

## 円筒度誤差評価のための円筒フィッティングアルゴリズムの精度評価

北海道大学 ○岩崎匠史, 金井理 伊達宏昭  
 日立製作所 渡辺正浩, 谷口敦史

CMM やレーザトラックを用いた計測のような、高精度で比較的低密度な計測点群を用いた工業製品の幾何公差検証を行なうためには、JIS, ISO 等の規格に基づいた最小外接や最大内接、最小領域を与えるフィッティングが必要とされる。しかし、これらのフィッティングは一般に非線形最小化問題となり、その解法は単純でない。本報ではこのフィッティング条件を満たし、高速で簡易にフィッティングが行える手法として既提案の反復的最小外接・最大内接円筒フィッティング手法の精度検証を行なうとともに、その問題点を明らかにする。

### 1. はじめに

3次元計測技術の発達により、製品表面の3次元計測点群を活用し、JIS等の規格[1,2]に則った幾何公差の3次元的管理を高精度に行う要求が高まっている。これを行なうには、規格で規定された幾何公差検証手順に則った計測点群に対する平面、円筒面等の形体フィッティング、及び幾何公差の評価が不可欠である。しかし、最小二乗法による形体フィッティングは、レーザスキャナのような比較的高密度だが精度が中程度の計測点群に対する形体フィッティングとして妥当であるが、CMM (Coordinate Measuring Machine) やレーザトラック[3]のように高精度で比較的低密度な点群へのフィッティングとしては適切でない事が知られており[4]、また幾何公差規格で定められている最小外接、最大内接、最小領域といった条件にも適合していない。その理由は、これらの条件を満たすフィッティングが非線形最適化問題となり、その解法が特に円筒度誤差評価の際の円筒フィッティングにおいて難しいからである。これに対してLeiら[5]は、反復的かつ離散的な円筒軸の移動による最小外接、最大内接、最小領域円筒の近似的フィッティング手法を提案しているが、生成されるフィット円筒が精度的に適切かどうかの検証は十分に行っていない。

そこで本研究ではレーザトラックのような高精度かつ比較的低密度な計測点群を入力としLeiらの手法[5]によって生成される円筒が、計測点群の分布状況によらず適切なフィットを与えるかどうかについて検証する。

### 2. 反復的離散的軸移動による円筒フィッティング手法 [5]

最小外接円筒フィッティングにおける、Leiらの手法[5]のフローチャートを図1に示す。この手法はノミナルな円筒の軸直線、そこから微小に変位した仮想軸直線群それぞれから各計測点群との距離を算出し、その距離評価値から最小外接もしくは最大内接条件を与える円筒軸に最も近づくと思われる軸直線を選択し、これを反復する手法である。この手法では図1の通り、まず現在の軸直線の上端・下端周辺に対して、1辺の長さが摂動量 $f$ となる正六角形を生成する。次に上端と下端の六角形の各頂点同士を結ぶ36本の仮想軸直線を生成する。そして軸直線と計測点群間の距離のうち、以下の2.1~2.3のように選択される評価値を図2のように算出し、最も評価値が高いものを新たな軸直線とする。これらの処理を、摂動量 $f$ の値が反復係数を乗じながら、幾何公差の評価として十分微小な閾値 $\delta$ 未満に減少するまで反復する。

#### 2.1 最小外接円筒フィッティング

最小外接円筒フィッティングでは軸直線と各計測点間の最大距離 $R_{max}$ の小ささを評価する。即ち、仮想軸直線の中で最も評価値の高い軸直線による仮想軸直線・点間最大距離である $\min\{R_{max}\}$ と、軸直線・点間最大距離 $D_{max}$ を比較し、より小さい方を新たな軸直線とする。更新された $D_{max}$ が半径となり、軸直線両端から軸ベクトルが算出される。

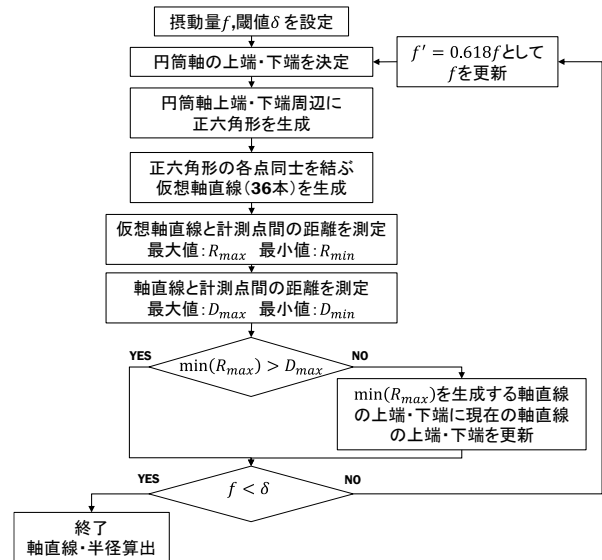


図1 円筒フィッティング[5]のフローチャート

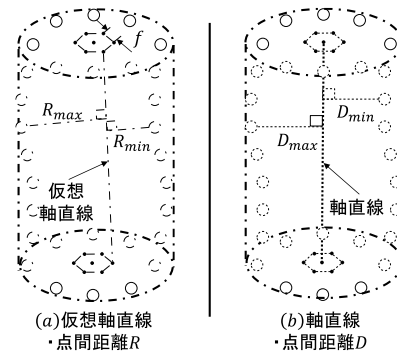


図2 最小外接円筒における (a) 仮想軸直線・点間距離、 (b) 軸直線・点間距離

#### 2.2 最大内接円筒フィッティング

最大内接円筒フィッティングでは軸直線と各計測点間の最小距離 $R_{min}$ の大きさを評価する。即ち、仮想軸直線の中で最も評価値の高い軸直線による仮想軸直線・点間最小距離である $\max\{R_{min}\}$ と、軸直線・点間最小距離 $D_{min}$ を比較し、より大きい方を新たな軸直線とする。更新された $D_{min}$ が半径となり、軸直線両端から軸ベクトルが算出される。

#### 2.3 最小領域円筒フィッティング

最小領域円筒フィッティングでは軸直線と各計測点間の最大距離と最小距離の差分 $\Delta R$ を評価する。即ち、仮想軸直線の中で最も評価値の高い軸直線による仮想軸直線・点間距離最小差分値である $\min\{\Delta R\}$ と、軸直線・点間距離最小差分値 $\Delta D$ を比較

し、より小さい方を新たな軸直線とする。更新された $\Delta D$ が円筒度公差となる。

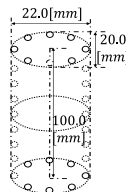
### 3. 既存円筒フィッティングアルゴリズムに対する精度評価

実製品の穴形状を再現した擬似計測点群に対して手法[5]を適用した。平均的なCMMの特性を仮定して、以下の3.1,3.2のような、z軸に対して垂直な一定間隔毎の断面上で、角度0度であるx軸上を基準に、角度30度毎で合計132点の仮想計測点を生成した。これらの点群に対し、フィットされる最小外接円筒、および最大内接円筒の半径・軸ベクトルを求め、それを既知の理論値と比較する。また2節のアルゴリズムの反復を制御する各パラメータを表1に示す。なおいずれの場合においても、処理時間は1秒以下であった。

表1 反復パラメータ

項目	値
摂動量 $f$ [mm]	1.0
反復係数	0.618
閾値 $\delta$ [mm]	0.0001

表2 楕円円筒擬似計測点群



底面中心([mm])	(0.0, 0.0, 0.0)
上面中心([mm])	(0.0, 0.0, 100.0)
点取得間隔([mm])	10.0
長軸半径([mm])	11.0
短軸半径([mm])	10.0
総点数([点])	12 × 11 = 132

#### 3.1 楕円断面・鉛直軸を持つ穴の擬似計測点群に対する検証

楕円断面・鉛直軸を持つ穴の擬似計測点群を表2に、この点群に対する最小外接円筒・最大内接円筒のフィット結果を表3に示す。最小外接円筒の半径と楕円の長軸が、最小内接円筒の半径と楕円の短軸が一致しており、軸ベクトルも鉛直方向を向いているため、妥当な結果であると言える。また楕円長軸上または楕円短軸上の仮想計測点が、フィット円筒表面上の点として正しく確認できている。

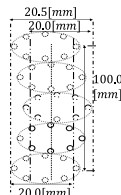
表3 表2の点群に対するフィット円筒算出結果

	最小外接円筒			最大内接円筒		
	x	y	z	x	y	z
軸ベクトル下端([mm])	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
軸ベクトル上端([mm])	0.0000	0.0000	100.0	0.0000	0.0000	100.0
軸ベクトル	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
フィット円筒半径([mm])	11.0			10.0		
フィット円筒上点数([点])	22			22		

#### 3.2 円断面・湾曲軸変位を持つ穴の擬似計測点群に対する検証

円筒中央にかけてx軸方向に軸を微小に変位させた円筒擬似計測点群を表4に、この点群に対する最小外接円筒・最大内接円筒のフィット結果を表5に示す。フィット円筒軸ベクトルが初期値からx方向へ微小変位し、また最小外接円筒半径・最大内接円筒半径とともに、理論値に対して誤差は $10^{-3}mm$ オーダーとなり、計測器の計測精度と比較して妥当な結果が得られた。しかし鉛直となるべき軸ベクトル方向に微小な傾きが残ることが確認された。このためフィット円筒上の $\min\{R_{max}\}$ ,  $\max\{R_{min}\}$ を与える点が本来3点となるべき所が、1点のみにとどまっていることがわかる。

表4 円筒擬似計測点群



底面中心([mm])	(0.0, 0.0, 0.0)
中央面中心([mm])	(0.5, 0.0, 50.0)
上面中心([mm])	(0.0, 0.0, 100.0)
点取得間隔([mm])	10.0
円筒半径([mm])	10.0
総点数([点])	12 × 11 = 132

表5 表4の点群に対する最小外接円筒算出結果

	最小外接円筒			最大内接円筒		
	x	y	z	x	y	z
軸ベクトル下端([mm])	0.2439	0.0814	0.0000	0.2324	0.1089	0.0000
軸ベクトル上端([mm])	0.2519	0.1006	100.0	0.2557	0.1078	100.0
軸ベクトル	0.0001	0.0002	1.0000	0.0002	0.0000	1.0000
フィット円筒半径([mm])	10.2521			9.7442		
フィット円筒上点数([点])	1			1		

#### 3.3 摂動量反復係数のフィッティング結果への影響

表4の点群に対する最小外接円筒フィッティングにおいて、摂動量の反復係数の変化に応じた軸ベクトル・理想軸ベクトル間角度、および最小外接円筒半径の変化を図3に示す。反復係数が1に近づくほど反復回数が増加するが、最終的な算出半径や軸方向には明確な差は見られなかった。

### 4. まとめ

本報告では[5]の円筒フィッティング手法が、計測点群によらず最小外接、最大内接等を条件とする適切なフィット円筒を近似的に与えることを明らかにした。しかし軸が湾曲している場合、理論値と若干の誤差を持つことも明らかになったため、その改善を今後検討したい。

### 参考文献

- [1] JIS B0621: 「幾何公差の定義および表示」(1984).
- [2] ISO1101: “GPS - Geometrical tolerancing -”, (2012).
- [3] Leica Geosystems, “Laser Tracker Systems”, [http://www.leica-geosystems.co.jp/ip/Laser-Tracker-Systems\\_69045.htm](http://www.leica-geosystems.co.jp/ip/Laser-Tracker-Systems_69045.htm)
- [4] Mohan, Prashant, Jami Shah, and Joseph K. Davidson. "A Library of Feature Fitting Algorithms for GD&T Verification of Planar and Cylindrical Features." *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [5] Lei, Xianqing, et al. "Method for cylindricity error evaluation using Geometry Optimization Searching Algorithm." *Measurement* 44.9 (2011): 1556-1563.

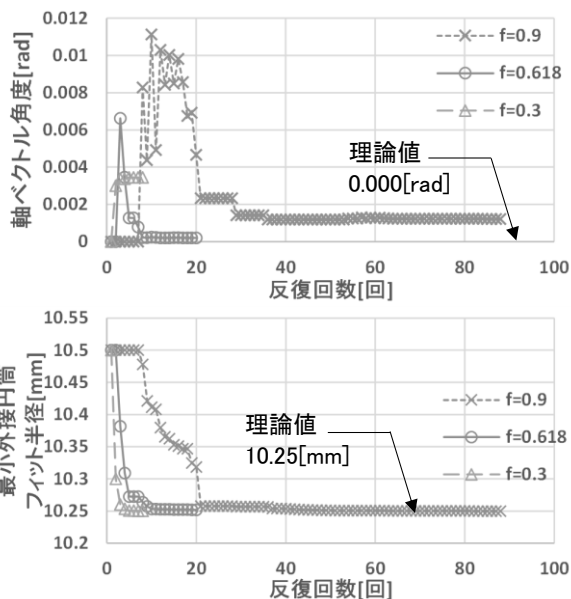


図3 反復係数の変化に対する最小外接円筒