レーダ映像の合成による形状推定に関する研究 —複数のレーダによる合成実験—

石渡 隼也*・藤坂 貴彦**・今津 隼馬**

Study of Estimating Shape by Integrating Radar Images -Integration Experiment by Use of Multi-Radar-

Junya ISHIWATA Takahiko FUJISAKA and Hayama IMAZU

Abstract

We have proposed a method to estimate the shape of a ship by means of the integration of radar images obtained by the observation from some directions. In making this method fit for practical use, the observation by multi-radar set on a land or a ship is needed. In this case, the estimation can be affected by errors included in the obtained images. And they are errors in the range direction and the cross range direction of each radar. Therefore, estimating the shape of a ship by integrating the images should be carried out after applying an adjustment of them.

In this study, an adjustment method for correcting the errors is proposed. And the accuracy of the estimation of a shape is cleared by an experiment. As results of the experiment, the accuracy of about 2 degrees in direction, about 14 meters in length and about 9 meters in beam was obtained.

Keywords : Image Integration, Estimating Shape, Bearing Error, Distance Error

キーワード: 映像合成、形状推定、方位誤差、距離誤差

1. まえがき

2002 年 7 月より搭載が始まった船舶自動識別装置(Automatic Identification System : AIS)により、位置、速度、針路といった動的情報から、MMSI、船体の長さ、幅といった静的情報まで数多くの情報を得られるようになった。しかし、AIS は全船舶に搭載義務が無く、また送信を停止している船舶も存在することから、情報が必ずしも得られるわけではなく、今後もレーダによる海上交通監視の必要性は変わらないと考えられる。ここで、海上交通の特性を把握するためには、通航隻数や船舶の形状といった情報が必要であり、これまでにレーダ映像から船舶の形状を推定する研究がなされている^{(1),(2)}。しか

し、電波の性質上、レーダ映像とその形状が一致するのはレーダ反射面であり⁽³⁾、従来、この性質を考慮した検討はされていない。

このような背景から、筆者らは前報⁽⁴⁾にて、ある対象を複数のレーダを用いて観測し、その電波照射面の映像を合成することで、対象の形状を推定する方法を提案した。そして、その形状の長さや幅を推定するために好ましい観測方向を明らかにした。

ここで、このとき行った実験では、レーダを搭載した船舶にてその周囲を周り、観測の時刻を変えることで、異なる方向からの船舶の観測を行った(対象船舶を AIS 船舶としたので、異なる観測時刻による対象のずれを補正した上で形状推定に用いてい

* 学生会員 東京海洋大学大学院 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6) jishiwa@e.kaiyodai.ac.jp

** 正会員 東京海洋大学海洋工学部

Fig.1 Concept image in this study

る。)しかし、実際の運用にあたっては、Fig.1に示されるように、陸上や船舶といった様々な異なるレーダからの観測を考慮する必要がある。

ここで、複数の異なるレーダにより、ある対象を観測すると、その得られた映像情報は、それぞれのレーダの持つ誤差の影響を受けることがある。これは、それぞれのレーダにおいて、例えばパルス幅、ビーム幅、使用するレーダ画面の画素あたりの分解能が異なることや、またジャイロの示す北と真北との方位のずれによる影響であり、こうした影響を受けた映像からは、形状の推定が上手く行えない。従って、複数のレーダ映像の合成にあたっては、その得られた映像に影響する誤差を補正した上で、その形状推定を行う必要がある。

本研究では、複数の異なるレーダにより観測された映像を合成する際に問題となる、それぞれのレーダの誤差による影響を除去するための方法を提案する。そして、陸上レーダと船舶搭載レーダ、2台の異なるレーダを用いて船舶を観測する実験を行う。そして、それにより得られた映像に、提案したレーダの持つ誤差を除去する方法を適用し、その影響を補正した上で、その形状（向き、長さ、幅）の推定を行う。

2. レーダの映像合成による形状推定

2.1 レーダの持つ誤差

本方法では、レーダにより得られた映像を位置情報に変換し合成を行っている。このとき、レーダが持つ誤差によってその位置情報にずれが生じてしまうことがあり、このずれに影響する誤差として、方位誤差と距離誤差がある。

方位誤差は、レーダアンテナの北方向と真の北方

向との不一致と、レーダ映像の方位拡大効果により生じる。

距離誤差は、パルス幅に依存するレーダの距離分解能による測定結果の曖昧さと、Fig.2に示すような、基準とする受信タイミングと受信信号時刻とのずれにより生じる。

T_0 : Reference time of a synchronization signal

Δt : A difference between each timing

Fig.2 Difference of each timing

また、映像から位置情報への変換は、レーダ画面の画素に対応する長さや観測レーダの位置情報を元に行われる。このことから、ある対象が存在する画素の位置座標を (x_c, y_c) としたとき、その画素の大きさ内で、その対象が存在する真の位置座標 (x, y) と画素の位置座標との差により位置情報がずれることがある。

そして、これらの位置座標の線分が、レーダと対象からなる極座標系である距離方向と方位方向に射影されたとき、それらが方位誤差と距離誤差の双方に影響を及ぼしてしまう。

以上のことから、方位誤差 ε_θ は、(a)アンテナ北方向と真の北方向との誤差、(b)レーダ映像の方位拡大効果による誤差、そして(c)画像の分解能の制約による誤差をそれぞれ $\varepsilon_{\theta n}$ 、 $\varepsilon_{\theta b}$ 、 $\varepsilon_{\theta px}$ としたとき、

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta n} + \varepsilon_{\theta b} + \varepsilon_{\theta px} \quad (1)$$

とあらわされる。

また、距離誤差 ε_R は、(d)パルス幅に依存する距離分解能による測定結果の曖昧さ、(e)受信タイミングと受信信号時刻のずれ、(f)画像の分解能の制約による誤差をそれぞれ ε_{Rpw} 、 ε_{Rt} 、 ε_{Rpx} としたとき、

$$\varepsilon_R = \varepsilon_{Rpw} + \varepsilon_{Rt} + \varepsilon_{Rpx} \quad (2)$$

とあらわされる。ここで、誤差(a)はアンテナ設置に伴うバイアス誤差、(b)、(e)はレーダの諸元によるバ

イアス誤差である。そして、(c)、(d)、(f)は輝点の真の位置と、パルス幅や使用画素の分解能の制約により生じるランダム誤差である。

2.2 調整方法

ここでは、2-1 で述べられた方位誤差と距離誤差を調整する方法について述べる。

この方法は、ある陸上物標を定め、その物標のレーダ映像と地図データとの比較を行い、これらが一致するような方位角と距離の補正値を求めるものである。ここで、その基準として使用する地図データを Fig.3(a)に、レーダ映像データを Fig.3(b) に示す。また、地図データとしては、google 社の GoogleEarth の衛星写真画像を用いている。

(a) A map image

(b) A radar image

Fig.3 The land images of a map and a radar

ここでは、基準となる陸上物標として、Fig.3(a),(b)の○に囲まれているシンボル横浜港タワー付近岸壁(緯度:N35° 25' 21"、経度:E139° 41' 26")を用いる。この陸上物標を例とした調整方法は以下の①～③の手順で行われる。また、その調整の進行例を Fig.4 に示す。

①: マップとレーダ映像 (Fig.4(a)) において、観測レーダからみて、定めた陸上物標の表面となる輝点を沿岸として抽出し、その輝点を位置情報 (Fig.4(b)) に変換する。このとき、レーダ映像はクロスレンジ方向にビーム幅相当分、映像が拡大しているので、その方位拡大処理を行いその影響を除去⁽⁴⁾した後に位置情報に変換される。すなわち、この段階で、2-1 で挙げられた方位誤差の原因の一つである、(b)レーダ映像の方位拡大効果による誤差が補正される。また、ここでは、映像から変換されたその位置座標を、観測レーダ位置 (東扇島レーダ位置) を原点とした xy 座標 (単位:m) として扱っている。

②: その沿岸を構成する位置情報点列に対して、回帰直線を引く (Fig.4(c))。ここで、回帰直線はレーダ、マップ側でそれぞれ二本引かれる。ここでは、説明のために、レーダ側の線を Line(radar1)、Line(radar2) とし、マップ側を Line(map1)、Line(map2) とする。

③: Fig.4(d) に示すように、それらの回帰直線が合成される。そして対応する回帰直線同士、line(radar1) と line(map1)、line(radar2) と line(map2) における、それぞれの距離 d_1 と d_2 の和 d が最小となるような、レーダ側の直線の回転角、距離の補正値を求める (Fig.4(d))。この直線の距離 d_1 、 d_2 、 d はそれぞれ、

$$d_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_n^{\text{radar } 1} - x_n^{\text{map } 1})^2 + (y_n^{\text{radar } 1} - y_n^{\text{map } 1})^2 \quad (3)$$

$$d_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_n^{\text{radar } 2} - x_n^{\text{map } 2})^2 + (y_n^{\text{radar } 2} - y_n^{\text{map } 2})^2 \quad (4)$$

$$d = \frac{1}{2} (d_1 + d_2) \quad (5)$$

とあらわされる。ここで、 $(x_n^{\text{radar } 1}, y_n^{\text{radar } 1})$ 、 $(x_n^{\text{radar } 2}, y_n^{\text{radar } 2})$ 、 $(x_n^{\text{map } 1}, y_n^{\text{map } 1})$ 、 $(x_n^{\text{map } 2}, y_n^{\text{map } 2})$ は、レーダとマップで比較される直線において、x 軸に等間隔に作成された点列であり、それぞれのラインの交点の x 座標からマップ上の一番端の輝点の x 座標までの範囲で作成される。直線の距離は、このようにして作成された点列において対応する点同士の距離の平均値であらわされる。また、 d_1 、 d_2 はそれぞれ、line(radar1) と line(map1)、line(radar2) と

line(map2)において作成された点列の距離である。

以上の手順で求められた補正值は、方位が 1.2° 、距離が 36m であり、Fig.4(e)はその得られた補正值で、位置情報を補正した後の合成結果である。

ここで、今回のケースは、陸上物標として観測レーダから距離 6.12NM、方位 225° の位置にある岸壁を選んだ。また、用いたレーダのパラメータは、パルス幅 $0.4\mu\text{sec}$ 、ビーム幅 0.8° 、一画素の一辺の長さ約 18m である。この場合、式(1)、(2)によって得られるバイアス誤差を除いた方位誤差と距離誤差の最大値は、方位誤差が 0.0007° 、距離誤差が 72m 以内となる。この値と、得られた補正值を比べると、方位誤差はバイアス誤差の影響が大きいことがわかる。これは、方位誤差におけるランダム誤差である画素と対象の位置のずれは、基準となる陸上物標が遠いほど、その影響が少なくなることから明らかである。ここで、その距離による方位の誤差は、1NM で 0.004° 程度、3NM で 0.001° 程度であり、ここでの方位誤差の補正によって、影響の大きいバイアス誤差の補正に対処できる。

また、距離誤差において方位誤差に比べてその影響が大きいランダム誤差に関しては、実際の処理では、この影響を取り除くために、数点陸上物標の選定を行うか、あるいは同じ陸上物標を数回観測することで得られた補正值の平均を取ることで対処する。

2.3 形状推定方法

本方法において推定される形状は、対象の向き、長さ、幅としている。

対象の形状は、得られたレーダ映像を位置座標に変換し、2-2 で提案した誤差の調整方法により補正を行った後、楕円回帰を当てはめ、その傾き、長径、短径をそれぞれ形状の向き、長さ、幅として形状推定を行う。ここで、得られた映像データは、構造物による多重反射といった影響を受けてしまうことがあるため、楕円回帰の当てはめの前に、こうした影響を受けたデータをカットラインにより棄却する⁽⁴⁾。カットラインとは、レーダに一番近い輝点である映像測定点とレーダを結ぶ線に直行した線が、その映像測定点を通るようにひかれた線である。カットラインは、そのラインとレーダの間には物標が存在しないと判断するラインであることから、複数の映像を合成した際に、あるレーダとそのカットラインとの間に存在している、他のレーダで観測された多重反射の影響を受けた輝点を除去することができる。

(a) Each land image from the (a) and (b) of Fig.3

(b) Each position data of map and radar

(c) Each position data and regression line

(d) Integration of each regression line

(e) Adjustment Result

Fig.4 Process of the adjustment method
(Left images are "Map data" and Right images are "Radar data" in (a), (b) and (c))

そして、残った点列に楕円回帰を当てはめ、向きとその長径を長さ、短径を幅とすることで形状を推定する。このとき、点列の並びによっては、回帰楕円が点列よりも外側に大きく外装してしまい、形状が大きく推定されてしまうことがある。そこで、カットラインとそのレーダの間には物標が存在しないことより、Fig.5 に示される楕円の白色の部分には物標が存在しないと判断できることから、その回帰楕円とカットラインに囲まれた灰色の部分に推定された形状となる。そして、その囲まれた部分における長径と短径が、それぞれ長さ、幅となる。また、向きはその楕円の長径の傾きから求められる。

Fig.5 An estimated shape

3. 実験による形状推定の評価

本研究で提案した方法の有効性を評価するため、川崎東扇島沖合にて AIS を搭載している停泊船舶を探し、それを東京海洋大学の調査研究船汐路丸と東扇島陸上レーダの2台のレーダを用いて多方向からその停泊船舶を観測し、それにより得られた映像を合成し、その形状を推定する実験を行った。ここで、本実験では、実験結果と真値を比較するために AIS を搭載した対象船舶(船名: ANDESHIGHWAY、長さ: 155m、幅: 27m)を観測対象としているが、本方法は対象船舶の観測をレーダのみで行うことから、実際の対象船舶は AIS を搭載していない船舶も観測することができる。

3.1 実験方法と緒元

本実験における対象船舶と、観測レーダの位置を示した図を Fig.6 に示す。

Fig.6 The positions of each radar and the object

図中の番号は、①が東扇島レーダ、②と③が対象船舶を観測した汐路丸の位置、すなわち観測レーダの位置であり、塗りつぶされた楕円の印が対象船舶である。また、図中には対象船舶から見た、それぞれのレーダにより観測された方向と距離が示されている。

また、観測レーダ②と③は、同じレーダにより観測を行っているため観測時刻が異なっているが、今回観測した対象船舶は AIS を搭載した停泊船舶であることから、観測時刻ずれによる位置の差は、同時刻に観測したものとして扱うため、AIS データを基にあらかじめ補正してある。また、対象船舶の向きは①と②、③のそれぞれの観測時刻において同じ船首方向(24°)である。Table1 に本実験において用いた東扇島レーダ、汐路丸搭載レーダの諸元を、Fig.7 に対象船舶の写真を示す。

また、今回、オフセットに使った地点は、東扇島レーダがシンボル横浜港タワー付近岸壁(緯度: N35°25'21"、経度: E139°41'26")、レーダビーコン(緯度: N35°24'53"、経度: E139°45'19")であり、汐路丸搭載レーダが大黒ふ頭岸壁(緯度: N35°27'18"、経度: E139°42'08")、扇島岸壁(緯度: N35°27'51"、経度: E139°42'45")である。ここで、こうした陸上物標を選ぶ基準として、沿岸が抽出しやすいように、岸壁の角といったようにエッジが利いており、ビルや複雑な構造物が周囲にない場所を選んだ。また、これらにより求められるそれぞれのレーダの補正值は、方位誤差、距離誤差にランダム誤差が含まれることから、各レーダにおいて基準と

した陸上ごとにその補正值が異なるため、それら平均値をとることで、各レーダの補正值を求めている。

このようにして求められた補正值は、東扇島陸上レーダでは、シンボル横浜港タワー付近岸壁で方位 1.2° 、距離 36m、横浜港沖合レーダビーコンで 1.2° 、24m であることから、その補正值は 1.2° 、30m となった。そして、汐路丸レーダでは、大黒ふ頭岸壁で -0.9° 、16m、扇島岸壁で -0.8° 、50m であり、その補正值は -0.85° 、33m となった。

Table1 The parameters of radars used in this experiment

	Higashi Ogishima Radar	Shiojimaruru Radar
Frequency	9410 $\pm$ 30MHz	9410 $\pm$ 30MHz
Pulse Width	0.4 μ sec	0.8 μ sec
Beam Width	0.8 $^\circ$	0.8 $^\circ$

Fig.7 The observed ship

3.2 実験結果

東扇島陸上レーダ、汐路丸レーダによる合成結果を Fig.8 に示す。ここで、Fig.8 の●は Fig.6 における位置①からの東扇島陸上レーダによる観測結果、▲は位置②からの汐路丸搭載レーダによる観測結果、◇は位置③からの汐路丸搭載レーダによる観測結果である。また、図中の四角形は、AIS データから求めた実際の対象船舶の形状（長さ、幅、向き）を表している。また、Fig.8 は 2-2 の調整方法による補正後の結果である。

そして、Fig.8 に示される各レーダから得られた映像の位置情報の点列から、2-3 で述べた形状推定方法を用い、対象の形状を推定する。Fig.8 の点列により得られた回帰楕円とカットラインにより処理された長さと幅を Fig.9 に、その推定結果を Table2 に示す。Table2 に示された結果として、今回の実験では向き 2.4° 、長さ 13.6m、幅 9.1m 程度の誤差

で形状を推定できた。また、楕円の外装に対処するためのカットライン処理を用いない場合の推定値 (Fig.9 における回帰楕円による値) が、長さが 279.7m、幅が 36.1m、向きが 21° となり、楕円回帰とカットラインとの組み合わせにより、形状の推定精度を上げることができたことがわかる。

- : The data observed from ① in Fig.6
- ▲ : The data observed from ② in Fig.6
- ◇ : The data observed from ③ in Fig.6

Fig.8 The result of the integration

Fig.9 The estimation of the length and beam by the ellipse and the cutlines

Table2 The result of the estimation

	Direction (°)	Length (m)	Beam (m)
Estimated value	21.6	168.6	36.1
True value	24	155	27

4. まとめ

複数の異なる種類のレーダにて、船舶を多方向から観測し、船舶の形状を推定した。このとき、各レーダの持つ誤差である方位誤差、距離誤差の調整を行う方法を提案し、複数のレーダから得られた映像から船舶の形状を推定する実験を行った。

その結果として、今回の実験では、向き 2.4° 、長さ 13.6m、幅 9.1m 程度の誤差で形状を推定することができ、この結果から従来の研究^{(1),(2)}に比べ同等以上の精度を得ることができ、レーダを用いたより高い精度での船舶監視の可能性を示すことができた。このようにして、合成に影響を及ぼすレーダの誤差を調整することで、様々なレーダにより観測された映像、例えば観測対象の周囲に存在する船舶のレーダにより観測された映像を用いることができ、前報⁽⁴⁾で明らかにした形状推定における好ましい観測方向からの映像データをより多く得ることができるようになり、船舶監視における観測精度向上につながると考えられる。

また、今回の実験では停泊船舶を対象として形状推定を行ったが、今後は航行船舶を観測した場合のずれや、複数レーダの観測時刻のずれの影響の検討を予定している。

参考文献

- (1) 庄司るり、萩原秀樹、大津皓平、林尚吾、浪江宏宗：東京湾における船舶交通観測レーダネットワークシステムの研究，日本航海学会論文集 第 109 号 pp.69-78, 2003
- (2) 井手麻奈美、林尚吾：レーダ画像処理による船形の推定 日本航海学会論文集 第 82 号原稿
- (3) 今津隼馬：避航と衝突予防装置，成山堂，pp.34-39, 1984.12
- (4) 石渡隼也、藤坂貴彦、今津隼馬：レーダ映像の合成による形状推定に関する研究，日本航海学会論文集 第 114 号 pp.251-257, 2006

謝辞

本研究にあたって、東扇島陸上レーダのデータを提供して下さった東京海洋大学萩原研究室の皆様

に感謝の意を表します。

質疑応答

新井康夫（海技大学校）：

講演中にマップマッチングの説明をされた時に、レーダの方位拡大効果についての説明が無かったのですが、実際には対応されているのでしょうか？

石渡隼也：

ご質問ありがとうございます。

本研究では、レーダのビーム幅情報を元に、方位拡大効果処理した上で、合成やマップマッチングにその映像情報を用いております。その処理に関する詳細は前報⁽⁴⁾に記述しております。

全炳東（千葉大学）：

使用している「マップ」(リモートセンシング画像)の幾何学的な(形状としての)精度は十分か？

石渡隼也：

ご質問ありがとうございます。

今回オフセット用のマップとして、google 社が提供している衛星画像の表示ソフト、GoogleEarth のマップデータを用いております。今回の使用にあたっては、陸上物標とマップと海図の位置を比較し、その差が 10m 程度であることを確認した上で使用しており、照合として使用するには十分なものであると考えられます。