

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

浅井 俊弘 神原 誠之 横矢 直和
奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

あらまし 現実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が、現在このような分野で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手動で作成することが多く、作成コストが膨大になるという問題がある。本論文では、全周囲の三次元形状が計測可能なレーザレンジファインダを用いて取得した多地点における全周レンジデータと全方位画像を統合することにより広範囲の現実環境をモデル化する手法について述べる。また、多地点におけるデータ統合により膨大になるモデルのデータ量を平面検出によって削減する。さらに、作成したモデルを用いて、大型半球ドームスクリーンに立体的に表示することで臨場感の高いウォークスルー環境の構築を行った。

3D Modeling of a Real World Scene Using an Omnidirectional Rangefinder and an Omnidirectional Camera for Walkthrough

Toshihiro Asai Masayuki Kanbara Naokazu Yokoya
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Abstract: Three-dimensional (3-D) models of real world scenes can be widely used in a number of fields such as simulation, navigation and walkthrough. However, such 3-D models are often made manually using a modeling software with high costs. This report describes a 3-D modeling method for real scenes using an omnidirectional rangefinder and an omnidirectional camera. In this case, we must reduce a large amount of model data preserving the high quality of generated models. Since many planes, such as a wall or a road, exist in the real world, the proposed method extracts a plane region from range data, and deletes the data contained in the plane. A walkthrough system has been prototyped with a controller and a large-sized spherical immersive display which can display stereoscopic images of the generated model.

1 はじめに

現実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たものが多く、現実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て現実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 [1][2]。

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 [2]-[5]。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現実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、レンジファインダは近年その発達により現実環境の三次元情報を広範囲かつ高精度に得ることが容易となったため、都市環境のような広範囲の三次元モデリングへの利用の期待が高まっている。従来、全周囲の形状が計測可能なレンジファインダを利用して、屋外の複数地点で形状を計測し、それらを統合することで現実環境

を復元する試みがなされている [6]-[10]。レンジファインダは現実環境の三次元形状を高精度に取得可能であることが利点であるが、広範囲の三次元モデルを作成する場合は複数の地点でレンジデータを取得し、それらを統合する必要がある。そのため、データ量が膨大になってしまい、ウォークスルーのようにモデルを実時間でユーザーに提示する応用例への適用は困難であった。

本稿では、全周レンジファインダで取得したレンジデータと全方位カメラで取得した画像を統合することで現実環境の三次元モデルを作成する。その際、現実環境には建物の壁や道路といった平面部分が多く存在することに着目して、平面検出を行い平面に含まれるデータを削除することで、モデルの精密さを損なうことなくデータ量の削減を行う。また、全方位カメラにより得た高解像度な現実環境のテクスチャを利用して、写実性の高いモデルを作成する。さらに、作成したモデルを用い、没入型ディスプレイにより臨場感の高いウォークスルーシステムの構築を試みる。

以下、2章では、使用するレンジファインダとそれによって得られたレンジデータを用いたサーフェイスモデルの生成手法について、3章ではサーフェイスモデルと全方位画像の統合によるテクスチャ付三次元モデル生成手法について詳述する。4章では本学を対象として行った三次元モデル生成実験とウォークスルー実験について述べ、最後に5章でまとめと今後の課題について述べる。

2 サーフェイスモデルの作成

2.1 モデルの作成手法の概要

図1に、サーフェイスモデルの作成手法の処理の流れを示す。まず、全周レーザーレンジファインダを用いて多地点においてレンジデータを取得する。次に各地点のレンジデータに対して、ポリゴン化処理、平面検出によるポリゴン数の削減を行う。最後にこれらのデータを1つのモデルに統合する。以下、各処理について詳述する。

2.2 全周レーザーレンジファインダ

本研究では全周レーザーレンジファインダ Riegler 社製 LMS-Z360 を利用した。LMS-Z360 の外観および主な性能を図2、表1にそれぞれ示す。本センサは計測の際、水平・垂直方向共に角度分解能が変更可能である。図3に本センサで計測したレンジデータを示しており、距離に近い点は明るく、遠い点は暗く表現している。

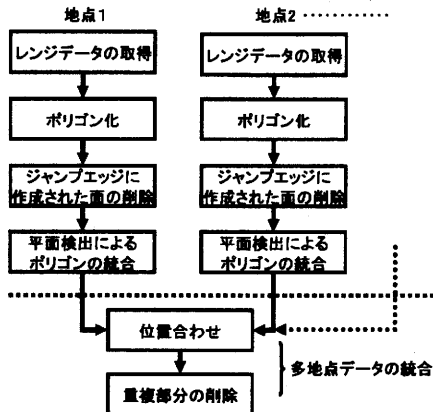


図1: サーフェイスモデル作成の流れ

2.3 レンジデータのポリゴン化

レンジファインダにより計測したレンジデータのポリゴン化を行う。具体的には、レンジデータで隣接する画素に該当する点同士で三角ポリゴンを作成し、点群データからポリゴンデータを作成する。その際、二点間の微分値が大きくかつ二次微分値が零交差している場合はジャンプエッジ (距離の不連続点) と判断する。ジャンプエッジとして現れる部分は現実環境では存在しない面であると判断しポリゴンは作成しない。

2.4 平面検出によるポリゴンの統合

レンジデータは三次元点群データであるので、複数のデータを統合するとデータ量が膨大になってしまう。そこで、本研究ではレンジデータから平面を検出し平面内に含まれるポリゴンを1つに統合することで、形状の精密さを保ったままポリゴン数の削減を行う。

ここではレンジデータに局所的に窓を当てはめ、窓内の点群データから最適な平面のパラメータを推定する。平面パラメータの推定手法には王らの手法 [11] を用いた。局所窓内の点群を

$$\mathbf{P}_i = (x_i, y_i, z_i)^T, \mathbf{n}_i = \frac{\mathbf{P}_i}{|\mathbf{P}_i|}, (i:1 \sim N)$$

として、まず次の二つの行列 \mathbf{G} と \mathbf{H} を次のように

表1: LMS-Z360 の性能

測定角範囲	水平方向: 360度 垂直方向: 40~50度
測定距離範囲	1~200m
測定精度	±12mm
最小角度ステップ幅	0.01度
角度読み取り分解能	水平方向: 0.0025度 垂直方向: 0.002度

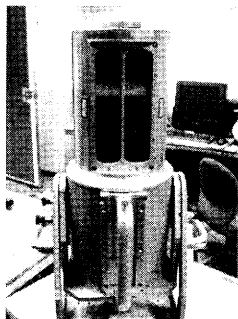


図 2: LMS-Z360 の外観

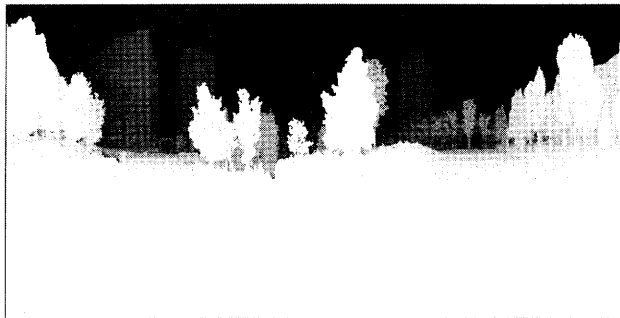
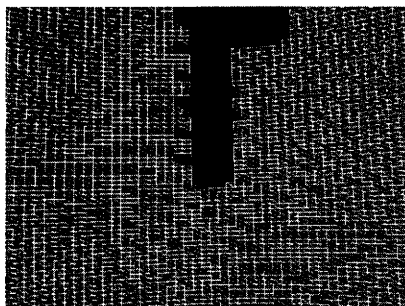
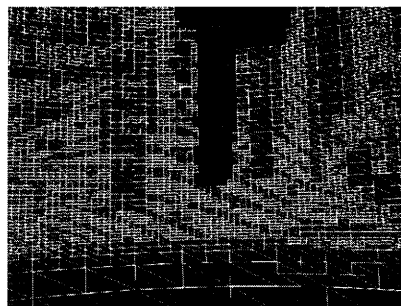


図 3: LMS-Z360 により取得したレンジデータ



(a) 統合前



(b) 統合後

図 4: 平面推定によるポリゴン数の削減

定義する。

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

$$\mathbf{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \begin{pmatrix} \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

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 \mathbf{v} を計算する。
4. $\lambda \approx 0$ ならば、 \mathbf{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。

$$c \leftarrow c + \frac{\lambda}{\mathbf{v}^T \mathbf{H} \mathbf{v}}$$

$$W_i = \frac{1}{(\mathbf{v}_1 \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_2 \mathbf{y}_i + \mathbf{v}_3 \mathbf{z}_i)^2}$$

6. 2. に戻る。

局所窓内全ての点と推定された平面との距離を求め、全て閾値以下なら局所窓内の点群は平面上に存在すると判断し、局所窓の四隅のデータでポリゴンを作成する。

2.5 多地点データの統合

多地点で取得したレンジデータを基準となる世界座標系へと統合する。レンジデータ間で対応する三次元点を指定し、手法 [12] によりデータ間の回転・平行移動成分を求め、座標系の位置合わせを行う。また、多地点でレンジデータを取得した場合、重複して計測される箇所が存在するため、ポリゴンもその部分に重複して作成される。そのため、ポリゴンの作成時、別のレンジデータによってすでにその場所にポリゴンが存在する場合は作成しない。

3 テクスチャマッピング

本章では、2章で生成されたサーフェイスモデルに全方位カメラで取得したテクスチャをマッピング

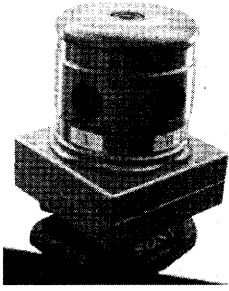


図 5: Ladybug の外観

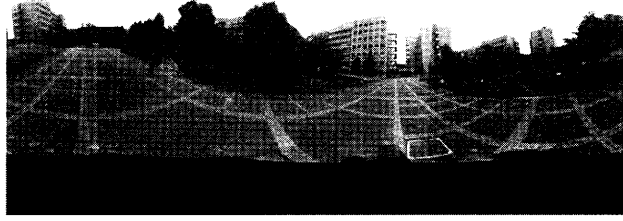


図 6: Ladybug により撮影した全方位画像

する方法について述べる。

3.1 全方位カメラ

本研究では全方位カメラとして図 5 に示す PointGrayResearch 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 つのカメラを持ち、全方向の約 75% を解像度約 3000×1000 画素で取得可能である。図 6 に生成された全方位画像を示す。なお、手法 [13] によって幾何学的・光学的にキャリブレーションを行って全方位画像を生成した。なお、Ladybug はカメラが 6 台あるのでカメラ座標系も 6 つになるが、本手法においては、代表のカメラを一つ決めその座標系を Ladybug の座標系とする。

3.2 カメラの位置・姿勢の推定

テクスチャマッピングの際、モデルの座標系とカメラの座標系の位置関係が分かれば、モデルのある三次元点がテクスチャのどの点に投影されているかを一意に求めることができる。世界座標系からカメラ座標系への変換行列はレンジデータの三次元座標とカメラの入力画像上での二次元座標の対応を与え、手法 [13] により計算する。

3.3 テクスチャの選択

ポリゴンの重心から最も近いカメラ位置において撮影された全方位画像を選択し、そのテクスチャを使用することによって解像度の高い最適なテクスチャの貼り付けを行う。しかし、選択されたテクスチャにはオクルージョンによって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と考えられる。例えば図 7 に示すようにポリゴン P のテクスチャを選択する場合、カメラ位置が近いカメラ C_1 が選択されるが、オクルージョンによりカメラ C_1 にはポリゴン P のテクスチャは撮影されていない。これを回避するためにポリゴン P からカメラ C_1 への奥

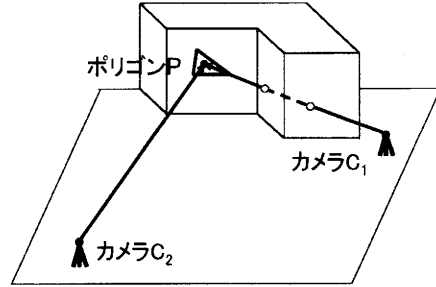


図 7: 最適な全方位画像の選択

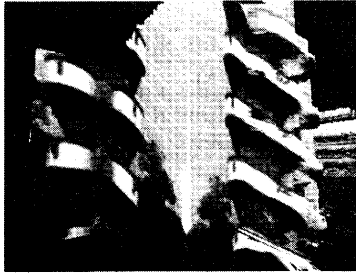
行き値がポリゴン P とカメラ C_1 との距離と一致していない場合はオクルージョンが発生していると判断する。従って図 7 の場合は最も近いカメラは C_1 だがオクルージョンが発生していると判断され第二候補である C_2 が選択される。

4 実験

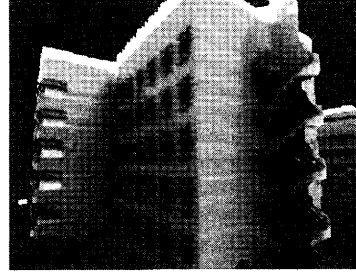
提案手法を用いて屋外の現実環境の三次元モデル化実験を行った。以下、本学敷地内を対象とした三次元モデルの生成実験、および生成したモデルを用いて試作したウォークスルーシステムについて述べる。

4.1 三次元モデルの生成実験

本実験では、本学構内においてレンジデータおよび全方位画像をほぼ同じ場所で取得した。本実験では計測範囲を水平 360 度・垂直 90 度に設定し、解像度は 904×450 でレンジデータを取得した。モデルの作成に関して、レンジデータ統合の際のデータ間の対応点の指定、カメラの位置・姿勢を求める際のレンジデータとテクスチャの対応点の指定は手動で行った。図 9 に生成した三次元モデルを示す。図より複雑な屋外環境においても三次元モデルの生成が行えていることが確認できる。図 9 の場合、10 地点のデータを統合し、約 $50\text{m} \times 50\text{m}$ の範囲がポリゴン数約 50 万でモデル化されている。



(a) オクルージョンを考慮しない場合



(b) オクルージョンを考慮した場合

図 8: オクルージョンを考慮したテクスチャマッピング



図 9: 生成された三次元モデル

4.2 ウォークスルーシステムの試作

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2と図10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11に示すように、ユーザーはコントローラによって視点の位置・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。図12にユーザ視点の映像を示す。また、ウォークスルーシステムについては、今回の機器構成で描画速度を10フレーム毎秒を保つためにはポリゴン数を50万程度に抑える必要があったため、10地点程度のモデル限界になってしまった。しかしモデルの範囲は約50m×約50m程度となり、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。

5 まとめ

本稿ではウォークスルーのための現実環境の三次元モデル化手法を提案した。多地点の全周レンジデータと全方位画像を統合し広範囲における現実環境の

三次元モデルを作成した。モデル生成の際、平面検出を行うことでモデルの精密さを保ちながらデータ量の削減し、本学におけるモデル生成実験を行った。そして、生成されたモデルを利用してウォークスルーシステムを試作しユーザーに立体画像として提示することで、臨場感の高い提示が可能であることを確認した。今回、現実環境の三次元モデルの作成は手動で行ったが今後は、より広域な現実環境の三次元モデル化手法の自動化について検討していく予定である。

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. Take-mura: "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] C. Tomasi and T. Kanade: "Shape and Motion from Image Streams under Orthography: A Factorization Method," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 9, No. 2, pp. 137-154, 1992.

表 2: ウォークスルーシステムの機器構成

球面ディスプレイ	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)
PC	CPU: Intel Xeon 2.0GHz Dual, Memory:1GB Graphics Card: WildcatVP Pro 990(ステレオ視対応)

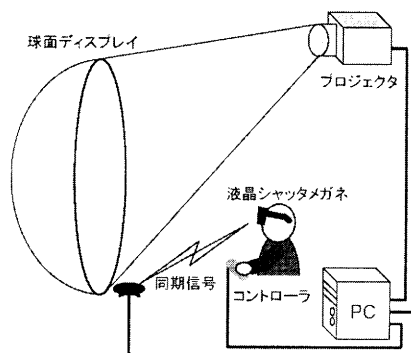


図 10: システムの概要



図 11: ウォークスルー実験の様子

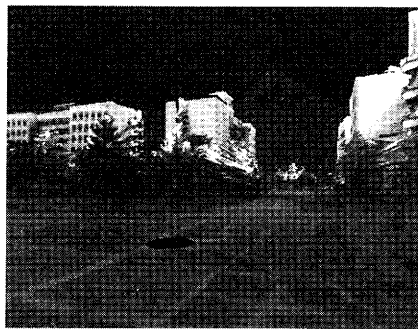


図 12: ウォークスルーでのユーザ視点の画像

- [4] 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.
- [5] M. Okutomi and T. Kanade: "A Multiple-baseline Stereo," IEEE Trans. Pattern SAnalysi and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 4, pp. 353-363, 1993.
- [6] C. Früh and A. Zakhor: "Constructing 3D City Models by Merging Aerial and Ground Views," Proc. International Conf. on Pattern Recognition, Vol. 3, pp. 653-656, 2002.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Y. Sun, J. K. Paik, A. Koschan and M. A. Abidi: "3D Reconstruction of Indoor and Outdoor Scenes Using a Mobile Range Scanner," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 23, pp. 52-61, 2003.
- [10] 清水, 大野, 小島, 相澤: "航空高度データによる広域モデルとレンジデータによる高精細モデルの統合", 信学技報 MVE, Vol. 12, No. 737, pp. 61-64, 2003.
- [11] 王, 棚橋, 平湯, 丹羽, 山本: "レンジデータの局所平面当てはめ手法の比較", 信学技報 PRMU, Vol. 101, No. 58, pp. 77-83, 2001.
- [12] 太田, 金谷: "3次元回転の最適推定と信頼性評価", 信学技報 PRMU, Vol. 97, No. 325, pp. 17-24, 1997.
- [13] 池田, 佐藤, 横矢: "全方位マルチカメラシステムによる全地球動画像の生成とテレプレゼンスへの応用", VR 学研報サイバースペースと仮想都市研究会, Vol. 8 No. 2, pp. 31-36, 2003.