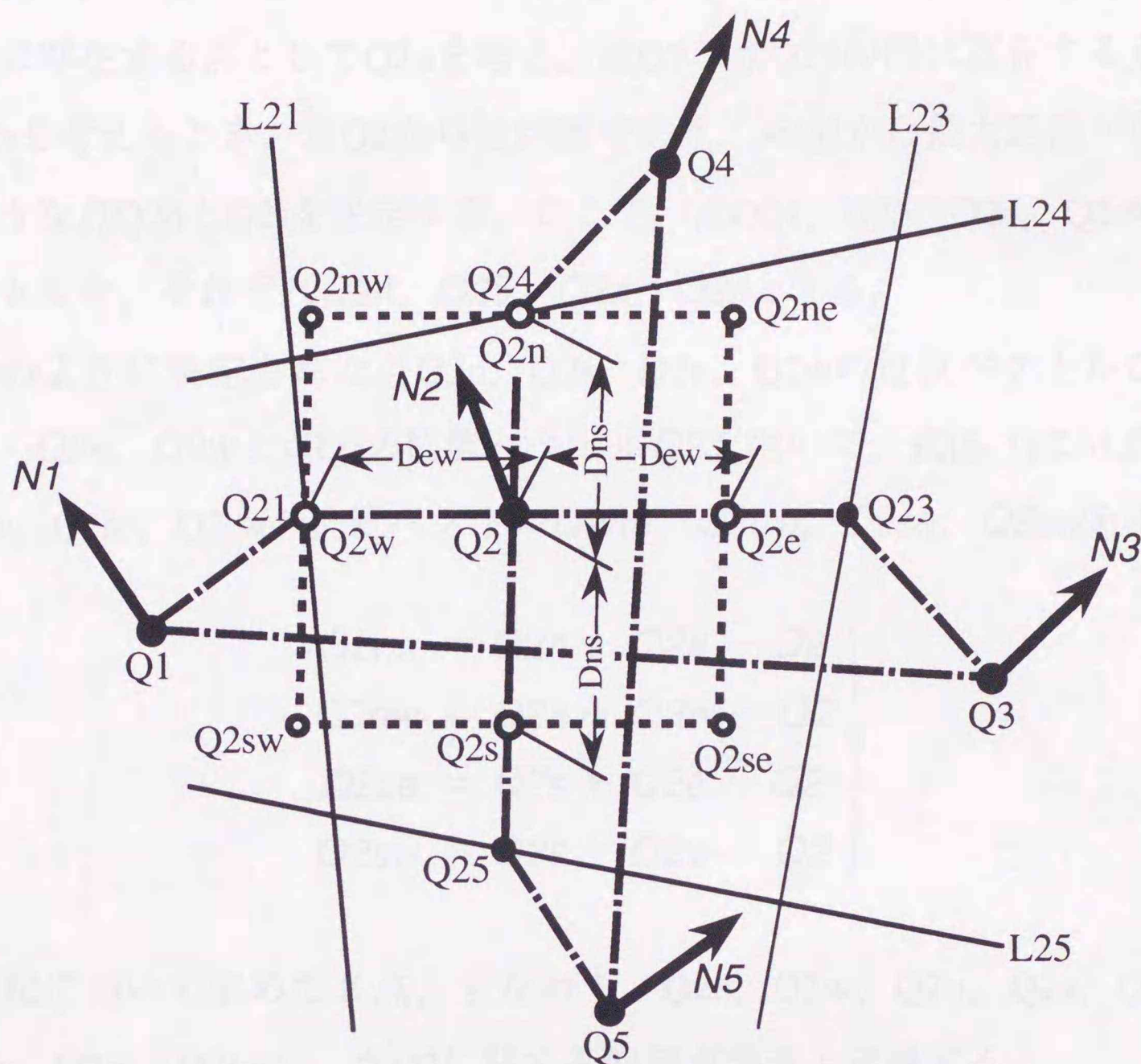


図6-1 制御点要素

クトル $N5$ により定義される平面との交線である。

このとき、3点 $Q1, Q2, Q3$ の位置ベクトル $Q1, Q2, Q3$ により定義される平面と、2直線 $L21, L23$ との交点 $Q21, Q23$ を算出する。点 $Q2$ と点 $Q21$ の間に存在する点として $Q2w$ を考え、点 $Q2$ と点 $Q23$ の間に存在する点として $Q2e$ を考えると、点 $Q2$ から等距離であり、点 $Q2$ から最大距離が得られるような点 $Q2w$ と $Q2e$ を決定する。ここで、点 $Q21, Q23, Q2w, Q2e$ の位置ベクトルを、それぞれ $Q21, Q23, Q2w, Q2e$ とする。

同様に、3点 $Q2, Q4, Q5$ の位置ベクトル $Q2, Q4, Q5$ により定義され

る平面と、2直線L24, L25との交点Q24, Q25を算出する。点Q2と点Q24の間に存在する点としてQ2nを考え、点Q2と点Q25の間に存在する点としてQ2sを考えると、点Q2から等距離であり、点Q2から最大距離が得られるような点Q2nとQ2sを決定する。ここで、点Q24, Q25, Q2n, Q2sの位置ベクトルを、それぞれQ24, Q25, Q2n, Q2sとする。

このように決定された点Q2n, Q2s, Q2e, Q2wの位置ベクトルQ2n, Q2s, Q2e, Q2wと点Q2の位置ベクトルQ2を用いて、式(6-1)より点Q2ne, Q2nw, Q2se, Q2swの位置ベクトルQ2ne, Q2nw, Q2se, Q2swを求める。

$$\left. \begin{aligned} Q2ne &= Q2n + Q2e - Q2 \\ Q2nw &= Q2n + Q2w - Q2 \\ Q2se &= Q2s + Q2e - Q2 \\ Q2sw &= Q2s + Q2w - Q2 \end{aligned} \right\} \quad (6-1)$$

上記において求めた8点、すなわち、Q2e, Q2w, Q2n, Q2s, Q2ne, Q2nw, Q2se, Q2swを、点Q2に関する制御点要素と定義する。

6. 2. 3 P N曲面パッチ定義式

図6-2において、点Q1~Q6は、それぞれ、位置ベクトルQ1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6と、法線ベクトルN1, N2, N3, N4, N5, N6が与えられている。ここで、位置ベクトルQ1, Q2, Q4, Q5と法線ベクトルN1, N2, N4, N5より導かれるP N曲面パッチ1について、そのP N曲面パッチ定義式P1(u,v)を導く手順を、以下に示す。

点Q1, Q2, Q4, Q5は、曲面パッチのコーナ一点であるため、P N曲面

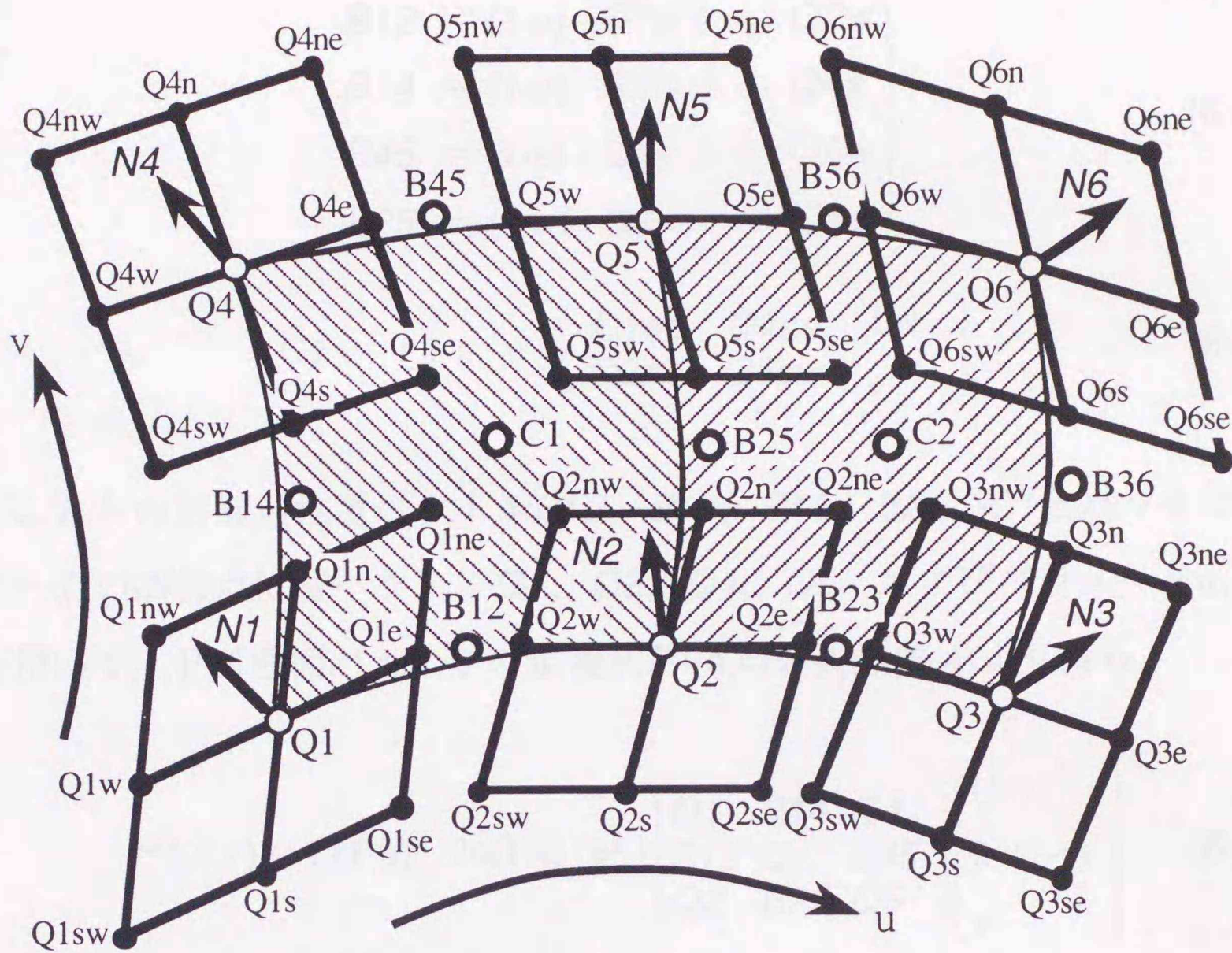


図 6-2 提案する P N 曲面パッチ

パッチ 1 を導く 2 次Bezier補間式の制御点とすることができる。次に、制御点 $Q1$, $Q2$, $Q4$, $Q5$ に関する各制御点要素を 6. 2. 2 で示した方法に従って求める。これより、P N 曲面パッチ 1 を表す 2 次Bezier補間式を定義するために必要な制御点位置ベクトルとして、点 $Q1$, $Q2$, $Q4$, $Q5$ 以外の制御点 $B12$, $B14$, $B45$, $B25$ と $C1$ の位置ベクトル $B12$, $B14$, $B45$, $B25$ と $C1$ を、パラメータ u , v と制御点 $Q1$, $Q2$, $Q4$, $Q5$ に関する制御点要素の位置ベクトルを用いて、式(6-2), 式(6-3)より得る。

$$\left. \begin{aligned} B12 &= (1-u) \cdot Q1e + u \cdot Q2w \\ B14 &= (1-u) \cdot Q1n + u \cdot Q4s \\ B45 &= (1-u) \cdot Q4e + u \cdot Q5w \\ B25 &= (1-u) \cdot Q2n + u \cdot Q5s \end{aligned} \right\} \quad (6-2)$$

$$C1 = [1-u \quad u] \begin{bmatrix} Q1ne & Q4se \\ Q2nw & Q5sw \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-v \\ v \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

これらの制御点位置ベクトル $B12$, $B14$, $B45$, $B25$, $C1$ とパッチコーナ一点の制御点位置ベクトル $Q1$, $Q2$, $Q4$, $Q5$, およびパラメータ u , v を用いて, PN曲面パッチ1の定義式 $P1(u,v)$ を次式(6-4)より得る。

$$P1(u,v) = [(1-u)^2 \quad 2u(1-u) \quad u^2] \begin{bmatrix} Q1 & B14 & Q4 \\ B12 & C1 & B45 \\ Q2 & B25 & Q5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1-v)^2 \\ 2v(1-v) \\ v^2 \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

したがって, 式(6-4)が, 提案するPN曲面パッチの定義式となる。また, 上式(6-2), (6-3), (6-4)に用いられているパラメータ u , v は, 0~1の値を持っている。

6. 3 PN曲面パッチ間の連続性の数式的確認

6. 3. 1 連続するPN曲面パッチ

6. 2. 3で導かれたように, 図6-2に示されている点 $Q1$, $Q2$, $Q4$, $Q5$ の位置ベクトル $Q1$, $Q2$, $Q4$, $Q5$ と法線ベクトル $N1$, $N2$, $N4$, $N5$ により導かれるPN曲面パッチ1の定義式 $P1(u,v)$ は, 式(6-4)で示された。再度, 同式を次式(6-5)に示す。

$$P1(u,v) = \begin{bmatrix} (1-u)^2 & 2u(1-u) & u^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q1 & B14 & Q4 \\ B12 & C1 & B45 \\ Q2 & B25 & Q5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1-v)^2 \\ 2v(1-v) \\ v^2 \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

式(6-5)は、2次Bezier補間式となっている。制御点B12, B14, B45, B25, C1の位置ベクトルB12, B14, B45, B25, C1は、式(6-2), 式(6-3)に示されているように、制御点Q1, Q2, Q4, Q5に関する制御要素点の位置ベクトルQ1e, Q1n, Q1ne, Q2w, Q2n, Q2nw, Q4s, Q4e, Q4se, Q5w, Q5s, Q5swとパラメータu, vを用いて求めることができる。同式を再度式(6-6), (6-7)に示す。

$$\begin{cases} B12 = (1-u) \cdot Q1e + u \cdot Q2w \\ B14 = (1-u) \cdot Q1n + u \cdot Q4s \\ B45 = (1-u) \cdot Q4e + u \cdot Q5w \\ B25 = (1-u) \cdot Q2n + u \cdot Q5s \end{cases} \quad (6-6)$$

$$C1 = \begin{bmatrix} 1-u & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q1ne & Q4se \\ Q2nw & Q5sw \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-v \\ v \end{bmatrix} \quad (6-7)$$

同様に、図6-2に示されている点Q2, Q3, Q5, Q6の位置ベクトルQ2, Q3, Q5, Q6と法線ベクトルN2, N3, N5, N6により導かれるPN曲面パッチ2の定義式P2(u,v)は、式(6-8)で表すことができる。

$$P2(u,v) = \begin{bmatrix} (1-u)^2 & 2u(1-u) & u^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q2 & B25 & Q5 \\ B23 & C2 & B56 \\ Q3 & B36 & Q6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1-v)^2 \\ 2v(1-v) \\ v^2 \end{bmatrix} \quad (6-8)$$

式(6-8)において、制御点B23, B25, B56, B36, C2の位置ベクトルB23,

B_{25} , B_{56} , B_{36} , C_2 は, P N 曲面パッチ 1 の御点位置ベクトル B_{12} , B_{14} , B_{45} , B_{25} , C_1 と同様に算出することができ, 式(6-9), 式(6-10)のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} B_{23} &= (1-u) \cdot Q_{2e} + u \cdot Q_{3w} \\ B_{25} &= (1-u) \cdot Q_{2n} + u \cdot Q_{5s} \\ B_{56} &= (1-u) \cdot Q_{5e} + u \cdot Q_{6w} \\ B_{36} &= (1-u) \cdot Q_{3n} + u \cdot Q_{6s} \end{aligned} \right\} \quad (6-9)$$

$$C_2 = [1-u \quad u] \begin{bmatrix} Q_{2ne} & Q_{5se} \\ Q_{3nw} & Q_{6sw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-v \\ v \end{bmatrix} \quad (6-10)$$

式(6-9), 式(6-10)において, Q_{2e} , Q_{2n} , Q_{2ne} , Q_{3w} , Q_{3n} , Q_{3nw} , Q_{5s} , Q_{5e} , Q_{5se} , Q_{6w} , Q_{6s} , Q_{6sw} は, 制御点 Q_2 , Q_3 , Q_5 , Q_6 に関する制御要素点の位置ベクトルである。

P N 曲面パッチ 1 の $u=1$ における境界線 ($0 \leq v \leq 1$) と P N 曲面パッチ 2 の $u=0$ における境界線 ($0 \leq v \leq 1$) は, P N 曲面パッチ 1 と P N 曲面パッチ 2 の接続境界線となっている。以下において, この境界線部分の接続状態について検討する。

6. 3. 2 位置ベクトルの連続性

式(6-5)に $u=1$ を代入し, 式(6-8)に $u=0$ を代入することにより, 式(6-11), 式(6-12)が得られる。

$$P_1(1,v) = [Q_2 \quad B_{25} \quad Q_5] \begin{bmatrix} (1-v)^2 \\ 2v(1-v) \\ v^2 \end{bmatrix} \quad (6-11)$$

$$P2(0,v) = [Q2 \ B25 \ Q5] \begin{bmatrix} (1-v)^2 \\ 2v(1-v) \\ v^2 \end{bmatrix} \quad (6-12)$$

したがって、 $P1(1,v) = P2(0,v)$ となり、PN曲面パッチ1とPN曲面パッチ2の接続境界において、位置ベクトルの連続条件を満足していることが数式的に証明された。

6. 3. 3 接線ベクトルの連続性

PN曲面パッチ1とPN曲面パッチ2の接続境界におけるパラメータu方向の接線ベクトルは、式(6-5)、式(6-8)より、それぞれ式(6-13)、式(6-14)のように導くことができる。

$$\frac{\partial P1(1,v)}{\partial u} = [I1 \ I2 \ I3] \begin{bmatrix} (1-v)^2 \\ 2v(1-v) \\ v^2 \end{bmatrix} \quad (6-13)$$

$$\frac{\partial P2(0,v)}{\partial u} = [J1 \ J2 \ J3] \begin{bmatrix} (1-v)^2 \\ 2v(1-v) \\ v^2 \end{bmatrix} \quad (6-14)$$

ここで、ベクトル $I1$, $I2$, $I3$, $J1$, $J2$, $J3$ は式(6-15)、式(6-16)で表される。

$$\left. \begin{aligned} I1 &= 2 \cdot (-B12 + Q2) \\ I2 &= 2 \cdot (-C1 + B25) \\ I3 &= 2 \cdot (-B45 + Q5) \end{aligned} \right\} \quad (6-15)$$

$$\left. \begin{aligned} J1 &= 2 \cdot (-Q2 + B23) \\ J2 &= 2 \cdot (-B25 + C2) \\ J3 &= 2 \cdot (-Q5 + B56) \end{aligned} \right\} \quad (6-16)$$

P N 曲面パッチ 1 と P N 曲面パッチ 2 の接続境界は、P N 曲面パッチ 1 の $u=1$ における境界線 ($0 \leq v \leq 1$) と P N 曲面パッチ 2 の $u=0$ における境界線 ($0 \leq v \leq 1$) である。したがって、P N 曲面パッチ 1 の制御点位置ベクトル $B12, B14, B45, B25, C1$ を導いている式(6-6), 式(6-7)に $u=1$ を代入し、P N 曲面パッチ 2 の制御点位置ベクトル $B23, B25, B56, B36, C2$ を導いている式(6-9), 式(6-10)に $u=0$ を代入することにより、境界線を定義する制御点位置ベクトル $B12, B14, B45, B25, C1, B23, B25, B56, B36, C2$ を決定できる。これより得られた制御点位置ベクトル値 $B12, B14, B45, B25, C1, B23, B25, B56, B36, C2$ を式(6-15), 式(6-16)に代入することにより、式(6-17)が得られる。

$$\left. \begin{aligned} I1 &= J1 \\ I2 &= J2 \\ I3 &= J3 \end{aligned} \right\} \quad (6-17)$$

式(6-17)を、式(6-13), 式(6-14)に代入することにより、式(6-18)を導くことができる。

$$\frac{\partial P1(u,v)}{\partial u} = \frac{\partial P2(u,v)}{\partial u} \quad (6-18)$$

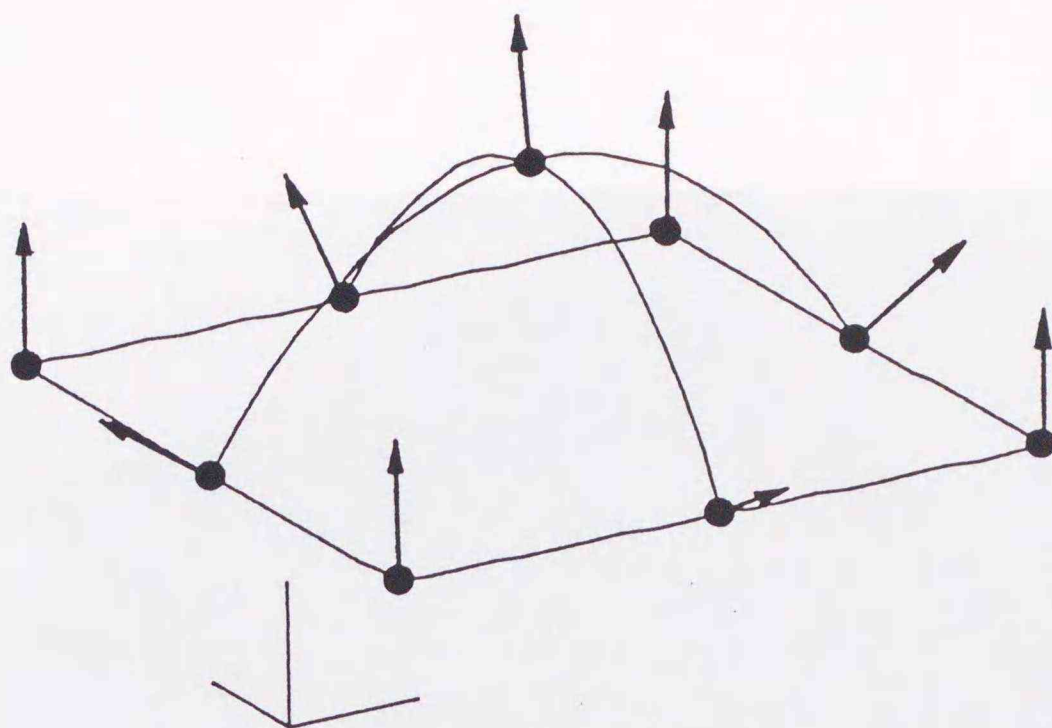
式(6-18)より、P N 曲面パッチ 1 と P N 曲面パッチ 2 の接続境界において、パラメータ u 方向の接線ベクトルの連続性が証明された。同様に、パラメータ v 方向に P N 曲面パッチを接続した場合についても、接続境界において、パラメータ v 方向の接線ベクトルの連続性が証明される。以上よ

り，提案したPN曲面パッチは，パッチの接続境界において，接線ベクトル連続の条件を満足していることが，数式的に証明された。

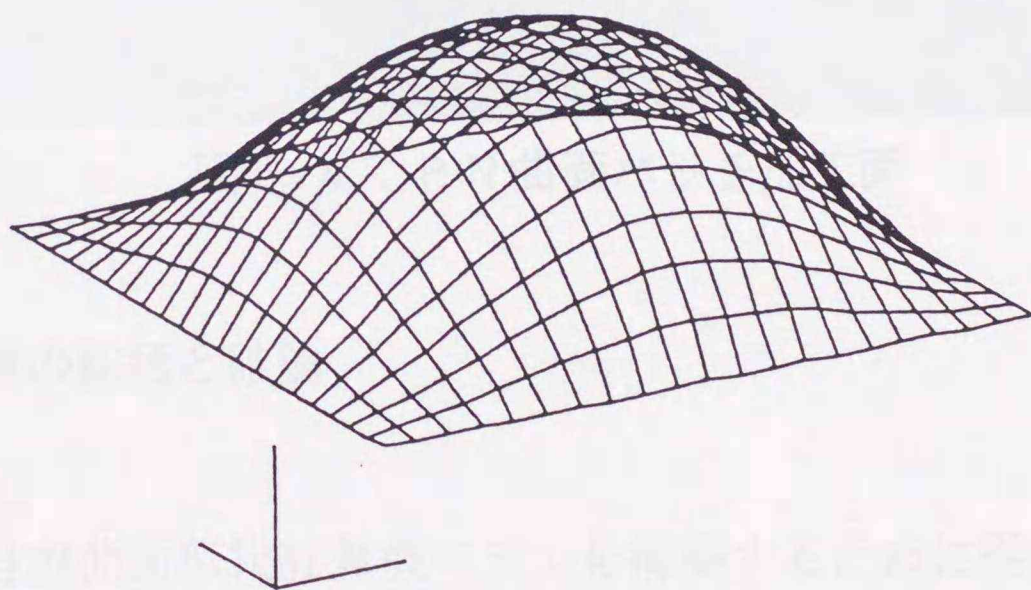
6. 4 PN曲面パッチの連続性の実験的確認

6. 3において，PN曲面パッチ間の接続状態が，位置ベクトルと接線ベクトルに関して，連続の条件を満足していることを数式的に確認した。本節では，接続された複数のPN曲面パッチの切削加工面を形成し，その観察から，PN曲面パッチの接続の状態が滑らかであることを実験的に確認する。

図6-3(a)は，1点を共通点として接続される4枚のPN曲面パッチを定義する9点の位置ベクトル（●印）と法線ベクトル（矢印）を表している。また図6-3(b)は，同図(a)に示された9点の位置ベクトルと法線ベクトルにより，計算機モデルとして構築されたPN曲面パッチ形状のワイヤフレーム表示である。NCフライス盤によりマシナブルワックス（機械加工用ワックス）を直径25mmのボールエンドミルで切削加工することにより，この計算機モデルの物理モデルを形成した。切削において，パラメータ u 方向と v 方向の接線ベクトルの外積からPN曲面パッチの法線ベクトルを算出してPN曲面パッチに対してボールエンドミル半径値だけオフセット（移動）した面を生成し，同オフセット面をボールエンドミルにより操作することによりPNパッチの加工面を形成した。



(a) PN曲面パッチ定義データ
(9点の位置ベクトルと法線ベクトル)



(b) PN曲面パッチ計算機モデル

図6-3 PN曲面パッチの定義

図6-4は、これより得られたPN曲面パッチ加工面（物理モデル）を示している。同加工面の観察より、形成された4枚のPN曲面パッチは、滑らかに接続されていることが確認された。

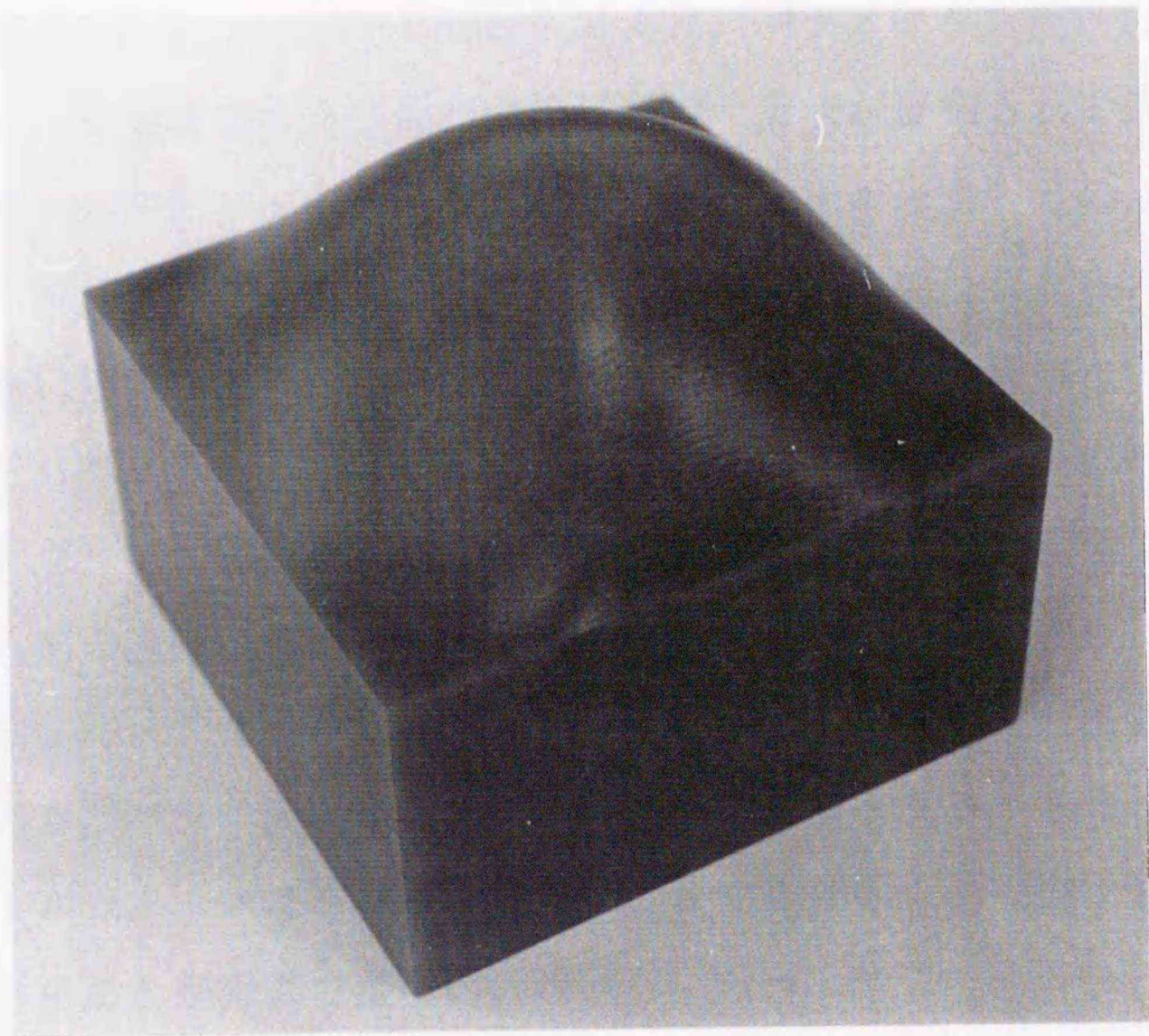


図 6 - 4 P N 曲面パッチ加工面

6. 5 本章の総括と結論

本章は、自由曲面形状計算機モデルを構築するために従来採用されていた曲面パッチの定義式における問題点を明らかにし、その問題点を解決する方法として、位置ベクトルと法線ベクトルに基づく曲面パッチ定義式を提案した。同定義式に導かれる曲面パッチをPN曲面パッチと称し、PN曲面パッチ間の接続状態について、数式的に検討し、実験的に確認した。その結果、以下の通りにまとめられる。

- (1) 従来の曲面パッチの定義式における問題点として、次の点が挙げられる。

1960年代以降、自由曲面形状の計算機モデルの構築方法として、S.A.CoonsやP.Bezierらにより、パラメータを用いた補間式により定義される曲面パッチに基づく方法が提案されてきた。これらの曲面パッチの定義式は、曲面パッチコーナー点の位置ベクトル、接線ベクトル、ねじれベクトル、あるいはこれらのベクトルに等価な制御点を必要としている。しかし、接線ベクトルやねじれベクトル（および接線ベクトルとねじれベクトルに等価な制御点）は、図面や物理モデルから定量化することは困難であり、人間の直観に基づき決定することも容易ではない。また、複数の曲面パッチを滑らかに接続しながら曲面形状を表現（構築）するとき、パッチ間の連続の条件に基づく接線ベクトルとねじれベクトル（あるいは等価な制御点）の拘束条件から、意図する形状を得ることが容易ではない。

- (2) 本章は、上記（1）に示した従来の曲面パッチの定義（自由曲面計算機モデルの構築）における問題点を解決するため、図面から直接読み取ることができ、物理モデルの測定値として直接得ることができ、直観的にも定量化が容易である要素に基づく曲面パッチ定義式を提案することを目的とした。また同曲面パッチは、滑らかなパッチの接続が容易に得られることが要求された。
- (3) 上記（2）に示した目的を達成するため、曲面パッチコーナー点の位置ベクトルと法線ベクトルに基づく曲面パッチ定義式を提案し、同定義式により導かれる曲面パッチをPN曲面パッチと称した。PN曲面パッチは2次Bezier曲面パッチを基礎としており、その定義過程において、曲面パッチコーナー点の位置ベクトルと法線ベクトルから独自の制御点要素を算出し、その制御点要素を

基に2次Bezier曲面パッチを定義するための制御点を導いている。

- (4) P N曲面パッチは、その接続境界において、位置ベクトルの連続の条件および接線ベクトルの連続の条件を満足してることが数式的に証明された。

- (5) P N曲面パッチの切削加工面の観察から、P N曲面パッチは、その接続境界において接続状態が滑らかであることが実験的に確認された。

参 考 文 献

- [6- 1] Hideki AOYAMA, Takeshi KISHINAMI : A Proposotion of an Interpolation Form Defined by Position Vectors and Normal Vectors, International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.25, No.3, 1991年, p239.
- [6- 2] J.C.Ferguson : Multivariate Curve Interpolation, Journal of the ACM, Vol.11, 1964年, p221. ([1-87])
- [6- 3] S.A.Coons : Surface for computer-aided design of space figures, M.I.T. ESL 9442-M-139, January, 1964年. ([1-88])
- [6- 4] S.A.Coons : Surface for Computer Aided Design of Space Forms, MIT Project MAC, TR-41, June, 1967. ([1-89])
- [6- 5] P.Bezier : How Renault uses Numerical Control for Car Body Design and Tooling, SAE 680010, Soc. Automobile Enggrs., 1968年. ([1-90])
- [6- 6] R.F.Riesenfeld : Applications of B-spline Approximation to Geometric Problems of Computer Aided Design, Univ. of Utah UTEC-CSc-73-126, 1973年. ([1-91])
- [6- 7] A.R.Forrest : The Computation of Bicubic Twist Terms, Computer-Aided Design Group Document 20, Cambridge University, 1969年. ([1-92])
- [6- 8] R.E.Barnhill, J.H.Brown, I.M.Klucwicz : A New Twist in Computer Aided Geometric Design, Computer Graphics and Image Processing, Vol.8, 1978年, p78. ([1-93])

- [6-9] J.A.Gregory : Smooth Interpolation Without Twist Constraints in Computer Aided Geometric Design (R.E.Barnhill and R.F.Riesenfeld, Eds), Academic Press (New York), 1974年, p71. ([1-94])
- [6-10] H.Chiyokura and F.Kimura : A New Surface Interpolation Method for Irregular Curve Model, Computer Graphics Forum (J. Eurographics), Vol.3, No.3, 1984年, p209. ([1-95])
- [6-11] 金井理, 田中文基, 岸浪建史, 斎藤勝政 : セル構造化幾何モデルとそのモデリングシステム, 精密工学会誌, Vol.52, No.10, 1986年, p1808.
- [6-12] 金井理, 田中文基, 岸浪建史, 斎藤勝政 : セル構造化幾何モデル (CCM) に基づく階層処理CAMシステム, Vol.52, No.11, 1986年, p1927.
- [6-13] 高井憲二郎 : カメラ自由曲面生成処理システムー三次元測定データからの自由曲面の生成ー, 精密工学会誌, Vol.54, No.10, 1988年, p1897.
- [6-14] 倉賀野哲造, 佐々木伸夫, 菊池敦 : 意匠的に特徴ある自由形状の設計およびその工具経路自動生成システムの開発, 精密工学会誌, Vol.55, No.12, 1989年, p2169.
- [6-15] 倉賀野哲造, 佐々木伸夫 : 意匠的に特徴ある自由曲面加工用工具経路自動生成システム F R E S D A M / M, 精密工学会誌, Vol.56, No.5, 1990年, p879.
- [6-16] 倉賀野哲造, 鈴木章, 佐々木伸夫 : 高品位形状の射出成形品に対するパーティング面の設計とその工具経路生成, 精密工学会誌, Vol.56, No.7, 1990年, p1256. ([5-12])

[6-17] 大野義夫：CAGD入門—曲面（1）—，bit，Vol.13，No.14，
1981年，p1784. ([2-18])

第7章 結 論

本研究は、三次元座標測定機を基にした測定評価における従来の問題点を解決するため、測定点の法線ベクトルの検出を可能とする接触式プローブを提案試作し、同プローブを三次元座標測定機と組み合わせることにより測定点の位置ベクトルと法線ベクトルを測定するシステムを構築するとともに、同システムを用いた応用計測として独自の測定評価法を提案することを目的として行われた。その応用計測では、機械加工部品基礎形状の測定評価法、自由曲面加工形状の測定評価法、自由曲面計算機モデルの構築法が示された。

本研究は、以下の通りにまとめられる。

7. 1 本研究の背景・従来の問題点・本研究の目的について（第1章）

三次元座標測定機は、同機が開発されて以来、(a)高精度・高能率測定が可能である、(b)複雑な形状の測定が可能である、(c)測定データ処理の多機能化・高機能化を可能とする、(d)自動測定を可能とする、(e)測定結果を生産工程や生産計画へフィードバックすることを容易にする等の理由から、急速に普及してきた。しかし、従来の三次元座標測定機により得られる測定データは、測定点（プローブと被測定物との接触点）から測定点の法線方向にプローブ半径値だけ移動した点、すなわちプローブ中心点の座標値である。このため、従来の三次元座標測定機による測定評価法には以下に示す4つの問題が指摘される。

- (1) 機械部品基礎形状（平面、円筒、球など）の測定評価を行う場合、検出されたプローブ中心座標値に対してプローブ半径値の補

正を行うことが必要であり，この補正を行うための情報（補正方向，あるいは測定点の法線方向）を与える必要がある。また，円筒の厳密な測定評価は困難である。

- (2) 自由曲面形状の測定では，測定点座標値を求めるため，多点測定データ（プローブ中心座標値）を用いて測定点座標値を推定する方法や，アナログプローブヘッドにより見かけ上半径ゼロのプローブを実現する方法が提案されている。しかし，前者は間接測定法であり，測定とデータ処理に多大の時間を要し，複雑なソフトウェアを必要としている。また後者は，プローブヘッドが高価であるとともに，その構造が複雑で小型化が困難であり，プローブ支持方向に制限がある等の問題点がある。
- (3) 自由曲面加工形状の測定評価法として，従来，上記(2)の方法により求められた測定点座標値に対して回転変換と並進変換を施し，測定点を設計形状に可能なかぎり接近させたときの座標値と設計形状との差（誤差）から加工形状の評価を行うベストフィット法が提案されていた。従来の三次元座標測定機ではプローブ中心座標値の検出を行っているため，このような評価法が採用されていたが，同評価法は自由曲面加工形状評価について十分な検討がなされたうえで提案された方法であるかどうか疑問である。
- (4) 自由曲面形状の計算機モデルは，一般に，複数の曲面パッチを滑らかに接続することにより構築される。曲面パッチは，パッチコーナ点の位置ベクトル，接線ベクトル，ねじれベクトル，あるいはこれらのベクトルに等価な制御点により定義されている。自由曲面計算機モデルを構築するうえで，三次元座標測定機による物理モデルの測定データを直接用いて計算機モデルを構築する

ことが望まれているが、測定データ（プローブ中心座標値）と曲面パッチ定義データが一致していないため、可能となっていない。すなわち、曲面パッチの定義データとして採用されているパッチコーナー点の接線ベクトルおよびねじれベクトルは、図面あるいは物理モデルから直接得ることができず、直感的にも定量化が容易ではないことが計算機モデルの構築を困難にしている。また、曲面パッチを滑らかに接続する時（例えば曲面パッチの接続境界において接線ベクトル連続の条件を満足させる時）、接線ベクトルとねじれベクトルは隣接する曲面パッチの接線ベクトルとねじれベクトルの拘束を受け、要求する曲面形状を形成することは容易ではない。

上記（１），（２）の問題点は、三次元座標測定機による測定で測定点を直接検出できないことに原因があり、上記（３），（４）の問題点は、三次元座標測定機による測定で得られるデータが座標値（位置ベクトル）だけであることに原因がある。本研究は、これらの問題点を解決するため、以下に示す５項目（a～e）を達成することを目的として行われた。

- （a） 測定点の法線ベクトルの直接検出を可能とする接触式プローブを提案・試作する
- （b） 法線ベクトル検出プローブを三次元座標測定機と組み合わせ、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを構築するとともに、同システムを用いた応用計測として独自の測定評価法を提案する。
- （c） 上記（b）の測定システムを用いた応用計測として、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく機械加工部品基礎形状の測定評価法を提案する。

(d) 上記(b)の測定システムを用いた応用計測として、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく自由曲面加工形状の測定評価法を提案する。

(e) 上記(b)の測定システムを用いた応用計測として、位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく自由曲面計算機モデルの構築法を提案する。

7. 2 法線ベクトル検出プローブについて(第2章)

測定点の法線ベクトルを検出することにより、プローブ中心位置ベクトルから測定点の位置ベクトルを求めることができることを示し、法線ベクトル検出の意義と必要性を明らかにした。また、法線ベクトルは、極座標(θ , ϕ)における θ と ϕ の角度で表示することとした。

PSDの光位置検出原理および球面ポテンショメータ原理に基づく法線ベクトル検出プローブを提案し、その検出原理と構造を明かにした。プローブは絶縁セラミック球表面に球面抵抗薄膜と4個の電極を形成した単純な構造となっており、その4個の電極と被測定物を定電流電源を介して接続している。プローブと被測定物の接触に伴い接触点から電極へ電流が流れるが、接触点と各電極間の抵抗値に反比例して電流が分流するため、電極に流れ込む電流値を検出することにより、プローブ中心を基準座標系とした接触点(測定点)座標値を求めることができる。プローブが球形状であるためプローブ中心は測定点の法線上に位置することになり、プローブ中心を基準座標系とした接触点座標値の正規化された値は、測定点の法線ベクトルを意味していることになる。

プローブと被測定物が接触し定電流回路において電圧が定常状態にある

とき、電圧はラプラス方程式を満足する。したがって、ラプラス方程式の電圧に関する差分式の解からプローブ上の球面抵抗薄膜の電位分布を求め、電極位置、電極形状、球面抵抗薄膜形状の異なる6種類のプローブモデルについて、接触点位置（法線ベクトル）と電極に流れ込む電流値の関係を求めた。これより、法線ベクトルを検出するうえで高分解能が得られるプローブ電極の位置と形状および球面抵抗薄膜形状を明らかにした。この結果、抵抗薄膜は球面全体に形成し、電極形状は帯形状あるいは円形状とし、その位置は上半球に存在しなければならないが可能な限り下半球に接近させるべきであることが示された。

直径30.2mmの絶縁セラミック球表面にNi-Crを蒸着して球面抵抗薄膜を形成した。さらにその上半球に円形状のNiを析出して電極を形成し、法線ベクトル検出基礎プローブの試作を行った。また、電極に流れ込む電流値を電圧値（電極電圧値と呼ぶ）に変換し、A/Dコンバータを介してマイクロコンピュータへ入力するシステムを構築した。

あらかじめ法線方向を割り出した被測定面の測定より、キャリブレーションデータとして離散的な法線ベクトルに対する電極電圧値を求め、これより法線ベクトルに対する電極電圧値の関係として双1次パッチを定義し、同双1次パッチ式を基に測定電極電圧値から測定点の法線ベクトルを算出する方法を提案した。被測定面の法線方向の割り出しは、基準球（スチールボール）を用いて球中心座標値を認識することにより、基準球上の任意点を測定点とすることにより得た。

基礎実験により、試作した法線ベクトル検出基礎プローブの測定精度が θ 、 ϕ 方向とも $\pm 0.7^\circ$ であることを明かにし、また曲面形状測定実験により、曲面形状測定に対する同プローブの有意性を確認した。

7. 3 位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムについて（第3章）

法線ベクトル検出プローブを実用において用いる場合に要求される機能について検討を行った結果、次の3点を実用プローブの基本仕様とした。

- (a) プローブの直径は10 mmとする。
- (b) 法線ベクトルの測定精度は θ , ϕ 方向ともに $\pm 0.1^\circ$ が得られることとする。
- (c) プローブ球表面の球面抵抗薄膜は耐摩耗性が高くTCRが小さいこととする。

これらの要求に基づき、直径10 mmの石英ガラス球面にスパッタによりTiN抵抗薄膜とAu電極を形成し、実用プローブの試作を行った。

測定精度の向上を図るため、基礎プローブを基にした測定システムにおいて用いられた機器よりも高性能の機器を用いて実用プローブによる測定システムを構築した。また、同実用測定システムの電気的特性として、プローブと被測定物が接触した瞬間より15 msec後に電流が定常状態となることを明らかにした。

法線ベクトル測定システムとCNC三次元座標測定機を組み合わせることにより、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの測定を可能とするシステムを構築した。法線ベクトル検出プローブは、プローブと被測定物との衝突回避機能とプローブの姿勢制御機能を持たせるため、タッチトリガプローブヘッドと電動プローブヘッドを介して三次元座標測定機に設置された。

測定データ（電極電圧値）から法線ベクトルを算出するためには、あらかじめ法線方向を割り出した被測定面の測定を行い、キャリブレーションデータとして離散法線ベクトルに対する電極電圧値の関係を求めておく必

要がある。基礎プローブのキャリブレーション実験では、被測定面の法線方向を割り出すために基準球を用いていたが、プローブの位置決め誤差が被測定面の法線方向の割り出し誤差の原因となっていた。このため測定基準面として平面を採用することとし、ポリゴンミラーを用いたキャリブレーション方法を提案し、同方法に基づき実験を行いキャリブレーションデータとして法線ベクトルと電極電圧値の関係を得た。。

構築した実用プローブに基づく位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムの法線ベクトル測定精度が、 θ 、 ϕ 方向とも $\pm 0.1^\circ$ であることを明らかにした。

7. 4 機械部品基礎形状の測定評価法について（第4章）

機械部品の多くは、平面、円筒、球を基礎として形成されている。したがって、平面、円筒、球を機械部品基礎形状とするならば、機械部品基礎形状の測定評価において、測定データより評価対象となっている平面、円筒面、球面の定義式（方程式）を求めることが基礎となることを示した。

従来の測定評価法、すなわち、測定点から法線方向にプローブ半径値だけ移動した点（プローブの中心点）の座標値を検出し、同座標値から平面、円筒面、球面の定義式を求め、目的とする評価を行う方法の問題点を明らかにした。その問題点は、検出される座標値（プローブ中心座標値）に対してプローブ半径値の補正を必要とすることに起因している。また円筒測定に関し、測定点を直接的に検出できないことから円筒面を正確に定義することを困難にしている。

従来の測定評価法における問題点を解決するため、測定点の位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく平面、円筒面、球面の定義方法を提案し、

同定義方法に基づき，平行平面間距離，円筒半径値と円筒軸，球半径値と球中心点を求める評価手順を示した。

提案した位置ベクトルと法線ベクトルに基づく測定評価法と従来の測定法を比較し，測定点数の観点から，提案した測定評価法は2～3倍の測定効率が得られることを明らかにした。また，提案した方法は，厳密な意味で円筒面の定義が可能であることを示した。

第3章で構築した位置ベクトルと法線ベクトルの測定システムを用いて，平行平面間距離，円筒半径，球半径の測定評価実験を行い，提案した測定法の実用性・有効性を確認した。

7. 5 自由曲面加工形状の測定評価法について（第5章）

使用目的および要求される機能に基づき，自由曲面を意匠曲面と機能曲面に分類し，自由曲面の評価のあり方・基本的考え方について検討した結果，次の2点にまとめられた。

- (1) 意匠曲面の場合，その設計形状は法線ベクトルにより評価されていることから，加工形状の評価も法線ベクトルに基づき行われるべきである。
- (2) 機能曲面の場合，曲面の絶対的位置・形状がその機能を決定していることから，加工形状の評価は位置ベクトルに基づき行われるべきである。

これより，自由曲面加工形状の評価項目は，意匠曲面の場合，法線ベクトルとなり，機能曲面の場合，位置ベクトルとなることを示した。

設計形状（計算機モデル）から加工形状（物理モデル）への変換を座標変換としてモデル化し，その座標変換モデルは，意匠曲面評価の場合には

並進変換と拡大縮小変換を許容し、機能曲面評価の場合には単位マトリックス変換でなければならないことを明かにした。また、従来自由曲面加工形状の評価法として採用されているベストフィット法は、設計形状から加工形状への変換に対して並進変換と回転変換を許容しており、自由曲面の持つ意匠性や機能性を明確に意識して評価していないことを示した。

自由曲面加工形状の評価手順の概要は次の通りである。すなわち、加工形状の任意点の位置ベクトルと法線ベクトルを検出し、加工形状の位置ベクトル補間式と法線ベクトル補間式を求め、設計形状のそれらと比較する。これより、設計形状から加工形状への座標変換が、「並進・拡大縮小変換」か、「単位マトリックス変換」か、あるいはどちらの変換形式でもないのかを判断する。この時、座標変換が、「並進・拡大縮小変換」と判断できる場合には、加工形状は意匠曲面として適当であると評価し、「単位マトリックス変換」と判断できる場合には、加工形状は機能曲面として適当であると評価し、どちらの変換形式でもない場合には、加工形状は意匠曲面としても機能曲面としても適当ではないと評価する。

加工面を形成する1曲面パッチ上の任意の16点の位置ベクトル値と法線ベクトル値から、加工形状の位置ベクトル補間式と法線ベクトル補間式を求める方法を提案した。その中で、測定点のパラメータ値を決定する独自の方法を示した。

計算機シミュレーションにより、提案した位置ベクトルと法線ベクトルの検出に基づく自由曲面加工形状の評価法の妥当性の確認を行った。

7. 6 自由曲面計算機モデルの構築法について（第6章）

自由曲面計算機モデルは複数の曲面パッチを滑らかに接続することによ

り構築できる。従来提案されていた曲面パッチは、曲面パッチのコーナー点の位置ベクトル、接線ベクトル、ねじれベクトル、あるいはこれらのベクトルに等価な制御点により定義されるが、次の二つの問題点があった。

- (1) 接線ベクトルやねじれベクトル（および接線ベクトルとねじれベクトルに等価な制御点）は、図面や物理モデルから定量化することは困難であり、人間の直観に基づき決定することも容易ではない。
- (2) 曲面パッチを滑らかに接続しながら曲面形状を表現（構築）するとき、隣接する曲面パッチの接線ベクトルとねじれベクトル（あるいは等価な制御点）との拘束条件から、意図する形状を構築することが容易ではない。

上記の問題点を解決するため、図面や物理モデルから直接求めることができ、直感的にも定量化が容易である位置ベクトルと法線ベクトルに基づく曲面パッチ定義式を提案し、同定義式により定義される曲面パッチをPN曲面パッチと称した。

PN曲面パッチは、パッチコーナ一点の位置ベクトルと法線ベクトルにより定義され、接続境界において、位置ベクトルの連続の条件および接線ベクトルの連続の条件を満足してゐることを、数式的に明らかにした。

PN曲面パッチは、その切削加工面の観察から、パッチ境界において滑らかな接続が得られていることを実験的に確認した。



