

位相限定相関法に基づく高精度ステレオビジョンシステムと 金属部品検査への応用

柴原 琢磨[†] 青木 孝文[†] 山華 義博^{††} 小野 勝一^{††}

[†] 東北大学大学院情報科学研究科, 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††} スズキ株式会社 四輪技術本部 横浜研究所 第一グループ, 〒224-0046 神奈川県横浜市都筑区桜並木 2-1

E-mail: †sibahara@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 本稿では, 金属部品に掘削されたスルーホールの幾何学的パラメータを計測するための高精度ステレオビジョンシステムを提案する. 本システムの計測手順は, 特徴ベース計測, 領域ベース計測およびモデルフィッティング計測の3ステップからなる. 特徴ベース計測においては, エピポーラ幾何に基づいてスルーホールの開口部(ふち)を3次元復元する. 領域ベース計測においては, 位相限定相関法に基づくステレオ画像のサブピクセル対応付け手法を利用することでスルーホールの内壁を3次元復元する. モデルフィッティング計測においては, スルーホールの開口部と内壁の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することによりスルーホールの掘削位置, 半径, 掘削軸の向きを計測する.

キーワード 位相限定相関法, ステレオビジョン, 3次元計測, 部品検査

High-Accuracy Stereo Vision System Based on Phase-Only Correlation and Its Application to Metal Component Inspection

Takuma SHIBAHARA[†], Takafumi AOKI[†], Yoshihiro YAMAGE^{††}, and Masakazu ONO^{††}

[†] Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Sendai-shi 980-8579, Japan

^{††} Department 1 Yokohama R&D Center, Automobile Engineering Division, Suzuki Motor Corporation,
Yokohama-shi 224-0046, Japan

E-mail: †sibahara@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

Abstract This paper proposes a high-accuracy stereo vision system for measuring geometric parameters of through-holes in metal components. A measurement procedure in our system consists of the following steps: feature-based measurement, area-based measurement and model fitting measurement. The feature-based measurement reconstructs edge points of a through-hole using epipolar-geometry-based stereo correspondence. The area-based measurement reconstructs inner walls of the through-hole using a sub-pixel stereo image matching technique based on Phase-Only Correlation (POC). The cylinder model fitting measurement fits a geometric model of a cylinder to 3D data of the edge points and inner walls in order to measure position, radius and direction of the through-hole.

Key words phase-only correlation, stereo vision, 3D measurement, component inspection

1. ま え が き

本稿では, 自動車などのフレームを構成する金属部品に掘削されたスルーホールの形状検査の自動化を目的として, 高精度ステレオビジョンシステムを提案する. 自動車などのフレーム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. この加工の際にフレーム全体に複雑な歪みが生じ, スルーホールの位置や向きがずれる可能性があるため, 3次元的な形状検査が必要となる(図

1). 特に, 自動車フレームは検査の対象となる箇所が非常に多く, その構造も複雑であるため, 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2), 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次元形状検査の自動化を目的として, (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計測アルゴリズムを考案するとともに, (ii) これとエピポーラ幾何に基づく特徴ベース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,

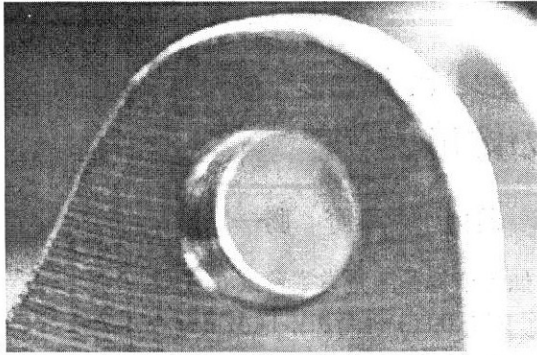


図1 金属部品に掘削されたスルーホール

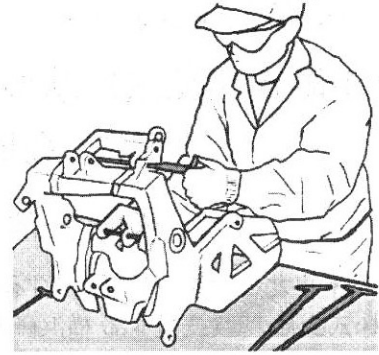


図2 技術者によるスルーホールの手動検査

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、スルーホールの幾何学的パラメータ（掘削位置、半径、金属部品表面の法線ベクトル、掘削軸の向きベクトル）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軸の向きベクトルはシリンダー軸の向きベクトルとして与えられる。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の幾何学的モデルをフィッティングすることによって掘削軸の向きベクトルを計測する。このためには領域ベース対応付け手法により、多数の点を高精度に3次元復元する必要があるが、SAD (Sum of Absolute Differences) などを用いた従来の領域ベース対応付け手法では3次元復元精度が不十分である。そこで、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) に基づくステレオ画像のサブピクセル対応付け手法によって[1],[2]、高精度領域ベース計測アルゴリズムを構築する。

(ii) スルーホールの開口部は画像上に楕円として結像する。そこで、特徴ベース計測アルゴリズムにおいては、エッジベース幾何を利用して楕円を対応づけることでスルーホールの開口部を3次元復元し、スルーホールの掘削位置、半径、金属部品表面の法線ベクトル（開口部が張る平面の法線ベクトル）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および(i)で得られたスルーホール内壁の3次元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でスルーホールの掘削軸の向きベクトルを計測する。

以上に基づくステレオビジョンシステムを構築し、実験を通して、スルーホールの掘削位置については0.004 mm精度、半径については0.025 mm精度および掘削軸の向きベクトルについては1°分解能で計測できることを示す。

2. 位相限定相関法に基づくステレオ画像のサブピクセル対応付け手法

本節では、スルーホールの内壁を高精度に3次元復元するために、位相限定相関法に基づいてサブピクセル精度でステレオ画像の対応付けを行う手法を示す。はじめに、相対的に移動し

ている2枚の画像間の移動量をサブピクセル精度で推定する手法を述べる。次に、階層マッチングに位相限定相関法を適用したステレオ画像のサブピクセル対応付けアルゴリズムを示す。

2.1 サブピクセル移動量推定手法

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。今、 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 だけ移動した画像は $f_c(x_1 - \delta_1, x_2 - \delta_2)$ 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 $f_c(x_1 - \delta_1, x_2 - \delta_2)$ を標準化間隔 T_1 と T_2 で標準化した離散空間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 $G(k_1, k_2)$ の合成位相スペクトルを次式で定義する。

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

$$\simeq e^{j \frac{2\pi}{N_1} k_1 \delta_1} e^{j \frac{2\pi}{N_2} k_2 \delta_2} \quad (1)$$

そして、位相限定相関関数 $\hat{r}(n_1, n_2)$ は、 $\hat{R}(k_1, k_2)$ を2次元離

散フーリエ逆変換（2次元 IDFT）したものと定義される。

画像間の移動量をサブピクセル精度で高精度に推定するための重要な手法を以下に示す。

(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。

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

(ii) スペクトルの重み付けに基づくエイリアシングとノイズの影響の低減

一般に、自然画像の高周波領域は S/N 比が低いと考えられるが、合成位相スペクトル $\hat{R}(k_1, k_2)$ 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型のスペクトル重み付け関数を適用することによって高精度化が可能となる。具体的には、次式で表される Gauss 関数 $H(k_1, k_2)$ を $\hat{R}(k_1, k_2)$ の計算の際に適用する。

$$H(k_1, k_2) \simeq e^{-2\pi^2\sigma^2(k_1^2+k_2^2)} \quad (3)$$

ただし、 σ は関数の幅を制御するパラメータである。このとき、位相限定相関関数 $\hat{r}(n_1, n_2)$ は次のように変形される。

$$\hat{r}(n_1, n_2) \simeq \frac{\alpha}{2\pi\sigma^2} e^{-\{(n_1+\delta_1)^2+(n_2+\delta_2)^2\}/2\sigma^2} \quad (4)$$

上式のパラメータ α は、画像の移動やノイズが加わることによって、位相限定相関関数の相関ピークの高さが減少することを表すために導入したパラメータである。本稿では α を相関ピーク値と呼ぶ。

(iii) 関数フィッティングによるサブピクセル移動量推定

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) をフィッティングすることで、サブピクセル精度の移動量 δ_1, δ_2 および相関ピーク値 α を推定する。

2.2 サブピクセル対応付けアルゴリズム

2.1 節で提案した手法を用いることにより、サブピクセル分解能で 2枚の画像間の移動量を求めることができる。しかし、一方のステレオ画像から切り出した小領域に対応する領域をもう一方の画像から見つけることは、画像全体からの 2次元探索となるため容易ではない。そこで、原画像を縮小して作成した多重解像度画像を利用して階層マッチングを行う。階層マッチングは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。ここで、 p_l および q_l を第 l 階層における階層画像 $I_l(n_1, n_2)$ および画像 $J_l(n_1, n_2)$ 上の対応点の組を表す位置ベクトルとし、便宜上、 q_0 のサブピクセル精度で求められ

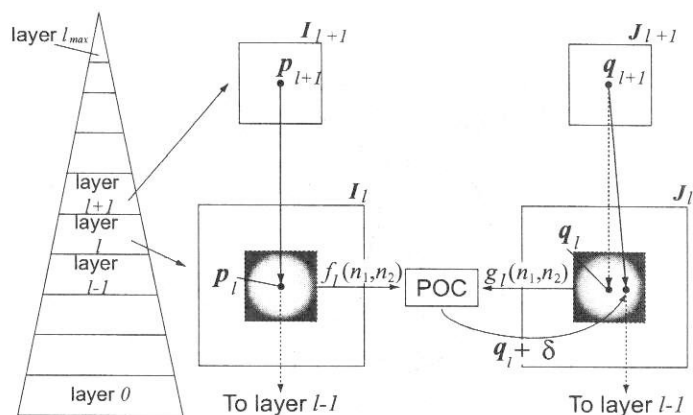


図3 階層マッチングを用いた対応付け: 上層から下層へ降りるにつれて、対応付けを補正していく。

た位置ベクトルを q_{-1} とする。図3に階層マッチングの概略を示す。

入力:

- 画像 $I_0(n_1, n_2)$ および画像 $J_0(n_1, n_2)$, 画像 $I_0(n_1, n_2)$ 上の参照点 p_0

出力:

- 画像 $J_0(n_1, n_2)$ 上の対応点 q_{-1} , 相関ピーク値 α_0

Step 1: 全ての階層 l ($l = 1, \dots, l_{max}$) に対して、第 l 階層における参照点 p_l を次式で計算する。

$$p_l = \lfloor \frac{1}{2} p_{l-1} \rfloor \quad (5)$$

Step 2: 全ての階層 l に対して、第 l 階層の多重解像度画像 $I_l(n_1, n_2)$ ($I_0(n_1, n_2)$ の粗い画像) を次式で作成する。

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

また、 $J_l(n_1, n_2)$ についても同様に作成する。

Step 3: 最上位にある粗い解像度の画像は原画像と比べると非常に小さい画像のため、移動量は画像内の位置によらずほぼ一定値 $\delta_{l_{max}}$ とみなせる。この移動量 $\delta_{l_{max}}$ を最上位階層の画像 $I_{l_{max}}$ および $J_{l_{max}}$ 全体から、2.1 節の手法を利用してピクセル精度で求める。最上位階層における対応点 $q_{l_{max}}$ を次式で求める。

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

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、大きさ $N_1 \times N_2$ ピクセルの小領域画像 $f_l(n_1, n_2)$ および $g_l(n_1, n_2)$ を、その中心がそれぞれ p_l および q_l に一致するように切り出す。これらの小領域画像 $f_l(n_1, n_2)$ と $g_l(n_1, n_2)$ に 2次元ハニング窓を適用する。

Step 5: 小領域画像 $f_l(n_1, n_2)$ と $g_l(n_1, n_2)$ の間の移動量 δ_l を 2.1 節の手法を利用してピクセル精度で求め、第 $l-1$ 階層における対応点 q_{l-1} を次式で求める。

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

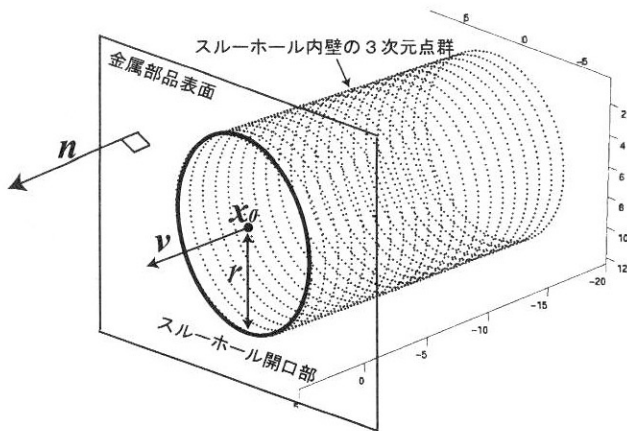


図4 スルーホールのモデルとその計測値

Step 6: 条件 $l > 0$ を満たす限り, $l = l - 1$ として **Step 4**, **Step 5** を繰り返す.

Step 7: 原画像 $I_0(n_1, n_2)$ および $J_0(n_1, n_2)$ から, 大きさ $N_1 \times N_2$ ピクセルの小領域画像 $f_0(n_1, n_2)$ および $g_0(n_1, n_2)$ をその中心がそれぞれ p_0 および q_0 に一致するように切り出す. そして, 小領域画像 $f_0(n_1, n_2)$ と $g_0(n_1, n_2)$ に2次元ハニング窓を適用する.

Step 8: 小領域画像 $f_0(n_1, n_2)$ および $g_0(n_1, n_2)$ 間の移動量 δ を2.1節の手法を利用してサブピクセル精度で求める. そして, 移動量 δ_{next} を以下のように更新する.

$$\delta_{next} = \delta_{cur} + \delta$$

ただし, 1回目の繰り返しの時は $\delta_{cur} = 0$ とする.

Step 9: 推定した移動量 δ_{next} を用いて小領域画像 $g_0(n_1, n_2)$ を更新し, 2次元ハニング窓を適用する. また, $\delta_{cur} = \delta_{next}$ とする.

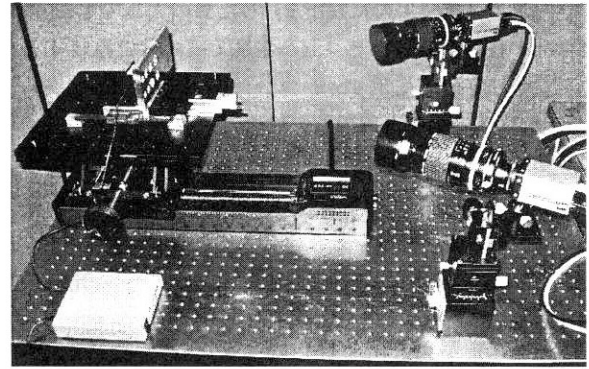
Step 10: **Step 8**, **Step 9** を移動量 δ が十分小さくなるまで繰り返し, 最終的に求められた移動量を $\delta_{opt} = \delta_{next}$ とする. また, そのとき推定された相関ピーク値を α_0 とする.

Step 11: 画像 $J_0(n_1, n_2)$ 上の対応点 q_{-1} を次式で求める.

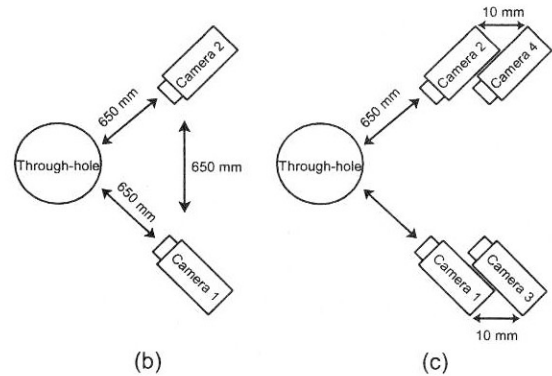
$$q_{-1} = q_0 + \delta_{opt}$$

3. 金属部品スルーホール計測のためのステレオビジョンシステム

スルーホールの幾何学的パラメータ(掘削位置, 半径, 金属部品表面の法線ベクトル, 掘削軸の向きベクトル)を高精度に計測するために, 特徴ベース計測アルゴリズム, 領域ベース計測アルゴリズムおよびモデルフィッティングアルゴリズムを組み合わせることを考える. 領域ベース計測アルゴリズムにおいては, 前節で述べたステレオ画像のサブピクセル対応付けアルゴリズムを利用してスルーホールの内壁を3次元復元する. モデルフィッティングアルゴリズムにおいては, 内壁の3次元点群にシリンダーの幾何学的モデルをフィッティングさせること



(a)



(b)

(c)

図5 ステレオビジョンシステム: (a) 撮影系, (b) 特徴ベース計測アルゴリズムで利用するカメラ配置, (c) 領域ベース計測アルゴリズムで利用するカメラ配置

により, スルーホールの掘削軸の向きベクトルを計測する. 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)と半径については特徴ベース計測アルゴリズム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. 以下に, スルーホール計測の流れを示す.

- エッジ情報を利用する特徴ベース計測アルゴリズムにより, スルーホール開口部を3次元復元する. 開口部の3次元点群から金属部品表面のスルーホールの掘削位置(開口部中心)の3次元座標 x_0 , 開口部の半径 r および法線ベクトル n (開口部が張る平面の法線ベクトル) を求める(図4).
- 領域ベース計測アルゴリズムによりスルーホールの内壁を3次元復元する. さらに, モデルフィッティングアルゴリズムにおいては, 特徴ベース計測アルゴリズムで求めた掘削位置 x_0 と半径 r を拘束条件として内壁の3次元点群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軸の向きベクトル v (シリンダー軸の方向ベクトル) を求める(図4).

3.1 ステレオビジョンシステムの構成

ステレオビジョンシステムの撮影系は2台の工業用デジタルCCDカメラ(解像度: 1000×1000 ピクセル)とLED照明, 移動ステージから構成される(図5). 特徴ベース計測アルゴリズムにおいては, Camera 1とCamera 2を一組のステレオカメラとして使用する. 領域ベース計測アルゴリズムにおいて

は、移動ステージを利用してスルーホールを移動させることで1台のカメラで2視点のステレオ画像を撮影する。すなわち、Camera 1とCamera 3を一組のステレオカメラとし、Camera 2とCamera 4を一組のステレオカメラとして利用する。あらかじめ、各カメラはカメラ校正板を利用した方法で校正しておく。また、撮影に適切な照明条件を得るためにLED照明を利用してスルーホールの内壁を照らす。

3.2 特徴ベース計測アルゴリズム

入力:

- Camera 1~2の画像とその校正データ

出力:

- 金属部品表面の法線ベクトル \mathbf{n} 、スルーホールの掘削位置の3次元座標 \mathbf{x}_0 、開口部の半径 r

Step 1: Camera 1とCamera 2の画像に対し、Cannyフィルタを用いてスルーホール開口部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[3]。

Step 2: スルーホール開口部は画像面に楕円として投影される。開口部のエッジをサブピクセルレベルで検出するために、Camera 1とCamera 2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[4]。

Step 3: 2つの楕円の対応付けを行い、スルーホール開口部を3次元復元する。はじめに、Camera 1とCamera 2の校正データから基礎行列を求める[5]。Camera 1の画像の楕円上の点 \mathbf{m} と基礎行列を用いてCamera 2の画像にエピポーラ線を引く。点 \mathbf{m} に対応するCamera 2の画像の点 \mathbf{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、それを3次元空間上における金属部品表面の法線ベクトル \mathbf{n} とする。

Step 5: スルーホール開口部の3次元点群に円をフィッティングする。円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 \mathbf{x}_0 と開口部の半径 r を計測する。

3.3 領域ベース計測およびモデルフィッティングアルゴリズム

入力:

- Camera 1~4の画像とその校正データ、スルーホールの掘削位置の3次元座標 \mathbf{x}_0 、開口部の半径 r

出力:

- スルーホールの掘削軸の向きベクトル \mathbf{v}

Step 1: 2.2節で述べたステレオ画像の対応付けアルゴリズムを利用してCamera 1とCamera 3の画像間およびCamera 2とCamera 4の画像間で対応点の組を求める。後述する実験では、位相限定相関関数のブロックサイズを $N_1 \times N_2 = 33 \times 33$ ピクセルとした。また、式(3)の σ の値を $\sigma = \sqrt{0.5}$ とした。

Step 2: 位相限定相関関数の相関ピーク値 α はノイズが加わることで1以下に減少する。そこで、 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 $\alpha = 0.5$ とした。

Step 3: エピポーラ拘束を利用して誤対応点を除去する。はじめに、カメラ校正データから基礎行列を求める。そして、各対応点とエピポーラ線との間の距離を対応付け精度とする。距離が遠い対応点をエピポーラ拘束を満たさない点として除去する。後述する実験では、距離が0.5ピクセル以上の点を除去する。

Step 4: 各ステレオ画像間の対応点の組と校正データを用いてスルーホール内壁を3次元復元し、その3次元点群 $\mathbf{x}_i = (x_i \ y_i \ z_i)^T$ ($i = 1, \dots, N$) を求める

Step 5: 実ベクトル $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^3$ に対して、シリンダー方程式は 3×3 の実行列 \mathbf{A} と3つの要素を持つ実ベクトル \mathbf{b} を用いて次式で表される。

$$F(\mathbf{x}) = (\mathbf{x}, \mathbf{A}\mathbf{x}) + 2(\mathbf{b}, \mathbf{x}) - r^2 = 0$$

ただし、 (\mathbf{s}, \mathbf{t}) はベクトル \mathbf{s} とベクトル \mathbf{t} の内積を表す。

特徴ベース計測アルゴリズムにおいてシリンダー中心を掘削位置 $\mathbf{x}_0 = (x_0 \ y_0 \ z_0)^T$ とし、シリンダー半径を開口部の半径 r として計測している。そこで、上式の1次の項を消去し、シリンダー方程式を次式で置き換える。

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

ただし、 $\mathbf{x}' = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0 = (x' \ y' \ z')^T$ とする。

壁面の3次元点群内の点 \mathbf{x}_i に対して最小2乗法を用いて、

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

を解くことによって行列 \mathbf{A} を算出する。

Step 6: 行列 \mathbf{A} の最大の主値(固有値)に対する主軸(固有ベクトル)としてスルーホールの掘削軸の向きベクトル \mathbf{v} を計測する[6]。

4. 3次元計測実験

4.1 実験手法

ステレオビジョンシステムの性能を評価するためにスルーホールの計測実験を行う。実験では2種類のスルーホールを計測する。スルーホールAは金属部品表面に対して垂直に掘削されており、スルーホールBは金属部品表面に対して 3° 傾けて掘削されている。これらのスルーホールはともに直径14mmであり、厚さ8mmのアルミニウム製の金属板に掘削されている。

スルーホールについて、次の3項目の値を計測する。また、スルーホールをカメラから0.1mm刻みで遠ざけつつ、計 $N = 10$ 回の計測を行う。

(i) スルーホールの掘削位置 \mathbf{x}_0 の移動間隔 $\|\Delta\mathbf{x}_0\|$ m 回目と n 回目の移動間隔 $\|\Delta\mathbf{x}_0\|_{m,n}$ は次式で表される。なお、 m 回目に計測された掘削位置を $\mathbf{x}_{0,m}$ とする。

$$\|\Delta\mathbf{x}_0\|_{m,n} = \frac{\|\mathbf{x}_{0,m} - \mathbf{x}_{0,n}\|}{|m - n|}$$

ただし、ベクトル \mathbf{a} に対して、 $\|\mathbf{a}\| = \sqrt{(\mathbf{a}, \mathbf{a})}$ をベクトル \mathbf{a} の長さとする。

表 1 スルーホール A の計測結果

	加工値	平均値	RMS 誤差	最大誤差	最小誤差
$\ \Delta\mathbf{x}_0\ $	0.1mm	0.101mm	0.003mm	0.009mm	0.000mm
r	7mm	7.022mm	0.022mm	0.027mm	0.019mm
θ	0°	0.374°	0.407°	0.550°	0.060°

表 2 スルーホール B の計測結果

	加工値	平均値	RMS 誤差	最大誤差	最小誤差
$\ \Delta\mathbf{x}_0\ $	0.1mm	0.100mm	0.004mm	0.017mm	0.000mm
r	7mm	7.024mm	0.025mm	0.030mm	0.017mm
θ	3°	2.907°	0.155°	0.350°	0.031°

(ii) 開口部の半径 r

(iii) 金属部品表面の法線ベクトルと掘削軸の向きベクトルのなす角の角度 θ

m 回目に計測された金属部品表面の法線ベクトルを \mathbf{n}_m , 掘削軸の向きベクトルを \mathbf{v}_m とする.

$$\theta_m = \text{angle}(\mathbf{n}_m, \mathbf{v}_m)$$

ただし, ベクトル \mathbf{a} とベクトル \mathbf{b} に対して, 次式をベクトル \mathbf{a} とベクトル \mathbf{b} のなす角の角度とする.

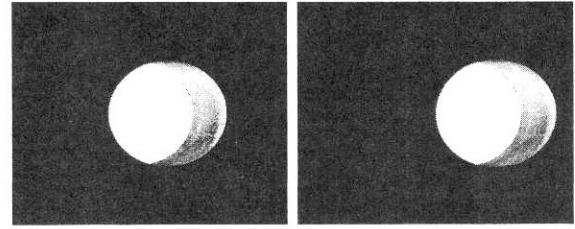
$$\text{angle}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \arccos \frac{(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{\|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\|} \quad (0 \leq \text{angle}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \leq \pi)$$

4.2 実験結果

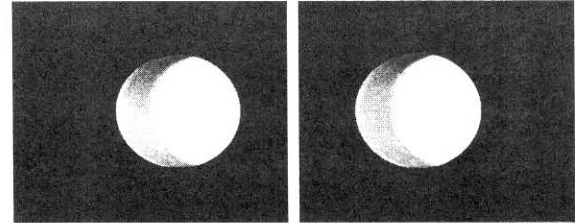
計測結果を表 1, 2 に示す. また, スルーホール B を 3 次元復元し, シリンダーをフィッティングした結果を図 6 に示す. 本ステレオビジョンシステムを用いて, (i), (ii) の計測値 $\|\Delta\mathbf{x}_0\|$, r を高精度に計測した. この要因は特徴ベース計測アルゴリズムのステレオ画像の対応づけに, 誤対応がおこりにくいことにあると考えられる. 特徴量ベース計測アルゴリズムにおいて, ステレオ画像の対応付けは 2 つの楕円方程式とエピソード方程式との間に成り立つ連立方程式を解くことで行う. 従って, エッジ画像から開口部の楕円方程式が正しく求まり, ステレオカメラの校正が精密に行われていれば誤対応はおこりにくい. 項目 (iii) の計測値 θ を, スルーホール A については 0.374° およびスルーホール B については 2.907° と計測した. この結果から, 本ステレオビジョンシステムを利用すれば, 1° 分解能でスルーホールの加工の違いを計測することが可能になると考えられる.

5. むすび

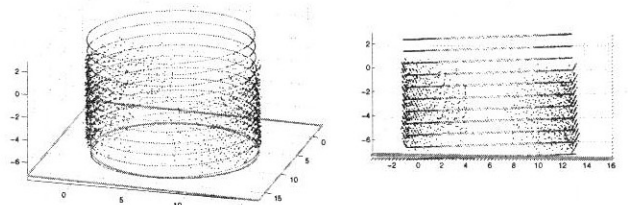
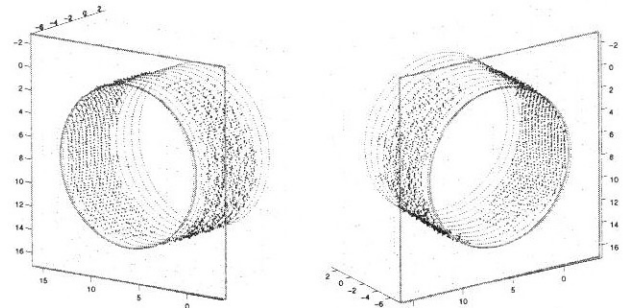
本稿で提案した位相限定相関法に基づくステレオビジョンシステムを利用すれば, スルーホールの掘削位置については 0.004 mm 精度, 半径については 0.025 mm 精度および掘削軸の向きベクトルについては 1° 分解能で計測を行うことが可能である. また, 2 節で提案したステレオ画像のサブピクセル対応付けアルゴリズムを用いることで, スルーホールに限らず他の工業製品計測のための実用的なステレオビジョンシステムを構築することが可能になると考えられる.



(a)



(b)



(c)

図 6 シリンダーフィッティング: (a) Camara 1 と Camara 3 のステレオ画像, (b) Camara 2 と Camara 4 のステレオ画像, (c) スルーホールの 3 次元復元点群にシリンダーをフィッティングした.

文 献

- [1] 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.
- [2] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, "A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 8, pp. 1913-1923, August 2004.
- [3] Yi Ma, Stefano Soatto, Jana Kosecka, and S. Shankar Sastri, *An Invitation 3-D Vision*, Springer, 2004.
- [4] A. Fitzgibbon, "Direct least square fitting of ellipses," *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 21, No. 5, pp. 476-480, May 1999.
- [5] G. Xu and Z. Zhang, *Epipolar geometry in stereo: Motion and object recognition*, Kluwer academic publishers, 1996.
- [6] 戸田暢茂, 基礎線形代数, 学術図書出版社, 1997.