

2方向からのスリット光投影による

3次元情報の抽出と認識

渡辺 弥寿夫*、中野 幸一**、漢野 救泰**、奥野 孝**

*金沢工業大学、**石川県工業試験場

本論文は、乱反射成分と正反射成分を持つ金属などの物体に対して2方向から当てたスリット光群を用いて3次元情報を抽出する方法について述べている。従来のスリット光投影法では、反射光や鏡像から、距離を算出すると誤った情報が得られるが、本手法は、この問題を解決し、位置ベクトルだけでなく、面の法線ベクトルも同時に求めて、認識手続きに渡す。また、画像上で、線検出を精度よく、効率的に行う方法を用いて、2つのスリット光像の交点を正確に求めることができる。実験システムにより、この方法が有効であることを確かめた。

EXTRACTION AND RECOGNITION OF 3-DIMENSIONAL INFORMATION

BY PROJECTING A PAIR OF SLIT-RAYS

Yasuo WATANABE*, Kouichi NAKANO**, Sukeyasu KANNO** and Takashi OKUNO**

*Kanazawa Institute of Technology, **Industrial Research Institute of Ishikawa

*Oogigaoka 7-1, Nonoichi-Machi, Ishikawa-Gun, Ishikawa, 921, Japan

The paper presents a method for extracting 3-D information of the object which has both lambertian and specular components such as metals making use of a pair of slit-rays. Although the traditional slit-ray method obtains a wrong distance information using specular slit-ray or mirror image, the method proposed here solves the problem and calculates not only the positional vector but also the surface normal which are sent to the recognition procedure. The cross point of two slit-ray image can be exactly detected by means of the accurate and efficient method of line detection. Our experimental system supports the effectiveness of this method.

1. まえがき

立体の形状認識において、濃度情報やテキスチャ、ハターン光投影像などを用いて3次元情報を抽出する方法がいろいろ提案されている[1-3]。中でも、スリット光投影法は、スリット光とTVカメラを用いて三角測量の原理に基づいて、距離を計測する代表的な方法であり[4]、生産ラインの実用システムも提唱されている[5,6]。しかし、図1のように、金型や金属面を含んだ機械部品などでは、鏡面反射があるため、反射光による散乱や鏡像が観測され、そのような像を用いて計算すると、従来の手法では、誤った距離情報が得られる。そこで、2組のスリット光群を用いて、誤った3次元情報を抽出しないようにするとともに、位置ベクトルだけでなく、面の法線ベクトルも同時に求められる方法を提案する。

2. 2方向スリット光投影法の原理

図2のように、スリット光を2つの方向から当てる。このとき、物体表面上で交線が観測され、その交点をサンプル点として位置座標および法線ベクトルが計算できる。今、スリット光 i ($i = 1, 2$) の平面の方程式を

$$n_i \cdot (X - C_i) = 0 \quad (1)$$

とし、視点を Q 、視平面上での交点の観測点を P とすると、 P 、 Q を結ぶ直線とスリット光平面との交点が位置座標であり、次のようになる。

$$X_0^{(i)} = \frac{(n_i \cdot (C_i - Q))P - (n_i \cdot (C_i - P))Q}{(n_i \cdot (P - Q))} \quad (2)$$

反射光による偽の観測データが存在しないときは、スリット光 $i = 1, 2$ の平面に対して、 $X_0^{(1)} = X_0^{(2)} = X_0$ となり、一致するが、そうでないときは一致しない。例えば、図3のような状況では、2つのスリット光平面 P_1 、 P_2 に対して、視平面上の交点 q_1 、 q_2 を物体空間の中へ延長して、直線 l_1 、 l_2 としたとき、 P_1 と l_1 の交点はともに、実際の物体表面上の点 Q_1 に一致するが、 P_2 と l_2 の交点は、それぞれ Q_2' 、 Q_2 となり、一致しないからである。

また、物体表面の法線ベクトル N は、次のようにして求められる。即ち、視平面上のスリット光 i に対する交線方向の単位ベクトルを l_i とすると、 $P + l_i$ と視点 Q を結ぶ直線がスリット光 i の平面と交わる点 X_i を求めれば、 X_0 、 X_i を結

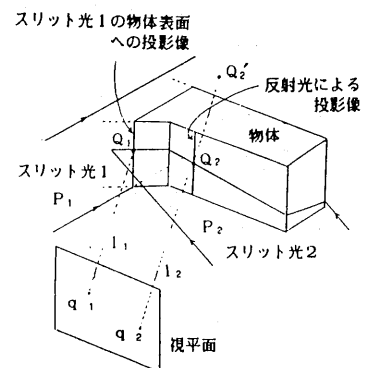
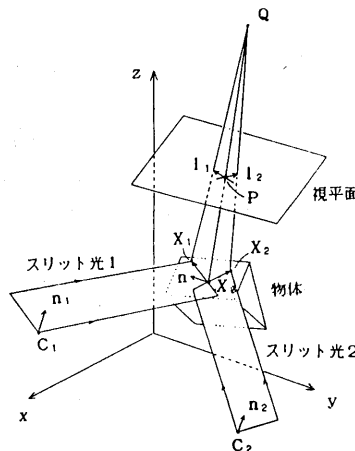
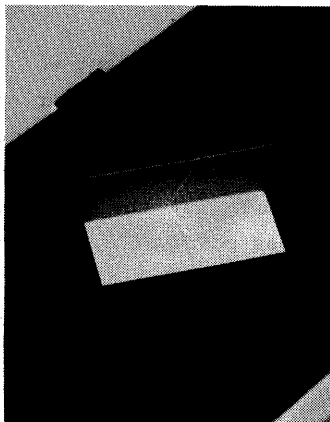


図1. 金属面におけるスリット光の反射

図2. 2方向からのスリット光投影

図3. 反射スリット光による影響

ぶ直線が、物体表面上の実際の交線になる。 X_1 は式 (2) で P の代わりに $P + l_1$ とすればよい。このようにして求められた X_0, X_1, X_2 をもとにして、

$$\begin{aligned}
 N &= (X_2 - X_0) \times (X_1 - X_0) \\
 &= \frac{(n_2 \cdot (P - Q))(n_2 \cdot (C_2 - Q))l_2 - (n_2 \cdot l_2)(n_2 \cdot (C_2 - Q))(P - Q)}{(n_2 \cdot (P - Q + l_2))(n_2 \cdot (P - Q))} \\
 &\times \frac{(n_1 \cdot (P - Q))(n_1 \cdot (C_1 - Q))l_1 - (n_1 \cdot l_1)(n_1 \cdot (C_1 - Q))(P - Q)}{(n_1 \cdot (P - Q + l_1))(n_1 \cdot (P - Q))} \quad (3)
 \end{aligned}$$

を計算すれば、物体表面上の法線ベクトル N が求められる。(図 2)

2組の平行なスリット光群を投影することは、メッシュ状のパターンが投影される[3]のと同価で、それぞれの交点をサンプル点として、位置ベクトルと面の法線ベクトルが算出できる。法線ベクトルを正規化して、 $n = N / |N|$ とすることにより、 $n \cdot (X - C) = 0$ なる平面は、 n と $(n \cdot C)$ で特徴づけられる。

3. 実験システムと処理手順

前節の理論に基づいて、図 4 のような実験システムを作成した。物体をのせる観測テーブルと TV カメラは固定されており、マニュアルでプリズムおよびレンズを動かすことにより、スリット光を物体に任意の角度で投射することができる。また、CPU からの信号で、スリット光を平行にスキャンすることができるようになっている。2方向からの平行スキャンは、光の投射角を変えてスリット光発生部を往復スキャンさせる。物体に投射されたスリット光像は、TV カメラから入力されコンピュータにより処理される。

光源と TV カメラの位置、姿勢のパラメータは、あらかじめ計測しておき、次の手順で処理する。

- (1) 1組の平行なスリット光群の各々に対して、雑音除去した後、スリット光を当てた画像と、当てない画像との差を求め、スリット光投影像の線を抽出する。
 - (2) 他の1組のスリット光を当てた画像に対しても、(1)と同様に処理する。
 - (3) (1)、(2)で得られた線の交点について、それぞれ、偽のデータかどうかチェックし、正しい3次元情報を算出する。
 - (4) 平面のパラメータをもとに、サンプル点の分類を行い、面の識別を行う。
- (1)、(2)で得られた画像からの線抽出については次節で述べる。(3)の3次元位置座標のチェックは、前節で述べたように、異なるスリット光から算出した位置座標の距離 $|X_0^{(2)} - X_0^{(1)}|$ があるしきい値以下であれば、正しいとし、面の法線ベクトルを計算する。そうでなければ、反射光による像あるいは鏡像であるとして、そのサンプル点を使わない。

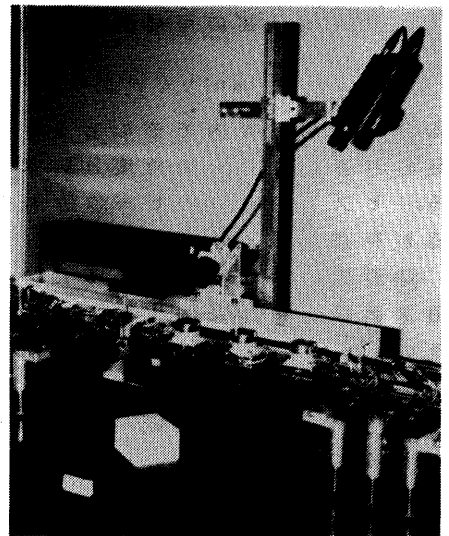


図4. 実験システム

4. 線抽出と精度の向上

従来のスリット光投影法は、TVカメラの走査線を横切るスリット光投影像の位置を検出するという、1次元的な方法であるが、本手法は、方向の異なる2組のスリット光群の交点を利用するため、線検出と交点検出を行う必要がある。スリット光は、画像上で水平に写る可能性もあるため、走査線に沿った1次元的な走査方法では位置検出はできない。また、3次元情報は、デジタル画像におけるスリット光像の位置を利用するため、この位置検出が精度に大きな影響を与える[7]ので、線検出と交点検出を離散的にではなく、なるべく精度よく行う必要がある。

エッジ検出オペレータには、グラジエントやラブラシアンがよく用いられるがそれらをもとに線抽出を行うためには、(1)エッジを2値画像として細線化する、(2)エッジを多値画像として①フィルタリングする、または②追跡する方法がある。しかし、いずれもデジタル画像上でのオペレーションであり、厳密な意味での線は抽出できない。

そこで、全体の画像をいくつかの副画像に分け、その中で線分抽出を行い、各々の副画像に対して、線分のパラメータと対応するスリット光の番号を登録しておく。(このとき、スリット光の鏡像、正反射成分の像のため、あるいは、物体の面の傾きが変化するため、一つの副画像内に複数の線分が存在し得る。)この手続きは、すべてのスリット光に対して行い、最後に、各副画像内の線分から交点を求め、副画像を統合して線分をつなぎ合わせ、交点、線分、スリット光の対応表を作成する。

まず、画像の明度を $\phi(x, y)$ として、線分検出は次のように行う。

①直線の存在の可能性とその傾きを求めるために、 $|\text{grad}\phi| > \epsilon$ なる点に対して、

$$\theta = \tan^{-1}(\phi_y / \phi_x) \quad (-\frac{\pi}{2} < \theta \leq \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

を求め、副画像内でそのヒストグラムをとる。ヒストグラムに明らかなピークが見られるとき、その角度 α に垂直な傾き $-\cot\alpha$ を持つ直線が存在する可能性がある。ヒストグラムのピークが複数個存在する場合、異なる傾きをもつ複数個の直線が存在し得る。

②直線の通過点を求めるために、図5のように副画像の中心を通るエッジに垂直な直線上に、副画像内の明度を累積する。今、副画像の中心を (x_0, y_0) とし、その点を原点に傾き $\tan\alpha$ の直線上に局所座標 t をとると副画像上の点 (x, y) は、

$$t = (x - x_0) \cos\alpha + (y - y_0) \sin\alpha \quad (5)$$

に移る。 $-\cos\alpha$ の直線が存在するところで、 t 上でのヒストグラムのピークが見られる。そこで、この近傍で2次曲線をあてはめ、正確なピーク位置 r を求め

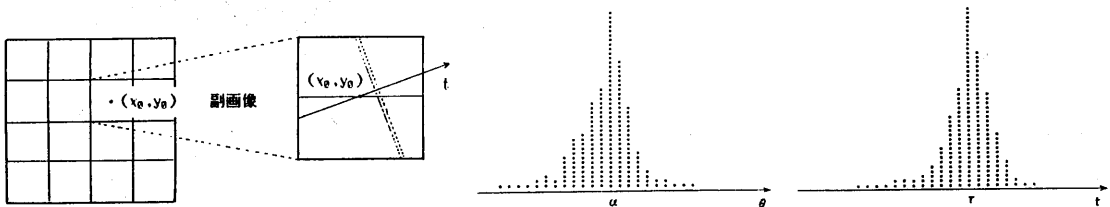


図5. 副画像およびその中に存在する線の勾配と位置の推定

$$x = x_0 + r \cos \alpha, \quad y = y_0 + r \sin \alpha \quad (6)$$

として、直線の通過点を決定する。副画像内に同じ傾き $-\cos \alpha$ を持つ複数の直線が存在するとき、複数のピークが見られる。また、 $-\cos \alpha$ でない傾きを持つ直線が存在する場合、 t 上での明度の累積は t に沿って一様に効いてくるので、 $-\cos \alpha$ の傾きを持つ直線を検出するためのヒストグラムのピーク検出には寄与しない。

次に、副画像内で、線上の特徴的な点、即ち、端点、屈曲点、交差点を検出する。1つのスリット光に対して交差点ができるのは、反射光の影響である。これらの特徴点は、①、②で求められた、副画像内に存在するであろう直線上を追跡することによって求められる。

5. 面の認識

平面から成る物体のモデルとして、面の単位法線ベクトルを属性に持つ節点と、2つの面の単位法線ベクトルの変換行列を属性として持つ枝からなるグラフを考える。観測データをもとにして作られる物体の記述が、このようなグラフの部分グラフであるとすると、物体の認識は部分グラフマッチングの問題に帰着される。

前節で作成された図6のようなスリット光のグラフをもとに、観測さ

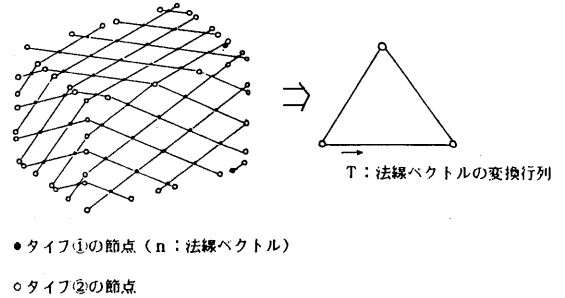


図6. 平面からなる立体の記述

れた物体の記述を作る。このグラフの節点は、①異なる方向のスリット光の交点か、または②同一スリット光が面の稜で屈曲する点を表わす。①のタイプの節点は、面の法線ベクトルの情報をもつ。このグラフは平面グラフであり、タイプ②の節点で切り離すと部分グラフができるが、これらはちょうど一つの面上にできたスリット光のグラフである。この中のタイプ①の節点には、面の法線ベクトルの情報があるので、これより面を節点とするグラフを構成し、節点には単位法線ベクトルを、面と面を狭む稜に対応する枝にはその2つの面の単位法線ベクトルの変換行列を属性として持たせる。そこで、このようなグラフと、物体のモデルとのマッチングを行うには、枝のラベル(属性)をキーにすれば効率がよい。

6. 試作システムと実験例

試作システムは、雑音除去、画像間演算などの前処理はハードウェアで実現し、3次元位置座標、面の法線ベクトルの計算はソフトウェアで行った。図7にハードウェア構成図を示す。

図8に図1のような断面がし字型の物体に2方向から当てたスリット光群からエッジ検出、線検出を行った例を示す。ただし、面は金属光沢をもたない、ほとんど乱反射成分のみの物体である。表1は、これにより算出した3次元位置座標である。これにより、スリット光像の線抽出が正確に行われ、3次元位置座標がほぼ正しく計算されていることがわかる。一方、図9は、金属面の場合のエッジの例であり、表2は、これにより算出された3次元位置座標である。これを見る

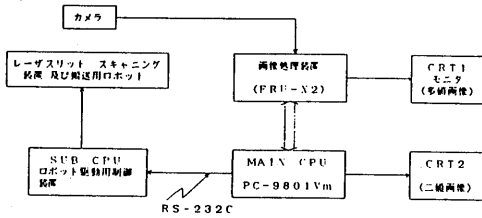
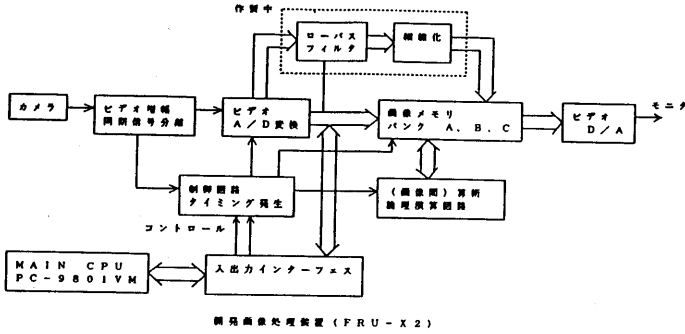


図7. 試作システムのハードウェアブロック図

表1. 図8中のサンプル点における3次元座標位置

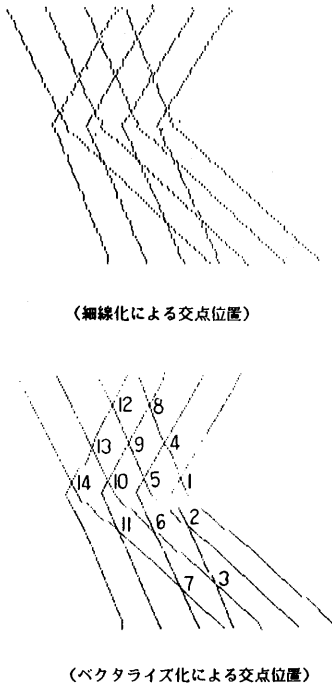


図8. 反射光のない物体のスリット光像からの線抽出

サンプルNo.		X	Y	Z
1	理論値	7. 0	0	8. 9
	実験値	7	-1. 3	9. 1
2	理論値	6. 3	10. 9	0
	実験値	6	11. 4	1. 1
3	理論値	-1. 1	32. 6	0
	実験値	-2	35. 2	1. 3
4	理論値	10. 9	0	26. 8
	実験値	12	2. 2	26. 3
5	理論値	17. 0	0	8. 9
	実験値	18	-1. 8	8. 3
6	理論値	16. 3	10. 9	0
	実験値	16. 3	12. 1	-1. 5
7	理論値	8. 9	32. 6	0
	実験値	7	36. 0	0. 7
8	理論値	14. 8	0	44. 7
	実験値	15	-2. 4	46. 6
9	理論値	20. 9	0	26. 8
	実験値	21	-1. 7	27. 2
10	理論値	27. 0	0	8. 9
	実験値	28	-1. 5	6. 9
11	理論値	26. 3	10. 9	0
	実験値	25	13. 6	0. 8
12	理論値	24. 8	0	44. 7
	実験値	25	-2. 4	46. 6
13	理論値	30. 9	0	26. 8
	実験値	32	-1. 4	25. 8
14	理論値	37. 0	0	8. 9
	実験値	38	-1. 2	5. 5

※観測テーブル上における座標 (mm)

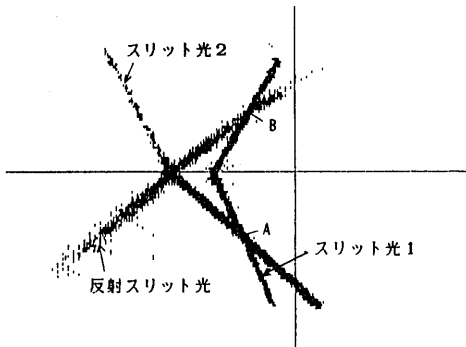


図9. 反射光のある物体のスリット光像

表2. 図9中のサンプル点における3次元座標位置

サンプル点	3次元位置座標※			
	x	y	z	
A	スリット光1による点	16.1	23.9	-0.86
	スリット光2による点	16.2	24.0	-0.53
B	スリット光1による点	14.2	-1.59	30.3
	スリット光2による点	11.2	57.8	116.8

(※観測テーブル上での座標)

と、本来のスリット光からできた交点Aからは正しい3次元情報が抽出され、反射スリット光のためにできた交点Bからは誤った3次元情報が得られることがわかる。

7. あとがき

小論では、乱反射成分だけでなく金属面など正反射成分があり、鏡像を写し出すような物体に対して適用可能なスリット光投影法を提案した。これはもちろん磨き上げた金属面のような全くの鏡面反射だけ起こすものに対しては適用できないが、表面に汚れがあったり、くすんでいてある程度乱反射成分がある金属面には適用できる。実際に、いくつかの金型、金属材料に適用して本手法の有効性を確かめることができた。

試作システムでは、前処理をハードウェアで実現したが、今後、2～4節で述べたアルゴリズムに基づいて、位置ベクトルと面の法線ベクトルを計算するためのハードウェアを実現する予定である。さらに、抽出された3次元情報をもとに、金型などの搬送のための認識システムを完成したい。

[参考文献]

- [1] 杉原: “サーベイ: 画像を利用した立体計測の諸手法”, 情処研報, CV33-4, 1984
- [2] 渡辺, 榎本: “両眼視による3次元情報の抽出について”, 信学情報・システム部門全大, p.1-126, 1981
- [3] 吉武, 杉原, 杉江: “規則的パターンの投影像を利用した三次元物体の識別の試み”, 情処研報, CV-42-2, 1986
- [4] “Progress Report on 3-D Object Recognition”, パターン情報処理システム調査研究報告, PIPS-R-No.13, 1977
- [5] 小関, 中野, 山本: “光切断法を用いた実時間距離検出装置”, 信学論, Vol. J68-D, No.5, pp.1141-1148, 1985
- [6] 岡田, 奏, 高木: “立体形状の高速認識方式”, 精密工学会誌, Vol.56, No.6, pp.82-86, 1986
- [7] 成瀬, 野村, 山本: “スリット光投影法による高精度距離・姿勢計測”, 信学論, Vol. J69-D, No.12, pp.1889-1895, 1986