

屋外環境の異種計測データを対象とした動的輪郭法による三次元モデル生成

北市 泰寛 佐藤 智和 横矢 直和

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

3-D modeling of outdoor environments by 3-D active contour using geometrically registered heterogeneous 3-D points

Yasuhiro KITAICHI Tomokazu SATO Naokazu YOKOYA

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Abstract: Three dimensional (3-D) models of outdoor environments can be widely used in many fields such as navigation and simulation. Generally, it is necessary to use heterogeneous sensors to recover a complete surface model of an outdoor environment. However, the point clouds measured by different sensors have different characteristics with respect to density and accuracy, and in outdoor environments, the amount of 3-D data is very large. To build a complete 3-D model of the outdoor environment, we propose a novel method which generates a continuous 3-D surface model from 3-D point clouds measured by heterogeneous sensors. In our method, the framework of 3-D active contour is used for 3-D modeling, and 3-D models are generated by considering density and accuracy of acquired data. In experiments, by using point clouds measured by two kinds of sensors, a 3-D polygonal model is generated.

1 はじめに

屋外環境の三次元モデルは、ナビゲーション、シミュレーション、ウォークスルーなど、様々な分野への応用が可能である。そのため、屋外環境の三次元モデル生成に関する研究が近年盛んに行われている。一般的に、屋外環境の三次元モデル化においては、(1) 環境の三次元計測、(2) 取得された三次元データに対する三次元形状モデルの生成、という二つの手順が必要となる。

屋外環境を三次元計測する手段（手順 (1)）としては、動画像を用いて特徴点の三次元位置を推定する手法 [1, 2] や、レーザーレンジファインダ（以下、レンジファインダ）を用いて奥行きデータを取得する方法 [3, 4] などがある。動画像による計測手法 [1, 2] では、対象となる環境を動きながら撮影し、画像中の特徴点を追跡することで、特徴点の見かけの動きから特徴点の三次元位置を推定する。この手法では、対象のビデオ撮影を行うだけで容易に広域を計測できるという利点がある。しかし、推定した三次元点は、レンジファインダにより計測された点と比較して、計測密度や計測精度・信頼度が劣るといった問題がある。一方、レン

ジファインダによる計測では、比較的高精度・高密度に三次元計測を行え、レンジファインダによる屋外の計測では、多数地点における計測結果を幾何学的に位置合わせし、統合することで広域の三次元計測結果を得ることができる。しかし、各地点における計測では、数分程度の計測時間が必要となるため、計測コストの面から広域を対象として計測地点を密に配置することは難しい。このため、オクルージョンが発生する複雑な環境では計測漏れが発生しやすく、モデル化の際に形状が欠損してしまうという問題がある。

また、屋外環境の形状計測においては、建物の屋根等のように地上からの計測が不可能な部分が存在するため、レンジファインダによる地上からの計測のみでは完全な形状モデルを構築することはできない。このため、地上からの計測に加えて、ヘリコプターなどの飛行物体から動きながらデータを取得可能な動画像からの三次元復元手法による計測を行うことで、地上からは計測できない部分や計測漏れの発生している領域を補間する必要がある。このように異種の計測手段で取得したデータを用いて形状のモデル化を行う場合には、それぞれの手法で計測された三次元点群において、計測密度および精度が大幅に異なるため、形状推定時

にこれらを考慮する必要がある。

三次元計測により取得された三次元点群に対する形状のモデル化(手順(2))に関する研究は数多く行われているが、本研究では、データの扱いやすさから、形状をポリゴンモデルとして算出する手法に着目する。ポリゴンモデル化において、入力となる三次元点群が単一地点から計測された場合には、奥行き画像上で隣接する画素に対応する三次元点の間に三角形ポリゴンを形成することで容易にポリゴンモデルを生成することができる[5]。しかし、計測が複数地点で行われ、奥行き画像が複数存在する場合には、このような手法を用いることができないため、計測地点間のポリゴンの整合性を考慮することが必要となる。

このような整合性問題を解決し、複数地点で計測された三次元点群からポリゴンモデルを生成する手法に関する研究は、陰関数表現を用いた手法[6, 7, 8, 9, 10]と、動的輪郭法を用いた手法[11, 12, 13]の二つに大別される。陰関数表現を用いた手法は、まず、三次元空間をボクセル空間に分割し、ボクセルごとに最近傍点までの符号付距離を計算する。次に、符号付距離が0となるボクセルにおいて、物体表面が存在するとしてポリゴンを生成する。この手法は、複雑な形状のモデルを自動的に生成できるという特長がある。しかし、復元対象となる環境をあらかじめボクセル空間として分割し、メモリ上に保持する必要があるため、屋外環境のような広域な環境を扱う場合には、データ量が膨大となってしまう、広域な実環境に適用することは難しい。一方、動的輪郭法による手法では、まず、三次元空間中に初期輪郭モデルを設定し、モデルに対してあらかじめ設定したエネルギーを最小化するように変形を繰り返す。これにより、最終的に得られるエネルギーの極小状態における輪郭モデルを対象物体の表面形状とする。この手法は、ポリゴンによる表面形状モデルを更新するアプローチを採ることから、形状の推定に必要なメモリ量は比較的小さく、広域環境への適用が可能である。しかし、従来提案されている手法では、単一の計測手段によって得られる計測密度や計測精度が均一の三次元点群を入力として想定している。このため、計測密度や計測精度が異なる点群に手法を適用した場合には、計測密度が疎な部分で穴が空いてしまい、また計測精度が低い点の影響を受け正確なモデルが生成できないという問題が生じる。

以上のことから、本論文では、地上および上空から異なる計測手段を用いて取得した、性質の異なる三次元点群データ(以下、異種計測データ)を用いて、連続した三次元ポリゴンモデルを自動で生成する手法を提案する。提案手法では、まず、高精度・高密度な計測が可能なレンジファインダを用いて地上からの三次元

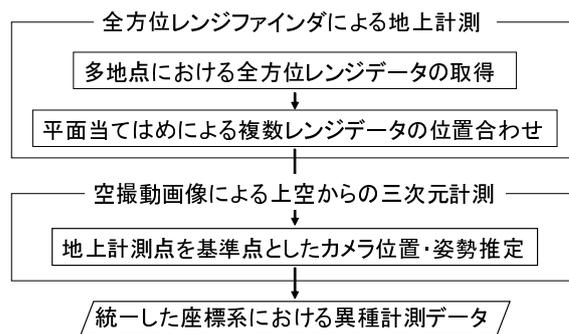


図 1: 三次元計測の流れ

計測を行う。次に、地上計測によって得られた点を基準点として用い、動画像からの三次元復元手法によって、空撮動画像からの三次元計測を行うことで、統一した座標系において異種計測による三次元点群を得る。このようにして得られた異種三次元計測データを用い、動的輪郭法の枠組みを用いてポリゴンモデル化を行う。この際、異種計測データに対応するために、計測密度や計測精度を考慮した表面形状モデルの更新を行う。

以下、2節では、レンジファインダによる地上計測と空撮動画像による上空からの計測を用いた、屋外環境の計測手法について述べ、3節で、動的輪郭法を用いた計測精度・計測密度を考慮した三次元モデル化について詳述する。4節では、現実の屋外環境を対象として三次元ポリゴンモデル生成実験を行い、本手法の特徴と有用性について考察する。最後に5節で、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 広域屋外環境の三次元計測

本節では、広域屋外環境を対象とする、地上および上空からの三次元計測手法について述べる。図1に、三次元計測の流れを示す。本研究では、まず、地上において全方位レンジファインダを用いて多地点で計測を行い、計測された三次元点群の位置合わせを行う。次に、ヘリコプターから空撮動画像を取得し、動画像からの三次元復元を行う。ここで、空撮動画像中のキーフレームにおいて、位置合わせ済みの地上計測点を手動で指定し、三次元復元処理において最適化を行うことで、地上データと空撮データの位置合わせを行う。以下、各計測手法について詳述する。



図 2: 全方位レンジファインダ (下) と全方位カメラ (上)

2.1 全方位レンジファインダによる地上計測

本研究では、全方位を計測可能なレンジファインダ (図 2) で多地点において地上計測を行い、浅井らの手法 [3] を用いて計測データの位置合わせを行う。手法 [3] では、まずそれぞれの計測地点からの計測データが、一定の割合で他地点からの計測データと重複するように計測地点を配置し、計測を行う。この際、図 2 に示すように、レンジファインダに固定した全方位カメラを用い、全方位画像を同時に撮影することで、テクスチャ情報を取得する。また、RTK-GPS とジャイロセンサから構成されるハイブリッドセンサを用いて、計測時の全方位センサの位置・姿勢を取得しておく。次に、各地点で取得したレンジデータの重複領域において平面を検出し、同一の平面を対応付けることで、自動で位置合わせを行う。ここでは、RTK-GPS とジャイロセンサにより計測された計測位置・姿勢を初期値とし、平面同士の対応へと拡張した ICP アルゴリズムを用いることで、すべてのレンジデータを同時に位置合わせする [3]。これにより、各レンジデータの位置・姿勢を最適化する。

2.2 空撮動画像による上空からの三次元計測

上空からの計測は、空撮動画像に対して画像解析による三次元復元処理を行うことで実現する。本研究では、まず structure from motion の原理により、動画像中の特徴点を抽出・追跡することで、特徴点の見かけの動きから、カメラの位置・姿勢と画像上で追跡された特徴点の三次元位置を算出する [1]。その際、基準点として、地上計測でレンジファインダにより計測され

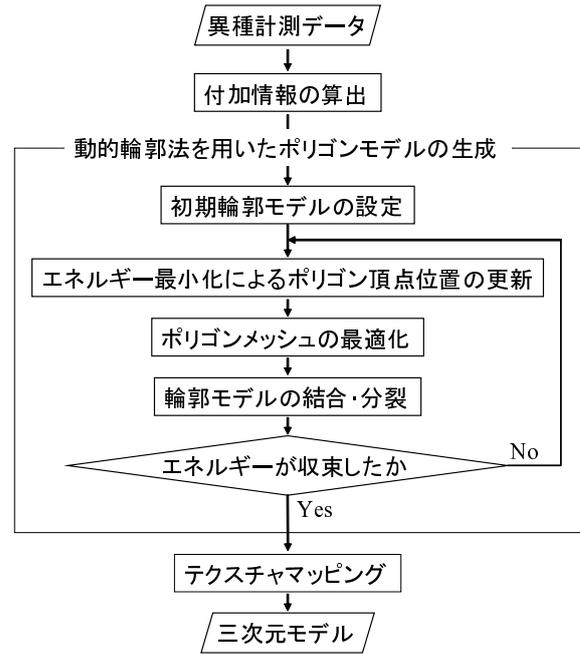


図 3: 三次元モデル生成の流れ

た点を動画像のキーフレームにおいて指定し、基準点の空撮画像上での再投影誤差を最小化することで、推定するカメラ位置・姿勢の座標系を、地上計測による三次元点群の座標系と一致させる。これにより、空撮時のカメラ位置・姿勢と特徴点の三次元位置を地上計測による座標系で得ることができる。

3 異種計測データに対する動的輪郭法を用いた三次元モデル生成

本節では、2 節で述べた手法により計測した屋外環境の異種三次元計測データに対して、計測精度・計測密度を考慮した動的輪郭法を用いることで屋外環境の三次元モデルを生成する手法について述べる。三次元モデル生成の流れを図 3 に示す。本手法では、三次元点群データを入力とし、まず前処理として、奥行き画像およびその計測地点情報を用いて、計測精度や計測密度に関する三次元点群への付加情報を算出する。次に、これらの付加情報を考慮した動的輪郭法により、ポリゴンモデルを生成する。最後に、生成されたポリゴンモデルにテクスチャマッピングを行う。以下ではまず、付加情報の算出法と、本手法で用いるエネルギー関数について詳述する。次に、動的輪郭法を用いた三次元形状モデル生成法について述べる。最後に、得られたポリゴンモデルに対するテクスチャマッピング手法に

ついて述べる．

3.1 三次元点群の付加情報の算出

本手法では，計測された各三次元点に対して，平均近傍距離，法線，信頼度の情報を付加し，これらを考慮したポリゴン化を行うことで，三次元点群の計測密度や計測精度・信頼度を考慮した形状モデルを生成する．以下に，計測点に対する付加情報の算出方法について詳述する．

平均近傍距離の算出： 平均近傍距離は，各計測点の計測密度を示す尺度であり，この数値が小さいほどその点は密に計測されている．本手法では，後に述べるポリゴンメッシュの最適化処理において平均近傍距離を考慮することで，計測箇所に応じた大きさのポリゴンを生成し，計測密度が疎な部分において穴が空くことを防止する．計測点 i の平均近傍距離 \bar{d}_i は， i の近傍点集合 $S_i = \{1, \dots, j, \dots, s\}$ に対して， j から最も空間距離が近い点までの空間距離の平均として，以下の式で算出する．

$$\bar{d}_i = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s \min_{k \in S_j} \left(\left| \hat{\mathbf{X}}_j - \hat{\mathbf{X}}_k \right| \right) \quad (1)$$

ただし， $\hat{\mathbf{X}}_i$ は点 i の三次元座標を示す．

法線の算出： 各計測点の法線を用いることで，形状モデルの更新時に三次元点群に対する表裏判定を行い，輪郭モデルが対象物体の裏側に引き寄せられることを防ぐ．計測点 i の法線 \mathbf{n}_i は，レンジファインダにより計測された点については，点 i とその隣接点を結ぶベクトル $\mathbf{v}_j = \hat{\mathbf{X}}_j - \hat{\mathbf{X}}_i$ の外積を用いて，以下の式で算出する．

$$\mathbf{n}_i = \frac{1}{s} \sum_{j \in S_i} (\mathbf{v}_{j+1} \times \mathbf{v}_j) \quad (2)$$

動画像により得られた点については，計測密度・精度が低く，隣接点を用いた法線方向の算出が難しいため，ここでは点 i が映っているすべてのフレームのカメラ位置の重心を求め，点 i から重心方向への単位ベクトルを，点 i の法線として用いる．

信頼度の算出： 各計測点の計測の信頼度を算出し，3.2 項で定義されるエネルギー関数の重みを変化させることにより，計測精度を考慮したポリゴン化を行う．ここでは，計測点 i の信頼度 C_i として，三次元空間における計測誤差の分散の逆数を用いる．動画像より得られた三次元点群の信頼度は，画像上における点 i の

再投影誤差の平均 \hat{R}_i を，各フレームにおける計測点 i の奥行き Z_i に対応する三次元空間に投影し，その二乗値を三次元推定結果の分散値として用いることで，信頼度を以下のように算出する．

$$C_i = \frac{1}{Z_i^2 \cdot \hat{R}_i^2} \quad (3)$$

レンジファインダより得た三次元点群については，仕様上の計測誤差の分散から信頼度を算出する．

3.2 エネルギー関数の定義

本節では，本研究で用いる動的輪郭法のエネルギー関数について述べる．本手法では，複数の計測地点において形状輪郭モデルを発生させ，更新・統合・分裂することで広域環境における形状モデルの推定を行う．ここでは，個々の形状輪郭モデルが持つエネルギー E を，三次元点群に対するポテンシャルエネルギー E_p と輪郭の滑らかさを表すエネルギー E_s の和として以下のように定義する．

$$E = E_p + E_s \quad (4)$$

本研究では，エネルギー E をそれぞれの輪郭モデルに対して独立に最小化することで最終的な形状モデルを推定する．以下では， E_p, E_s について詳述する．

ポテンシャルエネルギー E_p は，輪郭と点群の距離によるエネルギーを表し，輪郭を三次元点群に引き寄せさせる力を発生させる．ここでは E_p を，図 4 で示すような，輪郭 C を構成するポリゴン頂点 i の三次元位置 \mathbf{X}_i と，頂点 i に対応する計測点の三次元位置 $\hat{\mathbf{X}}_i$ の距離 $\left| \mathbf{X}_i - \hat{\mathbf{X}}_i \right|$ の重みつき和として，以下の式で定義する．

$$E_p = \sum_{i \in C} w_{pi} \left| \mathbf{X}_i - \hat{\mathbf{X}}_i \right| \quad (5)$$

ただし， w_{pi} は，各点のポテンシャルエネルギーに対する重み係数である．また，ポリゴン頂点 i に対応する計測点の三次元座標 $\hat{\mathbf{X}}_i$ は，図 4 中 A で示されるような，頂点 i の三次元位置 \mathbf{X}_i を視点，その法線を光軸とする一定画角 θ 内の領域において，法線が表側を向いている三次元点群の中で，最も空間距離に近い計測点の三次元位置とする．

輪郭の滑らかさを表すエネルギー E_s は，ポリゴンの頂点 i と，その n 個の接点 $N_i = \{1, \dots, j, \dots, n\}$ から成る n 角形の重心との距離（図 4 参照）を用いて，以下の式で定義する．

$$E_s = \sum_i w_{si} \left| \mathbf{X}_i - \frac{1}{n} \sum_{j \in N_i} \mathbf{X}_j \right| \quad (6)$$

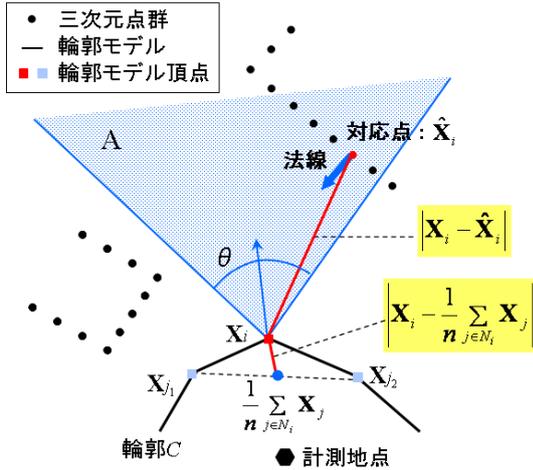


図 4: エネルギー関数の概念図

ただし, w_{s_i} は, 点 i の滑らかさのエネルギーに対する重み係数である.

次に, 各点の重み係数 w_{p_i} , w_{s_i} について述べる. これらの重み係数は, ポリゴン頂点 i の対応点に付加された信頼度を用いて動的に決定し, 三次元点群の計測精度に応じたポリゴン化を行う. 具体的には, 各計測点の信頼度 C_i を用いて, 以下の式により重み係数を算出する.

$$w_{p_i} = -\frac{a_p}{C_i} + b_p \quad (7)$$

$$w_{s_i} = \frac{a_s}{C_i} + b_s \quad (8)$$

ただし, a_p , b_p , a_s , b_s は重みを決定するための正の定数であり, 経験的に与える.

3.3 動的輪郭法を用いたポリゴンモデル生成

本節では, 動的輪郭法を用いたポリゴンモデル生成の手法について述べる. 本手法では, 各三次元点群の計測地点に初期輪郭モデルを設定し. 3.2 項で定義したエネルギー関数を繰り返し最小化することで, それぞれの輪郭形状モデルを三次元点群に向けて膨張させる. このような輪郭形状モデルの更新は, (1) 頂点位置の更新, (2) ポリゴンメッシュの最適化, (3) 輪郭モデルの結合・分裂, の手順を, エネルギーが収束するまで繰り返すことで行う. 以下, 各手順について述べる.

3.3.1 初期輪郭モデルの設定

各三次元点群が計測された計測地点に, どの初期輪郭モデルとも重ならず, またモデルの内部に計測点を含まない多面体を設定する. ここでは, レンジファインダにより計測したすべての計測地点に初期輪郭モデルを設定する. また, 動画像が撮影された一定フレーム間隔毎のカメラ位置において初期輪郭モデルを設定する.

3.3.2 エネルギー最小化によるポリゴン頂点位置の更新

初期輪郭モデルの頂点位置を, 3.2 項で定義したエネルギーを最小化することで更新していく. ここでは, 頂点ごとにエネルギー E の最急降下ベクトル $e_i = (-\partial E/\partial x_i, -\partial E/\partial y_i, -\partial E/\partial z_i)$ を算出し, 移動量の重み係数 k を用いて以下の式でポリゴン頂点を移動させることでポリゴンを更新する.

$$\mathbf{X}_i \leftarrow \mathbf{X}_i - k e_i \quad (9)$$

3.3.3 ポリゴンメッシュの最適化

輪郭モデルを形成するポリゴンの大きさ, 形状が最適になるよう, 自動的にポリゴンの分裂・結合を行う [11, 14]. すなわち, ポリゴンの面積が閾値 A_i 以上, またはエッジの長さが閾値 $l_{i \max}$ 以上の場合にはポリゴンの分裂を行い, エッジの長さが閾値 $l_{i \min}$ 以下の場合には, ポリゴンを結合する. この際, 各閾値 A_i , $l_{i \max}$, $l_{i \min}$ を, 計測点 i の平均近傍距離を考慮して動的に決定することで, ポリゴンの大きさを三次元点群の計測密度に適したものとする. 具体的には, まず, 最適化を行う三角ポリゴンを構成する三頂点を i_1, i_2, i_3 とし, それぞれの計測点中の対応点に付加された平均近傍距離を $\bar{d}_{i1}, \bar{d}_{i2}, \bar{d}_{i3}$ とする. このとき, 三頂点に対応する平均近傍距離の平均 $t_i = (\bar{d}_{i1} + \bar{d}_{i2} + \bar{d}_{i3})/3$ を用いて, 以下の式で各閾値をポリゴン毎に算出する.

$$l_{i \max} = C_1 \times t_i \quad (10)$$

$$l_{i \min} = C_2 \times t_i \quad (11)$$

$$A_i = C_3 \times t_i^2 \quad (12)$$

ただし, C_1, C_2, C_3 はあらかじめ与える比例定数である.

3.3.4 輪郭モデルの結合・分裂

異なる計測地点から膨張させた異なる輪郭モデルの頂点間の距離が閾値以下になった場合には、輪郭モデルの結合処理を行う [11]。また、輪郭モデル上で閉ループを構成する複数の頂点が、ある一点に収縮・収束した場合には、その閉ループを断面として輪郭モデルを分裂させる [14]。

3.4 テクスチャマッピング

最後に、生成された三次元ポリゴンモデルに対してテクスチャマッピングを行う。本手法では、三次元モデルに対する動画撮影時のカメラ位置・姿勢は既知であり、また、レンジファインダに取り付けられた全方位カメラに関しては、レンジファインダと全方位カメラの位置・姿勢関係が既知であるので、各ポリゴンの頂点を画像上に投影することでテクスチャ領域を算出する。ただし、単一のポリゴンに対してテクスチャとして利用可能な画像は複数存在し、加えてオクルージョンを考慮する必要があることから、テクスチャとして利用する画像の選択を行う。具体的には、各ポリゴンに対して、まずオクルージョンの発生していないテクスチャ領域を選択し、次に選択されたテクスチャから画像上で面積が最大となるものを選択する。ただし、ポリゴンを構成する頂点 i に対して、図 4 に示した点 i の三次元位置 X_i から一定画角内の領域 A に計測点が存在しない場合には、点 i はモデルに必要な点とし、点 i を含むポリゴンに対するテクスチャマッピングは行わず、削除する。

4 実験

提案手法の有効性を示すために、屋外実環境の三次元モデル化実験を行った。本実験では、本学敷地内の約 $150\text{m} \times 240\text{m}$ の範囲内において取得した 12 計測地点からのレンジデータを地上計測による入力として用いた。各地点におけるレンジデータの計測では、計測範囲を水平 360 度・垂直 90 度に設定し、 1033×512 個のレンジデータを取得した。図 5 に、計測された奥行き画像の例を示す。また、図 6 に、同地点で取得した全方位画像を示す。次に、ヘリコプターより上空から撮影された動画像 (800 フレーム, 1920×1080 画素) を用いて特徴点追跡を行い、上空からの計測データを取得した。撮影された動画像の一部を図 7 に示す。

上述の方法で計測し、取得した三次元点群に対して、ポリゴンモデル化実験を行った。図 8 に、本実験で用

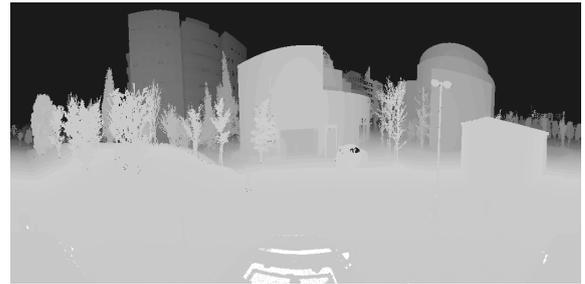


図 5: 全方位レンジデータ



図 6: 全方位画像

いた三次元点群データと、計測地点に設定した初期輪郭モデルを示す。本実験では、初期輪郭モデルとして正二十面体を用い、レンジファインダにおけるすべての計測地点 12 地点と、空撮動画撮影時のカメラ位置においては 100 フレーム毎の 8 地点に正二十面体を設定し、計 20 個の初期輪郭モデルよりモデル化を行った。また、本実験で用いた三次元点群は、約 300,000 点であった。

次に、表 1 に示すパラメータ値を用いてエネルギーを最小化し、輪郭モデルを更新することで、図 9 に示すテクスチャ付き三次元モデルを生成した。同図より、計測密度・計測精度が異なる異種計測データに対して、三次元モデルが生成できていることがわかる。しかし、実環境における平面の接合部分が直線とならず、生成された形状に歪みが生じている。今後は、平面および平面間の接合線を計測データから検出し、その情報をエネルギー関数に導入することで、より正確な三次元モデルの生成を目指す。

5 まとめ

本報告では、屋外環境の三次元モデル化を目的として、地上および上空から異なる手段で計測された異種計測データを用いて、三次元ポリゴンモデルを生成する手法を提案した。提案手法では、レンジファインダに



(a) 第 100 フレーム

(b) 第 300 フレーム



(c) 第 500 フレーム

(d) 第 700 フレーム

図 7: 空撮画像

表 1: 実験に用いた各パラメータの値

a_p	7.5
b_p	1.5
a_s	5.0
b_s	1.0
k	0.1
C_1	0.75
C_2	$0.9375 \times \sqrt{3}$
C_3	0.125

よって計測された地上の計測点を，空撮動画像上で基準点として与え，最適化を行うことで異種三次元データの幾何学的位置合わせを行う．また，計測された三次元点群の各点に，平均近傍距離，法線，信頼度の付加情報を与え，これらを考慮した動的輪郭法によるポリゴン化を行うことで，計測精度・計測密度が異なる異種計測データに対しても，計測密度が疎な部分で穴が空くことなく，また計測精度が低い点の影響を受けずに正確な三次元ポリゴンモデルが生成可能となった．

今後の課題として，屋外環境において多く存在する建物の壁などの平面部分を正しく表現するために，計測データからの平面検出を行い，エネルギー関数に導入することが必要である．

参考文献

- [1] 佐藤，神原，横矢，竹村: “マーカと自然特徴点の追跡による動画像からのカメラ移動パラメータの復元”，電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J86-D-II, No. 10, pp. 1431-1440, 2003.
- [2] M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen, A. A. Deknuydt and L. J. V. Gool: “Three-Dimensional Scene Reconstruction from Images,” Proc. SPIE, Vol. 3958, pp. 215-226, 2000.
- [3] 浅井，神原，横矢: “全方位距離画像と全方位カラー画像の統合による屋外環境の三次元モデル化”，画像電子学会誌, Vol. 34, No. 5, pp. 529-538, 2005.
- [4] H. Zhao and R. Shibasaki: “Reconstruction of Textured Urban 3D Model by Fusing Ground-Based Laser Range and CCD Images,” IEICE Trans. on Information and Systems, Vol. E83-D, No. 7, pp. 1429-1440, 2000.
- [5] 島村，山澤，竹村，横矢: “全周パノラマステレオ画像とCGモデルの合成による複合現実環境の構築”，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. SIG6(CVIM2), pp. 44-53, 2001.
- [6] 佐川，西野，倉爪，池内: “大規模観測対象のための幾何形状および光学情報統合システム”，画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2002) 講演論文集, Vol. 1, pp. 11-20, 2002.
- [7] J. E. Solem and A. Heyden: “Reconstruction Open Surfaces from Unorganized Data Points,” Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 653-660, 2004.
- [8] H-K. Zhao, S. Osher, B. Marriman and M. Kang: “Implicit and Non-Parametric Shape Reconstruction from Unorganized Data Using Variational Level Set Method,” Computer Vision and Image Understanding, Vol. 80, No. 3, pp. 295-314, 2000.
- [9] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum and T. R. Evans: “Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions,” Proc. SIGGRAPH, pp. 67-76, 2001.
- [10] H. Dinh, G. Turk and G. Slabaugh: “Reconstructing Surfaces by Volumetric Regularization Using Radial Basis Functions,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 24, No. 10, pp. 1358-1371, 2002.
- [11] Y. Duan and H. Qin: “A Novel Modeling Algorithm for Shape Recovery of Unknown Topology,” Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, Vol. 1, pp. 402-409, 2001.
- [12] G. Slabaugh and G. Unal: “Active Polyhedron: Surface Evolution Theory Applied to Deformable Meshes,” Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 84-91, 2005.
- [13] H. Delingette: “General Object Reconstruction Based on Simplex Meshes,” Int. Jour. of Computer Vision, Vol. 32, No. 2, pp. 111-146, 1999.
- [14] J-O. Lauchaud and A. Montanvert: “Deformable Meshes with Automated Topology Changes for Coarse-to-Fine 3D Surface Extraction,” Medical Image Analysis, Vol. 3, No. 2, pp. 187-207, 1999.

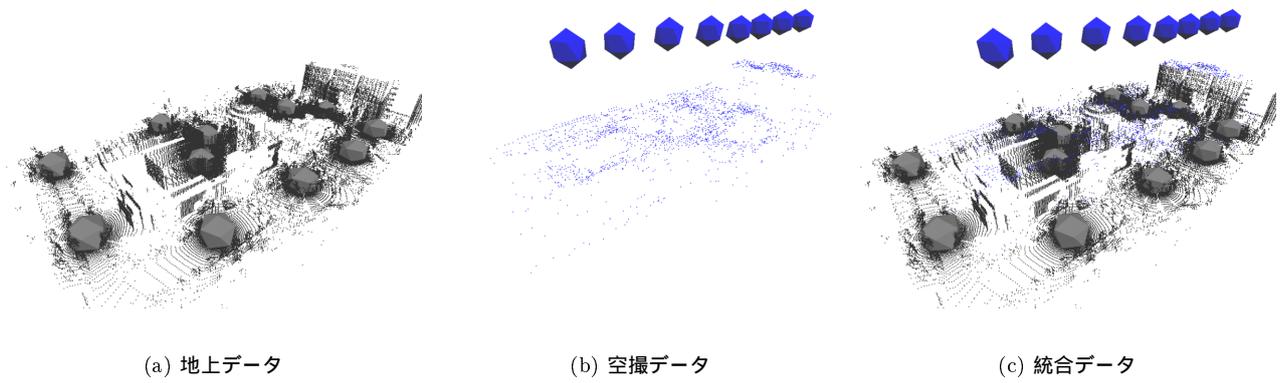


図 8: 三次元点群と初期輪郭モデル



図 9: 生成された三次元モデル