

# 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

浅井俊弘<sup>†</sup> 神原誠之<sup>†</sup> 横矢直和<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

あらまし 本論文では、全方位が計測可能なレーザレンジファインダとカメラを用いた屋外環境のモデル化手法を提案する。提案手法では、一度に広範囲の環境の形状・色情報を収集するために二つの全方位センサを用い、全方位レンジデータと全方位画像を同地点で取得することで、全方位レンジデータの各点に対応したテクスチャ情報を獲得する。全方位レンジデータと全方位画像を環境中の多地点で取得し、それらを統合することで対象の屋外環境をモデル化する。レンジデータの統合においては、各レンジデータから平面部分を抽出し、平面部分のマッチングを行うことでレンジデータの位置合せを行う。その際、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により計測時の全方位センサの位置・姿勢を取得し、その位置・姿勢を初期値とし、全てのレンジデータを同時位置合せすることで、各レンジデータの回転・平行移動成分を最適化する。また、モデルへのテクスチャマッピングでは、画像の解像度とモデルのオクルージョンを考慮したテクスチャを全方位画像から選択する。実験では、本学構内を対象とした三次元モデル化結果を示し、本手法の有効性を示す。  
キーワード：三次元モデル化, レーザレンジファインダ, 全方位距離画像, 全方位カラー画像, 屋外環境

**Summary** This paper describes a 3D modeling method for wide area outdoor environments, which is based on integrating omnidirectional range and color images. In the proposed method, outdoor scenes can be efficiently digitized by using two omnidirectional sensors; that is, the omnidirectional color and range images are acquired at the same position to register both of the images geometrically. In order to register multiple range images correctly, points on planar regions detected from the range data are used in registration process. Multiple range images are registered by making the corresponding planes overlap in different range images. The position and orientation of omnidirectional sensors acquired by a hybrid sensor consisting of RTK-GPS and gyroscope are used as initial values for registration, and rotations and translations of whole range data are optimized by registering range data simultaneously. The 3D model obtained by registration of range data is mapped by textures selected from omnidirectional color images in consideration of the resolution of texture and occlusions of the generated model. In experiments, we have carried out 3D modeling of our campus with the proposed method.

**Key words:** 3-D modeling, laser rangefinder, omnidirectional range data, omnidirectional color image, outdoor environment

## 1. はじめに

屋外環境の三次元モデルは、シミュレーション、ナビゲーション、ウォークスルーなどの様々な分野への応用が期待されている。しかし、現在そのような分野におい

“3-D Modeling of Outdoor Environments by Integrating Omnidirectional Range and Color Images” by Toshihiro ASAI, Masayuki KANBARA, and Naokazu YOKOYA, (〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5).

て利用される三次元モデルは、モデリングソフトなどを用いて人手により作成されることが多く、屋外環境のモデルを作成するには膨大な労力が必要になる。そのため近年、静止画像や動画からの三次元形状推定や、レーザレンジファインダ（以下、レンジファインダ）による計測等を利用し屋外環境の三次元モデル化を自動化する研究が盛んに行われている<sup>1)2)</sup>。

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<sup>2)-6)</sup>。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目ざされている<sup>1),7),8)</sup>。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、一般に一回の計測で対象物体の全て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、レンジデータの位置合せが課題となる。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<sup>9)-12)</sup>。

複数のレンジデータの位置合せには ICP アルゴリズム<sup>13)</sup>が一般的によく用いられている。この手法は、異なるレンジデータ間の重複して計測された部分で、ユークリッド距離が最も小さくなる点を対応点として、対応点同士が最も近づくように、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。点と点の対応では、計測地点の違いから、同じ部分を計測しても計測点の密度が大きく異なる場合、1つの点に複数の点が対応付けられる場合がある。また、必ずしも異なるレンジデータ間で同一の三次元点が計測されておらず、局所解に陥りやすくなる<sup>14)</sup>。そのため、ICP アルゴリズムを改良した様々な手法が提案されている。

西野ら<sup>15)</sup>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<sup>16)</sup>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やすく、局所解に陥りやすくなる。さらに、ICP アルゴリズムは一般に対応点探索の計算量が大きくなる。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<sup>9)</sup>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、その直線のマッチングにより位置合せを行なっている。壁面のみを使うことで樹木などの影響を排除し、計算量を削減している。この手法は、環境中に鉛直な壁面が必要であり、計測時はレンジファインダの垂直軸と、鉛直方向が一致している必要がある。また、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メモリの必要量が大きくなる。清水ら<sup>12)</sup>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とマッチングすることで位置合せを行っている。この手法も環境中に鉛直な壁面が必要であり、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同士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。

本論文では、屋外環境を高精度にモデル化するために、1) 屋外環境の多地点において、全方位レンジデータと全方位画像の同地点での取得、2) 平面同士の対応へと拡張した ICP アルゴリズムによる複数のレンジデータの同時位置合せ、3) 環境のオクルージョンを考慮した上で解像度が最も高くなる全方位画像からのテクスチャの生成、によるモデル化手法を提案する。全方位レンジデータと全方位画像を同地点で取得することでモデル化対象のレンジデータをテクスチャ付きで取得する。本研究で対象としている屋外環境は主に都市環境であり、道路や壁などの平面部分が多く存在するため、レンジデータから平面を検出し、平面部分のみを利用したレンジデータの位置合せを行う。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

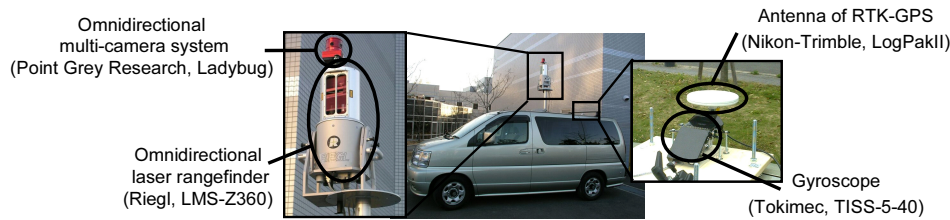


図 1 センサシステムの外観  
Fig. 1 Sensor system mounted on a vehicle.

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．そして、平面同士の対応へと拡張した ICP アルゴリズムにより、レンジデータの同時位置合せによる全体最適化を行う．レンジデータ間に対応する平面を探索し、対応する平面同士の法線の向きを一致させて重ね合わせるにより、物体の形状を考慮した位置合せを行う．この方法により位置合せを行うには、1 つのレンジデータに法線が異なる平面が 3 つ以上必要であるが、全方位レンジファインダを用いて一度に広範囲を計測することでその取得が容易に行える．データ取得時の全方位センサの位置・姿勢は 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によって取得する．センサによる位置・姿勢は測定誤差等を含んでいることを考慮して位置合せの全体最適化の初期値として利用する．位置合せしたレンジデータからポリゴンを作成し、得られたサーフェスマodelと全方位カメラにより得た高解像度画像を用い、環境のオクルージョンを考慮した上で解像度が最も高くなる全方位画像を選択し、モデルのテクスチャを生成する．

以下、2 章では、本研究で用いたセンサと得られるデータについて述べる．3 章では全方位距離画像からのサーフェスマodelの生成方法について述べ、4 章ではテクスチャマッピング手法について述べる．5 章では、本学キャンパスを対象とした三次元モデル生成実験について述べ、最後に 6 章で本論文をまとめる．

## 2. センサシステム

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・姿勢の取得に RTK-GPS とジャイロセンサを使用する．図 1 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、座標系の統合は事前に行う．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．

表 1 LMS-Z360 の性能  
Table 1 Specification of LMS-Z360

measurable angle	horizontal: 360° vertical: -50°~40°
measurable range	1m~200m
measurement accuracy	±12mm
minimum step angle	0.01°
maximum resolution	horizontal: 0.0025° vertical: 0.002°

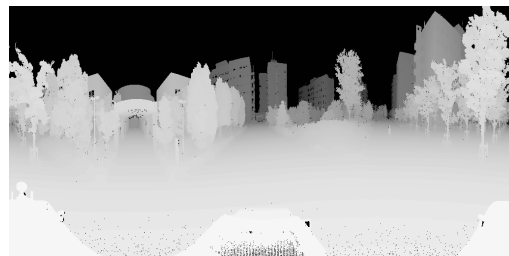


図 2 全方位距離画像  
Fig. 2 Omnidirectional range image.

### 2.1 各センサの特徴

#### 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 Riegl 社製 LMS-Z360 を利用した．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 2 は本センサで計測したレンジデータを示しており、距離が近い点は明るく、遠い点は暗く表現している．本センサは、機器から外側に放射状にレーザを照射し、物体までの距離を計測するため、計測点はセンサから近い場所は密に、遠い場合は疎になる．

#### 2.1.2 全方位カメラ

全方位カメラは図 3(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 3(b) に各カメラの位置・姿勢の関係



(a) appearance (b) view volume

図3 全方位マルチカメラシステム Ladybug

Fig. 3 Omnidirectional multi-camera system Ladybug.



図4 全方位カラー画像

Fig. 4 Omnidirectional color image.

を示す。なお、池田らの手法<sup>17)</sup>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面透視投影によりパノラマ展開した画像を図4に示す。

### 2.1.3 位置・姿勢センサ

RTK-GPS はニコン・トリプル社製 LogPakII を、ジャイロセンサはトキメック社製 TISS-5-40 を利用した。RTK-GPS の位置精度を表2に示す。センサシステム的位置はレンジデータ取得中に得られた RTK-GPS の値の平均値を利用する。RTK-GPS とジャイロセンサ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センサの蓄積誤差を補正することができる<sup>18)</sup>。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、ジャイロセンサの蓄積誤差は RTK-GPS の位置情報から補正されない。従って、姿勢はレンジデータ取得開始時のジャイロセンサの値を利用する。RTK-GPS と連動したジャイロセンサの性能を表3に示す。また、ジャイロセンサ座標系は自動的に 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、ジャイロセンサ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

表2 RTK-GPS の性能  
Table 2 Accuracy of RTK-GPS.

latitude	±3.0cm
longitude	±3.0cm
altitude	±4.0cm

表3 ジャイロセンサの性能  
Table 3 Accuracy of gyroscope.

yaw	±2°
roll	±0.5°
pitch	±0.5°

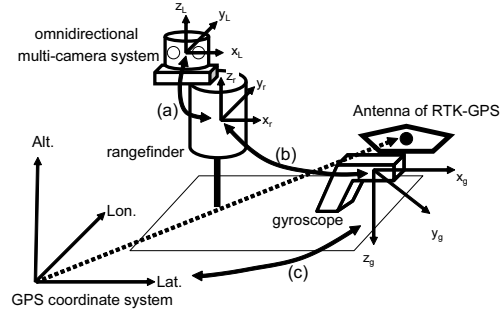


図5 センサ座標系

Fig. 5 Relationship among the coordinate systems of the sensors.

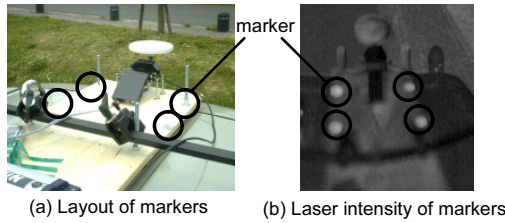


図6 レンジファインダとジャイロセンサの座標系の統合  
Fig. 6 Alignment of rangefinder and gyroscope coordinate systems.

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

本手法ではレンジデータを GPS 座標系に統合する。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。

図5の(a),(b),(c)は変換行列を示しておりそれぞれ次の方法で推定する。

(a) レンジファインダとカメラ間の変換行列は、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<sup>17)</sup>の手法により推定する。

(b) 図6に示すように、ジャイロセンサ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位置から、センサ間の変換行列を推定する。ここで、マーカにはレーザの反射率が高い再帰性反射材を用いた。

(c) RTK-GPS とジャイロセンサは連動しており、GPS 座標系とジャイロセンサ座標系は自動的に統合される。ま

た, RTK-GPS のアンテナとジャイロセンサを近づけて設置することで, RTK-GPS の計測点とジャイロセンサ座標系の原点を同じと見なす.

変換行列 (a), (b), (c) が推定されると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. 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, ポリゴンを作成することでサーフェイスモデルを生成する. そのために, まず全てのレンジデータを GPS 座標系へと統合する. 次に, レンジデータからポリゴンを作成し, レンジデータ間で重複してデータを取得している部分の統合を行う.

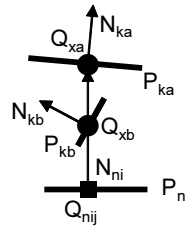
#### 3.1 多地点レンジデータの同時位置合せ

多地点レンジデータの位置合せは, 各レンジデータから平面を検出し, レンジデータ間で対応する平面を探索する. そして, その平面を重ね合わせるにより行う. そのために, まずレンジデータから平面の検出とその平面の法線ベクトルを求める. 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データのみを用いる. 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その平面に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. それぞれのレンジデータの位置・姿勢は, RTK-GPS とジャイロセンサによって取得するが, 測定誤差を含んでいるため測定値は初期値として利用する. 以下に処理手順を示す.

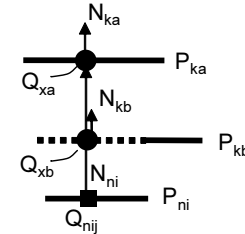
1. レンジデータから平面部分を検出.
  2. レンジデータを GPS 座標系へ座標変換.
  3. 平面の対応関係を全レンジデータ間で探索.
  4. 対応する平面の法線と平面領域の計測点からレンジデータの回転・平行移動成分を推定し変換行列を更新.
  5. 変換行列の推定結果が収束していれば終了. 収束していなければ 2. に戻る.
2. の座標変換で, 最初は RTK-GPS とジャイロセンサで計測した位置・姿勢を用い, 以後は 4. で推定された変換行列を用いる. 以下, 1. 平面検出, 3. 対応面の探索, 4. 変換行列の推定のそれぞれの処理について詳述する.

##### 3.1.1 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. 四分木を用いて距離画像を分割し, 窓内の



(a) Selection by threshold of an inner product.



(b) Selection by existence of an intersection.

図 7 対応面の探索

Fig. 7 Selection of corresponding plane.

点群データから最適な平面のパラメータをくりこみ法<sup>19)</sup>を用いて推定する. 窓内全ての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なら窓内の点群は平面であると判断し, 推定された平面の法線をその点群での法線とする. 平面と判断されなかった場合は窓を四分分割して処理を繰り返す. 窓の大きさが  $3 \times 3$  でも平面と判断されなかった部分の計測点は位置合せに利用しない.

##### 3.1.2 対応面の探索

ある平面に対応する平面をその法線方向に別のレンジデータから探索する. 対応面の定義を以下に述べる. レンジデータ  $n$  ( $n = 1, \dots, N$ ) の平面を  $P_{ni}$  とし, その  $P_{ni}$  上の計測点を  $Q_{nij}$ ,  $P_{ni}$  の法線ベクトルを  $N_{ni}$  とする.  $P_{ni}$  の対応面は,  $P_{ni}$  上の計測点  $Q_{nij}$  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  $N_{ni}$  の角度が閾値以内でかつ,  $Q_{nij}$  と  $Q_x$  の距離が最小となる平面を選択する. 図 7 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,  $P_{ni}$  上の計測点  $Q_{nij}$  で探索を行い対応面が複数見つかった場合は, 全てを対応面とする.

##### 3.1.3 レンジデータの変換行列の推定

各レンジデータの変換行列を, 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

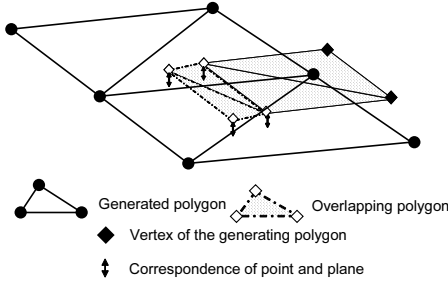


図 8 重複部分の削除  
Fig. 8 Deletion of overlapping areas.

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，

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

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その点から探索された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，

$$E_T = \sum_{u=1}^U \text{distance}(Q_{P_u}(R'_{P_u}, T_{P_u}), H_{P_u}(R'_{H_{P_u}}, T_{H_{P_u}})) \rightarrow \min, \quad (2)$$

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最適化する．

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位置合せ処理を終了し，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する．そして，再び対応面を探索し，変換行列の推定を行う．位置・姿勢の最適化処理では，多次元滑降シンプレックス法<sup>20)</sup>を用いる．

### 3.2 レンジデータのポリゴン化

ポリゴンは，レンジデータの入力順に，距離画像上で隣接する画素を結ぶことで作成する．ポリゴン数の削減として，平面検出で平面と判定された部分は，平面当て

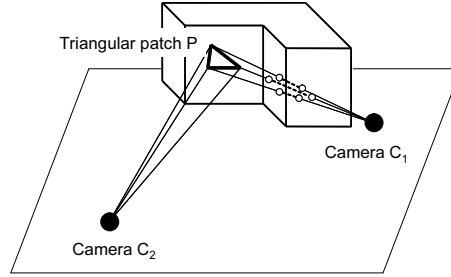


図 9 オクルージョンを考慮した全方位画像の選択  
Fig. 9 Selection of omnidirectional image in consideration of occlusion.

はめを行った窓の四隅の計測点 (図 8 の 印) でポリゴンを作成する．3.1.2 節で述べた対応面の探索の際，計測点と対応面の距離が閾値以下となった場合は，図 8 のように，他のレンジデータとの重複した計測点として記憶しておく．そして，図 8 の点線で示す三角形のように，作成するポリゴンの頂点全てが作成済みのポリゴンと重複する場合はポリゴンを作成しない．

## 4. テクスチャマッピング

提案手法では，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重複して撮影されている場合がある．そこで，モデルの各ポリゴンのテクスチャが，最も高い解像度を持つように全方位画像の選択を行う．2 章で述べたように，レンジファインダと全方位カメラの位置関係は固定しているため，レンジデータを位置合せすることで各カメラの位置・姿勢も同時に推定される．従って，レンジデータの全ての三次元点が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ため，ポリゴンの各頂点をそれぞれの全方位画像面へと投影しポリゴンの面積が一番大きくなる全方位画像を選択する．しかし，選択された全方位画像には，オクルージョンによりそのポリゴンの実際のテクスチャが写っていない場合がある．例えば図 9 に示すようにポリゴン P はカメラ  $C_1$  の全方位画像から生成されたテクスチャが，最も解像度が高くなる．しかしポリゴン P は，オクルージョンによりカメラ  $C_1$  で撮影されていない．このような画像が選択されるのを避けるために，生成されたサーフェイスモデルからオクルージョンの判定を行う．ポリゴン P を構成する 3 頂点とカメラ  $C_1$  の位置の 4 点で構成される三角錐の内部に他のポリゴンが存在している場合は，オクルージョンによりポリゴン P のテクスチャが写っていないと判断する．図 9 の場合は最も解像度の高い全方位画像はカメラ  $C_1$  の画像であるがオクルージョンが発生しているため次候補のカメラ  $C_2$



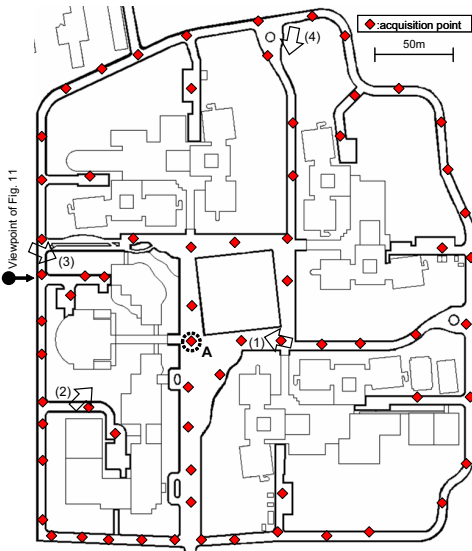


図 10 構内の地図とデータ取得位置  
Fig. 10 Range data acquisition points.

の画像が選択され、再びオクルージョンの判定を繰り返す。カメラ  $C_2$  ではオクルージョンが発生していないため、ポリゴン  $P$  のテクスチャはカメラ  $C_2$  の画像から生成される。

### 5. 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、本学構内約 250m×約 300m の範囲を 68 地点においてレンジデータおよび全方位画像を取得した。提案手法では位置合せのために、取得位置が近いレンジデータ間で平面の重複部分が一定領域必要になる点に留意し、約 30m 間隔でデータの取得を行った。図 10 に本学の地図とデータの取得位置を示す。図 10 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 とジャイロセンサ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  $30^\circ$  以内かつ平面との距離 10m 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、図 10 の A 点で取得したレンジデータを基準とし、そのセンサ位置・姿勢を固定し、1 台の PC(CPU:Pentium4 1.7GHz, メモリ:1024MB) で

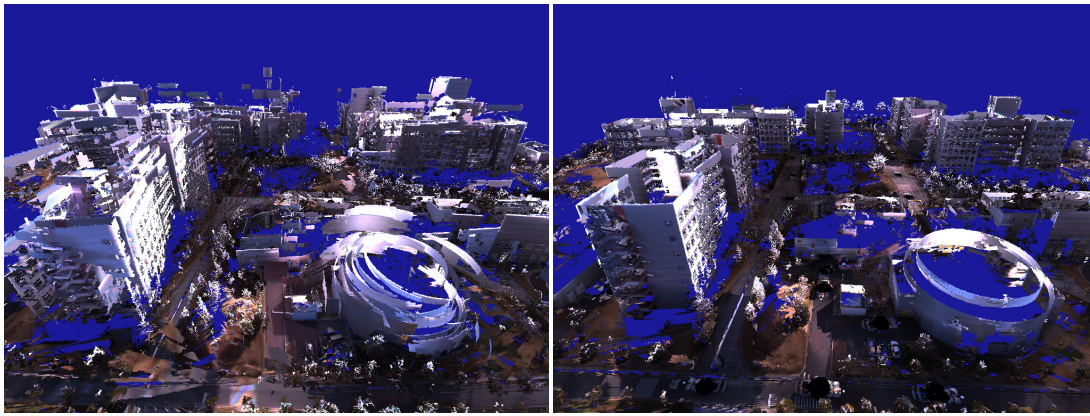
行った。位置合せの処理に要した時間は約 72 時間であった。最適化前から後への移動距離は平均が 4.69m, 最大 7.24m であり、表 2 で示した RTK-GPS の精度が得られなかった。これは、本学構内は 7 階建て約 30m の建造物が複数存在し、計測位置のほとんどが建物に近接していたため、GPS 衛星からの電波が反射・遮蔽された影響が大きかったと考えられる。RTK-GPS とジャイロセンサによって得られた位置・姿勢情報を用いて統合されたモデルを図 11(a) に、最適化後の位置・姿勢情報による統合結果を図 11(b) に示す。図 11 は図 10 の印から矢印の方向にモデルをみたシーンである。図 11(a) では位置ずれにより壁面が幾重にも見えているが、図 11(b) では統合されていることが確認できる。図 12 に水平面に平行投影した位置合せ済みのモデルと、本学構内の二次元 CAD データとを重ね合せたものを示す。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 13 に生成した三次元モデルを示す。図 13(1)~(4) は、図 10 中の矢印(1)~(4)における視点からモデルを見たシーンである。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。

生成モデルの総ポリゴン数は 7,724,462 となった。樹木の部分では計測位置によりポリゴンによる形状が異なるため、重複ポリゴンの削除が正しく行えない場合があった。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。しかし、全方位画像の選択基準が解像度とオクルージョンの有無のみであったため、隣り合うポリゴン同士で選択される全方位画像が異なる部分で、日照条件等によりテクスチャの品質が異なる際、違和感が生じる場合があった。

### 6. ま と め

本論文では、屋外環境を高精度に三次元モデル化するために、効率的にデータが取得可能な全方位センサを用いたモデル化手法を提案した。提案手法では、まず、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。そして、RTK-GPS とジャイロセンサにより取得したセンサの位置・姿勢を、平面の対応へと拡張した ICP アルゴリズム



(a) Integration results using initial values.

(b) Results after optimization.

図 11 最適化前と後の統合結果

Fig. 11 Reistration results.



図 12 二次元 CAD と重ねさせた結果

Fig. 12 2D CAD data overlaid on generated 3D model

を用いた位置合せの初期値として利用し、多地点で取得したレンジデータの一括同時位置合せを行うことで全体的に歪みのないサーフェスモデルを生成した。ここで、

それぞれのレンジデータから検出された平面部分のデータのみを利用することで計算量を削減し、レンジファインダでは安定して測定できない物体の影響を排除した。



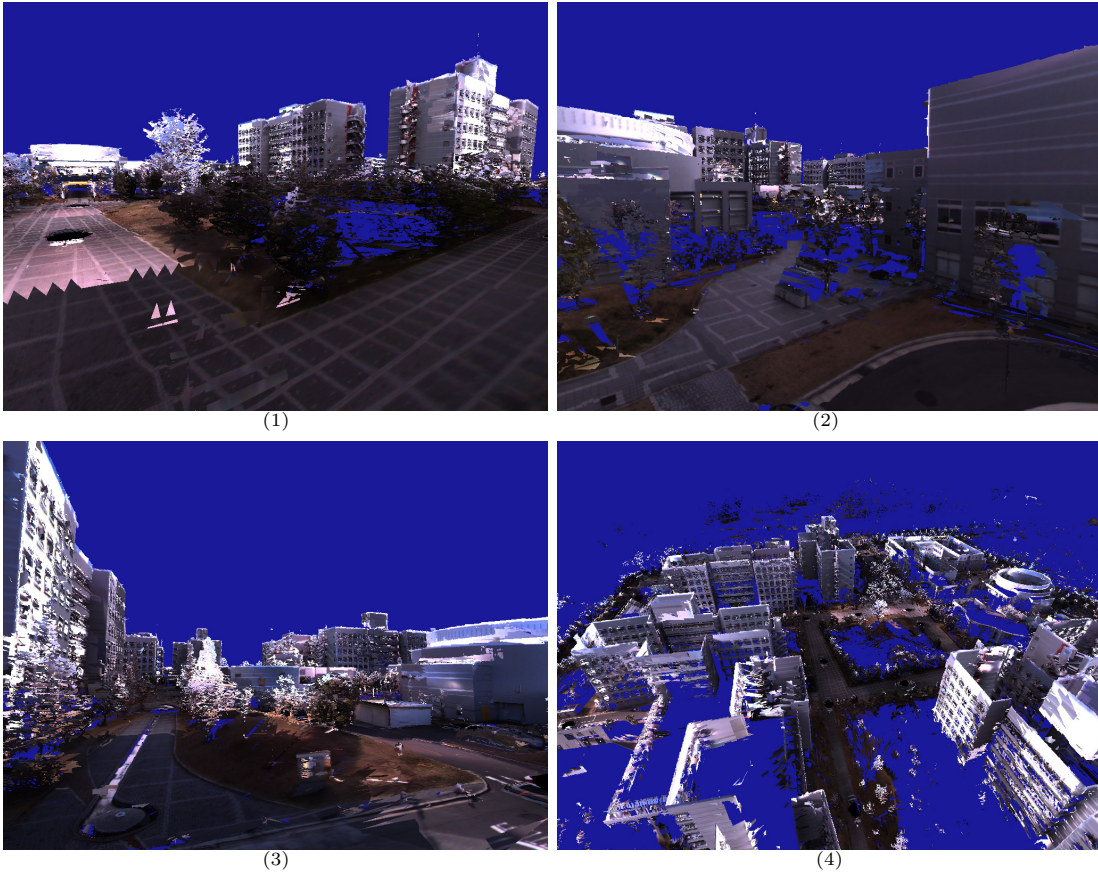


図 13 生成された三次元モデル

Fig. 13 Generated 3D model with texture

最後に、モデルのテクスチャは、生成されたサーフェイスモデルからオクルージョンを考慮し、かつ解像度が最も高い全方位画像を選択することで最適なテクスチャを生成した。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。

今後はより広域な屋外環境をモデル化するために、レンジファインダの移動計測を取り入れることでデータの取得効率の向上を図る。今回提案した手法のようにレンジファインダを固定する定地点計測でモデルを生成した後、そのモデルから未計測部分を判断し、未計測部分を移動計測によって計測することにより、モデルの欠損を効率的に減少させる。また、生成モデル改善のために、1) ガラスや樹木を計測した場合の誤差を考慮したポリゴン作成、2) 重複したポリゴンを判断し削除するのではなく、レンジデータ間で重複したポリゴンの統合、3) 隣接する

ポリゴンとのテクスチャの品質の違いを考慮したテクスチャマッピング手法、について検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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," *International Jour. of Computer Vision*, Vol. 47, No. 1-3, pp. 119-129, 2002.
- 3) 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.
- 4) C. Tomasi and T. Kanade: "Shape and Motion from Image Streams under Orthography A Factorization Method," *International Jour. of Computer Vision*, Vol. 9, No. 2, pp. 137-154, 1992.
- 5) M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen, A. A. Deknuydt, and L. J. V. Gool: "Three-demintional Scene Reconstruction from Images," *Proc. SPIE*, Vol. 3958, pp. 215-226, 2000.
- 6) 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.
- 7) 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.
  - 8) C. Früh and A. Zakhor: “An Automated Method for Large-Scale, Ground-Based City Model Acquisition,” International Jour. of Computer Vision, Vol. 60, pp. 5–24, 2004.
  - 9) 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.
  - 10) 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.
  - 11) Y. Sun, J. K. Paik, A. Koschan, and M. A. Abidi: “3D Reconstruction of Indoor and Outdoor Scenes Using a Mobile Range Scanner,” Proc. International Conf. on Pattern Recognition, Vol. 3, pp. 653–656, 2002.
  - 12) 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.
  - 13) 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.
  - 14) K. Pulli: “Multiview Registration for Large Data Sets,” Proc. International Conf. on 3D Digital Imaging and Modelling, pp. 160–168, 1999.
  - 15) 西野 恒, 池内克史: “大規模距離画像群の頑健な位置合せ”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-D-II, No. 9, pp. 1413–1424, 2002.
  - 16) T. Oishi, R. Sagawa, A. Nakazawa, R. Kurazume and K. Ikeuchi: “Parallel Alignment of a Large Number of Range Images,” Proc. International Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling, pp. 195–202, 2003.
  - 17) 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.
  - 18) 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”, 信学技報 PRMU, Vol. 104, No. 572, pp. 37–42, 2005.
  - 19) 金谷健一: “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.
  - 20) W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling: Numerical Recipes in C, Cambridge University Press 1988.

(2005年8月19日受付)