

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21240015

研究課題名（和文） リアルタイムプログレッシブサーフェス生成

研究課題名（英文） Real-time Progressive Surface Generation

研究代表者

奥富 正敏（OKUTOMI MASATOSHI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00262303

研究成果の概要（和文）：

ステレオ時系列画像から、サーフェスとフレーム間のカメラ運動の同時推定を効率的に行う技術を開発し、この手法に基づいて、広範囲な地形形状のサーフェス生成をプログレッシブに行うアルゴリズムを開発した。その要素技術であるステレオ画像からのサーフェス生成やステレオ時系列画像からの平面姿勢とカメラ運動の同時推定について、それらをリアルタイムに行うシステムを作成した。また、インクリメンタル Structure from Motion 技術により、単眼画像が撮影される度に出力される撮影時のカメラ位置と3次元点群を用い、プログレッシブにサーフェスを生成する手法を開発した。そして、撮影しながらモデリング結果をリアルタイムに確認できるオンラインシステムを実現し、SSII2012においてベストデモンストレーション賞を受賞した。

研究成果の概要（英文）：

We developed a progressive surface generation technique using stereo image sequences, based on the development of a method for simultaneously estimating a surface and inter-frame camera motion. Several component techniques, including stereo surface reconstruction and simultaneous estimation of plane parameters and inter-frame motion, were implemented into real-time demonstration systems. We also developed a method for progressively generating a surface from the camera positions and 3D point clouds obtained by an incremental Structure from Motion technique, enabling us to confirm in real-time the surface reconstruction result at every picture-taken time instance while taking pictures. We won the best demonstration prize in SSII2012 on the latter demonstration system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2010年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2011年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2012年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
年度			0
総計	35,500,000	10,650,000	46,150,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：コンピュータビジョン 3次元計測

1. 研究開始当初の背景

一般的な3次元計測技術では、ステレオカメラやレーザレンジファインダなどのセンサを用いた計測により、物体表面上の点の3次元座標を「点群データ」として取得する。しかし、移動ロボットの制御や形状認識などの応用では、物体の内と外の境界を表す「サーフェス」を表面法線などの情報とともに推定することが求められる。サーフェスを取得する既存技術では、上記の計測手法によって得た点群データに対し、特定のサーフェスモデルにあてはめるアプローチが用いられるが、ノイズや欠損を含む点群データに対する既存手法の処理方法は複雑で計算コストが大きい。実環境に対するサーフェス生成を、幅広い分野に応用できるようにするためには、これまでとは異なったアプローチでサーフェスを推定する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、移動するカメラを用いて撮影した画像を新たに入力する度にサーフェスを生成し、過去に求めたサーフェスと統合して逐次広げてゆく技術を研究開発するとともに、このような処理をリアルタイムで行えるシステムを開発することにある。

3. 研究の方法

本研究では、プログレッシブサーフェス生成を実現するにあたり、ステレオ時系列画像を入力とするケースと、スティルカメラによる撮影画像を入力とするケースについて研究を行う。

(1) ステレオ時系列画像を用いたプログレッシブサーフェス生成.

代表者らの過去の成果である「ダイレクトイメーリアライメントを用いたステレオサーフェス生成」を拡張し、ステレオ時系列画像からサーフェスとフレーム間のカメラ運動を同時に推定する技術を研究開発する。そして、フレーム毎に得られるサーフェス生成結果を、推定されたカメラ運動を用いて統合してゆくことにより、プログレッシブなサーフェス生成を実現する。ただし、過去の手法では、一方の画像上に事前に定めた2次元メッシュの全頂点の奥行きを推定することでサーフェスを生成しており、この場合、異なる時刻間で得られたサーフェスを統合することが困難となる。そこで、本研究では、事前に定めたワールド座標系において2次元メッシュを定め、その全頂点の位置(各1自由度)を推定することによりサーフェス生成を行う。この方法では、カメラ運動推定結果から、各フレームにおけるワールド座標系とカメラ座標系との関係を算出できるため、各フレ

ームにおいて同一のメッシュによるサーフェス生成が可能と考えられる。

(2) スティルカメラ画像を利用したプログレッシブサーフェス生成.

Structure from Motion (SfM)技術では、複数の撮影画像から、各画像のカメラ撮影位置と、画像中の特徴点の3次元座標を推定することにより、点群による3次元復元を行う。この技術は、新たな画像が入力されると、その画像のカメラ撮影位置を推定して点群を追加するというインクリメンタルな処理に基づいている。ここでは、まず、このインクリメンタルなSfMの処理を効率的に行うためのアルゴリズムについて研究開発を行う。そして、点群からサーフェスを生成する処理を効率的に行う手法、および、インクリメンタルSfMにあわせて、点群が追加される度にサーフェスを拡張するアルゴリズムの研究開発を行う。

4. 研究成果

(1) ステレオ時系列画像を用いたプログレッシブサーフェス生成に関する研究成果.

時系列ステレオ画像から単一平面とカメラ運動を同時に推定する手法を開発し、これを実時間処理するシステムを作成した(雑談論文[7], 学会発表[25])。また、ステレオ画像からサーフェスを生成する実時間処理システムを作成した(学会発表[23])。

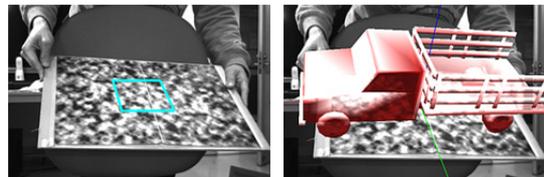


図1: ステレオ時系列画像を用いた単一平面姿勢とカメラ運動の実時間推定の様子. 左: ステレオ基準画像と処理領域. 右: 仮想物体の重畳表示.

図1は、ステレオ時系列画像から、平面姿勢とフレーム間のカメラ運動を実時間推定し、その結果から撮影対象平面の運動を算出して、平面上に仮想物体を重畳表示している様子を示している。また、図2は、ステレオ画像からの実時間サーフェス生成の様子を示しており、同図(a)は、撮影対象と基準画像上に定めた2次元メッシュを示し、同図(b)に、実時間生成されたサーフェスを示している。

次に、上述の2つの技術を組み合わせ、ダイレクトイメーリアライメントに基づいて、時系列ステレオ画像からサーフェスとカメ

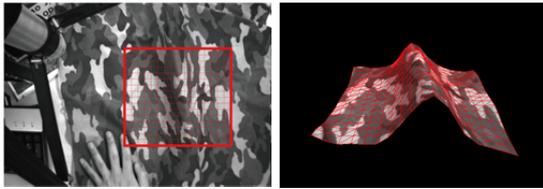


図 2: ステレオ画像を用いたサーフェス生成の実時間処理の様子. 左: ステレオ基準画像とメッシュ. 右: サーフェス生成結果.

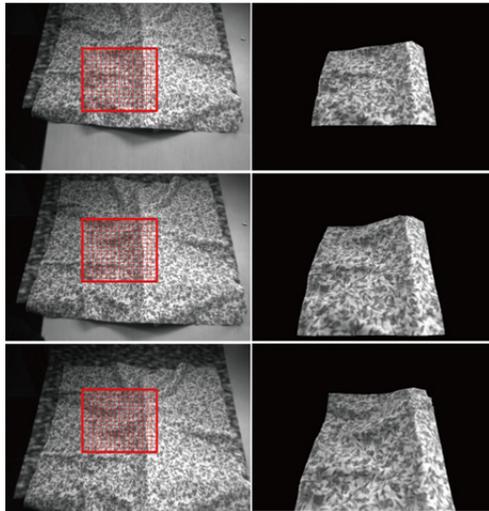


図 3: ステレオ時系列画像を用いたサーフェスとカメラ運動の同時推定処理の様子. 左: 基準画像とメッシュ (下ほどフレーム番号が大). 右: 全時刻のサーフェス生成結果を重ねて表示した結果.

ラモーションを同時に推定する手法を開発した (学会発表[19]).

図 3 は, サーフェスとカメラ運動の同時推定処理の様子を示している. 同図右では, 各時刻で推定されたカメラ運動を利用して, 各時刻のサーフェス生成結果を全て重ねて表示している. 比較的高い精度でカメラ運動が推定されており, 各時刻のメッシュが単一のサーフェスのように表示されている. ただし, この方法では, フレーム毎に推定されるサーフェスを統合することが困難であった.

次に, 事前に定めたワールド座標系において 2次元メッシュを定め, その全頂点の位置 (各 1 自由度) を推定することによりサーフェス生成を行う手法を開発した (雑誌論文[1], 学会発表[1][5], 特許出願[1]). 図 4 は, 前方視線のステレオカメラを用い, 地形状のサーフェスを求める際の座標系の関係を示しており, ここでは地上座標系 (ワールド座標系) の水平面上にメッシュを定め, その頂点の高さを求めることにより地形状のサーフェスを求めた.

図 5 は, ステレオ画像のみを用いて推定したサーフェスを示しており, 同図右では, パッチの傾きの大きさを色で示している. 青は傾きが小さく, 赤になるほど傾きが大きいこ

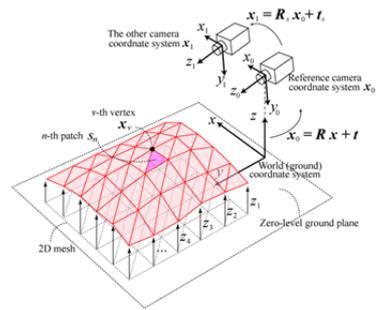


図 4: ワールド座標系に定めたメッシュとその頂点の高さ推定に基づくサーフェス生成.

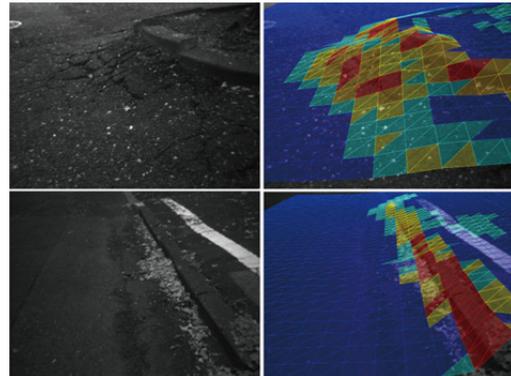


図 5: ステレオ画像を用いた地上サーフェス生成結果. 左: 基準画像. 右: サーフェス生成結果 (各パッチの色は傾きの大きさを示す).

とを表しており, この手法が, 地上を移動するロボットが移動可能領域を判断する際に有用であることが示されている.

図 6 は, 時系列ステレオ画像を用いてサーフェスとカメラ運動の同時推定を行うことにより, 各時刻で得られたサーフェスが統合されてゆく様子を示している. この手法により, 統合されたサーフェス出力することが可能となった.

その他, 基礎技術として, 多値グラフカットを用いて, 複数平面の領域と姿勢を同時に推定するアルゴリズムを開発した (雑誌論文[4], 学会発表[20][27]).

(2) スティルカメラ画像を利用したプログレッシブサーフェス生成に関する研究成果.

インクリメンタル SfM の処理において, 入力画像の時系列性を利用した特徴点对応付けや, 復元に不適切な画像を判断し利用しない等の処理を行うことにより, 効率的で安定なアルゴリズムを開発した (学会発表[8][9][13][15][18]).

次に, SfM の出力結果を用い, 画像上の特徴点を母点としたドローネー三角形分割と, 高速な平面姿勢推定手法を用いて, サーフェスを効率的に生成する手法を開発した (学会発

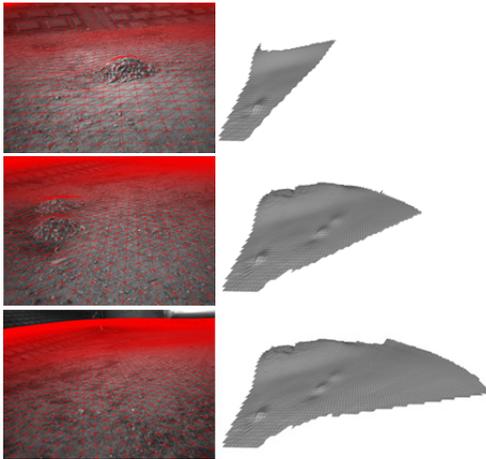


図 6: ステレオ時系列画像を用いた広範囲地上サーフェス生成におけるサーフェス統合の様子. 左: フレーム毎の基準画像とサーフェス生成結果例. 右: 統合されたサーフェス.



図 7: インクリメンタル SfM からのオンラインサーフェス生成の結果例. 左: インクリメンタル SfM の出力 (手前は撮影時のカメラ位置). 右: サーフェス生成結果.

表[6][12]). そして, インクリメンタル SfM の出力を用い, 画像を撮影する度に, ほぼリアルタイムにサーフェスを生成して表示するオンラインシステムを開発した (学会発表[12]). 図 7 は, このシステムによって得られたサーフェスマデリング結果の例を示している. 本システムは, SSII2012 でベストデモンストレーション賞を受賞した.

また, 空間中の 3 次元点を用いた四面体分割と, 物体の内と外の境界を求めるカービング手法を用いたモデリングを, インクリメンタルに行うアルゴリズムを開発した (学会発表[3][4]). 図 8 は, この手法によってインクリメンタルにサーフェス生成が行われる様子を示している.

その他, SfM に関連した基礎技術として, 様々な幾何推定における効率的な大域的最適化手法 (雑誌論文 [2], 学会発表 [2][16][17]) や, 非剛体 SfM にも適用可能な安定な行列分解法 (学会発表 [10][11]) を開発した.

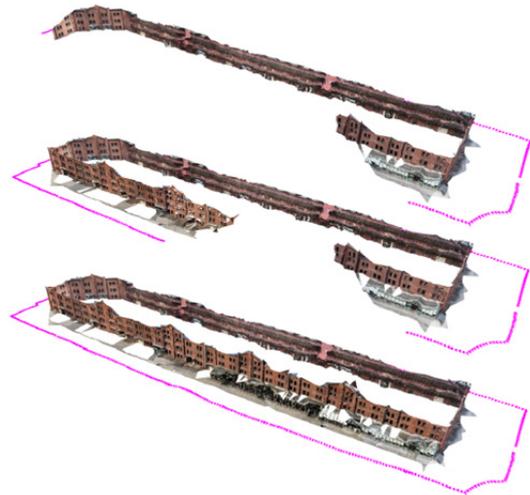


図 8: インクリメンタル四面体カービングによるサーフェス生成の様子. 赤点は撮影時のカメラ位置を示す.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1. Shigeki Sugimoto, Takaaki Kato, Kouma Motooka, Masatoshi Okutomi: Direct Ground Surface Reconstruction from Stereo Images, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 査読有, 2013. (掲載確定)
2. Yinqiang Zheng, Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi: ASPnP: An accurate and scalable solution to the perspective-n-point problem, IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, Vol. E96-D, No. 7, 2013. (掲載確定)
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, 査読有, Vol. J96-D, No. 8, 2013. (掲載確定)
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, 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有, Vol. J96-D, No. 8, 2013. (掲載確定)
5. Wei Jiang, Masao Shimizu, Masatoshi Okutomi: Monocular multi-view stereo imaging system, Journal of the European Optical Society, 査読有, Vol. 6, No. 11051, pp. 1-10, 2011, DOI: 10.2971/jeos.2011.11051.
6. Wei Jiang, Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi: Panoramic 3D Reconstruction Using Stereo Multi-perspective Panorama, International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 査読有, Vol. 24, No. 6, pp. 867-896, 2010, DOI: 10.1142/S0218001410008226.
7. 内田秀雄, 杉本茂樹, 奥富正敏: ステレオ時系列画像を用いた直接法による高速・高精度

モーシオン推定, 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有, Vol. J92-D, No. 8, pp.1414-1424, 2009.

[学会発表] (計 29 件)

1. Shigeki Sugimoto, Takaaki Kato, Kouma Motooka, Masatoshi Okutomi: Direct Ground Surface Reconstruction from Stereo Images, 第 16 回画像の認識・理解シンポジウム論文集 (MIRU2013), 2013 年 7 月 29 日-8 月 1 日. 国立情報学研究所. (発表確定)
2. 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 (CVPR2013), 2013 年 6 月 26 日, Portland OR USA. (発表確定)
3. 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, 第 19 回画像センシングシンポジウム講演論文集 (SSII2013), 2013 年 6 月 13 日, パシフィコ横浜. (発表確定)
4. 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), 2013 年 5 月 30-31 日, 東京農工大学.
5. 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面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), 2013 年 5 月 30-31 日, 東京農工大学(小金井).
6. Kichang Kim, Takayuki Sugiura, Akihiko Torii, Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi: Instant Surface Reconstruction for Incremental SfM, IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA2013), 2013 年 5 月 23 日, 立命館大学(朱雀)
7. Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi: Camera Self Calibration Based on Direct Image Alignment, International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012), pp.3240-3243, 2012 年 11 月 15 日, 筑波国際会議場.
8. Kazuki Nozawa, Akihiko Torii, Masatoshi Okutomi: Stable Two View Reconstruction Using the Six-Point Algorithm, Asian Conference on Computer Vision (ACCV2012), Vol. Part-IV, pp.122-135, 2012 年 11 月 9 日, Daejeon Korea, DOI:10.1007/978-3-642-37447-0_10.
9. 半澤悠樹, 鳥居秋彦, 奥富正敏: オンライン処理に適した Structure from Motion システム, 第 15 回画像の認識・理解シンポジウム論文集 (MIRU2012), pp. IS2-17-1-8, 2012 年 8 月 7 日. 福岡国際会議場.
10. Yinqiang Zheng, Shigeki Sugimoto, Shuicheng Yan, Masatoshi Okutomi: Generalizing Wiberg Algorithm for Rigid and Nonrigid Factorizations with Missing Components and Metric Constraints, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2012), pp.2010-2017, 2012 年 6 月 19 日, Providence RI USA. DOI:10.1109/CVPR.2012.6247904.
11. Yinqiang Zheng, Guangcan Liu, Shigeki Sugimoto, Shuicheng Yan, Masatoshi Okutomi: Practical Low-Rank Matrix Approximation under Robust L1-Norm, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2012), pp.1410-1417, 2012 年 6 月 19 日, Providence RI USA. DOI:10.1109/CVPR.2012.6247828.
12. 鳥居秋彦, 半澤悠樹, 金杞昌, 阿達大地, 杉本茂樹, 奥富正敏: オンライン 3 次元復元システム, 第 18 回画像センシングシンポジウム講演論文集 (SSII2012), pp. DS1-08-1-1, 2012 年 6 月 7-8 日, パシフィコ横浜. **ベストデモンストレーション賞**
13. 野沢和輝, 鳥居秋彦, 奥富正敏: 焦点距離が未知の入力画像群に対する 3 次元復元の安定化, 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.2012-CVIM-182, No.19, pp.1-8, 2012 年 5 月 23 日, 中京大学(豊田). **優秀論文賞**
14. 杉本茂樹, 奥富正敏: Inverse Compositional Image Alignment を用いた 3 次元パラメータ推定手法の比較, 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.2012-CVIM-181, No.12, pp.1-8, 2012 年 3 月 15 日, 東京工業大学(大岡山).
15. 鳥居秋彦, 奥富正敏: 安定・高精度なオンライン SfM, 第 14 回画像の認識・理解シンポジウム論文集 (MIRU2011), pp.1719-1720, 2011 年 7 月 20-22 日, 金沢市文化ホール.
16. Yinqiang Zheng, Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi: A Branch and Contract Algorithm For Globally Optimal Fundamental Matrix Estimation, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2011), pp.2953-2960, 2011 年 6 月 22 日, Colorado Springs USA. DOI:10.1109/CVPR.2011.5995352.
17. Yinqiang Zheng, Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi: Deterministically Maximizing Feasible Subsystem for Robust Model Fitting with Unit Norm Constraint, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2011), pp.1825-1832, 2011 年 6 月 22 日, Colorado Springs USA. DOI:10.1109/CVPR.2011.5995640.

18. 鳥居秋彦, 半澤悠樹, 奥富正敏: 誰でも簡単オンライン3次元復元, 第17回画像センシングシンポジウム講演論文集(SSII2011), pp. IS2-11-1-6, 2011年6月9日, パシフィコ横浜.
19. 大久保淳司, 杉本 茂樹, 奥富正敏: ステレオ時系列画像のダイレクトアライメントに基づくサーフェスとカメラ運動の同時推定, 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.2011-CVIM-176, No.13, pp.1-8, 2011年3月18日, 東京工業大学(大岡山).
20. 藤原将展, 杉本茂樹, 奥富正敏: グラフカットを利用したステレオ画像からの複数平面領域と平面パラメータの直接推定, 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.2011-CVIM-176, No.3, pp.1-8, 2011年3月17日, 東京工業大学(大岡山).
21. Yinqiang Zheng, Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi: 3D Structure Refinement of Nonrigid Surfaces Through Efficient Image Alignment, Asian Conference on Computer Vision (ACCV2010), Vol.Part-IV, pp.76-89, 2010年11月12日, Queenstown NZ. DOI:10.1007/978-3-642-19282-1_7.
22. 杉本茂樹, 奥富正敏: 平面を利用した直接法によるカメラキャリブレーション, 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.2010-CVIM-173, No.4, pp.1-8, 2010年9月5日, 福岡大学.
23. 杉本茂樹, 大久保淳司, 奥富正敏: ダイレクトステレオイメージアライメントによる3次元実時間推定, 第16回画像センシングシンポジウム(SSII2010), pp. DS1-03-1-1, 2010年6月10-11日, パシフィコ横浜.
24. Wei Jiang, Masao Shimizu, Masatoshi Okutomi: Single-Camera Multi-Baseline Stereo using Fish-Eye Lens and Mirrors, Asian Conference on Computer Vision (ACCV2009), Vol.Part-II, pp.347-358, 2009年9月25日, Xi'an China. DOI: 10.1007/978-3-642-12304-7_33.
25. 杉本茂樹, 内田秀雄, 大久保淳司, 奥富正敏: ステレオ時系列画像を用いた直接法による実時間モーション推定, 第12回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2009), pp.1877-1878, 2009年7月21日, くにびきメッセ(松江市).
26. 清水雅夫, 姜偉, 奥富正敏: 魚眼レンズとミラーを使った単眼マルチステレオシステム, 第12回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2009), pp.206-213, 2009年7月21日, くにびきメッセ(松江市).
27. 八重田岳, 杉本茂樹, 奥富正敏: グラフカットを利用したステレオ画像からの平面領域抽出, 第12回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2009), pp.606-613, 2009年7月20日, くにびきメッセ(松江市).
28. 清水雅夫, 姜偉, 奥富正敏: 超広角撮影の周辺視野を使った単眼高精度マルチステレオシステム, 第15回画像センシングシンポジウム(SSII2009), pp. IS1-12-1-8, 2009年6月11日, パシフィコ横浜.
29. 塩田陽介, 杉本茂樹, 奥富正敏: 多眼ステレオカメラを用いた直接法による全周サーフェス生成, 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.2009-CVIM-167, No.19, pp.1-8. 2009年6月10日, 京都大学(吉田).

〔図書〕(計1件)

1. 杉本茂樹, 奥富正敏, 他編著: 車載カメラによる道路認識, ロボット情報学ハンドブック, ナノオプトニクス・エナジー出版局, pp.334-342, 2010.

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

1. 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: 奥富正敏, 杉本茂樹, 志磨健。
権利者: 東京工業大学, 日立製作所。
種類: 特許。
番号: 特願2013-106229
出願年月日: 平成25年5月20日。
国内外の別: 国内。

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ok.ctrl.titech.ac.jp/res/res-j.shtml>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥富正敏 (OKUTOMI MASATOSHI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 00262303

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

清水 雅夫 (SHIMIZU MASAO)
日本大学・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・助教
研究者番号: 20585179