Vol.2012-MPS-91 No.36
Vol.2012-BIO-32 No.36
2012/12/7

3次元形状位置合わせにおける進化計算アルゴリズムの比較検討と全周復元への応用

澤井 陽輔[1,a)]　篠原 悠[1]　小野 智司[1]　中山 茂[1]　川崎 洋[1]

概要：本研究では，手動で初期位置を与えなくとも 3 次元物体の全周形状を復元できる方式を提案する．全周形状の復元は，2 形状間でのペアワイズな位置合わせを，計測位置が隣接する全ての形状間で順次行う方法が考えられる．この場合，途中で一度でも位置合わせに失敗すると，全周形状を復元することができない．計測した全形状を同時に位置合せする方法もあるが，次元数が膨大になるため最適化が困難である．このため，本研究ではまず，ペアワイズの位置合わせに対して，パラメータの調整が不要な自己適応型差分進化法（jDE）が優れていることを示す．また，提案する方式は，全周形状復元の問題設定を積極的に活用し，探索範囲を限定して jDE を適用することで安定したペアワイズ位置合わせが可能である．さらに，1 つまでの誤ったペアワイズ位置合わせを検知し，訂正することができる．実験により，プロジェクタカメラシステムで得られた実計測データに対して，全自動での全周形状復元を安定して行えることを確認した．

キーワード：3 次元全周形状復元，位置合わせ，進化計算，自己適応型差分進化法，プロジェクタカメラシステム

A Comparative Study on 3-Dimensional Registration by Evolutionary Computation and Its Application to Entire Shape Reconstruction

Yosuke Sawai[1,a)]　Yu Shinohara[1]　Satoshi Ono[1]　Shigeru Nakayama[1]　Hiroshi Kawasaki[1]

Abstract: This paper proposes an entire shape reconstruction method which does not require an initial position adjusted by hand. Entire shape reconstruction contains its peculiar difficulties: Even just one error of pairwise registration causes a failure of an entire shape reconstruction. Even when no failures occur during all of the pair-wise registration, the last and first shape objects cannot be precisely matched due to accumulated errors. The proposed method uses Self-Adaptive Differential Evolution (jDE) which does not require parameter tuning and shows good search performance for pair-wise registration. In addition, considering conditions of entire shape reconstruction, the proposed method reduces a range of variables for rotation, which allows to prevent premature convergence to local optima, and corrects one of pair-wise registration errors. Experimental results showed that jDE showed better, more robust search performance than other evolutionary computation algorithms, and that the proposed method could reconstruct the entire shape from actually measured depth images captured by a projector-camera system.

Keywords: three dimensional entire shape reconstruction, three dimensional registration, evolutionary computation, self-adaptive differential evolution, projector-camera system

1. はじめに

近年，3 次元形状の計測や取得方法は大幅な進歩を遂げており，医療やエンタテイメント，文化財保護の分野で 3

[1] 鹿児島大学理工学研究科情報生体システム工学専攻
1-21-40, Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan
[a)] k3554230@kadai.jp

© 2012 Information Processing Society of Japan

次元計測，表示技術の利用は増加の一途にある．このため，レンジセンサによる形状取得が広く行われているが，レンジセンサは一度に全周を取得できないため，複数の視点から計測した形状の位置合わせが必要である．

2形状位置合わせの問題は，大域的位置合わせと，詳細な位置合わせに大別される．詳細な位置合わせは，ICP[1]など幾つか代表的な手法が知られており，ある程度解決されたと考えられている．一方で前者で有効な手法は確立されておらず，現在も多くの研究が行われている．

大域的な位置合わせ方式は，3次元形状の形状特徴などを利用して [2] 大まかな位置・姿勢を推定する．しかし，この手法では3次元形状の種類によってアルゴリズムを変更する必要があるほか，視点変化や計測ノイズによって安定した特徴を取得できない場合がある．そのため，現状では大域的な位置合わせを手作業に頼っている場合が多い．

この問題を解決するために，メタヒューリスティクスを用いた位置合わせ手法が研究されている [3]．これは，形状の位置および姿勢を直接推定するため，形状の種類によらない位置合わせが可能である． また，計測環境にロバストであることが報告されている． 位置合わせに適用された進化計算の具体例として，Genetic Algorithm（GA）[4], [5], [6] や Particle Swarm Optimizaiton（PSO）[7], [8], Differential Evolution（DE）[9] などが挙げられる [3]． これらの方式は問題インスタンス毎に有効なパラメータが異なることがあるため，パラメータ調整が必要とされる．

近年，安価な3次元プリンタや Kinect などの安価な3次元スキャナが広く普及しつつあり，対象物体の全周形状復元の需要が高まっている．全周形状の位置合わせには，2形状間で位置合せを行う場合と異なる問題がある．一つの方法として，2形状間で位置合わせをペアワイズに行っていき，一周することが考えられる．この場合，途中で一度でも位置合わせに失敗すると，全周位置合わせが失敗となる．さらに，大きな失敗がない場合でも，誤差が蓄積されてしまうため，最後に位置を決定した形状と最初に固定した形状がずれてしまうという問題がある．このため，全ての形状を一度に最適化することも考えられる．しかし，推定するパラメータが多すぎることから，実際にはほとんど解が得られない．このように全周形状の位置合わせ問題には，現在のところ有効な解決策が存在していない．

本研究では，複数視点から計測した3次元形状を入力し，隣接する順番を与えることで，人手による初期位置合せを必要とせずに全自動で3次元の全周形状を復元する方式を提案する．目的を全周形状復元に限定し，計測した形状の隣接関係を利用することで，2形状間の位置合せを逐次的に行う方法であっても，位置合せの失敗や誤差の蓄積を抑えることができ，全ての形状を同時に最適化する場合と比べて，問題の探索空間の爆発的な増大を抑えることができる．提案する方式は，パラメータの調整が不要な頑健な進化計算の一つである自己適応型差分進化法（Self-Adaptive Differential Evolution: jDE）[10] を用いたペアワイズの位置合わせ法，および，全周形状復元であることを利用したペアワイズ位置合せの誤りの検出および訂正法の2つから構成される．本論文では，仮想物体から作成したシミュレーションデータ，および，実物体を計測して得た実データを用いて，提案する方式の有効性を検証する．

本論文の貢献は以下の通りである．

- ペアワイズ位置合わせの問題において，パラメータの調整が事実上不要な jDE が優れていることを示す．
- 提案する方式は，全周形状復元の問題設定を積極的に活用し，探索範囲を狭めることで安定してペアワイズ位置合せが可能である．
- 同様に，全周形状復元の問題設定に基づき，1つまでの誤ったペアワイズ位置合わせを検知し，訂正できる．
- プロジェクタカメラシステムで計測した実データに対して，提案する方式が計測物体の全周形状を復元できることを示す．

2. 提案する方式

2.1 概要

一般的なレンジスキャナでは，一度に全周の計測ができないため，対象物体を回転台に乗せるか，計測者が対象物体の周囲を移動しながら計測を行う．このとき，計測後に複数の計測結果の位置を合わせることを想定して，計測領域がある程度重なるように計測する．このような計測状況において，隣接する計測結果の上下が反転するなど，隣接する計測結果の角度差が極端に大きくなることは一般的には起こらないと考える．提案手法では，全周形状復元を行うために，上記のような計測状況を考慮して角度の探索範囲を狭め，隣接計測結果の位置合わせ問題を順に解く．探索によって得られた解は相対的な位置関係，すなわち，剛体変換行列である．推定した剛体変換行列を，隣接順に掛け合わせることで，全オブジェクトの位置関係を推定することができ，全周形状の復元が可能である．また，全周形状復元を行うため，最後の計測結果と最初の計測結果が隣接している状況を対象とする．このことを積極的に利用することで，隣接計測結果間の位置合わせが1箇所だけ間違っている場合は，その間違いを結果を無視することができる．

2.2 ペアワイズ位置合わせ

2.2.1 定式化

本節では，隣接する2つの計測結果の位置合わせを行うペアワイズ位置合わせ問題のモデル化について説明する．

本問題は，点群から構成される2つの3次元形状の相対的な位置関係を形状間の重心の並進 (t_x, t_y, t_z) および回転 (α, β, γ) により表し，これらの値を求める問題である．本

© 2012 Information Processing Society of Japan

問題において，位置あわせを行う形状は対象物体の同じ領域を重複して計測している．この重複する領域が合致するように，上記の 6 次元の設計変数の値組を探索する．

ここで，位置あわせを行う 2 つの 3 次元形状のうち，位置を固定する形状をターゲット $I_t = \left\{\vec{p'}_1, \vec{p'}_2, ..., \vec{p'}_m\right\}$ と表と呼び，移動させながら適切な相対位置を探る形状をソース $I_s = \left\{\vec{p}_1, \vec{p}_2, ..., \vec{p}_n\right\}$ と呼ぶこととする．2 つの 3 次元形状の位置合せを行うための目的関数 $f(I_s, I_t, T_{(R,t)})$ を以下のように定義する [3].

$$f(I_s, I_t, T_{(R,t)}) = median(d_i) \tag{1}$$

ここで，d_i は，I_s を構成する i 番目の点（座標を $\vec{p_i}$ とする）における誤差，すなわち，$T_{(R,t)}$ により剛体変換された座標 $T_{(R,t)}(\vec{p_i})$ と，I_t 上の最近傍点 $\vec{p'}_d$ とのユークリッド距離である．

$$d_i = ||T_{(R,t)}(\vec{p_i}) - \vec{p'_d}|| \tag{2}$$

剛体変換 $T_{(R,t)}(\vec{p_i})$ は以下の式で表現される．

$$T_{(R,t)}(\vec{p_i}) = R(\vec{p_i}) + t \tag{3}$$

上記の目的関数は，位置合せを行う 2 形状間において，5 割以上重なり合っていることを想定する．

全周形状復元を行う本問題では，1 つの対象物体に対して，8 方向以上の計測を行うこととなる．

2.2.2 自己適応型差分進化法

自己適応型差分進化法（jDE: Self-Adaptive Differential Evolution）[10] は，差分進化法 (DE: Differential Evolution)[9] におけるスケール係数 F と交叉率 CR を個体ごとに設定し，確率的にそれぞれの値をランダムに変化させるアルゴリズムである．jDE は国際会議 Congress on Evolutionary Computation 2009 のコンペティションの一つである “Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments”[11] においてもっとも探索能力が高かった手法である．jDE では，現世代の個体群に含まれるすべての個体が次の世代の個体の生成に関与する．各世代で，各個体（ターゲットベクトル）に対してベースベクトル $x_{b,g}$ を選択し，突然変異を適用することで変異ベクトル $v_{i,g}$ を作成する (式 (4)).

$$v_{i,g} = x_{b,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}) \tag{4}$$

その後，交叉を行いターゲットベクトルと変異ベクトルからトライアルベクトルを作成し，トライアルベクトルとターゲットベクトルのうち，目的関数の値が優れる方を次世代に残す．二項交叉では交叉率 $CR(0 \leq CR \leq 1)$ とランダムに選択した添字 $j_{rand}(1 \leq j_{rand} \leq D)$ に基づき，式 (5) のように $u_{i,g}$ の各要素 $u_{j,i,g} \in u_{i,g}(j = 1, 2, \cdots, D)$ を決定する．

$$u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j.i,g} & \text{if } rand_{j,i}[0,1] \leq CR \text{ or } j = j_{rand} \\ x_{j,i,g} & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

$rand_{j,i}[0,1]$ は範囲 [0,1] の一様乱数である．

jDE では，各世代で各個体ごとに，スケール係数 F および交叉率 CR をそれぞれ式 (6) および式 (7) に従って更新する．

$$F_{i,g+1} = \begin{cases} F_l + rand_1 \times F_u & \text{if } rand_2 < \tau_1 \\ F_{i,g} & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

$$CR_{i,g+1} = \begin{cases} rand_3 & \text{if } rand_4 < \tau_2 \\ CR_{i,g} & \text{otherwise} \end{cases} \tag{7}$$

ここで，$rand_j$（$j \in 1, 2, 3, 4$）は $[0, 1]$ の一様乱数を示し，τ_1 と τ_2 はスケール係数と交叉率が更新される確率を示す．また，F_l と F_u でスケール係数を変化させる範囲を設定する．これらの値は実験によって良好な値が確認されており，また，多少の値を変更しても探索性能に影響が少なくロバストであるため，事実上，スケール係数と交叉率の調整が不要となる．

2.3 全周形状復元

2.2 節で述べたペアワイズ位置合せを，計測した隣接形状間に順次適用することで全周形状の復元を行う．計測結果 P_1，P_2，P_3，P_4 から全周形状を復元する状況を考える[*1]．P_1 と P_2 との位置合せで得られた剛体変換パラメータを $(R,t)_{P_1-P_2}$ とし，P_2 の剛体変換結果を $T_{(R,t)_{P_1-P_2}}(P_2)$ とすると，P_3 の位置は $T_{(R,t)_{P_1-P_2}}(T_{(R,t)_{P_2-P_3}}(P_3)))$ で表せる．同様に，P_4 の剛体変換結果は $T_{(R,t)_{P_1-P_2}}(T_{(R,t)_{P_2-P_3}}(T_{(R,t)_{P_3-P_4}}(P_4))))$ と表せ，P_2，P_3，P_4 の剛体変換結果と P_1 を合成することで全周形状を復元することができる．

2.3.1 誤り訂正

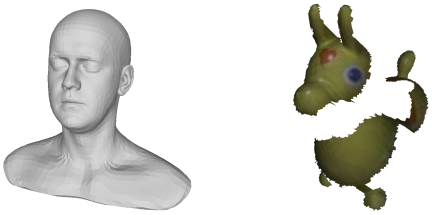
提案する方式では，全周形状を復元する際に高々 1 箇所のペアワイズ位置合せの誤りを許容する．例えば，計測結果 P_1，P_2，P_3，P_4 から全周形状を復元する状況で，P_2-P_3 間の位置合わせが何らかの理由で精度良く行えなかった場合を考える．このとき，P_1-P_2 の剛体変換 $(R,t)_{P_1-P_2}$，P_2-P_3 の剛体変換 $(R,t)_{P_2-P_3}$ を順に掛け合わせて計測結果 P_1 から P_4 まで位置を決定するかわりに，位置あわせに失敗した 2 つの計測結果 P_2 および P_3 が開始点および終了点となるように復元を行う．すなわち，P_3 を固定し，P_3-P_4 の剛体変換パラメータ $(R,t)_{P_3-P_4}$ を用いて P_4 の位置 $T_{(R,t)_{P_3-P_4}}(P_4)$ を取得する．同様に，P_1 および P_2 の位置を，$T_{(R,t)_{P_3-P_4}}(T_{(R,t)_{P_3-P_4}}(P_4))$，$T_{(R,t)_{P_3-P_4}}(T_{(R,t)_{P_3-P_4}}(T_{(R,t)_{P_3-P_4}}(P_4)))$ とすることで，ペアワイズ位置合せに失敗した品質の良くない剛体変換パラメータ $(R,t)_{P_2-P_3}$ を使わずに全周形状を復元することができる．

2.3.2 ペアワイズ位置合せの誤りの検出

ペアワイズ位置合せの失敗は，形状間の重心距離に着目して

[*1] ここでは説明の都合上，4 個の計測結果から全周形状復元を行う場合を例としているが，本方式は，計測結果に含まれる計測対象物体の領域の 5 割以上が計測間で重複することを想定しており，8 方向以上からの計測を行うこととなる．

© 2012 Information Processing Society of Japan



(a) V_1 (b) M_1

図 1 実験に用いた仮想物体と実物体（撮影例）

検出する．固定する形状を，P_s とし，剛体変換行列を掛けあわせて最後に位置合わせを行う形状を P_e とする．P_s と P_e は隣接関係にあるので，正しく位置合わせがされていれば P_s と P_e の距離は近くなる．一方，剛体変換行列のいずれかに間違いがあれば，P_s と P_e は遠くなる．そこで，P_s と P_e の重心が近くなるように以下の式 (8) を最小化する．s を変えながら E を計算し，E が最小となる $(R,t)_{P_e-P_s}$ が，誤っている可能性が最も高い剛体変換パラメータである．

$$E = C_s - T_{(R,t)_{P_s-P_{s+1}}}(T_{(R,t)_{P_{s+1}-P_{s+2}}}(\dots T_{(R,t)_{P_{e-1}-P_e}}(C_e)\dots))) \quad (8)$$

ここで，C_s は P_s の重心を表し，C_e は P_e の重心を表す．

3. 評価実験

3.2 節では，ペアワイズによる詳細な位置合わせに対する各進化計算アルゴリズムの性能評価と，のため，正解が既知のシミュレーションデータを用いて位置合わせの実験を行った．また，提案する方式を用いて全周形状復元を行い，2.2 で述べた角度制限の有無による解の品質の差を調べた (実験 1)．

3.3 節では，プロジェクタカメラシステムを用いて取得した実データを対象として，全周形状復元の性能を評価し，誤り訂正を適用した結果を調べた（実験 2)．

3.1 実験準備

3.1.1 テストデータ

本論文では，仮想物体から生成したシミュレーションデータ，および，プロジェクタカメラシステムで一般物体を計測して取得した実データを用いて実験を行った．

シミュレーションデータは各仮想物体を仮想空間上で β 方向に 40° ずつ回転させ，9 回の計測を行うことで獲得した．計測で得られた各形状は 3000 点から 8000 点の点群で構成される．

仮想物体 V_1[*2] と実物体 M_1 の形状を図 1(a)，(b) に示す．

上記各物体におけるペアワイズ位置合せ問題は，設計変数の値を正規化し，各次元の最小値を 0，最大値を 1 とする実数の値を持つものとした．t_x，t_y，t_z は，物体の最長辺の最小値を 0，最大値を 1 と正規化した．α，β，γ については，範囲制限を行わない実験 1 では-180° を 0 とし，180° を 1 として正規化した．実験 2，実験 3 および実験 4 では $-60°$ を 0 とし，60° を 1 として正規化した．

[*2] Infinite Realities: `http://www.ir-ltd.net/`

3.1.2 アルゴリズムのパラメータ

提案する方式で用いる jDE のほかに，実験 1 では，進化計算アルゴリズム（DE，GA，PSO，CMA-ES）と，位置合わせで一般的に用いられる ICP との比較を行った．本論文の実験で用いたパラメータを以下に示す．進化計算アルゴリズムに共通するのパラメータ設定として, 個体数 N を 50, 世代数の上限 Gen を 1000 世代とした．DE は, 交叉法は二項交叉を用いた． パラメータ設定は, 交叉率 $CR = 0.8$, スケール係数 $F = 0.8$ とした．jDE[10] は，交叉法は二項交叉を用いた． $\tau_1 = \tau_2 = 0.1$ とし，その他の F や CR といったパラメータ設定は探索が進むにつれてランダムに変化するため必要としない．GA は，BLX-α の α を 1.0, 突然変異率を 0.05, エリート個体数を 10 とした．PSO は，慣性項 (w_{min}, w_{max}) =(0.4, 0.9) と設定し探索が進むにつれて最大値から最小値へと変動し, 学習係数 $c_1 = c_2 = 1.49445$, 個体の速度ベクトル V の最大値 $v_{max} = 1.0$ とする．CMA-ES は個体数に相当する λ を，$4 + ln(n)$ (n は次元数) と定めているが [12]，より安定的に探索するために個体数を λ=N とし，サンプル数を $N/2$ とした [12]．また， 初期分布 $\sigma = 0.1$ とした．なお，全ての実験について試行回数を 30 回とした．

3.1.3 評価基準

実験 1，実験 2，実験 3 では，最適解が既知のシミュレーションデータを用いるため，全周形状復元結果の品質を客観的に評価することができる．本論文では，得られた全周形状と正解形状の平均二乗誤差（RMSE）(式 9) を，正解形状の最長辺で正規化した値により品質を表すものとした．

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} ||T'(\vec{p_i}) - \vec{x_d}||^2}{n}} \quad (9)$$

ここで，i は I_s 上の点の番号であり，n は I_s を構成する点の総数である．$T'(\vec{x_i})$ は得られた解（剛体変換パラメータ組）によって I_s を剛体変換した形状である．$\vec{p_i}$ は I_s 上の i 番目の点の座標を示し，I_s 上の i 番目の点に対する正解形状上の最近傍点を $\vec{x_d}$ とする．

また，上記の正規化された RMSE の値が 1%以下の場合に，ペアワイズの位置合せが成功したとみなすこととした．実データを用いる実験 4 では，位置合わせの成功判定を目視によって確認した．

3.2 実験 1: ペアワイズ位置合せにおけるアルゴリズムの性能比較

ペアワイズによる詳細な位置合わせに対する各進化計算アルゴリズム（GA，PSO，CMA-ES，DE，jDE）および ICP の性能評価のため，正解が既知のシミュレーションデータを用いて位置合わせの実験を行った．各アルゴリズムのパラメータは，3.1.2 節に示すように設定した．

3.2.1 得られた解の品質

各仮想形状における計測形状間の位置合せ結果を表 1 に示す．表 1 において，得られた解の RMSE に着目すると，全体を通して ICP の品質が低く，次に，GA および CMA-ES の性能が低いことがわかる．また，jDE および PSO が安定して品質の良い解を発見していることがわかる．DE は，V_1 のように問題に

© 2012 Information Processing Society of Japan

表 1　V_1 における各アルゴリズムの性能比較

		P_1-P_2	P_2-P_3	P_3-P_4	P_4-P_5	P_5-P_6	P_6-P_7	P_7-P_8	P_8-P_9	P_9-P_1	average
ICP	best	2.05E-1	3.12E-1	2.36E-1	3.20E-1	2.85E-1	3.27E-1	2.86E-1	3.35E-1	2.70E-1	2.86E-1
	mean	4.66E-1	5.80E-1	5.61E-1	7.45E-1	6.74E-1	9.44E-1	6.15E-1	5.81E-1	4.93E-1	6.29E-1
	suc.	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/270
GA	best	3.25E-3	2.84E-3	4.06E-3	2.80E-3	3.67E-3	1.06E-2	4.24E-3	2.38E-3	3.89E-3	4.19E-3
	mean	3.79E-1	4.23E-1	3.26E-1	3.40E-1	2.80E-1	3.71E-1	3.33E-1	4.00E-1	3.58E-1	3.57E-1
	suc.	6/30	1/30	6/30	5/30	6/30	0/30	2/30	3/30	7/30	36/270
PSO	best	6.41E-3	1.02E-2	1.34E-2	2.40E-2	2.76E-2	5.19E-3	5.86E-3	2.03E-2	3.12E-3	1.29E-2
	mean	4.87E-2	8.25E-2	8.32E-2	1.15E-1	9.11E-2	1.16E-1	1.01E-1	8.75E-2	4.98E-2	8.60E-2
	suc.	1/30	0/30	0/30	0/30	0/30	2/30	1/30	0/30	2/30	6/270
CMA	best	2.95E-3	2.98E-3	3.52E-3	2.87E-3	3.48E-3	3.45E-3	3.21E-3	3.54E-3	3.48E-3	3.28E-3
-ES	mean	1.67E-1	3.13E-1	1.68E-1	2.09E-1	1.88E-1	2.06E-1	2.63E-1	1.60E-1	1.35E-1	2.01E-1
	suc.	18/30	11/30	18/30	15/30	16/30	16/30	12/30	19/30	19/30	144/270
DE	best	3.00E-3	3.30E-3	3.64E-3	3.79E-3	3.62E-3	3.24E-3	3.24E-3	2.51E-3	3.44E-3	3.31E-3
	mean	7.42E-2	4.38E-1	2.36E-1	3.53E-1	2.70E-2	4.36E-1	2.40E-1	2.10E-1	6.93E-2	2.31E-1
	suc.	22/30	4/30	13/30	8/30	21/30	5/30	14/30	18/30	23/30	128/270
jDE	best	2.94E-3	2.98E-3	3.60E-3	3.40E-3	3.61E-3	3.08E-3	3.27E-3	3.51E-3	3.30E-3	3.30E-3
	mean	5.20E-2	1.80E-1	5.56E-2	2.49E-1	5.43E-2	2.73E-1	1.21E-1	1.07E-1	5.72E-2	1.28E-1
	suc.	27/30	20/30	27/30	16/30	27/30	15/30	23/30	24/30	26/30	205/270
jDE2	best	2.92E-03	2.99E-03	3.55E-03	3.26E-03	3.62E-03	3.52E-03	3.24E-03	3.55E-03	4.03E-03	3.41E-03
	mean	3.32E-03	3.69E-03	3.97E-03	4.24E-03	4.21E-03	3.57E-03	3.29E-03	3.67E-03	4.16E-03	3.79E-03
	suc.	30/30	30/30	30/30	30/30	30/30	30/30	30/30	30/30	30/30	270/270

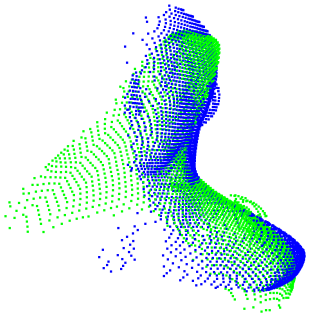
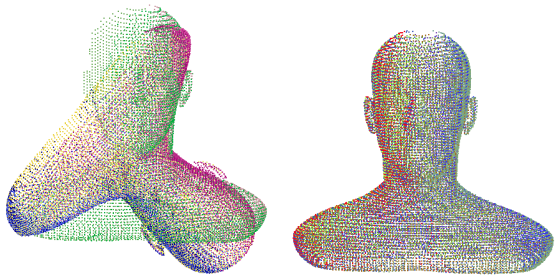


図 2　位置合わせに失敗した例



(a) 50%の誤りを含む例　(b) 誤り訂正結果

図 3　誤りを含む全周復元結果と誤り訂正結果

よっては高品質な解を発見できたが，得られる解の精度にばらつきがあり，他の問題では PSO や CMA-ES と同程度の品質の解を発見していた．

次に，成功率に着目すると，jDE の成功率が安定して高く，PSO は RMSE の値こそよいものの 1%を下回る解を発見して成功とみなされた試行が少ないことがわかる．

位置合せに失敗した際の局所解をみると，図 2 のように 2 つの形状がある程度重なっている局所解に陥ってしまうことが多かった．図 2 の例では，頭と肩の位置が逆転してしまった場合でも，形状の半分程度が重複しているために目的関数の値が高くなってしまう．式 (1) を用いる場合はこのような局所解と大域的最適解を見分けることが困難である．

次に全周形状復元を行うため，回転範囲の制限を設けて探索精度の改善を図る．このことによる効果を確認するため，3.2 節と同様の条件で実験を行った．jDE において，α, β, γ の範囲が $-60°$ から $60°$ となるように制限を設けたアルゴリズムを jDE2 と表記し，表 1 に結果を示す．jDE の結果と比較すると，回転角度に制限を設けることで，すべての仮想形状において RMSE および成功率が改善しており，すべての試行において位置合せに成功したことが確認できる．これは，回転角度の範囲に制限を加えることで，局所解に陥る可能性が低下したためと考える．

3.3　実験 2: 実計測データからの全周形状復元

一般物体 M_1 をプロジェクタカメラシステムで取得した実計測データをもとに，全周形状復元を試みた．ペアワイズ位置合せのアルゴリズムとして jDE を用い，回転角度の範囲を実際の撮影環境を考慮して，$-60°$ から $60°$ に制限した．

ペアワイズ位置合せの実験結果を表 2 に示す．ほぼ全ての試行でペアワイズ位置合せに成功したが，いくつかの計測形状間で失敗することがあった．

全周形状復元の結果の成功例を図 4 に，失敗例を図 5 に示す．失敗した理由は，目的関数が二形状間の重なり具合の中央値であるため，失敗例のように充分に重なってしまった場合は局所解となる．図 5 のように形状の頭同士で位置が合ってしまうと，局所解から抜け出すためには，大きく回転させる必要がある．

次に，提案する方式の誤り検出を行い，全周形状復元を行った．誤りを訂正した例を図 6 に示す．一般物体のすべての試行で適切に全周形状復元を行うことができた．

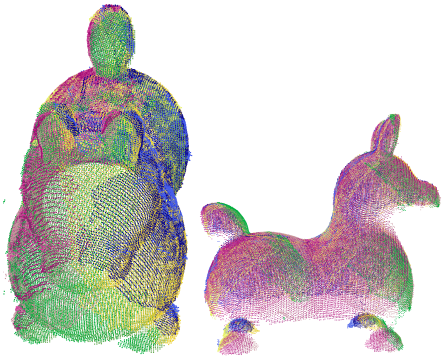
4.　おわりに

大域的なペアワイズ位置合せにより，初期位置を与えることなく 3 次元形状の全周形状復元を行う方式を提案した．提案する方式は，パラメータの調整が不要な jDE を用いて大域的なペ

© 2012 Information Processing Society of Japan

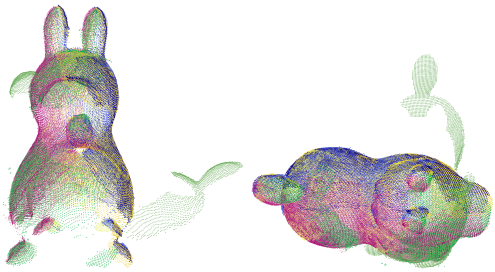
表 2 実撮影データからの全周形状復元結果

	P_1-P_2	P_2-P_3	P_3-P_4	P_4-P_5	P_5-P_6	P_6-P_7	P_7-P_8	P_8-P_9	P_9-P_1	average
M_1 best	4.37E-06	1.83E-06	7.41E-07	5.77E-07	8.83E-07	1.26E-06	7.14E-07	5.27E-07	7.59E-06	2.05E-06
ave	5.05E-06	1.83E-06	7.42E-07	5.77E-07	9.79E-07	1.56E-06	7.15E-07	5.28E-07	7.62E-06	2.18E-06
suc.	29/30	30/30	30/30	30/30	28/30	28/30	30/30	30/30	30/30	265/270



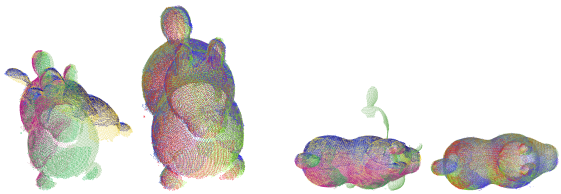
(a) M_1

図 4 実計測データからの全周形状復元に成功した例



(a) M_1

図 5 実計測データからの全周形状復元に失敗した例



(a) M_1 における例 (1)　　(b) M_1 における例 (2)

図 6 誤り検知および訂正の適用前後の例（左: 誤り訂正適用前，右: 適用後）

アワイズ位置合せを行い，また，全周形状復元であることを積極的に利用して，回転角度の制限およびペアワイズ位置合せの誤り検出及び訂正を行う点に特徴がある．仮想物体を用いた実験で，本方式で利用する jDE が他の進化計算アルゴリズムと比較して品質の良い解を安定して探索できること，および，高々 1 箇所の誤りを検出し，誤った剛体変換パラメータを避けて全周形状の復元を行えることを示した．また，プロジェクタカメラシステムを用いて計測したデータをもとに，全周形状復元を行えることを示した．

今後，入力順を与えない完全自動な全周形状復元手法や．目的関数を見直しによる計測時の重複量に依存しない手法について検討する．

謝辞 本研究の一部は，総務省戦略的情報通信研究開発制度（SCOPE）ICT イノベーション創出型研究開発（101710002）および内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム (LR030) の助成を受けて実施されたものである．ここに記して謝意を表す．

参考文献

[1] J.Besl, P. and D.McKay., N.: A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256 (1992).

[2] Salti, S., Tombari, F. and Stefano, L. D.: A Performance Evaluation of 3D keypoint Detectors, *International Conference on 3D imaging, Modeling, Proccessing, Visualization and Transmission* (2011).

[3] Santamaría, J., Cordón, O. and Damas, S.: A comparative study of state-of-theart evolutionary image registration methods for 3D modeling, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 115, No. 9, pp. 1340–1354 (2011).

[4] Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA (1989).

[5] R.He, P. N.: Global optimization of mutual information: application to three-dimensional retrospective registration of magnetic resonance images, *Computerized Medical Imaging and Graphics*, Vol. 26, pp. 277–292 (2002).

[6] Silva, L., Bellon, O. R. and Boyer, K. L.: Precision Range Image Registration Using a Robust Surface Interpenetration Measure and Enhanced Genetic Algorithm, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 27, No. 5, pp. 762–776 (2005).

[7] J.Kennedy and Everhart, R. C.: Particle Swarm Optimization, *Proc. IEEE Int'l Conf. on Neural Networks*, Vol. 4, pp. 1942–1948 (1995).

[8] Wachowiak, M. P., Smolfková, R., Zheng, Y., Zurada, J. M. and Elmaghraby, A. S.: An Approach to Multimodal Biomedical Image Registration Utilizing Particle Swarm Optimizaiton, *IEEE transactions on evolutionary computaiton*, Vol. 8, No. 3, pp. 289–301 (2004).

[9] Storn, R. and Price, K.: Differential Evolution A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, Vol. 11, pp. 341–359 (1997).

[10] Brest, J., Greiner, S., Boskovic, B., Mernik, M. and Zumer, V.: Self-Adapting Control Parameters in Differential Evolution: A Comparative Study on Numerical Benchmark Problems, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on In Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, Vol. 10, No. 6, pp. 646–657 (2006).

[11] Li, C., Yang, S., Nguyen, T. T., Yu, E. L., Yao, X., Jin, Y., Beyer, g. H. and Suganthan, P. N.: Benchmark Generator for CEC'2009 Competition on Dynamic Optimization (2008).

[12] Hansen, N. and Ostermeier, A.: Completely Derandomized Self-Adaptation in Evolution Strategies, *Evol. Comput.*, Vol. 9, No. 2, pp. 159–195 (2001).

© 2012 Information Processing Society of Japan