

局所的位相構造評価を取り入れた距離画像の頑健な位置合わせ

岡谷 (清水) 郁子[†] 杉本 晃宏[‡] 前川 仁[†]

埼玉大学工学部[†] 国立情報学研究所[‡]

E-mail: ikuko@cda.ics.saitama-u.ac.jp, sugimoto@nii.ac.jp

距離画像中での計測点の隣接関係や近傍における対応の整合性を考慮することにより、物体の局所的な位相構造を保持する距離画像の位置合わせ手法を提案する。本手法では、各計測点の近傍の局所的形状パターンを利用することで、誤った対応関係を排除し、画像上で隣接する計測点での対応の整合性を評価する指標として「歪係数」を導入することで、局所的な位相構造の保持のよさを評価する。これにより、評価関数のローカルミニマムが少なくなり、初期値に対して頑健な位置合わせが可能となる。

キーワード： 距離画像，位置合わせ，重ね合わせ，局所形状パターン，対応の歪

Robust Registration of Range Images Using the Evaluation of Local Topological Structure

Ikuko Shimizu Okatani[†], Akihiro Sugimoto[‡], Hitoshi Maekawa[†]

Saitama University[†], National Institute of Informatics[‡]

E-mail: ikuko@cda.ics.saitama-u.ac.jp, sugimoto@nii.ac.jp

We propose a method for registration of range images that locally preserves surface structures of an object. To register two coordinate systems of the range images, we introduce “shape patterns” and “skewness”, both of which are extracted from local surfaces nearby a point of interest in each image. The shape patterns of the local surfaces are used to eliminate errors incurred by corresponding surface pairs, while the skewness of the corresponding surfaces is used to robustly estimate registration transformation locally preserving the structures of object surfaces. These two features enable us to robustly estimate the transformation that locally preserves the structures between corresponding surfaces.

keywords: Range Image, Registration, Alignment, Local Shape Pattern, Skewness of the Correspondence

1 はじめに

レンジファインダ開発技術の急速な進歩によって、レンジファインダの高速化、小型化、低下価格化が進んでいる [9]。それに伴い、レンジファインダを用いて実世界に存在する物体の 3 次元形状を計算機内に取り込む手法に関する研究が、数多く報告されている [10, 12, 14, 15, 16, 18]。

レンジファインダで得られる形状データは距離画像と呼ばれ、これは物体を一方からみたときの視点の位置から物体までの距離を各画素に格納した画像の形式で得られる。すなわち、一枚の距離画像には、視点の位置と姿勢に依存する座標系で表された対象物体の部分的な形状データが含まれている。そこで、物体の 3 次元の全形状を得るには、物体に対してさまざまな角度・視点から距離画像を得て、視点の位置と姿勢を正確に知り、各距離画像に含まれる部分形状を基準となる一つの座標系に変換して表してから、重複した形状を過不足なく一元化することが必要である。そのために、距離画像を得た視点の位置・姿勢 (以下、変換パラメータと呼ぶ) を知ることを、距離画像の位置合わせという。

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で対応付け、(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った手順で行われるのが一般的である。

位置合わせを精度高く行う場合には、部分形状データの 3 次元座標そのものの対応が用いられる。最も代表的な手法である Besl ら [2] 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ータで変換し、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ータを求め、新たな変換パラメータが求まったら、計測点の対応を求めなおして変換パラメータを推定するというプロセスを繰り返す。この方法を基本として、(1) 画像間での対応付けの問題 (どのような特徴量を対応付けるかと、どのように正しい対応付けを行うか) を解決する手法や、(2) 変換パラメータの推定の問題 (得られた対応からどのようにして変換パラメータを推定するか) を解決する様々な拡張手法が提案されている。

まず、対応の問題について述べる。「対応する計測点」とは、対象物体上の同じ場所を観測している、異なった視点から観測した距離画像に含まれる計測点である。距離画像はある方向から見た離散的な計測点群である

ため、物体上の全く同一の点を観測することはほとんどない。そのため、物体上を十分細かい密度で計測していると仮定して計測点の間を補間し、点と面の対応を用いることによって、同一の点を観測していない問題を解決している [4, 20]。

点と局所的な面の正しい対応関係は、正しい変換パラメータが得られるまでわからないが、できるだけ正しい対応関係を求めるために、誤った対応関係をうまく取り除く必要がある。Dorai ら [6] は、2 組の対応を使って、1 番目の画像での 2 点間の距離と 2 番目の画像での 2 点間の距離がおおよそ等しいことからこれらの距離を比較し、大きく異なる場合は、その対応を誤ったものとしている。また、Masuda ら [11] は、ロバスト推定の手法である Least Median Squares の考え方をもとに、距離画像の中から少数の計測点をランダムに選び、視点間の座標変換の推定を繰り返す。Guest ら [8] は、微量変化させたときの対応する点間の距離の変化をもとに対応の信頼度を計算して位置合わせする手法を提案している。

一方、得られた対応関係から、どのように変換パラメータを推定するかという問題に対して、ICP アルゴリズムでは、変換パラメータの初期値で対応を探索し、対応する点同士の距離の和が最も小さくなる変換パラメータを推定するということを交互に繰り返している。このとき、距離画像に含まれる計測誤差や、形状の不確かさにより、正しい変換パラメータで評価関数が最小値をとらなかつたり、正しい変換パラメータの付近に多くのローカルミニマムが生じることがある。このような問題を解決するために、距離に加えていろいろな特徴量を利用する方法が提案されている。Chua ら [5] は、対応の探索に主曲率を使っている。Feldmar ら [7] は、距離と法線と曲率の差を最小化している。Sharp ら [17] は、距離に加え、曲率、モーメントなどの不変量の差を最小化している。また、Chen ら [3] は、ランダムにいろいろな変換の初期値を選び探索している。

以上概観したように、距離画像の位置合わせにおける (1) 画像間での対応付けの問題と (2) 変換パラメータ推定の問題に対して様々な手法が提案されているが、それらはいずれも、個々の計測点を単独で評価し、各計測点における評価値の和によって距離画像全体としての位置合わせのよさを評価している。すなわち、計測点の隣接関係や計測点の近傍における対応の整合性を考慮しない手法になっている。本稿では、従来手法に欠けているこのような問題点に着目し、画像上での近傍領域における局所的な位相構造を保持するような変換

を求め、それによって頑健に距離画像を位置合わせする手法を提案する。本手法は、(1) 各計測点の近傍の局所的形状パターンを利用することで、誤った対応関係を排除し、(2) 画像上で隣接する計測点での対応の整合性を評価する指標として「歪係数」を利用することで、局所的な位相構造の保持のよさを評価する。これにより、計測点の隣接関係や計測点の近傍における対応の整合性を考慮した距離画像の位置合わせが可能となる。

2 局所的な位相構造を表す特徴量

対象となる物体面上での隣接関係と、それを観測した距離画像上での計測点の隣接関係に着目する。図1のように、物体上の局所的な領域は、物体面に対して距離画像を得た視点の位置と姿勢が変化しても、距離画像中では隣接する画素で観測されると考えられる。本手法ではこの画像上での隣接関係に着目し、距離画像上で隣接した画素に対応する計測点から成る局所的な面を考え、この局所的な面から得られる特徴量を利用して位置合わせを行う。

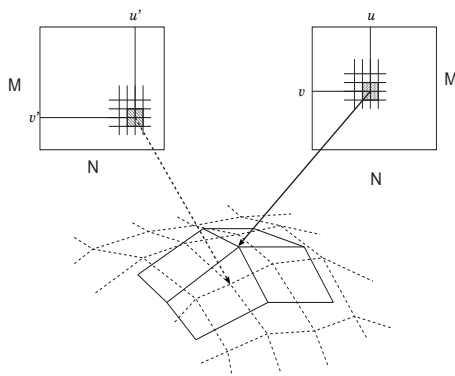


図 1: 異なる視点から得られた計測点の対応。物体上の局所的な領域を考えると、面に対して距離画像を得た視点の位置と姿勢が変化しても、面上の局所領域は距離画像中で隣接する画素で観測される。

2.1 局所的形状パターン

上述したように、距離画像の位置合わせでは、ある距離画像の各計測点で観測されている物体上の点を、他の距離画像ではどの計測点として観測しているかという、画像間での対応関係を知ることが重要である。本手法では、距離画像の隣接する画素で観測されている計測点から成る局所的な面を考え、ある距離画像の各計測点について、他の距離画像の局所的な面へ対応付

ける。このとき、正しい対応関係であれば、対応する面の局所的な形状(凹凸など)は類似していることを利用して、距離に基づいて仮の対応を求めた後に、各計測点の近傍の局所的な形状パターンを評価して誤った対応関係を除く。

まず、各距離画像の各計測点について隣接画素で観測されている計測点から成る面を考え、形状パターンを「凹、凸、平、凹円筒、凸円筒、鞍点」に分類しておく。現在得られている変換パラメタに対して、その変換パラメタで各計測点を変換し、各計測点に対して、ICP アルゴリズムと同様に、基準となる距離画像の中で一番距離の近い面を仮に対応付ける。次に、仮に対応させた局所領域の形状の整合性を調べるために、対応付けられた局所領域同士の形状パターンを比較し、一致していない場合は誤った対応関係として取り除く。

局所的な面の形状パターンは、各計測点 $x(u, v)$ の画像上での近傍で観測されている計測点から成る局所的な面の、ガウス曲率 K と平均曲率 H を用いて求める。

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}, \quad (1)$$

$$H = \frac{1}{2} \frac{LG + EN - 2FM}{EG - F^2}. \quad (2)$$

ただし、 E, F, G, L, M, N は、 $x(u, v)$ における面の単位法線ベクトルを \mathbf{n} として以下のように表される。

$$E = \left\| \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial u} \right\|^2, F = \left[\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial u} \right]^\top \left[\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial v} \right], G = \left\| \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial v} \right\|^2, \\ L = \mathbf{n}^\top \left[\frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial u^2} \right], M = \mathbf{n}^\top \left[\frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial u \partial v} \right], N = \mathbf{n}^\top \left[\frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial v^2} \right].$$

各計測点の局所的形状パターンは、 K, H の正負から以下のように分類する。

1. 凹 : $K > 0, H > 0$
2. 凸 : $K > 0, H < 0$
3. 平面 : $H = 0$
4. 凹円筒 : $K = 0, H > 0$
5. 凸円筒 : $K = 0, H < 0$
6. 鞍点 : $K < 0$

これは、処理の最初に 1 回求めておけばよい。

2.2 対応の歪係数

距離画像間での局所的な面の対応関係を得たら、これを用いて変換パラメタを評価し、最もよいものを求

める．このとき，正確に，かつ，初期値に対して頑健に変換パラメタ求めるためには，変換パラメタを評価するための評価関数は，真の変換パラメタで最小値をとり，さらに，真の変換パラメタの周りにローカルミニマムが少ないものが望ましい．本手法では，計測点の近傍での対応関係の位相構造を考慮することにより，真の変換パラメタの周りに存在するローカルミニマムを減らすために，近傍における対応関係との整合性を表す歪係数を導入する．

図2のように，変換パラメタで変換された計測点 x' から対応する面上の点 x へのベクトル（以下，対応ベクトルと呼ぶ）を考えると，変換パラメタが正しければ，近傍の点で対応ベクトルは揃っているはずである．また，図3に示すように，距離が同程度でも，対応ベクトルが近傍の点で揃っているほうが，よい変換パラメタであると考えられる．歪係数は，このベクトルの近傍での揃い具合を表すものである．

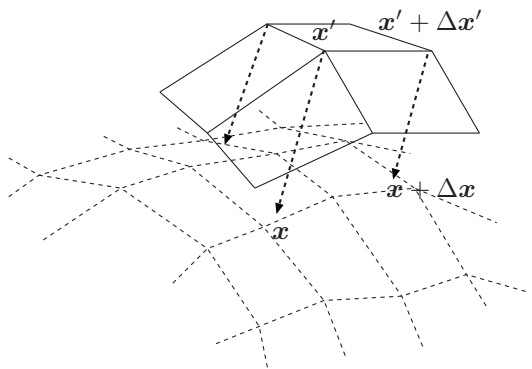


図2: 対応する面を結んだベクトル．対応ベクトルの近傍での歪テンソルを計算し，このベクトルの揃い具合を表す歪係数を利用して変換パラメタを評価する．

対応ベクトルの揃い具合を表すための歪係数として，本手法では近傍の点での対応ベクトルの歪テンソル [1] の固有値の和を用いる．図2のように，変換パラメタで変換した各計測点 x' を始点とし，基準となる距離画像中の対応する点 x を終点とする対応ベクトル $v = x - x'$ を考えると，点 x' の近傍の点 $x' + \Delta x'$ での対応ベクトル $v + \Delta v = (x + \Delta x) - (x' + \Delta x')$ の歪テンソル S は以下のように表される．

$$S = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし， $\frac{\partial v_x}{\partial x}$ などは，以下のような関係を満たす行列 V

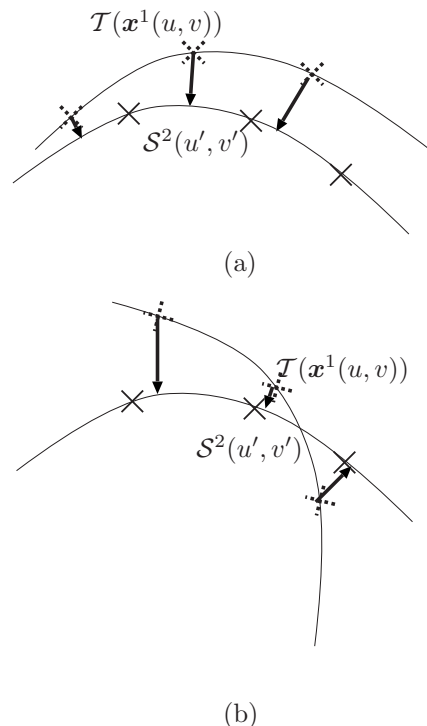


図3: 隣接する画素での対応の揃い具合の評価．(a)，(b)とも，対応する面への距離の和は同程度であるが，対応する面へのベクトルは (a) の方が揃っている．

の各成分であるとする．

$$\Delta v = V \Delta x' = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \Delta x' \quad (4)$$

この歪係数を利用し，対応する点と面との距離が近く，かつ，対応ベクトルが揃っている変換パラメタにより評価を与えるために，距離と歪係数をあわせた評価関数を導入する．対応する面の距離が小さく，かつ，対応ベクトルが揃っているものにより高い評価を与えるような評価関数は，正しい変換パラメタでは対応ベクトルは揃うので最小値は変化せず，正しい変換パラメタの周辺のローカルミニマムを減らすことができると考えられる．

変換パラメタが変化すると，対応関係も変換するため，この歪係数も変化する．そのため，歪係数は，変換パラメタを更新するたびに求めなおす必要がある．

3 局所的な位相構造評価を取り入れた位置合わせ

距離画像中で隣接する画素に観測された計測点の局所的性質に着目し、計測点同士の隣接関係や、対応の整合性を評価するために、前節に述べた局所的形状パターンと対応ベクトルから計算される歪係数を用いて、2枚の距離画像の位置合わせを行う。

距離画像は、各画素 (u, v) に対象物体までの距離が格納されている場合もあるが、画素にうつつている点の、カメラの位置と視点に依存する物体座標系での3次元座標が格納されているものも多い。そこで、本稿では、 $N \times M$ の大きさの第 i 番目の距離画像の画素 $(u, v) (u = 1, \dots, N, v = 1, \dots, M)$ に対応する計測点の物体座標系での3次元座標を、 $\mathbf{x}^i(u, v)$ と記述する。1番目の距離画像が表されている物体座標系から2番目の距離画像が表されている物体座標系への変換を \mathcal{T} とし、1番目の距離画像の計測点 \mathbf{x}^1 を2番目の物体座標系で表した座標を \mathbf{x}^2 としたとき、2つの座標間の関係は以下の通りであるとする。

$$\mathbf{x}^2 = \mathcal{T}(\mathbf{x}^1) = R\mathbf{x}^1 + \mathbf{t} \quad (5)$$

上の式 (5) の \mathcal{T} が求める変換パラメタである。

距離画像の画素 (u, v) で観測された計測点 $\mathbf{x}^i(u, v)$ に関して、画像上での8近傍の点をあわせた 3×3 の画素 $(u \pm k, v \pm k) (k = -1, 0, 1)$ に対応する計測点 $\mathbf{x}^i(u \pm k, v \pm k) (k = -1, 0, 1)$ から成る局所的な面を考え、これを $\mathcal{S}^i(u, v)$ と記述する。この局所的な面 $\mathcal{S}^i(u, v)$ から求められる形状パターンを用いて対応を求め、この面に含まれる計測点の対応の整合性を表す歪係数を用いて位置合わせのよさを評価する。

3.1 対応の探索

現在得られている変換 \mathcal{T} が正しいと仮定して、距離と局所的な形状パターンに基づき対応を探索する。

局所的な形状パターンは変換パラメタ \mathcal{T} によらないので、各距離画像の各計測点について、 i 番目の距離画像の各画素 (u, v) に対応する計測点の近傍の局所的な面 $\mathcal{S}^i(u, v)$ について、あらかじめ求めておく。与えられた変換パラメタに対して、まず距離に基づいて仮の対応関係を求めたら、各対応について、形状パターンが整合しているかどうか調べ、整合していないものは誤った対応として取り除く。

形状パターンの計算 画素 (u, v) で観測された計測点の近傍の局所的な面 $\mathcal{S}(u, v)$ のガウス曲率 $K(u, v)$ と平均曲率 $H(u, v)$ は、それぞれ式 (6)、式 (7) のように表される。これを、画素 (u, v) の画像上での8近傍の画素 $(u \pm k, v \pm k)$ に対応する 3×3 の計測点 $\mathbf{x}(u \pm k, v \pm k)$ を用いて計算する。

$$K(u, v) = \frac{L(u, v)N(u, v) - M(u, v)^2}{E(u, v)G(u, v) - F(u, v)^2}, \quad (6)$$

$$H(u, v) = \frac{L(u, v)G(u, v) + E(u, v)N(u, v) - 2F(u, v)M(u, v)}{2(E(u, v)G(u, v) - F(u, v)^2)}. \quad (7)$$

ただし、 $E(u, v)$ などは、 $\mathbf{x}(u, v)$ における法線ベクトル $\mathbf{n}(u, v)$ を用いて以下のように近似的に計算する。

$$\begin{aligned} E(u, v) &= \|\mathbf{x}_u(u, v)\|^2, & G(u, v) &= \|\mathbf{x}_v(u, v)\|^2, \\ F(u, v) &= \mathbf{x}_u(u, v)^\top \mathbf{x}_v(u, v), \\ L(u, v) &= \mathbf{x}_u(u, v)^\top \mathbf{n}_u(u, v), \\ N(u, v) &= \mathbf{x}_v(u, v)^\top \mathbf{n}_v(u, v), \\ M(u, v) &= (\mathbf{x}_u(u, v)^\top \mathbf{n}_v(u, v) + \mathbf{x}_v(u, v)^\top \mathbf{n}_u(u, v))/2, \\ \mathbf{x}_u(u, v) &= (\mathbf{x}(u+1, v) - \mathbf{x}(u-1, v))/2, \\ \mathbf{x}_v(u, v) &= (\mathbf{x}(u, v+1) - \mathbf{x}(u, v-1))/2, \\ \mathbf{n}_u(u, v) &= (\mathbf{n}(u-1, v) - \mathbf{n}(u+1, v))/2, \\ \mathbf{n}_v(u, v) &= (\mathbf{n}(u, v-1) - \mathbf{n}(u, v+1))/2. \end{aligned}$$

求めた曲率 $K(u, v), H(u, v)$ から、各計測点の形状パターン $p(u, v)$ を求める。

$$p(u, v) = \begin{cases} \text{凹} & K > 0, H > 0 \\ \text{凸} & K > 0, H < 0 \\ \text{平面} & H = 0 \\ \text{凹円筒} & K = 0, H > 0 \\ \text{凸円筒} & K = 0, H < 0 \\ \text{鞍点} & K < 0 \end{cases} \quad (8)$$

距離に基づく仮の対応 与えられた変換パラメタに対して、まず、距離に基づき仮の対応関係を求める。2番目の距離画像の画素 (u', v') の近傍の計測点からなる局所領域 $\mathcal{S}^2(u', v')$ を考える。1番目の距離画像の各点 (u, v) に対して、2番目の距離画像の仮の対応領域 $\mathcal{C}_d^2(u, v, \mathcal{T})$ は、全ての局所領域の中で、 $\mathcal{T}(\mathbf{x}^1(u, v))$ との距離 $d(\mathcal{T}(\mathbf{x}^1(u, v)), \mathcal{S}^2(u', v'))$ が最小となるものである。計算の簡単のため、局所領域 $\mathcal{S}^2(u', v')$ は計測点 $\mathbf{x}^2(u', v')$ の近傍の点 $\mathbf{x}^2(u' \pm k, v' \pm k) (k = -1, 0, 1)$ を平面で近似し、 $d(\cdot)$ は点から平面への距離とした。

形状パターンに基づく誤対応の除去 距離に基づいて対応関係を求めたら、形状パターンの整合性を調べ、誤つ

た対応関係を取り除き，1 番目の距離画像に含まれる計測点 $x(u, v)$ の変換 T における 2 番目の距離画像の対応領域 $C^2(u, v, T)$ を求める．

$$C^2(u, v, T) = \begin{cases} C_d^2(u, v, T) & p^1(u, v) = p^2(u'_d, v'_d) \\ \text{なし} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

このようにして求めた変換パラメタ T における対応の組を基に，この対応が正しいときに現在の変換よりもよい評価となる変換 T を推定する．

3.2 変換の探索

現在の対応関係が正しいと仮定して，対応する点と局所領域の距離が近くなり，かつ，近傍の対応の位相構造を保持するような変換 T を求める．

距離に関する項 J_d ，対応の近傍の歪に関する項 J_s から成る，以下の評価関数 $J(T)$ を最小にする T を求める．

$$J(T) = (1 - \alpha)J_s + \alpha J_d \quad (10)$$

歪係数の計算 対応の歪係数 s は以下のように計算する．まず，各対応の組について，距離画像の距離画像上での 8 近傍の点の対応を用いて，式 (4) の関係をもとに以下の行列 $V(u, v)$ を求める．

$$V(u, v) = \begin{bmatrix} \Delta v(u+1, v+1), \dots, \Delta v(u-1, v-1) \\ \Delta x'(u+1, v+1), \dots, \Delta x'(u-1, v-1) \end{bmatrix}^+ \quad (11)$$

ただし， $+$ は一般逆行列を表し， $\Delta x'$ ， Δv は以下の通りである．

$$\begin{aligned} \Delta x'(u \pm k, v \pm k) &= T(x(u \pm k, v \pm k)) - T(x(u, v)) \\ \Delta v(u \pm k, v \pm k) &= C^2(u \pm k, v \pm k, T) - C^2(u, v, T) \\ &\quad - \Delta x' \end{aligned} \quad (12)$$

求めた $V(u, v)$ の各成分を用いて，歪テンソル $S(u, v)$ を以下のように計算し， $S(u, v)$ の固有値の和を歪係数 $s(u, v)$ とする．

$$S(u, v) = \begin{bmatrix} V_{11} & (V_{12} + V_{21})/2 & (V_{13} + V_{31})/2 \\ (V_{21} + V_{12})/2 & V_{22} & (V_{23} + V_{32})/2 \\ (V_{31} + V_{13})/2 & (V_{32} + V_{23})/2 & V_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

距離と歪の重み付け 重み係数 α について述べる．変換の初期値付近，つまり，変換の真の値に遠い場合には，距離にばらつきがあると考えられる．このようなときには，面と面を近づけるような変換パラメタを求めたいため，距離の項を重視したい．変換パラメタの更新が進み，面同士が近くなってくると，距離のばらつきは小さくなると考えられる．このような場合には，距離が近くなるだけでなく対応が揃うような変換パラメタを求めたい．そこで，重み係数 α は，以下のように，対応する点と面の距離の変動係数 [19] を用いて決定する．

対応する点と面の距離 d の平均を m_d ，標準偏差を σ_d とする．距離にばらつきがあるとき（変換が真の値に遠いとき）には距離の項 J_d が，距離のばらつきが小さくなるにつれ歪 J_s の項が，それぞれ主要な項になるようにするために， α は以下のようにする．

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{\sigma_d}{m_d} / \frac{\sigma_{d0}}{m_{d0}} \quad (14)$$

ただし，平均 m_{d0} と標準偏差 σ_{d0} は，変換の初期値 T_0 での値である．

誤対応の影響を減らすための ρ 関数 形状パターンの整合性から誤対応を減らしているが，取り除けなかった誤対応の影響を減らすために，M 推定に用いられる ρ 関数 [13] を用いる．これにより，距離や歪係数が閾値以上になっている対応の影響を減らす．式 (10) の各項 J_d と J_s は以下の通りである．

$$J_d = \sum_{u,v} \rho[d(T(x^1(u, v)), S^2(u', v')), d_\gamma] \quad (15)$$

$$J_s = \sum_{u,v} \rho[s(T(x^1(u, v)), S^2(u', v')), s_\gamma] \quad (16)$$

$$\rho[t, \gamma] = \frac{t^2}{(t^2 - \gamma)} \quad (17)$$

ただし， d_γ および s_γ は距離と歪係数の閾値に相当する定数である．

変換パラメタの表現 この評価関数 $J(T)$ は，変換パラメタ T に関する非線形関数になる．変換パラメタは 6 自由度（回転 3，並進 3）であるが，式 (5) のように 3×3 の回転行列によって回転を表すことが多い．最小化を簡単にするため，本手法では，回転軸を n の周りの回転角 θ の回転を表すために，方向は n に一致し，長さ $\tan(\theta/2)$ の 3 次元ベクトル a を用いる．

$$T(x) = x + \frac{2}{1 + a^\top a} (a \times x - (a \times x) \times a) + t \quad (18)$$

4 アルゴリズムの記述

以上の議論を踏まえ、以下に本手法による距離画像の位置合わせのアルゴリズムを記述する。

1. 局所的形状パターンの分類．各距離画像の画素 (u, v) に関して、画像上での 8 近傍で観測されている 3×3 の計測点 $x^i(u \pm k, v \pm k) (k = -1, 0, 1)$ から成る面 $S^i(u, v)$ について、式 (8) の形状パターン $p^i(u, v)$ を求める．
2. 式 (10) の値が収束するまで以下の 2 つのステップを繰り返す．
 - (a) 距離と局所的な形状パターンに基づく対応の探索．変換パラメタを仮定し、式 (8) が一致する対応を求める．
 - (b) 点と面との距離と近傍の歪に基づく変換の探索．求めた対応を仮定し、式 (10) を最小にする変換 T を求める．
3. 求めた変換パラメタ T で変換し、重ね合わせる．

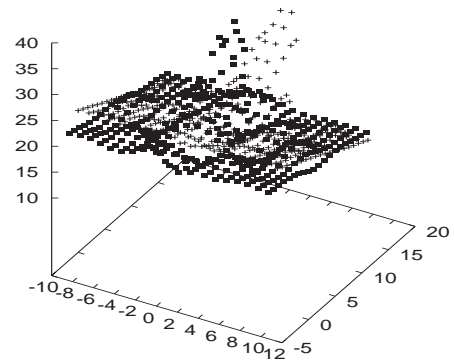
5 実験結果

前章で述べた手法を検討するため、合成画像を用いて実験を行った結果を以下に示す．合成距離画像は、1 番目の距離画像を得た視点から 20 度傾けた視点で 2 番目の距離画像を得たものである．

図 4 は、前章に述べたアルゴリズムで合成距離画像を位置合わせした結果である．上が変換パラメタの初期値で 2 つの距離画像を重ねて表示したもの、下が提案手法で求めた変換パラメタで 2 つの距離画像を重ねて表示したものである．また、図 5 に、このときの繰り返し回数と評価関数の値の関係と繰り返し回数と並進ベクトルの誤差のノルムの関係を示した．

また、正しい変換パラメタの周りでの評価関数 J の挙動を調べるために、正しい変換パラメタから並進ベクトルを変化させて評価関数 J の値をプロットしたものを図 6 に示す．中央が正しい変換パラメタでの値で、正しい変換パラメタから並進ベクトルの x, y 成分を変化させ、評価関数 J の値を計算した．(b) は提案手法によるもの、(a) は評価関数の歪係数の項を除いたものである．(a)、(b) とともに、対応関係を求めるために形状パターンを利用しているが、(b) は変換パラメタの評価に歪係数を利用しているのに対し、(a) は距離のみで評価している．歪係数を導入した (b) は、(a) に比較して、

Range Image 1 (Initial Transformation) +
Range Image 2 ■



Range Image 1 (Registered) +
Range Image 2 ■

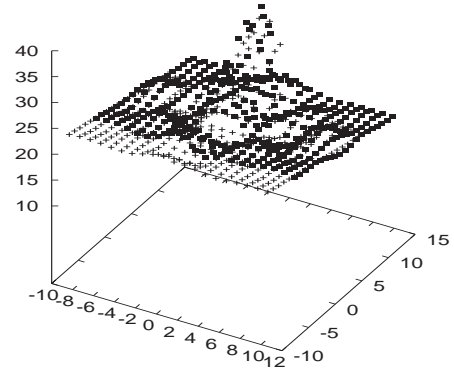


図 4: 合成画像を用いた位置合わせ結果．上が初期値、下が求めた変換パラメタを用いて 2 枚の距離画像を重ね合わせて表示した．

並進ベクトルを x 軸方向に変化させたときのローカルミニマムが減っていることがわかる．

6 まとめ

本稿では、距離画像の精密な位置合わせのために、計測点の隣接関係や計測点の近傍における対応の整合性を考慮した手法を提案した．画像上での近傍領域における局所的な位相構造を保持するような変換を求めるために、まず、各計測点の近傍の局所的形状パターンを利用することで、誤った対応関係を排除し、次に、画像上で隣接する計測点での対応の整合性を評価する指標として対応ベクトルの歪係数を利用することで、局所的な位相構造の保持のよさを評価に取り入れた．こ

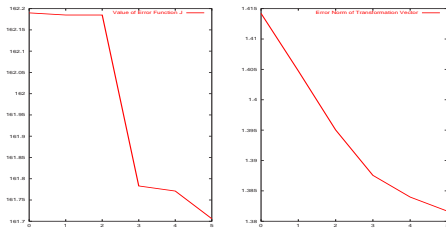


図 5: 合成画像を用いた位置合わせを行ったときの繰り返し回数と関数評価関数 J の値, および, 並進ベクトルの誤差のノルム.

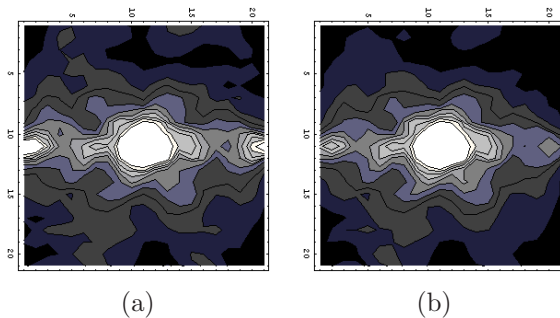


図 6: 合成画像を用いたときの評価関数の値. 中央が正しい変換パラメタでの値, 並進ベクトルの x, y 成分を変化させて計算した. (a), (b) とも, 対応関係を求めるために形状パターンを利用した. (b) は提案手法によるもの, (a) は変換パラメタの評価に歪係数の項を利用していないものである. 歪係数を導入した (b) は, (a) に比べてローカルミニマムが減っていることがわかる.

これらの局所的形状や位相構造を表す特徴量を利用した 2 枚の距離画像の位置合わせのアルゴリズムを示した. この手法により, 初期値に対して頑健な位置合わせができることを確認した.

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (No.13224051, No.14380161, No.14750342) による.

参考文献

[1] 安達忠次. ベクトル解析. 培風館, 1961.
 [2] 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.
 [3] 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.

[4] Y. Chen and G. Medioni. Object Modeling by Registration of Multiple Range Images. *IVC*, Vol. 10, No. 3, pp. 145–155, 1992.
 [5] C. S. Chua and R. Jarvis. Point Signature: A New Representation for 3D Object Recognition. *IJCV*, Vol. 25, No. 1, pp. 63–85, 1997.
 [6] C. Dorai, G. Wang, A. K. Jain, and C. Mercer. Registration and Integration of Multiple Object Views for 3D Model Construction. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 20, No. 1, pp. 83–89, 1998.
 [7] 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.
 [8] E. Guest, E. Berry, R. A. Baldock, M. Fidrich, and M. A. Smith. Robust Point Correspondence Applied to Two and Three-Dimensional Image Registration. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 23, No. 2, pp. 165–179, 2001.
 [9] E. Harvey, M. Arsenault, J-F. Lavoie, B. Belanger, and M-A. Boucher. Compact and Portable 3D camera for Space Applications. In *Proc. of 3DIM*, pp. 31–37, 2001.
 [10] K. Ikeuchi. Overview of CREST Digital Archiving Project – Digital Archiving of Cultural Heritage through Observation. In *Proc. of International Symposium on the CREST Digital Archiving Project*, pp. 3–15, 2003.
 [11] 増田健, 横矢直和. モデル生成のための複数の距離画像の位置合わせと統合. 画像の認識・理解シンポジウム 講演論文集, pp. II-247–252, 1996.
 [12] 増田智仁, 池内克史. レンジデータを用いた三次元形状の復元と評価. 情報処理学会研究報告, Vol. CVIM-137, pp. 35–43, 2003.
 [13] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳 (編). コンピュータビジョン – 技術評論と将来展望. 新技術コミュニケーションズ, 1998.
 [14] 諸岡健一, 高鳥暁彦, 長橋宏. 幾何情報と位相情報を用いた 3 次元物体形状の復元. 画像の認識・理解シンポジウム 講演論文集, pp. II-269–274, 2002.
 [15] 大石岳史, 佐川立昌, 中澤篤志, 倉爪亮, 池内克史. Pc クラスタによる大規模距離画像の並列ライメント. 情報処理学会研究報告, Vol. CVIM-137, pp. 27–34, 2003.
 [16] R. Sagawa and K. Ikeuchi. Taking Consensus of Signed Distance Field for Complementing Unobservable Surface. In *Proc. of International Symposium on the CREST Digital Archiving Project*, pp. 127–138, 2003.
 [17] 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.
 [18] 清水浩行, コーニリアニグナディ, 山本智幸, 相澤清晴. 画像, レンジデータと航空測量データを利用した広域実空間空間のモデル化. 画像の認識・理解シンポジウム 講演論文集, pp. I-177–182, 2002.
 [19] 東京大学教養学部統計学教室編. 統計学入門. 東京大学出版会, 1991.
 [20] Z. Zhang. Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces. *IJCV*, Vol. 13, No. 2, pp. 119–152, 1994.