

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K17889

研究課題名（和文）ライトフィールドカメラにおけるGPUを用いた高速奥行き推定アルゴリズムの構築

研究課題名（英文）Fast GPU-based Depth Estimation Algorithm for Light Field Cameras

研究代表者

三柴 数 (MISHIBA, Kazu)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40609038

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ライトフィールド画像を用いた高速高精度な奥行き推定法を確立することを目的とした。奥行き推定は、初期推定と、その推定を修正する処理からなるため、それら二つを高速化することが求められた。本研究の成果は、高速な初期推定方法を確立したこと、および高速な推定誤り修正方法を確立したことである。そしてそれら二つを組み合わせることで、研究目的であったライトフィールド画像を用いた高速高精度な奥行き推定を実現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において確立した高速な初期推定方法および高速な推定誤り修正方法は、ライトフィールド画像に対する奥行き推定のみならず、さまざまな画像処理に応用可能なものである。このことは、本研究が多くの研究に影響を与えることを期待できることを意味する。

また、これまで実現できていなかった高速奥行き推定が達成されたことで、ライトフィールド画像を用いた奥行き推定がより実用的になった。画像から奥行きを推定することは、自動運転やセキュリティ、ロボットの自律操作などへの応用が考えられており、本研究の成果がそれらの実現に寄与することを期待する。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to establish a fast and accurate depth estimation method using light field images. Since depth estimation consists of an initial estimation and a process to correct the estimation, it was required to speed up these two processes. The results of this study are the establishment of a fast initial estimation method and a fast estimation error correction method. By combining these two methods, the research goal of fast and accurate depth estimation using light-field images was achieved.

研究分野：画像処理

キーワード：ライトフィールド 奥行き推定 視差推定 高速化 GPU

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

空間を行き交う光の強度と方向の情報であるライトフィールド(LF)を記録する LF カメラから撮影シーンの奥行き推定(三次元再構成)を行うことで、工業から医療に至るまで様々な画像処理応用の性能が飛躍的に向上することが期待されている。

LF カメラから得られる LF 画像は、撮影位置がわずかに異なる複数枚の画像(以下、これを視点画像と呼ぶ)で構成される。旧来からある、複数枚の画像からシーンの奥行きを推定する手法と同様、LF 画像から奥行きを推定することも可能である。

LF 画像の奥行き推定は大きく分けて二つのステップからなる。一つ目のステップは、推定奥行きの確からしさを評価するマッチングコスト関数を定義し、その関数を最小にする奥行きを初期推定値として求めるステップである。初期推定には推定誤りが含まれるため、二つ目のステップにおいて、これを抑制する視差修正処理を行い、最終的な推定結果を得る。多くの従来手法は LF 画像 1 枚あたり汎用 PC を用いて数分~数十分の処理時間を要する。実用上はリアルタイムやそれに近い速度で処理を行う必要があり、高い推定精度と高速処理が可能な手法が望まれていた。

高速処理を実現するカギとなるのは大量の並列演算が可能な GPU の使用である。GPU で高速な処理を実現するためには、コスト関数の演算に条件分岐を可能な限り含まないようにする必要があり、既存手法の複雑なコスト計算法では単に GPU 上で実装しても高速動作は望めない。そのため、従来とは異なるコスト計算法を必要としていた。

### 2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえ、本研究は LF カメラから高速に奥行き推定可能な手法を確立することを目的とした。より具体的には以下の二つを確立することを目指した。

- (1) 高速な初期推定方法
- (2) 高速な推定誤り修正方法

### 3. 研究の方法

#### (1) 高速な初期推定方法の確立

初期推定では、まず画像の特徴量を計算し、次に特徴量に基づきマッチングコストを計算し、最後にコストが最も低くなる視差を得ることで行う。高速化処理において重要なことは、計算量を減らしながらも精度の低下を抑えることである。

特徴量計算の計算量を減らすために、画素の特徴を 1bit で表す 1bit 特徴量を新たに提案した。この特徴量は高速に演算可能である一方、情報を 1bit しか持たない。このことは、他の画素との区別が困難でありマッチング処理に向いていないことを意味する。この問題を克服するために、特徴量から計算されるコストを全視点の組み合わせで計算することとした。これにより推定精度は向上するものの、全視点の組み合わせは非常に量が多く、計算時間の増加につながる。そこで全視点組み合わせコストを高速に計算可能なアルゴリズムを確立した。これにより、非常に高速にコスト計算が可能になった。

マッチングコスト計算処理は、推定する視点の奥行き解像度と同じ数行う必要がある。一般にこれは 256 回行われることがあり、これも計算時間を要する要因となる。そこで、奥行き解像度を減らしてコスト計算を行い、コストを奥行き解像度方向に補間することで必要な解像度の奥行きを得る手法を確立した。これにより、大幅に計算回数を減らしながら、奥行き解像度を減少させることによる精度劣化を最小限に抑えることができた。

LF 画像の構成要素である視点画像は数が多く、例えば Lytro では 81 枚の画像を持つ。この画像全てを用いて奥行きを推定することは、推定精度向上には寄与する一方で計算速度の低下を招く。そこで、推定に使用する視点画像を適応的に選択し、少ない視点画像でも高い推定精度を得られるアルゴリズムを提案した。

以上全てのアルゴリズムは GPU 上での並列計算に適したものとなっており、GPU を用いて高速に計算することができる。

#### (2) 高速な推定誤り修正方法の確立

誤り修正の方法は大きく分けて二つある。一つは線形または非線形フィルタリングを適用する方法、もう一つは目的関数を設計し最適化問題を解くことで修正を行う方法である。フィルタを適用する方法は一般に高速に動作するが、修正の精度がもう一方の方法に比べ低く、実用的ではない。そこで本研究では目的関数を設計し最適化問題を解く方法を採用した。この方法は、修正精度は高い一方で、最適化問題を解く計算コストが一般に高い。本研究では最適化問題として、物体境界で急激に値が変化する視差データの特徴に適合する、 $\ell_1$  ノルムを用いた目的関数の最小化を行うこととした。確立した目的関数の最適化は、グラフカットアルゴリズムを用いることで実行可能であるが、これには汎用 PC を用いて 10 分以上の時間を要する。そこで、この最適化問題の近似解を高速に計算する手法を提案した。高速化の鍵となったのは、高速重み付き中央値フィルタの応用である。目的関数を変形し、高速重み付き中央値フィルタを応用して近似的に解ける形式にすることで、高速化を達成した。

#### 4. 研究成果

本研究の成果は大きく分けて以下の3点である。

- (1) 高速な初期推定方法の確立
- (2) 高速な推定誤り修正方法の確立
- (3) LF 画像を用いた高速高精度な奥行き推定の達成

詳細は以下の通りである。

##### (1) 高速な初期推定方法の確立

高速な初期推定は、具体的には以下の成果により実現した。

- 1bit 特徴量の提案
- これを用いた全使用視点の組み合わせコストを高速に計算可能なアルゴリズムの確立
- 奥行き解像度を減らしてコストを計算し、補間により解像度を増加させるアルゴリズムの確立
- 推定に使用する視点画像を適応的に選択するアルゴリズムの確立

##### (2) 高速な推定誤り修正方法の確立

高速な推定誤り修正は、具体的には以下の成果により実現した。

- $\ell_1$  ノルムを用いた目的関数の近似計算用の式変形の確立
- 高速重み付き中央値フィルタを応用して近似解を計算する方法の確立

(1)(2) で得られた成果は、LF 画像の高速奥行き推定のみならず、様々な画像処理において応用が可能なものが多く、その成果の波及効果は多岐にわたると考えられる。

##### (3) LF 画像を用いた高速高精度な奥行き推定の達成

(1) および(2) の成果を組み合わせることで、高速高精度な奥行き推定を実現した。具体的な性能は表1のようになる。表において、FDE が提案した方法である。従来の様々な方法と比較して、提案法は最も高速に動作しており、LF 画像 1 枚当たり視差推定に要する時間を 1 秒まで短縮できた。

推定精度についても、従来の高い推定精度と比較して遜色のない結果が得られた。従来の最も推定精度が高い手法は、機械学習を用いた手法であり、この手法には学習の計算コストが非常に高いことや、学習に用いたデータとは異なる環境で撮影されたデータに対する推定精度が低いという問題もある。一方で提案法はそれらの問題が生じず、様々な LF 画像に対して高速に、安定して高い精度の推定が可能であることが示された。

表 1. 推定精度と計算速度

Method	MSE ( $\times 100$ )	BP [%] ( $> 0.07$ )	Time [sec]
EPI1 [15]	4.13 (5)	22.14 (9)	86.27 (5)
EPI2 [10]	6.94 (8)	21.83 (8)	8.18 (3)
PS_RF [16]	3.69 (3)	6.96 (2)	1089.96 (7)
RPRF-5view [9]	6.03 (7)	12.93 (5)	11.75 (4)
SPO [12]	3.57 (2)	8.23 (4)	2100.63 (8)
LF [7]	8.66 (9)	16.05 (7)	1004.79 (6)
LF_OCC [6]	5.93 (6)	14.07 (6)	10915.13 (9)
Epinet-fcn9x9 [4]	<b>1.75</b> (1)	<b>3.58</b> (1)	2.03 (2)
FDE (Ours)	3.80 (4)	7.46 (3)	<b>1.12</b> (1)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mishiba Kazu	4. 巻 29
2. 論文標題 Fast Depth Estimation for Light Field Cameras	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Image Processing	6. 最初と最後の頁 4232 ~ 4242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIP.2020.2970814	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 三柴数, 内藤光一	4. 巻 103
2. 論文標題 動的計画法に基づく視差計算を用いたライトフィールドカメラにおける視差推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2019JDP7043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 三柴数, 加藤滉也	4. 巻 103
2. 論文標題 Multiscale Normalized Cuts を用いた画像の二値セグメンテーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2019JDP7053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takayuki Tomioka, Kazu Mishiba, Yuji Oyamada and Katsuya Kondo	4. 巻 E100
2. 論文標題 Depth Map Estimation Using Census Transform for Light Field Cameras	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 2711, 2720
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2017EDP7052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小谷 宏道, 三柴 数, 小山田 雄仁, 近藤 克哉
2. 発表標題 ライトフィールドカメラ画像に対する教師なしセグメンテーション
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム・映像メディア処理シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------