

講演 4. LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法に関する検討

交通システム研究部

※山口 大助

長谷川 智紀

一柳 洋輔

望月 駿登

八木 誠（客員研究員）

1. はじめに

鉄道ではこれまで地上主体の設備である軌道回路等を用いて列車の位置検知を正確に行う列車制御システムによって安全を確保してきたが、その維持や更新に係るコストが大きな負担となっている。これを解決する手段として、軌道回路によらない車上主体型の列車位置検知システムが期待されている。その一つに米国の GPS (Global Positioning System) や日本の準天頂衛星等に代表される衛星測位システム (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) があり、交通安全環境研究所では鉄道分野における衛星測位の精度評価に取り組んできた¹⁾。

衛星測位は複数の衛星から発信される電波を受信して現在位置を算出するが、トンネル等の電波受信が難しい場所では測位できず、高層ビル等が密集する場所では建物に反射した電波を受信すること（マルチパス）で測位精度の低下が懸念される。このような地点では衛星測位を補完する他の位置検知手法が必要である。速度発電機による補完などが考えられる中で、筆者らは LiDAR (Light Detection And Ranging) センサに着目し、軌道側にマーキングして固有地点をコード化の上、LiDAR センサでコードを読み取る手法を考案した。実車による実験を通じて本手法の実現可能性を検討したので報告する。

2. LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法

LiDAR センサとは、レーザ光をパルス状に照射し、物体からの反射光を受光することで物体までの距離や方向を測定するセンサである。交通安全環境研究所では、自動車の分野で採用が進んでいるセンサ技術のうち、検出距離や検出精度、耐環境性能で有利な LiDAR センサが今後、鉄道分野へ活用され得ると考えている²⁾。そこで、筆者らは他の目的で使われるであろう LiDAR センサの共用を想定して、LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法を考案した。本手法

(以下、提案手法) の概要を図 1 に示す。

LiDAR センサを車上側、ターゲットマーカを軌道側に設置する。軌道側はターゲットマーカを複数個使用し、固有地点に応じてターゲットマーカの並べ方を変えることで固有地点をコード化する。これによって固有地点ごとに ID を付加でき、絶対位置の情報である緯度・経度や起点からのキロ程を ID に持たせることができる。LiDAR センサは物体からの反射光の強さ（輝度）を検知できるので、提案手法ではこの機能を利用して、ターゲットマーカに向けてレーザ光を照射し、ターゲットマーカからの反射光の輝度を測定してコードを読み取る。あらかじめ固有地点とコードを紐付けたデータベースを車上側に装備し、LiDAR センサが読み取ったコードをデータベースに照合することで、固有地点の特定が可能となる。

LiDAR センサが照射したレーザ光は周辺の様々な物体からも反射してくるため、周辺物体とターゲットマーカが同程度の反射では LiDAR センサでターゲットマーカを認識することが難しい場合もある。そこで、LiDAR センサから照射したレーザ光が確実に反

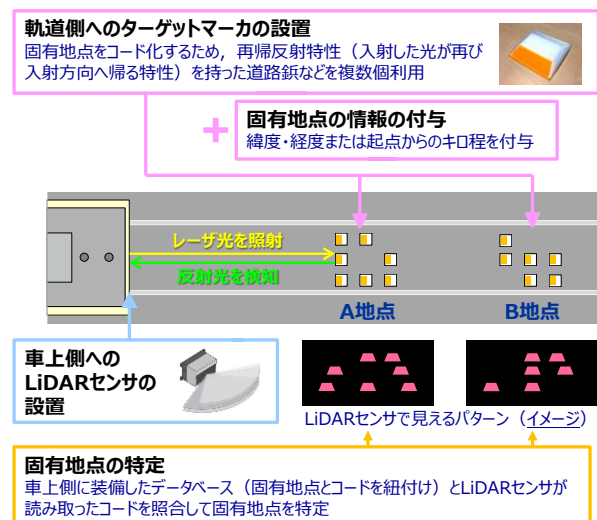


図1 LiDAR センサを利用した衛星測位の補完手法

射するよう、ターゲットマーカには再帰反射性能を持った物体（道路鋸など、以下、再帰反射体）を使用する。再帰反射体からの反射光は強く、輝度が大きくなる。この輝度の検出に閾値を設けることで、ターゲットマーカによるコードの認識率を向上させる。

筆者らは提案手法の利用として以下の二つを想定している。

- 列車の走行位置は、基本は衛星測位によって把握し、衛星測位の測位精度が低下する区間やトンネルなど電波受信が困難で測位が不可となる区間ではターゲットマーカを設置して、提案手法によって衛星測位を補完
- 衛星測位から得られる列車の速度³⁾を利用して列車の走行距離を推算し、LiDAR センサがターゲットマーカを検知したときの列車とターゲットマーカの間を測距するとともに、提案手法によって固有地点を特定して、推算した走行距離を補正

3. 実車による実験

提案手法の実現可能性を検討するため、広島電鉄株式会社のご協力を得て実車による実験を行った。

3. 1. 実験に使用したLiDAR センサ

交通安全環境研究所が所有する LiDAR センサ²⁾がターゲットマーカを検知できるかを研究所内で予備的に実験したところ、レイヤ数が少ないために検知できないことが分かった。そこで、レイヤ数を多く有する、またはそれに相当する LiDAR センサを調べた結果、今回の実験では表 1 に示す諸元の LiDAR センサを使用した。この LiDAR センサは非反復走査と呼ばれる独特なスキャンが特徴の機種⁴⁾で、露光時間 (Integration Time) が 0.1 秒の場合はレイヤ数 64 本の LiDAR センサと同等の性能を有し、1 秒の場合は FOV (Field Of View: 視野角) 内のほぼ 100% を検知エリアとする性能を有する。反射光の輝度は 0~255 の数値で記録され、そのうち再帰反射体からの反射光の輝度は 151~255 の数値で記録される。本稿ではこの

表 1 実験で使用した LiDAR センサの主な諸元

レーザー波長	905nm
安全等級	クラス1 (IEC60825-1:2014)
範囲 (@100キロルクス)	90m @反射率10% 130m @反射率20% 260m @反射率80%
FOV	81.7° (水平) × 25.1° (垂直)
データサイズ	240000点/秒 (480000点/秒:デュアルリターン)
FOVカバー率	60% @0.1秒, 98% @0.5秒

数値に基づいて実験結果を整理した。

3. 2. LiDAR センサの車両への取り付け

実験では図 2 に示すように、運転席から前方に向かって左側に LiDAR センサを軌道面から高さ 1870mm、車体中心から 279mm の車内に仮設した。

3. 3. センサ取付向きと検知エリアの関係

LiDAR センサの取付向き (軌道面に対する取付角度) によってレーザー光の照射状況が変化し、ターゲットマーカを検知できるエリアが変化する。そこで、取付向きは 12.5 度と 20 度の 2 条件を設けた。前者はターゲットマーカだけでなく先行する電車も検知することを狙って設定し、後者は車両に極力近い側で検知できるかを確認するために設定した。図 3 に LiDAR センサの取付向きと検知可能エリアの関係を示す。このエリアの線路方向の広さは図中の距離 L と D によって示される。LiDAR センサ取付高さは $H=1.87\text{m}$ 、今回使用した LiDAR センサの FOV は垂直方向が 25.1 度である。取付向きが 12.55 度となると、FOV の上端が水平線と平行になるため、幾何学計算により検知可能エリアは電車先端 $L=4.00\text{m}$ より奥で、遠方は LiDAR センサの諸元の 260m となる。取付向き 20 度の場合は LiDAR センサの垂直方向 FOV の半分である 12.55 度よりも大きいため、幾何学計算により $L=2.93\text{m}$ 、 $D=11.37\text{m}$ となり、検知エリアの広さは電車先端より 2.93m~14.30m の部分となる。

3. 4. 車庫内での実験とその結果

初めに、千田車庫において実験を行った。ターゲットマーカの配置 (パターン I) を図 4 に示す。広島電

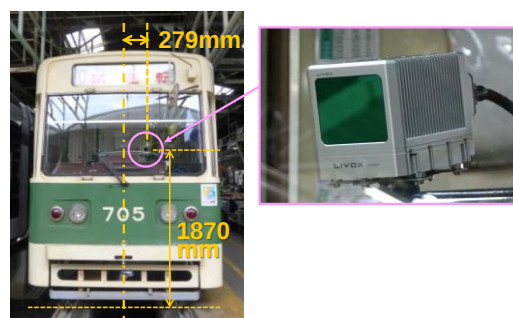


図 2 LiDAR センサの仮設の様子

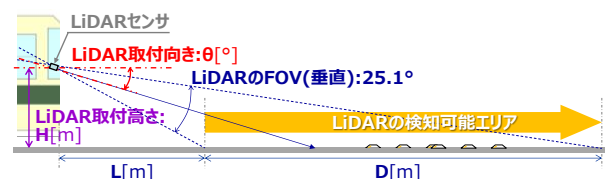


図 3 LiDAR センサの検知可能エリア

鉄は標準軌(1435mm)を採用しており、この配置は実用を想定して250mm間隔の格子状にターゲットマーカである再帰反射体(道路鋸)を複数並べ、所々再帰反射体を置かないことで固有地点のコードをイメージしている。停車時はターゲットマーカの最前列(車両から見て一番手前の列)を車両先端から5m、10m、15m先に置いた。停車時の検知結果を図5に示す。LiDAR センサ取付向きが20度の場合は15m先は検知エリアを超えるため示していない。グラフの横軸はまくらぎ方向の位置で、ゼロはLiDAR センサの中心に相当する。グラフの縦軸は線路方向の位置で、ゼロはLiDAR センサの先端に相当する。図中の青い点は再帰反射体からの反射光を検知した点を示している(以下同様)。露光時間は0.1秒としている(以下同様)。本結果より、ターゲットマーカを5m先に置いたときは概ね検知し、コードを読み取れることが分かる。一方、車両から離れるにつれて反射光の検知点数が減り、ターゲットマーカの配置通りには検知できず、コードを読み取れないことが分かる。本結果より、実験で使用したLiDAR センサは車両から近い検知エリアの方がコードを読み取りやすいといえる。

低速走行時(8km/h 程度)の検知結果を図6に示す。同図(a)はLiDAR センサ取付向き12.5度の場合、(b)は20度の場合である。本結果より取付向きが12.5度の場合はターゲットマーカを概ね検知し、コードを読み取れることが分かる。一方、取付向きが20度の場合は、本来はターゲットマーカを置いていないところで検知している結果(図中の実線枠)や、逆にターゲットマーカを置いていないところで検知していない結果(図中の点線枠)となっている。このことから、実験で使用したLiDAR センサは取付向き12.5度の方がコードを読み取りやすいといえる。

3. 5. 営業線での実験とその結果

次に、営業線である宇品線海岸通電停～元宇品口電停間において実験を行った。車庫内での実験の結果を踏まえてLiDAR センサの取付向きは12.5度とした。仮設の様子は図2と同様である。ターゲットマーカの配置は図4で示したパターンIのほか、図7に示すパターンIIを設定した。

パターンIの検知結果を図8に示す。電車通過速度は25km/hである。本結果より、営業運転速度での走行時はターゲットマーカの配置通りには検知できていないことが分かる。これは特に線路方向が顕著であ

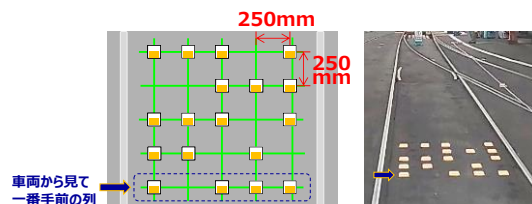


図4 ターゲットマーカの配置 (パターンI)

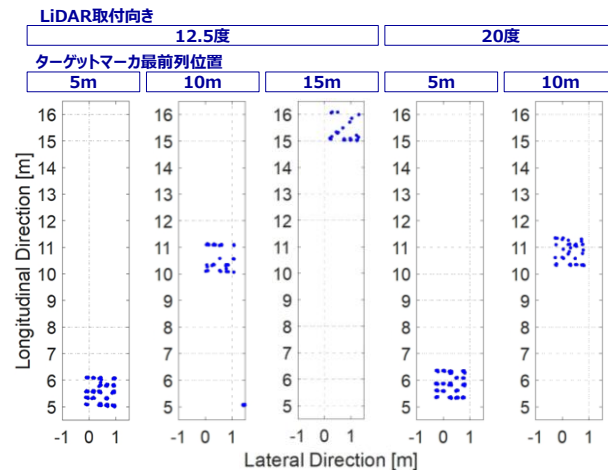
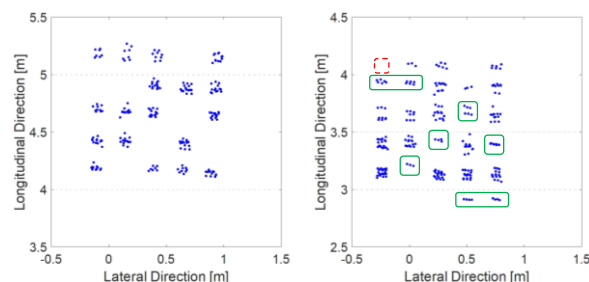


図5 ターゲットマーカの位置によるLiDAR センサの検知結果の違い



(a) 12.5 度

(b) 20 度

図6 LiDAR センサによる検知結果 (パターンI、車庫内)

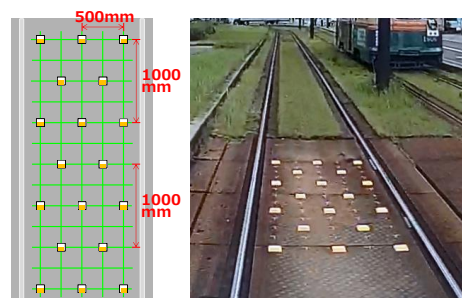


図7 ターゲットマーカの配置 (パターンII)

る。一方、まくらぎ方向のターゲットマーカについては重複せずに検知できていることが分かる。

パターンIIの検知結果を図9に示す。電車通過速度は34km/hである。同図(a)は検知結果であるが、パターンIと同様に、ターゲットマーカの配置通りには検知できておらず、特に線路方向が顕著であることが

分かる。本結果を詳しく見たところ、同図(b)に示すように、線路方向に対して点群が概ね実線で囲んだグループと点線で囲んだグループの二つに分けられる。これは走行していることによって二重に検知されたためと考えられる。一方、まくらぎ方向については重複せずに検知できていることが分かる。

3. 6. 実験結果を踏まえた提案手法の利用

実験で使用した LiDAR センサを取付向き 12.5 度で図 2 のように設置し、標準軌の路面電車の走行速度 (40km/h 以下) で使用する場合は、図 10 に示すターゲットマーカの配置が適当と考えられる。この図において、線路方向にはターゲットマーカを複数個連続に置いて一つの塊として確実に検知できるようにし、まくらぎ方向のターゲットマーカの有無でコード化する。中央列にはターゲットマーカを必ず置き、「ここにコードがある」ことを明示する。この配置では最大 16 通り ($=2 \times 2 \times 1 \times 2 \times 2$) のコードを生成できる。

4. 今後の展開

実験結果を踏まえると、提案手法の実現には使用する LiDAR センサの機構や仕様によるところが大きいといえる。実験で使用した LiDAR センサは内部をプリズムが回転する機構であったため、特に線路方向のコードの読み取りが困難であったと考えられる。現在、可動部分を持たない新しいタイプの LiDAR センサの開発が進んでおり⁵⁾、このタイプを使用すれば図 4 や図 7 に示すコードを読み取れる可能性が高い。

5. おわりに

衛星測位を補完する手法として、軌道側にマーキングして固有地点をコード化の上、LiDAR センサでコードを読み取る手法を考案し、実車による実験を通じて提案手法の実現可能性を検討した。その結果、使用する LiDAR センサの機構や仕様に応じて適切に調整することで、提案手法を実現できる可能性が高い。

今後は新しいタイプの LiDAR センサによる検知傾向の把握、一般の高速鉄道での提案手法の実現可能性の検討、保安の用途を含む衛星測位の補完の具体的な手法及び測位精度の総合的な評価手法について検討を進める予定である。

謝 辞

本稿は広島電鉄株式会社との共同研究の成果の一

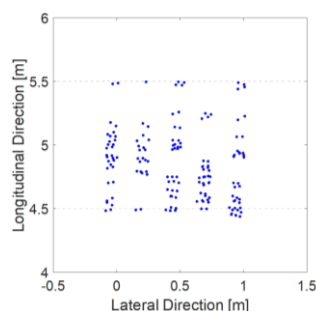
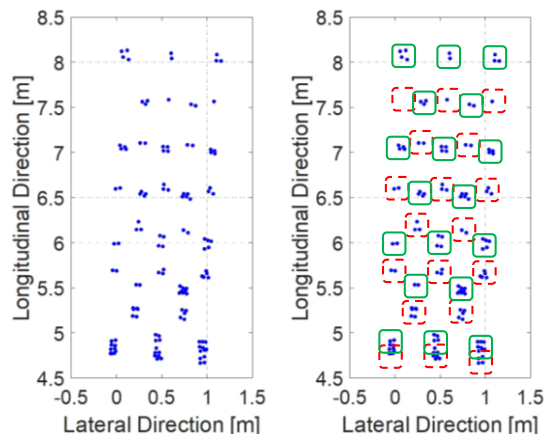


図 8 LiDAR センサによる検知結果
(パターン I、営業線)



(a) 検知結果 (b) グループ分け
図 9 LiDAR センサによる検知結果
(パターン II)

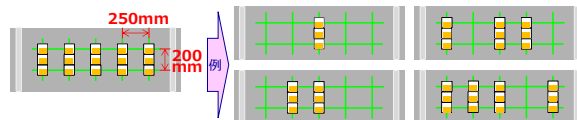


図 10 実用で想定されるコードの例

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) 例えば、山口大助ほか、“衛星測位による列車位置検知の精度の評価に向けた取組”、交通研フォーラム 2021 講演概要集、pp.23-26
- 2) 竹内俊裕、“汎用センサ技術を活用した鉄道における事故防止の取組み”、日本鉄道電気技術協会『鉄道と電気技術』2019 年 7 月号、pp.3-13
- 3) 柳井香史朗、“GNSS と汎用携帯通信網を用いた踏切制御システムの開発”、日本鉄道電気技術協会『鉄道と電気技術』2021 年 10 月号、pp.30-36
- 4) メーカーサイト <https://www.livoxtech.com/jp> または <https://www.symphotony.com/lidar/livox/>
- 5) NEDO 2022 年 2 月 21 日付プレスリリース https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101518.html