コースラインの自動設定に関する研究－Ⅱ． －細線化手法による特徴点の利用と適用例－

田中 隆博*・原 潔**

A Basic Study on Automatic Course Line Setting－Ⅱ． －Utilizing Thinning Image Processing－

Takahiro TANAKA and Kiyoshi HARA

Abstract

The authors proposed an algorithm to set a course line for coastal navigation automatically in the previous report. In this paper, authors improved this algorithm in order to be applicable to sea area with complicated geographical features or artificial structures such as breakwaters in a port.

The algorithm is utilized the thinning image processing technique to improve the former algorithm. Using the algorithm, it is possible to set course lines among the complicated lie of islands and find an entrance between breakwaters corresponding to the subjective risk level (SJ_L^*) of a navigator.

Finally some examples were shown to examine the possibility of the applicability algorithm into the practical use.

1. はじめに

船舶を安全に航行させるための最も基本的な手法は、正しい情報から適切に選定されたコースライン上を航行することと考えられる。しかし、船舶は、他の交通主体と比べ、進路の選択の幅が大きい、コースラインの設定は操船者の経験や技術を基本としており、その体系化や自動化が遅れている。効率的かつ安全なコースラインを自動的に設定できれば、自船の乗揚げ防止や操船者への負担を軽減することができる。

そこで、第一報で筆者らは沿岸航行など比較的単純な地形のみが存在する海域に有効なコースライン設定のアルゴリズムを検討した⁽¹⁾。ただし、このアルゴリズムは陸岸の面積重心と円相当径の関係のみによってノード設定を行うため、複雑な形状の地形や人工的な構造物が多い港内では、適切な場所にノードを設定すること、すなわちコースラインを自動的に設定することができない場合があり、さまざまな地形環境のもとで、いかに狭隘な部分に適切なノード設定をするかが一つの問題点であった。この問題に対処するためには、操船者の作業や判断と同様に、狭隘な部分を生じさせている岬や防波堤の先端を定量的にとらえる必要がある。

そこで、本研究では既存のアルゴリズムをさらに発展させ、客観的な特徴点を 2 次元地形情報を形状解析することによって抽出し、これを利用したより実用的なコースライン設定を行うことができるアルゴリズムの構築を試み、さらに、コースライン設定がどのように活用ができるか実海域を想定した適用例を示す。

* 正会員 神戸商船大学大学院 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

**正会員 神戸商船大学 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

コースライン自動設定の意義は、これによって単に操船者の作業量の軽減になるのみならず、VTSにおける交通監視や大規模海上構造物の建設計画に伴う交通流への影響をより客観的に予測評価するための手段としても応用することが期待できる。

2. 特徴点の抽出

2.1 地形的な特徴点の抽出

既存のコースライン設定のアルゴリズムは、沿岸など比較的複雑な地形が存在しない海域には有効な手法であった。ところが、複雑な地形や防波堤に代表される人工的な構造物が存在する海域ではコースラインが適切に設定できないことがあることが明らかになった。例えば、図1のように従来どおり防波堤の面積重心の位置を利用しノードを設定すると、防波堤間の水路を航過するために必要なノードは水路内に設定されず、到着地まで連結したネットワークを求めるのが困難となる。何らかの手法を用いて特徴的な点である防波堤の先端を抽出できれば防波堤間の水路に適切なノード設定が行えることは容易に想像できる。

しかし、これらの自然的地形および人工的地形にみられる航行上の目標となる特徴点は定性的に表現することはできるが、定量的に表現するのは非常に難しく、人間の判断を介さずに見つけだすことは困難であった。ここでは、モーメントおよび細線化の2つの手法によって、人間の判断結果と近くなるように特徴点を定量的に抽出する方法を示す。

2.2 モーメントによる特徴点の抽出

島など海上に存在する地形は、風化作用によって比較的海岸線がなだらかで、大観すると地形が特定の方向に伸びていることが多い。このような場合、対象地形のモーメントから、客観的に特徴点を決定することができる。

2値(2次元)平面において、ある地形の重心 $G(x_c, y_c)$ まわりについて一般的に $(p+q)$ 次のセントラルモーメント M_{pq} は、

$$M_{pq} = \sum \sum (x-x_c)^p (y-y_c)^q f(x, y) \quad (1)$$

ここに、 $f(x, y)$:対象図形の画素値
で算出することができ⁽²⁾、この地形が x 軸となす角 θ は、

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right) \quad (2)$$

で求めることができる⁽²⁾。この θ を利用し、地形を包含する矩形に接する4点は岬などの地形的に突出した部分であり特徴点ととらえることができる。図2は(1)および(2)式を用い特徴点を求めた例である。同図から、おおむね岬に当たる点と特徴点に対応していることがわかる。また、この地形の方向を表す角 θ は、船舶が地形に対し大略どのような角度で接近しつつあるか客観的に表すことにも利用ができる。

このモーメントを利用した特徴点の抽出は、次に述べる細線化のものとは比べ、繰返し計算を必要としないため計算量が少ないという利点があるが、図3のように、対象が複雑な海岸線を

図1 既存の手法でのネットワーク設定例

図2 モーメントを利用した特徴点の抽出例1
(右下の円内の指針は(2)式から求めた地形の方向を示す)

図3 モーメントを利用した特徴点の抽出例2

もつような場合、定量的な特徴点が必ずしも人為的に決定された岬と精度よく一致しない欠点がある。ただし、沿岸航行など対象海域に複雑な海岸線や人工的な陸岸が少ない場合には有効と考えられる。

2.3 細線化による特徴点の抽出

2値画像の形状解析に細線化と呼ばれる処理がある。細線化は文字認識などの目的のため、一般的に対象画像上で幅をもっている文字や線を、線幅が1画素になるまで細め、その形状の特徴を捕らえやすくするための処理である。ところが、都合がよいことに、この細線化を地形の解析に応用すると、地形的に突出した部分が最終的に端点として残る。つまり、同じ地形情報で同じ細線化アルゴリズムで処理すれば、必然的に特徴点が決まる。すなわち、準定量的に特徴点を抽出することができる。この細線化は、与えられた画像の端点を削除せず、かつ、連結性を損なわない点を削除することで実現できるが、これを解析的な手順を踏んで処理しようとするやや煩雑なため、図4に示す3×3画素マスクを用いる手法が提案⁽²⁾されている。これは、原画像の3×3の局所画素から、まず、同

図のM₁のパターンに当てはまる部分を探索し、このパターンに該当するすべての局所画素の中心画素値を1から0に置き換え、引き続いてM₂～M₈について同様の処理を順次施し1サイクルとする。処理中の原画像の3×3の局所画像がM₁～M₈のすべてのパターンに当てはまらなくなるまで処理を繰り返す。なお、同図中の*印は画素値を問わないことを意味する。例えば、細線化を利用すると図5に示すように、精度良く岬を抽出することができ、図6のように複雑な海岸線をもつ地形に対しても、モーメントによる特徴点の抽出と比べ、端点が岬などの地形的な特徴点とよく対応していることがわかる。従来の面積中心を利用した場合、人工的な地形については、狭隘部の適切な位置にノードを設定することは困難であったが、防波堤の先端などの隣接する特徴点を利用することで、これまでの面積中心の関係からは得られなかった狭隘な水路にも適切なノードを設定することができる。細線化による特徴点の抽出のためには、繰返し計算を必要とするためモーメントによる特徴点の抽出と比べ計算量が多くなるものの、より複雑な地形に対応できること、そして、3次元に応用すれば山頂や島頂などのピークのみならず、向針目標となるような地形的な特徴点を見つけることもできると考えられ、より発展性があるので、ここでは細線化による特徴点の抽出を利用し狭隘部にノードを設定する手法を採用した。

$\begin{matrix} 0 & 0 & * \\ 0 & 1 & 1 \\ * & 1 & * \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & * \\ 1 & 1 & * \end{matrix}$	$\begin{matrix} * & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ * & 1 & * \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 & * & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ * & * & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} * & 1 & * \\ 1 & 1 & * \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} * & 1 & 1 \\ * & 1 & * \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} * & 1 & * \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & * \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 & * & * \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & * & 1 \end{matrix}$
M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈

図4 細線化のマスクパターン

図5 細線化を利用した特徴点の抽出例1

図6 細線化を利用した特徴点の抽出例2

図7 改良した手法でのネットワーク設定例

図7に示すように面積重心の関係からでは困難であったケースも防波堤先端の特徴点の関係から、水路の中央にノードが設定されていることがわかる。

以上のような特徴点を求める手法は、対象物の特徴的な部分の認識を必要とする他の研究にも応用が期待できる。

3. コースライン設定のアルゴリズム

コースラインを設定するアルゴリズムは、2値地形情報に対し、

①画像変換、特徴量抽出などの画像処理

②Dijkstra法⁽³⁾を用いる戦略的航路選択

③操船者の陸岸に対する主観的危険度(SJ_L)に対し、あらかじめ設定した操船者の許容しうる危険度基準(SJ_L^*)を満たすためのコースライン修正である戦術的航路選択

④より効率的なコースラインに修正するためのフィルタリング

の手順を経る。例として、図8(a)の初期情報である2値画像に対し①の処理を施すと、図8(b)のようにノードとリンクを決定することができ、②の処理で最短経路探索法であるDijkstra法を適用すると図8(c)の経路が求まる。そして、③および④の処理を経て最終的に図8(d)のようなコースラインを設定することができる。

図8 コースライン設定の概要図

②の手順を改良し、従来どおり面積中心を利用したノード設定に加え、あらたに特徴点を利用したノードを加えた。

なお、操船者の陸岸に対する主観的危険度(SJ_L)は、第一報で示したように、操船者が単純陸岸に対し感じる危険度を操船シミュレータ上で、

+3 (非常に安全)

+2 (かなり安全)

+1 (やや安全)

0 (危険とも安全ともいえない)

-1 (やや危険)

-2 (かなり危険)

-3 (非常に危険)

の7段階で評価を求め、これを、

$$SJ_L = f(R/V, L) \quad (3)$$

ここに、 R : 陸岸までの距離(m) V : 速力(m/s)

L : 船舶の全長(m)

のとおり回帰した式である。第一報で述べたように、沿岸航行においては、船舶はおよそ SJ_L が+2 (かなり安全) ~ +3 (非常に安全) となり、安全側になるような離岸距離を確保しており、これが沿岸航行におけ

る操船者のコースライン設定の安全基準(SJ_L^*)と考えられる。

主観的危険度(SJ_L)と安全基準(SJ_L^*)を用いることで、操船者の危険度感覚に対応した柔軟なコースラインを選定することができる。図9は同じ出発点と到着点で安全基準(SJ_L^*)を変化させた例である。 $SJ_L^*=+2$ では広い水域に同図中のコースライン1を選定しているのに対し、 $SJ_L^*=0$ ではより航程が短くより狭い水域にコースライン2を選定している。安全基準(SJ_L^*)により操船者の経験や技術に応じたコースライン選定ができることがわかる。

ここでは、操船者が経路選択を安全基準(SJ_L^*)を境に2値的に決定することを前提としているが、より一般的には、経済性(航程の増減など)と操船者負担(危険度の増減など)とはトレードオフの関係にあると考えるのが自然である。ノードに対して、操船者に与える操船負担の変化や経済的な損失を距離ウエイト(W)として与えると、このようなトレードオフ関係を表現することができる。一般的に距離ウエイト(W)は、

$$W=f(E_m, E_s, E_e) \quad (4)$$

ここに、 E_m : 操船者特性指標 E_s : 船舶性能指標
 E_e : 航行環境指標

のように船舶をとりまく環境指標の関数で与えられると考えられる。ノードに対しこの距離ウエイト(W)を特徴点から設定したノードに与えることで、全般的には重心の関係から得られたノードを使用し、迂回路と狭隘部分の評価結果によって経路を柔軟に選り出すことが可能となる。

ただし、(4)式のようにすべての指標を含んだ関係式を求めるのは困難であり、ウエイト(W)の与え方としては、簡易的ではあるが、環境評価指標の一つである陸岸に対する操船者の主観的危険度(SJ_L)を利用する方法が考えられる。例えば、

$$W=a \cdot SJ_L + b \quad (5)$$

ここに、 SJ_L : 陸岸に対する操船者の主観的危険度
 a, b : 比例係数

として、操船者負担と経済性の関係を表現するのも1つの手段である。このように距離ウエイト(W)によって、操船者の意思として SJ_L^* を満たすコースラインが優先的に設定されるものの、迂回路が設定できない、または、経済的に迂回路を利用するのが好ましくないため局所的に狭隘な部分を航行せざるを得ない場合、それまで SJ_L^* によって対象外とされたノードを航行することも許可するようにコースラインの設定を行うことができる。これによって、運用上の判断の多様性が表現できるとともに、港湾設計上の評価等にも応用が期待できる。ただし、距離ウエイト(W)をどのように客観的に与えるかについては検討を要する。

4. 実海域を想定したコースライン設定適用例

4.1 港内への入港例

部分的にきわめて狭隘な水域が存在する場合、地形の面積中

図9 安全基準(SJ_L^*)を変化させた場合のコースライン設定例

図10 港内でのノード設定例

図11 港内への入港例

表1 各ケースの条件

	安全基準 (SJ_L^*)	海上構造物の数
ケース1	0	なし
ケース2	-1	1
ケース3	-1	2
ケース4	0	3
ケース5	-3	3

心の関係のみによってノードを設定すると、防波堤を航過する経路を選定することは困難であるが、図10に示すように、相対する防波堤の先端を細線化処理によって捕らえることで、防波堤間の水路の適正な位置にノードが設定でき、図11のように港内へのコースラインの設定が可能である(想定船舶は、全長 $L=70(m)$ 、速力 $V=10(k't)$)。

4.2 海上構造物によるコースラインへの影響

海上構造物の存在や安全基準(SJ_L^*)の高低によってコースラインがどのように変化するかを知るために表1に示すケース1～ケース5の条件でコースライン設定を行った。以下、船舶は全長 $L=70(m)$ 、速力 $V=13(k't)$ と想定する。

図12のケース1は海上構造物が存在しない状況において操船者の安全基準 $SJ_L^*=0$ で設定したコースラインであり、この海域では最も安全なコースライン選定をした結果である。この場合、操船者の陸岸に対する危険度は図17に示すように SJ_L の最小値はほぼ+0.5である。

ここで、ケース2として図13に示すよ

図12 海上構造物によるコースラインへの影響 (ケース1)

図13 海上構造物によるコースラインへの影響 (ケース2)

図14 海上構造物によるコースラインへの影響 (ケース3)

図15 海上構造物によるコースラインへの影響 (ケース4)

図16 海上構造物によるコースラインへの影響 (ケース5)

うに島Aと島Bの間に橋脚が1基構築されると想定すると、両島間の可航域が制約される影響で $SJ_L^* = -1$ と設定しなければ島Aと島Bの間を航過するコースラインは設定できず、 SJ_L の最小値はほぼ -0.5 である。

また、ケース3として図14に示すように島Aと島Bの間に橋脚が2基構築されると想定し、同様に $SJ_L^* = -1$ に設定するとコースラインは2つの橋脚間に設定される。図17に示すようにケース2と同様に SJ_L の最小値はほぼ -0.5 であるが、北よりのコースライン

となったため、操船者は約15分経過した地点で他の島の影響を受けることが分かる。

つぎに、ケース4として図15に示すように橋脚が3基構築されると想定すると、 $SJ_L^* = 0$ ではコースラインの設定ができるものの、もはやこれまでの海域には設定することはできず、島Bの南方を迂回したコースラインが設定される。図17に示すようにこのケースでは島が操船者に影響を与える時間が非常に長くなる様子が容易に予測できる。

さらに、ケース5として、図16に示すように橋脚が3基構築され操船者の安全基準を $SJ_L^* = -3$ と設定すると、島Bと橋脚間の狭い水路にコースラインを設定している様子がわかる。この例のように狭隘な水路にもコースラインが設定できるのは、本論文で提案し改良した地形的特徴点を利用したノード設定を行った結果でありアルゴリズム改良の効果がわかる。

5. 結 論

画像処理手法の一つである細線化を応用することで、定量的に陸岸の特徴点を捕らえることができ、この特徴点を利用して人工的な地形や複雑な海岸線の陸岸が存在する海域においても2次元情報からのコースラインの設定が行えることを示した。また、コースラインを設定することが単に操船者の作業負担を軽減するのみならず、交通流の予測にも利用が期待できることを示した。

本研究は2次元情報からのコースライン自動設定はより実用的なものに近づいたと考えられる。今後の課題としては、3次元情報を用いたアルゴリズムの構築、このアルゴリズムを利用し対象海域のコースライン設定の難易度から操船環境の評価を試みたい。

参 考 文 献

- (1) 原 潔・田中隆博：コースラインの自動設定に関する研究，日本航海学会論文集，第96号，pp. 101-109，1997年。
- (2) 高木幹雄・下田陽久：画像解析ハンドブック，東京大学出版会，pp.575-582，1991年。
- (3) 劉・王：ファジィネットワーク工学，pp.47，1995年。

質 疑 応 答

井上欣三(神戸商船大学)：埋め立てなどによって従来の交通の流れがディスタurbされる時、これらの船の迂回航跡の予測にもこの手法は適用できますか。

田中隆博：適用例では海上構造物として面積が小さい橋脚が構築された場合、どのようにコースラインが影響を受けるかを示しましたが、面積の大きな埋立て地などについても適用可能です。

図17 各ケースにおける操船者の陸岸に対する主観的危険度(SJ_L)の時間的推移