

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2015

課題番号：15H06345

研究課題名(和文)不均一光源下における照度差ステレオによる高精度3次元形状推定手法の開発

研究課題名(英文) High-fidelity 3D reconstruction by photometric stereo under non-uniform light intensities

研究代表者

松下 康之 (Matsushita, Yasuyuki)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：30756507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では不均一な光源強度下、もしくはセンサ露光時間/感度が不均一な状況下における照度差ステレオ法の定式化と実装を行った。従来の照度差ステレオ法を一般化し、光源強度と3次元形状の同時推定問題と捉えることでこの問題が非負の双線形問題として定式化できることが明らかになった。また、この問題が一般的な双線形問題とは異なる構造を持ち、この特性を利用することで交互最小化の枠組みで一意的な最適解が求まることを示した。この最適化手法をソフトウェアとして実装し、シミュレーションデータと実世界データの両方を用いて実験を行い、どちらにおいても従来手法に比して良好な結果が得られることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new photometric stereo method that can work under non-uniform light intensities that are unknown, or with photographs that are recorded with varying and unknown exposure times. By generalizing the conventional photometric stereo formulation, we cast the problem as a joint estimation of surface normal and light intensities, which can be represented as a non-negative bilinear problem. We have shown that this problem has a unique structure unlike general bilinear problems and by exploiting the structure, we have developed an efficient solution method based on alternating minimization for determining both surface normal and light intensities. The solution method is implemented, and with both simulation and real-world experiments, we have confirmed that the developed method shows favorable performance over existing methods that do not consider the light intensity variations.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：3次元形状復元 照度差ステレオ

### 1. 研究開始当初の背景

照度差ステレオ法とは、複数の異なる光源下で撮影されたシーンの画像からシーン中の物体表面の法線を推定する方法である。照度差ステレオ法は、ピクセル単位で面の傾きを計算することができるため、物体表面の微細な形状を推定できるという利点がある。従来の照度差ステレオ法では、「複数光源の間の光源輝度が一樣である」という仮定に基づいており、これが破綻すると誤差が大きくなるという課題があった。

### 2. 研究の目的

本研究では、複数光源間の光源輝度が不均一な場合においても高精度な形状推定が可能な照度差ステレオ法の開発を目的とする。この手法の実現により、光源強度を均一に揃える手間が緩和されると同時にカメラの露光時間も光源ごとに適応できるようになり、より幅広い応用が期待される。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1) 不均一な光源下における照度差ステレオの理論構築、および (2) その実装と実証実験を行うために以下のような研究計画に沿って研究を進めた。

平成 27 年上半期: 不均一な光源下における照度差ステレオ法の定式化と予備実験を行った。ある程度容易で検証可能なシミュレーションデータセットを作成し、これを用いて定式化の実験的検討をおこなった。

平成 27 年下半期: 上半期の結果である定式化をもとに計算ソフトウェア Matlab を用いて実装を進め、現実的な環境下での実証実験を行った。この実証実験のために、カメラと光源を用いて実世界データを収集し、さらに、従来の線形反射モデルに依存しないアプローチと併せた実装・実験を行い、これらの有効性の検討を行った。また、成果を国内外へ広くアピールするために研究報告(論文等)の準備を進めた。

### 4. 研究成果

本研究は概ね計画通りに行われ、大きく以下の2点の結果を得ることができた。

#### (1) 均一な光源強度を仮定しない照度差ステレオ法の開発

従来の照度差ステレオ法では、線形モデルのケースにおいては以下のような近似モデルから法線を推定する問題として定式化される：

$$M \approx LN$$

ここで、 $M$ は観測輝度行列、 $L$ は光源方向を記述する行列、 $N$ は求めたい法線ベクトルからなる行列である。

本研究では定式化を改良し、未知の光源輝度行列 $E$ を明示的に加え、

$$M \approx ELN$$

として、光源輝度行列 $E$ と法線行列 $N$ の同時推定問題に帰着した。具体的には、これを最小二乗法として定式化し、以下のような問題と

して定式化した：

$$\{E^*, N^*\} = \operatorname{argmin}_{E, N} \|M - ELN\|_F^2$$

この問題は一般には双線形問題として知られ、一意な解が求まることはないが、本研究のケースでは行列 $E$ が正の要素のみを持つ対角行列であることに着目し、これがシルベスター方程式の類似したケースとなるため行列 $E$ と $N$ の同時推定が可能となることがわかった。

この発見に基づいて最小二乗近似解が斉次形線型方程式の解として得られることを示し、特異値分解を用いた解法により安定して法線と光源強度を求めることができた。また、その他の2つの効率的な解法を考案し、これらについても有効性が確認できた。これら2つの手法は、①行列の因子分解(factorization)に基づく方法、②交互最小化(alternating minimization)による方法である。

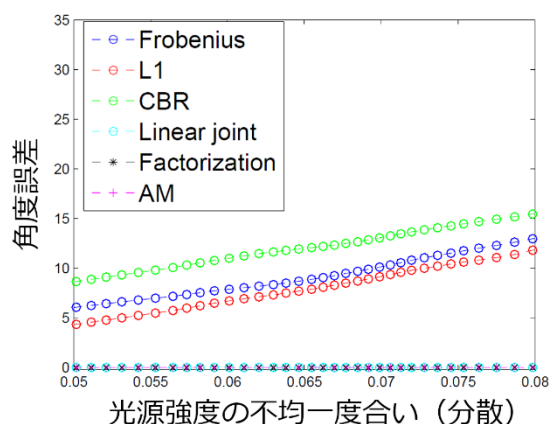


図 1 不均一な光源強度科での照度差ステレオ法の評価

図 1 に開発した手法と既存手法の比較をまとめる。横軸が光源強度の不均一さに、縦軸が角度誤差に対応する。Frobenius, L1, CBR 法はいずれも既存の手法であり、それぞれ線形最小二乗法に基づくもの、L1 ノルム最小化に基づくもの、より近年の constrained bivariate regression と呼ばれる手法に対応する。また、Linear joint, Factorization, AM が本研究において開発した手法であり、これらはいずれも未知の光源輝度行列と法線を同時推定するアルゴリズムとなっている。既

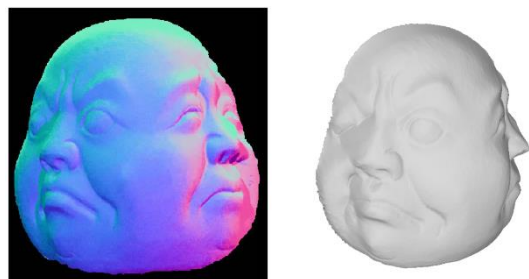


図 2 提案手法による法線マップの推定 (左) と 3 次元再構成 (右)

存手法が、光源強度の不均一さが上がるにつ

れて大きな角度誤差を示すのに対し、提案手法では安定して低い誤差で法線を推定できていることがわかる。

図2に本研究による手法によって推定された法線マップと3次元復元の一例を示す。この研究の結果は現在国際会議に投稿中であり、広く社会に発信していく予定である。

#### (2) 近接光源下における照度差ステレオ法の性能評価

本研究課題の計画に当初予定はしていなかったが、研究を進めるうえで「不均一な光源強度」と「近接光源」の密接な関係が明らかになった。従来の照度差ステレオ法は無限遠点光源を仮定するが、これは理想的な光源であり、実際には近接光を仮定するほうが妥当なケースが多い。また、近接光源下では必ずと光源強度の不均一さが問題になる。そこで、近接光源下において光源の分布と法線の推定精度を関連付ける理論を構築し、この実実験による検証を行った。さらに、図3に示すようなコンパクトな照度差ステレオセットアップを実装し、この性能評価を行った。図2のセットアップではカメラの光軸を中心としてLED光源が同心円状に分布しているものである。ベースラインとして示すのは、光源の分布の直径である。

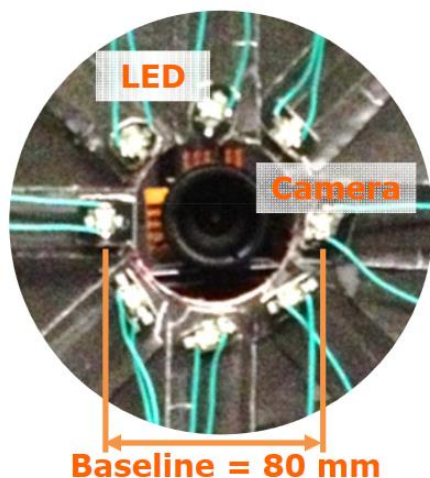


図3 近接光源照度差ステレオデバイス

また、図4に光源の分布が光軸を中心として円状に分布するケースにおいて、その分布半径と推定される法線の角度誤差をプロットしたものを示す。この結果により、光源の分布半径が100mm以上であれば、近接光源による角度誤差が6度未満に抑えられることがわかった。この結果により、小さなセットアップでも照度差ステレオを有効に機能させることができることがわかり、またその際に期待される誤差の程度がわかることから、照度差ステレオの実用化に向けたガイドラインとなることが期待できる。

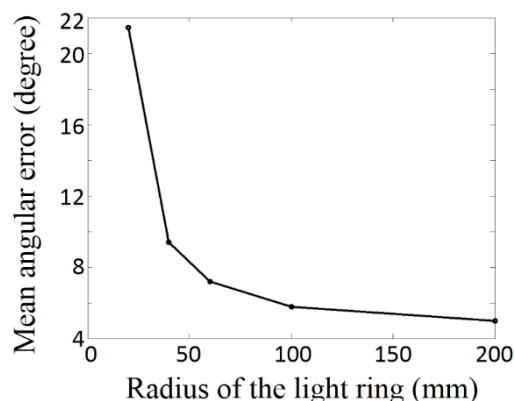


図4 光源分布半径と法線の角度誤差

この結果はコンピュータビジョン分野の国際会議 International Conference on Computer Vision (ICCV) 2015 において報告した。

#### 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 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

① Jian Wang, Yasuyuki Matsushita, Boxin Shi, and Aswin C. Sankaranarayanan, "Photometric Stereo with Small Angular Variations," International Conference on Computer Vision (ICCV), Dec. 16, 2015, pp. 3478-3486, Santiago, Chile, [http://www-infobiz.ist.osaka-u.ac.jp/user/matsushita/papers/Wang\\_ICCV15.pdf](http://www.infobiz.ist.osaka-u.ac.jp/user/matsushita/papers/Wang_ICCV15.pdf)

\* 現在もう1件を国際会議に投稿中

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等  
[http://www.infobiz.ist.osaka-u.ac.jp/user/matsushita/papers/Wang\\_ICC\\_V15.pdf](http://www.infobiz.ist.osaka-u.ac.jp/user/matsushita/papers/Wang_ICC_V15.pdf)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松下 康之 (MATSUSHITA, Yasuyuki)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号：30756507

(2) 研究分担者 無し  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 無し  
( )

研究者番号：