

NAIST-IS-MT0551042

修士論文

屋外環境の異種三次元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

北市 泰寛

2007年3月9日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

北市 泰寛

審査委員：

横矢 直和 教授 (主指導教員)

千原 國宏 教授 (副指導教員)

屋外環境の異種三次元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*

北市 泰寛

内容梗概

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、バーチャル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。屋外環境の三次元形状を計測する手段として、レーザ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や、動画像を用いて特徴点の三次元位置を求める方法などがある。本論文では、このような計測手段で取得され、位置合わせされた三次元点群データを用いて、連続した表面形状モデルを自動生成する手法を提案する。一般に、都市などの屋外環境の形状計測においては、都市環境の構造上、建物の屋根等のように地上からの計測が困難な部分が存在する。このため、完全な形状モデルを構築するためには、地上からの計測に加えて、ヘリコプターなどの飛行体からの計測結果を統合的に用いることが必要となる。ただし、異なる計測手段を用いて得た点群データは、計測手段や計測位置によって計測密度や計測精度が異なるため、連続した表面形状モデルを生成するためには、これらを考慮することが必要となる。また、本研究では、モデル化の対象として屋外環境を扱うため、比較的計算コストが少ない手法が望ましい。そこで、本論文では比較的計算コストの小さい動的輪郭法の枠組みを用い、計測密度および精度の違いを考慮した三次元モデル化を行う。実験では、レーザレンジファインダによって地上から計測された三次元点群と、ヘリコプターによって上空から撮影された動画像を用いて得られた三

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0551042, 2007年 3月 9日.

次元点群を統合した広域点群データに対してポリゴンモデル化を行い，本手法の有効性を検証する．

キーワード

三次元モデル化, 屋外環境, 異種計測データ, 動的輪郭法

3-D Modeling of Outdoor Environments

by 3-D Active Contour

Using Geometrically Registered

Heterogeneous 3-D Points*

Yasuhiro Kitaichi

Abstract

Three dimensional (3-D) models of outdoor environments can be widely used in many fields such as navigation, simulation, and virtual walk-through. Therefore, 3-D modeling methods for outdoor environments have been investigated recently. There are several ways to acquire 3-D data of outdoor environments. For example, a laser rangefinder can obtain highly accurate depth images, and structure from motion method can recover 3-D positions of image features. This paper proposes a novel method which generates a continuous 3-D surface model from heterogeneous 3-D point clouds measured by different sensors. Generally, in outdoor environments like cities, there usually exist parts that cannot be measured only from the ground due to the structure of the environment. Therefore, to recover a complete surface model of an outdoor environment, it becomes necessary to combine 3-D data measured from the airborne and those from the ground. 3-D data provided by different sensors have different characteristics with respect to density and accuracy. This leads to the necessity to consider the nonuniformity in data to build a complete surface model. Additionally, it is desirable to employ

* Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0551042, March 9, 2007.

a computationally inexpensive method because modeling targets are large outdoor environments. In this paper, the framework of 3-D active contour is used for 3-D modeling and 3-D models are generated by considering the difference in density and accuracy of acquired data. In experiments, a 3-D polygonal model is generated from point clouds measured by two kinds of sensors. The validity of the proposed method has been shown in the experiments.

Keywords:

3-D modeling, Outdoor environment, Heterogeneous measurement data,
Active contour model

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究と本研究の位置づけ	3
2.1 三次元点群の計測に関する関連研究	3
2.1.1 能動的な三次元計測手法	3
2.1.2 受動的な三次元計測手法	5
2.2 三次元点群からのポリゴンモデル化に関する従来研究	7
2.2.1 陰関数表現を用いた手法	7
2.2.2 動的輪郭法を用いた手法	8
2.3 本研究の位置づけ	10
3. 広域屋外環境の三次元計測	12
3.1 全方位レーザレンジファインダによる地上からの計測	12
3.2 動画像を用いた上空からの計測	14
4. 異種計測データに対する動的輪郭法を用いた屋外環境の三次元モデル生成	16
4.1 三次元点群への付加情報の算出	16
4.2 動的輪郭法を用いたポリゴンモデル生成	20
4.2.1 エネルギー関数の定義	20
4.2.2 初期輪郭モデルの設定	23
4.2.3 エネルギー最小化によるポリゴン頂点位置の更新	23
4.2.4 ポリゴンメッシュの最適化	24
4.2.5 輪郭モデルの結合・分裂	24
4.3 テクスチャマッピング	27
5. 実験	29
5.1 異種計測データに対するポリゴンモデル生成実験	29
5.2 考察	38

6. まとめ	41
謝辞	42
参考文献	43

目 次

1	動的輪郭法による三次元ポリゴンモデル生成 [14]	9
2	三次元計測の流れ	13
3	全方位レンジファインダ (下) と全方位カメラ (上)	13
4	三次元モデル生成の流れ	17
5	三次元点群における近傍点と法線	19
6	第一段階の動的輪郭法におけるエネルギー	22
7	第二段階の動的輪郭法におけるポテンシャルエネルギー	22
8	ポリゴンメッシュの最適化	25
9	輪郭モデルの結合	26
10	輪郭モデルの分裂	26
11	テクスチャ領域の選択	28
12	全方位レンジデータ	32
13	全方位画像	32
14	空撮画像	33
15	本学地図と三次元データ取得位置	34
16	三次元点群と初期輪郭モデル	35
17	動的輪郭法における輪郭モデル更新の過程	36
18	生成された三次元モデル	37
19	テクスチャのブレンドを行わない場合と行う場合の比較	40

表 目 次

1	レーザレンジファインダの仕様	30
2	RTK-GPS の仕様	30
3	ジャイロセンサの仕様	30
4	実験に用いた各パラメータの値	31

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、バーチャル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, 3] や、レーザレンジファインダ（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 [4, 5, 6, 7] などがある。一般的に、動画像からの計測は、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特長があるが、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が劣るという問題点がある。これに対し、レンジファインダによる計測は、比較的高精度・高密度に三次元計測を行えるという特長があるが、一地点における計測に数分程度の時間が必要となるため、計測コストの面から広域環境を対象として多地点で計測を行うことは難しい。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いという問題がある。

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体から動きながらデータを取得可能な動画像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、形状モデル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ポリゴンモデル生成（手順(2)）に関する研究は数多く行われており、これらの手法は、陰関数表現を用いた手法 [8, 9, 10, 11, 12, 13] と、動的輪郭法を用いた手法 [14, 15, 16] の二つに大別される。陰関数表現を用いた手法は、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，正確なモデルが生成できない．

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章では，屋外環境の三次元計測手法と，ポリゴンモデル生成法に関する従来研究を概観し，本研究の位置付けを述べる．3章では，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る．4章で，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．5章では，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，提案手法の特徴と有用性について考察する．最後に6章で，本論文のまとめと今後の課題を述べる．

2. 関連研究と本研究の位置づけ

本章では、屋外環境の三次元モデル化に関する関連研究および本研究の位置付けについて述べる。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。ここではまず、屋外環境の三次元計測手法（手順(1)）について概説し、次に、三次元データに対する三次元モデルの生成（手順(2)）に関する従来研究について述べる。また、最後にこれらの関連研究に対する本研究の位置付けについて述べる。

2.1 三次元点群の計測に関する関連研究

現実環境において、三次元形状を計測する手法は、対象に積極的にエネルギーを照射することで対象の形状を計測する能動的な手法と、対象への直接的な働きかけは行わず、対象の画像を取得し画像処理のみにより形状を取得する受動的な手法の二つに大別される。以下では、それぞれの計測手法について述べる。

2.1.1 能動的な三次元計測手法

能動的な三次元計測手法は、レーザや光などの何らかのエネルギーを対象に照射し、三次元計測を行う。一般的に、受動的な手法と比較して精度の高い計測が行えるという特長がある。以下では、能動的な手法に分類される、スリット光の三角測量による手法と光レーザの飛行時間測定による手法について述べる。

スリット光の三角測量による手法 スリット光の三角測量による計測は、プロジェクターやレーザ光によってスリット光を対象物に照射し、近接する位置に設置したカメラでスリット光の位置を検出し、三角測量の原理により対象の形状を距離画像として取得する。三角測量による計測では、カメラとスリットプロジェクタ間の距離（ベースライン）と、カメラと対象間の距離の比によっておおよその計測精度が決まり、対象までの距離に対して比較的容易にベースラインを長く設定で

きる小物体の計測時には高精度での三次元計測を実現できるという特長がある。しかし、屋外の広域環境を対象とした計測では、カメラ・スリットプロジェクタ間の十分なベースライン距離を確保することが難しく、精度のよい計測は困難である。また、屋外においては日照によってスリット光を検出することが難しいという問題がある。

光レーザの飛行時間測定による手法 光レーザの飛行時間測定に基づく手法は、光レーザを対象物に照射し、反射して計測されるまでの時間 (time of flight) を計測することでレンジデータを取得する。このような原理に基づく計測装置としては、点測量型トータルステーション、面計測型レンジファインダ、全周型レンジファインダなど多種のセンサが市販されている。なかでも、面計測型および全周型のレンジファインダでは、面または全周に対してレーザを二次元走査することで、レンジデータを奥行き画像として取得することが可能である。これらのセンサを用いれば、一般的にレーザの反射強度が一定以上であれば、屋外環境において高精度・高密度なレンジデータを取得することができる。

屋外環境を対象としたレンジファインダによる計測では、一回の計測で対象物体のすべてを計測することは困難であり、複数地点で計測を行い、幾何学的な位置合わせを行う必要がある。レンジデータの位置合わせに関する手法は多数提案されており [4, 5, 6]、計測地点に関する良い初期値が与えられれば、自動で位置合わせを行うことができる。ただし、レンジデータの位置合わせを行うためには、重複して計測された領域が必要となるため、多数のレンジデータを取得することが必要となる。しかし、一般的なレンジファインダでは、各地点の計測において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、オクルージョンの発生しやすい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、一般にこれらのセンサは静止状態での計測を前提として設計されているため、移動を伴う計測に用いることは難しい。

2.1.2 受動的な三次元計測手法

受動的な計測手法は、一枚または複数枚の画像を用いて、画像処理のみで三次元計測を行う。この手法は、特別な機器を必要とせず、市販のステルカメラ、またはビデオカメラで対象を撮影するだけで容易に計測が行えるという特長がある。以下では、受動的な手法に分類される各計測手法について述べる。

陰影による手法 陰影による手法は、対象物の陰影画像を取得し、撮影対象の反射特性や光源情報を用いて三次元計測を行う手法である [17]。この手法には、対象物に関する滑らかさの制約条件などを用いると、比較的精度のよい計測が行えるという特長がある。しかし、暗室のような光源状況を任意に設定できる環境でのみ利用が可能なため、自然光により明るさが変化する屋外環境には適さない。

視体積交差法 視体積交差法は、対象の画像上での輪郭情報を用いる手法である。撮影時のカメラ位置・姿勢を既知とし、輪郭情報を三次元空間に投影して得られる錐体(視体積)の内側に対象が含まれるという仮定の下、対象物の形状を取得する [18, 19]。この手法は、視体積の交差する領域を用いて形状を取得するため、物体の凹み部分など、輪郭として現れない形状を取得することはできない。そのため、輪郭の抽出が難しく、また形状が複雑な屋外環境に対して手法を適用することは困難である。

ステレオ法 ステレオ法は、カメラの位置・姿勢が既知の二台のカメラにより撮影された画像に対し、画像上で各画素の対応を決定することで、三角測量の原理により距離画像を推定する。対応点のあいまいさを減少させるために、三台以上のカメラを用いる三眼ステレオ法も提案されている [20, 21]。一般的にステレオ法では、カメラ位置関係の算出が重要であり、高精度なキャリブレーションが必要である。このようなステレオカメラのキャリブレーション手法として、三次元位置が既知のマーカを用いる手法が代表的である。しかし、スリット光の三角測量による手法と同様に、屋外環境を対象とする場合には、対象までの距離が屋内環境に比べて長くなるため、カメラ間の距離を長く設定する必要がある。このような環境において複数のカメラに写るようにマーカを配置することは困難であ

る。また、マーカーを用いないキャリブレーション手法として、GPS やジャイロを用いてカメラの位置・姿勢を推定する手法 [22] があるが、GPS やジャイロの計測精度が十分でなく、これらの機器の誤差がそのままモデルに影響するという問題がある。

レンズ焦点法 レンズ焦点法は、レンズの焦点深度を変化させた画像において、被写界深度の範囲外に写る対象に画像上のボケが発生するという光学的な特徴を利用し、奥行きを求める手法である [23, 24]。この手法は、計測環境に対する事前知識や制約条件が必要なく、カメラに近い物体に対しては精度の高い計測が行えるため、微小物体等の三次元計測に適している。しかし、屋外環境を対象とした場合には、被写界深度が数十メートルとなってしまう、十分な計測精度が得られないという問題がある。

動画像上の特徴点追跡による手法 動画像を用いた特徴点追跡による手法は、動画像上の特徴点を複数の画像間で対応付ける (追跡する) ことで、特徴点の三次元位置とカメラの移動パラメータを取得する手法である [1, 2, 3]。この structure from motion と呼ばれる手法は、任意の移動を伴った画像系列から特徴点の三次元位置を取得でき、また、対象や撮影位置・姿勢に対する制約が少なく、容易に屋外環境の三次元計測を行うことができる。しかし、一般的に、動画像上の特徴点のみを用いる手法では、カメラと特徴点の相対的な位置関係のみが推定され、絶対的な位置・姿勢の推定には何らかの外部指標を与える必要がある。また、相対的な位置・姿勢推定では、推定誤差の累積が避けられないという問題がある。このため、外部指標として、GPS やジャイロなどのセンサ類を利用する手法 [25, 26] や、三次元位置が既知の基準点を用いる手法 [1] が提案されている。これらの手法を用いることで、現実世界との位置関係およびスケール情報を取得でき、また、累積的な推定誤差の影響を回避することができる。

このような動画像を用いた特徴点追跡による手法は、動きながらの計測を前提としているため、移動体上でのデータの取得に向くという特長を持つ反面、計測密度や計測精度に関しては、レンジファインダによる計測と比較して劣るという問題がある。

2.2 三次元点群からのポリゴンモデル化に関する従来研究

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の地点から計測された場合には，距離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 [27]．しかし，計測が複数地点で行われ，距離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必要がある．

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 [8, 9, 10, 11, 12, 13] と，動的輪郭法を用いた手法 [14, 15, 16] の二つに大別される．以下，各手法について詳述する．

2.2.1 陰関数表現を用いた手法

陰関数表現を用いたポリゴン化手法として，三次元ボリュームデータを対象とした Marching Cubes 法 [28] がある．この手法は，まず，対象となる三次元空間をボクセル空間として表現し，各ボクセルに対して物体の存在確率を陰関数として設定する．ここで，各ボクセルの中心を参照点とし，隣接する 8 個の参照点より構成される立方体を考える．次に，各ボクセルが持つ陰関数の値により，立方体頂点 (参照点) が対象物体表面の内側にあるか外側にあるかを分類する．そして，立方体における内側頂点と外側頂点の配置に基づき，その立方体においてポリゴンを生成する．この手法は，比較的単純なアルゴリズムにより三次元ポリゴンモデルを生成できることから，広く用いられている．

しかし，Marching Cubes 法は，すべてのボクセルに対して陰関数が算出されていることを前提としており，レンジデータを入力として用いる場合には，何らかの方法により陰関数を決定する必要がある．このようなレンジデータからの陰関数の決定手法としては，符号付距離場関数を陰関数として用いる手法 [8, 9, 10, 11, 12, 13]

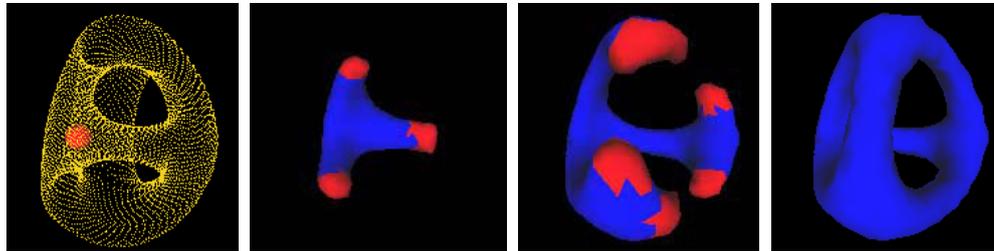
が一般的である．その中で，三次元点群の計測漏れを考慮した Radial Basis 関数を用いた符号付距離場関数の算出手法 [10, 11] など提案されている．また，佐川ら [12] は，大規模な物体を対象とし，データ量削減のために表面形状の曲率に基づき動的にボクセルの細かさを調節する手法を提案している．これらの手法を用いることで，少ないポリゴンでかつ計測漏れを考慮した物体形状の算出が可能となる．

このような陰関数表現を用いた手法は，複雑な形状のモデルを自動的に生成できるという利点があり，現在の複数レンジデータからのポリゴンモデル化において主流となっている．しかし，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・計算量が膨大となってしまう，広域な実環境に手法を適用することは難しい．

2.2.2 動的輪郭法を用いた手法

動的輪郭法は，図 1 に示す例のように，まず対象環境中に初期輪郭モデルを設定し (図 1(a) 中の赤部分)，輪郭モデルに対して定義されたエネルギー関数を繰り返し最小化することで輪郭モデルを更新していき (図 1(b)(c))，エネルギーの極小状態における輪郭モデル (図 1(d)) を対象物体の形状モデルとする手法である．図 1 では，既にエネルギーが収束し更新の必要がないポリゴンは青色で，まだ更新する必要があるポリゴンは赤色で表示されている．動的輪郭法は，古くは二次元画像を対象とし，画像上の物体領域の抽出に用いられてきた [29, 30]．これらの手法では，対象となる画像上に閉曲線により初期輪郭モデルを設定し，モデルに対して定義されたエネルギー関数を最小化するようモデルを更新することで，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輪郭形状とする．

このような二次元画像に対する動的輪郭法のアイデアは，三次元空間中の物体領域の抽出にも用いられ始めている．具体的には，CT 画像や MRI 画像から取得した三次元ボリュームデータに対して，三次元の動的輪郭法を用いることでポリゴンモデルを生成する手法 [31, 32] が提案されている．これらの手法では，二次



(a) 三次元点群と初期モデル (b) 生成過程におけるモデル (c) 生成過程におけるモデル (d) 生成されたポリゴンモデル

図 1 動的輪郭法による三次元ポリゴンモデル生成 [14]

元で構成される閉曲線ではなく，多数のポリゴンで構成される閉曲面を用いて輪郭モデルを定義し，この輪郭モデルをエネルギー最小化により更新していくことで，三次元形状モデルを生成する．形状モデルをボリュームデータに引き寄せるためのエネルギーとしては，三次元画像上でのエッジ強度に関するエネルギーが用いられる．この手法には，輪郭モデルの更新の際に，モデルの結合やモデルの分裂といった位相的な変形が扱えないという問題があるが，近年位相的な変形を考慮した手法が提案されている [33, 34, 35] ．

一方，レンジファインダなどにより取得された三次元点群データを対象とした動的輪郭法を用いたポリゴンモデル化の手法 [14, 15, 16] が提案されている．三次元点群データは，三次元ボリュームデータとは異なり，エネルギーとしてエッジ強度を算出することはできない．そこで，これらの手法では，各ポリゴン頂点において三次元点群の中から最近傍点を探索し，ポリゴン頂点から最近傍点までの距離をエネルギーとして用いることで，三次元点群に対する輪郭モデルの更新を行う．

上述した三次元点群に対する動的輪郭法は，ボリュームデータではなく表面形状モデルを用いるため，陰関数表現を用いた手法と比較して三次元点群からの形状の推定に必要なメモリ量が小さく，広域環境を対象とする形状モデリングに適している．しかし，従来提案されている三次元の動的輪郭法は，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な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を入力とした場合には，計測密度が疎な部分で穴が空くという問題や，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．

2.3 本研究の位置づけ

本研究は，広域な屋外環境の三次元モデル化を目的としている．既に述べた通り，屋外広域環境の三次元モデル化には，計測とモデル化の二つの手順が必要となるが，計測においては，広域な屋外環境を高精度に，かつ計測漏れ少なく計測できることが重要である．しかし，このような要求を単一の計測手段で満たすことは容易ではない．すなわち，レンジファインダ単体による屋外環境の計測では，2.1節で述べたような特徴から，オクルージョンの発生しやすい複雑な環境では計測漏れが発生しやすく，また建物の屋根などのように地上からの計測が不可能な領域が存在するため，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．そこで，本研究では，まず高密度・高精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計測を行う．次に，地上からの計測に加えて，ヘリコプターによる上空からの計測を行うことで，地上からは計測できない部分や計測漏れが発生している領域を補間する．上空からの計測には，静止状態での計測を前提とするレンジファインダではなく，移動計測を前提とした動画像からの三次元復元手法を用い，空撮動画像中のキーフレームにおいて，地上計測によって得られた点を基準点として用いた全体の最適化処理を行うことで，統一した座標系において三次元点群を得る．

次に，異種計測により得られる三次元点群を入力とする広域環境の形状モデル化においては，対象となる空間の規模が大きいため，比較的計算コストが小さく大きな領域を扱うことができる動的輪郭法による手法が適している．ただし，本研究では入力として異種計測によって得られる三次元点群を対象としており，計測手段の違いによる計測密度・精度の違いを考慮する必要がある．しかし，従来提案されている三次元の動的輪郭法は，単一の計測手段によって得られる計測データを入力としており，計測密度や計測精度が考慮されていないため，異種計

測データに適用した場合には，計測の疎な領域で穴が開くという問題や，計測誤差のばらつきによって正確な形状モデルを生成することが難しいという問題が発生する．このような問題に対して，本研究では，計測密度と計測精度の違いを考慮した動的輪郭法を用いて輪郭モデルを更新することで，計測密度および精度を考慮した三次元ポリゴンモデルを生成する．

3. 広域屋外環境の三次元計測

本章では、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2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。

3.1 全方位レーザレンジファインダによる地上からの計測

本研究では、全方位を計測可能なレンジファインダ(図3)で多地点において地上計測を行う。広域な屋外環境においてレンジファインダを用いて複数地点で計測を行う場合には、各地点での計測データを一つの座標系に統合する必要がある。一般的に、複数地点のレンジデータの位置合わせには、ICP アルゴリズム [7] が用いられているが、屋外環境を対象とする場合には樹木などのようにレンジファインダでは安定して計測することが困難な物体が多く存在するため、一般的な点対応に基づく ICP アルゴリズムではそのような部分で対応関係に誤りが発生し、位置合わせが失敗するという問題がある。そこで本研究では、この問題を回避するために、屋外環境に多く存在する道路や壁などの平面部分を基準とした位置合わせ手法 [4] を用いることで、複雑な屋外環境における位置合わせのロバスト性を向上させる。本手法では、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。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

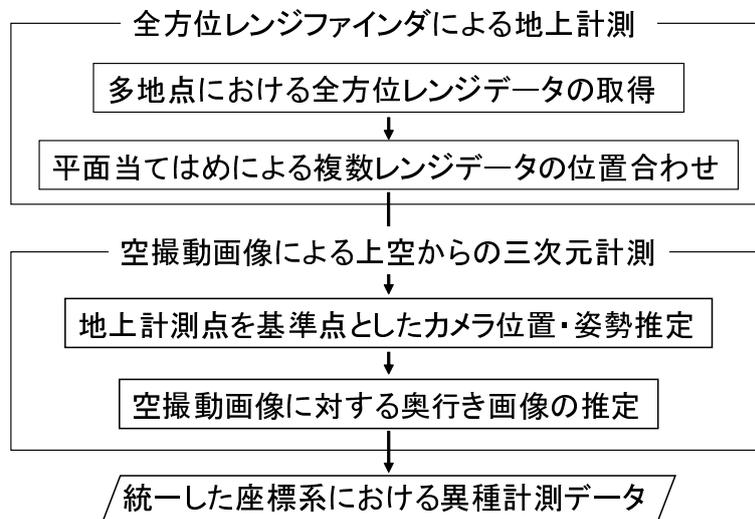


図 2 三次元計測の流れ



図 3 全方位レンジファインダ(下)と全方位カメラ(上)

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 [4]。これにより、各レンジデータの位置・姿勢を最適化する。

なお、テクスチャについては、図 3 に示すように、レンジファインダと全方位カメラの位置関係を固定し、全方位の三次元計測と同時に、全方位カメラにより全方位画像の撮影を行うことで、全方位の三次元データに対応するテクスチャ情報を取得する。このように位置関係を固定することで、レンジファインダと全方位カメラ間の位置・姿勢の関係を一意に決めることができ、三次元モデルのテクスチャを生成することができる [4]。

3.2 動画像を用いた上空からの計測

上空からの計測は、空撮動画像に対して、structure from motion の原理に基づく三次元復元処理を行うことで実現する。本研究では、佐藤らの手法 [1] を用いて特徴点の三次元位置とカメラの位置・姿勢を推定する。本手法では、まず動画像中のキーフレームにおいて、地上計測によって計測された三次元位置が既知の基準点を手動で指定する。次に、動画像中の各フレームにおいて以下に示す処理を行い、これらを最終フレームまで繰り返すことで、カメラ位置・姿勢と特徴点の三次元位置を逐次推定する (詳細については文献 [1] 参照)。

(特徴点の追跡) Harris オペレータとテンプレートマッチングにより、前フレームの各特徴点について、現フレームにおける対応点を探索する。更に、RANSAC アルゴリズムより、特徴点の誤対応を排除する。

(カメラ位置・姿勢の推定) 前ステップで決定された特徴点の画像上での座標と、対応する三次元座標を用い、カメラの位置・姿勢を算出する。ここでは、すべての検出された特徴点の三次元座標を画像に再投影した際の再投影誤差の二乗和が最小になるようにカメラ位置・姿勢を決定する。なお、特徴点の三次元座標は、前フレームまでに推定されている値を用いる。

(特徴点の三次元位置推定) 現フレームに存在するすべての特徴点について、特徴点ごとに、その特徴点が写っている画像への再投影誤差の二乗和を最小化することで三次元座標を算出し、フレーム毎に特徴点の三次元座標を更新する。

(特徴点の追加と削除) 複数の評価尺度を用いることで、カメラ位置・姿勢推定に用いる信頼度の高い特徴点の組をフレームごとに自動更新する。ここで用いる信頼度は、各画像上での特徴点の座標と特徴点の三次元位置を各画像へ再投影した際の画像上での座標の誤差(再投影誤差)の分散の逆数として定義され、この値を用いて4章において各特徴点の信頼度を算出する。

最後に、動画像全体での最適化処理を行うことで、推定誤差を最小化する。具体的には、動画像全体に対する再投影誤差の総和を最小化することで、カメラ位置・姿勢と特徴点の三次元位置を最適化する。本手法では、動画像中で指定する地上計測点を基準点として最適化処理を行うことで、地上計測による座標系で三次元点群とカメラ位置・姿勢を得ることができる。しかし、ここで得られる特徴点の三次元位置は非常に疎なものとなり、形状モデルを得るには十分でない。

そこで、求めたカメラ位置・姿勢を用い、マルチベースラインステレオ法を適用することで、奥行き画像を生成する[36]。ただし、手法[36]では、マルチベースラインステレオ法の奥行き推定の評価尺度として、画像特徴点の座標からなる評価尺度を用いることで、奥行き推定のロバスト性の向上と計算コストの低減を図るため、画像特徴点以外の画素に対する奥行きは算出されない。

4. 異種計測データに対する動的輪郭法を用いた屋外環境の三次元モデル生成

本章では、3章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を三次元モデル化する手法について述べる。三次元モデル生成の流れを図4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、計測精度と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い、テクスチャ付き三次元モデルを生成する。

以下では、まず付加情報の算出法について詳述する。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について述べる。

4.1 三次元点群への付加情報の算出

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 i 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周辺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 s 個の近傍点 $S_i = \{1, \dots, j, \dots, s\}$ に対し、各近傍点 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

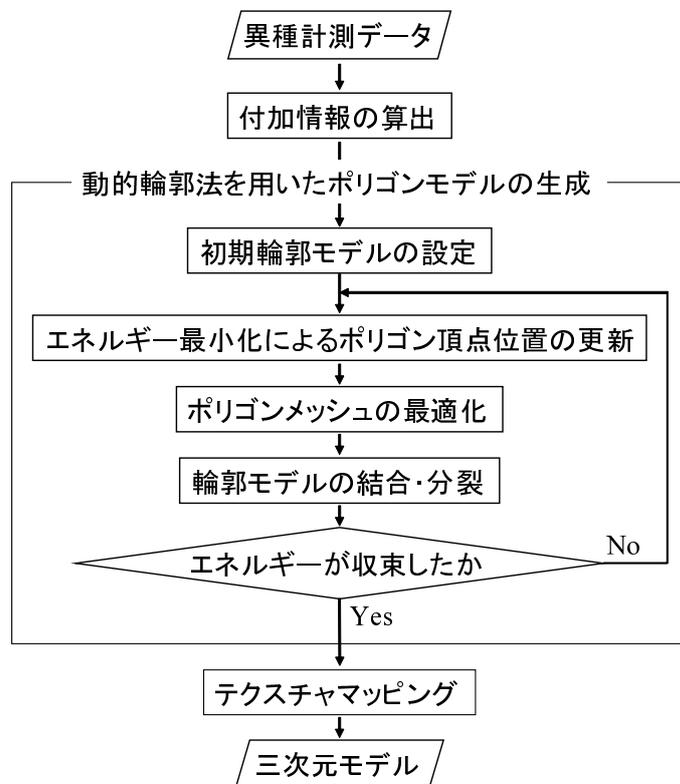


図 4 三次元モデル生成の流れ

下の式で算出する．

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

ただし， \hat{X}_i は点 i の三次元座標を示す．また，近傍点は，図 5 に示すように，レンジファインダにより計測された点については，奥行き画像上での注目点の近傍点を三次元空間上に投影した点とし，動画像より取得された点については，点 i からある一定距離以内の領域 R 内に含まれる点とする．

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 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 とその近傍点を結ぶベクトル $\mathbf{v}_j = \hat{\mathbf{X}}_j - \hat{\mathbf{X}}_i$ の外積を用いて、以下の式で算出する。

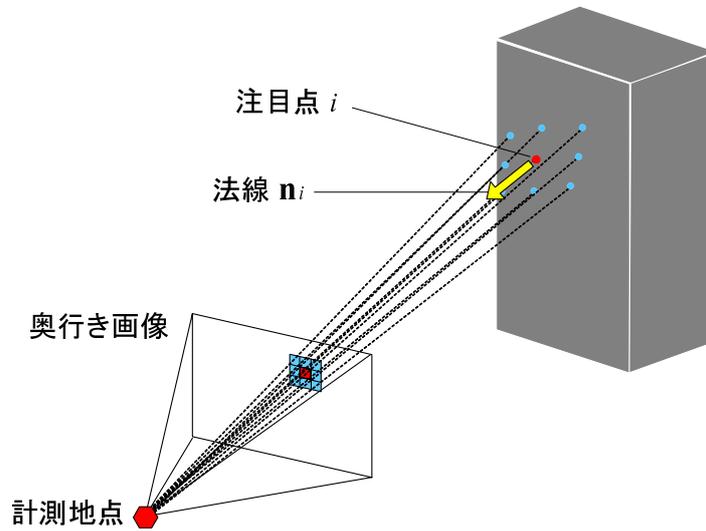
$$\mathbf{n}_i = \frac{1}{s} \sum_{j \in S_i} (\mathbf{v}_{j+1} \times \mathbf{v}_j) \quad (2)$$

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の座標 \mathbf{V}_i 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。

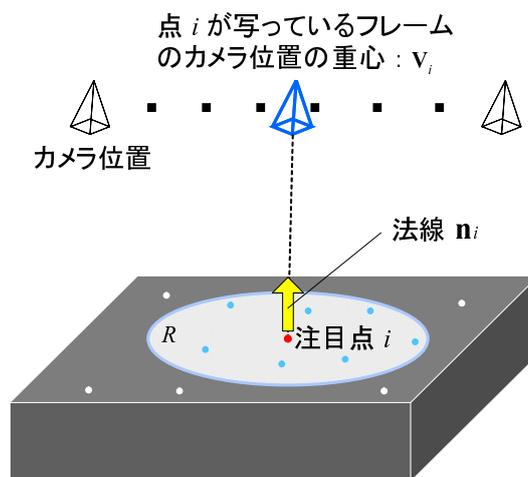
信頼度の算出： 各計測点の計測の信頼度を算出し、4.2.1 項で定義されるエネルギー関数の重みを変化させることにより、計測精度を考慮したポリゴン化を行う。ここでは、計測点 i の信頼度 C_i として、三次元空間における計測誤差の分散の逆数を用いる。動画像より得られた三次元点群の信頼度は、画像上における点 i の再投影誤差の平均 \hat{R}_i を、各フレームにおける計測点 i の奥行き Z_i の平均値 Z_i に対応する三次元空間に投影し、その二乗値を三次元推定結果の分散値として用いることで、信頼度を以下のように算出する。

$$C_i = \left(Z_i \cdot \hat{R}_i \right)^{-2} \quad (3)$$

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。



(a) レンジファインダによる計測点



(b) 空撮動画像による計測点

- 注目点 i (三次元位置: $\hat{\mathbf{x}}_i$)
- 近傍点 j (三次元位置: $\hat{\mathbf{x}}_j$)
($j \in S_i, S_i$: 近傍点集合)

図 5 三次元点群における近傍点と法線

4.2 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。動的輪郭法では、図4に示すように、まず三次元点群に対して初期輪郭モデルを設定し、輪郭モデルに対して定義したエネルギー関数を繰り返し最小化することで輪郭形状モデルを三次元点群に近づくように更新し、エネルギーが収束するまで更新を繰り返すことで最終的な輪郭形状モデルを生成する。このような輪郭形状モデルの更新は、(1) エネルギー最小化による頂点位置の更新、(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。本手法では、エネルギー最小化による頂点位置の更新、および、ポリゴンメッシュの最適化の各処理において、4.1節で算出した付加情報を考慮することで、計測密度・精度を考慮したポリゴンモデル化を行う。また、本手法では動的輪郭法を二段階で行うことで、ロバスト性の向上と計算量の削減を図る。まず、第一段階では、粗いポリゴンにより、大まかな形状モデルを生成する。これにより、対象物体の概形を比較的高速に算出する。次に、第二段階では、第一段階で得られた形状を初期値としてポリゴンを細分化し、エネルギーを収束させることでより精細な三次元形状モデルを生成する。以下では、まず、本手法で用いる動的輪郭法のエネルギー関数について詳述する。次に、各手順について述べる。

4.2.1 エネルギー関数の定義

本手法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・分裂させ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せる力を発生させる。ここでは E_p を、図6、図7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 X_i と、頂点 i に対応する計測点 \hat{i} の三次元位置 \hat{X}_i の距離 $|X_i - \hat{X}_i|$ の重みつき和として、以下の式で定義する。

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

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、 \hat{X}_i は、ポリゴン頂点 i に対応する計測点 \hat{i} の三次元座標である。ここで、対応点 \hat{i} の決定法を動的輪郭法の各段階において変えることで、各段階に適したポテンシャルエネルギーを発生させる。すなわち、第一段階では輪郭モデルが外側に存在する点群に向かって膨張するように対応点を決定する。具体的には、図6中Aで示されるような、頂点 i の三次元位置 X_i を視点、その外側法線を光軸とする一定画角 θ 内の領域において、法線が頂点 i が存在する側を向いている三次元点群の中で、最も空間距離が近い計測点を対応点 \hat{i} とする。第二段階では、輪郭モデルが既に点群に十分近いところに収束していることを前提とし、図7に示すように、注目点 i から、探索範囲を限定せずに三次元点群の中から空間距離が近い順に a 個選び、これらの点の重心位置を仮想的な対応点 \hat{i} とする。また、仮想対応点の信頼度は、仮想対応点の算出に用いた a 個の点の信頼度を平均化したものとする。

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6参照）を用いて、以下の式で定義する。

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

ただし、 w_{si} 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。また、滑らかさのエネルギーは、第一段階、第二段階の輪郭更新処理において同一のものをを用いる。

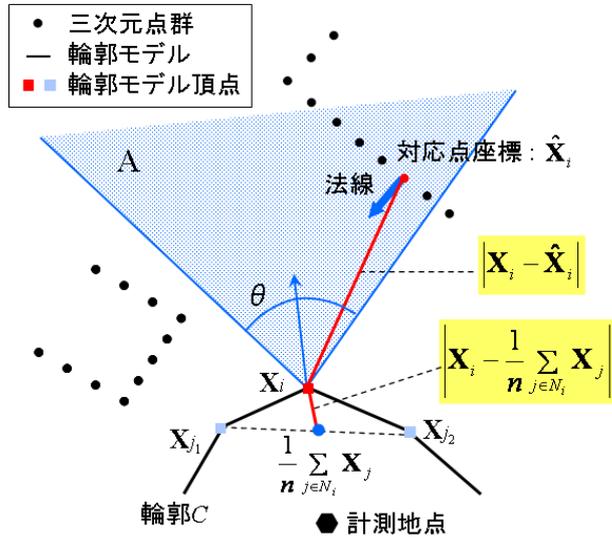


図 6 第一段階の動的輪郭法におけるエネルギー

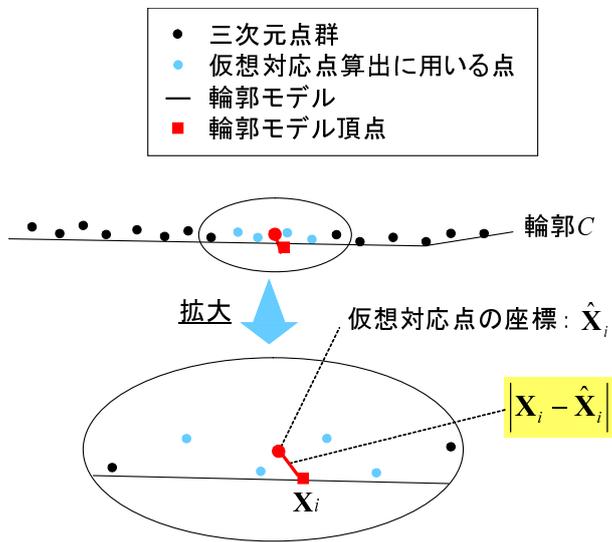


図 7 第二段階の動的輪郭法におけるポテンシャルエネルギー

次に，各点の重み係数 w_{pi} , w_{si} 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．

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

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

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．

4.2.2 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，上空計測データについては，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．

4.2.3 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，4.2.1 節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 $\mathbf{e}_i = (-\partial E/\partial x_i, -\partial E/\partial y_i, -\partial E/\partial z_i)$ 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．

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

第一段階における輪郭の更新処理では，重み係数 k に比較的大きい値を与えることで，大まかな形状を少ない計算コストで推定する．第二段階においては，重み係数 k を第一段階より小さく設定することで，より精細に形状モデルを推定する．

4.2.4 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が三次元点群の計測密度に合うよう、自動的にポリゴンの分裂・結合を行う [14, 34]。図 8 に示すように、ポリゴンの面積が閾値 A_i より大きい、またはエッジの長さが閾値 $l_{i \max}$ より長い場合にはポリゴンの分裂を行い、エッジの長さが閾値 $l_{i \min}$ より短い場合には、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。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。

$$l_{i \max} = m_1 \times t_i \quad (10)$$

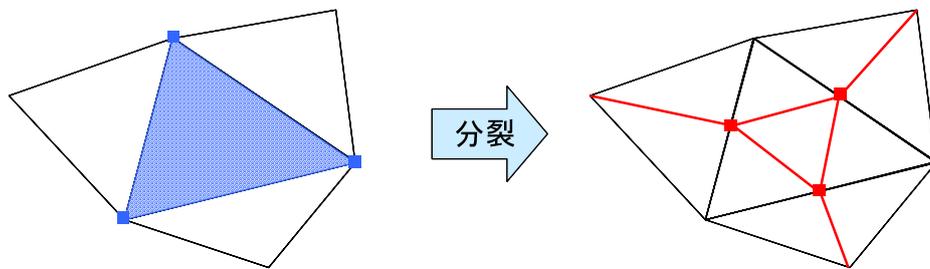
$$l_{i \min} = m_2 \times t_i \quad (11)$$

$$A_i = m_3 \times t_i^2 \quad (12)$$

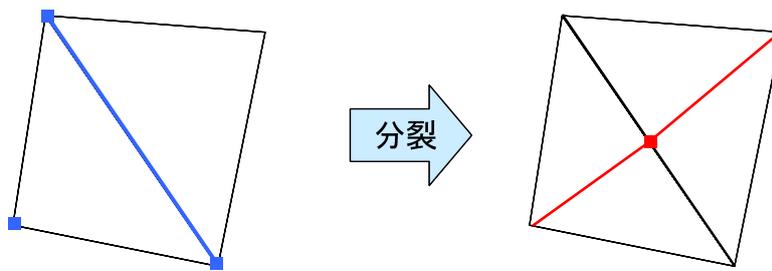
ただし、 m_1, m_2, m_3 はあらかじめ与える比例定数である。第一段階では、これらの比例定数に比較的大きい値を与え、ポリゴンの大きさを粗くする。これより、第一段階における輪郭の更新処理で生成されるモデルは、比較的小さいポリゴン数で生成される。第二段階の処理では、比例定数を第一段階より小さい値に設定することで、より精細なモデルを生成する。

4.2.5 輪郭モデルの結合・分裂

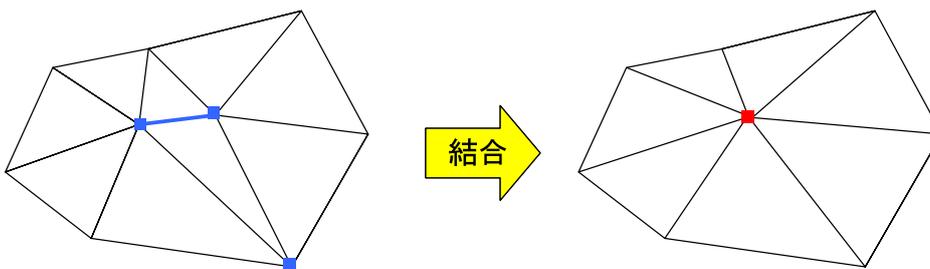
異なる計測地点から膨張させた異なる輪郭モデルの頂点間の距離が閾値以下になった場合には、図 9 のように輪郭モデルの結合処理を行う [14]。また、輪郭モデル上で閉ループを構成する複数の頂点が、ある一点に収縮・収束した場合には、図 10 のようにその閉ループを断面として輪郭モデルを分裂させる [34]。



(a) ポリゴンの面積 $> A_i$ の場合



(b) エッジの長さ $> l_{i \max}$ の場合



(c) エッジの長さ $< l_{i \min}$ の場合

図 8 ポリゴンメッシュの最適化

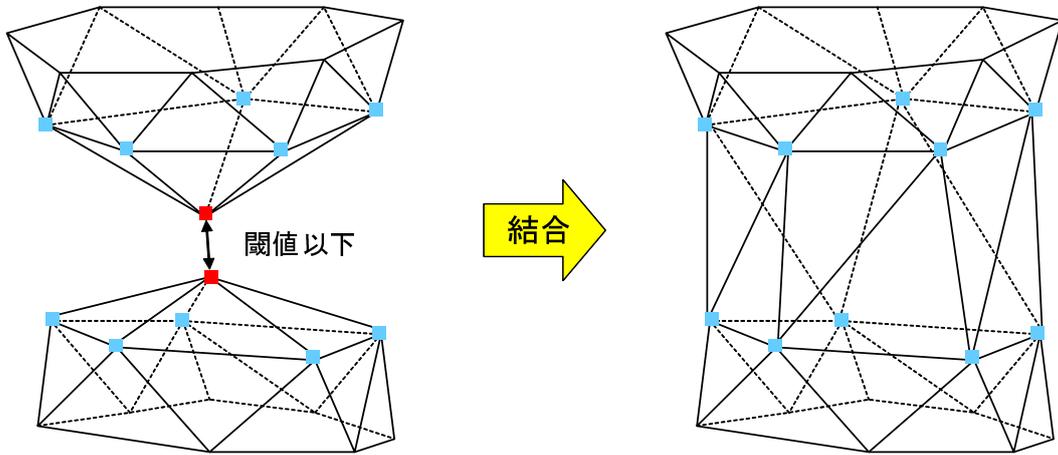


図 9 輪郭モデルの結合

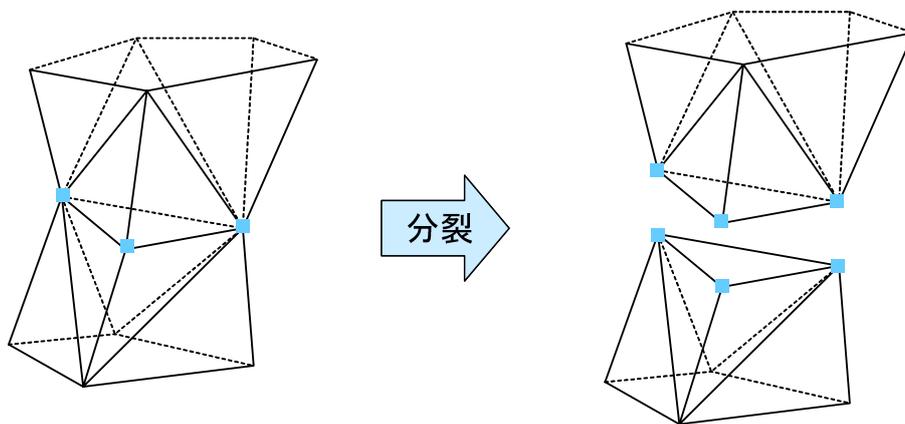


図 10 輪郭モデルの分裂

4.3 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上空からの動画像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するため，テクスチャとして利用する画像の選択を行い，また隣り合うポリゴンにおいてテクスチャに不連続が生じないように，テクスチャのブレンドを行う．ここでは，オクルージョンの影響を考慮した上で，ポリゴンの画像上での面積がもっとも大きい2つのテクスチャを選択し，選択された2つのテクスチャをブレンドしてマッピングする．具体的には，各ポリゴンに対して利用可能な画像の中から，画像上でのテクスチャの面積が大きい順にオクルージョンの判定を行い，オクルージョンが発生していないテクスチャが2つ得られた時点で，その2つのテクスチャを画像上の面積の比率に応じてブレンドし，ポリゴンにマッピングする．オクルージョンの判定は，ポリゴンの3頂点と選択されたテクスチャ画像の撮影位置の4点で構成される三角錐の内部にモデルが存在するかどうかを判定することで行う．例えば図11の例では，ポリゴンPの画像上の面積が最も大きいカメラ1とポリゴンPの間にオクルージョンが発生しているため，カメラ1のテクスチャは選択せず，次に画像上での面積が大きいカメラ2とカメラ3のテクスチャを選択し，カメラ2とカメラ3における画像上の面積の比率に応じてテクスチャをブレンドし，ポリゴンPにマッピングを行う．なお，ポリゴンを構成する頂点 i に対して，図6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．

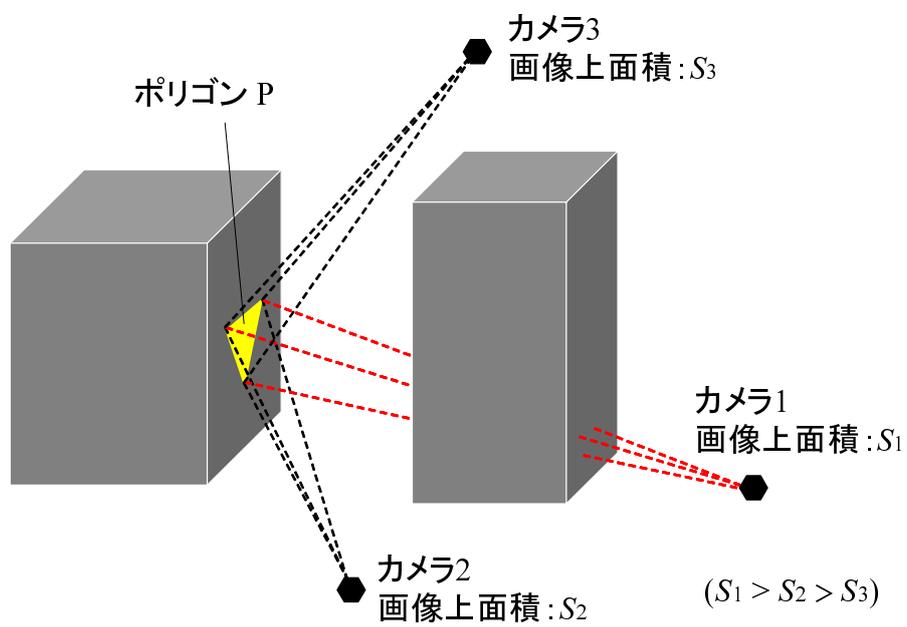


図 11 テクスチャ領域の選択

5. 実験

5.1 異種計測データに対するポリゴンモデル生成実験

提案手法により、異種計測データに対して計測密度および計測精度を考慮した三次元モデルが生成できることを検証するため、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 $150\text{m} \times 240\text{m}$ の範囲内を対象とし、15 計測地点においてレンジファインダによって取得された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。また、RTK-GPS とジャイロ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、その位置・姿勢をレンジデータの同時位置合わせの際に用いた。さらに、計測の際には同時に全方位カメラにより全方位画像を取得した。本実験で用いた全方位カメラは、水平方向に 5 つ、上方向に 1 つのカメラから構成され、6 つのカメラで全方向の約 75 % のテクスチャを取得可能である。また、各カメラの解像度は、 768×1024 画素である。テクスチャマッピングの際には、各カメラで取得したカラー画像を池田らの手法 [37] によりパノラマ展開した全方位画像を用いた。用いたパノラマ画像の解像度は、 2048×1024 画素である。本実験で用いたレンジファインダ、RTK-GPS およびジャイロセンサの仕様をそれぞれ表 1、表 2 および表 3 に示す。また、レンジファインダにより計測された奥行き画像の例を図 12 に示し、同地点で取得した全方位画像を図 13 に示す。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。この際、動画中のキーフレームにおいて地上計測点を手動で指定することで、地上計測データと空撮動画データの位置合わせを行った。撮影された動画像の一部を図 14 に示す。また、モデル化の対象となった本学の地図と三次元点群データの取得位置を図 15 に示す。本実験で用いた三次元点群は、地上計測点が約 155,000 点、上空計測点が約 5,000 点で、合計約 160,000 点である。

上述の方法で取得した三次元点群に対して、表 4 に示すパラメータを用いてポリゴンモデル化を行った。本実験で用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図 16 に示す．本実験では，レンジファインダによるすべての計測地点 15 地点と，空撮動画像撮影時の 100 フレーム毎のカメラ位置 8 地点において，計 23 個の初期輪郭モデル(正二十面体)を設定した．本実験では，動的輪郭法における輪郭モデルの更新において，エネルギー収束までに，第一段階では 1770 回，第二段階では 240 回の反復処理を要した．動的輪郭法による輪郭モデル更新の過程を図 17 に示す．図 17 より，初期輪郭モデルが，モデルの結合・分裂を行いながら点群に向かって膨張していき，三次元点群に張り付いていく様子が見て取れる．生成したテクスチャ付き三次元モデルを図 18 に示す．生成されたモデルは，第一段階終了時では，頂点の数は約 18,000 点，ポリゴン数は約 34,000 ポリゴンであり，第二段階終了時では，頂点の数は約 98,000 点，ポリゴン数は約 190,000 ポリゴンであった．

本実験では，PC(CPU : Xeon 3.2GHz , Memory : 8GB) を用い，動的輪郭法による形状モデル生成には約 20 時間，オクルージョンを考慮したテクスチャマッピング処理には約 55 分を要した．

表 1 レーザレンジファインダの仕様

計測角範囲	水平方向 : 360度 垂直方向 : 40~-50度
計測距離範囲	1~200度
計測精度	±12mm
最小角度ステップ幅	0.01度
角度読み取り分解能	水平方向 : 0.0025度 垂直方向 : 0.002度

表 2 RTK-GPS の仕様

緯度	±3.3cm
経度	±3.3cm
高度	±4.0cm

表 3 ジャイロセンサの仕様

方位角	±2.2度
ロール角	±0.5度
ピッチ角	±0.5度

表 4 実験に用いた各パラメータの値

(a) 第一段階の動的輪郭法における各パラメータの値

a_p	75.0
b_p	1.5
a_s	50.0
b_s	0.8
k	0.12
m_1	1.25
m_2	$0.24 \times \sqrt{3}$
m_3	0.208

(b) 第二段階の動的輪郭法における各パラメータの値

a_p	75.0
b_p	1.5
a_s	50.0
b_s	0.8
k	0.03
m_1	0.75
m_2	$0.0938 \times \sqrt{3}$
m_3	0.125

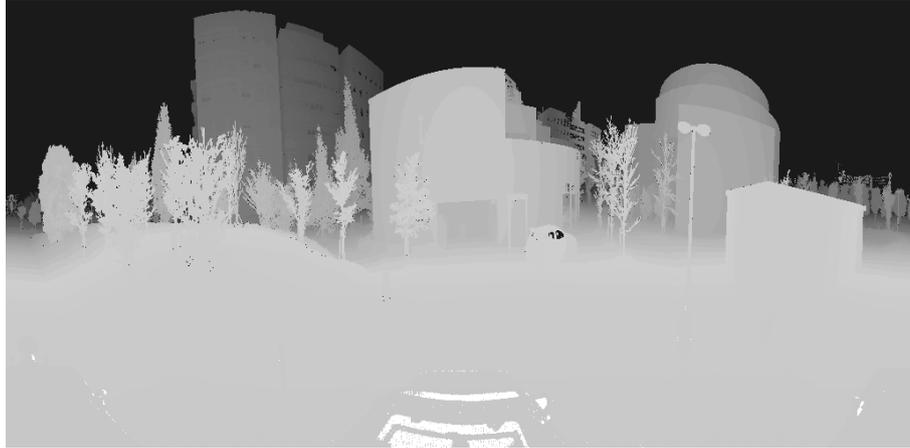
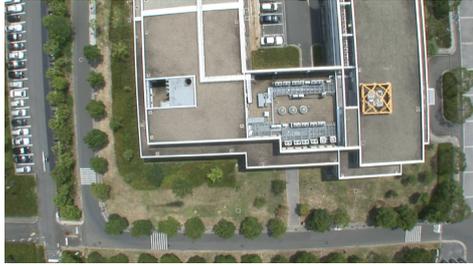


図 12 全方位レンジデータ



図 13 全方位画像



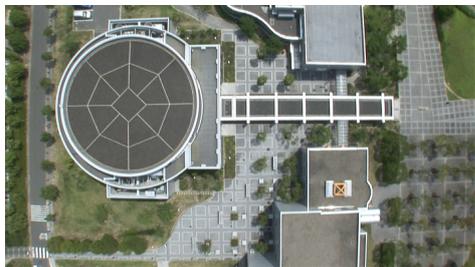
(a) 第1フレーム



(b) 第110フレーム



(c) 第220フレーム



(d) 第330フレーム



(e) 第440フレーム



(f) 第550フレーム



(g) 第660フレーム



(h) 第800フレーム

図 14 空撮画像

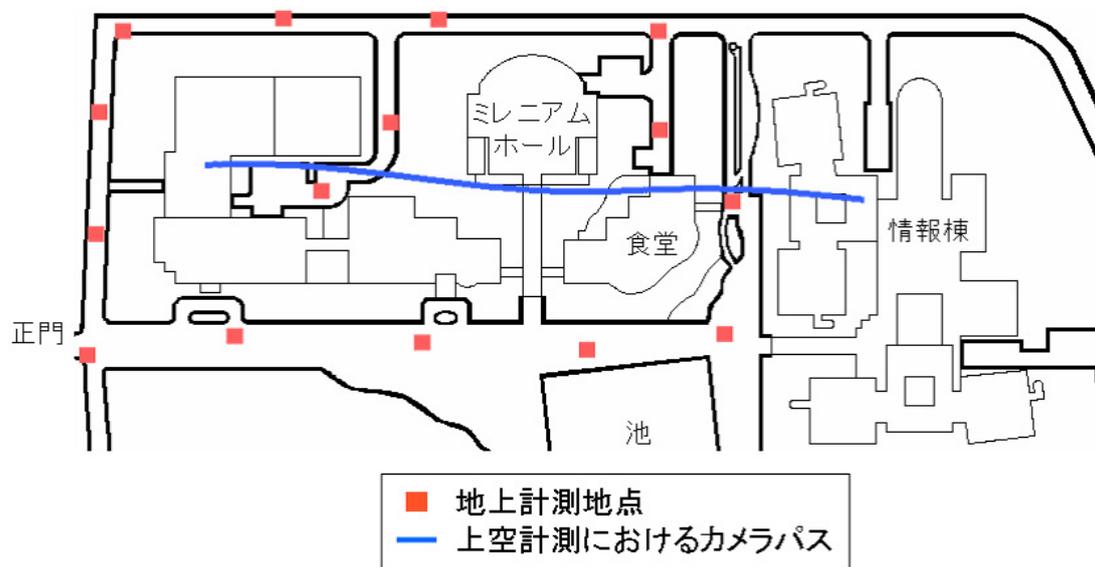
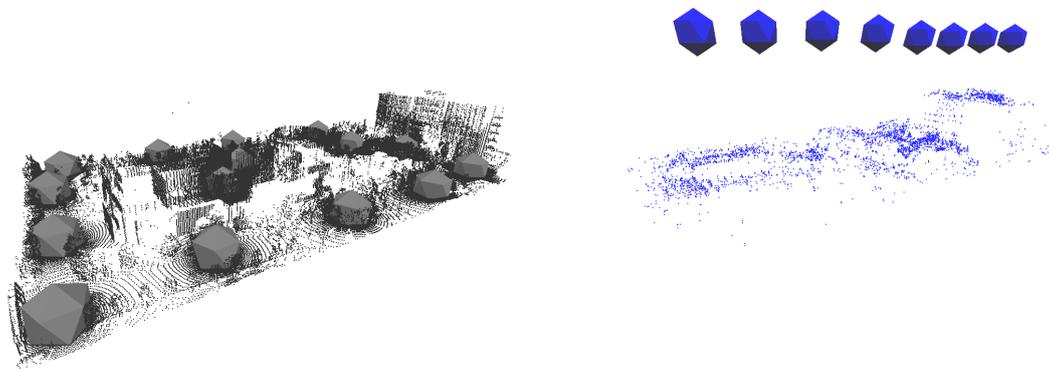
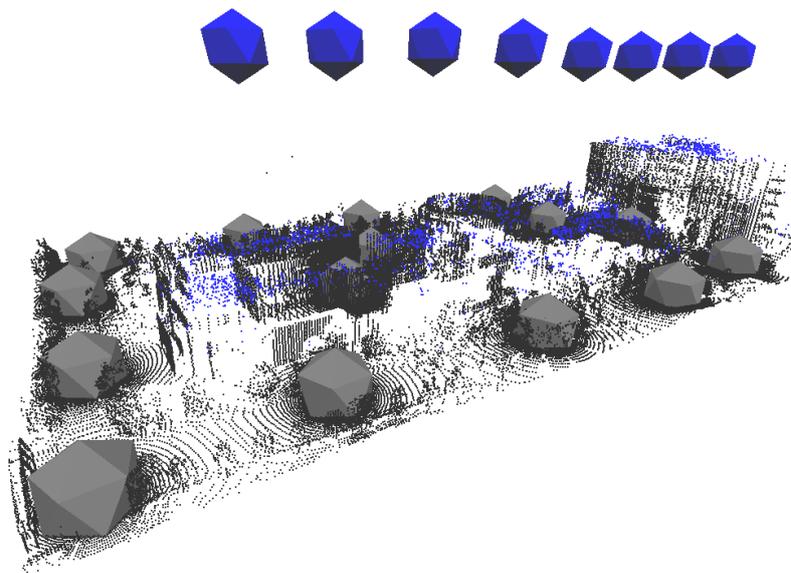


図 15 本学地図と三次元データ取得位置



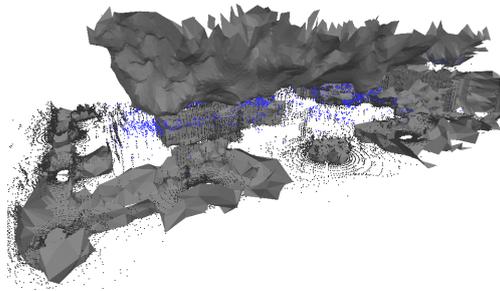
(a) 地上データ

(b) 空撮データ

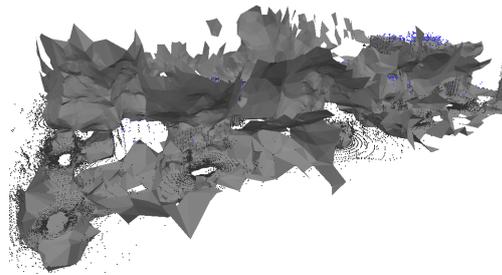


(c) 統合データ

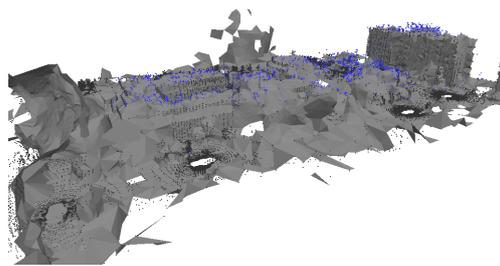
図 16 三次元点群と初期輪郭モデル



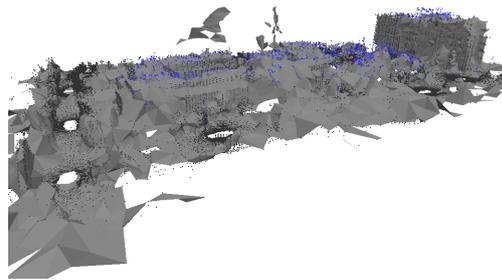
(a) 第一段階 300 回目



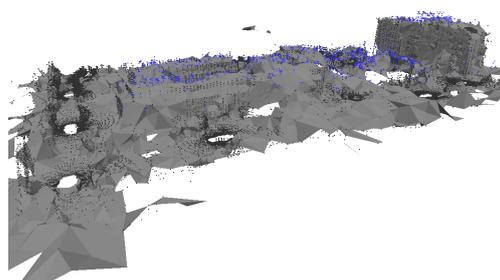
(b) 第一段階 600 回目



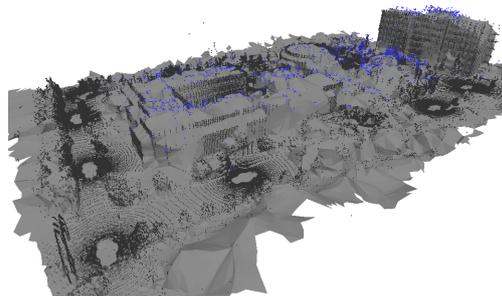
(c) 第一段階 900 回目



(d) 第一段階 1200 回目



(e) 第一段階 1770 回目



(f) 第二段階 120 回目

図 17 動的輪郭法における輪郭モデル更新の過程

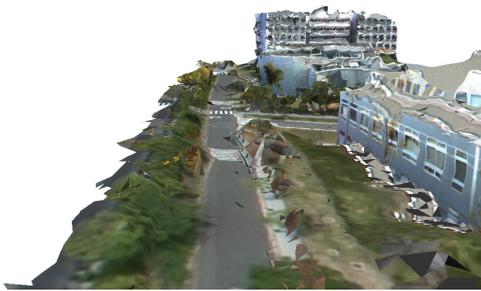


図 18 生成された三次元モデル

5.2 考察

提案手法では、地上計測データと空撮動画データを統合した三次元点群データに対して、計測密度・計測精度を考慮した動的輪郭法を用いて三次元ポリゴンモデル化を行った。図 18 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、計測密度が疎な部分においても穴のない三次元モデルが生成できていることが確認できる。また、地上計測により得られたデータと空撮動画より得られたデータから生成された領域に対して面が連続的に生成されており、地上計測データと空撮動画データの位置合わせが正確に行われていることが確認できる。生成された三次元モデルは、地上における三次元計測地点付近において比較的正確に生成できており、計測地点近辺での見渡しや自由視点画像生成などには、生成したモデルは有効であると考えられる。しかし、計測地点から遠い部分や木が乱立している部分などにおいては、正確にモデルが生成されているとは言えず、そのため、任意経路を歩き回れるバーチャルウォークスルーシステムに生成されたモデルを用いるためには、今後さらにモデルを改善していく必要がある。

生成されたモデルに関して改善が必要である部分として、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ことが確認できる。屋外環境には、平面部や直線が多数存在することから、このような歪みが生成されたモデルの見栄えを悪化させている。このような歪みを補正する手段として、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を生成することなどが考えられる。

また、テクスチャマッピングについて、本実験では地上・上空計測でそれぞれ異なる日時に取得した画像を用いており、日照条件等の撮影条件に違いがある。このため、隣り合うポリゴンにおいて異なる画像からテクスチャが選択された場合には、テクスチャに不連続が発生し、違和感が生じてしまう場合がある。このようなテクスチャの品質の違いによる違和感を低減するために、本研究では 4.3 節で述べた手法により、テクスチャをブレンドした上でテクスチャマッピングを行っている。テクスチャのブレンドを行わない場合と行う場合のテクスチャの比較を図 19 に示す。図 19(a)(b)(c)(d) においては、テクスチャのブレンドを行うことで、テクスチャの品質の違いによる違和感が低減されていることが確認できる。

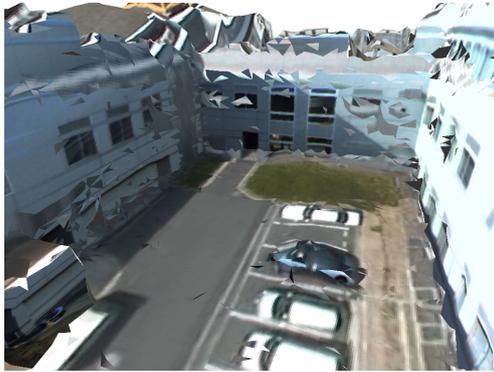
しかし，図 19(e)(f) のように，テクスチャのブレンドを行うことで，違和感が生じてしまう場合も見受けられる．このようなテクスチャのブレンドによる違和感を低減するためには，隣り合うポリゴンのテクスチャを考慮したテクスチャマッピング手法の検討や，テクスチャをブレンドする比率を連続的に変化させる方法の検討などが考えられる．



(a) テクスチャのブレンドを行わない場合 (1)



(b) テクスチャのブレンドを行う場合 (1)



(c) テクスチャのブレンドを行わない場合 (2)



(d) テクスチャのブレンドを行う場合 (2)



(e) テクスチャのブレンドを行わない場合 (3)



(f) テクスチャのブレンドを行う場合 (3)

図 19 テクスチャのブレンドを行わない場合と行う場合の比較

6. まとめ

本論文では、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、まず屋外環境の三次元計測において、レンジファインダによる地上計測と、空撮動画撮影に基づく structure from motion による上空からの計測を行う。この際、空撮動画像中のキーフレームにおいて地上計測点を基準点として指定し、最適化を行うことで、地上計測データと空撮動画データの幾何学的位置合わせを実現する。次に、取得した三次元点群データに対してポリゴンモデル化を行う。提案手法では、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ポリゴンモデル化を行う。実験では、屋外環境として本学敷地内を対象として、提案手法を用いて三次元モデルを生成し、異種の計測手段によって得られた点群に対して、欠損のない連続した表面形状モデルを生成できることを示した。生成されたモデルは、三次元点群の計測地点付近では正確に生成されており、計測地点付近における見渡しや任意視点画像生成などに有効であると考えられる。しかし、計測地点から遠い部分などにおいては正確にモデルが生成されているとは言えず、任意経路を歩き回れるバーチャルウォークスルーシステムに生成されたモデルを用いるためには、今後さらにモデルを改善していく必要がある。

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および平面間の接合線を正しく表現するために、計測データから平面および平面間の接合線の検出を行い、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を生成することが可能になると考えられる。また、テクスチャマッピングにおいて、テクスチャの品質の違いによる違和感を取り除くために、隣り合うポリゴンのテクスチャを考慮したテクスチャマッピング手法の検討や、テクスチャブレンドの比率を連続的に変化させる手法の検討などが必要であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，その全過程において細やかな御指導，御鞭撻を頂いた視覚情報メディア講座 横矢 直和教授に心より感謝申し上げます．また，本研究の遂行にあたり，有益な御助言，御鞭撻を頂いた像情報処理学講座 千原 國宏教授に厚く御礼申し上げます．そして，本研究の全過程を通して，終始温かい御指導をして頂いた視覚情報メディア講座 山澤 一誠助教授に深く感謝申し上げます．さらに，本研究の遂行において多大なる御助言，御鞭撻を頂いた視覚情報メディア講座 神原 誠之助手に深く御礼申し上げます．研究活動の全過程を通して多くの御助言，御指導賜りました視覚情報メディア講座 佐藤 智和助手に心より感謝致します．特に，佐藤 智和助手には本研究のテーマの設定から本論文の執筆，その他の発表論文の添削，発表練習に至るまで細やかな御指導，御鞭撻を頂きました．また，日頃より有益なご意見を頂き，御指導して頂いた視覚情報メディア講座 池田 聖特任助手に心より感謝致します．さらに，本研究の遂行にあたり，有益な御助言を頂き，またデータを提供して頂いた視覚情報メディア講座 浅井 俊弘氏に深く御礼申し上げます．そして，物心両面において常に温かい御支援を頂いた視覚情報メディア講座の諸氏に深く感謝致します．最後に，研究室での生活を支えて頂いた視覚情報メディア講座 守屋 智代女史に心より感謝申し上げます．

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] C. Tomasi and T. Kanade: “Shape and Motion from Image Streams under Orthography: a Factorization Method,” Int. Jour. of Computer Vision, Vol. 9, No. 2, pp. 137–154, 1992.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] C. Frueh and A. Zakhor: “Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views,” Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 562–569, 2003.
- [7] P. J. Besl and N. D. McKay: “A Method for Registration of 3-D Shapes,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, 1992.
- [8] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald and W. Stuetzle: “Surface Reconstruction from Unorganized Points,” Proc. SIGGRAPH, pp. 71–78, 1992.

- [9] 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.
- [10] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] H. Delingette: “General Object Reconstruction Based on Simplex Meshes,” *Int. Jour. of Computer Vision*, Vol. 32, No. 2, pp. 111–146, 1999.
- [17] K. Ikeuchi: “Determining Surface Orientation of Specular Surfaces by Using The Photometric Stereo Method,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and*

- Machine Intelligence, Vol. 3, No. 6, pp. 661–669, 1981.
- [18] J. Y. Zheng: “Acquiring 3-D Models from Sequences of Contours,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 16, No. 2, pp. 163–178, 1994.
- [19] W. Niem and J. Wingbermuehle: “Automatic Reconstruction of 3D Objects using a Mobile Monoscopic Camera,” Proc. IEEE Int. Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 173–180, 1997.
- [20] V. J. Milenkovic and T. Kanade: “Trinocular Vision Using Photometric and Edge Orientation Constraints,” Proc. DARPA Image Understanding Workshop, pp. 163–175, 1985.
- [21] N. Ayache and F. Lustman: “Fast and Reliable Passive Trinocular Stereo Vision,” Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, Vol. 1, pp. 422–426, 1987.
- [22] 松川, 神原, 山澤, 竹村, 横矢: “GPS と三軸角度センサを用いた多視点ステレオによる屋外環境構造の再構成”, 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU99-266, 2000.
- [23] H. N. Nair and C. V. Stewart: “Robust Focus Ranging,” Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 309–314, 1992.
- [24] S. K. Nayar and Y. Nakagawa: “Shape from Focus,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 16, No. 8, pp. 824–831, 1994.
- [25] T. Mukai and N. Ohnishi: “The Recovery of Object Shape and Camera Motion Using a Sensing System with a Video Camera and a Gyro Sensor,” Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, Vol. 1, pp. 411–417, 1999.
- [26] 上原, 塩崎, 全: “数値地図と動画像解析による都市空間モデリング”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2000) 講演論文集, Vol. 2, pp. 373–378, 2000.

- [27] 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.
- [28] W. E. Lorensen and H. E. Cline: “Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm,” Proc. SIGGRAPH, pp. 163–169, 1987.
- [29] M. Kass, A. Witkin and D. Terzopoulos: “Snakes: Active Contour Models,” Int. Jour. of Computer Vision, Vol. 1, No. 4, pp. 321–331, 1988.
- [30] T. McInerney and D. Terzopoulos: “Topologically Adaptable Snakes,” Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pp. 840–845, 1995.
- [31] L. D. Cohen and I. Cohen: “Finite-Element Methods for Active Contour Models and Balloons for 2-D and 3-D Images,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 11, pp. 1131–1147, 1993.
- [32] T. McInerney and D. Terzopoulos: “A Dynamic Finite Element Surface Model for Segmentation and Tracking in Multidimensional Medical Images with Application to Cardiac 4D Image Analysis,” Computerized Medical Imaging and Graphics, Vol. 19, No. 1, pp. 69–83, 1995.
- [33] J. Hu, A. Razdan, G. M. Nielson and G. E. Farin: “Improved Geometric Constraints on Deformable Surface Model for Volumetric Segmentation,” Proc. IEEE Geometric Modeling and Processing, pp. 237–245, 2004.
- [34] 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.
- [35] T. McInerney and D. Terzopoulos: “A Method for Registration of 3-D Shapes,” IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol. 18, No. 10, pp. 840–850, 1999.

- [36] 佐藤, 横矢: “画像特徴点の数え上げによるマルチベースラインステレオ法”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005) 講演論文集, pp. 189–196, 2005.
- [37] 池田, 佐藤, 横矢: “全方位型マルチカメラシステムを用いた高解像度な全天球パノラマ動画の生成とテレプレゼンスへの応用”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 4, pp. 443–450, 2003.