

警備に活用する自律走行台車の自己位置推定手法

澤野 雄哉[†] 永井 悠人[†] 鈴木 孝幸[‡] 清原 良三[‡]

概要: 自動運転技術の研究開発が盛んであり、法律も改正され、市場投入は間近であると推定される。自動運転の技術を幅広く適用する研究も多くあり、ロボットの移動や、台車の自動走行などが一例である。特に台車は、荷物の運搬や、デジタルサイネージ、案内ロボット、警備ロボットなどに活用することができる。本論文では、特に警備ロボットとして自動走行台車を活用した場合の、各種課題の中で、問題発生時に警備員に自己の絶対位置を通報するための自己位置推定手法を提案し、基礎的な実験を行い、提案方式で実装できることを確認したので報告する。

キーワード: 情報処理学会論文誌ジャーナル,

Localization Method for an Autonomous Cart as a Guard Robot

YUYA SAWANO[†] YUTO NAGAI[†]
TAKAYUKI SUZUKI[‡] RYOZO KIYOHARA[‡]

1. はじめに

自律走行ロボットの技術は自動運転技術とともに発展しており、多くの場所で導入が進められている[1]。特に、産業界では人件費削減、作業の質の均質化、質の向上などを目指している。一般的な家庭では、掃除ロボットや高齢者や子供のなどの見守りロボットとして活用されている。また、警備においても古くからロボットが導入されている。

株式会社 ZMP は、警備ロボットや配送ロボットを開発し、日本郵便株式会社と共同で配送目的として自立走行ロボットの導入を進められており、公道実験が公開されている[2]。

神奈川工科大学では、KAIT モビリティリサーチキャンパスと呼ぶ研究開発[3]を進めており、人とモビリティが共存する大学生活を目標にしている。また、大学構内だけではなく周辺地域とも連携も目的としている。その企画の一環として警備ロボットの導入を進めている。

神奈川工科大学は、多くの大学や、病院などの開放型の施設同様に、昼間は自由に人が出入りできる状態である。夜間は解放された門の数は減るものの守衛に見られることなく入ることができる。もちろん夜間、建物内にはなんらかの鍵などがなければ入れない。夜間は、以下の4種類の人がいる。

- (1) 教職員 (特に制限なく構内に滞在可)
- (2) 学生 (許可を得た者のみ滞在可)
- (3) 悪意のある不審者 (犯罪目的)
- (4) 悪意のない不審者 (迷いこむなど)

これらに対して、警備員が毎晩巡回することで不審物や不審人物の発見を行っている。夜間は必要最小限の人数で巡回警備を数回実施している。夜間の警備では実際に悪意ある不審者を見つけることもあれば、年に数回は悪意のない不審者を発見することがある。悪意のない不審者には、単に知らずに入ってしまった場合もあるが、認知症の方の場合もあり、適切に保護しなければならない場合もある。そのため巡回警備が必須となっている。

一方夜間の警備員の数はコストの関係で絞っていること、建物内の巡視も必要なことから屋外の巡回回数を減らしたいという要求もある。そのため KAIT モビリティリサーチキャンパスのプロジェクトで昼間は配送や、案内、掃除に活用する台車を夜間に警備ロボットとし運用することを提案する。

夜間に巡回する計ロボットの課題を以下に示す。

- (1) 人間の発見
- (2) 不審者の特定
- (3) 警備員を正確に呼ぶための自己位置推定

警備ロボットは、一般的な自律走行ロボットとして以下のように動作していることを前提とする。

- (1) SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術により、あらかじめ走行のためのマップを作成し走行
- (2) 3D-LiDAR を搭載して、SLAM を作成
- (3) PDR(Pedestrian Dead Reckoning)と同様にタイヤ軸の回転と方向により移動を推定する。

しかしながら、このような手法では以下に示すような課題がある。

- (1) 構内の建物は同じような形状の部分が多く

[†] 神奈川工科大学大学院
Graduate School of Kanagawa Institute of Technology
[‡] 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology

SLAM で得た情報のみで正確な位置の補正はむずかしい。

- (2) GNSS の利用も想定されるが、高い建物があるなど正確性に疑問がある。
- (3) 3D-LiDAR で絶対位置を推定するには情報量が多く計算量削減が必要である。

このような課題を解決することを目的に複数の手法の組み合わせによる推定手法を提案する。

2. 不審者発見、通知手法

自律走行台車は、3DLiDAR を利用して前節で述べたように走行している。実際には台車に組み込んだ機器で計算しながら動作するだけでぼりソースを使いすぎるケースが多い。そこで、不審者発見は別のシステムとして構築する。3D-LiDAR の出力情報は入力としてそのまま利用することを想定しているが、人を認識する処理をするには、3D-LiDAR の点群情報では情報が多すぎリソース不足が心配される。そのため、文献[4]などで情報を選択することで情報量を減らして人を認識する手法の提案評価中である。

また、不審人物特定の方法は以下の手順で想定している。神奈川工科大学では、学生証アプリやモバイル教職員証に導入実績もあるため、このアプリを活用し、滞在許可が出ている教員や学生の情報を、サーバーに登録する。教職員は常に許可されており、学生は申請によって許可する。自律走行ロボットが構内を巡回し、文献[4]の手法などにより、不審人物である可能性があるものを発見した場合、その人物に BLE(Bluetooth Low Energy)を用いてアクセス要求を行う。アプリ側はロボットの ID などを事前にサーバーから取得して知っており、警備ロボットからのアクセス要求には応答する。ここで、警備ロボット側が判断するための情報を送信し、警備ロボットはサーバーとの通信により許可されているかどうかを判断する。

このようにして、不審人物だと判断された場合は、警備員に知らせ、警備員を呼ぶが不審人物発見までの流れである。

警備ロボットは、犯罪の抑制と不審人物の発見を目的としている。犯罪の抑制は警備ロボットが巡回していることを周りに周知させることで行う。本論文での対象は、悪意のない不審人物である。しかしロボット周辺には多数の人が存在することも想定され、できる限り自己位置を正しく通報するとともに、不審者とロボットの相対位置関係も明確にしておく必要がある。また、警備員が到着するまでの間に不審者が移動する場合には追従する必要もある。

警備ロボットは警備員に対して自己位置推定結果とその位置からの不審者候補の情報を警備員に通知する。通知は Wi-Fi または LTE を活用して送信する。

3. 関連研究

屋外では、位置推定の手法として多くの場合、GNSS が使用できる。GNSS では、マルチパスを考慮しなければならないが、カーナビのようなデバイスでは走行方向や速度と道路上といった制約条件から推定するが、どうしても同じような条件で満足するようなケースがあると間違えることがある。鈴木ら[7]は、RTK-GPS のような基準点を置かずにマルチパスが起きる環境下での位置推定精度の向上を行っている。赤外線全周映像 (IR-ODV: Infrared Omnidirectional Vision) を使用することで GNSS 受信機で除去することが困難なマルチパスの影響を除外し、精密単独測位 (PPP: Precise Point Positioning) を使用することで GNSS 受信機単体での高精度かつ信頼性の高い位置推定を実現する研究がされた。不可視衛生からのマルチパスを除外し、可視衛生のみの情報を基にマルチパスの影響を受けずに精度の高い位置推定を可能とした。

また木村ら[8]は、マルチパスが発生する環境下でオドメトリを使用した際、長時間の間 GPS が使えない場合、積算誤差に対応することはできないとして LiDAR と電子地図をマッチングさせることで対応した。ジャイロセンサとオドメトリのみ結果より高精度で走行させることが可能であった。

4. 基礎実験

現実に神奈川工科大学の中で、各種手法が単独でどの程度の精度がでるのかを確認するために基礎的な実験を行った。神奈川工科大学の全体図を図1に示す。大学構内では、広い空間 (中央広場) があるため、広い角度で複数の衛星を見つけることができ、そこでは GNSS が十分使用できると推定される。しかし、GNSS を使う際に建物の間や屋根

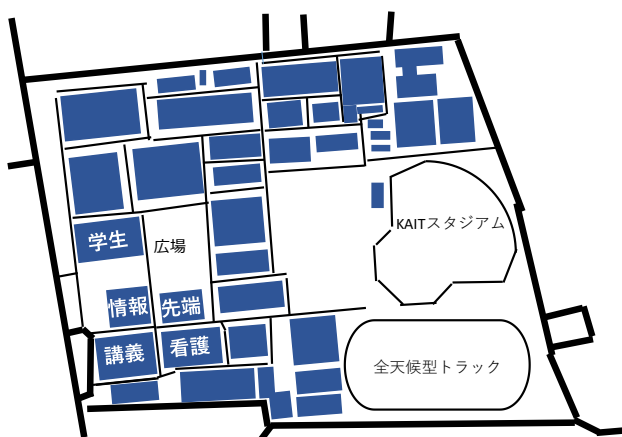


図1 神奈川工科大学の全体図

の下などではマルチパス問題や、広い角度での衛星の補足ができないなどの問題が起きる点が憂慮される。そのため実際に地図に位置情報が表示された際、位置が正しく表示された位置か、各種要因によって位置情報がずれた結果として表示された位置かを判断しなければならないことも問題点として挙げられる。

そのため GNSS 単独では正しい位置であるかどうかの判断が難しい。時系列で連続的に測位する場合にはある程度判断できそうであるが、ロボットのように必ずしも走行方向が一定でなく、頻繁に向きを変更するような場合には推定が難しい。

そこで、屋内での位置推定に用いることが多い BLE ビーコンを使用して位置測位を行う方法も基礎実験を行うこととした。ロボット搭載の BLE 機器が建物にある機器の情報を受信した際の RSSI を使い、距離を求めることで位置測位を行う。なお、BLE デバイスは学内には多数存在していることが予測できるが、決まった ID のみを対象とする予定で無関係の BLE は排除できると考えている。

一方、講義室などに Wi-Fi が設置されていることが多いため、それらが位置測位に使えることも基礎実験として実施する。

不審人物発見のための手段や、自律走行のために LiDAR を使用している。この LiDAR には測定範囲があるが、範囲内なら周辺の地形を測定し可視化することが可能である。しかし LiDAR の性能によって測定範囲が変わることが挙げられる。そのため、どの範囲まで利用可能かを基礎実験にて明らかにする。

4.1 GNSS の誤差の測定

GNSS を使用するにはマルチパスが発生しない場所で計測しなければ正しい位置情報を得ることができない。そのため大学構内での計測場所によっての誤差を調べるために基礎実験を行った。測定場所は、図 1 における講義棟と看護医療棟の間、情報学部棟壁沿い付近、情報学部棟と先端研究所の間の三ヶ所で計測を行った。計測を行った場所については、マルチパスが発生しやすい建物の間、建物の陰になる場所、建物からある程度離れている場所の三ヶ所で測定を行った。Android アプリ[9]を使用し、実際にいる地点 GNSS で表示される誤差はどれくらいあるかを測定した。講義棟と看護医療棟間で計測した結果、実際の位置と計測された位置では、30m ほど誤差が生じた。情報学部棟壁沿い付近で計測した結果、講義棟と看護医療棟の間ほどの誤差は生じなかったが 20m ほどの誤差が生じた。情報学部棟と先端研究所の間で計測した結果、建物からある程度離れた芝生上で計測したため、GNSS の誤差は約 10m 程であり、ほかの測定地点よりも誤差がかなり小さかったためマルチパスが発生しない場所であると推測される。マルチパスが発生しなくても誤差が生じるが建物から離れているので不審者を見つけやすい場所にいと推測できる。そのため大

学構内では、GNSS を使う際には、建物から十分離れていることと建物間でないことが判断できれば GNSS を使用することが可能である。

4.2 BLE ビーコン

屋外で BLE ビーコンがどのくらいの精度で使用できるかどうか検証するため、図 1 に示した情報学部棟入り口付近の柱に BLE ビーコンを設置し実験をした。実験で使った BLE ビーコンの設定を表 1 に示す。受信するデバイスの向きは、計測した場所に一番近い BLE ビーコンの方向にデバイスを向けて計測を行った。

計測した RSSI を基に距離を算出した。RSSI 大きさは以下で求めることができる。

$$RSSI = TxPower - 20 \times \log D \quad (1)$$

式(1)より D は、距離であり距離を求める式は以下のように変形することができる。

$$D = 10^{(TxPower - RSSI)/20} \quad (2)$$

実際の計測する環境によって値は、増減するが今回は考慮しない実験する。

配置した BLE ビーコンから 5m と 10m 離れた位置で 1 分間 RSSI を測定した。計測して得られた RSSI を基に、式

表 1 BLE ビーコンの設定

通信規格	Bluetooth 4.0
通信距離	50m
通信インターバル	900ms
対応規格	iBeacon
Txpower	-59dBm

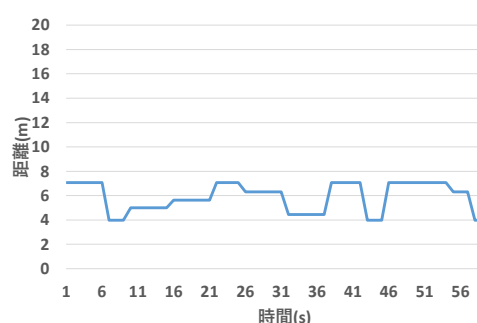


図 2 5m 地点での計測結果

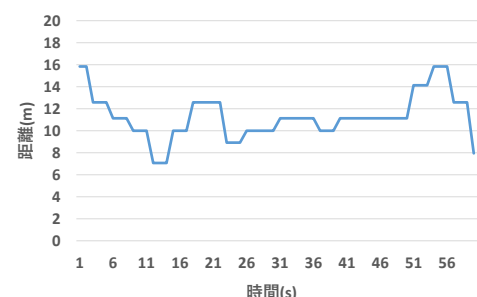


図 3 10m 地点での計測結果

(2)を使い距離を求めた。5m離れた位置で測定し、RSSIから得られた距離を図2、10m離れた位置で測定しRSSIから得られた距離を図3に示す。結果より5m離れた場所での計測結果の平均は、5.87mとなり、10m離れた場所での計測結果の平均は、11.30mとなった。測定距離が延びるにつれて誤差が大きくなっていく傾向がある。平均値の誤差では両方とも、1m程ではあったが、10m地点では最小値と最大値の差が10m程となるため5m以内の値を使用する。

4.3 施設周辺のWi-Fiの計測

情報学部棟周辺でWi-Fiが位置測位に使えるかどうか判断するために周辺のAP(アクセスポイント)を計測した。測定場所は、講義棟と情報学部棟の間、情報学部棟と先端研究所の間、情報学部棟と学生サービス棟の間の3か所で計測した。

講義棟と大学情報学部棟間では、講義室で使用するAPが多く表示されたほか、情報学部棟のフリーの無線LANのAPが表示された。情報学部棟と先端研究所の間では、情報学部棟のフリーの無線LANのAPが表示されたほか、研究室で使われているWi-FiのAPが多く表示された。情報学部棟と学生サービス棟の間では、情報学部棟と先端研究所の間の計測結果と変わりがなかった。情報学部棟周辺では、研究室で使われているAPが多く毎回計測できる保証がないことや、BLEビーコンと同様にRSSIを使って距離を求める方法もあるが、Wi-Fiの配置場所は、公開されていないため距離を計算することは難しいと判断した。

4.4 LiDARの性能調査

LiDARの性能調査のため基礎実験を行った。使用したLiDARは、RPLiDAR A1M8を使用し、性能を表2に表す。計測でキス距離が最大直径12m程なので、同じぐらいの幅の広さである研究室で計測した。計測した結果を図4に表す。上方面と右方面には壁が近くにあるためはっきりと点群で表示された。近くの物体は、はっきり表示されるが遠くなっていくほど点の間隔が薄れる。また障害物があるとその先の物は表示されない。右上は、外につながる通路になっているが正面の壁に阻まれているため奥の通路の形状は分からず、遠いため点群も少ししか表示されていない。また右下方向にはなにも表示されることはなかったが大きなモニターがあったため、光が反射しなかったためである。

測定結果より、遠くのもののほど点群が広がってしまうため広範囲の測定は不可能だが、物体までの距離を測定することは可能なので施設から離れているかを判断に利用する。

5. 提案手法

基礎実験の結果から位置測位をする手法を提案する。大学構内全体は広いので、いくつかの方法を組み合わせることで全体の位置測位を行う。基本的には屋外であるためGNSSを利用する。そのため、GNSSの精度が低い場所、即ち建物の近くなどでないことを確認する。そのために学内

表2 LiDARの性能

レーザ	360° 無指向性
スキャン周波数	5.5-10Hz
サンプル周波数	4000 - 8000Hz
距離の範囲	0.15 - 12m

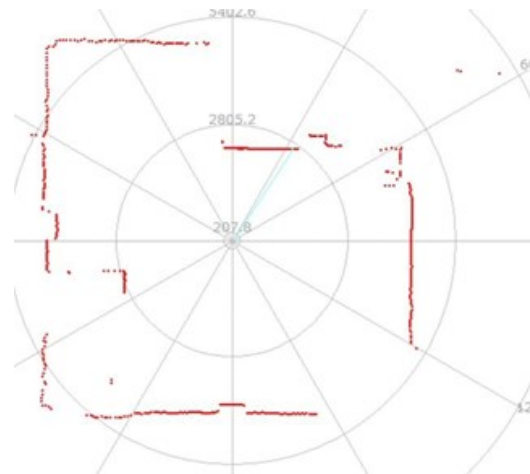


図4 研究室の形状

のBLEビーコンや、LiDARによる建物形状の認識を活用しおおよその場所を特定し、GNSSが利用できるかどうかを判定する。

まず、不審人物を見つけた際、配置されているBLEビーコンのRSSIを測定する。RSSIを測定した際に距離を求め5m以内であった場合には三点測位で位置測位を行い、5m以内ではない場合搭載されている2D-LiDARを使って周辺の地形を測定する。周辺に何か表示されている場合は建物付近にいると判断できるため2D-LiDARとBLEビーコンのRSSIから位置を絞り込む。何も表示されない場合は建物から十分離れているためマルチパスが発生しない場所と判断できるためGNSSを使い位置測位を行う。

具体的には予めどこであれば精度がでるのかを図5に示したように様々な場所ごとにできるだけ細かく測定しておく。それとともに、その場所がマルチパスや衛星の見える数が少ないなどの影響がないことを確認するために、BLEおよびLiDARの情報で確認する。一方、影響があることが確認できると、BLEの情報や建物の形状を元に場所を判断する。LiDARを使用する際には、建物のガラスはカーテンの有無や屋内の机の配置の影響が大きいため、柱の形状を利用して場所を把握する。しかし、同一の構造が続くような場合もあるため、BLEビーコンの強さである程度の位置を絞ったうえで、LiDARを用いて位置を正確に把握するという手法をとる。

6. 実験

提案した手法を基に示した情報学部棟周辺 26 か所で計測した。図 5 の黄色で示してある場所は測定地点であり、赤色で示している場所は、BLE ビーコンを配置した場所を表しており、全体で 6 ヶ所に配置し実験した。また青色は建物や柱、ベンチなど通過することができない範囲を表している。

1 分間 RSSI を測定し、その後 2D-LiDAR を使って周辺の地形を測定した。RSSI を計測する際、方角によって測定地点から一番近い BLE ビーコンの方向にデバイスを向けて計測した。

2D-LiDAR で測定する際、1m で地面と平行になるように計測した。また実際に位置測位を行う際に、自律ロボットの進行方向により LiDAR の向きが状況によって変わる。同じ場所で計測した場合でも表示される物体の位置が変わってしまう。磁気センサを搭載すれば方角などがわかるが今回は、わかりやすくするために 2D-LiDAR で測定した際、向きは先端技術研究所や看護医療棟方面が上に表示され、講義棟や情報学部棟方面が下に表示される方角で計測した。

7. 実験結果

7.1 RSSI の測定結果

RSSI を測定し、5m 以内の大きさが表示された場所は、計測地点 2,4,6,10,11,16,25 であった。実際に BLE ビーコン

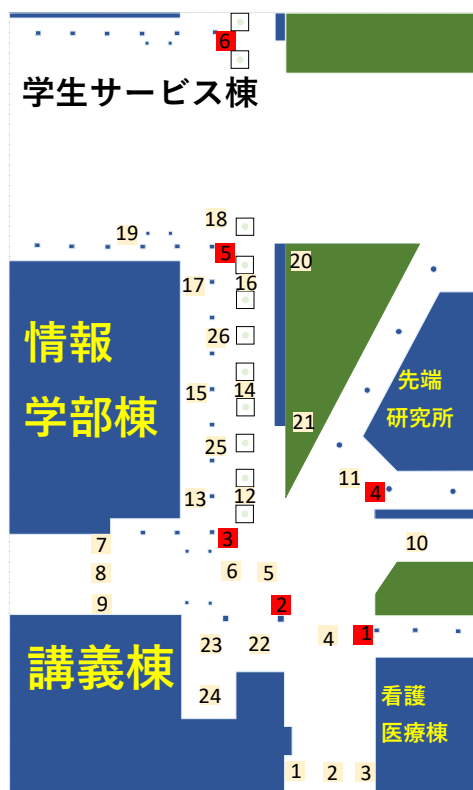


図 5 測定場所

から 5m 以内の距離である場所は、計測地点 4,5,6,11,22 であるため、計測地点 2,10,16,25 が実際と違う結果になった。また計測地点 5,22 は 5m 以内の測定地点であったが RSSI が 5m 以内の大きさが計測されることはなかった。計測地点 22 は、間近な BLE ビーコンではなく、BLE ビーコン 4 の値が大きく表示された。

7.2 LiDAR を使った計測結果

LiDAR を使用した周辺地形の計測の 2D-LiDAR で計測した結果を区分けしたものを表 3 に表す。同じような地形が計測された場所は、計測地点 12,14,16 と計測地点 13,17 と計測地点 25,26 の 3 通りである。計測地点 13,15,17 では、ガラスの透過率が高いため LiDAR で計測されない場所が多くあった。計測地点 11,20,21 は、計測場所が傾斜であった。計測地点 11 は、問題なかったが計測地点 20,21 では、傾斜の角度の都合上で地面が表示されることがあった。それ以外の計測場所は、特徴的な地形だったため問題なかった。今回は、周辺に何も計測できない場所はなかったため GNSS は使用しなかった。計測地点 20,21 は、地面以外に計測されるものがなく建物から十分離れており、GNSS で計測した際にも、マルチパスが発生しない場所であった。

7.3 BLE ビーコンを利用した三点測位

実際の距離が 5m 以内で RSSI の大きさが 5m 以内の大きさが表示された計測地点 4,6,11 の三ヶ所で三点測位をした。計測した結果を計測地点 4,6 では、位置測位をした範囲内に表示された。計測地点 11 では、位置測位をした範囲内に表示されなかったが、誤差は、最小で約 7m ほどであり、最大でも誤差が 10m 程の精度だった。

7.4 BLE と LiDAR を組み合わせた位置測位

同じような地形を測定した地点では、近くにある二つの BLE ビーコンの RSSI を使って判断した。1 分間 2 つの BLE ビーコンを計測し平均を求めた。結果を表 4 に表す。計測地点 12,14,16 と計測地点 13,17、計測地点 25,26 の三通りで行った。情報学部棟周辺だったため情報学部棟の両端に設定してある BLE ビーコン 3 と BLE ビーコン 5 の RSSI を

表 3 LiDAR を使用した計測結果

	計測地点		
同じ形状の地形	12,14,16	13,17	25,26
傾斜	11,20,21		
それ以外	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,15,18,19,22,23,24		

表 4 RSSI の比較

	計測地点12	計測地点13	計測地点14	計測地点16	計測地点17	計測地点25	計測地点26
BLEビーコン3	-77.63	-85.03	-89.72	-89.25	-92.18	-86.58	-93.78
BLEビーコン5	-89.87	-93.57	-91.42	-69.32	-81.71	-88.60	-82.96

使用し 1 分間の平均を求めた。結果を表に示す。計測地点 12,13,25 では, BLE ビーコン 3 が大きく表示され, 計測地点 16,17,26 では, BLE ビーコン 5 が大きく表示された。また両方の BLE ビーコンが同じ距離である計測地点 14 では, RSSI の差は, 2dBm 程度であった。

8. おわりに

屋外で行う位置推定の手法について様々な方法を組み合わせる手法を提案し実験した。施設の周辺では特徴的な地形が多かったため, 位置推定しやすいが同じ形状の地形の場所では BLE ビーコンを組み合わせる位置推定したが, どちらの BLE ビーコンに近い判断するだけだったため今後精度を上げていく必要がある。また計測された RSSI が実際の距離から十数メートルほど離れているにもかかわらず 5m 以内の大きさが表示される計測場所があったため, 今後 BLE ビーコンの設定を調整していく必要がある。

LiDAR に関しては傾斜では地面が表示されてしまうことや情報学部棟の壁沿いではガラスの透過率の影響で LiDAR で表示することができなかった壁があるので今後の課題である。

今後, 自律走行台車の 3D-LiDAR から複数の高さ方向の情報を取得した場合の計算時間評価や, 搭載する地図を利用する場合の計算時間評価をもとに精度の向上を図る予定

である。

参考文献

- [1] 浅間 一, “ロボットの自律性,” 学術の動向, Vo.25, No.5, pp.28-29 (2029)
- [2] ZMP, “日本初! 物流分野での配送ロボットの活用に向けた公道走行実証実験の動画を公開,”
https://www.zmp.co.jp/news/pressrelease_20210122 (2021/4/12 参照)
- [3] 神奈川工科大学, “KAIT モビリティリサーチキャンパスの構築”, <https://www.kait.jp/topics/atrc/report07.html> (2021/4/12 参照)
- [4] 永井悠人, 澤野雄哉, 鈴木孝幸, 清原良三, “ロボットによる構内巡回時の不審者判定手法,” 情報処理学会研究報告 2020-CDS-28, No.5, pp1-6, 2020-09-22.
- [5] 神奈川工科大学, “Kait Walker,” <https://www.kait.jp/kaitwalker/look.html> (2021/4/19 参照)
- [6] 永井悠人, 澤野雄哉, 鈴木孝幸, 清原良三, “2D-LiDAR による人物発見手法の一検討,” 情報処理学会研究報告 2020-DPS-185, No.1, pp. 1-6, 2020-12-14.
- [7] 鈴木太郎, 北村光教, 天野嘉春*・橘詰匠* “GNSS マルチパス波判別を複合した精密単独測位による屋外移動ロボットの位置推定”, 2012 年 48 巻 7 号 pp. 399-405
- [8] 木内健太郎, 黒田洋司, “LiDAR と電子地図を用いたマッチングによる積算誤差の軽減,” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2014, _2A2-R06_1-_2A2-
- [9] GPSTest, ver3.8.4,
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.android.gpstest&hl=en_US&gl=US