円形速度バイアス法による三次元計測*
(マルチスポットレーザの配列を考慮した計測精度向上手法)川末 紀功仁*¹, 大宅 雄一郎*², 石 松 隆 和*³Three-Dimensional Measurement Using Circular Velocity Bias
(Improvement of Measurement Accuracy Using Multi Spot Laser)Kikuhito KAWASUE*⁴, Yuichiro OHYA and Takakazu ISHIMATSU^{**} Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Miyazaki University,
1-1 Gakuen Kibanadai Nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

Since the circular velocity bias system enables the 3-D measurement for multiple points from a single image, the system is suitable for the measurement of unsteady phenomena such as particle movement in water flow. In this paper practical improvement of velocity bias system using multi spot laser is introduced. Using the multi spot laser, effective calibration method is established and the accurate measurement can be realized by considering the parameter of the each laser spot. The measurement of a moving surface such as a free surface of water is introduced for one of the applications of circular velocity bias system. This measurement can be realized by utilizing the peculiarity of our system and multi spot laser. Experiments show the feasibility of our method.

Key Words: Measurement, Image Processing, Sensor, Three-Dimensional, Refractor, Laser, Free-Surface

1. 緒言

画像処理による三次元計測は非接触かつオンラインの計測が可能のため、広く理工学の分野で利用され、設計や解析さらに生産効率の向上に大きく寄与している。三次元計測手法としては、複数台のTVカメラを用いたステレオ法⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾やレーザスリット⁽³⁾⁽⁴⁾を利用した光切断法がある。しかし、ステレオ法では画像に周期性がある模様など酷似した計測点が多く存在するとカメラ間の対応が困難になる問題がある。また、光切断法ではレーザを走査させる必要性から動いている対象が計測できない問題がある。レーザを走査する代わりに、並列スリット光や格子縞パターンを投光することで一枚の画像から三次元計測を行う方法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が提案されているが、面が不連続な所で、スリットや格子縞も不連続となり、どの方向から投光されている光なのか識別できずに計測できない場合がある。

著者らは、屈折レンズを回転させ、撮影される映像にTVカメラの受像面に平行な円運動(円形速度バイアス)を加えることで三次元計測を行う手法を開発し、

前報⁽¹⁾⁽⁸⁾で報告している。本手法は、1枚の画像に運動を含む三次元情報を記録するので対象が動いている場合にも計測を行うことができる。また、1台のTVカメラを用いるため、ステレオ法のような画像間での対応点の検索を必要としない。さらに計測対象にマルチスポットレーザを照射することで、1枚の画像情報から三次元形状計測を行うことができ、対象に不連続な面が存在しても計測を行うことができる。しかしながら、単眼で計測する性質上、TVカメラの受像面に平行な方向に対し、TVカメラの光軸方向の計測精度が落ちる問題があった。また、計測現場において計測器とワールド座標系の位置関係を事前に把握するキャリブレーションが必要であり、その作業は煩雑なものであった。そこで、これらを改善するために、光分散レンズで構成されたマルチスポットレーザの特徴を生かした計測精度向上と効率良いキャリブレーション手法を提案する。

マルチスポットレーザを目盛板に照射し、目盛板表面に現れるレーザ輝点を基準点とすることでキャリブレーションを行う。すなわち、目盛板から読まれるワールド座標系と円形速度バイアス法によって得られる計測データの関係を同次座標系でマトリックス表記し、基準となるレーザ輝点のワールド座標と計測データの組み合わせを複数点代入することでキャリブレーション

* 原稿受付 2002年3月20日。

^{*1} 正員, 宮崎大学工学部(☎889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)。^{*2} 正員, (株)西日本流体技研(☎857-0401 長崎県北松浦郡小佐々町黒石免字小島339-30)。^{*3} 正員, 長崎大学工学部(☎852-8131 長崎市文教町14-1)。

E-mail: kawasue@computer.org

ンを行う。

計測時には、マルチスポットレーザを計測対象に照射し、対象表面に現れた輝点の位置を計測する。そこで、計測点が各レーザ光線にあることを考慮すると、あらかじめ各マルチスポットレーザ光線の式を求めておくことで、計測精度の向上に利用できる。本手法の効果を実験的に検証し、任意の計測器の配置において、2倍程度の精度向上を確認した。

また、同マルチスポットレーザと本計測器を組み合わせることで、多点の同時計測が可能になることに着目し、非定常的な変化を伴う流体自由表面計測を行った。本手法によると、一枚の画像から、三次元計測を行うことができるので、連続的に撮影することにより、流体自由表面や生物表面など非定常性のある動く対象の形状も計測することが可能になる。

2. 円形速度バイアス法

2.1 原理 図1に装置の概略図を示す。TVカメラの前に傾けて設置した屈折レンズをTVカメラの光軸を中心に高速回転させると撮影される画像は、円形にシフトされる。レーザによる輝点等の計測点はカメラの受像面上で円軌跡を描き、この径 r はTVカメラの焦点から計測点までの距離 z に反比例する。この関係は次のようになる。

$$r = \frac{f \cdot d}{z} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 f はカメラの焦点距離、 d は屈折レンズの傾き、および屈折率から決まる定数である。従って、画像処理により円軌跡の径 r を調べることで、計測点の深さを含む三次元位置を計測することができる。

2.2 三次元形状計測システム構成 図2に三次元計測器とマルチスポットレーザを組み合わせたシステム構成を示す。測定対象表面にマルチスポットレーザ光を投光し、対象表面に現れた輝点を計測器で撮影する。マルチスポットレーザはレーザ管から放射状に広がるので、レーザ管と対象との距離を変更することで対象表面上に現れる輝点の間隔を調整できる。これらの輝点は回転する屈折レンズによって円形にシフトされ円軌跡として撮影される。撮影される円軌跡の径はTVカメラからの距離に反比例し、カメラから離れている程小さな円軌跡を描く。図3は図2のように配置した対象を撮影した例で、aは画像に円形速度バイアスを加えていない状態で、bは屈折レンズを回転させ、円形速度バイアスを加えた状態である。

Fig.1 Measuring system

Fig.2 Experimental setup using multi laser spots.

Fig.3 Measurement of the position of laser spots. a. Multi laser spots projected on the surface of objects. b. Image with circular shift.

3. 計測器のキャリブレーション

本システムにおいて、三次元計測に必要な情報は、計測点における円軌跡の径 r_c と中心座標 (u_c, v_c) で、これらの情報は撮影された画像から画像処理の手法を利用して算出される⁽⁸⁾。算出される情報と、カメラの焦点に固定した座標系 (x_f, y_f, z_f) の関係は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = \frac{d}{r_c} \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ f \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 f はカメラの焦点距離で、 d は屈折レンズによる計測点の変位量である。

(2) 式において、 $z_f = s$ と置くことで線形化し、同次座標系で表すと以下のようになる。

$$s \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ r_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & fd \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots \quad (3)$$

計測台上に設置した座標系（ワールド座標系） x, y, z とカメラ座標系 (u_c, v_c) 及び円軌跡の径 r_c の関係を表すために(3)式に回転と平行移動を考慮すると、以下の式で表すことができる。

$$s \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ r_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots \quad (4)$$

$h_{11} \sim h_{43}$ のパラメータに計測器の位置、姿勢、画角など計測対象と計測器の関係を表すデータが全て含まれる。展開して整理すると、次のようになる。

$$\begin{cases} h_{11}x + h_{12}y + h_{13}z + h_{14} - (h_{41}x + h_{42}y + h_{43}z)u_c = u_c \\ h_{21}x + h_{22}y + h_{23}z + h_{24} - (h_{41}x + h_{42}y + h_{43}z)v_c = v_c \\ h_{31}x + h_{32}y + h_{33}z + h_{34} - (h_{41}x + h_{42}y + h_{43}z)r_c = r_c \end{cases} \quad (5)$$

ワールド座標系で基準となる点 (x, y, z) と、それに対応するカメラ座標系 (u_c, v_c) および円軌跡の径 r_c が一組わかれれば(5)式のように三つの式が成立するので、 $h_{11} \sim h_{43}$ の15個の未知数を求めるためには、同一平面上に無い5点以上の基準となる点を入力すると良い。また、さらに精度を向上させるためには、できるだけ多くの基準点を入力し、最小自乗法によりパラメータを決定する。これらの基準点を入力する方法を以下に説明する。

キャリブレーション時のセッティングを図4に示す。計測テーブル上にワールド座標 x, y, z を設定する。目盛板を z ステージ上に設置し、 z ステージ上で z 軸に沿ってスライドできるようにする。また、目盛板は、 x, y 軸と平行とする。

- 1) マルチスポットレーザを目盛板表面に照射する。
- 2) バンドパスフィルタをTVカメラのレンズに取り付け、屈折レンズを回転させることでレーザスポットによる円軌跡を撮影する。図5に円軌跡撮影時の概略図を示す。
- 3) 各円軌跡の半径 r_i と中心座標 (u_i, v_i) を画像処理により算出する。
- 4) バンドパスフィルタと屈折レンズをTVカメラか

らはずし、目盛板上の xy 目盛りをTVカメラで撮影する。

- 5) 撮影した xy 目盛りをコンピュータのディスプレイ上に表示する。図6に xy 目盛り撮影時の概略図を示す。
- 6) ディスプレイに表示された xy 目盛上で基準となる任意の点をマウスで指示することでカメラ座標 (u_p, v_p) をコンピュータに入力する。また、指示された位置での円軌跡の径 r_p を、3)で得られたデータの内、近傍のデータを利用して、以下の式のように距離の自乗の重み付き平均により求める。

$$r_p = \frac{\sum_i r_i \cdot \frac{1}{l_i^2}}{\sum_i \frac{1}{l_i^2}}, \quad l_i^2 = (u_p - u_i)^2 + (v_p - v_i)^2 \quad (6)$$

ここで、 r_i, u_i, v_i は、3)で得られた点の内、 (u_p, v_p) 近傍の円軌跡のデータである。

- 7) 6)で指示された位置を目盛り板の xy 目盛りと z 軸ステージ上の目盛り z より、ワールド座標 (x_p, y_p, z_p) としてコンピュータに入力する。
- 8) 1)～7)までの処理を z 軸ステージ上で z 位置を変えながら数十回繰り返す。

以上の手続きより得られたデータを(5)式に代入し、次の連立方程式を組み立てる。

$$Th = c \quad \dots \quad (7)$$

ここで、

$$T = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -r_1x_1 & -r_1y_1 & -r_1z_1 \\ & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -r_nx_n & -r_ny_n & -r_nz_n \end{bmatrix}$$

$$h = \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{14} \\ \vdots \\ h_{43} \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ r_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ r_2 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \\ r_n \end{bmatrix}$$

であり、 n は入力する基準点の個数である。

$h_{11} \sim h_{43}$ の15個のパラメータは、最小自乗法により求められる T の擬似逆行列 T^* を用いて、以下の式で算出される。

$$h = T^*c = (T'T)^{-1}T'c \quad \dots \quad (8)$$

算出される h のパラメータを用いて、計測器から得られるデータ (u, v, r) からワールド座標 (x, y, z) への変換式は次の式で表される。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{41}u - h_{11} & h_{42}u - h_{12} & h_{43}u - h_{13} \\ h_{41}v - h_{21} & h_{42}v - h_{22} & h_{43}v - h_{23} \\ h_{41}r - h_{31} & h_{42}r - h_{32} & h_{43}r - h_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} h_{14} - u \\ h_{24} - v \\ h_{34} - r \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 (u, v) は、計測点による円軌跡の中心座標、また、 r は円軌跡の半径である。

Fig. 4 Setup for calibration

Fig. 5 Estimation of size of circular streaks

Fig. 6 Detection of pairs between coordinates

4. マルチスポットレーザの配列を考慮した精度向上

撮影される円軌跡の中心位置 (u_c, v_c) 及び円軌跡の径 r_c から(9)式を用いてワールド座標 (x, y, z) を算出できる。しかしながら、単眼で計測する装置の性質上、カメラの受像面に平行な方向の精度と比較して深さ方向の精度が落ちる。この問題を解決するために、各マルチスポットレーザ光線の式を予め求め、各計測点がこの光線上にあることを考慮して、計測結果を補正することを試みた。

使用したマルチスポットレーザ光は、それぞれの光線がある1点から放射状に伸びており、かつ、各点の間隔は等間隔になるように作られている。そこで、透視変換の関係と同様に各レーザ光のマトリックス内での位置を表す識別番号を図7で示すように m, n とおくと、ワールド座標 (x, y, z) との関係は次式で示される。

$$H \begin{bmatrix} m \\ n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$(m=0,1,2,3, \dots; n=0,1,2,3, \dots)$$

$L_{11} \sim L_{33}$ のパラメータにレーザの位置、姿勢等ワールド座標とレーザ識別番号の関係が全て含まれる。展開して整理すると次のようになる。

$$\begin{cases} xL_{11} + yL_{12} + zL_{13} + L_{14} - (xL_{31} + yL_{32} + zL_{33})m = m \\ xL_{21} + yL_{22} + zL_{23} + L_{24} - (xL_{31} + yL_{32} + zL_{33})n = n \end{cases} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ワールド座標系上で基準となるレーザ上の輝点 (x, y, z) と、それに対応するレーザの参照番号 (m, n) が一組わかれば(11)式から二つの式が成立するので、 $L_{11} \sim L_{33}$ の11個の未知数は、同一平面上に無い6点以上の基準となる点を入力し、次の連立方程式を組み立てることで算出する。

$$TL = c \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、

$$T = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1m_1 & -y_1m_1 & -z_1m_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -x_1n_1 & -y_1n_1 & -z_1n_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & z_N & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_Nm_N & -y_Nm_N & -z_Nm_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_N & y_N & z_N & 1 & -x_Nn_N & -y_Nn_N & -z_Nn_N \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{12} \\ L_{13} \\ L_{21} \\ \vdots \\ L_{33} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} m_1 \\ n_1 \\ m_2 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_N \end{bmatrix}$$

であり、 N は、入力した基準点の個数である。

$L_{11} \sim L_{33}$ のパラメータは最小自乗法により求められる
 T の擬似逆行列 T^* を用いて、以下の式で算出される。

$$L = T^*c = (T'T)^{-1}T'c \quad \dots\dots\dots(13)$$

三次元計測器によって計測された輝点は、マルチスポットレーザの内では何れかのレーザ光線上に存在するので、(9)式で得られた三次元座標 x, y, z を(11)式に代入し、対応するレーザの識別番号 (m, n : 整数) を算出する。識別番号が決まると輝点が存在するレーザの式は(11)式を変形して、以下の2平面の方程式の交線として求まる。

$$\begin{cases} (L_{11} - mL_{31})x + (L_{12} - mL_{32})y + (L_{13} - mL_{33})z + L_{14} - m = 0 \\ (L_{21} - nL_{31})x + (L_{22} - nL_{32})y + (L_{23} - nL_{33})z + L_{24} - n = 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(14)$$

また、この式と(5)式中で測定精度がおとる r_c を含んだ3行目の式を除いた1, 2行目の2式と連立させる。

$$F = QV \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここで、

$$F = \begin{bmatrix} m - L_{14} \\ n - L_{24} \\ u_c - h_{14} \\ v_c - h_{24} \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} L_{11} - mL_{31} & L_{12} - mL_{32} & L_{13} - mL_{33} \\ L_{21} - nL_{31} & L_{22} - nL_{32} & L_{23} - nL_{33} \\ h_{11} - u_c h_{41} & h_{12} - u_c h_{42} & h_{13} - u_c h_{43} \\ h_{21} - v_c h_{41} & h_{22} - v_c h_{42} & h_{23} - v_c h_{43} \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$

である。

従って、 Q の擬似逆行列 Q^* を求めて、

$$V = Q^*F = (Q'Q)^{-1}Q'V \quad \dots\dots\dots(16)$$

から、補正された座標 x', y', z' を求めることができる。

Fig.7 Arrangement of multi laser spots

5. 計測性能試験

5.1 計測精度の評価 システムの計測性能を試験するために、次のような実験を行った。TVカメラの受像面に対し平行に設置した平板にマルチスポットレーザ (約 300 点) をカメラの光軸に対し約 45 度の角度から投光し、平板表面に現れるそれぞれの輝点の位置を計測器で計測する実験を行った。撮影される円軌跡の画像を画像メモリ (分解能 512 × 512) に取り込み、パーソナルコンピュータ (Pentium III, 800MHz) で解析した。TVカメラから平板までの距離は 100mm から 300mm の間で 25mm 刻みで位置を変更した。4章で示した手法によって補正を行った場合の計測誤差と補正を行わない場合の計測誤差を計測器からの深さごとに表したものを図 8 に示す。補正処理により、補正を行わない場合と比較して誤差を 50% 程度削減できた。

5.2 運動する計測点に対する追従性の評価 計測点が運動している場合、撮影される軌跡はらせん形軌跡に変形するが、屈折レンズの回転数をより高くすることで円軌跡として近似できるので、前報⁽⁸⁾で提案した画像処理手法が適用可能である。ここでは、どのような条件で屈折レンズの回転数を高めることが必要になるかについて、同回転数を 3,600r/min とした計測例について検討する。

図 9 は、レーザスポットがカメラから 300mm の距離で運動している場合に前報⁽⁸⁾で報告した手法によりらせん軌跡を円軌跡と近似して解析した例で、右側の軌跡ほど移動速度が速くなっている。中段の画像は軌跡の中心候補の集合を画像で示したもので、下段は算出された近似円を基の画像に重ねたものである。第 1 列、第 2 列のように計測点の動きが遅い場合に算出される近似円は、屈折レンズが 1 回転する間での計測点の平均位置を示し、TVカメラから等距離であれば同

Fig. 8 Accuracy of the measuring system

じサイズの近似円が得られることが確認できる。ただし、計測点の動きが速くなるにつれ、中心位置候補の集合が二つに分かれ始め、第3列のようにさらに動きが速くなると一つのらせん軌跡が大小二つの円として近似される。計測できる計測点の最大速度は、画像上での円形軌跡サイズに対する計測点の移動量に関係し、今回使用したアルゴリズムでは、円軌跡径に対して露光時間内で30%程度（円軌跡径が30ドットであれば9ドット）までの変形（計測点の画像内での移動量）であれば解析が可能である。さらに速い現象を計測する場合は、屈折レンズの回転数を上げると共にカメラの露光時間を変更する必要がある。

6. 流体自由表面の計測例

本計測器とマルチスポットレーザを組み合わせることで、多数の計測点の三次元位置を一枚の画像から計測できることに着目し、流体自由表面の三次元形状計測を行った。

実験装置の概略を図10に示す。水を張った水槽にアルミニウム粉末（20 μ m）を導入すると、これらの

Fig. 10 Experimental setup for surface measurement of flow

Fig. 11 Multi laser spots with circular shift

150mm/s 300mm/s 480mm/s

a. Original image.

b. Accumulation of candidates of center.

c. Results of analysis.

Fig.9 Analysis of spiral streak

粉末は流体表面上で薄い膜を形成する。マルチスポットレーザ（30mW）を流体表面に照射すると、アルミ膜により、流体表面上で輝点が現れる。計測器の屈折レンズを3,600 r/minで回転させると画像上に円軌跡が現れる。計測器で撮影される円軌跡の画像を図11に示す。流体表面に現れたレーザ輝点の三次元位置データを元に、ディスプレイ上に波の形状を再現したものを図12に示す。連続的に計測することで、非定常性を持つ流体自由表面の計測を行うことができる。

7. 結言

円形バイアス法による三次元計測器において、画像処理によって得られる計測データとワールド座標系の関係性をマトリックス表記し、マルチスポットレーザを用いて効率的にキャリブレーションを行う手法を提案した。また、各マルチスポットレーザ光線の式を予め求めておき、計測点がこの光線上にあることを考慮して計測結果の補正を行う手法を提案した。位置が既知の輝点を計測することで実験を行い、提案した補正処理により、補正を行わない場合と比較して、誤差を50

Fig.12 Experimental result of surface measurement of water wave

%程度に削減できることを確認した。

本計測器には、1枚の画像を用いて多数の計測点の三次元位置を計測できる特徴があり、非定常的な動きを持つ表面形状計測が実現できる。本論文において、マルチスポットレーザを組み合わせることで流体自由表面の形状計測を行った計測例を示した。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費(No.11555056)の支援による。記して謝意を表す。

文献

- (1) 川末紀功仁, 石松隆和: 円形速度バイアス法を用いる流れ場の三次元計測法, 機論, 62-594, C(1996), pp.629-634
- (2) 蚊野浩, 金出武雄: 任意カメラ配置におけるステレオ視とステレオカメラ校正, 信学論, J79-D-II, No.11(1996), pp.1810-1818
- (3) 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990
- (4) 牛島省: レーザライトシートスキャニングシステムを用いた三次元画像処理流速計測法, 機論, 62-596,, B(1996), pp.1414-1419
- (5) 徐 剛, 辻 三郎: 三次元ビジョン, 共立出版, 1998
- (6) 西野耕一, 笠木伸英, ほか2名: 画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究, 機論, 55-510, B(1989), pp.404-412
- (7) E.R. DAVIES, Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities, Academic press, Harcourt Brace Jovansvich, Publishers.
- (8) 川末紀功仁, 大宅雄一郎, ほか1名: 円形速度バイアス法による三次元計測 (画像処理の自動化手法), 機論, 67-661, C (2001), pp.2877-2882
- (9) 谷内田正彦: ロボットビジョン, 昭晃堂, 1990
- (10) Carme Torras: Computer Vision: Theory and Industrial Applications, Springer-Verlag, 1992