

# 車両運動投影モデルに基づく 全方位画像系列からの市街地空間の3次元構造復元

宮川 勲<sup>†</sup> 石川 裕 治<sup>†</sup>,  
若林 佳 織<sup>†</sup> 荒川 賢 一<sup>†</sup>

本論文では、車両移動観測で取得した全方位画像系列からの市街地空間の3次元構造復元法を提案する。まず、全方位カメラの移動観測を表す車両運動投影モデルに基づき、全方位画像系列からカメラ運動と3次元形状を獲得する。次に、各系列で獲得したカメラ運動と3次元形状から、スケールパラメータを使って市街地空間の3次元構造を逐次的に復元する。実験では、従来法と提案法をシミュレーションと実画像に適用し、提案法の有効性を示す。また、逐次的に復元した市街地の3次元構造において提案法により良好な結果が得られることを示す。

## 3D Structure Recovery of Urban Space from Omnidirectional Image Sequences Based on a Projection Model of Vehicle Motion

ISAO MIYAGAWA,<sup>†</sup> YUJI ISHIKAWA,<sup>†</sup> KAORU WAKABAYASHI<sup>†</sup>  
and KENICHI ARAKAWA<sup>†</sup>

We propose a recovery method of 3D urban structure from omnidirectional image sequences captured in vehicle mobile observation. At first, our method acquires camera motion and 3D shape from omnidirectional image sequences based on a projection model of vehicle motion, which represents an omnidirectional projection in mobile observation. Next, the method recovers sequentially 3D structure of urban space using scale parameters from the camera motion and the 3D shape, each of which is acquired from each sequence. Both simulated and real images have been used to evaluate an existing method and the proposed method, and we show that the proposed method is more effective to recover camera motion and 3D shape. Our experiments show that good results for 3D structure recovery of urban space are obtained by the proposed method.

### 1. はじめに

建物や標高形状を含む市街地の実空間構造を再構築した市街地空間モデルは、3次元GIS( Geographic Information Systems )において都市設計や観光ナビゲーションに見られる景観再現、建築環境工学や電波伝搬分野での空間シミュレーションなどに利用されており、情報化社会の基盤データとしてその重要性が認識されている<sup>1)</sup>。市街地空間モデルの構築にあたり、ヘリコプタによる空中測量・空撮は大規模、かつ、効率的に市街地構造を構築する<sup>2),3)</sup>には適している。

一方、モバイルマッピング<sup>4)~6)</sup>の場合は市街地景観の測量・撮影コストが比較的安く、車両の機動性を

活かした迅速なモデル構築ができるという利点がある。筆者らは全方位カメラ<sup>7)</sup>による大局的移動観測に着目し、全方位画像から市街地空間モデルを構築するモバイルマッピングを進めている<sup>8)</sup>。この技術開発において、構築した市街地空間モデルを景観再現だけでなく電波伝搬推定などの空間シミュレーションへ利用することも視野に入れているため、建物の位置と建物高を1m以下の精度で獲得することが要求されている<sup>9)</sup>。市街地空間をモデル化するには市街地景観を表す3次元構造(本論文では、市街地景観画像から獲得した3次元点群を市街地空間の3次元構造と称する)を全方位画像から獲得する必要があり、シーン中の線分などの幾何的特徴量を利用した手法<sup>10),11)</sup>、全方位画像上の対応点のエピポーラ拘束<sup>12)</sup>、または微分エピポーラ拘束<sup>13)</sup>に基づく手法などの応用が考えられる。

しかし、移動観測で得た全方位画像から上記の要求条件を満たす精度の3次元構造を獲得するには因子分解法<sup>14),15)</sup>の応用が有望である。筆者らは全方位カメ

<sup>†</sup> 日本電信電話株式会社 NTT サイバースペース研究所  
NTT Cyber Space Laboratories, NTT Corporation  
現在、株式会社 NTT データ技術開発本部  
Presently with Research and Development Headquarters,  
NTT DATA Corporation

ラで取得した画像系列からの平面運動と3次元形状の復元方法<sup>16)</sup>を提案しているが、復元対象とするカメラ運動は、光軸を水平面に垂直とした状態で運動する自由度3の平面運動であった。ところが、市街地環境での移動観測では車両が絶えず揺れているため、この手法において走行中の揺れを考慮しなければならない。このような車両の揺れを扱った典型的な研究として文献17)があり、車両の揺れを考慮した画像安定化法が提案されている。また、画像安定化を使った自己運動の復元方法<sup>18)</sup>なども類似研究としてあげられる。

本論文では、車両移動観測で取得した全方位画像系列から市街地空間の3次元構造を復元する方法を提案する。ただし、市街地内の路面が舗装された平坦な地面であることを想定して、市街地走行の車両運動をピッチ回転とロール回転が小さく、光軸方向の並進運動を無視した自由度5の運動と仮定する。まず、移動観測での投影関係を表す投影モデル(車両運動投影モデル)に基づき、全方位画像系列からカメラ運動と3次元形状を獲得する。次に、各系列で求めたカメラ運動と3次元形状から、スケールパラメータを使って市街地空間の3次元構造を逐次的に復元する。

実験では、従来法<sup>16)</sup>と提案法を計算機シミュレーションと実画像に適用し、提案法の有効性を示す。また、逐次的に復元した市街地の3次元構造において提案法により良好な結果が得られることを示す。

## 2. 提案方法

### 2.1 車両運動を考慮した全方位カメラの投影関係

車両移動観測で用いられる全方位カメラは光軸を鉛直上向きの状態に設置される。全方位カメラを天空方向に向けることで、車道に沿って左右両側の建物を同時に観測することができる。

図1に、ユークリッド空間( $X_w Y_w Z_w$ 座標系)における全方位カメラと対象物の位置関係を示す。この図で、対象物の特徴点を  $\mathbf{P}_j = (X_j, Y_j, Z_j); j \in \{1, 2, \dots, P\}$ 、全方位カメラの視点位置を  $\mathbf{T}_i = (Tx_i, Ty_i, Tz_i); i \in \{1, 2, \dots, F\}$  と記述する。図1において、全方位カメラの視点  $\mathbf{T}_i$  を原点とした  $XYZ$  座標系を設定する。全方位カメラは光軸を天空方向に向けて車両の屋根に設置されており、 $X$  軸周りのピッチ回転  $\psi_i$ 、 $Y$  軸周りのロール回転  $\omega_i$ 、 $Z$  軸(光軸)周りのヨー回転  $\theta_i$ 、ならびに、並進運動  $\mathbf{T}_i = (Tx_i, Ty_i, Tz_i); i \in \{1, 2, \dots, F\}$  を行って周囲の景観を観測する。なお、 $\theta_i$  はある基準方向からの方位角であり、図1では  $X_w$  軸を基準方向として  $X_w$  軸とカメラ座標系の  $X$  軸のなす角とする。

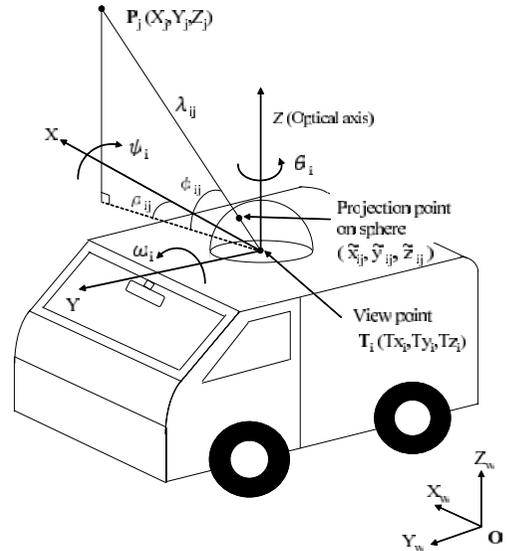


図1 車両上の球面座標系

Fig. 1 Spherical coordinate system on a vehicle.

ここで、全方位カメラの投影関係を表現するには球面座標系を用いると便利である。すなわち、図1のユークリッド空間において、点  $\mathbf{P}_j$  と単位球面座標値  $(\tilde{x}_{ij}, \tilde{y}_{ij}, \tilde{z}_{ij})$  は仰角  $\phi_{ij}$ 、位相角  $\rho_{ij}$ 、回転行列  $\mathbf{R}_{xi}$ 、 $\mathbf{R}_{yi}$ 、 $\mathbf{R}_{zi}$  と視点位置  $\mathbf{T}_i$  を使って、式(1)~(6)により表される。

$$\lambda_{ij} \begin{bmatrix} \tilde{x}_{ij} \\ \tilde{y}_{ij} \\ \tilde{z}_{ij} \end{bmatrix} = \lambda_{ij} \begin{bmatrix} \cos(\phi_{ij}) \cos(\rho_{ij}) \\ \cos(\phi_{ij}) \sin(\rho_{ij}) \\ \sin(\phi_{ij}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \mathbf{R}_{zi} \mathbf{R}_{yi} \mathbf{R}_{xi} (\mathbf{P}_j - \mathbf{T}_i), \quad (2)$$

$$\lambda_{ij} = \|\mathbf{P}_j - \mathbf{T}_i\|, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_{xi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi_i) & \sin(\psi_i) \\ 0 & -\sin(\psi_i) & \cos(\psi_i) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_{yi} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_i) & 0 & -\sin(\omega_i) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\omega_i) & 0 & \cos(\omega_i) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_{zi} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) & 0 \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

一方、全方位カメラの画像面において、画像投影中心を原点とした画像座標系での点  $(x_{ij}, y_{ij})$  から、仰角  $\phi_{ij}$  と位相角  $\rho_{ij}$  が得られる。たとえば、魚眼レンズによる等距離投影では、

$$\phi_{ij} = \frac{\pi}{2} - \frac{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}{f} \quad (7)$$

と表すことができる ( $f$  は焦点距離である). また, 放物線鏡で反射する投影<sup>19)</sup> では,

$$\phi_{ij} = \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}{h} \right) \quad (8)$$

となり ( $h$  は放物面の  $xy$  平面での半径である), 双曲線鏡の場合<sup>20)</sup> では,

$$\phi_{ij} = -\tan^{-1} \left( \frac{(b^2 + c^2) \sin \gamma - 2bc}{(b^2 - c^2) \cos \gamma} \right) \quad (9)$$

と表すことができる ( $b, c$  は双曲線のパラメータ,  $\gamma$  は  $\tan^{-1}(f/\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2})$ ,  $f$  は焦点距離である). 一方, 画像面と  $XY$  平面は平行と考えて, 上記の光学系では共通に

$$\rho_{ij} = \tan^{-1} \left( \frac{y_{ij}}{x_{ij}} \right) \quad (10)$$

と表すことができる. したがって, 図 1 に示した仰角  $\phi_{ij}$  と位相角  $\rho_{ij}$  は, 全方位画像で観測した画像座標値  $(x_{ij}, y_{ij})$  から, 式 (9), (10) により求めることができる.

ここで, 式 (9), (10) を式 (1) に代入すると,  $xy$  画像座標値  $(x_{ij}, y_{ij})$  と 3 次元座標値  $(X_j, Y_j, Z_j)$  との投影関係が得られる. しかし,  $xy$  画像座標系を用いた場合, 得られる投影関係は複雑となる. そこで, 因子分解法を適用するための投影モデルが必要となる.

## 2.2 車両運動投影モデルの定式化

車両を使った市街地での移動観測では微小なカメラの揺れが発生すると考えられる. 本論文では, 対象とする画像系列に関して, 市街地走行時の車両の揺れや車体固有の振動は小さいとし, 坂道の急激な上り下りはないと仮定する. すなわち, 式 (2) の行列  $\mathbf{R}_{xi}, \mathbf{R}_{yi}$  において  $\psi_i, \omega_i$  は小さく,  $Z$  軸方向の並進運動  $Tz_i$  は無視できると仮定する. 本節では, この仮定を取り入れた全方位カメラの近似的な投影モデル (車両運動投影モデル) について説明する.

式 (1)~(6) において, 上記の仮定を取り入れて整理すると,

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{ij} \\ \tilde{v}_{ij} \end{bmatrix} = \epsilon_{ij} \begin{bmatrix} u_{ij} \\ v_{ij} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \zeta_i \\ \eta_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) & Tu_i \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & Tv_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_j/Z_j \\ Y_j/Z_j \\ 1/Z_j \end{bmatrix} \quad (12)$$

を得る (付録 A.1 を参照). ここで,

$$\epsilon_{ij} = 1 + \omega_i \left( \frac{X_j - Tx_i}{Z_j} \right) - \psi_i \left( \frac{Y_j - Ty_i}{Z_j} \right), \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \zeta_i \\ \eta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\omega_i \\ \psi_i \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} Tu_i \\ Tv_i \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Tx_i \\ Ty_i \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$u_{ij} = \cot(\phi_{ij}) \cos(\rho_{ij}), \quad v_{ij} = \cot(\phi_{ij}) \sin(\rho_{ij}) \quad (16)$$

である. なお, 式 (16) で定義する座標値  $(u_{ij}, v_{ij})$  は文献 16) で定義した  $uv$  座標値であり, 透視投影に変換した画像座標値となっている.

式 (11), (12) を全フレーム  $i \in \{1, 2, \dots, F\}$  にわたり,  $P$  個の点  $\mathbf{P}_j, j \in \{1, 2, \dots, P\}$  に展開して行列表記すると,

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{11} & \tilde{u}_{12} & \cdots & \tilde{u}_{1P} \\ \tilde{u}_{21} & \tilde{u}_{22} & \cdots & \tilde{u}_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{u}_{F1} & \tilde{u}_{F2} & \cdots & \tilde{u}_{FP} \\ \tilde{v}_{11} & \tilde{v}_{12} & \cdots & \tilde{v}_{1P} \\ \tilde{v}_{21} & \tilde{v}_{22} & \cdots & \tilde{v}_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{v}_{F1} & \tilde{v}_{F2} & \cdots & \tilde{v}_{FP} \end{bmatrix} = [M][S], \quad (17)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & Tu_1 \\ \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) & Tu_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\theta_F) & \sin(\theta_F) & Tu_F \\ -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & Tv_1 \\ -\sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & Tv_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\sin(\theta_F) & \cos(\theta_F) & Tv_F \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} X_1/Z_1 & X_2/Z_2 & \cdots & X_P/Z_P \\ Y_1/Z_1 & Y_2/Z_2 & \cdots & Y_P/Z_P \\ 1/Z_1 & 1/Z_2 & \cdots & 1/Z_P \end{bmatrix} \quad (19)$$

を得る.

ここで, 式 (17)~(19) の行列分解の解釈について考える. これらの式は, 式 (11) に示す  $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  を要

使用する全方位カメラにより仰角算出式を選択する. 本論文での実験では HyperOmniVision<sup>20)</sup> を使用するため, 以降では式 (9) で代表させる.

素とする行列 から、カメラ運動を表す行列  $[M]$  と3次元形状を表す行列  $[S]$  に分解できることを示している。式 (18) の行列  $[M]$  の要素はヨー回転と  $XY$  並進から構成される自由度3の平面運動である<sup>16)</sup>。つまり、式 (11) の変換を受けた  $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  は、平面運動で観測した  $uv$  座標値であることを意味している。いい換えれば、 $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  を行列要素とする  $uv$  行列に対して、文献 16) の方法により平面運動と3次元形状を復元することができると考えられる。本論文では、 $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  から構成される  $uv$  行列を式 (17) ~ (19) に示す行列  $[M]$  と行列  $[S]$  に分解する投影モデルを車両運動投影モデルと定義する。なお、図 1 に示す投影では、視点の位置  $T_i$  より上に位置する点を対象としており、提案法は視点の高さと同じ位置、および、視点の高さより低い位置の3次元形状を復元することはできない。つまり、提案法は仰角0度とそれ以下の仰角は適用範囲外である。

ちなみに、式 (11), (12) において、 $Z_j \rightarrow \infty$  とすると、 $uv$  座標系での無限高の点  $(\tilde{u}_{io}, \tilde{v}_{io})$

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{io} \\ \tilde{v}_{io} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{io} \\ v_{io} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_i \\ \eta_i \end{bmatrix} \quad (20)$$

が得られる。式 (20) は  $(\zeta_i, \eta_i)$  が各フレームにおいてユニークに得られることを示している。 $Z_j \rightarrow \infty$  は光軸方向を表しているので、 $(\zeta_i, \eta_i)$  は  $uv$  座標系での光軸の方向を示す座標値 (光軸座標値) であることが分かる。

### 2.3 車両運動投影モデルに基づくカメラ運動と3次元形状の復元

本節では、2.2 節の車両運動投影モデルに基づき、画像系列からカメラ運動と3次元形状を復元する方法を説明する。ただし、式 (17) ~ (19) に基づいてカメラ運動と3次元形状を同時に求めることは容易ではない。そこで、提案法では、段階的にカメラ運動と3次元形状を復元するアプローチをとる。

#### 2.3.1 平面運動と3次元形状の復元

ここでは、初期状態として、車両運動投影モデルで  $\epsilon_{ij} = 1, (\zeta_i, \eta_i) = (0, 0)$  とおいて  $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij}) = (u_{ij}, v_{ij})$  と見なし、文献 16) の方法により平面運動と3次元形状を復元する。

対象とする画像系列において観測した特徴点の画像座標値  $(x_{ij}, y_{ij}); i \in \{1, 2, \dots, F\}; j \in \{1, 2, \dots, P\}$  から、式 (9), (10) を用いて各特徴点の仰角  $\phi_{ij}$  と位

相角  $\rho_{ij}$  を求め、式 (16) により  $uv$  座標値  $(u_{ij}, v_{ij})$  を得る。さらに、式 (11) に従って  $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  を求め、これらを行列要素とする  $2F \times P$  の  $uv$  行列

$$[A] = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{11} & \tilde{u}_{12} & \cdots & \tilde{u}_{1P} \\ \tilde{u}_{21} & \tilde{u}_{22} & \cdots & \tilde{u}_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{u}_{F1} & \tilde{u}_{F2} & \cdots & \tilde{u}_{FP} \\ \tilde{v}_{11} & \tilde{v}_{12} & \cdots & \tilde{v}_{1P} \\ \tilde{v}_{21} & \tilde{v}_{22} & \cdots & \tilde{v}_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{v}_{F1} & \tilde{v}_{F2} & \cdots & \tilde{v}_{FP} \end{bmatrix} \quad (21)$$

を得る。以下は、文献 16) の方法に従った平面運動と3次元形状の復元方法である。

$uv$  行列  $[A]$  から平面運動を表す  $2F \times 3$  の行列

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{1u} & m_{1v} & Tu_1 \\ m_{2u} & m_{2v} & Tu_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{Fu} & m_{Fv} & Tu_F \\ n_{1u} & n_{1v} & Tv_1 \\ n_{2u} & n_{2v} & Tv_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{Fu} & n_{Fv} & Tv_F \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1 & \mathbf{m}_2 & \cdots & \mathbf{m}_F & \mathbf{n}_1 & \mathbf{n}_2 & \cdots & \mathbf{n}_F \end{bmatrix}^T$$

と3次元形状を表す  $3 \times P$  の行列

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1P} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2P} \\ S_{31} & S_{32} & \cdots & S_{3P} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{S}_2 & \cdots & \mathbf{S}_P \end{bmatrix}$$

に因子分解する。なお、式 (22) の  $\mathbf{m}_i, \mathbf{n}_i, i \in \{1, 2, \dots, F\}$  は各フレームでの平面運動を表す3次元列ベクトルであり、式 (23) の  $\mathbf{S}_j, j \in \{1, 2, \dots, P\}$  は各特徴点の3次元座標値を表す3次元列ベクトルである。

各フレーム  $i \in \{1, 2, \dots, F\}$  でのヨー回転  $\theta_i$  は

$$\theta_i = \tan^{-1}\left(-\frac{n_{iu}}{m_{iu}}\right), \quad (24)$$

$XY$  並進運動  $(Tx_i, Ty_i)$  は

$$\begin{bmatrix} Tx_i \\ Ty_i \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Tu_i \\ Tv_i \end{bmatrix} \quad (25)$$

で求められる。さらに、各特徴点の3次元座標値

式 (17) 左辺の行列要素は、画像系列から直接観測されるものではなく、式 (11) で定義する座標値である。本論文では、式 (17) 左辺の行列を  $uv$  行列と称する。

$(X_j, Y_j, Z_j); j \in \{1, 2, \dots, P\}$  は

$$\begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1j}/S_{3j} \\ S_{2j}/S_{3j} \\ 1/S_{3j} \end{bmatrix} \quad (26)$$

で得られる．

### 2.3.2 回転運動の復元

2.3.1 項では、ピッチ回転運動とロール回転運動がないと仮定して、平面運動と 3 次元形状を復元した．ここでは、画像系列から得た  $uv$  座標値と、2.3.1 項の平面運動と 3 次元形状から算出した  $uv$  座標値との誤差が、ピッチ回転とロール回転から発生する誤差であると考えられる．この誤差は、式 (11), (12) を使うと、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta u_{ij} \\ \Delta v_{ij} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_{ij} \\ v_{ij} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{m}_i^T \\ \mathbf{n}_i^T \end{bmatrix} \mathbf{S}_j \quad (27) \\ &= \begin{bmatrix} u_{ij} \\ v_{ij} \end{bmatrix} - \epsilon_{ij} \begin{bmatrix} u_{ij} \\ v_{ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_i \\ \eta_i \end{bmatrix} \quad (28) \end{aligned}$$

と表される．式 (28) 右辺を式 (13), (14) を使って展開し、さらに、ピッチ回転  $\psi_i$  とロール回転  $\omega_i$  を未知数として  $P$  個の特徴点  $\mathbf{S}_j, j \in \{1, 2, \dots, P\}$  に対して行列表記すると、

$$[R_i] \begin{bmatrix} -\omega_i \\ \psi_i \end{bmatrix} = [\Delta A_i], \quad (29)$$

$$[R_i] = \begin{bmatrix} U_{i1}^{(\omega)} U_{i2}^{(\omega)} \dots U_{iP}^{(\omega)} V_{i1}^{(\omega)} V_{i2}^{(\omega)} \dots V_{iP}^{(\omega)} \\ U_{i1}^{(\psi)} U_{i2}^{(\psi)} \dots U_{iP}^{(\psi)} V_{i1}^{(\psi)} V_{i2}^{(\psi)} \dots V_{iP}^{(\psi)} \end{bmatrix}^T, \quad (30)$$

$$[\Delta A_i] = [\Delta u_{i1} \Delta u_{i2} \dots \Delta u_{iP} \Delta v_{i1} \Delta v_{i2} \dots \Delta v_{iP}]^T, \quad (31)$$

$$U_{ij}^{(\omega)} = u_{ij} \frac{X_j - Tx_i}{Z_j} + \cos(\theta_i), \quad (32)$$

$$U_{ij}^{(\psi)} = u_{ij} \frac{Y_j - Ty_i}{Z_j} + \sin(\theta_i), \quad (33)$$

$$V_{ij}^{(\omega)} = v_{ij} \frac{X_j - Tx_i}{Z_j} - \sin(\theta_i), \quad (34)$$

$$V_{ij}^{(\psi)} = v_{ij} \frac{Y_j - Ty_i}{Z_j} + \cos(\theta_i) \quad (35)$$

を得る．ここで、式 (27) の誤差  $(\Delta u_{ij}, \Delta v_{ij})$ 、ならびに、式 (32) ~ (35) の値は、画像系列から得られた  $uv$  座標値  $(u_{ij}, v_{ij})$  と、2.3.1 項で求めた平面運動と 3 次元形状から計算できる値である．したがって、式 (29) から、ピッチ回転  $\psi_i$  とロール回転  $\omega_i$  を

$$\begin{bmatrix} -\omega_i \\ \psi_i \end{bmatrix} = ([R_i]^T [R_i])^{-1} [R_i]^T [\Delta A_i], \quad i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad (36)$$

の計算によって求めることができる．

### 2.3.3 反復復元

2.3.1, 2.3.2 項で説明した方法により、 $uv$  行列からカメラ運動と 3 次元形状を復元することができる．しかし、これまでは、あらかじめ  $\epsilon_{ij} = 1, (\zeta_i, \eta_i) = (0, 0)$  と置いて議論を進めてきた．そこで、これまでに求めたカメラ運動と 3 次元形状から係数  $\epsilon_{ij}$  を式 (13), 光軸座標値  $(\zeta_i, \eta_i)$  を式 (14) に従って更新し、 $uv$  行列の各要素  $(u_{ij}, v_{ij})$  を式 (11) に従って  $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  に変換する．この  $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  を行列要素とする  $uv$  行列  $[A]$  に対して、2.3.1, 2.3.2 項の手法を適用する．これを反復的に続けることで、車両運動投影モデルに基づいてカメラ運動と 3 次元形状を復元することができる．

ここで、各反復における評価値として

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{u}_{ij} \\ \Delta \tilde{v}_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{ij} \\ \tilde{v}_{ij} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{m}_i^T \\ \mathbf{n}_i^T \end{bmatrix} \mathbf{S}_j, \quad (37)$$

$$\Delta E = \frac{1}{FP} \sum_{i=1}^F \sum_{j=1}^P \sqrt{(\Delta \tilde{u}_{ij})^2 + (\Delta \tilde{v}_{ij})^2} \quad (38)$$

を定義する．この評価値は、係数  $\epsilon_{ij}$  ならびに光軸座標値  $(\zeta_i, \eta_i)$  で変換した  $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  と、カメラ運動を平面運動として復元した再投影座標値との間の平均誤差である．つまり、この値が小さいほど、 $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  が平面運動での  $uv$  座標値に漸近していることを意味する．反復は  $\Delta E$  が十分に収束するまで繰り返す．

以上、上記の方法により車両運動投影モデルに基づいて、カメラ座標軸周りの回転運動  $\psi_i, \omega_i, \theta_i, XY$  並進運動  $(Tx_i, Ty_i), i \in \{1, 2, \dots, F\}$ 、ならびに、物体の 3 次元形状  $(X_j, Y_j, Z_j), j \in \{1, 2, \dots, P\}$  を復元することができる．

### 2.3.4 提案方法に関する計算手順

2.3.1 ~ 2.3.3 項で説明した提案方法によるカメラ運動と 3 次元形状の復元に関する計算手順を以下に列挙する．

手順 1 全方位カメラで獲得した画像系列から特徴点の画像座標値  $(x_{ij}, y_{ij}); i \in \{1, 2, \dots, F\}, j \in \{1, 2, \dots, P\}$  を観測する．次に、式 (9), (10) を使って各特徴点の仰角  $\phi_{ij}$  と位相角  $\rho_{ij}$  を求める．さらに、式 (16) により  $uv$  座標値  $(u_{ij}, v_{ij})$  を得る．

手順 2 係数  $\epsilon_{ij} = 1$ , 光軸座標値  $(\zeta_i, \eta_i) = (0, 0)$

表 1 両手法の特徴

Table 1 Characteristics of both methods.

項目	従来法	提案法
回転運動	Z 軸回転	XYZ 軸回転
並進運動	XY 平面での並進	
因子分解の回数	1 回	収束するまで
対象とする点	$\phi_{ij} > 0$ となる点	

と初期化する．

手順 3 画像系列から得た  $uv$  座標値  $(u_{ij}, v_{ij})$ ，係数  $\epsilon_{ij}$ ，ならびに，光軸座標値  $(\zeta_i, \eta_i)$  を式 (11) に代入して  $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  を得る．

手順 4  $(\tilde{u}_{ij}, \tilde{v}_{ij})$  を行列要素とする式 (21) の  $uv$  行列  $[A]$  を得て，文献 16) の方法によりユークリッド空間での平面運動  $(Tx_i, Ty_i)$ ， $\theta_i$  と 3 次元形状  $(X_j, Y_j, Z_j)$  を復元する．

手順 5 式 (32)～(35) を要素とする式 (30) の行列  $[R_i]$  と，式 (27) を要素とする式 (31) の行列  $[\Delta A_i]$  を準備して，式 (36) に従って，ピッチ回転  $\psi_i$  とロール回転  $\omega_i$  を求める．

手順 6 式 (37)，(38) で定義する誤差  $\Delta E$  を求める．誤差  $\Delta E$  がある一定値に収束した場合は処理を停止する．そうでない場合は，式 (13) により係数  $\epsilon_{ij}$  を，式 (14) により光軸座標値  $(\zeta_i, \eta_i)$  をそれぞれ更新し，手順 3 に戻る．

ここで，従来法<sup>16)</sup> と提案法の特徴を表 1 にまとめる．従来法の計算手順は，上記の計算手順の手順 1 から手順 4 までの処理に等しい．また，ピッチ回転とロール回転を想定していないため，平面運動での移動観測に適用が限定される．これに対して，提案法では誤差  $\Delta E$  が収束するまで従来法を反復的に利用するため因子分解する回数が多いが，この反復復元においてピッチ回転とロール回転を求めることができる．

#### 2.4 スケールパラメータによる逐次復元

本節では，2.3 節の方法で求めたカメラ運動と 3 次元形状から，スケールパラメータを使って市街地空間の 3 次元構造を逐次的に復元する方法を説明する．

図 2 に示すように，移動観測では，道路を走行しながら市街地景観を撮像する．移動観測により取得した画像は複数のフレームごとに画像系列化し，各系列に対して 2.3 節で説明した方法によりカメラ運動と 3 次元形状を復元する．このとき，各系列において，初期フレームでの  $X$  軸方向の方向ベクトルを  $(1, 0)$ ， $Y$  軸方向の方向ベクトルを  $(0, 1)$ ，方位角を 0 度として復元しており<sup>16)</sup>，各系列で求めたカメラ運動と 3 次元形状は独立したカメラ座標系上で復元されている．したがって，市街地の 3 次元構造を復元するには，系列

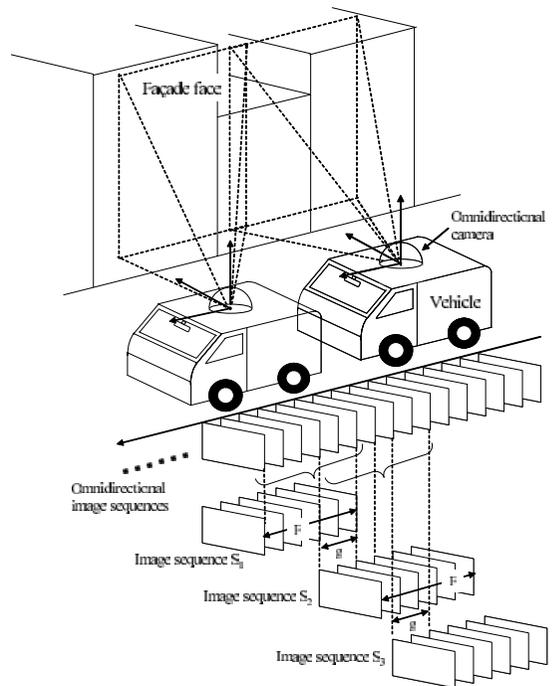


図 2 移動観測と画像系列

Fig. 2 Mobile observation and image sequences.

間のスケール合わせ，ならびに，方角合わせ ( $Z$  軸周りの回転) を行い，共通の座標系にてカメラ運動と 3 次元形状を復元する必要がある．そのために，図 2 の各系列の重複フレームを利用して，共通のカメラ座標系上に逐次的に復元する．説明の便宜上，車両は一定速度で移動したと考えて，各系列のフレーム数を  $F$ ，重複するフレーム数を  $g$  とする．

逐次復元を説明するために，図 2 の画像系列  $S_1$  と画像系列  $S_2$  に着目する．画像系列  $S_1$  の最後の  $g$  フレームは画像系列  $S_2$  の先頭の  $g$  フレームと重複するため，この区間のカメラ運動は同じでなければならない．つまり，この重複フレーム部分が両系列間の接続の役割となり，各々のカメラ運動と 3 次元形状を共通の座標系で復元することができる．

図 3 に，系列  $S_1, S_2$  から復元したカメラ運動と 3 次元形状を示す．この図で，系列  $S_1$  から復元した平面運動を  $(Tx_i^{(1)}, Ty_i^{(1)}), \theta_i^{(1)}, i \in \{1, 2, \dots, F\}$ ，3 次元形状を  $(X_{j_1}^{(1)}, Y_{j_1}^{(1)}, Z_{j_1}^{(1)}), j_1 \in \{1, 2, \dots, P_1\}$ ，系列  $S_2$  から復元した平面運動を  $(Tx_i^{(2)}, Ty_i^{(2)}), \theta_i^{(2)}, i \in \{1, 2, \dots, F\}$ ，3 次元形状を  $(X_{j_2}^{(2)}, Y_{j_2}^{(2)}, Z_{j_2}^{(2)}), j_2 \in \{1, 2, \dots, P_2\}$  で表している．ここで，両系列での  $XY$  並進運動と 3 次元形状を，初期フレームでのカメラ位置を原点とした相対座標系で求めておく．

まず，重複するフレームに対応するベクトル  $T_1$ ，

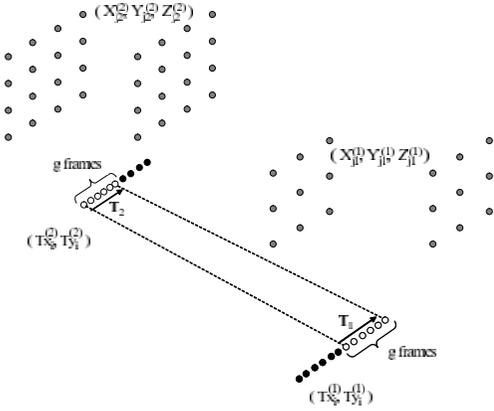


図3 両系列間の関係

Fig. 3 Relationship between both sequences.

$\mathbf{T}_2$  は,

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_1 &= (Tx_F^{(1)} - Tx_h^{(1)}, Ty_F^{(1)} - Ty_h^{(1)}), \\ \mathbf{T}_2 &= (Tx_g^{(2)}, Ty_g^{(2)}), \quad h = F - g + 1 \end{aligned}$$

となる．このベクトルの大きさは各系列でのスケールを表している．本論文では，系列間のスケール比と方位角を総称してスケールパラメータと称している．系列間のスケール比は  $\|\mathbf{T}_1\| / \|\mathbf{T}_2\| (= C_{1,2})$  で求められる．また，ベクトル  $\mathbf{T}_2$  のベクトル  $\mathbf{T}_1$  に対する方位角は  $\theta_h^{(1)} (= \Theta_{1,2})$  となる．これらのパラメータを使うと，系列  $S_2$  で得た  $XY$  並進運動と 3 次元形状を，

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tilde{T}x_i^{(2)} \\ \tilde{T}y_i^{(2)} \end{bmatrix} &= C_{1,2} \mathbf{R}(\Theta_{1,2}) \begin{bmatrix} Tx_i^{(2)} \\ Ty_i^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx_h^{(1)} \\ Ty_h^{(1)} \end{bmatrix}, \\ i &\in \{1, 2, \dots, F\}, \\ \begin{bmatrix} \tilde{X}_{j_2}^{(2)} \\ \tilde{Y}_{j_2}^{(2)} \end{bmatrix} &= C_{1,2} \mathbf{R}(\Theta_{1,2}) \begin{bmatrix} X_{j_2}^{(2)} \\ Y_{j_2}^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx_h^{(1)} \\ Ty_h^{(1)} \end{bmatrix}, \\ \tilde{Z}_{j_2}^{(2)} &= C_{1,2} Z_{j_2}^{(2)}, \quad j_2 \in \{1, 2, \dots, P_2\} \end{aligned}$$

なる相似変換により，系列  $S_1$  でのカメラ運動と 3 次元形状を復元したカメラ座標系において復元できる．ただし， $\mathbf{R}(\Theta_{1,2})$  は回転角  $\Theta_{1,2}$  の  $2 \times 2$  の回転行列を表す．この相似変換を系列  $S_3$  以降にも適用する．以下に，系列  $S_k (k \geq 2)$  で復元した  $XY$  並進運動と 3 次元形状の変換を示す．

$$\begin{bmatrix} \tilde{T}x_i^{(k)} \\ \tilde{T}y_i^{(k)} \end{bmatrix} = C_{1,k} \mathbf{R}(\Theta_{1,k}) \begin{bmatrix} Tx_i^{(k)} \\ Ty_i^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix}, \quad i \in \{1, 2, \dots, F\}, \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{X}_{j_k}^{(k)} \\ \tilde{Y}_{j_k}^{(k)} \end{bmatrix} = C_{1,k} \mathbf{R}(\Theta_{1,k}) \begin{bmatrix} X_{j_k}^{(k)} \\ Y_{j_k}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix},$$

$$\tilde{Z}_{j_k}^{(k)} = C_{1,k} Z_{j_k}^{(k)}, \quad j_k \in \{1, 2, \dots, P_k\}, \quad (40)$$

$$\tilde{\theta}_i^{(k)} = \theta_i^{(k)} + \Theta_{1,k}, \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{q=1}^{k-1} \tilde{T}x_h^{(q)} \\ \sum_{q=1}^{k-1} \tilde{T}y_h^{(q)} \end{bmatrix},$$

$$(\tilde{T}x_h^{(1)}, \tilde{T}y_h^{(1)}) = (Tx_h^{(1)}, Ty_h^{(1)}),$$

$$C_{1,k} = \prod_{q=1}^{k-1} C_{q,q+1} = \frac{\|\mathbf{T}_1\|}{\|\mathbf{T}_k\|}, \quad \Theta_{1,k} = \sum_{q=1}^{k-1} \theta_h^{(q)},$$

$$\mathbf{T}_k = (Tx_g^{(k)}, Ty_g^{(k)})$$

このように，スケールパラメータを利用し，系列  $S_1$  を基準のカメラ座標系として各系列から求めたカメラ運動と 3 次元形状を復元する．

以上説明した方法に従えば，各系列で復元した  $XY$  並進運動  $(\tilde{T}x_i^{(k)}, \tilde{T}y_i^{(k)})$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, F\}$  を空間的に連結するための骨組みとして利用し，市街地空間の 3 次元構造  $(\tilde{X}_{j_k}^{(k)}, \tilde{Y}_{j_k}^{(k)}, \tilde{Z}_{j_k}^{(k)})$ ,  $j_k \in \{1, 2, \dots, P_k\}$  を逐次的に復元することができる．

### 3. 実験結果

本章は以下の構成としている．まず，3.1 節において計算機シミュレーションにより精度評価を行う．3.2 節では，全方位画像に対する特徴点抽出と追跡処理について述べる．次に，3.3 節では，市街地景観の全方位画像系列からカメラ運動と 3 次元形状を獲得した結果を示す．さらに，3.4 節では，各画像系列のカメラ運動と 3 次元形状から，スケールパラメータを使って市街地空間の 3 次元構造を逐次的に復元した結果を示す．3.5 節では，これらの結果をふまえて考察を行う．以下では，従来法とは文献 16) の手法を指すことにし，図表において従来法を“Method A”，提案法を“Method B”と表記することにする．

#### 3.1 計算機シミュレーションによる精度評価

提案法では  $Z$  軸並進運動を考慮していないため， $Z$  軸並進運動の有無がカメラ運動と 3 次元形状の復元にどのような影響を与えるかを把握する必要がある．本節では，ピッチ回転，ロール回転，ならびに， $Z$  軸並進運動の有無が復元精度に与える影響を調べる計算機

系列  $S_1$  を基準と考えたが，他の系列のカメラ座標系を基準としてもかまわない．

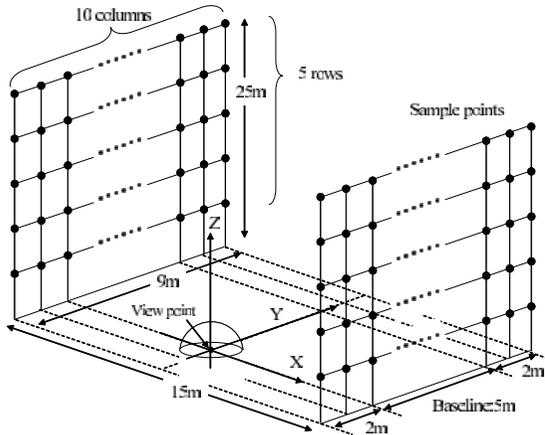


図4 シミュレーションサンプル  
Fig. 4 Simulation sample.

表2 内部パラメータ  
Table 2 Internal parameters.

Parameter	Value
Constant $b$	42.7 [mm]
Constant $c$	60.0 [mm]
Focal length $f$	8.89 [mm]
Image center	(320.19, 238.59)
Scale for 1 pixel	9.937 [ $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ]

シミュレーションを行った。

以下では、市街地の一方通行路（図4のX軸方向の幅は3.3, 3.4節での道路幅とほぼ同じ）において、全方位カメラが直進運動をしながら回転運動する移動観測を想定した。図4にカメラ位置と3次元形状を示す。ここでは、市街地撮影時の車両速度を20 km/h、フレームレートを30 fpsとし、1秒間での移動観測を考慮したシミュレーションを行う。ただし、与えるカメラ運動の便宜上、フレーム数を31とする。このフレーム間において全方位カメラがY軸に沿って5m移動し、左右対称に配置した格子点を観測する。カメラ内部パラメータとして表2のHyperOmniVision<sup>20)</sup>の内部パラメータを用いており、各視点位置での投影では全方位カメラの投影式に基づいて $xy$ 画像座標値を求める。このとき、画像サイズを $640 \times 480$ 画素とし、画像計測誤差を考慮して各画像座標値にランダムなガウス性雑音（平均値0, 標準偏差1）を付加する。以下の実験結果は、100回試行した平均である。

まず、ピッチ回転とロール回転がある場合（パターン1）について実験結果を述べる。パターン1では、ピッチ回転、ロール回転、ならびにヨー回転をそれぞれ $\psi_i = A_R \sin(2\pi \times (i-1)/30)$ ,  $\omega_i = A_R \cos(2\pi \times (i-1)/30)$ ,  $\theta_i = A_R \sin(2\pi \times (i-1)/30)$ ,  $A_R = 4$ で変化させて

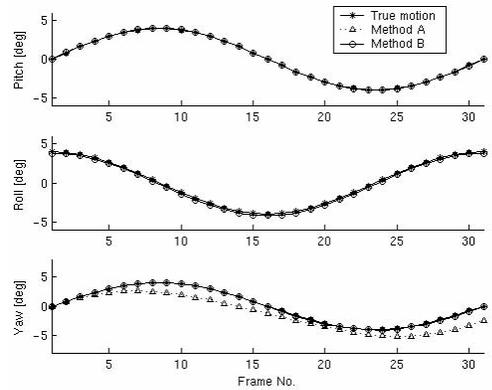


図5 パターン1の回転運動  
Fig. 5 Rotation motion of pattern 1.

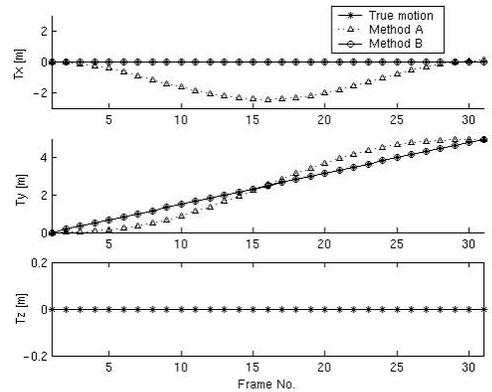


図6 パターン1の並進運動  
Fig. 6 Translation motion of pattern 1.

表3 カメラ運動の復元誤差（パターン1）  
Table 3 Recovery error of camera motion (pattern 1).

	Method A	Method B
$\psi$ [deg]	—	0.02
$\omega$ [deg]	—	0.18
$\theta$ [deg]	1.44	0.07
$T_x$ [m]	1.47	0.01
$T_y$ [m]	0.49	0.01

いる。図5は従来法と提案法による回転運動の復元結果であり、図6はXY並進運動の復元結果である。ここで、復元したカメラ運動の移動距離が図4での移動距離と同じ5mとなるようにスケール調整を行っている。また、表3に各運動成分について全フレームで平均化した平均二乗誤差を示す。

表3において、従来法では1.44度の誤差がヨー回転に発生しているのに対して、提案法では0.07度の誤差でヨー回転を得ている。また、提案法はピッチ回転、ロール回転を0.2度以下の誤差で獲得している。次に、図6において従来法では、並進運動に膨らみ

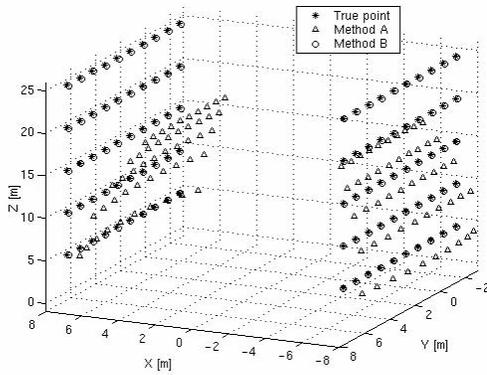


図7 パターン1の3次元形状  
Fig. 7 3D shape of pattern 1.

が発生しており、表3から $X$ 軸並進の位置誤差は約1.5mに達している。これに対して、提案法は $XY$ 並進ともに1cm程度の誤差で並進運動を復元している。一方、図7は3次元形状の復元結果（並進運動と同様にスケールアップしている）であり、特徴点位置と真値との間の平均二乗誤差（位置誤差）を求めると、従来法では3.99m、提案法では0.11mという結果が得られ、提案法は3次元形状を精度良く復元している。

続いて、 $Z$ 軸並進運動がある場合（パターン2）についての実験結果を以下に示す。このときの $Z$ 軸並進運動は $Tz_i = A_z \sin(2\pi \times (i-1)/30)$ 、 $A_z = 20$ の運動とした。このシミュレーションでは、図4の空間で1秒間に $\pm 20$ cmの規模で変化する条件において、従来法と提案法がどれくらいの精度で獲得するのかを調べた。

パターン2に対する従来法と提案法の回転運動、並進運動、3次元形状の復元結果を、それぞれ図8、図9、ならびに図10に示す。また、各運動成分の復元誤差を求め、表4にまとめた。ヨー回転については、従来法では1.44度の誤差、提案法は0.05度の精度で復元している。ところが、提案法で得られるピッチ回転は1.25度の誤差、ロール回転は0.20度の誤差となっており、パターン1のときと比較してピッチ回転の誤差が大きくなっている。次に、図9の並進運動を見ると、従来法ではパターン1と同様に膨らんだ並進運動であり、提案法では3cm程度の位置誤差で並進運動が得られている。一方、図10の3次元形状について位置誤差を求めたところ、従来法では4.00m、提案法では0.46mの誤差で3次元位置を獲得していた。提案法ではパターン1と比べて精度が劣化しており、図10から $Y$ 軸方向に3次元位置が多少ずれていることが確認できる。この場合、ピッチ回転を高精度に求められ

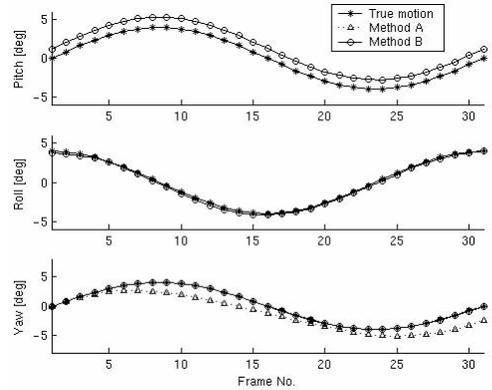


図8 パターン2の回転運動  
Fig. 8 Rotation motion of pattern 2.

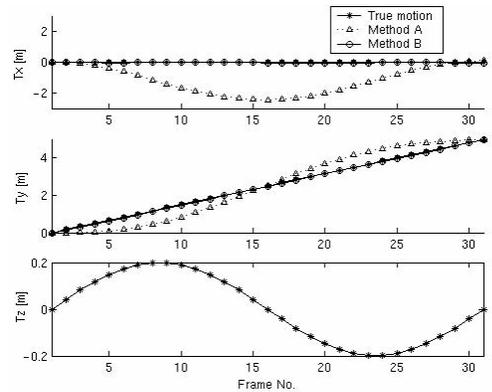


図9 パターン2の並進運動  
Fig. 9 Translation motion of pattern 2.

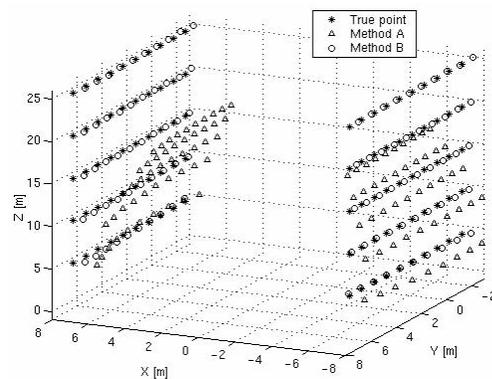


図10 パターン2の3次元形状  
Fig. 10 3D shape of pattern 2.

ていないことが3次元形状の $Y$ 軸方向の位置誤差に表れており、視点から遠くなる（ $Z$ 値が大きくなる）につれてその位置誤差は大きくなっている。

さらに、パターン1での $A_R$ 、パターン2での $A_z$ をそれぞれ変化させた場合について、3次元形状の位置誤差を図11と図12にまとめた。図11において、

表 4 カメラ運動の復元誤差 (パターン 2)

Table 4 Recovery error of camera motion (pattern 2).

	Method A	Method B
$\psi$ [deg]	—	1.25
$\omega$ [deg]	—	0.20
$\theta$ [deg]	1.44	0.05
$T_x$ [m]	1.47	0.03
$T_y$ [m]	0.49	0.03

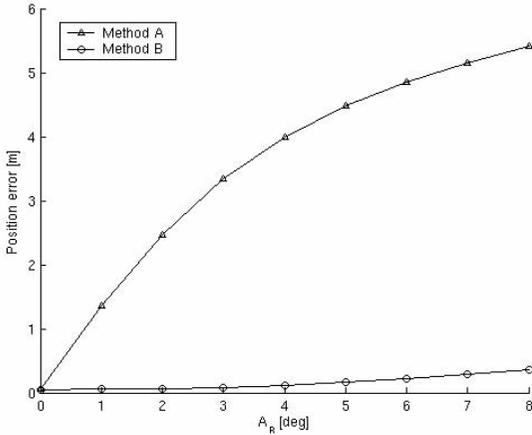


図 11 位置誤差の比較 ( $T_z$  一定)

Fig. 11 Comparison with position errors ( $T_z$  is constant).

従来法ではピッチ回転とロール回転の大きさが増加すると位置誤差は急な増加傾向を示しているが、提案法の位置誤差は緩やかな増加となっている。ただし、提案法では5度以上において位置誤差が若干大きくなっており、車両運動投影モデルで前提としていたピッチ回転とロール回転に関する近似が合わなくなっていると考えられる。一方、図 12 では、従来法の場合、 $A_R = 2, 4$  により位置誤差が異なっており、それぞれ  $A_z$  の増加とともにその誤差は緩やかに増加している。これに対して、提案法は  $A_z$  の大きさに従って誤差が増加するが、 $A_R = 2, 4$  の場合とも同じような位置誤差で復元している。

車両には路面凹凸の衝撃を吸収する車体機構が機能する場合もある。そのため、平坦な路面では  $Z$  軸並進運動が無視できる場合もある。この点では車両運動投影モデルに基づき、カメラ運動と3次元形状を高精度に獲得できると考えられる。一方、 $Z$  軸並進運動がある場合は、図 12 で示した位置誤差が見込まれる。しかし、平坦な路面での走行において  $\pm 20$  cm/秒で変化する状況はほとんどないと考えられ、仮にこの範囲で変化したとしても、図 12 から特徴点の位置が 0.5 m 以内の誤差で3次元形状を獲得できるという結果が得られている。これは  $Z$  軸並進運動がない場合の図 11 の位置誤差に近い。したがって、本シミュ

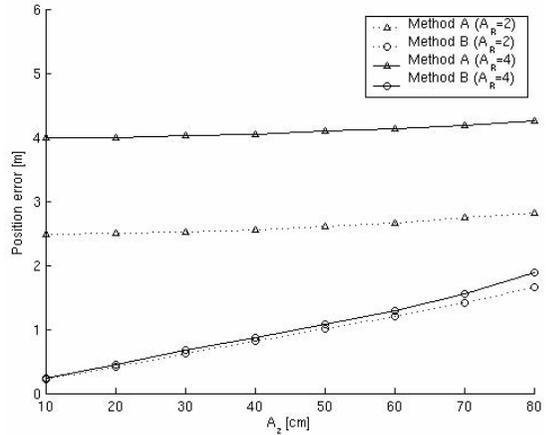


図 12 位置誤差の比較 ( $T_z$  変化)

Fig. 12 Comparison with position errors ( $T_z$  is variable).

レーション結果から、車両運動投影モデルが実環境においても近似的に適合すると考えることができる。

### 3.2 特徴点の抽出と追跡

全方位カメラとして表 2 の内部パラメータを有する HyperOmniVision を使用した (図 13 左). HyperOmniVision を車両 (図 13 右) に搭載し、約 20 km/h の速度で移動観測しながら全方位画像系列 (640 × 480 画素, 30 fps) を取得した。全方位画像の例を図 14 に示す。なお、HyperOmniVision では視点の高さより低い位置の領域も撮像することができるが、2.2 節で述べたように、提案法は仰角 0 度以下の仰角は適用範囲外であるため、仰角 0 度となる境界が画面の端に投影されるように光学系を調整している (図 14 の  $\Phi = 0^\circ$ )。

次に、特徴点抽出について説明する。文献 16) の実験結果によれば、特徴点が視点の高さに近づく (仰角 10 度以下となる) と水平位置の獲得精度が悪化することが確認されている。また、図 14 から分かるように、画像領域の中心部分にはカメラ自体が写り込む。そこで、特徴点を設定する画像 (中央画像) では  $10 \text{ 度} \leq \phi_0 \leq 55 \text{ 度}$ ,  $\rho_0$  で囲まれる扇形領域内から特徴点を抽出する。このとき、全方位カメラの大局的な観測力を活用するためには広角な  $\rho_0$  が望ましいが、領域の指定とその領域内の特徴点を追跡できるフレーム数のトレードオフを考慮する必要がある。以降の実験では、20 km/h の移動観測で取得した画像系列において特徴点がフレームアウトしない程度の範囲を把握したうえで、 $-40 \text{ 度} \leq \rho_0 \leq 40 \text{ 度}$  とした。この扇形領域から、以下の手順により特徴点を抽出する<sup>21), 22)</sup>。

- (1) 領域内の各画素に対する  $2 \times 2$  のヘッセ行列を求め、

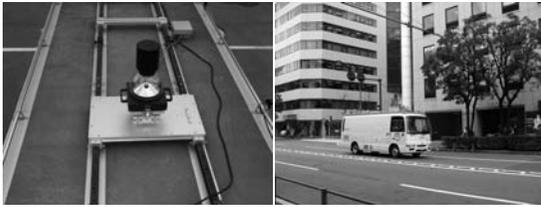


図 13 撮影車両システム  
Fig. 13 Imaging vehicle system.

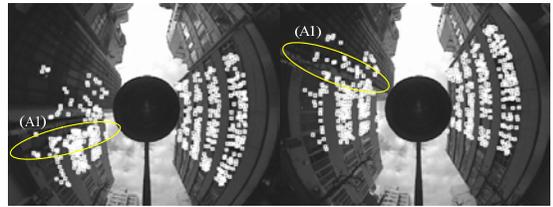


図 15 サンプル A  
Fig. 15 Sample A.

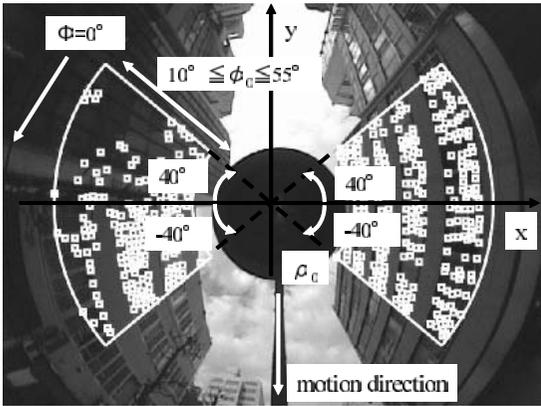


図 14 特徴点の例  
Fig. 14 Example of feature points.

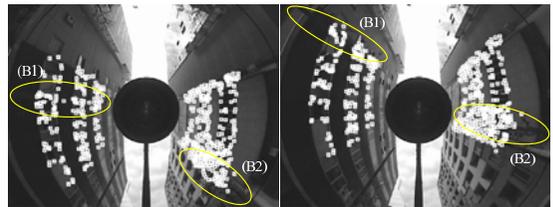


図 16 サンプル B  
Fig. 16 Sample B.

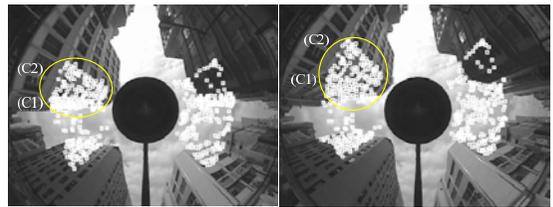


図 17 サンプル C  
Fig. 17 Sample C.

- (2) 各点の  $3 \times 3$  近傍領域においてその点が極大点かどうか判定し、極大点とならない場合はその点を削除する (non-maxima suppression) .
- (3) 得られた各点のヘッセ行列の固有値  $\sigma_l, \sigma_s$  ( $\sigma_s \leq \sigma_l$ ) を求め、 $\sigma_s$  が  $\sigma_p$  以上となる点を抽出する .
- (4) 抽出した点の  $\sigma_s$  の大きさの順にソートし、上位の点から順番にその点 ( $p_l$ ) より上位の点 ( $p_h$ ) が  $\sigma_d$  画素以内の距離に存在するかどうかを判定する . もし、存在する場合は下位の点  $p_l$  を削除する .

以下の実験では、上記の処理において  $\sigma_p = 0.1$ ,  $\sigma_d = 5$  として特徴点を抽出した . 図 14 に示す特徴点 (マーク) は、これにより得られたものである .

特徴点追跡には KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) 法<sup>22)</sup>を採用し、中央画像から時系列方向、ならびに、時系列と逆方向に追跡を行って特徴点の画像座標値を得た . 図 15, 図 16, 図 17 に本実験で用いた代表的な画像サンプルを示す . 各図において、左図は中央画像に対して時系列と逆方向に追跡した先頭のフレーム画像であり、右図は中央画像に対して時系列に追跡した末尾のフレーム画像である . 各サンプルにおいてマークで特徴点位置を示している .

ところで、初期状態の  $uv$  行列の要素において、誤

追跡などの特徴点を含む場合があった . さらに、図 17 に見られるように、雲に特徴点が付く場合もある . このような場合、アウトライア除去は必要である . 筆者らは、文献 23) において空撮画像から移動物体や誤追跡の特徴点を除去するために、特徴点のフィルタリングが有効であることを示した . 本実験でも、初期状態の  $uv$  行列に対して、このフィルタリング処理により、ある程度特徴点を絞り込むことはカメラ運動と 3 次元形状の復元に有効であることを確認した . 以下の実験では、適当なパラメータを与えて特徴点のフィルタリングを行い、誤追跡や雲に付いた特徴点を除去している .

### 3.3 全方位画像からのカメラ運動と 3 次元形状の復元

図 18, 図 19, 図 20 はサンプル A ~ サンプル C に対して、従来法と提案法が復元したカメラ運動である . 提案法ではピッチ回転とロール回転として、 $\pm 2$  度の範囲で緩やかに変化する回転運動が得られている . さらに、従来法との比較という点では、サンプル A とサンプル C においてフレーム数の増加にともないヨー回転が多少異なっている . 一方、並進運動 ( $XY$  並進

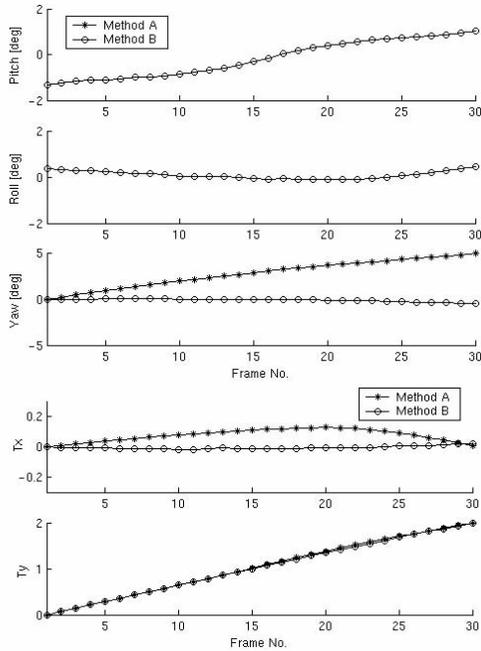


図 18 サンプル A からのカメラ運動  
Fig. 18 Camera motion from sample A.

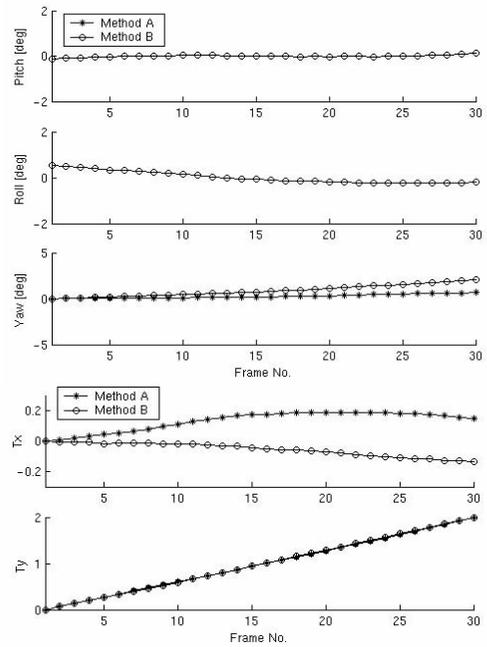


図 20 サンプル C からのカメラ運動  
Fig. 20 Camera motion from sample C.

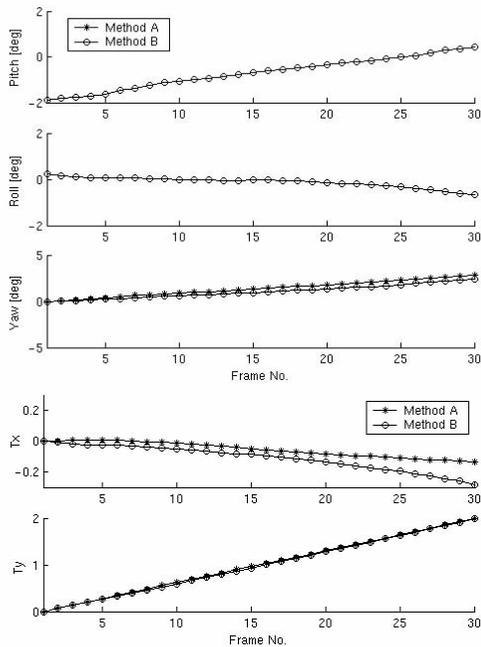


図 19 サンプル B からのカメラ運動  
Fig. 19 Camera motion from sample B.

運動の移動距離を 2 としている) の場合, 各サンプルにおいて, 両手法ともフレーム数に比例した Y 軸方向の並進運動を復元しているが, X 軸方向の並進運動に差異がある。

図 21, 図 22, 図 23 は従来法による 3 次元形状, 図 24, 図 25, 図 26 は提案法による 3 次元形状である (これらの図においても XY 並進運動の移動距離を 2 としてスケール調整している)。両手法の結果において, サンプル A から得られた特徴点の 3 次元位置は壁と識別できる 3 次元配置を形成している。XY 面で見た 3 次元形状からもある程度の平坦性が確認できる。また, 図 21, 図 24 の (A1) で示す箇所は図 15 の丸棒 (A1) で示したように街路樹であることが確認できる。サンプル B でも, 図 22, 図 25 の丸棒 (B1) と丸棒 (B2) に示す箇所に図 16 の丸棒で示した街路樹の部分の復元している。一方, 図 23, 図 26 では交差点の四方の建物側面に点在する特徴点が復元されている。図 17 の丸棒に示す建物には, 進行方向と交差する道路に面した壁 (C1) と交差点を向いた壁 (C2) の部分に特徴点が分布している。図 23, 図 26 の (C1), (C2) には, この 2 面上に点在する特徴点が一度に復元されている。サンプル C で見られるように, 交差点付近での四方の 3 次元形状を一度に復元できるのは全方位カメラの利点でもある。なお, この実験では, 一方通行路の中央を車両が走行した。このことは図 21 ~ 図 23, ならびに, 図 24 ~ 図 26 でのカメラ位置が示している。

上記の 3 次元形状の復元では, 従来法と提案法の結果において目立った差異は確認できなかった。そこで,

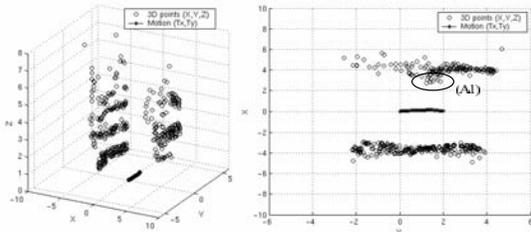


図 21 サンプル A からの 3 次元形状 (Method A)  
Fig. 21 3D shape from sample A (Method A).

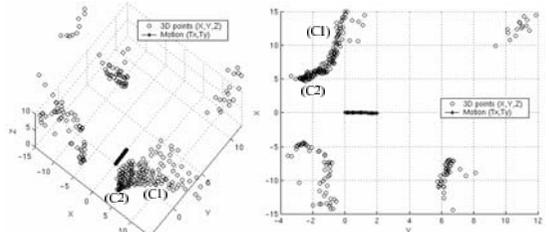


図 26 サンプル C からの 3 次元形状 (Method B)  
Fig. 26 3D shape from sample C (Method B).

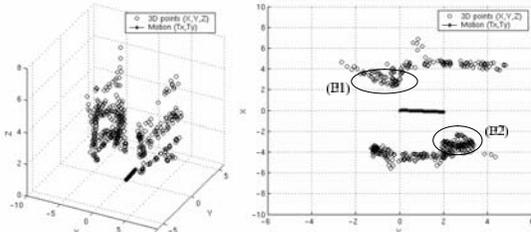


図 22 サンプル B からの 3 次元形状 (Method A)  
Fig. 22 3D shape from sample B (Method A).

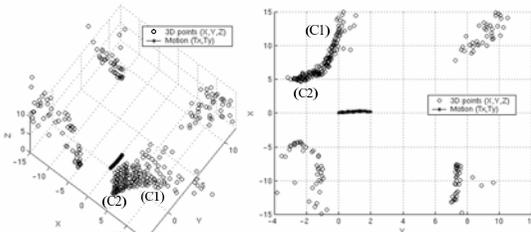


図 23 サンプル C からの 3 次元形状 (Method A)  
Fig. 23 3D shape from sample C (Method A).

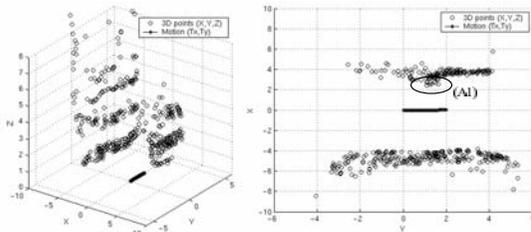


図 24 サンプル A からの 3 次元形状 (Method B)  
Fig. 24 3D shape from sample A (Method B).

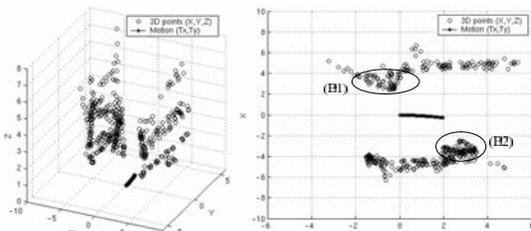


図 25 サンプル B からの 3 次元形状 (Method B)  
Fig. 25 3D shape from sample B (Method B).

表 5  $\Delta E$  の比較 [単位: 画素]

Table 5 Comparison with  $\Delta E$  [unit: pixel].

	Method A	Method B	Method B
		(ite=5)	(ite=50)
Sample A	1.38	1.07	0.97
Sample B	1.53	1.21	1.19
Sample C	0.85	0.68	0.65

表 5 に、サンプル A ~ サンプル C について、式 (38) で定義した誤差  $\Delta E$  をまとめた。提案法として反復回数を 5 回 (ite=5)、50 回 (ite=50、収束した状態) の場合の  $\Delta E$  を示す。全サンプルとも従来法よりも提案法の  $\Delta E$  が小さくなっており、反復回数を増すことで、さらに  $\Delta E$  が減少している。なお、反復回数 5 回の場合でも十分に収束した状態にかなり近いことが分かる。

### 3.4 市街地空間の 3 次元構造復元

#### 3.4.1 直進運動での市街地構造復元

連続した全方位画像系列からカメラ運動と 3 次元形状を復元し、2.4 節の逐次復元を行った実験結果について述べる。本実験では、撮影車両を 15 km/h から 20 km/h の速度範囲で走行させて市街地景観の全方位画像を取得した。この車両速度で取得した画像系列に対して、フレーム数  $F$  を変化させて特徴点追跡を行ったところ、図 14 で示したような特徴点配置の場合、フレーム数 40 を超えると低層の特徴点の追跡が困難となる場合があった。この実験では、車両がほぼ一定の速度で走行したと考えて、全体の全方位画像系列から 15 フレーム重複させて各系列あたり 30 フレームに分割し、205 種の画像系列を得た。なお、特徴点は 3.2 節で述べた  $-40 \text{度} \leq \rho_0 \leq 40 \text{度}$ 、 $10 \text{度} \leq \phi_0 \leq 55 \text{度}$  の領域において抽出しており、以下では階層 A と称する。撮影車両は図 27 左の地点 (A) から地点 (E) まで移動して、全方位画像を取得した。この道路は車 3 台分の幅があり、両側には駐車可能なスペースがある一

従来法の場合  $\epsilon_{ij}=1$ 、 $(\zeta_i, \eta_i)=(0,0)$  とした。

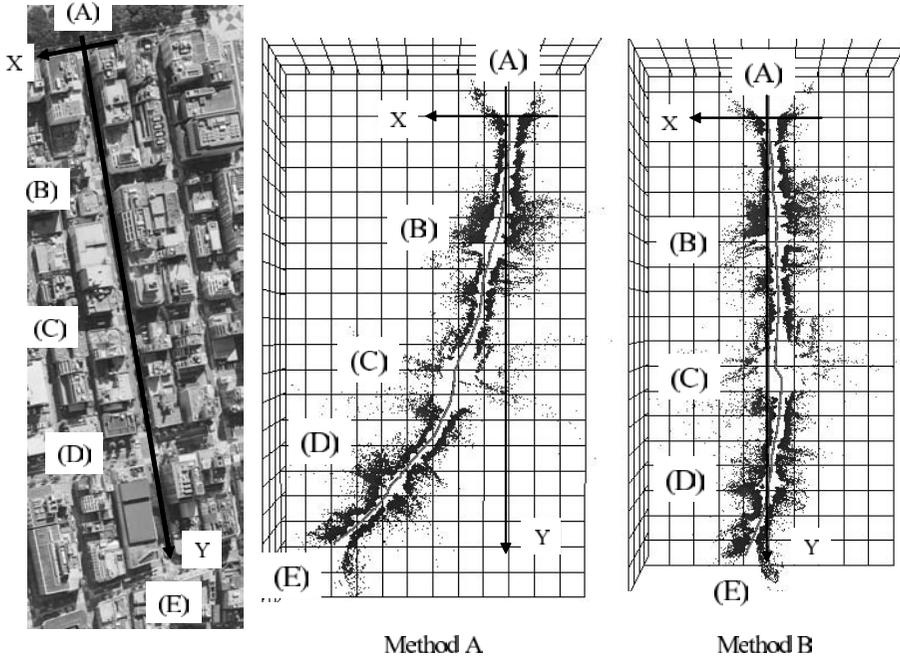


図 27 市街地空間構造

Fig. 27 Urban space structure.

表 6  $\Delta T_x$  の比較 [単位: m]

Table 6 Comparison with  $\Delta T_x$  [unit: m].

Class	Method A	Method B
A	57.86	7.39
B	28.64	6.95
C	45.32	41.27

表 7  $\Delta \theta$  の比較 [単位: 度]

Table 7 Comparison with  $\Delta \theta$  [unit: degree].

Class	Method A	Method B
A	26.96	8.53
B	7.15	3.48
C	10.17	8.30

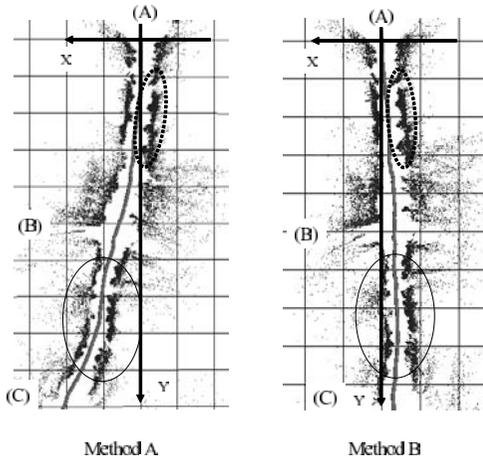
方通行路となっている。交差点は地点 (B), (C), (D) にあり、区間 (A)–(E) の距離は約 440m である。

図 27 中右にそれぞれ従来法と提案法による階層 A の 3 次元構造を示す。図 27 左の区間 (A)–(E) は直線の道路 (Y 軸) の両側に建物が並んだ典型的な市街地となっている。ここでは、3 次元構造がどれだけ Y 軸に沿って復元されたかを評価するために車両運動に着目する。車両運動の指標として、式 (39) の  $\tilde{T}_{x_i}^{(k)}$  を Y 軸からのずれ幅、式 (41) の  $\tilde{\theta}_i^{(k)}$  を Y 軸との傾きとして用いる。この絶対値をそれぞれ逐次復元の全フレームにわたり平均化した値  $\Delta T_x$ ,  $\Delta \theta$  を表 6, 表 7 に示す。ただし、 $\Delta T_x$  は逐次復元で得た全体の XY 並進運動において Y 軸方向の移動距離を 440m とした値になっている。

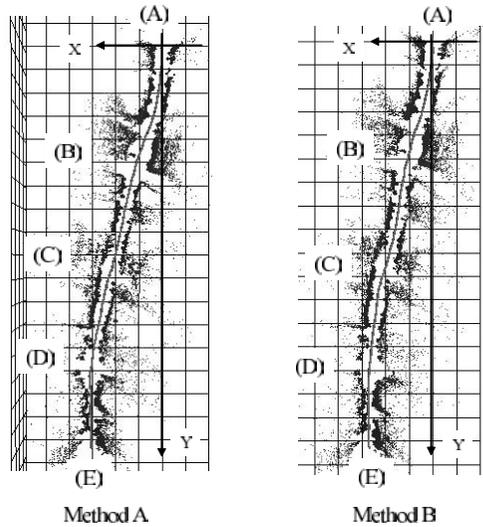
図 27 中から明らかなように、従来法では Y 軸に沿った構造ではなく弓状に反った市街地構造を復元している。表 6 では  $\Delta T_x$  が 57.86m となっており、表 7 での  $\Delta \theta$  は 26.96 度となって、Y 軸から大幅に外れていることが分かる。一方、提案法では図 27 右の区

間 (A)–(C) においてほぼ Y 軸に沿った構造を復元しており、表 6 から  $\Delta T_x$  が 7.39m となっており、従来法と比較すると 1/7 以下となっている。また、表 7 でも提案法は従来法と比べて 1/3 以下になっている。ただし、図 27 右の地点 (C) 以降において、Y 軸方向に対してやや反ったような構造を復元している。

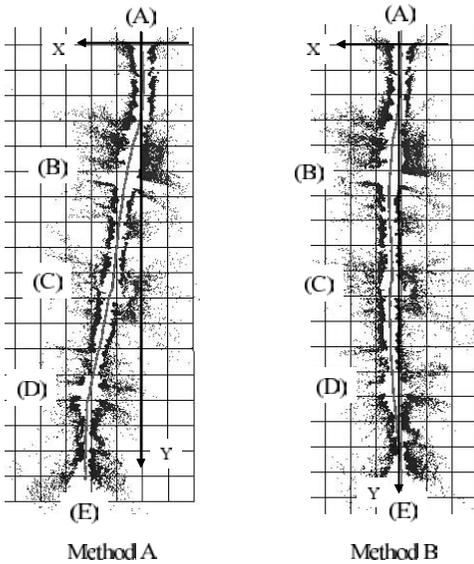
図 28 は、区間 (A)–(C) の市街地構造である。両手法とも、破線の丸枠に示す位置などに街路樹がところどころ復元されているのが分かる。従来法では Y 軸に沿った車両運動と両側の 3 次元構造が得られておらず、進行方向に進むにつれて次第に Y 軸から外れている。さらに、図 28 の丸枠に示す区間 (B)–(C) に着目すると、従来法ではこの区間において蛇行してカメラ運動を復元し、それと同調したように蛇行した市街地構造を復元している。これに対して、提案法の場合では、地点 (B) の交差点部分をほぼ直交した十字路として復元しており、従来法と比べて区間 (B)–(C) において市街地構造を蛇行することなく、ほぼ Y 軸に沿った市街地構造を復元している。



Method A Method B  
 図 28 市街地空間構造：区間 (A)–(C)  
 Fig. 28 Urban space structure: section (A)–(C).



Method A Method B  
 図 30 階層 C の市街地空間構造  
 Fig. 30 Urban space structure of class C.



Method A Method B  
 図 29 階層 B の市街地空間構造  
 Fig. 29 Urban space structure of class B.

次に、上記と同じ画像系列に対して  $\rho_0$  を変えずに、 $20 \text{度} \leq \phi_0 \leq 55 \text{度}$  とした領域中の特徴点（階層 B）と、 $30 \text{度} \leq \phi_0 \leq 55 \text{度}$  とした領域中の特徴点（階層 C）から逐次復元した市街地構造をそれぞれ図 29、図 30 に示す。階層 B の場合、表 6、表 7 から従来法では  $\Delta T_x$ 、 $\Delta \theta$  が階層 A の場合と比べて半分以下となっているが、図 29 左を見ると Y 軸からの外れが目立つ。一方、提案法では、 $\Delta T_x$  が 6.95 m、 $\Delta \theta$  は 3.48 度となっており、階層 A に対する提案法の結果よりそれぞれ減少している。このことは図 29 右において図 27 右よりも Y 軸に平行な市街地構造が得

られていることから分かる。特に、図 27 右の地点 (C) あたりの車両運動の折れ曲がり、ならびに、地点 (C) 以降の Y 軸からのずれは低減されており、滑らかな車両運動と Y 軸にほぼ平行な構造が復元されている。このことから、この車両運動の折れ曲がり、ならびに、構造の曲折は低層の特徴点の原因の 1 つと考えられる。ちなみに、図 27 中の車両運動に注目すると、地点 (C) での車両運動の折れ曲がりには図 27 右と比べて小さいように見える。しかし、実際は同様に折れ曲がっており、また、誤ったヨー回転も復元されていた。このとき、逐次復元でのヨー回転による回転変換により、折れ曲がり打ち消されたような結果になっていた。

一方、階層 C の場合では、図 30 が示しているように従来法と提案法の市街地構造はほとんど同じ結果となった。このことは、表 6、表 7 の階層 C の  $\Delta T_x$ 、 $\Delta \theta$  を見ると従来法と提案法の値が近いことから確認できる。なお、高層の特徴点を使うと従来法と提案法とも市街地構造がよく似た結果になる原因については 3.5.1 項において考察を行う。

3.4.2 交差点回転運動での市街地構造復元

市街地走行では交差点を曲がる場合もあり、交差点での回転運動で得た画像系列に対して、提案法がどのような市街地構造を復元するのか実験を行った。図 31 の地点 (A) から地点 (D) の道路は一方通行となっており、20 km/h 以下の低速度で移動観測を行った。地点 (A) から地点 (C) の交差点に近づくとき速度が低下し交差点内ではゆっくりと左折した。このため、区間

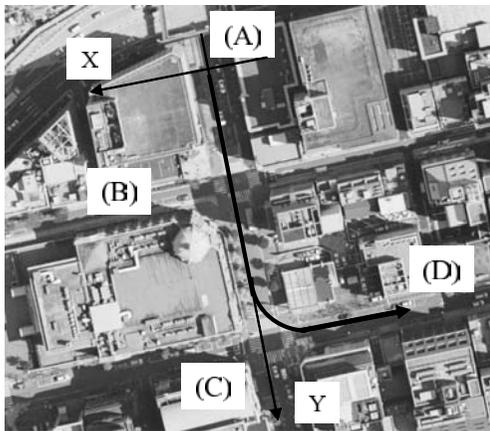


図 31 交差点構造  
Fig. 31 Intersection structure.

表 8 地点 (D) での方位角 [単位: 度]  
Table 8 Direction at section (D) [unit: degree].

$F$	Class A	Class B
30	71.84	85.25
40	72.59	81.70
50	78.44	90.10
60	73.57	74.66

(A)–(C) の直進運動と交差点 (C) での回転運動では、1 フレームあたりの車両移動量は異なるものと予想される。そこで、フレーム数  $F$  を変化させたときの市街地構造の復元結果を調べた (ただし、重複フレーム数  $g$  は  $F/2$  として画像系列を分割した)。この実験での交差点回転を示す指標として、式 (41) で得られる終点 (D) での方位角を表 8 に示す。

図 32 は階層 A の市街地構造の復元結果である。階層 A では、車両運動に、ところどころ、乱れが発生している。特に、 $F = 50, 60$  の市街地構造での区間 (A)–(C) ではその乱れが顕著になっている。特徴点追跡結果で確認したところ、この区間では低層 (仰角 10 度から 20 度範囲の特徴点) において誤追跡となっている特徴点が数点存在していた。 $F = 30, 40$  のフレーム範囲では、誤追跡とは認められなかったが、 $F = 50, 60$  とフレーム数を増加したことで低層の特徴点が誤追跡となっていた。これらの特徴点はフィルタリング処理でも除去できず、その結果、車両運動と 3 次元構造が乱れたといえる。図 32 では、 $F = 40$  の市街地構造が車両運動の乱れも少なく交差点付近の市街地構造を良好に復元しているように見えるが、表 8 からは交差点を曲がりきったときの方位角が 90 度にはなっていない。一方、交差点内に着目すると、 $F = 30, 40$  の車両運動に多少の乱れが発生しているが、 $F = 50,$

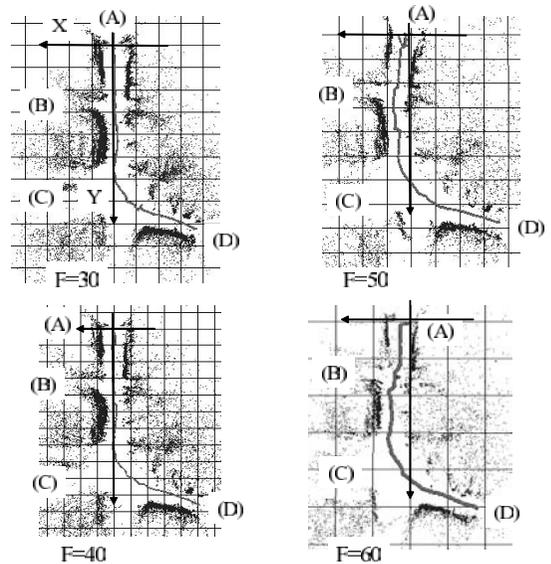


図 32 階層 A の交差点構造  
Fig. 32 Intersection structure of class A.

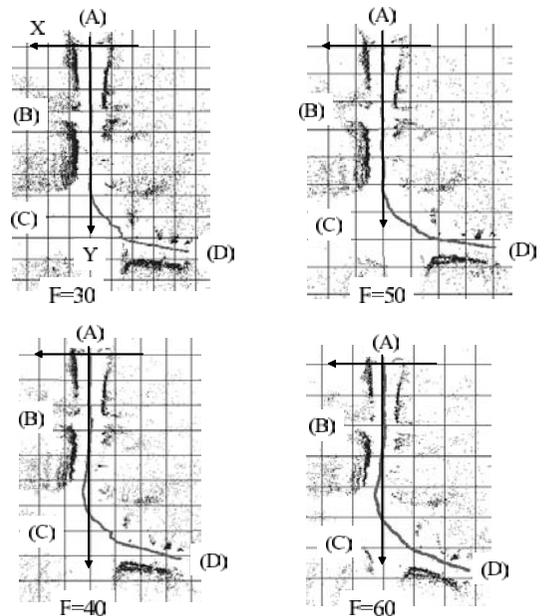


図 33 階層 B の交差点構造  
Fig. 33 Intersection structure of class B.

60 では比較的滑らかな運動が得られている。

これに対して、低層の特徴点の誤追跡を抑えた結果として、図 33 に階層 B の市街地構造を示す。この市街地構造において、区間 (A)–(C) での車両運動の乱れが改善されているのが分かる。表 8 では  $F = 50$  のとき交差点左折の回転が 90 度に達している。しかし、 $F = 60$  になると交差点回転が 90 度を下回り車

両運動と市街地構造が交差点で蛇行した構造となっている。この場合、フレーム数 60 の区間で追跡できた特徴点の数はそれ以下のフレーム数の場合と比べて少なくなっていた。このため市街地の 3 次元構造を復元するには不十分だったと考えられる。また、図 33 の交差点内の車両運動を見ると、 $F = 30, 40$  の場合より  $F = 50, 60$  のときの方が滑らかな左折を示す運動が得られているのが分かる。

### 3.5 考察

#### 3.5.1 従来法と提案法の差異

図 27, 図 28 の市街地空間の 3 次元構造復元から、従来法と提案法の差異について考える。図 28 左には区間 (B)-(C) に見られるように蛇行した個所が確認できる。これは市街地走行でのカメラ運動を平面運動と仮定したことに起因するものと考えられる。つまり、従来法ではピッチ回転とロール回転を含むカメラ運動では、3.1 節の図 6 と図 9 が示しているように、 $Y$  軸並進運動にもかかわらず  $X$  軸方向の並進運動に膨らみが発生する。これは蛇行運動を意味しており、 $Y$  軸周りの回転（ロール回転）が  $X$  軸並進運動に転換されているといえる。図 28 左の丸枠で示した蛇行形状は、このことが原因と考えられる。さらに、並進運動の復元にはヨー回転の復元が影響する。なぜなら、式 (25) に示す関係があるからである。3.1 節の図 5 と図 8 で示したように、ピッチ回転とロール回転をともなうカメラ運動に対して、従来法ではヨー回転が正しく得られていない。このことが、市街地構造が弓状に折れ曲がり、蛇行した構造を復元してしまうもう 1 つの原因となっている。

また、図 30 で示した階層 C の市街地構造が従来法と提案法ではほとんど同じ結果になっていた点について、車両運動投影モデルを用いて考察する。高層の特徴点ほど  $(X_j - Tx_i)/Z_j$  と  $(Y_j - Ty_i)/Z_j$  の項は小さくなるため、式 (13) の係数  $\epsilon_{ij}$  は 1 に近づく。このことは各反復において係数  $\epsilon_{ij}$  と光軸座標値  $(\zeta_i, \eta_i)$  が更新されなくなり、平面運動へ漸近させる反復復元は機能しなくなる。その結果、反復を繰り返しても平面運動で復元する従来法と同じ結果になると考えられる。したがって、仰角の大きい高層の特徴点を観測する場合ほど、提案法では平面運動での投影モデルに基づいて復元した市街地構造になる。いい換えれば、提案法においてピッチ回転とロール回転を復元するには、高層の点だけでは不十分である。

#### 3.5.2 低層の影響と逐次復元での補正手段

図 27, 図 29, 図 30 に、階層の異なる市街地空間の 3 次元構造を示した。図 27 右の地点 (C) の交差点

あたりにおいて、車両運動が折れ曲がっていた。これについては、図 29 右の地点 (C) にこのような運動の乱れが確認できないことから、低層の特徴点が影響していたことが分かった。特に、図 27 と図 29 に示した結果により、低層の特徴点は市街地構造の逐次復元において敏感に影響を与えることを示した。ここでは、低層の点が 3 次元構造の復元に与える影響について考察する。

式 (17), (19) によれば、 $uv$  行列から各特徴点の 3 次元座標値を  $(X/Z, Y/Z, 1/Z)$  で復元するため、 $1/Z$  因子がユークリッド空間での 3 次元形状の復元に影響を与える。また、 $1/Z$  因子は、式 (17) ~ (19) において  $(X/Z, Y/Z, 1/Z)$  の行列成分との積の関係から、平面運動成分へも波及する。すなわち、 $Z$  値が小さいほど雑音に敏感になり、 $Z$  値の微小な誤差で復元誤差が大きくなる。これが原因となって、図 27 の地点 (C) での車両運動の折れ曲がりが発生していたものと考えられる。一方、式 (16) が示すように、 $uv$  座標値は仰角  $\phi_{ij}$  が 0 度に近づくほど  $\cot(\phi_{ij})$  が大きくなる。つまり、仰角の小さい特徴点の画像座標値に計測誤差が含まれると、 $uv$  座標値の誤差も大きくなる。この点において、低層の点は計測誤差の影響を受けやすい。

2.4 節のスケールパラメータによる逐次復元では、式 (39), (40) に示す変換を逐次的に行って、車両運動を骨格として利用し、市街地空間の 3 次元構造を復元する。ある画像系列で上記の原因によりカメラ運動の復元誤差が発生すると、式 (39), (40) において、これらの誤差は蓄積していくことになる。このような問題を考えると、各画像系列での復元誤差、ならびに、逐次復元での蓄積誤差をできるだけ低減する必要がある。今回の実験では全方位画像において共通の追跡パラメータで特徴点追跡を行ったが、階層によって追跡パラメータを変更するなどの改良を行い、低層の特徴点の復元精度を向上させることが対策としてあげられる。また、交差点などでは見通しが良くなり、建物壁面に点在する特徴点を十分に観測できない場合もある。このような状況では、GPS センサを利用した車両運動の補間も有望であると考えられる。

#### 3.5.3 交差点回転運動での市街地構造

交差点回転運動での画像系列から復元した市街地構造とフレーム数の関連について考察を行う。交差点付近での車両運動は直進運動と比べて低速で緩やかに運動していた。この場合、フレーム数が 30, 40 では基線長（車両の移動量）が十分でないためカメラ運動と 3 次元形状を精度良く獲得することが難しいと考えられる。実際に、図 32, 図 33 の  $F = 30, 40$  の場合

では交差点において車両運動に乱れが発生しており、 $F = 50, 60$ では車両運動が滑らかなカーブとして復元されている。このように、画像系列のフレーム数は市街地の3次元構造復元に関して重要なパラメータとなる。一方、重複フレーム数  $g$  は今回の実験では  $F/2$  としていたが、重複フレーム数が多いと画像系列間での重複が多くなり処理コストの面で効率が悪い。逆に、重複フレーム数が少ないと逐次復元での連結の精度が悪くなるのが考えられる。

本実験では、提案法の適用性を調べるために、交差点回転運動での画像系列から市街地構造を復元したが、筆者らはモバイルマッピングにおいて直線運動を主体として提案法を利用することが望ましいと考えている。なぜなら、交差点付近は停止する頻度も多く、シーンが静止した画像系列が多く含まれるからである。このようなシーンを含む画像系列に対してフレーム数を固定で分割すると、分割した画像系列の中には車両の移動量が小さく基線長が不十分のためにカメラ運動と3次元形状を精度良く求められない。また、急激な回転運動は特徴点追跡の精度も悪く、提案法を使って良好な結果を得ることが困難である。そもそも、直進の市街地走行においても信号などで車両が停止するため、移動観測においては車両速度に応じた画像系列の取得が必要となる。車両速度は車速センサを利用することで計測することができるため、車速センサとカメラ装置を工夫することで、距離線形な画像系列を取得することが期待できる。今後は、車両速度に応じて得られた全方位画像系列に対して、効率的な画像系列の利用を考慮しつつ、市街地の3次元構造復元に十分なフレーム数  $F$  と重複フレーム数  $g$  を決定しなければならない。

#### 4. おわりに

本論文では、ほぼ平坦な市街地中の車両運動で観測される投影モデル(車両運動投影モデル)に基づき、全方位画像系列からカメラ運動と3次元形状を獲得し、スケールパラメータを用いて市街地空間の3次元構造を復元する方法を提案した。計算機シミュレーションでは、わずかなZ軸方向の並進運動を含むカメラ運動においても、提案法は適切なカメラ運動と3次元形状を復元し、その有効性を示した。次に、市街地景観の全方位画像系列から従来法と提案法により復元したカメラ運動と3次元形状を示し、カメラ運動の平面運動成分において両手法の間に差異を確認した。このとき、提案法では誤差  $\Delta E$  は反復を繰り返すことで減少しており、5回程度の反復でも、十分に収束した状

態に近いことが分かった。さらに、画像系列に従って逐次的に市街地空間の3次元構造を復元し、従来法と比べて提案法により良好な結果が得られることを示した。この実験において、階層の異なる特徴点から市街地構造を復元し、低層の点による市街地構造復元への影響を確認した。また、高層の点から市街地構造を復元すると従来法とほぼ同じ結果が得られることが明らかとなった。一方、交差点回転運動で得た全方位画像系列を例にして、フレーム数  $F$  により市街地の3次元構造の復元結果が異なることを示し、車両速度に応じた画像系列取得の重要性を認識した。

本論文には、提案方法に関する計算手順を示しており、容易に実装可能である。本実験で示した市街地の3次元構造は、全方位画像系列を与え、特徴点抽出からスケールパラメータによる逐次復元までの一連の処理フローにより復元したものである。全方位画像として  $640 \times 480$  画素の低解像度のビデオ画像を用いたが、提案法は仰角算出により他の全方位カメラにも適用可能であり、高解像度の全方位カメラに応用することで、より精度の高い3次元構造の復元が期待できる。ただし、実験ではローカルなカメラ座標系において市街地構造を復元しており、3次元GISでのアプリケーションを考慮すると、地理的座標系でのスケール化が必要である。これについては、提案法で得られる車両運動とGPS測位情報とのスケール合わせにより、地理的座標系での3次元構造が復元できると考えている。

全方位カメラを天空方向に向けて移動観測した場合、提案法では視点位置より低い位置の景観については適用範囲外となっている。筆者らは、市街地空間モデルの利用目的に応じて、3次元構造の詳細化・高精度化を図るべきと考えている。今後は、要求される市街地空間モデルの精度獲得に向けて、撮影車両システムの改造も検討しつつ、以下の研究課題に取り組んでいく予定である。

- Z軸並進運動を考慮した復元方法への拡張
- 車速に応じた画像系列取得と分割フレーム数・重複フレーム数の決定
- 低層に対する特徴点追跡と復元精度の向上
- 3次元構造からの市街地空間モデルの再構築

謝辞 本研究を進めるうえで、NTTサイバースペース研究所画像メディア通信プロジェクト藤生宏プロジェクトマネージャーには日ごろから有益なご指導をいただいた。また同研究所の小澤史朗君には車両を使った市街地での移動観測に協力していただいた。両氏に感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) 総務省 3次元 GIS ショーケース .  
<http://www.3dgis.jp>
- 2) 高精度デジタル航空センサ (STARIMAGER) .  
<http://www.starlabo.co.jp>
- 3) 石川裕治, 宮川 勲, 小澤史朗, 若林佳織, 荒川賢一: 少人数・非熟練オペレータによる広域な市街地空間モデルの自動構築システム, 情報処理学会研究報告: コンピュータビジョンとイメージメディア, 2004-CVIM-142, Vol.2004, No.6, pp.73-80 (2004).
- 4) Zhao, H. and Shibasaki, R.: Reconstructing Urban 3D Model using Vehicle-borne Laser Range Scanners, *Proc. 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling* (2001).
- 5) 納富幹人, 小澤史朗, 全 柄東: 移動体観測による都市モデル構築, 信学論 (D-II), Vol.J81-D-II, No.5, pp.872-879 (1998).
- 6) Konno, T., Tsuji, K., Shimogaki, Y., Shibasaki, R. and Manandha, D.: A New Approach to Mobile Mapping for Automated Reconstruction of Urban 3D Model, *Proc. Urban Multimedia/3D Mapping (UM3'2000)* (2000).
- 7) 八木康史, 横矢直和: 全方位ビジョン: センサ開発と応用の最新動向, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.42, No.SIG 13(CVIM 3), pp.1-18 (2001).
- 8) Ozawa, S., Miyagawa, I., Wakabayashi, K. and Arikawa, T.: Mobile Mapping from Stereo Omnidirectional Vision, *Proc. ISPRS*, Vol.XXXIV, Part 5, Commission V, pp.198-213 (2002).
- 9) 総務省: 3次元 GIS 技術ガイドライン第2版 .  
[http://www.3dgis.jp/pdf\\_files/gijutu\\_gl/g2-3-1.pdf](http://www.3dgis.jp/pdf_files/gijutu_gl/g2-3-1.pdf)
- 10) Etoh, M., Aoki, T. and Hata, K.: Estimation of Structure and Motion Parameters for a Roaming Robot that Scans the Space, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol.1, pp.579-584 (1999).
- 11) Taylor, C.J.: VideoPlus, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.3-10 (2000).
- 12) Chang, P. and Hebert, M.: Omni-directional Structure From Motion, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.127-133 (2000).
- 13) Gluckman, J. and Nayar, S.K.: Ego-Motion and Omnidirectional Cameras, *Proc. International Conference on Computer Vision*, pp.999-1005 (1998).
- 14) Tomasi, C. and Kanade, T.: Shape and Motion from Image Streams Under Orthography: A Factorization Method, *International Journal of Computer Vision*, Vol.9, No.2, pp.137-154 (1992).
- 15) Poelman, C.J. and Kanade, T.: A Paraperspective Factorization Method for Shape and Motion Recovery, *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, Vol.19, No.3, pp.206-218 (1997).
- 16) 宮川 勲, 若林佳織, 荒川賢一: 魚眼投影モデルに基づく画像系列からの平面運動と3次元形状の復元, 信学論 (D-II), Vol.J87-D-II, No.5, pp.1120-1132 (2004).
- 17) Duric, Z. and Rosenfeld, A.: Image Sequence Stabilization in Real Time, *Real-Time Imaging*, Vol.2, pp.271-284 (1996).
- 18) Irani, M., Rousso, B. and Peleg, S.: Recovery of Ego-Motion Using Image Stabilization, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.454-460 (1994).
- 19) Nayar, S.K.: Catadioptric Omnidirectional Cameras, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.482-488 (1997).
- 20) 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦: 移動ロボットのナビゲーションのための全方位センサ Hyper-OmniVision の提案, 信学論 (D-II), Vol.J79-D-II, No.5, pp.698-707 (1996).
- 21) Shi, J. and Tomasi, C.: Good Features to Track, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.593-600 (1994).
- 22) Bradski, G.R. and Pisarevsky, V.: Intel's Computer Vision Library: Applications in calibration, stereo, segmentation, tracking, gesture, face and object recognition, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.2, pp.796-797 (2000).  
<http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>
- 23) 宮川 勲, 石川裕治, 若林佳織, 有川知彦: 空撮映像からの透視投影型因子分解法による空間連鎖復元, 信学論 (D-II), Vol.J87-D-II, No.4, pp.942-957 (2004).

## 付 録

## A.1 式 (11), (12) の導出

式 (2) の行列  $\mathbf{R}_{xi}$ ,  $\mathbf{R}_{yi}$  において  $\psi_i$ ,  $\omega_i$  は小さいとし, 式 (4) の各要素において Taylor 展開して2次項以下を切り詰めて,  $\cos(\psi_i) \approx 1$ ,  $\sin(\psi_i) \approx \psi_i$ , 式 (5) においても同様に  $\cos(\omega_i) \approx 1$ ,  $\sin(\omega_i) \approx \omega_i$  とする. また, Z 軸方向の並進運動は無視できると仮定して  $Tz_i=0$  とおく. これらの近似を式 (1), (2) に代入して整理すると,

$$\lambda_{ij} \begin{bmatrix} \cos(\phi_{ij}) \cos(\rho_{ij}) \\ \cos(\phi_{ij}) \sin(\rho_{ij}) \\ \sin(\phi_{ij}) \end{bmatrix} \approx \mathbf{R}_{zi} \begin{bmatrix} 1 & \psi_i \omega_i & -\omega_i \\ 0 & 1 & \psi_i \\ \omega_i & -\psi_i & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_j - Tx_i \\ Y_j - Ty_i \\ Z_j \end{bmatrix} \quad (42)$$

を得る。式(42)で $\psi_i \omega_i$ は2次項なので、1次項に比べて微小と考えて0とおく。ここで、式(42)の第3行目から、 $\lambda_{ij} = \{\omega_i(X_j - Tx_i) - \psi_i(Y_j - Ty_i) + Z_j\} / \sin(\phi_{ij})$ が得られる。そこで、式(42)において $\lambda_{ij}$ を消去すると、

$$\epsilon_{ij} Z_j \begin{bmatrix} \cot(\phi_{ij}) \cos(\rho_{ij}) \\ \cot(\phi_{ij}) \sin(\rho_{ij}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_j - Tx_i - \omega_i Z_j \\ Y_j - Ty_i + \psi_i Z_j \end{bmatrix} \quad (43)$$

となる( $\epsilon_{ij}$ は式(13)で定義)。さらに、両辺を $Z_j$ で割って、式(14)~(16)で置換すると式(11)、(12)が得られる。

(平成16年3月1日受付)

(平成16年9月11日採録)

(担当編集委員 山澤 一誠)



宮川 勲 (正会員)

平成3年福井大学工学部電子工学科卒業。同年日本電信電話(株)入社。以来、カラーファクシミリにおける複合符号化と入出力色信号処理の研究、ならびにファクシミリ機器の開発を経て、コンピュータビジョンに関する研究開発に従事。現在、日本電信電話(株)NTTサイバースペース研究所画像メディア通信プロジェクト研究主任。平成14年10月より福井大学大学院工学研究科博士後期課程在学中。電子情報通信学会会員。



石川 裕治 (正会員)

平成8年東京工業大学大学院理工学研究科システム科学専攻修士課程修了。同年NTTデータ通信(株)〔現(株)NTTデータ〕入社。放送型データ通信方式の研究に従事。平成12年5月から平成16年1月まで日本電信電話(株)NTTサイバースペース研究所に勤務し、市街地構造物の形状復元、ならびに市街地景観の空間モデリングに関する研究開発に従事。現在、(株)NTTデータ技術開発本部に勤務。



若林 佳織 (正会員)

昭和57年電気通信大学電気通信学部応用電子学科卒業。同年日本電信電話公社〔現日本電信電話(株)〕に入社。以来、ファクシミリ通信網の研究実用化、2値画像変換処理、地図情報処理、認知地図の理解、3次元景観情報獲得・復元等の研究に従事。現在、日本電信電話(株)NTTサイバースペース研究所画像メディア通信プロジェクト主任研究員。工学博士(東京大学)。電子情報通信学会、地図情報システム学会各会員。



荒川 賢一 (正会員)

昭和61年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。同社基礎研究所、ヒューマンインタフェース研究所、第三部門を経て、平成14年2月より日本電信電話(株)NTTサイバースペース研究所画像メディア通信プロジェクト主幹研究員。その間、平成2年3月より平成4年3月まで、CMU計算機科学部客員研究員。画像処理、コンピュータビジョン、空間情報処理に関する研究開発に従事。電子情報通信学会、日本ロボット学会、AVIRG、IEEE各会員。