

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

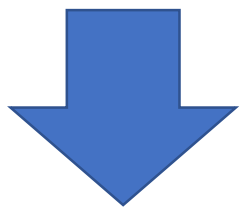
研究員 望月駿登

はじめに

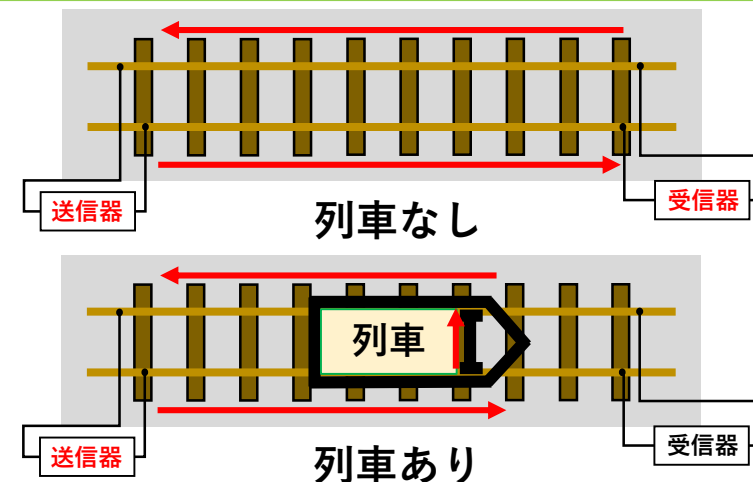
はじめに

鉄道の位置検知の例：軌道回路

レールに流れる信号(電流)の有無で列車位置を検知



維持及び更新に係るコストの軽減



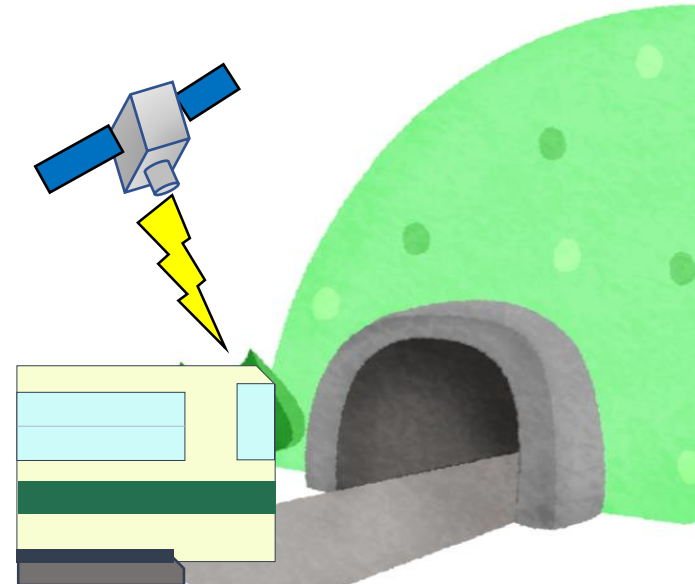
衛星測位システム：車上位置検知として注目

衛星からの電波を用いて列車の位置検知を行う

→トンネルや高層ビルがあるところでは

一定の測位精度を得ることができない

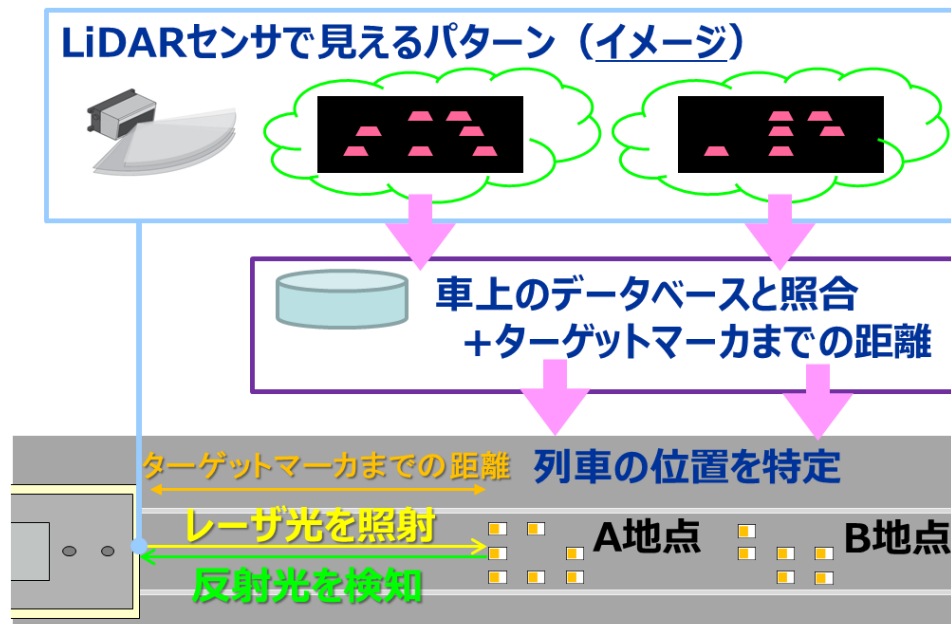
⇒衛星測位システムを補完する位置検知手法が必要



はじめに

自動車の自動運転等に使われているLiDAR(Light Detection And Ranging)センサに注目し、LiDARセンサを利用した補完手法を提案

⇒ 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)を検知し、その配置から列車の位置検知を行う手法



ターゲットマーカの例(道路鋲)

はじめに

LiDARセンサを列車に取り付け、走行中に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)を用いて、ターゲットマーカの配置を認識することが可能かについて検討

→30km/h程度の走行時において、**進行方向に対してLiDAR検知データが重なる**結果となった

実験の状況

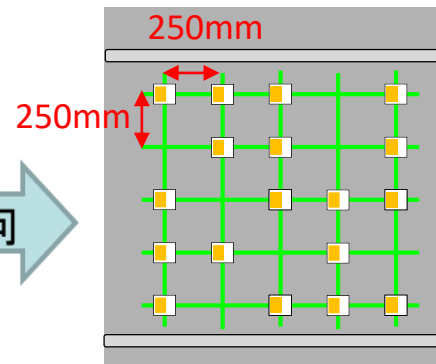


ターゲットマーカ

LiDARセンサ

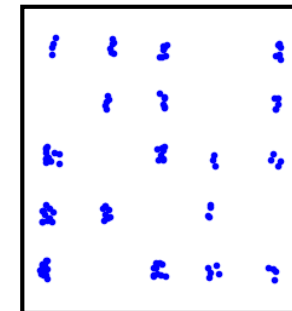


検知したターゲット
マーカの配置



LiDAR検知データ

停止時



走行時



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

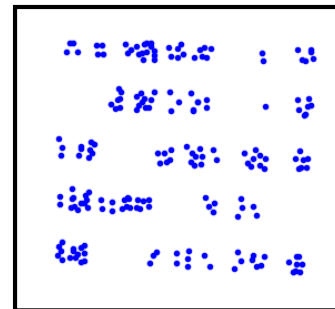
目的

先行研究と同様にLiDARセンサを用いてターゲットマーカの配置を認識すること

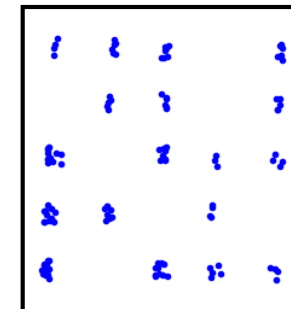
LiDAR検知データを補正することによりターゲットマーカの配置を認識する手法を考案

実車によるLiDAR検知データを用いて、本手法の実現可能性を検討

LiDAR検知データ



補正



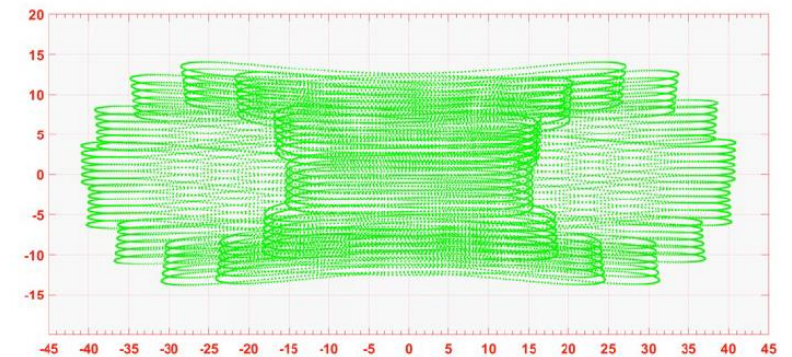
LiDAR検知データの補正手法

本研究で使用したLiDARセンサ

センサ本体から非反復走査という手法でレーザ光を照射し、物体からの反射光を受光

これにより、

- LiDARセンサを原点とする、レーザ光が反射した物体までの3次元の位置
- 反射光の強さ(reflectivity)
- レーザ光を照射した時間が紐付けされて出力



Livox Horizon user manual v1.2 より引用

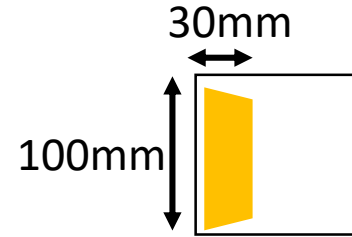
LiDAR検知データが重なる要因

- LiDARセンサが数m離れたターゲットマーカを検知するには、レーザ光をターゲットマーカの再帰反射部(100mm×30mm)に照射
- ターゲットマーカの配置を認識できる程度のLiDAR検知データ数を確保

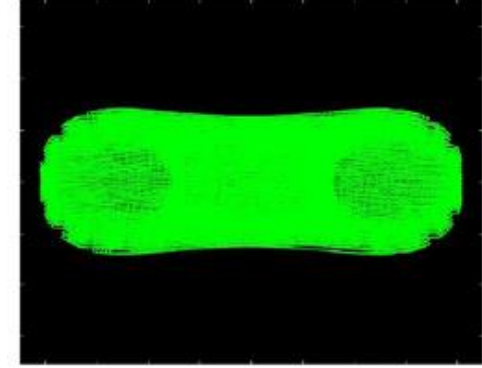
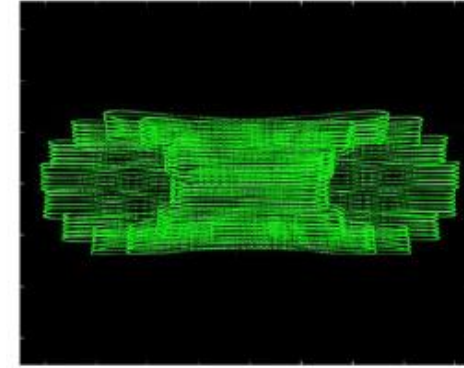


LiDARセンサの検知時間を長くすることが必要

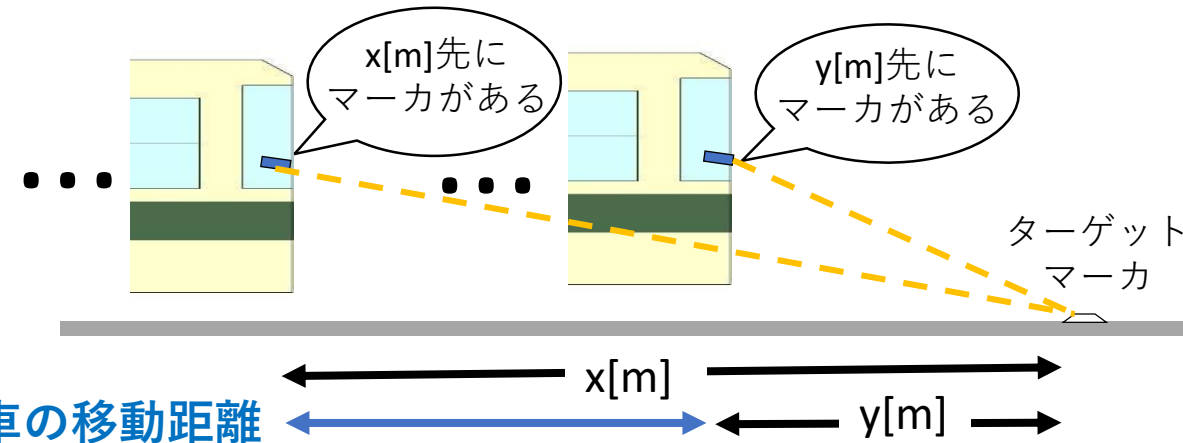
→列車の走行に伴いLiDARセンサの位置が変化することにより、**同じターゲットマーカを検知しても異なる位置として検知**



使用したLiDARセンサの検知時間
0.1s 0.5s



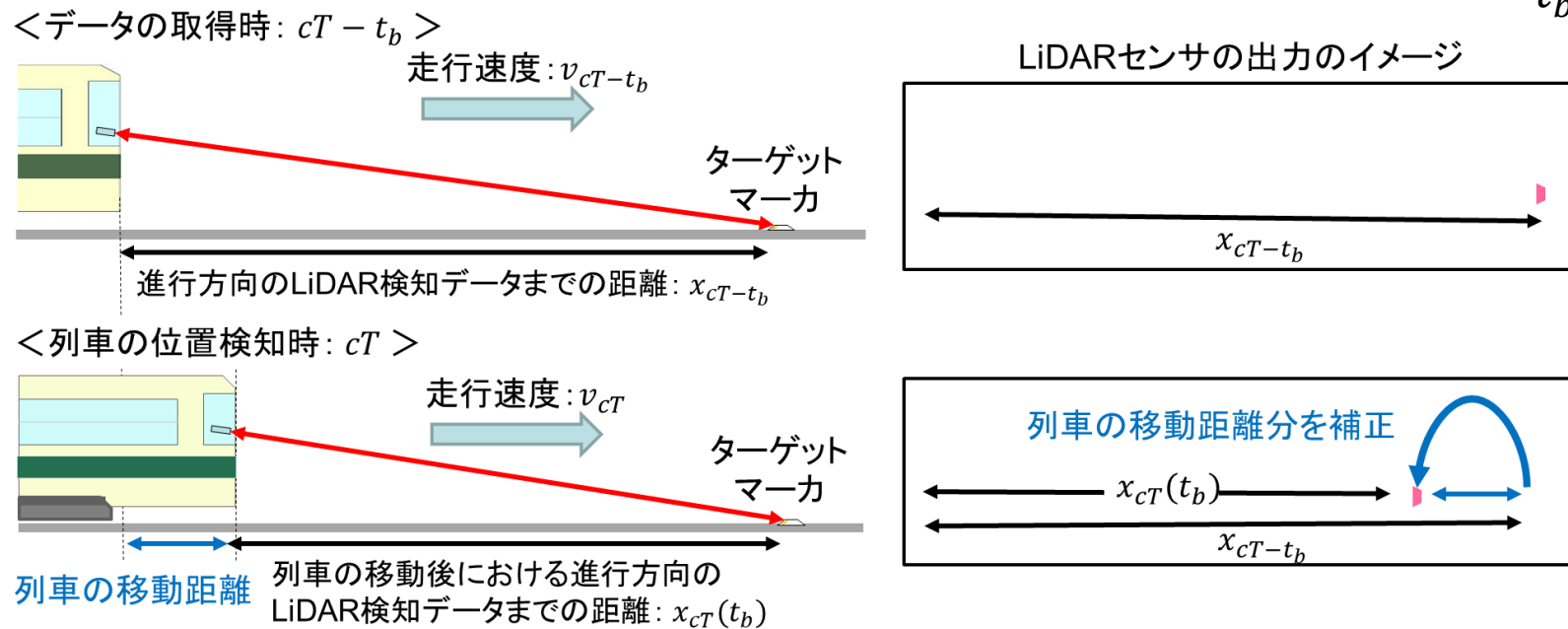
Livox Horizon user manual v1.2より引用



LiDAR検知データの補正手法

列車の移動距離を用いて、位置検知時より t_b 秒*前に取得したLiDAR検知データまでの距離(x_{cT-t_b})を位置検知時のLiDAR検知データまでの距離($x_{cT}(t_b)$)に補正

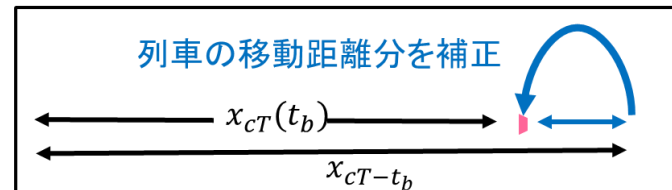
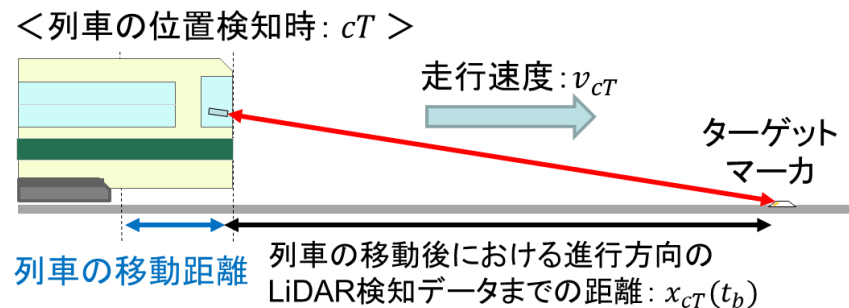
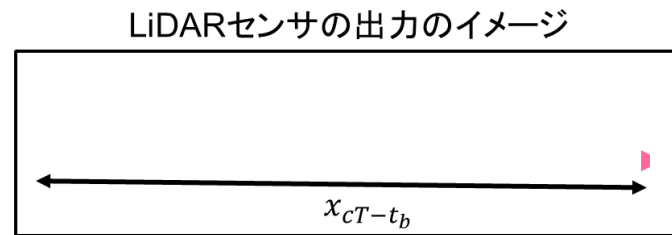
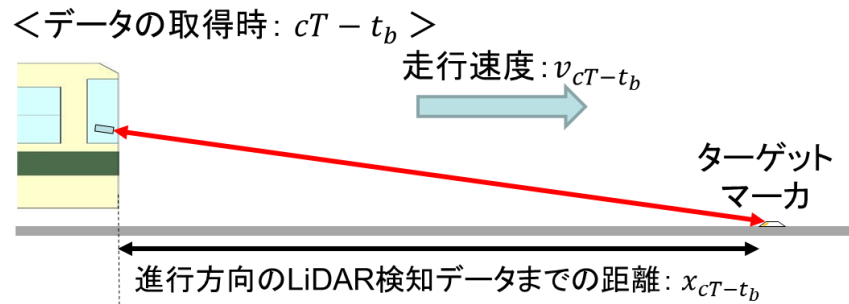
* t_b 秒：検知時間以下の時間



T : 位置検知の周期[s], c : 位置検知のサイクル数, $v(t)$: 走行速度[km/h], t_b : データを取得してから位置検知を行うまでの時間[s]
 x_{cT-t_b} : 進行方向のLiDAR検知データまでの距離[m], $x_{cT}(t_b)$: 列車の移動後における進行方向のLiDAR検知データまでの距離[m]

LiDAR検知データの補正手法

$$\text{LiDAR検知データの補正手法: } x_{cT}(t_b) = x_{cT-t_b} - \int_{cT-t_b}^{cT} \underbrace{v(t)/3.6}_{\text{列車の移動距離}} dt$$



列車の移動距離

列車の走行速度が必要

列車の速度検知手法

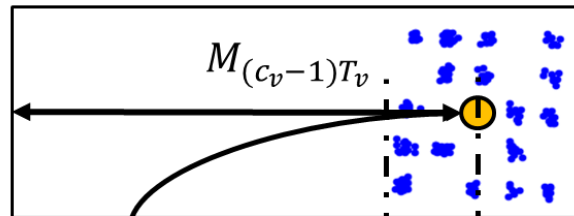
列車の速度検知手法

進行方向における速度検知時のLiDAR検知データの重心*の差分距離から検知速度($v_{c_v T_v}$ [km/h])を算出

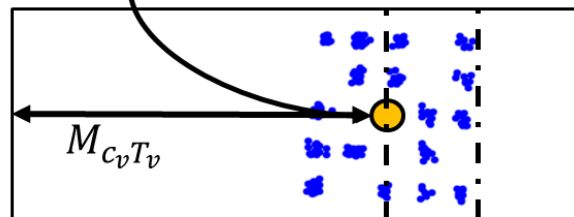
<速度検知時: $(c_v - 1)T_v$ >



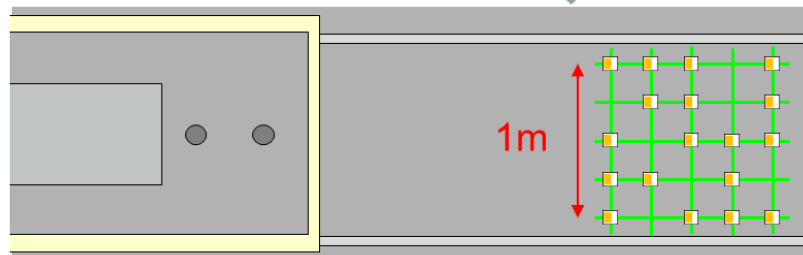
LiDARセンサの出力のイメージ



LiDAR検知データの重心
重心の差分距離



<速度検知時: $c_v T_v$ >



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

T_v : 速度検知の周期[s]

c_v : 速度検知のサイクル数

M : LiDAR検知データの重心までの距離[m]

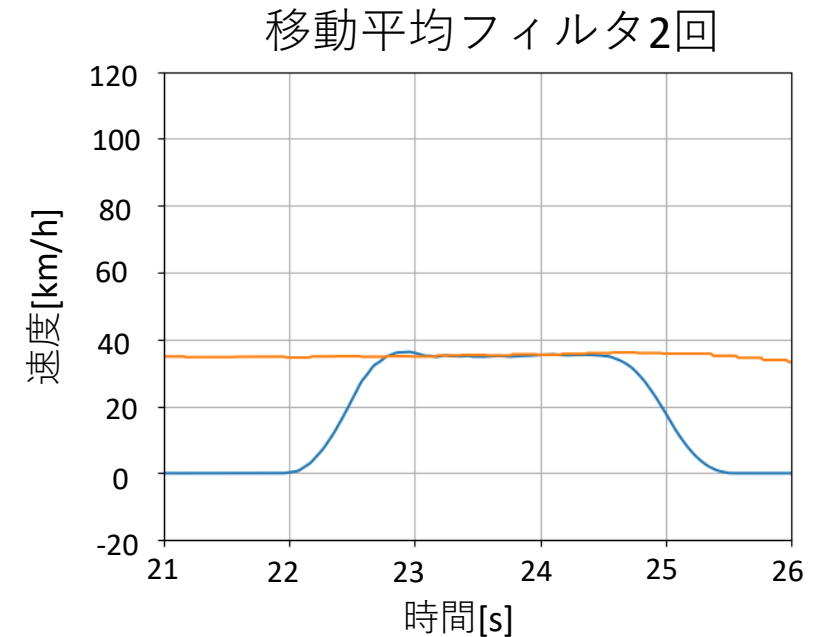
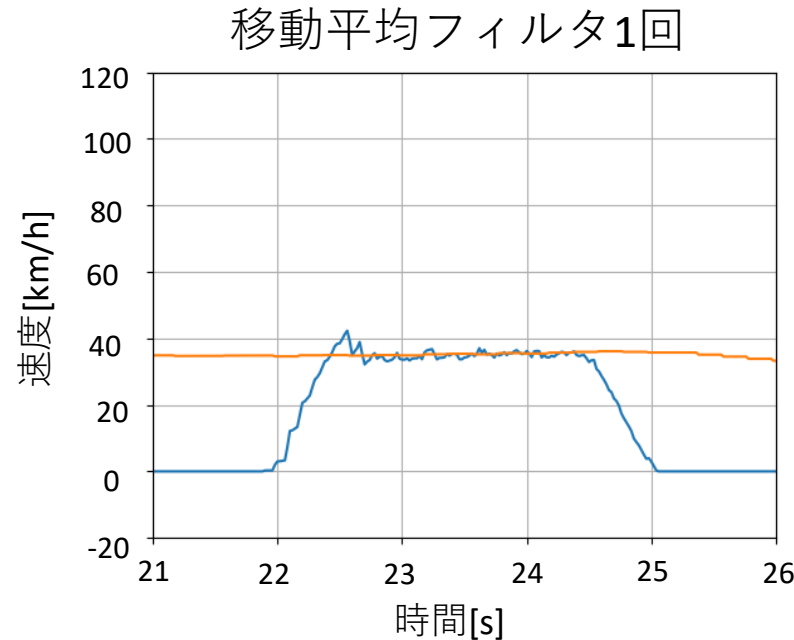
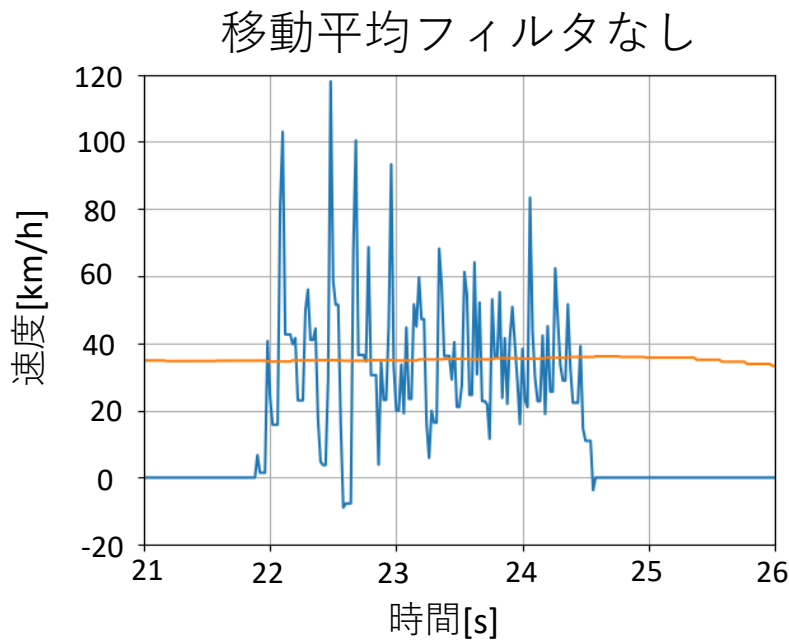
※但し、LiDAR検知データの重心が算出できない場合の検知速度は0km/h

LiDAR検知データの重心* :
使用するLiDAR検知データを
平均化した座標

列車の速度検知手法

算出された検知速度(v_{cvTv})の変動が大きいため、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 $v(t)$ とした

衛星の速度データ 本手法の走行速度

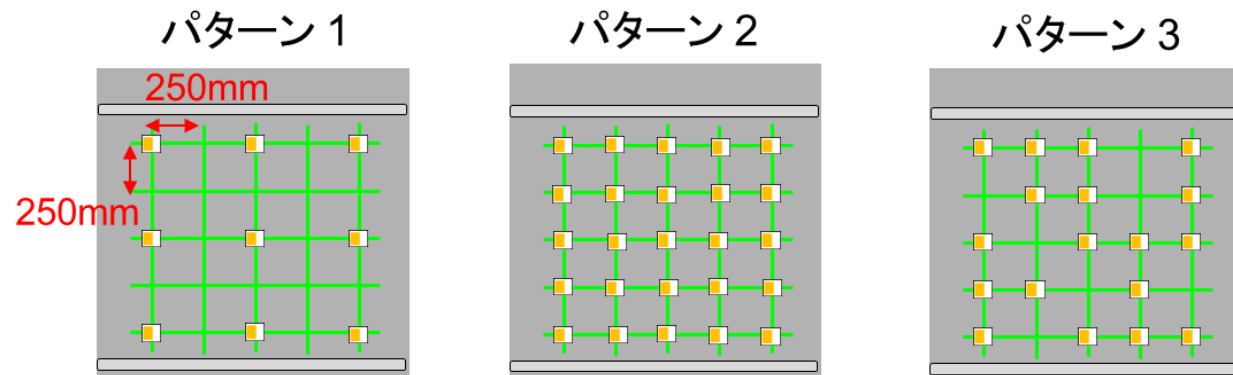


*移動平均フィルタ：入力データを含め、過去の入力データを用いて、それらのデータの平均を出力するもの

実車による実験と評価

実験環境及びパラメータ設定

ターゲットマーカの配置パターン



衛星測位システムの速度データ

配置パターン	路面電車の通過速度
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

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センサからのLiDAR検知データの重心の範囲	5 ~ 6m	5 ~ 30m
検知周期	$T = 0.02s$	$T_v = 0.02s$
各検知時より前に取得したデータが使用可能な時間(検知時間)	0.1s	0.1s
使用する移動平均フィルタ数	-	2
移動平均フィルタのデータ数	-	25*

25*：使用するLiDARセンサの仕様において、検知範囲の98%の情報を得るために必要な時間は0.5sであり、速度検知の周期を0.02sと設定したため、移動平均フィルタのデータ数は25に設定

速度検知手法の速度安定距離

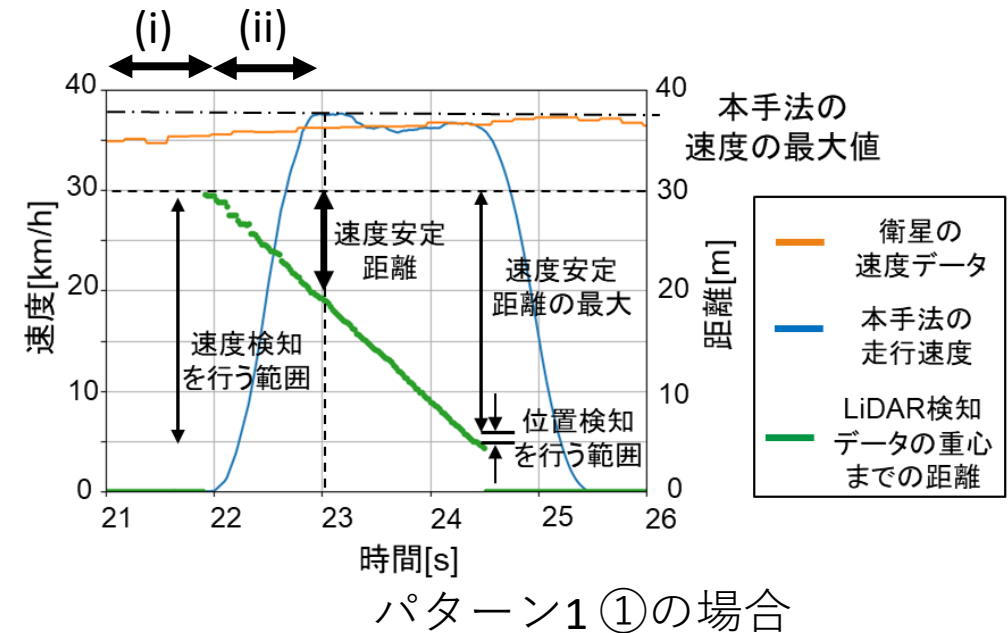
移動平均フィルタを用いるため、過去の検知速度の影響を受ける



- LiDAR検知データの重心が算出できない状況(i)では、検知速度を"0"として入力
- その状況が続いた直後に速度検知を行う場合(ii)、検知速度が実際の列車の走行速度と同等程度になるためのデータ入力数が必要



各配置パターンにおいて、位置検知を行う範囲(5~6m)までに、本手法の走行速度が実際の列車の速度に近づくことが必要

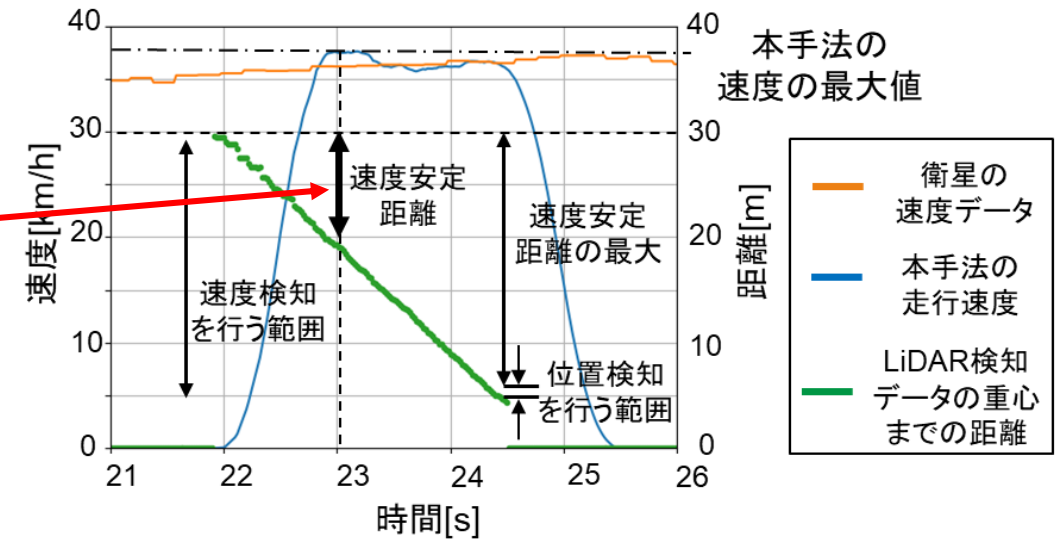


速度検知手法の速度安定距離

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検知データの重心の変化距離→速度安定距離と定義

- 走行速度が速くなるほど速度安定距離は増加する傾向
- 各配置パターンの速度安定距離が速度検知を開始して(30m手前)から位置検知を行う(6m手前)までの24m以内にあることを確認

配置パターン	速度安定距離
パターン1 ①	10.3m
パターン1 ②	3.86m
パターン2	10.2m
パターン3	8.12m



パターン1 ①の場合

衛星測位システムとの比較による速度精度評価

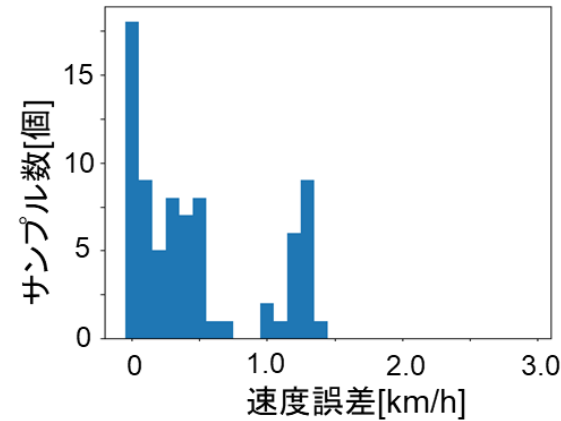
- 衛星測位システムの速度データをリファレンス
- 速度検知の範囲(5～30m)と路面電車の最高速度(40km/h)に近い走行速度の場合の速度安定距離(約10m)から、走行速度の評価範囲は5～20m

速度誤差 =

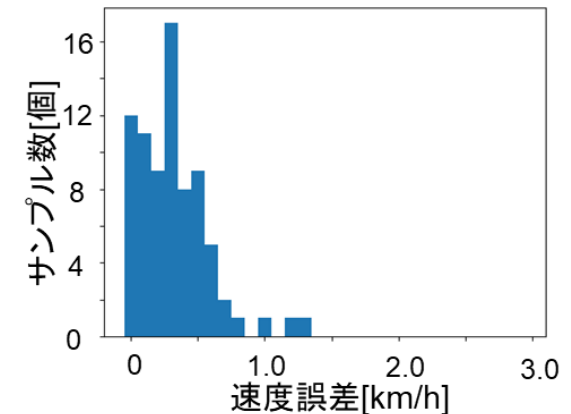
$$\left| \begin{array}{l} \text{衛星測位システムの速度データ} \\ - \text{本手法の走行速度} \end{array} \right|$$

走行速度及びターゲットマーカの配置に関係なく、**速度誤差は2km/h以下**であり、JIS規格(鉄道車両の速度計の管理基準)で想定している速度誤差($\pm 2 \sim 3 \text{km/h}$)未満

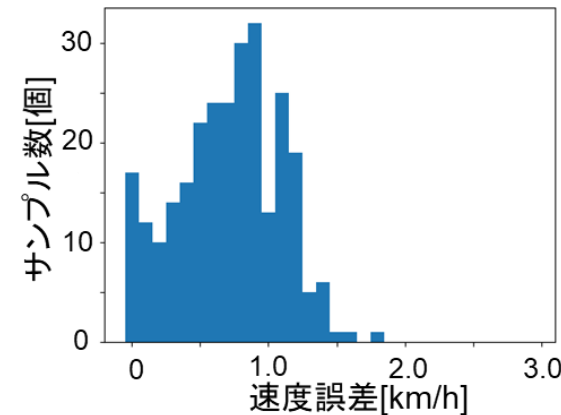
→補正手法に適用可能な見通しを得た



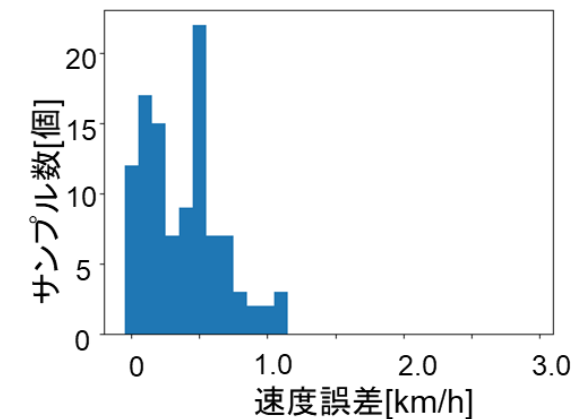
パターン1 ①



パターン2



パターン1 ②



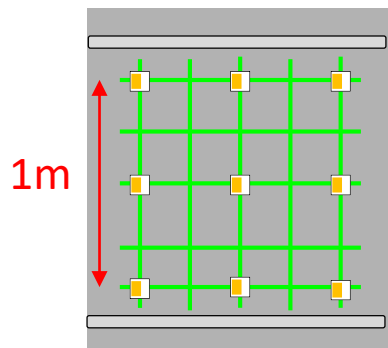
パターン3

ターゲットマーカの認識結果

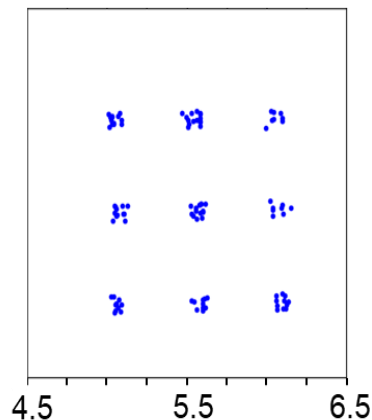
速度検知手法による走行速度を用いて補正手法を適用した結果、
走行速度が25km/h程度では、ターゲットマーカの配置を認識することが可能な
見通しを得た

通過時の速度：9.6km/h

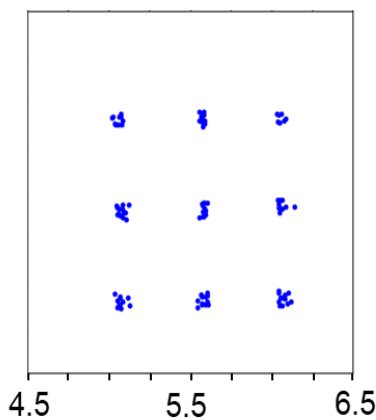
パターン1 ②



補正前



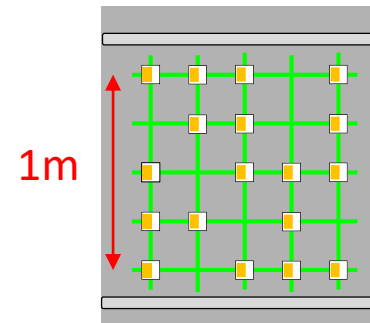
補正後



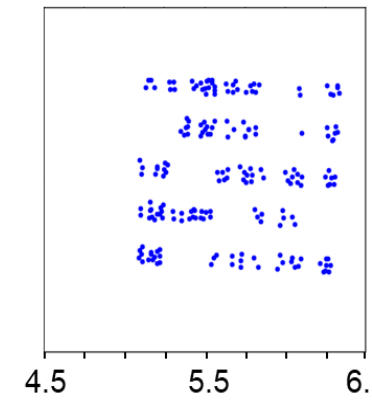
進行方向における列車からの距離[m]

通過時の速度：25.3km/h

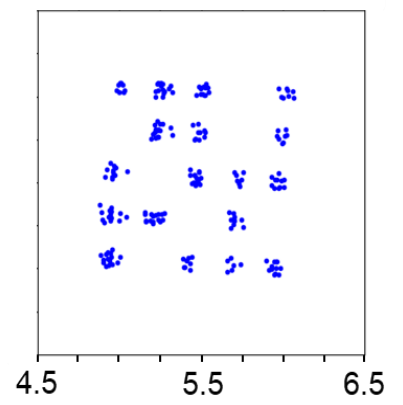
パターン3



補正前



補正後



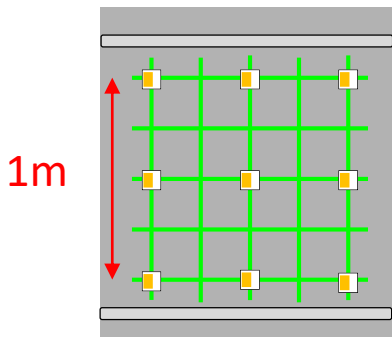
進行方向における列車からの距離[m]

ターゲットマーカの認識結果

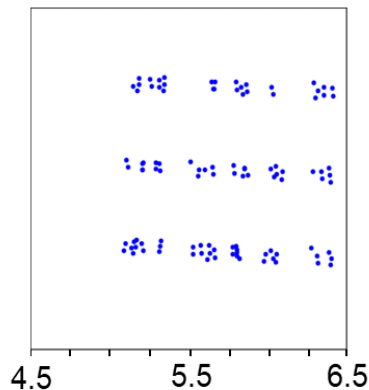
速度検知手法による走行速度を用いて補正手法を適用した結果、走行速度が35km/h程度では、ターゲットマーカを狭い間隔で設置すると、ターゲットマーカの配置の認識が困難

通過時の速度：36.6km/h

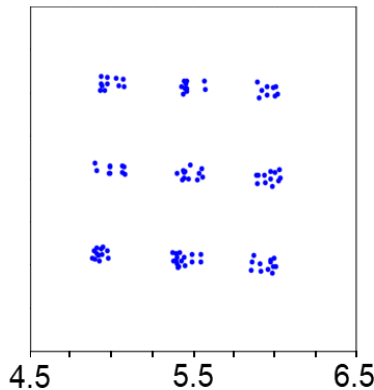
パターン1①



補正前



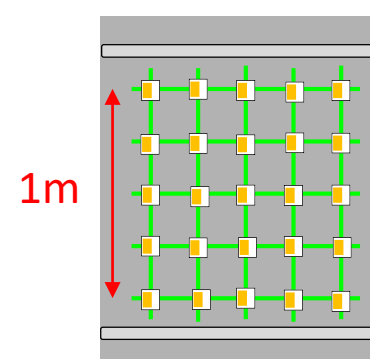
補正後



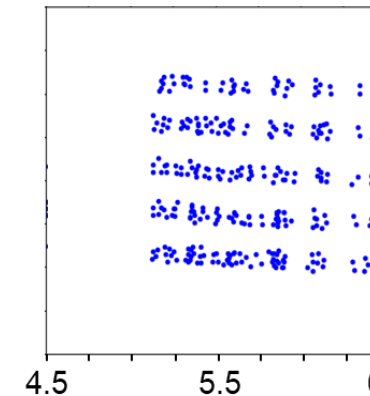
進行方向における列車からの距離[m]

通過時の速度：36.1km/h

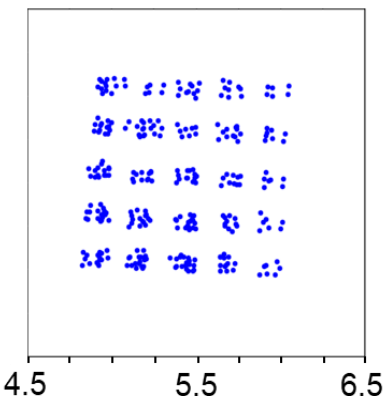
パターン2



補正前



補正後



進行方向における列車からの距離[m]

まとめ・今後の予定

<まとめ>

- LiDARセンサを利用した位置検知手法に対して、列車の移動距離を用いてLiDAR検知データを補正する手法を提案
- 走行速度が25km/h程度では設置したターゲットマーカの配置を認識することが可能な見通しを得た
- 走行速度が35km/h程度ではターゲットマーカ間の間隔を広げることで、ターゲットマーカの配置の認識が可能になると考える

<今後の予定>

- ターゲットマーカの配置を認識するために最適なターゲットマーカ間の間隔を検討

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。