

## 審査の結果の要旨

氏 名 李 楊

本論文は「Robust Non-rigid Tracking and Reconstruction Based on Spatial-Temporal Learning (時空間学習に基づくロバストな非剛体追跡および再構成)」と題し、時空間学習に基づいて、単一RGB-Dカメラを用いたロバストな非剛体変形シーンの4D再構成システムを提案したものであり、全9章から構成される。

本論文で扱う非剛体変形シーンの4D再構成とは、単一RGB-Dカメラで観察した情報を利用し、動的なシーンの時間軸での変化を追跡し、そのジオメトリを再構成する技術であり、CV, VR, ロボティクスなどに多くの応用がある。また、Microsoft Kinect や Intel Real Sense などの民生レベルの深度センサの進歩により、単一RGB-Dカメラを用いた非剛体再構成の研究が盛んになっている。しかし、4D再構成のコアとなってる非剛体追跡課題は高い非凸性がある非線形最適化問題であり、ターゲットシーンが大きな非剛体運動を行うときに、望ましくない極小値に陥ることが多発し、追跡と再構成が失敗しやすい。また、非剛体トラッキングの複雑さは、シーンの大きさに応じて多項式的に増大するため、単一のオブジェクトを超える大きなシーンをうまく再構成することは難しい。さらに、オクルージョンと距離センサの物理的制限があるため、単一のRGB-Dカメラは、特定のシーンの部分的および不完全な再構成しか取得できない。以上の問題によって、一般的な非剛体変形シーンのためのロバストな再構成システムは依然として困難な課題である。

そこで、本論文では、時空間学習に基づいて、1) 大きな非剛体運動トラッキング、2) シーンの静的背景と動的前景の同時再構成、3) オクルージョン補完、4) 大域のかつ一貫したカメラポーズトラッキング、を満たした、単一RGB-Dカメラベースのロバストな非剛体シーン再構成システムを提案した。この再構成システムの4つの機能に応じて、それぞれの時空間学習モデルを提案している。具体的には、1) 極小値を飛び越えるのに役立つ時空間非剛体特徴抽出器を用いた非剛体運動トラッキング方法、2) セマンティックインスタンスセグメンテーションを用い、シーンを静的背景と動的前景に分解して、静的背景と動的前景を同時に再構成するフレームワーク、3) RGB-Dカメラで観測した不完全な情報から、シーンの形状と動きを同時に補完する手法、4) 局所的な時空間的制約と大域的なカメラポーズ制約を考慮したカメラトラッキング手法を提案している。各提案モデルについては検証実験を行ない、有効性を示している。各章の概要は以下のとおりである。

導入部分は第1章から第3章で構成される。第1章「Background」では、まず、非剛体追跡と再構成の標準パイプラインについて説明した後、単一のRGB-Dカメラベースの非剛体シーン再構成の非凸性や複雑さなどの制限を課題として紹介している。第2章「Toward a Versatile and Robust Non-Rigid 4D Reconstruction System」では、本論文が目標とするシステムの構成と機能、そして時空間学習について述べている。第3章「Related Work」では、従来研究および本研究との関係について説明している。

第4章「Learning-based Optimization for Robust Non-Rigid Tracking」では、大きな非剛体運動にロバストなトラッキング手法を提案している。具体的には、非剛体追跡のエネルギー関数を時空間情報で埋めた特徴空間を用いて再定義し、大域的な変形を捕らえることができる畳み込みニューラルネットワークの特徴抽出器を学習することにより、ロバストな追跡を達成した。従来の手法より、大きな非剛体運動に対し、トラッキングの精度向上が可能であることを示した。

第5章「SplitFusion」では、静的背景と動的前景の同時再構成フレームワークを提案している。具体的には、まず、セマンティックインスタンスセグメンテーションを用い、シーンを静的背景と動的前景に分解した後、分解した部分の剛性によって剛体トラッキング或いは非剛体トラッキングを行い、各部分を同時に再構成している。シーンの分解により、静的背景と動的前景の再構成のロバスト性が向上可能であることを示した。

第6章「Structure and Motion Completion for Non-rigidly Deforming Scene」では、RGB-Dカメラで観測した不完全な情報から、シーンの形状補完と動きの同時推定を行うモデルを提案している。形状の補完と非剛体の動きの推定は、相互補完的なタスクであることを示した。

第7章「Pose Graph Optimization for Unsupervised Monocular Visual Odometry」では、大域的かつ一貫したカメラポーズトラッキング手法を提案している。時空間的制約はカメラトラッキングの精度を向上させると示している。

第8章「System Demonstration」では、第4、5、6、7章で提案した手法を統合したシステムを提案している。統合したシステムを用いて、動的な人間が存在する部屋の4D再構成の過程、結果とその有効性を実証している。

第9章「Conclusion & Future Work」においては、上述した提案手法について総括した上、得られた知見および今後の展望について議論を行なっている。

以上、本論文は、「時空間学習に基づくロバストな非剛体追跡および再構成」という新しい研究領域に対して、独自性の高い手法を提案しながら、網羅的に研究に取り組んでおり、学術的に極めて価値の高い研究成果を達成していると言える。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。