

博士論文

単眼カメラとGNSSコンパスの融合による着岸支援の  
ための船体軌跡推定に関する研究

中村 拓

2019年 9月 13日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
博士(工学) 授与の要件として提出した学位論文である。

中村 拓

審査委員：

加藤 博一 教授 (主指導教員)

向川 康博 教授 (副指導教員)

神原 誠之 准教授

武富 貴史 客員准教授 (副指導教員)

# 単眼カメラとGNSSコンパスの融合による着棧支援の ための船体軌跡推定に関する研究\*

中村 拓

## 内容梗概

国内の海運業界では操船者の高齢化が進んでいる。経験不足や高齢の操船者にとって、特に着棧操船は難易度が高い。加えて、岸壁衝突による事故の損害規模が大きいため、着棧操船を支援するシステムが望まれている。一方、国内外で自動運航船の実現に向けた取り組みが進んでいる。自動運航船の要素技術の一つに自動着棧技術が挙げられている。自動着棧には着棧位置に対する自船の相対位置精度10 cmが求められており、その実現には、自船の軌跡（位置姿勢）と着棧位置をそれぞれ10 cm以下の精度で求める必要がある。

本研究では、現状の着棧支援に、将来的には自動着棧に利用可能な自船の軌跡を高精度に推定する技術の構築を目的とした。そこで、GNSS(Global Navigation Satellite System) コンパスに搭載されたIMU (Inertial Measurement Unit) と、GNSSの搬送波位相と、単眼カメラによるVO (Visual Odometry) を融合し、自船の軌跡を精度10 cmで推定する手法を構築した。さらに、拡張現実感を用いた着棧支援システムを提案した。本論文は、以下の6章から構成されている。

第1章では、着棧操船の現状と課題について述べ、本研究の目的を示している。第2章では、従来の航海機器を概観し、着棧操船に必要な情報を整理している。第3章では、従来技術とその技術課題を整理し、本研究のアプローチを述べている。第4章では、GNSSコンパスの初期化を高速化する手法と衛星遮蔽に対するロバスト性を向上する手法を提案している。第5章では、単眼カメラとGNSSコンパスを融合して自船の軌跡を推定する手法を提案している。具体的には、GNSSコンパスを構成する複数のGNSS受信機のクロックを共通化すると共に、

GNSS衛星単位の搬送波位相とIMUのタイトカップリングによって得た軌跡とVOの軌跡とのルースカップリングにより，衛星の遮蔽に対してロバストかつ高精度に自船の軌跡を推定している．軌跡の推定結果について，実データを用いたオフライン解析により精度検証している．さらに提案手法による自船の軌跡推定技術を用いた着棧支援のための拡張現実感システムを提案している．最後に第6章では，本研究を総括すると共に，今後の展望について述べている．

## キーワード

単眼カメラ，GNSS，IMU，センサフュージョン，拡張現実感，着棧支援

---

\*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 博士論文，2019年9月13日．

# Ship Trajectory Estimation for Berthing Aid by Fusion of Monocular Camera and GNSS Compass\*

Hiraku Nakamura

## Abstract

In recent years, Japanese merchant seamen are aging fast. A shore-arrival of a vessel is particularly difficult for inexperienced or aged merchant seaman. Furthermore, because a damage caused by a collision to the quay is extremely large, a system to support the berthing operations is desired. At the same time, movements to realize autonomous shipping in Japan and overseas are becoming active. One of the elemental technologies of the autonomous shipping is an automatic berthing technology. To realize automatic berthing, 10 cm as the relative position accuracy from the berthing position to the ship is required, and in order to achieve it, the accuracy of 10 cm or less of the ship's trajectory (position and attitude) and the berthing position is necessary.

In this study, we aimed to build the technology to estimate the trajectory of the ship with high accuracy for the berthing aid system in the near future and which can be used for the automatic berthing in the future. Therefore, we constructed a method to estimate our ship's trajectory with an accuracy of 10 cm. The method is based on the fusion of VO (Visual Odometry) of a monocular camera and carrier phases of multiple GNSS (Global Navigation Satellite System) output by GNSS compass consisting of multiple GNSS and IMU (Inertial Measurement Unit). In addition, we proposed a system to support the berthing using augmented reality. This paper consists of the following 6 chapters.

First, Chapter 1 describes a current situation and issues of the berthing operations and shows the purpose of this study. Chapter 2 gives an overview of conventional equipment for navigation and organizes the necessary information for berthing

operations. Chapter 3 organizes the conventional methods and their technical issues, and describes the approach of this study. Chapter 4 proposes a method for speeding up the initialization of the GNSS compass and a method for improving robustness against satellite blocking. Chapter 5 proposes a method to estimate the trajectory of the ship by fusing a monocular camera and the GNSS compass. Specifically, in these proposed methods, clocks of the multiple GNSS receivers constituting the GNSS compass are made common, and the trajectory obtained by loose coupling of a trajectory of the VO and a trajectory obtained by tightly coupled a IMU and the carrier phases of the GNSS satellites, the trajectory of the ship is estimated robustly and accurately against blocking of satellites. The result of trajectory estimation is confirmed by off-line analysis of an experiment using actual berthing data of a boat. In addition, we propose an augmented reality system for berthing support using the ship's trajectory calculated by the proposed method. Finally, Chapter 6 summarizes this study and describes future prospects.

**Keywords:**

monocular camera, GNSS, IMU, sensor fusion, augmented reality, berthing aid

---

. \*Doctoral Dissertation, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, September 13, 2019.

# 目次

<b>1. 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 背景と目的 .....	1
1.2 本論文の構成 .....	3
<b>2. 着棧支援に用いられる従来の航海機器</b> .....	<b>4</b>
2.1 絶対位置センサ（プロッタ） .....	4
2.2 速度センサ（ログ） .....	5
2.3 姿勢センサ（コンパス） .....	6
2.4 周辺監視センサ .....	7
2.5 環境センサ .....	9
2.6 制御装置の表示機器 .....	10
2.7 本章のまとめ .....	10
<b>3. 従来技術の課題と本研究のアプローチ</b> .....	<b>14</b>
3.1 動画像への情報重畳技術 .....	15
3.2 軌跡推定技術 .....	17
3.2.1 V0 .....	17
3.2.2 GNSS .....	20
3.2.3 INS との融合 .....	26
3.3 関連研究 .....	29
3.4 本研究の位置づけ .....	32
3.4.1 アプリケーションの位置づけ .....	32
3.4.2 センサ融合技術の位置づけ .....	34
3.5 従来技術の課題 .....	36
3.6 本研究のアプローチ .....	37
3.7 本章のまとめ .....	39
<b>4. GNSS コンパスの性能向上</b> .....	<b>40</b>
4.1 提案手法1：姿勢決定の高速化 .....	42
4.1.1 提案手法1の概要 .....	42
4.1.2 実験結果 .....	45
4.2 提案手法2：姿勢推定のロバスト化 .....	47

4.2.1	提案手法 2 の概要	47
4.2.2	実験結果	48
<b>5.</b>	<b>単眼カメラと GNSS コンパスの融合</b>	<b>49</b>
5.1	提案手法 3 : 高精度軌跡推定	50
5.1.1	提案手法 3 の概要	51
5.1.2	実験結果	65
5.2	提案手法 4 : 高精度軌跡推定のロバスト化	74
5.2.1	提案手法 4 の概要	74
5.2.1	実験結果	76
5.3	拡張現実感を用いた着床支援システム	87
<b>6.</b>	<b>結論</b>	<b>91</b>
6.1	本研究のまとめ	91
6.2	今後の展望	93
	謝辞	94
	参考文献	95



## 図目次

図 1 通常の着棧操船と岸壁衝突事故の事例 .....	2
図 2 座標系の模式図 .....	14
図 3 V0 の模式図 .....	18
図 4 GNSS 衛星の信号構成 .....	21
図 5 ルースカップリングの模式図 .....	27
図 6 タイトカップリングの模式図 .....	28
図 7 大型船に設置したカメラの視野と着棧時の画像 [52] .....	32
図 8 ガントリークレーンによる衛星遮蔽環境 .....	33
図 9 本研究で提案するシステムの全体ブロック .....	38
図 10 GNSS コンパスの構成ブロック .....	41
図 11 GNSS 姿勢決定アルゴリズムの比較 .....	44
図 12 姿勢決定実験の様子 (2015/10/6) .....	46
図 13 姿勢決定性能の比較 .....	46
図 14 衛星 1 機だけ使用したときの方位精度の比較 .....	48
図 15 提案システムの構成ブロック .....	52
図 16 本研究で提案する演算ブロック .....	53
図 17 V0 演算部 (V0) のフロー図 .....	54
図 18 搬送波位相演算部 (CPP) のフロー図 .....	56
図 19 INS 演算部 (INS) のフロー図 .....	58
図 20 海上着棧実験 (2018/1/23) .....	66
図 21 GNSS 衛星のスカイプロット (2018/1/23) .....	67
図 22 測位方式ごとの軌跡の比較 .....	69
図 23 測位方式ごとの軌跡の水平誤差の比較 .....	69
図 24 着棧位置の ORB 特徴点抽出結果 .....	71
図 25 3次元構造推定結果の比較 .....	72
図 26 選択した GPS 衛星のスカイプロット .....	77
図 27 速度の水平精度比較 (表 18 のプロット結果) .....	79
図 28 軌跡の水平精度比較 (表 19 のプロット結果) .....	80
図 29 方位の精度比較 (表 20 のプロット結果) .....	82

図 30 アンテナが受信できている衛星を表す模式図 .....	85
図 31 図 30 のシナリオにおける軌跡の水平誤差の比較 .....	85
図 32 着棧支援システムの全体ブロック .....	87
図 33 拡張現実感を用いた着棧支援システム .....	89
図 34 自船の軌跡と 3 次元構造復元結果の自由視点表示 .....	90

## 表目次

表 1 着棧支援センサー一覧 .....	11
表 2 速度センサの比較 .....	12
表 3 姿勢センサの比較 .....	12
表 4 周辺監視センサの比較 .....	13
表 5 座標系の定義 .....	14
表 6 関連研究の観測量一覧 .....	30
表 7 関連研究のセンサ融合技術の比較 .....	31
表 8 アプリケーションごとのセンサ装備条件の違い .....	33
表 9 本研究のセンサ融合技術の位置づけ .....	34
表 10 本研究と関連研究の融合技術の分類 .....	34
表 11 単眼カメラ (V0) と GNSS コンパス (GNSS/INS) の特徴 .....	35
表 12 本研究の提案手法によって期待する効果 .....	35
表 13 従来技術の課題一覧 .....	36
表 14 課題に対する本研究のアプローチ .....	37
表 15 センサ機器の仕様一覧 .....	38
表 16 大型船と小型船のセンサ装備条件の違い .....	65
表 17 図 23 の軌跡の水平精度比較 .....	70
表 18 速度の水平精度比較 .....	79
表 19 軌跡の水平精度比較 .....	80
表 20 方位の精度比較 .....	82
表 21 図 31 の軌跡の水平精度比較 .....	86

# 1. 序論

本論文は、船舶の着岸支援のための船体軌跡推定技術に関する研究成果をまとめたものである。本章では、初めに、本研究の背景と目的について言及した後、本論文の構成を示す。

## 1.1 背景と目的

我が国、日本は島国であるが故、諸外国との輸出入は海運と空運に頼らざるを得ない。海運は空運よりも一度に大量の貨物を輸送できるため輸送コストが安い。それに加えて、エネルギー効率が高いため環境にも優しい。これらの背景を理由に、輸出入される貨物の99%以上が海運で輸送されている。また、造船技術の発展と共に船舶の大型化が進み、一隻の貨物船に積載可能な輸送量は増加傾向にある[1]。近年は国内において、トラックによる陸上輸送からトレーラーと船舶を連係した海上輸送へのモーダルシフトが進んでおり、海運の役割は重要視されている。このような膨大な量の貨物を輸送する船舶が海難事故を起こすと、国内外の物流に重大な影響を与えることは明白である。海運業にとって最も損害規模が大きい海難事故が岸壁への衝突事故である[2][3][4]。岸壁に衝突して港湾施設を損傷させると、元の状態まで復帰する期間、事故を起こした港湾で受け入れ予定だった貨物に対して賠償責任を負うこともある。

岸壁への衝突事故を発生させる最も大きな要因は人為的な過失（ヒューマンエラー）である。大型船は巨大な質量を持つため慣性が大きく、周囲の目視確認を怠り回避行動が遅れると、既に事故の回避は手遅れという状況がある。岸壁への衝突事故を回避するため、着岸時は、船首と船尾に配置された船員が目視で岸壁までの距離を観測し、観測した距離を船橋にいる操船者へ定期的に報告し、操船者はその報告を受けて岸壁との距離を把握する。しかしながら、目視で観測した岸壁との距離はあいまいである。また、そのあいまいさの程度は観測した船員に依存する。よって、操船者はあいまいな報告を受け、誤った状況判断をする場合がある。事故防止のために、岸壁から船幅の1.5～2倍程度離れた位置に一旦停船させ、その後タグボートで横押しして接岸させる平行着岸が推奨されている。

推奨される着棧操船の例と岸壁衝突事故の事例を図1に示す。

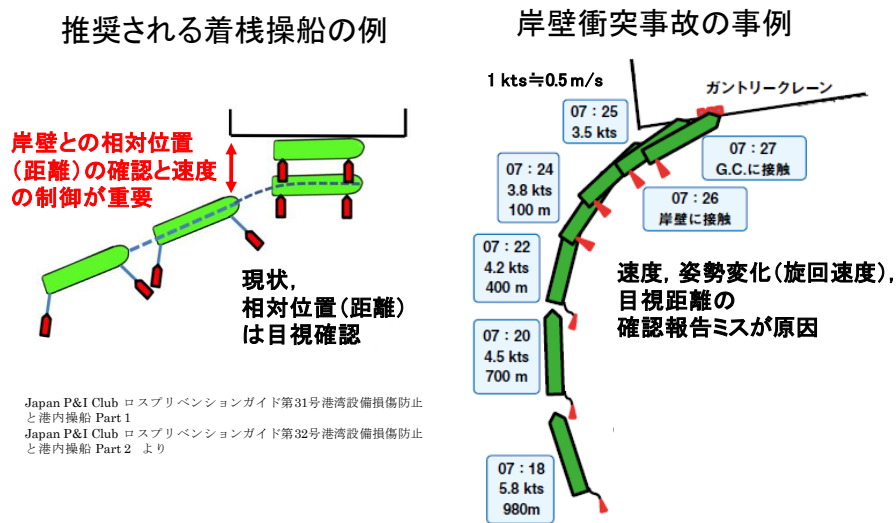


図1 通常の着棧操船と岸壁衝突事故の事例

着棧は、操船の中でも難易度が高く、操船者の勘と経験に大きく依存する。前述のように、自船が岸壁に衝突すると甚大な被害を負うため、操船者は着棧を完了するまで細心の注意を払う必要がある。その反面、岸壁との衝突を過剰に注意する余り、着棧を完了させるまでに必要以上に時間を掛けてしまうこともある。着棧に時間を掛け過ぎてしまうと、貨物の積み下ろしや積み込みが遅れ、港湾の施設使用料を余分に支払うことになる。また、着棧待ちの船舶が増え、港湾が混雑する原因となる。従って、着棧には安全や安心だけでなく、効率も求められる。このような現状の中、国内では喫緊の問題として、操船者の人手不足と高齢化が進んでおり、熟練の技能を持たない操船者や認知能力が低下した高齢の操船者に対して、着棧に必要な情報を正確にわかりやすく提示するシステムが望まれている。

計算機によって生成された仮想情報を現実環境に重ね合わせて提示する技術を拡張現実感という。操船者へ支援情報を正確にわかりやすく伝えるため、船舶の操船支援システムにも応用されている[5][6]。難易度の高い着棧を支援するシステムもまた、拡張現実感による操船者への支援が期待されている。拡張現実感には、現実環境を撮影したカメラの動画像に対して、支援情報を重畳するための正確な位置合わせが求められる。カメラの動画像への位置合わせは3次元空間内

のカメラの軌跡（位置姿勢）を得ることで実現できる．現在普及している航海機器でも船舶に固定したカメラの軌跡を推定できるものの，着棧支援の用途としては精度不足である．

その一方で，国土交通省は自動運航船の実現に向けたロードマップを公開している[7]．そのロードマップでは，自動運航船に必須となる技術の一つとして自動着棧が挙げられている．大型商船の自動着棧の実現には，風や潮流などの外乱の影響を考慮した船体の制御や，着棧位置までの経路の生成など，現状として多くの課題がある．その中でも，船体制御や経路生成の入力となる自船の高精度な位置情報が必要である．着棧は岸壁に設置されたフェンダ（着棧時に岸壁接触による衝撃を軽減し，船体を保護するための防舷材）に接触した時点で完了する．従って，自動着棧システムでは位置精度 10 cm[8]が要求されており，岸壁や棧橋などの着棧位置に対する自船の相対位置を高精度に推定する技術が求められる．そのためには，自船の軌跡と着棧位置の両者をそれぞれ高精度に得る必要がある．そこで本研究では，操船者が着棧の支援情報を正確に把握できるような着棧支援システムに使い，将来的には自動運航船に搭載される自動着棧システムにも使える，位置精度 10 cm を実現する測位技術の構築を目的とする．

## 1.2 本論文の構成

本論文では，船舶の着棧支援のための船体軌跡推定技術について記す．本論文の構成は以下の通りである．

本章では，着棧操船の現状と課題について述べ，本論文の目的と構成を示した．第 2 章では，従来の着棧支援に用いる航海機器を概観し，本研究のアプローチを示している．第 3 章では，従来技術とその技術課題を整理し，提案手法による課題解決のアプローチを示して，本研究の位置づけを明確にしている．第 4 章では，着棧支援に用いられる GNSS コンパスの初期化を高速化する手法と衛星遮蔽に対するロバスト性を向上する手法を提案している．第 5 章では，単眼カメラと GNSS コンパスを融合して自船の軌跡を高精度に推定する手法を提案し，軌跡の推定精度を検証した結果を示している．さらに，提案手法による高精度な軌跡を用いた着棧支援のための拡張現実感システムを提案している．最後に第 6 章では，本研究を総括すると共に，今後の展望について述べている．

## 2. 着棧支援に用いられる従来の航海機器

本章では，着棧支援に用いられる従来の航海機器を概観し，着棧支援に必要な情報を整理する．着棧支援に用いる現行の航海機器として，自船の状態を把握する絶対位置，速度，姿勢センサ，自船周辺を監視するセンサ，風や潮流などの外乱を把握する環境センサ，及び，船体の制御情報を把握する装置がある．以下にそれぞれの概要を示す．

### 2.1 絶対位置センサ（プロッタ）

自分の現在位置を把握しながら目的地までの航行を導く方法を航法（Navigation）という．古くは 20 世紀前半までは，陸地や天体を観測して船舶の現在地を把握する地文航法や天文航法が用いられた．20 世紀半ば，2 箇所の上局から発信する電波を観測して航空機や船舶の現在地を把握する電波航法が第二次世界大戦をきっかけに開発が進み，戦後に普及した．20 世紀終わりには衛星航法システムとして GPS (Global Positioning System) に代表される GNSS が整備され，現在では船舶に限らず様々な移動体の航法に用いられ，社会インフラとなっている [9]．今では，絶対位置を得るためセンサとして，ほとんどの船舶で GNSS が使われている．

GNSS 測位によって得た絶対位置を航海用電子海図に重畳させて表示する航海機器 [10] を「プロッタ」と呼ぶ．また，国際海事機関（IMO: International Maritime Organization）の認証を得た航海用電子海図の画像を表示する装置を電子海図情報表示装置（ECDIS: Electronic Chart Display and Information System） [11] という．現状の GNSS 測位によって得られる絶対位置は m 級の精度であり，また，航海用電子海図の情報は自動着棧に利用できるほどの絶対位置精度は保証されていない [12]．従って現状では，プロッタなどの GNSS の絶対位置と共に海図を表示する装置は，着棧操船の支援には，おおまなか絶対位置を把握する目安としては使えるものの，自動着棧できるほど正確に着棧位置との相対位置を把握できない．

## 2.2 速度センサ（ログ）

船舶の速度（速力）とそれを積分して得られる距離（航程）を計測する航海機器を「ログ」と呼ぶ。ログとは丸太を意味し、昔、船舶の速度を計測するため、海面に丸太を落とし、船舶が通過する時間を計測して速度を求めていた名残でログという呼び名が使われている。航海日誌に速力や航程等を記録していたことから派生して、今でもデータの記録についてはログやロギングという言葉が使われている。着岸支援には高精度の位置（10 cm）が求められるのと同じく、速度においても高精度（cm/sec 級）が求められる。現行のログに用いられる方式には、主に電磁ログ、ドップラログ、GNSS ログがある。以下に、それぞれの概要を述べる。

### 【電磁ログ】

船底に装備した電極から船舶の速度を求める装置[13]である。ファラデーの電磁誘導の原理を利用して、既知の電極間の距離と電極間に発生する誘電電圧と磁束密度から速度が得られる。但し、電磁ログは海水に対する速度、つまり、対水船速は得られるが、岸壁などの陸地に対する速度、つまりは、対地船速は得られない。

### 【ドップラログ】

船底に装備した超音波送受波器によって海水と海底からの反射から対水船速と対地船速を求める装置である。cm/sec 級の高精度な速度が得られるため、着岸支援に用いられている。但し、超音波のドップラシフトの原理を利用するため、受波器に付着した気泡による誤差は避けられない問題となっている。

### 【GNSS ログ】

GNSS 衛星からの航法データを用いて対地速度を求める装置[14]である。cm/sec 級の高精度な速度が得られるため、ドップラログの補助センサとして、着岸支援に用いられている。他のログのように船底に装備する必要がなく、メンテナンスも必要ない。但し、衛星航法の原理を利用するため、高精度な速度の算出には 4 機以上の GNSS 衛星からの信号を受信する必要があり、衛星が遮蔽し



て受信衛星が 4 機未満になると高精度な速度を算出できなくなる問題がある。

## 2.3 姿勢センサ（コンパス）

航海には、自船の位置だけでなく自船がどの方向に向いているかを知る必要がある。本論文では、3次元空間に設定したグローバル座標系におけるローカル座標系の3軸の角度を「姿勢」と呼び、特に局地水平座標系（ローカル座標系の内の2軸が水平方向、1軸が重力方向を向いた座標系、座標系の定義は次章参照）の水平面からの角度を「傾斜」、水平方向の角度を「方位」と定義する。

船舶は、風や潮の影響を受けて船体が流されたり、着岸時にサイドスラスト（横方向に動かすための動力装置）を使って横方向に移動したり、進行方位（進路）と船首方位（針路）は必ずしも一致しない。従って両者を把握するために、ログから得られる進行方位とは別に、コンパスによって船首方位を得る必要がある。着岸時は、高精度な船首方位と、船首方位の変化率である回頭角速度が要求される。現行のコンパスに用いられる方式には、主にジャイロコンパス、機械式のマグネットコンパス、GNSSコンパスがある。以下に、それぞれの概要を述べる。

### 【マグネットコンパス】

地磁気を検出して方位を求める装置である。マグネットコンパスが指す方位から、自差（コンパス周辺の磁界による誤差）を修正して磁北（地球の北側の磁極方向）を求め、偏差（真北と磁北の差）を修正して真北（北極点の方向）を求める必要がある。他のコンパスよりも精度は低いものの、非常時に電源系統が落ちるブラックアウトが発生して他の航海機器が使えなくなったときのため、また、機械式ジャイロコンパスと比較してロバスト性を保証するために搭載されている。

### 【機械式ジャイロコンパス】

高速回転する機械式のコマを用いて船首方位を求める装置[15]である。ジャイロ効果（角運動量保存則）を利用して、コマの回転方向を地球の自転方向に向けて回転軸方向から方位が得られる。機械式ジャイロコンパスは真北が得られ、原理上は重量が大きいほど高精度な方位が得られるものの、装置が大掛かりで高価

である。機械式のため保守メンテナンスが必要である。また、起動から正しい方位を指すまで数時間ほど起動時間（静定時間）がかかる。

### 【GNSS コンパス】

複数の GNSS アンテナで受信した GNSS 衛星からの航法データと IMU を用いて方位（姿勢）を求める装置[16]である。アンテナの基線長（間隔）を長くとるほど高精度な方位が得られる。また、高精度な方位と共に回頭角速度が得られるため、着積支援に用いられる。マグネットコンパスよりも高精度で、機械式ジャイロコンパスよりも安価でメンテナンスも必要なく、静定時間も短い。機械式ジャイロコンパスの補助センサとして搭載されている。但し、衛星航法の原理を利用するため、従来の GNSS コンパスでは高精度な方位の初期化に 5 機以上の GNSS 衛星からの信号を連続的に受信する必要があり、衛星が遮蔽して受信衛星が 4 機未満になると高精度な方位を算出できなくなる問題がある。

## 2.4 周辺監視センサ

他船や岸壁、漂流物への衝突などを回避するには、自船周辺を監視するセンサが必要である。特に大型船は慣性が大きいため、より遠方まで監視できるレーダー（RADAR: Radio Detection and Ranging）が用いられる。一方で近年では、レーダーでは得られない高分解能な近距離の情報を得るためにカメラが用いられ、可視光カメラでは映りにくい夜間は、赤外線カメラが用いられることもある。さらに今後、低価格で長距離に対応した、船舶向けの LIDAR（Light Detection and Ranging）が広く普及されることが期待されている。以下に、それぞれの概要を述べる。

### 【レーダー】

レーダーアンテナから送信したマイクロ波の反射波を受信して、反射物までの距離を計測する装置[17]である。遠方監視向けの S 帯（周波数～3 GHz、波長～100 mm 付近）や、遠方監視向けで小型軽量、高分解能化した X 帯（周波数～10 GHz、波長～30 mm 付近）が広く普及している。近年は、さらに高分解能な近距離監視向けに K 帯（周波数～22 GHz、波長～14 mm 付近）が普及しつつある。

航海用のレーダーアンテナは、より遠方の他船の位置を把握するため、なるべく高い位置に装備される。そのため、レーダーの高い直進性により、着棧完了まで航海用のレーダーで着棧位置を検出し続けることはできない。着棧支援向けには、遠方監視向けのレーダーよりも周波数が高い（波長が短い）ミリ波等を利用して航海用のレーダーとは異なる場所にアンテナを設置する必要がある。但し、レーダーの距離精度は探知距離とトレードオフであり、一般的なミリ波レーダーの距離分解能は LIDAR よりも低く、ミリ波レーダーだけでは自動着棧の実現は難しい。

### 【可視光カメラ】

撮像素子に入った可視光の情報を、レンズを通して 2次元の画像を撮影する装置である。航海用のレーダーほど遠方を見ることはできないものの、近距離では高角度分解能の情報が得られる。高角度分解能で色情報も得られるため、一枚の画像情報から多くの情報を把握できる。現実空間の再現性が高いため、操船者の支援装置として拡張現実感システムに用いられる。港湾に着棧する場合は港湾作業員が配置されているため、着棧する時間帯は基本的には夜間以外になることが大半で、たとえ夜間であっても港湾の光源は確保されており、可視光カメラでも着棧支援が可能と考えられる。但し、単眼のカメラだけでは距離情報は得られない。また、光源がない場所では使えず、豪雨や豪雪、霧など悪天候では十分な性能が得られない場合がある。

可視光カメラを複数使ったステレオカメラであれば距離を計測できる。単眼カメラと同様の性能が得られ、加えて、カメラ基線長（カメラ間の間隔）に応じた精度の距離情報が得られる。近年、ステレオカメラを用いた着棧支援システム [18] が小型船向けに提案されている。大型船の自動着棧に用いる場合、小型船向けよりもカメラ基線長を長くする必要があり [19]、装置の大型化は避けられない。また、カメラ基線長を確保するためにステレオカメラを分離した場合は、装備や調整に手間がかかる。

### 【赤外線カメラ】

物体が放射した赤外線を、レンズを通して赤外線センサで検出し、2次元の画像として記録する装置 [20] である。可視光カメラよりも角度分解能は悪く、距離

情報や色情報も得られないが、可視光の光源が得られにくい夜間などで周辺を監視できる。

#### 【LIDAR】

レーザー光（一般的には近赤外線）を照射し、反射光を受信して、反射物までの距離を計測する装置[21]である。他のセンサよりも高精度に距離情報が得られる。近年はメカレス化によって低価格化が進み、今後広く普及することが期待されている。但し、遠方から得られる反射物の点群の密度が低く、遠方からは着棧位置周辺の岸壁や棧橋の線形状を捉えることが難しいため、着棧用途として活用できるシーンが限定される。

## 2.5 環境センサ

大型船の舷（船体の側面）の面積は広く、喫水（船底から海水面までの距離）が深いため、風や潮流の影響が大きい。大型船の慣性が大きいことに加え、風や潮流の影響が大きいことも、着棧操船の難易度が高い理由といえる。環境を把握するためのセンサとして風向風速計と潮流計がある。以下に、それぞれの概要を述べる。

#### 【風向風速計】

風向と風速を計測する装置[22]である。プロペラの方角と回転数を風向風速と対応させて計測するプロペラ方式や、離間した複数の超音波送受波器間の伝播時間の遅延差から計測する超音波方式などがある。着棧時、操船者は風向風速に注意しつつ船体を制御するため、着棧支援において重要な情報といえる。

#### 【潮流計】

潮の流向と流速を計測する装置[23]である。原理はドップラログと同じで、対地速度と対水速度の差から流速を求める。流向と流速は水深ごとに得られる。潮も着棧時に影響を受けるため、風と同様に着棧支援の情報として用いられる。

## 2.6 制御装置の表示機器

着岸時，操船者は舵角，プロペラ・スラスタの角度，回転方向，回転数などの制御情報の表示機器を確認する．他のセンサ情報と共に確認しながら，自船の状態，応答を把握する．

## 2.7 本章のまとめ

着岸支援センサ一覧を表 1，それぞれのセンサの比較を表 2 から表 4 に示す．大型船の着岸支援に用いられる高精度な機器は，高価で大掛かりなものが多い．それに対して，GNSS ログや GNSS コンパスなどの GNSS 機器は安価かつ軽量であり，同一のハードウェア構成で高精度な速度や方位（姿勢）が得られる．一方，周辺監視センサにおいては，単眼カメラを用いれば操船者に対する支援情報を動画像に重畳して拡張現実感による着岸支援システムを実現できる．LIDAR やステレオカメラであれば距離情報を得られるが，現状普及している LIDAR は高価であり，ステレオカメラを用いると装置が大型化してしまう．本研究では，LIDAR やステレオカメラを用いずに GNSS コンパス（GNSS ログ）と単眼カメラだけで着岸支援システム実現を目指す．

表 1 着機支援センサー一覧

分類	センサ
絶対位置	GNSS プロッタ
速度	電磁ログ
	ドップラログ
	GNSS ログ
姿勢	マグネットコンパス
	機械式ジャイロコンパス
	GNSS コンパス
周辺監視	レーダー
	可視光カメラ (単眼/ステレオ)
	赤外線カメラ
	LIDAR
環境	風向風速計
	潮流計
制御装置の 表示機器	舵角, プロペラ・スラストの角度, 回転方向, 回転数などの表示機器

表 2 速度センサの比較

	GNSS ログ	電磁ログ	ドップラログ
利用	衛星	電磁誘導	超音波
計測	対地速度	対水速度	対地と対水速度
精度	○	×	○
装備性	○ (船上設置)	×	×
脆弱性	×	○ (電源不要)	×
コスト	○	○	×

表 3 姿勢センサの比較

	GNSS コンパス	マグネットコンパス	機械式 ジャイロコンパス
利用	衛星	地磁気	地球自転
計測	傾斜・真方位	磁方位	傾斜・真方位
精度	×	×	○
装備性	○	○	×
脆弱性	×	○	○
コスト	○	○	×

表 4 周辺監視センサの比較

	可視光カメラ (単眼/ステレオ)	赤外線カメラ	レーダー	LIDAR
利用	可視光	赤外線	マイクロ波	近赤外線
計測	距離不定/ 3次元距離	距離不定	水平距離 (航海用)	3次元距離
精度	-/ × (カメラ基線長 が短いと低精度)	-	×	○
分解能	○	-	× (距離分解能)	× (遠方の点群 密度)
装備性	○/ × (要調整)	○	× (筐体大・重)	○
脆弱性	× (悪天候, 夜間)	○	○	× (悪天候)
コスト	○	×	×	×



### 3. 従来技術の課題と本研究のアプローチ

初めに，本論文で用いる座標系の定義，及び，模式図を表 5，及び，図 2 に示す．以降，座標系 A から座標系 B の座標変換行列を  $C_A^B$  と表している．

表 5 座標系の定義

座標系	定義
画像座標系 (V)	2次元の画像平面を表す座標系 (右, 下)
カメラ座標系 (C)	主点を中心として画像座標系の座標軸方向と光軸方向から成るローカル座標系 (右, 下, 前)
世界座標系 (W)	3次元に直交した座標軸を持つ任意に設定したグローバル座標系 (X, Y, Z)
船体座標系 (B)	3次元に直交した座標軸を持つ船体に固定したローカル座標系 (前, 右, 下)
局地水平座標系 (L)	自分を中心とした東西南北上下の座標軸を持つローカル座標系 (北, 東, 下)
地球固定 地球中心座標系 (E)	地球の中心を座標中心として地球に固定されたグローバル座標系 (X, Y, Z)



図2 座標系の模式図

前章より，着積支援向けには GNSS コンパスと単眼カメラが有用であることを示した．本章は，従来の動画像への情報重畳技術と軌跡推定技術，並びに，関連研究と技術課題について述べ，それぞれの技術課題に対する本研究のアプローチについて示す．

### 3.1 動画像への情報重畳技術

計算機によって生成された仮想情報を現実環境に重畳して提示する技術を拡張現実感という．船内で光学シースルー型 HMD (Head Mounted Display) を用いて拡張現実感を実現するには，船体運動と共に頭部の運動も推定する必要がある．それらを推定する場合は処理が複雑になる．また，HMD では遠方の監視に必要な広角の視野を得られにくいため，航海の支援にはビデオモニタ方式が用いられることが多い．ビデオモニタ方式の拡張現実感には，現実環境の投影にカメラの動画像が用いられる．拡張現実感によって操船者へ正確に情報を伝えるには，カメラ画像に仮想情報を正確に重ねる必要がある．カメラ画像の 2 次元座標と撮影した現実空間の 3 次元座標は，透視投影行列によって対応づけられる．透視投影行列はカメラの内部パラメータ (カメラの校正パラメータ) と外部パラメータ (カメラの並進と回転) から構成される．カメラの動画像に仮想情報を正確に重ね合わせるには，正確にカメラをキャリブレーションし，撮影した 3 次元空間に対してカメラの並進と回転から得られる軌跡 (位置姿勢) を精度良く求める必要がある．拡張現実感は，入力する情報の違いでロケーションベースとビジョンベースの手法に大別される．以下に，それぞれの概要を述べる．

#### 【ロケーションベース】

カメラの動画像に映る物体の絶対位置と，GNSS などの絶対位置センサと姿勢センサから得たカメラの軌跡 (位置姿勢) に基づいて，カメラの動画像に仮想情報を重ねる方式をロケーションベース方式という．GNSS コンパスは絶対位置と姿勢を出力できる．一般的な GNSS コンパスが出力する絶対位置は m 級の精度の単独測位であるが，GNSS を用いた高精度測位，例えば，リアルタイムキネマティック (RTK: Real Time Kinematic) 測位や，準天頂衛星システム (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) のセンチメートル級測位補強サービス (CLAS:

Centimeter Level Augmentation Service) の利用により, cm 級の高精度な絶対位置が得られるため, 岸壁や棧橋などの絶対位置や形状が同程度以上の精度で既知であれば, 自動着棧や着棧支援にロケーションベース方式が利用できると期待できる. しかしながら, すべての着棧位置の絶対位置や形状を測量し, インフラ情報として維持するにはコストの面で現実的ではなく, また, 浮棧橋のような絶対位置が変動する港湾施設には使えない. つまり, インフラ情報を必要とせず, どこの港湾でも使えるシステムであることが望ましい.

### 【ビジョンベース】

カメラの動画像の情報からカメラの軌跡(位置姿勢)を得て外部パラメータを求め, 動画像に映る物体を認識する方式をビジョンベース方式という. その中でも, マーカを用いて軌跡を求める方式をマーカ方式, マーカを用いない方式をマーカレス方式という.

着棧支援にマーカ方式を用いる場合, 港湾側に巨大なマーカをインフラとして設置する必要がある. さらに, マーカを継続的に利用するにはメンテナンスが必要となる. 従って, 着棧支援にはマーカを用いない方が望ましい. カメラの動画像の情報からマーカなしでカメラの軌跡を得る手法として, VO[24]や VSLAM (Visual Simultaneous Localization and Mapping) [25][26][27]がある. VSLAM は, VO によってカメラの軌跡を推定中に閉区間を検出した時にループ閉じ込み処理 (Loop Closure) を実行して, 全体を最適化する手法である. 船舶の着棧時は, ほぼ一方通行の航路をたどるため閉区間はできず, Loop Closure は使えない.

そこで, 本研究では VO を用いたビジョンベース方式の拡張現実感を採用する. 次節では, 単眼カメラの VO による軌跡推定技術と GNSS コンパスによる軌跡推定技術の従来技術について述べている.

## 3.2 軌跡推定技術

本節では，従来の軌跡推定技術について示す．第 1 項 (VO) ではカメラ動画像を用いた方法，第 2 項 (GNSS) では衛星測位による方法，第 3 項 (INS との融合) では慣性センサとの融合による方法についてそれぞれ示す．

### 3.2.1 VO

移動しながら撮影した前後の画像から構造物の 3 次元構造を復元しつつ，カメラの軌跡を推定する手法を VO という．VO あるいは VSLAM は特徴点を用いた手法[24]-[27]と画素を直接用いた手法[30][31]に大別される．静止した岸壁の固体領域と，うねり，あるいは潮流や風浪がある海面の流体領域とが混在する環境の中で岸壁を検出するには，特徴点を用いた手法の方が扱い易い．よって，提案手法では特徴点を用いた手法を採用した．本項では，提案手法に採用した特徴点を用いた手法[24]-[27]について説明する．

カメラで撮影した動画像の一枚の画像について特徴点を抽出し，時系列に特徴点を追尾し，画像マッチング処理により特徴点の時系列画像の対応をとる．本研究では特徴点に ORB 特徴(ORB: Oriented FAST and Rotated BRIEF)[32]，特徴点の追尾に Lucas-Kanade 法[33]を用いた．共通視野を持った時間差のある画像  $a$  と画像  $b$  の 2 枚の画像について，対応させた 2 次元画像座標系  $V$  で表される複数の特徴点の画像座標  $\tilde{\mathbf{x}}_a^V$ ，及び， $\tilde{\mathbf{x}}_b^V$  と，事前にキャリブレーション計測[34]したカメラ内部パラメータ行列  $\mathbf{A}$  から，エピポーラ幾何の拘束式

$$(\tilde{\mathbf{x}}_a^V)^T \cdot \mathbf{A}^{-T} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{A}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{x}}_b^V = 0$$

を用いて基本行列  $\mathbf{E}$  を求める．基本行列  $\mathbf{E}$  は画像  $a$  から画像  $b$  のカメラの回転行列  $\mathbf{C}$  と並進ベクトル  $\mathbf{t}$  に分解し，カメラの軌跡 (位置姿勢) を求める．このとき，2 次元画像座標系  $V$  の 2 軸とカメラの光軸から成る 3 次元の座標系をカメラ座標系  $C$  とする．最初の画像を撮影したカメラ座標系  $C$  を基準カメラ座標系  $C_0$  とし，最初の画像の撮影位置から 2 枚目の画像の撮影位置までの距離を 1 として規格化して 3 次元世界座標系  $W$  を設定する． $m$  枚目の画像における回転行列  $\mathbf{C}_m$ ，及び，並進ベクトル  $\mathbf{t}_m$  から構成されるカメラ外部パラメータ行列を  $\mathbf{M}_m$ ， $n$  番目の 3 次元世界座標の特徴点の位置を  $\tilde{\mathbf{x}}^W_n$ ， $m$  枚目の画像における  $n$  番目の 2 次元画像座

標の特徴点の位置を  $\tilde{\mathbf{x}}^V_{n,m}$  とすると、2次元画像座標と3次元世界座標の特徴点の位置は、

$$\tilde{\mathbf{x}}^V_{n,m} \sim \mathbf{A} \cdot \mathbf{M}_m \cdot \tilde{\mathbf{x}}^W_n$$

というスケールの不定性を含む関係式で表され、3次元世界座標の特徴点の位置  $\tilde{\mathbf{x}}^W_n$  が求まる。ここで、VOの模式図を図3に示す。

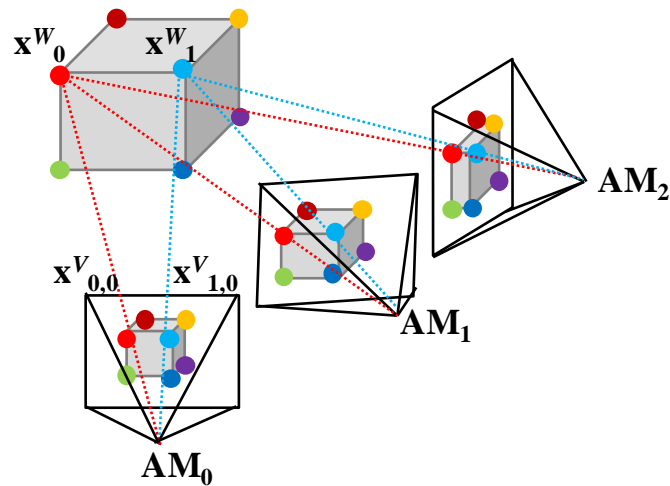


図3 VOの模式図

VO初期化後、バンドル調整 (BA: Bundle Adjustment) [35]により、再投影誤差  $\gamma$  を最小化して、カメラの軌跡と特徴点の位置を最適化する。

$$\gamma = \arg \min \sum_{n=1}^{\alpha} \sum_{m=1}^{\beta} \left\| \hat{\mathbf{x}}^V_{n,m} - \mathbf{x}^V_{n,m} \right\|^2$$

ここで、特徴点の2次元画像座標の観測値  $\mathbf{x}^V_{n,m}$  と、推定した3次元世界座標の特徴点の位置  $(\tilde{\mathbf{x}}^W_1, \tilde{\mathbf{x}}^W_2, \dots, \tilde{\mathbf{x}}^W_\alpha)$  と射影行列  $(\mathbf{P}_1 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M}_1, \mathbf{P}_2 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{P}_\beta = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M}_\beta)$  を用いて計算した特徴点の2次元画像座標位置の推定値を  $\hat{\mathbf{x}}^V_{n,m}$  とした。特徴点の2次元画像座標位置と3次元世界座標位置の対応より、世界座標系  $W$  からカメラ座標系  $C$  へのカメラの回転行列  $\mathbf{C}_W^C$  と、カメラ座標系  $C$  のカメラの並進ベクトル  $\mathbf{t}^C$ 、並びに、世界座標系  $W$  の特徴点の3次元位置  $\mathbf{x}^W$  が推定できる。上記の最適

化処理によってカメラの軌跡と特徴点の 3 次元位置を任意のタイミングで最適化し，順次繰り返して，カメラの軌跡推定を継続する．動体の特徴点等の外れ値は，RANSAC 法（Random Sample Consensus）[36]を用いて排除する．

上記のような従来の VO には，カメラから構造物までの距離のスケール，あるいは，カメラの移動距離のスケールが求まらないスケール不定性と，推定したカメラの軌跡がドリフトする問題がある[37]．特に，広域環境ではドリフトの影響は顕著になる．さらに，カメラの軌跡のドリフトに伴い，構造物の 3 次元特徴点による復元結果もドリフトする問題がある．

### 3.2.2 GNSS

GNSS は、GNSS 衛星からの電波を受けた GNSS アンテナの絶対位置を得るシステムである。絶対位置に限らず、高精度な速度や姿勢、時刻などが得られ、様々なアプリケーションに利用される。衛星は、約 2 万 km 上空の複数の軌道の上に配備されており、決められた軌道を描いて地球を周回するように地上管制局から制御されている。衛星から衛星個別のコードと航法データを重畳した搬送波を複数の周波数帯で地球に向けて発信し、ユーザは対応した周波数帯（一般的に普及している周波数帯は L1 帯）の GNSS アンテナと GNSS 受信機で受信する。航法データには衛星の軌道情報（位置、速度など）や発信時刻が含まれている。衛星には高精度な原子発信器が搭載されており、高精度に発信時刻がわかる。一方、一般的な廉価受信機は原子発信器よりも低精度の水晶発信器が搭載されることが多い。そのため、受信時刻は発信時刻よりも時刻精度が低い。ユーザは受信機の受信時刻と受信した航法データを用いてアンテナの位置と速度が得られる。アンテナと受信機が複数あれば姿勢（アンテナ間のベクトル）が得られる。本項では、GNSS による位置・速度・姿勢の推定方法について述べる。

## 【GNSS 測位】

ユーザから衛星間の時刻誤差を含む距離を擬似距離と呼び、光速と航法データに含まれる衛星の発信時刻、及び、ユーザ受信機の受信時刻から求まる。ユーザ受信機は衛星の航法データを受信して擬似距離を求め、4機以上の衛星の擬似距離から、時刻誤差とアンテナの3次元の絶対位置を求める。この測位手法を単独測位という。単独測位によって得られる絶対位置は m 級の精度である。GNSS の L1 帯信号コードの波長が約 300 m であるのに対して、搬送波の波長は約 20 cm であり、搬送波の位相を用いれば mm 級の距離が得られる。コードには発信時刻の情報を含んでいるが、搬送波には発信時刻の情報は含まれておらず、ユーザと衛星間にある搬送波の波数は未知である。GNSS 衛星の信号構成（コードと搬送波）を図 4 に示す。

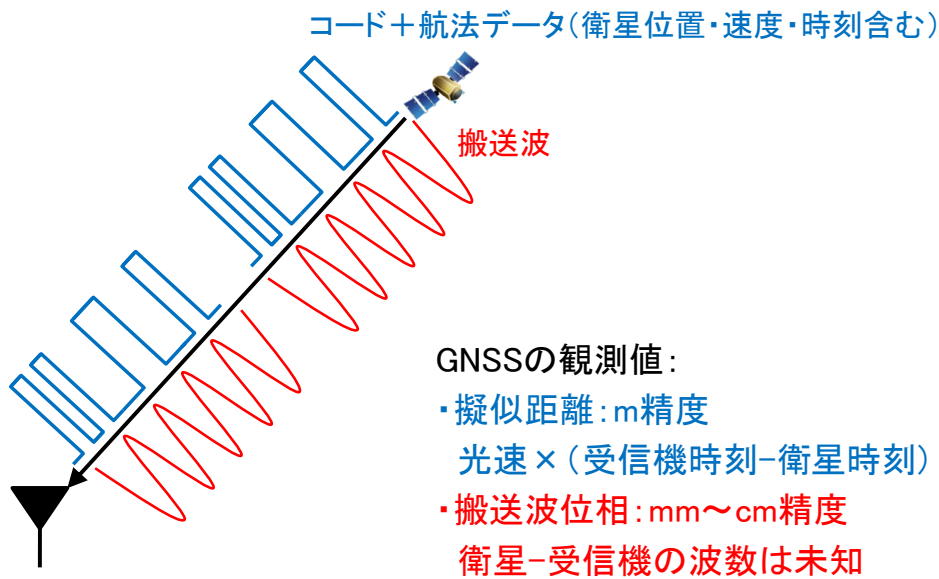


図 4 GNSS 衛星の信号構成



### 【搬送波位相高精度測位】

搬送波による高精度な距離情報を用いれば高精度に位置が得られる。RTK 測位は、ユーザ受信機と既知の絶対位置に固定された基準局受信機で受信した複数の衛星の搬送波位相を連続的に観測し、両者で受信した搬送波の波数の差（整数値バイアス）を求め、整数値バイアスから両者のアンテナ間の基線ベクトルを求める。こうして計算した基線ベクトルと、既知である基準局の絶対位置から、ユーザ受信機の絶対位置が求まる。RTK 測位によって得られる絶対位置は cm 級の精度である。

### 【搬送波位相速度推定】

前述のように、GNSS による高精度な絶対位置を得るためには、搬送波位相の連続的な観測によって整数値バイアスを解く必要があることを述べた。しかしながら、搬送波位相の変化量であれば、整数値バイアスを解くことなく、ただちに得られる。

ここで、搬送波位相観測値  $\Phi^k$  は、衛星  $k$  からアンテナまでの幾何学的距離  $\rho^k$ 、搬送波の波長  $\lambda$ 、衛星  $k$  からアンテナまでの搬送波の波数  $N^k$ 、衛星  $k$  のクロック  $\tau^k$ 、受信機のクロック  $\tau$ 、光速  $c$ 、電離層遅延量  $I^k$ 、対流圏遅延量  $T^k$ 、及び、観測誤差  $u(\Phi^k)$  を用いて、

$$\lambda\Phi^k = \rho^k + c(\tau - \tau^k) - I^k + T^k + \lambda N^k + u(\Phi^k)$$

と表せる。アンテナ  $i$  における速度の衛星  $k$  の視線方向成分を  $\eta_i^k$ 、衛星  $k$  の搬送波位相を  $\Phi_i^k$ 、その時間変化量を  $\dot{\Phi}_i^k$ 、搬送波の波長を  $\lambda$ 、航法データから得られる衛星  $k$  の速度の衛星視線方向成分を  $v^k$ 、速度に換算したクロックの時刻誤差の変化量（クロックドリフト）を  $\hat{Z}$ 、観測誤差を  $u(\eta_i^k)$  とすると、

$$\eta_i^k = \lambda\dot{\Phi}_i^k + v^k - \hat{Z} + u(\eta_i^k)$$

の関係がある。よって、ユーザ受信機は 4 機以上の衛星の搬送波位相を受信して、

クロックドリフトとアンテナの 3 次元速度が求まる。この手法によって得られる速度は cm/sec 級の精度である。以上のように、GNSS の搬送波位相の変化量を用いて、高精度な速度を計測できる。

### 【姿勢決定】

衛星が発信した航法データを複数のアンテナで受信し、RTK 測位と同様の原理を用いて、アンテナ間の基線ベクトルを求めて姿勢を得る。これを GNSS の姿勢決定という。一般的に姿勢決定には、2 機のユーザ受信機で共通に受信した 5 機以上の衛星の搬送波位相を連続的に受信して決定する。共通に受信した衛星の中の 1 つを基準衛星とし、別の衛星との搬送波位相の差分（二重位相差）を 1 つの観測量として、4 つ以上の観測量で 2 機のアンテナ間の基線ベクトルを算出するために必要な整数値バイアスを求める。

GNSS 単独測位によってアンテナの絶対位置  $\mathbf{r}$  を求め、アンテナの絶対位置  $\mathbf{r}$  と衛星  $k$  の絶対位置  $\mathbf{r}^k$  から、衛星  $k$  の視線方向ベクトル  $\mathbf{h}^k$  を求める。これらはいずれも、地球中心・地球固定座標系  $E$  (ECEF: Earth Centered, Earth Fixed) で表される。

アンテナ間の差分（一重位相差）を取ることで、電離層遅延量  $I^k$  や対流圏遅延量  $T^k$  の影響を除去できる。さらに、2 機の衛星  $k, l$  間と 2 機のアンテナ  $i, j$  間の二重位相差  $\Phi_{i,j}^{k,l}$  は、地球中心・地球固定座標系  $E$  の衛星  $k$  と  $l$  の視線方向差ベクトル  $\mathbf{h}^{k,l}$ 、局地水平座標系  $L$  におけるアンテナ  $i, j$  間の基線ベクトル  $\mathbf{b}_{i,j}$ 、二重位相差の整数値バイアス  $N_{i,j}^{k,l}$ 、及び、観測誤差  $u(\Phi_{i,j}^{k,l})$  を用いて、

$$\lambda \Phi_{i,j}^{k,l} = \mathbf{h}^{k,l} \mathbf{C}_L^E \mathbf{b}_{i,j} + \lambda N_{i,j}^{k,l} + u(\Phi_{i,j}^{k,l})$$

と表せる。未知パラメータは、時間的に変化する基線ベクトル  $\mathbf{b}_{i,j}$  の 3 軸と、時

間的に一定の衛星の個数分の整数値バイアス  $N_{i,j}^{k,l}$  である。求めたい整数値バイアスの数、つまり、二重位相差の数を  $n$ 、観測回数を  $t$  とすると、得られる観測量の数は  $n \times t$ 、未知パラメータの数は計  $3 \times t + n$  である。よって、 $n \times t > 3 \times t + n$  が未知パラメータを解くために必要な条件であり、必要な観測回数は  $t > \frac{n}{n-3}$  となり、少なくとも二重位相差の数  $n$  は 4 以上、つまり、5 機以上の衛星が必要となる。

一般的に、整数値バイアスの整数解の決定には LAMBDA 法 (Least-square Ambiguity Decorrelation Adjustment) [28][29] を用いる。整数値バイアス  $N_{i,j}^{k,l}$

の推定値である Float 解のベクトルを  $\hat{\mathbf{N}}$ 、ECEF 座標系の基線ベクトル  $\mathbf{C}_L^E \mathbf{b}_{i,j}$  の推定値を  $\hat{\mathbf{b}}$ 、観測誤差のベクトルを  $\mathbf{u}$ 、二重位相差のベクトルを  $\boldsymbol{\xi}$  として、観測方程式

$$\boldsymbol{\xi} = \mathbf{h}^{k,l} \hat{\mathbf{b}} + \lambda \hat{\mathbf{N}} + \mathbf{u}$$

について、Float 解  $\hat{\mathbf{N}}$ 、及び、その共分散行列  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}$  を求める。整数値バイアスの候補点のベクトルを  $\mathbf{N}$  とし、コスト関数

$$\Gamma(\mathbf{N}) = \arg \min_{\mathbf{N}} (\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N})^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}^{-1} (\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N})$$

が最小となる候補点  $\mathbf{N}$  を抽出する。ここで、共分散行列  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}$  は相関を持つため、 $\hat{\mathbf{N}}$  を四捨五入するだけでは正しい整数解は得られない。無相関化のために、共分散行列  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}$  を対角化する行列  $\mathbf{Z}^T$  を用いて、それぞれ

$$\mathbf{z} = \mathbf{Z}^T \mathbf{N}, \quad \hat{\mathbf{z}} = \mathbf{Z}^T \hat{\mathbf{N}}, \quad \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{z}}} = \mathbf{Z}^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}} \mathbf{Z}$$

と変換 (Z変換) し、コスト関数

$$\Gamma(\mathbf{z}) = \arg \min_{\mathbf{z}} (\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z})^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{z}}}^{-1} (\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z})$$

を最小化する  $\mathbf{z}$  を求め、候補点  $\mathbf{N} = (\mathbf{Z}^T)^{-1} \mathbf{z}$  を得る。候補点を絞り込むため、 $\chi^2$  二乗検定、あるいは、幾何学的な条件として既知であるアンテナ基線長の検定やアンテナ基線ベクトルの姿勢検定などを実施し、最終的に1組の整数値バイアスの整数解を決定する。

整数値バイアスは整数の定数であるため、搬送波位相が中断しない限り、一度だけ解けば既知の定数として扱える。よって、姿勢決定後（整数値バイアス決定後）は、基線ベクトルを解くための未知パラメータは3つとなり、3つ以上の二重位相差、つまり、4機以上の衛星が必要となる。

以上、従来では姿勢決定に5機以上の搬送波位相の連続的な観測が必要で、整数値バイアスの Float 解の推定に静定時間を要し、姿勢の継続には4機以上の搬送波位相の観測が必要であることを示した。搬送波位相は擬似距離に比べて追尾を外しやすい特徴があり、そのため、GNSSによって得られる姿勢は衛星の遮蔽に弱いこと、また、機械式ジャイロコンパスよりは圧倒的に静定時間は短いものの、それでも姿勢決定までに時間を要することが課題である。さらに、高精度な姿勢を得るためにはアンテナ間の基線長を長くする必要があり、基線長が長くなれば装置が大型化し、さらに、基線長が長くなるほど整数値バイアスの候補点が増え、整数解の絞り込みが長期化して静定時間が長くなるという課題がある。

### 3.2.3 INS との融合

INS (Inertial Navigation System) とは、慣性センサのデータから並進と回転を推定するシステムの略称である。慣性センサとは、加速度センサや角速度センサなどの自律センサの総称である。加速度センサは、衝撃や振動の検出や移動速度、軌跡の推定、あるいは、重力方向を検出して傾斜を推定できる。加速度の検出方式は静電容量方式やピエゾ抵抗方式、熱検知方式などがある。角速度センサは、ハイエンド向けには機械式ジャイロコンパスや、リングレーザージャイロ (RLG: Ring Laser Gyroscope), 光ファイバージャイロ (FOG: Fiber Optic Gyroscope) などがある。一般的に安価な MEMS (Micro Electro Mechanical System) の加速度センサや角速度センサが汎用デバイスの内蔵センサとして普及している。INS は外部環境の影響を受けにくく、高いロバスト性を持ち、高い頻度で出力できる特徴を持つ。一方で、前々項、及び、前項では、カメラ動画像を用いた VO によって軌跡 (位置姿勢) が得られること、GNSS の搬送波位相によって高精度な絶対位置、速度、姿勢が得られることを述べた。本項では VO, あるいは、GNSS と、INS との融合について述べる。

INS では、加速度や角速度の積算処理により並進や回転を推定する。従って、INS は積算処理による累積誤差が問題となる。累積誤差は INS にとって避けられない問題であるが、VO, あるいは、GNSS など、他のセンサの観測量を用いて累積誤差の影響を緩和できる。一般的に、融合した演算結果は VO/INS や GNSS/INS などで表現される。INS の累積誤差はバイアス誤差と呼ばれ、カルマンフィルタなどを用いてバイアス誤差を推定して除去できる [38]。しかしながら、他のセンサの観測量が中断すると INS だけで更新され、バイアス誤差は除去されずに演算結果の精度は劣化し続ける。安価な MEMS センサはハイエンド向けの高価なセンサよりもバイアス誤差が大きい。従って観測量が中断しているときは、ハイエンド向けよりも安価な MEMS センサの方が精度劣化の影響は大きくなる。従って、出来る限り幅広いシーンでバイアス誤差を除去し続けること、つまりは、より少ない観測量でより密な結合でバイアス誤差を推定できることが望ましい。複数のセンサを融合する方式として、ルースカップリング (LC: Loose Coupling) とタイトカップリング (TC: Tight Coupling) がある。以下に、それぞれのセンサ融合方式の概要について述べる。

### 【ルースカップリング】

複数のセンサから得られた観測量（物理量）同士の疎な結合による融合技術をルースカップリング（LC）という。VOの演算によって得た軌跡（位置姿勢）と、INSによって得た軌跡（位置姿勢）との融合をVOとINSのLCという。同様に、GNSSで得た絶対位置や速度（速度ベクトル）あるいは、姿勢（基線ベクトル）の演算結果と、INSの演算結果との融合をGNSSとINSのLCという。LCの模式図を図5に示す。

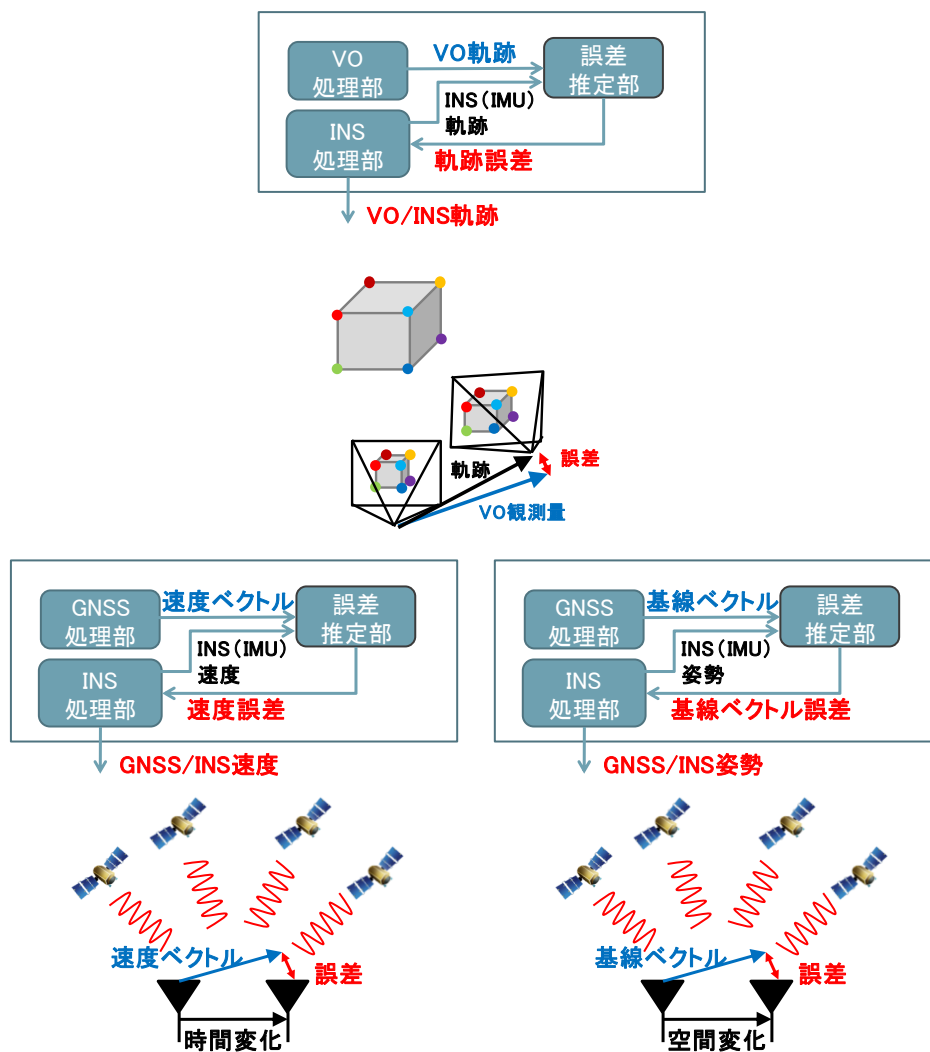


図5 ルースカップリングの模式図

### 【タイトカップリング】

複数のセンサから得られた観測量（物理量）同士の密な結合による融合技術をタイトカップリング（TC）という。VOの演算に用いられる特徴点位置と、INSの並進と回転を用いて推定される特徴点位置との融合をVOとINSのTCという。同様に、GNSSの擬似距離や搬送波位相、あるいは、その変化量や位相差などの観測量と、INSの並進と回転を用いて推定される時間変化量や空間変化量との融合をGNSSとINSのTCという。TCの模式図を図6に示す。

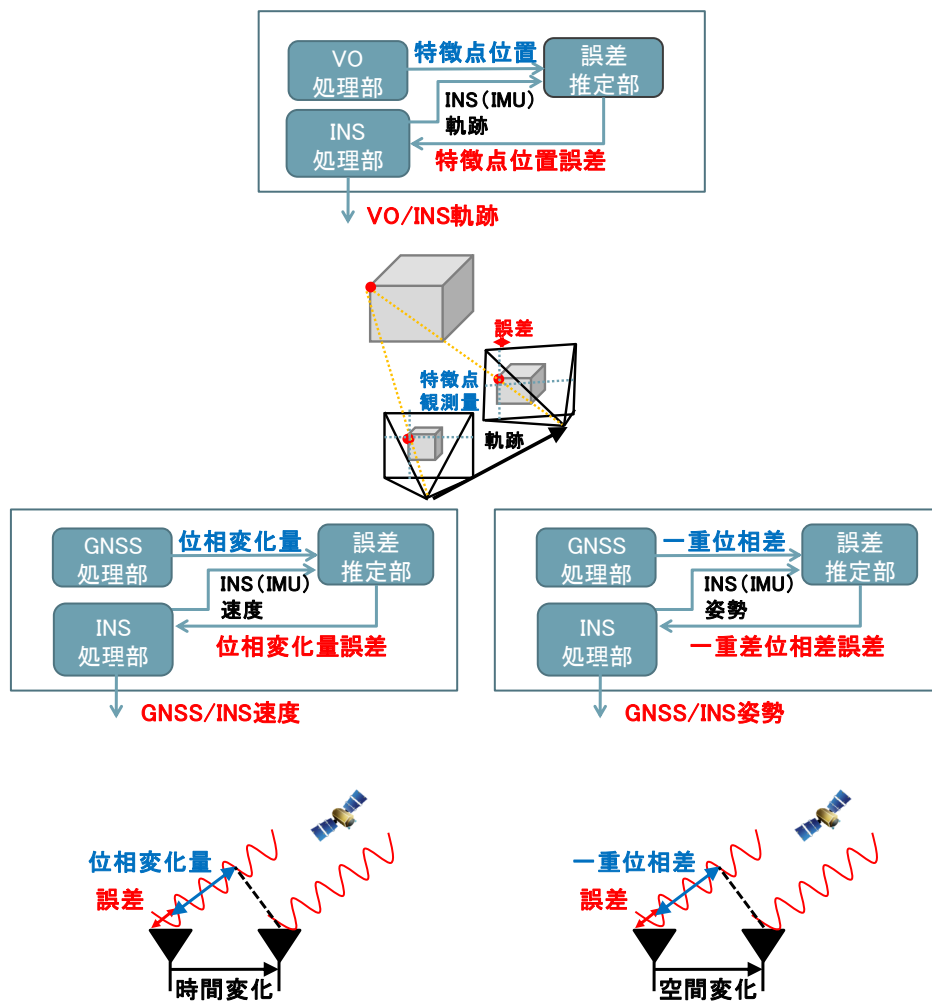


図6 タイトカップリングの模式図

上記では、TC は LC よりも密な結合であるため、よりロバストな推定が可能であることを述べた。しかしながら、LC と TC に用いる観測量の数が十分多く、かつ、同じ観測量を使用した場合は両者の推定精度は原理的に同じである。また、一般的に TC は LC よりも演算処理量が多いため、アプリケーションや使用環境を考慮した技術の選定が必要である。

### 3.3 関連研究

これまで、GNSS と IMU の融合技術に関する研究が報告されている。Hirokawa ら[39]、並びに、Suzuki ら[40]は、無人航空機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle) 向けに複数の GNSS アンテナの二重位相差と IMU から得た姿勢の TC により、衛星の遮蔽に対して UAV の姿勢推定をロバスト化した。武山ら[41]は 1 つの GNSS アンテナにおける搬送波のドップラシフトと IMU から得た速度の TC、並びに、自動車の移動の拘束条件を用いて、衛星の遮蔽に対して速度・軌跡推定をロバスト化した。

単眼カメラと IMU の融合技術に関する研究について、Nützi ら[42]は、VO (VSLAM) と IMU それぞれで算出したカメラの軌跡についてカルマンフィルタを用いた LC によって融合し、VO のスケールを推定しつつ軌跡を高精度化した。Bloesch ら[43]は、VO の特徴点の位置誤差を観測量とし、カルマンフィルタを用いた TC によって、特徴点の変化に対してカメラの軌跡推定をロバスト化した。Leutenegger ら[44]は、カルマンフィルタを用いず、IMU から得た軌跡誤差と VO (VSLAM) の再投影誤差をコスト関数とした TC によって、特徴点の変化に対してロバストにカメラの軌跡を最適化した。

GNSS との融合技術に関する研究について、Schall ら[45]は、RTK 測位による高精度な位置と、IMU から得た姿勢、並びに、単眼カメラの動画像から得た姿勢をカルマンフィルタに入力した LC によってカメラの絶対位置と姿勢を推定した。糸ら[46]は、カルマンフィルタを用いず、RTK 測位の信頼度を考慮して、VO (VSLAM) における BA のコスト関数を最小化してカメラの絶対位置を推定した。Shepard ら[47]は、キーフレームにおける特徴点の位置と RTK 測位結果を BA に、キーフレーム以外の演算結果はカルマンフィルタに入力し、両者を併用してカメラの軌跡を推定した。Soloviev ら[48]は、VO と IMU で算出した軌跡、



並びに、1つのGNSSアンテナによる搬送波位相の時間変化量を融合して衛星の遮蔽に対してロバスト、かつ、高精度な軌跡を推定した。

その他のセンサとの融合技術に関する研究について、Afiaら[49]は、GNSSとIMUの演算結果、並びに、カメラの軌跡と車輪オドメトリ（Wheel Odometry）の情報を融合した。Henkelら[50]は、車載カメラの鳥瞰画像と電子地図の中の路面の標識画像のマッチングを行い、カメラの絶対位置と姿勢を高精度化した。Niesenら[51]は、車輪オドメトリの情報と、1つのGNSSアンテナの搬送波位相とIMU、並びに、VOにおける特徴点とのTCを用いて、市街地環境における衛星の遮蔽と特徴点の変化に対して絶対位置をロバスト化した。但し、これら手法は、車輪の情報を用いるため、船舶では使えない。また、港湾では電子地図の大型船舶の停泊画像が実際とは異なるため、電子地図とのマッチングには課題がある。

関連研究のセンサ融合技術に用いられる観測量一覧を表6に示す。さらに、表6の観測量を組み合わせた関連研究のセンサ融合技術の比較を表7に示す。

表 6 関連研究の観測量一覧

	並進（位置，速度，軌跡）の推定	回転（姿勢）の推定
観測量	i : IMU 加速度積算値（速度）	i : IMU 角速度積算値（姿勢）と加速度ベクトルによる傾斜
	ii -1 : GNSS 絶対位置	ii -1 : GNSS 姿勢 ii -2 : GNSS 一重位相差 ii -3 : GNSS 二重位相差
	ii -2 : GNSS 速度	
	ii -3 : GNSS 擬似距離	
	ii -4 : GNSS 搬送波位相，ドップラシフト	
	ii -5 : RTK 絶対位置	
	iii -1 : VO (VSLAM) 軌跡（位置）	iii -1 : VO (VSLAM) 姿勢
	iii -2 : VO (VSLAM) 特徴点	iii -2 : VO (VSLAM) 特徴点
iii -3 : 画像マッチングによる並進	iii -3 : 画像マッチングによる回転	
iv : Wheel Odometry 軌跡		

表 7 関連研究のセンサ融合技術の比較

	並進（位置，速度，軌跡）の推定	回転（姿勢）の推定
[39][40]	-	i と ii -3 の TC による姿勢推定（カルマンフィルタ）
[41]	i と iv と ii -4 の TC による速度の積算で軌跡推定（バッチ処理）	-
[42]	i と iii -1 の LC による軌跡推定と姿勢推定（カルマンフィルタ）	
[43]	i と iii -2 の TC による軌跡推定と姿勢推定（カルマンフィルタ）	
[44]	i と iii -2 の TC による軌跡推定と姿勢推定（バッチ処理）	
[45]	i と ii -5 の LC による絶対位置推定	i と iii -1 の LC による姿勢推定
[46]	ii -5 と iii -1 の LC による絶対位置推定（バッチ処理）	-
[47]	i と ii -5 と iii -2 の TC による軌跡推定（カルマンフィルタとバッチ処理）	i と iii -2 の TC による姿勢推定（カルマンフィルタとバッチ処理）
[48]	i と ii -4 の TC と iii -1 の LC による軌跡推定	-
[49]	i と iv と ii -1,2 と iii -1 の LC による絶対位置推定と速度推定	i と iii -1 の LC による姿勢推定
[50]	i と ii -3,4 の TC と iii -3 の LC による絶対位置推定と速度推定	i と ii -3 の TC と iii -3 の LC による姿勢推定
[51]	i と iv と ii -3,4 の TC と iii -2 の TC による絶対位置推定と速度推定	-

### 3.4 本研究の位置づけ

#### 3.4.1 アプリケーションの位置づけ

##### 【本研究の想定環境】

本研究は大型船を着棧する港湾環境を想定している。本研究と同様、着棧時の操船支援を研究対象とする平田ら [52][53]の先行研究では、単眼カメラを大型船に固定し、着棧時に岸壁を撮影して画像処理により岸壁線を検出し、船体から岸壁線までの距離を高精度に把握する手法を提案している。本研究の想定環境である、大型船に固定した単眼カメラの画像を参考として図 7 に示す。

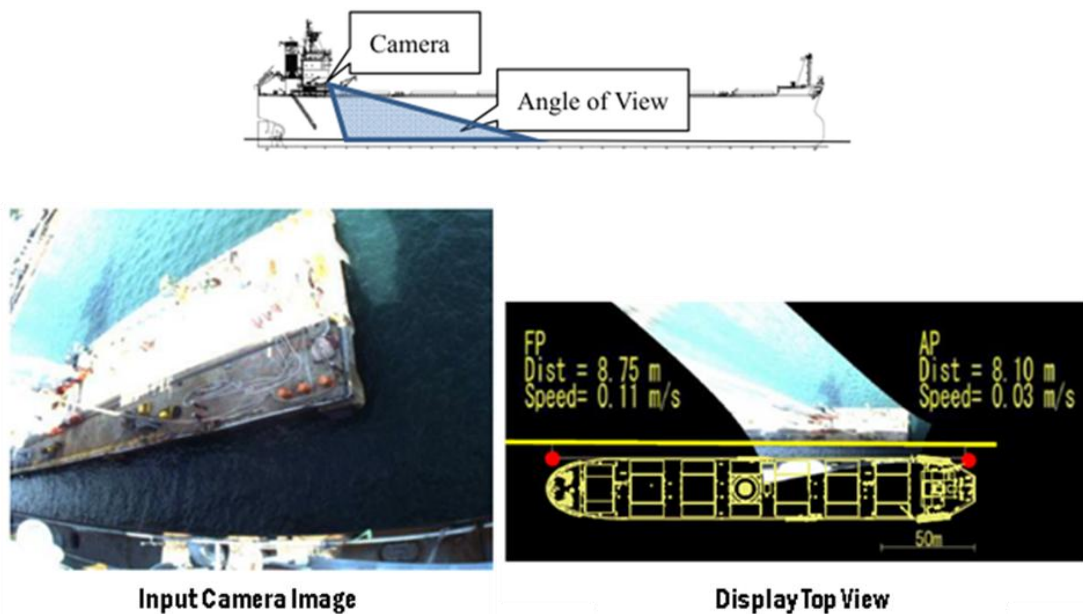


図 7 大型船に設置したカメラの視野と着棧時の画像 [52]

本研究では、着棧時のガントリークレーン等による衛星の遮蔽に対してロバストかつ高精度な軌跡を推定する手法を提案する。港湾環境におけるガントリークレーンによる衛星遮蔽環境の様子を図 8 に示す。



図 8 ガントリークレーンによる衛星遮蔽環境

アプリケーションごと（大型船，自動車，及び，歩行者）のセンサ装備条件の違いを表 8 に示す。

表 8 アプリケーションごとのセンサ装備条件の違い

	大型船 (本研究の想定環境)	自動車	歩行者
おおよその旋回速度	遅 ( $\sim 1 \text{ deg/sec}$ )	速 ( $\sim 10 \text{ deg/sec}$ )	速 ( $\sim 100 \text{ deg/sec}$ )
おおよその進行速度	遅 ( $\sim 0.1 \text{ m/sec}$ )	速 ( $\sim 10 \text{ m/sec}$ )	遅 ( $\sim 1 \text{ m/sec}$ )
撮影対象までのおおよその距離	遠 ( $\sim 100 \text{ m}$ )	近 ( $\sim 10 \text{ m}$ )	近 ( $\sim 10 \text{ m}$ )
カメラ設置位置	高 (高度 $\sim 20 \text{ m}$ )	低 (高度 $\sim 1 \text{ m}$ )	低 (高度 $\sim 1 \text{ m}$ )
進行方向に対するカメラ設置角	一致しない (斜め下向き)	一致 (正面前向き)	一致しない (向きは変動)
衛星受信環境	厳 (着棧時の港湾)	厳 (市街地)	厳 (屋内・市街地)

### 3.4.2 センサ融合技術の位置づけ

#### 【本研究の新規性のポイント】

本研究では、GNSS コンパスと単眼カメラを融合して、着岸支援のための高精度な軌跡推定手法を提案している。GNSS コンパスを構成する複数の GNSS と 6 軸 IMU（加速度センサと角速度センサ）を用い、複数の GNSS 搬送波位相の時間変化量と加速度センサ、並びに、複数の GNSS 搬送波位相の一重位相差（空間変化量）と角速度センサのそれぞれの TC によって、原理的には 1 つの GNSS 衛星の搬送波位相で 6 自由度の運動（並進と回転）を推定する。大型船の遅い動特性を考慮し、特徴点との TC は行わず、GNSS 衛星の搬送波位相との TC によって推定した移動の軌跡と VO の軌跡の LC で高精度かつ衛星の遮蔽に対してロバストな軌跡を得ると共に、特徴点の 3 次元位置を補正して 3 次元構造の推定結果を得る。前節表 6 の観測量を組み合わせた本研究のセンサ融合技術の位置づけを表 9、並びに、本研究と関連研究の融合技術の分類を表 10 に示す。

表 9 本研究のセンサ融合技術の位置づけ

	並進（位置，速度，軌跡）の推定	回転（姿勢）の推定
本研究	i と ii -4 の TC による速度の積算と iii -1 の LC による軌跡推定	i と ii -2 の TC による姿勢と iii -1 の LC による姿勢推定

表 10 本研究と関連研究の融合技術の分類

	GNSS との融合	VO との融合
LC	[45] [46] [49]	[42] [45] [46] [48] [49] [50] 本研究
TC	[39] [40] [41] [47] [48] [50] [51] 本研究	[43] [44] [47] [51]

表 11 単眼カメラ (VO) と GNSS コンパス (GNSS/INS) の特徴

	単眼カメラ (VO)	GNSS コンパス (GNSS/INS)		
推定値	軌跡 (位置姿勢)	絶対位置	速度	姿勢
性能	距離のスケール不定性, 位置姿勢 (軌跡) のドリフト	低精度	高精度	高精度
脆弱性	悪天候, 夜間に弱い	衛星の遮蔽		
備考	動画像への情報重畳が可能			

表 12 本研究の提案手法によって期待する効果

	単眼カメラ (VO) + GNSS コンパス (GNSS/INS)			
推定値	軌跡 (位置姿勢)	絶対位置	速度	姿勢
性能	高精度	低精度 <sup>※</sup>	高精度	高精度
脆弱性	悪天候, 夜間に弱い <sup>※</sup>	衛星の遮蔽に高い耐性		
備考	動画像への情報重畳が可能			

※の課題は本研究の対象外

### 3.5 従来技術の課題

本章で示した単眼カメラ（VO）と GNSS コンパスの従来技術についての課題を表 13 にまとめた。

表 13 従来技術の課題一覧

分類		課題
単眼カメラ	動画像への情報重畳	① 自船のセンサ情報を使って，着岸時に自船のカメラ動画像へ情報を重畳する（ロケーションベース方式）には，自船，及び，岸壁や桟橋の高精度な絶対位置が必要
	VO による軌跡推定と 3 次元構造復元	② スケール不定性がある ③ 広域環境では軌跡と 3 次元構造復元結果がドリフトする
GNSS コンパス	GNSS 測位	④ 着岸用途には絶対位置精度不足
	搬送波位相速度推定	⑤ 速度の算出には，受信機 4 機のいずれかで衛星 4 機以上必要
	姿勢決定	⑥ 姿勢決定には，いずれかの 1 組の受信機で衛星 5 機以上必要 ⑦ 姿勢の継続に，LC を用いた場合は衛星 4 機以上必要，二重位相差の TC を用いた場合でも衛星 2 機以上必要 ⑧ アンテナの基線を長くすると精度は向上するが，装置が大型化する

### 3.6 本研究のアプローチ

前節で示した課題を解決する本研究の提案手法を表 14 まとめた。

表 14 課題に対する本研究のアプローチ

分類	本研究のアプローチ	
単眼カメラ	動画像への 情報重畳	① ビジョンベース方式を適用 (5.3 節)
	VO による 軌跡推定と 3 次元構造 復元	② 搬送波位相速度を積算して算出した高精度な軌跡を用いてスケールを推定する手法を提案 (5.1 節, 及び, 5.2 節) ③ 搬送波位相速度を積算して算出した高精度な軌跡と一重位相差を用いて算出した姿勢の融合によりドリフトを補正する手法を提案 (5.1 節, 及び, 5.2 節)
GNSS コンパス	GNSS 測位	④ GNSS 測位の絶対位置は用いず, 搬送波位相速度を積算して高精度な軌跡を算出する手法を提案 (5.1 節)
	搬送波位相 速度推定	受信機 4 機のクロックを共通化し, ⑤ GNSS 搬送波位相の変化量の TC を用いて受信機 4 機の中で重複しない衛星 4 機で速度の継続を可能にする手法を提案 (5.2 節)
	姿勢決定	受信機 4 機のクロックを共通化し, ⑥ 6 本の短い基線ベクトルと IMU を用いて衛星 4 機で姿勢決定を可能にする手法を提案 (4.1 節) ⑦ 一重位相差の TC を用いて衛星 1 機で姿勢の継続を可能にする手法を提案 (4.2 節) ⑧ 6 本の基線ベクトルを用いて精度を維持しつつ大型化を避ける構成を提案 (4.1 節, 及び, 4.2 節)



本研究で提案するシステム全体のブロック図を図9、センサ機器（Camera, GNSS, 及び, IMU）の主な諸元を表15に示す。

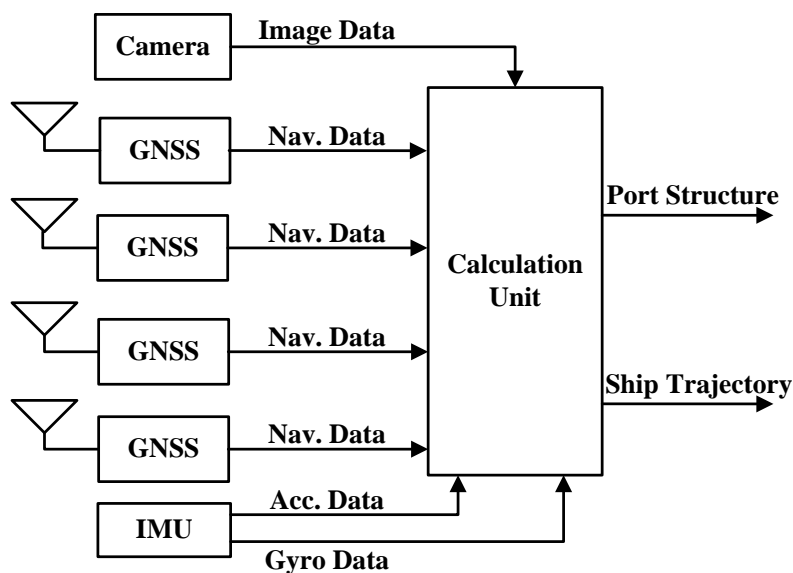


図9 本研究で提案するシステムの全体ブロック

表15 センサ機器の仕様一覧

センサ	仕様
単眼カメラ (Camera)	焦点距離: 8 mm, 絞り: F16, 視野角: 70.3° x 47.4°, 画像サイズ: 1920 x 1200, フレームレート: 10 fps.
一周波 GNSS 受信機 (GNSS)	受信信号:GPS L1C/A, QZSS L1C/A, GLONASS L1OF, Galileo E1B, 演算レート: 1Hz.
MEMS IMU (IMU)	センサデータ: Acc. 3-axis, Gyro 3-axis, 更新レート: 100Hz.

### 3.7 本章のまとめ

本章では，従来の動画像への情報重畳技術と軌跡推定技術について述べた．着  
棧支援に用いる動画像への情報重畳技術として，岸壁や棧橋の絶対位置や形状の  
情報，あるいは，マーカなどのインフラ構築が不要な，ビジョンベース方式が適  
していることを述べた．また，ビジョンベース方式に用いられる VO，並びに，  
GNSS コンパスに用いられる GNSS, 及び, INS との融合技術を示した．さらに，  
関連研究について述べ，それぞれの従来技術の課題を整理し，本研究のアプロ  
チを示した．

## 4. GNSS コンパスの性能向上

GNSS コンパスの姿勢決定には、搬送波位相の整数値バイアスを解く必要がある。高精度な姿勢を得るために、一般的な GNSS コンパスはアンテナの間隔が長くなるように配置されている。しかしながら、基線長が長くなるほど装置が大型化し、さらには、整数値バイアスの候補解が増え、姿勢決定までの時間が長くなったり、衛星の遮蔽から復帰したときに整数値バイアスを間違えたりする。そこで、アンテナの数を 4 機にして基線長を短くしつつ基線の数を 6 本に増やし、さらに、複数ある受信機のクロックを共通化して、姿勢推定に必要な未知パラメータを減らした。これらの手法によって精度を維持しつつ装置を小型化した複数基線方式の GNSS コンパス[55]を実現した。

本章では、複数ある受信機のクロックを共通化し、GNSS コンパス単体の性能を向上した結果[56]を示す。具体的に、姿勢決定において 6 本の短い基線ベクトルと IMU を利用して姿勢決定を高速化した結果を 4.1 項に示す。続いて、信号伝播時間の受信機内遅延差を推定して、一重位相差と IMU の TC において GNSS/INS 姿勢推定に必要であった衛星数の条件を 4 機から 1 機まで緩和し、6 本の基線ベクトルを利用して姿勢推定をロバスト化した結果を 4.2 項に示す。

複数基線方式の GNSS コンパスの構成ブロックを図 10 に示す。

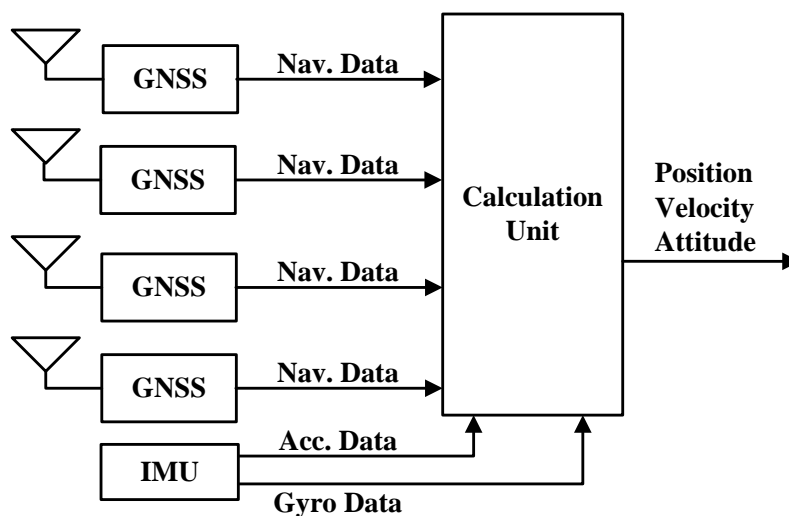


図 10 GNSS コンパスの構成ブロック

GNSS は、GNSS アンテナと GNSS 受信機であり、単独測位結果、並びに、搬送波位相を含む GNSS 衛星の航法データ (Nav. Data) を出力する。4 機の受信機を共通のクロックで動作させ、かつ、4 機のアンテナが 1 辺 10 cm の正方形となるよう配置している。IMU は 3 軸の加速度センサと 3 軸の角速度センサから成る MEMS のセンサで、加速度データ (Acc. Data) と角速度データ (Gyro Data) を出力する。演算部 (Calculation Unit) は、搬送波位相、及び、IMU のデータから絶対位置と速度、及び、姿勢の推定結果を出力する。

## 4.1 提案手法1：姿勢決定の高速化

本節では、6本の短い基線ベクトルとIMUを用いて衛星4機で姿勢決定を可能にするアルゴリズムと、それを用いて姿勢決定を高速化した結果を示す。

### 4.1.1 提案手法1の概要

従来手法(3.2.2項)では、Float解を求めて整数値バイアスの探索範囲を絞ってから、LAMBDA法によって整数値バイアスを解いていた。このとき、カルマンフィルタでFloat解を収束させるために10秒程度の時間を要していた。

提案手法では、6本の短い基線ベクトルを用いて、従来のFloat解の推定を行うことなく整数値バイアスを決定して姿勢決定時間を短縮した。具体的には、3.2.2項で示した従来の姿勢決定アルゴリズムの中で、整数値バイアスの候補点の絞り込みにおいて、IMUの傾斜情報と任意に設定した方位の初期値を用いて基線ベクトルを任意に設定し、6本の基線ベクトルの配置情報に基づいて検定し、検定を通過した整数値バイアスを採用して基線ベクトルを解く。6本の基線ベクトルの配置情報に基づいた検定について以下に示す。

6本の基線ベクトルの内、それぞれ2本を選んだとき、基線ベクトルの内積、及び、外積から2本の基線ベクトルの配置関係についての妥当性を検定する。2本の基線ベクトルを $\mathbf{b}_1 = (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z})$ 、 $\mathbf{b}_2 = (b_{2x}, b_{2y}, b_{2z})$ とし、2本のベクトルがなす角度を $\alpha$ とすると、2本のベクトルの内積は、

$$\mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{b}_2 = b_{1x}b_{2x} + b_{1y}b_{2y} + b_{1z}b_{2z}$$

である。よって、

$$\mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{b}_2 = |\mathbf{b}_1| \cdot |\mathbf{b}_2| \cos \alpha$$

の関係より、2本のベクトルがなす角度 $\alpha$ は

$$\cos \alpha = \frac{b_{1x}b_{2x} + b_{1y}b_{2y} + b_{1z}b_{2z}}{\sqrt{b_{1x}^2 + b_{1y}^2 + b_{1z}^2} \cdot \sqrt{b_{2x}^2 + b_{2y}^2 + b_{2z}^2}} \text{ より,}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{b_{1x}b_{2x} + b_{1y}b_{2y} + b_{1z}b_{2z}}{\sqrt{b_{1x}^2 + b_{1y}^2 + b_{1z}^2} \cdot \sqrt{b_{2x}^2 + b_{2y}^2 + b_{2z}^2}}$$

と表せる。一方、2本のベクトルの外積は、

$$\mathbf{b}_1 \times \mathbf{b}_2 = \begin{bmatrix} b_{1y}b_{2z} - b_{1z}b_{2y} \\ b_{1z}b_{2x} - b_{1x}b_{2z} \\ b_{1x}b_{2y} - b_{1y}b_{2x} \end{bmatrix}$$

である。よって、

$$|\mathbf{b}_1 \times \mathbf{b}_2| = |\mathbf{b}_1| \cdot |\mathbf{b}_2| \sin \alpha$$

の関係より、2本のベクトルがなす角度  $\alpha$  は

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{(b_{1y}b_{2z} - b_{1z}b_{2y})^2 + (b_{1z}b_{2x} - b_{1x}b_{2z})^2 + (b_{1x}b_{2y} - b_{1y}b_{2x})^2}}{\sqrt{b_{1x}^2 + b_{1y}^2 + b_{1z}^2} \cdot \sqrt{b_{2x}^2 + b_{2y}^2 + b_{2z}^2}} \text{ より,}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{\sqrt{(b_{1y}b_{2z} - b_{1z}b_{2y})^2 + (b_{1z}b_{2x} - b_{1x}b_{2z})^2 + (b_{1x}b_{2y} - b_{1y}b_{2x})^2}}{\sqrt{b_{1x}^2 + b_{1y}^2 + b_{1z}^2} \cdot \sqrt{b_{2x}^2 + b_{2y}^2 + b_{2z}^2}}$$

となる。よって、2本の基線ベクトルがなす角度  $\alpha$  とアンテナ配置によって既知である2本の基線ベクトルのオフセット角度  $\Delta_{OFFSET}$  との許容誤差を  $\delta\psi_{VECT}$  とすると、

$$\alpha - \Delta_{OFFSET} < \delta\psi_{VECT}$$

となるため、

$$\left| \cos^{-1} \frac{b_{1x}b_{2x} + b_{1y}b_{2y} + b_{1z}b_{2z}}{\sqrt{b_{1x}^2 + b_{1y}^2 + b_{1z}^2} \cdot \sqrt{b_{2x}^2 + b_{2y}^2 + b_{2z}^2}} - \Delta_{OFFSET} \right| < \delta\psi_{VECT}$$

かつ、

$$\left| \sin^{-1} \frac{\sqrt{(b_{1y}b_{2z} - b_{1z}b_{2y})^2 + (b_{1z}b_{2x} - b_{1x}b_{2z})^2 + (b_{1x}b_{2y} - b_{1y}b_{2x})^2}}{\sqrt{b_{1x}^2 + b_{1y}^2 + b_{1z}^2} \cdot \sqrt{b_{2x}^2 + b_{2y}^2 + b_{2z}^2}} - \Delta_{OFFSET} \right| < \delta\psi_{VECT}$$

のとき、両者のベクトルの候補点を採択する。

GNSS 姿勢決定アルゴリズムについて、従来手法と提案手法を比較した結果を図 11 に示す。この提案手法により、Float 解を求めることなく整数値バイアスを解くことで、最短で1回（1秒）の観測で姿勢決定を可能にした。

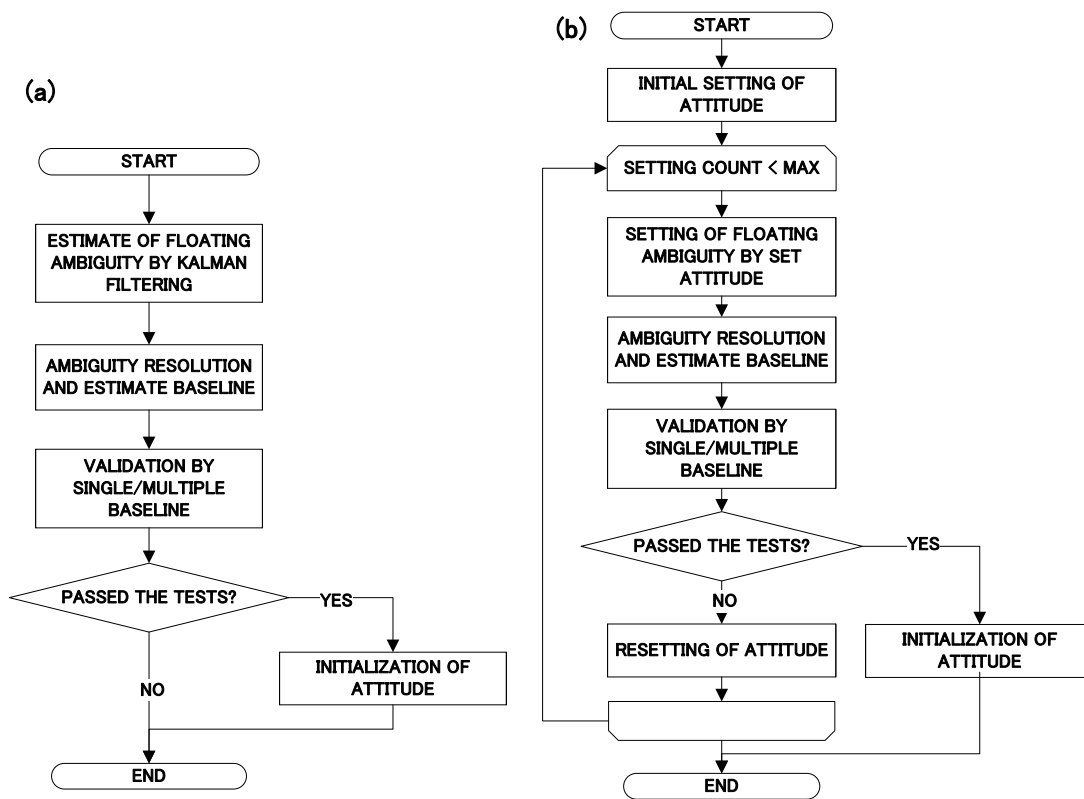


図 11 GNSS 姿勢決定アルゴリズムの比較

(a) 従来手法, (b) 提案手法.

#### 4.1.2 実験結果

兵庫県西宮市古野電気本社ビルの前に三脚を立て、三脚上に GNSS コンパスを設置した。GNSS コンパスの姿勢決定性能について、従来手法と提案手法を比較するため、衛星を受信しにくい環境を選んで実験した。GNSS コンパスを設置した様子を図 12 に示す。GNSS コンパスの設置場所は、上空視界の片側が建物で遮蔽した天空率約 50%の環境である。約 2 時間のデータを収録し、オフライン解析で 150 秒ごとに姿勢決定処理を繰り返した。整数値バイアスが求まり姿勢決定を完了した時間に対する試行回数の累積結果について、全試行回数を 100%として規格化し、それを姿勢決定性能とした。従来のカルマンフィルタを用いて Float 解を求めて整数値バイアスを決定した従来手法（図 11(a)）と、6 本の基線ベクトルを利用して Float 解を求めずに整数値バイアスを直接決定した提案手法（図 11(b)）を用いて GPS 衛星のみ使用して比較した結果を図 13 に示す。参考として、使用衛星に QZSS 衛星と Galileo 衛星を加えた提案手法の結果も示している。

図 13 より、150 秒後の姿勢決定完了率は従来手法の 40%に対して、提案手法は 60%まで向上しており、姿勢決定性能は約 1.5 倍向上したことがわかる。さらに、姿勢決定に使用衛星に QZSS 衛星と Galileo 衛星を加えることで、姿勢決定完了率はさらに向上することがわかった。





図 12 姿勢決定実験の様子 (2015/10/6)

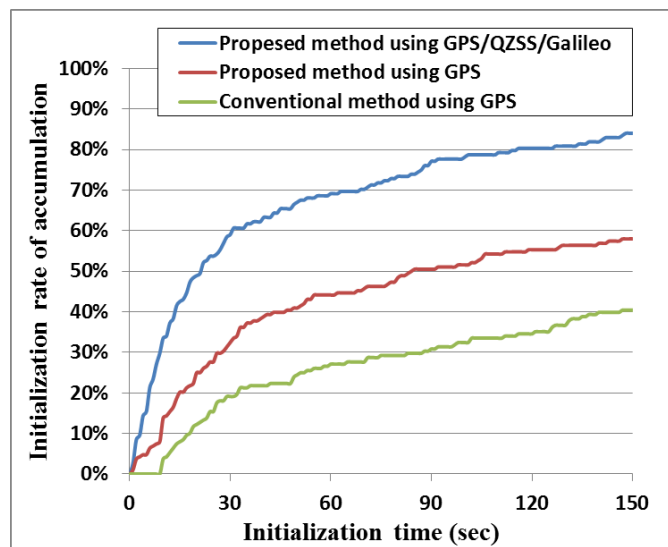


図 13 姿勢決定性能の比較

## 4.2 提案手法2：姿勢推定のロバスト化

本節では、一重位相差の TC を用いて衛星 1 機で姿勢の継続を可能にし、4 機のアンテナの 6 本の基線ベクトルを用いて GNSS/INS 姿勢推定をロバスト化した結果を示す。

### 4.2.1 提案手法2の概要

従来手法では、GNSS コンパスの姿勢の継続に GNSS 姿勢の LC を用いた場合は衛星 4 機以上必要、二重位相差の TC を用いた場合でも衛星 2 機以上必要であった。提案手法では受信機のクロックを共通化し、GNSS の一重位相差と IMU の TC によって 1 機の衛星で姿勢推定を可能にした。次項の実験結果から、6 本の基線ベクトルを用いることで 1 本の基線ベクトルよりもロバストに姿勢推定できたことを示す。

## 4.2.2 実験結果

兵庫県西宮市古野電気研究棟屋上に三脚を立て、三脚上に GNSS コンパスを設置した。GNSS コンパスの設置場所は、オープンスカイ環境である。GNSS コンパスは三脚に固定した静止状態で約 2 時間のデータを収録し、オフライン解析で方位（姿勢）精度を評価した。TC の GNSS/INS 姿勢推定によって出力した全時間における方位の標準偏差を求め、それを方位精度とした。実験結果を図 14 に示す。姿勢決定後にオフライン処理によって意図的に使用できる衛星を 1 機だけに制限し、衛星 12, 14, 18, 22, 24, 及び、25 番の 6 機の衛星に対して、6 本の基線ベクトルによって成すそれぞれの基線（BLineX）と 6 本の基線を全て使ったとき（MultiBLine）の計 42 通りの方位を出力し、提案手法である複数基線方式の方位精度（MultiBLine）と、1つの基線だけで姿勢推定したときの方位精度（BLineX）と比較した。図 14 より、姿勢推定に用いた基線が 1 本だけのときは、いずれかの条件で標準偏差 10 deg 以上に精度劣化していることがわかる。それに対して、複数基線方式（MultiBLine）ではいずれの条件でも方位精度は維持できていることがわかる。

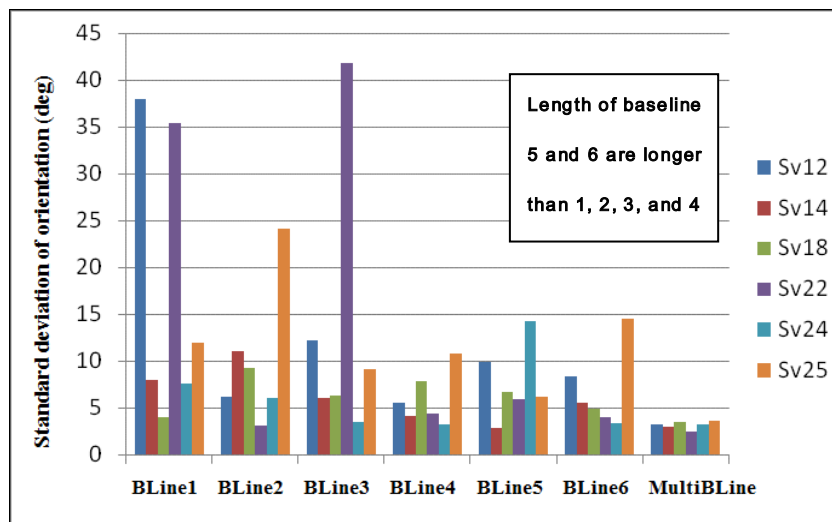


図 14 衛星 1 機だけ使用したときの方位精度の比較

## 5. 単眼カメラと GNSS コンパスの融合

本章では、ビジョンベース方式の拡張現実感に用いる単眼カメラと、前章の通りに性能を向上した GNSS コンパスを融合して軌跡推定の性能を向上した結果 [57][58]を示す。具体的には、搬送波位相速度を積算して算出した高精度な軌跡を用いて VO のスケールを推定しつつ、その軌跡と一重位相差を用いて算出した姿勢を融合して VO のドリフトを補正して高精度な軌跡を推定した結果を 5.1 節、受信機 4 機のクロックを共通化して、搬送波位相の変化量の TC を用いて受信機 4 機の中で重複しない衛星 4 機で速度の継続を可能にした結果を 5.2 節に示す。さらに、5.2 節の手法によって得た結果を用いて支援情報を動画像へ重畳をした着床支援システムを 5.3 節で提案する。

### 5.1 提案手法3：高精度軌跡推定

GNSS 測位から得る絶対位置の座標系は地球中心・地球固定座標系である。それに対して、拡張現実感に必要な位置は世界座標系を用いる。世界座標系は VO の初期化時のカメラ位置を原点とする座標系である。従って、VO の初期化時から高精度な搬送波位相速度を積算すれば高精度な世界座標系の位置が得られる。本節では、搬送波位相速度を積算して算出した高精度な軌跡を用いてスケールを推定しつつ、その軌跡と一重位相差を用いて算出した姿勢を融合してドリフトを補正して高精度な軌跡を推定した結果を示す。

### 5.1.1 提案手法3の概要

従来手法では、GNSS測位の絶対位置を用いて軌跡を算出すると精度不足であった。GNSSを用いた高精度測位は基準局が必要で、かつ、高価なアンテナと受信機が必要である。高精度測位によって、たとえ高精度な絶対位置が得られたとしても、cm級の高精度な着棧位置の地図・海図情報が必要になる。カメラを用いた場合は、着棧位置にマーカの設置が必要になる。VOによる軌跡はスケール不定性があり、軌跡と共に3次元構造復元結果がドリフトする問題もある。

提案手法では、GNSS測位の絶対位置は用いず、搬送波位相速度を積算して高精度な軌跡を算出し、高精度な軌跡を用いてスケールを推定する手法と、高精度な軌跡と一重位相差を用いて算出した姿勢の融合によりドリフトを補正した。本研究で提案するセンサの構成ブロック、及び、演算ブロックを図15、及び、図16に示す。

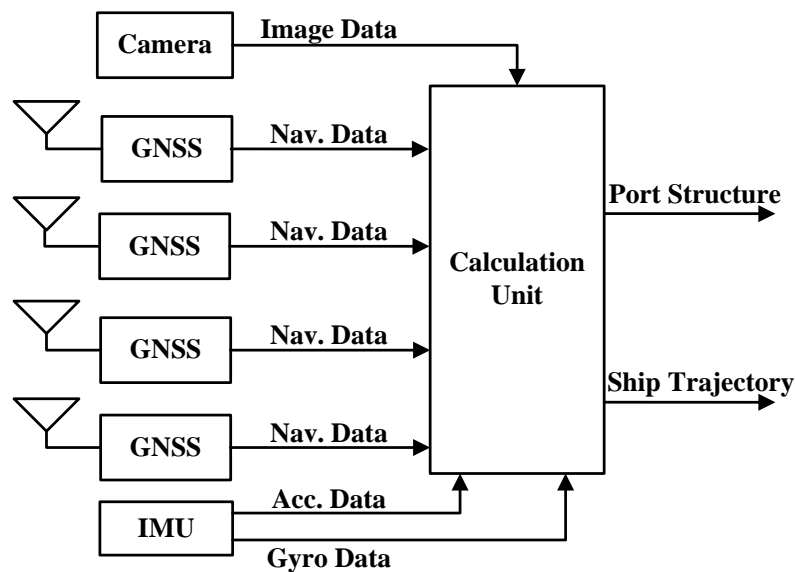


図 15 提案システムの構成ブロック

カメラ（Camera）は、船体に固定した広角レンズ搭載の単眼カメラで、動画データ（Image Data）を出力する。GNSS は、GNSS アンテナと GNSS 受信機であり、単独測位結果、並びに、搬送波位相を含む GNSS 衛星の航法データ（Nav. Data）を出力する。4 機の受信機を共通のクロックで動作させ、かつ、4 機のアンテナが 1 辺 10 cm の正方形となるよう配置している。IMU は 3 軸の加速度センサと 3 軸の角速度センサから成る MEMS のセンサで、加速度データ（Acc. Data）と角速度データ（Gyro Data）を出力する。演算部（Calculation Unit）は、動画像、搬送波位相、及び、IMU のデータから復元した構造物の 3 次元構造（Port Structure）と、カメラの軌跡（Ship Trajectory）の推定結果を出力する。

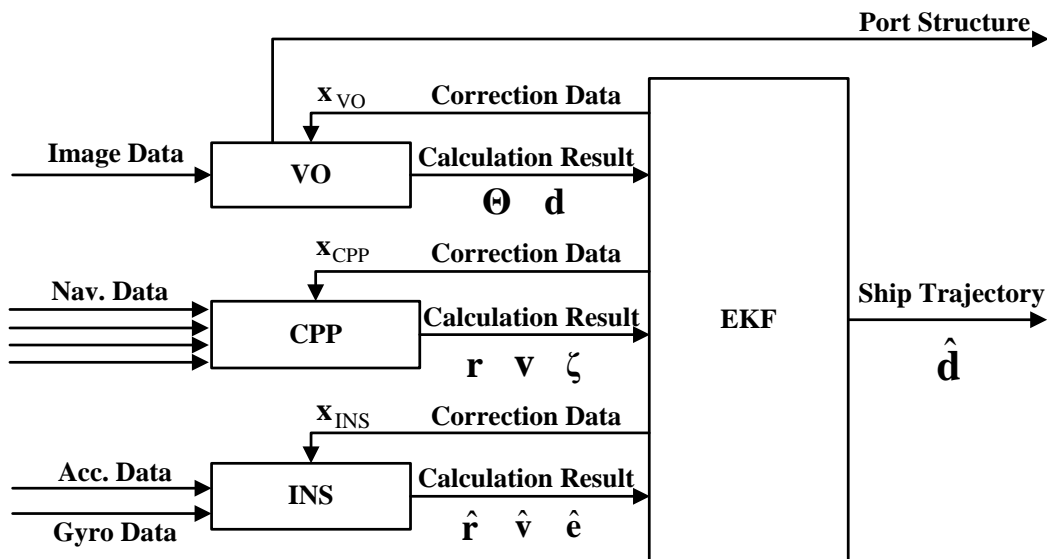


図 16 本研究で提案する演算ブロック

演算部のブロックは、VOブロック、搬送波位相の処理（CPP: Carrier Phase Processing）ブロック、慣性航法データの処理（INS）ブロック、及び、拡張カルマンフィルタ（EKF: Extended Kalman Filter）ブロックから成る。VOブロックは、動画データからVOによるカメラの姿勢 $\Theta$ 、及び、カメラの移動距離のスケールを含まない軌跡 $\mathbf{d}$ を演算するブロック、CPPブロックは、単独測位結果、並びに、搬送波位相を含む衛星の航法データから、GNSS絶対位置 $\mathbf{r}$ 、GNSS速度 $\mathbf{v}$ 、及び、ドリフトしない姿勢の算出に用いる観測量である、衛星から任意の2機のアンテナまでの幾何学的距離の差分 $\zeta$ を演算するブロック、INSブロックは、加速度データと角速度データからカメラの移動速度（INS速度 $\hat{\mathbf{v}}$ ）と姿勢（INS姿勢 $\hat{\mathbf{e}}$ ）を演算するブロックとし、EKFブロックにて、EKFを用いて移動距離のスケールを含んだカメラの軌跡 $\hat{\mathbf{d}}$ を推定した。VOブロック、CPPブロック、及び、INSブロックを図17、図18、及び、図19に示す。



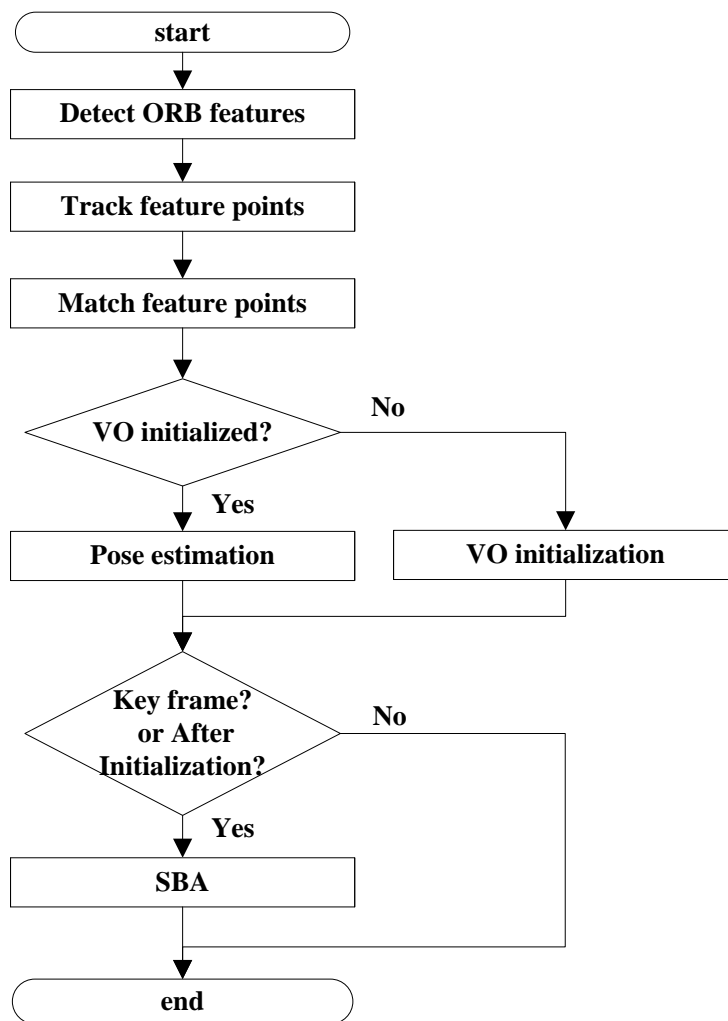


図17 VO演算部 (VO) のフロー図

VO 初期化時の船体座標系  $B$  を基準船体座標系  $B0$  と定義し、以降で示す相対姿勢の基準とする．  $\mathbf{C}_W^C$  を用いて、VO 相対姿勢  $\Theta$  の回転行列  $\mathbf{C}_{B0}^L$  を表すと、

$$\mathbf{C}_{B0}^L = \hat{\mathbf{C}}_B^L \cdot \mathbf{C}_C^B \cdot \mathbf{C}_W^C \cdot \mathbf{C}_{B0}^W$$

となる．世界座標系  $W$  は VO 初期化時の基準カメラ座標系  $C0$  と定義したことから、基準船体座標系  $B0$  から基準カメラ座標系  $C0$  の回転行列  $\mathbf{C}_{B0}^W = \mathbf{C}_{B0}^{C0}$  は、船体に対するカメラの設置角から決まる回転行列である．  $\hat{\mathbf{C}}_B^L$  は INS 姿勢から求めた船体座標系  $B$  から局地水平座標系  $L$  の回転行列である．

一方で、世界座標系  $W$  の原点における局地水平座標系  $L$  を、以降で示す相対位置の基準とする．  $\mathbf{C}_W^C$ 、及び、  $\mathbf{t}^C$  を用いて、VO 相対位置  $\mathbf{d}$  を表すと、

$$\mathbf{d} = \hat{\mathbf{C}}_{B0}^L \cdot \mathbf{C}_W^{B0} \cdot (-\hat{S} \cdot \mathbf{C}_C^W \cdot \mathbf{t}^C)$$

となる．EKF によって推定した VO のスケール推定値を  $\hat{S}$  とした．  $\mathbf{C}_C^B$ 、及び、  $\mathbf{C}_{B0}^W$  は、船体に対するカメラの設置角から求まる回転行列であり、  $\mathbf{C}_C^B = \mathbf{C}_W^{B0} = (\mathbf{C}_{B0}^W)^T$  の関係にある．  $\hat{\mathbf{C}}_{B0}^L$  は EKF によって推定した相対姿勢の推定値  $\hat{\Theta}$  の回転行列を表す．以上より、EKF へ入力する VO の演算結果は、VO 相対位置  $\mathbf{d}$ 、及び、VO 相対姿勢  $\Theta$  となる．

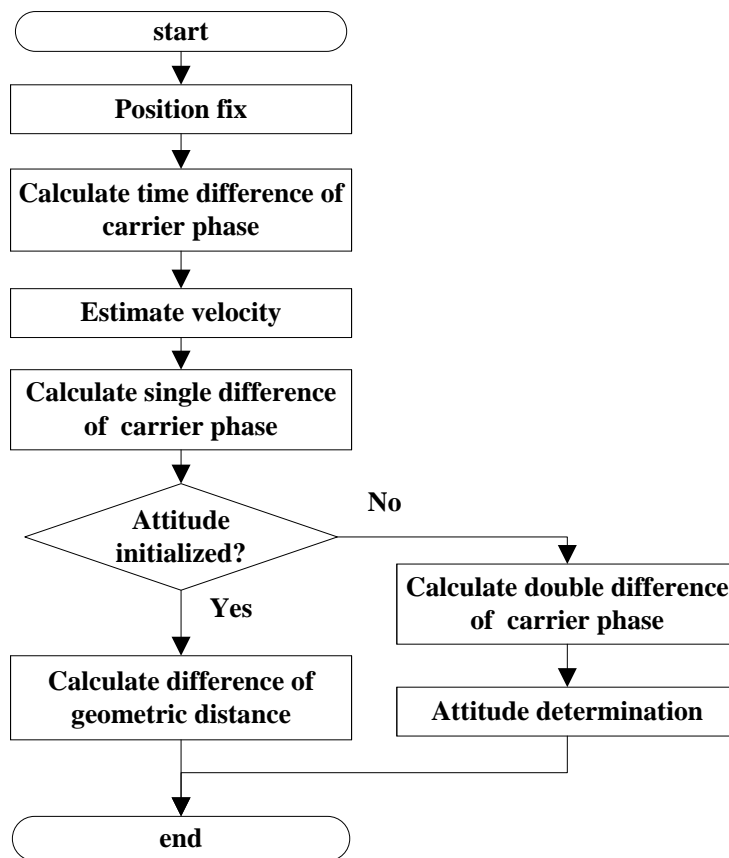


図18 搬送波位相演算部 (CPP) のフロー図

CPPブロックには、4機の受信機の単独測位結果、並びに、搬送波位相を含む衛星の航法データが入力される。入力された航法データと、EKFブロックで推定した支援情報 (Correction Data) から、演算結果 (Calculation Result) を算出し、演算結果がEKFブロックへ送られる。CPPブロックからEKFブロックへ送られた演算結果は、 $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{v}$ 、及び、 $\boldsymbol{\zeta}$  である。 $\mathbf{r}$  は、4機のアンテナの中心位置であり、4機の受信機の単独測位結果から求まる。 $\mathbf{v}$  は、アンテナ数の要素数から成る速度ベクトルである。 $\boldsymbol{\zeta}$  は、衛星数×アンテナ基線数の要素数から成るベクトルである。ベクトルを構成する要素は、衛星  $k$  からアンテナ  $i$ 、及び、 $j$  までの幾何学的距離の差分  $\zeta_{i,j}^k$  であり、

$$\zeta_{i,j}^k = \lambda \Phi_{i,j}^k - \hat{D}_{i,j} - \lambda N_{i,j}^k + u(\zeta_{i,j}^k)$$

によって求まる。ここで、アンテナ  $i$ 、及び、 $j$  についての衛星  $k$  の搬送波位相の一重差を  $\Phi_{i,j}^k$ 、一重差の整数値バイアスを  $N_{i,j}^k$ 、EKFブロックで推定した支援情報の一部である受信機内遅延差の推定値を  $\hat{D}_{i,j}$ 、観測誤差を  $u(\zeta_{i,j}^k)$  とした。但し、アンテナから受信したGNSS信号の、異なる受信機内の伝搬時間の遅延差に対して、距離に換算した値を受信機内遅延差と定義した。

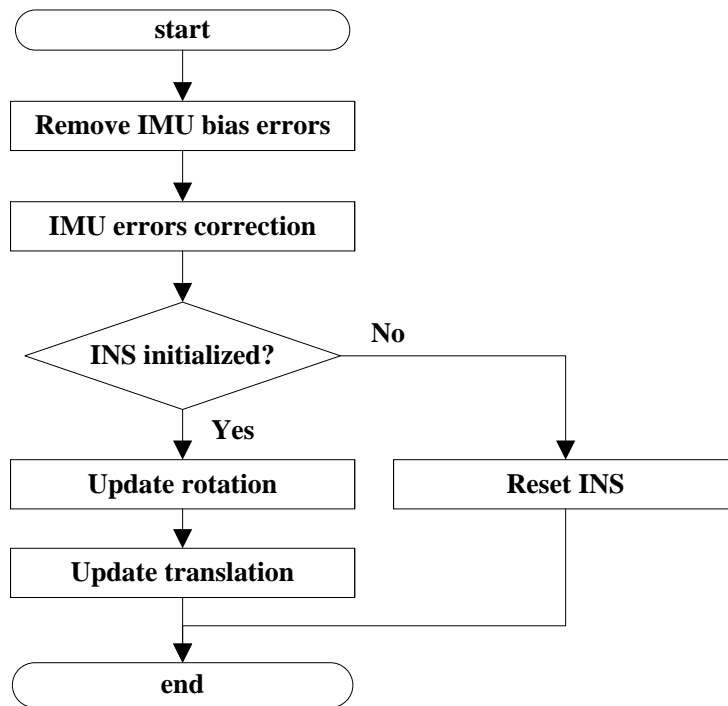


図19 INS演算部 (INS) のフロー図

INS 演算の前処理を以下に示す.

$$\hat{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} 1+G_{sx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & 1+G_{sy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & 1+G_{sz} \end{bmatrix} (\tilde{\boldsymbol{\omega}} - \mathbf{x}_\omega), \quad \hat{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} 1+A_{sx} & A_{xy} & A_{xz} \\ A_{yx} & 1+A_{sy} & A_{yz} \\ A_{zx} & A_{zy} & 1+A_{sz} \end{bmatrix} (\tilde{\mathbf{a}} - \mathbf{x}_a)$$

上式よって, IMU から取得した角速度データ  $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ , 及び, 加速度データ  $\tilde{\mathbf{a}}$  から, IMU のスケールファクタ校正値 (IMU 検出値の比例補正係数,  $\mathbf{G}$ , 及び,  $\mathbf{A}$  の対角成分), 並びに, ミスアライメント校正値 (IMU 検出値の軸間補正係数,  $\mathbf{G}$ , 及び,  $\mathbf{A}$  の対角以外の成分) によって補正し, EKF で推定した INS 角速度バイアス誤差  $\mathbf{x}_\omega$ , 及び, INS 加速度バイアス誤差  $\mathbf{x}_a$  を除去して INS 角速度推定値  $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ , 及び, INS 加速度推定値  $\hat{\mathbf{a}}$  を得た [38].

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}'_k = \hat{\boldsymbol{\omega}}_k + \frac{\Delta\tau}{12} \hat{\boldsymbol{\omega}}_{k-1} \times \hat{\boldsymbol{\omega}}_k, \quad \hat{\mathbf{a}}' = \hat{\mathbf{a}} + \frac{\Delta\tau}{2} \hat{\boldsymbol{\omega}} \times \hat{\mathbf{a}}$$

さらに, 上式によって, コーニング補正 (微小時間  $\Delta\tau$  中のセンサの運動に伴う角速度の補正) とスカーリング補正 (微小時間  $\Delta\tau$  中のセンサの運動に伴う加速度の補正) を実施し, コーニング補正後の INS 角速度推定値  $\hat{\boldsymbol{\omega}}'$ , 及び, スカーリング補正後の INS 加速度推定値  $\hat{\mathbf{a}}'$  を得た. さらに, 加速度については, 重力加速度  $\mathbf{g}$  を除去して運動加速度を得た. INS 演算結果の初期化では, INS 角速度バイアス推定値, 及び, INS 加速度バイアス推定値をリセットし, CPP 演算部で求めた GNSS 絶対位置  $\mathbf{r}$ , GNSS 対地速度  $\mathbf{v}$ , 及び, GNSS 絶対姿勢  $\mathbf{e}$  を INS 絶対位置  $\hat{\mathbf{r}}$ , INS 対地速度  $\hat{\mathbf{v}}$ , 及び, INS 絶対姿勢  $\hat{\mathbf{e}}$  の初期値として設定した. INS 演算の更新処理として, INS 角速度推定値  $\hat{\boldsymbol{\omega}}$  を積算し, INS 絶対姿勢  $\hat{\mathbf{e}}$ , 及び, 回転行列  $\hat{\mathbf{C}}_B^L$  を更新した. 同様に, INS 加速度推定値  $\hat{\mathbf{a}}$  を積算して INS 対地速度  $\hat{\mathbf{v}}$ , 及び, INS 絶対位置  $\hat{\mathbf{r}}$  を更新した.

EKFブロックには、VOブロック、CPPブロック、及び、INSブロックの演算結果が入力される。EKFによる状態量の推定演算を行い、推定したカメラの姿勢、及び、軌跡のドリフト誤差を除去し、推定したスケールを掛けて、移動距離のスケールを含んだカメラの軌跡を出力する。各演算ブロックに対しては、必要な支援情報を送る。EKFによる状態量の推定演算は、時間更新と観測更新で構成される。以下、時間更新と観測更新について、それぞれ説明する。

### 【EKF の時間更新】

EKF の時間更新の方程式は、

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{F}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t$$

$$\mathbf{P}_{t+1/t} = \mathbf{F}_t \mathbf{P}_{t/t} \mathbf{F}_t^T + \mathbf{Q}_{t/t}$$

で表される。

状態ベクトル  $\mathbf{x}$  は、VO ブロック、CPP ブロック、及び、INS ブロックへの支援情報に関する推定誤差を表し、それぞれの演算ブロックごとに、

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_{\text{INS}}, \mathbf{x}_{\text{CPP}}, \mathbf{x}_{\text{VO}}]^T$$

とした。

INS ブロックへの支援情報に関する状態量は、

$$\mathbf{x}_{\text{INS}} = [\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_v, \mathbf{x}_e, \mathbf{x}_\omega, \mathbf{x}_a]^T$$

$\mathbf{x}_r$  : INS 絶対位置誤差,

$\mathbf{x}_v$  : INS 速度誤差,

$\mathbf{x}_e$  : INS 姿勢誤差,

$\mathbf{x}_\omega$  : INS 角速度バイアス誤差,

$\mathbf{x}_a$  : INS 加速度バイアス誤差,

とした。

CPP ブロックへの支援情報に関する状態量は、

$$\mathbf{x}_{\text{CPP}} = [\mathbf{x}_D, \mathbf{x}_Z]^T$$

$\mathbf{x}_D$  : GNSS 受信機内遅延差誤差,

$\mathbf{x}_Z$  : GNSS クロックドリフト誤差,

とした。

VO ブロックへの支援情報に関する状態量は、

$$\mathbf{x}_{\text{VO}} = [\mathbf{x}_\theta, \mathbf{x}_S, \mathbf{x}_d]^T$$

$\mathbf{x}_\theta$  : VO によるカメラの姿勢ドリフト誤差,



$\mathbf{x}_s$  : VO のスケール誤差,

$\mathbf{x}_d$  : VO によるカメラの軌跡ドリフト誤差,

とした.

状態遷移行列  $\mathbf{F}$  は,

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{rr} & \mathbf{F}_{rv} & \mathbf{F}_{re} & \mathbf{F}_{r\omega} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_{vr} & \mathbf{F}_{vv} & \mathbf{F}_{ve} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_{va} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_{er} & \mathbf{F}_{ev} & \mathbf{F}_{ee} & \mathbf{F}_{e\omega} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_{\omega\omega} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_{aa} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_{DD} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_{ZZ} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_{\theta\theta} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_{dd} \end{bmatrix}$$

とした.

システム雑音  $\mathbf{w}$  の共分散行列  $\mathbf{Q}$  は,

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{rr} & \mathbf{Q}_{rv} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Q}_{vr} & \mathbf{Q}_{vv} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{ee} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{\omega\omega} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{aa} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{DD} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{ZZ} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{\theta\theta} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{dd} \end{bmatrix}$$

とした.

ここで, 状態ベクトル  $\mathbf{x}_r$ ,  $\mathbf{x}_v$ , 及び,  $\mathbf{x}_e$  の時間更新については公知の

GNSS/INS 技術に用いられる状態遷移モデルを採用した. 状態ベクトル  $\mathbf{x}_\omega$ ,  $\mathbf{x}_a$ ,  $\mathbf{x}_D$ ,  $\mathbf{x}_Z$ ,  $\mathbf{x}_\theta$ ,  $\mathbf{x}_S$ , 及び,  $\mathbf{x}_d$  の時間更新については, Gauss-Markov 過程の状態遷移モデルを採用した. 状態量  $X$  の時定数を  $T_X$  とすると, 状態遷移行列  $\mathbf{F}_{XX}$  は単位行列  $\mathbf{I}$  を用いて,

$$\mathbf{F}_{XX} = \left( 1 - \frac{1}{T_X} \right) \mathbf{I}$$

とした.

**【EKF の観測更新】**

EKF の観測更新の方程式は、

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{u}_t$$

$$\mathbf{P}_{\nu t} = \mathbf{P}_{\nu t-1} - \mathbf{K}_t \mathbf{H}_t \mathbf{P}_{\nu t-1}$$

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{\nu t-1} \mathbf{H}_t^T [\mathbf{H}_t \mathbf{P}_{\nu t-1} \mathbf{H}_t^T + \mathbf{R}_t]^{-1}$$

で表される。

観測ベクトル  $\mathbf{y}$  は、CPP ブロックの演算結果である  $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{v}$ 、及び、 $\zeta$ 、並びに、VO ブロックの演算結果である  $\Theta$ 、及び、 $\mathbf{d}$  を用いて計算した。

従って、 $\mathbf{y}$  を、

$$\mathbf{y} = [\mathbf{y}_r, \mathbf{y}_v, \mathbf{y}_\zeta, \mathbf{y}_\Theta, \mathbf{y}_d]^T$$

とした。

観測行列  $\mathbf{H}$  は、

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{rr} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_{vv} & \mathbf{H}_{ve} & \mathbf{H}_{v\omega} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\zeta e} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\zeta D} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\theta e} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\theta\theta} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{d\theta} & \mathbf{H}_{dS} & \mathbf{H}_{dd} \end{bmatrix}$$

とした。

観測雑音  $\mathbf{u}$  の共分散行列  $\mathbf{R}$  は、

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{rr} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{vv} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{\zeta\zeta} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{\theta\theta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{dd} \end{bmatrix}$$

とした。

### 5.1.2 実験結果

大型船で評価する前に、予備実験として小型船で提案手法による効果を確認した。着岸時の大型船と小型船の動特性の違いとして、大型船は小型船に比べて進行速度と旋回速度が非常に低速（約1桁の違い）である。カメラの設置条件の違いについて、大型船は20 m近くの高さから岸壁を斜め下向きに見下ろす方向に撮影する。一方で、小型船では海水面から高さ約1 mで正面に向けて撮影する。従って、本研究の想定環境である大型船は、小型船よりも広い範囲を撮影でき、時系列画像のマッチングには有利で、かつ、被写体に含まれる動体の影響を受けにくい環境であると想定している。大型船と小型船のセンサ装備条件の違いを表16に示す。

表 16 大型船と小型船のセンサ装備条件の違い

	大型船 (本研究の想定環境)	小型船 (本論文で検証)
およその旋回速度	遅 ( $\sim 1 \text{ deg/sec}$ )	速 ( $\sim 10 \text{ deg/sec}$ )
およその進行速度	遅 ( $\sim 0.1 \text{ m/sec}$ )	遅 ( $\sim 1 \text{ m/sec}$ )
撮影対象までの およその距離	遠 ( $\sim 100 \text{ m}$ )	近 ( $\sim 10 \text{ m}$ )
カメラ設置位置	高 (高度 $\sim 20 \text{ m}$ )	低 (高度 $\sim 1 \text{ m}$ )
進行方向に対する カメラ設置角	一致しない (斜め下向き)	一致しない (正面前向き)
衛星受信環境	厳 (着岸時の港湾)	緩 ⇒オフラインで厳しい 環境を模擬

表 15 で示したセンサ構成の試作機を小型船の船首に設置し、兵庫県西宮マリーナでオープンスカイ環境における約 90 秒間にわたる小型船の着棧データを収録した。小型船の軌跡のリファレンスに RTK 測位を用いた。RTK の基準局は着棧位置に設置した。小型船の船首に試作機を設置した様子、並びに、Google Earth 上に重畳した、着棧データの収録開始点（基準座標の原点）から着棧位置までの軌跡を図 20 に示す。着棧データを収録した時間帯のスカイプロットを図 21 に示す。スカイプロットは Trimble GNSS Planning を用いて表示した。



図 20 海上着棧実験（2018/1/23）

左図：試作機を設置した様子，  
右図：基準座標の原点から着棧位置までの軌跡。

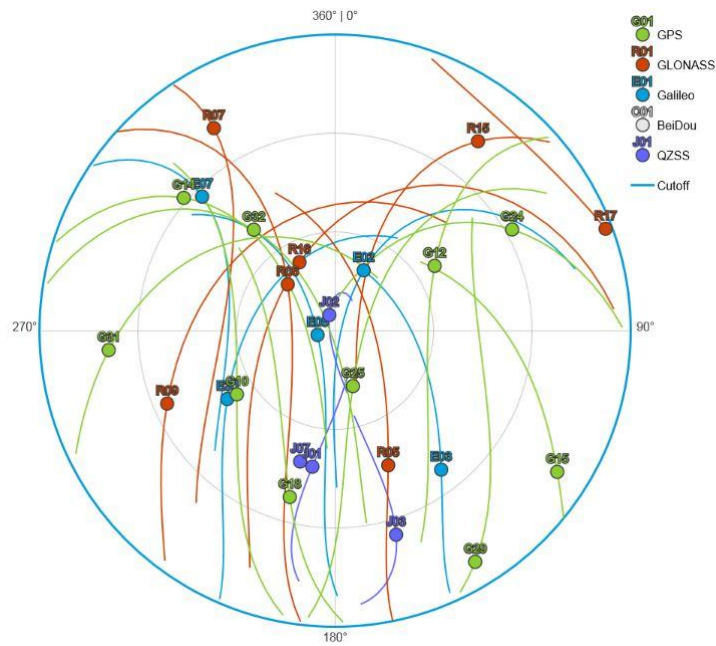


図 21 GNSS 衛星のスカイプロット (2018/1/23)

収録した着栈データを用いて、オフライン解析により、基準座標の原点における RTK 測位結果を誤差 0 として、RTK 測位結果に対する約 90 秒続いた全ての軌跡の結果について水平精度を評価した結果、標準偏差は 4.3 cm であった。尚、搬送波位相を使用した衛星数について、評価時間の全時間帯、かつ、4 機の受信機の平均値は 12.5 であった。

提案手法で得た軌跡 (INS+VO+CPP) と、GNSS を用いない測位手法で得た軌跡 (INS, VO, 及び, INS+VO) の精度を比較した。VO の演算結果はスケール不定性があり, INS の演算結果は加速度と角速度のバイアス誤差がある。また, 両者とも絶対的な方位 (姿勢) は得られない。これら, VO のスケール, INS のバイアス誤差, あるいは, 方位 (姿勢) の初期値を得るため, 着棧データ収録開始から 30 秒間, CPP の演算結果を用いて, それぞれの初期値を推定し, 着棧データ収録開始 30 秒以降の結果を得た。一つのシナリオから, VO と CPP の EKF 観測更新を停止し, INS の軌跡 (INS) を得た。別のシナリオからは, VO のスケールの EKF 時間更新と, CPP の EKF 観測更新を停止して, VO の軌跡 (VO) を得た。同時に INS と VO の演算結果を融合した軌跡 (INS+VO) を得た。さらに, 前節の提案手法によって得た軌跡 (INS+VO+CPP) の中から, 開始 30 秒以降の結果を比較対象として取り出した。取得したそれぞれの軌跡, 並びに, 着棧データの全時間帯約 90 秒間の RTK 測位結果を図 22 に示す。また, RTK 測位結果を基準にしたときの, それぞれの軌跡の水平誤差の比較を図 23 に示す。さらに, 約 60 秒間の全ての軌跡の誤差について水平距離方向に換算した標準偏差と最大水平誤差を求め, それらを水平精度として比較した結果を表 17 に示す。

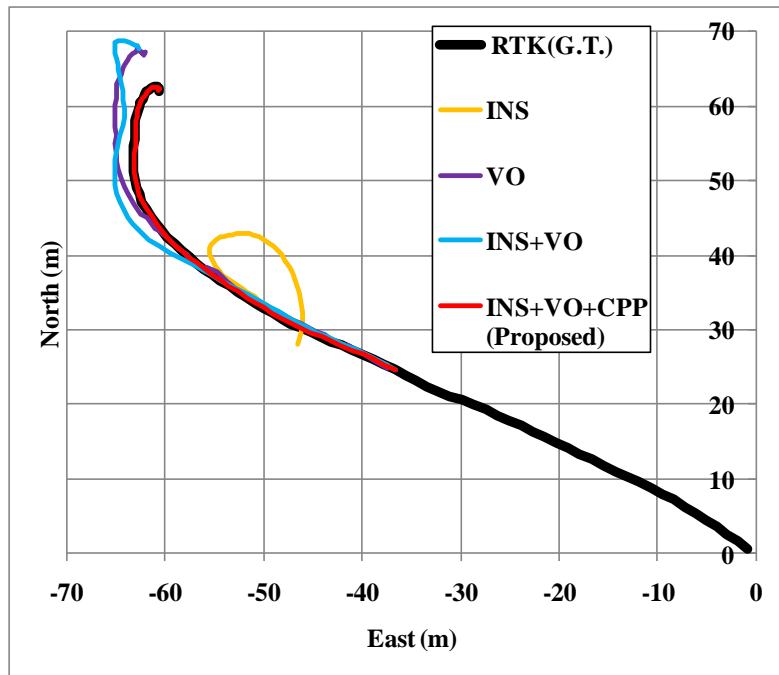


図22 測位方式ごとの軌跡の比較

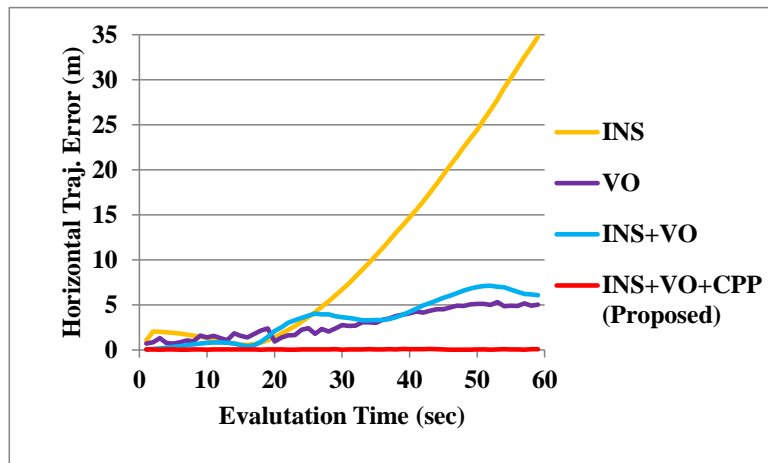


図23 測位方式ごとの軌跡の水平誤差の比較



表17 図23の軌跡の水平精度比較

	Std. Dev. (m)	Max. Err. (m)
<b>INS</b>	11.6	34.8
<b>VO</b>	1.64	5.31
<b>INS+VO</b>	2.76	7.13
<b>INS+VO+CPP (Proposed Method)</b>	0.048	0.197

着棧位置の ORB 特徴点抽出結果を図 24 に示す。RTK 測位結果，並びに，軌跡（VO）と軌跡（INS+VO+CPP）について，3次元構造（特徴点の点群）の推定結果と共に水平の基準座標上で比較した結果を図 25 上図に示す。3次元構造の推定結果は，着棧完了までの直前 20 秒間の累積結果である。また，着棧位置の棧橋形状のリファレンスとして，図 20 右図に示した着棧位置（Stop）の真上からの拡大図を基準座標の方向に合わせて図 25 下図に示し，着棧位置の棧橋の線形状を破線で重畳させている。これと同じ方向の破線を図 25 上図にも棧橋形状の目安として重畳させている。



図24 着棧位置のORB特徴点抽出結果

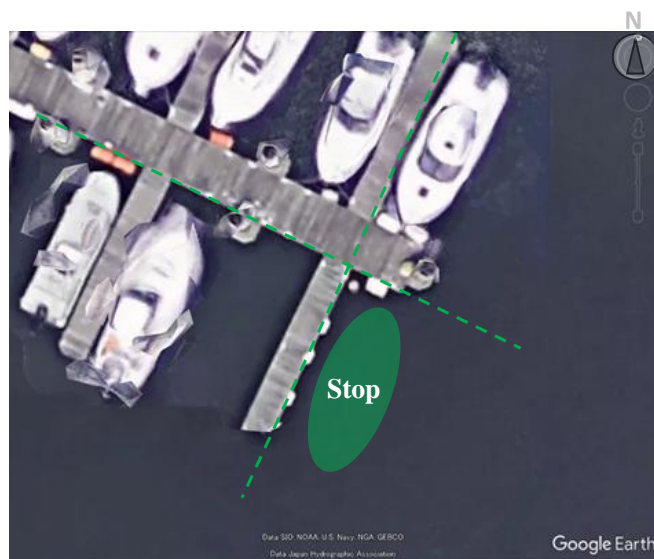
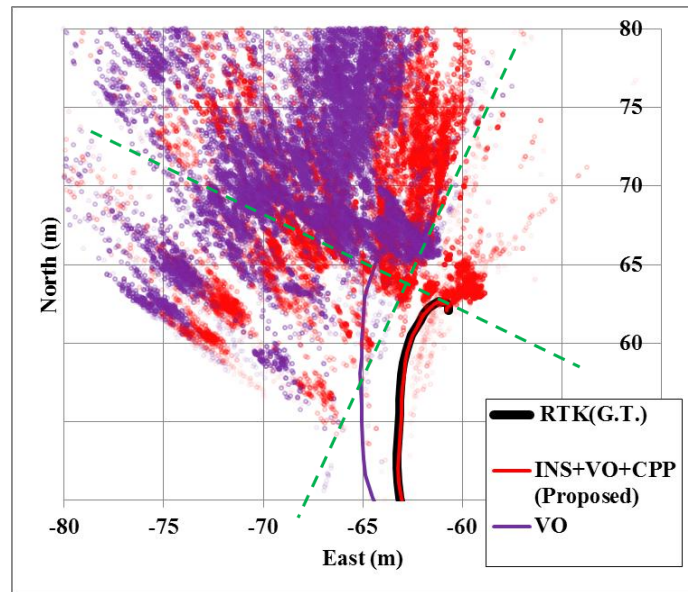


図25 3次元構造推定結果の比較  
 上図：軌跡と3次元構造推定結果，  
 下図：着棧位置の真上からの拡大図，  
 緑破線：棧橋の線形状を表す補助線。

図 22, 図 23, 及び, 表 17 の結果より, 収録した着棧データにおける GNSS を用いない場合の 60 秒間の軌跡のドリフト誤差は, INS で約 35 m, VO で約 5 m と, INS は VO に比べ精度劣化が大きいことがわかる. また, たとえ両者を融合 (INS+VO) させても, GNSS を用いなければ, 高精度な軌跡は得られないこともわかる. VO にはスケール不定性があり, 原理的に速度を観測できず, INS の軌跡誤差の主要因となる INS 加速度バイアス誤差のドリフトを抑圧しきれない. それに対して, 提案手法 (INS+VO+CPP) は, 搬送波位相の時間変化量を用いて INS 加速度バイアス誤差のドリフトを高精度に推定して補正できる.

図 24, 及び, 図 25 より, 提案手法 (INS+VO+CPP) の 3 次元構造推定結果は, カメラの視線方向に対して誤差が大きい特徴点を含んでいるものの, 累積結果と Google Earth で示した図を棧橋の補助線と共に比較すると, 累積結果は棧橋の形状を概ね復元している様子がわかる. 一方で, VO と提案手法 (INS+VO+CPP) の 3 次元構造推定結果を比較すると, 全体として, VO の結果は提案手法 (INS+VO+CPP) の結果よりも北西方向に約 5 m オフセットしていることがわかる. この結果は, 図 23, 及び, 表 17 で示した VO の軌跡のドリフト誤差と同程度であることもわかる. 従って, 提案手法 (INS+VO+CPP) では, VO のドリフト誤差を補正した 3 次元構造の推定結果が得られたといえる. 棧橋の補助線のように, 着棧位置を高精度に設定するためには, 高精度に推定された良質な特徴点だけで岸壁や棧橋の線形状を復元する必要がある. そのためにも, 今後, BA の最適化が課題となる.

## 5.2 提案手法4：高精度軌跡推定のロバスト化

本節では，受信機4機のクロックを共通化し，搬送波位相の変化量のTCを用いて受信機4機の中で重複しない衛星4機で速度の継続を可能にした結果を示す．

### 5.2.1 提案手法4の概要

前節では，スケールの不定性を解くために重要なカメラの移動速度に関し， $\mathbf{v}$ と疎に結合した $\hat{\mathbf{v}}$ をLC速度 $\hat{\mathbf{v}}_{\text{LC}}$ として使っていた．すなわち， $\hat{\mathbf{v}}_{\text{LC}}$ を積算して移動距離のスケールを含んだカメラの軌跡を求め，VOのスケール $\hat{s}$ を推定しつつ，ドリフトしない $\xi$ と結合した $\hat{\mathbf{e}}$ を $\mathbf{d}$ に対するドリフトの補正に利用して，高精度化したカメラの軌跡 $\hat{\mathbf{d}}_{\text{LC}}$ を求めた．

本節の提案手法は，前節の手法からCPPブロックとEKFブロックの処理（の一部）を変更した．カメラの移動速度に関し， $\mathbf{v}$ を求める前の観測量である，GNSS速度の衛星視線方向成分 $\boldsymbol{\eta}$ と密に結合した $\hat{\mathbf{v}}$ をTC速度 $\hat{\mathbf{v}}_{\text{TC}}$ として用いた．加えて，4機の受信機が共通のクロックで動作している構成を活かし，クロックの周波数誤差による各受信機の時計誤差（クロックドリフト）を共通の状態量として扱い， $\hat{\mathbf{v}}_{\text{TC}}$ の推定に使える観測量を増加させることを試みた．推定した $\hat{\mathbf{v}}_{\text{TC}}$ を用いて，高精度化したカメラの軌跡 $\hat{\mathbf{d}}_{\text{TC}}$ を求めた．

$\boldsymbol{\eta}$ は，衛星数 $\times$ アンテナ数の要素数から成るベクトルである．ベクトルを構成する要素は，アンテナ $i$ における速度の衛星 $k$ の視線方向成分 $\eta_i^k$ であり，

$$\eta_i^k = \lambda \dot{\phi}_i^k + v^k - \hat{Z} + u(\eta_i^k)$$

によって求まる．ここで，アンテナ $i$ における衛星 $k$ の搬送波位相を $\phi_i^k$ ，その時間変化量を $\dot{\phi}_i^k$ ，搬送波の波長を $\lambda$ ，衛星 $k$ の速度の衛星視線方向成分を $v^k$ ，EKFブロックで推定した支援情報の一部である速度に換算したクロックドリフトの推定値を $\hat{Z}$ ，観測誤差を $u(\eta_i^k)$ とした．この中で，提案手法として，4機の受信機が共通のクロックで動作している構成を活かし， $\hat{Z}$ を1つの変数として扱っている．

観測ベクトル  $\mathbf{y}$  は, CPP ブロックの演算結果である  $\mathbf{r}$ ,  $\boldsymbol{\eta}$ , 及び,  $\boldsymbol{\zeta}$ , 並びに, VO ブロックの演算結果である  $\boldsymbol{\Theta}$ , 及び,  $\mathbf{d}$  を用いて計算した.  
従って,  $\mathbf{y}$  を,

$$\mathbf{y} = [\mathbf{y}_r, \mathbf{y}_\eta, \mathbf{y}_\zeta, \mathbf{y}_\Theta, \mathbf{y}_d]^T$$

とした.

観測行列  $\mathbf{H}$  は,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{rr} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\eta\eta} & \mathbf{H}_{\eta e} & \mathbf{H}_{\eta\omega} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\eta Z} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\zeta e} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\zeta D} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\Theta e} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{\Theta\Theta} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{d\Theta} & \mathbf{H}_{dS} & \mathbf{H}_{dd} \end{bmatrix}$$

とした.

観測雑音  $\mathbf{u}$  の共分散行列  $\mathbf{R}$  は,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{rr} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{\eta\eta} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{\zeta\zeta} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{\Theta\Theta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{dd} \end{bmatrix}$$

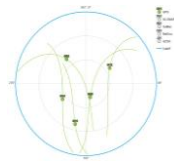
とした.

### 5.2.1 実験結果

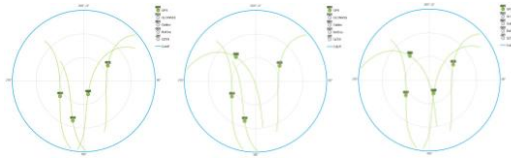
提案手法による軌跡推定のロバスト化の効果について、速度 TC 化とクロックドリフト推定共通化を切り分けて評価した。以下にそれぞれの評価結果を示す。

#### 【速度タイトカップリング化の効果検証】

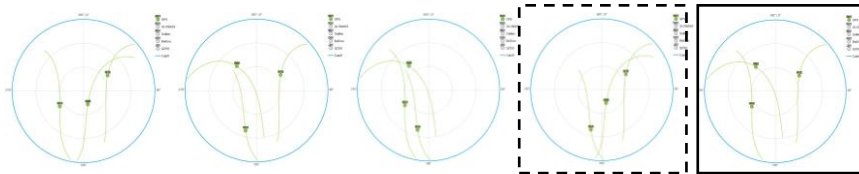
図 21 から、着棧データの全時間の約 90 秒間、搬送波位相を継続して追尾した 5 機の GPS 衛星 (PRN10, 12, 18, 25, 及び, 32) を選んだ。5 機の衛星からそれぞれ、5, 4, 3, 2, 1 機の衛星を選ぶ全ての組み合わせは、それぞれ、1, 5, 10, 10, 5 通りである。この中から、速度の TC 化による精度向上の傾向を把握するため、3 機を選ぶ組み合わせを中心に、4, 3, 2 機を選ぶ組み合わせを重点的に調べた。この方針に沿って任意に衛星を選択した組み合わせ (それぞれ 1, 3, 5, 3, 2 通り) と衛星なし (0 機) の 1 通りを評価対象としてシナリオを作成した。それぞれのシナリオのスカイプロットを図 26 に示す。



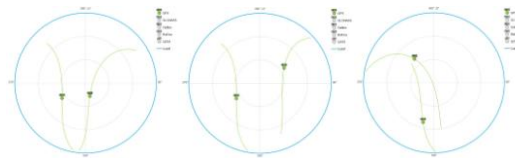
**A Constellation of Selected 5 Satellites**



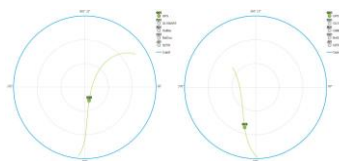
**Constellations of Selected 4 Satellites**



**Constellations of Selected 3 Satellites**



**Constellations of Selected 2 Satellites**



**Positions of Selected 1 Satellite**

図26 選択したGPS衛星のスカイプロット  
 実線四角：推定精度が高かったときの3衛星の配置，  
 破線四角：推定精度が低かったときの3衛星の配置．



衛星の遮蔽をシミュレーションしたシナリオそれぞれの  $\hat{\mathbf{v}}_{\text{TC}}$  と  $\hat{\mathbf{v}}_{\text{LC}}$  , 並びに,  $\hat{\mathbf{d}}_{\text{TC}}$  と  $\hat{\mathbf{d}}_{\text{LC}}$  について, 衛星の遮蔽をシミュレーションした約60秒続いた全ての結果について誤差の標準偏差を求め, 水平距離方向に換算した. この水平精度について, 本節の提案手法と前節の手法を比較した結果を表18と図27, 並びに, 表19と図28に示す. ここで, 速度のリファレンスには遮蔽なしの  $\hat{\mathbf{v}}$  (オープンスカイ環境で1 cm/s以下の精度) を用いた.

表 18 速度の水平精度比較

Sv						Vel.σ (m/s)		
	Cnt	10	12	18	25	32	Previous	Proposed
5	○	○	○	○	○	○	0.004	0.005
4	○	○	○	○	—	—	0.009	0.011
4	○	○	○	—	○	○	0.007	0.008
4	○	○	—	○	○	○	0.009	0.009
3	○	○	—	○	—	—	0.199	0.055
3	—	○	○	—	○	○	0.164	0.021
3	○	—	○	—	○	○	0.173	0.086
3	—	○	○	○	—	—	0.199	0.136
3	○	○	—	—	○	○	0.149	0.013
2	○	—	—	○	—	—	0.214	0.108
2	○	○	—	—	—	—	0.160	0.077
2	—	—	○	—	○	○	0.209	0.142
1	—	—	—	○	—	—	0.211	0.197
1	—	—	○	—	—	—	0.181	0.164
0	—	—	—	—	—	—	0.175	0.157

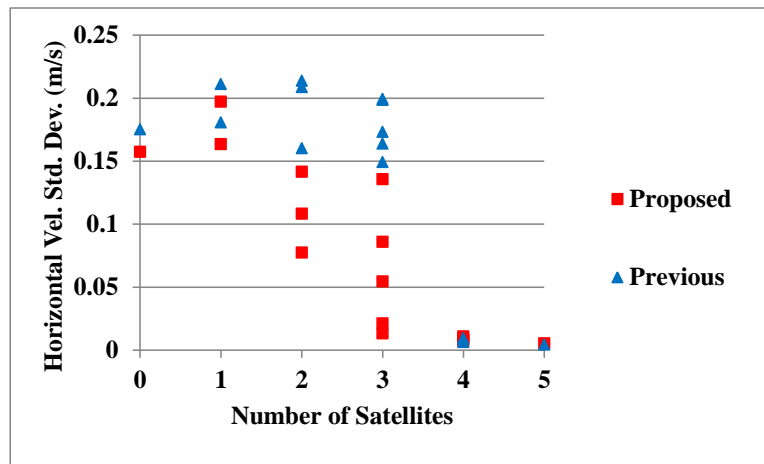


図27 速度の水平精度比較（表18のプロット結果）

表19 軌跡の水平精度比較

Sv						Traj.σ (m)		
	Cnt	10	12	18	25	32	Previous	Proposed
5	○	○	○	○	○	○	0.039	0.039
4	○	○	○	○	—	—	0.040	0.060
4	○	○	○	—	○	—	0.044	0.043
4	○	○	—	○	○	—	0.050	0.061
3	○	○	—	○	—	—	1.745	0.694
3	—	○	○	—	○	—	1.948	0.273
3	○	—	○	—	○	—	1.523	1.003
3	—	○	○	○	—	—	2.194	1.933
3	○	○	—	—	○	—	1.550	0.119
2	○	—	—	○	—	—	1.708	0.829
2	○	○	—	—	—	—	1.552	1.107
2	—	—	○	—	○	—	1.858	0.974
1	—	—	—	○	—	—	1.964	1.895
1	—	—	○	—	—	—	1.936	1.897
0	—	—	—	—	—	—	1.807	1.679

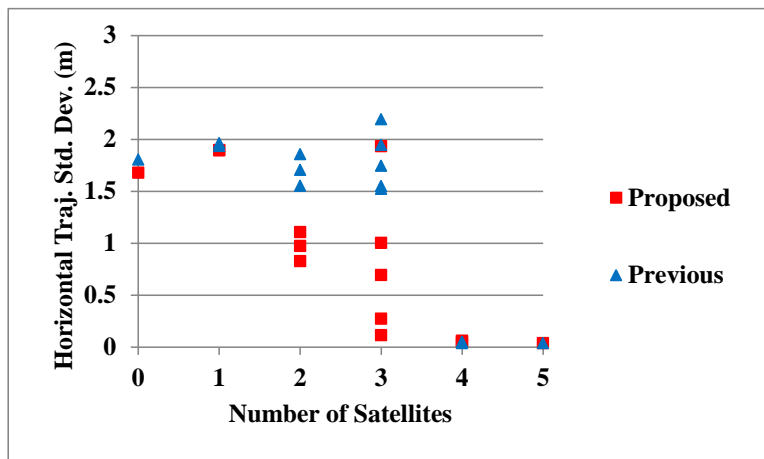


図28 軌跡の水平精度比較 (表19のプロット結果)

衛星遮蔽のシミュレーションでは、搬送波位相を無効にしているため、提案手法と前報告手法の両者に用いた INS 姿勢  $\hat{\mathbf{e}}$  も影響を受ける。参考のため、衛星数が十分に多い（平均使用衛星数 12.5）ときに対して、衛星数が少ないときの方位精度の劣化度合いを評価した。ここで、3 軸の INS 姿勢（Roll, Pitch, 及び、方位）の内の 2 軸（Roll, 及び、Pitch）は、重力加速度に依存するため、たとえ衛星が減少したとしても精度劣化の影響は小さく、最も衛星数減少の影響を受ける方位を評価した。図 26 のシナリオを用いて、衛星を遮蔽した約 60 秒間の全ての結果について方位誤差の標準偏差を求めた。方位精度について、提案手法と前報告手法を比較した結果を表 20 と図 29 に示す。ここで、方位のリファレンスとして遮蔽なしの INS 方位  $\hat{\mathbf{e}}$ （オープンスカイ環境の動的精度 0.5 deg 以下）を用いた。

表20 方位の精度比較

Sv						Orientation $\sigma$ (deg)		
	Cnt	10	12	18	25	32	Previous	Proposed
5	○	○	○	○	○	○	0.053	0.075
4	○	○	○	○	—	—	0.081	0.108
4	○	○	○	—	○	—	0.096	0.102
4	○	○	—	○	○	—	0.117	0.161
3	○	○	—	○	—	—	0.197	0.199
3	—	○	○	—	○	—	0.095	0.094
3	○	—	○	—	○	—	0.095	0.104
3	—	○	○	○	—	—	0.103	0.113
3	○	○	—	—	○	—	0.181	0.184
2	○	—	—	○	—	—	0.148	0.217
2	○	○	—	—	—	—	0.189	0.214
2	—	—	○	—	○	—	0.179	0.125
1	—	—	—	○	—	—	0.128	0.164
1	—	—	○	—	—	—	0.227	0.151
0	—	—	—	—	—	—	0.166	0.180

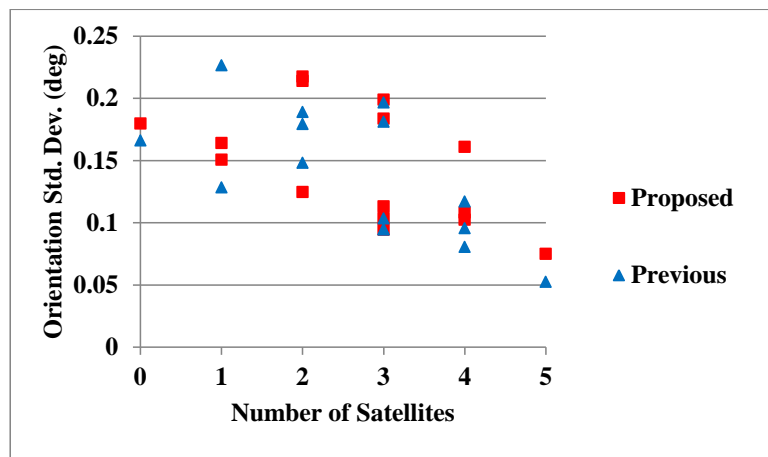


図29 方位の精度比較 (表20のプロット結果)

表 20 と図 29 の結果より，衛星数が少なくなるほど方位精度が劣化し，その劣化度合いは提案手法と前報告手法でほとんど変わらないことがわかる．全衛星を遮蔽した（衛星数 0）ときは原理的には INS 方位はドリフトし続けるが，遮蔽時間が約 60 秒間と短かったため，方位の精度劣化は小さかった（衛星数が十分に多いときに対する 60 秒後の方位のドリフト誤差は 1 deg 以下）．

表 18 と図 27，並びに，表 19 と図 28 の結果より，前報告手法である  $\hat{\mathbf{v}}_{\text{LC}}$  を用いた場合は，搬送波を受信できる衛星が 4 機未満では GNSS 速度が計算できず，全衛星を遮蔽した（衛星数 0）ときと同程度の精度に劣化する．それに対して，提案手法である  $\hat{\mathbf{v}}_{\text{TC}}$  を用いた場合は，搬送波を受信できる衛星が 3 衛星，あるいは 2 衛星のときも，全衛星を遮蔽したときよりも高精度な傾向にある．その中でも，特に 3 衛星のときは，衛星配置によって推定精度が大きく異なっていることがわかる．選択した 3 衛星を使用したときの衛星配置の中で，高精度だったときの衛星配置を図 26 に実線四角で囲い，低精度だったときの衛星配置を図 26 に破線四角で囲った．3 衛星が偏りなく配置されているときは高精度であること，スカイプロットが直線的な配置のときは精度が劣化すること，つまり，衛星配置の影響が大きいことがわかった．一方で，1 衛星のときは前報告手法と同様，衛星数 0 と同程度に精度劣化し，この結果は，前節の GNSS なしでは高精度は得られないことに起因すると考えられる．これは，クロックドリフトと共に速度を推定するとき，速度精度を向上させるには少なくとも異なる 2 衛星が必要で，たとえ同一の 1 衛星を 4 機の受信機で重複して使用しても，速度推定において観測量が増加する効果はほとんど得られないことがわかった．

### 【クロックドリフト推定共通化の効果検証】

GNSS 受信環境によっては、受信機ごとで衛星を追尾するタイミングの違いや、アンテナの空間ダイバーシティにより、複数の受信機で完全に同一衛星の搬送波を追尾しない場合がある。それらを考慮し、以下のシミュレーションによって、4機の受信機のクロックドリフトを1つの状態量として共通化して推定した効果を確認した。

図 26 のシナリオの中から、4 衛星 (PRN12, 18, 25, 及び, 32) のシナリオを任意に選び、これら 4 機の衛星を 4 機の受信機に 1 機ずつ受信させるシナリオに変更した。このシナリオを表す模式図を図 30 に示す。尚、表 20 と図 29 の結果より、たとえ衛星がなくても、60 秒間は方位精度を維持できることを確認している。この結果を利用し、本項では、クロックドリフト推定共通化によるロバスト化の効果を明確にするため、方位推定のための EKF 観測更新に必要な、受信機間で共通の受信衛星を用いずに評価した。

図 30 のシナリオを用いて、クロックドリフトを共通に推定したとき ( $\hat{\mathbf{v}}_{TC} +$  共通推定あり) と、別々に推定したとき ( $\hat{\mathbf{v}}_{TC} +$  共通推定なし) の軌跡について、RTK 測位結果を基準にして水平誤差を比較した結果を図 31 に示す。さらに、約 60 秒続いた全ての軌跡の誤差について水平距離方向に換算した標準偏差と最大水平誤差を求め、それらを比較した結果を表 21 に示す。

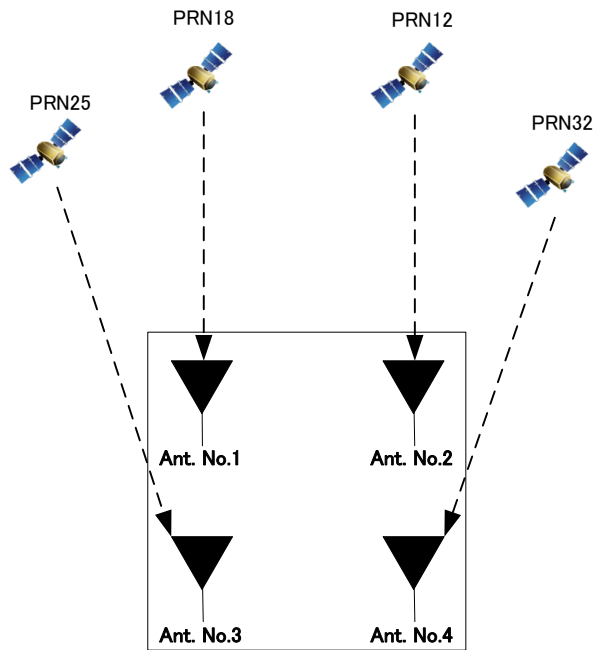


図30 アンテナが受信できている衛星を表す模式図

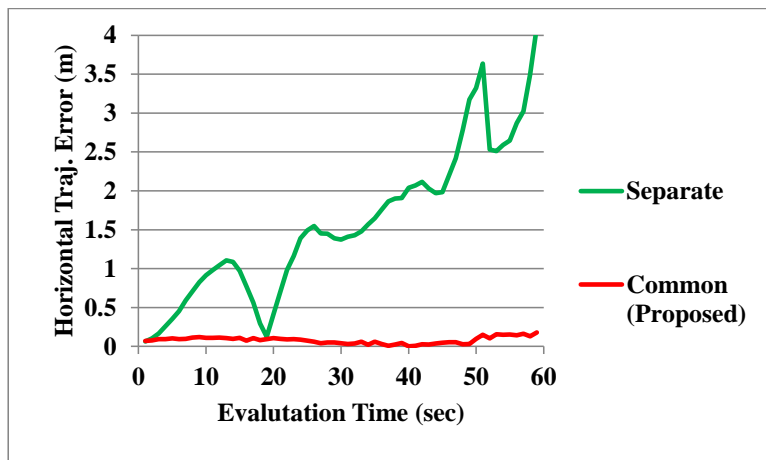


図31 図30のシナリオにおける軌跡の水平誤差の比較



表21 図31の軌跡の水平精度比較

	Std. Dev. (m)	Max. Err. (m)
<b>Separate</b>	1.44	4.11
<b>Common (Proposed Method)</b>	0.063	0.180

図31と表21の結果より、 $\hat{\mathbf{v}}_{TC}$  + 共通推定なしは $\hat{\mathbf{v}}_{TC}$  + 共通推定あり（提案手法）に比べ、軌跡の精度劣化が大きいことがわかる。 $\hat{\mathbf{v}}_{TC}$  + 共通推定なしの場合、3軸の速度を推定するには4機の受信機のクロックドリフトと合わせて7つの未知パラメータを解く必要がある。図30のような4つの搬送波位相しか得られないシナリオでは可観測性を満たせず、軌跡の精度が劣化したと考えられる。それに対して、提案手法では4つのクロックドリフトを1つの未知パラメータとして扱う。従って、3軸の速度の推定には4つの未知パラメータを解けば良く、図30のような4つの搬送波位相しか得られないシナリオであっても、高精度な軌跡を維持できたと考えられる。この結果から、可視衛星数が少ない環境の中で、複数の受信機が共通の衛星の搬送波を追尾できず、異なる衛星の搬送波を追尾できている場合、提案手法の優位性が発揮されると期待できる。

### 5.3 拡張現実感を用いた着棧支援システム

本節では、前節までの単眼カメラと GNSS コンパスの融合により VO のスケールを推定しつつドリフトを補正して高精度に軌跡を推定した。その高精度な軌跡を用いた拡張現実感による着棧支援システムを提案する。着棧支援システムを構成する全体のブロックを図 32 に示す。

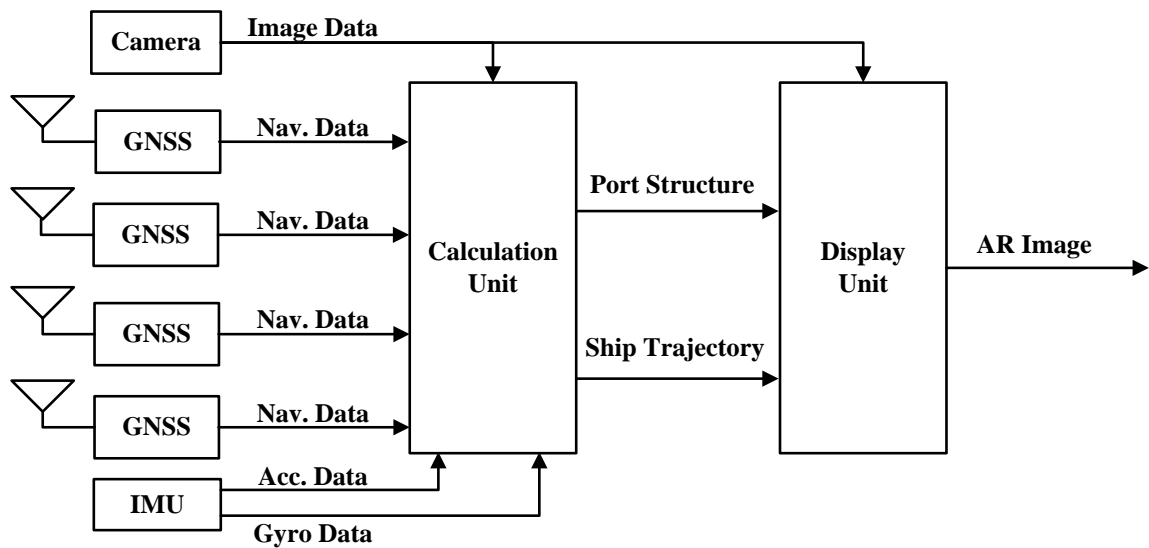


図 32 着棧支援システムの全体ブロック

図20の海上実験結果に基づき、動画像に適用した結果を図33、3次元構造復元結果の自由視点表示を図34に示す。前述の実験と同様、システムの適用先は大型船を想定しているが、まずは、小型船でシステムの動作を確認した。

従来の航海機器について、表1で示した通り、速度や姿勢などのセンサ情報や制御装置の情報は、デジタルの数値やアナログの目盛りで提示され、操船者がそれを読んで経験に基づき状況判断をしていた。図33で提案する拡張現実感を用いた着岸支援システムでは、自船の運動情報や周辺の空間情報を動画像上に重ね合わせることで表現している。緑色のグリッドは、水平面上の2 mの区画を表し、距離ごとの色相に分けた3次元特徴点は、上部に示す鳥瞰図と対応している。実際の船体サイズを反映した船体の予測線は、1秒ごとの先の予測位置と予測姿勢を表し、自船が風や潮流による偏流の影響や、自船を制御したときの応答を直感的に把握できる。また、従来は目視観測していた着岸位置までの距離情報を画像上で指定すれば、2次元画像座標と3次元空間座標の対応から指定位置までの距離を把握できる。これは、GNSSコンパスと単眼カメラの融合によって得た軌跡を用いることで高精度に指定位置を追従できる。図34では、提案手法によって推定した自船の軌跡（赤色）と図25で示した3次元構造の復元結果（青色）を自由視点表示している。

大型船の乗組員経験者1名にシステムの価値についての妥当性をヒアリングした。ヒアリングの結果、目視情報と共に正確な位置や速度、姿勢情報の提示は操船支援に有効であるものの、距離情報の提示については、船体座標系のグリッド表示や特徴点の色彩表示が有効とはいえ、船員が実際に必要とする距離情報の提示方法を検討すべきとの所感を得た。今後、実際の操船者に対してユーザスタディを行い、距離情報の提示方法の改善を検討する。

【動画重畳表示】

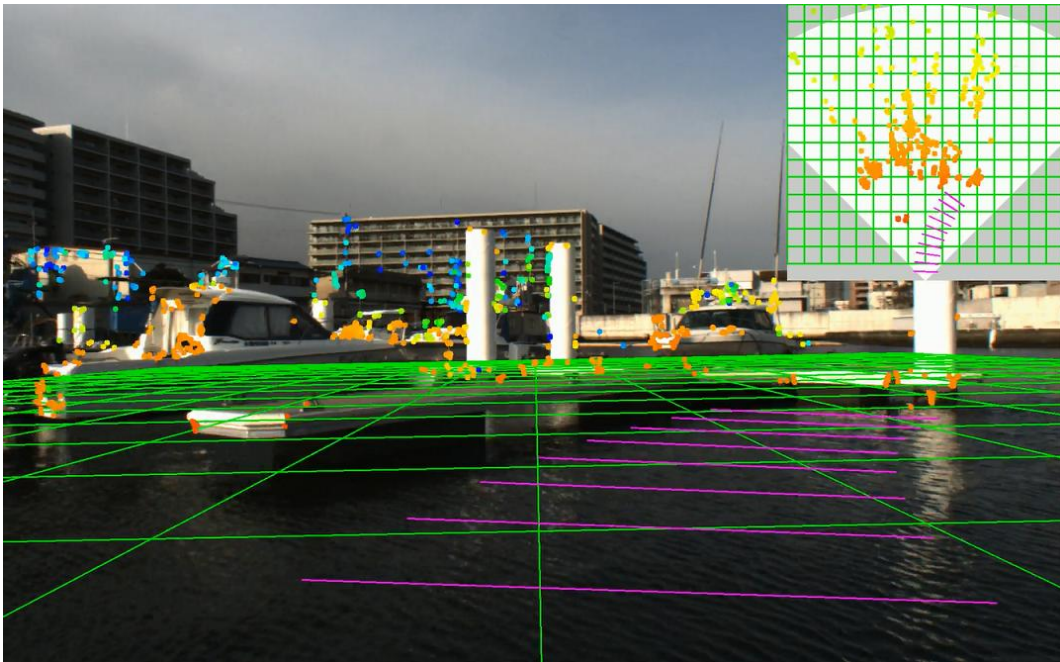


図 33 拡張現実感を用いた着棧支援システム

【自由視点表示】

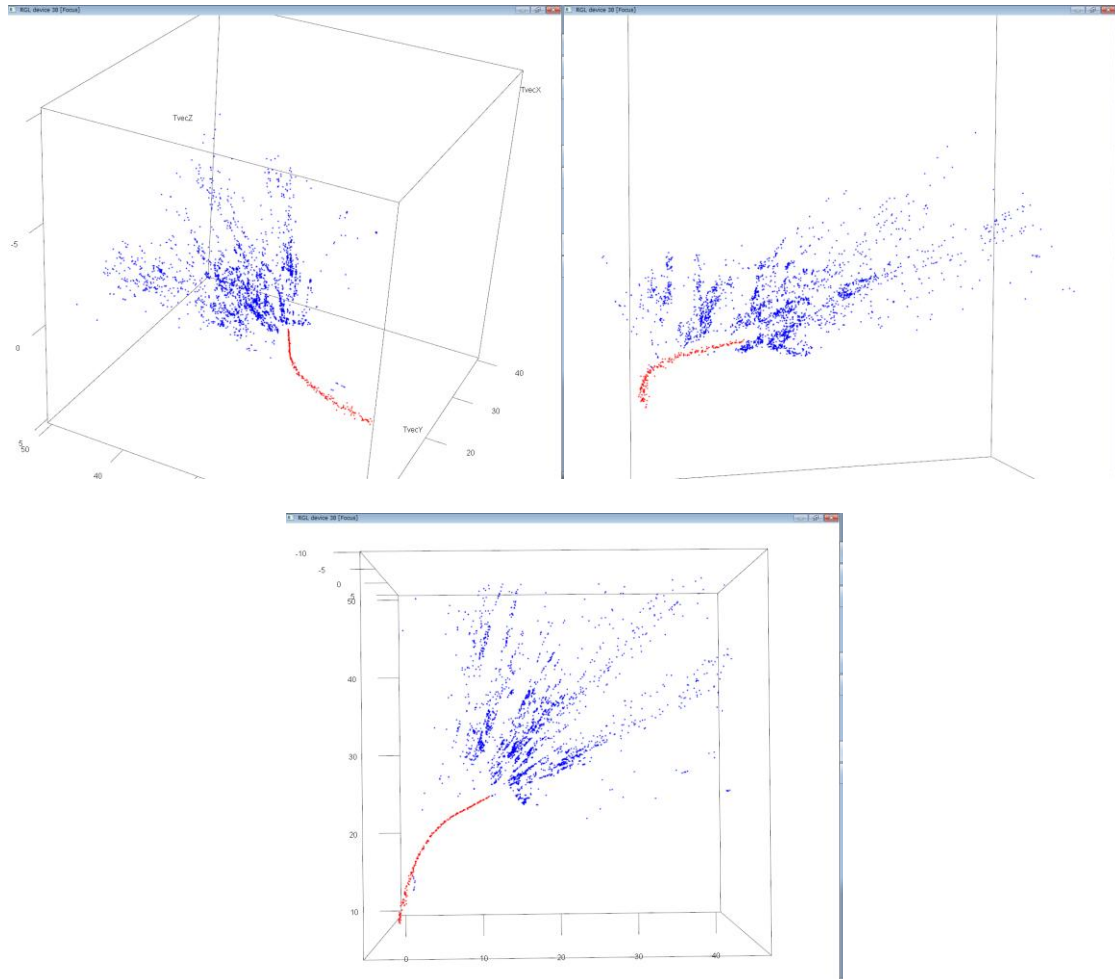


図 34 自船の軌跡と 3 次元構造復元結果の自由視点表示

## 6. 結論

本章では，本研究全体を総括し，着棧支援システムの実用化と，自動運航船のための自動着棧システムの確立に向けた今後の展望について述べる．

### 6.1 本研究のまとめ

本研究では，着棧支援システムに使い，将来的には自動着棧システムにも使える，高精度な測位技術の構築を目的とし，単眼カメラとGNSSコンパスの融合により高精度に船体の軌跡を推定する技術を提案した．第1章では，着棧操船の現状として，国内の海運業界では操船者の人手不足と高齢化が進んでいること，経験不足や高齢の操船者にとって，特に着棧操船は難易度が高いことから，着棧操船を支援するシステムが望まれていることを述べた．また，自動着棧には着棧位置に対する自船の相対位置精度10 cmが求められており，その実現には，自船の軌跡（位置姿勢）と着棧位置をそれぞれ10 cm以下の精度で求める必要があることを述べた．さらに，自動着棧に必要な高精度な位置を提供する現状の航海機器はないことを述べた．第2章では，着棧操船の支援に用いられる従来の航海機器を概観した．GNSSコンパスを用いれば，速度や方位（姿勢）などの自船の運動情報を高精度に提供でき，単眼カメラを用いれば，周辺の状態を監視しつつ，拡張現実感による着棧支援システムを実現できることを述べた．第3章では，従来の動画像への情報重畳技術と軌跡推定技術について述べた．着棧支援に用いる拡張現実感技術として，岸壁や棧橋の絶対位置や形状の情報，あるいは，マーカなどのインフラ構築が不要な，ビジョンベース方式が適していることを述べた．また，ビジョンベース方式に用いられるVO，並びに，GNSSコンパスに用いられるGNSS，及び，GNSS/INSの技術を示した．さらに，それぞれの従来技術の課題を整理し，本研究のアプローチを示した．第4章では，GNSSコンパスの性能を向上する手法を提案した．GNSSコンパスを構成する4機の受信機のクロックを共通化した．1つは，姿勢決定について，6本の短い基線ベクトルとIMUを利用して姿勢決定を高速化した．もう1つは，信号伝播時間の受信機内遅延差を推定して，一重位相差とIMUのTCにおいてGNSS/INS姿勢推定に必要であった衛星数の条件を4機から1機まで緩和し，6本の基線ベクトルを利用して姿勢推定をロ

バスト化した結果を示した。第5章では、単眼カメラとGNSSコンパスを融合して自船の軌跡を推定する手法を提案した。具体的には、搬送波位相速度を積算して算出した高精度な軌跡を用いてVOのスケールを推定する手法と、一重位相差とIMUのTCを用いて算出した姿勢と搬送波位相の変化量のTCを用いて算出した軌跡を融合してVOのドリフトを補正し、高精度な軌跡を得た結果を示した。これらの手法によって、受信機4機の中で重複しない衛星4機で速度の継続を可能にした。さらに、提案手法による自船の軌跡推定技術を用いた着棧支援のための拡張現実感システムを提案した。

本研究では、4機のアンテナと4機で共通化したクロックを持つ受信機、及び、6軸のIMUで構成したGNSSコンパスを提案した。この構成を利用し、4機の衛星を最短1回（1秒）観測して姿勢決定する高速化手法と、最少1機の衛星で姿勢推定の継続を可能にするロバスト化手法を提案した。さらに、このGNSSコンパスと単眼カメラを融合する手法を提案した。この融合によって約10 cmの高精度な船体の軌跡推定を実現した。

## 6.2 今後の展望

本論文では，単眼カメラとGNSSコンパスの融合によって港湾側の基準局やインフラ情報を用いずに船体の軌跡を精度10 cmで得られたことを示した．着棧支援システムの実用化に向け，センサ融合に用いたEKFの観測雑音やシステム雑音の最適なパラメータを設定し，大型船の環境における精度を評価する．また，拡張現実感を用いた着棧支援の有効性を実際の操船者のユーザスタディにより確認し，距離情報の提示についてユーザインターフェースを改善する．リアルタイムシステムの実現には，VOの画像処理の高速化が課題である．特に，BAについて，大型船向けの最適なパラメータを設定し，高精度に着棧位置を求める手法を確立する．加えて，画像処理の耐環境性向上，あるいは，ステレオカメラ，赤外線カメラ，ミリ波レーダー，LIDARなど他の周辺監視センサとの融合技術も検討し，悪天候でも使えるシステムの構築を目指す．さらに，GoogleのVPS (Visual Positioning System) に代表される位置情報と動画像情報との紐付けと，Google Lens[54]のような画像認識技術によって着棧位置を認識し，着棧位置とそれに付随する操船支援情報を提供するアプリケーションの展開も検討する．



## 謝辞

本論文は、筆者が古野電気株式会社に勤務しながら、奈良先端科学技術大学院大学の博士後期課程に在学していた期間に論文発表した研究成果をまとめたものである。研究成果は、周囲の多くの方々のご協力によるものであり、ご協力頂いた皆様には心より感謝の意を表したいと思えます。

初めに、筆者の突然の研究室訪問から進学の受け入れを許可いただき、主指導教員としてご指導ご鞭撻を受け賜りました、インタラクティブメディア設計学研究室 加藤博一 教授に心より感謝いたします。本研究の立ち上げから、温かいご指導と多くのご助言を賜りましたことに深く感謝いたします。同じく、本研究において、副指導教員としてご指導ご鞭撻を受け賜りました、武富 貴史 客員准教授には本研究で重要な役割を持つコンピュータビジョン技術の獲得において多大なご支援ご助言を賜りましたことに心より感謝いたします。

本研究についてのご助言を賜りました、本論文の審査委員である光メディアインタフェース研究室 向川 康博 教授、インタラクティブメディア設計学研究室 神原 誠之 准教授に心より感謝いたします。

インタラクティブメディア設計学研究室の Alexander Plopski 助教には、特に国際会議論文発表において、ご助言ご指導を頂いたことに心より感謝いたします。Christian Sandor 准教授（現 香港城市大学）には、本学の入学から本研究立ち上げのきっかけを頂いたこと、加藤先生をはじめとする本学の先生方、世界中の研究者の方々との繋ぎ役を果たして頂いたことに心より感謝いたします。

インタラクティブメディア設計学研究室の秘書様方には事務手続きにおいて様々なお世話いただきましたこと、心より感謝いたします。また、学生の皆様には、社会人である筆者を研究室メンバーとして温かく迎え入れ、また、論文発表前には様々なご助言を頂いたこと、心より感謝いたします。

最後に、古野電気株式会社 研究部でご指導いただいた上司の皆様、航法システム研究室 藤澤 奈緒美 室長、戸田 裕行 主研、鳥居 勇人 主研、辻本 一喜 氏、園部 達也 氏には、大学院通学や長期出張でご迷惑をおかけすることがありました。また、海上実験や実験データ解析のご協力、実験結果について議論など、多大なるご支援を賜りましたこと、心より感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 一般社団法人 日本船主協会 統計データ <<https://www.jsanet.or.jp/data/data.html>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [2] Japan P&I Club ロスプリベンションガイド第 31 号港湾設備損傷防止と港内操船 Part 1
- [3] Japan P&I Club ロスプリベンションガイド第 32 号港湾設備損傷防止と港内操船 Part 2
- [4] Japan P&I Club ロスプリベンションガイド第 33 号大型事故分析と傾向
- [5] J. Oh, S. Park, and O. S. Kwon, “Advanced Navigation Aids System Based on Augmented Reality,” *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, Vol.5, pp. 21-31, 2016.
- [6] J. M. Lee, K. H. Lee, D. S. Kim, B. W. Nam, and R. Li, “Image-Based Ship Pose Estimation for AR Sea Navigation,” *Advanced Science and Technology Letters, Software*, Vol.58, pp.14-20, 2014.
- [7] 国土交通省 平成 30 年 7 月 25 日報道発表資料
- [8] 日本造船研究協会：2.2 章 自動離着棧システム，高度自動化運航システムの研究開発総合報告書，1989.3.
- [9] 内閣府 みちびきウェブサイト「衛星測位入門」 <<http://qzss.go.jp/column/index.html>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [10] 古野電気株式会社, GPS プロッタ <<https://www.furuno.com/jp/products/chartplotter>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [11] 古野電気株式会社, ECDIS <<https://www.furuno.com/jp/products/ecdis>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [12] Japan P&I Club ロスプリベンションガイド第 39 号電子海図情報表示装置 (ECDIS)
- [13] 横河電子機器株式会社, 電磁ログ <<https://www.yokogawadenshikiki.co.jp/jp-ydk/mr/marine/emlog>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [14] 古野電気株式会社, 船速計 <<https://www.furuno.com/jp/products/speedlog>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [15] 横河電子機器株式会社, ジャイロコンパス

- <<https://www.yokogawadenshikiki.co.jp/jp-ydk/mr/marine/gyro>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [16] 古野電気株式会社, サテライトコンパス <<https://www.furuno.com/jp/products/compass>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [17] 古野電気株式会社, レーダー <<https://www.furuno.com/jp/products/radar>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [18] レイマリン, Docksense <<http://www.raymarine.com/docksense>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [19] 星野邦弘, 原正一, 加納敏幸, 川島英幹, “CCD カメラを用いた接岸速度計の開発と評価試験,” 独立行政法人海上技術安全研究所研究発表会講演集, Vol. 5, pp. 19-24, 2005.
- [20] フリーシステムズ, 赤外線サーマルカメラ <<https://prod.flir.jp/applications/marine>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [21] Neptec Technologies, OPAL Marine Lidar <<http://www.neptectechnologies.com/marine-lidar>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [22] ヴァイサラ, 風向風速計 <<https://www.vaisala.com/ja>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [23] 古野電気株式会社, 潮流計 <<https://www.furuno.com/jp/products/currentIndicator>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [24] D. Nister, O. Naroditsky, and J. Bergen, “Visual Odometry,” IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 1, pp. 652-659. 2004.
- [25] Klein, G., and Murray, D., “Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces,” IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 1-10, 2007.
- [26] R. Mur-Artal, J. M. M. Montiel, and J. D. Tardos, “ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System,” IEEE Transactions on Robotics, Vol. 31, No. 5, pp. 1147-1163, 2015.
- [27] H. Uchiyama, T. Taketomi, S. Ikeda, and Monte Lima, J. P. S. do, “Abecedary Tracking and Mapping: a Toolkit for Tracking Competitions,” IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 198-199, 2015.
- [28] P. J. G. Teunissen, “The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation,” Journal of Geodesy, Vol. 70, pp. 65-82, 1995.
- [29] P. J. G. Teunissen, P. J. D. Jonge, and C. C. J. M. Tiberius, “Performance of the

- LAMBDA Method for Fast Ambiguity Resolution,” NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation, Vol. 44, No. 3, pp. 373-383, 1997.
- [30] J. Engel, T. Schöps, and D. Cremers, “LSD-SLAM: large-scale direct monocular SLAM,” European Conference on Computer Vision, pp. 834-849, 2014.
- [31] J. Engel, V. Koltun, and D. Cremers, “Direct Sparse Odometry,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 40, No. 3, pp. 611-625, 2018.
- [32] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige and G. Bradski, “ORB: An Efficient Alternative to Sift or Surf,” IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 2564-2571, 2011.
- [33] B. D. Lucas, and T. Kanade, “An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision,” International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 674-679, 1981.
- [34] 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.
- [35] M. I. A. Lourakis, and A. A. Argyros, “SBA: A Software Package for Generic Sparse Bundle Adjustment,” ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 36, No. 1, Article No. 2, 2009.
- [36] M. Fischler, and R. Bolles, “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications To Image Analysis and Automated Cartography,” Communications of the ACM, Vol. 24, No. 6, pp. 381-395, 1981.
- [37] T. Taketomi, H. Uchiyama, and S. Ikeda, “Visual-SLAM Algorithms: a Survey from 2010 to 2016,” IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2017.
- [38] 張替正敏, 辻井利昭, 村田正秋, 新宮博公, “搬送波位相 DGPS/INS 複合航法アルゴリズムの開発,” 航空宇宙技術研究所報告 1416 号, 2000.
- [39] R. Hirokawa, and T. Ebinuma, “A Low-Cost Tightly Coupled GPS/INS for Small UAVs Augmented with Multiple GPS Antennas,” NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation, Vol. 56, No. 1, pp. 35-44, 2009.
- [40] T. Suzuki, Y. Takahashi, and Y. Amano, “Precise UAV Position and Attitude

- Estimation by Multiple GNSS Receivers for 3D Mapping,” International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 1455-1464, 2016.
- [41] 武山 洪二郎, 小島 祥子, 目黒 淳一, 岩瀬 竜也, 寺本 英二, “GPS ドップラー/INS タイトカップリングによる走行軌跡推定の提案,” 自動車技術会論文集, pp. 199-204, 2013.
- [42] G. Nützi, S. Weiss, D. Scaramuzza, and R. Siegwart, “Fusion of IMU and Vision for Absolute Scale Estimation in Monocular SLAM,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 61, No. 1-4, pp. 287-299, 2011.
- [43] M. Bloesch, M. Burri, S. Omari, M. Hutter, R. Siegwart, “IEKF-based Visual-Inertial Odometry using Direct Photometric Feedback,” *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 36, No. 10, pp. 1053-1072, 2017.
- [44] S. Leutenegger, S. Lynen, M. Bosse, R. Siegwart, and P. Furgale, “Keyframe-Based Visual-Inertial Odometry Using Nonlinear Optimization,” *The International Journal of Robotics Research* Vol. 34 No. 3, pp. 314-334, 2015.
- [45] G. Schall, D. Wagner, G. Reitmayr, E. Taichmann, M. Wieser, D. Schmalstieg, and B. Hofmann-Wellenhof, “Global Pose Estimation Using Multi-Sensor Fusion for Outdoor Augmented Reality,” *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 153-162, 2009.
- [46] 桑 秀行, 穴井 哲治, 佐藤 智和, 武富 貴史, 高地 伸夫, 横矢 直和, “信頼度を考慮した GPS 測位情報の併用による動画像からのカメラ位置・姿勢推定,” 画像電子学会誌, pp. 35-43, 2014.
- [47] D. P. Shepard, and T. E. Humphreys “High-Precision Globally-Referenced Position and Attitude via a Fusion of Visual SLAM, Carrier-Phase-Based GPS, and Inertial Measurements,” *IEEE/ION Positioning, Location and Navigation Symposium*, pp. 1309-1328, 2014.
- [48] A. Soloviev, and D. Venable, “Integration of GPS and Vision Measurements for Navigation in GPS-Challenged Environments,” *IEEE/ION Positioning, Location and Navigation Symposium*, pp. 826-833, 2010.
- [49] A. B. Afia, A.C. Escher, C. Macabiau, and S. Roche, “A GNSS/IMU/WSS/VSLAM Hybridization Using an Extended Kalman Filter,” *ION Pacific PNT Meeting*, pp.

719-732, 2015.

- [50] P. Henkel, and P. Burger, “Multi-Sensor Fusion of GNSS Receivers, Inertial Sensor and Cameras for Precise and Reliable Positioning,” Conference on Future Automotive Technology, pp. 1-5, 2015.
- [51] U. Niesen, J. Jose, and X. Wu, “Accurate Positioning in GNSS-Challenged Environments with Consumer-Grade Sensors,” International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 503-514, 2018.
- [52] 平田法隆, 西嶋孝典, 垣野文彦, “画像処理技術を用いた着離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.
- [53] 平田法隆, 下赤洋介, “画像処理技術を用いた着離棧操船支援,” 日本航海学会講演予稿集, 第 137 回講演会 5 巻 2 号, pp. 158-160, 2017.
- [54] Google Lens , <<https://lens.google.com/intl/ja/>> (最終アクセス日 2019/8/1)
- [55] 中村拓, 藤澤奈緒美, 特許第 6310202 号 状態算出装置、移動体、状態算出方法、および状態算出プログラム
- [56] H. Nakamura, H. Toda, N. Fujisawa, and T. Kashiwa, “Robust Attitude Determination Using GNSS Multi Baseline Carrier Phase and IMU Sensor Fusion,” International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 3102-3110, 2017.
- [57] H. Nakamura, T. Sonobe, H. Toda, N. Fujisawa, T. Taketomi, A. Plopski, C. Sandor, and H. Kato, “Fusion of VSLAM/GNSS/INS for Augmented Reality Navigation in Ports,” International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 1765-1775, 2018.
- [58] 中村 拓, 園部 達也, 戸田 裕行, 藤澤 奈緒美, 武富 貴史, Alexander Plopski, Christian Sandor, 加藤 博一, “着棧支援のための 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, 10 巻, pp. 1-12, 2019.
- [59] H. Strasdat, J. M. M. Montiel, and A. J. Davison, “Visual SLAM: Why Filter?,” Image and Vision Computing, Vol. 30, No. 2, pp. 65-77, 2012.
- [60] H. Strasdat, J. M. M. Montiel, and A. J. Davison, “Scale Drift-Aware Large Scale Monocular SLAM,” Robotics: Science and Systems, pp. 73-80, 2010.
- [61] N. Antigny, M. Servières, and V. Renaudin, “Fusion of 3D GIS, Vision, Inertial

- and Magnetic Data for Improved Urban Pedestrian Navigation and Augmented Reality Applications,” *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 65, No. 3, pp. 431-447, 2018,.
- [62] A. I. Mourikis, and S. I. Roumeliotis, “A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3565-3572, 2007.
- [63] K. Itani, T. Hayashi, and M. Ueno, “Low-Cost Wave Sensor Using Time Differential Carrier Phase Observations,” *International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, pp. 1467-1475, 2000.
- [64] T. Kashiwayanagi, Y. Koura, K. Ogawa, H. Suzuki, and M. Nakamura, “Fast Ambiguity Resolution by a Combined System of Multiple-Baseline Equations,” *International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation* pp. 286-291, 2006.
- [65] P. Buist, “The Baseline Constrained LAMBDA Method for Single Epoch, Single Frequency Attitude Determination Applications,” *International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation* pp. 2962-2973, 2007.
- [66] G. Falco, M. C. Gutiérrez, E. López Serna, F. Zacchello, and S. Bories, “Low-cost Real-time Tightly-Coupled GNSS/INS Navigation System Based on Carrier-phase Double differences for UAV Applications,” *International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation* pp. 841–857, 2014.
- [67] D. Willi, M. Meindl, H. Xui, and M. Rothacher, “GNSS Antenna Phase Center Variation Calibration for Attitude Determination on Short Baselines,” *International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation* pp. 3997-4010, 2018.
- [68] G. Pascoe, W. Maddern, M. Tanner, P. Pini’es, and P. Newman, “NID-SLAM: Robust Monocular SLAM Using Normalised Information Distance,” *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1435-1444. 2017.
- [69] D. Nister, “An Efficient Solution to the Five-Point Relative Pose Problem,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 26, No. 6, pp.

756-777, 2004.

- [70] A. J. Davison, I. D. Reid, N. D. Molton, and O. Stasse “MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 29, No. 6, pp. 1052-1067, 2007.
- [71] U. Niesen, V. N. Ekambaram, J. Jose, L. Garin, and X. Wu, “Robust Positioning from Visual-Inertial and GPS Measurements,” *International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, pp. 788-793, 2016.
- [72] 神原誠之, 横矢直和, “RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感システム,” *画像の認識・理解シンポジウム講演論文集*, pp. 933-938, 2005.
- [73] 武富貴史, 佐藤智和, 横矢直和, “拡張現実感のための優先度情報を付加した自然特徴点ランドマークデータベースを用いた実時間カメラ位置・姿勢推定,” *電子情報通信学会論文誌*, pp. 1440-1451, 2009.
- [74] 武富貴史, 佐藤智和, 山口晃一郎, 横矢直和, “AR カーナビゲーションのためのランドマークデータベースを用いた高精度な自車位置・姿勢の推定,” *電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集*, pp. 917-920, 2009.
- [75] 岡谷貴之, “バンドルアジャストメント,” *情報処理学会研究報告*, pp. 1-16, 2009.
- [76] 岩元祐輝, 菅谷保之, 金谷健一, “3次元復元のためのバンドル調整の実装と評価,” *電子情報通信学会技術研究報告*, pp. 107-114, 2011.
- [77] P. Misra, and P. Enge 原著, 測位航法学会訳 “GLOBAL POSITIONING SYSTEM Signal, Measurements, and Performance, 精説 GPS”
- [78] R. Azuma, “A Survey of Augmented Reality,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.
- [79] S. You, U. Neumann, R. Azuma, “Orientation Tracking for Outdoor Augmented Reality Registration,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 19, No. 6, pp. 36-42, 1999.



## 研究業績

### 学術論文誌

- 1 中村 拓, 園部 達也, 戸田 裕行, 藤澤 奈緒美, 武富 貴史, Alexander Plopski, Christian Sandor, 加藤 博一,  
“着栈支援のための 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, 10 巻, pp. 1-12, 2019 年 5 月,  
(本論文 5 章 1 節, 及び, 2 節に対応)

### 国際会議論文

- 1 Hiraku Nakamura, Tatsuya Sonobe, Hiroyuki Toda, Naomi Fujisawa, Takafumi Taketomi, Alexander Plopski, Christian Sandor, and Hirokazu Kato,  
“Fusion of VSLAM/GNSS/INS for Augmented Reality Navigation in Ports”,  
Proceedings of the 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018),  
pp. 1765-1775, September 2018,  
(本論文 5 章 1 節, 及び, 3 節に対応)
- 2 Hiraku Nakamura, Hiroyuki Toda, Naomi Fujisawa, and Takuo Kashiwa,  
“Robust Attitude Determination Using GNSS Multi Baseline Carrier Phase and IMU Sensor Fusion”,  
Proceedings of the 30th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017),  
pp. 3102-3110, September 2017,  
(本論文 4 章に対応)