

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25540068

研究課題名(和文) 多重鏡映像による仮想多視点カメラ環境を用いた高精度全周囲3次元形状推定

研究課題名(英文) Accurate full 3D shape estimation from kaleidoscopic images

研究代表者

延原 章平 (Nobuhara, Shohei)

京都大学・情報学研究科・講師

研究者番号：00423020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は多視点画像を用いた撮影対象の3次元形状復元を、単一のカメラと複数枚の鏡を用いて行うことを目的としたものであり、具体的には被写体を万華鏡のような複合鏡環境で環境し、得られた多重鏡映像から元の形状を推定する。本研究では多重鏡映像から鏡の位置姿勢と、それによって定義される多重仮想カメラ視点の較正を行うための新たな線形解法を考案するとともに、シミュレーションによってより全周囲3次元形状計測に適した鏡の配置を設計し、また実際に計測システムを構築して考案手法の有効性を検証することができた。

研究成果の概要(英文)：This research is aimed at estimating the full 3D shape of objects using a single camera and multiple mirrors. Given kaleidoscopic images of an object, our method can estimate the mirror poses and the object 3D geometry simultaneously without using any other reference objects in the scene. We proposed a new linear algorithm for such mirror pose and 3D geometry estimation, and designed a mirror arrangement that is optimized in terms of coverage and triangulation accuracy for full 3D capture. Also we developed a real system with a kaleidoscopic mirrors with a projector-camera system to demonstrate the performance of our method.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：コンピュータビジョン 多視点幾何 鏡映変換

1. 研究開始当初の背景

本研究の目的は、多視点画像を用いた撮影対象の3次元形状復元を、単一のカメラと複数枚の鏡を用いて行う新たな高精度アルゴリズムを構築することである。これは被写体を万華鏡のような合わせ鏡の環境中で撮影することによって、1つのカメラの画像中に無数の多重鏡映像を生成させ、それらが撮影対象を相異なる仮想視点から撮影した状態と等価であること、つまり仮想多視点カメラ環境であることを利用して全周囲の形状復元を行うものである。

これにより多視点環境を用意することが難しい微細な撮影対象の3次元計測が可能となり、例えば受精卵が細胞分裂する様子を全周囲から3次元的に形状計測することが可能となるなど、これまでコンピュータビジョン分野が扱ってこなかった生命・医療分野など新たな応用へとつながることが期待できる。

2. 研究の目的

これまで単一カメラと、鏡による1回の反射による鏡像を用いて対象の3次元計測を行うためのキャリブレーション手法はいくつか提案されているが、多重鏡映像を用いて全周囲の3次元形状計測に取り組んだものは存在しない。

合わせ鏡によって発生した鏡映像(図1)それぞれについて、正確な鏡の位置・姿勢に基づいて反射方向を推定し、多重鏡映像が作る仮想多視点カメラ環境をモデル化すること、そしてそれに基づいて全周囲3次元形状復元を行うことを目標とする。

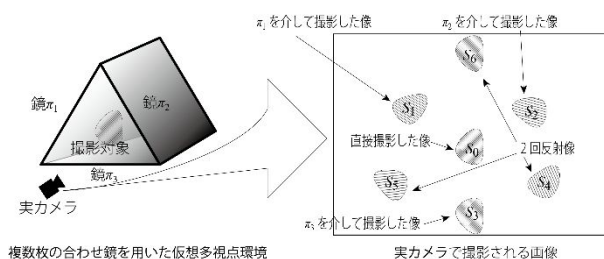


図1: 複数枚の合わせ鏡を用いた仮想多視点環境で対象を撮影すると、実カメラでは仮想カメラで撮影された画像(鏡映像)も同時に撮影される(3回目以降の反射像は省略)。

3. 研究の方法

本研究では(1)1回の反射のみを考慮した複数枚の鏡の同時位置・姿勢推定アルゴリズムの確立、(2)複数回の相互反射を考慮した多重鏡映像の投影プロセスのモデル化、(3)鏡の枚数と配置の最適性の証明、の3段階に全体を分割して、それぞれを平成25年度、26年度、27年度の研究目標とする。これは解くべき問題に妥当な制約を導入して基本

手法を開発した後に、制約を緩和した問題に取り組むことに相当する。すなわち各年度では(1)まず平成25年度では鏡の枚数と配置を固定し、かつ処理対象を撮影画像中の鏡による1回反射像のみに絞って基礎的なアルゴリズムを開発した後に、(2)平成26年度では反射回数に関する制約を取り除いて1回の観測画像からより多くの情報を引き出すことを試み、(3)続いて平成27年度では鏡の枚数と配置が3次元形状計測精度に与える影響を数学的にモデル化することによって最適な配置の導出に取り組む。

4. 研究成果

従来の研究では鏡の位置・姿勢推定に3次元形状が既知の較正物体を使用していたが、本研究では3次元形状が未知の、2組の対応点が鏡毎に得られさえすれば、線形な解放が存在することを導出することができた。これによって万華鏡のような合わせ鏡を構成する複数枚の鏡の位置・姿勢推定をより一般的な

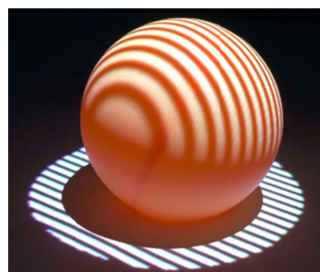


図2: 計測対象物体

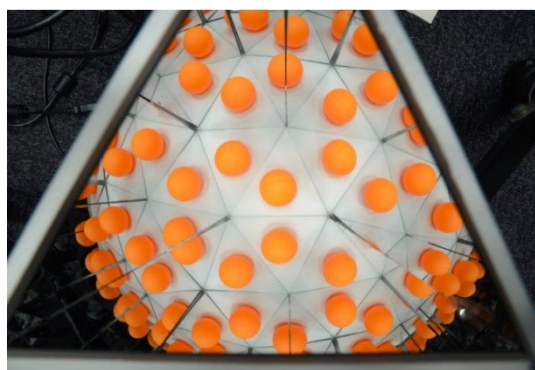


図3: 複合鏡による撮影画像

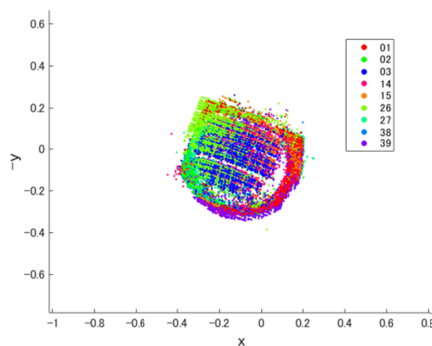


図4: 3次元形状復元結果。色は三角測量に寄与した鏡を示す。

状況でかつ正確に行うことが可能となることを示すことができ、さらにこの原理に基づいて、多重鏡映像を入力とした全周囲形状3次元計測を実現した(図1~4)。

具体的には、図5のように1枚の鏡を介してカメラとその鏡像である仮想カメラが同一点を観測しているとき、カメラ間の並進ベクトルは鏡の法線に一致し、また相対姿勢を表す回転行列はハウスホルダー変換に他ならない。

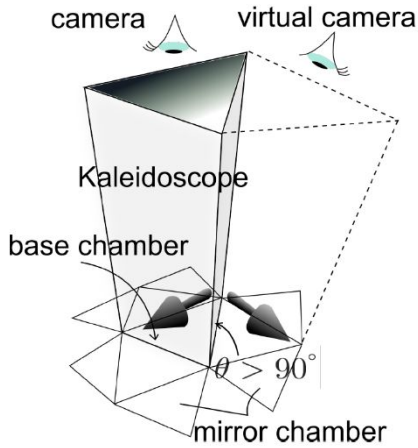


図5：実カメラと仮想カメラの関係

このとき、本来任意の2台のカメラ間の位置・姿勢を線形推定するためには、対応点が8点以上必要であることが知られているが、上記の制約をさらに加えることによって、これが2点以上で実行可能となることが以下のように証明できる。

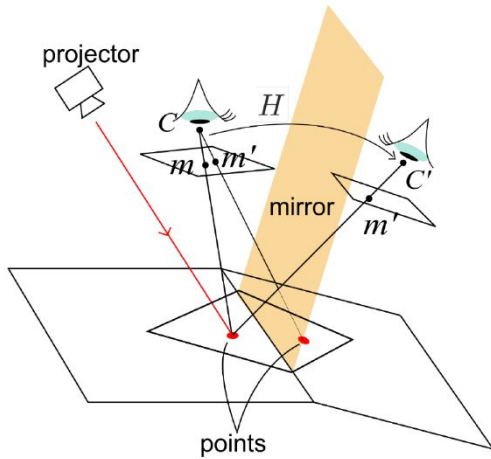


図6：プロジェクタを用いた対応点推定

証明 図6に示すように、3次元点Mを写した画素mと、Mの鏡像であるM'を写した画素m'が与えられたとき、カメラの内部パラメータをAとすると $m \sim AM$ および $m' \sim AM'$ が成り立つ。ただし \sim はスケールの不定性を除いて両辺が等しいことを示し、内部パラメータAは既知であるとする。

ここで鏡の法線nによる鏡映変換 $H = I - 2nn^T$ を介して、 n, M, HM' が同一平面に存在することから

$$(n \times M)^T \cdot HM' = 0$$

であり、これに $m \sim AM$ および $m' \sim AM'$ を代入すると

$$m^T A^{-T} [n]_{\times}^T H A^{-1} m' = 0$$

を得る。ただし $[\cdot]_{\times}$ は外積を表す歪対称行列である。

このとき

$$F = A^{-T} [n]_{\times}^T H A^{-1}$$

とすると、

$$\begin{aligned} E = A^T F A &= [n]_{\times}^T H = [n]_{\times}^T (I - 2nn^T) \\ &= [n]_{\times}^T \end{aligned}$$

は歪対称行列であり、スケールの任意性から自由度は2である。またこのことからF行列も自由度2である。したがって

$$m^T F m' = 0$$

より、対応点1組につきFに関する1本の拘束式が得られるため、2組以上の対応点を得られると線形に解くことができる。

具体的には

$$F = \begin{pmatrix} 0 & f_1 & f_2 \\ -f_1 & 0 & f_3 \\ -f_2 & -f_3 & 0 \end{pmatrix}$$

$$m = (u, v, 1)^T$$

$$m' = (u', v', 1)^T$$

としたとき、

$$m^T F m' = 0$$

は

$$(uv' - u'v \quad u - u' \quad v - v') \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} = Uf$$

となるため、2組以上の対応点を得られることで行列Uの行数が2以上となれば、fは行列Uの零空間、すなわち特異値0に対応する右特異ベクトルとして得ることができる。行列Fが得られることで

$$E = A^T F A = [n]_{\times}^T$$

によって、行列Eを得ることが可能となり、さらに定義より

$$E^T n = [n]_{\times} n = 0$$

であるため、nはE^Tの最小固有値に対応する固有ベクトルとして求めることができる。以上より2組の対応点を入力として、鏡の法線nを線形に得ることができた。

なお現実には計測ノイズの影響によって

上記行列 U の特異値が正確に0となることは一般的に期待できず、したがって行列 F のランクも2ではなく3になってしまう。そこで得られた行列 F の特異値分解を

$$F = U \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} V^T$$

としたとき、

$$F \approx U \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} V^T$$

によって行列 F のランクが2となるように修正する必要がある。

(証明終わり)

以上の原理に基づくと、プロジェクタを導入して物体表面の1点を照射する場合(図6),この照射点が移動する様子を観測すれば、鏡の位置姿勢が推定できると同時に、照射された対象表面の形状も三角測量によって知ることができる。

ただし対象表面上を1点ずつ照射するアプローチでは対象表面上を走査するために O (画像の幅×画像の高さ)のオーダーの枚数で画像を撮影することとなるため、現実的ではない。そこで図7に示すようなグレイコードによって画素座標を符号化したパターン光を照射し、これを復号することによって撮影枚数を $O(\log(\text{画像の幅}) + \log(\text{画像の高さ}))$ に抑える手法が一般的に知られている。

以上の考察に基づき、図8に示す複合鏡を備えたプロジェクタカメラシステムによって撮影された画像(図3)を入力として、本研究によって考案されたアルゴリズムによって推定された3次元形状が図4である。なおカメラはニコン D7000、鏡は保護層による屈折の影響を除外するために表面反射鏡を使用した。またプロジェクタは鏡を介しての照射となることでプロジェクタから物体までの距離が不均一となり、結果として通常のレンズを備えた物体が合焦範囲に収まらないことを考慮して、パンフォーカス型のレーザープロジェクタを使用した。

なおこのシステムを設計する際には、レイトラッキングによるシミュレーションによって最適な鏡の配置についても検討を行い、3次元形状計測精度と対象の全周囲撮影を両立できる鏡配置を採用することができた。

このように本研究では、新たな鏡の位置姿勢推定原理の考案と、それに基づいた実際のシステム設計およびこれを用いた形状計測の評価を行うことができた。

5. 主な発表論文等

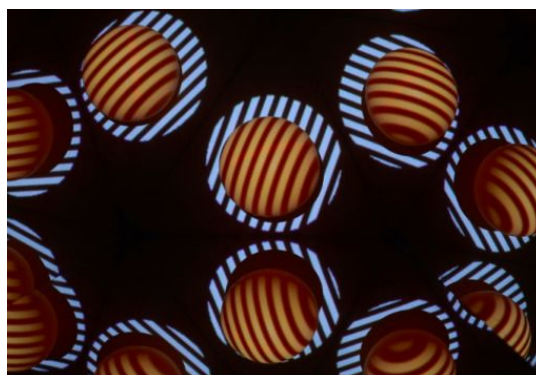


図7：符号化パターン光を用いた対応点推定の様子

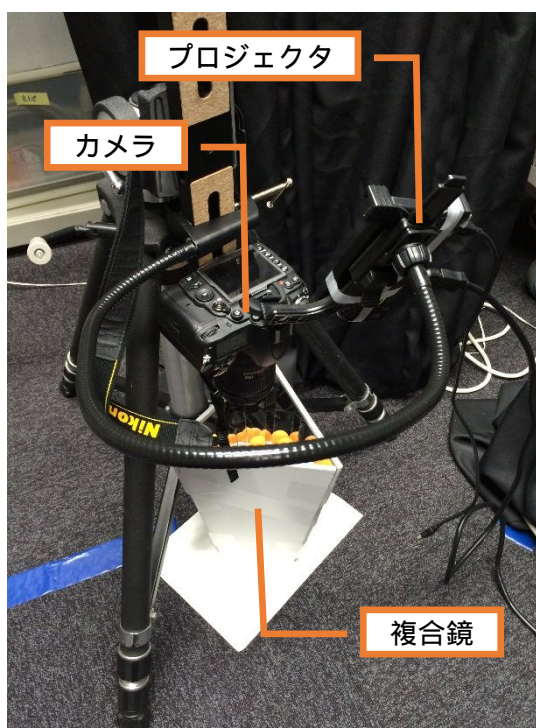


図8：複合鏡を備えたプロジェクタカメラシステム

(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1件)
Kosuke Takahashi, Shohei Nobuhara and Takashi Matsuyama: Mirror-based Camera Pose Estimation Using an Orthogonality Constraint, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.8, pp.11-19, 2016.

〔学会発表〕(計1件)
柏野孝士, 延原章平, 松山隆司: 複合鏡を用いた単一深度カメラによる全周囲3次元形状計測, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM), 2014-CVIM-192(5), pp. 1-7, 2014.5.15.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

延原 章平（NOBUHARA, Shohei）

京都大学大学院情報学研究科・講師

研究者番号：00423020

(2)研究分担者

(3)連携研究者