

博士論文

全方位レンジファインダと全方位カメラを用いた
データ取得支援による屋外環境の
三次元モデル化に関する研究

浅井 俊弘

2009年 3月 24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
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

浅井 俊弘

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)

山澤 一誠 准教授 (副指導教員)

全方位レンジファインダと全方位カメラを用いた データ取得支援による屋外環境の 三次元モデル化に関する研究*

浅井 俊弘

内容梗概

広域な都市環境三次元モデルは、都市計画、三次元地図、仮想旅行体験等の様々なアプリケーションへの応用が期待されている。そのため、従来からカメラやレーザレンジファインダを用いて実物体の三次元モデルを自動生成する手法の開発が盛んに行われている。特にレーザレンジファインダは物体の形状を高速かつ高精度に計測できるため広域な都市環境のモデル化に多く用いられている。しかし、レーザレンジファインダが形状を計測できるのはレーザが照射された部分に限定されるため、広域な環境全体のモデルを生成するには、多地点で取得したレンジデータを統合する必要がある。さらに、物体の色情報の取得にはカメラ等を用いる必要があるため、レーザレンジファインダを用いた広域都市環境の三次元モデル化には、1) 多地点で取得したレンジデータの高精度な位置合せ、2) 計測回数の削減を目的とした効率的な計測位置の決定、3) レンジデータとテクスチャの正確な統合、が課題となる。本研究は、効率的な計測のためのデータの取得支援システムを用いて取得した多地点の全方位レンジデータと全方位画像の統合による屋外環境の高精度な三次元モデル化を目的とする。まず、1章で実環境の三次元モデル化に関する従来手法について概観し、本研究の位置付けと方針を明確にする。2章では、本研究で用いるデータ取得のためのセンサシステムについて

* 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 博士論文, NAIST-IS-DD0461002, 2009年3月24日.

述べる．3章では，多地点で取得した全方位レンジデータを平面領域の対応関係に基づくICP法により位置合せする手法を提案し，4章でセンサシステムの操作者に全方位レンジデータの取得効率の良い場所を提示するデータ取得支援システムを提案する．5章では，全方位レンジデータと全方位画像との統合によるテクスチャ付き三次元モデルの生成手法について述べ，屋外環境の三次元モデル化結果を示す．最後に6章で本研究を総括すると共に，今後の展望について述べる．

キーワード

三次元モデル生成, 距離画像処理, 屋外環境, データ取得支援, 全方位レンジファインダ

3D Modeling of Outdoor Environments with Data Acquisition Support by Using Omnidirectional Range and Color Images*

Toshihiro ASAI

Abstract

3D model of urban environment can be used for a number of applications such as a city planning, a 3D map and a virtual tour. Automatic 3D modeling of a real scene with rangefinders or cameras has been widely investigated. A laser rangefinder has attracted much attention for 3D modeling of outdoor environments since it can efficiently acquire the shape of the object with high accuracy. However, the laser rangefinder can measure only the shapes of objects where laser beams are irradiated. Integration of range data acquired at multiple positions is thus required to generate the whole model of target area in urban environments. Moreover, cameras are required to acquire color information of objects. In the 3D modeling of urban environments using a laser rangefinder, there are three problems; 1) registration of multiple range data, 2) view planning for decreasing the number of data acquisition, and 3) accurate registration of range data and color textures.

This thesis proposes a 3D modeling system for urban environments by integrating omnidirectional range and color images which are acquired by using a support system for efficient data acquisition. Chapter 1 gives the survey of this study in the area of 3D modeling. Chapter 2 explains the sensor system used

* Doctoral Dissertation, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD0461002, March 24, 2009.

for data acquisition in the study. Chapter 3 describes the registration of multiple omnidirectional range data based on an extended ICP algorithm. Chapter 4 describes the data acquisition support system which provides a sensor operator with efficient acquisition positions. In Chapter 5, the 3D modeling method by integrating omnidirectional range and color images is proposed. Finally, Chapter 6 summarizes the present work.

Keywords:

3D modeling, range image processing, urban environment, data acquisition support, omnidirectional laser rangefinder

目次

1. 序論	1
1.1 屋外環境の三次元モデル化に関する従来研究	1
1.1.1 レンジデータの位置合せ手法	3
1.1.2 レンジデータの取得のための操作者支援	4
1.2 本研究の位置づけと方針	7
2. センサシステム	9
2.1 センサシステムの概要	9
2.1.1 全方位レンジファインダ	10
2.1.2 全方位カメラ	13
2.1.3 位置・姿勢センサ	13
2.2 センサ座標系の統合	16
3. 拡張 ICP 法による多地点レンジデータの位置合せ	19
3.1 序言	19
3.2 平面領域に基づくレンジデータの同時位置合せ	19
3.2.1 レンジデータからの平面検出	21
3.2.2 対応面の探索	24
3.2.3 レンジデータの変換行列の推定	27
3.3 評価実験	29
3.3.1 シミュレーション環境による精度評価実験	29
3.3.2 実環境による精度評価実験	33
3.4 結言	37
4. 推奨度マップを用いたレンジデータ取得支援システム	39
4.1 序言	39
4.2 屋外環境におけるレンジデータ取得支援システム	40
4.2.1 システムの設計方針	40
4.2.2 提案システムの処理の概要	42

4.2.3	モデル化の対象範囲の設定	43
4.2.4	取得したレンジデータの位置合せ	44
4.2.5	推奨度算出に用いるボクセルモデル	44
4.2.6	推奨度マップの更新	47
4.2.7	操作者への推奨度マップの提示	48
4.3	提案システムによるデータ取得実験	49
4.3.1	シミュレーションによる取得効率の評価	51
4.3.2	実環境におけるデータ取得支援	53
4.4	結言	59
5.	多地点全方位データの統合による三次元モデル生成	60
5.1	序言	60
5.2	サーフェイスモデルの生成	60
5.2.1	レンジデータのポリゴン化	60
5.2.2	重複部分のポリゴンの結合	61
5.3	テクスチャマッピング	61
5.4	モデル生成実験	68
5.5	ウォークスルーシステムの試作	72
5.6	結言	76
6.	結論	77
6.1	まとめと考察	77
6.2	現状と今後の課題	79
	謝辞	82
	参考文献	83

目 次

1	佐藤らの手法 [SKYT02] による三次元モデル	2
2	オクルージョンによるモデル欠損の例	5
3	データ取得に用いる車載センサシステム	9
4	全方位レンジファインダ LMS-Z360	10
5	全方位レンジデータ	11
6	点群の鳥瞰図	12
7	全方位マルチカメラシステム Ladybug	13
8	池田らの手法 [池田 03] により生成された全方位画像	14
9	センサ座標系の関係	17
10	ジャイロスコープの座標系から位置が既知のマーカ	18
11	レンジデータからの平面領域の検出	23
12	Oishi らの手法の対応点探索	24
13	対応面の判定	25
14	インデックス画像	26
15	対応面探索のビューボリュームの設定	27
16	シミュレーション環境	30
17	シミュレーションデータにおける最適化前後の位置合せ結果	32
18	構内の地図とデータ取得位置	34
19	実環境データにおける最適化前と後の位置合せ結果	35
20	二次元 CAD を位置合せされたレンジデータに重畳表示	36
21	提案システムの処理の流れ	42
22	モデル化の対象範囲の指定	43
23	GPU を用いたボクセルモデルのレンダリング	49
24	操作者に提示される推奨度マップの例	50
25	支援システムの有無による計測地点の違い	51
26	ボクセルの計測密度の和	52
27	データの取得位置と経路 (本学構内)	54
28	推奨度マップの更新の様子 (本学構内)	55

29	データ取得の位置と経路 (北大和一丁目付近)	56
30	推奨度マップの更新の様子 (北大和一丁目付近)	57
31	対象範囲全域の計測結果 (北大和一丁目付近)	58
32	ポリゴンの頂点の結合	61
33	Mesh Zippering[TL94] による重複部分の結合	62
34	オクルージョンの判定	63
35	解像度を考慮したブレンディングによるテクスチャの生成	64
36	カメラ座標系 CAM_i の原点を中心とした球への三角ポリゴンの投影	67
37	テクスチャ画像と色を取得する点	67
38	生成された三次元モデル	69
38	生成された三次元モデル (つづき)	70
38	生成された三次元モデル (つづき)	71
39	ウォークスルーシステムの概要	73
40	球面ディスプレイへの投影画像の作成	74
41	ウォークスルーシステムの外観	75

表 目 次

1	LMS-Z360 の性能	11
2	RTK-GPS の性能	14
3	ジャイロスコープの性能	14
4	レンジファインダのパラメータ	29
5	レンジファインダの位置・姿勢誤差	30
6	従来手法との比較による精度評価	31
7	ウォークスルーシステムの機器構成	72

1. 序論

実環境の三次元形状や色情報を計算機内に取り込み三次元的に仮想化する技術は、仮想化現実技術 (virtualized reality) と呼ばれる [金出 97]。近年、計算機の高性能化、記憶容量の大容量化により広域な実環境を仮想化する要求が高まっている。特に、都市環境のような広域な屋外環境の三次元モデルは、都市計画、三次元地図、仮想旅行体験技術などの様々な分野への応用が期待できる [新谷 00]。しかし現時点では、実用に耐える品質を持つ三次元モデルを生成するには、モデリングソフトなどを用いて人手により作成する必要がある、屋外環境のように広域な三次元モデルを作成するには膨大な人的コストが必要となる。

従来から、カメラやレンジファインダ等を用いて、屋外環境の三次元モデルを自動生成する手法が盛んに研究されている。広域な環境の三次元モデル化はいかに効率よくデータを収集し、そしていかに精度良くモデルを生成するかということが課題となる。

本研究は、全方位レーザレンジファインダと全方位カメラを用いて、屋外環境を精度良く三次元モデル化することを目的とする。本章では、まず、実物体の三次元モデル化技術について概観し、広域な屋外環境を環境を三次元モデル化するために、レーザレンジファインダ(以下、レンジファインダ)が有効であることを述べる。そして、都市環境のような広域な屋外環境をモデル化する場合の技術的課題を取り上げ、本研究の位置づけと方針を明らかにする。

1.1 屋外環境の三次元モデル化に関する従来研究

近年では、計算機の高性能化、大容量化により Google earth [Goo08a] や Google マップストリートビュー [Goo08b] といった技術に代表されるように、遠隔地の環境を計算機により仮想的に体験したいという要求が近年急激に高まっている。

コンピュータビジョンの分野において、複数の静止画や動画像からステレオ法や因子分解法などを利用して、モデルを復元する手法が多く研究されている [SKYT02, 納富 98, TK92, PKV⁺00, OK93]。図 1 は佐藤らの手法 [SKYT02] によって、複数の動画像から生成された三次元モデルである。これらの手法では、

カメラ以外の特別な機器を必要としないという利点がある反面，復元されたモデルの精度や信頼性には課題が残されているため，広範囲の屋外環境を安定して三次元モデル化することは現時点では困難である．

一方，物体の三次元形状を広範囲かつ高精度に計測することが可能なレンジファインダを用いた屋外環境モデルの自動生成手法が注目されている [EBR98, FZ04, 中川 04, ZS03]．レンジファインダは，正確に物体までの距離を計測できるが，測定可能な部分はレーザの届く範囲に限定され，一回の測定で対象物体の全表面を計測することは困難である．対象の三次元モデルを得るには，異なる方向からレンジデータを取得し，それらを統合する必要があるため，レンジデータの計測の位置関係を推定することが課題となる．計測したレンジデータの幾何学的位置関係を推定することを位置合せと呼ぶ．レンジファインダは，実世界の物体と同じスケールで形状を計測できるため，レンジデータの位置合せとは，レンジデータ間の三次元剛体変換パラメータを求めることである．従来，環境の複数地点においてレンジデータを取得し，それらを位置合せして統合することで屋外環境をモデル化する手法が多く提案されている [ZS00, ATS⁺03, SPKA02, 清水 04]．



図 1 佐藤らの手法 [SKYT02] による三次元モデル

1.1.1 レンジデータの位置合せ手法

レンジデータの位置合せは、ポジショニングセンサやマーカ等を利用し、計測時のレンジファインダの位置・姿勢を求めることで可能であるが、屋外環境のような広域環境においてそれらを用いて十分な精度を得ることは困難である。対象を剛体である場合、レンジデータ間の対応点が既知であれば、対応点間の距離の和の最小化問題として定式化でき、その問題を解くことで、計測の位置関係を推定することが可能である [SA91, Horn87]。しかし、一般にレンジデータ間の対応点は既知ではないため、複数のレンジデータの位置合せには ICP アルゴリズム [BM92] がよく用いられている。この手法は、取得したデータが初めから大まかに位置合せされていることを前提とし、ユークリッド距離が最も小さくなる点を対応点として、その対応点間の距離の和を誤差とし、誤差が最小になるようにレンジデータ間の回転・平行移動成分を推定する。これら、点の対応付けと、対応付けられた点の誤差の最小化を交互に繰り返すことで対応付けと位置合せを同時に解決する。しかし、点と点の対応では、計測地点の違いから、同じ部分を計測した場合でも計測点の密度が大きく異なる場合、1つの点に複数の点に対応付けられる場合がある。また、必ずしも同一の三次元点が異なるレンジデータ間で計測されているわけではないため、局所解に陥りやすくなる [Pul99]。

西野ら [西野 03] は、レーザで同じ材質を計測した場合、そのレーザ反射強度はレーザの照射方向に依存しないことに着目し、対応点同士のレーザ反射強度が近い場合は対応付けの信頼度が高いものとし、対応点間の距離にレーザ反射強度の差を重み付けすることで位置合せの精度を高めている。点と点の対応は離散的な対応であり、物体の表面形状に関する情報が含まれていないため、大石ら [OSN⁺03] は、計測点へのレーザベクトルと他のレンジデータから構成された面との交点を対応点とすることで形状を考慮した位置合せ手法を提案している。

しかし、屋外環境には樹木など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、ICP アルゴリズムではそのような部分で対応関係の誤りが起こり、局所解に陥りやすくなる。また、一般に ICP アルゴリズムは対応点探索の計算量が大きくなるため、広域な屋外環境での ICP アルゴリズムを用いないレンジデータの位置合せ手法として、Zhao ら [ZS00] は全方位レンジデー

タを鉛直方向に投影した二次元画像 (Z-image) を生成することで、建物の壁面を示す直線を検出し、その直線をマッチングすることで位置合せを行った。この手法は、環境中に鉛直な壁面が必要であり、位置合せの精度が Z-image の解像度に依存するため、精度を高くかつ広範囲に適用すると必要なメモリ量が大きくなる。清水ら [清水 04] は地上で取得した範囲が狭く、計測点が密なレンジデータから抽出した建物の壁面を、航空機から取得した広範囲のレンジデータから抽出した建物の壁面にマッチングさせることで位置合せを行っている。航空機からのレンジデータの計測点密度は疎であるため、抽出した建物の精度は、地上から取得したデータから抽出した建物の精度よりも低くなる。また、地上から取得したレンジデータ間ではマッチングを行っていないため、地上から取得したレンジデータ間では位置ずれが発生する可能性がある。

増田 [増田 03] は、符号付距離場を利用してレンジデータの位置合せを行っている。符号付距離場はボクセル空間を定義し、距離場を計算する必要があるため、精度良く位置合せするためにはボクセル空間の解像度を高くする必要がある。そのため、広域な屋外環境にこの手法を適用する場合、膨大なメモリ量が必要となり一括で位置合せすることは困難になる。

符号付距離場のデータ量を削減するために、run-length encoding による圧縮 [CL96] や、Octree を用いる手法 [WSI98] などが提案されているが、樹木などの形状が複雑な部分では、計測位置によって計算される符号付距離が異なるため、精度良く位置合せを行うには、これらの物体を除去する必要がある。

1.1.2 レンジデータの取得のための操作者支援

一般にレンジファインダが測定可能な部分はレーザーが到達する範囲に限定されるため、一度の計測で対象物体の全てを計測することは困難である。そのため、対象全体の形状を得るには、異なる方向からレンジデータを取得し、それらを統合する必要がある [Pul99, OSN+03]。このとき、オクルージョンなどによりレーザーが照射されなかった未計測の部分は、図 2 の白い部分のように欠損となってしまう。このようなセンサによる未計測部分を、物体形状の尤もらしさを表すエネルギー関数 [河合 08] や符号付距離場 [板野 07] などを用いて補間する手法が提案

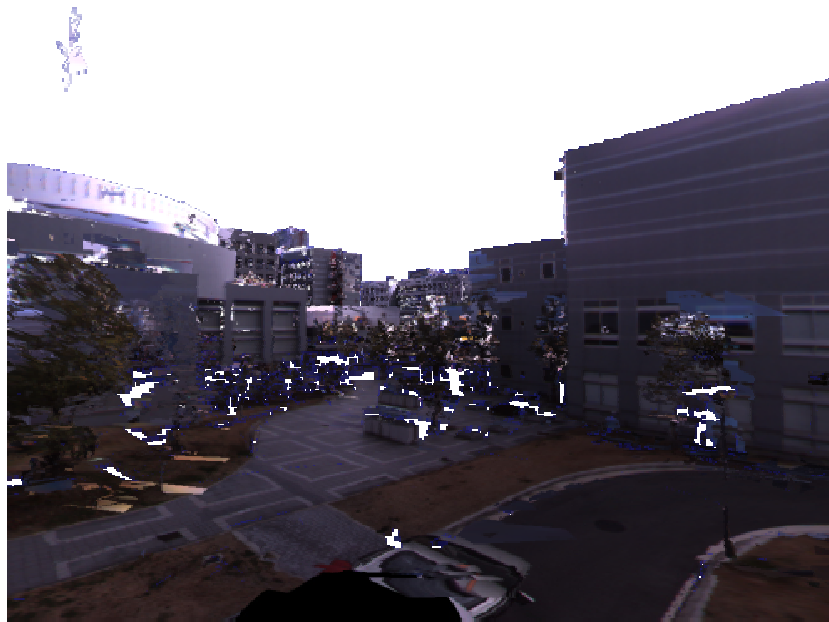


図 2 オクルージョンによるモデル欠損の例

されている。しかし、これらの手法は計測部分の形状に基づいて未計測部分の形状を補間するため、未計測部分が大きい場合、違和感なく形状を補間することは困難である。

従来から、物体の計測において未計測部分を効率よく削減するために、最適なレンジデータの取得位置を求めるビュープランニング手法が提案されている [Con85, MF98, MB93, Pit99]。一般にビュープランニングとは、モデル化の対象領域に対し、取得済みのレンジデータから、各地点で計測した場合に予測される未計測領域の削減量を計算し、削減量が最も多い地点を次計測地点 (NBV:Next Best View) として求める手法である [SRR03]。未計測部分は、レンジデータを取得する度に变化するため、变化する未計測部分の削減量を精度良く求めるには、取得したレンジデータが精度良く位置合せされている必要がある。Scott らが [SRR03] で述べている手法は主に屋内に存在するような物体を対象としており、センサやマーカ等を利用したレンジデータの高精度な位置合せの実現が前提となっている。また、屋外環境を対象とした手法として、Allen ら [ARS98] は、未計測部分の形

状をその周辺の既知の形状から推定し、最も多く未計測部分を削減できる場所を算出する手法を提案している。この手法では、未計測部分の形状を精度良く推定するために、対象範囲がほぼ計測済みかつ位置合せ済みであることが前提となる。そのためこの手法を、未計測部分の形状を推定するための、レンジデータが取得されていない対象に適用することは困難である。屋外環境のような広域な環境では、レンジデータを精度良く位置合せするためにセンサやマーカ等を利用することが困難となるため、新たに取得したレンジデータと取得済みレンジデータを位置合せする必要がある。

レンジデータの位置合せ手法として一般にICPアルゴリズム [BM92] が用いられているが、レンジデータ間の重複部分が少ない場合、正確な位置合せが行えない場合がある。ICPアルゴリズムによるレンジデータの位置合せを利用した手法として Surmann ら [SNH03] は、ロボットの自律移動により環境の三次元地図の自動構築を行っている。この手法は、取得したレンジデータをICPアルゴリズムにより位置合せすることで、レンジデータの位置合せとNBVの計算を行っているが、NBVの計算時に、次計測地点で取得されたレンジデータがICPアルゴリズムに必要な重複領域を取得可能かどうかは考慮されていない。

1.2 本研究の位置づけと方針

広域な環境を精度良く復元するためには、レーザレンジファインダのように能動的に形状を計測するセンサを用いる手法が適していると言える。しかし、屋外環境をレンジデータの統合によりモデル化する場合以下の3つの課題が挙げられる。

1) 多地点で取得したレンジデータの高精度な位置合せ

都市環境には、歩行者などの移動物体や、樹木等の複雑な形状をした物体が多数存在する。このような物体がレンジデータとして計測された場合、位置合せの際のノイズとなり、精度低下を招く。

2) 効率的なレンジデータ取得のためのユーザ支援

位置合せ手法は、レンジデータ間の重複部分のマッチングによりレンジデータ間の剛体変換パラメータを求める。しかし、未計測部分を少ない計測回数で削減しようとデータの取得効率を重視した場合、位置合せのために必要なレンジデータの重複部分が小さくなるため位置合せの精度が得られなくなる。しかし、レンジデータの取得を行う際に、取得効率や位置合せのための重複部分をレンジファインダの操作者が判定することは、大きな手間となる。

3) レンジデータとテクスチャの統合による三次元モデルの生成

位置合せされたレンジデータの重複部分の形状の統合を行い、日照条件が異なる状況で撮影された複数の画像から見た目の違和感を軽減するように三次元モデルのテクスチャを生成する必要がある。

本論文では、上記問題を解決し、多地点で取得した全方位レンジデータと全方位画像から屋外環境の三次元モデル化を行うことを目的とし、

- 1) 多地点で取得したレンジデータの平面領域を利用した高精度な位置合せ手法
- 2) 位置合せのための重複部分を考慮し、かつデータの取得効率が大きくなる計測位置をセンサの操作者に示す、データ取得支援システム

3) 複数の全方位レンジデータと全方位画像を統合した三次元モデルの生成手法を提案する。

本論文の構成は以下の通りである。2章では、本研究で用いるデータ取得のためのセンサシステムについて述べる。3章では、平面領域に基づく多地点全方位レンジデータの位置合せ手法について述べる。また、シミュレーションデータによる定量的な評価実験を行い、本手法の精度について考察する。4章では、レンジファインダの操作者に効率の良いデータ取得位置を提示する、レンジデータの取得支援システムについて述べる。実験ではシミュレーション環境において提案システムの特徴と有用性について述べる。5章では、4章における支援システムを用いて取得したレンジデータを3章における手法により位置合せし、同じ位置で取得した全方位画像との統合による、三次元モデル化手法について述べる。実験では、実環境における三次元モデルの生成結果を示す。そして、6章で本論文のまとめと、今後の展望について述べる。

2. センサシステム

本研究は、屋外環境の高精度な三次元モデルを生成するために、レンジファインダとカメラを用いて、形状と色の情報を取得する。また、それぞれ全方位のデータが取得可能なセンサを用いることでデータの取得効率を向上させる。以下、本研究で用いるセンサシステムと、各センサの座標系の統合方法について述べる。

2.1 センサシステムの概要

本研究では、レンジデータの取得に全方位レンジファインダ、テクスチャの取得に全方位カメラ、レンジファインダとカメラの位置・姿勢情報の取得にRTK-GPSとジャイロスコープを使用する。図3にセンサシステムの外観を示す。各センサの位置関係は固定し、本章で述べる手法で座標系の統合を事前に行っておく。レンジファインダとカメラはそれぞれの画像の取得位置の差が小さくなるように近づけて設置する。

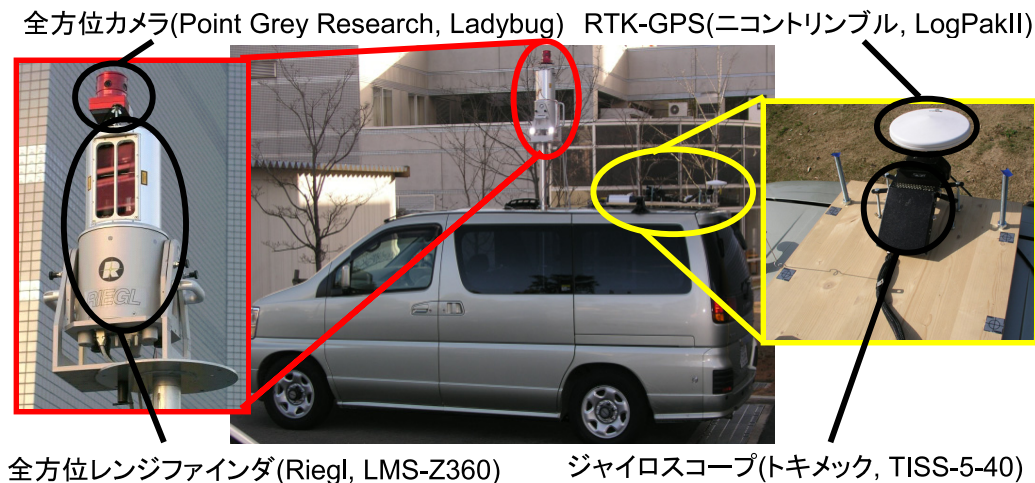


図3 データ取得に用いる車載センサシステム

2.1.1 全方位レンジファインダ

全方位レンジファインダは、図4に示す Riegl 社製 LMS-Z360 を利用した。本センサは、レーザを照射し物体に反射してセンサまで戻ってくるまでの飛行時間 (Time of Flight) を測定することで、物体までの距離を計測する。LMS-Z360 の主な性能を表1に示す。本センサは計測の際、水平・垂直方向共に計測範囲・角度分解能が変更可能である。図5は本センサで計測したレンジデータを示しており、センサからの距離に応じた色付けを行って表示している。図5の距離画像を三次元的に可視化したものを図6に示す。本センサは、機器から外側に放射状にレーザを照射することで物体までの距離を計測するため、計測点の密度はセンサから近い場所は密に、遠い場合は疎になる。



図4 全方位レンジファインダ LMS-Z360

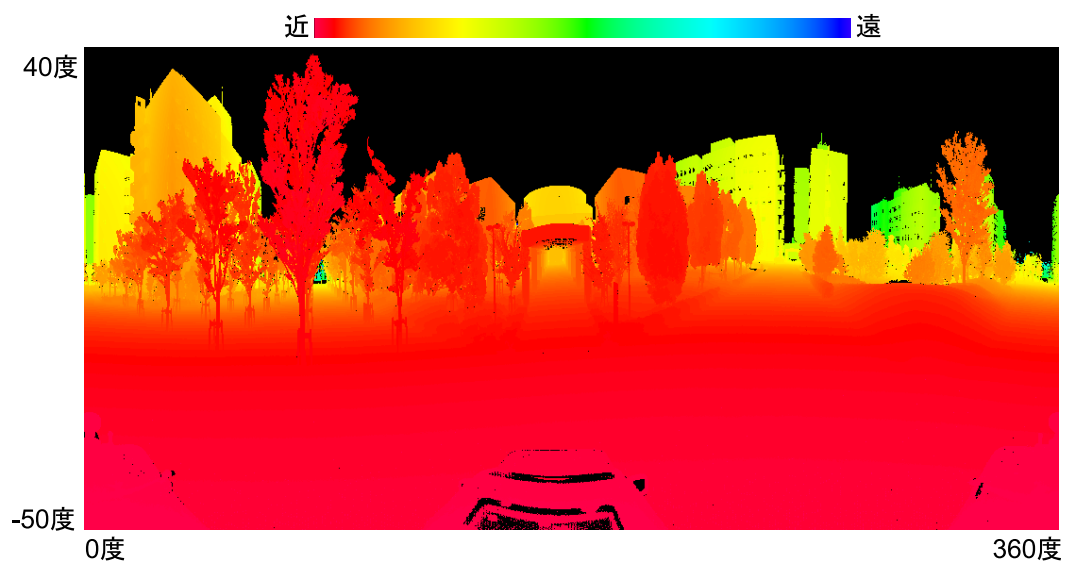


図 5 全方位レンジデータ

表 1 LMS-Z360 の性能

測定角範囲	horizontal: 360° vertical: -50°~40°
測定距離範囲	1m~200m
測定精度	$\sigma = 12\text{mm}$
最小角度ステップ幅	0.01°
角度読み取り分解能	水平: 0.0025° 垂直: 0.002°

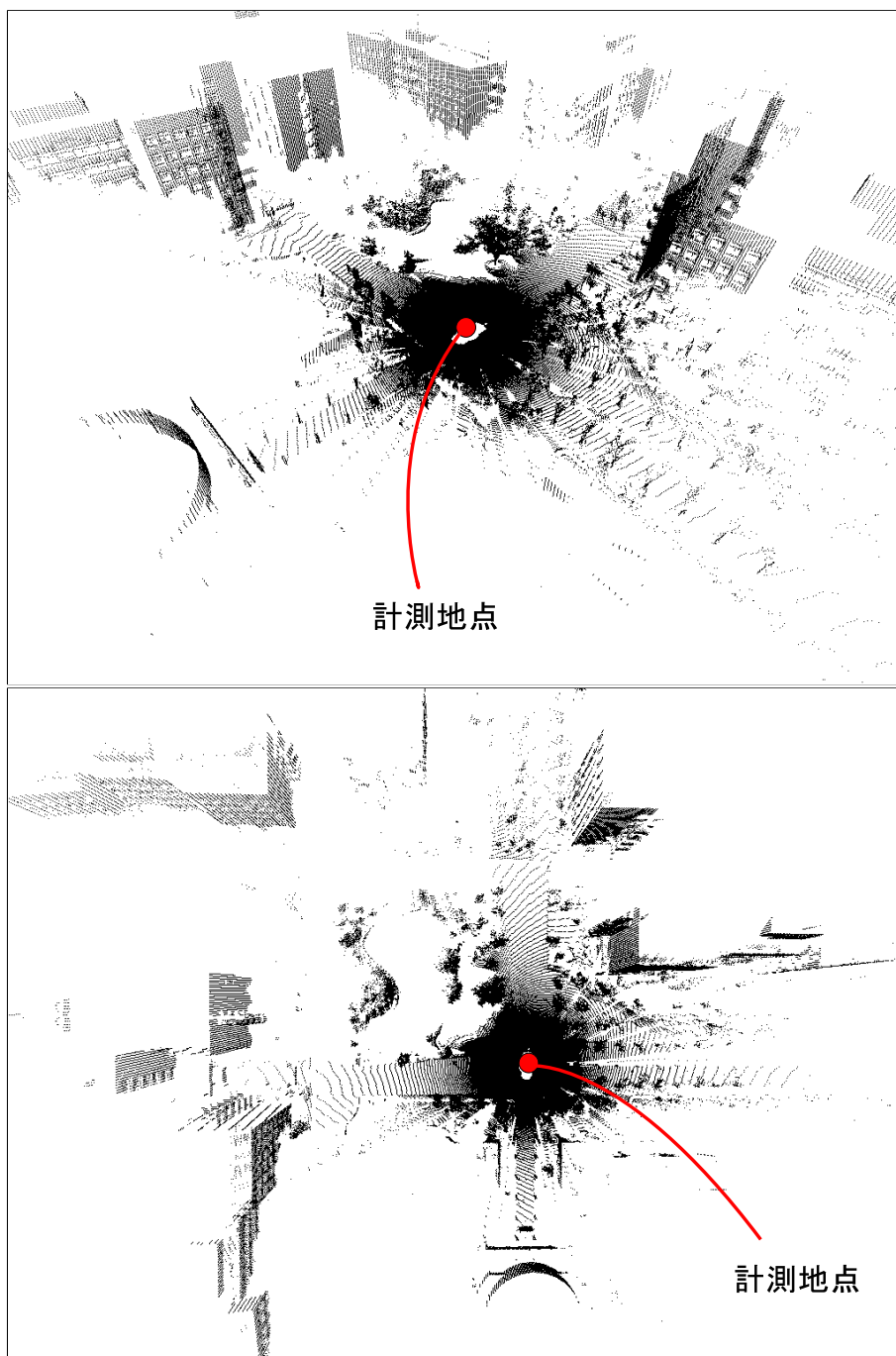


図 6 点群の鳥瞰図

2.1.2 全方位カメラ

全方位カメラは図 7(a) に示す PointGreyResearch 社製 Ladybug を利用した。Ladybug はマルチカメラシステムであり水平方向に 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横 768× 縦 1024 画素である。図 7(b) に各カメラの位置・姿勢の関係を示す。なお，池田らの手法 [池田 03] によって事前に Ladybug の幾何学的・光学的キャリブレーションを行った。同手法により生成した全方位カラー画像を円筒極座標投影によりパノラマ展開した画像を図 8 に示す。

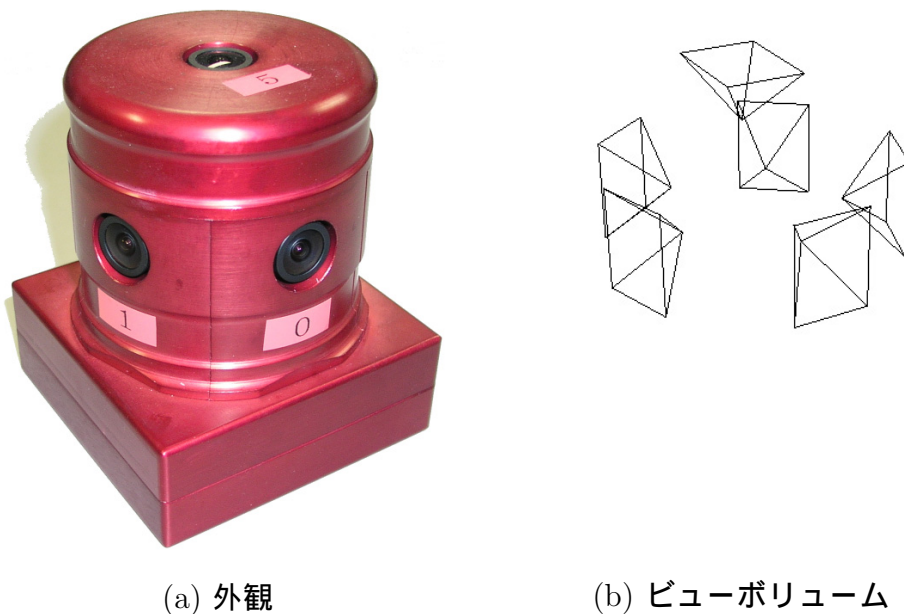


図 7 全方位マルチカメラシステム Ladybug

2.1.3 位置・姿勢センサ

レンジファインダと全方位カメラのセンサ位置を計測するために RTK-GPS，姿勢を計測するためにジャイロ스코ープを利用する。

RTK-GPS はニコン・トリンプル社製 LogPakII を，ジャイロ스코ープはトキメック社製 TISS-5-40 を利用した。RTK-GPS の位置精度を表 2 に示す。センサシ



図 8 池田らの手法 [池田 03] により生成された全方位画像

表 2 RTK-GPS の性能

緯度	±3.0cm
経度	±3.0cm
高度	±4.0cm

表 3 ジャイロスコープの性能

方位角	±2°
ロール角	±0.5°
ピッチ角	±0.5°

ステムの位置はレンジデータ取得中に得られた RTK-GPS の位置情報の平均値を利用する。RTK-GPS とジャイロスコープは一体型のハイブリッドセンサとなっており、このセンサは移動することで、RTK-GPS の出力値を用いてジャイロスコープの蓄積誤差を補正することができる [神原 05]。そのため、長時間使用しても誤差は一定以下に抑えられる。しかし、レンジデータはセンサシステムを静止させて取得するため、ジャイロスコープの蓄積誤差は RTK-GPS の位置情報から補正されない。そのため、姿勢情報はレンジデータ取得開始時に取得したジャイロスコープの値を利用する。RTK-GPS と連動したジャイロスコープの性能を表 3 に示す。また、ジャイロスコープ座標系は自動的に GPS 座標系へと統合される。

RTK-GPS は衛星の捕捉状況や、建造物等による電波の遮蔽や反射により性能通りの精度が得られない場合があり、レンジファインダはセンサから放射状にレーザを照射しているため、ジャイロスコープによる姿勢の誤差はレンジファインダから離れた部分の位置ずれに大きく影響する。従って、このセンサによって得られた位置・姿勢は位置合せの際の初期値として用いる。

2.2 センサ座標系の統合

本論文では，レンジデータを GPS 座標系へと統合する．従って各センサの座標系も GPS 座標系へと統合しておく．以下，センサ座標系の統合方法について述べる．それぞれの座標系間の変換行列を M で表す．座標系間の 3 軸に対する回転角を $\mathbf{R} = (r_1, r_2, r_3)$ ，平行移動成分を $\mathbf{T} = (t_1, t_2, t_3)^T$ としたとき M は以下のように表される．

$$M = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & t_1 \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & t_2 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{pmatrix} c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3 & s_1 c_2 & -c_1 s_3 + s_1 s_2 s_3 & t_1 \\ -s_1 c_3 + c_1 s_2 s_3 & c_1 c_2 & s_1 s_3 + c_1 s_2 s_3 & t_2 \\ c_2 s_3 & -s_2 & c_2 c_3 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし，

$$\begin{aligned} s_1 &= \sin r_1, & s_2 &= \sin r_2, & s_3 &= \sin r_3 \\ c_1 &= \cos r_1, & c_2 &= \cos r_2, & c_3 &= \cos r_3 \end{aligned} \quad (4)$$

とする．

図 9 の M_a ， M_b ， M_c はそれぞれの座標系間の変換行列を示しており，次の方法で推定する．

(a) カメラ座標系からレンジファインダ座標系への変換行列 M_a

レンジデータの 3 次元点と画像上の 2 次元点の対応を与え，池田ら [池田 03] の手法により推定する．

(b) レンジファインダ座標系からジャイロスコープ座標系への変換行列 M_b

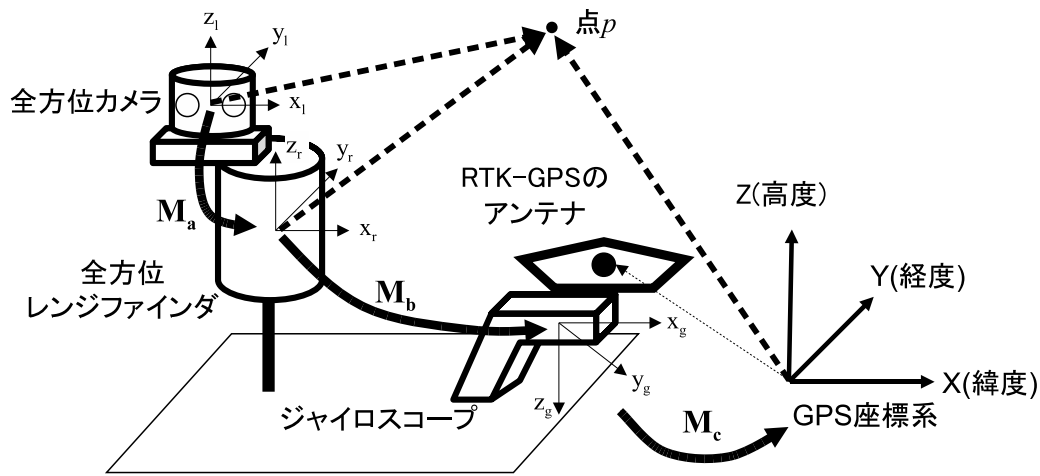


図 9 センサ座標系の関係

図 10 に示すように，ジャイロスコープ座標系で位置が既知であるマーカをレンジファインダで測定し，レンジファインダ座標系でのマーカの三次元位置から， M_b を推定する．ここで，レンジファインダでのマーカの判定を容易にするためにレーザの反射率が高い再帰性反射材を用いた．

(c) ジャイロスコープ座標系から GPS 座標系への変換行列 M_c

RTK-GPS とジャイロスコープは連動しており，ジャイロスコープ座標系から GPS 座標系へは自動的に変換されるため， M_c は既知とする．また，RTK-GPS のアンテナとジャイロスコープを近づけて設置することで，RTK-GPS の計測点とジャイロスコープ座標系の原点を同じと見なす．

レンジファインダ座標系における計測点 p の三次元座標を (x_r, y_r, z_r) ，カメラ座標系における三次元座標を (x_l, y_l, z_l) ，GPS 座標系における三次元座標を (X, Y, Z) とした場合，GPS 座標系への変換は以下のように記述される．

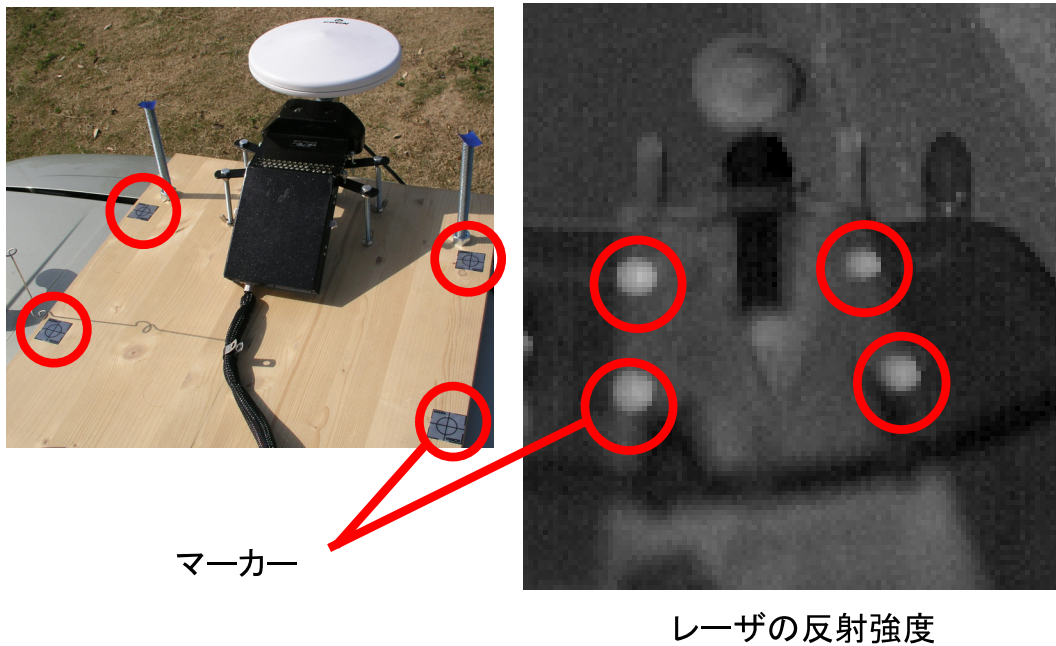


図 10 ジャイロスコープの座標系から位置が既知のマーカー

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = M_c M_b \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{pmatrix} = M_c M_b M_a \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

変換行列 M_a , M_b , M_c を推定することで全てのセンサの座標系を GPS 座標系へと統合することができる。

3. 拡張ICP法による多地点レンジデータの位置合せ

3.1 序言

レーザレンジファインダは、一般に一度で対象物体の全表面の形状を計測することは困難なため、対象を複数の方向から計測する必要がある。それぞれのレンジデータの計測の位置関係は、ポジショニングセンサやマーカ等を用いて求めることが可能であるが、屋外環境のような広域環境においてそれらを用いて十分な精度を得ることは困難である。そのため、レンジデータ間の位置・姿勢の関係を推定する手法が、従来から提案されている [西野 03, OSN+03, ZS00, 清水 04, 増田 03]。しかし、従来手法では、樹木等のレンジファインダで安定して計測することが困難な、形状の複雑な物体が多く存在する屋外環境において、高精度に位置合せをすることは困難であった。

本章では、従来提案されているICPアルゴリズムに、屋外環境に多く存在する路面や建物の壁面などの平面領域を利用したレンジデータの位置合せ手法を提案する。平面部分のみを利用することで、位置合せの計算量を削減し、樹木などのレンジファインダでは形状が安定して計測することが困難な物体の影響を排除する。提案手法ではまず、レンジデータから平面領域を検出し、レンジデータ間で対応する平面の探索を行う。そして、対応する平面のパラメータの誤差の和が最小になるようにレンジデータの回転・平行移動成分を推定する。

位置合せを取得したレンジデータ全体で最適化処理により行うことで、累積的な誤差が発生しないようにする。このとき、RTK-GPSとジャイロ스코プを組み合わせたハイブリッドセンサにより取得したセンサシステムの位置・姿勢を、最適化の初期値として用いる。

3.2 平面領域に基づくレンジデータの同時位置合せ

レンジデータの回転・平行移動成分は、RTK-GPSとジャイロ스코プによって取得するが、測定誤差を含むため、位置合せの初期値として利用し、同時位置合せによる最適推定を行なう。多地点レンジデータの同時位置合せは、各レンジ

データの平面領域を用いて行なう。レンジデータ間で対応する平面を探索し、対応する平面のパラメータを一致させることにより、各レンジデータの回転・平行移動成分を推定する。

そのために、まずレンジデータから平面領域の検出を行なう。レンジデータのある計測点の法線情報はその周辺の計測点から推定する二次的な情報になるため、木のような複雑な形状をした物体は、同じ部分でも計測した方向や解像度によって推定される法線が大きく異なる可能性が高い。そのため、計測した方向や解像度が異なっても、推定される法線が大きく変化しない道路や壁などの平面部分のみを用いる。ある程度の面積を持った平面領域を道路や壁面の平面領域とし、それらを用いて位置合せを行なう。ある平面に対応する平面を他のレンジデータから探索し、対応する平面の法線ベクトルの成す角、及び平面部分の計測点から対応する平面への距離が最小になるように回転・平行移動成分を推定する。RTK-GPSとジャイロスコープによって取得された回転・平行移動成分は、位置合せの初期値として利用する。以下に処理手順を示す。

1. レンジデータの点群に局所平面を当てはめ平面部分を検出。
 2. レンジデータを GPS 座標系へ座標変換。
 3. GPS 座標系における平面の対応関係を全レンジデータ間で探索。
 4. 任意のレンジデータ1つの回転・平行移動成分を固定し、その座標系に対してその他のレンジデータの回転・平行移動成分を対応する平面のパラメータから推定し変換行列を更新。
 5. 変換行列の推定結果が収束していれば終了。収束していなければ2.に戻る。
 6. レンジデータ間の相対的な回転・平行移動成分を固定したまま、RTK-GPSにより取得した平行移動成分と推定された平行移動成分の差の全レンジデータでの和が最小になるようにGPS座標系への変換行列を推定する。
2. の座標変換の初期値は、RTK-GPSとジャイロスコープで計測した回転・平行移動を用い、以降は4.で推定された変換行列を用いる。以下、1. 平面検出、3. 対応面の探索、4. 変換行列の推定のそれぞれの処理について詳述する。

3.2.1 レンジデータからの平面検出

平面検出はレンジデータに局所的平面を当てはめることにより行う．点群の平面のパラメータをくりこみ法 [金谷 94] を用いて推定する．当てはめに用いた点と推定された平面との距離を求め，全ての距離が閾値以下であれば点群は平面部分であると判断し，推定された平面の法線をその点群での法線とする．このとき，平面の面積が閾値以上になった部分のみを位置合せに利用する．

くりこみ法による点群からの平面のパラメータ推定

N 個の点群を $\mathbf{P}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ ， \mathbf{P}_i の単位ベクトル $\mathbf{n}_i = \frac{\mathbf{P}_i}{|\mathbf{P}_i|}$ ($i:1 \sim N$) として，まず次の二つの行列 \mathbf{G} と \mathbf{H} を次のように定義する．

$$\mathbf{G} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \begin{pmatrix} \mathbf{P}_i \mathbf{P}_i^T & \mathbf{P}_i \\ \mathbf{P}_i^T & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \begin{pmatrix} \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

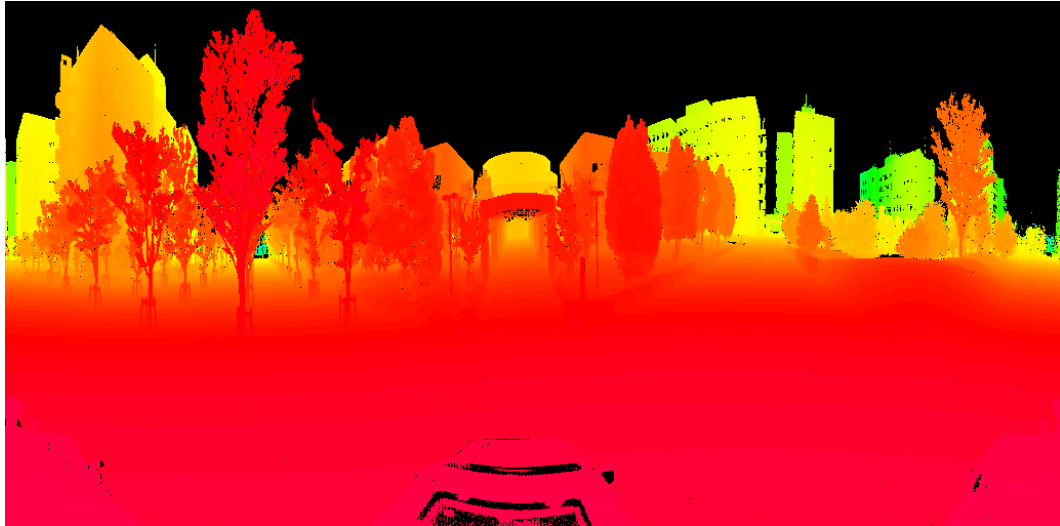
以下の手順で平面のパラメータを推定する．

1. $c=0, W_i=1$ とおく．
2. 窓内のデータに対して行列 \mathbf{G} と \mathbf{H} を計算する．
3. 不偏モーメント行列 $\hat{\mathbf{G}} = \mathbf{G} - c\mathbf{H}$ を計算し，その最小固有値 λ と対応する単位固有ベクトル \mathcal{V} を計算する．
4. $\lambda \approx 0$ ならば， \mathcal{V} を点群データの平面のパラメータとして，計算を終了する．
5. c と W_i を次のように更新する．

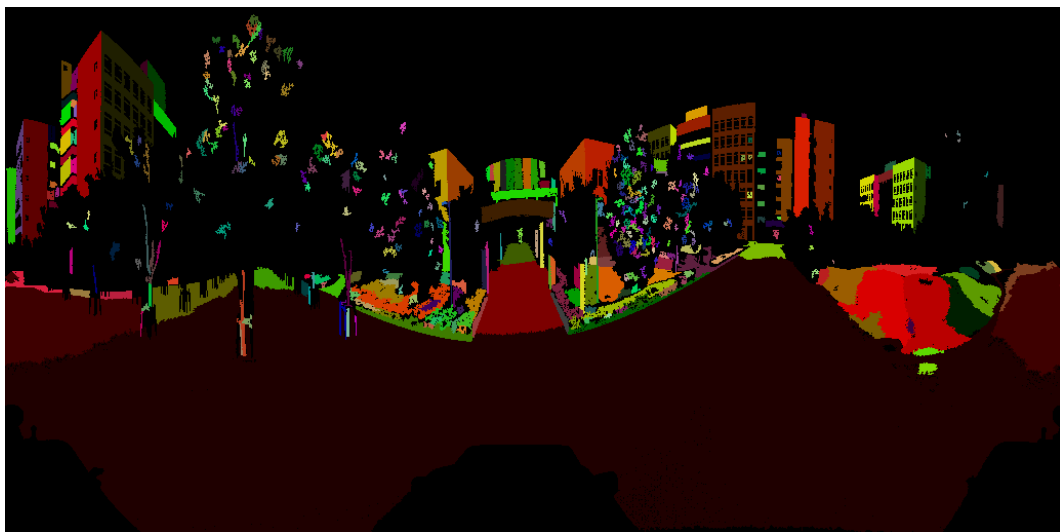
$$c \leftarrow c + \frac{\lambda}{\mathcal{V}^T \mathbf{H} \mathcal{V}}$$
$$W_i = \frac{1}{(\mathcal{V}_1 x_i + \mathcal{V}_2 y_i + \mathcal{V}_3 z_i)^2}$$

6. 2. に戻る .

当てはめに用いた点と推定された平面との距離をそれぞれ求め、全て閾値以下であれば点群は同一の平面領域とする。図 11 にレンジデータからの平面領域の検出例を示す。同一の平面領域は同じ色で表される。



(a) 入力レンジデータ



(b) 検出された平面領域

図 11 レンジデータからの平面領域の検出

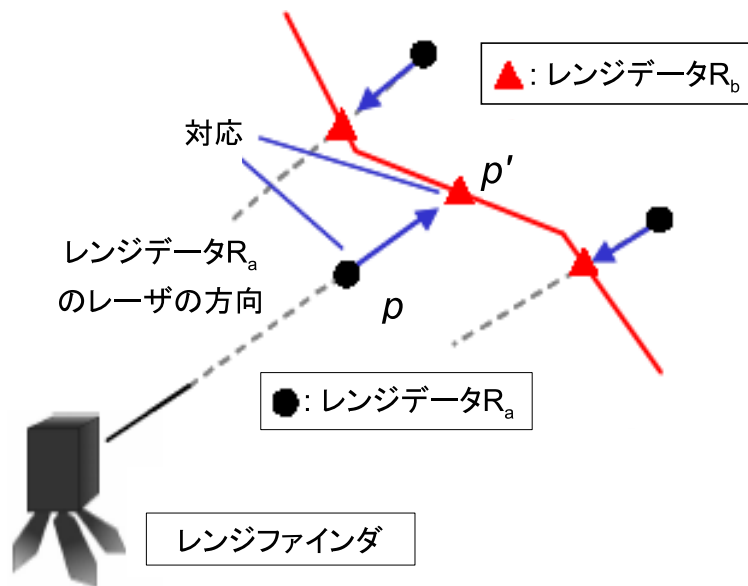


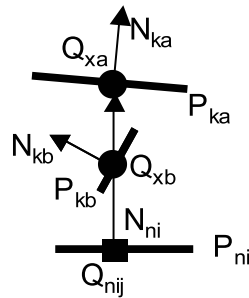
図 12 Oishi らの手法の対応点探索

3.2.2 対応面の探索

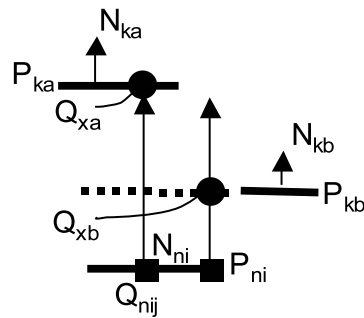
Oishi ら [OSN+03] は、図 12 に示すように、照射されたレーザーの方向に探索し、レーザーのベクトルと交差する面との交点を対応点としている。しかし、奥行きの変化が大きいレンジデータの場合は、角度の誤差によるずれが大きく影響するためレーザーの方向に対応面を探索すると、対応面が見つからない場合が発生する。そのため、提案する位置合せ手法では、面の法線方向に対応面の探索を行う。

レンジデータから検出された平面領域の結果を用いて、同一平面上の点からポリゴンを作成する。レンジデータ $R_n (n = 1, \dots, N)$ の平面を $P_{ni} (i = 1, \dots, I_n)$ とし、その法線ベクトルを N_{ni} とする。 P_{ni} の対応面探索はその法線方向に行う。

対応面の定義を以下に述べる。 P_{ni} の対応面は、 P_{ni} 上の任意の点 Q_{nij} を通る法線ベクトル N_{ni} と他のレンジデータの平面との交点 Q_x が存在する平面と定義する。ある点 Q_{nij} からその平面の法線方向に複数の対応面が見つかった場合、見つかった平面の法線ベクトルと N_{ni} の角度が閾値以内となる平面を選択する。図 13 の場合 (a), (b) 両方とも距離は P_{kb} が近いが、(a) では法線ベクトルの角度差



(a) 法線ベクトルの角度による判定



(b) 交点の存在による判定

図 13 対応面の判定

が閾値を越えているため，(b) では交点が平面部分に存在しないため， P_{ka} が Q_{nij} に対応する平面として選択される．また，対応面が複数見つかった場合は，全てを対応面とする．

インデックス画像とグラフィクスハードウェアを用いた対応面探索

Oishi ら [OSN⁺03] は，インデックス画像を用いたレンジデータ間の対応点探索手法を提案している．

レンジデータ R_a の対応点をレンジデータ R_b から探索する場合，レンジデータ R_b から平面を作成し，それぞれの平面に固有のインデックス値を割り当てる．そしてレンジデータ R_a の計測地点・方向からレンジデータ R_b の平面を透視変換により画像面に投影する．このとき平面に割り当てたインデックス値に応じた色で

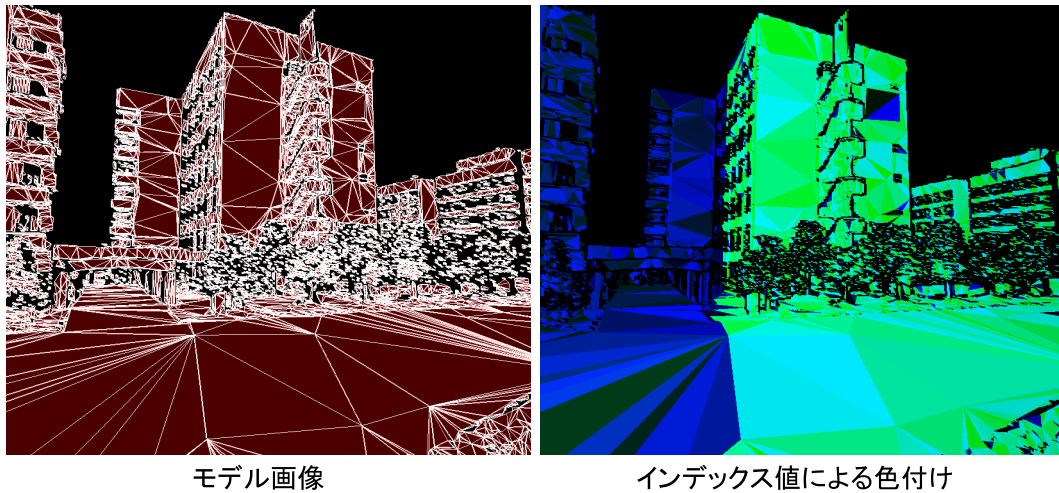


図 14 インデックス画像

描画したものがインデックス画像である．レンジデータ R_a の計測点 p の対応点を探索する場合， p の画像上での座標を計算し，その色を取得する．その色をインデックス値へと逆変換することで p に対応する平面が得られる．Oishi らは，計測地点と p を結ぶ直線と平面の交点 p' を p の対応点としている．インデックス画像は，Graphics Processing Unit（以下，GPU）を利用することで，高速に作成することが可能であり，Oishi らは対応点のより高速な探索を実現している．インデックス画像の作成例を図 14 に示す．

本手法においても，インデックス画像を用いた対応面探索を行う．GPU を用いてレンジデータ R_a の平面 P_{ax} の対応面をレンジデータ R_b の平面から探索する場合， P_{ax} を覆う平行投影のビューボリュームを図 15 の赤線で示すように設定し， P_{ax} がレンダリングされた画素を記憶しておく．つぎに，レンジデータ R_b の平面をレンダリングし， P_{ax} がレンダリングされた画素の色を取得し，対応平面の候補となる R_b の平面のインデックス値を抽出する．候補となった平面の法線と P_{ni} の法線の角度差が閾値以内であったものを対応面とする．

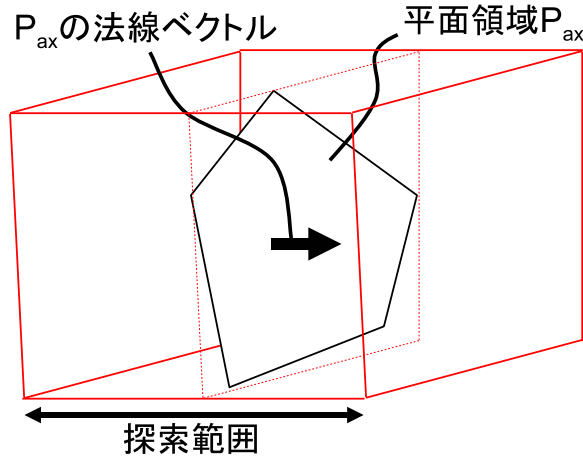


図 15 対応面探索のビューボリュームの設定

3.2.3 レンジデータの変換行列の推定

任意のレンジデータに対する回転・平行移動成分を，求めた対応面の法線と平面領域の計測点から推定する．回転成分を平面の法線ベクトルの内積から，平行移動成分を平面領域の計測点とその対応面の距離から推定する．

step 1. 回転成分 R_n は，対応面の法線ベクトルの内積の和を信頼度 C_R と定義し， C_R を最大化することで求める．3.1.2 節で述べた手法により探索した平面 P_u とその対応面 H_{P_u} のペア集合 (P_u, H_{P_u}) ($u = 1, \dots, U$) から C_R は，

$$C_R = \sum_{u=1}^U (R_{P_u} N_{P_u}) \cdot (R_{H_{P_u}} N_{H_{P_u}}) \quad (8)$$

と定義する．ここで， R_{P_u} と $R_{H_{P_u}}$ はそれぞれ P_u と H_{P_u} が存在するレンジデータの回転成分を， N_{P_u} と $N_{H_{P_u}}$ はそれぞれ P_u と H_{P_u} の法線を示す．

step 2. 平行移動成分 T_n は，平面領域の計測点と対応する平面の距離の和を誤差 E_T と定義し， E_T を最小化することで求める． E_T は，

$$E_T = \sum_{u=1}^U \text{distance}(Q_{P_u}(R'_{P_u}, T_{P_u}), H_{P_u}(R'_{H_{P_u}}, T_{H_{P_u}})) \quad (9)$$

で定義され、 R'_{P_u} と $R'_{H_{P_u}}$ は、それぞれ step1 で求めた P_u と H_{P_u} が存在するレンジデータの回転成分、 $Q(R, T)$ と $H(R, T)$ は、回転成分 R と平行移動成分 T によって座標変換された点 Q と平面 H 、 T_{P_u} と $T_{H_{P_u}}$ はそれぞれ P_u と H_{P_u} が存在するレンジデータの平行移動成分を示す。step2 では回転成分を固定し平行移動成分のみを推定する。

step2 の結果、回転・平行移動成分の推定結果が収束していれば、レンジデータ間の相対的な回転・平行移動成分を保持したまま、推定された平行移動成分 T_n と RTK-GPS によって得られた平行移動成分 T_{GPSn} との差のレンジデータ全体での和が最小にする変換行列 M_{GPS} を推定し、GPS 座標系へと統合する。収束していなければ推定された回転・平行移動成分をレンジデータに適用し、再び対応面を探索し、変換行列の推定を繰り返す。

3.3 評価実験

本節では、提案手法の有効性を確認するため、屋外環境を想定したシミュレーション環境で生成したレンジデータを用いて、従来手法との精度比較、提案手法の位置合せ精度の定量的評価、を行った。また、実環境で得たレンジデータの位置合せを行い、本手法の有効性を示す。レンジデータの回転・平行移動成分の推定は、全レンジデータの一括処理を行うことで、累積的な誤差が発生することを防ぐ。一括処理による最適化は、多次元滑降シンプレックス法を [PFTV88] を用いて行った。

3.3.1 シミュレーション環境による精度評価実験

図 16 に示す本学を想定したシミュレーションデータを用いて、提案した位置合せ手法の精度を評価する。シミュレーション実験におけるレンジファインダの仕様を、実環境で利用するレンジファインダ LMS-Z360 と同様にする。設定パラメータを表 4 に示す。レンジファインダの位置・姿勢のパラメータは、実環境では RTK-GPS とジャイロスコープにより取得する。衛星の電波状況等により発生する誤差を考慮し、シミュレーション実験で与える誤差を経験的に表 5 のように設定した。なお、表 4, 5 の σ は誤差の標準偏差を表し、その分布は正規分布に従う。

位置合せ処理において、対応面の探索は、角度の閾値を法線ベクトルの角度 30° 以内、平面との距離の閾値を 5m 以内に設定し、24 台の PC(CPU:Pentium4 1.8GHz, メモリ:2048MB) を用いて行い、回転・平行移動成分の推定を、1 台の PC(CPU:Pentium4 1.7GHz, メモリ:1024MB) で行った。

表 4 レンジファインダのパラメータ

解像度	1024×512
画角	水平:360度 垂直:90度
測定距離に付加する誤差	$\sigma = 12\text{mm}$

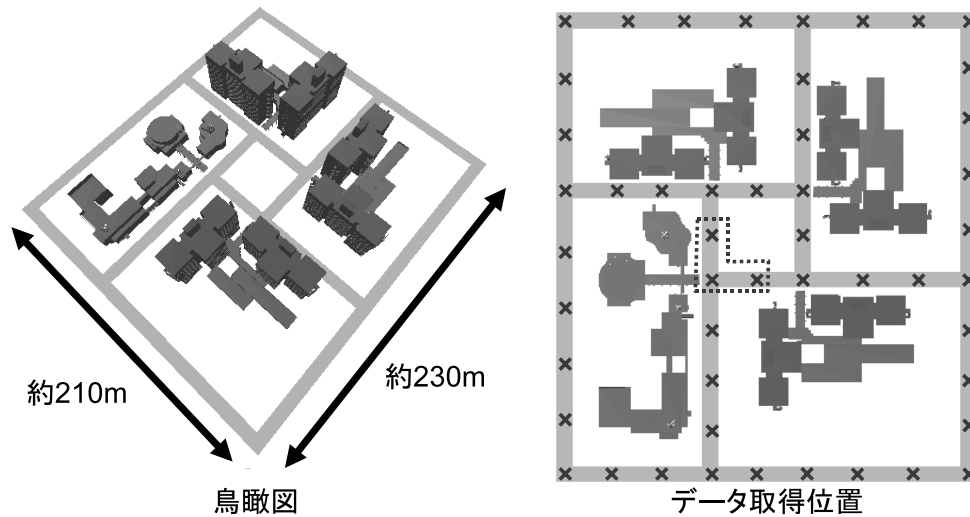


図 16 シミュレーション環境

表 5 レンジファインダの位置・姿勢誤差

位置誤差	緯度: $\sigma=3\text{m}$ 経度: $\sigma=3\text{m}$ 高度: $\sigma=1\text{m}$
姿勢誤差	roll 角: $\sigma=5$ 度 pitch 角: $\sigma=5$ 度 方位角: $\sigma=10$ 度

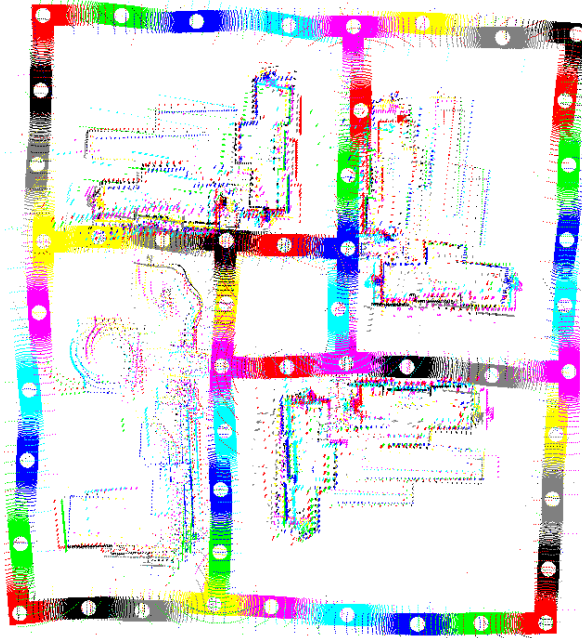
まず、ICP 法、Oishi らの手法、提案手法の比較による位置合せの精度評価について述べる。ICP 法と Oishi らの手法は、対応点間の距離の和を最小化することで位置合せを行う。図 16 の点線で囲まれた 3 地点分のレンジデータを ICP 法、Oishi らの手法、提案手法でそれぞれ位置合せを行い精度を比較した。それぞれの手法におけるレンジデータ間の相対的な位置誤差と三軸（ロール角、ピッチ角、方位角）の角度誤差それぞれの平均と分散を表 6 に示す。

次に位置合せの範囲を拡大し、図 16 中の × で示す 49 地点で取得したレンジデータの位置合せを行った。図 17(a) に、与えた初期値によるレンジデータの描画結果を、(b) に最適推定されたレンジファインダの位置・姿勢を用いた結果をレンジデータ毎に色分けして示す。

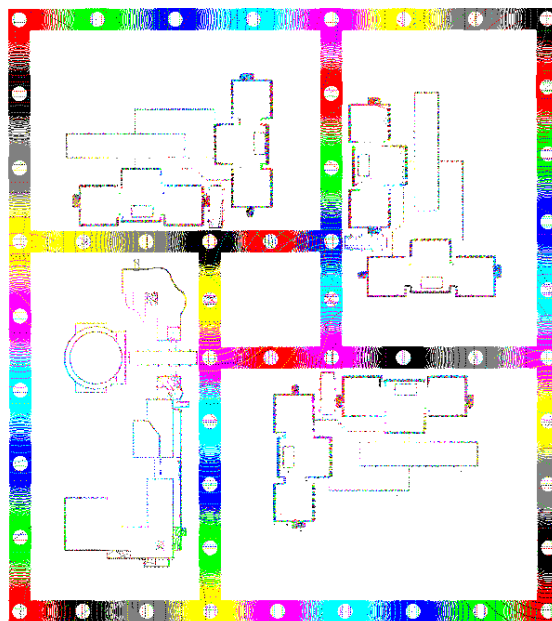
表 6 従来手法との比較による精度評価

	位置誤差		角度誤差	
	平均	分散	平均	分散
ICP 法	1.8m	1.1m	8.6 度	1.6 度
Oishi らの手法	3.7m	1.5m	1.1 度	0.38 度
提案手法	0.25m	0.15m	1.0 度	0.17 度

レンジデータの回転・平行移動成分を真値と推定結果で比較した結果、三軸の角度誤差の平均は約 0.29 度、分散は 0.15 度、位置誤差の平均は約 0.60m、分散は 0.15m となった。また、レンジデータ間の相対的な回転・平行移動成分を真値と比較した結果、三軸の角度誤差の平均は約 0.23 度、分散は 0.17 度位置誤差の平均は約 0.19m、分散は 0.082m となった。



(a) 初期値による位置合せ結果



(b) 提案手法による位置合せ結果

図 17 シミュレーションデータにおける最適化前後の位置合せ結果

3.3.2 実環境による精度評価実験

本学構内 68 地点で取得したレンジデータを，本章で述べた位置合せ手法を用いて，位置合せを行った．図 18 に本学の地図とデータの取得位置を示す．図 18 では太線が道路の境界を，細線が建物の境界（壁面）を表す．レンジデータは計測範囲を水平 360 度・垂直 90 度に設定し，解像度は水平 1024×垂直 512 で取得した．レンジデータの位置合せでは，RTK-GPS とジャイロスコープにより得られた位置・姿勢を初期値として全体最適化を行った．対応面探索では，復元対象である本学構内の建物の大きさや形状を考慮して，誤対応が起こらないように閾値を経験的に法線ベクトルの角度 30° 以内かつ平面との距離 5m 以内に設定し，24 台の PC(CPU:Pentium4 1.8GHz, メモリ:2048MB) を用いて並列に行った．回転・平行移動成分の推定は，1 台の PC(CPU:Pentium4 1.7GHz, メモリ:1024MB) で行った．最適化前から後への移動距離は平均が 4.69m，最大 7.24m であり，表 2 で示した RTK-GPS の精度が得られなかった．これは，本学構内は 7 階建て約 30m の建造物が複数存在し，計測位置のほとんどが建物に近接していたため，GPS 衛星からの電波が反射・遮蔽された影響が大きかったと考えられる．RTK-GPS とジャイロスコープによって得られた位置・姿勢情報を用いて統合されたモデルを図 19(a) に，最適化後の位置・姿勢情報による統合結果を図 19(b) に示す．図 19 は図 18 の 印から矢印の方向に位置合せ結果を描画したものである．図 19(a) では位置ずれにより壁面が幾重にも見えているが，図 19(b) では統合されていることが確認できる．図 20 に水平面に平行投影した位置合せ済みのモデルに，本学構内の二次元 CAD データを重畳表示したものを示す．道路の部分がほぼ一致していることにより，全体のモデルが大きく歪んでいないことが確認できる．

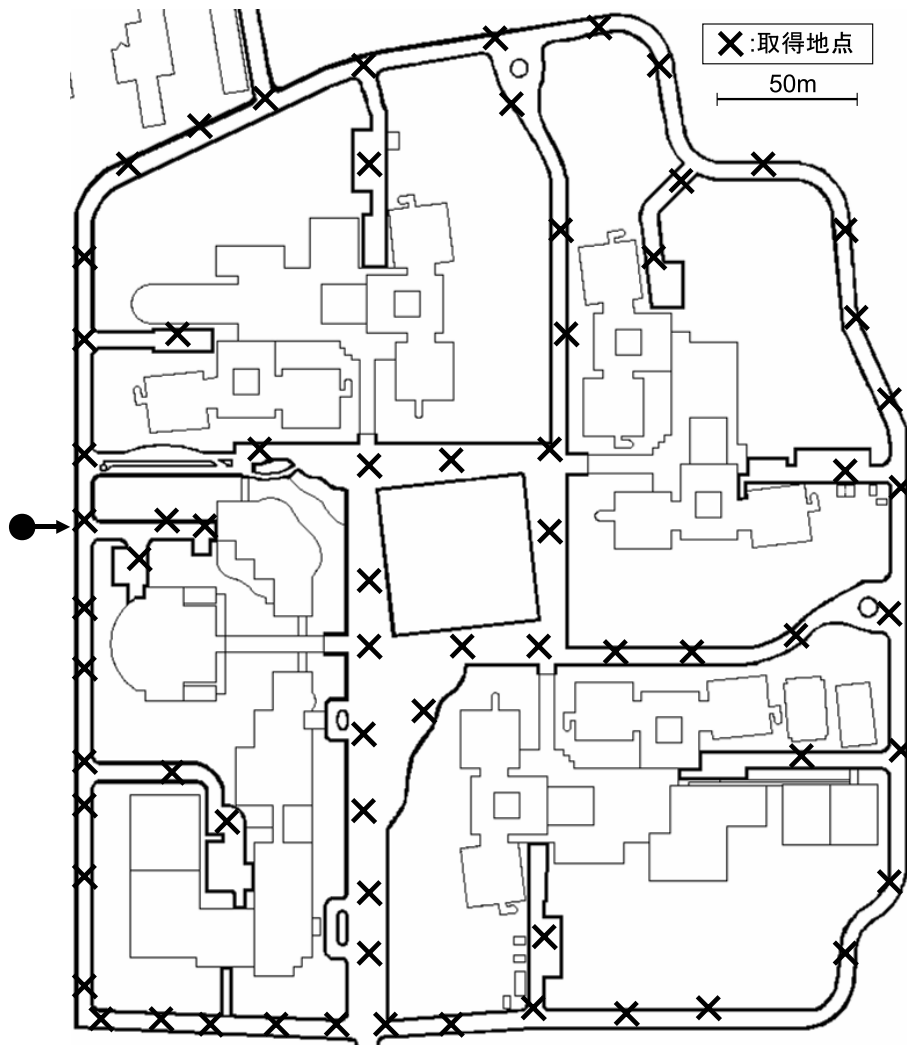
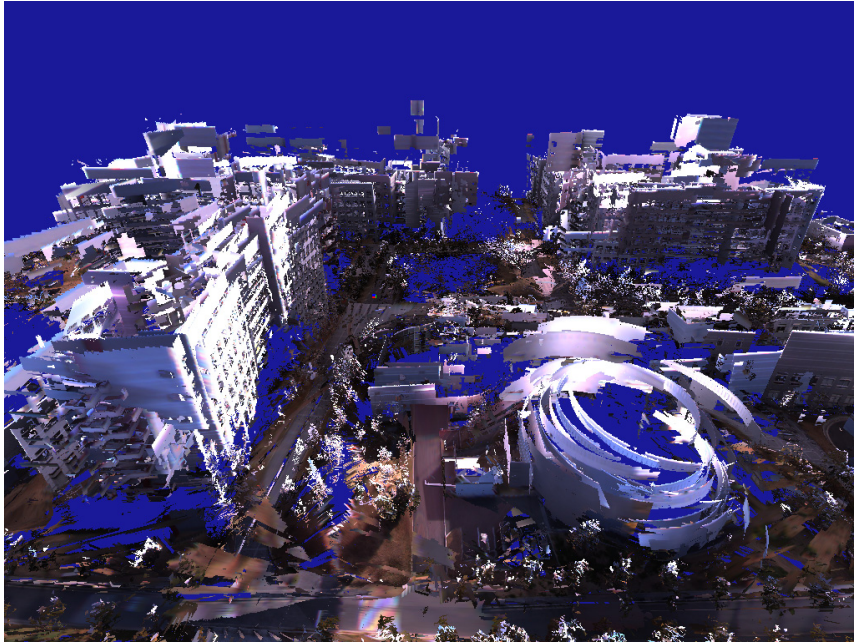


図 18 構内の地図とデータ取得位置



(a) センサ値による統合



(b) 最適化後

図 19 実環境データにおける最適化前と後の位置合せ結果

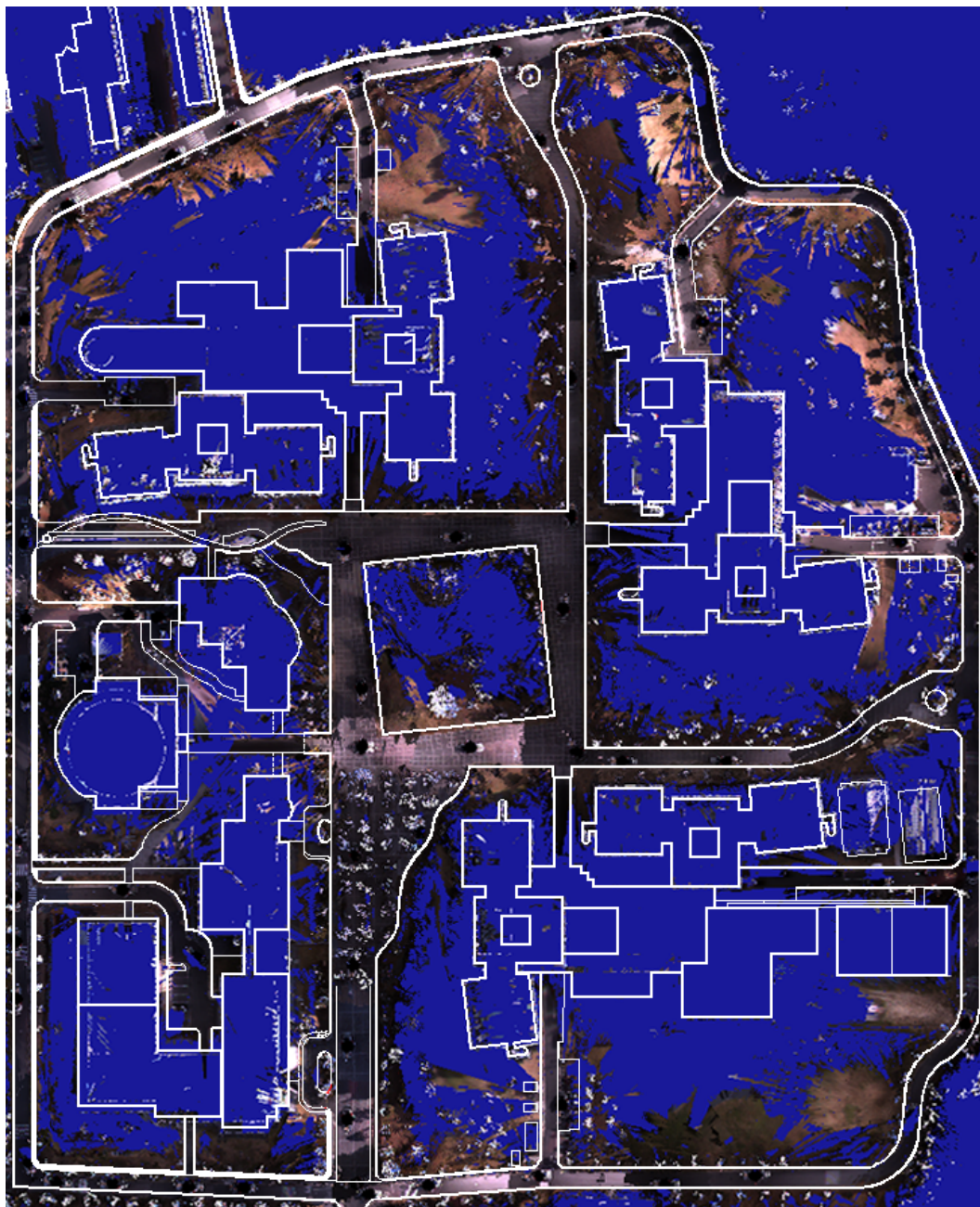


図 20 二次元 CAD を位置合せされたレンジデータに重畳表示

3.4 結言

本章では、都市環境に多く存在する、建造物の壁面や、道路面などの平面部分を利用することで、広域な都市環境の多地点で取得したレンジデータの位置合せを、高精度に行う手法を提案した。取得したレンジデータから平面の検出を行い、RTK-GPS とジャイロスコープにより取得したセンサの位置・姿勢を用いて、レンジデータ間で対応する平面を探索した。そして、対応する平面のパラメータの誤差が最小化するように位置合せを行った。対応面の探索と誤差の最小化を解が収束するまで繰り返し、取得したレンジデータを一括同時位置合せすることで全体的に歪みなく位置合せできた。

シミュレーションデータを用いた位置合せにおいて、真値に対する位置誤差を平均 0.60m、分散 0.14m、角度誤差を平均 0.29 度、分散 0.15 度、レンジデータ間の相対的な位置誤差を平均 0.19m、分散 0.082m、角度誤差を平均 0.23 度、分散 0.16 度という推定結果を得た。また、従来手法との精度の比較を行った結果、従来手法よりも高い精度で位置合せすることができ、点群の密度の差や奥行きの変化が大きい環境においても提案手法が有効であることが確認できた。

実環境で取得した全方位レンジデータの位置合せでは、本学構内 68 地点で取得した全方位レンジデータを、提案手法により位置合せした。モデル化対象の二次元 CAD データに、位置合せしたレンジデータを平行投影した結果から、道路の部分と建物の壁面がほぼ一致していることにより、樹木などのレンジファインダでは安定して測定できない物体が存在する屋外環境においても、生成モデルに大きな歪みがないことが確認できた。

シミュレーションデータによる実験でのレンジデータ間の相対的な位置誤差や、実環境での二次元 CAD データとの比較結果から、提案手法を用いることで、相対的な位置合せは高精度に行うことが可能であると言える。しかし、実環境における実験で、RTK-GPS により取得した位置と位置合せ処理によって推定した位置の差が大きかったことから、位置取得時の GPS の電波状況を位置推定時に誤差関数の重みとして利用することが必要であると考えられる。

本論文では、全方位レンジデータを用いた実験を行ったが、提案手法は、レンジデータ全般に適用可能である。ただし、レンジファインダの画角が狭い場合、レ

ンジデータ間での対応面の取得が困難になる可能性が考えられる。

4. 推奨度マップを用いたレンジデータ取得支援システム

4.1 序言

一般にレンジファインダが測定可能な部分はレーザが到達する範囲に限定されるため、一度の計測で対象物体の全てを計測することは困難である。そのため、対象全体の形状を得るには、異なる方向からレンジデータを取得し、それらを統合する必要があるが、オクルージョンなどによりレーザが照射されなかった未計測の部分は、欠損となってしまう。従来から、物体の計測において未計測部分を効率よく削減するために、最適なレンジデータの取得位置を求めるビュープランニング手法が提案されている [Con85, MF98, MB93, Pit99]。しかし、従来手法では、計測時のレンジファインダの位置・姿勢が精度よく求められることが前提のため、屋外環境に適用することは困難であるという問題がある。

本章では、計測候補地点の推奨度の計算を、新たなレンジデータを取得する度に更新することで、センサの操作者に計測効率の良い次計測地点をインタラクティブに提示する取得支援システムを提案する。新たに取得したレンジデータを三次元モデルへと反映させるためには、取得したレンジデータを取得済みのデータと位置合せする必要がある。レンジデータの位置合せは、3章で提案した、平面領域を利用したICPアルゴリズムにより行うことを想定する。システムは、推奨度を算出する位置において位置合せに必要な取得済みのレンジデータの平面領域が計測可能かどうかの判定を行う。屋外環境では、センサの進入可能な領域や移動経路が制限されることが考えられるため、位置合せに必要な平面領域が取得可能な各地点で求めた推奨度を示した二次元マップを生成し、レンジファインダの操作者にインタラクティブに提示する。提案システムは、数値地図 [国土07] の道路情報をセンサの進入可能領域とし、システムは、推奨度をセンサの進入可能領域上に重畳表示し、GPSにより得られた現在位置を合わせて提示することで、操作者は次の計測位置を決定する。

4.2 屋外環境におけるレンジデータ取得支援システム

本節では、屋外環境におけるレンジデータの取得支援のためのシステムの設計方針と構築したシステムの概要について述べる。

4.2.1 システムの設計方針

モデル化の対象範囲においてレンジデータを取得する際、レンジデータ取得支援システムへの要求として以下のことが挙げられる。

- (1) 未計測部分を効率的に削減し、形状をより密にするレンジデータを取得できる計測候補地点を操作者に示す。
- (2) 新たに取得したレンジデータを、次の計測候補地点の算出に反映する。

本研究は、操作者によるレンジデータの取得と、システムによる計測候補地点の提示を繰り返すことを想定する。構築するシステムは、上記の要求のために以下の機能を実現する。

(a) 物体の計測密度を指標とした推奨度算出

取得したレンジデータから対象の三次元モデルを生成し、三次元モデルの局所領域における計測密度からセンサの進入可能領域の各地点でのレンジデータ取得の推奨度を計算する。レンジファインダは、一般にセンサから放射状にレーザを照射するため、センサから離れた位置で計測された物体は計測密度が低くなり、物体形状の精度が悪くなる。提案システムでは、物体の計測密度を指標とし、モデル化の対象となる領域の計測密度を高めるように推奨度を算出する。これは、要求項目 (1) に対応する。

(b) 推奨度算出のオンライン処理

推奨度の算出に形状モデルを用いる手法として、ボクセルモデルを用いる手法 [Con85, MF98] と、ポリゴンモデルを用いる手法 [MB93, Pit99] が従来提案されている。提案システムでは、現場での取得支援を想定し、操作者が、円滑にデータ取得を行えるように、推奨度算出のオンライン処理を試みる。ポリゴンモデルは、ボクセルモデルに比べ物体の形状を詳細に記述できるが、複数のレンジデー

タから計測・未計測部分を判定するには、ポリゴン同士の交差判定や交差部分でのポリゴンの結合が必要であるため、屋外環境のように広域でかつ、樹木などの形状が複雑な物体が多く存在する場合は計算量が大きくなる。また、取得したレンジデータが増加する度に、ポリゴンモデルのデータ量が増加するため、計算機のメモリ量の限界を超えないようにポリゴン数を削減する処理が必要になる。一方、ボクセルモデルは、計測・未計測部分の判定を各ボクセルで行うことにより形状を生成できるため、計算量がポリゴンモデルに比べて少ない。そのため、視体積交差法 [Bak77] などのモデリング手法で一般によく用いられている。また、メモリ量はボクセル数に依存するため、モデル化の範囲とボクセルの解像度を固定した場合、メモリ量を一定にすることができる。提案システムでは、推奨度算出の高速性を重視し、生成の計算量が、ポリゴンモデルに比べ少ないボクセルモデルを利用して推奨度の算出を行う。新たに取得したレンジデータを推奨度に反映するためには、そのレンジデータを位置合せし三次元モデルを更新する必要がある。そのため推奨度を算出する位置において、位置合せに必要な平面領域の取得が可能かどうかの判定を三次元モデルから行う。さらに、これらの処理を GPU 利用することで処理時間を短縮する。これは、要求項目 (2) に対応する。

(c) 二次元マップによる推奨度の提示

現実の屋外環境では、レンジファインダが進入可能な範囲には様々な制限があることが考えられる。システムは、推奨度の最も高い位置への移動を指示するのではなく、推奨度を輝度値として示した二次元マップを操作者に提示する。操作者は、推奨度の高さや移動の距離や所要時間等を考慮して次の計測地点を決定する。これは、要求項目 (2) に対応する。

なお、提案システムは広域でのデータ取得のためにセンサシステムを車載する。そのため、進入可能な緯度・経度を数値地図 [国土 07] から得られる道路上に限定し、地面の高さは、取得されたレンジデータから決定する。そして、地面の高さが既知の範囲においてレンジファインダを設置する高さを考慮してモデル化の対象範囲の推奨度を求める。

4.2.2 提案システムの処理の概要

提案システムにおける，処理の流れを図 21 示す．操作者はまず，モデル化の対象範囲を決定し，最初のレンジデータの取得位置を任意で決定する．2 回目以降のレンジデータの取得位置は，推奨度が示されたマップを見て決定する．システムが GPS で取得した現在の位置情報を推奨度が示されたマップに重畳表示することで，操作者は現在位置を知ることができる．システムは，操作者により取得されたレンジデータを取得済みのレンジデータと位置合せし，三次元ボクセルモデルを更新する．そして，更新されたボクセルモデルを用いて，モデル化の対

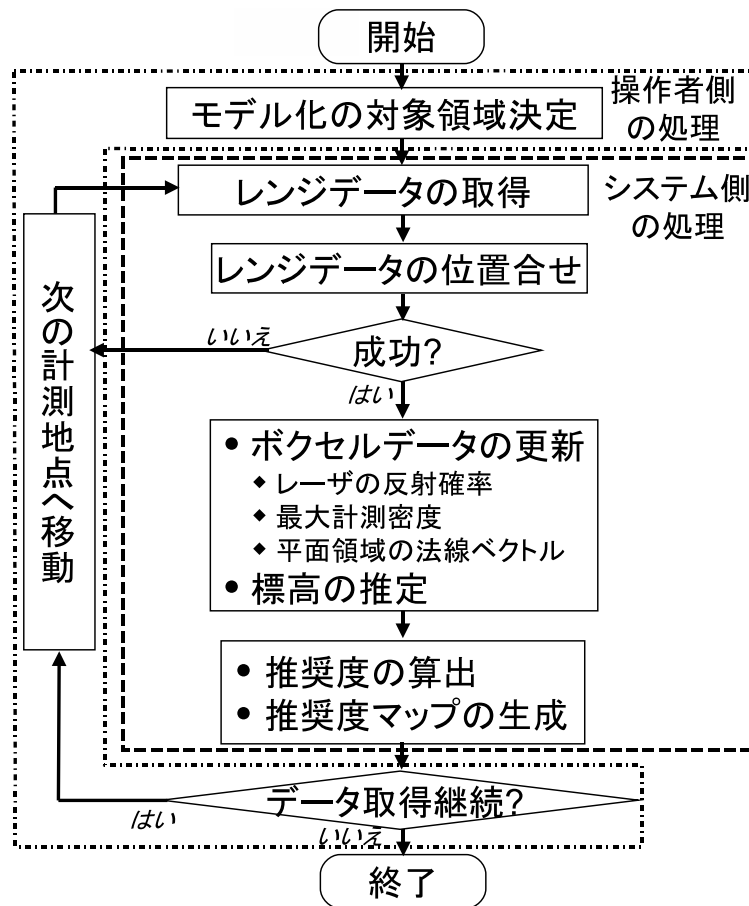


図 21 提案システムの処理の流れ

象範囲における推奨度を算出し、推奨度マップを更新する。操作者は、更新された推奨度マップを見て次の計測位置を決定し、移動する。レンジデータの取得が十分であると判断した場合は終了する。以下、各処理について詳述する。

4.2.3 モデル化の対象範囲の設定

まず最初に操作者は、モデル化する範囲(緯度・経度)を図 22 に示すように多角形で指定する。操作者は、提示されている地図上に指定範囲の各頂点の緯度・経度をマウスにより指定する。システムは、指定範囲外に存在するレンジデータを除外して推奨度の計算を行う。

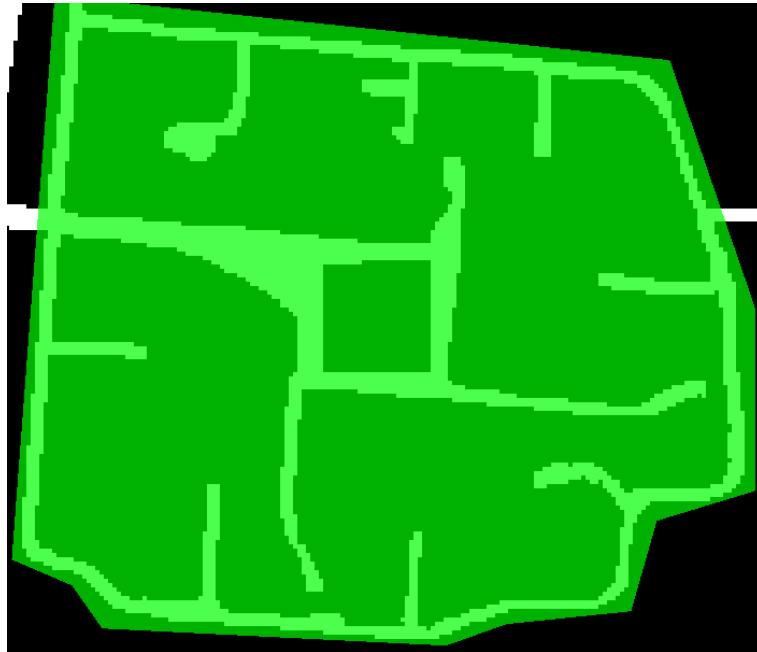


図 22 モデル化の対象範囲の指定

4.2.4 取得したレンジデータの位置合せ

3章において、屋外環境に多く存在する樹木などの影響を排除し、安定して位置合せを行うために平面領域を利用したレンジデータの同時位置合せ手法を提案した。提案システムも同様に平面領域を用いた位置合せを行う。ただし、提案システムでは、取得した全レンジデータの一括同時位置合せではなく、新たなレンジデータと取得位置が近いレンジデータとで同時位置合せによる最適化を行うことで、処理時間を短縮する。

位置合せに用いた全てのレンジデータの変換行列を更新し、位置合せの結果とGPS座標系とのずれを補正するために、最適化によって求めたレンジデータの位置とそのレンジデータを取得したときのGPSの位置との差の二乗和が最小になるように補正する。3章で提案した位置合せ手法は、位置合せのために他のレンジデータの対応する平面領域が必要となるため、新たなレンジデータの平面領域に対応する平面領域が見つからなかった場合は位置合せが失敗したとみなし、操作者にレンジデータの取り直しを指示する。最後に、緯度・経度をボクセルの一边と同じ長さで格子状に区切り、各格子内に存在するレーザの反射点の最も高度が低いものをその格子における地面の高さとする。

4.2.5 推奨度算出に用いるボクセルモデル

提案システムでは、生成の計算量が比較的低いボクセルモデルを利用し、各地点における推奨度を算出する。Connollyら [Con85] や Massionsら [MF98] のボクセルモデルを用いたビュープランニング手法は、レンジファインダの計測位置は既知であることが前提であるため、システムによる指示位置で取得したレンジデータと取得済みのレンジデータとの位置合せについては考慮されていない。また、Massionsら [MF98] は物体表面の法線と計測位置の関係から、ボクセル内部の形状の信頼度を算出しているが、レンジファインダから物体までの距離に応じた計測密度の変化については考慮していないため、屋外環境のように対象が広域である場合、生成した三次元モデルの形状の精度が低くなる場合が考えられる。これらの手法を屋外環境へと適用し、推奨度を算出するために必要な情報を以下に示す。

- 計測候補地点からレーザが到達する範囲
- 上記範囲において増加する物体の計測密度
- 計測候補地点で取得したレンジデータと取得済みレンジデータとの位置合せが可能か？

ボクセルモデルを用いた場合にこれらの情報を得るため、各ボクセルに以下のパラメータを設定する。

- レーザの反射確率
- 最大計測密度
- 平面領域の法線情報

屋外のような広域な環境でボクセルモデルを利用する場合、必要なメモリ量を抑えるためにボクセル空間の解像度を低くする必要がある。レーザの反射確率はボクセル内部を物体が占有する割合を表し、解像度の低いボクセルモデルにおいて、計測候補地点から照射されるレーザが到達する範囲を求めるために用いる。最大計測密度は、ボクセル内部の物体の計測密度を表し、ボクセル内部が一様な計測密度であることを保証するために、複数回計測された場合は最大のものを保持しておく。法線情報は、レンジデータの位置合せのために必要な平面領域が計測候補地点から計測可能かどうかを確認するために用いる。

以下、ボクセルが持つパラメータについて詳述する。

(a) レーザの反射確率

ボクセルのレーザの反射確率 P は、ボクセル内部でレーザが反射した回数を t 、レーザがボクセルを通過した回数 f とした場合、

$$P = \frac{t}{(t + f)} \quad (10)$$

で定義する。提案システムで用いるレンジファインダは、レーザを照射した方向と反射した点までの距離を得ることができる。その場合、計測地点から反射点ま

では物体が存在しないと判断できることから，計測地点とレーザの反射点を結んだ線分上のボクセルにおけるレーザの通過判定を行う．レーザの通過判定を高速に行うために，Bresenhamの直線描画アルゴリズム [Bre65] による直線の描画結果を利用する．具体的には，計測地点が存在するボクセルからレーザの反射点が存在するボクセルまで，三次元に拡張した Bresenham のアルゴリズムにより直線を描画し，描画と判定されたボクセルのうちレーザの反射点が存在するボクセル以外のボクセルでレーザが通過したと判定する．レーザの反射点が得られなかった場合は，レンジファインダが計測可能な距離までレーザが通過したものとする．ここで，未計測部分は物体が存在するものとし，レーザの反射確率の初期値は 1 とする．

(b) 最大計測密度

レーザがセンサから放射状に照射される場合，物体とレンジファインダとの距離が離れるほどその計測密度は低くなり，詳細な形状が得られなくなる．提案システムでは，生成モデルの精度を向上させるために，取得済みのレンジデータよりも高い計測密度でボクセルを計測できる場合，その密度差で推奨度の重み付けを行う．計測密度 D はレンジデータの水平・垂直それぞれの解像度を R_h, R_v ，計測地点からボクセルまでの距離を r としたとき，

$$D = \frac{R_h R_v}{r^2} \quad (11)$$

で定義する．取得したレンジデータから計算された計測密度の最大値をそのボクセルが持つ最大計測密度とする．

(c) 平面領域の法線情報

提案システムでは，レンジデータを位置合せするために，他のレンジデータと重複する平面領域を必要とする．計測候補地点において，取得済みのレンジデータの平面領域が取得可能かどうかを判定するために，平面検出により平面領域と判定されたレーザの反射点が存在するボクセルにその法線情報を格納する．ボクセル内に複数の平面領域が存在した場合は全ての法線情報を格納する．

計測候補地点からレーザが到達する範囲を，各ボクセルが持つレーザの反射確率から求め，その範囲内のボクセルで上昇する計測密度から推奨度を算出する．

このとき，法線情報をもつボクセルを通過するレーザの数から位置合せの可否を判定する．

4.2.6 推奨度マップの更新

推奨度の算出

本節では，前節までに述べた手法で生成されたボクセルモデルから，センサの進入可能領域における各地点での推奨度の算出手法について述べる．計測候補地点 p の推奨度は， p でレンジデータを取得することによる，全ボクセルにおける最大計測密度の上昇量の期待値を示し，各ボクセルで「レーザがボクセルで反射する確率」と「計測密度が既取得の最大計測密度を上回った場合の差」の積を求め，全ボクセルでの和とする．

計測候補地点 p でレンジデータを取得する場合， p から方向 $i (i = 1, \dots, I)$ に向かって照射されるレーザを L_i とし， L_i が通過するボクセルを，順に $V_{in} (n = 1, \dots, N_i)$ とする． V_{in} の最大計測密度を d_{in} ，レーザの反射確率を P_{in} としたとき，推奨度 $R(p)$ は，以下のように表される．

$$R(p) = \sum_{i=1}^I \left(d_{i1} P_{i1} + \sum_{n=2}^{N_i} d_{in} P_{in} \prod_{m=1}^{n-1} (1 - P_{im}) \right) \quad (12)$$

ここで d_{in} は， p から計測した場合の V_{in} における計測密度を d'_{in} としたとき，

$$d_{in} = \begin{cases} d'_{in} - D_{in} & (d'_{in} > D_{in}) \\ 0 & (d'_{in} \leq D_{in}) \end{cases} \quad (13)$$

となる．

位置合せのための平面領域の取得

取得するレンジデータを他のレンジデータと位置合せするためには，取得済みのレンジデータと重複する平面領域が必要になる．計測候補地点からのレーザのベクトルとボクセルが持つ法線との角度差が閾値以内の場合は，そのボクセルに存在する平面領域を計測可能とする．平面を用いた位置合せにおいては，レンジデータ間の座標変換行列を一意に決定するために，法線が異なる三つの対応平面が必要になる．システムから提示された推奨度マップに基づいて操作者が決定し

た計測地点に、操作者がレンジファインダを誤差なく移動させることは困難であるため、計測候補地点から閾値以上のレーザにより計測可能である平面領域が三つ以上の場合、位置合せが正しく行えると判定する。

割合が一定以下の場合、位置合せに必要な平面領域が取得できないと判断し、その地点での推奨度は0とする。

GPUによる推奨度算出の高速化

本節では、推奨度の計算をプログラマブルシェーダ機能を有するGPUを用いることで高速化する手法について述べる。例として、図23に同一視点から見たモデルを示す。レンジデータが(a)に示すポリゴンモデルのように取得されている場合、提案システムに用いるボクセルモデルは、(b)で示すように生成される。(b)の輝度値はボクセルの最大計測密度を表し、赤いボクセルは未計測部分を示す。

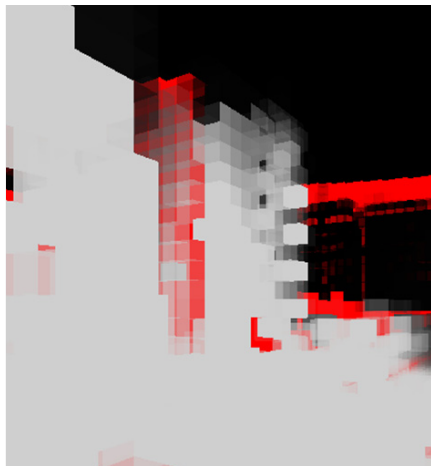
推奨度は、計測候補地点からの計測密度が過去の最大計測密度を上回った場合の差とレーザが反射する確率の積を全ボクセルで算出し、その和となる。図23(c)に示すように各ボクセルの計測密度差を濃淡値、レーザの反射確率を不透明度として半透明合成し、レンジデータと同じ解像度でレンダリングすることで、全画素における輝度値の和が推奨度となる。このとき、ボクセルが持つ各法線情報は、水平8方向×垂直4方向それぞれ45度単位で量子化し、32bitのフラグ情報としてGPUに入力する。GPUでの処理では、フラグ情報からボクセルがもつ法線情報を抽出し、視点からボクセルへのベクトルとの角度差が閾値以上の場合、そのボクセルに存在する平面領域が計測可能として、別の色の輝度値を用いてレンダリング結果に反映する。ボクセルを立方体ではなく、1辺の長さがボクセルと同じビルボードとして描画することで、レンダリングの正確さは若干低下するが、描画する面の数が6分の1となり、描画速度を向上させることができる。

4.2.7 操作者への推奨度マップの提示

システムは、計算された推奨度に応じた色を付けて作成した推奨度マップを操作者に提示する。提示する地図の例を図24に示す。操作者は提示された推奨度マップから、推奨度の高さ、移動経路・時間等を考慮して次の計測地点を決定する。レンジデータの取得が充分と操作者が判定した場合は、終了する。



(a) ポリゴンモデル



(b) 推奨度計算のための
ボクセルモデル



(c) 推奨度の計算結果

図 23 GPU を用いたボクセルモデルのレンダリング

4.3 提案システムによるデータ取得実験

本節では、提案システムを用いたデータ取得実験について述べる。実験では、仮想環境におけるシミュレーション実験と、実環境での実験をそれぞれ行った。

全方位レンジファインダのレーザの有効距離を 150m、解像度を水平 360 度・垂直 90 度の範囲で 1024×512 に設定し、ボクセル空間でのボクセル 1 辺の大きさは 2m に設定した。実験で用いたレンジファインダ LMS-Z360 は解像度 1024×512

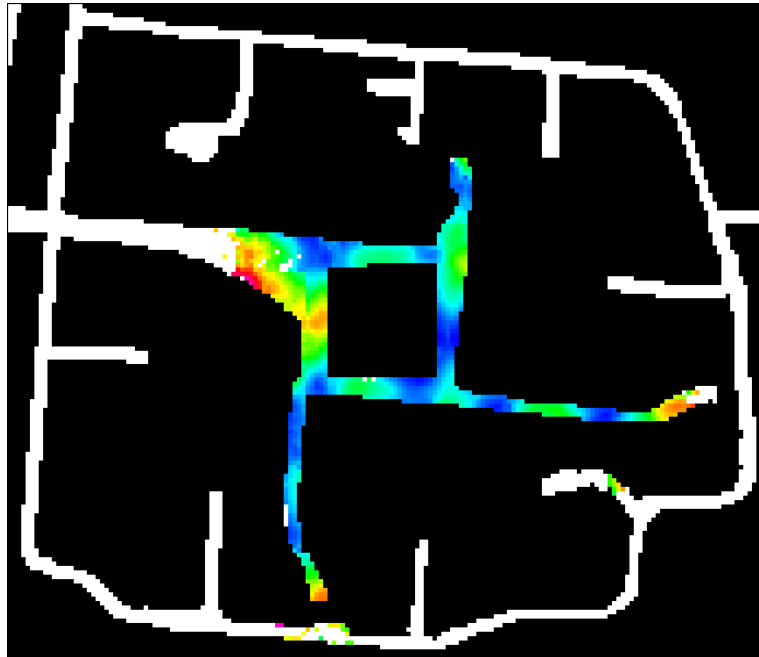


図 24 操作者に提示される推奨度マップの例

のレンジデータを取得するのに約1分の時間を要する。推奨度の算出は水平方向に2m間隔で行った。位置合せの成功条件は、計測候補地点から照射するレーザーの0.05%で計測可能な平面が、3つ以上存在することとした。本実験では、デスクトップPC(CPU:Pentium4 3.4GHz, RAM:2GB)とグラフィクスカード(GPU: GeForce7900GTX, VRAM:512MB)を利用した。新たに取得したレンジデータの計測位置から水平方向に半径200m以内、垂直方向に50m以内のボクセルデータを用いて、計測位置から半径50m以内の範囲で推奨度を更新する。このとき、1地点あたりの推奨度算出に要した時間は約0.05秒であった。推奨度算出をCPUで行った場合、1地点あたりの計算時間は約0.8秒となりGPUを用いることで、推奨度計算中の待ち時間を軽減することができた。



図 25 支援システムの有無による計測地点の違い

4.3.1 シミュレーションによる取得効率の評価

シミュレーション実験により、提案システムを利用する場合と利用しない場合の、モデル化の対象範囲の計測密度を比較することにより計測効率を評価する。仮想環境のモデルは、図 16 と同じモデルを用い、実環境の状況に近づくように建物の周りに高さ 6m の樹木モデルを配置して平面検出の障害となるようにした。範囲は約 200m 四方で、建物の高さは最大約 40m である。提案システムを利用し

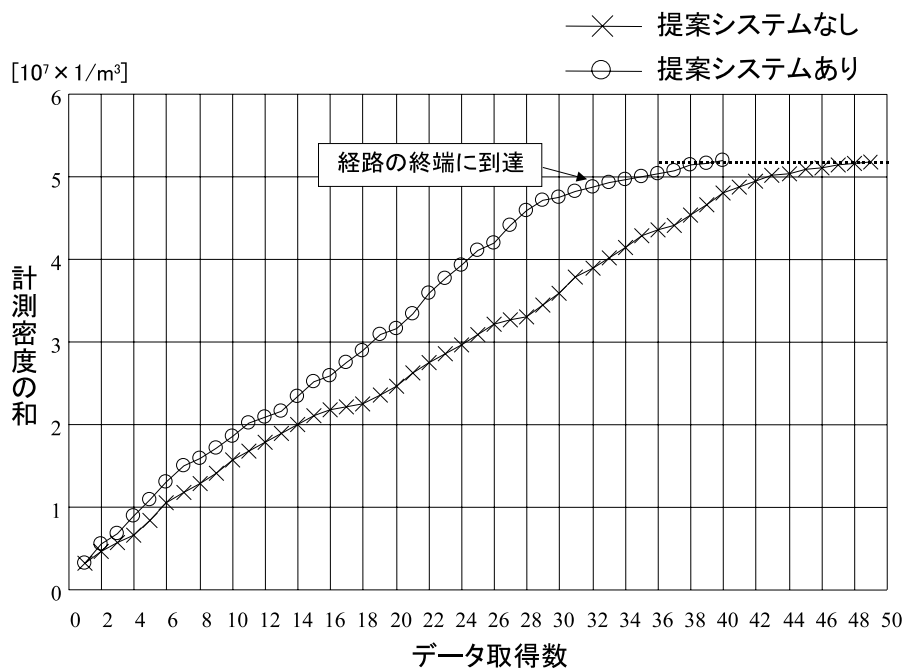


図 26 ボクセルの計測密度の和

ない場合には，平面領域の取得が行えるようにレンジデータの取得間隔を 20～30m とした．このとき計測回数は 49 回であった．

システムを利用する場合も，利用しなかった場合と同じ経路に沿って計測を行い，システムを利用しなかった場合の計測密度の和を上回ることを終了条件とした．システムを用いた場合，経路の終端へは 32 回目の計測で到達したため，33 回目以降は，システムが示した推奨度が最大の地点でレンジデータの取得を繰り返した．その結果，40 回目の計測でシステムを利用しなかった場合における 49 回目の計測密度の和を上回った．33 回目以降の取得地点を，図 25 中の番号で示す．図 25 にデータを取得した経路と，提案システムを利用した場合と利用しなかった場合の計測地点を示す．どちらの場合も 1 回目の取得地点は同じである．図 26 に，それぞれの場合の計測密度の和の推移を示す．システムを利用した場合の計測密度の和は，システムを利用しなかった場合に対して最大で 38.8%，経路の終端に達した 32 回目においては 25.5% 上回った．図 26 より，同じ計測回数におけ

る計測密度の和は常に提案システムを利用した方が上回っており、提案システムを利用することで、モデル化の対象範囲を少ない回数で計測できたことが確認できる。

計測密度は、それぞれの場合において1回目からほぼ一定の割合で増加しているが、提案システムを利用した場合は29回目、利用しない場合では40回目あたりから増加率が低下している。これは、計測した領域がモデル化の対象範囲の全域に達したためであると考えられる。

4.3.2 実環境におけるデータ取得支援

現実環境における支援システムによる実験では、車載センサシステムを用いて行い、本学構内と奈良県生駒市北大和一丁目付近の二箇所を対象として実験を行った。本学構内のセンサの進入可能領域は、CADデータを元に手動で設定し、北大和一丁目付近のセンサ進入可能領域は、国土地理院により提供されている数値地図[国土07]から抽出した道路領域を利用した。図27に本学構内、図29に北大和一丁目付近のセンサ進入可能領域を示し、レンジデータ取得地点を×印で示す。推奨度マップの更新の様子をそれぞれ、図28、図30に示す。

作成されたマップにより、推奨度の高い計測位置が確認できる。レンジファインダの操作者はこのマップをみて次の計測位置を決定した。本実験におけるレンジデータを取得してから推奨度マップが更新されるまでの時間は、約1分であった。また、GPSの電波の受信状態の悪化による精度低下が発生し、位置合せの初期値の精度が悪化したためレンジデータの位置合せが失敗する場合がみられた。そのような場合は、受信状態の回復を待ってRTK-GPSとジャイロ스코ープによる位置・姿勢を取得し、位置合せを行った。

北大和一丁目において、図29のAで示される道路は、他の場所と比べて、レンジデータの取得間隔が短くなっている。これは、道路沿いに街路樹が密に存在し、他の場所と同じ距離を移動すると、法線の異なる三平面を取得可能であるレーザの数が閾値を下回り、位置合せが不可になるとシステムが判定したためである。このような平面領域の取得に対する障害物が多い場所でも、システムに従うことで位置合せが可能なレンジデータを取得することができた。北大和一丁目付近におけ

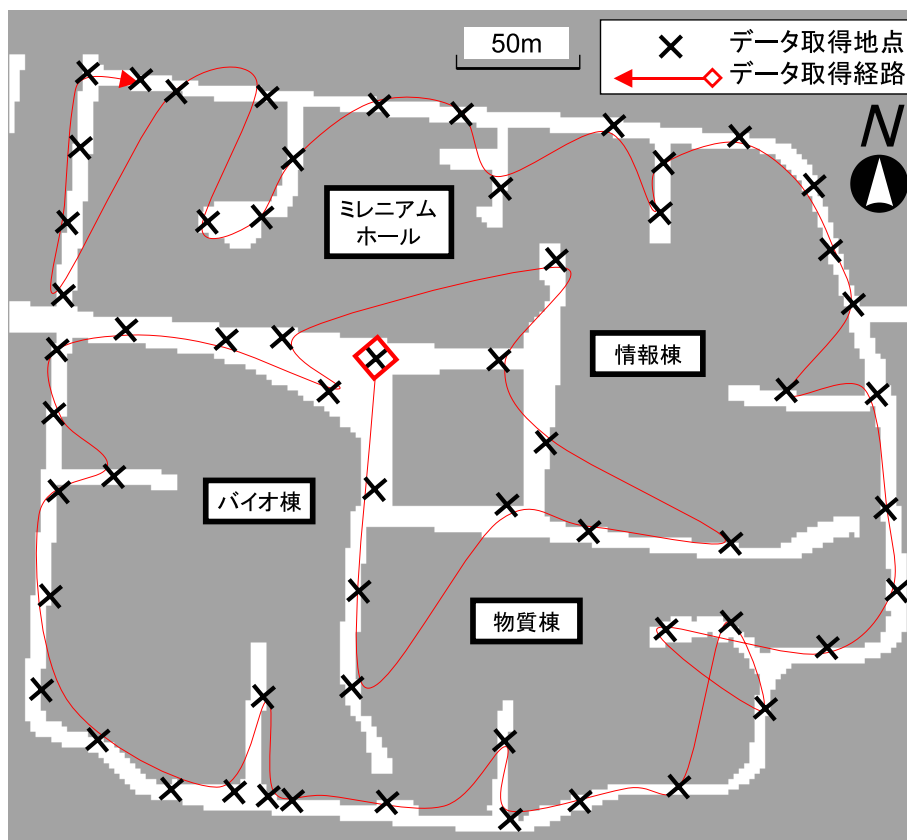


図 27 データの取得位置と経路 (本学構内)

る対象範囲全域で取得した 112 地点分のレンジデータを位置合せした結果を，図 29 中の矢印で示す視点からの画像を図 31 に示す．本学構内で取得したデータから作成した三次元モデルについては，次章で述べる．

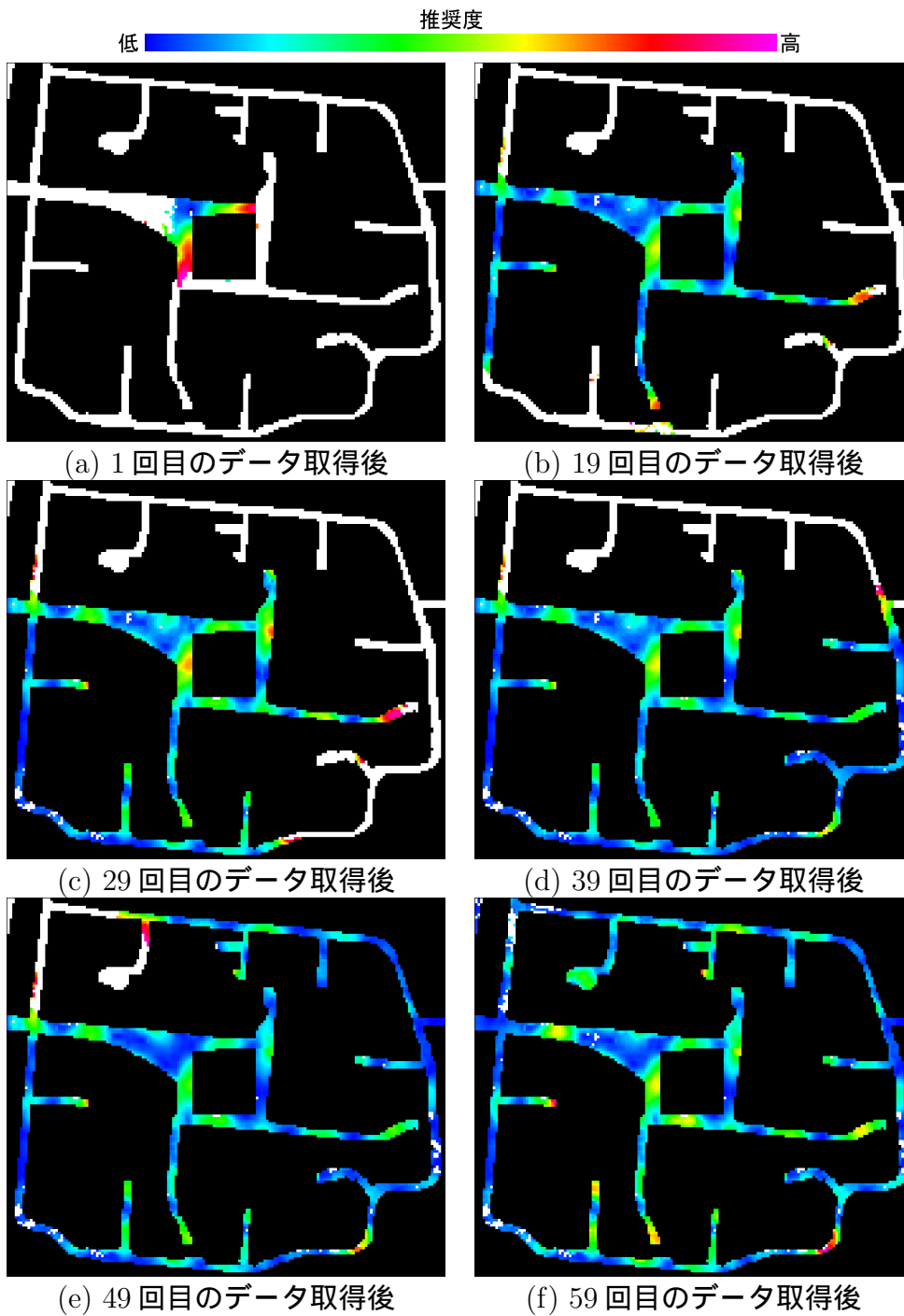


図 28 推奨度マップの更新の様子 (本学構内)

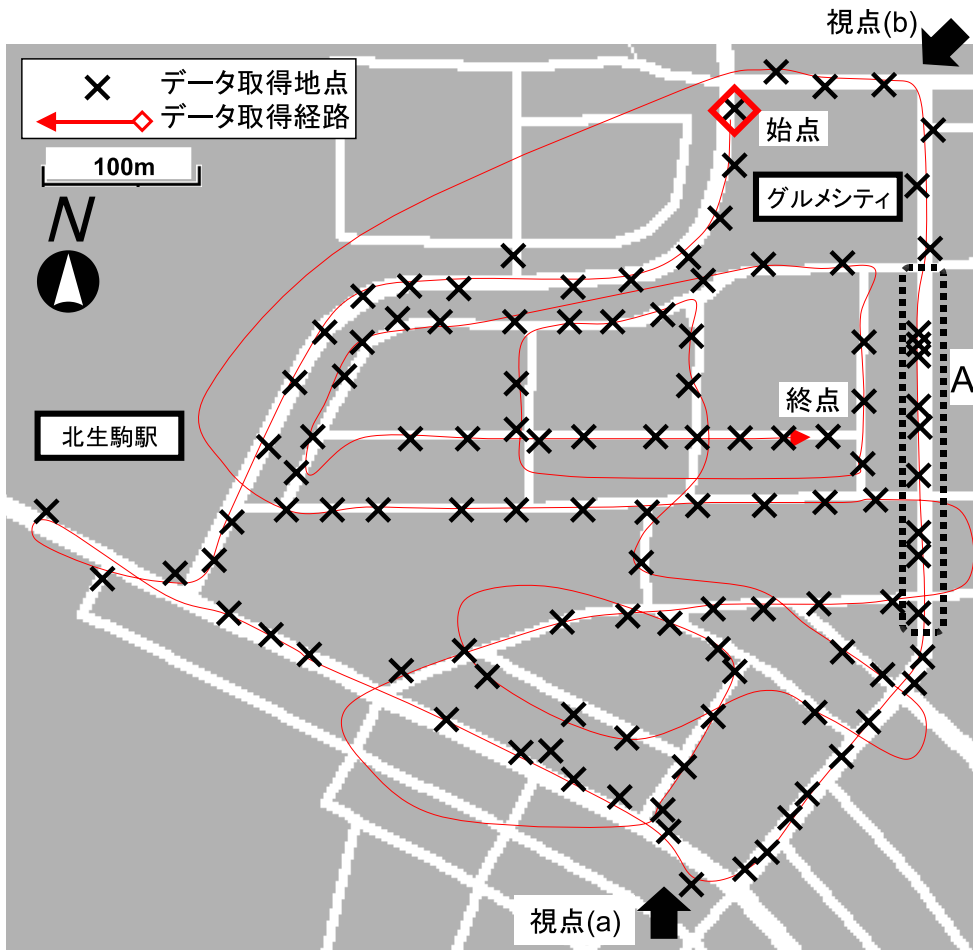


図 29 データ取得の位置と経路 (北大和一丁目付近)

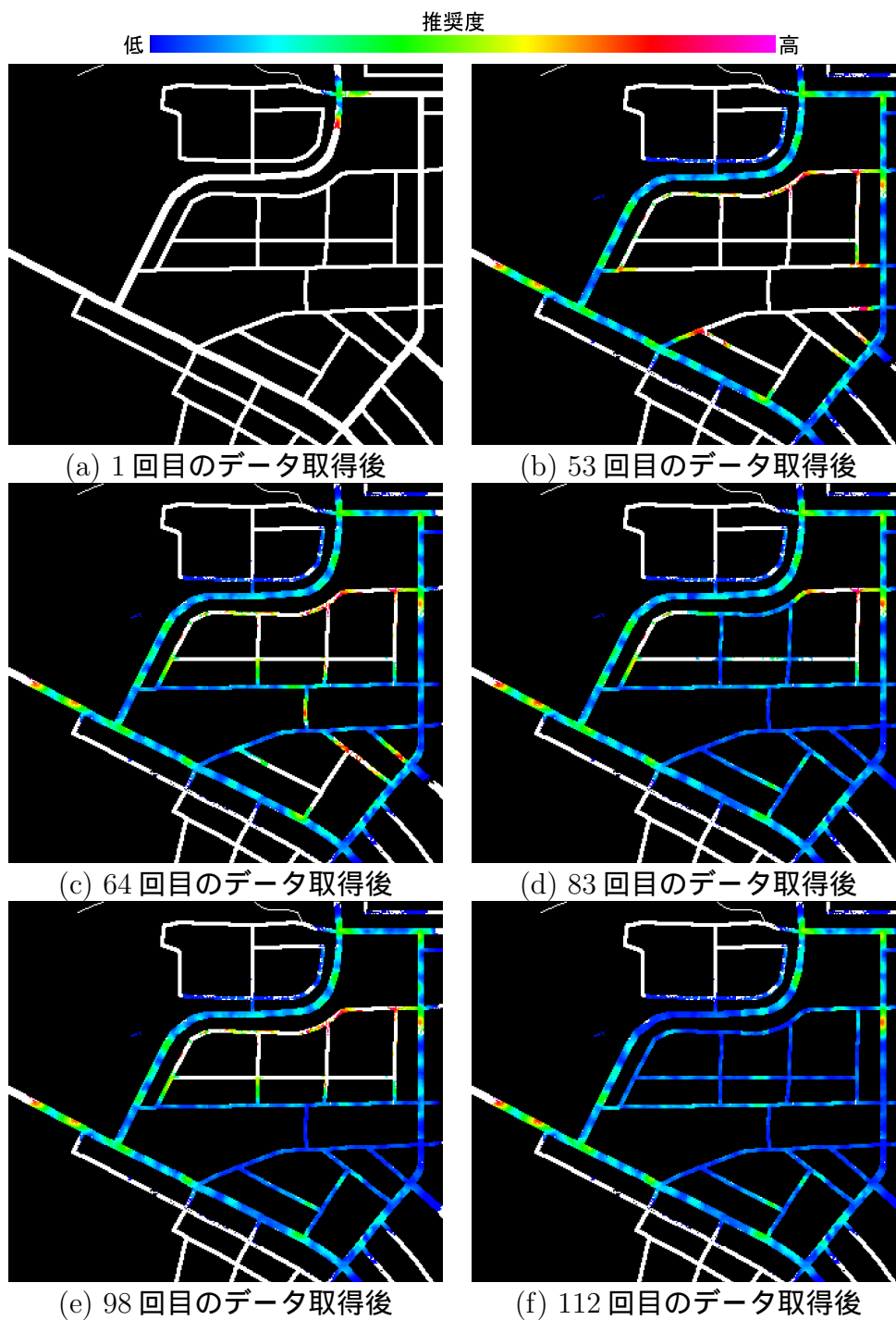


図 30 推奨度マップの更新の様子 (北大和一丁目付近)



図 29 の視点 (a) からの画像



図 29 の視点 (b) からの画像

図 31 対象範囲全域の計測結果 (北大和一丁目付近)

4.4 結言

本章では、レンジファインダの操作者に、次の計測位置を決めるための情報として、計測の推奨度を示すマップを提示するレンジデータ取得支援システムを提案した。提案システムは、物体の計測密度を指標とした各地点の推奨度をボクセルモデルを用いて算出し、取得したレンジデータを位置合せして、逐次形状モデルに反映させるために、取得済みのレンジデータから、位置合せのための重複する平面領域の取得を考慮した。また、GPUを用いることで推奨度計算を高速化し、レンジデータを取得する度にモデルを更新することで、レンジファインダの操作者にインタラクティブに効率の良い場所を提示した。シミュレーション実験において、提案システムを用いた場合と用いなかった場合でのモデル化対象の計測密度を比較することで本システムの有効性を示した。実環境での実験においても、レンジデータの取得効率の高い場所を示すことができ、かつ位置合せが正しく行えることを確認した。

5. 多地点全方位データの統合による三次元モデル生成

5.1 序言

本章では，取得した全方位レンジデータと全方位画像を統合し，テクスチャつき三次元モデルを生成する手法について述べる．提案手法は，まず多地点で取得したレンジデータからサーフェイスモデルを生成する．このとき，2章で述べた位置合せの際に行った対応面探索手法を利用して，レンジデータの重複部分の判定を行い，重複部分の形状の統合を行い，サーフェリスモデルを生成する．そして統合されたサーフェイスモデルのテクスチャを全方位画像から生成する．しかし，屋外環境では，全方位画像の撮影時の日照条件がさまざまに変化することが考えられ，生成したテクスチャの連続性が損なわれる場合が生じる．従来から，連続性を保持したテクスチャを生成するために，物体の表面反射特性を推定する手法が提案されているが [MYT07]，これらの手法は既知の光源下で物体の色を計測し反射特性を推定する．しかし，屋外環境では照明を人工的に制御することは困難である．そこで本手法では，テクスチャを，取得した全方位画像の解像度とオクルージョンを考慮したブレンディングにより生成する．また，生成した三次元モデルと没入型球面ディスプレイを用いて，臨場感の高いウォークスルーシステムの試作を行った．

5.2 サーフェイスモデルの生成

多地点で取得したレンジデータを統合し，サーフェイスモデルを生成する．レンジデータ毎にポリゴンを作成し，ポリゴンリダクションを行う．そして，他のレンジデータとの重複部分の結合を行うことで，複数のレンジデータから統合された形状モデルを生成する．

5.2.1 レンジデータのポリゴン化

ポリゴンは，距離画像上で隣接する画素を結ぶことで作成する．そして，3.2.1節での平面検出の結果を利用してポリゴン数の削減を行う．同一平面と判定され

た部分で行うことで，形状を変えずにポリゴンを削減することが可能である．

ポリゴンの削減は以下の処理を繰り返すことにより行われる．

1. 頂点の結合
2. 頂点の移動

ポリゴンの頂点の結合は，図 32 に示すように，ある注目頂点 p の結合を考えた場合， p を共有する三角ポリゴンの頂点に着目する．すべての頂点が同一の平面領域の頂点であれば，頂点の結合により新たに生成された辺の長さの和が最小になるようにする．

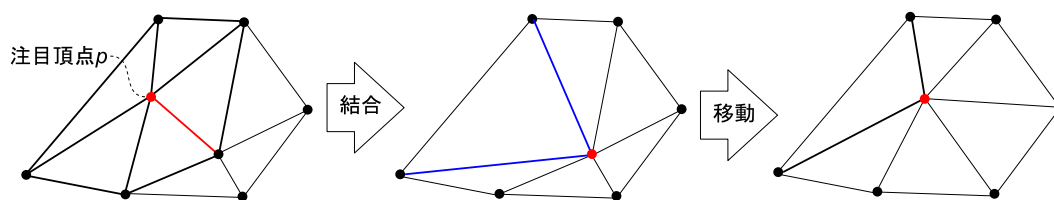


図 32 ポリゴンの頂点の結合

5.2.2 重複部分のポリゴンの結合

他のレンジデータとの重複部分の結合を，Turk らが提案した図 33 に示す Mesh Zippering [TL94] により行う．ただし，樹木などの形状が複雑な部分では，レンジデータの計測位置により生成されるパッチの形状が異なるため，Turk らの手法によりポリゴンを結合することは困難となる．そのため，本手法で Mesh Zippering を適用する部分は，3.1.2 節で述べた平面検出により平面と判定された点で構成されたポリゴンが重複した部分のみとする．

5.3 テクスチャマッピング

本節では，各ポリゴンのテクスチャを全方位画像から生成する手法について述べる．

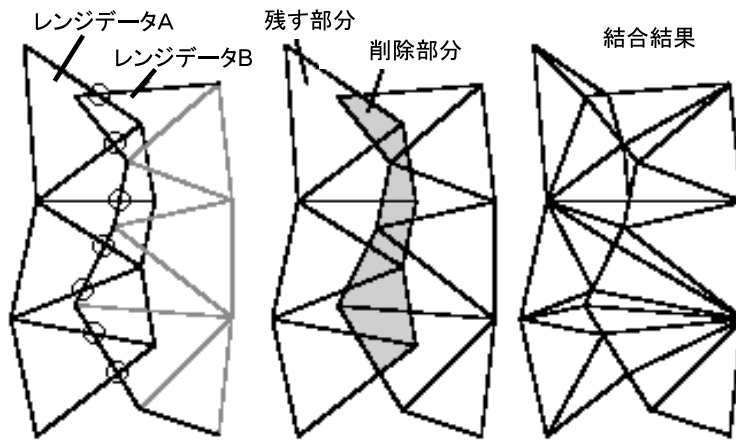


図 33 Mesh Zippering[TL94] による重複部分の結合

2章で述べたように，全方位レンジファインダと全方位カメラの位置関係は固定されており，座標系間の変換行列も推定済みである．そして，3章の位置合わせ手法でレンジデータを位置合わせすることにより，統合座標系からの各全方位カメラ座標系への変換行列が求まるため，モデルの三次元点が各全方位画像のどの点に投影されるかを一意に求めることができる．そして，その変換行列を用いてポリゴンをそれぞれの全方位画像面へと投影することで，ポリゴンのテクスチャを取得することが可能となる．

全方位画像 Img_i 取得時のカメラ座標系を CAM_i とし，モデルの統合座標系 (GPS 座標系) からカメラ座標系 CAM_i への変換行列を M_{GtoC_i} としたとき，統合座標系の点 $p_G = (x_G, y_G, z_G)^T$ の全方位カメラ Img_i での座標 (u_{p_G}, v_{p_G}) は， CAM_i における p_G の座標 $(x_{C_i}, y_{C_i}, z_{C_i})^T$ から以下のように求められる．

$$\begin{pmatrix} x_{C_i} \\ y_{C_i} \\ z_{C_i} \end{pmatrix} = M_{GtoC_i} \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} u_{pG} \\ v_{pG} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{iW} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{y_{C_i}}{x_{C_i}} \right) \\ I_{iH} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{z_{C_i}}{\sqrt{x_{C_i}^2 + y_{C_i}^2}} \right) \right) \end{pmatrix} \quad (15)$$

ここで, I_{iW} , I_{iH} は, 全方位画像 Img_i の縦横それぞれの解像度である.

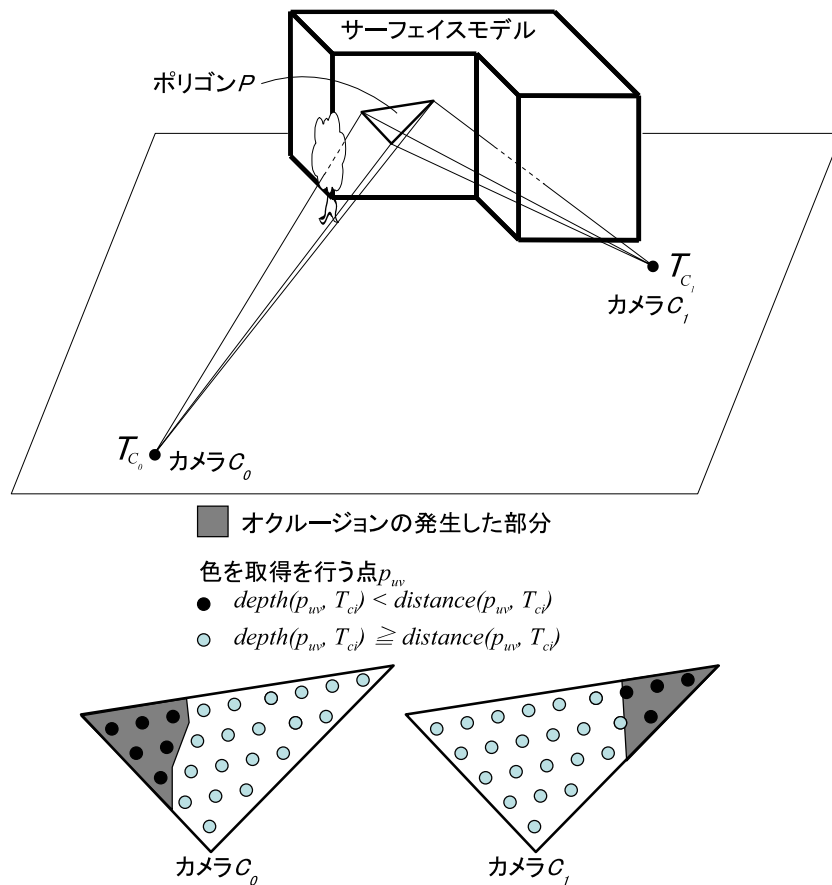
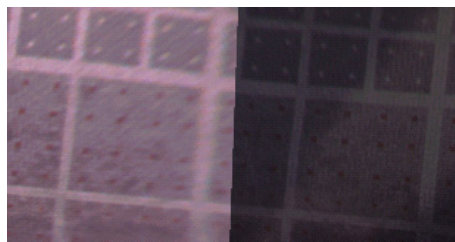


図 34 オクルージョンの判定

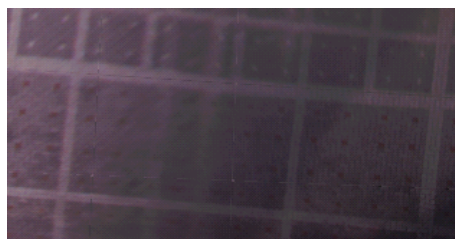
レンジデータと画像は同地点で取得するため, レンジデータと同様に同じ部分が複数の全方位画像に写っている場合がある. また, オクルージョンによりそのポリゴン全体のテクスチャが写っていない場合も考えられる. 例えば, 図 34 に示

すように，ポリゴン P はカメラ C_0, C_1 の2つのカメラによりテクスチャが撮影されている．しかし，どちらのカメラもポリゴン P のテクスチャは，オクルージョンにより撮影されていない部分が発生している．オクルージョンが発生している全方位画像からテクスチャを生成すると誤ったテクスチャが生成されるため，前節で生成したサーフェイスモデルから，カメラとテクスチャを生成するポリゴン間のオクルージョン判定を行うことで，正しいテクスチャを生成する．

また，屋外環境では，天候や時刻による日照条件の変化などからテクスチャの品質が変化しやすい．そのため，テクスチャを生成するための画像を解像度が最も高い画像のみから生成した場合，図 35(a) に示すように品質の異なるテクスチャが隣接する場合が発生する．このような，テクスチャが不連続な部分が発生すると，見た目の違和感が大きくなってしまう．見た目の違和感を軽減するために，テクスチャを複数の画像のブレンドにより生成することが，一般に行われている [EBR98]．本手法では，画像の解像度を考慮したブレンドによりテクスチャを生成する．



(a) ブレンドなし



(b) ブレンドあり

図 35 解像度を考慮したブレンドによるテクスチャの生成

ポリゴンのテクスチャ生成の手順を以下に示す．

1. ポリゴン P を全方位画像 Img_i の取得位置 T_{C_i} を中心とする半径 1 の球へと投影し，表面積 S_i を求める．

半径 1 の球面上に投影した三角ポリゴンの面積 S は，図 36 に示す $\alpha \beta \gamma$ により以下のように求めることができる．

$$S = (\alpha + \beta + \gamma - \pi) \quad (16)$$

ここで， α は面 $op'_1p'_3$ と面 $op'_1p'_2$ のなす角， β は面 $op'_2p'_1$ と面 $op'_2p'_3$ のなす角， γ は面 $op'_3p'_2$ と面 $op'_3p'_1$ のなす角である．ポリゴン P の角度が最も大きい頂点をはさむ 2 辺の中から長辺を L_p ，短辺を S_p としたとき， L_p に対応する弧の角度 L_{arg} ， S_p に対応する弧の角度 S_{arg} を求める．テクスチャ画像の縦の解像度 th_i を S_{arg} から，横の解像度 tw_i を L_{arg} から算出する．全方位カメラにより画像を取得した場合，円周の解像度は I_{i_H} となることから，テクスチャ画像の解像度 th_i, tw_i をそれぞれ以下のように計算する．

$$th_i = \left\lceil \frac{S_{arg} \cdot I_{i_H}}{2\pi} \right\rceil \quad (17)$$

$$tw_i = \left\lceil \frac{L_{arg} \cdot I_{i_H}}{2\pi} \right\rceil \quad (18)$$

2. th_i, tw_i それぞれの最大値をテクスチャ画像の縦横の解像度 T_h, T_w とし，各画素に対応する三角ポリゴン上の点 p_{uv} を設定する．図 37 の場合，

$$p_{uv} = p_2 + (u + 0.5) \frac{L_p}{T_w} + (v + 0.5) \frac{S_p}{T_h} \quad (19)$$

$$(u = 0, \dots, T_w - 1, \quad v = 0, \dots, T_h - 1)$$

となる． p_{uv} が三角ポリゴン内に点が含まれなかった場合も，点が存在するものとして色の取得を行う．

3. 点 p_{uv} の全方位画像上での座標 $(u_{p_{uv}}, v_{p_{uv}})$ の色 $Color_i(u_{p_{uv}}, v_{p_{uv}})$ を取得する．そして，表面積 S_i による加重平均によって点 p_{uv} の色 $Texture(p_{uv})$ を決定する．このとき，サーフェイスモデルを用いて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る画像は除外する．

点 p_{uv} の色 $Texture(p_{uv})$ は次式により算出する .

$$Texture(p_{uv}) = \frac{Occlusion(p_{uv}, Tc_i) \cdot S_i \cdot Image_i(u, v)}{\sum_{i=1}^I Occlusion(p_{uv}, Tc_i) \cdot S_i} \quad (20)$$

ここで , $Occlusion(p_{uv}, Tc_i)$ は , 点 p_{uv} と全方位画像 Img_i の取得位置 Tc_i の間のオクルージョンの有無を示し , オクルージョンが発生しているときは0 , 発生していないときは1 となる . $Depth(p_{uv}, Tc_i)$ をサーフェイスモデルを用いて算出した , p_{uv} を視点とした Tc_i 方向への奥行き値 , $Distance(p_{uv}, Tc_i)$ を p_{uv} と Tc_i の距離としたとき ,

$$Occlusion(p_{uv}, Tc_i) = \begin{cases} 0 & (Depth(p_{uv}, Tc_i) < Distance(p_{uv}, Tc_i)) \\ 1 & (Depth(p_{uv}, Tc_i) \geq Distance(p_{uv}, Tc_i)) \end{cases} \quad (21)$$

となる .

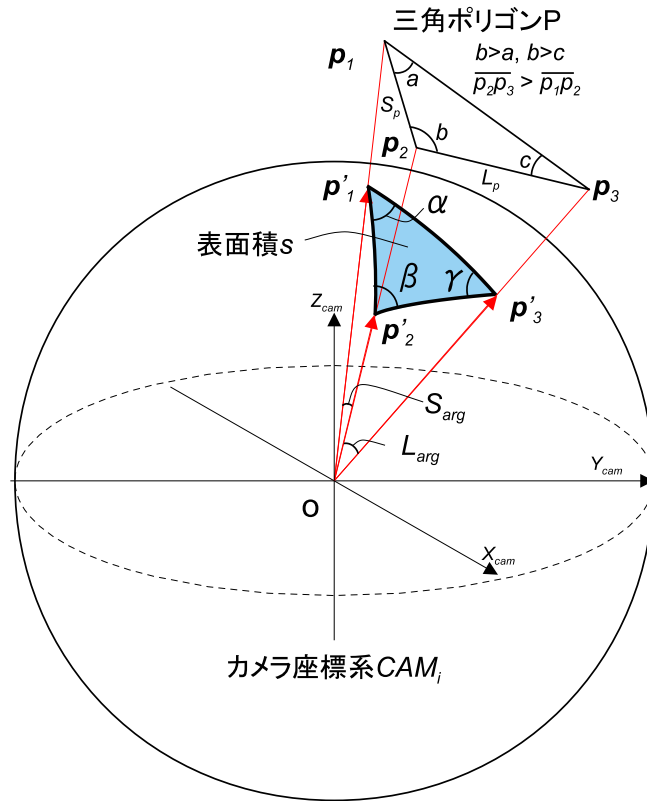


図 36 カメラ座標系 CAM_i の原点を中心とした球への三角ポリゴンの投影

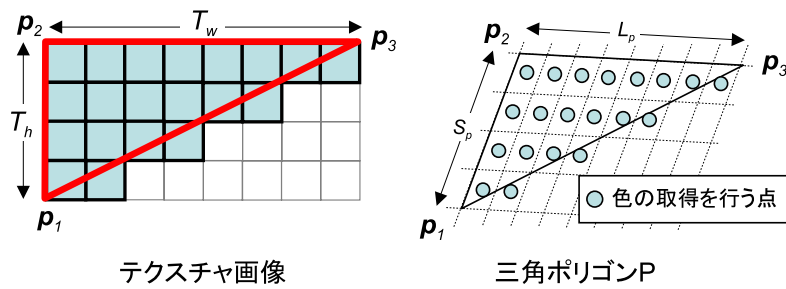


図 37 テクスチャ画像と色を取得する点

5.4 モデル生成実験

提案手法を用いて屋外環境の三次元モデル化実験を行った。以下、本学構内を対象とした三次元モデルの生成実験について述べる。本実験では、4章の実験で示した本学構内で取得した図 27 に示す 59 地点分の全方位レンジデータおよび全方位画像を用いて三次元モデル生成を行った。

図 38 に生成した三次元モデルを示す。生成モデルを歩行者の視点で見ても精度が保たれ、かつ自由な視点移動および見回しが可能であることを確認した。

また、ガラスをレーザレンジファインダで計測した場合、1) ガラスまでの距離、2) レーザがガラスを透過し建物内部の物体までの距離、3) ガラスがレーザを反射しガラスに映った虚像までの距離、のいずれかが計測され、窓の部分はポリゴンが正しく生成できない場合や虚像の位置にポリゴンが作成されることがあった。

レンジファインダと全方位カメラの投影中心のずれは約 30cm であり、ずれによりレンジデータは存在するがテクスチャが存在しないという部分は見られなかった。

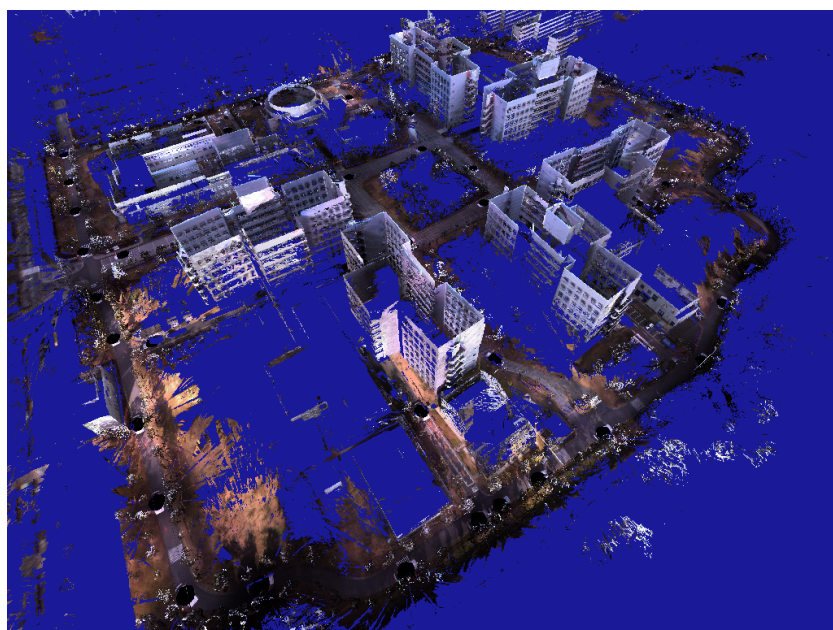
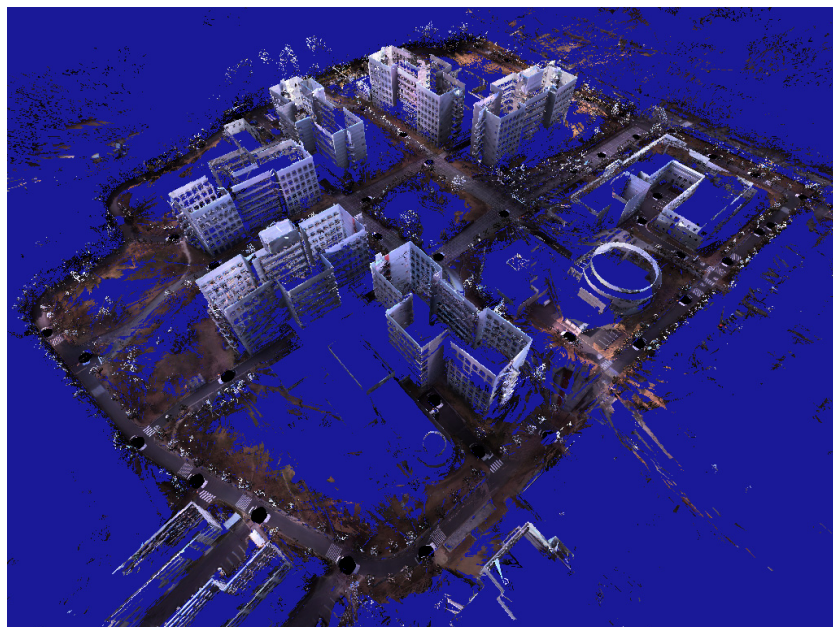


図 38 生成された三次元モデル

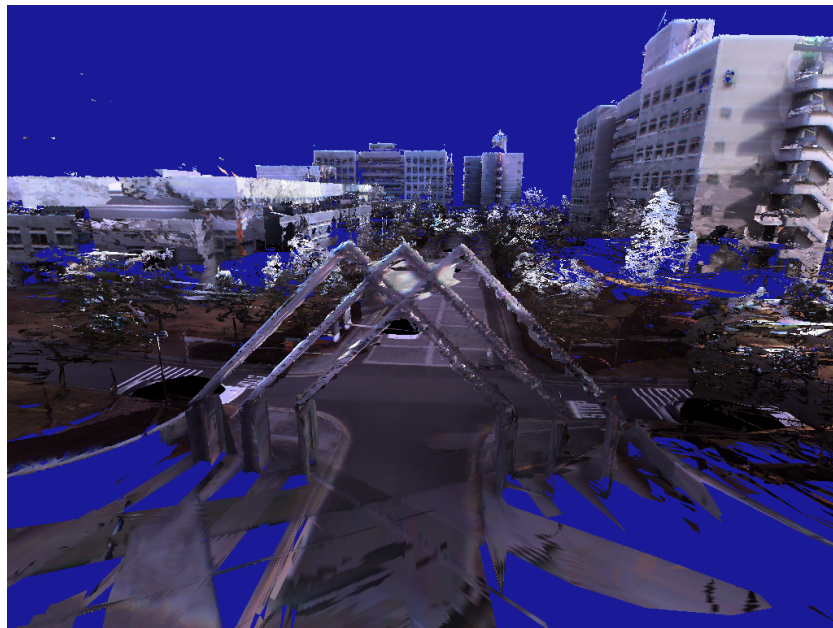
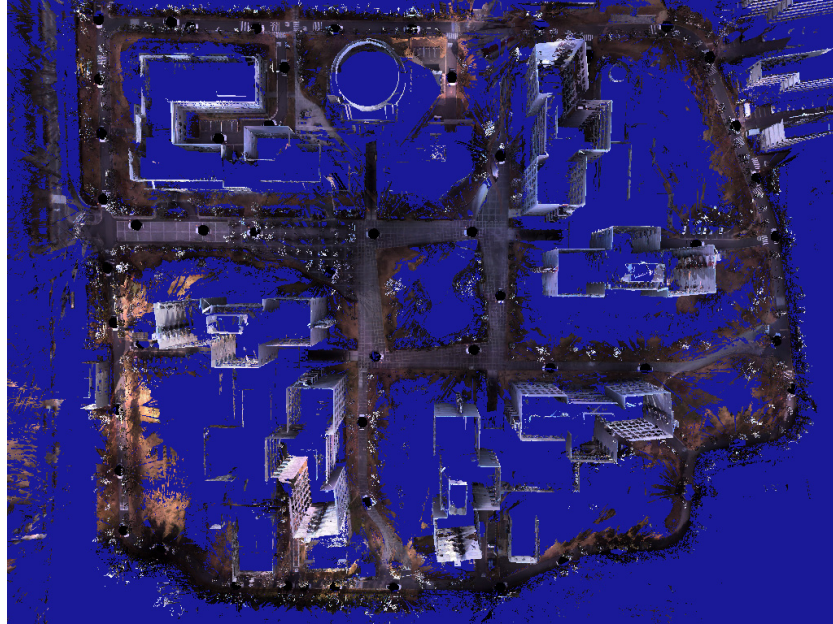


図 38 生成された三次元モデル(つづき)

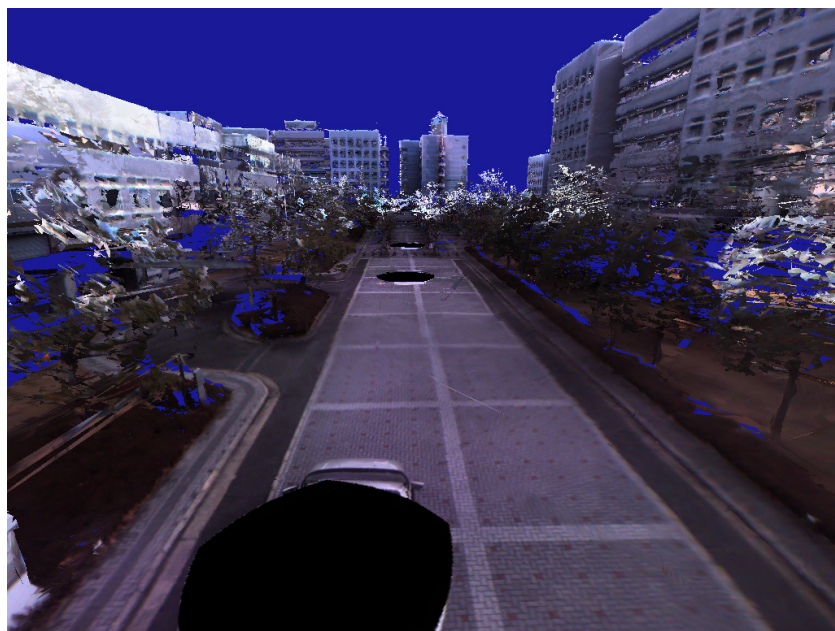
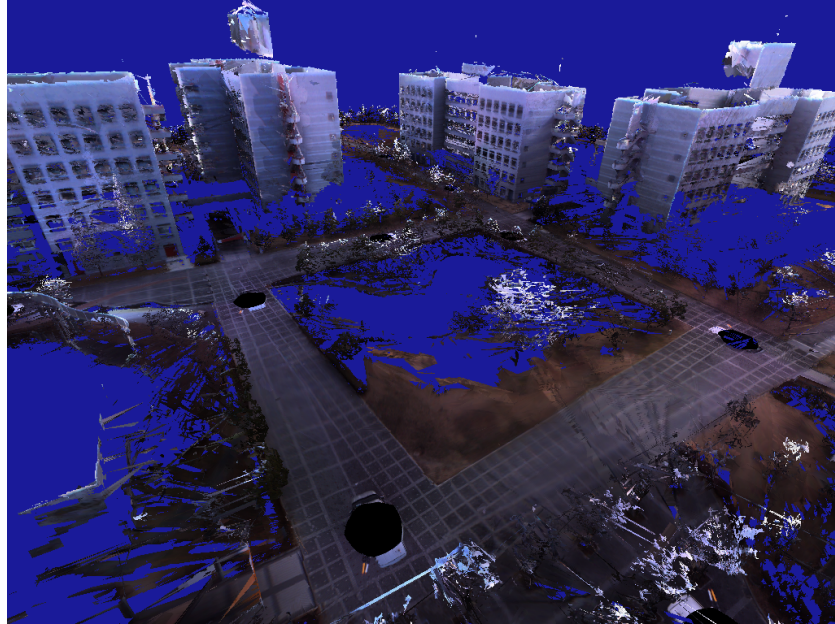


図 38 生成された三次元モデル(つづき)

5.5 ウォークスルーシステムの試作

提案手法によって生成された三次元モデルを用いて三次元モデル内を移動可能なウォークスルーシステムを構築した。試作したウォークスルーシステムの機器構成および概要を表7と図39に示す。作成されたモデルから、液晶シャッタ方式で両眼画像を球面ディスプレイに提示した。

図41に示すように、ユーザはコントローラによって視点の位置と向きをインタラクティブに操作することができ、仮想環境内を自由に動き回ることができる。球面ディスプレイへ表示してもユーザから透視投影画像を表示するために図40に示すように、変換を行った画像を利用する。

表7の機器構成で描画速度を10フレーム毎秒に保つためにはポリゴン数を100万程度に抑える必要があったため、データを取得した範囲全てを同時に表示することはできなかった。しかし一度に表示できるモデルの範囲は約100m×約100m程度となり、ウォークスルーにおいて一度に見える範囲としては十分であるため、視点に応じてデータを選択することでウォークスルーが可能であった。

表7 ウォークスルーシステムの機器構成

球面ディスプレイ	松下電工 CyberDome 直径:4.0m (幅:3.75m) 画角:水平 114 度, 垂直 77 度
プロジェクタ	解像度:1280×1024(SXGA)
コントローラ	Microsoft SideWinder Game Pad Pro
液晶シャッタ眼鏡	Stereo Graphics Corporation Crystal Eyes
PC	CPU:Intel Pentium 2.53GHz Memory:1GB
グラフィクスカード	WildcatVP Pro 990(ステレオ視対応)

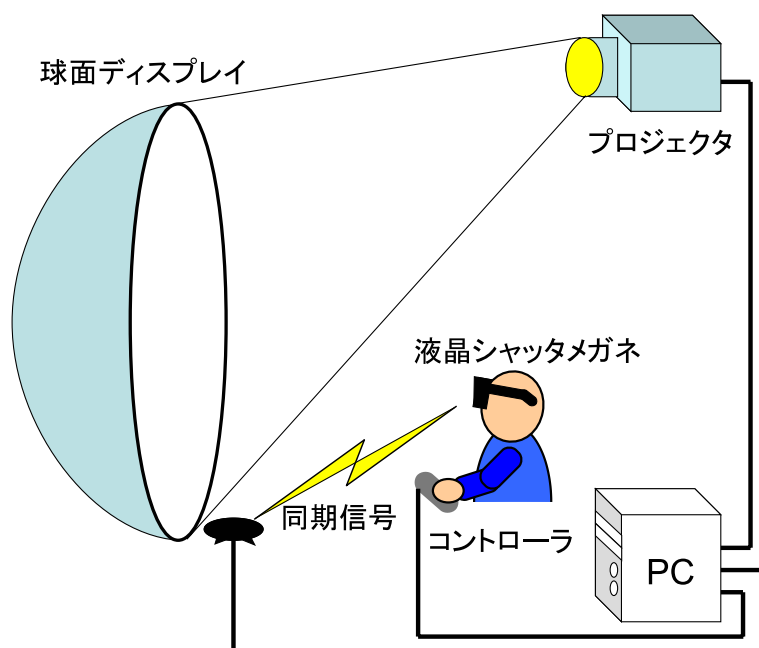
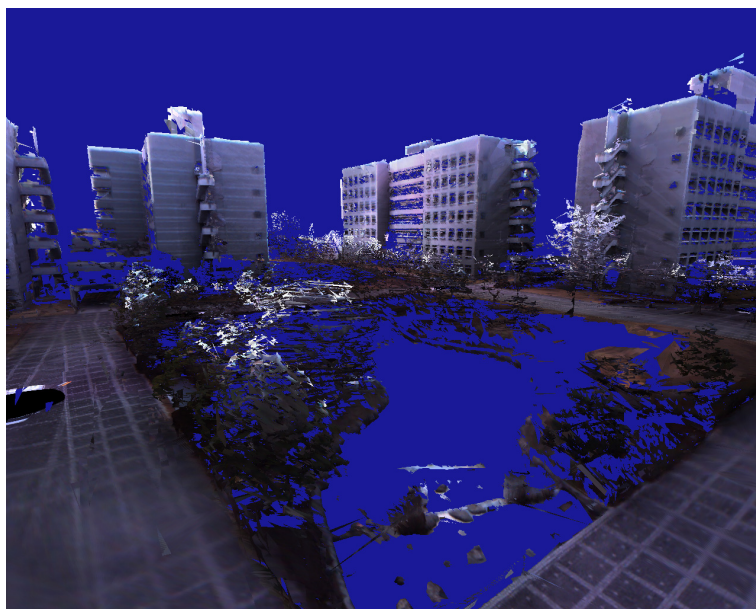
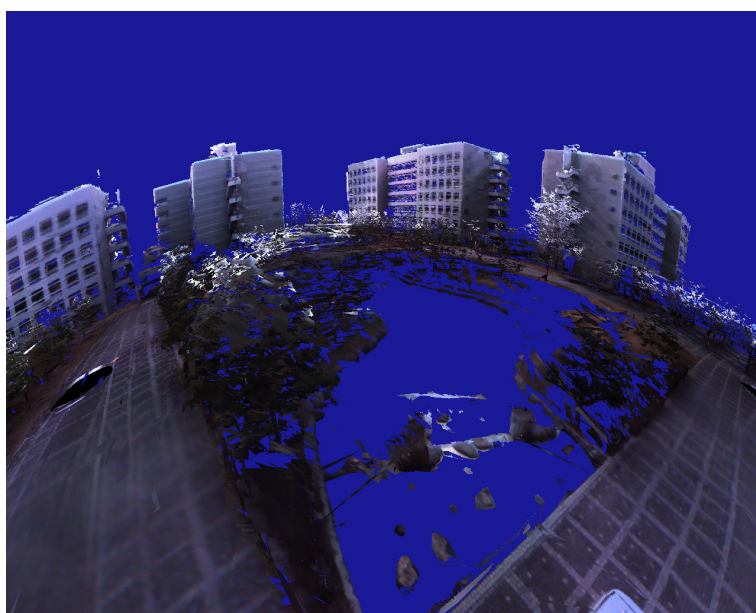


図 39 ウォークスルーシステムの概要



透視投影画像



球面ディスプレイに投影する画像

図 40 球面ディスプレイへの投影画像の作成

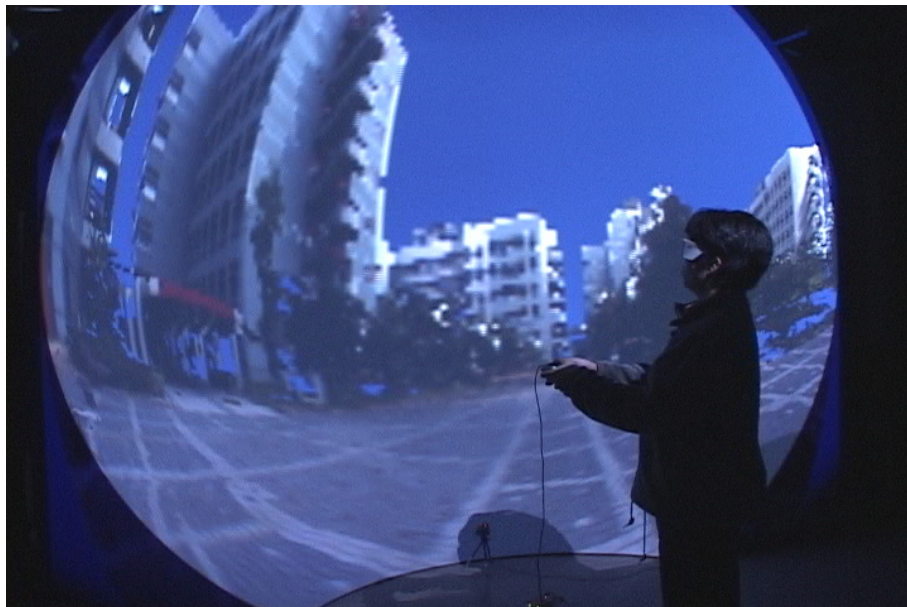


図 41 ウォークスルーシステムの外観

5.6 結言

本章では、屋外環境を高精度に三次元モデル化するために、全方位センサによって取得されたレンジデータと画像を用いた、三次元モデルの生成手法を提案した。全方位レンジデータと全方位画像を同じ位置で取得することで、テクスチャ情報付レンジデータを取得する。

提案手法では、まず、レンジデータ毎にポリゴンを作成し、平面の検出結果を利用した頂点の結合によりポリゴン数の削減を行う。そして、レンジデータ間で平面の重複部分を探索し、Mesh Zippering に基づいて形状の統合を行った。形状モデルのテクスチャは、全方位画像中でのポリゴンの解像度とオクルージョンを考慮したレンディングによって生成することで、照明条件の変化しやすい屋外環境において取得された画像でも、違和感の少ないテクスチャを生成する。

実環境の三次元モデル化実験では、本学構内 59 地点において全方位レンジデータおよび全方位画像を取得し、提案手法を用いて三次元モデルを生成した。また、試作したウォークスルーシステムにより、歩行者の視点で見ても精度が保たれ、全体的に歪みのないモデルが生成されたことを確認した。

しかし、樹木などの複雑な形状をした物体は、統合された形状を作成することは困難であったため、Marchin Cube 法 [LC87] によるポリゴンの作成や、Point based rendering 法 [SP04] により描画することが考えられる。また、テクスチャの生成は [KTI05] らの手法により屋外環境の光源 (太陽, 空) の色を推定することで、日照条件の違いによるテクスチャの品質の違いをより低減させることが可能であると考えられる。

6. 結論

6.1 まとめと考察

本論文では、全方位レンジデータと全方位画像から、広域な屋外環境の三次元モデルを高精度に生成する手法についての提案した。

第2章では、形状情報を取得する全方位レンジファインダ、色情報を取得する全方位カメラ、それらの位置・姿勢情報を取得する RTK-GPS とジャイロスコープを組み合わせたハイブリッドセンサ、から構成されるセンサシステムについて述べた。

第3章では、広域な都市環境の多地点で取得したレンジデータの位置合せを、都市環境に多く存在する、建造物の壁面や、道路面などの平面部分を利用することで、高精度に行う手法を提案した。取得したレンジデータから平面の検出を行い、RTK-GPS とジャイロスコープにより取得したセンサの位置・姿勢を用いて、レンジデータ間で対応する平面を探索した。そして、対応する平面のパラメータの誤差が最小化するように位置合せを行った。対応面の探索と誤差の最小化を解が収束するまで繰り返し、取得したレンジデータを一括同時位置合せすることで全体的に歪みなく位置合せできた。また、従来手法との精度の比較を行った結果、点群の密度の差や奥行きの変化が大きい環境においても精度良く位置合せが可能であることを確認できた。今後の課題として、位置センサである RTK-GPS の位置取得時の衛星の電波状況を誤差関数に反映させるなどして絶対位置の精度を向上させる必要がある。

第4章では、レンジファインダの操作者に、次の計測位置を決めるための情報として、計測の推奨度を示すマップを提示するレンジデータ取得支援システムを提案した。提案システムは、物体の計測密度を指標とした各地点の推奨度をボクセルモデルを用いて算出し、取得したレンジデータを逐次モデルに反映させるために、位置合せのための他のレンジデータとの重複する平面領域の取得を考慮した。また、GPU を用いることで推奨度計算を高速化し、レンジデータを取得する度にモデルを更新することで、レンジファインダの操作者にインタラクティブに効率の良い場所を提示した。シミュレーション実験において、提案システムを

用いた場合と用いなかった場合でのモデル化対象の計測密度を比較することで本システムの有効性を示した。実環境での実験においても、レンジデータの取得効率の高い場所を示すことができ、かつ位置合せが正しく行えることを確認した。

第5章では、屋外環境を高精度に三次元モデル化するために、全方位センサによって取得されたレンジデータと画像を用いた、三次元モデルの生成手法を提案した。提案手法では、まず、レンジデータ毎にポリゴンを作成し、平面の検出結果を利用した頂点の結合によりポリゴン数の削減を行う。そして、レンジデータ間で平面の重複部分を探索し、Mesh Zippering に基づいて形状の統合を行った。形状モデルのテクスチャは、全方位画像中でのポリゴンの解像度とオクルージョンを考慮したブレンディングによって生成することで、照明条件の変化しやすい屋外環境において取得された画像でも、違和感の少ないテクスチャを生成する。実環境の三次元モデル化実験では、本学構内 68 地点において全方位レンジデータおよび全方位画像を取得し、提案手法を用いて三次元モデルを生成した。歩行者の視点で見ても精度が保たれ、全体的に歪みのないモデルが生成されたことを確認した。樹木等の形状が複雑な物体の形状生成やユーザへの違和感のない提示方法が今後の課題である。

本論文で、提案した手法・システムを用いることで、広域な屋外環境の三次元モデルを高精度に生成することが可能となり、景観シミュレーションやカーナビゲーションなどの複合現実感技術への幅広い分野での応用が期待できる。

6.2 現状と今後の課題

本論文では、広域な屋外環境の三次元モデルを生成する手法を提案したが、モデルの精度・写実性をさらに発展させるために、以下の手法を検討することが考えられる。

移動計測手法との併用

従来、レンジファインダの計測手法は、以下の二つの方法に大別される。

- 定地点計測 (“Stop-and-go” scanning) [SPKA02, ZS00]
- 移動計測 (“Continuous” scanning) [FZ04, ZS03, 小野 04]

定地点計測は、本論文での計測手法であり、レンジファインダを固定して環境を計測し、環境の多地点においてデータの取得を繰り返す。環境全体のモデルを得るとき、計測位置が近いデータ間でマッチングによる位置合せが可能であるが、広域な都市環境をオクルージョンによる未計測部分なく計測するには長い時間を必要とする。

移動計測は、定地点計測の欠点である計測労力を軽減するための手法である。この手法は車両や飛行機などの移動体にレンジファインダを搭載し移動しながら計測を行う手法である。広域な環境を固定計測よりも少ない計測労力で計測することが可能であるが、計測中のセンサの位置・姿勢情報が必要になり、生成されるモデルの精度がレンジファインダの位置・姿勢の推定精度に依存する。

移動計測でレンジファインダの位置・姿勢を取得するために用いられている主な手法として、一つにGPSや慣性航法装置 (Inertial Navigation System, 以下, INS センサ) 等の位置・姿勢センサを利用する手法がある [ZS03]。この手法は容易にセンサの位置・姿勢の取得が可能であるが、GPSは建造物などによる電波の反射や遮蔽により精度が影響され、INSセンサは長時間の使用した際、蓄積誤差が発生し十分な精度を得ることは困難である。本研究で使用したジャイロスコープのようにRTK-GPSと連動することにより、蓄積誤差の影響を低減することは可能であるが、この場合、蓄積誤

差の補正の精度は RTK-GPS の位置精度の影響を受けてしまうため、移動計測中のレンジファインダの位置・姿勢を精度良く計測することは困難であると考えられる。

もう一つの手法として、Früh[FZ01] らによって提案された、移動計測中にラインスキャンを行うレンジファインダを水平方向に計測し続け、フレーム毎のスキャン結果をマッチングすることでセンサの位置・姿勢を推定する手法がある。Früh らはこの手法を利用して、テクスチャ付きの三次元都市空間モデルの構築を行っている [FZ04]。小野ら [小野 04] は、そのスキャン結果の時間的連続性も考慮した時空間距離画像を提案している。この手法は基本的に前フレームからの差分から現在の位置・姿勢を求めるものであるため、誤差が蓄積する。また、樹木やガラスなどレーザで安定して計測できない物体の影響や、移動体の揺れにより一定の方向をスキャンし続けられなくなった場合、前フレームのスキャンラインとマッチングできなくなり推定結果が局所解に陥ってしまう可能性がある。

そこで、あらかじめ定地点計測によりおおまかに広域環境をモデル化し、残った未計測部分を移動計測により計測し、定地点計測により生成したモデルを利用して、移動中のレンジファインダの動きを精度良く推定することですることによって、モデルの精度と未計測部分の削減効率を向上させたモデル化が行えると考えられる [AKY05]。

欠損領域の形状推定手法 [河合 08, 板野 07] の利用

センサシステムの進入可能領域は周囲の状況に依存する。特に屋外環境では大きく制限されるため、計測により、未計測部分を無くすことは困難であると考えられる。また、本論文で使用したレンジファインダは、レーザを用いているため原理的に黒色の物体やガラス等の鏡面物体の計測を安定して行うことは困難である。そのため、欠損部分の形状を物体形状の尤もらしさを表すエネルギー関数や符号付距離場等を用いて補間する手法が提案されている。しかし、これらの手法は欠損部分が大きい場合には、形状を違和感無く補間することが困難となるため、定地点計測と移動計測を併用するなどして、極力計測により未計測部分を削減した上で利用するこ

とが望ましいと考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なる御助言，御指導を頂きました視覚情報メディア講座 横矢 直和 教授に厚く御礼申し上げます．博士課程前期・後期を通して国内外での発表の機会を数多く与えて頂き，懇切丁寧な指導をしていただきました．

また，副指導教官として御助言を頂いた像情報処理講座 千原 國宏 教授，並びに視覚情報メディア講座 山澤 一誠 准教授に深く感謝致します．本研究に対して様々なご指摘をいただいたことで，本研究をより良いものへと発展させることができました．

そして，全研究活動を通じて物心両面からの貴重な御助言，御指導をいただきました視覚情報メディア講座 神原 誠之 助教に心より感謝いたします．特に，本研究のテーマ設定や，発表論文における助言や添削，研究での実験などで細やかな御指導をいただきました．

研究ミーティングや学外発表の練習の場において多くの御助言，御指導を賜りました視覚情報メディア講座 佐藤 智和 助教に心より感謝いたします．

日々の研究室の活動を支えて下さった元視覚情報メディア講座事務補佐員 守屋 知代 女史に心より感謝申し上げます．

さらに，本研究に対して忌憚のないご意見をくださった像情報処理学講座 池田 聖 助教には，本研究を進めるにあたり多大なる御協力を頂きました．ここに感謝の意を表します．

最後に，本論文における研究活動を通して暖かいご助言を頂いた視覚情報メディア講座の諸氏に深く感謝をいたします．特に，本研究における実験データの取得等に協力してくれた，牧田 孝嗣氏，堀 磨伊也氏，河合 紀彦氏，武富 貴史氏，越澤 広幸氏，水戸 博之氏に感謝申し上げます．

参考文献

- [AKY05] T. Asai, M. Kanbara, and N. Yokoya: “3D Modeling of Outdoor Scenes by Integrating Stop-and-Go and Continuous Scanning of Rangefinder,” CD-ROM Proc. the ISPRS Working Group V/4 Workshop 3D-ARCH 2005: Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Vol. XXXVI, 2005.
- [ARS98] P. K. Allen, M. K. Reed and I. Stamos: “View Planning for Site Modeling,” Proc. DARPA Image Understanding Workshop, pp. 1181–1192, 1998.
- [ATS⁺03] P. K. Allen, A. Troccoli, B. Smith, S. Murray, I. Stamos, and M. Leordeanu: “New Methods for Digital Modeling of Historic Sites,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 23, pp. 32–41, 2003.
- [Bak77] H. Baker: “Three-Dimensional Modelling”, Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Vol. 2, pp. 649-655, 1977.
- [BM92] 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.
- [Bre65] J. E. Bresenham: “Algorithm for Computer Control of a Digital Plotter,” IBM Systems Jour., Vol. 4, No. 1, pp. 25–30, 1965.
- [CL96] B. Curless and M. Levoy: “A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images,” Proc. SIGGRAPH '96, ACM, pp. 303–312, 1996.
- [Con85] C. I. Connolly: “The Determination of Next Best Views,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol 2. pp. 432–435, 1985.

- [EBR98] S. F. El-Hakim, C. Brenner, and G. Roth: “A Multi-sensor Approach to Creating Accurate Virtual Environments,” *Jour. of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 53, pp. 379–391, 1998.
- [FZ01] C. Früh and A. Zakhor: “Fast 3D Model Generation in Urban Environments,” *IEEE Conf.on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System*, pp. 165–170, 2001.
- [FZ04] C. Früh and A. Zakhor: “An Automated Method for Large-Scale, Ground-Based City Model Acquisition,” *Int. Jour. of Computer Vision*, Vol. 60, pp. 5–24, 2004.
- [Goo08a] Google, “Google Earth,” <http://earth.google.com/>, 2008.
- [Goo08b] Google, “Google マップ ストリートビュー”, <http://www.google.co.jp/help/maps/streetview/>, 2008.
- [Horn87] B. K. P. Horn: “Closed-Form Solution of Absolute Orientation using Unit Quaternions,” *Jour. of the Optical Society of America A*, Vol. 4, pp. 629–642, 1987.
- [KTI05] R. Kawakami, R. T. Tan, and K. Ikeuchi “Consistent Surface Color for Texturing Large Objects in Outdoor Scenes,” *Proc. Int. Conf. on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 1200–1207, 2005.
- [LC87] W. E. Lorensen and H. E. Cline: “Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm,” *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, 1987.
- [MB93] J. Maver and R. Bajcsy: “Occlusions as a Guide for Planning the Next View,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15 No. 5, pp. 417–433, 1993.

- [MF98] N. A. Massios and R. B. Fisher “A Best Next View Selection Algorithm Incorporating a Quality Criterion,” Proc. British Machine Vision Conference, pp 780–789, 1998.
- [MYT07] T. Machida, N. Yokoya, and H. Takemura: “Inverse reflectometry for real objects with diffuse and specular interreflections,” Electronics and Communications in Japan, Part II, Vol. 90, No. 1, pp. 50–60, 2007.
- [OK93] M. Okutomi and T. Kanade: “A Multiple-baseline Stereo,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 4, pp. 353–363, 1993.
- [OSN⁺03] T. Oishi, R. Sagawa, A. Nakazawa, R. Kurazume and K. Ikeuchi: “Parallel Alignment of a Large Number of Range Images,” Proc. Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling, pp. 195–202, 2003.
- [PFTV88] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling: “Numerical Recipes in C,” Cambridge University Press 1988.
- [Pit99] R. Pito: “A Solution to the Next Best View Problem for Automated Surface Acquisition,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, No. 10, pp. 1016–1030, 1999.
- [PKV⁺00] 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.
- [Pul99] K. Pulli: “Multiview Registration for Large Data Sets,” Proc. Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling, pp. 160–168, 1999.
- [SA91] B. Sabata and J. K. Aggarwal “Estimation of Motion from a Pair of Range Images: A Review,” Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 54, No. 3, pp. 309–324, 1991.

- [SKYT02] T. Sato, M. Kanbara, N. Yokoya, and H. Takemura: “Dense 3-D Reconstruction of an Outdoor Scene by Hundreds-baseline Stereo Using a Hand-held Video Camera,” *Int. Jour. of Computer Vision*, Vol. 47, No. 1-3, pp. 119–129, 2002.
- [SNH03] H. Surmann, A. Nüchter and J. Hertzberg: “An Autonomous Mobile Robot with a 3D Laser Range Finder for 3D Exploration and Digitalization of Indoor Environments,” *Jour. Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 45, pp. 181–198, 2003.
- [SP04] M. Saintz and R. Pajarola: “Point-based Rendering Techniques,” *Computers & Graphics* 28, pp. 869–879. 2004.
- [SPKA02] Y. Sun, J. K. Paik, A. Koschan, and M. A. Abidi: “3D Reconstruction of Indoor and Outdoor Scenes Using a Mobile Range Scanner,” *Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol. 3, pp. 653–656, 2002.
- [SRR03] W. R. Scott, G. Roth and J. F. Rivest: “View Planning for Automated 3D Object Reconstruction and Inspection,” *ACM Computing Surveys*, Vol. 35, No. 1, pp. 64–96, 2003.
- [TK92] 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.
- [TL94] G. Turk and M. Levoy: “Zippered Polygon Meshes from Range Images,” *Proc. SIGGRAPH '94*, ACM, pp. 311–318, 1994.
- [WSI98] M. Wheeler, Y. Sato, and K. Ikeuchi: “Consensus Surfaces for Modeling 3D Objects from Multiple Range Images,” *Proc. Int. Conf. on Computer Vision*, pp. 917–924, 1998.
- [ZS00] H. Zhao and R. Shibasaki: “Reconstruction of Textured Urban 3D Model by Fusing Ground-Based Laser Range and CCD Images,” *IEICE*

Trans. Inf. & Syst., Vol. E-83-D, No. 7, pp. 1429–1440, 2000.

- [ZS03] H. Zhao and R. Shibasaki: “Reconstructing a Textured CAD Model of an Urban Environment Using Vehicle-Borne Laser Range Scanners and Line Cameras,” *Machine Vision and Applications*, Vol. 14, No. 1, pp. 35-41, 2003.
- [池田 03] 池田 聖, 佐藤 智和, 横矢 直和: “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.
- [板野 07] 板野 友哉, 森栄 晃彦, 古川 亮, 川崎 洋: “未観測ボクセルのクラス推定を用いた形状の統合及び補間手法と GPU を用いた高速な実装”, *画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007) 講演論文集*, pp 365–371, 2007.
- [小野 04] 小野 晋太郎, 川崎 洋, 影沢 政隆, 池内 克史: “時空間距離画像を利用した自己位置推定による効率的な広域空間モデルの構築”, *画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004) 講演論文集*, pp. 201–206, 2004.
- [金谷 94] 金谷: “コンピュータビジョンのためのくりこみ法”, *情報処理学会論文誌*, Vol. 35, No. 2, pp. 201–209, 1994.
- [金出 97] 金出 武雄: “Virtualized Reality - 仮想化された現実”, *bit* 2月号, pp. 4–12, 1997.
- [河合 08] 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和: “局所形状の類似度評価に基づくエネルギー最小化による三次元欠損修復”, *画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008) 講演論文集*, pp. 272–277, 2008.
- [神原 05] 神原 誠之, 横矢 直和: “RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感”, *電子通信学会技術報告 PRMU*, Vol. 104, No. 572, pp. 37–42, 2005.

- [国土 07] 国土地理院 “数値地図データ”, <http://www.gsi.go.jp/>, 2007.
- [清水 04] 清水 浩行, 大野 哲之, 相澤 清晴: “航空高度データとレンジデータの統合による3次元街モデルの構築”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 58, No. 6, pp. 827–834, 2004.
- [新谷 00] 新谷 幹夫, 宮川 勲, 堀口 賞一, 南田 幸紀, 植本 尚子: “3次元仮想都市景観の構築: 3次元地図を目指して”, NTTR&D, Vol. 49, No. 1, pp. 11–18, 2000.
- [中川 04] 中川 雅史, 柴崎 亮介: “TLS(Three Line Sensor) を用いた三次元建物データの構築手法の開発”, 情報処理学会研究報告 CVIM, Vol. 2004, No. 6, pp. 89–94, 2004.
- [西野 03] 西野 恒, 池内 克史: “大規模距離画像群の頑健な同時位置合せ”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-D-II, No. 9, pp. 1413–1424, 2002.
- [納富 98] 納富 幹人, 小澤 史朗, 全 炳東: “移動体観測による都市モデル構築”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 5, pp. 872–879, 1998 .
- [増田 03] 増田 健: “符号付距離場の一致による複数距離画像からの形状モデル生成”, 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. SIG5(CVIM6), pp. 30–40, 2003.

研究業績

学術論文誌

1. 浅井 俊弘, 神原 誠之, 横矢 直和: "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, Sep. 2005. (3 , 5 章に関連)
2. 浅井 俊弘, 神原 誠之, 横矢 直和: "屋外環境の三次元モデル化のための推奨度マップを用いたレンジデータ取得支援システム", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J92-D, No. 4, Apr. 2009. (掲載予定)(4 章に関連)

国際会議

1. T. Asai, M. Kanbara, and N. Yokoya: "3D modeling of outdoor scenes from omnidirectional range and color images," Proc. Int. Conf. on Computer Vision and Graphics, pp. 118-124, Sep. 2004. (3 , 5 章に関連)
2. T. Asai, M. Kanbara, and N. Yokoya: "3D modeling of wide area outdoor environments by integrating omnidirectional range and color images," Proc. IEEE and ACM Int. Sympo. on Mixed Augmented Reality(ISMAR 04), pp. 264-265, Nov. 2004. (3 , 5 章に関連)
3. T. Asai, M. Kanbara, and N. Yokoya: "Three-dimensional reconstruction of outdoor environments from omnidirectional range and color images," Proc. SPIE Electronic Imaging, Vol. 5664, pp. 579-588, Jan. 2005. (3 , 5 章に関連)
4. T. Asai, M. Kanbara, and N. Yokoya: "3D Modeling of outdoor environments by integrating omnidirectional range and color images," Proc. Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM), pp. 447-454, Jun. 2005. (3 , 5 章に関連)

5. T. Asai, M. Kanbara, and N. Yokoya: "3D modeling of outdoor scenes by integrating stop-and-go and continuous scanning of rangefinder," CD-ROM Proc. the ISPRS Working Group V/4 Workshop 3D-ARCH 2005: Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Vol. XXXVI, Aug. 2005. (6章に関連)
6. T. Asai, M. Kanbara, and N. Yokoya: "Data acquiring support system using recommendation degree map for 3D outdoor modeling," Proc. SPIE Electronic Imaging, Vol. 6491, pp. 64910-64910H-8, Jan. 2007. (4章に関連)
7. T. Asai, K. Yamaguchi, Y. Kojima, T. Naito, Y. Ninomiya: "3D line reconstruction of a road environment using an in-vehicle camera," Proc. Int. Sympo. on Visual Computing(ISVC08), Part II, LNCS5359, pp. 897-904 Dec. 2008.

研究会・シンポジウム

1. 山澤 一誠, 石田 皓之, 岡本 崇弘, 小田 昌宏, 前橋 久美子, 浅井 俊弘, 牧田 孝嗣: "2002年PRMUアルゴリズムコンテスト「砂嵐から立体を見つけ出そう」実施報告とその入賞アルゴリズムの紹介", 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU2002-168, pp. 133-144, Dec. 2002.
2. 浅井 俊弘, 神原 誠之, 横矢 直和: "ウォークスルーのための全周レンジファインダと全方位カメラを利用した現実環境の三次元モデル化", 日本バーチャルリアリティ学会 サイバースペースと仮想都市研究会 研究報告, Vol. 9, No. 1, pp. 73-78, Jan. 2004. (3, 5章に関連)
3. 浅井 俊弘, 神原 誠之, 横矢 直和: "全方位レンジデータと全方位画像の統合による屋外環境の三次元モデル化", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004) 講演論文集, Vol. I, pp. 195-200, Jul. 2004. (3, 5章に関連)

4. 浅井 俊弘, 神原 誠之, 横矢 直和: "レンジファインダの定地点計測と移動計測の統合による屋外環境の三次元モデル化", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005) 講演論文集, pp. 808-813, Jul. 2005. (6章に関連)
5. 浅井 俊弘, 神原 誠之, 横矢 直和: "物体の存在確率を持つボクセルモデルを用いたデータ取得率マップによるビュープランニング", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006) 講演論文集, pp. 589-594, Jul. 2006. (4章に関連)
6. 浅井 俊弘, 山口 晃一郎, 小島 祥子, 二宮 芳樹: "車載単眼カメラを用いた走行環境の直線構造の三次元位置推定", 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU2007-231, pp.99-104, Feb. 2008.
7. 浅井 俊弘, 山口 晃一郎, 小島 祥子, 内藤 貴志, 二宮 芳樹: "車載カメラを用いた走行環境の直線構造の三次元復元", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008) 講演論文集, pp. 1088-1091, Jul. 2008.

全国大会

1. 浅井 俊弘, 神原 誠之, 佐藤 智和, 横矢 直和: "ウォークスルーのためのレンジファインダを利用した現実環境の三次元モデル化", 情報科学技術フォーラム (FIT) 一般講演論文集, Vol. 3, No. K-099, Sep. 2003.
2. 浅井 俊弘, 神原 誠之, 横矢 直和: "全周レンジファインダの移動計測による屋外環境のモデル化", 2004年電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. D-12-141, Mar. 2004.
3. 浅井 俊弘, 神原 誠之, 横矢 直和: "レンジファインダの定地点計測と移動計測による屋外環境の三次元モデル化", 2005年電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. D-12-136, Mar. 2005.

解説

1. 浅井 俊弘, 神原 誠之, 横矢 直和: ”全方位センサを用いた広域都市環境の仮想化 -レーザレンジファインダと全方位カメラによる屋外環境のモデル化-”, 画像ラボ, Vol. 17, No. 8, pp. 47-51, Aug. 2006.
2. 浅井 俊弘, 山口 晃一郎, 小島 祥子, 二宮 芳樹: ”車載単眼カメラを用いた走行環境の直線構造の三次元復元 -走行環境の三次元地図生成に向けて-”, 画像ラボ, Vol. 19, NO. 8, pp. 6-10. Aug. 2008.

受賞

1. 電子情報通信学会, パターン認識・メディア理解研究会 第6回アルゴリズムコンテスト入賞. 2002年9月