

令和元年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16084

研究課題名(和文)任意運動単眼カメラを用いた幾何プリミティブ近似による3次元構造復元

研究課題名(英文)3D shape reconstruction with a monocular camera by employing geometric primitives

研究代表者

大石 修士(Oishi, Shuji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員

研究者番号：30759618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：実世界における環境計測・物体認識には、特定視点から得られる限定的なセンサ情報を基にした正確な形状計測技術が重要となる。そこで、本研究では、単眼カメラを用いた高密度な3次元復元手法の開発に取り組んだ。具体的には、Pixel-wiseな深度推定手法や、画像中の極値を特徴点とする新たなVisual SLAMを開発し、単眼カメラによる3次元形状復元の高精度化・高密度化に取り組んだ。また、より密な形状復元を図るため、部分的な観測形状に対する参照モデル(幾何プリミティブ)のフィッティング手法を開発し、離散的な3次元点群から連続的な3次元モデルを生成する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

移動ロボットのような実世界で稼働するシステムでは、正確な3次元環境計測が課題となる。人間と同様、移動ロボットも現在地点からの限定的な観測のみ利用可能であり、その断片的な情報の蓄積から高精度・高密度な形状情報を得ることで安全な経路計画や物体操作が実現できる。本研究は、一般に用いられる単眼カメラを用いた3次元形状復元手法を開発するもので、特殊なセンサを必要としないため多様なシステムへ適用が可能である。

研究成果の概要(英文)：Accurate 3D shape measurement technology based on limited sensor information obtained from a specific viewpoint is important to grab a structure of the scene. In this research, we addressed dense 3D reconstruction using a monocular camera. Specifically, we developed a Pixel-wise depth estimation method and a new Visual SLAM that maintains an enormous amount of feature points to generate highly-detailed 3D models with a monocular camera. In addition, in order to achieve denser shape recovery, we developed a model fitting method where a reference model (a geometric primitive) is aligned toward a partial shape observation, which leads to continuous 3D model reconstruction from a discrete 3D point cloud.

研究分野：ロボットビジョン

キーワード：3次元復元 Visual SLAM Model fitting

1. 研究開始当初の背景

周囲環境のリアルタイムな 3 次元形状計測は、実世界において動作するロボットの認識・行動決定に必要な不可欠な技術である。近年、レーザスキャナや Kinect 等の様々な距離センサが開発されているが、リアルタイム性の乏しさや計測範囲の制限等によりその利用環境は限られている。一方、3 次元計測手法の一つとして、単眼のデジタルカメラより得られる多視点画像列からリアルタイムに 3 次元点群および各フレームでのカメラの位置姿勢を算出する Visual SLAM(Simultaneously Localization And Mapping)が盛んに研究されている。

Visual SLAM は、画像中のエッジやコーナー等の顕著な特徴点のフレーム間対応を基に三角測量による 3 次元復元・自己位置同定を行うもので、デジタルカメラのみで屋内/屋外、近方/遠方を問わずリアルタイムで距離計測が可能であるという大きな利点を持つ。しかし、画像間対応付けの容易な特徴点や輝度勾配の高い画素のみの 3 次元復元を行うため、得られる 3 次元情報は一般に疎な 3 次元点の集合であり、物体形状の高密度な復元には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、単眼カメラによる実時間での密な 3 次元形状復元を目指す。まず、単眼カメラを用いたより詳細な形状復元を可能にするため、高密度な点群復元が可能な Visual SLAM や Dense reconstruction 手法を確立する。

一方で、得られた点群を基にした 3 次元モデルの生成にも取り組み、メッシュモデルとしての 3 次元復元を図る。具体的には、同カテゴリの 3 次元モデルのような、対象物体と類似した参照モデル(幾何プリミティブ)を出発点とし、部分的な観測に合わせ柔軟に変形させることで、物体毎の 3 次元メッシュモデリングを目指す。関連研究として、RGB-D カメラ(Kinect)により得られた 3 次元点群情報から、事前に CAD データとして登録された机や椅子を検出することで、その領域の 3 次元復元精度を向上させる研究[1]も行われているが、環境中に存在する全ての物体を予め登録することは不可能である。これに対し本研究は、Visual SLAM により得られる疎・部分的な幾何情報(3 次元点群)を基に参照モデル(幾何プリミティブ)を柔軟にフィッティングさせることで、対象物体を 3 次元全周モデルとして復元する手法の構築を目指すものである。

[1] R.F.Salas-Moreno+, SLAM++: Simultaneous Localisation and Mapping at the Level of Objects, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2013

3. 研究の方法

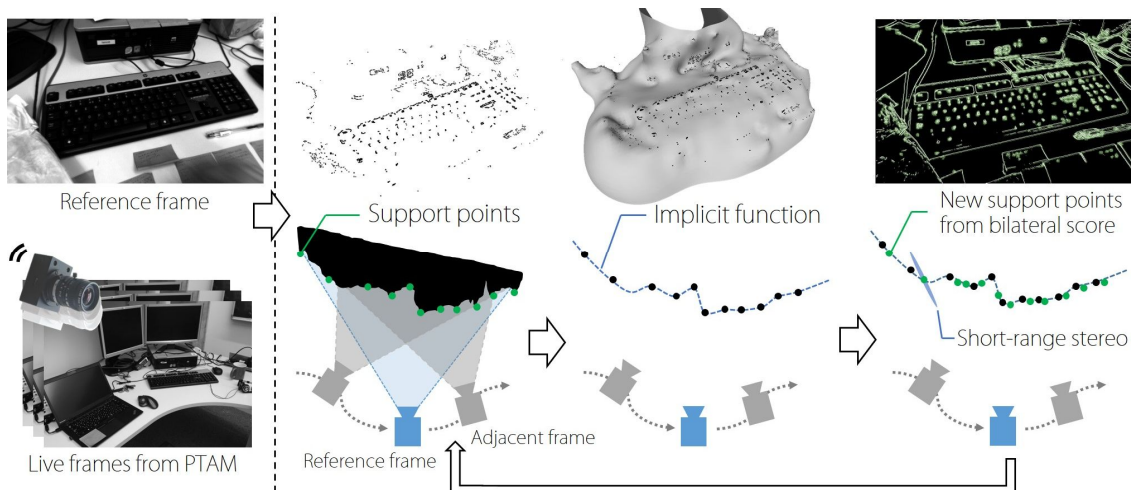
下記の項目について研究を遂行した。具体的には、単眼カメラによる密な形状復元に向けて(1)(2)に、3 次元参照モデル(幾何プリミティブ)のフィッティングに向けて(3)(4)に取り組んだ。

- (1) 陰関数近似を用いた単眼カメラによる実時間での高密度な 3 次元復元
- (2) 単眼カメラによる密な特徴点追跡と地図生成
- (3) 部分的な観測形状に対する一般化円筒分解
- (4) 参照モデル(プリミティブ)を利用した部分的な観測からの形状復元

4. 研究成果

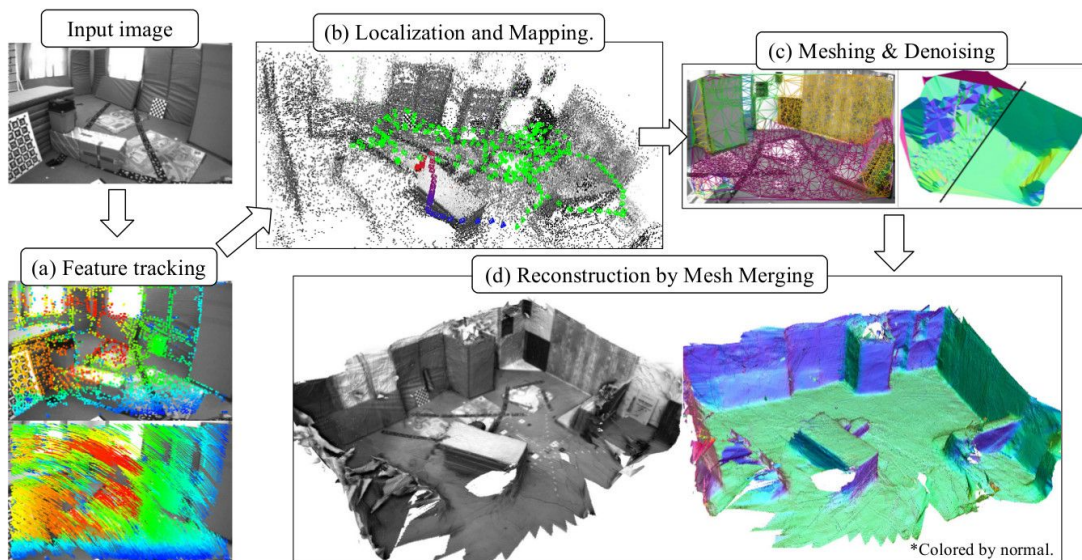
[(1) 陰関数近似を用いた単眼カメラによる実時間での高密度な3次元復元]

本研究では、単眼カメラを用いた高密度な 3 次元復元手法の開発に取り組んだ。画像中のエッジやコーナーは、画像間での対応付けが容易であり、Visual SLAM により高精度な 3 次元復元が可能である。この点群(Support Points, 以下 SPs)を足掛かりとし、陰関数近似による計測対象物体の概形推定を行うことで、未計測領域に対する大まかな推定値を与えることができる。そこで、未計測画素に対する 3 次元復元計算を、近似により得られた推定値周辺に限定することで、復元速度の高速化および外れ値・ノイズの低減を図る。また、SPs 近傍ほど陰関数近似の精度が高くなるので、推定値の信頼度が高い SPs 周辺の距離未計測画素を次の SPs とする選択的な 3 次元復元を行う。同時に、得られた復元結果を基に逐次陰関数を更新することで、領域拡大していく形で計測対象全体の高速・高精度な 3 次元復元を実現した。



[(2) 単眼カメラによる密な特徴点追跡と地図生成]

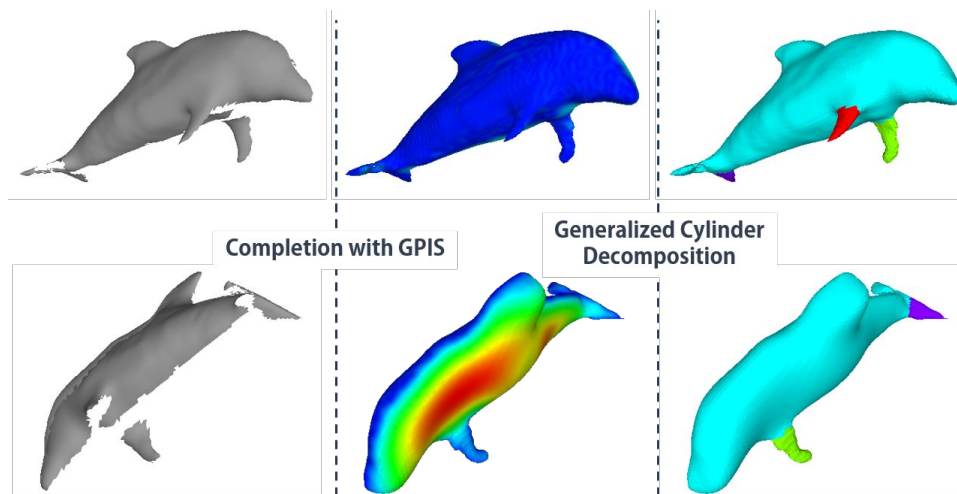
単眼カメラ自身の運動推定および周囲物体の形状取得のため、自己位置同定および周囲環境の密な点群復元を行う新たな Visual SLAM 手法を開発した。提案法では、まず連続する画像間の支配的なオプティカルフローを求め、そのフローを初期値とする画像中の極大値(特徴点)のマッチングを行うことで、特徴量を用いず高速に大量の対応点を取得する。さらに、得られた対応に基づき三角測量を行いつつ、周辺化を利用した軽量の Bundle adjustment を逐次適用することで、高精度な自己位置推定・3次元点群復元を実現した。EuRoC 等のベンチマークによる評価を行い、照明変化や高速な運動下でも従来法と比べロバストで高精度な位置推定が可能であり、また非常に密な特徴点復元が可能であることを示した。



[(3) 部分的な観測形状に対する一般化円筒分解]

参照モデルの幾何形状を解析するため、一般化円筒分解に取り組んだ。一般化円筒分解は、対称の3次元モデルを Skeleton と Profile curve に分解するもので、分解結果は対象モデルの骨格の取得や内在的な対称性の解析に用いることができる。本研究では、[2]の手法を拡張し、任意視点から観測された幾何形状に対し、観測の不確かさを考慮した一般化円筒分解手法を提案した。まず、得られた点群を Gaussian process implicit surface を用いてモデリングし、その期待値と分散から不確かさを付加した閉じた3次元モデルを生成する。さらに、この3次元モデルに対し一般化円筒分解を行う際、観測データの密な領域の形状を重視した Profile の連続性評価を行うことで、部分的な観測形状からも欠損の無いモデルに対する一般化円筒分解により近い結果が得られることを示した。

[2] Zhou+, Generalized cylinder decomposition, ACM Transactions on Graphics, 2015



【(4) 参照モデル(プリミティブ)を利用した部分的な観測からの形状復元】

任意視点からの形状計測のように、遮蔽等による欠損を含む部分的な観測形状から高品位な全周3次元モデルを生成するため、参照モデル(プリミティブ)の非剛体レジストレーション手法を提案した。まず、参照モデルの内在的な幾何特徴を解析するため、(c)で用いた一般化円筒分解を適用し、局所的な対称性を取得する。次に、非剛体変形後もその幾何特徴を保持するため、対称性に基づく拘束条件を導入し、部分的な観測に過度に適合する従来の非剛体レジストレーションに比べ自然な3次元全周モデルの推定が行えることを確認した。本成果は国際会議に投稿中である。

【(5)今後の予定】

単眼カメラによる密な3次元復元、部分的な観測形状に対する参照モデル(幾何プリミティブ)のフィッティングのそれぞれについては研究成果を得ているが、各ステップを組み合わせた3次元モデリングには至っていない。今後は、各手法をプログラムとしてモジュール化しつなぎ合わせることで、画像系列からの全周モデル復元の実験を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計7件)

VITAMIN-E: Visual Tracking And Mapping with Extremely Dense Feature Points
Masashi Yokozuka, Shuji Oishi, Thompson Simon, Atsuhiko Banno
2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2019), 2019

形状の不確かさを考慮した3次元モデルの一般化円筒分解
大石 修士, 横塚 将志, Thompson Frank Simon, 阪野 貴彦
第24回ロボティクスシンポジウム, 2019

単眼カメラによる密な特徴点追跡及び地図生成
横塚 将志, 大石 修士, Thompson Frank Simon, 阪野 貴彦
第24回ロボティクスシンポジウム, 2019

SeqSLAM++: 見えに基づく位置推定と屋外ナビゲーション
大石修士, 井上陽平, 三浦純, 田中翔大
第23回ロボティクスシンポジウム, 2018

LIDARを用いた3次元地図生成における未観測領域削減のための視点選択
井内正誠, 大石修士, 三浦 純
2018年ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2018

反射強度付き3次元地図を用いた単眼カメラの自己位置推定
川又康了, 大石修士, 三浦純
2018年ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2018

陰関数近似を用いた単眼カメラによる密な 3 次元復元
大石 修士, 三浦 純
第 21 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, 2016

〔その他〕
ホームページ等
<https://staff.aist.go.jp/shuji.oishi/>

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。