

自動化船向け高精度三次元地図に関する研究

浅里幸起*, 清水悦郎†, 梅田綾子†, 立木友之†, 中村海斗†

*宇宙システム開発利用推進機構, †東京海洋大学

Abstract This paper presents study on high-accuracy map of inland waterway, rivers, estuary, and canals (waterways map) towards automated ships, based on the comparison with maps for emerging automated vehicles on the road. As a result, it can be proposed to develop the waterways map of digital data with 25 to 50 centimeter accuracy for automated ships, using a MEMS LiDAR sensor integrated with other sensors.

1. はじめに

本研究は、自動航行技術を搭載した船舶すなわち自動化船による水上交通システムの実現を目指し、実現のための重要な要素の一つとして水路に関する高精度三次元地図の開発を推進するものである。一般に船舶周囲の状況を認識するためにはカメラと人工知能

(AI) を組み合わせた技術の利用が提案されているが、ブイや橋などの固定障害物は既知の障害物として扱えるものであり、信頼できる位置、形状に関する情報があれば、予め避けるように船舶を航行させることが出来る。また、船舶を航行させる際には水深の情報も重要であるが、内部河川においてはそのような情報が十分に提供されていない。そこで自動化船が使用する高精度三次元地図が必要とする仕様を明らかにし、実際の水路を計測してデータを取得し、当該地図が実現するべき精度について、その妥当性と実現性を考察する。

近年、渋滞している高速道路上という制限はあるものの、運転者が動作や周辺を常時監視していない状況で自動車を走行させるといふ、レベル3の自動運転システムを搭載した自動車が市販されるなど、自動運転技術の開発が国内外を問わず積極的に行われている。

同時に、自動運転技術の開発は単に自動車を搭載される技術の開発だけでなく、自動運転を支える高精度3次元地図整備も進められている。このような自動運転技術の開発は、自動車だけでなく船舶に対しても進められており、実証実験も開始されている^[1,2]。

一方、船舶に対する地図という観点では、Electronic Nautical Chart (電子海図)、Inland Electronic Navigational Chart など電子化は進められているが、これらの地図は、基本的に既存の地図を電子化したというだけであり、自動運転技術との連携を考慮したものとはなっていない^[3]。例えば、水面上には道路における車線を示すような表示はないため、地図上にその代替となるような航路の情報があれば自動運転は格段に楽になると考えられるが、そのような情報を提供するという事は、一部の狭水路等を除いてなされていない。なお、本論文における航路とは、海上交通安全法等の法令に定める航路に限ら

ず、船舶の航行が可能な通路と定義する。

このような状況を受け、自動化船による水上交通システムの実現を目指す第一段階として、自動化船に向けた高精度三次元地図に関する研究を推進している。自動車分野において、高速道路等に関しては既に整備が進められている自動運転のための道路地図と比較し、都市開発におけるウォーターフロントの整備という観点も考えて研究を進めており、本論文では現時点までの成果をまとめた。

2. 水路地図の必要性

はじめに水路地図の必要性についてまとめるにあたり、本稿で用いる水路地図という言葉进行を定義する。一般に水路地図というと地下水路や各種用水路に関する地図のことを想像される方が多いと思われる。また、船舶に対しては、洋上を航行する場合は海図と呼ばれる水深や航路が表示されている海の地図が用いられている。一方、河川や運河において船舶が航行するための地図に関しては、欧米においては Inland Electronic Navigational Chart が整備されている場所もあるが、日本においてはほとんど整備されていない。

このため本稿では、自動化船の実現を目指すための地図整備にあたり、海洋、港湾、運河、河川等を含め船舶が航行できる場所という意味で「水路」という言葉を用い、水路やその他、海洋、港湾、運河、河川等を利用するにあたり有用な情報が掲載された地図という意味で「水路地図」という言葉を用いることとする。並行して進められている自動運転のための自動車用道路地図の整備と比較して論ずることとする。

自動車用道路の場合、自動運転のための地図の必要性は、次のような観点による。まず、自動車の運転においてカーブの先、坂を越えた所は見えないため、走行制御のために「先読み」が必要となる。このためには、地図が不可欠である。また、道路内の自己位置を必要とし、道路のどこにいるのか、安全のために高精度に把握する必要がある。

一方、船舶の自動航行においては、まず水中や航路空間内の障害物を把握する必要がある。水上に存在する障害物として代表的な橋脚や橋桁の位置情報が必要となる。しかし、水面下に存在する障害物は位置や形状等を把握することは困難である。また、障害物を回避するために水路内における自己位置を把握しなければならない。

しかしながら、特に都市部においては水路がビル等に囲まれていること等により GNSS による測位データが不正確となる場合も多数発生する。カメラや LiDAR 等の光学的なセンサを用いる際には水面のつくる偽像の妨げを回避する必要がある。これらの状況において、センサ情報だけで航行することは難しく、地図なしの運航は考えにくいといえる。したがって、水路地図は不可欠なものといえる。

3. ダイナミックな水路地図の概念

水路地図は、実際の水路の状況を反映したものである。しかし、実際の状況は時間と共

に変化する要素も少なくない。このため、ダイナミックな状況変化を反映する地図の研究開発を進めている。この概念は図1に示すとおりである。

船舶の運航では、移動に伴ってリアルタイム（実時間）に変化する情報が必要である。水路の構造物は基本的には変化せず、静的と見ることができる。これを基盤情報と考え、高精度3次元地図によって形成する。

これに対して、実際にリアルタイムで変化する自他の船舶や水位等は、動的情報である。準動的情報とは、規制や工事の情報など日々変化する情報をいう。また、準静的情報は、更に周期が長い週や月の単位で変化する情報をいう。

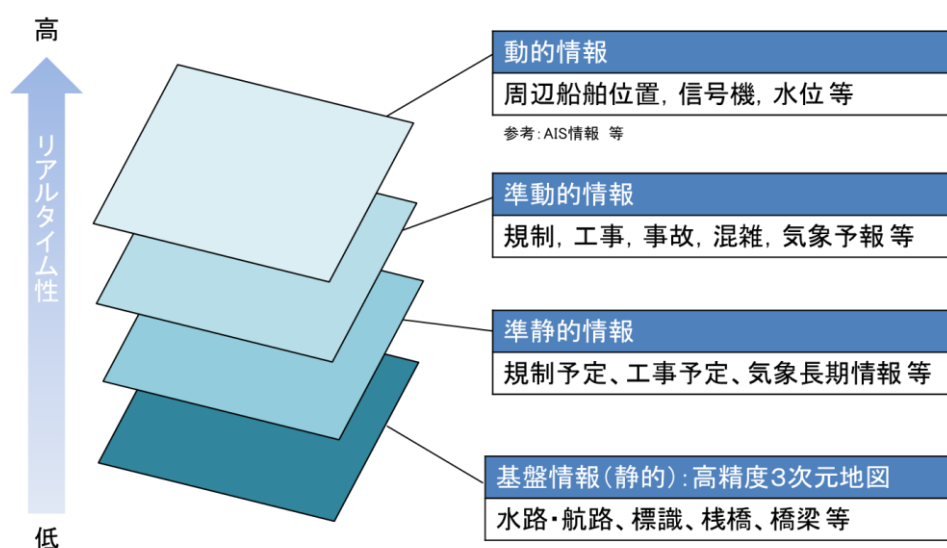


図1 ダイナミックな水路地図の概念

ダイナミックな水路地図の概念には、リアルタイム性が低いものから高いものを含み、大きく分けて4つの段階が考えられ、基盤情報としては静的な高精度3次元地図である。準静的情報は1カ月ごとに変わっていくような、規制や工事の予定等が分類される。さらに毎日変化していく準動的情報および周辺の船舶の位置など時々刻々と変わっていく動的情報などに分類できる。実際の水路の利用では、これらすべての階層の情報が必要である。

4. 自動化船の水路地図の概念

自動化船の航行をするための水路地図に必要な要素について調査をした。

河川の水路を航行するためには、橋梁の位置や橋げたの高さを把握する必要がある。特に水位の変化に対応して、相対的な橋桁の高さが把握される必要がある。橋梁の位置は、船舶の運航に最も適する位置・形状に設置されているとは限らない。運航のためには、正

確な高さを必要とする。

また、自動離着棧のためには、棧橋の位置が必要である。棧橋には固定されたものと不浮動式で位置が可動範囲内で変化するものがある。また、水平位置は固定されているが、水位の変化で高さが変わる仕組みのものが設置されている場合がある。

このように必要な要件を総合的にまとめ、三次元水路地図に必要な要素を図2に描いた。橋脚の位置、橋桁の高さと形状、棧橋の位置、進入禁止エリア（区画線）、推奨される航路などの情報が必要である。区画線に対応する仮想地物として区画リンク、船舶の通路に対応する仮想地物として航路リンクを規定する。

ここで規定する仕様は、既に確立されている自動車の自動運転地図の開発で得られたノウハウを取り入れたものであり、移動体を制御するために必要となった要素を考慮しているが、今後、船舶の実験を積み重ねてよいブラッシュアップしていく可能性がある。

図2において、黄色実線は橋梁底面すなわち高さ、橙色実線は棧橋線、緑色実線は船舶の入れない区画リンク、水色点線は通路リンクを表わしており、これらの用語は表1と対応している。



図2 高精度三次元地図の概念図

水路の高精度三次元地図に必要な要件の案は、表1に示すとおりである。この要件は、自動化船が航行するために必要な情報を備えている。その情報には、橋梁の底面の高さ、橋脚の位置、棧橋線など自動航行時に必要な実在地物の情報と共に、必要とされる仮想地物のデータを含むものである。これらをデータ要素として表現できるよう整備する予定である。仕様をまとめて自動化船の研究に役立つ Hydrography Markup Language を規定していく予定である。

表1 地図の要件(案)

区分	地物名	説明	備考
実在地物	橋梁底面	船上部と相対する面(高さ, 形状)	*
	橋脚位置	水路の障害となる橋脚の位置	*
	栈橋線	栈橋において船体と接する線	*
	浮栈橋線	浮栈橋において船体と接する線	
	岸壁線	岸壁において船体と接する線	
	標識		
	信号		
仮想地物	水路リンク	水路の物理的なつながりを表すリンク	
	航路リンク	推奨される船舶の通路を表すリンク	*
	区画リンク	水路の限界(区画線)を表すリンク	*

(注)*: 日本橋実験の対象(案)

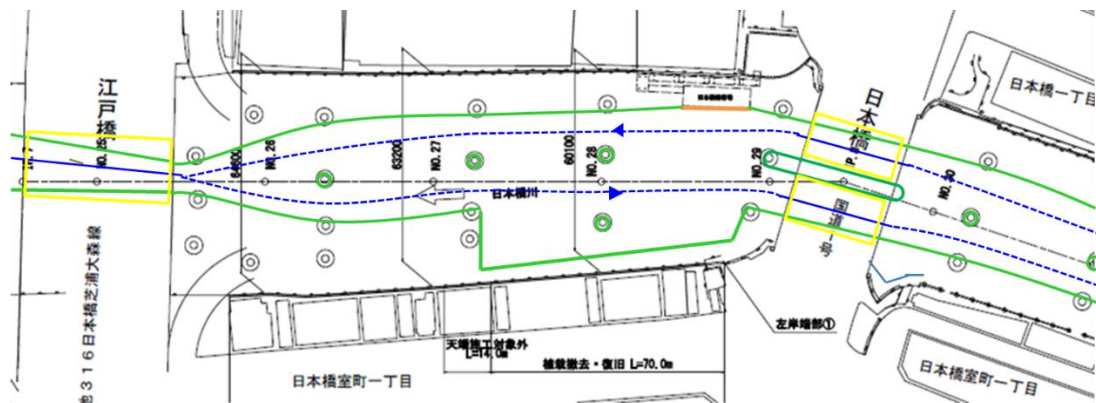
5. 水路地図の調製に向けて

自動化船のための水路地図の調製に向けて、水路地図の種類に関して表2のように整理した。操船できる資格を持つ者が乗船、非乗船に関わらず自動化船では、定まった航路を進むものと自由航行のものがあると考えられるが、それぞれに対応して2種類の水路図を想定することができる。つまり、地図の調製において、航路をベースに調製していく方法 (Type-1) と、地形をベースに調製していく方法 (Type-2) の二つがあると考えられる。目的に応じて選択する必要がある。

表2 自動航行に関する水路地図の分類

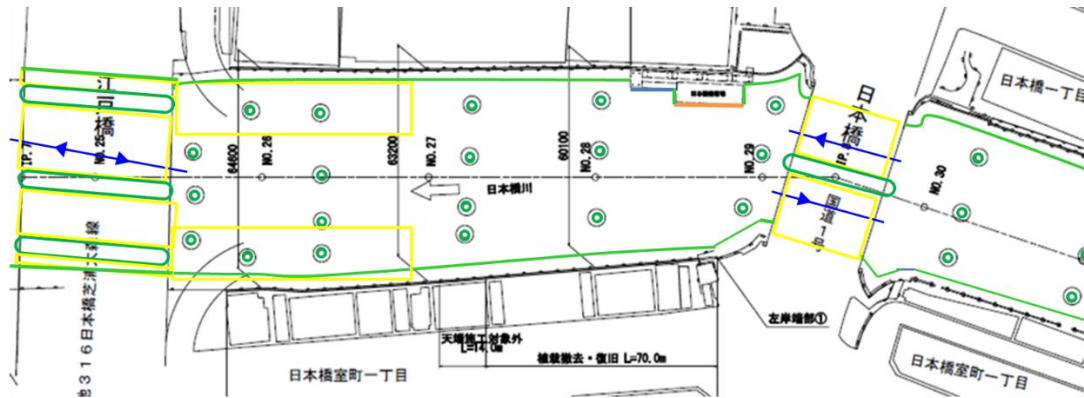
項目		船員		水路図
		あり	なし	
操船方法	人が操船	人が乗って操船する船	—	従来型水路図
	定まった航路	自動運航船	無人運航船	自動航行用 水路図 (Type I: 航路型)
			遠隔操縦 自律運航	
	自由航行	遠隔操縦船	無人遠隔操縦船	自動航行用 水路図 (Type II: 地形型)
自律航行船		無人自律航行船		

実験エリアとして想定する東京・日本橋エリアにおいて、既存の地図を用いて、必要な要素を描いたものを図3に示す。実際に航行できるエリア又はコースは橋脚や栈橋等が存在するために限定的なものとなり、船舶の大きさによっても異なることがわかる。これらの知見をあらかじめ地図データとして整備しておくことには意味があるといえる。



工事図面: 東京都

(a) Type-I : 航路型



工事図面: 東京都

(b) Type-II : 地形型

図3 地図作りの考え方

図3では図2と同様に、黄色実線は橋梁底面の高さ、橙色実線は栈橋線、緑色実線は船舶の入れない区画リンク、水色点線は航路リンクを表わしている。

6. システム構成と計測

橋や栈橋等の水上に存在する構造物に対する計測を行う計測システムの構成として考えられる形態は、図4のとおりである。MEMS LiDARを用いて複合計測系を構成したものである。MEMSとはMicro-ElectroMechanical Systemsの略語である。光軸を整合させたカメラも複合し、高精細画像でRGB色彩情報も取得するものとする。絶対的な座標は、従来から測量に用いられているGPSのみならず準天頂衛星システム「みちびき」の高精度測位サービスや、近年登場した通信事業者の高精度位置情報サービスを活用する。また、衛星が見えない場所や船舶の姿勢を取得するために、慣性航法計器を複合する^[4]。

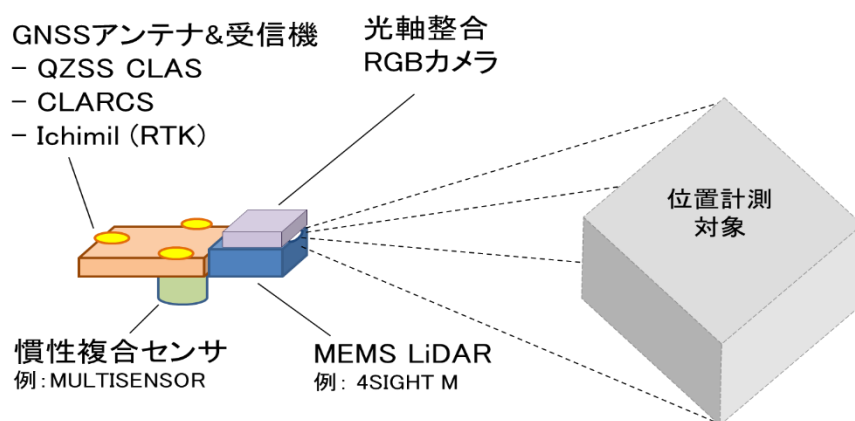


図4 MEMS LiDAR 複合マッピングシステムの概念構成

MEMS LiDARとしては米AEye社製の4SIGHT Mを使用した。この測定機器の技術仕様は表3のとおりである。また、水中の計測については、河川管理のために活用されているグリーンレーザ点群測量など他のセンサの利用を想定している。

表3 MEMS LiDARの技術仕様

No	項目	性能
1	距離レンジ	1 cm to 1000 m
2	角度レンジ	水平60° 垂直30°
3	角度分解能	0.1°
4	最大更新周期	200Hz

4SIGHT Mを使用した計測結果データを図5に示す。計測日は2020年12月20日、場所は東京都の日本橋川である。水路の各部について写真とレーザ点群を取得したものである。上の画像が4SIGHT Mによるレーザ点群、下の画像は視線を合わせたカメラ画像である。河川の上に首都高が設置されている区間を含んでいる。なお、日本橋付近の首都高

速道は今後撤去される計画であり、既に一部の工事が開始されている。

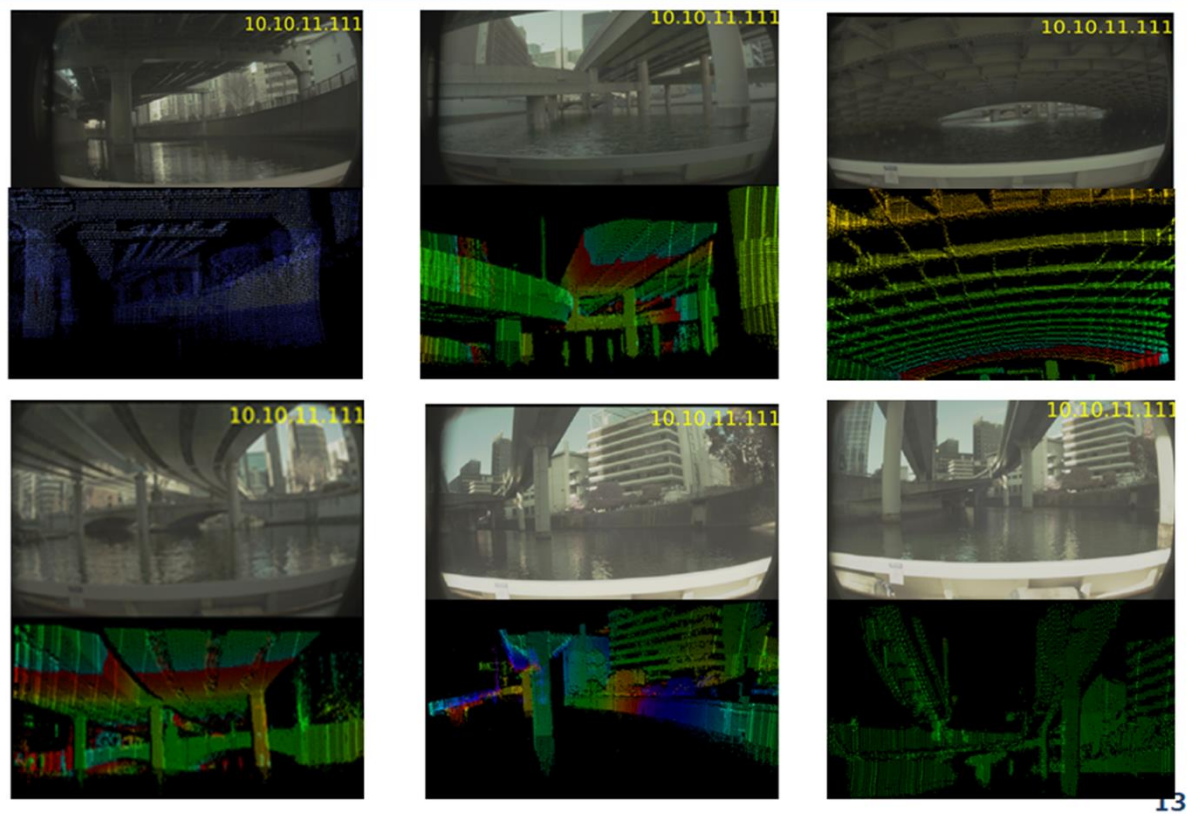


図5 計測結果データ：日本橋川

水路や道路の形状が判別できるデータが取得されていることが分かる。これらの計測結果から、自動化船向けの3次元高精度地図としては実用性あるデータが得られる見通しを得ている。

7. 計測精度に関する考察

航海計測実験の結果から、水路地図の精度について考察した結果は表4のとおりである。RTK受信機の精度規格は、1.5cmにもなっており、測定の基準点は2cmの精度で求められる。移動体による計測としては、道路等で25cmが実現されており、同等の精度は要求できると考える。

表4 計測精度に関する考察

No.	項目	精度			根拠
		数値	単位	条件	
1	RTK 受信機	1.5	cm RMS (σ)	緯度・経度	JIS B 7912-8:2018 ISO 17123-8:2015
2	測量要求	2	cm RMS (σ)	緯度・経度	公共測量 準則
3	CMAS /CLAS	3	cm RMS (σ)	水平(静止)	CMAS 文部科学省(2011) CLAS 内閣府(2018)
4		6	cm 95%	水平(静止)	
5	自動化船用 水路地図 (案)	10	cm RMS (σ)	水平(地図)	縮尺1/100相当
6		25	cm RMS (σ)	水平(地図)	縮尺1/250相当
7		50	cm RMS (σ)	水平(地図)	縮尺1/500相当

また、自動離着棧などのニーズも考えた時、要求精度としては25~50cm程が適切ではないかと考えられる。今後、多くの事例や関係者の意見を取り入れて、規定していく計画である。

8. おわりに

本論文では、自動化船に向けた高精度三次元地図について、基本的な概念をまとめ、基礎的な仕様案を作成、初期計測データを取得した。また、計測精度の実現性についての調査・検討を行い、必要な性能が得られる見通しを得た。

今後の課題としては、次のような事項があげられる。

- ・水路・港湾におけるデジタルツインを利用した自動航行方式
- ・水中を含むLiDAR及び他センサを利用した水路・港湾形状の自動作成方式
- ・水路・港湾におけるデジタルツイン作成方式とDB構造の在り方
- ・衛星測位を用いた船舶の自己位置および姿勢推定方式
- ・衛星測位を用いた船舶の移動軌跡および距離の推定方式

今後とも多くの分野の研究者と協力して当該プロジェクトを推進していきたい。

謝辞

本研究に対し、埼玉大学工学部特任准教授高木宗房先生より、まちづくりの視点からの貴重なご助言を得ました。また、株式会社空間技術総合研究所の原口幸治氏より地図開発について貴重なご助言を得ました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 清水悦郎, 自動運航船の実用化に向けた最新動向と課題, ClassNK 技報 No.3 2021(I), (2021)
- [2] 立木友之, 梅田綾子, 清水悦郎, 自動運航船用三次元地図構築に向けた予備研究, 第91回(令和3年度)マリンエンジニアリング学術講演会予稿集, (2021)
- [3] 一般財団法人 日本水路協会, 水路分野の国際的動向に関する調査研究, 日本財団, (2012)
- [4] 杉本末雄, 柴崎亮介 編, GPS ハンドブック, 朝倉書店, (2010)