

## (6)自律移動知能モジュール群の開発 協調走行に関する知能モジュール群

### (ア) フォーメーション走行用モジュール群の開発

開発モジュール名称： フォーメーション走行用モジュール

オープンソースライセンス

商用以外の利用の場合，修正 BSD ライセンスが適用，商用利用の際には，個別に使用条件

開発実施者： 京都大学

開発目的：

複数台の移動ロボットを協調走行(フォーメーション走行)させるためモジュール群の開発を行う。

成果：

複数の移動ロボットを協調走行(フォーメーション走行)させるためモジュール群の開発を行った。本モジュール群では，移動ロボット群を協調走行させるため，Leader-Follower 型のアルゴリズムに基づく制御系を実装した。Leader-Follower 型の制御系とは移動ロボット群のうち 1 台を Leader，残りを Follower と区別し，Follower を Leader に対して一定の相対位置関係で追従させることでフォーメーション走行を実現するものである。Leader は外部からの指令(例えば，遠隔操作指令あるいは自律走行モジュールからの指令)に基づき走行を行う。したがって，本モジュール群を用いると Leader のみを遠隔操作あるいは自律走行させることで，その他の Follower ロボットは一定の位置関係で追従してくるため，移動ロボット群の移動の省力化・衝突危険性の低減化を図ることが期待される。

Fig. 50は3台の移動ロボットを用いた例を示している。先頭の1台が Leader ロボットであり，後方の2台のロボットが Follower ロボットであり，3 角形の形状を形成するような相対位置関係でそれぞれが Leader ロボットへの追従を行っている。本モジュール群は，このような Follower が Leader に対して一定の相対位置関係で走行する際の速度指令値を生成している。

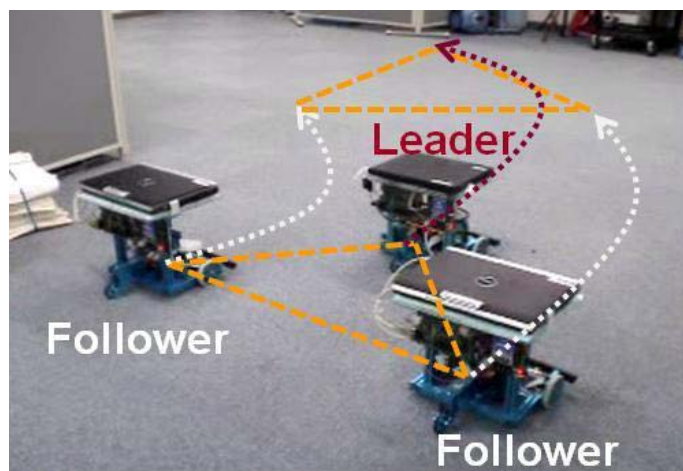


Fig. 50 移動ロボット群による協調(フォーメーション)走行例(3台の場合)

Fig. 51はFig. 50の3台の移動ロボットをフォーメーション走行させるためのモジュール構成を示している。

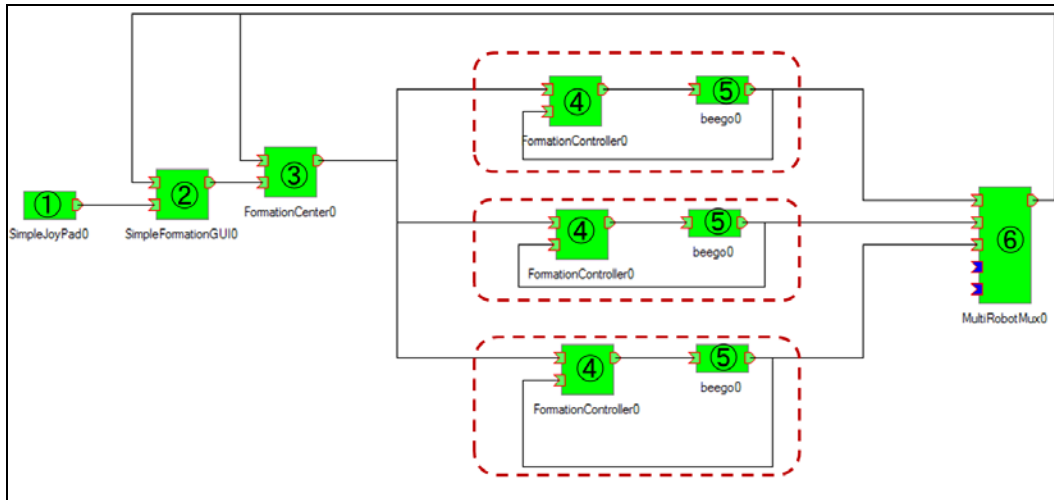


Fig. 51 フォーメーション走行用モジュール構成

Fig. 51に示すように、フォーメーション走行モジュール群には以下の5つの智能モジュール、①SimpleJoyPad、②SimpleFormationGUI、③FormationCenter、④FormationController、⑤移動ロボット制御用モジュール(本例では beego)、⑥MultiRobotMux が含まれる。①の SimpleJoyPad は Leader を遠隔操縦させるための速度指令値を生成するためのモジュールである。②の SimpleFormationGUI は後述の GUI 画面によりフォーメーション走行させたい移動ロボットの設定を行うものである。⑤は移動ロボット制御用のモジュールであり、本モジュールを置き換えることで他移動ロボットへの適用も図ることができる。⑥は移動ロボットの位置データを集約するためのモジュールである。集約された移動ロボットの位置データが、フォーメーションの設定や制御に使用される。③、④がフォーメーションの設定や制御入力を生成するためのモジュールであるあり、本モジュール群で中心私的な役割を果たすものである。その概略を以下に示す。その他のモジュールについては別紙を参照されたい。なお、移動ロボットの台数の増減は赤線部分に含まれる④FormationController と⑤移動制御用モジュールの計 2 モジュールをロボットの台数に応じて増減させるのみで対応が可能であり、最大 5 台の移動体まで対応している。

・ FormationCenter モジュール

Fig. 51中、③の FormationCenter モジュールでは移動ロボット群の位置情報とフォーメーションのグループ情報に基づき、各移動ロボットの目標位置を決定・出力する。フォーメーションのグループ情報とは、フォーメーションを組ませたい移動ロボットのグルーピング情報、Leader・Follower の設定、目標とする形状情報が含まれたものである。

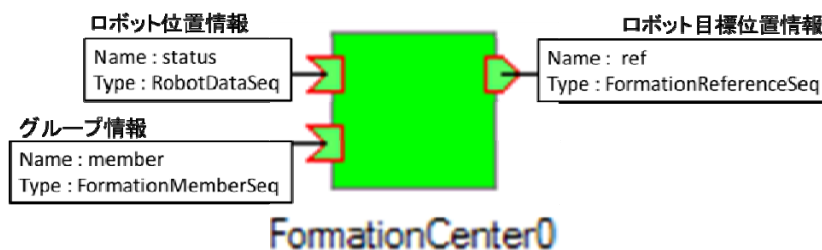


Fig. 52 FormationCenter モジュール

フォーメーションのグループ情報はFig. 53に示す GUI (②SimpleFormationGUI) 上で設定することができる。本モジュール群には、複数のグループの設定とグループの設定を行う簡易 GUI モジュールも含まれており、グループの数、グループに含まれる移動ロボット、Leader ロボット・Follower ロボットの設定、目標とする形状設定などができる。

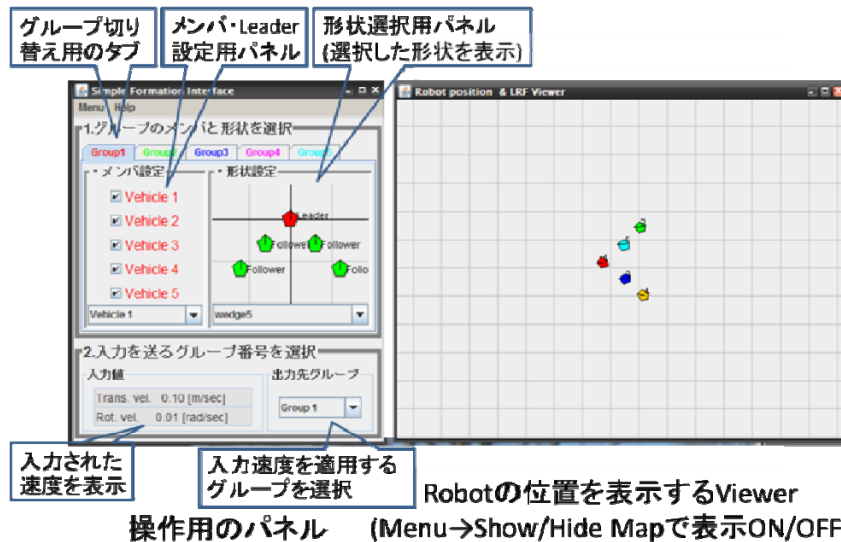


Fig. 53 フォーメーション設定の GUI 画面 (②SimpleFormationGUI モジュール)

・ FormationController モジュール

Fig. 51中、④FormationController モジュールでは、与えられた目標相対位置関係で Leader ロボットに追従するための速度指令値を生成する。目標位置情報は前述の FormationCenter モジュールを用いることで生成でき、出力を移動ロボット制御用のモジュールに接続することで、Leader ロボットへの追従を実現することができる。

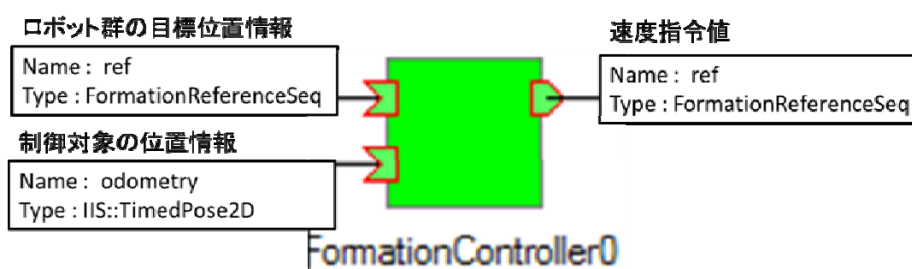


Fig. 54 FormationController モジュール

Fig. 55は、2 台の移動ロボットを用いてフォーメーション走行モジュール群の検証を行った実験の様子を示したものである。この実験ではFig. 50とは異なる移動ロボットに本モジュール群を適用している。このように、本モジュールは、移動ロボット制御用のモジュールを入れ替えることによって、他移動ロボットに対しても容易に適用が可能になっている。



Fig. 55 フォーマーション走行モジュール群を用いた実験例

(イ) 人追従機能 RTC モジュール群の開発

開発モジュール名称：人追従機能 RTC モジュール群

オープンソースライセンス

商用以外の利用の場合、修正 BSD ライセンスが適用、商用利用の際には、個別に使用条件

開発実施者：セグウェイジャパン株式会社

開発目的：

モビリティロボットと使用者間で、ロボットと人が 1 対 1 で追尾可能な協調行動が可能な人追従機能モジュールの開発を行う。

成果：

人追従機能 RTC は、レーザーレンジセンサと USB カメラ、台車モジュールなどから構成されており、台車モジュールは、研究用移動台車「Blackship」と「SegwayRMP シリーズ」という異なる台車に対して、共通インターフェースを用いて共通化を行い、動作の異なる台車に対して相互利用ができることを示した。

完成した人追従機能モジュールはセグウェイジャパン株式会社より販売している、移動ロボット向け環境シミュレータ「.env」（ドットエンヴ）や、研究用移動台車「Blackship」と「SegwayRMP シリーズ」に対して、オープンソースの形で無償添付し、さらに.env については、セグウェイジャパンの Web ページより無償体験版に添付する形で公開を行っており、ロボットの研究開発を簡便に実施することができる環境を整えた上で配布を実施した。Fig. 56 に人追従機能 RTC のイメージ図と構成図を示す。

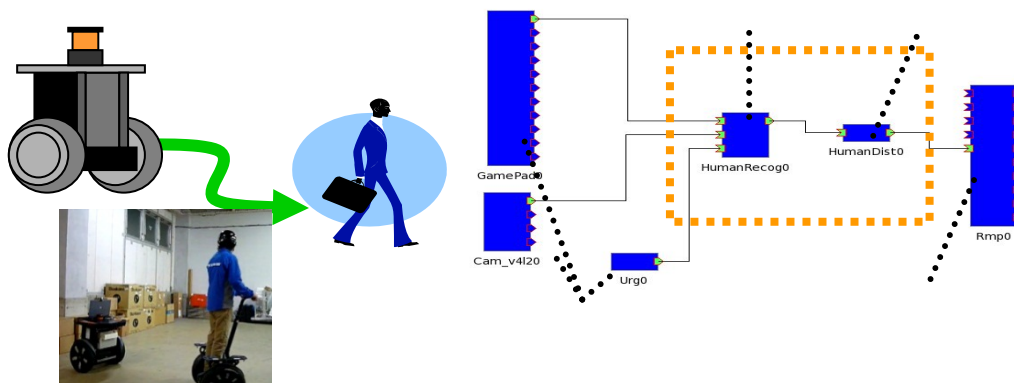


Fig. 56 人追従機能 RTC モジュール群のイメージ図(左)

人追従機能 RTC モジュール群の構成図(右)

## (7) 統合実験

### (ア) 先行・実証デモンストレーション

RTミドルウェアの普及促進を加速する目的に、平成20年度に開発中のモジュールを主に知能化PJ従事者向けに実施された「先行・実証デモンストレーション(以下、先行デモ)」(平成21年1月実施)にて、モジュールの公開と実機や動画によるデモンストレーションを実施した(Fig. 57)。

ここでは、屋内デモンストレーションが可能な「人追従機能モジュール群」「フォーメーションモジュール群」などの開発中の知能モジュールを、実機を用いてデモンストレーションを実施し、屋外でのデモンストレーションが必要な機能については、動画で紹介を実施した。また、RTミドルウェア対応組込みプラットフォーム群組込モジュールの、実機展示とデモンストレーションを実施した。

この時点までは、機能ごと個別に開発を実施していたが、先行デモにおいてそれぞれの機能のプロトタイプが動作していることを、実機を用いてデモンストレーションを行うことが出来たため、これ以降は機能を統合する開発フェーズに移行した。



**Fig. 57** 先行デモンストレーションにおけるデモ風景  
「人追従機能モジュール群」の動作風景(左)  
「フォーメーションモジュール群」の動作風景(右)

### (イ) 長期間実証実験

実施目的：

2007年から2011年まで、茨城県つくば市内の公共空間で、ロボットを自律走行させる実証実験「Real World Robot Challenge」(通称：つくばチャレンジ、主催：財団法人ニューテクノロジー財団)が実施された。つくばチャレンジは、ロボットがヒトと共存している環境で、ヒトと親和性を保ちつつ安全に動作するための技術を追求することを目的とし、本研究開発の目的と合致するため、つくばチャレンジに参加することで開発したモジュールの屋外環境での長期間の検証実験を実施した。

つくばチャレンジでは約1～1.5 kmのコースを自律移動ロボットが自律移動することが目的であり、自律移動のために環境に手を加える等を行わない、ありのままの環境での自律移動機能の実現が求められる。本来屋外環境とくに公道での実験では公的機関等の許可が必要であり、容易ではない。しかしながら、つくばチャレンジにおいてはつくばチャレンジ実行委員会により、公道等の仕様許可が事前に警察及びつくば市等の許可が取られており、また安全確保のための人員

等の配備などがなされている。そのため長期間の、比較的人の多い公園や公道を用いての実験が行いやすい状態であり、屋外自律移動のためのモジュールの検証実証に適している。

安全確保のため、つくばチャレンジに参加するためには、安全のため下記のような条件が課されている。(各年により、細かな規定は異なる)

- ・最大時速 4km
- ・重量 100kg 以内 (重量により安全責任者の人数が定められている)
- ・緊急停止スイッチの用意
- ・危険な部位等がないこと。

その他、細かな安全遵守事項が定められており、これら条件下のもと自律走行実験が可能となる。つくばチャレンジは毎年7月末から11月半ばまでの間の3~4ヶ月間開催される。我々は2008年から2011年まで参加し、開発したモジュール群の長期的な検証を行うと共に、屋外自律走行での知見をモジュールへ実装し蓄えることを目的とする。

成果：

2008年度から2011年度まで下記のように各年度段階的に開発を行った。

2008年度はセンサデータの蓄積と、ハードウェアやジョイスティックやロボット等基本モジュールの長期検証実験を行うとともに、屋外長距離自律移動に必要な機能の基礎理論を実装し検証を行った。

2009年度はセンサデータの蓄積、RTC化を進めると共に、屋外長距離自律移動に必要な基本機能の実現を目指し実装を行い、1kmの自律走行を実現した。

2010年度はセンサデータの蓄積に加え、開発したすべての機能のRTC化を行った。

2011年度はセンサデータの蓄積に加え、より高度な自律移動のための、動作計画に関する機能の拡充を行った。

下記に各年の詳細を述べる。

#### ・つくばチャレンジ2008

Fig. 58に用いたロボットとモジュールの構成を示す。実験にはSegwayRMP200を用い、内界センサとしてオドメトリ、IMU (Crossbow IMU440)、外界センサとしてDGPS (Hemisphere A100)、レーザスキャナ (北陽電機 UTM-30LX 2個, URG-04LX 2個)を用いた。レーザスキャナは1個を除きサーボモータにより駆動することで能動的に3次元計測が可能な構成とした。また安全装置としてバンパセンサ、緊急停止スイッチ、イネーブルスイッチを搭載した。

自律移動のためのソフトウェアとして、SegwayRMP、ジョイスティック、自律移動モジュール群を利用した。しかしながら、実験にて生じた諸問題に対応するため、ソフトウェアの変更を行ったため、自律移動RTCを一つのRTCに統合した形となった。また位置推定機能として、2次元の環境地図を用いた測域センサの自由空間観測モデルによる位置推定機能を開発した。これにより、人や未知物体が多数存在する環境にて安定した位置推定を実現した。

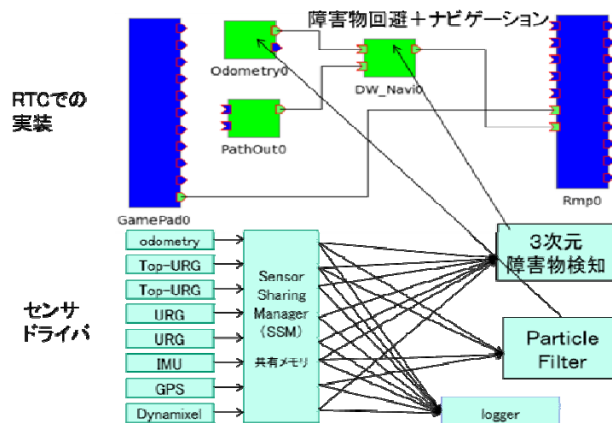


Fig. 58 つくばチャレンジ 2008 にて実験に用いたロボットとモジュール構成

屋外環境は人や車等の地図に記されていない動的・静的な多数の未知の物体が存在し、また様々な形状の障害物する。そのため位置推定機能として、未知物体にロバストである自由空間観測モデルを提案し、2次元環境地図を用いた位置推定を実現した。Fig. 59左に開発した機能により1kmを通して位置推定を行った結果を示す。また、障害物検知機能として、様々な形状の障害物に対応するため、レーザスキャナを振ることで3次元計測を行い、未観測領域を表現する機能を実現することで、死角に存在する障害物への衝突を避ける障害物検知機能を実現した。障害物検知の一例をFig. 59右に示す。従来のセンサデータを蓄積する手法では、死角への対応がある程度可能となるが、その分移動物体まで蓄積してしまい過剰に検出してしまいう問題があったが、開発した障害物検知機能は死角への対応が可能でありながら、移動障害物への対応も可能である。

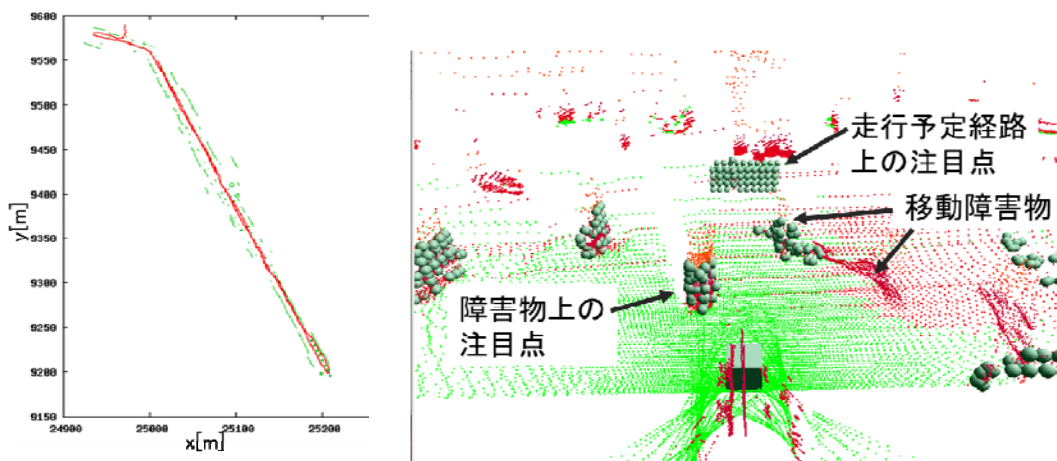


Fig. 59 つくばチャレンジ 2008 での位置推定結果と障害物検知機能

つくばチャレンジ2008には試走会として8月3日、10月5日、10月19日、11月2日、11月18日、11月19日の計6回、および11月20日のトライアル走行及び11月21日の本走行に参加した。試走会においては、一時的に手動操作に切り替える場合はあったが、1kmを自律走行することが確認できた。トライアル走行の100mは達成したが、本走行では電源切替時に制御用に用いていたノートPCのCPU周波数が遅くなる問題により、制御周期が回らな

くなり制御が発散し失敗した。

実験により、様々な知見が得られた。試走会は 10 時から 16 時まで 5～6 時間行われ、その間コースを 2～3 往復しているが、今回用いた SegwayRMP200 はバッテリーが切れる事なく、走行することが可能であった。またコース上には坂等が存在するが、走行に問題は生じなかった。位置推定機能について、2次元平面を仮定していたがコースが坂道等高低差を含む環境であったため位置推定の破綻するケースが見られた。RTC を eclipse 上で構成する際、モジュール構成が記録されない場合があり、その場合の再構成に時間が掛かる問題があった。測域センサ (UTM-30LX) を利用している際、太陽光が入ると故障と診断され、再起動が必要となる場合が生じた。これは特に冬の太陽が低い際に顕著に見られた。

・つくばチャレンジ2009

つくばチャレンジ 2009 では位置推定機能の 3次元化及び開発した RTC の再利用を促進した。また、RTC 化の利点を活かし、複数 PC での分散処理に取り組んだ。

Fig. 60に用いたロボットとモジュール構成を示す。ロボット、センサ等はほぼ 2008 年度と同様である。利用したモジュールはジョイスティック、SegwayRMP、自律移動 RTC 群、障害物回避 RTC である。位置推定については外部プログラムにより実装した。

7月から11月の4ヶ月間において、6回の試走会・トライアル・本走行に参加し、22回のログデータを収集（全コース有効データは12回分）した。11月18日試走会以降安定して走行。試走会では5回完走。うち1回は雨天時に走行した。トライアル・本走行・デモンストレーション走行を完走し、計6回の自律走行を行った。全コースログデータに対して位置推定を行い、安定して位置推定が可能であることを確かめた。

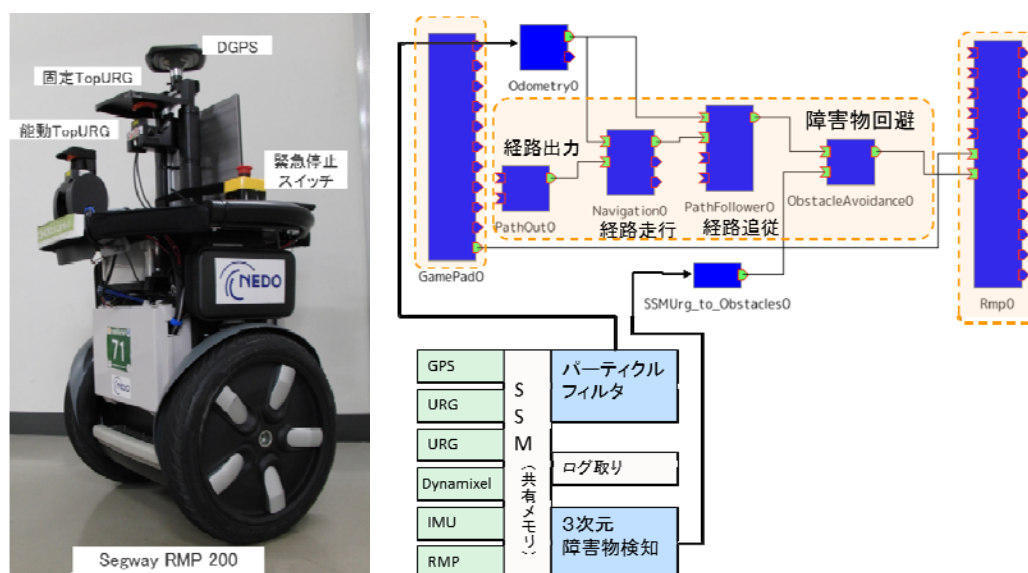


Fig. 60 つくばチャレンジ 2009 で用いた移動ロボットとモジュール構成





Fig. 61 つくばチャレンジ2009の様子

屋外長距離自律移動に必要な基本機能として、未知物体にロバストな位置推定機能の実現を行った。2008年度の反省を踏まえ、地図の3次元化を行った。Fig. 62に位置推定に用いた3次元地図を示す。これにより、安定した位置推定が可能となり、得られた有効なログデータ12個に対して破綻せず位置推定が可能であることが確かめられた (Fig. 63)。

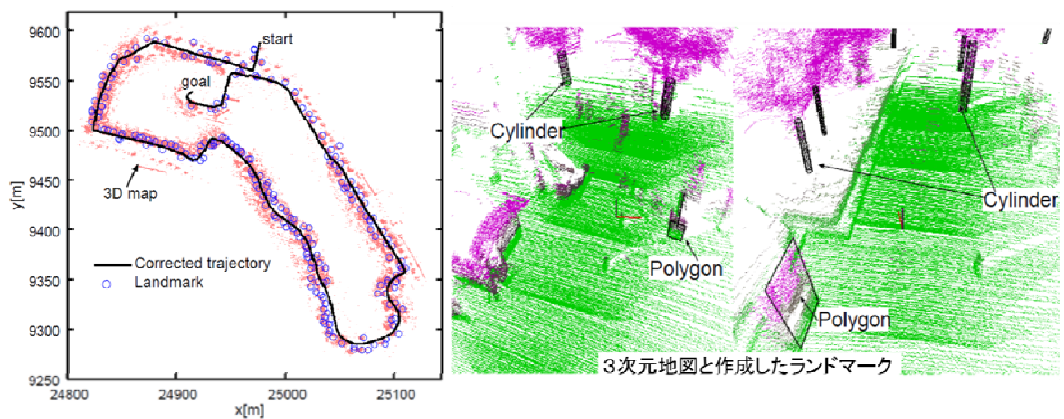


Fig. 62 図位置推定に用いた3次元地図

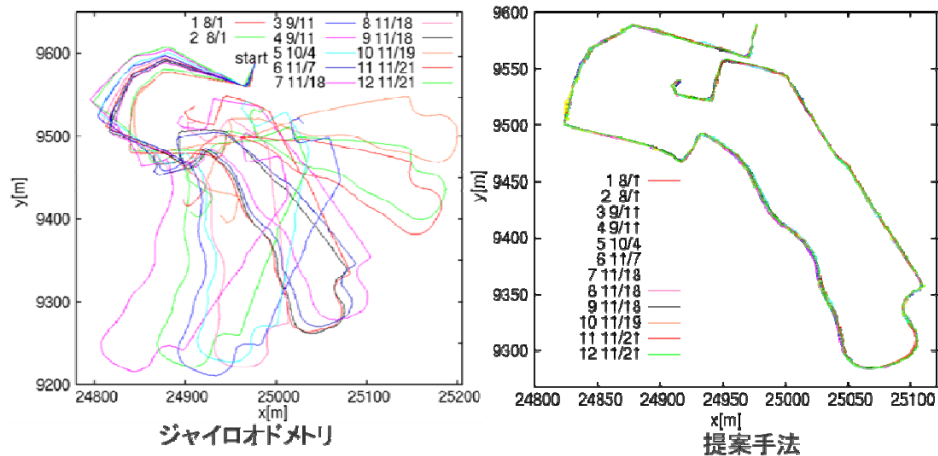


Fig. 63 12回のログデータに対しての位置推定結果

また、試験的に複数PCでの分散処理を行った。Fig. 64に示す橙の領域がPC1であり全体のナビゲーションを行い、緑色の領域がPC2でありGPSによる位置推定を行った。GPSの誤差により経路からは外れていたが、プログラミングすることなく容易に構成が変更可能であることが確かめられた。

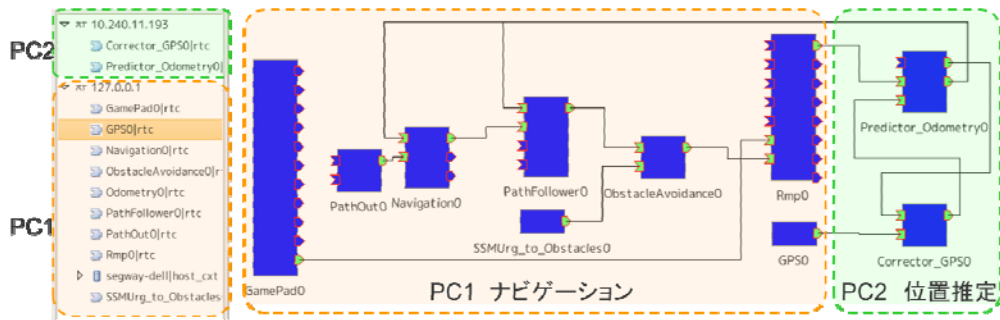


Fig. 64 複数 PC での分散処理

・つくばチャレンジ2010

2010年度は完全 RTC 化を目指し開発を行い、5回の実験走行・トライアル・本走行に参加した。用いたロボット及びモジュール構成をFig. 65に示す。モジュールはこれまで外部モジュールであった位置推定及び障害物検知についてもすべての RTC 化され、障害物検知及び位置推定に用いるセンサの構成変更が可能な枠組みを実現した。このうち、ナビゲーション機能はほぼ変更なしで用いており、位置推定と障害物回避については一般化のため、3次元化されたものを用いている。

本モジュールを用いて位置推定を行った例をFig. 66に示す。機能はほぼ2009年度に実現したものと同様であり、安定した位置推定が可能である。

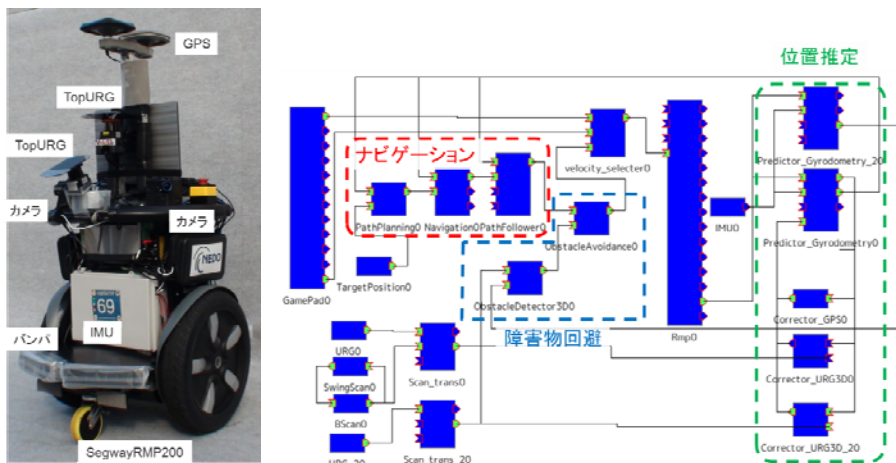


Fig. 65 つくばチャレンジ2010 に用いたロボットとモジュール構成

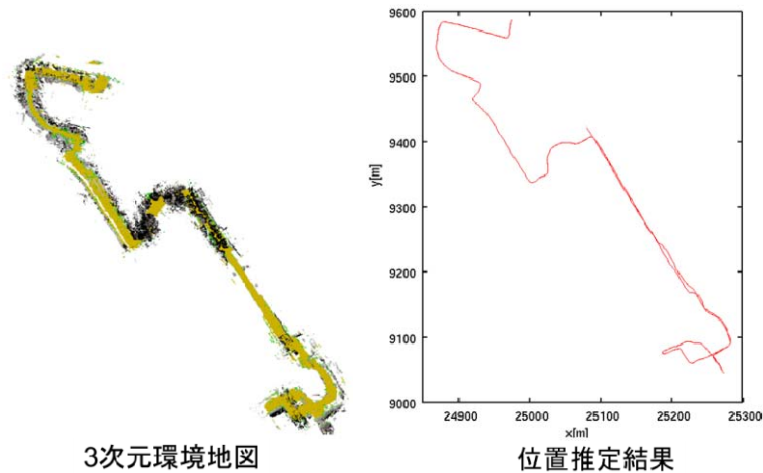


Fig. 66 環境地図と位置推定モジュールにより推定した推定位置

ほぼすべての機能を RTC 化することが実現されたが、それによる問題も生じた。モジュール化の際に一般化して実装を行うため、いくつかセンサに特化した処理を省略せざるを得なかった。そのため、つくばチャレンジ2009にて対策したセンサ個別のノイズ対策等のフィルタ処理が実装できず、最終的に本走行での失敗につながった。しかしながら、全機能の RTC 化を行なっても処理量等は単一 PC でも実現可能であり、懸念していた RTC 化によるオーバーヘッドは実際の処理量に対して大きな問題とならないことが確かめられた。

・つくばチャレンジ2011

つくばチャレンジ2011では、2010年度までに開発したモジュール群を再利用し、また機能の高度化を行った。2011年度はエレベータへの乗り込み等、これまでと異なる課題が課された。これに対し、3次元計測に基づく経路計画機能を追加し、これに対応した。また、これまで移動ロボットとして SegwayRMP200 を用いてきたが、今回はエレベータへの搭乗のため、狭い場所を通過する必要があることから、幅の狭い対向二輪型の移動ロボットを用いた (Fig. 67 参照)。ロボットの変更は行ったが、RTC はほとんどパラメータの変更もなく利用することが可能であった。

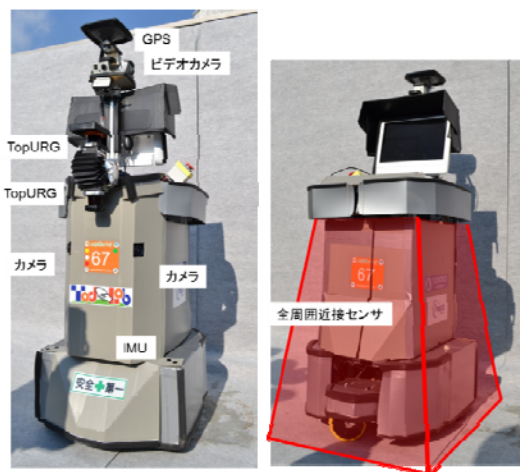


Fig. 67 つくばチャレンジ2011に用いたロボット

モジュール構成図を下図に示す。下図において点線部は2010年度開発機能の再利用部であり、実線部を新規開発もしくは改良を行った。再利用を行う事により、新規機能の開発に集中することが可能となった。

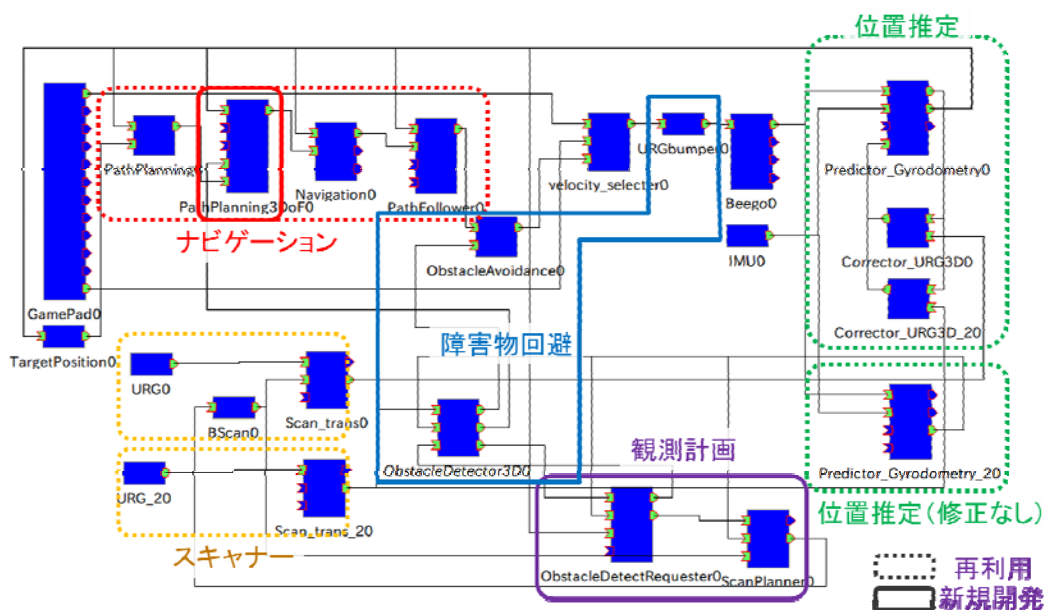


Fig. 68 つくばチャレンジ2011でのモジュール構成

下図に実験走行及びトライアル走行時の様子を示す。実験走行及びトライアル走行では、人に囲まれる等のシーンが多く見られたが、障害物回避機能により周囲に危険を与える事なく走行することが実現できた。また、新規開発した3次元計測に基づく3自由度経路計画機能により、エレベータへの搭乗を、詳細な経路を指示することなく実現した。



Fig. 69 実験走行の様子

下図に実験に用いた3次元計測に基づく3自由度経路計画の結果を示す。環境は大小様々な物体が存在する環境であり、ロボットはほぼ直方体の形状をしており、目的位置への到達のためには繰り返し等を必要とする。それに対し、3次元計測に基づき障害物検知を行い、ロボット形状を考慮した3自由度の経路計画を行う事により、目的位置へ衝突せずに移動する経路を得ることができている。