

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25240025

研究課題名(和文) 情報フィードバック型ビジョンベースオンライン空間モデリング

研究課題名(英文) Vision-Based Online 3D Modeling with Visual Feedbacks

研究代表者

奥富 正敏 (Okutomi, Masatoshi)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00262303

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、四面体カービング法を発展させ、画像が入力される毎に更新される点群に応じ、それまでに推定したサーフェスを更新・拡張する「逐次的四面体カービング法」を開発した。そして、この方法に基づき、カメラ付き遠隔操作飛行体を用いて、ユーザが飛行体を操作しながら結果を随時確認できるオンライン空間モデリングシステムを開発した。さらに、サーフェスとともに光源分布と表面反射率を同時に推定することで、オンラインで推定したサーフェスモデルを高精度化するオフライン手法を開発した。これらの成果は、SSII2013においてオーディエンス賞と優秀学術賞を、SSII2016においてオーディエンス賞を受賞した。

研究成果の概要(英文)：We have developed an incremental tetrahedra carving algorithm, where the tetrahedra-carving-based surface extraction algorithm was extended to the incremental fashion by efficiently detecting ray-tetrahedra intersections and the dynamic graph cut. Then we have built an online 3D modeling system using aerial images, where the user can immediately confirm the 3D model updated by the aerial images captured by the camera mounted on a drone operated by remote control. In addition, we have developed a method for refining the 3D model estimated by the online 3D modeling system, where we estimate not only 3D surface parameters but also illumination parameters and surface albedo. These achievements have been awarded the SSII Audience prize and Academic prize at SSII2013, and the SSII Audience prize at SSII2016.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：空間モデリング Structure from Motion 準実時間処理 空撮3次元計測

1. 研究開始当初の背景

カメラで撮影された複数の画像を利用して、撮影シーンの3次元情報を取得する技術は、レーザレンジセンサ等の高価な専用機器を必要とせず、さまざまな環境や対象に対して柔軟かつ手軽に適用できる可能性があるため、近年、大量の画像を利用した大規模空間の復元手法等の研究が盛んに行われている。しかし、多くの研究は、撮影画像を全て一度ハードディスクなどに保存して一括処理する“オフライン処理”を前提としており、結果を得るまでに非常に長い時間を要する。

これに対し、画像が撮影される毎に、復元結果を順次出力する“オンライン処理”は、(i) その時点までに撮影された画像を基にした復元結果がすぐに得られること、および、(ii) 撮影者がその場で結果を確認しながら撮影できることから、撮影に失敗や無駄がなく信頼性の高い復元を効率よく行える、という利点があり、その実現が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、撮影された画像から順次3次元情報を復元し空間モデリングが行える「ビジョンベース空間モデリングシステム」の実現を目的とする。そして、その結果から得られる様々な情報を逐次ユーザにフィードバックすることで、(1) 人が歩きながら撮影するモデリングシステム、および、(2) 人が飛行体を遠隔操縦しながらモデリングを行うシステム、の2形態の実現に向けた研究を行う。

3. 研究の方法

研究代表者らは、これまでに、オンライン空間モデリング技術の実現に向けて「オンライン Structure from Motion」の研究を精力的に行ってきた。この手法は、入力画像群からカメラの撮影位置・姿勢と空間中の点群を出力する Structure from Motion (以下 SfM)の技術を発展させたものであり、画像が入力される毎に、その時点までに入力した画像を基にした空間中の点群を、逐次的かつ安定に出力することができる。一方で、研究代表者らは、点群生成を伴わずに、画像から直接的かつ高精度なサーフェス生成を高速に行う「ステレオダイレクトサーフェス生成」の研究も行ってきた。この手法では、画像から特徴が抽出できないような場合でも、高精度なサーフェス生成が可能である。

本研究では、上述のこれまでの研究成果である、「オンライン SfM」と「ステレオダイレクトサーフェス生成」の技術を融合・発展させ、オンラインでの空間モデリング処理の実現に向けた研究を行う。そして、その成果に基づいて、人が歩きながら撮影するモデリングシステムと、人が飛行体を遠隔操縦しながらモデリングを行うシステムの構築を行う。

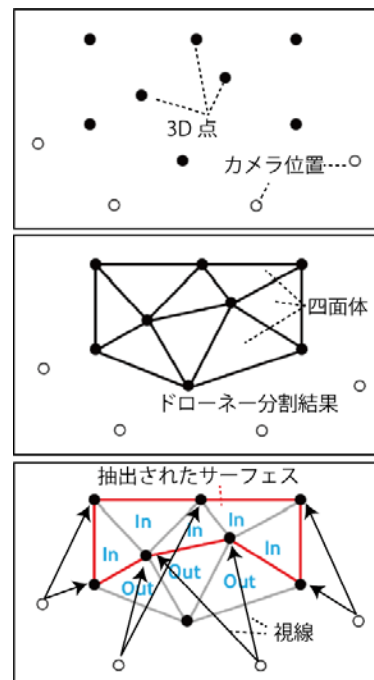


図1 四面体カービング法

4. 研究成果

① オンライン空間モデリング

オンライン SfM[雑誌論文 3]で得られた3次元点から効率的に空間モデリング(サーフェス生成)を行う方法として、画像中の特徴点と2次元ドロネー分割を利用して画像上に三角メッシュを生成し、各三角パッチの頂点の空間中の3次元位置を、ダイレクトイメージライメントの考え方をを用いて高速に推定するインスタントサーフェス生成手法を開発した[学会発表 1]。

また、より精度良くサーフェスを生成する方法として、オンライン SfM で得られた空間中の点群に対して、3次元ドロネー分割を適用して四面体群を作成し、カメラからの視点と交差する四面体を削除することによってサーフェスを推定する「四面体カービング法」(図1)を適用したオンライン空間モデリングアルゴリズムを開発した。ここでは、削除すべき四面体を推定するために、四面体の隣接関係から各四面体をノードとしたグラフ構造を生成し、グラフカットを利用して大域的最適解を得ている。この方法には、画像数が増えると、空間中の点が増えてゆくと、サーフェス生成の精度が徐々に向上してゆくという利点がある。この成果に基づいて、人が歩きながら撮影するモデリングシステムを構築した[学会発表 5](オーディエンス賞と優秀学術賞を受賞)。

上述の方法は、画像数が多いほど計算コストも大きくなるため、入力された画像数が徐々に増えてゆくオンライン処理では、計算時間が膨大になってしまうという課題があった。

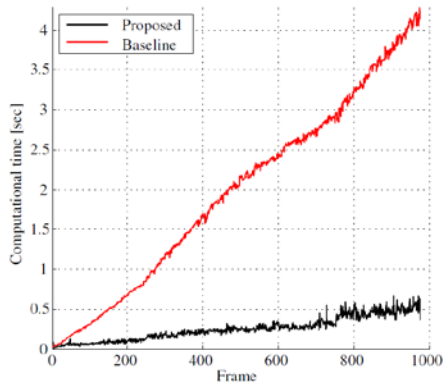


図2 四面体カービング法の逐次処理の有無による計算時間の違い

そこで、新たな画像を入力することによって変化した点群のみに注目してグラフ構造を変更し、ダイナミックグラフカットを適用することによってサーフェスを更新・拡張する「逐次的四面体カービング法」を開発した[雑誌論文 5][学会発表 2, 9, 12]([学会発表 9]は優秀研究発表賞を受賞)。この方法により、画像が入力される都度全ての点群に対して四面体カービング法を適用する方法と比較して、大幅に計算時間を減らすことに成功した(図2)。図3に、オンライン空間モデリング処理が進んでいく様子を示す。

② 情報フィードバック型オンライン空間モデリングシステムの構築.

上記の成果に基づき、遠隔操作飛行体を用いたビジョンベースモデリングシステムを構築した



空撮用ドローン

[学会発表 27, 28]([学会発表 27]はオーディエンス賞を受賞)。上図は使用した空撮用ドローンを示し、図4にシステムのユーザインタフェースを示す。このシステムでは左側に撮影画像と復元進捗状況が表示され、その画像を入力した直前までのモデリング結果が右側に表示されている。ユーザはマウスを使って回転や並進させることが可能で、これにより、現時点のモデリング結果を任意の視点位置からいつでも見ることができ、その結果に基づいて飛行体を操作することができた。

③ ステレオダイレクトイサーフェス生成の拡張.

ステレオ画像によるダイレクトサーフェス手法[雑誌論文 2]を発展させ、時系列ステレオ画像を用いて広範囲に地表サーフェスマップを生成するアルゴリズムを開発した[雑誌論文 3, 9][学会発表 7, 11, 14, 18]。ここでは、時系列画像間の特徴点对応を用いたカメラ運動推定を行い、画素値を利用した最適化の初期値とすることや、そのカメラ運動推

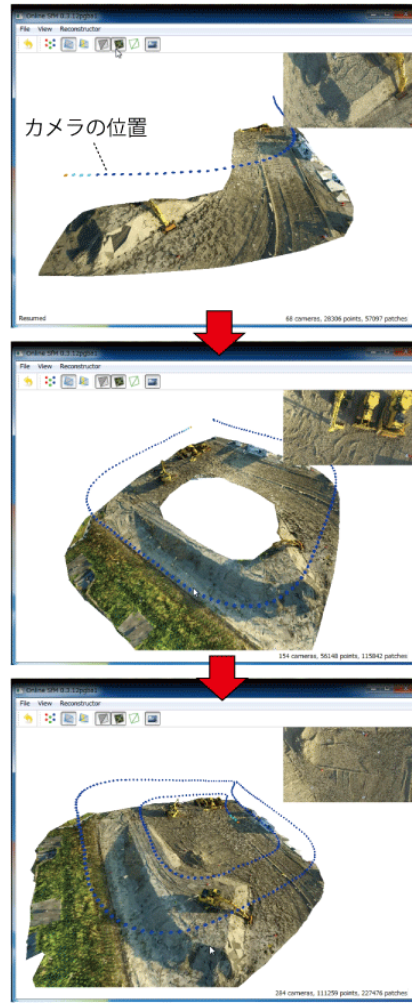
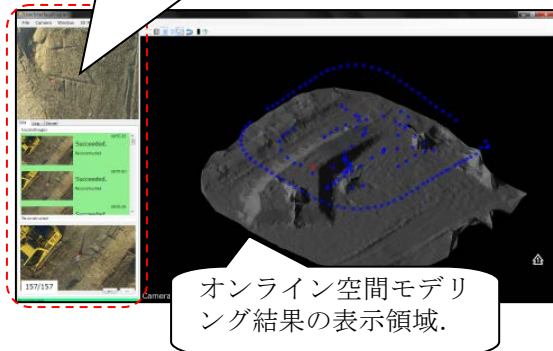


図3 オンライン空間モデリングによる処理の様子

ライブビューと 3D 復元の進捗状態の表示領域.



オンライン空間モデリング結果の表示領域.

図4 ユーザフィードバック型オンライン空間モデリングシステムの UI

定結果を利用して、フレーム間で画素値が大きく異なる移動体の画素を検出する枠組みを利用することにより、推定の安定性を向上させた。図5は、時系列ステレオ画像を用い

た地表サーフェスマップの生成結果を示しており、オフロードにおける地表の細かいサーフェスが復元できた。

また、オフロード環境での重機を用いた周囲の地形形状推定などのアプリケーションを想定し、単眼カメラを回転させて得られる画像から、周囲 360 度にわたる地表サーフェスを高精度に生成するアルゴリズムを開発した[学会発表 23, 24]。この方法では、画像群に対して SfM を適用して空間中の点群を取得し、この点群に初期サーフェスをフィッティングした後に、多眼ステレオを用いたダイレクトサーフェス生成を行う。ここでは、セルフシャドウになる画素をアウトライヤ画素として取り除く手法を考案し、安定性の高い地表サーフェス生成手法を実現した。図 6 は、

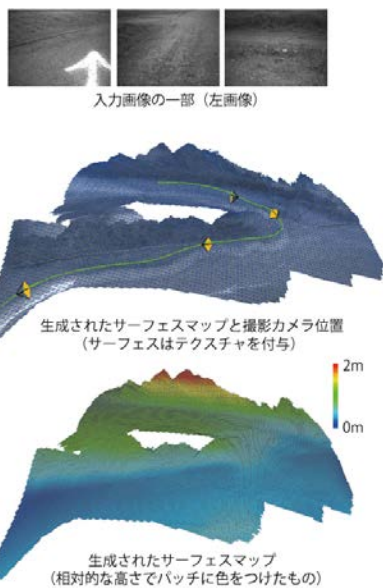


図 5 時系列ステレオを用いた地表サーフェスマップ生成の結果

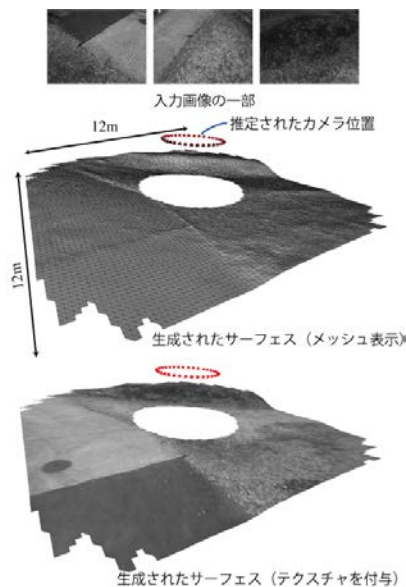


図 6 回転カメラを用いた周囲 360 度の地表サーフェス生成結果

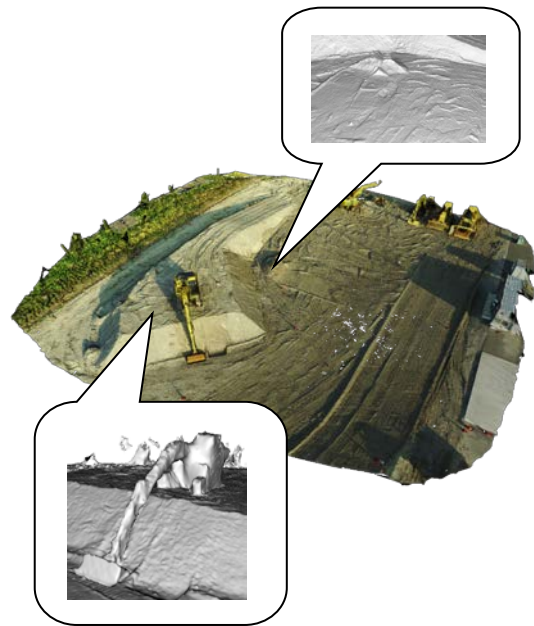


図 7 Multiview Inverse Rendering による高精度な空間モデリング結果

この結果を示しており、アスファルトの境目にある約 1cm の段差も復元できた。

④ Multi-view Inverse Rendering (MVIR) によるオフライン処理での高精度化。

上述のオンライン空間モデリングによって生成したサーフェスマップを、オフライン処理によって高精度化する手法として、サーフェスとともに、撮影時の光源分布とサーフェスの表面反射率を同時に推定する Multi-view Inverse Rendering (MVIR) 手法を開発した[学会発表 27, 28] ([学会発表 27]はオーディエンス賞を受賞)。図 7 は、図 3 で示したシーンを MVIR によって高精度化したものであり、重機や轍の詳細な形状がわかるまでに高精度化することができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

1. Yinqiang Zheng, Shigeki Sugimoto, and Masatoshi Okutomi, “ASPnP: An accurate and scalable solution to the perspective-n-point problem”, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol.E96-D, No.7, pp.1525-1535, 2013. 査読有. DOI:10.1587/transinf.E96.D.1525
2. Shigeki Sugimoto, Takaaki Kato, Kouma Motooka, and Masatoshi Okutomi, *Direct Ground Surface Reconstruction from Stereo Images*, *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol.5, pp.60-64, 2013. 査読有. DOI:10.2197/ipsjtcca.5.60
3. 半澤悠樹, 鳥居秋彦, 奥富正敏, “オンライン撮影に適した実用的な SfM システム”, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.J96-D, No.8, pp.1753-1763, 2013. 査読有.
4. 藤原将展, 杉本茂樹, 奥富正敏, “ステレオ画像

- を用いた複数平面領域と平面パラメータの同時推定”, 子情報通信学会論文誌 D, Vol.J96-D, No.8, pp.1874-1877, 2013. 査読有.
5. 杉浦貴行, 鳥居秋彦, 奥富正敏, “全体最適性を保証した逐次的 3次元サーフェス抽出法”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J98-D, No.4, pp.616-626, 2015. 査読有.
DOI:10.14923/transinfj.2014IUP0012
 6. 杉本茂樹, 本岡昂馬, 奥富正敏, 志磨健, “車載ステレオカメラを用いたロバストな 3D 地表サーフェスマップ生成”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J98-D, No.4, pp.627-638, 2015. 査読有. DOI:10.14923/transinfj.2014IUP0014
 7. Hajime Taira, Yuki Inoue, Akihiko Torii, and Masatoshi Okutomi, "Robust feature matching for distorted projection by spherical cameras", *IPSS Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol.7, pp.84-88, 2015. 査読有.
DOI:10.2197/ipsjtcva.7.84
 8. 井上優希, 董亜飛, 田平創, 鳥居秋彦, 奥富正敏, “全球パノラマ画像を用いた SfM による 3次元復元と自己位置・方位推定への応用”, 精密工学会誌, Vol.81, No.12, pp.1173-1179, 2015. 査読有. DOI:10.2493/jjspe.81.1173
 9. 杉本茂樹, 本岡昂馬, 奥富正敏, 志磨健, “車載ステレオカメラによる地表サーフェスマップ生成”, 画像ラボ, 日本工業出版, Vol.27, No.2, pp.25-32, 2016. 査読無 (解説記事).
〔学会発表〕 (計 28 件)
 1. Kichang Kim, Takayuki Sugiura, Akihiko Torii, Shigeki Sugimoto, and Masatoshi Okutomi, "Instant surface reconstruction for incremental SfM", *IAPR Conference on Machine Vision Applications*, 2013/5/23, 立命館大学朱雀キャンパス(京都府).
 2. 杉浦貴行, 鳥居秋彦, 奥富正敏, “インクリメンタル四面体カービング法による三次元サーフェス生成”, 情報処理学会研究報告(コンピュータビジョンとイメージメディア), Vol.2013-CVIM-187, No.7, 2013/5/30, 東京農工大学小金井キャンパス(東京都).
 3. 本岡昂馬, 杉本茂樹, 奥富正敏, “時系列ステレオ画像を用いた直接法による広範囲な地表サーフェスマップ生成”, 情報処理学会研究報告(コンピュータビジョンとイメージメディア), Vol.2013-CVIM-187, No.9, 2013/5/30, 東京農工大学小金井キャンパス(東京都).
 4. 奥富正敏, 鳥居秋彦, “多視点画像からの 3次元復元 ~基本原理から大規模復元まで~, 画像センシングシンポジウム, チュートリアル講演, 2013/6/12, パシフィコ横浜(神奈川県).
 5. 鳥居秋彦, 杉浦貴行, 阿達大地, 奥富正敏, “逐次的 SfM とサーフェス生成によるインスタント 3D 復元”, 画像センシングシンポジウム 2013/6/14, パシフィコ横浜(神奈川県). (オーディエンス賞)(優秀学術賞)
 6. Yinqiang Zheng, Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi, "A practical rank-constrained eight-point algorithm for fundamental matrix estimation", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013/6/26. Oregon Convention Center in Portland(米国オレゴン州).
DOI: 10.1109/CVPR.2013.203
 7. Shigeki Sugimoto, Takaaki Kato, Kouma Motooka, and Masatoshi Okutomi, "Direct Ground Surface Reconstruction from Stereo Images", 画像の認識・理解シンポジウム, 2013/7/31, 国立情報学研究所(東京都千代田区).
 8. 奥富正敏, “デジタルカメラを用いた即時的かつ柔軟な 3次元復元”, Forum8 7th Design Festival (招待講演), 2013/9/19, 品川インターシティホール(東京都).
 9. 鳥居秋彦, 杉浦貴行, 奥富正敏, “逐次的四面体カービング法を用いた 3D モデリング”, 情報処理学会研究報告(コンピュータビジョンとイメージメディア), Vol.2013-CVIM-189, No.6, 2013/11/28, 九州大学(福岡県福岡市). (優秀研究発表賞)
 10. Yinqiang Zheng, Yubin Kuang, Shigeki Sugimoto, Kalle Åström, and Masatoshi Okutomi, "Revisiting the PnP problem: A fast, general and optimal solution", *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2013/12/5, Sydney Convention and Exhibition Centre(豪州).
DOI:10.1109/ICCV.2013.291
 11. Shigeki Sugimoto, Kouma Motooka, and Masatoshi Okutomi, "Direct generation of regular-grid ground surface map from in-vehicle stereo image sequences", 4th Workshop on Computer Vision in Vehicle Technology: From Earth to Mars, 2013/12/8, Sydney Convention and Exhibition Centre(豪州).
DOI:10.1109/ICCVW.2013.83
 12. Takayuki Sugiura, Akihiko Torii, and Masatoshi Okutomi, "3D surface extraction using incremental tetrahedra carving", *ICCV 2013 Workshop: Big Data in 3D Computer Vision*, 2013/12/8, Sydney Convention and Exhibition Centre(豪州).
DOI:10.1109/ICCVW.2013.95
 13. 井上優希, 鳥居秋彦, 奥富正敏, “様々な広視野カメラを利用可能なオンライン SfM システムの構築”, 情報処理学会研究報告(コンピュータビジョンとイメージメディア), Vol.2014-CVIM-192, No.25, 2014/5/15, 近畿大学東大阪キャンパス(大阪府).
 14. 本岡昂馬, 杉本茂樹, 奥富正敏, 志磨健, “車載ステレオカメラを用いたロバストな地表サーフェスマップ生成”, 画像センシングシンポジウム, 2014/6/13, パシフィコ横浜(神奈川県).
 15. 鳥居秋彦, 井上優希, 董亜飛, 杉浦貴行, 奥富正敏, “インスタント 3D 復元による位置情報

- 付き画像データベース構築とその利用",画像センシングシンポジウム, 2014/6/12-13, パシフィコ横浜(神奈川県).
16. Yinqiang Zheng, Shigeki Sugimoto, Imari Sato, and Masatoshi Okutomi, "A general and simple method for camera pose and focal length determination", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014/6/24, Columbus Convention Center(米国オハイオ州). DOI:10.1109/CVPR.2014.62
 17. Akihiko Torii, Yafei Dong, Masatoshi Okutomi, Josef Sivic, and Tomas Pajdla, "Efficient Localization of Panoramic Images Using Tiled Image Descriptors",画像の認識・理解シンポジウム, 2014/7/29, 岡山コンベンションセンター(岡山県).
 18. Kouma Motooka, Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi, and Takeshi Shima, "Robust ground surface map generation using vehicle-mounted stereo camera", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014/9/16, Palmer House Hilton Chicago(米国イリノイ州). DOI:10.1109/IROS.2014.6942937
 19. 奥富正敏. "多視点画像からの3次元再構成", VCAD システム研究会 第38回定例研究会(招待講演), 2014/10/7, 理化学研究所(埼玉県和光市).
 20. 新井大地, 鳥居秋彦, 奥富正敏, "SfMによる3次元復元結果と地図データの位置合わせに関する研究", 情報処理学会研究報告(コンピュータビジョンとイメージメディア), Vol.2015-CVIM-197, No.8, pp.1-5, 2015/5/18, 日本科学未来館(東京都江東区).
 21. Ren Foo Lim, Akihiko Torii, and Masatoshi Okutomi, "View extension for teleoperated MAV", IAPR International Conference on Machine Vision Applications, 2015/5/21, 日本科学未来館(東京都江東区). DOI: 10.1109/MVA.2015.7153247
 22. 井上優希, 田平創, 杉浦貴行, 鳥居秋彦, 奥富正敏, "全球パノラマ画像を用いたSfMによる3次元復元システム", 画像センシングシンポジウム, 2015/6/11, パシフィコ横浜(神奈川県).
 23. 本岡昂馬, 杉本茂樹, Doan Phuc Phan, 奥富正敏, 志磨健, "回転するカメラを用いた高精度地表3Dサーフェス推定", 画像センシングシンポジウム, 2015/6/11, パシフィコ横浜(神奈川県).
 24. Kouma Motooka, Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi, and Takeshi Shima, "360-degree 3D ground surface reconstruction using a single rotating camera", 7th Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles, 2015/9/28, Conference Center Hamburg(ドイツ ハンブルグ).
 25. Takayuki Sugiura, Akihiko Torii, and Masatoshi Okutomi, "3D surface reconstruction from point-and-line cloud", International Conference on 3D Vision, 2015/10/21, ENS de Lyon(フランス リオン). DOI:10.1109/3DV.2015.37
 26. Kichang Kim, Akihiko Torii, and Masatoshi Okutomi, "Joint estimation of depth, reflectance and illumination for depth refinement", ICCV2015 Inverse Rendering Workshop, 2015/12/12, Marriott Hotel Gallery(チリ サンチアゴ). DOI:10.1109/ICCVW.2015.35
 27. 石黒耀, 井上優希, 杉本茂樹, 鳥居秋彦, 奥富正敏, "ドローンを用いた準実時間3D画像センシングシステム", 画像センシングシンポジウム, 2016/6/10, パシフィコ横浜(神奈川県). (オーディエンス賞)
 28. 鳥居明彦, 石黒耀, 井上優希, 杉本茂樹, 奥富正敏, "高速オンライン/高精細オフライン3D画像センシング", 第27回計量計測展, 2016/9/28-30, 東京ビッグサイト(東京都).(発表予定)
- 〔図書〕(計1件)
1. 鳥居秋彦, 奥富正敏 他著, 岩堀祐之 監修, 三次元画像センシングの新展開[第3章 三次元復元技術]担当, NTS, pp.107-116(10ページ), 2015年5月.
- 〔産業財産権〕
- 出願状況(計1件)
- 名称: 地表面3次元サーフェス形状計測装置, 走行可能領域検出装置およびそれを搭載した建設機械並びに走行可能領域検出方法
- 発明者: 志磨 健, 奥富正敏, 杉本茂樹
- 権利者: 同上
- 種類: 特許
- 番号: 特許願 2013-106229 号
- 出願年月日: 2013年5月20日
- 国内外の別: 国内
- 〔その他〕
- ホームページ等
- <http://www.ok.ctrl.titech.ac.jp/>
- ## 6. 研究組織
- (1)研究代表者
- 奥富正敏 (Okutomi, Masatoshi)
東京工業大学・理工学研究科・教授
研究者番号: 00262303
- (2)連携研究者
- 清水 雅夫 (Shimizu, Masao)
日本大学・理工学部・精密機械工学科・教授
研究者番号: 70361798
- 鳥居秋彦 (Torii, Akihiko)
東京工業大学・大学院理工学研究科・機械制御システム専攻・助教
研究者番号: 20585179
- 杉本茂樹 (Sugimoto, Shigeki)
東京工業大学・大学院理工学研究科・機械制御システム専攻・研究員
研究者番号: 40436712