

ライトフィールド履歴の類似度に基づくシーンの法線推定

黒木 武¹ 岡部 孝弘²

概要: 光源方向の変化に伴う輝度の変化, つまり, 輝度履歴に基づく照度差ステレオでは, 輝度履歴の類似度と法線の類似度の関係に着目した多次元尺度構成法による次元削減, ならびに, 次元削減に伴う不定性の遮蔽輪郭線を手掛かりにした解決により, 物体表面の法線を推定している. ところが, 輝度履歴に基づく従来手法は, 一様な反射特性を持つ物体を仮定している. そこで本研究では, ライトフィールド (LF) 履歴に基づいて, 様々な反射特性の物体を含むシーンの法線を推定する手法を提案する. 具体的には, 多視点からの観測に基づいて鏡面反射に頑健な輝度履歴を得るとともに, 次元削減と不定性の解決を同時に行うことで, 法線推定の精度向上を図る.

キーワード: ライトフィールド履歴, 反射特性, 多次元尺度構成法

1. はじめに

2次元の画像から3次元の物体形状を復元することはコンピュータビジョンにおいて重要な課題のひとつである. 代表的な形状復元の手法に, 光源方向の変化に伴う反射光強度の変化を手掛かりにして物体表面の法線を推定する照度差ステレオ [1] と呼ばれる手法がある.

照度差ステレオについては様々な拡張研究がなされているが, その手法の一つに, 未知方向の光源下で撮影された画像列を用いて, 光源方向の変化に伴う輝度の変化, つまり, 輝度履歴に基づく照度差ステレオがある [2]. この手法では, 類似の法線ベクトルを持つ物体表面上の点が類似の輝度履歴を持つことに着目し, 多次元尺度構成法 (MDS) [3] による次元削減, ならびに, 次元削減に伴う不定性の遮蔽輪郭線を手掛かりにした解決により, 反射特性も光源方向も未知の条件下での物体表面の法線推定を可能にしている.

ところが, 輝度履歴に基づく従来手法は, 一様な反射特性を持つ孤立した物体を仮定している. そのため, 鏡面反射成分の強度や拡がり異なる様々な物体を含む一般的なシーンにおける法線推定は困難であると考えられる [7].

そこで本論文では, ライトフィールド履歴に基づいて, 様々な反射特性の物体を含むシーンの法線を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 [8] を用いた多視点からの観測に基づいて, 鏡面反射に頑健な輝度履歴を得るとともに, 次元削減と不定性の解決を同時に行うことで, 法線推定の精度向上を図る.

本研究ではシーン中の光線の集合であるライトフィールドを獲得することができるライトフィールドカメラを扱う. マイクロレンズアレイ型のライトフィールドカメラは, 撮像素子の直上に多数のマイクロレンズが配置されており, この構造により, 物体表面上のある点を複数の視線方向から観測したときの輝度値を各光源ごとに並べた行列である, ライトフィールド履歴を獲得することができる.

高次元空間内の輝度履歴間の距離は, それぞれに対応した法線ベクトルの相対的な距離を表していると考えられるため [2], 各履歴間の距離を計算し, 距離行列を作成する. 本研究では光源の方向が未知であるため, 回転と並進の不定性が残っている. そこでライトフィールド履歴を用いて遮蔽輪郭線を検出し, 得られた法線を既知の値として, 制約付き MDS を用いることでこれを解決し, 3次元空間への埋め込みを行う.

また, 提案手法の有効性を確認するために, 実画像を用いて実験を行った. 加えて, 従来の輝度履歴を用いた手法と比較実験を行うことにより, ライトフィールド履歴を用いることの有効性も確認した.

本論文は以下のように構成されている. 第2章で輝度履歴を利用した法線推定に関する関連研究, および, ライトフィールドカメラについて述べる. 第3章では, 提案手法について, ライトフィールド履歴を用いたシーンの法線推定手法について具体的に説明する. 第4章では, 実験の方法や仮定, 実験結果について述べる. 最後に第5章で提案手法とその結果について簡潔にまとめる.

¹ 九州工業大学大学院情報工学府先端情報工学専攻

² 九州工業大学大学院情報工学研究院知能情報工学研究系

2. 関連研究

2.1 輝度履歴に基づく法線推定

Sato ら [2] は、光源方向の変化に伴う輝度の変化、つまり、輝度履歴に基づいて、輝度履歴の類似度と法線の類似度の関係に着目した多次元尺度構成法による次元削減を行うことにより、物体表面の法線を推定している。

物体を照らす光源 $l (l = 1, 2, 3, \dots, L)$ の方向が変化するとき、物体表面上のある点 $p (p = 1, 2, 3, \dots, P)$ で観察される輝度 I_{pl} を並べたベクトルの長さが 1 になるように正規化したものをその点の輝度履歴と定義する。

$$\mathbf{I}_p = \frac{(I_{p1}, I_{p2}, I_{p3}, \dots, I_{pN})^T}{\sqrt{\sum_{n=1}^N I_{pn}^2}} \quad (1)$$

例として一様な拡散反射率を持つ拡散反射物体を考えた場合、平行光線、平行投影、凸物体を仮定すると、類似の法線ベクトルを持つ物体表面上の点が類似の輝度履歴を持つことは、直観的に明らかである。

しかしながら、輝度履歴と法線ベクトルが常に先ほどの相関を示すとは限らない。様々な反射特性の物体を含む一般的なシーンを対象にした場合、類似した法線ベクトルを持つ点であっても、物体表面上の鏡面反射成分の強度や拡がりの違いにより異なる明るさが観測されるため、得られた輝度履歴には大きな差異が生じてしまう。

このように、輝度履歴に基づく従来手法は、一様な反射特性を持つ物体を仮定しているため、鏡面反射成分の強度や拡がりが異なる様々な物体を含む一般的なシーンでの法線推定は困難であると考えられる。

2.2 ライトフィールドカメラ

ライトフィールドカメラ [8] とは、シーン中の光線の集合であるライトフィールドを獲得することができるカメラである。本研究では撮像素子の直上、すなわち、通常のカメラで撮像素子が配置されている位置にマイクロレンズを並べたマイクロレンズアレイ方式のライトフィールドカメラを用いる。

つまり、図 1 のように、各マイクロレンズ直下の画素には、光線の入射する方向に対応してシーンの同一の点を異なる視線方向から観察したときの画素値が記録される。したがってライトフィールドカメラで撮影された画像は空間的な位置だけではなく視線方向に対応する光線の角度情報も記録されていることになる。そのため、ライトフィールドカメラによって得られた原画像は、図 2 のようにマイクロレンズの配置を反映したような画像になっており、円構造をした部分がそれぞれマイクロレンズと対応している [11]。

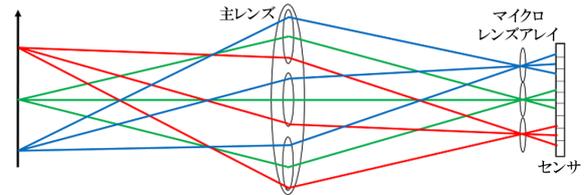


図 1 ライトフィールド獲得の原理



図 2 ライトフィールドカメラの原画像

3. 提案手法

3.1 ライトフィールド履歴

本研究ではマイクロレンズ (ML) アレイ型の LF カメラを使用し、シーン中のある点を複数の視線方向から見たときの画素値を記録したものを ML 画像とする。提案手法では被写体に焦点が合っていることを仮定し、カメラと被写体を固定して、光源方向を変化させながらマイクロレンズ画像を撮影する。ある光源 $l (l = 1, 2, 3, \dots, L)$ 下において、物体表面上のある点 p を視線方向 $v (v = 1, 2, 3, \dots, V)$ から観測したときの輝度値 I_{plv} とする。これらを並べると、点 p におけるライトフィールド履歴 \mathbf{I}_p は、

$$\mathbf{I}_p = \begin{pmatrix} I_{p11} & I_{p12} & \dots & I_{p1V} \\ I_{p21} & I_{p22} & \dots & I_{p2V} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{pL1} & I_{pL2} & \dots & I_{pLV} \end{pmatrix} \quad (2)$$

のような行列として定義することができる。

このとき、各行の要素からなる行ベクトルはある時刻（ある光源下）において点 P を多視点から観察したときの画素値を並べたものになっている。即ち、このライトフィールド履歴は多視点画像に記録されたライトフィールドの時系列の集合であると言える (図 3)。

様々な反射特性の物体を含む一般的なシーンを対象にした場合、通常のカメラではレンズの様々な位置に入射する光線が 1 画素に集光する、即ち、鏡面反射成分と拡散反射成分の両方が 1 画素に含まれ、平均化されてしまうため、類似した法線ベクトルを持つ点であっても、物体ごとの異なる鏡面反射成分の強度や拡がりの影響により、輝度履歴

に大きな差異が生じてしまう。

一方、ライトフィールド履歴は物体表面上のある1点を多視点画像内の画素数分の視線方向に分解し、鏡面反射の拡がりを捉えた多視点情報であるため、これを拡散反射の抽出に利用することで、様々な反射特性の物体においても、同定義の類似度を用いて法線の推定ができると考えられる。

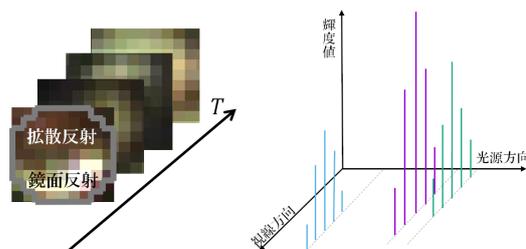


図3 ライトフィールド履歴

3.2 履歴間距離の定義

鏡面反射に対する頑健性を得るため、ある光源 l ($l = 1, 2, 3, \dots, L$) 下において物体表面上のある点 p を多視点から観測した輝度値群から最小輝度のものを選択し、拡散反射のみの輝度履歴とみなす。

具体的には、まず式 (2) の各行ベクトルから最小の輝度値を検出する。ライトフィールド履歴の行ベクトルは点 p でのある光源下 l における多視点画像の画素値を並べたものであるため、選択された最小の輝度値は拡散反射の明るさが記録されたものになる。

$$I_{min,pl} = \min(I_{p1}, I_{p2}, \dots, I_{pL}) \quad (3)$$

光源位置を変化させながら履歴を獲得しているので、これを並べたベクトルを長さが1になるように正規化すると、最終的なライトフィールド履歴 I_p は

$$I_p = \frac{(I_{min,p1}, I_{min,p2}, I_{min,p3}, \dots, I_{min,pL})^T}{\sqrt{\sum_{l=1}^L I_{min,pl}^2}} \quad (4)$$

のように表すことができる。

次に、高次元空間内の輝度履歴間の距離は、それぞれに対応した法線ベクトルの相対的な距離を表していると考えられるため、式5のように、点 p, q における各履歴 I_p, I_q 間のユークリッド距離を計算したものを履歴間距離 D_{pq} の初期値と定義する。

$$D_{pq} = \|I_p - I_q\| \quad (5)$$

3.3 距離行列の作成

この節では、多次元尺度構成法の入力である、距離行列の作成について述べる。

まず初めに、ある2点 p, q 間の履歴間距離 D_{pq} を全ての p と q の組み合わせについて計算し、保存したものを距離行列 D の初期値とする。この行列 D は入力画像の総画素数 \times 総画素数の行列になっている。

次に、距離行列 D に基づいて各ライトフィールド履歴の K 近傍集合を求める。本稿での K 近傍集合とは、ある

点のライトフィールド履歴に注目したときに、その履歴との距離に近い K 個のライトフィールド履歴群のことを指す。ここで、ライトフィールド履歴 I_p と I_q が互いの K 近傍集合に属さない場合には、 $D_{pq} = \infty$ と置き換える。互いの K 近傍集合に属さないというのは、法線ベクトルが大きく異なっていることを表しており、距離を ∞ へと置き換えるのは履歴間の最短距離の計算の際に大きく距離を離す必要があるためである。

その後、最短経路アルゴリズムにより、 p と q の全ての組合せについて最短距離を求め、最終的な距離行列 D とする。本研究では、最短経路アルゴリズムにダイクストラ法 [6] を用いた。ダイクストラ法とは、辺の重み为非負数の場合の単一始点最短経路問題を解くための代表的な最良優先探索アルゴリズムである。

3.4 次元削減と不定性の解決

前節の距離行列に対し、多次元尺度構成法 (MDS) [3] を用いて、3次元空間への埋め込みを行う。

MDS とは n 個の点 x_1, \dots, x_n の間の距離 (非類似度) がある形で定義できる場合に、その要素を要素間の距離を保存したまま多次元空間に配置する場合に有効な次元削減手法である。MDS については測定における様々な種類のノイズなどの問題を克服するために、多くの拡張手法が提案されている。Franco ら [4] は、いくつかの要素の座標の一部 (アンカー) が分かっている場合の古典的な MDS アルゴリズムを理論的に一般化した手法を提案している。

座標 $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_N]^T \in \mathbb{R}^{N \times d}$ が未知である d 次元空間内の N 個のノードが与えられた場合、式の誤差を最小化することによって要素の座標を推定する関数である。

$$\min_{\mathbf{X}} S(\mathbf{X}) = \min_{\mathbf{X}} \sum_{i < j \leq N} w_{ij} (\hat{d}_{ij} - d_{ij}(\mathbf{X}))^2 \quad (6)$$

w_{ij} は算出した d_{ij} の信頼度を定義する重みであり、 $d_{ij}(\mathbf{X}) = \|x_i - x_j\|$ はユークリッド距離である。

ストレス関数とも呼ばれる目的関数 S は、最急降下アプローチを使用するなど、様々な方法で最小化することができる。制約付き MDS では、各ステップで複素関数を大きく

する単純な凸関数を最小にする反復法である SMACOF[5]を用いて最小化される。

ここで、最初の n 個のノードが未知の位置にあり、最後の m 個がアンカーノードである $N = n + m$ 個のノードの集合を考える。 u を未知のノード、 a を既知のアンカーノードの添え字とし、座標 \mathbf{X} を以下のように置き換える。

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_u \\ \mathbf{X}_a \end{pmatrix} \quad (7)$$

Franco らは \mathbf{X} の部分集合 \mathbf{X}_a の正確な値を知っていれば、残りの未知の値 \mathbf{X}_u を \mathbf{X}_a の関数として計算することが可能であることを証明した。

本研究では光源の方向が未知であるため、多次元尺度構成法の出力結果に、回転と並進の不定性が残っている。そこで、上述した制約付きの多次元尺度構成法を用いて、この不定性の問題を解決し、次元削減を行う。

次に、不定性の解決のための MDS に用いる制約、すなわち、既知の法線ベクトルの推定方法について述べる。本手法では、物体の遮蔽輪郭線上においては法線ベクトルが既知であることを利用する。遮蔽輪郭線上（もしくはその内側）では、法線が視線方向に直交（もしくはほぼ直交）しているのに対して、遮蔽輪郭線の外側では、法線は視線方向に平行な成分を持つ。したがって、その境界においてライトフィールド履歴の履歴間距離は大きく異なっていると考えられる。

そこで、入力画像中のある画素の近傍画素における LF 履歴の履歴間距離が閾値以上である点を遮蔽輪郭線上の点とみなす。実験では、閾値は経験的に設定し、遮蔽輪郭線上の点として 4 点を抽出し、選択した遮蔽輪郭線付近の勾配から、法線ベクトルを一意に決定する。

この法線ベクトルを既知の値として制約に加え、制約付き多次元尺度構成法を用いて、不定性を解決する。制約付き多次元尺度構成法では、各ステップで複素関数を大きくする単純な凸関数を最小にする反復法である SMACOF を用いて最小化される。実験の初期値には、古典的な多次元尺度構成法の出力を採用することで、最小化に伴う反復回数を最小限に抑える。

4. 実験

本研究ではライトフィールドカメラとして Lytro 社の Lytro illum[12] を用いた。また、Lytro Illum の出力データから原画像を抽出を行うために Tao によるオープンソースのデコーダーを利用した [13][14]。なお、原画像における各マイクロレンズの中心座標の較正には、Bok[10] らのライブラリを用いた。被写体には拡散反射物体として石膏、鏡面反射が観測できるつやのある物体として木製のパンと陶器を採用した。カメラ、被写体を固定し、光源方向を上



図 4 入力画像の一例

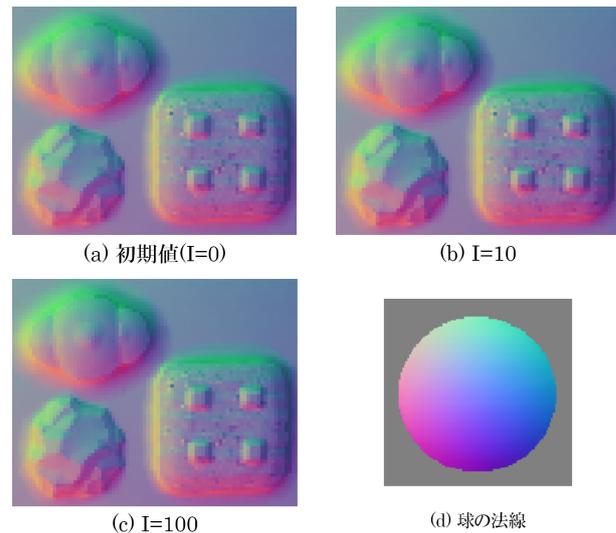


図 5 推定したシーンの法線の可視化

半球上で位置を変化させながら 100 枚の入力画像を撮影した。実験には、距離行列の算出や MDS における計算コストを考慮し、入力画像から 2×2 の範囲のごとに画素のサンプリングを行い、再構成した画像を用いる。入力画像の一例を図 4 に示す。また、ライトフィールド履歴を用いて遮蔽輪郭線を検出した結果を図 6 に示す。入力画像と比較して、シーン中の被写体の輪郭が定性的に良好に検出できていることが分かる。

本実験では、ライトフィールド履歴の K 近傍集合は経験的に $K = 300$ に設定している。また、制約付き MDS の最小化の反復回数の上限は 100 とした。

提案手法を用いて推定したシーンの法線を可視化したものを図 5 に示す。球の法線マップ (b) と提案手法により法線を推定した結果 (c) を比べると、定性的に正しく法線推定できていることが分かる。また、得られた法線ベクトルから勾配を計算し、shapelet 表現に基づいて形状復元を行った結果、図 7 のようにシーン中の物体の形状を概ね復元することができた。

5. むすび

本稿では、ライトフィールド履歴の類似度に基づいた、様々な反射特性の物体を含むシーンの法線推定手法を提案

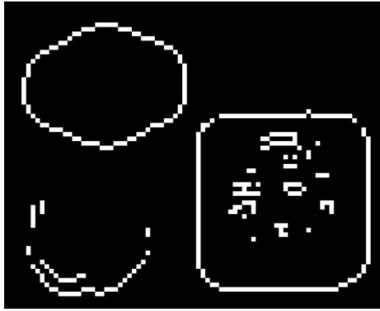


図 6 遮蔽輪郭線の検出結果

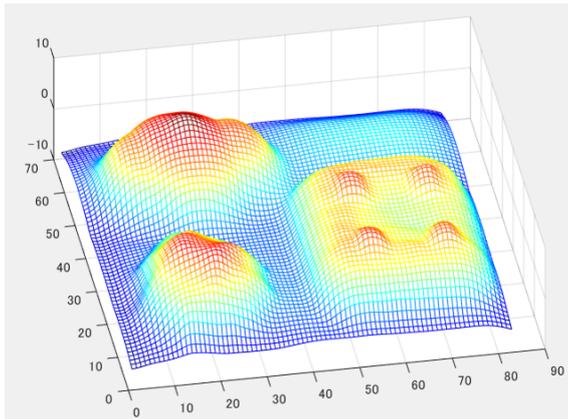


図 7 3次元復元の結果

した。提案手法では、撮影デバイスにライトフィールドカメラを使用し、シーン中の鏡面反射に対する頑健性を向上させた。また、ライトフィールド履歴を用いた遮蔽輪郭線の検出と制約付き多次元尺度構成法により、次元削減と不定性の解決を行った。実験では、光源とカメラが未校正の条件下で、実画像を用いて提案手法の有効性を確認した。今後は、より複雑な形状や反射特性の物体を含むシーンへの拡張が期待される。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H00744、および、JP17H01766 の助成を受けた。

参考文献

- [1] R. Woodham, “Photometric method for determining surface orientation from multiple images”, *Optical Engineering*, 19(1), pp.139-144, 1980.
- [2] I. Sato, T. Okabe, Q. Yu and Y. Sato, “Shape reconstruction based on similarity in radiance changes under varying illumination”, in *Proc. IEEE ICCV07*, pp.1-8, 2007.
- [3] K. Mardia, J. Kent, and J. Bibby, “Multivariate analysis”, Academic Press, 1979.
- [4] C. D. Franco, E. Bini, M. Marinoni, G. C. Buttazzo, “Multidimensional scaling localization with anchors”, 2017 IEEE ICARSC, pp. 49-54, April 2017.
- [5] J. D. Leeuw, “Applications of convex analysis to multidimensional scaling”, Department of Statistics, UCLA, 2005.
- [6] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs”, In *Numerische Mathematik 1*, pp. 269

- 271, 1959.
- [7] S. A. Shafer, “Using color to separate reflection components”, in *COLOR Research and Application*, Vol.10, No.4, pp.210-218, 1985.
- [8] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, “Light field photography with a hand-held plenoptic camera”, *Stanford Tech Report CTSR 2005-02*, 2005.
- [9] R. T. Frankot, R. Chellappa, “A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms”, *PAMI*, 10(4): 439451, 1988.
- [10] Y. Bok, H.G. Jeon, I.S. Kweon, “Geometric calibration of micro-lens-based light field cameras using line features”, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2016.
- [11] 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”, 第 127 回微小光学研究会, Vol.31, No.1, pp.17-22, 2013.
- [12] “Lytro”, <https://www.lytro.com/>
- [13] “Lytro Power Tools Beta”, <https://lytro.com/imaging/power-tools>
- [14] “open source decoder for Lytro Illum”, http://cseweb.ucsd.edu/~viscomp/projects/LF/papers/illum_full.zip