

効率的な三次元姿勢推定のための照合領域漸増型 ICP アルゴリズム

Incremental Region Type ICP Algorithm for Efficient 3D Pose Estimation

出口 央† 吉村 順† 伊藤 俊樹† 榎田 修一† 江島 俊朗†

Hisashi Ideguchi† Jun Yoshimura† Toshiki Ito† Shuichi Enokida† Toshiaki Ejima†

1 はじめに

計算機等の発展に伴い、対象物体の三次元情報を表す距離データを取得し、位置や姿勢の推定を行う研究が盛んに行われている。高精度な姿勢推定は、対象物体の全周囲表面形状を補完している三次元点群データ(モデル)と入力された単方向からの距離データ(シーン)との対応点を求め、それらを位置合わせすることで実現される。この対応点探索において様々な特徴量を用いた研究が行なわれている。文献 [1] では Spin-Images と呼ばれる隠れに強い不変特徴量を提案しており、文献 [2] では3点から規定される平面上に距離データを投影することで得られる距離アスペクト画像を特徴量として用いることで頑健な姿勢推定を実現している。しかし、前者は法線を基準として得られるため計測誤差の影響を受けやすく、後者は3点の組み合わせによる計算コストの抑制が問題となる。我々はこれらの問題点を解決するために二つの特徴点から得られる Horizontal-Spin-Images(以後 HSI)を提案し、構築した姿勢推定システムにおいて評価実験を行うことによりその有効性を確認している [3]。姿勢推定システムでは、得られた対応点による位置合わせの後の詳細位置合わせとして ICP アルゴリズム [4] が用いられる。ICP アルゴリズムは反復計算により高精度の位置合わせを実現する手法であるが、処理コストが高く、またノイズに対しても脆弱であるため、クラッター等のノイズが含まれる前提での位置合わせにおいては信頼性のある領域を定める必要がある。そこで本論文では、HSIの類似性に基づき選択された二つの特徴点の近傍領域を最も信頼できる初期照合領域として設定し、照合領域を漸増させる新しいタイプの ICP アルゴリズムを提案する。照合領域を漸増させることにより、隠れやクラッターなどのノイズに対する頑健性を損なわずに、照合時間(処理コスト)を大幅に削減できることを姿勢推定実験により明らかにする。

2 姿勢推定の流れ

姿勢推定のおおまかな流れを(図1)に示す。本論文では二つの特徴点の組み合わせから得られる特徴軸の周辺形状を表す特徴量 HSI を用いた姿勢推定を考える。シーンから特徴軸とその周辺形状を表す HSI を選出し、あらかじめ作成しているモデルの特徴軸の HSI とのマッチングを行う。マッチングの評価が高かった順にソーティングし、対応候補のリスト(以下マッチングリスト)を作成する。マッチングリストの順に初期位置合わせと詳細位置合わせを行い、それぞれの対応条件を満たしたものを姿勢推定結果とする。

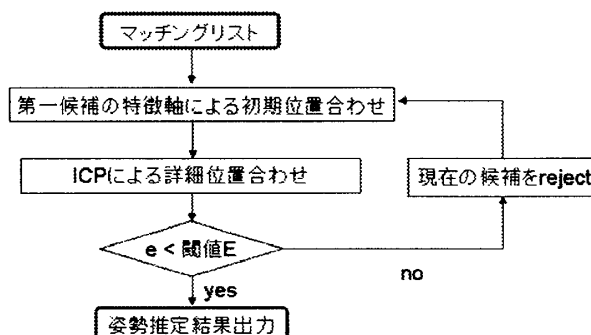


図1 姿勢推定の流れ

2.1 HSI による初期位置合わせ

Horizontal-Spin-Image(HSI)とは物体の表面から2点選び生成された特徴軸を基準として Spin-Images を取得して得られる特徴量である(図2)。特徴軸の単位ベクトルを n 、特徴軸の重心を p としたとき、周辺の点 x から Horizontal-Spin-Image を生成するための二次元パラメータ (α, β) への変換式は以下(1)を用いる。

$$(\alpha, \beta) = (\sqrt{\|x - p\|^2 - (n \cdot (x - p))^2}, n \cdot (x - p)) \quad (1)$$

このようにすることで法線方向の誤差に対し頑健な特徴量を得ることができる。また法線を基準としていないため Spin-Images に比べ特徴点の位置が多少ずれていても同様の特徴量を得ることが可能である。よって特徴的

†九州工業大学

な局所領域に対して特徴点を1点に絞り込んでの対応点探索が可能であり、効率的な姿勢推定が行なえる。

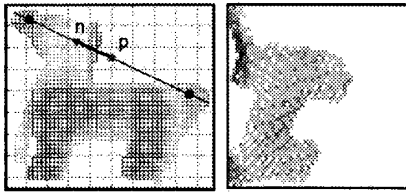


図2 Horizontal-Spin-Images

2.2 ICP アルゴリズムによる詳細位置合わせ

より高精度に姿勢推定を行うために ICP を用いた位置合わせを行う。ICP は HSI によって位置合わせされたシーンとモデルの二つの点群データに対して、以下の処理を誤差の変動が収束するまで反復的に行うことで高精度の位置合わせを行う手法である。

1. 対応点探索
2. 誤差が最小となるような剛体変換パラメータを計算
3. 求められた剛体変換パラメータによる位置合わせ

対応点探索では、モデルの各点についてシーンから最近傍点探索を行い、ある程度近いものが見つかったらそれを対応点としている。この時、あらかじめシーンの点群をグリッド平面に投影しておき、その平面から対応点探索を行うことで処理コストを大幅に削減している(図3)。

誤差の評価は対応点間の距離を法線によって重み付けた値の総和(式2)を用いる。

$$\epsilon^2 = \min_{R,t} \sum_k (\overline{n}((R\vec{x}_k - t) - \vec{y}_k))^2 \quad (2)$$

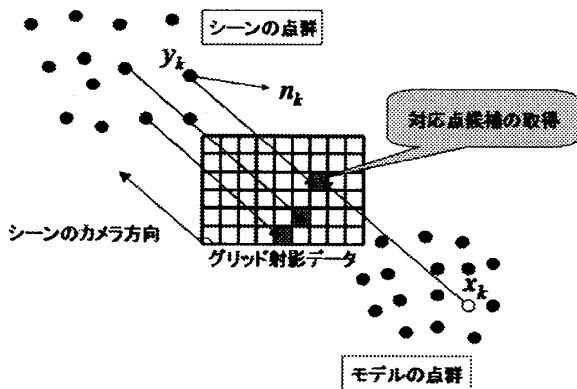


図3 グリッド射影による対応点探索

$R, t, \vec{x}_k, \vec{y}_k, n_k$ はそれぞれ回転行列、並進ベクトル、モデルの k 番目の対応点、シーンの k 番目の対応点、シーンの k 番目の対応点の法線ベクトルとなる。剛体変換パラメータである回転行列と並進ベクトルはこの誤差関数を非線形最小二乗法によって最適化することで求めることができる。

最終的に収束した時の対応点間の平均誤差が閾値以下であれば姿勢推定成功とみなし、それ以外は現在の対応特徴軸候補をマッチングリストから破棄して次の対応特徴軸について位置合わせを行う。また、詳細位置合わせ中でも、対応点数が閾値以下の場合は途中で現在の候補を破棄する。ICP は誤対応やクラッター等によるノイズの影響を受けやすいため、ノイズが少ない領域のみで位置合わせを行う必要がある。後述の照合領域漸増型 ICP でこれを解決する。

2.3 照合領域漸増型 ICP

ICP による位置合わせにおいて領域を指定する際に、よりノイズの少ない位置を指定する必要がある。範囲についても狭すぎると局所解に陥る可能性が高くなり、広すぎるとノイズを含み収束が遅れて処理コストが高くなる。そこで本論文では、クラッター等に頑健な詳細位置合わせ手法として照合領域漸増型 ICP (Incremental-region-ICP) を提案する。Incremental-region-ICP では領域としては初期位置合わせで用いた特徴軸の端点周りに限定し、領域の範囲は Incremental-region-ICP の繰り返し回数に応じて増加させることでノイズに対して頑健な位置合わせを実現する。特徴軸の端点周りの点は HSI のマッチングによってある程度似たような形状であることが保障されているため、ノイズが少ないことが期待できる。領域の範囲については、より信頼性の高い狭い領域で位置合わせを行い、範囲を広げていくことで大域的な整合性を保つ。狭いときに局所解に近づいても最終的には修正され正しい位置合わせが行われることが期待でき、範囲を広げることでノイズが含まれても、狭い範囲での位置合わせが正しく行われていれば、距離の閾値等でノイズとの誤対応を防ぐことが可能となる。

本研究では初期位置合わせで用いた特徴軸周りに誤差が線形増加する誤差モデルを仮定し(図4)、位置合わせの対象となる誤差の大きさに比例する形で照合領域の大きさを増加させた。

以下、本論文では区別をつけるために従来の

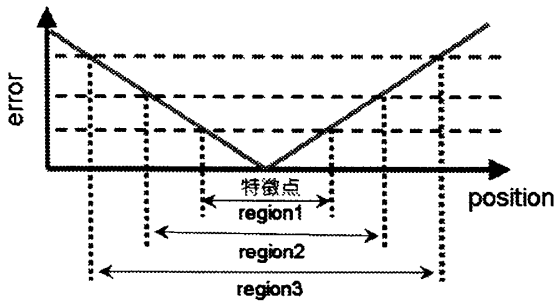


図4 線形誤差モデル

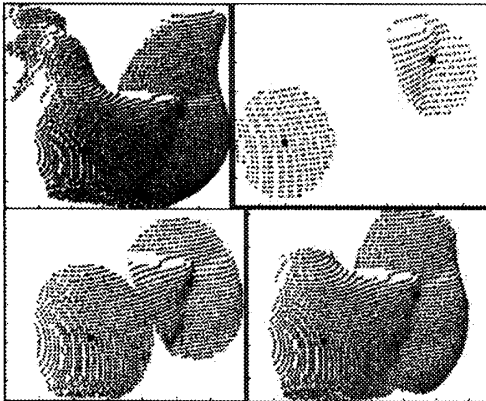


図5 左上:シーン(黒点は端点), 右上:region1(繰り返し回数1回目), 左下:region2(2回目), 右下:region3(3回目以降)

ICP(Fixed-region-ICP)をF-ICP, Incremental-region-ICPをI-ICPと記述する。

3 実験

3.1 実験環境

実際の距離データを用いて比較実験を行った。対象物体としては約 $10 \times 10 \times 3\text{cm}$ の大きさの鶏の置物を使用した。シーンとして用いた距離データとしては平面上にシーン中に対象物体が一体と別物体として対象物体と似たような置物がある状態で取得したデータ8個(データセットA), 平面上に別物体と重なり合っているデータ10個(データセットB), 床が散乱しているデータ5個(データセットC)の計23個のデータを用いた。これらのデータに対してHSIによる初期位置合わせを行った後に, 詳細位置合わせとしてF-ICPを用いた場合とI-ICPを用いた場合との比較を行った。ただし, F-ICPでの位置合わせ領域はI-ICPでの最大領域とする。すべてのシーンにおける姿勢推定時の各パラメータは表1に示す。また, 姿勢推定結果の正否は目視にて確認した。

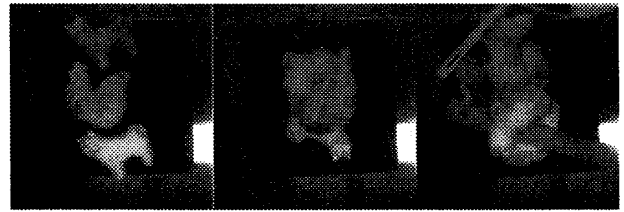


図6 入力シーン例(左からデータセットA, B, C)

表1 姿勢推定時の各パラメータ

ICP最大繰り返し回数	5回
対応点数閾値	30
F-ICP領域半径	30mm
I-ICP領域半径	10 → 20 → 30mm
最終平均誤差閾値	0.5mm^2

3.2 実験結果と考察

実験結果を表2に示す。ここでの平均処理時間 T_1 はF-ICPとI-ICPの両方で成功したデータのみで平均値を算出しており, 平均処理時間 T_2 はすべてのデータでの処理時間の平均を記述している。データセットA, B, Cすべてに対して高速化が図られ, 姿勢推定成功率についてもデータセットC以外は向上が図れた。I-ICPを用いた手法では正解した20個のシーン中, 7個はマッチングリスト中での上位特徴軸候補により位置姿勢推定を実現し, 平均処理時間 T_1 の削減に大きく寄与した。同じ特徴軸候補より位置姿勢推定を行ったがF-ICPでは収束しなかった例を図7に示す。狭い領域で全体の位置合わせに有効な対応点が含まれていれば, それらすべての対応点を用いることで変位量の大きい位置合わせが可能であり, 図7のような特徴軸回転方向に大きくずれた初期位置でもI-ICPであれば制限回数内で十分な位置合わせが実現できた。

残り13個中1個だけF-ICPで見つけた解をI-ICPが見落としたシーンがあった(図8)。このようなずれ方をした初期位置の場合, 狭い領域では全体のずれを補正するのに十分な誤差が測れずに収束が遅れたと考えられる。

データセットC中のI-ICPで失敗したデータは, F-ICPでは対応点数でリジェクトされていたものがリジェクトされずにそのまま最終誤差も満たしてしまい, 正解として出力されていた。これらの解決法としては, 適切な閾値の設定, またはロバストな終了条件の決定法の提案などが挙げられる。

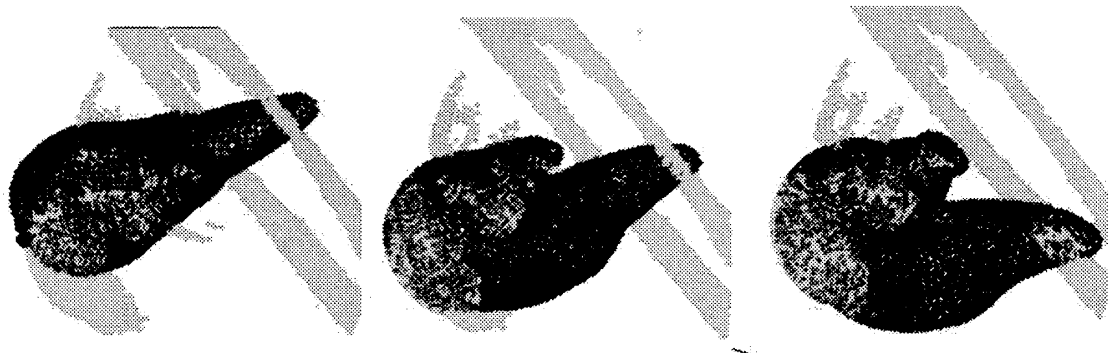


図7 I-ICPでは解として出力されたがF-ICPではrejectされた対応候補(左から初期, F-ICP, I-ICP)

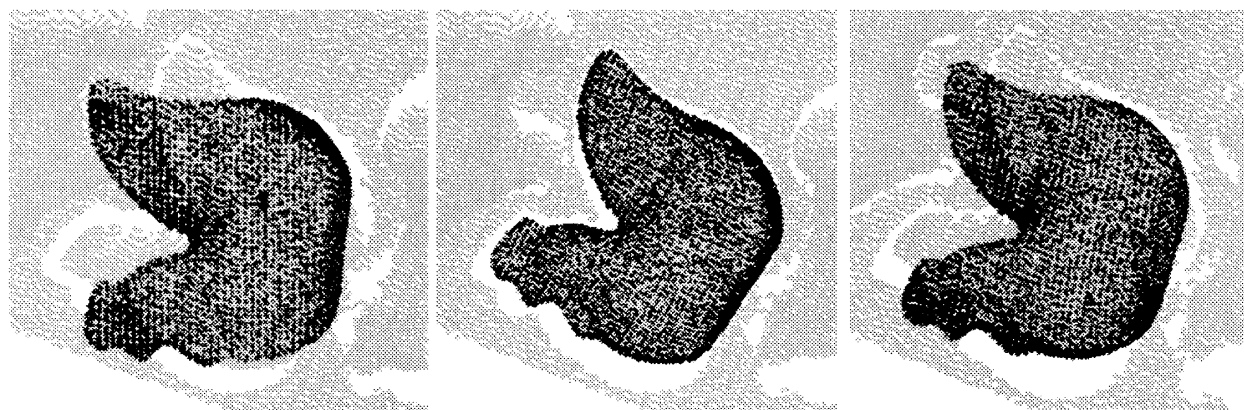


図8 F-ICPでは解として出力されたがI-ICPではrejectされた対応候補(左から初期, F-ICP, I-ICP)

表2 実験結果

		A	B	C
F-ICP	成功数/データ数	6/8	8/10	5/5
	平均処理時間 T_1 [秒]	19.8	31.9	33.4
	平均処理時間 T_2 [秒]	740.4	956.8	172.1
I-ICP	成功数/データ数	7/8	9/10	4/5
	平均処理時間 T_1 [秒]	11.3	9.2	28.1
	平均処理時間 T_2 [秒]	98.4	49.4	35.2

4 まとめ

本論文では効率的な三次元物体姿勢推定のための照合領域漸増型ICPを提案した。照合領域漸増型ICPの性能評価実験において、姿勢推定成功率を下げずに処理時間をおよそ80%~99%削減することに成功した。すなわち、処理時間は $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{100}$ となった。今後の課題としては、照合領域の範囲や新たな誤差モデルにおける検証、照合領域範囲の決定手法の提案などが挙げられる。

謝辞

本研究は文部科学省北九州知的クラスタ創成事業の支援を受け行われた。

参考文献

- [1] A. Johnson, "Spin-Images: A Representation for 3-D Surface Matching", doctoral dissertation, The Robotics Institute, Carnegie Mellon Univ, 1997
- [2] 北明靖雄, 奥田晴久, 橋本学, 金子俊一: 距離アスペクト画像照合と階層型ICP照合を用いたピンピッキングシステムの開発, 第12回画像センシングシンポジウム予稿集, pp.207-214, Yokohama, Jun, 2006.
- [3] 伊藤俊樹, 吉村順, 出口央, 榎田修一, 江島俊朗: Horizontal-Spin-Images: 三次元物体姿勢推定のための頑健な不変特徴量, 第13回画像センシングシンポジウム, Yokohama, Jun, 2007.
- [4] P. J. Besl and N. D. McKay: "A Method for Registration of 3-D Shapes", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell, Vol.14, No.2, pp.239-256, Feb 1992.