

## 小型無人移動体による個人用知的移動体の センシング領域の拡張とその応用

渡辺 賢<sup>†1</sup> 井上 泰佑<sup>†2</sup> 長尾 確<sup>†2</sup>

我々の研究室では、個人用知的移動体 AT(Attentive Townvehicle) と呼ばれる、搭乗者の行きたい場所まで自動的に移動する個人用の乗り物の研究・開発を行っている。自動走行する移動体が解決すべき問題の一つは搭乗者の安全の確保である。この問題に対処するためには、移動体自身が持つセンサーは十分ではなく、いかに環境側に周囲の情報を収集し移動体に伝達する仕組みを実現するか、ということが重要になってくる。搭乗者の安全の確保のために必要な環境情報とは、例えば進行方向の死角から接近する移動障害物の情報である。そこで本研究では、AT の前方に小型無人移動体 (Small Unmanned Vehicle) を走らせ、それを AT の外部拡張センサーとして扱い、AT のセンシング領域を拡張することで搭乗者の安全性を向上させる仕組みを提案する。

### Extension of Sensing Areas of Personal Intelligent Vehicles by Small Unmanned Vehicles

KEN WATANABE,<sup>†1</sup> TAISUKE INOUE<sup>†2</sup>  
and KATASHI NAGAO<sup>†2</sup>

We have been conducting a research on Personal Intelligent Vehicles. We developed a prototype vehicle called AT (Attentive Townvehicle). AT has function of automated driving toward its passenger's specified destination. While automated driving, it is necessary for AT to avoid moving obstacles. We developed a mechanism for avoiding them by using Laser Range Finders (LRFs). However, there is a problem that LRFs cannot detect the obstacles approaching from dead areas. We propose a solution of this problem by extension of AT's sensing areas by Small Unmanned Vehicles (SUVs). SUV runs autonomously in front of AT, and sends LRF data to it. Our proposed method can make AT's automated driving safer than ever before.

#### 1. はじめに

近年、セグウェイ社の「セグウェイ」、ホンダの「U3-X」など一人乗りの移動機械(パーソナルモビリティ) についての研究・開発が活発に行われている。この研究が進むことで、人はより便利な移動手段を獲得し、生活の行動範囲は広がるだろう。我々の研究室では、個人用知的移動体 AT(Attentive Townvehicle) と呼ばれる、搭乗者の行きたい場所まで自動で移動する個人用の乗り物の研究・開発を行っている。

自動走行する移動体の大きな課題の一つは搭乗者の安全性である。この課題に対して、従来研究としてはレーザーレンジセンサーを用いることで移動障害物を認識し、回避するという方法が研究されてきた<sup>3)-5)</sup>。

しかしこの方法には、レンジセンサーの死角領域からの接近する移動障害物の回避が困難という問題がある。この問題に対して移動体自身が持つセンサーでは十分ではなく、いかに環境側に周囲の情報を収集し伝達する仕組みを実現するか、ということが重要となる。自動走行中に危険な死角領域とは、AT の経路から遠く離れた地点などではなく、進行方向の前方だと考えられる。そこで本研究では、AT の前方に小型無人移動体 (SUV: Small Unmanned Vehicle) を走らせ、それを AT の外部拡張センサーとして扱い、AT のセンシング領域を拡張させる仕組みを提案し、実現した。さらに、センシング領域の拡張を応用し、前方の死角から接近する移動障害物を回避する仕組みを実現した。

#### 2. 個人用知的移動体 AT

AT は乗り物に情報処理・通信機能を持たせ、情報処理と人間の物理的な移動とを連動させることにより、人間の活動をより便利にするための乗り物である(図1)。その機能の一つとして、搭乗者が AT に搭載されたタッチパネルディスプレイから目的地を入力することで、自動で目的地まで移動する機能がある。この機能について具体的に説明する。AT は搭載された RFID タグリーダーで環境に設置された RFID タグを読み取り、タグの ID と地図情報が対応付けられたデータベースから AT の現在地を認識する。さらに、AT のタッチパネルディスプレイから入力されたタグ ID によって目的地を認識し、経路を計算する。さら

<sup>†1</sup> 名古屋大学 工学部 電気電子・情報工学科  
Dept. of Information Engineering, School of Engineering, Nagoya University

<sup>†2</sup> 名古屋大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science, Nagoya University

に、AT には移動障害物を回避するためにレーザーレンジセンサーが搭載されている。レーザーレンジセンサーは物体にレーザー光をあて、その反射光を受光して物体までの距離を算出し、これを一定角度間隔で測定することで、平面上に扇状の物体までの距離を知ることができるセンサーである。AT はこれを前後左右の 4 箇所に搭載し、その情報を統合することで全方位の障害物情報を知ることができる。AT は過去にこのセンサーを用いた移動障害物の回避について研究してきた<sup>7)</sup>。連続時間で取得した複数のセンシング情報を ICP マッチングで重ね合わせ、大きな差分を移動障害物とし、その障害物の時間の軌跡から移動障害物の移動ベクトルを計算し、それが AT と衝突する場合にメカナムホイールを用いて全方位移動で回避した。図 2 は AT が認識した移動障害物の図である。青い四角が AT で、ピンクの図形が移動障害物の位置と向きを表している。しかし、AT 自身のセンサーでは、交差点の左右からの通路などの死角から接近する移動障害物を検出することはできない。本研究では、安全な自動走行を目的とし、死角からの移動障害物が検出できないという問題を、センシング領域の拡張という手法で解決した。



図 1 AT の構成

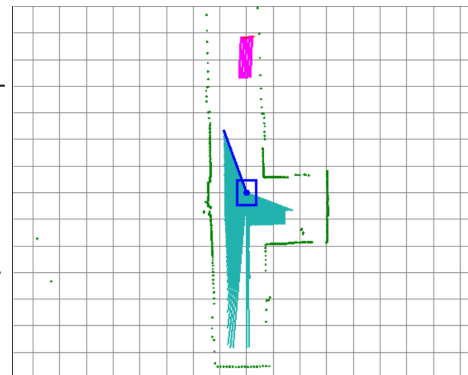


図 2 レンジセンサーによる障害物情報の取得

これによって起きる問題の具体例が先ほど挙げた死角からの移動障害物の問題である。その他にも自分の進行方向の前方の情報をもっと知ることができれば、回避できる事故は多くある。これらの考えから本研究では、AT の前方を拡張センサーとして SUV を走行させることにより、AT 自身のセンシング領域を拡張する手法を提案する。SUV は、ベースの移動体としては iRobot 社の iRobot Create を使い、制御用 PC とレーザーレンジセンサーをその上に搭載した小型のロボットである (図 3)。

この手法を実現するための具体的方法として、まず、AT と SUV のセンシング領域を統合するために、AT と SUV のレーザーレンジセンサーの値を共通の座標系で表す必要がある。これは、AT と SUV が違う座標系で障害物までの距離データを取得するためである (図 4)。そこで本研究では、共通の座標系としてセンサー地図を作り、その地図上での AT と SUV の位置を推定することで解決した。これについては第 4.1 節、第 4.2 節で説明する。さらに、SUV は外部拡張センサーとして AT の自動走行に合わせて自律して動く必要がある。これに対して、本研究では SUV に目的地に対して自律的に走行する機能と、AT と SUV の速度を制御することで、二台が近付き過ぎたり離れ過ぎないような連携走行機能を実現した。これについては第 4.4 節、第 4.5 節で説明する。

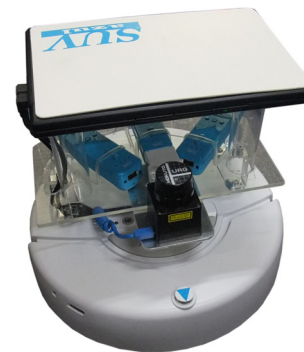


図 3 小型無人移動体

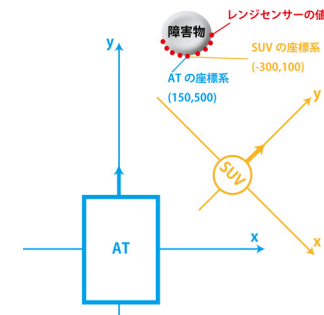


図 4 AT と SUV の座標系の違い

### 3. システムの概要

AT のような自動走行する乗り物は周囲の環境情報をセンサーを通して取得することで行動を決定する。しかし、自身に搭載されたセンサーだけでは取得する情報は限られており、

### 4. センシング領域拡張のための要素技術

この章では、センシング領域の拡張のための要素技術をそれぞれ説明する。次章で、それらを組み合わせることで実現したセンシング領域の拡張について説明する。

#### 4.1 地図生成

地図生成は、移動体のオドメトリ情報（これまでの移動距離情報）とレーザーレンジセンサーの情報を用いてセンサー地図を作る機能である。目的は第3章で説明したようにATとSUVで共通の座標系を作るためであり、本研究ではSUVを事前にマニュアル操作で環境を網羅するように走行させた時のセンサーログから地図を生成した。

オドメトリ情報とセンサー情報はどちらも誤差を含む情報であり、正しい位置と地図を同時に推定しなければならない。これは Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) 問題として知られる問題である。SLAM 問題とはある時刻  $t$  までのセンサー情報  $z_{1:t}$  とオドメトリ情報  $u_{1:t}$  が与えられた状態で、姿勢  $a_t = (x_t, y_t, \theta_t)$ 、地図情報  $m$  である事後確率  $p(a_t, m | z_{1:t}, u_{1:t})$  の分布関数を求め、最尤の  $a_t$  と  $m$  を決めることである。本研究では FastSLAM<sup>(6)</sup> や DPSLAM<sup>(1)</sup> で知られるような、パーティクルフィルタを用いた地図生成を実現した。実際に生成した地図が図5である。また、生成した地図と実際の環境を比較したのが図6である。黒の太字の数字は実際の環境の壁の長さを測定した数値で、赤の数字が生成した地図上の長さである。単位はメートルであり、誤差が一番大きいのは、実際は9.91mで地図上では9.76mの壁であった。その誤差は+1.5%で、誤差はあまり大きくないことが分かった。

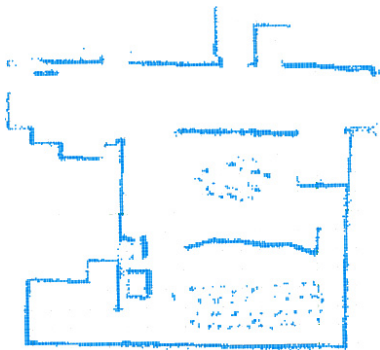


図5 生成された地図

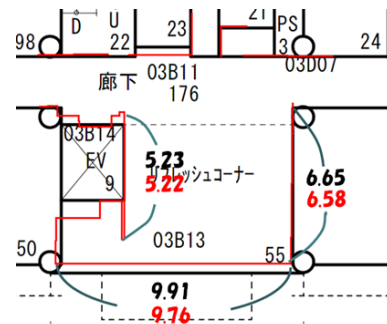


図6 生成した地図と実環境の比較

#### 4.2 自己位置推定

自己位置推定とは、前節で生成した地図と現在のレンジセンサーの値を比較することで、地図上での位置を推定する機能である。目的は第3章で説明した通り、ATとSUVの位置

を共通の座標系で表すためである。よって、ATとSUVに同様な仕組みでこの機能を実現した。位置推定は  $m, z_{1:t}, u_{1:t}$  が与えられた状態で、 $a_t$  である事後確率  $p(a_t | m, z_{1:t}, u_{1:t})$  を求め、最尤の  $a_t$  を決めることである。アルゴリズムは地図生成とほぼ同じでパーティクルフィルタを用いた方法である。位置推定は走行中に地図情報  $m$  が既知の情報としてわかっているため、地図生成よりもロバストである。ただし、SUVが走行中に実時間で自己位置推定を行う必要があるため、パーティクルの数と処理するセンサーの分解能を地図生成よりも減らすことで、計算時間を短縮した。

また、自己位置推定により、誤差を累積することなく現在地を推定し続けられるか検証実験を行った。SUVの出発地点に目印をつけ、マニュアル操作で決まったコースを6周した。每周、出発地点に着いた時点で自己位置推定無しと有りの現在地情報を記録した。結果は図7の通りである。位置推定することで誤差を累積することなく、一定内の誤差に抑えられていることがわかる。また、位置推定無し・有りの場合のそれぞれの軌跡を図8に示す。

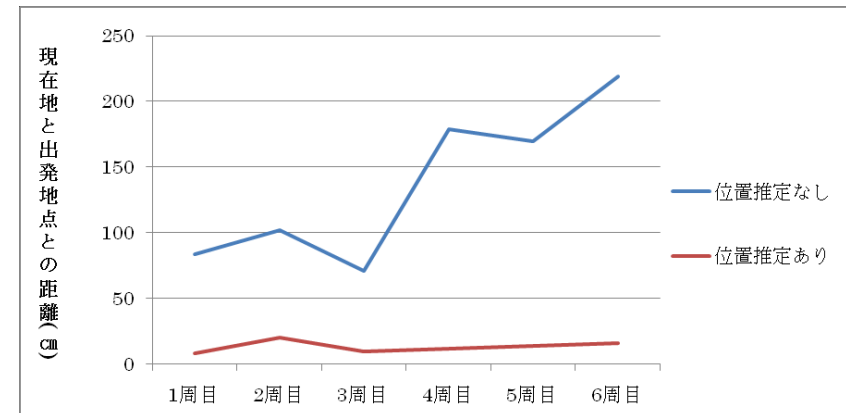


図7 周回後の現在地情報と出発地点との距離

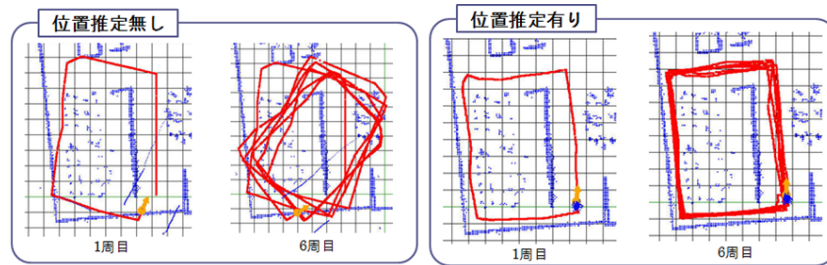


図 8 位置推定無し・有りの場合のそれぞれの軌跡

### 4.3 障害物検出

環境地図上での AT と SUV の現在地の座標を推定することにより、センサー地図と現在のセンサー情報との差分の情報、つまり移動障害物や通常時には置かれていない静止障害物などの情報を知ることができる。SUV は AT のセンシング領域を拡張するための外部拡張センサーである。AT が外部拡張センサーから知りたい情報は壁など地図に載っている情報ではなく、障害物の情報である。したがって、障害物の情報はセンシング情報の中で特に重要である。しかし、SUV のオドメトリに大きな誤差がでた時、SUV の位置推定は正しい位置からずれる。この時、環境地図とセンサー情報がずれているため壁の情報まで障害物として認識してしまう。それによって、移動障害物と誤認識して AT が回避行動をとってしまうなどの問題が起きるため、本研究では位置推定の精度をパーティクルの分散で求め、これが高い時のみ障害物検出を行うことによって解決した。また、一度地図に反映された障害物情報が再び通る際に存在しない場合は、その障害物情報を消去することで地図を最新の状態に更新する。

### 4.4 SUV の自律走行

SUV は AT の前方を常に自律的に移動する必要がある。また、SUV は AT の外部拡張センサーとして機能するために、目的地に対して柔軟に自律走行を行う必要がある。ここでいう柔軟とは、任意の目的地・現在地に対して経路が生成できることや、指定した目的地に対して存在する複数の経路の中から、走行する経路を指定できることなどである。なお、自動走行とは、AT のように機械が自力で動いていても、人によりいつでも手動走行に切り替えることができる場合を指し、自律走行とは、SUV のように機械が常に自力で走行を制御しなければならない場合を指す。

本研究では地図にグラフ構造を埋め込むことで柔軟な自律走行を実現した。地図にノードを追加し、通行可能なノード間をつなぐことでグラフ構造をつくる。図 12 が作成したグラフである。緑色の点がノードで、ノード間を結ぶ線が通行可能領域である。このグラフ構造を基に、SUV の現在地と入力された目的地を結ぶ経路を深さ優先探索で生成する。図 12 の赤い線が生成された経路である。また、途中で必ず通るノードを指定して経路生成できるようにアルゴリズムを改良した。生成された経路を走行するアルゴリズムは、現在地から次のノードに向かうようにその場回転により向きを変えて、次のノードまでの距離だけ直進する。指定距離分を直進したら、現在地が目的地のノードの位置とずれていてもそのノードに到達したとして、さらに次のノードに同様の方法で向かう。これを繰り返して目的地の座標まで進む方法で自律走行する。

また、この仕組みで正しく自律走行が行われるかを実験によって検証した。ここで検証したいのは壁にぶつかることなく安定して自律走行が行えるかどうかである。実験は以下の手順で行った。

- (1) 目印を付けた地点から SUV を手動で操作し、地図を生成した。
- (2) 出発点を目印の場所にして、図 10 の 7 つの緑の四角のエリアから、SUV が内部でランダムに目的地を選び、その地点に向かって自律走行を開始させた。自律走行には 1 で作成した地図を使った。目的地には 60cm × 60cm の四角をテープで作っており、自律走行が終わった時点で、その四角の領域に SUV が入っているかどうかで、自律走行が正しく行われたかを評価した。SUV の大きさは直径 34cm である。
- (3) 自律走行が完了したら、その場所から 2 と同様な手順で次の目的地を選び、再び自律走行を開始させた。これを計 5 回行った。
- (4) 2,3 の手順を 10 回行った。2 の手順を再びやる際は、目印の位置に SUV を合わせることで誤差をリセットした。

実験手順 2,3 の結果が図 11 である。結果 C は、自律走行が失敗した場合であり、それは四角の領域から完全にはみ出た場合、あるいは壁などにぶつかって自律走行を中断した場合である。それらの場合は 0 回であった。結果 B は、SUV が枠線から一部はみ出た回数であるが、その場合は 6 回あり、いずれも SUV の中心は枠内にあった。結果 A は、四角の領域に完全に SUV が入った回数であり、44 回あった。この結果から、SUV は安定して自律走行できることが確認された。



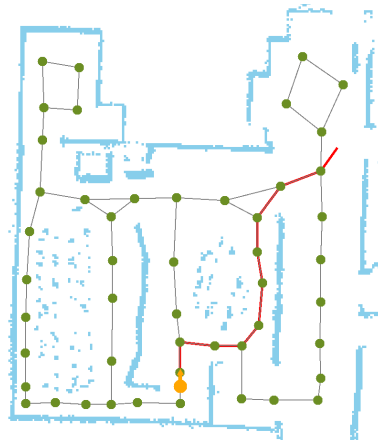


図 9 センサー地図のグラフ構造とそれを用いた経路生成

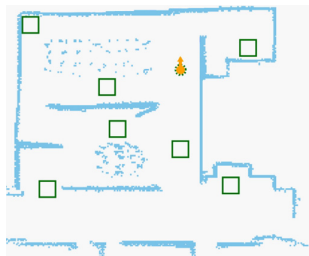


図 10 自律走行の検証の目的地候補

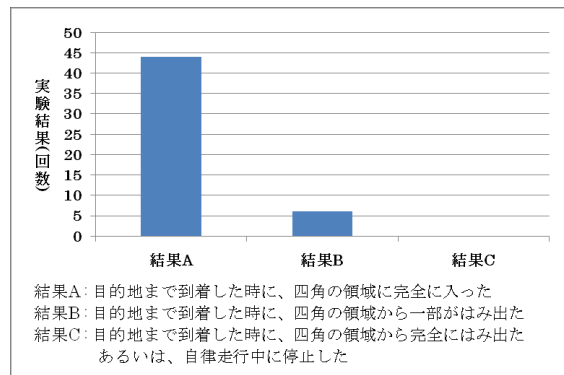


図 11 自律走行の検証結果

#### 4.5 AT と SUV の連携走行

AT の搭乗者がタッチパネルディスプレイより目的地を入力し、自動走行を開始すると同時に、SUV は AT の同経路の自律走行を開始する。また、AT と SUV の距離間隔が離れすぎたり、近づきすぎないように速度を制御する必要がある。

AT は第 2 章で説明したように、RFID のタグ ID と地図の対応関係により経路を生成す

る。通過するタグ ID 群を SUV に送信することで、SUV は第 4.4 節の仕組みでそれらを全て通過する経路を生成する (図 12)。また、AT と SUV は第 4.2 節で説明した自己位置推定の仕組みより、共通の地図上で自分の現在地を求めることができる。SUV は現在地を常に AT に送信し、AT は自分と SUV の距離を計算する。その距離が近すぎる場合は AT が自動走行を一時停止し、距離が遠すぎる場合は SUV の自律走行を一時停止する命令を送信する。これによって、一定間隔を保ちながらの連携走行を可能にした。

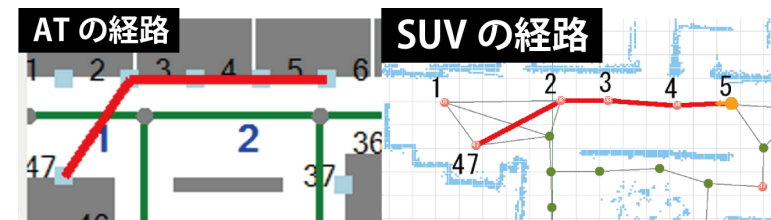


図 12 センサー地図上で AT の経路の再現

#### 5. SUV による AT のセンシング領域の拡張

前章の仕組みを組み合わせることで、本研究のアプローチであるセンシング領域の拡張を実現した。具体的には第 4.1 節で生成した地図上で、AT と SUV の現在地をそれぞれ第 4.2 節の仕組みで推定し、SUV は現在地とセンシング情報を AT に常時送信する。これにより AT は、SUV の位置とセンシング情報を自身のセンシング情報に統合することができる。さらに、第 4.4 節と第 4.5 節の仕組みにより、AT の自動走行を開始すると SUV は AT の前方を一定間隔空けて自律走行する。実際に連携走行している様子が図 13 であり、AT のタッチパネルディスプレイから見る事ができる情報が図 14 である。図 14 で AT のセンシング領域では死角になっている領域をセンシングできているのが分かる。

#### 6. 死角からの移動障害物の回避

本研究のアプローチであるセンシング領域の拡張を用いた応用例として、AT の死角領域から接近する移動障害物の回避を実現した。図 15 は AT が目的地を指定する画面である。搭乗者はこの画面から目的地を入力し、SUV と連携走行をしながら目的地へ移動する。移動中に搭乗者は SUV に重点的にセンシングして欲しい地点を指示することができる。指示



図 13 AT と SUV の連携走行



図 14 SUV による AT のセンシング領域の拡張



図 15 重点的にセンシングする地点の指定

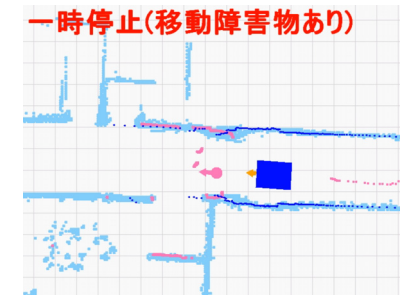


図 16 SUV のセンシング情報による移動障害物の回避

すると図 15 のように赤い丸が表示され、SUV はそこに向かって移動速度を上げる。指定した地点まで SUV がたどりつくと SUV は停止し、AT のタッチパネルディスプレイ上では、図 16 のような SUV を中心としたセンシング情報に自動的に切り替わる。搭乗者はこの画面から、指定した領域の情報を見ることができる。さらに、SUV が移動障害物を検知すると、SUV は後ろに移動することで移動障害物を回避し、同時に AT に移動障害物の情報を送信する。AT は移動障害物の情報を受け取ると自動走行を一時停止する。タッチパネルディスプレイには図 16 のように、一時停止の表示を出すことで搭乗者に情報を提示する。移動障害物が現れない場合は、AT が SUV に近づいたところで連携走行を再開する。このようにして死角からの移動障害物の回避を実現した。今回は自動走行の経路上で死角がある地点を搭乗者が指定したが、このような地点を自動的に検出することは今後の課題である。

## 7. まとめと今後の課題

本研究では AT が自動走行する際に、SUV が連携して自律走行し、AT のセンシング領域を拡張する仕組みを実現した。その仕組みによって、AT の搭乗者は自動走行中、死角からの移動障害物との衝突を回避することができる。今後、センシング領域の拡張という考えをさらに発展させ、様々な応用を実現していく予定である。具体的には、SUV が独立で環境を巡回させることで、環境情報を取得するセンサーの役割を果たす機能や、自動走行の機能を持たないパーソナルモビリティに対して、SUV が案内役のロボットとして機能することなどが考えられる。また、本研究ではレーザーレンジセンサーのみで行ったが、これは平面上の距離情報であるため、人間の足が図 16 の SUV の前にある小さな点のように見え

てしまう。それにより移動障害物の誤認識が問題となったため、Microsoft Kinect などの深度センサーを使って 3 次元のセンシング情報を取り扱うことも今後の課題とする。また、Kinect にはカメラとマイクがついており、それを使うことで AT の搭乗者に伝達できる情報をより多様にすることができる。その応用についても今後の課題とする。

## 参考文献

- 1) Eliazar, I., and Parr, R.: "DP-SLAM 2.0," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1314-1320, 2004.
- 2) Kleiner, A., Prediger, J., and Nebel, B.: "RFID Technology-based Exploration and SLAM for Search And Rescue," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.
- 3) Koyasu, H., Miura, J., and Shirai, Y.: "Recognizing Moving Obstacles for Robot Navigation Using Real-time Omnidirectional Stereo Vision," J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 14, No. 2, pp. 147-156, 2002.
- 4) Lindstrom, M., and Eklundh, J.: "Detecting and Tracking Moving Objects from a Mobile Platform using a Laser Range Scanner," Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1364-1369, 2001.
- 5) Prassler, E., and Scholz, J.: "Tracking Multiple Moving Objects for Real-Time Navigation," Autonomous Robots, Vol. 8, No. 2, pp. 105-116, 2000.
- 6) Thrun, S., Burgard, W., and Fox, D.: Probabilistic Robotics, The MIT Press, 2005. 上田隆一 (訳): 確率ロボティクス, 毎日コミュニケーションズ, 2007.
- 7) 尾崎 宏樹, 井上 泰佑, 安田 知加, 森 直史, 長尾 確: "個人用知的移動体による移動障害物回避", 情報処理学会第 71 回全国大会, 2009.