方位検出と交差点認識を用いた 道なり走行ベースの屋外自律ナビゲーション

渡辺 敦志* 阪東 茂* 品田 和洋* 油田 信一*

Road-Following-Based Navigation in Park and Pedestrian Street with Finding Intersection and Orientation Detection

Atsushi Watanabe*, Shigeru Bando*, Kazuhiro Shinada* and Shin'ichi Yuta*

Autonomous outdoor navigation technology is required for automatic portage, transportation, and many other service robot systems. In case of people, one can go through the town to the destined building without using global positioning system. He walks while detecting his orientation and knowing which street he is on. And he finds the intersection and turns based on his knowledge of the map. In this paper, we explain our outdoor navigation method based on the road following with detecting orientation and finding intersection, which we adopted in our robot for Tsukuba Challenge 2010. We have used two scanning laser range sensors, for obstacle detection and finding the edge of the road, to know the road area, and a magnetic field sensor to know the robot orientation to follow the proper path. In this paper, we describe the implementation of the system, and show the experimental results of autonomous navigation in park and pedestrian street of Tsukuba city.

Key Words: Tsukuba Challenge, Mobile Robot, Outdoor Navigation, Road Following, Orientation Detection

1. はじめに

我々が暮らす実世界の中で、移動ロボットが与えられた目的を自律的に達成するためには、絶えず変化する周囲の環境をロバストに取得・認識し、次に行うべき行動を計画し、どのように手足を動かすか決定し、実際にアクチュエータを動かす、といった一連の動作が必要である。情報科学・工学や機械工学・制御工学の多くの分野では、これらの一つ一つの部分について、長年にわたって自動化・機械化を行う研究が行われているが、それらの技術を単に組み合わせるだけでは、現実の世界で動作するシステムを構築することは容易ではない。これが、実世界で働くシステムを実際に開発する研究アプローチの意義である。

実世界で動作する自律移動ロボットの研究としては、2007年に開催された DARPA アーバンチャレンジにおいて、交通規則に従って動作する移動ロボットが模擬的な市街地環境で動作するための技術研究が行われ、総延長 97 [km] の自律走行が、6 チームによって実現された [1]~[4]。DARPA アーバンチャレンジにおいては、参加した自律移動ロボットには多くのセンサと、そのデータを処理して環境認識と動作計画を行うためのラップトップコンピュータを複数台搭載していることが普通であった。

一方、移動支援や物流をはじめとする、移動ロボットシステムを実用化するためには、低コストで単純な構成による自律移動ロボットの実現が求められている。また、人間生活環境内で働くロボットを作る際には、自動車用の道路と比べて規格化がされておらずバリエーションの多い歩道を走行する必要があるため、様々な形状をした歩道を認識する必要がある。

屋外における自律ナビゲーションのアルゴリズムとしてはスキャンマッチングによる自己位置推定に基づくナビゲーション手法 [5] [6] や、GPS による自己位置推定に基づくナビゲーション手法 [7] などが提案されている。ICP スキャンマッチングなどの手法を用いた地図とのマッチングによる自己位置推定に基づくナビゲーション手法においては、あらかじめ環境の詳細なデータを地図として取得しておく必要があるため、大きなデータ量の地図をもつ必要があったり、地図を作成する手間が大きくなる問題がある。また、経時変化などにより環境が変化した際には地図を作り直す必要がある。また、GPS を用いた自己位置推定に基づくナビゲーション手法を、本稿で対象とする環境に適用する場合、付近に建物がある領域や上方を街路樹が覆っている領域では、GPS で得られる位置情報に誤差が乗りやすいため工夫が必要であり、不可視な衛星のデータを除外する手法などが研究されている [8]。

筆者らはすでに、屋内環境を対象として、レーザ測域センサを 1 台用いた、道なり走行ベースの自律ナビゲーションシステムを提案している [10]。このシステムは、人間同士の経路指示

原稿受付 2011 年 6 月 30 日

*筑波大学システム情報工学研究科

*University of Tsukuba

■ 本論文は学術的に評価されました。

Fig. 1 Route in park and pedestrian street environment for experiments [9]

のように、大まかな距離と交差点の情報より構成されるトポロジカルな地図による動作指示に従って、500 [m] 程度の屋内の廊下における巡回経路を安定して自律走行することに成功している。この手法は、精密な自己位置推定を行わずに、交差点の認識と簡単な経路の情報に従って動作するため、詳細な環境データをあらかじめ取得する必要がなく、地図の作成が容易である。また、ハードウェア構成とセンサ構成が単純化できるという利点がある。

筆者らは、この手法を発展させて、2 台のレーザ測域センサを用いて屋外環境において走行可能な道路の検出を行い、また、地磁気センサと簡単に表現された経路情報を用いて自身の走行を制御する、屋外自律ナビゲーション手法を考案し、これをつくばチャレンジ 2010 に適用した。本稿では、筆者らが構築したロボットのハードウェアについて説明したあと、走行可能領域の検出、方位認識、交差点検出と、トポロジカルな地図を用いた、道なり走行ベースのナビゲーション手法について述べ、これを実装して、つくばチャレンジ 2010 [9] において走行実験を行った結果を示す。

2. つくばチャレンジが対象としている環境

つくばチャレンジが自律ナビゲーションの対象としている環境は、茨城県つくば市のつくば駅前の遊歩道、公園および駅前広場である。つくばチャレンジは、実世界で利用可能な技術開発・研究を行うための実証実験の場として開催されている [9]。筆者らは、つくばチャレンジ 2010 の経路を自律的に走行することを具体的な目標としてハードウェアとソフトウェアのシステムの開発を行った。Fig. 1 につくばチャレンジ 2010 ロボットが走行すべき課題として示されたコースを示す。このコースは、実際の市街地の遊歩道および公園の環境中に設定されており、ロボットが走行中も一般の歩行者および自転車利用している。経路の全長は 1.1 [km] で、経路中にはタイル張りの路面、車道沿いの歩道、公園内の歩道、歩道橋などがある。

3. ロボットのハードウェア構成

筆者らがつくばチャレンジ 2010 の課題達成を目標として開発した自立移動ロボット「山彦メロス」は、2 個の独立に駆動される動輪と 2 個のキャスターから構成される独立二輪操舵形車両である。動輪およびキャスターには、市街地環境における段差を走破するため、オイルサスペンションを搭載し、最大 2 [cm]

Fig. 2 Developed practical mobile robot “YAMABICO Meros”

Fig. 3 Sensor layout

Table 1 Specification of laptop computer used for sensor data processing, motion control, and navigation

CPU model name	Intel Core2 Duo T7100
CPU operating frequency	1.80 [GHz]

程度の段差を乗り越えて走行することを想定して設計した。動力源として 12 [V] 7 [Ah] のシール鉛蓄電池を 1 個搭載し、およそ 1 時間程度の連続走行が可能である。

Fig. 2 に外観を示す「山彦メロス」には、センサとして車輪の回転を検出するためのロータリーエンコーダのほかに、北陽電機製の走査型レーザ測域センサ UTM-30LX（通称：Top-URG）を 2 台と、Honeywell 社の 3 軸磁気センサ HMC1043 を 1 個搭載している。Fig. 3 に、搭載した Top-URG の取り付け位置および向きを示す。下側の Top-URG (a) は、走査平面が地面と水平になるように設置している。また、上側の Top-URG (b) は走査平面を 16.6° 傾けて設置しており、ロボット正面の地面の形状を取得することができる。

「山彦メロス」の走行制御系は、モータの速度制御をルネサスエレクトロニクス社の SH7045 マイコンで行い、センサ情報処理、走行軌跡制御、自律ナビゲーションの処理をロボットの統括コントローラである Lenovo 社の Thinkpad X61 (Table 1)

を用いて行っている。

4. 走行可能領域の認識

ロボットに自律的に市街地内のコースを走行させるため、まずロボット自身のセンサにより前方の走行可能な領域を識別する。市街地において、移動ロボットにとっての静止している障害物として、壁、路肩・縁石・階段等の段差や走行路のまわりの斜面、芝生がある。また、移動する障害物として、歩行者、自転車と考えられる。ロボットは常時走行可能な路面の上にいるという前提に基づき、ロボットの中心からロボット前方の扇形領域のなかで、各方向について走行不可能と判断される点の手前までを、ロボットの走行可能領域として考え、以下の三つの手法を用いて、これを認識する。

4.1 移動物体・静止物体の分離・検出

水平に向けて設置している Top-URG (a) から得られた環境中の物体表面のレーザが反射した点（以下、測距点と記す）と、この Top-URG (a) の間には壁、自転車や歩行者などの大きな障害物は存在しない。この測距点とセンサの間の領域を、ロボットのオドメトリ、すなわち、車輪の回転数から計算した推定自己位置に連動してスクロールする二次元グリッドマップ中に、自由領域として記録する。測距点については、過去に自由領域として記録されたグリッド上の点を移動物体、それ以外の点を静止物体と判断する。ここで、グリッドサイズは 15 [cm]、グリッドマップ全体の大きさは 12 [m²] とした。

4.2 段差検出

地面に向けて傾けて設置した上側の Top-URG (b) から得られたおのおのの測距点の地面からの高さを、ロボットのオドメトリによる推定自己位置に連動してスクロールするグリッドマップ上に、測距点の高さの分布を記録する。ただし、4.1 節で、移動物体等の大きな障害物として認識された点の付近は移動物体のデータが蓄積されて残ることを防ぐため記録しない。グリッドマップ上の各グリッドについて、測距点の高さの分散を求め、これが閾値を超える場所を段差と判断する。閾値は、ロボットを走行させながらセンサデータのばらつきを見て、実験環境中

の高さ 5 [cm] 程度の縁石が検出されるように決定した。最終的に使用した閾値は 6² [cm²] とした。

4.3 路肩検出

市街地環境の歩道は、一般に排水のために凸の形状を持つ [11] ため、路肩部分は変曲点を持つことが多い。そこで、4.2 節で作成したグリッドマップ上の各グリッドについて隣接するグリッド間の、標高の平均値の 4 方向微分および 2 階微分を計算し、2 階微分が 0 となるか符号が変化する点、かつ、1 階微分の絶対値が大きい点を、路肩と判断し、それより手前は走行可能領域とする。閾値は 4.2 節と同様に実際の計測データを見ながら Fig. 4 に写真で示す公園内の歩道の路肩が検出されるように決定し、1 階微分の絶対値の閾値を 5 [cm] とした。

以上の手法 4.1～4.3 節で検出された走行可能領域の論理積を、ロボットが走行可能な領域と判断する。ただし、4.3 節は駅前遊歩道のように地面が平らな場所では誤検出が発生する場合があるため、後述の経路情報に従って、走行している場所によって使用する手法の組み合わせを切り替えて走行可能領域を認識することとした。

Fig. 5 に、Fig. 4 に写真を示す公園で取得したデータに対して、4.3 節の手法を適用した様子を示す。Fig. 5 (a) は標高、(b) は傾きベクトルの絶対値、(c) は傾きの 2 階微分の値を濃淡で示している。検出された路肩を Fig. 5 (d) に示す。また、Fig. 6 に、2010 年 11 月 17 日に行われた公開実験走行のうち 1 回の

Fig. 4 Picture of park environment which have road shoulders

Fig. 5 Detection of road shoulders on smooth ground on Digital Elevation Map generated from scanning laser range sensor

Fig. 6 Practical results of the detection

Fig. 7 Enlarged view of Fig. 6: Integrated points (a), Detected static Objects (b), Road shoulders (c) and Bumps (d)

走行実験において検出・測定され、計算された、静止物体、段差、路肩等のロボットが安全に走行できる領域の端点を示す点群を、推定した方位と走行距離に基づいて指定された使用するアルゴリズムで得られたデータを区間毎に経路情報で貼り合わせたデータを示す。この例においては、コースのほとんど全域にわたって、道の輪郭に沿って点群が検出されていることが確

認できる。また、Fig. 7にFig. 6中の点線で囲った部分を拡大した図を認識アルゴリズムごとに示す。

5. ロボット方位のフィルタリング

筆者らが開発したナビゲーション手法は、地図上に記した方位を利用してロボットを走行させる向きを決定する。そのために、ロボットは常時自身の方位を検出する必要がある。

方位を検出するために、磁気センサの出力情報と車輪の回転数検出によるオドメトリ情報を用いている。磁気センサを用いると地磁気による絶対方位が検出可能であるが、これには電磁ノイズや環境磁場によるノイズが含まれている。また、オドメトリを用いた方位検出では、短時間での方位の変化を高精度に検出可能であるが、求められた方位の変化量には地面の凹凸や傾斜による誤差や、車輪のスリップなどによる測定誤差があり、それが累積計算された方位には累積誤差が含まれる。

そこで、磁気センサから求められた方位の低周波成分とオドメトリにより求められた方位の高周波成分の和を計算することで、ロボットの向いている方位を推定する手法を考案した。なお、ここでは、磁気センサとオドメトリから求めた方位信号は走行距離の関数として扱うものとした。本稿で対象としている、遊歩道、公園および駅前広場における環境磁場は、地中や建物中の磁化した鉄骨等によって局所的に発生していると考えられる。そこで本手法では、磁気センサから求められた方位信号中で、対象とする環境中に存在する鉄骨等の大きさと同程度の周期をもつ成分をローパスフィルタで取り除くことでロボットの方位を検出するものとした。この計算では、ローパスフィルタで環境磁場の成分を取り除いて得られた磁気方位には遅れがあるが、オドメトリによって得られた方位の高周波成分を足し合わせることで、最終的に計算された方位には原理的に遅れは発生しない。この方位検出系の構造をFig. 8に示す。ここでは、オドメトリにより求められた方位に適用するハイパスフィルタと磁気方位に適用するローパスフィルタはそれぞれ走行距離の関数として表された次式の、距離を5[cm]で離散化した一次IIRデジタルフィルタとして構成した。

$$\begin{cases} Lx^{mag}(n) = \alpha \cdot Lx^{mag}(n-1) + (1-\alpha)\theta_{mag}(n) \\ Lx^{odm}(n) = \alpha \cdot Lx^{odm}(n-1) + (1-\alpha)\theta_{odm}(n) \\ Hx^{odm}(n) = 1 - Lx^{odm}(n) \\ \hat{\theta}(n) = Lx^{mag}(n) + Hx^{odm}(n) \end{cases} \quad (1)$$

これに、5[m]のカットオフ周期を持たせるため、

$$\alpha = 0.93906 \quad (2)$$

とした。ここで、 θ_{mag} は地磁気センサから得られた方位、 θ_{odm} はオドメトリから得られた方位、 Lx および Hx はフィルタの内部状態、 $\hat{\theta}$ は推定された方位を表す。これをアナログ系として表すと、カットオフ周期を $2\pi\tau$ として次式の伝達関数で表されることになる。

$$\theta(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega\tau}\theta_{mag}(j\omega) + \frac{j\omega\tau}{1+j\omega\tau}\theta_{odm}(j\omega) \quad (3)$$

Fig. 8 Structure of the filter of the orientation detection

Fig. 9 Comparison between detected orientation after fusion of both data, and odometry and magnetic field measured data. The cutoff frequency is 5 meters

Fig. 10 Comparison between detected orientation after fusion of both data, and odometry raw and HPF data, magnetic field measured raw and LPF data

走行実験の際にロボットにコース上を手動で走行させ、その時にこの本方位検出手法を適用したときに得られた、ロボットの方位の計算結果を Fig. 9 に、このうち 22~28 [m] 付近を拡大した図を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より、オドメトリによる方位の累積誤差と、磁気により測定された方位の高周波ノイズが除去された方位が、遅れなく検出できていることが確認できる。

ただし、この実験データのなかで、走行距離 600 [m] 付近 (図中の円で囲まれた部分) では、実際は、ロボットが歩道橋のたもと付近を直線状に走行していたが、求められた磁場には約 25 [m] に渡って、最大で約 90° に近い方位のずれが発生している。走行時にはこの誤差は道沿い走行のアルゴリズムによって吸収さ

Fig. 11 Comparison between detected orientation after fusion of both data, and odometry and magnetic field measured data. The cutoff frequency is 50 meters. The area in the circle is deferent from Fig. 9

れたが、この誤差の原因は、地磁気センサのデータ中の環境磁場の影響が十分に除去されていないためである。これは、つくばチャレンジのコース内の環境磁場の周期が、当初想定していた値よりも大きく、前述の歩道橋付近で約 25 [m] 程度を半周期としていたためと考えられる。そこで、カットオフ周期を 50 [m] にして計算した場合のロボットの方角を Fig. 11 に示す。カットオフ周期を 50 [m] とすると、歩道橋付近の方角のずれは 10° 程度に抑えられていることが確認できた。

6. 道なり走行ベースの自律ナビゲーション

目標の経路に沿ったロボットの自律的な走行には、コース上の各地点における進むべき方位の情報のほか、交差点などの特徴的な形状をもつ地点について、それらの間の大まかな距離、その形状、曲がる方向、次の道の大体の方角、そこで使用する走行可能領域の認識アルゴリズムを目的地までの経路情報としてあらかじめ準備しておく、道なり走行に基づくナビゲーション手法を採用した。ロボットに与える経路情報は、例えば「北向きの道を 30 [m] 程度道なりに進み、丁字路を左に曲がる。続いて西に 100 [m] 程度道なりに進む。」というように、人間同士が目的地までの経路を提示するのと同じような情報である。

この方式によるナビゲーションシステムの全体の流れを Fig. 12 に示す。また、Fig. 13 に実装したナビゲーションシステムのソフトウェア構造を示す。ロボットは原則として常時走行距離を計りながら、与えられた地図に従って、進むべき方向を勘案しつつ、自分が検出した路面に従って道なりに走行する。経路情報で指定された交差点等の間の距離情報により、次の交差点や特徴点に近づいたことを知ると、それらの検出処理を開始し、交差点に到達したことを認識すると与えられた方向に曲がる。交差点を曲がり与えられた方向に向いたことを確認すると、走行した距離をリセットして、再び距離を求めながら道なりに走行する。この動作を経路情報に従って繰り返すことで目的地まで向かう。以下、その詳細を示す。

6.1 経路情報で与えられた向きを優先する道なり走行の制御

道には左右に植木・壁・路肩などが存在する。そのため、それらの障害物に衝突したり路肩から外れないようにロボットの幅より広い幅を持つ空間が開いている方向に進めば、道なりに

Fig. 12 Navigation flowchart

走行することができる。走行可能領域の中でロボットが進むべき方位，すなわち，開いている方向は以下のアルゴリズムにより算出する。

- [1] ロボットの現在の位置から，ロボットの幅が第4章で述べた走行不可能な点に当たらずに進むことのできる距離 $l(\phi)$ を，各方向 ϕ (-90° から 90° まで 1° 間隔) ごとに計算する。この距離は，Fig. 14 に例を示すような点群に対して，方向ごとに障害物に当たらないロボットの幅と同じ幅の最長の角丸四角形の長さとして求められる。
- [2] 各方向について， $l(\phi)$ までの距離で，走行可能な道幅，すなわち左右の走行不可能な点までの最小距離 $r(\phi)$ を計算する。
- [3] 広い道においては，道の中央を走行せずに，中心から左右いずれかに寄って走行させることとし，路肩から H 離れた位置を走行するときに最大となる重み式 (4) を用いる。

$$r(\phi) = \begin{cases} 2H - r(\phi) & (r(\phi) > H) \\ r(\phi) & (r(\phi) \leq H) \end{cases} \quad (4)$$

- [4] 経路情報としてあらかじめ与えられているロボットが走行すべき道の方角を θ^{ref} として，進むべき方向の重み $\Omega(\phi)$ を，

$$\Omega(\phi) = \frac{\frac{\pi}{2} - |\theta^{ref} - \phi|}{\pi} \quad (5)$$

により求める。これは，走行すべき方位に対して1となり， 90° 向きが違うとき0となっている。

- [5] ロボットが進むべき方位の評価式を (6) とし，これを方向ごとに計算する。

$$E(\phi) = \{l(\phi) + kr(\phi)\}\Omega(\phi) \quad (6)$$

k は走行する位置の路肩からの距離と，開いている方向の優先度のバランスを調整するための重み付け係数である。この値は実験から， $k = 0.2$ に設定した。

- [6] 評価式 (5) を最大化する方位を，

$$\theta = \arg \max_{-\pi < \phi \leq \pi} E(\phi) \quad (7)$$

Fig. 13 Configuration of the navigation system

Fig. 14 Overview of detection of directions which robot can go through

により求める。

- [7] 進むべき方位が求まったら，次にロボットの目標並進速度 v を次式で決定する。

$$v = \begin{cases} k_v \left(\frac{\min l(\phi)}{0 \leq |\phi| \leq |\theta| \wedge \text{sign}(\phi) = \text{sign}(\theta)} \right)^2 & (|\theta^{ref} - \theta| < \frac{\pi}{4}) \\ k_v \left(\frac{\min l(\phi)}{0 \leq |\phi| \leq |\theta| \wedge \text{sign}(\phi) = \text{sign}(\theta)} \right)^2 & -(|\theta^{ref} - \theta| - \frac{\pi}{4}) \\ & (|\theta^{ref} - \theta| \geq \frac{\pi}{4}) \end{cases} \quad (8)$$

これは，ロボットの現在の進行方向と求められた進むべき方位の間に障害物が存在するなどの理由により，進むべき方位が地図で与えられた向きと異なる場合に減速するものである。実装上では，最大速度を 0.8 [m] 毎秒とし，目標の並進速度 v が 0.8 [m] 毎秒を越える場合には， $v = 0.8$ とした。また，減速の度合いを表すパラメータ k_v を 0.1 とした。

これらの処理によって決定した目標の方向 θ および並進速度

ψ を、ロボットの走行制御系に与える。走行制御系では、ここで求められた目標の方向と 5 章に示したロボット方位の測定値からフィードバック制御系を構築してロボットに与える角速度を求め、式 (7) の目標並進速度と角速度を実現するようにモータの速度制御を行うことで走行する。

6.2 道なり走行方式の実験による評価

この手法を用いて、つくばチャレンジ 2010 の 11 月 06 日と 11 月 16 日および 11 月 17 日の実験走行においてロボットを計 5 回、自律道なり走行による自律ナビゲーションを用いて走行させた結果を説明する。

11 月 06 日の実験では、スタートから約 770 [m] の地点でロボットがコースから外れた。これは、事前に与えた経路情報に誤りがあり、右折すべき交差点を直進してしまったためだった。また、11 月 16 日の 2 回の実験では、それぞれ、スタートから約 220 [m]、約 500 [m] の地点で、ロボットがコースから外れた。スタート地点から約 220 [m] の地点は、公園内の遊歩道であり、路肩のくぼみを走行不可能な点として検出できず、片方の車輪がくぼみに落ちたため、走行が困難となった。また、スタートから約 500 [m] の地点は、歩道橋のたもとで、左右に通路と下りの階段が存在する。この地点は、コースに対して左右が開けた環境となっており、道の認識および環境磁場の影響による方位推定の誤差により、階段へ向かって走行したため、緊急停止をした。これに若干のパラメータ調整を追加して、11 月 17 日に行った 2 回の実験では、道を見失うことなく、スタートから約 900 [m] の地点まで到達した。ゴールまでの約 100 [m] は、周囲に壁や植え込みのない開けた場所となっており、走行すべき道の認識が困難な環境であった。またこの領域は、環境磁場の影響が強く方位の検出が困難なため、これらの原因により走行に失敗したと考えられた。いずれの実験においても、残りの区間においては、ロボットは走行可能領域を認識し、その道に沿って安定して走行できた。

6.3 交差点および道の特徴的な地点の認識と交差点の走行

経路情報では、交差点や道の特徴的な地点について、その形状を、丁字路（左・右に空間がある）、ト字路（前方・右に空間がある）、逆ト字路（前方・左に空間がある）、十字路（前方・左・右に空間がある）、左側が開ける地点（左に空間がある）、右側が開ける地点（右に空間がある）、広場（左・右に空間がある）、狭路（左・右に空間がない）に分けて表現している（Table 2）。

交差点や道の特徴的な地点に近づくと、ロボットは 4 章の手法で得られた走行可能領域のデータを用いて交差点等の形状についてパターンマッチングを行いながら走行する。このパターンマッチングは、経路情報に含まれる交差点等の種別に応じて、道があるはずである方向のすべてに、ロボットが通れる幅の空間が存在している場合に成立したものとする。

交差点または道の特徴的な地点においてマッチングが成立すると、ロボットの道なり走行制御系において、式 (5) 中の θ^{ref} を、経路情報で与えられた曲がる方向に置き換えると同時に交差点からの走行距離をリセットする。これによりロボットは目的の方向に曲がり、次の区間の各点の道の方位データに従って走行を続けることになる。

Fig. 15 に交差点認識の例を示す。この交差点は、経路情報中で十字路として与えられており、Fig. 15 (a) の地点で前、左、右に道が存在することを認識し、Fig. 15 (b) で示すように、経路情報で与えられたとおり右側に曲がっていることが確認できる。なお、交差点などの特徴的な形状をもつ地点だとしても、通行人が存在して交差点等の形状を正しく認識できない恐れがある地点は、交差点として経路情報には記述せず、単に走るべき道路の方向に従ってロボットに走行させることとした。これは、

Table 2 List of intersection type

Intersection Types	
⊥	: Left and Right is open
└	: Front and Right is open
┐	: Left and Front is open
+	: Left, Front and Right is open
┌	: Left is open
└	: Right is open
O	: Open Space
N	: Narrow Space

Fig. 15 Picture of an example of experimental result of turning on the intersection

Table 3 Experimental results of intersection matching

	Date	Control	Intersection Number(Intersection type)														
			1 (┌)	2 (N)	3 (┐)	4 (┐)	5 (┐)	6 (N)	7 (┐)	8 (+)	9 (┐)	10 (┐)	11 (┐)	12 (┐)	13 (┐)	14 (┐)	15 (+)
1	2010/11/06	Remote Control	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
2	2010/11/06	Autonomous	S	S	S	S	S	S	S	S	S	-	-	-	-	-	-
3	2010/11/16	Remote Control	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
4	2010/11/16	Autonomous	S	S	S	S	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	2010/11/16	Autonomous	S	S	S	S	S	S	S	-	-	-	-	-	-	-	-
6	2010/11/17	Autonomous	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	F	S	S
7	2010/11/17	Autonomous	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

S : Success
 F : Failure
 - : No result

交差点の認識を誤るとその影響が極めて大きいのでそれを防ぐ措置である。

6.4 交差点認識方式の評価

この手法を、つくばチャレンジ 2010 の 11 月 06 日と 11 月 16 日および 11 月 17 日の実験走行において走行中に取得したデータに適用した際の、交差点毎のマッチング結果を **Table 3** に示す。なお、自律走行時の経路情報として与える交差点は、リモートコントロールによる走行中に取得したデータにおいて、コース中の 21ヶ所の交差点のなかから、通行人などの影響が少なく、安定して認識が可能と判断した 15ヶ所を指定した。

11 月 06 日と 11 月 16 日に行ったりリモートコントロールによる走行中に取得したデータに対しては、すべての交差点においてマッチングが成功した。また、この経路情報を用いて、11 月 16 日および 11 月 17 日の走行実験において自律走行を行った際のマッチングの成功は 74 回中 49 回であった。なお、残りの 25 回のうち 24 回は、自律走行で該当の交差点までたどり着けない場合であった。11 月 17 日 1 回目の自律走行における失敗は、障害物回避により走行距離が大幅にずれ、意図しない箇所でマッチングしたものであるが、この場合については、次の交差点でのマッチングが成功し、走行を継続することができた。

7. 走行実験と結果

つくばチャレンジ 2010 の公開実験日に、構築したシステムについて実験を行った。筆者らの大学は、つくばチャレンジのコースに近いので、公開実験日には毎回参加して実験を行い、プログラムの改良を行って、与える経路情報、ロボットの最大加速度・角速度・角加速度、走行可能領域の認識中で用いる閾値、道なり走行制御中の走行すべき壁からの距離、進む方向成分のバランスを調整する重み付け係数などの走行時のパラメータを調整した。

2010 年 11 月 16 日に、ロボットを手動でつくばチャレンジ 2010 の全コースを走行させて得た、走行距離ごとに与えた進むべき方位を表す直線と、交差点認識を行う位置を二次元の平面上に表示したものを **Fig. 16** に示す。このロボットの進むべき方位は、ロボットを手動でコースに沿って走行させた際の進行方向より求めたものである。これが、それ以降の走行でロボットに与えた経路情報である。ロボットには、経路情報としては、各区間の走行すべき方位と交差点間距離のみ与えており、この図に示される直交座標の値は用いていない。図中の直交座標による軌跡は、ロボットに与えた 1 [m] の走行距離ごとの進むべき方位を累積したものであり、実質のコースと若干ずれているが、その誤差は実走行時には影響しない。

以下、2010 年 11 月 17 日に行われた公開実験走行における実験結果を示す。安全確保のために、ロボットを数回一旦停止して再開させながら、目的の経路に従って、歩行者や他のロボット、障害物を避けて自律的に走行させた。この結果、3 回行った走行実験のうち 2 回は、コース中 900 [m] 付近までは自律的に安定して走行することができた。コース中のゴール手前 100 [m] の区間で走行が不安定となったのは、この区間で磁気方位が大きく乱れていたことが原因と考えられた。この区間は開けた広場となっており、外界センサにより検出される走行可能領域のみ

Fig. 16 Applied routing information for Tsukuba Challenge 2010

ではロボットの進むべき経路を判断することが難しく、ロボットの進行方向の決定は、磁気方位による部分が大きい。そのため、磁気方位が乱れることにより、ロボットが進むべき経路を誤り、本来進むべき経路から外れたものと考えられた。一方、Fig. 9 に示される 600 [m] 地点付近での方位の計測誤差は走行時に走行可能領域を優先して走行方向を決めているため、大きな障害とはなっていなかった。

2010 年 11 月 19 日に行われた最終実証走行においては、経路中の 365 [m] 地点付近において、歩道から道路に向かうスロープでロボットが車道に侵入しようとしたため、緊急停止を行った。これは、実装した道なり走行のアルゴリズムが、その時点で歩道中に置かれたカラーコーンを避けるために、ロボットを歩道の左側から若干ずれたところを走行させ、一方、路面が車道に向けてスロープになっていたため、ロボットがロール方向に傾いて、走行可能領域の認識に失敗したためであった。

8. お わ り に

筆者らは、屋外実環境における方位の検出と、道路上の走行可能領域と交差点の認識を用いた道なり走行ベースの自律移動ロボットのナビゲーション手法を実装したロボットを開発してつくばチャレンジ 2010 に参加した。走行可能領域の認識、方位推定、道なり走行によるナビゲーションのそれぞれについて、実際の遊歩道および公園環境で、与えられたコースの 900 [m]

の区間を走行可能であることが確認された。

しかし、

- (1) 道が開けている場所で、環境磁場により磁気方位が大きく乱れる環境で進むべき経路を外れる
- (2) ロボットが傾いた際に走行可能領域の認識を誤り本来の経路でない道に向かって進む

という問題が残り、つくばチャレンジ 2010 のコースを完走することはできなかった。今後、これらの点を改良し、特に、より正確に方位を測定することと、より正しく路面を検出する方式を検討・実装し、つくばチャレンジ 2011 へ再度チャレンジする予定である。方位推定においては、フィルタパラメータの最適化および、ジャイロセンサの追加による高精度化を検討している。また、路面検出アルゴリズムにおいては、ジャイロセンサ等を使用してロボットの姿勢を検出することで、斜面上での誤認識を減らすことを検討している。

本手法は、大まかな距離と交差点の情報により構成されるトポロジカルな地図により動作が指示されるため、地図の作成が容易であるという特徴を持つ。道なり走行と交差点認識が十分に働く環境では、道のトポロジカルな構造が変化しない限り、環境が変化しても地図を作り直す必要がない点もこの手法の特徴である。また、高精度の全地球測位システムや慣性計測装置などの高価なセンサを必要とせずハードウェア構成とセンサ構成が単純である。したがって、本手法をさらにロボast化するにより、屋外での搬送や警備等のロボットに広く適用することが可能で、有用な方法になると考えている。

一方でこの手法は、ロボットが一度コースから外れると、コース上へ復帰することは困難である。しかし、このような場合に対しても、検出された道のトポロジカルな構造が地図と異なる場合に、これを認識し、走行してきた道を逆に辿りコースに復帰するなどの動作を組み込むことによって、ある程度の対処が可能であると考えている。これについては今後の課題としたいと考えている。

参考文献

- [1] C. Urmson et al.: "Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge," Journal of Field Robotics, Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part I, 2008.
- [2] J. Levinson et al.: "Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms," Proc. of Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp.163–168, 2011.
- [3] D. Hong et al.: "Development of a semi-autonomous vehicle operable by the visually-impaired," Proc. of Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp.539–544, 2008.
- [4] G.S. Aoude, B.D. Luders, D.S. Levine and J.P. How: "Development of a semi-autonomous vehicle operable by the visually-impaired," Proc. of Intelligent Robots and Systems, pp.6058–6063, 2010.
- [5] N. Fairfield and D. Wettergreen: "Evidence grid-based methods for 3D map matching," Proc. of International Conference on Robotics and Automation, pp.1637–1642, 2009.
- [6] L. Armesto, J. Minguez and L. Montesano: "A generalization of the metric-based Iterative Closest Point technique for 3D scan matching," Proc. of International Conference on Robotics and Automation, pp.1367–1372, 2010.
- [7] S. Godha and M.E. Cannon: "Development of a DGPS/MEMS IMU Integrated System for Navigation in Urban Canyon Conditions," Proc. of International Symposium on GPS/GNSS, 2005.
- [8] J. Meguro, T. Murata, J. Takiguchi, Y. Amano and T. Hashizume: "Development of a DGPS/MEMS IMU Integrated System for Navigation in Urban Canyon Conditions," IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, vol.10, no.1, pp.22–30, 2009.
- [9] S. Yuta, M. Mizukawa and H. Hashimoto: "Tsukuba Challenge," The Purpose and Results Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, vol.49, no.9, pp.572–578, 2010.
- [10] K. Shinada and S. Yuta: "Mobile Robot Autonomous Navigation by Simple Map Instruction in Indoor Environments," Proc. ROBOMECH2009, 2A2-F05, 2009 (in Japanese).
- [11] T. Yamaguchi and S. Yuta: "Autonomous Long-distance Outdoor Navigation at 4km Side-walk in University of Tsukuba," Proc. 15th Robotics Symposia, pp.494–499, 2010 (in Japanese).

渡辺敦志 (Atsushi Watanabe)

2011 年筑波大学システム情報工学研究科博士前期課程修了。2011 年 4 月より同博士後期課程。主として数値計算と最適化手法に基づく自律移動ロボットの走行制御および動作計画、屋外実環境におけるナビゲーション技術に関する研究に従事。IEEE の学生会員。(日本ロボット学会学生会員)

阪東 茂 (Shigeru Bando)

2011 年筑波大学システム情報工学研究科博士前期課程修了。2011 年 4 月より同博士後期課程。移動ロボットの設計・製作および自律移動ロボットによる自己位置認識と地図生成に関する研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)

品田和洋 (Kazuhiro Shinada)

2011 年筑波大学システム情報工学研究科博士前期課程修了。屋内における自律移動ロボットの走行制御、および動作計画に関する研究に従事。同年、安川電機入社。

油田信一 (Shin'ichi Yuta)

1975 年慶應義塾大学工学研究科修了(専攻は電気工学)。工学博士。東京農工大学工学部を経て、1978 年より筑波大学。現在同システム情報工学研究科教授。この間、2004～2006 年法人化した筑波大学の理事・副学長(研究・産学官連携・社会貢献などを担当)、長年にわたり知能移動ロボットを研究している。2007 年より、つくばチャレンジの実施を提唱し委員長をつとめている。(日本ロボット学会正会員・フェロー)