

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330205

研究課題名(和文) マルチレーザ光投射に基づく高速小型距離画像センサの構築とその応用

研究課題名(英文) Construction of fast and compact range image sensors using multiple laser lights and their applications

研究代表者

梅田 和昇 (UMEDA, Kazunori)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：10266273

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：スリット光などを多数投射するレーザプロジェクタを用いて距離画像を高速に計測する小型距離画像センサの構築ならびにその応用を行い，以下を実現した．(1)マルチスリット光を用いたカラーテクスチャ同時取得可能な距離画像センサの構築，(2)連続する画像間において成り立つ勾配拘束あるいはカラー画像間のオプティカルフローを利用することで高速なオンライン3次元マッピングを実現する手法の構築，(3)ぼけを利用することで近距離での計測が可能な，ロボットハンドに搭載可能な超小型距離画像センサの構築．

研究成果の概要(英文)：Fast and compact range image sensors are constructed that use a laser projector that projects multiple laser lights such as slit lights and their applications are presented. Following contributions have been achieved. (1) A range image sensor with multiple slit lights is constructed that can obtain color texture simultaneously. (2) Methods for fast online three-dimensional mapping are proposed by utilizing gradient constraint between continuous range / color images or optical flows between color images. (3) Compact range image sensors that are small enough to be mounted on a robot hand and can measure small distances by using blur of images of projected slit lights are constructed.

研究分野：ロボット工学，計測工学

キーワード：距離画像センサ マルチスリットレーザ アクティブステレオ 三次元マッピング 高速ビジョン オプティカルフロー 勾配拘束 ぼけ

1. 研究開始当初の背景

距離画像は、多数の距離情報から構成される画像である。3次元情報を直接持つことから、ロボットビジョン、3次元形状モデリング、生産自動化、測量など様々な分野で有用であり、その計測・処理手法に関して、これまでに多くの研究・開発が行われて来た。研究開始当初、距離画像を計測する距離画像センサに関して2つの大きな進展が見られていた。一つは、TOF (Time of flight) 距離画像センサの実用化である。これは、パルス光・変調光を対象に照射し、戻ってくる時間(位相差)から距離を測るTOF法を、特殊なCMOS撮像素子を用いることで画像のすべての画素で同時に行うものである、Mesa Imaging、パナソニック、オプテックスなどで商品化されていた。もう一つは、Microsoftのゲーム機Xbox用の距離画像センサKinectの発売・普及であった。当時のロボティクスやビジョンの国際会議では、Kinectを利用した研究が数多く発表されていた。初代のKinectは、パターン光(Kinectの場合はランダムドットパターン)を照射して三角測量の原理で距離を計測するアクティブステレオ法を用いていた(一方、その後登場したKinect v2はTOF距離画像センサであった)。TOF法と比較すると、アクティブステレオ法は、計測誤差が距離の2乗に比例するため、遠距離の計測は不向きである一方、近距離においてTOF法よりも誤差が小さいという長所を持つ。アクティブステレオ法の一つとして、マルチレーザスポット光を用いた距離画像センサが、慶応大の中澤らによって提案されている。我々は、この手法に基づき、距離画像を高速かつロボストに計測する小型距離画像センサを長年にわたり開発してきた。当時、既に200Hzとビデオレートを超えていく速度でしかも屋外の太陽光下で距離画像ならびにカラーテクスチャ付きの距離画像を計測できるセンサの開発に成功していた。さらにコールドミラーを用いることで距離画像とカラー画像の同軸化も実現していた。同様の手法を用いて、高速ビジョンの研究で知られる東大の石川らのグループは、1kHz近くという超高速で距離画像を計測することに成功している。石川らのセンサと比較すると速度では劣るものの、サイズ、ロボスト性、汎用性などの点で、我々が構築したセンサはロボティクスなどへの応用には適していると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、当時までの我々の研究の枠組みを拡張し、スリット光などを多数投射するレーザプロジェクトを用いて距離画像を高速に計測する小型距離画像センサを構築し、さらに構築したセンサをいくつかのロボティクスの問題に適用することを目的とした。具体的には、以下の3つのテーマを挙げた。

(1) マルチスリット光を用いたカラーテクス

チャを同時取得可能な距離画像センサの構築：当時まで主に利用してきたマルチスポット光ではなくマルチスリット光を用いることで、より密な距離画像を計測でき、特にロボットに搭載している時のようにセンサが移動する場合に有効な距離画像センサを構築する。また、カラーカメラを組み合わせることで、カラーテクスチャの同時計測を実現する。

(2) 超高速オンライン3次元マッピング手法の構築：マルチスポット光を用いたセンサは、高速かつ計測がロボストな代わりに画素数が少ない欠点がある。我々は既に、このような粗い距離画像にも適用できる3次元マッピング手法を提案していたが、処理時間がかかるといった問題点があった。そこで、新たな手法を提案して処理速度を2桁程度大幅に向上させ、オンラインでの環境の3次元マッピングを実現する。さらに、マルチスリット光を用いた距離画像センサをヒューマノイドロボットに搭載し、歩行しながらのリアルタイム3次元マップ作成を実現する。

(3) ロボットハンドに搭載可能な超小型距離画像センサの構築：30mm角程度の超小型でかつ100mm以内、50mm程度までの近距離での計測が可能で、ロボットハンドによる物体把持などこれまで距離画像センサが応用できなかった対象に利用可能な超小型距離画像センサを構築する。近距離ではマルチスリット光像がぼけてしまう。本研究では、逆にスリット光像のぼけの大きさを距離計測に積極的に用いる。さらにロボットハンドに搭載して実物体のマニピュレーションを実現する。

3. 研究の方法

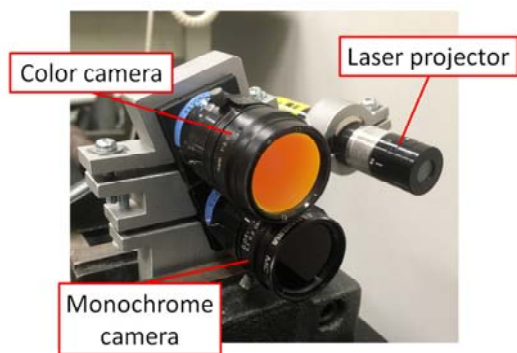
研究目的の(1)に関しては、小型さと高速性とを兼ね備え、外乱光にロボストな、カラーテクスチャも同時取得可能なセンサを構築した。(2)に関しては、センサが高速であり連続する画像間の変位が小さくなることを生かし、オンラインで利用可能な3次元マッピング手法を構築した。(3)に関しては、小型のレーザプロジェクトおよび超小型カメラを用いてハンドに搭載可能な超小型センサを製作し、100mm以内の近距離での距離画像計測を実現した。

4. 研究成果

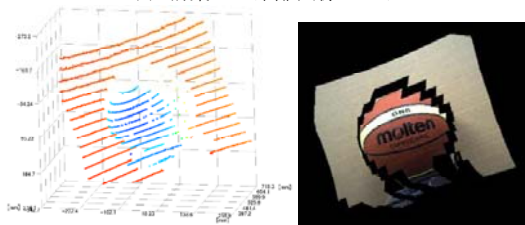
(1) マルチスリット光を用いたカラーテクスチャを同時取得可能な距離画像センサの構築

マルチスリットレーザプロジェクトにモノクロカメラ・カラーカメラを組み合わせ、カラーテクスチャを同時取得可能な距離画像センサを構築した。スリットの本数は15本であり、約4600点からなる距離画像を取得可能である。また、カラー画像は1280×960画素である。この時、カラーカメラにレーザの波長(660nm)をカットするハイパスフイ

ルタを装着することで、カラー画像にレーザスリット光像が写らないようにした。また、カラーテクスチャと距離画像との位置ずれの解消、計測精度ならびに計測速度の向上、スリットレーザ像の画像中での探索範囲の見直しなどによる計測レンジの拡大を実現した。図1に構築したセンサならびに取得したカラーテクスチャつき距離画像の例（バスケットボール）を示す。なお、この例ではハイパスフィルタは装着していないため、テクスチャにスリット光が写っている。



(a) 構築した距離画像センサ



(b) 取得した距離画像とテクスチャマッピング結果

図1 構築した距離画像センサと距離画像例

(2) 超高速オンライン3次元マッピング手法の構築

本テーマに関しては特に顕著な成果を挙げることができた。大きく分けて以下の2つの手法を構築した。なお、①のうちカラー画像に関する勾配拘束の導出とその利用、ならびに②は、当初の計画に含まれない想定以上の成果である。

①勾配拘束を用いた手法

連続する距離画像間において、各点で成り立つ勾配拘束を利用して運動パラメータを算出する手法を構築した。勾配拘束は、距離画像間の運動パラメータ6成分に関する線形の式であり、距離画像中の複数（6点以上）の点において式を求めることで、線形演算により運動パラメータを容易に算出ができ、さらに得られた運動パラメータを用いることで距離画像の重ね合わせが実現できる。さらに本手法を我々が以前開発した200Hzで画像取得が可能なマルチスポット光を用いた距離画像センサに実装した。本センサは、381点の点を持つ。その結果、画像間の運動パラメータの算出を1ms以内に行うことが可能であり、200Hzという高速でのオンラインの3次元マッピングを実現した。当初の研究目的で3次元モデル構築手法の2桁程度の高速化を目標に掲げたのに対し、数秒を要

していた連続する画像の位置合わせを1ms以下に短縮した、すなわち3桁もの高速化を実現できたのは、大きな成果である。また、同時取得されるカラー画像に関する勾配拘束も導出し、距離画像に関する勾配拘束と合わせて利用することで、形状が一応で距離画像のみでの運動計測が不安定な物体における計測の安定化を実現した。さらに、市販の一般的な距離画像センサであるKinectにも本手法が適用可能なことを示した。以下に述べる②の手法も含め、提案した3次元マッピング手法はアクティブステレオ法に基づくセンサやTOF距離画像センサの大半で利用可能であると考えられる（粗い距離画像で利用可能であることを示せたので、密な距離画像ならより容易に利用可能。ただし、処理時間は長くなる）。

②カラー画像のオプティカルフローを用いた手法

①の手法は、超高速である一方、マッピング精度が高くないという欠点もあった。そこで、連続するカラー画像で特徴点の対応（オプティカルフロー）を求め、その特徴点の3次元座標を距離画像の補間から得て3次元運動を求めるという手法を構築した。これにより、処理速度はやや犠牲になる一方、マッピング精度の向上を実現した。図2に提案手法で3次元マッピングを行った結果を示す。同図(d)は①の手法による結果である。マップ生成に用いた画像は100枚、また連続する画像間の運動パラメータ算出に要した時間は27ms、①の手法は0.42msであった。手法②は①よりは処理時間を要するものの比較的高速であることが分かる。(e)は、マッピングが困難な小さく複雑な形状でも本手法が適用可能であることを示している。なお、①だとマッピングに失敗する。さらに、本手法を(1)で構築した距離画像センサに実装した。これにより、本手法がマルチスリット光を用いたセンサで得られる非等方的な距離画像に対しても適用可能であることを示し、マルチスポット光を用いたセンサの約10倍の高密度のマップ作成を実現した。

(3) ロボットハンドに搭載可能な超小型距離画像センサの構築

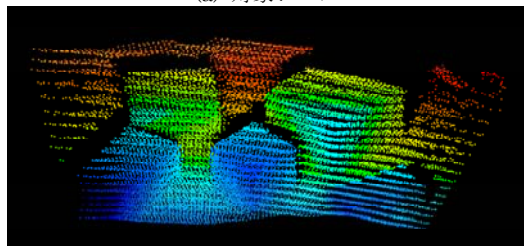
小型カメラ・マルチスリットレーザプロジェクタを用い、超小型で近距離計測が可能な距離画像センサのプロトタイプを複数台開発した。さらに、スリット光像のぼけを用いて距離を算出する手法を提案した。ぼけたスリット像にガウス曲線を当てはめ、その分散の大きさから距離を取得するという手法である。これにより、対象物の色や反射率によらず距離の算出が可能であることを確認した。計測レンジは、50~120mmであり、目的としていた近距離での計測を実現した。

図3にスリット光像のぼけを用いた距離画像計測の例を示す。計測対象は、50mm×25mm×15mmの直方体である。(a)

は、距離によりスリット光像のぼけが違うことを示している。(c)に示すように、ぼけを用いた距離画像計測を実現している。近距離ではスリット光像のぼけを用いた手法、中距離では従来の視差を用いた手法を実装し、両手法を組み合わせることで、広い計測範囲での距離画像の計測が実現可能であることを示した。また、2017年度より、ロボットマニピュレータの開発を行っている台湾の会社と共同で、実際にロボットハンドに搭載することを旨とした超小型センサの開発を開始している(図4参照)。27mm×20mm×18mmと小型である。



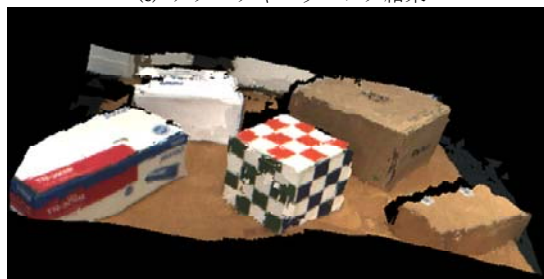
(a) 対象シーン



(b) 取得した3次元マップ



(c) テクスチャマッピング結果

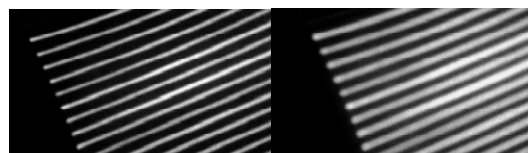


(d) 勾配拘束を用いた手法による結果

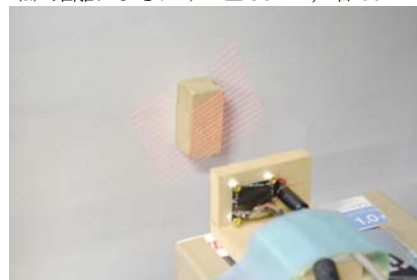


(e) 小さく複雑な形状に対するマッピング結果

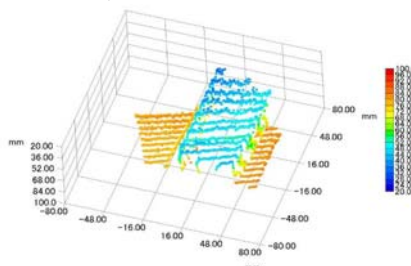
図2 カラー画像のオプティカルフローを用いた3次元マッピング



(a) 距離によるぼけ. 左 90mm, 右 60mm



(b) 構築したセンサによる計測の様子



(c) ぼけを用いた距離画像計測結果

図3 スリット光像のぼけを用いた距離画像計測



図4 開発中の小型距離画像センサ

以上で示したように、本研究は、マルチスリット・マルチスポットレーザ光を用いた高速小型距離画像センサの構築と3次元マッピングへの応用に関して、当初想定していなかった内容も含め、十分な成果を挙げている。一方で、ロボットハンドへの搭載などロボティクスへの実用に関して必ずしも十分な実装ができなかったことは課題として残っている。また、3次元マッピングにおけるマルチスリットレーザ光を用いて得られる距離画像の異方性を活用した手法の構築も実現に至らなかった。これらの改善を行っていくこと、また現在開発中の超小型センサの完成・実用化を目指していくことが今後の課題であると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 梅田 和昇: 距離画像計測手法の概要とその動向, 自動化推進, 査読無, Vol.46, No.3, pp.2-5, 2017.
- ② 野崎 慎太, 増山 岳人, 梅田 和昇: 距離画像とカラー画像を用いた微小運動の直

接推定による三次元地図生成, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.82, No.834, 2016.
DOI: 10.1299/transjsme.15-00367

[学会発表] (計 15 件)

- ① 木村優志, 増山岳人, 梅田和昇: マルチスリットレーザプロジェクタを利用した距離画像センサを用いた微小運動の直接推定による三次元地図生成, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集, 2A2-N10, 2017.5.
- ② Masashi Kimura, Gakuto Masuyama, Kazunori Umeda: Three-dimensional mapping by direct estimation of a small motion using range images and optical flow of color images, Proc. of 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2016), pp.756-761, 2016.12.
DOI: 10.1109/SII.2016.7844090
- ③ Yi Feng, Ayase Itagaki, Gakuto Masuyama, Kazunori Umeda: Development of Compact Range Image Sensor with Multi-Slit Laser Projector that Uses Disparity and Blur, Proc. of 16th International Conference on Precision Engineering (ICPE2016), P05-8256, 2016.11.
- ④ Shinta Nozaki, Masashi Kimura, Gakuto Masuyama and Kazunori Umeda: High-speed Three-dimensional Mapping by Direct Estimation of a Small Motion Using Range Images, Proc. 11th France-Japan and 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics, pp.68-73, 2016.6.
DOI:10.1109/MECATRONICS.2016.7547118
- ⑤ 馮 益, 木村 優志, 増山 岳人, 梅田 和昇: スリット像のぼけの計測と視差計測とを組み合わせたマルチスリットレーザプロジェクタを用いた小型距離画像センサの構築, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集, 1A2-19a7, 2016.6.
- ⑥ 板垣 文瀬, 木村 優志, 増山 岳人, 梅田 和昇: マルチスリット光を用いたカラーテクスチャ取得可能な小型距離画像センサの構築, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集, 1A2-19a6, 2016.6.
- ⑦ 野崎慎太, 増山岳人, 梅田和昇: 距離画像とカラー画像を用いた微小運動の直接推定による三次元地図生成, 第 20 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 1B3, pp.43-48, 2015.3.

[図書] (計 1 件)

① 岩堀 祐之監修, 梅田 和昇 他 52 名執筆, エヌ・ディー・エス, 三次元画像センシングの新展開—リアルタイム・高精度に向けた要素技術から産業応用まで, 2015, pp.195-202.

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.chuo-u.ac.jp/umedalab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅田 和昇 (UMEDA, Kazunori)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号: 10266273

(2) 研究分担者

増山 岳人 (MASUYAMA, Gakuto)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号: 20707088