<ショート・ペーパー>

つくばチャレンジのための自律移動ロボット：JW-Future

藤 本 勝 治*・梶 洋 隆*・根 来 正 憲*・吉 田 睦*
水 谷 浩 幸*・斉 藤 友 也*・中 村 克*

An Autonomous Mobile Robot for Tsukuba Challenge: JW-Future

Katsuharu FUJIMOTO*, Hirotaka KAJI*, Masanori NEGORO*, Makoto YOSHIDA*,
Hiroyuki MIZUTANI*, Tomoya SAITOU* and Katsu NAKAMURA*

“Tsukuba Challenge” is the only of its kind to require mobile robots to work autonomously and safely on public walkways. In this paper, we introduce the outline of our robot “JW-Future”, developed for this experiment based on an electric wheelchair. Additionally, the significance of participation to such a technical trial is discussed from the viewpoint of industries.

Key Words: mobile robot, Tsukuba challenge, electric wheelchair

1. はじめに

近年、航空機や船舶などに導入されていた自動操縦システムが、よりわれわれの生活環境に近いところにある自動車などの輸送機器へと適用されつつある。しかしながら、生活環境に近いがゆえに実環境での検証が難しく、実用化への道のは険しい。しかし 2007 年から、国内初めての本格的な公道実験として、屋外遊歩道での自律移動をめざすロボットのための技術チャレンジ「つくばチャレンジ」が行なわれている¹⁾。

第 1 回大会のつくばチャレンジ 2007²⁾では、全 33 チームの参加があり、課題である自律移動による 1 km の完走を果たしたのは 3 チームであった。自律移動に関する研究は、大学・研究機関をはじめ多くの企業でも行なわれているが、参加チームのうち企業からの参加はごく少数であった。

本論文では、2008 年 11 月に開催されたつくばチャレンジ 2008³⁾に参加するにあたり、著者らが製作した自律移動ロボット JW-Future について紹介し、つくばチャレンジ 2008 の結果とその考察を述べる。また、企業チームとしての視点から、このような技術チャレンジに参加する意義を示す。

2. システム構成

自律移動ロボット JW-Future の外観を Fig. 1 に、その諸元を Table 1 にそれぞれ示す。また、JW-Future のシステム構成を Fig. 2 に示す。

ベース車両として、弊社製品であるジョイスティックタイプの電動車椅子 JW-アクティブを使用した。JW-アクティブは重量が約 30 kg、耐荷重は約 100 kg であり、総重量がつくばチャレンジのレギュレーション上限の 100 kg に達しても十分な走行能力を有する。電源は 24 V のニッケル水素バッ

Fig. 1 JW-Future

Fig. 2 System structure

テリを採用し、1 回の充電で約 15 km の走行が可能である。また、ノーマルクローズタイプの電磁ブレーキを備えており、坂道の途中でバッテリー切れやシステム異常により動力が遮断された場合でも静止可能である。

外界認識用センサとして Laser Range Finder (LRF) を、自己位置計測用として Differential GPS (DGPS) を、姿勢角および角速度の計測用として Inertial Measurement Unit (IMU) を用いている。センサの詳細を Table 2 に示す。また、標準で備えるパルスエンコーダにより車輪速を計測する。メインコントローラには、自動車業界を中心に近年注目さ

* ヤマハ発動機株式会社 磐田市新貝 2500

* Yamaha Motor CO., LTD., 2500 Shingai, Iwata

(Received March 13, 2009)

(Revised September 18, 2009)

Table 1 Specification of JW-Future

Length [m]	1.1
Width [m]	0.65
Height [m]	1.5
Weight [kg]	72
Wheel Tread [m]	0.54
Wheel Size [inch]	24

Table 2 Specification of sensors

Laser Range Finder	Hokuyo UTM-30LX
Differential GPS	Hemisphere R110
Inertial Measurement Unit	Tokyo Keiki VSAS-2GM

れている開発手法であるモデルベース開発 (Model Based Development, MBD) を導入するために, dSPACE 社製の MicroAutoBox (MABX) を採用した. MBD では, MATLAB/Simulink を用いて制御ロジックを開発し, シミュレーションにて机上評価を行ない, 実機で検証するというサイクルを繰り返す. MABX を用いると, Simulink で記述されたアルゴリズムを C 言語などへ移植することなく実装できるので, 変換ミスの生じるリスクがなく, 問題があった場合も原因の洗い出しと修正が容易であり, 効率的な開発が可能である.

Fig. 2 に示すように, センサおよび JW の車両用コントローラの情報は, 車載 LAN である Controller Area Network (CAN) を通じて MABX に入力される. MABX は後述する自律移動アルゴリズムにより目標前進速度/目標回頭角速度を計算し, DA 出力により擬似的なジョイスティック操作量として車両用コントローラに入力することで, 左右の車輪速を制御する.

3. 自律移動アルゴリズム

自律移動アルゴリズムは大きく分けてナビゲーション系, ガイダンス系, 制御系の三つのブロックから構成される. 全体の制御ブロック図を **Fig. 3** に示す.

Fig. 3 Block diagram of the controller

3.1 ナビゲーション系

DGPS から得た緯度経度情報は, 北方向を x m, 東方向を y m, x 軸方向を 0 とし時計回りに正の値をとる方位角を θ rad とする局所平面座標系へ変換され, IMU, オドメトリとともに Extended Kalman Filter によって推定位置 $[\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{\theta}]^T$ を算出する. EKF は差動二輪車の運動学モデル

$$\begin{bmatrix} x(t+1) \\ y(t+1) \\ \theta(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & 0 \\ \sin \theta(t) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

に対して設計する⁴⁾. ここで, t はサンプリング時刻, T s はサンプリング周期, v m/s は前進速度, ω rad/s は回頭角速度である.

3.2 ガイダンス系

大域的な経路追従と局所的な障害物回避を組み合わせ, 目標方位角 θ_d rad を算出する. 大域的な経路追従手法として Line of Sight (LOS) を用い, 経路追従のための方位角を次式により求める⁵⁾:

$$\theta_{los} = \text{atan2}(y_{los} - \hat{y}, x_{los} - \hat{x})$$

$$-\pi \leq \text{atan2}(y, x) \leq \pi$$

ここで (x_{los}, y_{los}) は次式の関係より得られる:

$$(y_{los} - \hat{y})^2 + (x_{los} - \hat{x})^2 = R^2$$

$$\left(\frac{y_{los} - y_{k-1}}{x_{los} - x_{k-1}} \right) = \left(\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \right) = \text{constant}$$

ここで (x_k, y_k) , $k = 1, \dots, n$ は経路を構成する Way Point (WP), R は LOS 半径と呼ぶパラメータであり, $(y_k - \hat{y})^2 + (x_k - \hat{x})^2 < R^2$ のとき $k := k + 1$ とする. LOS の概念図を **Fig. 4** に示す.

Fig. 4 Conceptual diagram of Line of Sight

そして, 局所的な障害物回避を行なうために, 大島の提案する Sensor-Based Navigation 法⁶⁾を利用して θ_{los} を修正する. なお, 周囲が障害物で囲まれて移動不可となった場合は, 一定時間の停止の後に回頭して前進可能な方向を発見するようにしている.

3.3 制御系

目標前進速度 v_d m/s ならびに目標回頭角速度 ω_d rad/s を算出する. v_d は, 経路に設定された最大速度・前進可能距離の統計量 (最大値, 平均値) や経路からのクロストラック誤差など, 9 種類の状態量ごとに用意された前進速度マップの出力を求め, その最小値とする. また, ω_d は単純な比例制御

則 $\omega_d = K_p(\theta_d - \hat{\theta})$ を用いる．ここで K_p は比例ゲインである．

実際の開発では、三つのブロックを Simulink のサブルーチンとして記述し、MABX に実装している．直線経路上に二つの障害物がある場合の回避行動のようすを Fig. 5 に示す．

Fig. 5 Obstacle avoidance

4. つくばチャレンジ 2008

4.1 課題と設定

つくばチャレンジ 2008 の課題は、つくばエキスポセンターを出発してつくば駅方面に進み、450 m 地点で U ターンしてもとの道を戻り、ゴール前を通過して 950 m 地点で再び U ターンする、全長 1 km のコースを 2 時間以内に走破することである³⁾。

このコースに対し、WP は実走行データをもとに直線区間で 20–50 m、U ターン区間は約 1 m 間隔で 60 点程度設定した。LOS 半径 R は、直線区間では直進安定性を優先して 5 m、U ターン区間は経路追従性を優先して 3 m とした。最大走行速度は直線区間で 3 km/h、U ターン区間は 1.5 km/h に設定した。

4.2 結果と考察

つくばチャレンジ 2008 では、本コースの前半 100 m を使用したトライアルを通過したロボットが、翌日の本走行 1 km に参加できる。JW-Future は、2008 年 11 月 20 日に実施されたトライアルを 2 分 12 秒のタイムでクリアし、翌 21 日の本走行では 25 分 50 秒で本走行参加 22 チーム（全参加 50 チーム）中唯一の完走を果たした。

本コースを安定して走行するためには、以下に示す三つの点を考慮する必要があった。

- (1) GPS や地磁気センサの値が正確に得られない場所。
- (2) U ターン地点などの狭路。
- (3) 路面の凹凸やコーンなどの障害物。

(1) と (2) については、センサのステータスによって EKF をオドメトリ重視にしたり、 R などのパラメータを WP によって切り替えることで対処したが、その調整には多くの時間を費やした。特に後者はコース依存性があるため、汎用性をもたせるためには自動調整手法が必要であると思われる。(3) に関しては、他チームがリタイアした原因となった箇所でも大径ホイールの効果で影響を受けなかったことから、ホイール径は屋外移動に重要な要素であると考えられる。

4.3 参加の意義

著者らは、つくばチャレンジのような技術チャレンジに企業が参加することの意義をつぎのように考えている。

技術開発の促進 達成すべき目標が明確かつ参加者共通なので、技術開発のポイントが絞り込みやすく、到達レベルの把握が容易である。実際に、著者らは自己位置推定や障害物回避などの要素技術を短期間に開発することができた。

技術者の育成 要素技術開発だけでなく、システム全体の設計やプロジェクト管理などの上位レベルの業務を若手技術者が経験する絶好の機会である。また、社外の研究者と接する機会が増えることで、幅広い人脈の構築も期待できる。

社外への情報発信 企業の姿勢や技術力を社外へ広く発信できる。結果はメディアにも取り上げられたが、特に、自律移動ロボットの研究に携わる学生の方々に弊社の存在を強くアピール出来たと感じており、人材獲得の面で大きなメリットがあると考えている。

5. おわりに

本論文では、2008 年 11 月に開催されたつくばチャレンジ 2008 のために製作した自律移動ロボット JW-Future について紹介し、走行結果とその考察を述べた。また、企業チームとしての視点から、このような技術チャレンジに参加する意義を示した。

参考文献

- 1) 油田信一：つくばチャレンジ趣旨と課題，第 8 回計測自動制御学会 SI 部門講演会，3C1-1，941/942 (2007)
- 2) つくばチャレンジ 2007：http://www.robomedia.org/challenge/index.html
- 3) つくばチャレンジ 2008：http://www.robomedia.org/challenge08/index.html
- 4) S. Thrun, W. Burgard and D. Fox: Probabilistic Robotics, MIT Press (2005)
- 5) T.I. Fossen: Marine Control Systems, Marine Cybernetics (2002)
- 6) 大島 章：移動ロボットによる測域センサを用いたセンサベースナビゲーション，つくばチャレンジシンポジウム 2007 資料，10/11 (2008)