電子的に構成した空間フィルタによる運動計測[†]

三 橋 渉*・岡 和 彦**・山 崎 弘 郎***

Motion Measurement of Dynamic Images by the Use of Spatial Filter Built by Electronic Circuits

Wataru MITSUHASHI*, Kazuhiko OKA** and Hiro YAMASAKI***

A measurement system of dynamic image motions is developed by the use of spatial filters which are implemented with electronic circuits and video signals. The conventional spatial filter method, developed to measure the translating velocity of object motions, is not suitable to measure object displacement precisely. A pair of electronic spatial filters, of which phase are orthogonal to each other, forms a Hilbert transform pair and, therefore, allows object displacement to be measured as well as velocity. In addition, a complex logarithmic mapping of dynamic images will transform scaling and rotating image motions to translating ones independent of one another. These motion parameters, therefore, can be measured by utilizing the spatial filter method on the transformed domain. Originally developed for translation velocity measurement applications, the spatial filter method, implemented with electronic devices, now has capabilities to measure the global parameters of object motions.

Key Words: complex logarithmic transform, rotation-and scale-invariance, spatial filter, Hilbert transform, motion parameter estimation

1. はじめに

TV カメラのような2次元撮像系を用いた運動物体

の動き情報検出法は、①連続する画像フレーム間での対応付け（たとえば局所相関の最大値を求める、など）により変位ベクトルを求める方法^{1),2)}、②画素濃淡値の時間・空間勾配を局所的に連立させる方法^{3)~7)}、などに大別されるが、前者では計算量が大きく実時間性に乏しい、後者では大域的な計測が困難で雑音の混入に弱く、比較的大きな動きに対して精度が低下する、などの欠点がある。また、たとえこれらの方法でフレーム間の変位ベクトルが局所的に推定できたとしても、物体の運動パラメータは未知のまま残されている。いま、測定対象は単一の剛体で奥行き方向の回転はないものとすれば、その運動は一般に①観測面に平行な並進、②光軸まわりの回転、③光軸に沿った並進による拡大・縮小、の各成分に分離される。したがって画像中の局所的な変位ベクトルでなく、これらの運動パラメータを直接推定可能な計測方法が望ましい。

対象物体が静止背景上を変形せずに運動する場合の並進速度計測法としては空間フィルタ法^{8),9)}がよく知られている。この方法は、並進運動する動画像の時空スペクトルが速度ベクトルに対応した傾斜平面内に拘束される性質¹⁰⁾を利用し、動画像に周期格子を重ねることによってスペクトル拘束平面の傾きを時間周波数軸上で計測する¹¹⁾もので、比較的単純な構成ながら光学的な並列演算により高速処理が可能という特徴もっている。しかし空間フィルタ法の時間・空間分解能は悪く、もともと並進速度計測法として発展してきたために、回転計測への応用^{12),13)}も報告されてはいるものの、一般に任意の運動を対象とするには不適当であると考えられていた。

ところで、観測空間の座標系を複素対数変換すると、回転、拡大・縮小運動は並進運動に変換される^{14),15)}ことから、これら運動パラメータの大域的な抽出のために、複素対数変換面上で空間フィルタ法を適用することが考えられる。この場合、運動パラメー

† 第3回応用計測部会講演会（昭62・11）

* 電気通信大学電気通信学部 調布市調布ケ丘 1-5-1

** 北海道大学工学部 札幌市北区北13条西 8

*** 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

* Faculty of Electro-communications, University of Electro-communications, Chofu

** Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo

*** Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received May 24, 1988)

(Revised July 19, 1988)

タの推定のためには対象の変位を高い時間分解能で測定できることが要求されるから、速度計測法である空間フィルタ法を直接適用するのではなく、変位計測が可能となるように改良を加えなければならない。

空間フィルタとしての機能は固体撮像素子の出力に電子的に演算を施すことによって実現できる^{16)~18)}。すなわち、あらかじめ空間荷重関数を書き込んだメモリーを用意しておき、固体撮像素子の画素走査に同期してメモリー内容を逐次読み出し、撮像素子の画素出力との乗算結果を 1 画像フレーム全体について積分して出力すると、画像フレーム周期で標本化された空間フィルタ出力が得られる。具体的な構成法や機能の特長など、詳細については別途報告する予定¹⁹⁾だが、この方法には①画像フレーム周期ごとにしかデータを採取できないため高速運動の計測が不可能である、②撮像素子の画素数が有限であるため細かい空間荷重パターンを作成できず、測定精度に限界がある、などいくつかの問題点はあるものの、①光学的に実現困難な空間荷重関数がある程度自由に設計できる、②同一視野に複数の空間荷重を施して異なる空間フィルタ機能を同時に実現できる、③これらの空間荷重を視野内で移動させ、対象と観測系との相対速度を制御できる、などの優れた特長がある。この②の特長を生かして互いに位相の直交する空間フィルタの対を作成すると、相関演算やスペクトル分析などの方法によらずに出力信号の瞬時周波数や瞬時位相を測定でき、高い時間分解能で速度のみならず変位の計測も可能となる。

一方、観測動画像の座標変換の後に空間フィルタ法を適用して回転、拡大・縮小運動計測を行おうとすると、多大な計算時間が必要で実時間計測は困難となる。この問題を避けるため、座標変換後に必要な 2 次元並進運動計測用の平行スリット列を観測動画像の座標系に逆写像して作成し、画像空間上で空間フィルタ演算を行う方法を採用した。これにより回転、拡大・縮小運動パラメータの実時間計測が可能となった。

本論文では、観測像面内の並進運動成分はすでに他の方法（たとえば平行スリット列を用いる空間フィルタ法、など）によって既知であるという前提のもとで議論を進める。2 章では座標系の変換による回転、拡大・縮小運動の並進運動への変換法について述べる。3 章において瞬時周波数・位相推定法の提案を行い、これらの方法を実際に回転、拡大・縮小運動計測に適用した結果については 4 章に示す。

2. 動画像の座標変換

動画像の「動きの無限遠点」を原点として像面内に

取られた直交座標系を複素対数変換すると、像の回転、拡大・縮小は互いに直交する並進に写像される。この原理を利用した像の回転、拡大・縮小に不変なパターン検出法¹⁴⁾や、単眼 TV カメラの動立体視による奥行き検出法¹⁵⁾が報告されている。複素対数変換面での並進運動ベクトルを空間フィルタ法によって測定すれば、回転運動と拡大・縮小運動を互いに独立に推定できる。

2.1 複素対数変換と空間フィルタ法の適用

観測像面上で直交座標 (x, y) あるいは極座標 (r, θ) を考える。像面上の点

$$z = x + jy = r \cdot e^{j\theta} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}(y/x)$$

は座標系の複素対数変換により、点

$$w = R + j\theta$$

$$= \log(z) = \log r + j\theta \quad (2)$$

に写像される。対象の運動によって、点 z が並進運動 (u, v) 、回転速度 ω 、拡大率 m で運動するものとする、この点の軌跡は

$$x(t) = ut + m^t \cdot r \cdot \cos(\theta + \omega t) \quad (3a)$$

$$y(t) = vt + m^t \cdot r \cdot \sin(\theta + \omega t) \quad (3b)$$

と記述できる。

回転、拡大・縮小の中心と複素対数変換の原点を一致させるためには、並進成分を検出して注視点を移動させる必要がある。本論文では、 (x, y) 座標上での並進成分 (u, v) がすでに求められているとして議論を進める。注視点の移動により像面上の並進成分を除外できるとき、複素対数変換による投影は

$$R(t) = \log r + t \cdot \log m \quad (4a)$$

$$\theta(t) = \theta + \omega t \quad (4b)$$

と表わされ、像の拡大・縮小および回転が、それぞれ $\log m$ 、 ω を速度成分とする並進運動に変換される。

Fig. 1 Complex logarithmic mapping (b) of displacement vectors in Cartesian coordinates (a). Points a, b and c on an object moving with constant rotational speed and scaling rate are mapped identically in translation components

回転, 拡大・縮小による変位ベクトルの例を Fig. 1 (a) に, その複素対数変換を同図 (b) に示す. 図中, 点線および実線で示す平行スリット列で構成される空間フィルタを用いて R , θ 軸に沿った並進成分を測定すれば, 拡大率 m および回転速度 ω を推定できる.

2.2 回転, 拡大・縮小計測に必要な空間荷重

実際に空間フィルタ法を適用する場合, 観測画像そのものを座標変換するのは所要計算時間の点で現実的でない. R , θ 座標系での並進運動計測用の平行スリット列を (x, y) 座標系に逆変換してあらかじめ作成しておけば, 像の座標変換を行うことなく, (x, y) 座標での演算によって回転, 拡大・縮小運動を計測できる. この目的のために作成した空間フィルタの荷重関数の例を Fig. 2 (回転用), Fig. 3 (拡大・縮小用) に示す. これらは Fig. 1 (b) に実線および点線で示す平行スリット列をそれぞれ逆変換したものである. また両図の (a), (b) はそれぞれ 3 章で述べる正弦および余弦の空間荷重に対応している. 図中の点線に沿った (Fig. 3 ではその対数変換座標に沿った) 1.5 周期分の荷重分布を Fig. 4 に示す. 本研究では実験装置の制約により, 荷重の値を ± 1 , および 0 の 3 値に近似している.

Fig. 2 Spatial weighting functions for rotation measurement. These spatial patterns correspond to the parallel slits shown by the solid lines in Fig. 1 (b)

Fig. 3 Spatial weighting functions for scaling measurement. These spatial patterns correspond to the parallel slits shown by the dotted lines in Fig. 1 (b)

Fig. 4 Bipolar ternary weighting functions used in experiments in place of continuous sinusoidal functions

3. 空間フィルタ出力の処理

Fig. 2 あるいは 3 に示すような, 周期が等しく空間位相の直交する二つの空間荷重を同一視野に別々に重ねて空間フィルタを作成すると, それらの出力信号の位相も互いに直交する. これらをそれぞれ実部, 虚部とする信号は解析信号であり, 相関演算やスペクトル分析を行うことなく瞬時周波数を推定できる. しかし本研究で採用している空間フィルタの電子的構成法では, 空間荷重信号とビデオ信号との積和演算が 1 画面ごとに行われるため, フレーム周期ごとに標本化された出力信号しか得られない. この場合, 瞬時周波数推定式に含まれる微分演算を数値的に実行しなければならないために系統的な誤差が発生し, 周波数測定可能な範囲が限定される欠点²⁰⁾があった. このため本論文では微分演算の不要な瞬時周波数・位相推定法を提案し, 速度, 変位計測への応用を試みる. 以下, 簡単のため 1 次元で考察する.

3.1 位相直交荷重によるヒルベルト変換対の生成

観測される対象の像 $i(X)$ が速度 V で X 方向に流れていくものとする. これに重ね合わせる空間荷重関数が $\cos(2\pi X/p)$ のとき, その透過光を光電変換して得られる出力 $c(t)$ は,

$$c(t) = \int i(X - Vt) \cdot \cos(2\pi X/p) \cdot dX \\ = \|I(1/p)\| \cdot \cos(2\pi Vt/p - \phi(1/p)) \quad (5)$$

で与えられる. 一方, 空間荷重が $\sin(2\pi X/p)$ の場合の出力は

$$s(t) = \|I(1/p)\| \cdot \sin(2\pi Vt/p - \phi(1/p)) \quad (6)$$

となる. ただし $i(X)$ のフーリエ変換を $I(\mu)$ で表わし,

$$\tan \{\phi(\mu)\} = \text{Im} \{I(\mu)\} / \text{Re} \{I(\mu)\} \quad (7)$$

としている. 実際の観測視野の広さは有限で, 対象の像パターンも移動とともに時々刻々変化するため振幅と位相は不規則に変動するが, $c(t)$ と $s(t)$ は中心周波数 V/p の互いに直交する狭帯域不規則信号の対をなし, ヒルベルト変換対を構成する. この中心周波数を測定すれば対象の速度 V が方向も含めて推定できる.

空間フィルタを光学的に作成する場合、同一の観測視野に複数の荷重関数を重ね合わせることは困難で、光路分割などの方法を取らざるをえず、位置合せが必要となるなど装置構成が複雑となる。また余弦あるいは正弦関数のような正負の値をもつ空間荷重を直接実現することも不可能である。しかし、本研究のように撮像素子の画素走査によって $i(X)$ を電気信号に変換し、(5)式および(6)式を電子回路で演算する場合にはこのような制約がなく、複数の空間フィルタ機能を同時に実現することも、光学的には実現不可能な負値をもつ荷重関数を作成することも容易である。

3.2 瞬時周波数・瞬時位相推定法

画像フレームごとの像の変位を求めるためには、空間フィルタの出力周波数の積分を実行するよりも、フレーム周期ごとに出力される信号の位相回転が直接推定できるほうが、誤差の蓄積を避けるなどの点でも望ましい。しかし従来の空間フィルタ法では単一の実信号が得られるのみで、位相復元のためには一連のデータの採取後にオフラインでヒルベルト変換などを行う必要があった。前節で述べたように、空間フィルタ機能を電子的に実現し、互いに位相の直交する空間荷重を作成すれば、それらの出力はヒルベルト変換対を構成しており、位相回転を実時間で測定できる。

対象の運動が滑らかで、信号の振幅や位相回転などが急変しないものと仮定し、画像のフレーム周期による標本化間隔を Δ 、画像フレーム番号を k として信号 $c(t)$ および $s(t)$ を離散化すると

$$\begin{aligned} z_k &= c_k + j \cdot s_k \\ &= A_k \cdot e^{j\phi_k}; \phi_{k+1} = \phi_k + 2\pi f_k \cdot \Delta \end{aligned} \quad (8)$$

と近似できる。 ϕ_k および f_k はそれぞれ第 k フレームでの瞬時位相および瞬時周波数を示す。このとき

$$\begin{aligned} z_{k+1} \pm z_{k-1} &= A_k \cdot e^{j\phi_k} [e^{j2\pi f_k \cdot \Delta} \pm e^{-j2\pi f_k \cdot \Delta}] \\ &= \begin{cases} z_k \cdot 2 \cos(2\pi f_k \cdot \Delta) \cdots (+ \text{の場合}) \\ z_k \cdot 2j \sin(2\pi f_k \cdot \Delta) \cdots (- \text{の場合}) \end{cases} \end{aligned} \quad \begin{matrix} (9a) \\ (9b) \end{matrix}$$

であり、各標本化時刻での位相推定値は

$$\hat{\phi}_k = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{(z_{k+1} - z_{k-1}) \cdot z_k^*\}}{\text{Re}\{(z_{k+1} - z_{k-1}) \cdot z_k^*\}} \quad (10)$$

で与えられる。(10)式は出力の和分形式となっており、雑音の混入に強い推定法となっている。また

$$\cos(2\pi f_k \Delta) = (z_{k+1} + z_{k-1}) \cdot z_k^* / 2|z_k|^2 \quad (11a)$$

$$\sin(2\pi f_k \Delta) = (z_{k+1} - z_{k-1}) \cdot z_k^* / 2j|z_k|^2 \quad (11b)$$

であるから、瞬時周波数推定値は

$$\hat{f}_k = \frac{1}{2\pi\Delta} \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{(z_{k+1} - z_{k-1}) \cdot z_k^*\}}{\text{Re}\{(z_{k+1} - z_{k-1}) \cdot z_k^*\}} \quad (12)$$

で与えられる (*は複素共役を示す)。

以上の方法には微分演算が陽に含まれず、推定しようとする時刻前後の画像フレームの出力に対する簡単な代数演算と逆正接表の索引によって位相と周波数の実時間推定が可能であり、小規模な演算装置によるオンライン現場計測に適したものとなっている。

4. 実験

前章までに述べた方法を用いて、運動パラメータの計測実験を行った。本来ならば並進、回転、拡大・縮小のすべての成分をもつ運動に対して実験を行うべきであるが、撮像面に平行な並進成分はすでに他の方法によって既知であるものとして除外した。一方、回転計測用の空間荷重関数を使用して拡大・縮小運動を観測したり、あるいは逆に拡大・縮小計測用の荷重を使用して回転運動を観測すると、それぞれの運動が互いの計測結果におよぼす影響を知ることができる。撮像系の光軸と対象の回転、拡大・縮小の中心を一致させると、回転運動と拡大・縮小運動は、像座標系の複素対数変換により互いに直交する並進運動に変換されるから、それぞれの運動を独立に扱うことができる。このことは実験によっても確認できたため、回転運動と拡大・縮小運動については別々に実験を行った。

4.1 回転速度計測

回転テーブル表面にランダムパターンを添付し、その回転速度および回転角度の計測を行った。空間荷重の周期 $p(\text{rad})$ および対象の回転速度 $r(\text{rpm})$ と空間フィルタの出力周波数 $f(\text{Hz})$ の間には

$$f = \frac{2\pi r}{60p} \quad (\text{Hz}) \quad (13)$$

の関係がある。

回転テーブルの位置を X - Y ステージで調整して出力信号の包絡線がほぼ平坦となったとき、撮像系の光軸（空間荷重の中心）とテーブル回転中心が一致するものとした¹²⁾。15.0 rpm から 60.0 rpm の速度範囲でテーブルを回転させ、3章で述べた方法によって瞬時周波数の推定を行った。得られた結果は(13)式で示される直線とほぼ一致するため、推定周波数の(13)式

Fig. 5 Comparison of errors in frequencies for rotational speed measurement estimated by FFT and the proposed method

からの誤差を Fig. 5 に示した。この図には FFT を用いて求めた卓越ピーク周波数から速度を推定した場合の誤差も合せて示してある。FFT 法では観測時間長（この実験では約 2 秒）によって定まる固有の周波数分解能のため、誤差が周期的に発生している。これに対し瞬時周波数推定値の誤差はランダムに変動しているものの、FFT 法に比べ低く抑えられており、精度のよい回転速度計測が可能であることが確かめられた。

4.2 回転角度計測

対象の変位を測定するためには出力信号の位相回転を測定すればよい。空間荷重関数の周期が $p(\text{rad})$ のとき、対象の $p(\text{rad})$ の回転で出力信号の位相は $2\pi(\text{rad})$ 回転する。したがって対象の回転変位が $\Delta\theta(\text{rad})$ のときに観測される信号の位相回転量は

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{p} \Delta\theta \quad (\text{rad}) \quad (14)$$

で与えられる。

前節同様、回転テーブルを対象として実験を行った。対象を $+\pi/4.5(\text{rad})$ 回転させて観測された出力信号と瞬時周波数および位相回転推定量の例を Fig. 6 に示す。このとき使用した荷重の周期 p は $2\pi/48(\text{rad})$ であり、回転の開始（時間軸上 t_s で示す）から停止（同じく t_e ）にいたる間で約 $10.7\pi(\text{rad})$ の位相回転が観測されている。この値は (14) 式で与えられる値にほぼ一致しており、精度のよい回転角計測が可能になったことが確認できた。

Fig. 6 Examples of observed signals (a), instantaneous frequency estimates (b) and phase rotation (c) in rotation angle measurement

Fig. 7 Comparison of errors in object rotation angle estimation with two different types of filter pitch

対象を ± 360 度の範囲で回転させて観測された位相回転量から (14) 式を用いて回転角度を推定したときの誤差を Fig. 7 に示す。この例では周期の異なる 2 種類の空間荷重を用いた場合の結果を比較して示している。

4.3 拡大・縮小運動計測

拡大・縮小運動は撮像系の光軸に平行な運動成分によって生ずる。前方 $a(\text{m})$ の距離にある物体に対する撮像系の光学倍率を、光学系の像面距離を $b(\text{m})$ として

$$M = b/a \quad (15)$$

で表わすと、光軸上 $h(\text{m})$ の高さの物体は、像面上の高さ

$$r = M \cdot h = b \cdot h/a \quad (\text{m}) \quad (16)$$

の位置に投影される。像面座標系の対数変換は、

$$R = \log r = \log b + \log h - \log a \quad (17)$$

となるから、光軸に沿った物体の微小変位 $\Delta a(\text{m})$ による対数変換座標上での変位は

$$\Delta R = -\Delta a/a \quad (18)$$

で表わされる。この座標上での荷重関数の周期を p とすれば、物体の変位 $\Delta a(\text{m})$ によって生じる空間フィルタ出力の位相回転は

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta R}{p} = -\frac{2\pi \Delta a}{a \cdot p} \quad (\text{rad}) \quad (19)$$

で与えられ、 $a_1(\text{m})$ から $a_2(\text{m})$ までの物体移動で観測される出力信号のトータルの位相回転は

$$\phi = -\frac{2\pi}{p} \cdot \log \frac{a_2}{a_1} \quad (\text{rad}) \quad (20)$$

で表わされる。

実際には対数変換後の座標系に平行なスリット列を観測像面に逆写像して作成している。この結果、光軸からの距離が $r_{\min}(\text{m})$ から $r_{\max}(\text{m})$ の範囲に N 周期の荷重が作成されたものとすれば、対数変換後の座標上で 1 周期に相当する長さは

$$p = \frac{\log r_{\max} - \log r_{\min}}{N} \quad (21)$$

で与えられる。

撮像素前方 400 mm の位置を基点とし、表面にランダムパターンを添付した平面状の物体を光軸に直角に配置し、光軸に沿って移動させ、その像の拡大・縮小を観測した。 $r_{\max}$ と $r_{\min}$ の比を 3 とし、8 周期分の荷重を作成して実験に用いた。実際に用いた荷重の余弦部を Fig. 8 に示す。同図が縦長なのは撮像素子の画素間隔が水平および垂直走査方向で異なるため、撮像面に換算した物理的な形状は正円となっている。この実験で観測された出力信号の位相回転と物体変位との関係を Fig. 9 に示す。同図では基点からの接近を正の変位とし、接近後再び基点への移動を負の変位として表示している。400 mm から 300 mm までの変位では、(20) 式で計算される値（図中に実線で示す）と 4 % の誤差で一致していた。

Fig. 8 An example of spatial configuration of weighting function implemented in semiconductor memory devices. Moire patterns shown in this figure are caused by the interaction between the periodic structures of weighting function and the discrete positions of memory elements

Fig. 9 Observed phase rotations vs. object displacements along the line of sight are plotted. A continuous line denotes calculated phase rotations

4.4 実験結果と誤差の検討

本章の実験結果に示されるように、本方法による速度・変位計測の結果は比較的精度の良いものであることが確認できた。計測誤差の原因は、主としてビデオアンプに混入する雑音と空間荷重関数の設計に起因するものとに大別できる。

雑音は荷重関数の形状とは独立で、空間フィルタ出力に対して加法的である。したがって測定精度の点からいえば、周期の小さい空間荷重関数を用いて変位あたりの出力信号の位相回転量を大きくすることが望ましい。このことは Fig. 7 から確認できるが、本方法は撮像素子の離散的な空間配置に対応させて荷重信号を発生させているため、周期を小さく設計するには限界がある。

一方、本来正弦的な値をもつべき荷重関数を、本研究では Fig. 4 に示すように 3 値化して近似している。並進運動や回転運動に対しては、たとえこのように近似しても正弦部と余弦部の直交性は保たれており、また空間積分がゼロとなる性質に変わりはない。しかし対数変換後の座標系でこのように荷重関数を作成しても、像面座標に逆変換するとこれらの性質は保障されない。これは対数変換座標上で等周期の荷重関数が、像面への逆変換により等周期でなくなるためで、この結果、空間積分がゼロにならず出力信号に直流オフセットがあらわれ、位相推定に誤差を生ずる。これを解決するには、周期の違いを補償する重みを空間荷重関数の振幅に対して施す必要がある。本研究のように 0, ± 1 の 3 値で近似している場合にはこの補償が行えず、Fig. 9 回に示すように、転計測と比較して大きな誤差が観測されているが、撮像素子による空間標本化の影響で荷重関数の形状にモアレが生じていることの影響 (Fig. 8 参照) もこの誤差には含まれている。

5. おわりに

TV カメラなどの撮像素で観測される物体の座標系を複素対数変換して回転、拡大・縮小運動を並進運動に置き換え、空間フィルタ法を適用してその運動パラメータを実時間で測定する方法について述べた。速度計測用に開発されてきた空間フィルタ法を改良し、位相の互いに直交する空間荷重を用いる瞬時周波数・位相推定法の提案を行った。本報告では、回転と拡大・縮小計測実験を別々に行った結果について述べたが、これは試作した実験装置の制約によるもので、光軸に沿った運動ならば回転と拡大・縮小がともに含まれていても、それぞれの運動成分の同時推定が可能である。むしろ観測像面に平行な並進運動が含まれる場合

に、それに追尾して注視点を移動させる方法の開発が今後の課題として残っている。

本研究の研究費の一部は文部省科学研究費特定研究「光波利用センシング」による。

参 考 文 献

- 1) J. M. Prager and M. A. Arbib: Computing the Optical Flow: The Match Algorithm and Prediction, *Comput. Vision, Graphics, Image Processing*, **24**-3, 271/304 (1983)
- 2) 山本, 柏岡, 江尻, 高島, 辻倉, 村山: 気象衛星画像からの風ベクトル演算アルゴリズム, *情報処理学会誌*, **15**-1, 10/17 (1974)
- 3) J. O. Limb and J. A. Murphy: Estimating the Velocity of Moving Images in Television Signals, *Computer Graphics and Image Processing*, **4**-4, 311/327 (1975)
- 4) C. Cafforio and F. Rocca: Methods for Measuring Small Displacements of Television Images, *IEEE Trans. Information Theory*, **IT-22**-5, 573/579 (1976)
- 5) 吹抜敬彦: 画像信号による動対象の移動量, 速度の測定, *信学会画像工学研資*, **IE78**-67, 35/41 (1978)
- 6) 和田, 山口: 反復勾配法による動き検出, *信学会画像工学研資*, **IE83**-93, 19/24 (1983)
- 7) 安藤 繁: 画像の時空間微分算法を用いた速度ベクトル分布計測システム, *計測自動制御学会論文集*, **22**-12, 88/94 (1986)
- 8) 堤 捨男: 空間フィルタとその応用, *応用物理*, **43**-8, 824/830 (1974)
- 9) 小林 彬: 空間フィルタとその応用 [I], [II], *計測と制御*, **19**-4, 409-417, **19**-6, 571/579 (1982)
- 10) L. Jacobson and H. Wechsler: Derivation of Optical Flow Using a Spatiotemporal-Frequency Approach, *Comput. Vision, Graphics, Image Processing*, **38**-1, 29/65 (1987)
- 11) 安藤 繁: 立体と運動の画像計測—光学的方法を中心に—, *テレビジョン学会誌*, **39**-9, 798/805 (1985)
- 12) 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*, **15**-1, 89/96 (1979)
- 13) 小林, 近久, 小林: 空間フィルタを応用した回転速度変動センサ, *計測自動制御学会論文集*, **21**-2, 157/163 (1985)
- 14) H. J. Reitboeck and J. Altmann: A Model for Size- and Rotation-Invariant Pattern Processing in the Visual System, *Biol. Cybern.*, **51**, 113/121 (1984)
- 15) R. Jain, S. L. Bartlett and N. O'Brien: Motion Stereo Using Ego-Motion Complex Logarithmic Mapping, *IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence*, **PAMI**-9-3, 356/369 (1987)
- 16) 下川, 三橋, 山崎: 電子的に実現した空間フィルタによる二次元速度計測, 第27回自動制御連合講演会前刷, 481/482 (1984)
- 17) 岡, 山崎: 柔軟性を有する空間フィルタ (正弦曲線状のレティクルを用いた速度計測), 第29回自動制御連合講演会前刷, 597/598 (1986)
- 18) 吉田, 三橋, 山崎: 電子的に実現した空間フィルタ機能による回転速度計測, 第4回流体計測シンポジウム資料, 45/48 (1987)
- 19) 岡, 三橋, 山崎: 電子的に実現した柔軟性を有する空間フィルタ, *計測自動制御学会論文集*に投稿中
- 20) 三橋, 山崎: 直交化空間フィルタによる運動計測, 第26回 SICE 學術講演会予稿集, 383/384 (1987)