

金属部品スルーホールの高精度3次元計測

High-Accuracy 3D Measurement of Through Holes in Metal Components

○柴原琢磨*, 青木孝文*, 山華義博†, 小野勝一†

○Takuma Shibahara*, Tkafumi Aoki*, Yoshihiro Yamage†, and Masakazu Ono†

*東北大学大学院情報科学研究科 †スズキ株式会社横浜研究所

* Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

†Yokohama R&D Center, Suzuki Motor Corporation

キーワード: 位相限定相関法 (phase-only correlation), 3次元計測 (3D measurement), 貫通孔(through holes),
ステレオビジョン(stereo vision), シリンダーフィッティング (cylinder fitting)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉05 東北大学大学院情報科学研究科 青木研究室
柴原琢磨, Tel.: (022)217-7169, Fax.: (022)263-9308, E-mail: sibahara@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, 工業製品の製造・検査の過程において, 製品を構成する部品の高精度な3次元計測への要求が高まっている. 工業部品を対象とする従来の3次元計測手法は, 機械的なプローブによる接触式・点計測手法が主流であり, その測定に要する時間や高いコストなどが問題となっていた¹⁾. このため, 非接触式3次元形状計測技術への期待が高まりつつある. 非接触式3次元形状計測法は, 能動型計測と受動型計測の2つに分類することができる²⁾. 工業部品の計測でよく用いられる能動型計測手法は, 物体に何らかのエネルギーを照射して物体の3次元形状を取得するものである. 具体的には, 光レーザ法, モアレトポグラフィ法などがあり, 計測精度および計測に要する時間などの計測コストが優れているという利点から広く用いられる. し

かし, エネルギーを物体に照射するため, 複数の計測システムによる相互干渉や計測対象・環境が制限されるという問題が存在する.

一方, 受動型計測手法の1つとして, 複数のカメラ画像のみを用いて3次元計測を行うステレオビジョン (stereo vision) が知られている. ステレオビジョンは異なる視点から同一の対象を観察し, それぞれの画像上への投影位置の違いから対象の3次元情報を得るものであり, ささまざまな計測対象に柔軟に適用できる簡便な手法である. しかし, 工業製品の形状検査に適用できる高いレベルの計測精度を実現することは一般に困難であると考えられる. ステレオビジョンによる3次元計測において, 計測精度の大幅な向上が実現できれば, 広範な工業製品の製造・検査の分野に適用されることが期待される.

本稿では, 自動車のフレームなどの金属部品に

貫通掘削されたスルーホール形状検査を目的として、ステレオビジョンによる高精度3次元計測システムを構築し、その性能評価を行った結果を示す。自動車等の工業部品は、製造過程の異なる金属部品に溶接等の加工を施し、組み合わせることにより製造される場合が多い。この加工の際に、金属部品全体に複雑な歪みを生じる場合があるため、3次元形状検査が要求される。しかし、自動車部品の形状検査は対象箇所が非常に多く、部品構造が複雑であるために、場合によっては熟練技術者による手動検査が必要であり(図1)、その自動化が強く求められている。

以上のような観点から本稿では、スルーホールの3次元形状検査を目的として、(i)サブピクセル精度でのステレオ画像の対応付けに基づく高精度領域ベースステレオ計測アルゴリズムを考案するとともに、(ii)これとエッジを用いた特徴量ベースステレオ計測アルゴリズムを相互補完的に組み合わせることにより、スルーホールを高精度に3次元復元し、さらに、(iii)復元された3次元壁面点群にシリンダーの幾何学的モデルをフィッティングすることによって、スルーホールの掘削位置、掘削半径、掘削方向を高精度に計測する手法を提案する。以下では、上記(i)~(iii)のそれぞれについて簡単に説明する。

- (i) 一般に、スルーホールはシリンダー形状をなしており、3次元空間における掘削方向はシリンダー軸の向きとして与えられる。そこで、スルーホールの内壁を3次元復元し、その3次元点群にシリンダーをフィッティングすることによって、掘削軸の向きを計測する。このためには、領域ベースステレオ計測により、多数の点を高精度に3次元復元する必要があるが、従来の領域ベースステレオ計測手法では3次元復元精度が不十分である。このため、位相限定相関法(phase-only correlation)に基

づくサブピクセル対応点探索手法⁴⁾⁵⁾を利用して、高精度領域ベースステレオ計測アルゴリズムを構成する。

- (ii) スルーホールの掘削位置と掘削方向を高精度に計測するために特徴量ベースステレオ計測と領域ベースステレオ計測を組み合わせた高精度3次元計測アルゴリズムを提案する。特徴量ベースステレオ計測では、スルーホールの開口部のエッジを用いて対応付けを行い、金属部品表面の法線ベクトル(開口部ふちが張る平面の法線ベクトル)とスルーホールの掘削位置、半径を計測する。
- (iii) 上記の(ii)で得られた開口部の幾何学的パラメータを用いて、(i)で得られたスルーホール内壁点群の3次元データにシリンダーの幾何学的モデルをフィッティングし、スルーホールの掘削方向を高精度に推定する。

以上に基づくスルーホール計測システムを構築し、計測精度の評価実験を行った結果、スルーホールの掘削方向を0.1°程度の精度で計測できることを示す。



Fig. 1 検査工程

2. 位相限定相関法を用いた領域ベース対応付け手法

2.1 位相限定相関関数

領域ベースステレオは、ステレオ画像から小領域を切り出し、相関計算を行うことによって対応

付けを行う。本稿では、画像の輝度値の変化に対してロバストであり、対応点座標をサブピクセル精度で検出することが可能な位相限定相関関数を対応付けに用いる。

連続空間で定義された2次元画像 $f_c(x_1, x_2)$ を考える。ここで x_1 および x_2 は実数である。いま、 δ_1 および δ_2 をそれぞれ x_1 および x_2 方向に関する微小移動量を表す実数とすると、連続空間で $f_c(x_1, x_2)$ を δ_1 および δ_2 だけ微小シフトした画像は $f_c(x_1 - \delta_1, x_2 - \delta_2)$ と表現できる。これらの連続空間画像 $f_c(x_1, x_2)$ および $f_c(x_1 - \delta_1, x_2 - \delta_2)$ を標本化間隔 T_1 と T_2 で標本化した離散空間2次元画像をそれぞれ $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ とする。

$$f(n_1, n_2) = f_c(x_1, x_2)|_{x_1=n_1T_1, x_2=n_2T_2}$$

$$g(n_1, n_2) = f_c(x_1 - \delta_1, x_2 - \delta_2)|_{x_1=n_1T_1, x_2=n_2T_2}$$

ただし、定式化の便宜上、離散空間のインデックスを $n_1 = -M_1, \dots, M_1$, $n_2 = -M_2, \dots, M_2$ とし、画像サイズを $N_1 = 2M_1 + 1$ および $N_2 = 2M_2 + 1$ とする。

$f(n_1, n_2)$ の2次元離散フーリエ変換 (2次元DFT) $F(k_1, k_2)$ を次式で与える。

$$F(k_1, k_2) = \sum_{n_1=-M_1}^{M_1} \sum_{n_2=-M_2}^{M_2} f(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2}$$

ただし、 $k_1 = -M_1, \dots, M_1$, $k_2 = -M_2, \dots, M_2$ とし、 $W_{N_1} = e^{-j\frac{2\pi}{N_1}}$, $W_{N_2} = e^{-j\frac{2\pi}{N_2}}$ である。また、 $g(n_1, n_2)$ の2次元DFT $G(k_1, k_2)$ も同様である。このとき、 $F(k_1, k_2)$ および $G(k_1, k_2)$ の間に次のような近似が成り立つ。

$$G(k_1, k_2) \simeq F(k_1, k_2) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N_1} k_1 \delta_1} e^{-j\frac{2\pi}{N_2} k_2 \delta_2}$$

上式が近似であるのは、連続空間画像と離散空間画像に対するフーリエ変換の性質の違いに起因する。

$F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ の相互位相スペクトルを次式で定義する。

$$\hat{R}(k_1, k_2) = \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}|} \quad (1)$$

$$\simeq e^{j\frac{2\pi}{N_1} k_1 \delta_1} e^{j\frac{2\pi}{N_2} k_2 \delta_2}$$

位相限定相関関数 $\hat{r}(n_1, n_2)$ は $\hat{R}(k_1, k_2)$ の2次元逆離散フーリエ変換 (2次元IDFT) である。

$$\hat{r}(n_1, n_2) \quad (2)$$

$$\simeq \frac{\alpha}{N_1 N_2} \frac{\sin\{\frac{\pi}{N_1}(n_1 + \delta_1)\}}{\sin\{\frac{\pi}{N_1}(n_1 + \delta_1)\}} \frac{\sin\{\frac{\pi}{N_2}(n_2 + \delta_2)\}}{\sin\{\frac{\pi}{N_2}(n_2 + \delta_2)\}}$$

通常 $\alpha = 1$ であるが、 $f(n_1, n_2)$ および $g(n_1, n_2)$ にノイズが加わることで α は減少する。

画像間の位置ずれ量をサブピクセルレベルで高精度に推定するための重要な操作を以下に示す。

(i) 窓関数による画像の周期性の排除

2次元DFTは取り扱う画像が画像端で循環することを仮定しているため、画像の端に本来は存在しないはずの不連続性が現れる。この不連続性の影響を低減するために、画像 $f(n_1, n_2)$ および $g(n_1, n_2)$ に対して、次式で定義される2次元ハンニング窓を乗じる。

$$w(n_1, n_2) = \frac{1 + \cos(\frac{\pi n_1}{M_1})}{2} \frac{1 + \cos(\frac{\pi n_2}{M_2})}{2} \quad (3)$$

(ii) 低域通過型位相限定相関関数への拡張

カメラで撮影した画像の高周波領域はS/N比が低いと考えられるが、相互位相スペクトル $\hat{R}(k_1, k_2)$ の計算式 (1) は、相対的に信頼性の低い高周波成分の情報を強調する。そこで、位相限定相関関数の計算の際に、信頼性の低い高周波成分を除去する低域通過フィルタを適用することによって高精度化が可能である。具体的には次式で表される方形フィルタ $L(k_1, k_2)$ を $\hat{R}(k_1, k_2)$ の計算の際に適用する。

$$L(k_1, k_2) = \begin{cases} 1 & |k_1| \leq U_1, |k_2| \leq U_2 \text{ のとき} \\ 0 & \text{その他のとき} \end{cases}$$

ただし、 U_1 および U_2 はそれぞれ M_1 および M_2 以下の整数 (≥ 0) である。このとき、式 (2) は次のようになる。

$$\hat{r}(n_1, n_2) \quad (4)$$

$$\simeq \frac{\alpha}{N_1 N_2} \frac{\sin\{\frac{V_1}{N_1} \pi(n_1 + \delta_1)\}}{\sin\{\frac{\pi}{N_1}(n_1 + \delta_1)\}} \frac{\sin\{\frac{V_2}{N_2} \pi(n_2 + \delta_2)\}}{\sin\{\frac{\pi}{N_2}(n_2 + \delta_2)\}}$$

ただし, $V_1 = 2U_1 + 1$, $V_2 = 2U_2 + 1$ である.

(iii) 関数フィッティングによるピーク座標のサブピクセル推定

2枚の画像 $f(n_1, n_2)$ および $g(n_1, n_2)$ の位相限定相関関数を計算することによって得られる実際の数値データは, $n_1 = -M_1, \dots, M_1$ および $n_2 = -M_2, \dots, M_2$ の離散点のみで得られるデータである. これらのデータの最大値を中心としてその周囲の複数点に対して, 式(4)を $\alpha, \delta_1, \delta_2$ をパラメータとしてフィッティングすることにより, ピクセルとピクセルの間に存在するピークの位置 δ_1 および δ_2 をサブピクセルレベルで推定することが可能となる.

2.2 サブピクセル対応付けアルゴリズム

位相限定相関関数を用いることにより, 入力画像 $I_0(n_1, n_2)$ および $J_0(n_1, n_2)$ からそれぞれ切り出した小領域画像 $f(n_1, n_2)$ および $g(n_1, n_2)$ の位置ずれ量を高精度に求めることができるが, その際に, 小領域画像 $f(n_1, n_2)$ に対応する部分が $g(n_1, n_2)$ に含まれる必要がある. そこで, 多重解像度画像を利用した階層マッチングを行い, $f(n_1, n_2)$ に対応する部分が確実に $g(n_1, n_2)$ に含まれるようにする. 階層マッチングは, 原画像を縮小して作成した多重解像度画像を用いて, まず解像度の低い画像で大まかな対応点を求め, その結果を初期値として解像度の高い画像でより正確に対応点を求める手法である.

以下に多重解像度画像を用いた階層マッチングのアルゴリズムを示す. ただし, p_l および q_l を第 l 階層における対応点对を表す座標ベクトルとし, 便宜上 q_0 のサブピクセルレベルの座標を q_{-1} とする. 図2に階層マッチングの概要を示す.

Step 1: $l = 1, 2, \dots, l_{max}$ に対して, 第 l 階層の多重解像度画像 $I_l(n_1, n_2)$ および $J_l(n_1, n_2)$ ($I_0(n_1, n_2)$ および $J_0(n_1, n_2)$ の粗い画像) をそれぞれ以下の

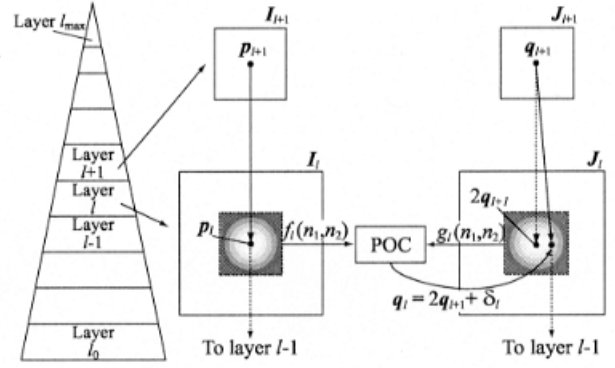


Fig. 2 階層マッチングを用いたピクセルレベルの対応付け

式で作成する.

$$I_l(n_1, n_2) = \frac{1}{4} \sum_{i_1=0}^1 \sum_{i_2=0}^1 I_{l-1}(2n_1 + i_1, 2n_2 + i_2)$$

$$J_l(n_1, n_2) = \frac{1}{4} \sum_{i_1=0}^1 \sum_{i_2=0}^1 J_{l-1}(2n_1 + i_1, 2n_2 + i_2)$$

多重解像度画像の階層数は, ステレオ画像 $I_0(n_1, n_2)$ と $J_0(n_1, n_2)$ の間の視差によって決定される. ステレオ画像間の視差のばらつきが大きいくほど, 多くの階層が必要となる. 本稿における実験では, $l_{max} = 4$ としている.

Step 2: $l = 1, 2, \dots, l_{max}$ に対して, 原画像上の参照点 p_0 に対応する座標 $p_l = (p_{l1}, p_{l2})$ を以下の式で計算する.

$$p_l = \lfloor \frac{1}{2} p_{l-1} \rfloor = (\lfloor \frac{1}{2} p_{l-1,1} \rfloor, \lfloor \frac{1}{2} p_{l-1,2} \rfloor)$$

Step 3: 最上位の粗い解像度の階層画像は原画像に比べると非常に小さい画像のため, 最上位階層の画像上では視差はほぼ一定値 $\delta_{l_{max}}$ とみなせる. この視差 $\delta_{l_{max}}$ は, 最上位階層の画像 $I_{l_{max}}$ および $J_{l_{max}}$ 全体に対する位相限定相関関数を計算することによってピクセルレベルで得ることができる. ここで, 画像全体を見るために, 最上位階層画像に対して窓関数を適用しない. 最上位階層における対応点 $q_{l_{max}}$ は次の式で与えられる.

$$q_{l_{max}} = p_{l_{max}} + \delta_{l_{max}}$$

$l = l_{max} - 1$ とする.

Step 4: 第 l 階層の画像 $I_l(n_1, n_2)$ および $J_l(n_1, n_2)$ から, 2つの部分画像 $f_l(n_1, n_2)$ および $g_l(n_1, n_2)$ の中心がそれぞれ p_l および $2q_{l+1}$ に一致するように切り出す。ただし, 本稿における実験では, 部分画像の大きさを部分画像の大きさを 31×31 とする。

Step 5: 部分画像 $f_l(n_1, n_2)$ と $g_l(n_1, n_2)$ 間の位置ずれ量を位相限定相関関数を用いてピクセルレベルで推定する。このとき, 部分画像の位置ずれ量を安定に求めるために, 部分画像 $f_l(n_1, n_2)$ と $g_l(n_1, n_2)$ に窓関数を適用する。推定された位置ずれベクトルを δ_l とすると, 第 l 階層における対応点 q_l は次の式で与えられる。

$$q_l = 2q_{l+1} + \delta_l$$

Step 6: 条件 $l > 0$ を満たす限り, $l = l - 1$ として, **Step 4** から **Step 6** までを繰り返す。

以下では, 最下位階層の原画像上のピクセルレベルの対応点 q_0 を用いてサブピクセルレベルの対応点 q_{-1} を求める。

Step 7: 原階層の画像 $I_0(n_1, n_2)$ および $J_0(n_1, n_2)$ から, 2つの部分画像 $f_{-1}(n_1, n_2)$ および $g_{-1}(n_1, n_2)$ の中心がそれぞれ p_0 および $2q_0$ に一致するように切り出す。ただし, 本稿における実験では, 部分画像の大きさを 17×17 とする。

Step 8: 部分画像 $f_{-1}(n_1, n_2)$ と $g_{-1}(n_1, n_2)$ 間の位置ずれ量を位相限定相関関数を用いてサブピクセルレベルで推定する。このとき, 部分画像の位置ずれ量を高精度に求めるために, 部分画像 $f_{-1}(n_1, n_2)$ と $g_{-1}(n_1, n_2)$ に窓関数を適用し, さらに低域通過型位相限定相関関数を用いる。推定された位置ずれベクトルを δ_{-1} とすると, 対応点 q_{-1} は次の式で与えられる。

$$q_{-1} = q_0 + \delta_{-1}$$

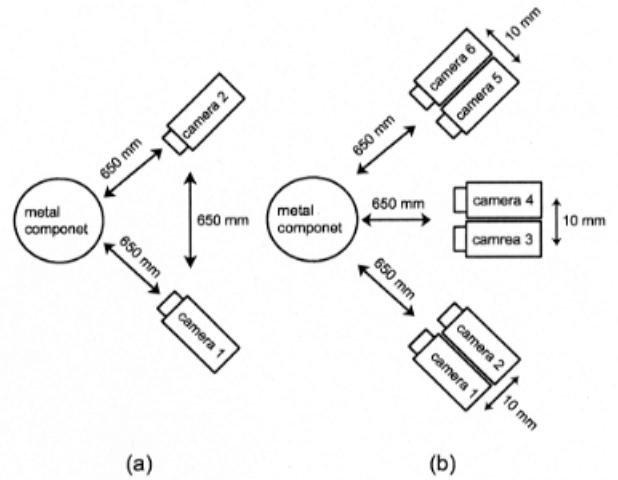


Fig. 3 カメラ配置

3. 高精度3次元計測アルゴリズム

3.1 アルゴリズムの構成

本稿では, スルーホールの掘削位置と掘削方向を高精度に計測するために, 特徴量ベースステレオ計測と領域ベースステレオ計測を組み合わせた高精度3次元計測アルゴリズムを提案する。領域ベースステレオ計測においては, 前章で述べたサブピクセル対応付けアルゴリズムにより, スルーホールの内壁面を高精度・高密度に3次元復元することが可能になる。計測された3次元点群にシリンダーをフィッティングさせることにより, スルーホールの位置・姿勢等のパラメータを推定することができる。その際, より高精度な推定を可能にするために, スルーホールの掘削位置 (開口部中心) と半径については, 画像中のエッジを利用する特徴量ベースステレオ計測により高精度に求め, シリンダーフィッティングの際の拘束条件として利用するものとする。

すなわち, 提案するスルーホール計測手法は, 下記のような流れとなる。

- エッジ情報を利用する特徴量ベースステレオ計測により, スルーホール開口部のふち円を3次元復元する。その際に, 図3 (a) のカメラ

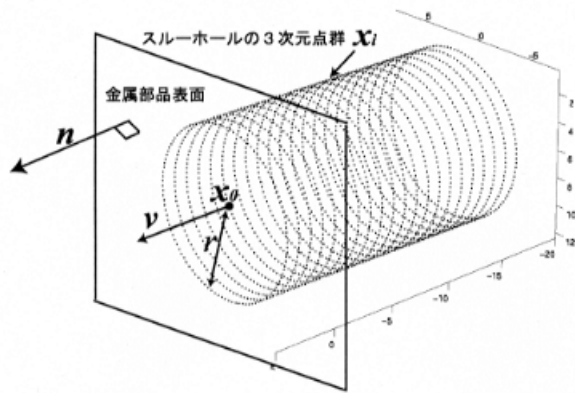


Fig. 4 スルーホールの計測値

配置を用いる。得られたふち円の3次元データを用いて、金属部品表面の法線ベクトル n (開口部ふちが張る平面の法線ベクトル)、スルーホールの掘削位置 (開口部中心) の3次元座標 x_0 と半径 r を求める (図4)。

- 領域ベースステレオ計測により、スルーホールの内壁の3次元点群 x_i , $i = 1 \dots N$ を復元する。その際に、図3 (b) のカメラ配置を用い、3つの異なる方向から内壁面全体を撮影する。さらに、特徴量ベースステレオ計測で求めた掘削位置 x_0 と半径 r を拘束条件として、内壁点群 x_i , $i = 1 \dots N$ にシリンダーをフィッティングし、スルーホールの掘削方向ベクトル (シリンダー軸の方向ベクトル) v を求める (図4)。

なお、カメラはあらかじめキャリブレーションする。後述する実験では、キャリブレーション器具を用いることにより、3次元空間中の既知点と2次元画像上に観察された点の間の投影を定める行列を求める手法で行っている⁶⁾。

3.2 特徴量ベースステレオ計測

入力: camera1~2の画像, camera1~2のキャリブレーションデータ

出力: 金属部品表面の法線ベクトル n , スルーホールの掘削位置の3次元座標 x_0 , 半径 r ,

Step 1: 撮影されたcamera1とcamera2の画像に対し、Cannyフィルタ⁶⁾を用いてスルーホール開口部ふちのエッジを抽出する。Cannyフィルタは、ノイズに対してロバストなエッジ抽出フィルタであり、1ピクセル幅でエッジを抽出することができる。

Step 2: スルーホール開口部のふちは円であるから、画像面に楕円として投影される。ふち円のエッジをサブピクセルレベルで検出するために、camera1とcamera2の画像から抽出したエッジ点群に対して、楕円をフィッティングする。このフィッティングが、**Step 3**のステレオ画像の対応付け精度を決定する。本稿では、楕円の直接最小二乗フィッティング (direct least-square fitting of ellipses)⁷⁾ を使用する。これは、楕円であるという代数的な拘束条件を利用して最小二乗法で点群に楕円をフィッティングする手法である。

Step 3: **Step 2**で求めた2つの楕円上の点列の対応付けを行い、スルーホール開口部のふちを3次元復元する。はじめに、camera1とcamera2のキャリブレーションデータから、基礎行列 (fundamental matrix) を求める⁸⁾。camera1の画像の楕円上の点 m と基礎行列から、camera2の画像にエピポーラ線を引く。点 m に対応するcamera2の画像の点 m' は、エピポーラ線と画像2の楕円の交点として求める。

Step 4: スルーホール開口部のふちの3次元点群に、平面をフィッティングする。得られた平面の法線ベクトルを求め、3次元空間上における金属部品表面の法線ベクトル n とする。

Step 5: スルーホール開口部のふちの3次元点群に、円の方程式をフィッティングする。この方程式のパラメータから、スルーホールの掘削位置の3次元座標 x_0 と半径 r を計測する。

3.3 領域ベースステレオ計測

入力: camera1~6の画像, camera1~6のキャリブレーションデータ, スルーホールの掘削位置の3次元座標 \mathbf{x}_0 , 半径 r

出力: スルーホールの掘削方向ベクトル \mathbf{v}

Step 1: 2.2章に基づいた対応点探索手法によって, camera1と2の画像間, camera3と4の画像間, camera5と6の画像間で対応点の組を求める. 位相限定相関関数(4)の α の値は, ノイズが加わることで, $0 \leq \alpha \leq 1$ に減少する. よって, α がある閾値未満で対応付けされた点を, 誤対応点, あるいは対応付け精度の低い点として除去する. 後述する実験では, $\alpha = 0.8$ とした.

Step 2: しかし, Step 1だけでは, 十分に誤対応点を除去することができない. よって, エピポラ幾何学に基づいて誤対応点をさらに除去することを考える. カメラキャリブレーションデータから基礎行列を求める. この基礎行列で定義されるエピポラ線とのユークリッド距離が遠い対応点を除去する. 後述する実験では, 0.5 pix以上の点を除去した.

Step 3: Step 2で得られたステレオ画像の対応点の組から, 新たに基礎行列を計算する⁹⁾. この基礎行列で定義されるエピポラ線とのユークリッド距離が遠い対応点を除去する. 後述する実験では, 0.5 pix以上の点を除去した.

Step 4: ステレオ画像の対応点の組が定義する視線は交わらなければならない. よって, 対応点の組が厳密にエピポラ幾何学を満たすように, Step 3で算出された基礎行列を用いて補正を行う⁹⁾.

Step 5: 各ステレオ画像間の対応点の組とキャリブレーションデータを用いてスルーホール内壁の3次元復元を行う.

Step 6: 3.2から, シリンダー中心 \mathbf{x}_0 と半径 r を計測している. また, Step 5でスルーホール内壁の3次元データ点群 $\mathbf{x}_i, i = 1, \dots, N$ が得られている.

ここで, シリンダー中心 \mathbf{x}_0 に原点に移動, すなわち, $\mathbf{x}' = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0 = [x', y', z']^T$, とすれば, シリンダー方程式の1次の項をなくすことができ, シリンダー方程式は

$$F(\mathbf{x}', y', z') = (\mathbf{x}', \mathbf{A}\mathbf{x}') - r^2 = 0$$

となる(付録参照). よって, 壁面データ点 $\mathbf{x}_i, i = 1, \dots, N$ に対して, 最小二乗法を用いて

$$\sum_{i=1}^N |(\mathbf{x}'_i, \mathbf{A}\mathbf{x}'_i) - r^2|^2 \rightarrow \min$$

を解くことによって, \mathbf{A} を算出する.

Step 6: シリンダーのパラメータ行列 \mathbf{A} の固有ベクトルからシリンダーの主軸 \mathbf{e}_3 を求めることができ, スルーホールの掘削方向をベクトル \mathbf{v} として計測する.

4. 計測実験

4.1 計測対象および撮影装置

本稿で提案する計測アルゴリズムに基づいて構築された計測システムの性能評価に用いる金属部品について説明する. 金属部品はAl-Mg製, 厚さ11 mmの板である. 計測対象となるスルーホール(図5)は, 金属部品に直径12 mmのエンドミル(ドリル状の工具)を用いて貫通掘削されている. スルーホール開口部のふちは幅1 mmの面取りがされている(図7).

本実験で構築した3次元計測システムは以下の比較的簡便な入力系からなる(図3). また, 撮影に適切な光量を確保するために照明を用いる.

- レンズ: Nikon社製 Micro-Nikkor 105mm f/2.8D
- CCDデジタルカメラ: Adimec社製 Adimec1000 1004×1004 ピクセル, モノクロ 1024階調
- キャプチャボード: Coreco Imaging Technology 社製 X64-CL-DUAL-32M

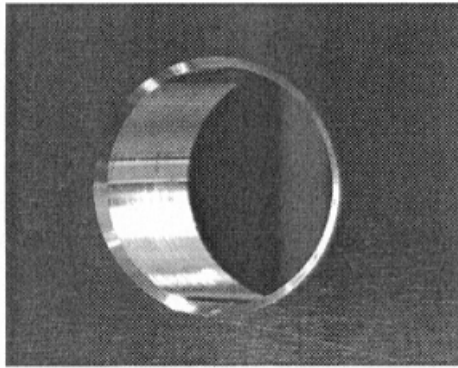


Fig. 5 スルーホール

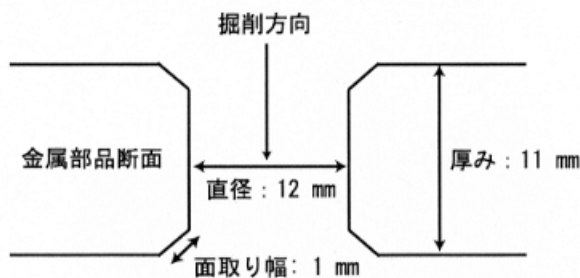


Fig. 6 金属部品断面図

- LED照明：日進電子工業株式会社製 LTD-5050

4.2 実験手法および結果

提案計測アルゴリズムの信頼性を評価するために、計測対象である金属部品を1軸の移動ステージ上に固定し、1回の撮影ごとに0.1 mmずつカメラから遠ざけ、計10段階の撮影を行った。以下に示す項目(i)~(v)の計測値を評価する。

- 金属部品表面の法線ベクトル n
金属部品は1方向の並進運動をしているために、各撮影段階のベクトル同士なす角度は誤差が無ければ 0° となる。
- スルーホールの半径 r
スルーホールの半径は誤差が無ければ $r = 6 \text{ mm}$ となる。

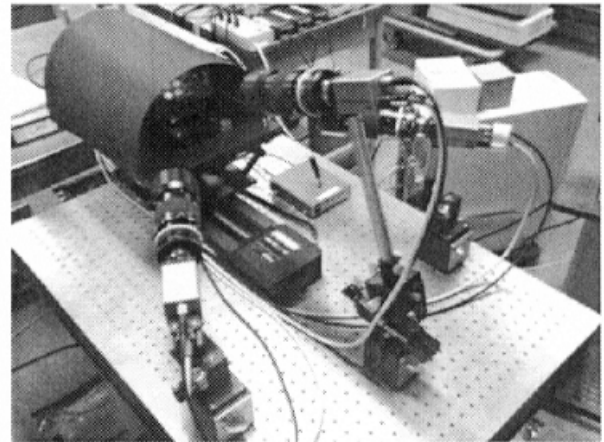


Fig. 7 実験システム

- スルーホールの掘削位置の3次元座標 x_0
金属部品は1回撮影するごとに、0.1 mmの並進運動をしているために、掘削位置の移動距離は誤差が無ければ0.1 mmとなる。
- スルーホールの掘削方向ベクトル v
金属部品は1方向の並進運動をしているために、各撮影段階のベクトル同士の角度は誤差が無ければ 0° となる。
- 金属部品表面に対する掘削軸の傾き θ
金属部品表面の法線ベクトル n とスルーホールの掘削方向ベクトル v ベクトル同士の角度は誤差が無ければ $\theta = 0^\circ$ となる。

計測結果を表1に示す。測定値として平均値を算出した。また、スルーホールを3次元復元し、シリンダーをフィッティングした結果を図8に示す。特徴量ベースステレオ計測により、金属部品表面の法線ベクトル n を 0.027° 程度の精度、スルーホールの半径 r を0.1 mm程度の精度、スルーホールの掘削位置の3次元座標 x_0 を0.001 mm程度の精度で計測した。領域ベースステレオ計測により、スルーホールの掘削方向ベクトル v を 0.048° 程度の精度で計測した。また、金属部品表面に対する掘削軸の傾き θ を 0.098° 程度の精度で計測した。この結果は、金属部品の形状検査への応用が可能である。

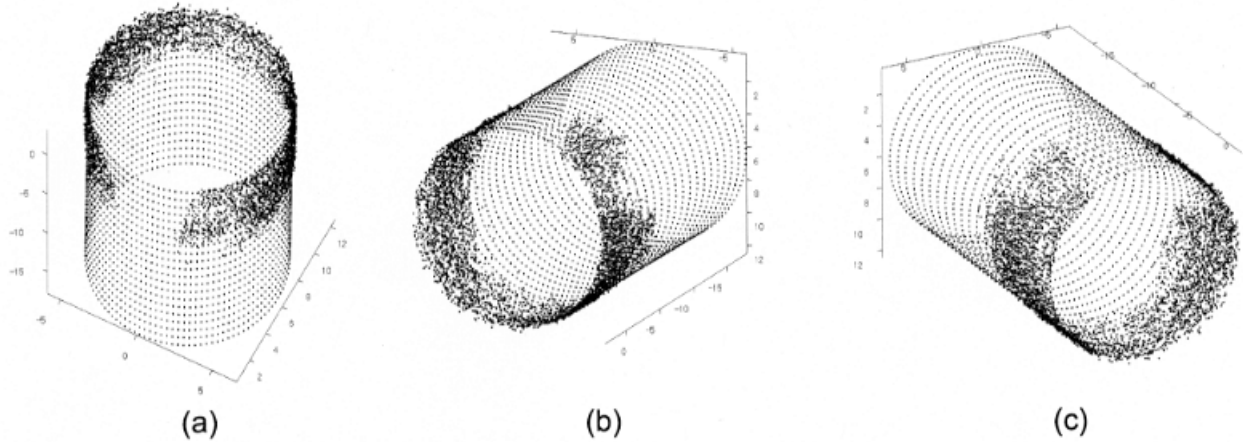


Fig. 8 スルーホール内壁点群へのシリンダーフィッティング

Table 1 実験結果

| 並進実験 | 理論値 | 計測値 | 標本標準偏差 |
|----------|-----------|---------------|---------------|
| n | 0° | 0.027° | 0.014° |
| r | 6.0mm | 6.097mm | 0.004mm |
| x_0 | 0.1mm | 0.101mm | 0.005mm |
| v | 0° | 0.048° | 0.022° |
| θ | 0° | 0.098° | 0.032° |

5. むすび

本稿は、位相限定相関法を用いたサブピクセル精度でのステレオ画像の対応付けに基づく高精度領域ベースステレオ計測と特徴量ベースステレオ計測を組み合わせた高精度3次元計測システムを構築した。本システムは、スルーホールを高精度に3次元復元し、その3次元壁面点群にシリンダーの幾何学的モデルをフィッティングすることによって、スルーホールの掘削位置、掘削半径、掘削方向を高精度に計測できることを示した。また、高精度領域ベースステレオ計測は金属部品に限らず、他の工業部品、製品の精度検査も適用可能であると期待できる。

参考文献

- 1) 吉澤徹, 光3次元像計測, 新技術コミュニケーションズ, 1998.
- 2) 井口征士, 佐藤宏介, 3次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- 3) M. G. Strintzis S. Malassiotis, "Stereo vision system for precision dimensional inspection of 3D holes," *Machine Vision and Applications*, Vol. 15, No. 2, pp. 101-113, December 2003.
- 4) K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, "High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E86-A, No. 8, pp. 1925-1934, August 2003.
- 5) K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, "A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications," *IEICE Trans. Fundamentals*, (to be published).
- 6) 徐剛, 辻三郎, 3次元ビジョン, 共立出版, 1998.
- 7) A. Fitzgibbon, M. Pilu, and R. B. Fisher, "Direct least square fitting of ellipses," *IEEE*

Trans. PAMI, Vol. 21, No. 5, pp. 476-480, May 1999.

- 8) Z. Zhang G. Xu, *Epipolar geometry in stereo: Motion and object recognition*, Kluwer academic publishers, 1996.
- 9) K. Kanatani, *Statistical Optimization for Geometric Computation: Theory and Practice*, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, 1996.
- 10) 戸田暢茂, 基礎線形代数, 学術図書出版社, 1997.

6. 付録

シリンダー (円柱面) について概説する. xyz 空間において,

$(a, b, c, f, g, h) \neq 0$ となる実係数の2次方程式,

$$F(x, y, z) = ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fxy + 2gxz + 2hyz + 2px + 2qy + 2rz + d = 0 \quad (5)$$

を満たす点 $(x, y, z)^T$ の表す図形を2次曲面という

10). シリンダーはその1つである. 式(5)において

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a & f & g \\ f & b & h \\ g & h & c \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

とおくと, \mathbf{A} は零行列とは異なる実対象行列であり, 内積 $(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta})$ を用いれば,

$$F(x, y, z) = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + 2\mathbf{b}^T \mathbf{x} + d = (\mathbf{x}, \mathbf{A} \mathbf{x}) + 2(\mathbf{b}, \mathbf{x}) + d = 0 \quad (6)$$

と表される.

$\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ を上手に選び, 平行移動

$$\mathbf{x} - \mathbf{x}_0 = \mathbf{u} \quad (\mathbf{u} = (u, v, w)^T) \quad (7)$$

によって, 式(6)の一次の項をなくすことを考える. 式(7)を式(6)へ代入すると,

$$(\mathbf{u} + \mathbf{x}_0)^T \mathbf{A} (\mathbf{u} + \mathbf{x}_0) + 2\mathbf{b}^T (\mathbf{u} + \mathbf{x}_0) + d \quad (8)$$

$$= (\mathbf{u}, \mathbf{A} \mathbf{u}) + 2(\mathbf{A} \mathbf{x}_0 + \mathbf{b})^T \mathbf{u} + F(x_0, y_0, z_0) = 0$$

となる. 式(8)において, 方程式

$$\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b} = 0$$

を満たす $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ が存在するときには, 式(8)は

$$(\mathbf{u}, \mathbf{A} \mathbf{u}) + F(x_0, y_0, z_0) = 0 \quad (9)$$

となる. この式は \mathbf{u} の代わりに $-\mathbf{u}$ を代入しても不変である. このことは, 式(9)が \mathbf{u} に関して原点对称であることを, 式(6)が点 (x_0, y_0, z_0) に関して点对称なことを意味している. 方程式(9)を満たす $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ が存在する二次曲面(5)を有心二次曲面といい, \mathbf{x}_0 をその中心という. 次に, 式(9)を変形する. \mathbf{A} の固有値を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ とした時, 直交行列 \mathbf{T} があって, さらに, その行列式 $|\mathbf{T}| = 1$ を満たすとき,

$$\mathbf{T}^T \mathbf{A} \mathbf{T} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \lambda_2 & \\ 0 & & \lambda_3 \end{pmatrix} \quad (10)$$

とできる. 固有値の大小関係を $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ とし, u, v, w に関する実二次形式 $(\mathbf{u}, \mathbf{A} \mathbf{u})$ を直交変換

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \mathbf{u} = \mathbf{T} \mathbf{y} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (11)$$

により標準形

$$(\mathbf{u}, \mathbf{A} \mathbf{u}) = \lambda_1 X^2 + \lambda_2 Y^2 + \lambda_3 Z^2 \quad (12)$$

に変形する. この時, 式(9)は

$$\lambda_1 X^2 + \lambda_2 Y^2 + \lambda_3 Z^2 + F(x_0, y_0, z_0) = 0 \quad (13)$$

と変形される. これを有心二次曲面の標準形といい, \mathbf{T} の各行ベクトル $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ を二次曲面式(5)の主軸という. シリンダーは有心二次曲面であり, その中心 \mathbf{x}_0 は無数にある. また, 主軸の1つ \mathbf{e}_3 がシリンダー軸の向きベクトルを表している.