

ステレオカメラとパターン投影を用いた物体の三次元計測

Three-Dimensional Coordinate Measurement Using Stereo Vision and Pattern Projection

民谷 真孝 (立命館大学) 平井 慎一 (立命館大学)

Masataka TAMIYA, Ritsumeikan University

Shinichi HIRAI, Ritsumeikan University

In this paper, we propose three-dimensional coordinate measurement using a stereo camera and a projector. In order to perform stereo matching of an object, a specific pattern is projected on the object's surface. Stereo matching gives advantage in measuring the shape of the object precisely by comparing the similarity between input and template image. To verify the precision of the system configured, the shape of a planar body was measured by using the proposed method. As the result, we were able to measure the shape of the object correctly. We verified the accuracy of the depth measurement which is within error of ± 1.00 mm in an optimal situation.

Key Words: Vision, Stereo, Matching, Pattern

1. 緒言

現在、工場での作業はロボットによる自動化が進められている。しかし、自動化が困難なため、人が手作業しなければならない工程が存在する。その例としてケーブルなどの柔軟に変形する物体の取り付けが挙げられる。ケーブルのような柔軟物をロボットで操作した場合は形状が変化してしまうので、目標位置へ正確に案内することが困難である。したがって、柔軟物の変形を計測して、操作にフィードバックすることで柔軟物を正確に操作する必要がある。そこで本研究では、ステレオカメラを用いて物体の形状を計測することを目指す。ステレオカメラだけでは、表面が特徴のないような物体に対して計測ができないという問題がある。そこでパターン投影を用いて能動的で非接触な物体の三次元計測を実現する。

2. システム構成

システム構成概要について説明する。PC、プロジェクタ、ステレオカメラを使用する。システム概要図を図1に示す。PCでプロジェクタを操作し、対象物にパターンを投影する。パターンが投影された対象物をPCでカメラを操作し撮影する。

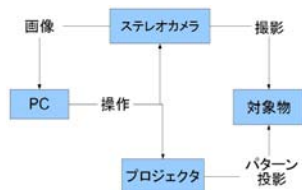


Fig. 1 System overview

3. パターン投影を用いたステレオ法

3.1 プログラム概要

本研究で使用したプログラムの流れについて説明する。プログラムの流れを図2に示す。プロジェクタを用いて対象物にパターンを投影する。対象物をステレオカメラで撮影を行い、その画像に対して、画像の平行化を行う。画像の平行化を行うことで、3.5節で述べるテンプレートマッチングを行いやすくする。平行化した画像にテンプレートマッチングを適用し、視差を求める。視差から3.4節で述べる3次元座標の計測を行う。本研究では、三次元メディアが製作したライブ러리である TVL を用いて3次元計測を行う。



Fig. 2 Flowchart

3.2 内部パラメータと外部パラメータ

内部パラメータについて説明する。図3のように、左カメラの焦点をカメラ座標系の原点 O 、撮影される画像の左上をデジタル画像座標系の原点 O_L とする。カメラ座標系の z 軸と画像との交点を正規化画像座標系の原点 O_a とする。カメラ座標系から正規化画像座標系への射影を次式に示す。

$$x = \frac{X}{Z}, \quad (1)$$

$$y = \frac{Y}{Z} \quad (2)$$

デジタル座標系と正規化画像座標系との関係は、レンズの歪みを無視すれば次式で表すことができる。

$$u = f_u x + u_0, \quad (3)$$

$$v = f_v y + v_0 \quad (4)$$

しかし、実際の画像はレンズの歪みの影響を受けている。レンズの歪みを考慮した式を次式に示す。

$$u = u_0 + sy + f_u x (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2), \quad (5)$$

$$v = v_0 + f_v y (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \quad (6)$$

なお式(5)で用いる s はスキューを表す。スキューとは、画像センサの素子並びの横方向と縦方向のなす角度が直角からずれた量を表すパラメータである。 k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 は歪みの

パラメータである．またここで $r^2 = x^2 + y^2$ である．これらのパラメータをまとめて，カメラの内部パラメータと呼ぶ．

次に外部パラメータについて説明する．外部パラメータとは，異なるカメラ間や，ロボット座標系とカメラ座標系の変換を行う回転行列と並進ベクトルのことである．左カメラ座標系における3次元座標を X_l ，右カメラ座標系における3次元座標を X_r とする．右カメラ座標系から左カメラ座標系への回転を行う行列を R ，並進ベクトルを t とする．変換を以下の式で示す．

$$X_l = R X_r + t \quad (7)$$

式(7)の回転行列 R と並進ベクトル t を外部パラメータと呼ぶ．

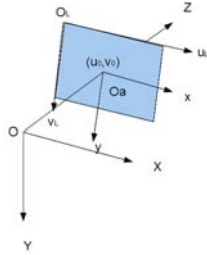


Fig. 3 Coordinate system setting

3.3 カメラの校正

次にカメラの校正について説明する．校正とは内部パラメータと2つのカメラ間の外部パラメータを求めることである．初めに適当な位置，向きで設置した校正ボードをステレオカメラを用いて撮影する．位置や向きを変えながら M 枚の画像を撮影する．図4に校正に使用した画像を示す．

次に，校正ボードから白いドットの点のデジタル座標系での座標を求める．ここで j 枚目の画像の i 番目のドットの座標を $m_{ij} = [u_{ij}, v_{ij}]^T$ とする． i 番目のドットの3次元座標を X_i とする．次式を用いてカメラ座標系を正規化画像座標系に射影する．

$$x = \frac{X_i}{Z_i}, \quad (8)$$

$$y = \frac{Y_i}{Z_i} \quad (9)$$

式(8)，(9)を用いて正規化画像座標系からデジタル画像座標系に変換する．

$$u = u_0 + s \frac{Y_i}{Z_i} + f_u \frac{X_i}{Z_i} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (10)$$

$$+ 2p_1 \frac{X_i Y_i}{Z_i^2} + p_2 (r^2 + 2 \frac{X_i^2}{Z_i^2}),$$

$$v = v_0 + f_v \frac{Y_i}{Z_i} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (11)$$

$$+ p_1 (r^2 + 2 \frac{Y_i^2}{Z_i^2}) + 2p_2 \frac{X_i Y_i}{Z_i^2}$$

式(10)，(11)より求めた u, v をまとめてベクトル $p_{ij} = [u, v]^T$ で表す．画像から抽出されたデジタル画像座標系の m_{ij} と，3次元座標を射影してデジタル画像座標系に変換した p_{ij} を用いて評価関数 E を次式で定義する．

$$E = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{121} w_{ij} (m_{ij} - p_{ij}) \quad (12)$$

式(12)に示す w_{ij} は， i 番目のドットが j 枚目の画像で抽出されていれば $w_{ij}=1$ であり，抽出されなければ $w_{ij}=0$ であ

る．評価関数 E が最小となるとき内部パラメータと外部パラメータが求める値である．

次に逆投影誤差について説明する．逆投影誤差とは画像上の1点あたりの誤差を表すものである．逆投影誤差 E_p は

$$E_p = \sqrt{\frac{E_{min}}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{121} w_{ij}}} \quad (13)$$

と表される．



(a) Left image (b) Right image
Fig. 4 Stereo images to use for camera calibration

3.4 平行化ステレオの原理

平行化ステレオカメラの原理について説明する．平行化ステレオカメラを図5に示す．図5のように，左カメラと右カメラの光軸が平行となる配置のステレオカメラのことを平行化ステレオカメラと呼ぶ．左カメラの焦点をカメラ座標系の原点 O ，各画像の左上をデジタル画像座標系の原点 O_L, O_R とする．カメラを平行に配置した場合，図5のように対応する画像のデジタル座標である v_l, v_r は $v_l = v_r$ が成立する．また横軸の差を視差 d は

$$d = u_l - u_r \quad (14)$$

と表される．物体の奥行き Z と視差 d は次式を満たす．

$$Z = \frac{Bf}{d} \quad (15)$$

平行化画像の焦点距離を f とする．また，二つのカメラの焦点の距離を B とする．対象の3次元座標は

$$(x, y, z) = (\frac{u_l - u_{l0}}{f} Z, \frac{v_l - v_{l0}}{f} Z, Z) \quad (16)$$

と表される．

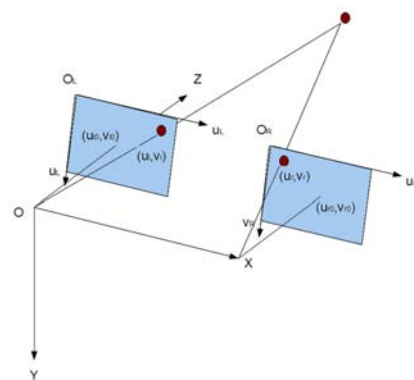


Fig. 5 Paralleled stereo camera

3.5 テンプレートマッチングの原理

テンプレートマッチングについて説明する。テンプレートマッチングとは、入力画像とテンプレート画像を比較し、類似度を求めるものである。テンプレートマッチングの方法として、SSD (Sum of Squared Difference) を用いる。テンプレート画像と入力画像の大きさを $m \times n$ pixel とする。各画像の左上を原点とし、原点から右方向に正として x 軸、原点から下方向に正として y 軸を置く。テンプレート画像において $(x, y) = (i, j)$ の輝度を $T(i, j)$ とし、入力画像において $(x, y) = (i, j)$ の輝度を $I(i, j)$ とする。このときの類似度 R_{SSD} は次式で示される。

$$R_{SSD} = \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} (T(i, j) - I(i, j))^2 \quad (17)$$

類似度 R_{SSD} の値が低いほどテンプレート画像と入力画像が類似していることを示す。類似度 $R_{SSD}=0$ であれば、テンプレート画像と入力画像が同一の画像であると判断する。SSD は、テンプレート画像と入力画像の輝度を比較して類似度を求めるので、画像に輝度の変化が少ない場合には誤対応する可能性がある。

3.6 テンプレートマッチングを用いた視差の算出

テンプレートマッチングを用いた視差の算出について説明する。図6に視差の算出の概要を示す。図6の赤枠がテンプレート画像、青枠が入力画像を示す。まず左カメラの画像から $m \times n$ pixel の画像をテンプレート画像として抽出する。このテンプレート画像の左上の画素の座標は (p_0, q_0) である。次に、右カメラの画像から $m \times n$ pixel の画像を入力画像として抽出する。入力画像の左上の画素の座標を (p_1, q_1) とする。ただし、 $q_0 = q_1$ であり、初期状態で $p_1=0$ である。ここで式(17)を用いて類似度 R_{SSD} を求める。類似度を求めた後に、 $p_0 = p_0 + t$ として、 t を入力画像が画像外を含まない範囲で変化させる。 t はテンプレートの移動量である。求めたすべての R_{SSD} から最小値となった時の座標から、視差 $d = p_0 - p_1$ を求める。

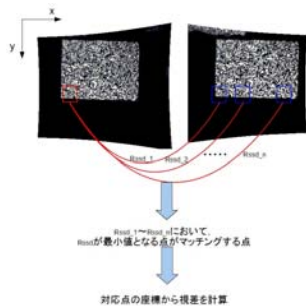


Fig. 6 Calculation of the parallax using the template matching

3.7 投影パターン

投影パターンについて説明する。本研究で用いる投影パターンとは、物体の表面に輝度の変化をつけるために、プロジェクタを用いて投影する白黒の模様のことである。本研究では、表面に模様などの特徴がない物体を対象としている。3.3節で述べたように、テンプレートマッチングを用いる場合、輝度の変化が必要である。そこで本研究では、プロジェクタを用いて対象物体の表面に輝度の変化をつけ、テンプレートマッチングを使用する。本研究に用いる投影パターンを図7に示す。

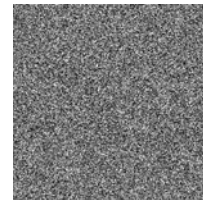


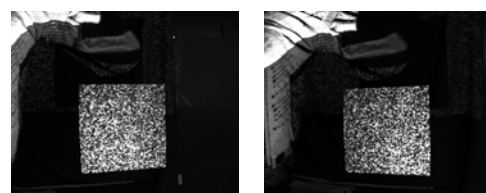
Fig. 7 Projection figure

4. 物体の形状認識および計測精度の評価

平面の板を対象に計測を行い、形状が正しいかどうかを確認する。また対象までの奥行距離の計測精度評価を行う。

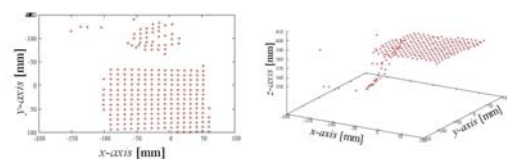
4.1 形状の認識

パターン投影を行い対象を撮影した画像を図8に示す。図8に3.1節の処理を行い算出した三次元座標を図9に示す。図9より平面物体が確認でき、形状が正しいことが確認できた。



(a) Left image (b) Right image

Fig. 8 Stereo Image



(a) x - y plane

(b) 3D coordinate

Fig. 9 Stereo Image

4.2 奥行計測精度の評価

対象をロボットハンドで操作し、移動距離を計測により求めた値を実測値、ロボットハンドの操作距離を理論値として奥行計測の精度を評価する。本実験ではロボットハンドで板を10 mm刻みで50 mmまで奥へ移動、計測を行っていき移動距離を求めた。移動前と各移動後の板の上端の計測データを z - x 平面でプロットした結果を図10に示す。

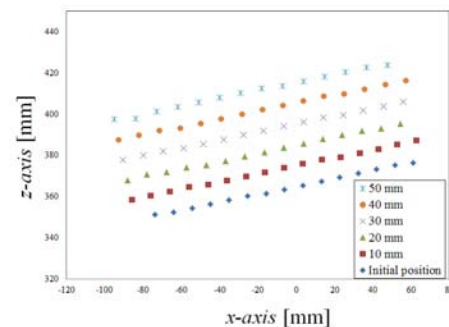


Fig. 10 Measurements of the top edge of the plate (z - x plane)

移動距離算出について説明する．まず計測結果の中から板の上端部分の計測値を取り出す．次に移動前の計測値を最小二乗法を用いて線形近似する．近似直線と移動後の各計測点との距離を求め，これを移動距離とする．これにより求めた移動距離を表 1 に示す．表 1 よりロボットハンドで移動した距離が 10 ～ 40 mm の範囲であれば ± 1.00 mm 以内の誤差で対象までの奥行が計測できることを確認した．移動距離が 50 mm のときでは誤差が 1.00 mm を超えている．これは対象がピントの最適な状態で調整されている初期位置より離れすぎたため，ピントがボケたことによりマッチングのミスが起きたことが原因である．

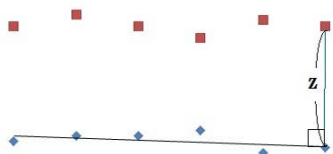
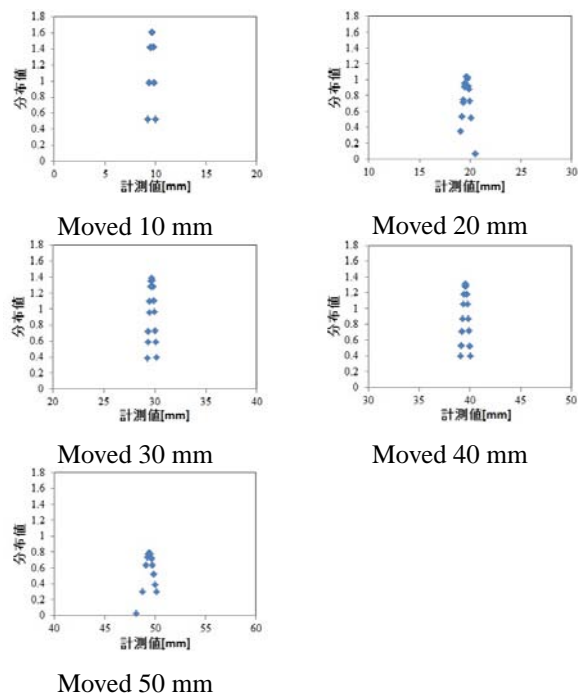


Fig. 11 Calculated depth

Table 1 Depth calculation results

移動距離	実測値 [mm]	理論値 [mm]	誤差 [mm]
10.00 mm	9.66	10.00	0.34
	9.78	10.00	0.22
	9.91	10.00	0.09
	10.03	10.00	0.03
	9.29	10.00	0.71
20.00 mm	19.46	20.00	0.54
	20.51	20.00	0.51
	19.72	20.00	0.28
	19.84	20.00	0.16
	19.06	20.00	0.94
30.00 mm	29.80	30.00	0.20
	29.93	30.00	0.07
	30.06	30.00	0.06
	29.23	30.00	0.77
	29.36	30.00	0.64
40.00 mm	39.70	40.00	0.30
	39.84	40.00	0.16
	39.97	40.00	0.03
	39.09	40.00	0.91
	39.22	40.00	0.78
50.00 mm	50.12	50.00	0.12
	48.11	50.00	1.89
	49.33	50.00	0.67
	49.47	50.00	0.53
	49.61	50.00	0.39

次に移動距離の実測値を正規分布で表した結果を図 12 に示す．図 12 より 50 mm 移動させたときの分布図のみ他の計測結果と比べると計測データのばらつきが多いことが確認できる．これは上述のピントのボケが原因である．



Moved 50 mm

Fig. 12 Normal distribution of measured value

5. 結言

本稿では，パターン投影を用いたステレオ法による物体の三次元計測を行った．平面物体の計測結果では形状が正しく計測できていることを確認した．また奥行の計測精度の評価を行った．ステレオ画像の撮影時にピントがあった状態であれば， ± 1.00 mm 以内の誤差で対象までの奥行を計測できることを確認した．今後は曲面を有する物体に対して形状認識，精度評価を行う予定である．

文献

- [1] 徐剛・辻三郎，”3次元ビジョン”，共立出版，1999
- [2] 徐剛，”写真から作る3次元CG”，近代科学社，2001