

K-012

計測点群位置合わせのための2次曲面推定を用いた特徴量抽出法 Feature Line Extraction Using Quadric Surface Estimation for Range Image Registration

金野 哲士†
Tetsuji Konno

高橋 哲也‡
Tetsuya Takahashi

今野 晃市†
Kouichi Konno

1. はじめに

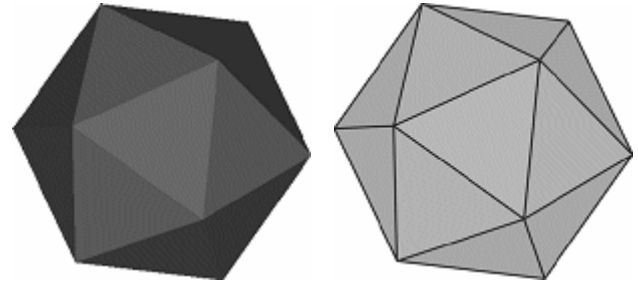
3次元形状計測技術は、ものづくりには欠かせない基盤技術である。しかし、成形品の品質や、それを生み出す金型の品質と磨耗状態の検査においては、いまだに目視検査や手作業による寸法計測が多く行われている。機械部品の目視検査においては、人が検査を行うため、効率が悪く、また個人差による計測精度のバラツキが生じ、定量的な判断が困難である。機械部品を検査する方法の一つに、3次元計測による計測点群と、設計データであるCADモデルがどの程度一致するのかを調べる手法が考えられる。このような検査手法を自動化するためには、計測点群とCADモデルを一つの3次元空間で位置合わせする必要がある。本研究では、CADデータと計測点群の特徴をそれぞれ抽出し、特徴量を利用して2者を同一空間で位置合わせする[1]。その後、CADデータと計測点群の幾何学的な差分を計算する。文献[1]の手法では、平面形状に依存した特徴量を抽出することは可能であるが、機械部品で多用されるフィレット面などの2次曲面に依存する特徴量を抽出することは困難である。そこで、本稿では、機械部品を計測して得られた点群から、2次曲面を表す点群を推定し、2次曲面の特徴量を抽出する手法について提案する。

2. 関連研究

2.1 領域分割による稜線抽出法

文献[1]では、計測対象物の平面で構成されている部分に着目し、平面形状の輪郭線が計測方向に依存しにくいことを利用して、輪郭を表す直線形状を、計測点群から抽出する手法を提案している。以下にその手順を示す。

1. 測定点群から3次元デプスエッジ (DE) を抽出する。
2. DE とその近傍の点群を包含するような無限平面が存在すると仮定し、DE とその近傍の点群を用いて無限平面の単位法線ベクトル \mathbf{N} を近似する。
3. \mathbf{N} と DE の方向を基に、DE 上に局所的な座標軸 \mathbf{S} を設定する。
4. \mathbf{N} の近似に用いた点群を開始点として、処理2で仮定した無限平面に含まれる点群を探索することで、計測点群を平面性に基いた領域に分割する。このとき、局所的な座標軸 \mathbf{S} と点の接平面を表す法線ベクトルがなす角度を用いて、無限平面に含まれる点群を探索する。
5. 隣接する2つの領域で無限平面の交線 \mathbf{L} を求める。
6. 交線 \mathbf{L} 上の適切な2点を端点として連結し稜線を表す線分を作成する。2つの無限平面に含まれる点群で、交線 \mathbf{L} から距離 r 以下の点群を探索し \mathbf{L} に射影する。そして、線分の長さが最大となるような2点を端点とする。



(a) ポリゴン (b) 稜線抽出結果
図1. ポリゴンと稜線抽出結果

図1(a)のポリゴンから仮想的に計算した3次元座標点群を用いて、稜線抽出を行った結果を図1(b)に示す。図1(b)の黒線は特徴線を表す。本研究では、文献[1]で提案された手法をベースにして、計測点群から2次曲面を表す座標点群を抽出する。ただし局所的な欠落や欠損が存在せず、また、平面形状から必ず3次元デプスエッジが抽出できるような計測点群を対象とする。

2.2 2次曲面推定

文献[1]の手法を利用すると、円柱形状を表す計測点群からは、計測方向に依存する特徴線が抽出される。そこで、文献[2]では、円柱を表す点群から計測方向に依存しない特徴線を抽出するための円柱形状認識手法を提案している。具体的には、文献[1]の手法により抽出された特徴線から、円柱を切断する断面を複数想定し、断面上に乗る点群を円錐曲線で近似することで、断面線を推定する。その後、複数の断面線から円柱の中心軸を近似するものである。文献[2]の手法により、円柱面に乗る点群を得ることが可能となり、断面生成の基になった特徴線を円柱面と関連付けることが可能となる。このことから、文献[1]で得られた特徴線を、円柱面に属する特徴線と、それ以外の特徴線に分類することができる。

- 文献[2]で提案された円柱形状認識の手順を以下に示す。
1. 円柱のシルエットを表す特徴線から、円柱を特徴線に垂直な平面で切断した断面上にのる点群を抽出する。
 2. 抽出された断面上にのる点群を円錐曲線で近似する。円錐曲線として有理2次Bezier曲線を用いる。
 3. 近似した円錐曲線に基づいて中心軸の推定を行う。

具体的には、図2に示すように円柱のシルエットを表す特徴線を4等分し、特徴線上の点 $\mathbf{P}_s, \mathbf{P}_m, \mathbf{P}_e$ を得る。次に、特徴線方向ベクトルを法線ベクトルとし、 $\mathbf{P}_s, \mathbf{P}_m, \mathbf{P}_e$ を通る平面 $\mathbf{F}_s, \mathbf{F}_m, \mathbf{F}_e$ を定義する。そして、定義した平面に乗る点を抽出することで円柱の断面線を構成する点列 \mathbf{M} を得る。ここで、点列 \mathbf{M} を $\{\mathbf{Q}_0, \mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_{n-1}\}$ とし、 n は点列 \mathbf{M} の点の数とする。次に、得られた点列 \mathbf{M} を円錐曲線で近似し、中心軸の推定を行う。

2.3 メッシュモデルの領域分割法

Mizoguchi らは、機械部品をCTスキャンで計測して、

†岩手大学総務企画部情報企画課

‡岩手大学工学部情報システム工学科

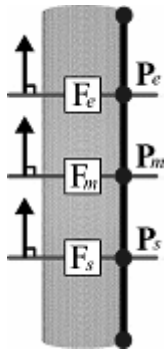


図 2. 特徴線に垂直な断面

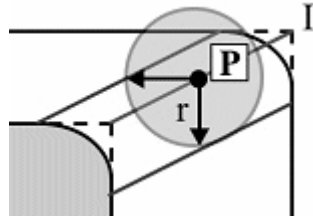


図 3. 特徴線の自動選択

得られた三角メッシュモデルに対して、局所的な曲率を計算し、その値に基づいて、メッシュの局所領域を分割する手法を提案した[3]。Mizoguchi らの手法では、フィレット部分に相当する全ての点群を求めることができる。しかし、位置合わせに必要な特徴線を抽出するためには、さらにその点群を、円筒面や円錐面などの、CAD モデルの面単位でグループ化する必要がある。本手法では、既にグループ化された点群を抽出することができているため、グループ化の手間がかからない。

3. 提案手法

単純な機械部品の形状には、平面とフィレット面が混在している。従来手法では、特徴抽出として 3 次元デプスエッジによる特徴線の抽出と、領域分割による平面の認識を行うことができる。しかし、平面性に注目している文献[1]の手法では、フィレット面の認識を行うことはできない。本手法では、文献[1]の手法により、点群から平面性に注目した特徴線を抽出した後で、文献[2]で提案されている 2 次曲面推定を用いて、円柱面と円錐面で表されるフィレット面を認識し、特徴量として抽出する手法を提案する。フィレット面から得られた特徴量は、点群の計測方向に依存しない。よって、計測点群と CAD モデルの位置合わせに利用することが可能である[4]。

3.1 フィレット面候補点群の抽出

本節では、計測点群のうちで、フィレット面として認識される可能性がある、候補点群を抽出する方法について述べる。フィレット面とは、2 つの曲面間の接続を滑らかにするために挿入される曲面である。また、2 つの平面が交差する干涉線は、フィレット処理が行われる前に 2 面が本来接続されていた部分である。よって、フィレット面候補点群となる部分は、平面間の干涉線付近の点群と考えられる。これより、干涉線を抽出し、その近傍の点群を探索することでフィレット面候補点群を抽出することができる。

フィレット面候補点群の抽出手順を以下に示す。

1. 文献[1]の手法を用いて計測点群を領域分割する。
2. 分割された平面領域と、その領域に隣接する別の平面領域とのペアを探索する。
3. 隣接平面ペアのリストを作成し、文献[1]の手法を用いて干涉線を抽出する。
4. 干涉線から半径 r 内の点群を、フィレット面を表す可能性が高い候補点群として抽出する。

3.2 特徴線抽出

本節では、2 次曲面推定で使用する特徴線を、フィレ

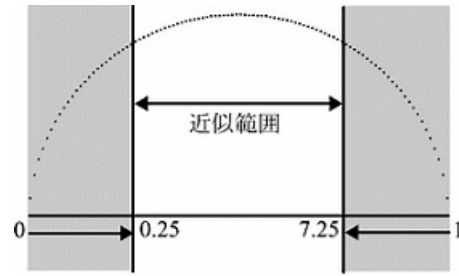


図 4. SetBack

ト面候補点群から自動選択する方法について述べる。初めに 3.1 節で述べた手法により抽出されたフィレット面候補点群に対して、文献[1]で提案された手法を使って特徴線を抽出する。抽出された特徴線は、フィレット面の輪郭線を表す。次に、抽出された特徴線の中でフィレット面認識を行うのに最も適した特徴線を、干涉線ごとに選択する。選択された特徴線は 3.3 節で述べる 2 次曲面推定で利用する。特徴線の自動選択手順を以下に示す。

1. 干涉線に対応する特徴線の探索

図 3 に示すように、干涉線 I の中点 P を求め、中点 P から半径 r 内にある特徴線を複数探索する。

2. 得られた特徴線の評価

得られた特徴線を次の 2 つの基準で評価し、2 つとも満たすような最適な特徴線の一つを選択する。

- ・ 特徴線が、一定以上の長さであるかを評価する。長さが一定以下の特徴線は、円柱面や円柱線の母線とは考えにくいため選択しない
- ・ 干涉線の単位方向ベクトルと、特徴線の単位方向ベクトルのなす角を評価する。角度が最も小さい特徴線を選択する。

3.3 2 次曲面推定

本研究では、3.2 節で述べた特徴線を利用して、点群が 2 次曲面かどうかを推定する。この手法を応用し、フィレット面候補点群が、フィレット面を表すかどうかを自動的に認識し、フィレット面の場合には、計測方向に依存しない特徴量を抽出することができる。抽出した特徴量は、点群と CAD データとの位置合わせに利用する。

フィレット面候補点群からフィレット面を精度良くかつ自動的に認識するために、断面上に乗る計測点群の端の部分に SetBack することにより、点群の近似範囲を動的に変更する。SetBack とは、2 次曲面推定に使用する点群の取得範囲を調整することである。SetBack することにより、特徴線抽出の結果が、測定誤差によって、本来の位置からずれることを考慮した楕円近似を行うことが可能となる。図 4 の垂直方向から対象物を計測する場合、対象物の端の部分は、計測方向と対象物の表面が垂直に近い。そのため、計測点群の誤差が大きくなる。そこで、本手法では、楕円近似の認識範囲を内側に狭めることによって、より誤差の少ない楕円近似を行う。また、楕円近似した結果を評価するために、断面上にのる点群 M 上の点 Q_i と有理 2 次 Bezier 曲線 $C(t)$ の距離を基にした誤差評価関数 E を定義する。誤差評価関数 E を式(1)に示す。

$$E = \sum_{i=0}^{n-1} |C(t_i) - Q_i|^2 \quad (1)$$

点群がフィレット面かどうかを判定する手順を以下に示す。

1. 誤差評価関数 E に対する最小二乗法の反復回数, および

SetBack 回数に閾値を設ける。本研究では、最適化回数を 10, SetBack 回数を 5 に設定した。

2. E が許容誤差よりも小さくなるまで最適化を繰り返す。
3. E が誤差の許容範囲内の場合、フレット形状であると判断し、2次曲面の中心軸を推定する。
4. 最適化の回数が閾値を超えたら SetBack を行い、再び楕円近似の最適化を行う。
5. SetBack の回数が閾値を超えたらフレット形状ではないと判断する。

以上の手順を、3.1 節で抽出したフレット面候補点群ごとに行うことにより、候補点群が、フレット形状であるかどうかを自動的に認識し、特徴量を抽出することが可能となる。

4. 実験

本章では、単純な機械部品を計測して得られた点群に対して、本手法を適用した結果を示す。機械部品は、高さ 6mm, 幅 7.2mm, 奥行 13.2mm のプラスチック製である。図 5 が機械部品の CAD データであり、A がフレット面を表す。また図 6 が、ある方向から部品を測定した結果である。測定点群の総点数は、134,765 である。図 6 に示す計測点群に、本手法を適用した結果を、図 7, 8 に示す。図 7 の灰色部分がフレット面候補点群であり、黒線が干渉線である。干渉線と点群の奥行き関係によって、干渉線が途切れたように見えるが、実際には直線として計算されている。また、図 8 の濃色部分が、本手法によりフレット面認識された点群である。本研究では、誤差評価関数に対する最小二乗法の最適化回数を 10 回、SetBack に 5 回の閾値を設定した。

図 8 より、図 5 に示す CAD データのフレット面だけが、フレット面認識されたことが分かる。図 9(a), (b) の中心にある特徴線が中心軸を抽出した結果である。

また、図 10 は、立方体の 3 辺の稜線を異なる半径で丸めたフレット面を表している。図 10(a) は、3 辺の半径が 1 の場合、(b) は、3 辺の半径が 3 の場合、(c) は、3 辺のうちの 3 辺の半径が 3, 1 辺の半径が 2 の場合のフレット面をそれぞれ示している。これらのフレット面に対して本手法を適用し、フレット面を表す点群から特徴線を抽出した例が、図 10(d), (e), (f) である。図 10 では、濃色部分にある白線が特徴線を表している。これらの図から分かるように、フレット面から特徴線を抽出することができた。

本手法によって得られた中心軸を用いることで、フレット形状を含む計測点群でも安定した位置合わせ処理が可能となる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、機械部品の検査を自動化するために 2 次曲面推定法を用いて、計測点群からフレット面を自動的に認識し、計測方向に依存しない特徴量を抽出する手法を提案した。単純な機械部品を計測して、部品の計測点群からフレット面の中心軸を抽出することができた。

今後の課題は、抽出したフレット面の中心軸を使って位置合わせを行い、CAD データと計測点群の差分を計測することである。

参考文献

[1] 金野哲士, 今野晃市, 千葉則茂, ”点群の平面性に基づく領域分割による稜線抽出法”, 芸術科学会論文誌, Vol. 6, No. 4, pp. 197 - 206, 2007

[2] 金野哲士, 今野晃市, ”3 次元計測点群からの円柱形状認識と中心軸推定”, 日本情報考古学会誌, Vol.13, No.2, pp.1-9, 2008

[3] T. Mizoguchi, H.Date, S.Kanai, T.Kishinami, ”Segmentation of Scanned Mesh into Analytic Surfaces Based on Robust Curvature Estimation and Region Growing”, Proc. Of GMP2006, Springer-Verlag, pp.644-654, 2006.

[4] P. Besl & N. McKay, ”A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.

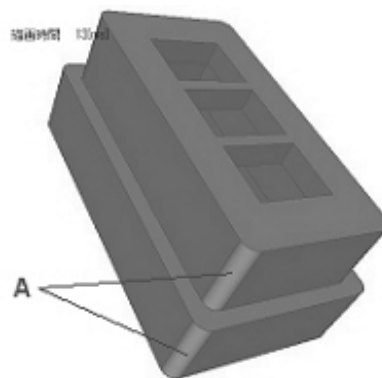


図 5. 機械部品の CAD データ



図 6. 測定結果

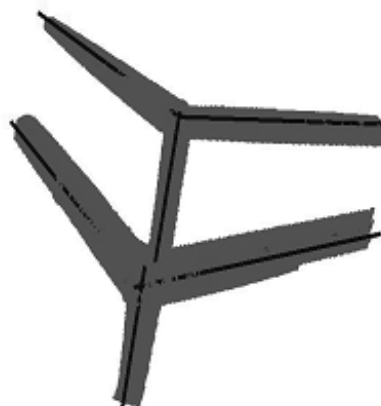


図 7. フレット面候補点群

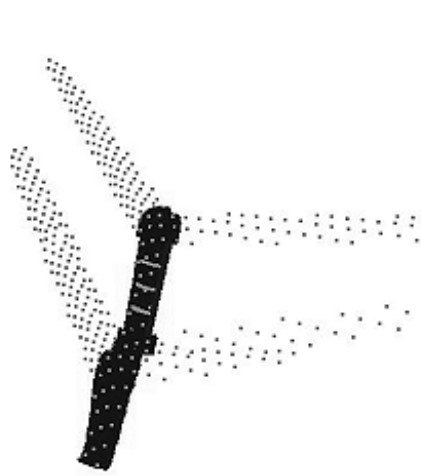
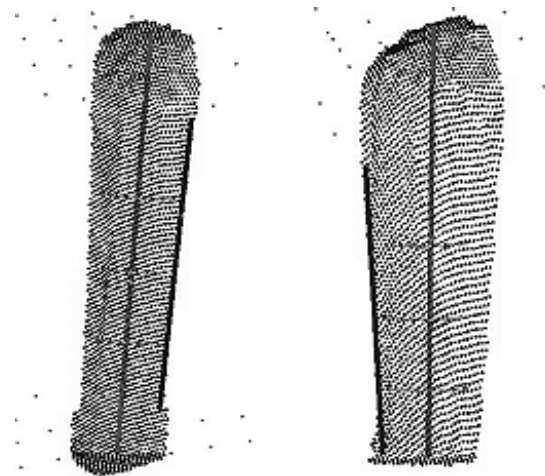


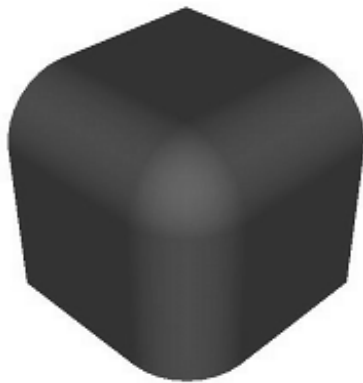
図 8. フィレット面認識の結果 1



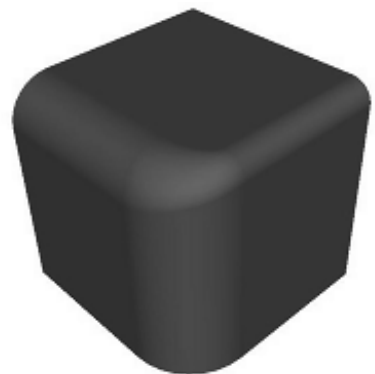
(a) 結果上部 (b) 結果下部
図 9. フィレット面認識の結果 2



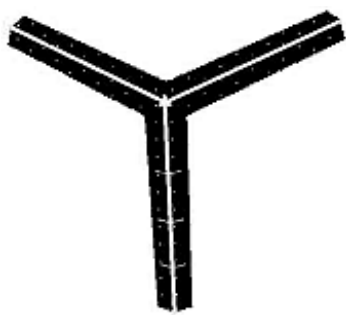
(a)



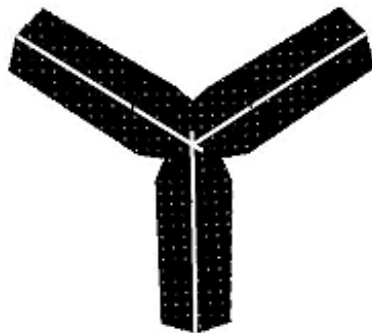
(b)



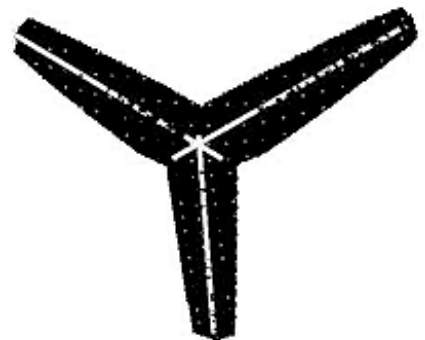
(c)



(d)



(e)



(f)

図 10. 半径の異なるフィレット面から得られた特徴線