

レンジファインダを用いた 3次元形状モデルの自動入力に向けて

岡谷(清水) 郁子, 前川仁

埼玉大学工学部情報システム工学科

2004.1.22

概要

レンジファインダを用いて得られるデータから, 対象の全形状を獲得するための手法について述べる. レンジファインダとは, 非接触に対象の3次元形状を取得するためのセンサである. これを用いて得られるデータは距離画像と呼ばれ, 対象の部分形状を含んでいる. そこで, 全形状モデルを獲得するためには, いろいろな視点から対象を計測し, 得られた複数のデータをまとめてモデルを生成する必要がある. そのため重要な技術である「距離画像の位置合わせ」と呼ばれる手法について詳しく述べる.

1 はじめに

CG(computer graphics) や CAD/CAM(computer aided design/manufacturing) の分野では, 物体の3次元形状を計算機上に展開し, 自由に処理することが広く行なわれている. これらの用途に供するために, 実世界のあらゆる物体の3次元形状データを簡単に計算機に取り込む方法が必要とされている. CAD や工業デザインの分野では, 通常, 物体を一方向だけから見た3次元形状データでなく, 全周囲から見て完全な3次元形状データが必要とされる.

実世界にある物体の3次元形状を得るためのセンサとして, レンジファインダ [1] が開発され, 数多く実用化されている. レンジファインダとは, 対象物体に能動的に光や超音波などのエネルギーを照射して, その反射から距離を測定するセンサを指し, 様々な種類のものが含まれ, 用途に応じて様々な種類のレンジファインダが使われている. 例えば, CG や CAD のデータ入力以外に, 無人走行車の移動のための視覚センサとして働くものや, 産業用ロボットが機械部品を識別するために利用されるもの, 部品検査に利用されるものなどが挙げられる. また, 人体形状を計測し, 側彎症などの検診に役立てるために利用されているものもある.

対象物体の3次元形状データを得るために使われるレンジファインダは, その多くに画像センサが組み込まれている. カメラで得られる「画像」は, そこに写る情景の輝度が各画素に格納されたものであるのに対し, レンジファインダで得られるデータは, 画像の各画素に対象物体までの距離を格納されたものであり, 「距離画像」と呼ばれている.

対象を計測したときに得られる距離画像は, ある一方向から見た部分的な形状データを含むものである. そのため, 対象の全形状を得るためには, 物体に対して様々な角度・視点からレンジファインダで計測することを繰り返し, 得られた複数の形状データを1つにまとめることで, 全周囲からの完全なデータを得ることになる.

複数の視点で得た距離画像を1つにまとめることによる対象の全形状のモデル獲得は, 次の3つのステップから成る. まず, 物体を計測した複数の視点の間の位置関係を正確に知る. こ

表 1: 非接触で3次元形状を計測する主な手法.

受動的手法	単眼 両眼 多眼	焦点, 陰影, テクスチャ, 輪郭など ステレオ画像
能動的手法	光レーダー法 光投影法 モアレ法 [8] 照度差ステレオ法	時間差, 位相差 [3] スポット光, スリット光 [4, 5, 6], 符号化パターン光 [7], 傾斜 パターン光など

これは距離画像の「位置合わせ」の問題と呼ばれる。次に、得られた視点の位置と姿勢から形状データを重ねるとき、重複する形状の同一部分の3次元データを一元化して、過不足のない形状データを得る必要がある。これは「統合」の問題と呼ばれる。最後に、単なる点の座標値の集合であるデータをもとに物体を面として記述し、計算機で利用しやすい形に直す。これは「モデル生成」と呼ばれている。

本稿では、レンジファインダの測定原理、距離画像の位置合わせについて、さらに、自動的なモデル獲得に向けての問題を述べる。

2 レンジファインダとは

2.1 能動的3次元画像計測

「レンジファインダ」という用語は、古くはカメラや銃に用いられる光学式の測距計を表すのに用いられてきたが、近年では能動的3次元画像計測器を表すのに用いられている。レンジファインダの開発が盛んに行われ、多く製品が実用化されている [2]。

非接触で対象の3次元形状を計測する手法は表1に示すように、能動的手法と受動的手法に大別される。能動的な3次元画像計測とは、対象に何らかの意味のあるエネルギーを照射する手法を指す。これに対し、受動型とは、ステレオ画像法に代表されるように、通常の照明は別として計測に関して意味のあるエネルギーを利用しない方法である。ステレオ画像法は、最も一般的な測距法として紀元前より用いられてきている方法で、人間の両眼のように、2台のカメラを使って対象を観測し、それぞれの視線から対象までの距離を測定する。

受動型手法であるステレオで問題になるのは、右の画像で見えている点が左の画像でどこに対応しているのかを決定するマッチングである。自動的に対応を決定するためのマッチング手法は、数多くの研究がなされているが十分に解決されていない難しい問題である。また、模様のない一様な表面の対象に対しては、対応は決定できないという問題もある。

そこで、ステレオの2つのカメラのうち片方を、光を投影するプロジェクタに置き換えることによって生まれた方法が、光投影法と呼ばれる手法である。この方法では、プロジェクタから対応が一意に決定されるような光パターンを対象物体に投影し、相対的な位置関係が既知であるカメラで観察して3次元座標値を求める。片方の「眼」をプロジェクタに置き換えることにより、対応点の探索の必要がないため高速であり、距離の精度が高いこと、密なデータが得られることなど、実用性が高い。

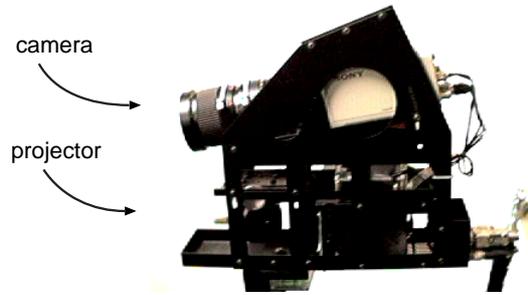


図 1: カメラとプロジェクタからなる光投影法に基づくレンジファインダ。

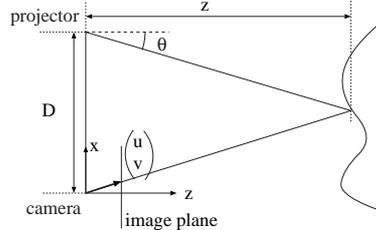


図 2: 三角測量の原理に基づく対象までの距離の計算。

2.2 光投影法に基づくレンジファインダ

光投影法に基づくレンジファインダは、カメラとプロジェクタから構成されており(図1)、基本的には図2のように、三角測量の原理に基づいて3次元座標を計算する。

スポット光を用いる方法では、物体表面上にスポット光を照射し、その画像上の像点の位置とスポット光の照射角度から、上記の原理で3次元座標を計算する。画像中のスポット光の位置を検出する時間を短縮するために、種々の工夫がなされている。

スリット光を用いる方法では、物体表面上へスリット光を照射しその像を画像で得るが、得られる像はスリット光がのる平面によって物体を切断したときの切断面の像である。スリット光の照射角度と像の位置関係から、切断面の3次元座標を計算する。ある角度で1本のスリット光を照射することに画像を取得することになる。

空間符号化パターン光を照射する方法は、スリット光を照射する方法よりも少ない照射回数と画像の取得回数で、スリット光を照射するのと同様の画像を得るものである。これによってスリット光を照射するレンジファインダに比べ、計測時間が短くなる。

スリット光は符号化パターン光に比べ、1枚の距離画像を得るための計測時間はかかるが、照射角度を細かく制御することにより量子化誤差を小さくすることができるため、多くの商用のレンジファインダで採用されている。

3 3次元モデル獲得

3.1 距離画像を用いたモデル獲得の概要

レンジファインダによる計測で得られる距離画像は、対象物体をある方向から見たときの対象までの距離である。したがって、1枚の距離画像にはある一方向から見た部分的な形状データを含んでいる。対象の全形状を得るためには、物体に対して様々な角度・視点から計測した距離画像を重ね合わせ、1つにまとめる必要がある。

距離画像は計測したそれぞれの視点固有の座標系で表された物体形状の数値データである。そこで、重ね合わせるために、個々の視点の位置関係を求め、統一された1つの座標系において表す(位置合わせ)。対象の全形状を得るためには、視点の位置関係を正しく求めることが重要である。

3.2 距離画像の位置合わせ

距離画像の位置合わせとは、レンジファインダを3次元空間中で自由に動かし、形状を多数の方向から計測し、得た距離画像だけから、計測した各方向自体を知ることである。

これを行うために、正確に位置決めのできる装置(ターンテーブル、ロボットハンドなど)を用い、センサないし物体を回転しながら距離画像を取得することで、視点間の位置関係を距離画像の取得時に得てしまうことも考えられる。しかし、例えば、ターンテーブルの回転角を十分精度よく制御できても、センサとターンテーブルの位置関係が分からなければ、回転軸が正確には算出できないという問題があったり、ロボットハンドの制御の精度が十分でなかったりすることがある。

これに対し、視点間の位置関係を、得た距離画像自体から推定することを考えると、精度の求められる装置が必要ないなど、自由度が高いことが魅力である。また、装置を用いた方法で精度が十分でなかったときに、この方法を適用することもある。この方法は、異なる視点から物体表面の同じ部分の形状データを重複して取得しておき、その同一部分の形状データを利用して、視点間の位置関係を求める。

距離画像に含まれる形状データを用いて位置合わせを行う場合、(1)部分形状データから抽出した特徴量、もしくは、形状データの3次元座標そのものを距離画像間に対応付け、(2)その対応関係をもとに、視点の位置と姿勢を求めるという手順で行われるのが一般的である。

(1)では、異なる視点から共通に観測されるような対象形状の大域的な特徴を取りだし、これを用いる。ここでは、対象の形状をできるだけ限定しなような、大域的な特徴を選ぶことが要点となる [14, 18]。

(2)では、より精度の高い位置合わせのために、(1)のように何か特徴を取り出すのではなく、距離画像の形状データ自体(座標値そのもの)を利用する。最も代表的な手法である Beslら [9] によって提案された Iterative Closest Point(ICP) アルゴリズムでは、一方の距離画像の各計測点のある変換パラメタで変換し、各計測点に対してもう一方の距離画像中の対応点を求め、対応する点同士の距離が最小になるような変換パラメタを求め、新たな変換パラメタが求まったら、計測点の対応を求めなおして変換パラメタを推定するというプロセスを繰り返す。

精度の高い位置合わせで問題になるのは次のようなことである。まず、一般に、得られる距離画像は、対象面の連続な形状データではなく、センサの視線方向固有の基準で量子化されたデータであることである。また、一般に、ある視点で得た距離画像が、他の視点で得た距離画像を完全に含むことはない。その上、当然計測誤差が存在する。計測誤差は、一般に、センサからの距離などに依存して場所ごとに異なり、センサの視線方向の計測誤差の大きさは、それに直交する方向のそれに比べて大きいという傾向がある。これらの問題を解決するために、様々な拡張手法が提案されている [19, 11, 13, 12, 17, 16, 10, 15]。

さらに、自動的に位置合わせを行うために残されている問題として、局所最適解に陥ってしまう問題がある。精度の高い位置合わせを行うことができる手法も、一般に非線形最小化をおこなうため、よい初期値が得られていなければ正しい位置合わせはできない。また、精度の高い位置合わせを行うことができる手法ほど、評価関数が複雑で、正しい解の周りに多くの局所最適解が存在している。

これを解決するために，筆者らは，局所的な面の構造を保持することにより，局所最適解を減らす手法を開発中である．

4 おわりに

非接触に対象の3次元形状を取得するためのセンサである，レンジファインダを用いて得られるデータから，対象の全形状を獲得するための手法について述べた．レンジファインダを用いて得られるデータは距離画像と呼ばれ，対象の部分形状を含んでいる．全形状モデルを獲得するために，いろいろな視点から対象を計測した距離画像をまとめてモデルを生成する．そのため重要な技術である距離画像の位置合わせ(距離画像から，それらを得た視点の位置関係を推定する手法)について述べた．

参考文献

- [1] 井口征士, 佐藤宏介. 三次元画像計測. 昭晃堂, 1990.
- [2] <http://www.netheaven.com/~simple3d/index.html>
- [3] <http://www.cyra.com/>
- [4] <http://www.cyberware.com/>
- [5] http://www.ino.ca/en/syst_et_compo/3dps.asp
- [6] <http://www.minolta-3d.com/>
- [7] <http://www.inspeck.com/>
- [8] <http://www.opton.co.jp/>
- [9] P. J. Besl and N. D. McKay. A Method for Registration 3-D Shapes. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, 1992.
- [10] C. S. Chen, Y. P. Hung, and J. B. Cheng. RANSAC-Based DARCES: A New Approach to Fast Automatic Registration of Partially Overlapping Range Images. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 21, No. 11, pp. 1229–1234, 1999.
- [11] Y. Chen and G. Medioni. Object Modeling by Registration of Multiple Range Images. *IVC*, Vol. 10, No. 3, pp. 145–155, 1992.
- [12] C. S. Chua and R. Jarvis. Point Signature: A New Representation for 3D Object Recognition. *IJCV*, Vol. 25, No. 1, pp. 63–85, 1997.
- [13] J. Feldmar, N. Ayache, and F. Berrig. Rigid, Affine and Locally Affine Registration of Free-Form Surfaces. *IJCV*, Vol. 18, No. 2, pp. 99–119, 1996.
- [14] K. Higuchi, M. Hebert, and K. Ikeuchi. Building 3-D Models from Unregistered Range Images. *GMIP*, Vol. 57, No. 4, pp. 315–333, 1995.
- [15] I. S. Okatani and K. Deguchi. A Method for Fine Registration of Multiple View Range Images Considering the Measurement Error Properties. *CVIU*, Vol. 87, pp.66-77, 2002.
- [16] G. C. Sharp, S. W. Lee, and D. K. Wehe. ICP Registration Using Invariant Features. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 24, No. 1, pp. 90–102, 2002.
- [17] J. P. Thron. New Feature Points Based on Geometric Invariants for 3D Image Registration. *IJCV*, Vol. 18, No. 2, pp. 121–137, 1996.
- [18] J. V. Wyngaerd, and L. V. Gool. Automatic Crude Patch Registration: Toward Automatic 3D Model Building. *CVIU*, Vol. 87, pp. 8–26, 2002.
- [19] Z. Zhang. Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces. *IJCV*, Vol. 13, No. 2, pp. 119–152, 1994.