

将来都市交通要素としての自律移動技術

Autonomous Moving Technology for Future Urban Mobility Element

細田 祐司
Hosoda Yuji古賀 昌史
Koga Masashi山本 健次郎
Yamamoto Kenjiro

高齢社会の到来に向け、都市交通の新しい形態として自律型ビークルシェアリングシステムを想定し、自律移動技術の開発が進められている。人混環境での運用をめざした自律移動システムは、第一に対人安全性の保証が求められ、その実用化のためのコア技術は、外界センシング、自己位置同定、障害物回避の3点である。日立グループは、屋外自律移動ロボット、物流支援ロボットなどの開発を通じてこれらのコア技術を育成している。屋外自律移動に関しては、「つくばチャレンジ」での公道実証を進めており、また物流支援ロボットについては、工場や物流センターなどでの高効率な物流自動化をめざした開発を進めている。

1. はじめに

21世紀に入り、世界中の人口の半数以上が都市で生活するようになった。これに伴い、都市における移動のためのインフラを社会の状況に応じて構築することは、従来にも増して重要になっている。欧米、日本などの先進国の都市では、高齢化や都心部空洞化が問題となっている。このため、都市の規模を適正化し、自動車への依存を減らす動きが顕著になっている。東アジアなどの成長中の都市では、環境対策、渋滞対策のため、公共交通機関の敷設が進んでいる。

新しい都市交通における課題は以下のとおりである。

- (1) 低環境負荷
- (2) 高齢者など弱者の移動支援
- (3) 低運用コスト

こうした課題を解決するための一案として、日立グループは自律型ビークルシェアリングシステムを想定し、自律移動技術の研究を進めている。

想定しているシステムの概要を図1に示す。

このシステムでは、都市間の長距離の移動は鉄道などの高速公共交通機関で担い、最寄りの駅と自宅、あるいは目

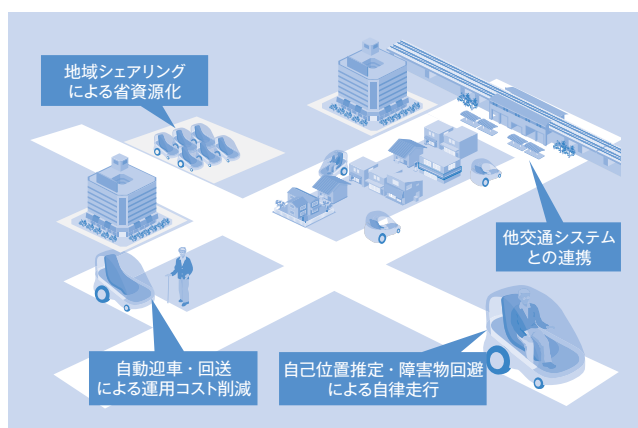


図1 | 自律移動技術を用いた新しい都市交通
ロボットの自律移動機能を、一人乗りのビークルに適用して公共交通として用いた例（想像図）を示す。

的地の間の移動を自律型ビークルで行う。資源節約および都市内の駐車スペース削減のため、ビークルはシェアリングする。利用者の自宅まで配車し、目的地で乗り捨てられるようにすることで、体力の落ちた高齢者でも容易に移動ができるようにする。さらに、配車や回収を自律走行で行うことで、運用コストを削減する。

ここで鍵となるのは、自律移動技術である。誘導線など特別な設備がなくても、都市内を正確かつ安全に車両が自動的に走行できるようにするには、外界センシング、自己位置同定、障害物回避などの技術課題が残されている。

ここでは、自律移動技術の課題に対する日立グループの取り組みの中から、屋外自律移動ロボットと物流支援ロボットについて述べる。

2. 自律移動システムの基本技術

まず、自律移動システムを構成する基本技術と、その開発課題について述べる。自律移動制御システムの基本構成を図2に示す。

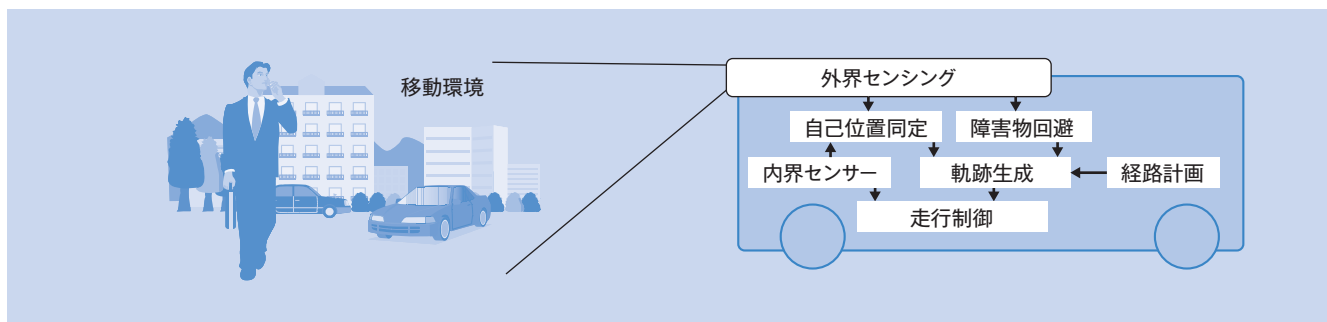


図2 | 自律移動制御システムの基本構成

移動状況を計測する外界センシングと内界センサー、および、これらの情報から自己位置を推定する機能と障害物回避を実行する機能を備える。

主要要素は、(1) 移動環境の形状、位置、速度情報を検出して自律移動に必要な情報を抽出する外界センシング、(2) みずからの移動履歴からロボット自身の現在位置や速度に関する情報を出力する内界センサー、(3) 外界センシングと内界センサーの情報からロボット自身の移動位置を推定する自己位置同定、(4) 外界センシングで感知したロボット周辺に存在する障害物との衝突を回避するアクションを起こす障害物回避、(5) ロボットの到達すべき位置と経路位置、走行速度条件などを決定する経路計画である。経路計画による指示、自己位置同定から提示されるロボットの現在位置および障害物の回避条件に基づいてロボットが進行する軌跡を生成し、走行制御によって生成した軌跡に追従して走行するように移動機構の走行速度および走行方向を操る。

自律移動とは、自己位置同定で推定したロボットの現在位置をフィードバックし、経路計画で確定した目標位置に至る一種の位置決め制御であり、進行方向での障害物との衝突が推定される場合は、適切に軌道を修正し、また必要に応じて一時停止をすることにより、目標位置への移動を継続する機能である。

実用化に向けた課題の一つは、確実に移動環境を把握することが可能な外界センシング手段を得ることである。センシング方式としては、レーザスキャナ、ミリ波レーダ、超音波レーダなどのエネルギー投射型と、ステレオビジョンなどの画像処理を伴うものがあり、また絶対位置を検出する手段としては衛星を利用したGPS (Global Positioning System)がよく使われる。確実に目標地点に至るためには、自己位置同定は必須であり、内界センサー、外界センシングで推定された位置データ、およびGPSなどで直接得られた絶対位置データなどの相互補完性のある情報をうまく統合し、精度の高い自己位置情報を得る手法が求められる。人と混在する環境での自律移動ロボットの運用にあたっては、人を含む障害物との確実な衝突回避が重要な課題となる。このためには、進行方向の障害物を見落とすことのない外界センシング手段が必要であり、障害物の発見に対し、

移動効率を落とすことなく障害物を迂(う)回するか、また、必要な場合は一時停止するロボスタ性の高い衝突回避アルゴリズムを開発しなければならない。

3. 屋外自律移動ロボット

日立グループは、新交通システムを実用化するためのコア技術開発を目標として、茨城県つくば市で2007年から継続して開催されている「つくばチャレンジ」¹⁾に参画し、屋外自律移動ロボットの実証実験を進めており、2009年の実証実験では公道1.1 kmの自律走行を実現した。屋外自律移動技術の実用化への取り組みは世界的に活発になっており、特に2007年には米国DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) による「アーバンチャレンジ (DARPA グランドチャレンジ)」²⁾において、市街地での自律走行自動車レースが実施された。ここでは、無人の市街地の車道での複数の自動化自動車の運用が先駆的に実証された。これに対し、ここで紹介する試みでは、車道よりも形状が複雑で雑多な環境の歩道や公園内通路などを移動環境とし、さらに不特定の多くの一般歩行者が行き交う人間共存環境での自律移動の実証を行った。この試みにより、人とロボットが協調する将来社会での移動ロボット普及に向けた道が、さらに一歩前進したと考える。

開発した屋外自律移動ロボットの外観を図3に示す。

移動機構はシンプルな差動二輪型である。外界センシングに用いるセンサーとしては、屋外環境で直接環境形状データを計測することが可能なレーザスキャナを多用している。最上部に設けた2個のレーザスキャナは、ロールおよびピッチ姿勢の設定を最適化³⁾することで、走行しながら上方、左右側面、路面の抜けの少ない三次元形状データを計測できる。さらに路面形状を確実にとらえることを目的に、中段には前方向斜め下向きのレーザスキャナを備え、障害物検出の確度を上げるために、足元の前後水平方向に向けたレーザスキャナ2個を設けている。このほか、絶対位置計測の手段としてディファレンシャルGPSを搭載している。レーザスキャナ群によって計測した三次元データ



注：略語説明 GPS (Global Positioning System)

図3 | 屋外自律移動ロボットの外観
2009年11月に開催された「つくばチャレンジ2009」に、日立グループから参加した屋外自律移動ロボットの外観を示す。

の例を図4に示す。

同図(a)は、同図(b)に示す移動実験状況に対する三次元形状データの生成結果である。この開発では、人や車などの地上移動物体の影響を受けない位置同定のためのランドマークとして、人の背丈よりも高い位置に存在する構造物の形状を活用することを試みた。同図に示すように、2.5～3 mの高さにある木立のドット群をよいランドマークとしてとらえることができており、また、路面の形状も抜けなく検出することができており、ロボットの周辺に立ち並ぶ人の足の形状もよくとらえている。

自己位置同定については、次の三つの自己位置計測情報に基づいてロボットの位置の高い位置推定を行っている。

(1) オドメトリ計測

各車輪の回転数を検出するエンコーダと、方向計測用レートジャイロのセンサー情報の累積演算によって自己位

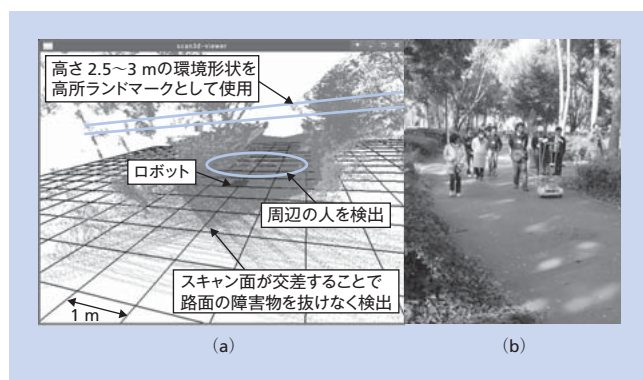


図4 | レーザスキャナによる移動環境の計測例
屋外自律移動ロボットの前方に設けた三つのレーザスキャナによりとらえられた三次元データの例を示す。

置を推定する。

(2) スキャンマッチング計測

レーザスキャナ群によって得た移動環境の三次元ドット群と、あらかじめ記録したドット群から成る地図の比較により、ロボットの現在位置を推定する。

(3) GPS計測

基地局を原点として絶対座標計測を行う。

オドメトリ計測は、連続的に安定な自己位置推定が可能であるが、移動の経過に伴い累積誤差が増加する。これに対し、スキャンマッチング計測とGPS計測は、断続的ではあるが絶対位置の情報を得ることができる。また、今回の開発で採用したスキャンマッチング計測は、木立や建屋などの上方向の構造物をランドマークとして使用しているため、立て込んだ環境での自己位置計測に優れる。一方、GPS計測は、GPS衛星からの電波を遮蔽(へい)するものがない上方空間が開放された環境での計測性能を発揮する。これらの計測手段の誤差特性は相補的であり、拡張カルマンフィルタによっておのおのの位置推定値を確率的に融合し、さらに、 χ^2 検定による外れ値除去を適用することにより、精度が高く信頼性の高い自己位置同定を可能としている。

自己位置同定性能の例を図5に示す。これは、建物の近傍を通過する状態を示しているが、 χ^2 検定により、建物壁面のマルチパスの影響によるGPS計測の外れ値誤差の影響を排除し、真の移動軌跡に沿った自己位置同定を実現している。

障害物回避に関しては、図6に示すように、障害物上に危険度を定義したポテンシャル場を設け、ロボットの接近に対して斥力を発生し、一方、移動目標位置のウェイポイントに対しては引力を発生し、これらの合力をロボットの前方に設けた制御点に与えることで、障害物との接近を回避しつつ目標軌跡に向かった走行を実現している。走行速

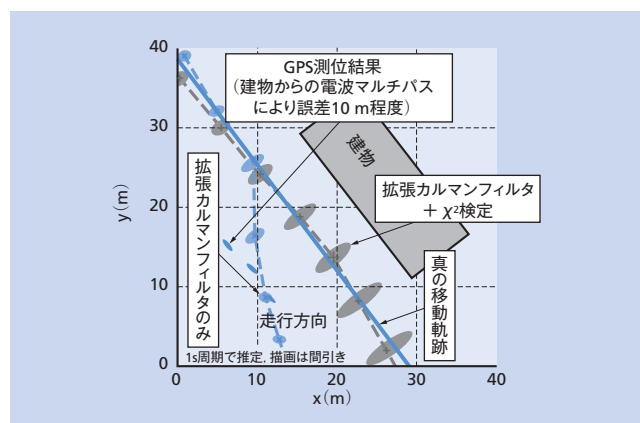


図5 | 拡張カルマンフィルタと χ^2 検定を用いた自己位置推定の効果
突発的なGPS測位誤差が発生しても、レーザスキャナなどによる位置同定結果から、確からしい位置を推定し、真の移動軌跡に追従する。



図6 | 障害物回避制御

障害物から斥力、ウェイポイントから引力をそれぞれ仮定し、その合力方向にロボットを誘導して障害物回避走行を行う。

度は障害物に対する斥力の大きさに応じて制限することで、衝突に対する安全性を高めている。

4. 物流支援ロボット

従来、工場や物流センターなどでは、物流自動化の有力な手段として、磁気テープなどを床面に設置して構成したガイドラインに沿って自動走行する無人搬送車が活用されている。しかし、最近の製造現場では、セル生産方式などのレイアウトフリー化のニーズも増えてきていることから、ガイドラインのような固定環境インフラを必要としないフレキシブルな移動運用が可能な物流支援ロボットを、日立製作所と株式会社日立産機システムが共同で開発している。まず次世代物流ロボットの製品化をめざし、将来的には、その基盤上に屋内外での運用展開も可能な自律移動ロボットプラットフォームを提供できるように開発を進めている。

ロボットの外観を図7に示す。

ロボットの足回りは、その場回転、真横移動など小回りが効く四輪独立操舵(だ)機構を採用している。センサー系としては、進行方向の環境や、障害物の形状を計測するレーザスキャナと、ロボット周囲への障害物の接近を検出するために、全周近接センサーを設けている。また、足回りの全周にはバンパセンサーを設けており、障害物との接触を検出し、非常停止を行う。小物搬送作業を想定し、寸法形状は60 cm³、ペイロード20 kgと比較的コンパクトな設計としている。最高移動速度は秒速1 m(時速3.6 km)と、人の歩行速度相当である。

自分の位置を把握する位置同定機能については、搭載したレーザスキャナによって移動環境の形状を計測し、この情報に基づいてロボット自身の位置を同定する。位置同定の方式を図8に示す。ロボットは、あらかじめ計測した移動領域の形状地図データの記憶と、レーザスキャナで計測



図7 | 物流支援ロボットの外観

誘導ラインなどのインフラを必要としないことを特徴としている。工場のラインや物流センターでの適用を計画中である。

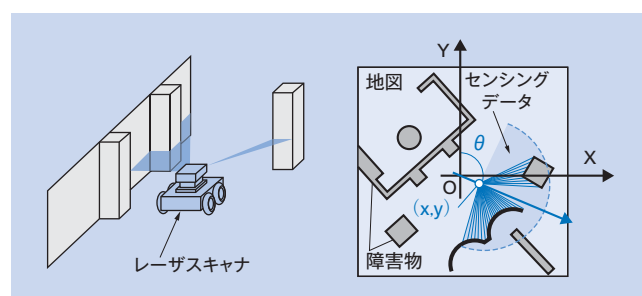


図8 | 位置同定の方式

あらかじめ記録した地図上の地形形状と、レーザスキャナで計測した地形形状を比較し、重ね合わせの条件からロボットの現在位置と方向を推定する。

した移動環境の水平断面形状が重なる条件を探し出すことで自己位置を推定する。地図は図9に示すように、ロボットを移動環境の中で移動させながら環境の形状データを取り込み、微小移動ごとの形状データを積み重ねていくことにより、自己位置を累積推定しながら地図データを生成する。したがって、あらかじめロボットを移動環境中で一巡させることにより、短時間かつ容易に地図情報を得ることができるため、レイアウト変更が頻繁に行われるセル生産

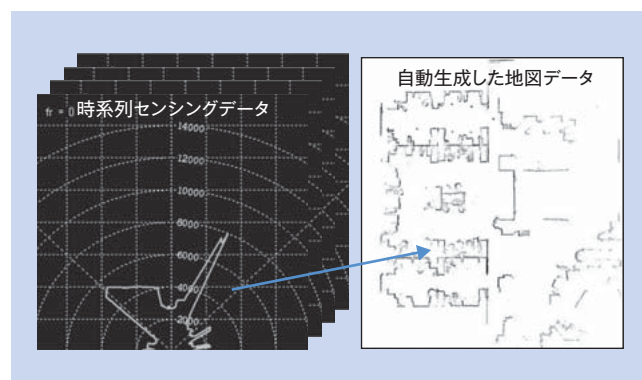


図9 | 地図生成の過程

逐次計測されるチャートデータを、同時に推定した位置情報に基づいてシフトしながら重ねて記録し、右に示すような地図データを生成する。

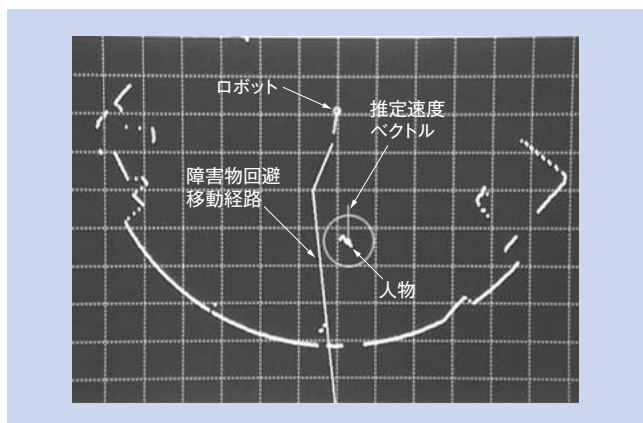


図10 動的障害物回避移動経路生成

人物など障害物の速度ベクトルから将来の衝突の可能性を推定し、衝突のない安全な回避経路を逐次生成する。

現場などでの移動経路再構築作業が短期間で実施できる。

この開発では、人混在環境での安全な運用のために、人間共生ロボットの開発⁴⁾において先行開発した動的障害物回避技術⁵⁾を継承している。ロボットは正面のレーザスキャナによって得た障害物の位置データの移動履歴から、歩行者などの移動体との相対速度ベクトルを推定し、予定移動経路に沿った移動の継続により、将来衝突が発生するか否かを推定し、衝突が推定された場合は安全マージンを確保した新規の移動経路を生成する。この処理を常時反復し、逐次出現する複数の移動体を回避して目標地点に到達する(図10参照)。

5. おわりに

ここでは、自律移動技術の課題に対する日立グループの取り組みの中から、屋外自律移動ロボットと物流支援ロボットについて述べた。

将来、都市環境での交通手段として想定する自律移動ビークルシステムは、間近に迫った高齢社会の問題に対する一つの有望なソリューションと考える。今回紹介した屋外自律移動ロボットについては、つくばチャレンジにおいて、歩道を逸脱しない精度で、人がいる環境で自律走行が可能なが示された。今後は、つくば市ロボット特区での実証実験を通じて実用化開発の加速を図っていく。このような技術実証の積み重ねにより、自律移動型のシェアリングビークルなど、高齢者に配慮した低運用コストの自律交通システムを実現していく。

また、物流支援ロボットについては、屋内自律移動システムの製品化をめざすとともに、その先の展開として屋外自律走行運用のシステムを視野に入れている。このシステムによって各戸ごとの自動物流を可能にすることで、日常の買い物や高齢者の屋外移動での荷物運びを支援するなど、高齢者の生活を優しく支援するサービスの実現をめざす。さらに、高齢化対応の社会システムの基盤として、このような電動型の移動ロボットシステムを普及させることは、現状の自動車電動化促進の流れとともに、環境負荷低減に大きく寄与するものと考ええる。

なお、ここで紹介した障害物回避機能は、筑波大学と日立製作所の連携事業実施協定の一環として推進しており、筑波大学知能ロボット研究室の坪内孝司教授、油田信一教授らとの共同研究の成果を活用している。

参考文献など

- 1) 財団法人ニューテクノロジー振興財団：つくばチャレンジ、<http://www.ntf.or.jp/challenge/>
- 2) DARPA : URBAN CHALLENGE、<http://www.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>
- 3) 原、外：ピッチ・ロール傾斜させた2D測域センサを用いた屋外自律移動のための3D環境形状の取得、Proc. of SI'09 (2009.12)
- 4) Y. Hosoda, et al.: Development of human-symbiotic robot "EMIEW" — Design Concept and System Construction —, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No.2, pp.195-202 (2006)
- 5) 山本、外：人間共生ロボット"EMIEW"の衝突回避ナビゲーション、第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集、1L-23 (2006)

執筆者紹介



細田 祐司

1979年日立製作所入社、機械研究所 輸送システム研究部 所属
現在、人間共生ロボットの開発に従事
日本機械学会会員、日本ロボット学会会員、計測自動制御学会会員、日本機械学会フェロー



古賀 昌史

1989年日立製作所入社、中央研究所 情報システム研究センター 知能システム研究部 所属
現在、画像処理、パタン認識、地理情報処理の研究開発に従事
博士(工学)
情報処理学会会員、電子情報通信学会会員、IEEE会員



山本 健次郎

1994年日立製作所入社、機械研究所 輸送システム研究部 所属
現在、自律移動ロボットの研究開発に従事
日本ロボット学会会員