



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

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

(1990年9月6日受付, 1991年6月3日受理)

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

Position Measurement by Using Method of Convolution Integral with Saw Tooth Wave Form 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 September 6, 1990; Accepted June 3, 1991)

In this paper, the measuring method of the position of moving object on real time, by using the saw tooth wave form weighting function, is proposed. The centroid of intensity is calculated in one scanning period, by using the time series image signal according to NTSC television system and two kinds of saw tooth wave form weighting signal which give the weighting ratio in proportion to displacement, and by replacing spatial integration with time integration in the process of calculation. In this method, any video signal can be performed above operation, therefore it is possible to compute a recorded image of measured objects by VTR etc. The analogue signal processing circuits, which can compute 2-dimensional position of a centroid of intensity, was made as a trial. And as the results of the experimental confirmation of validity of this method, it was possible to measure the position of the feature point with an accuracy to $\pm 0.5\%$ of the measuring span.

1. はじめに

TVカメラ系は、VTRなどの周辺機器が豊富で取扱いが容易であり、レンズや信号が規格化されているため情報や機器の互換性が高く、工学分野で広く利用¹⁾されている。TVカメラ系を用いたロボットの近接視覚センサーや3次元形状測定システムでは、2次元画像から運動物体上の特徴線や点を抽出した後、それらの空間座標より物体形状や距離・角度などの情報を算出^{2,3)}している。2次元画像の膨大な情報から特徴線や特徴点に関する情報を抽出する作業は、多くの場合、画像記憶装置と計算機を用いて行われており、その処理には長時間を要する傾向がある。そこで、短時間に運動物体上の特徴点

の2次元情報を抽出するため、2値化法^{4,5)}、面積中心法⁶⁾や零位法⁷⁾などの手法が提案されている。しかし、2値化法においては最適しきい値調整の必要があり⁵⁾、また、面積中心法や零位法では逐次計算を行うため2走査周期以上の処理時間⁷⁾を必要としている。

これに対し、TVカメラを使用しない光学的非接触位置計測法としては、光点位置検出素子(PSD)を用いた光量重心位置⁹⁾の測定や、フォトダイオード・アレイを用いた空間フィルタ速度計¹⁰⁾などが挙げられる。これらの手法においては、抽出目的情報に適したセンサーが採用可能であるため信号処理が容易であるという利点を有している。しかし、その反面、被測定物を直接観察できないため、測定の際の状態監視や光学系の調整が困難で

あり、調整時に TV カメラの併用⁹⁾などが必要となる。

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

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

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

2. 光量重心位置算出アルゴリズム

TV カメラの撮像面上に結像した像の光量重心の位置を、X-Y 平面に置かれた物体の重心¹¹⁾と同様に定義する。TV カメラ撮像面の左上を原点とし、水平走査線方向を X 軸、垂直走査線方向を Y 軸とする X-Y 座標系を設定する。撮像面上に結像された対象像の光量分布を $I_p(x, y)$ 、光量分布が撮像面上で占める領域を S とすれば、像の光量重心座標 (x_m, y_m) は次式で示される。

$$x_m = \iint_{(S)} x \cdot I_p(x, y) dS / \iint_{(S)} I_p(x, y) dS \quad (1)$$

$$y_m = \iint_{(S)} y \cdot I_p(x, y) dS / \iint_{(S)} I_p(x, y) dS \quad (2)$$

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

対象像の光量分布 $I_p(x, y)$ は TV カメラのインタレース走査により時系列映像信号 $I_p'(t)$ に変換される。

光量分布 $I_p(x, y)$ への位置を重率とする重み付けは、時系列映像信号 $I_p'(t)$ と、水平・垂直走査に同期して発生され時間と共に線形に増加する鋸歯状荷重信号 $G_x(t)$ 、 $G_y(t)$ との乗算として行われる。インタレース走査によって 1 走査周期 T 秒間に撮像領域の全情報が抽出されるため、積分領域を撮像面とする空間積分は、積分時間を T 秒とする時間積分に置換することが可能である。これらの置換により、式(1)、(2)は次式となる。

$$x_m' = \int_{(T)} G_x(t) \cdot I_p'(t) dt / \int_{(T)} I_p'(t) dt \quad (3)$$

$$y_m' = \int_{(T)} G_y(t) \cdot I_p'(t) dt / \int_{(T)} I_p'(t) dt \quad (4)$$

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

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

撮像面内の座標 (x_{p1}, y_{p1}) に一つの光点が結像しており、その光量分布 $I_{p1}(x, y)$ が式(5)のガウス関数で近似可能¹²⁾であるとする。

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

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

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

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

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

同様にして、式(5)を式(2)に代入すれば、

$$y_m = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} y \cdot I_{p1}(x, y) dx dy$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{p1}(x, y) dx dy = y_{p1} \quad (7)$$

となる。

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

$$x_m = \frac{\int_{y_l}^{y_u} \int_{x_l}^{x_u} x \cdot I_{p1}(x, y) dx dy}{\int_{y_l}^{y_u} \int_{x_l}^{x_u} I_{p1}(x, y) dx dy}$$

$$= x_{p1} - r_{p1}^2 [\exp\{-(x_u - x_{p1})^2 / r_{p1}^2\} - \exp\{-(x_l - x_{p1})^2 / r_{p1}^2\}]$$

$$\int_{x_l}^{x_u} \exp\{-(x - x_{p1})^2 / r_{p1}^2\} dx \quad (8)$$

$$y_m = \frac{\int_{y_l}^{y_u} \int_{x_l}^{x_u} y \cdot I_{p1}(x, y) dx dy}{\int_{y_l}^{y_u} \int_{x_l}^{x_u} I_{p1}(x, y) dx dy}$$

$$= y_{p1} - r_{p1}^2 [\exp\{-(y_u - y_{p1})^2 / r_{p1}^2\} - \exp\{-(y_l - y_{p1})^2 / r_{p1}^2\}]$$

$$\int_{y_l}^{y_u} \exp\{-(y - y_{p1})^2 / r_{p1}^2\} dy \quad (9)$$

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

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

$$x_{p1} = (x_u + x_l) / 2 \quad (11)$$

$$y_{p1} = (y_u + y_l) / 2 \quad (12)$$

となる。これより、光点の像が広がりを持たないか、または、光点が有効撮像領域の中心にある場合のみ、位置検出誤差がゼロとなることがわかる。この誤差の数値計算結果を Fig. 1 に示す。特性は有効撮像面の幅で無次

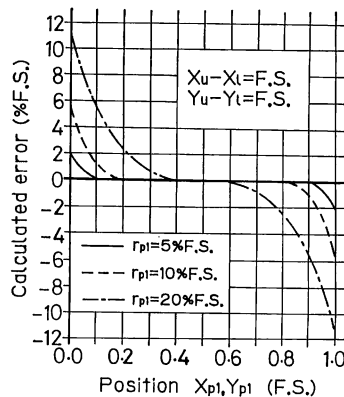


Fig. 1 Calculated error of position measurement.

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

3. 光点位置検出回路系の構成

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

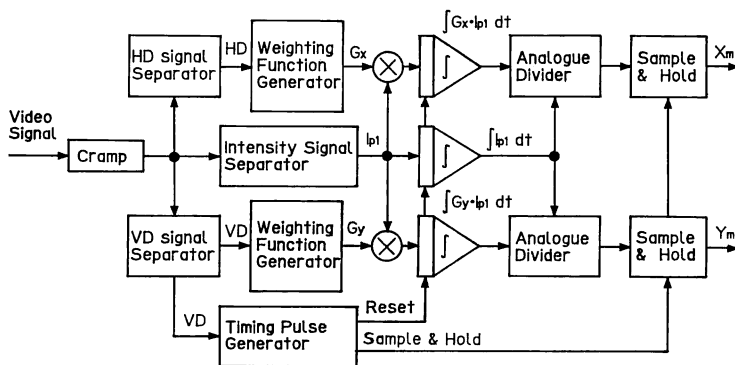


Fig. 2 Block diagram of the measurement method by using a convolution with saw tooth wave form weighting function.

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

重畳積分を行う際に使用する重率は、荷重関数発生回路によって水平・垂直走査に同期して発生される2種類の時系列鋸歯状荷重信号により与えられる。2種類の鋸歯状荷重信号の各走査開始時刻における値はゼロであり、各荷重信号の傾きは、X 方向 $5.07 \times 10^{-2} \text{ V}/\mu\text{s}$ 、Y 方向 $1.30 \times 10^{-1} \text{ V}/\text{ms}$ である。これらの鋸歯状荷重信号により与えられる重率は、両方向ともにそれぞれの位置に対して $4.15 \times 10^{-1} \text{ V}/\text{mm}$ の比例倍率を有している。この比例倍率の逆数を試作回路により求めた光量重心位置信号に乗じることにより、撮像面上の位置に換算することが可能である。

映像信号ならびに位置に関する重率を時系列電気信号に変換したことに従い、撮像面を積分領域とする空間積分を1走査周期を積分時間とする時間積分へと置換する。試作回路では、インタレース方式の走査による奇数・偶数フィールドの画像信号の差異が微小であると考へ、積分時間を1フィールド走査周期とした。同様に、全光量信号値も1フィールド走査周期の映像信号の時間積分値とした。

これら重畳積分値と全光量信号値により求められる光量重心の位置は、1フィールド走査終了後にサンプル・ホールド回路により次回の走査終了まで保持される。

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

4. 試作装置による実験的検討

位置測定のアプローチと信号処理回路の有効性を確認するため、運動物体上に直径 5.5 mm の赤色 LED を設置し位置測定を行った。被測定物である LED は、レンズ取付け位置前方 840 mm の位置に設置した。このとき、倍率は 6.70×10^{-2} であった。また、測定範囲は有効撮像領域と同一で X 方向 6.426 mm、Y 方向 4.802 mm である。また、光点の広がり半径 r_{p1} や測定位置、測定誤差などは、有効撮像領域の X 方向の幅 (6.426 mm) で無次元化し、「% F.S.」の表記を用いる。

実験で特徴点とした LED の光量分布は、Fig. 3 に示すように光点半径 r_{p1} が十分小さく有限範囲で光量がゼロとなるため、光量重心位置計算過程において、積分

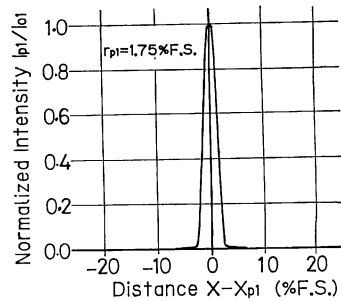


Fig. 3 Waveform of intensity signal of single light point.

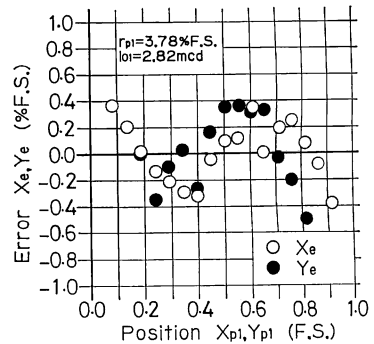


Fig. 4 Experimental results for the position measurement of a point at rest.

範囲を有効撮像範囲に限定するために生じる誤差は考慮する必要がないと考えられる。

最大光度 2.82 mcd、広がり半径 r_{p1} 3.78 %F.S. である LED 光点の、静止状態における位置測定を行った結果を Fig. 4 に示す。LED 光点は電気式サーボ機構の移動テーブル上に設置され、一定量ずつ移動される。移動後の光点の正確な位置は、位置検出用ポテンシオメータの出力値より換算して求め、この基準値と試作回路による測定値を統計的処理した結果、平均位置測定誤差は X 方向、Y 方向ともに $\pm 0.5\%$ F.S. 以内、標準偏差は X 方向 0.28 %F.S.、Y 方向 0.25 %F.S. であり、撮像素子の画素数 (502×485 画素) による解像度と同等である良好な精度を得た。これは、CCD 撮像素子の画素出力信号がビデオ信号に変換される際に平滑化されていることと、信号処理過程において画像処理装置の画素番地などの離散値的な重率に代って、連続した鋸歯状荷重信号を使用しているためと考えられる。

なお、インタレース方式のカメラでは、奇数フィールドと偶数フィールドとの間に Y 軸方向へ1走査線分の位置ずれがあるが、1フィールドごとの位置出力から両フィールド間の位置ずれによる誤差を検討した結果、両

者の差は平均位置測定誤差の10%以下であることがわかった。これは、光点の広がり半径 r_{p1} が 3.78%F.S. の場合、最大光度の 36.8% の光量をもつ円の直径が1フレームあたり約 40本の走査線に対応しており、フィールドの違いによる走査線位置の移動が位置検出信号にほとんど影響しないためであると考えられ、従って、光点の広がり半径が減少すれば対応する走査線数も減少し、走査線の移動が位置検出信号に与える影響が増加する。ゆえに、微小直径の光点を測定する場合には積分時間を1フレーム走査周期とすることが望ましい。

位置測定結果の測定方向による測定精度の差異は、水平走査周波数と垂直走査周波数との比が約 250倍あるため、同様の演算素子により回路を構成しても二つの回路の周波数特性が同一にならないために発生すると予測される。また、光点静止時に発生する誤差の変動は、積分回路のバイアス電流の変化により発生することが、回路系の特性実験により確認された。

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

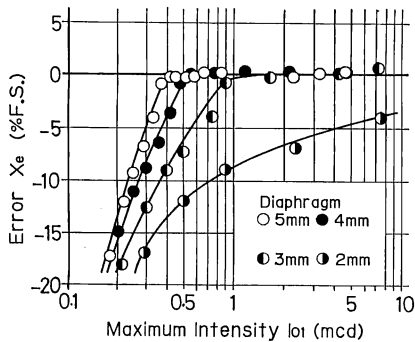


Fig. 5 Change in the position measurement error X_e caused by the change of maximum intensity I_{01} .

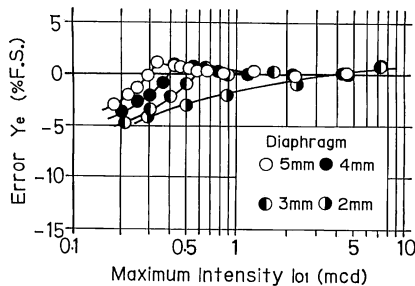


Fig. 6 Change in the position measurement error Y_e caused by the change of maximum intensity I_{01} .

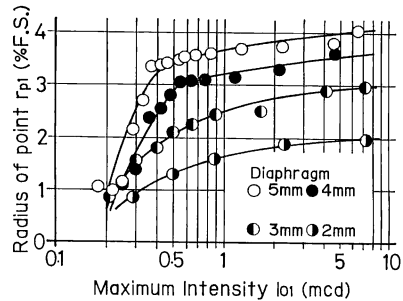


Fig. 7 Relationship between maximum intensity I_{01} and radius of point r_{p1} .

特徴点の最大光度と、 X 方向測定誤差、 Y 方向測定誤差との関係を Fig. 5, Fig. 6 に示す。これらの図より、測定誤差を X 方向、 Y 方向同時に $\pm 0.5\%$ F.S. 以内とするためには、開口絞りの直径が 5 mm の場合 0.4 mcd 以上、4 mm の場合 0.5 mcd 以上、3 mm の場合 0.9 mcd 以上の最大光度が必要であることがわかる。測定対象として使用した LED と開口絞りの構成では、特徴点の明るさと広がり半径を単独に調整することが不可能であり、両者の間には Fig. 7 に示す関係があった。ここで、広がり半径は、特徴点の光量を式(5)で示すガウス関数で近似して求めた。この関係を用いれば、前述の条件に対応する光点の結像半径は、開口絞りの直径が 5 mm の場合 3.3%F.S. 以上、4 mm の場合 3.0%F.S. 以上、3 mm の場合 2.4%F.S. 以上となる。 X 方向、 Y 方向ともに測定誤差が $\pm 0.5\%$ F.S. 以内となるこれら 3 種類の測定条件では、入射全光量に相当する映像信号の一面の積分値は同一であるが、これら 3 種の条件より小径の光点では入射全光量が減少し、信号処理回路中の除算回路の性能を保証する信号電圧を十分確保できないため測定精度が低下する。そのため、入射光量に適応して積分回路の回路定数を調整し、信号レベルを保証する回路機能を付加する必要がある。

動的な位置計測性能を検討するため、サーボ送り装置の台上に開口絞り径を直径 5 mm に調節した LED を設置し、視野内で直線往復運動させた場合の位置測定誤差を Fig. 8 に示す。物体の移動最高周波数 f_b はフィールドの走査周波数を考慮して、 $f_b = 5$ Hz とした。

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

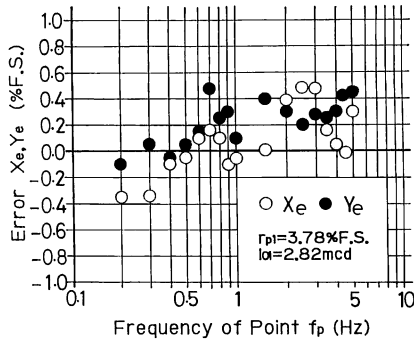


Fig. 8 Experimental results for the position measurement of moving point.

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

5. おわりに

運動物体の特徴点の位置を、汎用的 TV カメラを用いて高速、かつ高精度に測定する手法として、鋸歯状荷重関数重畳法を提案した。この手法は、2方向の走査に同期して発生させた2種類の鋸歯状荷重信号を用いて、対象像の時系列映像信号へ位置に比例した重み付けを行い、1フィールド走査周期を積分時間とする時間積分を行うことによって、測定対象物像の光量重心の位置を算出するものである。本報告では、鋸歯状荷重関数重畳法の演算アルゴリズムと実験的検証結果を示した。

簡単なアナログ演算回路系で構成した試作システムを用いて測定対象物の位置を測定した結果、静止している場合、移動している場合ともに良好な測定精度が得られた。また、誤差解析を行い測定精度向上のための基礎的

設計指針を導いた。

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

最後に、本実験に協力頂いた大学院生の本多陽介氏(現在、マツダ(株)勤務)に、感謝の意を表する。

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) 三上和夫，石原 英，中本 浩，藤枝紫朗，平野誠太郎：“知能ロボット用リアルタイム視覚センサの開発”，第31回システムと制御研究発表講演会講演論文集 (1987) pp. 115-116.
- 3) 佐藤宏介，井口征士：“空間コード化による距離画像入力”，電子情報通信学会誌，**J 68-D** (1985) 369-375.
- 4) S. Myers and S. Q. A. M. A. Hossain：“Logic circuitry and vidicon measure displayed areas,” Electron. Eng., **Feb.** (1971) 65-68.
- 5) 中野康夫，水野秀明，平山真明，上田澄広，小池 健：“貫通孔の3次元位置計測システムの開発”，第32回システムと制御研究発表講演会講演論文集 (1988) pp. 297-298.
- 6) 長谷川健介，前島英雄，大前 力：“物体の位置を測定する工業ロボットの眼に関する研究”，計測自動制御学会論文集，**9** (1973) 270-276.
- 7) 中野道雄，小林史典：“高速零位処理法による位置計測”，計測自動制御学会論文集，**13** (1977) 87-92.
- 8) 土田縫夫，山田陽滋，都築裕之：“2次元 PSD を用いた穴位置検出センサ”，電子情報通信学会論文誌 C，**J 71-C** (1988) 1483-1485.
- 9) 相田貞蔵，芹川聖一，中島 渉，山下昭裕，永村栄治：“背景光の影響を補正した PSD カメラによる三次元座標検出法”，電学論，**107-C** (1987) 632-639.
- 10) 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.
- 11) たとえば，矢野健太郎監修：数学ハンドブック (森北出版，1985) p. 384.
- 12) 高木潤一，山下 牧，加藤孝孝：“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.