

個人用知的移動体の安全自動走行

渡邊 賢[†] 尾崎 宏樹^{††} 矢田 幸大^{††} 長尾 確[†]

個人の移動をより便利にするパーソナルモビリティの研究が進むことで、人々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、パーソナルモビリティのさらに先である個人用知的移動体 AT (Attentive Townvehicle) と呼ばれる、情報処理技術で搭乗者に様々な支援を行う乗り物の研究・開発を行っている。本論文では、このような乗り物の安全な移動に関して、情報処理技術が支援する方法を提案し、それを実現したことを報告する。具体的には、搭乗者がマニュアルで AT を操作する際に、自動で周囲の障害物を回避したり停止したりする仕組みと、自律移動ロボットを拡張センサーとして用いることで、自動走行中に死角から接近する移動障害物を検知し、回避する仕組みである。

Safe and Automatic Driving System of Personal Intelligent Vehicle

Ken Watanabe[†] Hiroki Osaki^{††} Hiroyuki Yata^{††}
Katashi Nagao[†]

A personal mobility system lets people move quickly and conveniently. We are conducting a research project of a personal intelligent vehicle called AT (Attentive Townvehicle). AT is an advanced personal mobility system that supports its passenger by means of some information technologies.

This paper presents two new methods of passenger support in terms of safety. The details are as follows: 1) When the passenger drives AT by a joy stick controller, AT recognizes and avoids obstacles around AT. 2) During automatic driving toward a passenger specified destination, it is difficult for AT to avoid moving obstacles that are approaching AT from dead area of AT's sensors. Therefore, we solved the problem by extending sensing areas of AT based on an autonomous probe robot.

[†] 名古屋大学 大学院 情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University

^{††} 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

1. はじめに

近年、セグウェイ社の「セグウェイ」、トヨタの「i-REAL」、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、パーソナルモビリティのさらに先である個人用知的移動体 AT (Attentive Townvehicle) と呼ばれる、情報処理技術で搭乗者に様々な支援を行う乗り物の研究・開発を行っている。本論文では、このような乗り物の安全な移動に関して、情報技術がどのように支援が可能かを提案し、それを実現したことを報告する。

AT はジョイスティックを利用することによって搭乗者の行きたい方向に自由に移動することができる。しかし、障害物等によって走行が制限された狭空間においては、搭乗者の認識や目測の誤りにより障害物と衝突する可能性が高いだけでなく、たとえ障害物と衝突することなく移動することができたとしても、複雑で細かい操作を必要とする。そこで、搭乗者の指定する方向へ移動すると衝突する危険がある場合に、AT が移動する方向と速度をシステム側で調節する手法を提案する。これによって、簡単な操作で障害物に衝突することなく移動を行うことができるようになる。

また、AT は搭乗者がタッチパネルディスプレイに表示された地図を用いて指定した目的地まで自動で走行する機能を持つ。この際、安全に自動走行するためには、移動障害物を含むすべての障害物との衝突を自動で回避する機能が必要である。移動障害物を認識してから回避するまでに十分時間がある場合はすでに多くの手法が研究されている[11,12]。例えば、目の前を歩く人間とすれ違う場合などである。しかし、これらの研究では死角から突発的に現れる移動障害物を安全に回避することは困難である。この問題に対しては移動体自身が持つセンサーでは十分に対処できないため、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。そこで、AT のもう一つの安全な移動に対する仕組みとして、小型無人移動体(SUV: Small Unmanned Vehicle) と呼ばれる自律移動ロボットを拡張センサーとして用いることで、目的地に対して自動走行中に死角から接近する移動障害物を検知し、回避する仕組みを提案する。

2. 個人用知的移動体

AT は移動体に情報処理・通信機能を持たせ、人間の物理的な移動と情報処理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)。AT の特徴の一つは、メカナムホイール(車輪に小型の補助輪を組み合わせた複合車輪)を用いた全方位移動である。これにより、狭い屋内などで正面から現れる歩行者を真横に移

動して回避することや、3章で説明する安全なマニュアル走行のための補助が可能となる。

さらに、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、平面上のセンサーから物体までの距離を知ることができるデバイスである。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。我々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[7]。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[6]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することができる。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。

また、ATの搭乗者はATに搭載されているタッチパネルディスプレイにより行きたい場所を地図上で指定することで、自動で目的地まで移動する機能をもつ。この目的地まで自動で行く手法については4章で説明する。目的地までの移動中は、前述のレーザーレンジセンサーで移動障害物を検出・回避を行うが、この方法では、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。この問題は、ATのような自動走行をする乗り物が一般に普及することを考えると、必ず解決すべき問題である。この問題に対しての解決策として、本論文ではSUVを拡張センサーとして使う手法を提案するが、これについては5章で説明する。



図1.ATの構成

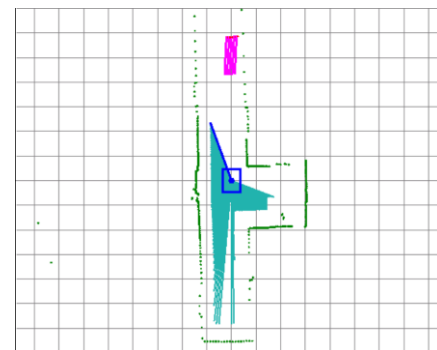


図2.レンジセンサーによる
障害物情報の取得

3. 安全なマニュアル走行

ATには図1のようなジョイスティックが搭載されており、搭乗者がマニュアルでATを操作することが可能である。ATはスティックが倒された方向に全方位移動を行い、倒された深さに応じて移動速度が決まる。また、ジョイスティックの上部に付いているボタンを押しながらスティックを左右に倒すことで左あるいは右回りでその場で回転を行う。

現在のATは屋内の走行を目的としたものであるため、その走行中には走行できる幅の狭い空間や室内の障害物が多く存在していると考えられる。そのような空間を走行する際に、搭乗者は衝突を避けるために細かな操作を要求される。しかし、常に周囲の障害物を警戒しつつ操作するのは搭乗者の負担が大きい。そのため、ATにはそのような狭い空間での搭乗者の操作を支援する補助走行という仕組みが搭載されている。この補助走行では、搭乗者は自分自身が進みたい大まかな方向と速度をATに伝えるだけで十分である。ATはその方向と速度に基づいて、さらにATに搭載されているレンジセンサーの情報も利用して、安全に走行できる方向と速度を計算し、その情報を走行に反映させる。これにより、搭乗者は簡単な操作で安全に移動することが可能となる。この補助走行による速度と進行方向の決定方法について詳しく説明する。

3.1 補助走行による移動速度調節

速度の調節は、近接する障害物までの距離に応じて行う。速度調節を行う範囲は、搭乗者の指定方向から±90度以内にある障害物（ただし、障害物の移動は考慮していない）を対象としている。障害物がATから離れている場合は、ATが接近するまで衝突する危険性がないため、速度調節を始める範囲を100cmと設定した。さらに、指定方向の正面でない場所にある障害物においては正面にある障害物と比べて障害物に衝突する可能性が低いと、速度調節を始めるための障害物までの距離を若干短くし、50cmとすることで不必要な減速を行わないようにした。また、減速を行う速度の下限値はあらかじめ決められている。以上のことを考慮して、図3のように速度調節を行う範囲を設定した。これにより、移動に危険が生じにくい障害物においてはできるだけ減速することなく、移動に危険が生じやすい障害物との距離を特に考慮して減速させることができる。

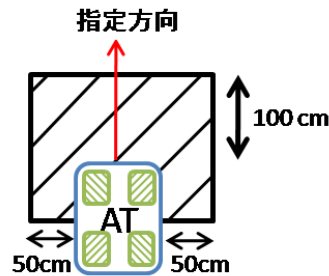


図 3 速度を考慮するエリア

3.2 補助走行による移動方向調節

進行方向は、まず全方位の距離情報から AT の走行可能空間を検出し、次のようにして決定する。AT から一定距離範囲内にある障害物同士の間隔が AT の幅より大きい場合に AT の周辺の空間を走行可能空間と定義する。そして、指定方向と走行可能空間の中心との角度差を計算し、計算された角度差が一番小さい方向を移動すべき方向として、移動方向を決定する。しかし、実際に移動する際に、搭乗者の指定方向と全く異なる方向へ移動してしまつては、搭乗者の意図から大きく外れてしまう。そこで、移動方向を搭乗者の指定方向から ± 90 度以内にするこゝで、搭乗者の指定方向と全く異なる方向へ進むことを防止している。また、周りが障害物に囲まれていて、進行可能な方向がない場合は走行を停止する。

例えば図 5 のような狭空間を走行する場合、搭乗者の入力だけに従って走行すると搭乗者は何度も入力を変更しなければならない。しかし、システムが移動方向の調節を行うこゝで、搭乗者が入力を変更しなくても障害物と衝突することなく走行することができる。

ある程度複雑な地形において、補助走行の有無によるマニュアル走行の操作回数を計測したところ、平均して約 6 割の操作を補助走行によって減少できることが実験によって分かっている。このように、補助走行は衝突を回避する安全面だけでなく、搭乗者の負担の軽減にも有効に機能する。

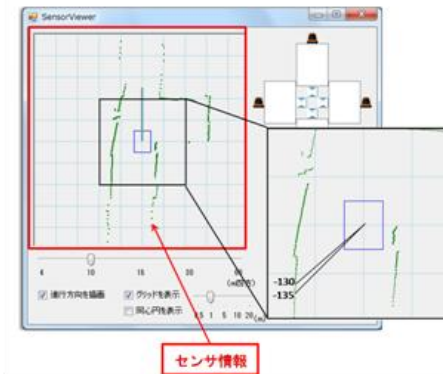


図 4. レンジセンサーが取得した全方位の距離情報

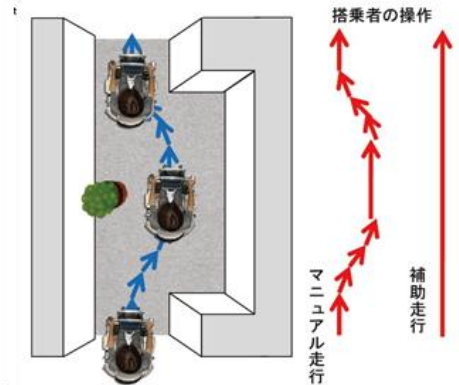


図 5. 移動方向調整の例

4. 自動走行の仕組み

AT と SUV は指定した目的地に対して自律的に移動する仕組みが必要である。これは移動ロボットの基本的な機能として数多く研究がされており、その多くは次の 3 つのステップを解決することにより達成する。

1. 環境地図生成
2. 自己位置推定
3. 経路生成

1 は AT と SUV が環境を認識するために事前につけておく地図であり、2 は作られた環境地図上で現在の自分の姿勢(位置・向き)を推定する機能で、3 は指定された目的地まで環境地図上のどこを通るか決定する機能である。それぞれのステップは様々な手法が提案されており、本章では AT と SUV に実装した手法について説明する。

4.1 環境地図生成

現在地を把握したり、目的地を決めその場所まで自律走行するためには走行する環境の地図が必要である。地図の作成は SUV を事前に環境を走らせ、レーザーレンジセンサーの計測記録から 2 次元の占有格子地図を作る。

占有格子地図とは、等間隔の格子に配置された確率変数で表現される地図のことであり、確率変数の値が高いほどその領域が物体によって占められている可能性が高いことを意味する。この占有格子地図は移動体の走行中に得られるオドメトリ(モーターの回転から得られる推定位置)とレンジセンサーの記録を ICP アルゴリズムで補正しながら重ね合わせるこゝで作成される。実際に作った占有格子地図を図 6 に示す。画像の各

画素の色の濃さが占有格子地図の各格子の確率変数の値の大きさを表す。黒は障害物有り、白は障害物無し、灰色が初期状態を表している。各格子の間隔は 50mm, SUV が 300mm 進むごとに記録したデータから作成した。



図 6.生成された占有格子地図

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、環境地図上での位置を推定する機能である。ある程度動的な環境でも一定の誤差以内で位置を推定し続けるのが重要であるため、確率で位置を推定していくパーティクルフィルタ[6]を、自己位置推定に用いた。

位置推定は、地図の更新が行われないこととオンタイムで推定する必要があることから、誤差の大きさよりも処理速度とロバスト性が求められる。処理速度を上げるために地図とのマッチングを行うセンサーの分解能を 15 度に設定し、ロバスト性を上げるためにパーティクルを多めの 500 個用意した。1 回の位置推定にかかる処理時間は 10msec 以下で、これを 1 秒間に 4 回繰り返すことで、オドメトリの誤差に対してロバストな位置推定を行うことができる。

4.3 経路生成

AT と SUV は前節で説明した通り、環境地図上で自己位置を一定の誤差内で推定し続けることができる。本節では自己位置から指定された任意の座標に対して走行可能な経路を生成する方法を説明する。

環境地図に用いた占有格子地図は地図上の格子ごとに物体に占められている確率を表現しているが、一定の閾値以下の領域を走行可能領域として、走行可能領域に経路生成のためのグラフ構造を自動で生成する。生成手法は、次の通りである。まず、図 7 の黒い部分で表されているような障害物から一定距離内の領域を塗りつぶし、その境界線にノードを一定間隔で追加する。さらに、障害物から一定距離外の領域を塗りつぶし、その境界線にも同様にノードを追加する。図 7 の点はこの手法で生成されたノードである。生成されたそれぞれのノードについて一定距離内にあるノードをつなげることによってグラフ構造を作る。図 8 は実際に生成されたグラフ構造である。

次にグラフ構造から経路を生成する手法を説明する。環境地図の走行可能領域で任

意の場所が目的地として指定された時、現在地と目的地のそれぞれの最近傍のノード間を A*アルゴリズムで探索することで経路を生成する。A*はダイクストラ法の推定値が小さいものから順に探索し、経路が見つかった時点で探索を終了するアルゴリズムである。このアルゴリズムは目的地までの推定値をユークリッド距離とすることで最短経路を探索できることが保証されている。図 8 は実際に生成された経路である。

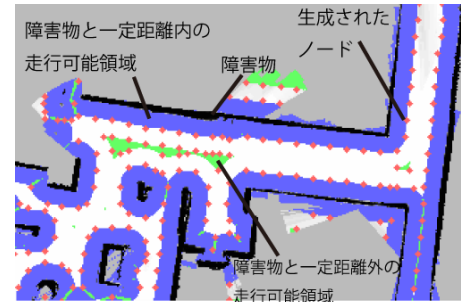


図 7. 地図上の障害物とその境界線

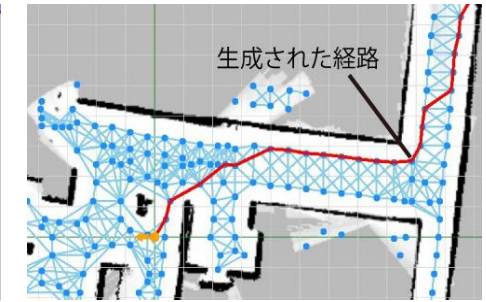


図 8. 地図に付与されたグラフ構造と生成された経路

5. 小型無人移動体による安全な自動走行

1 章で説明したとおり、AT が安全に自動走行するためには、移動体自身が持つセンサーでは十分に対処できないため、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。そこで、自律走行可能な小型無人移動体(SUV: Small Unmanned Vehicle)を AT の拡張センサーとして用いることでこの問題を解決する。SUV は拡張センサーとして機能するために次の 3 点の機能を持つ

1. 指定された目的地まで正確に自律走行を行う
2. AT が自動走行する経路上に、注意すべき死角のある場所を自動検出する
3. 移動障害物を発見する

1 については 4 章で説明した AT と同様な仕組みである。2 については 5.1 節、3 については 5.3 節で説明する。

5.1 小型無人移動体の注意区間の検出

注意区間とは、ある経路上を走行する際に、進行方向前方の視野外から接近する移動障害物と衝突する可能性がある場合、それを回避するために特に注意を払う必要がある、経路上の区間を指す。直感的な説明をすれば、車を運転する際に視野が不明瞭で危険を感じる場所を、徐行して走行する区間とほぼ同様である。

SUV が AT の拡張センサーとして AT の安全性を高めるためには、AT が自動走行する

際に通る経路上の注意区間の終点を SUV の目的地に設定して自律移動させ、AT の死角となる領域を前もってセンシングする必要がある。注意区間は定義の性質上、移動体の状態・性質によって判断基準があいまいである。そこで、事前に複数の人間の判断によって注意区間を調査したところ、次のような傾向が見られた。

1. 左右の初めてセンシングできる領域が急増する区間において発生する傾向がある。
2. 初めてセンシングした領域について、移動体とより近い領域の増加分を重要視する傾向がある。

以上の方針に基づいて占有格子地図から注意区間を検出する手法を実現した[15]。図9は実際に検出した注意区間である。

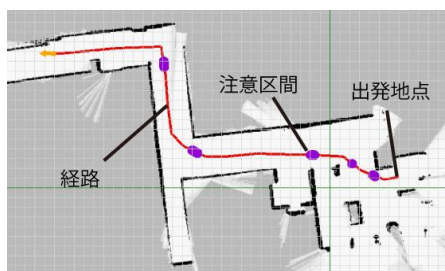


図9. 使用した経路とその検出結果

5.2 注意区間を考慮した安全走行

AT の搭乗者がタッチパネルディスプレイにより目的地を入力し、自動走行を開始すると同時に、AT は 4.1 節で説明した方法で経路を生成し、生成した経路を SUV に送信することで、AT と SUV は同時に同経路を走行開始する。SUV は AT よりも速い速度で自律走行を行い、注意区間付近で速度を落とし、移動障害物の出現に備える。さらに注意区間の終点に着くと完全に停止し、AT が一定距離に近づくまで AT の死角から接近する移動障害物がないか監視し続ける。移動障害物が現れたときは、SUV は移動障害物と衝突しない位置に移動し、移動障害物が通り過ぎのを待つ。移動障害物を認識した時点で AT にその情報を伝達する。移動障害物が現れないときは AT の接近に伴って SUV は次の注意区間まで移動を再開する。SUV のセンサー情報は走行中常に送信され、AT は SUV のセンサー情報を自分のセンサーと同じように処理することができる。図 10 の右側は AT のタッチパネルディスプレイから見ることができる画面である。SUV の取得したセンサーが反映されているのが分かる。

移動障害物の認識には SUV に搭載された Kinect[a]とレンジセンサーを用いる。

a) Kinect は米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標です

Kinect は RGB カメラ、深度センサー、マルチアレイマイクロフォン、および専用ソフトウェアを動作させるプロセッサを持つデバイスである。Kinect の深度センサーは人間の検出に向いているが検出位置の誤差が大きく、レンジセンサーは人間の検出には向いていないが距離の誤差が少ないため人間の進行方向を計算するのに向いている。以上の理由から、SUV に搭載された Kinect で人間の検出を行い、人間の認識位置付近のレンジセンサーの値を参照することで、人間の進行方向を計算し、その人間が接近中かどうかを判定する。実際に検出した時の様子が図 11 である。左上の画像が Kinect で取得した RGB 画像で、左下が Kinect で取得した障害物までの深度と人間の検出結果である。右の環境地図上に検出した人間の位置がピクトグラムで表示される。

SUV を用いた安全な自動走行の仕組みは、AT のセンサーで検知できない領域から接近する移動障害物を事前に検出し、ぶつからないように停止するという動作である。単純ではあるが、移動障害物同士の衝突の多くはお互いをお互いを認識することなく移動し続けた場合に発生する。SUV を用いたこの仕組みは、移動障害物の認識を早め、その障害物との衝突の危険性が十分に低くなるまで停止する仕組みであり、移動の安全性を大幅に向上させることができると考えられる。

そもそも SUV のような注意区間で一旦停止し、移動障害物を見つけたときは回避する動作を AT 自身が行えば安全に走行することは可能である。しかし、AT のような人間が乗る乗り物が見通しの悪い注意区間の全てにおいて一旦停止し、移動障害物を見つけたときに速い速度で回避する動作を行うことは搭乗者の乗り心地を悪化させる。自動走行は人間が歩くよりも安心して移動できる仕組みを実現するため、SUV が注意区間を監視する本研究の仕組みは有効だと考えられる。

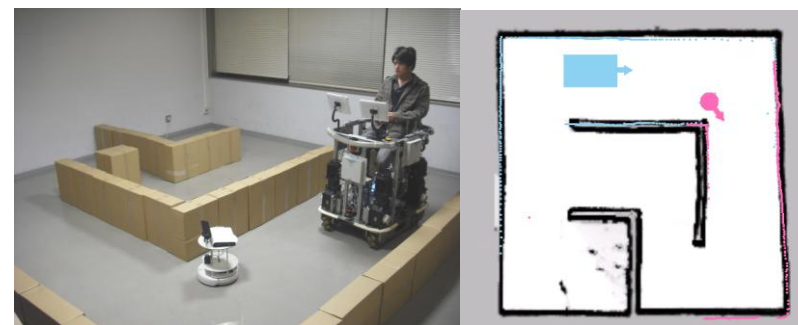


図 10 .注意区間で停止する SUV とその時の AT のコンソール画面

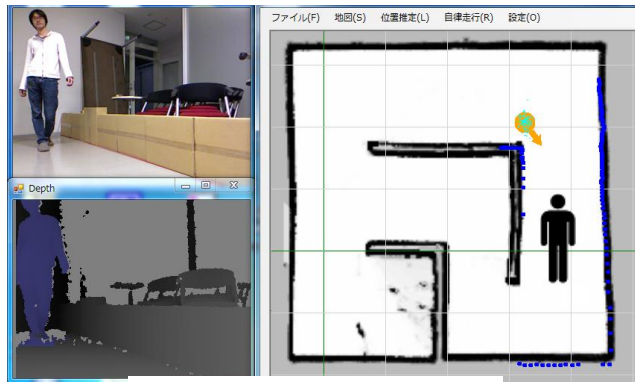


図 11.SUV の移動障害物の認識

6. おわりに

本論文では、個人用知的移動体が安全に走行するための仕組みをマニュアル走行と自動走行でそれぞれ提案した。ATは補助走行機能によって壁などの障害物にぶつかることなくマニュアル走行することができる。現在の手法は障害物が静止していることを前提としているため、障害物が移動している場合は適切に回避を行うことができず、衝突する可能性がある。今後は、移動する障害物の動きも考慮した上で移動速度や移動方向の調節を行う必要がある。さらにATは自動走行においては、SUVを拡張センサーとして用いることで交差点の死角から接近する移動障害物を検知・回避することができる。しかし、マニュアル走行時のSUVの挙動が現在考慮されていない。ATがマニュアルで動くとき、SUVはATの進路を予測して、周辺の注意区間に先回りするなど、ATとSUVの連携機能を拡張していくのが今後の課題である。

本論文で提案した安全自動走行の仕組みでATのような移動体が確実に安全に走行できるようになったわけではない。補助走行とSUVと連携による安全走行は安全性に関する部分的な問題を解決したが、実際には様々な例外的な問題が発生すると考えられる。したがって、より大規模な環境で実際にATを運用させることで新たな問題を発見し、その問題を解決していくことも今後の重要な課題である。さらに、安全性の面だけでなく、ATが新しい情報端末として、移動に関する様々な情動的支援を行う研究を進めていくのも今後の課題である。例えば、搭乗者の趣味趣向を学習することで目的地を予測したり、移動先の店舗や観光施設などの情報を搭乗者に提示することで、より快適な買い物や観光を支援するシステムなど、情報端末と移動体が密接に交わることで様々な応用の可能性が考えられる。

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/RISJ 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.
- 8) 佐藤 雄隆, 坂上 勝彦: "安心・安全な次世代モビリティを目指して -全方向ステレオカメラを搭載したインテリジェント電動車いす-", Synthesiology, Vol.2, No.2, pp.113-126, 2009.
- 9) 武野 純一, 柿倉 正義: "移動ロボットの移動障害物に対する衝突回避問題について", 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.5, 1986.
- 10) 藤原 豊, 中村 孝宏: "点字ブロックを用いた福祉型自律移動ロボットの開発", 一般社団法人日本機械学会講演論文集, 2006.
- 11) 堀井 千夏, 今井 正和, 鳥野 武: "視覚を持ったロボットによる追跡と衝突回避", 電子情報通信学会技術研究報告 パターン認識・理解, Vol.95, No.44, pp.33-40, 1995.
- 12) 前田 陽一郎, 竹垣 盛一: "ファジィ推論を用いた移動ロボットの動的障害物回避制御", 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.6, pp.518-522, 1988.
- 13) 横山 牧, 岡野 裕, 福嶋 政期, 古川 正紘, 梶本 裕之: "曲がり角における出会い頭の衝突回避を目的とした周辺視野への接近感提示装置の制作", 情報処理学会シンポジウム論文集, No.3, pp.573-574, 2011.
- 14) 渡邊 賢, 井上 泰佑, 長尾 確: "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", 第 163 回 情報処理学会 知能システム研究会, 2011.
- 15) 渡邊 賢, 長尾 確: "個人用知的移動体の安全走行のための注意区間検出", 第 16 回知能メカトロニクスワークショップ, 2011.
- 16) 渡部 翔, 金子 正秀: "自律移動ロボットにおける視野外の状況も考慮した衝突回避: 音情報による物陰の人物認識", 映像情報メディア学会技術報告, Vol.35, No.8, pp.57-60, 2011.