

航空写真と電子地図を用いた屋外環境ウェイ ポイントナビゲーションに関する研究

Miura, Yuto / 三浦, 悠斗

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

64

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026437>

航空写真と電子地図を用いた屋外環境 ウェイポイントナビゲーションに関する研究

A STUDY OF WAYPOINT NAVIGATION FOR OUTDOOR MOBILE ROBOTS
BY FUSING AERIAL PHOTOGRAPHS AND ELECTRONIC MAPS

三浦悠斗

Yuto Miura

指導教員 小林一行 教授

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

Waypoint navigation for autonomous mobile robots allows navigation safely and smoothly to the destination point by following predetermined waypoints that serve as route points. To assign waypoints, environmental maps are needed to accurately determine the current location and the moving direction of the mobile robot. In this paper, we propose a new waypoint navigation method using both aerial photographs and electronic maps. By fusing aerial photographs and electronic map data, waypoint navigation environmental maps can be generated without prior acquisition of environmental data by traveling. The effectiveness of the proposed system was demonstrated by using an actual autonomous mobile robot and generated environmental maps of outdoor environments to confirm the validity of the proposed waypoint navigation.

Key Words : Autonomous mobile robot, Waypoint navigation, Electronic map, Aerial photograph

1. はじめに

近年、日本では、人の代わりに担うロボットの実用化が進められている。それらのロボットの一つとして自律移動ロボットが注目されている。自律移動ロボットとは、センサやカメラなどから得た情報で周囲を把握し、障害物を回避しながら自律的に目的地まで移動するロボットのことである。また、より安全な目的地までのナビゲーションを行う手法としてウェイポイントナビゲーションが存在する[1, 2]。この手法では、目的地に辿り着くまでの地点にウェイポイントと呼ばれる経路点を設置することで、迂回が必要なルートに対してもより安定した走行が可能となる。また、この手法を行うためには、ロボットの位置に対する目的地・ウェイポイントへの正確な距離と方向と、ウェイポイント設置可能エリアを把握する為の環境地図が必要となる。目的地に至るまでの環境地図を生成する手法として、SLAM 技術が存在する[3]。しかし、この手法では、LiDAR やカメラなどを用いて事前に走行環境のセンサデータを取得する必要がある。その為、長距離のルートではデータ取得に時間がかかることや、一度も赴いてデータを取得していない未知の環境には対応できないといった問題点がある。

本稿では、ウェイポイントナビゲーションに必要な環境地図を事前走行によるセンサデータ取得をせずに生成し、目的地までのウェイポイントを決定するシステムの

開発および検証を行なう。

2. 提案するシステムの概要

ウェイポイントを決定する為に必要な走行環境データを取得する手法として電子地図を用いる手法や航空写真を用いる手法が存在する[4-6]。本稿では、航空写真・電子地図の両方からアプローチを行なうことで、走行不可能領域を抽出した移動ロボットの為の新たな環境地図を生成する。

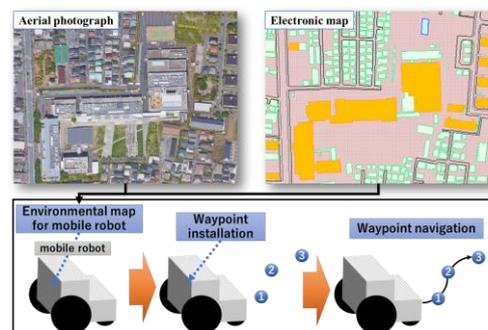


Fig.1 System Overview

電子地図からは建築物・道路線の位置情報が記されており、移動ロボットの為の環境地図情報として利用可能である。加えて、航空写真からは敷地・歩道における塗装路領域と植生領域を判別し、電子地図情報と合わせるこ

とで環境地図の生成を行なう。生成した環境地図を基に移動ロボットの初期位置と目的地・ウェイポイントを決定することで、実環境におけるウェイポイントナビゲーションを行なう。

3. 移動ロボットの構成

Fig.2 に提案する本研究に使用するロボットおよびセンサを示す。

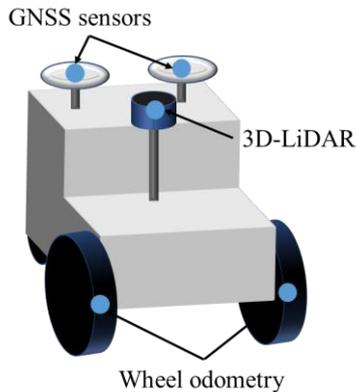


Fig.2 Mobile robot and sensor configuration

環境地図上での移動ロボットの初期位置を把握する為にGNSSセンサを搭載しており、走行時の自己位置を把握する為にホイールオドメトリを搭載する。また、走行時の安全を考慮して、障害物回避と走行中の自己位置補正の為に3D-LiDARセンサを使用する。

4. 問題の定義

本研究において、以下の三つの仮定を設ける。

- (A1) 電子地図は建物縁と道路縁の形状が得られる。
- (A2) 航空写真はRGBカラー画像で構成される。
- (A3) 移動ロボットは植生領域や建物内を避けて走行する。

仮定A1, A2は環境地図を生成する際に必要な情報が記された形式のものを使用するために設ける。仮定A3は、屋外環境下で、より安全な経路を辿りナビゲーションを行なうために設ける。この仮定より、ウェイポイントナビゲーションシステムを実装するために、以下の二つが問題として挙げられる。

- (P1) 環境地図の生成法
- (P2) 経路点・目的地までのウェイポイント設置法

問題P1では、走行不可能領域をより正確に抽出する工夫が必要である。問題P2では、地図と実環境の位置情報を一致させ、地図上でより安全な経路を生成する工夫が必要である。

5. 提案手法

Fig.3 に提案するウェイポイントナビゲーションシステムの概要を示す。提案するシステムでは、大きく二つのス

テップが存在する。

- (A) 環境地図生成
- (B) ウェイポイント生成

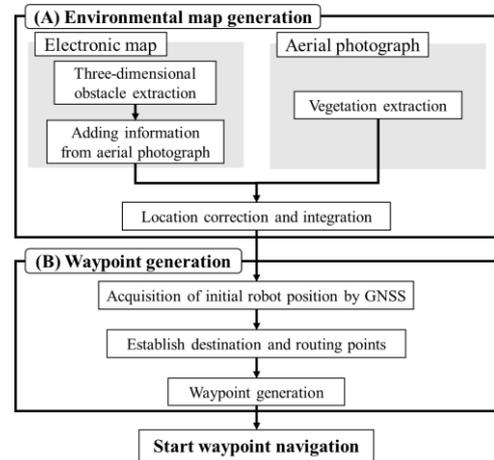


Fig.3 Flow of the proposed system

(A)では、電子地図・航空写真から走行不可能領域の抽出を行なう。抽出した情報を統合することで移動ロボットの走行可能領域を示す環境地図を生成する。また、それぞれの地図から抽出した領域の位置情報を補正することで、統合した際の地図のずれが起こらないようにする。加えて、本稿で得た地図座標は平面直角座標に統一したものを使用する[7]。

(B)では、(A)で生成した環境地図を基に移動ロボットの初期位置・目的地・ウェイポイントを設置する。初期位置はGNSSから得た位置情報を平面直角座標に変換し、地図座標と照らし合わせることで決定する。目的地とウェイポイントは地図画像上で指定できる取得システムを開発することで環境地図から直観的な取得を可能とする。

(1) 電子地図と航空写真における走行不可能領域抽出

Table.1 に示すように、それぞれの地図画像の特徴から走行不可能領域・走行可能領域の判別を行なう。

Table.1 Distinguishing between travelable and non-travelable areas

	Aerial photograph	Electronic map
Travelable	Paved road	Sidewalk
Non-Travelable	Vegetation	Building

航空写真はRGBカラー画像を利用しており、電子地図は国土地理院が提供するベクターデータで構成された地図を利用する[8]。

a) 電子地図における走行不可能領域の抽出

Fig.4 に建物縁・道路縁のみを残した電子地図を二値画像に変換する例を示す。ベクターデータである電子地図

をグリッドベースに変換した二値画像を使用する。二値画像のグリッドサイズは、実環境の 0.10[m]×0.10[m]に相当するサイズにする。

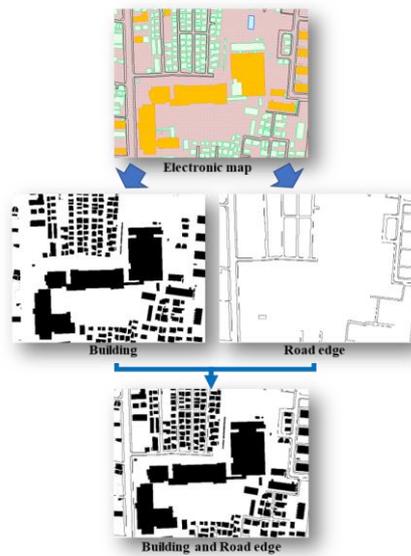


Fig.4 Conversion from electronic map to environmental map

また、電子地図のみの道路情報では、横断歩道の判断ができない為、航空写真を用いて電子地図の道路情報に横断歩道を追加する。航空写真からの横断歩道抽出はテンプレートマッチングにより行なう。テンプレートマッチングにかける画像には、航空写真の車道領域のみで二値化を行なった画像を使用した。Fig.5 に使用したテンプレート画像の概要を示す。テンプレート画像として縦横二種類を作成した。二値画像に横断歩道の白線はおよそ 5pixel, 白線間はおよそ 4pixel でうつる。テンプレートとの類似度が一定以上の場所を横断歩道候補領域と判断して二値画像に残す。Fig.6 に横断歩道候補領域を電子地図に横断歩道として追加する例を示す。電子地図と横断歩道候補領域の二値画像の論理積を計算した二値画像にラベリング処理を行なう。ラベル 1, 2 のみ検出された画像を横断歩道とする。ラベル 1, 2 の両端を結び、それ以外に反転処理を行なったものを電子地図に加えることで電子地図に横断歩道を追加する。

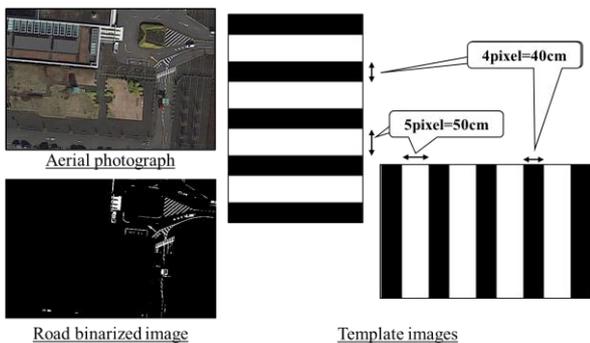


Fig.5 Template images

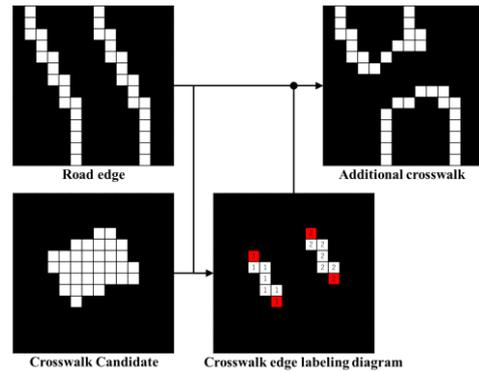


Fig.6 Adding crosswalk to electronic map

b) 航空写真における走行不可能領域の抽出

Fig.7 に航空写真から植生領域を検出する例を示す。

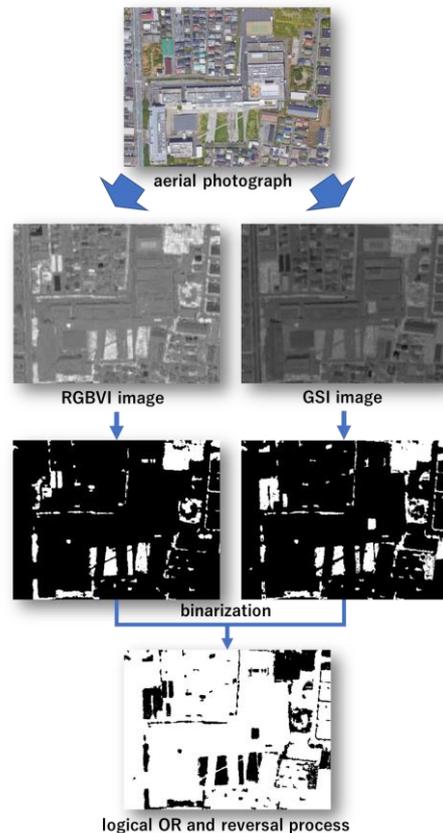


Fig.7 Extraction of vegetation areas from aerial photograph

植生領域のみを安定して検出するために R(Red), B(Blue), G(Green)のみの波長から算出可能な RGBVI(赤緑青植生指数), GSI(粒度指数)を植生と裸地域の指標として利用する[9, 10]. 裸地域は季節による植生の変化や、人為的に植生が刈り取られている為に土壌が見えている領域にも対応できるように加える。自動二値化処理で RGBVI と GSI から生成した二値画像の論理和を計算し、対応する領域を 0(走行不可能領域)とするよう反転処理を行なうことで、新たな二値画像を生成する。また、Fig.8 に示す前処理を行なった後、自動二値化処理を行なうことで、不

要な情報が取り除かれ、より適切な閾値の決定が可能となる。

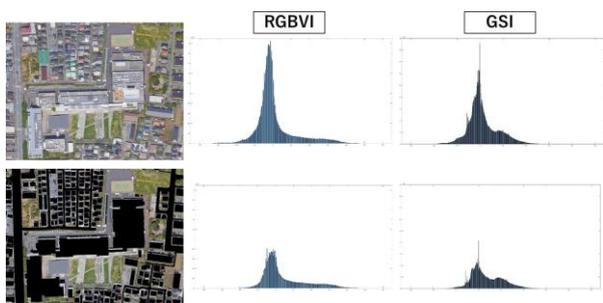


Fig.8 Binarization preprocessing of aerial photograph

c) 環境地図の生成

電子地図・航空写真から生成した二つの二値画像に対して、論理積を計算することで、0 が走行不可能領域を示す移動ロボットの為の環境地図を生成する。Fig.9 に新たに生成した環境地図を示す。

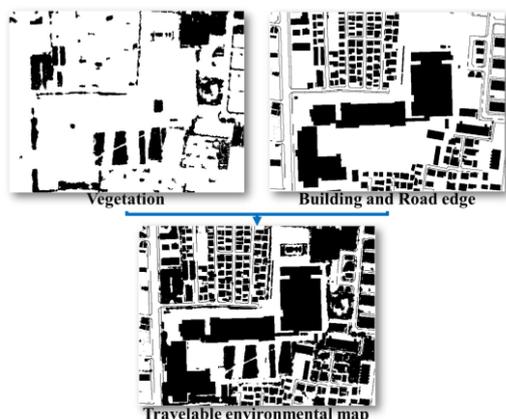


Fig.9 Combining binary images generated from aerial photograph and electronic map

(2) 環境地図上におけるウェイポイントの決定

ウェイポイントナビゲーションでは、生成した環境地図を基に目的地までの複数のウェイポイントを設置することで、ウェイポイントを辿りながらより安定したナビゲーションを行なう。本稿では設置方法として、マウス操作によるウェイポイント生成システムを開発する。

a) 地図上における経路点座標取得

マウス操作により直観的に経路点を取得できる GUI を開発する。Fig.10 に経路点を地図画像上から取得するようすを示す。クリック操作によりマウスポイントの座標を取得することが可能である。Fig.10 の青地点が GNSS によって得たロボットの初期位置座標で赤地点が目的地座標を記している。Fig.10 右画像で追加されている緑地点が環境地図上から取得した経路点を指しており、経路点座標として保存する。

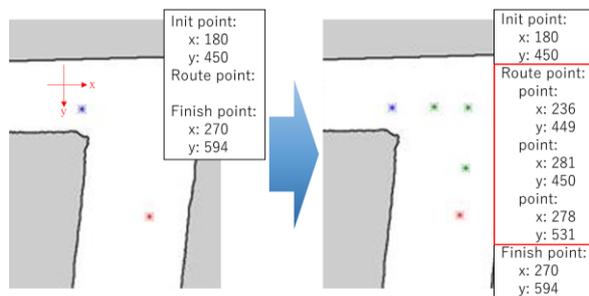


Fig.10 Obtain route point coordinates on an environmental map

b) ウェイポイント生成処理

初期位置—経路点—目的地間のウェイポイントを生成する為には、ポテンシャル法を利用した経路生成システムを使用する。Fig.11 にポテンシャル場を用いた経路生成のようすを示す。まず、障害物縁に斥力ポテンシャル、つぎに向かうポイントに引力ポテンシャルを与えたポテンシャル場を生成する。その後、次ポイントまでの経路生成を行ない、目的地に辿り着くまでこれを繰り返す。

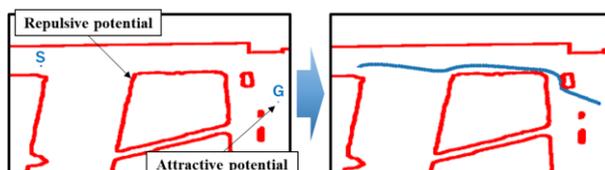


Fig.11 Automatic route generation based on the potential method

生成した経路を基に、最短距離を進めるよう洗練処理を行ない、ウェイポイントを生成していく。Fig.12 に洗練処理のようすを示す。また、洗練処理の手順についても以下に示す。

1. W_p と W_n の二点を抽出
 W_{\square} : □番目のウェイポイント座標
 $p=0, n=1, 2, \dots, g$
2. $W_p \cdot W_n$ 間が障害物に干渉するか確認, 干渉した場合は $W_p \cdot W_{n-1}$ 巻のウェイポイント削除
3. $p=n-1$ として引き続き処理を行なう
4. W_g まで確認後, ウェイポイントが一定距離以上離れないように直線経路にウェイポイント生成

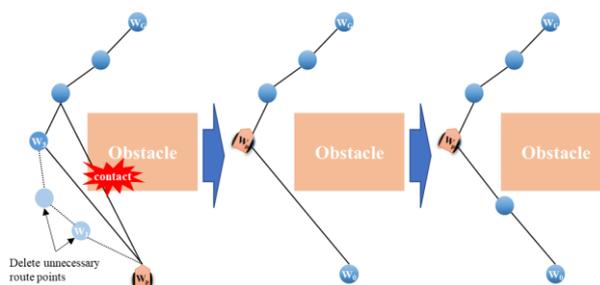


Fig.12 Path refinement processing

c) ウェイポイント座標変換

ROS で用いるウェイポイント座標はロボットの初期位置を原点とした左手系の座標として変換しなくてはならない。しかし、ロボットの初期位置座標は平面直角座標系から取得しており、地図画像から取得したウェイポイント座標も画像座標系で表されている。その為、ROS の座標系で扱うには、座標変換を行なう必要がある。Fig.13 にウェイポイントの座標変換の概要図を示し、その変数の詳細を以下に示す。

h, w : 地図画像の高さ, 幅

$I\Box$: 画像座標系

$PR\Box$: 平面直角座標系

$R\Box$: ROS 座標系

$W\Box$: ウェイポイント座標

θ : 方位角

$R\theta$: ロボットの yaw, $R\theta = \theta$

- ・ 地図画像におけるロボットの座標

$$(I x_R, I y_R) = (P R x_R, h - P R y_R) \quad (1)$$

- ・ ウェイポイント座標

$$\begin{bmatrix} W x \\ W y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(R\theta) & -\sin(R\theta) \\ \sin(R\theta) & \cos(R\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I x_W - I x_R \\ -(I y_W - I y_R) \end{bmatrix} \quad (2)$$

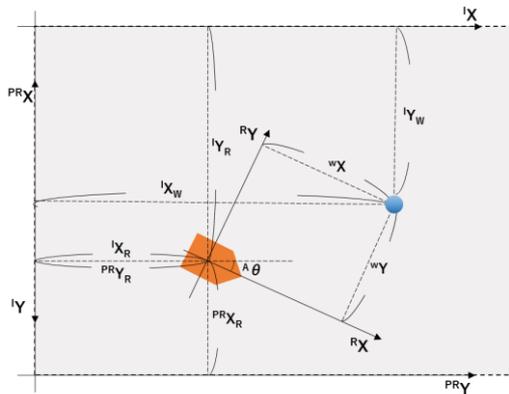


Fig.13 Coordinate transformation of waypoint

6. 検証

(1) 検証環境

提案するシステムの有効性を確認するために、Fig.14 に示す法政大学小金井キャンパス内の中庭で実験を行なう。本実験では、四カ所の経路ポイントを置き、その経路ポイントを通りながら目的地まで走行する。

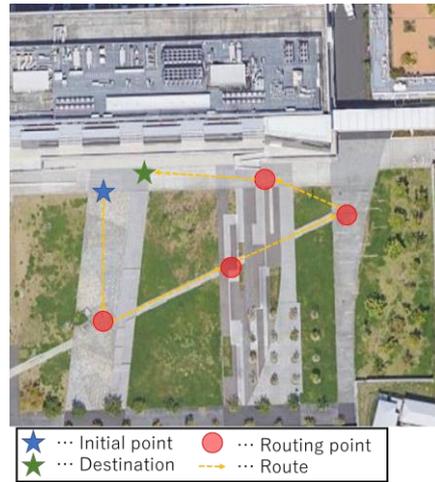


Fig.14 Experimental environments

(2) 環境地図・ウェイポイント生成

Fig.15 に検証環境の航空写真と電子地図から提案するシステムによって生成した環境地図を示す。

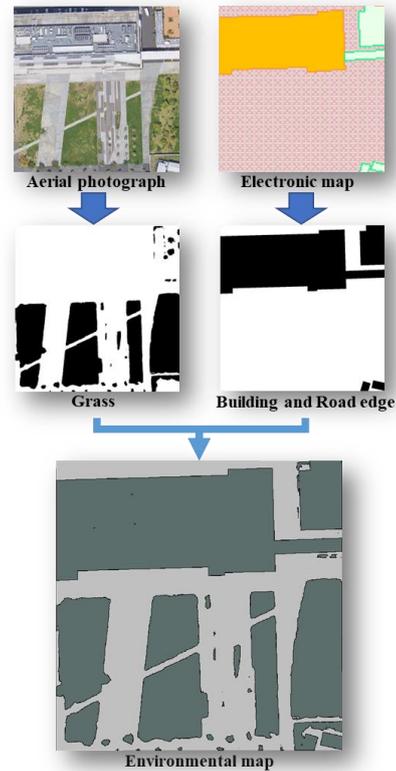


Fig.15 Generate environmental map from aerial photograph and electronic map

上記の環境地図を用いてウェイポイントを設置する。Table.2 に経路ポイントのみ取得したウェイポイント座標, Table.3 に経路ポイントを基に新たに生成したウェイポイント座標, Fig.16 に環境地図上でのウェイポイントの違いをそれぞれ示す。経路ポイントを通りつつ、地図上での障害物を回避しながら一定距離間でウェイポイントが生成されていることが確認できた。

Table.2 Coordinates of waypoints

	w_1	w_2	w_3	w_4	goal
x	31.60	19.20	5.90	-2.69	-2.99
y	0.69	29.80	58.21	36.40	9.30

Table.3 Coordinates of the changed waypoints

	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9	w_{10}	w_{11}
x	6.31	12.63	18.96	25.28	31.60	29.11	26.63	24.16	21.68	19.20	16.40
y	0.14	0.28	0.41	0.55	0.69	6.51	12.33	18.16	23.98	29.80	35.52
	w_{12}	w_{13}	w_{14}	w_{15}	w_{16}	w_{17}	w_{18}	w_{19}	w_{20}	w_{21}	goal
x	13.60	10.8	8.00	5.90	-0.85	-1.77	-2.69	-2.77	-2.84	-2.92	-2.99
y	41.23	46.96	52.67	58.21	52.75	44.57	36.40	29.62	22.85	16.07	9.30

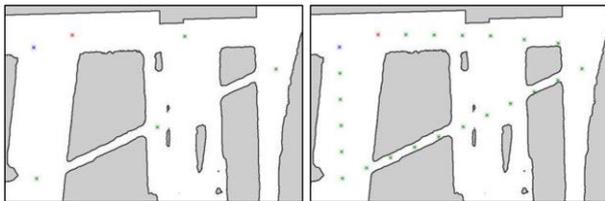


Fig.16 Waypoint coordinate transformation on the environmental map

(3) ウェイポイントナビゲーション

Fig.17 に実環境でウェイポイントナビゲーション検証を行なうようすを示す。生成したウェイポイントの距離・方向が実環境にも対応しており、植生などを回避したコースで経路ポイント・目的地まで到達することが確認できた。

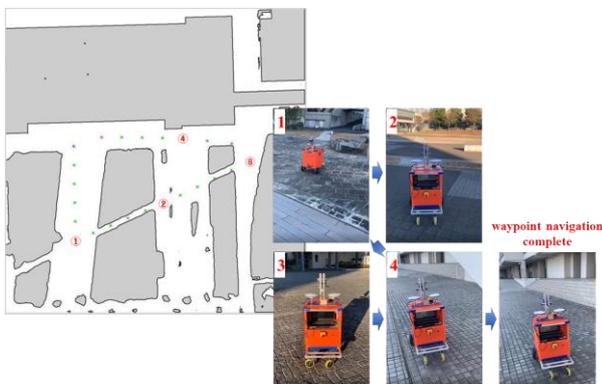


Fig.17 Waypoint navigation in progress

7. 結論

本研究では、移動ロボットの為の事前走行によるデータ取得を必要としないウェイポイントナビゲーションシステムを提案した。簡単に入手可能な電子地図と航空写真を用いて走行不可能領域を記した環境地図を生成した。生成した環境地図を基にウェイポイントを設置することで、センサデータ未取得の実環境におけるウェイポイントナビゲーションが可能であることが確認できた。

参考文献

1) D. Mulvaney, Y. Wang, I. Sillitoe, "Waypoint-based Mobile

Robot Navigation," Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Vol.2, pp.9063-9067, 2006

- 2) S. Veera Ragavan, S.G. Ponnambalam, C. Sumero, "Waypoint-based Path Planner for Mobile Robot Navigation Using PSO and GA-AIS," 2011 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems, pp.756-760, 2011
- 3) M. Rojas-Fernández, D. Mújica-Vargas, M. Matuz-Cruz, D. López-Borreguero, "Performance comparison of 2D SLAM techniques available in ROS using a differential drive robot," 2018 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP), pp. 50-58, 2018
- 4) S. Muramatsu, T. Tomizawa, S. Kudoh, T. Suehiro, "Mobile Robot Navigation Utilizing the WEB Based Aerial Images Without Prior Teaching Run," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.29, No.4, pp.697-705, 2017
- 5) S. Shair, J.H. Chandler, V.J. González-Villela, R.M. Parkin, M.R. Jackson, "The Use of Aerial Images and GPS for Mobile Robot Waypoint Navigation," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 13, No. 6, pp.692-699, 2008
- 6) Y. Hosoda, R. Sawahashi, N. Machinaka, R. Yamazaki, Y. Sadakuni, K. Onda, R. Kusakari, M. Kimba, T. Oishi, Y. Kuroda, "Robust Road-Following Navigation System with a Simple Map," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.30, No.4, pp.552-562, 2018
- 7) K. Kawase, "A More Concise Method of Calculation for the Coordinate Conversion between Geographic and Plane Rectangular Coordinates on the Gauss-Kruger Projection," Journal of the Geospatial Information Authority of Japan, No.121, pp.109-124, 2011
- 8) 基盤地図情報サイト | 国土地理院,
< <https://www.gsi.go.jp/kiban/> >, 2023年1月30日アクセス
- 9) J.Park, "Vegetation growth monitoring by drone remote sensing in precision agriculture," 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.111, 2020.01
- 10) 小山内信智ほか：地球観測衛星 ALOS（だいち）による崩壊地の抽出手法について，砂防学会研究発表会概要集，pp.490-491, 2010