

研究

TV カメラを用いた運動物体の高精度測定への一提案

正弦波状荷重関数重畳法による位置・速度測定

倉田 純一・内山 寛信・田中 輝夫

関西大学工学部機械システム工学科 〒564 吹田市山手町 3-3-35

(1991年11月11日受付, 1992年2月20日受理)

One Proposal for High Sensitivity Measurement of Moving Objects by Using TV Camera

Position and Velocity Measurement by Using Method of Convolution Integral with Sinusoidal Weighting Functions

Junichi KURATA, Hironobu UCHIYAMA and Teruo TANAKA

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Kansai University, 3-3-35, Yamate-cho, Suita 564

(Received November 11, 1991; Accepted February 20, 1992)

The simultaneous measuring method of the position and the velocity on real time, by using one pair of orthogonal and sinusoidal weighting functions, is proposed. The spatial filtering characteristics was improved by using sinusoidal weighting functions instead of rectangular wave weighting functions widely used. Algorithm used in this paper to estimate both position and velocity makes use of the orthogonal property of one pair of orthogonal spatial filters with sinusoidal weighting functions. The validity of this method was confirmed by an experimental system composed of analogue circuits. As the results of some experimental confirmation, it was possible to measure the position of moving object with an accuracy to $\pm 0.5\%$ and the velocity of it with an accuracy to $\pm 2.5\%$ of a measuring span. In this method, video signal is used for the calculation, therefore, the image of measured object stored into a video tape recorder or observed by a monitoring camera located at remote place can be used.

1. はじめに

TV カメラを用いた計測システムは、ビデオ信号の形態や周辺機器が標準化されており、情報の保存や伝達が容易であること、測定対象物の状態観察が可能であることから、工業計測分野においても応用範囲¹⁾が広い。また、2次元に配置した圧力センサー群の出力をビデオ信号準拠に変換した触覚センサー²⁾の開発や、可視化された流れの録画映像から速度ベクトル分布を求める手法³⁾、監視映像による振動測定⁴⁾などが報告されており、ビデオ信号を用いた新たな計測手法の開発がなされている。

TV カメラの映像信号を処理して運動物体の位置や速

度を測定する場合の多くは、画像内に特徴点あるいは特徴点を含む領域を定め、これらの点や領域の移動量を2次元相関演算などを用いて抽出する手法⁵⁾が採用されている。この手法は、流体の複雑な速度ベクトルの測定などに有効であるが、信号処理過程において画像記憶装置と計算機が必要不可欠であり、さらに、画像がもつ情報が膨大であるため処理時間が長時間となる傾向があるため実時間測定が困難である。これに対して、スリット状に配列したフォトダイオードや光ファイバーなどを用いた計測系⁶⁾のように、空間的に特徴付けされた光学系によって抽出される情報は配列やセンサー形状などによって決定される空間荷重により限定されており、そのため、情報抽出に要する時間は非常に短く、実時間測定が

可能である。

このように空間荷重による特徴付けは、入力される画像から被測定量を効率よく抽出する前処理として有効であると考えられる。空間荷重を利用した測定手法である空間フィルタ法⁷⁾は、周期的空間荷重を用いることにより、画像情報の中から限定された空間周波数成分の光量変化を抽出するのに有効であり、比較的簡単な光学系で構成できる。そのため、直線運動物体の速度測定のほか回転体の速度⁸⁾、物体の拡大縮小⁹⁾や変位測定への応用¹⁰⁾なども報告されている。空間フィルタ法における精度向上や信号処理の簡素化を図るためには、空間荷重を正弦波状とすることが有効¹¹⁾であり、その構成手法として空間荷重を電子的に発生させる手法^{11,12)}が提案されている。正弦波状空間荷重を有する空間フィルタを実現することにより、従来行われていた出力信号の周波数分析に代わる信号処理^{11,12)}が可能となって、信号処理時間が短縮された。また、空間荷重を電子的に構成する手法は、複数の空間荷重を同時に発生させることが可能であり、この並列処理が可能である点を利用して、運動物体の2次元位置を TV カメラの映像信号と2種類の鋸歯波状空間荷重とを用いて測定する手法¹³⁾が報告されている。

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

提案する手法は、直交する2種類の正弦波状空間荷重を用いた空間フィルタの出力が、直交性を有することを利用し、2出力が描くリサージュ図形から対象物の位置と速度をそれぞれ独立した信号処理系によって求める手法である。直交正弦波状空間荷重を有する空間フィルタは、従来フォトダイオード・アレイや光ファイバーの形状によって決定されていた空間荷重を処理系内部で電子的に発生させ、従来手法の結像光学系と集光光学系を映像信号と空間荷重との重畳積分に置換することによって構成している。この処理は、NTSC方式に従って映像信号が時系列信号として出力されることから、すべて時系列処理に置換され、その結果、1フィールド走査周期

ごとに対象物の位置と速度を出力することが可能となった。

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

2. 位置・速度算出アルゴリズム

2.1 直交正弦波状荷重関数を空間荷重とする空間フィルタの出力

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

測定座標系の原点は TV カメラの有効撮像面の左上とし、水平走査線方向を X 軸、垂直走査線方向を Y 軸とした X-Y 座標系を設定する。対象物は TV カメラの X 方向のみに視野から出入りすることなしに、並進往復運動するものとする。

いま、簡単のために対象物が一つの光点であり、その光量分布 $I_{pi}(x, y)$ が式(1)で示されるガウス関数で近似可能¹⁴⁾であるとする。

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

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

この光点を、有効撮像面左端から x 方向に無限長さをもつ周期 P の正弦波状空間荷重関数と同周期の余弦波状空間荷重関数とを採用した一対の直交正弦波状空間フィルタを通して観察した場合、それぞれの空間フィルタの出力は次式で表される。

a) 正弦波状空間フィルタの場合

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

b) 余弦波状空間フィルタの場合

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

これらの出力は、それぞれの空間荷重関数が無限長さであることを仮定しているが、TV カメラの有効撮像面

は有限である。そのため、実際の出力信号と式(2)、(3)の間には差異が生じると思われるが、光学的な調整などを行うことによって光点の広がり半径を十分小さくすれば、光点の光量は有効撮像面内で近似的にゼロとなり、積分領域を有限とすることによって生じる差異を考慮する必要が実際上なくなる¹³⁾と考えられる。

次に、対象物が一つの光点でなく、視野内にあるランダムなパターンの場合を考える。視野内のランダムパターンの光量分布 $I_{pr}(x, y)$ は、ランダムパターンが n 個の光点から構成されていると考えれば、式(4)で表すことができる。

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

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

このランダムパターンを、前述と同様の一对の直交正弦波状空間フィルタを通して観察した場合、それぞれの空間フィルタの出力は次式で表される。

a) 正弦波状空間フィルタの場合

$$I_{sr} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{pr}(x, y) \cdot \sin(2\pi \cdot x/P) dx dy = \sum_{m=1}^n \pi \cdot I_{0m} \cdot r_{pm}^2 \cdot \exp(-\pi^2 \cdot r_{pm}^2/P^2) \cdot \sin(2\pi \cdot x_{pm}/P) \quad (5)$$

b) 余弦波状空間フィルタの場合

$$I_{cr} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{pr}(x, y) \cdot \cos(2\pi \cdot x/P) dx dy = \sum_{m=1}^n \pi \cdot I_{0m} \cdot r_{pm}^2 \cdot \exp(-\pi^2 \cdot r_{pm}^2/P^2) \cdot \cos(2\pi \cdot x_{pm}/P) \quad (6)$$

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

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

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

ただし、

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

式(7)~(9)を展開し整理すれば、式(10)~(14)となる。

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

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

ただし、

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

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

$$\alpha = \arctan(W_2/W_1) \quad (14)$$

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

式(10)~(14)より、一对の正弦波状空間フィルタの出力は対象物の移動とともに正弦波状、余弦波状に変化し、その両出力は直交性を保っていることがわかる。

この直交性を有する一对の空間フィルタ出力から、対象物の位置ならびに速度を求めるアルゴリズムを以下に示す。アルゴリズムの導出にあたっては簡単のために、対象物が単一の光点である場合について行うが、ランダムパターンの場合にも同様にして求めることが可能である。

2.2 一对の直交正弦波状空間フィルタ出力を用いた位置測定アルゴリズム

式(2)、(3)の出力信号は、横軸を余弦波状空間フィルタの出力、縦軸を正弦波状空間フィルタの出力とした直交座標系では、**Fig. 1** に示す円状のリサージュ図形となる。両出力の値を示す軌跡上の動点 M は、光点像の移動に伴って円周上を移動し、回転角 θ が光点像の位置を与える。動点 M の描く軌跡の半径 r 、回転角 θ はそれぞれ次式で与えられる。

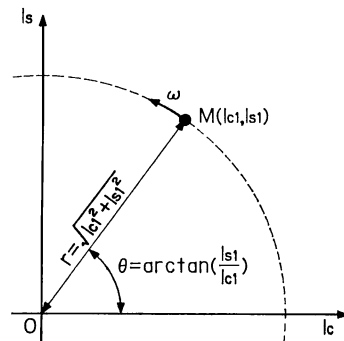


Fig. 1 Relationship between output signal of orthogonal spatial filters I_c and I_s .

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

$$\theta = \arctan(I_{s1}/I_{c1}) + n\pi = 2\pi \cdot x_{p1}/P \quad (16)$$

ただし、 n は整数である。

動点 M の描く軌跡の半径 r は、光点の形状、明るさと正弦波状空間荷重のピッチ P により定まる値であり、また、リサージュ図形上での回転角 θ は光点像の位置によって変化することがわかる。これより、光点像の X 方向位置 x_{p1} は式(17)で示される。

$$x_{p1} = \theta \cdot P / 2\pi = \{\arctan(I_{s1}/I_{c1}) + n\pi\} \cdot P / 2\pi \quad (17)$$

ただし、 n は整数である。

式(17)より光点像の位置は、動点 M の描く軌跡の半径 r に無関係に、すなわち、光点の形状、明るさの変動に影響されることなく求められることがわかる。式中の整数 n は光点像の概略的位置を与える数であり、映像信号の観測や目視などの手法によって、あらかじめ測定開始時に初期値を与える必要がある。測定中は、自動的に更新され、光点像の位置が求まる。

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

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

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

2.3 一對の直交正弦波状空間フィルタ出力を用いた速度測定アルゴリズム

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

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

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

として表せることから、それぞれの正弦波状空間フィルタの出力は次式となる。

$$I_{s1(k-2)} = A_{(k-2)} \cdot \sin\{2\pi \cdot x_{p1(k-2)}/P\}$$

$$I_{c1(k-2)} = A_{(k-2)} \cdot \cos\{2\pi \cdot x_{p1(k-2)}/P\}$$

$$I_{s1(k)} = A_{(k)} \cdot \sin[2\pi\{x_{p1(k-2)} + 2\Delta t \cdot V_{(k-2)}\}/P]$$

$$I_{c1(k)} = A_{(k)} \cdot \cos[2\pi\{x_{p1(k-2)} + 2\Delta t \cdot V_{(k-2)}\}/P] \quad (20)$$

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

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

$$\omega = 2\pi \cdot V_{(k-2)}/P \quad (21)$$

式(20)を展開、整理して回転角速度から速度 $V_{(k-2)}$ を求めると次式となる。

$$\begin{aligned} V_{(k-2)} &= \{\omega \cdot P / 2\pi\} \\ &= \{P / (4\pi \cdot \Delta t)\} \cdot \arctan\{(I_{c1(k-2)} \cdot I_{s1(k)} - I_{s1(k-2)} \cdot I_{c1(k)}) / (I_{c1(k-2)} \cdot I_{c1(k)} + I_{s1(k-2)} \cdot I_{s1(k)})\} \quad (22) \end{aligned}$$

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

3. アナログ素子を用いた信号処理回路の構成

TV カメラと正弦波状空間荷重とを用いた位置・速度同時測定系の信号処理回路を、アナログ素子を用いて試作した。実験に使用した TV カメラは、最低被写体照度 2Lx (F1.4) の $1/1,000$ 秒電子シャッター付 $1/2$ インチ CCD カメラ (502×485 画素) で、有効撮像領域は X 方向 6.426mm 、 Y 方向 4.802mm であり、レンズは $F: 1.4$ 、 $f=58\text{mm}$ のものを使用した。

Fig. 2 に、一對の直交正弦波状荷重関数を空間荷重とする空間フィルタの構成ブロック図を示す。撮像面上の光点像は、NTSC インタレース方式に従って時系列信号として出力される。そこで、従来のフォトダイオードや光ファイバを用いた空間的構成手法に代わり、空間荷重の発生、映像信号との重畳、さらに視野全域の積分を時系列信号処理に置換して行う。映像信号はクランプ

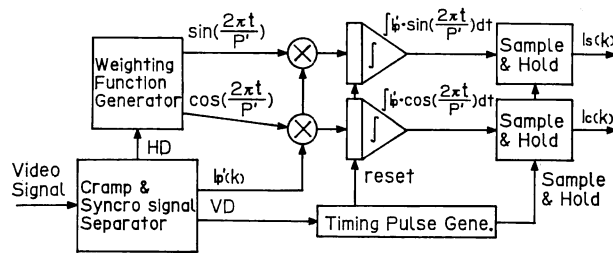


Fig. 2 Block diagram of the spatial filters with orthogonal and sinusoidal weighting functions.

回路によって光学的黒レベルが固定された後、映像信号分離回路ならびに同期信号分離回路へ送られる。

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

る。

Fig. 3 に、一対の直交正弦波状空間フィルタの出力から、位置を算出する処理回路のブロック図を示す。前述のアルゴリズムにおいて、対象物の光学的特徴に変化がない場合には動点 M の描く軌跡の半径に無関係に位置測定が可能であることを示した。しかし、実際の信号処理回路系では除算器などの演算精度が入力電圧範囲によって左右されるため、振幅補正回路を付加して空間フィルタの出力振幅の変動を低減し、演算精度を良好に保つよう試みている。振幅補正された一対の直交正弦波状空間フィルタの逆正接から位置情報を算出する際、演算回路の値域が $\pm\pi/2$ であるため、動点 M が Fig. 1 の I_x 軸を横切るとに位相弁別を行い、 $n\pi$ 相当量の補正を行う。この補正値と逆正接の値の和に、空間荷重関数の撮像面上での周期によって定まる定数を乗じて、撮像

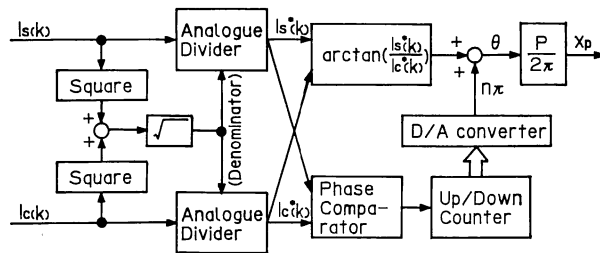


Fig. 3 Block diagram of the circuits for the position measurement unit.

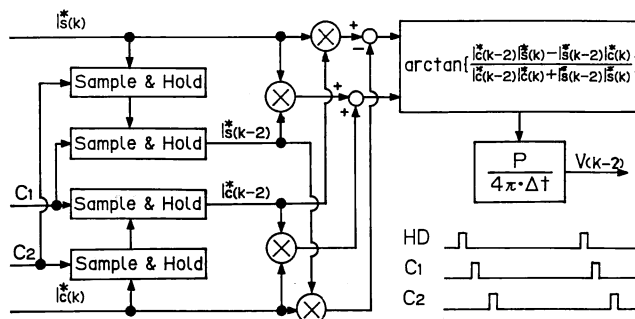


Fig. 4 Block diagram of the circuits for the velocity measurement unit.

面上での光点位置を出力する。

Fig. 4 に、一対の直交正弦波状空間フィルタの出力から、速度を算出する処理回路のブロック図を示す。位置測定と同様に、対象物の光学的特徴の変化による精度悪化を防止するため、振幅補正された一対の直交正弦波状空間フィルタの出力を測定に用いる。振幅補正された一対の直交正弦波状空間フィルタの出力は、それぞれサンプル・ホールド素子を用いたアナログシフトレジスタに入力され、その内容は 1/60 秒ごとにシフトされる。現時点での空間フィルタ出力とアナログシフトレジスタの 2 段目の内容を用いて、インタレース方式によるフィールド間の差に影響されることなく、速度測定を行うことが可能である。逆正接演算回路の出力に、フィールド走査周期と空間荷重関数の撮像面上での周期によって定まる定数を乗じて、撮像面上での光点の速度を出力する。

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

4. 試作測定系による実験的検討

提案した位置、速度測定アルゴリズムならびに信号処理回路の有効性を確認するため、対象物として直径 3.2 mm の赤色 LED を 5 個配置したものをを用い、試作回路系によって位置、速度の測定を行った。実験に使用した TV カメラは、最低被写体照度 2Lx (F 1.4) の 1/1,000 秒電子シャッター付 1/2 インチ CCD カメラ (502×485 画素) で、有効撮像領域は X 方向 6.426 mm, Y 方向 4.802 mm であり、レンズは F: 1.4, $f=58$ mm のものを使用した。測定対象物は、レンズマウントの前方 840 mm の位置に設置した。このとき、倍率は 7.66×10^{-2} であった。測定範囲は有効撮像領域と同一であるが、試作回路では X 方向 (有効撮像領域の幅 6.426 mm) のみに空間荷重を設定しているため Y 方向の測定は不可能である。また、光点の広がり半径 r_{pm} や測定条件、測定結果を示すための長さの基準は、有効撮像領域の X 方向の幅 (6.426 mm) とし、それぞれ無次元化して「% F.S.」の表記を用いる。測定時の基準となる対象物の位置は、5 個の赤色 LED (LED 1~LED 5) のうち特徴的地点とした LED 1 の撮像面上での位置とした。赤色 LED (LED 1~LED 5) の配置ならびに光点形状を Table 1 に示す。対象物は電気式サーボ機構の移動テーブル台上に設置され、外部より加えられる電気信号

Table 1 Specification of measured target.

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

に従って移動される。対象物の特徴的地点の正確な位置は、位置検出用ポテンシオメータの出力値より換算して求めた。

対象物を振幅 23.8% F.S. (1.532 mm), 周期 5.34 秒の正弦波状に往復移動させ、周期 11.86% F.S. (0.762 mm) の直交正弦波状空間フィルタを通して観察した場合の出力波形を、Fig. 5 に示す。図より、一対の直交正弦波状空間フィルタの出力は、それぞれ対象物の移動に従って直交性を保持したまま正弦波状、余弦波状に変化していることがわかる。これより、提案した位置、速度の測定アルゴリズムが適用可能であることが判明した。

位置測定精度を検討するため、対象物を電気サーボ式移動テーブルで一定量ずつ移動させ、対象物の特徴的地点の位置と位置測定回路の出力より測定誤差を求めた。対象物の光学的特徴の違いによる測定精度の変化を検討するため、対象物の特徴的地点である LED 1 のみを点灯した場合の位置測定誤差 x_{e1} と、5 個すべてを点灯した場合の位置測定誤差 x_{e5} を Fig. 6 に示す。対象物の基準位置は、LED 1 のみ点灯時、全 LED 点灯時ともに対象物の特徴的地点である LED 1 の位置 x_{p1} とした。測定に用いる空間フィルタの荷重関数の周期は、

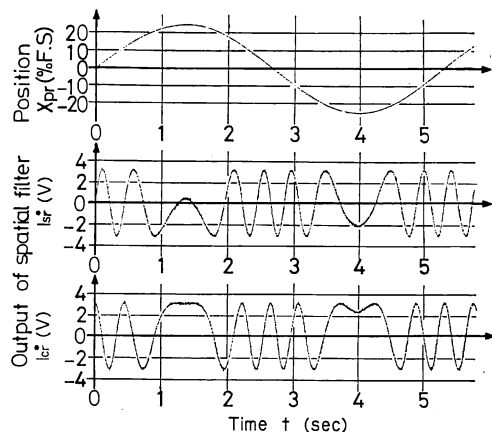


Fig. 5 Example of output signal of spatial filters I_{cr}^* and I_{sr}^* .

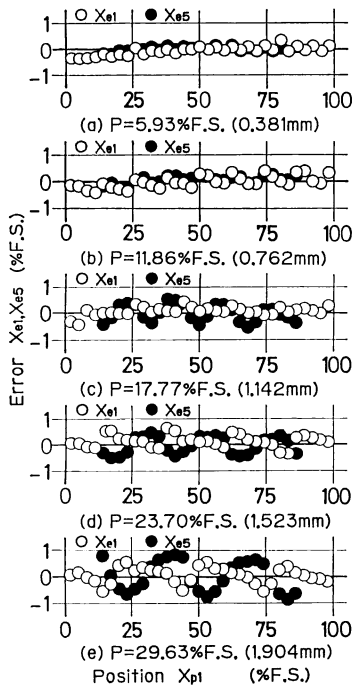


Fig. 6 Experimental results for the position measurement of moving point.

5.93% F.S. (0.381 mm) から 29.83% F.S. (1.904 mm) の間で 5 段階とした。図より、対象物の光学的特徴に関係なく、空間荷重関数の周期が増大するにともなって位置測定誤差が増加する傾向があり、誤差の増減は空間荷重関数の周期とほぼ一致していることがわかる。これは、荷重関数発生回路内で荷重関数の値を $\pi/8$ ごとに計算しているため、荷重関数の周期が長くなるにつれて直交正弦波状空間荷重の歪が増加するためであると考えられる。また、全 LED 点灯時 (ランダムパターンの場合) の誤差が LED 1 のみ点灯時 (単一光点の場合) の誤差と比較して大きいのは、レンズなどの光学系の特性のため画面全域にわたって対象物が同一条件で撮像されないため、空間フィルタ出力の位相角 α が変動するためであると考えられる。これらのことから、光学系による像の歪による誤差を除けば、正弦波状空間荷重を連続的に歪なく発生すれば、位置測定精度を向上させることが可能であると考えられる。

速度測定精度を検討するため、対象物を電気サーボ式移動テーブルで一定速度で移動させ、対象物の特徴的光点の速度と速度測定回路の出力より測定誤差を求めた。位置測定の際と同様、対象物の光学的特徴の違いによる測定精度の変化を検討するため、対象物の特徴的光点で

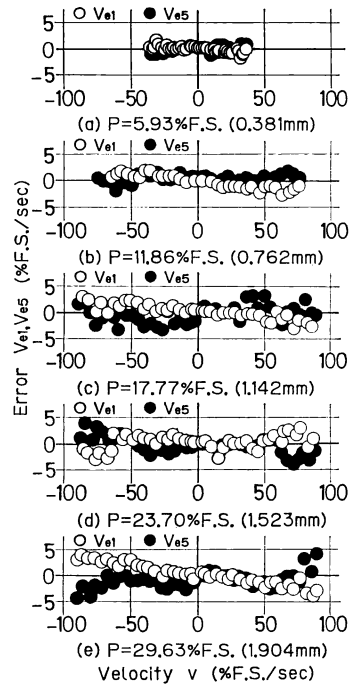


Fig. 7 Experimental results for the velocity measurement of moving point.

ある LED 1 のみを点灯した場合の速度測定誤差 V_{e1} と、5 個すべてを点灯した場合の速度測定誤差 V_{e5} を Fig. 7 に示す。対象物の基準速度は、LED 1 のみ点灯時、全 LED 点灯時ともに対象物の特徴的光点である LED 1 の速度 V とした。空間フィルタの荷重関数の周期は、位置測定時と同一とした。図より、対象物の光学的特徴に関係なく、空間荷重関数の周期が増大するにつれて速度測定誤差が増加する傾向があることがわかる。これは、位置測定と同様、直交正弦波状空間荷重の歪のためであると考えられる。また、全 LED 点灯時 (ランダムパターンの場合) の誤差が LED 1 のみ点灯時 (単一光点の場合) の誤差と比較して大きいのも、光学系による対象物像の歪による位相角 α の変動によるものと考えられる。

ところで、直交正弦波状荷重関数の周期が短い場合に高速度域で測定値がないのは、測定アルゴリズムに基づく測定限界があるためである。提案した速度測定アルゴリズムにおいては、NTSC 方式の TV カメラがサンプル周期を 1/30 秒とするサンプル値系であると考え、1 サンプル周期間に動点 M が描くリサージュ図形 (Fig. 1) の回転角の変化量を求め、その変化量を速度に換算している。この回転角の変化量は信号処理回路の特性によって $\pm\pi/2$ 以下に限られており、変化量が $\pm\pi/2$ を越え

る場合には $\pm\pi$ から変化量を減じた値が速度に換算される。そのため、1 サンプル周期間の回転角の変化量が $\pm\pi/2$ を越える場合、すなわち1 サンプル周期間に荷重関数の周期の $\pm 1/4$ を越える移動がある場合には、速度測定結果に大きな測定誤差が生じる。よって、速度測定が可能な範囲は荷重関数の周期が短くなるほど狭く、周期が長くなるほど広くなるのが明らかである。これらのことから、対象物の速度を精度良く、かつ、広範囲にわたって測定するためには、対象物の速度に応じて適応的に荷重関数の周期を調整する必要があることがわかる。

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

5. おわりに

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

対象物が単一光点である場合とランダムパターンである場合について演算アルゴリズムを示し、その後アナロ

グ演算素子により信号処理回路を試作して、それぞれの場合について位置と速度の同時測定を行った。検証実験の結果、位置測定、速度測定ともに良好な結果が得られた。また、光学系に起因する以外の誤差を軽減させ、位置測定ならびに速度測定の精度を向上させるための指針を導いた。

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

最後に、本実験に協力いただいた大学院生の今中成和氏 (現在、トヨタ自動車(株)勤務) に、感謝の意を表す。

文 献

- 1) 丹羽 登: “テレビジョン技術の計測への応用”, 計測と制御, **12** (1973) 575-586.
- 2) 石川正俊, 下条 誠: “ビデオ信号出力をもつ圧力分布センサと触覚パターン処理”, 計測自動制御学会論文集, **24** (1988) 662-669.
- 3) 木村一郎, 小澤 守, 真鍋義人, 竹中信幸, 高森 年: “感温液晶を用いた温度場と速度場の同時計測”, 計測自動制御学会論文集, **27** (1991) 870-877.
- 4) M. R. Belmont, D. J. Buckingham, E. A. W. Maunder and D. Walsh: “Remote video based vibration monitor,” Measurement, **3** (1985) 51-54.
- 5) 木村一郎, 高森 年, 井上 隆: “相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測—円柱後流の変動渦への適用—”, 計測自動制御学会論文集, **23** (1987) 101-107.
- 6) 小林 彬: “空間フィルタとその応用 [I], 空間フィルタとその応用 [II]”, 計測と制御, **19** (1980) 409-417, 571-579.
- 7) J. T. Ator: “Image-velocity sensing with parallel-slit reticles,” J. Opt. Soc. Am., **53** (1963) 1416-1422.
- 8) 小林史典, 近久直一, 小林 彬: “空間フィルタを応用した回転速度変動センサ”, 計測自動制御学会論文集, **21** (1985) 157-163.
- 9) 三橋 涉, 岡 和彦, 山崎弘郎: “電子的に構成した空間フィルタによる運動計測”, 計測自動制御学会論文集, **24** (1988) 1111-1117.
- 10) 長山秀徳, 岡本隆之, 山口一郎: “適応型空間フィルタ検出器と高分解能スペックル変位計への応用”, 光学, **20** (1991) 530-537.
- 11) 岡 和彦, 三橋 涉, 山崎弘郎: “電子的に実現した柔軟性を有する空間フィルタ”, 計測自動制御学会論文集, **25** (1989) 271-277.
- 12) 今中成和, 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: “ITV 画像による振動測定”, 第 64 回日本機械学会関西支部定時総会講演会講演概要集 (1989) pp. 175-176.
- 13) 倉田純一, 内山寛信, 田中輝夫: “TV カメラを用いた運動物体の高精度測定への一提案—鋸歯状荷重関数重畳法による位置測定—”, 光学, **20** (1991) 584-589.
- 14) 高木潤一, 山下 牧, 加藤充孝: “非対称 X 分岐を用いた導波型光変位センサ”, 電子通信学会技術研究報告, OQE 85-162 (1985) 37-42.