点群データ分類と自動位置合わせの高速化

Classification of Cloud Points and High-Speed Automatic Registration

趙希祿・埼玉工業大学

Xilu ZHAO, Saitama Institute of Technology

徐放・住友重機械工業

Fang XU, Sumitomo Heavy Industries, Ltd

萩原一郎・明治大学

Ichiro HAGIWARA, Meiji University

Key Words: Reverse engineering, Automatic registration, Shape measurement, Computer aided design, Image Processing

1. はじめに

リバースエンジニアリングにおいて、異なる視点で測定した距離画像の自動位置合わせ問題は非常に重要な研究課題になっている⁽¹⁾。位置合わせの目的は異なる視点から計測した距離画像をベースにして、重ねた部分の正しい相対位置関係を表せるデータ変換関係を求めることである⁽²⁾⁻⁽³⁾。

本文では、各点の近傍点の共分散行列の固有値分析を行い、得られた固有ベクトルをベースにし、点群を平滑点、折目点、角点と境界点に分類して、更に、同種類の点に対して全体的な位置パラメータを計算し、高速かつ正確な自動位置合わせ方法を検討する。

2. 点の分類

まず、任意の注目点 p_i とその近傍点 q_j ($j=1,2,\dots,N_i$) を考える。その近傍点の中心 c_i を次式のように表される。

$$c_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} q_j \quad (1)$$

そして、近傍点の共分散行列が次式のように定義できる。

$$C_i = \sum_{j=1}^{N_i} (q_j - c_i)(q_j - c_i)^T \quad (2)$$

式中では、 $q_j - c_i$ は 3×1 の列ベクトル、 C_i は 3×3 の共分散行列である。 C_i に対して固有値解析を行い、得られた固有ベクトル e_0, e_1, e_2 とそれに対応する固有値 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ ($\lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2$) を利用して、点 p_i を図1のように4種類に分類することができる。

(1) 平滑点 p_{surf} 注目点 p_i は滑らかな曲面にある場合、固有値が $\lambda_1 \approx \lambda_2$ そして $\lambda_0 \approx 0$ となり、図1(a)に示すように、平滑点の最小固有値に対応する固有ベクトル e_0 の方向は、 p_i の位置する曲面の法線ベクトルとほぼ一致する。 e_1 と e_2 はそれぞれ e_0 と直交しており、方向は決められない。

(2) 折目点 p_{cre} 図1(b)に示すように注目点 p_i が曲面と曲面の交差する交線上にある場合、固有値が $\lambda_0 \approx \lambda_1$ そして $\lambda_0 + \lambda_1 \approx \lambda_2$ となり、 e_2 が注目点 p_i にある曲面と曲面の交線の接線方向と一致する。 e_0 が両曲面と同じ角度を持つ平面にあり、各方向が確定できる。

(3) 境界点 p_{bor} 境界にある点を境界点 p_{bor} と定義する。境界点の場合、 $\lambda_0 \approx 0$ そして $2\lambda_1 \approx \lambda_2$ になる。対応する固有

ベクトルの関係は図1(c)に示しており、 e_0 は曲面の法線方向、 e_2 は境界線の接線方向と一致する。

(4) 角点 p_{cor} 角にある点を角点 p_{cor} とする。固有ベクトルの関係は複雑になって不確定になる。図1(d)に示すように、角の部分複数の曲面の交線の交点と見なし、各曲面の挟む角度が異なり、 e_0 だけの方向が決められる。

Fig.1 Points Classification

3. 自動位置合わせ

図2に示す点群 P を点群 Q に変換する例を考える。図中では、点 p_1 と p_2 は点群 P の上にある対応点、点 q_1 と q_2 は点群 Q の上にある対応点、 p_c は点群 P の中心、矢印は各点の固有ベクトルである。

ここで、点の位置および固有ベクトルを揃えるように、点群 P の対応点を点群 Q の対応点に変換した結果を図3に示す。図3により、図3(a)と(d)に示す p_1 と q_1 、 p_2 と q_2 による変換は正しく、図3(b)と(c)に示す p_1 と q_2 、 p_2 と q_1 による変換は間違っていたことが判る。この結果を利用すれば自動位置合わせを実現することができる。

まず、次式で点群 P の中心 p_c を計算する。

$$p_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (3)$$

式中では、 N は点群 P の点の総数である。次式の共分散行列の固有ベクトル e_{c0}, e_{c1}, e_{c2} を求める。

Fig.2 Cloud Data and Corresponding Points

Fig.3 Transformation Using Different points

$$C = \sum_{i=1}^N (p_i - p_c)(p_i - p_c)^T \quad (4)$$

次に、同じ種類の点 $p_i \in P$ と $q_j \in Q$ を選択して、点 p_i と点 q_j の固有ベクトルから構成する 3×3 の行列の間に次の関係が存在する。

$$D_j = T_{ji} D_i \quad (5)$$

式(5)を整理して、点 p_i から点 q_j への回転変換行列 T_{ji} が次式のように求められる。

$$T_{ji} = D_j D_i^{-1} \quad (6)$$

一方、点 p_i から点 q_j への並進変換ベクトルが次式のように求められる。

$$d_{ji} = q_j - p_i \quad (7)$$

ここで、点群 P を剛体として考え、式(6)と(7)に示す回転変換行列と並進変換行列を使い、点群 P の中心 p_c を次式で点群 Q に変換する。

$$p'_c = T_{ji}(p_c - p_i) + d_{ji} \quad (8)$$

式中では、 p'_c は点群 P の中心 p_c を変換した点である。点群 P の中心 p_c の固有ベクトル e_{c0}, e_{c1}, e_{c2} を点群 Q に変換した後のベクトル $e'_{c0}, e'_{c1}, e'_{c2}$ が次式で求められる。

$$e'_{ck} = T_{ji} e_{ck} \quad (k=0,1,2) \quad (9)$$

最後に、点群 P の全ての点について、式(6)~(9)を使い、回転変換行列と並進変換行列を求め、点群 P の中心を点群 Q に変換して、得られた沢山の中心点の中で、正しく変換さ

れたのはある点に集中しており、この時の位置パラメータを利用して、点群 P の全ての点を点群 Q に変換すれば、位置合わせを実現することができる。

図4に示すのは、マウスの位置合わせの例である。両方の重ねた部分が少なく、そして重ねた部分には平滑点が多く、全体的に特徴点が少ないマウスの点群データに対して自動位置合わせを行った結果、重ねた部分が非常に滑らかな曲面となり、品質の良い位置合わせ結果が得られた。

図5に示すのは、オイルパンの位置合わせの結果である。全体的に似ている特徴点が多く、重ねた部分が比較的少ないオイルパンの点群データに対して自動位置合わせを行った結果、点分類を行い、同じ種類の点同士だけをマッチングしているため、正確な位置合わせ結果が得られた。

Fig.4 Validation Result of Mouse

Fig.5 Validation Result of Oil pan

4. 結論

(1) 点群データの近傍点群を用いて生成した共分散行列に対して固有値解析を行い、新しい点分類方法を提案した。

(2) 点群データを平滑点、折目点、境界点と角点に明確に分類することが実現できた。

(3) 本法を用いて、従来の位置合わせ方法で処理できない問題に対しても非常に有効であることを示している。

謝 辞

本研究は平成 24 年度科学研究費補助金（基盤研究 C, No.24560271）の援助を受けてなされた。ここに深甚なる感謝の意を示す。

参考文献

- [1] P. J. Besl and N.D. McKay, A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, No.14-2, (1992), pp. 239-256.
- [2] 徐放, 趙希祿, 萩原一郎, リバースエンジニアリングにおける自動位置合わせに関する検討, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.771, (2010 年), pp.2861-2869.
- [3] 徐放, 趙希祿, 萩原一郎, 多記述子点群モデルによる高速自動位置合わせに関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.787, (2012 年), pp.783-798.