

テクスチャ付距離画像計測システムの高速化と同期機能の追加

○内田 裕己 (中央大学), 寺林 賢司 (中央大学), 梅田 和昇 (中央大学)

Speedup of a textured range image sensing system and implementation of synchronous function

○Yuki Uchida (Chuo Univ.), Kenji Terabayashi (Chuo Univ.), and Kazunori Umeda (Chuo Univ.)

Abstract: This paper describes improving a processing speed of a textured range image sensing system to 200[Hz] and synchronizing two cameras of the system. The system consists of only commercially available products: a monochrome CCD camera, a color CCD camera, a laser projector, and two optical filters. The system obtains range image and color image at 200[Hz]. Improving processing speed of the system to 200[Hz] is achieved by changing 1394 Express Card. Synchronization is achieved by using a software and a library offered by Point Grey Research. The accuracy of synchronization and advantage of 200[Hz] sensing are evaluated by experiments.

1. 緒言

距離画像は移動ロボットの自律行動のために利用される。主に障害物検出や周囲のマッピングの目的で使われることが多く、高速性を重視した距離画像センサが求められる。高速な距離画像センサには SR4000[1] や石川らの 1[kHz]センサ[2]がある。SR4000 は 50[Hz]までが限界であり、1[kHz]センサは独自開発であるため、導入が困難である。

これらの理由から我々は導入が容易で高速センシングが可能なセンサ構築を行ってきた。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 200[Hz] 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[3]、さらに外界の認識を行うために、カラーテクスチャを距離画像に貼りつけるテクスチャ付距離画像計測システムへと発展させた[4]。このシステムでは、距離画像センサ単体は 200[Hz]でのセンシングが可能であるが、カラーテクスチャ取得も含めると計測速度が 100[Hz]になってしまい、距離画像センサの高速性を生かし切れていない点およびシステムに使用されている 2 台のカメラの同期がとれていない点が問題であった。

そこで本研究では本システムの 200[Hz]化及び 2 台のカメラの同期を取ることを目的とする。

2 章で構築したセンサの構成と原理を説明する。3 章では、高速化と同期の方法について説明する。4 章では、実験により 200[Hz]センシングの有用性と同期の検証を行う。5 章では、本論文の結論を述べる。

2. 200Hz テクスチャ付距離画像センサ

構築したテクスチャ付距離画像センサの構成と計測原理の概要を示す。これらは IEEE1394b PCI Express Card を除き[4]と同一である。

2.1 センサの構成

Fig. 1 に構築したセンサの外観を示す。レーザプロジェクタには StockerYale 社 Mini-519X を使用している。レーザ波長は近赤外の 785[nm]、出力は 35[mW] である。プロジェクタの先端に取り付けられた回折格子によって 19×19 の合計 361 点のスポット像を照射する。隣り合うスポット光線のなす角は $0.90[\text{deg}]$ である。モノクロカメラ、カラーカメラには Point Grey Research 社 Dragonfly Express を使用している。カメラの画素数は 640×480 (VGA)、1 画素の幅は $7.4[\mu\text{m}]$ である。レンズには TAMRON 13FM08IR を用いている。焦点距離 $8.0[\text{mm}]$ で、画角は水平 $34.5[\text{deg}]$ 、垂直 $25.7[\text{deg}]$ である。モノクロカメラには、レンズ前面に HOYA 社 R72 フィルタ、レンズの背面に Edmund Optics 社 785[nm] バンドパスフィルタを取り付けている。モノクロカメラとレーザプロジェクタとの基線長は $47.5[\text{mm}]$ としている。センサの大きさは幅 $130[\text{mm}] \times$ 高さ $157[\text{mm}] \times$ 奥行き $70[\text{mm}]$ 、また重量は金具を含め、約 $700[\text{g}]$ である。すべての画像処理は、PC: DELL XPS XPS720 (Core2 Extreme CPU Q6850 @ 3.00GHz, DRAM 4.00GB) を用いて行う。PC と 2 台のカメラとは一枚の IEEE1394b PCI Express Card を介して接続されており、2 台同時に動作させた場合の最大速度は 200[Hz] である。

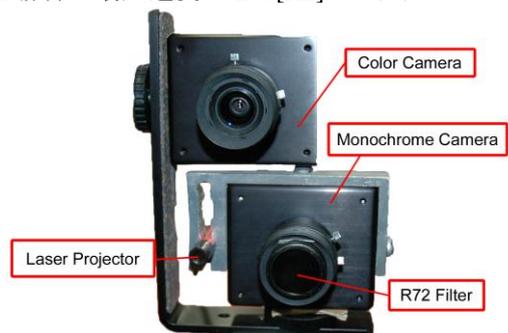


Fig. 1 Constructed sensor

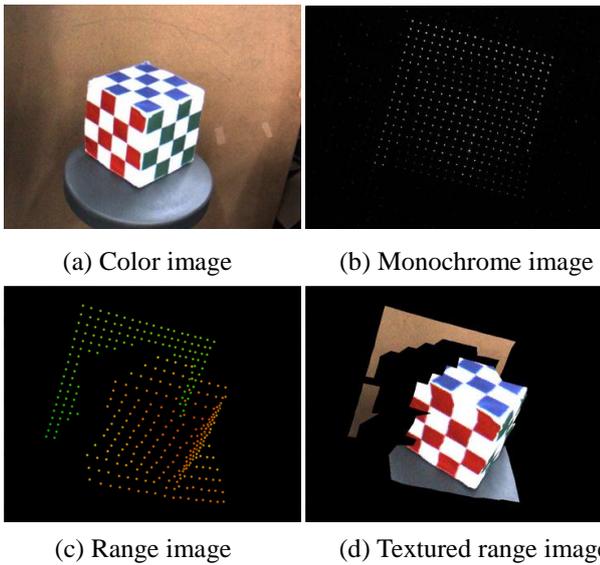


Fig. 2 Measurement of textured range image

2.2 テクスチャ付距離画像計測手法

本センサは三角測量の原理を使って距離を計算している。モノクロカメラとマルチスポット光を用いたアクティブステレオ方式により 361 点の距離画像を得る。Fig. 2(a)の計測物体にスポット光を照射し、モノクロカメラで計測した様子を Fig. 2(b)に、得られた距離画像を Fig. 2(c)に示す。距離画像は 200[Hz]で計測可能であり、計測精度は計測距離 2[m]で 10[mm]以内である。さらに取り付けられているカラーカメラから取得したカラー画像を距離画像に貼りつけることにより、テクスチャ付距離画像を取得することができる(Fig. 2(d))。

3. センサの高速化とカメラの同期

3.1 センサの200Hz化

以前のシステムの計測速度が100[Hz]であった主な理由はカラーカメラとモノクロカメラを同時に動作させた場合、単体で動作させた200[Hz]の半分の100[Hz]でしか動作できないことであり、その原因は2台のカメラを200[Hz]で動作させた場合のデータ量が大きいためである。IEEE1394b PCI ExpressCardのデータ転送帯域は、最大約78[MB/s]程度あるが、モノクロカメラを画像サイズ640×480で200[Hz]で動作させるときには、約61[MB/s]のデータ転送を行う。そのため、2台を動作させるためにはCard側の許容量を超えてしまうため、200[Hz]で同時に動作させることができない。センサを200[Hz]化するためにはExpress Cardを換える必要がある。今まで使用していたPoint Grey Research 社製のExpress Cardは1バスタイプのものであるが、2枚使用して1枚のCardにカメラを1つずつ接続するか2バスタイプのものを使用することにより2台のカメラを200[Hz]で動作可能になる。本論文では、2バスタイプのものに変更してこの問題を解決した。

3.2 カメラの同期

本システムで使用している2台のカメラはPoint Grey Research 社のDragonfly Expressである。このカメラで同期を取る場合には、シャッタタイミングを揃えること、同時刻の画像が保存されているバッファにアクセスすることの2点が条件となる。2台のカメラが同一のバスに接続されている場合には、自動的にシャッタタイミングを揃えることができる。しかしセンサの200[Hz]化を行うために2バスタイプのCardを使用する必要があるため、同一のバスに接続することができない。この場合は同社から提供されているMultiSyncというソフトウェア[5]を使用する必要がある。このソフトウェアは複数のカメラのシャッタタイミングを揃えることができる。取得した画像はバッファに保存され取得した時刻と保存したバッファのアドレスが返される。2台のカメラ画像が同じ時刻のバッファにアクセスすることにより、同期の取れた画像を取得することができる。この操作も同社から提供されている画像取得用ライブラリの同期専用APIを使用することにより、解決することができる。

4. 実験

4.1 同期の検証

ここではLEDを高速に点滅させ、その様子を2台のカメラで撮影し、同じフレームにLEDの点灯が映っているかを確認することにより、同期がとれているかを検証する。

Fig. 3に示すマイコンにはLEDが付いており、LEDの制御をマイコンにより行う。LEDを周期的に点滅させ、その様子をモノクロカメラとカラーカメラで撮影し、同じフレームに点灯した様子が映っているかどうかで同期の確認を取る。具体的には、撮影した画像のうち同期に失敗した割合を調べることにより保障できる同期のずれを調べる。この実験ではLEDの点灯時間を1[μs]、カメラの露光時間を20 [μs]とした。

カラーカメラとモノクロカメラで撮影し、同じフレームにLEDの点灯が確認できる成功例を連続3フレーム分、Fig. 4に示す。画像が暗いのはカメラの露光時間が短いためである。撮影した結果、LEDを100回点灯させたうち、96回がカラーカメラ、モノクロカメラどちらも同じフレームに映っており、4回はカラーカメラは映っているがモノクロカメラは映っていなかった。カメラの露光時間を T_c 、LEDの点灯時間を T_l 、カメラ間の同期ずれを T_d 、モノクロカメラとカラーカメラどちらにもLEDの点灯が映った成功率を p とすると以下の式(1)が成り立つ。

$$T_d = (1 - p)(T_l + T_c) \quad (1)$$

$T_l=1[\mu s]$ 、 $T_c=20[\mu s]$ 、 $p=0.96$ を(1)に代入すると

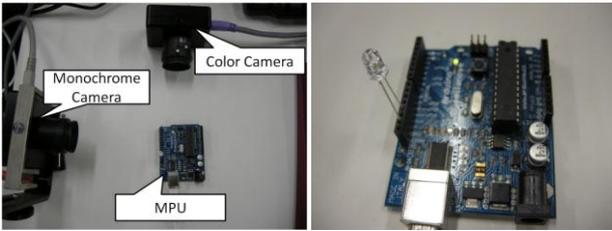
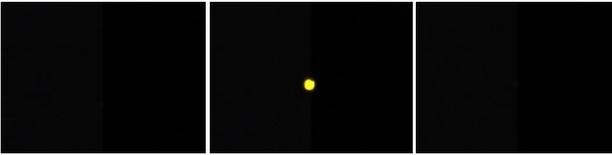


Fig. 3 Measured object



(i) frame#1 (ii) frame#2 (iii) frame#3

(a) Color camera image



(i) frame#1 (ii) frame#2 (iii) frame#3

(b) Monochrome camera image

Fig. 4 Color and monochrome camera image

$T_d=0.84[\mu s]$ となるのでカメラの画像取得の周期, $5[ms]$ に対して十分小さなずれであると考えられる.

4.2 200[Hz] センシングの有用性の検証

この章では本システムを高速な移動をする移動ロボットに搭載することを想定し, 高速センシングの一例である三次元マッピングを用いて200[Hz]センシングの有用性を検証する.

処理速度200[Hz], 以前までのシステムの限界であった処理速度100[Hz], 一般的なカメラの処理速度30[Hz]でセンシングした場合の計測データでマップを作成し, 比較することで, 本システムの有用性を示す. ただし200[Hz], 100[Hz], 30[Hz]で別々に計測を行うと同じ実験環境にすることができない. そのため, マッピングに使う計測データは200[Hz]で計測したデータから半分にサンプリングしたデータを100[Hz]の計測データ, 1/7にサンプリングしたデータを30[Hz]の計測データとすることで同じデータセットを用いて疑似的に100[Hz]と30[Hz]の計測データを再現する. 三次元マップはKLTを用いたビジュアルオドメトリにより作成し, この処理自体は時間がかかるためオフラインで行っている (詳細は[6]を参照). マッピング対象はFig. 5に示す様々なものが置かれた机である. センサを三脚に固定し, 約1.4[m]の距離を回転させて走査して計測を行った. 全ての走査にかかった時間は0.2[s]である. マップ作成に使

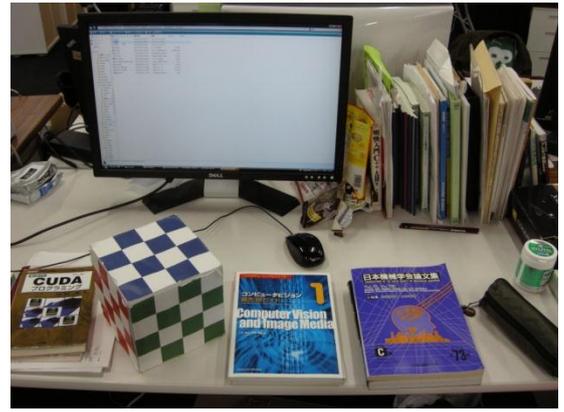
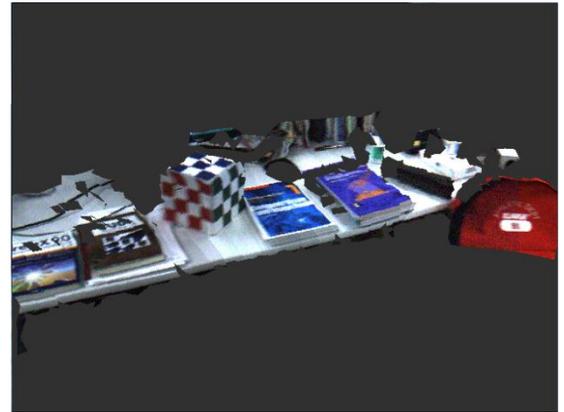
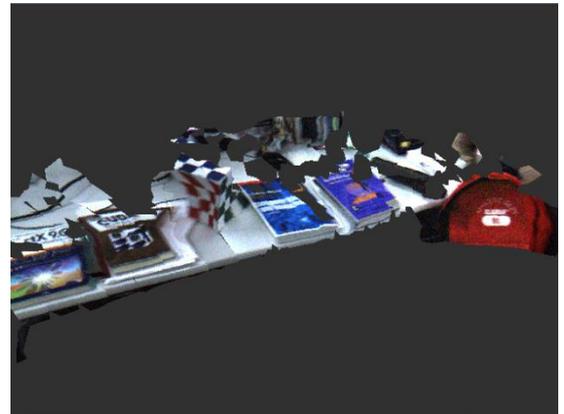


Fig. 5 Measured object



(a) 3D Map using sensing data at 200Hz



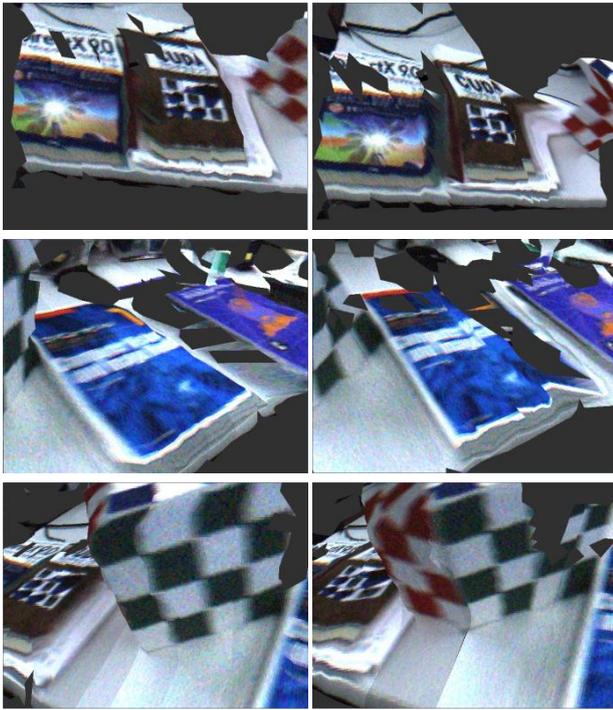
(b) 3D Map using sensing data at 100Hz

Fig. 6 Mapping results

用したデータ数は200[Hz]の場合が40枚, 100[Hz]が20枚, 30[Hz]が6枚である.

200[Hz], 100[Hz]でセンシングしたマッピング結果をFig. 6に示す. 30[Hz]についてはマッピング結果を得ることができなかった. 30[Hz]のマッピング結果を得ることができなかった原因はフレーム間の画像の変化が大きくビジュアルオドメトリが困難であったためである.

また200[Hz]と100[Hz]を比較しやすくするため, マップの一部の拡大図をFig. 7に示す. Fig. 7からわかるように200[Hz]のマップに比べると100[Hz]のマップは部分



(a) 200[Hz]

(b) 100[Hz]

Fig. 7 Enlarged figure of 200[Hz] and 100[Hz] maps

的にずれが生じていることがわかる。この原因もフレーム間の画像の変化によるビジュアルオドメトリの精度の低下である。

30[Hz]のマップが作成できなかったことと200[Hz]よりも100[Hz]のマップの精度が悪くなった原因はどちらも、計測速度の低下によるビジュアルオドメトリの精度が低下したためである。30[Hz]ではマップが作成できず、100[Hz]でもずれが生じる速さでセンサを移動させても200[Hz]でセンシングすることにより、精度の高いマップを作成できることが確認できた。この結果から200[Hz]のセンシングはフレーム間の変化が小さいデータを取得できるため、マップ作成に有用であると言える。

5. 結論

本論文ではテクスチャ付距離画像計測システムの200[Hz]高速化と同期を行った。IEEE1394b PCI ExpressCard を変更することにより計測時間を改善した。Point Grey Research 社提供のソフトウェア、MultiSync と flycapture ライブラリを使用することにより、2台のカメラの同期を取った。LED を用いた実験により1.05[μs]以下の同期が保障されていることを示した。高速センシングの一例である三次元マッピングを用いた実験により 200[Hz]のセンシングが有用であることを示した。

本システムは市販製品を用いて構築されているため、導入が容易であり、200[Hz]で距離画像だけでなくカラー画像も同時に取得可能である。そのため、距離画像

を用いた障害物検出、特徴点を用いた認識、距離画像とカラー画像を用いた三次元マッピングなど様々な応用が可能であり、移動ロボットの環境認識に有用であると考えている。

参考文献

- [1] <http://www.j-clavis.co.jp/Mesa-sr/SR4000.html>
- [2] Y. Watanabe, "955-Fps Real-Time Shape Measurement of a Moving/Deforming Object Using High-Speed Vision for Numerous-Point Analysis," in *Proc. of IEEE int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, pp.3192-3197, 2007.
- [3] 立石雅輝, 石山英俊, 梅田和昇: "マルチスポットレーザプロジェクタを用いた 200Hz 小型距離画像センサの構築", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.739, pp.499-505, 2008.3.
- [4] H. Ishiyama, K. Terabayashi, K. Umeda, "A 100Hz Real-time Sensing System of Textured Range Images," *Proc. of 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies, SP-SH-7*, 2010.
- [5] <http://www.ptgrey.com/products/multisync/index.asp>
- [6] 内田裕己, 寺林賢司, 梅田和昇: "テクスチャ付距離画像計測システムを用いた実環境の 3D マッピングの高速化", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 講演論文集, 1P1-D07, 2011.6.