

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

浅井 俊弘^{†,††} 神原 誠之[†] 横矢 直和[†]

Data Acquiring Support System Using a Recommendation Degree Map
for 3D Outdoor Modeling

Toshihiro ASAI^{†,††}, Masayuki KANBARA[†], and Naokazu YOKOYA[†]

あらまし

本論文は、レーザレンジファインダ(以下、レンジファインダ)を用いた屋外環境のモデル化におけるデータ取得支援システムについて述べる。提案システムは、未計測部分の効率的な削減のために、モデル化の対象範囲における各地点の計測の推奨度を二次元マップでレンジファインダの操作者に提示する。システムは、モデル化の対象範囲の各位置での推奨度を、取得済みのレンジデータから生成した三次元形状モデルを用いて求め、レンジデータを取得する度にモデルを更新することで、対象範囲の推奨度を操作者にインタラクティブに提示する。システムは、生成モデルの形状の精度を向上することを目的とし、物体の計測密度を指標として推奨度を計算する。操作者は、数値地図の道路情報とGPSを用いて現在位置を知り、提示された推奨度マップから次の計測位置を決定する。実験において、本システムを用いた屋外環境のモデル化を行い提案システムの有効性を示す。

キーワード 屋外環境の三次元モデル化, レンジデータ取得支援, 推奨度マップ, レーザレンジファインダ

1. はじめに

近年、物体の形状を高精度に計測可能なレンジファインダの発達により、広域屋外環境の三次元モデルを自動生成することで、景観シミュレーション、ナビゲーション、テレプレゼンスなどの様々な分野への応用が期待されている[1]~[3]。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[4],[5]。このとき、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、図1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[6]や符号付距離

場[7]など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[8]~[11]。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[12]。

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わせされている必要がある。Scottらが[12]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わ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[13]は、未

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科, 奈良県
Nara Institute of Science and Technology, 8916-5 Takayama-
cho, Ikoma-shi, Nara, 630-0192 Japan
^{††} 現在, 株式会社 豊田中央研究所
Presently with Toyota Central R&D Labs., Inc.



図 1 オクルージョンによるモデル欠損の例
Fig. 1 Data lacking portion due to occlusions.

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わ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わせする必要がある。

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 [14] 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 [15] 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。

そこで本論文では、計測候補地点の推奨度の計算に利用する三次元モデルを、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、我々が従来提案した、平面領域を利用した ICP アルゴリズム [16] 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 [17] 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。

以下、2 節では、提案するレンジデータ取得支援システムと処理の概要について説明し、3 節では、提案システムを用いたレンジデータの取得実験と結果について詳述し、4 節で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

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。

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

NBV 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 [8], [9] と、ポリゴンモデルを用いる手法 [10], [11] 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 [18] 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 Graphics Processing Unit (以下、GPU) を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

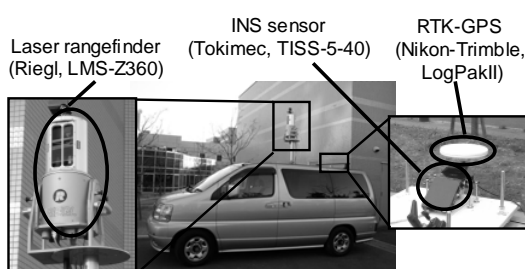


図 2 車載センサシステム
Fig. 2 Car mounted sensor system.

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 [17] から得られる道路路上に限定し、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。

2.2 センサシステム

本研究に用いるセンサシステムの外観を図 2 に示す。レンジデータの取得に全方位の計測が可能なレンジファインダを用いることで、センサの向きに関する指示を省略することができる。RTK-GPS とジャイロセンサをレンジデータの位置合せ時に座標変換の初期値を得るために用いる。全方位レンジファインダは Riegl 社製 LMS-Z360、RTK-GPS はニコン・トリムブル社製 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 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、移動中の RTK-GPS の位置履歴からジャイロセンサの蓄積誤差を補正することができる [19]。

2.3 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 3 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

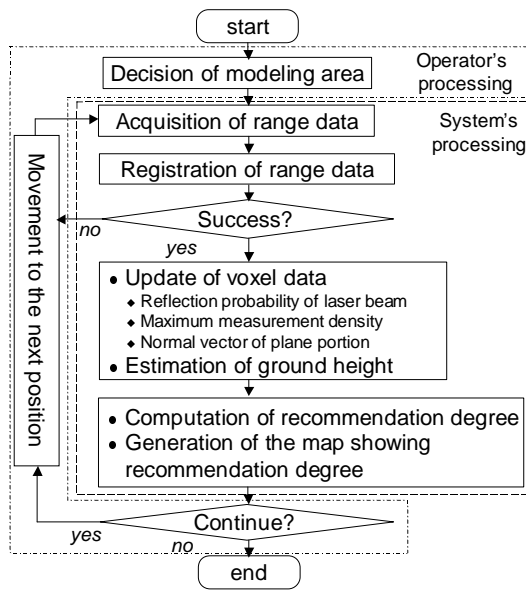


図 3 提案システムの処理の流れ
Fig. 3 Procedure of the proposed system.

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．

2.4 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 4 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．

2.5 取得したレンジデータの位置合せ

我々は従来，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 [16] 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に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



図 4 モデル化の対象範囲の指定
Fig. 4 Determination of modeling area.

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．手法 [16] 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．

2.6 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 [8] や Massions ら [9] のボクセルモデルを用いた手法は，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 [9] 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
- 上記範囲において上昇する物体の計測密度
- 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、

$$P = \frac{t}{(t+f)}, \quad (1)$$

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 [20] 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。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、

$$D = \frac{R_h}{r} \times \frac{R_v}{r}, \quad (2)$$

で定義する。

(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。

2.7 推奨度マップの更新

2.7.1 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。

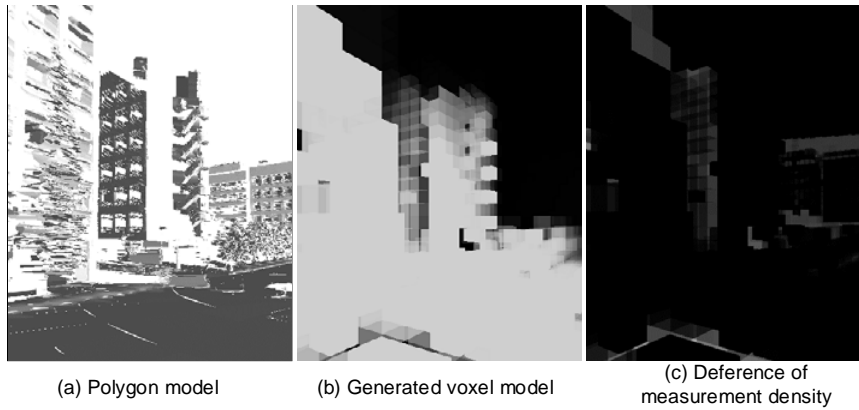


図 5 GPU を用いたボクセルモデルのレンダリング例
Fig. 5 Rendering of voxel model using GPU.

$$R(p) = \sum_{i=1}^I \left(D_{i1} P_{i1} + \sum_{n=2}^{N_i} D_{in} P_{in} \prod_{m=1}^{n-1} (1 - P_{im}) \right) \quad (3)$$

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,

$$D_{in} = \begin{cases} d'_{in} - d_{in} & (d'_{in} > d_{in}) \\ 0 & (d'_{in} \leq d_{in}) \end{cases} \quad (4)$$

となる.

2.7.2 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.

2.7.3 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



図 6 操作者に提示される推奨度マップの例
Fig. 6 Example of recommendation degree map.

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 5 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 5(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

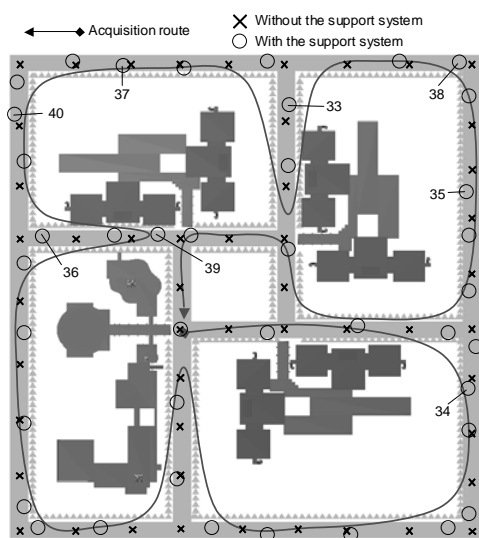


図 7 支援システムの有無による計測地点の違い
Fig. 7 Range data acquisition positions with/without the proposed support system.

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。ボクセルは立方体ではなく、1 辺の長さがボクセルと同じビルボードを描画することで、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。

2.8 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 6 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。

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 のレンジデータを取得

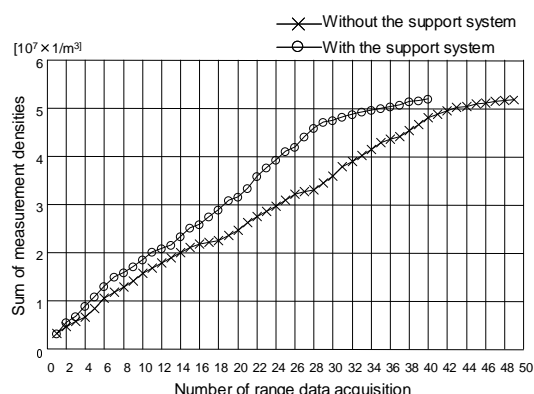


図 8 ボクセルの計測密度の和
Fig. 8 Sum of measurement density of voxels.

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) とグラフィックスカード (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。

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、本学構内を簡易的に表したもので、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、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ない場合では、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

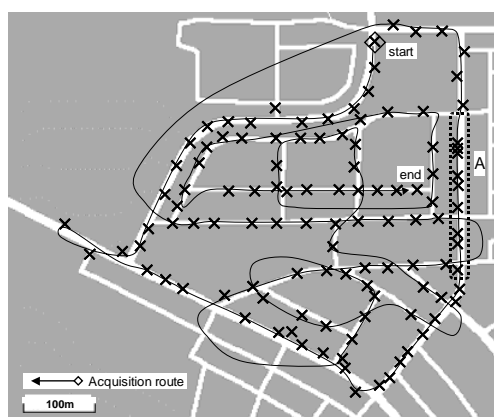


図9 データ取得の位置と経路

Fig. 9 Position and route of range data acquisition.

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の計測密度の和を上回った．33回目以降の取得地点を，図7中の番号で示す．図7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8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8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，以降は回を重ねる毎に計測密度の増加率は低下することが考えられる．

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，図2に示す車載センサシステムを用いて行い，国土地理院により提供されている数値地図[17]から抽出した道路領域をセンサの進入可能領域とした．図9に実験を行った奈良県生駒市北大和一丁目付近の道路情報と，

レンジデータ取得地点を×印で示す．データ取得を◇で示した地点から開始し，図に示す経路に沿って112地点での計測を行った．

データ取得後に操作者に示された推奨度マップの更新の様子を図10(a)~(f)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分だった．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面がみられた．そのような場合は，受信状態の回復を待つてRTK-GPSとジャイロセンサによる位置・姿勢を取得し，位置合せを行った．実験を行った図9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得ることができた．対象範囲全域で取得した112地点分のレンジデータを図11に，手法[16]によるテクスチャ付きモデルの生成結果を図12に示す．

4. まとめ

本論文では，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

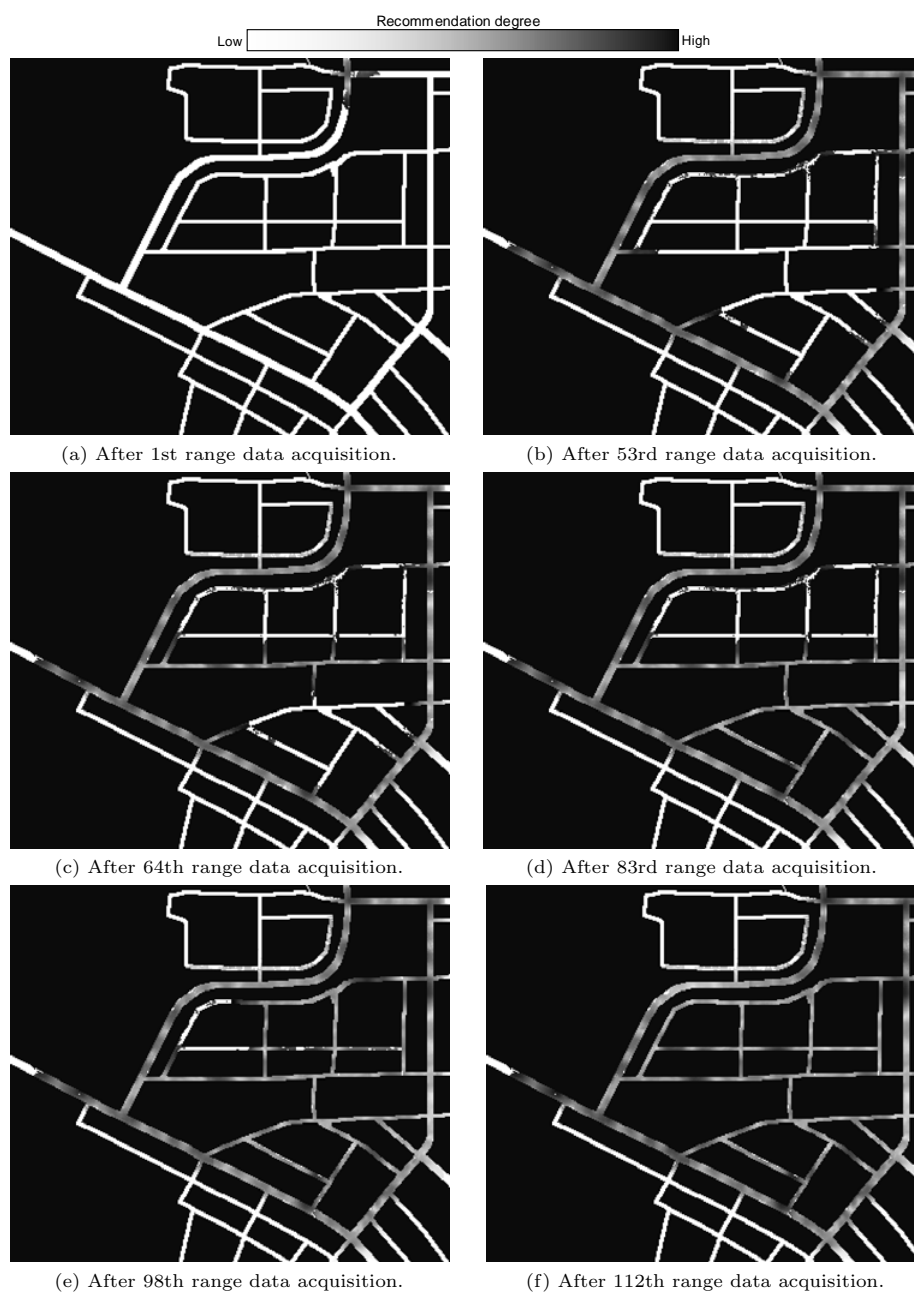


図 10 推奨度マップの更新の様子

Fig. 10 Update of recommendation degree map during range data acquisition.

えることを確認した。

今後は、提案システムを用いた対象範囲のモデル化と、我々が従来提案した、移動計測 [21] を統合することにより、残った未計測部分をより効率的に計測する手法について検討する。

謝辞 本研究の実験にご協力頂いた、奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 堀 磨伊也氏、河合 紀彦氏、越澤 広幸氏、水戸 博之氏に感謝を表する。

文 献

[1] S. F. El-Hakim, C. Brenner, and G. Roth: "A Multi-

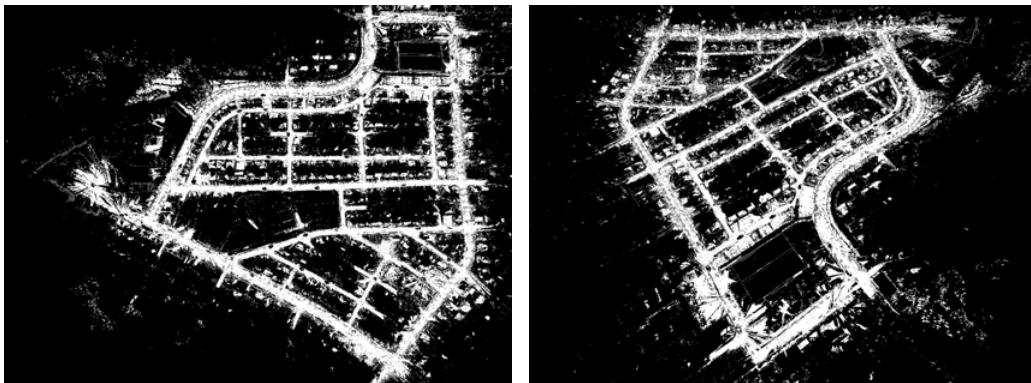


図 11 対象範囲全域の計測結果
Fig. 11 Acquisition result of whole target area.

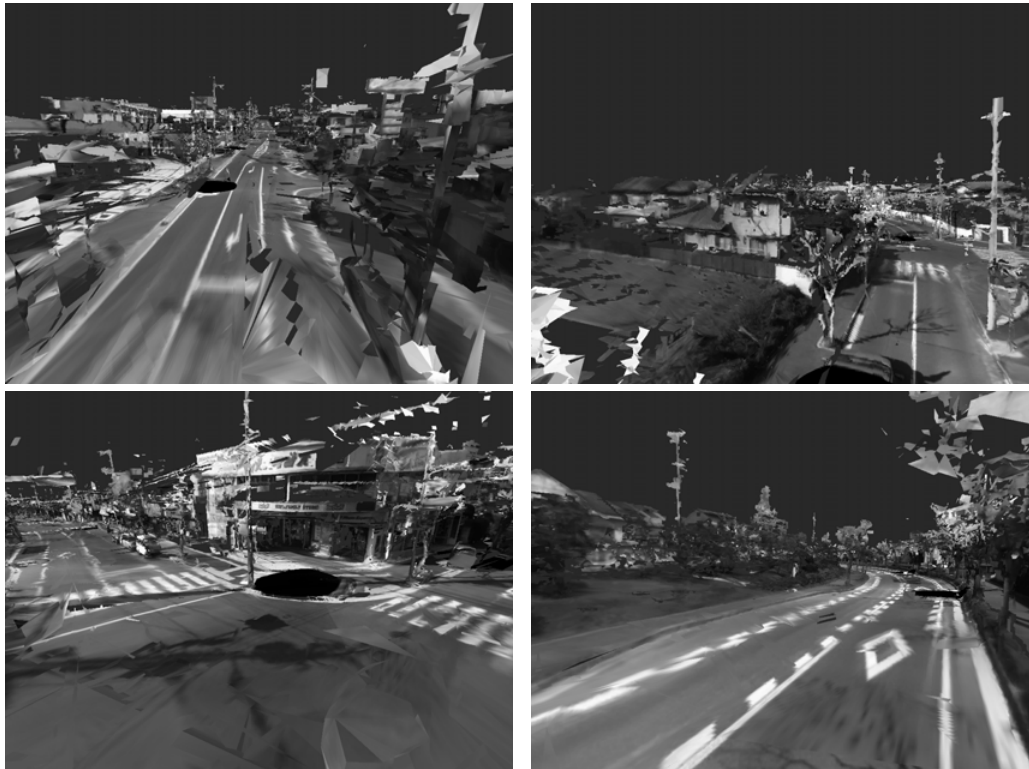


図 12 テクスチャ付き三次元モデル
Fig. 12 Generated 3D model with texture.

- sensor Approach to Creating Accurate Virtual Environments,” *Jour. of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 53, pp. 379–391, 1998.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] K. Pulli: “Multiview Registration for Large Data

- Sets,” Proc. Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling, pp. 160–168, 1999.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] C. I. Connolly: “The Determination of Next Best Views,” Proc. IEEE Int. conf. on Robotics and Automation, Vol 2. pp. 432–435, 1985.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] P. K. Allen, M. K. Reed and I. Stamos: “View Planning for Site Modeling,” Proc. DARPA Image Understanding Workshop, pp. 1181–1192, 1998.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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, 2005.
- [17] 国土地理院 “数値地図データ”, <http://www.gsi.go.jp/>, 2007.
- [18] H. Baker: “Three-Dimensional Modelling”, Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Vol. 2, pp. 649–655, 1977.
- [19] 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.
- [20] J. E. Bresenham: “Algorithm for Computer Control of a Digital Plotter,” IBM Systems Jour., Vol. 4, No. 1, pp. 25–30, 1965.
- [21] 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.

(平成 xx 年 x 月 xx 日受付)

Abstract This paper describes a support system for range data acquisition in order to non-measurement portions efficiently for 3D outdoor modeling using a laser rangefinder. The proposed system computes the recommendation degrees in the target area of modeling by using a 3D model which is generated from acquired range data, and indicates the recommendation degree map interactively by updating the 3D model whenever new range data is acquired. The operator decides the next data acquisition position seeing the recommendation map. Experiments in simulation and outdoor environments have shown the effectiveness of the proposed system.

Key words 3D modeling of outdoor environments, range data acquiring support, recommendation degree map, laser rangefinder