

ライトフィールド情報を活用した局所平面角度の推定と SIFT 特徴対応付けへの応用

○清水政行 †, 川西康友 ††, 出口大輔 ‡, 井手一郎 ††, 村瀬洋 ††

○ Masayuki SHIMIZU †, Yasutomo KAWANISHI ††, Daisuke DEGUCHI ‡,
Ichiro IDE †† and Hiroshi MURASE ††

†: 名古屋大学大学院情報科学研究科

††: 名古屋大学大学院情報学研究科

‡: 名古屋大学情報連携統括本部

<要約>近年, ライトフィールドカメラが一般に市販されるようになり, ライトフィールド情報を容易に取得することが可能になった. ライトフィールド情報は空間中の光線情報を記録したものであり, 撮影後の後処理によって任意の位置に合焦した画像を生成できるという特徴を有する. 本発表では, このライトフィールド情報を活用することによって, 画像中の任意の位置における最適な焦点距離と局所平面角度を同時に推定する手法を提案する. 具体的には, ライトフィールドカメラの部分開口画像から算出される SSD (Sum of Squared Difference) が合焦位置で最小になり, かつ, その隣接画素における最適な焦点距離が連続的に変化するというという 2 つの性質に着目し, 焦点距離と局所平面角度の同時推定手法を提案する. 提案手法の有効性を確認するため, 実環境において撮影した評価画像を用いて精度の検証を行った. その結果, テクスチャ情報が豊富な領域において良好な推定結果が得られることを確認した.

<キーワード>ライトフィールド, デプス推定, 局所平面角度, 焦点距離, リフォーカス

1 はじめに

近年, 空間中の光線情報を記録するライトフィールド情報の撮像方法に関する研究開発が進み, 現在はライトフィールド情報を手軽に記録可能なカメラも一般に入手可能となっている. これまでに, ライトフィールド情報を活用した撮影後のリフォーカス [1] やデプス推定 [2] 等の手法が多数提案されている.

一方, ライトフィールド情報を活用することで SIFT 特徴等による画像対応付けの精度向上を図る研究も行われている. SIFT 等で用いられる局所特徴量は, 対象物体の姿勢変化の影響を強く受けるため, ライトフィールド情報を利用した焦点距離推定は画像対応付け精度の向上に大きく寄与することが報告されている [3]. 一般に, ライトフィールド情報から推定されたデプス情報を微分することで局所平面角度を得ることができる (図 1 中の手法 1). 手法 1 のような手順で局所平面角度推定を行った場合, デプス推定の誤差が局所平面角

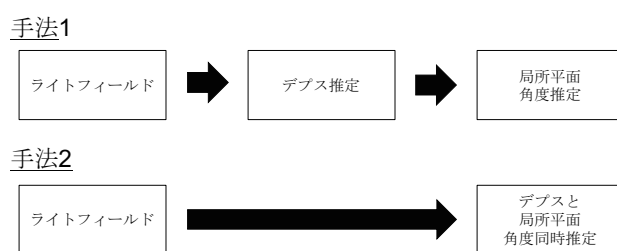


図 1 局所平面角度推定の手法

度推定の精度に大きく影響するため, 局所平面角度推定後にフィルタ処理を行ってノイズ除去を行うことが一般的である. しかし, フィルタ処理を行った場合, デプス情報と局所平面角度の関係が失われる可能性がある. そこで本発表では, デプス情報と局所平面角度を同時に推定することでこの問題を解決する手法を提案する (図 1 中の手法 2).

提案手法の処理手順を図 2 に示す. 提案手法では, まずライトフィールド情報から得られた部分開口画像を用いて画素単位の SSD (Sum of Squared Difference) を

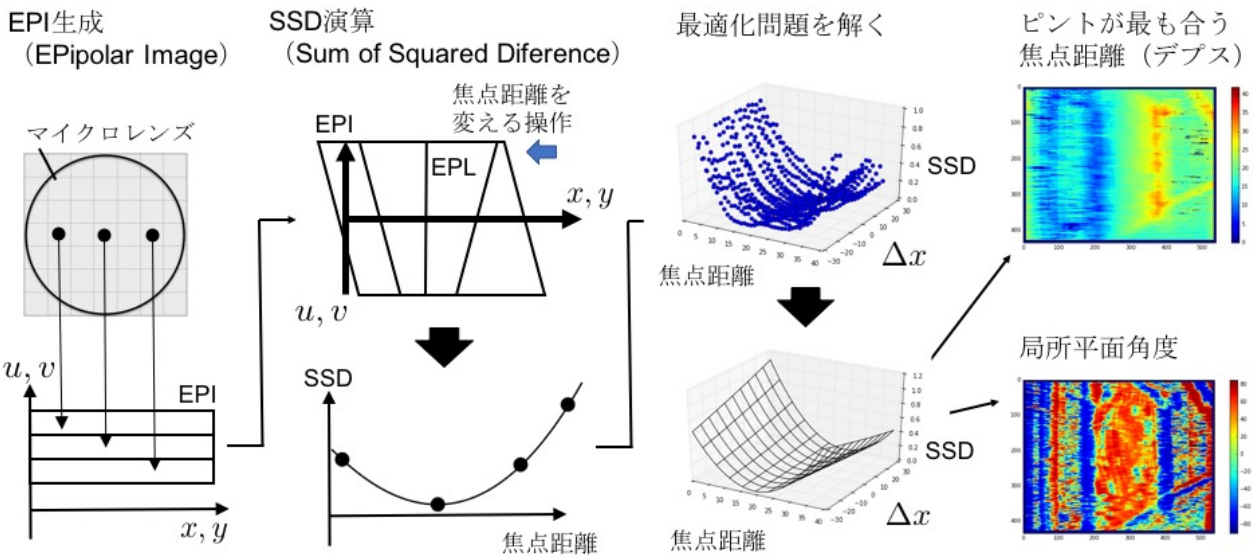


図 2 ライトフィールド情報を活用した局所平面角度の推定

計算する。ここで得られる SSD は、合焦位置（ピントが最も合う焦点距離）で最小の値をとり、また、その隣接画素では SSD が最小となる位置、つまり合焦位置での焦点距離が連続的に変化するという性質がある。そこでこれらの性質を利用することにより、局所的な曲面当てはめの最適化問題を解くことによって合焦時の焦点距離と局所平面角度を同時に推定する。

以降、2 節でライトフィールドについて簡単に説明し、3 節で提案手法の詳細を述べる。そして、4 節で評価実験の詳細を述べるとともに、5 節で考察を加え、最後に 6 節でまとめる。

2 ライトフィールド

ライトフィールド（光線空間）は、場における光線情報を表し、ライトフィールドカメラはその光線情報を記録することが可能なカメラである [1, 4, 5]。最も初期の研究では、多数のカメラを縦横に並べたカメラアレイによってライトフィールド情報を記録するライトフィールドカメラが用いられていた。最近では、撮像素子の前面にマイクロレンズアレイを配置することで密なカメラアレイを実現したライトフィールドカメラが製品化されている。以降は、このようなマイクロレンズアレイを用いたライトフィールドカメラである Lytro 社の Lytro illum [6] を前提に話を進める。ライトフィールドカメラは、主レンズとマイクロレンズを通過した光を画像センサにより撮像する。図 3 は、ライトフィールドカメラの撮像の様子を図示したものである。物体

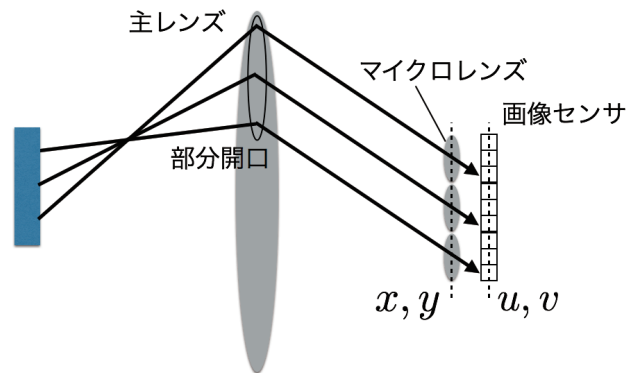


図 3 ライトフィールド情報の取得原理

から発せられる光は主レンズの部分開口を通り、各マイクロレンズの同じ座標に記録される。この機構によって、マイクロレンズ面での座標 (x, y) と画像センサ面の座標 (u, v) を記録することで光の方向を含めた 4 次元のライトフィールド情報 $L(x, y, u, v)$ を得ることができる。

ここで図 4 に示すように、同じ方向から入射する光線、すなわち同じ (u, v) 座標の画素を集めた画像を部分開口画像と呼ばれる。

このようなライトフィールド情報を活用することにより、任意の焦点距離の画像を生成することができる。任意の焦点距離の画像、すなわちリフォーカス画像は以下の式 (1) により求めることができる。ここで αF は任意の焦点距離を表し、 F は基準となるカメラの焦点距離を表す。式 (1) は積分による連続系で定式化されているが、実際に求める際は部分開口画像を平行移動

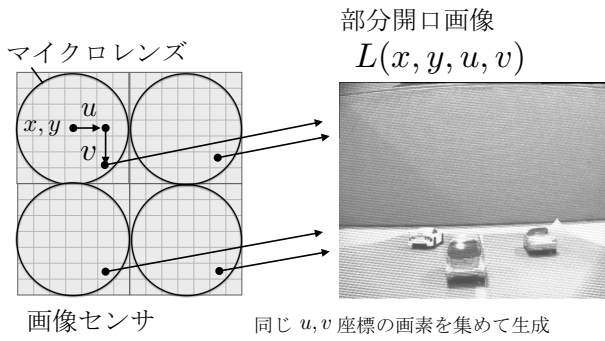


図 4 部分開口画像



図 5 リフォーカス画像

して離散的に加算する操作によって実現される。実際に式 (1) の計算によって求めた焦点距離を変化させた画像を図 5 に示す。図 5 中の左側はシーン中の奥に焦点距離を合わせた画像、右側は手前に焦点距離を合わせた画像を後処理で生成したものである。

$$I_{\alpha}(x, y) = \iint L\left(x + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)u, y + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)v, u, v\right) dudv \quad (1)$$

3 焦点距離と局所平面角度の同時推定

提案手法の処理の手順を図 2 に示す。ここでは説明の簡略化のため、 $L(x, y, u, v)$ を x 方向の一軸に限定した $L(x, u)$ を用いて説明する。ここで、図 6 に示すような縦軸に u をとる部分開口画像の画素集合 (x, u) を考える。本発表では従来のライトフィールドに関連する論文の用語に習い、このような画像を EPI (Epipolar Image) と呼び、EPI 中で同じ物体からの光を結んだ線を EPL (Epipolar Line) と呼ぶこととする。

合焦 (ピントが合う) している位置では、EPL は x 軸に垂直な直線となる。一方、式 (1) から分かる通り、部分開口画像を平行移動することによって任意の位置に焦点距離を変えることが可能である。この焦点距離を変化させる操作を行うと、図 7 に示すように EPI と EPL が変化する。このことから分かるように、EPL

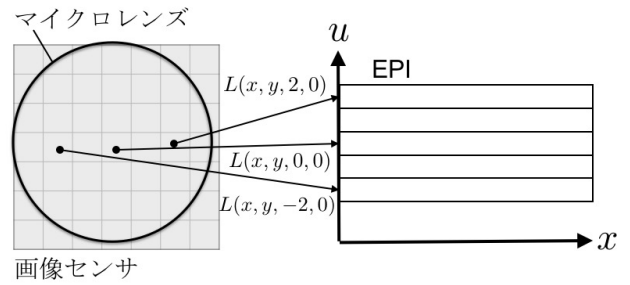
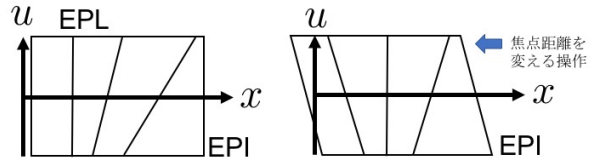


図 6 エピポーラ画像 (EPI)



EPL が x 軸に対して垂直の時、ピントが最も合った焦点距離となる EPL 同士の相対角度差が x 軸に対する焦点距離の変化量となる

図 7 焦点距離と EPL

の角度が x 軸に対して垂直になる位置を見つけることにより、ピントが最も合う焦点距離を推定することが可能となる。

次に、 $u = 0$ における部分開口画像とそれ以外の部分開口画像の差 SSD (Sum of Squared Difference) を考え、次式のような形で定式化する。

$$S(\alpha, x) = \frac{1}{|W_D|} \sum_{W_D} \sum_u \left(L\left(x + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)u, u\right) - L(x, 0) \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 W_D は注目画素を中心とした一定サイズの窓領域を表す。SSD は、 x 軸に対して EPL が垂直になったときに最小の値をとり、垂直からの傾きが大きくなるほど SSD は大きくなる。ここで、SSD は x の関数でもあることから、注目画素からの距離 Δx に応じて SSD が最小値となる焦点距離が異なり、それは局所平面の角度に応じた変化となる。このような変化が 2 次曲面で近似できると仮定すると、SSD は次式のように表すことができる。

$$\tilde{S}_x(\alpha, \Delta x) = a_1(\alpha - a_2 - a_3\Delta x)^2 + a_4 \quad (3)$$

式 (3) は $\alpha = a_2 + a_3\Delta x$ で最小となり、その際の a_2 は最もピントがある焦点距離、 a_3 は Δx における焦点距離の変化量となる。 a_3 を角度に換算することにより、

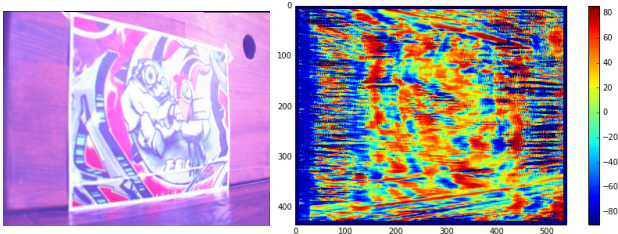


図 8 データ 1 の局所平面角度推定結果
(真値 $\theta_y : 43.5[\text{deg}]$)

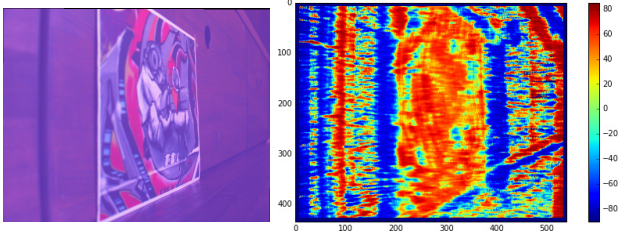


図 9 データ 2 の局所平面角度推定結果
(真値 $\theta_y : 71.7[\text{deg}]$)

最終的に求めたい局所平面角度 θ_y が得られる. 実際に焦点距離と局所平面角度を推定する際は, 式 (4) を誤差関数として次式の最適化問題を解き, その際の a_2 と a_3 が推定値として得られる.

$$\arg \min_{a_1, a_2, a_3, a_4} \sum_{\Delta x} \sum_{\alpha} \left(S(\alpha, x + \Delta x) - \tilde{S}_x(\alpha, \Delta x) \right)^2 \quad (4)$$

以上の説明は x 軸方向のみを用いて説明したが, 同様にして y 軸方向の推定も可能である.

4 実験

提案手法の局所平面角度の推定精度を評価するため, ライトフィールドカメラを用いて実環境で撮影したデータを用いて精度評価を行った. 図 8 と図 9 は実験に用いたデータと提案手法による推定結果を示している. また, 局所平面角度推定結果の $y = 200$ におけるプロットを図 10 と図 11 に示す.

実験の結果, テクスチャが豊富に存在する領域 (図 10 の $x = 150 \sim 450$, 図 11 の $x = 200 \sim 400$) における局所平面角度の推定は良好であった. しかし, テクスチャが少ない領域での推定精度は低い傾向が見られた. 特に, テクスチャの有無が切り替わる境界 (図 10 の $x = 150$ と $x = 450$ 付近, 図 11 の $x = 200$ と $x = 400$) では精度の低下が顕著に見られた.

次に, 提案手法と最小 2 乗法により直接局所平面勾配を推定する手法の比較を行った. 比較手法の入力と

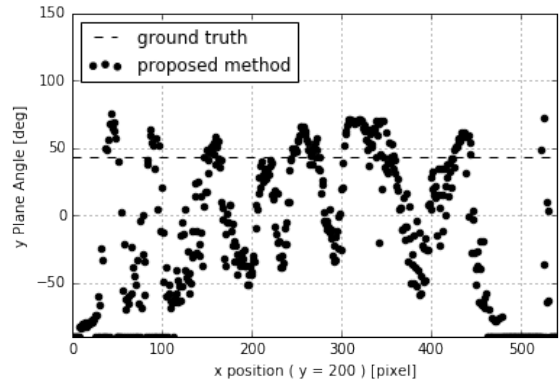


図 10 データ 1 の局所平面勾配の推定結果 ($y = 200$)

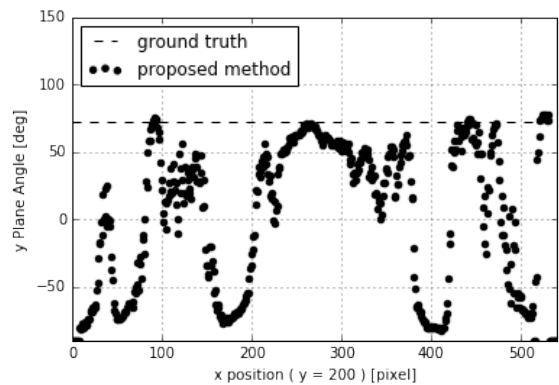


図 11 データ 2 の局所平面勾配の推定結果 ($y = 200$)

して, 提案手法で求めたデプス値を使用した. また比較に用いたデータには, 局所平面角度に変化が含まれるものを用いた. 図 12 に評価データの元画像と提案手法の推定結果を示し, 図 13 にデプス画像と比較手法 (最小 2 乗法) による推定結果を示す. また, $y = 200$ における局所平面角度の推定結果を図 14 に示す.

図 14 より, 提案手法の角度変化に対する追従性は良いものの, 比較手法 (最小 2 乗法) の方が低ノイズであることが確認できる.

5 考察

提案手法と比較手法の比較を通して, 提案手法の性質として以下のことが示唆された.

- 1 ステップでピントが最も合う焦点距離と局所平面角度を推定可能
- 局所平面角度の変化に強い
- ノイズに弱い

これは, 比較手法がデプス画像から改めて局所平面角度を求めるため, ローパスフィルタと同じ効果が得られていると考えられる. 今後, 提案手法と比較手法そ

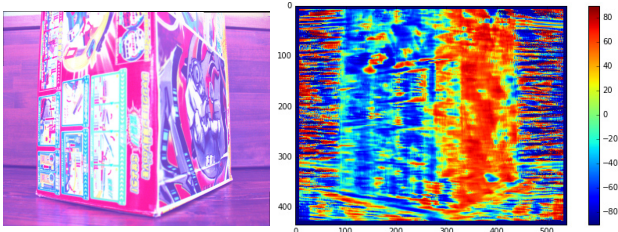


図 12 評価用データ 3 の元画像と提案手法による局所平面角度推定結果

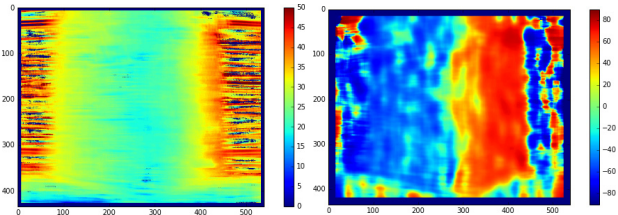


図 13 評価用データ 3 のデプス画像 (左) と比較手法 (最小 2 乗法) による局所平面角度推定結果 (右)

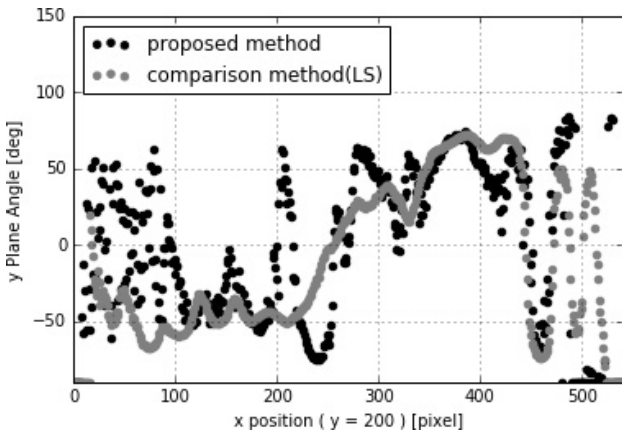


図 14 データ 3 の局所平面角度推定結果比較 ($y = 200$)

それぞれから推定された局所平面角度を組み合わせることにより、提案手法の欠点を補うことが可能と考えられる。実際に、提案手法と比較手法の結果を重み付け平均により統合した結果を図 15 と図 16 に示す。これらの図から分かるように、角度変化の追従性を保ちつつ、ノイズ低減が可能であることがわかる。また、提案手法の精度向上には焦点距離方向の分解能向上も効果的と考えられる。

次に、SIFT 特徴量 [7] の計算に局所平面角度推定を応用することによる、画像対応付け性能改善可能性について検討する。SIFT 特徴量を用いた画像対応付けの課題として、透視投影変換に対する精度の低下が挙げられる。画像中の局所平面角度が推定できれば、入力画像に対して予め透視投影変換の補正を行って特徴点

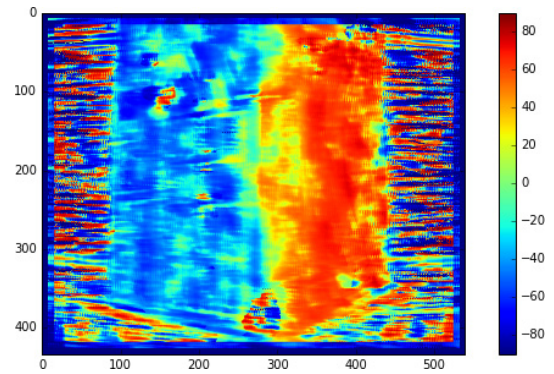


図 15 データ 3 に対する提案手法と比較手法の統合結果

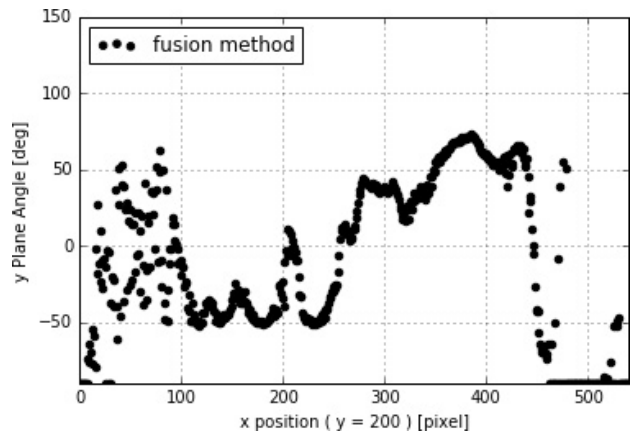


図 16 データ 3 の提案手法と比較手法統合結果 ($y = 200$)

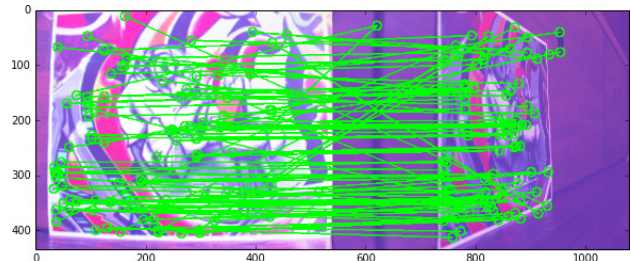


図 17 局所平面角度を用いた SIFT 特徴対応付け結果

と特徴量を算出することが可能となり、対応付け精度の改善が見込まれる。従来、文献 [8] や [9] では総当たりで特徴点の対応付けを行うことでこの問題に対処しているが、提案手法を応用することで対応付候補を絞り込むことも可能となる。この可能性を検討した結果を図 17 に示す。図から分かるように、提案手法による局所平面角度推定を利用することで透視投影変換が含まれる画像の対応付け精度と速度の改善が見込まれる。

6 むすび

本発表では、ライトフィールド情報からピントが最も合う焦点距離と局所平面角度を同時に推定する手法を提案した。部分開口合成から SSD を算出し、焦点距

離と注目画素からの画素間の距離を変数とした2次曲面を当てはめることで焦点距離と局所平面角度を推定できることを示した。実際のデータを用いた評価実験の結果、テクスチャが明確な領域で良好な推定結果が得られることを確認した。

今後の課題として、テクスチャが少ない領域における推定精度向上、時系列ライトフィールド画像を活用したデプスと局所平面角度の同時推定ならびにバンドルアジャストメントによる性能向上、カメラモーション推定等への応用などが挙げられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、ご指導およびご協力いただいた多くの方々に心より感謝する。本研究の一部は、科学研究費補助金による。

参考文献

- [1] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, “Light field photography with a hand-held plenoptic camera,” Stanford University Computer Science Tech Report, CSTR 2005-02, Apr. 2005.
- [2] MW. Tao, Su. Hadap, Ji. Malik, and R Ramamoorthi, “Depth from combining defocus and correspondence using light-field cameras,” Proc. 14th IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pp.673–680, Dec. 2013
- [3] 清水 政行, 川西 康友, 出口 大輔, 井手 一郎, 村瀬 洋, “ライトフィールド情報を活用した特徴点の対応付けに関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2017-36, June 2017.
- [4] R. Ng, “Digital light field photography,” Ph.D thesis, Stanford University, July 2006.
- [5] 蚊野 浩, “ライトフィールドカメラ Lytro の動作原理とアルゴリズム,” 応用物理学会微小光学研究会 第 127 回研究会, Mar. 2013.
- [6] <http://www.lytro.com/>
- [7] D. Lowe, “Distinctive image features from scaleinvariant keypoints,” Int. J. of Computer Vision, vol.60, no.2, pp.91–110, Jan. 2004.
- [8] J.-M. Morel, and G. Yu, “ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison,” SIAM J. on Imaging Sciences, vol.2, no.2, pp.438–469, Apr. 2009.
- [9] G.-R. Cai, P.-M. Jodoin, S.-Z. Li, Y.-D. Wu, S.-Z. Su, Z.-K. Huang, “Perspective-SIFT: An efficient tool for low-altitude remote sensing image registration,” Signal Processing, vol.93, no.11, pp.3088–3110, Nov. 2013.