



Title	光ファイバ配列型センサに関する研究
Author(s)	林, 昭博
Citation	大阪大学, 1985, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/879
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

光ファイバ配列型センサ に関する研究

昭和 59 年 11 月

林 昭 博

内 容 梗 概

本論文は、光ファイバ配列型センサに関する研究成果をまとめたものであり、次の 8 章から構成されている。

第 1 章「序論」においては、光ファイバ応用センサの現状を概観し、生産システムに用いられているセンサの現状と問題点を述べ、本論文の位置づけを行っている。

第 2 章「速度計測用光ファイバ列空間フィルタ」においては、光ファイバ端面を直線状に等間隔に配列することにより、操作性並びに耐環境性に優れた速度計測用の光ファイバ列空間フィルタを構成できることを示している。出力信号の選択度を用いて、光ファイバ列空間フィルタの速度検出特性を明らかにし、さらに物体の横ぶれ対策、円周速度測定における最適配列数についても述べている。

第 3 章「光ファイバ列を用いた 2 次元イメージ速度センサ」においては、光ファイバ端面を直線状に等間隔に配列した光ファイバ列を 2 組直角に配置した光ファイバ列空間フィルタと球面レンズと円柱レンズで構成される結像系を持つ 2 次元イメージ速度センサについて述べている。結像系を含む光ファイバ列空間フィルタの等価空間フィルタを求め、これを用いて必要とする測定精度を得るための構成パラメータを明らかにしている。

第 4 章「光ファイバ列を用いたレーザスペckル速度センサ」においては、物体から反射されたレーザ光が作るスペckルパターンの移動を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出する構成の速度センサについて述べている。投受光系に光ファイバを用いることにより、物体距離に依存しない速度センサを簡便に構成できることを示している。

第5章「光ファイバ列を用いた距離センサ」においては、光ファイバ列空間フィルタを用いてスペックルパターンの移動を検出する構成の距離センサと、この距離センサとスペックル速度センサを組み合わせた構成の距離・速度センサ、および光ファイバ列空間フィルタを用いて結像系の焦点はずれ量を検出する構成の距離センサについて述べている。構成パラメータによる検出特性を明らかにし、光ファイバを用いることにより、これらのセンサを簡便に構成できることを示している。

第6章「スペックル移動検出による回転角センサ」においては、円柱表面から反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動量を検出することにより、高分解能を持つ回転角センサを構成できることを示している。円柱の回転によるスペックルパターンの移動特性を導き、これを用いて高分解、高精度で安定な回転角センサを構成するための構成パラメータを明らかにしている。さらに、スペックルパターンの移動速度を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出することによる本センサの回転体半径の非接触計測への応用についても述べている。

第7章「配列光ファイバを用いたエッジセンサ」においては、光ファイバを端面が中心とその周囲に複数個とりかこむ形に配列し、各光ファイバ出力に重み付けした後、差動出力を得る構成のエッジセンサについて述べている。構成パラメータに対する検出特性を明らかにし、有用性を確認した実験結果について述べている。

第8章「結論」においては、本研究で得られた成果を総括し、今後に残された課題について述べている。

光ファイバ配列型センサに関する研究

目 次

第1章 序 論	1
第2章 速度計測用光ファイバ列空間フィルタ	10
§ 2-1 緒 言	10
§ 2-2 空間フィルタを用いた速度計測の原理	10
§ 2-3 光ファイバ列空間フィルタの構成と速度検出特性	15
2-3-1 構成と出力信号	15
2-3-2 速度検出特性	18
2-3-3 横ぶれ対策	20
2-3-4 円周速度測定における最適配列数	21
§ 2-4 実験結果と考察	25
§ 2-5 結 言	30
第3章 光ファイバ列を用いた2次元イメージ速度センサ	32
§ 3-1 緒 言	32
§ 3-2 構成と出力信号	32
§ 3-3 結像系を含む等価空間フィルタとその速度検出特性	34
3-3-1 結像特性	34
3-3-2 等価空間フィルタ	36
3-3-3 速度検出特性	39
3-3-4 測定精度	40
§ 3-4 実験結果と考察	42
§ 3-5 結 言	46

第 4 章 光ファイバ列を用いたレーザスペckル速度センサ	47
§ 4-1 緒 言	47
§ 4-2 スペckルパターンの移動特性	47
§ 4-3 構 成	50
§ 4-4 実験結果	53
§ 4-5 結 言	55
第 5 章 光ファイバ列を用いた距離センサ	56
§ 5-1 緒 言	56
§ 5-2 レーザスペckル距離センサ	56
5-2-1 原理と測定精度	56
5-2-2 実験結果	59
§ 5-3 レーザスペckル距離・速度センサ	61
5-3-1 構成と出力信号	61
5-3-2 測定範囲および測定精度	64
5-3-3 実験結果と考察	68
§ 5-4 結像系の焦点はずれ量検出による距離センサ	71
5-4-1 構成と検出特性	71
5-4-2 実験結果	74
§ 5-5 結 言	75
第 6 章 スペckル移動検出による回転角センサ	76
§ 6-1 緒 言	76
§ 6-2 原理と検出特性	76
§ 6-3 円柱表面の回転変位に対するスペckルの移動特性	78
§ 6-4 実験結果と考察	82
§ 6-5 光ファイバ列を用いた回転角センサ	87

§ 6 - 6	回転体半径計測への応用	89
6 - 6 - 1	半径によるスペックルの移動特性	89
6 - 6 - 2	実験結果	91
§ 6 - 7	結 言	94
第 7 章	配列光ファイバを用いたエッジセンサ	95
§ 7 - 1	緒 言	95
§ 7 - 2	構成と検出特性	95
§ 7 - 3	実験結果	97
§ 7 - 4	結 言	100
第 8 章	結 論	101
謝 辞		104
参 考 文 献		105
関 連 発 表 論 文		114

第 1 章 序 論

近年、ファクトリ・オートメーションの進展に伴い、各種の情報を検出するセンサの重要性が高まっている。このゆえんは次のような状況によっているのであろう。すなわち、

- (1) マイクロコンピュータに代表されるマイクロエレクトロニクス技術の発達により情報処理が容易となり、システムの特長、良否はセンサによって左右される。
- (2) 高機能システムは各種の高機能センサの開発により実現可能となる。
- (3) センサに要求される機能は使用目的、使用環境により異なり、種々のセンサの開発が要求される。
- (4) 危険な作業、悪環境下における作業も産業用ロボット等を活用した自動化が進んでおり、そこに用いられるセンサは高機能性と共に耐環境性並びに高信頼性、高操作性が要求される。

では、このようなニーズに答えるべきセンサの現状はどうであろうか。現在、センサは俗に“千差万別”と言われる程、多くの種類のセンサが開発されている。しかし、その多くはセンサヘッド部に電子回路等の電気信号を扱う部分を含んでおり、高温高湿、高電磁界、引火爆発性雰囲気等の環境下において使用するためには、これらの環境に対する何らかの保護対策が必要とされる。これに対して、近年、光ファイバ、レーザ等を活用した光応用計測制御システムによるファクトリ・オートメーションの要求が高まり、これと共に光ファイバを応用したセンサが注目されるようになっている⁽¹⁾。これは、光ファイバ応用センサが生産システムに要求される高信頼性、高操作性、高機能性に答えられるのみならず、前述の悪環境下においても、安全、高感度、高精度、非接触検出を可能とするためである。

光ファイバは光通信の伝送路として研究が進められてきたが、伝送損失の低減化⁽²⁾が進む 1976 年前後から光ファイバをセンサに活用する試みが活発に

行われるようになり、各種の光ファイバ応用センサが開発されてきた⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。従来開発されてきた光ファイバ応用センサをその構成から分類すると表 1-1 に示すようになる⁽⁷⁾。このように光ファイバ応用センサは、光ファイバを単に伝送路として用いる電気／光ハイブリッド方式、光ファイバの端面または中間に高感度光学素子を付けた光学式センサ方式、光ファイバを光の送受信プローブとして用いたピックアップ・プローブ型センサ方式、光ファイバ端面の配列効果を用いた光ファイバ配列型センサ方式、光ファイバ自身の特性変化を利用する光ファイバ機能型センサ方式に分類され、それぞれの方式に対して各種のセンサが開発されている。しかし、光応用計測制御システムを用いたファクトリ・オートメーションを実現するためには多種多様なセンサが必要とされ、今後も益々活発に光ファイバ応用センサの開発が進められなければならないのである。

ところで、生産ラインの自動化を進めるに当っては、生産ラインの随所で行われる製品の移動、搬送に対して、物体の移動速度、移動軌跡、物体までの距離、物体位置、物体形状を検出するセンサが必要とされる。このため、速度センサは物体の移動速度の計測と共に、速度を積分して、変位、長さ、走行距離等の計測に用いられる。又、距離センサは物体までの距離の計測の他に、物体位置、物体形状の計測、物体との間隔制御用のセンサとして用いられる。そして、種々の速度センサ、距離センサが開発されてきた。

従来開発されてきた光を用いた非接触速度センサ、距離センサを表 1-2 および表 1-3 に示す。これらの中で、レーザドップラ速度センサ^{(14),(15)}を除いて、光ファイバは応用されていないのが現状である。

空間フィルタ速度計測法は対象物体と観測系を結ぶ直線方向と直角方向の速度成分を検出し、レーザドップラ速度計測法と互に他を補間する関係にあり、速度計測のみならず、長さ⁽⁵⁴⁾、回転数⁽⁵⁵⁾、距離センサ^{(52),(53)}への応用も考えられる。

このような空間フィルタ速度計測法は、1963年、J.T.Atorによりスリット列で構成された空間フィルタを用いてイメージ速度の計測が可能であることが示され、研究の第一歩が開始された⁽²³⁾。その後、速度の向きをも検出可能な

表 1-1 光ファイバ応用センサの種類

方 式	構 成	計測対象	効果 (材料)	性 能
電気 / 光ハイブリッド方式	電気式のセンサの信号を光に変換し, 光ファイバで信号を伝送する。	(• 信号線 • データリンク)	—————	- 誘導障害を受けない - 接地電位障害を受けない
光学式センサ方式	光ファイバの端面または中間に, 計測対象によって光のパラメータが変化する光学素子を挿入する。	電 流 界	ファラデー効果 (鉛ガラス ⁽⁸⁾) ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ⁽⁹⁾)	50 ~ 5000 A 3 ~ 500 Oe (精度 0.5 ~ 2 %)
		電 圧 界	ポッケルス効果 ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ⁽⁹⁾) ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ⁽¹⁰⁾)	0.5 ~ 1000 V, 0.15 ~ 2 kV/cm (精度 0.5 ~ 1 %)
		温 度	基礎吸収端の変化 (GaAs, CdTe ⁽¹¹⁾)	-10 ~ 300 °C (精度 1 °C)
			赤外励起蛍光体 ($\text{YF}_3:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ ⁽¹²⁾)	-30 ~ 200 °C (精度 0.5 °C)
		加 速 度 圧 力	光弾性効果 (エポキシ樹脂, ⁽⁵⁾) (DAP, LiNbO_3 ⁽⁵⁾)	0.1 ~ 40 G 0 ~ 1 kg/cm ² (SN比 40 dB 以上)
ピックアップ・プローブ型センサ方式	物体が放射する光, 又は物体から反射されたレーザ光等を光ファイバプローブでピックアップし, 情報を検出する。	温 度	赤外線放射 ⁽¹³⁾	60 ~ 2000 °C (精度 1 %)
		速 度 振 動	ドップラ効果 ^{(14), (15)}	数 nm/sec ~ 100 m/sec (精度 0.5 ~ 数 %) 最小振幅 0.8 μm (120 Hz)
光ファイバ配列型センサ方式	光ファイバ端面を規則的に配列し, その配列の効果により情報を検出する。	イメー ジ 伝 送	2次元配列	数 10 m, 数万画素
		変位振動	ファイバ束の受光量の変化 ⁽¹⁶⁾	$2 \times 10^{-11} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$
		粉体速度	円形配列された各光ファイバの受光時間差 ⁽¹⁷⁾	0.1 ~ 5 m/sec
光ファイバ機能型センサ方式	計測対象による光ファイバ自身の特性変化を伝送光の変調として検出する。	電 流	ファラデー効果 ⁽¹⁸⁾	50 ~ 1200 A (精度 0.24 %)
		圧 力	光ファイバの伸縮 ⁽¹⁹⁾	154 kPa - m / フリンジ
			マイクロバンド損 ⁽²⁰⁾	70 dB re 1 μPa
		角 速 度	サゲナック効果 ^{(21), (22)}	$1 \times 10^{-7} \text{ rad/sec}$

表 1 - 2 光応用非接触速度センサの種類

方 式	原 理	性 能
空間フィルタ法 ⁽²³⁾⁻⁽²⁹⁾	空間フィルタを用いて物体の有する画像の空間周波数成分を選択し，出力信号の周波数から速度を求める。	数 10 mm/sec ～ 数 10 m/sec (精度 0.5 ～ 数 %))
相 関 法 ⁽³⁰⁾⁻⁽³²⁾	I T V カメラ等を用いて得られた移動前後の画像の相関ピーク位置から速度を求める。	0 ～ 数 m/sec (精度 0.01 ～ 0.1 %))
スペckル法 ⁽³³⁾⁻⁽⁴³⁾	レーザ光が物体から反射されたときに生じるスペckルパターンの移動を空間フィルタ法または相関法等により検出し，速度を求める。	数 mm/sec ～ 数 10 m/sec (精度 0.1 ～ 数 %))
ドップラ法 ^{(14),(15),(44)}	物体から反射されたレーザ光の周波数シフト（ドップラシフト）から速度を求める。	数 mm/sec ～ 100 m/sec (精度 0.5 ～ 数 %))

表 1 - 3 光応用非接触距離センサの種類

方 式	原 理		性 能
飛行時間測定法 ⁽⁴⁵⁾	物体に対する光の往復時間から距離を求める。		1 m ～ 5 m (精度 0.25cm ～ 2 cm)
三角測量法 ⁽⁴⁶⁾⁻⁽⁴⁹⁾	三角形の構成要素を利用して距離を求める。	反射タイミング検出型 ⁽⁴⁶⁾	10 mm ～ 50 mm (精度 5 mm)
		レーザ光走査型 ⁽⁴⁷⁾	100 mm ～ 1300 mm (精度 5 mm)
		画像解析型 ^{(48),(49)}	3 m ～ 10 m (精度 0.1 ～ 1 %))
強度変化検出法 ⁽⁵⁰⁾	物体から反射された光の距離による強度変化から距離を求める。		10 mm ～ 60 mm (精度 2 mm)
空間フィルタ法 ⁽⁵¹⁾⁻⁽⁵³⁾	画像の有する空間周波数成分を利用して距離を求める。	焦点はずれ量検出型 ⁽⁵¹⁾	20 cm ～ 20 m (精度 0.25 ～ 10 %))
		速度検出型 ^{(52),(53)}	—

並進する空間フィルタも提案された⁽²⁴⁾。そして、速度計測用空間フィルタの定量的評価⁽²⁵⁾、低域伝達特性の改善⁽²⁹⁾等も進められてきた。しかし、これまでに使用されてきた速度計測用の空間フィルタは、フォトダイオード列、液晶セルアレイ⁽²⁶⁾、太陽電池表面を特定のパターンにエッチング仕上げしたもの⁽²⁷⁾、固体イメージセンサ⁽²⁸⁾等であり、これらの空間フィルタは使用される環境、特に高温高湿、化学的雰囲気、電磁ノイズ、高電圧等の環境に対しては何らかの保護対策が必要とされるのが現状である。

このような状況に鑑み、本研究は、光ファイバ端面を空間上に規則的に配列し、その端面の円形開口によって構成される光ファイバ列空間フィルタを提案し、これを用いて耐環境性並びに操作性に優れた次のような新しい光ファイバ配列型センサの構成を提案したものである。

- (1) 1次元イメージ速度センサ(第2章)
- (2) 2次元イメージ速度センサ(第3章)
- (3) レーザスペckル速度センサ(第4章)
- (4) レーザスペckル距離センサ(第5章)
- (5) レーザスペckル距離・速度センサ(第5章)
- (6) 焦点はずれ量検出による距離センサ(第5章)
- (7) 回転角センサ(第6章)
- (8) 回転体の半径計測用センサ(第6章)
- (9) エッジセンサ(第7章)

光ファイバを用いて空間フィルタを構成することにより差動構成の空間フィルタを容易に構成でき、受光部と光電変換部を分離することができる。又、ここで提案するセンサのセンサヘッドはすべて光ファイバにより構成されているので、センサヘッド部に電気信号を取り扱う回路は含まれていない。従って、ここで提案するセンサは次のような特長を有している。

- (1) 柔軟性並びに操作性に優れている。
- (2) 軽量で細いので狭い空間での計測が可能である。

- (3) 耐電気絶縁性に優れており、高電圧のかかる場所での使用が可能である。
- (4) 耐電磁雑音性に優れており、電磁雑音の多い場所でも安定した測定が可能である。
- (5) 化学的安定性、耐薬品性、耐腐食性、耐熱性等の耐環境性に優れたセンサである。
- (6) 本質的に安全防爆であり、可燃物、爆発物を取り扱う環境においても使用可能である。

さて、以下の各章で述べる内容を示せば次のようになる。

まず第2章では、以下の各章の基礎となる光ファイバ列空間フィルタを提案する。光ファイバ端面を直線状に等間隔に配列し、その1つおきの光ファイバ出力の総和の差をとることにより速度計測用の差動構成の空間フィルタを容易に構成できることを示す。出力信号の選択度を定義し、これを用いて、光ファイバ数、光ファイバ間隔、物体のスペクトル分布、物体の移動方向に対する光ファイバ列空間フィルタの速度検出特性に詳細な検討を加える。合せて、物体の横ぶれ対策、円周速度測定における最適配列数を明らかにする。さらに、光ファイバ列空間フィルタの1次元イメージ速度センサとしての有効性を確認した実験結果についても述べる。

第3章では、第2章で述べた光ファイバ列を2組直角に配置して構成される光ファイバ列空間フィルタと球面レンズと円柱レンズで構成される結像系を用いた2次元イメージ速度センサを提案する。

2次元的に移動する物体に対しては、その速度の大きさと方向を計測することが必要とされる。又、移動方向が一定している物体に対しても、空間フィルタを物体の移動方向に正確に設定する必要をなくするために2次元速度センサが必要とされる。空間フィルタを用いた2次元イメージ速度センサは、各方向の速度成分を計測する2組の空間フィルタを用いて構成される^{(26), (27)}。しかし、2次元速度計測においては、物体の画像が必然的に空間フィルタを大きく斜め方向に移

動するので、このときの速度検出特性を定量的に把握し、これに対処できる構成をとることが必要となる。しかし、この詳しい考察はなされていなかった。

本章では、結像系を含む光ファイバ列空間フィルタの等価空間フィルタを求め、これを用いて、必要とする測定精度を得るための構成パラメータを明らかにする。そして、2次元イメージ速度センサとしての有用性を確認した実験結果についても述べる。

第4章では、レーザ光が物体から反射されたときに生じるスペックルパターンの移動を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出する構成の速度センサを提案する。

物体の画像の光強度が弱い場合、前章までに述べたように、この光強度分布の移動を空間フィルタを用いて検出する方式では、高いS/N特性が得られない。このような場合には、レーザ光を物体に照射し、このときに生じる物体速度に比例した速度で移動するコントラストの強いスペックルパターン⁽⁵⁶⁾を利用するのが有効である。そして、このスペックルパターンの移動検出に空間フィルタを用いたスペックル速度センサが開発されてきた^{(33),(34),(36),(38)}。しかし、従来の空間フィルタを用いた構成では、センサヘッドのサイズが大きくなり、このため物体距離に依存しないスペックル速度センサ^{(35),(36)}を簡便に構成することが困難であった。

本章では、投受光系に光ファイバを用いることにより、物体距離に依存しないスペックル速度センサを簡便に構成できることを示す。

第5章では、光ファイバ列を用いた距離センサを提案する。

距離センサは、すでに述べたように、生産ラインにおける物体位置の計測、物体形状の計測、物体との間隔制御用センサ等に用いられる。そして、近年、産業用ロボット等に適用可能な比較的近距離を簡便に計測する距離センサが求められるようになった。このための距離センサとしては、表1-3に示したように、発光素子または受光素子を順次走査し、反射光のタイミングを検出する方式⁽⁴⁶⁾、走査レーザ光の受光角を検出する方式⁽⁴⁷⁾、物体から反射された光の距離

による強度変化を変調信号の位相差として検出する方式⁽⁵⁰⁾等が開発されてきた。しかし、これらの距離センサはセンサヘッド部に電気信号を扱う回路を含んでおり、悪環境下で使用される産業用ロボットに適用するのは困難であった。

そこで、本章では、スペックルの移動速度が照射レーザ光の波面の曲率半径に依存することに着目した光ファイバ列を用いた新しい構成の距離センサと、この距離センサとスペックル速度センサを組み合わせた構成の距離・速度センサを提案し、その構成パラメータによる検出特性を明らかにし、有用性を確認した実験結果について述べる。これらの距離センサは、センサが物体に近づくに従い測定精度が向上するというロボット用センサとして特に有用な特長を有している。

又、結像系を有する光学システムにおいては、その結像特性自身を利用し、結像系の焦点はずれ量を空間フィルタで検出する方式の距離センサが報告されている⁽⁵¹⁾。本章では、さらに、この焦点はずれ量検出用の空間フィルタとして、光ファイバ列空間フィルタを用いた距離センサを提案し、その検出特性、有用性を確認した実験結果についても述べる。

第6章では、円柱表面から生じるスペックル移動を検出する方式の回転角センサを提案する。

回転角センサは回転機構を伴う機器の位置制御情報を得るセンサとして用いられ、円板にスリット又は磁性体を一定間隔に取り付け、この移動を光学的または磁氣的に検出する方式が多く用いられている。しかし、分解能は多くて一回転当たり数万分割であり、より高精度な位置制御を可能とするためには、さらに高い分解能を持つ回転角センサが必要とされる。

本章では、円柱表面から生じるスペックルパターンの移動特性を用いた新しい方式の回転角センサを提案し、構成パラメータによる検出特性を明らかにし、本方式の有用性を確認した実験結果について述べる。そして、本方式によれば、容易に1回転当たり 10^6 分割以上の高分解能を持つ回転角センサを実現できることを示す。本章では、さらに、光ファイバ列空間フィルタを用いて、スペックルパターンの移動速度を検出することによる本センサの回転体半径の非接触計測への

応用についても述べる。

第7章では、光ファイバを端面が中心とその周囲に複数個とりかこむ形に配列し、各光ファイバ出力に重み付けした後、差動出力を得る構成のエッジセンサを提案する。

エッジセンサは、物体のエッジ検出のみならず、物体の形状、間隔および位置決め計測用のセンサとしても用いられる。デジタル画像処理においては、重み付けされた各画素の演算によりエッジの検出が行われることはよく知られている⁽⁵⁷⁾。又、この処理を重み付けされた複数個の開口で構成される複合開口の走査により行うことも可能である⁽⁵⁸⁾。

本章では、複合開口として配列光ファイバを用いたエッジセンサを提案し、その検出特性および有用性を確認した実験結果について述べる。光ファイバを用いることにより操作性並びに耐環境性に優れたエッジセンサを構成することができる。又、本センサによると、1本の光ファイバ出力からエッジを検出するよりも格段に高い検出精度が得られることを示す。

最後に第8章では、本研究で得られた結果をまとめて述べる。

第2章 速度計測用光ファイバ列空間フィルタ^{(59)~(66)}

§ 2-1 緒 言

本章では，耐環境性において多くの優れた特長を持つ光ファイバの端面を直線上に等間隔に配列することにより，速度計測用の差動構成の光ファイバ列空間フィルタを容易に構成できることを示す。

まず，空間フィルタを用いた速度計測の原理を述べ，続いて，光ファイバ列空間フィルタの構成とその速度検出特性を明らかにする。光ファイバ列空間フィルタの出力信号の選択度を定義し，これを用いて，光ファイバ数，光ファイバ間隔，物体のスペクトル分布，物体の移動方向に対する光ファイバ列空間フィルタの速度検出特性を詳細に検討する。合せて，物体の横ぶれ対策，円周速度測定における最適配列数を考察する。さらに，光ファイバ列空間フィルタの1次元イメージ速度センサとしての有効性を確認した実験結果についても述べる。

§ 2-2 空間フィルタを用いた速度計測の原理

物体に規則的な目印などをつけずに，物体が画像として有する光強度分布から空間フィルタを用いて特定の空間周波数成分を選択し，その空間積分値の時間変化を観測すると物体の移動速度に比例する周波数をもつ信号が得られ，周波数測定により非接触速度計測が可能である^{(23)~(29)}。この原理を図2-1に示す。物体像は結像レンズにより空間フィルタ面上に結像され，空間フィルタにより画像の明暗分布に重みが付けられる。空間フィルタを通過してきた光量は集光レンズにより集光された後，光電変換される。そして，その出力信号の時間変化が観測される。この速度計測の原理を直観的に理解するには，図2-1において，空間フィルタとして透明，不透明の部分が周期 p で繰返される2値のスリット列を，又，移動物体として点光源を考えてみればよい。このとき，点光源の空間フィルタ面上の x 軸方向の速度成分を V とすると，出力信号は周期 $T = p / V$ を有する信号となる。従って，これより出力信号の周期または周波数を測定することにより速度計

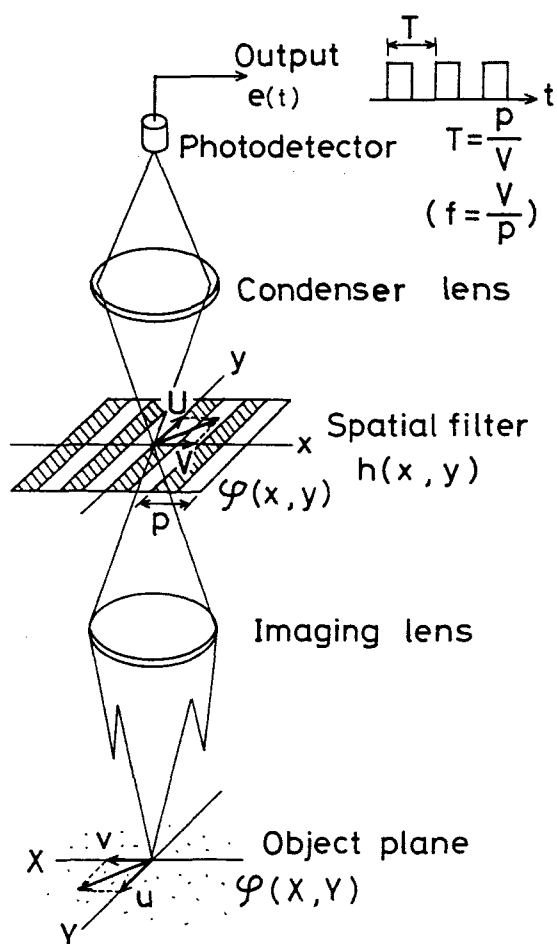


図2-1 空間フィルタを用いた速度計測の原理図

測が可能であることがわかる。

移動物体の光強度分布が多くの空間周波数成分より成る不規則な画像の場合にはどうであろうか。この場合にも空間フィルタの空間周波数選択特性により画像の移動速度に比例した周波数をもつ出力信号が得られる。このことを理論的に示してみよう。空間フィルタの空間透過率分布を $h(x, y)$ ，物体の空間フィルタ面上の光強度分布を $\varphi(x, y)$ とする。そして，物体は空間フィルタ面上で x 軸， y 軸方向にそれぞれ速度成分 V ， U をもつとする。このとき，空間フィル

タを通して得られる光量の空間積分値の時間変化する出力信号 $e(t)$ は次式で表される。

$$e(t) = \iint \varphi(x - x_0, y - y_0) h(x, y) dx dy \quad (2-1)$$

但し,

$$x_0 = Vt \quad (2-2)$$

$$y_0 = Ut \quad (2-3)$$

である。式(2-1)から、出力信号は空間フィルタの空間透過率分布と移動物体の画像の有する光強度分布の相互相関関数で表されることがわかる。従って、出力信号の自己相関関数 $e'(t)$ は画像のパワースペクトル $\Phi(\mu, \nu)$ と空間フィルタのパワースペクトル $|H(\mu, \nu)|^2$ の積のフーリエ変換として次式で表される。

$$e'(t) = \iint_{-\infty}^{\infty} \Phi(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 \times \exp \{ -j 2 \pi (\mu V + \nu U) t \} d\mu d\nu \quad (2-4)$$

従って、時間変化する出力信号のパワースペクトル $E(f)$ は式(2-4)をフーリエ変換することにより次のように求められる。

すなわち,

$$\begin{aligned} E(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} e'(t) \exp(-j 2 \pi f t) dt \\ &= \iiint_{-\infty}^{\infty} \Phi(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 \\ &\quad \times \exp \{ -j 2 \pi (\mu V + \nu U) t \} \exp(-j 2 \pi f t) d\mu d\nu dt \\ &\quad (2-5) \end{aligned}$$

ここで,

$$R(Vt, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 \exp(-j 2\pi \mu Vt) d\mu \quad (2-6)$$

とにおいて積分を実行すると, 出力信号のパワースペクトル $E(f)$ として次式の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} E(f) &= \iint_{-\infty}^{\infty} R(Vt, \nu) \exp\left\{-j 2\pi \left(\frac{f}{V} + \frac{U}{V} \nu\right) Vt\right\} dt d\nu \\ &= \frac{1}{V} \int_{-\infty}^{\infty} \phi\left(\frac{f}{V} + \frac{U}{V} \nu, \nu\right) \left|H\left(\frac{f}{V} + \frac{U}{V} \nu, \nu\right)\right|^2 d\nu \end{aligned} \quad (2-7)$$

ここで, f は時間周波数を表す。

式(2-7)は空間周波数面上 $\mu = f/V + U\nu/V$ の線上でパワースペクトルの積を積分することを意味している。従って, 空間フィルタのパワースペクトルが, $\mu = \mu_0, \nu = 0$ 近傍のみで急峻な選択特性を持てば, 出力信号の周波数 f は,

$$f = \mu_0 V \quad (2-8)$$

となり, 多くの空間周波数成分から成る不規則な画像に対しても出力信号の周波数を測定することにより速度計測が可能となる。

特定の空間周波数において急峻な選択特性を持つ速度計測用の空間フィルタは空間上に一定の透過率分布を周期的に配列することによって構成される⁽²⁵⁾。図2-2に示すように, x 軸方向に周期 p で N 回繰返される透過率分布 $h(x, y)$ を持つ空間フィルタを考えよう。このとき, この空間フィルタの空間周波数選択特性を表すパワースペクトルは, 透過率分布をフーリエ変換することにより次式で与えられる。

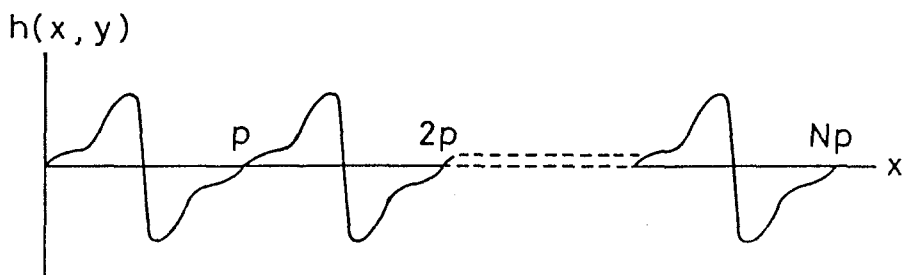


図 2-2 空間フィルタの透過率分布

$$\begin{aligned}
 |H(\mu, \nu)|^2 &= \left| \iint_D h(x, y) \exp \{ -j 2\pi (\mu x + \nu y) \} dx dy \right|^2 \\
 &= (Np)^2 |H_N(\mu)|^2 |H_W(\mu, \nu)|^2
 \end{aligned}
 \tag{2-9}$$

ここで,

$$|H_N(\mu)|^2 = \left(\frac{\sin N\pi p\mu}{N \sin \pi p\mu} \right)^2 \tag{2-10}$$

$$\begin{aligned}
 |H_W(\mu, \nu)|^2 &= \left| \iint_{1 \text{ 周期}} \frac{h(x, y)}{p} \right. \\
 &\quad \times \exp \{ -j 2\pi (\mu x + \nu y) \} dx dy \left. \right|^2
 \end{aligned}
 \tag{2-11}$$

$|H_N(\mu)|^2$ は透過率分布が x 軸方向に N 回繰返される効果を表しており、その特性を図 2-3 に示す。図 2-3 からわかるように、 $|H_N(\mu)|^2$ は、

$$\mu = n/p, \quad n = 0, 1, 2, \dots \tag{2-12}$$

なる空間周波数に大きなピークを有し、 N が大きい程この選択特性は急峻になる。

従って、周期 p は空間フィルタの選択する空間周波数を決め、繰返し数 N は空間

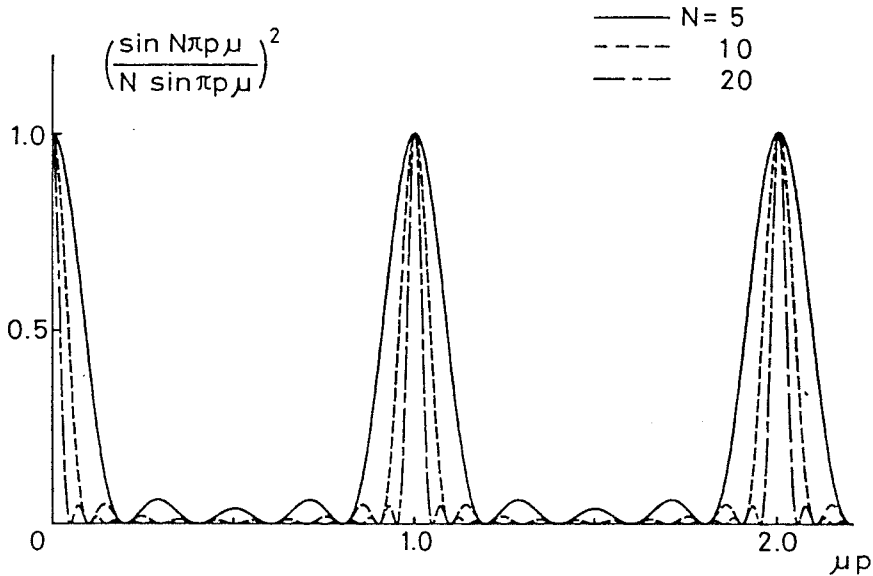


図 2-3 $|H_N(\mu)|^2$ の特性

フィルタの選択度を決めることになる。

$|H_W(\mu, \nu)|^2$ は繰返される透過率分布の効果を表しており、一般に正の透過率分布が繰返されるときには低域通過特性となるが、正負に渡る透過率分布の繰返しを用いることにより、帯域通過特性を実現することができ、ほぼ $\mu = 1/p$ 近傍の空間周波数のみを選択する空間フィルタを構成することができる。

§ 2-3 光ファイバ列空間フィルタの構成と速度検出特性 ⁽⁵⁹⁾⁻⁽⁶³⁾

2-3-1 構成と出力信号

前節で述べたように速度計測用の空間フィルタは一定の透過率分布を空間上に周期的に配列することによって構成される。光ファイバにおいては、光ファイバ端面に入射した光量が光ファイバ自身によって伝送される。従って、図 2-4 に示すように、直径 a の円形光ファイバ端面を間隔 $p/2$ で直線状に配列すること

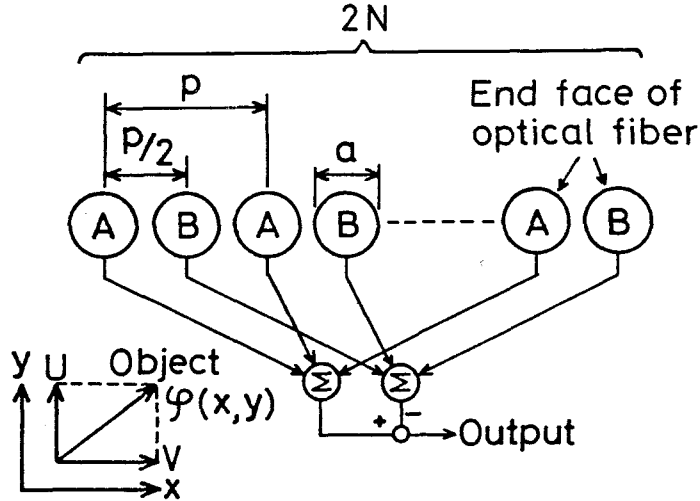


図 2-4 光ファイバ列空間フィルタの構成図

により透過率が空間上で周期的に変化することになり，速度計測用の光ファイバ列空間フィルタを構成することができる。図 2-4 においては，1つおきの光ファイバ出力の総和の差をとる差動構成を考えている。この差動構成により等価的に負の透過率を実現でき，零近辺の低周波空間周波数成分の選択を除去することができる。

この光ファイバ列空間フィルタの空間周波数選択特性を表すパワースペクトルは，光ファイバ部分の透過率を一様と仮定すると，図 2-4 の光ファイバ端面の透過部分に ± 1 の重みをかけフーリエ変換することにより次式で表される。

$$|H(\mu, \nu)|^2 = \pi^2 a^4 (\sin \pi p \mu / 2)^2 \times \left(\frac{\sin N \pi p \mu}{\sin \pi p \mu} \right)^2 \left\{ \frac{J_1(\pi a \sqrt{\mu^2 + \nu^2})}{\pi a \sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \right\}^2 \quad (2-13)$$

ここで， μ ， ν はそれぞれ x ， y 方向の空間周波数， J_1 は第 1 種 1 次のベッセル関数， $2N$ は差動構成における全光ファイバ数を表す。

$N=10$ ， $a/p=0.25$ の光ファイバ列空間フィルタの空間周波数選択特性を図 2-5 に示す。この例からもわかるように，光ファイバ端面を直線状に等間

隔に配列し、その1つおきの光ファイバ出力の総和の差の出力信号を得る構成の光ファイバ列空間フィルタは、空間周波数 $(\mu, \nu) = (1/p, 0)$ の周りに、 μ 軸方向には急峻で、 ν 軸方向にはかなり広がった空間周波数選択特性を示す。

この光ファイバ列空間フィルタを用いて、図2-4に示すように、光ファイバ列方向に速度 V 、光ファイバ列と直角方向に速度 U で移動する光強度分布 $\varphi(x, y)$ を有する移動物体を観測したときの出力信号のパワースペクトルは式(2-7)によって求められる。その計算例を図2-6に示す。但し、ここでは対象物体の有するパワースペクトル $\Phi(\mu, \nu)$ は、空間フィルタの選択する空間周波数近傍において一定とみなせると仮定している。図2-6からわかるように、光ファイバ列空間フィルタは対象物体の有するスペクトルの中から光ファイバの配列周期 p によって決まる空間周波数成分を選択し、その出力信号は、

$$f = V/p \quad (2-14)$$

を中心周波数に持つ狭帯域信号となっている。この中心周波数は対象物体の光ファイバ列方向の速度

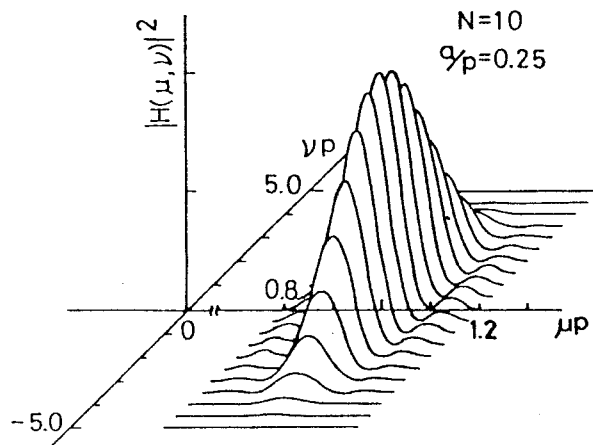


図2-5 光ファイバ列空間フィルタの空間周波数選択特性

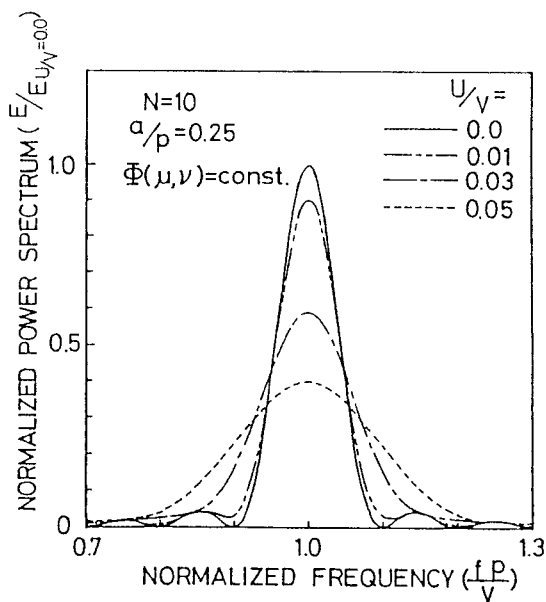


図2-6 出力信号のパワースペクトル例

成分 V に比例するので、中心周波数を測定することにより物体の光ファイバ列方向の速度成分の計測が可能となる。しかし、光ファイバは円形開口であり、光ファイバ列と直角方向の開口が短いので、この方向の速度成分 U が大きくなると出力信号のスペクトルは広がりを示す特性となる。

2-3-2 速度検出特性

空間フィルタを用いて、その出力信号の中心周波数の測定により速度を求める場合、出力信号の中心周波数ができるだけ高く、狭帯域信号であるほど測定精度が上がることになる。従って、出力信号の中心周波数 $f (=V/p)$ と式(2-7)で求められる出力信号のパワースペクトルの広がり Δf を用いて、出力信号の選択度 Q を次式で定義し、この値を用いて光ファイバ列空間フィルタの速度検出特性を評価する。

$$Q = \frac{V}{p \cdot \Delta f} \quad (2-15)$$

この場合、出力信号の中心周波数 f をそのパワースペクトルの広がり $\pm \Delta f / 2$ の範囲内で測定できるとき、速度 V に対する誤差 ΔV の比で表される相対測定誤差 ϵ_V は選択度 Q を用いて次式で表される。

$$\epsilon_V = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta f}{2f} = \frac{1}{2Q} \quad (2-16)$$

さて、構成パラメータによる選択度を検討してみよう。式(2-7)で求められる出力信号のパワースペクトルは物体の有するパワースペクトル $\Phi(\mu, \nu)$ に依存する。しかし、空間フィルタの選択する帯域幅が十分に狭い場合には、空間フィルタの選択する空間周波数近傍において $\Phi(\mu, \nu) = \text{一定}$ とみなすことができる。そこで、まず $\Phi(\mu, \nu) = \text{一定}$ として、光ファイバ数、光ファイバ間隔による出力信号の選択度の変化について調べる。

光ファイバを最も接近して配列した場合 ($a/p = 0.5$) における式(2-7),

(2-13), (2-15) を用いて計算した光ファイバ数 N に対する選択度 Q の変化を図 2-7 に示す。光ファイバ列と直角方向の速度成分 U が存在しない場合 ($U/V = 0$) においては、選択度は

$$Q_{U/V=0} \simeq 1.13 N \quad (2-17)$$

で表され、 y 軸方向に適当に長いスリット列空間フィルタの Q ⁽²⁵⁾ と同じ特性となる。しかし、 U が存在するとき、 Q は N を増加しても飽和する特性を示し、この値は U が大きい程小さくなり、 U の Q に及ぼす影響は大きい。

光ファイバの直径 a とファイバ間隔 p の比に対する選択度 Q の変化を図 2-8 に示す。 $U = 0$ のときには p の変化に対して Q の値は影響を受けないが、 U が存在するとき、 p を大きくすると Q は低下し、この低下は U が大きい程大きくなる。

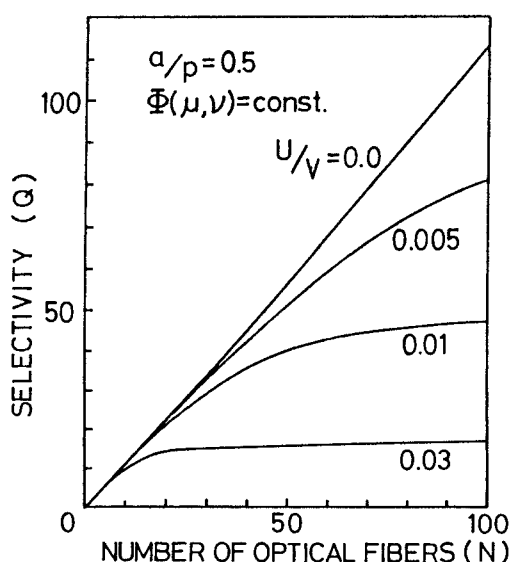


図 2-7 光ファイバ数 N に対する選択度 Q の変化

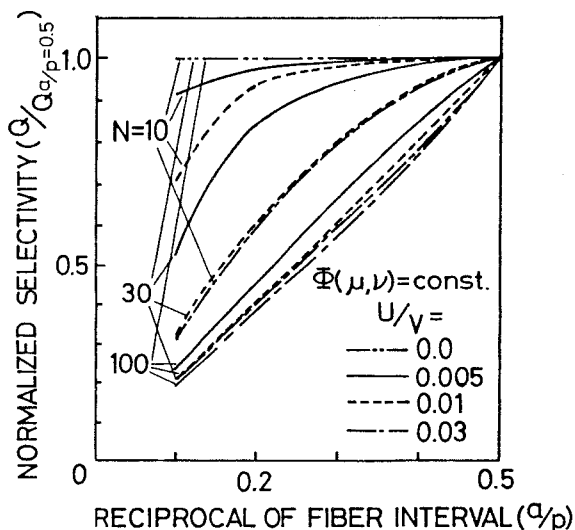


図 2-8 光ファイバ間隔 p に対する選択度 Q の変化

次に物体の画像が有するパワースペクトルがガウス分布、すなわち、

$$\Phi(\mu, \nu) = A_0 \exp \left\{ -(\mu^2 + \nu^2) / (2\sigma^2) \right\} \quad (2-18)$$

で表される場合における選択度について調べる。式(2-7), (2-13), (2-15), (2-18)を用いて計算したガウス分布の広がり σ に対する選択度 Q の変化を図2-9に示す。ただし, σ は光ファイバ列空間フィルタが選択する中心周波数 $1/p$ で規格化してある。図において丸印は $\Phi(\mu, \nu) = \text{一定}$ とした場合の選択度の値を示している。

$N, U/V$ が小さいときには, σ が変化しても Q は $\Phi(\mu, \nu) = \text{一定}$ の場合と大差がない。 $N, U/V$ が大きいとき, Q は光ファイバ列空間フィルタが選択する ν 軸方向のスペクトルにより劣化している。 σ が小さいときにはこの ν 軸方向の広がりを実質的に小さくなり, 結果として Q は大きくなる。しかし, $\sigma p \geq 3$ においては, Q は $\Phi(\mu, \nu) = \text{一定}$ のときとほぼ同じ値となり, 対象物体のスペクトルの影響はほとんどなくなる。

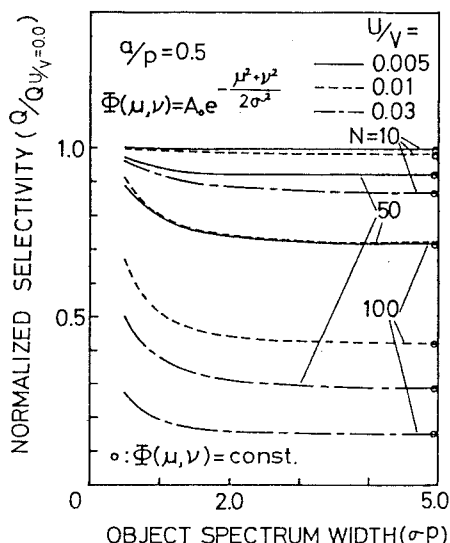


図2-9 画像のスペクトルの広がり σ に対する選択度 Q の変化

2-3-3 横ぶれ対策

前節までに光ファイバ列空間フィルタを用いて, 移動物体の光ファイバ列方向の速度を計測することが可能であることを示した。しかし, 横ぶれ等により光ファイバ列と直角方向の速度成分が大きくなると, この影響により出力信号のスペクトルは広がり, 速度検出特性が劣化する。この劣化は光ファイバ列空間フィルタの開口がファイバ列と直角方向に対して短いことに起因している。従って, この劣化を防ぐには等価的にファイバ列と直角方向の開口を長くする必要がある。これはファイバ列と直角方向の光量を平均化することによって可能であり, 円柱レンズを用いた結像系によって近似的に実現することができる。

図 2-4 の構成において、光ファイバ列と直角 (y 軸) 方向に $|y| \leq L/2$ の範囲で対象物体の有する光強度分布を平均化するとき、対象パターンはこの範囲で x のみの関数 ($g(x)$ とする) となるので、そのパワースペクトルは次式で表される。

$$\Phi(\mu, \nu) = G(\mu) \operatorname{sinc}^2(\pi L \nu) \quad (2-19)$$

ここで、 $\operatorname{sinc} x \equiv \sin x / x$ 、 $G(\mu)$ は $g(x)$ のパワースペクトルである。

平均化距離 L に対する選択度 Q の変化を図 2-10 に示す。平均化距離が $L < N \cdot U/V$ においては、この平均化の効果によって Q は急激に改善される。 $L > N \cdot U/V$ においては Q は緩やかに増加し、 $L > 3 N \cdot U/V$ のとき、 Q は式 (2-17) で与えられるファイバ列と直角方向の速度成分が存在しない場合の Q の値に近くなる。

従って、光ファイバ列と直角方向の速度成分が大きい場合の速度計測においても、この方向の光量を平均化することにより、十分よい特性を持つ速度センサを実現できることになる。そして、この平均化距離は

$$L = k N \cdot U/V \quad (2-20)$$

として、 $k > 2 \sim 3$ に選ぶのが適当になる。

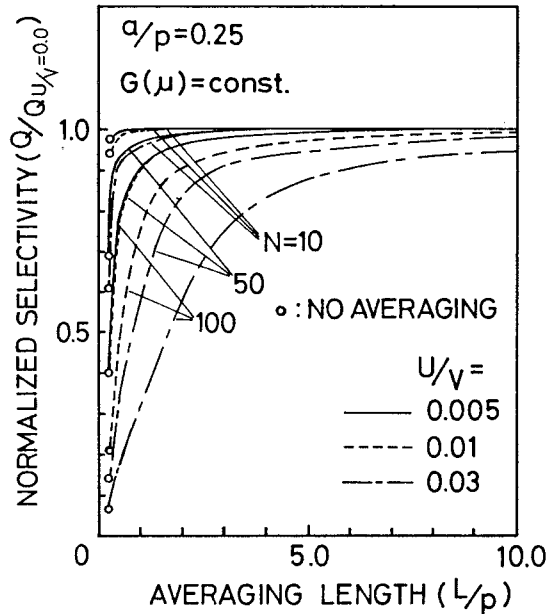


図 2-10 平均化距離 L に対する選択度 Q の変化

2-3-4 円周速度測定における最適配列数⁽⁶⁴⁾⁻⁽⁶⁶⁾

光ファイバ列空間フィルタを用いたイメージ速度計測において測定精度を上げ

るには光ファイバ数を増加して空間フィルタの選択度を向上させる必要がある。しかし、回転体の円周速度の測定においては、円周速度のフィルタ面方向の速度成分が空間フィルタ面に投影されるので、速度分布のある画像の移動が観測され、配列数の増加が必ずしも空間フィルタの選択度の向上につながらない。

本節では、空間フィルタを用いて非接触で円周速度を測定する場合において、空間フィルタの配列周期が与えられたとき、最高の測定精度を得るために、空間フィルタの選択度を最大にする配列数について考察する。

ここでは、図 2-11 に示すように、幅 W において一定の透過特性を有するスリットの差動列が周期 P で N 回繰返される空間フィルタを考え、選択度を最大にする配列数 N を考察する。

図 2-11 に示すように、空間フィルタ面上には円周速度 V の空間フィルタの配列方向の速度成分 V_x が投影される。この値は位置によって異なるので、等速度を与える方位角 θ で空間フィルタの特性を記述する。回転体の半径を r とすると、空間フィルタの透過特性 $h(\theta)$ は次式で表される。

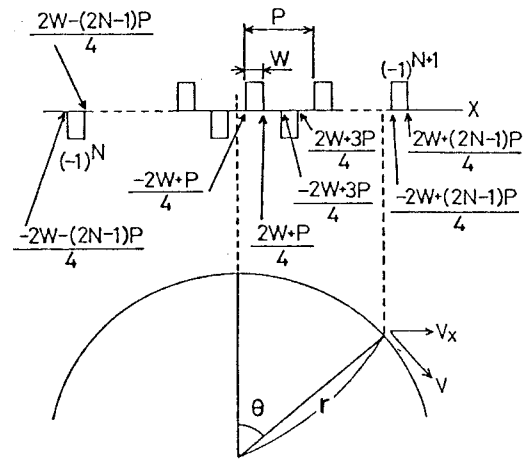


図 2-11 空間フィルタと円周速度の関係

$$h(\theta) = \begin{cases} (-1)^{n+1} : \sin^{-1}[\{-2\alpha + (2n-1)\beta\}/4] \leq \theta \\ \leq \sin^{-1}[\{2\alpha + (2n-1)\beta\}/4] \\ (-1)^n : \sin^{-1}[\{-2\alpha - (2n-1)\beta\}/4] \leq \theta \\ \leq \sin^{-1}[\{2\alpha - (2n-1)\beta\}/4] \\ 0 : \text{その他} \end{cases}$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (2-21)$$

$$\alpha = W / r \quad (2-22)$$

$$\beta = p / r \quad (2-23)$$

従って、この空間フィルタの空間周波数スペクトル $H(\mu)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} H(\mu) &= \int_{\sin^{-1} \left[\frac{-2\alpha - (2N-1)\beta}{4} \right]}^{\sin^{-1} \left[\frac{2\alpha + (2N-1)\beta}{4} \right]} h(\theta) e^{-j2\pi\mu\theta} d\theta \\ &= \frac{j}{\pi\mu} \sum_{n=1}^N (-1)^n \left[\cos \left\{ 2\pi\mu \sin^{-1} \frac{-2\alpha + (2n-1)\beta}{4} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \cos \left\{ 2\pi\mu \sin^{-1} \frac{2\alpha + (2n-1)\beta}{4} \right\} \right] \quad (2-24) \end{aligned}$$

空間フィルタは差動構成を考えているので、空間周波数 μ が 0 及び $1/\beta$ の偶数倍の近傍では式 (2-24) は非常に小さい値となり、又、 $W = p/3$ と選ぶと 3 次の高調波成分も除去され、ほぼ $\mu = 1/\beta$ の近傍のみに空間周波数選択特性が得られる⁽²⁵⁾。従って、以下ではこの場合について検討する。しかし、この条件を除いても、 $\mu = 1/\beta$

の近傍のみを考える場合には、ほぼ同じフィルタ特性が得られる。このフィルタのパワースペクトル例として、 $\beta = 0.02$ の場合を図 2-12 に示す。配列数 N の増加と共にフィルタの選択特性は狭帯域になっていくが、多くし過ぎると低周

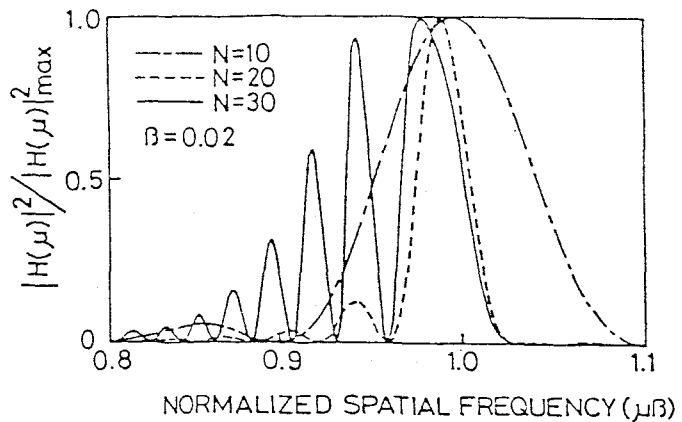


図 2-12 空間フィルタのパワースペクトル例

波数側の周期的な選択性が大きくなり、フィルタの特性は悪くなる。

このような周期的な選択性が大きい空間フィルタの選択特性を評価するのに、空間フィルタの広がりをもピーク近傍の広がり半値幅でなく、空間フィルタの配列周期で決まる空間周波数 $1/\beta$ からの平均値として、広がり $\Delta\mu$ を次式で定義する。

$$(\Delta\mu)^2 = \frac{\int_{1/(2\beta)}^{3/(2\beta)} (\mu - 1/\beta)^2 |H(\mu)|^2 d\mu}{\int_{1/(2\beta)}^{3/(2\beta)} |H(\mu)|^2 d\mu} \quad (2-25)$$

又、空間フィルタの選択度 Q を

$$Q = 1/(\beta \cdot \Delta\mu) \quad (2-26)$$

で定義して Q を最大にする配列数 N を求める。

このとき、各種の β において、 Q の N に対する変化を図 2-13 に示す。

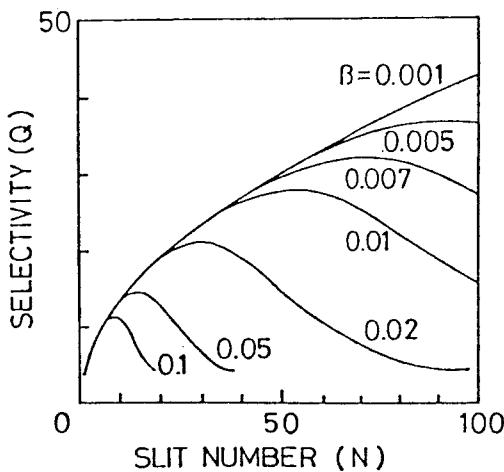


図 2-13 配列数 N に対する選択度 Q の変化

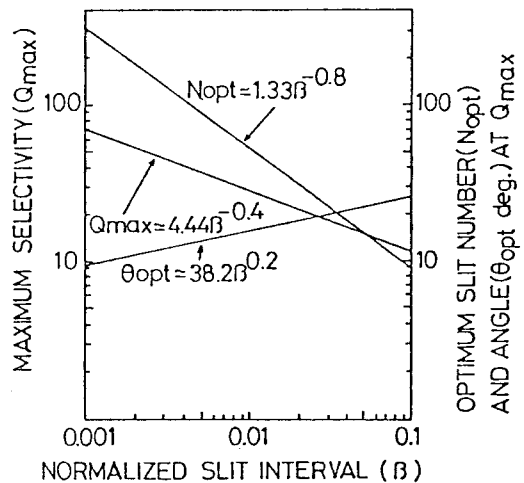


図 2-14 規格化された配列間隔 β に対する最大の選択度 $Q_{\max}$ と $Q_{\max}$ を与える配列数 N_{opt} および方位角 θ_{opt}

図 2-13 から，それぞれの β に対して Q を最大にする N が存在することがわかる。これより求めた β に対する最大の選択度 $Q_{\max}$ 及び $Q_{\max}$ を与える配列数 N_{opt} ，方位角 θ_{opt} の関係を図 2-14 に示す。これらは近似的に，

$$Q_{\max} \simeq 4.44 \beta^{-0.4} \quad (2-27)$$

$$N_{\text{opt}} \simeq 1.33 \beta^{-0.8} \quad (2-28)$$

$$\theta_{\text{opt}} \simeq 38.2 \beta^{0.2} \quad (2-29)$$

で表される。

このように，空間フィルタを用いて非接触で円周速度を測定する場合においては，フィルタの配列周期が与えられたとき，最高の測定精度を得るための最適配列数に注意する必要がある。

§ 2-4 実験結果と考察

本節では，光ファイバ列空間フィルタが移動物体の光ファイバ列方向の速度成分の計測に有効であることを確認した実験結果について述べる。

コア径 $150 \mu\text{m}$ ，クラッド径 $350 \mu\text{m}$ のステップインデックス形円形光ファイバを $350 \mu\text{m}$ 間隔に V 溝を施したアルミ平板上に 16 本配列し，接着剤で固定した後研磨して， $N=8$ ， $a/p=0.214$ の差動構成の光ファイバ列空間フィルタを製作した。この光ファイバ列空間フィルタを用いた実験の構成を図 2-15 に示す。対象物体には，レーザ光のスペックルパターンの写真（図 2-16 (a)）を用い，これを直径 167 mm の回転体表面に貼り移動させた。この対象パターンを 18 W のタングステンランプで照明し，焦点距離 50 mm の球面レンズを用いて，倍率 0.35 倍で光ファイバ端面上に結像した。対象物体の光ファイバ列と直角方向の光量を平均化するときには，焦点距離 47 mm の円柱レンズを球面レンズの後に挿入した。このときの結像パターンを図 2-16 (b)

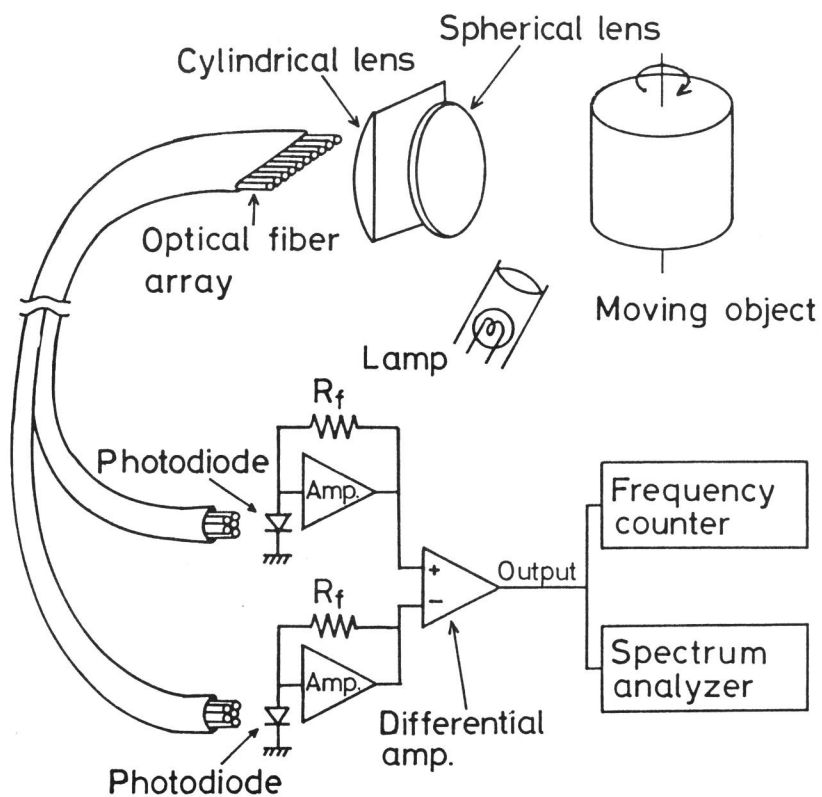
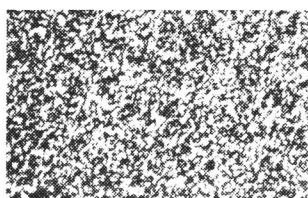
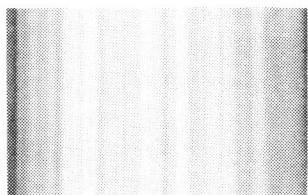


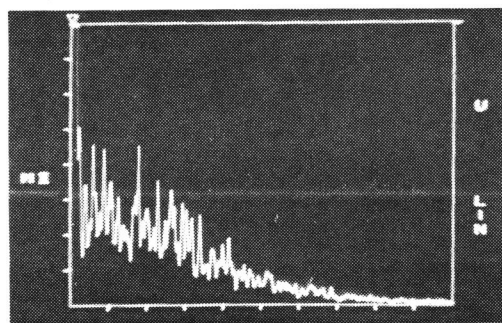
図 2-15 実験の構成図



(a)

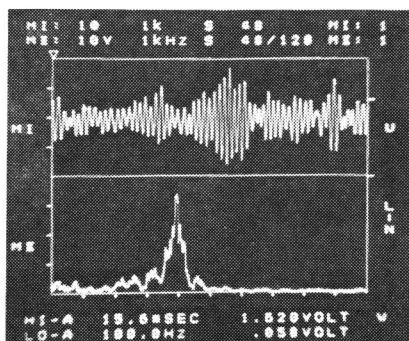


(b)

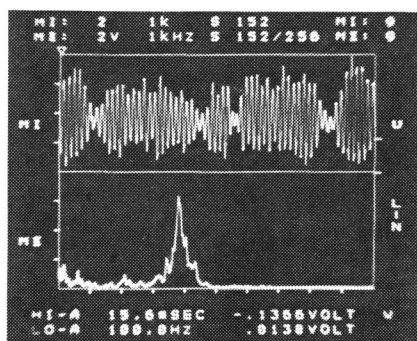


(c)

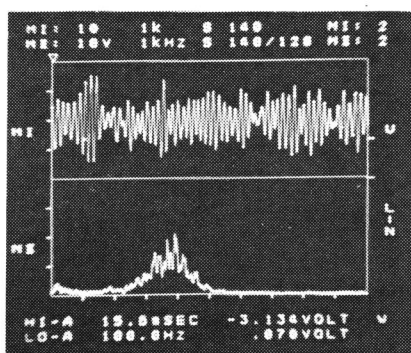
図 2-16 (a) 実験に用いた対象パターン
(b) 円柱レンズによる結像パターン
(c) 対象パターンのパワースペクトル
(0.26 c/mm/div)



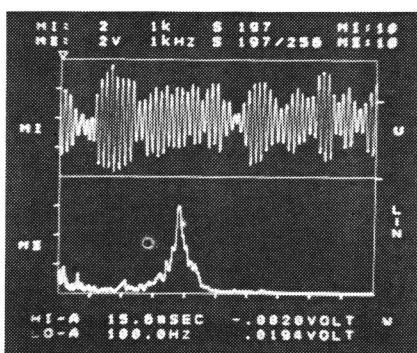
(a)



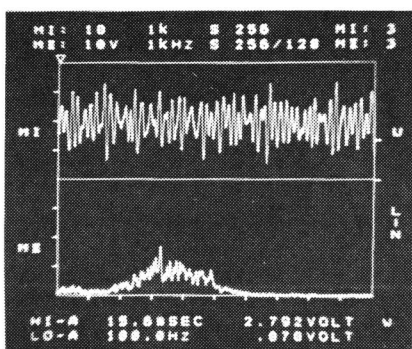
(b)



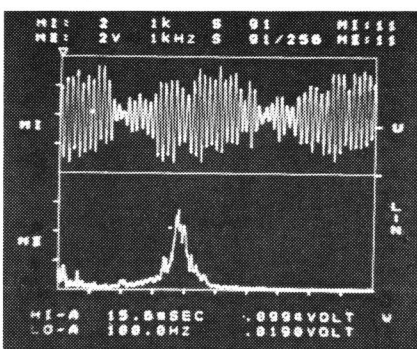
(c)



(d)



(e)



(f)

図 2-17 出力信号波形 (15.6 msec/div, 上段) とそのパワースペクトル (100 Hz/div, 下段)

円柱レンズなし: (a) $U/V=0.0$ (c) $U/V=0.1$

(e) $U/V=0.2$

円柱レンズあり: (b) $U/V=0.0$ (d) $U/V=0.1$

(f) $U/V=0.2$

に示す。幅 $90\text{ }\mu\text{m}$ の単スリットを用いて便宜的に測定した図 2-16(a) のパターンのパワースペクトルを図 2-16(c) に示す。光ファイバ端面に入射した光量を 1 つおきの光ファイバ光量の総和としてフォトダイオードで光電変換し、差動増幅した後の出力信号の波形、パワースペクトル及び周波数を測定した。

円柱レンズを用いない場合、用いた場合における対象パターンの斜め移動方向に対する出力信号波形とそのパワースペクトルを図 2-17 に示す。移動方向は光ファイバ列空間フィルタ及びレンズ系を回転することにより設定され、パワースペクトルは、 156 msec にわたる出力信号を 1024 点サンプリングし、これから FFT により求められたパワースペクトルを 256 回以上加算して求められている。なお、円柱レンズを用いる場合においては、対象パターンに幅 5 mm のスリットを重ねて、光量の平均化範囲を限定した。従って、図 2-17(d) においては、式 (2-20) における $k = 3.1$ となり、図 2-17(b) と比べて広がりはないが、図 2-17(f) においては $k = 1.6$ となり、少し広がりを見せている。

円柱レンズを用いない場合においては、 U/V が増加すると出力信号のスペクトルは大きく広がり、光ファイバ列空間フィルタの速度検出特性は劣化する。これに対して、円柱レンズを用いた場合には、式 (2-20) において、 $k > 2 \sim 3$ を満足するように平均化距離を選ぶと、出力信号のスペクトルの広がりはいくらか少なく、光ファイバ列と直角方向の速度成分がない場合のスペクトルとほぼ等しいスペクトルを得ることができる。これより、円柱レンズによる平均化の効果は明らかである。

周波数カウンタを用いて測定した物体速度に対する出力信号の周波数を図 2-18 に示す。出力信号の周波数は測定範囲内において 2% 以内で物体速度に比例する結果が得られ、光ファイバ列空間フィルタの速度計測に対する有用性を示している。 2% の測定精度は $Q = 25$ の空間フィルタを用いたときに得られる精度であり、本実験では出力信号の中心周波数がスペクトルの広がり半値全幅の $1/2.7$ で測定されたことになる。

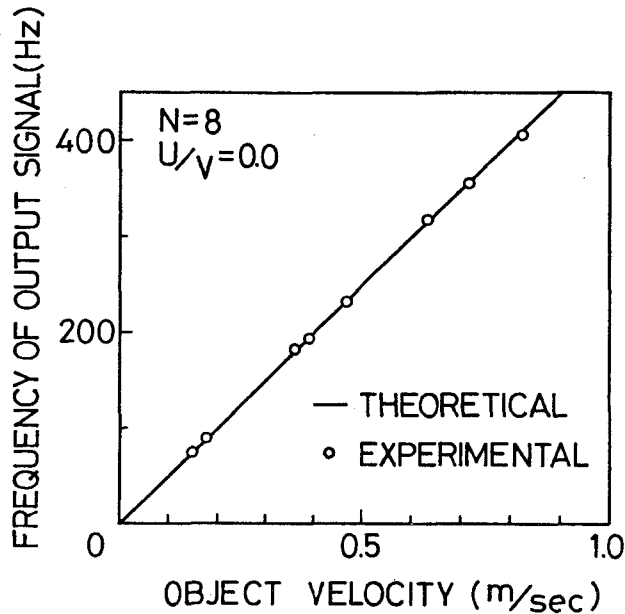


図 2-18 物体速度に対する出力信号の周波数

出力信号において中心周波数以外の周波数成分は正弦波的な速度信号を乱す。これらの周波数成分は空間フィルタの選択特性、物体の有するスペクトル及び光検出器、増幅器の雑音によって生じる。ここで、光検出器、増幅器の雑音に対する速度検出に必要な速度信号となる物体の光強度を検討する。本実験では、光検出器として Si フォトダイオード (Hamamatsu S1337-66BR) を用い、これを 0 V バイアス直流結合で動作させた。従って、ショットノイズを無視することができ、雑音源はほぼジョンソンノイズのみとなるが、直流結合で使用すると、ゼロドリフトとフリッカーノイズのために雑音量は 2 桁ほど大きくなる。使用したフォトダイオードの帯域幅は 350 kHz, NEP (雑音等価電力) は $2 \times 10^{-14} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるので、出力信号の S/N (信号対雑音比) が 1 となる速度信号の光量は約 1.2 nW となる。又、差動増幅器への入力電圧は、フォトダイオードの光電流と図 2-15 における帰還抵抗 R_f の積で与えられる。 R_f として 100 k Ω を使用し、使用した差動増幅器の入力換算雑音電圧は 50 $\mu\text{V p-p}$ で

ある。従って、フォトダイオードの入射光量に対する出力電流の関係から、増幅器の雑音電圧に相当する速度信号の光強度は約 1 nW となる。さらに、物体光強度の 10% が有効に活用されると仮定し、さらに速度信号を検出するのに 40 dB 以上の S/N を必要と仮定する。このとき、速度信号の光強度は、光ファイバ端面の総面積が $2.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ であることを考慮すると、 $430 \text{ } \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以上必要となる。

本実験では照明光源として 18 W のタングステンランプを使用した。差動増幅器の利得が 50 dB のとき、雑音レベルは速度信号に対して 45 dB 以下であった。従って、本実験における測定誤差は主として空間フィルタの選択特性によっているものと思われる。よりよい精度で速度を検出するためには、より多くの光ファイバを用いて空間フィルタを構成し、出力信号の選択度を向上させるか、又は、出力信号の中心周波数の測定精度を上げ、等価的に選択度を向上させる必要がある。

又、本方式における検出可能最大速度は、光検出器と増幅器の帯域幅によって決まり、本実験では増幅器の帯域幅 50 kHz によって制限され、 100 m/sec である。

§ 2-5 結 言

本章では、光ファイバ端面を直線状に等間隔に配列することにより速度計測用の差動構成の光ファイバ列空間フィルタを容易に構成できることを示した。出力信号の選択度を定義し、これを用いて光ファイバ列空間フィルタの速度検出特性を評価した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 光ファイバ列と直角方向の速度成分が存在しないとき、光ファイバ列空間フィルタの速度検出特性は光ファイバ間隔に関係なく光ファイバ数に比例してよくなる。
- (2) 光ファイバ列と直角方向の速度成分が存在するとき、その速度成分が大きくなればなる程、また光ファイバ間隔が大きい程、速度検出特性は劣化する。

- (3) 物体の有するスペクトル分布の広がり小さくなる程，速度検出特性の劣化は改善される。
- (4) 球面レンズと円柱レンズで構成される結像系を用いて光ファイバ列と直角方向の光量を平均化することにより，速度検出特性の劣化を大きく改善することができる。これにより横ぶれ等がある物体に対しても光ファイバ列空間フィルタを用いた速度計測が可能になる。
- (5) 円周速度測定への応用においては，選択度を最大にする最適配列数が存在する。

又，ステップインデックス形光ファイバを16本直線状に配列した $N=8$ の光ファイバ列空間フィルタを製作し，これを用いた実験により光ファイバ列空間フィルタの1次元イメージ速度センサとしての有効性を確認した。

第3章 光ファイバ列を用いた2次元 イメージ速度センサ^{(67)~(70)}

§ 3-1 緒 言

本章では、第2章で述べた光ファイバ列を2組直角に配置して構成される光ファイバ列空間フィルタと、球面レンズと円柱レンズで構成される結像系を持つ2次元イメージ速度センサについて述べる。

本速度センサにおける結像系を含む光ファイバ列空間フィルタの等価空間フィルタを求め、これを用いて構成パラメータによるその空間周波数選択特性、対象物体の画像が光ファイバ列に対して斜め移動するときの速度検出特性を明らかにする。そして、構成パラメータおよび対象物体の移動方向に対する合成速度の測定精度を検討し、必要とする測定精度を得るための構成パラメータを考察する。又、本速度センサの有用性を確認した実験結果についても述べる。

§ 3-2 構成と出力信号

光ファイバ列を用いた2次元イメージ速度センサの構成を図3-1に示す。移動物体の画像は球面レンズと円柱レンズを用いた結像系により光ファイバ列空間フィルタの光ファイバ端面上に結像される。光ファイバ列空間フィルタは、図3-2に示すように、各軸方向の速度成分を検出する2組の光ファイバ列を直角に配置することにより構成されている。各光ファイバ列は、第2章で述べたように、光ファイバ端面が間隔 $d/2$ で $2N$ 個直線状に配列されており、光ファイバに入射した対象物体の画像の光量は光ファイバ自身により導かれ、1つおきの光ファイバ出力の総和の差の出力信号が得られる構成となっている。

このとき、対象物体の x 、 y 軸方向の速度成分をそれぞれ、 V_x 、 V_y とし、結像系の倍率を m とすると、 x 、 y 軸方向のそれぞれの光ファイバ列からは、式(2-14)で述べたように、中心周波数

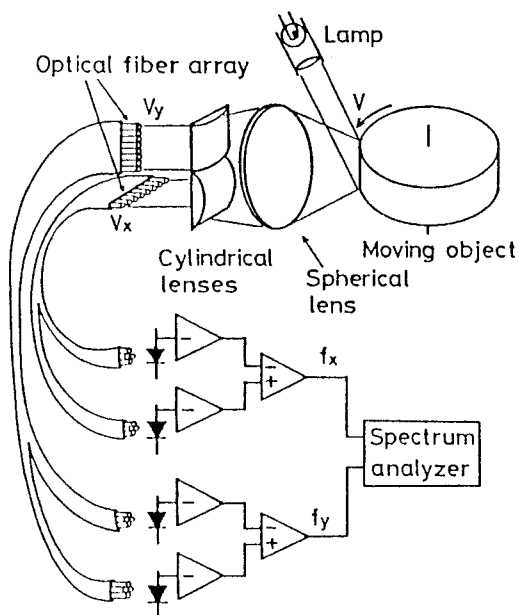


図 3-1 光ファイバ列を用いた 2 次元
イメージ速度センサの構成図

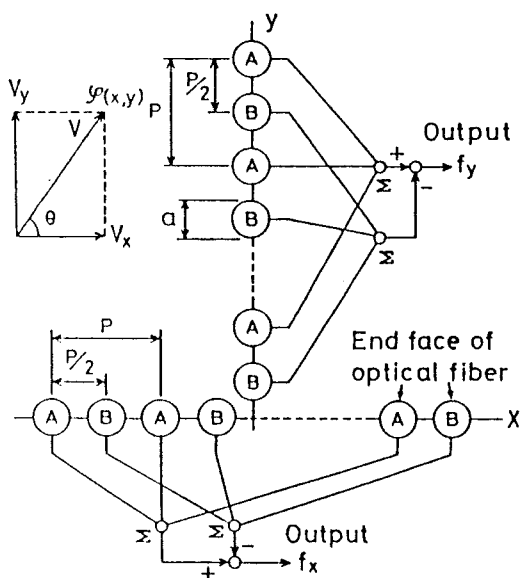


図 3-2 2次元イメージ速度を計測す
ための光ファイバ列空間フ
ィルタの構成図

$$f_x = m V_x / p \quad (3-1)$$

$$f_y = m V_y / p \quad (3-2)$$

を持つ狭帯域信号が得られる。従って、
合成速度 V とその方向 θ は

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \frac{p}{m} \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (3-3)$$

$$\theta = \tan^{-1}(V_y / V_x)$$

$$= \tan^{-1}(f_y / f_x)$$

$$(3-4)$$

により求められる。

しかし、光ファイバは円形開口であり、光ファイバ列に直角な方向の開口が短いので、この方向の速度成分が大きくなると出力信号のスペクトルが広がり、中心周波数の測定精度が劣化する。この対策として、それぞれの光ファイバ列に対して球面レンズの後に円柱レンズを置き、光ファイバ列と直角方向の光量を平均化する構成となっている。2次元速度計測においては、物体の画像が必然的に光ファイバ列に対して大きく斜め方向に移動するので、結像系および空間フィルタの構成を適切に決める必要がある。

§ 3-3 結像系を含む等価空間フィルタとその速度検出特性

本節では、画像の斜め移動方向 θ に対する結像系を含む光ファイバ列空間フィルタの速度検出特性、測定精度を検討する。光ファイバ列を直角に配置しているので、 V_y を検出する特性は $90^\circ - \theta$ の V_x を検出する特性で表される。従って、以下では主として x 軸方向の光ファイバ列に対して検討する。

3-3-1 結像特性

V_x を検出するための光ファイバ列に対する結像系を図 3-3 に示す。球面レンズ、円柱レンズの焦点距離をそれぞれ f_s 、 f_c とする。又、物体面、各レンズ、像面間の各距離を、図 3-3 に示すように、それぞれ d_1 、 d_2 、 d_3 とする。ここで像面 I (ξ , η) は物体面 O (x , y) の画像が球面レンズにより、倍率

$$m = d_3 / d_1 \quad (3-5)$$

で結像する面とし、光ファイバ端面は配列方向を ξ 軸方向に I 面上に置かれる。このとき I 面上においては、 ξ 軸方向には物体像が倍率 m で結像されるが、 η 軸方向には円柱レンズの効果により O 面上の点光源が Γ の長さに広がる結像特性となる。従って、この広がり Γ の範囲が光ファイバ端面を横切る条件を満足する O 面上の光量が光ファイバ端面に入射することになる。すなわち、物体面上の光強度分布が y 軸方向に長さ L の範囲で平

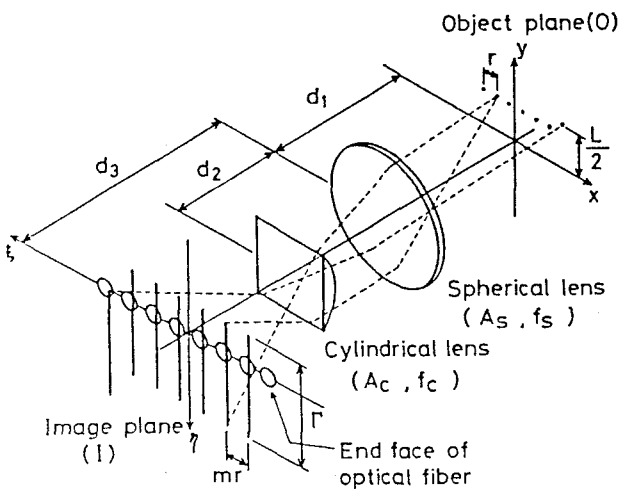


図 3-3 球面レンズと円柱レンズを用いた結像系

均化されて光ファイバに入射する結像特性となる。

今、球面レンズ、円柱レンズの開口をそれぞれ A_S , A_C とし、光ファイバの径が L および Γ に比べて十分小さいと仮定する。このとき、平均化距離 L および点像の広がり距離 Γ は、近軸光線を考え、光線行列⁽⁷¹⁾を用いて光線追跡を行い、結像条件を適用することにより、次式で表される。

$$L = \min \{ L_S , L_C \} \quad (3-6)$$

$$\Gamma = \min \{ \Gamma_S , \Gamma_C \} \quad (3-7)$$

但し、

$$L_S = A_S \frac{(D_1 + D_2 - D_1 D_2)^2}{(F - D_2) D_1 + (D_1 - 1) D_2^2} \quad (3-8)$$

$$L_C = A_C \frac{D_1 + D_2 - D_1 D_2}{F} \quad (3-9)$$

$$\Gamma_S = A_S \frac{(D_1 + D_2 - D_1 D_2)^2}{F D_1 (D_1 - 1)} \quad (3-10)$$

$$\Gamma_C = A_C \frac{D_1 + D_2 - D_1 D_2}{D_1 + D_2 - D_1 D_2 + F (D_1 - 1)} \quad (3-11)$$

ここで、

$$D_1 = d_1 / f_S \quad (3-12)$$

$$D_2 = d_2 / f_S \quad (3-13)$$

$$F = f_C / f_S \quad (3-14)$$

である。 L_S および Γ_S は球面レンズの開口によって制限される場合であり、 L_C および Γ_C は円柱レンズの開口によって制限される場合である。式(3-6)～(3-11)は、球面レンズ、円柱レンズ、光ファイバ列の中心が互にずれた配置においても、球面レンズ又は円柱レンズのどちらか一方のレンズの開口によって制限される場合には成立する。但し、レンズの中心がずれると、光ファイバ端

面上に結像する物体像の位置が変わることになる。

L および Γ は球面レンズと円柱レンズの開口および結像条件（物体面，球面レンズ，円柱レンズ，結像面の各距離およびレンズの焦点距離）によって決まり， Γ は空間フィルタに入る光量に影響し， L は空間フィルタの空間周波数選択特性を決める。種々の結像系のパラメータに対する平均化距離 L を決める L_s および L_c の計算例を図 3-4 に示す。 L_s および L_c は共にレンズの開口に比例し，球面レンズと円柱レンズ間の距離 D_2 がある程度小さいとき物体までの距離 D_1 に比例する特性となる。 L は L_s と L_c の小さい方の値によって決まり，結像系のパラメータを適切に選ぶことにより必要とする L の値を得ることができる。但し， A_c は光ファイバの開口 N.A. ($= \sin \gamma$) によって

$$A_c \leq 2 (d_3 - d_2) \tan \gamma \quad (3-15)$$

であることに注意する必要がある。

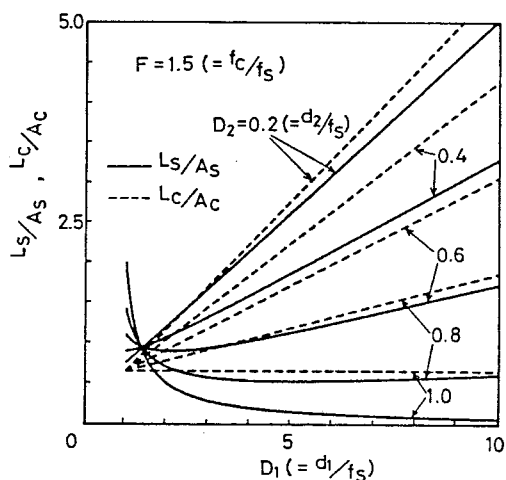


図 3-4 平均化距離 L を決める L_s および L_c の計算例

3-3-2 等価空間フィルタ

球面レンズと円柱レンズを用いた結像系においては，一軸方向には物体像が倍率 m で結像され，他軸方向には物体面上の点光源が像面上で Γ の長さに広がり，物体面上の長さ L の範囲の光量が像面上の一点に入射する。従って，直径 a の光ファイバを間隔 $p/2$ で $2N$ 個直線状に配列し差動構成とした光ファイバ列空間フィルタは，結像系を含み物体面上で考えると， x 軸方向の光ファイバ列に対しては，図 3-5 に示すように， x 軸方向に p/m の周期を持ち， y 軸方向に開口 L を持つ空間フィルタと等価とみなすことができる。

従って， y 軸方向に点光源の光量が $1/\Gamma$ 倍となり，光ファイバ円形端面の y

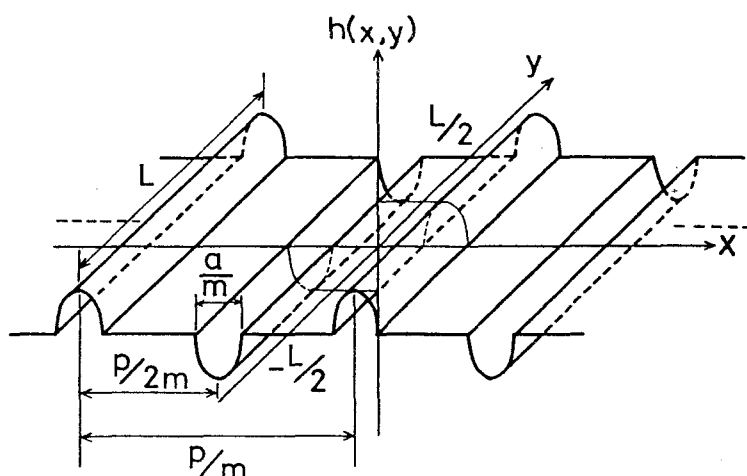


図 3-5 結像系を含む光ファイバ列空間フィルタの等価空間フィルタ

軸方向の長さが入射光量の重みとなることを考慮すると、この等価空間フィルタの空間透過特性 $h_x(x, y)$ は次式で表されることになる。

$$h_x(x, y) = \begin{cases} \frac{2\sigma(-1)^{n+1}}{\Gamma} \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 - \left\{x - \frac{(2n-1)\beta}{4}\right\}^2} & : \left\{ -2\alpha + (2n-1)\beta \right\} / 4 \leq x \\ & \leq \left\{ 2\alpha + (2n-1)\beta \right\} / 4, \\ & -L/2 \leq y \leq L/2 \\ \frac{2\sigma(-1)^n}{\Gamma} \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 - \left\{x + \frac{(2n-1)\beta}{4}\right\}^2} & : \left\{ -2\alpha - (2n-1)\beta \right\} / 4 \leq x \\ & \leq \left\{ 2\alpha - (2n-1)\beta \right\} / 4, \\ & -L/2 \leq y \leq L/2 \\ 0 & : \text{その他} \end{cases}$$

($n = 1, 2, 3, \dots, N$) (3-16)

$$\alpha = a / m \quad (3-17)$$

$$\beta = b / m \quad (3-18)$$

ここで、 σ は物体の光量のうち結像に寄与する割合である。

従って、この空間フィルタの空間周波数選択特性を表すパワースペクトル $|H_x(\mu, \nu)|^2$ は、式(3-16)をフーリエ変換することにより、次式で表される。

$$\begin{aligned} & |H_x(\mu, \nu)|^2 \\ &= \left| \int_{\substack{\{2\alpha + (2N-1)\beta\}/4 \\ \{-2\alpha - (2N-1)\beta\}/4}}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} h_x(x, y) \right. \\ &\quad \left. \times e^{-j2\pi(\mu x + \nu y)} dx dy \right|^2 \\ &= \left\{ \frac{\sigma L \alpha \beta N J_1(\pi \alpha / \beta)}{\Gamma} \right\}^2 \left\{ \frac{J_1(\pi \alpha \mu)}{\beta \mu J_1(\pi \alpha / \beta)} \right\}^2 \\ &\quad \times \left(\sin \frac{\pi \beta \mu}{2} \right)^2 \left(\frac{\sin N \pi \beta \mu}{N \sin \pi \beta \mu} \right)^2 \text{sinc}^2(\pi L \nu) \quad (3-19) \end{aligned}$$

ここで、 μ, ν はそれぞれ x, y 軸方向の空間周波数を表し、 J_1 は第1種1次のベッセル関数、 $\text{sinc } x \equiv \sin x / x$ である。

式(3-19)は、空間周波数 $(\mu, \nu) = (1/\beta, 0)$ 近傍に、 μ 軸方向には光ファイバの配列個数 N 、 ν 軸方向には平均化距離 L で決まる広がりを持った選択特性を示しており、球面レンズと円柱レンズによる結像系を持った光ファイバ列空間フィルタは、基本的にはスリット列空間フィルタの選択特性⁽²⁵⁾に帰着されることになる。なお $\sigma L \alpha \beta N J_1(\pi \alpha / \beta) / \Gamma$ は空間フィルタの光量感度特性を表している。

3-3-3 速度検出特性

空間周波数選択特性 $H_x(\mu, \nu)$ を持つ空間フィルタを用いて x 軸方向に V_x , y 軸方向に V_y の速度成分を持つ対象物体の画像を観測したとき, 空間フィルタを通過して出てくる光量の時間変化する出力信号のパワースペクトル $E_x(f_x)$ は, 式(2-7)を参照して,

$$E_x(f_x) = \frac{1}{V_x} \int_{-\infty}^{\infty} \phi\left(\frac{f_x}{V_x} + \frac{V_y}{V_x} \nu, \nu\right) \left| H_x\left(\frac{f_x}{V_x} + \frac{V_y}{V_x} \nu, \nu\right) \right|^2 d\nu \quad (3-20)$$

で表される。ここで, $\phi(\mu, \nu)$ は対象物体の画像が有するパワースペクトルである。式(3-20)において, 式(3-19)で表される空間フィルタの空間周波数選択特性を考慮すると, 出力信号は中心周波数 $f_x = V_x / \beta$ の周りに広がった信号となる。従って, 式(2-15)で定義した出力信号の中心周波数に対するそのスペクトルの広がりとの比である選択度により速度検出特性を評価できる。しかし, 2次元速度計測においては, $\theta = \tan^{-1}(V_y / V_x)$ が大きいときの V_x の検出特性を把握する必要がある。 θ に対する速度検出特性を評価するために, 出力信号の中心周波数 V_x / β とそのパワースペクトルの広がりとの半値全幅 Δf_x の比で定義される選択度

$$Q_x = V_x / (\beta \cdot \Delta f_x) \quad (3-21)$$

の $\theta = 0^\circ$ の選択度 $Q_x(\theta = 0^\circ)$ に対する減少率

$$\kappa_x = Q_x / Q_x(\theta = 0^\circ) \quad (3-22)$$

を検討する。式(3-19)～(3-22)を用いて数値計算により求めた θ に

対する κ_x の変化を図 3-6 に示す。
 なおここでは、対象物体の画像が有するパワースペクトルは空間フィルタの選択する空間周波数近傍において一定とみなされるものとしている。 θ が大きくなると、選択度はある角度より急激に低下し、速度検出特性が劣化する。しかし、平均化距離 L を適切に選ぶことにより、必要な角度 θ まで選択度の劣化を抑えられることがわかる。

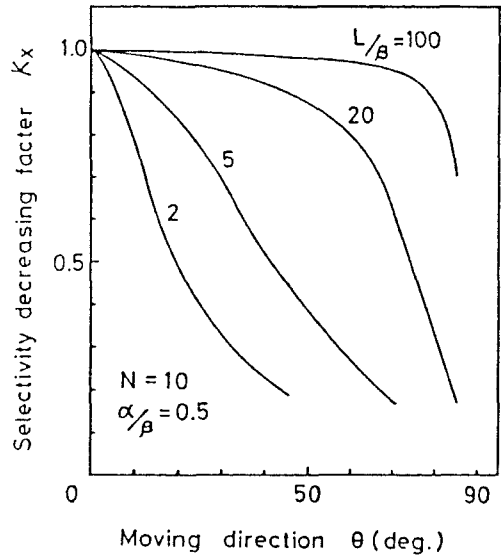


図 3-6 対象物体の移動方向 θ に対する選択度減少率 κ_x の変化

3-3-4 測定精度

合成速度 V は各速度成分を用いて式 (3-3) により求められるので、その誤差 $\epsilon_V^{\pm}$ は、 V_x 、 V_y の測定誤差をそれぞれ ϵ_x 、 ϵ_y とすると、次式で与えられる（以下複号同順とする）。

$$(1 \pm \epsilon_V^{\pm}) V = \sqrt{\{(1 \pm \epsilon_x) V_x\}^2 + \{(1 \pm \epsilon_y) V_y\}^2} \quad (3-23)$$

y 軸方向の光ファイバ列に対しても、式 (3-21)、(3-22) と同様に選択度 Q_y およびその減少率 κ_y を次式で定義する。

$$Q_y = V_y / (\beta \cdot \Delta f_y) \quad (3-24)$$

$$\kappa_y = Q_y / Q_y (\theta = 90^\circ) \quad (3-25)$$

対象物体の移動方向が光ファイバ列の方向と一致しているときの選択度は、式 (2-17) より

$$Q_x (\theta = 0^\circ) = Q_y (\theta = 90^\circ) = 1.13 N \quad (3-26)$$

で表されるので、出力信号の中心周波数をその広がり半値幅の精度で測定できるとき、すなわち式(2-16)から、 $\varepsilon_x = 1 / (2 Q_x)$ 、 $\varepsilon_y = 1 / (2 Q_y)$ と考えると、 ε_x 、 ε_y は次式で表される。

$$\varepsilon_x = 1 / (2.26 N \kappa_x) \quad (3-27)$$

$$\varepsilon_y = 1 / (2.26 N \kappa_y) \quad (3-28)$$

従って、式(3-27)、(3-28)を式(3-23)に代入し、 $V_x = V \cos \theta$ 、 $V_y = V \sin \theta$ を考慮すると、 $\varepsilon_V^\pm$ は次式で表される。

$$\varepsilon_V^\pm = \mp 1 \pm \sqrt{\left(1 \pm \frac{1}{2.26 N \kappa_x}\right)^2 \cos^2 \theta + \left(1 \pm \frac{1}{2.26 N \kappa_y}\right)^2 \sin^2 \theta} \quad (3-29)$$

但し、

$$\kappa_{x,y} \geq 1 / (2.26 N) \quad (3-30)$$

κ_x 、 κ_y は図3-6からわかるように、結像系および光ファイバ列の構成パラメータにより大きく変わる。 V_x および V_y を検出する結像系および光ファイバ列が同じパラメータを持つとき、

$$\kappa_y (\theta) = \kappa_x (90^\circ - \theta) \quad (3-31)$$

となることを考慮し、対象物体の移動方向 θ に対する測定誤差 ε_V^+ (通常 $\varepsilon_V^+ >$

ε_V^- となる)を種々のパラメータに対して計算した。その結果を図3-7に示す。 ε_V^+ は $\theta = 0^\circ$ においては一方の光ファイバ列で計測したときの誤差となるが、 θ が増加すると ε_V^+ も増加する。平均化距離 L が小さいとき θ の増加に対する ε_V^+ の増加も大きいが、 L を大きくとることにより ε_V^+ の増加を抑えることができる。又、光ファイバ数 N を大きくすると誤差は小さくなる。結像系および光ファイバ列のパラメータを適切に選ぶことにより、必要とする測定精度を得ることができる。

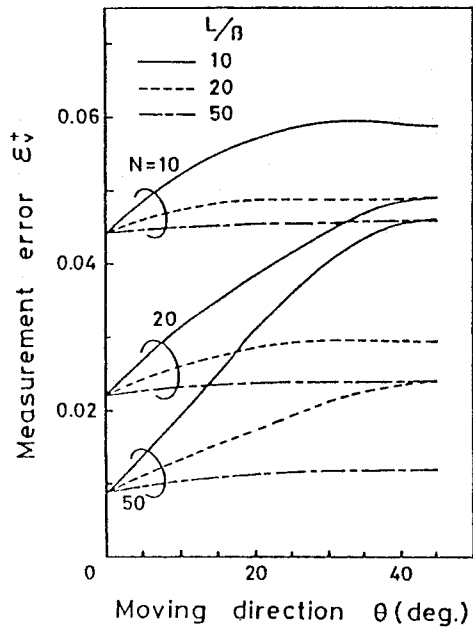


図3-7 対象物体の移動方向 θ に対する測定誤差 ε_V^+

§ 3-4 実験結果と考察

実験は基本的には図3-1に示す構成で行った。コア径 $100\ \mu\text{m}$ 、クラッド径 $125\ \mu\text{m}$ 、 $N.A. = 0.18$ のステップインデックス形光ファイバを間隔 $137\ \mu\text{m}$ で20本直線状に配列した光ファイバ列空間フィルタを2組直角に配置した。1つおきの光ファイバ出力の総和をSiフォトダイオードで光電変換し、差動増幅した後、その出力信号のパワースペクトルをFFTアナライザ(小野測器CF-500)を用いて観測した。結像系には、 $f_s = 52\ \text{mm}$ の球面レンズと $f_c = 80\ \text{mm}$ の円柱レンズを、図3-3における $d_1 = 115\ \text{mm}$ 、 $d_2 = 49\ \text{mm}$ 、 $d_3 = 96\ \text{mm}$ で配置し、対象物体像を光ファイバ端面上に結像させた。なお、円柱レンズの前にはスリットを置き円柱レンズの開口を変え、平均化距離を設定する構成としてある。従って、本実験系におけるパラメータは、 $N = 10$ 、 $\alpha / \beta = 0.365$ 、 $m = 0.835$ となり、 V 、 θ および L は任意に変えられる構成となっている。

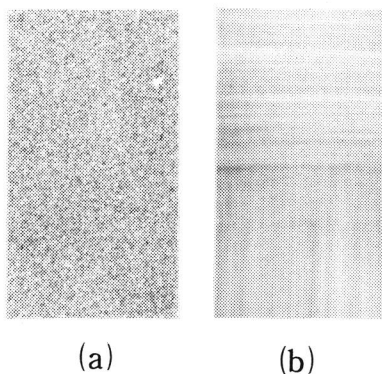


図 3-8 (a) 実験に用いた対象パターン
(b) その結像パターン

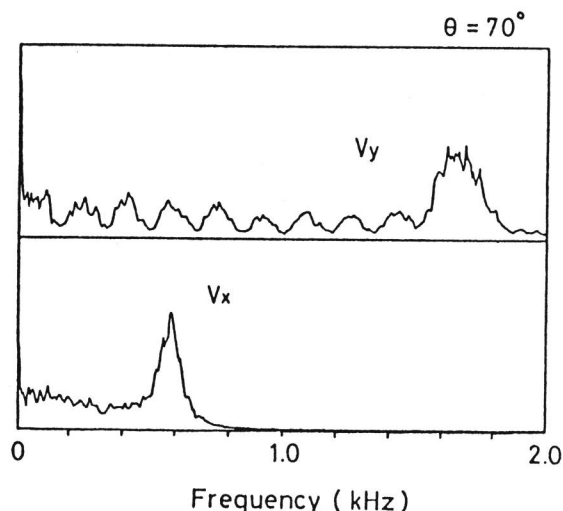


図 3-9 出力信号のパワースペクトル例
(x 軸成分; 上段, y 軸成分; 下段)

対象物体の画像には、空間フィルタの選択する空間周波数近傍においてほぼ一定のパワースペクトルとするために、レーザ光のスペックルの写真を用い、それを半径 164 mm の回転体周囲に貼り移動物体とした。実験に用いた対象パターンとその結像パターンを図 3-8 に示す。結像パターンは、球面レンズと円柱レンズにより、 x 、 y 軸方向とも光ファイバ列に直角な方向の光量が平均化されている。 $\theta = 70^\circ$ における x 、 y 軸方向に配列したそれぞれの光ファイバ列からの出力信号のパワースペクトル例を図 3-9 に示す。本実験においては、 $V = 570 \text{ mm/sec}$ 、 $L/\beta = 33$ の条件で行っている。出力信号は理論より求められる選択度、11.1 (y 軸成分) および 9.1 (x 軸成分) よりやや広がった選択特性を持つ信号となっているが、中心周波数から各軸方向の速度成分および合成速度とその方向を求めることができる。

物体の移動方向 θ に対する選択度減少率 κ_x の測定例を図 3-10 に、平均化距離 L に対する κ_x の測定例を図 3-11 に示す。本実験では、結像系および光ファイバ列を回転することにより移動方向を設定し、円柱レンズの前に置いたスリット幅を変え、式 (3-9) から平均化距離を求めた。物体の移動方向が光ファイ

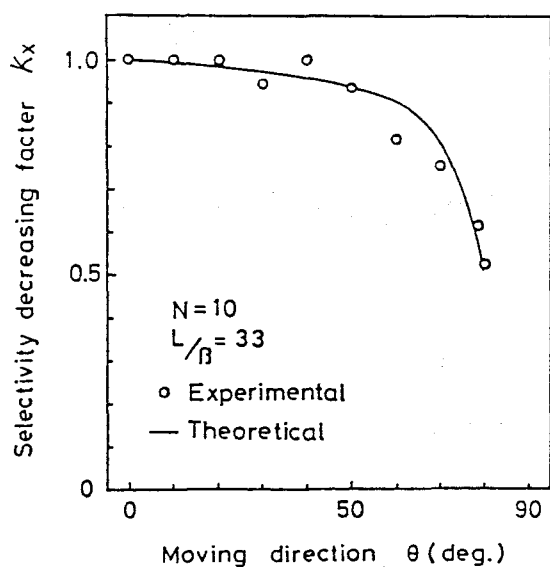


図 3 - 10 物体の移動方向 θ に対する
選択度減少率 K_x の変化

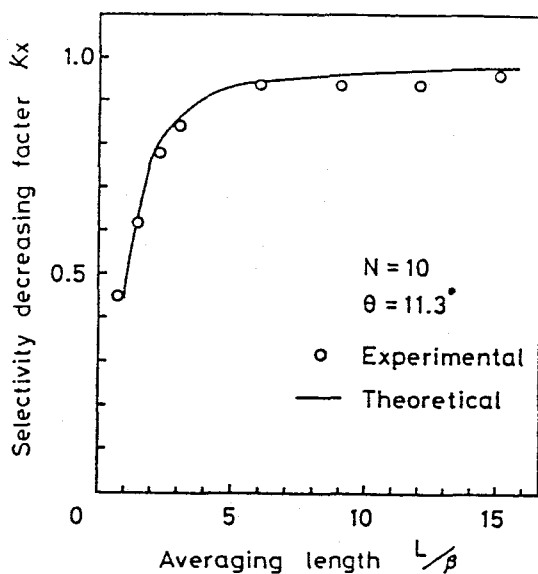


図 3 - 11 平均化距離 L に対する選択
度減少率 K_x の変化

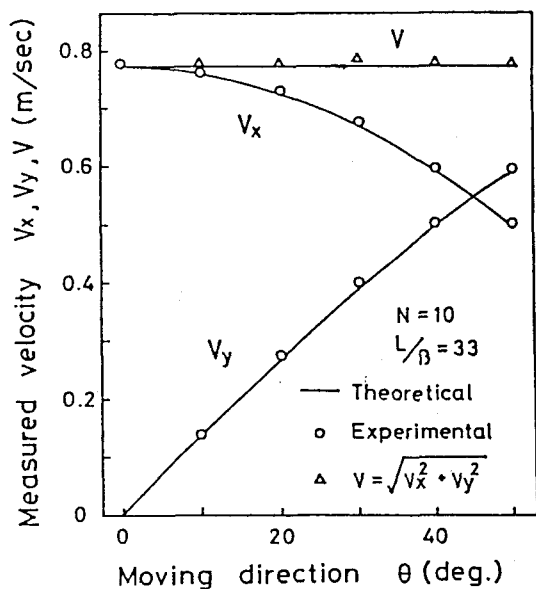


図 3 - 12 物体の移動方向 θ に対する
測定速度

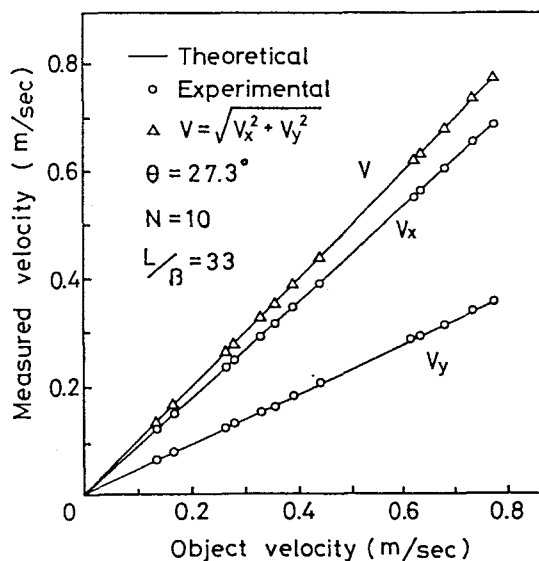


図 3 - 13 物体速度に対する測定速度

バ列方向からずれるに従い選択度は減少し、速度の検出精度は劣化するが、その劣化は平均化距離を大きくすることにより改善されることがわかる。

物体の移動方向 θ に対する各方向の速度成分の測定結果とその合成速度を図 3-12 に、又、物体速度の変化に対する速度の測定結果を図 3-13 に示す。ここで、平均化距離は円柱レンズの前に置いたスリット幅を調節して、 $L = 11.0 \text{ mm}$ ($A_c = 15.8 \text{ mm}$) とした。各軸の速度成分より求められた合成速度は 2% 以内の誤差で物体速度に比例しており、本速度センサの有用性を示している。

測定精度の考察においては、出力信号のパワースペクトルの半値幅の精度で中心周波数を測定できる場合の測定誤差を式 (3-29) に示した。しかし、周波数の測定方法によっては、半値幅の $1/k$ の精度で中心周波数の測定が可能となる。このとき、式 (3-27)、(3-28) で与えられる各軸の測定精度は ϵ_x / k 、 ϵ_y / k となり、合成速度の測定精度も向上する。本実験においては、測定誤差から考えて、 $k \geq 2.4$ で中心周波数が測定されており、等価的に $Q \geq 27$ の空間フィルタを用いたときの精度で 2 次元速度を測定できた。

本速度センサの光量感度特性を検討する。式 (3-19) における σ を物体面上の点光源の結像系に対する見込み角の視野に対する割合で近似する。本構成では、見込み角は円柱レンズにより決まり、 $2 \tan^{-1} \{ A_c / \{ 2 (d_1 + d_2 - d_1 d_2 / f_s) \} \}$ で与えられる。従って、 $\sigma = 0.09$ となる。又、円柱レンズにより制限されるとき L 及び Γ は式 (3-9) 及び (3-11) で与えられ、本構成では $L = 11.0 \text{ mm}$ 、 $\Gamma = 5.8 \text{ mm}$ である。従って、 $\sigma L \alpha \beta N J_1(\pi \alpha / \beta) / \Gamma = 3.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ となる。本実験で使用したフォトダイオード、増幅器は第 2 章で述べたものと同一性能である。従って、フォトダイオード、増幅器のノイズレベルに相当する入射光量は 1.2 nW と考えられる。これより、40 dB 以上の S/N で速度信号を検出するには対象物体は空間フィルタの選択する空間周波数成分の光量を $360 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ 以上有していることが必要となる。本実験においては、18W のタングステンランプを照明光として用いた場合、フォトダイオード、増幅器のノイズレベルに対して 40 dB 以上の S/N が得られた。

本速度センサの測定可能最大速度はフォトダイオード、増幅器および周波数測定装置の周波数特性によって決まる。本構成では、50 kHz までの周波数を測定でき、測定可能な最大速度は 16 m / sec である。しかし、測定可能周波数を上げることによりさらに高速度を計測できる。例えば、300 kHz までの周波数測定が可能な構成にすると 96 m / sec までの速度計測が可能になる。

§ 3-5 結 言

本章では、光ファイバ端面を直線状に等間隔に配列した光ファイバ列を2組直角に配置した構成の光ファイバ列空間フィルタと、球面レンズと円柱レンズで構成される結像系を持つ2次元イメージ速度センサについて述べた。

結像系を含む光ファイバ列空間フィルタの等価空間フィルタを求め、これを用いて、その空間周波数選択特性、対象物体の画像が光ファイバ列に対して斜め移動するときの速度検出特性を明らかにした。そして、構成パラメータおよび対象物体の移動方向に対する合成速度の測定精度を検討し、構成パラメータを適切に選ぶことにより、必要とする測定精度を得られることを示した。

又、光ファイバ端面を20本配列し、差動構成とした $N=10$ の光ファイバ列を2組直角に配置した光ファイバ列空間フィルタを用いて物体速度の大きさと方向を計測する実験を行った。合成速度は2%以上の精度で求まり、本速度センサの有用性を確認できたが、さらに高い精度の測定は適切な構成パラメータの選択、中心周波数のより正確な測定により可能となる。

第4章 光ファイバ列を用いたレーザ スペックル速度センサ^{(72), (73)}

§ 4-1 緒 言

本章では，第2章で述べた光ファイバ列を用いて，レーザ光が物体から反射されたときに生じるスペックルパターンの移動を検出する構成の速度センサについて述べる。

まず，移動物体に対する照射レーザ光のパラメータ，スペックルの検出位置によるスペックルパターンの移動特性について述べる。そして次に，投受光系に光ファイバを用いることにより，物体距離に依存しないスペックル速度センサを簡便に構成できることを示す。

§ 4-2 スペックルパターンの移動特性

レーザ光が粗面から反射されたときにその相互の干渉により生じるスペックルパターンは，物体の移動に対して，その動きと関連した移動特性を示す。本節では，レーザ光が平面移動する物体から反射されたときに生じるスペックルパターンの移動特性について述べる。

照射レーザ光と物体の移動に対するスペックルパターンの移動特性を求めるモデルを図4-1に示す。物体の移動方向を x 軸方向とし，点光源 S から角度 α ，距離が ρ となる x 軸上の点 Q 近傍にレーザ光が照射され， Q から角度 β ，距離 L の点 P における $\overline{QP}$ と垂直な方向のスペックルパターンの移動特性を考える。このとき，点 Q および P 近傍に微小距離 ϵ および δ をもつ

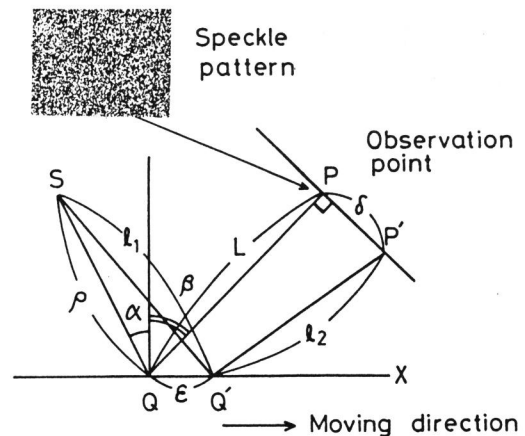


図4-1 スペックルパターンの移動特性を求めるモデル

点 Q' , P' を取ると, 物体が x 軸方向に距離 x_0 だけ移動したときの P 近傍の点 P' における光の振幅 $u(x_0, \delta)$ は, $\overline{SQ'}$ および $\overline{Q'P'}$ の長さをそれぞれ l_1, l_2 とすると, ホイゲンス・フレネルの原理⁽⁷⁴⁾ により, 光路長の異なる Q' からの光の振幅の積分として次式で表される。

$$u(x_0, \delta) = A \int g(\varepsilon - x_0) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \{ l_1(\varepsilon) + l_2(\varepsilon, \delta) \} \right\} d\varepsilon \quad (4-1)$$

ここで, A は定数, λ は光の波長, $g(\varepsilon)$ は表面の反射係数を表しており, $g(\varepsilon)$ の角度依存性はないものとしている。又, S から照射される光の Q 近傍の強度は一定と仮定している。

さて, 式 (4-1) において, フレネル回折領域, すなわち, l_1, l_2 を ε および δ の 2 次までの展開項で近似できる領域におけるスペックルの移動特性を考えよう。このとき, l_1, l_2 は次式のように与えられる。

$$l_1(\varepsilon) = \xi_0 + \xi_1 \varepsilon + \xi_2 \varepsilon^2 \quad (4-2)$$

$$l_2(\varepsilon, \delta) = \eta_0 + \eta_1 \varepsilon + \eta_1' \delta + \zeta \varepsilon \delta + \eta_2 \varepsilon^2 + \eta_2' \delta^2 \quad (4-3)$$

ここで, $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \eta_0, \eta_1, \eta_1', \zeta, \eta_2, \eta_2'$ は展開係数である。このとき, 式 (4-1) は式 (4-2) と (4-3) を用いて次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} u(x_0, \delta) &= A \int g(\varepsilon) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ l_1(\varepsilon) + l_2 \left(\varepsilon, \delta + 2x_0 \frac{\xi_2 + \eta_2}{\zeta} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + x \right\} \right] d\varepsilon \\ &= \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} x \right) u \left(0, \delta + 2x_0 \frac{\xi_2 + \eta_2}{\zeta} \right) \end{aligned} \quad (4-4)$$

ここで,

$$\begin{aligned}
x = & (\xi_2 + \eta_2) \left\{ 1 - \frac{4 \eta'_2 (\xi_2 + \eta_2)}{\zeta^2} \right\} x_0^2 \\
& + \left\{ \xi_1 + \eta_1 + \zeta \delta - \frac{2(\xi_2 + \eta_2)(\eta'_1 + 2 \eta'_2 \delta)}{\zeta} \right\} x_0 \quad (4-5)
\end{aligned}$$

式(4-4)は、物体が x_0 だけ移動した後のP近傍の光強度は、移動の前の光強度を用いて次式のように表されることを意味している。

$$|u(x_0, \delta)|^2 = \left| u \left(0, \delta + 2x_0 \frac{\xi_2 + \eta_2}{\zeta} \right) \right|^2 \quad (4-6)$$

従って、物体が x_0 だけ移動することによるスペックルパターンの移動量 X_0 は次式で与えられることになる。

$$X_0 = - \frac{2(\xi_2 + \eta_2)}{\zeta} x_0 \quad (4-7)$$

図4-1の構成を考えると、 l_1 、 l_2 は次式で表される。

$$\begin{aligned}
l_1(\varepsilon) &= \sqrt{(\rho \cos \alpha)^2 + (\varepsilon + \rho \sin \alpha)^2} \\
&\simeq \rho + (\sin \alpha) \varepsilon + \frac{\cos^2 \alpha}{2 \rho} \varepsilon^2 \quad (4-8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
l_2(\varepsilon) &= \sqrt{(L - \varepsilon \sin \beta)^2 + (\delta - \varepsilon \cos \beta)^2} \\
&\simeq L - (\sin \beta) \varepsilon - \frac{\cos \beta}{L} \varepsilon \delta \\
&\quad + \frac{\cos^2 \beta}{2 L} \varepsilon^2 + \frac{\delta^2}{2 L} \quad (4-9)
\end{aligned}$$

従って、

$$\xi_2 = \frac{\cos^2 \alpha}{2 \rho} \quad (4-10)$$

$$\eta_2 = \frac{\cos^2 \beta}{2 L} \quad (4-11)$$

$$\zeta = -\frac{\cos \beta}{L} \quad (4-12)$$

を式(4-7)へ代入することにより，物体の移動量 x_0 に対するスペックルの移動量 X_0 の関係は次式で与えられる。

$$X_0 = \left(\cos \beta + \frac{L \cos^2 \alpha}{\rho \cos \beta} \right) x_0 \quad (4-13)$$

§ 4-3 構 成

スペックルパターンは式(4-13)に示したように，物体が x_0 だけ平面移動するとき，照射レーザ光波面の曲率半径 ρ ，照射角度 α および検出位置 β ， L によって決まる量 X_0 だけ移動する。従って，物体の速度が $v (= dx_0 / dt)$ のとき，スペックルパターンの移動速度 $V (= dX_0 / dt)$ は次式で表される。

$$V = \left(\cos \beta + \frac{L \cos^2 \alpha}{\rho \cos \beta} \right) v \quad (4-14)$$

スペックルパターンは図4-1に示すようにコントラストの強い不規則な斑点模様のパターンであり，このパターンの移動速度は第2章で述べた光ファイバ列空間フィルタを用いて検出でき，式(4-14)の関係から物体速度を求めることができる。しかし，スペックル速度は式(4-14)からわかるように，構成パラメータ ρ ， L ， α および β に依存し，物体の速度を決めるには，前もってこれらの値を測っておく必要がある。

物体距離に依存しない速度センサを構成するには2つの方法が考えられる^{(35),(36)}。

1 つは $\rho = \infty$, すなわち十分な平行光を物体に照射する方法であり, 他の方法はすべての測定点において $\rho = L$ および $\alpha, \beta =$ 一定の条件を満足する構成とすることである。ここでは後者の方法を検討する。しかし, レーザ光は対象物体が金属等の場合には, 反射角が入射角と等しい方向に強く反射される。又, 角度 α, β は物体距離と共に変化する。従って, 後者の方法において物体距離に依存しない速度センサを構成するには, $\alpha = \beta = 0$ の構成が好ましいことになる。このように,

$$\rho = L \quad (4-15)$$

$$\alpha = \beta = 0 \quad (4-16)$$

を近似的に満足する構成は投受光系に光ファイバを用いることにより簡便に実現される。そして, このときのスペックル速度 V は, 式 (4-14) から,

$$V = 2v \quad (4-17)$$

となり, 物体速度の 2 倍となる。

投受光系に光ファイバを用いたレーザスペックル速度センサの構成を図 4-2 に示す。投光用のレーザビームは, 顕微鏡対物レンズを用いて光ファイバに結合され, 光ファイバによって測定点へ導かれる。出射レーザ光は, 光ファイバ他端に取り付けられたセルフロックマイクロレンズにより一定の広がり角を持って移動物体に照射される。移動物体から反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動は第 2 章で述べた光ファイバ列空間フィルタを用いて検出される。レーザ光は, ビームウエスト位置近傍を除いて, ビームウエスト位置からの距離がその波面の曲率半径を与えるので⁽⁷⁵⁾, 光ファイバ列端面を照射レーザビームのビームウエスト位置と一致するように配置することにより, ビームウエスト位置近傍を除いて, $\rho = L$ の構成となる。又, 光ファイバの径は細いので, セルフロックマイクロレンズと光ファイバ列空間フィルタを十分に近づけて配置することにより, ほぼ $\alpha = \beta = 0$ を満足する構成とすることができる。

光ファイバ列空間フィルタとして、光ファイバ端面を間隔 $p/2$ で $2N$ 本直線状に並べ、その 1 つおきの出力の総和の差の出力信号を得る構成の光ファイバ列空間フィルタを用いるとき、光ファイバ列空間フィルタはスペックルパターン of 光強度分布からその配列間隔で決まる空間周波数成分を選択するので、光ファイバ列空間フィルタからの出力信号は、式 (2-14) で示したように、中心周波数

$$f = V / p \quad (4-18)$$

を持つ狭帯域信号となる。従って、出力信号の中心周波数 f を測定することにより、物体の移動速度 v は、式 (4-17)、(4-18) から、

$$v = \frac{p}{2} f \quad (4-19)$$

の関係で求められることになる。

又、このときの測定精度は、第 2 章で述べたように中心周波数の測定精度に依存し、中心周波数とそのスペクトルの広がり of 半値幅の精度で測定できるとき、速度の測定誤差 ϵ_v は、式 (2-16) で示したように、選択度 Q を用いて、

$$\epsilon_v = \frac{1}{2Q} \quad (4-20)$$

で与えられる。

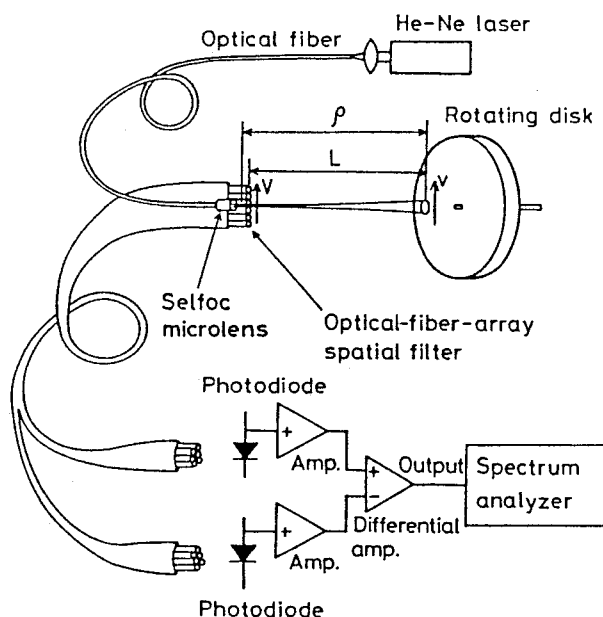


図4-2 光ファイバを用いたレーザスペックル速度センサの構成図

§ 4-4 実験結果

実験は基本的には図4-2に示す構成で行った。出力25mWのHe-Neレーザ光を顕微鏡対物レンズを用いてコア径80 μ mのグレーデッドインデックス形光ファイバに結合し、光ファイバによりレーザ光を測定点に導いた。光ファイバ他端には、光ファイバ端面と少し間隔をおいて直径2mm、長さ6.9mm、1/4周期長のセルフロックマイクロレンズを取り付け、出射レーザビームに広がり角を持たせた。実験に用いたレーザ光の広がり角は0.025radであった。このレーザ光を半径164mmのアルミ回転体の回転中心から157mmの所に移動方向と垂直に照射した。He-Neレーザ光と光ファイバとの結合を適切に行ったとき、出射レーザ光のパターンは出射パターン自身の中にスペックルを含まないほぼ円形のパターンとなった。

物体から反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動検出には、コア径100 μ mのステップインデックス形光ファイバを137 μ m間隔に直線状に20本配列し、その1つおきの光ファイバ出力の総和の差の出力信号を得る構成の光ファイバ列空間フィルタを用いた。なお、照射レーザビームと受光用の光ファイバ列はできるだけ近づけて配置してある。FFTアナライザ(小野測器CF-500)を用いて測定した出力信号例を図4-3に示す。ここで、下段に示すパワースペクトルは、40msecの瞬時出力波形を1024点サンプリングし、フーリエ変換して求められるパワースペクトルを256回以上加算して求められたものである。上段はその瞬時出力波形の15.6msec部分を示している。出力信号は速度に比例する中

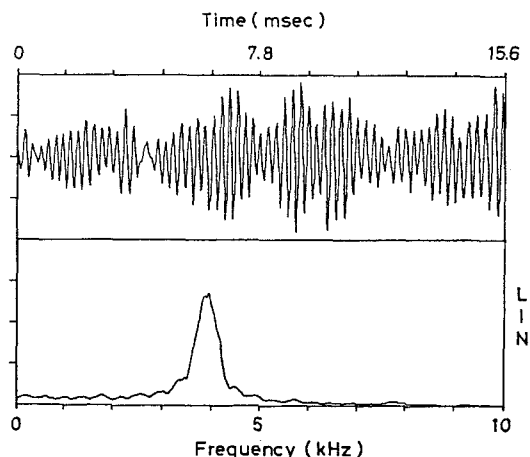


図4-3 出力信号波形(1.56msec/div, 上段)とそのパワースペクトル(1kHz/div, 下段)

心周波数を持ち、その周りに広がった信号となっている。従って、出力信号の中心周波数から物体の速度を求めることができる。レーザ光と投光用の光ファイバの結合が適切でないとき、出射ビームはそれ自身にスペックルを含んだパターンとなり、出力信号のスペクトルは広がってくる。従って、中心周波数を正確に測定し、測定精度を上げるには、レーザ光を光ファイバに適切に結合する必要がある。

光ファイバ列とレーザ光のビームウエスト位置の基本的な3つの配置における物体距離に対するスペックル速度の変化を図4-4に示す。本測定においては、光ファイバ列とレーザ光の相互の配置を固定し、物体距離を変化させ、出力信号の中心周波数からスペックル速度を求めた。又、物体速度が $v = 550 \text{ mm/sec}$ と一定のときのスペックル速度を測定した。スペックル速度は、物体距離が大きくなるに従って、 $\rho < L$ の構成においては減少し、 $\rho > L$ の構成においては増加する。しかし、 $\rho = L$ の構成においては、スペックル速度は物体距離に依存せず、

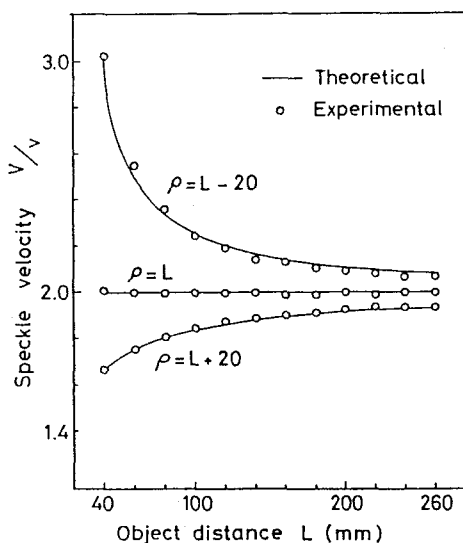


図4-4 物体距離 L に対する
スペックル速度 V

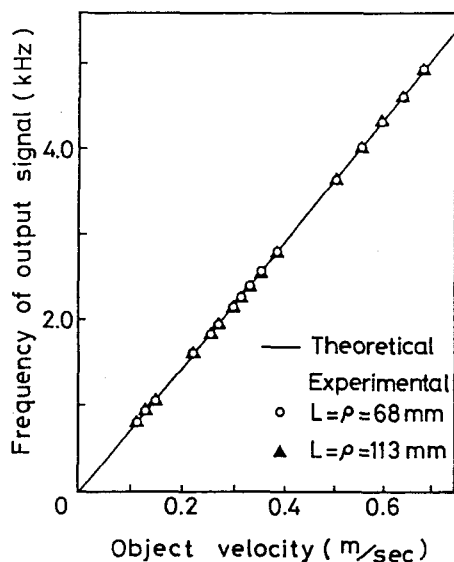


図4-5 物体速度に対する出力
信号の周波数

物体速度の2倍となる。従って、 $\rho = L$ の構成とすることにより物体距離に依存しないスペックル速度センサを構成できることがわかる。

FFTアナライザを用いて測定した物体速度の変化に対する出力信号の中心周波数の変化を図4-5に示す。出力信号の中心周波数は1%以上の精度で物体速度に比例する結果が得られ、等価的に $Q \geq 50$ の空間フィルタを用いた精度で物体速度を測定できた。

§ 4-5 結 言

本章では、光ファイバを用いてレーザ光をガイドし、物体から反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出する構成の速度センサについて述べた。

そして、投受光系に光ファイバを用い、照射レーザ光のビームウエスト位置が光ファイバ列の端面に一致する構成とすることにより、柔軟性に富み、かつ物体距離に依存しないスペックル速度センサを簡便に構成できることを示した。

又、光ファイバを20本配列して構成される $N = 10$ の光ファイバ列空間フィルタを用いた実験では1%以上の精度で物体速度を測定でき、本センサの有用性を確認することができた。

第5章 光ファイバ列を用いた距離センサ^{(76) ~ (83)}

§ 5-1 緒 言

本章では、光ファイバ列空間フィルタを用いて構成される距離センサについて述べる。

まず、レーザ光が物体から反射されたときに生じるスペックルパターンの移動速度が物体面上における照射レーザ光波面の曲率半径すなわち物体距離に依存することに着目し、スペックルパターンの移動速度を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出する構成の速度がわかっている移動物体に対する距離センサを検討する。

次に、この距離センサと前章で述べたスペックル速度センサを組み合わせることにより、移動物体までの距離と物体速度を計測する距離・速度センサを構成できることを示す。

さらに、結像系の焦点はずれ量を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出する構成の距離センサについても述べる。

§ 5-2 レーザスペックル距離センサ^{(76),(77)}

5-2-1 原理と測定精度

前章で述べたように、レーザ光が粗面から反射されたときに生じるスペックルパターンは、物体が移動するときレーザ光の物体面上における波面の曲率半径とスペックルパターンの検出位置によって決まる移動特性を示す。従って、物体速度が他の何らかの方法でわかっているとき、スペックル移動を検出することにより物体までの距離を求めることができる。

空間フィルタを用いてスペックル移動を検出する構成の距離センサの原理を図5-1に示す。レーザ光を速度 v で移動している物体に照射し、反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動を空間フィルタで検出する。そして、その

出力信号の中心周波数から距離を求める構成である。

今、物体までの距離として照射レーザ光のビームウエスト位置からの距離 z を基準に考える。照射レーザ光に基本ガウスビームを用いると、ビームウエスト位置近傍を除いて、レーザ光波面の曲率半径 ρ はビームウエスト位置からの距離 z で与えられる⁽⁷⁵⁾。従って、物体に垂直にレーザ光を照射し、物体に垂直で物体から距離 L の点においてスペックルパターンの移動を観測すると、その移動速度 V は式(4-14)から次式で表される。

$$V = v \left(1 + \frac{L}{z} \right) \quad (5-1)$$

スペックル移動の検出に第2章で述べた光ファイバ端面を間隔 $p/2$ で $2N$ 個直線状に配列し、その1つおきの出力の総和の差の出力信号を得る光ファイバ列空間フィルタを用い、空間フィルタとレーザ光のビームウエスト位置を

$$A = L - z \quad (5-2)$$

の間隔で固定した距離センサを考える。このとき、光ファイバ列空間フィルタからの出力信号の中心周波数 f は、式(4-18)で示したように $f = V/p$ で与えられるので、物体までの距離 z は、式(5-1)、(5-2)から次式で表される。

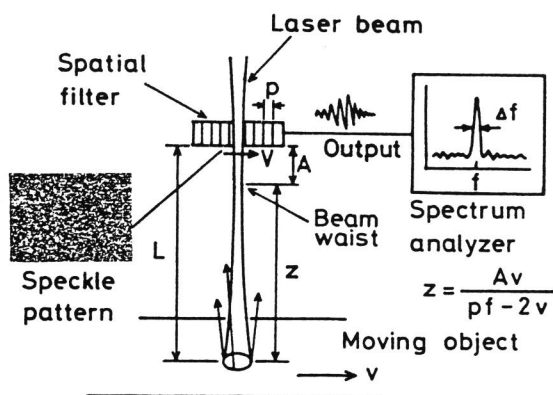


図5-1 スペックル移動検出による距離センサの原理図

$$z = \frac{A v}{p f - 2 v} \quad (5-3)$$

従って、物体の速度 v が他の何らかの方法、例えば、前章で述べた光ファイバレーザスペックル速度センサを用いて測定されているとき、空間フィルタの出力信号の中心周波数 f を測定することにより物体までの距離 z を求めることができる。

次に本方法の測定精度を考察しよう。但し、ここでは正しい物体速度がわかっている場合の測定精度を考察し、測定速度に誤差がある場合については次節で考察する。距離の測定精度は式 (5-3) からわかるように周波数の測定精度に依存する。光ファイバ列空間フィルタの出力信号の選択度 Q は、式 (2-15) で示したように、出力信号の中心周波数 f とそのスペクトルの広がり Δf の比によって与えられる。従って、中心周波数 f をそのスペクトルの広がり Δf の精度で測定できるとき、測定誤差は、式 (5-3) の f のかわりに

$$f \pm \frac{\Delta f}{2} = f \left(1 \pm \frac{1}{2Q} \right) \quad (5-4)$$

を用いたときの距離 z の誤差を求めることにより得られ、相対測定誤差 $\epsilon_z^{\pm}$ は次式で表される。

$$\epsilon_z^{\pm} = \frac{\frac{z}{A} + \frac{1}{2}}{Q \mp \left(\frac{z}{A} + \frac{1}{2} \right)} \quad (5-5)$$

ここで、 ϵ_z^{+} および ϵ_z^{-} はそれぞれ増加および減少誤差を表している。

種々の選択度 Q の値における距離 z に対する測定誤差 $\epsilon_z^{\pm}$ を図 5-2 に示す。誤差は大きな Q の値を持つ空間フィルタを用いたとき、すなわち、

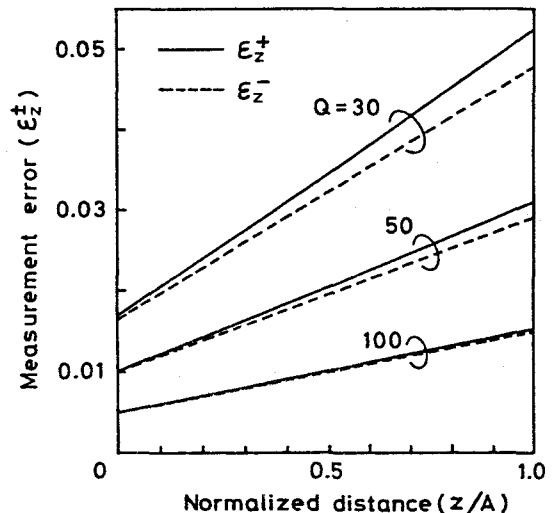


図 5-2 距離 z に対する測定誤差 $\epsilon_z^{\pm}$

多くの光ファイバで構成される光ファイバ列空間フィルタを用いたとき及び光ファイバ列空間フィルタと照射レーザビームのビームウエスト位置の間隔 A を大きくしたときに小さくなる。又、距離 z が小さい程、測定精度はよくなる。そして、増加誤差 ε_z^+ の方が減少誤差 ε_z^- よりも大きくなる。

5-2-2 実験結果

実験の構成を図 5-3 に示す。実験の構成は基本的には前章で述べた速度センサの構成と同じであるが、距離センサにおいては光ファイバ列空間フィルタの端面は照射レーザ光のビームウエスト位置に対して間隔 A をおいて配置される。本実験においては、レーザ光のガイドとしてコア径 $10\ \mu\text{m}$ の単一モード光ファイバを用い、 $25\ \text{mW}$ の He-Ne レーザ光を顕微鏡対物レンズにより光ファイバに結合した。光ファイバ他端には、直径 $2\ \text{mm}$ 、長さ $6.9\ \text{mm}$ ($1/4$ 周期長) のセル

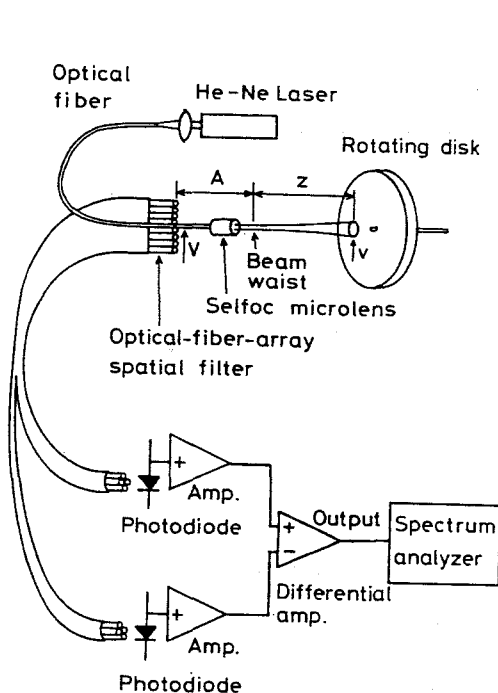


図 5-3 光ファイバを用いたスペクル移動検出による距離センサの構成図

フォックマイクロレンズを取り付け、出射レーザビームに広がり角を持たせた。出射ビームのパターンはそれ自身にスペクルを含まず円形の良好なパターンが得られた。なお実験に用いたビームの広がり角は 0.024rad であり、これをアルミ回転体表面に垂直に照射した。スペクルパターンの移動検出には、コア径 $100\ \mu\text{m}$ のステップインデックス形光ファイバを $137\ \mu\text{m}$ 間隔に直線状に 20 本配列し、その 1 つおきの出力の総和の差の出力信号を得る $N = 10$ の光ファイバ列空間フィルタを用いた。

光ファイバ列は照射レーザービームの延長線上にできるだけ近くなるように配置した。従って、スペックルパターンはほぼ式(5-1)を満足する移動特性を示すことになる。1つおきの光ファイバ出力の総和をSiフォトダイオードで光電変換し、それを差動増幅した出力信号の中心周波数をFFTアナライザを用いて測定した。光ファイバ列からの出力信号例を図5-4に示す。

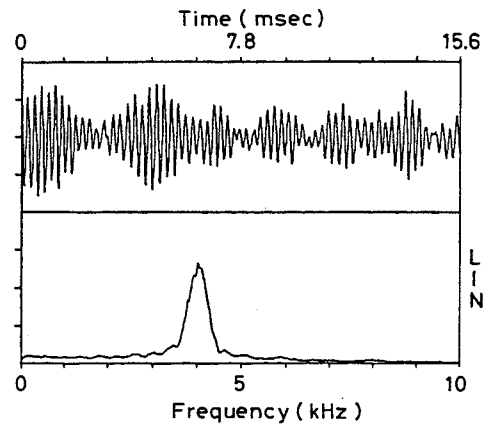


図5-4 出力信号波形(1.56 msec/div, 上段)とそのパワースペクトル(1 kHz/div, 下段)

図5-4において、上段は瞬時出力波形を示しており、下段はその信号をデジタルフーリエ変換し、得られたパ

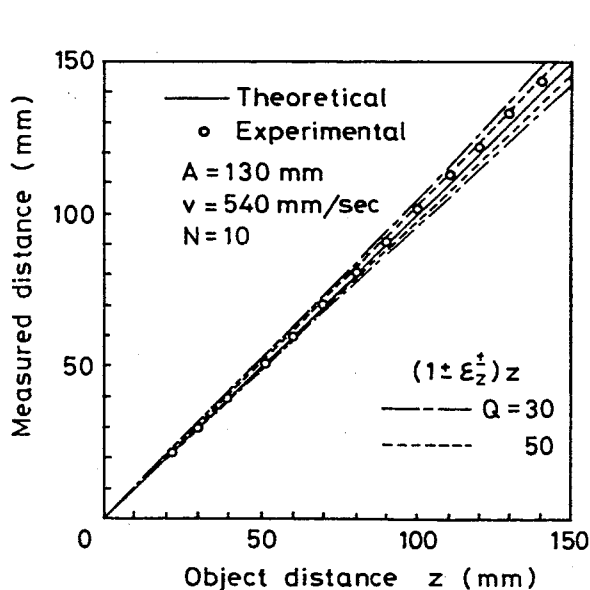


図5-5 距離の測定結果

ワースペクトルを多数回加算して得られた出力信号のパワースペクトルを示している。出力信号はスペックルの移動速度に比例する中心周波数を持ち、そのまわりに広がったスペクトルを持つ狭帯域不規則信号となっている。従って、光ファイバ列空間フィルタからの出力信号の中心周波数を測定することにより、移動物体までの距離を求めることができる。

距離測定の実験結果を図5-5に示す。本実験では、 $A = 130 \text{ mm}$ 、 $v = 540 \text{ mm/sec}$ の条件のもとに物体距離を種々設定し、その距離において得られる光ファイバ列空間フィルタからの出力信号の中心周波

数 f を測定し、式(5-3)の関係から測定距離を求めた。図5-5において実線は理論値を、点線は選択度 Q の値が与えられたときの誤差の限界を表している。

式(5-5)で表される測定誤差の考察においては、空間フィルタからの出力信号の中心周波数を選択度 Q で決まる出力信号のパワースペクトルの半値幅の精度で測定できる場合について示した。本実験では $N=10$ の光ファイバ列空間フィルタを用いているので、選択度 Q の値は、式(2-17)において示したように、スペックルの移動方向が光ファイバの配列方向と一致している場合には11.3となる。本実験では出力信号の中心周波数の測定にFFTアナライザ(小野測器 CF-500)を用い、出力信号を1024点サンプリング後、フーリエ変換して得られるパワースペクトルを256回以上加算して得られるパワースペクトルから中心周波数を求めた。この操作により出力信号のパワースペクトルは十分に平均化され、出力信号の中心周波数をパワースペクトルの広がり半値全幅の $1/5$ 以下で測定できた。従って、物体距離を等価的に $Q \geq 50$ の空間フィルタを用いたときの精度で決定することができた。

このように、物体の速度が他の何らかの方法でわかっているとき、レーザ光のガイドとして光ファイバを用い、スペックルパターンの移動を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出することにより物体距離を求めることができる。そして、このとき、選択度 Q の値が大きい空間フィルタを用いる程、又、光ファイバ列と照射レーザ光のビームウエスト位置の間隔を大きくする程、より高い測定精度が得られる。

§ 5-3 レーザスペックル距離・速度センサ⁽⁷⁸⁾⁻⁽⁸¹⁾

5-3-1 構成と出力信号

前節では、スペックルパターンの移動速度を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出することにより、速度がわかっている移動物体までの距離を求める距離センサを構成できることを示した。本節では、この距離センサと前章で述べたスペックル速度センサを組み合わせた構成の移動物体までの距離と物体速度を求める距

離・速度センサについて考察する。すなわち、レーザ光を移動物体に照射し、その反射によって生じるスペックルパターンの移動を異なる2点で検出する構成の距離・速度センサを考察する。

速度 v で平面移動する物体に照射するレーザ光、レーザ光が物体から反射されるときに生じるスペックルパターンの移動およびその空間フィルタ検出による出力信号の関係を図5-6に示す。物体上におけるレーザ光波面の曲率半径を ρ ，照射角を図5-6に示すように α とすると、角度 β_1 ， β_2 をもち距離 L_1 ， L_2 におけるスペックルの移動速度 V_1 ， V_2 は式(4-14)で示したように次式で表される。

$$V_i = v \left(\cos \beta_i + \frac{L_i \cos^2 \alpha}{\rho \cos \beta_i} \right) \quad (i = 1, 2) \quad (5-6)$$

スペックル速度 V_i は角度 α および β_i に依存し、角度 α および β_i は物体までの距離が変わると変化する。従って、 α ， β_i を測定することなしに距離および速度を計測するセンサを構成するためには

$$\alpha = \beta_1 = \beta_2 = 0 \quad (5-7)$$

の条件を満足することが必要となる。式(5-7)を近似的に満足する構成は、レーザ光のガイドとして光ファイバを用い、スペックル速度検出に光ファイバ列空間フィルタを用いることにより簡便に実現でき、このとき、 ρ ， L_1 および L_2

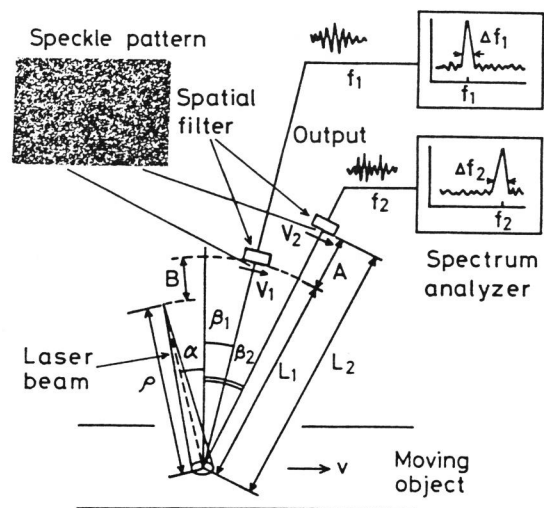


図5-6 移動物体に対するレーザ光の照射と空間フィルタを用いた異なる2点におけるスペックルパターンの移動検出

相互間の距離を固定し、スペックル速度を計測することにより、物体までの距離および物体の速度を求めることができる。

スペックルの移動速度 V_1 , V_2 の検出に、光ファイバ端面を間隔 $p/2$ で $2N$ 個直線状に配列し、その1つおきの光ファイバ出力の総和の差をとる光ファイバ列空間フィルタを用いると、その出力信号は式(4-18)に示したように、中心周波数

$$f_i = V_i / p, \quad (i = 1, 2) \quad (5-8)$$

を持つ狭帯域信号となり、周波数測定によりスペックル速度を求めることができる。

今、物体までの距離として L_1 を基準に考え、 L_1 , L_2 および ρ に対して

$$A = L_2 - L_1 \quad (5-9)$$

$$B = L_1 - \rho \quad (5-10)$$

とおく。式(5-7)が満足されるとき、出力信号の中心周波数 f_1 , f_2 は、式(5-6)～(5-10)から

$$f_1 = \frac{v(2L_1 - B)}{p(L_1 - B)} \quad (5-11)$$

$$f_2 = \frac{v(2L_1 + A - B)}{p(L_1 - B)} \quad (5-12)$$

となる。従って、出力信号の中心周波数 f_1 , f_2 を測定することにより、物体までの距離 L_1 および物体速度 v を次式の関係から求めることができる。

$$L_1 = \frac{A}{2(f_2/f_1 - 1)} + \frac{B}{2} \quad (5-13)$$

$$v = \frac{p(A+B)}{2A} f_1 - \frac{pB}{2A} f_2 \quad (5-14)$$

ここで、 $B = 0$ の構成とすると、 v は f_1 の測定値のみで求められる特性となる。

5-3-2 測定範囲および測定精度

物体までの距離 L_1 および物体速度 v は、構成パラメータ A 、 B 、 p および出力信号の周波数 f_1 、 f_2 を用いて、式 (5-13)、(5-14) の関係から求められる。 $A > 0$ としても一般性を失わないので、この構成における測定範囲を考えよう。このとき、式 (5-11)、(5-12) から $f_1 < f_2$ となるので、出力信号の周波数 f_1 、 f_2 が

$$f_{\min} \leq f_1, f_2 \leq f_{\max} \quad (5-15)$$

の範囲で測定可能とすると、 L_1 および v は

$$f_1 = \frac{v(2L_1 - B)}{p(L_1 - B)} \geq f_{\min} \quad (5-16)$$

$$f_2 = \frac{v(2L_1 + A - B)}{p(L_1 - B)} \leq f_{\max} \quad (5-17)$$

を満足する必要がある。

又、出力信号のパワースペクトルにおいて中心周波数 f_1 、 f_2 のまわりのスペクトルの広がり半値全幅を Δf_1 、 Δf_2 とすると、出力信号の選択度 Q は、スペckルの移動方向が光ファイバ列の配列方向と一致しているとき、式 (2-17) から次式で表される。

$$Q = \frac{f_1}{\Delta f_1} = \frac{f_2}{\Delta f_2} = 1.13 N \quad (5-18)$$

$2N$ は差動構成の光ファイバ列空間フィルタにおける全光ファイバ数である。このとき、出力信号の周波数が接近し、

$$f_2 - f_1 = \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2} \approx \Delta f_2 \quad (5-19)$$

となるときを測定距離の上限とすると、 L_1 は式(5-13)、(5-18)、(5-19)から

$$L_1 \leq \frac{A(Q-1)}{2} + \frac{B}{2} \quad (5-20)$$

を満足する必要がある。

出力信号において周波数の正負の判定ができないので $L_1 \geq B$ とし、 L_1 は空間フィルタの位置を与えるので $L_1 \geq 0$ とすると、

$$L_1 \geq \max \{ B, 0 \} \quad (5-21)$$

となる。

式(5-16)、(5-17)、(5-20)、(5-21)を満足する L_1 および v の値が測定可能範囲となり、この範囲は A に対する B の値によって異なる。 $B=0$ の構成における距離 L_1 および速度 v の測定範囲を図5-7に示す。 $B=0$ の構成においては速度は距離によらず一方の光ファイバ列空間フィルタの出力信号のみによって求められるので、このときの速度の測定範囲は L_1 の値によらず

$$pf_{\min}/2 \leq v \leq pf_{\max}/2 \quad (5-22)$$

である。

次に距離および速度の測定精度を考察しよう。物体までの距離 L_1 および物体速度 v は f_1 、 f_2 の測定値を用いて、式(5-13)、(5-14)の関係から求められる。従って、 L_1

および v の測定精度は f_1 、 f_2 の測定精度で決まることになる。出力信号の周波数 f_1 、 f_2 をそのスペクトルの広がり Δf_1 、 Δf_2 の範囲内で測定できると

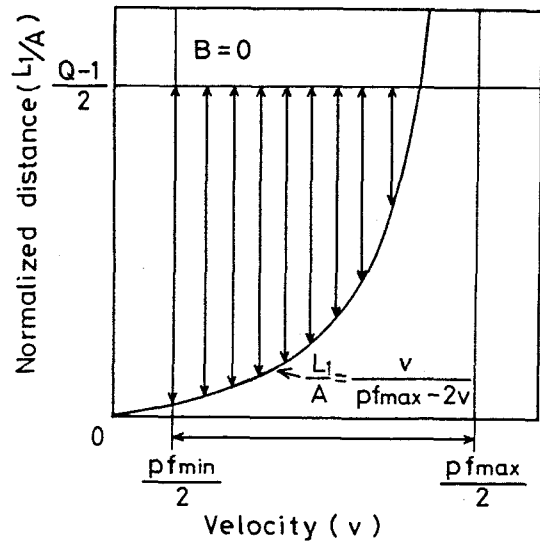


図5-7 $B=0$ の構成における距離 L_1 および速度 v の測定範囲

仮定すると、 L_1 および v の相対測定誤差 $\epsilon_{L_1}^{\pm}$ および $\epsilon_v^{\pm}$ は、式 (5-13)、(5-14) の f_1, f_2 に

$$f_1 \pm \frac{\Delta f_1}{2} = f_1 \left(1 \pm \frac{1}{2Q} \right) \quad (5-23)$$

$$f_2 \pm \frac{\Delta f_2}{2} = f_2 \left(1 \pm \frac{1}{2Q} \right) \quad (5-24)$$

を用いたときの誤差を求めることにより得られ、次式で表される。

$$\begin{aligned} \epsilon_{L_1}^{\pm} &= \frac{(2A-4B+4L_1)L_1-AB+B^2}{2QAL_1 \mp (A-2B+4L_1)L_1} \\ &\approx \frac{(2A-4B+4L_1)L_1-AB+B^2}{2QAL_1}, \quad (L_1 \leq A) \end{aligned} \quad (5-25)$$

$$\epsilon_v^{\pm} = \begin{cases} \frac{AL_1+2BL_1-B^2}{2QA(L_1-B)} & ; \quad B > 0 \\ \frac{1}{2Q} & ; \quad -A \leq B \leq 0 \\ -\frac{AL_1+2BL_1-B^2}{2QA(L_1-B)} & ; \quad B < -A \end{cases} \quad (5-26)$$

ここで、複号は誤差の正負に対応し、 $\epsilon_{L_1}^{+} > \epsilon_{L_1}^{-}$ 、 $\epsilon_v^{+} = \epsilon_v^{-}$ となる。但し、 Q がある程度大きいとき、 $L_1 \leq A$ において $\epsilon_{L_1}^{+} \approx \epsilon_{L_1}^{-}$ とみなすことができる。 $\epsilon_{L_1}^{\pm}$ および $\epsilon_v^{\pm}$ は構成パラメータ A, B 、光ファイバ列空間フィルタの Q および移動物体までの距離 L_1 によって決まり、物体速度 v および光ファイバの配列周期 p に依存しない特性となる。

$B = 0$ の構成における距離の測定誤差 $\epsilon_{L_1}^{\pm}$ および速度の測定誤差 $\epsilon_v^{\pm}$ を図 5-8 に示す。 $B = 0$ の構成においては、距離の測定精度は光ファイバ列空間フィル

タの選択度がよく2組の光ファイバ列の間隔が大きい程よくなり、速度の測定精度は光ファイバ列空間フィルタの選択度がよい程よくなる。又、この構成においては、速度の測定精度は前章で述べた速度センサの精度と同じであるが、距離の測定精度は前節で述べた距離センサの精度と比べて速度の測定誤差分だけ悪くなる。これは、前節の距離センサの測定精度の考察においては速度は正しく測定されていると仮定したが、本節では速度の測定誤差を考えているためである。

このように光ファイバを用いた距離・速度センサの性能は構成パラメータにより決まることになる。構成パラメータ例とそのときの距離・速度検出特性を表5-1に示す。このようなパラメータ値は容易に実現可能な値であり、本センサでは、光ファイバ列の間隔を大きくすることにより誤差を一定に保ったまま距離の測定範囲を大きくでき、

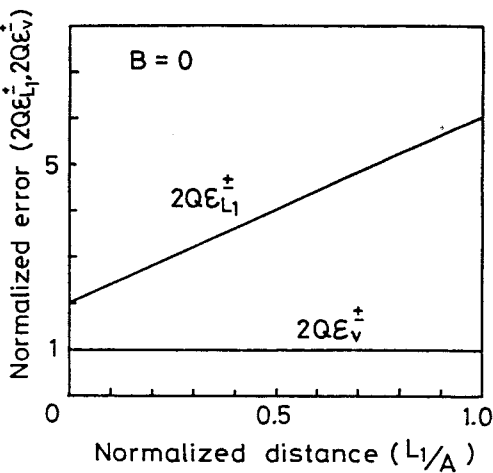


図5-8 B=0の構成における距離および速度の測定誤差(ε_{L1}⁺, ε_v⁺)

表5-1 光ファイバを用いた距離・速度センサの構成例と検出特性

構成 パラ メー タ	光ファイバ列の間隔(A)		100 mm
	レーザ光のビームウエスト位置(B)		0 mm
	光ファイバ列のファイバ数(2 N)		100 (Q = 56)
	光ファイバ間隔(p/2)		150 μm
	出力信号の周波数の測定可能範囲(f _{min} ~ f _{max})		1 Hz ~ 50 kHz
検 出 特 性	距 離		$\frac{Av}{pf_{max}-2v} \sim A \sim \frac{A(Q-1)}{2}$
		測定範囲(L ₁)	$\frac{50v}{7500-v} \text{ mm} \sim 100 \text{ mm} \sim 2750 \text{ mm}$
		測定誤差(ε _{L1} ⁺)	~ 5.6 % ~
	速 度	測定範囲(v)	0.15 mm/sec ~ 7500 mm/sec
		測定誤差(ε _v ⁺)	0.9 %

又，出力信号の周波数の測定範囲を大きくすることにより速度の測定範囲を拡大することができる。

5-3-3 実験結果と考察

光ファイバを用いた距離・速度センサの実験構成を図5-9に示す。出力25 mWのHe-Neレーザー光をコア径 $10\text{ }\mu\text{m}$ の単一モード光ファイバに顕微鏡対物レンズを用いて結合し，光ファイバによりレーザ光を測定点に導いた。光ファイバの他端には，直径2 mm，長さ6.9 mm（ $1/4$ 周期長）のセルフフォーカスマイクロレンズをファイバ端面と少し間隔を置いて取り付け，レーザビームに広がり角を持たせた。本実験においては，広がり角が約 0.024 rad のレーザビームを半径164 mmのアルミ回転体表面に垂直に照射した。

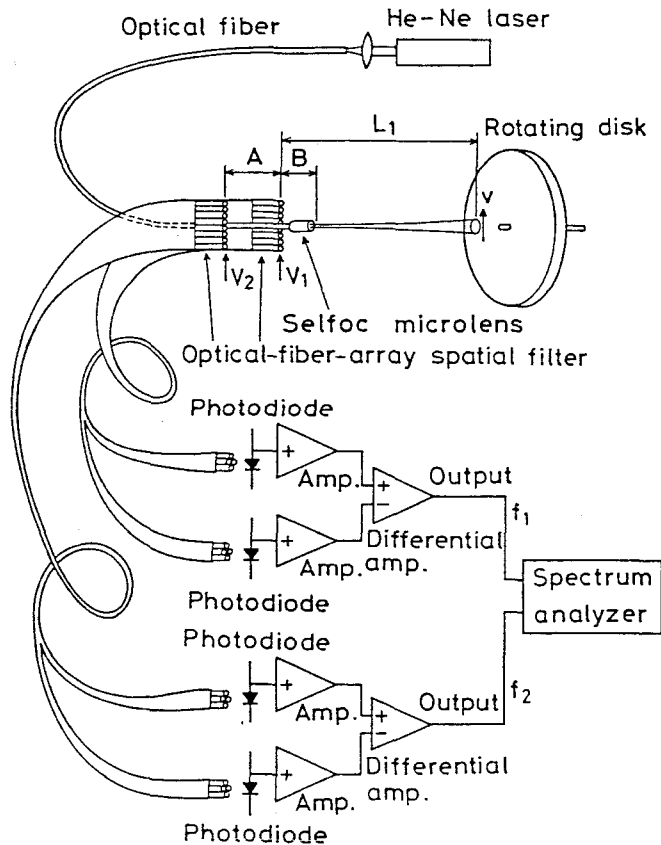


図5-9 光ファイバを用いた距離・速度センサの実験構成図

回転体表面から反射されたレーザ光の干渉により生じるスペックルパターンの移動を2組の光ファイバ列空間フィルタを用いて検出した。各光ファイバ列はコア径 $100\text{ }\mu\text{m}$ ，クラッド径 $125\text{ }\mu\text{m}$ ，開口0.18のステップインデックス形光ファイバを $137\text{ }\mu\text{m}$ 間隔に20本直線状に配列することにより構成されており，これらを配列方向を同じくして $A=130\text{ mm}$ ， $B=0\text{ mm}$ の配置で投光用の光ファイバと共に一体に固定した。各光ファイバ列において，光ファイバにより伝送された光量を，1つおきの光量の総和としてSiフォトダイオードで光電変換し，その差動増幅して得られる出力信号の中心周波数 f_1 ， f_2 をFFTアナライザ（小野測器CF-500）を用いて測定した。出力信号は図5-4に示したのと同様に，スペックル速度に比例した中心周波数を持ち，その周囲に広がった狭帯域信号となった。従って，出力信号の中心周波数 f_1 ， f_2 から物体までの距離および物体速度を求めることができる。

距離の測定結果を図5-10に示す。ここで測定距離は，物体までの距離 L_1 を設定し，この L_1 において得られる出力信号の中心周波数の測定値を用いて式（5-13）の関係から求められている。

本実験においては， $v=540\text{ mm/sec}$ で行っている。図中点線は，式（5-25）で与えられる測定誤差の範囲を示している。本実験においては， $N=10$ の光ファイバ列空間フィルタを用いているので，式（5-18）で与えられる Q は11.3となる。測定精度の考察ではこの Q に相当するスペクトルの広がり精度で中心周波数を測定できる場合について示した。しかし，周波数の測定方法によってはこれ以上の精度で中心周波数の測定が可

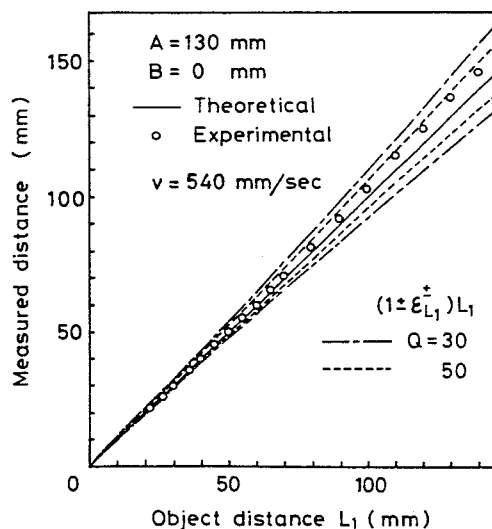


図5-10 距離の測定結果

能である。本実験では、測定誤差から考えて等価的に $Q \geq 50$ の空間フィルタを用いたときの精度で中心周波数を測定でき、2～5%以上の精度で物体までの距離を測定することができた。

速度の測定結果を図5-11に示す。測定速度は出力信号の中心周波数の測定値を用いて式(5-14)の関係から求められている。 $B = 0$ mmの構成としていたので、 v は f_1 のみによって求められ、 f_1 は物体までの距離 L_1 に依存しない。又、このとき、測定精度は式(5-26)から Q のみによって決まる特性となる。本実験においては、測定速度は1%以上の精度で求められ、中心周波数はスペクトルの広がりの中値幅の1/5以下で測定されたことになる。

このように本実験においては、等価的に $Q \geq 50$ における精度で距離および速度を測定できた。このとき、速度の測定誤差は距離に依存しないが、距離の測定誤差は距離に依存する特性となり、距離が小さい程測定精度が向上する。

次に本構成の測定範囲を考察する。本測定系における測定可能周波数の最小値および最大値は、 $f_{\min} = 1$ Hz、 $f_{\max} = 50$ kHzである。従って、 $B = 0$ mmの構成における速度の測定範囲は $0.14 \text{ mm/sec} \leq v \leq 6850 \text{ mm/sec}$ となる。

又、等価的に $Q = 50$ と考えると、 $A = 130$ mmにおける式(5-20)で与えられる最大測定距離は3185 mmとなる。しかし、式(5-25)で与えられる測定誤差を考慮すると、 $L_1 \leq A$ 程度を距離測定の目安に考えることが妥当と思われる。最小測定距離は、式(5-17)で与えられる関係

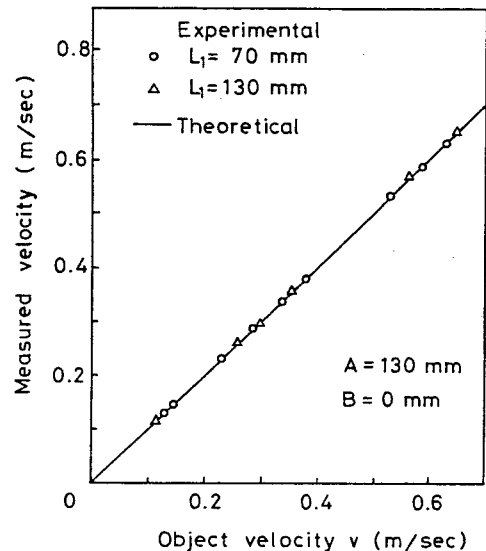


図5-11 速度の測定結果

$$L_1 \geq 65v / (6850 - v) \text{ mm} \quad (5-27)$$

と共に、空間フィルタに用いる光ファイバの開口数を考慮しなければならない。投光用の光ファイバと光ファイバ列空間フィルタは有限の大きさを持っており、有限の距離で配置されている。このため、 L_1 が小さくなると光ファイバ列に用いられている光ファイバに入射するスペックルパターンの光量が減少する。光ファイバの開口 (N.A.) を $\sin \gamma$ 、投光用光ファイバと受光用光ファイバの間隔を d とすると、受光用光ファイバにスペックルパターンの光量が入射するためには、 L_1 は

$$L_1 \geq d / \tan \gamma \quad (5-28)$$

を満足する必要がある。本構成では、 $N.A. = 0.18$ 、 $d = 3 \text{ mm}$ であるので、 $L_1 \geq 1.7 \text{ mm}$ のとき光が入射する。従って、本構成における最小測定距離は、式 (5-27) で与えられる L_1 と 1.7 mm の大きい方の値となる。

測定範囲、測定精度を考えると、スペックルパターンの光量を受光する 2 組の光ファイバ列空間フィルタの間隔 A を大きくすることが好ましい。しかし、 A を大きくすると、各光ファイバ列に入射する光量差が大きくなることに注意する必要がある。

§ 5-4 結像系の焦点はずれ量検出による距離センサ^{(82),(83)}

5-4-1 構成と検出特性

結像系においては、焦点はずれのとき物体の画像が有する高い空間周波数成分が結像面において減少する。この減少が最小となる位置、すなわち結像面を空間フィルタを用いて検出することにより、結像条件から物体までの距離を求めることができる。

結像系の焦点はずれ量検出の空間フィルタとして光ファイバ列空間フィルタを用いた距離センサの構成を図 5-12 に示す。対象物体像は結像レンズにより結

像面近傍に置かれた光ファイバ列空間フィルタ上に投影され、空間フィルタを通してきた物体の光強度が観測される。このとき、光ファイバ列空間フィルタからの出力信号の平均パワー $\langle E \rangle$ は、式(2-7)において結像系の伝達特性を考慮することにより次式で表される⁽⁵¹⁾。

$$\langle E \rangle = \iint_{-\infty}^{\infty} \Phi(\mu, \nu) |K(\mu, \nu)|^2 |H(\mu, \nu)|^2 d\mu d\nu \quad (5-29)$$

ここで、 μ, ν はそれぞれ x, y 方向の空間周波数を表し、 $\Phi(\mu, \nu)$ は対象物体の有する光強度分布のパワースペクトル、 $K(\mu, \nu)$ は結像系の伝達関数、 $H(\mu, \nu)$ は空間フィルタの空間周波数選択特性を表す。

結像系の焦点はずれ量検出のための光ファイバ列空間フィルタの構成には、第2章の図2-4に示したように光ファイバ端面を直線状に等間隔に配列した1次元配列と共に、これを2次元に拡張した図5-13に示す構成が考えられる。1次元配列の光ファイバ列空間フィルタの空間周波数選択特性は式(2-13)で与え

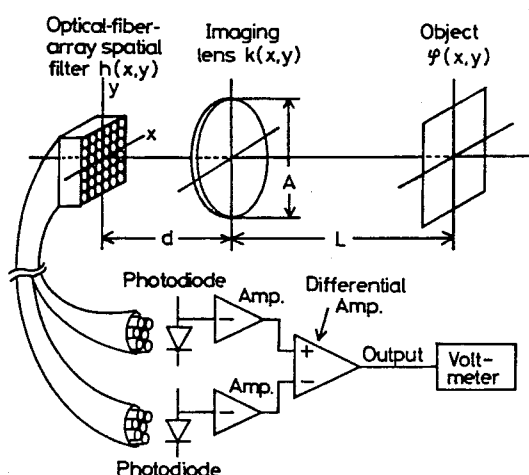


図5-12 光ファイバ列空間フィルタを用いた焦点はずれ量検出型距離センサの構成図

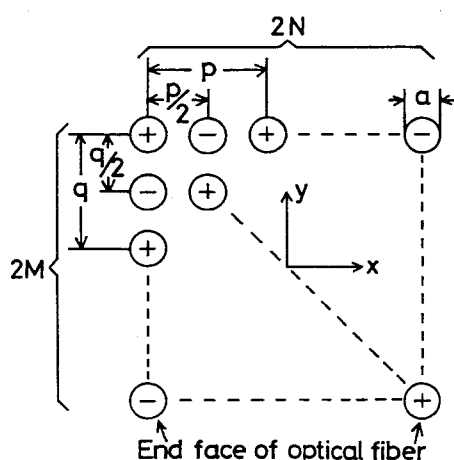


図5-13 結像系の焦点はずれ量検出のための光ファイバ列空間フィルタの構成図

られた。図 5-13 に示すように、直径 a の光ファイバ端面を x, y 軸方向にそれぞれ $p/2, q/2$ の間隔で $2N \times 2M$ 個格子状に 2 次元配列し、その 1 つおきに ± 1 の重みを付けた出力信号を得る差動構成の光ファイバ列空間フィルタに対しては、その空間周波数選択特性は光ファイバ端面に ± 1 の重みをかけてフーリエ変換することにより次式で表される。

$$|H(\mu, \nu)|^2 = \pi^2 a^4 \sin^2 \frac{\pi p \mu}{2} \sin^2 \frac{\pi q \nu}{2} \left(\frac{\sin N \pi p \mu}{\sin \pi p \mu} \right)^2 \\ \times \left(\frac{\sin M \pi q \nu}{\sin \pi q \nu} \right)^2 \left\{ \frac{2 J_1(\pi a \sqrt{\mu^2 + \nu^2})}{\pi a \sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \right\}^2 \quad (5-30)$$

ここで、 J_1 は第 1 種 1 次のベッセル関数である。

又、結像系は焦点はずれするとき、点光源が光ファイバ列空間フィルタ面上において円に広がる特性となる。従って、この直径を αp とすると、結像系の伝達関数は次式で与えられる⁽⁸⁴⁾。

$$|K(\mu, \nu)|^2 = \left\{ \frac{2 J_1(\pi \alpha p \sqrt{\mu^2 + \nu^2})}{\pi \alpha p \sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \right\} \quad (5-31)$$

結像レンズの開口および焦点距離をそれぞれ A, f_l 、レンズと空間フィルタ間の距離を d 、レンズから物体までの距離を L とすると、 α は結像式を用いて

$$\alpha = \frac{A}{p} \left(1 + \frac{d}{L} - \frac{d}{f_l} \right) \quad (5-32)$$

で表され、結像条件を満足するときに零となる物体までの距離 L の関数となる。

空間フィルタが選択する空間周波数の帯域幅が十分に狭いとき、この範囲内で対象物体が有するパワースペクトルを一定とみなすことができる。 $\Phi(\mu, \nu)$ = 一定として、式 (5-29)、(5-31) および 1 次元配列の光ファイバ列空間フィルタに対しては式 (2-13)、2 次元配列の光ファイバ列空間フィル

タに対しては式(5-30)で表される空間周波数選択特性を用いて計算した α に対する出力信号強度の変化を図5-14に示す。出力信号は $\alpha=0$ のとき、すなわち、空間フィルタ面が結像面に一致するときに最大となり、焦点はずれが大きくなるにつれて小さくなる。従って、結像レンズ又は空間フィルタを移動して、出力信号を最大にするレンズと空間フィルタ間の距離 d と結像レンズの焦点距離 f_l を用いて、結像条件から物体までの距離 L を求めることができる。

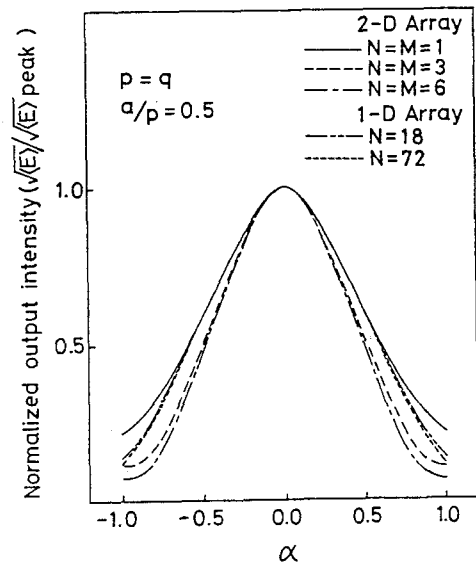


図5-14 α に対する出力信号強度

このとき、距離の変化に対する出力信号の変化が大きい程、検出感度は高くなる。従って、図5-14からわかるように、同じ数の光ファイバを用いる場合には、光ファイバ端面を格子状に2次元配列した光ファイバ列空間フィルタを用いる方が距離の検出には好ましいことになる。

5-4-2 実験結果

実験は基本的には図5-12に示す構成で行った。焦点はずれ量の検出には、コア径1mmのプラスチック光ファイバ端面を1mm間隔に 6×6 本格子状に配列し、その1つおきの光量の総和の差の出力信号を得る $N=M=3$ の光ファイバ列空間フィルタを用いた。又、対象物体の画像には、レーザ光が作るスペックルパターンを写真に撮ったものを用い、 $A=37\text{ mm}$ 、 $f_l=52\text{ mm}$ のレンズを用いて対象物体像を光ファイバ列端面上に結像した。そして、光ファイバ端面に入射した光量を光ファイバ自身によって導き、その1つおきの光量の総和を光電変換し、差動増幅した後、その出力電圧を測定した。

結像レンズから対象物体までの距離 L を設定し，光ファイバ列空間フィルタを移動して最大出力を与える結像レンズと光ファイバ列空間フィルタ間の距離 d を測定し， d とレンズの焦点距離を用いて結像条件から求めた距離の測定結果を図 5-15 に示す。本実験では，1%以上の精度で距離を求めることができ，光ファイバ列空間フィルタを用いて結像系の焦点はずれ量を検出する距離センサの有用性を確認することができた。

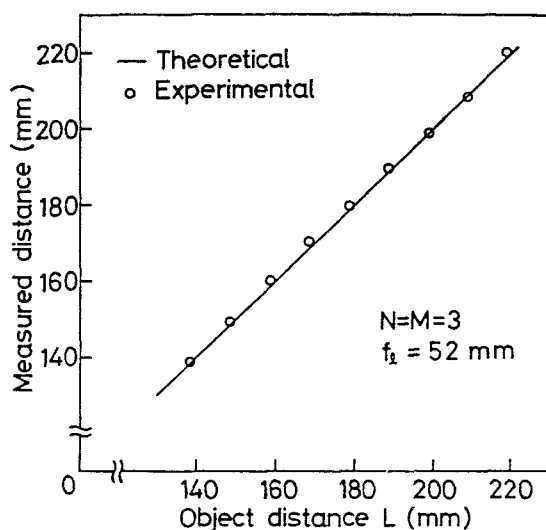


図 5-15 距離の測定結果

§ 5-5 結 言

本章では，まずスペックルパターンの移動特性が照射レーザ光波面の曲率半径に依存することに着目した光ファイバ列を用いた距離センサについて述べた。出力信号の中心周波数の測定精度から，本距離センサの測定精度を明らかにし， $N = 10$ の光ファイバ列空間フィルタを用いた実験により本センサの有用性を確認した。

次に，この距離センサとスペックル速度センサを組み合わせた構成の投受光系に光ファイバを用いた距離・速度センサについて述べた。照射レーザ光と受光用の光ファイバ列の配置および構成パラメータによる出力信号の特性から本センサにおける距離および速度の測定範囲，測定精度を明らかにし，実験により本センサの有用性を確認した。

さらに，結像系の焦点はずれ量を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出する構成の距離センサについて，その検出特性を明らかにし，実験により有用性を確認した。

第6章 スペックル移動検出による回転角 センサ⁽⁸⁵⁾⁻⁽⁸⁹⁾

§ 6-1 緒 言

本章では、円柱表面から反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動を検出することによる高分解能を持つ回転角センサについて述べる。

まず、円柱の回転による円柱表面から生じるスペックルパターンの移動特性を明らかにし、これを用いて高分解能、高精度で安定な回転角センサを構成するための構成パラメータを検討する。そして、本方式の有用性を確認した実験結果について述べる。

さらに、スペックルパターンの移動速度を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出することによる本センサの回転体半径の非接触計測への応用についても述べる。

§ 6-2 原理と検出特性^{(86),(87)}

スペックル移動検出による回転角検出の原理を図6-1に示す。コヒーレントなレーザ光を円柱表面に照射し、その反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動を検出することにより回転角を求める構成である。スペックルパターンの移動量は回転角，すなわち円柱表面の回転変位 d に対するスペックルの移動量 D の比を m とすると、半径 r の円柱に対して、スペックルの移動量 D

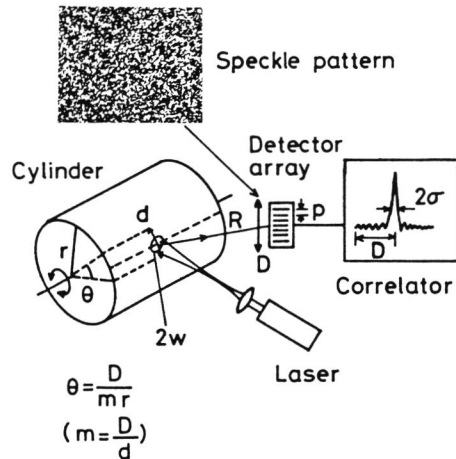


図6-1 スペックル移動検出による
回転角検出の原理図

と回転角 θ には、次式の関係がある。

$$\theta = \frac{D}{m r} \quad (6-1)$$

従って、 m および r がわかっているとき、スペックルの移動量 D を測定することにより回転角 θ が求められることになる。ここで、 m は本測定系におけるスペックル移動の倍率を表しており、次節で詳しく考察することにする。

さて、スペックルの移動量を検出器アレイによって受光された移動前後のスペックルパターンの相互相関関数の演算により求める場合を考えよう。このとき、回転角の測定精度は相互相関関数におけるスペックルの移動量に対応するピークの広がり幅に依存する。スペックルパターンの光強度分布は、大きさの異なるランダムに存在する多くのスペックルから成っている。従って、検出器内に十分多くのスペックルが存在するとき、その相関ピークの広がり幅は平均スペックル径 σ に等しくなるはずである。そして、相関出力のピークの広がり幅が狭ければ狭い程、ピーク位置の検出精度、すなわち、スペックルの移動量の検出精度はよくなる。平均スペックル径 σ はスペックルパターンの自己相関関数のピーク値の $1/e$ になる幅として定義すると次式で与えられる⁽⁴¹⁾。

$$\sigma = \frac{\lambda R}{\pi w} \quad (6-2)$$

ここで、 λ はレーザ光の波長、 w は円柱上の散乱点におけるビーム径、 R は散乱点からスペックル移動の観測点までの距離を表す。従って、この平均スペックル径 σ に等しいスペックル移動を与える回転角 $\Delta\theta$ によって、測定精度を評価することができる。このとき、 $\Delta\theta$ は式(6-1)から次式で表される。

$$\Delta\theta = \frac{\sigma}{m r} \quad (6-3)$$

又、本方法による回転角測定における分解能 $\delta\theta$ は検出器アレイの配列間隔 p によって決まり、次式で表されることになる。

$$\delta \theta = \frac{p}{mr} \quad (6-4)$$

又，単位回転角に対するスペックルの移動量，すなわち本測定系における感度 $dD / d\theta$ は次式で表される。

$$\frac{dD}{d\theta} = mr \quad (6-5)$$

このように，スペックルの移動量 D を検出して円柱の回転角 θ を求める回転角センサを構成する場合，精度 $\Delta \theta$ ，分解能 $\delta \theta$ および感度 $dD / d\theta$ は平均スペックル径 σ ，検出器アレイの配列間隔 p および m （円柱の表面変位 d に対するスペックルの移動量 D の比）によって決まる特性となる。

§ 6-3 円柱表面の回転変位に対するスペックルの移動特性^{(85), (87)}

前節で述べたように，スペックル移動を検出する回転角センサの精度，分解能および感度は円柱の表面変位に対するスペックルの移動倍率 m が大きい程よくなる。本節では必要とする精度，分解能および感度を有するセンサを構成するために，第4章第2節で述べたようにスペックルパターンの光強度分布の移動特性から構成パラメータに対するスペックルパターンの移動倍率 m を求める。

円柱表面の回転変位に対するスペックルパターンの移動倍率 m を求めるためのモデルを図6-2に示す。軸 O のまわりに回転する半径 r の円柱に対して，円柱表面から ρ の距離にある点光源 S からのコヒーレント光が $\overline{OS}$ から角度 α の円柱表面上の点 Q 近傍に照射され， $\overline{OS}$ から角度 β ，円柱表面から距離 L の点 P においてスペックルパターンの移動を観測する場合を考える。そして，図6-2に示すように， Q 近傍の円柱表面上に $\overline{OQ}$ から角度 φ の点 Q' および P 近傍に円柱表面から距離 L で $\overline{OP}$ から角度 ψ の点 P' をとる。このとき， P 近傍の点 P' における光の振幅は，ホイゲンス・フレネルの原理⁽⁷⁴⁾により，光路長の異なる種々の角度 φ をもつ点 Q' から反射された光の振幅の積分として表される。従って，円柱が角

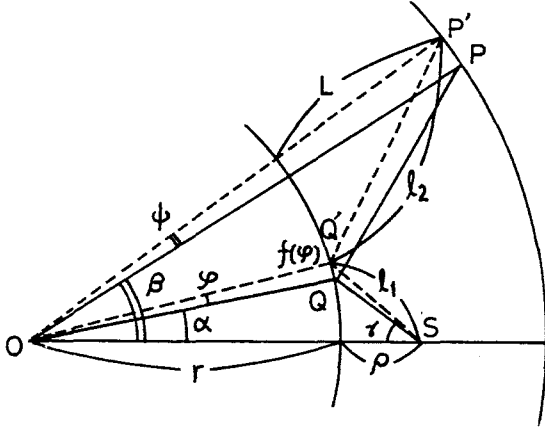


図6-2 スペックルの移動特性を求めるモデル

度 θ だけ回転したとき、 P' における光の振幅 $u(\theta, \phi)$ は次式で与えられることになる。

$$u(\theta, \phi) = A \int g(\varphi - \theta) \times \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \{ l_1(\varphi) + l_2(\varphi, \phi) \} \right] d\varphi \quad (6-6)$$

ここで、 A は定数、 λ は光の波長、 $g(\varphi)$ は円柱表面の反射係数、 l_1 、 l_2 はそれぞれ $\overline{SQ}$ 、 $\overline{QP'}$ の長さを表わす。又、 S から出た光の Q 近傍の強度は一定と仮定し、 Q 近傍における

反射係数の角度依存性は無視できるものとしている。

さて、距離 l_1 、 l_2 が角度 φ および ψ の2次までの展開項で近似できる程 φ および ψ が小さいとき、すなわちフレネル回折領域におけるスペックル移動を考えよう。このとき、 l_1 および l_2 は次式で表される。

$$l_1(\varphi) = \xi_0 + \xi_1 \varphi + \xi_2 \varphi^2 \quad (6-7)$$

$$l_2(\varphi, \psi) = \eta_0 + \eta_1(\psi - \varphi) + \eta_2(\psi - \varphi)^2 \quad (6-8)$$

ここで、 ξ_0 、 ξ_1 、 ξ_2 、 η_0 、 η_1 および η_2 は展開係数である。このとき、式(6-6)は、式(6-7)および(6-8)を用いて、次式のように書き換えられる。

$$u(\theta, \phi) = A \int g(\varphi) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ l_1(\varphi) + l_2 \left(\varphi, \psi - \frac{\eta_2 + \xi_2}{\eta_2} \theta \right) + x \right\} \right] d\varphi$$

$$= \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} x \right) u \left(0, \phi - \frac{\eta_2 + \xi_2}{\eta_2} \theta \right) \quad (6-9)$$

ここで,

$$x = -\frac{\xi_2 (\eta_2 + \xi_2)}{\eta_2} \theta^2 + \left(\xi_1 + 2 \xi_2 \phi + \frac{\eta_1 \xi_2}{\eta_2} \right) \theta \quad (6-10)$$

式(6-9)は、円柱が角度 θ だけ回転したとき、円柱表面の回転変位の後のスペックルパターンの強度分布は回転前の強度分布を用いて次式のように表されることを意味している。

$$|u(\theta, \phi)|^2 = \left| u \left(0, \phi - \frac{\eta_2 + \xi_2}{\eta_2} \theta \right) \right|^2 \quad (6-11)$$

従って、円柱の回転角 θ に対するスペックルパターンの回転角 Ω は次式で表される。

$$\Omega = \left(1 + \frac{\xi_2}{\eta_2} \right) \theta \quad (6-12)$$

式(6-7), (6-8)における l_1 , l_2 の展開係数 ξ_2 および η_2 は、図6-2における幾可学的な考察により次式で与えられる。

$$\xi_2 = c(r, \rho, \alpha) \quad (6-13)$$

$$\eta_2 = c(r, L, \beta - \alpha) \quad (6-14)$$

ここで,

$$\begin{aligned} c(x, y, a) = & \frac{x(x+y) \cos a}{2\sqrt{y^2 + 2x(x+y)(1-\cos a)}} \\ & \times \left\{ 1 - \frac{x(x+y)}{y^2 + 2x(x+y)(1-\cos a)} \cdot \frac{\sin^2 a}{\cos a} \right\} \end{aligned} \quad (6-15)$$

従って、円柱の表面変位 d に対するスペックル変位 D の比で定義されるスペックル移動の倍率 m は次式で与えられることになる。

$$m = \frac{D}{d} = \frac{(r+L)\varrho}{r\theta}$$

$$= \left(1 + \frac{L}{r} \right) \left\{ 1 + \frac{c(r, \rho, \alpha)}{c(r, L, \beta - \alpha)} \right\} \quad (6-16)$$

又、図 6-2 の幾可学的配置においては、 r 、 ρ 、 L が与えられたとき、角度 α 、 β は次の条件を満足する必要がある。

$$-\cos^{-1} \frac{r}{r+\rho} \leq \alpha \leq \cos^{-1} \frac{r}{r+\rho} \quad (6-17)$$

$$\alpha - \cos^{-1} \frac{r}{r+L} \leq \beta \leq \alpha + \cos^{-1} \frac{r}{r+L} \quad (6-18)$$

点光源の距離 ρ を固定したとき、円柱表面のビーム位置を与える角度 α に対するスペックル移動の倍率 m を図 6-3 に示す。スペックル移動が点 O と S を結ぶ線上で観測されるとき、すなわち、 $\beta = 0$ のときには、 m は $\alpha = 0$ に関して対象となる。このとき、 $\alpha = 0$ において、 m は、 $\rho < L$ のとき最大値をとり、 $\rho > L$ のとき最小値をとる。そして、この最大値は ρ が小さい程、又、 L が大きい程大きくなる。又、 $\beta = 0$ で、かつ $\rho = L$ のときには、 m は

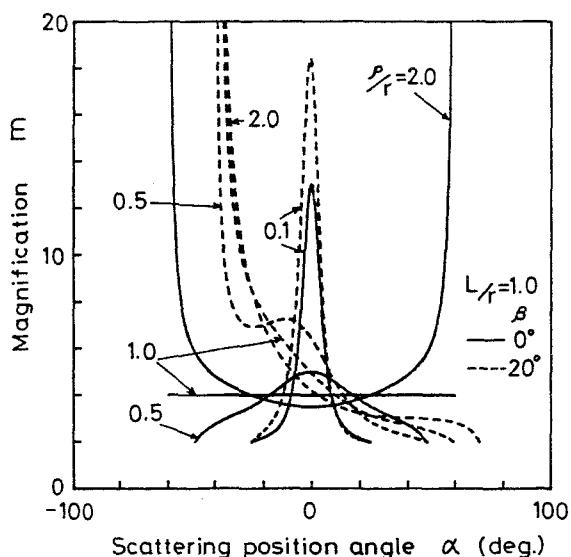


図 6-3 円柱表面のビーム位置を与える角度 α に対するスペックル移動の倍率 m

次式で与えられるようにビーム位置を与える角度 α に依存しない一定値となる。

$$m = 2 \left(1 + \frac{L}{r} \right) \quad (6-19)$$

$\beta \approx 0$ においては、スペックル移動の倍率 m は、図 6-3 において点線で示すように α に対して複雑な特性となる。

式 (6-15) および (6-16) からわかるように、スペックル移動の観測角度 β の変化に対して、 m は $\beta = \alpha$ で最小値をとり、これを離れるに従って増加し、 β が $\alpha \pm \cos^{-1} \{ r / (r+L) \}$ に近づくに従って無限大に近づく。そして、 $\beta = \alpha$ における最小値は $|\alpha|$ が大きい程小さくなる。又、 m は観測距離 L にはほぼ比例して増加し、光源距離 ρ に反比例する特性となる。そして、 $\alpha = \beta = 0$ の構成においては、 m は次式で与えられる。

$$m = \left(1 + \frac{L}{\rho} + \frac{2L}{r} \right) \quad (6-20)$$

本センサの精度、分解能、感度を考えると、 m は大きければ大きい程よいことになる。そして、構成パラメータを適切に選ぶことにより必要な m の値を得ることができる。しかし、安定なセンサの構成を考えると、構成パラメータの変化に対して m の変化が少ない構成がよいことになる。上に述べたスペックル移動の倍率の特性を考えると、安定なセンサの構成には、 α 、 β および $|L - \rho|$ の値が小さい構成が好ましいことになる。センサの構成に当っては、これらの条件を考慮して構成パラメータを決める必要がある。

§ 6-4 実験結果と考察⁽⁸⁵⁾⁻⁽⁸⁷⁾

本節では、スペックル移動を検出することによって円柱の回転角の検出が可能であることを確認した実験結果について述べる。実験の構成を図 6-4 に示す。出力 25 mW の He-Ne レーザからのコヒーレントビームを顕微鏡対物レンズを用いてコア径 10 μm の単一モード光ファイバに結合し、レーザ光を測定点へ導いた。光ファイバ他端には、その端面と少し間隔をおいて直径 2 mm、長さ 6.9

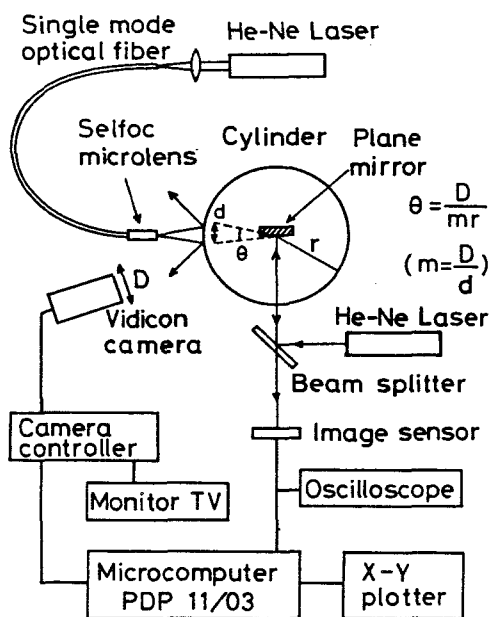


図 6-4 実験の構成図

mm (1 / 4 周期長) のセルフフォーカスマイクロレンズを取り付け、適当な広がり角を持った出射ビームを得た。セルフフォーカスレンズからの出射光はほぼ円形の出射パターンとなり、その広がり角は、 0.024 rad であった。この出射レーザ光を円柱表面に照射し、円柱表面から反射されたレーザ光の干渉によって作られるスペックルパターンの移動量をビジコンカメラ (浜松テレビ C-1000) を用いて検出した。ビジコンカメラは受光面積約 1 cm^2 で 1024×1024 の分解能を有している。ビジコンカメラの各画素に対応する長さは平行ビーム中を細いスリットを移動させることにより校正されている。スペックルの移動方向に対して直角方向のビジコンカメラの 21 ラインの光強度分布をマイクロコンピュータ (PDP 11/03) に取り込み、21 ラインの平均強度分布を求め、その分布を平均値零のデータに変換した。そして、円柱の回転前後におけるスペックルパターンの光強度分布の相互相関関数を FFT アルゴリズムを用いて演算し、相関出力のピーク位置からスペックルパターンの移動量を求めた。又、回転角の基準には、円柱の回転軸上におかれた平面鏡によって反射されるレーザ光のスポット位置から求められる角度を用いた。なお、レーザスポットの位置の測定には $28 \mu\text{m}$ 間隔に並べられた 512 個のフォトダイオードから構成される 1 次元イメージセンサ (MEL 512 K) を用いた。

本実験においては、回転体として半径 $r = 164 \text{ mm}$ のアルミ製円柱を用い、スペックル移動測定用のビジコンカメラを円柱表面から $L = 330 \text{ mm}$ の距離

mm (1 / 4 周期長) のセルフフォーカスマイクロレンズを取り付け、適当な広がり角を持った出射ビームを得た。セルフフォーカスレンズからの出射光はほぼ円形の出射パターンとなり、その広がり角は、 0.024 rad であった。この出射レーザ光を円柱表面に照射し、円柱表面から反射されたレーザ光の干渉によって作られるスペックルパターンの移動量をビジコンカメラ (浜松テレビ C-1000) を用いて検出した。ビジコンカメラは受光面積約 1 cm^2 で 1024×1024 の分解能を有している。ビジコンカ

にセットした。円柱の回転前後のスペックルパターンの相関出力例を図 6-5 に示す。ここで用いている他の構成パラメータは $\alpha = 0$, $\beta = 0$, $\rho = 6.6 \text{ mm}$ である。相関出力のピーク値の $1/e$ の強度を与える半幅は約 $4.4 \mu\text{m}$ であり、これは式 (6-2) を用いて求められる

平均スペックル半径 $4.2 \mu\text{m}$ とほぼ一致する値となる。そして、この場合、平均スペックル直径の中には約 9 ラインのビジコンカメラのライン数が含まれることになる。スペックルの移動量が大きくなると相関出力には多くのピークが現れる。しかし、これらのピーク値はスペックル移動に対応するピーク値よりも小さく、相互相関関数の演算をほぼ同一とみなされる光強度分布に対して行うとき単一のピークを持つ相関出力が得られた。自己相関関数のピーク値で規格化した相互相関関数の

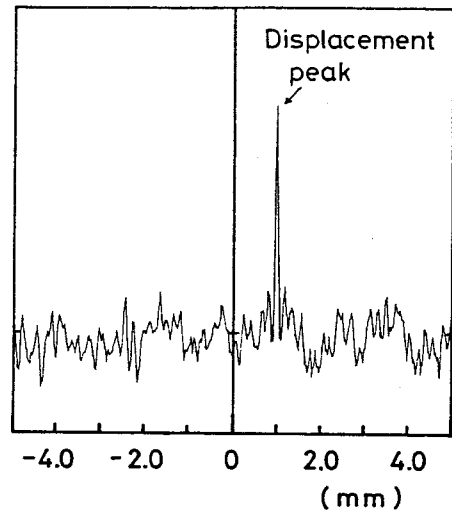


図 6-5 スペックル移動の相関出力例

ピーク値は 0.8 ~ 0.9 となり、これから考えるとスペックルパターンはほぼ変形なしに同一のパターンで移動しているものと考えることができる。

円柱の表面変位に対するスペックルパターンの移動倍率 m は式 (6-16) からわかるように構成パラメータに依存する。この関係を確認するために次の実験を行った。すなわち、レーザ光の円柱表面への照射角を変化させ、その入射角と等しい反射角の方向におけるスペックルパターンの移動量をビジコンカメラ出力信号の相互相関関数から求めた。これにより、角度 α , β を大きく変えた場合にも強い光強度分布が得られ、 α , β を大きくとることができた。図 6-2 に示すように、 $\overline{SO}$ から測ったレーザ光の照射角を γ とすると、角度 α , β は角度 γ と次の関係で与えられる。

$$\alpha = -\gamma + \sin^{-1} \left\{ \left(1 + \frac{\rho}{r} \right) \sin \gamma \right\} \quad (6-21)$$

$$\beta = 2\alpha + \gamma - \sin^{-1} \left(\frac{r+\rho}{r+L} \sin \gamma \right) \quad (6-22)$$

そして、角度 γ は幾可学的条件から次式の範囲の値となる。

$$-\sin^{-1} \frac{r}{r+\rho} \leq \gamma \leq \sin^{-1} \frac{r}{r+\rho} \quad (6-23)$$

種々の光源距離 ρ において、レーザ光の照射角 γ に対するスペックル移動の倍率 m の実験結果を図6-6に示す。ここで、 $\rho/r = 0.341$ の構成においては、 $\gamma = 40.0^\circ$ は $\alpha = 19.5^\circ$ 、 $\beta = 62.4^\circ$ に対応し、 $\rho/r = 1.28$ においては $\gamma = 20.0^\circ$ は $\alpha = 31.2^\circ$ 、 $\beta = 67.5^\circ$ に、 $\rho/r = 3.20$ においては $\gamma = 8.0^\circ$ は $\alpha = 27.8^\circ$ 、 $\beta = 52.3^\circ$ に対応する。実験結果は理論値とよく一致しており、ス

ペックルパターンは式(6-16)の関係に従って移動することがわかる。

次に、円柱表面のビーム位置を与える角度 α を設定し、観測角度 β に対するスペックル移動の倍率 m を測定した。その結果を図6-7に示す。スペックル移動の倍率 m は $\beta = \alpha$ で最小値となり、その両側で $|\beta - \alpha|$ が大きくなるに従って増加する。そして、 β の変化に対する m の変化は $\beta = \alpha$ の近傍で小さくなる。又、 β が与えられたとき、 α の変化に対する m の変化は β が小さいときに小さくなる。従って、安定して回転角を検出するためには $\alpha = \beta = 0$ の構成が好ましいことになる。

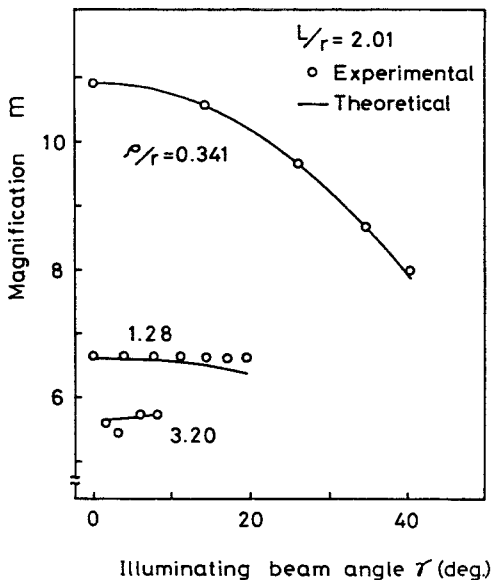


図6-6 レーザ光の照射角 γ に対するスペックル移動の倍率 m

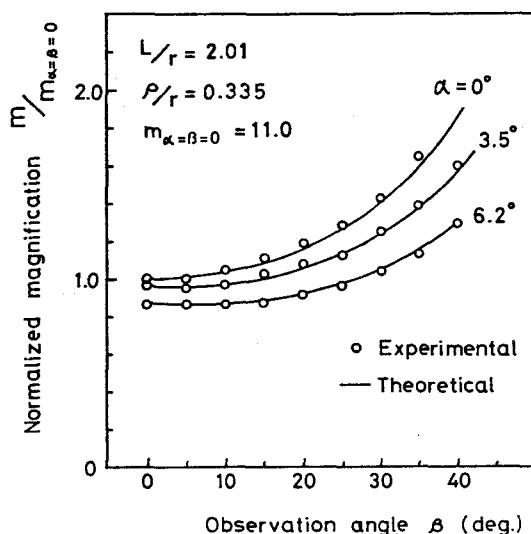


図 6-7 観測角度 β に対するスペックル移動の倍率 m

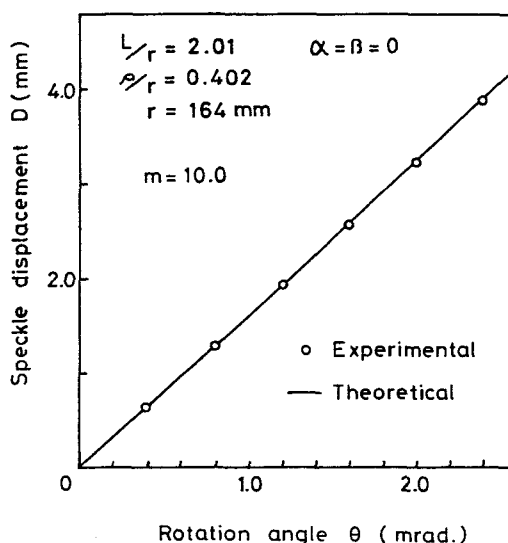


図 6-8 回転角 θ に対するスペックルの移動量 D

円柱の回転角 θ に対するスペックルの移動量 D の測定結果を図 6-8 に示す。本実験における構成パラメータは図 6-5 の相関出力を得たときに用いた値と同じである。この構成においてはスペックル移動の倍率 m は 10.0 となり、ほぼ安定して回転角の検出が可能な構成となっている。又、イメージセンサと平面鏡間の距離を 1805 mm に設定し、このときのレーザスポットの位置から基準となる回転角を求めた。従って、イメージセンサの配列間隔に対応する円柱の回転角は 7.76×10^{-6} rad となる。ビジコンカメラによって測定されたスペックルの移動量 D はレーザスポットによって測定された回転角に正比例する結果が得られ、スペックルの移動量を測定することにより回転角を求められることがわかる。

図 6-8 の測定に用いた構成においては、平均スペックル径に等しいスペックルの移動量を与える円柱の回転角 $\Delta\theta$ は 2.68×10^{-5} rad となる。又、ビジコンカメラの分解能によって決まる分解角 $\delta\theta$ は 5.86×10^{-6} rad となり、これは 1 回

転当り 1.07×10^6 分割に相当する。又、感度 $dD / d\theta$ は 1.64 m / rad である。構成パラメータを変え、 m を大きくすることにより、容易にこれらの性能を改善することができる。例えば、光源距離 ρ を小さくすることにより m を容易に大きくできる。しかし、 m を大きくする場合には構成パラメータの変化に対する安定度に注意をする必要がある。又、観測距離 L を大きくすることによって m を大きくすることは、式 (6-2), (6-3), (6-20) からわかるようにスペックル径も大きくなり精度の向上につながらないことにも注意する必要がある。 m が大きくなると一度に検出できる回転角は小さくなる。本構成では、ビジコンカメラの受光幅の半分に相当するスペックルの移動量を相互相関関数から測定可能とすると、一度に検出できる最大回転角は 3.0 mrad となる。又、本実験では、ビジコンカメラのサイズが大きいため、構成パラメータの変化に対して最も安定な構成、すなわち、 $\alpha = \beta = 0$ で、かつ $\rho = L$ の構成とすることができなかった。このような構成とするには次節で述べる光ファイバ列を用いてスペックル移動を検出する構成が有効と考えられる。又、本実験では、相関関数の演算にマイクロコンピュータを用いたので、相関演算に時間を要し、実時間計測が困難であった。実時間で回転角を検出するセンサを構成するには、ハードウェア相関器を用いるか、又は次節で述べる光ファイバ列を用いたスペックル移動の検出が有効と考えられる。

§ 6-5 光ファイバ列を用いた回転角センサ

前節では、スペックルの移動量をビジコンカメラの出力信号をマイクロコンピュータで相関演算することにより求めたので、実時間計測が困難であった。本節では、実時間計測を行うために光ファイバ端面を直線状に等間隔に配列した光ファイバ列を用いる方式を検討する。

光ファイバ列を用いた回転角センサの構成を図 6-9 に示す。レーザ光は光ファイバを用いて測定点に導かれ、光ファイバ端面に取り付けられたセルフオックレンズにより適当な広がり角を持って円柱表面に照射される。円柱表面から反射

されたレーザ光が作るスペックルパターンは第2章で述べた光ファイバ端面を間隔 $p/2$ で $2N$ 本直線状に並べた光ファイバ列で受光され、1つおきの光ファイバ出力の総和の差の出力信号が得られる。このとき、光ファイバ列はその配列周期 p で決まる空間周波数 $1/p$ をスペックルパターンの光強度分布から選択するので、円柱の回転によりスペックルパターンが p だけ移動する毎に光ファイバ列から1つのパルス出力が得られることになる。従って、前節で述べた

ように円柱の表面変位に対するスペックル移動の倍率 m がわかっているとき、半径 r の円柱に対して、円柱の回転角 θ は式(6-1)から出力信号のパルス数 n_c を計数することにより次式で求められる。

$$\theta = \frac{n_c p}{mr} \quad (6-24)$$

出力信号のパルス数の計数は実時間で可能であるので、回転角の実時間計測が可能になる。

又、光ファイバ径は細いので前節で述べた構成パラメータの変化に対して最も安定な構成、すなわち、 $\alpha = \beta = 0$ で、かつ $\rho = L$ をほぼ満足する回転角センサを構成することができる。そして、投受光系に光ファイバを用いることにより、簡易な構造で操作性並びに耐環境性に優れた回転角センサを構成することができる。

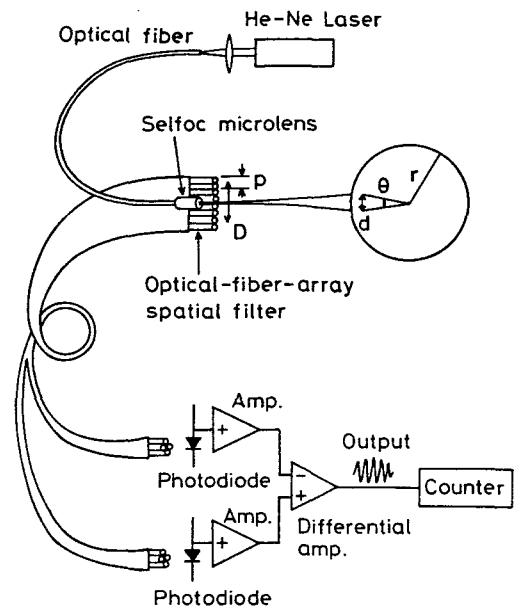


図6-9 光ファイバ列を用いた回転角センサの構成図

§ 6-6 回転体半径計測への応用 ^{(88), (89)}

レーザ光が円柱表面から反射されたときに生じるスペックルパターンは円柱の回転と共に移動し、その移動量は照射レーザ光、スペックルパターンの検出位置、円柱の回転角および半径によって決まる特性となった。前節まではスペックル移動を検出することにより円柱の回転角の検出が可能であることを述べてきた。

本節では、前節で述べた回転角センサを応用し、光ファイバ列空間フィルタを用いてスペックルパターンの移動を検出する構成の回転体半径の非接触計測用センサについて述べる。

6-6-1 半径によるスペックルの移動特性

回転円柱と照射レーザ光の関係を図 6-10 に示す。周速 v で回転する半径 r の円柱に対してレーザ光を回転軸に向けて照射する。このとき、円柱表面から反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動速度 V は、その観測位置が照射レーザ光の軸上で円柱表面から距離 L にあるとき、式 (6-20) から次式で与えられる。

$$V = v \left(1 + \frac{L}{\rho} + \frac{2L}{r} \right) \quad (6-25)$$

ここで、 ρ は円柱表面における照射レーザ光波面の曲率半径である。これからレーザビームを固定したとき、円柱の半径 r の変化によりスペックル速度 V が変化し、 V を検出することにより r を求められることがわか

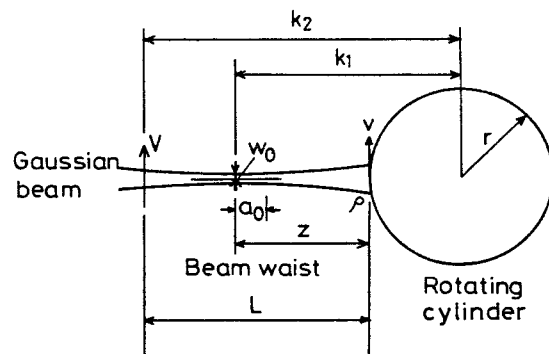


図 6-10 回転円柱とレーザ光の関係

る。円柱の半径 r の変化により円柱表面におけるレーザ光の曲率半径 ρ も変化する。そして、 r の変化に対して V が敏感に変化するのは ρ が小さいときである。照射レーザ光として基本ガウスビームを用いると、円柱表面におけるレーザ光の波面の曲率半径 ρ は円柱表面がビームウエスト位置から十分離れた位置にあるときにはビームウエスト位置と円柱表面間の距離 z に近似的に等しくなるが、 r の変化に対して敏感な所、すなわち、円柱表面がビームウエスト位置に近い場合には ρ はビームウエスト位置と円柱表面間の距離 z を用いて次式で与えられる⁽⁷⁵⁾。

$$\rho = z \left(1 + \frac{a_0^2}{z^2} \right) \quad (6-26)$$

ここで、

$$a_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (6-27)$$

であり、 a_0 はガウスビームのビームウエスト長さを表すパラメータである。又、 w_0 はビームウエスト位置におけるビーム半径、 λ は照射レーザ光の波長を表す。

照射レーザ光並びにスペックルパターンの検出位置を固定するとき、円柱半径 r の変化に対してビームウエスト位置と円柱表面間の距離 z および観測距離 L も変化する。従って、 z および L を円柱の回転軸からの距離として次のようにおく。

$$k_1 = z + r \quad (6-28)$$

$$k_2 = L + r \quad (6-29)$$

そして、周速度 v を回転角速度 $\dot{\theta}$ ($= d\theta / dt$) を用いて次のように表す。

$$v = r \dot{\theta} \quad (6-30)$$

このとき、スペックルの移動速度 V は円柱半径 r の関数として次式で表される。

$$V = \dot{\theta} \left\{ 2k_2 - r + \frac{r(k_1 - r)(k_2 - r)}{(k_1 - r)^2 + a^2} \right\} \quad (6-31)$$

従って、 k_1 、 k_2 を固定した構成において、円柱の回転角速度 $\dot{\theta}$ を他の何らかの方法で求める構成としておくことにより、スペックル速度 V の測定から円柱の半径 r を求めることができる。

種々の k_1/k_2 、 a_0/k_2 の値における円柱の半径 r によるスペックル速度 V の変化を図6-11に示す。スペックル速度は円柱表面が照射レーザー光のビームウエスト位置に近づくに従って大きくなる。しかし、その値は

ガウスビームのパラメータ a_0 で決まる最大値以上にはならない。そして、この最大値は a_0 が小さい程、すなわち、より細く集光したレーザービームを用いる程大きくなる。又、図6-11から、 a_0 の小さいビームを用いて、 $k_1/k_2 = 0.5$ の構成で、円柱の半径 r を $0.5 k_2$ 近傍で測定するとき、感度の高い半径計測をできることがわかる。又、適当な回転角速度 $\dot{\theta}$ を設定することにより半径の変化より1～2桁大きいスペックルの移動速度の変化を得ることができる。

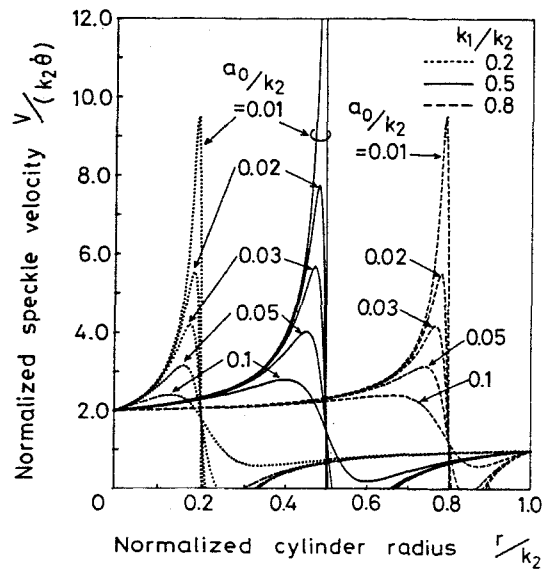


図6-11 円柱半径 r によるスペックル速度 V の変化

6-6-2 実験結果

スペックル移動検出による円柱の半径計測の実験構成を図6-12に示す。出力25mWのHe-Neレーザー光をレンズを用いて拡大、集光した後、円柱の回転軸に向けて照射した。ビームの広がり角から求めた照射ガウスビームのパラメータ a_0 は1.65mmであった。スペックル移動の検出には、コア径100 μ mのステップインデックス形光ファイバ端面を137 μ m(= $p/2$)間隔に20本

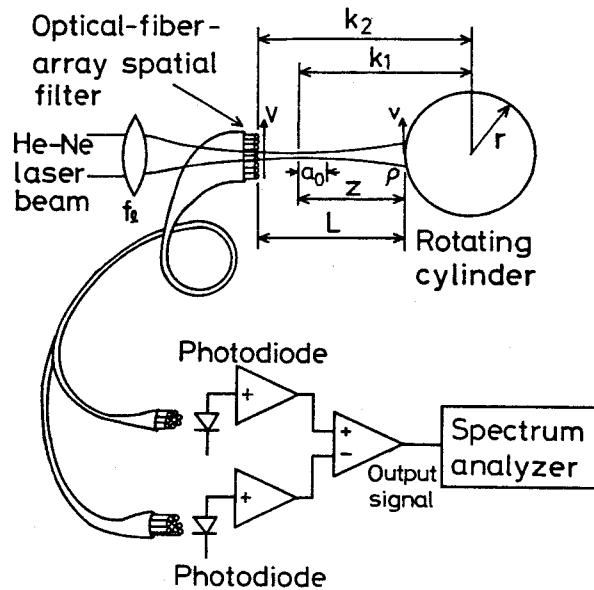


図 6 - 1 2 円柱半径計測の実験構成図

直線状に配列し、その1つおきの光ファイバ出力の総和の差の出力信号を得る光ファイバ列空間フィルタを用いた。その光ファイバ列の配列方向をスペックルの移動方向に合せ、照射レーザビームにできるだけ近づけて設置し、出力信号の中心周波数 f から、 $V = pf$ の関係を用いてスペックル速度 V を求めた。なお、出力信号の中心周波数の測定にはFFTアナライザ（小野測器CF-500）を用いた。

円柱の半径 r に対するスペックル速度 V の測定結果を図 6 - 1 3 に示す。本実験においては、 3.49 rad/sec で回転するテーブルの上に種々の半径を持つ円柱を置き、被測定物体とした。又、円柱の回転軸からスペックル移動の検出位置までの距離 k_2 を 165 mm に設定し、回転軸から照射レーザ光のビームウェスト位置までの距離 k_1 を種々の値に選んである。実験値は理論値とよい一致を示しており、スペックル速度から半径を求められることがわかる。

スペックル速度は光ファイバ列空間フィルタの出力信号の中心周波数から求ま

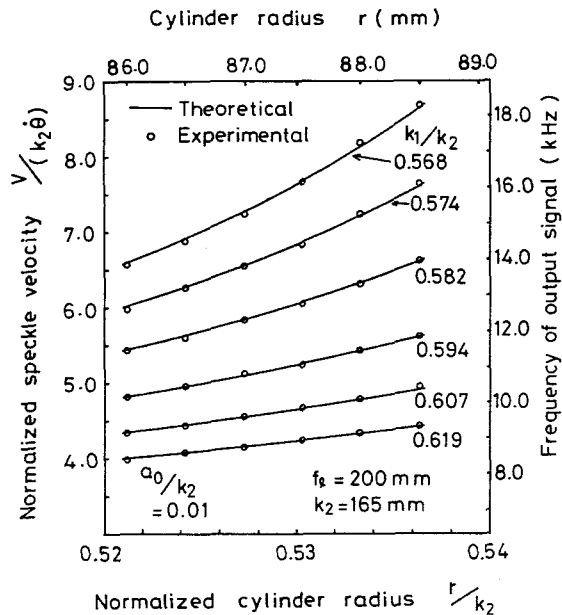


図6-13 円柱の半径 r に対するスペックル速度 V

り，出力信号の中心周波数は，式(2-16)で示したように光ファイバ列空間フィルタの選択度 Q を用いて， $1/(2Q)$ の精度で測定される。本構成においては， k_1 が小さいとき， 0.5 mm の半径の変化に対して 1 kHz 以上の周波数の変化が得られた。又，本測定系においては，出力信号の中心周波数をそのスペクトルの広がり半値幅の $1/5$ 以下の誤差で測定できた。従って，本測定系における Q を等価的に $Q \geq 56$ と考えると，中心周波数が 17 kHz であるとき，周波数の測定精度は 150 Hz となり，半径の測定精度は 0.075 mm 以上となる。より高精度の計測は，より小さい a_0 を持つ照射レーザ光を用い，出力信号の周波数をより正確に測定することにより可能になる。又，照射レーザ光のビームウエスト位置が円柱表面に近いとき，半径の変化に対して大きいスペックル速度の変化，すなわち，大きい周波数変化が得られる。従って，半径の変化に追従して投受光系を移動させることにより，広範囲，高精度の計測が可能になる。

§ 6-7 結 言

本章では、円柱の回転によるスペックルパターンの移動を検出する構成の回転角センサについて述べた。

まず、円柱表面から生じるスペックルパターンの光強度分布の移動から構成パラメータによるスペックルの移動特性を明らかにした。

次に、これを用いて高分解能、高精度で安定な回転角センサを構成するための構成パラメータを明らかにし、実験により本方式の有用性を確認した。そして、本方式によれば、容易に1回転当り 10^6 分割以上の高分解能を持つ回転角センサを構成できることを示した。

さらに、スペックルパターンの移動速度を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出することによる本センサの回転体半径の非接触計測への応用についても述べた。構成パラメータによる検出特性を明らかにし、実験により本方法の有用性を確認した。本実験においては、半径測定の精度は0.075 mmであったが、光ファイバ列空間フィルタからの出力信号の中心周波数をより正確に測定することにより、又、より集光した照射レーザ光を用いることにより、より高い精度で円柱半径の測定が可能となる。

第7章 配列光ファイバを用いたエッジセンサ^{(90),(91)}

§ 7-1 緒 言

本章では、光ファイバを端面が中心とその周囲に複数個とりかこむ形に配列し、各光ファイバ出力に重み付けした後、差動出力を得る構成の配列光ファイバを用いたエッジセンサについて述べる。

まず、本センサのエッジに対する出力信号特性および検出特性を明らかにする。そして次に、本センサの有用性を確認した実験結果について述べる。

§ 7-2 構成と検出特性

物体のエッジ検出のための光ファイバの配列を図7-1に示す。直径 a の光ファイバを端面が中心とその周囲に中心からの距離 b で N 個とりかこむ形に配列し、中心の光ファイバ出力に N 倍の重みを付け、周囲の光ファイバ出力の総和との差の出力を得る構成である。このとき、均一な光強度分布 I を持つステップ状のエッジの通過に対する出力信号光量 P は、エッジの x 座標を α 、周囲の光ファイバの中心座標を (x_i, y_i) とすると次式で表される。

$$\begin{aligned} P(\alpha) = & \frac{I a^2}{4} \left[Nu \left(\alpha + \frac{a}{2} \right) \left\{ u \left(-\alpha + \frac{a}{2} \right) \left(\sin^{-1} \frac{2\alpha}{a} \right. \right. \right. \\ & + \frac{2\alpha}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{2\alpha}{a} \right)^2} - \frac{\pi}{2} \Big) + \pi \Big\} - \sum_{i=1}^N u \left(\alpha - x_i \right. \\ & + \frac{a}{2} \Big) \left\{ u \left(-\alpha + x_i + \frac{a}{2} \right) \left(\sin^{-1} D_i(\alpha) \right. \right. \\ & \left. \left. + D_i(\alpha) \sqrt{1 - D_i^2(\alpha)} - \frac{\pi}{2} \right) + \pi \right\} \Big] \quad (7-1) \end{aligned}$$

但し、

$$D_i(\alpha) = 2(\alpha - x_i) / a \quad (7-2)$$

$$u(\alpha - c) = \begin{cases} 1; & \alpha \geq c \\ 0; & \alpha < c \end{cases} \quad (7-3)$$

である。

$N = 6$ で等分割に周囲の光ファイバ端面を配列したときの出力信号を図 7-2 に示す。ここで、 θ は出力信号が最大となるときを基準とした配列光ファイバのエッジに対する配置角を表す。図 7-2 からわかるように、出力信号は物体のエッジが中心の光ファイバの中心にきたときに零となる。従って、これを検出することによりエッジを検出することができる。

本センサにおいては、出力信号が零を横切るときの傾きが大きい程、エッジの検出感度は高くなる。 $N = 2, 4, 6$ で等分割に周囲の光ファイバ端面を配列したときのエッジに対する配列光ファイバの配置角 θ とこの傾きの関係を図 7-3 に示す。これより、周囲に多くの光ファイバを配列する程、検出感度は高くなり、又、配列光ファイバの配置角によって検出感度に変化する特性となることがわかる。

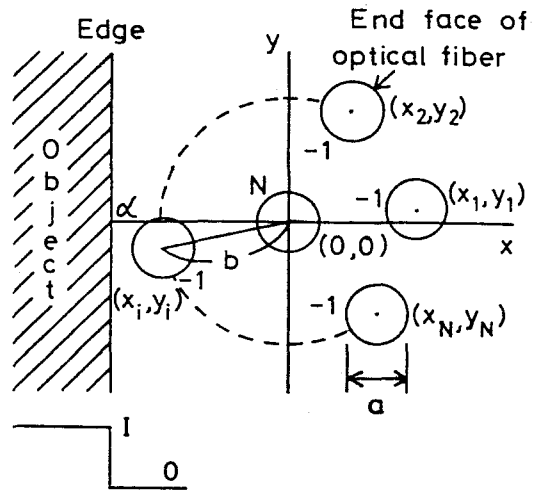


図 7-1 エッジ検出のための光ファイバの配列

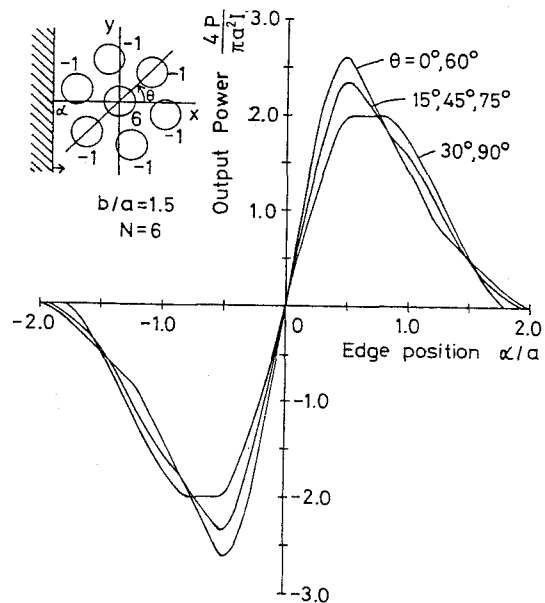


図 7-2 エッジの位置 α に対する出力信号光量 P

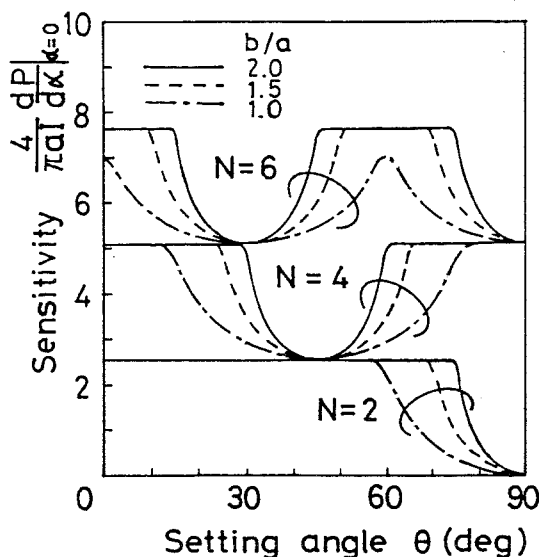


図7-3 配列光ファイバの配置角 θ に対する検出感度 $dP/d\alpha \big|_{\alpha=0}$

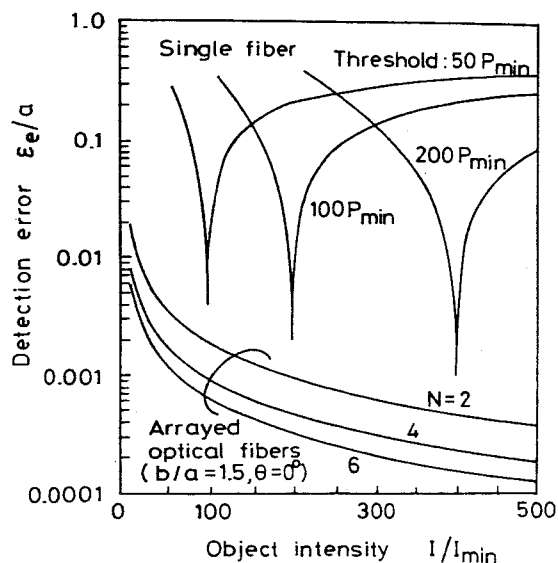


図7-4 物体の光強度 I に対するエッジの検出誤差 ϵ_e

次に、対象物体の光強度 I の変化に対するエッジの検出精度を考えよう。今、検出可能な物体の最小光強度を $I_{\min}$ とする。すなわち、1本の光ファイバで受ける検出可能光量変化を $P_{\min} (= \pi a^2 I_{\min} / 4)$ とする。このとき、出力信号が零を横切る傾きから求めた検出誤差 ϵ_e の物体の光強度 I に対する変化を図7-4に示す。図7-4には、1本の光ファイバ出力から閾値を固定してエッジを検出する場合の検出誤差も示した。図7-4から、配列光ファイバを用いると1本の光ファイバでエッジを検出するよりも、格段に高い精度で物体のエッジを検出でき、物体の光強度の変化に対しても、安定した精度でエッジの検出が可能であることがわかる。

§7-3 実験結果

配列光ファイバを用いたエッジ検出の実験構成を図7-5に示す。本実験においては、配列光ファイバとして、コア径 $100 \mu\text{m}$ 、クラッド径 $150 \mu\text{m}$ のステップインデックス形光ファイバ端面を中心とその周囲に中心からの距離 150

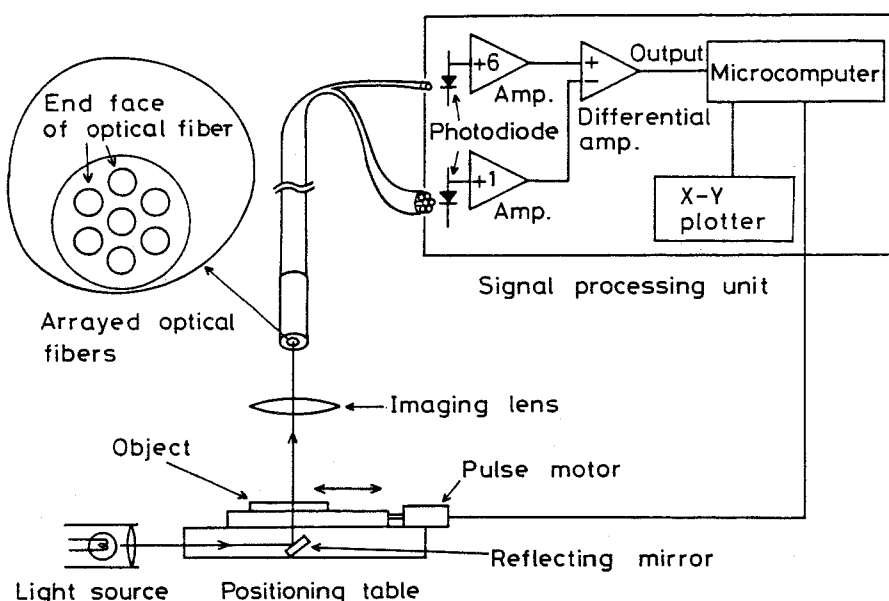


図7-5 配列光ファイバを用いたエッジ検出の実験構成図

μm で等間隔に 6 本配列したものを用いた。又、対象物体には金属板を等間隔に並べて構成されたスリット列を用い、これを $0.2\mu\text{m}$ 単位でマイクロコンピュータ制御により移動する微動テーブルの上に載せて移動させた。そして、スリット列に対しては透過形の照明を行い、スリット列端面の像を焦点距離 52mm のレンズを用いて倍率 3.5 倍で配列光ファイバ端面上に結像した。光ファイバに入射した光量を中心の光ファイバ出力と周囲の光ファイバ出力に分け、それぞれを光電変換した後、6 倍の重み付けされた中心の光ファイバ出力と周囲の光ファイバ出力の総和の差を増幅して得られる出力信号をマイクロコンピュータに取り込み、信号処理を行った。

スリット列で構成される対象物体を移動させたときに得られる出力信号例を図 7-6 に示す。出力信号は物体のエッジが配列光ファイバの中心を横切るときに零を横切る特性となっている。従って、出力信号が零を横切る位置を検出することにより物体のエッジを検出できることがわかる。

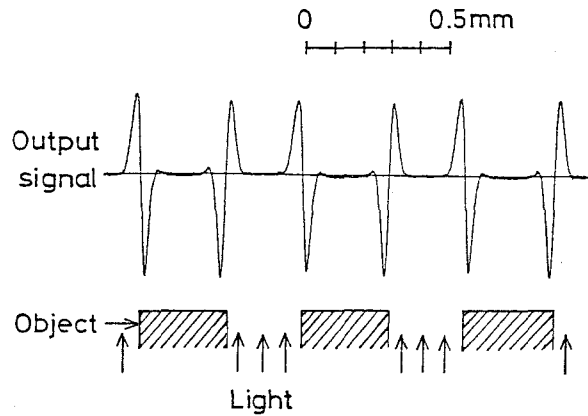


図 7-6 出力信号例

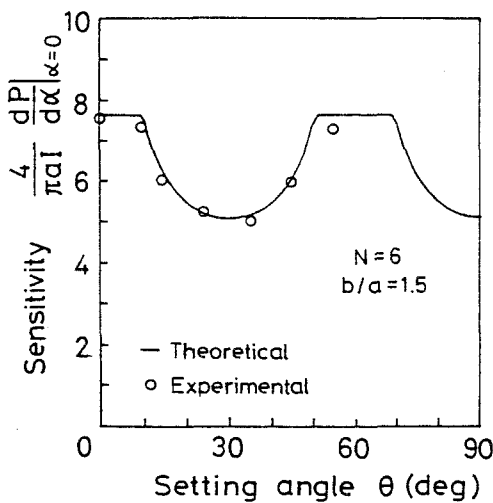


図 7-7 配列光ファイバの配置角に対する検出感度

出力信号が零を横切る傾きが大きければ大きい程、エッジの検出感度は高くなる。配列光ファイバの配置角に対するこの傾きの測定結果を図 7-7 に示す。実験値は理論値とよい一致を示しており、検出感度は配列光ファイバの配置角によって変化することがわかる。

又、本センサを用いて幅 1 mm に設定されたスリットの間隔を測定した。その結果、測定値は 995 μm ，くり返し誤差は 1 μm 以内であった。測定誤差の原因には、光ファイバ端面の透過率の不均一性、照明光の強度むら、焦点はずれ等によりエッジが完全にステップ状の明暗

分布になっていないこと等が考えられる。しかし、現状においても 5 μm 以内の誤差で間隔を求めることができた。誤差原因に対する対策を講じることにより、さらに高い精度でエッジを検出することが可能になると考えられる。

§ 7-4 結 言

本章では，光ファイバを端面が中心とその周囲に複数個とりかこむ形に配列し，各光ファイバ出力に重み付けした後，差動出力を得る構成のエッジセンサについて述べた。

構成パラメータによる出力信号特性を求め，これから光ファイバの配列数，配置角に対する本センサの検出感度および検出精度を明らかにした。そして，本センサを用いると，1本の光ファイバ出力からエッジを検出するよりも格段に高い精度でエッジを検出でき，又，物体の光強度の変化に対しても安定した精度でエッジを検出できることを示した。

又，中心の光ファイバの周囲に6本の光ファイバを配列した配列光ファイバを用いて行った実験においては， $5\text{ }\mu\text{m}$ 以上の精度で物体のエッジを検出でき，本センサの有用性を確認することができた。

第 8 章 結 論

本章では、本研究で得られた成果を要約して述べ、今後に残された課題を指摘して結論とする。

本研究で得られた成果を要約すると次のようになる。

1. 光ファイバを用いて操作性並びに耐環境性に優れた速度計測用の光ファイバ列空間フィルタを構成できることが示された。すなわち，
 - (1) 光ファイバ端面を直線状に等間隔に配列し，その1つおきの光ファイバ出力の総和の差をとることにより，速度計測用の差動構成の光ファイバ列空間フィルタを構成できることが示された。
 - (2) 出力信号の選択度の計算および実験により，光ファイバ列空間フィルタの速度計測用の空間フィルタとしての有用性が確認された。
 - (3) 横ぶれを有する物体速度の計測には，球面レンズと円柱レンズで構成される結像系が有効であることが示された。
 - (4) 円周速度測定への応用に際しては，最高の測定精度を得るための最適配列数が明らかにされた。
2. 光ファイバ列空間フィルタを用いて2次元イメージ速度センサを構成できることが示された。すなわち，
 - (1) 光ファイバ端面を直線状に等間隔に配列した光ファイバ列を2組直角に配置した構成の光ファイバ列空間フィルタに，球面レンズと円柱レンズで構成される結像系をつけることにより，物体速度の大きさと方向を計測する2次元イメージ速度センサを構成できることが示された。
 - (2) 結像系を含む光ファイバ列空間フィルタの等価空間フィルタが求められ，これにより必要とする測定精度を得るための構成パラメータが明らかにされた。

3. 光ファイバを用いてレーザ光をガイドし、物体から反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出することにより、物体距離に依存しないスペックル速度センサを簡便に構成できることが示された。
4. 光ファイバ列空間フィルタを用いて距離センサを構成できることが示された。すなわち、
 - (1) 投受光系に光ファイバを用いてスペックルパターンの移動を検出する構成において、照射レーザ光のビームウエスト位置とスペックルパターン検出用の光ファイバ列空間フィルタを間隔をおいて配置することにより、移動物体までの距離を計測するセンサを構成できることが示された。
 - (2) レーザ光のガイドに光ファイバを用い、物体から反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動を異なった位置に配置された2組の光ファイバ列空間フィルタを用いて検出することにより、移動物体までの距離と物体速度を計測する距離・速度センサを構成できることが示された。
 - (3) 光ファイバ端面を格子状に配列した光ファイバ列空間フィルタを用いて結像系の焦点はずれ量を検出することにより、物体までの距離を計測するセンサを構成できることが示された。
5. 円柱表面から反射されたレーザ光が作るスペックルパターンの移動を検出することにより、高分解能を持つ回転角センサおよび回転体半径の非接触計測用センサを構成できることが示された。すなわち、
 - (1) 構成パラメータによる円柱表面の変位に対するスペックルの移動特性が導かれ、これにより、高分解能、高精度で安定な回転角センサを構成するための構成パラメータが明らかにされた。
 - (2) レーザ光を円柱表面に照射し、スペックルパターンの移動速度を光ファイバ列空間フィルタを用いて検出することにより、回転体半径の非接触計測が

可能であることが示された。

6. 光ファイバを端面が中心とその周囲に複数個とりかこむ形に配列し、各光ファイバ出力に重み付けした後、差動出力を得る構成の配列光ファイバは、高精度で、かつ物体の光強度の変化に対しても安定した精度で物体のエッジを検出できることが示された。

今後に残された課題として次のことがあげられる。

- (1) 本研究では、光ファイバ列空間フィルタから得られる狭帯域不規則信号の中心周波数の測定に1回のフーリエ変換時間が80 msecのFFTアナライザを用い、256回のフーリエ変換の平均スペクトル分布から中心周波数を測定した。従って、約20秒の応答時間を要した。

しかし、より高速のフーリエ変換器を用い、数回のフーリエ変換からコンピュータ処理で中心周波数を測定する方式により、応答時間は0.1 sec程度まで改善可能と考えられる。

このため、狭帯域不規則信号の中心周波数を精度よく高速に測定できる周波数測定装置を開発する。

- (2) 光ファイバ列方向の移動の向きをも判別できる光ファイバ列空間フィルタを開発し、速度センサおよび回転角センサに適用する。
- (3) 本論文で述べたセンサを実際に産業用ロボット等に適用し、光応用計測制御システムを構成する。

謝 辞

本論文をまとめるに際して、懇切なる御指導，御鞭撻を賜った大阪大学工学部電子工学科小山次郎教授に深甚なる感謝の意を表します。また，適切なる御助言，御指導を賜った大阪大学工学部電子ビーム研究施設裏克己教授ならびに大阪大学工学部応用物理学科南茂夫教授に深甚なる感謝の意を表します。

さらに本研究に関して，適切なる御助言，御教示を賜った大阪大学工学部電子工学科西原浩教授，寺田浩詔教授，児玉慎三教授，大阪大学工学部電子ビーム研究施設塙輝雄教授，大阪大学産業科学研究所中村勝吾教授ならびに角所収教授に深謝の意を表します。

筆者が大阪大学に在学中から，つねづね御指導，御教示をいただいている大阪大学松尾幸人名誉教授，大阪大学産業科学研究所張吉夫助教授に深謝の意を表します。

また，本研究を行う機会を与えられ，御激励，御鞭撻をいただいた兵庫県立工業試験場柏原太郎前場長，岸本和一郎参事，吉山裕二機械電子部長，沖田耕三機械電子部次長ならびに関係各位に心から感謝いたします。

本研究の各過程において，有益なる御討論，御助言をいただいた大阪大学工学部春名正光博士，栖原敏明博士，兵庫県立工業試験場北川洋一氏ならびに関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 桜井, 鈴木: “光ファイバのシステム計測・制御への応用とその将来”, システムと制御, Vol. 24, No. 1, pp. 2 - 5 (1980).
- (2) 中原, 枝広, 稲垣: “光ファイバの低損失化”, 応用物理, Vol. 50, No. 10, pp. 1006 - 1020 (1981).
- (3) 松村: “提案が相次ぐ光ファイバ利用センサ”, 日経エレクトロニクス, 1981年7月6日号, No. 268, pp. 154 - 189 (1981).
- (4) T.G.Giallorenzi, J.A.Bucaro, A.Dandridge, G.H.Sigel, Jr., J.H.Cole, S.C.Rashleigh and R.G.Priest: “Optical fiber sensor technology”, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE - 18, No. 4, pp. 626 - 665 (1982).
- (5) 久間, 布下: “光ファイバ応用センサ”, 電気学会雑誌, Vol. 102, No. 5, pp. 380 - 383 (1982).
- (6) 布下, 久間, 田井: “光ファイバ応用レーザー計測”, レーザー研究, Vol. 11, No. 4, pp. 271 - 286 (1983).
- (7) 林: “光ファイバ応用センサ”, レーザー学会第81回研究会(レーザー研究, Vol. 10, No. 3, p. 357) (1982).
- (8) K.kyuma, S.Tai, M.Nunoshita, T.Takioka and Y.Ida: “Fiber optic measuring system for electric current by using a magneto optic sensor”, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE - 18, No. 10, pp. 1619 - 1623 (1982).
- (9) K.Kyuma, S.Tai, M.Nunoshita, N.Mikami and Y.Ida: “Fiber-optic current and voltage sensors using a $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ single crystal”, *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-1, No. 1, pp. 93 - 97 (1983).

- (10) Y.Hamasaki, H.Gotoh, M.Katoh, S.Takeuchi : " OPSEF : An optical sensor for measurement of high electric field intensity ", *Electron. Lett.*, Vol.16, No 11, pp. 406-407 (1980).
- (11) K.kyuma, S.Tai, T.Sawada and M.Nunoshita : " Fiber-optic instrument for temperature measurement ", *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-18, No 4, pp. 676-679 (1982).
- (12) 高岡, 平野, 志村, 日野田 : " 赤外励起蛍光体を用いた光ファイバ温度センサ ", センサ技術, Vol. 3, No 13, pp. 72-77 (1983).
- (13) A.J.Intrieri : " The fiber optic thermal monitor - a new approach to temperature measurement and control ", *Heat Treatment of Metals*, 1975.1, pp. 11-14 (1975).
- (14) K.Kyuma, S.Tai, K.Hamanaka and M.Nunoshita : " Laser Doppler velocimeter with a novel optical fiber probe ", *Appl. Opt.*, Vol. 20, No 14, pp. 2424-2427 (1981).
- (15) H.Nishihara, J.Koyama, N.Hoki, F.Kajiya, M.Hironaga and M.Kano : " Optical-fiber laser Doppler velocimeter for high-resolution measurement of pulsatile blood flows ", *Appl. Opt.*, Vol. 21, No 10, pp. 1785-1790 (1982).
- (16) R.O.Cook and C.W.Hamm : " Fiber optic lever displacement transducer ", *Appl. Opt.*, Vol. 19, No 18, pp. 3230-3241 (1979).
- (17) K.Oki, M.Ishida and T.Shirai : " The behaviour of jets and particles near the gas distributor grid in a three-dimensional fluidized bed ", *Proceedings of the 1980 International Fluidization Conference*, New Hampshire, Aug. 1980, J.R.Grace and J.M.Matsen, Eds.

- (Plenum, New York), pp. 421-428 (1980).
- (18) H.Harms and A.Papp: "Magneto-optical current transformer. 3:Measurements", *Appl.Opt.*, Vol.19, No.22, pp.3741-3745(1980).
- (19) G.B.Hocker: "Fiber-optic sensing of pressure and temperature", *Appl.Opt.*, Vol.18, No.9, pp.1445-1448(1979).
- (20) N.Lagakos, W.J.Trott, T.R.Hickman, J.H.Cole and J.A.Bucaro: "Microbend fiber-optic sensor as extended hydrophone", *IEEE J.Quantum Electron.* Vol.QE-18, No.10, pp.1633-1638(1982).
- (21) 保立, 東口, 丹羽: "レーザージャイロ - 光ファイバレーザージャイロの研究動向-", 計測と制御, Vol.20, No.10, pp.937-946(1981).
- (22) H.C.Lefevre, R.A.Bergh and H.J.Shaw: "All-fiber gyroscope with inertial-navigation short-term sensitivity", *Opt.Lett.*, Vol.7, No.9, pp.454-456(1982).
- (23) J.T.Ator: "Image-velocity sensing with parallel-slit reticles", *J.Opt.Soc.Am.* Vol.53, No.12, pp.1416-1422(1963).
- (24) 堤: "イメージ角速度の検出等に関する振幅変調レティクルの応用", 電子通信学会論文誌, Vol.51-C, No.2, pp.66-73(1968).
- (25) 内藤, 狼, 小林: "空間フィルタによる速度計測", 計測と制御, Vol.7, No.11, pp.761-772(1968).
- (26) Y.Itakura, A.Sugimura and S.Tsutsumi: "Amplitude-modulated reticle constructed by a liquide crystal cell array", *Appl.Opt.*, Vol.20, No.16, pp.2819-2826(1981).
- (27) 中山, 山浦, 小林: "非接触2次元速度ベクトル計測用光学的空間フィルタ検出器", 計測自動制御学会論文集, Vol.18, No.6, pp.609-616(1982).

- (28) 三橋, 望月: “イメージセンサを用いた非接触速度測定”, 電子通信学会論文誌, Vol. J 65-C, No. 7, pp. 578-579 (1982).
- (29) 津田川, 堤, 山田: “速度計測用空間フィルタの低域伝達特性の改善法”, 電子通信学会論文誌, Vol. J 64-C, No. 12, pp. 843-850 (1981).
- (30) 柏木, 片岡: “相関を用いる速度計測(1)”, 計測と制御, Vol. 2, No. 1, pp. 41-46 (1963).
- (31) W.W. Seemuller and K.D. Robertson: “A noncontact velocimeter using sensing arrays”, *IEEE Trans. Indust. Electron. Control Instrum.*, Vol. IECI-26, No. 2, pp. 75-78 (1979).
- (32) 永井, 赤沢, 井戸川: “ITVカメラを用いる相関速度測定”, 電子通信学会論文誌, Vol. J 63-C, No. 8, pp. 515-520 (1980).
- (33) G. Stavis: “Optical Diffraction velocimeter”, *Instrum. Control Syst.*, Vol. 39, pp. 99-102 (1966).
- (34) H. Ogiwara and H. Ukita: “A speckle pattern velocimeter using a periodical differential detector”, *Proc. ICO Conf. Opt. Methods in Sci. and Ind. Meas.*, Tokyo, 1974, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 14, Suppl. 14-1, pp. 307-310 (1975).
- (35) P.N. Pusey: “Photon correlation study of laser speckle produced by a moving rough surface”, *J. Phys. D*, Vol. 9, pp. 1399-1409 (1976).
- (36) S. Komatsu, I. Yamaguchi and H. Saito: “Velocity measurement using structural change of speckle”, *Opt. Commun.*, Vol. 18, No. 3, pp. 314-316 (1976).
- (37) J. Ohtsubo and T. Asakura: “Velocity measurement of a diffuse object by using time-varying speckles”, *Opt. Quantum Electron.*, Vol. 8, pp. 523-529 (1976).
- (38) 稻荷, 高嶋, 北原, 大道: “レーザー・スペックルパターンによる非接触速

- 度計の試作”，計測自動制御学会論文集，Vol. 13, No. 1, pp. 82 - 86 (1977)。
- (39) J. Ohtsubo and T. Asakura : “Differential-type laser speckle velocimeter”, *Optik*, Vol. 52, No. 5, pp. 413 - 420 (1978/79).
- (40) N. Takai, T. Iwai, T. Ushizaka and T. Asakura : “Velocity measurement of the diffuse object based on time differentiated speckle intensity fluctuations”, *Opt. Commun.*, Vol. 30, No. 3, pp. 287 - 292 (1979).
- (41) N. Takai, T. Iwai and T. Asakura : “Real-time velocity measurement for a diffuse object using zero-crossings of laser speckle”, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 70, No. 4, pp. 450 - 455 (1980).
- (42) J. Ohtsubo : “Velocity measurement using the time-space cross-correlation of speckle patterns”, *Opt. Commun.*, Vol. 34, No. 2, pp. 147 - 152 (1980).
- (43) J. H. Churnside and H. T. Yura : “Velocity measurement using laser speckle statistics”, *Appl. Opt.*, Vol. 20, No. 20, pp. 3539 - 3541 (1981).
- (44) 流れの計測懇談会 : “LDVの基礎と応用”，日刊工業新聞社 (1980)。
- (45) R. A. Jarvis : “A laser time-of-flight range scanner for robotic vision”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-5, No. 5, pp. 505 - 512 (1983).
- (46) 岡田 : “光電式近接距離計”，電子通信学会論文誌，Vol. J63-C, No. 10, pp. 700 - 707 (1980)。
- (47) 松田，松山，上田 : “産業用ロボットのアーム先端と物体との間隔一定制御システム”，計測自動制御学会論文集，Vol. 18, No. 5, pp. 514 - 519 (1982)。

- (48) 中川, 大場, 村田: “ 相関法による距離測定 ”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 18, No. 9, pp. 923-928 (1982).
- (49) R.A. Jarvis: “ A perspective on range finding techniques for computer vision ”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-5, No. 2, pp. 122-139 (1983).
- (50) 増田, 佐々, 長谷川: “ 位相情報に注目した光学式近接センサ ”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 17, No. 9, pp. 945-950 (1981).
- (51) 竹村, 堤: “ 光学系の焦点外れ検出のための最適空間フィルタ ”, 電子通信学会論文誌, Vol. J64-C, No. 9, pp. 582-589 (1981).
- (52) 堤: “ 空間フィルタを用いた受動式距離・速度センサ ”, 日本機械学会誌, Vol. 82, No. 731, pp. 1143-1148 (1974).
- (53) M. Giglio, S. Musazzi and U. Perini: “ Distance measurement from a moving object based on speckle velocity detection ”, *Appl. Opt.*, Vol. 20, No. 5, pp. 721-722 (1981).
- (54) 小林: “ 空間フィルタとその応用 [I] [II] ”, 計測と制御, Vol. 19, No. 4, pp. 409-417 (1980); Vol. 19, No. 6, pp. 571-580 (1980).
- (55) 小林, 中山, 山浦, 狼: “ 非接触回転速度計測と集積化された空間フィルタ検出器 ”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 15, No. 1, pp. 89-96 (1979).
- (56) I. Yamaguchi and S. Komatsu: “ Theory and applications of dynamic laser speckles due to in-plane object motion ”, *Opt. Acta*, Vol. 24, No. 7, pp. 705-724 (1977).
- (57) A. Rosenfeld and A.C. Kak 著, 長尾監訳, “ デジタル画像処理 ”, p. 283, 近代科学社 (1978).
- (58) T. Honda, J. Tsujiuchi and S. Ishiguro: “ Image processing

by multiple aperture scanning", *Opt. Acta*, Vol. 21, No. 8, pp. 653-673 (1974).

- (59) 林, 北川: "非接触速度測定のための光ファイバ列空間フィルタ", 昭和56年春季第28回応用物理学関係連合講演会予稿集, 31 p-F-7 (1981).
- (60) 林, 北川: "光ファイバ列イメージ速度センサ", 画像変換装置合同研究会(電子通信学会技術研究報告, ED 81-29) (1981).
- (61) 林, 北川: "光ファイバ列非接触速度センサ", 電子通信学会論文誌, Vol. J 64-C, No. 11, pp. 809-810 (1981).
- (62) A. Hayashi and Y. Kitagawa: "Image velocity sensing using an optical fiber array", *Appl. Opt.* Vol. 21, No. 8, pp. 1394-1399 (1982).
- (63) 林: "光ファイバを用いたイメージ速度センサ", 新しいセンサの開発と応用実例総合技術資料集(経営開発センター), pp. 655-660 (1983).
- (64) 林, 北川: "空間フィルタによる非接触円周速度測定における速度分布の影響", 昭和55年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G 2-15 (1980).
- (65) 林, 北川: "円周速度測定用空間フィルタの最適スリット数", 昭和56年春季第28回応用物理学関係連合講演会予稿集, 31 p-F-8 (1981).
- (66) 林, 北川: "円周速度測定用スリット列空間フィルタの最適スリット数", 電子通信学会論文誌, Vol. J 64-C, No. 9, pp. 599-600 (1981).
- (67) 林, 北川: "光ファイバ列空間フィルタを用いた非接触速度センサ", 昭和56年秋季第42回応用物理学学会学術講演会予稿集, 7 p-J-5 (1981).
- (68) 林, 北川: "光ファイバ列2次元イメージ速度センサ", 昭和57年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G 2-16 (1982).
- (69) 林, 北川: "光ファイバ列を用いた2次元イメージ速度センサ", 電子通信学会論文誌, Vol. J 66-C, No. 10, pp. 717-724 (1983)
(Translated in *Electronics and Communications in*

Japan, Vol. 67, No. 1, pp. 59-67, 1984).

- (70) 林, 北川: “光ファイバ列を用いた二次元イメージ速度計測”, *OHM*, Vol. 71, No. 2, p. 87 (1984).
- (71) A. Yariv 著, 多田, 神谷共訳: “光エレクトロニクスの基礎”, p. 19, 丸善 (1974).
- (72) 林, 北川: “光ファイバを用いたレーザスペckル速度計”, 昭和56年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G 2-8 (1981).
- (73) A. Hayashi and Y. Kitagawa: “Laser speckle velocimeter utilizing optical fibers”, *Opt. Commun.*, Vol. 43, No. 3, pp. 161-163 (1982).
- (74) M. Born and E. Wolf: “*Principles of Optics*”, p. 370, Pergamon (1975).
- (75) A. Yariv 著, 多田, 神谷共訳: “光エレクトロニクスの基礎”, p. 33, 丸善 (1974).
- (76) 林, 北川: “光ファイバレーザスペckル速度計を用いた移動物体の変位測定”, 昭和57年度電子通信学会総合全国大会講演論文集, 904 (1982).
- (77) A. Hayashi and Y. Kitagawa: “Fiber-optic distance sensor based on speckle velocity detection”, *Opt. Commun.*, Vol. 49, No. 2, pp. 91-94 (1984).
- (78) 林, 北川: “光ファイバ列を用いた距離・速度センサ”, 昭和58年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G 2-21 (1983).
- (79) 林, 北川: “距離・速度計測用光ファイバセンサ”, 電子通信学会論文誌, Vol. J 67-C, No. 1, pp. 33-38 (1984).
- (80) 林: “光ファイバ列を用いた距離・速度センサーその特長および用途”, 無人化技術, Vol. 25, No. 6, pp. 47-50 (1984).
- (81) 林: “光ファイバ列を用いた距離・速度センサ”, センサ技術, Vol. 4, No. 8, pp. 49-54 (1984).

- (82) 林, 田口, 北川: “配列光ファイバ空間フィルタを用いた距離センサ”, 昭和57年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G 2 - 15 (1982).
- (83) 林, 田口, 北川: “光ファイバ列空間フィルタを用いた距離センサ”, 電子通信学会論文誌, Vol. J 67 - C, No. 2, pp. 239 - 240 (1984).
- (84) 述内, 村田編集: “光学情報処理”, p. 137, 朝倉書店 (1974).
- (85) 林, 北川: “円柱回転体表面から生じるスペックルの移動特性”, 昭和57年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G 10 - 11 (1982).
- (86) 林, 北川: “スペックル移動検出による円柱の回転角測定”, 昭和58年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G 2 - 20 (1983).
- (87) A. Hayashi and Y. Kitagawa: “High-resolution rotation-angle measurement of a cylinder using speckle displacement detection”, *Appl. Opt.*, Vol. 22, No. 22, pp. 3520 - 3525 (1983).
- (88) 林, 北川: “動的レーザスペックルを用いた回転体半径の非接触測定”, 昭和56年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G 2 - 7 (1981).
- (89) 林, 北川: “スペックル速度検出による回転体半径の非接触測定”, 昭和57年度電子通信学会総合全国大会講演論文集, 907 (1982).
- (90) 林, 北川, 松本, 吉山: “配列光ファイバエッジセンサの検出特性”, 昭和58年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G 2 - 22 (1983).
- (91) 林, 北川, 松本, 吉山: “配列光ファイバを用いたエッジセンサの検出特性”, 電子通信学会論文誌, Vol. J - 67 C, No. 4, pp. 426 - 427 (1984).

関 連 発 表 論 文

(1) 論 文

- (1) 林, 北川: “円周速度測定用スリット列空間フィルタの最適スリット数”, 電子通信学会論文誌, Vol. J 64-C, No 9, pp. 599-560 (1981).
- (2) 林, 北川: “光ファイバ列非接触速度センサ”, 電子通信学会論文誌, Vol. J 64-C, No 11, pp. 809-810 (1981).
- (3) A. Hayashi and Y. Kitagawa: “Image velocity sensing using an optical fiber array”, *Appl. Opt.* Vol. 21, No 8, pp. 1394-1399 (1982).
- (4) A. Hayashi and Y. Kitagawa: “Laser speckle velocimeter utilizing optical fibers”, *Opt. Commun.*, Vol. 43, No 3, pp. 161-163 (1982).
- (5) 林, 北川: “光ファイバ列を用いた2次元イメージ速度センサ”, 電子通信学会論文誌, Vol. J 66-C, No 10, pp. 717-724 (1983)
(Translated in *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 67, No 1, pp. 59-67, 1984).
- (6) A. Hayashi and Y. Kitagawa: “High-resolution rotation-angle measurement of a cylinder using speckle displacement detection”, *Appl. Opt.*, Vol. 22, No 22, pp. 3520-3525 (1983).
- (7) 林, 北川: “距離・速度計測用光ファイバセンサ”, 電子通信学会論文誌, Vol. J 67-C, No 1, pp. 33-38 (1984).
- (8) A. Hayashi and Y. Kitagawa: “Fiber-optic distance sensor based on speckle velocity detection”, *Opt. Commun.*, Vol. 49, No 2, pp. 91-94 (1984).

- (9) 林，田口，北川：“光ファイバ列空間フィルタを用いた距離センサ”，電子通信学会論文誌，Vol. J 67-C，No. 2，pp. 239-240（1984）。
- (10) 林，北川，松本，吉山：“配列光ファイバを用いたエッジセンサの検出特性”，電子通信学会論文誌，Vol. J 67-C，No. 4，pp. 426-427（1984）。

〔2〕 資 料

- (1) 林：“光ファイバを用いたイメージ速度センサ”，新しいセンサの開発と応用実例総合技術資料集（経営開発センター），pp. 655-660（1983）。
- (2) 林，北川：“光ファイバ列を用いた二次元イメージ速度計測”，OHM，Vol. 71，No. 2，p. 87（1984）。
- (3) 林：“光ファイバ列を用いた距離・速度センサーその特長および用途”，無人化技術，Vol. 25，No. 6，pp. 47-50（1984）。
- (4) 林：“光ファイバ列を用いた距離・速度センサ”，センサ技術，Vol. 4，No. 8，pp. 49-54（1984）。

〔3〕 学会研究会

- (1) 林，北川：“光ファイバ列イメージ速度センサ”，画像変換装置合同研究会（電子通信学会技術研究報告，ED 81-29）（1981）。
- (2) 林：“光ファイバ応用センサ”，レーザー学会第81回研究会（レーザー研究，Vol. 10，No. 3，p. 357）（1982）。

〔4〕 学会講演会

- (1) 林，北川：“空間フィルタによる非接触円周速度測定における速度分布の影響”，昭和55年電気関係学会関西支部連合大会論文集，G 2-15（1980）。
- (2) 林，北川：“非接触速度測定のための光ファイバ列空間フィルタ”，昭和

56年春季第28回応用物理学関係連合講演会予稿集, 31p-F-7
(1981).

- (3) 林, 北川: “円周速度測定用空間フィルタの最適スリット数”, 昭和56年春季第28回応用物理学関係連合講演会予稿集, 31p-F-8(1981).
- (4) 林, 北川: “光ファイバ列空間フィルタを用いた非接触速度センサ”, 昭和56年秋季第42回応用物理学学会学術講演会予稿集, 7p-J-5(1981).
- (5) 林, 北川: “動的レーザスペckルを用いた回転体半径の非接触測定”, 昭和56年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G2-7(1981).
- (6) 林, 北川: “光ファイバを用いたレーザスペckル速度計”, 昭和56年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G2-8(1981).
- (7) 林, 北川: “光ファイバレーザスペckル速度計を用いた移動物体の変位測定”, 昭和57年度電子通信学会総合全国大会講演論文集, 904
(1982).
- (8) 林, 北川: “スペckル速度検出による回転体半径の非接触測定”, 昭和57年度電子通信学会総合全国大会講演論文集, 907(1982).
- (9) 林, 田口, 北川: “配列光ファイバ空間フィルタを用いた距離センサ”, 昭和57年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G2-15(1982).
- (10) 林, 北川: “光ファイバ列2次元イメージ速度センサ”, 昭和57年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G2-16(1982).
- (11) 林, 北川: “円柱回転体表面から生じるスペckルの移動特性”, 昭和57年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G10-11(1982).
- (12) 林, 北川: “スペckル移動検出による円柱の回転角測定”, 昭和58年電気関係学会関西支部連合大会, G2-20(1983).
- (13) 林, 北川: “光ファイバ列を用いた距離・速度センサ”, 昭和58年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G2-21(1983).
- (14) 林, 北川, 松本, 吉山: “配列光ファイバエッジセンサの検出特性”, 昭和58年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G2-22(1983).