ステレオ画像を利用した船舶の検出に関する基礎的検討*

山 本 茂 広** ミェ テンギ ウィン***

Basic Study on Detection of Ships from Stereo Images

By Shigehiro Yamamoto and Myat Theingi Win

Radar is essential to safety navigation for ships. However, it is not perfect equipment and there exist marine accidents. The authors propose using stereo vision that automatically detects ships and/or other objects and measures their 3D locations in order to assist usual navigation equipment. This paper focuses on a novel method to detect ships from stereo images. The proposed method is composed of detection of edges from images, confirmation of corresponding points between left and right images, and final judgment of ships from 3D measurement results. An experiment, which used twelve pairs of stereo images obtained at Akashi Strait, was conducted. The result indicates good possibility of the proposed method, although there is room for improvement in order to ensure the detection.

1. はじめに

船舶には様々な航海計器が搭載されている。中でもレーダは、他船や他の障害となる物体を検出する装置として欠かせないものである。しかし、時には海面反射等による偽像が小型船等との識別を困難にすることもあり、レーダも万能ではない。ほかには、船舶自動識別装置 (AIS: Automatic Identification System) が実用化されているが、搭載が義務づけられているのは一定の条件を満たす大型船舶のみであり、小型船や船舶以外の障害物に対しては役に立たない。それゆえ、最終的には航海士の目視による安全確認が欠かせないが、見落としなどのミスを犯すこともあり、海難事故が後を絶たないのが現状である。

一方、陸上では自動車の自動走行を目的として、画像処理技術を応用した走行レーンの検出や、前方の他車または障害物の検出を行う研究が数多く進められている^{1)~4)}。これに対して、海上でも陸上ほど多くはないが、従来の航海計器や航海士の安全確認を補助する目的で、画像処理を用いた船舶の自動検出の試みがいくつか報告されている^{5)~10)}。例えば、文献5)では、レーダから得られた情報と赤外線画像に写る船舶像のアスペクト比から計算される船舶の方向の情報とを総合して衝突を回避するシステムが紹介されている。文献6)~8)では、海上の時系列画像から船舶を検出する方

法を論じている。また、陸上に設置したカメラから海上を航行する船舶を監視するシステムとして、3種類の画像処理方法を組み合わせることが、文献9)で提案されている。しかし、これらの手法はカメラ1台の単眼視を基本としており、船舶を検出してもその位置を特定することが困難であると考えられる。唯一、文献10)では、単眼視ながら水平線と対象船舶の喫水線とのなす視角を利用して対象船舶までの距離を求める方法を提案している。しかし、この方法は水平線が確認できる状況でしか使用できないなどの制限がある。

以上のようなことから、著者らは、カメラを2台以上用いた三次元ステレオ画像計測の原理を用いて船舶等を検出し、その位置を計測することを提案した¹¹⁾。ただ、文献11)は、ステレオ画像計測によりどの程度の精度で船舶の位置を計測できるのかについて、理論的及び実験的に検証したもので、画像中から船舶を自動的に検出するまでには至らなかった。陸上では、先に挙げた文献3)や4)でステレオカメラを用いた研究がなされているが、海上では、対象物までの距離が陸上と比べてかなり長いことや、背景がかなり違うことなどから、陸上での方法をそのまま用いることができるわけではない。そこで本論文では、船舶等を含む海上のステレオ画像から自動的に船舶や他の障害物を検出する方法について基礎的な検討を行ったので、それについて報告する。

2. ステレオ画像計測の原理

*原稿受付 平成19年3月9日。

**正会員 神戸大学 (神戸市東灘区深江南町5-1-1)。

***学生会員 神戸大学大学院

2.1 原理 ここで、簡単にステレオ画像計測の原理について紹介する。その原理は、簡単に言えば、2台（以上）のカメラを用いて三角測量の原理により対象物の三次元位置を計測することである。これを、簡単化のため、図1に示す標準ステレオカメラモデルを用いて説明する。

図1 標準ステレオカメラモデル

いま、三次元空間上で O -XYZ 座標系（世界座標系）を定義し、右側のカメラの光学中心を座標 $(L_B/2, 0, 0)$ におく。カメラの光軸は Z 軸と平行とする。このときカメラの光学中心を原点、光軸を z_r 軸としたカメラ座標系 o_r - x_r - y_r - z_r を図のように定義する。同様に、左側のカメラの光学中心を座標 $(-L_B/2, 0, 0)$ におき、そのカメラ座標系を o_l - x_l - y_l - z_l と定義する。カメラの光軸 (z_l 軸) は、やはり Z 軸と平行とする。また、両カメラの焦点距離は 1 とする。以上のような座標系において、三次元空間上の点 $P(X, Y, Z)$ は、右側のカメラにおいては、平面 $z_r = 1$ 上の点 $p_r(x_r, y_r, 1)$ に、左側のカメラにおいては、平面 $z_l = 1$ 上の点 $p_l(x_l, y_l, 1)$ に、それぞれ投影される。このとき、標準ステレオカメラモデルでは、必ず $y_r = y_l$ となる。以上のことから、逆に $x_r, x_l, y_r (= y_l)$ が既知であれば、対象物の座標は、

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{L_B}{x_l - x_r} \begin{bmatrix} (x_l + x_r)/2 \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

により求めることができる。これがステレオ画像を用いた三次元計測の原理である。

2.2 カメラの校正 2.1 節で用いた x_r, x_l, y_r, y_l の値は、左右のカメラ座標系での値であり、 O -XYZ 座標系と同じ単位（メートルなど）で表されるものである。これに対して、カメラで撮影された画像から直接得られる情報は、画素を単位とする画像座標系での座標である。したがって、画像座標系とカメラ座標系と

の対応関係（パラメータ）をあらかじめ求めておく必要がある。これをカメラの校正と呼ぶ。このとき、必要なパラメータはカメラ固有のパラメータであり、内部パラメータと呼ばれる。本研究で用いたカメラの場合は、試行錯誤的に次式を求めて校正を行った。この式によりレンズのひずみなども補正されているが、詳細は文献 11) を参照されたい。

$$\begin{cases} x = a_0 u + a_1 v + a_2 uv + a_3 u^3 + a_4 uv^2 \\ y = a_5 v + a_6 u + a_7 vu + a_8 v^3 + a_9 vu^2 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 (x, y) がカメラ座標系での座標値、 (u, v) が画像座標系での座標値、 $a_0 \sim a_9$ がカメラ固有の内部パラメータである。

一方、2.1 節では、標準ステレオカメラモデルとして、両カメラの光軸が平行な場合で説明したが、実際にそのようにカメラの向きの調整を行うことは、かなり困難な作業となる。そこで、現実的には、カメラを実際に設置した状態でカメラの位置と向きを測定した方が容易である。これもカメラ校正の一種で、求めるカメラの位置や向きなどは外部パラメータと呼ばれる。本研究では、まず、カメラの位置について両カメラの光学中心を通る線を X 軸とし、それらの中点を原点 O 、鉛直上向きに Y 軸と定義した。その上で、XYZ 座標が分かっている点を少なくとも 1 点用意し、両カメラで撮影して画像上での座標を求める。加えて、両カメラに共通して写っている点（XYZ 座標は未知でよい）の座標が何点か得られれば、これらから両カメラの向きを求めることができる¹¹⁾。両カメラの向きが分かれば、座標変換により図1に示した標準ステレオカメラモデルに変換すればよい。

2.3 計測精度の例 以上のような方法を用いて実際に海上を航行する船舶の位置計測を想定した実験を行った。その結果は文献 11) で詳しく述べているので、ここでは簡単に要点のみ紹介する。実験場所は明石海峡で、舞子側から明石海峡大橋を含む海上の画像を2台のカメラにより 12 組撮影した。その例を図2に示す。なお、掲載の画像は、2.2 節で示した方法によりカメラのひずみや向きを補正し、標準ステレオカメラモデルの状態に変換している（左右に黒い部分があるのはそのためである）。使用したカメラは、民生用のデジタルビデオカメラ（2台とも同機種）で、使用画角は約 43° である。画像は静止画として記録し、解像度は 2048×1512 画素である。また、カメラの基線長（2.1 節の L_B ）は 8.14m である。この値は、短いほど奥行き方向（ Z 軸方向）の計測結果に誤差が生じやすくなるため、ある程度長い方がよいが、カメラを船舶に搭載することを想定して約 10m を目安に設定した。

(a) 左画像

(b) 右画像

図2 実験で用いたステレオ画像の例 (補正済)

以上のような条件の下で、明石海峡大橋の2本の主塔の先端の位置を計測し、これを地図から求めた値と比較した。結果を表1に示す。なお、 X 軸については、前述のようにカメラを基準として決めているため、実際の地理上の向きの特定が困難である。このため、座標変換を施して X 座標の値が地図と本手法とで整合するように調整した。結果を見ると、奥行き方向(Z 軸方向)、特に奥側の主塔で誤差がやや大きくなっているが、それでも平均二乗誤差が約5%であり、比較的高い精度で計測できていることが分かる。

表1 明石海峡大橋主塔の位置計測結果

	手前側主塔			奥側の主塔		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
地図による位置	-35	292	936	70	292	2924
本手法平均値	-35	295	918	70	293	2815
本手法平均二乗誤差	1.3	7.8	26.2	4.1	16.5	160.0

3. 海上画像からの船舶等の検出

3.1 方法の概略 前章では、ステレオ画像計測の原理と計測結果の実例を示したが、そこでは述べていないもう一つの重要な点は、画像中から対象物を検出し、左右の画像間での対応関係を求めることである。ここでは、海上の画像から船舶やその他の障害となりうる物体を検出する手法を説明する。まず、その概略を示すと以下ようになる。

(ステップ1) メディアン(中間値)フィルタによりノイズを除去する。

(ステップ2) 左画像において、対象領域を横方向に走査していき輝度値が大きく変化する点を検出する。

(ステップ3) ステップ2で検出した点の近傍の領域について、右画像中から相関の高い領域を探す。この

とき、左右の画像間で高い相関が得られない場合は、その元の検出された点をこれ以後無視する。

(ステップ4) 検出された左右の画像の対応点からその点の三次元位置を求める。この位置が対象とする海域外になるような場合は、その点を無視する。以上の操作により残った点が船舶あるいは海上の構造物であると推定できる。

以下、各ステップについてももう少し詳しく説明する。

3.2 ステップ1 メディアンフィルタは、対象とする画素の近傍の画素の値(輝度値やRGB値)を調べ、その中間値を対象画素の値とするフィルタである。これにより、他の平滑化フィルタと比べて画像の輪郭構造を比較的保ったままノイズを除去することができる。本研究では、船舶等の検出対象物の像に対する影響とノイズ除去効果を考慮した結果、 7×7 画素の大きさのメディアンフィルタを用いた。

3.3 ステップ2 ステップ2では、船舶やその他の物体の輪郭部分を検出する。その手法は、まず、対象となる海上の領域において横方向に画像を走査して各画素の輝度値を調べる。例として、図2(a)の海上部分を拡大したものを図3(a)に、同図中に黒の点線で示したライン上の輝度値を図4に実線で示す。つぎに、この輝度値が急激に変化している部分を検出する。それには、この輝度値の移動平均をとり(図4の点線)、輝度値のグラフと移動平均のグラフが交差する点を求める。このとき、輝度値と移動平均値のグラフで囲まれる部分の面積を調べ、面積が小さい場合は交差していても無視する。これを模式的に表したのが図5である。同図の例では、交点P、Qは選ばれるが、交点Rはその前後の囲まれる部分の面積が小さいため選ばれない。これにより、ノイズなどの影響を避けることができる。図4の例では、A~Hで表した8個の交点を検出され、これは図3(a)のA~Hで示した白い点の部分にそれぞれ対応している。以上の操作を対象領域全域

図3 船舶等の検出過程

図4 ステップ2での輝度値の例

図5 輪郭部の検出方法

にわたって繰り返すことにより、図3(a)に白点で示したように画像中から主な輪郭部が検出される。

3.4 ステップ3 ステップ2で検出した点について、左右の画像間の相関を調べる。これは、図6に

示すように、まず、検出した点の近傍の領域と最も高い相関値を持つ領域を右画像から検出する。ここで相関値とは、次式で表される正規化相関値を用いた。

$$r = \frac{\sum_{u,v \in A} (R_{lr} + G_{lr} + B_{lr})}{\sqrt{\sum_{u,v \in A} (R_{ll} + G_{ll} + B_{ll}) \sum_{u,v \in A} (R_{rr} + G_{rr} + B_{rr})}} \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} R_{lr} &= r_l(u,v)r_r(u,v), \\ G_{lr} &= g_l(u,v)g_r(u,v), \\ B_{lr} &= b_l(u,v)b_r(u,v), \\ R_{ll} &= r_l^2(u,v), \\ G_{ll} &= g_l^2(u,v), \\ B_{ll} &= b_l^2(u,v), \\ R_{rr} &= r_r^2(u,v), \\ G_{rr} &= g_r^2(u,v), \\ B_{rr} &= b_r^2(u,v) \end{aligned}$$

で表され、 $r_l(u,v)$ は左画像 (添え字 l) の (u,v) 座標の赤色成分の値であり、他も同様に g は緑色成分、 b は青色成分、添え字 r は右画像を表している。ただし、 (u,v) 座標は対象とする領域 (領域 A) を基準としている (図6参照)。

つぎに、今度は逆に、検出された右画像の領域と最も高い相関値を持つ領域を左画像から検出する。この検出された領域が、左画像中の元の領域と一致すれば、左右の画像間に高い相関があるとみなす。これが一致しなければ、左右の画像間で対応がとれないため、船

図6 左右の画像間の相関関係の検出方法

船舶等として検出する対象から外す。

以上の例を図3 (b)に示す。図中の白い点が左右の画像間で対応がとれた点である。図3 (a)のステップ2の結果では、白の両矢印で示した船舶等がない海上の部分で多数の点が検出されているが、ステップ3を実行した結果、その誤検出がかなり減少しているのが分かる。このように左右ペアの画像を用いることで検出の精度を上げられることが、位置計測が可能となる以外にステレオ画像を用いるもう一つの利点である。

3.5 ステップ4 最後に、ステップ3で検出された左右の画像の対応点からその点の三次元位置を求める。この位置が対象とする海域外になるような場合は、その点を無視する。以上の操作により残った点を図3 (c)に示す。これが最終の検出結果であり、この例では、同図(b)では検出されていた三脚(黒の破線で囲った部分)が対象外として除かれている。なお、この三脚はカメラの校正のために設置したものである。

結果として、船舶の主に船首と船尾部分、主塔の基礎部分がうまく検出されている。ただし、海上の波等が誤検出のまま少し残っている。

4. 船舶等の検出実験結果

4.1 実験方法と結果 上述の方法を12枚のステレオペア画像(2.3節で説明したものと同一)を用いて検証した。結果をまとめたものを表2に示す。表中の数字はそれぞれ検出された点の数である。

例えば、図2および3で使用した画像は表2のNo.4

表2 船舶等の検出結果

番号	船舶1	船舶2	船舶3	主塔	誤検出
No. 1	23	0		12	1
No. 2	48(5)	13	16	28	1
No. 3	99	4	11	12	1
No. 4	106	5	9	18	6
No. 5	5	4		21	3
No. 6	8	25		29	1
No. 7	32(4)	26(1)	2	24	4
No. 8	30	0		24	4
No. 9	4	1	0	17	0
No. 10	21	3		25	0
No. 11	21(3)	9		27	1
No. 12	28			27	8

にあたるが、そこには3隻の船舶が写っている。それらを船舶1～船舶3と表している。ただし、No.1から12までの画像の間で、写っている船舶は逐次入れ替わっているため、船舶1がすべて同じ船舶を指しているわけではない。図3 (c)で示したように、船舶1(左側の手前に大きく写っている船舶)について106個の点、船舶2(画像中央やや右手にかすかに写っている船舶)では5個の点、船舶3(右側の遠くの船舶)では9個の点が検出されている。なお、図3では点の数がそれほど多く見えないが、これは各点が重なっているためである。同様に主塔の基礎部分で18個の点が検出されている。最後に誤検出と記されている欄は、実際には何もない海上部分で、橋の陰や波などが検出されてしまった場合で、No.4の例では6点あったことを示している。

また、括弧内の数字は、船舶を検出するにはしたが左右の画像間の対応が正しくとれておらず、位置検出の結果に大きな誤差が生じている点の数である。この原因は、船首や船尾などの特徴のはっきりした部分ではなく、船体中央等が検出されたためで、特に、主塔の陰に船舶が半分隠れている様な場合、あるいは、画像の左右端で船舶が途切れてしまっている場合に生じやすい。

4.2 考察と課題 表2の結果より、ほぼ正しく船舶および主塔の基礎部分が検出できていることが分かる。ただし、課題が少し残っている。一つは、画像中に船舶が写っているにもかかわらず検出できなかった場合で、No.1, 8, 9の画像で生じている。これは、写っている船舶がかなり遠方にあり、当該画像を肉眼で見てもほんのかすかにしか見えないためである。二つめの課題は、誤った点を検出してしまうことで、今

回の例では、海上部の橋の陰を検出してしまうケースが多かった。そのほか、船舶によって生じる波を検出してしまう例もある。また、前述のように船舶を検出しても、左右の画像間の対応点が正しくなく、三次元位置計測の結果に誤りが生じる場合がある。

上述の課題については、以下のような対策が考えられる。前者の遠方の船舶の検出については、まず、より高解像度のカメラを使用することや、望遠レンズ(あるいは、ズームレンズの望遠側)を用いて撮影することが考えられる。要するに、ハードウェア側での対応で、これは、例えば、夜間で通常の可視光カメラが使えない場合に赤外線カメラを用いるなどして対応することと同種の策である。

つぎに、ソフトウェア側での対応としては、3章で説明した各検出時に用いるしきい値を緩くすることで、かすかな像でも検出しやすくなる。ただし、同時に後者の課題として挙げた誤検出も増えてしまうことが予想される。したがって、後者の課題の対策と併せて考える必要がある。その対策としては、左右の画像間の対応関係をより厳密に求めることが考えられる。さらに、いまは、それぞれ独立した点としてしか検出していないが、それらの点のクラスタリング処理を行い、どの対象物を構成している点であるのかを求めることで、対象外の点を識別できると思われる。

なお、処理時間については、現在のところ1組のステレオペア画像の処理に、Pentium 4 - 3.2GHz、メモリ 1GB の PC (OS は Windows XP、プログラム開発は Microsoft Visual Studio 2005 および Intel C++ コンパイラ) を用いて約 25 秒かかっている。リアルタイム処理を行うには、処理速度を考慮したアルゴリズムの改良およびプログラムの実装方法も検討していく必要がある。

5. おわりに

本論文では、ステレオ画像から海上を航行する船舶等を検出する手法について検討した。明石海峡で撮影した実際の画像を用いて検証したところ、概ね良好な結果が得られた。もちろん、気象・海象条件によっては視界が極端に悪く、提案手法が全く使えない場合もあると思われる。しかし、安全確認のための手段が多いに越したことはなく、従来の航海計器を補う目的としては十分可能性があることを示すことができたと考ええる。

今後は、4.2 節で述べた課題についてさらに検討し手法の改良を重ねるとともに、様々な条件下での有効性の検証を続けていきたい。また、今回は、検出した船舶の位置計測結果については検証できていない。こ

れは、実際の船舶の位置が不明であることと、左右の画像撮影時のタイミングがわずかにずれてしまったため動体の計測精度が悪化していることも原因である。本研究の最終的な目的は、船舶の位置を計測し、さらに、連続的に観測することにより船舶の速度や針路を求めることにある。したがって、この点についても確認を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 足立ほか1名, 信学論, J89D-1 (平 18-1), 74-83.
- 2) R. Labayrade et al., IEICE Trans., E89-D-7 (2006-7), 2092-2100.
- 3) E. Segawa et al., IEICE Trans., E89-D-7 (2006-7), 2101-2107.
- 4) 関ほか1名, 信学論, E89D-8 (平 18-8), 1859-1868.
- 5) Y. Sato et al., Control Engineering Practice, 6 (1998), 1141-1149.
- 6) 新保ほか2名, 日航学論, 111 (平 16-9), 181-191.
- 7) 新保ほか2名, 日航学論, 113 (平 17-9), 115-126.
- 8) 桐谷ほか1名, 日航学論, 113 (平 17-9), 107-113.
- 9) K. Takahashi et al., IEICE Trans., E88-D-2 (2005-2), 230-237.
- 10) 林ほか2名, 電学論, 113-C-12 (平 5-12) 1121-1129.
- 11) S. Yamamoto et al., Proc. of Techno-Ocean 2006/19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium, (2006-10) Paper No. 38.