

Abstract

Over the years, Yamaha Motor Co., Ltd. has developed various automated vehicles. Examples include a low-speed automated vehicle running along an electromagnetic guide line^[1], an automated vehicle relying on the high-precision RTK-GPS used in surveying and similar applications^[2], and an off-road automated vehicle functioning with a 3D LIDAR and three-dimensional maps^[3].

These technologies are currently serving as the building blocks for the development of a mobility service system that allows on-demand dispatching of multiple low-speed automated vehicles. Looking ahead, the goal is to make a low-speed automated vehicle-based service, covering resorts or a few square kilometers in the city center, available to the elderly, people traveling with children, people in wheelchairs, and other average users.

This paper presents an overview of the above mobility service system. More specifically, the Virtual Guide Line (VGL) system that performs automated driving based on identifying the vehicle position using the feature values of asphalt and other road surfaces, as well as the control server that performs intersection arbitration and on-demand dispatch of multiple low-speed automated vehicles, are described.

1 はじめに

ヤマハ発動機（以下、当社）ではこれまでに、さまざまな自動走行車両を開発してきた。例えば、電磁誘導線による低速自動走行車両^[1]や、測量などで用いられる高精度のRTK-GPSを用いた自動走行車両^[2]、3D-LIDARと3次元地図によるオフロード自動走行車両^[3]などである。

現在、これらの技術を応用し、複数の低速自動走行車両をオンデマンドで配車が可能な「移動サービスシステム」を開発している。将来的には、高齢者、子連れ、車いす利用者などを含む一般のユーザを対象とした、数キロ四方程度の広さの市街地やリゾートなどでの低速自動走行車両によるサービスの実現を目指している。

本技術紹介では、上記移動サービスシステムの概要について説明する。具体的には、アスファルトなどの路面の特徴量を用いた自車位置同定によって自動走行するVGL（Virtual Guide Line）を搭載した低速自動走行車両および複数台の低速自動走行車両の交差点調停やオンデマンド配車などを行う管制サーバについて説明する。

2 移動サービスシステム概要

移動サービスシステムの概要について説明する。

本システムは、複数の低速自動走行車両とそれらを集中制御する管制サーバとによって構成されている（図1）。

移動サービスは、スマートフォンの配車アプリから利用可

能である。このアプリからの配車要求が管制サーバに送信されることで、配車時間の通知と配車が行われる。ユーザは、自身のスマートフォンまたは配車された車両内部のタブレット端末のアプリに目的地を入力することで、自動走行車両による目的地までの移動が可能となる（図2）。

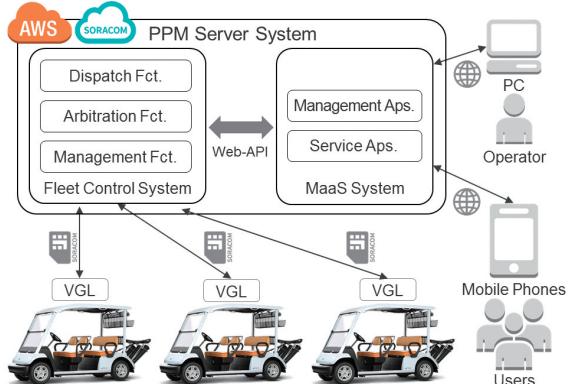


図1 移動サービスシステムの全体構成

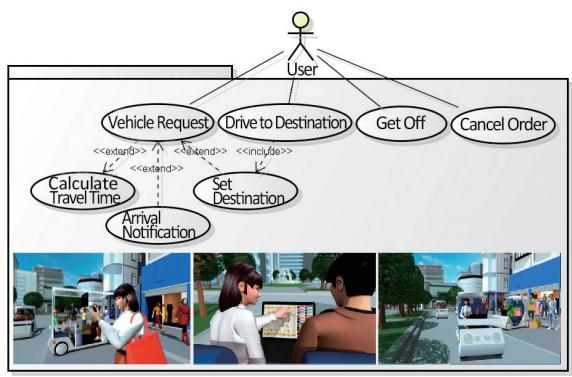


図2 移動サービスシステムのユースケース

3 VGLを搭載した自動走行車両

移動サービスシステムは複数台の自動走行車両によって構成される。自動走行制御には車両位置情報が重要であり、前述のように、電磁誘導線や、測量などで用いられる高精度な RTK-GPS (Real Time Kinematics -GPS)、レーザによつて周辺環境を 3 次元測量可能な 3D-LIDAR を用いた自車位置同定技術をこれまでに開発してきた。

本技術紹介では、SwRI(Southwest Research Institute)との共同研究で新たに開発した、アスファルトなどの路面の特徴量により自車位置同定を行う自動走行システムである、VGL (Virtual Guide Line)^[4] による低速自動走行車両を紹介する。この車両の外観を図 3 に示す。

VGL は、車両底部に設置されたカメラ（図 4）で撮影した路面画像を、事前に記録したマップデータベースの情報を照会（画像マッチング）することで、車両の位置姿勢情報を取得する自車位置同定機能を備えている。また、ナビゲーションシステムによって求められた目的地までの経路と自車位置情報に基づき、最高速度 20km/h で経路を追従走行する機能に加え、経路上に障害物を見つめた際に車両を減速または停止させる 3D-LIDAR による障害物認識機能も備えている。

3-1. VGL位置同定の原理

上記 VGL システムの特徴的な機能である、位置同定機能についてより詳細に説明する。



図3 VGL システム搭載、低速自動走行車両

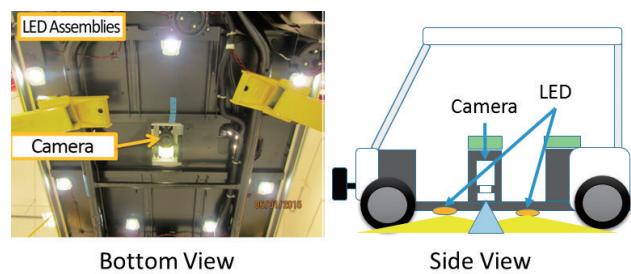


図4 車両底部のVGLカメラ&LED照明

図 5 に VGL システムのブロック図を示す。

本位置同定機能は、車両底面に取り付けられたカメラと、安定的に路面を撮影するための複数の LED 照明、RTK-GPS よりも性能は劣るが安価な DGPS (Differential GPS) と姿勢センサによって構成される DGPS-IMU、コントローラによって構成される。また、路面画像と位置情報を対応付けて記憶したマップデータベースを有している。VGL で自動走行

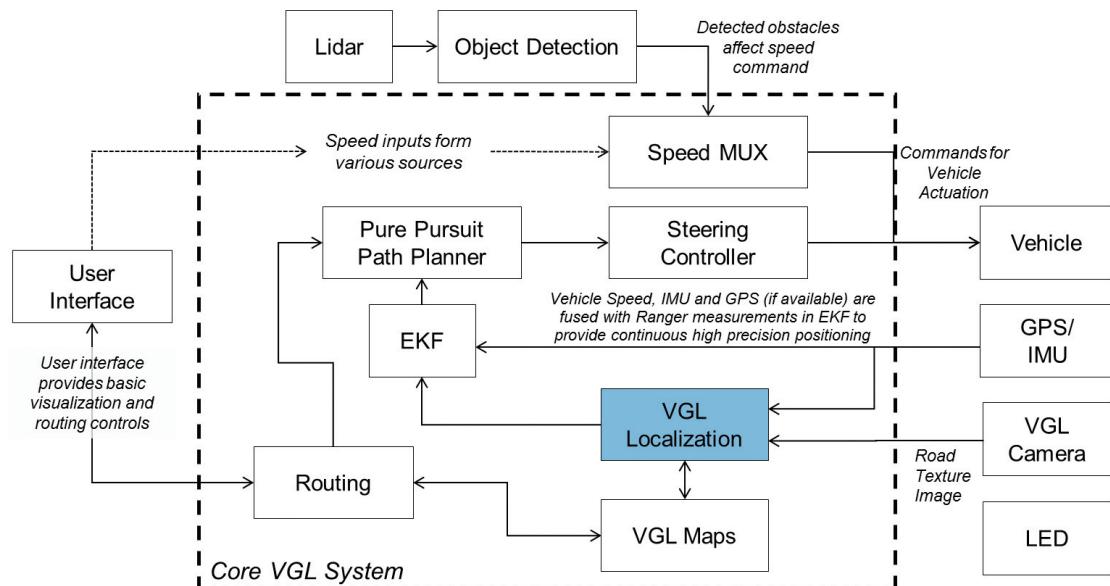


図5 VGLシステムのブロック図

を行うには、事前にこのマップデータベースを作成する必要がある。マップ作成の方法を図 6 に示す。マップの作成は、VGL を搭載した車両で路面画像、DGPS-IMU、オドメトリによる車速情報を同時に記録しながらオペレータによるマニュアル操作で運転することで行う。これにより各路面テクスチャに対応する位置情報をマップデータベースから抽出することが可能になるが、さらに連続して記録した路面画像の重複部分が不整合なくつながるよう、画像マッチングの技術でつなぎ合わせるとともに、それに対応する位置姿勢情報の誤差を最小にする補正処理も行われている（図 6(b)）。

自動走行を行う際、図 7 (a) に示すように、カメラによって

撮影した路面画像から路面テクスチャの特徴を抽出し、図 7 (b) に示すように前記マップデータベースの画像情報と画像マッチングさせる。この処理により図 7 (c) に示すようにそれに対応した位置姿勢情報を得ることができる。また、図 7 (a) に示すように、求められた位置姿勢情報はロバスト性向上を目的に、DGPS-IMU の位置姿勢情報を拡張カルマンフィルタ (EKF : Extended Kalman Filter) によって補完しており、路面テクスチャを一時的に取得できない場合であっても VGL 車両は自動走行に必要な位置姿勢情報を得ることができる。

この VGL 位置同定は、高精度の位置同定技術 RTK-GPS 以上の精度で車両位置情報を取得することが可能である。

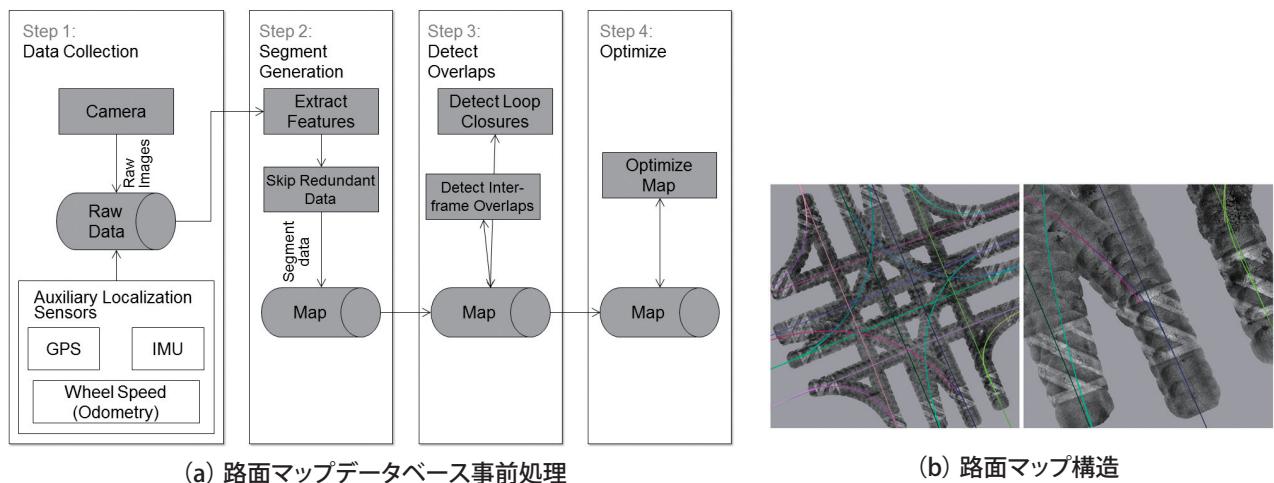


図6 VGLシステムの路面マップ作成(マップ事前処理)

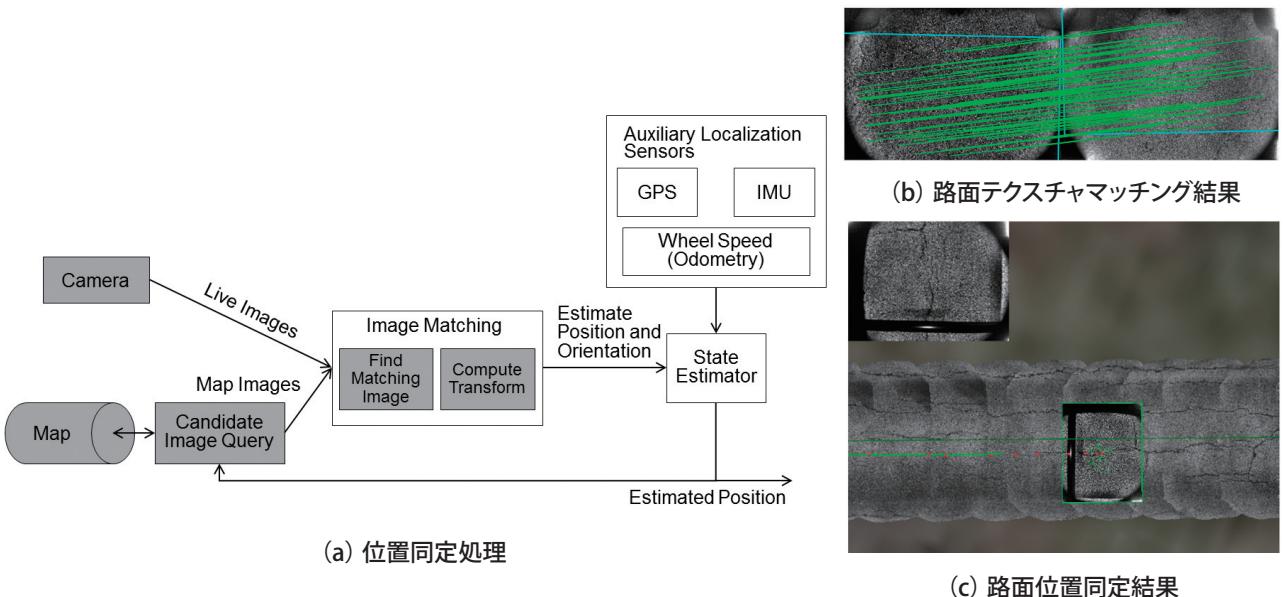


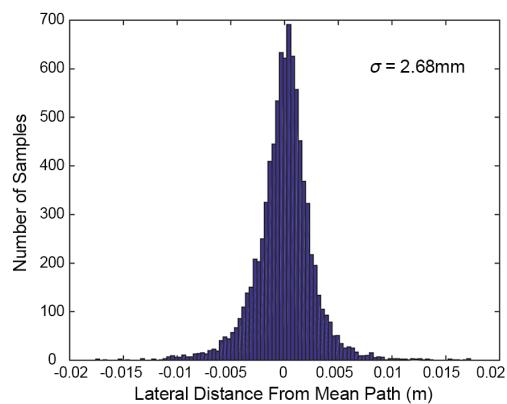
図7 VGLシステムの位置同定原理

3-2. VGL 位置同定の性能評価

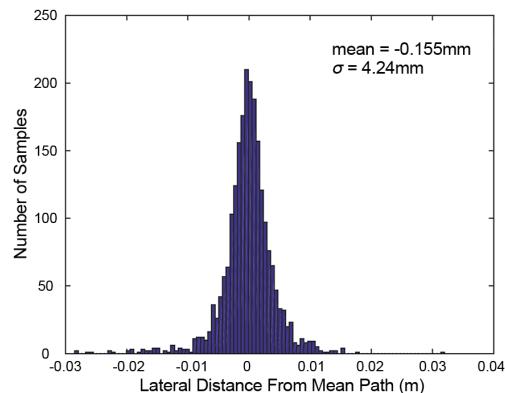
アスファルト、コンクリートを走行した際の VGL 位置同定精度のばらつきを図 8 のヒストグラムに示す。

図 8(a) に示すように、アスファルト上であれば、誤差 2.68mm の精度で測位できる。また図 8(b) に示すように、アスファルトと比較して凹凸などの特徴が少ないコンクリートであっても誤差 4.24mm の精度で測位できた。

一般的な自動走行システムでよく採用される RTK-GPS の誤差 20mm ~ 200 mm 程度と比較して、非常に高い位置同定精度を VGL は有していることが確認できた。



(a) アスファルトでの測位情報ヒストグラム



(b) コンクリートでの測位情報ヒストグラム

図 8 VGL 位置同定の精度(アスファルト、コンクリート)

4 管制サーバ

管制サーバは、サーバが複数の自動走行車両の運行を集中制御することで、自動走行による移動サービスを実現している。具体的には、スマートフォン経由での自動走行車両のオンデマンド配車機能や自動走行車両同士の交差点でのスムースな運行管理のための合流調停機能を備えた。さらに、

ユーザへの配車時間通知機能やオペレータ向けの運行管理機能なども実装した。

この管制サーバの基本機能（車両情報を記憶するデータベースや、調停処理などの追加機能）をプラットフォーム化することで、開発者が移動サービスアプリの開発に注力できるようにした。

4-1. 管制サーバプラットフォーム

上記、管制サーバプラットフォームについて説明する。

走行中の自動走行車両に対してサーバが交差点通過許可指令を送ることで、交差点での調停機能を実現している。このような調停機能を実現するためには、「リアルタイム性」や「高アクセス負荷耐性」、「セキュリティ」などの性能用件を満たすサーバプラットフォームが必要となる。

そこで、リアルタイム性や大量のアクセス処理性能、信頼性などの性能用件が求められる証券取引システムで採用実績のある「ラムダーアーキテクチャ」^[5]を基に、上記性能用件を満たす論理アーキテクチャを設計した（図 9）。ラムダーアーキテクチャは、リアルタイム性が要求されるデータや大容量のデータなど、異なる特性を有する複数のデータを並行して処理するのに適したアーキテクチャであり、データの特性ごとに最適な処理技術を採用できることを特徴としている。

この論理アーキテクチャでは、上記の性能用件を満たすために、自動走行車両とサーバとで行われる通信データの特性を分析し、リアルタイム性が要求されるデータについては Speed Layer Data Base と Speed Event とによって処理することで、複数の自動運転車両に対する調停処理の高速化を実現した。

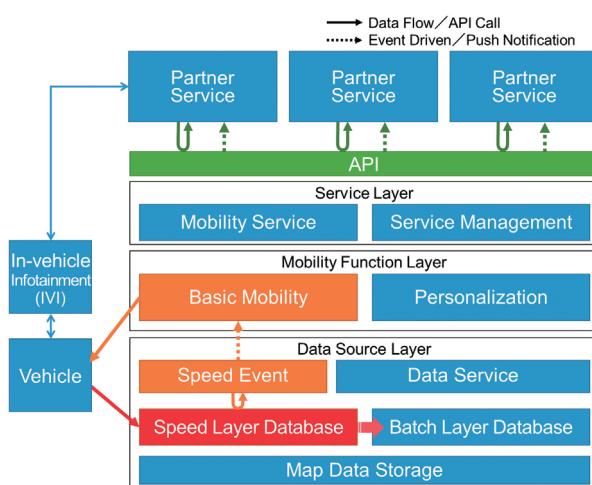


図9 管制サーバプラットフォームの論理アーキテクチャ

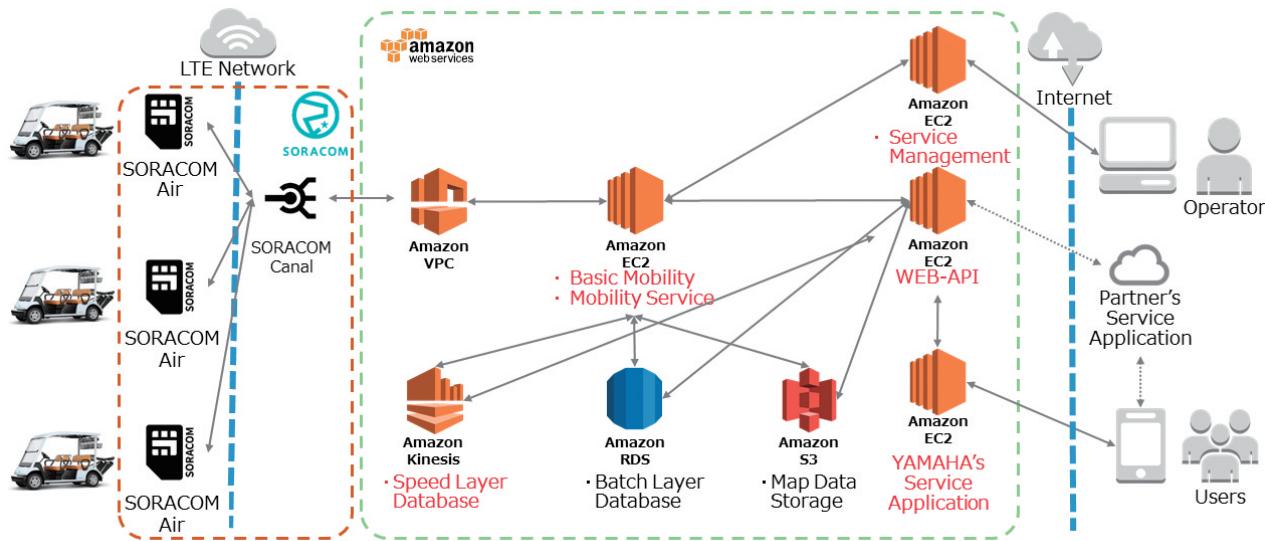


図10 管制サーバプラットフォームの実装

そして上記アーキテクチャを、図 10 に示すようにクラウド PaaS(Platform as a Service) サービスの AWS^{TM[6]} 上で実現することを目指した。具体的には Amazon KinesisTM + EC2TM サービスにより、Speed Layer Database および Speed Event を実現している。このような実装により自動走行に必要なリアルタイム性を実現した。なお、車両サーバ間の通信は、自動走行車両のハッキングを防ぐために、LTE 網から AWS サーバまでの通信経路を、高いセキュリティを持つ VPC (Virtual Private Cloud) によって接続可能な SORACOM^[7] の通信サービスを採用した。

このように、サーバアプリ開発のためのプラットフォームを整備することで、開発者は調停機能などのアプリケーション開発に集中することができるようになった。また、サーバプラットフォーム構築の際に、大規模システムなどすでに実績のある AWS や SORACOM などのクラウド PaaS サービスを活用することで、安定したプラットフォームを短期間で構築できた。さらに、車両台数が増えた際に必要となる、サーバのスケーラビリティの問題についてもクラウドサービスの活用により解決できると考えている。

4-2. WEB-API による移動サービスシステムおよび移動サービスアプリ

また、オープンイノベーションによる、低速自動走行車両を使った移動サービスの実現を目的に、サービスアプリ開発用の WEB – API (WEB Application Program Interface) を備えていることも特徴としている。セキュリティによって通

常は外部からアクセスできないが、移動サービスの実現を目指すパートナーに対して本 API を公開することが可能である。



図11 WEB – API による移動サービスシステムおよび移動サービスアプリの例

このWEB-APIを活用することで、パートナーは移動サービスシステムに対して、ユーザ認証や配車要求などの指令、車両の利用回数・利用状況などの情報取得が可能となる。つまり、これらのAPIを組み合わせて活用することで、容易に低速自動走行車両を使った移動サービスシステムや移動サービスアプリケーションの開発が可能となる。

図11に、WEB-APIを活用して開発した移動サービスシステムおよびサービスアプリの例を示す。ユーザ認証機能の利用や、ユーザの利用明細情報、ユーザ情報、車両の運行などの情報を取得することができる。

5 おわりに

本稿では、低速自動走行による移動サービスシステムについて紹介した。

具体的には、路面画像によって自己位置同定および自動走行を行うVGLシステムや、複数の自動走行車両による移動サービスを実現するための管制サーバについて紹介した。

現在、移動サービスシステムの実用化に向けて、低コスト化や、安全性、信頼性、セキュリティなどを向上させるべく開発を進めている。またユーザの使い勝手を向上させるためにサービスアプリのユーザビリティについても改善を行う予定である。

将来的には、本システムでは管理できない他の一般走行車両との協調が課題になるとを考えている。この課題に対して、公道自動運転車両への応用が期待されている高精度三次元地図を使ったダイナミックマップ^[8]への対応も視野に入れ、検討を進めていきたい。

■参考文献

- [1] ヤマハ発動機ホームページ「電磁誘導式ランドカーとは」<<https://www.yamaha-motor.co.jp/golfcar/landcar/about-landcar/self-driving.html>> (アクセス日 2017/8/3)
- [2] 石山 健二、神谷 剛志：ロボットカーによる建設現場における無人測量、および経路追従制御のための位置・姿勢推定技術；ヤマハ発動機技報 2008-12 No.44
- [3] 難波 直樹、藤井 北斗、張 炎甫、神谷 剛志：自律ビーコンの知能化プラットフォーム開発；ヤマハ発動機技報 2016-12 No.52
- [4] Kristopher Kozak and Marc Alban. "Ranger: A ground-facing camera-based localization system for ground vehicles." Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 2016 IEEE/ION. IEEE, 2016.

[5] Nathan Marz. "Big Data Lambda Architecture" (<http://www.databasetube.com/database/big-data-lambda-architecture/>) (アクセス日 2017/9/13)

[6] Amazon Web Services、"Powered by Amazon Web Services" ロゴ、[およびかかる資料で使用されるその他のAWS商標]は、米国その他の諸国における、Amazon.com, Inc. またはその関連会社の商標です。

[7] SORACOM、SORACOM Air および SORACOM Beam は、株式会社ソラコムの登録商標または商標です。

[8] ダイナミックマップ2.0 コンソーシアム <<https://www.nces.i.nagoya-u.ac.jp/dm2/index.html>> (アクセス日 2017/9/6)

■謝辞

VGLシステムの開発にあたってはSouthwest Research InstituteのKristopher Kozak氏、Marc Alban氏、また、管制サーバの開発にあたっては株式会社永和システムマネジメントの中垣内 勇祐氏、森 崇氏にそれぞれ多大なご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

■著者



藤井 北斗

Hokuto Fujii

技術本部

EM開発統括部



渡辺 仁

Hitoshi Watanabe

技術本部

EM開発統括部