

距離データ処理 複数距離画像からの形状モデル生成技術

A Survey of Shape Model Generation from Multiple Range Images

増田 健 (1), 岡谷 (清水) 郁子 (2), 佐川 立昌 (3)

Takeshi Masuda(1), Ikuko Shimizu Okatani(2), Ryusuke Sagawa(3)

1: 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

2: 東京農工大学 Tokyo University of Agriculture and Technology

3: 大阪大学 Osaka University

概要

三次元形状の計測が普及し、様々な応用分野で多数の距離データが得られるようになってきている。本稿では、距離データ処理の中でも、複数の距離画像から一つの形状として記述された形状モデルを生成するために必要となる技術、特に位置あわせと形状統合を中心に調査報告を行う。

Abstract

The importance and popularity of measuring 3d shapes by range sensors has been increasing in many application fields. The objective of this document is to provide a survey of techniques required for generating object shape models from range images measured from multiple viewpoints, especially on the issue of registration and integration of multiple range images.

はじめに

センサー技術の向上により三次元形状計測装置は比較的容易に使用できるようになってきている。また、計算機の性能向上により大量の計測データを蓄積し処理し表示することが可能になってきた。実際に物体を計測して得られた形状のデータから形状モデルを生成することは、CV・CG・CAD・VR・MR・数値シミュレーション・考古学・文化財研究・映像産業などさまざまな分野で重要な技術である。

三次元形状計測には様々な手法が提案されている。光学的な計測手段としては、ステレオ・合焦点・ぼけ (defocus) を利用する受動的手法と、時空間で様々なコード化したパターンの光をレーザーやプロジェクタによって投射する能動的手法がある。三次元形状計測装置で計測された形状データは、一般に距離データと呼ばれている。三次元物体の表面は向き付きの二次元曲面なので、二次元配列としてあらわしたものは距離画像 (range image) とよばれる。距離画像の各画素には、奥行き値 z , より一般的には三次元座標値 (x,y,z) が対応している。計測点の三次元座標値集合である点群 (point cloud) に加えて、距離画像には曲面上の二次元座標があるので、表面の法線や曲率などの微分幾何学的な特徴量を計算しやすい。

光学的な三次元計測手法では、一般に一度に対象物の全表面を計測することはできない。視点から見て裏側の部分・手前の物体に隠されて死角となっている部分・計測装置の計測範囲外の部分が計測できないからである。物体の形状モデルを生成するためには物体の周囲の複数の視点から計測する必要がある。視点の位置関係は、事前に校正しておいたり、磁気・超音波・電磁波を利用するポジショニングデバイスや回転台・ロボットアームを利用してある程度既知と扱える場合もあるが、使用環境や精度に限度があり、必ずしも統合に十分な情報と精度が得られるとは限らない。このような視点の位置関係を、形状データが合うように推定する技術として、位置あわせが必要となる。

計測された距離画像はそれぞれ異なった構造を持っており、位置あわせして単に重ね合わせただけでは一つの形状として記述されたことにはならない。それぞれの距離画像には視点に依存した計測誤差が含まれており、滑らかに接続するためには重複部分を比較して計測誤差を除去しなくてはならない。このような形状統合の技術は、どのような形状の記述方法を用いるかによって、様々な手法が提案されている。センサーの原理、あるいは、幾何学的な制約のために、多くの視点を設定したとしても計測できない部分が残ってしまう場合も多い。このような場合には、尤もらしく欠損部を埋めるほうが実用的である。

本稿では、静的な物体を光学的手法で多視点から計測した複数の距離画像から、一つの形状として記述された形状モデルを生成するために必要な技術について、特に位置あわせと形状統合技術を中心として、必要な関連技術について調査報告を行う。

位置あわせ

複数の距離画像間の幾何学的な位置関係を推定することを位置あわせ (registration, aligning, motion estimation) と呼ぶ。

全く異なった位置関係にある状態から互いに重なりあう程度まであわせる手法と、重なり合う程度を初期状態としてより精密な位置あわせを行う手法に分類できる。

対応点が既知の場合

対象が剛体であるならば、二つの形状データの位置合わせは3次元の回転行列と並進ベクトルで表される剛体運動の座標変換を推定する問題となる。点の対応関係が既知ならば、自乗誤差の最小化問題として定式化でき [Sabata 1991]、その解は数学的に解くことができる。回転の表現によりいくつかの手法があるが、線形代数の範囲で解く有効な手法として単位四元数 (UQ) [Horn 1987; Faugeras 1986] と特異値分解 (SVD) [Kanatani 1994] を利用する手法がある。Eggert ら [1997] はこれらを含む四つの手法について比較を行っており、大差はないものの SVD は UQ に比べてやや安定性がよいとしている。

不変特徴量によるマッチング

一般に対応点は事前に既知ではない。データ形状間の座標値の違いが大きい場合には、剛体運動に不変な特徴量を用いて対応点を求めることが必要となる。欠損部の影響を受けにくく部分形状の位置あわせを行うには特徴量は局所的である方が望ましいが、局所的になるほど形状は単純になり一対の特徴点だけでは変換を特定できず、特徴点の組み合わせが必要になってくる。特徴量のサイズとマッチングの探索手法の組み合わせにより様々な手法が提案されている。

Faugeras ら [1986] は局所的な平面当てはめによりプリミティブに分割し、対応関係の仮説検証を逐次的に行った。このような平面分割を用いる手法では [河井 1992]、同一の曲面でも計測誤差等の影響で同様に分割できるとは限らず、対応付けができなくなる可能性がある。Kehtarnavaz ら [1989] は、曲面を曲率の符号によって領域分割し、各領域の隣接関係を表すグラフ構造のマッチングを行った。Higuchi ら [1995] は、距離画像の各頂点の曲率を球面に写像したものをマッチングすることで位置合わせを行っている。Feldmar ら [1996] は、曲率の主方向と法線で構成される直交系が一致するような変換をランダムサンプルし RANSAC のような手法により大まかな位置あわせを行っている。Krsek ら [2002] は平均曲率が0であるような曲面上の曲線を特徴として利用し、ランダムサンプリングにより多数の仮説を生成し、その中から最良のものを選んでいく。

Stein と Medioni[1992] は形状モデルの頂点とその周囲の頂点の法線ベクトルを用いて定義した splash という特徴量を用いて対応付けを行った。その名称は法線ベクトルが広がる様子が水しぶきのように見えることに由来している。Chua と Jarvis[1996] は、曲面上の点を中心とする一定半径の球と曲面との交点と接平面との距離の変化を point signature と称して対応付けに使用している。これらの特徴量は、曲率の表現方法の一種と考えられる。Johnson と Hebert[1999] は頂点の法線ベクトルを軸とする円柱面に周囲の頂点を投票することによりスピニメージ (spin image) という画像を生成し、主成分分析によって圧縮したスピニメージを用いて類似画像検索により対応付けを行う手法を提案した。スピニメージは曲率より広い範囲の形状を特徴量として扱っている手法である。

直接法

山本ら [1991] は、推定する運動が微小で距離画像の射影関数が既知である場合に、濃淡画像のオプティカルフローに相当する距離動画像の移動ベクトルであるレンジフローについての拘束式を用いて、対応付けをすることなく位置あわせを線形に解く直接法を提案している。Horn ら [1991] や梅田ら [1992] も同様の拘束式を導出している。手前の物体による隠蔽などの非線形な変化については考慮されていない。山本らはさらに非剛体運動の推定も行っている。

ICP アルゴリズム

Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズム [Besl 1992] は、データ形状がモデル形状に大まかに位置あわせされていることを初期状態として仮定し、データ形状の各点から最も近いモデル形状上の点への対応づけと、その対応づけに基づく変換の推定を、交互に繰り返すことにより、対応付けと位置あわせを同時に解くアルゴリズムである。対応付けと位置あわせそれぞれが誤差関数を減少させるので、極小解に単調に収束することが保障されている。ICP アルゴリズムではデータ形状の各点から最も近いモデル形状の点に対応付けている (point-to-point) のに対して、Chen と Medioni[1992] が提案した手法では、各制御点 (control point) を、法線と他方の距離画像面との交点に対応付けしている (point-to-plane)。面上に対応点を求めたほうが正解への収束性がよいとされている [Rusinkiewicz 2001]。

頑強性

ICP アルゴリズムで極小解が正解となっているためには、データ形状がモデル形状の一部であることが必要であるが、一般に異なる視点から計測された二枚の距離画像は互いに重なり合わない部分があり、この条件が満たされない。重なりあわない未計測部分や他方のデータに対応点がない誤計測部分に不要な対応関係をつけないように判定する必要がある。

清水ら [1999] は計測誤差の性質が既知であれば、精度の良い位置あわせが行えることを示した。Zhang[1994] は ICP アルゴリズムと同様の手法を提案したが、対応点間の距離のヒストグラムを基に適応的に調整される閾値によって信頼できない対応関係を除去している。増田ら [1995] は中間値から求めた閾値を使っている。Turk ら [1994] は、データ点の間隔から求めた固定閾値と、最も近い点が計測領域の端にある場合は対応点として使用しないという拘束条件を利用している。類似した手法は [Blais 1995] でも使われている。Pulli[1999] は位置あわせ誤差が小さい方から $p\%$ の対応点だけを利用している。同様な手法は Bittar ら [1993] も用いている。Dorai ら [1998] はユークリッド距離があまり変化しないような対応点だけ用いている。Liu ら [2002] は、正しい対応の満たすべき幾何学的な性質を導き、これを用いて誤対応を除去している。Okatani ら [2004] は、面の局所的な構造が整合するような位置あわせを行っている。

高速化

ICP アルゴリズムの高速化に関しては多くの手法が提案されているが、その効果は対象とするデータ形状や実装する計算機の性質に依存する [Rusinkiewicz 2001]。最近傍点の探索の高速化には k-d tree が使われる [Zhang1994]。ユークリッド距離を用いて最近傍点を求めることは多くの計算量を必要とするため、距離画像を視線方向に投影し、他方の距離画像との交点を対応点として求める方法が提案されている [Benjemaa 1999; Blais 1995]。レンダリングすることにより計算可能であるため、グラフィックスハードウェアを用いて高速化が可能である。

特徴量の組み合わせ

ICP アルゴリズムの一つの特徴は、特徴点を用いないことである。しかし、特徴的な点が極端に少ない場合や位置あわせを遮るような凹凸がある場合には誤った対応関係に影響されて、収束が遅くなったり正解に到達しない場合がある。点の座標値だけでなく、法線方向・主曲率・モーメント等の不変特徴量についての二乗誤差も加えた距離を用いる手法が提案されている [Feldmar 1996; Sharp 2002]。特徴量と組み合わせることにより、より離れた初期値から位置あわせを行うことができるが、正解の近傍では幾何学的な特徴量の情報は冗長で、微分的な特徴量は計測誤差の影響を受けやすく、適切に組み合わせないと却って正確な位置あわせを実現することは困難である。回転体のように対称性が高い形状は形状だけでは位置あわせが不可能で、表面のテクスチャや色の情報も利用する必要がある [Godin 2001]。表面の色情報を用いる場合には、対象の反射特性によっては照明による変化を考慮する必要がある [Okatani 2004]。

複数距離画像の同時位置あわせ

ICP アルゴリズムに代表されるアルゴリズムは二つのデータ間で位置あわせを行う。位置あわせを行うためにはデータ間に重なりが必要で、手前にある物体による隠蔽も考慮すると、二つの計測データからだけでは形状全体を覆うモデルを生成することはできない。二つのデータ間の位置合わせ手法を逐次的に適用して三つ以上の複数形状データの位置合わせを行うことは可能であるが、データ数が増えるに従って組み合わせの数が増え、位置合わせを何度も繰り返して行くうちに誤差が累積し全体として整合性がとれなくなる。複数のメッシュ構造間の対応関係が既知である場合には、データの欠損にも耐えられるように改良した主成分分析手法により全体として最適な運動パラメータを求めることができる [Shum 1997] が、一般に対応は既知ではない。

おおまかな位置合わせは特徴量ベースの手法や手作業により行うことができる。その状態を初期値として、選択した一つのデータに対して、他のデータを位置合わせするような微調整を繰り返し適用することにより全体の整合性をとる手法が提案されている [Bergevin 1996; 下鍋 1996; Pulli 1999; Benjemaa 1999]。二つのデータ間の位置あわせ誤差の和として全体の位置合わせ状態を表すような誤差関数を一つ定義し、その非線形最小化問題として問題を定式化し、通常の数値計算アルゴリズムを適用して解を求める手法もあるが、多数ある局所解を避けて正解に到達させるにはよい初期値を与える必要がある [Stoddart 1996; Nishino 2002]。Silva ら [2003] は、評価関数を遺伝的アルゴリズムにより最小化することによって複数データの位置あわせを行っている。

Turk ら [1994] は、物体全体を広く覆う円筒状の計測データに対して、多視点からのデータを位置あわせしているが、いつもそのような都合の良いデータがあるとは限らない。全体を覆うようなデータは形状を統合すれば生成することができるが、形状を統合するためには位置あわせができていなくてはならない。大まかな位置あわせができていならば、統合と位置あわせを交互に繰り返すことでこの鶏と卵の関係を解くことができる [Guhning 2001]。Huber ら [2003] は、距離画像間での面の見え方の整合性を利用し、複数画像間での共通に観測されている領域の対応を決定している。増田 [2003] は、符号付距離場による形状記述を用いて、形状した統合に各計測データを

位置あわせし、さらに形状を統合する際にロバスト統計を組み合わせることで、誤計測点の自動判別も行っている。各計測データは統合形状の一部になっているので、データ間での重なりを考慮して誤差関数を設計したりする必要がなく、計測データが重なりあう程度に初期値を与えておけば自動的に形状モデルが生成される。

形状統合

部分的な形状データはそれぞれ異なった構造を持っており、位置あわせして重ね合わせただけでは連続した一つの形状モデルができたことにはならず、形状統合 (merging, integration, fusion) を行わなければならない。形状統合で解くべき課題は次の二つに整理できる：

- ・単一の形状記述にまとめること (リメッシング, remeshing) ;
- ・重複した部分を比較することによって計測誤差を除去すること。

形状統合の手法は、形状の記述方法に強く依存しており、面ベースと体積ベースの手法に分類できる。

グラフ曲面の平均

グラフ曲面とは $z=f(x,y)$ のように表すことができる曲面である。Chen ら [1992] は、位置あわせした形状データを極座標系のグラフ曲面で表し、中心からの距離値を平均することにより、形状統合を行っている。この方法では歯のように単純な形状しか扱うことができない。

メッシュ縫合

Turk と Levoy [1994] はジッパーのようにメッシュを接続する手法 (mesh zippering) を提案している。

1. 重なったメッシュから冗長な三角形を取り除き、少し重なった状態にする；
2. 重なった部分に新しい頂点を生成してつなぎ直し、二つのメッシュを連結する；
3. 小さな三角形パッチを削除する。

接続部分には小さな三角形パッチが生成される可能性があり、メッシュモデルの応用にとって望ましくないため、最後の手順が必要になる。新しく構成した全体のメッシュの頂点の位置を、頂点からの法線と入力距離画像との交点の重み付き平均にすることで、計測誤差の平均化を行っている。

Soucy と Laurendeau [1995] も同様にメッシュモデルベースの統合手法を提案している。まず、冗長に取得された部分を検出し、重複の状態によってデータを分割する。それぞれの部分に対して以下の処理を行う。

1. 各部分を平面近似して新たな直角座標系を導入し、格子状のメッシュを定義する；
2. それぞれの距離画像をメッシュに投影し、メッシュの頂点での各距離画像の高さを求める；
3. 高さの重み付き平均を取り、メッシュの各頂点の位置を決定する。

このようにして部分的に正射影された距離画像のメッシュが複数生成されるが、まだ分割された状態であるので、最後にメッシュの隙間をドロネー三角形分割することによって接続し、複数の距離画像の統合を行っている。

これらのメッシュモデルベースの手法ではメッシュの境界部分の処理が難しく、距離画像に含まれる計測誤差や、残留している位置あわせ誤差の影響を受けやすい。

変形体モデル

事前に用意したメッシュを変形して計測した点群に当てはめ、整った形状表現を得ようとする手法が提案されている。Chen と Medioni[1995] は、重なりあった複数のデータ形状の点群の内部に球体の初期値を与え、適応的にメッシュを膨張して内部から貼り付けていく balloon model を提案している。Delingette ら [1992] や Higuchi ら [1995] は、データ形状の点群を包むような球を初期値とし、誤差関数を最適化することにより外側から貼り付ける手法を提案している。これらの手法は、初期値と位相幾何学的に異なる形状に当てはめることができない。また、計測データには、ノイズや欠損部がある一方で、突起や凹部もあり、どちらにもうまく貼り付くような制御方法を設計するのは難しい。

ボクセルカービング

センサーの位置と幾何学的構成が既知であるならば、センサーで計測できる空間を、計測された表面を境にして、内部と外部に分割することができる。坂口ら [1991] は octree で記述したボクセルを、object(内部)、surface(表面)、space(外部)に分類することにより多視点からの計測結果の統合を行っている。

1. 初期値として全ボクセルに object のラベルをつけておく；
2. センサーで計測した表面上のボクセルに surface のラベルをつける；
3. surface のボクセルとカメラおよびプロジェクター間のボクセルに space のラベルをつける；
4. 回転台やロボットアームによりセンサーの視点を変える。

ボクセルによる形状記述を用いた形状統合は容易であるが滑らかな形状は得られない。

符号付距離場

体積的な形状の記述方法として符号付距離場を用いると、滑らかなメッシュによる形状モデルを生成することができる。符号付距離場は中間表現として使用され、次の二つの変換が必要になる：

- ・複数距離画像からの統合符号付距離場の生成；
- ・符号付距離場からメッシュモデルへの変換。

以下、符号付距離場を用いた形状のモデリングについて説明し、次に距離画像から符号付距離場を生成するいくつかの手法について述べる。

符号付距離場を用いた形状モデリング

符号付距離場は、3次元空間の各点に、その点から向き付き曲面としての物体表面までの絶対値距離に、その点が面の表裏(物体の内外)のいずれにあるかを表す正負の符号をつけた符号付距離を対応させたスカラー場である。符号付距離場を $f(x)$ と表すと、表面は $f(x)=0$ を満たす 2次元曲面である等値面として表され、その曲面を 0等値面と呼ぶ。この方法によってあらわされた曲面を、式の表現形式から、陰関数表面 (implicit surface) と呼ぶ。

符号付距離場の離散的な表現は、3次元空間をボクセルに分割し、各ボクセルに、その中心から物体表面までの距離を保持することによって得られる。離散化された符号付距離場によって表さ

れた表面形状からメッシュモデルに変換するには、しばしばマーチングキューブ法 (marching cubes algorithm)[Lorenson and Cline 1987] が用いられる。隣接するボクセル中心に囲まれた立方体の各辺の頂点の符号が異なる場合に、スカラー値が 0 になる位置に頂点を補間して生成し、立方体内で適切に接続することにより、等値面のメッシュを生成することができる。マーチングキューブ法は汎用な手法であるが、微小な三角形が生成されたり、不適切な接続によって不要な穴が生成されトポロジーが変化したりする問題点が指摘されている。

符号付距離場による距離画像の統合

複数の距離画像から統合された符号付距離場を求めるためのいくつかの手法が提案されているが、主要な問題点は、複数の距離画像の情報から一つの最近傍点をいかに求めるかである。Hoppe ら [1992] は複数距離画像を向きの情報のない単なる 3 次元点群として扱い、局所的な平面を当てはめ、各ボクセルから平面までの距離を計算し、平面の法線方向を考慮することによって符号を決定し、生成した符号付距離場にマーチングキューブ法を適用してメッシュモデルを生成している。Hilton ら [1996] は各距離画像の最近傍点までの符号付距離を計算し、その重み付平均を取ることによって最終的な符号付距離を計算する手法を提案している。距離画像から符号付距離を計算する際に、最近傍点が距離画像の端にある場合には、重みを 0 としている。

Curless と Levoy[1996] は、ボクセルから距離画像までの符号付距離の計算に、ユークリッド距離ではなく、各ボクセルとカメラの視点を結ぶ視線方向上での距離を用い、ボクセルが距離画像よりも視点寄りである場合に負、奥にある場合に正の符号を与えている。ボクセルが距離画像よりもある程度奥にある場合、物体の裏面の影響を除去するため、重みを徐々に減少させている。この符号付距離は、グラフィックスハードウェアを用いた投影により高速に計算することができる。

符号付距離計算において距離画像に含まれる外れ値を除外するための手法（合致表面法）が、Wheeler ら [1998] によって提案されている。まず、ボクセル中心 x から距離画像 T_0 の最近傍点 p_0 を探索する。次に最近傍点 p_0 から他の距離画像 T_1, T_2, \dots の最近傍点 p_1, p_2, \dots を計算する。それらの距離が近く、法線方向が類似している場合には同一の平面を表しているとみなし重み付平均を取る。中心とする距離画像を T_0, T_1, \dots と変え、その重み付き平均のうち距離が最小のもので符号付距離を決定する。

増田 [2003] は、各距離画像について求めた符号付距離場と法線場の値に、ロバスト統計手法を適用することにより統合を行っている。重複するデータが少ない場合でも統計処理を容易にし周囲との連続性を保つために、近傍の場の値も外挿して利用する。統合の際に重み付けも同時に行い、視点に依存して生じた誤差の大きな計測値は自動的に外れ値として判別している。

最終的にメッシュ生成に利用されるのは、隣接するボクセルの符号付距離の符号が異なる部分だけである。符号付距離計算をそのような部分に限定することにより、計算量・データ量を削減することが可能になる。Curless と Levoy[1996] は、距離画像から遠方のボクセルを run-length encoding を用いて圧縮しデータ量を削減している。Wheeler ら [1998] はオクトツリーを用いて距離画像から遠い部分を粗くサンプリングし、計算量・データ量を削減している。佐川ら [2002] はそれを改良し、観測対象の形状に応じてサンプリング間隔を決定し、生成するモデルの解像度を調節する手法を提案している。また、佐川ら [2004] は、レーザレンジセンサによって取得されたレーザの反射率 (laser reflectance strength, LRS) の情報も、距離情報と同時に統合処理処理する方法を提案している。

欠損部の補完

計測できていない部分(欠損部)は,センサーの原理的な制約と,視点位置と物体との位置関係による幾何学的な制約によって発生する.例えば,ステレオなどの受動的手法ではテクスチャがない部分,レーザーレンジファインダなどの能動的手法では黒や鏡面など光が受光部に反射してこない部分では,形状計測を安定して行うことができない.それぞれのセンサーは装置の構成によって計測可能な範囲が決まっており,センサーを設定できる位置は対象物や周囲の物体に制限され,あまり複雑でない形状でも非常に多くの視点を必要とする場合がある.残された未計測部を効率よく計測するための視点の計画法(view planning)が研究されているが[Scott 2003],どうしても計測できない部分は尤もらしく穴埋めする(hole filling, shape completion)のが実用的である.穴埋めの手法は,形状の記述方法により面ベースと体積ベースの手法に分類できる.

面ベースの穴埋め

ステレオで計測したいいわゆる 2.5 次元のグラフ曲面の欠落部を補完するために,マッチング誤差に滑らかさの拘束を加えて正則化したエネルギー関数を最小化する手法が一時期盛んに研究された[Grimson 1983; Terzopoulos 1988; Szeliski 1990]. Kass と Terzopoulos[1998]は,二次元画像中の対象物の輪郭抽出を正則化したエネルギー最小化として定式化した snakes を提案しているが,その三次元版といえるのが形状統合手法でも紹介した変形体モデル[Chen 1995; Delingette 1992; Higuchi 1995]である.この手法は,滑らかさ拘束で正則化したエネルギー関数を最小化するように反復計算によって事前に設定したメッシュモデルを変形していくが,初期値と位相的に異なる形状には当てはめられず,滑らかさ拘束を制御して複雑な形状にうまく当てはめるのは難しい.

Liepa[2003]は,まず単純な三角形を用いて欠損部を埋め,欠損部とその周辺のメッシュの大きさがそろるように調節し,最後にメッシュが滑らかになるように変形を行う手法を提案した.この方法は,最初のステップで欠損部を単純な形状で埋めることを仮定しているため,複雑な形状には向いていないと考えられる.

体積ベースの穴埋め

形状統合で紹介した坂口ら[1991]の手法では,object(内部)とspace(外部)がsurface(表面)を挟まずに面している箇所を未計測部であると判定している. Curless と Levoy[1996]も同様に,Unseen(内部),Near surface(表面),Empty(外部)の三つのクラスを用いることにより,簡単な穴埋め処理を行っている.これらの手法で埋められる面は visual hull であり滑らかにはならない.

Davisら[2002]は観測された表面の近傍から,空間全体にわたって符号付距離場を熱伝導方程式に基づいて拡散し,欠損部での0等値面を補完している. Sagawa と Ikeuchi[2003]の手法は,複数の距離画像から符号付距離場として統合する際に生じる不整合を修正する計算を行うことにより,曲率が一定となるような欠損部の0等値面を生成する.これにより,位置合わせ時に生じる符号付距離場の不整合によって発生する誤差の問題を解決しつつ,補間が可能となる.体積的な手法としては他に,偏微分方程式に基づく手法[Verdera 2003],平均曲率を積分したものを最小化する方法[Clarenz 2004] 符号付距離場を低次多項式で近似する方法[Ohtake 2003][Masuda 2004]も提案されている.

Sharfら[2004]は,欠損部周辺の形状と類似した部分を他の場所から切り貼りすることにより context-based な補完を行う手法を提案している.形状の類似性は符号付距離や法線方向を用いて計算しており,メッシュを貼り付ける際には ICP 法を拡張して変形しながら位置合わせを行って

いる．これにより，周囲に類似した性質を持つ滑らかな曲面で補間することが可能になっている．

データ

距離データの研究を行いたいセンサーがない，手持ちのデータ以外で実験したい，または，他人の結果と比較したいという場合には公開されているデータが利用できると便利である．データフォーマットや使用条件について理解してから使用する必要がある．

National Research Council of Canada では距離画像のデータベースを整備し一時期は web でも公開していた [Rioux 1988]．Stanford Computer Graphics Laboratory では，距離画像データや生成した形状モデルなどのデータと処理ソフトウェアを公開している [<http://graphics.stanford.edu/>]．この中には標準的に使用されているデータも多く含まれている．The Ohio State University(OSU) では，Michigan State University(MSU) や Washington State University(WSU) で行ってきた研究も含めて，さまざまなセンサーで計測した多数の距離画像を公開している [<http://sampl.eng.ohio-state.edu/~sampl/data/3DDB/index.htm>]．University of South Florida(USF) では，4種類のセンサーで計測した距離画像を公開している [<http://marathon.csee.usf.edu/range/DataBase.html>]．その他，形状モデルから生成した距離画像 [<http://range.informatik.uni-stuttgart.de/htdocs/html/>] や接触式のセンサーで計測したデータ [<http://www.inf.ufpr.br/imago/database/database.html>] もある．

まとめ

本稿では，複数距離画像から形状モデルを生成するための技術を中心に距離データ処理についてサーベイを行った．ここまでみてきた様に，この研究分野には，古典的な理論から実装が重要となる応用まで，幅広い技術分野が関連している．しかし，現実世界に存在する物体をモデル化するには，変形・テクスチャ・反射特性などの様々な要素も必要である．これらの技術を確立していくためには今回サーベイできなかったさらに広範囲の技術も考慮していかななくてはならない．

参考文献

- Benjemaa, R., and Schmitt, F. 1999. Fast global registration of 3d sampled surfaces using a multi-z-buffer technique. Image and Vision Computing, volume 17, pages 113-123.
- Bergevin, R., Soucy, M., Gagnon, H. and Laurendeau, D. 1996. Towards a general multiview registration technique. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 18, number 5, pages 540-547.
- Besl, P. J., and McKay, N. D. 1992. A method for registration of 3-d shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 14, number 2, pages 239-256.
- Bittar, E., Lavallee, S. and Szeliski, R. 1993. A method for registering overlapping range images of arbitrary shaped surfaces for 3-D object reconstruction. Proceedings of SPIE, volume 2059, Sensor Fusion VI, pages 384-395.
- Blais, G., and Levine, M. D. 1995. Registering multiview range data to create 3d computer objects. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 17, number 8, pages 820-824.
- Chen, Y., and Medioni, G. 1992. Object modelling by registration of multiple range images. Image and Vision Computing, volume 10, number 3, pages 145-155.
- Chen, Y., and Medioni, G. 1995. Description of complex objects from multiple range images using an inflating balloon model. Computer Vision and Image Understanding: CVIU, volume 61, number 3, pages

325-334.

Chua, C., and Jarvis, R. 1996. 3-d free-form surface registration and object recognition. *International Journal of Computer Vision*, volume 17, number 1, pages 77-99.

Clarenz, U., Diewald, U., Dziuk, G., Rumpf, M., and Rusu, R. 2004. A finite element method for surface restoration with smooth boundary conditions. *Computer Aided Geometric Design*, volume 21, number 5, pages 427-445.

Curless, B., and Levoy, M. 1996. A volumetric method for building complex models from range images. *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'96)*, pages 303-312.

Davis, J., Marschner, S. R., Garr, M., and Levoy, M. 2002. Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion. *Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pages 428-438.

Delingette, H., Hebert, M., and Ikeuchi, K. 1992. Shape representation and image segmentation using deformable surfaces. *Image and Vision Computing*, volume 10, number 3, pages 132-144.

Dorai, C., Wang, G., and Jain, A. 1998. Registration and integration of multiple object views for 3d model construction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume 20, number 1, pages 83-89.

Eggert, D. W., Lorusso, A., and Fisher, R.B. 1997. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms. *Machine Vision and Applications*, volume 9, pages 272-290.

Faugeras, O. D. and Hebert, M. 1986. The representation, recognition, and locating of 3-D objects. *The International Journal of Robotics Research*, volume 5, number 3, pages 27-52.

Feldmar, J., and Ayache, N. 1996. Rigid, affine and locally affine registration of free-form surfaces. *International Journal of Computer Vision*, volume 18, number 2, pages 99-119.

Godin, G., Laurendeau, D., and Bergevin, R. 2001. A method for the registration of attributed range images. *Proceedings of the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 179-186.

Grimson, W. E. L. 1983. An implementation of a computational theory of visual surface interpolation. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, volume 22, pages 39-69.

Guhring, J. 2001. Reliable 3D surface acquisition, registration and validation using statistical error models. *Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 224-231.

Higuchi, K., Hebert, M., and Ikeuchi, K. 1995. Building 3-d models from unregistered range images, graphical models and image processing, volume 57, number 4, pages 315-333.

Hilton, A., Stoddart, A. J., Illingworth, J., and Windeatt, T. 1996. Reliable surface reconstruction from multiple range images. *Proceedings of 4th European Conference on Computer Vision*, pages 117-126.

Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J. A., and Stuetzle, W. 1992. Surface reconstruction from unorganized points. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH'92)*, volume 26, number 2, pages 71-78.

Horn, B. K. P. 1987. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions, *Journal of Optical Society of America A*, volume 4, pages 629-642.

Horn, B. K. P., and Haris, J. G. 1991. Rigid body motion from range image sequences, *CVGIP:Image Understanding*, volume 53, number 1, pages 1-13.

Huber, D., and Hebert, M. 2003. Fully Automatic registration of multiple 3d data sets. *Image Vision Computing*, volume 21, number 7, pages 637-650.

Johnson, A. E., and Hebert, M. 1999. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3d

- scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume 21, number 5, pages 433-449.
- Kanatani, K. 1994. Analysis of 3-D rotation fitting. *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume 16, pages 543-549.
- Kass, M., Witkin, A., and Terzopoulos, D. 1988. Snakes: active contour models. *International Journal of Computer Vision*, volume 1, number 4, pages 321-331.
- 河井良浩, 吉見隆, 植芝俊夫, 大島正毅, 1992. 多視点レンジデータからの3次元形状復元. *電子情報通信学会論文誌*, volume J75-D-II, number 4, pages 737-748.
- Kehtarnavaz, N., and Mohan, S. 1989. A framework for estimation of motion parameters from range images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, volume 45, pages 88-105.
- Krsek, P., Pajdla, T., and Hlavac, V. 2002. Differential invariants as the base of triangulated surface registration. *Computer Vision and Image Understanding*, volume 87, pages 27-38.
- Liepa, P. 2003. Filling holes in meshes. *Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing*, pages 200-205.
- Liu, Y., and Rodrigues, M. A. 2003. Geometrical analysis of two sets of 3d correspondence data patterns for the registration of free-form shapes, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, volume 33, number 4 pages 409-436.
- Lorensen, W., and Cline, H. 1987. Marching cubes: a high resolution 3d surface construction algorithm. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH'87)*, volume 21, number 4, pages 163-170.
- Masuda, T., and Yokoya, N. 1995. A robust method for registration and segmentation of multiple range images. *Computer Vision and Image Understanding*, volume 61, number 3, pages 295-307.
- 増田健. 2003. 符号付距離場の一致による複数距離画像からの形状モデル生成. *情報処理学会論文: コンピュータビジョンとイメージメディア*, volume 44, number SIG5(CVIM6), pages 30-40.
- Masuda, T. 2004. Filling the signed distance field by fitting local quadrics. *Proceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT 2004)*, pages 1003-1010.
- Nishino, K. and Ikeuchi, K. 2002, Robust simultaneous registration of multiple range images. *Proceedings of the 5th Asian Conference on Computer Vision*, pages 454-461.
- Ohtake, Y., Belyaev, A., Alexa, M., Turk, G., and Seidel, H.-P. 2003. Multi-level partition of unity implicits, *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2003)*, volume 22, number 3, pages 463-470.
- Okatani, I.S. and Sugimoto, A. 2004, Registration of range images that preserves local surface structures and color, *Proceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT 2004)*, pages 789-796.
- Pulli, K. 1999. Multiview registration for large data sets. *Proceedings of Second International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, pages 160-168.
- Rioux, M., and Cournoyer, L. 1988. The NRCC three-dimensional image data files. *Technical Report of National Research Council of Canada, CNRC 29077*.
- Rusinkiewicz, S., and Levoy, M. 2001. Efficient variant of the ICP algorithm. *Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp.145-152.
- Sabata, B., and Aggarwal, J. K. 1991. Estimation of motion from a pair of range images: a review. *CVGIP: Image Understanding*, volume 54, number 3, pages 309-324.
- 佐川立昌, 西野恒, 池内克史. 2002. 光学的情報付き距離画像のロバストな適応的統合. *電子情報通信学会論文誌*, volume J85-DII, number 12, pages 1781-1790.

- 佐川立昌, 西野恒, 倉爪亮, 池内克史. 2003. 大規模観測対象のための幾何形状および光学情報統合システム. 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, volume 44, number SIG5(CVIM6), pages 41-53.
- Sagawa, R., and Ikeuchi, K. 2003. Taking consensus of signed distance field for complementing unobservable surface. Proceedings of the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2003), pages 410-417.
- Sakaguchi, Y., Kato, H., Sato, K., and Inokuchi, S. 1991. Acquisition of entire surface data based on fusion of range images. IEICE Transactions, volume E-74, number 10, pages 3417-3422.
- Scott, W. R., Roth, G., and Rivest, J.-F. 2003. View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection. ACM Computing Surveys, volume 35, number 1, pages 64-96.
- Sharf, A., Alexa, M., and Cohen-Or, D. 2004. Context-based surface completion. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 2004), volume 23, number 3, pages 878-887.
- 清水郁子, 出口光一郎. 1999. 計測誤差を考慮した距離画像の重ね合わせ手法. 情報処理学会論文誌, volume 40, number 11, pages 4007-4105.
- 下鍋忠, 1996. 3次元形状モデル生成のための多視点距離データの位置合せと統合. 奈良先端科学技術大学院大学修士論文, NAIST-IS-MT9451055.
- Shum, H. Y., Hebert, M., Ikeuchi, K. and Reddy, R. 1997. An integral approach to free-form object modeling. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 19, number 12, pages 1366-1370.
- Silva, L., Bellon, O., and Boyer, K., 2003. Enhanced, robust genetic algorithms for multiview range image registration, Proceedings of the Fourth International Conference on 3-D Imaging and Modeling, pages 268-275.
- Soucy, M., and Laurendeau, D. 1995. A general surface approach to the integration of a set of range views. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 17, number 4, pages 344-358.
- Stein, F., and Medioni, G., 1992. Structural indexing: efficient 3-d object recognition. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 14, number 2, pages 125-145.
- Stoddart, A. J. and Hilton, A. 1996. Registration of multiple point sets. Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, volume II, pages 40-44.
- Szeliski, R. 1990. Fast surface interpolation using hierarchical basis functions. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 12, number 6, pages 513-528.
- Terzopoulos, D. 1988. The computation of visible surface representations. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 10, number 4, pages 417-438.
- Turk, G., and Levoy, M. 1994. Zippered polygon meshes from range images. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, (Proceedings of SIGGRAPH'94), pages 311-318.
- 梅田和昇, 新井民夫, 1992. 運動・距離式を用いた距離画像からの3次元運動の計測. 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'92) 講演論文集 I, pages 381-387.
- Verdera, J., Caselles, V., Bertalmio, M., and Sapiro, G. 2003. Inpainting surface holes. Proceedings of 2003 International Conference on Image Processing, volume 2, pages 903-906.
- Wheeler, M. D., Sato, Y., and Ikeuchi, K. 1998. Consensus surfaces for modeling 3d objects from multiple range images. Proceedings of International Conference on Computer Vision (ICCV'98), pages 917-924.
- 山本正信, Boulanger, P., Beraldin, J.-A., and Rioux, M. 1991. 距離動画像を用いた非剛体パラメータの直接的推定法. 情報処理学会論文誌, volume 32, number 9, pages 1129-1141.
- Zhang, Z. 1994. Iterative point matching for registration of free-form curved surfaces. International Journal of Computer Vision, volume 13, number 2, pages 119-152.