

設備点検・検査自動化のためのロボット自律走行制御

Autonomous Moving Control of Robot for Equipment Inspection

山下 浩二 YAMASHITA Koji JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (副部長)
小林 正樹 KOBAYASHI Masaki JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (課長)
館野 純一 TATENEO Junichi JFE スチール スチール研究所 副所長 (理事)・博士 (工学)

要旨

製鉄所内においては設備点検・検査の自動化ニーズが高まっており、自走式ロボットを高精度に移動させることが非常に重要となっている。本研究では、目標ルートを高精度に追従する、屋内型 GPS を利用したロボットを開発した。ロボットの移動は、各車輪を独立した駆動モータで制御する四輪駆動・四輪操舵方式であり、直線、回転、全方位移動を可能とした。目標ルート追従のため、ロボット位置と目標ルートの関係をラウス・フルビッツ安定判別法の安定領域に入るように誘導制御した。その結果、目標ルートからの位置ずれ量が少ない安定した自律走行が可能となった。

Abstract:

It is very important to move the mobile robot with a high degree of accuracy. JFE Steel has developed robot using indoor GPS, that can follow target routes with high degree of accuracy. For linear, rotational and omnidirectional movement, we designed four-wheel drive and four-wheel steering system to control each wheel with an independent drive motor and a steering motor. For follow-up control of a target route, it was guided and controlled to bring the robot position and the target route relationship within the stable area of the decision result in the Routh-Hurwitz stability determination method. As a result, amount of misalignment from the target route was reduced and stable autonomous traveling became possible.

1. はじめに

製鉄所においては設備点検や検査作業を自動化させるニーズが年々高まってきている。このような作業を代替させる自走式ロボットは、目標ルートを所定の精度で追従しながら移動^{1,2)} する必要がある。ルートの与え方としては、レールやガイド等による有軌道方式や磁気や光学を用いたテープ誘導方式、測位センサ等による自律移動方式がある。

有軌道方式は高精度な移動が可能であるが、レール等の変更には制約が大きい。テープ誘導方式の場合はテープの貼り直し等によるルートの変更は容易であるが、テープが貼れない場所への適用はできない。また、その移動精度は磁気センサ・光学センサの測定精度に依存し、現状においてはそれほど高くない。一方、自律移動方式は、基本的にロボット等の移動方向に制約が少なくルート設定に対する拡張性も高いが、実用的な技術課題も多い。

自律移動方式のロボットにとって高精度な自己位置認識は必須の技術であり、エンコーダや IMU (慣性計測装置) などロボットに搭載した内界センサを利用する方式やレーザ測域センサ、カメラ等によるランドマークの認識等の外界セ

ンサを利用する方式、ロボット外部に設置したアンテナ等によりロボット位置を認識する方式^{3,5)} などがある。

内界センサ方式は一般にオドメトリ (積算距離法)、デッドレコニング (推測航法) と呼ばれるもので、この方式単独では、その性質上移動距離が長くなると位置認識誤差が累積する可能性がある。外界センサ方式は一般に SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) で用いられるもので、外界センサの測定精度に依存するため、位置認識誤差は土数十 mm あることが多い。外部アンテナ方式には屋内型 GPS (Indoor GPS) や電波ビーコン、RFID⁶⁾ 等がある。

また、移動方式は一般的には車輪方式、履帯 (クローラ) 方式等があるが、後者については履帯をスリップさせながら方向転換するという機構のため、移動誤差を許容せざるを得ない。

上記の目的および技術的背景のもと、外部アンテナによる測位システムとして屋内型 GPS を利用した車輪型移動ロボットを開発・製作し、所定エリア内における高精度移動の実証実験を行ったので報告する。

2. 測位システムの概要

現在、実用化されている測位システムの主要なものとして

は GPS 方式，無線 LAN 方式，赤外線方式，超音波方式等⁷⁾がある。その測位精度を比較したものを表 1 に示す。

屋外の移動誤差は RTK (Real Time Kinematic)-GPS 方式⁸⁻¹⁰⁾による 10~20 mm，屋内の移動誤差は超音波方式による 50~80 mm が最も高精度であるが，本研究の目的である高精度移動という点においては不十分である。そのため，本研究では，通常の屋外 GPS 機能を模したシステムを屋内で実現した屋内型 GPS (indoor-Global Positioning System: indoor GPS) を採用した。その仕組みは，人工衛星に相当する複数の赤外線レーザー灯台 (トランスミッタ) を設置し，トランスミッタにて構築された屋内型 GPS 空間内にロボットを配置するもので，複数個のトランスミッタを基準にした三角測量の原理により高精度の測位を可能とする。例えばトランスミッタを 3 個用いた場合，停止した対象の三次元測位は ±1 mm 以内の精度になるとされている。

本研究で採用した屋内型 GPS の概要について説明する。

表 1 測位システムの比較

Table 1 Comparison of the positioning method

Positioning method		Indoor		Outdoor	
		Avail.	Accuracy	Avail.	Accuracy
GPS	Alone	×		○	10~20 m
	Differential-GPS	×		○	1~5 m
	RTK (Real Time Kinematic)-GPS	×		○	10~20 mm
Wireless LAN	Wi-Fi	△	10~200 m	○	10~200 m
	RSSI (Received Signal Strength Indicator)	△	20~30 m	○	20~30 m
	TDOA (Time Delay Of Arrival)	△	20~30 m	○	20~30 m
Infrared rays	RFID (Radio Frequency Identifier)	○	2~3 m	○	2~3 m
Visible light	Image recognition	○	1 m	○	1 m
UWB (Ultra Wide Band)		○	100~200 mm	△	100~200 mm
Ultrasonic wave		○	50~80 mm	△	50~80 mm
Indoor GPS		○	±1 mm	△	±2 mm

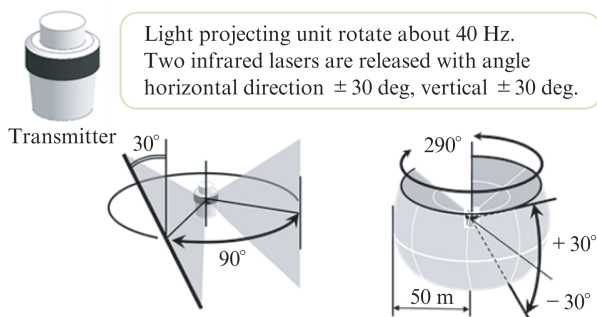


図 1 屋内型 GPS の赤外線レーザー照射角度
Fig. 1 Angle of infrared laser radiation of indoor GPS

屋内型 GPS は三角測量の原理を利用しているため最低 2 個のトランスミッタが必要であり，トランスミッタ数が増えれば測位精度も向上する。各トランスミッタは投光部が約 40 Hz で回転し 2 本の赤外線レーザを放出している。1 個のトランスミッタからの赤外線レーザ到達距離は 30 m 程度である。図 1 に示すように，赤外線レーザは水平方向 ±30°，垂直方向 ±30° の視野角に設定されている。

ロボットに搭載された赤外線レーザ受信部 (センサ) への仰角は，図 2(a) に示すように，傾斜した 2 本の赤外線レーザが通過した時間差から計算する。また図 2 (b) に示すように，方位角は基準となるストロボ発光時と回転する 2 本の赤外線レーザの midpoint が通過した時間差から計算する。

図 3 に屋内型 GPS のシステム構成を示す。センサ情報を取り込み計算用 PC に送信するレシーバ (以下 PCE とする)，およびセンサ情報からロボットの位置・姿勢角を計算するための計算用 PC も含めた構成となっている。

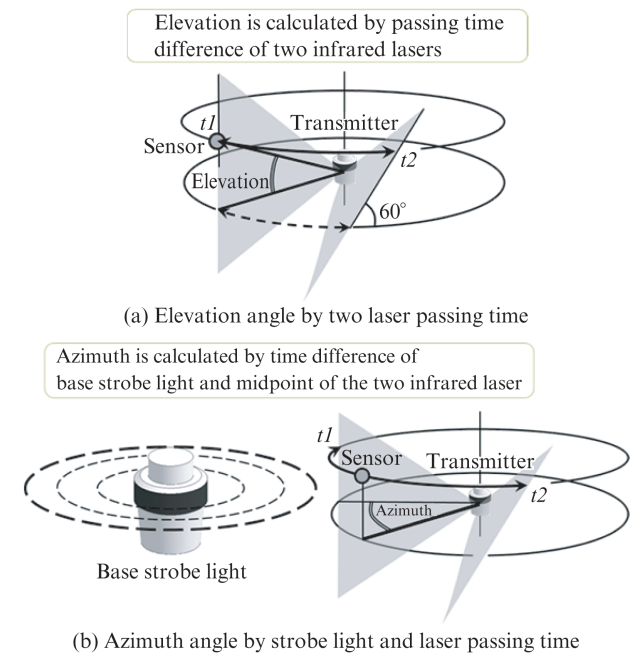


図 2 レーザ通過時間による仰角と方位角の計算
Fig. 2 Calculation method of elevation and azimuth angle by infrared laser passing time

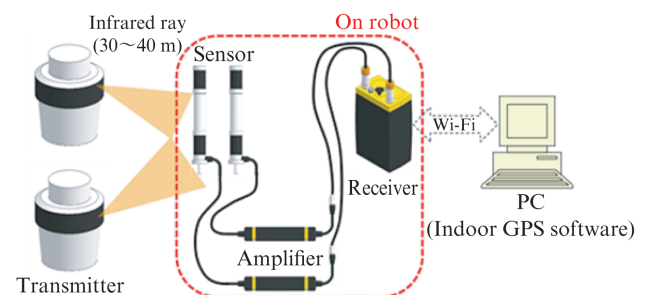


図 3 屋内型 GPS のシステム構成
Fig. 3 System configuration of indoor GPS

3. 屋内型 GPS を利用したロボット制御

3.1 移動制御のシステム構成

図4に自走ロボットシステムの構成を示す。屋内型GPSは、3個のトランスミッタ、ロボットに搭載するトランスミッタからの赤外線レーザを受信するセンサ4個およびPCE、PCEからの情報を無線LANで受信しロボットの位置・姿勢角を計算する計算用PCから構成される。一方、ロボットの移動制御システムはロボット搭載の制御用PCおよび上記の計算用PCから構成され、PC間も無線LANによる情報通信が行われる。

図5に制御システムの情報処理系を示す。制御用PCは、計算用PCからロボットの位置・姿勢角情報を受け取り、ロボットを目標ルートに追従して移動させるため、駆動モータおよびステアリングモータのコントローラに対し、制御ロジックに基づいて車輪回転速度、車輪ステアリング角度の命令を出す。

3.2 ロボット機構・ハードウェア構成

図6にロボットのハードウェア構成を示す。ロボットは目

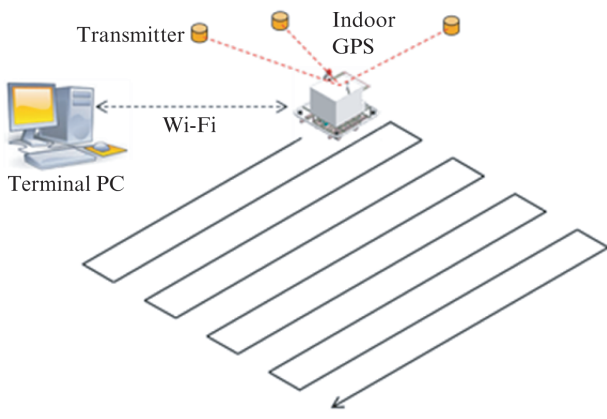


図4 自走ロボットのシステム構成

Fig. 4 System configuration of autonomous mobile robot

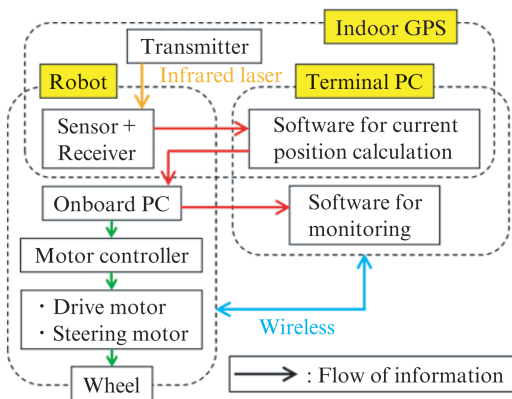


図5 制御システム内の情報処理

Fig. 5 Information process in the control system

標ルートを追従しながら自走するため、高精度な移動を実現できる車輪方式を採用した。各車輪を独立した1個の駆動モータおよび1個のステアリングモータで制御する四輪駆動・四輪操舵とすることにより、直進移動、スラローム移動、超信地旋回を可能とした。また、無線方式と合わせて電源をバッテリー駆動としたことで、ロボットは移動エリア上を、ケーブルがない完全に独立した状態で移動できる。

図7に車輪配置を示す。各車輪のステアリング軸は正方形の頂点に配置しており、ロボットをスラローム制御する際のロボット回転中心と各車輪のステアリング角度および回転速度は図7に示す関係となっているため、ロボットの向きに依存せず正確なスラローム制御が可能である。

3.3 屋内型 GPS を用いた走行制御ロジック

移動エリアを設備点検するためにロボット中心が通る目

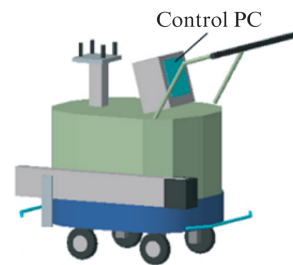


図6 自律移動ロボット

Fig. 6 Autonomous mobile robot

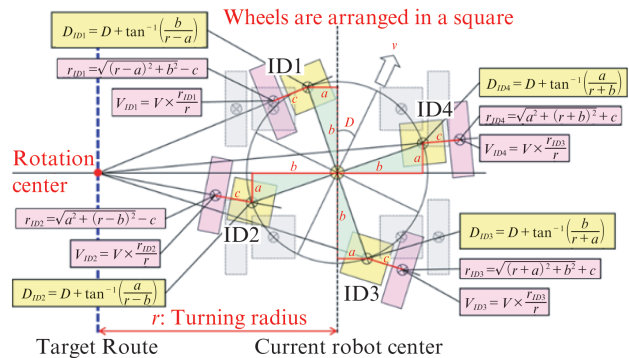


図7 ロボットの車輪配置

Fig. 7 Wheel arrangement of the robot

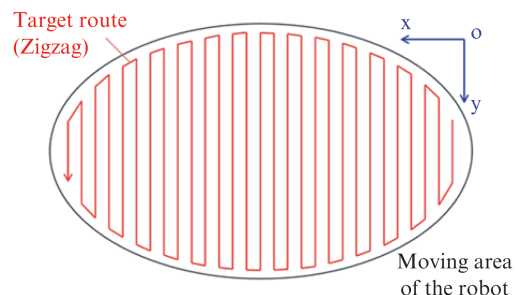


図8 走行実験パターン

Fig. 8 Experiment of operation pattern

標ルートのパターン例を図8に示す。移動エリアの面形状は長方形であることが多いため、面内を網羅して走行するためのロボット中心の基本的な目標ルートは直線を組み合わせることになる。

図9を用いて、当初の制御ロジック1について説明する。ロジック1は、ロボットがスラロームしながら目標の直線を軌跡追従するロジックである。ある時点におけるロボット中心から目標ルートへの垂線距離 η_t およびロボットの姿勢角度 θ_t は屋内型GPSから得ることができ、ロボットのステアリング角度の変更量 $\Delta\theta_t$ は図9中の式①で定義する。すなわちロボット中心が目標ルートから離れているほど、またロボットの移動速度が低いほど $\Delta\theta_t$ は大きくなる。これは、実際の自動車の運転等からもイメージしやすいものである。

その後、ロボット中心は目標の直線と交差することになり、交差以降は $\Delta\theta_t$ の符号を逆転させ逆にステアリングを切るようにするため、再び目標の直線に接近、交差する。この繰り返しによりロボットはスラロームしながら目標の直線を軌跡追従する。

さらに軌跡追従性を向上させるために図9中の式①を変更した制御ロジック2について図10で説明する。

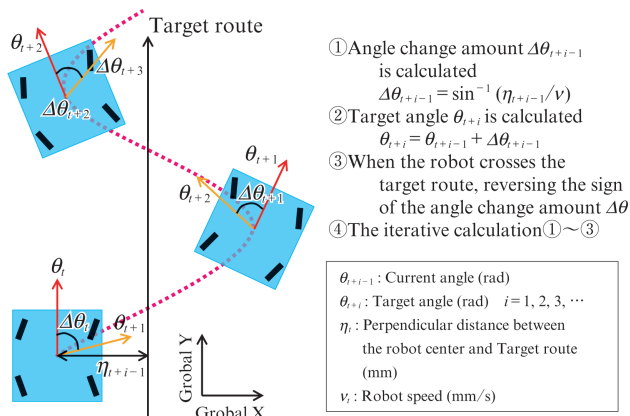


図9 従来のロボット制御ロジック1
 Fig. 9 Conventional robot control; logic 1

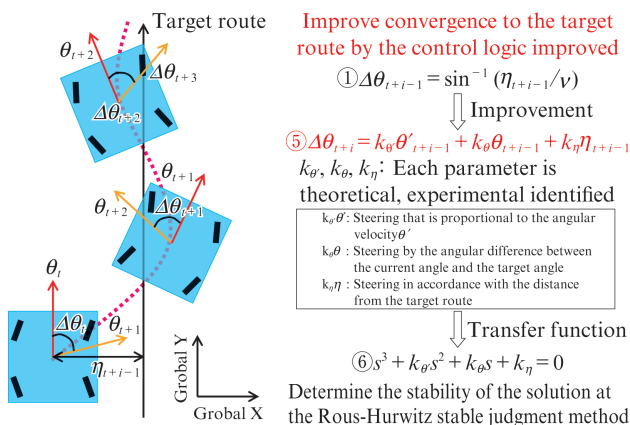


図10 改良したロボット制御ロジック2
 Fig. 10 Improved robot control; logic 2

ロボットの回転角速度 θ' とステアリング角 θ 、ロボット中心から目標ルートへの垂線距離 η_i 間の関係式として図10中の式⑤が成立する。このときの係数 $k_\theta, k_\theta, k_\eta$ が満足すべき条件としては、図10中の式⑥の全ての解 s の実数部分が負である、すなわちラウス・フルビッツの安定判別法にて解が安定領域に入っている必要がある。

上記制御ロジック1, 2について数値シミュレーションによる検証を実施した。初期条件を表2、設定速度パターンを図11(a)、シミュレーション結果の代表例を図11(b)に示す。

制御ロジック1は目標ルートへの収束が難しいことが分かる。一方、制御ロジック2は係数 $k_\theta, k_\theta, k_\eta$ の設定により収束パターンは異なるものの安定した収束が見込めること

表2 走行解析の初期条件

Table 2 Initial condition of numerical simulation

Initial angle	θ	1	deg
Initial position	X	5	mm
	Y	0	mm
Control cycle	CC	10	Hz
Maximum speed	V_{max}	200	mm/s
Acceleration	a	40	mm/s ²
Distance	L	2 000	mm

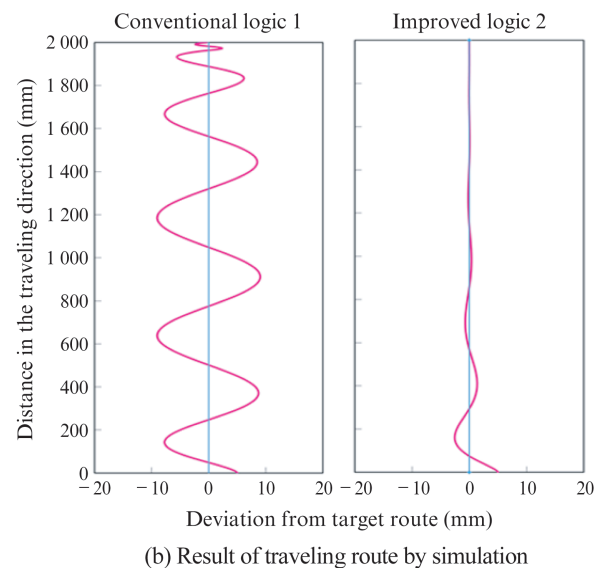
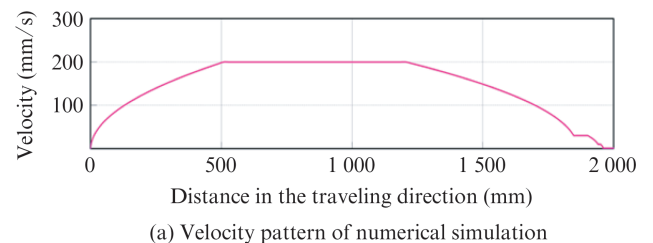


図11 ロボット走行解析の数値計算結果

Fig. 11 Numerical simulation result of robot traveling

が明らかになった。この結果よりロボットには制御ロジック 2 を適用した^{11,12)}。

4. 評価実験

試作したロボットを用いて屋内型 GPS による走行実験を実施した。写真 1 に実験で使用したロボットの外観写真を示す。目標ルートプランとして図 8 のような直進と旋回の組合せによるジグザグ経路を設定した。図 12 (a) に示すとおり、車輪動作としては、ロボットの y 方向移動が完了すると四輪ともその場で 90° 旋回、x 方向移動が完了すると同様に 90° 旋回し、次の y 方向移動を行うことになる。

様々な目標ルートプランを設定した実機実験を実施し、その過程で数値シミュレーションベースの係数 $k\theta'$, $k\theta$, $k\eta$ の実機チューニングも行った結果、図 12 (b) に示すように、

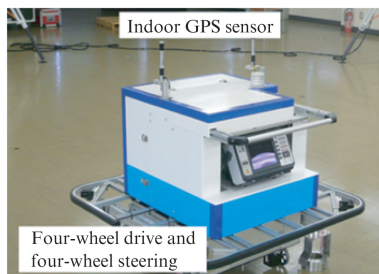
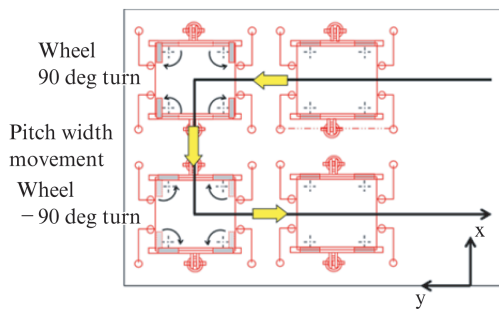
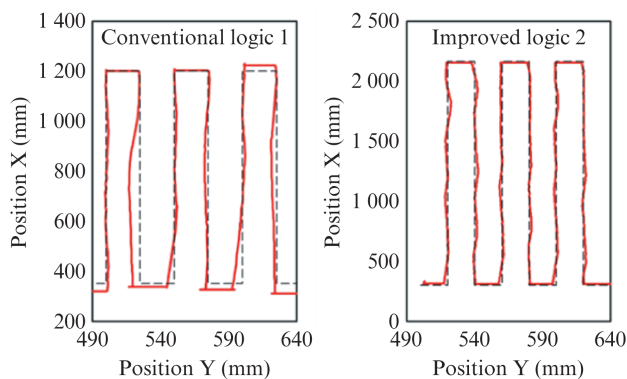


写真 1 ロボットの外観写真

Photo 1 External appearance of actual robot



(a) Experimental motion of 90 degrees turning



(b) Experimental result of autonomous moving

図 12 走行実験の動作と走行軌跡の結果

Fig. 12 Experimental motion and result of traveling route

最終的にロボット移動速度 200 mm/s においても目標ルートからの偏差を ± 2 mm 以内に抑えることができた。

5. おわりに

本稿では、自走式ロボットを高精度に移動させるために、三角測量の原理に基づいた赤外線レーザ方式の屋内型 GPS を使用した四輪独立駆動・操舵方式のロボットを開発し、機構および制御ロジックの数値シミュレーションによる検証、実機実験による最適化を実施した。その結果、一般的な移動ロボットの追従精度が数十 mm 程度であるのに対し、速度 200 mm/s における目標ルートからの偏差を ± 2 mm 以内に抑えて高精度に追従できることを確認した。この高精度な誘導制御技術を用いた自走式ロボットにより、製鉄所における設備点検・検査の一層の自動化を進めていきたい。

参考文献

- 1) 佐藤暁, 村松鋭一. 移動ロボットの軌道追従制御. 計測自動制御学会東北支部 第 275 回研究集会. 2012, p. 1.
- 2) 羽田芳朗, 高瀬國克. iGPS を用いたカート型搬送ロボットの軌道追従制御. SICE SI2002 システムインテグレーション部門 講演会. 2002, p. 143.
- 3) 磯崎直哉, 中後大輔, 横田祥, 高瀬國克. iGPS における無人軌道車 (AGV) のナビゲーション. 電気学会次世代産業システム研究会資料. 2011, IIS-11-007, p. 35.
- 4) 磯崎直哉, 中後大輔, 横田祥, 高瀬國克. iGPS を用いた無人搬送車の移動制御 (第 3 報). 電気学会次世代産業システム研究会資料. 2012, IIS-12-006, p. 21.
- 5) 磯崎直哉, 中後大輔, 横田祥, 高瀬國克. iGPS における無人搬送車 (AGV) 測位システムの研究. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集. 2010, vol. 2010, no. 2A2-B03.
- 6) 横林亮介, 河野公則, 河野実則. 屋内向け高精度位置検知システムの開発. 電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集. 2012, vol. 63, p. 245.
- 7) 中嶋信生. 屋内測位技術の動向. GPS/GNSS シンポジウム 2011. p. 221.
- 8) 柳原徳久, 初本慎太郎. さまざまな次世代 GPS 測位方式: 1. RTK-GPS. 情報処理. 2002, vol. 43, no. 8, p. 831.
- 9) 浪江宏宗, 樊春明, 白井澄夫, 安田明生. ネットワーク RTK-GPS 測位精度の測点位置依存性に関する実験的研究. 電気学会論文誌 D. 2005, vol. 125, no. 7, p. 745.
- 10) 佐田達典, 江上翔悟, 村山盛. RTK-GPS による移動体測位の特性に関する基礎的研究. 土木情報利用技術論文集. 2008, vol. 17, p. 195.
- 11) 小林正樹, 小原祐司, 石田匡平, 館野純一. 屋内型 GPS を利用した自走式ロボットの開発. SICE 産業応用部門 2016 年度大会一般講演. 2016.
- 12) Kobayashi, M.; Ishida, K.; Tateno, J. Development of Autonomous Mobile Robot Using indoor GPS. 3rd International Conference on Mechatronics, Automation and Manufacturing. 2016.



山下 浩二



小林 正樹



館野 純一