

高速距離画像センサとカラーカメラを用いた テクスチャ付距離画像の実時間計測システムの構築

Construction of real-time sensing system of textured range images

with a high-speed range image sensor and a color camera

石山 英俊(中大) 正 寺林 賢司(中大) 正 梅田 和昇(中大)

Hidetoshi ISHIYAMA, Chuo University, ishiyama@sensor.mech.chuo-u.ac.jp
Kenji TERABAYASHI, Chuo University, terabayashi@mech.chuo-u.ac.jp
Kazunori UMEDA, Chuo University, umeda@mech.chuo-u.ac.jp

Abstract: This paper discusses a high-speed range image sensor which can obtain textured range images in real time. One of the important applications of this system is an outside sensing for mobile robots. The proposed system consists of a commercially available laser projector and two CCD cameras. The number of pixels of a range image is 361 and the measurement range is 800-2000mm. Experimental results show 40Hz sensing of textured range images. The effectiveness of the proposed system is verified by experiments. As a major conclusion, the constructed sensing system obtains real-time textured range images with commercially available devices.

Key Words: Range Image, Textured Range Image, 3D Sensing, Multi-Spot Laser

1. 序論

多くの分野で距離画像が用いられている。例えば、文化財をデジタルデータとして保存するデジタルアーカイブに代表される 3D モデリング[1]や、インタフェースとして人間のジェスチャ認識を行う研究 [2]、あるいは、歩行者の軌跡をから、不審な行動を見つけ出す研究[3]など、求められる計測速度や計測精度に応じて計測原理も様々なものが存在する[4]。これまで我々は、移動ロボットの外界認識用のセンサとして、市販のカメラを用いた 200Hz という高速に距離画像計測が可能な小型距離画像センサを構築し[5]、さらに光学フィルタの構成を工夫し、外乱光の強い屋外環境でも、距離画像計測が行えることを示した[6]。構築したセンサから得られる距離画像を用いて、リアルタイムで障害物の検出を行うことは可能であるが、テクスチャがないことから、特徴点や特徴領域などの抽出が難しく、従来のセンサ情報を用いて移動ロボットに外界を認識させることは難しい。そこで、距離画像にカラーテクスチャを貼り付けることで問題の解決を試みる。

本研究の目的は、従来の距離画像センサに新しくカラーカメラを取り付け、高速な距離画像計測に加え、リアルタイムでテクスチャマッピングした距離画像を取得することである。

本論文の構成について、2 章では、センサの構成と、カラーカメラ画像を距離画像へマッピングする方法を述べる。3 章では、構築したセンサを用いて計測実験を行い、結果を考察する。

2. システムの原理と構成

2.1 センサの構成

Fig.1 に構築したセンサを示す。距離画像センサは、外乱光を低減するために光学フィルタを取り付けたモノクロ CCD カメラとその光軸に平行に取り付けたレーザープロジェクタから構成されている、そしてカラーテクスチャを得るためのカラー CCD カメラが同じく、その光軸に平行になるよう取り付けられている。

プロジェクタは Stocker Yale 製の Mini-519X を使用している。レーザー波長 785nm、出力 35mW、先端に取り付けた回折格子によって 19×19 の格子状のマルチスポットを照射する。モノクロ CCD カメラ、カラー CCD カメラは共に最大 200Hz で撮像可能な Point Grey Research 製の Dragonfly Express を使用している。モノクロ CCD カメラのレンズ前面には、波長 720nm

以上の光を透過するローパスフィルタ HOYA R72 が取り付けられている。



Fig. 1 Constructed sensor. From left, color CCD camera, laser projector and monochrome CCD camera with optical filter.

2.2 距離画像計測

計測原理には三角測量を用いる。レーザを計測対象に向けて照射し、モノクロ CCD カメラから得られるスポット光像を観測する。スポット光像の画像座標から基準座標との視差を求める。計測原理より視差に反比例してレンズ中心からの距離が求められる。計算に用いる基準座標と反比例係数は、レーザープロジェクタとモノクロ CCD カメラとの校正により求めている[6]。マルチスポット光を用いることで、一度の観測で対象の形状データを取得することが可能である[7]。

2.3 点群処理

テクスチャを距離画像にフィッティングするために、点群データからメッシュを生成する必要がある。メッシュの生成には 2 次元ドロネー三角分割を用いる[8]。これにより、不自然な穴が開くことなく、与えた点群から面を張ることができる。

2.4 テクスチャマッピング

計測時、センサは対象のカラー画像と距離画像を同時に取得する。ここで画像処理ライブラリ Microsoft DirectX SDK を用いて、カラー画像をテクスチャとして、取得したスポット光像の位置に対応するテクスチャ座標を与えることで、前節で作成した距離画像メッシュにテクスチャマッピングを行うシステムを用意する。

スポット光像の 3 次元位置からテクスチャ座標を得るため

には, 3次元位置を2次元画像平面に投影する透視投影行列を用いた[9]. テクスチャ座標は3次元位置から

$$\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{x}} \quad (1)$$

により求められる. ここで, $\tilde{\mathbf{m}}$ はカラーカメラ画像座標, \mathbf{P} は 3×4 の透視投影行列, $\tilde{\mathbf{x}}$ はセンサが取得するカメラ座標系でのスポット光像の位置である. 以下に透視投影行列 \mathbf{P} を推定するカメラキャリブレーションについて示す.

2.5 カメラキャリブレーション

カラーカメラが観測するスポット光像の画像座標を求める. またこのスポット光像に対応する3次元位置を距離画像センサから取得する. 得られた $\tilde{\mathbf{m}}$ と $\tilde{\mathbf{x}}$ から拘束式が2つ成り立つ. 行列 \mathbf{P} は同次座標系より定数倍の不定性があるので, 未知数の数は11個となっている. スポット光像のカラー画像座標とそれに対応する3次元位置のペアを6つ以上与えることで, 連立方程式の解として透視投影行列 \mathbf{P} が求められる. 本センサにおいては, センサの光軸に垂直な平板を計測対象とし, 平板との距離が800mmの時と2000mmの時の四隅のスポット光像を用いた. この合計8ペアのデータから拘束式を16個求め, 線形最小2乗法を用いて行列 \mathbf{P} の要素を決める.

行列 \mathbf{P} の3行4列目の要素を1として, 残りの要素を縦に並べたベクトルを \mathbf{p} と置く(本ページの下部参照). \mathbf{p} を用いた連立方程式を次式で表す.

$$\mathbf{B}\mathbf{p} = \mathbf{q} \quad (2)$$

ここで, \mathbf{B} は与えたペアのデータから得られる 16×11 の行列である(本ページの下部参照). \mathbf{q} は与えた画像座標から作られる16次元のベクトルである(本ページの下部参照). 式(2)より, \mathbf{p} の最小2乗法解は, 次式より得られる.

$$\mathbf{p} = (\mathbf{B}^T\mathbf{B})^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{q} \quad (3)$$

3. 計測実験

3.1 計測環境

構築したセンサシステムを用いて計測実験を行った. 実験環境は屋内蛍光灯下(照度約500lx), 計測対象までの距離を800mmとした. 紅白の模様が印刷されている紙を貼り付けた, 大きさ200mm×200mm×300mmの直方体を計測対象とし, 3面をセンサに見えるよう配置した. 実験の様子を Fig.2 に示す. 手前が距離画像センサである.

3.2 実験結果

計測対象をモノクロカメラより光学フィルタを外して撮影した画像を Fig.3 に示す. センサは光学フィルタを取り付けているので, スポット光像のみが映し出される. このときのカラーカメラの画像を Fig.4 に示す. カメラの配線の関係から, オクルージョンをなるべく小さくするため, カラーカメラを天地逆転して設置していることに注意されたい. 2章で説明したように, Fig.3 よりスポット光像を観測し, 距離画像を得る. 得られた距離画像において, 800mm が赤, 2000mm が青になるようグラデーションで色付けをしたものを Fig.5(a) に示す. これに点群処理を施し, メッシュ生成を行ったものを Fig.5(b) に示す.

2.5 節の方法で求めた透視投影行列を用いて, Fig.4 をテクスチャとし, マッピングしたテクスチャ付距離画像を Fig.5(c) に示す. Fig.3 から Fig.5 はセンサ処理の流れから得られるもので, 一連の処理時間は約25.2ms, およそ40Hz でテクスチャ付距離画像を得ることができる. PC は TOSHIBA dynabook TX/68F, CPU Core2 Duo T8100 2.1GHz, メモリ 2GB を使用した.



Fig. 2 Experimental scene

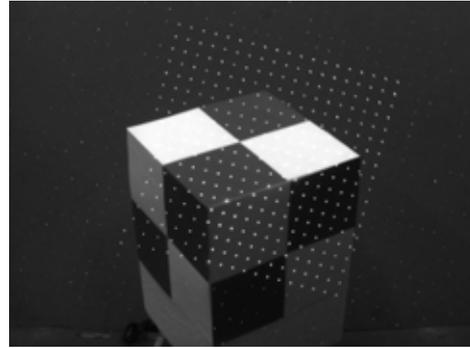


Fig. 3 Monochrome camera image



Fig. 4 Color camera image

$$\mathbf{P} = [p_{11} \ p_{12} \ p_{13} \ p_{14} \ p_{21} \ p_{22} \ p_{23} \ p_{24} \ p_{31} \ p_{32} \ p_{33}]^T$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_{w1} & -u_1 Y_{w1} & -u_1 Z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -v_1 X_{w1} & -v_1 Y_{w1} & -v_1 Z_{w1} \\ X_{w2} & Y_{w2} & Z_{w2} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_2 X_{w2} & -u_2 Y_{w2} & -u_2 Z_{w2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w2} & Y_{w2} & Z_{w2} & 1 & -v_2 X_{w2} & -v_2 Y_{w2} & -v_2 Z_{w2} \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{q} = [u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ \dots]^T$$

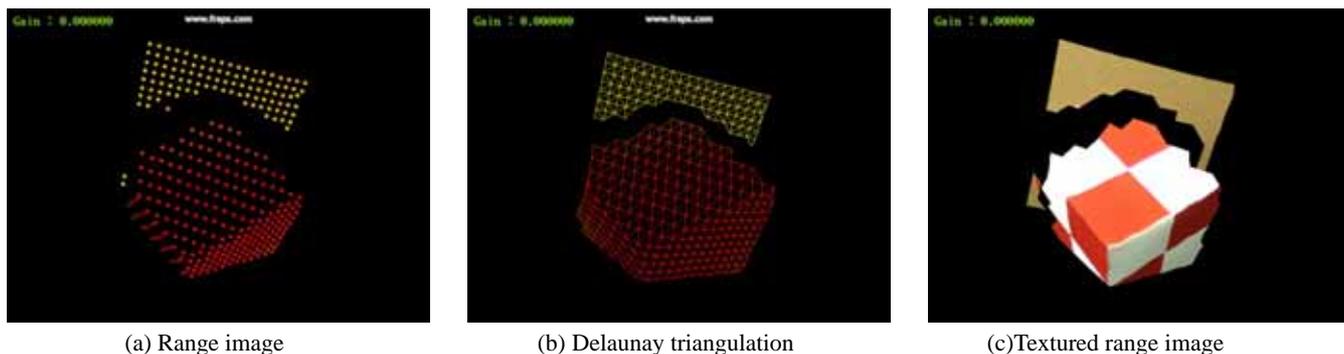


Fig. 5 Measurement of textured range image

3.3 考察

Fig.5 より、テクスチャが正しくマッピングされていることから、カメラキャリブレーションは成功し、正しく透視投影行列が求められているといえる。センサプログラムは距離画像計測のスレッドと、テクスチャ付距離画像生成のスレッドから構成されるマルチスレッドである。距離画像計測スレッドが1ループに要する時間は約1.6ms、よってテクスチャのない無地の距離画像の取得はカメラの最大速度である200Hzで動作できる。一方、テクスチャ付距離画像生成のスレッドにおいて、処理時間の大半をドロネー三角分割に要している。メッシュ作成の方法を短時間で行えるものに変更することで、更に高速なテクスチャ付き距離画像の生成が可能になると考えている。テクスチャのマッチング精度に関して、その評価の方法も含めて今後の課題とする。

4. 結論

距離画像にカラーテクスチャをマッピングすることを考え、既に構築した小型高速距離画像センサに、新しくカラーカメラを付加することを行った。カメラキャリブレーションより求めた透視投影行列を用いて、カラーカメラ画像をテクスチャとして、距離画像にテクスチャマッピングを行った。実験により、市販のカメラとプロジェクタを用いて、約40Hzでのテクスチャ付距離画像計測システムを実現した。

今後の展望として、距離画像とそのテクスチャから、特徴点や特徴領域の抽出方法の提案や、時系列で得られる距離画像のレジストレーションと統合の方法の提案を考える。方向性として、移動ロボットの自己位置同定、環境地図生成、また実環境認識へ向けた研究を行っていく予定である。

謝辞

本研究は、科研費(20500164)の助成を受けたものである。

文献

- [1] K. Ikeuchi, K. Hasegawa, A. Nakazawa, J. Takamatsu, T. Oishi and T. Masuda, "Bayon Digital Archival Project," In Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual System and Multimedia, pages 334-343, November 2004.
- [2] Holte, M.B., Moeslund, T.B., Fihl, P., "Fusion of range and intensity information for view invariant gesture recognition," Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008.
- [3] 寺林賢司, 中西達也, 橋本優希, 星川佑磨, 川田昂次, 梅田和昇, "差分ステレオを用いた多人数歩行者環境における人数推定", DIA, O3-2, 2009.
- [4] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, pp.14-16, 1990.
- [5] M. Tateishi, H. Ishiyama and K. Umeda, "A 200Hz Small Range Image Sensor Using a Multi-Spot Laser Projector," International Conference on Robotics and Automation, FrA9.6 A 3022, 2008.
- [6] 石山英俊, 梅田和昇, "屋外照明環境での200Hz距離画像計測",

第26回日本ロボット学会学術講演会講演概要集, 3I1-01, 2008.

- [7] K. Sorimachi, Active range pattern sensor, J. Robotics & Mechatronics, 1, pp.269-273, 1989.
- [8] B. Delaunay, Otdelenie matematicheskikh i estestvennykh nauk, Izvestia Akademii Nauk SSSR, 7:793-800, 1934.
- [9] 奥富正敏他, デジタル画像処理, CG-ARTS 協会, p.255, 2006.