3D スキャナとジャイロを用いた屋外ナビゲーションプラットフォーム

吉 田 智 章*・入 江 清*
小 柳 栄 次*・友 納 正 裕*

An Outdoor Navigation Platform with a 3D Scanner and Gyro-assisted Odometry

Tomoaki YOSHIDA*, Kiyoshi IRIE*,
Eiji KOYANAGI* and Masahiro TOMONO*

This paper proposes a light-weight navigation platform that consists of gyro-assisted odometry, a 3D laser scanner and map-based localization for human-scale robots. The gyro-assisted odometry provides highly accurate positioning only by dead-reckoning. The 3D laser scanner has a wide field of view and uniform measuring-point distribution. The map-based localization is robust and computationally inexpensive by utilizing a particle filter on a 2D grid map generated by projecting 3D points on to the ground. The system uses small and low-cost sensors, and can be applied to a variety of mobile robots in human-scale environments. Outdoor navigation experiments were conducted at the Tsukuba Challenge held in 2009 and 2010, which is an open proving ground for human-scale robots. Our robot successfully navigated the assigned 1-km courses in a fully autonomous mode multiple times.

Key Words: robot platform, gyroscope, 3D range scanner, Tsukuba Challenge, outdoor navigation

1. 緒 言

1.1 屋外環境におけるナビゲーション

屋内外のさまざまな環境を走行する自律移動ロボットの開発は、ロボット工学における重要な研究課題である。特に人間の生活空間を走行する移動ロボットは、掃除・運搬・案内などのサービスロボット、電動車椅子、盲導犬ロボットなど、多くのアプリケーションを有する有望分野である^{1)~3)}。サービスロボットや電動車椅子などは、人間と同じスケールの環境を走行する。すなわち、人と共存して移動するのに適切なサイズおよび重量のロボットが人の歩行速度と同程度の走行速度で狭く入り組んだ通路、明確な道のない広場、人通りの多い通路など多様な環境を走行する。このようなロボットは、自動車などと比較してサイズが小さいため、大量のセンサやコンピュータを搭載することはできない。さらに、建物や樹木の近くを走行したり、屋内と屋外を行き来することも多いため、GPS を安定して用いることは難しい。

屋外ナビゲーションにおける困難の1つは、多様な条件下での自己位置推定である。屋内環境では壁や家具が有力なラ

ンドマークとして利用できるのに対して、屋外環境には開放空間が多く、まばらなランドマークしか得られないことも多い。このため、屋外ナビゲーションでは屋内よりも高精度かつロバストなナビゲーションシステムが要求される。

一般に、自己位置推定には、内界センサを使うデッドレコニングと外界センサを使うスターレコニングの2つの方法がある。デッドレコニングは累積誤差をもつため、単独では長距離走行に用いることはできない。スターレコニングでは、外界センサでランドマークを計測して自己位置を推定するが、ランドマークが見えない場合は利用できない。このため、デッドレコニングで自己位置推定しつつ、ランドマークを用いてその累積誤差を減らすことで、精度とロバスト性を高める方法が一般的である⁴⁾。ランドマークがスパースな屋外環境に対処するためには、累積誤差の少ないデッドレコニングと、広い視野で多くのランドマークを観測できる外界センサとによってロバスト性を高めることが鍵となる。

本稿では移動ロボットの屋外ナビゲーションプラットフォームを提案する。このプラットフォームの特徴は(1)ジャイロを併用した高精度なオドメトリ(2)広視野な揺動型3Dレーザスキャナ(3)効率的なマップマッチングによる自己位置推定であり、これらを統合することにより信頼性高い屋外ナビゲーションを実現する。提案システムは、オドメトリと3Dレーザスキャナの計測データをパーティクルフィルタで高速に融合して自己位置推定を行なう。そこでは、3Dデータを地面に投影して2D占有格子地図を生成し、広視野の情報を保持

* 千葉工業大学未来ロボット技術研究センター
習志野市津田沼 2-17-1

* Future Robotics Technology Center, Chiba Institute of
Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino
(Received June 6, 2011)
(Revised September 6, 2011)

しながら2次元でマップマッチングを行なうことで、大量のパーティクルを用いた高速でロバストな自己位置推定を実現する。提案システムは小型・安価な普及型センサで構成され、多くの移動ロボットに広く適用可能である。

提案システムをロボット台車に搭載し、屋外ナビゲーションの公開実験であるつくばチャレンジ⁵⁾で走行実験を行なった。その結果、2009年および2010年において、約1kmのコースを再現性よく完走することができ、本システムの有効性を確認した。

1.2 関連研究

車輪型ロボットのデッドレコニングにおいて、並進速度だけを車輪の回転量で求め、角速度をジャイロで計測することで、路面の凹凸や車輪の滑りによる方位の誤差を軽減することがよく行なわれる。一般に、ジャイロはドリフトなどの要因により誤差が蓄積するため、単純にオドメトリと統合しても方位の精度がよくなるとは限らない。この問題に対して、EKFを用いたセンサフュージョンで対処する方法⁶⁾、適応的にオドメトリとジャイロを切り替える方法⁷⁾、移動体の走行モデルのヒューリスティックを用いて移動中においてもバイアス推定を行なう方法⁸⁾などが提案されている。

2Dレーザスキャナの視野を広げるためには一般にスキャナを首振りもしくは回転させることが行なわれる。いくつかの方法でスキャナを動かしたときの視野と観測点の分布に関して文献9)においてシミュレーションによる評価が行なわれている。われわれの揺動型3Dスキャナは駆動方法は異なるものの、観測点の分布はここで一様性に優れているとされた回転方法とはほぼ等価である。

移動ロボットによる屋外長距離ナビゲーションに関する研究はGrand ChallengeやUrban Challenge¹⁰⁾を筆頭に活発に行なわれている。これらの研究におけるタスクは自動車型ロボットが人間のいない車道を自律走行することであり、対象環境のスケールは人間の生活環境とは異なる。

2. ジャイロを使った高精度オドメトリ

オドメトリではロボットの並進速度と角速度を台車のキネマティクスと車輪の回転量から求めるため、どちらも車輪径やトレッド幅などの台車に起因する誤差とスリップや路面の凹凸などの要因により誤差が蓄積する。推定位置誤差に影響が大きいのは角速度から求める方位の誤差である。角速度を左右の車輪の回転速度の差分とトレッド幅から計算するのではなく、ジャイロを使って直接計測すると、台車に起因する系統誤差および車輪の滑りなどの偶然誤差のどちらの影響も軽減でき、精度向上が望める。ここでは並進速度を駆動輪モータのエンコーダ出力から求め、角速度をシリコンセンシングシステムのMEMS振動ジャイロCRS-10を用いて計測するジャイロ併用オドメトリの実装について述べる。

2.1 誤差要因

レートジャイロの出力を積分して方位を計算するときの誤差の要因はつぎのものが考えられる。

Fig.1 Odometry tracks of wheel-only and gyro-assisted implementation

- 温度、電源、その他周辺環境の変化によるオフセット変動
- 電源などに起因するアナログノイズ
- AD変換時および計算時の丸め誤差

特にMEMS振動ジャイロを用いるためオフセット変動は光ファイバジャイロなどに比べると大きくなる。丸め誤差はAD変換器の分解能とジャイロのダイナミックレンジによって決まり、われわれはレートレンジが $\pm 75 \text{ deg/s}$ で出力電圧レンジが $\pm 2.07 \text{ V}$ のジャイロと12bitのAD変換器を $V_{ref} = 5 \text{ V}$ で用いたので、1bitあたり 0.044 deg/s となる。

2.2 誤差対策

オフセット変動は、ロボットの停止時に0点のキャリブレーションを行なうことで対処する。ロボットの停止は駆動輪のエンコーダ値を監視することで検出し、1秒以上停止状態にあるときにその間のジャイロ出力の積算値の平均を用いて、オフセット値を修正する。また、回転方向が逆になるように取り付けした2つのジャイロを用い、両者の出力を平均することでオフセット変動を相殺する。ジャイロ起動時は温度変化によりオフセットが大きく変動するため、安定するまでの約20分間ウオームアップしてから運用する。

アナログノイズ、および、丸め誤差は、複数のサンプルを平均することで対処する。12bitAD変換器の下位の数bitはアナログノイズに埋もれるが、高周波アナログノイズを含むサンプルを複数取得して平均するためディザリング効果により量子化誤差が軽減する。特にキャリブレーションで求める0点の量子化誤差は積分されて大きな影響を及ぼすため、複数のサンプルを利用する効果は大きい。

Fig.1に、車輪の回転数のみを使うオドメトリ単独によるロボットの軌跡とジャイロ併用オドメトリによるロボットの軌跡を示す。ロボットはリモコンで操縦し、 $70 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ の広い屋内環境を急旋回を伴う不規則な経路で走行させた。床はタイルで平坦であるが、複数の箇所直径1cm程度のケーブルを乗り越えた。Fig.1には、オドメトリの精度を可視化する

Fig. 2 The motion of the 3D scanner

Fig. 3 Simulated FoV of our scanner covering 5/6 of secondary rotation range in 30 scans

ために、前方の床面に向けて斜めに設置したレーザスキャナから得た計測点群を軌跡に沿って配置した地図を表示している。各計測点はその高さに応じて明度を変えており、明るいグレーは床面で濃い点群が壁面に相当する。オドメトリ単独では、全体的に地図が歪み、さらに、始点と終点付近では地図が大きくずれて二重に見えている。地図の歪みは、車輪径やトレッド幅などの誤差によると考えられる。また、スリッパやケーブル乗り越えにより局所的に大きな回転誤差も発生している。これに対して、ジャイロ併用オドメトリは歪みがきわめて小さいことがわかる。

3. 広視野な 3D スキャナ

2D レーザスキャナ (北陽電機 UTM-30LX) を振って広視野の 3D 点群を取得するために、揺動機構¹¹⁾を採用する。Fig. 2 に揺動 1 周期の動作を示す。揺動機構は、ジンバル上に固定したレーザスキャナを 1 つのアクチュエータで揺動させ、スキャナの水平視野 275deg の範囲において上下に視野を拡張する。この揺動スキャナはロール角、ピッチ角それぞれ $\pm 28\text{deg}$ の振幅をもつため、水平視野 275deg の全範囲において上下 28deg の視野をもつ。これはスキャナの視野が 360deg ある場合では 28deg のピッチ角をもつスキャナを鉛直軸周りに旋回させたものとはほぼ等価であり、このような振り方はスキャン点の一様性において優れていることが文献 9) でも述べられている。

Fig. 3 に、シミュレーションで求めた揺動スキャナの視野を示す。これは、各レーザビームの計測値をすべて一定値の

500mm として仮想的な球を内側から測定したときの点群であり、揺動アクチュエータを 10deg 刻みに 300deg 回転させて計算した。後述する実装上の制限を反映するため揺動アクチュエータの可動域を 300deg に制限している。

この実装の利点はつぎのとおりである。

- (1) 上下の視野角が水平視野角の全方位において等しい
- (2) 計測点密度の偏りが小さい
- (3) 揺動アクチュエータは等速回転でよいので制御が容易
- (4) 2D レーザスキャナ本体は無限回転しないためスリッパリングが不要

2D レーザスキャナを外側から動かして 3D スキャナを構成するには、スキャン面に平行な軸に対して回転させる方法や首振りするように往復運動させる方法などが一般に用いられる。われわれのスキャナは (1), (4) の点で回転法に対して優位であり、(1), (2), (3) の点で首振り法に対して優位性をもつ。

3.1 計測点座標計算

台車の推定自己位置、台車上のセンサ位置、ジンバルの姿勢、ジンバル上のレーザスキャナ位置、レーザスキャナのビーム方位を考慮し、順にそれぞれの座標変換を行なうことによって反射点の 3D 座標を得る。ジンバルの姿勢はつぎの式を用いて揺動アクチュエータのリンク角 ϕ とリンクのパラメータ L_1 と L_2 より求めることができる (Fig. 4)。

$$\text{Roll}(\phi) = \tan^{-1} \frac{y(\phi)}{z(\phi)} \quad (1)$$

$$\text{Pitch}(\phi) = \tan^{-1} \frac{x(\phi)}{\sqrt{y^2(\phi) + z^2(\phi)}} \quad (2)$$

ただし、 x, y, z はジンバルを駆動するジョイントの軌道であり、揺動アクチュエータによりジョイントは円運動するので

$$x(\phi) = L_1 \cos \phi \quad (3)$$

$$y(\phi) = L_1 \sin \phi \quad (4)$$

$$z(\phi) = L_2 \quad (5)$$

である。今回の実装では $L_1 = 26.0\text{mm}$, $L_2 = 50.5\text{mm}$ である。

揺動スキャナ座標系での観測点は観測した距離とレーザ方位、ジンバルの姿勢からつぎの式で求めることができ、さらに台車座標系を経由し、台車の推定自己位置を使って世界座標系の点座標に変換することができる。

$$P(l, \theta, \phi) = R_x(\text{Roll}(\phi)) R_y(\text{Pitch}(\phi)) R_z(\theta) (r, 0, z_{\text{offset}})^T \quad (6)$$

ここで l はレーザスキャナが計測した距離、 ϕ は揺動アクチュエータのリンク角、 θ はレーザスキャナのビーム方位、 z_{offset} はジンバルの回転中心からレーザスキャナのレーザ投受光窓までの高さオフセットで 25mm である。また、XYZ 軸回りの回転行列をそれぞれ R_x , R_y , R_z と表記した。このとき、ジンバルの姿勢はレーザスキャナのビームが 1 周する

Fig. 4 Scanner structure

間も連続して変化しているため、各ビーム方位 θ でのジンバル姿勢を、スキャン開始時のジンバル姿勢とジンバルの駆動速度から補間して求め、各点ごとに計算する。台車が移動する場合台車位置も連続して変化するため各ビーム方位ごとに補間して計算すると精度が上がるが、実際には5章で述べるように、台車の速度はスキャナのスキャンに比べて十分に遅いのでスキャンごとに一括して計算しても大きく歪むことはない。

3.2 スキャンデータの同期

環境形状を表す 3D 点の座標は、3D スキャナの計測データ、スキャン時のジンバルの姿勢、オドメトリによる台車の位置から計算できる。ここで重要なのは各データ取得の同期であり、うまく同期できないと計測結果が歪む。

ジンバルの駆動にスマートアクチュエータ (ROBOTIS RX-64) を用い、2D レーザスキャナ UTM-30LX の同期出力を用いてスマートアクチュエータとのシリアル通信のフローを制御することにより、レーザスキャナ、揺動アクチュエータ、台車オドメトリの3つを同期する。PC から RX-64 へ角度問い合わせコマンドを発行すると、コマンドのビット列は UTM-30LX からの同期信号が発生するまで RS485 インタフェース上に留められ、RX-64 へ送信されない。UTM-30LX の同期信号が発生すると CTS が有効となり、このタイミングでコマンドが RX-64 に送信される。さらに、PC 上では RX-64 のレスポンス受信をトリガとしてオドメトリの自己位置を取得する。この構成ではスキャンの取得、スマートアクチュエータの制御、データの同期処理まで1台のPCで行なうことができる。

4. 自己位置推定

自己位置推定はジャイロ併用オドメトリと 3D スキャナの計測値をパーティクルフィルタで融合することで行なう。

ここでの問題の1つは、3D スキャナで生成した 3D 点群を 3D 空間で地図照合 (マップマッチング) を行なうと計算時間がかかることである。地図照合はパーティクルごとに行なうため、パーティクル数が多いと計算量は非常に大きくなる。この問題に対処するため、われわれは 3D 点群を地面に投影した 2D 占有格子地図を用いて地図照合を行なう。

4.1 地図の表現と生成

2D 占有格子地図の各セルは“占有”あるいは“フリー”のいずれかの値をもつ。地図の生成手順は、3D 点群を地面に投影し、格子地図の各セルについて、閾値 th_1 以上、もしくは閾値 th_2 以下の高さの点を含むセルを“占有”、それ以外のセルを“フリー”と設定する。われわれの実装では閾値をそれぞれ $th_1 = 15\text{cm}$, $th_2 = -45\text{cm}$ としている。これは、地面の検出によりセルが“占有”と設定されることを防ぐため、地面より明らかに高い・低い点群のみを自己位置推定に用いることを意味する。なお、屋内環境においては、天井が検出されることによりセルが“占有”と設定されてしまうことを防ぐため、高さ 2m 以上の点は占有格子地図の生成に使用しない。

4.2 パーティクルフィルタによる自己位置推定

パーティクルフィルタの状態ベクトルをロボットの2次元座標にジャイロのバイアス γ を加え、 $\mathbf{x} = (x, y, \theta, \gamma)$ と定める¹²⁾。ロボットが一定時間走行するごとに、(7) 式に示す提案分布に従ってパーティクルを生成する。

$$\mathbf{x}_t^i \sim p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}^i, \Delta \mathbf{x}_t, \Delta t) \quad (7)$$

ここで $\mathbf{x}_t^i$ は時刻 t における i 番目のパーティクル、 $\Delta \mathbf{x}_t$ は時刻 $t-1$ から t までの間のオドメトリによるロボット移動量であり、 Δt は時間の刻み幅である。オドメトリの誤差は正規分布に従うものと仮定する。また、ジャイロのバイアスは時間に応じて連続的に変化し、その変化量は平均 0 の正規分布に従うものと仮定する。

3D スキャナの1周期 (1.8s) ごとに、3D スキャナによる観測を融合しパーティクルフィルタの更新を行なう。更新ステップでは 3D スキャナ1周期分の 3D 点群を地面に投影して局所 2D 占有格子地図 $M_{local,t}$ を生成し、あらかじめ生成した参照用 2D 占有格子地図 M_{global} を用いて (8) 式に示す重み w_t^i に従ってパーティクルをリサンプルする。

$$w_t^i \propto p(M_{local,t} | \mathbf{x}_t^i, M_{global}) \quad (8)$$

筆者らの実装では、 $p(M_{local,t} | \mathbf{x}_t^i, M_{global})$ はこの局所 2D 占有格子地図とあらかじめ生成した参照用 2D 占有格子地図を各パーティクルの予測位置で対応づけて、値の一致するセル数から尤度を近似的に計算する。この方法では、広視野で得た 3D 点群を 2D 地図に要約するので、単一の 2D スキャンよりも豊富な環境特徴を利用しつつ、2D スキャンと同等の高速な照合を実現することができる。

4.3 失敗からの復帰

この自己位置推定法はさまざまな環境でロボットに働くが、稀に発生する状況で推定自己位置の誤差が大きくなることがあり得る。たとえば観測が長時間にわたって遮られた場合や車輪の大きなスリップによってオドメトリの誤差が想定以上に大きくなった場合などである。このような要因でパーティクルが真値付近に存在しなくなってしまった場合のために、自己位置推定の失敗からの復帰機能を備える。

Fig. 5 Papyrus II

Fig. 6 Start position and some difficult areas in Tsukuba Challenge 2009

自己位置推定の失敗は誘拐ロボット問題の一種として扱うことができる。パーティクルフィルタを用いた誘拐ロボット問題の解決にはセンサリセット¹³⁾などが提案されているが、ここで想定する失敗は小規模な位置のずれであるため、膨張リセット¹⁴⁾を簡略化した方法を使用する。パーティクルフィルタの更新時の重み ((8) 式) を監視することにより、失敗を検知する。各パーティクルについて計算した重みがいずれも閾値を下回る状態が一定回数 (実装上は 3 回) 続いた場合に、パーティクルの位置・方位に対して乱数を付加し、パーティクルの分散を拡大する。これによって、真値付近からパーティクルが消失した状態から復帰することができる。筆者らの実装では概ね 1m 以内の位置推定の誤差を想定し、付加する乱数は位置に対して標準偏差 50cm, 方位に対して 10deg の正規乱数とした。

5. 実 験

提案システムを独立二輪駆動型移動ロボット PapyrusII (Fig.5) に搭載して、2009 年および 2010 年のつくばチャレンジにて屋外実験を行なった。つくばチャレンジは茨城県つくば市で行なわれる公道自律走行実験である。その目標タスクは一般の歩行者が存在する歩道および公園に設定された約 1km のコースを自律走行することである。2009 年のコースは、広場、歩道、ゲート、湾曲路、橋など、多様な環境を含む。2010 年のコースは、同様の環境のほかに、坂のある陸

Fig. 7 Generated environment map in Tsukuba Challenge 2009

橋、自動ドアを含み、また、5 箇所の交差点に一時停止用の白線が張られ、その手前で停止しなければならない。Fig.6 に 2009 年のコースの一部を示す。ひらけていてランドマークとなる物体の乏しい場所や、ポールやゲートに挟まれた狭い走行領域があり、ロバストかつ精度のよい自己位置推定が必要とされる。

走行実験の手順はつぎのとおりである。まず 3D スキャナで環境計測しつつロボットをリモコン操縦でコースを 1 周し、地図を作成する。この地図とリモコン操縦軌跡を参照して人手により目標経路列を設定する。これらの地図と経路列を用いて自律走行を行なう。自律走行時には 3D スキャナで環境計測し、パーティクルフィルタで地図と照合することで自己位置推定を行なう。また、同じ 3D スキャナのデータを用いて障害物の検出と回避経路計画も行なう。

5.1 移動ロボットの設定

つくばチャレンジ 2009 では、つぎのようにシステムパラメータを設定した。揺動スキャナの水平視野は搭載する 2D レーザスキャナの水平視野と同じで 275deg あるが、後ろの視野にロボット自身が入ってしまうので実験では前方 180deg に制限して用いた。揺動アクチュエータ RX-64 の角速度は 200deg/s に設定した。そのため揺動スキャナは 1.8s で 1 セットのスキャンを完了する。UTM-30LX は秒間 40 回スキャンするので 1 セットで 72 スキャンが得られる。RX-64 の仕様上の制限により出力軸の角度が取得できるのは 300deg の範囲に限られる。残る 60deg の範囲に RX-64 の出力軸があるときのスキャンは破棄することになると、レーザスキャナが出力するスキャンの 5/6 である 60 スキャンが 3D 点として得られる。台車の走行速度は 60cm/s, 最大角速度は 60deg/s とした。また、パーティクルフィルタのパーティクル数は 100 とした。このときパーティクル更新処理の時間は Core2Duo 2.4GHz の PC で 0.15s であった。

つくばチャレンジ 2010 では、揺動機構のモータとして maxon EC-max 22 を用い、SH2 マイコンで制御した。これにより、RX-64 での上記制限が解消され、揺動 1 周期 360deg すべてのスキャンが使えるようになり、計測点数が 20% 増えた。また、プログラムの改良によりパーティクルフィルタの更新時間は 0.1s になった。つくばチャレンジ 2010 では魚眼カメラによる自己位置推定も行なったが、本稿の提案プラットフォームはそれとは分離・独立して動作するため、本稿での評価には影響しない。

5.2 結果

環境地図は、ロボットをリモコン操縦して収集した 3D スキャナによる 3D 点群をジャイロ併用オドメトリの計測値に基づいて配置することで生成した。2009 年の環境地図を Fig.7 に示す。2009 年のコースではスタート地点付近の壁がコース 1 周後にも観測できる。この壁のコーナーの位置のずれを利用して測定した、1 周走行後のオドメトリ誤差は 3.7m であった。これ以後の走行実験でも、同じ地点での誤差は 8-12m 程度であり、提案したジャイロ併用オドメトリが再現性よく高い精度が得られることを確認した。

この地図と、地図上に設定した目標経路を用いて自律走行実験を行なった。完走を目的とした総合実験は、2009 年で 6 回、2010 年で 9 回行ない、いずれも約 1km のコースを自律で完走することができた。自己位置推定の真値の測定は難しく、厳密な評価は行なっていないが、つぎのことから自己位置推定の精度は、1km の走行で 20cm 以内の誤差であると考えられる。

- 2009 年のコースで、Fig.6 B) のボールの間隔は 1.4m であり、左右十分なマージンをもって、毎回中央付近を通過した。ロボットの幅は 53cm である。
- 2010 年のコースで、間隔が 1.5m のゲートを斜めに進入する経路があったが、毎回衝突することなく通過した。
- 2009 年、2010 年とも、コースの一部である歩道には点字ブロックがあり、ロボットと点字ブロックとの距離のずれは常時 20cm 以内であった。なお、点字ブロックはセンサで検出していない。
- 2010 年のコースの一時停止の白線では、毎回、20cm 以内手前で停止した。
- 2010 年のゴール直前に自動ドアがあり、その幅は 1.3m であるが、毎回、中央付近を通過した。

実験走行のうちの 1 回では他のロボットと観客に囲まれ十分な観測が得られない状態が数分間続いたため、推定自己位置におよそ 1m の誤差が発生した。そのため一時的に経路から逸れ歩道脇の看板に向かって走行してしまったが、失敗からの復帰機能により正しい経路に復帰することができた。

5.3 考察

提案プラットフォームは、ジャイロ併用オドメトリ、揺動 3D スキャナ、自己位置推定ソフトウェアから構成されており、これらが一体となって、有用性の高いシステムが実現される。本プラットフォームの利点について、構成、機能、運

Fig. 8 A local grid map generated from a set of 3D points at point B (left) and a local grid map generated by simulating 2D scanner using the same 3D points (right)

Fig. 9 A local grid map generated from a set of 3D points at point C (left) and a local grid map generated by simulating 2D scanner using the same 3D points (right)

用の観点から述べる。

構成上の利点は小型軽量であることである。本システムのハードウェアは、ジャイロ併用オドメトリ、および、小型 2D レーザスキャナ 1 台 (UTM-30LX) と揺動機構だけからなる。ジャイロ併用オドメトリの基板サイズは 40 × 60mm である。UTM-30LX はサイズ W60 × D60 × H87mm、重量 370g であり、揺動機構と合せても、サイズ W100 × D110 × H240mm、重量 800g である。これだけの構成で、地図生成と自己位置推定を行ない、また、本稿では詳細は割愛したが、障害物検出も行なう。センサが少なく小型軽量なので、人間の生活空間を走行する各種移動ロボットに搭載しやすく、消費電力や消費 CPU パワーの点でも有利である。

なお、つくばチャレンジで完走したチームは、2009 年は参加登録 72 チームのうち 5 チーム、2010 年は参加登録 70 チームのうち 7 チームであり、両年とも完走したのはわれわれを含めて 3 チームであった。参加した多くのチームが、複数台のレーザスキャナを使用したり、GPS や光ファイバジャイロなど高価なセンサを使用していたのに対し、われわれのチームはその中でほぼ最小のセンサ構成であった。

提案プラットフォームの機能上の利点は、広視野の 3D データを 2D 地図に集約することで、高速かつロバストな自己位置推定を実現していることである。これは屋外の多様な環境に対処するのに有利である。屋内には壁が多いため、一定高さに設置した 2D レーザスキャナでも十分な情報が得られることが多い。しかし、屋外は開放空間が多く、3 次元でない

と十分な情報が得られないことがある。その例として、Fig.6 の B 点で取得したレーザスキャナの点群による局所地図を Fig.8 に示す。同図左は、3D スキャナで得た高さ 15cm 以上の点群すべてを平面に投影した地図である。同図右は、同じ 3D スキャナのデータから高さ 1~1.5m の点群のみを投影した地図であり、この高さに水平に設置した 2D レーザスキャナによって得られる地図と同等である。同様に、Fig.6 の C 点で取得した点群による局所地図を Fig.9 に示す。いずれの例でも、3D スキャナの広い視野を使って生成した局所地図のほうが、2D レーザスキャナよりもはるかに多くの計測点をもつ。これは、3D スキャナが、種々の高さの壁や生け垣、木の枝葉など、多くの 3 次元形状を計測したことによるものである。このように豊富な 3D 情報を用いながら、2D 地図に集約してマップマッチングを高速化することにより、多様な環境に対処できるロバストな自己位置推定が可能になった。

提案プラットフォームの運用上の利点は、地図生成の工数が少ないことである。対象環境でロボットをリモコン操縦で一度走行させるだけで地図が生成でき、ジャイロ併用オドメトリの精度が高いため、SLAM 処理を行わなくても十分な精度の地図が得られる。前述のように、ジャイロ併用オドメトリだけでは 1km で数 m の誤差が生じるが、自己位置推定は地図に相対で行えばよいので、この地図をそのまま利用しても問題なくナビゲーションが可能である。このようにオドメトリ単独で高精度な位置推定ができることは、今回は行っていないが、地図生成でループを閉じる場合にも有利である。また、広視野の点群による占有格子地図をそのままマップマッチングしているので、壁や木など顕著な物体を手で抽出して明示的なランドマークとして定義する必要がない。このように地図生成が簡便であると、システムの利便性が高まることがつくばチャレンジでも実感できた。

6. 結 言

本稿では広視野な揺動型 3D レーザスキャナとジャイロを併用した高精度なオドメトリ、効率的なマップマッチングによる自己位置推定を統合した移動ロボット用ナビゲーションプラットフォームを提案した。提案プラットフォームにより得られる 3D 点群は、高精度のジャイロ併用オドメトリにより SLAM などによる後処理をしないでも歪みが少ない。そのため移動ロボットの教示再生走行のための地図として簡単に利用できる。また、自己位置推定では、広視野な 3D スキャナから得られる、環境中の特徴を多くもった 3D 点群を、2D 占有格子地図に投影し、パーティクルフィルタでマップマッチングすることで高いロバスト性と高速な処理を実現した。

今後の課題は、移動障害物への対処、ループを含んだより複雑な経路への対処などがある。

参 考 文 献

- 1) O. Matsumoto, K. Komoriya, T. Hatase and H. Nishimura: Autonomous Traveling Control of the "TAO Aicle" Intelligent Wheelchair, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ In-*

ternational Conference on Intelligent Robots and Systems, 4322/4327 (2006)

- 2) K. Iwatsuka, K. Yamamoto and K. Kato: Development of a Guide Dog System for the Blind People with Character Recognition Ability, *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, 453/456 (2004)
- 3) Y. Shimosasa, J. Kanemoto, K. Hakamada, H. Horii, T. Ariki, Y. Sugawara, F. Kojio, A. Kimura and S. Yuta: Security service system using autonomous mobile robot, *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 825/829 (1999)
- 4) S. Thrun, W. Burgard and D. Fox: Probabilistic Robotics, MIT Press (2005)
- 5) 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: Real World Robot Challenge, <http://www.ntf.or.jp/challenge/>
- 6) B. Barshan and H.F. Durrant-Whyte: Inertial Navigation Systems for Mobile Robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11-3, 328/342 (1995)
- 7) J. Borenstein and L. Feng: Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots, *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 423/428 (1996)
- 8) J. Borenstein and L. Ojeda: Heuristic Reduction of Gyro Drift in Gyro-based Vehicle Tracking, *SPIE Defense, Security + Sensing; Conference 7305: Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligent (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense VIII* (2009)
- 9) A. Desai and D. Huber: Objective Evaluation of Scanning Ladar Configurations for Mobile Robots, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2009)
- 10) DARPA, URBAN CHALLENGE, <http://www.darpa.mil/grandchallenge/>
- 11) 森, 嶋地, 油田, 大矢, 小柳, 吉田: 三次元測距装置, 特開 2008-134163A (2008)
- 12) 入江, 吉田, 小柳, 友納: ジャイロオドメトリとレーザスキャナによるジャイロのドリフト誤差を考慮した自己位置推定法, ロボティクスメカトロニクス講演会 2010, 1A1-E01 (2010)
- 13) S. Lenser and M. Veloso: Sensor Resetting Localization for Poorly Modelled Robots, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1225/1232 (2000)
- 14) 上田, 新井, 浅沼, 梅田, 大隅: パーティクルフィルタを利用した自己位置推定に生じる致命的な推定誤りからの回復法, 日本ロボット学会誌, 23-4, 466/473 (2005)

[著 者 紹 介]

吉 田 智 章 (正会員)

2004 年筑波大学大学院博士課程修了。筑波大学研究員, 桐蔭横浜大学講師を経て 2006 年より千葉工業大学未来ロボット技術研究センター研究員, 博士 (工学)。

入 江 清

2004 年筑波大学大学院修士課程修了。株式会社 ACCESS を経て 2009 年より千葉工業大学未来ロボット技術研究センター研究員。修士（理工学）。

小 柳 栄 次

2002 年筑波大学大学院博士課程修了。桐蔭横浜大学工学部知能機械工学科助教授。同大学工学部ロボット工学科教授を経て 2006 年より千葉工業大学未来ロボット技術研究センター副所長。博士（工学）。

友 納 正 裕

1985 年東京大学大学院修士課程修了。85-99 年 NEC。2002 年筑波大学大学院博士課程修了。2002-2006 年科学技術振興機構さがけ研究者。2006-2007 年東洋大学。2008 年より千葉工業大学未来ロボット技術研究センター副所長。博士（工学）。

=====