

①

関西大学博士論文

光学的空間情報計測システムと
その高機能化に関する研究

平成4年9月

倉田純一



関西大学博士論文

光学的空間情報計測システムと
その高機能化に関する研究

倉田純一

目次

第1章 序論	1
第2章 反射型光学センサーを用いた水位計とその高精度化	4
1. はじめに	4
2. 試作した光学式水位計の構成	6
2.1 送り機構の機械的性能評価	6
2.2 反射型光学センサーの特性	7
2.2.1 反射型光学センサーの出力特性	8
2.2.2 測定レンジの決定	10
2.2.3 傾斜面に対する距離検出特性の変化	12
2.2.4 水槽底面および色素混入による距離検出特性への影響	12
2.3 デジタルコントローラ部	15
2.4 測定信号処理部	15
2.5 信号の流れと測定アルゴリズム	16
3. レンジシフト・サーボ方式水位計の調整条件	17
3.1 レンジシフト・サーボ方式の動作原理と特徴	17
3.2 レンジシフト・サーボ方式におけるヒステリシス幅の調整条件	19

3.3 模擬面による周波数応答試験	20
4. 振動水面の測定	21
5. おわりに	22

第3章 格子縞透過法による水面形状計測システムとその高精度化

1. はじめに	23
2. 格子縞透過法による水面形状の測定原理と実験的検討	24
2.1 格子縞透過法の測定原理	24
2.2 大判カメラを用いた純流体素子内の水面形状の測定	27
3. 格子縞透過法を用いた水面形状計測システムの試作	31
3.1 水面形状測定システムの構成	31
3.2 透明アクリル模型の測定による性能評価	32
4. ガウス関数近似による新しいエッジ検出法の提案と格子縞透過法への応用	34
4.1 エッジ部分の微分輝度信号のガウス関数による近似	34
4.1.1 ガウス関数を用いた近似について	34
4.1.2 最小二乗法によるパラメータの決定手法	35
4.2 ガウス関数近似によるエッジ位置検出に関する実験的検討	37
4.3 透明アクリル模型の測定による精度向上の確認	40

5. 新しいエッジ検出法を用いた透明物体形状計測システムによる水面の測定	41
5.1 回転円筒内強制渦の測定	41
5.2 水槽内のノズル内流れの測定	42
6. おわりに	44

第4章 レーザ光線の円錐状走査による姿勢計測

1. はじめに	45
2. センサー系の構成	47
3. 測定原理と信号処理	48
3.1 センサー系の解析	48
3.2 距離測定のアプローチ	51
3.3 傾斜角(姿勢)測定アルゴリズム	53
3.3.1 Z_2 軸まわりの傾斜角 β の測定アルゴリズム	54
3.3.2 X_2 軸まわりの傾斜角 α の測定アルゴリズム	55
3.4 信号処理回路の構成	56
4. 試作センサー系の性能評価	57
4.1 距離測定の精度	57
4.2 傾斜角(姿勢)測定の精度	58

4.2.1	Z ₂ 軸まわりの傾斜角 β の測定	58
4.2.2	X ₂ 軸まわりの傾斜角 α の測定	58
4.2.3	測定結果の考察と精度向上に対する指針	59
5.	おわりに	60

第5章 鋸歯状荷重関数重畳法による移動体の2次元位置計測

1.	はじめに	61
2.	荷重関数重畳法による受光特性への空間的特徴付け	62
3.	光量重心位置算出アルゴリズム	65
3.1	光量重心算出アルゴリズム	65
3.2	積分領域の有限化による測定誤差の解析	67
4.	光点位置検出回路系の構成	69
5.	試作装置による実験的検討	70
5.1	静止物体の位置測定	71
5.1.1	静止時の位置測定精度	71
5.1.2	特徴点の光学的変化による測定精度への影響	72
5.2	移動物体の位置測定	73
5.2.1	移動時の位置測定精度	73

5.2.2	歩行時の人間の下肢各関節の位置測定	74
6.	おわりに	75

第6章 直交正弦波状荷重関数重畳法による移動体の位置・速度計測

1.	はじめに	76
2.	位置・速度算出アルゴリズム	78
2.1	直交正弦波状荷重関数を空間荷重とする空間フィルタの出力	78
2.1.1	特徴点が単一の光点の場合	78
2.1.2	特徴点がランダムパターンの場合	79
2.2	一組の空間フィルタ出力を用いた位置測定アルゴリズム	81
2.3	一組の空間フィルタ出力を用いた速度測定アルゴリズム	83
3.	位置・速度計測システムの構成	84
3.1	荷重関数重畳法による空間フィルタの構成	84
3.2	位置測定回路の構成	86
3.3	速度測定回路の構成	86
4.	試作測定システムによる実験的検討	87
4.1	空間フィルタ出力の解析	88
4.2	位置測定誤差の解析	88

4.3	速度測定誤差の解析	90
4.4	位置・速度測定結果のまとめと精度向上に関する提案	92
4.5	歩行時における下肢の位置と速度の測定	92
5.	おわりに	93
	付録A 正弦波状荷重関数を有する空間フィルタの 出力波形の詳細な導出	95
第7章 周期可変空間フィルタによる位置・速度計測とその高精度化		
1.	はじめに	97
2.	一組の直交正弦波状空間フィルタを用いた速度測定	98
2.1	一組の空間フィルタ出力による速度測定アルゴリズム	98
2.2	正弦波状荷重をもつ空間フィルタを用いた速度測定	101
2.2.1	ハイブリッド回路による高性能空間フィルタの構成	101
2.2.2	速度測定誤差の実験的検討と改善手法の提案	102
3.	周期の異なる二組の直交正弦波状空間フィルタを用いた絶対位置測定	105
3.1	二組の空間フィルタによる絶対位置測定アルゴリズム	105
3.2	提案する手法による絶対位置測定	107
4.	周期可変機構を付加した位置・速度同時測定システムの構成	108

4.1	周期可変機構を付加した位置・速度同時測定システムのブロック図	108
4.2	周期可変機構の制御アルゴリズム	108
4.3	提案する位置・速度同時測定システムによる測定結果の検討	111
5.	おわりに	113
第8章 結論		
		114

参考文献

121

本論文に関連する論文・講演

126

謝辞

第1章 序論

光学式センサーを用いた計測系は、測定物を拘束することなく非接触で計測可能なため、各分野で広く用いられている。測定の対象となる物理量も、長さ、形状、表面粗さ[3]、角度、振動、応力、フローパターンなど[1]多岐にわたっている。測定の手法も数多く提案されているが、いずれの測定システムにおいても、空間情報を抽出するまでの情報の流れは以下のようなものである。

- (1) まず、測定対象物にレーザー光線やパターン状の光を照射するか、または、照明の下で他と比較して十分に明るい点を探索して、対象物の面上に光学的ムラを設ける。
- (2) 対象物の面上の特徴点である光学的ムラが、物体の位置や移動などによる光学的環境の変化によって影響を受け、その結果、像の歪や光量の変化が生じる。
- (3) 光学的特徴の変化を観測し信号処理することによって、形状や位置、速度などの空間情報を得る。

この情報の流れに基づいて行われる光学的計測手法に対して、測定精度の向上と高速な信号処理手法、すなわち、実時間測定が要求されている。光学的手法による計測をこのような観点から見れば、計測を精度良く、かつ、高速に行うために、光学的特徴（ムラ）の与え方と光学的特徴の変化の抽出方法、ならびに、信号処理の手法が重要であることがわかる。本論文では、おもに形状、位置、速度などの空間情報を光学的手法を用いて計測するシステムについて、対象物への空間的特徴付け、精度向上を図り処理時間を短縮する信号処理手法、受光センサーへの空間的特徴付けによる多機能化の点から研究を行っている。

対象物への空間的特徴付けは、照射する光、あるいは、特徴とする領域を点、線、面とすることによって情報量が増加する。空間的特徴付けを点で行った場合、得られる情報は空間的に局所的であり空間情報を得るための信号処理を簡略化することが可能であり、また、一般にその精度は高い[2]が、スポット径が減少することによって光が照射されている領域の表面性状の影響が大となり補償が必要[6]となる。空間的特徴付けが線あるいは面で行われる場合、得られる情報の量、質とも向上するが、その反面、対象物の空間情報を抽出するための処理時間が長くなる傾向がある。そこで、信号処理を容易にし、かつ、効率よく空間情報を得る手法として点を走査して線とする手法[4,5]や、面に複数の規則的なパターンを連続して照射する手法[7]あるいは不規則に濃淡情報を付加す

る手法[8,9]などが提案されており，信号処理の簡略化と高精度化，短時間化を図っている。

また，対象物の空間的情報を効率よく抽出する手法は，その後の信号処理手法と併せて提案されている。受光センサー系の空間情報抽出特性を改善すれば，対象物へ特別な空間的特徴付けを行うことなく，対象物のもつ空間情報を抽出することが可能となる。なかでも，J.T.Atorによって提案された空間フィルタ[10]の原理は，対象物の画像を入力する撮像素子の空間的受光特性に周期的な特徴付けを行うことによって，空間周波数領域における相関演算を瞬時に可能とするもので，空間フィルタから得られる出力から簡単に対象物の速度が計測される。また，半導体位置検出素子や等分割されたフォトダイオードのように，素子を設計・製作する段階で空間的特徴付けを行い，異なった受光特性を有するセンサーとして機能させている例も多い。このように受光光学系に空間的特徴付けを行う手法は，従来の画像処理法での前処理過程と同様に必要とする空間情報を容易に検出可能とすることができる。しかし，画像処理法の前処理では比較的原画像のもつ空間情報を加工せず光学的外乱などを除去することを目的としているのに対して，空間的特徴付けによる場合は，空間情報を得る段階で空間的に画像情報を取捨選択し，原画像のもつ空間情報を加工し（たとえば，2次元画像情報から単に一つの値を求める.），後段の信号処理の簡略化を図っている。

このように，光学的手法を用いた空間情報計測システムの高精度化，高機能化を図る手法は，対象物への空間的特徴付け，受光センサー系への空間的選択特性の付加，信号処理手法の改善の3方面から考えられる。そこで本論文では，これら3方面の立場から，点状の特徴付けを用いた高分解能の水位計，線状の特徴付けを行う水面形状の測定，光点を円錐状に走査して対象面に環状の特徴付けを行って面情報を抽出する近接センサー，工業用カメラの受光特性に空間的特徴を与えて多機能センサー系とする計測システムを構成し，従来の光学的空間情報システムで問題視されている以下の事柄についての改善策を示している。

- (1) 高分解能の点計測センサーの測定レンジが比較的狭いこと。
- (2) 複数の受光センサーや特別な光学系を必要とせず，広範囲の形状を精度良く計測すること。
- (3) ロボット工学などで特に重要視されている高速処理を考慮し，特徴付けと信号処理を並行して行い，かつ，簡単な信号処理で複数の空間情報を一

度に計測すること。

- (4) 能動的に対象物へ空間的特徴付けができない場合に，受光センサー系へ空間的特徴付けを行い，対象物の空間情報を効率よく抽出すること。

以下では，それぞれの空間情報計測システムに対して，システムの構成，計測原理の提案と解析，検証実験の結果による検討を行い，提案する各手法の有効性と実用性について考察する。

第2章 反射型光学センサーを用いた 水位計とその高精度化

浅底水槽や水理模型を用いたシミュレーション実験時の流れの解析において、連続的に精度良く水位変動を測定することが極めて重要であり、測定装置の開発が強く望まれている。本章では、検出部に反射型光学センサーを用いた、新しいサーボ方式の非接触水位計を提案し、その調整条件と測定性能について述べている。水位計のサーボ機構には、測定精度の向上と高速化を図るため、従来の純サーボ方式にかわり、レンジシフト・サーボ方式を採用している。その結果、従来のサーボ式水位計に比べ提案する水位計は、短周期・高振幅の水位変動を精度良く測定することが可能となった。

1. はじめに

浅底水槽法や水理模型実験は、流動特性の解析に有用なシミュレーション技法であり、手軽に実験可能なため広範に使用されている。浅底水槽法を用いて高速気体流の流動特性を低速水流の挙動に置換し、衝撃波や翼流れの解析など[11~15]が行われている。また、水理模型実験は、臨海地帯の開発に伴う水質汚濁防止など、環境保全に関する海流特性の解析研究に有効な手法として用いられている。

浅底水槽実験においては、水位変動が気体流の圧力、密度、温度の変動に対応するTable 2-1に示すアナロジー[15]が解析的に用いられている。そのため、アナロジーの点から諸量を算出するとともに、流線、流脈などの解析のために、水位変動を連続的に精度良く測定することが重要である。同様に、水理模型実験においても、水位を正確に測定することは、実験の再現性や測定精度の面からも重要[16]である。

現在、微小な水面変動を測定する水位計[16~20]として、接触型水位計と

Table 2-1 Hydraulic analogy between air and water flow

	density	Mach number	pressure	temperature
air flow	$\frac{\rho}{\rho_0}$	$M = \frac{U}{a}$	$\frac{P}{P_0}$	$\frac{T}{T_0}$
water flow	$\frac{h}{h_0}$	$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$	$\left(\frac{h}{h_0}\right)^2$	$\frac{h}{h_0}$

非接触型水位計がある。これらの水位計のうちで、広く用いられているのは、サーボ式水位計と抵抗式水位計である。抵抗式水位計は、水流内に測定用電極を設置し、電極と水との接触抵抗の変化により水位変動を測定する。また、サーボ式水位計はポイントゲージにサーボ機構を計装したもので、触針検出部と水との接触抵抗を常に一定に保つように、サーボ機構によって触針検出部位置を制御している。この時の触針検出部の変位が、水位変動として記録される。これら2つの測定手法は、ともに水と検出部との接触抵抗を利用しているため、水温や水質変化に伴う電気伝導度の変化[21]や、分極作用による精度悪化などの問題がある。このため、色素混入などによる流れのパターン計測技術と併用し、水位測定することが不可能となる。また、両手法とも接触式のため、水流を乱す原因にもなっている。さらに、触針式サーボ水位計では、流体の表面張力の影響により触針検出部において、触針の上昇時に水面が持ち上がり、下降時に水面が押し込まれるヒステリシス現象が発生する[24]ことが報告されており、水位計測の誤差発生要因として避けがたい問題となっている。

そこで、本研究では、水位変動の高精度な非接触測定が可能となるように、検出部に距離検出の分解能が高い反射型光学センサーを計装した、光学式水位計を試作し提案する。高分解能の距離検出センサーの測定レンジが狭く、高振幅の水位変動が測定不可能なため、検出部である光学式センサーを水位変動に追従して上下動させ、高分解能と広い測定レンジの相反する条件を満たす構成とした。検出部の位置を制御するサーボ機構には、従来の純サーボ方式にかわって、レンジシフト・サーボ方式を採用している。レンジシフト・サーボ方式の採用により、測定レンジの狭い高分解能センサーを、等価的に測定レンジの広いセンサーとして用いることが可能となる。また、デジタルコントローラの一部としてマイクロコンピュータを内蔵し、測定に先立って光学センサーの校正を行って、リニアリティの向上を図っている。以下に、水位計の構成、レンジ

シフト・サーボ方式の調整条件, 水位計の動特性, 水位変動の測定結果について報告する.

2. 試作した光学式水位計の構成

試作した光学式水位計は, Fig.2-1 に示すように以下の4つの部分により構成されている.

- (1) ボールねじとパルスモータによる送り機構
- (2) 反射型光学センサーと増幅器からなる検出部
- (3) マイクロコンピュータを内蔵した校正部とデジタルコントローラ部
- (4) 電子回路系からなる測定信号処理部

以下に, 各部分の説明をあげる.

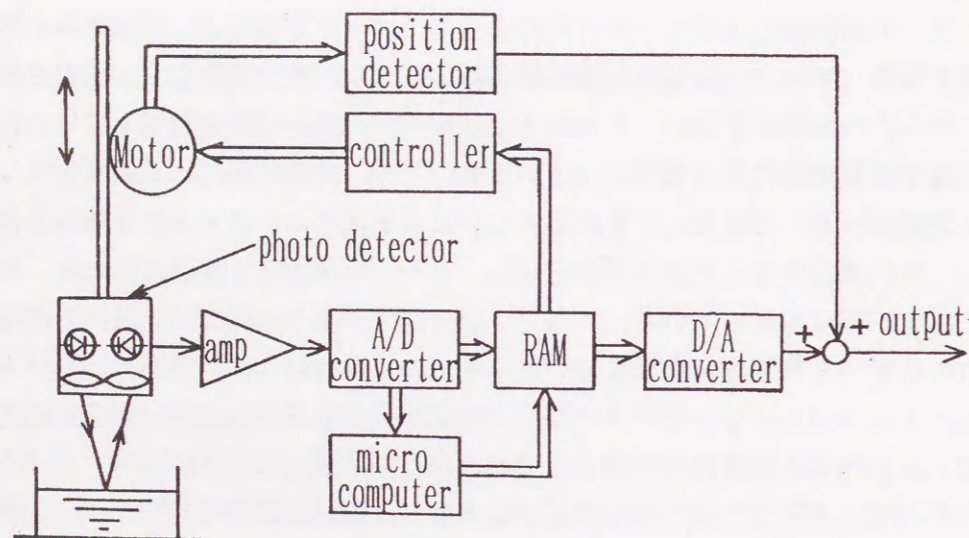


Fig.2-1 Illustrated diagram of optical level gauge with range shift servomechanism

2.1 送り機構の機械的性能評価

検出部を上下に移動させる送り機構は, ボールねじと2個のパルスモータ, 減速ギア, 電磁クラッチから構成されており, 各仕様はTable 2-2 に示すとおりである. パルスモータの励磁クロックは178ppsである. 早送りと微速送りは, デジタルコントロールによって切り換えられる. それぞれの場合の, 1

パルスあたりの移動量の平均値は0.150mm, 0.010mmであり, 標準偏差は0.008mm, 0.001mmである. 主に, 早送りは水面測定時以外のセンサー移動時に, 微速送りは校正時ならびに測定時に用いられる.

Table 2-2 Specification of traveling mechanism

	distance per one pulse	standerd deviation	speed
fast	0.150 mm	0.008 mm	26.7 mm/s
slow	0.10 mm	0.001 mm	1.78 mm/s

2.2 反射型光学センサーの特性

検出部はFig.2-2 に示す反射型光学センサーと, 演算増幅器によって構成された信号増幅部により構成されている. 反射型光学センサーは, 直径0.178mm, 波長700nmのLEDとICフォトディテクタが同一パッケージ内に計装されており, 反射型光学センサモジュールとして設計されている.

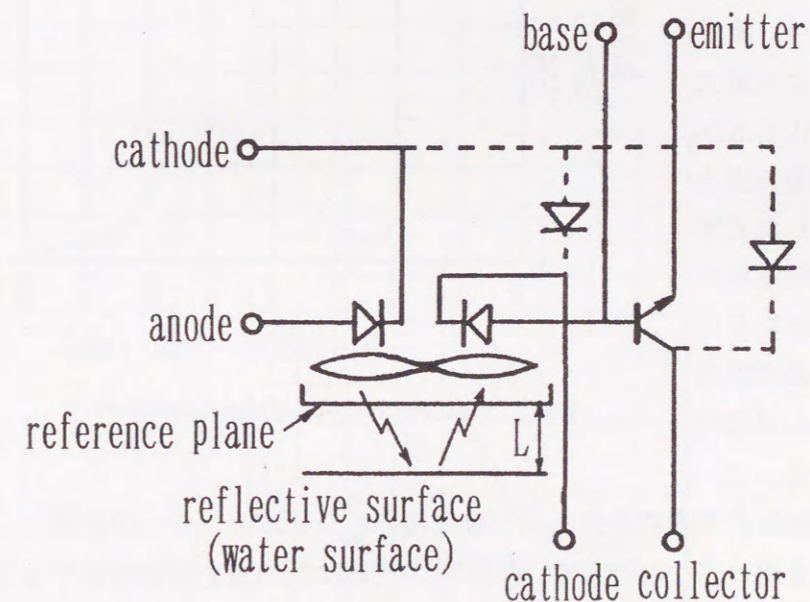


Fig.2-2 Schematic of optical reflective sensor

2.2.1 反射型光学センサーの出力特性

センサー内のLED光源から出た光は収束レンズを介し測定面に照射され、その反射光はレンズを介してセンサー内の受光部により検出される。受光部に生じるフォト電流はセンサー内の増幅器と外部に設けられた増幅回路によって増幅される。Fig.2-3に、基準面からの距離Lと最大出力電圧によって正規化した出力電圧 V_n の関係を示す。

グラフからわかるように、このセンサーの出力は、基準面と反射面との距離Lが光学系の焦点距離4.3mmに等しい時に最大となる。最大出力値は、反射面の状態により変化する。Fig.2-4に、反射面の状態による出力値の変化を示す。反射面の状態により最大出力値は変化するが、それぞれの最大出力値で正規化した光学センサーの距離検出特性は、Fig.2-5に示すように最大出力値近傍では、ほぼ同一と見なせる。よって、測定に利用する範囲を最大出力値近傍とし、光学センサーの正規化した距離検出特性を用いることにより、反射面の状態に関わらず距離測定することが可能であると考えられる。

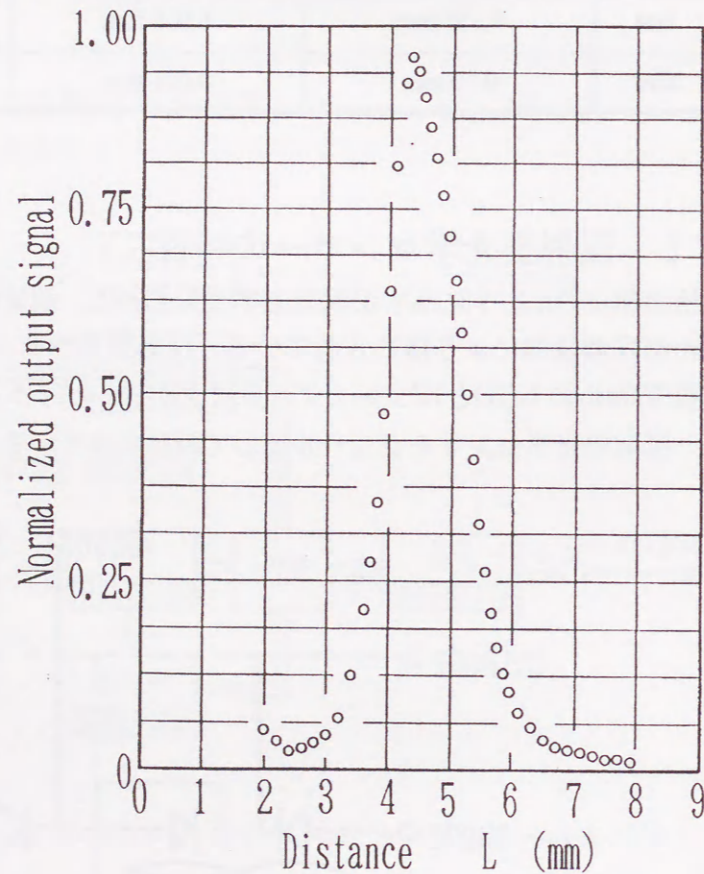


Fig.2-3 Characteristics of optical sensor

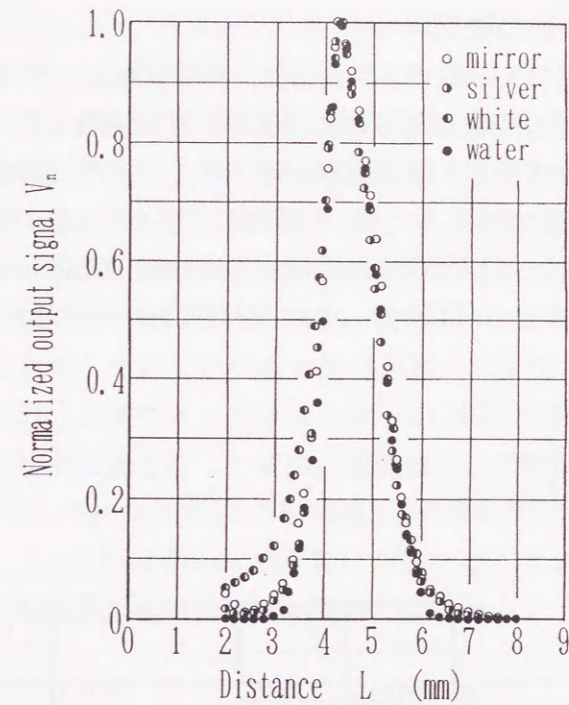


Fig.2-4 Output characteristics of sensor for various reflective surface

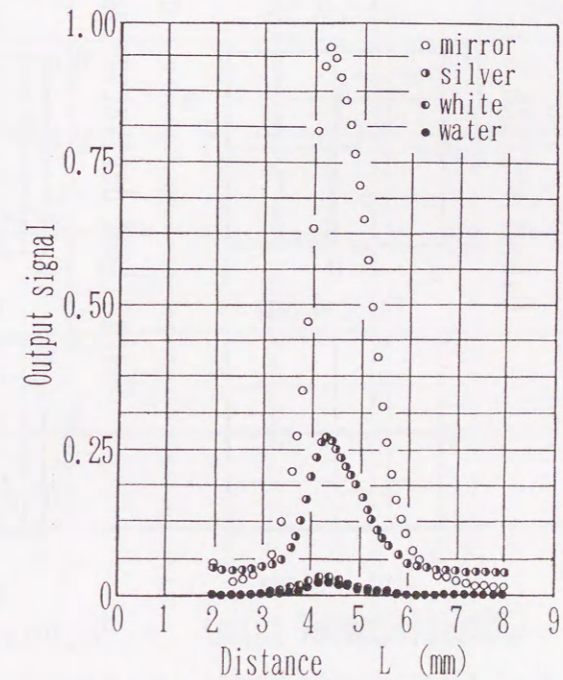


Fig.2-5 Normalized Output characteristics of sensor for various reflective surface

2.2.2 測定レンジの決定

一般に、光学系の特性を比較する場合には、OTF(Optical Transfer Function)を用いるが、空間周波数領域におけるフーリエ変換を行う必要があるため、実際にOTFを求めることは困難である。そこで、OTFの代わりに、空間周波数の異なる等間隔の白黒パターンを横切るときのセンサー出力により容易に求めることが可能なMTF(Modulation Transfer Function)を用いて、光学系の応答性を考察する。MTFは、ある空間周波数に対する応答性により、次式で定義される。

$$MTF = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2.1)$$

本章で使用する反射型光学センサーのMTFは、反射面上のスポット像の直径dにより大きな影響を受ける。スポット像が存在する領域の空間的平均値が光学センサーの出力として得られるため、スポット像の大小により平均化する空間領域の面積が変化し、その結果、反射型光学センサーのMTFが変化する。反射面上のスポット像直径dは、基準面から反射面までの

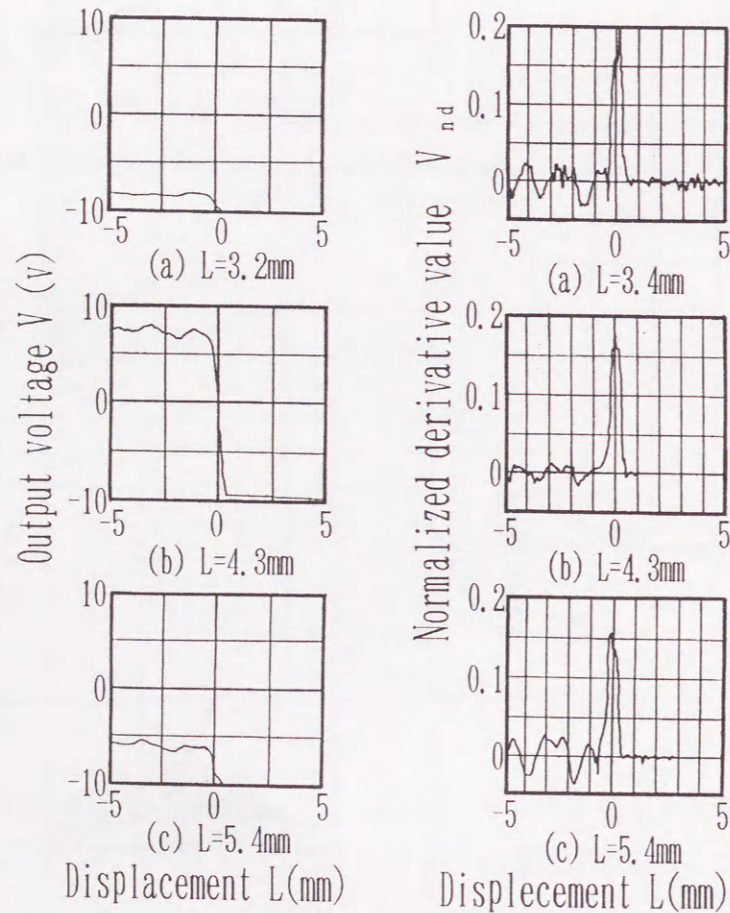


Fig.2-6 Responses for striped pattern image

Fig.2-7 Normalized differential output for striped pattern image

距離Lにより変化し、L=4.3mmのとき(4.3mmは、焦点距離である。)最小となる。L=4.3mmの時、スポット像が最小、すなわち、空間的に平均化される領域が最小となって、高い空間周波数の輝度の変化も検出可能となりMTFが最大となる。この時、光学センサーの空間分解能、ならびに、距離変化に対する応答性ともに最も優れていると言える。そこで、距離に対するMTFの変化を検討するために、白黒の縞のエッジ部分の出力変化により光学センサーの応答性を調べた。Fig.2-6にその数例を示す。さらに、白と黒との切り換え点での変化を検討するため、それぞれの最大値で正規化した後、微分した結果をFig.2-7に示す。これらの波形と、光学センサーのMTFが最大となるL=4.3mmのときの波形との相関計算を行った結果、相関値はFig.2-8に示すようになった。図より、L=4.3±1.0mmの範囲で相関値rが0.95以上の値を示すことがわかる。これより、L=4.3±1.0mmの範囲においては、光学式センサーのMTFがほぼ等しく、同等の距離検出精度が期待できる。

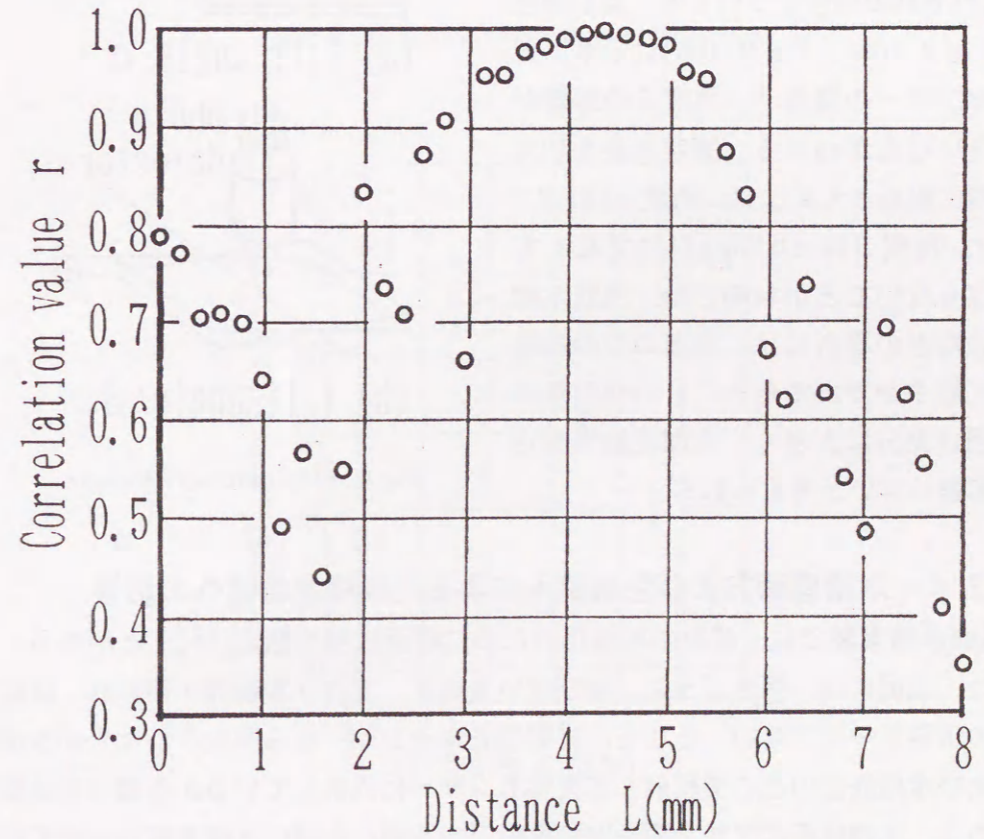


Fig.2-8 Correlation values of response for striped pattern

以上のことから、今回使用した反射型光学センサーは、 $L=4.3\pm 1.0\text{mm}$ の範囲内では光学的特性が安定しており、距離測定に使用することが可能であると考えられる。さらに、光学センサーの出力値 V と反射面までの距離 L との関係を一意的にするために、距離測定には $L=4.9\pm 0.5\text{mm}$ の範囲を使用する。

2.2.3 傾斜面に対する距離検出特性の変化

使用する光学センサーは反射型であるため、反射面の傾斜角によって、特性が変化すると考えられる。そこで、Fig.2-9に示す二つの場合について、反射面による距離検出特性への影響を検討した。

(1)発光部と受光部を結ぶ直線に平行な直線まわりに傾斜角度 α をもつ場合

(2)発光部と受光部を結ぶ直線に垂直な直線まわりに傾斜角度 β をもつ場合

それぞれの場合についての、反射特性をFig.2-10a), Fig.2-10b)に示す。光学センサーの構造上、角度 β の影響が大きいことがわかる。測定誤差を10%以内に収めるためには、角度 α は $\pm 2.7\text{deg}$ 、角度 β は $\pm 0.9\text{deg}$ 以内でなくてはならないことが判明した。浅底水槽実験などの場合には、水面の変動は極めて緩やかであるため、この傾斜角の範囲は十分に大きく、水面変動の測定に影響しないと考えられる。

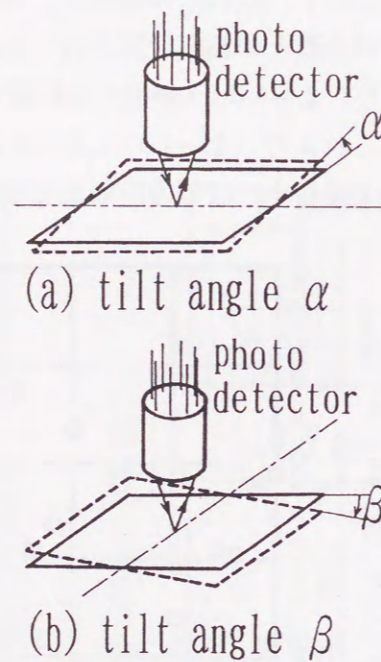
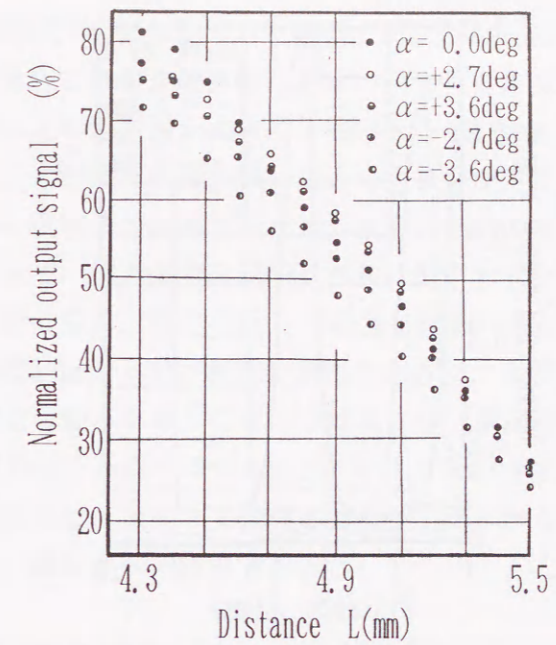


Fig.2-9 Definition of tilt angle

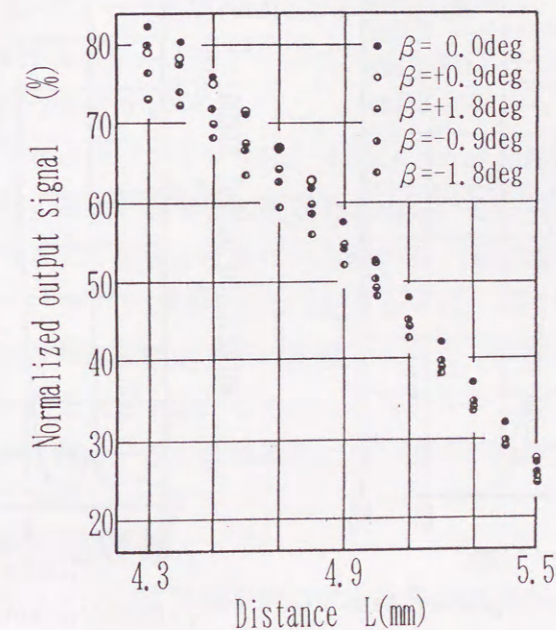
2.2.4 水槽底面および色素混入による距離検出特性への影響

浅底水槽実験では、流れの可視化のために底面に縞を貼る[15]ことがある。また、底面には、磨きガラス、錆びない金属板、アクリル板等が使われ、反射面の状態も一定でない。そこで、反射型光学センサーから照射された光が水面および水槽底面のどこで反射して光学センサーに入射しているかを調べる必要がある。水槽底面にアルミ箔を貼り反射率を高め、水槽の水深を変化させて距離検出特性への影響を調べた。その結果をFig.2-11に示す。

Fig.2-11a)は流動する流体に色素を混入しない場合、Fig.2-11b)は白色ポス

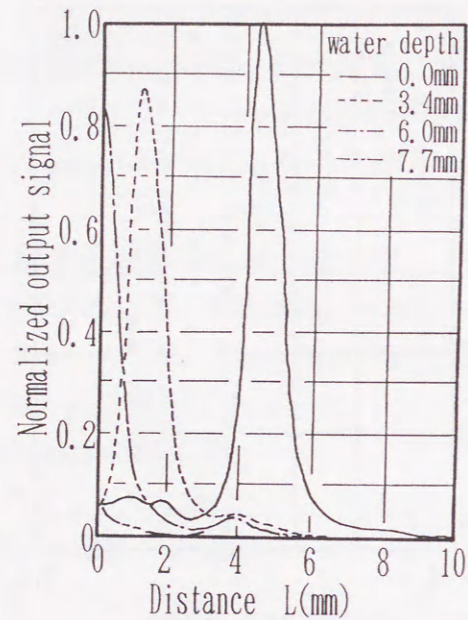


(a) Relation between output signal and α

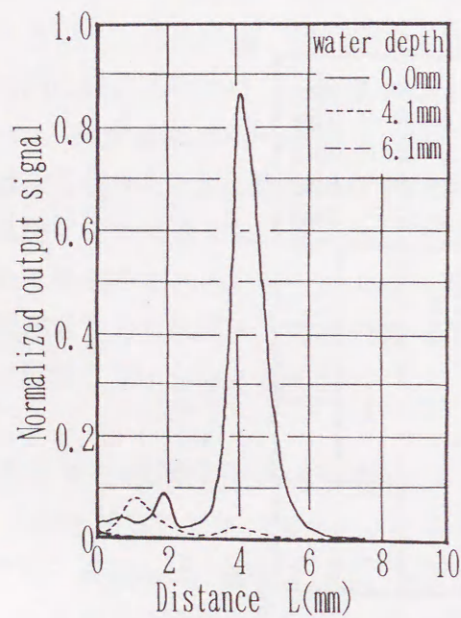


(b) Relation between output signal and β

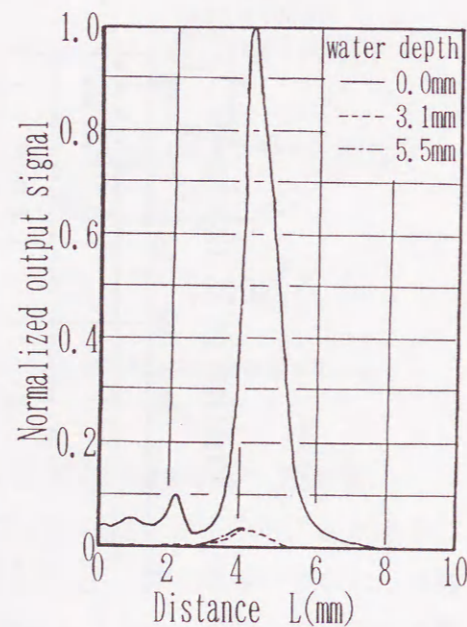
Fig.2-10 Output characteristics for various tilt angle



(a) Case of clear water



(b) Case of mixing 0.01% poster colour



(c) Case of mixing 1% poster colour

Fig.2-11 Influence of water depth and coloured water

ターカラーを体積比で0.01%混入した場合, Fig.2-11c)は白色ポスターカラーを1%混入した場合である. 着色を行わない場合には水面表面における反射に比べて水槽底面における反射が大きく, 光学センサーの出力は水槽底面の位置を示している. この傾向は水深が浅い場合に大きいが, 水深が深くなるにつれて水槽底面からの反射光が減衰するため, 水面表面での反射光のみを捕らえることが可能となって, 出力信号の電圧レベルは低下するが水面までの距離を測定することが可能となる. 着色を行った場合も同様の傾向があり, 着色濃度が高まるにつれて水槽底面からの反射光の減衰が大きく, 水深が浅い場合にも水面までの距離が測定可能となる. これらの結果より, 測定時に使用する 4.9 ± 0.5 mm の範囲に限れば, 水深が5mm以上になれば反射特性が一定していることがわかる. この結果は, 流動する流体の水深を10mmから30mm程度とする浅底水槽実験では, 満足すべき結果である.

2.3 デジタルコントローラ部

デジタルコントローラ部は, 次あげる要素により構成されている.

- (1) 検出部からのアナログ信号をデジタル化する A/D変換器
- (2) マイクロコンピュータと RAMによる校正回路
- (3) デジタルコンパレータとディップスイッチによって構成された, ヒステリシスをもつ3値リレー

この中で, マイクロコンピュータは, 4.9 ± 0.5 mm の範囲の距離検出特性を用いて出力値に対する反射面までの距離を算出し, その校正値をデジタルコントローラ内の RAMに書き込む時にのみ使われ, 測定時にはコントローラから切り離される. ヒステリシスをもつ3値リレーは, RAMに書き込まれた校正値によって補間された反射面までの距離をもとに, 検出端である反射型光学センサーの上下移動を決定する. この時のヒステリシス幅 W_h は, ディップスイッチにより設定される. この調整条件については, 後述する.

2.4 測定信号処理部

測定部では, 次の2つの信号量を用いて水位を測定する.

- (1) RAMに書き込まれた 4.9 ± 0.5 mm に対応するデジタル信号D。
- (2) 光学センサーの位置X

光学センサーの距離検出特性をもとにデジタルコントローラ部で線形補間された局所的な距離情報であるデジタル信号D。は, D/A変換器によって

$\pm 0.5V$ の電圧に変換される。つまり、 $1V$ が $1mm$ に対応している。光学センサーの位置もポテンショメータによって同じ比率で電圧に変換される。この二つの電圧の和が、水位に相当する電圧 Y である。

2.5 信号の流れと測定アルゴリズム

試作した水位計は、以上の4つの部分により構成されている。それぞれの部分の信号の流れに注目すれば、ブロック図はFig.2-12のようになる。信号の流れをさらに詳しく説明すると、次のようになる。

- (1) 反射面と反射型光学センサーの基準面までの距離 L が光学センサーによって検出され、電圧として出力される。(この時、 $L=4.9\pm 0.5mm$ 以内である。)
- (2) 距離 L に対応する電圧はA/D変換され、距離 L に対応するデジタル信号 D_i となる。
- (3) 距離 L に対応するデジタル信号 D_i は、校正値が書き込まれたRAMを介して線形補間された距離に対応するデジタル信号 D_o となる。この時、光学センサーの非線形性は線形化される。
- (4) 校正された距離に対応するデジタル信号 D_o を用い、デジタルコントローラ部で光学センサーの上下移動の指令(± 1)が決定される。
- (5) 上下移動の指令(± 1)によって、パルスモータの励磁クロック($\pm P$)が決まり、励磁クロックに従ってパルスモータが駆動され、光学センサーが移動する。
- (6) 光学センサーの位置 X に対応する電圧 V_x と、校正された距離に対応するデジタル信号 D_o をD/A変換して得られた電圧 V_s との和が、水位に相当する電圧 Y となる。

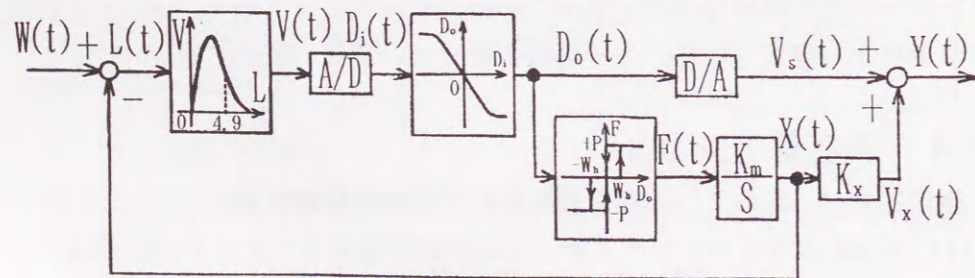


Fig2-12 Block diagram of level gauge with range shift servomechanism

以上(1)から(6)の信号の流れによって、水位変動が電圧として測定される。また、測定前には、光学センサーの正規化特性を求め、校正値を求めている。

3. レンジシフト・サーボ方式水位計の調整条件

試作した水位計の構成は第2節で述べたとおりであり、検出端として採用した反射型光学センサーは高い距離分解能を有するが、その反面、一般の高分解能のセンサーと同様に測定レンジが狭く、距離検出可能範囲は $1mm$ である。そこで、測定レンジをさらに拡大して大きい水面変動を測定可能とするため、光学センサーをサーボ機構により上下に移動させている。本章における制御方法は、従来の純サーボ方式とは異なるレンジシフト・サーボ方式を採用している。以下に、レンジシフト・サーボ方式の動作原理、ならびに調整条件について述べる。

3.1 レンジシフト・サーボ方式の動作原理と特徴

レンジシフト・サーボ方式が従来の純サーボ方式と大きく異なる点は、純サーボ方式では常に偏差をゼロに保つようセンサーの位置を制御するのに対して、レンジシフト・サーボ方式では、偏差が常にセンサーの測定レンジ内に収まるようにセンサー位置を制御する点である。つまり、測定レンジの座標中心を制御することにより、測定レンジを平行移動させ、測定レンジの小さいセンサーを見かけ上測定レンジの大きいセンサーとして使用することが可能となる。

純サーボ方式においては、センサー位置が水位変動に対応するのにに対して、レンジシフト・サーボ方式では、センサー位置と偏差との和が水位変動に対応する。また、誤差について考察すれば、純サーボ方式では偏差(追従誤差)が測定誤差となるが、レンジシフト・サーボ方式では、偏差が測定レンジ(試作した水位計の場合 $\pm 0.5mm$)を越えない限り測定誤差は発生しない。

サーボ機構の構造について考えれば、純サーボ方式ではPIDコントローラに代表されるような線形のコントローラと、応答性が良く高精度の送り機構を使用しなければならない。一方、レンジシフト・サーボ方式では、リレー要素を主要構成要素とする簡単なコントローラを用いるだけで、それほど応答性の良くない送り機構を使用しても高い測定精度を得ることが可能である。つまり、同じ性能をもつサーボ機構を使用したと仮定すれば、レンジシフト・サーボ方式を採用した場合に、高周波数、高振幅の水位変動を測定することが可能となる。

Fig.2-13にそって、レンジシフト・サーボ方式の動作を説明する。コントローラはヒステリシスをもつ3値リレーとし、ヒステリシス幅を W_h とする。コントローラの3値リレーに不感帯を設けていないのは、制御系にリミットサイクルが発生しないよう考慮[12]しているためである。水位 $W(t)$ とセンサー位置 $X(t)$ との差は、水面までの距離 $L(t)$ となる。

$$L(t) = W(t) - X(t) \quad (2.2)$$

水面までの距離 $L(t)$ がヒステリシス幅 W_h より小さい場合には、状況点はコントローラ上0または1または5にあり、光学センサーの送り機構は停止している。水面までの距離 $L(t)$ がヒステリシス幅 W_h より大きくなれば、状況点はコントローラ上2へ移り、光学センサーは上昇し始める。状況点が2から3を経て4に移った瞬間に光学センサーは停止し、状況点が1または5になるまで停止し続ける。水面までの距離 $L(t)$ が負になった場合も同様に、水面までの距離 $L(t)$ がヒステリシス幅 $-W_h$ より大きい時は状況点はコントローラ上0または1または5にあり、光学センサーは停止している。水面までの距離 $L(t)$ がヒステリシス幅 $-W_h$ より小さくなれば、状況点はコントローラ上6に移り、光学センサーは下降し始める。状況点が1から7を経て8に移った瞬間に光学センサーは停止し、状況点が1または5になるまで停止し続ける。その結果、センサー位置 $X(t)$ はFig.2-13c)に示すような動作を行う。

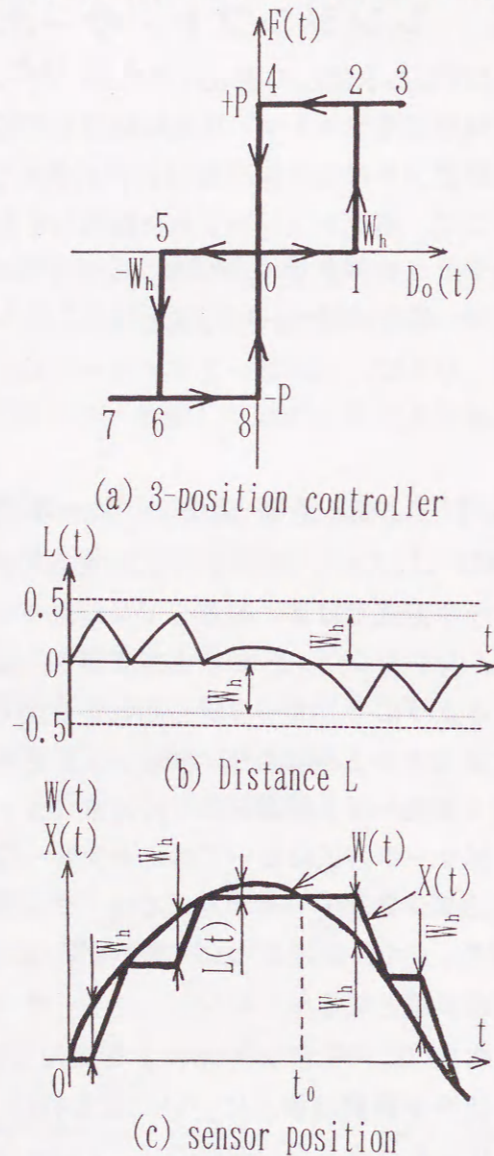


Fig.2-13 Measuring principle of level gauge

レンジシフト・サーボ方式では、制御が行われている間、光学センサーと水面までの距離 $L(t)$ はセンサーの測定レンジ内になければならない。そこで、次節では、レンジシフト・サーボ方式におけるヒステリシス幅 W_h の調整条件を求める。

3.2 レンジシフト・サーボ方式におけるヒステリシス幅の調整条件

今回試作した水位計では、常に水面までの距離 $L(t)$ がセンサーの測定レンジ内にあるためには、次式を満足せねばならない。

$$-0.5 \leq L(t) \leq 0.5 \quad (2.3)$$

$$W(t) = A_w \cdot \sin(\omega_w \cdot t) \quad (2.4)$$

ここで、水面は緩やかに正弦波状に変動するものとして考える。 A_w は水位変動の振幅、 ω_w は水位変動の角周波数である。もし、水位変動の振幅 A_w が0.5mmより小さい場合には、ヒステリシス幅 W_h を0.5mmとすれば常に水位変動が測定レンジ内に収まっており、レンジシフトすることなく測定が可能である。

また、光学センサーの位置 $X(t)$ は、パルスモータの駆動パルスを P 、1パルスあたりの光学センサーの移動量を K_m とすれば次式で表される。

$$X(t) = \int_0^t P \cdot K_m \, dt \quad (2.5)$$

式(2.3)～(2.5)より、次式が導かれる。

$$|A_w \cdot \sin(\omega_w \cdot t) - P \cdot K_m \cdot (t - t_0)| \leq 0.5 \quad (2.6)$$

ここで、時刻 t_0 とは t の直前で $L(t)=0$ となった時刻 (Fig.2-13参照)である。式(2.6)を満足するようにヒステリシス幅 W_h を調整すれば、レンジシフト・サーボ方式により測定することが可能となる。また、式(2.6)の等号は測定限界を与える。この調整条件を求めるため、非線形制御系の設計で用いられるチブキン法など[13]の解析的手法による解法も考えられるが、本章では水面変動の振幅 A_w 、角周波数 ω_w をパラメータにとり、デジタル・シミュレーションによって測定限界を与えるヒステリシス幅 W_h を求めた。Fig.2-14に、その結果を示す。測定限界を与える曲面と $W_h - A_w$ 平面、 $W_h - \omega_w$ 平面

で囲まれた閉空間が、レンジシフト・サーボ方式によって光学センサーの測定範囲を越えることなく光学センサーの位置が制御され、誤差を発生することなく水面形状の測定が可能な条件を示している。

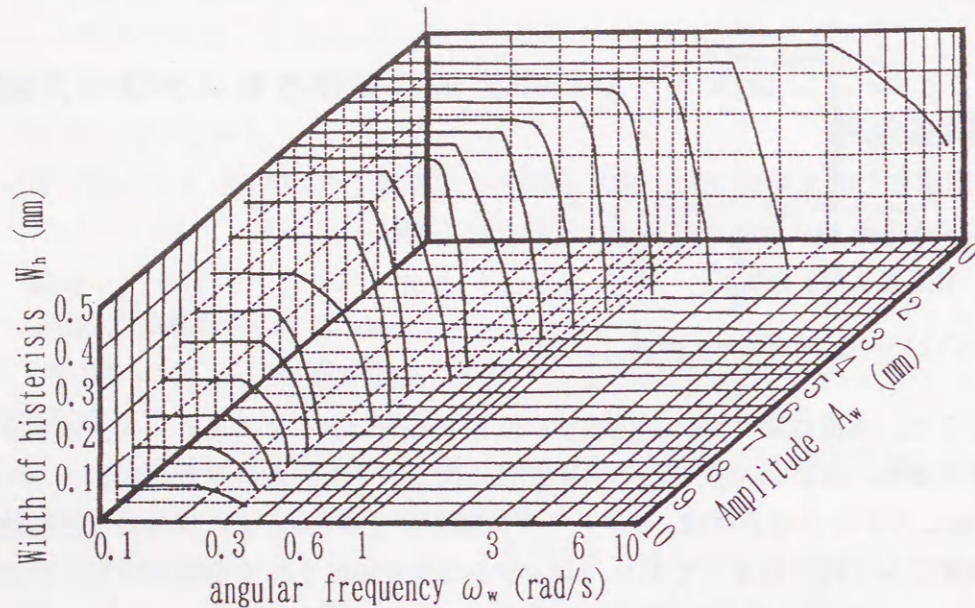


Fig.2-14 Regulating condition of level gauge system

3.3 模擬面による周波数応答試験

試作した水位計の性能を調べるため、動特性試験器を試作して周波数応答試験を行った。この試験器は、模擬面を正弦波状に上下振動させることが可能である。また、振幅、周波数ともに調整可能である。前節の調整条件を考慮に入れて、ヒステリシス幅の調整を行い動特性実験を行った結果を、Fig.2-15に示す。コントローラとして純サーボ方式を用いた水位計は、試作したレンジシフト・サーボ方式水位計のコントローラをPI調節器に変更し、最適調整したものを用いた。グラフより、レンジシフト・サーボ方式の方が、従来の純サーボ方式に比べ、高周波、高振幅の変動に対しても測定可能であることが判明した。これより、レンジシフト・サーボ方式の有効性を実験的に確認することができた。

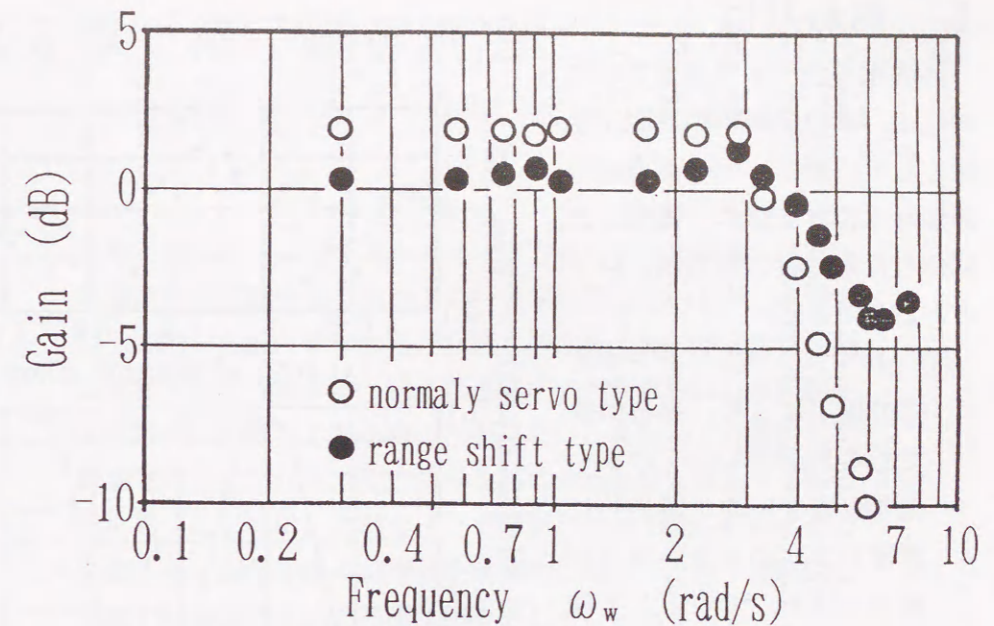


Fig.2-15 Frequency characteristics of level gauge

4. 振動水面の測定

デジタル・シミュレーションならびに模擬面の周波数応答試験により、試作した水位計の性能評価を行い良好な結果を得た。そこで、実際に変動している水面の水位測定を行った。Fig.2-16に測定結果の一例を示す。グラフ中の誤差は、波が式(2.7)の波動方程式を満足していると仮定し、次のようにして求めた。

$$W(t) = A \cdot \sin\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad (2.7)$$

ここで、水位計は常にある一点の水位を測定しているものとし、式中の x をゼロとおけば、式(2.7)は次式となる。

$$W(t) = A \cdot \sin\left(\frac{t}{T}\right) \quad (2.8)$$

よって、測定誤差は式(2.8)で求められる値と、実測値との差となる。

グラフからわかるように、水位変動の激しい部分では誤差が大きいものの、水面変動の動的測定が可能である。なお、誤差の要因としては、水面の傾斜角によるものと考えられる。

5. おわりに

浅底水槽法や水理模型実験における、水位変動の動的測定手法として、新しいサーボ方式の非接触水位計を試作、提案した。試作した水位計の特徴は、以下のとおりである。

- (1) レンジシフト・サーボ方式の採用により、高分解能であるが測定レンジの狭い光学センサーを、等価的に測定レンジの大きい高分解能の光学センサーとして使用することが可能となった。
- (2) 測定前に光学センサーの距離検出特性の校正を行い、校正値を算出することにより、光学センサーの非線形特性を線形化する。このため、光学センサーの距離検出特性の線形性が向上した。
- (3) レンジシフト・サーボ方式の採用により、同等性能の送り機構を使用しても、従来の純サーボ方式の水位計と比較して、高周波、高振幅の水位変動の測定が可能となった。

また、レンジシフト・サーボ方式の調整条件として、デジタル・シミュレーションによりヒステリシス幅 W_h の設定可能な範囲を求めた。ヒステリシス幅 W_h を調整条件に合致するよう設定し、模擬面を用いた周波数応答試験を行った結果、従来のサーボ方式のものに比べ、高周波、高振幅の水位変動の測定が可能であることが確認された。また、水位の動的測定を行った結果、調整条件を満足する範囲であれば、測定誤差は $\pm 0.1\text{mm}$ 以内であり、浅底水槽実験や水理模型実験における水位変動の動的測定手法として有効であることが判明した。

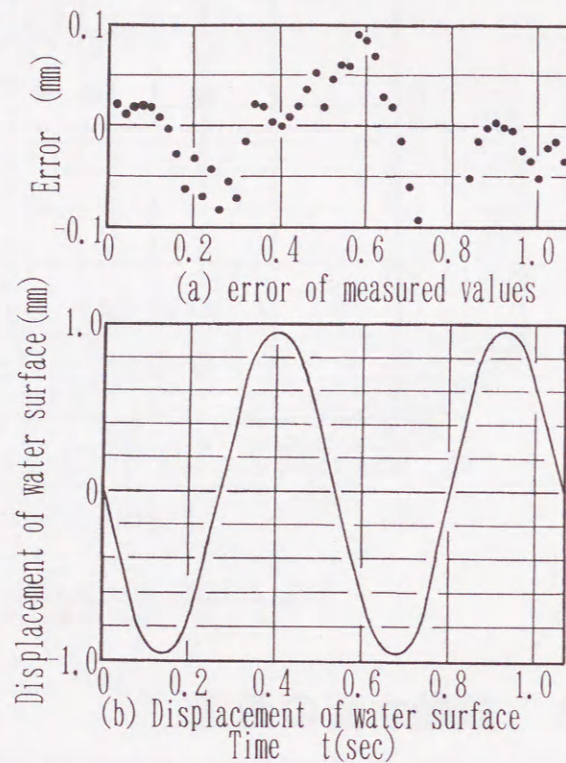


Fig.2-16 Measurement results of waving water surface

第3章 格子縞透過法による水面形状計測システムとその高精度化

前章で述べたレンジシフト・サーボ方式による光学式水位計は、高精度かつ追従性良く水面上の一点を計測しているが、本章では広範囲の水位、すなわち、浅底水槽内部全面の水面形状を測定する手法を提案する。格子縞透過法の測定原理は、水槽底面の拡散面に設置した格子縞が水面における屈折により変形して観測されることから、その歪みを基に水面形状を算出するものである。はじめに、大判カメラで撮影した格子像を解析することにより、測定手法の有効性を実験的に確認した後、連続的な水面形状測定のための基礎的研究として、一次元イメージセンサーを用いた自動計測システムを構成した。また、格子縞の歪みを高精度に検出するため、格子像のエッジ部分における輝度の空間微分値をガウス関数で近似し、近似関数の各パラメータを最小二乗法によって推定する信号処理法を示し、測定の精度を向上させた。さらに、水面を模擬した透明物体の測定を行い、ガウス関数近似法によるエッジ検出手法を格子縞透過法に適用する有効性を確認した。最後に、浅底水槽内に設置したノズル内流れの水面形状測定結果を示し、実用性に対する検討を行っている。

1. はじめに

水深変化や水位変動など、水面形状を高精度に測定する手法は、浅底水槽実験や水理模型実験などの模型実験の精度向上や再現性の面から、種々の研究[1, 16, 26 ~ 28]が提案・研究されている。従来、高精度の水面形状測定においては、接触式サーボ水位計に代表される点測定が主になされており、広範囲の水面形状の測定の際には機械的走査により多点測定を行う必要があった。また、接触式サーボ水位計は、流体の流れに乱れを生じさせ、使用流体の温度変化や水質変化に伴う電気伝導度の変化、測定プローブの変質により測定誤差が発生する[11]ことが明らかとなっている。光学的手法による場合には、容易に広範

囲の水面形状測定が可能であるが、光源に平行光やスリット光等の特殊光源が必要な場合[29]が多く、光学系の設置にも困難がある。

そこで本章においては、特殊な光源を必要としない簡単な光学系を使用して広範囲の水面形状を高精度に測定する手法として、格子縞透過法を提案する。格子縞透過法とは、水槽底面に設置した拡散面上の格子を水面上方より観察し、水面形状変化による格子像の歪みを抽出し、簡単な幾何光学の演算手法により水面上の屈折点の水深と傾斜角を求める手法である。

本手法には以下のような特徴がある。

- (1) 流れを乱すことなく非接触で測定できる。
- (2) 格子縞は特徴付けを行うために使用され、縞の工作精度が測定精度に直接に影響しない。
- (3) 平行光線や点光源などの特殊光源を必要とせず、光学系の設置も比較的容易である。

一方、格子縞透過法は光学系内部に受光センサーが一つ存在する場合に適用可能であり、両眼視のような複数の受光センサーをもつ光学系に本手法を適用しても水面上での屈折点が一致せず、測定精度の向上には寄与しない。格子縞透過法の測定精度を向上させるには、特徴点としている格子縞のエッジ部分の検出精度を向上させる必要がある。そこで、格子縞のエッジ部分における輝度変化を空間微分し、微分輝度信号をガウス関数で近似してエッジ部分の位置を求める手法を提案する。このエッジ検出法はパラメータ推定を最小二乗法によって行っているため、微分輝度信号に含まれる外乱要素を平均化し、センサ画素間の情報を補間することにより、従来、画素間隔に等しかったエッジ検出精度を向上させることが可能となった。

以下に、エッジ検出にガウス関数近似法を採用した格子縞透過法の測定原理、透明アクリル模型を用いた有効性の確認実験結果、ならびに、実水面形状測定結果について報告する。

2. 格子縞透過法を用いた水面形状の測定原理と実験的検討

2.1 格子縞透過法の測定原理

石野らによって提案された格子縞透過法[30]は、水槽底面に設置した光学的拡散面上に透過率の大きく異なる2値格子を設置し、水面上方から観測した格子像の水面形状変化前後における差より像の歪みを抽出し、簡単な幾何光学に

より水面上の屈折点の水深と傾斜角を求める手法である。光学系には平行光線などの特殊光源を必要とせず、水槽下方より拡散面である底面を一様に照射する光源であれば良い。Fig.3-1に光学系の配置を示す。

水槽底面をX軸、水槽底面に垂直な光軸をZ軸、格子像観測用カメラの撮像面上をx軸とし、光軸と水槽底面との交点を原点Oとする。水槽底面から光学系レンズ主点までの距離をH、光学系レンズ主点から撮像面までの距離をh、変形前の底面上の特徴点を点P、点Pまでの距離を L_p 、点Pの撮像面上での結像位置をp、変形後の特徴点

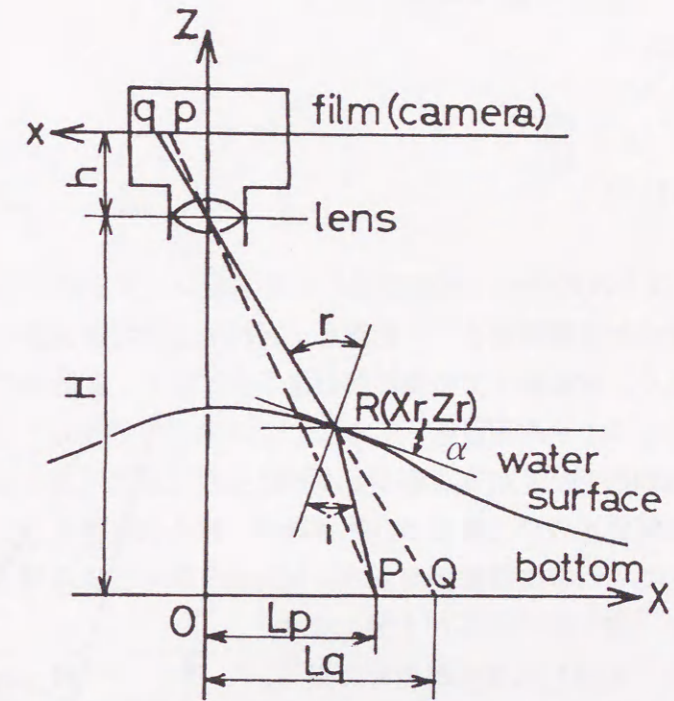


Fig.3-1 Schematic of the optical system

を点Q、点Qまでの距離を L_q 、点Qの撮像面上での結像位置をqとし、水面上の屈折点を点R(X_r, Z_r)、屈折点Rにおける傾斜角を α 、屈折点Rにおける入射角を i 、出射角を r とすると、幾何光学より以下の関係が成立する。

$$X_r = L_q - \frac{Z_r \cdot L_q}{H} \quad (3.1)$$

$$L_q = \frac{H}{h} q \quad (3.2)$$

$$L_p = \frac{H}{h} p \quad (3.3)$$

$$\tan(i + \alpha) = \frac{L_p - X_r}{Z_r} \quad (3.4)$$

$$\tan(r + \alpha) = \frac{L_q}{H} \quad (3.5)$$

$$\mu = \frac{\sin r}{\sin i} \quad (3.6)$$

以上の式中の、水槽底面から光学系レンズ主点までの距離H、光学系レンズ主点から撮像面までの距離h、屈折率 μ は実験装置のパラメータとして既知であり、撮像面上での変形前の格子像位置p、変形後の格子像位置qは観測用カメラにより測定可能である。

次に、近接する2個の屈折点の関係について考える。Fig.3-2に、その位置関係を示す。いま、格子縞の間隔が十分に小さく、水面形状変化が極めて滑らかであるとすれば、水面上の2個の屈折点R(X_r, Z_r)とR'(X_r', Z_r')の関係は屈折点Rにおける傾斜角 α を用いて、次式で近似可能である。

$$Z_r' \approx Z_r + (X_r' - X_r) \cdot \tan \alpha \quad (3.7)$$

式(3.1)～(3.7)を整理すれば、水面上の屈折点R'の水深 Z_r'

は、点Rの水深 Z_r をもとに次式で算出できる。

$$Z_r' = \frac{(L_q' - L_q) \cdot \tan \alpha + Z_r \left(\frac{L_q}{H} \tan \alpha + 1 \right)}{1 + \frac{L_q}{H} \tan \alpha} \quad (3.8)$$

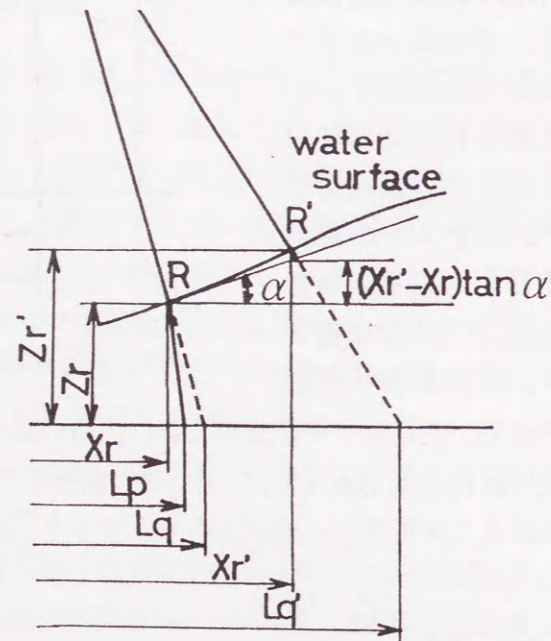


Fig.3-2 Relationship between two refracting points in the model

$$\tan \alpha = \frac{\mu \cdot \sin K_1 - \sin K_2}{\mu \cdot \cos K_1 - \cos K_2} \quad (3.9)$$

$$L_q' = \frac{H}{h} q' \quad (3.10)$$

$$K_1 = \arctan \left(\frac{L_p - L_q}{Z_r} + \frac{L_q}{H} \right) \quad (3.11)$$

$$K_2 = \arctan \left(\frac{L_q}{H} \right) \quad (3.12)$$

格子縞透過法においては、式(3.7)から明らかなように、水面上の少なくとも一点の水深と傾斜角を知る必要がある。浅底水槽実験においては、水槽の上流部に「よどみ領域」と呼ばれる傾斜角が零、水深が既知で変動しない領域があるため、このよどみ領域の傾斜角と水深を水深計算の初期値として用いることが可能である。

2.2 大判カメラを用いた純流体素子内の水面形状の測定

格子縞透過法による水面測定の有効性を確認するため、水面上方に 6×7 判の大判カメラを設置し、Fig.3-3のような光学系により附着型純流体素子内の水面形状の測定を行った。測定例を以下に示す。

第1段階として、浅底水槽に純流体素子を設置し、水槽に水を入れない時の格子像を撮影する。その時の写真を、Photo.3-1に示す。次に、浅底水槽に水を入れて実験し、同様に格子像を撮影する。この時、浅底水槽上流部のよどみ領域の水深を水位計で測定する。よどみ領域では、理論上流速がゼロであり、傾斜角もゼロとした。純流体素子内の格子像の例を、Photo.3-2, 3-3に示す。水面形状の変化により、格子縞が変形して観察される様子がわかる。Photo.3-2, 3-3に示した写真のネガを万能投影器の微動載物台上に設置し、マイクロメータヘッドにより格子縞のエッジ部分の読み取りを行った。写真の読み取りを自動化するため、高倍率の光学系を用いた自動読み取り装置の開発を試みたが、ネガのたわみのない保持方法や傷の発生などの光学的外乱の発生を除去することが困難であり、また、高倍率の読み取り光学系の移動によって得られ

6 × 7 camera
f=50mm
F=11
shutter speed 1/60sec
H=229.6mm

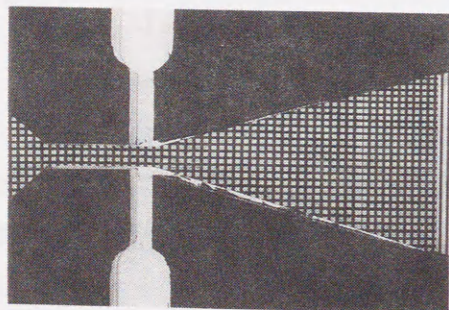
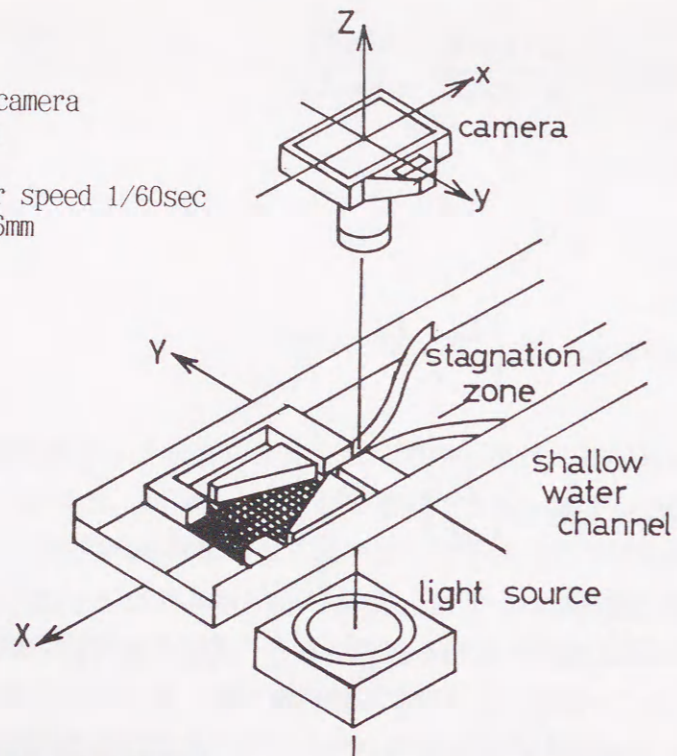


Photo.3-1 Image of the standard grid

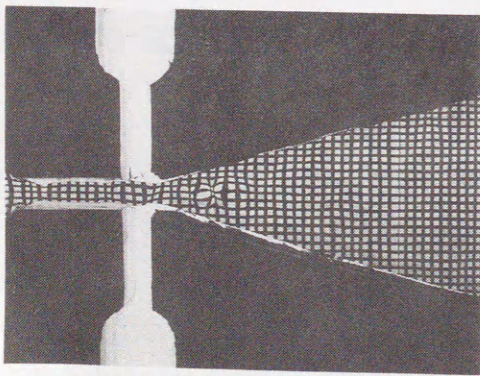


Photo.3-2 Image of the modulated grid

Fig.3-3 Location of components of the optical system

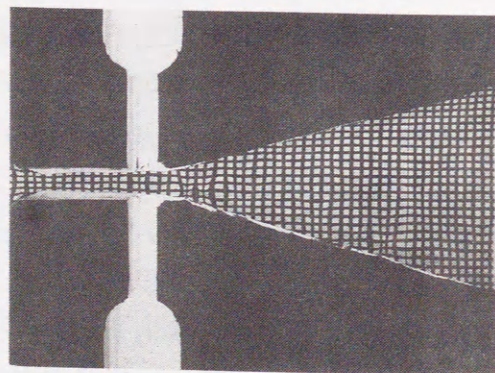
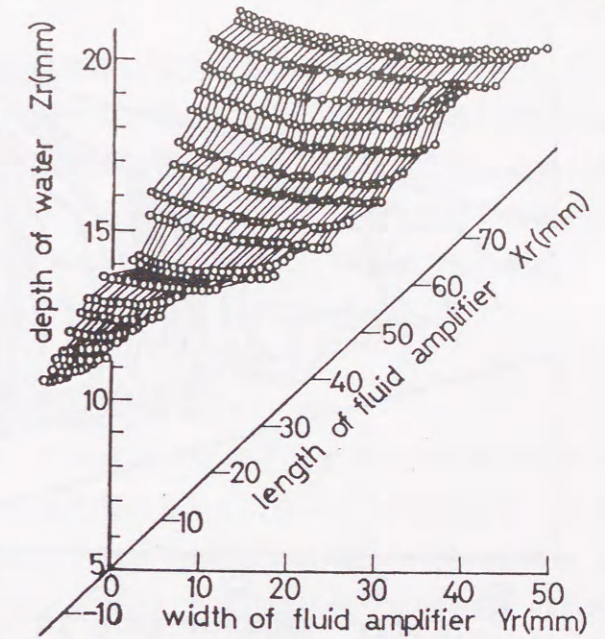


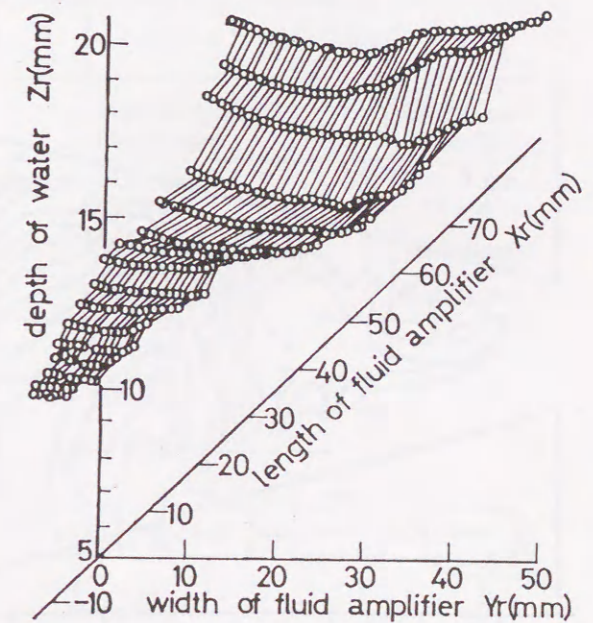
Photo.3-3 Image of the modulated grid

る区間的画像信号の波形接続や移動台の走行ガタの問題により、十分な精度が得られなかった。検出器を移動させて区間的情報を収集し、その後、波形接続時に走行ガタの影響などを取り除く手法は、最近の平らの研究[31,32]によって確立された。今後、この手法を適用すれば、写真ネガの自動読み取りも可能になると考えられる。

万能投影器による写真ネガの解析を行って純流体素子内の水面形状を算出し、3次元表示したものがFig.3-4である。Fig.3-4(a)はPhoto.3-2の、Fig.3-4(b)はPhoto.3-3の結果を示している。また、等高線図をFig.3-5に示す。同様に、Fig.3-5(a)はPhoto.3-2の、Fig.3-5(b)はPhoto.3-3の結果を示している。水面形状測定結果や等高線図より、純流体素子内の水面の起伏や渦の発生箇所が確認できる。このように、水面形状の変化が滑らかで格子縞のエッジ部分の欠落がない場合に、提案する格子縞透過法は有効であることが判明した。

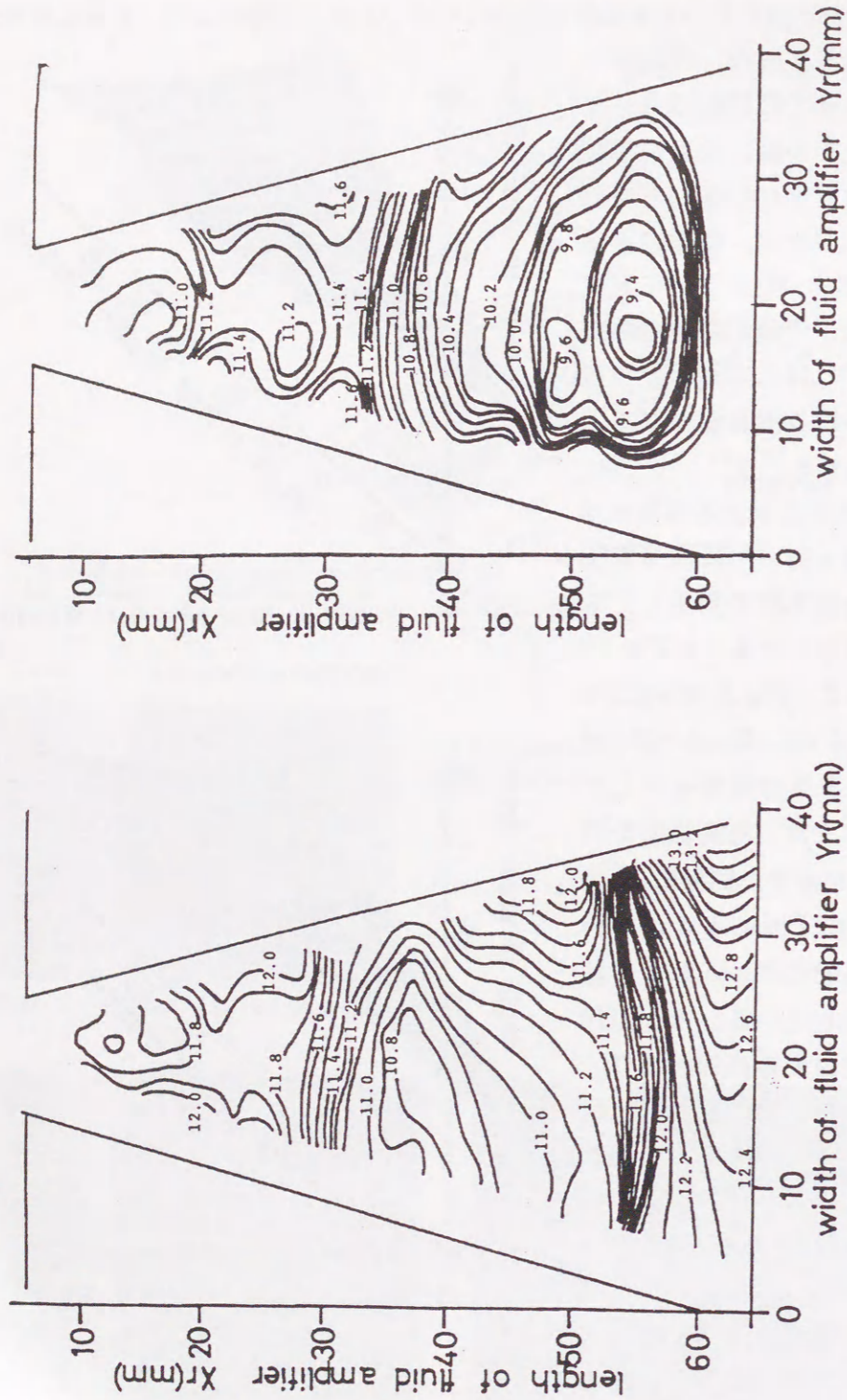


(a) Case of Photo.3-2



(b) Case of Photo.3-3

Fig.3-4 Water depth calculated from modulated image



(a) Based on Fig.3-5(a) (Photo.3-2)

(b) Based on Fig.3-5(b) (Photo.3-3)

Fig.3-5 Contour map of water surface

3. 格子縞透過法を用いた水面形状計測システムの試作

前節で、格子縞透過法は水面形状測定に有効であることが示されたが、先の検証実験のように写真カメラの使用では、動的に変化する水面形状の連続的な測定が困難である。そこで、格子縞観測用カメラとして比較的空間分解能の高い二次元イメージ・センサー・カメラを試作し、コンピュータを用いた解析システムを採用して、水面形状計測システムを試作した。以下に、その構成と、測定精度向上のための新しいエッジ検出手法について述べる。

3.1 水面形状計測システムの構成

Table 3-1に、本研究で使用した光学系の仕様を示す。試作した二次元イメージ・センサー・カメラは、水槽上部のXYZステージ上に設置され、カメラの光軸と水槽底面上に配置された2値格子のいずれかのエッジが一致するように位置調整される。水槽底面上に配置された2値格子は、水槽下部より散乱光により照射される。

イメージ・センサーより出力された画像信号は、Fig.3-6に示すブロック図のように増幅された後、サンプル・ホールドされ、A/D変換器によってデジタル信号に変換された後に外部メモ

Table 3-1 Specification of the optical system

Light source	Tungsten halogen lamp	150 W
Lens	Focal length Diaphragm	85-210 mm 3-8-22
CCD image sensor	Pixel size Pitch Numbers of pixels	7 × 7 μm 7 μm 5000 (line)
Grating	Ronchi grating	0.51 lp/mm

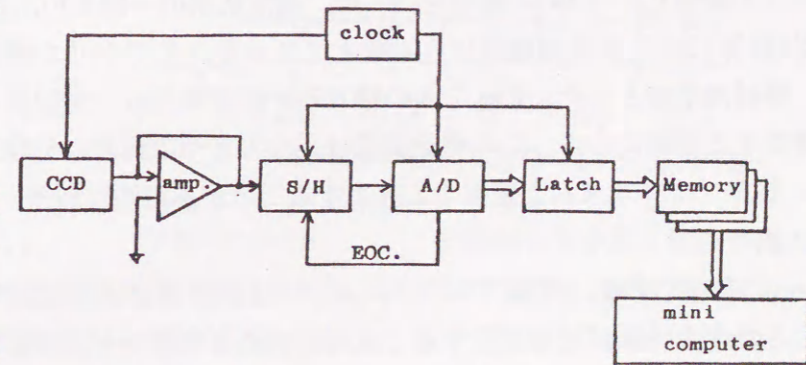


Fig.3-6 Block diagram of measuring system based on CCD image sensor

りに格納される。格納された信号はミニ・コンピュータにより呼び出され、水深計算に使用される。

水深計算の際には、イメージ・センサーによって得られた水面形状変化前後の画像信号から、2値格子のエッジ部分を特徴点として抽出する。エッジ位置は、一般の画像処理で行われるように、画像輝度信号の微分値が極値をとる点として得られる。本章では、イメージ・センサーの奇数画素と偶数画素間の感度の不一致による影響を軽減するため、微分輝度信号を次式に示す中央差分法によって演算する。

$$\frac{dI(n)}{dx} \approx \frac{I(n+1) - I(n-1)}{2} \quad (3.13)$$

ここで、 $I(n)$ はイメージ・センサの n 番地の輝度信号を表す。

水面形状変化前後の画像信号を外部メモリに記憶させ、それぞれの微分画像信号より特徴点であるエッジ部分の画素番地 p 、 q を求め、式(3.8)に代入して水深計算を実行する。

試作測定システムでは、空間分解能の高いセンサーを用いることを重視しているため、一次元イメージ・センサーを撮像素子として採用している。そのため、一回の処理では XZ 平面の水深情報しか得ることができない。そこで、二次元水深情報が必要な場合には、カメラが設置されている XYZ ステージを用いてカメラを Y 方向に走査し、処理を繰り返すことにより情報を蓄積する。

3.2 透明アクリル模型の測定による性能評価

試作形状計測システムの性能を評価するために、Fig.3-7に示すように透明アクリル模型($\mu=1.49$)の測定を行った。測定結果の一例をFig.3-8に示す。

形状計算に使用する初期値は、光軸上($X=0$)のアクリル模型の厚みを用い、傾斜角は零とした。Fig.3-8の●で示す測定誤差は、光軸から離れるに伴い増加する傾向にある。この測定誤差は、次の2つの誤差に分類可能である。

- (a) 演算アルゴリズム上発生する除去することが不可能な誤差
- (b) 画像処理上発生する誤差

Fig.3-8の実線は、演算アルゴリズム中の逐次計算により発生する誤差を示す。この逐次計算誤差は近接する2点の屈折点の位置を一次の線形関数で近似することによって生じており、本手法においては発生を回避することが不可能である。逐次計算誤差を軽減するためには、格子定数を増加させ近似精度を向

上させることが有効であると考えられる。

一方、Fig.3-8の実線と●との差は画像処理上発生する誤差と考えられる。本手法においては、特徴点を2値格子のエッジ部分としているため、エッジ検出精度により形状測定の精度が左右される。式(3.13)に示した中央差分法により得られた微分輝度信号の極値を与えるイメージ・センサー画素番地をエッジ位置とすると、エッジ検出精度は画素間隔に等しく、エッジ位置は離散値的にしか得られない。

そこで、エッジ位置検出精度を向上させ、画像処理上発生する誤差を軽減させるため、微分輝度信号を連続関数に近似し、エッジ検出を精度良く行う手法を提案する。

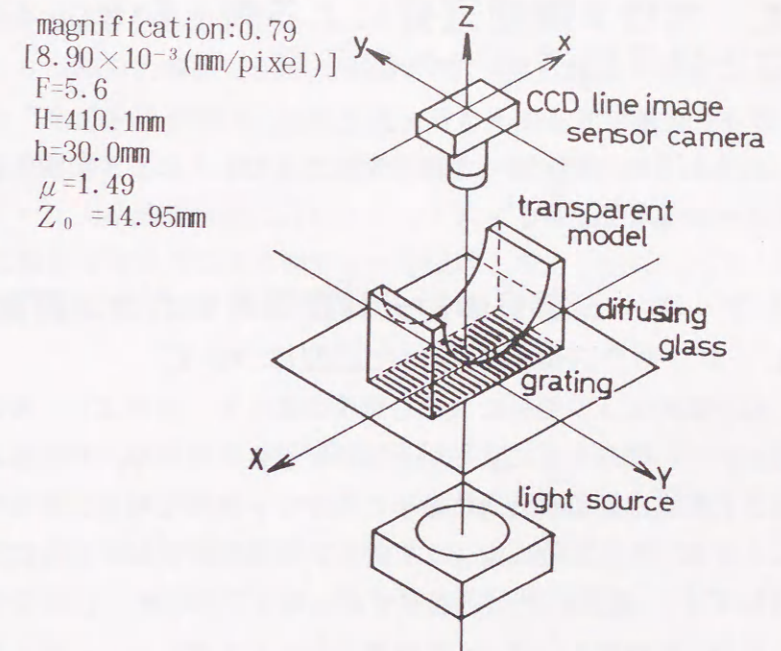


Fig.3-7 Location of components used for calibration

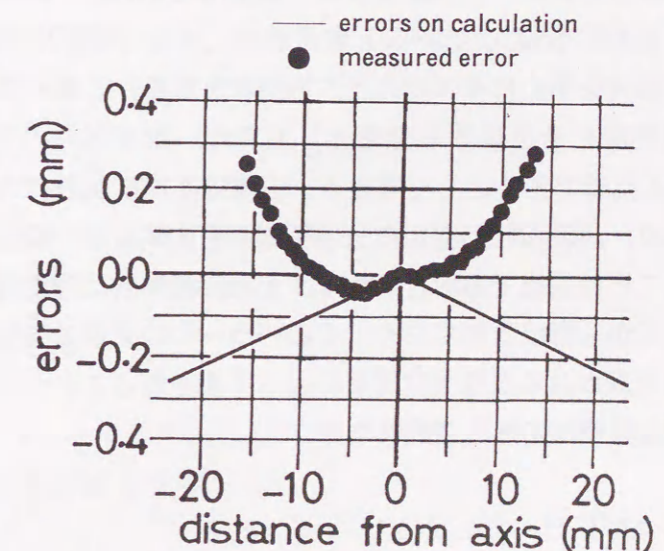


Fig.3-8 Experimental results of the measurement

4. ガウス関数近似による新しいエッジ検出法の提案と格子縞透過法への応用

エッジ検出精度を向上させて測定誤差を軽減させるため、空間的に離散値的に得られる微分輝度信号を連続関数に近似し、エッジ位置を高精度に検出する手法を提案する。

4.1 エッジ部分の微分輝度信号のガウス関数による近似

4.1.1 ガウス関数を用いた近似について

格子縞のエッジ部分における輝度の変化を、次のように考える。水槽下方に置かれた一様な光源により格子縞が照射されており、その結果、水面上方に設置された検出面積が十分に微小な光学センサーで暗部分から明部分に向かってエッジ部分を空間的に走査して得られる輝度変化は、完全に光が到達しない部分は「0」、完全に光が透過している場合には「1」と正規化でき、そのエッジ部分での輝度変化は一つの確率過程として考えることができる。つまり、輝度信号の変化を「0」から「1」へと変化する確率分布関数として考える。いま、エッジ部において回折現象などが生じておらず、暗から明、明から暗への変化が同様に発生していると考えれば、エッジ部分では0.5となり、また、エッジ部分を中心にその変化は左右対象となる。これらのことから、エッジ部分の輝度変化を正規確率分布として考え、輝度信号の空間微分値の信号 $I_d(x)$ を正規確率密度として考える。正規確率密度関数はガウス関数として知られており、輝度信号の空間微分値を確率密度関数を一般化したガウス関数で近似することは妥当であると考えられる。また、光学的に理由付けを行えば、像が複数の光点から構成されており、その一つ一つの光点の強度が一般に2次元ガウス関数で表される点像強度関数によって表されることから、ガウス関数による近似は妥当であると考えられる。

ガウス関数は一般に式(3.14)で示される。

$$I_d(x) = f(x, a_1, a_2, a_3) = a_1 \cdot \exp\left\{-a_2(x - a_3)^2\right\} \quad (3.14)$$

ここで、エッジ検出にガウス関数近似を用いた場合には、式(3.14)のガウス関数の3つのパラメータ a_1, a_2, a_3 はそれぞれ次のような物理的意味をもつ。

a_1 : あるエッジ部分における輝度の微分値の最大値

a_2 : エッジ部分の輝度変化の度合いを表す数値。大きいほど変化が急峻

a_3 : エッジ部分の位置を表す数値

このように、エッジ部分の輝度変化の空間微分値をガウス関数で近似し、その3つのパラメータを最小二乗法によって推定することにより、電気的あるいは光学的外乱を平均化することにより除去でき、また、離散値的に得られるイメージ・センサーの出力を連続関数に近似することによる補間効果が得られる。その結果、従来の微分輝度信号の最大値をエッジ位置とする手法に比べて、高精度にエッジ部分の位置を検出することが可能で、その位置はパラメータ a_3 で与えられる。

4.1.2 最小二乗法によるパラメータの決定手法

式(3.14)で示されるガウス関数の3つのパラメータを推定するため最小二乗法を用いるが、ガウス関数が非線形関数であるために、計算機を用いた繰り返し数値計算による「最小二乗線形Taylor微分補正法」[33]によって計算を行う。

式(3.14)で示されるガウス関数の3つのパラメータ a_1, a_2, a_3 は独立であるとする。正しいパラメータ a_1, a_2, a_3 がすでに判明していると仮定すれば、実測した n 個の輝度の空間微分値 $I_{d,i}$ との誤差 e_i は次式で示される。ここで、添字 i は、 i 番目のデータであることを示す。

$$e_i = f(x_i, a_1, a_2, a_3) - I_{d,i} \quad (i = 0, n) \quad (3.15)$$

しかし、実際にはパラメータの真の値は不明で、その初期推定値 a_1^0, a_2^0, a_3^0 がわかっているだけなので、その誤差 E_i は次式となる。

$$E_i = f(x_i, a_1^0, a_2^0, a_3^0) - I_{d,i} \quad (i = 0, n) \quad (3.16)$$

式(3.14)の関数とパラメータ a_1^0, a_2^0, a_3^0 に微小の推定誤差がある場合の関数との間には、次式の近似が成立する。

$$\begin{aligned} f(x, a_1, a_2, a_3) & \approx f(x, a_1^0, a_2^0, a_3^0) \\ & + \frac{\partial f}{\partial a_1} (a_1 - a_1^0) + \frac{\partial f}{\partial a_2} (a_2 - a_2^0) + \frac{\partial f}{\partial a_3} (a_3 - a_3^0) \end{aligned} \quad (3.17)$$

式を簡略化するために、次の量を導入する。

$$\delta a_k = a_k - a_k^0, \quad \frac{\partial f_i}{\partial a_k} = \left. \frac{\partial f}{\partial a_k} \right|_{x=x_i, a_k=a_k^0} \quad (3.18)$$

式(3.17)の両辺から実測した輝度の空間微分値を引き、真の関数との誤差 e_i ならびに推定誤差を含む関数との誤差 E_i を求めると、両者には次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} f(x_i, a_1, a_2, a_3) - I_{d,i} \\ \equiv f(x_i, a_1^0, a_2^0, a_3^0) - I_{d,i} \\ + \frac{\partial f_i}{\partial a_1} \delta a_1 + \frac{\partial f_i}{\partial a_2} \delta a_2 + \frac{\partial f_i}{\partial a_3} \delta a_3 \quad (i = 0, n) \end{aligned} \quad (3.19)$$

よって

$$e_i \equiv E_i + \frac{\partial f_i}{\partial a_1} \delta a_1 + \frac{\partial f_i}{\partial a_2} \delta a_2 + \frac{\partial f_i}{\partial a_3} \delta a_3 \quad (i = 0, n) \quad (3.20)$$

真の関数と実測値との誤差 e_i の平方和 S を次式で定義する。

$$S \equiv \sum_{i=0}^n e_i^2 \equiv \sum_{i=0}^n \left(E_i + \frac{\partial f_i}{\partial a_1} \delta a_1 + \frac{\partial f_i}{\partial a_2} \delta a_2 + \frac{\partial f_i}{\partial a_3} \delta a_3 \right)^2 \quad (3.21)$$

パラメータの真の値が求めれば式(3.21)の関数は最小値をとり、その時、式中の全ての偏微分係数がゼロになることから、次の関係が導かれる。

$$\frac{\partial S}{\partial (\delta a_k)} = 2 \sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial a_k} E_i + \frac{\partial f_i}{\partial a_k} \frac{\partial f_i}{\partial a_1} \delta a_1 + \frac{\partial f_i}{\partial a_k} \frac{\partial f_i}{\partial a_2} \delta a_2 + \frac{\partial f_i}{\partial a_k} \frac{\partial f_i}{\partial a_3} \delta a_3 \right) = 0 \quad (k = 1, 2, 3) \quad (3.22)$$

この方程式を行列形式に書き換えて、次の正規方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial a_1} \right)^2 & \sum_{i=0}^n \frac{\partial f_i}{\partial a_1} \frac{\partial f_i}{\partial a_2} & \sum_{i=0}^n \frac{\partial f_i}{\partial a_1} \frac{\partial f_i}{\partial a_3} \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial f_i}{\partial a_2} \frac{\partial f_i}{\partial a_1} & \sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial a_2} \right)^2 & \sum_{i=0}^n \frac{\partial f_i}{\partial a_2} \frac{\partial f_i}{\partial a_3} \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial f_i}{\partial a_3} \frac{\partial f_i}{\partial a_1} & \sum_{i=0}^n \frac{\partial f_i}{\partial a_3} \frac{\partial f_i}{\partial a_2} & \sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial a_3} \right)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta a_1 \\ \delta a_2 \\ \delta a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} - \sum_{i=0}^n \frac{\partial f_i}{\partial a_1} E_i \\ - \sum_{i=0}^n \frac{\partial f_i}{\partial a_2} E_i \\ - \sum_{i=0}^n \frac{\partial f_i}{\partial a_3} E_i \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

この方程式の解 (δa_1 , δa_2 , δa_3) は、初期推定値に対する補正值の第1近似である。十分に小さい正数 ε を考え、

$$|\delta a_k| > \varepsilon \quad (k = 1, 2, 3)$$

であれば、パラメータの推定値を

$$a_k^0 \equiv a_k^0 + \delta a_k \quad (k = 1, 2, 3)$$

で置換して、同様の手順を繰り返すことにより、真の値に充分近いパラメータの推定を行うことができる。

この手法の収束の速さや安定性は、初期推定値の与え方による。初期推定値が真の値に充分近い値でなければ、計算の収束は補償されない。エッジ部分の輝度の空間微分値を近似する時の初期推定値は、次のように定めた。

a_1^0 : 輝度の空間微分値の最大値

a_2^0 : 輝度の空間微分値の最大値に e^{-1} を乗じた値に最も近い値を与える画素番地と、輝度の空間微分値の最大値を与える画素番地との差の逆数

a_3^0 : 輝度の空間微分値の最大値を与える画素番地

初期推定値 a_3^0 は従来の手法でエッジ位置としていた採用していた量であり、このことから提案する手法は従来の手法と比較して、精度良くエッジ位置を推定できることが明白となった。

4.2 ガウス関数近似によるエッジ位置検出に関する実験的検討

格子縞のエッジ部分における輝度変化の空間微分値をガウス関数で近似する手法の有効性を、実験的に確認した。その結果を以下に示す。

Fig.3-9に格子縞の一つのエッジ部分の輝度変化を示す。イメージ・センサーの画素番地の増加とともに暗部分から明部分へと移っており、輝度信号出力が緩やかに増加していることがわかる。この輝度変化を正

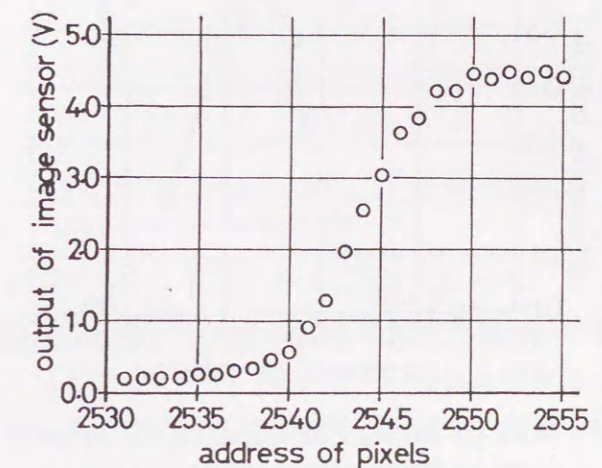


Fig.3-9 Direct output signal of an edge detected by the image sensor

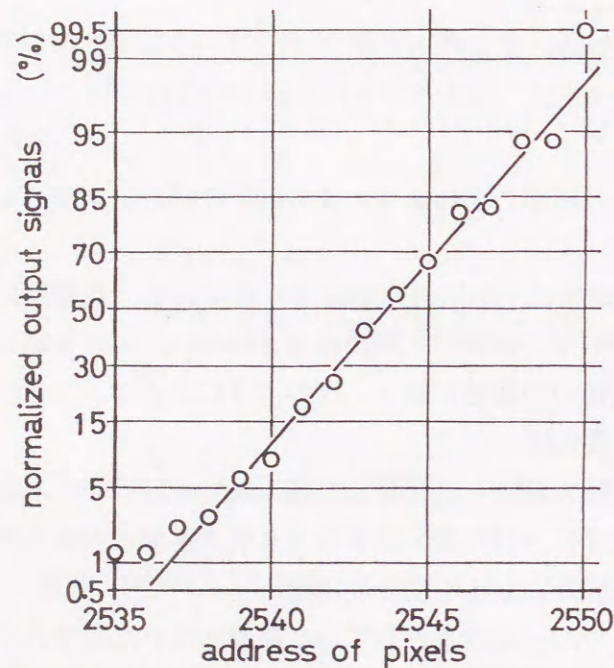


Fig.3-10 Normalized output signal obtained from Fig.3-9

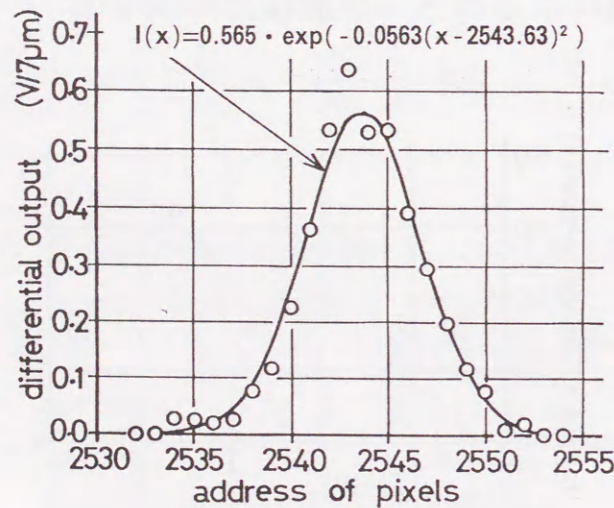


Fig.3-11 Differential output signal at an edge showing the Gaussian function used

定を行った。その結果をFig.3-11に示す。パラメータ推定を行ったガウス関数と輝度変化の空間微分値とは良く一致しており、近似の妥当性が認められる。また、近似関数を用いることにより、微分値の外乱的誤差を平均化することが

規確率紙上に描き、輝度変化が正規確率分布に合致しているかの検証を行った。

Fig.3-10に示すように、5%から95%の間で正規確率紙上で直線となり、輝度変化が正規確率分布にほぼ一致していることがわかる。5%以下、95%以上の輝度信号については正規確率分布と一致していないが、これは、正規確率分布関数が無限小から無限大の範囲で「0」から「1」へと変化するのに対して、輝度の変化が有限範囲で起こるためと考えられる。

輝度変化のほとんどの部分が正規確率分布に合致していることから、輝度変化の空間微分値を正規確率密度関数と同じ意味をもつガウス関数で近似可能であることが実験的に検証されたので、先の「最小二乗線形Taylor微分補正法」による逐次計算を行い、パラメータ推

確認できた。

格子縞透過法では水面形状の変化や水の有無による縞の歪みを観察するが、格子像の歪みは水面での屈折によって生じている。たとえば、水の有る状態で観察した格子のエッジ位置は、水が無い状態で観察したエッジ位置に比べて、光軸から離れるほど遠方に移動したように見え、あたかも格子全体が浮き上がったように見える。この「浮き上がり現象」のために、撮像面上での格子の像はピントがずれた状態で結像されてMTFの低下、すなわち、解像度の低下が発生する。解像度低下時のエッジ検出精度を検討するため、格子縞とイメージ・センサー・カメラとの距離だけを変化させて模擬的に「浮き上がり現象」を発生させ、同一エッジ部分を繰り返して測定してエッジ位置の標準偏差を求めた。その結果をFig.3-12に示す。図から明らかなように、従来の輝度微分値の最大値をエッジ位置とする手法と比較して、ガウス関数近似法を用いたエッジ位置検出手法は、「浮き上がり現象」による解像度の低下に対しても、大きな誤差を発生することなく良好な精度でエッジ位置を検出していることがわかる。

以上の結果より、格子縞のエッジ部分における輝度変化を確率過程と考え、輝度変化の空間微分値を確率密度関数と同形のガウス関

数で近似する手法は、エッジ位置の検出に有効であることがわかった。この手法は、パラメータ推定を最小二乗法で求めているため、電気的あるいは光学的外乱による誤差の影響、また、CCDイメージ・センサーに特有な現象としてあげられる画素間の感度不一致による微分輝度信号の外乱的変動の影響を軽減できる。

さらに、ガウス関数が連続関数であることからイメージ・センサーの空間的離散値画像データを補間することが可能となり、空間的分解能を画素間隔以下にすることが容易になった。また、格子縞透過法で発生する「浮き上がり現

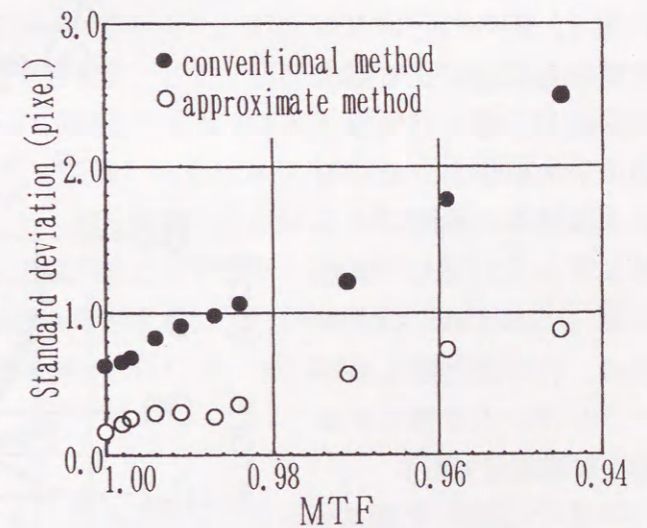


Fig.3-12 Comparison of proposed method and conventional method

象」による解像度の低下に対しても、その影響を軽減して良好な精度でエッジ位置の検出が行えることが判明した。

4.3 透明アクリル模型の測定による精度向上の確認

ガウス関数近似法によるエッジ位置検出法を格子縞透過法に適用し、形状が既知である透明アクリル模型の形状測定を行い、測定精度の向上に対する実験的考察を行った。形状測定の一例をFig.3-13に示す。図中の○はガウス関数近似法による形状測定結果、●は輝度微分値の最大値をエッジ位置とする従来の手法による結果である。また、実線によって示されている誤差は、格子縞透過法のアルゴリズム上で発生する逐次計算誤差である。

エッジ位置の検出にガウス関数近似法を採用することにより、従来の手法に比べて画像処理中に発生する誤差が大幅に軽減されており、形状測定の誤差が減少しているこ

とがわかる。また、その誤差は格子縞透過法を用いる上で避けることの不可能な逐次計算誤差に近づいており、エッジ位置の検出や形状算出の処理は良好な精度で行われていることが明らかとなった。これらの結果より、測定時に水槽底面に設置する格子縞の格子定数を十分に増加させることにより、測定誤差を

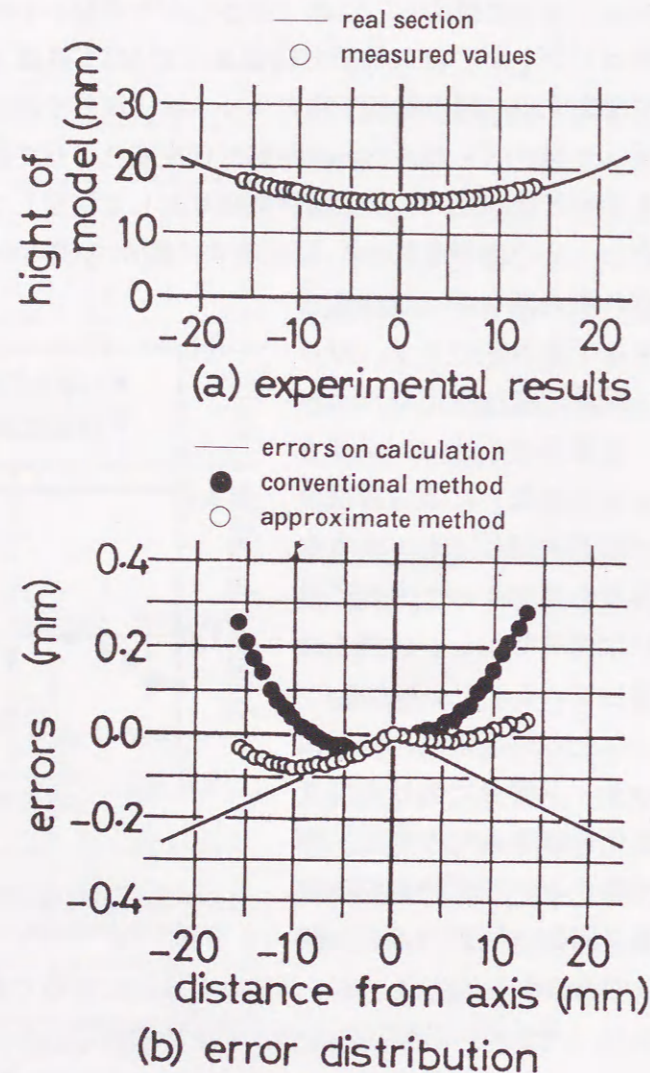


Fig.3-13 Experimental results obtained from the resin model

±0.1mm以内とすることが可能であり、本章で提案するガウス関数近似によるエッジ検出法を用いた格子縞透過法は、浅底水槽実験などに対して十分有効であることが判明した。

5. 新しいエッジ検出法を用いた透明物体形状計測システムによる水面の測定

透明アクリル模型の形状測定によって本手法の有効性が確認されたので、回転円筒内に発生する強制回転渦と浅底水槽のノズル内流れの測定を行い、水面測定への応用の可能性を確認した。

5.1 回転円筒内強制渦の測定

水面形状測定へ応用する第1段階として、形状が既知である水面形状の測定を行うことにより、測定精度の検討を行った。水面形状の再現性が良く、その形状を容易に確認できる測定対象水面として、回転円筒内の強制回転渦を検証実験に用いた。内径140mmの透明底面を有する回転円筒内に透明粘性流体($\mu=1.52$)を満ち、円筒外周に設置した歯付きベルトにより回転させ、定常状態に達した後に測定を行った。回転円筒内の流体は、その表面が放物面となることが知られており、回転円筒の軸と円筒底面との交点を原点とし、静止状態の初期水位を Z_0 、円筒の回転角速度を ω 、円筒内径を $2R$ とすれば、定常状態に達した後の点 (X, Y) の水深 $Z(X, Y)$ は、式(3.26)で与えられる。

$$Z(x, y) = Z_0 + \frac{\omega^2}{2g}(x^2 + y^2) - \frac{\omega^2 R^2}{4g} \quad (3.26)$$

Fig.3-14に、円筒直径上の液体面表面形状の測定例を示す。図中の実線は式(3.26)により求めた計算値である。図から測定誤差は±0.1mmであり、模擬実験と同様の精度が得られ十分実用に値することが判明した。

Table 3-2 Condition of measurement

magnification	0.36 [1.94×10^{-2} (mm/pixel)]
Lens	F=11
Distance	H=797.6mm h=30.0mm
Refractive index	$\mu=1.52$
Cylinder	R=70.0mm $\omega_w=80$ (rpm)

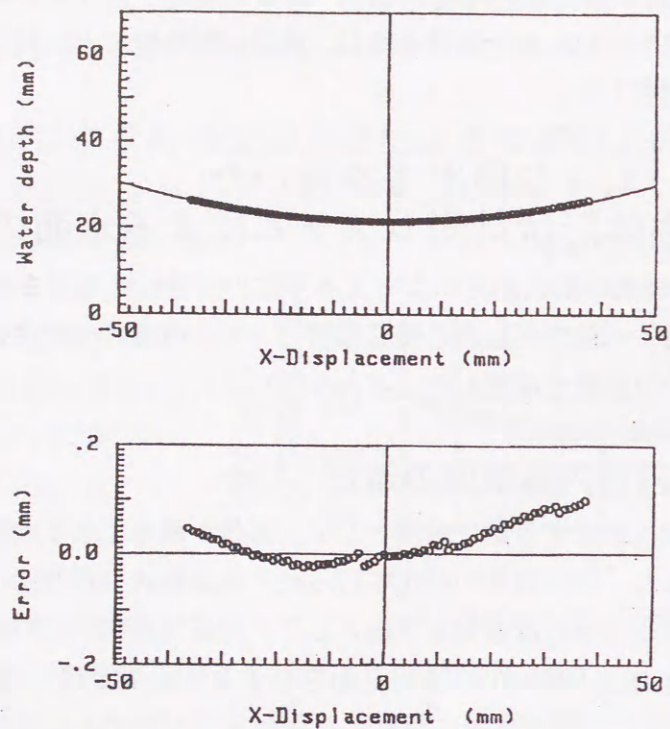


Fig.3-14 Experimental results obtained from the water surface of a rotating vessel

5.2 水槽内のノズル内流れの測定

水槽実験への応用として、Fig.3-15に示すように水槽内に先細ノズルを設置し、ノズル内の水面形状の測定を行った。試作したイメージ・センサー・カメラは一次元ラインセンサーを用いているために、一度の測定ではX軸方向に平行な直線の水面形状しか計測することができない。そこで、カメラを機械的にY軸方向に機械的に走査してデータを

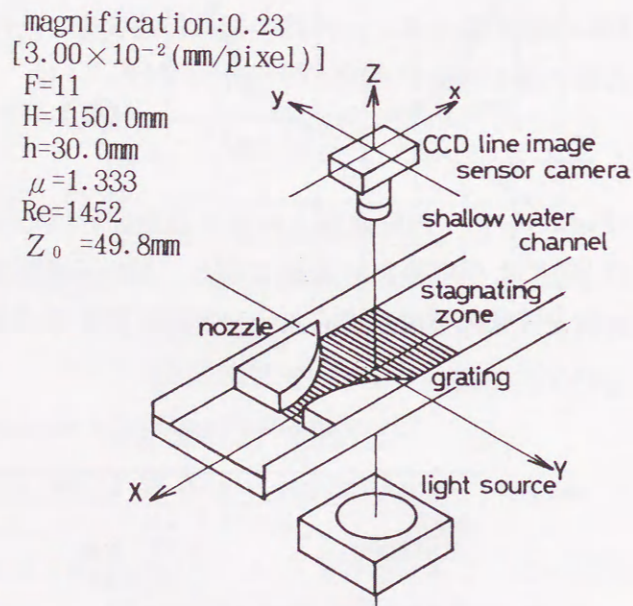


Fig.3-15 Location of components of the optical system for measurement of the shallow channel

蓄積し、2次元水深を測定した結果をFig.3-16に示す。また、Fig.3-17にはX軸上の水位を基に、アナロジーを用いて空気流の圧力比を求めた結果である。良く傾向が一致しており、水槽実験への適用の可能性が確認された。この結果より、定常流の場合には機械的走査により、広範囲の水深を測定可能であることが確認された。今後、ハイビジョンカメラのように空間的高分解能を有する2次元撮像素子の開発が進めば、これを用いて一度に水面全体の形状測定が可能になると考えられる。

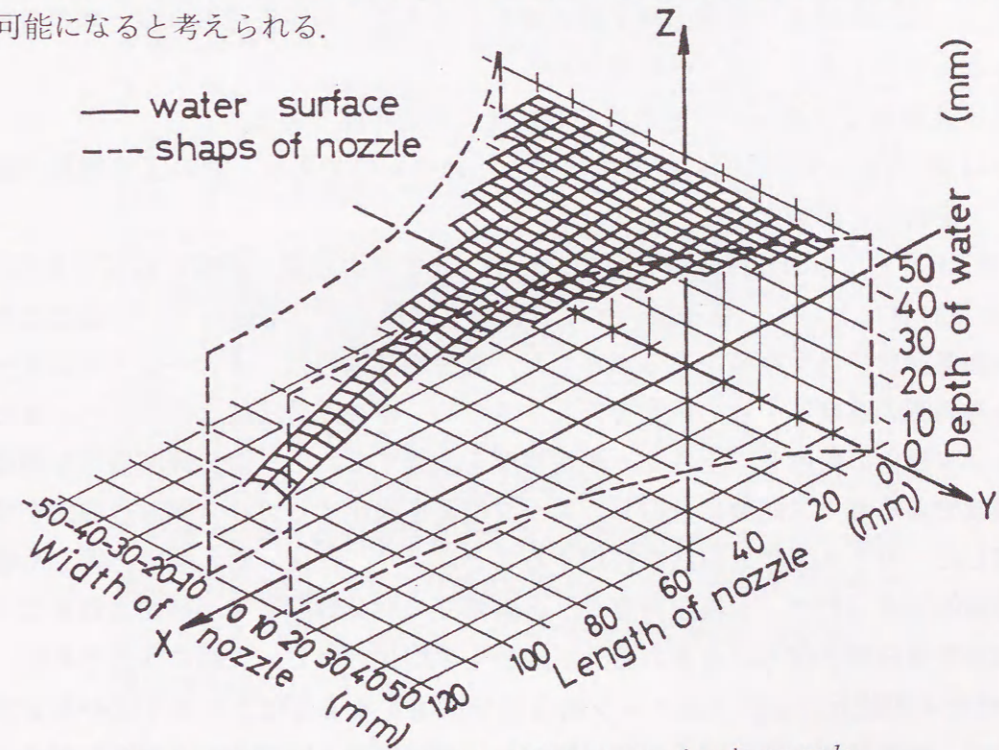


Fig.3-16 Measurement profile of the water surface in a nozzle

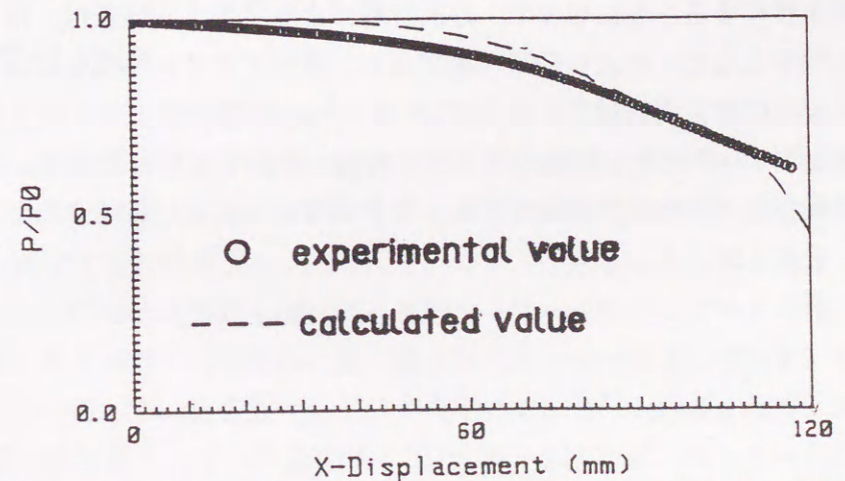


Fig.3-17 Comparison of experimental results and calculated results used hydraulic analogy

6. おわりに

浅底水槽実験や水理模型実験などの広範囲の水面形状を高精度に測定する一手法として、簡単な光学系で構成可能な格子縞透過法を用いた透明物体形状測定システムを提案した。

格子縞透過法は水槽底面に配置した2値格子を水槽下部より拡散光により照射し、水面形状変化前後の格子縞の変形から水面上の屈折点の水深と傾斜角を求めるものであり、以下の特徴がある。

- (1) 非接触で広範囲の水面形状を高精度に測定可能である。
- (2) 格子縞は水槽底面に特徴付けするためのものであり、その工作精度が測定精度に影響することがない。
- (3) 平行光などの特殊光源を必要とせず、光学系の設置・調整が容易である。

水深計算において、格子縞のエッジ部分を特徴点として採用し、特徴点は微分画像輝度信号が極値をとる点とした。微分輝度信号は、イメージ・センサーの各画素の感度不一致の影響を軽減するため、中央差分法により求めた。また、エッジ検出の精度を向上させ、測定精度を改善するため、微分輝度信号を連続関数であるガウス関数に近似し、エッジ位置を検出するガウス関数近似法を提案した。ガウス関数近似法を採用することにより、従来、画素間隔と等しく離散値的であったエッジ検出精度が、各画素間の微分輝度信号が補間されることにより微分輝度信号に含まれる外乱成分を平均化されて、大幅に改善された。

ガウス関数近似法によるエッジ検出法を採用することにより本手法の測定誤差は、画像処理上発生する誤差は軽減し、測定原理上回避不能な逐次計算による誤差が残存することになった。逐次計算により発生する誤差は、格子定数を十分増加させることにより軽減可能であり、透明アクリル模型の測定等によって、本手法の測定誤差は $\pm 0.1\text{mm}$ であることが判明した。

回転円筒内の強制渦や水槽内のノズル内流れの測定を行った結果、本手法が水理実験などの水面形状測定手法として有効であることが確認された。

第4章 レーザー光線の円錐状走査による姿勢計測

ロボット工学の分野では、関節の角度や角速度などのロボットアームの運動制御に不可欠な内界情報を検出する内界センサーに加えて、ロボットの手先とワークとの相対的關係などを検出する外界センサーの開発が期待されている。外界センサーによって得られる情報を基にロボットの手先の位置ならびに姿勢の制御を高速に行うため、簡単な信号処理で姿勢の検出が可能なセンサー系を提案している。レーザー光線を円錐状に走査することによって対象物（ワーク）面上に環状軌跡を描き、相対的距離の増減による環状軌跡の半径の変化、姿勢を表す傾斜角の大小による環状軌跡の変形を観測し、半導体位置検出素子を内蔵したカメラ（PSDカメラ）で観察する。対象物面上での光点の位置を表すPSDカメラの出力信号を時系列処理することにより、環状軌跡の変形の度合いを定量化し、これより簡単な信号処理で位置と傾斜角を算出する。近接姿勢検出センサー系の構成、対象物面上での環状軌跡の解析、位置と傾斜角の算出アルゴリズムの導出、試作センサーでの検証実験の結果を示し、実用性を確認している。

1. はじめに

非接触計測技術の重要な応用として、工業分野で広く使用されているロボットマニピュレータの位置と姿勢の計測[52]があげられる。ロボットの制御に用いられているセンサーには、ロボットアームの各関節の角度、角速度や角加速度などを測定する内界センサーに加えて、ロボットアームと外界の環境（例えばワーク）との相対的位置を測定する外界センサーがある。アーク溶接における溶接線のならい動作[34]などでは、特に外界センサーは重要である。非接触外界センサーとして、超音波センサーや光学式センサーが数多く提案、研究されている。超音波センサーを使用する場合[35～37]には、センサー系の小型化や、反射波信号の十分な受信が困難である傾向があり、また、超音波近接セ

ンサーは本質的には方向検知センサーであって、距離センサーとしての応用では多くの場合2, 3 m離れたところに対象物を配置している。これは、対象までの距離が短い場合には、信号処理が困難であるためと考えられる。

パターンマッチング法や画像処理法を用いた光学式センサーは、検査や加工のためにピッキングする際のワーク形状や位置の認識[39~42]に有効である。しかし、これらの手法を用いてロボットマニピュレータと対象物との相対的な位置と姿勢を検出することは困難である。また、距離センサーとして、投影されたフレネルゾーンプレートパターンを用いたセンサー系[53]も提案されているが、分解能の向上や傾斜角の同時測定を行うためには精密なフレネルゾーンプレートパターンを多数使用する必要がある。これらの受動的なセンサー系は、対象の置かれている環境によって光学的条件が変化し、計測精度の向上のために、補償動作が必要[60]である。また、2台のカメラやイメージセンサーによるステレオ立体両眼視法による両眼視光学系を用いたセンサーでは、各受光センサー共に十分な反射光を得ることが困難[43]であることやナノ秒オーダーの精巧なタイミング回路が必要であり装置の構成が高価になる傾向がある。また、数台の受光素子や光源を用いたセンサーの提案[44-47]も行われているが、パターンマッチング法や数個の受光素子を用いた場合には、十分なノイズ除去のために処理時間が長時間となる傾向がある。

一方、一台の受光素子を用いる場合には、センサーシステムによって得られる情報には制限があり[48,49]、対象物の形状が既知である場合にのみ[50,51]センサーとして使用することができる場合が多いが、対象物へ空間的に特徴のある光を照射すること[7~9]によって情報量を増加させ、単眼光学系を使用して未知形状の物体の計測を行っている。単眼光学系を使用したセンサー系は、光学系の構成が簡単であることから一体化構造をとることが可能で、さらに、小型化、軽量化が容易であることからロボットマニピュレータに搭載して用いることが可能である。また、信号処理も簡単であり、実時間測定が可能となる。

この章では、円錐状光線走査機構を有する光学式近接センサーを提案し、測定面上に描かれた環状軌跡より、ロボットマニピュレータと外界との相対的距離と傾斜角に関する情報を算出するアルゴリズムの導出について述べる。さらに、試作センサー系を用いて検証実験を行い、有効性ならびに実用性を確認した。

2. センサー系の構成

提案するセンサー系の光学系を、Fig.4-1に示す。センサー系は、1台の半導体レーザー、2枚のスキャニングミラー、1台の半導体位置検出素子(PSD)を内蔵したカメラ(以下、PSDカメラとする。)とハイブリッド演算処理回路によって構成されている。半導体レーザーから照射された光線を2枚のスキャニングミラーの機械的操作によって円錐状に走査し、対象面に環状の軌跡を描く。本手法で提案するセンサーでは、対象物面上に描かれた環状軌跡の変形により、センサー系と対象物面までの相対的位置と傾

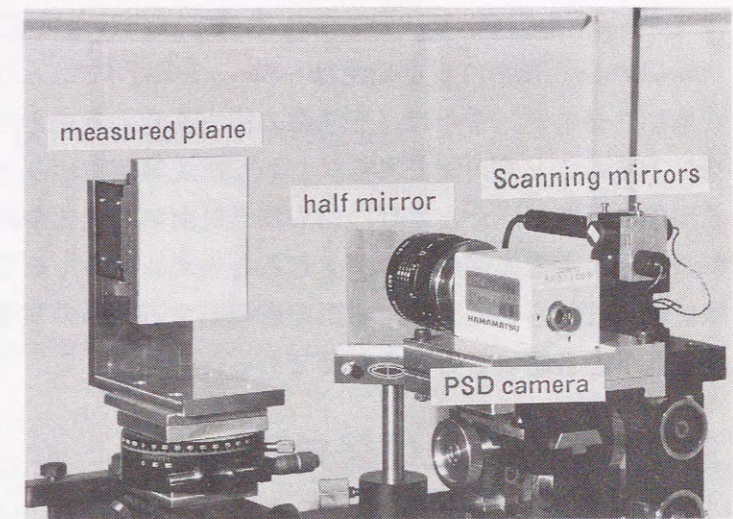


Fig.4-1 The sensor system

Table 4-1 Specification of the Optical Scanning System

Component	Specification
Semiconductor laser diode	Wavelength 830 nm Power 30 mW
Scanning mirrors	Maximum scanning frequency 60 Hz Natural frequency of galvanometer 95 Hz Maximum scanning angle 10 deg Galvanometer sensitivity 0.20 deg/mA
PSD camera	Focal length 50 mm and 10-mm extension tube Response speed 20 μ s Peak wavelength 900 nm (0.6 A/W) Effective sensor area 10-mm diameter Maximum error 250 μ m

斜角(姿勢)を計測する。すなわち、環状軌跡の半径により距離を、一走査周期間の環状軌跡の変形の大きさから相対的傾斜角(姿勢)を計測する。光学系の仕様をTable 4-1に示す。2枚のスキャニングミラーによる走査機構の光軸とPSDカメラの光軸とは、ハーフミラーを用いて同一線上になるよう調整されている。走査機構によって半導体レーザー光は、頂点をPSDカメラの光軸上に置く円錐状の母線となり、対象物面上に照射されて環状の軌跡を描く。対象物面上の環状軌跡はハーフミラーを通過してPSDカメラによって観測され、

光点の光量重心の2次元位置が電圧値として出力される。一走査周期間の光点の2次元位置の時間的変化を信号処理することによって、センサー系に固定した座標から見た対象物の距離と傾斜角の情報を得る。センサー系の測定レンジは光学系の構成により決定され、本章で試作した装置では、距離測定範囲は240~300 mm、傾斜角測定範囲は-30~+30deg.であった。半導体レーザの出力を増加させるか、または、光学系の構成を変えることにより、さらに測定範囲を拡大することも可能である。しかし、工業用ロボットが使用される劣悪な作業環境の下では、たとえば、対象物の反射率の変化や高温の空気流による屈折率の変化による光路の乱れが生じると考えられる。そこで、測定範囲の拡大の際には、これらの要因による誤差を軽減するための補償や、あるいは、測定精度の低下を容認することも必要であると考えられる。

3. 測定原理と信号処理

3.1 センサー系の解析

Fig.4-2にセンサー系の座標を示す。PSDカメラのレンズの主点を、光学系の基準座標系の原点 O_0 とする。また、原点から光軸にそって距離 l_1 の点を走査機構の原点 O_1 、距離 L の点を測定面の原点 O_2 とする。PSDカメラの撮像面は、光学系の基準原点 O_0 から距離 $-l$ の点を撮像面の中心として、光軸に垂直に設置されている。試作した光学系では距離 l_1 を-72.8mm、距離 $-l$ を-58.9mmとして、距離測定範囲を240~300 mmとしている。

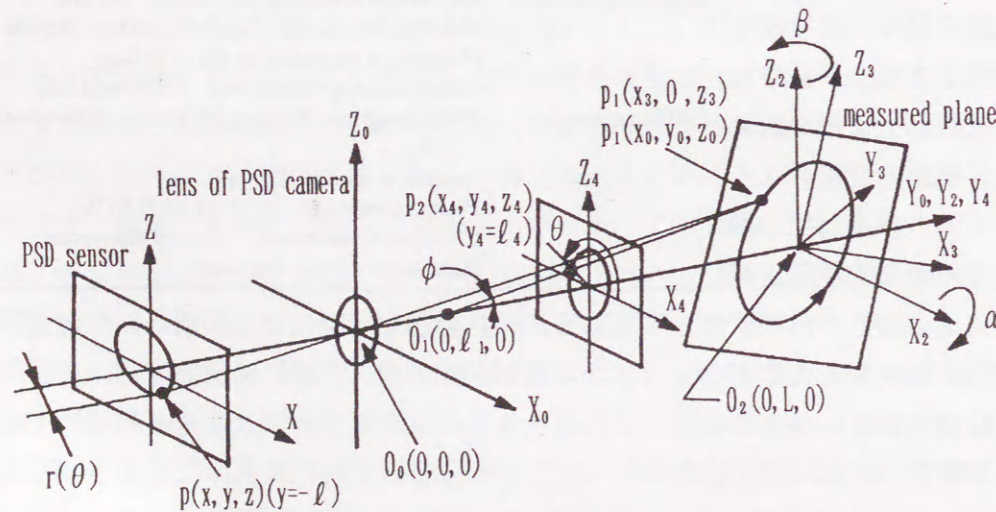


Fig.4-2 Coordinates of the measurement system

いま、測定面が基準座標原点よりY方向に距離 L 離れており、 Z_2 軸まわりに角度 β 、 X_2 軸まわりに角度 α 傾いているとすれば、測定面上の点 $(x_3, 0, z_3)$ は、次式により基準座標系の位置 (x_0, y_0, z_0) に変換される。

$$(x_0, y_0, z_0, 1)^T = T(x_3, 0, z_3, 1)^T \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} T &= \text{Trans}(0, L, 0) \text{Rot}(Z_2, \beta) \text{Rot}(X_2, \alpha) \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & L \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.2)$$

基準原点から距離 l_1 の点に原点をもつ走査機構によって、レーザ光はY軸と角度 ϕ をなして円錐状に走査される。いま、仮に、基準原点から距離 l_4 離れ、光軸に垂直な平面(PSDカメラの撮像面と平行な平面)があるとすれば、この平面上に描かれるレーザ光の環状軌跡 (x_4, y_4, z_4) は、次式で示される。ここで、角 θ は走査角度である。

$$\begin{cases} x_4 = (l_4 - l_1) \tan \phi \cos \theta \\ y_4 = l_4 \\ z_4 = (l_4 - l_1) \tan \phi \sin \theta \end{cases} \quad (4.3)$$

仮想平面上の光点と測定面上での光点の位置が一致するように仮想平面をY軸方向に平行移動させた時、式(4.3)で示される光点の位置は式(4.1)の変換によって基準座標系での位置(式(4.1)の左辺)として示される。その結果、測定面上での光点の座標 $(x_3, 0, z_3)$ は、次式となる。

$$z_3 = \frac{(l_4 - l_1) \tan \phi \sin \theta}{\cos \alpha} \quad (4.4)$$

$$x_3 = \frac{(l_4 - l_1) \tan \phi \{\cos \alpha \cos \theta - \sin \alpha \sin \beta \sin \theta\}}{\cos \alpha \cos \beta} \quad (4.5)$$

また、測定面が傾斜しているためにレーザ光が測定面に到達するまでの光路長が変化し、その長さは次式で示される。

$$l_4 - l_1 = \frac{(L - l_1) \cos \alpha \cos \beta}{\cos \alpha \cos \beta - \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \quad (4.6)$$

光路長の変化を式(4.4),(4.5)に代入すると、次式となる。

$$x_3 = \frac{(L - l_1) \tan \phi (\cos \alpha \cos \theta - \sin \alpha \sin \beta \sin \theta)}{\cos \alpha \cos \beta - \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \quad (4.7)$$

$$z_3 = \frac{(L - l_1) \tan \phi \cos \beta \sin \theta}{\cos \alpha \cos \beta - \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \quad (4.8)$$

これらの結果を行列形式にまとめると、式(4.9)となる。

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} x_3 \\ 0 \\ z_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(L - l_1) \tan \phi \cos \alpha \cos \beta \cos \theta}{\cos \alpha \cos \beta - \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \\ \frac{(L - l_1) \cos \alpha \cos \beta}{\cos \alpha \cos \beta - \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} + l_1 \\ \frac{(L - l_1) \tan \phi \cos \alpha \cos \beta \sin \theta}{\cos \alpha \cos \beta - \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

上式で示される光点の位置を、光学系の基準座標原点から $-l$ 離れたところに置かれた PSDカメラで観察する。結像倍率 m はY軸方向の距離の比で決定され、次式で求まる。

$$m = \frac{-l}{y_0} = \frac{-l \{ \cos \alpha \cos \beta - \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta) \}}{L \cos \alpha \cos \beta - l_1 \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \quad (4.10)$$

よって、PSDカメラの撮像面上での位置は次式となる。

$$x = m \cdot x_0 = \frac{-l(L - l_1) \tan \phi \cos \alpha \cos \beta \cos \theta}{L \cos \alpha \cos \beta - l_1 \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \quad (4.11)$$

$$z = m \cdot z_0 = \frac{-l(L - l_1) \tan \phi \cos \alpha \cos \beta \sin \theta}{L \cos \alpha \cos \beta - l_1 \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \quad (4.12)$$

式の表示を簡略化するため、次のように書き改める。

$$\begin{cases} x(\theta) = r(\theta) \cos \theta \\ z(\theta) = r(\theta) \sin \theta \end{cases} \quad (4.13)$$

$$r(\theta) = \frac{-l(L - l_1) \tan \phi \cos \alpha \cos \beta}{L \cos \alpha \cos \beta - l_1 \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)} \quad (4.14)$$

PSDカメラによって観測される環状軌跡の半径 $r(\theta)$ は、測定面の傾斜角によって変化するが、測定面が傾斜せず PSDカメラの撮像面と平行な場合は次式のように簡略化され、PSDカメラの2出力はそれぞれ余弦関数、正弦関数となる。

$$r_0 = \frac{-l(L - l_1) \tan \phi}{L} \quad (4.15)$$

測定面が傾斜している場合には、両出力はFig.4-3に示すように変形し、それぞれの極値を与える走査角度 θ_x 、 θ_z は次式となる。

$$\theta_x = \arcsin\left(\frac{-l_1 \tan \phi \tan \alpha}{L \cos \beta}\right) \quad (4.16)$$

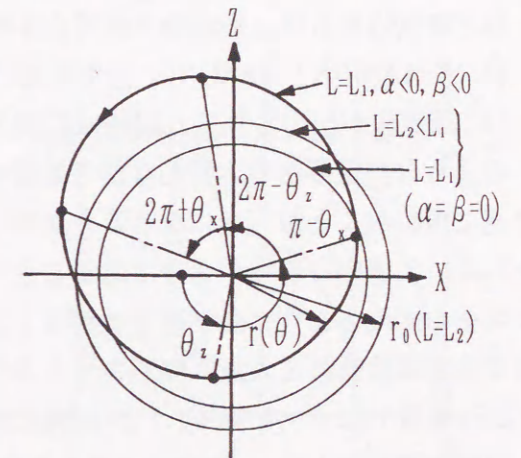
$$\theta_z = \arcsin\left(\frac{l_1 \tan \phi \tan \beta}{L}\right) \quad (4.17)$$

ここで、走査光学系の原点がP

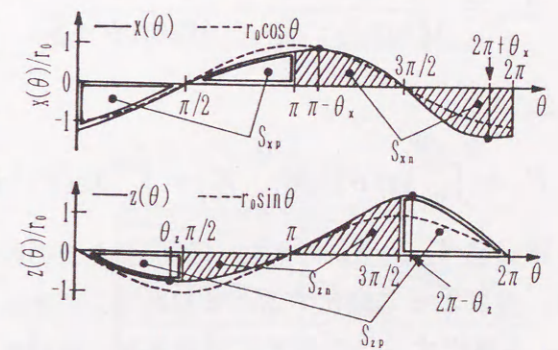
SDカメラのレンズ主点と一致(l_1 が零)する場合には、測定面との距離 L の増減に無関係に撮像面上の環状軌跡の半径は一定となり、測定が不可能となる。

3.2 距離測定のアプローチ

PSDカメラの2出力の振幅を用いて、対象物面までの距離 L を求める手法を提案する。2出力信号の振幅は、測定面までの距離 L の増減によって顕著に変化する。この振幅の変化を効率よく検出するため、各出力の絶対値を一走査



(a) Circular trajectory marked on the measured plane



(b) Output signals of sensor unit

Fig.4-3 Schematic graph of output signals

周期間にわたって積分した値を用いる。一走査周期間の積分値を用いることにより、次にあげる利点が考えられる。

- (a) 振幅の微小変化を効率よく検出することが可能である。
- (b) 電気的あるいは光学的ノイズを平均化することにより除去できる。
- (c) 多点測定法と比較して、信号処理に要する時間が短い。
- (d) 測定値が出力されると同時に処理され、走査終了時に結果が得られる。

このような測定手法の本質的な信号処理の簡略化により、測定結果が簡単かつ高速に求めることが可能になることが明らかである。この手法の測定感度の向上には、工場内の環境が清浄であることに加えて、環状軌跡の変形を撮像面上に大きく捉えるように光学系をロボットアームへ搭載することや、微小な距離の変化で環状軌跡を大きく変形させるような開き角 ϕ の大きな走査機構の採用（試作装置では $\phi = 3.03 \text{deg.}$ ）が有効であると考えられる。

距離の測定値 L_m と PSDカメラの X出力の積分値 S_x 、Y出力の積分値 S_y の関係を次式に示す。

$$L_m = \frac{4l \cdot l_1 \tan \phi}{4l \tan \phi - S_x} = \frac{4l \cdot l_1 \tan \phi}{4l \tan \phi - S_z} \quad (4.18)$$

ここで、

$$S_x = \int_0^{2\pi} |x(\theta)| d\theta, \quad S_z = \int_0^{2\pi} |z(\theta)| d\theta \quad (4.19)$$

積分値 S_x 、 S_y とともに、測定面までの距離 L だけでなく、測定面の傾斜角 α 、 β によって変化する。すなわち、これらの積分値 S_x 、 S_y だけでは距離 L_m を算出することが不可能であり、傾斜角を他の手法を用いて求めるか、あるいは、傾斜角を常に零に保つよう姿勢制御を行う必要が考えられるが実用的でない。そこで、測定面の傾斜角 α 、 β の変化による積分値 S_x 、 S_y の変化を求め、式(4.18)に示した距離測定アルゴリズムに与える傾斜角の影響を考察し、傾斜角に影響されることなく距離を算出するアルゴリズムを導く。傾斜角の有無による積分値の変化を、次式で定義する値を用いて評価する。

$$\begin{cases} A_x = (S_x - S)/S, \\ A_z = (S_z - S)/S \end{cases} \quad (4.20)$$

ここで、 S は傾斜角が零の時の積分値とし、次式で与えられる。

$$S = r_0 \int_0^{2\pi} |\sin \theta| d\theta = r_0 \int_0^{2\pi} |\cos \theta| d\theta = \frac{-4l(L - l_1) \tan \phi}{L} \quad (4.21)$$

式(4.20)に示した評価値を数値計算により求め、その一例を Fig.4-4 に示す。一走査周期間の信号を積分することにより、傾斜角による出力信号の波形歪みが平均化されることにより傾斜角の変化による積分値 S_x 、 S_y の変化は微小となる。そこで、傾斜角がない場合の積分値 S に代えて積分値 S_x または S_y を用いて距離 L_m の計算を行っても、距離測定の精度に大きな影響を与えないものとする。積分値 S に代えて積分値 S_x または S_y を用いた場合の距離測定の誤差を、Fig.4-5 に示す。積分値の代用による距離測定誤差は 0.15% 以内であり、これより積分値 S に代えて積分値 S_x または S_y を用いることの妥当性が示された。すなわち、測定面の傾斜角 α 、 β の値がともに未知であっても、十分な精度で距離 L_m の測定が可能であることが明らかになった。

3.3 傾斜角（姿勢）測定アルゴリズム

本手法では、姿勢に関する情報は X_2 軸まわりの角度 α 、 Z_2

軸まわりの角度 β として測定される。それぞれの角度は、測定面までの距離

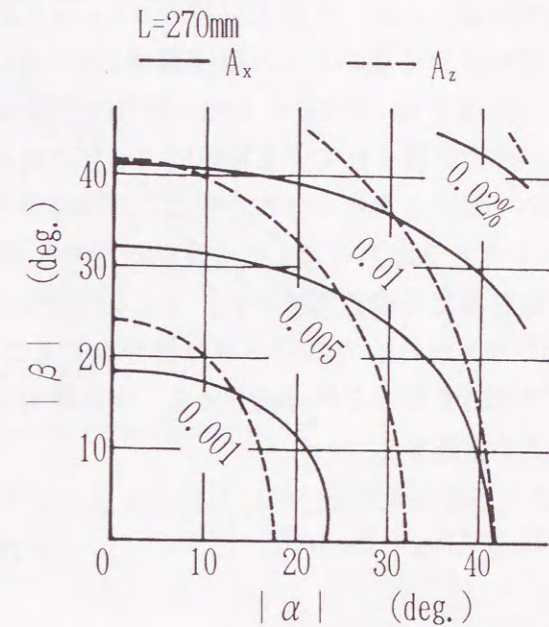


Fig.4-4 Influence of orientation α and β

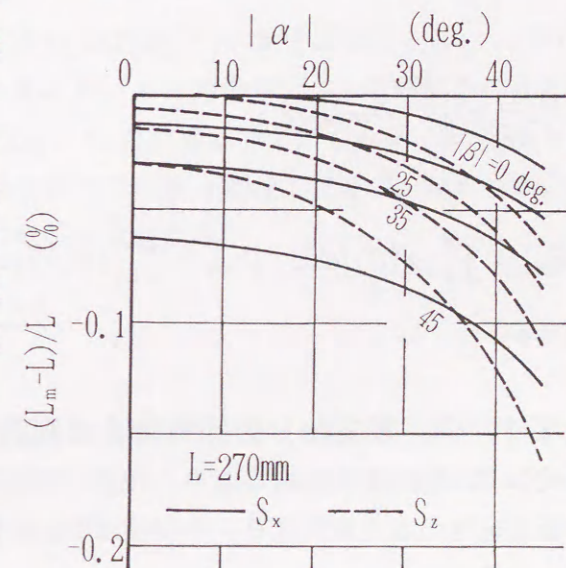


Fig.4-5 Theoretical errors in the distance measurement

と出力信号 $x(\theta), z(\theta)$ の極値を与える走査角度 θ_x, θ_z とをPSDカメラの出力から求めて、式(4.16),(4.17)に代入することにより、算出することが可能である。しかし、出力信号 $x(\theta), z(\theta)$ から極値を与える走査角度 θ_x, θ_z を精度良く求めることは困難である。例えば、PSDカメラの出力を微分回路に通過させ、PSDカメラの出力の微分値が零となることを極値と定めても、出力に含まれている電氣的ノイズのために、得られた走査角度の信頼性は極めて低いと考えられる。そこで、極値を与える走査角度 θ_x, θ_z に代えてPSDカメラ出力の積分値の変化を求め、傾斜角を測定する手法を提案する。極値を与える走査角度 θ_x, θ_z の変化は極めて微小であるが、半周期毎のPSDカメラの出力信号の積分値を求めることにより、信号波形の歪みを拡大して観測することが可能である。半周期毎の積分値の差異を評価する値として、次式を定義する。

$$R_z = (S_{zp} - S_{zn})/S_z \quad (4.22)$$

ここで、

$$S_{zp} = \int_{\pi/2}^{3\pi/2} |z(\theta)| d\theta, \quad S_{zn} = \int_0^{\pi/2} |z(\theta)| d\theta + \int_{3\pi/2}^{2\pi} |z(\theta)| d\theta \quad (4.23)$$

また、

$$R_x = (S_{xp} - S_{xn})/S_x \quad (4.24)$$

ここで、

$$S_{xp} = \int_0^{\pi} |x(\theta)| d\theta, \quad S_{xn} = \int_{\pi}^{2\pi} |x(\theta)| d\theta \quad (4.25)$$

とする。

3.3.1 Z_2 軸まわりの傾斜角 β の測定アルゴリズム

式(4.22)の数値計算結果より、出力信号 $z(\theta)$ の歪み R_z と出力信号 $z(\theta)$ の極値を与える走査角度 θ_z の関係はFig.4-6となり、これより次式の関係が得られる。

$$2R_z = \cos \theta_z = \frac{\ell_1 \tan \phi \tan \beta}{L} \quad (4.26)$$

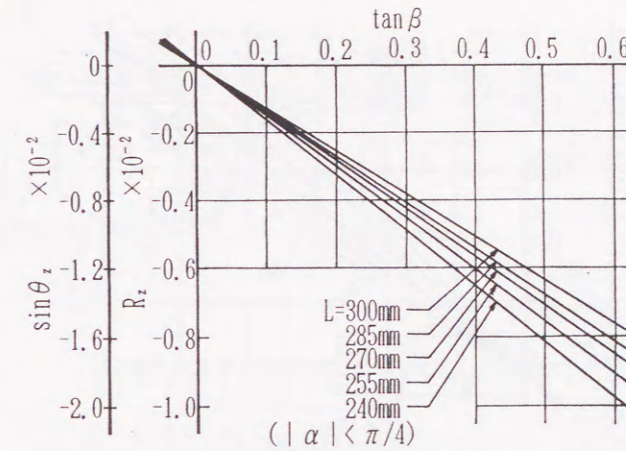


Fig.4-6 Relation between R_z and angle β

距離 L_m は前節で述べたアルゴリズムによって式(4.18)から求められ、 Z_2 軸まわりの角度 β は次式で求められる。

$$\beta = \arctan \frac{2R_z L_m}{\ell_1 \tan \phi} \quad (4.27)$$

3.3.2 X_2 軸まわりの傾斜角 α の測定アルゴリズム

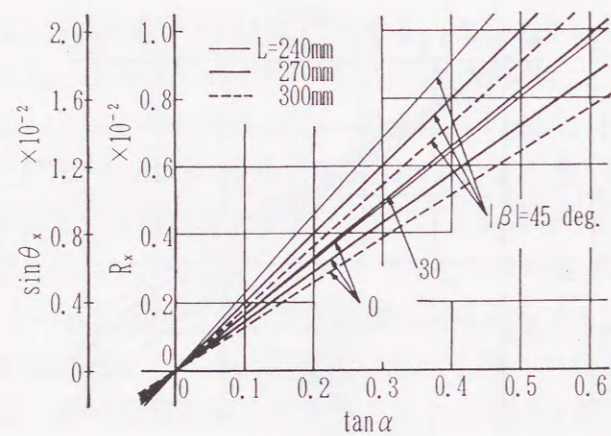
同様にして、出力信号 $x(\theta)$ の歪み R_x と出力信号 $x(\theta)$ の極値を与える走査角度 θ_x の関係はFig.4-7となる。出力信号 $x(\theta)$ の歪み R_x は変換マトリックスTの定義により、 X_2 軸まわりの角度 α だけでなく Z_2 軸まわりの角度 β の影響を受けるため、次式の関係が成立する。

$$2R_x = \sin \theta_x = \frac{-\ell_1 \tan \phi \tan \alpha}{L \cos \beta} \quad (4.28)$$

前節のアルゴリズムに従って測定された距離 L_m と、前節のアルゴリズムに従って算出された Z_2 軸まわりの角度 β を代入することにより、 X_2 軸まわりの角度 α は次式で求めることができる。

$$\alpha = \arctan \frac{-2R_x L_m \cos \beta}{\ell_1 \tan \phi} \quad (4.29)$$

式(4.27)と式(4.29)を用いることによって、 Z_2 軸まわりの角度 β 、 X_2 軸

Fig.4-7 Relation between R_x and angle α

まわりの角度 α の順に求められる。

3.4 信号処理回路の構成

以上のように本手法では、出力信号 $x(\theta), z(\theta)$ の区間積分値を用いて距離や傾斜角の変化によるわずかな波形歪みを拡大して観測するため、信号処理回路内に安定して動作する高性能の積分器を使用することが重要である。試作装置では、積分器をハイブリッド回路により構成した。Fig.4-8 に信号処理回路のブロック図を示す。

半導体レーザーから照射される光を円錐状に走査するためのスキャニングミラーは、余弦関数値と正弦関数値が書き込まれたROMを用いた一組の余弦波、正弦波発生回路の出力により走査される。走査角度 $\pi/4$ 毎に出力されるタイミングパルスによって、積分器として使用している8組の20bit バイナリーカウンタがリセットされる。測定面上の環状軌跡を撮影したPSDカメラの出力信号 $x(\theta), z(\theta)$ は、増幅器を介して絶対値回路に送られ、その後、電圧-周波数変換器 (V/F変換器: 1MHz/V) によってパルス信号に変換される。パルス信号をバイナリーカウンタで累積して、出力信号 $x(\theta), z(\theta)$ の1/4周期毎の区間積分値 (合計で8個) をハイブリッド回路によって求める。一走査終了後に各積分値をマイクロプロセッサ内に取り込み、前述のアルゴリズムによって演算し、測定面までの距離 L_m 、 Z_2 軸まわりの角度 β 、 X_2 軸まわりの角度 α の順に求める。

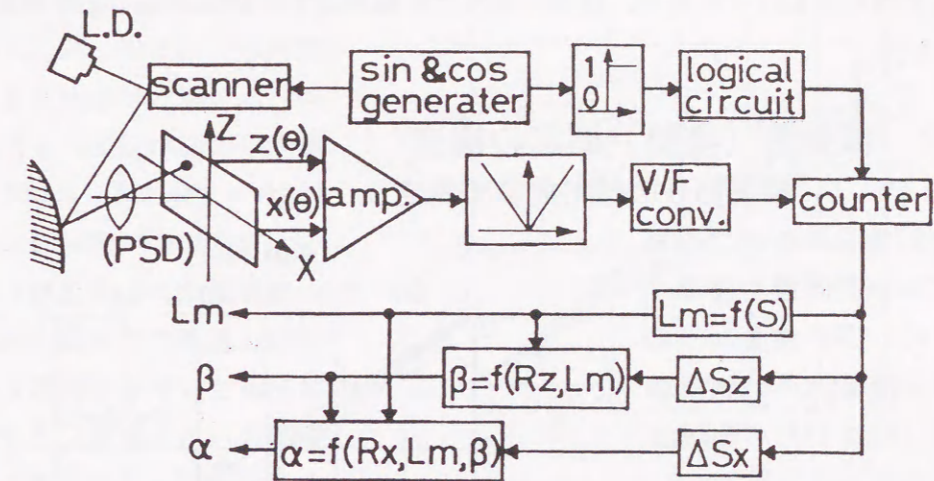


Fig.4-8 Block diagram of the processing system

4. 試作センサー系の性能評価

提案するセンサー系の有効性を確認するために基礎的実験を行い、姿勢検出性能を評価した。

4.1 距離測定の精度

Fig.4-9 に、測定面の傾斜角が零の場合の距離測定の結果を示す。距離測定の測定誤差の平均は1mm以内であることが確認された。また、距離測定のアルゴリズム中において、本来ならば測定面の傾斜角の情報を既知とすべきところを傾斜角がゼロとして距離の算出を行っている。数値計算によって、この近似の妥当性を検討したが実測値による検討を行うため、同様の距離測定実験を測定面に傾斜角を

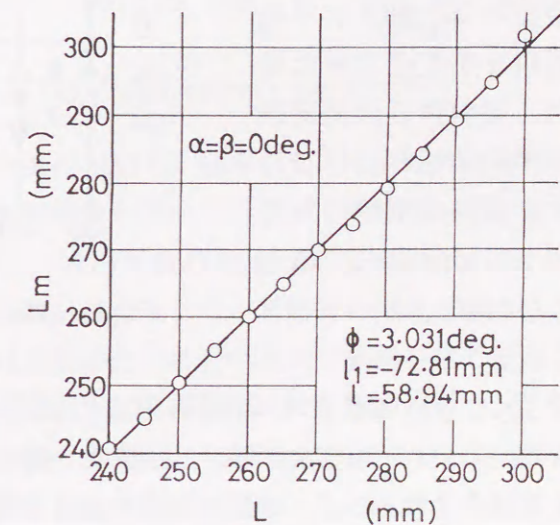


Fig.4-9 Experimental results of the distance measurement

与えて繰り返し行った結果、同等の精度で距離測定が可能であることが確認されている。

4.2 傾斜角（姿勢）測定の精度

4.2.1 Z_2 軸まわりの傾斜角 β の測定

傾斜角 β の測定アルゴリズムの妥当性を確認するため、 X_2 軸まわりの角度 α を零とし、測定面の Z_2 軸まわりの角度 β の絶対値と出力信号 $z(\theta)$ の歪み R_z の間にある式(4.26)の関係を調べ、その結果をFig.4-10に示す。

これより、実験値と実線で示される計算値が良く一致しており、傾斜角 β の測定アルゴリズムの妥当性が確認された。また、測定面の X_2 軸まわりの傾斜角 α を変化させた場合の、傾斜角 β の測定誤差の平均値をFig.4-11に示す。傾斜角測定の誤差は、 $\pm 1.5\text{deg}$ 以内であることが判明した。

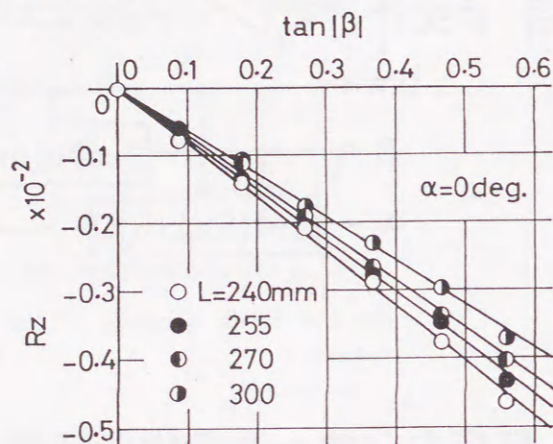


Fig.4-10 Experimental results on the confirmation to measure angle β

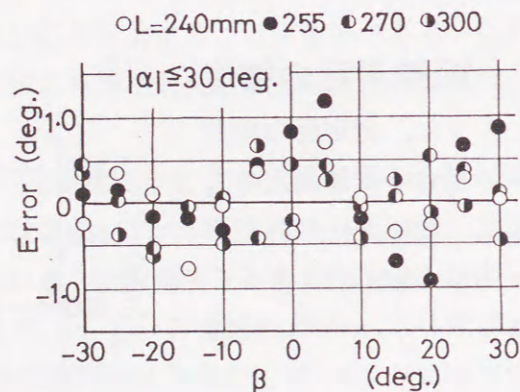


Fig.4-11 Measured error of angle β

4.2.2 X_2 軸まわりの傾斜角 α の測定

Z_2 軸まわりの角度 β の測定と同様に、傾斜角 α の測定アルゴリズムの妥当性を確認するため、 Z_2 軸まわりの角度 β を零とし、測定面の X_2 軸まわりの角度 α の絶対値と出力信号 $x(\theta)$ の歪み R_x の間にある式(4.28)の関係を実験的に調べた。その結果をFig.4-12に示す。図より、実験値と実線で示される計算値が良く一致しており、傾斜角 β の場合と同様に傾斜角 α の測定アルゴリ

ズムの妥当性が確認された。また、 Z_2 軸まわりの角度 β を変化させた場合の、傾斜角 α の測定誤差の平均値をFig.4-13に示す。傾斜角 α の測定アルゴリズムで示されるように、傾斜角 α は測定面までの距離と傾斜角 β の情報を用いて算出されるが、実測値から傾斜角測定の誤差は $\pm 1.5\text{deg}$ 以内であり、傾斜角 β の測定精度と同等であることが判明した。

4.2.3 測定結果の考察と精度向上に対する指針

測定面までの距離が測定範囲の上限、下限に近づくにつれて、距離、傾斜角ともに測定誤差が増加する傾向がある。これは、試作センサー系において、倍率を大とするために接写光学系を使用しており、光学系の被写界深度が浅いことによる測定面との距離の変化によって生じる光点像のぼけと、入射光量の増減による PSD カメラの空間分解能の変化によるものと考えられ、試作センサー系特有の現象であると思われる。また、試作センサー系では調整のために光学系に可動部を多く使用しており、光学系の剛性が低いことから測定結果の再現性の維持が困難であるが、走査光学系と受光光学系を可能な限り小型化して剛性を高めたベースに固定することにより、再現性の向上と測定精度の改善が図れるものと考えられる。また、入射光量に依存する PSD カメラの空間分解能を一定に保つため、入射光量をフィードバックして半導体レーザーの出力を調整し、入射光量を一定とすることが有効であると考えられる。その結果、距離の変化のほか、ワークの個体

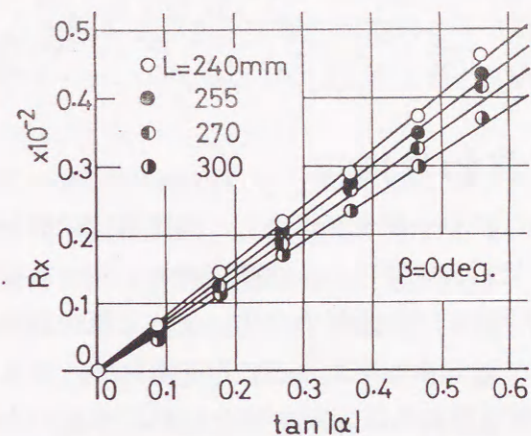


Fig.4-12 Experimental results on the confirmation to measure angle α

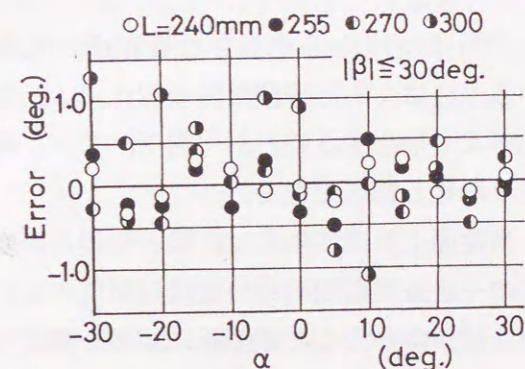


Fig.4-13 Measured error of angle α

差による測定面の反射率の変化や作業環境の変化などによる光量の変動に対してPSDカメラの空間分解能の変化を不感とし、測定精度の向上が図られるものとする。

5. おわりに

円錐状にレーザー光を走査し、測定面状に描かれた環状軌跡の波形歪みから、距離と傾斜角を測定する近接姿勢センサーを提案し、実験的に有効性を確認した。測定面までの距離の変化によって環状軌跡の半径が変化し、傾斜角の変化によって波形歪みが生じることを用いて、光点の光量重心位置の時間的変化を1/4走査周期毎の区間積分値として求める。これらの積分値から測定面までの距離と傾斜角を順次求め、センサー系と対象物との相対的位置を決定する。

提案する手法の有効性を、数値解析と検証実験により確認し、以下のことが判明した。

- (1) PSDカメラから出力される光点の光量重心位置信号の区間積分値を用いる手法は、距離や傾斜角の変化によって生じる環状軌跡の微小な変化を効率よく抽出することが可能で、また、電気的ノイズや光学的外乱の影響を平均化し軽減できる。
- (2) 測定面上の環状軌跡は距離と傾斜角の変化によって変形するが、位置信号の一走査周期間の積分値は傾斜角の変化に対してほとんど不感であるため、傾斜角の大小に無関係に距離を測定することが可能である。
- (3) 区間積分値の差を用いることにより、傾斜角による微小な波形歪みを効率よく抽出でき、簡単な信号処理で2つの傾斜角を算出できる。
- (4) 出力信号を時系列処理するため、一走査終了直後に結果が得られ、多点位置測定法と比較して高速処理が可能である。
- (5) 検証実験の結果、距離測定精度は $\pm 1\text{ mm}$ 、傾斜角測定精度は両角度とも $\pm 1.5\text{ deg}$ 以内であった。

測定領域の変更や測定感度は光学系の構成によって変更することが可能であり、近接センサー以外の利用も可能であると思われる。また、光学系の小型化や剛性の改善、さらに軽量化を図ることにより、実用的な単眼視覚センサーとして用いることが可能であるとする。

第5章 鋸歯状荷重関数重畳法による移動体の2次元位置計測

工業用カメラの受光特性へ空間的特徴付けを行って計測システムを構築する手法として、空間荷重関数によって決定される空間荷重を画像に重畳する荷重関数重畳法を提案する。空間荷重関数に鋸歯状荷重関数を採用し、工業用カメラの映像信号へ位置に比例した重率を与える2種類の鋸歯状荷重信号を乗じ、かつ、計算過程における空間積分を時間積分に置換することにより、一走査周期中に対象像の光量重心を算出する。本手法ではビデオ信号に対して演算を行うために、VTRなどに録画された測定対象の像を処理対象とすることが可能である。光量重心の2次元位置を同時に算出できるアナログ演算回路を試作し、実験的に有効性を確認した結果、良好な結果が得られた。

1. はじめに

工業用カメラ系は、VTRなどの周辺機器が豊富で取扱いが容易であり、レンズや信号が規格化されているため情報や機器の互換性が高く、工学分野で広く利用[54]されている。工業用カメラを用いたロボットの近接視覚センサや3次元形状測定システムでは、2次元画像から運動物体上の特徴線や点を抽出した後、それらの空間座標より物体形状や距離・角度などの情報を算出[7,55]している。2次元画像の膨大な情報から特徴線や特徴点に関する情報を抽出する作業は、多くの場合、画像記憶装置と計算機を用いて行われており、その処理には長時間を要する傾向がある。そこで、短時間に運動物体上の特徴点の2次元情報を抽出するため、2値化法[45,56]、面積中心法[57]や零位法[58]などの手法が提案されている。しかし、2値化法においては最適しきい値調整の必要があり[45]、また、面積中心法や零位法では逐次計算を行うため2走査周期以上の処理時間[58]を必要としている。

これに対し、工業用カメラを使用しない光学的非接触位置計測法としては、光点位置検出素子(PSD)を用いた光量重心位置[60]の測定や、フォトダイ

オード・アレイを用いた空間フィルタ速度計[61]などが挙げられる。これらの手法においては、抽出目的情報に適したセンサが採用可能であるため信号処理が容易であるという利点を有している。しかし、その反面、被測定物を直接観察できないため、測定の際の状態監視や光学系の調整が困難であり、調整時に工業用カメラの併用[59]などが必要となる。

そこで本章では、光学系の調整を容易にし、かつ、運動物体の特徴点の状態監視と同時に特徴点の位置を実時間で測定可能とするため、工業用カメラと鋸歯状荷重関数重畳法を用いた光量重心位置測定システムを提案する。本手法における信号処理対象はビデオ信号であるため、工業用カメラや周辺機器が有する画像情報の保存・伝達の利便性を有効に利用でき、運動物体の録画映像への適用も可能である。また、映像情報が電気信号であるため、並列演算処理に適している。

提案する手法では、工業用カメラの撮像面上に結像された対象像の光量重心を実時間で求めるため、工業用カメラ撮像面を積分領域とする空間積分を、1フィールド走査周期を積分時間とする時間積分に置換する。また、光量重心の演算過程における対象像の光量への重み付けは、工業用カメラの走査によって時系列信号に変換された映像信号と、工業用カメラの水平・垂直走査に同期して発生される鋸歯状電気信号との乗算によって行う。光量重心の水平方向位置と垂直方向位置は、それぞれ独立したアナログ回路によって並列演算処理され、1フィールド走査周期毎に出力される。

以下、鋸歯状荷重関数重畳法の演算アルゴリズム、信号処理回路の構成、ならびに試作回路系による運動物体の位置測定の結果について報告する。

2. 荷重関数重畳法による受光特性への空間的特徴付け

一般的に、工業用カメラを用いた計測では、撮影された画像が直観的である反面、情報量が膨大であるため、必要とする情報（例えば、特徴点の位置など）の抽出に多くの計算を要し、実時間計測が困難である。一方、工業用カメラ以外の受光センサを用いる場合には対象の状態を容易に監視することは不可能であるが、情報抽出に適した形状や機能を有する素子を選択することにより、信号処理の簡素化、高速化が可能である。例えば、空間フィルタ法[10,61]では、受光センサ部分に周期的な透過率分布を与え、空間周波数領域における狭帯域通過特性を生じさせている。その結果、測定対象がアスファルトの路面の

ようにランダムな模様の場合にも、特別な前処理を行うことなく、移動体の速度に比例した周波数を中心周波数とする空間フィルタ出力が得られ、速度計測を容易にしている。すなわち、受光センサーの空間的な選択特性により、対象物の状態を画像として入力する段階で空間的信号処理が行われて、後段の信号処理が容易となるように対象物の画像が加工されている。換言すれば、全ての画像情報に均等な重み付け（たとえば、照度とビデオ出力との比）を行って入力する工業用カメラに、画面の水平方向ならびに垂直方向にある重み付けを行い、空間的な受光特性が異なる新たなセンサーとして機能させて、希望する情報を簡単な信号処理で抽出している。

このように、空間荷重関数重畳法はセンサー特性の多機能化や信号処理の簡略化に有効であると考えられる。特に、受光系として工業用カメラを用いる場合には、映像信号が時系列電気信号であるため、映像信号に電氣的に発生した荷重信号を乗じて空間的受光特性に特徴付けを行えば、複数の荷重関数を同時に用いた並列処理が可能である。また、一連の信号処理は画像処理装置を使用しない電子回路で時系列に行われるため、一フィールド走査周期の間に信号処理が終了して位置や速度の実時間測定が可能である。

工業用カメラを受光光学系とし、空間荷重関数重畳法を用いた計測系の一般的な構成図をFig.5-1に示す。計測システムの構成にあたって、工業用カメラの画面左上を原点、水平走査線方向をX軸、垂直走査線方向をY軸とした。また、交換レンズにより結像倍率が可変であるため、荷重関数の定義、測定条件の設定、測定結果の評価については、撮像面上の長さで示すこととした。

測定システムはFig.5-1に示すように、画像入力部、前処理部、荷重関数重畳部、演算部により構成される。画像入力部には、工業用カメラのほか、VTRなどビデオ信号出力を有する機器を使用することが可能である。前処理部は、ビデオ信号レベルを一定に保つクランプ回路、同期信号分離回路、映像信号分離回路の3回路により構成されており、水平同期信号、垂直同期信号、映像信号の3信号を出力する。

荷重関数重畳部では、電氣的処理によって映像信号に重み付けして工業用カメラに空間的情報抽出機能を付加することが目的であり、荷重信号発生回路、乗算器、積分器により構成される。撮像面上の像が時系列映像信号に変換されるため、荷重関数重畳部において空間的に行われるべき信号処理は時系列処理に置換される。すなわち、空間的受光特性を決定するため撮像面上で定義される荷重関数は、各同期信号に同期して発生される時系列荷重信号に、また、映

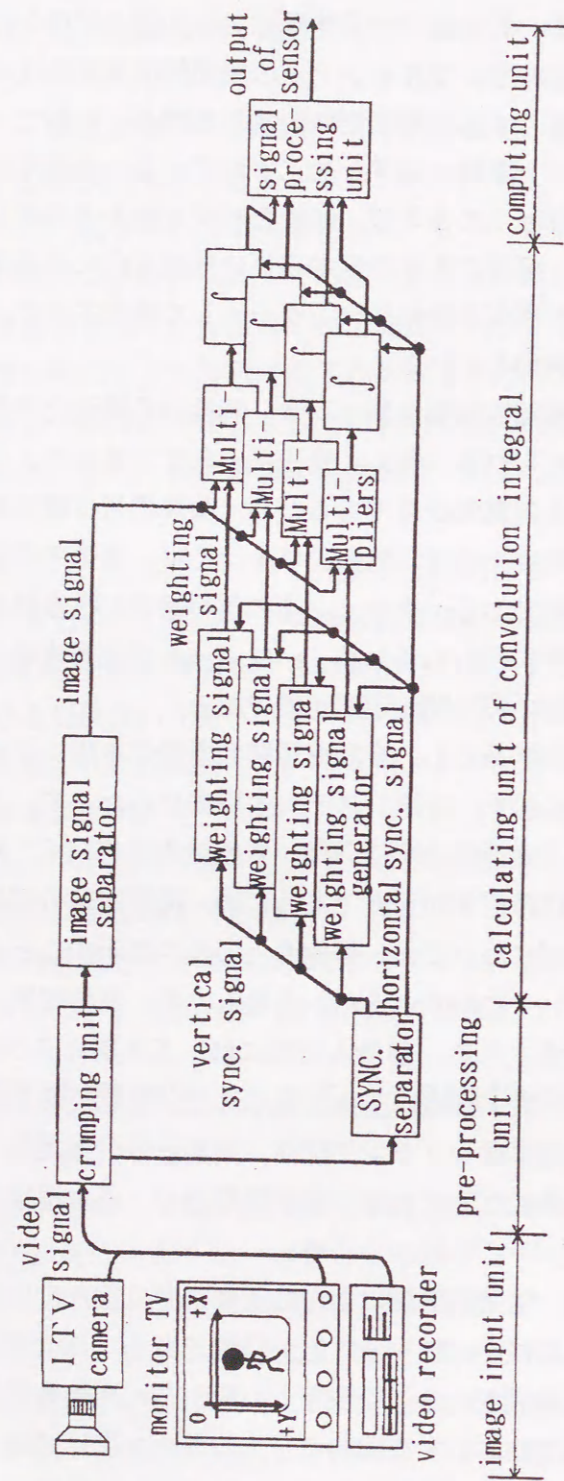


Fig.5-1 General components of measuring system using the spatial weighting function

像信号と荷重信号の積である時系列信号の撮像面全域にわたる空間積分は、一フィールド走査周期(1/60秒)を積分時間とした時間積分に置換した。空間的信号処理の時系列信号処理への置換は、信号処理の並列化ならびに高速化に極めて有効であると考えられる。荷重関数重畳部を複数用意して並列処理を行えば、1台の工業用カメラは異なる空間的受光特性を有する複数のセンサとして機能し、各出力は演算部に送られる。演算部においては、いくつかのセンサ出力を用いて必要とする情報を算出する。以上が、空間荷重関数重畳法による計測システムの一般的構成である。

3. 光量重心位置算出アルゴリズム

空間荷重関数重畳法を用いた移動体の位置計測システムとして、移動体上の特徴点の光量重心位置を計測するシステムを構成した。以下に、その算出アルゴリズムを述べる。

3.1 光量重心算出アルゴリズム

工業用カメラの撮像面上に結像した像の光量重心の位置を、X-Y平面に置かれた物体の重心[62]と同様に定義する。工業用カメラ撮像面の左上を原点とし、水平走査線方向をX軸、垂直走査線方向をY軸とするX-Y座標系を設定する。撮像面上に結像された対象像の光量分布を $I_p(x,y)$ 、光量分布が撮像面上で占める領域をSとすれば、像の光量重心座標 (x_m, y_m) は次式で示される。

$$x_m = \frac{\int \int_{(S)} x \cdot I_p(x, y) dS}{\int \int_{(S)} I_p(x, y) dS} \quad (5-1)$$

$$y_m = \frac{\int \int_{(S)} y \cdot I_p(x, y) dS}{\int \int_{(S)} I_p(x, y) dS} \quad (5-2)$$

提案する手法では、上式の光量重心計算を実時間で行うため、工業用カメラから出力される映像信号が時系列信号であることに基づき、工業用カメラの撮像領域にわたって行われる空間積分を1走査周期間の時間積分に次のように置換する。

対象像の光量分布 $I_p(x,y)$ は工業用カメラのインタレース走査により時系列映像信号 $I'_p(t)$ に変換される。光量分布 $I_p(x,y)$ への位置を重率とする重み付けは、時系列映像信号 $I'_p(t)$ と、水平・垂直走査に同期して発生され時間と共に線形に増加する鋸歯状荷重信号 $G_x(t)$ 、 $G_y(t)$ との乗算として行われる。イン

タレース走査によって1走査周期T秒間に撮像領域の全情報が抽出されるため、積分領域を撮像面とする空間積分は、積分時間をT秒とする時間積分に置換することが可能である。これらの置換により、式(5-1),(5-2)は次式となる。

$$x'_m = \frac{\int_{(T)} G_x(t) \cdot I'_p(t) dt}{\int_{(T)} I'_p(t) dt} \quad (5-3)$$

$$y'_m = \frac{\int_{(T)} G_y(t) \cdot I'_p(t) dt}{\int_{(T)} I'_p(t) dt} \quad (5-4)$$

式(5-3), (5-4)で示される演算はアナログ回路により並列演算処理され、求められた光量重心信号 x'_m, y'_m は、光量重心座標 (x_m, y_m) に比例した電気信号として1走査終了毎に出力される。

鋸歯状荷重関数重畳法による光量位置計測のアルゴリズムを示す両式の分子は、それぞれ画像のX軸ならびにY軸についての1次モーメント(幾何モーメント[63])であり、位置 x ならびに位置 y による画像への重み付けによって得られる。また、両式の分母は、重みを常に1として得られる画像の0次モーメントである。信号処理回路内では、1次モーメントを算出するために、水平同期信号の発生直後をゼロとし一定

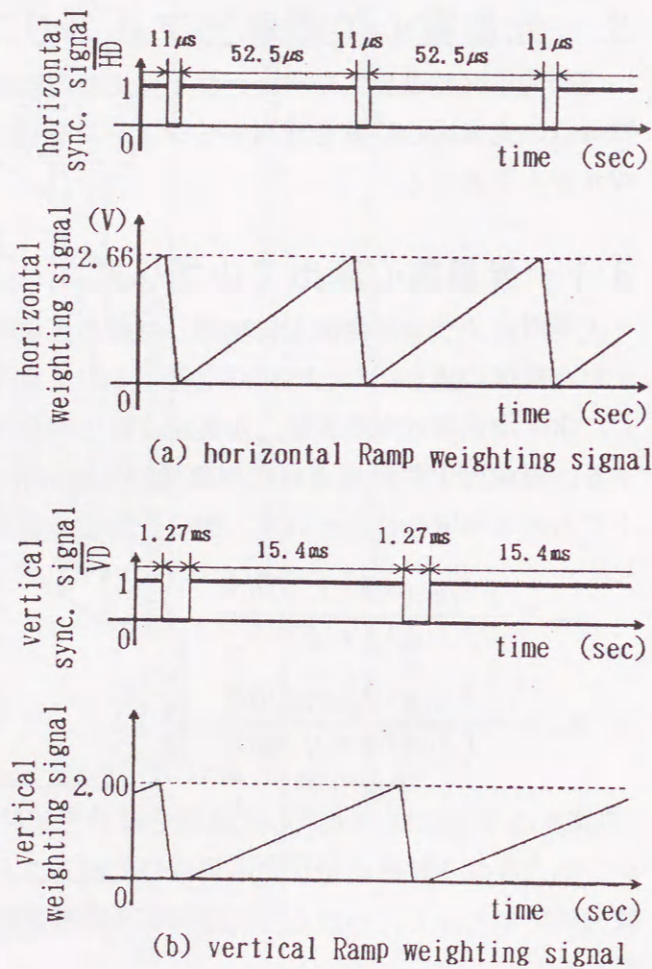


Fig.5-2 Saw tooth wave form (Ramp) weighting signal used in proposed system

の傾きで増加するX方向位置測定用鋸歯状信号 (Fig.5-2 (a)), 同様に垂直同期信号の発生直後をゼロとするY方向位置測定用鋸歯状信号 (Fig.5-2 (b)) の2種類の荷重信号を用いた。0次モーメントの算出には荷重関数として定数1を用いた。各モーメントは電圧値として得られ、演算部のアナログ除算器により各1次モーメントを0次モーメントで除することにより、光量重心位置を1フィールド走査終了毎に更新される2つの電圧値として得ることができる。

3.2 積分領域の有限化による測定誤差の解析

本手法における演算アルゴリズムでは、空間積分の積分領域が無限である場合には任意の対象像の光量重心を演算可能であるが、工業用カメラの撮像面は有限であるため、例えば対象像が撮像面外にも結像した場合には、対象像の光量分布と撮像面内の光量分布が一致しないことから光量重心の測定誤差が増大すると考えられる。このように積分領域が有限範囲とされるために生じる誤差を調べるため、撮像面内の光量分布をガウス関数と仮定して解析を行った。

撮像面内の座標 (x_{p1}, y_{p1}) に1つの光点が結像しており、その光量分布 $I_{p1}(x, y)$ が式(5-5)のガウス関数で近似可能[64]であるとする。

$$I_{p1}(x, y) = I_{01} \cdot \exp\left[-\left\{\frac{(x - x_{p1})^2 + (y - y_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\}\right] \quad (5-5)$$

ここで、 I_{01} は光点の最大光量、 r_{p1} は光点の広がり半径とする。式(5-5)を式(5-1)に代入し、

$$u = x - x_{p1}, \quad v = y - y_{p1}$$

なる変数変換を行い、 x_{p1}, y_{p1} がともに有限であることに留意して整理すれば次式となる。

$$\begin{aligned} x_m &= \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot I_{p1}(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{p1}(x, y) dx dy} \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (u + x_{p1}) \cdot I_{01} \cdot \exp\left\{-\frac{(u^2 + v^2)}{r_{p1}^2}\right\} du dv}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{01} \cdot \exp\left\{-\frac{(u^2 + v^2)}{r_{p1}^2}\right\} du dv} \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_{p1} \cdot I_{01} \cdot \exp\left\{-\frac{(u^2 + v^2)}{r_{p1}^2}\right\} du dv + 0}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{01} \cdot \exp\left\{-\frac{(u^2 + v^2)}{r_{p1}^2}\right\} du dv} = x_{p1} \end{aligned} \quad (5-6)$$

同様に、式(5-5)を式(5-2)に代入すれば、

$$y_m = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} y \cdot I_{p1}(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{p1}(x, y) dx dy} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (v + y_{p1}) \cdot I_{01} \cdot \exp\left\{-\frac{(u^2 + v^2)}{r_{p1}^2}\right\} dudv}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{01} \cdot \exp\left\{-\frac{(u^2 + v^2)}{r_{p1}^2}\right\} dudv} = y_{p1} \quad (5-7)$$

となる。

工業用カメラの撮像面の上限を x_u, y_u 、下限を x_l, y_l とすれば、実際の積分領域が撮像面内となることから式(5-6)、(5-7)の積分範囲は有限となり、それぞれ次式となる。

$$x_m = \frac{\int_{y_l}^{y_u} \int_{x_l}^{x_u} x \cdot I_{p1}(x, y) dx dy}{\int_{y_l}^{y_u} \int_{x_l}^{x_u} I_{p1}(x, y) dx dy} = x_{p1} - \frac{r_{p1}^2 \left[\exp\left\{-\frac{(x_u - x_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} - \exp\left\{-\frac{(x_l - x_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} \right]}{2 \int_{x_l}^{x_u} \exp\left\{-\frac{(x - x_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} dx} \quad (5-8)$$

$$y_m = \frac{\int_{y_l}^{y_u} \int_{x_l}^{x_u} y \cdot I_{p1}(x, y) dx dy}{\int_{y_l}^{y_u} \int_{x_l}^{x_u} I_{p1}(x, y) dx dy} = y_{p1} - \frac{r_{p1}^2 \left[\exp\left\{-\frac{(y_u - y_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} - \exp\left\{-\frac{(y_l - y_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} \right]}{2 \int_{y_l}^{y_u} \exp\left\{-\frac{(y - y_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} dy} \quad (5-9)$$

式(5-8)、(5-9)の右辺第2項は、積分領域を有限な撮像領域に限定したことによって発生する誤差を表し、この誤差を最小にする条件は、

$$r_{p1} = 0 \quad (5-10)$$

$$x_{p1} = \frac{(x_u + x_l)}{2} \quad (5-11)$$

$$y_{p1} = \frac{(y_u + y_l)}{2} \quad (5-12)$$

となる。これより、光点の像が広がりを持たないか、または、光点が有効撮像領域の中心にある場合のみ、位置検出誤差が零となることがわかる。この誤差の数値計算結果をFig.5-3に示す。特性は有効撮像面の幅で無次元化したフル

スケール比とし、「%F.S.」で表示する。積分範囲を限定するために生じる理論的誤差は、画面中央で小さく、また、光点の半径 r_{p1} が小さいほど減少する。これより、有効撮像領域における占有率が極度に大きい特徴点を測定する場合には、式(5-8)、(5-9)を用いて測定値を補正するか、フィルタによる光学的処理によって特徴点の縮小を行なうなどの改善が必要である。

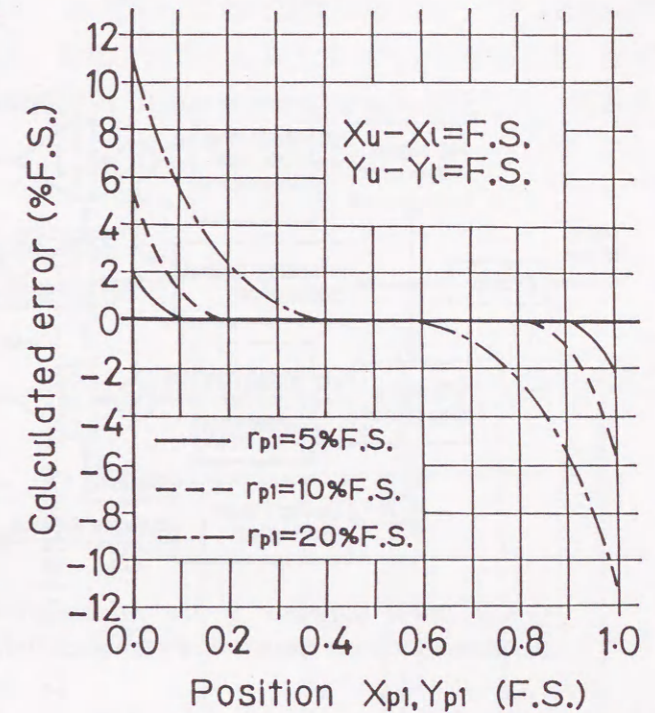


Fig.5-3 Theoretical error of position measurement

4. 光点位置検出回路系の構成

提案したアルゴリズムに従い試作した光点位置検出回路のブロック図を、Fig.5-4に示す。試作回路は全てアナログ演算素子で構成されており、画像記憶装置などは使用していない。実験に使用した工業用カメラは、最低被写体照度2Lx(F1.4)の1/1000秒電子シャッター付1/2インチCCDカメラで、有効撮像領域はX方向6.426mm、Y方向4.802mmであり、レンズはF:1.3, f=50mmのものを使用した。

撮像面上の2次元光点像は、NTSCインタレース方式に従って時系列映像信号として出力される。映像信号はクランプ回路によって光学的黒レベルが固定された後、映像信号分離回路ならびに同期信号分離回路へ送られる。

重畳積分を行う際に使用する重率は、荷重関数発生回路によって水平・垂直走査に同期して発生される2種類の時系列鋸歯状荷重信号によって与えられる。2種類の鋸歯状荷重信号の各走査開始時刻における値は零であり、各荷重信号の傾きは、X方向 5.07×10^{-2} volt/ μ s、Y方向 1.30×10^{-1} volt/mmである。これらの鋸歯状荷重信号により与えられる重率は、両方向ともにそれぞれの位置に対

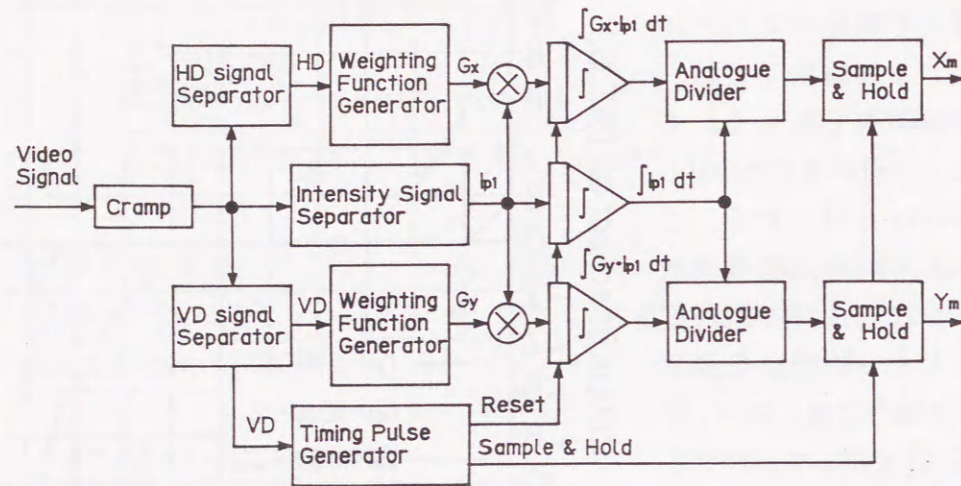


Fig.5-4 Block diagram of the measurement method by using a convolution with saw tooth wave form weighting function

して 4.15×10^{-1} volt/mmの比例倍率を有している。この比例倍率の逆数を試作回路により求めた光量重心位置信号に乗じることにより、撮像面上の位置に換算することが可能である。

映像信号ならびに位置に関する重率を時系列電気信号に変換したことに従い、撮像面を積分領域とする空間積分を1走査周期を積分時間とする時間積分へと置換する。試作回路では、インタレース方式の走査による奇数・偶数フィールドの画像信号の差異が微小であると考え、積分時間を1フィールド走査周期とした。同様に、全光量信号値も1フィールド走査周期間の映像信号の時間積分値とした。これら重畳積分値と全光量信号値により求められる光量重心の位置は、1フィールド走査終了後にサンプル・ホールド回路により次の走査終了まで保持される。

上述の光量重心演算回路は独立した2回路により構成されており、それぞれ同時にX方向、Y方向の信号処理を行い並列処理を実現している。

5. 試作装置による実験的検討

位置測定のアロリズムと信号処理回路の有効性を確認するため、運動物体上に直径5.5mmの赤色LEDを設置し位置測定を行った。被測定物であるLEDは、レンズ取り付け位置前方840mmの位置に設置した。このとき、倍率

は 6.70×10^{-2} であった。また、測定範囲は有効撮像領域と同一でX方向6.426mm、Y方向4.802mmである。また、光点の広がり半径 r_{p1} や測定位置、測定誤差などは、有効撮像領域のX方向の幅(6.426mm)で無次元化し、「%F.S.」の表記を用いる。

5.1 静止物体の位置測定

5.1.1 静止時の位置測定精度

実験で特徴点としたLEDの光量分布は、Fig.5-5に示すように光点半径 r_{p1} が充分小さく有限範囲で光量が零となるため、光量重心位置計算過程において、積分範囲を有効撮像範囲に限定するために生じる誤差は考慮する必要がないと考えられる。

最大光度2.82mcd、広がり半径 r_{p1} 3.78%F.S.であるLED光点の、静止状態における位置測定を行った結果をFig.5-6に示す。L

ED光点は電気式サーボ機構の移動テーブル台上に設置され、一定量づつ移動される。移動後の光点の正確な位置は、位置検出用ポテンショメータの出力値より換算して求め、この基準値と試作回路による測定値を統計的処理した結果、平均位置測定誤差はX方向、Y方向ともに ± 0.5 %F.S.以内、標準偏差はX方向0.28%F.S.、Y方向0.25%F.S.であり、撮像素子の画素数(502×485画素)による解像度と同等である良好な精度を得た。これは、CCD撮像素子の画素出力信号がビデオ信号に変換される際に平滑化されていることと、信号処理過程において画像処理装置の画素番地などの離散値的な重率に代って、連続した鋸歯状荷重信号を使用しているためと考えられる。

なお、インタレース方式のカメラでは、奇数フィールドと偶数フィールドとの間にY軸方向へ1走査線分の位置ずれがあるが、1フィールド毎の位置出力

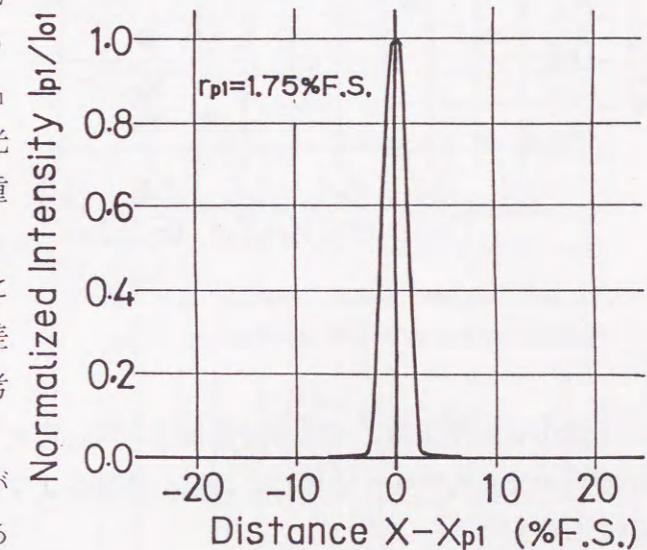


Fig.5-5 Waveform of intensity signal of single light point.

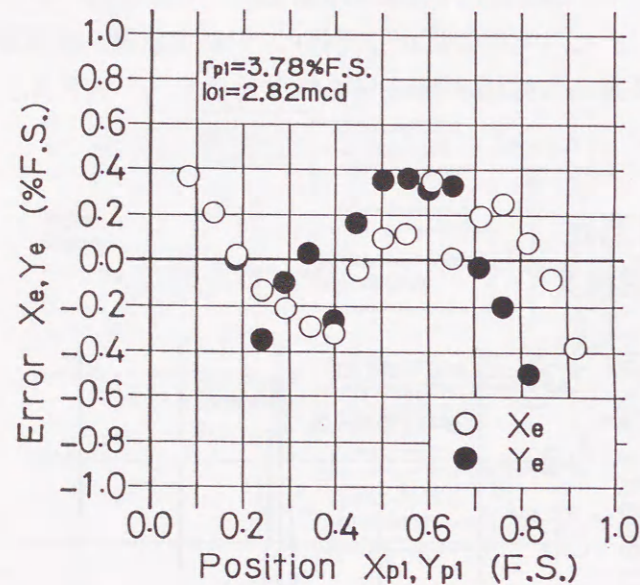


Fig. 5-6 Experimental results for the position measurement of one point

線数も減少し、走査線の移動が位置検出信号に与える影響が増加する。ゆえに、微小直径の光点を測定する場合には積分時間を1フレーム走査周期とすることが望ましい。

位置測定結果の測定方向による測定精度の差異は、水平走査周波数と垂直走査周波数との比が約250倍あるため、同様の演算素子により回路を構成しても2つの回路の周波数特性が同一にならないために発生すると予測される。また、光点静止時に発生する誤差の変動は、積分回路のバイアス電流の変化により発生することが、回路系の特性実験により確認された。

5.1.2 特徴点の光学的変化による測定精度への影響

LEDへの供給電流とその直上に設置した絞りとを調整して、特徴点の明るさ、ならびに大きさと位置測定精度との関係を実験的に求めた。

特徴点の最大光度と、X方向測定誤差、Y方向測定誤差との関係をFig.5-7, Fig.5-8に示す。これらの図より、測定誤差をX方向、Y方向同時に $\pm 0.5\%$ F.S.以内とするためには、開口絞りの直径が5mmの場合0.4mcd以上、4mmの場合0.5mcd以上、3mmの場合0.9mcd以上の最大光度が必要であることがわかる。測定対象として使用したLEDと開口絞りの構成では、特徴点の

から両フィールド間の位置ずれによる誤差を検討した結果、両者の差は平均位置測定誤差の10%以下であることが判った。これは、光点の広がり半径 r_{p1} が3.78%F.S.の場合に、最大光度の36.8%の光量をもつ円の直径が1フレームあたり約40本の走査線に対応しており、フィールドの違いによる走査線位置の移動が位置検出信号にほとんど影響しないためであると考えられ、従って、光点の広がり半径が減少すれば対応する走査

明るさと広がり半径を単独に調整することが不可能であり、両者の間にはFig.5-9に示す関係があった。ここで、広がり半径は、特徴点の光量を式(5-5)で示すガウス関数で近似して求めた。この関係を用いれば、前述の条件に対応する光点の結像半径は、開口絞りの直径が5mmの場合3.3%F.S.以上、4mmの場合3.0%F.S.以上、3mmの場合2.4%F.S.以上となる。X方向、Y方向ともに測定誤差が $\pm 0.5\%$ F.S.以内となるこれら3種の測定条件では、入射全光量に相当する映像信号の一画面の積分値は同一であるが、これら3種の条件より小径の光点では入射全光量が減少し、信号処理回路中の除算回路の性能を保證する信号電圧を十分確保できないため測定精度が低下する。そのため、入射光量に適應して積分回路の回路定数を調整し、信号レベルを保證する回路機能を付加する必要がある。

5.2 移動物体の位置測定

5.2.1 移動時の位置測定精度

動的な位置計測性能を検討するため、サーボ式送り装置の台上に開口絞り径を直径5mmに調節したLEDを設置し、視野内で直線往復運動させた場合の位

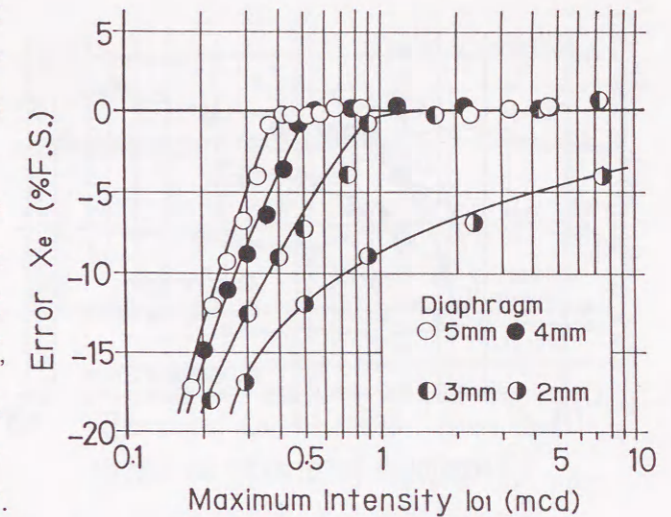


Fig. 5-7 Change in the position measurement error X_e caused by the change of maximum intensity

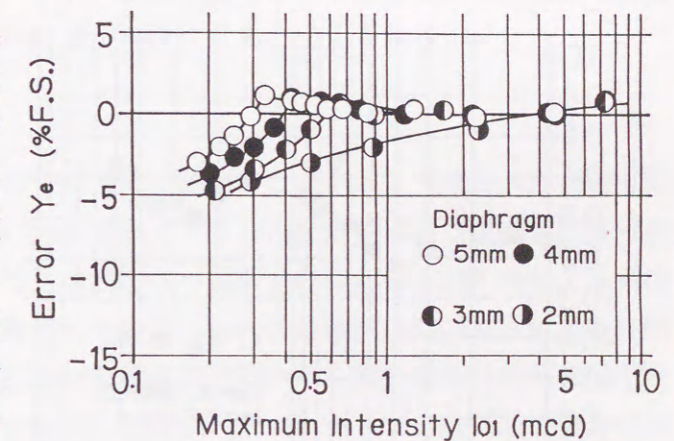


Fig. 5-8 Change in the position measurement error Y_e caused by the change of maximum intensity

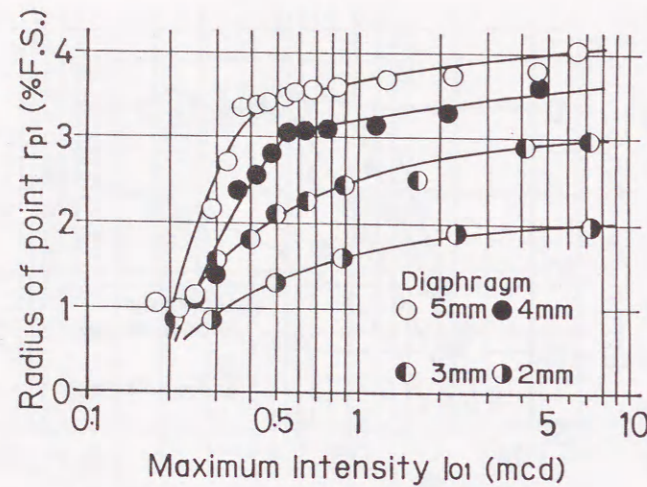


Fig.5-9 Relationship between maximum intensity and radius of point

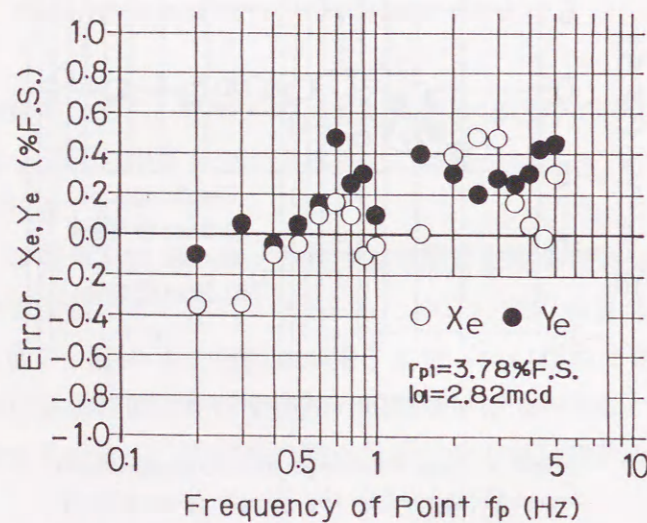


Fig.5-10 Experimental results for the position measurement of moving point

5.2.2 歩行時の人間の下肢各関節の位置測定

移動体の動的位置計測の一例として、カメラに $F=1.4, f=16\text{mm}$ のレンズを装着し、太陽光が入射する室内でカメラ前方 6.3m のところを撮像面に平行に歩行する人間の各関節の位置計測を行った。このときの倍率は 2.56×10^{-3} であった。外乱光の影響による計測誤差を軽減するため、各関節にスポット光源を付

置測定誤差をFig.5-10に示す。物体の移動最高周波数 f_p はフィールドの走査周波数を考慮して、 $f_p=5\text{Hz}$ とした。

測定対象物が移動中の場合でも、カメラに内蔵された $1/1000$ 秒電子シャッターの効果により、光点の移動に伴う残像は削減され、測定精度はそれほど悪化しない。平均測定誤差はX方向、Y方向ともに $\pm 0.5\%F.S.$ 以内、標準偏差はX方向、Y方向ともに $0.44\%F.S.$ であった。

これらの結果より、電子シャッターを内蔵した工業用カメラを使用した鋸歯状荷重関数重畳法による位置測定システムでは、測定対象が静止している場合にも移動している場合にも、平均測定誤差が $\pm 0.5\%F.S.$ 以内の測定精度が得られることが明らかとなった。

けて特徴点とした。各関節の位置をX-Yレコーダに記録した結果を、Fig.5-11に示す。同様に歩行している動作を暗室中でストロボ撮影した写真と比較し測定結果を検討し、良好な精度で計測が行われていることが判明した。このように、比較的速度が遅い移動体の場合に、提案する計測システムが有効であることが確認された。工業用カメラの空間分解能は写真と比較して劣るが、将来ハイビジョンカメラが一般的に使用されるようになれば空間分解能が向上し、さらに精度の良い計測が可能になると考えられる。

6. おわりに

直観的な画像が得られ、各分野で広く使用されている工業用カメラに空間的な受光特性の特徴付けを行い、多機能センサーとして用いる空間荷重関数重畳法を提案し、その応用として、運動物体の特徴点の位置を高速、かつ、高精度に測定する鋸歯状荷重関数重畳法を提案した。この手法は、2方向の走査に同期して発生させた2種類の鋸歯状荷重信号を用いて、対象像の時系列映像信号へ位置に比例した重み付けを電氣的に行い、1フィールド走査周期を積分時間とする時間積分を行うことによって、測定対象物像の光量重心の位置を算出するものである。本章では、鋸歯状荷重関数重畳法の演算アルゴリズムと実験的検証結果を示した。

モーメント計算に基づく光量位置検出アルゴリズムを用いたアナログ演算回路系で試作システムを構成し、基礎的性能を評価するため対象物の位置を測定した結果、静止している場合、移動している場合ともに良好な測定精度が得られた。また、誤差解析を行い測定精度向上のための基礎的設計指針を導いた。

これより、提案した鋸歯状荷重関数重畳法による位置測定手法は、信号処理系の安定化と演算精度の補償を行なうことにより、十分実用に期するものであると考える。

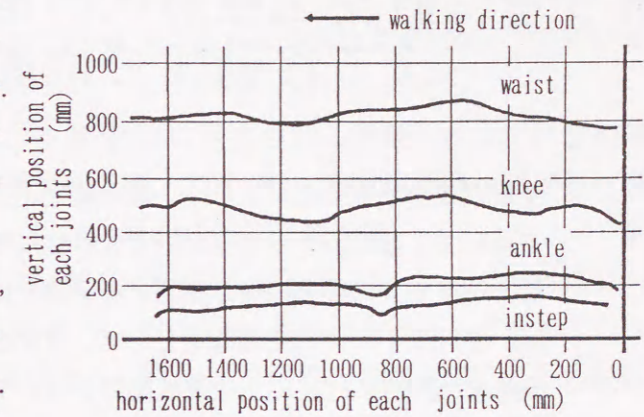


Fig.5-11 Experimental results for the position measurement of walking human

第6章 直交正弦波状荷重関数重畳法による移動体の位置・速度計測

空間荷重関数重畳法により、一組の直交正弦波状空間荷重関数を用いて工業用カメラの空間的受光特性に特徴付けを行い、位置と速度を実時間で同時に測定する手法を提案する。この手法は、空間フィルタの空間荷重として、従来広く用いられていた矩形波状関数に代えて正弦波状関数を用いており、空間フィルタの空間選択特性を高めている。また、一組の直交正弦波状空間フィルタの出力の直交性を利用して、対象物の位置と速度を実時間で求めるアルゴリズムを示した。アナログ素子を使用した信号処理回路を試作し、検証実験を行い良好な結果が得られた。

1. はじめに

工業用カメラを用いた計測システムは、ビデオ信号の形態や周辺機器が標準化されており、情報の保存や伝達が容易であること、測定対象物の状態観察が可能であり得られた画像が直観的で分かり易いことから、工業計測分野においても応用範囲[54]が広い。また、2次元に配置した圧力センサ群の出力をビデオ信号準拠に変換した触覚センサ[65]の開発や、可視化された流れの録画映像から速度ベクトル分布を求める手法[66]、監視映像による振動測定[67]などが報告されており、ビデオ信号を用いた新たな計測手法の開発がなされている。

TVカメラの映像信号を処理して運動物体の位置や速度を測定する場合の多くは、画像内に特徴点あるいは特徴点を含む領域を定め、これらの点や領域の移動量を2次元相関演算などを用いて抽出する手法[68]が採用されている。この手法は、流体の複雑な速度ベクトルの測定などに有効であるが、信号処理過程において画像記憶装置と計算機が必要不可欠であり、さらに、画像がもつ情報が膨大であるため処理時間が長時間となる傾向があるため実時間測定が困難である。これに対して、スリット状に配列したフォトダイオードや光ファイバーなどを用いた計測系[61]のように、空間的に特徴付けされた光学系によ

1. はじめに

て抽出される情報は配列やセンサ形状などによって決定される空間荷重により限定されており、そのため、情報抽出に要する時間は非常に短く、実時間測定が可能である。

このように空間荷重による特徴付けは、入力される画像から被測定量を効率よく抽出する前処理として有効であると考えられる。空間荷重を利用した測定手法である空間フィルタ法[10]は、周期的空間荷重を用いることにより、画像情報の中から限定された空間周波数成分の光量変化を抽出するのに有効であり、比較的簡単な光学系で構成できる。そのため、直線運動物体の速度測定のほか回転体の速度[69]、物体の拡大縮小[70]や変位測定への応用[71]なども報告されている。空間フィルタ法における精度向上や信号処理の簡素化を図るためには、空間荷重を正弦波状とすることが有効[72]であり、その構成手法として空間荷重を電子的に発生させる手法[72,73]が提案されている。正弦波状空間荷重を有する空間フィルタを実現することにより、従来行われていた出力信号の周波数分析に代わる信号処理[72,73]が可能となつて、信号処理時間が短縮された。また、空間荷重を電子的に構成する手法は、複数の空間荷重を同時に発生させることが可能であり、この並列処理が可能である点を利用して、運動物体の2次元位置を工業用カメラの映像信号と2種類の鋸歯波状空間荷重とを用いて測定する手法[74]が報告されている。

本章では、ロボットによる移動物体のハンドリング時などに重要である位置と速度を、工業用カメラと位相が90度異なる(以下、「直交する」という。)2種類の正弦波状空間荷重とを用いて同時に測定する手法を提案する。本手法では対象物の像を工業用カメラで入力するため、対象物が配置されている状況を監視することが容易であり、また、工業用カメラの映像信号を電子的に処理するため、対象物の検査などと並行して位置と速度を同時に測定することも可能である。また、対象物の録画映像や、遠隔地から伝達される映像を測定対象とすることも可能である。

提案する手法は、直交する2種類の正弦波状空間荷重を用いた空間フィルタの出力が、直交性を有することを利用し、2出力が描くりサーージュ図形から対象物の位置と速度をそれぞれ独立した信号処理系によって求める手法である。直交正弦波状空間荷重を有する空間フィルタは、従来フォトダイオード・アレイや光ファイバーの形状によって決定されていた空間荷重を処理系内部で電子的に発生させ、従来手法の結像光学系と集光光学系を映像信号と空間荷重との重畳積分に置換することによって構成している。この処理は、NTSC方式に

従って映像信号が時系列信号として出力されることから、すべて時系列処理に置換され、その結果、一フィールド走査周期ごとに対象物の位置と速度を独立して同時に計測することが可能となった。

以下、正弦波状荷重関数重畳法による位置ならびに速度の演算アルゴリズム、信号処理回路の構成、試作回路系による実験的検討結果について報告する。

2. 位置・速度算出アルゴリズム

2.1 直交正弦波状荷重関数を空間荷重とする空間フィルタの出力

空間荷重関数を用いて撮像面の水平方向に正弦波状の重み付けを行い、透過率分布が正弦波状となる空間フィルタを電子的に構成する。空間フィルタの出力を時間領域で解析し、位置と速度を算出するアルゴリズムを導出する。

2.1.1 特徴点が単一の光点の場合

対象物を撮影する工業用カメラの映像信号に、電子的に発生した正弦波状荷重信号を重畳して構成する空間フィルタは、正弦波状に透過率が変化するスリットを撮像面上へ擬似的に設置した空間フィルタと同等であると考えられる。その出力は以下のように求めることができる。

試作した測定座標系の原点は工業用カメラの有効撮像面の左上とし、水平走査線方向をX軸、垂直走査線方向をY軸としたX-Y座標系を設定する。試作装置では水平走査線方向のみに荷重関数を定義しているため、垂直走査線方向であるY方向の測定は不可能であるが、原理的にX方向と同様にして計測が可能である。いま、対象物は工業用カメラのX方向のみに視野から出入りすることなしに、並進往復運動するものとする。

簡単のために対象物が1つの光点であり、その光量分布 $I_{p1}(x,y)$ が式(6-1)で示されるガウス関数で近似可能[64]であるとする。

$$I_{p1}(x,y) = I_{01} \cdot \exp\left[-\frac{\{(x-x_{p1})^2 + (y-y_{p1})^2\}}{r_{p1}^2}\right] \quad (6-1)$$

ここで、 (x_{p1}, y_{p1}) は撮像面上の光点の位置、 I_{01} は光点の最大光量、 r_{p1} は光点の広がり半径とする。

この光点を、有効撮像面左端からx方向に無限長さをもつ周期Pの正弦波状空間荷重関数と同周期の余弦波状空間荷重関数とを採用した一対の直交正弦波状

空間フィルタを通して観察した場合、それぞれの空間フィルタの出力は次式で表される。

a) 正弦波状空間フィルタの場合

$$\begin{aligned} I_{s1} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{p1}(x,y) \cdot \sin\left(2\pi \frac{x}{P}\right) dx dy \\ &= \pi \cdot I_{01} \cdot r_{p1}^2 \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot r_{p1}^2}{P^2}\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{x_{p1}}{P}\right) \end{aligned} \quad (6-2)$$

b) 余弦波状空間フィルタの場合

$$\begin{aligned} I_{c1} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{p1}(x,y) \cdot \cos\left(2\pi \frac{x}{P}\right) dx dy \\ &= \pi \cdot I_{01} \cdot r_{p1}^2 \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot r_{p1}^2}{P^2}\right) \cdot \cos\left(2\pi \frac{x_{p1}}{P}\right) \end{aligned} \quad (6-3)$$

これらの出力は、それぞれの空間荷重関数が無限長さで定義されていることを仮定しているが、工業用カメラの有効撮像面は有限である。そのため、実際の出力信号と式(6-2)、(6-3)の間には差異が生じると思われるが、光学的な調整などを行うことによって光点の広がり半径を十分小さくすれば、光点の光量は有効撮像面内で近似的にゼロとなり、積分領域を有限とすることによって生じる差異を考慮する必要が実際上なくなる[74]と考えられる。

2.1.2 特徴点がランダムパターンの場合

対象物が1つの光点でなく、視野内にあるランダムなパターンの場合を考える。視野内のランダムパターンの光量分布 $I_{pr}(x,y)$ は、ランダムパターンがn個の光点から構成されていると考えれば、式(6-4)で表すことができる。

$$I_{pr}(x,y) = \sum_{m=1}^n I_{0m} \cdot \exp\left[-\frac{\{(x-x_{pm})^2 + (y-y_{pm})^2\}}{r_{pm}^2}\right] \quad (6-4)$$

ここで、 $I_{pm}(x,y)$ はm番目の光点の光量分布、 I_{0m} は最大光量、 (x_{pm}, y_{pm}) は撮像面上の位置、 r_{pm} は広がり半径とする。

このランダムパターンを、前述と同様の一対の直交正弦波状空間フィルタを通して観察した場合、それぞれの空間フィルタの出力は次式で表される。

a) 正弦波状空間フィルタの場合

$$I_{sr} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{pr}(x, y) \cdot \sin\left(2\pi \frac{x}{P}\right) dx dy$$

$$= \sum_{m=1}^n \pi \cdot I_{0m} \cdot r_{pm}^2 \cdot \exp\left(-\pi^2 \frac{r_{pm}^2}{P^2}\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{x_{pm}}{P}\right) \quad (6-5)$$

b) 余弦波状空間フィルタの場合

$$I_{cr} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{pr}(x, y) \cdot \cos\left(2\pi \frac{x}{P}\right) dx dy$$

$$= \sum_{m=1}^n \pi \cdot I_{0m} \cdot r_{pm}^2 \cdot \exp\left(-\pi^2 \frac{r_{pm}^2}{P^2}\right) \cdot \cos\left(2\pi \frac{x_{pm}}{P}\right) \quad (6-6)$$

ランダムパターン内の m 番目の光点の位置を、ランダムパターン内部(x_{pr} , y_{pr})にある特徴的光点(たとえば、光量が最大の光点)からの相対位置(Δx_{pm} , Δy_{pm})を用いて書き改めば、式(6-5), (6-6)は次式となる。

$$I_{sr} = \sum_{m=1}^n B_m \cdot \sin\left\{2\pi \left(\frac{x_{pr} + \Delta x_{pm}}{P}\right)\right\} \quad (6-7)$$

$$I_{cr} = \sum_{m=1}^n B_m \cdot \cos\left\{2\pi \left(\frac{x_{pr} + \Delta x_{pm}}{P}\right)\right\} \quad (6-8)$$

ただし、

$$B_m = \pi \cdot I_{0m} \cdot r_{pm}^2 \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot r_{pm}^2}{P^2}\right) \quad (6-9)$$

式(6-7) ~ (6-9)を展開し整理すれば、式(6-10) ~ (6-14)となる。

$$I_{sr} = \sqrt{W_1^2 + W_2^2} \cdot \sin\left(2\pi \frac{x_{pr}}{P} + \alpha\right) \quad (6-10)$$

$$I_{cr} = \sqrt{W_1^2 + W_2^2} \cdot \cos\left(2\pi \frac{x_{pr}}{P} + \alpha\right) \quad (6-11)$$

ただし、

$$W_1 = \sum_{m=1}^n B_m \cdot \cos\left(2\pi \frac{\Delta x_{pm}}{P}\right) \quad (6-12)$$

$$W_2 = \sum_{m=1}^n B_m \cdot \sin\left(2\pi \frac{\Delta x_{pm}}{P}\right) \quad (6-13)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{W_2}{W_1}\right) \quad (6-14)$$

式(6-14)の位相角 α はランダムパターンの形状、明るさ、正弦波状空間荷重のピッチにより定まり、ランダムパターンの形状や明るさが不変で、かつ、視野内で並進運動のみをする場合には一定である。また、対象物が単一光点の場合は、特徴的光点だけが存在するものと考えれば相対位置(Δx_{pm} , Δy_{pm})が(0,0)となり、位相角 α もゼロとなって式(6-2), (6-3)の結果と等しくなる。

式(6-10) ~ (6-14)より、一対の正弦波状空間フィルタの出力は対象物の移動とともに正弦波状、余弦波状に変化し、その両出力は直交性を保っていることがわかる。

この直交性を有する一対の空間フィルタ出力から、対象物の位置ならびに速度を求めるアルゴリズムを以下に示す。アルゴリズムの導出にあたっては簡単のために、対象物が単一の光点である場合について行うが、ランダムパターンの場合にも同様にして求めることが可能である。

2.2 一組の直交正弦波状空間フィルタ出力を用いた位置測定アルゴリズム

式(6-2), (6-3)の出力信号は、横軸を余弦波状空間フィルタの出力、縦軸を正弦波状空間フィルタの出力とした直交座標系では、Fig.6-1に示す円状のリサージュ図形となる。

両出力の値を示す軌跡上の動点Mは、光点像の移動に伴って円周上を移動して回転角 θ が光点像の位置を与える。動点Mの描く軌跡の半径 r 、回転角 θ はそれぞれ次式で与えられる。

$$r = \sqrt{I_{s1}^2 + I_{c1}^2} = \pi \cdot I_{01} \cdot r_{p1}^2 \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 r_{p1}^2}{P^2}\right) \quad (6-15)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{I_{s1}}{I_{c1}}\right) + n\pi = 2\pi \frac{x_{p1}}{P} \quad (6-16)$$

ただし、 n は整数である。

動点Mの描く軌跡の半径 r は、光点の形状、明るさと正弦波状空間荷重のピッチ P により定まる値であり、また、リサージュ図形上での回転角 θ は光点像の位置によって変化することがわかる。これより、光点像のX方向位置 x_{p1} は次式で示される。

$$x_{p1} = \frac{\arctan\left(\frac{I_{s1}}{I_{c1}}\right) + n\pi}{2\pi} \cdot P \quad (6-17)$$

ただし、 n は整数である。

式(6-17)より光点像の位置は、動点Mの描く軌跡の半径 r

に無関係に、すなわち、光点の形状、明るさの変動に影響されることがなく求められることがわかる。式中の整数 n は光点像の概略的位置を与える数であり、映像信号の観測や目視などの手法によって、予め測定開始時に初期値を与える必要がある。測定中は、自動的に更新され、光点像の位置が求まる。

対象物がランダムパターンの場合には、式(6-14)の位相角 α が零とならないため、位置測定結果に式(6-18)で示されるオフセット Δx_{pr} が生じる。

$$\Delta x_{pr} = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot P \quad (6-18)$$

このオフセット Δx_{pr} は、光点の形状、明るさが不変である限り一定であり、測定結果を補正することでその影響を除去することが可能である。しかし、光点の形状や明るさが変動する場合、オフセット Δx_{pr} は変化し位置測定精度は悪化する。

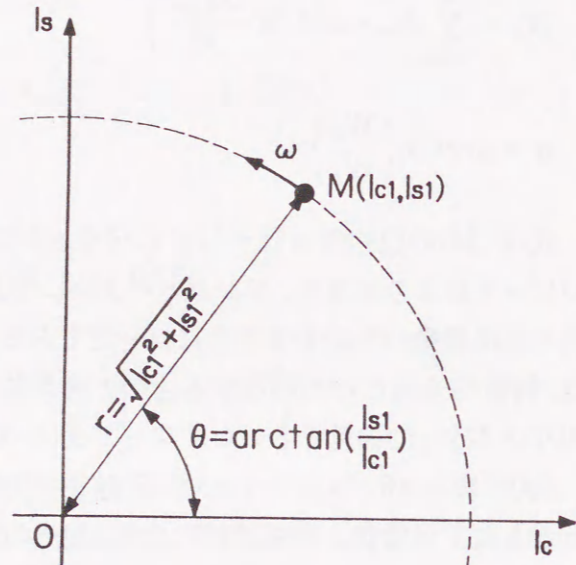


Fig.6-1 Relationship between output signal of orthogonal spatial filters

2.3 一組の直交正弦波状空間フィルタ出力を用いた速度測定アルゴリズム

式(6-2),(6-3)の値を示す円状リサージュ図形 (Fig.6-1) 上の動点Mは、光点像の移動に伴って円周上を移動し、回転角速度 ω が移動速度を与える。いま、回転角速度 ω を微小時間内の回転角 θ の変化として近似する。本研究で使用している工業用カメラは、NTSCインタレース方式 (フィールド走査周期 $\Delta t=1/60$ 秒) に従って動作しており、 Δt 秒ごとに奇数フィールド、偶数フィールドの映像信号を交互に出力する。奇数フィールドと偶数フィールドの映像信号には垂直走査方向に一走査線分のずれがあり、同一の映像でないため比較することができない。そこで、2フィールド走査周期後の同一フィールドの映像信号を比較して回転角 θ の変化を求め、回転角速度 ω を求める。

いま、 $(k-2)$ 番目フィールドの時刻を $(k-2)\Delta t$ 、対象物の位置を $x_{p1}(k-2)$ 、速度を $V(k-2)$ とすれば、 $2\Delta t$ 秒後の (k) 番目フィールドの時刻における対象物の位置 $x_{p1}(k)$ は、

$$x_{p1}(k) = x_{p1}(k-2) + V(k-2) \cdot 2\Delta t \quad (6-19)$$

として表せることから、それぞれの正弦波状空間フィルタの出力は次式となる。

$$\begin{cases} I_{c1}(k-2) = A(k-2) \cdot \cos\left\{2\pi \frac{x_{p1}(k-2)}{P}\right\} \\ I_{s1}(k-2) = A(k-2) \cdot \sin\left\{2\pi \frac{x_{p1}(k-2)}{P}\right\} \\ I_{c1}(k) = A(k) \cdot \cos\left[2\pi \frac{\{x_{p1}(k-2) + V(k-2) \cdot 2\Delta t\}}{P}\right] \\ I_{s1}(k) = A(k) \cdot \sin\left[2\pi \frac{\{x_{p1}(k-2) + V(k-2) \cdot 2\Delta t\}}{P}\right] \end{cases} \quad (6-20)$$

ここで、 $A(k-2)$ 、 $A(k)$ は、動点Mの軌跡の $(k-2)$ 番目フィールド、 (k) 番目フィールドにおける半径である。

また、リサージュ図形上の動点Mは、 $2\Delta t$ 秒間に式(6-21)で表される回転角速度 ω で移動したと考えられる。

$$\omega = 2\pi \frac{V(k-2)}{P} \quad (6-21)$$

式(6-21)を展開, 整理して回転角速度から速度 $V(k-2)$ を求めると次式となる. なお, 詳細な導出については第7章を参照されたい.

$$V(k-2) = \frac{\omega}{2\pi} \frac{P}{P} = \frac{\omega}{4\pi\Delta t} \cdot \arctan \left\{ \frac{I_{c1}(k-2) \cdot I_{s1}(k) - I_{s1}(k-2) \cdot I_{c1}(k)}{I_{c1}(k-2) \cdot I_{c1}(k) + I_{s1}(k-2) \cdot I_{s1}(k)} \right\} \quad (6-22)$$

式(6-22)より, 対象物が一つの光点である場合には, 移動速度は, 動点Mが描く軌跡の半径の大小にかかわらず求まることがわかる. 対象物がランダムパターンの場合にも同一のアルゴリズムによって速度を求めることが可能であるが, 単一光点の場合と比較して空間フィルタ出力に位相角 α の差があり, その位相角 α は対象物の形状や明るさによって変化するため, 対象物の光学的特徴の変動に伴って測定結果に誤差が生じることがわかる.

3. 位置・速度計測システムの構成

工業用カメラと直交正弦波状空間荷重とを用いた位置・速度同時測定系の信号処理回路を, アナログ素子を用いて試作した. 実験に使用した工業用カメラは, 最低被写体照度 $2 Lx$ (F1.4) の $1/1000$ 秒電子シャッター付 $1/2$ インチ CCD カメラ (502×485 画素) で, 有効撮像領域は X 方向 6.426 mm , Y 方向 4.802 mm であり, レンズは F:1.4, $f=58 \text{ mm}$ のものを使用した.

位置測定回路と速度測定回路はそれぞれ独立して構成されており, 同時に並列して演算処理を行うため, フィールド走査終了ごとに対象物の撮像面上における位置と速度を同時に測定することが可能である.

3.1 荷重関数重畳法による空間フィルタの構成

Fig.6-2 に, 一对の直交正弦波状荷重関数を空間荷重とする空間フィルタの構成ブロック図を示す. 撮像面上の光点像は, NTSC インタレース方式に従って時系列信号として出力される. そこで, 従来のフォトガイドードや光ファイバを用いた空間的構成手法に代わり, 空間荷重の発生, 映像信号との重畳, さらに視野全域の積分を時系列信号処理に置換して行う. 映像信号はクランプ回路によって光学的黒レベルが固定された後, 映像信号分離回路ならびに同期信号分離回路へ送られる.

X 方向の正弦波状空間荷重を与える正弦波状荷重関数は, Fig.6-3 に示すように水平同期信号に同期した時系列電気信号として発生される. 水平同期信号

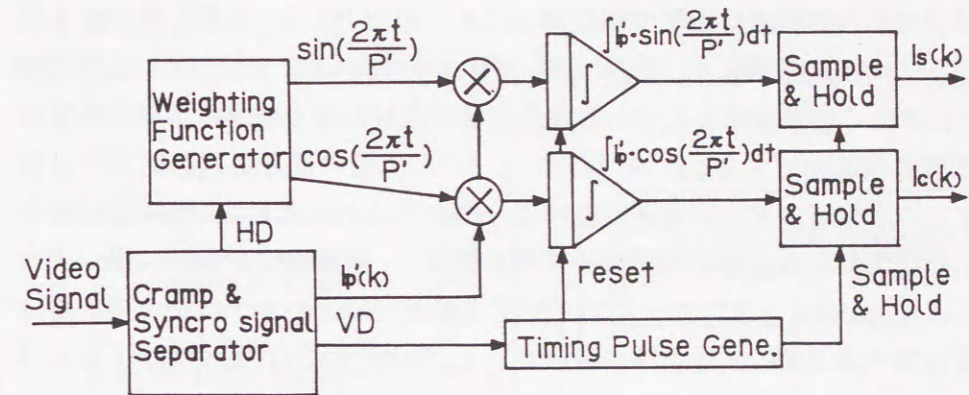


Fig.6-2 Block diagram of the spatial filters with orthogonal and sinusoidal weighting function

発生直後をゼロとする鋸歯状関数の値に基づき, 三角関数発生 IC を用いて正弦波信号ならびに余弦波信号を発生させる. これら時系列正弦波状荷重信号の周期 P' は, 三角関数の位相を与える鋸歯状関数の周期を調整することによって変更可能であり, 試作回路の場合には, $3 \sim 15 \mu\text{s}$ の間で 13 段階の値から選択できる. これは, 有効水平走査周期が $52.6 \mu\text{s}$ であることから, 撮像面上で $0.381 \sim 1.904 \text{ mm}$ に相当する. 映像信号に時系列正弦波状荷重信号を乗じた後, 一画面分の空間積分に代えて一フィールド走査周期間の時間積分を行い, 次のフィールドの積分が終了するまで保持される.

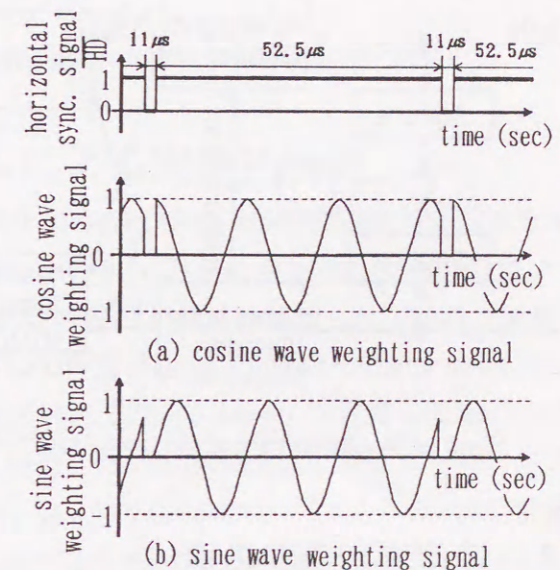


Fig.6-3 Orthogonal and sinusoidal weighting function used in proposed system

3.2 位置測定回路の構成

Fig.6-4 に, 一对の直交正弦波状空間フィルタの出力から, 位置を算出する処理回路のブロック図を示す. 前述のアルゴリズムにおいて, 対象物の光学的特徴に変化がなく並進運動をしている場合には動点Mの描く軌跡の半径に無関係に位置測定が可能であることを示した. しかし, 実際の信号処理回路系では除算器などの演算精度が入力電圧範囲によって左右されるため, 振幅補正回路を付加して空間フィルタの出力振幅の変動を低減し, 演算精度を良好に保つよう試みている. 振幅補正された一对の直交正弦波状空間フィルタの逆正接から位置情報を算出する際, 演算回路の値域が $\pm \pi/2$ であるため, 動点MがFig.6-1で示すリサージュ図形のI. 軸を横切るときに位相弁別を行い, $n\pi$ 相当量の補正を行う. この補正值と逆正接の値の和に, 空間荷重関数の撮像面上での周期によって定まる定数を乗じて, 撮像面上での光点位置を出力する.

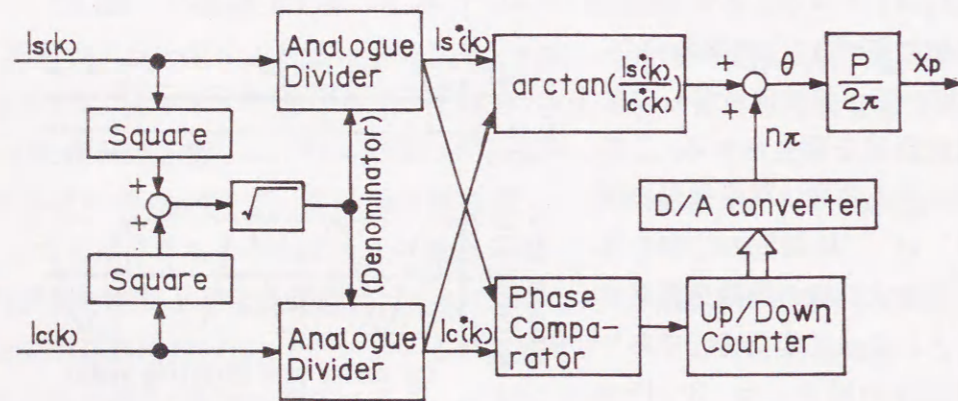


Fig.6-4 Block diagram of the circuits for the position measurement

3.3 速度測定回路の構成

Fig.6-5 に, 一对の直交正弦波状空間フィルタの出力から, 速度を算出する処理回路のブロック図を示す. 位置測定と同様に, 対象物の光学的特徴の変化による精度悪化を防止するため, 振幅補正された一对の直交正弦波状空間フィルタの出力を測定に用いる. 振幅補正された一对の直交正弦波状空間フィルタの出力は, それぞれサンプル・ホールド素子を用いたアナログシフトレジスタに入力され, その内容は1/60秒ごとにシフトされる. 現時点での空間フィルタ出力とアナログシフトレジスタの2段目の内容を用いて, インタレース方式によ

4. 試作測定システムによる実験的検討

るフィールド間の差に影響されことなく, 速度測定を行うことが可能である. 逆正接演算回路の出力に, フィールド走査周期と空間荷重関数の撮像面上での周期によって定まる定数を乗じて, 撮像面上での光点の速度を出力する.

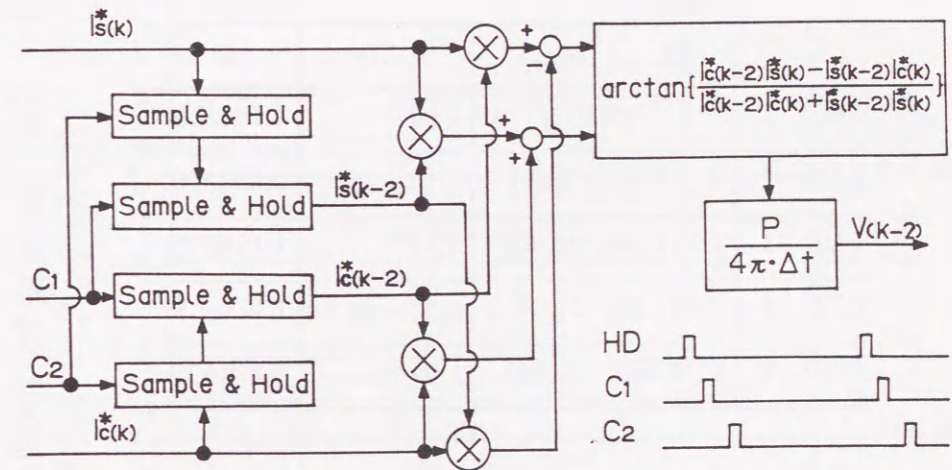


Fig.6-5 Block diagram of the circuits for the velocity measurement

4. 試作測定システムによる実験的検討

提案した位置, 速度測定アルゴリズムならびに信号処理回路の有効性を確認するため, 対象物として直径3.2mmの赤色LEDを5個配置したものをを用い, 試作回路系によって位置, 速度の測定を行った. 実験に使用した工業用カメラは, 最低被写体照度2 Lx(F1.4)の1/1000秒電子シャッター付1/2インチ CCDカメラ(502×485画素)で, 有効撮像領域はX方向6.426mm, Y方向4.802mmであり, レンズはF:1.4, f=58mmのものを使用した. 測定対象物は, レンズマウントの前方840mmの位置に設置した. このとき, 倍率は 7.66×10^{-2} であった. 測定範囲は有効撮像領域と同一であるが, 試作回路ではX方向(有効撮像領域の幅6.426mm)のみに空間荷重を設定しているためY方向の測定は不可能である. また, 光点の広がり半径 r_{pm} や測定条件, 測定結果を示すための長さの基準は, 有効撮像領域のX方向の幅(6.426mm)とし, それぞれ無次元化して「%F.S.」の表記を用いる. 測定時の基準となる対象物の位置は, 5個の赤色LED(LED1~LED5)のうち特徴的光点としたLED1の撮像面上での位置とした. 赤色LED(LED1~LED5)の配置ならびに光点形状をTable 6-1に示す. 対象物は電気式サーボ機構の移動テーブル台上に設置され, 外部より加えられる電気信号に従って移

動される. 対象物の特徴的光点の正確な位置は, 位置検出用ポテンシオメータの出力値より換算して求めた.

Table 6-1 Specification of measured targets

	$(\Delta x_{pm}, \Delta y_{pm})$	I_{0m}/I_{01}	r_{pm}
LED 1	(0, 0)	1.00	1.18%F.S.
LED 2	(11.44, 0.72)	9.10×10^{-2}	0.88%F.S.
LED 3	(-11.56, 12.40)	2.79	1.16%F.S.
LED 4	(-11.98, -11.68)	9.25×10^{-1}	1.17%F.S.
LED 5	(11.56, -12.52)	1.05	1.15%F.S.

4.1 空間フィルタ出力の解析

対象物を振幅23.8%F.S.(1.532mm), 周期5.34秒の正弦波状に往復移動させ, 周期11.86%F.S.(0.762mm)の直交正弦波状空間フィルタを通して観察した場合の出力波形を, Fig.6-6に示す. 図より, 一对の直交正弦波状空間フィルタの出力は, それぞれ対象物の移動に従って直交性を保持したまま正弦波状, 余弦波状に変化していることがわかる. これより, 提案した位置, 速度の測定アルゴリズムが適用可能であることが判明した. これをFig.6-1にならいうりサージュ図形としたものがFig.6-7である.

一組の正弦波状空間フィルタの出力信号によって描かれるリサージュ図形は環状となるが, レンズと対象物との相対的關係による光量変化や像の歪みなどにより真円とはならず, 対象の移動に伴い変形している. しかし, 振幅補正を行った後の波形では, 同様の移動に対してもその図形は半径が一定の円となり, 振幅補正回路の有効性が確認された. また, 振幅補正後の出力を用いれば2出力間の直交性も良好に保たれ, 位置と速度の計測が精度良く行えるものと考えられる.

4.2 位置測定誤差の解析

位置測定精度を検討するため, 対象物を電気サーボ式移動テーブルで一定量づつ移動させ, 対象物の特徴的光点の位置と位置測定回路の出力より測定誤差

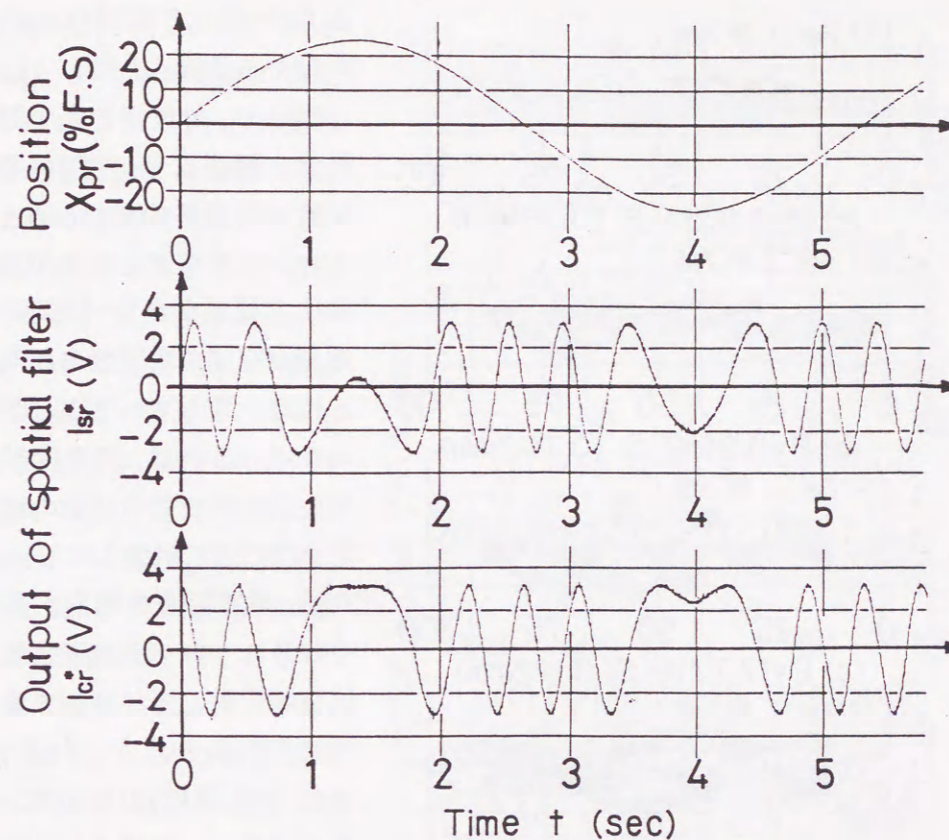


Fig.6-6 Waveform of orthogonal spatial filters

を求めた. 対象物の光学的特徴の違いによる測定精度の変化を検討するため, 対象物の特徴的光点であるLED1のみを点灯した場合の位置測定誤差 x_{e1} と, 5個すべてを点灯した場合の位置測定誤差 x_{e5} をFig.6-8に示す. 対象物の基準位置は, LED1のみ点灯時, 全LED点灯時ともに対象物の特徴的光点であるLED1の位置 x_{p1} とした. 測定に用いる空間フィルタの荷重関数の周期は, 5.93%F.S.(0.381mm)

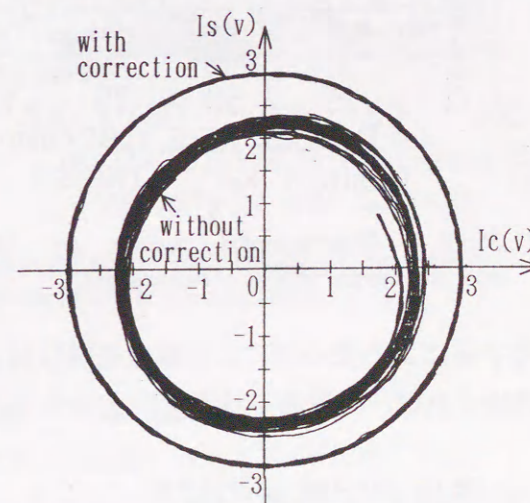


Fig.6-7 Lissajou's figure obtained from spatial filters

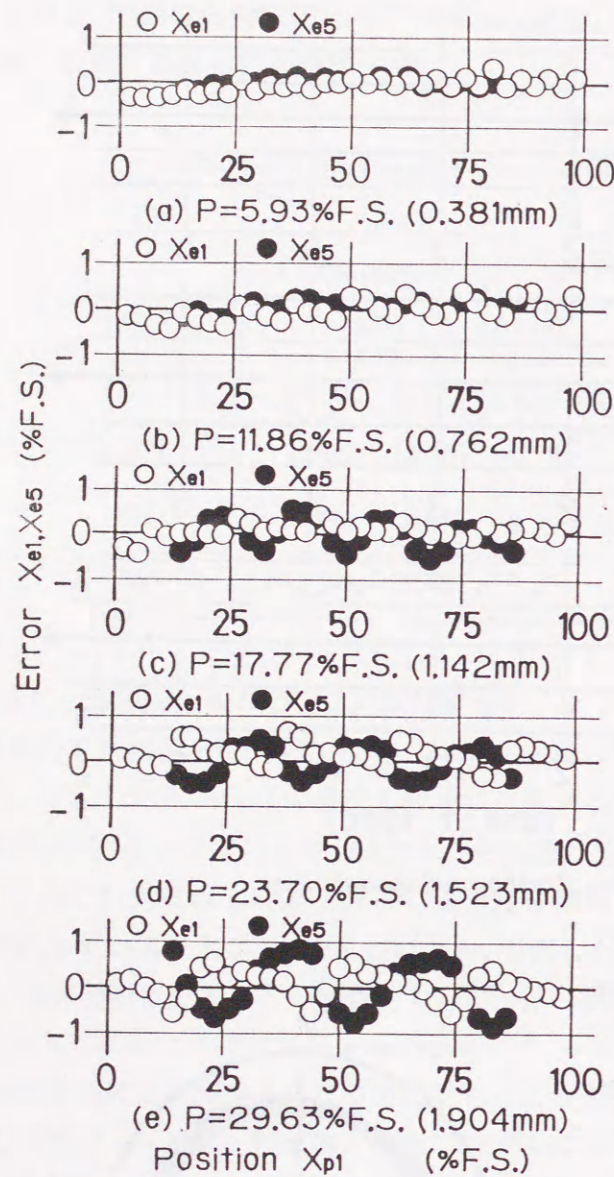


Fig.6-8 Experimental results for the position measurement of moving point

り、光学系による像の歪による誤差を除けば、正弦波状空間荷重を連続的に歪なく発生すれば、位置測定精度を向上させることが可能であると考えられる。

4.3 速度測定誤差の解析

速度測定精度を検討するため、対象物を電気サーボ式移動テーブルで一定速度で移動させ、対象物の特徴的光点の速度と速度測定回路の出力より測定誤差

から 29.83%F.S.(1.904mm)の間で5段階とした。

図より、対象物の光学的特徴に関係なく、空間荷重関数の周期が増大するともなって位置測定誤差が増加する傾向があり、誤差の増減は空間荷重関数の周期とほぼ一致していることがわかる。これは、荷重関数発生回路内で荷重関数の値を $\pi/8$ ごとに計算しているため、荷重関数の周期が長くなるにつれて直交正弦波状空間荷重の歪が増加するためであると考えられる。また、全LED点灯時(ランダムパターンの場合)の誤差がLED1のみ点灯時(単一光点の場合)の誤差と比較して大きいのは、レンズなどの光学系の特性のため画面全域にわたって対象物が同一条件で撮像されないため、空間フィルタ出力の位相角 α が変動するためであると考えられる。これより

4. 試作測定系による実験的検討

を求めた。位置測定の際と同様、対象物の光学的特徴の違いによる測定精度の変化を検討するために、対象物の特徴的光点であるLED1のみを点灯した場合の速度測定誤差 V_{e1} と、5個すべてを点灯した場合の速度測定誤差 V_{e5} をFig.6-9に示す。測定結果を評価する上で基準とした速度は、LED1のみ点灯時、全LED点灯時ともに対象物の特徴的光点であるLED1の速度 V とした。また、空間フィルタの荷重関数の周期は、位置測定時と同一とした。図より、対象物の光学的特徴に関係なく、空間荷重関数の周期が増大するにつれて速度測定誤差が増加する傾向があることがわかる。これは、位置測定と同様、直交正弦波状空間荷重の歪のためであると考えられる。また、全LED点灯時(ランダムパターンの場合)の誤差が

LED1のみ点灯時(単一光点の場合)の誤差と比較して大きいのも、光学系による対象物像の歪を原因とした位相角 α の変動によるものと考えられる。

ところで、直交正弦波状荷重関数の周期が短い場合に高速度域で測定値が示されていないのは、測定アルゴリズムに基づく測定限界があるためである。提案した速度測定アルゴリズムにおいては、NTSC方式の工業用カメラがサン

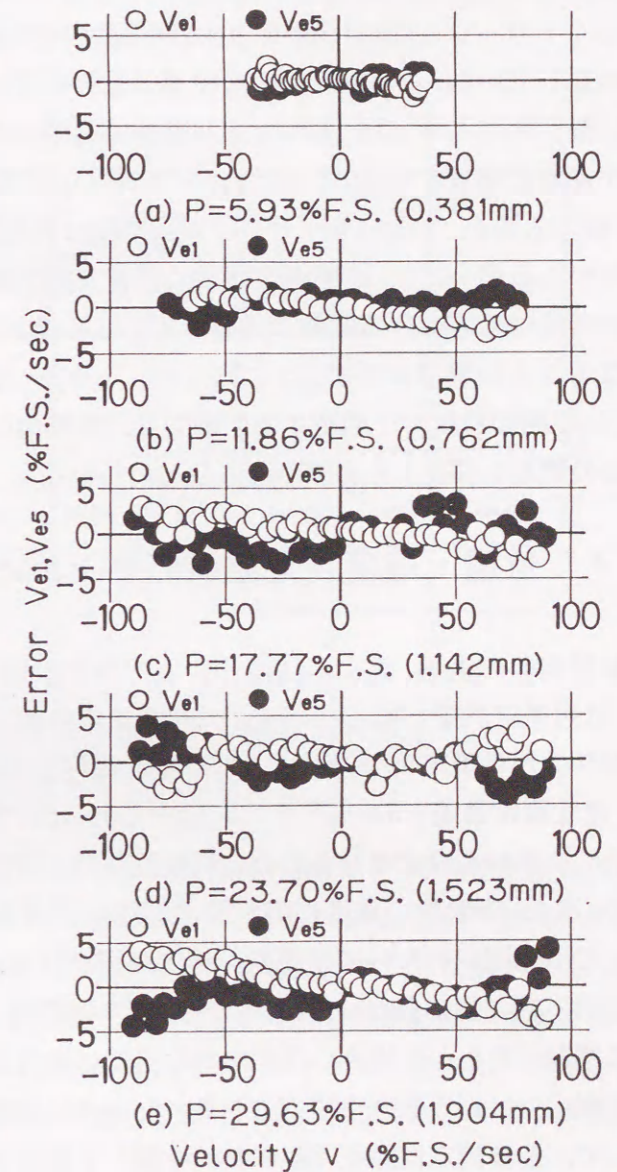


Fig.6-9 Experimental results for the velocity measurement of moving point

ル周期を1/30秒とするサンプル値系であると考え、1サンプル周期間に動点Mが描くリサージュ図形(Fig.6-1)の回転角の変化量を求め、その変化量を速度に換算している。この回転角の変化量は信号処理回路の特性によって $\pm\pi/2$ 以下に限られており、変化量が $\pm\pi/2$ を越える場合には $\pm\pi$ から変化量を減じた値が速度に換算される。そのため、1サンプル周期間の回転角の変化量が $\pm\pi/2$ を越える場合、すなわち1サンプル周期間に荷重関数の周期の $\pm 1/4$ を越える移動がある場合には、速度測定結果に大きな測定誤差が生じる。よって、速度測定が可能な範囲は荷重関数の周期が短くなるほど狭く、周期が長くなるほど広くなること明らかである。これらのことから、対象物の速度を精度良く、かつ、広範囲にわたって測定するためには、対象物の速度に応じて適応的に荷重関数の周期を調整する必要があることがわかる。

4.4 位置・速度測定結果のまとめと精度向上に関する提案

検証実験の結果、直交正弦波状荷重関数が短周期5.93%F.S.(0.381mm)の場合、位置測定誤差 $\pm 0.5\%$ F.S.以内、速度測定誤差 $\pm 2.5\%$ F.S./sec以内、また、荷重関数が長周期29.83%F.S.(1.904mm)の場合、位置測定誤差 $\pm 1.0\%$ F.S.以内、速度測定誤差 $\pm 5.0\%$ F.S./sec以内であった。さらに、正弦波状空間荷重を連続的に歪なく発生させることにより位置測定精度を向上させることが可能であり、また、対象物の速度に応じて適応的に荷重関数の周期を調整することによって広範囲にわたって精度良く速度測定が行えるものと期待できる。この周期の適応的調整にあたっては、1サンプル周期間に荷重関数の $\pm 1/4$ 周期を超える移動が発生した場合、提案する手法では速度測定が不可能となることと、位置測定では短周期の空間荷重を用いた場合に測定精度が良好となることを考慮して、速度測定に関する限界条件を満たす範囲で可能な限り短周期の荷重関数を選択することが、位置測定ならびに速度測定ともに良好な測定精度を得るために重要であると考えられる。

4.5 歩行時における下肢の位置と速度の測定

比較的速度の遅い移動体の動的位置計測の一例として、カメラにF=1.6, F=16mmのレンズを装着し、カメラの前方4mのところを撮像面に平行に歩行する人間の各関節の位置と速度の計測を行った。この時の倍率は 3.08×10^{-3} であった。外乱光の影響による計測誤差を軽減するため、各関節にスポット光源

を付けて特徴点とし、暗室内で撮影した画像をVTRに記録して解析した。例として左足首の位置と速度の測定結果を、Fig.6-10に示す。

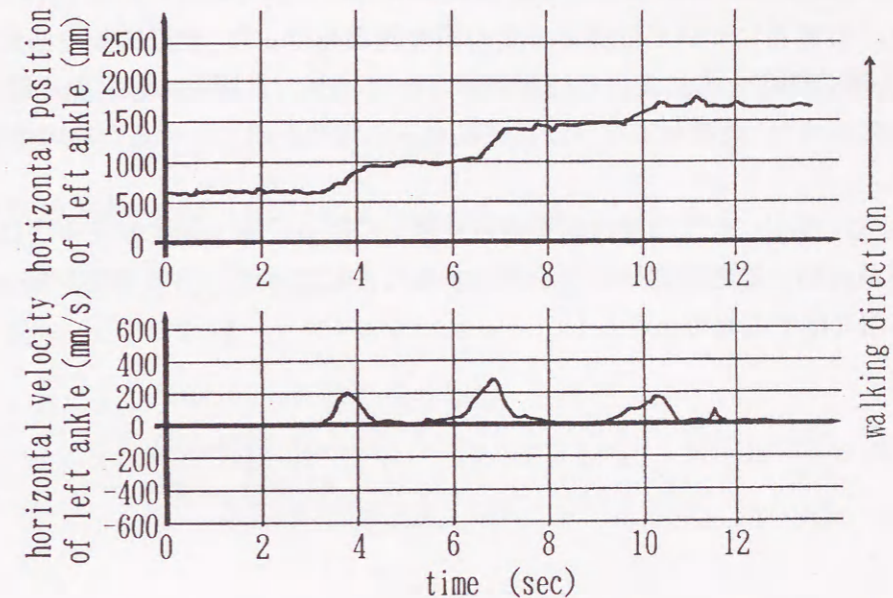


Fig.6-10 Experimental results for the position and velocity measurement of walking human

他の関節の位置と速度も同様にして計測可能であり、その測定精度は良好であることが確認できた。人間の歩行のように比較的速度が遅い移動体の場合、提案する計測システムが有効であることが示された。また、位置と速度の計測処理が独立して行われているため、測定誤差が他方の測定結果へ悪影響を与えておらず、同時計測システムとして有効であることが確認された。将来、空間分解能の高いハイビジョンカメラなどを用いれば、さらに精度の良い計測が可能になると考えられる。

5. おわりに

汎用的工業用カメラを用いて比較的速度の遅い移動体の位置と速度を同時に計測する手法として、正弦波状荷重関数重畳法を提案した。この手法は正弦関数と余弦関数により空間荷重を定めて電子的に空間フィルタを構成し、これら直交正弦波状空間フィルタの一对の出力がもつ直交性を用いてリサージュ図形を描き、その軌跡より水平走査線方向に往復運動する対象物の位置と速度を求めるものである。本報告では、正弦波状荷重関数重畳法の演算アルゴリズムと

実験的検証結果を示した。

対象物が単一光点である場合とランダムパターンである場合について演算アルゴリズムを示し、その後アナログ演算素子により信号処理回路を試作して、それぞれの場合について位置と速度の同時測定を行った。検証実験の結果、位置測定、速度測定ともに良好な結果が得られた。また、光学系に起因する以外の誤差を軽減させ、位置測定ならびに速度測定の精度を向上させるための指針を導いた。

これより、提案した正弦波状荷重関数重畳法による位置・速度測定手法は、信号処理系内部に適応的調節要素を付加することによってさらに精度が向上し、十分実用に期するものと考えられる。

付録A 正弦波状荷重関数を有する 空間フィルタの出力波形の詳細な導出

特徴点の一つの光点で、その輝度分布が式(A-1)のガウス関数で表されると仮定する。

$$I_{p1}(x, y) = I_{01} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_{p1})^2 + (y-y_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right] \quad (\text{A-1})$$

この光点を、X方向に無限長さの余弦波状荷重関数をもつ空間フィルタを介して観測したとすれば、次式となる。

$$\begin{aligned} I_{c1} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{p1}(x, y) \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x}{P}\right) dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{01} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_{p1})^2 + (y-y_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right] \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x}{P}\right) dx dy \\ &= I_{01} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{(y-y_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{(x-x_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x}{P}\right) dx dy \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

ここで、

$$x - x_{p1} = u$$

なる変換を行うと、

$$I_{c1} = I_{01} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{(y-y_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{u^2}{r_{p1}^2}\right\} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{u+x_{p1}}{P}\right) du dy \quad (\text{A-3})$$

となる。ここで、

$$\cos\left\{2\pi \cdot \frac{u+x_{p1}}{P}\right\} = \cos\left(2\pi \cdot \frac{u}{P}\right) \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) - \sin\left(2\pi \cdot \frac{u}{P}\right) \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) \quad (\text{A-4})$$

より、

$$\begin{aligned} I_{c1} &= I_{01} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{(y-y_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} \\ &\quad \left[\cos\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{u^2}{r_{p1}^2}\right\} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{u}{P}\right) du \right. \\ &\quad \left. - \sin\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{u^2}{r_{p1}^2}\right\} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{u}{P}\right) du \right] dy \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

よって、

$$I_{c1} = I_{01} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{(y-y_{p1})^2}{r_{p1}^2}\right\} \left[\cos\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{-u^2/r_{p1}^2\} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{u}{P}\right) du - \sin\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) \cdot 0 \right] dy \quad (\text{A-6})$$

となる。また、 y について、同様に、

$$y - y_{p1} = v$$

なる変換を行えば、

$$\begin{aligned} I_{c1} &= I_{01} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{-v^2/r_{p1}^2\} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{-u^2/r_{p1}^2\} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{u}{P}\right) dudv \\ &= I_{01} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{-v^2/r_{p1}^2\} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{-u^2/r_{p1}^2\} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{u}{P}\right) dudv \end{aligned} \quad (\text{A-7})$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{-u^2/r_{p1}^2\} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{u}{P}\right) du &= 2 \cdot \int_0^{+\infty} \exp\{-u^2/r_{p1}^2\} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{u}{P}\right) du \\ &= 2 \cdot \frac{r_{p1} \cdot \sqrt{\pi}}{2} \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot r_{p1}^2}{P^2}\right) \end{aligned} \quad (\text{A-8})$$

であるから、代入して整理すれば次式となり、空間フィルタの出力となる。

$$\begin{aligned} I_{c1} &= I_{01} \cdot \sqrt{\pi} \cdot r_{p1} \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot r_{p1}^2}{P^2}\right) \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) \cdot 2 \cdot \int_0^{+\infty} \exp\{-v^2/r_{p1}^2\} dv \\ &= I_{01} \cdot \sqrt{\pi} \cdot r_{p1} \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot r_{p1}^2}{P^2}\right) \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) \cdot 2 \cdot \left(\frac{\sqrt{\pi} \cdot r_{p1}}{2}\right) \\ &= I_{01} \cdot \pi \cdot r_{p1}^2 \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot r_{p1}^2}{P^2}\right) \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x_{p1}}{P}\right) \end{aligned} \quad (\text{A-9})$$

同様にすれば、正弦波状荷重関数をもつ空間フィルタの出力のほか、特徴点がランダムパターンの場合の空間フィルタの出力が求められる。

第7章 周期可変空間フィルタによる位置・速度計測とその高精度化

工業用カメラの映像信号に電氣的に発生した空間荷重を掛け合わせることで構成した空間フィルタを三組使用し、一組で速度を、残り二組で位置を測定する位置・速度同時測定系を提案する。第6章で示した周期を固定した一組の空間フィルタを用いた速度測定法では、荷重関数の周期によって速度測定範囲が決定されて高速移動物体の速度計測が困難であり、また、位置測定においても測定開始時の初期位置を決定するために他の計測手法を併用することが必要であった。これらの問題点を改善するため、測定した速度情報に従って荷重関数の周期を適応的に調整する速度測定系と、周期の異なる二組の空間フィルタを用いた絶対位置測定系を構成した。これら三組（合計6枚）の空間フィルタ処理を同時に並列して行い、独立した速度測定回路ならびに位置測定回路を用いて実時間計測を行った。実験的検討を行い、その有効性を確認した。

1. はじめに

空間荷重関数を用いた計測の例として、受光光学系に透過率分布関数で表される空間荷重を掛け合わせた、空間フィルタ法による速度測定があげられる。ランダム模様 of 測定対象物を空間フィルタで観測した場合の出力信号は、空間フィルタの狭帯域通過特性から狭帯域ランダム信号となり、この信号を周波数解析して抽出される中心周波数に空間フィルタの周期と光学的倍率を乗じて測定対象物の速度を算出[61]している。速度計測の過程で行われる信号処理の簡略化、また、測定精度の向上を図るためには、空間フィルタの周期の逆数で与えられる空間周波数にのみ選択特性をもつ鋭い狭帯域通過特性とすることが望まれ、そのためには、空間荷重を決定する透過率分布関数を正弦波状関数とすることが必要となる。格子状スリットパターンやフォトダイオード・アレイを使用した空間フィルタでは透過率分布関数を正弦波状関数とすることが困難なため、イメージセンサや工業用カメラを用いて電子的に構成した空間フィルタ

[72,75] が提案された. これらの電子的空間フィルタでは透過率分布関数を変更することが容易であり, 測定条件に応じて空間フィルタの周期を調整することが可能[72]である. さらに, 空間フィルタの出力が高調波成分信号が少ない正弦波状信号となることから, 信号処理の簡略化[75]がなされるばかりでなく, 位置と速度の同時測定[75]が可能となる. しかしながら, 空間フィルタに採用される空間荷重が周期的であるため, 基本的に空間荷重関数一周期内の絶対位置測定となり, それ以上では空間荷重関数一周期通過毎に補助的手段により相対的位置の補正[75]を必要とする. そこで本章では, 工業用カメラの映像信号に一对の直交正弦波状荷重関数を重畳して構成した周期の異なる電子的空間フィルタを三組作成し, そのうち二組の空間フィルタで絶対位置を, 残り一組の空間フィルタで速度を測定する位置・速度の同時測定系を提案する. これら三組の電子的空間フィルタの周期は, 被測定物の速度を精度良く測定することを目的に, マイクロプロセッサを用いたデジタルコントローラによって自動調整される. この周期可変機能を付加したことにより, 速度測定に最適な空間フィルタの周期を選択することが可能となった. また, 周期の異なる二組の空間フィルタの出力信号間の位相差に注目することにより, 従来困難とされていた測定開始時における対象物の初期位置決定を可能とし, 他の計測手法を併用することなく移動物体の撮像面上の位置を直接測定することが可能となった. 以下, 周期可変機能を有する電子的空間フィルタを用いた絶対位置・速度の同時測定系の構成, 測定アルゴリズム, ならびに, 比較的速度の速い運動物体を測定した結果について報告する.

2. 一組の直交正弦波状空間フィルタを用いた速度測定

2.1 一組の空間フィルタ出力による速度測定アルゴリズム

正弦波状荷重による空間フィルタの出力は, 第6章でも述べたように, 対象物が際立って明るい一つの光点であると仮定し, 変形せずに工業用カメラの視野内を移動する場合には, 式(7.1),(7.2)で表される. ここで, $I_c(k)$, $I_s(k)$ はそれぞれ余弦関数, 正弦関数を荷重関数とする空間フィルタの出力, $A(k)$ は対象物の明るさ, 形状, 空間フィルタの周期 P によって定まる空間フィルタ出力の振幅, $x(k)$ は対象物の位置であり, (k) は k 番目フィールドの時刻における値を意味する.

$$I_c(k) = A(k) \cos\left(2\pi \frac{x(k)}{P}\right) \quad (7.1)$$

$$I_s(k) = A(k) \sin\left(2\pi \frac{x(k)}{P}\right) \quad (7.2)$$

式(7.1),(7.2)の振幅 $A(k)$ の変化は速度測定の精度を悪化させるため, 両式から算出した振幅 $A(k)$ で両出力を除すことによって, 常に振幅が一定値になるよう補正を行い, 次式とする.

$$I_c(k) = \cos\left(2\pi \frac{x(k)}{P}\right) = \cos(\theta(k)) \quad (7.3)$$

$$I_s(k) = \sin\left(2\pi \frac{x(k)}{P}\right) = \sin(\theta(k)) \quad (7.4)$$

この2出力を, 横軸に余弦波状荷重を採用した空間フィルタの出力, 縦軸に正弦波状荷重を採用した空間フィルタの出力をとって図示すると, Fig.7-1に示すように対象物の移動にともなって円状の軌跡を描く. 原点は横軸にあり, 対象物が荷重関数の周期と同一距離移動した時に, 空間フィルタ出力を示す動点 M は円状軌跡上

を一回転する. 対象物の運動にともなう動点 M の円状軌跡上の移動に注目し, K 番目フィールド時の位相角 $\theta(K)$ と $K-2$ 番目フィールド時の位相角 $\theta(K-2)$ から前章と同様に速度測定アルゴリズムを導く.

K 番目, $K-2$ 番目フィールド時の振幅補正された空間フィルタ出力は, それぞれ次式で示される.

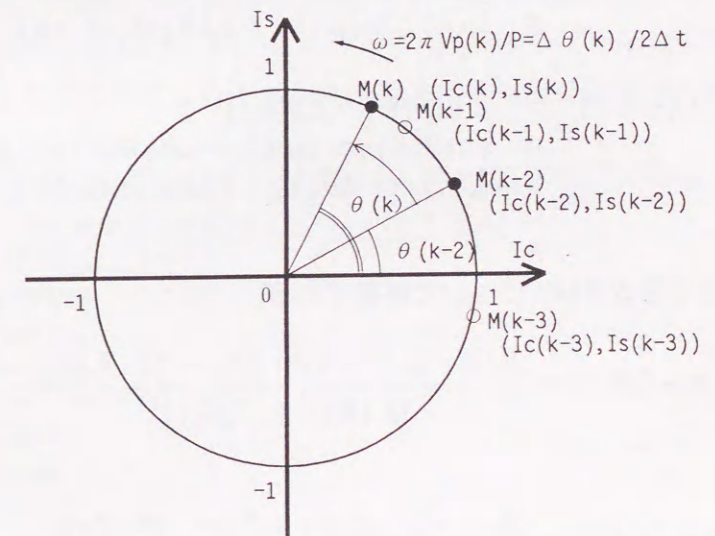


Fig. 7-1 Principle of velocity measurement

$$\begin{cases} I_c(k) = \cos\left(2\pi \frac{x(k)}{P}\right) = \cos(\theta(k)) \\ I_s(k) = \sin\left(2\pi \frac{x(k)}{P}\right) = \sin(\theta(k)) \\ I_c(k-2) = \cos\left(2\pi \frac{x(k-2)}{P}\right) = \cos(\theta(k-2)) \\ I_s(k-2) = \sin\left(2\pi \frac{x(k-2)}{P}\right) = \sin(\theta(k-2)) \end{cases} \quad (7.5)$$

いま、この2フィールド間(1フィールド走査周期を Δt 秒とすれば $2\Delta t$ 秒間)に対象物の移動によって位相角が $\Delta\theta(k)$ 増加したと考えれば、次式が成立する。

$$\theta(k-2) = \theta(k) - \Delta\theta(k) \quad (7.6)$$

この関係を式(7.5)に代入し整理すれば次式が得られる。

$$\begin{aligned} I_c(k-2) &= \cos\{\theta(k) - \Delta\theta(k)\} \\ &= \cos\theta(k)\cos\Delta\theta(k) + \sin\theta(k)\sin\Delta\theta(k) \\ &= I_c(k)\cos\Delta\theta(k) + I_s(k)\sin\Delta\theta(k) \end{aligned} \quad (7.7)$$

$$\begin{aligned} I_s(k-2) &= \sin\{\theta(k) - \Delta\theta(k)\} \\ &= \sin\theta(k)\cos\Delta\theta(k) - \cos\theta(k)\sin\Delta\theta(k) \\ &= I_s(k)\cos\Delta\theta(k) - I_c(k)\sin\Delta\theta(k) \end{aligned} \quad (7.8)$$

これらを $\Delta\theta(k)$ について整理すれば、

$$\sin\Delta\theta(k) = \frac{I_c(k-2) \cdot I_s(k) - I_s(k-2) \cdot I_c(k)}{\{I_c(k)\}^2 + \{I_s(k)\}^2} \quad (7.9)$$

$$\cos\Delta\theta(k) = \frac{I_c(k-2) \cdot I_c(k) + I_s(k-2) \cdot I_s(k)}{\{I_c(k)\}^2 + \{I_s(k)\}^2} \quad (7.10)$$

から、

$$\begin{aligned} \Delta\theta(k) &= \arctan\left\{\frac{\sin\Delta\theta(k)}{\cos\Delta\theta(k)}\right\} \\ &= \arctan\left\{\frac{I_c(k-2) \cdot I_s(k) - I_s(k-2) \cdot I_c(k)}{I_c(k-2) \cdot I_c(k) + I_s(k-2) \cdot I_s(k)}\right\} \end{aligned} \quad (7.11)$$

となる。これより2フィールド間の平均速度 $V(k-2)$ は次式となる。

$$\begin{aligned} V(k-2) &= \frac{P \cdot \Delta\theta(k)}{4\pi\Delta t} \\ &= \frac{P}{4\pi\Delta t} \cdot \arctan\left\{\frac{I_c(k-2) \cdot I_s(k) - I_s(k-2) \cdot I_c(k)}{I_c(k-2) \cdot I_c(k) + I_s(k-2) \cdot I_s(k)}\right\} \end{aligned} \quad (7.12)$$

速度算出にあたって2フィールド間の比較(すなわち、偶数番目フィールド同士、奇数番目フィールド同士の比較)を行っているのは、○で示す奇数番目のフィールドと●で示す偶数番目のフィールドとではインタレース方式走査のために映像が一水平走査線分上下するために画像に差異が生じており、この影響を軽減するためである。その結果得られる速度は、2フィールド走査周期(1/30秒)間の平均速度となる。

2.2 正弦波状荷重をもつ空間フィルタを用いた速度測定

2.2.1 ハイブリッド回路による高性能空間フィルタの構成

本研究で構成した電子的空間フィルタのブロック図をFig.7-2に示す。電子的空間フィルタは、A/D変換器によりデジタル信号化された対象物の映像信

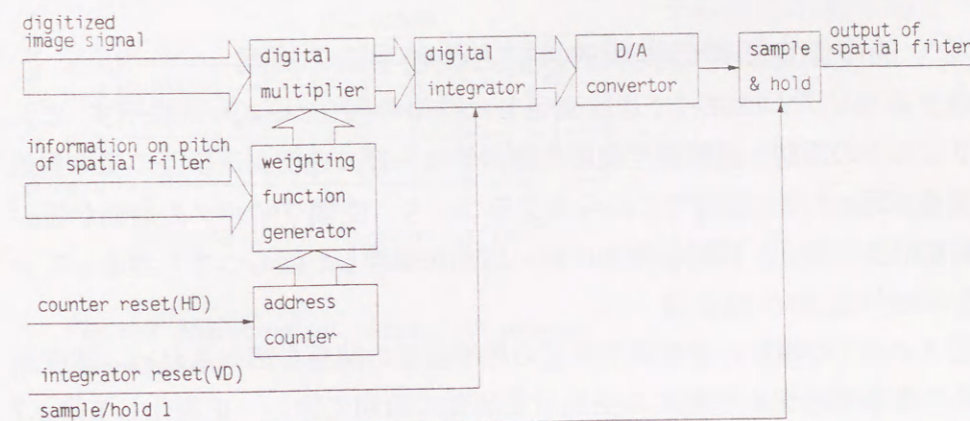


Fig. 7-2 Block diagram of new spatial filter

号と、ROMに予め書き込まれている正弦波状荷重関数値との重畳によって構成される。

水平同期信号発生直後にデジタル積分器として用いているデジタル・シグナル・プロセッサのアクムレータを初期化する。その後、有効水平走査範囲（工業用カメラの撮像面上では6.426mm）を840分割するように、水平同期信号発生直後を原点として $6.25\mu\text{s}$ （工業用カメラの撮像面上では $7.65 \times 10^{-3}\text{mm}$ ）毎に映像信号をA/D変換器によって7ビットのデジタル信号とし、デジタル・シグナル・プロセッサに被乗数として出力する。また、ROM内の正弦波状荷重関数値が、乗数として同様のタイミングで出力される。ROMには13種類の周期の正弦波状荷重が8ビットのデジタル信号として書き込まれており、垂直走査線帰還周期の間に決定される上位アドレスによって、任意の周期の正弦波状荷重信号が選択される。デジタル信号化された映像信号と荷重信号とが乗算されたのち、デジタル積分器として動作するアクムレータ内に累積される。デジタル化された2信号の乗算と累積が一フィールド走査周期（1/60秒）の間連続して時系列処理され、工業用カメラの画像と空間荷重関数との一画面分の空間重畳積分が、積分時間を一フィールド走査周期とする時間積分に置換されて行われた後、垂直同期信号毎にアナログ信号に変換された後に保持される。試作した位置・速度同時測定系では、この空間フィルタの基本構成を六枚用いて三組の直交正弦波状荷重関数を用いた空間フィルタを構成している。

2.2.2 速度測定誤差の実験的検討と改善手法の提案

このアルゴリズムに従って速度測定した結果の例を、Fig.7-3に示す。また、空間フィルタの周期と速度測定範囲の絶対値ならびに速度測定誤差の標準偏差の関係を、Fig.7-4に示す。これらのグラフより、空間フィルタの周期が短いほど測定精度が良く、周期の増加に伴い誤差が増加し、ばらつきも増加していることがわかる。

空間フィルタの周期と速度測定誤差の標準偏差の関係を調べるため、速度測定誤差の標準偏差をそれぞれの空間荷重関数の周期で除し、正規化してFig.7-5に示す。

第6章で使用した空間フィルタでは荷重関数を周期の1/16で等分割して荷重信号を発生しているため、荷重関数の周期が長くなるにつれ荷重信号波形の歪みが増加するのに対して、本章で試作した回路では等時間間隔に荷重信号を発

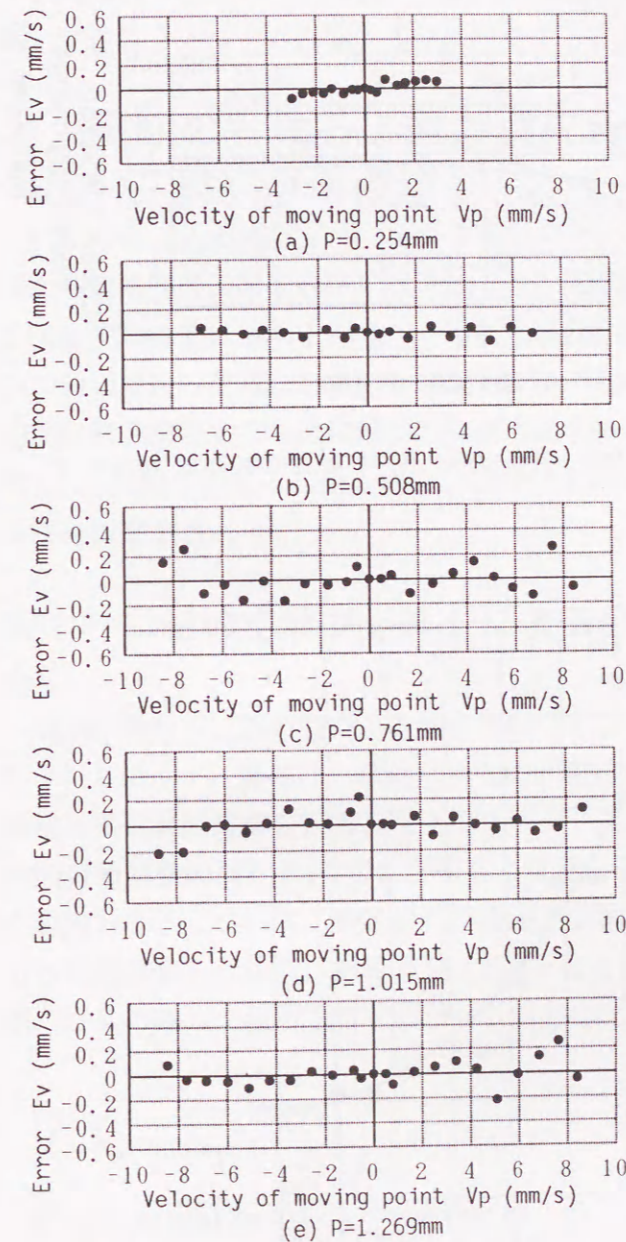


Fig.7-3 Experimental results of velocity measurement

生させるため、荷重関数の周期が長くなるにつれ一周期内に発生される荷重信号の数が増加して正弦波状の信号に近づく。そのため、速度測定に長周期の空間フィルタを使用した場合にも、周期で正規化した相対的な誤差は増加せず、荷重関数の近似度が高くなる長周期では減少していることがわかる。しかし、絶対的な誤差は、長周期の場合に増加する。

また、速度測定範囲の上限は、短周期の場合は低速に、長周期の場合は高速になっている。速度測定範囲は、工業用カメラの動作が基本的に1/60秒をサンプリング間隔とするサンプル値系であることから、2サンプリング間隔に生じる角変化 $\Delta\theta$ (K) が $\pm\pi/2$ （信号処理回路の構成によっては $\pm\pi$ ）以内であり、この範囲を超える角変化が生じた場合には速度算出演算における逆正接計算において誤りが生じ、符号ならびに大きさともに異なる速度が出力される。このため、高速で移動している物体の測定を行うためには、周期を長くする必要がある。

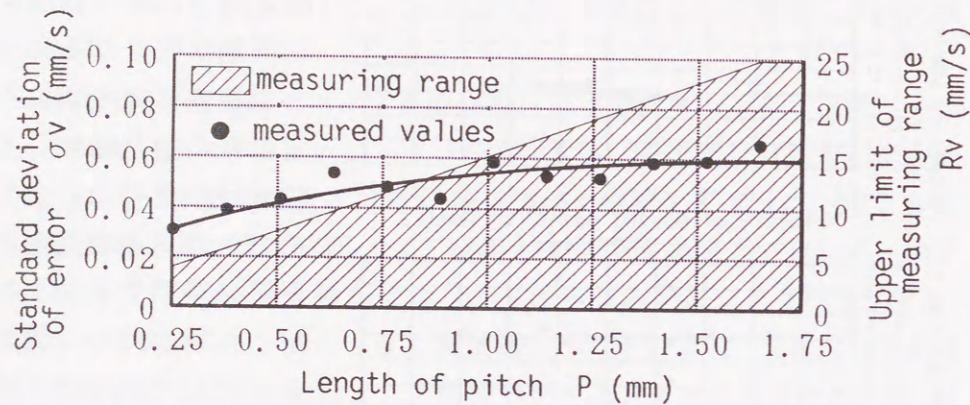


Fig.7-4 Standard deviation and upper limit of measuring range of velocity measurement

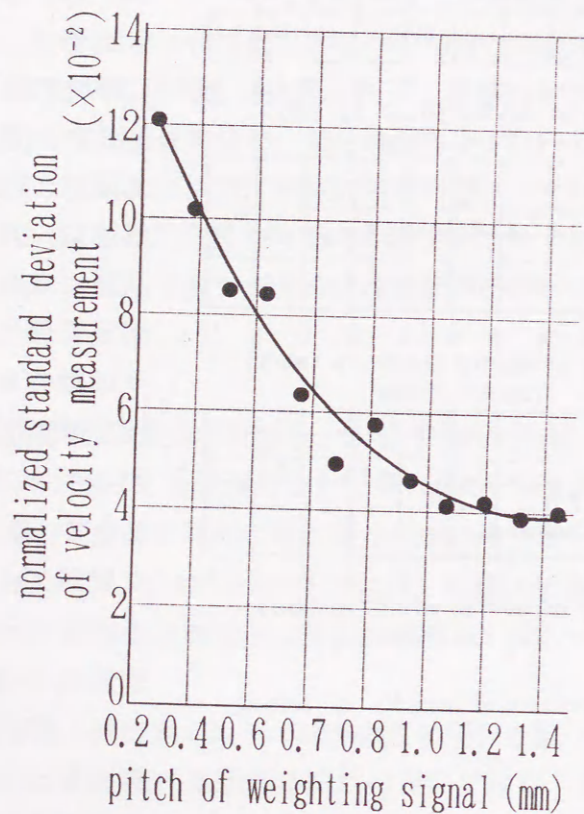


Fig.7-5 Normalized standard deviation of velocity measurement

これらの結果より, 精度良く広範囲の測定を行うためには, 対象物の速度に応じて空間フィルタの周期を柔軟に変更する必要があることがわかる.

3. 周期の異なる二組の直交正弦波状空間フィルタを用いた絶対位置測定

一組の直交正弦波状空間フィルタを用いてIc-Is平面上の動点の幾何学的位置から対象物の位置を測定する手法では, 空間荷重関数の一周期内の絶対位置を決定することは可能であるが, 撮像領域に複数周期の荷重関数が存在する場合に何周期目の位置にあるのかを決定することが不可能であり, 測定開始時の初期位置を決定するために補助的計測手法を併用する必要があった. そこで本章では, 周期が異なる二組の直交正弦波状空間フィルタを用いた絶対位置測定手法を提案する.

3.1 二組の空間フィルタによる絶対位置測定アルゴリズム

周期が異なる二組の直交正弦波状空間フィルタを用いた位置測定の原理を, Fig.7-6に示す. 図には, 横軸に余弦波状荷重を採用した空間フィルタの出力, 縦軸に正弦波状荷重を採用した空間フィルタの出力をとり, 円軌跡の円周長が空間荷重関数の周期P₁, P₂と等しくなるようスケールを換えて空間フィルタの出力を示している. 測定原点が横軸上にあるものとし, 原点から対象物がある距離移動した場合, 各動点M₁, M₂はそれぞれの円周上を移動し円弧を描く. この時の二組の空間フィルタの出力は次式で示される.

$$\begin{cases} I_{c1}(k) = \cos\left(2\pi \frac{x(k)}{P_1}\right) = \cos \theta_1(k) \\ I_{s1}(k) = \sin\left(2\pi \frac{x(k)}{P_1}\right) = \sin \theta_1(k) \\ I_{c2}(k) = \cos\left(2\pi \frac{x(k)}{P_2}\right) = \cos \theta_2(k) \\ I_{s2}(k) = \sin\left(2\pi \frac{x(k)}{P_2}\right) = \sin \theta_2(k) \end{cases} \quad (P_2 < P_1) \quad (7.13)$$

周期P₁, P₂が異なる場合, 対象物の移動距離が一定であるにもかかわらず,

その距離を表す円弧の円周に対する割合が異なるため、それぞれの位置を示す角度 $\theta_1(k), \theta_2(k)$ に差が生じる。

$$\begin{aligned} & \theta_1(k) - \theta_2(k) \\ &= 2\pi \frac{x(k)}{P_1} - 2\pi \frac{x(k)}{P_2} \\ &= 2\pi \left(\frac{P_2 - P_1}{P_1 \cdot P_2} \right) \cdot x(k) \end{aligned} \quad (7.14)$$

この角度差は、対象物の移動にともなって単調に減少（周期 P_1, P_2 の大小関係によっては増加）し、かつ、移動距離に対してただ一つ定まるため、原点からの絶対位置の測定が可能であることがわかる。

また、角度差と二組の空間フィルタ出力の間には、式(7.13)より

$$I_{s1}(k) - I_{s2}(k) = 2 \cos \left\{ \frac{\theta_1(k) + \theta_2(k)}{2} \right\} \sin \left\{ \frac{\theta_1(k) - \theta_2(k)}{2} \right\} \quad (7.15)$$

$$I_{c1}(k) + I_{c2}(k) = 2 \cos \left\{ \frac{\theta_1(k) + \theta_2(k)}{2} \right\} \cos \left\{ \frac{\theta_1(k) - \theta_2(k)}{2} \right\} \quad (7.16)$$

の関係があり、これより角度差は次式で求まる。

$$\theta_1(k) - \theta_2(k) = 2 \arctan \left\{ \frac{I_{s1}(k) - I_{s2}(k)}{I_{c1}(k) + I_{c2}(k)} \right\} \quad (7.17)$$

式(7.14)と(7.17)より、対象物の撮像面上での位置 $x(k)$ は次式で算出される。

$$x(k) = \frac{P_1 \cdot P_2}{\pi(P_2 - P_1)} \cdot \arctan \left\{ \frac{I_{s1}(k) - I_{s2}(k)}{I_{c1}(k) + I_{c2}(k)} \right\} \quad (7.18)$$

式中の逆正接の値が $\pm \pi/2$ （信号処理回路の構成によっては $\pm \pi$ ）以内の範囲、すなわち、

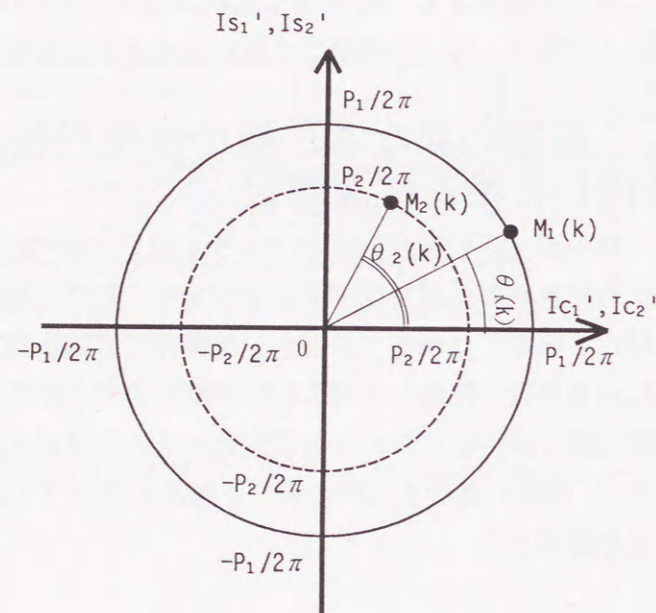


Fig. 7-6 Principle of position measurement

$$\frac{P_1 \cdot P_2}{2(P_2 - P_1)} < x(k) < \frac{-P_1 \cdot P_2}{2(P_2 - P_1)} \quad (7.19)$$

を満足する範囲の絶対位置測定が可能であり、撮像面の水平方向の範囲がこの条件満足するように相異なる周期 P_1, P_2 を設定すれば、測定開始時に他の計測手法を併用して初期位置の決定を行うことなく、撮像面の水平走査範囲において絶対位置測定が可能となる。

3.2 提案する手法による絶対位置測定

Fig.7-7 に絶対位置測定結果の例を示す。試作回路では13種類の正弦波状荷重が発生可能であるが、有効撮像領域の水平方向全域にわたって絶対位置測定を行うためにTable 7-1 に示す4種類の周期の組み合わせが可能であった。グラフには、そのうちの最も測定可能範囲の短いもの（○）と最も測定可能範囲の長いもの（●）の2種類の測定結果を示しているが、両者には著しい差異はなく、精度良く対象物の絶対位置が測定されていることがわかる。これより、

Table 7-1 Measurement range of position measurement

P_A (mm)	P_B (mm)	range (mm)
1.396	1.523	8.371
1.523	1.650	9.894
1.650	1.777	11.544
1.777	1.904	13.321

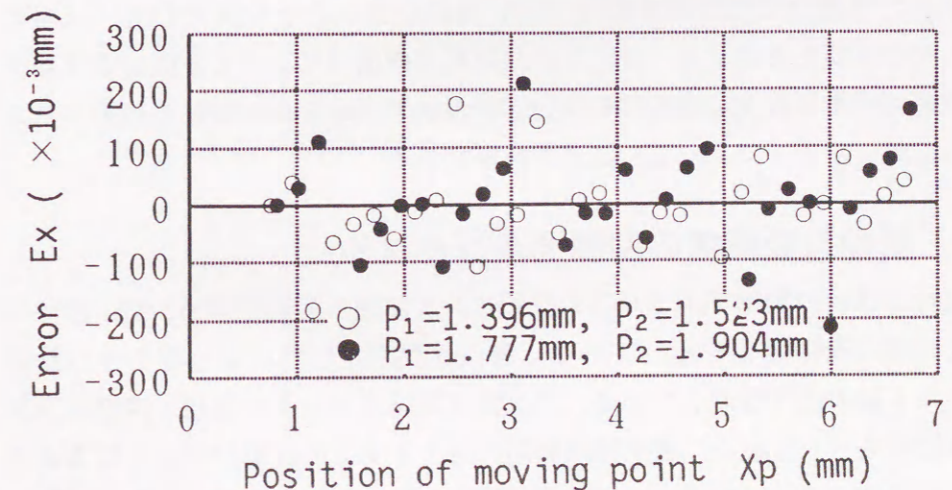


Fig. 7-7 Experimental results of position measurement

提案する周期の異なる二組の空間フィルタを用いた絶対位置測定手法が有効であることが判明した。

4. 周期可変機構を付加した位置・速度同時測定システムの構成

絶対位置測定の結果と速度測定の結果より、広い範囲の速度を精度良く測定するためには可能な限り短い周期を使用し、さらにエリアジングを起こさないよう速度に応じて周期を調整すること、また、対象物の絶対位置を測定するためには周期が異なる二組の空間フィルタを使用する必要があることが判明した。そこで、速度測定用に一組、絶対位置測定用に二組の合計三組の空間フィルタと、速度測定結果を基に周期の調整を行う可変調整機能を付加した、位置・速度同時測定系を提案する。

4.1 周期可変機構を付加した位置・速度同時測定システムのブロック図

周期可変調整機能を有する三組の直交正弦波状空間フィルタをもつ位置・速度同時測定系のブロック図を、Fig.7-8に示す。ブロック図中の空間フィルタ部分は、Fig.7-2を示す。全体は大別して、三組六枚の空間フィルタ、速度測定回路、位置測定回路、Z-80マイクロプロセッサを用いたデジタルコントローラと、周期変更に伴って変化する検出ゲインを再調整するゲイン調整回路によって構成されている。デジタルコントローラは、速度測定回路によって計測された速度に応じて可能な限り短い周期を選ぶことを優先して、三組のフィルタの周期を決定する。決定された周期選択信号によって垂直走査線帰還周期の間に荷重関数発生用ROMの上位アドレスが定まり、新しく選択された三組の空間フィルタによって、計測が継続される。

4.2 周期可変機構の制御アルゴリズム

周期可変機構の制御アルゴリズムをFig.7-9に従って説明する。(a)図は対象物の速度の時間変化を示しており、●は速度測定回路により測定された各フィールド毎の速度を示している。(b)図は空間フィルタの周期と速度測定が可能な範囲を示しており、逆正接演算回路を $\pm\pi$ までの計算が可能となるよう構成した場合のアルゴリズム上で測定可能な領域を斜線部分で、また、試作装置で選択可能な周期を太実線で示している。周期の切替と、切り換え後の空

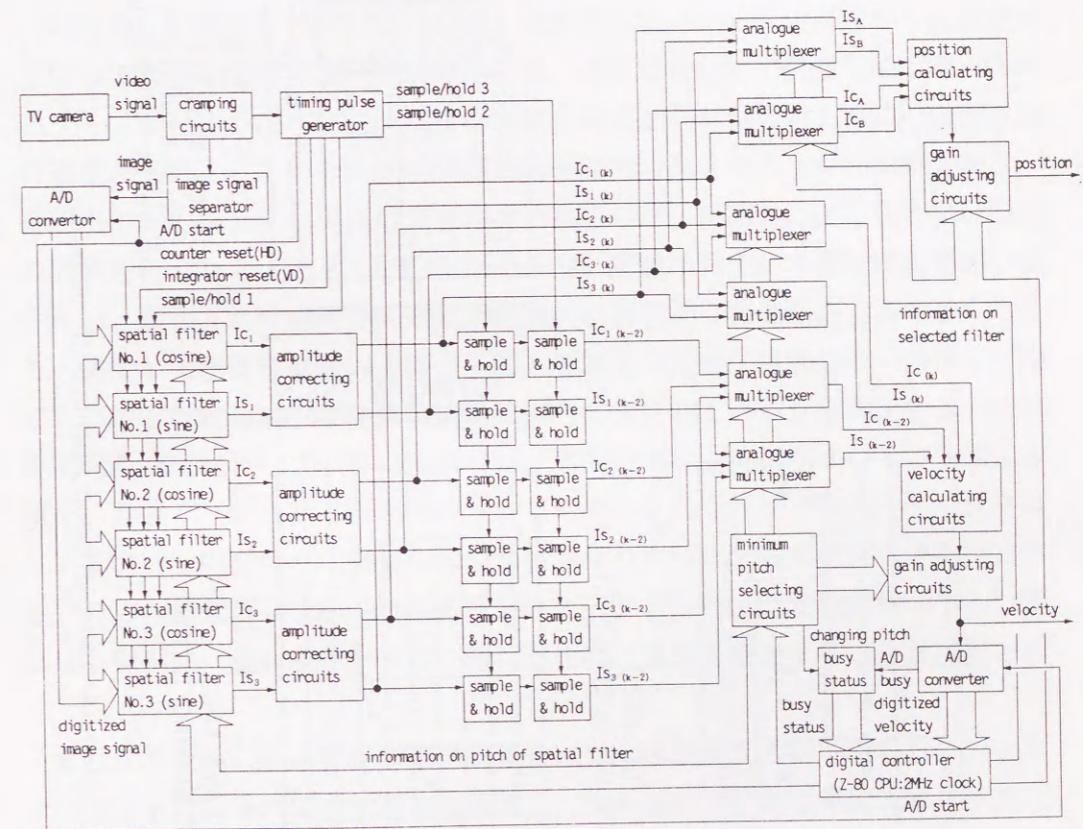


Fig.7-8 Block diagram of position and velocity measurement system with auto pitch adjusting function

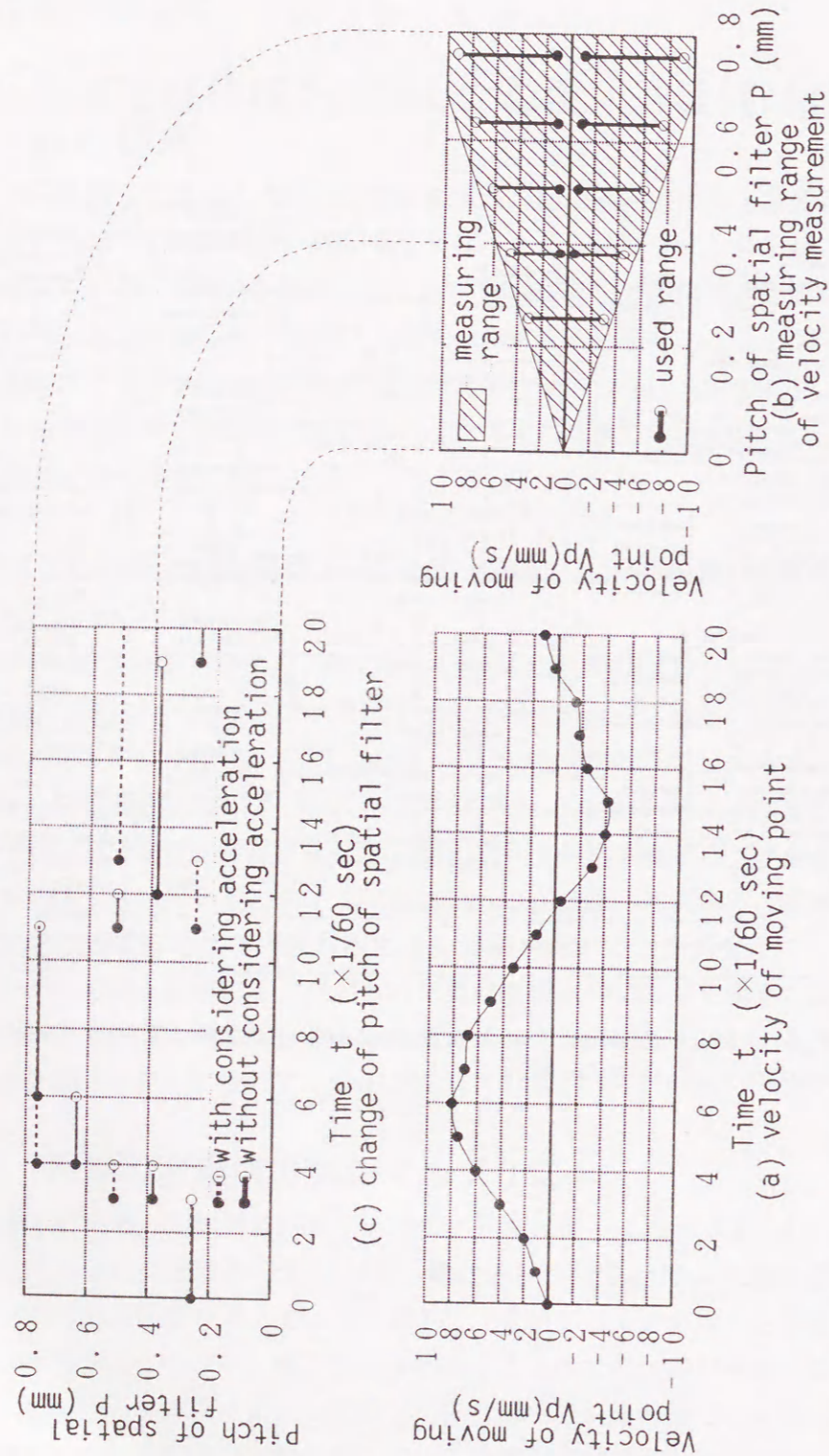


Fig. 7-9 Process to determine a pitch of spatial filter in pitch control

間フィルタの出力が安定するために3フィールド走査周期の時間経過が必要となるため、実際の測定に使用する範囲はそれぞれの周期で測定可能な範囲の10%から80%までの範囲とし、最短周期の場合のみ測定可能範囲の0%から80%までの範囲を使用する。この範囲を「周期使用範囲」と呼び、周期使用範囲の上限と下限の調整は、実験的に行った。

対象物の加速度を考慮しない場合、速度測定回路によって得られる結果だけを用いて周期を決定する。移動開始直後、速度は遅いので最短周期が選択される。一フィールド走査終了後に新たな速度測定結果が得られる毎に、測定された速度が選択されている周期の周期使用範囲内にあるかどうかの判定を行う。範囲内にある場合には周期の変更は行われませんが、範囲外にある場合には周期の調整を行う。デジタルコントローラ内に記憶されている周期使用範囲の表を用い、測定された速度を周期使用範囲内に含む最小の周期を検索する。つまり、速度が周期使用範囲の上限(下限)を越えた場合には周期を一段長く(短く)したと仮定して、表の周期使用範囲内に含まれているかを判定する。周期使用範囲内に含まれていない場合には、周期使用範囲内に含まれるまで順に周期を一段長く(短く)した場合についての判定を行う。この検索をデジタルコントローラ内で行い、最適な周期が検索された時に、周期選択信号を出力する。この検索動作によって(c)図の実線に示すように、速度の変化が小さい時には小刻みに、速度変化が大きい時には大幅に周期を変更することが可能である。

また、対象物の加速度を考慮する場合には、速度測定の結果をもとにデジタルコントローラ内部で加速度を演算し、次の速度測定値を予測する。予測した速度と記憶されている周期使用範囲の表を用いて上述の検索動作を行い、最適な周期を選択して出力する。(c)図の破線に加速度を考慮した場合の周期の変化を示しているが、加速度を考慮しない場合に比べて、加速度が正の場合には大きめの周期、加速度が負の場合には小さめの周期が選択されていることがわかる。

4.3 提案する位置・速度同時測定システムによる測定結果の検討

工業用カメラの前方840mmに設置した電気サーボ式移動台を正弦波状に往復運動させ、台上の赤色LEDの位置と速度を同時に測定した結果をFig.7-10に示す。周期の自動調整を行わない場合(Fig.7-10(a))には、対象物の速度が高

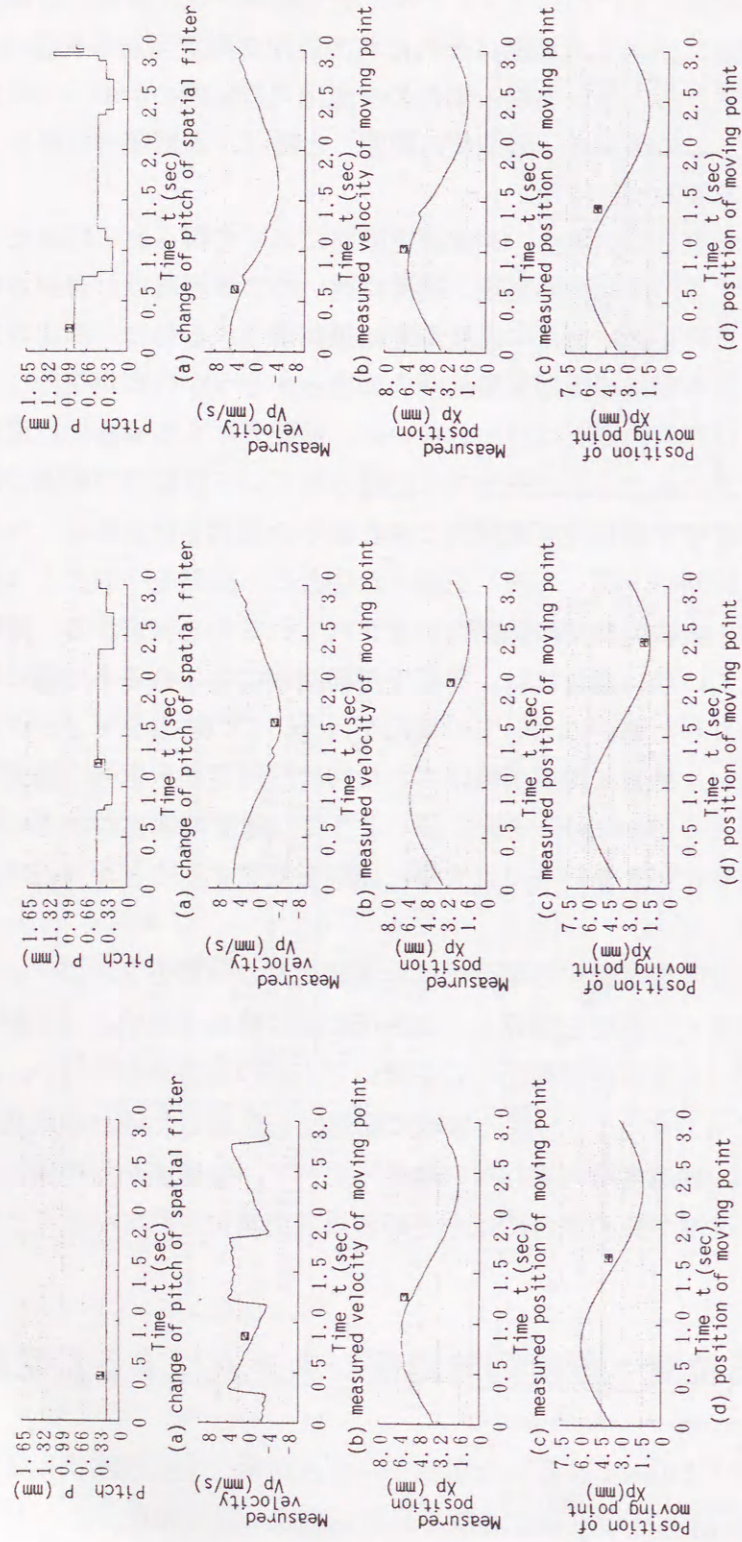


Fig.7-10 (a) Experimental results of position and velocity measurement without pitch adjusting function

Fig.7-10 (b) Experimental results of position and velocity measurement using pitch control without considering acceleration

Fig.7-10 (c) Experimental results of position and velocity measurement using pitch control with considering acceleration

速の時に著しい測定誤差が生じているが、周期の自動調整を行った場合(Fig.7-10(b),(c))には、速度測定結果、位置測定結果ともに良好に行われていることがわかる。荷重関数の周期は、速度測定を精度良く行うために低速度域で短く高速度域で長く設定されており、周期の自動調整が的確に行われていることが確認された。また、加速度を考慮して周期を決定した場合(Fig.7-10(c))には、加速度を考慮しない場合(Fig.7-10(b))に比べ長めの周期が選択されており、急激な速度の変化に対しても著しい速度測定誤差が発生しないよう余裕ある調整が行われていることが確認された。これらのことより、広い速度範囲を精度良く測定するために、周期可変機構を付加することが有効であり、提案した位置・速度同時測定系が充分実用に値することが確認された。

5. おわりに

工業用カメラの映像信号に電氣的に発生した空間荷重を掛け合わせることで構成した空間フィルタを三組使用し、一組で速度を、残り二組で絶対位置を測定する位置・速度同時測定系を提案した。工業用カメラが基本的にサンプル値系であるために従来の手法で発生する速度測定の上限を除き、広い速度範囲を高精度に計測するため、測定した速度情報に従って荷重関数の周期を適応的に調整する周期可変機構を付加した速度測定系、ならびに、他の計測手法を併用せずに位置測定開始時から正しく撮像面上での位置を計測するため、周期の異なる二組の空間フィルタを用いた絶対位置測定系を構成した。これら三組(合計六枚)の空間フィルタ処理を同時に並列して行い、独立した速度測定回路ならびに位置測定回路を用いることによって、位置と速度の実時間計測を同時に行うことが可能となった。実験的検討を行い、提案する位置と速度の同時測定系の有効性を確認した。今後、空間分解能が良好なハイビジョンシステムに本手法を応用することにより、さらに、精度の良い計測が可能になるものと考えられ、多方面での応用が期待される。

第8章 結論

光学的手法による形状、位置、速度などの空間情報を計測する手法として、対象物へ光を照射して空間的特徴付けを行う手法、受光センサー系に空間的特徴を与えて多機能化する手法ならびに情報抽出を簡略化して簡単な信号処理で高精度かつ高速に計測する手法を提案し、その有効性と実用性を試作計測システムを用いた検証実験を行うことにより確認した。その結果、以下の事柄が判明した。

(a) 高分解能の点計測センサーの測定レンジが比較的狭いことを改善し、測定レンジの拡大と分解能の維持ならびに動的計測を可能とするため、レンジシフト・サーボ方式を採用した水位計を試作、提案した。浅底水槽実験などで動的に変動する水位を、連続的に実時間で高精度に計測するために試作した水位計の特徴は、以下のとおりである。

- (1) レンジシフト・サーボ方式の採用により、高分解能であるが測定レンジの狭い光学センサーを、等価的に測定レンジの大きい高分解能の光学センサーとして使用することが可能となった。
- (2) 測定前に光学センサーの距離検出特性の校正を行い、校正値を算出することにより、光学センサーの非線形特性を線形化する。このため、光学センサーの距離検出特性の線形性が向上した。
- (3) レンジシフト・サーボ方式の採用により、同等性能の送り機構を使用しても、従来の純サーボ方式の水位計と比較して、高周波、高振幅の水位変動の測定が可能となった。

また、レンジシフト・サーボ方式の調整条件として、デジタル・シミュレーションによりヒステリシス幅の設定可能な範囲を求め、模擬面を用いた周波数応答試験を行った結果、従来のサーボ方式のものに比べ、高周波、高振幅の水位変動の測定が可能であることが確認された。また、水位の動的測定を行った結果、調整条件を満足する範囲であれば、測定精度は $\pm 0.1\text{mm}$ 以下であり、浅底水槽実験や水理模型実験における水位変動の動的測定手法として有効であることが判明した。

(b) 複数の受光センサーや特殊な光学系を用いることなく、広範囲の水面形状を測定する手法として、格子縞透過法を提案した。また、精度向上法の有効な

手段として、格子縞のエッジを高精度に検出するガウス関数近似によるエッジ検出法を提案し、格子縞透過法に適用した。格子縞透過法は簡単な光学系で構成可能であり、水槽底面に配置した2値格子を水面上方より観測し、水面形状変化前後の格子縞の変形から水面上の屈折点の水深と傾斜角を求めるものであって、以下の特徴がある。

- (1) 非接触で広範囲の水面形状を高精度に測定可能である。
 - (2) 格子縞は水槽底面に特徴付けするためのものであり、その工作精度が測定精度に影響することがない。
 - (3) 平行光などの特殊光源を必要とせず、光学系の設置・調整が容易である。
- また、エッジ検出の精度を向上させ、格子縞透過法の測定精度を改善するため、微分輝度信号を連続関数であるガウス関数に近似し、エッジ位置を検出するガウス関数近似法を提案した。ガウス関数近似法を採用することにより、従来、画素間隔と等しく離散値的であったエッジ検出精度が、各画素間の微分輝度信号が補間されることにより微分輝度信号に含まれる外乱成分を平均化されて、大幅に改善された。

ガウス関数近似法によるエッジ検出法を採用することにより格子縞透過法の測定誤差のうち、画像処理上発生する誤差は軽減し、測定原理上回避不能な逐次計算による誤差が残存することになった。逐次計算により発生する誤差は、格子定数を十分増加させることにより軽減可能であり、透明アクリル模型の測定等によって、本手法の測定誤差は $\pm 0.1\text{mm}$ であることが判明した。

回転円筒内の強制渦や水槽内のノズル内流れの測定を行った結果、本手法が水理実験などの水面形状測定手法として有効であることが確認された。

(c) ロボット工学などで特に要求が高い高速処理を可能とし、さらに、簡単なアルゴリズムで複数の空間情報を計測するシステムとして、レーザー光線を円錐状に走査して対象物面状に環状の特徴付けを行い、走査と同時に環状の図形の歪みを定量化する信号処理を逐次行うことにより、一走査終了後にセンサー系と対象物との相対的距離と傾斜角を一度に計測するシステムを提案した。提案する手法の有効性を、数値解析と検証実験により確認し、以下のことが判明した。

- (1) PSDカメラから出力される光点の光量重心位置信号の区間積分値を用いる手法は、距離や傾斜角の変化によって生じる環状軌跡の微小な変化を効率よく抽出することが可能で、また、電氣的ノイズや光学的外乱の

影響を平均化し軽減できる。

- (2) 測定面上の環状軌跡は距離と傾斜角の変化によって変形するが、位置信号の一走査周期間の積分値は傾斜角の変化に対してほとんど不感であるため、傾斜角の大小に無関係に距離を測定することが可能である。
- (3) 区間積分値の差を用いることにより、傾斜角による微小な波形歪みを効率よく抽出でき、簡単な信号処理で2つの傾斜角を算出できる。
- (4) 出力信号を時系列処理するため、一走査終了直後に結果が得られ、多点位置測定法と比較して高速処理が可能である。
- (5) 検証実験の結果、距離の測定精度は $\pm 1 \text{ mm}$ 、傾斜角の測定精度は $\pm 1.5 \text{ deg}$ 以内であった。

測定領域の変更や測定感度は光学系の構成によって変更することが可能であり、近接センサー以外の利用も可能であると思われる。また、光学系の小型化や剛性の改善、さらに軽量化を図ることにより、実用的な単眼視覚センサーとして用いることが可能であると考えられる。

(d) 対象物への能動的な特徴付けを行うことなく、受光センサー系へ空間的特徴を付加する手法として、空間荷重関数重畳法を提案した。荷重関数に従って電氣的に発生させた荷重信号を工業用カメラの映像信号に乗じることにより各種の空間的受光特性を実現可能な本手法は、センサー系の多機能化と信号処理の簡略化に有効であることが示された。試作計測システムとして、移動体の2次元位置を計測する鋸歯状荷重関数重畳法と、位置と速度を独立した信号処理系で同時に計測する直交正弦波状荷重関数重畳法を提案した。

鋸歯状荷重関数重畳法を用いた光量重心位置計測システムは、工業用カメラのラスタ一走査に同期して発生させた2種類の鋸歯状荷重信号を用いて、対象像の時系列映像信号へ位置に比例した重み付けを行い、一フィールド走査周期を積分時間とする時間積分を行うことによって、画像のモーメントを求めて測定対象物像の光量重心の位置を算出するものである。簡単なアナログ演算回路系で構成した試作システムを用いて測定対象物の位置を測定した結果、静止している場合、移動している場合ともに良好な測定精度が得られた。また、誤差解析を行い測定精度向上のための基礎的設計指針を導いた。これより、鋸歯状荷重関数重畳法による位置計測手法は、信号処理系の安定化と演算精度の補償を行なうことにより、さらに精度が向上し十分実用に期するものであることが判明した。

空間フィルタの原理に基づいて、空間的透過率分布を正弦波状とした正弦波状荷重関数重畳法を提案した。この手法は正弦関数と余弦関数により空間荷重を定めて電子的に空間フィルタを構成し、これら直交正弦波状空間フィルタの一对の出力がもつ直交性を用いてリサージュ図形を描き、その軌跡より水平走査線方向に往復運動する対象物の位置と速度を独立した信号処理手法によって求めるものである。空間フィルタの出力を時間領域で解析し、対象物が単一光点である場合とランダムパターンである場合について位置と速度に関する演算アルゴリズムを示し、その後アナログ演算素子により信号処理回路を試作して、それぞれの場合について位置と速度の同時測定を行った。検証実験の結果、位置測定、速度測定ともに良好な結果が得られた。また、光学系に起因する以外の誤差を軽減させ、位置測定ならびに速度測定の精度を向上させるための指針を導いた。これより、直交正弦波状荷重関数重畳法による位置・速度測定手法は、信号処理系内部に適応的調節要素を付加することによって、さらに精度を向上させることが可能で、位置と速度の同時計測手法として有効であることが判明した。

直交正弦波状荷重関数重畳法による位置と速度の計測手法が有効であることが判明したが、測定精度の向上や測定範囲の拡大を図るため、電子的に構成した空間フィルタを三組使用し、一組で速度を、残り二組で絶対位置を測定する位置・速度同時測定系を提案した。工業用カメラが基本的にサンプル値系であるために従来の手法で発生する速度測定の上限を除き、広い速度範囲を高精度に計測するため、測定した速度情報に従って荷重関数の周期を適応的に調整する周期可変機構を付加した速度測定系、ならびに、他の計測手法を併用せずに位置測定開始時から正しく撮像面上での位置を計測するため、周期の異なる二組の空間フィルタを用いた絶対位置測定系を構成し、計測アルゴリズムを導出した。三組（合計六枚）の空間フィルタ処理を同時に並列して行い、独立した速度測定回路ならびに位置測定回路を用いた試作計測システムを用いた実験的検討を行い、提案する多機能化システムの有効性を確認した。

荷重関数重畳法を用いた試作計測システムの検証実験結果より、本手法がセンサーの高機能化に有効であり、複合センサー系の構成手法としての応用性の高さを確認できたが、今後、空間分解能が良好なハイビジョンシステムに本手法を応用することにより、さらに、精度の良い計測が可能になるものと考えられ、多方面での応用が期待できる。

以上のように、対象物へ光を照射して空間的特徴付けを行う手法、受光センサー系に空間的特徴を与えて多機能化する手法ならびに情報抽出を簡略化して簡単な信号処理で高精度かつ高速に計測する手法を提案した。本論文で提案した手法は各々異なった観点から光学的手法による空間情報計測システムの構築とその高機能化に重要な位置づけをもち、その有効性と実用性が確認された。

参考文献

- [1] たとえば, 田幸敏治, 辻内順平, 南 茂夫編集: "光学的測定ハンドブック", 朝倉書店 (1984)
- [2] T.Akuta, Y.Negishi: Automatic 3-D shape measuring system using new auto-Focusing method, Proc. of 3rd Int. IMEKO Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control (ISMQC), pp.1/6 (1989)
- [3] 鈴木紀生, 安田恵勇, 米田康司, 安達正明, 三木秀司: 超精密光学式粗さ計の開発, 計測自動制御学会論文集, Vol.27 No.7, pp.735/740 (1991)
- [4] 岡田徳次, Ulrich REMBOLD: 螺旋状光照射型近接センサ, 計測自動制御学会論文集, Vol.26 No.6, pp.612/619 (1990)
- [5] J.KURATA, K.T.V.GRATTAN, H.UCHIYAMA, T.TANAKA: Optical proximity sensor that uses a laser-scanning system, Applied Optics, Vol.30, No.28 pp.4060/4065 (1991)
- [6] 金田 一: 三角測量法によるレーザー式変位計の高精度化-測定面の影響について-, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.8, pp.853/860 (1991)
- [7] 佐藤宏介, 井口征士: 空間コード化による距離画像入力, 電子情報通信学会誌, Vol.J68-D No.3, pp.369/375 (1985)
- [8] 葉 雄英, 藤村貞夫: M系列符号化投影法による3次元物体の計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.25 No.6, pp.644/650 (1989)
- [9] 葉 雄英, 藤村貞夫, 山田範秀: M系列符号化格子光源の照明による鏡面物体の測定, 計測自動制御学会論文集, Vol.26 No.2, pp.123/128 (1990)
- [10] J.T.Ator: Image-Velocity Sensing with Parallel-Slit Reticles, Journal of The Optical Society of America, Vol.53 pp.1416/1422 (1963)
- [11] 原田, 尾崎: 流子工学, 養賢堂, pp.352/362 (1969)
- [12] ポフ: 機械工学における空気力学実験法, 朝倉書店, pp.336/350 (1966)
- [13] 本城: 浅底水槽法による流れの可視化と計測, 日本機械学会関西支部第85回講習会教材, pp.11/12 (1979)
- [14] R.B.Webster: Jet noise simulation on shallow water, Journal of Fluid Mechanics, Vol.40 No.2, pp.423/432 (1970)
- [15] 嶋仲美友, 前田 弘, 明石 一: 浅底水槽による付着糞流型流体素子の実験的

- 研究, システムと制御, Vol.18 No.11, pp.633/640 (1974)
- [16]岡田三郎: 水理計測機器, 中国工業, Vol.6, pp.2/20 (1976)
- [17]本間 仁, 石原藤次郎: 応用水理学下 I, 丸善, pp.103/116 (1971)
- [18]桜井, 白江: 変換検出, コロナ社, pp.144/148 (1973)
- [19]E.O.Doebein: Measurement system, McGraw - Hill, pp.593/596 (1966)
- [20]鹿野快男, 梶 政雄: 円筒状四電極を用いた導電率計, 電気学会論文誌, Vol.53-C28, pp.213/220 (1978)
- [21]岡田三郎, 住友哲宏: サーボ式水位計の精度の向上, 計測自動制御学会論文集, Vol.16 No.4, pp.550/555 (1980)
- [22]たとえば, 平井一正, 池田雅夫: 非線形制御システムの解析, pp.46/52 (1986) オーム社
- [23]たとえば, 平井一正, 池田雅夫: 非線形制御システムの解析, pp.73/78 (1986) オーム社
- [24]多賀谷雅史ほか: 浅底水槽用水位測定装置の試作とその性能について, 第23回自動制御連合講演会真前刷集, pp.437/438 (1980)
- [25]J.KURATA, K.T.V.Grattan, H.UCHIYAMA, T.TANAKA: Water surface measurement in a shallow channel using the transmitted image of a grating, Review of Scientific Instruments, Vol.61, No.2 pp.736/739 (1990)
- [26]小林保正; 応答速度と精度を高めた水面波波高計, 東京電機大学工学部研究報告, DEC,1980,No.28,pp.73/85
- [27]坂本; 光ファイバ液面センサ, 計装, Vol.27, No.7,pp.46/48 (1984)
- [28]田中久仁雄; 水槽試験における光学式非接触 3次元運動計測法, 石川島播磨技報, Vol.25,No.4,pp.232/238 (1985)
- [29]山藤和男, 大橋秀雄: モアレ法による水表面の可視化, ターボ機械, Vol.4, No.2, pp.83/94 (1976)
- [30]石野久秀: 格子縞液中透過法による水槽流れの可視化と水深測定について, 関西大学大学院工学研究科修士論文 (1982)
- [31]田村洋一, 平卯太郎, 阪本喜保: 逐次多点法による表面プロフィール計測方法, 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.5, pp.509/516 (1989)
- [32]平 卯太郎: 逐次多点法によるロールプロフィール計測方法, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.2, pp.177/183 (1992)
- [33]たとえば, T.R.マッカーラ著, 三浦 巧, 田尾陽一共訳: 計算機のための数値計算法概論, サイエンス社, pp.225/228 (1980)

- [34]西川晃平, 大寺信行, 西村利彦, 谷口 悟: 薄板溶接ロボット用視覚センサの開発, 第1回ロボットセンサシンポジウム予稿集, pp.49/52 (1988)
- [35]中嶋新一: ロボットによる経路ならい作業のための超音波近接センサー位相差を利用した手先の3次元姿勢計測一, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.5, pp.567/573 (1986)
- [36]中嶋新一: 空間姿勢計測用超音波近接センサー二重位相差による測定範囲の改善一, 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.6, pp.396/400 (1989)
- [37]佐々木忠之, 小西周平, 伊福部達: コウモリの反響定位に基づいた超音波による視覚, 第1回ロボットセンサシンポジウム予稿集, pp.45/48 (1988)
- [38]J.Borenstein and Y.Koren: Obstracle svoidance with ultrasonic sensors, IEEE J.Robotics Automation, Vol.4, pp.213/218 (1988)
- [39]中本 浩, 石原 英, 三上和夫: 知能ロボット用リアルタイム視覚センサの開発, 第30回システムと制御研究発表講演会, pp.73/74 (1986)
- [40]金丸孝夫, 平松 新, 小倉一樹, 種子田定博: 高速画像処理装置の開発, 第31回システムと制御研究発表講演会, pp.53/54 (1987)
- [41]尾崎, 佐藤宏介, 井口征士: 第1回インテリジェントFAシンポジウム, pp.81/82 (1987)
- [42]山本 勉, 佐藤宏介, 井口征士: 小型CRT プロジェクタを用いた形状計測装置, 第32回システムと制御研究発表講演会, pp.295/296 (1988)
- [43]T.Taneda, A.Kato, T.Suzuki, and M.Hosoi: Automated vehicle guidance using spotmask, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation p.1346 (1986)
- [44]平山真明, 上田澄広, 飯島剛平, 飯塚隆久, 小川宗吉: 光学式ケ書線倣い方式ガス切断装置, 第31回システムと制御研究発表講演会, pp.109/110 (1987)
- [45]中野康夫, 水野秀明, 平山真明, 上田澄広, 小池 健: 貫通孔の3次元位置計測システムの開発, 第32回システムと制御研究発表講演会講演論文集, pp.297/298 (1988)
- [46]二宮隆典, 広井高志, 中川泰夫: 斜め十字型スリット光を用いたロボット用小型3次元センサ, 計測自動制御学会論文集, Vol.23, No.10, pp.1009/1016 (1987)
- [47]中沢和夫, 大矢晃久, 中島真人, 油田信一: ファイバージェネィティングを用いたロボット視覚センサの開発, 第1回ロボットセンサシンポジウム予稿集, pp.53/56 (1988)

- [48]木下源一郎, 出澤正徳: ロボット用光学的距離センサの開発ーリングパターン照射による方法ー, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.11, pp.1204/1209 (1986)
- [49]野村由司彦, 相良道弘, 成瀬 央: 輝度変化による姿勢角計測, 機械学会論文集, Vol.54, No.504, pp.2481/2486 (1988)
- [50]藤原直史, 津村俊弘, 米沢 徹: 既知形状物体の単眼視による三次元移動体の位置計測 - その2 三次元位置計測について, 第32回システムと制御研究発表講演会講演論文集, pp.293/294 (1988)
- [51]R.P.Paul, Robot Manipulators (MIT Press, Cambridge, Mass., 1981)
- [52]A.Bradshaw, Sensor for mobile robots, Measurement and Control, Vol.23, pp.48/52 (1990)
- [53]D.W.Sweeny and G.D.Hudelson II: Optical-position sensing for robotics using corded-aperture imaging, Journal of Optical Society of America Vol.72, p.1827 (1982)
- [54]丹羽 登: テレビジョン技術の計測への応用, 計測と制御, Vol.12, pp.575/586 (1973)
- [55]三上和夫, 石原 英, 中本 浩, 藤枝紫朗, 平野誠太郎: 知能ロボット用リアルタイム視覚センサの開発, 第31回システムと制御研究発表講演会講演論文集, pp.115/116 (1987)
- [56]S.Myers and S.Q.A.M.A.Hossain: Logic circuitry and vidicon measure displayed areas, Electronic Engineering, Feb. pp.65/68 (1971)
- [57]長谷川健介, 前島英雄, 大前 力: 物体の位置を測定する工業ロボットの眼に関する研究, 計測自動制御学会論文集, Vol.9, pp.270/276 (1973)
- [58]中野道雄, 小林史典: 高速零位処理法による位置計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.13, pp.87/92 (1977)
- [59]土田縫夫, 山田陽滋, 都築裕之: 2次元PSDを用いた穴位置検出センサ, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J71-C, pp.1483/1485 (1988)
- [60]相田貞蔵, 芹川聖一, 中島 渉, 山下昭裕, 永村栄治: 背景光の影響を補正したPSDカメラによる三次元座標検出法, 電学論, Vol.107-C, pp.632/639 (1987)
- [61]小林 彬: 空間フィルタとその応用〔I〕, 空間フィルタとその応用〔II〕, 計測と制御, Vol.19, pp.409/417, 571/579 (1980)
- [62]たとえば, 矢野 健太郎監修: 数学ハンドブック, 森北出版, p.384

- (1985)
- [63]尾崎 弘, 谷口慶治, 小川秀夫: 画像処理ーその基礎から応用まで, 共立出版, pp.193/195 (1984)
- [64]高木潤一, 山下 牧, 加藤充孝: 非対称X分岐を用いた導波型光変位センサ, 電子通信学会技術研究報告, Vol.OQE85-162, pp.37/42 (1985)
- [65]石川正俊, 下条 誠: ビデオ信号出力をもつ圧力分布センサと触覚パターン処理, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, pp.662/669 (1988)
- [66]木村一郎, 小澤 守, 真鍋義人, 竹中信幸, 高森 年: 感温液晶を用いた温度場と速度場の同時計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, pp.870/877 (1991)
- [67].R.Belmont, D.J.Buckingham, E.A.W.Maunders and D.Walsh: Remote video based vibration monitor, Measurement, Vol.3, pp.51/54 (1985)
- [68]木村一郎, 高森 年, 井上 隆: 相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測ー円柱後流の変動渦への適用ー, 計測自動制御学会論文集, Vol.23, pp.101/107 (1987)
- [69]小林史典, 近久直一, 小林 彬: 空間フィルタを応用した回転速度変動センサ, 計測自動制御学会論文誌, Vol.21, pp.157/163 (1985)
- [70]三橋 渉, 岡 和彦, 山崎弘郎: 電子的に構成した空間フィルタによる運動計測, 計測自動制御学会論文誌, Vol.24, pp.1111/1117 (1988)
- [71]長山秀徳, 岡本隆之, 山口一郎: 適応型空間フィルター検出器と高分解能スペックル変位計への応用, 光学, Vol.20, pp.530/537 (1991)
- [72]岡 和彦, 三橋 渉, 山崎弘郎: 電子的に実現した柔軟性を有する空間フィルタ, 計測自動制御学会論文誌, Vol.25, pp.271/277 (1989)
- [73]今中成和, 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: I T V画像による振動測定, 第64回日本機械学会関西支部定時総会講演会講演概要集, pp.175/176 (1989)
- [74]倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: TVカメラを用いた運動物体の高精度測定への一提案ー鋸歯状荷重関数重畳法による位置測定ー, 光学, Vol.20, pp.584/589 (1991)
- [75]今中成和, 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: 直交正弦波状空間フィルタを用いた位置・速度計測, 第39期日本機械学会東海支部定時総会講演会講演概要集, (1989)

本論文に関連する論文・講演

- (1) 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: レンジシフト方式による光学式ポイントゲージの調整条件, 第29回システムと制御研究発表講演会, pp.133/134 (1985)
- (2) 泉田 豊, 内山寛信, 倉田純一, 田中輝夫: 空間フィルタ速度測定系の信号処理に関する一手法, 第1回シグナル・システム・コントロール・シンポジウム, pp.65/68 (1988)
- (3) 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: 格子縞透過法による水面形状の測定, 第32回システムと制御研究発表講演会, pp.305/306 (1988)
- (4) 今中成和, 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: ITV画像による振動測定, 日本機械学会関西支部第64期定時講演会 (1989)
- (5) 本多陽介, 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: 円錐状走査機構をもつ光近接センサ, 日本機械学会関西支部第64期定時講演会, pp.201/202 (1989)
- (6) J.KURATA, H.UCHIYAMA, T.TANAKA: Optical proximity sensors with conically scanning system, Sensors & their Application IV, pp.106/107 (1989)
- (7) J.KURATA, H.UCHIYAMA, T.TANAKA: Measurement of water surface with trans - mitted image of a grating, Sensors & their Application IV, pp.87/88 (1989)
- (8) J.KURATA, K.T.V.Grattan, H.UCHIYAMA, T.TANAKA: Water surface measurement in a shallow channel using the transmitted image of a grating, Review of Scientific Instruments, Vol.61, No.2 pp.736/739 (1990)
- (9) 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: 工業用カメラを用いた空間フィルタ速度計の試作, 日本機械学会東海支部第39期定時講演会 (1990)
- (10) 本多陽介, 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: ランプ状荷重関数重畳積分法による光点位置測定, 日本機械学会東海支部第39期定時講演会 (1990)
- (11) 今中成和, 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: 直交正弦波状空間フィルタを用いた位置・速度計測, 日本機械学会東海支部第39期定時講演会 (1990)
- (12) J.KURATA, K.T.V.Grattan, H.UCHIYAMA, T.TANAKA: Measurement of a water surface using the image of a grating-edge detection using a Gaussian function, International Journal of Optoelectronics, Vol.6, No.4, pp.395,405 (1991)

- (13) 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: TVカメラを用いた運動物体の高精度測定への一提案 - 鋸歯状荷重関数重畳法による位置測定 -, 光学, Vol.20, No.9, pp.584/589 (1991)
- (14) 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: TVカメラと荷重関数重畳法による運動物体の位置・速度計測, 計測自動制御学会関西支部シンポジウム「計測・センサの最新の動向 - 知能化を中心として」, pp.11/14 (1991)
- (15) J.KURATA, K.T.V.Grattan, H.UCHIYAMA, T.TANAKA: Optical proximity sensor using a Laser scanning system, Applied Optics, Vol.30, No.10, pp.4060/4065 (1991)
- (16) 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: TVカメラを用いた運動物体の高精度測定への一提案 - 正弦波状荷重関数重畳法による位置・速度測定 -, 光学, Vol.21, No.5, pp.286/293 (1992)
- (17) 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: 工業用カメラと荷重関数重畳法による移動体の位置・速度計測, センサ技術, Vol.11, No.6, pp.45/50 (1992)

謝 辞

本研究を行うにあたり、終始かわらぬご指導、ご鞭撻を賜った恩師、関西大学田中輝夫教授、前田 弘教授、山田朝治教授に、謹んでここに感謝の意を表します。また、本研究に関して詳細なご教示をいただいた関西大学内山寛信助教授をはじめ、機械工学科、機械システム工学科（旧 機械工学第二学科）の諸先生方はもとより、倉田忠雄名誉教授、勝田勝太郎名誉教授、ならびに、制御工学研究室（旧 機械力学研究室）の諸兄に心から感謝いたします。

さらに、平成3年10月より6か月間の国内研修を行うにあたり、貴重なご意見を頂戴した神戸大学高森 年教授、木村一郎助教授、田所 諭助手をはじめとする工学部計測工学科第1講座の諸氏に、心より感謝し、御礼申し上げます。

なお、英論文の執筆と海外における研究発表にあたっては、英国City University のProf. Dr. K.T.V.Grattan 氏に多大な助言とご協力をいただきました。深く感謝の意を表します。

最後に、温かく見守り励ましてくれた妻 早智子と娘 真衣に感謝します。

