時空間画像解析による水中物体の3次元形状計測

河村 拓史*・斎藤 英雄*・中島 真人*

3-D Shape Measurement of Underwater Object by Temporal-Spatial Image Analysis

Hirofumi KAWAMURA*, Hideo SAITO* and Masato NAKAJIMA*

This paper describes a new method for 3-D shape measurement of underwater object by using temporal-spatial image analysis. We performed a basic experiment for demonstrating the efficacy of the proposed method. A shape of an underwater polyhedron can be experimentally measured by using the proposed method.

Key Words: temporal-spatial image, Hough transform, underwater measurement, stereo vision

1. はじめに

本研究では、水中にある物体を水の外へ取り出すロボットなどを想定し、水面上から水中物体の形状計測を行うために、時空間画像解析法^{1),2)}を拡張して適用する手法を提案する。水面上から水中物体を観測する場合には、水面における光の屈折の影響が無視できない。そこで本手法では、カメラから水面までの距離を未知パラメータとして扱い、このパラメータを平行移動するカメラから得られる時空間画像より推定しながら水中物体の3次元形状を計測する。

2. 本手法の原理

2.1 水中物体の三次元座標計測の原理

本手法は、Fig. 1 に示されるカメラの初期位置を原点とする三次元座標系において、物体の特徴点の三次元座標 (X, Y, Z) 、および屈折の情報を与えるカメラから水面までの距離 Z_w を求めるものである。

本手法ではまず、 Z 軸に対して一定角度傾けた CCD カメラを、水面に対して一定の距離間隔で平行移動させながら水中物体を撮影し、時空間画像を収集する。つぎに、得られた各画像から特徴点を抽出する。そしてこの特徴点の座標を、Fig. 1 に示す水面に対して平行な平面を基準とする (x, y) 座標系に変換する。本手法では、こうして得られる座標系をカメラの移動方向 d に対して並べた時空間座標系に注目する。この時空間画像中で、物

Fig. 1 Principle of 3-D shape measurement of underwater object

体の各特徴点は曲線の軌跡を描く。この軌跡は、もしも水のない一般的な環境においては直線となるのに対し、本手法では水面における光の屈折の影響のために軌跡は曲線となる。

この軌跡を表わす式は、物体の各特徴点の X, Z, Z_w のパラメータ、その特徴点の時空間座標 (x, y, d) 、および本手法では既知として与える屈折率 N 、焦点距離 L を用いて、次式で表わすことができる。

$$X - \frac{x}{AL}Z - \frac{x(A-1)}{AL}Z_w - d = 0 \quad (1)$$

$$\text{where : } A = \sqrt{(N^2 - 1) \frac{x^2 + y^2}{L^2} + N^2}$$

また、 X, Y の間には次式の関係がある。

$$Y = (X - d) \frac{y}{x} \quad (2)$$

本手法では、(1) および (2) 式に時空間画像における特徴点の座標 (x, y, d) を代入して得られる方程式を解くことにより、 (X, Y, Z) および Z_w の4種の未知パラメータを算出する。

* 慶應義塾大学理工学部 横浜市港北区日吉 3-14-1

* Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama

(Received July 17, 1995)

(Revised November 1, 1995)

Fig. 2 Parameter estimation by Hough transform

2.2 Hough 変換による未知パラメータの算出

本手法では、(1) 式中の X , Z , Z_w の 3 種のパラメータを求めるために Hough 変換^{3), 4)}を利用する. Hough 変換はパラメータで表現された図形を空間中から検出する方法である. これを本手法に適用することにより、時空間中において、特徴点の対応関係をまもって知ることなく曲線の軌跡が検出でき、これら 3 種のパラメータを決定できると考えられる.

本手法において、Hough 変換のパラメータ空間は、Fig. 2 に示すような X , Z , Z_w の三次元空間となる. そして (1) 式に時空間画像の (x, y, d) 座標を代入して得られる X , Z , Z_w の一次方程式は、この空間中で平面を示す. 特徴点の数が 1 つの場合に、1 本の軌跡上の複数の点が与える平面群をパラメータ空間内に示すと、Fig. 2(a) のように、これらの平面は同一の座標点で交わる. これは (1) 式に (x, y, d) 座標を代入して得られる連立方程式の解 X , Z , Z_w を与えるものである. Hough 変換では、この座標がピークという形で得られるので、このピークを検出することで、これら 3 種のパラメータを求めることができる. 特徴点が多数ある場合には、Fig. 2(b) に示すように、軌跡の本数だけピークが現れる. そこでこれら複数のピークを検出することにより、複数組のパラメータを一度に求めることができる.

このとき、複数組のパラメータに対応する各ピークの Z_w 座標は、水面の位置を与えるものであるため、特徴点の三次元座標によらずすべて一定の値を示す. したがって、Fig. 3 に示すようなパラメータ空間を $X-Z$

Fig. 3 Schema of detecting peak parameters

平面に平行な平面で切った断面群を考えると、水面の位置を与える Z_w では、すべての特徴点に対応する投票のピークが存在することになる. そこで、まずパラメータ空間内で最大値を与えるパラメータを 1 組求め、このパラメータの Z_w に対する $X-Z$ の二次元空間でピークを探索する. このように、パラメータ空間中で最大度数を与える信頼性の高い 1 組のパラメータにより Z_w を決定し、残りの特徴点のパラメータを探索する範囲を限定することにより、ピーク検出処理が効率化される. 以上のようにして、すべての特徴点に対応する X , Z , Z_w の値が決定される.

最後に、先述の Hough 変換の操作によって算出された特徴点の X の値および、その特徴点を与える (x, y, d) の座標値を (2) 式に代入して得られる方程式を解くことにより Y の値を算出する.

3. 実 験

本研究では、本手法の有効性を検証するために、多面体を対象とした基礎実験を行った. この実験では、本手法により水中にある多面体の頂点の三次元座標を計測するのみならず、時空間画像のエッジ情報を利用して、多面体の稜線も計測する.

本実験では、Fig. 4 に示す条件および、Table 1 に示す実験パラメータのもとで画像収集を行った. ここで、カメラから水面までの距離は 36cm と設定した. また、立方体と正四角錐とを上下に組み合わせたプラスチック製の物体を対象物体として用いた. この多面体中の、立方体、正四角錐の 1 辺の長さはともに 10cm である.

Fig. 5 は移動するカメラにより撮影された画像の一例であり、(a) は水中にある物体を撮影した画像、(b) は比較のために撮影した、水がない場合の画像である. また Fig. 6 は、屈折の影響が取り除かれた物体の三次元形状を、同一視点のカメラのイメージプレーンに投影した

Fig. 4 Geometric arrangement in experiment

Table 1 Experimental parameters

画角の大きさ	±15.25 度
イメージプレーン	256 × 256 pixels
カメラの傾斜角度 θ	45 度
視点の数	24 視点 (3cm 間隔)
Hough 空間 (X, Z, Z_w)	128 × 128 × 64 pixels (1pixel:1cm)
水の屈折率 N	1.33

Fig. 5 Example of the collected temporal-spatial images

Fig. 6 Reconstructed 3-D shape (unit : cm)

Table 2 Length of the edge in case of measured Z_w

稜線	長さ (cm)	稜線	長さ (cm)
(1)-(2)	13.0	(2)-(5)	11.0
(1)-(3)	15.4	(3)-(4)	9.5
(1)-(4)	16.1	(3)-(6)	9.0
(2)-(3)	10.7	(5)-(6)	10.3

Table 3 Length of the edge in case of correct Z_w

稜線	長さ (cm)	稜線	長さ (cm)
(1)-(2)	10.7	(2)-(5)	7.3
(1)-(3)	12.6	(3)-(4)	9.9
(1)-(4)	11.6	(3)-(6)	7.1
(2)-(3)	10.9	(5)-(6)	9.7

結果である。Fig. 5(b) と Fig. 6 とを比較すると、Fig. 6 が Fig. 5(b) に近づいていることが理解できる。しかしながら、水面の位置を与える計測値については、実際の 36cm という値に対し 32cm と、4cm の誤差があった。

また、定量的な評価を行うために、物体の稜線の長さを比較した。本実験で用いた多面体の一辺がすべて 10cm であったのに対し、計測の結果得られた稜線の長さは、Table 2 のようであった。なおこの表中の番号は、各稜線の端点である頂点の番号を示し、それぞれ

(1) (93.0, 4.0, 43.0) (2) (92.0, -1.0, 55.0)

(3) (89.0, 9.0, 57.0) (4) (98.0, 12.0, 56.0)

(5) (92.0, -1.0, 64.0) (6) (89.0, 9.0, 66.0)

の座標 (単位: cm) を与える頂点の番号である。

この表に示すように、定量的に見ると計測結果にはかなりの誤差が含まれている。この誤差の原因は、 Z_w の決定の際の誤差によるものであると考えられる。Table 3 に Z_w の値が正しく推定されたと仮定した場合の各稜線の長さを示す。この表を見ると、依然としてシステムパラメータの誤差によるものと考えられる多少の誤差が含まれているものの、全体的に誤差は Table 2 の場合に比べると少なくなっている。すなわち本手法においては、 Z_w の値を正しく推定することが重要であるといえる。

4. あとがき

時空間画像解析法を拡張して使用し、水中物体の三次元形状を水面上から計測する手法を提案し、実験によりその有効性を示した。

参考文献

- 山本正信 : 連続ステレオからの 3 次元情報の抽出, 電子通信学会論文誌, **J69-D-11**, 1631/1638 (1986)
- 山本正信 : 時空間画像による動的 3 次元世界の理解, 電子情報通信学会誌, **76-9**, 948/951 (1993)
- P.V.C. Hough : Method and Means Recognizing for Complex Patterns, U.S. Patent, 306954 (1962)
- 松山, 奥水 : Hough 変換とパターンマッチング, 情報処理, **30-9**, 1035/1046, (1989)