

講演 6. LiDAR センサを利用した列車の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、軌道回路等を地上に設置して列車の位置検知を行うが、その維持及び更新に係るコストが鉄道事業者の大きな負担となっている。この負担を軽減するために、軌道回路等を用いない車上主体の新たな列車の位置検知装置として、衛星測位システムを活用する手法が注目されている¹⁾。しかし、衛星測位システムは衛星からの電波を利用するため、トンネル等により電波が受信できない地点では測位できず、また高層ビル等によって電波が反射することにより生じるマルチパスを含む電波を受信する地点では、測位精度が低下する懸念がある。そのため、筆者らは衛星測位システムのみでの位置検知では一定の測位精度が確保できないと考え、衛星測位システムを補完するために、LiDAR(Light Detection And Ranging)センサを利用した位置検知手法を提案した²⁾。その実験の結果、列車の位置を特定するために軌道内に設けた固有地点を走行中に認識することは困難であった。そこで、走行中に固有地点を認識できるようにするために、LiDAR センサが検知したデータへの補正手法を考案し、実車による実験結果を基に位置検知手法の実現可能性を検討したので報告する。

2. LiDAR センサを用いた列車の位置検知手法

2. 1 LiDAR センサ

使用した LiDAR センサは、非反復走査を用いて本体からレーザ光を照射し、物体からの反射光を受光する。これにより、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³⁾。そこで、LiDAR センサは他の装置からの電波及び通信を使用しないため、衛星測位システムで一定の測位精度が得られない地点において、衛星測位システムを補完するセンサの一つとして活用できる可能性があると考えた。

2. 2 列車の位置検知手法の概要

列車の位置検知手法²⁾を図 1 に示す。本手法では、LiDAR センサの物体からの反射光の強さとそ

の物体の位置を出力する機能を利用する。まず、光が入射した際に光源に向かって反射する物体(以下、「ターゲットマーカ」という)を複数用意する。次に、ターゲットマーカの配置を変えて緯度・経度等の位置情報と紐付けを行い、軌道内の固有地点にそれぞれ固有の配置のターゲットマーカを設置する。そして、車上に取り付けた LiDAR センサが検知した個々のターゲットマーカの座標データ(以下、「LiDAR 検知データ」という)により、設置されたターゲットマーカの配置を認識する。さらに、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特定する手法である。

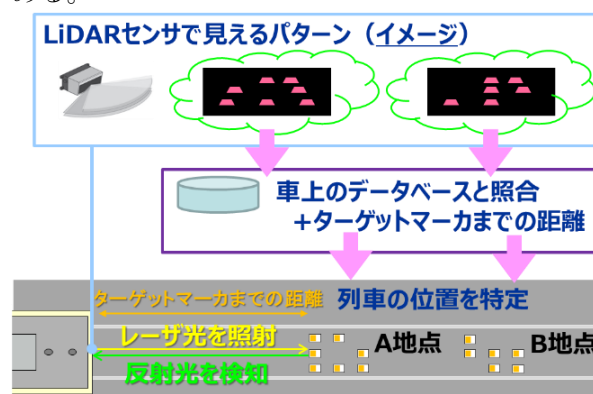


図 1 列車の位置検知手法

2. 3 LiDAR 検知データの補正手法

本手法による列車の位置検知は、任意の時刻における LiDAR 検知データを用いて行う。しかし、LiDAR センサを車上に取り付けると、列車が移動することに伴い LiDAR センサの位置も移動する。よって、走行中の異なる時刻においては、同じ物体を検知しても異なる LiDAR 検知データを取得することとなる。そのため、LiDAR センサがデータを取得してから列車の位置検知を行うまでの列車の移動距離を用いて、LiDAR 検知データを列車の移動後の位置に補正する必要がある。具体的には、式(1)に基づいて、各 LiDAR 検知データを列車の移動後の位置に補正する。ここで、列車の位置検知は周期 $T[s]$ で行うこととし、データ数を確保するため

に、 b 秒前までの LiDAR 検知データを使用する。次に、 c 周期目の列車の位置検知を行うとき($cT[s]$)に使用する各 LiDAR 検知データに対して、データを取得したとき($cT - t_b[s]$): t_b は b 秒までの任意の時間($0 \leq t_b \leq b$)からの列車の移動距離を、その間の走行速度($v(t)[km/h]$)を積分することにより算出する。そして、算出した列車の移動距離を使用して、 $cT - t_b[s]$ のときに取得した LiDAR 検知データの進行方向の座標($x_{cT-t_b}[m]$)を、列車の移動後の LiDAR 検知データの座標($x_{cT}(t_b)[m]$)に補正する。

$$x_{cT}(t_b) = x_{cT-t_b} - \int_{cT-t_b}^{cT} \frac{v(t)}{3.6} dt \dots (1)$$

LiDAR センサがデータを取得してから列車の位置検知を行うまでの時間(b)を短くすると、その時間内における速度の変化は小さくなるため、列車の位置検知のときの速度($v_{cT}[km/h]$)で列車が等速に移動するとみなせる。よって、LiDAR 検知データの補正は式(2)のように近似することができる。後述の 5.3 節においては、図 2 のように式(2)を用いて LiDAR 検知データを補正する。

$$x_{cT}(t_b) = x_{cT-t_b} - v_{cT}/3.6 * t_b \dots (2)$$

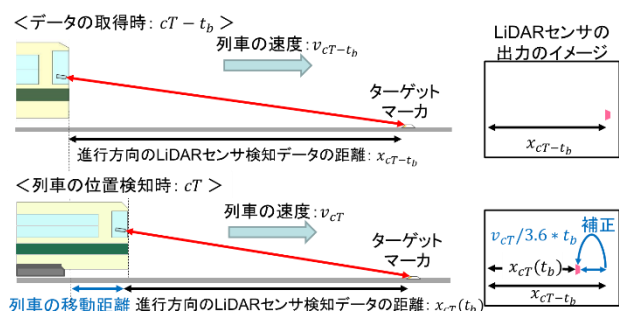


図 2 LiDAR 検知データの補正

3. LiDAR センサを用いた列車の速度検知手法

式(2)は速度を用いて補正を行うため、他の手法を用いて走行速度を検知する必要がある。速度発電機等の他のセンサを用いて走行速度を検知する手法も考えられるが、本手法では LiDAR センサのみで走行速度を求める手法を提案する。

3. 1 列車の速度検知手法の概要

列車の速度検知は周期 $T_v[s]$ で行うこととし、その周期ごとに b_v 秒前までの LiDAR 検知データを使用する。式(3)により速度(以下、「検知速度」という)を算出する。ここで図 3 に示すように、進行方向において、 c_v 周期目の速度検知を行うとき($c_v T_v[s]$)の

LiDAR センサから LiDAR 検知データの重心までの距離($M_{c_v T_v}[m]$)と、そのときから 1 周期前($(c_v - 1)T_v[s]$)の LiDAR センサから LiDAR 検知データの重心までの距離($M_{(c_v-1)T_v}[m]$)との差分距離を算出する。そして、その差分距離を速度検知の周期(T_v)で除することにより検知速度($v_{c_v T_v}[km/h]$)を算出する。ただし、LiDAR 検知データの重心の算出が行えない状況での検知速度は $0km/h$ とする。

$$v_{c_v T_v} = 3.6 * \frac{M_{(c_v-1)T_v} - M_{c_v T_v}}{T_v} \dots (3)$$

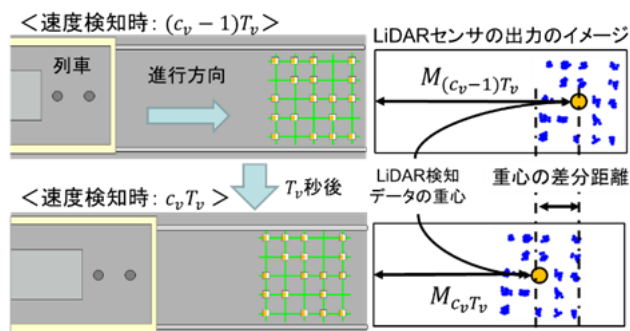


図 3 速度検知手法

3. 2 検知速度の平滑化

LiDAR センサは検知範囲の情報全体を取得するまでの時間(以下、「露光時間」という)が長いセンサもあり、その情報全体を使用することを検討する場合、 b_v を増加させる必要がある。一方、 b_v を増加させると、2.3 節と同様に LiDAR センサの移動に伴い、検知速度にも影響が生じる。また、露光時間を短くすると、LiDAR センサの検知範囲においてターゲットマーカーを検知しない、または一部のみを検知することとなり、検知速度に急な変化が生じる場合がある。本手法では、LiDAR センサを取り付ける車体に急な加速及び減速がないことを前提とし、露光時間より短い時間内の LiDAR 検知データを用いて速度検知を行うため、移動平均フィルタの使用を検討した。移動平均フィルタは式(4)に示すように、入力データ($x[i]$: i はデータの順番)を含め、一定数(n)の過去の入力データを用いて、それらのデータの平均($y[i]$)を出力するものである。このフィルタの入力を検知速度、出力を走行速度とすることで、急な検知速度の変化を抑制することができる。考える。(ただし、式(4)より、 $i - k < 0$ の入力データ $x[i - k]$ は 0 とする。)

$$y[i] = \frac{1}{n} * \sum_{k=0}^{n-1} x[i-k] \dots (4)$$

4. 実車による実験

提案手法の実現可能性を検討するため、路面電車の営業線において実験を行った²⁾。また、3章の走行速度の精度評価には、衛星測位システムの数値データをリファレンスとして使用することとした⁴⁾。

4. 1 LiDAR センサの車両への取付け

運転席から進行方向に向かって左側に 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。また LiDAR センサの取付角度は 12.5 度とした²⁾。

4. 2 ターゲットマーカの配置

図 4 のように、250mm の格子状に 3 つのパターンのターゲットマーカを設置した。各パターンを路面電車が通過した時の衛星測位システムの数値データを表 1 に示す。また、パターン 1 は走行速度を変化させて 2 回の実験を行った。

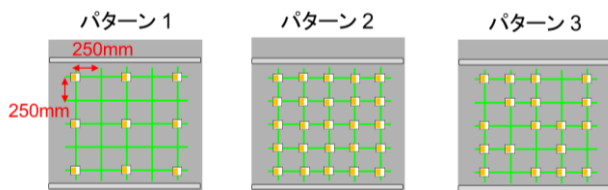


図 4 ターゲットマーカの配置図

表 1 衛星測位システムの数値データ

	ターゲットマーカの通過速度
パターン1 ①	36.6km/h
パターン1 ②	9.6km/h
パターン2	36.1km/h
パターン3	25.3km/h

4. 3 列車の位置検知及び速度検知手法の仕様

本実験に用いた列車の位置検知及び速度検知手法の主なパラメータを表 2 に示す。本研究で使用する LiDAR センサにおける検知範囲の 98% の情報を得るための露光時間が 0.5 秒³⁾であることから、速度検知の周期から移動平均フィルタのデータ数を

表 2 使用するパラメータ設定

	位置検知	速度検知
各検知を行う場合の LiDAR センサから LiDAR 検知データの重心までの距離	5 ~ 6m	5 ~ 30m
検知周期	$T = 0.02s$	$T_p = 0.02s$
各検知時より前に取得したデータが使用可能な時間	$b = 0.1s$	$b_p = 0.1s$

25 とし、検知速度に対して移動平均フィルタを 2 回使用した出力を本手法の走行速度とした。

5. 本手法の評価

5. 1 速度検知手法の速度安定距離

3.1 節より、LiDAR 検知データの重心を算出できない状況が続いた場合は移動平均フィルタの入力には 0 が連続する。よって、その状況の直後に速度検知を開始すると、移動平均フィルタは過去の入力である 0 を用いて走行速度を出力することとなる。したがって、本手法の走行速度が実際の走行速度に近づくためには、移動平均フィルタに入力される検知速度と、使用する過去の検知速度が同等程度になるまでの入力数が必要となる。また、表 2 の本実験のパラメータから、少なくとも速度検知を開始して (30m 手前) から位置検知を行うまで (6m 手前) の 24m 以内に、本手法の走行速度が実際の走行速度に近づく必要がある。本手法では図 5 に示すように、速度検知を開始してから走行速度の増加量が 0 となるまでの LiDAR 検知データの重心までの距離を速度安定距離とした。表 3 に各実験での速度安定距離の結果を示す。各パターンにおける列車の走行時の速度安定距離は 24m 以下であるため、2.3 節の補正をする際に使用する走行速度に、本手法で得られた値を適用することが可能であるといえる。また、走行速度が速くなると速度安定距離が増加する傾向にあるが、対象線区として路面電車(最高速度が 40km/h)を想定すると、本手法で求めた速度を使用することが可能であると考えられる。

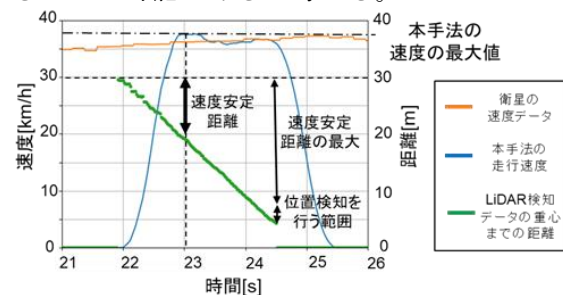


図 5 パターン 1 ①の速度安定距離

表 3 走行速度と速度安定距離との関係

	走行速度の増加量が0のとき		速度安定距離
	本手法の走行速度	衛星測位システムの数値データ	
パターン1 ①	37.6km/h	36.2km/h	10.3m
パターン1 ②	13.1km/h	12.8km/h	3.86m
パターン2	36.3km/h	35.0km/h	10.2m
パターン3	28.0km/h	25.3km/h	8.12m

5. 2 走行速度の精度

走行速度の速度誤差は、本手法と衛星測位システムの速度データとの差の絶対値を前提とした。また、評価範囲は表 2 の速度検知を行う範囲(5~30m)と表 3 の速度安定距離の最大が 10m 程度であることから、LiDAR センサから 5~20m の範囲内とした。その評価結果を図 6 に示す。鉄道車両の速度計は JIS 規格に準拠して、デジタル式速度計の誤差は $\pm 2 \sim 3 \text{ km/h}$ を管理基準⁵⁾としているが、本手法の速度誤差は上記前提において、JIS 規格で想定される管理基準の誤差を下回っていることが分かる。

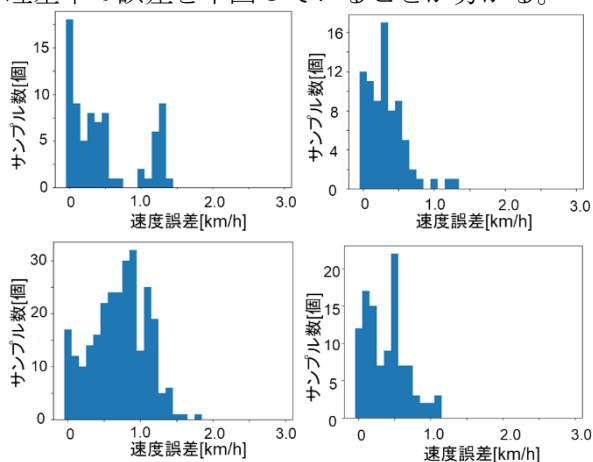


図 6 各パターンの速度誤差の分布

左上：パターン 1 ①、右上：パターン 2
左下：パターン 1 ②、右下：パターン 3

5. 3 ターゲットマーカの認識結果

図 7 にパターン 3 での補正前と補正後の LiDAR 検知データを示す。本図から進行方向におけるデータの広がりや補正することができ、ターゲットマーカの配置を認識可能な見通しを得た。図 8 にパターン 3 以外のパターンの補正結果を示す。走行速度が 35km/h 程度(パターン 1 ①、パターン 2)の場合は、進行方向に LiDAR 検知データが広がる傾向にあり、ターゲットマーカを狭い間隔で設置すると、その配置の認識が困難になることが分かった。

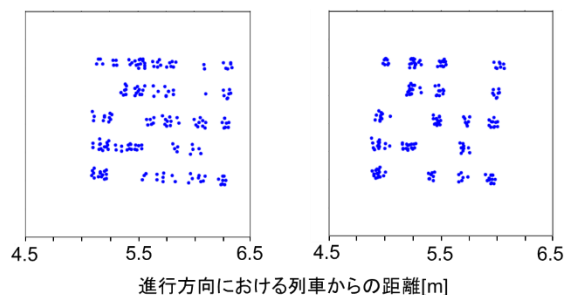


図 7 LiDAR 検知データ(左:補正前 右:補正後)

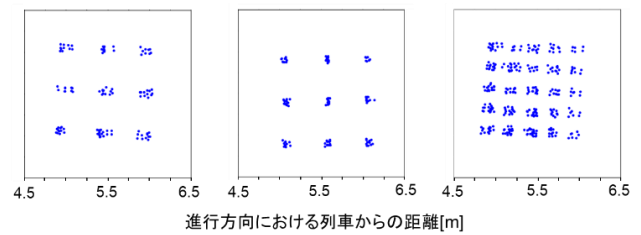


図 8 LiDAR 検知データの補正結果

左：パターン 1 ①、中央：パターン 1 ②
右：パターン 2

6. まとめ

列車の位置検知に衛星測位システムを用いた場合に、一定の測位精度が得られない地点において、LiDAR センサを利用してターゲットマーカの配置を検出する位置検知及びデータ補正手法を提案した。また、本手法の実現可能性を実車による実験を通じて検証した結果、走行速度が 25km/h 程度の場合はその配置を認識可能な見通しを得たが、走行速度が 35km/h 程度の場合は、ターゲットマーカの間隔を広げることで認識が可能になると考えている。今後は、走行速度に応じて必要となるターゲットマーカの間隔について検討していきたい。

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) 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) 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
- 3) 代理店サイト http://www.kobeseiko.co.jp/Livox_Horizon.html
- 4) 浅野 晃ほか、“列車保安制御への GNSS 利用に関する一検討”、日本信頼性学会誌 2018 年 40 巻 3 号、p.159-167
- 5) 国土交通省 速度計等の精度確保に係る実態調査結果について https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/08/081129_.html