

カメラベクトル映像法による自動航行用水路地図 の要求仕様に関する研究

浅里幸起¹, 清水悦郎², 梅田綾子², 高木宗房³, 鶴瀬隆一郎⁴, 関口隆⁴, 日黒章友⁵

¹宇宙システム開発利用推進機構, ²東京海洋大学, ³埼玉大学, ⁴株式会社岩根研究所, ⁵株式会社双葉

Abstract The camera-vector (CV) visual mapping is defined as a temporal transitional and spatially three-dimensional imaging measurement by using an omnibus camera with 8K-equivalent ultra-high resolution. In this study, we have developed a spatially three-dimensional map by using the CV visual mapping from an instrumentation craft in Tokyo metropolitan waterways. As the result, we have also formulated the requirement specifications of a hydrographic map for autonomous ships.

1. 概要

本研究は、自動航行技術を搭載した船舶（以下、「自動航行船」という。）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。

はじめに本稿で用いる水路地図という言葉进行定義する。一般に水路地図というて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、自動航行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。

本研究で用いたカメラベクトル映像法（以下、「CV法」という。）は、岩根研究所が開発した三次元空間計測法で、移動体に搭載した高精細な全天球カメラで連続的に画像計測することにより、時間推移できる映像型の三次元空間モデルを構成する方法である^[1]。CVの値は映像取得時のカメラの三次元位置と姿勢を意味し、全周囲映像を数学的に解析することで、それらの値を求めることができることが名称の由来である。

本研究では、東京都心の河川において、実際に船舶上から CV法で計測し、三次元空間モデルを構成して、自動航行用水路地図に適用するための要求仕様を検討した。その結果、水路から計測する CV法によって、高精度衛星測位や測量基準点を利用することで、産業的にも実用的な自動航行用水路地図が作成できることを明らかにした。

本研究の基礎となる研究^[2,3,4]では、自動航行技術を搭載した船舶のための水路地図の必

要性を明示した。近年、自動車の自動走行を支える高精度3次元地図整備が進められているが、こうした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⁵⁾。一方、船舶向けの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のみで自動航行技術との連携を考慮してはいない⁶⁾。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、都市部の内部河川において自動航行技術を備えた小型船舶による水上交通システムの実現を目指すため、自動航行用途の高精度3次元地図に関する研究を推進している。高速道路や一般道に関しては整備が進められている自動運転のための道路地図とも比較し、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、本稿では現時点までの成果をまとめた。また、本研究では比較的確認しやすい水上部分を対象とした。特に、水上の陸地部分を基準として今後水深の計測等に應用していくこととする。

2. 自動航行用水路地図の要求仕様案

著者らは自動航行船が航行するための水路地図に必要な要素について調査をしている。特に都市部内部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が、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ず、運航のためには、正確な高さを必要とする。

また、自動離着岸のためには、栈橋の位置が必要である。栈橋には固定されたものと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1に描いた。橋脚の位置、橋桁の高さと形状、栈橋の位置、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りブラッシュアップしていく予定である。

図1において、黄色実線は橋梁底面を表し、高さの値を持っているので、GNSS等の高さ検出値と比較すると、船舶の上部が橋梁底面に接触・衝突することなく通過できるかを

判定することができる。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おり，これらの用語は表1と対応している。また，水路リンクの説明図を右側に掲げる。水路リンクは表2にも記したように，水路のつながりを表すもので，ナビゲーションを広域的に解析する時に必要になる。



図1 自動航行用水路地図の概要

実験エリアである日本橋川=神田川区間に必要な地図の要件は，表1に示すとおりである。この要件は，自動航行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，栈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仕様を整備している。

表1 自動航行用水路地図の要件

区分	地物名	説明
実在地物	橋梁	船上部と相対する面（高さ，形状）
	橋脚	水路の障害となる橋脚の位置
	船着線	船着場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	規格による
	信号	同上
	その他	同上
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
	その他	規格による

自動航行水路地図は2種類考えられ、地図の調製において、目的に応じて選択する航路をベースに調製していく方法と、地形をベースに調製していく方法がある。実験エリアである東京・日本橋付近において、必要な要素を描いたものが図2である。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され、船舶の大きさによっても異なる。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は実用的に役に立つ。図2では図1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している。

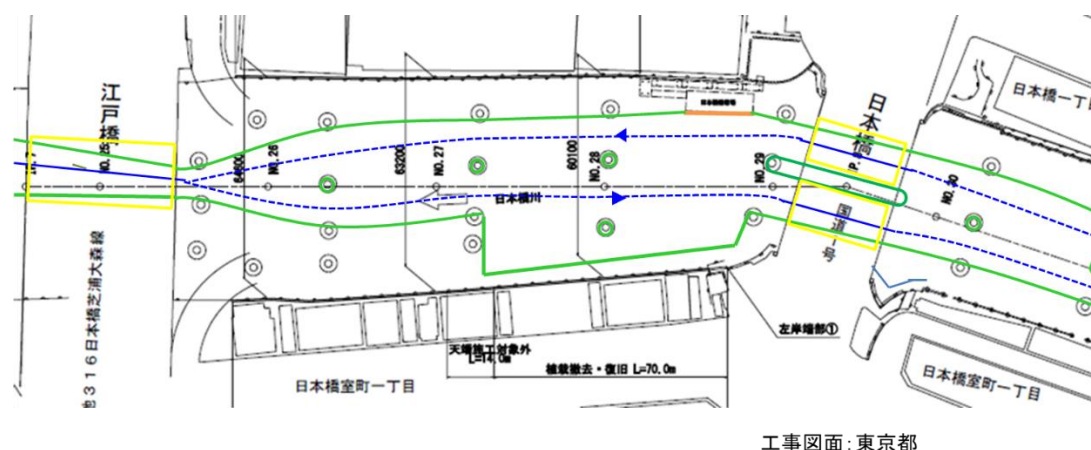


図2 自動航行水路地図の例

更に、自動航行水路図の諸要素の案を図3のように作成している。コンパクトなデジタルデータとするために、ノード&リンク、すなわち点座標であるノードとそれをつないだリンクをベースに構成している。この形態によって、区間リンクや橋梁・橋脚、船着場など自動航行に必要な情報を表現し、自船位置の座標に応じて、自動航行船の制御装置が読み取ることにより、自動航行が実現される。

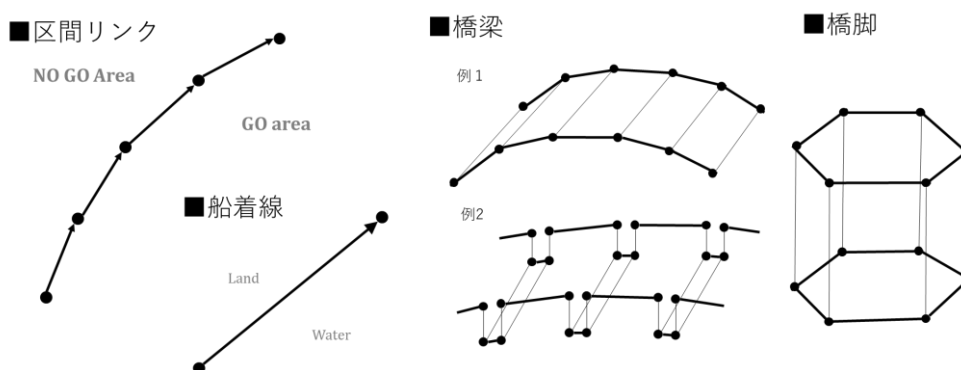


図3 自動航行水路地図の諸要素案

航行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2のとおりであ

る。RTK 受信機の精度規格は、1.5 cm になっており、測定の基準点は 2 cm 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 RMS が実現されており^[8,9]、同等の精度は要求できると考えられる。

表 2 位置の正確度に関する考察

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	自動航行船用地図	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

更に自動離着棧などのニーズも考えた時、船の大きさや運用水域によっても違ってくると考えられるが、実証で用いている都市部内部河川を航行する全長 10m 程度の小型船舶向けの地図であれば、要求水平精度としては表 2 の着色部分に示すとおり、25cm RMS 程度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、実用的な規定を確定していく予定である。

3. 計測システム

橋や棧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は表 3 及び図 4 のとおりである。絶対的な座標は、従来から測量に用いられている GNSS 及び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してある^[6]。

陸部計測は主に前後にそれぞれ 360 度で 8K 相当の解像度を持つ全球カメラ計 2 機搭載することにより高精細の映像を取得する。それぞれの全球カメラは、5M 画素レンズ系 6 個から構成されている。計測システムには LiDAR が付属しており、補助的に用いている。これらの系とは別に横視野約 150 度の 8K カメラを搭載し、部分的に特に高精細の画像を取得できるようにしてある。

空間構成は全周エピポーラ空間合成^[6]により行う。この方法は、複数のカメラで撮影した同一の場所に関する複数の画像を用いて、空間的に整合が取れるように距離を算出し、三次元空間上の座標を特定する方法である。

なお、水深を測るためにソナー計測器を装備しているが、本計測では比較的確認しやすい水上部分を対象とした。特に、水上の陸地部分を基準として今後水深の計測等に応用していくこととする。

表 3 計測システムの諸元

項目	内容
陸部計測方式	全天球カメラ映像 (LiDAR 付属)
カメラ解像度	全体：8K 相当(360 度)× 2 機 5M 画素レンズ 6 個で 30M 画素相当 部分：8K, 横視野約 150 度
画像(ピクセル)密度	8 K 写真相当
空間構成法	全周エピポーラ空間合成
水部計測方式	ソナー計測



図 4 計測システムの構成

4. CV 法による計測データ

計測した地域及び路線は、図 5 に示すとおり東京都心の神田川・日本橋川・隅田川の水路及び周辺の道路である。この地域は、東京・日本橋の周辺にて首都高速道路を地上から撤去し地下に移行させることで、水辺の都市空間の景観を取り戻すまちづくりが推進されている近年注目の場所となっている。計測及び表示アプリケーションは岩根研究所の開発した Waterfront Map (以下、「WFM」という。)を使用している。

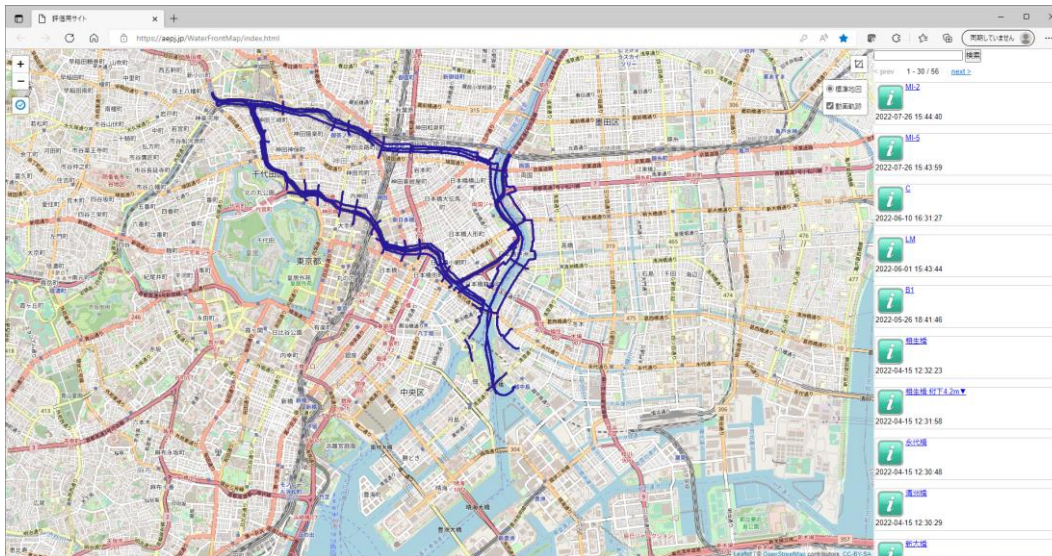
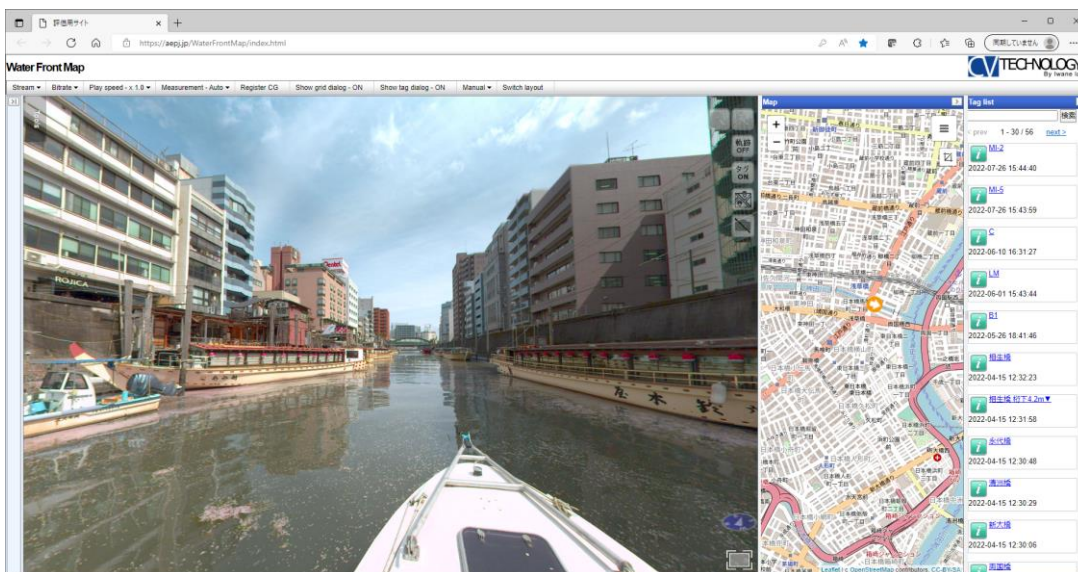
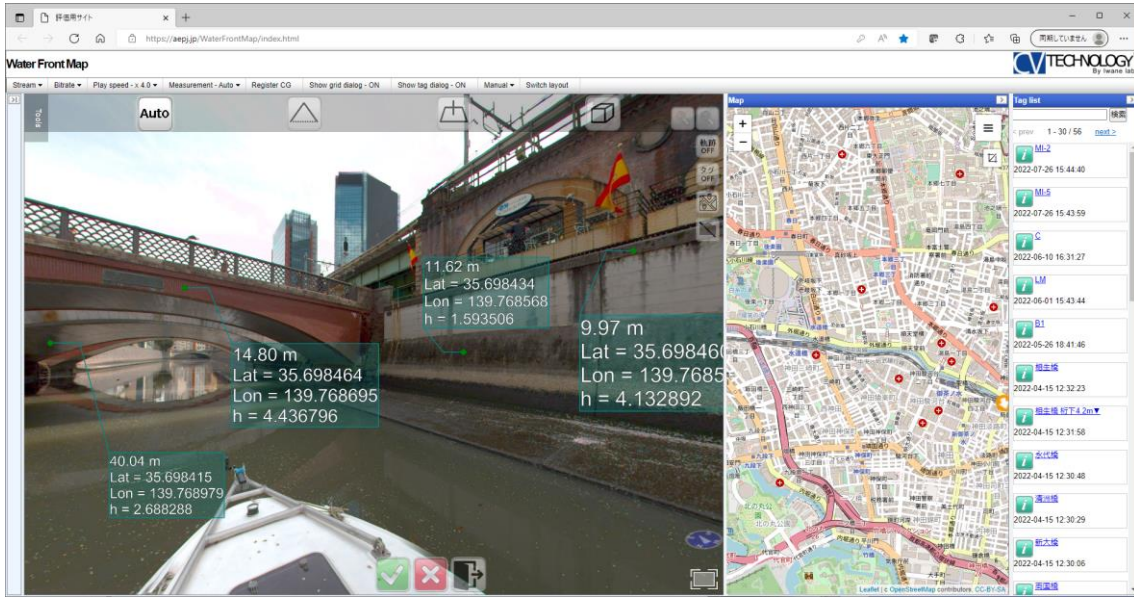


図5 計測した地域と路線：東京都心の水路及び道路

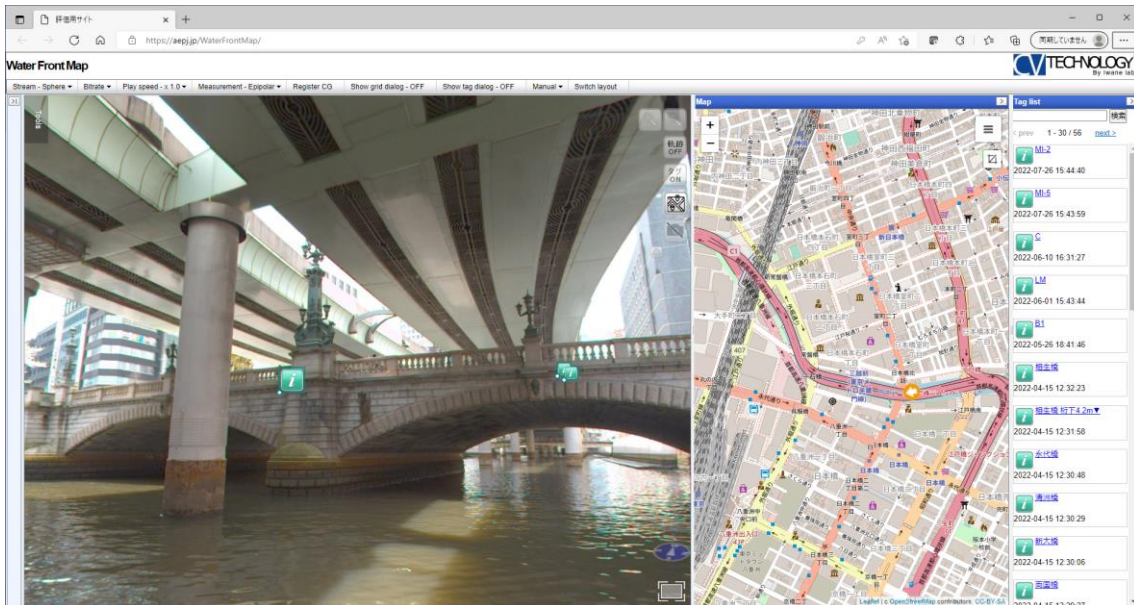
CV法による計測データ（以下、「CV計測データ」という。）は、図6(a)に示すように視覚したままの映像を見ることができ、現場の状況を三次元映像で把握できるだけでなく、図6(b)に示す任意の三次元座標を取得することができる。また、映像を順方向及び逆方向の時間推移することが可能である。このため、前節の図3に示したような三次元座標を取得できるので、自動航行用水路地図の要求仕様を満たし、実際に地図調製が可能であることを実証することができた。尚、当研究はカメラからの距離が20m以内の場合を対象としており、これは都内水路において、神田川や日本橋が両岸同時計測できる距離に相当する。これより水路幅が広い場合には、片岸ごとに計測する必要がある。



(a) CV法による映像地図の画面例：神田川下流域



(b) CV 法による座標点の取得作業例：神田川お茶の水駅付近



(c) 橋梁付近の CV 計測データ取得例：日本橋(2022)とその周辺

図 6 東京・日本橋川及び神田川の CV 計測データ

5. 精度の検証

本研究で得られた CV 計測データと地上部における TS 観測による測量結果を比較することで精度を検証した。場所は首都高速道路の高架によって衛星測位が困難な東京都千代田区九段とした。図 7 に検証範囲の位置図を示す。



図7 位置図

上記の CV 計測データの経緯度の値を国土地理院が公開している「緯度、経度への換算」を使用し平面直角座標に換算して検証した。TS 観測による測量の際は「千代田区3級基準点」を利用した。

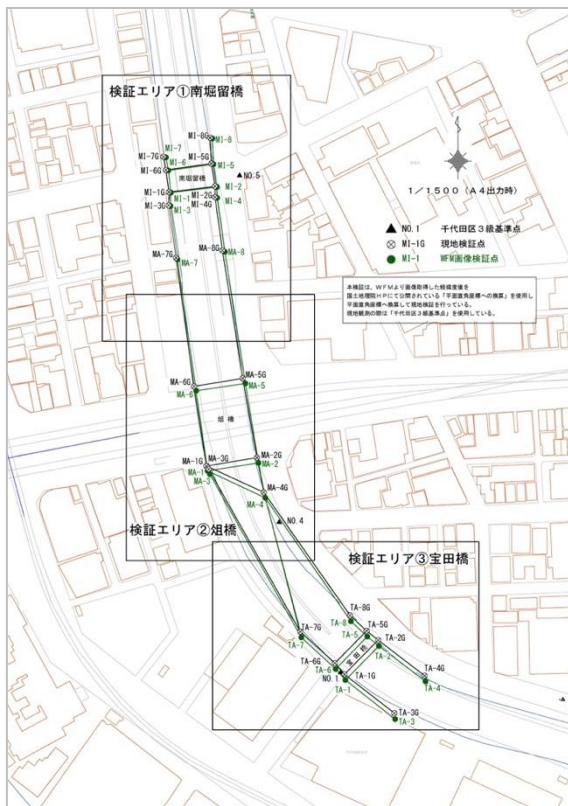


図8 検討エリア分割図

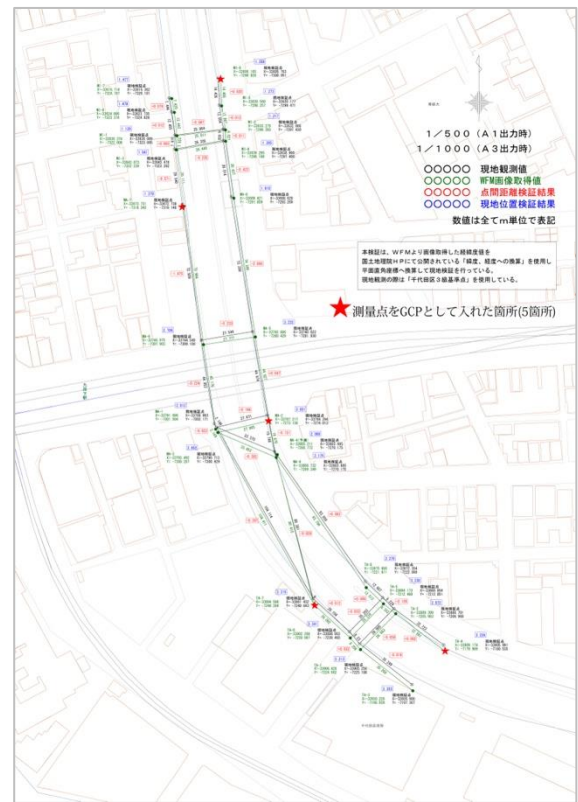


図9 GCP 設置位置図

TS 観測による測量結果は、図 8 に掲げる検討エリア分割図を拡大した図 10～図 12 に示すとおりである。これらの図は本研究結果における現地検証結果を地図上に記すため、北を上向きとして、北から南に向けて連なった地点を重複して表している。赤星印は測量した点を GCP(Ground Control Point)として入力した地点を表す。GCP は、図 9 のとおり 5 地点設定した。図中の黒字は TS 観測による測量結果、緑字は CV 計測データの値、赤字は点間距離検証結果、青字は現地位置検証結果である。数値は全て m 単位で表記している。

CV 計測データ比較を表 4 及び表 5 にまとめた。表 4 は TS 観測による測量結果と GCP に基づいた CV 計測データを比較し、誤差を算出した。赤字は GCP として利用した点を表している。前述の図 7～図 9 における赤星点が該当している。また、表 5 は 2 点間距離を比較して誤差を算出している。

元来 CV 法は、衛星測位が使える場所では、センチメートル級測位の性能が直接反映されて、高い精度を実現することができる。しかし、当該場所は、首都高速 5 号線が日本橋川を覆っており、衛星測位ができない区間である。そのような場所であっても、測量による GCP を得ることができれば、精度を回復することが示されている。

これらの結果から、衛星測位ができない場所は、ズレが発生するが、測量された GCP を設定することで精度を上げることができることが分かる。その GCP は、衛星測位ができない範囲の両端部に 2 点設置し、その間については、おおむね 50～100m 程度ごとに設定することにする。検証の結果、ほとんどがモバイル・マッピング・システム相当の精度である 25 cm 以内に収まっており、GCP を設定することによって、より精度が高まることが実証できたと言える。水平精度の要求仕様については、2 項でも議論したとおりであり、現行の計測技術を用いた自動運转向け地図の実績から考えると、25 cm RMS 以内を要求することが適当であると考えられる^[8,9]。

また、高さについては、おおむね±30cm ほどの精度であり、橋梁底面に接触しないよう制御するためには実用範囲といえるが、それ以上の誤差が発生しているところもあり、さらに検討を要する。橋梁底面の高さについては、特別な規定が必要である可能性もあると考えられる。この点については、更に研究を継続することにする。

上記の検証結果から、2 項で想定した要求仕様は、衛星測位が困難な場所であっても十分に実現性があることを確認することができた。

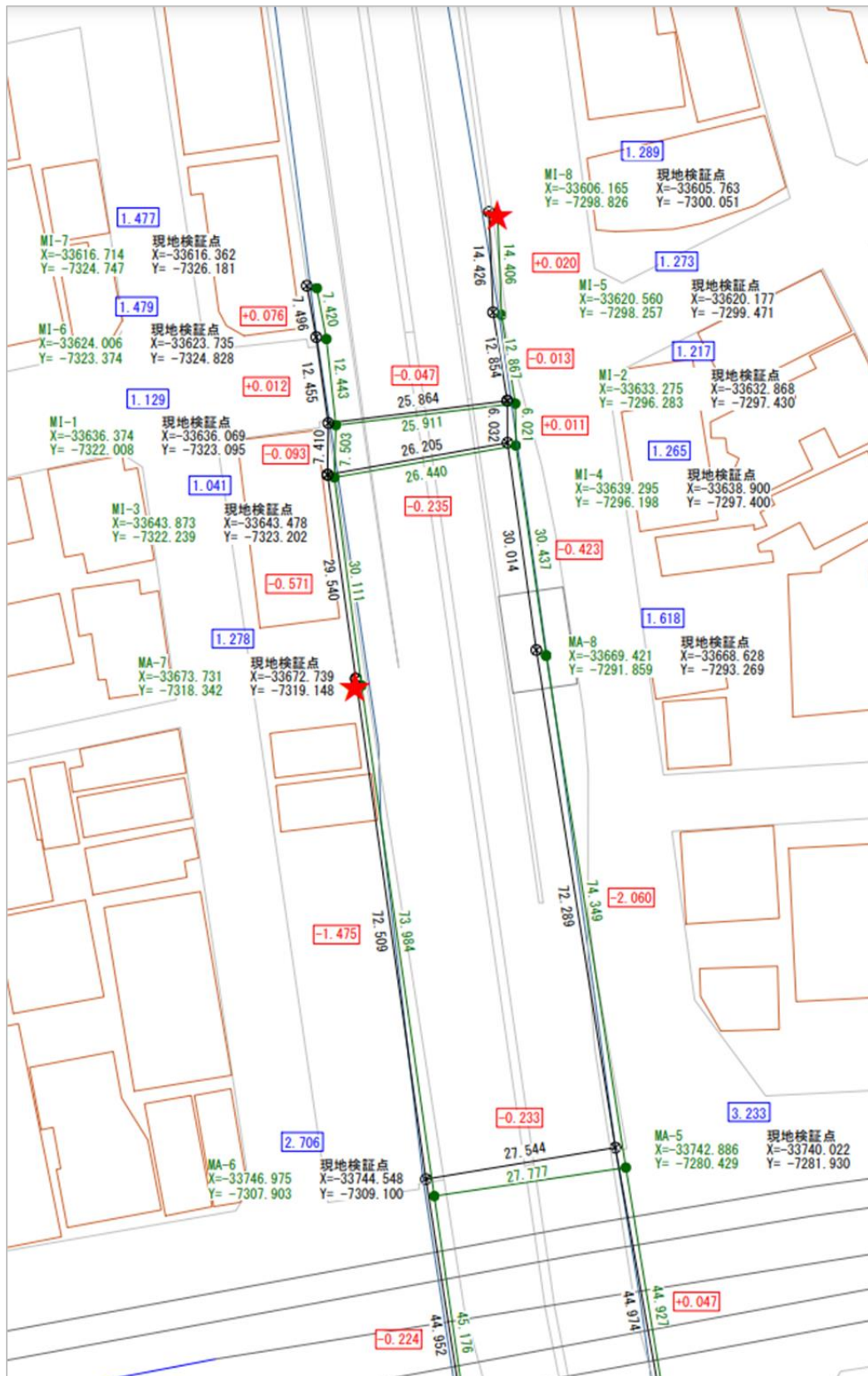


図 10 現地検証結果 (その 1)

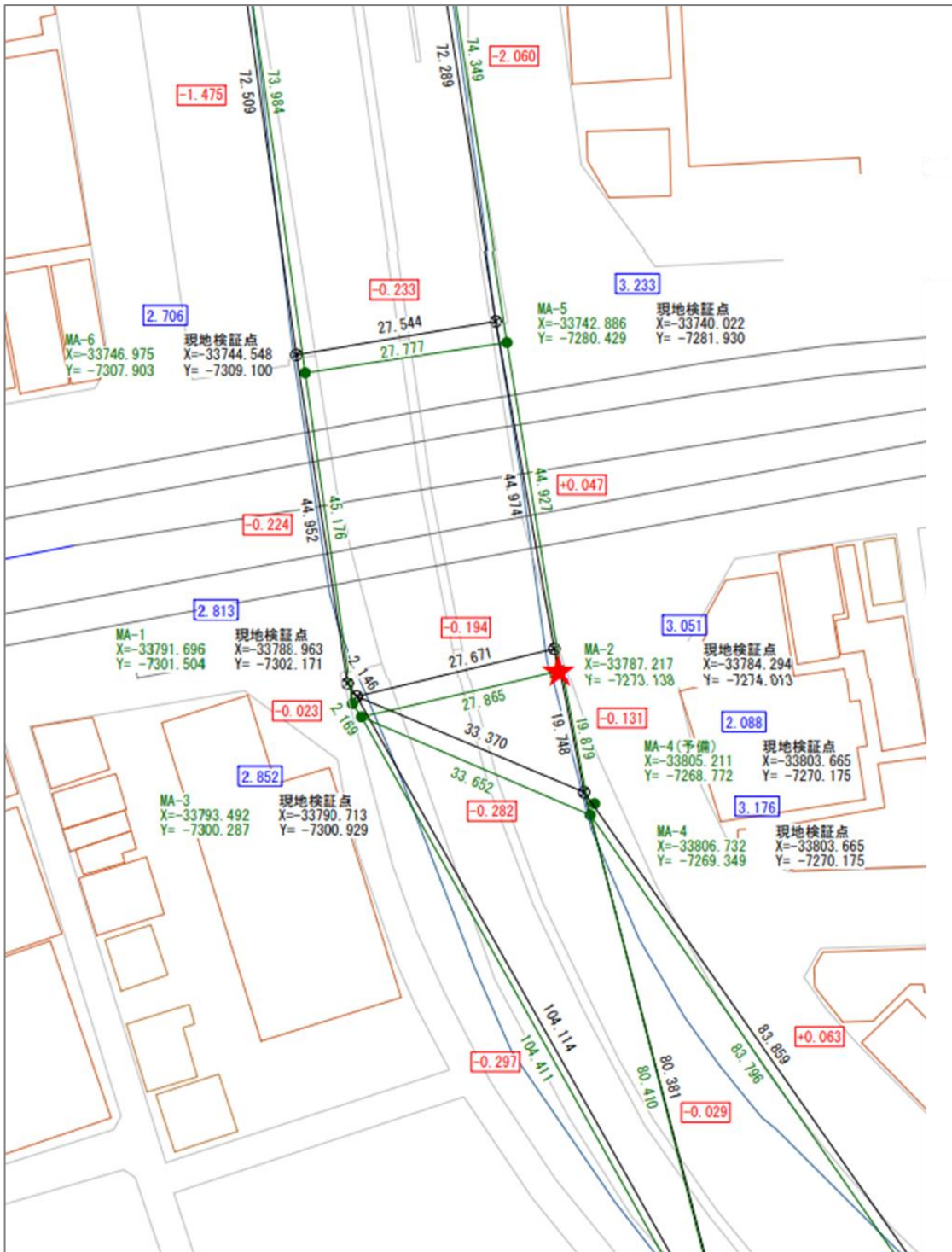


図 11 現地検証結果 (その 2)

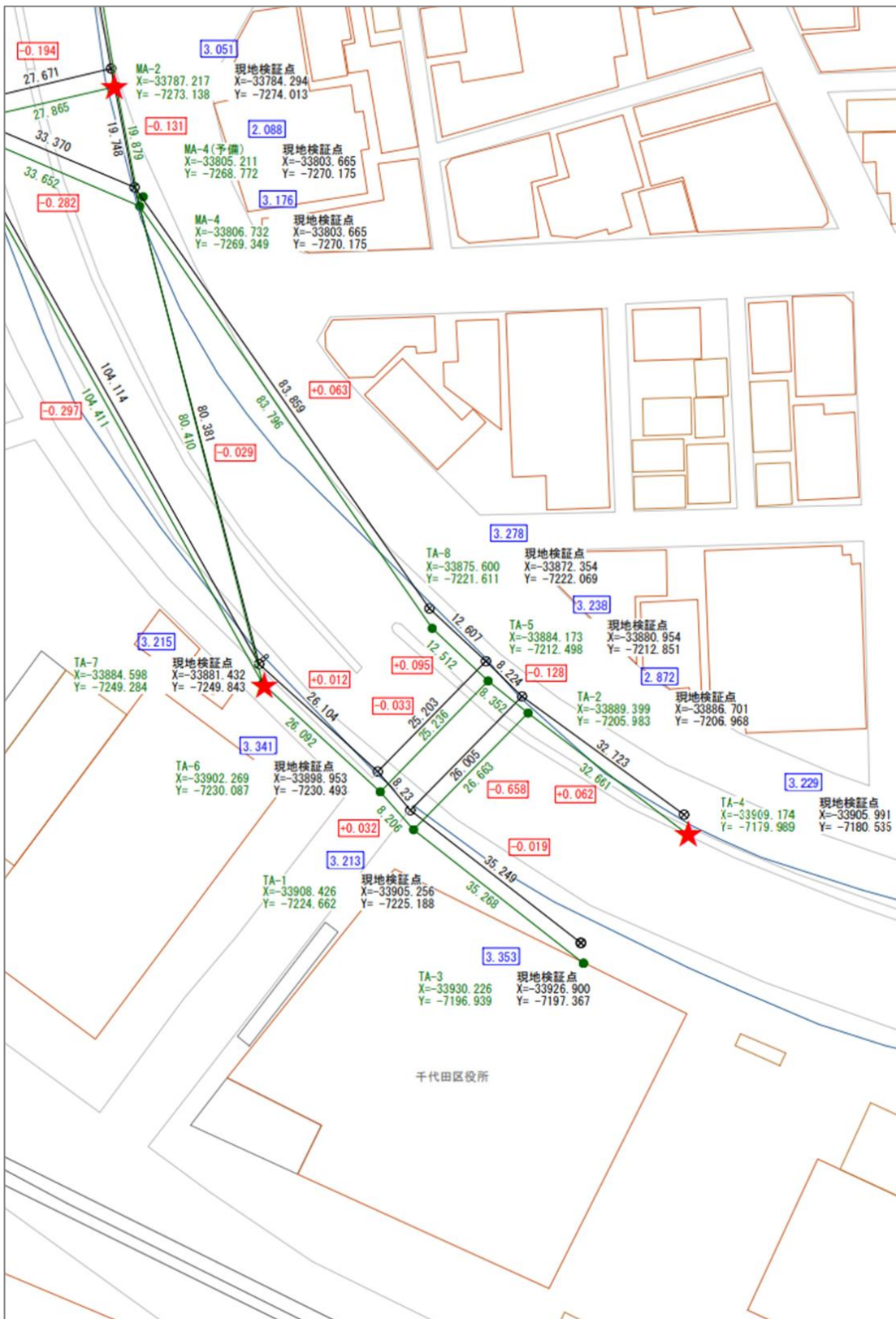


図 12 現地検証結果 (その 3)

表4 TS観測による測量結果と補正したCV計測データの較差

点名	TS観測による測量結果			GCPを用いて修正したCV計測データ			誤差(m)			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	XY
TA-1	-33905.256	-7225.188	4.460	-33905.237	-7225.121	4.191	-0.019	-0.067	0.269	0.087
TA-2	-33886.110	-7206.423	5.266	-33886.202	-7206.473	4.878	0.091	0.049	0.387	0.141
TA-3	-33926.900	-7197.367	6.293	-33926.790	-7197.387	6.350	-0.110	0.020	-0.056	0.131
TA-4	-33905.991	-7180.535	4.673	-33905.994	-7180.549	4.676	0.003	0.014	-0.003	0.018
TA-5	-33880.954	-7212.851	5.301	-33881.026	-7212.883	4.797	0.072	0.032	0.504	0.104
TA-6	-33898.953	-7230.493	5.407	-33899.054	-7230.498	5.381	0.100	0.005	0.025	0.106
TA-7	-33881.432	-7249.843	6.139	-33881.414	-7249.828	6.117	-0.018	-0.014	0.021	0.033
TA-8	-33872.354	-7222.069	4.166	-33872.411	-7222.022	4.217	0.056	-0.047	-0.050	0.104
MI-1	-33636.069	-7323.095	5.143	-33636.075	-7323.065	5.311	0.005	-0.030	-0.167	0.036
MI-2	-33632.868	-7297.430	4.434	-33632.926	-7297.476	4.291	0.057	0.045	0.143	0.104
MI-3	-33643.478	-7323.202	5.581	-33643.531	-7323.135	5.759	0.053	-0.067	-0.178	0.120
MI-4	-33638.900	-7297.400	4.422	-33638.914	-7297.414	4.314	0.013	0.013	0.107	0.027
MI-5	-33620.177	-7299.471	5.165	-33620.198	-7299.368	5.163	0.020	-0.103	0.002	0.124
MI-6	-33623.735	-7324.828	5.152	-33623.792	-7324.724	5.391	0.056	-0.104	-0.239	0.161
MI-7	-33616.362	-7326.181	5.392	-33616.393	-7326.047	5.597	0.031	-0.133	-0.205	0.165
MI-8	-33605.763	-7300.051	4.450	-33605.810	-7300.100	4.465	0.046	0.048	-0.014	0.096
MA-1	-33788.963	-7302.171	6.642	-33789.102	-7302.062	6.837	0.139	-0.109	-0.194	0.248
MA-2	-33784.294	-7274.013	6.651	-33784.290	-7274.023	6.624	-0.004	0.010	0.026	0.014
MA-3	-33790.713	-7300.929	5.943	-33790.865	-7300.772	6.133	0.151	-0.157	-0.190	0.309
MA-4	-33803.665	-7270.175	4.440	-33803.621	-7270.103	4.358	-0.044	-0.072	0.082	0.117
MA-5	-33740.022	-7281.930	6.741	-33739.914	-7282.056	6.594	-0.107	0.126	0.146	0.234
MA-6	-33744.548	-7309.100	6.738	-33744.479	-7309.139	6.806	-0.069	0.039	-0.067	0.109
MA-7	-33672.739	-7319.148	5.184	-33672.714	-7319.119	5.198	-0.025	-0.028	-0.013	0.054
MA-8	-33668.628	-7293.269	4.249	-33668.596	-7293.373	4.294	-0.032	0.103	-0.044	0.136

(注)赤字はGCPとして利用。

表5 2点間距離比較

From To	2点間距離比較(m)			From To	2点間距離比較(m)		
	現地検証距離	CV解析検証距離	誤差		現地検証距離	CV解析検証距離	誤差
TA-1 TA-2	26.005	26.648	0.643	MA-2 MA-5	44.974	45.097	0.123
TA-1 TA-3	35.249	35.123	0.126	MA-3 MA-4	33.370	33.216	0.154
TA-1 TA-6	8.238	8.195	0.043	MA-5 MA-8	72.289	72.211	0.078
TA-2 TA-4	32.723	32.616	0.107	MA-6 MA-7	72.509	72.455	0.054
TA-2 TA-5	8.224	8.239	0.015	MA-7 MI-3	29.540	29.457	0.083
TA-5 TA-6	25.203	25.205	0.002	MA-8 MI-4	30.014	29.956	0.058
TA-5 TA-8	12.607	12.559	0.048	MI-1 MI-2	25.864	25.782	0.082
TA-6 TA-7	26.104	26.169	0.065	MI-1 MI-3	7.410	7.457	0.047
TA-7 MA-3	104.114	103.896	0.218	MI-1 MI-6	12.455	12.394	0.061
TA-7 MA-4	80.381	80.392	0.011	MI-2 MI-4	6.032	5.988	0.044
TA-8 MA-4	83.859	83.927	0.068	MI-2 MI-5	12.854	12.868	0.014
MA-1 MA-3	2.146	2.184	0.038	MI-3 MI-4	26.205	26.133	0.072
MA-1 MA-6	45.176	45.181	0.005	MI-5 MI-8	14.426	14.406	0.020
MA-2 MA-3	27.671	27.545	0.126	MI-6 MI-7	7.496	7.516	0.020
MA-2 MA-4	19.748	19.725	0.023				

6. 結論

本研究では、自動航行用水路地図の要求仕様について、現実的な技術仕様の原型を開発した。概念を整理し、仕様案を作成、計測データを取得した。更に、計測精度の実現性についての調査・検討を行い、衛星測位が十分にできない場所も地上基準点(GCP)の値をインプットすることで想定した要求仕様を実現できる見通しを得た。

今後の課題としては、次の事項があげられる。

- ・自動航行用水路地図の製品仕様書の普及
- ・三次元地図作成のための測量方式と三次元モデル構成法の高度化
- ・実際の水路を対象にした自動航行用地図の量産化

今後とも多くの分野の研究者・技術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、前国際航法学会会長 海技大学校 新井康夫名誉教授より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] Iwane Laboratories, White Paper: CV 演算, 3.2.1 項, sapt-1912-0001, 測位技術振興会 (2019)
- [2] 浅里幸起, 清水悦郎, 梅田綾子, 立木友之, 中村海斗, 自動化船向け高精度三次元地図に関する研究, 第3回測位技術振興会研究発表講演会 (2021)
- [3] 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)
- [4] 中川雅史, 木邨直人, 尾関友啓, 久保信明, 清水悦郎, 都市河川での GNSS/SLAM による屋内外シームレス測位, 応用測量論文集, 第33巻, 日本測量協会 (2022)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 杉本末雄, 柴崎亮介 編, GPS ハンドブック, 朝倉書店, (2010)
- [8] ダイナミックマップ共通プラットフォーム化検討コンソーシアム, 自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討におけるダイナミックマップの多用途利用に向けた実現可能性の調査検討, 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)・自動走行システム, 1.1.2 項 (2018)
- [9] ダイナミックマップ基盤株式会社, ダイナミックマップ基盤公共測量作業規程 (2016)