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[†]

小 林 彬*・中山 鳩 夫*・山 浦 富 雄*・狼 嘉 彰**

Non-Contact Rotational Speed Measurement and Integrated Spatial Filter Detector

Akira KOBAYASHI*, MIZUO NAKAYAMA*, Tomio YAMAURA* and Yoshiaki OHKAMI**

A new method is described for non-contact rotational speed measurement. It utilizes the natural irregularity of the surface pattern on a rotating object. The method employs an optical system and a spatial filter. The spatial filter is a radial array of photo-sensors having equal angular pitches. With this arrangement of photo-sensors, the filter acts as a narrow-band-pass spatial filter which generates a narrow-band random signal whose center-frequency is proportional to the rotational speed.

First, the spatial frequency characteristics of the spatial filter are analytically examined in the polar co-ordinate system.

Next, a practical configuration of the measuring system is presented. In the measuring system, the spatial filter is realized by using a silicon solar cell of which the surface is etched to form the specially designed pattern. The experimental results showed that our method gave excellent characteristics in terms of accuracy, resolution and measuring range.

Furthermore, the effects of measuring conditions are examined and evaluated, among which the effect of nonalignment between the center axis of spatial filter and the center axis of the projected image of the rotating object is not negligible. It turns out that this off-center effect can be reduced if the parameters of the spatial filter pattern and the method of the center-frequency measurement are properly selected.

1. ま え が き

対象物体に規則的な目印などを付けず、物体が本来備えている不規則なむら¹⁾を光学的に観測し、かつ空間的处理を施して対象の回転速度を非接触的に計測する新しい方法を述べる。不規則なむら¹⁾を利用する非接触回転速度計測として、得られる不規則信号が1回転ごとの周期をもつことに着目し、時系列の周波数分析から回転速度を計測する方式がすでに開発されているが¹⁾、本方式はこれとは、空間領域で信号処理を施す点において、本質的に異なっている。

すなわち、直線速度計測において実現されている空間フィルタ法²⁾を極座標系に変換適用するもので、一定角度ごとに放射状に配列された光検出素子が、一種の狭帯域通過空間フィルタとして作用することを利用する。この結果回転速度に比例した中心周波数をもつ狭帯域不規則信号が得られる。このため計測系は直線速度計測の場合と多くの共通点をもつが、光学系の倍率の影響を直接受けないなど、極座標系に由来する新しい側面があり、回転速度計測として二、三の利点を有する。

本研究では、太陽電池のパターンを工夫することにより、空間フィルタと検出器の機能を同時に実現する一体化構造の素子を開発し、計測系の集積化を図った。この結果、精度・分解能・測定範囲の点で優れた計測系が実現され、良好な実験結果が得られた。また測定に影響を及ぼす種々の要因について検討したが、偏心と呼ぶ状態は空間フィルタの特性上、測定操作上影響が大きく重要な意味をもつもので、解析的検討も加え設計論的資料を与えた。

2. 空間フィルタを用いる回転速度計測の原理

空間フィルタの存在する平面上に極座標系 (r, θ) を

[†] 第19回自動制御連合講演会で発表(昭51・11)

* 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** 航空宇宙技術研究所 調布市深大寺町 1880

* Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo

** National Aerospace Laboratory, Chofu

(Received January 10, 1978)

設け、空間フィルタの感度分布に対応する空間的荷重関数を $h(r, \theta)$ とする。また回転物体をその回転軸方向から光学的に観測し、空間フィルタ面上に投影した像（回転物体面上の光学的むらに対応）の光強度分布を $f(r, \theta)$ とする。このときつぎの関数値に比例した出力信号が得られる場合を考える。

$$g(\theta_0) = \int_0^\infty dr \int_0^{2\pi} r d\theta f(r, \theta + \theta_0) h(r, \theta) \quad (1)$$

ここで θ_0 は回転像の空間フィルタに対する相対角変位を表わし、一定角速度 ω で回転していれば

$$\theta_0 = \omega t + \theta_c \quad (\theta_c: \text{初期相対角変位}) \quad (2)$$

で与えられる。なお $f(r, \theta)$ は便宜上その θ の範囲を広く自由に考え

$$f(r, \theta) = f(r, \theta + 2\pi) \quad (3)$$

の性質があるものとする。

$f(r, \theta)$ は一般に2次元不規則パターンであるので、出力の性質をそのパワースペクトル密度の観点から考察する。直線速度計測の場合と同様な解析²⁾を実行すれば、 θ 方向の空間領域でのパワースペクトル密度 $\Psi(\nu)$ は、

$$\Psi(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 d\mu \quad (4)$$

となる。ここで $\Phi(\mu, \nu)$ は $f(r, \theta)$ の極座標系におけるパワースペクトル密度であり、 $H(\mu, \nu)$ は $h(r, \theta)$ の極座標系2次元フーリエ変換であって、

$$H(\mu, \nu) = \int_0^\infty dr \int_0^{2\pi} r d\theta h(r, \theta) \exp \{-j2\pi(\mu r + \nu \theta)\} \quad (5)$$

で与えられる。なお μ, ν それぞれ r 方向、 θ 方向の空間周波数を表わす。

また得られる出力信号の時間領域でのパワースペクトル密度 $\Omega(f)$ は、

$$\Omega(f) = \frac{1}{\omega} \Psi\left(\frac{f}{\omega}\right) \quad (6)$$

と求まる。 $|H(\mu, \nu)|^2$ が $\nu = \nu_0$ のみを選択する関数であれば、 $\Phi(\mu, \nu_0) = 0$ でないかぎり $\Psi(\nu)$ も $\nu = \nu_0$ に急峻なスペクトルをもつから、 $\Omega(f)$ も $f = \omega \nu_0$ に際立ったスペクトルをもつことがわかる。したがって、 ω に比例した周波数をもつ出力信号が得られ、周波数測定から回転速度計測が可能となる。これが空間フィルタを用いた回転速度計測の原理である。なお(3)式の性質より、等価的に $\Phi(\mu, \nu)$ が ν について離散スペクトルとなるため、 $|H(\mu, \nu)|^2$ に要求される狭帯域通過特性は直線速度計測の場合に比較して若干軽減される。

3. 回転速度計測用空間フィルタの構成とその特性

2.でも述べたように、 $|H(\mu, \nu)|^2$ が特定の ν に急峻な選択特性をもつよう $h(r, \theta)$ の関数形を決める必要がある。そこで直線速度計測の場合のスリット列²⁾を極座標系に対応させ、 r 方向にある幅をもちかつ θ 方向に周期的構造をもつ、つぎのような関数形を考えた。

$$\left. \begin{aligned} h(r, \theta) &= h_1(r) \cdot h_2(\theta) \\ h_1(r) &= \begin{cases} 1; & a \leq r \leq b \\ 0; & 0 \leq r < a, r > b \end{cases} \\ h_2(\theta) &= h_2(\theta + p) \\ Np &= 2\pi, N: \text{正整数} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

すなわち、空間フィルタは1回転が N 等分され、角度 p の周期をもつ放射状パターンで、内径 a 、外径 b の形状をしている。(5)式を考慮し $|H(\mu, \nu)|^2$ を計算すると次式が得られる。

$$|H(\mu, \nu)|^2 = 4\pi^2 |H_r(\mu)|^2 \cdot |H_\theta(\nu)|^2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} |H_r(\mu)|^2 &= \frac{4ab \sin^2 \pi \mu (b-a)}{(2\pi \mu)^2} \\ &\quad + \frac{\{2\pi \mu (b-a) - \sin 2\pi \mu (b-a)\}^2}{(2\pi \mu)^4} \\ &\quad + \frac{4 \sin^4 \pi \mu (b-a)}{(2\pi \mu)^4} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} |H_\theta(\nu)|^2 &= \left(\frac{\sin N \nu p}{N \sin \nu p} \right)^2 \left| \int_0^p \frac{h_2(\theta)}{p} \exp \{-j2\pi \nu \theta\} d\theta \right|^2 \\ &= \left(\frac{\sin N \nu p}{N \sin \nu p} \right)^2 \left| \int_0^p \exp \{-j2\pi \nu \theta\} d\theta \right|^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Fig. 1 には $|H_r(\mu)|^2$ の変化の様子を、 $\xi = \pi \mu (b-a)$ を横軸に、 $\alpha = a/b$ をパラメータにして、 $\mu = 0$ のときの値を1に規格化して示した。Fig. 1 からわかるように $|H_r(\mu)|^2$ は μ につき低域通過特性を有している。このため $(b-a)$ がある程度以上大きいときは、 $\mu = 0$ の付近で $\Phi(\mu, \nu)$ が μ に関しほとんど変化しないと仮定すると、(4)式の積分が近似的に実行でき、 $\Psi(\nu)$ は

$$\Psi(\nu) \doteq 4\pi^2 \frac{b^3 - a^3}{3} \Phi(0, \nu) |H_\theta(\nu)|^2 \quad (11)$$

Fig. 1 Spatial frequency characteristics of $|H_r(\mu)|^2$

Fig. 2 (1) Function $h_2(\theta)$ and (2) Spatial frequency characteristics of $|H_\theta(v)|^2$

で与えられる。この結果、出力の空間周波数特性は、 $|H_\theta(v)|^2$ に代表されることがわかるが、この点(10)式が示す特性については、すでに文献(2)に詳しく検討されているとおりであり、ここでは説明を割愛する。

なお実際に作成された空間フィルタは、 $N=60$ であり、 $h_2(\theta)$ の 1 周期分の関数形は Fig. 2(1)に示すもので次式で表わせる。

$$h_2(\theta) = \begin{cases} 1, 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{180} \cdot \frac{5}{8}, \frac{\pi}{180} \leq \theta \leq \frac{\pi}{180} \cdot \left(1 + \frac{5}{8}\right) \\ -1, \frac{\pi}{180} \cdot 3 \leq \theta \leq \frac{\pi}{180} \left(3 + \frac{5}{8}\right), \frac{\pi}{180} \cdot 4 \leq \theta \leq \frac{\pi}{180} \left(4 + \frac{5}{8}\right) \\ 0, \text{残りの区間} \end{cases} \quad (12)$$

このとき $|H_\theta(v)|^2$ はつぎのように求まる。

$$|H_\theta(v)|^2 = \left(\frac{\sin 60 \cdot \pi \nu p}{60 \cdot \sin \pi \nu p} \right)^2 \times \left(\frac{2 \sin 3\pi \nu q \cdot \cos \pi \nu q \cdot \sin \pi \nu \Delta}{3\pi \nu q} \right)^2 \quad (13)$$

ただし $p = \pi/30$, $q = p/6 = \pi/180$, $\Delta = 5 \cdot q/8$

Fig. 2(2)に $|H_\theta(v)|^2$ の特性を示したが、 $\nu = 1/p$ にほぼ単峰の狭帯域通過特性が実現されていることがわかる。

4. 偏心の影響

本論でいう偏心とは、空間フィルタ面上に投影された回転体の像の回転中心が空間フィルタの中心からずれている状態を意味するが、光学系を固定する際、中心合せの精度をどの程度必要とするかの問題に関係する。直線速度計測の場合の横振れの影響²⁾に類似するが、空間フィルタ上を動く像の角速度が偏心に伴って、場所により早く見えたり遅く見えたりするため、

Fig. 3 Polar coordinates and eccentricity

総合的にフィルタ特性の悪化を招き、帯域幅や中心周波数などに影響が現われる。

Fig. 3 のように各座標系を定め、各中心間のずれを l (偏心量と呼ぶ) とすると、 R, θ は r, θ とつぎの関係にある。

$$R(r, \theta) = (r^2 + l^2 + 2rl \cos \theta)^{1/2} \quad (14)$$

$$\Theta(r, \theta) = \sin^{-1} \{ r \sin \theta / R(r, \theta) \} \quad (15)$$

この場合、像の基準動径が Θ_0 の位置にあるとき、瞬時出力 $g_i(\Theta_0)$ は(1)式と少し異なり次式となる。

$$g_i(\Theta_0) = \int_0^\infty dr \int_0^{2\pi} r d\theta f(R(r, \theta), \Theta_0 + \Theta(r, \theta)) h(r, \theta) \quad (16)$$

(ただし、 $\Theta_0 = \omega t + \Theta_0$ また、(4)、(5)式に対応するもの、

$$\Psi_i(v) = \int_{-\infty}^\infty \Phi(\mu, v) |H_i(\mu, v)|^2 d\mu \quad (17)$$

$$H_i(\mu, v) = \int_0^\infty dr \int_0^{2\pi} r d\theta h(r, \theta) \times \exp[-j2\pi \{ \mu R(r, \theta) + \nu \Theta(r, \theta) \}] \quad (18)$$

となる。空間フィルタ単独の特性変化を考察するため、 $\Phi(\mu, v)$ が一定値 k_1 の場合を考える(注1)。ここで(14)、(15)式を考慮して(18)式を (R, Θ) 座標系で表現しなおし、デルタ関数のフーリエ積分表示を利用すれば(17)式は、

$$\Psi_i(v) = k_1 \int_0^\infty dR R^2 \left| \int_0^{2\pi} h\{r(R, \Theta), \Theta(R, \Theta)\} \times \exp(-j2\pi \nu \Theta) d\theta \right|^2 \quad (19)$$

と変形できる。(7)式および $l \ll a, b$ を考慮すると、(19)式は近似的に次式で表わせる(注2)。

(注1) $f(r, \theta)$ について2次元白色雑音のような性質を仮定したことになると考えられる。

(注2) $\sin^{-1}[\sin \theta / (R^2 + l^2 - 2Rl \cos \theta)^{1/2}] \approx \theta + l \sin 2\theta / 2R$ が十分な精度で成立することを、数値的にも計算機で確認した。

Fig. 4 Effect of eccentricity on spatial frequency characteristics

$$\Psi_r(\nu) \doteq k_1 \int_b^a dR R^2 \left| \int_0^{2\pi} h_2 \left(\theta + \frac{l}{2R} \sin 2\theta \right) \times \exp(-j2\pi\nu\theta) d\theta \right|^2 \quad (20)$$

Fig. 4 は $h_2(\theta)$ が (12) 式の場合、(20) 式を数値計算したもので、 a/b が 0.5, 0.8 について l/b をパラメータとして示した。 l/b が増加するにつれ、ピーク値の減少、サイドローブの出現、さらにピークの低周波側への若干の推移が観察される。また a/b が大きいほうがその種の偏心の影響を受けにくいことがわかる。

Fig. 5 はピーク値が変化する様子を、 $l/b=0$ のときの値を基準にして、 a/b を横軸に、 l/b をパラメータとして図示したものである。ピーク値の減少はフィ

Fig. 5 Relation between peak-value and a/b

ルタ特性の悪化を表わす一つの尺度と考えられるので、許容されるフィルタ特性の悪化の程度が与えられれば、Fig. 5 を用いて対応する l/b の値が求まり、中心合せに要求される精度の目安を知ることができる。

5. 計測系の構成

回転速度計測系の概略を Fig. 6 に示した。主たる要素の説明を以下に行う。

5.1 回転体モデル

回転体モデルとして高速度領域用と微速度領域用の2種類を用意した。高速度用は2相サーボモータを使用した (600rpm~3000rpm)。回転軸に直径 100mm の円板を結合しその上に適当なパターンを貼り、回転軸方向から光学系により観測した。また別にフォトランジスタと円板の縁の目印により1回転1パルスの信号を得、10パルスの周期測定をし回転数の基準とした。

微速度用はパルスモータにより、1パルス 1/100 度回転する回転テーブルを使用した (1.5°/sec~4.5°/sec) 回転軸にはロータリーエンコーダ (分解能 1/100 度) が直結され、その回転角度を直読する構成にしている。

なお回転パターンの表面上ではほぼ 1500 lux が得られる程度に照明を行っている。

5.2 光学系

光学系はレンズ ($f/1.2$, $f=55\text{mm}$) とペローズから構成されている。ペローズにはシールドケースが装着でき、その中に空間フィルタ検出器が設置されている。光学系全体は X-Z メカニカルテーブル (分解能 1/100 mm) に載せており、中心合せおよび偏心を与えることができるようになっている。

5.3 空間フィルタ検出器

空間フィルタ検出器は本計測系における最も重要な

Fig. 6 Outlook of experimental measuring system

Fig. 7 Pattern of spatial filter

要素であり、その基本的機能は(7)および(12)式に対応する空間的荷重関数を実現し、(1)式の積分を行い、さらにその積分値に比例した電気的信号を出力することにある。この点、以前はスリット列状のシャ光板、加算検出器およびチャンネルフィルタを用いる構成をとった²⁾。その後筆者らはそのような信号処理を、集積化した一つの素子で実現するセンサを直線速度計測用に開発し、若干の報告も行った^{3)~5)}。本研究で用いた空間フィルタ検出器は、直線速度計測用のそれと基本的構造において同様の性格をもつが、回転速度計測用に新しく開発したもので電極構造などに若干の工夫が加えられている。

先の報告^{3)~5)}は公刊的なものでないので、以下に回転速度計測用の空間フィルタ検出器を例にした詳細な説明を行う。

本検出器は Fig. 7 にその概形を示すように、n型シリコン基板太陽電池に関しp型シリコン部の幾何学的形状を360本の細長いエレメントが等間隔放射状に配列されたようにエッチング仕上げし、その上に同心円状に6本のアルミニウム電極を蒸着したものである。それぞれのエレメントは個々に太陽電池として働くから、それと同じ形状をしたスリットの役割を果たすと同時に、その部分に照射される光量の積分値に比例した光電流を発生する。電極はこの光電流を外部に取り出す機能をもつ。この場合各電極は相互に電気的絶縁が保たれ、各エレメントと電極は、両者が重なる部分に微小な穴を設け(エッチングによる)その中にアルミニウム蒸着を行うことで相互の導通が図られる。この処理がなければ、エレメントと電極の間にあるSiO₂層により両者の電気的絶縁が保たれる。また各

エレメントは回転方向に6個おきに同一の電極に接続され、順に第1相から第6相までの電流出力が得られる(注3)。各部の幾何学的寸法などは Fig. 7 に示した。なお電極はそれ自身シャ光性がある(1/100以下に減衰)ため、その部分は空間的荷重関数が実用上零の領域となる。

以上の点を考慮すると、1, 2相の出力の和から4, 5相の出力の和を差し引く信号処理回路を構成すれば、(12)式に相当する空間的荷重関数とその符号も含めて等価的に実現できることがいえる。分光感度分布や光感度特性など、検出器の諸特性は一般のシリコン太陽電池の特性と同じである。なお実際に作成された空間フィルタ検出器の幾何学的仕上り精度や光強度に対する感度分布などについては現在調査・検討中であるが、常識的には幾何学的精度 $\pm 5\mu\text{m}$ 以内、感度分布 $\pm 5\%$ 以内とされている。この程度のばらつきであれば計測系に対してほとんど影響を与えないことがシミュレーションの結果判明している^{6), 7)}。なお一般のシリコン太陽電池の光変調シャ断周波数は約60kHz(負荷抵抗1k Ω , 30lux)であるので實際上これが回転速度測定範囲の上限を決める。

5.4 信号処理回路

信号処理回路は差動増幅回路と周波数計数回路から構成される。差動増幅回路は前述のように空間フィルタ検出器の1, 2相の和と4, 5相の和の出力電流をそれぞれ約2k Ω の抵抗負荷に流し、抵抗値の調整により相互の感度バランスをとったうえ、負荷抵抗の端子電圧の差を増幅することとした。

周波数計数回路は差動増幅回路の出力信号につき、その中心周波数を測定するものであるが、一般に偏心が小さい場合にはほとんど正弦波に近い信号が得られるので、通常の周波数カウンタで十分な精度の周波数測定が可能である。しかし偏心が大きくなった場合など、信号の狭帯域性がなくなってくると、振幅的、周波数的ゆらぎが現われるため、それに対応した周波数測定法が必要となる。この点極性相関形の周波数測定法が効果的であることがすでに指摘されている²⁾。そこで本論では通常のユニバーサルカウンタ、極性相関形カウンタの2種類を用意し比較測定を行うと共に、偏心の影響を軽減するうえで周波数測定法上の工夫がどの程度効果があるものか実験的考察を行った。

(注3) 6相分割したのは回転方向検出にも利用できるよう設計したためで、本論の範囲ではその必要はない。方向検出については別に報告する予定である。

Fig. 8 Wave-form observation

6. 実験結果

6.1 出力波形

得られる出力波形の例を示したものが Fig. 8 である。Fig. 8(1)は感度バランスをとり、かつ偏心のない時の差動増幅回路の出力波形で、ほぼ正弦波に近い信号が得られている。(2)は感度バランスを60%崩したときの波形で、低周波の顕著な変動成分が現われる。従来差動構成のないときにはこのような低周波成分を除去するため、チャンネルフィルタなど電気的な高域通過フィルタを利用していた²⁾。今回その種の回路は不必要となるため、測定回路が単純化され同時に初段の増幅回路の利得も高くでき、結果として高い SN 比が確保できた。(3),(4)は偏心量を大きくしていった場合の波形を示すもので、振幅的・周波数的なゆらぎが次第に顕著になる。

6.2 回転速度計測結果

Fig. 9 Experimental result of rotational speed measurement

Fig. 9 は高速度領域、微速度領域における回転速度を計測した結果であり、出力周波数はユニバーサルカウンタで測定した。なおこれは偏心がない場合であり、基準値に対する相対誤差は高速度域では $\pm 0.3\%$ 以内、微速度域でも $\pm 3.0\%$ 以内であった。

空間フィルタ検出器による回転速度から周波数への変換には原理的に遅れはまったく存在しないため、計測系の動特性は周波数測定的方式で決まり、周波数計数時のゲート時間や相関器の近似積分器の時定数などが特性パラメータとなる。

6.3 対象パターン

(11)式から明かなように、得られる出力信号のパワーは対象パターンが含む空間フィルタに選択される空間周波数成分のパワーに比例するため、対象パターンの統計的性質の影響を実験的に検討した。

(1) θ 方向のパワースペクトル密度

Fig. 10 に用意した対象パターンの写真とそれらの θ 方向のパワースペクトル密度を示した。 θ 方向のパワースペクトル密度は、投影された回転像を角度 $5/8$ 度の扇形をしたスリットを通して太陽電池で検出し、得られた不規則信号を FFT で分析する便宜的方法で求めた。

実験的検討の結果、パターンに選択すべき空間周波数成分が存在すればそれがかなり少ない場合でも振幅の減少はあるが、測定上十分な出力波形が得られかつ中心周波数に影響を及ぼさないことが知れた。

(2) 光学系の倍率

光学系の倍率は、それが異なっても投影された像の回転速度は変わらないから、計測上直接的影響をもたない。この点は直線速度計測の場合とまったく異なる状況にある。しかし同一の対象パターンでも、光学系の

Fig. 10 Surface patterns and their spectral densities

倍率が大きくなれば投影された像の θ 方向のパワースペクトル密度分布はその空間周波数軸に関して伸長する。このため対象によって光学系の倍率を変えて測定すると、より大きな振幅の出力が得られることも考えられるから、適切な倍率を選ぶことは必要である。

(3) 焦点合せ

一方、焦点合せが十分でなく投影された像にぼけがあると、ぼけは対象に含まれる高い空間周波数成分を除去する効果をもつので、ぼけの程度が大きい場合には一般に出力信号の振幅が小さくなる。この場合中心周波数に影響を及ぼさないことはいうまでもない。なおこのぼけの効果を利用すれば、空間フィルタが選択する空間周波数の高次成分を除去することが可能である。

6.4 偏心の存在する場合

回転体の像の回転中心と空間フィルタ検出器の中心とを合致させ、その後 X-Z メカニカルテーブルの1軸のみを移動させ、その変位量を光学系の倍率（本実験では 1/1）を考慮して空間フィルタ面上の値に読み換え、偏心量とした。偏心量が 0 mm ($l/b=0\%$), 0.28 mm ($l/b=2.0\%$), 0.42 mm ($l/b=3.0\%$) の場合の出力波形を Fig. 8(1), (3), (4) にすでに示したが、それぞれの波形のスペクトル分析の結果を周波数軸を規格化して示したものが Fig. 11 である。偏心量が増すにつれピーク値が減少し周波数帯域が広がり、かつ中心のピーク値が低周波側に推移することが観察され、3章の解析結果と同様の傾向をもつことが判明した。

6.5 周波数計数方式の比較

Fig. 12 は偏心のある場合の各周波数計数方式による回転速度の測定結果の比較である。偏心量が小さい範囲では両者にほとんど差がないが、偏心量が大きく

Fig. 11 Experimental result of eccentricity effect

Fig. 12 Comparison of frequency counting methods

Fig. 13 Experimental result of inclination effect

なると相関形カウンタのほうがやや正確な測定結果を与え、若干偏心に強い計数方式であることがわかる。

6.6 あおりの影響

対象の像を光学系で投影する場合、対象パターンと空間フィルタ検出器の面が平行でないことが実際上起こりうるが、大きくとも ± 10 度程度と考えられる。実験では意識的に光学系を約 0 度、5 度、10 度傾けてあおりを生じさせ、その場合の出力のスペクトル分析結果を Fig. 13 に示した。周波数帯域がやや広がる傾向が観測されるが、中心周波数には影響を及ぼさず回転速度計測にはほとんど影響のないことが知れた。

7. あとがき

本論文では、直線速度計測のための空間フィルタ法を考え方を極座標系に適用すると、非接触回転速度計測が可能になることを理論的・実験的に示した。また集積化された空間フィルタ検出器を開発したことにより、簡単な計測系で広い測定範囲にわたり高精度・高分解能の非接触回転速度計測が実現できた。さらに実

際の測定状況において生ずる種々の要因の影響を実験的に考察した。特に偏心の影響に注意を払うべきであることを指摘し、その影響を軽減する対策として空間フィルタの設計や周波数計数方式などの視点から基礎的データを示した。

なお本研究遂行に伴って多数のシミュレーション結果を参考としたが本論文では割愛した。また回転方向の検出などの詳細については別の機会に報告したい。最後に、本研究に多大な協力を得た、現ソニー(株)沢昌彦氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 稲荷隆彦：周波数分析形無接触回転計測，第11回SICE学術講演会予稿集，3604 (1972)
- 2) 内藤正，狼嘉彰，小林彬：空間フィルタによる速度計測，計測と制御，7-11，761/772 (1968)
- 3) 小林彬：計測用空間フィルタの研究とその応用，東京工業大学博士論文 (1969)
- 4) 小林彬ほか：差動形空間フィルタの計測への応用，第8回 SICE 学術講演会予稿集，528 (1969)
- 5) M. Naito, et al.: Spatial Filter and Its Application to Industrial Measurement, 5th IMEKO JA-129 (1970)
- 6) 狼嘉彰ほか：回転速度計測用空間フィルタのシミュレーション，第19回自動制御連合講演会前刷，4014 (1976)
- 7) 沢昌彦：回転速度計測のための空間フィルタの研究，東京工業大学制御工学科卒業論文 (1977)
- 8) 小林彬ほか：空間フィルタを用いた非接触回転速度計測，第19回自動制御連合講演会前刷，4015 (1976)
- 9) 中山鳩夫：集積化された空間フィルタを用いた速度計測，東京工業大学制御工学専攻修士論文 (1977)