

# 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

Construction site measurement by UGV (unmanned ground vehicle) and  
position/posture estimation technology for path-tracking control systems

石山 健二 神谷 剛志

## 技術紹介

### Abstract

As increasing attention has come to focus on the capabilities of UGVs (unmanned ground vehicles) for performing rescue/relief tasks in natural disasters and security surveillance and observation tasks, UGV research and development programs are being pursued actively in Japan and overseas. In the construction industry, UGVs for unmanned construction work have now reached the stage where practical use is viable. In this report we introduce an example of experimental use of a UGV for unmanned construction site measurement tasks based on joint application of Yamaha Motor Co., Ltd. vehicle control technologies and Toa Corporation measurement data management systems.

The aim of this experiment was to attempt to establish an automated measurement system, to test and evaluate the basic performance of a UGV and isolate problems to be solved for practical use, and to evaluate the accuracy of measurements performed by the UGV. This report focuses primarily on measurement accuracy. In the first half of the report we give a summary of the UGV automated measurement system and comparison of measurement accuracy vs. conventional manual measurements, while the latter half of the report deals with efforts to solve the problems of vehicle control using EKF (Extended Kalman Filter) technology.

## 1 はじめに

近年、ロボットカー(以下、UGV:Unmanned Ground Vehicle)は、防災やセキュリティ、計測などの分野で活躍が期待されており、国内外で研究・開発が盛んに行われている。建設現場における無人施工技術も実用段階に入りつつある。本稿ではヤマハ発動機株式会社(以下、当社)の車両制御技術と東亜建設工業株式会社の測量情報管理システムを組み合わせ、UGVを用いて建設現場で無人測量実験を行った事例を紹介する。

本実験の目的は自動測量システム確立を目指し、UGVの基本動作確認および実運用を行う際の課題抽出、測量精度検証を行うものである。本稿では特に測量精度に関して述べる。前半ではUGVによる自動測量システムの概要および従来の有人方式との測量精度比較について、後半では拡張型カルマンフィルター(以下、EKF:Extended Kalman Filter)を用いて車両制御における問題を解決した点について述べる。

## 2 システム概要

埋立て工事において従来からバギー車とGPSを用いた埋立て地盤の高さ計測が行われている(図1)。雨天時や夏の猛暑、冬の厳しい寒さなど悪条件下においても、作業者は車両に搭載されたパソコン画面上に示される目標経路に沿って、車両を正確に低速で長時間運転する必要がある。

当社は東亜建設工業と協力し無人測量用UGV(図2)と基地局システムを開発した。UGVは当社製サイドバイサイドビークルRhino660をベースに改造を行ったもので、固定基地局はパソコンや簡易操作インターフェイスなどから構成される。無線LANを介して基地局から車両に対して作業開始・終了などの指示を与えたり、車両ステータスや測量データを基地局でモニタリングしたりといったことが可能である。

UGV車両側は、モード管理や軌道計算を行うパソコン、アクチュエーターコントローラー(操舵モーター、ブレーキモーター、スロットルモーターやセンサーなどを管理)、リモコン操縦のためのビデオ装置、通信装置、GPS受信機、障害物センサー、傾斜計などから構成される(図3)。GPS受信機にはRTK-GPS+WADGPSハイブリッド方式のNavcom社製StarFireを用いた。



図1 有人での地盤高測量



図2 測量用UGV

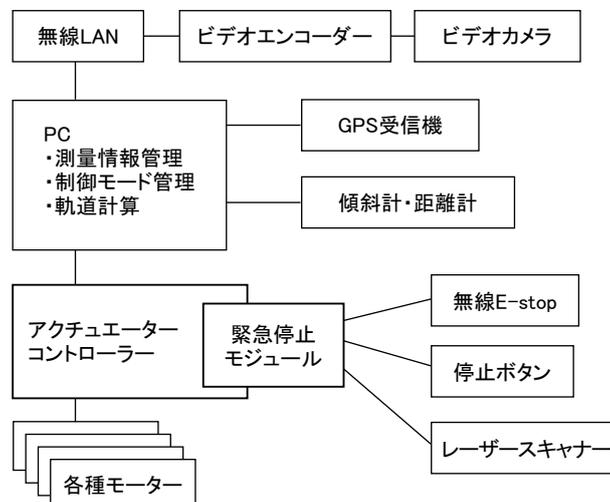


図3 UGV 車両側システム構成

### 3 測量実験結果

UGV無人走行での地盤高計測精度を確認するため、従来の有人バギーによる測量およびUGV手動走行による測量と比較を行った(図4、図5)。これらは80m×15mの矩形エリア内に5m間隔で測量線(直線)を設定し、その線に沿って地盤高計測しながら走行させた時の計測結果である。十分な計測ポイント数を得るため車両は5km/hという低速で走行した。図4、図5より有人バギーによる計測との差分の2σはおよそ0.02mであり、測量精度の点からみると従来の有人測量に置換えることが可能であると確認できた。

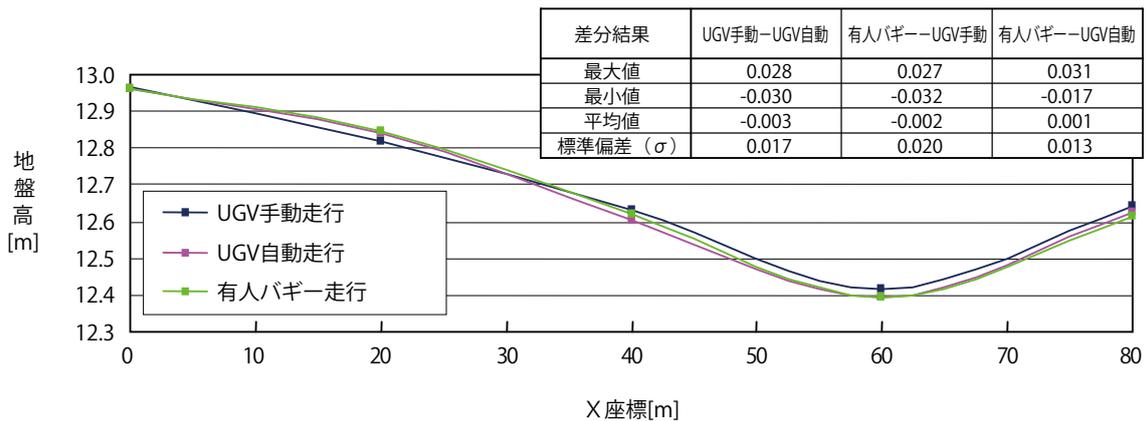


図4 各種計測における地盤高比較 (某工事現場内)

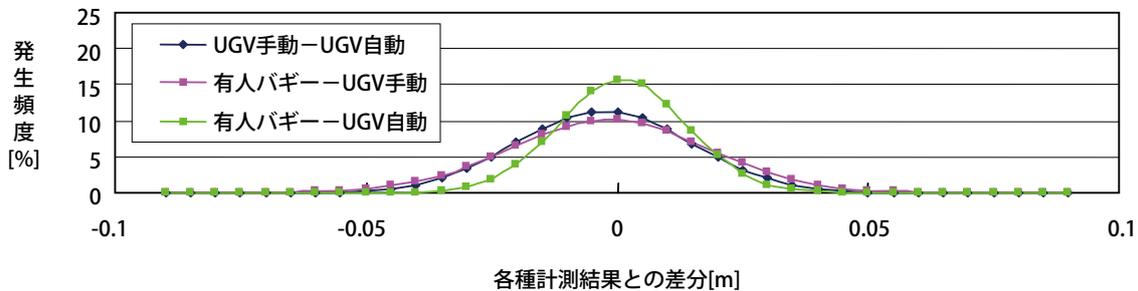


図5 各種計測結果との差分分布 (某工事現場内)

### 4 軌道追従制御における問題解決

UGVの目標軌道への追従方法は、車両前方軌道上の適当な点を目標とし、操舵角度を決定するものである。精度良く追従させるには車両がどの方向を向いているかを正確に知ることが重要となる。高性能な方位センサーやIMU(Inertial Measurement Unit:慣性計測装置)を用いれば簡単に実現できるが、今回は測量用に搭載されているセンサーのみを用いて最小限のコストでの機能実現を目指した。

本UGVには測量用に高精度RTK-GPSが搭載されており、まず初めに車両走行軌跡から車両ヨー角を計算し追従制御を行った。その時の車両軌跡を図6に示す。目標軌道に対して大きく蛇行しているのが分かる。これは車両ヨー角の計算に誤差や高周波ノイズを含むためである(図8)。高周波ノイズは操舵輪の細かいぶれの原因になる。データの比較参照用にはHemisphere社製高精度GPSコンパスVector Sensor(精度0.15deg)を用いた。

ヨー角が正確に得られない原因として、過去の軌跡を用いることによる遅れや、GPSのサンプリング周波数が遅い(10Hz)ことなどが挙げられるが、最大の原因はGPSアンテナが測量を兼ねるため、フロント操舵輪付近に搭載されていたことである。このためGPS軌跡と車両進行方向が必ずしも一致せず、また路面の凹凸などによる細かい操舵乱れによりヨー角計算にノイズが混入する。

そこで、定常旋回をしている場合は実際の車両ヨー角速度とGPS軌跡から得られるヨー角速度が同じであるという仮定をし、GPSのみからある程度操舵角の影響を考慮した車両ヨー角計算を行った。GPSに加えて車速センサーや操舵角センサー、加速度センサー(x,yの2軸)を用い、単純なデッドレコニングのモデルと合わせてEKFによる補正を行った。車速センサーと操舵角センサーはもともとUGV制御用に組み込まれているものである。加速度センサーも安価なものを用いコスト上昇を抑えた。図7にEKFを用いて追従制御を行った時の車両軌跡を、図9にその時の車両ヨー角の計算値を示す。ヨー角計算におけるノイズが除去され、追従誤差RMSは25cmから15cm以下に改善された。

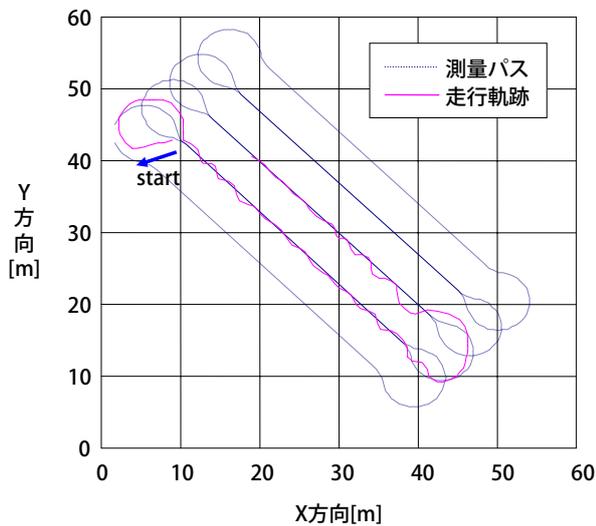


図6 GPSのみを用いた追従制御軌跡

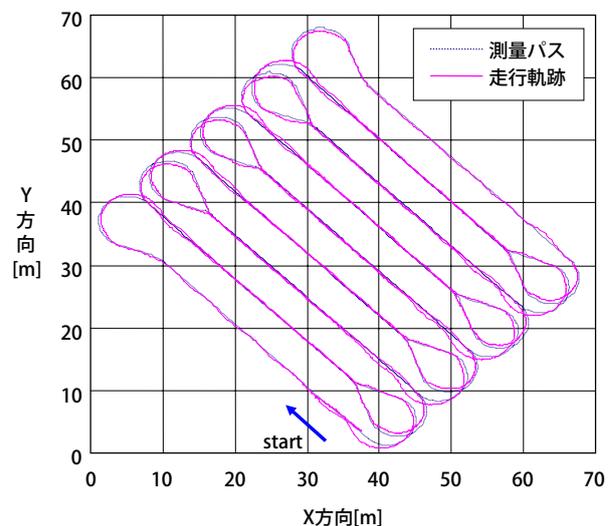


図7 EKFを用いた追従制御軌跡

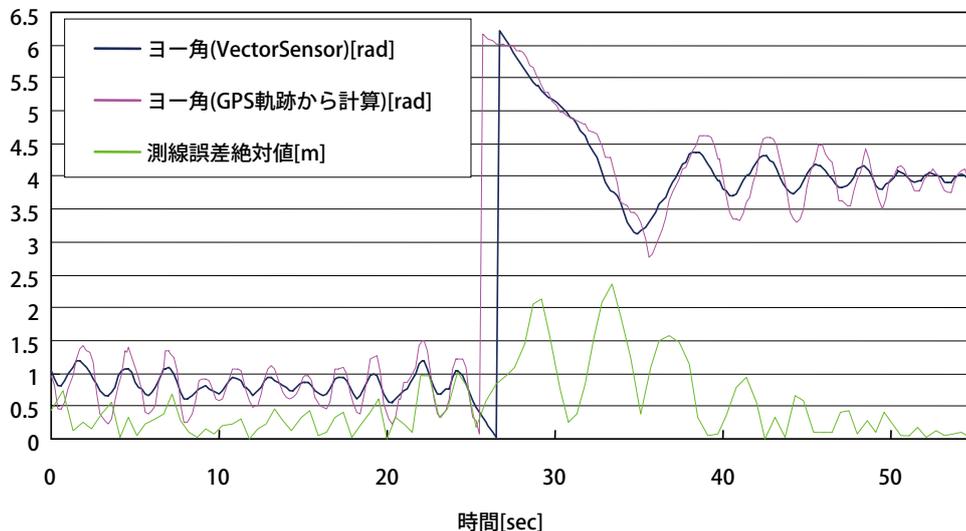


図8 GPSのみを用いた車両ヨー角計算

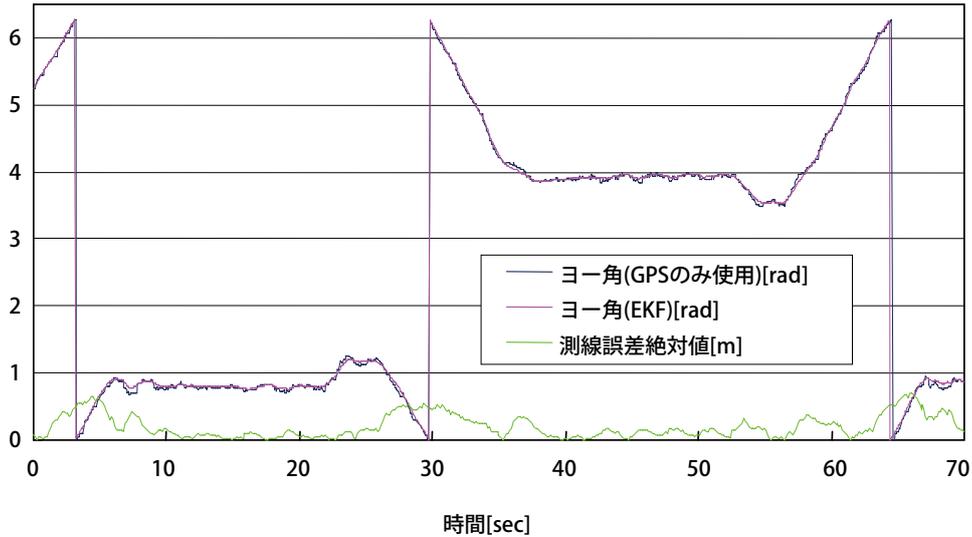


図9 EKFを用いた車両ヨー角計算

EKFによる推定とは運動モデルによる予測誤差およびセンサー誤差の分散を重みとした重み付線形和で表される。以下に今回用いたEKFの式を示す。

測量UGVで用いた式

状態変数

$$\mathbf{x} = (x, y, v, \theta, \dot{\theta}, a_x, a_y, \varphi)^T$$

- $x$ : 車両x座標
- $y$ : 車両y座標
- $v$ : 車両速度
- $\theta$ : 車両方位
- $\dot{\theta}$ : 車両方位角速度
- $a_x$ : 車両進行方向加速度
- $a_y$ : 車両横方向加速度
- $\varphi$ : 操舵角度

運動モデル

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \Delta t \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ a_x \\ \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{w}$$

- $\mathbf{w}$ : ノイズ
- $\Delta t$ : 時間ステップ

センサーデータ

- $x_{gps}$ : 車両x座標(GPS受信機)
- $y_{gps}$ : 車両y座標(GPS受信機)
- $v_{gps}$ : 車両速度(GPS受信機)
- $\theta_{gps}$ : 車両方位
- GPS受信機のデータから前処理により計算
- $v_{enc}$ : 車両速度(ECU情報: 車速パルス)
- $\varphi_{steer}$ : 操舵角(ECU情報: 操舵角センサ)
- $g_x$ : 車両進行方向加速度(加速度センサ)
- $g_y$ : 車両横方向加速度(加速度センサ)
- $\omega_{gyro}$ : 車両方位角速度(ジャイロ)

観測モデル

更新時間が異なるセンサ毎に分割し、値が更新された時だけ観測修正を行う。

$$\mathbf{z}_{gps} = \begin{bmatrix} x_{gps} \\ y_{gps} \\ v_{gps} \\ \theta_{gps} \end{bmatrix} = \mathbf{h}_{gps}(\mathbf{x}, \mathbf{r}_{gps}) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ v \\ \theta \end{bmatrix} + \mathbf{r}_{gps}$$

$$\mathbf{z}_{veh} = \begin{bmatrix} v_{enc} \\ \varphi_{steer} \\ f(v_{enc}, \varphi_{steer}) \end{bmatrix} = \mathbf{h}_{veh}(\mathbf{x}, \mathbf{r}_{veh}) = \begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ L\dot{\theta} \end{bmatrix} + \mathbf{r}_{veh}$$

$$\mathbf{z}_g = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_y \end{bmatrix} = \mathbf{h}_g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_g) = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ v\dot{\theta} \end{bmatrix} + \mathbf{r}_g$$

$$\mathbf{z}_{gyro} = [\omega_{gyro}] = \mathbf{h}_{gyro}(\mathbf{x}, \mathbf{r}_{gyro}) = [\dot{\theta}] + \mathbf{r}_{gyro}$$

- $\mathbf{r}_{***}$ : ノイズ
- $L$ : 前後車軸間長

## 5 まとめ

前半ではUGVによる測量と従来の有人バギーによる測量とで比較を行い、測量精度の点からUGVによる無人測量が有効であることを示した。今後は完全な無人運用を実現するために障害物回避を含む安全機能、耐久性、使い勝手などを含めて研究開発を進めていく。後半ではEKFを導入し、安価なセンサーのみで制御における問題点を解決し測量に必要な性能を実現した例について説明した。

UGVをはじめとする自律移動ロボットは急速に発展しているが、人の手を放れて全てを自律的に行うにはまだ多くの課題がある。実用化を考えた場合、目的を明確にして必要な機能を最小限の時間とコストで実現するのは重要なポイントである。

### ■参考文献

- 1) 東亜建設工業(株)：ベルーガシステム <http://www.toa-const.co.jp/techno/method/sokuryou/r06/index.html>
- 2) Greg Welch, Gary Bishop,: An Introduction to the Kalman Filter, SIGGRAPH 2001

### ■著者



石山 健二  
 Kenji Ishiyama  
 コーポレートR&D統括部  
 システム技術研究部



神谷 剛志  
 Tsuyoshi Kamiya  
 コーポレートR&D統括部  
 システム技術研究部