



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	A study on stacked object recognition and stacking operation planning combining 3D point cloud representation, deep-learning and physics engine [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	許, 雅俊
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第15552号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89552
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yajun_Xu_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学)

氏名 許 雅俊

審査担当者 主 査 教 授 金井 理

副 査 教 授 小野里 雅彦

副 査 教 授 近野 敦

副 査 准教授 伊達 宏昭

学位論文題名

A study on stacked object recognition and stacking operation planning combining 3D point cloud representation, deep-learning and physics engine

(3次元点群表現, 深層学習および物理エンジンを用いた積み上げ物体認識と積み上げ作業計画に関する研究)

近年, レーザ計測や画像計測技術の進歩により, 3次元環境を高速・高精度に計測可能なデバイスが, 製造, 土木・建築, 自動運転, 農業, 医療等の様々な産業に導入されている. これに伴い, 3次元計測点群シーン内に存在する個々の物体領域, 位置姿勢およびそのクラスを推定する3次元物体認識技術がコンピュータビジョン, ロボティクス, リモートセンシング等の分野で活発に研究されている. しかし現実的なシーンの中には物体が複雑に多数積み重なった場合があり, そのような状況下でも個々の物体を安定かつ正確に認識できる3次元物体認識の技術は未解決の問題である. また, 既存の積み重なった物体上に, 新たな物体を安定かつ密に積み重ねる最適な積上げ位置・姿勢を決定する技術は, 離散数学でのビンパッキングやロボットタスクプランニングの分野における重要な問題の一つとなっている.

本論文は, 上記問題解決のため3次元点群と深層学習および物理エンジンを組み合わせ, 多数の人工物が積み上げられた複雑な点群シーン内から個々の物体を正確に認識できる3次元物体認識手法, ならびに既に積み上げられた物体点群シーン上に新たな物体を安定かつ密に積み上げ可能な最適作業計画生成手法を新たに開発し, それらを工場内のロボットビンピッキング, ならびに防波堤の消波ブロック維持管理作業に応用し, その有効性を検証することを目的としたもので, 5章から構成されている.

Chapter 1 “Introduction” では, 屋内外環境に対する近年の3次元計測技術とその計測データ表現手法を概観するとともに, 物体が複雑に多数積み重なったシーンを対象とした場合, 個々の物体を正確に認識できる3次元積み上げ物体認識問題, ならびに既存の積み上げ物体上へ新たな物体を安定かつ密に積上げる積み上げ作業計画問題が, ロボティクス, リモートセンシング, 土木工学等の技術分野に共通した課題であることを明らかにしている. さらに, 3次元の物体積み上げ挙動を模擬可能な物理エンジンを, 3次元点群から物体インスタンスや最適積み上げ姿勢を推定可能なディープニューラルネットワーク (DNN) に組み合わせることで, その問題を解決しようというのが本論文の目的であることが述べられている.

Chapter 2 “Deep Learning-based Object Instance Segmentation from Point Clouds of Stacked Industrial Parts for Robotic Bin-Picking” では, ロボットによるビンピッキング向けに, 近距離レーザセンサより得られた単一種バラ積み部品シーンの3次元計測点群を, 個々の部品の点群領域に分割するインスタンスセグメンテーションのためのDNNであるFPCCを新たに開発している.FPCCは, 点の幾何学的類似性とインスタンス重心点の可能性を同時に予測し, その予測結果からインスタンスへの点群クラスタリングを高速に実行できる. また学習用に信頼性の高い多数の教師データを

与えるため、部品 3 次元モデルと物理エンジンを用いたバラ積みシーンの仮想データを多数生成する独自手法が提案されている。さらに、ロボットピンピッキング用公開データセット等を対象とした認識実験において、提案手法は認識精度と処理速度において既存類似セグメンテーション手法を上回ることが実証されている。

Chapter 3 “Deep Learning-based Object Instance Segmentation and Pose Estimation from Point Clouds of Stacked Wave-Dissipating Blocks” では、前章で開発した DNN を改良し、防波堤周辺の消波ブロックを UAV とソナーで計測した 3 次元計測点群から個別ブロックを認識し、そのポーズ推定とタイプ分類を行う手法を新たに開発している。ここでは、DNN にアテンションプーリング機構を採用し、FPCC に比べより多くの局所情報を学習できる点群特徴抽出器を設計し、同一計算量でより多くの点群のインスタンスセグメンテーションを処理できるよう改良した。また物理エンジンにより、消波ブロック積み上げシーンを多数生成し、UAV とソナー計測の特性を考慮したラベル付き計測点群を計測シミュレーションにより多数生成している。さらに 3 次元点群特徴記述子、点群レジストレーション、ブロック 3 次元モデルとの照合処理を追加し、各ブロックの位置・姿勢推定とタイプ分類を可能とした。さらに、北海道内の 3 港湾において計測された海上・海中部の消波ブロックの計測点群を対象に、インスタンスセグメンテーション、ブロックポーズ推定、ブロックタイプ分類の精度を評価し、提案手法が十分な性能を有することが実証されている。

Chapter 4 “Deep Learning-based Object Stacking Operation Plan for Replenishing Wave-Dissipating Blocks” では、現在、現場作業者の属人的知識で行われている消波ブロック補充作業の自動化を目指し、深層学習と物理エンジンを活用し、既に積み上げられた消波ブロック上に、新たなブロックを安定かつ密に積み上げ可能な最適な作業計画を自動生成する手法を新たに開発している。この手法では、既存ブロック表面の局所領域ごとに高さ画像を生成し、その高さ画像を入力とした画像認識用 DNN により、積み上げ時の重心点高さが最小かつ物理的に安定な追加ブロック挿入ポーズを高速に推定する手法を開発している。また追加ブロックの積み上げ状態模擬、DNN の教師データ作成に物理エンジンを活用している。北海道内 1 港湾を対象として推定した消波ブロック補充作業の計画は、ランダムポーズでのブロック挿入方法に比べ、同一目標補充空間に対し 100 個程度多いブロックを挿入できる計画が推定できること、またその推定個数が実作業で追加された個数と同程度であることが述べられ、提案手法を用いたブロック補充作業計画が、より強固な消波ブロックの構造実現に寄与できる可能性が示されている。

Chapter 5 “Conclusions and Future work” では、各章で得られた成果の要点と今後の課題がまとめられている。

以上を要するに、本論文は深層学習手法および物理エンジンを導入し、多数の物体が積み上げられた計測点群シーンを対象とした高精度で高速な 3 次元物体認識技術、ならびに既存シーン上へ追加物体を安定かつ密に積み上げることが可能な最適積み上げ作業計画生成技術を新たに実現したものであり、デジタル幾何処理、コンピュータビジョン、リモートセンシング、ロボティクス、土木情報学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。