

特別
講演

三次元地図とロボット制御の関わり

日本工業大学機械工学科 准教授 石川 貴一郎

1. はじめに

日本工業大学の石川と申します。ご紹介ありがとうございます。

MMS（モバイルマッピングシステム）は、元は、自律移動ロボットからの技術を応用して作られたものですが、現在では、そのMMSで取得されたデータが逆にロボットの制御に関わるようになってきています。本日のお話は、MMSの技術的な背景から、現在のロボット制御におけるMMSデータの位置づけについて紹介したいと思います。

最近、自動運転という言葉がマスコミ界隈を騒がせておりますが、この自動運転に必要な技術の一つに、ダイナミックマップがよく出てきていると思います。ダイナミックマップは、「高精度な三次元地図」と言われていますが、なぜ自動運転に高精度地図が必要になるのか？この技術的な背景を2000年代前半頃の自律移動ロボットの技術に沿って遡って説明していきます。

まず、自律移動ロボットには、様々なタイプのものがありますが、大きく2通りに分けられます。一つは、未知環境の中を移動していくロボット、もう一つは、事前知識をロボットに与えた状態、すでに既知の環境を移動して行くロボットの2通りがあります。

前者はレスキューロボットや惑星探査ロボットなど、人が簡単には行けないようなところに行くロボットで、状況が発災前と変化してしまうようなレスキューや、惑星など全く未知の場所で行動する必要があるロボットです。これらのロボットでは、“事前に正確な地図は持っていない”

という中で安全に（ロボットに対しても環境に対しても）移動しなければならないため、地図を構築しながら移動することになります。

後者は、既知の環境で目的地まで移動するロボット、すなわち、自動運転や、案内用ロボットなどが該当します。これらのロボットは、決められたところを走行するために、あらかじめ行動範囲の正確な地図を持っています。これらのロボットが、目的地まで安全に到達するためには、ロボットがおかれた状況をロボット自身が正しく認識する必要があります。そのために必要となる大前提の技術が位置推定技術になります。

自律移動ロボットに必要とされる基本機能として、位置推定、経路計画、環境認識、走行制御があります。

ロボットが目的地に移動するためには、まずどのように動くか行動決定をする必要があります。そのためには、ロボットの現在位置と目的地の関係が分かっている必要があります。ロボットの位置と目的地との関係が明らかであれば、次にどのような経路を通るのかを選択します。この際にロボットの周辺の環境がわかっていなければ、壁などに衝突することになります。経路計画は、現在地から目的地までの経路を決定する大域的経路計画と、局所的に障害物（事前の地図情報にない人や駐車車両など）を回避する経路を計算する局所経路計画の2つがあります。経路計画法ではダイクストラ法、A*法、ポテンシャル法などがよく使われる手法になります。画像やレーザスキャナの距離データを使っ

て環境認識と合わせて経路計画を行うのが一般的です。

経路が決定したら、次に経路に従ってロボットを動かします。昔のテーマパークなどにある無人車両は、この経路に磁気レールをあらかじめ敷いておき、その磁気を感じながらライントレースをしています。この方法ですと、磁気レールのないところは走れませんので、インフラ整備をする必要があります。現在のロボットではインフラ整備が不要のように、磁気レールの代わりに座標で仮想的にレールのようなものを敷いてあげます。仮想レールの敷設方法は、例えば一定の間隔でWayPointと呼ばれる通過点の座標を用意します。WayPointには座標だけでなくロボットによっては、減速や一時停止などのロボット動作命令と一緒に記述することもあります。この座標でロボットを制御するためには、ロボット自身がこの座標に対して何処にいるかというのが正確にわかっていないと、うまく制御できなくなります。特に座標も重要ですが、向いている方向が間違っていれば、当然、全然違う方向に進んでしまうため、自律移動ロボットはあくまでも仮想の「ここを通りなさい」というラインに対してどう動くかというのが重要になります。

もしロボットが位置推定に失敗すると、ロボットが思っている経路は、実際の空間とずれてし

まいます。例えばこの経路が建物と衝突するような経路ですと、ロボットは建物に向かって走っていき、建物手前で、本来道であると思っている場所に障害物があると勘違いし、動けなくなります。

そのため、ロボットでは、この位置をどうやって正確に推定するかということが非常に重要なテーマの一つとして、長年研究されています。

2. ロボットにおける自己位置推定

自己位置推定の方法として、いくつか手法が提案されてきたわけなのですが、ここで大まかに三つ紹介します。一つがGNSS/INS複合航法、UAVでも使われることが多いですが、測量の世界だと一番メジャーな手法になるかと思っています。そのほかにSLAM、MCL (Monte Carlo Localization) など、様々な手法があります。自己位置推定の説明を行う前に、使用される一般的なセンサを紹介します。車速を測るロータリエンコーダ、姿勢を測るジャイロ、GNSS、レーザスキャナ、カメラなどが使われます。これは本日、色々な方が講演されたようなドローンや、MMSでもスペックの差はありますが、同じものが使われます。センサ系統としては、自律移動ロボットも移動計測装置も変わらないということになります。

まず、最初に最も簡単な方法で、デッドレコ

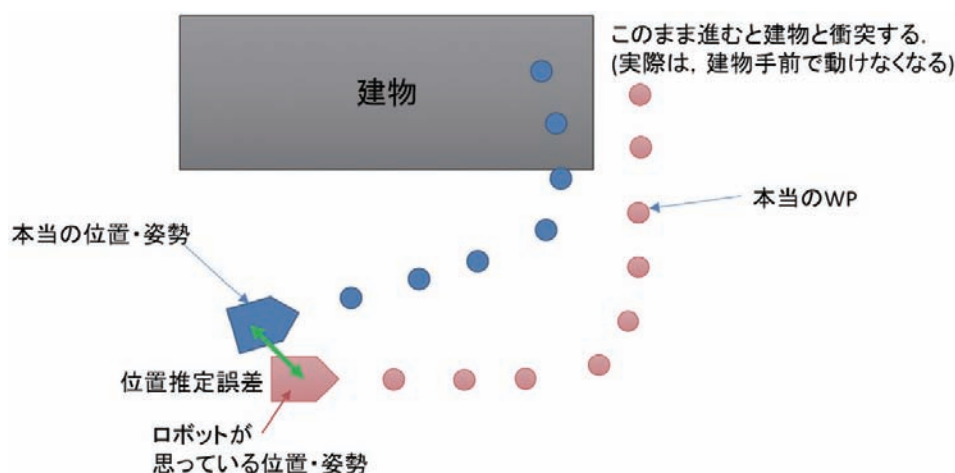


図1 ロボットの位置推定失敗

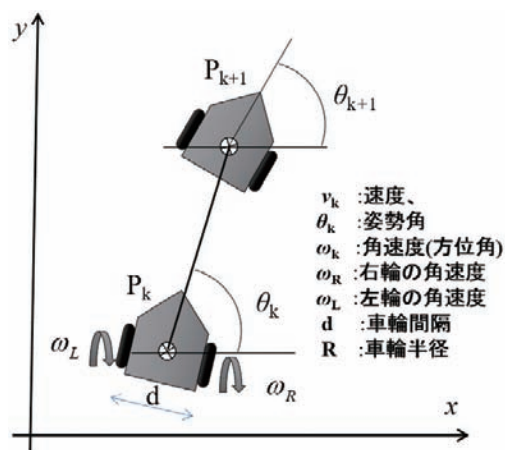


図2 デッドレコニング

$$x_k = v_k \cos \theta_k \cdot \Delta t$$

$$y_k = v_k \sin \theta_k \cdot \Delta t$$

$$\Delta \theta = \omega_k \cdot \Delta t$$

$$v_k = \frac{R\omega_{Lk} + R\omega_{Rk}}{2} \quad \omega_k = \frac{-R\omega_{Lk} + R\omega_{Rk}}{d}$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = [x_{k+1} \quad y_{k+1} \quad \omega_{k+1}]$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k + \begin{bmatrix} v_k \cos \theta_k \\ v_k \sin \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix} \Delta t$$

ニングがあります。これはタイヤにロータリエンコードをつけ、タイヤの回転を測り、タイヤの回転角から進んだ距離を積分により求める手法です。この方法ではスリップしてしまうと検知できなかつたり、微小誤差が累積しますので移動するほど誤差が累積していったりという問題があります。この方法は、ロボットの左右の駆動輪にそれぞれモータがついており、駆動輪の速度差で方向転換する差動駆動型と呼ばれるロボットで使われます。ステアリングタイプのロボットでは、角速度を測るジャイロスコープと合わせて、デッドレコニングをする場合がありますが、ジャイロも角速度を積分して角度を求めますので、累積誤差が発生します。また、完全に止めた状態であっても、ゼロ点の部分がゼロにはならないので、必ずノイズが乗ってしまいます。ノイズが乗っているのを、これを単純にそのまま積分してしまうと、静止状態であっても角度は動いていっているように見えるドリフト現象が発生します。どんなに高いセンサを使ったとしても、デッドレコニングを採用する限りは累積誤差が必ず発生するため、この累積誤差をいかに減らすかが課題になります。

その方法の一つとして、GPSデッドレコニング複合航法があります。MMSの原型になる技術です。これはGPSの場合、衛星観測さえでき

れば数cmレベルで位置が求められ、ドリフトや累積誤差がない。逆にGPS単体で使うと、場所によっては電波が受信できず、全く位置が求められない、もしくはマルチパスにより位置が大幅にずれてしまうという特徴と、デッドレコニングの、累積誤差は発生するものの、常に位置が出力され、外力等により強制的にスリップしない限り突然大幅に位置がずれることはないという2つの特徴を合わせた手法になります。基本的にはデッドレコニングによる予測値と、GPSによる観測値を使って、拡張カルマンフィルタにより真値を推定する方法になります。

この方法の問題点は、都市部や山間部など、空が開けていない状況が長時間続くと、デッドレコニングのみを使った位置推定と同じ状況になりますので、累積誤差が増えてしまうという点です。もし、ロバスト性が求められる自動運転でこの方法を使えば、都市部では必ず位置誤差が発生し、事故につながる可能性がありますので、この方法だけでは使えません。

その他の位置推定方法では、モンテカルロ位置推定という方法があります。これは、予め作った環境地図と、リアルタイムにレーザスキャナなどで取得した断面形状を使って地図に対しての位置を推定するという方法です。モンテカルロ位置推定ではパーティクルフィルターを使い

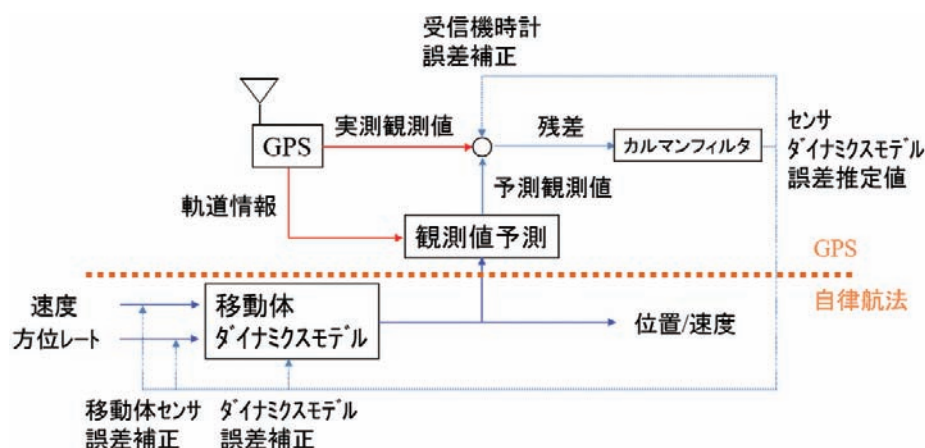


図3 GPS/INS 複合航法概略

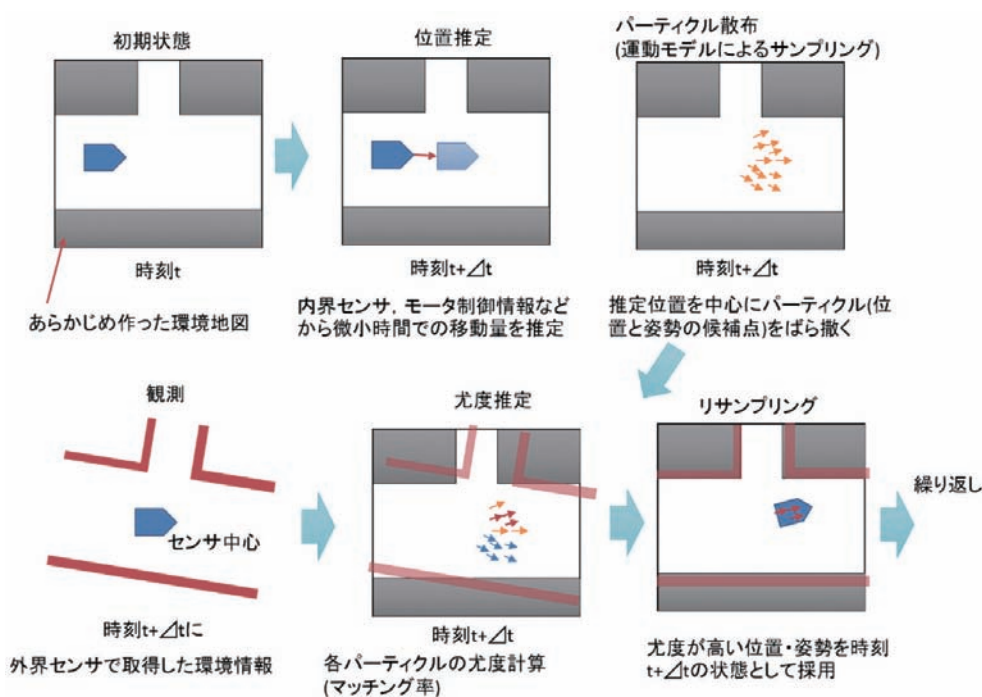


図4 モンテカルロ位置推定

ます。色々な方法がありますが、最も単純なものを説明します。ある時刻 t の位置から Δt 秒後の位置を求めることを考えます。最初に時刻 t における位置から Δt 秒後の位置はデッドレコニングにより予測します。当然この予測値には誤差が含まれますので、移動距離やセンサ性能などにより、いと予測される範囲にパーティクルと呼ばれる候補を多数ランダムにばらまきます。各パーティクルには位置と姿勢のデータが含まれています。次にこのパーティクルの中から最も真値に近いと思われるパーティクルを選択しま

す。選択に当たっては、 Δt 秒後にレーザスキャナで計測した断面形状と、環境地図の形状を比較して、最もマッチングするものを位置の推定結果として選択します。この過程をひたすら繰り返していきます。

この手法では、同じような形状が続く特徴のない場所（長い廊下や、野原など）では、最尤推定ができず失敗することがあります。また環境の地図が不正確であったり、環境が変わっていたりすると、マッチングがうまくできず失敗することがあります。

MCLでは、環境地図を事前に作る必要がありますが、この環境地図を作る方法はいくつかあり、例えば、先ほどのGPS/INS複合航法とレーザスキャナで取ったデータを合わせて、地図を作ります。また他にも、レーザスキャナを使ったSLAMにより作ることもありますが、デッドレコニングと同様に累積誤差が発生しますので、始点と終点の位置を合わせることで、誤差を減らすなど、何かしらの方法で工夫し補正するのが一般的です。ここまでの基礎的な位置推定の知識になります。

3. 自律移動ロボットからMMSへの技術転用

ここから、自律移動ロボットの技術がどのようにMMSに転用されたのか説明します。2000年代前半頃、自律移動ロボットの位置推定方法として有力な方法が大きく2つありました。一つは、RTK-GPS/INS複合航法、もう一つはレーザスキャンマッチングになります。この頃のロボットはセンサとしてRTK-GPS、光ファイバジャイロ、レーザスキャナ、カメラなどを搭載していることが多く、今のMMSの計測技術はこの頃のロボットで採用されていたRTK-GPS/INS複合航法や、ロボット用のマッピング技術が元になっています。

当時は、ロボットで使われるレーザスキャナは2Dのものしかなく、水平に設置し2Dの地図を作ったり、障害物回避をしたりするためのセンサとして使われていました。この時に、レーザスキャナを水平ではなく、傾けて使えば断面を計測する形で、三次元の形状を計測することができることに気づき、この頃に開発していたロボットを改造し、三次元地図を作るプロジェクトがスタートしました。

この頃は、携帯電話で人のナビゲーションが始まったり、カーナビに3Dのモデルが表示されるようになっていたりしていた頃で、このロボットを使ってこれら3Dデータを自動で作ることを目標にしていました。またITSの分野では、白線の位置情報や標識の内容などが含まれるもっと細かい地図があれば、速度制御や車線変更指示、高度情報があれば、エンジンの最適制御による燃費向上ができるということが考えられていました。このような社会的背景のもと、自律移動ロボットの技術から自律移動の機能を廃して、三次元形状を取得する機能に特化させるために開発したのがMMSになります。

図はMMSの試作機になります。当時はどこにレーザをつければ良いか、道路周辺のどんな設備を計測することに注力すべきか、ということがわかっていなかったため、色々な配置を試

ロータリエンコーダ	ジャイロ	GNSS	レーザスキャナ	カメラ
	 	 	 	
車速パルス計測	角速度計測	位置測位	形状計測	画像取得
内界センサ		外界センサ		

図5 自律移動ロボットやMMSで使われるセンサの例

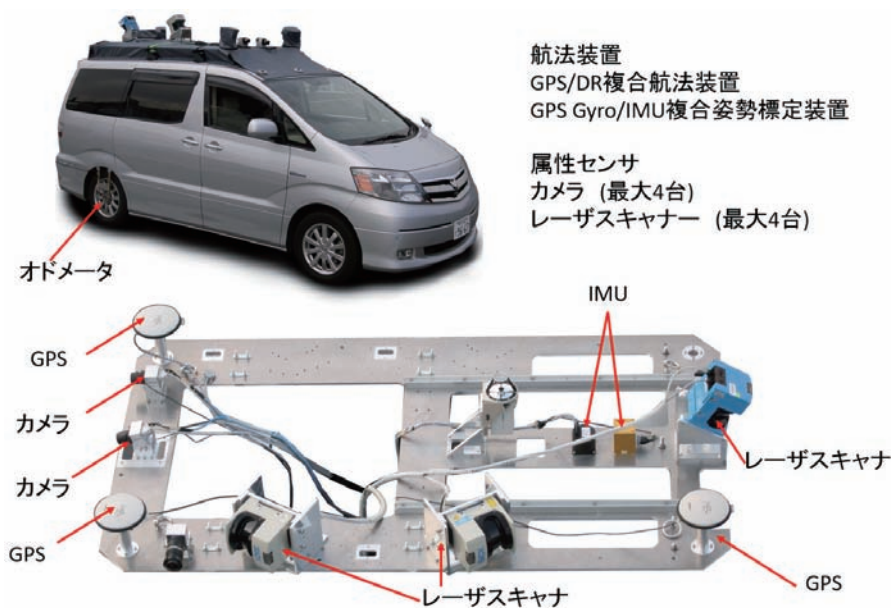


図6 MMS試作機

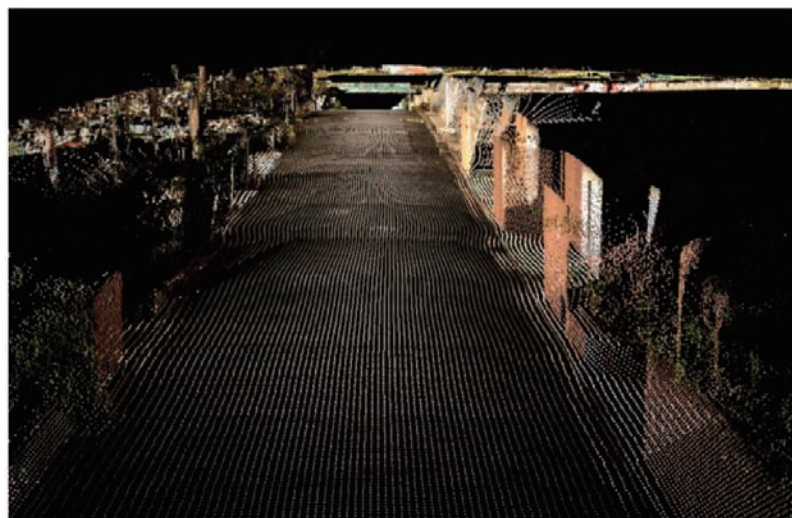


図7 MMSによる初めての色つき三次元点群

せるように作っていました。使っているセンサも先に開発した自律移動車両から流用して使っています。最終的には製品版のような形に落ち着いていますが、自律移動ロボットと比較していただくとセンサの数は変わるもののほぼ同じ構成であることがわかるかと思います。

MMSなどの移動計測において、最も難しいのは、GPS/INS複合航法で、姿勢角を正確に求めることになります。一番MMSの計測性能に反映されるのは姿勢角です。姿勢角が 0.1° ずれば長距離 離れるほど誤差は大きくなりま

す。またジャイロには累積誤差が発生しますので、何かしら他のセンサにより姿勢角を観測更新する必要があります。通常のGPS/INS複合航法では、複数回の連続したGPSのfix解により姿勢角を更新しますが、都市部での運用を考えると一回でもfixすることにより、姿勢角を更新できるほうが、姿勢角性能を向上できるのではと考え、三台のGPSを使うGPS-Gyro形式を採用しています。

図は初めてカラー化した三次元点群になります。元々カラー点群という発想はなく、偶々、

筑波大学の先生からしっかりと技術的に追い込んだ実空間の三次元復元結果があれば図が欲しいと依頼されたため、作ったものになります。これが2006年のことで以降、広範囲の三次元環境地図がMMSを使えば手に入る環境が整ったことになります。

4. レーザを使った位置推定技術の発展

一方で、同時期に自律移動ロボットの世界では、GPSが使えない環境下でもロボットが位置推定をする必要があるために、SLAM技術や、2Dスキャンマッチング技術が盛んに研究されPCの性能向上と合わせて発展してきました。

図は、私の研究室で開発したロボットと、そのロボットを使って実験的に学生にSLAMと2Dスキャンマッチング（アダプティブモンテカルロ位置推定）を実装させたものです。写真で搭載しているレーザスキャナはVelodyne VLP-16で、3Dのスキャナですが、実験のために意図的に2Dレーザスキャナを模擬して使っています。左右のモータ駆動軸にはロータリエンコーダが、車両の旋回中心にはMEMSジャイロが搭載されています。車両には制御用にPCが一台搭載さ

れており、センサのデータは、このPCで処理してモータに動作の指令値を送信します。

環境地図はあらかじめHector SLAMにより取得しています。地図は占有グリッドマップと呼ばれるもので、白い個所が移動可能な空間、黒い個所が壁面などの障害物と判定された箇所、灰色は未計測領域になります。地図は画像として保存しておきます。

自律移動の際には、事前に作成した地図に対して、AMCL（アダプティブモンテカルロ位置推定）を使用して、位置を推定しますが、ロボットは初期位置を知らされていないので、こちら側で与える必要があります。この2Dの地図を使った位置推定は屋内環境ではあまり失敗しませんが、屋外環境の場合、地面が平坦でない、空間が広すぎ特徴となるものが無いなどの要因により、よく失敗します。また、環境地図はGPS等で補正しない場合は、たいていの場合は歪みます。周回コースのような場合で、1周した後の位置がズレていると問題になりますが、そういった接続関係がない場合は、ロボットにとって多少の歪みは問題にはならないことが多いです。というのは、ロボットを動かすために

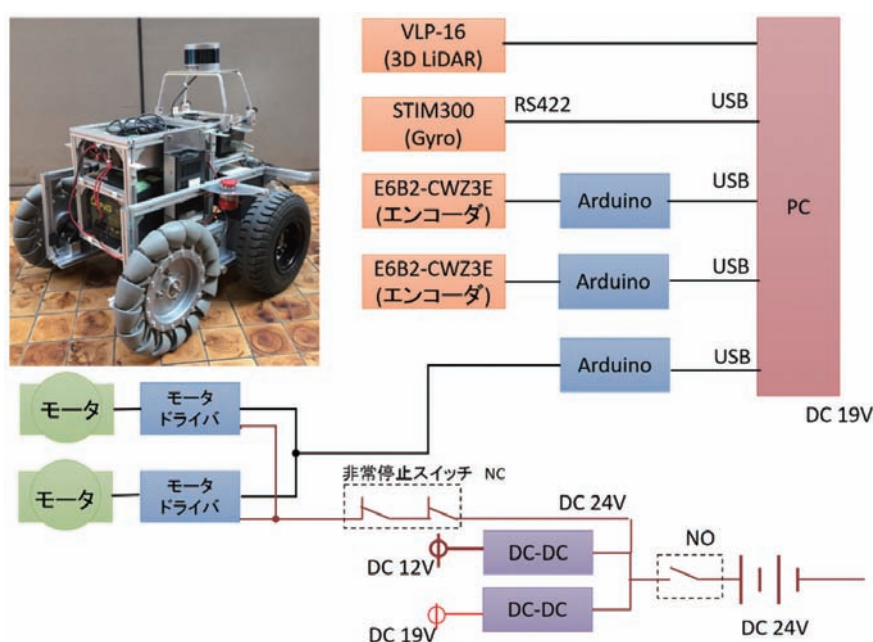


図8 自律移動ロボット

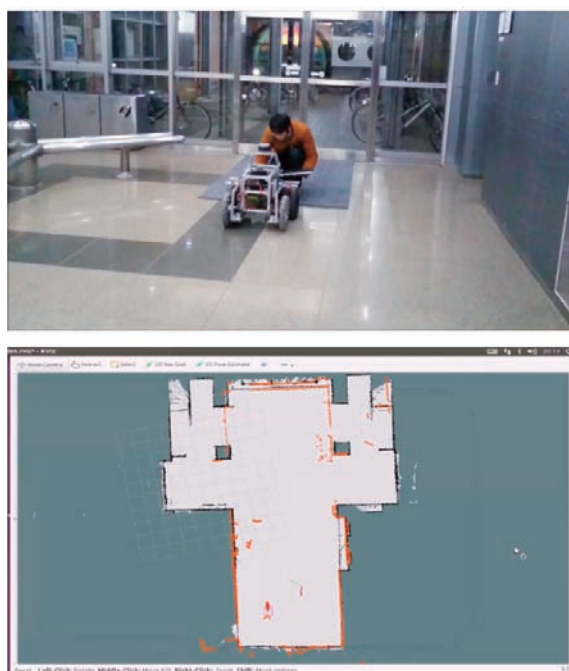


図9 AMCLによる位置推定

用意するWay Pointは絶対位置ではなく、あくまでも地図上の座標であり、位置推定も絶対座標ではなく、地図上のどこにロボットがいるのかがわかれば良いからです。この関係が破綻しない限りロボットが地図の歪みを要因として、自律移動を失敗することはまずありませんが、どこまでの歪みであれば許容されるのかといった定量的な数値はわかっていませんので、やはり、できる限りきれいに地図が作られている方が望ましいです。この環境地図をどれだけきっちり作ってあげられるかというのが自律移動の成功の鍵を握っています。

この2Dのモンテカルロ位置推定は、屋内などの地面が平坦な場所では成功しやすいですが、坂道などの起伏のあるところでは、環境地図がうまく作れなかったり、マッチングがうまく合わず失敗することが起きていましたが、近年では、2Dで行っていたこの手法を3Dで行うことが主流になってきています。

5. MMSデータと3Dスキャンマッチングによる位置推定

3Dのスキャンマッチングにすると計算コストは高くなりますが、3Dで情報量が多く、ミスマッチングが2Dに比べて減るという特徴があります。3Dスキャンマッチングでの位置推定で重宝されている手法でNDTマッチングがあります。NDTマッチングはICPマッチングよりも、計算量が軽い特徴があります。NDTは、点群そのものを比較してマッチングをかける手法ではなく、ボクセル内に含まれる点群数や、点群の共分散を比較する方法になります。この方法であればボクセル内の点群密度が高くても、計算量は変わらないため、MMSなど大規模な点群を取り扱っても実時間で計算できます。計算時間なのですが、私の研究室にある標準的なPC (Core-i5程度) で大体一回のマッチングで0.3秒ほどです。まとめますと、2000年初頭のころは、GPSを主体として位置推定する手法と、SLAMで位置を推定する手法、事前地図を正確に作り

参照スキャン点: $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i)'$

ボクセル k 内点個数: M_k

ボクセル k の平均値: $\mathbf{p}_k = \frac{1}{M_k} \sum_{i=0}^{M_k-1} \mathbf{x}_{ki}$

ボクセル k の共分散:

$$\sum_k = \frac{1}{M_k} \sum_{i=0}^{M_k-1} (\mathbf{x}_{ki} - \mathbf{p}_k)(\mathbf{x}_{ki} - \mathbf{p}_k)'$$

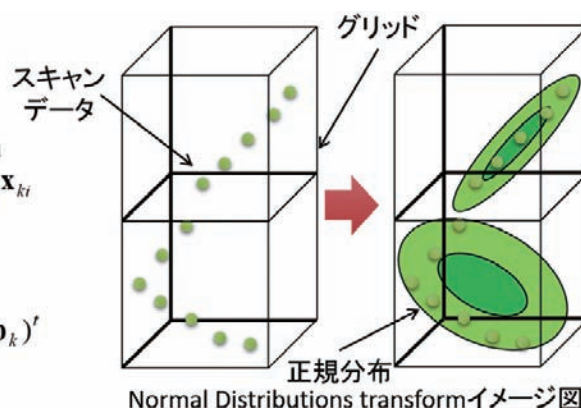


図10 NDT SLAMイメージ

スキャンマッチングにより位置推定する手法がありました。最近では、Velodyneのようなリアルタイムに3次元が取得できるレーザスキャナが登場してきたことにより、2Dから3Dへの位置推定に進化し、さらにMMSで簡単に3次元点群が取得できるようになったことにより、わざわざ自前で環境地図を作らなくても、データを購入したりMMSで計測したりすれば簡単に環境地図を用意できるということで、MMS点群がロボットで注目されるようになりました。その結果として、最近では、自動運転での位置推定手法の一つとして、MMSの点群と、Velodyneのような3Dセンサを使う方法を採用する人もでてきました。ただ、この手法の課題は、この環境地図をどのくらいの頻度で更新するのかが重要になります。環境地図が古ければ、当然、工事などにより環境が変わる可能性がありますので、その情報が更新されていなければ、位置推定に失敗することがあります。特に工事中などのような個所は、状況が絶えず変化しますので、大抵失敗します。

6. SLAM技術の計測システムへの応用

ここまでの話では、MMSがもともと自律移動ロボットの技術から作られたもので、その後、他のSLAMやスキャンマッチング技術の発展とともに、両方の技術が組み合わせられ、自動運転の位置推定手法の一つとして結びついてきた話でしたが、今度は、このスキャンマッチングやSLAMの技術をMMS・3D移動計測に应用するということが増えてきています。

ここからは、私の研究室での事例を紹介します。これまでのMMSでは、道路は走れますが、道路以外は走れないためそういった道路の無いようなところで、かつ人が行くには大変なところを遠隔操縦で3次元計測するロボットを作っています。ロボットを作っているといってもベースとなる車両は、買い物で、不整地走行用の水陸両用車両を購入してきてMMS+ α の機能を付与させています。このロボットは、上部にVelodyneのレーザスキャナVLP16が搭載されているほか、カメラ、MEMSジャイロ、一周波のGPSが搭載されています。エンコーダは



図11 遠隔操縦型水陸両用移動計測システム

搭載していませんが、モータの回転数を取得できるようにになっています。

通信機は、複数の系統があり、WiFi、無線LAN、特小無線が搭載されており、運用距離によって使い分けています。WiFiはLTE回線などの公共の電波が届く範囲で使っており、インターネットを介して運用します。通信速度が無線LANより落ちますが、理論上インターネットに接続できる環境であればどこからでも操縦が可能になります。現時点で11km離れたところからの運用実績があります。無線LANは5GHz帯の少し特殊なものを使っていて、1中継局あたり見通し500mで通信することが可能で、WiFiよ

りも高速に通信することができます。中継局を途中に増やせば通信距離を延ばすことができます。特小無線では、通信速度はかなり遅くなり、リアルタイムにカメラ画像等を送信するのは難しいですが、無線LANよりも電波が回り込むため、障害物に強い通信環境になります。

遠隔操縦では、カメラ画像での操縦を想像される方が多いかと思いますが、カメラ画像は1秒程度時間が遅れますので、操縦が難しいことが知られています。ですので、このシステムでは、簡単な自律移動の機能をつけています。この自律移動機能では、レーザで計測されている範囲内において、目的地を指定すると自動



図12 不整地における運用



図13 水上での運用

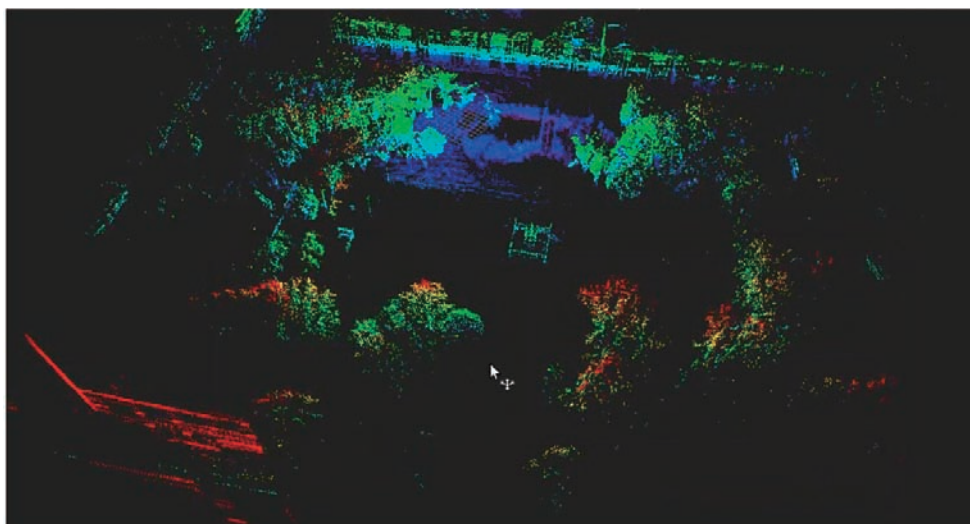


図14 水上から計測したSLAMによる三次元復元結果

で経路を計算して移動するといったものです。さらに、目的地に到達するまでに障害物があれば、回避経路を自分で判断して回避していきます。またレーザの三次元データをリアルタイムに操縦局に送信しており、遠隔で三次元形状を確認することができます。また車両の位置はGPSで取得していますので地図上にプロットしていくことが可能です。

ベース車両そのものの性能は、最高速度が18km/h、カタログスペックですが、フル充電で大体18km走行することができます。約40度の傾斜まで走行可能で、様々な不整地環境を走行することが可能です。また水陸両用の車両になっていますので、水辺であっても走行可能になります。深さのあるところでは車両は浮いた状態になり、タイヤについた水かきで推進します。水上では時速4kmが最高速度になるため、流れのある川で運用するとおそらく流されるかと思えます。

このシステムを使って不整地走行可能な三次元復元装置を研究していますが、GPSが使用できない場所での運用を考えていますので、今までのMMSとは異なりレーザのSLAMにより三次元復元しています。この車両にはGPSやジャイロなどスペック上は従来のMMSと変わらない

機材を搭載していますが、図は、Velodyneのみを使った三次元復元結果になります。SLAMにはNDT-SLAMを使用しています。

またリアルタイムに復元することができますので、計測中に三次元復元結果を確認することができます。定量的な評価は行っていないが柱の断面形状などを把握することはできます。

図はあくまでもレーザSLAMによる結果ですので累積誤差はデッドレコニング程ではありませんが発生しますので、絶対位置や歪みを補正するためにはGCPによる補正やGPS複合航法などと組み合わせる必要があります。

7. まとめ

今日話をまとめますと、もともと自律移動ロボットの技術を使って、MMSなどの3D計測の技術に発展し、それと同時にロボットではSLAMやスキャンマッチングの技術の研究が行われ、互いに発展した結果、MMSで取った三次元データが一部の自律移動ロボット・自動運転でも使われるようになりました。さらに最近では、ロボット側で開発が進んだSLAMの技術が計測に使われるようになってきています。

自律移動の方法は多数あり、必ずしも三次元地図を使った位置推定手法が全てではありま

せんが、一定の成功は収めています。自動運転では、MMSの三次元地図を使うシステム、画像主体で白線認識に主軸を置いているシステムなど色々な方法があります。また、人間と同じように位置を正確に知らなくても移動できるような方法を模索しているグループもあります。ただ、現時点で、環境地図を事前に作り、それに対してMCLで位置推定をするという方法が一定の成功を収めているという状況にあります。将来的に自動運転にどのような手法が採用されるかは自動車会社各社の思惑もあり、判断が難しいところですが、安全に関わる部分の情報は多いに越したことはありません。例えば、自動運転の車が信号無視をしたというニュースがありました。事前にダイナミックマップなどで、信号の位置がわかっているならば、少なくとも見落とすことはなくなるはずです。もしカメラで認識できなければ速度を落としたり停止したりという選択ができることになります。もしダイナミックマップがなければ、そこに信号があるかないかといった事前情報がないため、カメラの認識率を100%にしなければなりませんし、逆に信号がないところで過検出してしまえば、誤動作を起こしかねません。こういった道路上の運転にかかわるインフラの位置情報、特に安全に関

わる部分というのは絶対的に必要になってきます。さらに、ダイナミックマップを運用していく中で、どうやって更新するかという話に当然なります。三次元形状に対してマッチングをかけて位置合わせをして差分を抽出するなど色々な方法が考えられますが、最も簡単なのは、精度良く測っておけば差分抽出さえすればよいことになります。ですので、精度を担保して測ることが重要です。管理も楽になります。

また、三次元地図といっても、もとは点群情報ですので、その中からどうやって必要な情報だけを抽出するかという認識部分をどの程度まで進歩させれば十分かといったことが、もう一つ課題になるのではないかと考えております。ちょうど1時間くらい話したので、これで今日の私の講演を終わりにしたいと思います。ありがとうございました。

**講演者**

石川 貴一郎 (いしかわ きいちょう)
日本工業大学機械工学科 准教授

本稿は平成29年6月2日、当協会の第39回測量調査技術発表会において特別講演をいただいた石川准教授のご講演内容をまとめたものです。