

# つくばチャレンジにおける倒立振り子制御台車を用いた自律制御

○ 五十嵐広希(日本 SGI) 齋藤 俊久(日本 SGI) 金城隆也(日本 SGI)  
IGARASHI Hiroki, SAITOH Toshihisa, KINJO Takaya, SGI Japan, Ltd.

## 1. 概要

屋外環境での自律ロボット走行実験競技つくばチャレンジに、日本 SGI 株式会社は「Team SegwayRMP」として参加した。本報告では、同大会に出場するに至った経緯、使用したロボットの詳細仕様を述べる。

日本 SGI 株式会社はグラフィックスコンピュータに特化したコンピュータハードウェア/ソフトウェア開発に始まり、HPC(High Performance Computing)、大規模ストレージ装置などの販売会社であるが、2000 年からそのコンピュータ技術を用いてロボット事業に積極的に参画しており、研究用のプラットフォーム型ロボットや、マネキン型ロボット、立ち乗り電動二輪車「Segway」の販売などを中心に事業化を実施している。つくばチャレンジへの参加もこの流れの中で進められた。

今回は日本SGIから販売をしている、米国 Segway社製、移動機能を有する移動台車プラットフォーム「Segway RMP(Robotics Mobility Platform)」の屋外実証実験とプロモーションの一環として、つくばチャレンジへの出場を実施した。

Segway RMP には自律走行に必要なセンサを搭載し、ナビゲーションアルゴリズムを搭載したノート PC により動作させている。今年度は GPS を用いず、最小構成での実現性確認を目指した。

## 2. ハードウェア構成

出場車両「SegwayRMP-TC2007」の構成を Fig 1 に示す。図中の構成要素は以下である。

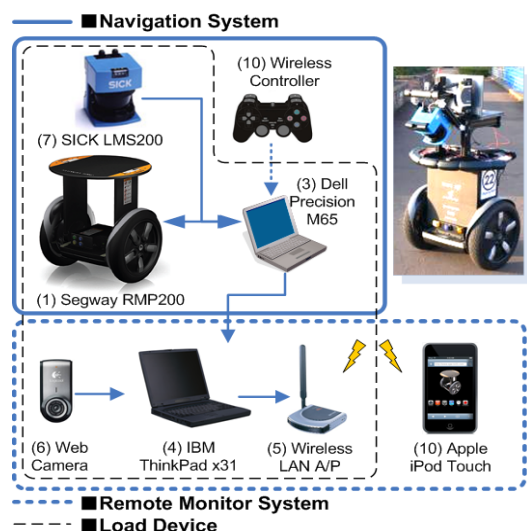


Fig 1. Segway RMP-TC2007

- 1) 移動台車プラットフォーム(Segway RMP200)
- 2) 搭載センサ用電源(鉛蓄電池 12V)
- 3) ナビゲーション用ノート PC(Dell Precision M65)
- 4) 情報発信用ノート PC(IBM ThinkPad X31)
- 5) 無線 LAN アクセスポイント(IEEE802.11g)
- 6) Web カメラ
- 7) レーザレンジセンサ(SICK LMS200)
- 8) 非常停止用ひもスイッチ(RMP200 内蔵)
- 9) 遠隔監視用情報端末(Apple iPod Touch)
- 10) 遠隔操作コントローラ(ゲームコントローラ)

ロボット総重量は約 80kg、一回の充電での走行可能距離は 13~24km 程度が期待できる。採用した移動台車プラットフォーム Segway RMP200 の緒元を Table 1 に示す。

Table 1. SegwayRMP200 Spec

<b>Size</b>	Footprint:76x61cm Height:75cm Ground clearance:11cm Wheel diameter:48cm
<b>Weight</b>	64kg
<b>Range</b>	13~24km
<b>Speed</b>	Max 16km/h
<b>Payload</b>	Max 45kg
<b>Hill-climbing Angle</b>	10degrees
<b>PC Interface</b>	USB or CAN-Bus
<b>Battery</b>	Two nickel metal hydride battery 72VDC, 3Ah
<b>Built charger accepts</b>	AC100~240V, 50~60Hz
<b>Sensor</b>	Encoder x 2 Gyro(Pitch, Yaw, Roll) x 1 Battery Voltage x 1 Motor Electric Current x 2

本プラットフォームの特徴は次のようである。

- 1) Segway PT (一人乗り立ち乗り電動二輪車) とベース部分の部品を共有し、高信頼性を実現
- 2) 二輪自立機構によりペイロードに比して小さなフットプリントを実現
- 3) 高い走破性、長い航続距離を実現

特に高い信頼性により、大会準備としてナビゲーションアルゴリズム開発に注力することが可能になった。また、SegwayRMP-TC2007 の緒元を Table2 に示す。ナビゲーション用ノート PC には

レーザレンジセンサおよび台車が接続されており、レーザレンジセンサと台車車輪に取り付けられたエンコーダの入力に応じて台車に対して動作指示を行う。処理手順については第4項で述べる。

Table 2. SegwayRMP-TC2007 Spec

<b>Size</b>	Footprint:76x61cm Height:100cm
<b>Weight</b>	80kg
<b>Speed</b>	1.2km/h
<b>Sensor</b>	Laser Range Sensor x 1 Encoder x 2 Gyro(Pitch, Yaw, Roll) x 1 Battery Voltage x 1

情報発信用ノート PC は、ナビゲーション用ノート PC に入力された情報とログ画像取得用 Web カメラからの情報を受け取り、無線 LAN アクセスポイントを介して無線で、遠隔監視用情報端末へ配信される。情報発信用ノート PC 内で Web サーバを立ち上げ、クライアント側(遠隔監視用情報端末など)では Web ブラウザで閲覧可能な構造とした。なお、今回は競技ルールを考慮し、データはロボット側からの一方のみであり、端末側から操作できる構造にできなかった。

レーザレンジセンサは走査面を路面と 45° の角をなすように取り付ける構造とした。前方はほぼ 1m まで、左右はレーザレンジセンサの検出可能距離までの検出が可能である。

### 3. アルゴリズム開発, 検証環境

アルゴリズム開発および検証環境として、コンピュータによるシミュレーション検証を提案, 実践した。

まず Fig2a に示すような環境情報取得ローグ台車を作製し、実コース環境の 3D 情報取得を行った。同台車にはレーザレンジセンサ4個, エンコーダが搭載されており, コースを移動させていくことで実コースの詳細な 3D 構造情報を取得出来る。松ボックリ公園までの 1km に渡る実コースを走行させ, 3D データを取得した。取得されたデータを Fig2b に示す。



Fig 2a. 3D Logger Cart

次に、競技で用いるロボット実機のシミュレータを作

成した。これには、外形の 3D データ, 倒立振り子による走行機能と搭載センサの振る舞いを模したソフトウェアモジュールが含まれる。シミュレータ環境内のバーチャルロボットを Fig3. に示す。

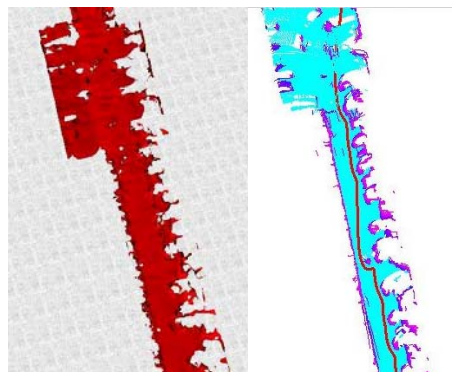


Fig 2b. 3D Course Data

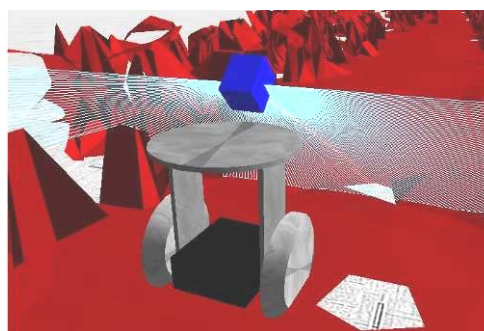


Fig 3. Virtual Robot

実機に搭載するナビゲーション PC と, シミュレータ PC を接続することで, ナビゲーション PC 側からは実コースに存在する実機が接続されたように見えるため, 実環境を考慮したアルゴリズム開発をコンピュータ内で完結することができ, Try and Error の Turn Around Time を大幅に減らすことができた。また, シミュレータを使用してセンサーデータを可視化することにより, 直感的にアルゴリズムの作成をすることができると共に, 不具合の原因特定の時間を大幅に短縮することができた(Fig 4)。さらに, ナビゲーションとシミュレータを同一の PC 上で稼動することも可能であり, シミュレータ用 PC を別途用意する必要もなく短期間での開発を実現した。

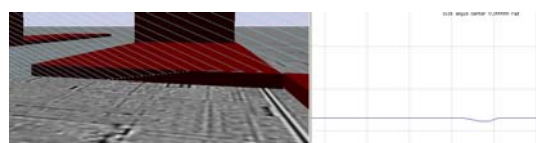


Fig 4. 可視化による不具合の原因特定

### 4. ナビゲーションアルゴリズム

今回, ナビゲーションアルゴリズムは, 必要最小限の情報から, なるべくシンプルなアルゴリズムで対応するよう留意して作成した。また, 事前の情報として, コースがほぼ直線であること, 総全長が 1km であることのみ

を用い、環境依存性を低くすることに注力した。

下向き 45 度のレーザデータを、エンコーダから得られるロボットのオドメトリ値に従って三次元座標に変換し、環境の形状を取得していく手法を取った(Fig 5a)。

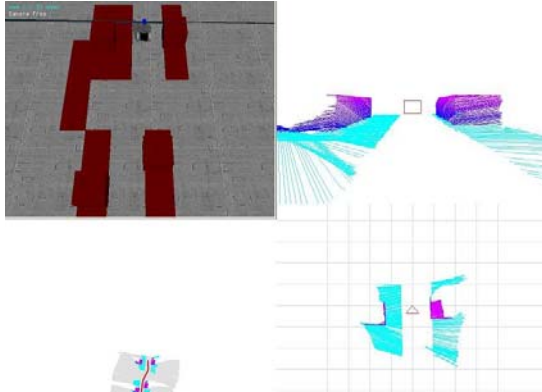


Fig 5a. 三次元形状の取得  
シミュレータ画面(左上) ロボット後方視点(右上)  
全体表示(左下) 上方視点(右下)

倒立振り子特有の前後の重心移動による揺れでレーザデータは変化するが、RMP 台車から得られる Pitch 角度によって補正した。得られる Pitch 角度は多少のタイムラグがあり、また坂道では倒立振り子の制御により、上り坂では台車が前傾、下り坂では後傾になるが、得られる Pitch 角度に適度のバイアスを掛けることにより対応した。そして環境の形状から、地面の高さや段差、平坦の判定をして走行可能部分を決定していき、走行可能以外の部分は障害物と扱った(Fig5b)。障害物に対する走行ナビゲーションのアルゴリズムの流れは Fig6a, Fig6b の通りである。

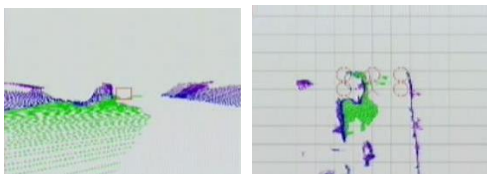


Fig 5b. 障害物(紫色), 平坦部(緑色)

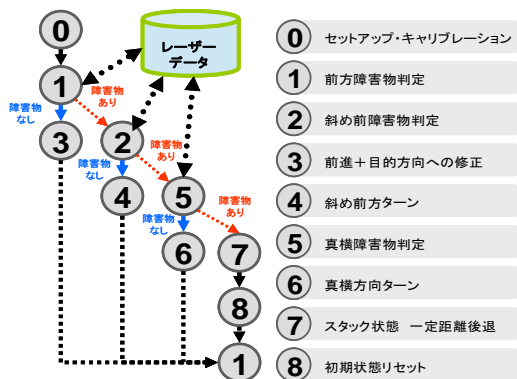


Fig 6a.

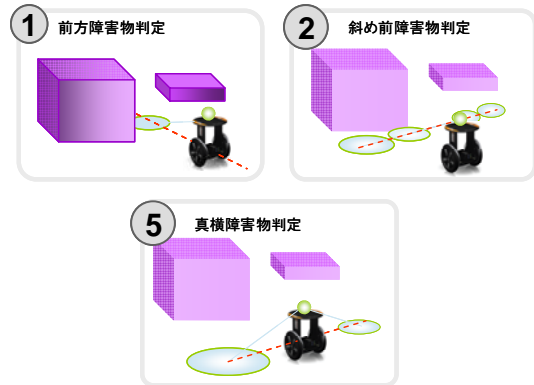


Fig 6b. Navigation Algorithm

本大会では、1km の走行距離を検知することを要求されている。今回は、エンコーダ情報のみを用いて移動距離を積算、1km で自動停止することとした。距離算出法を Fig 7 に示す。

現在のロボットの進行方向を求めるため、それまでに得たオドメトリ座標による過去十数点のサンプル座標の前方進路の平均を求めてロボットの現在の進行方向を決定した。これにより、新しい向きの道に進入した場合でも極端な道の方向変化が無い限り、障害物を回避しつつある程度進行すると、その道の方向が求まり進行方向を決定することができる。移動距離は、このように求まった進行方向とロボットの進行方向の内積を加算していった。内積をとることで障害物回避行動の時の進行方向以外の成分はキャンセルされ、道に沿って進行した距離を精度良く求めることができた。

この手法により、多少左右に迷ったことによる距離誤差、および左右エンコーダの累積誤差による進行方向の誤差をキャンセルできることが期待できる。なお、今回は 1km に渡りほぼ直線という情報を用いているが、例えば 500m 先で右 90 度曲がるというようなコースであっても、事前にその情報が明らかであれば十分対応可能であると考えられる。

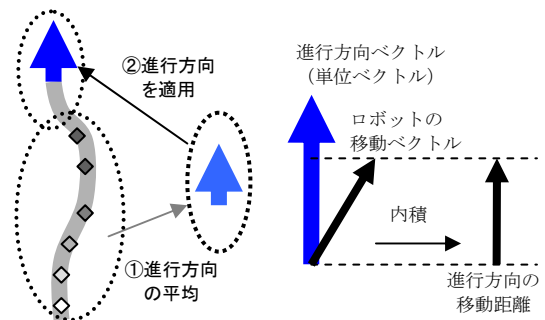


Fig 7. 走行距離の算出

また、限られた時間内で実際のコースでの実機を使用したパラメータ調整を行うために、走行ナビゲーションソフトの実行中にパラメータ調整用のメニューを表示して、ゲームパッドを使用してリアルタイムにパラメータ

を変更できるようにした(Fig 8)．これにより、パラメータ変更の度にソフトを起動しなおす必要が無く、約40個のパラメータを無理なく時間内に調整することができた．

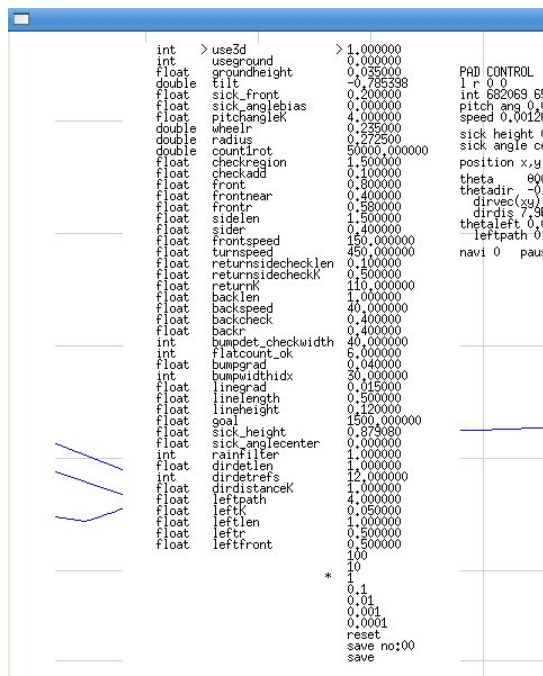


Fig 8. パラメータ調整メニュー

## 5. 結果と考察

実機による実走実験を 3 回行い、いずれもゴールまで自律走行が可能であったが、本戦では残念ながら 200m 付近でのリタイアという結果となった．リタイアの原因としては、障害物の存在を誤認識し、回避行動を取り、回避位置からの復帰中に路面に段差が存在し、行き過ぎてしまったものと考えられる．

二輪での自立走行をする場合、常にバランスを取る構造のため、段差等で走行抵抗が増加した場合、その後に指定位置より進んでしまうという特性がある．この特性には、レーザレンジセンサデータのノイズ除去や、前方より遠くの物体までの検知などでの対応が期待できる．

また、走行距離検出に関して、エンコーダデータだけを用いた手法を提案した．3 回の試行実験ではいずれも誤差 0.5% (+5m~+1.2m) 未満に収まった．これは、実距離検出アルゴリズムの有効性と、二輪自立型走行でのエンコーダ情報の正確性、SegwayRMP200 のハードウェア信頼性の高さを示すものと考えられ、二輪自立型では、自立制御のためにはスリップを許容しないことや、四輪型と異なり旋回時にスリップを前提としていないことがエンコーダ情報の誤差減少に貢献していると考えられる．

## 6. 結言

本戦においては完走をすることは出来なかったが、当初の参加目的であった Segway RMP の信頼性を確認することが出来た．また、公道での走行実験を実体験として経験する事により、今後の移動ロボット開発に向け非常に参考になった．次回は今大会の経験を踏まえ、是非完走できるようがんばっていく所存である．

## 7. 謝辞

本競技大会を主催頂いたニューテクノロジー財団をはじめ、茨城県、つくば市など関係機関、さらに、本競技大会に出場之际にご協力頂いた、北陽電機株式会社、ジック株式会社、寿技研株式会社その他関係各社に謝意を表します．