

令和 5 年 6 月 24 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04191

研究課題名（和文）複数のモダリティーの融合による距離画像計測手法の高度化

研究課題名（英文）Improvement of range image measurement by fusion of multiple modalities

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） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数のモダリティーの融合により距離画像計測手法の高度化を行うことを目的とし、(1) アクティブステレオとDepth from Defocus (DFD)との融合による近距離計測用小型距離画像センサの実現、(2) 魚眼ステレオカメラを対象に、擬似バイラテラルフィルタに基づくステレオとStructure from Motion (SfM)の融合の新たな枠組みの提案、(3) 深層学習技術を用いた、異なる特性を持つ距離画像の融合手法の構築、を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

距離画像（range image）は、距離値あるいは3次元座標値からなる画像であり、3次元情報を直接持つことからロボットビジョンを始め多くの分野で重要性が大きい。個々の距離画像センサの性能は、各センサが利用している距離計測原理自体が持つ物理的限界等に伴い必ずしも十分とは言えない。そこで本研究では、センサ融合（センサフュージョン）のアプローチで距離画像計測の高度化を行うことを目指し、異なる3つの方向での複数のモダリティーの融合手法の構築により、学術的な点でもまた実用的な面でも意義のある成果を得た。

研究成果の概要（英文）：In this study, we achieved following three results to improve the methods of range image measurement based on fusion of multiple modalities; (1) constructed compact range image sensors for short distance measurement by fusing active stereo and Depth from Defocus (DFD), (2) proposed a new framework with Bilateral-like filter for fusing stereo vision and Structure from Motion (SfM) for a fish-eye stereo camera, and (3) developed a fusion method for range images with different characteristics using deep learning techniques.

研究分野：ロボットビジョン，画像処理

キーワード：距離画像計測 センサフュージョン 複数モダリティー 小型距離画像センサ アクティブステレオ
深層学習

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

距離画像 (range image) は、距離値あるいは 3 次元座標値からなる画像である。深度画像 (depth image, depth map) と呼ばれる。ロボットビジョン、モデリング、測量、組立をはじめとする各種産業応用など、多くの分野で重要性が大きく、古くから数多くの計測手法の研究開発が行われてきた。近年、安価かつ性能もかなりよい民生用の距離画像センサが普及し、また自動車の運転支援・自動運転技術に適した距離画像センサが登場し、利用が拡大している。このように、距離画像計測技術は大きな進化を遂げ、実用化・商品化されている距離画像センサも多い。民生用、自動車用のセンサは、今後もさらに進化がすることが期待できる。しかしながら、それでもなお、各センサの性能は、各センサが利用している距離計測原理自体が持つ物理的限界に伴い、計測精度、計測速度、計測点数、計測レンジ、照明環境に対するロバスト性などといった点で、十分とは言えない。

2. 研究の目的

本研究では、センサ融合 (センサフュージョン) のアプローチで上記の問題を解決することを目指し、複数のモダリティの融合により、距離画像計測手法の高度化を行うことを目的とした。具体的な融合として、以下の 3 つを対象とした。

- (1) アクティブステレオにおける Depth from Defocus (DFD) との融合
- (2) ステレオと Structure from Motion (SfM) の融合
- (3) Time of Flight (TOF) とステレオの融合

3. 研究の方法

複数のモダリティの融合手法を構築・定式化すること、それにより距離画像計測の性能が向上できることを示すこと、また実用的なセンシングシステムを構築することを行った。上記の具体的な 3 つの対象に関しては、それぞれ以下の通りである。

(1) アクティブステレオとして、我々が研究開発を以前から行っていた、複数のスリット光などを対象に投影してカメラで撮像し、光が投影された位置までの距離を視差により求めるアクティブステレオを対象とした。この時、対象までの距離が小さいと、スリット像がぼけ、視差の計測誤差が大きくなるという問題があり、それに対し、逆にこのぼけを利用することで距離を計測する手法を提案していた。これが本研究で対象とした Depth from Defocus (DFD) である。この DFD は、ぼけのモデル化が不十分なことから、計測精度や安定性の面で改善の余地があった。そこで、まずはこの手法自体の改良を目指した。その上で、DFD による距離計測結果と視差を用いたアクティブステレオによる距離計測結果の融合手法の構築、さらにこの原理を用いた実用的なセンサのプロトタイプ構築を行った。

(2) ステレオカメラが移動ロボットや自動車に搭載されている場合、ロボット・車の移動に伴い、ステレオカメラも移動する。この時、移動した複数視点から得られる画像を用いることで、ステレオカメラの個々のカメラで、いわゆる Structure from Motion (SfM) によりシーンの 3 次元情報を復元し、さらに (スケールを除く) カメラの運動を同定することが可能である。そこで、2 台のカメラによるステレオと各カメラの SfM とを融合させることで、より高精度な距離画像計測の実現を目指した。この時の SfM では、カメラの移動方向がステレオカメラの左右の配置と異なり、前後となる。これにより、ステレオと SfM では画像中での計測精度の良い箇所が異なる。また、一般に SfM では距離が得られる点数がステレオより少なくなる一方で誤対応 (はずれ値) が生じにくい。これらのステレオと SfM との相補的な特徴を陽に利用することを目指した。また具体的なステレオカメラとして、我々が構築してきた、2 台の魚眼カメラを用いた魚眼ステレオカメラを用いて、提案手法の実装を行った。

(3) Time of Flight、すなわち光の飛行時間を用いた距離 (画像) センサは、対象に投影した光が戻ってくる時間 (通常は変調した光の位相差を時間に換算) から距離を求める手法である。TOF とステレオとは、ステレオでは原理的に距離の不確かさが距離の 2 乗に比例し、近距離で高精度となる一方で遠距離での計測精度が悪いのに対し、TOF では計測精度が距離の影響が小さいという相補的な特徴を持つ。また、TOF が本質的にアクティブな手法であり反射光の強度が十分でないと距離計測できないのに対し、ステレオは (原則として) 光を投影しないパッシブな手法であるため、そのような問題は生じない。そこで、TOF とステレオとを融合することで、計測可能対象の拡大、高精度化などの性能向上が実現できることが期待できる。本研究では、市販の TOF 距離画像センサとステレオカメラの組み合わせで実際に性能が向上できることを示すに加え、当初は想定していなかった、これら異なるセンサで取得された特性の異なる距離画像の位置合わせ (レジストレーション) に着目し、近年急速に進展している深層学習技術に基づいた手法の構築を目指した。

4. 研究成果

3 つの研究対象に関する成果を以下に示す。

(1) アクティブステレオにおける Depth from Defocus (DFD)との融合

まず我々の既存の DFD 方式に基づく距離画像計測手法の改良を行った。本手法は、複数のレーザスリット光を対象に投影してカメラで撮像した時の各スリット光像のぼけの大きさを求め、得られた各点でのぼけの大きさから距離画像を求めるといったものである。ぼけのモデルの改善ならびに実用化に向けてオンライン計測の実装を実現した。さらに、ぼけを用いた距離画像計測とアクティブステレオによる距離画像計測との基礎的な融合手法ならびにぼけ量を用いた新たな切り替え手法を構築した。図 1 に、構築したセンサによる近距離計測において、ぼけによる計測とアクティブステレオによる計測とを切り替えながら融合させている様子を示す。

また、複数のスリット光を用いたアクティブステレオに基づく距離画像センサに対し、ぼけ情報を求めてその結果を組み合わせることで、これまで複数スリット間での誤対応(投影したスリット光と撮像されたスリット光像との対応を間違えること)を避けるために狭くせざるを得なかった計測レンジを、距離計測精度を保ちつつ拡大することを実現した。さらに、このシステムのオンライン計測も実現した。

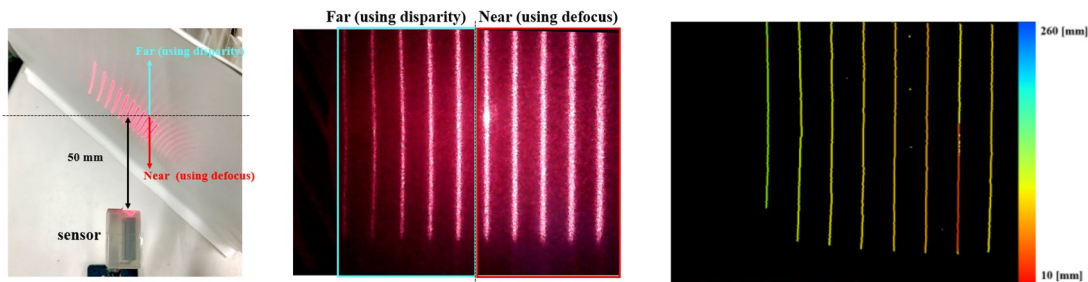


図 1 構築した小型距離画像センサによるぼけ計測と視差計測の組み合わせ。

左：構築したセンサを用いた計測風景，中央：マルチスリット光画像，右：得られた視差画像

(2) ステレオと Structure from Motion (SfM)の融合

ステレオカメラと SfM の持つ相補的な特徴を利用し、2 台のカメラによる 2 眼ステレオと SfM とを融合させることで、距離画像の計測精度を向上することに成功した。融合のための具体的な手法として、2 フレームの画像対を用いる擬似バイラテラルフィルタと呼ぶ手法を提案し、定式化した。なお、本手法の名称は、既存の画像処理技術であるバイラテラルフィルタとの類似性から定めている。具体的な手法の実装には、前述の、車載を目指して我々が開発した魚眼ステレオカメラを用いた。提案手法の流れは次の通りである。まず環境中で魚眼ステレオカメラを光軸方向に直進させ、2 フレームのステレオ画像を得る。取得した画像に対して、2 眼ステレオ計測、モーションステレオ計測を各々行う。最後に、2 種類の計測結果を擬似バイラテラルフィルタを用いて統合する。擬似バイラテラルフィルタは、2 眼ステレオにより各画素で得られた視差と SfM で得られた特徴点での視差との差、ならびに注目画素と特徴点との 2 次元画像中での距離とを組み合わせる重みを求め、精度が高い SfM の特徴点の視差を元に各画素の視差の値を補正することで、密かつ高精度な視差画像を得ることを実現している。用いた魚眼ステレオカメラと得られた視差画像の例を図 2 に示す。



図 2 魚眼ステレオカメラにより得られた視差画像。

左：魚眼ステレオカメラ，中央：対象シーン，右：得られた視差画像

(3) Time of Flight (TOF)とステレオの融合

まず、TOF とステレオの 2 種のセンサで得られる距離画像を融合することで計測可能対象の拡大と高精度化を実現できることを、既の実装していたのとは異なるステレオカメラを用いて検証した。また、TOF 方式の FARO のように大スケールで得られる距離画像情報と小型のステレオカメラで得られる小スケールの距離画像のように密度や計測範囲が異なる点群の位置合わせを実現可能な手法を、深層学習による点群処理手法の導入により提案した。具体的には、点数が異なる点群の位置推定手法として、PointpartNet++と呼ぶ独自の深層学習ベースのネットワークを構築し、位置合わせ手法の成功率や位置合わせ精度の向上を実現した。また、データセットや購入した異種距離画像センサで実際に取得した点群データを用いた実験を行い、提案手法がデータの欠損や距離計測誤差に対してもロバストに位置合わせを実現できることも示した。さ

らに、位置合わせされた異種点群データの統合手法も構築した。
 このネットワークは、サイズが大きい方の点群を切り分けし、各サブ点群の大域特徴を抽出し、各サブ点群とサイズの小さい点群のマッチング尤度スコアを算出する。このスコアは、サイズの小さい点群がサイズの大きい点群のどの箇所に類似するかを予測する。この結果をもとに、別のニューラルネットワークを用いて、実際の位置合わせを行う。また、ローカルミニマムに陥らないように、大雑把な位置合わせと精密位置合わせの二段階で位置合わせを行う。このモデルでは、精密位置合わせの際に特徴空間で点群同士の各点の対応関係を求めている。マッチング領域探索時には、最近傍点で点群切り分けを行った上で、切り分けられた点群を用いて位置合わせを行う。さらに、点の対応関係を求める深層学習モデルも導入することで、サイズの異なる点群を対象とした位置合わせ精度を向上している。

図 3 に構築したネットワークの構造ならびに実際に異種距離画像センサで取得された点群の位置合わせを実現した例を示す。

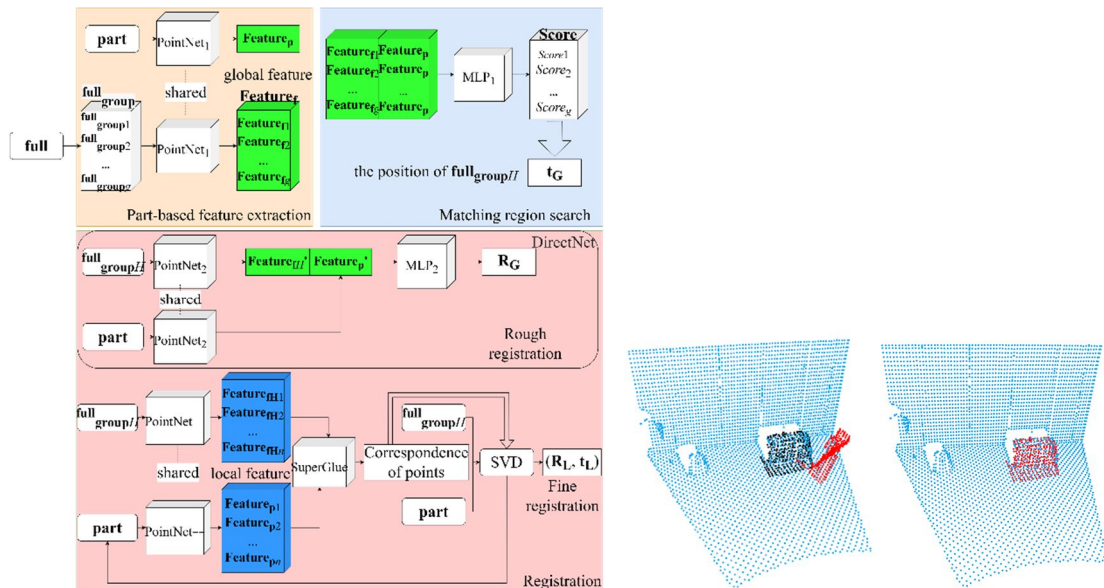


図 3 異種点群の位置合わせを実現するネットワーク PointPartNet++ . 左：ネットワークの構造，右：異種距離画像センサで取得された点群（上：位置合わせ前，下：位置合わせ後）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yan Shixun, Pathak Sarthak, Umeda Kazunori	4. 巻 36
2. 論文標題 PointpartNet: 3D point-cloud registration via deep part-based feature extraction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 724 ~ 734
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2022.2084346	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 顔 世筍, Sarthak Pathak, 梅田 和昇	4. 巻 89
2. 論文標題 PointpartNet++: 対応点の決定によるサイズが異なる3次元点群位置合わせの精度向上	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 90 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.89.90	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomoaki Fukuda, Yonghoon Ji, Kazunori Umeda	4. 巻 -
2. 論文標題 Tiny range image sensors using multiple laser lights for short distance measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE Vol. 11794, Fifteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV2021)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2589196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 飯田 浩貴, 佐久田 朝優, 池 勇勳, 梅田 和昇, 大橋 明, 福田 大輔, 金子 修造, 村山 純哉	4. 巻 86
2. 論文標題 擬似バイラテラルフィルタによる魚眼ステレオカメラの性能向上	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 969 ~ 974
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.86.969	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Karin Ohashi, Kazuki Tsumura, Yonghoon Ji, and Kazunori Umeda	4. 巻 -
2. 論文標題 Online Measurement of Compact Range Image Sensor Using Image Blur of Multi-Slit Laser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2021)	6. 最初と最後の頁 825 ~ 826
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IEEECONF49454.2021.9382644	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naho Fujii, Yonghoon Ji, Kazunori Umeda	4. 巻 -
2. 論文標題 Measurement range expansion of a range image sensor using a multi-slit laser projector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2020)	6. 最初と最後の頁 139 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII46433.2020.9026287	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirotaka Iida, Yonghoon Ji, Kazunori Umeda, Akira Ohashi, Daisuke Fukuda, Shuzo Kaneko, Junya Murayama, Yoshitaka Uchida	4. 巻 -
2. 論文標題 High-accuracy Range Image Generation by Fusing Binocular and Motion Stereo Using Fisheye Stereo Camera	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2020)	6. 最初と最後の頁 343 ~ 348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII46433.2020.9025910	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 佐々木 渉, 顔 世荀, Sarthak Pathak, 梅田 和昇
2. 発表標題 マルチスリットレーザを用いた距離画像センサのリアルタイム化と計測範囲拡大
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊島 隆太郎, Sarthak Pathak, 梅田 和昇
2. 発表標題 マルチスリットレーザの視差とぼけを用いた小型距離画像センサにおける計測手法の改善
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shixun Yan, Sarthak Pathak, Kazunori Umeda
2. 発表標題 Improving Multi-sensor Point Cloud Fusion via Color Information and Point Cloud Partitioning
3. 学会等名 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 顔 世荀, Sarthak Pathak, 梅田 和昇
2. 発表標題 3次元点群データの位置合わせのための深層学習を用いた部分的特徴抽出
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大橋 嘉倫, 顔 世荀, Sarthak Pathak, 梅田 和昇
2. 発表標題 マルチスリットレーザとカメラによる視差と像のぼけを組み合わせた近距離計測用小型距離画像センサ
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 顔 世荀, Sarthak Pathak, 梅田 和昇
2. 発表標題 PointpartNet: 位置合わせのための 3次元点群の部分的特徴抽出
3. 学会等名 動的画像処理実利用化ワークショップDIA2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大橋 嘉倫, 池 勇勳, 梅田 和昇
2. 発表標題 マルチスリットレーザと小型カメラによる像のぼけを利用した小型距離画像センサのオンライン計測
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新井 健斗, 佐久田 朝優, 大橋 明, 福田 大輔, 梅田 和昇
2. 発表標題 擬似バイラテラルフィルタの改善による魚眼ステレオカメラの精度向上
3. 学会等名 動的画像処理実利用化ワークショップDIA2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井 奈穂, 池 勇勳, 梅田 和昇
2. 発表標題 マルチスリットレーザプロジェクタを用いた距離画像センサの計測範囲拡大
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田 浩貴, 池 勇勲, 梅田 和昇, 大橋 明, 福田 大輔, 金子 修造, 村山 純哉
2. 発表標題 魚眼ステレオカメラによるStructure from Motionのための移動物体検出
3. 学会等名 動的画像処理実利用化ワークショップDIA2020講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井 奈穂, 池 勇勲, 梅田 和昇
2. 発表標題 ぼけを利用したスリット像判別による距離画像センサの計測範囲拡大
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中央大学 梅田研究室 https://www.mech.chuo-u.ac.jp/umeda/lab/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	池 勇勲 (Ji Yonghoon) (90823766)	中央大学・理工学部・助教 (32641)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------