

GNSS(全球測位衛星システム)による 移動体自位置測定と環境による誤差精度の検証

竹中章勝 (TAKENAKA Akimasa)¹, 畑中豊司(HATANAKA Toyoshi)¹, 田中武則(TANAKA Takenori)²

@新潟ロボット協会(NiiRobo) (新潟エスラボ株式会社)

1 概要

筆者らの所属する新潟ロボット協会は, LIDAR による周辺構造物の情報から緯度経度の位置情報を付与した地球地図データベース (GMDB: Global Map Data Base) を作成し, GPS 情報と LIDAR の計測情報から精度の高い位置情報補正するソフトウェア技術「クアッドキューブ」を開発している. この技術の実証実験を"つくばチャレンジ"で, 手動車椅子をユニットを後付けすることで電動化する「車椅子用電動ユニット (YAMAHA 製)」をベース車両とし, メイン制御 PC に Raspberry Pi^[1] (ラズベリーパイ財団による開発) を用いた自律制御移動ロボットを開発し, 2019 年から走行実験を行っているが, 2021 年は昨年度に引き続き, 新型コロナウイルス流行により実験走行と本走行は中止となり新潟ロボット協会内での検証活動を行なった. 昨年度の LIDAR を活用したクアッドキューブ技術に加えて, GPS による位置計測とその解析など, 基礎技術の検証を行なった結果を報告する.

2 クアッドキューブ技術

クアッドキューブ技術は, 緯度経度の値 (度数) を細分化し緯線と経線に囲まれたボクセル (占有格子) 四辺形を底辺とする高さを持つ立方体で移動体周辺の障害物を表現するソフトウェア技術である.

2.1 緯度経度四辺形

緯度経度四辺形 (LLQuad: Latitude Longitude Quadrilateral) は, 占有格子地図の縦横の線を緯線と経線に並行で囲み, その 1 辺の長さを 100km から 1mm まです 9 段階とする四辺形である. 緯度経度四辺形の辺長の種類を図 1 に示す.

一般にボクセルといわれている表現であるがクアッドキューブ技術では, 必ず緯線・経線に平行な四辺形として定義している.

LLQuad の辺長	定義値	対応度数	辺長
LLQuad100km	Q0	1.00000000	100km
LLQuad10km	Q1	0.10000000	10km
LLQuad1km	Q2	0.01000000	1km
LLQuad100m	Q3	0.00100000	100m
LLQuad10m	Q4	0.00010000	10m
LLQuad1m	Q5	0.00001000	1m
LLQuad10cm	Q6	0.00000100	10cm
LLQuad1cm	Q7	0.00000010	1cm
LLQuad1mm	Q8	0.00000001	1mm

図 1 緯度経度四辺形の 9 種類の辺長さ

例えば経線 1 度の長さは 111km であるが, 緯線 1 度の長さは地球が球体の為に着目する緯度により変化する. たとえば京都駅付近の東経 135.7594 度, 北緯 34.9876 度の位置では当該緯度経度で約 10m×10m の長さを正確に表すと 11.1m×9.0m となる. さらに緯度が高いアイスランドでは緯線 1 度の長さは 4.87m, 同じくアンカレッジでは 5.37m となる.

2.2 地球地図データベース

地球地図データベース (GMDB: Global Map Data Base) は測域空間の情報を格納し管理する地図をいう. GMDB は LLQuad100km の緯度経度の値 (度数) を地球トッ平面 (Q0) としたポイント配列群から, 縦横 10 分の 1 に細分化するためのポイント配列を 5 層重ね, 最終的には LLQuad1m (Q5) に BT 構造体^[2] (LIDAR による Beam Tree 構造体) を 1 つ管理する緯度経度データベースである.

LLQuad100km は 180 × 360 (緯度 -90 ~ 90 度, 経度 -180 ~ 180 度) の個数あり, 5 階層重ねること

¹ 新潟ロボット協会・クワッドキューブ株式会社

² 新潟ロボット協会・新潟エスラボ株式会社

Q0 から Q1->Q2->Q3->Q4->Q5 に到達する。

これらの BT 構造体のスケールを変更しながら仮想立方体をつくることで、ロボットが自律走行する際に建物や人などの移動体などの移動体にとっての障害物を検出しようとしている。

2.3 クアッドキューブ技術が目指す方向性

2021 年のつくばチャレンジレポート集の当協会報告にあるように、本研究の目指す位置情報のモニタリングの目指す方向性は、クワッドキューブ技術を用い、位置情報のモニタリングのための仮想風景(シンプルな立方体表現により見える風景)を少ない計算量で作成することを目指して開発してきた。

過去の経緯として、2014 年から 2018 年までつくばチャレンジにおいてクアッドキューブ株式会社は複数のロボット(移動体)を地図上で俯瞰的に位置表示するスマートフォンアプリを使った位置情報提示システム(Derimo)を開発・提供してきた。

さらにクアッドキューブ技術を活用する事で、移動体から見える一人称視点からの風景を、軽量の立方体データに置き換え 3D 空間視することで自律走行する際の周囲の状況把握を自律走行ロボットが行えるようにすることを目指すものである。

クアッドキューブ技術が目指す方向性として、

- 1) できるだけ安価な構成機器で障害物情報を収集。
 - 2) マシンパワーの小さい安価なコンピュータで運用できるように、極力計算量の少ないソフトウェアで稼働するシステムの構築。
- ということを目指している。

3 2021 年度の機材と活動場所

2021 年度は 2020 年度に引き続き新型コロナ肺炎流行があり、当初から「つくばチャレンジ現地走行」は行わないこととし、開発グループの拠点である新潟と京都でクアッドキューブ技術の開発と車椅子型ロボットの開発に加え、手掌サイズで比較的安価な小型コンピュータ Raspberry pi と各種センサでのデータ測距および処理技術の検証を行った。

3.1 主な機材

- ・小型 PC Raspberry Pi 4
- OS: Rasbian

- ・GPS アンテナユニット GT-902PMGG^[3]
- ・Raspberry Pi Sense HAT^[4]
- ・Lidar センサ YDLIDAR X4^[5]

これらを手押し車型計測車 Derimo1 に載せて各種データを取得できるようにした。

3.2 活動場所

当協会活動拠点の新潟および京都でそれぞれの地理的特性を勘案し次の 2 箇所で開催実験を行った

a) 新潟市 鳥野潟公園

つくばチャレンジおよび中之島チャレンジなどと同様外周が遊歩道になっている公園で周囲に大きな建物が無い場所として選定。

b) 京都市 四条烏丸周辺

都市における特性を計測するために京都市中心部の四条烏丸周辺の歩道で計測を行った。ビルに囲まれた東西・南北方向それぞれ直角に交差する十分に広い歩道などを有する場所として選定。

4 全球測位衛星システムによる位置情報計測

今年度は主に自位置の位置情報を測定および検証を行った。

4.1 BT 構造体と全球測位衛星システム(以後 GNSS)を活用した位置情報計測

2020 年度の活動として行った LIDAR 計測と「クワッドキューブ技術」は、技術構成上自分のロボットと障害物(BT 構造体)との相対位置関係を計測・計算・推定するシステムである。

今回はさらに、前述の Raspberry pi などの機材で GNSS を活用し、次の 2 点に着目したデータの特性とデータの処理に関する実験検証を行った。

実験の目的は

- 1) 地表上の絶対位置を推定すること
- 2) 位置データの変化からロボットの移動方向などを推定すること等を想定し衛星からの測位信号を使用した GNSS によるデータ活用の方向性を探る

以上の 2 点である。

4.2 GNSS によるデータ取得

L1 帯をサポートする GPS アンテナユニット GT-902PMGG を使用し衛星信号から位置データを取得

する構成とした。GT-902PMGG によって計測およびデータ処理がされたデータを USB シリアル変換アダプターを経由して Raspberry Pi に接続し、データを取得するシステムとし、NMEA フォーマットによるテキストデータを毎秒 1 度取得することができる環境を活用した。

4.3 測位開始時の挙動

USB 端子経由でシリアル通信として送られてくるデータを Raspberry pi でデータを受信するが、GPS アンテナユニットが測位に必要な数の衛星を補足するには時間がかかる。そのため測定開始直後はログデータはこのころが、位置情報は測位できていない。そのため今回実験している手押し車式の計測車に Raspberry pi とバッテリー駆動ディスプレイ、GPS アンテナユニットなどを接続し起動してから、数分移動せずに待ち、緯度経度情報を測位した段階で画面に通知するプログラムを作成し、その後自動的に計測したログデータを保存するシステムを作成した。なお実際の起動から位置情報測位し始めるまでの平均時間は 3 分ほどであった。

4.4 測位ログデータのデータクレンジング

測位したデータは 1 秒毎に捕捉した衛星の個別番号や衛星位置の仰角そして受信電波強度などの情報が記録された“NMEA (エヌメア) フォーマット”で記録されたデータを得ることができる。そのデータを順次記録していくが、NMEA フォーマットデータをデータクレンジングして必要な情報を次の手順で処理し、CSV データとして自動保存プログラムを開発した。

- 1) まず位置情報が含まれる情報 (GNSS GNRMC など) の行を抜き出す。
- 2) 計測しはじめの位置情報が得られていないレコード (行) は抽出しない。
- 3) 位置情報、時間、速度などの必要な情報で null データや文字化けなど不正な数値などのデータが含まれるレコードを削除する。
- 4) 測定時刻を GMT から JST に変換する。
- 5) GNSS ユニットから出力される緯度経度データは「度分秒 (DMS)」で出力されているので Google map や OpenStreetMap でレンダリングするために、「度数 (DD)」表記に変換する。
- 6) 1 秒毎の移動速度変化データを抜き出す。
- 7) データ飛びなど測定データ妥当性を簡易判定するため

前後測定ポイント間移動距離[knot]抽出し[m]に変換する。
8) 最大緯度最小緯度情報を計算し表示する。

10) 作業時間のタイムスタンプを含むファイル名として csv 形式ファイルを出力する。

このような手順で測位した NMEA フォーマット RAW ファイルからデータクレンジングし、検証を行った。

4.4 取得した位置情報の検証

新潟市鳥野湯公園多目的公園外周を手押し測定車で計測結果を前述のデータクレンジングした CSV データを Google map にインポートしプロットしたところ図 2 のようになった。なお、この時、連続して時計回り・反時計回りで計測したデータを二つ重ねてプロットしている。

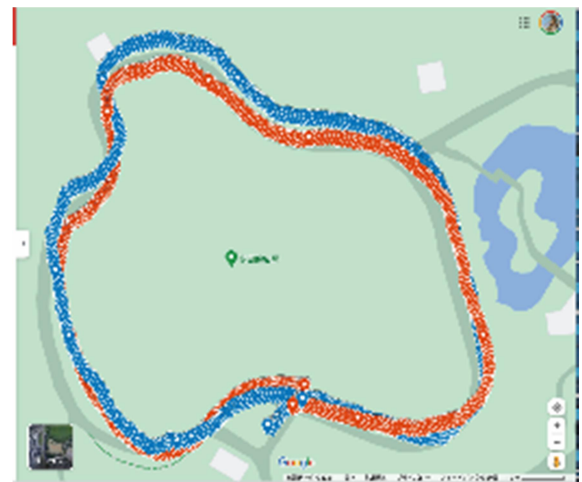


図 2 : Data plot on Google map

同様に OpenStreetMap にプロットした結果を図 3 に示す。



図 3 : Data plot on OpenStreetMap

Google map , OpenStreetMap とほぼ両サイトでレンダリングされた地図の小径上に、測定システムの GNSS によって測位された地点がプロットされている。

移動した小径は道幅約 2 m ほどで、ほぼ中央あたりを歩いているが、図の右上あたりと左上あたりで地図の道とズ

れて計測されている。

また、Google map, OpenStreetMap 共に公園内小径の形が異なっている。図4のように上空写真レイヤと比べてもずれているところもあるので、地図化した時の描画ずれもあることがわかる。

なおこのような時に OpenStreetMap は気がついた個人が修正することができる利点がある。



図4：OpenStreetMap と上空からの写真と経路

また、OpenStreetMap をベース地図としてオープンソースとして撮影した位置情報を地図にプロットするプロジェクト mapillary でも検証した結果を図5に示す。

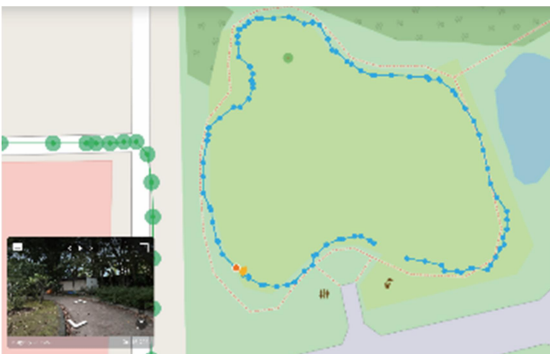


図5：mapillary にプロットした移動経路

左下の地図上の小径とスマートフォンで GNSS+LTE データにより測位した軌跡と今回測定したシステムで計測した結果の軌跡はほぼ一致するので地図の小径データのデータ間違い（実際の地形とのズレ）と思われる。

4.5 京都市内中心部（市街地）での測定

鳥野潟公園は立木以外はほぼ周囲に建物はなく良好な測定結果を得られた。

一方京都市内四条烏丸周辺は市街地中心部であり、特に烏丸通り（南北方向道路）沿いには5階建以上のビルが建っておりその間に片道2車線の道路が走っている。

ここで鳥野潟公園と同様のシステムで計測した結果を次の図6に示す。



図6：京都市街地での計測結果

出発地点（図上側左地点）から図の左右方向道路を進んだ。この時しばらくはほぼ移動経路に対して地図上にプロットされた点は正しく表示されているが、左折（図の上方方向に曲がって）北方向に移動したあとは随分プロットされた点が暴れており、図の移動経路最上部で折り返し南進（図下向き）に移動するとさらに実際の移動経路とプロットされた点のズレは大きくなっている。

この現象は主に二つの仮説が考えられる。

仮説1）ビルによる天空方向への見通し（仰角）の悪さから捕捉する衛星の仰角幅が狭くなり角度差から算出する地位情報の誤差が大きくなることによるズレ。

仮説2）衛星からの電波がビル壁面反射（マルチパス）によるズレ。

である。

5 市内計測時のズレ検証

5.1 HDOP による評価

仮説1）のビルが林立する場所で位置データの位置が外れている理由を解析するために、NMEA フォーマットによる計測データに記録された GNGGA レコードの HDOP データにより評価を行った。

HDOP は、Horizontal Dilution of Precision（水平精度低下率）のことで、天空における GNSS 関係衛星の配置とシステムが衛星信号を捕捉し処理した上で、位置情報を特定するために算出された数値である。一般に天空で衛星が広く分散して分布した状態でたくさんの衛星を捕捉すると位置情報の推定精度は向上する。このように衛星の分布と受信電波の状態によるその測位精度の度合いを示す

もので、数値が大きくなるほど測位精度は悪くなる。

GNGGA レコードの中から、測定時刻・緯度・経度・HDOP の値を抽出し CSV ファイルに変換した上で Google maps 上にプロットして位置と HDOP 値の関係について検証した図を図 7 に示す。



図 7：移動経路と HDOP 情報

図 7 で HDOP の値が 4.0 を超えている点を○に？のアイコンで示した。一般に HDOP の値が 2.5 を超えるとズレが大きくなる傾向がある。

○に？の地点は実際の「破線」で示した移動経路から大きくずれている。(南北方向の道路沿い)。

図 7 の左右方向道路ぎわの建物は高さが比較的低くおよそ 2 階建から 3 階建の建物が多い道路である。ここでは HDOP の値が 2.5 を下回る地点が多く実際の移動経路(地図上の道)とほぼ同じ地図上の位置を示している。

一方図 7 の南北方向の道路(図 7 の上下方向の道路)では比較的高いビルが隙間なく建てられており特に東西方向(左右方向)の天空を見ることができる仰角幅は狭い。この時 HDOP の値は 4 から最大 14 ほどを記録しており衛星の捕捉状況が良くないことを示している。

一方南北方向でも左折後(北進)しばらく HDOP の値は 4.0 以下の時もあり比較的 HDOP の値としては良い値になっている。しかし、折り返して南進するころからは HDOP 値が 4.0 を超えることが多く、地図(実際の移動経路)から大きくズレている。

一方、図 7 の南北方向(上下方向)で、HDOP が 2.5 を下回っていても移動経路(地図上の道)から大きくズレしまっているところがある。

これは仮説 2) の建物により反射した電波を細くしたマルチパス現象が発生していることが考えられる。

なお、本計測データによる HDOP 関係データを開発したプログラムおよび表計算ソフトにより集計した結果は次の通りである。

計測記録総レコード数 = 3754 行

GNGGA レコード数 = 311 行 (総記録地点 311 地点)

HDOP 最大値 = 13.46

HDOP 最小値 = 1.21

HDOP 平均値 = 3.26

HDOP 分散 = 8.29

度数分布表(図 8) およびグラフ(図 9) に示す。

階級	度数	階級	度数
1	0	5	0
1.2	0	5.2	0
1.4	101	5.4	1
1.6	8	5.6	2
1.8	1	5.8	2
2	26	6	1
2.2	15	6.2	0
2.4	24	6.4	0
2.6	6	6.6	0
2.8	0	6.8	0
3	33	7	0
3.2	2	7.2	0
3.4	0	7.4	0
3.6	16	7.6	2
3.8	0	7.8	0
4	0	8	0
4.2	1	8.2	0
4.4	6	8.4	0
4.6	6	8.6	0
4.8	2	8.8	31
		9	0
		15	9

n=311

図 8：度数分布表

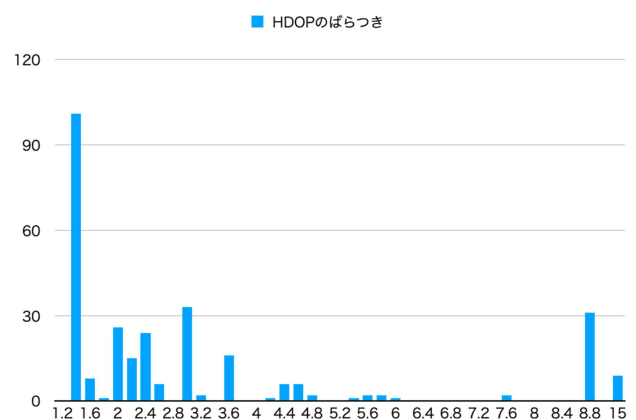


図 9：HDOP 度数グラフ

6 測定実験に関わる結果と考察

本実験結果から次のようなことがわかった。

1) 比較的安価なコンピュータ (Raspberry Pi) と GNSS センサでも条件が良ければおおよそ 3m 程度の誤差で位置情報を計測できることがわかった。

RTK など cm 級の精密な測定ができるシステムも既に実用化されているが、一般的な GNSS による計測でも、ある程度の自位置計測ができ、少ない計算量で移動体の自位置計測ができ安価なコンピュータでも対応が可能であることがわかった。

2) 測定値は周囲の建物など天空に向けた仰角見通しが良いと測定精度が上がる一方、市街地では建物の影響によって位置情報信頼度(HDOP)が下がったりマルチパスによる誤検出で 10m 以上のズレが発生することがあるため、市街地では他のセンサによる計測値を使った補正が必要であることがわかった。

例えば HDOP の数値が 2.4 を超えるような場合や、HDOP 数値が低い、過去数地点まえから急激に移動距離が増えた(測定点が飛んだ)場合などは、加速度センサと測定ポイント間の時間を t とすると $t-1, t, t+1$ のタイミングでの移動距離を計算結果から予測し GNSS 情報との比較をすることで測定位置の補正を行うことが可能であると考えられる。

更に車軸にロータリーエンコーダを装備し同時に実移動距離を測定することも可能であるし、昨年度報告した LIDAR による計測データからクワッドキューブ技術を用いたソフトウェアで移動位置予測が可能である。

3) LIDAR 計測が優位な状況 GNSS が優位な状況があり、更に加速度センサなどを用いることで、地表上の絶対位置と障害物などの相対位置計測による移動体自動制御に必要なデータの基礎データとなりうる事が推測できる。

4) 固定された走行フィールド(コース)であれば、試験走行で Way Point (SODA) の登録することで更に絶対位置(座標)のズレ補正を行うことも考えられる。

7 今後の活動と課題

2021 年は、昨年度に引き続き新型コロナウイルス流行の影響で遠距離移動が難しくなり、主に京都と新潟での実験を行うことになった。引き続き今後に向けて、前項でも述べた通り加速度センサによる時間軸による移動先位置推定やロータ

リーエンコーダによる実移動距離のデータなどから、特性に合わせたセンサ値を活用するなど、更にデータ精度を上げていき、安価なシステムによる低計算量で処理ができるクワッドキューブ技術を開発していきたい。

そうすることで、低スペース・低予算でシステムを組むことができ、当協会が 2019 年からの開発している車椅子型自動走行ロボットで車椅子による移動時の障害物衝突低減システムや運転アシストなどの機械システムのサポートが可能となると予想される。

参考文献

[1] <https://www.raspberrypi.org/> (2022 年 1 月 2 日 確認)

[2] つくばチャレンジ 2021 レポート集

[3] <https://www.vic.com.tw/wp-content/uploads/2020/11/YIC-GT-902PGG-GT-902PMGG.pdf>

(2022 年 1 月 2 日 確認)

[4] <https://github.com/raspberrypilearning/astro-pi-guide>

(2022 年 1 月 2 日 確認)

[5] <https://www.ydlidar.com/products/view/5.html>

(2022 年 1 月 2 日 確認)