多視点ステレオ画像計測を用いた 屋外設備位置計測システム

非会員 野 引 敦 (NTT アクセス網研)
非会員 成 瀬 央 (N T T)
非会員 立 田 光 廣 (千 葉 大)
非会員 藪 田 哲 郎 (NTT アクセス網研)

Outdoor Facility Measurement System using Multi-Viewpoint Stereo Measurement

Atsushi Nobiki, Non-member (NTT Access Network Systems Laboratories), Hiroshi Naruse, Non-member (NTT), Mitsuhiro Tateda, Non-member (Chiba University), Tetsuro Yabuta, Non-member (NTT Access Network Systems Laboratories)

This paper proposes a novel outdoor facility measurement system. The purpose of this system is to enable survey work on roads to be undertaken both safely and efficiently. This system employs a stereo measurement method and measures facility positions by integrating stereo measurement data from multi-viewpoints whose relationship is unknown. The system involves two processes which consist of recording images in the field and then analyzing those images indoors. The system is set up in the field and stereo images are recorded in a digital camera from several viewpoints around an intersection. The image analysis is divided into three parts. First, the facility positions from each viewpoint are obtained by a stereo measurement method with the aid of an operator. Second, the correspondences between the stereo measurement data from the multi-viewpoints are obtained. Finally, the facility positions and the relationship between the viewpoints are estimated. The second and final stages of this image analysis are performed automatically. This paper presents highly accurate measurement algorithms for this system, which reduces the amount of assistance required from an operator, and describes facility measurement for some actual intersections.

キーワード：屋外設備，位置計測，ステレオ画像計測，多視点，パターンマッチング，対応付け

1. ま え が き

情報通信は現代の社会にとって必要不可欠であり，この通信機能を良好な状態に維持しておくことの重要性はますます増大している。通信機能は膨大な数の設備によって支えられており，新しい設備管理方式による設備の信頼性向上が必要とされている。計算機の発達にともない，設備情報を計算機に入力することにより，データベースを構築し，これによって効率的な運用，管理を行う手法が検討されている^{(1)~(3)}。これらの情報を得るための調査は目視によって行われてきたが，作業環境の改善，人件費の高騰などの理由から自動化が望まれ，ロボットや画像処理技術を用いた設備調査技術が検討されている^{(4)~(7)}。

現在，屋外における測量作業は，トランジットや光波測距儀に代表される測量機器を用いて歩道などを中心とした道路上で行われている。この作業は本来4名で行うべきものであるが，経費の節減などの理由により2名程度で行わ

れているのが現状である。著者らはこの測量作業の危険を減らしたり，効率化を目的として，画像計測技術を用いた屋外設備位置計測システムの検討を進めている。本システムは地上写真測量を用いて100 m四方程度の範囲，すなわち，距離が離れた物体の測量作業を行うことを目的としたものであり，位置関係が未知な複数の異なる視点から得られたステレオ画像計測データを統合し，視点の位置関係と物体の位置とを高精度に推定するものである^{(8)~(10)}。前述のトランジットや光波測距儀を用いて行われる測量作業の計測精度は数 mm から数 cm 程度である⁽¹¹⁾のに対し，本システムでは現在，数十 cm 程度である。しかし，路上での作業については画像の入力だけで簡単であり，蓄えられた入力画像から，画像内における物体についてはどの物体でも位置情報を必要に応じて取り出せる利点がある。

設備管理用としては，主に縮尺 1/2500 の地図が用いられている⁽²⁾。地図に含まれている誤差は縮尺に応じて異なっており，縮尺 1/2500 の地図の場合には，最大で 1.75 m

程度である⁽³⁾。このことから、設備位置計測に要求される精度として、この1.75 mを十分に上回る1 mを目標精度とした。現在、著者らは、これまで検討を進めてきたアルゴリズムを統合した簡易システムを試作し、複数の交差点における屋外設備位置計測実験を通して計測精度の定量的な評価を行っているところである。

複数のカメラから得られた画像を用いて、三角測量の原理から距離情報を抽出するステレオ画像計測法は、非接触の三次元位置計測手法として写真測量に適用されている^{(12)~(14)}。写真測量は、航空機によって撮影されたオーバーラップする複数の画像を用いる航空写真測量と、1 m程度の基線の両側に平行に固定された2台のカメラによって撮影された画像を用いる地上写真測量とに大別できる。ステレオ画像計測における計測精度はカメラ間隔に比例して向上する。それに対して計測誤差の大きさ、特に視線方向の誤差は、物体までの距離が大きくなるとともに急増していく。従って、航空写真測量による地形測量では、カメラ間隔を長くとするなどの工夫により距離の離れた物体についても高精度で測量することを可能としている。これに対して、地上写真測量のようにカメラ間隔が短い場合には精度良く計測できるのは、近距離の物体だけであり、距離が長くなるにつれて、著しく精度が劣化していくという問題がある。そのため、地上写真測量は、警察の交通事故現場の測定などのように、物体までの距離が数 m 程度と短い場合に適用されてきた⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。また、ステレオ画像計測をロボットの視覚センサとして適用する検討も行われている。自律移動ロボットのナビゲーションへの応用として、異なる視点から得られたステレオ画像計測データを統合し、視点の位置関係と物体の位置とを推定するなどの様々な検討がされている^{(15)~(17)}。

本論文では、屋外設備位置計測を目的として今回試作したプロトタイプシステムを紹介するとともに、システムを構築する際に必要となるシステムパラメータの決定精度が計測精度に与える影響についても検討する。以下に、基本的なアルゴリズム、システム構成について簡単に説明し、実際の交差点において行った屋外設備位置計測実験について述べる。

2. 多視点ステレオ画像計測による計測精度の向上

本システムで用いている多視点ステレオ画像計測法について述べる。まず、ステレオ画像計測の原理とその誤差の解析⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、複数の異なる視点で得られたステレオ画像計測データの対応付け手法⁽⁹⁾、ステレオ画像計測データの統合により高精度化を図る多視点ステレオ画像計測⁽¹⁰⁾について述べる。本システムによる屋外設備位置計測の概念図を図1に示す。

〈2・1〉 ステレオ画像計測 ステレオ画像計測のモデルを図2に示す。実空間座標として x, y, z を用い、画像面座標として u, v を用いる。水平面内に x 軸、 y 軸をとり、鉛直方向に z 軸をとる。画像面の水平軸である u

図1 屋外設備位置計測概念図
Fig. 1. Outdoor facility measurement image.

図2 ステレオ画像計測モデル
Fig. 2. Stereo measurement model.

軸と垂直軸である v 軸は、それぞれ、 x 軸、 z 軸と平行であるものとする。また、光軸と y 軸とは平行であるものとする。点 O は座標系の原点であり、この点を視点と呼ぶ。左右カメラの主点 F_L, F_R はそれぞれ $(-a, 0, 0)$ 、 $(a, 0, 0)$ にあるとする。この $\overline{F_L F_R}$ 、すなわち $2a$ がカメラ間隔である。両カメラの画像面は主点から f だけ離れた位置にあるとする。

いま、三次元空間内の一点 $P(x, y, z)$ が左右画像面上の点 $I_L(u_L, v_L)$ 、 $I_R(u_R, v_R)$ に投影されたとする。このときエピポーラ条件より、 $v_L = v_R$ となるから、以下では v_L と v_R を区別せずに v で表す。 $\triangle I_L I_R P$ と $\triangle F_L F_R P$ とが相似であることから、画像面座標 $\mathbf{u} = [u_L \ u_R \ v]^T$ から三次元実空間座標 $\mathbf{x} = [x \ y \ z]^T$ への変換は次のように書ける。

$$\mathbf{x} = \frac{a}{u_L - u_R} \begin{bmatrix} u_L + u_R \\ 2f \\ 2v \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

以上の原理に基づいて、2枚のステレオ画像より三次元実空間座標が算出できる。通常の屋外設備位置の測量では、水平面内での位置が重要であることから、以下では二次元の場合について述べる。なお、以下の内容は容易に三次元に拡張可能である。

ステレオ画像計測ではデジタル化された濃度情報を用いて、画像面座標 $\mathbf{u}$ を求める。各種の内挿法を用いることにより、デジタル化による影響を大幅に緩和し、サブピクセルの精度で画像面座標を求めることができる⁽¹⁹⁾。しかし、各種雑音に起因する誤差が存在する。画像面上に

おける計測誤差 $du = [du_L \ du_R]^T$ の統計的性質として標準偏差 σ の独立な正規分布を仮定すると、 du が起こる確率密度関数は、

$$s = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^2 \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} (du^T du) \right] \dots\dots\dots (2)$$

で表される。

画像面座標計測誤差 du と実空間座標計測誤差 $dx = [dx \ dy]^T$ との関係について考える。画像面座標計測誤差 du が微小であるとする、 du と dx との関係は、

$$du = J^{-1} dx \dots\dots\dots (3)$$

と表せる。ここで、 J は、

$$J = \frac{\partial x}{\partial u}$$

である。従って、画像面座標計測誤差に起因する実空間座標計測誤差の確率密度関数 s は、(2)、(3)式より、

$$s = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^2 \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \{ dx^T (JJ^T)^{-1} dx \} \right] \dots\dots\dots (4)$$

と表せる。従って、実空間座標計測誤差の分散共分散マトリクス C は、次式のように表すことができる。

$$C = \sigma^2 JJ^T \dots\dots\dots (5)$$

更に、 JJ^T は対称マトリクスであるので、次式のように変形できる⁽²⁰⁾。

$$C = \sigma^2 UDU^T \dots\dots\dots (6)$$

$$U = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 \\ |e_1| & |e_2| \end{bmatrix}$$

$$D = \text{diag}[d_1 \ d_2]$$

$$0 \leq d_1 \leq d_2$$

ここで、 U の成分 $e_i (i=1,2)$ は JJ^T の固有ベクトルであり、 D の成分 $d_i (i=1,2)$ は e_i に対応する固有値を示している。これより、(4)式で示された実空間座標計測誤差の確率密度関数 s の等誤差面は、 e_i の方向に $2\sigma\sqrt{d_i}$ の主軸をもつ楕円の形状をなしていることがわかる。

計測値を $\tilde{x}$ のように $\sim$ を用いて示すと、 JJ^T は、

$$JJ^T = \frac{1}{2a^2f^2} \begin{bmatrix} (\tilde{x}^2 + a^2)\tilde{y}^2 & \tilde{x}\tilde{y}^3 \\ \tilde{x}\tilde{y}^3 & \tilde{y}^4 \end{bmatrix}$$

となる。実際のステレオ画像計測を考えると、 $y \gg a$ 、 $y \gg x$ とみなせるので、それらを考慮して(6)式の U 、 D を求めると、

$$U = \frac{1}{\sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}} \begin{bmatrix} -\tilde{y} & \tilde{x} \\ \tilde{x} & \tilde{y} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{y}^2}{2f^2} & 0 \\ 0 & \frac{\tilde{y}^4}{2a^2f^2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

となる。

〈2・2〉 異視点ステレオ画像計測データ対応付け 位置関係が未知な異なる複数の視点で得られたステレオ画像計測データについて対応付けを行う。ここでは、従来の2視点間での対応付け手法⁽⁹⁾を多視点の場合について拡張し、誤対応を減らし、対応の信頼性を向上させる。本方法

は、ステレオ画像計測データに含まれる情報である、視野と計測誤差とに着目して対応付けを行う。複数の視点の中から任意に2視点を選び出し、二つの視点の視野領域が重なる領域内において、対応する物体対には計測誤差に基づいた正の評価値を与え、しないものには負の評価値を与え、二つの視点におけるステレオ画像計測データの対応の程度を定量的に評価する。複数組の2視点間での対応付けを用いて多視点間における対応付けを行い、複数組の2視点間での対応の評価値の総和が最大となる多視点間での対応を求める。

(i) 視野領域の決定

各視点における計測点に対し、図3に示すように $OP_j (j=1,2,3,\dots,n)$ の延長線上に点 P'_j を、 P_i 、 P_n については後述するように P'_0 、 P_{n+1}' をとり、これらの点がつくる多角形 $OP'_0P'_1P'_2\dots P'_nP_{n+1}'O$ を視野領域 V_p とする。 $y \gg x$ を考慮すると、(8)式より y 座標の相対誤差 dy/y の標準偏差は $(\sigma/\sqrt{2}af)y$ となる。従って、点 P'_j を

$$\frac{OP'_j}{OP_j} = 1 + \frac{3\sigma}{\sqrt{2}af} y_j \dots\dots\dots (9)$$

となる位置にとると、99%以上の場合について P'_j を真の物体よりも遠くにつくることができる。

P'_0 および P_{n+1}' については、

$$\begin{aligned} & \overline{P_1P'_0} // x \text{ 軸}, \overline{P'_1P'_0} // y \text{ 軸}, \\ & \overline{P_nP_{n+1}'} // x \text{ 軸}, \overline{P'_nP_{n+1}'} // y \text{ 軸} \end{aligned}$$

となるように選ぶ。

(ii) 2視点間での対応付け

まず、二つの視野領域 V_p 、 V_q 内に含まれるステレオ画像計測データからそれぞれ2点ずつの重ね合わせの基準点対 P_j 、 P_k および Q_r 、 Q_s を選び出し、これらを互いに重ね合わせる。このとき、

$$|P_jP_k - Q_rQ_s| < \epsilon_1(j,k,r,s) \dots\dots\dots (10)$$

を満たさないものは重ならないものと判定し、他の基準点対を探す。ここで、重なり判定基準となるしきい値 $\epsilon_1(j,k,r,s)$ は4点 P_j 、 P_k 、 Q_r 、 Q_s に含まれる計測誤差に依存して定める。ステレオ画像計測における真の物体位置と計測物体位置との距離誤差の分散 V は、(8)式より、

図3 視野領域
Fig. 3. View field.

$$V = \frac{\sigma^2 \tilde{y}^2}{2a^2 f^2} (a^2 + \tilde{y}^2) \\ \cong \frac{\sigma^2 \tilde{y}^4}{2a^2 f^2}$$

と表すことができる。これより、上述の4点 P_j , P_k , Q_r , Q_s の真の物体位置からの隔たりの距離誤差の標準偏差がそれぞれ $(\sigma/\sqrt{2af})y_{P_j}$, $(\sigma/\sqrt{2af})y_{P_k}$, $(\sigma/\sqrt{2af})y_{Q_r}$, $(\sigma/\sqrt{2af})y_{Q_s}$ の程度であることから、しきい値 $\varepsilon_1(j, k, r, s)$ を距離誤差の標準偏差の3倍を用いて次式のように定める。

$$\varepsilon_1(j, k, r, s) = \frac{3\sigma}{\sqrt{2af}} \sqrt{y_{P_j}^4 + y_{P_k}^4 + y_{Q_r}^4 + y_{Q_s}^4} \quad (11)$$

次に、 P_j と Q_r , P_k と Q_s が互いに重なるように各視点の全ステレオ画像計測データを回転、平行移動させて重ね合わせる。重ね合わせの様子を図4に示す。図4では、 P_1 と Q_5 を一致させて、 P_2 と Q_4 が最も近くなるように視点2のデータを変換している例を示している。次に、 V_p , V_q の重複領域内の点 P_i , Q_i について重なり程度の評価値を算出する。 $\overline{P_i Q_i}$ が(11)式と同様の次式(12)で与えられるしきい値よりも小さければ、これら2点是对応するとして、誤差の確率密度関数に基づく次式(13)で評価値 E を算出する。

$$\varepsilon_2(t, l) = \frac{3\sigma}{\sqrt{2af}} \sqrt{y_{P_i}^4 + y_{Q_i}^4} \quad (12)$$

$$E = \exp\left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{3\overline{P_i Q_i}}{\varepsilon_2(t, l)} \right\}^2\right] \quad (13)$$

また、 $\overline{P_i Q_i}$ が(12)式よりも大きい場合には、これら2点是对応しないとして、負の評価値 $E = -1$ を与える。図4では、重複視野領域内の点 P_1 と Q_5 , P_2 と Q_4 , P_3 と Q_2 は、 $\overline{P_i Q_i}$ が(12)式で与えられるしきい値以下なので正の評価値を与える。しかし、 Q_3 の近くには対応する点がないので負の評価値を与える。 Q_1 の近くには対応する点がないが、 Q_1 は重複視野領域内にないので重なり程度の評価値の算出には寄与させない。

上述のようにして得られたすべての対応付けの中から評

図4 二つの地図の重なり程度の評価
Fig. 4. Overlapping evaluation for the two maps.

価値が最大となるものを選び出し、2視点間での最も確からしい対応付けとする。

(iii) 多視点間での対応付け

複数組の2視点間での対応付けを単に組み合わせて多視点間に拡張しようとする、誤対応により、対応すべき物体が対応していないなどの矛盾が生じる。そこで、ここでは2視点間々々における対応の確からしきを用い、多視点間での最も確からしい対応付けを求める。

複数の2視点間での対応に任意に順位をつけ、順番に多視点での対応付けを行う。その際、特定の2視点間において、対応すべき物体が対応していないなどの矛盾が生じた場合、その対応を捨て、新たにその2視点間における矛盾のない他の対応付けを試みる。その際、そこまでの過程で得られた他の2視点間における対応の情報から、求めるべき2視点間における対応の一部が既知となるので効率的に対応と評価値とを求めることができる。そして、多視点間での矛盾のない対応と総評価値を求める。すべての多視点間における対応の中で、最大評価値を与える対応を最も確からしいとして採用する。

<2.3> 多視点ステレオ画像計測

多視点ステレオ画像計測のモデルを図5に示す。相対位置関係が未知な複数の視点 $O_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$ から、複数の物体 $P_j (j=1, 2, 3, \dots, n)$ をステレオ画像計測し、得られた各視点座標系における計測データから視点の相対位置関係と基準座標系における物体位置の両方を推定する⁽¹⁰⁾。本手法は、画像面座標計測誤差の2乗和を評価関数として用い、この評価関数を視点の相対位置関係を与える座標変換パラメータと基準座標系における物体の真の実空間座標とで記述した後、この評価関数を最小化する条件から両者を推定する。

今、第 i 視点から計測された第 j 物体の画像面座標計測誤差の確率密度分布を s_{ij} とすると、すべての視点、計測点について合成した合成確率密度分布 S は、各視点における各計測点の確率密度分布の積として(2)式より次式のように表わせる。

図5 多視点ステレオ画像計測モデル
Fig. 5. Multi-viewpoint stereo measurement model.

$$S = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n s_{ij} \\ = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^{2mn} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (du_{ij}^T du_{ij}) \right] \quad (14)$$

(14)式を最大にする条件は画像面座標計測誤差の2乗和,

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (du_{ij}^T du_{ij}) \quad (15)$$

を最小にする条件になる。基準座標系を第1視点座標系にとり、第1視点座標系から第*i*視点座標系への変換を表す回転マトリクスを R_i 、平行移動ベクトルを T_i で表す。また、第*i*視点における第*j*物体の計測座標を $\hat{x}_{ij}$ 、基準座標系である第1視点座標系における第*j*物体の真の座標を x_{ij}^0 とすると、 E は実空間座標を用いて、

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(\hat{x}_{ij} - R_i^{-1} x_{ij}^0 + T_i)^T (J_{ij} J_{ij}^T)^{-1} \\ \times (\hat{x}_{ij} - R_i^{-1} x_{ij}^0 + T_i)] \quad (16)$$

と求められる。ただし、

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}$$

$$T_i = [t_{xi} \ t_{yi}]^T$$

である。上述の(16)式を最小にする R_i すなわち θ_i 、 T_i および x_{ij}^0 を求める視点の相対位置関係と物体の位置である。これらを解析的に算出することは困難であるので、共役勾配法⁽²¹⁾を用いて算出する。

3. プロトタイプシステム

〈3・1〉 システム構成 試作したプロトタイプシステムの外観を図6に示す。本システムは、カメラ、ステレオステージ、三脚、コントロールボックス、バッテリーから構成されている。コントロールボックスには、パソコン、画像処理ボード、ステレオステージ制御ボード、モニタが収納されている。本システムでは、カメラが左端から右端までステッピングモータによって移動してステレオ画像を取り込む。また、十分な計測範囲を得るために、ステレオステージを回転させ、一つの視点で複数のステレオ画像を入

図6 プロトタイプシステム
Fig. 6. Prototype system.

力している。

カメラには焦点距離 f が 24.8 mm のレンズが装着され、カメラ間隔 $2a$ を 0.3 m とした。カメラにはデジタルカメラを用いた。このデジタルカメラにはハードディスクが内蔵されていて、水平、垂直方向に 1,536, 1,024 画素に標本化され、256 階調に量子化された画像が記録される。デジタルカメラの1画素の大きさは 9 μm である。ソフトウェアは MS-DOS 上で管理され、処理プログラムは C 言語で記述されている。

〈3・2〉 システムパラメータ誤差 これまでステレオ画像計測モデルとして、図2に示した理想的なモデル、すなわち水平面内で光軸が平行となるように置かれた2台のピンホールカメラモデルを用いて誤差の低減方法を説明してきた。しかし、現実の計測システムはこのような理想的な状態になっていない。現実の計測システムで発生する誤差には、各種雑音に起因するランダム誤差とシステムパラメータに含まれる誤差に起因する系統誤差とがある。今回提案しているアルゴリズムでは、ランダム誤差については低減することが可能であるが、系統誤差については低減することが不可能である。ここでは、本プロトタイプシステムのシステムパラメータに含まれる誤差に起因する実空間座標計測誤差の系統誤差について検討する。

本プロトタイプシステムのシステムパラメータに含まれる誤差としては主に次の四つが考えられる。

- (i) カメラレンズのひずみによる画像面座標のずれ量
- (ii) カメラレンズの焦点距離に含まれる誤差
- (iii) 2台のカメラの光軸の平行のずれ量
- (iv) 2台のカメラ間隔に含まれる誤差

本システムでは、できる限り理想的な状態に近いカメラレンズを試作することにより、ひずみによる画像面座標のずれ量と焦点距離に含まれる誤差とを低減している。また、1台のカメラを水平面内に設置し、平行移動させることにより、2台のカメラの光軸の平行のずれ量とカメラ間隔に含まれる誤差とをステレオステージの精度によって評価することを可能にしている。実際に試作したカメラレンズでは、ひずみの影響による画像面座標のずれ量 Δu_d は最大で 0.4 μm に、焦点距離に含まれる誤差 df は 0.05 mm 以下になるように設計されている。また、ステレオステージの平行のずれ量、すなわち光軸の平行のずれ量 δ は 0.05 mrad 以下に、カメラ間隔に含まれる誤差 $d(2a)$ は 0.5 mm 以下になるように設計されている。本システムでは、十分な計測範囲を得るためにステレオステージを回転させている。ステレオステージが三脚上を回転することにより、角度、すなわちステレオステージの三脚上での位置によってはステレオステージの平行のずれ量が変化する可能性がある。実際にオートコリメータを用いてステレオステージを 10° ごと回転させ、各々の角度におけるステレオステージの平行のずれ量の計測を行った。その結果、回転した角度によって平行のずれ量は異なり、ずれ量の最大値は 0.04 mrad であった。このことから、ステレオステージの

平行のずれ量はステージが回転することにより影響を受けるが、設計値以下であることが確認された。

上述のシステムパラメータに含まれる誤差が実空間座標計測精度に与える影響について検討する。ステレオステージの左右の位置における平行の精度、すなわちカメラの光軸の平行のずれ量 δ は画像面座標に影響を与える。光軸の平行のずれ量 δ による画像面座標のずれ量を Δu_δ とすると Δu_δ は、

$$\Delta u_\delta = f \tan \delta \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。各システムパラメータに含まれる誤差が微小であると仮定すると、(1)式より、実空間座標に含まれる誤差は次式のようになる。

$$\begin{aligned} dx &= -\frac{xy}{2af}(du_L - du_R) + \frac{y}{2f}(du_L + du_R) + \frac{x}{2a}d(2a) \\ dy &= -\frac{y^2}{2af}(du_L - du_R) + \frac{y}{2a}d(2a) + \frac{y}{f}df \\ &\dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

本システムと同様にカメラの間隔 $2a$ を 0.3 m 、焦点距離 f を 24.8 mm 、1画素の大きさを $9 \mu\text{m}$ とし、光軸付近の遠方の物体 ($y \approx 50 \text{ m} \gg |x| \approx 10 \text{ m}$) を計測する場合について考える。画像面座標のずれ量 $(du_L - du_R)$ 、 $(du_L + du_R)$ を、ひずみによる画像面座標のずれ量 Δu_d の2倍、 $2\Delta u_d$ と、(17)式より得られる光軸の平行のずれ量 δ の影響 Δu_δ との和とする。システムパラメータに含まれる誤差は最大誤差を見積もり、

$$\begin{aligned} \Delta u_d &= 0.4 \mu\text{m} \\ df &= 0.05 \text{ mm} \\ \delta &= 0.05 \text{ mrad} \\ d(2a) &= 0.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

とする。これより、上述のシステムパラメータに含まれる誤差による実空間座標計測誤差 $\sqrt{dx^2 + dy^2}$ は最大で 0.87 m となる。

これに対して、第2章で述べた画像面座標計測誤差は最大1画素以内と考えて標準偏差 $\sigma = (1/6)$ 画素、すなわち $1.5 \mu\text{m}$ とする。画像面座標計測誤差を 3σ とすると、画像面座標計測誤差による実空間座標計測誤差は(8)式より 2.14 m となる。従って、単視点のステレオ画像計測に含まれる誤差は最大で 3.01 m となることがわかる。

4. 屋外設備位置計測実験

本システムにおける屋外設備位置計測の処理の手順のフローチャートを図7に示す。処理は、step 1, 2の現場におけるステレオ画像の撮影と、step 3~5の局舎における画像解析とに大きく分けられる。以下、実験を通して具体的に説明する。

図8に示す交差点において、試作したシステムを用いて屋外設備位置計測実験を行った。本実験では、交差点を四つの視点から撮影し、図7の処理手順に従って電柱などの屋外設備の位置を求めた。図8の交差点は道路幅 8 m 程度の交差点であり、写真は交差点の一部を中心に向かっ

図7 フローチャート
Fig. 7. Flow chart.

図8 交差点風景
Fig. 8. Actual intersection.

て、後述の第1視点付近から撮影したものである。四つの視点からのステレオ画像計測データを統合することにより、 130 m 四方程度の範囲内に存在する22個の屋外設備位置を計測した。22個の屋外設備のうち、2視点から9個、3視点から6個、4視点から7個の屋外設備を計測することができた。各視点から各屋外設備までの距離は平均 48 m であった。

step 1: 視点位置の決定

計測システムを画像を取り込む視点にセットする。できるだけたくさんの屋外設備が見えること、その位置に障害物がなく計測装置が設置できることが、視点位置決定の条件である。

step 2: ステレオ画像の入力

セットされた視点においてステレオ画像を取り込む。第1視点から入力されたステレオ画像の一例を図9に示す。

step 3: 各視点における屋外設備位置計測

ステレオ画像計測によって各視点座標系における屋外設備位置を計測する。ここでは、マウスにより屋外設備の境

図 9 入力ステレオ画像
Fig. 9. Input stereo images

界付近を指示し、左右の画像間での対応付けと画像面上での屋外設備の境界の座標、すなわちエッジ位置の計測を行う。エッジ位置は、指示された近傍画素の一次微分を計算し、その最大値を含む3画素を正規分布に内挿することによってサブピクセル精度で計測される⁽¹⁹⁾。計測を行う電柱などの屋外設備を拡大して表示することにより屋外設備の境界付近を指示しやすくしている。1本の電柱に対して左右のエッジの実空間座標を計測する。そして求められた1本の電柱に対する左右のエッジの実空間座標の平均を電柱の中心位置とした。その際、左右のエッジの実空間座標が、しきい値よりも異なる場合、画像面上でのエッジ位置が正しく求められていないということで、エッジ位置計測をやり直す。このような判定基準を用いることにより、エッジ位置の誤計測を防ぐことができる。本実験ではこのしきい値を0.5 mとした。また、電柱のように表面が曲面の形状をなしている物体を計測する場合、曲面の影響によって左右の画像間で異なるエッジが画像面上に投影される。従って、求められた実空間座標は実際のエッジの実空間座標とは厳密には異なる。しかし、この影響による誤差は物体が視点から数十 cm 離れるとほとんど無視できる程度の誤差である。この step 3 を全視点に対して繰返し、各視点座標系におけるすべての屋外設備位置を得る。

step 4: 視点間での屋外設備の対応付け

各視点で得られた屋外設備について多視点間で対応付けを行う。ここでは第3章と同様にして、画像面内における画像面座標計測誤差は最大1画素以内と考え、対応付けを行う際に用いられる画像面座標計測誤差の標準偏差 σ を $\sigma = (1/6)$ 画素とした。

step 5: 視点位置関係・屋外設備位置の推定

step 4 で得られた屋外設備の対応付けをもとにして、各視点間で得られた屋外設備位置計測データを統合する。推定された視点位置関係および屋外設備位置を既存の地図に重ねた結果を図10に示す。なお、地図内における第1視点の位置および方向はあらかじめわかっているものとして地図に重ねている。図10において、実線および●が真の

図 10 推定結果
Fig. 10. Estimated results.

図 11 交差点風景
Fig. 11. Actual intersection.

視点位置と物体位置とを表している。これに対して、破線および○が多視点化による推定位置を表している。この結果、視点の位置関係を与える角度パラメータについては平均 0.06° 、平行移動パラメータについては平均 0.14 m の誤差で推定された。また、屋外設備位置について多視点化による推定位置誤差の平均値は 0.20 m であった。これに対して、各視点における単視点のステレオ画像計測の計測位置の絶対誤差は平均 0.91 m であった。

同様な実験を図11に示す交差点において行った。図11の交差点は道路幅約10 m程度の交差点であり、写真は交差点の一部を中心に向かって、第1視点と第4視点の中間から撮影したものである。四つの視点から撮影されたステレオ画像計測データを統合することにより、100 m 四方程

図 12 推定結果
Fig. 12. Estimated results.

図 13 交差点風景
Fig. 13. Actual intersection.

度の範囲内にある 21 個の屋外設備位置を計測した。21 個の屋外設備のうち、1 視点から 3 個、2 視点から 6 個、3 視点から 5 個、4 視点から 7 個の屋外設備を計測することができた。各視点から各屋外設備までの距離は平均 41 m であった。図 10 と同様に、推定された視点の位置関係と屋外設備位置とを既存の地図に重ね合わせた結果を図 12 に示す。この結果、視点の位置関係を与える角度パラメータについては平均 0.04° 、平行移動パラメータについては平均 0.84 m の誤差で推定された。また、屋外設備位置について多視点化による推定位置誤差の平均値は 0.68 m であった。これに対して、各視点における単視点のステレオ画像計測の計測位置の絶対誤差は平均 3.21 m であった。

また、図 13 に示す交差点においても同様な実験を行った。図 13 の交差点は道路幅約 25 m 程度の交差点であり、写真は交差点の一部を中心に向かって、第 1 視点と第 4 視点の中間から撮影したものである。四つの視点から撮影されたステレオ画像計測データを統合することにより、100 m 四方程度の範囲内にある 30 個の屋外設備を計測した。30 個の屋外設備のうち、2 視点から 5 個、3 視点から 15 個、4 視点から 10 個の屋外設備を計測することができた。各視点から各屋外設備までの距離は平均 47 m であった。

図 14 推定結果
Fig. 14. Estimated results.

図 10 と同様に、推定された視点の位置関係と屋外設備位置とを既存の地図に重ね合わせた結果を図 14 に示す。この結果、視点の位置関係を与える角度パラメータについては平均 0.12° 、平行移動パラメータについては平均 0.70 m の誤差で推定された。また、屋外設備位置について多視点化による推定誤差の平均値は 0.74 m であった。これに対して、各視点における単視点のステレオ画像計測の計測位置の絶対誤差は平均 1.37 m であった。

上述のように、大きさの異なる三つの交差点において同じ実験を行った。その結果、屋外設備までの平均距離はほぼ同じであったにもかかわらず、推定された屋外設備位置の精度については違いが生じた。これは、文献(19)にあるように、計測しようとしている物体の背景によって画面上での物体位置の計測精度が多少異なり、それによってステレオ画像計測の精度が異なったことと、文献(22)、(23)にあるように、視点と物体の配置によって多視点化したときの推定精度が異なることが要因であると考えられる。

これらの結果から、多視点からのステレオ画像計測データを統合することにより、精度向上が図れたことが確認できた。また、人の介入を画像の入力とエッジの教示だけにすることにより、安全かつ効率的に屋外設備位置計測を行うことが可能となり、本システムが屋外設備位置計測で有効であることが確認された。

5. ま と め

これまで検討を進めてきた多視点ステレオ画像計測アルゴリズムを統合した屋外設備位置計測システムの試作を行った。本システムは、現場において撮影されたステレオ画像に対し、局舎においてオペレータが計算機を支援しながら画像処理することによって屋外設備位置を計測するものである。実際の交差点において実験を行い、本システムの

有効性を確認し、屋外設備測量作業に本システムが適用できることを明らかにした。

本システムにより、交通量の多い交差点などの危険な場所、もしくは、人が実際に行くことが困難な場所について安全かつ効率的に測量作業を行うことが可能となる。

(平成9年2月25日受付, 同9年6月20日再受付)

文 献

- (1) 山川修三・小田泰充・川野繁一・安田恒雄:「地図・設備図面情報処理システム」, NTT R & D, **41**, 5, 591~598 (平4)
- (2) 小田泰充・山川修三・高橋信之・桜井行雄:「NTTにおける線路土木設備設計管理システム」, 第2回 AM/FM *International Japan Conference*, 85~96 (平3)
- (3) 日本コンピュータ・グラフィックス協会, コンピュータ・マッピング入門, (昭63) 日本経済新聞社
- (4) 真鍋哲也・小谷忠司・森光武則:「音響反射モデルに基づいた通信管路継手部の形状パラメータ推定」, 計測自動制御学論誌, **32**, 12, 1588~1595 (平8)
- (5) 水沼 守・小川茂樹・桑野博喜:「レーザービーム走査法を用いた管路内面形状測定における欠陥検出の試み」, 精密工学会誌, **60**, 9, 1335~1339 (平6)
- (6) Y. Nomura, H. Naruse, A. Ide & M. Sagara, "Visual inspection system for manhole facilities", *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, 449~453 (1990)
- (7) 森光武則・白石健二・坂田秀明:「姿勢角累積法による管路位置計測」, 機論誌 (C編), **53**, 496, 2602~2607 (昭61)
- (8) 成瀬 央・立田光廣・野引 敦・井手敦志:「誤差の異方性を考慮した最尤推定法によるステレオ画像計測精度向上」, 信学論 (D-II), **J75-D-II**, 8, 1307~1316 (平4)
- (9) M. Tateda, T. Naruse, A. Ide & A. Nobiki: "Integration of overlapping maps made by stereo vision using view field information", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, **24**, 8, 1273~1279 (1994)
- (10) 野引 敦・成瀬 央・藪田哲郎・立田光廣:「非線形最適化手法を用いた多視点ステレオ画像計測」, 信学論 (D-II), **J76-D-II**, 11, 2391~2399 (平5)
- (11) 細野武庸・井内 登: 基準点測量 (平6) (社) 日本測量協会
- (12) 篠 邦彦: 写真測量, (昭55) 山海堂
- (13) 木本氏寿: 写真測量の実際, (昭63) 山海堂
- (14) 保谷忠男: 写真測量, (昭63) (社) 日本測量協会
- (15) L. Matthies & S. A. Shafer: "Error Modeling in Stereo Navigation", *IEEE J. of Robotics and Automation*, **RA-3**, 3, 239~248 (1987)
- (16) N. Ayache & O. D. Faugeras: "Building, Registering, and Fusing Noisy Visual Maps", *Proc. IEEE Int. Con. on Computer Vision*, 73~82 (1986)
- (17) D. J. Kriegman, E. Triendl & T. O. Binford: "Stereo Vision and Navigation in Building for Mobile Robots", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **RA-5**, 6, 792~803 (1989)
- (18) 安江利一・白井良明:「物体認識のための両眼立体視」, 電総研彙報, **37**, 12, 1101~1119 (昭48)
- (19) 野村由司彦・相良道弘・成瀬 央・井手敦志:「エッジ位置計測のサブピクセル化と誤差解析」, 信学論 (D-II), **J73-D-II**, 9, 1458~1467 (平2)
- (20) Y. Nakamura & Y. Xu: "Geometrical fusion method for multisensor robotic systems", *Proc. IEEE Int. Con. on Robotics and Automation*, 668~673 (1989)
- (21) R. Fletcher & C. Reeves: "Function minimization by conjugate gradients", *Computer J.*, **7**, 149~154 (1964)
- (22) 成瀬 央・立田光廣・野引 敦・藪田哲郎:「高精度多視点ステレオ画像計測」, 機論 (C編), **59**, 557, 112~118 (平5)
- (23) A. Nobiki, H. Naruse, T. Yabuta & M. Tateda: "Accurate Multi-Viewpoint Stereo Measurement Using Nonlinear Optimization Method", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IROS '93, 1851~1856 (1993)

野 引 敦

(非会員) 1967年1月6日生。90年3月上智大学電気電子工学科卒業。同年NTT入社。以来、コンピュータビジョン、センサフュージョンの研究に従事。現在、NTTアクセス網研究所光加入者ケーブルシステム研究部研究主任。博士(工学)。電子情報通信学会、計測自動制御学会会員。

成 瀬 央

(非会員) 1958年4月7日生。82年3月千葉大学工学部機械工学科卒業。84年3月同大学院修士課程修了。同年電電公社(現, NTT)電気通信研究所入所。以来、屋外通信設備の保守、管理に用いる知能機械の実用化を目的として、コンピュータビジョン、画像計測の研究に従事。現在、NTT技術部担当課長。博士(工学)。電子情報通信学会、日本機械学会会員。

立 田 光 廣

(非会員) 1949年9月1日生。72年4月東京大学工学部物理工学科卒業。74年3月同大学院修士課程修了。同年電電公社(現, NTT)電気通信研究所入所。以来、光ファイバの設計、伝送特性評価、光伝送用デバイス、画像計測技術の研究に従事。96年より千葉大学工学部画像工学科教授、工学博士。81年電子情報通信学会学術奨励賞, 83年, 91年電子情報通信学会論文賞, 96年OECC'96最優秀論文賞受賞。電子情報通信学会, 日本光学会(応用物理学会), OSA, IEEE会員。

藪 田 哲 郎

(非会員) 1949年7月19日生。72年4月東京大学工学部機械工学科卒。74年3月同大学院修士課程修了。同年電電公社(現, NTT)電気通信研究所入所。以来、海底光ファイバケーブル、屋外通信設備自動建設用ロボット技術の研究に従事。特に、ニューラルネットワークなどの知的制御技術の研究およびPSI現象に興味を有する。現在、NTTアクセス網研究所光加入者ケーブルシステム研究部部長。工学博士。86年~87年カリフォルニア大学サンタバーバラ校ロボットセンタ客員研究員。84年日本機械学会奨励賞受賞。日本機械学会、計測自動制御学会、日本ロボット学会、電子情報通信学会、IEEE会員。