

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500213

研究課題名(和文)計測位置提示型物体情報計測システムの開発

研究課題名(英文)Development of Object Information Measurement System Presenting Measurement Location

研究代表者

浮田 浩行(UKIDA, Hiroyuki)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・講師

研究者番号：60284311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、物体の全周における形状や色等を計測するシステムについて検討を行う。様々な物体の形状を計測するため、2台のカメラによる2眼ステレオ法と線光源を用いたフォトメトリックステレオ法を組み合わせた形状計測手法について提案する。そして、この方法による合成画像を形状計測実験を行い、有効性を確認した。また、部分形状を精度良く統合する方法や、超音波を用いた逆GPS方式による計測装置の3次元位置測定方法および計測位置を提示する方法についても検討を行なった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we discuss a system to measure over all of 3D shape and color of object. In order to measure various object shapes, we propose a shape measurement method which combines the binocular stereo method using two cameras and the photometric stereo method using linear light sources. We demonstrate the shape measurement experiment using synthetic images by proposed method and confirm the effectiveness of it. Moreover, we also discuss that the integration method of partial estimated object shapes, 3D positioning method by inverted GPS (Global Positioning System) using ultrasonic wave and the measurement locations presentation method.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：形状計測 フォトメトリックステレオ法 2眼ステレオ法 部分形状の統合 超音波センサ

1. 研究開始当初の背景

(1) 形状計測の必要性について

物体の3次元形状を計測する技術は、様々な分野で必要とされる。例えば、CAD/CAM システムにおける構造解析やリバースエンジニアリング、美術品や伝統工芸品等をデジタルデータとして保存・閲覧する「デジタルアーカイブ」、また、最近では、安価な3Dプリンタが販売されており、その入力データを実物から作るためにも、形状計測技術が利用されている。これらの分野では、高速かつ高精度な形状計測だけでなく、より現実に近い物体情報として、物体表面の色や質感を表す反射特性等も精密に計測することも求められている。

(2) 形状計測方法について

物体形状を計測する基本的な方法は、左右に並べた2台のカメラの画像から、三角測量の原理で物体までの距離を計測する「2眼ステレオ法」(以下、ステレオ法)である。この方法では、左右の画像で物体表面上の同じ点(対応点)を求める必要があり、色や明度が急激に変化する部分が計測可能である。しかし、色や明度が一樣な場合は、対応点が求められないため計測できない。

一方、照明の位置を変えて撮影した複数の画像から、物体の形状を求める「フォトメトリックステレオ法」(以下、PS法)がある。この場合、カメラは1台のみ使用する。このような形状計測装置として、我々は、イメージスキャナ内部に移動可能な複数の蛍光灯光源が配備されているものを考案し、各光源を様々な位置に移動して撮影した複数の画像から、PS法を元にした形状、色、光沢の計測手法を提案し、物体形状等の計測結果を示した。しかし、ステレオ法とは逆に、PS法は物体表面の色等が一樣または徐々に変化する部分は計測できるが、急激に変化する部分は難しい。そこで、ステレオ法とPS法を組み合わせることで、より様々な物体について、形状や色、光沢等を計測可能な装置を開発できると考えられる。

(3) 部分形状の統合について

物体全体の形状等を取得するには、カメラを動かしながら部分形状を取得し、それらをつなぎ合わせるようになる。そのための方法として、入力画像や推定形状について、類似部分を見つけ、パズルのように貼り合わせる方法が用いられる。しかし、類似部分が見つけられないと、正しく形状を求められない。一方、計測装置の3次元位置も分かれば、類似部の探索範囲を絞り込み、より正確に統合することができる。そのためには、3次元空間中に存在する計測装置の3次元位置を計測する方法の検討も必要となる。さらに、どの方向から部分形状を計測すればよいかは、物体形状にも依存し、あらかじめ決められない。そのため、不足部分を補う方策も含めた

計測手法も必要である。

2. 研究の目的

前述の背景から、本研究では、ステレオ法とPS法を組み合わせた装置を開発し、物体の様々な方向から得られた形状や色、光沢等の部分情報を統合し、物体全体の形状等の情報(以下、全周情報)を取得するシステムを開発する。この目的を達成するため、具体的には次の4項目について研究を進める。

- (1) ステレオ法とPS法を組み合わせた計測装置の開発
- (2) 部分情報の統合方法の開発
- (3) 超音波逆GPS方式による3次元位置計測方法の開発
- (4) 計測位置提示方法の検討

(1)については、2台の小型カメラと蛍光灯やLEDによるライン照明を備えた装置について検討し、ステレオ法とPS法を組み合わせた形状計測手法を開発する。(2)については、部分的に得られた全周情報を精度良く統合する方法の開発である。特に、部分形状間で誤差がある場合の補正方法について検討を行う。(3)については、超音波を用いた距離計測装置を元に、逆GPS方式による3次元位置計測手法を検討する。そして、(4)については、部分形状が得られていない部分を計測するために、その計測位置を特定する方法について検討する。

3. 研究の方法

(1) ステレオ法とフォトメトリックステレオ法を組み合わせた形状計測装置の開発

① 撮像系の構成と光学モデル

本研究における形状計測装置は、2台のカメラと線光源から構成される。図1に本研究で想定する撮像系の構成を示す。物体の部分形状を計測する場合、2台のカメラは静止し、線光源を様々な位置に動かして、複数の画像を撮影し、形状等を計測する。光源の配置について図2に示す。本研究では、半径 R_1 および R_2 の2つの軌道において、あらかじめ決められた様々な θ の位置に光源を動かし画像を撮影する。

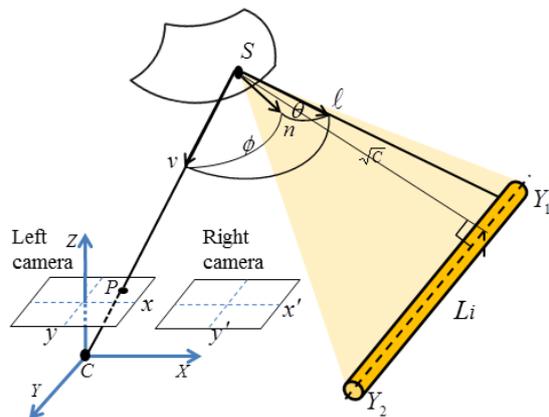


図1：撮像系

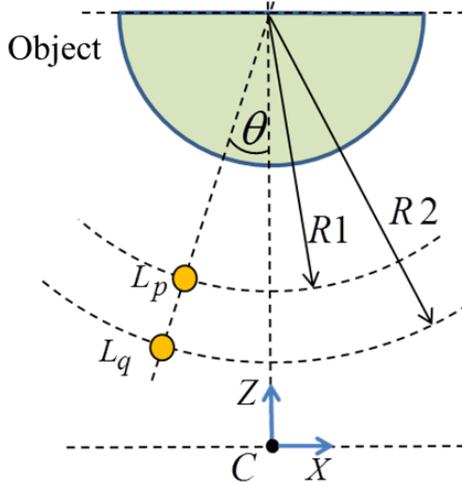


図 2 : 光源の配置

画像から形状を求めるためには、物体表面の形状と反射光強度に関する光学モデルを用いる必要がある、以下のように表すことができる。

$$P_{ic}(\tilde{Z}_s, \tilde{n}, \tilde{\rho}_c) = a_c \cdot I_{ic}(\tilde{Z}_s) \cdot \tilde{\rho}_c \cdot f_i(\tilde{Z}_s, \tilde{n}) + \Delta_c \quad (1)$$

$(c = \{r, g, b\})$

ここで、 P_{ic} が画像中の反射光強度、 a_c, Δ_c が光電変換パラメータ、 $\tilde{\rho}_c$ が物体表面の拡散反射特性(色)を表す。 I_{ic} は、線光源の照明光強度であり、光源から物体表面までの距離に反比例して減衰する特性がある。そして、 f_i は、物体表面の反射特性であり、光源方向と物体表面の法線ベクトルとの余弦として表される。

本研究では、この光学モデルを用いて、カメラから物体表面までの距離 \tilde{Z}_s 、物体表面の法線ベクトル \tilde{n} 、拡散反射特性 $\tilde{\rho}_c$ を物体表面上の全ての点について求めることになる。ここでは、次に示す各推定方法を実現するソフトウェアを開発し、実際に求めることが可能であるかどうかを検証する。

② 2台の線光源を用いたPS法による形状の推定

図2に示したように、物体表面から見て同一方向に2台の光源が配置される場合、それぞれの光源で得られる反射光強度モデルの比から、 \tilde{Z}_s を未知数とする、以下の式が得られる。

$$\frac{P_{qc} - \Delta_c}{P_{pc} - \Delta_c} = \frac{a_c \cdot \tilde{\rho}_c \cdot I_{qc}(\tilde{Z}_s) \cdot f_q(\tilde{Z}_s, \tilde{n})}{a_c \cdot \tilde{\rho}_c \cdot I_{pc}(\tilde{Z}_s) \cdot f_p(\tilde{Z}_s, \tilde{n})} \approx \frac{I_{qc}(\tilde{Z}_s)}{I_{pc}(\tilde{Z}_s)} \quad (2)$$

これより、以下の評価関数が得られ、これを最小化することで、 \tilde{Z}_s が求められる。

$$F(\tilde{Z}_s) = \sum_{c=\{r,g,b\}} \left\{ (P_{qc} - \Delta_c) \cdot I_{pc}(\tilde{Z}_s) - (P_{pc} - \Delta_c) \cdot I_{qc}(\tilde{Z}_s) \right\}^2 \quad (3)$$

③ 2眼ステレオ法による形状の推定

前述のPS法では、物体表面のエッジ部分について正しく形状を求めることができない。この部分については、2眼ステレオ法で求める。手順を以下に示す。

1. 左カメラで撮影された画像に対し、LOGフィルタを適用して、エッジ部分を抽出する。
2. 抽出されたエッジ部分に対し、左右の画像間での対応点をテンプレートマッチングで探索する。マッチング時の類似度の算出にはカラー画像の画素値を用いたSAD(Sum of Absolute Difference)を用いる。
3. 得られた左右の画像の対応点の x 座標 x_l, x_r から以下の式で奥行きを求める。ここで、 f はカメラの焦点距離、 b はカメラ間の距離(基線長)である。

$$\tilde{Z}_s = \frac{f}{x_l - x_r} b \quad (4)$$

④ 部分形状の抽出

PS法による形状の算出においては、物体表面上の点から見て、2台の光源が同一直線上にある場合は、ほぼ正しく求められる。しかし、そうでない場合は、式(2)が成り立たないため、正しく形状を求めることはできない。そこで、図3のように、2台の光源で示される直線に対し、 $\pm \theta_d$ の範囲に入る部分を推定範囲とする。この部分において、エッジ部分は2眼ステレオ法による結果を、それ以外は、PS法による結果を推定形状とする。光源の位置を変えて、多数の部分形状を求め、それを統合することで全周形状を求める。

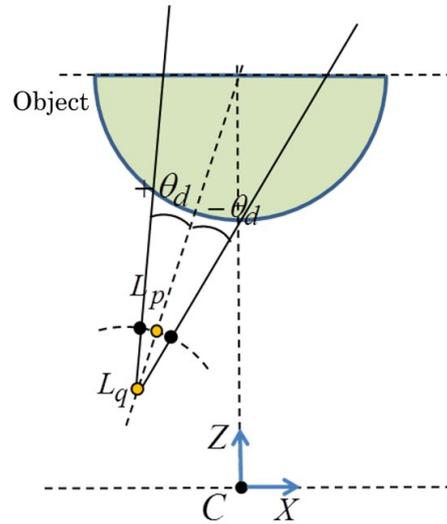


図 3 : 部分形状抽出

(2) 部分情報の統合方法の開発

前述のように、本研究による形状推定においては、あるカメラ位置において、多数の部分形状が得られる。この場合、カメラ位置は固定であるため、部分形状の座標系は同一であり、基本的に部分形状を並べるだけで統合

は可能となる。また、カメラ位置を変更した場合も、その3次元位置と方向が既知であれば、それぞれのカメラ位置による部分形状を並べるだけでよい。ただし、いずれの場合においても、特に部分形状の境界部分では、同じ座標において複数の推定結果が得られる場合があり、加えて、計測誤差のため、同じ値になっていないことがある。

そこで、部分形状の特に境界部分の統合方法として、2次曲面近似を用いる。部分形状をあらかじめ決められたサイズの矩形領域に分割し、求められている形状の3次元座標を次式で表される2次曲面のモデルに当てはめて係数を求め、このモデルで表される形状を推定形状とする。

$$z(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f \quad (5)$$

(3) 超音波逆 GPS 方式による3次元位置計測

図4に、超音波逆 GPS によって3次元位置を求めるための装置の構成を示す。ここでは、カメラ等の計測装置側に超音波の送信器を取付け、また、計測範囲を取り囲むようにして決められた3つ以上の位置に、超音波受信機を取り付ける。送信器から発せられた超音波を、各受信機で受信するまでの時間を計測することで、送信器から各受信機までの距離が求められ、それを用いて、GPS と同様な方法で3次元位置を求めるものである。

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + (Z - z_i)^2 = (f \cdot t_i)^2 \quad (6)$$

ここで、 (X, Y, Z) は送信器の座標、 (x_i, y_i, z_i) は、受信機 i の3次元座標、 t_i は計測された超音波受信までの時間、 f は音速である。 $i \geq 3$ の場合に、全ての式を最小化することで、送信器の座標 (X, Y, Z) を求める。

一般的な超音波距離計測器は、超音波が対象で反射して戻ってくるまでの時間を計測して距離を計る。この場合、送信器と受信器が一つとなっており、時間の計測が容易である。一方、本研究では、送信器と受信器が離れているため、時間を計測するためのタイミングを別の方法で合わせる必要がある。ここでは、小型の無線通信機を双方に取り付け、無線による通信で超音波発射のタイミングを合わせることにする。

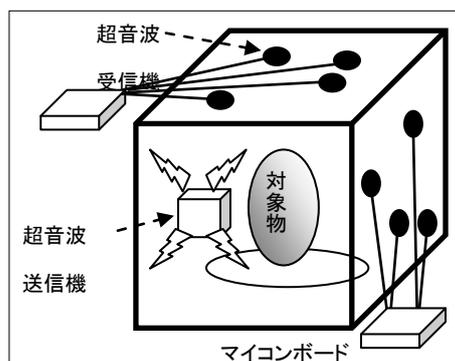


図4：超音波逆 GPS の構成

(4) 計測位置提示方法

物体の全周形状を求めるためには、部分形状を徐々に統合していくことになる。現在、どの程度まで全周形状が得られているか、あるいは得られていない部分はどこかを示すため、ここでは、3次元凸包を用いる。これによる計測位置提示アルゴリズムは、次のようになる。

- ① ある段階まで得られた部分形状を用いて、それを囲むような3次元凸包を求める。
- ② 凸包の中心から表面に向けて、あるベクトルを考えた時、そのベクトルが、部分形状と交差すれば、その部分は形状が得られていることになる。これによって部分形状の有無を表すマップが3次元凸包表面に得られる。
- ③ 凸包表面を世界地図のように2次元平面に展開し、部分形状が得られていない領域を求める。
- ④ 求められた各領域の中心に対応する3次元空間内での方向を、次の計測位置として提示する。

4. 研究成果

(1) ステレオ法と PS 法を組み合わせた形状計測と部分形状の統合

ステレオ法と PS 法を組み合わせた形状計測方法についてその有効性を確認するため、合成画像を用いた形状計測実験を行なった。図5は、入力画像の一部であり、4色に分けた半球を光源の位置 θ を変えて左カメラで撮影したと想定した場合の合成画像である。ここで、 $R_1 = 350\text{mm}$ としている。

図6は PS 法のみによる形状推定結果、図7はその誤差分布、図8は2眼ステレオ法によるエッジ部分の形状推定結果である。そして、図9 (a)は、部分形状を統合した結果であり、(b)は、その誤差分布である。ただし、この結果は2次曲面による補正は行っていない。2次曲面による補正を行うことで、形状誤差は、図9の場合(6.48)よりも小さい値(5.16)となったが、色の推定結果は、逆に誤差が大きくなる結果(誤差 0.390 が 0.481)となった。これは二次曲面に補正した多くが平面の推定結果になったためである。

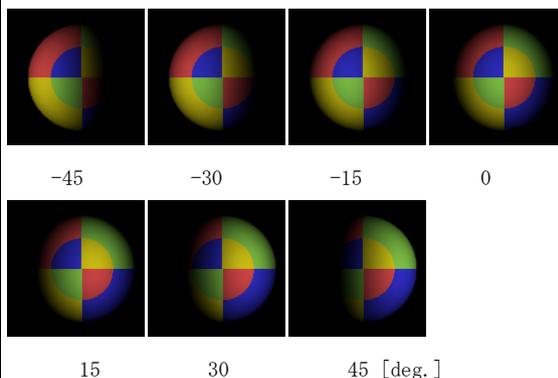


図5：合成入力画像（左カメラ）

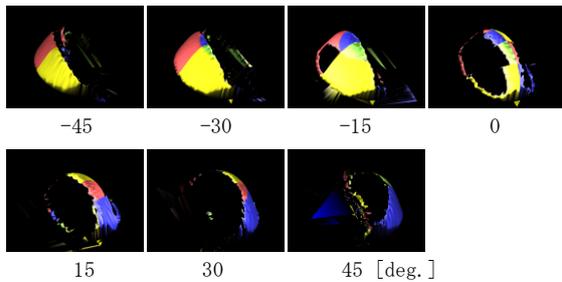


図6：推定された形状と色

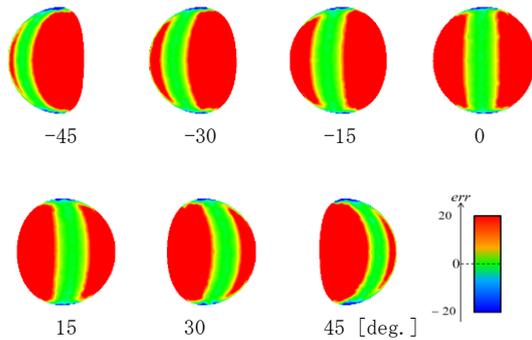


図7：推定形状の誤差分布

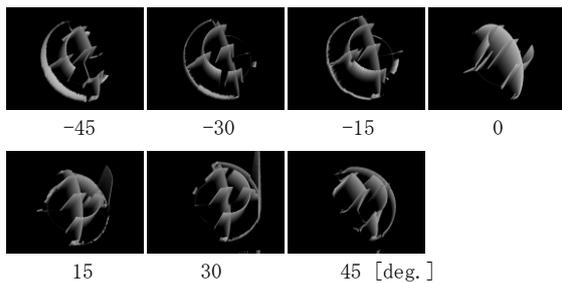


図8：エッジ部分の奥行き推定結果

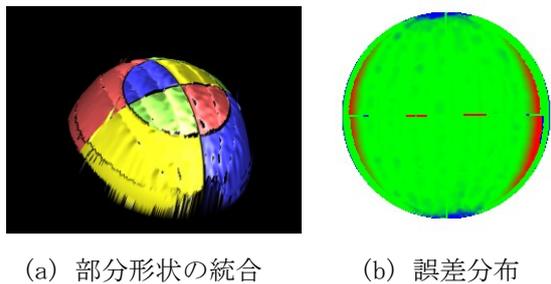


図9：形状統合結果

(2) 超音波逆 GPS 方式による 3 次元位置計測と計測位置提示方法

図10が、超音波による距離を計測するために試作した装置の写真である。送信器側と受信機側を分離して、それぞれをマイコンボードで制御するようにしている。これによって、想定する計測範囲である2~3m程度の距

離であれば超音波の送受信は十分に可能であることを確認した。

一方、無線送受信機も搭載しているが、これを用いた、超音波の送受信のタイミングを合わせる部分で、時間的なばらつきが生じたため、正確な距離を算出するまでには至っていない。この問題を解決するためには、実際の GPS 衛星と同様に、グローバルな計時機能も加える必要があると考えられる。今後、この点について検討し、超音波逆 GPS 方式による 3 次元位置計測を実現することを考えている。また、計測位置提示方法についても、計測装置の 3 次元位置が得られないため、実証できていないことから、この点についても、今後、合わせて検討する予定である。

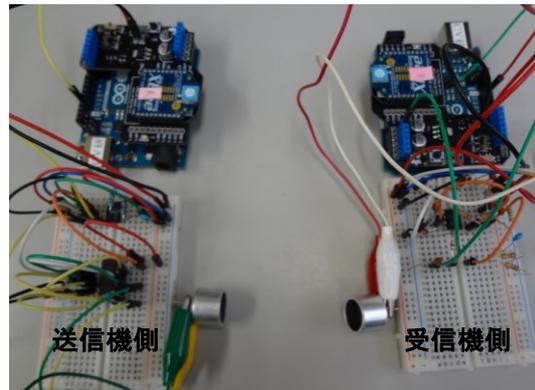


図10：超音波距離計測試作機

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)

〔学会発表〕(計9件)

- ① 浮田 浩行, 阿地 恵太, 吉田 章人, 2台のカメラと線光源を用いた3次元形状復元方法の検討, 動的画像処理実利用可ワークショップ 2014 (DIA2014), 2014年3月6日~2014年3月7日, 熊本大学(熊本県)
- ② 浮田 浩行, 3D Shape Reconstruction by Photometric Stereo Method Using Linear Light Sources, The 20th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2014), 2014年2月4日~2014年2月6日, 沖縄工業高等専門学校(沖縄県)
- ③ 浮田 浩行, 阿地 恵太, 吉田 章人, フォトメトリックステレオ法と2眼ステレオ法を組み合わせた形状復元, 計測自動制御学会 第18回パターン計測シンポジウム, 2013年11月20日~2013年11月21日, 長野県 上諏訪温泉 諏訪湖ホテル(長野県)
- ④ 浮田 浩行, 阿地 恵太, 吉田 章人, 3D Shape Reconstruction under Multiple Linear Light Sources, SICE Annual

- Conference 2013, 2013年9月14日～2013年9月17日, 名古屋大学(愛知県)
- ⑤ 阿地 恵太, 吉田 章人, 浮田 浩行, 複数の線光源とステレオカメラを用いた三次元形状計測, 第18回知能メカトロニクスワークショップ, 2013年8月27日～2013年8月28日, 香川県産業技術センター(香川県)
- ⑥ 阿地 恵太, 吉田 章人, 浮田 浩行, 複数の線光源と単眼カメラを用いた三次元形状計測, 電気学会情報処理点次世代産業システム合同研究会, 2013年3月29日～2013年3月30日, 徳島大学(徳島県)
- ⑦ 浮田 浩行, 原田 崇志, 3D Shape, Color and Specular Component Estimation Using Image Scanner with Multiple Light sources: Optimal Light Position Estimation, The 19th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2013), 2013年1月30日～2013年2月1日, Inha University(大韓民国)
- ⑧ 原田 崇志, 浮田 浩行, 複数光源イメージスキャナによる形状・色・光沢の復元と適切な光源配置の検討, 精密工学会第17回知能メカトロニクスワークショップ, 2012年8月30日～2013年8月31日, 広島工業大学(広島県)
- ⑨ 大原 丈二, 原田 崇志, 浮田 浩行, 複数光源イメージスキャナによる形状・色・光沢の推定と適切な光源配置の検討, 日本機械学会 中国四国支部 講演会, 2012年3月8日, 広島大学(広島県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浮田 浩行 (UKIDA, Hiroyuki)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・講師
研究者番号: 60284311