

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20500170

研究課題名（和文）鏡面反射する物体の3次元形状の計測方法

研究課題名（英文）3D Measurement of Specular Surfaces by Stereo Cameras and Display

研究代表者

徐 剛 (Xu Gang)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：90226374

研究成果の概要（和文）：

本研究では、ステレオカメラ・ディスプレイを使うことにより、従来拡散反射面しか3次元計測できなかった限界を乗り越え、鏡面反射面に対しても3次元計測ができるように発展させた。更に、プロジェクタも併用することにより、鏡面反射・拡散反射の混合反射面に対しても3次元計測ができるように拡張した。理論的には、ディスプレイに縦方向と横方向の位相シフトを表示観測することにより鏡面反射してくる光が3次元空間のどこから飛んできたかを全て計算することができ、鏡面上の各点において入射角と反射角が等しいことを利用すれば、各点の3次元座標及び法線方向を一意に決めることができた。更に、プロジェクタを併用するとき、鏡面反射成分と拡散反射成分の双方を用いて3次元形状の最尤推定法を提案し、その有効性を確認した。本研究の成果は鏡面反射する金属部品が多い工業計測に新しい知見をもたらした。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we proposed a new approach to 3D reconstruction of specular surfaces by using a stereo head and a display, overcoming the previous technical limitation that only Lambertian surfaces can be reconstructed. By showing both horizontal and vertical phase shift on the display, we can determine the 3D position of every light ray coming from the display and reflected by the specular surface. And using the constraint that the angle of incidence equals the angle of reflection, we successfully determined the 3D position and normal of each specular surface point. In addition, we also proposed to treat both specular reflection and Lambertian reflection in a unified maximal likelihood framework using an additional projector, and verified its effectiveness. These results can be used in industrial metrology where specular metal parts are ubiquitous.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：コンピュータビジョン、パターン認識、3次元画像処理、ロボティクス

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：計測工学、画像認識、スマートセンサ、応用光学、幾何学

1. 研究開始当初の背景

カメラを用いた非接触 3 次元形状計測とモデリングは、工業、コンピュータグラフィックスと文化財保存などの分野で広く利用されつつある。製造業においては、製品の 3 次元形状を計測することにより、CAD モデルを得るリバースエンジニアリングと、製造のもととなる CAD と実際の形状とを比較するインスペクションの用途が一般的である。形状検査では従来の接触型 3 次元測定器の使用が一般的であったが、最近、非接触型に変わってきている。コンピュータグラフィックスやゲームの世界では、実在する物体のリアリスティックな画像を得るのに、物体の 3 次元形状を計測し、テクスチャを貼り付ける手法が利用されている。更に、文化財保存では、文化財の 3 次元形状を計測したり、その複製品を作ったりすることが増えてきている。カメラを用いた 3 次元形状計測については多くの研究成果が報告されている[1]だけでなく、商用システムも多数市場で販売されており、技術的にも成熟してきたと言って良い。

これらのシステムはほとんど例外なく、3 角測量の原理に基づいている。計測対象の物体に対して、プロジェクタで縞模様を投影し、縞模様のままカメラで撮影する。カメラ画像で縞模様を解析することにより、画像上の点とプロジェクタ画像上の点との対応づけを行うことができる。そうすれば、プロジェクタの焦点とプロジェクタ画像上の点を結んだ直線、カメラの焦点とカメラ画像上の点を結んだ直線と、プロジェクタ焦点とカメラ焦点を結んだ直線の 3 本が 3 角形を形成しており、3 角測量の原理により、対応点の 3 次元空間における座標を求めることができる。

しかし、上記のシステムは対象物体が拡散反射の特性を持っていることを前提としている。つまり、プロジェクタで投影された物体表面の縞模様は、カメラの位置姿勢によらず一定であることが暗黙の前提である。たしかに多くの物体は拡散反射であるが、鏡や金属、ガラスなど鏡面反射する物体の場合は、カメラ画像に写る縞模様がカメラの位置姿勢によって変化するため、上記の原理がそのまま適用できず計測はできなくなる。パウダーを鏡面反射する物体に噴射することで拡散反射を作り出して計測を行うことが一般的である。パウダーを噴射して最後にきれいに拭き取ることが面倒だけでなく、パウダーの厚みが計測精度に悪影響を与える。現状では鏡面反射する物体の 3 次元計測は大変厄介な問題となっている。

そこで、本研究は鏡面反射する物体の 3 次元計測に新しい原理を持ち込み、問題を正面から取り組んでいく。プロジェクタのかわりに、平面のディスプレイを用いる。平面ディスプレイに縦方向と横方向の縞模様を順次

表示し、鏡面反射する物体に反射させ、カメラで撮影する。次に、カメラ画像上の点と平面ディスプレイ上の点との対応づけを行う。視線方向と反射方向は物体表面の法線方向と共平面であり、かつ法線方向によって 2 分される関係にある。

従来の研究においては、上記の関係に基づく 1 カメラと 1 ディスプレイのアルゴリズムが提案されていたが、1 カメラだけの場合、この関係から解が一意に得られないため、追加的に物体表面が滑らかである拘束条件を導入し、なんとか解を導いているが、拘束条件の実装の仕方によって求めた形状が異なったりするので、本当の問題解決には至っていない。

更に、鏡や金属、ガラスは、必ずしも 100% の鏡面反射ではなく、一定の割合で同時に拡散反射もしている。金属の表面反射特性は、鏡面反射と拡散反射を異なる割合で混じったものであると考えられる。このような表面を混合反射面と呼ぶことにする。そのような、様々な割合で拡散反射と鏡面反射が同時に存在する場合の 3 次元形状計測をどのように行ったら良いかは、まだどこも発表しておらず、本研究で新しい提案を行い、実験を通じて有効性を確認する。

2. 研究の目的

そこで、本研究は 2 つのカメラを利用すれば、解が一意となることを明らかにする。2 カメラとディスプレイを用いた鏡面反射する物体の 3 次元形状計測のアルゴリズムを確立し、プロトタイプシステムを完成させる。

更に、2 カメラとディスプレイに加えて、プロジェクタも併用すれば、金属のような鏡面と拡散の混合反射面に対しても統一的に 3 次元形状復元をする手法を提案する。

3. 研究の方法

本研究の理論的基礎は、ディスプレイに縦方向と横方向の位相シフトを表示観測することにより鏡面反射してくる光が 3 次元空間のどこから飛んできたかを全て計算できること、鏡面上の各点において入射角と反射角が等しいことを利用すれば、各点の 3 次元座標及び法線方向を一意に決めることにある。

更に、撮影した画像の各画素に対して、その輝度に対して正弦波を当てはめ、当てはめられた正弦波の振幅および当てはめ残差を用いて、その比率を SN 比とし、位相の品質を評価する。拡散反射表面であればあるほど、プロジェクタのパターンには強く反応する (SN 比が高い) が、ディスプレイにはあまり反応しない (SN 比が低い)。一方、鏡面反射表面であればあるほど、ディスプレイには強く反

応する（SN比が高い）が、プロジェクタのボタンにはあまり反応しない（SN比が低い）。このSN比を用いて物体表面の反射特性を評価する手法を提案した。

システムの流れは下記の通りである。

(1) 2台の高精細工業計測用デジタルカメラのステレオヘッドに対して、カメラの内部パラメータ、歪み係数、及びカメラ間回転と並進の外部パラメータを求め、カメラ校正を行う。

(2) 液晶ディスプレイで横方向と縦方向のそれぞれに正弦波形の位相をシフトしながら、鏡面反射物体に写っている縞模様を撮影する。

(3) カメラは同時にディスプレイも捉えるように配置して、ディスプレイを直接写した各画素の光がディスプレイ上のどの点からきた光かを求める。

(4) 校正済みのステレオ画像に対してレクティフィケーション（Rectification）を行った後、水平なエピポーラ線に沿って通常のステレオ対応を行うことで、ディスプレイ上の各点の3次元座標を求める。これをカメラとディスプレイ間の校正という。

(5) 一方、計測物体を撮影した画像上の縞模様の位相を解析することで、各画素の光はディスプレイ上のどの点から鏡面反射してきた光かを求める。

(6) ディスプレイ上の各点の3次元座標が既知なので、1枚の画像しかない場合、各点の法線方向は、計測物体の各点の奥行きに関する数として表せるが、一意に決まらない。そこで、他視点の画像がもう1枚あると、連立することで一意に解ける。すなわち、共通の法線方向を持つ解を求める。

(7) 計測対象を回転ステージに載せ、回転させるたびに計測を行うことで、計測対象の全方位3次元形状が得られる。そのためカメラと回転台との幾何関係を校正する。

(8) 従来は、ディスプレイはカメラから直接見える位置に設置する必要があったが、計測範囲に大きな制限となる。そこで、鏡を利用し、カメラと並んで置くディスプレイとカメラとの幾何関係を校正する。

(9) 拡散反射も一部する混合表面形状の計測については、プロジェクタを併用する。プロジェクタとディスプレイの双方から位相シフトを別々に発生させ、ステレオカメラで撮影する。

(10) 具体的には、それぞれの正弦波当てはめから拡散反射の強さと鏡面反射の強さを評価する。これらの強さを重みとする評価関数を立て、この評価関数を最適化するような3次元形状を求める。

(11) ステレオカメラと格子レーザによる3次元復元を提案する。レーザはSN比が高いため、完全な鏡面反射でない混合反射物体なら、カメラで観測できる。45度回転した格子レーザ（菱形に見える）を物体に投射し、ステレオカメラで撮影する。レーザ線はルーフエッジとして抽出される。具体的には、各画素におけるヘッセ行列の最大固有値方向に沿って一次微分を調べる。一次微分がゼロを交差する画素をルーフエッジとする。さらに、精度を向上させるため、サブピクセルでルーフエッジの位置を求めた。ルーフエッジを左上向けと右上向けとに分類し、対応付けは別々に行う。ステレオ画像を平行化し、水平となるエピポーラ線に沿って対応レーザ点を探索範囲内に限定して探索する。その結果、対応点が見つかり、その3次元座標を計算できる。密な3次元復元には多くの撮影回数が必要であるが、疎な3次元復元には1回のみで済む。

4. 研究成果

(1) ディスプレイに縦方向と横方向の位相シフトを表示観測することにより鏡面反射してくる光が3次元空間のどこから飛んできたかを全て計算できることを示した。

(2) 鏡面上の各点において入射角と反射角が等しいことを利用すれば、各点の3次元座標及び法線方向を一意に決めることを示した。

(3) 撮影した画像の各画素に対して、その輝度に対して正弦波を当てはめ、当てはめられた正弦波の振幅および当てはめ残差を用いて、その比率をSN比とし、位相の品質を評価できることを示した。

(4) 位相のSN比を重みとする評価関数を立て、この評価関数を最適化するような3次元形状を求めることで混合反射面の3次元計測が可能であることを示した。

(5) カメラやディスプレイ・プロジェクタの最適配置に関して考察した。

(6) ステレオカメラと格子レーザを用いた3次元計測手法を提案し、実験を行い新しい知見を得た。

(7) 雑誌・国際会議・国内学会で発表を行い、成果を広く公開した。

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5件)

発表者名:高田征吾、徐剛、発表標題:ステレオカメラと格子レーザを用いた3次元形状復元、学会名等:精密工学会ビジョン技術の実利用ワークショップ ViEW2010、発表年月日:2010年12月10日、発表場所:神奈川県横浜市 パシフィコ横浜

発表者名:Seigo Takada and Gang Xu、発表標題: Sparse 3D Reconstruction Using Stereo Cameras and Laser Grid Projection、学会名等: The 3rd Asian Joint Workshop on Information Technologies、発表年月日:2010年9月16日、発表場所:中国大連

発表者名: Masaki Yamazaki, Gang Xu、発表標題: 3D Reconstruction of Glossy Surfaces Using Stereo Cameras and Projector-Display、学会名等: Proc. of the 23th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition、発表年月: June.12.2010、発表場所: 米国 サンフランシスコ

発表者名: Masaki Yamazaki, Yokota Junichi, and Gang Xu、発表標題: Simulation of Display-Stereo Cameras Calibration for Specular Object Reconstruction、学会名等: Proc. of the Asia Simulation Conference 2009 (JSST2009)、発表年月: 2009年10月7-9日、発表場所: 滋賀県草津市 立命館大学

発表者名: 山崎雅起, 徐剛、発表標題: 3D Reconstruction of Glossy Metal Surfaces Using Stereo Cameras and Projector-Display、学会名等: 第15回画像センシングシンポジウム(SSII09)、発表年月: 2009年6月11日、発表場所: 神奈川県横浜市 パシフィコ横浜

[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

<http://www.cvg.is.ritsumeai.ac.jp/kenkyu.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

徐 剛 (Xu Gang)
立命館大学・情報理工学部・教授
研究者番号: 90226374

(2) 研究分担者

該当せず

(3) 連携研究者

深井 寛修 (Fukai Hironobu)
立命館大学・情報理工学部・助手
研究者番号: 50571585

(4) 研究協力者

山崎 雅起 (Yamazaki Masaki)
株式会社 東芝・研究開発センター
研究者番号: なし