海上ニアミス回避システムへのアプローチ[†]

佐藤 祐司*・石井 弘允*

Study on the Collision Avoidance System for Ships

Yuji SATO* and Hiromitsu ISHII*

Recently, the avoidance from ship collisions becomes a mandatory problem in the viewpoint of maneuvering ships safety in crowded or crossing areas. Today, information for the steering is mainly limited to pilot's eye measurement and radar information.

As for radar information, the detecting the course direction or turning of a target vessel urgently and accurately with an accuracy is difficult. Moreover, information on the bigness and the altering course of a target vessel obtained by eye measurement is regarded as seriously important for the avoidance. Then, the authors have studied on the collision avoidance systems that make use of image information instead of eye measurement.

In this study, they obtain a method for measuring course of a target vessel and evaluation of the collision risk by the extracted image of target from IR image.

As the result of this study;

(1) The image of the vessel is extracted from IR image base on the threshold set method by using area information.

(2) The course and the length of a target vessel are obtained from the number of the pixels corresponding to horizontal length of the vessel. And the altering course of a target vessel is detected on real time.

(3) As for the direction of the prow of the target vessel, it is done from the specified centroid of the vessel image.

(4) The amount of the altering course necessary for avoidance is obtained from the meeting condition predicted from radar and the image. And effect is evaluated.

It is demonstrated and evaluated that the effective and simultaneous use of radar and the image can improve the performance of collision avoidance.

Key Words: ships, collision avoidance, infrared images, image processing.

1. はじめに

近年、船舶交通量の増加にともない、船舶同士の衝突による海難事故の危険性が増大し、海上のニアミス回避が船舶安全運航上の重要な課題となっている。現在、船舶の航行に直接用いられる情報は、おもに目視情報と、レーダー情報に限られている。しかし、レーダーは、相手船の方位および距離の時間変化を追跡することによっ

てその針路を測定するため、短時間での測定精度が悪く、相手船が変針した場合の変針量を速やかに検出することは困難である。また実際の操船では相手船の大きさや船種、見かけの形状の変化による変針運動の情報が重要とされており、レーダー情報のみを使用した衝突防止支援装置では、その有効性が十分とはいえない。そこで筆者らは、可視または赤外画像の情報をレーダーと複合使用することで、目視情報を補完する海上ニアミス回避システムを構築することを目的として研究を進めている^{1)~4)}。本論文では、赤外画像処理によって抽出した船舶画像による、相手船の運動および変針量の算出ならびに会合時の危険度の評価について検討したので、以下に報告する。

[†] 第33回 SICE 学術講演会で発表(1994・7)

* 日本大学理工学部 東京都千代田区神田駿河台 1-8

* College of Science and Technology, Nihon University, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received May 15, 1995)

(Revised September 25, 1995)

2. 船舶の会合

船舶の接近・会合に至る状況では、Fig. 1 に示すように自船と相手船の最接近点(Closest Point of Approach: CPA)の船間距離を最接近距離(Distance of CPA: DCPA)、最接近点までの時間を最接近時間(Time of CPA: TCPA)といい、衝突する会合条件では $DCPA=0$ となり TCPA が衝突までの余裕時間となる。また、衝突時には、自船の進行方向を基準とした相手船の方位およびアスペクトは時間によって変化せずに接近することになる。通常、自船と相手船の針路が横切りの関係にある場合は、DCPA が避航限界距離(避航操船を行って衝突を回避できる最小距離、たとえば船舶長の5倍)より小さいと避航が必要であるといわれている。

3. ニアミス回避システム

Fig. 2 は、現在の船舶運航におけるニアミス回避の情報の流れを示したものである。同図では人による情報の処理を実線で、レーダーなど機器によるものを破線で囲んでいる。図中に示した衝突防止支援装置 ARPA (Automatic Radar Plotting Aids) は、レーダーによって得られた相手船舶の方位と距離の情報から DCPA と TCPA を予測し、衝突の危険性のある場合に警報を発するシステムである。しかし、針路情報の取得をレーダーのみで行っているため精度が十分とはいえず、誤警報の確率も高くなっている。これに対して、アスペクトやコンパス方位といった情報を得ることができれば、これらが変化せず一定のまま接近してくる船舶は衝突の可能性がある判断できる。現在これらの観測はおもに目視によって行われており、相手船舶の大きさもわかるので、そこから運動性能をも予測できる。したがって、これらの情報を総合してはじめて有効な判断が可能となるが、目視は、見損じる危険性もある。

Fig. 1 Ships meeting

そこで、筆者らは現在目視で得ている情報を、赤外線などを利用した画像より抽出し、レーダー情報と複合して使用すれば、効果的なニアミス回避が実現できると考えた。Fig. 3 はニアミス回避システムの構成である。このシステムでは、相手船および自船の運動を測定するセンサとして、レーダ、赤外線カメラおよび GPS (Global Positioning System) を用いる。まず、レーダ情報から相

Fig. 2 Information flow for avoidance

Fig. 3 Block diagram of collision avoidance system

手船の距離, 方位の時間変化を測定し, DCPA, TCPA を GPS より得られた自船の運動を用いて算出する. その結果, 衝突の可能性があると判断した相手船を赤外線カメラで撮像し, 画像処理により船舶長や運動を測定して危険度を評価する. その結果, 衝突の危険性があれば警報を発するとともに, 以後連続して危険度の評価を行い, 避航操船の時期および針路を計算する. 一連のニアミス回避情報については, 3次元グラフィックスなどを用いて操船者に表示, 伝達する.

4. 画像による相手船の運動の検出と船舶長の測定

4.1 針路・変針の検出

船舶は変針によりアスペクトおよび見かけの船舶長が変化する. Fig. 4 は, 川崎港から撮像した東京湾を航行する2隻の船舶の運動を, 撮影地点を中心とした相対座標に示したレーダープロット図である. A 船は, 大きな変針運動を行わずほぼ直進した船舶であり, B 船は2回大きな変針を行った船舶である. この2隻の船舶について, 撮像した VTR 画像(写野 6°)上での見かけの船舶長の時間的な変化を, 船舶の水平方向の画素数(画像上での画角)より測定した. Fig. 5 はその結果で, 距離により画素

Fig. 4 Ships trajectories on a radar plotting chart (in Tokyo Bay)

Fig. 5 Horizontal pixels of vessel image and distance

数が変化するため, 水平画素数と距離の積で正規化している. 図より明かなように, 水平画素数と距離の積は, 直進して接近した A 船では, ほぼ一様に増加しているが, 2回の変針運動をした B 船は変針ごとに急激に変化していることがわかる. このことは, 画像から求めた相手船舶の水平方向の画素数で, 変針運動を速やかに検知できることを示している. また, 船舶会合時の画像では, 衝突経路を接近する相手船はアスペクトが一定となるため, 水平画素数と距離の積も一定となり, 衝突の危険性の判断にも有効である. そこで, 相手船のアスペクトと船首の向きを, 画像から得た相手船の水平方向の画素数および図形重心から算出することにした.

4.2 アスペクトの算出

一般に船舶の総トン数 G , 船舶幅 B , 喫水 D の各諸元は, 船舶長 L (m) から下式を用いて近似することができる⁵⁾.

$$G = L^3 / 250 \text{ (t)} \quad (1)$$

$$B = 0.16L \text{ (m)} \quad (2)$$

$$D = 0.07L \text{ (m)} \quad (3)$$

Fig. 6 は, 相手船を長さ L , 幅を B の長方形と考えた場合の会合を示している. R は相手船までの距離, L' は相手船の対角線方向の船舶長, θ_{AS} はアスペクト, δ_k は船体とその対角線のなす角である.

ここで, $R \gg L$ の場合は,

$$L_1 = L \sin \theta_{AS}' \quad (4)$$

$$L_2 = B \cos \theta_{AS}'' \quad (5)$$

とみなすことができる. さらに $\theta_{AS} \doteq \theta_{AS}' \doteq \theta_{AS}''$ より

$$L' = \begin{cases} L \sin \theta_{AS} + B \cos \theta_{AS} & (\theta_{AS} \leq 90^\circ) \\ L \sin \theta_{AS} - B \cos \theta_{AS} & (90^\circ < \theta_{AS} < 180^\circ) \end{cases} \quad (6-1)$$

$$(6-2)$$

Fig. 6 Explanatory drawing of calculating aspect

となる。ここで

$$B = L \tan \delta_k \quad (7)$$

であるから、(6-1)、(6-2)式は、それぞれ、

$$L' = \frac{L}{\cos \delta_k} (\sin \theta_{AS} \cdot \cos \delta_k + \sin \delta_k \cdot \cos \theta_{AS}) \quad (8-1)$$

$$L' = \frac{L}{\cos \delta_k} (\sin \theta_{AS} \cdot \cos \delta_k - \sin \delta_k \cdot \cos \theta_{AS}) \quad (8-2)$$

となる。

また、(2)式の適用により $\cos \delta_k \approx 1$ となるため、(8-1)および(8-2)式は

$$L' = \begin{cases} L \sin (\theta_{AS} + \delta_k) & (\theta_{AS} \leq 90^\circ) \\ L \sin (\theta_{AS} - \delta_k) & (90^\circ < \theta_{AS} < 180^\circ) \end{cases} \quad (9-1)$$

$$(9-2)$$

となり、アスペクト θ_{AS} は L と L' より

$$\theta_{AS} = \begin{cases} \sin^{-1}(L'/L) + \delta_k & (\theta_{AS} \leq 90^\circ) \\ \sin^{-1}(L'/L) - \delta_k & (90^\circ < \theta_{AS} < 180^\circ) \end{cases} \quad (10-1)$$

$$(10-2)$$

で求められる。

L' は、画像における船舶の水平方向の画素数 W 、カメラの写野 ϕ 、画像の水平方向の全画素数 W_A およびレーダー情報から求まる相手船までの距離を R とすると

$$L' = 2R \cdot \frac{W}{W_A} \tan \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (11)$$

ただし、 $R \gg L$ とする

である。

画像からの θ_{AS} の算出にあたっては、会合初期にレーダー情報から得られる相手船の初期アスペクト θ_{AS0} 、相手船までの初期距離 R_0 および(11)式で求まる初期の対角線方向の船舶長 L_0 から、まず、初期の船舶長 L_0 を(12-1)または(12-2)式より求める。

$$L_0 = \begin{cases} \frac{L_0}{\sin (\theta_{AS0} + \delta_k)} & (\theta_{AS0} \leq 90^\circ) \\ \frac{L_0}{\sin (\theta_{AS0} - \delta_k)} & (90^\circ < \theta_{AS0} < 180^\circ) \end{cases} \quad (12-1)$$

$$(12-2)$$

つぎに、この L_0 と(11)式の L' を(10-1)または(10-2)式の $L(=L_0)$ 、 L' として θ_{AS} を算出する。以後、順次(11)式より L' を、(12-1)または(12-2)式より L を求めて更新しながら θ_{AS} を算出し、その変化を求める。

ところで、 δ_k は、船舶を長方形と考えた場合、(2)式の適用により $\delta_k \approx \tan^{-1} 0.16$ から $\delta_k = 9.1^\circ$ となる。しかし、実際の船舶は一般に船首部が三角形状をしているため、 δ_k はアスペクト θ_{AS} が小さい場合には長方形近似と一致するが、 θ_{AS} が大きい場合には差が生じる。そこで、

算出したアスペクトが $\theta_{AS} = 0^\circ$ のとき $\delta_k = 9.2^\circ$ 、 $\theta_{AS} = 90^\circ$ のとき $\delta_k = 0^\circ$ として、この間にはアスペクト θ_{AS} に比例して δ_k を変化させることにした。

4.2 相手船の船首方向の検出

一般に船舶を横方向から撮像すると前後方向は非対称であり、船舶画像の図形重心の位置は、アスペクトによって変化する。たとえば上部構造物が船体後部寄りにある場合は、船首が左向きするとき図形重心は右寄りとなる。したがって、レーダー情報より会合初期の相手船の移動方向がわかれば、その後は図形重心を算出することで船首の向きを判断できる。

いま、赤外線カメラより得られた画像の、2値画像の領域を J とすれば、 J の p, q 次モーメント $M(p, q)$ は、

$$M(p, q) = \sum_{(x,y) \in J} x^p y^q \quad (13)$$

で与えられる。ここで、 (x, y) は領域 J に含まれる画素の座標である。ところが、船舶は左右対称の部分が多く、また前後方向についてもあまり変化がないので、形状の図形重心は中央部に近く、アスペクトの変化に対し図形重心の移動が小さい。そこで、Fig. 7 に示すように y 軸方向の長さを拡大することで面積の重付けを行い、船舶の上部構造物部分を強調し、アスペクトの変化による図形重心の移動を大きくした。重付けには、(14)式に示す指数関数を用いた。重付け後の p, q 次モーメント $M_w(p, q)$ は(15)式より求める。

$$W(y) = e^{(y-y_{\min})} \cdot y - y_{\min} + 1 \quad (14)$$

$$M_w(p, q) = \sum_{(x,y) \in J} x^p y^q \cdot W(y) \quad (15)$$

この結果、領域 J の図形重心座標 (m, n) は

$$m = \frac{M_w(1, 0)}{M_w(0, 0)}, \quad n = \frac{M_w(0, 1)}{M_w(0, 0)} \quad (16)$$

ただし

$M_w(1, 0)$: x 軸方向の1次モーメント

$M_w(0, 1)$: y 軸方向の1次モーメント

$M(0, 0)$: 領域 J の全画素数

となる。

Fig. 7 Weighted and real centroids of vessel image

5. 船舶画像の抽出

船舶画像の抽出とデータ処理速度の高速化を図るため、レーダー情報に基づくウィンドを設定し処理を行った。

Photo. 1 は、冬季の船舶の赤外画像である。波長は8~12 μm 帯であり、画像では放射温度の高い部分ほど白く表示している。

画像処理は、まずレーダーにより相手船舶の方位情報を得、この方位情報に基づき、Photo. 1 の赤外画像に、**Photo. 2** に示すように、船舶を含むウィンドを設定する。ウィンドの垂直位置は、垂直ライン上の濃度変化により船舶が中央となるように決定する。なお、ウィンドの大きさは、最初、レーダーの方位分解能から2°とし、以後、抽出船舶の大きさに応じて変化させる。

つぎに、このウィンド内について雑音成分を除去するためにメディアンフィルタ処理を行い、その後、面積情報に基づくしきい値設定法⁹⁾を適用して船舶を抽出するための最適なしきい値を求める。

Photo. 1 IR image

Photo. 2 Windows for extraction

Photo. 3 Extracted vessel image

この方法は、画像をあるしきい値 t で2値化したときの画素数 $S(t)$ と、この2値化画像に対する最小値フィルタ処理後の画素数 $S'(t)$ から評価基準 $E(t)$ を(17)式より算出する。

$$E(t) = \frac{S'(t)}{S(t)} \{S(t) > S'(t)\} \quad (17)$$

$E(t)$ は、物体のまとまりが良いほど大きな値となるため、これが極大値をとるときにのしきい値 t が最適なしきい値となる。**Fig. 8** は、Photo. 2 について $E(t)$ を算出した結果で、 $E(t)$ の極大値は水平線抽出と船舶抽出の2つ存在する。そこで、船舶の濃度が背景の濃度よりも高いことを利用して高濃度値の極大値を選択し、その濃度値 t_v をしきい値として2値化処理を行い、さらに船舶以外の背景の雑音成分を除去するためラベリング処理を行って、船舶のみの画像を抽出した。**Photo. 3** は、以上の処理を行った結果で、船舶の形状がうまく抽出できている。

6. 海上実験

6.1 実験方法

以上のような画像処理による船舶運動の算出精度を確認するため、目標とする相手船が衝突針路を中心とした針路で変針を繰り返しながら接近する会合状況で実験を行い、計測船(自船)に設置した赤外線カメラおよびビデオ

Fig. 8 Criterion for evaluation

Table 1 Vessels for experiment on the sea

	Measuring (Own) vessel	Target vessel
Displacement	380 t	420 t
Length	52 m	52 m
Breadth	8.8 m	8.7 m
Equipment	<ul style="list-style-type: none"> • Radar • IR camera (BARNES MODEL 760) • CCD camera (NATIONAL VY4870) • GPS (FURUNO GP-3000) 	<ul style="list-style-type: none"> • RADAR • GPS (FURUNO GP-3000)

カメラによって相手船を撮像した。Table 1 は自船と相手船の諸元および使用した計測器である。会合条件は、実際の船舶衝突事故の発生頻度の高い初認距離 2~3 n.m. (1 n.m.=1852 m) に設定した。Fig. 9, Fig. 10 は、会合パターンを示したもので、相手船が約 500 yd (1 yd=0.914 m) ごとに左右 30° の変針を繰り返しながら、自船とほぼ直交する針路を接近するパターン 1 と、ほぼ対向する針路を接近するパターン 2 および斜め後方からの接近など数パターンを設定した。実験時の自船および相手船の速力は 10 knot (=約 18.5 km/h)、位置の変化は GPS によって 1 s ごとに測定し、記録した。実験は長

Fig. 9 Crossing situation (pattern 1)

Fig. 10 Head-on situation (pattern 2)

崎県平戸島周辺において実施した。

6.2 実験結果

Fig. 11 は、パターン 1 を実施したときの自船および相手船の航跡を GPS データから算出し、相手船の運動を自船を中心とした相対座標に示したレーダープロット図である。このようにレーダープロット図では、相手船の変針は大変判断しにくいものになっている。

Fig. 12 は、会合初期における相手船の針路および画像から計測した船舶長を初期条件として (10-1), (10-2) 式を用いてアスペクトを算出した結果である。図中の ■ は変針を開始した転舵時点、□ は変針が終了した定針時点を示している。算出したアスペクトの、GPS データから求めた実アスペクトに対する誤差の平均の偏りは 0.2°, 標準偏差は 4.7° であり、変針時にはその変針量が速やかに検出できている。

Fig. 13 は、図形重心の算出結果で、重心の水平位置が画像の中央にあるときは 0, 画像の右のときは正、左のときは負となるように正規化を行っている。この相手船では船体の上部構造物が後部寄りであるため、重心位置が負であることから相手船の船首が右向きであることがわかる。また、Fig. 14 は船舶長の算出結果であり、この

Fig. 11 Radar plotting of pattern 1 (Head-up stabilization)

Fig. 12 Calculated aspect (pattern 1)

Fig. 13 Calculated centroid of target vessel (pattern 1)

Fig. 16 Calculated aspect (pattern 2)

Fig. 14 Calculated length of target vessel (pattern 1)

Fig. 17 Calculated centroid of target vessel (pattern 2)

Fig. 15 Radar plotting of pattern 2
(Head-up stabilization)

Fig. 18 Calculated length of target vessel (pattern 2)

会合パターンにおける誤差率は最大 15.4%であった。

また, Fig. 15 は, パターン 2 の実施時における相手船の運動のレーダプロット図で, Fig. 16, Fig. 17 および Fig. 18 は, このときのアスペクト, 図形重心および船舶長の算出結果である。アスペクトは, 相手船の船首が自船に対し右向きを正, 左向きを負として表わした。算出したアスペクトの, 誤差の平均の偏りは 1.4° , 標準偏差 3.0° であり, 図形重心からは相手船の船首の向きの左右

への反転が検出できている。また, 算出船舶長の誤差率は最大 25.0%であり, 会合時のアスペクトの大きなパターン 1 に比べ, 誤差率が大きくなっている。

7. 変針の検出と危険度の評価

実際の衝突回避においては, 画像から得られた相手船の大きさおよび変針運動の情報をレーダー情報(方位・距離)に基づいて速やかに算出し, 衝突回避のための避航動

Fig. 19 Required altering course for collision avoidance

作を判断する必要がある。

そこで、画像情報から求めた相手船のアスペクトと船舶長を用いて、自船の変針による DCPA と TCPA の変化を算出し、相手船の回避に必要な変針量から会合時の危険度の評価を試みた。計算は、500 t クラスの船舶を想定し、自船の進行方向について接近距離による危険度の重付けを行うとともに、相手船運動の測定誤差を考慮して相手船速力を ± 2 knot の範囲で変化させ、DCPA が 500 m 以下で TCPA が 20 min 以下の会合条件を危険領域として、変針の所要量を算出した。

Fig. 19 は、パターン 2 について変針の所要量を算出した結果で、右への変針の所要量を実線、左への変針の所要量を破線で示している。船舶は、相手船を回避する場合、右に変針(面舵)するので、回避に必要な右への変針量が大きいくほど、会合時の危険度が高いと判断できる。

以上のように、画像から速やかに相手船の危険度が評価できれば、衝突回避の行動を起こすことができる。

8. おわりに

以上、海上ニアミス回避システムの構築を目的として研究を進めた結果、赤外面像は船舶の大きさ、変針など、目視による情報と同等の情報が得られるので、レーダー情報との併用はきわめて有効であり、これまでにない新しい衝突防止支援システムが構築ができるとの確証を得た。

本研究で得られた成果をまとめるとつぎのようになる。

- 1) データ処理の高速化手段として、レーダー情報に基づく船舶抽出のためのウィンドを設定し、その赤外面像に対して面積情報を用いるしきい値設定法を適用すれば船舶と背景との分離が可能となり、船舶形状を良好に抽出できる。

- 2) レーダー情報から会合初期の相手船距離とアスペクトを求め、これと赤外面像から抽出した相手船舶の水平方向の画素数を用いれば、会合状態にある船舶の針路、船舶長および変針運動がリアルタイムで検出できる。
- 3) 相手船舶の船首の方向を求める方法として、船舶画像の図形重心の位置の変化が利用でき、その算出にあたっては、上部構造物に重付けする方法が有効である。
- 4) レーダーおよび赤外面像より得た会合時の情報から、DCPA および TCPA を算出すれば、ニアミス回避に必要な変針量がリアルタイムで求められ、刻々の危険度が把握でき、衝突防止支援に有効である。

参考文献

- 1) 佐藤, 棟朝, 小野, 石井: 海上ニアミス回避システムへのアプローチ, 平成 5 年電気学会全国大会講演論文集, 6, 214(1993)
- 2) 佐藤, 棟朝, 小野, 石井: 海上ニアミス回避のための船舶の大きさの測定, 平成 5 年電気学会全国大会講演論文集, 6, 215(1993)
- 3) 佐藤, 棟朝, 富永, 小野, 石井: 画像処理を用いる海上ニアミス回避システム, 第 32 回 SICE 学術講演会予稿集, 101 E-2, 293/294(1993)
- 4) 佐藤, 富永, 小野, 石井: 海上ニアミス回避システムのための船舶運動の解析, 第 33 回 SICE 学術講演会予稿集, 303 E-6, 293/294(1993)
- 5) たとえば, 藤井, ほか: 海上交通工学, 97/113, 海文堂出版(1981)
- 6) 吉川, 関, 黒田, 池端: 面積情報を用いたしきい値設定法, 電子情報通信学会技術報告, 91, 528, 37/44(1992)

[著者紹介]

佐藤 祐 司 (正会員)

1984 年東京農工大学工学部電気工学科卒業, 85 年防衛庁入庁, 技術研究本部に勤務, 94 年日本大学大学院理工学研究科博士前期課程修了, 同年同大学院博士後期課程に入学, 現在に至る。センシングシステムに関する研究に従事。電子情報通信学会の会員。

石 井 弘 允 (正会員)

1958 年日本大学理工学部電気工学科卒業, 同大学勤務, 専任講師, 助教授を経て現在教授。工学博士。おもに AI ニューラルシステム, 画像処理, 防災・安全の研究に従事。電気学会, 照明学会, 日本火災学会, 日本循環器学会などの会員。