

レンジ画像による3次元都市空間データの自動計測方法 に関する基礎研究

○ 趙卉菁、 柴崎亮介
東京大学生産技術研究所

1. はじめに

都市空間をより忠実に表現するためには、3次元形状を自動的に計測する手法が必要不可欠である。これまでステレオ空中写真から建物や道路などの3次元情報を抽出する手法が盛んに研究されてきた。この手法はステレオマッチング技術によって3次元情報を抽出する方法であるが、都市における空中写真のように影や隠蔽などが非常に多い場合、建物の検出率と信頼性を向上させることはなかなか容易ではない。一方近年、レーザ計測技術の発展によりレーザレンジファインダ（距離計測装置）を利用して実物体の3次元情報を計測することが比較的容易になりつつある。例えば、筆者らは ASCODE の開発したレーザレンジファインダを用いて建物形状の自動計測実験を行った[6]。この際、用いられたレーザはクラス 1A（直接目に入っても被害を与えない強さ）であり、市街地内での利用にも問題がない。

レーザレンジファインダにより物体形状の3次元データは比較的簡単に得られる。ところが、物体全体の形状情報を得るためには、複数の地点から計測されたレンジ画像（ビュー）を同じグローバル座標系につなぎ合わせなければならない。各地点からのレンジ画像（ビュー）を互いにつなぎ合わせるためには各観測点の位置や観測方向などが必要である。しかし、ジャイロなどの精度にも限界があり、正確な位置・方向の取得は非常に手間がかかる手作業である。そのため、レンジ画像を利用して都市空間全体を効率的にモデリングするためには、計測そのものの効率や精度の向上だけでなく、位置関係が未知の複数観測点からのレンジ画像を自動マッチングして、すべてのレンジ画像をグローバル座標系にマージする手法の検討が必要である。

建物などの都市空間を対象とする場合、ガラスのような鏡面反射面を除けば、面に対するレーザ計測の誤差の分布は比較的安定であり、また都市空間においては平面により構成される対象物が比較的多い。そこで、レンジ画像の3次元レンジポイント群を平面パッチにより近似して、平面パッチをレンジ画像の自動マッチングに手がかりとして利用する方法を本研究では採用した。なお、レーザ計測は計測速度をあげようとする、誤差が大きくなる傾向があるため、全ての平面パッチを特徴量として利用す

るのではなく、信頼性の高い平面パッチだけをマッチングに利用した。そしてデータ取得時のセンサ座標系におけるその平面パッチの法線ベクトルと原点から平面パッチまでの距離だけを用いてレンジ画像の自動マッチングを行う手法を提案する。つまり、レンジ画像の自動マッチングには、基本的にまず平面パッチによりレンジ画像データを近似する。次に異なるビューの間で、信頼性の高い平面パッチの対応関係を求め、それを基に、各ビュー間の相対的位置関係（回転とシフト）を推定、グローバル座標系上に統合する。

なお、都市空間におけるレンジ計測にはかなりの誤差がある。これには計測誤差だけではなく、樹木や電柱などの計測対象物以外からの反射データも含めたさまざまな雑音が含まれる。こうした雑音をできるだけ明示的に表現でき、さらに、レンジポイントから“内在的構造”である平面パッチを抽出できる可能性のある方法として、確率モデルの最適選択方針を与える原理の一つである、MDL（Minimum Description Length）理論[1,4,5]を利用する。本論文では、平面パッチ抽出手法とマッチング手法に焦点をあててシミュレーションにより作成されたレンジ画像データによる実験結果とその評価を示す。第2章は平面パッチの抽出法、第3章は位置関係が未知の複数視点からのレンジ画像のマッチング手法、第4章は実験結果とその評価をそれぞれ述べている。

2 平面パッチの抽出法

レンジ画像のセグメンテーションプロセスは2つのステップに分けて行われる。

1) ステップ1： 初期化 --- 画像の分割

初めに、レンジ画像データ全体をあるルールによって分割する。分割されたものをレンジセルと呼ぶ。ここでは、Quad-Tree と同様の分割ルールによって分割する。分割にあたっては各レンジセルに注目して、事前に設定した閾値(θ_1)の範囲内で、対応するレンジ画像ピクセル（3次元レンジポイント）が空間平面に回帰できるかどうかを判断する（回帰の残差の分散値が閾値 θ_1 より小さいと一つの空間平面に回帰できると判断する）。そこで、一つの空間平面に回帰されないレンジセルはさらに分割し、このプロセスを繰り返す（図1(a)を参照）。分割が終わつ

た後のレンジセルは、平面パッチを抽出するプロセスにおける最小なユニットとなる。

2) ステップ2: 平面パッチの抽出

初期化により、レンジ画像をいくつかのレンジセルに分割した。各レンジセルは最小二乗法による空間に一意な平面パッチに対応しているので、空間物体の形状はこれら平面パッチによって近似されるといえる。しかし、この時点での近似は、平面パッチの数が多くて、近似効率が悪い。近似効率を高めるために、同じ平面に対応するレンジセルをマージする。このプロセスは対応する平面がほぼ同一平面上にある、すなわち、同じセンサ座標系の原点から平面に下ろした垂線の足の位置が最も近い、2つレンジセルから始める。レンジセルをマージした結果として、近似効率は高まるが、近似精度は悪くなる可能性もある。2つのレンジセルをマージするかどうか、つまり、近似効率と近似精度のバランスは、「符号長」が小さくなるかどうかによって決まる。ここでいう符号長は「モデル自身（この場合は平面パッチの組み合わせ）の記述も含めて二進法による観測データを符号化するために必要な長さ」を意味している。MDL (Minimum Description Length) 理論は「与えられたデータを最も短く符号化できるような確率モデルが最良のモデルである」と主張する[1,4]。すなわち、このようなマージプロセスは、最短の符号長になる平面パッチ分割パターンを探す過程ともいえる。図1はそれぞれ初期化の結果、MDLによる平面パッチの再統合結果を例示している。

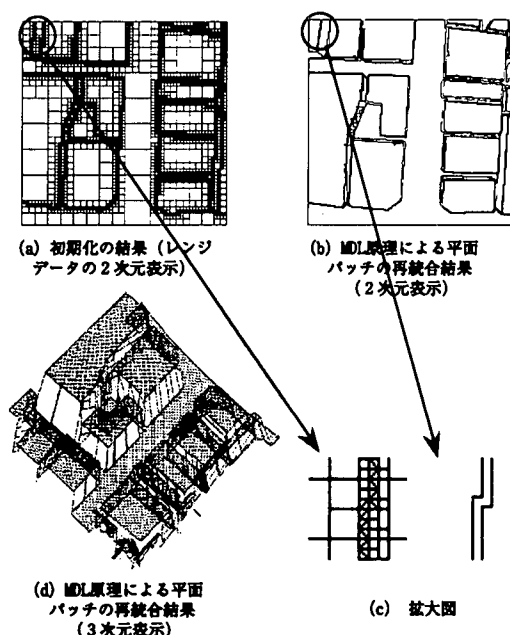


図1 平面パッチ抽出アルゴリズム

3 複数ビューのマッチング手法

レンジファインダによる単一方向からの測定では、裏側や凹部に隠された部分など、データの得られない部分が存在する。対象物体の完全な形状を知るためには、複数の方向から測定して得られるレンジ画像を統合することが必要になる。つまり、各視点のセンサ座標系で得られるレンジ画像を一つの座標系に変換しなければならない。このとき、各視点の位置とレンジファインダの観測方向が自動的に、かつ正確に推定する手法が必要になる[2,3]。

本研究は、前章で抽出された平面パッチを利用して、各視点間の位置関係（回転行列 $R_{3 \times 3}$ と移動量ベクトル $T=(x,y,z)$ ）を自動的に推定し、複数の視点から得たレンジ画像を統合する手法を提案する。この手法では隣接する2つのビューのマッチングと複数ビューのマッチングの二つのステップがある。

3.1 2つのビューのマッチング手法

このステップでは、隣合う二つの視点からのレンジ画像について、その間で対応する平面パッチを見出す。それをもとに、ビューの間の相対的な空間関係（回転行列と移動量シフト）を求める。

もし、対応する3つの平面パッチが互いに平行ではないとすると、これら平面パッチの対応関係から、2つのビューの空間関係と平面パッチの対応関係を求めることができる。しかし、現実には平面パッチの対応関係を自動的かつできるだけ正確に推定しなければならない。対応する平面パッチの組み合わせは多数存在する。そこで、より確からしい組合せを見出すために、以下のようなアルゴリズムを利用する（図2を参照）。

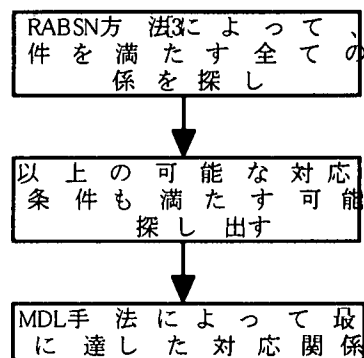


図2. 2つのビューのマッチングフローチャート

1) RABS 方法[1]による可能な対応関係の抽出

座標系変換は平面パッチの法線ベクトル間の角度に影響を与えない。そのため、ビュー1の平面パッチ p_{11}, p_{12} はそれぞれビュー2の平面パッチ p_{21}, p_{22} と対応すると仮定すると、 p_{11}, p_{12} の法線ベクトル間の角度 θ_{112} と、 p_{21}, p_{22} の法線ベクトル間の角度 θ_{212} は次の関係 $|\theta_{112} - \theta_{212}| < \epsilon_\theta$ がある

はずである。ただし、 $0^\circ < \theta_{ijk} < 180^\circ$ 、 e_θ は微小値である。

2) 距離関係の候補の絞り込み

マッチングした後、対応する平面パッチはマッチング座標系における原点からの距離が等しい。例えば、ビュー1にある平面パッチ p_{11} とビュー2にある平面パッチ p_{21} と対応しており、 d_{11} と d_{21} はそれぞれマッチング座標系における原点から平面パッチに至る距離とすれば、 $|d_{11} - d_{21}| < e_d$ となり、ただし、 $d_{ik} \geq 0$ 、 e_d は微小値である。

3) MDL 手法による対応関係の決定

自動マッチング際に、一致する平面パッチペアの数が多いほど、マッチング誤差が少ないほど、自動マッチング結果の信頼性が高い。最も信頼性が高い自動マッチングを実現するために、MDL 手法を利用する。

3.2 複数ビューのマッチング手法

3つ以上の複数のビューに対してマッチングを行うためには、以下の2つのステップを行う。

1) 上述のように、隣接する2つのビューに対するマッチングを行い、対応する平面ペアを求める。

2) 平面ペアの対応関係をもとに、全てのビューについて、同時に回転行列、移動量ベクトルを求める。

2つのビューのマッチングの結果を逐次的につないでいくことにより、各ビューのセンサ座標系から、グローバル座標系（適当なセンサ座標系）までの座標変換を逐次に求めることができる。しかし、このような過程では誤差が蓄積する。

そこで、2つのビューのマッチングによる推定された対応する平面ペアを全て利用して、各ビューの回転行列・シフトベクトルを同時推定し、誤差を調整することでその蓄積を軽減することが必要になる。平面パッチの対応関係によって下図のような観測行列が求められる。[2]

$$\begin{array}{c} \text{view1} \\ \text{view2} \\ \vdots \\ \text{viewN} \end{array} \begin{pmatrix} p_1 & p_2 & \cdots & p_M \\ \Delta Err_{11} & - & \cdots & \Delta Err_{1M} \\ \Delta Err_{21} & \Delta Err_{22} & & - \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ - & \Delta Err_{N1} & \cdots & \Delta Err_{NM} \end{pmatrix}$$

図3. 複数ビューのマッチングに用いた観測行列

ここで、 ΔErr_{ij} はマッチングされた平面パッチ j とビュー i に抽出された平面パッチ j による当てはめ誤差であり、次のように求められる。

- 2つのペア毎に決定された回転行列、シフトベクトルを利用してそれぞれのビューのレンジポイントをグローバル座標系へマッピング

グする。

- 対応している平面パッチごとに、マッピングされたレンジポイントを用いて、再度平面あてはめを行う。その際の当てはめ残差 ΔErr_{ij} とする。

複数ビューの同時マッチングは、抽出された平面パッチがマッチングされた平面に近づくように各ビューに座標系変換を施して、当てはめ誤差の差の総和が最小に達する。

4. 実レンジ画像による実験

ASCODE と日本電気（株）の開発したレーザレンジファインダ（表1）を用いて建物形状の自動計測実験を行った。実験の対象物として東京大学生産技術研究所にある一つの建物を利用された（図4を参照）。

最大計測距離	500 m ~ 1 Km
計測誤差	-5 cm ~ +5 cm
計測頻度	0.2 Hz ~ 20.0 Hz
レーザクラス	1A

表1. ASCODE の開発したレーザレンジファインダ

4.1 平面パッチ抽出の実験検証

MDL 手法による平面パッチが抽出する際に、レンジポイントが計測平面の近くに分散値が θ の正規分布に従うと仮定する。 θ は事前に設置した閾値である。実世界には建物のフェースは真の平面ではなく、窓や飾りなど計測対象物以外の物も含むので、平面パッチをより正確に抽出されるために、 θ が計測誤差の分散より大きく設定する必要がある。図5には、 $\theta=50\text{cm}$ の場合抽出された平面パッチである。

4.2 2つビューのマッチングの実験検証

2つビューのマッチングにはいくつの事前に設定した閾値を利用した。また、計測対象物によって、対応する平面パッチが2つしかない場合、GPS や FOG などの補助データを利用する必要がある。図6には2つのビューのマッチングの例である。

5. まとめ

本論文は、視点間の位置関係が未知である複数の視点で得られたレンジ画像を相互標定する手法を提案した。レンジ画像データの誤差の確率分布を近似し、またいくつかのマニュアル設定した閾値を利用して行った。今後は、レンジ画像データの誤差の確率分布を考え、推定結果の信頼性に関する統計理論的検討をさらに深めることで、また自動的に閾値を設定する手法を開発する予定である。なお、レーザレンジファインダーを貸与していただいた ASCODE と日本電気（株）に謝意を表する。

6. 参考文献

- [1] H. Zhao, R. Shibasaki, Automated Registration of Ground-Based Laser Range Images for Reconstructing Urban 3D Object, IAPRS, Vol.32, Part3-4W2, 1997.
- [2] K. Higuchi, M. Hebert, and K. Ikeuchi, Building 3-D Models from Unregistered Range Images, Graphical Models and Image Processing, vol.57, No.4, July, pp.315-333, 1995.
- [3] R. Krishnapuram, D. Casasent, Determination of Three-Dimensional Object Location and Orientation from Range Images, IEEE

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.11, pp.1158-1167, Nov. 1989.

- [4] 趙卉菁、柴崎亮介、レンジ画像による3次元都市空間データの自動計測方法に関するシミュレーション、写真測量とリモートセンシング, Vol.36, No.4, 1997.
- [5] 山西 健司、韓 太舜、MDL 入門：情報理論の立場から、人工知能学会誌, Vol.7, No.3, pp.427-434, 1992.
- [6] 日本測量協会、ジオインフォマテックス 2000、測量、pp.17-24, 1996.10.

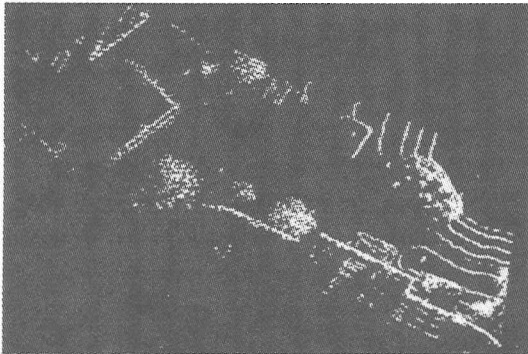


図 4.a、計測されたレンジ画像（斜めに表示された結果）

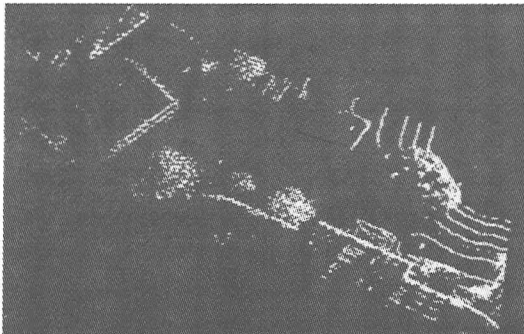


図 4.b 計測されたレンジ画像
（上から下向きに表示された結果）

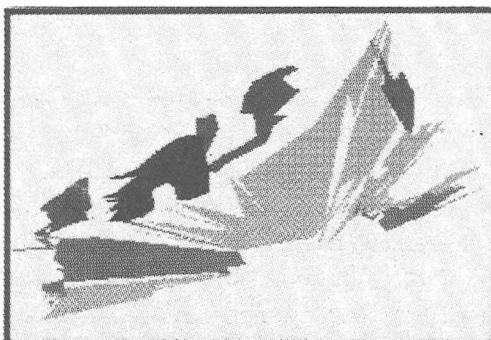


図 5.a ビュー 1 から抽出された平面パッチ

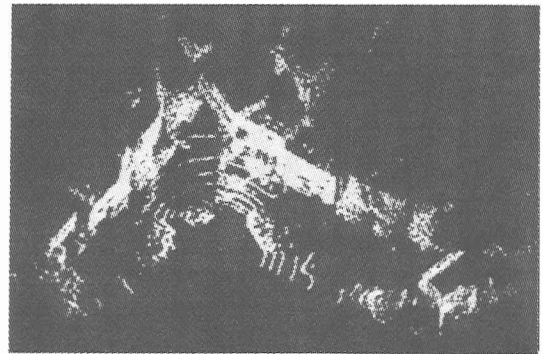


図 6.a マッチングする前に2つビューのレンジ画像

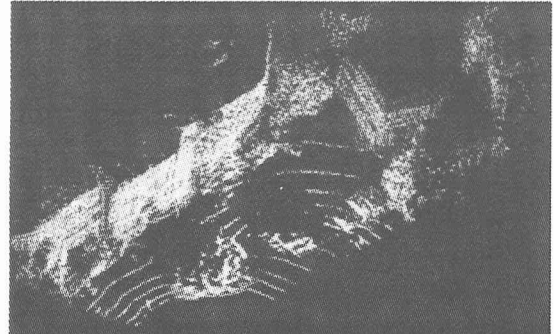


図 6.b マッチングする後に
2つビューのレンジ画像

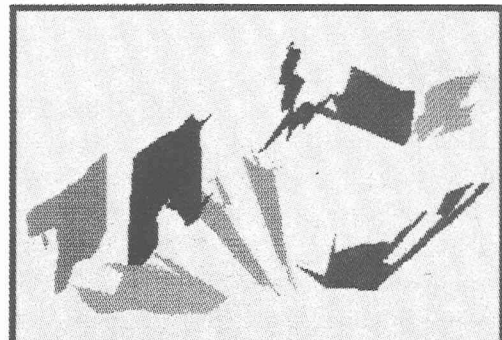


図 5.b ビュー 2 から抽出された平面パッチ