

研究報告書

「プロジェクタ・カメラ間の輝度伝達行列の推定に基づく三次元計測法」

研究期間：2018年4月～2020年3月

研究者番号：50209

研究者：千葉 直也

1. 研究のねらい

産業ロボットの実応用が本格的に進むにつれて、様々な物体を汎用的なシステムでハンドリングする需要が高まっている。特にばら積みピッキングなどの問題設定では、産業ロボットが正確に物体をハンドリングするためにはシーンの三次元形状を正確に認識することが必要である。これまでも様々な三次元計測法が提案されており、特に計測対象の表面テクスチャによらず計測できるため、プロジェクタ・カメラシステムを用いたアクティブステレオ法が広く普及している。一方、既存のアクティブステレオ法では複雑な光学特性を有する物体（例えば金属物体や半透明物体）については精度良く計測することが難しいという課題があった。

ACT-I 研究課題「プロジェクタ・カメラ間の輝度伝達行列の推定に基づく三次元計測法」において、輝度伝達行列 (Light Transport Matrix, 以下 LTM) の高速・ロバストなスパース推定というアプローチにより、プロジェクタ・カメラシステムによる金属物体・半透明物体を含むシーンをも精度良く計測できる三次元計測法を実現した。具体的成果として、スパース推定を用いた LTM の推定による三次元計測が原理的に可能であることを示し、行分解 LTM 推定、多段解像度 LTM 推定を提案することで現実的な時間 (数分程度) で実用できる解像度 (256x256 のプロジェクタ・カメラ解像度程度) の三次元形状計測を可能とした。また、主に金属物体の計測時に生じる白飛びに対応したスパース推定法を提案し、金属物体についてロバストな三次元形状計測が可能となった。

加速フェーズでは、LTM の三次元形状計測以外への応用、及び計測システムとしての完成・性能向上を軸として、ACT-I 期間の研究成果をさらに発展させることを目指した。これらの達成のため、A) 反射強度・表面下散乱による材質セグメンテーション、B) ロボットとの統合によるピッキング実証、C) LTM 推定・三次元計測の高速化、D) 反射強度に応じたロバストな計測を具体的目標として設定した。

2. 研究成果

(1) 概要

ACT-I 研究期間において、LTM のスパース推定による三次元計測法に関して研究を進め、LTM スパース推定の高速化 (行分解 LTM 推定と多段解像度 LTM 推定) 及びロバスト化 (白飛び対応スパース推定) に関する成果を得た [1, 3, 5, 6]。加速フェーズではこれらを発展させ、LTM 推定の高速化手法 (研究テーマ C「LTM 推定・三次元計測の高速化」) と黒つぶれに対するロバスト化 (研究テーマ D「反射強度に応じたロバストな計測」) を実現した。

LTM 推定の三次元計測以外への応用として、研究テーマ A「反射強度・表面下散乱による材質セグメンテーション」にも取り組んだ。これは LTM から得られた反射特性 (一画素照射応

答)によるクラスタリングを用いた材質セグメンテーションであり、オンラインの計測データのみから材質の違いを推定しセグメンテーションを行う。このために必要な光線方向・表面形状を利用した補正手法を開発し、実際に材質セグメンテーションができることを示した。

三次元計測結果の実応用として、研究テーマ B「ロボットとの統合によるピッキング実証」に取り組んだ [2, 7, 8]。これは研究提案時に応用例として想定していたアプリケーションである。既存手法では計測が困難な金属物体をばら積みしたシーンを設定し、開発した三次元計測法と既存の物体認識・位置姿勢推定手法を組み合わせることでピッキングアプリケーションを実現した。

研究テーマ B で得られた知見として、LTM スパース推定による三次元計測手法は計算時間が光学系の解像度に大きく依存するため、密度の小さい三次元点群を処理する手法が実現すれば非常に相性が良いと予想できる。したがって、まずは物体認識・位置姿勢推定について点群密度の小さい場合にもうまく推定できる手法の開発を進めた。本研究期間中に急速に発展した点群深層学習と呼ばれるアプローチに着目し、学習ベースでの物体認識・位置姿勢推定手法を提案、三次元計測法と組み合わせることでピッキングの高速化を実現した。

(2) 詳細

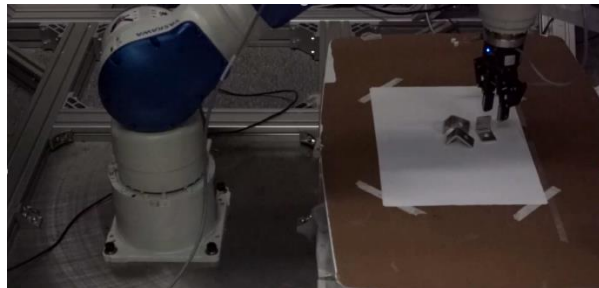
研究テーマ A「反射強度・表面下散乱による材質セグメンテーション」

LTM 推定による三次元計測法では LTM が一画素照射応答を結合した行列であることに着目し、LTM の取得によって一画素照射応答を得てからエピソード幾何を用いたマスクを行うことで直接反射成分を分離、光の反射が生じた三次元点を復元する。しかし、一画素照射応答は直接反射成分のみならず、他の情報(反射強度や表面下散乱の広がり)を含んでいるため、これらを利用することを目標とした。このために必要な光線・表面の方向による補正手法を開発し、例として濃度の異なる牛乳と水を混ぜ合わせた液体を見分けられることを示した。



研究テーマ B「ロボットとの統合によるピッキング実証」

LTM スパース推定による三次元計測手法を実際の産業ロボットと統合し、ばら積みピッキングの実装を行った。はじめに既存手法の一つである PPF Plus (Li ら, ICPR, 2018) を物体認識・位置姿勢推定手法として統合し、実際にロボットを用いた金属物体のピッキングを行った [4, 7,



8]。このとき、物体認識・位置姿勢推定手法が要求する点群密度の制約から、プロジェクタ・カメラシステムを 256x256 の解像度として計測し、全体として 1 分程度のタクトタイムでのピッキングを達成した。LTM スパース推定の場合、解像度を下げることで計算コストを大幅に下げる

ことができるため、少ない計測点数(低い点群密度)から物体認識・位置姿勢推定できることが望ましいことがわかった。したがって、近年急速に発展した点群深層学習のアプローチによる物体認識・位置姿勢推定手法を提案、128x128 の解像度のプロジェクタ・カメラシステムを用いて、タクトタイム 30 秒程度で金属物体のピッキングを実現した。伴って、点群深層学習に関する文献調査と和文資料の作成・公開を行った [9, 10]。

研究テーマ C「LTM 推定・三次元計測の高速化」

ACT-I 研究期間中に行分解 LTM 推定と多段解像度 LTM 推定の各手法を提案し、LTM のスパース推定の高速化を実現した [1, 3]。ここまでで 256x256 の解像度の LTM を 6 分程度で推定できる手法となっている。加速フェーズではここからさらに Sherman-Morrison-Woodbury 公式(SMW 公式)の利用(特に後述の白飛び対応スパース推定法、白飛び・黒つぶれ同時対応スパース推定法の設定においても利用できることを示した) [8] と複数行同時推定の導入 [8]、実装の見直しによって 23 秒程度で 256x256 の解像度の LTM 推定が実現した。

研究テーマ D「反射強度に応じたロバストな計測」

ACT-I 研究期間中に、白飛びに対応した LTM のスパース推定を実現した [4, 6]。加速フェーズでは白飛びに加えて黒つぶれにも対応したスパース推定手法を提案し、この手法で金属物体(白飛びが顕著に生じる)と暗色半透明物体(黒つぶれが顕著に生じる)が混合した計測シーンについても精度良く三次元形状を計測できた。

3. 今後の展開

金属物体や半透明物体の三次元形状計測は未だ重要な課題であると認識されており、本研究成果を応用した製品が実現すれば産業用ロボットビジョンシステムとして一定の価値があると予想できる。また、2020 年以降、ACT-I 研究での成果を更に発展させた研究成果(Ralašić ら, IEEE Access, 2020)や、深層学習と Light Transport を組み合わせた手法(Huang ら, arXiv:2003.03040, 2020)などが提案されており、加速フェーズでの成果についても今後学術的な波及効果が現れると期待される。さらに点群深層学習の調査・資料公開を通じて、国内での点群処理と深層学習を組み合わせた研究の発展に貢献できたと考えている。今後も引き続き点群深層学習に関する研究を継続し、国際的に評価される成果・似たデータを扱う他分野への波及効果を得ることを目指す。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

当初の研究目標であった「LTM の三次元形状計測以外への応用」「計測システムとしての完成・性能向上」については、上記研究成果で示した通りの成果を得ることができた。また、ばら積みピッキングのために必要な物体認識・位置姿勢推定手法の研究を進め、点群深層学習を用いた手法の提案に至った。このアプローチは LTM 推定による三次元計測法と特に相性の良いと考えられるため、最終的な目標の一つである「高速で汎用的なばら積みピッキングシステムの実現」に向けた重要な成果であると考えている。一方、学術的意義の低さから、高速プロジェクト・カメラシステムと産業ロボットの統合は優先しなかったため、ACT-I 加速フェーズ研究期間中に高速なばら積みピッキングシステムを実現できなかった。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

概ね研究計画通り実施した。ただし、研究計画時点よりも物体認識・位置姿勢推定に関する研究を重点的に進めた。これは研究期間中に点群深層学習を用いたアプローチがコンピュータビジョン分野で急速に発展したため、それらの成果を ACT-I 研究にも応用することを目指したためである。

研究経費についてはおおそ計画通りに執行することができ、購入した機器も有効に活用できた。特に産業ロボットを実際に用いた実験を行うことができたのはロボットビジョンのための計測法の評価として有意義であった。

・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

本研究提案は産業応用を見据えた三次元計測手法の開発を目標としており、これまでにある程度実用レベルの計算時間・解像度を達成している。将来的には実際にロボットビジョンシステムとして応用されることを期待する。また、学術的にも「3. 今後の展開」で述べたような波及効果が得られており、今後も広がることを期待している。同時に、点群深層学習に関する講演などの機会を多く頂いており、特に自動運転などの三次元点群処理の分野に貢献できたと考えている。こちらについては引き続き研究を進めたいと考えている。

・研究課題の独創性・挑戦性

本研究提案は金属物体や半透明物体の三次元形状計測という挑戦的な課題の解決を目指すものであったが、ACT-I 研究期間と加速フェーズでの研究期間を通して実用的な手法を提案することができたと評価している。さらにロボットビジョンとして統合するにあたり三次元点群処理との融合を目指したため、挑戦的な課題(点群深層学習による物体認識・位置姿勢推定)を見出すことができた。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|--|
| [1] Naoya Chiba, Koichi Hashimoto. Homogeneous light transport matrix estimation based 3D shape measurement. International Journal of Mechatronics and Automation (IJMA), 2018, Vol. 6, No. 2/3, pp.63-70. |
| [2] 福地伸晃, 千葉直也, 橋本浩一. CAD モデルを用いないばら積みシーンからの物体検出. 日本ロボット学会誌, 2018, Vol. 36, No. 5, pp. 368-375, 2018. |
| [3] 千葉直也, 橋本浩一. LT 行列行分解推定による三次元計測. 計測自動制御学会論文集, 2019, Vol. 55, No. 4, pp. 294-304, 2019. |
| [4] 千葉直也, 橋本浩一. LTM スパース推定による三次元計測の白飛び対応とばら積みピッキングロボットへの応用. 精密工学学会誌, 2020, Vol. 86, No. 1, pp106-112, 2020. |

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- [5] Naoya Chiba, Koichi Hashimoto. Ultra-Fast Multi-Scale Shape Estimation of Light Transport Matrix for Complex Light Reflection Objects. The 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2018), 2018.
- [6] Naoya Chiba, Koichi Hashimoto. Sparse Estimation of Light Transport Matrix under Saturated Condition. The 29th British Machine Vision Conference (BMVC2018), 2018.
- [7] Naoya Chiba, Mingyu Li, Akira Imakura, Koichi Hashimoto. Bin-picking of Randomly Piled Shiny Industrial Objects Using Light Transport Matrix Estimation. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2019).
- [8] Naoya Chiba, Akira Imakura, Koichi Hashimoto. Fast ADMM L1 minimization by applying SMW formula and multi-row simultaneous estimation for Light Transport Matrix acquisition. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2019).
- [9] (招待講演) 千葉直也. 点群深層学習の研究動向. 第 25 回 画像センシングシンポジウム (SSII2019), 企画セッション「画像センシングの最先端」講演 2, 2019.
- [10] 千葉直也, 戸田幸宏. 三次元点群を取り扱うニューラルネットワークのサーベイ Ver. 2. 2019.