

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K01299

研究課題名(和文)北極海航路航行支援システムの開発

研究課題名(英文)Navigation system for the Arctic Ocean route

研究代表者

高木 敏幸 (Takagi, Toshiyuki)

釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授

研究者番号：30331953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は船舶レーダ画像を用いて、現在地点から目的地まで氷海を安全に航行できるような最適な氷海上の航路の探索するアルゴリズムの開発を目的としている。本研究ではグローバル・ダイナミック・ウィンドウ・アプローチによる航路探索手法を開発した。航行が可能な開放水面に対してダイクストラ法を用いて、開放水面上に最短でゴールに向かうための船舶の向きと、wave front アルゴリズムを用いてゴールまでの距離を計算することによって、複雑に分布する氷海での航路探索を実現した。さらに、氷海の密接度に評価関数に導入することによって、船舶の砕氷能力に応じて連続的に航路を探索することを可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では北極海域において船舶レーダ画像から複雑に分布する氷海を避け最適な航路探索を行う手法を開発した。これにより、短時間で目的地までの安全かつ最適な航路が示され、熟練者による航路探索に要してきた時間が節約できる。また、船舶の砕氷能力や動特性に応じた航路選択により安全な北極海域の航行が可能になり、海難事故を防ぐことが出来る。これらのことから、輸送費用削減や資源調達先の拡大など大きな経済効果を東アジア地域にもたらすことが期待される。

研究成果の概要(英文)：The sea ice has caused significant damage to vessels in the Arctic. It is important to avoid the collision with the sea ice, and to select the route to save the fuel and time safety. However, it is not easy to select the best sea route promptly and safely because the shape and the distribution of the sea ice are very complex. In this study, the selection of the sea route in the ice sea is formulated as the obstacle avoidance problem using the global dynamic windows approach (GDWA) improved by incorporating ice concentration as a cost function. The GDWA is a search technique composed of a local and global path-planning algorithm. This approach takes the kinematic and dynamic constraints of the controlled object into account using a velocity motion model. Finally, it shows that the simulation results applied to the ship radar image are effective for sea ice navigation

研究分野：氷海航法

キーワード：北極海 最適航路 砕氷船 氷海密接度 GDWA

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヨーロッパとアジアを結ぶ北極海の水氷が地球温暖化の影響により特に夏季に減少し、氷厚も薄くなっている。北極海航路は輸送費用削減や資源調達先の拡大など大きな経済効果を東アジア地域にもたらすことが期待されている。しかし、氷海上の船舶の運航において、氷氷との衝突を避け、目的地への移動に要する燃料や時間を節約しなければならない。さらに、氷氷の衝突により船が損傷し、油流出が起きれば大規模な環境破壊の恐れもあり、北極海航行する船舶の航路の決定は重要な問題である。

2. 研究の目的

氷海航行は氷氷に覆われている北極海において、氷氷への衝突を回避し、目的地まで最短になるような航路を選択することである。すなわち、複雑に分布し、様々な形状、大きさの氷氷を全て回避し、安全かつ効率的な航行をしなければならない。このような航路を選択するために船上からの目視の他、衛星画像または船舶レーダ画像が氷氷を表す氷氷分布図として用いられている。しかしながら、氷氷の形状および分布は複雑で、船舶のダイナミックスを考慮し、これらのデータから迅速かつ安全に目的地までの最適な航路を選択することは容易ではないさらに、氷氷の密接度などの氷氷状によって船速や操舵角が制限される場合がある。そこで、本研究では、代表的な経路探索手法である GDWA (Global Dynamic Window Approach) に基づき氷氷の氷氷状によって速度や操舵角の制限領域での航路を実現する手法を提案する。GDWA は、ナビゲーション関数に基づく経路計画より求めた経路情報と対象物のダイナミックスに基づき、制御入力の範囲 Dynamic Window を計算し、一定時間未来までの軌道を離散的に複数予測し、その中から評価関数が最大になる制御入力を求め、初期地点から目標地点まで障害物と衝突しない軌道を導出する方法である。

3. 研究の方法

本研究では船舶レーダ画像から最適航路を探索する。本研究で用いている船舶レーダ画像を図 1 に示す。図 1 は 2012 年 8 月にカナダの砕氷船 Louise S. St-Laurent によって北極海で得られた船舶レーダ画像である。レーダの観測半径 3.0 NM(5556m)である。白い部分が氷氷、黒い部分が開放水面を表す。

本手法では船舶の旋回性能や追従性能を考慮するため船舶の操縦モデルとして広くオートパイロットやシミュレーションに用いられている次式に示す Nomoto モデル (KT モデル) を用いる。

$$Tr(t) + r(t) = K\delta(t) \quad (1)$$

ここで、 T は追従性指数を示し、操舵に対する追従性を示す指標で制御工学的には時定数を意味する。 δ は舵の角度、 r は船首の角度を表している。船舶の座標系を図 2 に示す。

また、本手法では船舶の氷氷密度に対する船速の関係を求めるため、図 1 に示す北極域で得られた複数枚のレーダ画像から氷氷密接度と船速の関係を抽出した。図 3 は北極域で得られた船舶レーダ画像から氷氷の密接度と船舶の速度の関係を示す。氷氷密接度に対する船速は、密接度に応じて船速が減少するので無く、ある密接度を超ええると急激に船速が減少することが示されている。そこで、本手法では、船速と氷氷密接度の関係を図 4 に示す区分線形関数に近似し、氷氷密接度に対する船速に用いた。

本手法では砕氷船の砕氷能力に応じた航路を選択するため GDWA 法の評価関数に氷氷密接度を導入している。GDWA は、ナビゲーション関数に基づく経路計画より求めた経路情報と対象物のダイナミックスに基づき、制御入力の範囲 Dynamic Window を計算し、一定時間の未来までの軌道を離散的に複数予測し、その中から評価関数が最大になる制御入力を求め、初期地点から目標地点まで障害物と衝突しない軌道を導出する方法である。

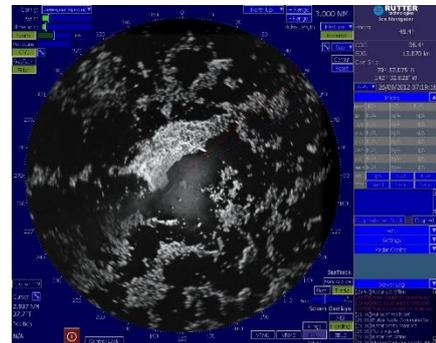


図 1 船舶レーダ画像

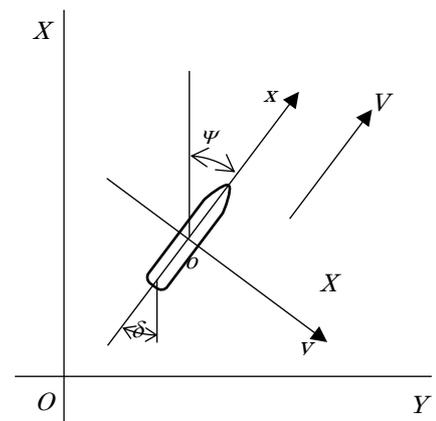


図 2 船舶の座標系

$$G(p, v, a) = \alpha \cdot nf1(p, v) + \beta \cdot vel(v) + \gamma \cdot goal(p, v) + \delta \cdot \Delta nf1(p, v, a) + \eta \cdot obs(p, v) \quad (2)$$

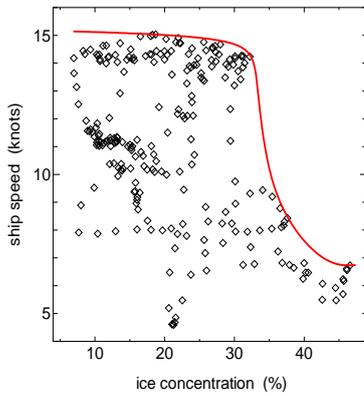


図3 海氷密接度と船速の関係

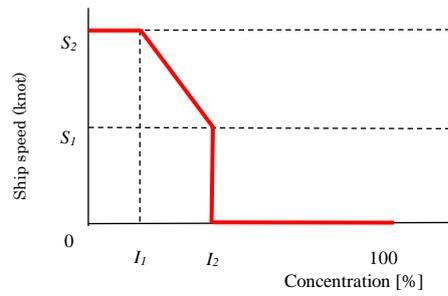


図4 海氷密接度に対する船速のモデル

ここで、 p は船舶の座標を示し、 v は船速、 a は加速度を示す。第1項のナビゲーション関数 nfl はダイクストラ法による各グリッドにおける最短ルートに向かう方向とその地点での船首の方向の差を示す。 vel は目的地と現在地の距離に対応した船速に関する評価関数を示し、目的地が遠い時は船速が速いほど評価関数が大きく、目的地に近づくにつれて遅いほど評価関数の値が大きくなる。 $goal$ は目的地への到達に関する評価関数を示し、 δnfl は Wavefront アルゴリズムによる現在地から目的地までの距離に関する評価関数を示す。最後の obs は海氷の密接度に関する評価関数を示し、船舶の砕氷能力はこの関数の重みづけ η を調整することによって対応付ける。本手法ではこれらの重み付けした関数を評価関数として用いる。

4. 研究成果

本手法は船舶上でレーダ画像から最適航路を探索することを目的としている。そこで、初めに図1に示す海氷のレーダ画像の格子状に分割し、さらに密接度が高い海氷と開放水面の領域に分ける。船舶の航行が可能な開放水面に対して、各格子は移動可能な開放水面において隣接する格子と接続されており、開放水面上の全格子からダイクストラ法によって目的地までの航路を探索される。図5ではレーダの上部に目的地を設定している場合のダイクストラ法によって得られた航路を示す。開放水面上のすべての格子は、矢印の方向の格子に移動することによって、最短ルートで目的地に到達することができる。ダイクストラ法によって得られた矢印の向きは式

(1) に示す船首の方向に関する評価関数に用いられる。予測された航路の最終状態においてその地点での船首の角度とダイクストラ法によって得られた角度の差が小さいほど評価関数が高くなる。Wavefront アルゴリズムも障害物回避経路探索法の一つで、格子状に設定された目的地から出発地点に到達するまで、波面のように障害物を迂回して目的地からの距離に従ってラベルが付けられ、現在地点からゴールまでの距離に関する評価関数を示す。図6は Wavefront アルゴリズムによって得られた各格子の値を3次元で表示している。目的地点から、障害物を避け徐々に低くなっていることが示されている。

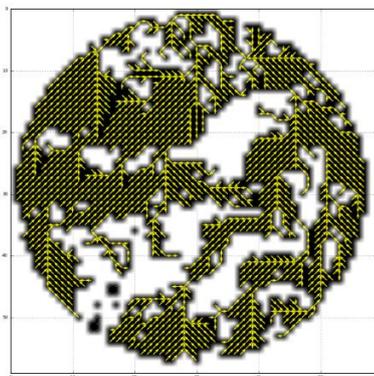


図5 ダイクストラ法

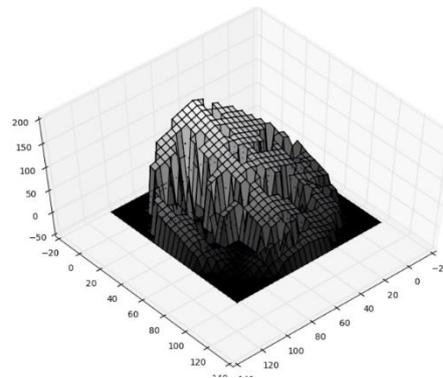


図6 Wavefront アルゴリズム

図7に砕氷船の砕氷能力に対応した海氷密接度の重みづけ ε の変化による航路と船速および舵角の変化を示す。ここで、図4に示す船速と海氷密接度の関係は $S_1=10$ [knot]、 $S_2=0$ [knot] とし、海氷密接度 $I_1=10$ [%]、 $I_2=20$ [%] としている。また、船速、船首の向きおよび舵角の初期値はそれぞれ 0 [knot]、 90 [degree]、 0 [degree] とした。図7(a)に示す $\varepsilon=0.05$ の場合、船舶は大きく海氷を避けない航路が選択されている。船速も目的地に着くまで 10

[knot]が維持されている。一方、図7(b)に示す $\varepsilon=0.2$ に設定した場合、船舶は海水に対して大きく迂回した航路が選択され、舵角も細かく変化している。船速も舵角の変化に従い、図7(a)と比較して変動が多いのが分かる。すなわち、海氷密接度の重みづけ ε を調整することによって、砕氷船の砕氷能力に応じた航路を探索することが可能になることが示されている。

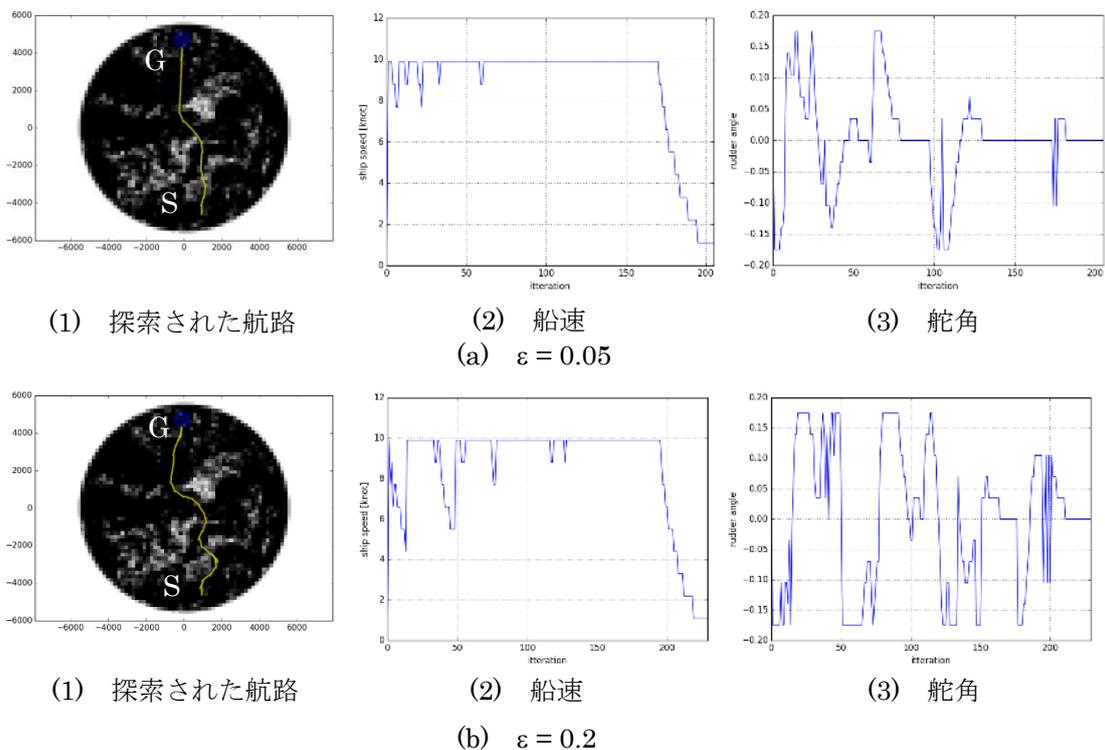


図7 シミュレーション結果(1)

図8(a)~(f)は、出発地点、目的地の座標は同じであるが、初期値として船首の向きが異なる場合の航路を示す。図8(a)は船首が目的地に対して90[degree]右を向いている状態、図8(b)は上向きに右45[degree]傾いた状態、図8(c)は真上を向いた状態から航路探索を行った結果を示す。

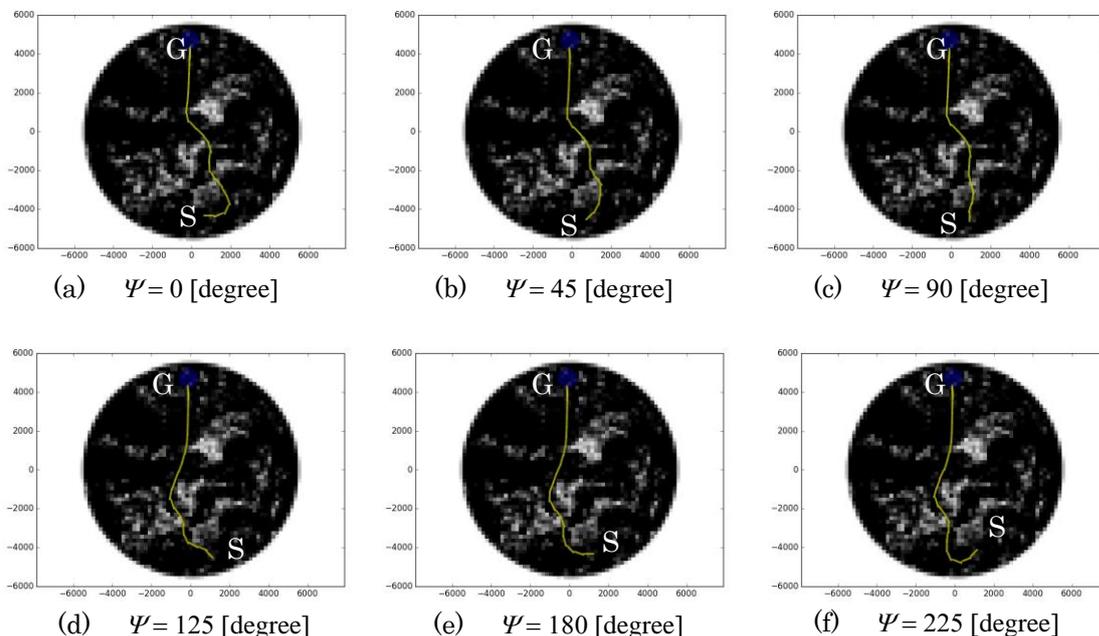


図8 シミュレーション結果(2)

出発地点の座標が同じであっても、船舶の向きによって選択される航路が異なることが示されている。また、図 8 (d) は図 8 (b) と逆向きに左に 45[degree]傾いた状態、図 8 (e) は図 8 (c) と逆に船舶が目的地に対して 90[degree]左を向いている状態を初期値とした場合の航路を示す。図 8 (a) ~ (c)とは異なる航路が探索されている事が示されている。図 8 (f) は目的地に対して逆向きに 45 [degree] 船首が向いている状態を初期値としている。船舶は大きく旋回して、図 8(d) と(e)と同じ航路が選択され目的地に到達している。

最後に本研究では、船舶のダイナミクスを考慮し、さらに、海氷の密接度などの氷状によって船速や操舵角が制限される氷海において、速度や操舵角の制限領域での航路を実現する手法を提案した。また、実際の北極域で採取された船舶レーダ画像に適用しその有用性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Toshiyuki Takagi and Kazutaka Tateyama
2. 発表標題 Global Dynamic Window Approach for Ice Sea Navigation using Vessel Radar Image
3. 学会等名 The 33nd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Takagi and Kazutaka Tateyama
2. 発表標題 Sea Route Search using the Global Dynamic Windows Approach Including Ice Concentration
3. 学会等名 Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Takagi and Kazutaka Tateyama
2. 発表標題 Segmentation of sea ice and open water from ship radar images using U-net
3. 学会等名 The Ninth Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Takagi and Kazutaka Tateyama
2. 発表標題 Radar image segmentation for sea ice navigation using deep learning
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiyuki Takagi and Kazutaka Tateyama
2. 発表標題 Route Search System in Ice Sea using Dynamic Window Approach
3. 学会等名 CECAR8 (Civil Engineering Conference in the Asian Region) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiyuki Takagi and Kazutaka Tateyama
2. 発表標題 Sea Route Search Using the Global Dynamic Windows Approach including Ice Concentration
3. 学会等名 Fifth International Symposium on Arctic Research (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Takagi and Kazutaka Tateyama
2. 発表標題 Global dynamic window approach for ice sea navigation using vessel radar image
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高木敏幸
2. 発表標題 北極海航路について
3. 学会等名 一般社団法人電子情報通信学会技法スマートインフォメディアシステム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Toshiyuki Takagi and Kazutaka Tateyama
2. 発表標題 Ice Sea Routes Selection using Global Dyanamic Window Approach
3. 学会等名 第7回極域科学シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Toshiyuki Takagi and Kazutaka Tateyama
2. 発表標題 Sea Route Selection using Global Dyanmic Window Approach
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考