表面反射率が部位によって異なる物体の3次元形状計測

A 3-D Shape Measurement Method for Objects with Uneven Reflective Surfaces

樋口 和 則[†], 塚 田 敏 彦[†], 正会員 山 本 新[†]
Kazunori Higuchi[†], Toshihiko Tsukada[†] and Shin Yamamoto[†]

Abstract A method for measuring 3-D objects with surfaces composed of various reflective regions is developed in which the 3-D coordinates of the object sections are obtained by triangulation with the light-section method by using a slit-light source and a TV camera. A slit-light source in which the lighting intensity is controllable and a TV camera with an expanded dynamic range are employed to reduce the influence of uneven reflective surfaces. The TV camera expands its dynamic range by combining multiple images captured at different shutter speeds. A trial 3-D shape measurement system is produced using this method, and its effectiveness is confirmed by experiments.

キーワード：3次元形状計測，光切断法，ダイナミックレンジ，表面反射率

1. ま え が き

3次元物体の形状計測は，CGや機械系CADのモデル化のための基礎的な形状の入力および各種物体のデータベース化のための形状入力として不可欠な技術である．初期の頃は，製造業の設計工程などで用いられることが多かったが，最近では，服飾などのアパレルの分野，体型や歯形・足型など人体計測の分野，美容・形成などのコスメティック分野，さらには発掘された文化財の保存など，考古学・民俗学の分野でも広く応用されるようになってきた¹⁾．

3次元物体には，その表面が拡散反射面で比較的均一な表面反射率をした物体から，鏡面反射面をした物体，さらには拡散反射面を主体とはしているが部位によって表面反射率が大きく変化する物体まである．これまで開発された3次元物体の形状計測技術は，表面が拡散反射面で，その反射率が比較的均一な物体を対象にした場合が圧倒的に多い．一部には鏡面反射物体を対象にしている場合もあるが，この場合には適用対象が限られている．

しかし，現実には部位によって表面反射率が大きく変化する3次元物体が数多く存在し，その3次元形状の獲得への要望は非常に強いが，この要望を十分に満たす方法はまだ開発されていない．これらの要望は，対象物体の3次元の形状計測とその計測データの保存が主目的であるため，

計測精度や計測時間が重要な要因となる．また，計測対象によっては変形するものもあるので，非接触計測も欠かせない条件である．

表面が拡散反射面で均一な表面反射率を持つ3次元物体の非接触な形状計測に関しては，光切断法による方法²⁾，空間コード化による方法³⁾⁵⁾，スポット光の走査と背面鏡を組合せた方法⁶⁾，スリット光と2つのテレビカメラを組合せた方法⁷⁾，イメージエンコーダを用いた方法⁸⁾などが提案されている．しかし，提案された方法だけでは，表面反射率が局部的に大きく変化する物体の3次元の形状を計測することができない．

表面が鏡面をした物体の3次元形状計測の方法としては，ハイライトを利用する方法⁹⁾¹⁰⁾，照度差ステレオ法¹¹⁾，M系列符号化光源法¹²⁾，鏡面像利用法¹³⁾などが研究開発されている．しかし，これらの方法も，表面が均一な鏡面をしている場合に限られる．また，光沢面を持つ物体の例として，はんだ付け部の形状検出がある．これには，カラーハイライト法の一つであるカラー段差照明法¹⁴⁾やスポット光を投射してその反射光をPSD素子で検出する方法¹⁵⁾などが提案されているが，いずれも鏡面反射を利用したもので，上記の要望には適さない．

その他，等輝度線のステレオ視を利用する方法¹⁶⁾，モーションステレオと照度差ステレオを組合せた方法¹⁷⁾も提案されているが，表面反射率が大きく変化する物体の3次元形状計測に適用することはできない．

表面反射率が部位によって大きく変化する物体の3次元の形状計測には，スリット光を対象物体に投射してその反射光をテレビカメラで撮像して，これで物体表面を全面走査する光切断法をベースにした方法が有効と考えられる．

1997年10月24日 第9回「外観検査の自動化」ワークショップにて発表
1997年8月25日受付，1997年10月15日採録

[†] 株式会社豊田中央研究所 システム2部
(〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町長瀬字横道41-1, TEL 0561-63-4654)

[†] Toyota Central R & D Labs., Inc.
(41-1, Yokomichi, Nagakute, Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi 480-1192, Japan)

筆者らの考案した方法は、スリット光を物体に投射し、その反射光画像を撮像する光切断法をベースにした方法で、受光側では異なる露光条件で撮像した複数枚の画像を合成することで反射光の検出範囲を拡大し、さらに投射側で投射光強度制御を付加することで、物体の表面反射率が局部的に大きく変化する物体に対しても、その3次元形状を安定に計測しようとするものである。検証実験では、この方式によって表面反射率が局部的に約200倍変化する物体の3次元形状も計測することができた。

2. 解決すべき課題

3次元物体には、その表面が拡散反射面で比較的均一な表面反射率をした物体から鏡面反射の物体、さらには拡散反射が主体であるが部位によっては表面反射率が大きく変化する物体まである。この表面反射率は物体の材質にも依存するが、表面色の影響も大きく受ける。

図1は、物体の表面反射率の違いによって、検出される3次元形状がどのように影響されるかを示したものである。反射率の高い白く塗装された台形状の物体上に、白く塗装されたブロックを2個配置した場合と、白いブロックと反射率が低い黒く塗装されたブロックが配置された場合を比較する。光切断法を用いて対象物体を移動させて3次元形状を検出すると、前者の場合は、図1(a)に示すような欠落のない形状の画像が得られるが、後者ではブロック2の部分だけ欠落した画像となる。これは、反射光を受光するテレビカメラのCCD素子の検出範囲のために、白塗装色の部位を検出できるように感度を調整すると黒塗装色の部位の形状が検出できなくなる。これは撮像に用いているCCD素子の検出範囲(テレビカメラのダイナミックレンジ)が50倍と狭いからである。このように、一般に広く用いられているテレビカメラでは、ダイナミックレンジの広い反射光の画像を撮像することができない。

3. 計測方式

図2は、考案した3次元形状計測の基本方式を示したものである。考案した方式は、光切断法をベースにした形状計測方式で、受光側のテレビカメラの検出範囲を拡大する方法に投射側のスリット光源の投射光強度を制御する方法を付加することで、表面反射率が部位によって著しく変化する物体の3次元形状計測を可能にしようとするものである。

受光側における方法は、筆者らの既開発の画像合成によってテレビカメラのダイナミックレンジを拡大する方式を用いている¹⁸⁾。所定強度のスリット光を対象物体に投射し、その反射光を電子シャッター機能をもつテレビカメラで短い露光時間(通常1/500秒)にて撮像する。この場合には、物体の表面反射率の大きな部分からの反射光画像は得られるが、表面反射率の小さな部分からの反射光画像は得られない。次に、同じスリット光強度で露光時間を長く(通常1/60秒)して、物体の反射光画像を撮像する。このときは、スリット光画像のうち表面反射率の小さな部分か

図1 物体の表面反射率の影響

The influence of surface reflection ratio on 3-D shape measurement.

図2 3次元形状計測の基本方式

Fundamental method of proposed 3-D shape measurement.

らの反射光画像は得られるが、表面反射率が大きな部分からの反射光画像にはハレーションが生じる。このようにして異なる露光条件で撮像された欠落や飽和のない2枚の反射光画像を合成処理することで、欠落のない3次元画像とすることができる。

この受光側における上述の方法だけでも、多くの対象物体の3次元画像を得ることができるが、反射率が極めて小さい、例えば黒い光沢のある物体などでは、それでも反射光画像に欠落が生じることがある。この場合には、さらに欠落部分がなくなるように投射するスリット光の強度制御を付加する。このように、受光側の検出範囲の拡大に加えて投射光の制御も行うことで、表面反射率が局部的に著しく変化する対象物体についても、画像に欠落のない3次元形状を計測することができる。

図3は、受光側における検出範囲の拡大の方法を詳細に示したものである。簡単のため、1本のスリット光画像について説明する。信頼できる反射光画像の指標として、この方式では撮像された画像のスリット光の線幅を用いている。まず、短い露光時間でスリット光を投射(通常1/500秒)して、その反射光画像を撮像する。そして得られたスリット光画像(以下、スリット1と呼ぶ)のスリットの線幅を計測し、その値がルックアップテーブルに規定された閾値の範囲内であるかどうかを確認する。次に、同じスリット光強度で長い露光時間でスリット光を投射(通常1/60秒)して、その反射光画像(以下、スリット2と呼ぶ)を撮像する。同様に、スリット光画像の線幅を計測する。このルックアップテーブルには、複数の露光条件(この場合は、2条件)で撮像したときのそれぞれの条件での適正な線幅(この方式では0.4~0.6 mm)が記憶されている。そのため、1本の画像を合成する場合、2つの条件で撮像された画像のうち適正な方の画像が選択される。

この場合、計測すべき物体の表面反射率または投射光が一定のときの反射光の上限と下限の値は既知としている。スリット光の投射光の強度は、表面反射率が最も小さな部位を最も長い露光時間で撮像したときに、スリットの反射光画像が適正な線幅になるよう設定される。この投射光強

図3 受光側における画像合成の方法
Method of combining multiple images.

度で、最大の表面反射率の部分からのスリット光画像が得られるように、短い露光時間のシャッタースピードが決定される。

4. 実 験

4.1 実験方法

考案した方法の有効性を確認するために、以下の2つの方法で検証実験を行った。

(1) 実験1—3次元座標値の検出

表面の反射率が異なるサンプルを作成し、従来法と考案した方法でサンプル上の1本の反射スリット光画像の3次元座標値を検出する。従来方法とは、光切断法において反射光を単一の露光条件で撮像したもので、考案した方法とは、2つの露光条件(実験では1/60秒と1/500秒。実用上は、この組合せで殆ど対応できる)で撮像したときのものを画像合成し、さらに投射光の制御(1:1/5)を加えたものである。この実験では、画像合成のときの閾値テーブルの線幅は、0.4~0.6 mmとしている。また、反射光画像の検出できる濃度範囲は8ビット、スリット光画像を検出するときのS/Nは5ビットとしている。

図4に実験に用いたサンプルの概要を示す。このサンプルは大きさが80 mm×30 mm×3 mmで、その表面には幅6 mmの反射率の異なる5種類のシートが貼付けられている。図4(b)はそのサンプルの各部分の相対反射率である。反射率は分光反射率計で測定し、白い部分の測定値を基準として表している。この実験に用いた黒いシートの反射率は白いシートのその約1/40であり、光沢のある

図4 実験に用いたサンプル
A sample of experiments

図5 実験における3次元座標
の検出法
Experimental method for
detecting 3-D coordinates

黒いシートの反射率は、白のそれのおよそ 1/200 である。

図 5 は、3 次元座標検出値の検出の実験方法を示したものである。スリット光源とテレビカメラからなるセンサヘッドから得られる 2 つの画像を合成して、それに投射光制御も付加した結果を 3 次元座標値に変換する。実験では、画像合成と投射光制御はパソコンでソフト処理し、座標演算は専用ハードで実行している。

(2) 実験 2—3 次元形状の検出

図 6 に示す形状のサンプルを作成し、そのサンプルをス

図 6 実験における 3 次元形状の計測法
Experimental method for measuring 3-D shapes.

図 7 3 次元座標の検出例
Examples of measured 3-D coordinates.

図 8 3 次元形状の計測結果
Results of 3-D shape measurements.

テージ上に搭載して一定速度で移動させて、従来方法と提案した方法でその物体の 3 次元形状を検出する。サンプルの表面には、図 6 に示す部位に前述の反射率をもつシートがそれぞれ貼付けられている。実験方法は、実験 1 と同様のシステムにて行っている。

4.2 実験結果

図 7 は、図 5 の実験方法で検出された 3 次元座標値の検出結果の例を示したものである。従来方法では、白いシートに対して約 1/40 しかない反射率の黒のシートの 3 次元座標値でも検出できないのに対し、考案した方法では黒のシートだけでなく、反射率が白に対しおよそ 1/200 の光沢のある黒いシートの部分の 3 次元座標値も検出されている。また、3 次元座標値の検出精度は、サンプルの全面に対して標準偏差の 2σ をとったとき $\pm 0.2\text{ mm}$ であった。

図 8 は、図 6 に示す実験方法で得られた 3 次元形状の計測結果である。従来方法では反射率の低い黒い部分の形状も検出できないのに対し、考案した方法では黒い部分も含めサンプル全体の形状が検出されている。さらに、3 次元座標値の検出精度も、実験 1 と同様 2σ に対して $\pm 0.2\text{ mm}$ であった。

以上の実験結果より、複数の露光条件(この実験では、2 露光条件)で撮像した画像を合成し、それに投射光の光強度制御を付加する筆者らの考案方法では、従来できなかった表面反射率の部位による変化が 40 倍はいうに及ばず、局部的に反射率が 200 倍程度と大きく変化する物体の 3 次元形状も測定でき、この方式の有効性が示された。

5. 3 次元形状計測システムへの応用

5.1 3 次元視覚システム

図 9 は、考案した方法を用いた 3 次元視覚システムの構成である。この視覚システムは、センサヘッド部、画像合

図 9 3 次元視覚システムの構成
Configuration of the 3-D vision sensor.

表 1 3次元視覚システムの性能
Performance of the 3-D vision sensor.

Standoff distance	70 mm
Measuring area	32 mm (Y) × ±10 mm (Z)
Measuring accuracy	±0.1 mm
Measuring time	0.21 sec/1 section
Measuring extent of reflection ratio	1: 200 (Exposure time: 1/500 sec, 1/60 sec with slit-light intensity control)

図 10 3次元形状計測システムの構成
Configuration of the 3-D shape measurement system.

成部、投射光制御部および3次元座標演算部で構成されている。センサヘッド部のスリット光源には、中心波長が近赤外(830 nm)にある半導体レーザを用い、スリット光の反射光画像の半値幅は、拡散反射面に対しては0.7 mmである。可視光の影響を防ぐために、テレビカメラには可視光遮断の光学フィルタを付けている。また、テレビカメラは、電子シャッター動作時でも垂直方向の画素数が半減することのないように、フレームシャッター式のテレビカメラを用いている。

複数の露光条件で撮像されたスリット状の反射光画像(図の場合は2枚)は、画像合成された後、座標演算部で3次元座標値列として出力される。ときとして、反射率が極めて小さい部位からの反射光画像の一部が欠落することがある。このときには、反射光画像のデータ列の欠落の有無を検出して投射光強度制御を付加する。反射光画像の強度分布は拡散反射面に対してはほぼ正規分布を示すので、高精度検出のために3次元座標値は加重平均処理を行っている。

表 1 は、この視覚システムの性能を示したものである。計測範囲は、センサヘッド内の TV カメラの下 70 mm の位置の 32 mm (Y) × ±10 mm (Z) である。測定精度は、各軸について ±0.1 mm である。また、1 断面 (484 点) の合成と座標演算に要する時間は 210 ms である。検出できる対象物体の反射率変化の範囲は、1/60 秒と 1/500 秒で撮像した画像合成だけなら約 40 倍、投射光制御と併用することで約 200 倍までその範囲を拡大することができる。

5.2 3次元形状計測システム

(1) システム構成

図 10 は、この視覚システムを用いて開発した3次元形状計測システムの構成を示したものである。このシステムは、計測対象を移動させるための XY ステージ、センサヘッドの高さを調節するための Z ステージおよびステージ制御や計測結果の処理・表示などのためのパソコンなどにより構成されている。計測すべき対象物体は、XY ステージ上の治具で固定される。この移動や位置決めは、各ステージを駆動するパルスモータによって行われる。

(2) 計測処理の流れ

図 11 に3次元形状計測の処理の流れを示す。まず、計測する物体を XY ステージ上に固定し、計測範囲を決め

図 11 3次元形状計測の処理の流れ
Flowchart of 3-D shape measurements.

た後、計測開始点に位置決めする。次に、所定の光強度のスリット光を投射し、異なった露光条件で撮像した2枚の反射光画像を合成する。合成した画像に欠落が生じることは少ないが、ときとして欠落することがある。そのときには、投射するスリット光の強度を上げて再投射し、情報欠落のない反射光画像とし、この反射光画像を専用のハードウェアによって3次元座標値列に変換する。これらの3次元座標値は、XYZの各ステージの計測時の位置と共にパソコンのメモリーに記憶される。この操作をX軸とY軸の決められた範囲について、指定された経路に沿って繰

表 2 3次元形状計測システムの性能
Performance of the 3-D shape measurement system.

Measuring area	200(X)×200(Y)×200(Z)mm
Measuring points	3200 points/1 section (Y=200 mm)
Measuring accuracy	±0.3 mm (X, Y, Z)
Measuring time	3.6 sec/1 section

図 12 形状計測例 (プッシュホン)
An example of 3-D shape measurements.

り返し行って幾つもの断面形状の組を獲得し、それから 3 次元形状を生成する。

(3) システム性能

表 2 に 3 次元形状計測システムの性能を示した。このシステムは比較的小さな物体の 3 次元形状を計測するために開発したもので、計測点数は 1 断面を 3200 点で構成している。計測時間は 1 断面当たり 3.6 秒で、座標演算に 1.6 秒、表示に 0.6 秒、そして位置決めに 1.4 秒要している。

図 12 は、このシステムを用いて測定したプッシュホンの形状計測結果の一例である。このプッシュホンには本体の色と大きく異なった反射率のプッシュボタンや機能選択ボタンがあり、この反射率の変化は分光反射率計による測定では 204 倍であった。この形状は、ステージを 1 mm ずつ移動させて得られた 170 断面の切断画像からなっている。この形状を得るのに要した時間は、ステージの移動時間を含めて約 10 分である。

6. む す び

表面反射率が部位によって著しく異なる 3 次元物体の形状計測への要望は相変わらず強いが、まだ実現されていないのが現状である。表面の反射率が部位によって著しく変化する物体の 3 次元形状を計測する新規の方法を考案し、この方式を用いた 3 次元形状計測システムを開発した。この方法は光切断法をベースにした方法で、画像合成法で受光側のテレビカメラの撮像できる検出範囲を拡大し、それに投光側での投射光強度制御を付加することで、部位によって表面の反射率が著しく変化する物体の 3 次元形状計測を可能とする方法である。

この方法の有効性を示す検証実験により、画像合成する方法だけで表面反射率が約 40 倍変化する物体の 3 次元形状が計測でき、これに投射光制御を加えることで約 200 倍の反射率変化をする物体の 3 次元形状が計測できることが

示された。さらに、この方式を用いた 3 次元形状計測システムを開発し、この形状計測システムの性能を明らかにした。

考案した方法により、表面反射率が部位によって大きく変化する物体の 3 次元形状計測も可能となった。しかし、この方法は、拡散反射面を主体とする反射特性をもつ物体の形状計測に適用が限られる。今後の課題は、拡散反射面と鏡面反射が混在する 3 次元物体にも適用できる形状計測方法を開発することである。

〔文 献〕

- 1) 例えば、井口、佐藤：“三次元画像計測”，昭晃堂（1990）
- 2) 西野、秋山、小林：“光切断法による 3 次元立体形状計測と形状再構成”，信学論，**J72-D-II**, 11, pp. 1778-1787 (Nov. 1989)
- 3) 佐藤、井口：“液晶レンジファインダー液晶シャッターによる高速距離画像計測システム”，信学論，**J71-D**, 7, pp. 1249-1257 (July 1988)
- 4) 服部、佐藤：“スキャン式符号化法による小型高速レンジファインダー”，信学論，**J76-D-II**, 8, pp. 1528-1535 (Aug. 1993)
- 5) 荒木、田中、藤野、佐藤：“高速 3 次元形状計測装置の試作”，信学論，**J71-D**, 10, pp. 2059-2068 (Oct. 1988)
- 6) 安居院、齊藤、中嶋：“背面鏡を用いた 3 次元物体データ入力システム”，信学論，**J70-D**, 5, pp. 995-1002 (May 1987)
- 7) 津田、池谷、荒木、三宮、鳥羽、脊戸：“光切断法による高速三次元計測とその応用”，テレビ学技報，**14**, 49, pp. 13-18 (1990)
- 8) 上杉、猪股：“イメージエンコーダを用いた 3 次元曲面形状計測”，計測自動制御学会学術講演会，pp. 305-306 (1989)
- 9) A. C. Sanderson, L. E. Weiss and S. K. Nayar: “Structured Hight-light Inspection of Specular Surfaces”, IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., **PAMI-10**, 1, pp. 44-55 (1988)
- 10) 深川、鄭、田中、安部：“ハイライトの検出による 3 次元形状の獲得”，信学論，**J79-D-II**, 5, pp. 719-726 (May 1996)
- 11) K. Ikeuchi: “Determining Surface Orientations of Specular Surfaces by Using the Photometric Stereo Method”, IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., **PAMI-3**, 6, pp. 661-669 (1981)
- 12) 西村、藤村、伊藤、喜安：“M 配列を用いた鏡面物体の三次元形状計測”，電学論，**112-C**, 2, pp. 97-101 (Feb. 1992)
- 13) 汪、加藤、佐藤、井口：“鏡面物体の 3 次元形状計測”，信学論，**J75-D-II**, 7, pp. 1177-1186 (July 1992)
- 14) S. Kobayashi, Y. Tanimura and T. Yotsuya: “Identifying Solder Surface Orientation from Color Hightlight Images”, 16th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society, 1, pp. 821-825 (1990)
- 15) 中川、押田、二宮、佐々木：“スポット光走査方式光切断法によるはんだ付部の形状検出”，計測自動制御学論，**22**, 9, pp. 982-987 (Sep. 1986)
- 16) 石山、富田：“等輝度線のステレオ視による曲面の復元”，信学論，**J77-D-II**, 9, pp. 1673-1679 (Sep. 1994)
- 17) 日浦、佐藤、井口：“対象物体の回転による形状と反射率の同時計測”，情処学論，**36**, 10, pp. 2295-2302 (Oct. 1995)
- 18) 山田、中野、山本：“車載用カメラのダイナミックレンジ拡大方式”，信学論，**J78-D-II**, 10, pp. 1439-1449 (Oct. 1995)

樋口 和則 1986 年、名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、(株)豊田中央研究所入社。以来、3 次元画像計測および車載ディスプレイの視認性向上に関する研究と開発に従事。1992～93 年、米国カーネギーメロン大学に客員研究員として滞在。現在、(株)豊田中央研究所システム 2 部に所属。

塚田 敏彦 1988 年、名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、(株)豊田中央研究所入社。以来、3 次元画像計測および画像を用いた工業計測の研究と開発に従事。現在、同社システム 2 部所属。

山本 新 1965 年、岐阜大学工学部電気工学科卒業。同年、(株)豊田中央研究所入社。以来、主に 3 次元画像計測、自動車におけるマシナビジョン、および車載ディスプレイの視認性向上に関する研究と開発に従事。現在、同社システム 2 部所属。豊田工業大学連携大学院客員教授兼任。工学博士。正会員。