



ステレオ画像計測による陸上からの船舶監視及び自動離着棧システムへの適用に関する研究

野村, 康紘

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2021-03-25

(Date of Publication)

2022-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8088号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008088>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

ステレオ画像計測による陸上からの船舶監視及び
自動離着棧システムへの適用に関する研究

2021 年 1 月

神戸大学大学院海事科学研究科

野村 康紘

目次

第 1 章	緒言	1
1.1	研究の背景	1
1.2	陸上からの船舶監視システム	4
1.2.1	方式選定	4
1.2.2	提案システムの概要	5
1.2.3	関連研究	8
1.3	本研究の目的	10
1.4	本論文の構成	10
第 2 章	ステレオカメラによる 3 次元位置計測	13
2.1	はじめに	13
2.2	ステレオカメラの原理	13
2.3	カメラのキャリブレーションと平行化	15
2.4	ステレオ計測の誤差	19
第 3 章	海域監視のためのカメラ配置位置の決定法	21
3.1	はじめに	21
3.2	陸上へのカメラ配置位置の自動決定法	21
3.2.1	アルゴリズム	21
3.2.2	カメラ配置の例	30
3.3	自動離着棧システムへの適用	40
3.3.1	アルゴリズム	41
3.3.2	カメラ配置の例	43
3.4	まとめ	47
第 4 章	自動離着棧システムに向けた船舶の 3 次元位置計測	49
4.1	はじめに	49
4.2	自動離着棧システムへの適用時の課題	49
4.3	Semi-Global-Matching(SGM) による視差計測	52
4.4	3 次元位置計測精度の検証	53
4.4.1	カメラのキャリブレーション	53
4.4.2	3 次元計測結果	57
4.5	まとめ	61

第 5 章	自動離着棧システムに向けた船舶の検出及び位置姿勢推定と統合評価	63
5.1	はじめに	63
5.2	視差画像による船舶の検出	63
	5.2.1 V-Disparity による海面の抽出	64
	5.2.2 U-Disparity による物体の抽出	67
5.3	船舶モデルとの位置合わせによる位置姿勢推定	71
	5.3.1 Iterative-Closest-Point(ICP) による位置合わせ	71
	5.3.2 船舶の 3 次元位置計測への適用	73
5.4	統合評価	78
	5.4.1 カメラのキャリブレーションと 3 次元計測結果	78
	5.4.2 船舶の検出及び位置姿勢推定結果	84
	5.4.3 処理時間に関する考察	94
5.5	まとめ	98
第 6 章	結言	99
	謝辞	103
	参考文献	105
	研究業績	111

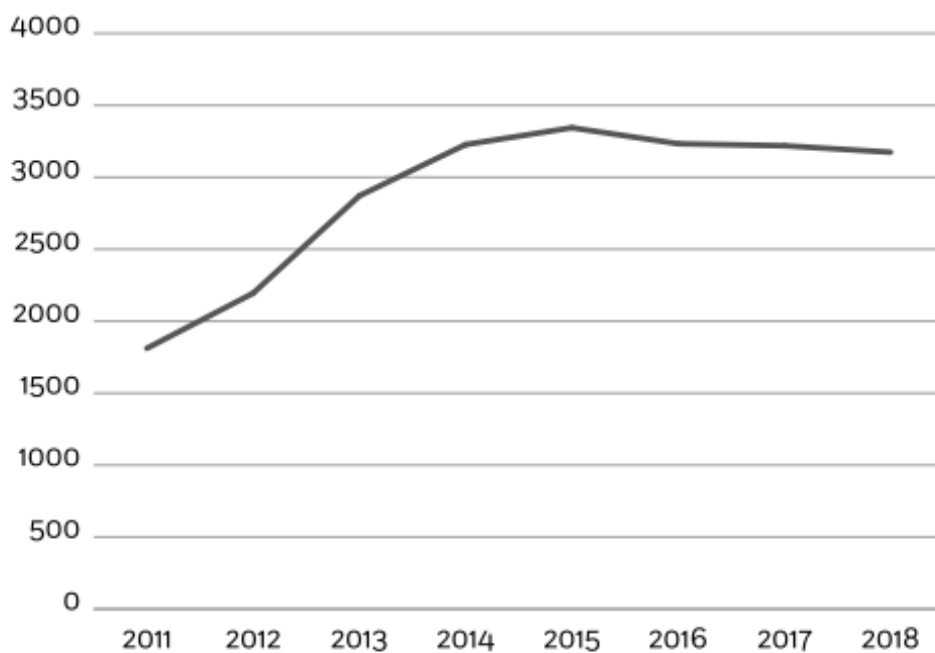
第 1 章

緒言

1.1 研究の背景

近年，船舶の自動運航に関する研究開発が国内外で活発化しており，様々な実証実験が行われているほか，既に製品化され，実社会で運用もされ始めている．国外においては，2018年12月にRolls-RoyceとFinferriesによる自動航行及び遠隔操船の実証試験が行われており [1]，KongsbergとYaraは完全自律型の電気推進貨物船の建造と自律運航への移行を進めている [2]．既に実用化されている例としては，L3HarrisからC-Workerシリーズを始めとする小型の自律船が販売されている [3]．一方，国内では，国土交通省が2025年までの実用化を目指し，自動操船，遠隔操船，自動離着栈に関する実証事業を始めている [4]．また，民間レベルでは日本財団が中心となり，2025年までに無人運航船の実用化を目指した「MEGURI2040」と題する大型プロジェクトが始動されることが2020年6月に発表されている [5]．

自動運航船の実用化が期待される背景の一つとして，海難事故の抑止が挙げられる．文献 [6] によると，欧州においては2015年以降，事故件数はほぼ横ばいとなっているが，年間3000件以上の事故が発生している（図 1.1(a)）．国内においても，過去10年で年間事故件数自体は減少傾向にあるものの，未だ2000隻前後の事故が発生している状況である [7]（図 1.1(b)）．国内外問わず，海難事故原因の50%以上が操船不適切，見張り不十分等の人為的要因である（図 1.2）．これらを補助あるいは自動化することで海難事故を防ぎ，海上輸送の安全性，信頼性を向上させるだけでなく，乗組員の作業負荷軽減による労働環境の改善等，いくつもの効果が期待されている．

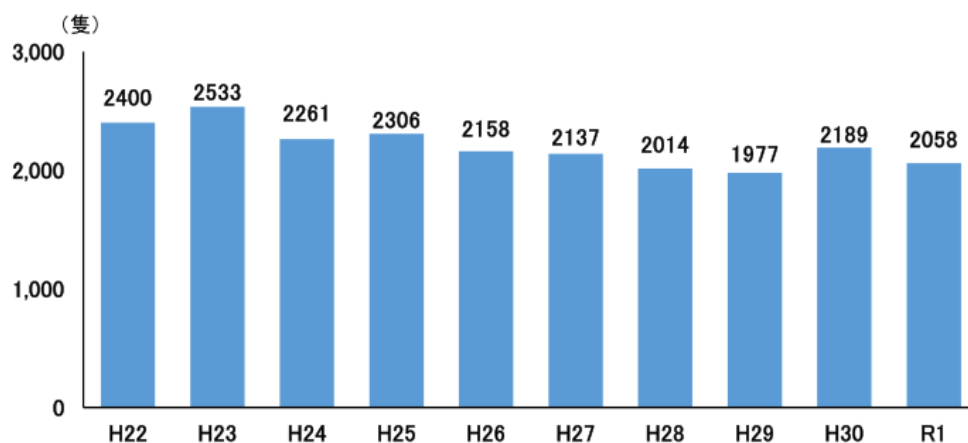


The total number of reported marine casualties and incidents is 23073.

In the last 5 years, the average number of marine casualties or incidents recorded in EMCIP is 3239. However, comparisons with various sources suggest that under-reporting of marine casualties and incidents continues, with a total of 4000 occurrences per year being a best estimate.

(a) 欧州における海難事故件数の推移

【船舶事故隻数の推移(過去10年間)】



(b) 国内における海難事故件数の推移

図 1.1 国内外における海難事故件数の推移

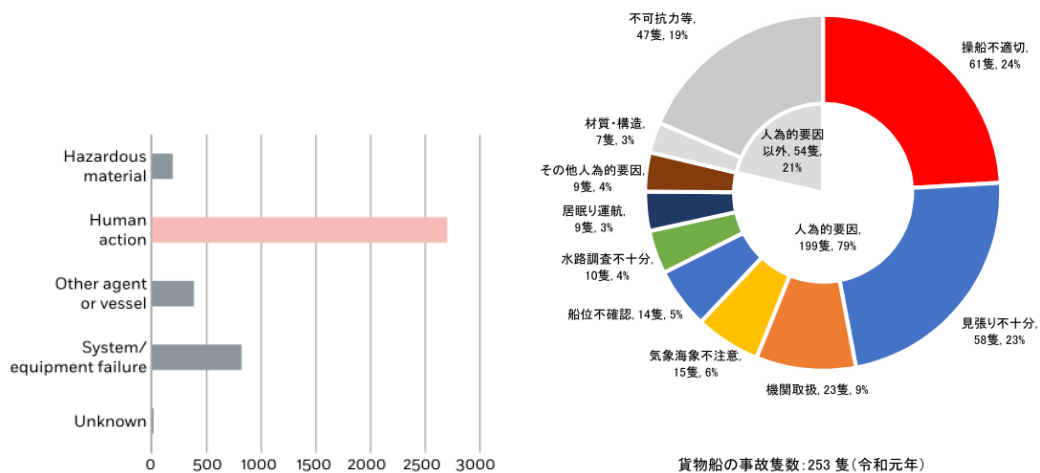


図 1.2 国内外における海難事故の要因内訳 [6, 7]

一方で、船舶の自律航行に関する研究の多くは、船舶が自律的に航行するための判断と制御について論じており、衝突回避やナビゲーションを目的とした手法が提案されている [8–11]. これらの手法において、自船あるいは他船の位置情報を取得するためのセンサはレーダー、AIS (Automatic Identification System), GPS (Global Positioning System) といった既に実用化され広く一般に普及している船用電子機器を使用する、もしくは何等かの手段で正確に位置情報を取得できる前提で議論がなされている. レーダーは気象や海象の影響により漁船やプレジャーボート等の小型の船舶の識別が困難になることがある. AIS は設置義務が大型船に限定されるため [12], 小型船舶を認識することはできない. さらに、GPS とジャイロコンパスを使用することで、自船の位置と姿勢を認識することはできるが、他船の位置を推定することは不可能である. 自動航行や自動操舵を安全に実現するためには、自船の状況だけでなく、他船や障害物を含む周囲の状況を正確かつ詳細に把握することが重要であり、従来のシステムだけでは不十分である.

以上の背景より、これら既存センサの課題を解決する方法として、ステレオ画像計測システムにより、船舶やその他の障害物を検出し、それらの 3 次元位置を計測する手法が提案されている [13–15]. これらの研究では、航行の安全性向上のため、船上に設置したカメラから航行中の船舶の位置計測を行い、追跡する手法を主題として扱ってきた [14, 15]. しかしながら、先行研究の最終目的は、船上や陸上に関係なく設置されたカメラ画像を用いた航行安全システムを構築することである. 提案されているステレオ画像計測による船舶の監視手法を海峡や港湾などの海域に適用するため、陸上に配置したカメラにより実現する手法についても検討が必要である.

1.2 陸上からの船舶監視システム

1.2.1 方式選定

本研究は、カメラ画像による陸上からの海上監視システムを提案する。特に、ステレオカメラ構成とすることで、船舶等の3次元位置を詳細に求めたい。船用の3次元計測センサとしてはレーダーが挙げられるが、ここ数年、自動車の安全運転システムを対象として、ステレオカメラ、LiDAR (Light Detection and Ranging)、ミリ波レーダーの三つが測距センサとして着目されており、ステレオカメラ、ミリ波レーダーは既に実用化され、広く普及している。ステレオカメラは、2台以上のカメラで撮像した画像から三角測量の原理により、物体までの距離や物体の大きさを計測する。LiDARは昨今、自動運転分野で非常に注目されているセンサ方式である。赤外線等のレーザー光を照射し、前方や周囲の物体に当たって跳ね返ってきた光を検出し、跳ね返って戻ってくるまでの時間を計測することで、物体までの距離や方向を測定する。ミリ波レーダーは、30~300[GHz]の電波をLiDARのように物体へ飛ばし、反射して戻ってくるまでの時間から物体までの距離を計測する。各方式の比較を表 1.1 に示す。

表 1.1 各センサの比較 [16]

ステレオカメラ	LiDAR	レーダー
○ 分解能・色識別	○ 測距性能	○ 速度計測, 耐環境性
△ 距離・速度計測	△ 分解能	△ 計測範囲
× 耐環境性	× 耐環境性	× 分解能

ステレオカメラは、空間分解能が比較的高く、物体の形状や識別だけでなく、色を識別することができるため、画像による物体認識も可能である。しかしながら、可視光を扱うため、夜間や雨、霧等の悪天候に弱く、耐環境性に劣る。ミリ波レーダーは、非常に直進性の高い電波を扱うため、雪や霧等の外乱の影響を受けにくく、比較的長距離計測が可能である。しかしながら、角度分解能が低いため、物体の形状や識別には不向きである。LiDARは、ミリ波レーダーよりも波長の短い赤外線を照射するため、ミリ波レーダーよりも対象物の識別能力が高い。悪天候時に検知能力が下がることはカメラと同じである。

以上のように、それぞれ一長一短あるが、本研究では、分解能や測距性能とのバランスからステレオカメラを採用する。後述するように、比較的遠方を対象とした広海域の監視から、離着舷を想定した数十[m]の近距離までの広い範

囲を計測対象としたいが、カメラであればレンズと解像度の組合せによって柔軟に対応が可能である。さらに、ステレオカメラであれば物体の3次元位置がわかるため、物体の形状把握と物体認識を同時に行うことができる。また、車載システムでは、複数のセンサを組合せるセンサフュージョンにより、システムのロバスト性を向上させている。船舶分野においても、自動航行システムや自動監視システムの実現のためには、複数のセンサを組合せたシステムの構築が現実的であると考えられる。そのためには、センサ単体の性能向上も不可欠であり、本研究ではステレオカメラを用いたシステムの実現性について検討を行う。

1.2.2 提案システムの概要

提案する監視システムのコンセプトを説明する。まず、交通量が多い海域（ふくそう海域）での船舶監視システムの概念図を図 1.3(a) に示す。周辺の海岸に数台のカメラを設置し、船舶を監視する。カメラ画像を分析することで、航行中の船舶の位置、速度及び航路の情報を得ることが可能である。本提案システムは、既存のレーダーによる監視システムを併用する。レーダーや AIS でもこれらの情報は取得できるが、上述の通りいくつかの問題を抱えており、カメラシステムはこれらのセンサの弱点を補える可能性がある。また、カメラ画像はレーダーでは認識できない詳細な情報を提供可能である。すなわち、対象物が船舶であるか、障害物であるかを判別し、船舶の種別を識別することも可能である。システムによって取得された情報は、例えば、AIS メッセージや海上 VHF 無線を介して近隣の船舶に通知することができる。また、海難事故が発生した場合に備え、画像を記録しておくことで、事故発生時の原因究明に使用することも可能である。

続いて、カメラを港に設置する例を図 1.3(b) に示す。岸壁にカメラを設置し、港内を通過する船舶を検出し、追跡等するだけでは既存の監視カメラで十分である。本研究では、さらに進んで、自動離着棧システムへの適用を提案する。対象船と岸壁の相対距離と姿勢を陸上に設置したカメラで測定する。次に、他船や障害物などの情報を含む測定値が対象船に送信され、それらの情報に基づいて自動的に岸壁に誘導されることで、自動（離）着棧を実現する。自動離着棧においては、通常、船舶側にカメラを設置することが考えられ、既にいくつかの手法が提案されている [17–23]。しかしながら、特に、離着棧においては、自船の周囲状況を把握する必要があるため、船舶の周囲全体を監視するためには多くのカメラが必要になる。全方位カメラを用いる手もあるが、画像周辺部の解像度が低くなるため、離着棧に必要な精度が十分に得られない可能性がある。大型船においては、死角を無くすためには多くのカメラの設置が必要で

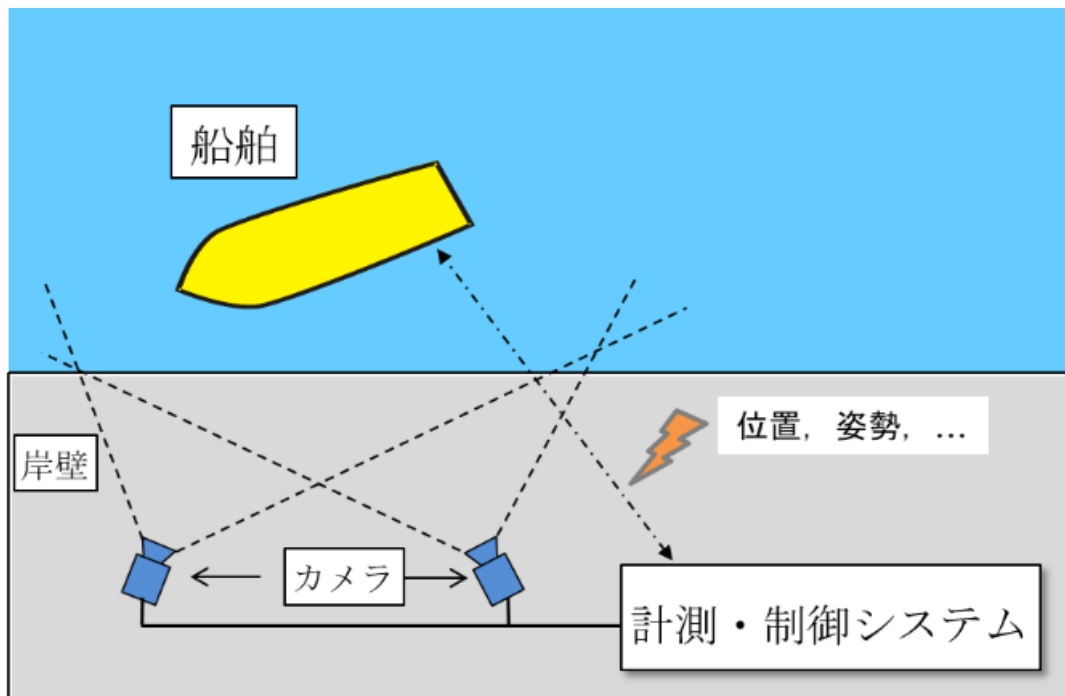
ある。プレジャーボートや小型漁船等においては、高価なカメラ画像システムであれば、所有者の搭載意欲は消極的になると想定される。したがって、安全性やシステムのロバスト性の向上という観点からも、船舶上ではなく、陸上にカメラを配置するメリットは十分にあると考えられる。提案手法は、着岸する船舶だけでなく、港内を通過する全ての船舶が、提案システムにより取得される情報を利用できるという利点もある。表 1.2 は陸上と船舶上それぞれにカメラを設置した場合の比較をまとめたものである。双方にメリット、デメリットがあり、理想的にはこれら二つを統合したシステムが望まれる。

表 1.2 陸上配置と船舶上配置の比較

	陸上	船舶上
システムの利用可能場所	カメラが設置された港のみ	全ての場所
システムを利用できる対象	全ての船舶	カメラを搭載する船舶のみ
必要カメラ台数	$(2 \sim 10^{*1}) \times$ 設置港数 *1:対象とする港の構造による	$(2 \sim 10^{*2}) \times$ 設置船舶数 *2:大型船の場合は自船周りを監視するために多くのカメラが必要
監視不可領域	カメラの配置により比較的小さくできる	船舶の真下のみ
システムが得られる情報	監視領域における全ての物標の世界座標	船舶から観測される物標の相対座標



(a) 広海域及びふくろう海域環境下の監視



(b) 港湾環境及び自動離着棧システムへの適用

図 1.3 提案手法のコンセプト

1.2.3 関連研究

前述の通り，離着棧支援あるいは自動離着棧を目的とした，船舶上に設置されたカメラによる手法が既にいくつか提案されている．これらは，①自船周りの監視（見張り補助）を目的として操船者への情報提示に主眼をおいたものと，さらに一步踏み込んで，②自船から岸壁までの距離推定まで行うもの，に大別される．

文献 [17] では，離着棧時における船体位置確認を行うモニタリングシステムとして，360 度視野による全方位画像センサを用いる手法が提案されている．撮像画像をパノラマ画像へ幾何補正処理することで，操船者が直感的に状況を理解しやすい画像を提供している．また，全方位画像センサの課題としてセンサ直下のブラインド領域を取り除き，離着棧時においても良好な画像を得るための設置手法についても提案されている．

文献 [18] は，文献 [17] の手法を魚眼レンズにより簡素化させるとともに，上空から自船を俯瞰した疑似映像を操船支援情報として提示する手法について述べている．撮像された魚眼画像を仮想平面にパノラマ展開する際，画像周辺の画素値が存在しない領域は補間処理を行うことで，操船者の視覚的判断が可能な画像を提供できることを示している．

文献 [19] では，自船周囲を監視可能なように配置された複数台のカメラ画像を全周画像として合成し，さらにレーダー画像から抽出したレーダーエコーを全周画像に重畳することで，乗組員の視覚的サポートを実現するシステムが提案されている．文献 [17,18] では一つの撮像素子により全周画像を得ていたが，比較的高解像度のカメラ 5 台を同心円上に配置したカメラデバイスを用いることで，高解像度な全周画像が得られるようにしている．自船から物標までの距離情報はレーダーの結果を利用している．

文献 [20] では，離着棧支援システムとして，船上に設置した二つのカメラにより，ステレオ計測の原理を用いて岸壁上に設置した特別な目標物（ターゲット）を追尾し，距離及び速度を計測する手法が報告されている．

文献 [23] は，港湾環境での小型船舶のナビゲーションを目的として，二つのターゲットを使用する画像処理ベースのファジー自動操舵方法を提案している．船上に設置した一台のカメラから岸壁上に設置した二つのターゲットを撮像し，岸壁までの距離と船首の向きを推定している．二つのターゲットは，岸壁の際からある一定の距離に前後関係をもって配置され，船舶側からみて手前は青一色，奥側は緑一色のマーカーである．RGB カラーで撮像された画像から，色相と彩度を求め，これらのマーカー領域を検出している．

文献 [21] では，船舶の側部を下方から前方へ俯瞰できるような広角カメラを船体側部に設置し，カメラのキャリブレーション情報と姿勢データを元に俯瞰

画像を作成し、接岸対象となる岸壁の直線を認識することで、船舶と岸壁間の相対距離を取得する方法が提案されている。

船舶上に設置した二組のステレオカメラユニットからそれぞれ岸壁上のターゲットを検出し、各ステレオカメラにより計測したターゲット位置と距離を用いて船舶から岸壁までの距離と向きを推定する手法も提案されている [22]。二組のステレオカメラユニットは、例えば、船首前方、後方の二箇所に設置され、一つのステレオカメラユニットの中心に、ターゲット追尾用のカメラを置くことも提案している。また、岸壁上のターゲットは、文献 [20] のように専用のチャート等を設置するのではなく、画像中から SURF (Speeded-Up Robust Features) 特徴量 [24] により抽出した特徴点を認識させることを想定している。

これらの研究において、①は操船者への視覚補助が目的であるため、船舶と岸壁との間の相対的な位置関係を計測することを目的としていない。加えて、単眼カメラシステムであるため、既知の物体の画像上の大きさから距離を推定する必要がある。②は、自船からの距離計測のために既知のターゲットを用意する必要がある。文献 [22] のように、撮影画像から自動的に特徴点を決定し、検出する手法も提案されているが、検出した点が本当に岸壁上に存在するのかわを確認する必要がある。また、その点が岸壁の際に存在しない場合、その位置から岸壁際までの距離がわからなければ、離着栈のために自船を制御することはできない。このように、船上にカメラを設置する場合には、着岸対象となる岸壁の認識が課題となる。一方で、本提案手法では、陸上にカメラを設置するため、カメラから見た岸壁や構造物等の位置関係を既知の情報として扱え、船舶を直接的に計測することで、岸壁と船舶の位置関係を把握しやすいという効果が期待できる。

また、自動離着栈のナビゲーションに関して、自律型タグ及びパイロットボートに関する研究も進められている。

文献 [25] では、タグボート上に設置した2台のカメラから水面上に浮かぶブイを検出し、その位置関係からタグを自律航行させる手法が提案されている。ブイの検出は、あらかじめユーザが指定した色の範囲に該当する部分を抽出する、簡単なものである。2台のカメラはそれぞれ独立に動作しており、特にステレオカメラとして扱ってはいない。

文献 [26,27] では、4隻のタグにより自動着栈させるための制御モデルが提案されているが、各タグや着栈対象とする船舶との位置関係の取得方法は述べられていない。

これらの手法を実現するためには着栈対象の船舶と全てのタグボートを協調的に制御する必要がある。この場合、陸上に設置したカメラシステムであれば、各タグボートの位置関係と周囲の状況を一度に把握することが可能である。

1.3 本研究の目的

以上に述べた提案手法を実現するためには、解決すべき課題がいくつかある。一つは、陸上にカメラを適切に配置することである。海岸のどこに、どのような向きでカメラを配置すれば、監視対象とする海域を漏れなくカメラ画像に捉えることができるのかを見積もる必要がある。カメラの配置位置を決定する方法として、3次元または2次元のモデルを用いる手法が既に提案されている [28,29]。しかし、これらの研究は屋内空間や道路交通の監視を目的としたものであり、海上監視のように広い領域の監視には対応していない。そこで、本研究では、数キロメートル四方の領域に適用でき、ステレオ画像計測も可能なカメラ配置位置を自動的に決定する手法を検討する。

二つ目は、自動離着棧システムへの適用そのものである。前述の通り、船舶上に設置したカメラによる手法は既にいくつか提案されているが、自動離着棧を目的として、陸上に配置したステレオカメラによって船舶の位置計測を試みた報告はなされていない。

また、これまで提案されているステレオ画像計測による手法 [13-15] は、数百から数キロメートル先に存在する船舶を検出し、位置推定を行うことを目的としていた。離着棧では数メートルから数十メートル程度の距離が計測対象になること、必要とされる計測精度も高くなることから、従来と同じ計測手法は適用できない可能性がある。そのため、本研究では、離着棧を想定したシーンを対象に、陸上からのステレオ画像計測によって船舶を検出し、位置姿勢を推定する手法を検討する。

1.4 本論文の構成

本論文は6章で構成され、以下に各章の概要を述べる。

第2章では、本研究において基盤技術となるステレオカメラのキャリブレーション方法並びに3次元位置計測の原理について説明する。

第3章では、広海域の監視を目的として、陸上に配置するカメラの位置、向きを自動的に決定する手法について述べる。ふくそう海域である明石海峡付近を監視対象海域とした場合のカメラ配置をシミュレーションし、ステレオ計測時に得られる推定精度についても検討を行った。また、提案手法を自動離着棧システムへ適用する方法を検討し、実際のポンドをモデルの対象としてカメラ配置をシミュレーションした結果を示す。

第4章では、自動離着棧システムへ適用するに際しての課題提起と、その対応策について検討する。ステレオ画像計測では、二つのカメラ画像間の対応（視差）を正確に求めることが重要である。離着棧を対象とした場合、従来

の計測手法では、視差を正確に捉えることが難しいことを示し、本研究では Semi-Global-Matching (SGM) と呼ばれる画素単位で高精度に視差を求められる手法を新たに適用することを検討する。実際の着岸状態の船舶を対象に、3次元位置計測精度の検証を行い、自動離着棧に必要な計測精度が得られたことを示す。この提案手法により船体各部の3次元座標を得られることになるが、実際に自動離着棧システムとして実現させるには、カメラ画像中から船舶を検出すること、得られた3次元点群データより船舶自体の位置、姿勢を推定することが必要である。

そこで、第5章では、ステレオ画像から船舶を検出し、得られた点群データから位置、姿勢を推定する手法について検討した結果を述べる。具体的には、視差画像から“V-Disparity”、“U-Disparity”という概念を用いて3次元物体を直接的に抽出する手法の適用を検討する。さらに、本提案手法の特徴である、陸上にカメラを配置する利点を活かし、背景視差画像から簡単に動物体（船舶）を検出できることを示す。また、得られた点群データと、船舶の3次元モデルをフィッティングさせ、船舶の位置姿勢を推定する手法についても述べる。統合評価として、第3章でシミュレーションしたカメラ配置位置にて、実際の船舶が着岸する様子を撮影し、船舶の検出から位置姿勢推定までの一連の処理を行った結果について述べる。

最後に、第6章は、各章のまとめに基づき本研究の成果を要約し、論文全体のまとめとする。

第 2 章

ステレオカメラによる 3 次元位置計測

2.1 はじめに

本章では，本研究を通じて使用するステレオカメラによる物体の 3 次元位置計測原理について述べる．ステレオ画像計測により物体の 3 次元位置を計測するためには，各カメラにおいて，カメラ座標系と画像座標系間の関係，カメラ座標系と世界座標系間の関係をそれぞれパラメータとして，あらかじめ求めておく必要がある．この過程をカメラのキャリブレーションと呼ぶ．キャリブレーションの結果から，後述する，標準ステレオカメラモデルへの変換が可能になる．

また，ステレオ画像計測において，二つのカメラの間で物体がそれぞれのカメラに写る位置を正確に対応づけることが重要である．本研究では，陸上に配置したカメラの位置によって，どの程度の計測誤差が生じるのかをシミュレーションしたい．そのため，対応点に誤差が含まれる場合の計測精度の導出方法を述べる．

2.2 ステレオカメラの原理

ステレオ画像計測の原理について，図 2.1 に示す標準ステレオカメラモデルを用いて簡単に説明する．ここで，世界座標系とは，実際の 3 次元空間のある位置を基準として考えた座標系であり，カメラ座標系は，世界座標系内に存在するカメラの位置を原点とし，光軸方向に z 軸， z 軸に垂直な面に x 軸， y 軸をとる座標系である．標準ステレオカメラモデルは，二つのカメラの内部パラメータが同じ（焦点距離を 1 とするピンホールカメラ）で，両カメラの座標系

の x, y, z 軸が世界座標の X, Y, Z 軸と平行であり，両カメラ中心の Y, Z 座標が同じ位置に配置されるステレオカメラモデルである．すなわち，二つのカメラは世界座標系 $O - XYZ$ の $(-B/2, 0, 0)$ と $(B/2, 0, 0)$ にそれぞれ配置され，両方のカメラの焦点距離は 1，それらの光軸は Z 軸に平行である．このモデルでは，世界座標系で $P(X, Y, Z)$ に位置する物体が，各カメラ座標系の $p_l(x_l, y_l, 1)$ と $p_r(x_r, y_r, 1)$ にそれぞれ投影される．このとき，式 (2.1) により座標 (X, Y, Z) を得ることができる．

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{B}{x_l - x_r} \begin{bmatrix} (x_l + x_r)/2 \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ここで， B は基線長と呼ばれ，二つのカメラ間の距離を示す．実運用上，このような理想的なシステムを構築することは難しいため，2.3 節に示すように，カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを用いて，任意のカメラ位置から取得した画像を標準ステレオカメラモデルの画像へと変換する．

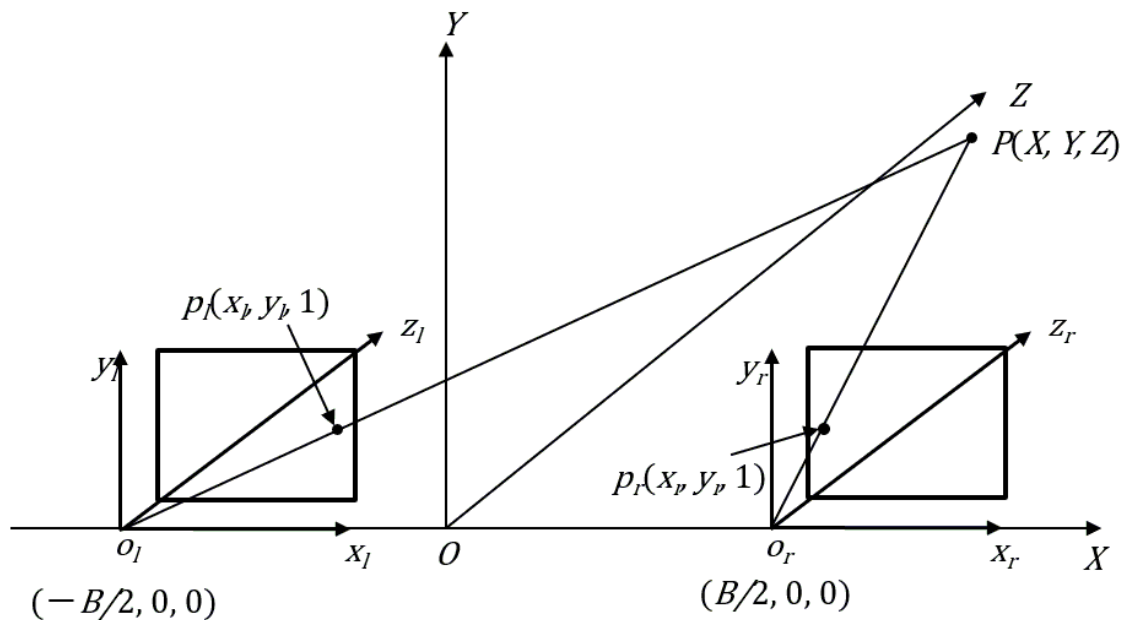


図 2.1 標準ステレオカメラモデル

2.3 カメラのキャリブレーションと平行化

2.2 節の x_l, y_l, x_r, y_r の値は左右のカメラ座標系の値であり， $O-XYZ$ と同じ単位（メートル等）で表される．一方で，カメラによってキャプチャされた画像から直接取得される情報はピクセル単位の画像座標系での値である．そのため，キャリブレーションを行い，カメラ座標系と画像座標系の対応関係をパラメータとして事前に取得しておく．このパラメータは，カメラの内部パラメータと呼ばれ，カメラ固有の値である．本研究では，オープンソースのコンピュータビジョンライブラリである OpenCV を用いてキャリブレーションを行ったため，OpenCV が扱うカメラモデルを以下に説明する [30]．

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

ここで，

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

さらに，

- x, y, z :カメラ座標系の値
- u, v :画像平面に投影された座標点
- \mathbf{K} :内部パラメータ行列
- s :スケーリング係数
- c_x, c_y :画像中心座標
- f_x, f_y :ピクセル単位の焦点距離

である．上記はレンズが歪んでいないことを前提としているが，実際のカメラのレンズは主に半径方向にわずかな円周歪みを持つため，上記のモデルは次のように拡張される．

$$\begin{cases} u = f_x x'' + c_x \\ v = f_y y'' + c_y \end{cases} \quad (2.4)$$

ここで,

$$\begin{cases} x'' = x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) \\ y'' = y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y', \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} x' = x/z \\ y' = y/z, \end{cases} \quad (2.6)$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2, \quad (2.7)$$

であり,

k_1, k_2, k_3 : 半径方向の歪み係数
 p_1, p_2 : 円周方向の歪み係数

とする.

上記は, カメラ座標系と画像座標系間の変換を示したものであり, カメラ座標系と世界座標系間の変換は次式で表される.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{t} \quad (2.8)$$

ここで,

\mathbf{R} : 回転行列
 \mathbf{t} : 並進ベクトル

である. これらはカメラの外部パラメータと呼ばれる.

また, カメラのキャリブレーション手法として, Zhang の手法が有名である [31]. この手法は, 大きさが既知である格子パターンが描かれた平面を, 位置や方向 (姿勢) を変えながら数十回撮像し, 画像から求めた格子点間の距離と正解距離との関係を最小二乗法により解くことでカメラの内部パラメータ, 外部パラメータを同時に推定する手法である. この手法は実際の 3次元空間上の座標を求める必要が無いというメリットがある. しかしながら, 本研究では広海域監視のためには数百から数千メートル, 離着栈の場合でも数十から数百

メートルまでの距離を計測したいため、カメラを設置する現場で二つのカメラから撮像可能なように巨大な格子パターンを使うことは現実的ではない。そのため、内部パラメータだけを事前に求めておき、レーザー測量器で3次元空間上の点をいくつか計測し、外部パラメータを推定することとする。

3次元空間上のある物体座標 (X, Y, Z) が画像座標上の (u, v) に投影されるとする。式 (2.2) 及び式 (2.8) より、

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

が導かれる。さらに、 (X, Y, Z) と (u, v) の組合せの関係は、

$$\begin{cases} u = \frac{a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}Z + a_{14}}{a_{31}X + a_{32}Y + a_{33}Z + a_{34}} \\ v = \frac{a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}Z + a_{24}}{a_{31}X + a_{32}Y + a_{33}Z + a_{34}} \end{cases} \quad (2.10)$$

と表現される。ここで、 a_{ij} ($i = 1 \sim 3, j = 1 \sim 4$) は行列 $\mathbf{A} = \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$ の i 行目ないしは j 列目の要素である。 n 組の3次元空間上の点 (X_k, Y_k, Z_k) ($k = 1 \sim n$) と画像上の点 (u_k, v_k) から最小二乗法により a_{ij} を求めることができる。そして、 $\mathbf{K}^{-1}\mathbf{A}$ より回転行列 \mathbf{R} と並進ベクトル \mathbf{t} が外部パラメータとして算出される。

最後に、二つのカメラの中心に世界座標系の原点をおくことを考える。図 2.1 のように、二つのカメラの光軸が平行になるよう、理想的に配置することは大変な作業であるが、カメラの向きは物体の世界座標系での位置とその画像座標のいくつかのペアから求めることができる。図 2.2 に示すように、カメラの向きを使用して計算することで、画像に投影された任意の点（同図中の青い点）を $Z = 1$ の平面（同図中の赤い点）に再投影することができる。この処理は図 2.2 の任意のカメラ配置から標準ステレオカメラモデルへの変換を意味し、画像を標準ステレオカメラモデルへ変換することを画像の平行化と呼ぶ。平行化（標準化）された画像では、左右のカメラに投影される物体の y 座標（高さ）が同じであるため、二つのカメラ画像間での対応点探索の問題を簡素化し、また探索精度を向上させることができる。平行化変換後の左カメラ画像上の座標 (u, v) と3次元上の座標 (X, Y, Z) の関係は式 (2.11) により表される。

$$(X, Y, Z) = \left(\frac{X_w}{W}, \frac{Y_w}{W}, \frac{Z_w}{W} \right),$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_u \\ 0 & 1 & 0 & -c_v \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & 1/B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ここで、各変数は以下の値を意味する。

- B : 二つのカメラ間の距離
- f : 焦点距離
- c_u, c_v : 画像中心
- d : 視差

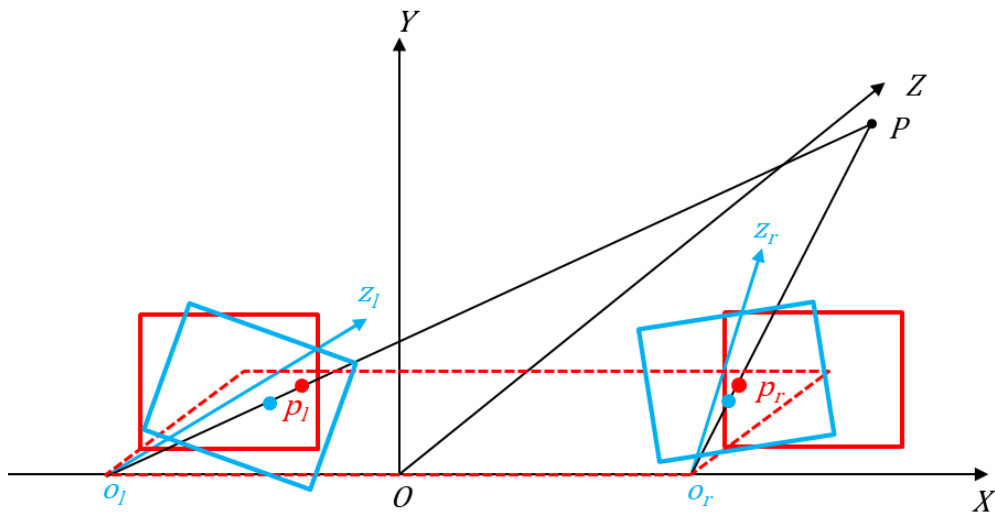


図 2.2 ステレオ画像の平行化

2.4 ステレオ計測の誤差

ステレオ画像計測における計測精度への影響として、二つのカメラ画像間の対応点付けに誤差が含まれる場合を考える [32]. ある左カメラ画像上の点 x_l に対応する右カメラ画像上の点 x_r に誤差 ϵ が生じると、物体 P の計測位置は、誤差を含んだ位置 P' として計測される. これは図 2.3 に示すように表される. このとき、 P' は式 (2.12) のように表され、差分 Δ は式 (2.13) で表される.

$$P' = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \frac{ZB}{B - \epsilon Z} \begin{bmatrix} X/Z + \epsilon/2 \\ Y/Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = P' - P = \frac{\epsilon Z}{B - \epsilon Z} \begin{bmatrix} B/2 + X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

この誤差 ϵ はカメラ座標系での値であるため、図 2.4 に示すように、カメラの水平解像度 N と視野角 (画角) θ などカメラの仕様を用いて表すことを考える. 第 N [pixel] から第 $N/2$ [pixel] までのカメラ座標系での長さは $\tan(\theta/2)$ となるため、第 $N/2$ [pixel] から第 i [pixel] までの長さは式 (2.14) で表される.

$$l_1 = \left(\frac{2i}{N} - 1 \right) \tan \frac{\theta}{2} \quad (2.14)$$

このとき、対応点の検出が δ [pixel] 分ずれたとすると、

$$l_2 = \left\{ \frac{2(i + \delta)}{N} - 1 \right\} \tan \frac{\theta}{2} \quad (2.15)$$

として表されるため、誤差 ϵ はこれらの差であるから、

$$\epsilon = \frac{2\delta}{N} \tan \frac{\theta}{2} \quad (2.16)$$

として求めることができる.

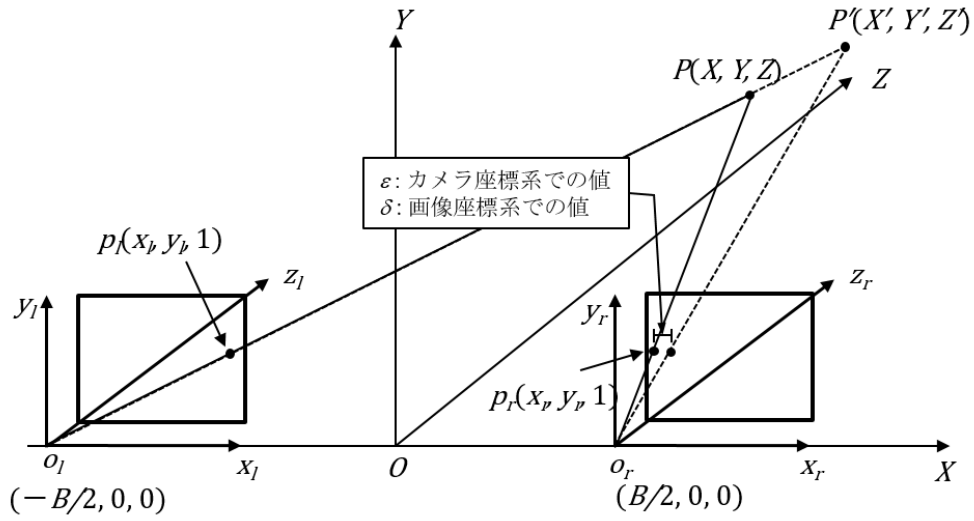


図 2.3 誤差を含むステレオ画像計測

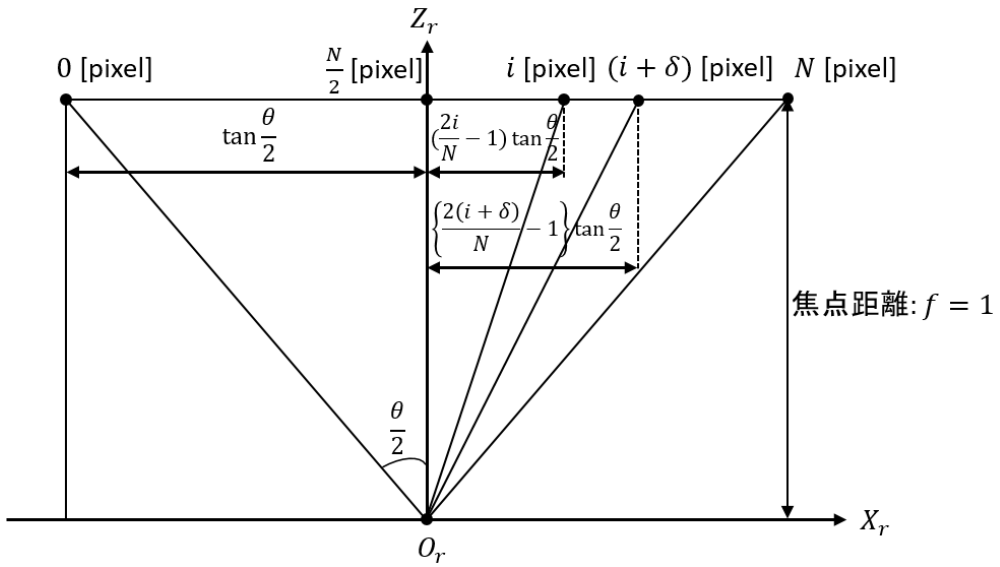


図 2.4 水平画素数と視野角の関係

第3章

海域監視のためのカメラ配置位置の決定法

3.1 はじめに

第1章において提案したカメラ画像による船舶の監視システムを実現するにあたり、カメラの台数、どこに、どのように配置するかは重要な問題である。本章では、カメラの配置位置とその方向を自動的に決定する手法について述べ、さらに配置したカメラの中からある2台のカメラを用いてステレオ視した場合の3次元計測精度について検討した結果を述べる [33].

3.2 陸上へのカメラ配置位置の自動決定法

3.2.1 アルゴリズム

本提案手法の主目的は対象領域を監視するためにカメラの最低限必要な台数と配置位置及び方向を決定することである。まず、監視対象領域を含む地図画像を用意する。本研究では、国土地理院より入手した明石海峡大橋付近の地図データ（図 3.1） [34] を用い以降の説明を行う。

はじめに、地図上でカメラの配置候補位置を算出するが、海岸から離れるほどカメラと海域の間に障害物等による死角が生じやすくなる可能性があるため、できる限り海岸線上にカメラを配置することが望ましい。そこで、地図データから海岸線を抽出することを考える。

海岸線を抽出することは、陸地部分と海域とを分割することと等しい。単純に色やエッジに基づいて識別することも考えられるが、地図上の地名や地図記号により適切に分離することが難しい。そこで、本研究では Mean Shift [35] に



図 3.1 地図データの例

よる画像の平滑化によるセグメンテーションと Canny エッジ検出 [36] の組み合わせにより海岸線を検出する方法を検討した．Mean Shift により画像の平滑化を行うことで，不要なエッジや文字の部分削除することが狙いである．

ここで，Mean Shift について簡単に説明する．図 3.2 に示すように，ある空間内に点の集合があるとする．半径 h の円を考え，初期位置 C_0 からその円内にある点の平均（重心）を求め，平均位置へ円の中心を移動させる．平均位置の計算と移動を繰り返すことで，円の中心は点の密度が最大（極大点）となる位置（同図中の赤い円及び点 C_m ）へ移動させることができる．点 p を中心とする円内の点の平均位置 $m(p)$ は次式で表される．

$$m(p) = \frac{\sum_{i=1}^n K(\mathbf{p}_i; \mathbf{p}, h) \mathbf{p}_i}{\sum_{i=1}^n K(\mathbf{p}_i; \mathbf{p}, h)} \quad (3.1)$$

ここで， $K(\mathbf{p}_i; \mathbf{p}, h)$ は，

$$K(\mathbf{p}_i; \mathbf{p}, h) = \begin{cases} 1 & \text{if } \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_i\| \leq h \\ 0 & \text{if } \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_i\| > h, \end{cases} \quad (3.2)$$

として定義され，カーネルと呼ばれる．

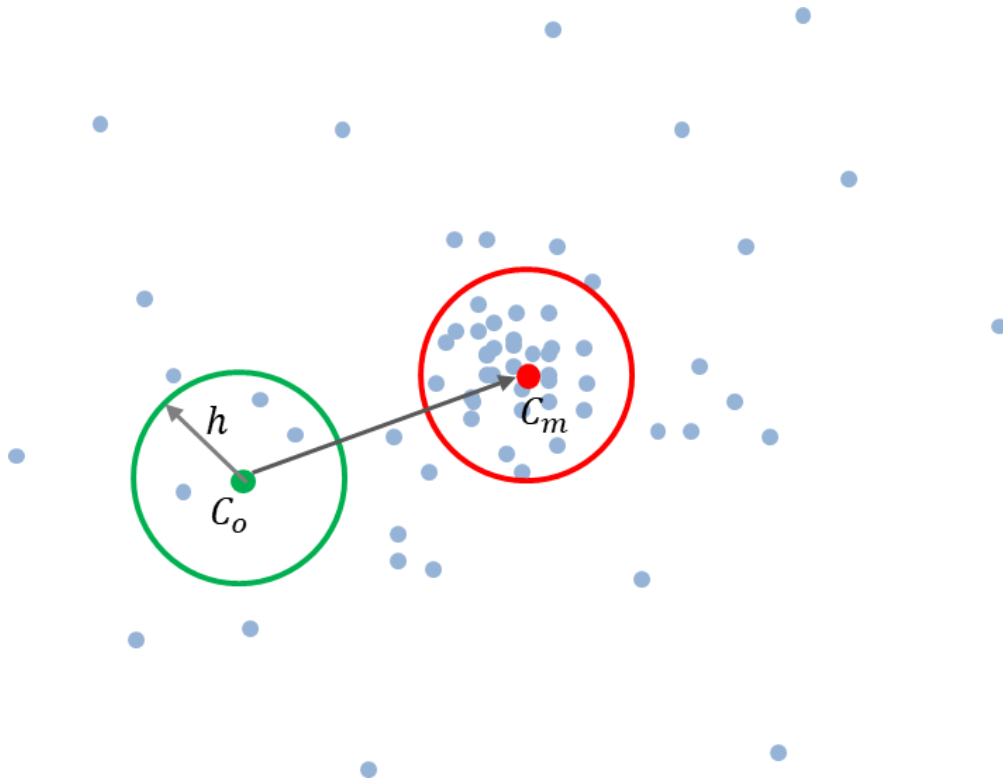


図 3.2 Mean-Shift のイメージ

RGB 画像において、各画素は (r, g, b) の 3 次元の値を持つ。上記の 2 次元の点分布と同様に、RGB の 3 次元空間における点分布について、画素 $p(r, g, b)$ における 3 次元ベクトル \mathbf{p} はその近傍に存在する極大値に向かって移動していくことになる。Mean Shift による画像の平滑化、セグメンテーションでは、画像内の全画素を各点近傍で極大値（平均値）となる RGB 値へ順次置換していくことにより、物体領域内の色や輪郭部の精緻さが失われることで、画像を滑らかに、あるいは大まかに物体領域を分割する効果が得られる。ただし、画像中で離れた位置に存在する同色の物体同士が同じ色に置換されてしまうことを避けるため、各画素のベクトルを (r, g, b) だけでなく、位置 (u, v) の情報を含む 5 次元ベクトル (r, g, b, u, v) に拡張する手法 [35] が一般的である。このとき、カーネルは以下のように定義される。

$$K(\mathbf{p}_i; \mathbf{p}, h) = K_s(\mathbf{p}_i^s; \mathbf{p}^s, h_s) K_r(\mathbf{p}_i^r; \mathbf{p}^r, h_r) \quad (3.3)$$

ここで、

$$\mathbf{p}_i = (\mathbf{p}^s, \mathbf{p}^r), \mathbf{p}_i^s = (u, v), \mathbf{p}_i^r = (r, g, b), \quad (3.4)$$

であり、 h_s は位置空間内の超球の半径、 h_r は色空間内の超球の半径である。

次に、Canny 法によるエッジ検出の原理を簡単に説明する。エッジ検出は画像中のノイズに敏感であるため、初めに 5×5 [pixel] サイズの Gaussian フィルタにより平滑化（ローパスフィルタリング）を行う。次に、平滑化された画像から Sobel フィルタにより縦方向 (G_y) と横方向 (G_x) のエッジを求め、エッジ強度（勾配）(G) と方向 (θ) を次式により求める。

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3.5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x}$$

続いて、エッジの方向を図 3.3 に示すように 4 つに分類し、エッジの法線方向の 3 画素のエッジ強度を用いて極大点の判定を行う。中央のエッジ（同図中赤丸の画素のエッジ）強度が残り二つのエッジ強度よりも大きければその画素のエッジは極大点となり、中央のエッジ強度が最大とならない場合はエッジ点から除外する。この処理は一般的に「非極大値の抑制」と言われており、エッジ部分を細線化していることと等しい。この細線化された画像に対して、二つの閾値（最大閾値、最小閾値）を用いて 2 値化する。エッジ強度が最大閾値以上のエッジは真のエッジとし、最小閾値以下の場合にはエッジでないともなし除外する。エッジ強度がこの二つの閾値の間である場合、このエッジが真のエッジに繋がっている場合は真のエッジとして残す。そうでない場合は真のエッジでないともなし除外することで、最終的に画像中の強いエッジを検出する。

図 3.1 の地図画像に対して平滑化を施した結果を図 3.4(a) に示す。本研究では Mean Shift のカーネル半径をそれぞれ、 $h_s = 100$, $h_r = 40$ として処理を行った。このカーネル半径の値は対象とする画像の解像度に応じて適切に調整する。図 3.1 の地図画像の解像度は 1280×960 [pixel] である。内陸部分の細かい線や、海域部分の破線、地名等が削除されているのがわかる。さらに、Canny エッジアルゴリズムにより陸地部分と海域部分とのエッジを抽出する。最大最小閾値はそれぞれ 200, 50 とした。その結果を図 3.4(b) に示す。見やすくするため、エッジ部分を黒、それ以外の部分を白で表現している。平滑化後の画像に対してエッジ検出しているため、ほぼ海岸部分のエッジを検出できているが、一部の地名部分等がエッジとしてまだ残ってしまっている。そのため、エッジとして検出された画素に対して、元の地図データ上の座標の近傍 5×5 [pixel] の領域

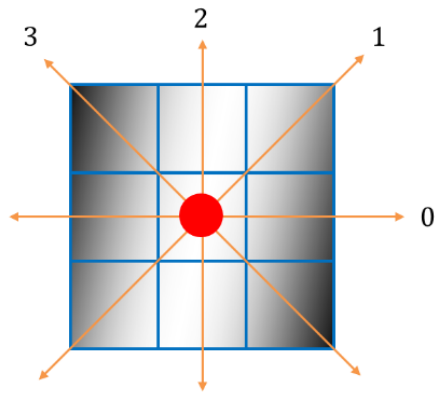


図 3.3 エッジ方向の分類

の画素値が r , g , b ともに 250 以上の画素が一画素でも存在するとき、そのエッジ点は海域ではなく陸地であるとみなし、非エッジ点として除外する。この結果を図 3.4(c) に示す。残っていた地名部分等がほぼ削除されていることがわかる。このエッジ点位置をカメラの設置候補位置とする。



(a) Mean-Shift による平滑化



(b) エッジ抽出結果



(c) カメラ配置候補

図 3.4 陸地と海域の分離

監視対象領域を取り囲むようにカメラを配置したいため、監視対象領域の中心から同心円上、時計回りに候補位置を探索し、カメラを配置していく。ある候補位置にカメラを置き、カメラを回転（パン）させた場合、図 3.5 に示すように、カメラが最も監視対象領域を見ることができる回転角を求める。図中の扇形は船舶を捉えることができる範囲を示している。 θ はカメラの画角であり、扇形の半径は以下に示す方法で決定される。図 3.6 はカメラの画角と、カメラから物体までの距離の関係を示している。カメラの射影方式が中心射影（いわゆるピンホールカメラモデル）であるとして、カメラから距離 Z [m] にある物体幅 W [m] の物体は、画像座標で幅 w [pixel] に投影されるとする。この関係は単純な幾何的な関係より、

$$2Z \tan \frac{\theta}{2} : W = N : w, \quad (3.6)$$

として表せる。 N は画像の水平解像度である（単位は pixel）。ここで、監視したい最小サイズの船舶の大きさを W_s [m]、画像から船舶を検出するために最低限必要な画素数を w_s [pixel] とすると、カメラから観測可能な距離 Z_{max} [m] は、式 (3.7) で求められる。表 3.1 に $N = 3840$ [pixel]、 $W_s = 5$ [m]、 $w_s = 10$ [pixel] とした場合のカメラ画角と距離の関係を例として示す。画角が小さくなるほど撮像可能な距離は長くなることがわかる。

$$Z_{max} = \frac{1}{2} \frac{W_s N}{w_s} \frac{1}{\tan(\frac{\theta}{2})} \quad (3.7)$$

表 3.1 画角と撮像可能距離の関係

画角 ([°])	距離 ([m])
45	2317
60	1662
120	554

他のカメラは残りの候補位置に配置され、以降に示す方法で配置位置と向きを決定する。本研究では、単眼モードとステレオモードの2種類のカメラ配置方法を提案する。

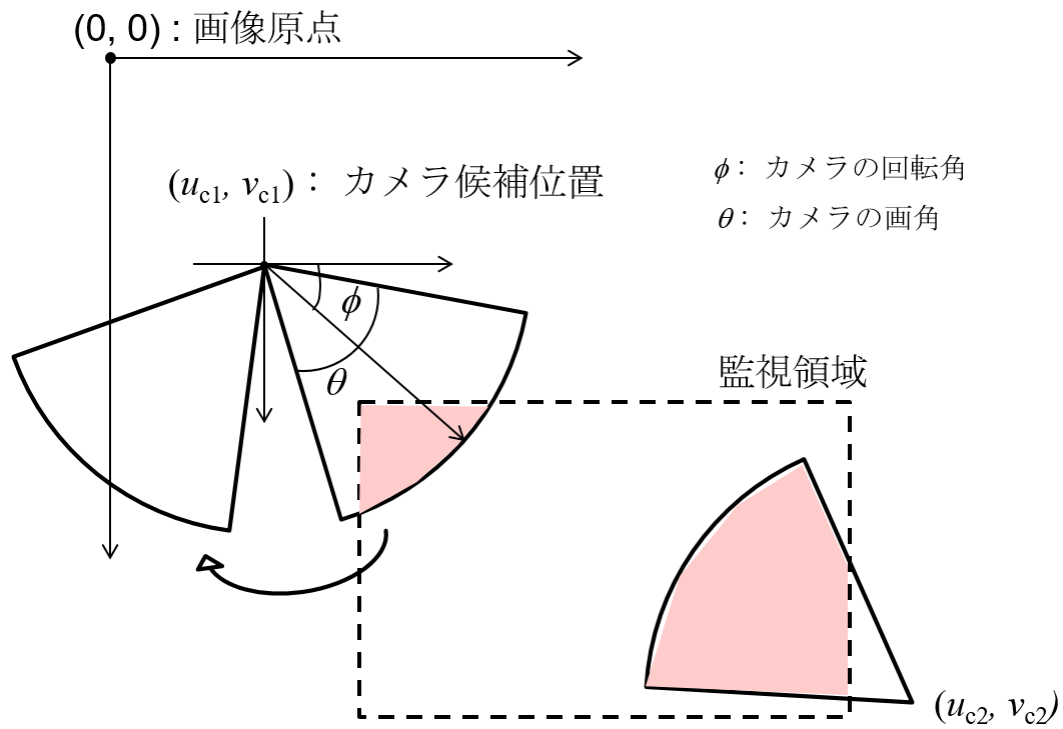


図 3.5 カメラの監視領域

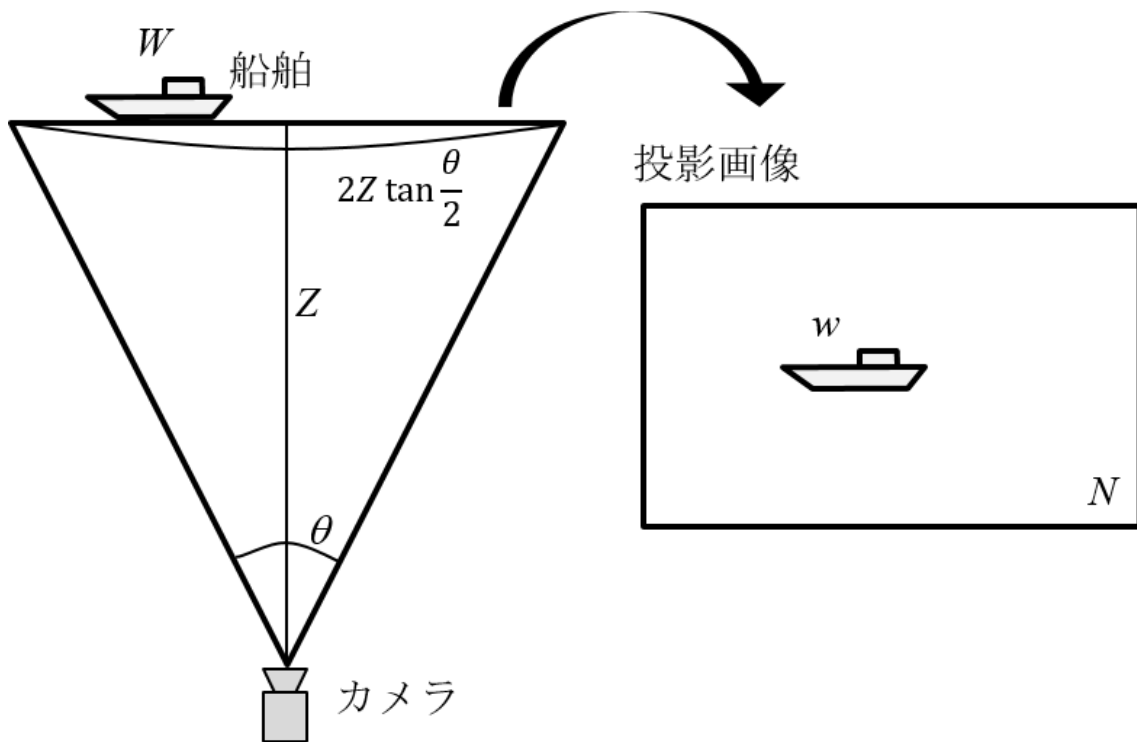


図 3.6 カメラ画角と距離の関係

単眼モードでは、監視領域中の船舶は少なくとも1台のカメラにより監視される。カメラの向きは、まだ対象領域に含まれていない領域を可能な限り新たに含むように決定する。一旦、カメラの最大設置台数分、配置する処理を繰り返す。その後、1台のカメラで監視可能な領域が、そのカメラを取り除いても減少しない場合、カメラを取り除き、カメラ台数を減らす。例えば、図 3.7 に示すように5台のカメラを監視領域に配置したとする。このとき、カメラ候補②の監視領域はカメラ候補①とカメラ候補⑤の監視領域と重なっている。すなわち、カメラ候補②を取り除いたとしても、監視可能領域が減少するわけではない。このようにして、不要なカメラが除去されることにより、最低限必要なカメラ台数及び各カメラの設置位置と向きが決定される。

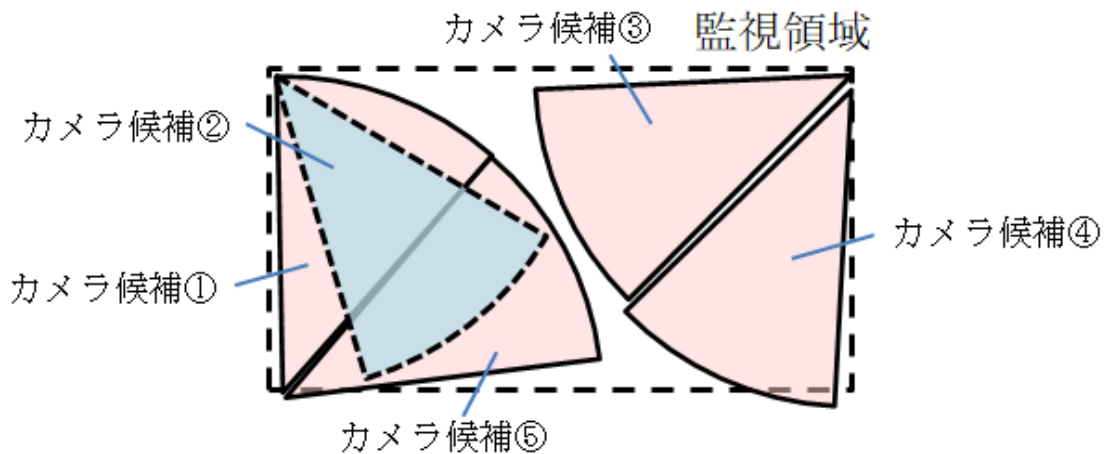


図 3.7 カメラの配置と除去

ステレオモードでは、少なくとも2台のカメラを使用して船舶の位置を特定する。ステレオ計測するためにはカメラ間に一定の距離が必要であるため、候補位置から既に配置されているカメラまでの距離が一定値未満の場合は、候補位置からは除外し、新たにカメラを配置していく。カメラの向き決定方法は単眼モードと同じである。ステレオモードにおいては、そのカメラを取り除いた場合に、少なくとも2台のカメラで監視可能となるように不要なカメラを除去する。本手法では、各カメラ間の監視領域が重複しない領域では単眼カメラにより船舶を検出することができ、重複領域では、ステレオ画像計測により3次元位置を特定することが可能である。

なお、本提案手法はカメラの配置位置、向きについて最適性を与えるものではない。また、配置位置、向きの決定に際して、探索空間は地図画像の解像度を $W_I \times H_I$ [pixel]、カメラの回転角を 1° 刻み、カメラの最大設置台数を N_c と

すると、 $W_I \times H_I \times 360 \times N_c$ の探索空間になる。ただし、カメラの候補位置は本手法のようにエッジ抽出等で限定されるため、地図画像の解像度目一杯ということは無く、カメラの回転角も $5[^\circ]$ 刻み等の間引くことで十分現実的な計算量に収まると考えられる。

最後に、本提案手法全体の処理フローを図 3.8 にまとめる。アルゴリズムへは、地図画像データ、縮尺（単位は $[m/pixel]$ ）、監視領域、配置モード（単眼 or ステレオ）が入力され、地図画像データから Mean Shift, Canny 法等の処理を経てカメラの配置候補位置が出力される。縮尺はカメラの撮像範囲の算出に使用される。候補位置と、監視領域、縮尺から配置位置が算出され、必要なカメラの台数と各カメラの配置位置が出力される。ステレオモードの場合、二つのカメラの組合せからステレオ計測精度を推定する。

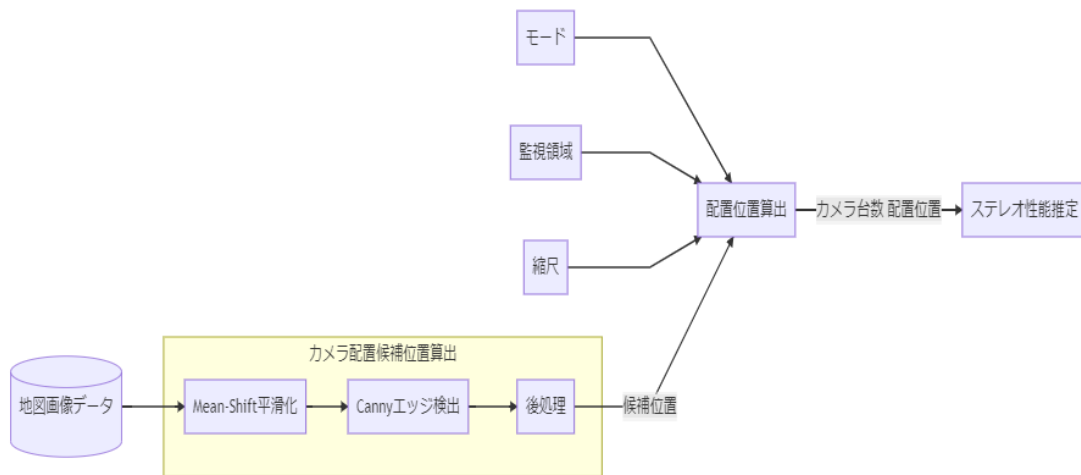


図 3.8 処理フロー概観

3.2.2 カメラ配置の例

前節で述べた手法により、監視対象領域を図 3.9 に示す領域として、解像度等の条件を表 3.2 に示す値として、カメラの配置位置をシミュレーションした。その結果を図 3.10 に示す。同図 (a) は単眼モードの結果を、同図 (b) はステレオモードの結果をそれぞれ示している。扇形の淡色部分は 1 台のカメラで監視している領域を意味しており、濃色部分はステレオ計測で監視可能な領域を意味している。このとき、カメラの画角は $25[^\circ]$ であり、単眼モードでは 7 台のカメラで監視領域を 100[%] 監視することができ、ステレオモードでは 14 台のカメラで 99[%] の領域を満たすことができる。



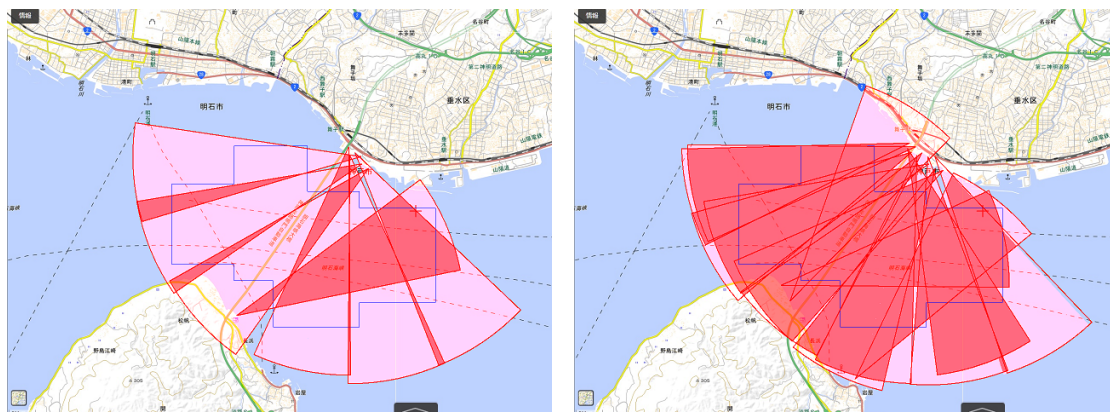
図 3.9 監視領域

表 3.2 シミュレーション条件

N	3840 [pixel]
W_s	5 [m]
w_s	10 [pixel]

図 3.11 はカメラの画角を 60° にした場合（単眼モード）の例である．カメラの画角を広角にすると，撮像可能距離が短くなるため，同図に示すように監視できない領域が生じてしまうことがわかる．

カメラの画角を変化させた場合のカメラ台数と監視領域のカバー率を表 3.3, 3.4 に示す．ここで，単眼モードにおける「カバー率（ステレオ）」は，ある 2 台のカメラの監視領域の一部が重なっており，その部分のみステレオ計測可能である領域の割合を示している．また，ステレオモードにおける「カバー率（単眼）」は，2 台のカメラで同じ監視領域を見ることはできていないが，単眼カメラとして対象とする監視領域を捉えることができている領域の割合を示している．カバー率 100[%] を達成した試行のうち，単眼モード，ステレオモードともに画角 25°] のとき最小のカメラ数となった．



(a) 単眼モード

(b) ステレオモード

図 3.10 カメラ配置結果 ($\theta=25[^\circ]$)

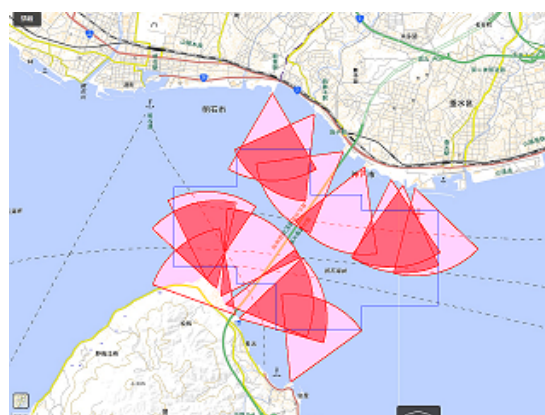


図 3.11 カメラ配置結果 ($\theta=60[^\circ]$)

表 3.3 カメラ配置の結果（単眼モード）

画角 ([°])	台数	カバー率（単眼） ([%])	カバー率（ステレオ） ([%])
20	12	99	60
25	7	100	38
30	9	100	51
35	10	100	64
40	12	100	69
45	12	99	59
50	14	96	58
55	13	89	47
60	14	73	44

表 3.4 カメラ配置の結果（ステレオモード）

画角 ([°])	台数	カバー率（単眼） ([%])	カバー率（ステレオ） ([%])
20	21	100	100
25	14	100	99
30	17	100	99
35	19	100	99
40	21	100	99
45	22	100	97
50	25	97	95
55	25	90	85
60	24	76	72

別海域への適用例として、図 3.12 に示す領域を監視対象としてシミュレーションを行った。地図画像 [34] の解像度は図 3.9 の例と同じであるが、地図の縮尺が小さくなっており、より広範囲の領域を監視対象としている。シミュレーション条件を表 3.5 に示す。このとき、カメラの画角を変化させた場合のカメラ台数と監視領域のカバー率を表 3.6, 3.7 にそれぞれ示す。カバー率 100[%] を達成した試行のうち、単眼モードではカメラ画角 $15[^\circ]$ 、ステレオモードでは画角 $20[^\circ]$ のときそれぞれ最小のカメラ数となった。このときのカメラ配置の様子を図 3.13 に示す。

また、本手法はカメラ数と配置の関係について、最適解を与えるものではなく、最初に配置したカメラ次第で、その後の配置に影響を及ぼす可能性がある。そこで、上記の画角 $15[^\circ]$ の単眼モード、画角 $20[^\circ]$ のステレオモードにおいて、カメラの候補位置の探索をそれぞれ逆順にしたところ、図 3.14 に示す配置結果が得られた。このとき、単眼モードではカメラ数が 12、カバー率は 100[%] (単眼), 37[%] (ステレオ) となり、カメラ数は変化ないが、ステレオ視可能なカバー率は 3[%] 低下する結果となった。一方で、ステレオモードでは、カメラ数が 23、カバー率は 100[%] (単眼), 100[%] (ステレオ) となり、カバー率は変化ないが、カメラ数は増える結果となった。図 3.13 と図 3.14 を見比べると、ステレオモードではカメラ数の変化はあるものの、配置の様子にそこまで大きな変化は見られない。一方で、単眼モードは濃色部分の表れ方が異なり、ステレオ視可能な領域が異なるということがわかる。ステレオモードでは、二つのカメラで監視領域として含まれる領域部分の面積を評価するのに対して、単眼モードは一つのカメラでその面積を評価するため、配置の自由度が高くなり、配置順による影響を受けやすくなると考えられる。配置候補位置の選択順の最適性は今後の検討課題である。



図 3.12 監視領域

表 3.5 シミュレーション条件

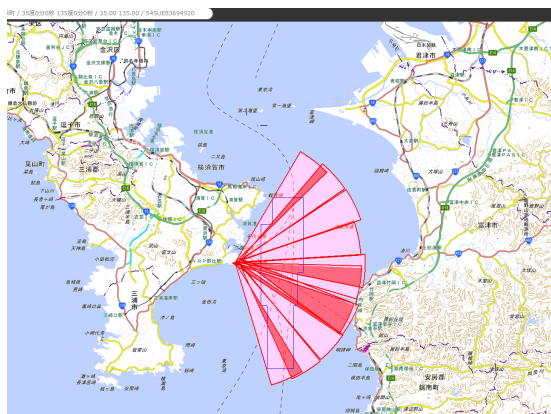
N	5120 [pixel]
W_s	5 [m]
w_s	10 [pixel]

表 3.6 カメラ配置の結果（単眼モード）

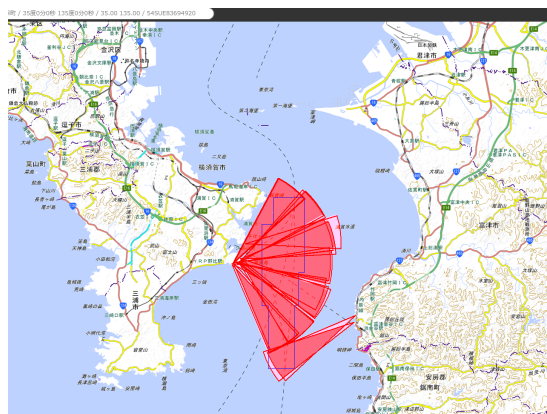
画角 (°)	台数	カバー率（単眼） ([%])	カバー率（ステレオ） ([%])
10	22	100	50
15	12	100	40
20	13	100	58
25	11	90	28
30	15	73	47
35	10	57	37

表 3.7 カメラ配置の結果（ステレオモード）

画角 (°)	台数	カバー率（単眼） ([%])	カバー率（ステレオ） ([%])
10	37	100	99
15	23	100	100
20	22	100	100
25	21	90	88
30	23	73	71
35	19	56	56

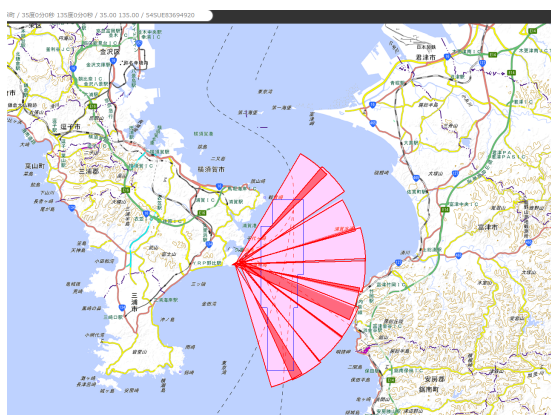


(a) 単眼モード ($\theta=15^\circ$)

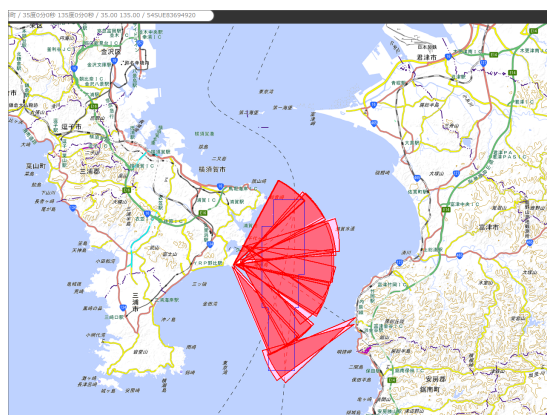


(b) ステレオモード ($\theta=20^\circ$)

図 3.13 カメラ配置結果



(a) 単眼モード ($\theta=15^\circ$)



(b) ステレオモード ($\theta=20^\circ$)

図 3.14 カメラ配置結果 (逆順)

続いて、ステレオ計測精度について検証する。図 3.10(b) に示すカメラ配置において、14 台のカメラの組合せのうち、ステレオ計測のために監視領域が重なる組合せは 43 通りである。2 台分だけを配置した様子を図 3.15 に示す。このうち、適当に 4 パターンの組合せを評価する (図 3.16)。元の地図データの画像サイズは 1280×960 [pixel] であり、2 台のカメラ間の距離は地図画像上の各カメラの座標と地図画像の縮尺より求めることができる。2 台のカメラ間の距離を表 3.8 に示す。式 (2.13), (2.16) よりステレオ計測精度を予測した結果を図 3.17 に示す。同図中のカメラ番号の後の数値は、表 3.8 に示す各ステレオカメラペアのベースライン距離である。カメラの水平画角が 25° の場合、計測限界距離は 4330 [m] である。このとき、カメラのキャリブレーション誤差や設置誤差が含まれない理想的な状態において、対応点の検出誤差 δ が 1 [pixel] である場合、距離誤差は 0.4% 未満であることがわかる。もちろん、検出誤差 δ を小さくできれば、距離測定誤差はさらに低減可能である。

表 3.8 カメラ間の距離

カメラ 1& 2	396[m]
カメラ 11&14	2262[m]
カメラ 3& 4	427[m]
カメラ 9&10	134[m]

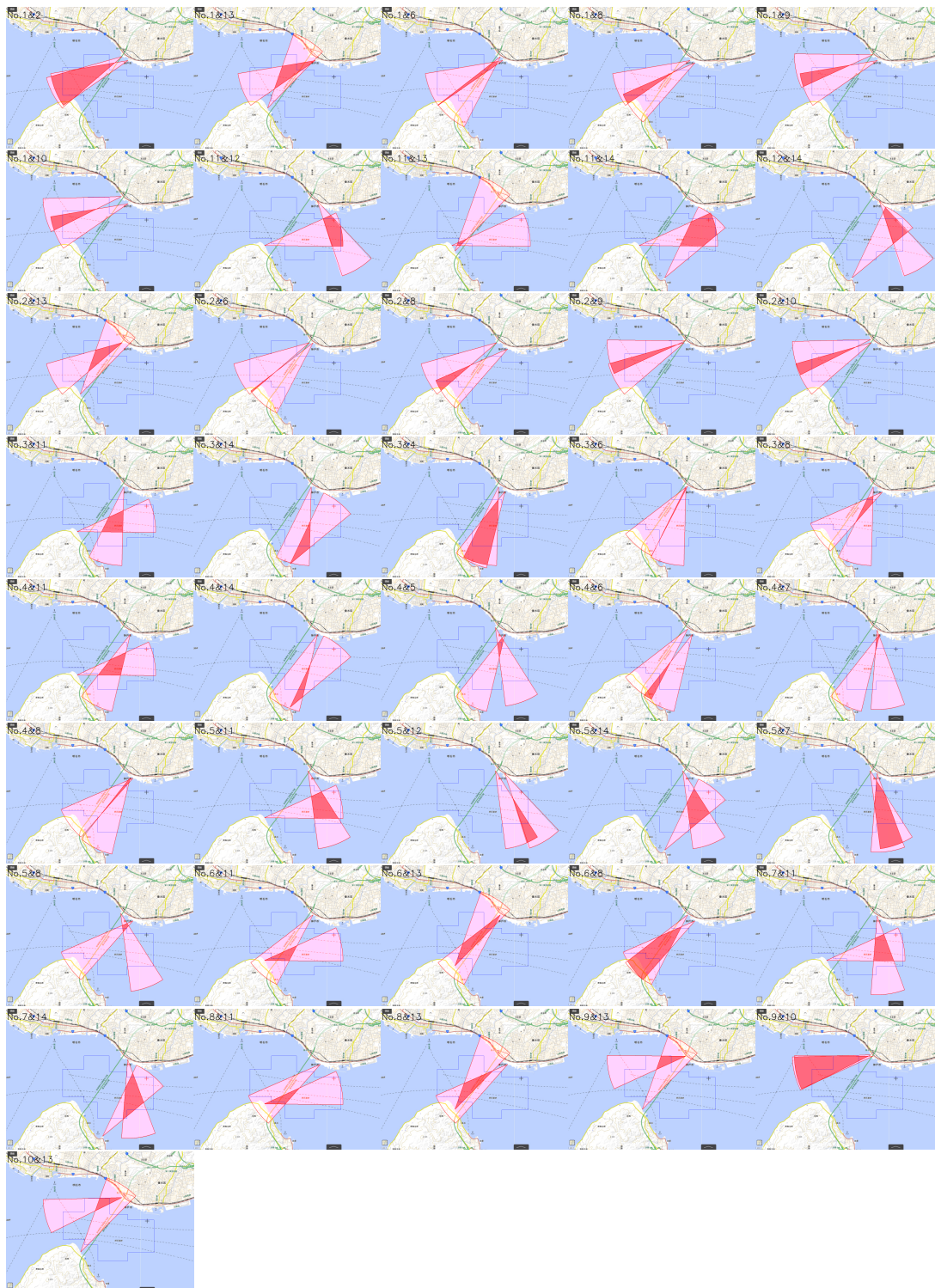


図 3.15 カメラ配置 2 台の組合せ

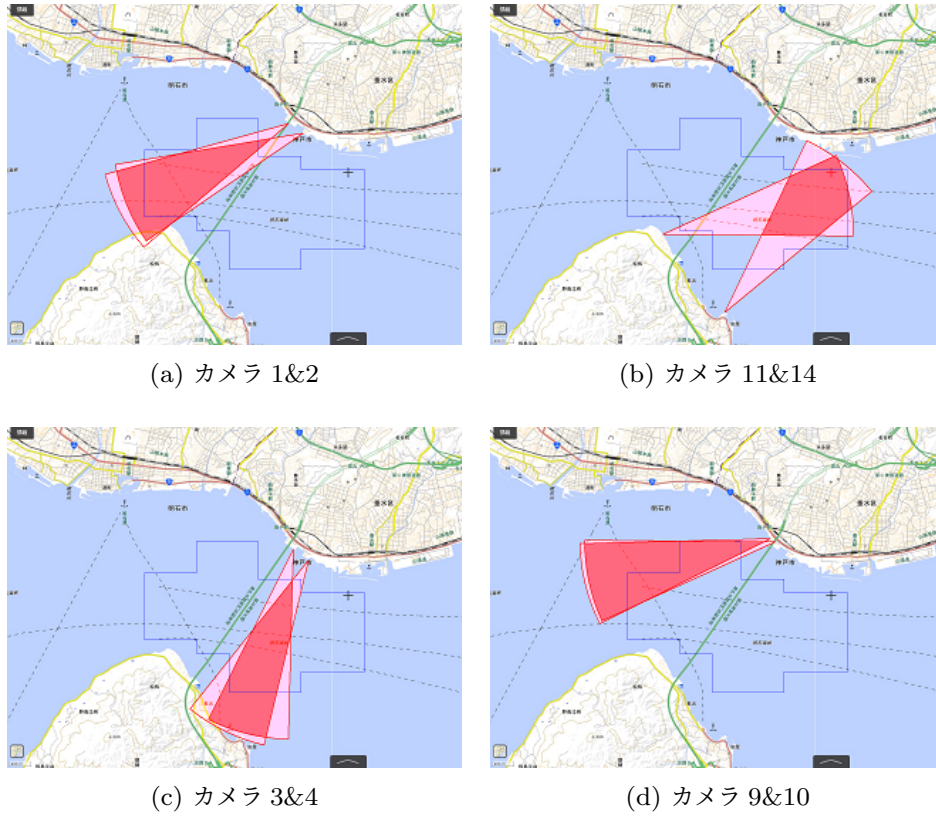


図 3.16 計測精度推定対象のカメラ組合せ

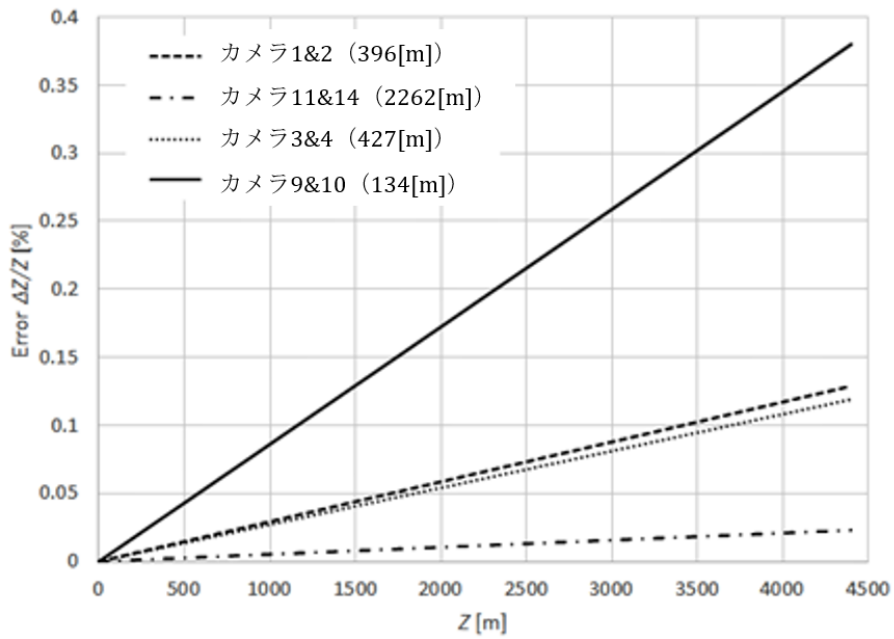


図 3.17 ステレオ計測時の推定誤差

3.3 自動離着棧システムへの適用

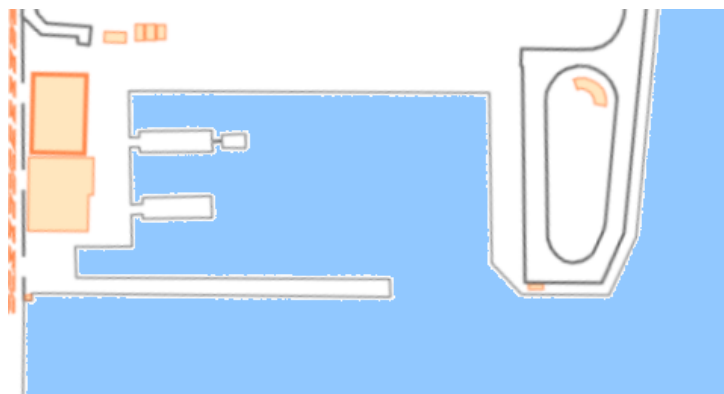
岸壁側に設置したカメラから離着棧する船舶を検出，位置計測し，その位置姿勢データを基に自動離着棧させることを目指している．その中で，カメラを岸壁上のどこに配置するかという問題は非常に重要な問題である．本節では，前節で提案したカメラ配置位置の自動決定法を自動離着棧システムへ適用することを検討する．本研究では，本学ポンド及び練習船深江丸を離着棧対象船舶として検討を行う．図 3.18 に対象とする岸壁の概観と地図データを示す．



(a) 岸壁概観

(出典：

<https://www.google.co.jp/maps/@34.7178261,135.2918273,170m/data=!3m1!1e3?hl=ja>)



(b) 地図データ

(出典：<https://maps.gsi.go.jp/#18/34.717814/135.292203/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1j0h0k010u0t0z0r0s0m0f1>) を基に一部修正して使用

図 3.18 岸壁モデルと地図データ

3.3.1 アルゴリズム

前節では，カメラを海岸線沿いに配置するとして，地図画像データから陸地と海域を識別し，候補位置を算出した．離着岸シーンを対象とする場合，岸壁の際にカメラを設置すると，接岸する船舶と至近距離で接写することになるため，船舶のある一部分のみしか撮像できなくなってしまう可能性が非常に高い．そのため，検出した海岸線上でなく，その内側の領域を設置候補位置とする．すなわち，図 3.18(b) の白色部分が配置候補位置となる．しかしながら，単に海岸（岸壁）線上の候補位置を除くだけでは，「接岸する船舶を至近距離で撮像することになる」という問題は解消されない．そのため，岸壁線から内側 10[pixel] (5[m]) の領域は設置不可領域として候補位置から除外する（図 3.19 黄色部分）．

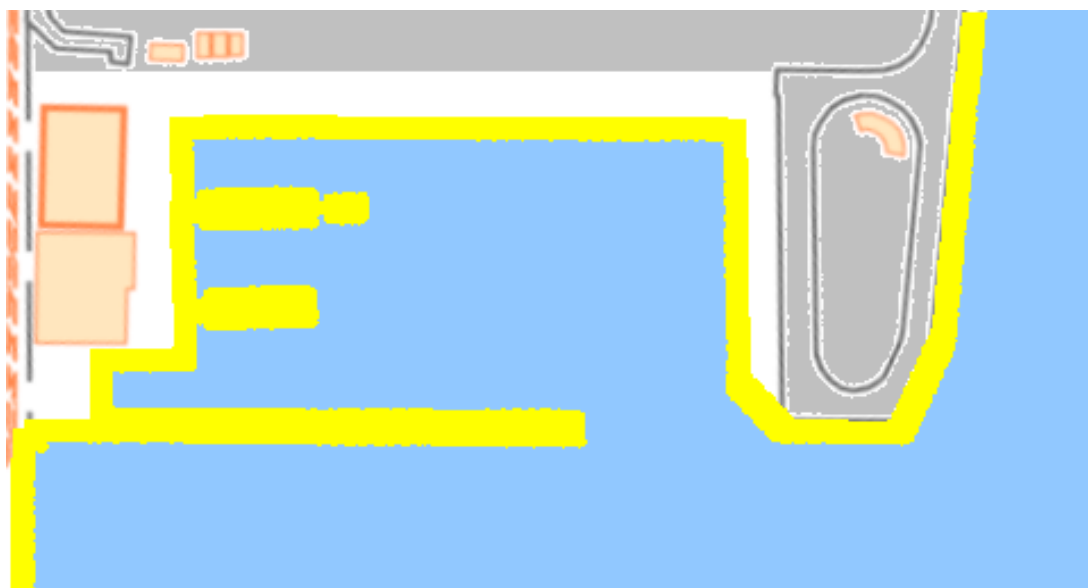


図 3.19 候補位置除外領域

続いて，図 3.18(a) を図 3.20 に示すようにモデル化する．岸壁を X ， Z 軸として， Z 軸に対して接岸を行うものとする．3.2 節と同様にして，陸上に配置したカメラから計測したい領域を同右図のように設定し，ある位置，ある向きにカメラを置いた場合にカメラが撮像（計測）可能な領域（面積）を計算する．

離着岸システムを想定しているため，着岸する岸壁と船舶の相対位置を求めたい．また，ステレオ計測を行うため，2 台のカメラから対象となる岸壁が写っている必要がある．そこで，例として図 3.21 に示すとおり岸壁上で必ず撮像したい部分を OA ， OB とし，計測可能領域に必ず含まれるようにする．このと

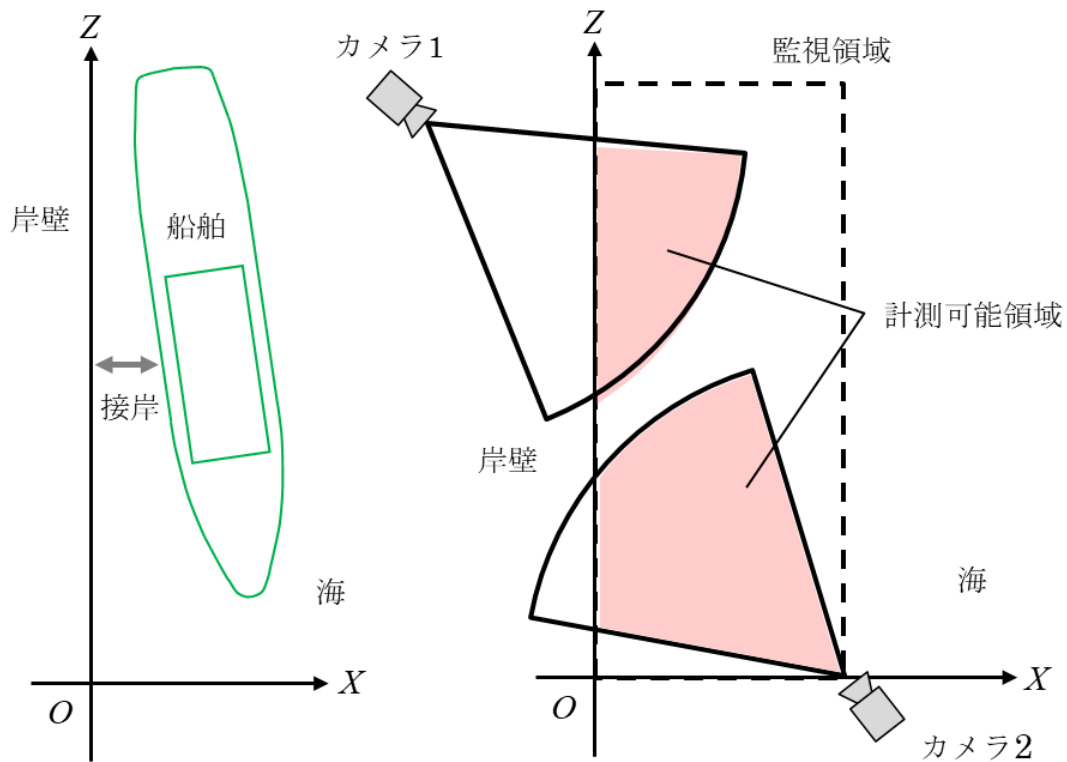


図 3.20 岸壁のモデル化

き、同図中のカメラ1の位置、向きでは岸壁OBは写るが、岸壁OAは船舶の位置によっては撮像できない。一方で、カメラ2は両方の岸壁部分を撮像可能である。これは、カメラの視線が必ず岸壁（陸側）から海上へと抜ける必要があることを示している。カメラ1の視線において、OB部分は陸から海へ抜けるが、OA部分は海から陸へ抜けることになるため、不適切である。この条件を満たすためには、カメラのある候補位置 $C(x_c, z_c)$ が、 $x_c < 0 \cap z_c < 0$ であればよい。このように、カメラの視線と岸壁との関係も考慮する。また、ステレオカメラにおいては二つのカメラ間の距離（基線長）を短くするほどそれぞれのカメラの画角が重なる領域が増えるため、計測対象領域も大きくすることができる。しかしながら、基線長はできる限り大きくする方が3次元計測としては有利になる。そのため、二つのカメラ間の距離も一定以上となるように条件を設ける。これらの追加の制約条件も加味し、カメラの撮像領域が計測対象領域を最大限に満たす2台のカメラの位置、向きの組合せを求める。なお、本手法では不要カメラの除去処理は行わず、条件に合致した配置位置を列挙することとした。

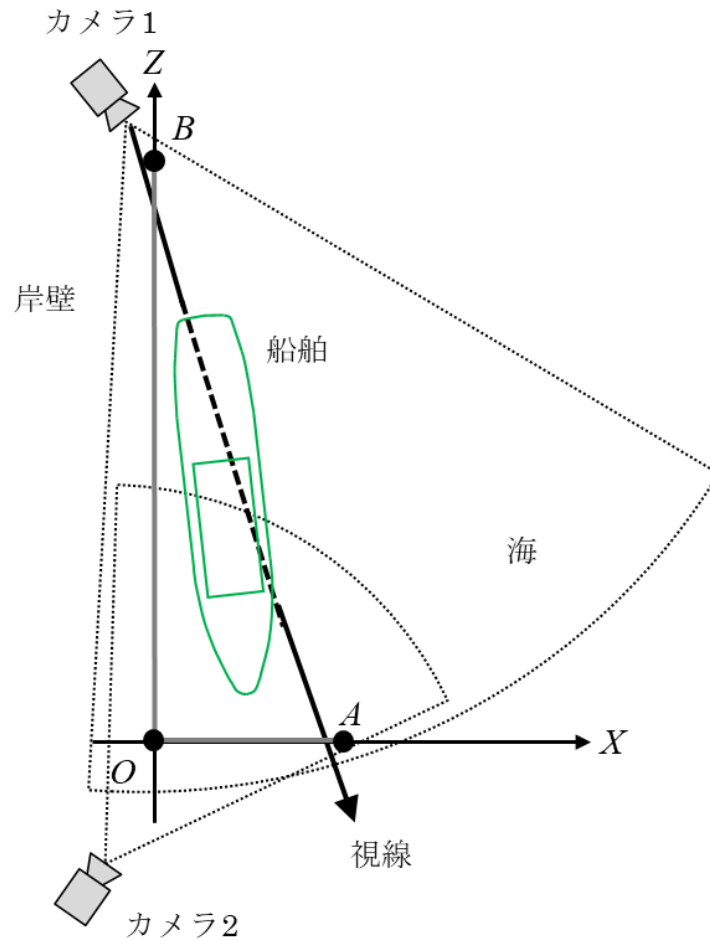


図 3.21 カメラの視線と岸壁線の関係

3.3.2 カメラ配置の例

この後の実環境における評価に使用するカメラの仕様から画角を 65°], 水平解像度を 3840[pixel], 2 台のカメラ間の距離を最低 5[m], $0 < X < 30$ [m], $0 < Z < 80$ [m] の範囲を監視対象領域としてカメラ配置のシミュレーションを行った. 接岸対象の岸壁として $OA = 20$ [m], $OB = 55$ [m] としている. シミュレーションで得られた候補位置の一覧を表 3.9 に示す. θ は Z 軸とのなす角 (右回りを正) である.

これら 4 つのカメラから 1 組のステレオペアを構成すると, 6 パターンの配置が考えられる. この配置の様子を図 3.22 に示す.

このとき, 各組合せのカメラ間距離及び対象領域のカバー率を表 3.10 に示す. 表 3.10 の通り, カメラ間の距離が最大となるのはカメラ 2 とカメラ 3 の組合せ (図 3.22(d)) である. 一方で, カバー率が最大となるのはカメラ 3 とカメ

表 3.9 カメラ配置位置結果

	$X[m]$	$Z[m]$	$\theta[^\circ]$
カメラ 1	-2.0	-11.5	20
カメラ 2	-7.5	-11.5	40
カメラ 3	-2.0	-13.0	20
カメラ 4	-7.0	-13.0	37

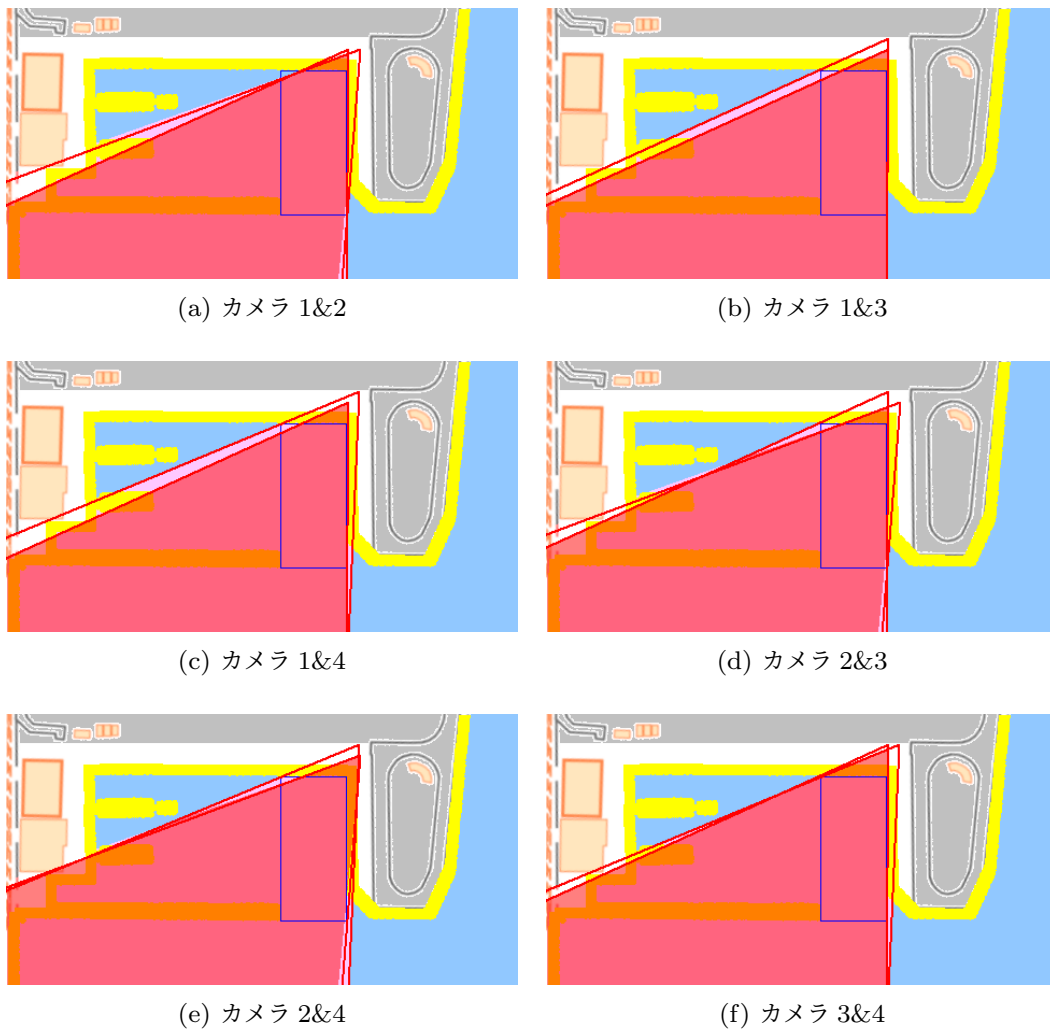


図 3.22 カメラ配置シミュレーション結果

カメラ4の組合せ（図 3.22(f)）である．カメラ間距離はカメラ2と3の組合せに対して0.70[m]短くなる．

表 3.10 カメラ間距離とカバー率

	カメラ間距離 ([m])	カバー率 (単眼) ([%])	カバー率 (ステレオ) ([%])
カメラ 1&2	5.50	99.19	98.53
カメラ 1&3	1.50	100.00	98.86
カメラ 1&4	5.22	99.99	98.86
カメラ 2&3	5.70	100.00	98.87
カメラ 2&4	1.58	99.99	98.87
カメラ 3&4	5.00	100.00	99.99

また，この2組のカメラ位置でステレオ計測した場合の誤差の影響を比較する．視差の誤マッチング等の誤差が1[pixel]であった場合の推定誤差を図 3.23に示す．監視対象領域としている $0 < Z < 80$ [m]において，カメラ2とカメラ3の組合せでは80[m]で0.47[%]，カメラ3とカメラ4の組合せでは0.53[%]である（いずれもキャリブレーション誤差等は無視できるものとする）．一方で，監視対象領域のカバー率はカメラ3とカメラ4の組合せの方がわずかに高い．本研究では，ステレオ計測により船舶等の3次元位置を正確に計測することを目的としている．どちらの組合せとも，一つのカメラでのカバー率は100[%]であり，かつ，ステレオ計測で捉えたい領域（岸壁 OA, OB）はいずれのカメラでも撮像範囲として満足できている．よって，カバー率よりも計測性能を優先し，カメラ2とカメラ3の組合せを最終的な配置位置として決定する．この位置関係を改めてカメラ1'，カメラ2'として図 3.24に模式的に示す．

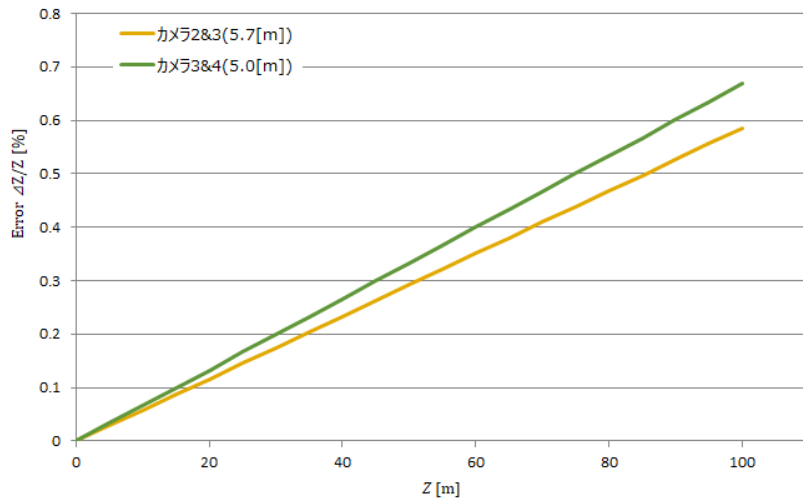


図 3.23 ステレオ計測時の推定誤差

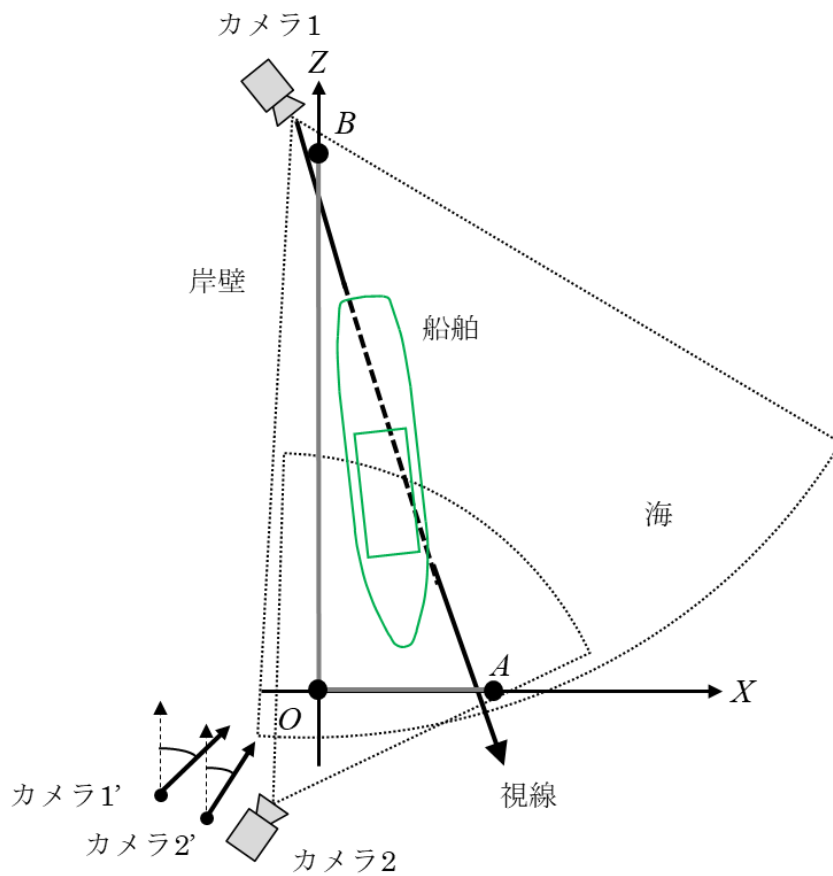


図 3.24 カメラ配置結果の模式図

3.4 まとめ

本章では、陸上に配置したカメラから船舶等の動向を監視するために、対象とする監視領域に対してカメラをどこに、どのように配置するべきかという問題に対する検討を行った。提案手法は、インターネット等により比較的簡単に入手可能な地図データから監視領域を選択するだけで、自動的に必要なカメラの台数、位置、向き（方向）を算出するものである。

カメラの候補位置として岸壁上にカメラを配置することを目標に、地図データ上で海岸線と海域とを識別するために、Mean Shift による画像の平滑化と Canny 法によるエッジ検出により、海岸線を抽出する方法を提案した。さらに、元の地図データ画像の輝度情報も組み合わせることで、ノイズを除去し、より正確な海岸線を抽出できることを示した。カメラの配置方法としては、一つのカメラのみで海域を監視する単眼モードと、複数のカメラを組み合わせることで、対象とする船舶の3次元位置を特定可能なステレオモードの二つの決定方法を提示した。また、ステレオモードでは、配置された複数カメラのうち2台を使ってステレオ計測した場合に、どの程度の精度が得られるかを簡易的に推定できることも示した。

さらに、本提案手法を発展させ、自動離着棧システムへの適用を検討した。離着棧を想定する場合、岸壁からある一定距離離れた位置にカメラを配置すること、着岸時にアプローチする岸壁部分を監視対象領域として含むことを必要条件として付加することを提案した。実際のポンドをモデルとしてカメラ配置のシミュレーションを行い、その位置でどの程度のステレオ計測性能が得られるかも明らかにした。

本提案手法は求めたカメラ位置、向きについて、最適性を保証するものではない。ステレオ計測の精度を評価指標にする等、最適な配置位置の導出は今後の課題である。また、配置位置も2次元で考えており、高さの決定方法についても検討が必要である。

次章では、提案する自動離着棧システムの検討をより進めるため、自動離着棧を想定したシーンにおいて、ステレオ画像計測手法の適用と、計測精度の検討を行った結果について述べる。

第 4 章

自動離着棧システムに向けた 船舶の 3 次元位置計測

4.1 はじめに

本研究では，陸上へ配置した 2 台（以上）のカメラを用いたステレオ画像計測により船舶の位置姿勢を推定することで，その情報を自動離着棧システムへ活用することを提案している．本章では，岸壁に設置したカメラから着岸する船舶を対象にステレオ計測を適用する手法を述べる．さらに，実際にポンドにて計測実験を行い，提案システムの実現性として有効な計測結果が得られたことを示す [37].

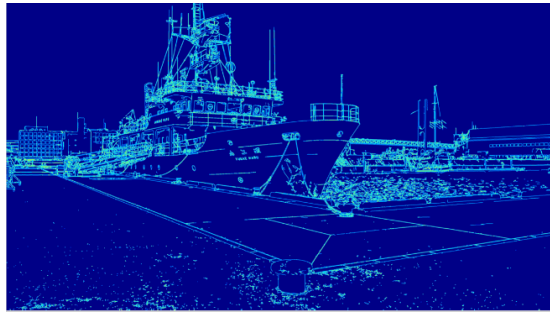
4.2 自動離着棧システムへの適用時の課題

各カメラ画像から物体部分を検出し，二つのカメラ画像間で対応をとる手法として，画像からエッジを抽出し，その周囲のウィンドウ領域の輝度情報を用いてテンプレートマッチングの要領で対応を求める方法が一般的である．これまでも，比較的長距離に存在する船舶の位置計測のために，移動平均による船舶部分の検出と，SSD (Sum of Squared Difference) によるマッチングを採用する手法が提案されている [14]. そこで，初期検討として，着岸している船舶を対象に Canny エッジ検出器により画像中の特徴点を抽出し，その点を中心に SSD により対応点探索を試みた．その結果を図 4.1 に示す．図 4.1(a) に示す左カメラ画像に対して Canny エッジ検出を行った結果が図 4.1(b) である．また，抽出されたエッジを用いて SSD によりテンプレートマッチングを行った結果の一例を図 4.1(c), (d) に示す．このように，エッジとその周辺領域の情報を用いたテンプレートマッチングでは誤マッチングにより，視差を正しく算出できない

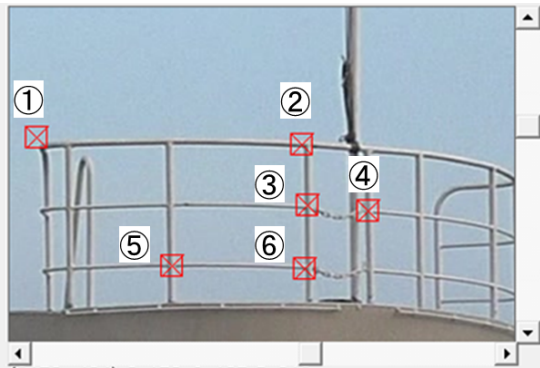
ことがわかる。また、船腹等の滑らかな部分はそもそもエッジ（特徴点）が存在しないため、対応を求めること自体が難しいとも言える。すなわち、船舶はその構造あるいはデザイン上、類似または繰り返しパターンが多く存在するため、一般的なエッジベースの視差計測手法の適用は不向きである。文献 [13,14] のように、遠方に存在する船舶を対象とする場合とは異なり、離着岸時のように、比較的近距离で計測するシーンでは視差の計測方法自体を見直す必要がある。



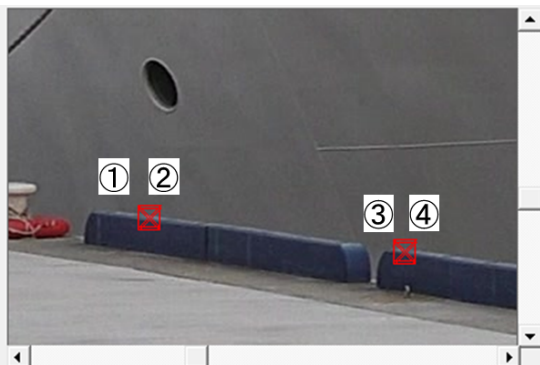
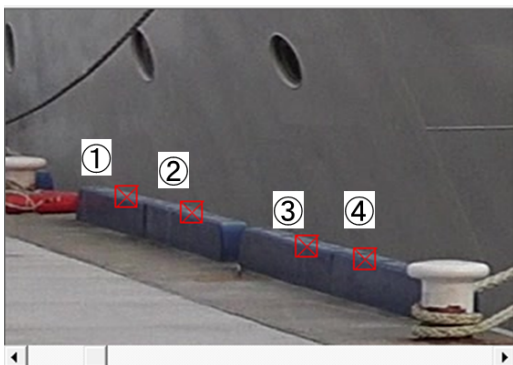
(a) 左カメラ画像



(b) Canny エッジ画像



(c) 船首部分の対応点探索例



(d) 岸壁（車止め）部分の対応点探索例

図 4.1 エッジベースの対応点探索結果

また、本研究では、得られた視差座標を3次元の世界座標系での座標点群に変換し、得られた点群データと船舶のモデルとのフィッティングを行うことで、船舶の位置姿勢を推定することを目指している。そのため、エッジベースの手法では視差を得ることが難しかった船腹等の滑らかな部分も含め、船体の多くの部分を捉えた視差画像を取得したい。

以上の課題を解決するため、本研究では Semi-Global Matching (SGM) と呼ばれるピクセル単位のステレオマッチングアルゴリズムを採用することを検討する [38]。SGM は局所領域（エッジベースの手法にあたる窓領域）の情報だけでなく、画像全体からマッチングコストを収集し、最適解を導出するため、船腹のように滑らかで特徴が無い部分についても有効な視差を得やすいという効果が期待できる。

4.3 Semi-Global-Matching(SGM) による視差計測

SGM アルゴリズムについて簡単に説明する．画像全体での最適化により各画素の視差を推定するために，式 (4.1) に示すようなエネルギー関数を定義する．

$$E = \sum_p C(\mathbf{p}, d_p) + \sum_p \sum_{q \in N_p} P(d_p, d_q) \quad (4.1)$$

ここで， d_q は画素 p の近傍領域 N_p 中の画素 q における視差値であり，

$$P(d_p, d_q) = \begin{cases} 0, & \text{if } d_p = d_q \\ P_1 (> 0), & \text{if } |d_p - d_q| = 1 \\ P_2 (> P_1), & \text{if } |d_p - d_q| > 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

とする．式 (4.1) の第 1 項は，画素 p における視差 d_p に対するコスト関数（すなわち，画素ごとのコスト関数）で，左右のカメラ画像間のある局所領域の統計値や特徴量等が類似しているほどコストの値が低くなるような関数である．全ての画素のコストを計算し，単純に最小化してしまうと，ノイズ等により正しい視差を得ることができない．そのため，式 (4.1) の第 2 項に示すように，ペナルティ項（平滑化項）を設ける．式 (4.2) は，視差の連続性についてペナルティを与えるもので，隣接画素間での視差変化が大きいほどペナルティ値が大きくなることを示している．これには以下の 3 つの仮定，狙いがある．

1. ペナルティ無し ($P = 0$) : 通常，カメラに正対する同一物体の同一平面上の視差は隣り合う画素で同じになる
2. ペナルティ 1 ($P = P_1$) : 斜めに写る物体平面等は隣接画素間で視差が 1 変化する場合もある
3. ペナルティ 2 ($P = P_2$) : 物体の境界部では背景と物体間で視差が 1 以上変化する事は当然あり得るため，より大きなペナルティを課すことで物体輪郭部の視差が背景と正しく分離されるようにする

画像全体に対して上記のコスト及びペナルティを計算していくが，SGM では注目画素に対して 8 方向あるいは 16 方向のパス上に存在する画素のコストのみ集約することで，最適な視差値を求めていく．なお，本研究ではカメラのキャリブレーションと同様，OpenCV の実装を利用する．OpenCV の実装では，上述のコスト関数は SAD (Sum of Absolute Difference) であり，コスト集約の方向も図 4.2 に示すようにデフォルト設定は 5 方向と簡略化されている (8 方

向も選択可能であるが、計算リソースの制約から適用を見送った)。なお、コスト関数については、他にも幾つかの手法が提案されており [39,40]、文献 [40] では種々の手法について視差値の精度に関して比較評価がなされている。本研究ではまず、SGM 適用の有効性を確認したいため、OpenCV の実装をそのまま利用し、海上監視環境における最適なコスト関数の選定は今後の検討課題とする。

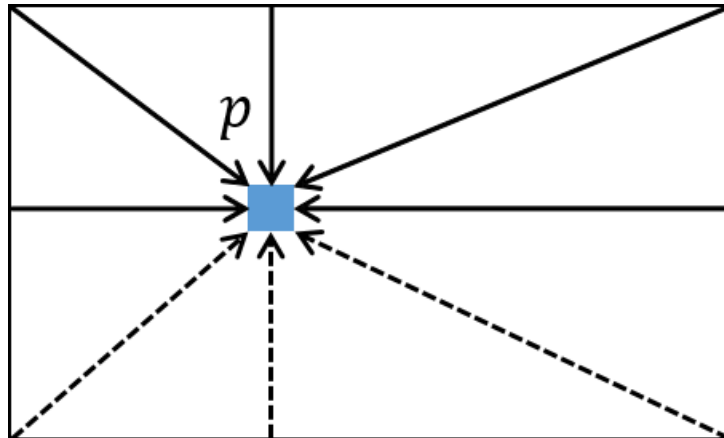


図 4.2 5 方向集約パスの例

4.4 3次元位置計測精度の検証

船舶の離着舷を想定したシーンにおいて、SGM による視差計測精度の検証のため、本学内のポンドにて撮影実験を行った。撮影には SONY 社製ビデオカメラ FDR-AX100 を 2 台用い、 5968×3352 [pixel] の解像度で画像を取得した。以降に 2 台のカメラのキャリブレーション結果及び船舶の 3 次元計測結果について述べる。

4.4.1 カメラのキャリブレーション

ポンドの岸壁上にカメラを設置し、カメラのキャリブレーションを行った。2 台のカメラ間隔は約 5[m] である。2.3 節に述べた通り、内部パラメータは事前に推定しておく。具体的には、チェッカーフラグパターンを印刷したボード (図 4.3) を 50 回撮像し、表 4.1 に示す内部パラメータを得た。

続いて、外部パラメータの推定を行う。図 4.4 にレーザー測量器で計測した 3 次元ポイントを左カメラ画像上に印した (赤十字の箇所) 結果を示す。後の結果を理解しやすくするため、同図中に示すように岸壁の縁に沿って世界座標系

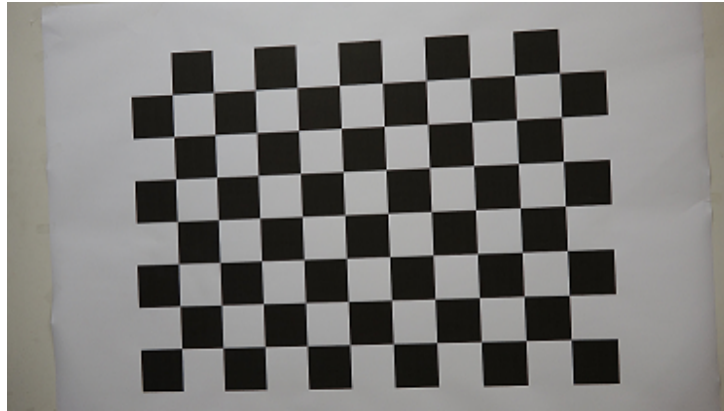


図 4.3 チェッカーパターン撮影画像例

表 4.1 内部パラメータ

f_x	4740.814
f_y	4735.134
c_x	3031.751
c_y	1645.572
k_1	3.479×10^{-3}
k_2	1.070×10^{-2}
k_3	-3.136×10^{-2}
p_1	-1.402×10^{-3}
p_2	3.074×10^{-3}

の X 軸, Z 軸をとり, Y 軸は鉛直上向きをとるように各点の 3 次元座標を定義する. 各点の 3 次元位置座標と左右画像中の対応座標の一覧を表 4.2 に示す.

表 4.2 のデータより外部パラメータの推定を行った. 図 4.5 にステレオ画像とキャリブレーションに使用した計測点を推定した外部パラメータにより再投影した結果を示す. 同図において, 計測点を赤丸印, 再投影後の点を緑円印で表している. 両者の結果は概ね一致しており, キャリブレーション結果は良好であると言える.

続いて, 画像の平行化処理を行った結果を図 4.6 に示す. 左カメラ画像の左端及び右上部分, 右カメラ画像の右端及び右下部分の黒部分は平行化処理によるものである. また, 式 (2.11) 右辺のパラメータを表 4.3 に示す.



図 4.4 世界座標系とキャリブレーションポイント



(a) 左カメラ画像



(b) 右カメラ画像

図 4.5 ステレオ画像と再投影点



(a) 左カメラ画像



(b) 右カメラ画像

図 4.6 平行化後ステレオ画像

表 4.2 左右画像座標と 3 次元位置座標

u_l (pixel)	v_l (pixel)	u_r (pixel)	v_r (pixel)	X (m)	Y (m)	Z (m)
5015	1819	3534	1924	3.517	-0.008	-0.005
5085	1814	3644	1920	3.895	-0.008	-0.028
5650	1765	4548	1896	7.978	0.001	-0.033
2845	1773	1567	1836	-0.013	0.008	4.921
1921	1702	1058	1769	-0.015	0.007	10.484
1863	1701	1025	1765	0.021	0.004	10.996
1441	1669	801	1734	-0.028	-0.003	14.834
1789	1573	1346	1652	3.741	0.434	19.142
1254	1562	942	1641	2.605	0.343	24.564
1121	1565	852	1639	2.515	0.296	26.427
733	1165	610	1256	2.477	3.455	34.855
929	1133	740	1226	2.698	3.501	30.706
1173	1096	896	1191	2.828	3.503	26.477
1430	1064	1069	1161	2.969	3.545	22.547
2192	1016	1855	1120	7.910	4.122	21.399
3684	888	4062	1022	858.192	146.762	724.651
3750	880	4130	1016	852.245	148.089	701.419
1105	952	861	1053	3.037	4.615	27.271
2144	436	1832	558	8.051	8.126	22.099
5084	2191	1235	2205	-3.433	0.011	-3.319
3395	2001	746	2021	-3.412	0.008	-0.537
5895	2039	3079	2114	-0.667	0.006	-3.379
2609	569	2329	687	11.803	7.751	22.245
2025	1161	1485	1254	3.618	2.648	15.811
4237	1193	4565	1332	233.257	19.731	155.193
4077	1245	4400	1387	231.410	17.251	165.807
1861	769	1504	879	5.353	5.486	21.700
1991	786	1641	897	6.164	5.465	21.654
2113	805	1773	913	7.007	5.460	21.590
2293	829	1965	938	8.315	5.393	21.470
2403	846	2083	957	9.517	5.443	21.419
2504	861	2195	971	10.478	5.421	21.482

表 4.3 Q 行列パラメータ

c_u	3025.501
c_v	1637.546
f	4735.134
B	5.128

4.4.2 3次元計測結果

4.4.1 項により求めた平行化画像を用いて SGM により視差画像を生成し、3次元計測を行った。4.3 節で述べた通り、SGM は OpenCV の実装を利用するが、計算負荷を軽減するため、画像を 1/4 のサイズに縮小し、 1492×838 [pixel] の解像度で処理を行った。また、試行錯誤的に、SAD のウィンドウサイズを 5×5 [pixel]、平滑化項のペナルティ値を $P_1 = 25$, $P_2 = 1600$ とした。図 4.7 に視差画像を示す。白い部分は視差が最も大きく（近方の物体）、黒くなるほど視差が小さく（遠方の物体）になっている。ただし、視差が検出できなかった箇所も黒くなっている。



図 4.7 視差画像

自動離着棧システムの場合、計測エリアをある程度限定することができる。図 4.4 に示す世界座標系において、 $0 < X < 50$ [m], $-5 < Y < 50$ [m], $0 < Z < 50$ [m] の領域の計測を行った。船舶部分と岸壁部分の 3次元座標を算出したいため、それらの画像上の座標を求める必要がある。ここでは、輝度画像による領域分割を試みた。まず、基準画像である左カメラ画像を RGB 色空間から HSV 色空間に変換する。変換した HSV 色空間において、船舶領域を $100 \leq H \leq 110$, $20 \leq S \leq 50$, $55 \leq V \leq 120$, 岸壁部分を $110 \leq H \leq 120$, $110 \leq S \leq 190$, $30 \leq V \leq 55$ としてそれぞれの領域を識別する。これらの閾値

の値は試行錯誤的に決定した。図 4.8 に HSV 色空間に変換後の画像及び各領域の識別結果を示す。同図において、H は 0 ~ 179, S, V は 0 ~ 255 で正規化し、グレースケールで表している。また、同図 (d), (e) は上記の閾値により抽出された船舶及び岸壁領域を白、それ以外の部分を黒の 2 値画像で表現している。図 4.8(d) の船舶領域の識別結果において、画像右奥の建物部分等も白くなっているが、上記の通り計測エリアを限定することでこの部分の 3 次元座標は含まれないようにしている。

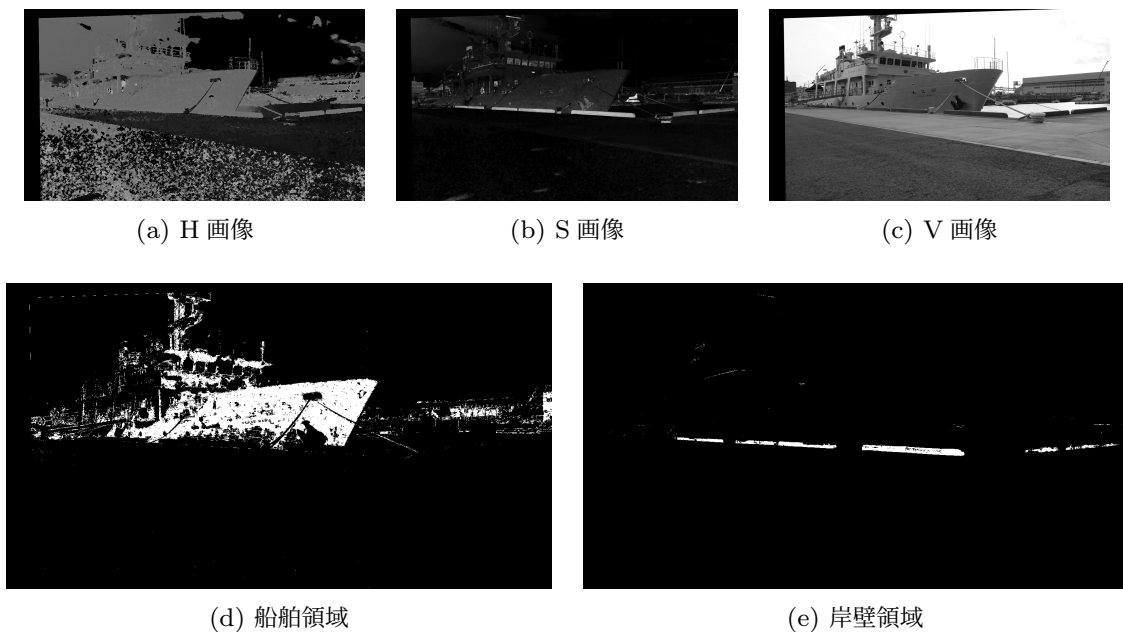


図 4.8 HSV 画像と船舶及び岸壁識別結果

左カメラ画像上で、図 4.8(d), (e) で船舶及び岸壁領域と識別された画素の視差値より、式 (2.11) 及び表 4.3 のパラメータを用いて 3 次元座標を計算し、 $Z-X$ 平面の結果を図 4.9 に示す。同図中、青丸はステレオ計測での結果、赤丸はレーザー測量器で計測した値を、緑の点線は比較のために描き入れた計測対象の船舶（深江丸）の輪郭をそれぞれ示している。この結果より、船橋前側部分及び右舷部分が正確に計測できていることがわかる。船首先端から船橋までの距離はステレオ計測では 13.45[m] であった。図 4.10 に示す船舶の配置図 [41] から求めた値は 13.1[m] でありほぼ一致していることが確認できた。

また、レーザー測量器で計測した 20 点の内、有効視差を持つ 16 点についてステレオ計測による 3 次元計測結果を表 4.4 に示す。測量器で得られた値を真値とした場合の計測誤差も同表に示している。Z 方向の偏差は X, Y 方向よりも大きくなっているが、X 方向の絶対値平均値が 0.020[m], Z 方向は 0.038[m]

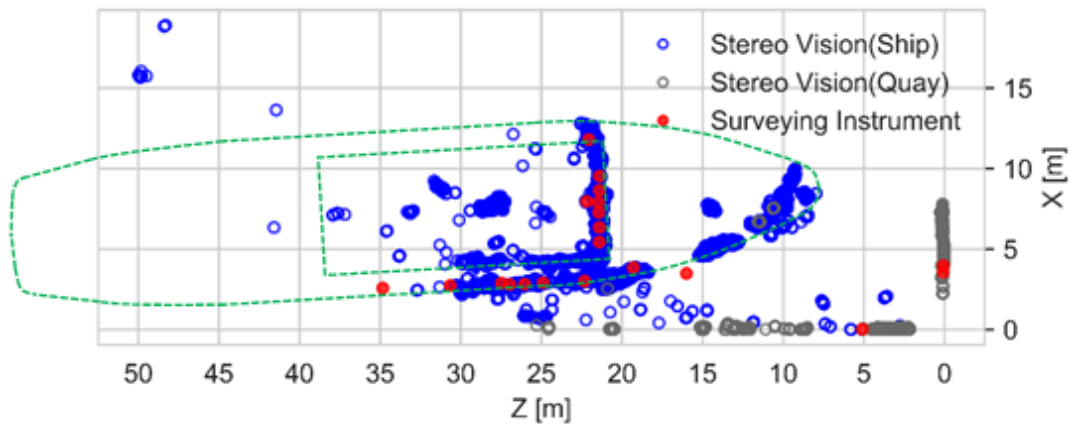


図 4.9 ステレオ計測結果

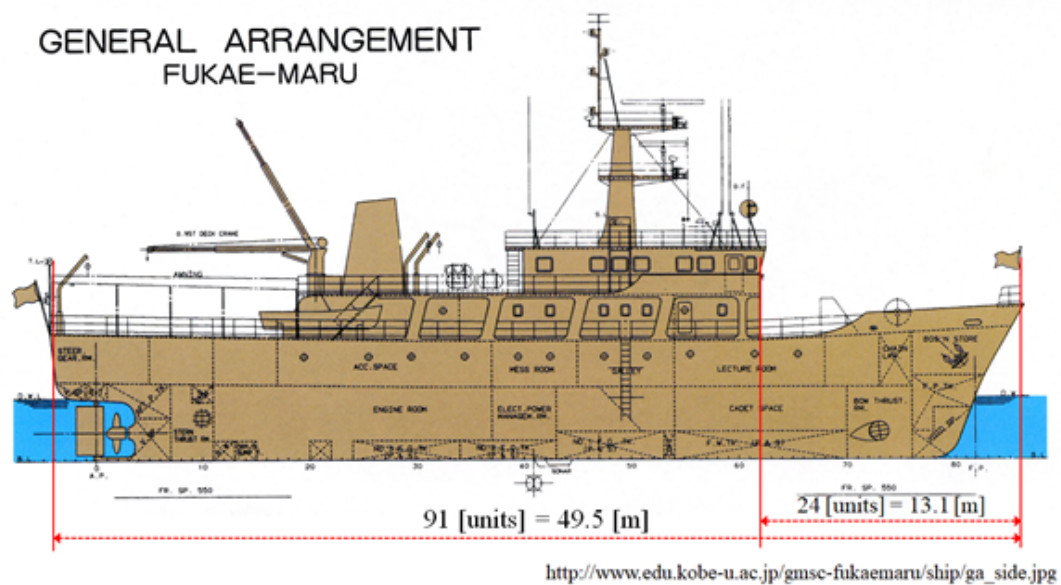


図 4.10 船首から船橋までの距離

である。既に実用化されているレーザー着岸計 [42, 43] の計測精度が 1.0[m] であるのに対して、本提案手法による計測誤差ははるかに小さいことがわかる。また、他のセンサとの比較として、GPS を使用した着岸システムにおいて、一つのセンサの位置決め精度で 0.5[m]、複数の受信機を使用することで 0.05[m] の精度であることが報告されている（それぞれ平均値） [44]。X, Y, Z いずれの方向の絶対値平均においても、提案手法は文献 [44] と同程度の精度を達成しており、自動着岸に必要な精度での計測が可能と考えられる。

表 4.4 レーザー計測とステレオ計測の比較

No	レーザー計測値 ([m])			ステレオ計測値 ([m])			計測誤差 ([m])		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
1	3.568	0.012	0.064	3.564	0.016	0.062	-0.004	0.004	-0.002
2	3.972	0.013	0.055	3.969	0.016	0.054	-0.003	0.003	-0.001
3	0.028	0.022	5.084	0.024	0.017	5.079	-0.004	-0.005	-0.005
4	3.847	0.408	19.29	3.807	0.399	19.212	-0.040	-0.009	-0.078
5	2.903	0.382	24.885	2.879	0.384	24.824	-0.024	0.002	-0.061
6	2.796	0.348	26.966	2.777	0.335	26.914	-0.019	-0.013	-0.052
7	2.815	3.497	26.046	2.844	3.503	26.122	0.029	0.006	0.076
8	3.002	3.48	22.332	2.995	3.481	22.316	-0.007	0.001	-0.016
9	7.901	4.089	21.457	7.901	4.090	21.458	0.000	0.001	0.001
10	2.889	4.584	27.48	2.876	4.578	27.443	-0.013	-0.006	-0.037
11	7.955	8.061	22.187	7.966	8.071	22.204	0.011	0.010	0.017
12	11.801	7.681	22.06	11.813	7.686	22.076	0.012	0.005	0.016
13	5.436	5.453	21.418	5.402	5.444	21.355	-0.034	-0.009	-0.063
14	7.28	5.429	21.441	7.212	5.406	21.327	-0.068	-0.023	-0.114
15	8.653	5.405	21.397	8.611	5.392	21.331	-0.042	-0.013	-0.066
16	10.453	5.37	21.471	10.450	5.369	21.467	-0.003	-0.001	-0.004
絶対値平均	-	-	-	-	-	-	0.020	0.007	0.038
標準偏差	-	-	-	-	-	-	0.019	0.006	0.035

4.5 まとめ

陸上（岸壁）に配置したステレオ画像計測システムを自動離着棧システムへ適用させるための基礎検討を行った。船舶を比較的近距离で計測する場合には、エッジベースによる視差計測では視差が十分に得られないことから、SGMによる密な視差画像生成アルゴリズムを適用することを検討した。実際の船舶を対象とした計測実験では、第2章で述べたキャリブレーション手法を適用し、岸壁にカメラを設置する場合として、カメラの内部パラメータと外部パラメータを別々に推定する手法においても、高精度にキャリブレーションを行えることを示した。推定したキャリブレーションパラメータを用いた視差画像計測を行い、計測精度として、測量器との計測誤差は X 方向で $0.020[m]$ 、 Z 方向が $0.038[m]$ であった。従来提案されてきている他の手法と同程度、もしくは、より高精度に計測できることを示し、提案手法の有効性を確認した。

提案システムの実現を目指すには、まだいくつか課題がある。本章では画像中から対象とする船舶を色情報により半自動的に抽出したが、照明変化や対象とする船舶毎に抽出条件を適合させることは実運用上、現実的ではない。物体認識の手法として、機械学習ベースのアルゴリズムの適用も考えられるが、これは単眼カメラ画像でも実現可能な手法であり、本提案手法であるステレオ視することのメリットを活かすことができない。すなわち、ステレオ計測では物体の3次元情報が得られることから、この情報を用いて物体候補を抽出することが可能である。また、本提案手法では、船舶の船腹部分等の一部分の点群データが得られるが、対象とする船舶を自動離着棧させるためには、最終的な位置、姿勢データを得る必要がある。これは、図 4.9 に示すように、点群データとモデルデータとを照合することで実現できると考える。

そこで、次章では、

- 視差画像から直接的に船舶等の3次元物体を抽出する手法
- 得られた3次元点群データと船舶モデルとのフィッティングにより船舶の位置姿勢を推定する手法

について検討した結果を述べる。

第 5 章

自動離着棧システムに向けた 船舶の検出及び位置姿勢推定と 統合評価

5.1 はじめに

本提案手法により自動離着棧システムを実現するためには、カメラ画像中から対象となる船舶を検出し、検出した物体の最終的な位置姿勢を推定する必要がある。本章では、撮像された画像中から船舶等の 3 次元物体を検出するために、視差画像から直接的に物体候補を抽出する手法と、ステレオ計測により得られた点群データと船舶のモデルをフィッティングさせ、位置姿勢を推定する手法について検討した結果を述べる。さらに、実際の船舶が着岸する一連のシーンを対象とした計測実験を行い、船舶の運航データ (AIS) と比較評価した結果について述べる [45].

5.2 視差画像による船舶の検出

画像中から船舶等の物体を認識する手法として、HOG (Histograms of Oriented Gradient) 特徴量と SVM (Support Vector Machine) を用いた機械学習による方法 [46] や、深層学習による方法 [47, 48] が報告されている。本研究では、事前の学習に依らず、視差画像から直接的に 3 次元物体を抽出する手法として、“V-Disparity”, “U-Disparity” 画像を用いた手法 [49] の適用を試みる。これは、二つのステレオ画像から視差画像を生成し、視差の存在する位置と視差値の頻度から海面上に存在する 3 次元物体を抽出しようというものである。これらの画像を用いた手法は従来、自動車の ADAS (Advanced Driver Assistant System)

や AD (Autonomous Driving) 向けに開発, 適用されてきた [50–52] が, 船舶を対象とした事例報告はなされていない.

V-Disparity は (u, v) 画像座標系において縦軸に v , 横軸に視差値 d をとり, v が一定で u を変化させた場合の視差値ごとの出現頻度を表現したものである. 同様に, U-Disparity は横軸に u , 縦軸に視差値 d をとり, u が一定で v を変化させた場合の視差値ごとの出現頻度を表現したものである. V-Disparity, U-Disparity は, v あるいは u 座標における視差 d の出現頻度を輝度値として表していることになる. 海上画像から船舶等の 3 次元物体を検出する上で, V-Disparity 平面により, 垂直方向の視差変化に着目することで, 海面より上に存在する物体を抽出し, 不要な視差値を使わないようにすることができる (本研究においては海面より下の物体はないので, 誤検出でしかない). また, U-Disparity を組み合わせることで, 奥行方向の物体の重なりを判定し, 物体候補を適切に分離・統合する.

以降, 図 5.1 に示すステレオ画像及び視差画像, 表 5.4 に示すキャリブレーションパラメータを用いて (導出の詳細は 5.4 節にて説明), 各処理の詳細を説明する. なお, 図 5.1(b) においては, 視差値が小さい (遠方の物体) ほど濃い青色になり, 視差が得られなかった部分は黒で表現している.

5.2.1 V-Disparity による海面の抽出

はじめに, V-Disparity 画像により海面上に存在する物体を抽出するために, 海面の推定を行う. 式 (2.11) より,

$$v = -\frac{Y}{B} \cdot d + c_v \quad (5.1)$$

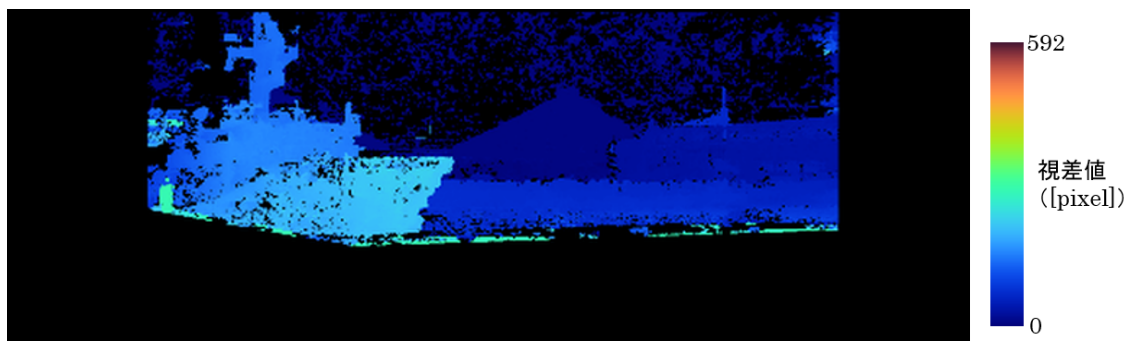
である. カメラは事前にキャリブレーション済みであるとすると, B と c_v は既知であるため (表 5.4), 海面の高さ Y_s がわかれば, V-Disparity 上で式 (5.1) (ただし, $Y = Y_s$ とする) を満たす v 座標と視差 d をもつ物体が海面と同じ高さにあることを表し (v と d の関係は直線になるので, 以後, 海面の直線と呼ぶ), 同じ視差値に対してそれより小さな v (v 座標を画像下向きに取っているため, 画像ではより上部) の画素は, 海面より上の物体であるとわかる. V-Disparity 画像から直接的に式 (5.1) の傾きと切片を求める手法も提案されているが [53], 今回, 海面の高さは元の視差画像から試行錯誤的に $-3.2[\text{m}]$ として推定を行った. 潮位の変動により, 海面の高さが変わる場合に備えて, 画像から直接求めることもできるが, 水位計や潮位計等, 他のセンサ情報を用いることも可能である.

図 5.1(b) の視差画像から v, d を 1 画素区切りで求めた V-Disparity 画像を図

5.2(a) に示す．同図において，輝度値が白に近いほど出現頻度が高いことを示しており，推定した海面の直線も同図に示している．図 5.2(b) は推定した海面に該当する (u, v) 座標を青で重畳した結果である．海域部分が意図通り識別できていることがわかる．この直線から上方に現れる視差分布は海面より上に存在する 3次元物体のものとみなすことができる．すなわち，左カメラ画像上のある座標 (u, v) における視差 d に対して， $v < -Y_s/B \cdot d + c_v$ となる組合せ (u, v, d) を物体候補として抽出することができる．

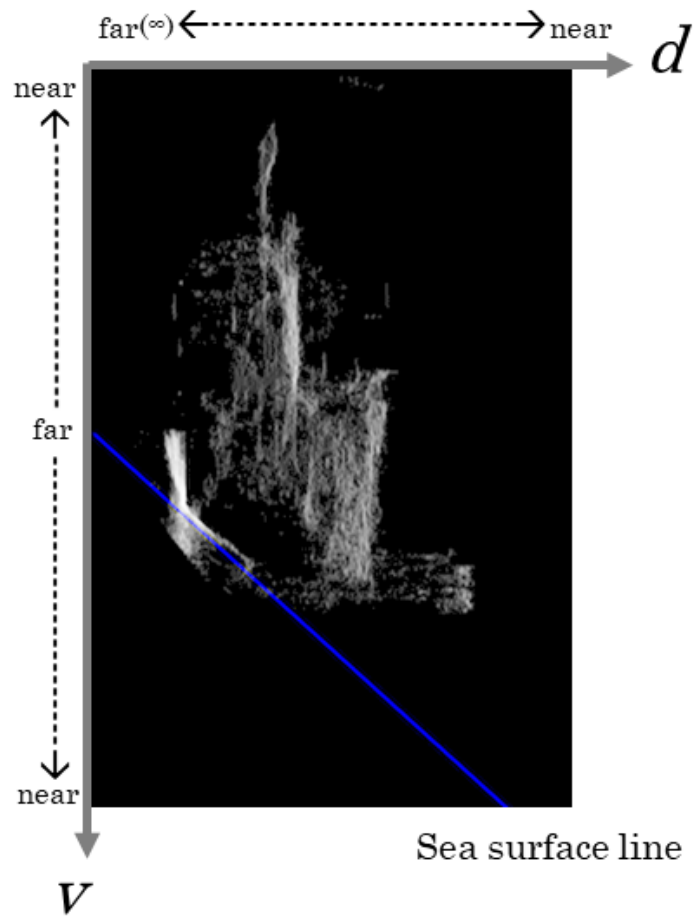


(a) 左カメラ画像（平行化変換後）



(b) 視差画像

図 5.1 ステレオ画像と視差画像



(a) V-Disparity 画像と海面の直線

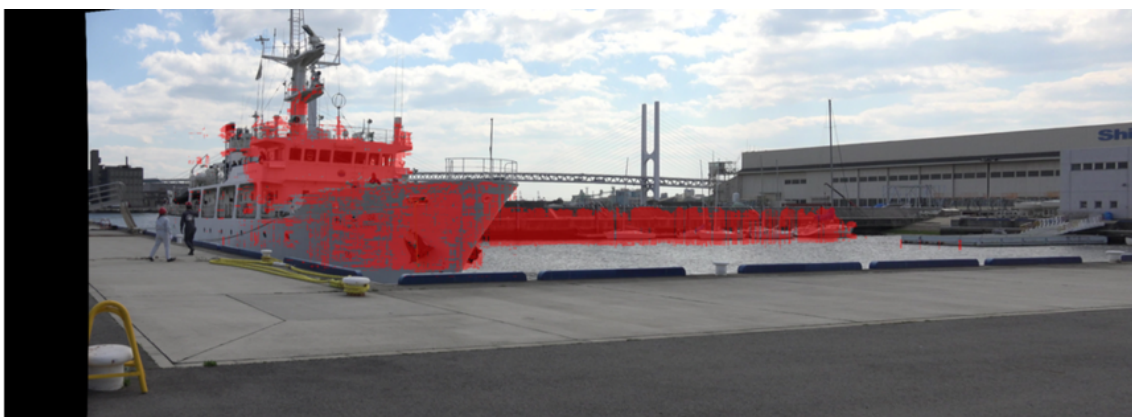


(b) 海面の識別結果

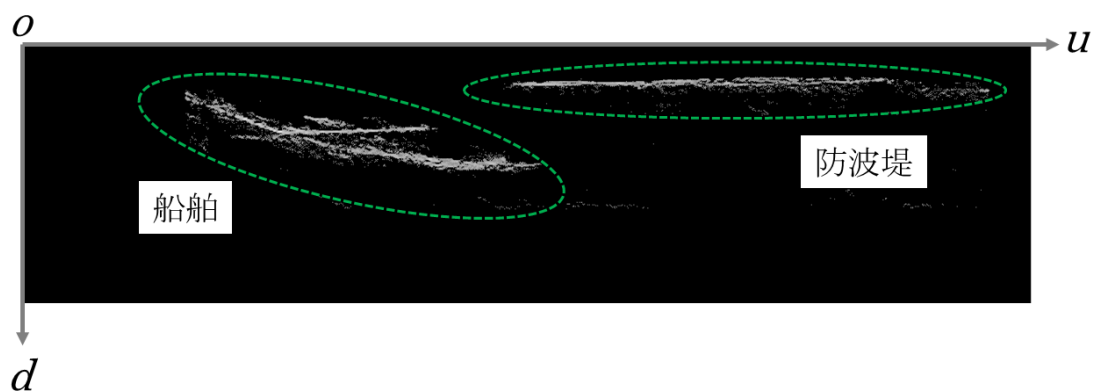
図 5.2 V-Disparity 画像と海面の識別結果

5.2.2 U-Disparity による物体の抽出

続いて、V-Disparity 画像により抽出した物体候補の視差が U-Disparity 画像において、ある頻度より大きいとき、その視差画像上での座標の組合せは有効と判断し、それ以外の場合は物体候補から除外する。本研究では、 u 、 v 、 d をそれぞれ1画素区切りで扱い、頻度の閾値を試行錯誤的に10とした。このときステレオ画像上で物体候補とみなされた画像上の座標位置を図 5.3(a)に赤色で重畳する。また、同図 (b)に U-Disparity 画像を示す（白に近いほど出現頻度が高いことを示している）。図 5.3(a)では画面左手前側の船舶部分と画面右奥の防波堤（突堤）部分の一つの物体領域として認識されていることを示しているが、これを U-Disparity 画像を用いて船舶部分と防波堤部分とに分離し、船舶部分のみを抽出することを試みる。



(a) 物体候補領域



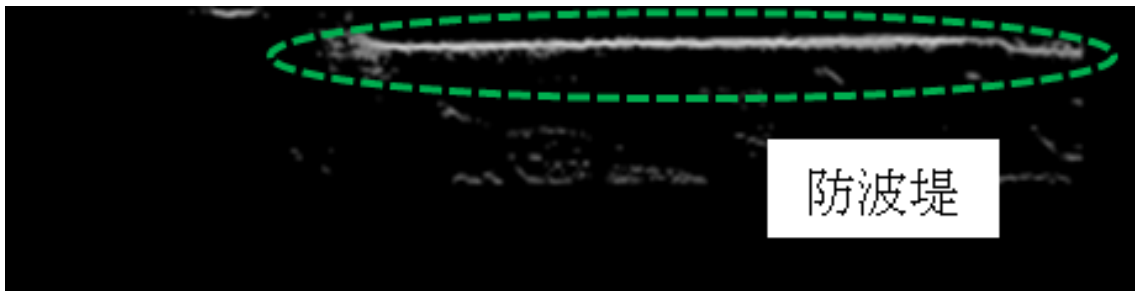
(b) U-Disparity 画像

図 5.3 物体候補領域と U-Disparity 画像

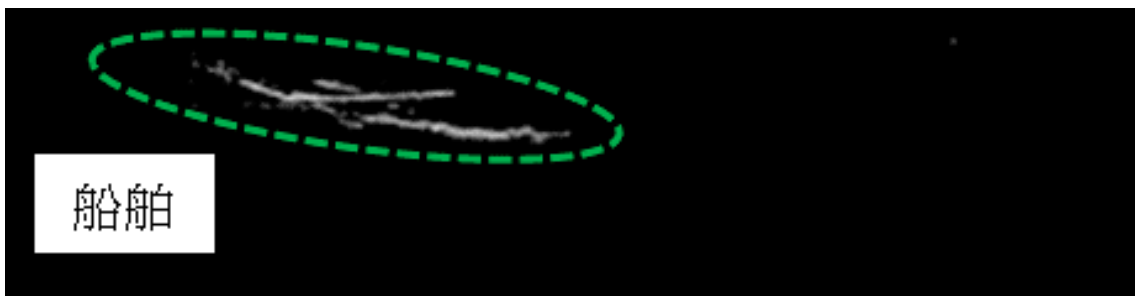
本提案手法である，陸上にカメラを配置するメリットの一つとして，船舶等の移動物体が写っていない状況の（視差）画像をあらかじめ取得しておくことで，構造物等の静止物体を背景領域として除去できるという点が挙げられる．すなわち，船舶がまだ着岸していない状態の画像を取得しておき，そのときの視差画像から 5.2.1 項に述べた方法により物体候補を抽出するとともに，U-Disparity 画像を生成する．その結果をそれぞれ図 5.4(a), (b) に示す．図 5.4(a) より構造物として防波堤部分が抽出されており，同図 (b) の U-Disparity 画像上においても，一定の頻度をもつ物体として表現されていることがわかる．頻度の閾値が 10 より大きい (u, d) 部分を背景として事前に抽出しておき，図 5.3(b) の U-Disparity 画像からその部分を差し引くことで，図 5.4(c) に示すように，左側の船舶部分のみの (u, d) 領域が抽出される．



(a) 背景物体



(b) 背景物体 of U-Disparity 画像

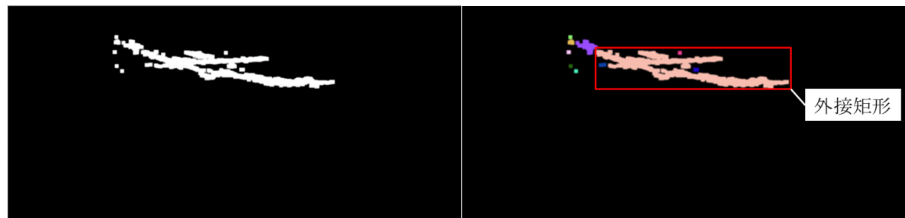


(c) 背景差分後の U-Disparity 画像

図 5.4 背景差分による物体候補領域の抽出

最後に、残った (u, d) 領域に対して、船舶部分を確定させる。まず、U-Disparity 画像上でラベリング処理を行う。船舶部分として残った (u, d) 座標部分を白、それ以外を黒とする 2 値画像 (図 5.5(a)) として、近傍 8 画素に対して連結処理を施すことでラベリングを行う (図 5.5(b))。この結果から、同色のラベルを持つ (u, d) 座標に対して外接矩形を求める。この矩形幅が、3 次元座標上で長さ 1[m] 未満の場合は対象船舶でないとして除去する。この結果、ラベルごとに求めた外接矩形内に該当する (u, v, d) の組合せを物体 (船舶) 領域とする。最終的な物体検出結果を図 5.5(c) に赤色で重畳して示す。陸上ではなく船舶上にカ

メラを設置する場合は、背景が絶えず変化するため、背景の視差を事前に取得しておくのは現実的ではない。このように、背景視差により比較的簡単に移動物体（船舶）を検出できることは、提案手法のメリットの一つであると言える。



(a) U-Disparity の 2 値化画像

(b) ラベリング結果



(c) 物体検出結果

図 5.5 背景差分による物体候補領域の抽出

5.3 船舶モデルとの位置合わせによる位置姿勢推定

5.2節により求めた船舶領域内の視差値から式(2.11)より3次元点群を求めることができる。しかしながら、この点群から直接、船舶の位置姿勢等の情報が得られるものではないため、ステレオ計測により求めた点群と対象船舶のモデルとをフィッティングすることで、最終的な船舶の位置を推定する。本手法は、未知の船舶を自動離着陸制御しようとするものではなく、対象とする船舶は既知であるものとし、事前にモデルデータは入手可能であるとする。これは、図1.3(b)に示す通り、ステレオ計測により得られた情報を制御対象とする船舶に送信し、自動操舵することを想定しているためである。モデルとのフィッティングはICP (Iterative Closest Point) [54] アルゴリズムを使用する。ICPにより船舶の位置姿勢を推定する手順を以下に述べる。

5.3.1 Iterative-Closest-Point(ICP) による位置合わせ

ICPは、図5.6に示すように、片側の点群Sからもう片側の点群Tで最近傍の点を探索し、対応付けを行い、対応付けた点の差(距離)を最小化するように点群Sの位置姿勢を調整する。そして、調整した位置姿勢から再び点群Tに対して対応付け及び距離の最小化を行い、位置姿勢を更新する。このように、対応付けと位置姿勢の更新を繰り返すことにより位置合わせの精度を向上させる手法である。本研究では、視差値から算出した点群をT、船舶モデルの点群をSとして処理を行う。

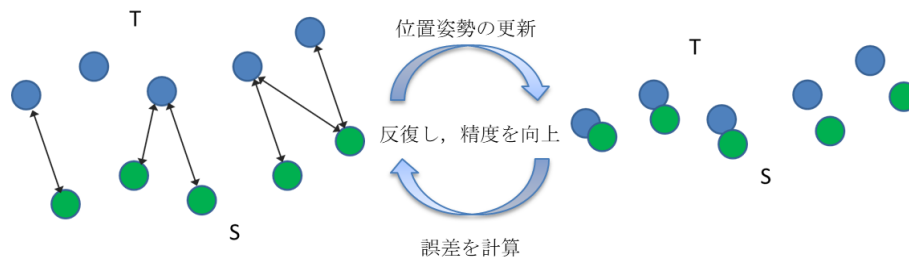


図 5.6 ICP アルゴリズムの概要

ここで ICP アルゴリズムについて簡単に説明する。3次元空間上の2点 p_1 , p_2 間の距離 d を,

$$d(p_1, p_2) = \|p_1 - p_2\|, \quad (5.2)$$

のように表すとき、ソース点群 S の各点 s_i とターゲット点群 T の最近傍点との距離は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} D(s_i, T) &= \arg \min_{j \in 1 \dots N_t} d(s_i, t_j) \\ &= d(s_i, m_i) \end{aligned} \quad (5.3)$$

$m_i \in T$ は位置合わせにおける s_i に対応する点とし、ソース点群 S のターゲット点群 T への対応点群を $M = m_i | i \in N_s$ とする。 N_s はソース点群 S の点数である。ソース点群 S に対応する点群 M を決定すると、位置合わせのための回転行列 R と並進ベクトル t は以下の誤差関数を最小化することで求められる。

$$E(R, t) = \sum_{i=1}^{N_s} \|m_i - R s_i - t\|^2 \quad (5.4)$$

式 (5.4) により求められたパラメータ R と t を用いてソース点群 S の座標変換を行い、一つ前の試行における二乗距離誤差 E' に対して、 τ を閾値として、

$$E' - E < \tau, \quad (5.5)$$

であるならば反復計算を終了し、閾値以上の場合は再び最近傍点の探索と距離誤差の評価を行い、 R と t の推定を繰り返す。収束しない場合においても、反復回数に上限を設けることで、処理を終了させることができる。

本研究では以降の処理において、3次元データ処理のためのオープンソースライブラリである Open3D [55] の実装を利用した。Open3D ではパラメータ計算の終了条件として、式 (5.5) は直接的に用いず、“*fitness*” と “*rmse*” の二つのメトリクスが用いられる。

$$fitness = \frac{N_m}{N_s} \quad (5.6)$$

ここで、 N_m は対応点群 M の点数である。また、

$$rmse = \sqrt{\frac{E}{N_m}}, \quad (5.7)$$

である。 *fitness*, *rmse* ともに、前回試行時からの変化分をパラメータとして指定し、指定する値より変化が小さくなったとき収束したと判断される。この判定は AND 条件である。なお、試行回数の上限值も設定可能である。

5.3.2 船舶の 3 次元位置計測への適用

ステレオ計測により得られた点群データに対して、以下のように前処理をした後、ステップ 4 で ICP を適用し、位置姿勢の推定を行う。

- (ステップ 1) 抽出した点群データに対して統計的外れ値除去手法によりノイズを除去する
- (ステップ 2) 船舶点群の Z 座標が最小となる位置にモデルをシフトする
- (ステップ 3) 大域的な位置合わせにより ICP の初期位置を決定する
- (ステップ 4) ICP により精密位置合わせを行う

図 5.7 にこれら一連の処理イメージを示す。以下、各ステップについてもう少し詳しく説明する。

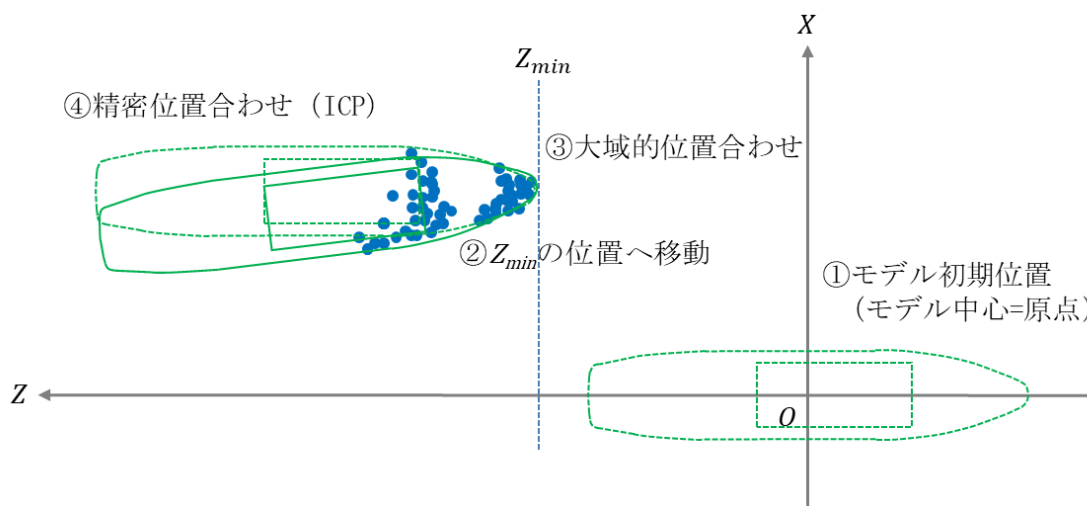


図 5.7 位置合わせ処理

(ステップ 1)

ある点 p_i に対して、近傍 n 点の平均距離 d_i を求め、全点群の平均距離の平均 \bar{d} と標準偏差 σ を求める。このとき、係数パラメータ r を用いて、 $d_i < \bar{d} + r \cdot \sigma$

を満たす点は残し、それ以外を外れ値として除去する。本研究では、 $n=200$, $r=0.05$ として処理を行った。

(ステップ2)

本研究では、図 4.4 に示すように、世界座標系を定義しており、モデルの初期位置として、モデルの中心が原点と一致している状態である(図 5.7の①)。そこから、ステップ3の大域的 position合わせにより実際の点群データの大まかな位置に合わせられることを期待しているが、稀に失敗するケースが見られた。そこで、外れ値除去後の点群データに対して、 Z が最小となる位置を求め、その位置にモデルをシフトさせておく(図 5.7の②)。

(ステップ3)

ICP アルゴリズムは初期位置を適切に与える必要がある。ステップ1による外れ値除去後の点群データに対して、ダウンサンプリングを施し、点群特徴量(FPFH (Fast Point Feature Histograms) [56])を算出する。(F) PFH 特徴量は、ある点に対して近傍領域内の各点との法線を求め、この法線同士の関係をヒストグラムで表したもので、演算性能とノイズに対するロバスト性が特徴である。この特徴量データを用いて、RANSACによる大域的 position合わせを行い、その結果をICPの初期値として使用する(図 5.7の③)。

(ステップ4)

ステップ3の結果を初期値として、ICP アルゴリズムを適用する。これまでの処理は全てモデルの初期位置からの剛体変換として扱えるため、ステップ1~4を通して、船舶の位置、姿勢を原点に対する回転と並進として求めることができる(図 5.7の④)。すなわち、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} &= M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= M_r M_g M_c \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{5.8}$$

ここで、

- X, Y, Z : 変換前の3次元位置座標
 X', Y', Z' : 変換後の3次元位置座標
 M : 各変換を合成した剛体変換行列
 M_c : 初期位置へ変換するための剛体変換行列
 M_g : 大域的 position合わせするための剛体変換行列
 M_r : 精密 position合わせするための剛体変換行列

である。 Z_{min} となる初期位置を $(X_c, 0, Z_c)$ とすると、

$$M_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_c \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.9)$$

である。さらに、各変換を合成した剛体変換行列は、

$$M = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_z \cos \theta_y & -\sin \theta_z \cos \theta_x + \cos \theta_z \sin \theta_y \sin \theta_x & \sin \theta_z \sin \theta_x + \cos \theta_z \sin \theta_y \cos \theta_x & X_t \\ \sin \theta_z \cos \theta_y & \cos \theta_z \cos \theta_x + \sin \theta_z \sin \theta_y \sin \theta_x & -\cos \theta_z \cos \theta_x + \sin \theta_z \sin \theta_y \cos \theta_x & Y_t \\ -\sin \theta_y & \cos \theta_y \sin \theta_x & \cos \theta_y \cos \theta_x & Z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

であるから、

$$\begin{aligned}
 \theta_x &= \tan^{-1} \left(\frac{m_{21}}{m_{22}} \right), \\
 \theta_y &= \sin^{-1} (-m_{20}), \\
 \theta_z &= \tan^{-1} \left(\frac{m_{10}}{m_{00}} \right),
 \end{aligned} \quad (5.10)$$

として、各軸の回転角を求めることができる。

図 5.8 に今回対象とする深江丸の3次元モデルを示す。モデルは深江丸の一般配置図 [41] より作成した。また、5.2 節において船舶として検出した領域部分 (図 5.5(c)) から抽出した点群データに対してフィッティングを行った結果

を図 5.9 に示す．ICP の収束パラメータは，試行錯誤的に，*fitness* 値の差分を 1×10^{-6} ，*rmse* 値の差分を 1×10^{-6} ，試行回数の上限を 10,000 回として処理を行った．船舶の右舷および船橋の一部分の点群しか得られていないが， $Z-X$ 平面については，概ね良好な結果が得られている．一方で， $Z-Y$ ， $X-Y$ 平面のフィッティング結果より， Y 方向は十分に合わせ切れていない． X ， Z 方向は大域的 position 合わせの前に点群データの情報からモデルをシフトさせているが， Y 方向は初期位置のままである．そのため， Y 方向についてもある程度それなりの初期値を与える，もしくは大域的 position 合わせを改善するなどし，推定精度の改善を図ることが必要である．これは，今後の課題である．

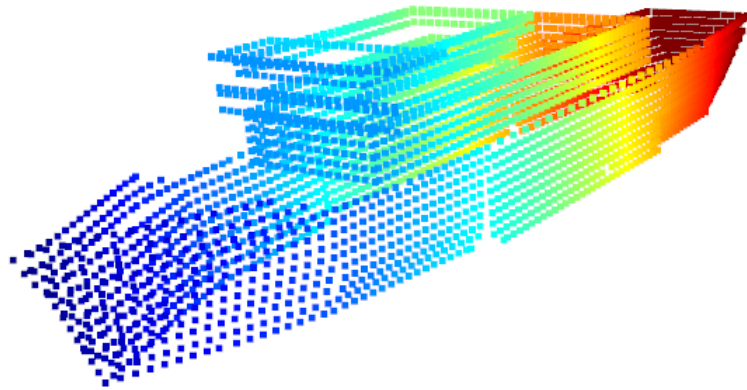


図 5.8 深江丸 3D モデルデータ

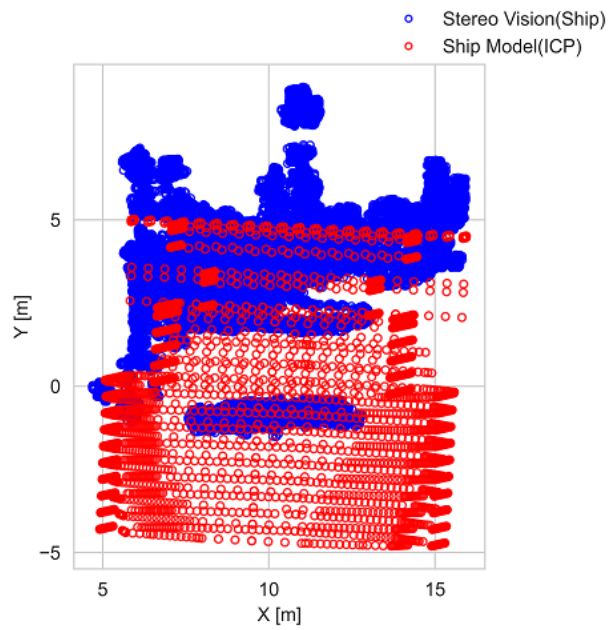
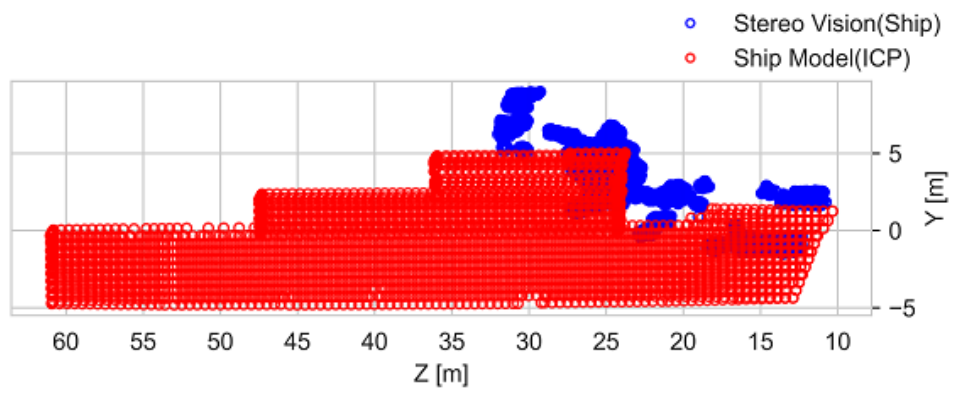
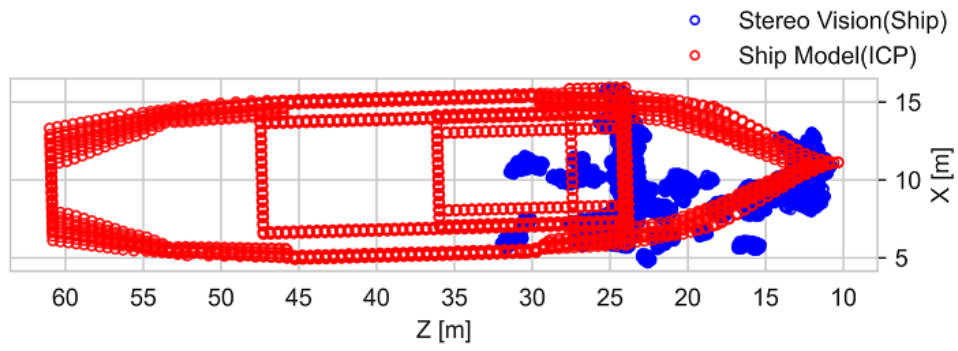


図 5.9 位置合わせ結果の例

5.4 統合評価

本学内のポンドにて，練習船深江丸が実際に着岸する一連の様子を撮影し，船舶の検出，位置姿勢の推定を行った．カメラは4.4節の実験にも使用したSONY社製FDR-AX100を用い，解像度 3840×2160 [pixel]， 30 [fps]の動画データとして取得した．また，3.3節でシミュレーションした位置にカメラを設置し，キャリブレーションを行った．以降に2台のカメラのキャリブレーション結果及び船舶の検出と位置姿勢推定を行った結果について述べる．

5.4.1 カメラのキャリブレーションと3次元計測結果

3.3節でシミュレーションにより求めたカメラ設置位置にカメラを配置し，キャリブレーションを行った．求めた2台のカメラの組合せを表3.9より表5.1に抜粋して示す．キャリブレーションの大まかな手順は4.4節と同じである．すなわち，内部パラメータは事前に推定しておき，外部パラメータをその場で計測した3次元座標の組合せから推定する．事前に求めておいた内部パラメータを表5.2に，外部パラメータ推定のために取得した3次元ポイントを図5.10，表5.3にそれぞれ示す．表5.3は対応する画像座標の値も記載している．

表 5.1 カメラ配置位置

	X [m]	Z [m]	θ [$^{\circ}$]
カメラ 2	-7.5	-11.5	40
カメラ 3	-2.0	-13.0	20

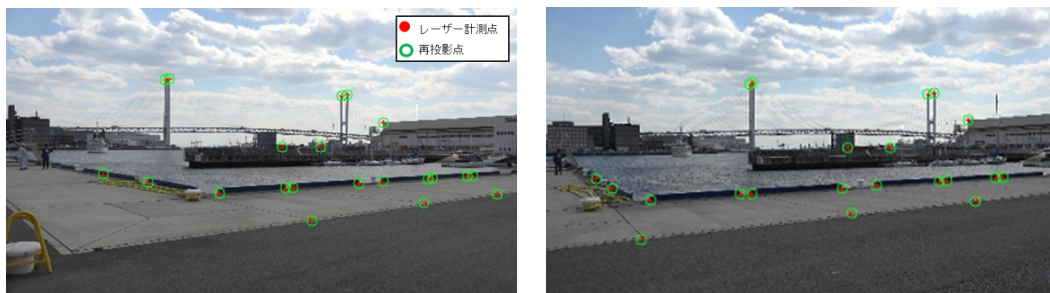
表5.2の内部パラメータ及び表5.3の3次元ポイントから外部パラメータの推定を行った．図5.11にステレオ画像とキャリブレーションに使用した計測点を推定した外部パラメータにより再投影した結果を示す．同図において，計測点を赤丸印，再投影後の点を緑円印で表している．両者の結果は概ね一致しており，キャリブレーション結果は良好であると言える．

表 5.2 内部パラメータ

f_x	3053.338
f_y	3045.659
c_x	1952.565
c_y	1065.320
k_1	-6.180×10^{-4}
k_2	4.913×10^{-2}
k_3	-1.386×10^{-1}
p_1	-1.159×10^{-3}
p_2	2.920×10^{-3}



図 5.10 世界座標系とキャリブレーションポイント



(a) 左カメラ画像

(b) 右カメラ画像

図 5.11 ステレオ画像と再投影点

表 5.3 左右画像座標と 3 次元位置座標

u_l (pixel)	v_l (pixel)	u_r (pixel)	v_r (pixel)	X (m)	Y (m)	Z (m)
3496	1257	3431	1271	18.227	-0.005	-0.002
3470	1262	3388	1277	17.621	0.013	0.002
3205	1278	3009	1300	13.696	0.011	0.015
3169	1280	2958	1305	13.134	-0.012	-0.010
2830	1304	2480	1335	9.223	-0.001	-0.002
2651	1316	2223	1352	7.377	-0.017	-0.003
2160	1350	1539	1398	3.399	-0.009	0.000
2103	1355	1462	1404	2.977	0.016	-0.008
1607	1388	779	1447	-0.001	-0.005	0.009
1068	1305	488	1358	-0.591	0.008	4.821
732	1248	375	1287	-0.698	0.020	10.927
3690	1392	3238	1448	8.125	0.015	-5.584
3155	1466	2287	1551	3.609	0.011	-5.446
2286	1586	732	1723	-1.238	0.006	-5.746
2566	652	2918	641	839.441	145.845	715.982
2523	658	2873	649	842.913	146.052	740.580
1224	531	1559	564	364.879	146.533	801.983
1204	543	1538	577	367.170	146.353	825.858
2362	1045	2583	1051	66.377	1.820	59.873
2074	1041	2272	1051	53.777	1.799	59.958
2832	859	3172	847	229.982	20.122	160.005

続いて、求めた外部パラメータにより、画像の平行化を行う。その結果を図 5.12 に示す。同図 (a), (b) はデフォルトのスケーリングで平行化した結果であるが、そうすると右カメラ画像の Z 軸側の岸壁が見切れてしまう。そのため、平行化前の元画像で捉えられていた画角分の情報が全て残るように画像を縮小、並進するようスケーリングパラメータが調整されるようにした（同図 (c), (d)）。図 5.12(c), (d) より SGM による視差画像を生成するが、画像の右半分や上下部分は無効画素（黒画素）を多く含むため、左右の画像をそれぞれ切り出した ROI（Region of Interest）画像を生成する。ROI 画像サイズは $2006 \times 722[\text{pixel}]$ で、元画像から ROI 画像の切り出し方法は図 5.13 に示す通りである。この ROI 画像に対して、視差の探索幅 $\text{depth}=592[\text{pixel}]$ として処理を行う。なお、第 4 章では処理リソースの制約から画像を $1/4$ サイズに間引いた $1492 \times 838[\text{pixel}]$, $\text{depth}=960[\text{pixel}]$ にて処理を行った。視差画像を生成するための探索空間は一般的に、画像サイズ \times 視差の探索幅、で表され、 $1492 \times 838 \times 960=1,200,284,160$ となる。本章の場合は、 $2006 \times 722 \times 592 = 857,412,544$ となり、第 4 章に比べて探索空間は十分小さくなる。そのため、本検証では画像の縮小処理等は行わず、切り出した ROI 画像をそのまま使用した。また、Q 行列パラメータを表 5.4 に示す。

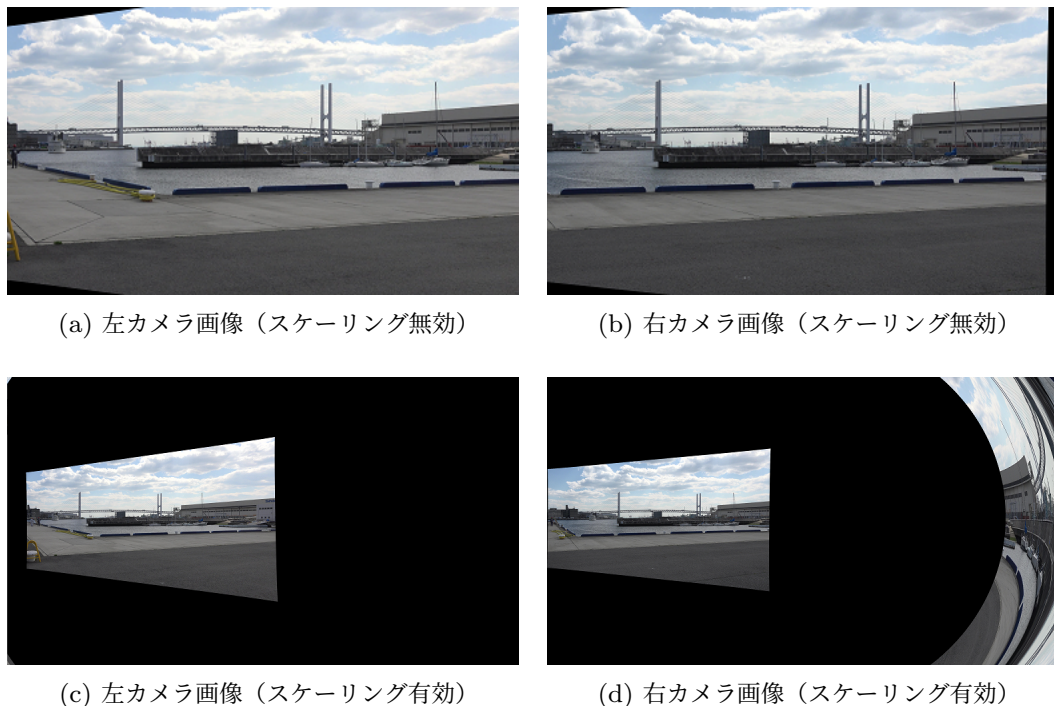


図 5.12 平行化変換後ステレオ画像

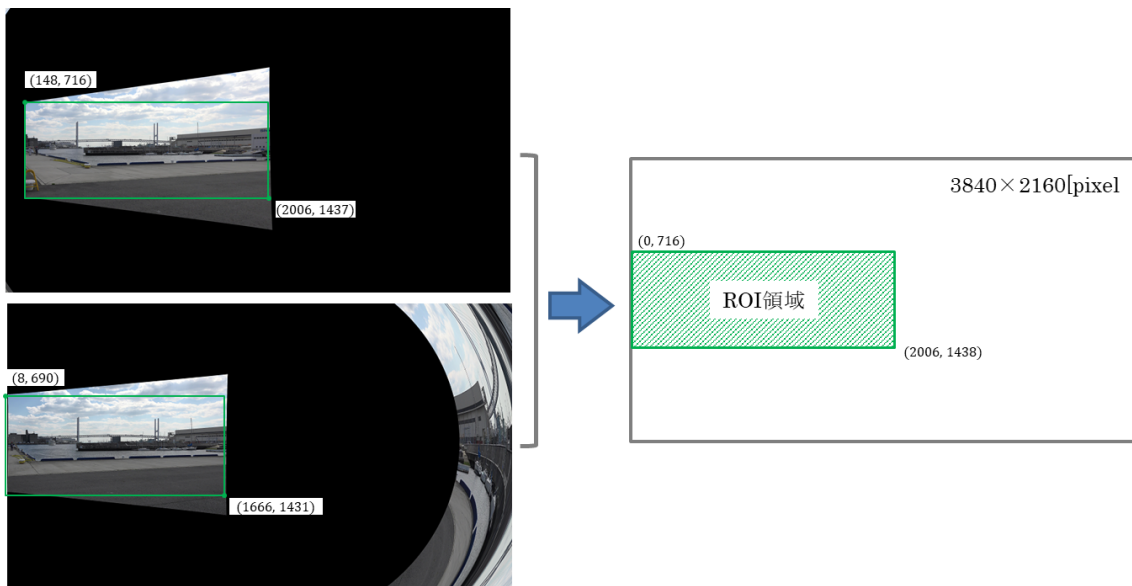


図 5.13 ROI 画像の設定

表 5.4 Q 行列パラメータ

c_u	351.078
c_v	1061.954
f	1180.191
B	5.043

最後に、キャリブレーション及び視差算出の精度を検証するため、船舶が着岸した状態のステレオ画像を用いて3次元位置計測した結果を図 5.14 及び表 5.5 にそれぞれ示す。図 5.14 はレーザー測量器で計測した3次元ポイントを示している。このとき、視差計算のパラメータはウィンドウサイズを 3×3 [pixel], $P_1=27$, $P_2=1728$ として処理した。外部パラメータの推定にはこれらの船舶上のポイントは使用していないが、自動離着栈に必要な計測誤差 0.3[m] 以内 [44] を達成できていることからキャリブレーション及び視差算出は高精度に実現できていると言える。



図 5.14 船舶上の計測ポイント

表 5.5 レーザー計測とステレオ計測の比較

No	レーザー計測値 ([m])			ステレオ計測値 ([m])			計測誤差 ([m])		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
1	1.243	2.934	21.711	1.211	2.924	21.586	-0.032	-0.010	-0.125
2	0.989	2.885	25.379	0.927	2.872	25.102	-0.062	-0.013	-0.277
3	9.662	4.861	21.199	9.563	4.841	21.006	-0.099	-0.020	-0.193
4	8.696	4.824	20.962	8.586	4.792	20.735	-0.110	-0.032	-0.227
5	7.791	4.818	20.885	7.648	4.775	20.577	-0.143	-0.043	-0.308
6	6.879	4.832	20.811	6.832	4.817	20.702	-0.047	-0.015	-0.109
7	5.447	4.846	20.679	5.418	4.830	20.605	-0.029	-0.016	-0.074
8	4.559	4.838	20.725	4.526	4.821	20.637	-0.033	-0.017	-0.088
9	3.663	4.865	20.830	3.632	4.846	20.736	-0.031	-0.019	-0.094
10	2.669	4.861	20.664	2.644	4.843	20.582	-0.025	-0.018	-0.082
11	10.964	5.280	21.361	10.878	5.262	21.203	-0.086	-0.018	-0.158
12	1.308	5.339	20.848	1.292	5.335	20.787	-0.016	-0.004	-0.061
絶対値平均	-	-	-	-	-	-	0.059	0.019	0.150
標準偏差	-	-	-	-	-	-	0.041	0.010	0.083

5.4.2 船舶の検出及び位置姿勢推定結果

深江丸がポンドの防波堤に差し掛かるくらいの位置から着岸完了までの1秒ごとの画像フレームに対して、画像の平行化から位置姿勢推定までの一連の処理を実施した。計測エリアのイメージを図 5.15 に示す。



図 5.15 計測エリア概観

まず、V-Disparity/U-Disparity 画像により船舶を検出した結果を図 5.16 に示す。図 5.16 中央の散布図は、AIS データの時刻と同タイミングの画像フレームから、深江丸のアンテナ部分を手で計測した (X, Z) 座標の結果を示しており、番号は時系列の順番を表している。ポンド入港時から着岸完了時点まで、船舶部分をほぼ正確に検出できていることがわかる。しかしながら、フレーム No.1~6 においては、防波堤左側で海面上では3次元物体が何も存在しない部分を誤検出してしまっている。その様子を図 5.17(a) に示す。このときの視差画像を確認すると、同図 (b) のように、海面上に何かしらの視差値が存在していることがわかる。一方、背景視差画像上には海面の視差のみが存在し、3次元物体を示すような視差値は存在していない。SGM は注目画素に対して画像の端からコストを繰り返し集約する（伝搬させる）ことで特徴の少ない箇所でもそれなりの視差値を得られることが特徴であるが、この例では画面左側の船舶部分の影響により不要な視差値がノイズとして生じてしまったと考えられる。

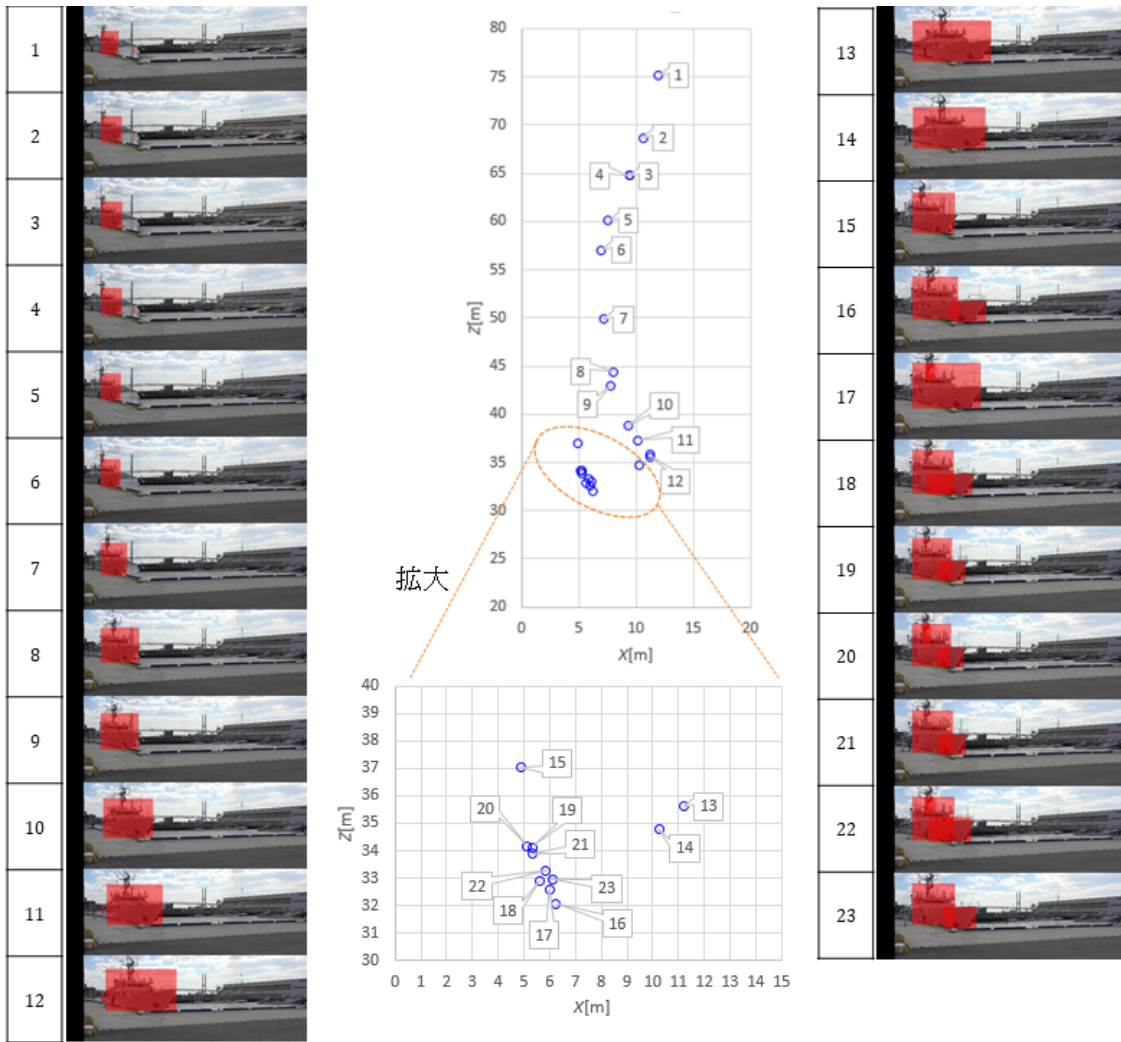
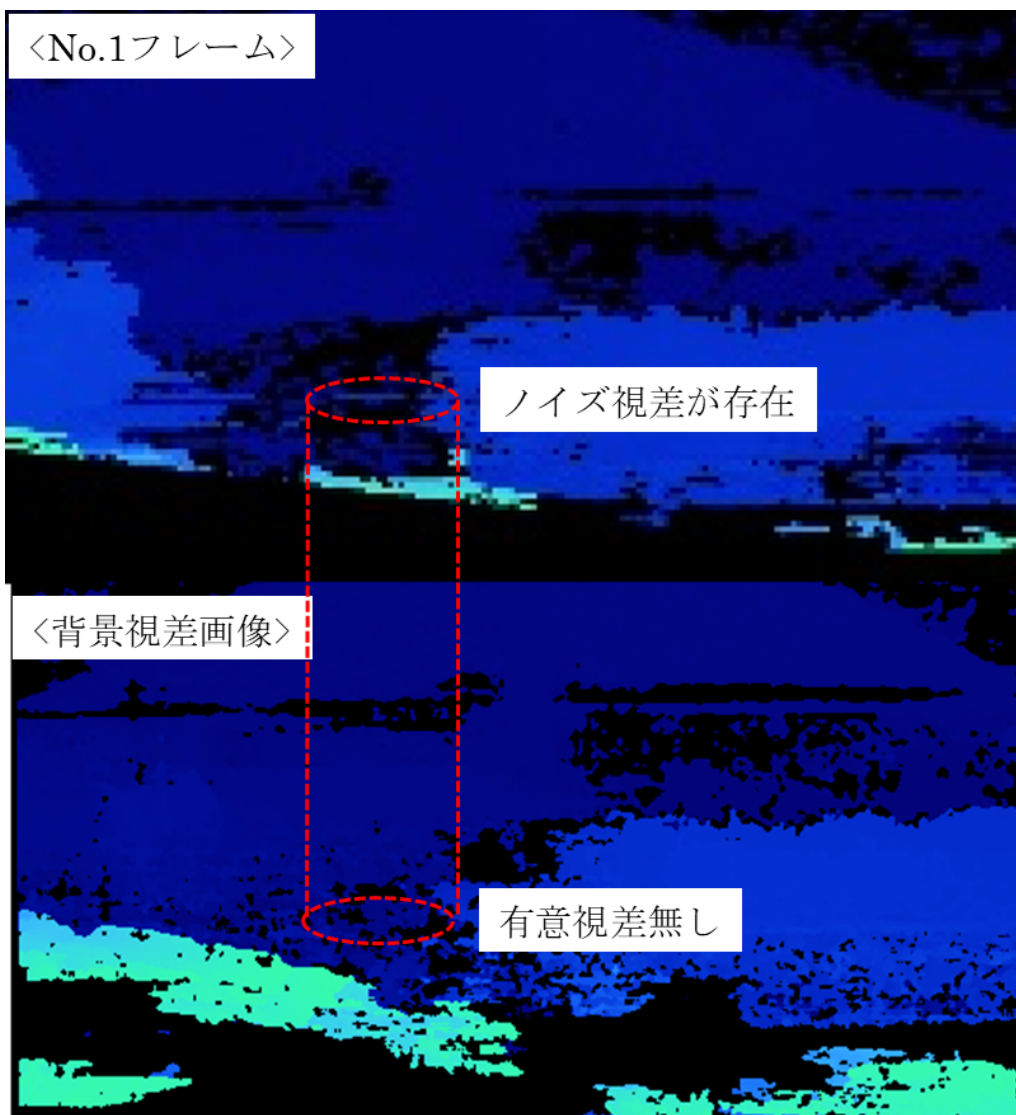


図 5.16 船舶の検出結果



(a) 誤検出の例 (図 5.16 No.1 フレーム)



(b) 背景視差画像との差分

図 5.17 誤検出の例

続いて、検出した船舶部分の視差値から3次元点群を求め、ICPによる3次元モデルとのフィッティングを行った。ICPの収束パラメータは5.3節の値を用いた。このとき、図5.18に示すように、フィッティングに失敗する例が見られた。本提案手法では、ICPの前処理として Z が最小となる位置に初期位置合わせを行っているが、図5.18に示すように、係留ロープ部分の3次元点群が船舶領域として含まれてしまっており、本来は船首先端部分の点群に初期位置を合わせたいが、 Z , X 方向ともに誤った位置を初期位置として処理されてしまっている。この様子を図5.19に示す。同図中の凡例“Ship Model(Init)”はモデルの初期位置合わせの結果を示している。同図(b)は初期位置がずれていても、ICPによりそれらしい位置に再フィッティングできているシーン(経過時間としては同図(a)の4[sec]前のフレーム)の結果である。同図(a)は誤って付与された初期位置である船首先端部分を軸として、右舷前方がフィットするよう回転し、フィッティング推定されている。一方で、同図(b)は X , Z 方向ともに正しい船首先端部分にシフトし、位置合わせが行われている。このとき、ICPの $fitness$ の値は失敗時(同図(a))が0.13で、適切にフィッティングできているとみなせるシーン(同図(b))では0.19であった。 $fitness$ 値自体が小さいのは、ソース点群が深江丸のモデルを構成する全点群であるのに対して、ターゲット点群(ステレオ計測により求まる点群)がカメラの撮像向きの都合上、右舷前方や船橋部分のみに限定されるためである。誤フィッティングの影響を除くため、この $fitness$ 値によりICPの成功、失敗を判断することを考えたが、遠方では計測できる点群が少ないため $fitness$ 値が低く出てしまう可能性がある。閾値を低くすると逆に近方で正しく判定できない可能性があるため、パラメータの扱いが難しい。そのため、本研究では $fitness$ 値自体の大きさによる判定は採用せず、式(5.8)により求めたモデル点群 S の各点 s_i の X 座標 s_i^x が全て $s_i^x > 0$ となる時(0以下は岸壁と接触している状態)、有効フレームデータとして位置姿勢推定を行った。

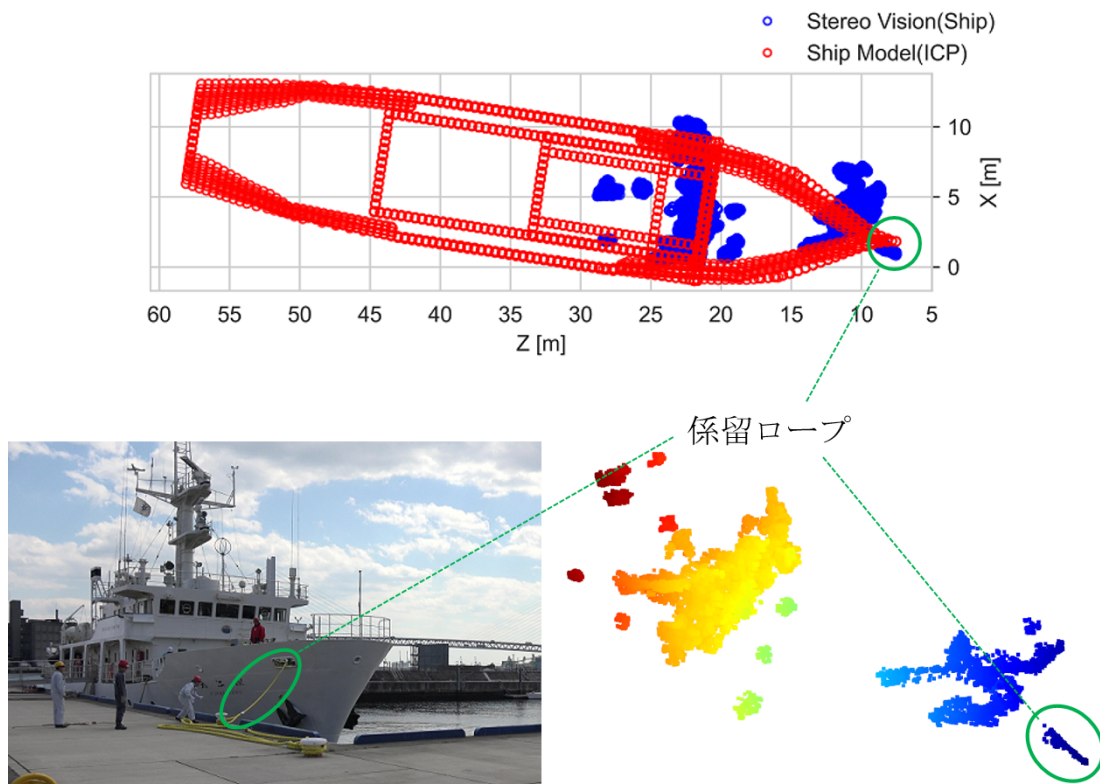
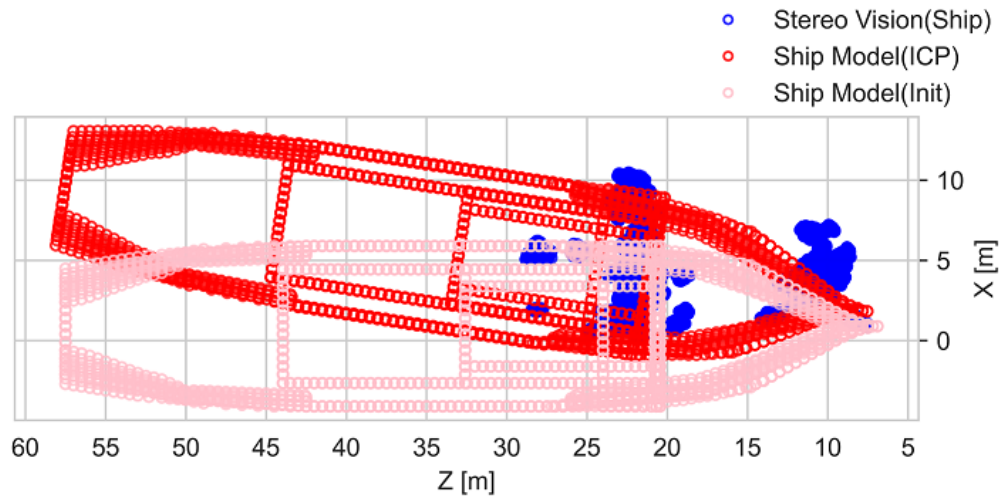
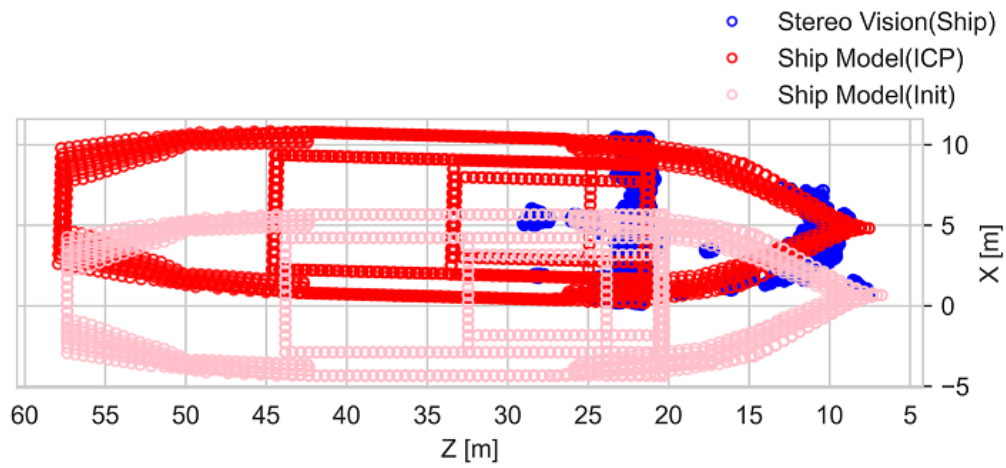


図 5.18 ICP 誤フィッティングの例



(a) フィッティング失敗時

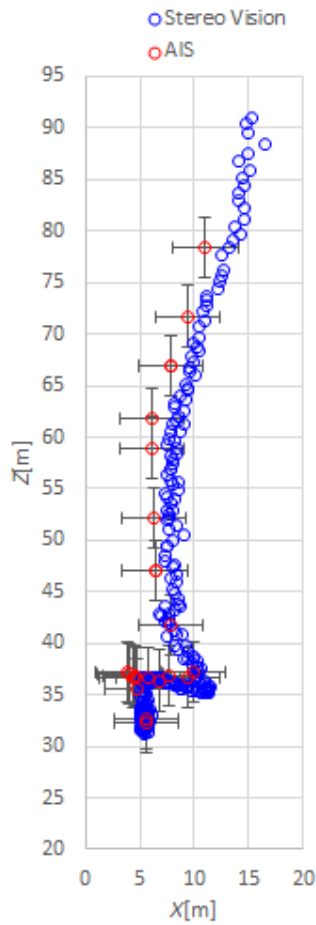


(b) フィッティング成功時

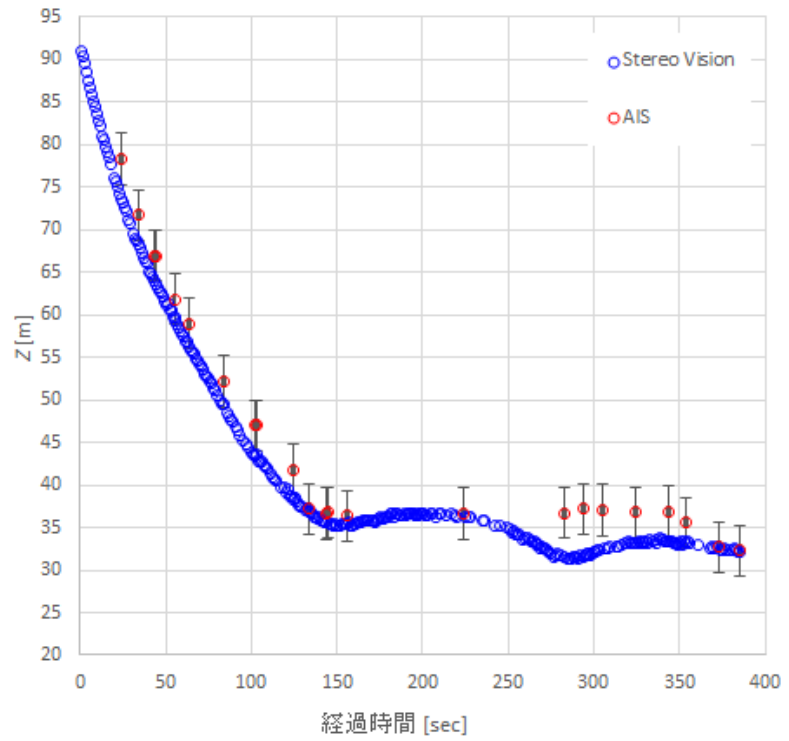
図 5.19 ICP 誤フィッティング時の初期位置

最終的な位置推定結果を図 5.20 に示す。X 方向及び Z 方向の位置推定結果を同図 (a) に、X 方向、Z 方向別に経過時間に対する位置変化の様子を同図 (b)、(c) にそれぞれ示す。推定位置 X, Z はいずれもモデルの中心位置の値を示しており、実際の船舶の運航データ (AIS) を比較としてプロットしている。同図中において、AIS データの方に $\pm 3[\text{m}]$ のエラーバーを表示している。船舶の GPS データ自体も誤差を含むほか、このとき AIS データの位置精度は“低精度状態”であったため、最悪 $10[\text{m}]$ 以上の誤差を有している可能性もあるが、ここでは一般的な精度として $\pm 3[\text{m}]$ とした [57]。同図 (a) では、 $60[\text{m}] < Z < 75[\text{m}]$ の区間でやや値がずれているが、それ以外の区間ではステレオ画像計測により推定した結果と AIS の位置データは概ね一致している。上記区間のずれは、同図 (b)、(c) で対応する経過時間 ($22[\text{sec}] \sim 64[\text{sec}]$) をみると、X, Z 方向ともに AIS の位置データに対して誤差 $\pm 3[\text{m}]$ のほぼ限界値となっているため、X, Z 方向の誤差が重なり、結果として値が外れて見えるためであると考えられる。また、同図 (b)、(c) より、X, Z 方向ともに船舶がポンド内に進行し、着岸完了時点までに位置が収束する様子を捉えられていることがわかる。同図 (c) より、岸壁側と接する X 方向は AIS データとの差が $\pm 3[\text{m}]$ 以内であることがわかる。一方で、Z 方向は経過時間 $283[\text{sec}] \sim 345[\text{sec}]$ の区間で差が大きくなっている。この間の実際の深江丸の挙動を動画で確認すると、ロープを使っての係留作業中で実際に後退する場面も見られた。これは、図 5.16 においても、フレーム No.16~20 までは Z 方向の正方向へ遷移し (後退し)、その後、フレーム No.20~23 へは負方向へ移動 (前進) している結果とも一致している。また、図 5.21 は該当区間での各 X, Z 位置におけるヨー角の向き (Z 軸となす角) を矢印で示したものである。この区間では、AIS の方でも方位角はほとんど変化しておらず、ほぼ船首方向を保ったままである。すなわち、その場で位置を保ったまま回頭したということではなく、ステレオ計測の結果が示すように、前後方向へ移動した可能性も十分にあり得る。したがって、AIS の位置情報よりも、提案手法の方がより細かく船舶の挙動をとらえることに成功したと考えられる。

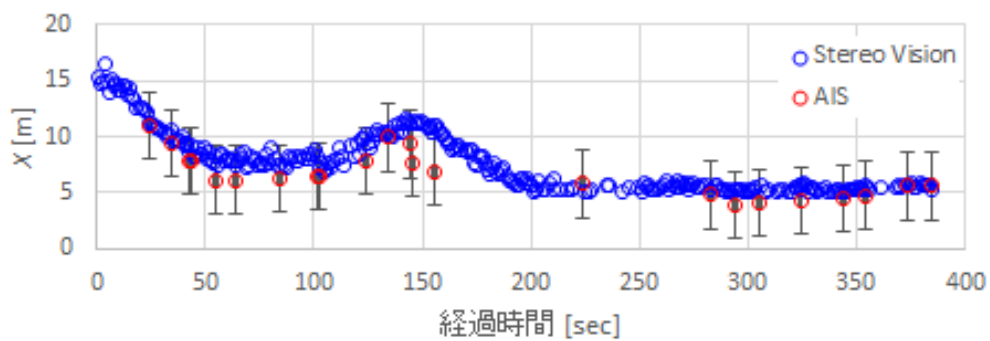
最後に、方位 (ヨー角) の比較結果を同じく図 5.22 に示す。同図中において、AIS データの方に $\pm 1.5[^\circ]$ のエラーバーを表示している。船舶に搭載される船首方位伝達装置 (THD: Transmitting Heading Device) の性能基準として求められる動的誤差: $\pm 1.5[^\circ]$ を参考にした [58]。AIS データに対して、ステレオ計測の結果はほとんどの区間で外れてしまっているが、値の変化の傾向は捉えられている。ここで、経過時間に対する、*fitness* 値とヨー角の関係を図 5.23 に示す。ヨー角の変化に追従できず、推定誤差が大きくなっている、すなわち、ヨー角が大きくなるほどソース点群であるモデルとターゲット点群であるステレオ計測で求めた点群の“当てはめ”が適切に行われにくくなっている、と考えた。しかし、実際には逆の挙動になることがわかった。つまり、図 5.23 から



(a) 位置推定結果



(b) AIS との比較 (Z 方向)



(c) AIS との比較 (X 方向)

図 5.20 位置推定結果

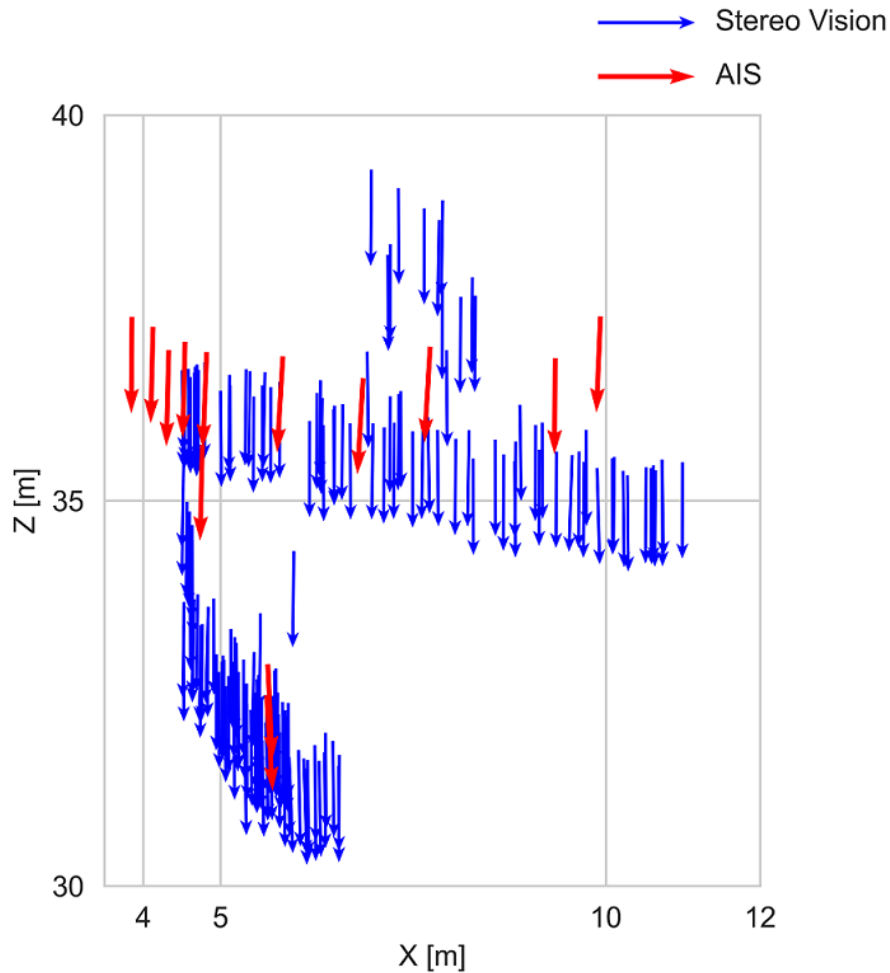


図 5.21 位置とヨー角の関係

は、ヨー角がマイナス側にふれるほど、*fitness* 値も大きくなり、“フィッティング率”としては向上するということである。これは、ヨー角がマイナスの場合、船舶の挙動としては右舷が岸壁から離れる方向に動くということであり、そうすると、カメラから捉えられる右舷の船腹部分の面積がわずかながら増えるため、その部分を捉える視差も増える。対象となるターゲット点群にモデル点群が当てはまる割合が増え、結果として *fitness* 値が大きくなった、と考えられる。しかしながら、ヨー角の絶対値が最大になる経過時間 43[sec] 時点においても、ヨー角の推定結果は AIS の誤差範囲には入っていない。そのため、ICP による推定結果（精度）と評価指標（メトリクス）の間にはっきりとした相関関係を認めることができない。ICP は近傍点探索しか行わないため、初期値がある程度正確でなければならない。現状は *X* 及び *Z* 方向の初期位置移動とその位置での大域的な位置合わせを実施しているが、ヨー角の変化に追従する

ような初期位置は付与できていない。したがって、ある初期状態でのソース点群とターゲット点群の組合せが偶然それらしい組合せであった場合は、それらしい推定結果となる（そのためバラつきも大きい）が、そうならなかった場合は図 5.19 の例に示すようにフィッティングに失敗した結果になると推定される。適切な初期位置の与え方、各軸の回転も含めた推定精度の向上は今後の課題である。

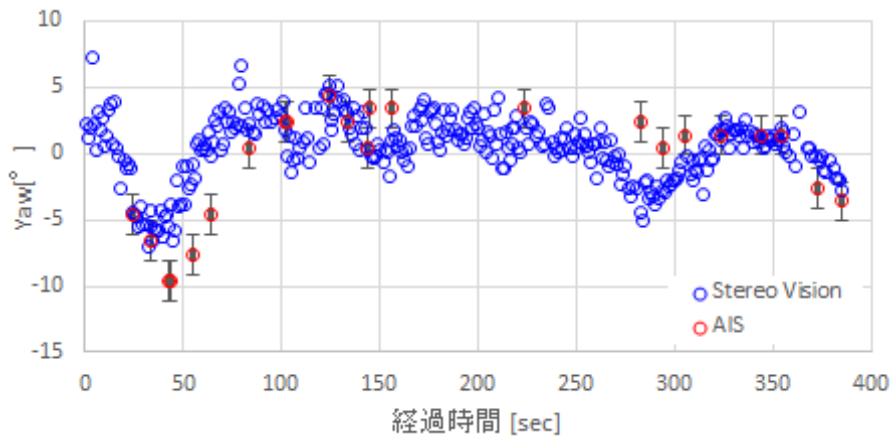


図 5.22 姿勢推定結果（AIS との比較:ヨー角）

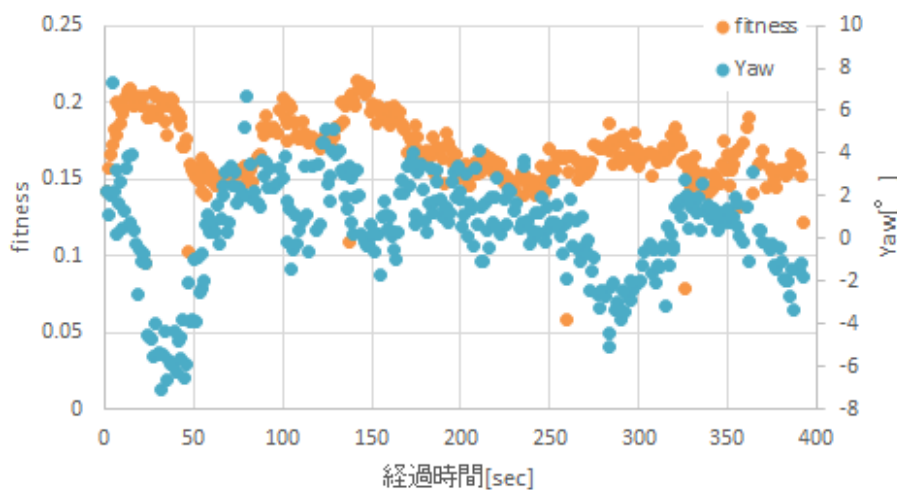


図 5.23 *fitness* 値とヨー角の関係

5.4.3 処理時間に関する考察

提案システムを実現する上でSGMによる視差計算からICPによる位置姿勢推定までをリアルタイムに処理する必要がある。GPS [44] やGNSS [59] を用いた自動離着陸システムが提案されており、それらのデータのリフレッシュレートは1[Hz] (1[fps]) である。よって、本研究においても、目標処理時間を1[sec] とおく。本研究では、まず手法の有効性を検証し、提示することを目的とするため、処理時間を考慮した実装や実験はできていない。そのため、本項では現状の実装による処理時間と、提案手法で用いている各アルゴリズムの高速化手法等を参考に、リアルタイム性の面で、自動離着陸システムへの適用可能性について検討する。

本章の検証で使用したPCと開発環境を表 5.6 に、本提案手法の一連の処理について、処理時間の内訳を表 5.7 にそれぞれ示す。視差計算及びU-Disparity, V-Disparity 画像による船舶の検出処理及び3次元点群データの生成はC++言語にて実装している。SGMはOpenCVの実装を利用しているが、位置姿勢推定を含む全体処理の半分近い時間を要していることがわかる。その後の、大域的位置合わせ及びICPによる精密位置合わせ処理はOpen3DのPython版を使用している。Pythonは実行時に機械語へと変換されるいわゆるインタプリタ言語のため、処理時間の面では不利である。Open3DはC++版も配布されているため、そちらを使用することで幾分かの処理時間短縮化が期待できる。しかしながら、ソフトウェア面での改善だけでは限界もあるため、ハードウェアによるアクセラレーションも期待される。

表 5.6 PC と開発環境

製品名	MDV-GZ770B-S5	
製造会社	MouseComputer Co., Ltd.	
スペック	OS	Windows 10 Pro
	プロセッサ	Intel® Core™ i7-6700 CPU @3.40 GHz
	実装メモリ	16.0 GB
開発環境	Visual Studio 2015	
開発言語, 使用ライブラリ	ステレオ処理, 物体検出	C++, OpenCV 3.2.0
	位置姿勢推定	Python3.7, Open3D 0.10.0.1

表 5.7 処理時間の内訳

項目	処理時間 ([sec])
視差計算 (SGM)	3.126
船舶検出 (U-Disparity/V-Disparity 生成含む)	0.652
位置姿勢推定 (大域的 position合わせ, ICP 含む)	2.257

SGMによる視差計算はコンピュータビジョン分野において広く研究されており, FPGA (Field Programmable Gate Array) を使用した並列実装によるハードウェアベースのアクセラレーションの例が数多く報告されている [60–63]. 特に, 文献 [60] では, フル HD 画像 (1920×1080 [pixel], $\text{depth}=128$ [pixel]) で 70 [fps] の性能を達成している. 本研究では 2006×722 [pixel], $\text{depth}=592$ [pixel] で処理しているため, 単純な画素比率では約 21 [fps] (0.048 [sec]) となり, 十分な高速化が期待できる.

また, 点群の位置合わせ問題に関しても FPGA や GPU (Graphic Processing Units) による高速化手法が提案されている [64–66]. いずれにおいても, CPU 実行 (非並列実行) 時に対して数倍以上の高速化を達成している. 文献 [64] では, モデルの点群数が $33,358$ 点, 入力されるシーンデータの点群数が $307,200$ 点において, GPU 処理により ICP は約 7 倍高速になることが報告されている. 本研究で作成した深江丸の 3D モデルは $3,440$ 点, ステレオ計測により得られた点群データの平均点群数は $34,898$ 点であった. 単純な点群数の組合せの比率は本研究よりも 85 倍ほど違うが, 同程度の改善効果が見込めるとすると, 位置姿勢推定部分は 0.322 [sec] となる (繰り返しになるが, Python から C/C++ 言語へ置き換えると元の処理時間も小さくなるため, 更なる短縮化が見込める).

ここで, 本提案手法において, ハードウェアに処理をオフロードする場合のシステム構成案を図 5.24 に示す. 図中の HWA (Hardware Accelerator) は FPGA, GPU, DSP (Digital Signal Processor) 等の並列処理に特化した演算機構を表している. 二つのカメラからの入力画像はハードウェアで処理され, 画像の平行化変換と, 視差画像の生成処理が行われる. ソフトウェア (CPU) は, HWA から視差画像を受け取り, U-Disparity/V-Disparity 画像の生成から物体検出までの処理を行う. 検出した物体領域部分の 3 次元点群データを HWA に入力し, 位置姿勢推定処理を移譲する. 推定された位置姿勢結果をソフトウェアが再び受け取り, 自動離着陸に必要な制御処理を実行する. さらに, ステレオ処理と位置姿勢推定を HWA で同時に実行可能な場合, この機能分割を処理スケジューリングの観点で見直すと, 図 5.25 のようなタイミングチャートも可能である (各処理の処理時間配分は適当である). すなわち, HWA へ処理を移

譲している期間はソフトウェア（CPU）の処理が空くため、次のフレームの処理をパイプライン的に平行して実行すれば、見かけ上の制御処理の応答時間を向上させることが可能である。ソフトウェア処理は一つのCPUコアで実行する前提で記載しているが、処理内容によってはマルチコア化も可能な部分はあるため、更なる処理速度の向上も期待できる。

以上より、視差計算と位置姿勢推定をFPGAやGPU等に処理をオフロードすることにより、提案手法の全ての処理を1[sec]で処理することは可能であると考え（船舶検出処理部分も最適化の余地は十分にある）。これらのハードウェアの進化は目覚ましく、近年比較的安価に入手できるようになってきている。また、FPGAはVerilog-HDL等のハードウェア記述言語により実装しなければならなかったが、昨今は高位合成というソフトウェアのプログラムからハードウェア記述を合成する技術 [67] が開発され、各FPGAベンダからも対応ツールがリリースされている [68,69]。これらの技術を導入することで、提案しているステレオ画像計測による自動離着陸システムは、処理性能面においても十分実現可能であると考え。

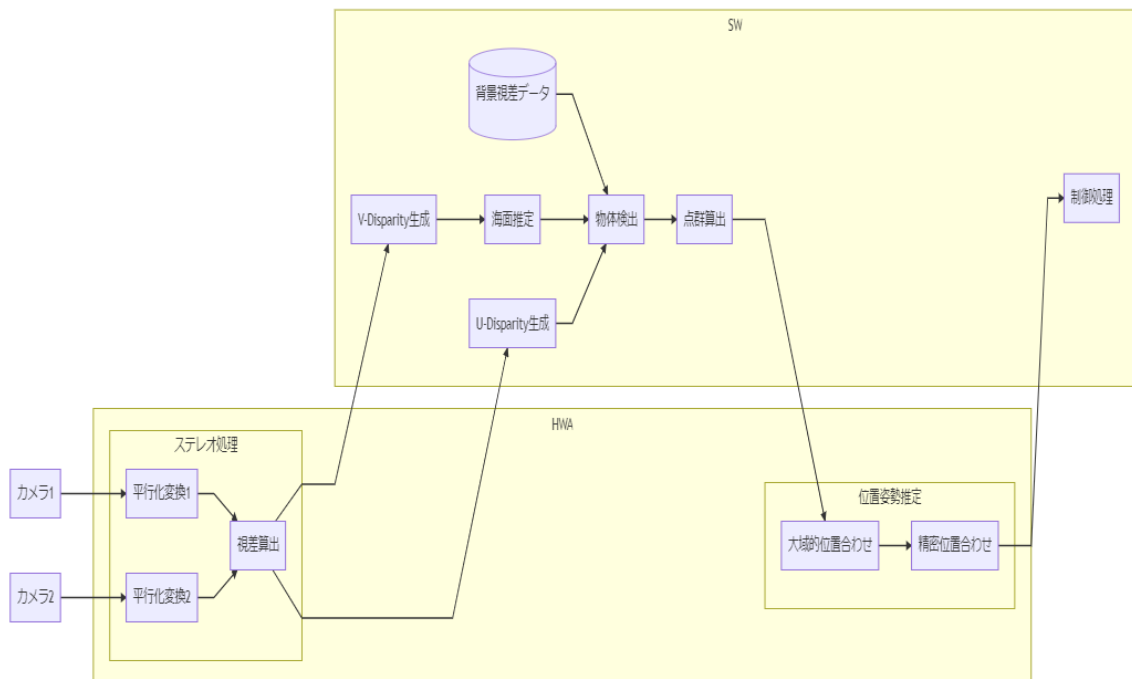


図 5.24 提案システムのシステムアーキテクチャ概観

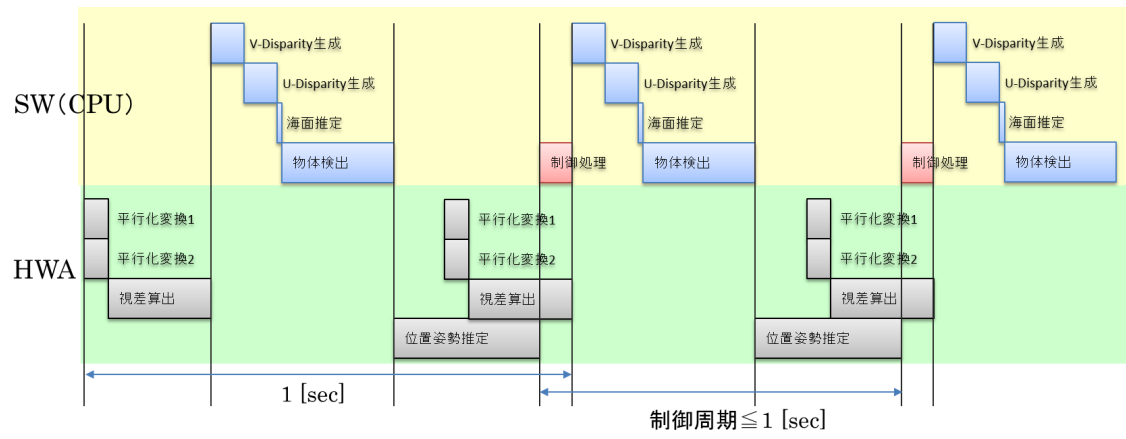


図 5.25 タイミングチャート

5.5 まとめ

自動離着棧システムへの適用に向けて、視差画像から船舶を検出し、位置姿勢推定を行う統合的手法を提案し、実際に陸上に配置したステレオカメラにより船舶が着岸する一連のシーンを対象に位置姿勢計測を試みた。視差画像から V-Disparity/U-Disparity 画像により物体候補を検出し、検出した候補領域から 3次元点群を求める手法を示した。そして、抽出した 3次元点群とモデルとのマッチングを行うことで、船舶の位置を推定可能なことを示した。実際の船舶の運航データとの比較では、少なくとも AIS (GPS) と同等の誤差数メートルの精度で計測できていると考えられる。静止状態での船舶各部での計測ではレーザー測量器と比較して 0.3[m] の精度で測定できている上、一部では AIS (GPS) よりも細かく船舶の挙動をとらえられていると思われる結果も確認できた。さらに、本提案手法によれば、船舶以外の 3次元構造物を検出可能であるため、システム全体のより一層の安全性、ロバスト性の向上が期待できる。また、システム全体の処理時間について、ハードウェアによるアクセラレーションを利用することで実現目途があることを考察した。

今後の課題として、モデルとのフィッティング精度向上が挙げられる。ICP アルゴリズムによるフィッティングに失敗したために位置推定できないシーンが見られ、また方位の推定も課題である。静止状態の計測精度から、カメラで捉えられている船舶右舷側は精度良く計測できているため、船舶の画像的特徴量が高い部分の計測を併用することで、方位角の推定精度を向上させることができると考えられる。初期位置・方位の最適な付与方法を検討し、推定精度の向上を目指す。点群位置合わせ問題については、文献 [70] のように高速高精度なアルゴリズムも開発されているので、それらも参考にしたい。また、カメラ画像と同期した位置、姿勢データの取得方法を検討し、より詳細な精度評価が必要である。

また、もう一つの課題として、船舶検出精度の向上がある。本研究では SGM により船腹部分等においても密な視差点が得られることを示したが、画像全体の情報を伝搬させる影響で不適切な視差が生じてしまう例が見られた。視差画像により検出した領域に該当する部分を、例えば深層学習等の手法により輝度画像の情報を用いて排除することも可能と考える。しかしながら、本提案手法単体で精度が良いことに越したことはない。本研究では OpenCV の実装を利用したため、4.3 節で述べた通り、コスト計算手法として SAD が採用されているが、他にも幾つかの手法が提案されている。また、物体輪郭部等の境界条件を付与し、物体からの不要な視差伝搬を避ける手法も提案されている [71]。これらについても検討を行い、視差画像そのものの精度向上、後段の U-Disparity/V-Disparity による物体検出精度向上も必要である。

第6章

結言

本論文では、陸上に配置したカメラによる船舶の監視システムの研究として、広海域監視のためのカメラの配置位置決定手法と、自動離着棧システムのための船舶の検出及び位置姿勢推定手法の提案を行った。これまで、船舶上に設置したステレオカメラにより遠方を航行中の船舶を検出し、追跡する手法について検討が進められてきた。著者らの最終的な目標は、陸上、船舶上を問わず、提案するステレオ画像計測システムにより統合的に船舶を検出し、船舶の航行安全性に寄与するシステムを実現することである。ふくそう海域における陸上からの海上監視と、港湾環境における自動離着システムを提案システムのコンセプトとして説明した。

その中で、陸上へのカメラ配置方法はこれまで十分に検討されていなかった。カメラの配置位置決定に関する従来研究は、屋内や車の道路環境といった限られた空間での議論に留まり、数キロメートル四方の広海域を対象とした手法は提案されていなかった。そこで、本研究では、一般的に入手し易い地図画像データを用いてカメラの配置位置、向き（方向）を自動的に決定する手法を提案した。提案手法は、シミュレートされたカメラ位置において、どの程度のステレオ計測性能が得られるか推定できることも特徴である。さらに、提案手法を離着棧を想定した岸壁モデルに対応させ、配置位置のシミュレーションを実施した。

また、港湾環境においては、岸壁に設置したカメラを単なる監視カメラとして使用するのではなく、自動離着棧システムへ適用することを提案した。自動離着システムに関する従来研究は、船上にカメラを配置する手法が多く提案されているが、それらは岸壁までの距離を計測することを目的とはせず、単なる操船補助的な使い方、ステレオ計測においても岸壁側に特別なターゲットを必要とする手法であった。そのため、陸上にカメラを配置する場合、船舶上にカメラを設置する場合、の双方の利点を整理するとともに、提案手法の必要性を

論じた。その上で、離着棧を想定したシーンにおいては、ステレオ画像計測として重要となる左右画像の対応付けの改善策として、SGMによる視差の取得を試みた。その結果、船体各部の正確な3次元点群が得られることを示した。また、ステレオ画像から直接的に船舶を検出する手法について検討を行い、背景視差画像を用いることで簡単に船舶を検出できることを示した。この得られた3次元点群からICPにより位置合わせを行うことで、船舶の3次元位置姿勢を推定する手法を提案した。統合評価として、シミュレーションにより求めた位置にカメラを設置し、実際に着岸する船舶を対象とした撮影実験により、提案手法による位置姿勢推定を行った。実際の船舶の運航データとの比較では、少なくともAIS (GPS) と同等の誤差精度で計測できている結果が得られた。また、静止状態の船舶各部の3次元位置計測結果は、誤差0.3[m]以内であり、自動離着システムに必要なとされている精度を十分に満たしていることを確認した。以下、各章で論じた内容について要約する。

第2章では、本研究で基礎技術となるステレオカメラのキャリブレーション及び3次元位置計測の原理について述べた。キャリブレーション手法として一般的なZhangの手法は、内部パラメータと外部パラメータを同時に推定する。本研究では、二つのカメラ間は数メートル以上離れており、従来手法のように、既知のパターンをカメラ設置位置で二つのカメラから同時に認識させることは現実的ないと判断し、内部パラメータと外部パラメータを別々に推定する方法を説明した。また、ステレオ画像計測における、精度見積りとして、二つのカメラ画像間の対応付けに誤差が含まれた場合の影響を定量化する方法を紹介した。

第3章では、広海域を監視対象としたカメラの配置位置を自動的に決定する手法を提案した。具体的にはまず、海岸線沿いにカメラを配置することを目標に、対象とする海域を含む地図画像データを処理し、Mean ShiftとCannyエッジ法により陸地と海域部分を領域分割し、そのエッジ部分を海岸線として抽出した。次に、抽出した海岸線をカメラ候補位置として、カメラの撮像範囲が対象海域を最大限満たすように向きを決定し、次のカメラを配置していくことを繰り返す。最終的に、監視対象領域を全て網羅できるカメラの台数と、各カメラの地図画像上での位置、向きが求まる。本研究では、一つのカメラにより海域を網羅できるように配置を求める単眼モードと、二つのカメラでの配置を求めるステレオモードの2パターンの手法を提案し、ステレオモードでは各カメラ間の距離を基線長として、どの程度の計測精度が得られるかシミュレーションできることを示した。また、本提案手法を発展させ、自動離着システムへ適用させる手法について述べた。

第4章では、港に設置したカメラを自動離着システムへ適用するための基礎的な検討を行った。離着棧を想定したシーンにおいては、対象とする船舶を

比較的近距离で計測することになるため、従来の視差算出方法の適用だけでは不十分であることを明らかにし、SGMによる視差算出手法の適用を検討した。実際にポンドでの撮影実験を行い、高精度に位置計測できることを示した。

第5章では、提案する自動離着棧システムの実現に向けて、ステレオ画像中から船舶を検出する方法、得られた3次元点群データから船舶の位置姿勢を推定する手法を提案した。ステレオ画像からの船舶検出は、V-Disparity/U-Disparity画像により得られた視差値の情報から船舶部分を検出することを検討した。特に、岸壁側にカメラを配置する提案システムのメリットを活かし、あらかじめ取得しておいた視差画像から静止物体領域を検出しておき、背景画像として差分を取ることで、簡単に動物体である船舶を検出できることを示した。検出した船舶領域部分の3次元点群データと船舶の3次元モデルをフィッティングさせることで、船舶の位置姿勢を推定できることを示した。船舶が着岸する一連のシーンに対して評価を行い、AIS同等の推定精度が得られただけでなく、さらに細かい挙動をとらえられていると思われる結果も確認できた。そして、提案システムの実現性について、処理時間の観点で考察し、ハードウェアによるアクセラレーションを活用することで十分に実現可能であることを論じた。

本研究では、陸上に配置したカメラによる船舶監視システムの実現に向けて、カメラの配置位置の決定方法、自動離着棧システムへ適用について提案を行ってきた。提案した配置位置の決定方法を自動離着棧システムへ展開するとともに、ステレオ画像から船舶を検出し、得られた点群データから位置姿勢推定する手法を提案した。統合検証として、シミュレーションにより得られたカメラ配置位置にて撮影実験を行い、着岸する船舶の位置姿勢を推定可能なことを示し、提案手法の有効性を確認した。

最後に、本提案システムの実用化を目指し、より高精度化するための今後の課題について述べる。本提案手法では、カメラの配置位置を決定する際、得られた候補位置に対して一つずつ順番にカメラを並べ、撮像範囲（面積）を評価するような、“力技”的なアプローチを採った。モンテカルロ的にランダムに配置位置を評価するような手法も有効であると考えられる。また、配置候補位置は、地図データの2次元的な位置情報しか使用していないが、実際は設置高さも決定する必要がある。広海域を監視するためには、より遠方までの計測が可能なようにカメラの位置はある程度高い方がよい。高さの情報も加味した配置位置決定方法の検討は今後の課題の一つである。また、求めた配置位置にて撮影実験を行い、船舶の検出と位置推定精度についての検証が必要である。

自動離着棧システムへの適用に関しては、得られた3次元点群データと船舶モデルとのフィッティング精度の向上が挙げられる。現状、ヨー角（方位角）、ロール角といった角度の推定ができていない。大域的位置合わせを工夫し、最適な初期位置・方位の付与方法を検討することが必要である。加えて、船舶や

海面を含む画像に対して、より最適な視差算出手法の検討が挙げられる。視差画像自体の精度を向上させることで、物体検出精度を向上させることができる。輝度画像に対して深層学習等により物体認識させることで、誤検出部分を排除できる可能性もある。これらの手法を組み合わせることにより、高精度でロバスト性の高い船舶監視及び自動離着岸システムの実現が期待される。

謝辞

本研究を行うにあたり，神戸大学大学院 海事科学研究科 山本茂広准教授には，終始適切なお指導ご鞭撻を頂きました。学部，修士の3年間だけでなく，卒業後社会人となった後にも再び学び，研究する機会を与えて下さりました。ここに，謹んで感謝の意を表します。

副査をしていただいた，神戸大学大学院 海事科学研究科 佐俣博章教授，堀口知也教授，元井直樹准教授には，審査委員として，本論文をまとめる上でとても有益なお助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

静岡大学 工学部 橋本岳准教授には，論文執筆等において貴重なご意見を頂きました。厚く御礼申し上げます。

神戸大学海事科学部電気工学研究室を2020年3月に修了された吉原蓮太氏には，本研究において重要な，カメラのキャリブレーション測定及び実験データの提供をしていただきました。厚く御礼申し上げます。

海技大学校 吉原広太郎准教授には，学会発表や実験等で多大なお協力を頂いただけでなく，同じく社会人学生として研究される姿勢がいつも著者の励みとなりました。心より御礼申し上げます。

最後に，ありとあらゆる面で著者を支え，そして終始励ましてくれた家族に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Rolls-Royce. “Rolls-Royce and Finferries demonstrate world’ s first Fully Autonomous Ferry”. <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/03-12-2018-rr-and-finferries-demonstrate-worlds-first-fully-autonomous-ferry.aspx>, (参照 2019-12-30).
- [2] Yara. “Yara Birkeland press kit”. <https://www.yara.com/news-and-media/press-kits/yara-birkeland-press-kit/>, (参照 2019-12-30).
- [3] L3Harris. <https://www.asvglobal.com/>, (参照 2020-8-24).
- [4] 国土交通省. <https://www.mlit.go.jp/common/001246716.pdf>, (参照 2020-8-24).
- [5] 日本財団. <https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/pr/2020/20200612-45056.html>, (参照 2020-8-24).
- [6] European Maritime Safety Agency. “Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2019”. <http://www.emsa.europa.eu/accident-investigation-publications/annual-overview/download/5854/2713/23.html>, (参照 2020-8-24).
- [7] 海上保安庁. “令和元年 海難の現状と対策 - 海の安全情報”. https://www6.kaiho.mlit.go.jp/info/keihatsu/20200511_state_measure01.pdf, (参照 2020-8-24).
- [8] H. Shen, H. Hashimoto, A. Matsuda, Y. Taniguchi, D. Terada, and C. Guo. “Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning”. *Applied Ocean Research*, Vol. 86, pp. 268–288, 2019.
- [9] Y. Xue, D. Clelland, B.S Lee, and D. Han. “Automatic simulation of ship navigation”. *Ocean Engineering*, Vol. 38, pp. 2290–2305, 2011.
- [10] L. Perera, J. Carvahó, and C. Soares. “Autonomous guidance and navigation based on the COLREGs rules and regulations of collision avoidance”. In *Proceedings of the International Workshop “Advanced Ship Design for Pollution Prevention”*, pp. 205–216, 2009.
- [11] L. Perera, V. Ferrari, F. Santos, M. Hinostroza, and C. Soares. “Experimental Evaluations on Ship Autonomous Navigation and Collision Avoidance by Intelligent Guidance”. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 40, No. 2, pp. 374–387, 2015.
- [12] 日本船舶電装協会. “平成 15 年度 通信講座用船用電気装備技術講座（レーダー、AIS・CDR・GPS 編）”. 日本財団 図書館, 2003.
- [13] 山本茂広, ミェ テンギウイン. “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”. 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 42, No. 4, pp.

- 713–718, 2007.
- [14] G. Kocak, S. Yamamoto, and T. Hashimoto. “Detection and tracking of ships using a stereo vision system”. *Scientific Research and Essays*, Vol. 8, No. 7, pp. 288–303, 2013.
 - [15] KOCAK GAZI, 山本茂広, 橋本岳. “Analyzing Influence of Ship Movement to Stereo Camera System Set-up on Board Ship”. *日本マリンエンジニアリング学会誌*, Vol. 47, No. 6, pp. 111–118, 2012.
 - [16] 日経クロステック. “LiDAR × レーダー × カメラ, 大競争時代の新技術”. <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00660/>, (参照 2020-1-4).
 - [17] 桐谷伸夫, 今里元信. “全方位画像センサによる離着棧操船時の海上モニタリング技術”. *日本航海学会誌 NAVIGATION*, Vol. 165, pp. 88–93, 2006.
 - [18] 大山雄佑, 江崎修央, 瀬田広明, 濱地義法. “魚眼レンズを用いた自船周りの映像表示技術”. *日本航海学会論文集*, Vol. 122, No. 0, pp. 45–52, 2010.
 - [19] 長島雄大, 古谷雅理, 稲石正明, 樫野純. “船舶周囲の監視に関する研究”. *日本航海学会論文集*, Vol. 127, pp. 141–148, 2012.
 - [20] 星野邦弘, 原正一, 池本義範, 黒田貴子. “離着棧操船支援のための着棧速度計の開発と評価試験”. *日本船用海洋工学会講演論文集*, No. 5E, pp. 151–154, 2007.
 - [21] 平田法隆, 西嶋孝典, 垣野文彦. “画像処理技術を用いた離着棧操船支援用数値情報の取得”. *日本航海学会論文集*, Vol. 129, pp. 99–104, 2013.
 - [22] Y. Mizuchi, T. Ogura, Y. Kim, Y. Hagiwara, and Y. Choi. “Camera-based measurement for close-distance relative vessel positioning”. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, No. 4, pp. 1899–1907, 2017.
 - [23] S. Lee, C. Tzeng, Y. Kehr, C. Kang, and C. Huang. “Design and Application of An Image-Processing-Based Fuzzy Autopilot for Small-Boat Approaching Maneuvers”. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 4, pp. 558–567, 2010.
 - [24] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool. “Speeded-Up Robust Features (SURF)”. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 110, No. 3, pp. 346 – 359, 2008.
 - [25] M. H. Tall, P. F. Rynne, J. M. Lorio, and K. D. von Ellenrieder. “Visual-based navigation of an autonomous tugboat”. In *OCEANS 2009*, pp. 1–9, 2009.
 - [26] V. Bui, H. Kawai, Y. Kim, and K. Lee. “A Ship berthing system design with four tug boats”. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 55, pp. 1257–1264, 2011.
 - [27] V. Bui and Y. Kim. “Development of Constrained Control Allocation for Ship

- Berthing by Using Autonomous Tugboats”. *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 9, No. 6, 1203-1208.
- [28] A. Hengel, R. Hill, B. Ward, and A. Cichowski. “Automatic Camera Placement for Large Scale Surveillance Networks”. In *2009 Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, pp. 1–6, 2009.
- [29] 望月良樹, 本多中二. “監視カメラシステムにおける最適カメラ配置探索シミュレーション”. 第22回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 2006.
- [30] opencv dev team. “Camera Calibration and 3D Reconstruction”. https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html, (参照 2019-12-30).
- [31] Z. Zhang. “A flexible new technique for camera calibration”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, 2000.
- [32] S. Yamamoto, G. Kocak, and K. Shimizu. “Accuracy Evaluation on Localization of Ships Using Stereo Vision System”. 第79回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp. 41–42, 2009.
- [33] Y. Nomura, S. Yamamoto, and T. Hashimoto. “A Proposal of Automatic Camera Placement Method for Wide Sea Area Monitoring”. *日本マリンエンジニアリング学会誌*, Vol. 53, No. 3, pp. 435–440, 2018.
- [34] 国土交通省国土地理院. <http://www.gsi.go.jp/index.html>.
- [35] D. Comaniciu and P. Meer. “Mean shift: a robust approach toward feature space analysis”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24, No. 5, pp. 603–619, 2002.
- [36] J. Canny. “A Computational Approach to Edge Detection”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, No. 6, pp. 679–698, 1986.
- [37] Y. Nomura, S. Yamamoto, and T. Hashimoto. “Study of 3D measurement of ships using dense stereo vision: towards application in automatic berthing systems”. *Journal of Marine Science and Technology*, 8 2020.
- [38] H. Hirschmuller. “Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information”. In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05)*, Vol. 2, pp. 807–814 vol. 2, 2005.
- [39] M. Loghman and J. Kim. “SGM-based dense disparity estimation using adaptive Census transform”. In *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, pp. 592–597, 2013.

- [40] H. Hirschmuller and D. Scharstein. “Evaluation of Stereo Matching Costs on Images with Radiometric Differences”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 31, No. 9, pp. 1582–1599, 2009.
- [41] Graduate School of Maritime Sciences Kobe University. “Fukaemaru”. <http://www.edu.kobe-u.ac.jp/gmsc-fukaemaru/ship/index.html>, (参照 2019-12-30).
- [42] 東京計器. “接岸速度計 DL-3000”. <https://www.tokyokeiki.jp/Portals/0/images/e/products/pdf/measurement/dl3000.pdf>, 2016. (参照 2019-12-30).
- [43] 光電製作所. “レーザー接岸速度計システム SRD-303i(防爆型)”. <https://www.koden-electronics.co.jp/en/enindustrial/srd-303i-e>, (参照 2019-12-30).
- [44] M. Ueno. “A GPS-based system for precise shipping guidance and control”. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 9–15, 2000.
- [45] 野村康紘, 山本茂広, 橋本岳. “自動離着棧に向けた高密度視差画像による船舶の位置姿勢推定”. 第90回 マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp. 233–234, 2020.
- [46] 松本洋平. “HOG(Histograms of Oriented Gradient) 特徴量を用いた船舶画像認識”. 日本航海学会論文集, Vol. 129, pp. 105–112, 2013.
- [47] 山本茂広, 野村康紘, 橋本岳. “深層学習を用いた海上航行船舶検出の試み”. Vol. 3, p. 158, 2017.
- [48] 小林充, 丹羽康之, 福戸淳司, 岩崎一晴. “深層学習による景観画像からの船影の検出”. 日本船舶海洋工学会講演会論文集, No. 26, pp. 121–124, 2018.
- [49] Z. Hu and K. Uchimura. “U-V-disparity: an efficient algorithm for stereovision based scene analysis”. In *IEEE Proceedings. Intelligent Vehicles Symposium, 2005.*, pp. 48–54, 2005.
- [50] N. Suganuma and N. Fujiwara. “An Obstacle Extraction Method Using Virtual Disparity Image”. In *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 456–461, 2007.
- [51] N. Suganuma. “Clustering and tracking of obstacles using stereo vision system”. In *2009 ICCAS-SICE International Joint Conference*, pp. 4623–4628, 2009.
- [52] R. Labayrade, D. Aubert, and J. Tarel. “Real time obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through ”v-disparity” representation”. In *Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE*, Vol. 2, pp. 646–651 vol.2, 2002.
- [53] I. Benacer, A. Hamissi, and A. Khouas. “A novel stereovision algorithm for obstacles detection based on U-V-disparity approach”. In *2015 IEEE Inter-*

- national Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 369–372, 2015.
- [54] S. Rusinkiewicz and M. Levoy. “Efficient variants of the ICP algorithm”. In *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 145–152, 2001.
- [55] Q. Zhou, J. Park, and V. Koltun. “Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing”. <http://www.open3d.org/paper.pdf>, (参照 2020-11-4).
- [56] R. B. Rusu, N. Blodow, and M. Beetz. “Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration”. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3212–3217, 2009.
- [57] 福戸淳司, 有村信夫, 沼野正義, 伊藤博子, 岡崎忠胤. “海上で扱う情報とその利用法に関する調査”. 海上技術安全研究所報告, Vol. 3, No. 5, pp. 579–593, 2003.
- [58] 日本船舶電装協会. “2010 年度船舶電気装備技術講座 (レーダー) AIS, VDR, GPS 編”. 日本財団 図書館, 2010.
- [59] 中村拓, 園部達也, 戸田裕行, 藤澤奈緒美, 武富貴史, アレクサンダープロブスキ, クリスタンサンドア, 加藤博一. “着陸支援のための GNSS 搬送波位相と IMU の密結合と視覚オドメトリの融合による位置推定のロバスト化”. 測位航法学会論文誌, Vol. 10, No. 1, pp. 1–12, 2019.
- [60] D. Zha, X. Jin, and T. Xiang. “A Real-Time Global Stereo-Matching on FPGA”. *Microprocessors and Microsystems*, Vol. 47, pp. 419–428, 2016.
- [61] L. Cambuim, L. Oliveira, E. Barros, and A. Ferreira. “An FPGA-based real-time occlusion robust stereo vision system using semi-global matching”. *Journal of Real-Time Image Processing*, Vol. 17, pp. 1447–1468, 10 2020.
- [62] J. Hofmann, J. Korinth, and A. Koch. “A Scalable High-Performance Hardware Architecture for Real-Time Stereo Vision by Semi-Global Matching”. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pp. 845–853, 2016.
- [63] A. Jain, A. Fell, and S. Anand. “A Parallel Architecture for High Frame Rate Stereo using Semi-Global Matching”. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, pp. 140.1–140.12, September 2017.
- [64] Y. Kitaaki, H. Okuda, H. Kage, and K. Sumi. “High speed 3-D registration using GPU”. In *2008 SICE Annual Conference*, pp. 3055–3059, 2008.
- [65] W. Dong, J. Park, Y. Yang, and M. Kaess. “GPU Accelerated Robust Scene Reconstruction”. In *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 7863–7870, 2019.
- [66] Q. Gautier, A. Althoff, and R. Kastner. “FPGA Architectures for Real-time Dense SLAM”. In *2019 IEEE 30th International Conference on Application-*

- specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)*, Vol. 2160-052X, pp. 83–90, 2019.
- [67] 若林一敏. “ソフトウェアプログラムからハードウェア記述を合成する高位合成技術”. 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol. 6, No. 1, pp. 37–50, 2012.
- [68] Intel HLS Compiler. <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/software/programmable/quartus-prime/hls-compiler.html>, (参照 2020-11-30).
- [69] Xilinx Vitis HLS. <https://japan.xilinx.com/products/design-tools/vivado/integration/esl-design.html>, (参照 2020-11-30).
- [70] O. Hirose. “A Bayesian Formulation of Coherent Point Drift”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 1–1, 2020.
- [71] TY. Chung, HW. Ting, and JJ. Jaw. “Dense Stereo Matching With Edge-Constrained Penalty Tuning”. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 15, pp. 664–668, 2018.

研究業績

本研究に関する研究業績

有審査論文

1. Yasuhiro Nomura, Shigehiro Yamamoto, Takeshi Hashimoto, “A Proposal of Automatic Camera Placement Method for Wide Sea Area Monitoring” , Journal of JIME, Vol.53, No.3, pp.435-440, 2018
2. Yasuhiro Nomura, Shigehiro Yamamoto, Takeshi Hashimoto, “Study of 3D measurement of ships using dense stereo vision: towards application in automatic berthing systems” , Springer Science and Business Media, Journal of Marine Science and Technology, 16th August 2020

国際会議プロシーディング

1. Yasuhiro Nomura, Shigehiro Yamamoto, Kotaro Yoshihara, Takeshi Hashimoto, “A Feasibility Study of Accurate 3D Measurement of Ships Using Dense Stereo Vision System” , Proc of TECHNO-OCEAN 2016: RETURN TO THE OCEANS, IEEE, pp.562-565, 2016
2. Yasuhiro Nomura, Shigehiro Yamamoto, Takeshi Hashimoto, “A Proposal of Automatic Camera Placement Method for Wide Sea Area Monitoring” , Proc of the International Symposium on Marine Engineering, pp.540-545, 2017

国内口頭発表

1. 野村 康紘, 山本 茂広 ”自動離着岸システムに向けた船体形状情報を用いた船舶の3次元位置姿勢計測に関する基礎的検討”, 第88回 マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp.85-86, 2018
2. 野村 康紘, 山本 茂広, 橋本 岳, ”自動離着岸に向けた高密度視差画像による船舶の位置姿勢推定”, 第90回 マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp.233-234, 2020

その他の研究業績

国内口頭発表

1. 野村 康紘, 崔 超, 山本 茂広, ”要所画像中のランドマーク自動認識による移動ロボットの自律走行に関する基礎的検討”, 平成 21 年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, p.G57 (CD-ROM), 2009
2. 崔 超, 野村 康紘, 山本 茂広, ”要所画像による移動ロボットの自律走行 – 複合的ランドマーク選択法の検討 –”, 第 52 回自動制御連合講演会講演論文集, F5-1, 2009
3. 野村 康紘, 中村 浩唯, 山本 茂広, ”要所画像を用いた自律移動ロボットのための複合的ランドマーク検出方法に関する基礎的検討”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2010AC1Q2-6, 2010
4. 野村 康紘, 中村 浩唯, 山本 茂広, ”複合的ランドマーク検出方法を用いた要所画像による移動ロボットの自律走行に関する基礎的検討”, 第 53 回自動制御連合講演会講演論文集, pp.1291-1294, 2010
5. 中村 浩唯, 野村 康紘, 山本 茂広, ”要所画像による移動ロボットの自律走行 – 道路認識による走行 –”, 第 53 回自動制御連合講演会講演論文集, pp.1295-1299, 2010
6. 成田 祐生, 野村 康紘, 山本 茂広, ”要所画像を用いた自律移動ロボットのための距離情報によるランドマーク検出”, 平成 22 年電気関係学会関西連合大会講演論文集, pp.880-884 (CD-ROM), 2010
7. 中村 浩唯, 野村 康紘, 山本 茂広, ”要所画像による移動ロボットの自律走行 – 彩度とエッジ情報を用いた複合的な分岐点認識法の検討 –”, 平成 22 年電気関係学会関西連合大会講演論文集, pp.967-971 (CD-ROM), 2010
8. 吉原 広太郎, 山本 茂広, 野村 康紘, 島田 賢二, 橋本 岳, ”多眼ステレオカメラを利用した遠距離三次元位置計測に関する基礎的検討”, 平成 27 年電気関係学会関西連合大会講演論文集, pp.72-73, G3-4 (CD-ROM), 2015
9. 山本 茂広, 野村 康紘, 橋本 岳, ”深層学習を用いた海上航行船舶検出の試み”, 平成 29 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.3, p.158, 3-102(CD-ROM), 2017