

講演 5. LiDAR センサを活用した物体の配置認識による 位置検知手法の検討

交通システム研究部

※望月 駿登

工藤 希

山口 大助

1. はじめに

鉄道における列車制御システムは、軌道回路等の地上装置を用いることにより列車の位置検知を行っている。一方、地上装置の保守や点検を行う際には、現地に作業員を派遣する必要があるため、地上装置の維持と更新は鉄道事業者の大きな負担となっている。加えて、少子高齢化に伴い作業員の確保が困難となることが予想される。よって、鉄道事業社への負担を軽減するためには、地上装置を簡略化することにより、装置の保守や点検にかかる時間を削減することが有効と考えられる。そこで、筆者らは地上装置を簡略化する方法として、地上で行っている列車の位置検知を車上で行う方法を考案した。具体的には、太陽光等の外乱に強いアクティブセンサである LiDAR(Light Detection And Ranging)センサを用いて、地上に設置した物体の配置を車上で認識することにより、列車の位置を把握する手法と、この手法の実現に向けた列車の走行による影響を抑制する手法を提案した¹⁾。しかし、物体の配置を認識する手法については未検討であった。

本研究では、LiDAR センサの出力を用いて物体の配置を認識する手法について検討し、実車による実験結果をもとに配置の認識手法の実現可能性を確認したので本稿にて報告する。

2. LiDAR センサを用いた列車の位置検知手法

2. 1 LiDAR センサ

LiDAR センサは、本体からレーザを照射し、物体からの反射光を受光し、照射から受光までの時間で距離を計測する。本研究で使用したセンサは、レーザを照射した時間、物体からの反射光の強さ、及び LiDAR センサを原点とする物体までの 3 次元の位置を一つのデータのまとまりとして連続的に出力することができるものである²⁾。

2. 2 位置検知手法の概要

図 1 に列車の位置検知手法³⁾の概要を示す。まず、緯度・経度等の位置情報と紐付けられた配置(以下、「配置パターン」という)に基づき、軌道内に物

体を設置する。ここで、設置する物体は、光が入射した際に光源に向かって反射する機能を有するもの(以下、「ターゲットマーカ」という)とする。次に、車に取り付けた LiDAR センサが検知したターゲットマーカの位置の座標(以下、「LiDAR 検知座標」という)により、配置パターンを認識する。そして、その認識した配置を車上のデータベースと照合して得た位置情報と、LiDAR センサからターゲットマーカまでの距離から列車の位置を検知する。

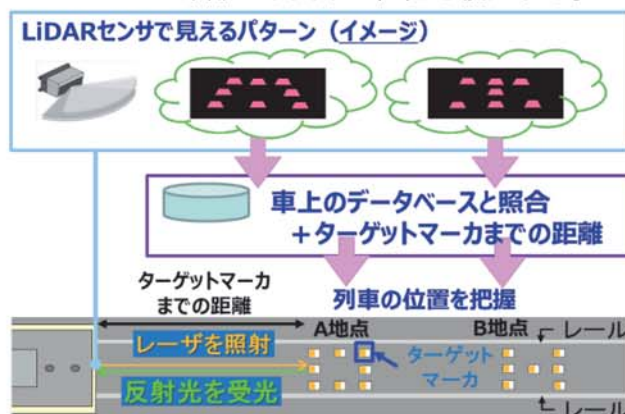


図 1 位置検知手法の概要

3. 配置パターンの認識手法

3. 1 配置パターンの認識の方針

本研究で使用する LiDAR センサが全ての検知範囲にレーザを走査するまでには数秒の時間を必要とする。そのため、検知範囲の LiDAR 検知座標を用いて配置パターンの認識を行う場合、数秒前からの LiDAR 検知座標を保持する必要がある。この時間を残存時間とする。ここで、残存時間内に列車が走行することにより、ターゲットマーカが相対的に移動することによる LiDAR 検知座標への影響については、列車の走行距離を用いて補正することとした¹⁾。

残存時間内において、LiDAR センサは複数のターゲットマーカを検知することに加え、一つのターゲットマーカを複数回検知する。よって、図 2(a)に示すようにターゲットマーカを配置した場合、LiDAR センサが検知した結果は図 2(b)のようにな

る。したがって、配置パターンを認識するためには、残存時間内の LiDAR 検知座標をターゲットマーカごとに分類し、その後に分類した LiDAR 検知座標をもとに配置パターンを認識するという手順で実施する。

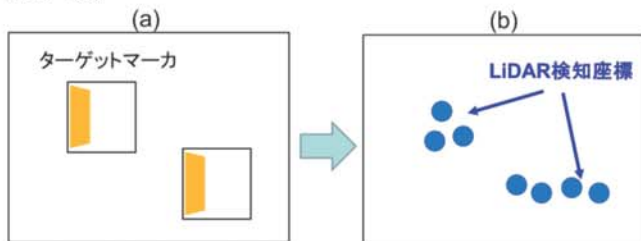


図2 ターゲットマーカと LiDAR 検知座標の関係
(a) ターゲットマーカの配置
(b) LiDAR 検知座標の取得例

3. 2 LiDAR 検知座標の分類

図3に示すように、LiDAR 検知座標をターゲットマーカごとに分類するために、以下を行う。

- 1) 個々のターゲットマーカごとに LiDAR 検知座標(図3の青色の点群)を分類する距離(以下、分類距離という)を設定する。
- 2) 残存時間内の LiDAR 検知座標から一つの座標を任意に選出する。
- 3) 選出した座標から分類距離(図3の緑円の半径)以内の全ての LiDAR 検知座標を同一のターゲットマーカから取得した LiDAR 検知座標として分類する。
- 4) 分類した全ての LiDAR 検知座標に対して3)を行う。
- 5) 全ての LiDAR 検知座標が分類されるまで、分類されていない LiDAR 検知座標から一つの座標を選出して3)と4)を繰り返す。
- 6) 分類した LiDAR 検知座標のまとまり(図3の紫色と水色)ごとに LiDAR 検知座標を平均化し、その平均化した座標をターゲットマーカの座標として推定する(図3の赤色)。
- 7) 分類した LiDAR 検知座標のまとまりごとに6)を繰り返す。

なお、LiDAR センサの検知誤差やターゲットマーカの間隔等によっては、ターゲットマーカの座標を誤推定する場合がある。具体的には、①複数のターゲットマーカから取得した LiDAR 検知座標を一つのターゲットマーカから取得した LiDAR 検知座

標として分類する場合(図4)と、②一つのターゲットマーカから取得した LiDAR 検知座標を複数のターゲットマーカから取得した LiDAR 検知座標として分類する場合(図5)である。①に関しては、LiDAR センサの検知誤差を考慮した分類距離を定めるとともに、複数のターゲットマーカを一つのターゲットマーカとして分類しない間隔でターゲットマーカを配置して誤推定を抑制した。また、②に関しては、①に加えて3.4節で述べるターゲットマーカが存在するかを判定する範囲を設定した後に、配置パターンを認識することで誤認識を抑制した。

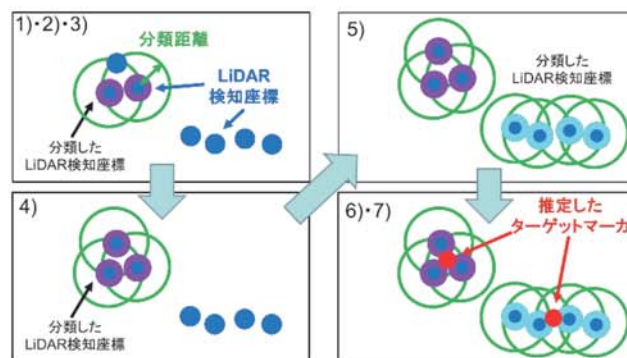


図3 LiDAR 検知座標の分類

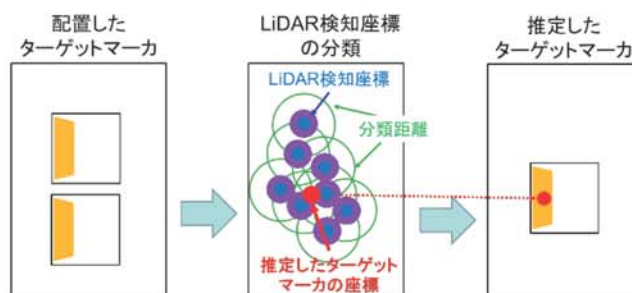


図4 ターゲットマーカ誤推定①

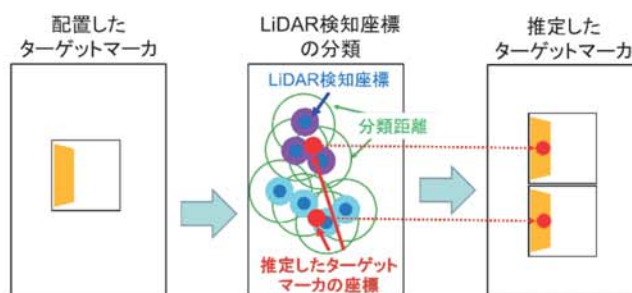


図5 ターゲットマーカ誤推定②

3. 3 分類距離の設定

図6に示すように、使用した LiDAR センサはまぐらぎ方向にレーザを走査することで物体を検知している。よって、LiDAR センサがターゲットマ

一カを検知した後の次の検知では、ターゲットマーカの大きさによっては同一のターゲットマーカを検知する。本研究では、残存時間内の LiDAR 検知座標を同一のターゲットマーカごとに分類するために、LiDAR センサが検知する間隔に着目して 3.2 節で用いている分類距離を設定した。具体的には、式(1)に示すように、分類距離($d[m]$)は隣接した二つの検知位置の距離と LiDAR センサの検知誤差($e[m]$)との和以上に設定するとした。ここで、まくらぎ方向における LiDAR センサの角度分解能を $\alpha[\text{rad}]$ 、LiDAR センサからターゲットマーカまでの距離を $L[m]$ とする。

$$d \geq 2L \tan \frac{\alpha}{2} + e \dots (1)$$



図6 分類距離

3.4 配置パターンの認識

本研究での配置パターンは、長方形の形状、かつその形状の四隅にターゲットマーカを配置することを前提とする(図7(a))。配置パターンを認識するためには、まず、配置パターンが軌道内のどの範囲にあるかを検知する必要がある。そのために、推定したターゲットマーカの座標間の距離が配置パターンの対角線に相当する組を選定し、選定に使用した四つのターゲットマーカの座標から配置パターンの四隅を決定する(図7(b))。次に、配置パターン内で配置可能なターゲットマーカの進行方向とまくらぎ方向の数からターゲットマーカの有無を判定する範囲を設定する(図7(c))。この範囲を用いることで、3.2 節②で示した一つのターゲットマーカから複数のターゲットマーカを推定したときの配置パターンの誤認識を抑制する。そして、推定したターゲットマーカの座標とこの範囲とを照合し、各範囲内に推定した座標が存在する場合はその範囲にターゲットマーカが存在するとして、配置パターンを認識する(図7(d))。

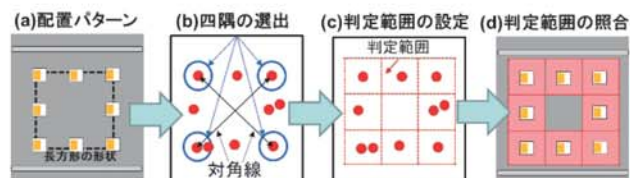


図7 配置パターンの認識

4. 実車による実験

配置パターンの認識手法の実現可能性を確認するため、路面電車において実験を行った。

4.1 LiDAR センサの仮設と配置パターン

本研究では、LiDAR センサは軌道面から 12.5 度下向き、かつ高さ 1.87m の車内に仮設した。また、図8に示すように、配置パターン内に設置可能なターゲットマーカの数、進行方向とまくらぎ方向で各4個とし、ターゲットマーカの間隔は、進行方向に 0.4m、まくらぎ方向に 0.3m とした。

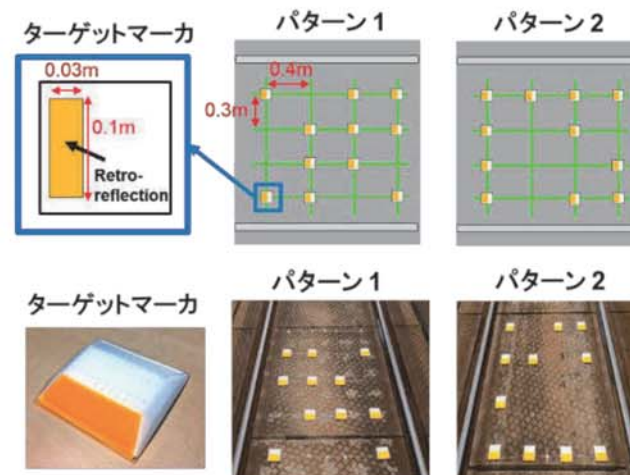


図8 配置パターン

4.2 配置パターンと認識範囲

図9に示すように、レーザの照射距離が長くなるとレーザの照射範囲が広がる。加えて、本研究で使用した LiDAR センサは通常の LiDAR センサに比べレーザの拡がり大きいいため、LiDAR センサとターゲットマーカとの距離が長い場合は、一つのレーザが複数のターゲットマーカに同時に照射する。これにより、出力する LiDAR 検知座標は複数のターゲットマーカを同時に検知した座標となる。よって、配置パターンを認識する際には、複数のターゲットマーカにレーザが照射しない範囲で検知した LiDAR 検知座標を用いる必要がある。本研究では、4.1 節で示した条件とレーザの拡がりを考慮

し、残存時間内の LiDAR 検知座標を平均化した座標が、進行方向に 4.6~6.0m の範囲にある場合に配置パターンの認識を行うこととした。

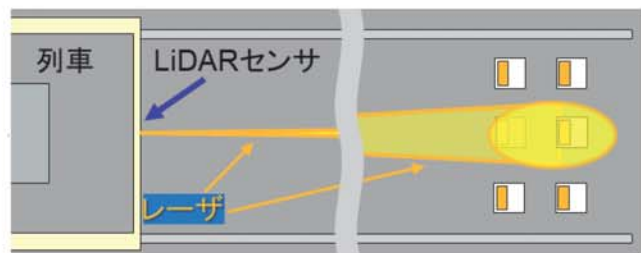


図9 レーザの拡がりによる同時検知例

4. 3 パラメータ設定

表1に示すように、図8の二つの配置パターンに対して、車両の速度が速い場合(40km/h程度)と遅い場合(10km/h程度)で計四つの条件で実験を行った。また、0.02秒の周期で配置パターンを認識することとした。

表1 配置パターンの通過速度

配置パターン		通過速度
パターン1	(a)	10.1km/h
	(b)	38.3km/h
パターン2	(c)	12.0km/h
	(d)	39.5km/h

5. 実験結果

配置パターンの認識手法の実現可能性を確認するために、実験の際に取得した残存時間内の LiDAR 検知座標(図10)に対して配置パターンの認識手法を適用した結果を図11に示す。本図の推定したターゲットマーカの座標(同図の赤丸)と図8の配置パターンより、3.2節①の誤推定が生じていないことを確認した。(b)(d)においては、3.2節②の誤推定が生じているが、ターゲットマーカが存在する範囲(同図の赤枠)を設定することにより、配置パターンの誤認識を抑制できることを確認した。さらに、配置パターンを認識する範囲(4.6~6.0m)では、どの周期においても図8に示す配置パターンを認識できることを確認した。

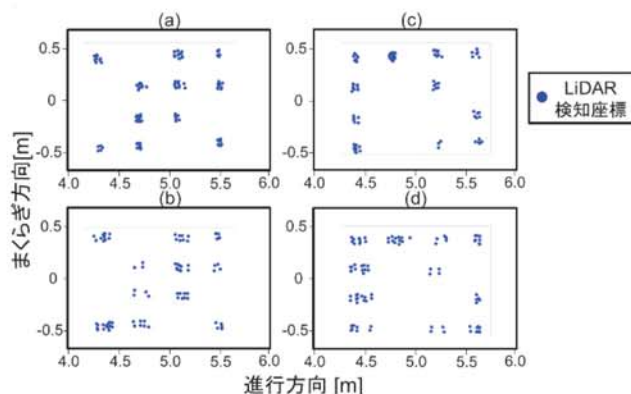


図10 LiDAR 検知座標

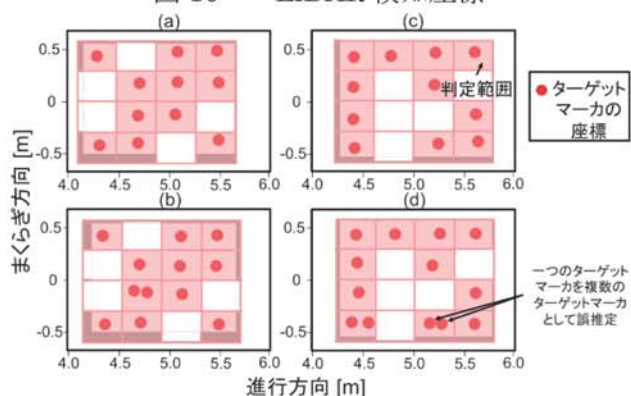


図11 配置パターンの認識結果

6. まとめ

地上装置を簡略化するための車上での位置検知手法として、LiDAR センサを用いて車上で配置パターンを認識する方法を提案した。また、提案手法の実現可能性を確認した結果、40km/h程度までの速度においては、配置パターンを認識できることを確認した。今後は、より高速度での走行における配置パターンの認識の精度について確認したい。

謝辞

本稿は広島電鉄株式会社との共同研究の成果の一部をまとめたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 望月駿登ほか、“LiDAR センサを利用した列車の位置検知手法の検討”、交通研フォーラム 2023 講演概要集、pp.25-28
- 2) 代理店メーカーサイト
http://www.kobeseiko.co.jp/Livox_Horizon.html
- 3) 山口大助ほか、“LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法に関する検討”、交通研フォーラム 2022 講演概要集、pp.17-20