

自動運転バスの操舵制御設計

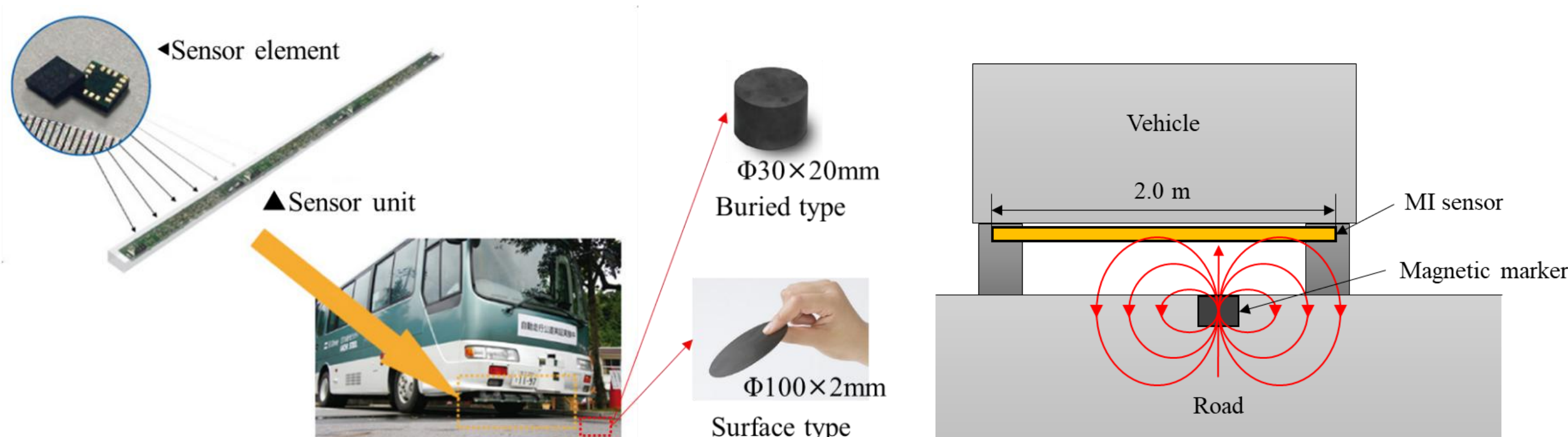
Steering Controller Design of Automated Driving Bus

Partner: Advanced Smart Mobility Co., Ltd. and Aichi Steel Corporation

はじめに Introduction

高齢化や労働者不足が進む先進国において、移動手段の確保を目的とした自動運転バスの開発には大きな期待が寄せられている。現状では車載センサのみで自己位置推定を行うには限界があるため、磁気マーカのようなインフラを用いて自己位置情報を補正することは有用な手段と言える。しかし、適切なインフラ間隔（磁気マーカ間隔）やその有用性はまだ十分に示されていない。

自己位置推定 Localization



磁気ポジショニングシステム (GMPS)

$$x = \begin{bmatrix} l \\ y \\ \theta \\ k_v \\ \gamma_b \\ k_\beta \end{bmatrix}$$

l ... 前後位置
 y ... 横変位
 θ ... ヨー角
 k_v ... 車両速度のスケールファクタ
 γ_b ... ヨーレートのバイアス
 k_β ... 横すべり角のスケールファクタ
 車両およびセンサパラメータ推定

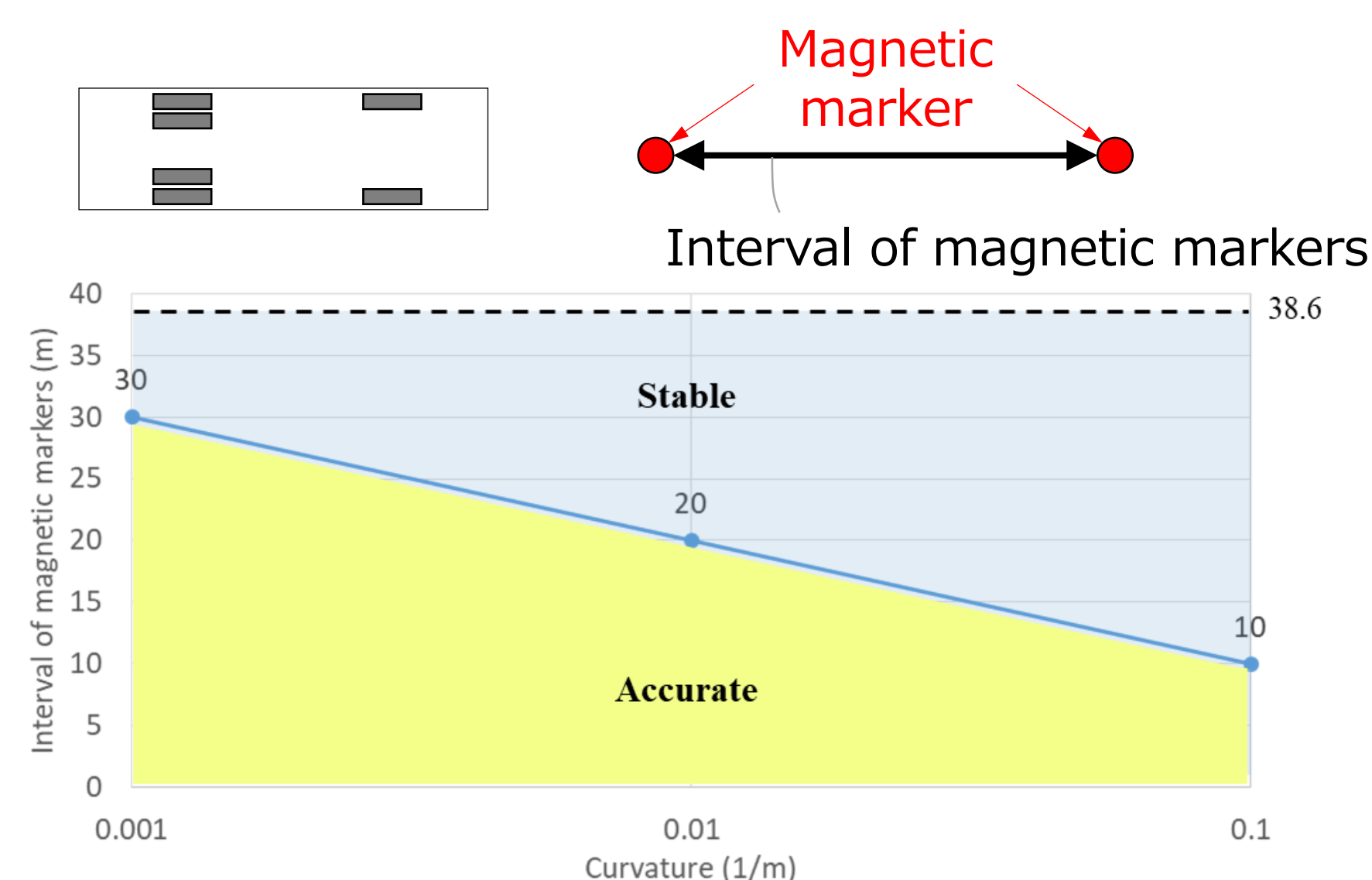
カルマンゲイン:

$$G_k = P_k^- C_k^T (C_k P_k^- C_k^T + Q)^{-1}$$

状態推定値:

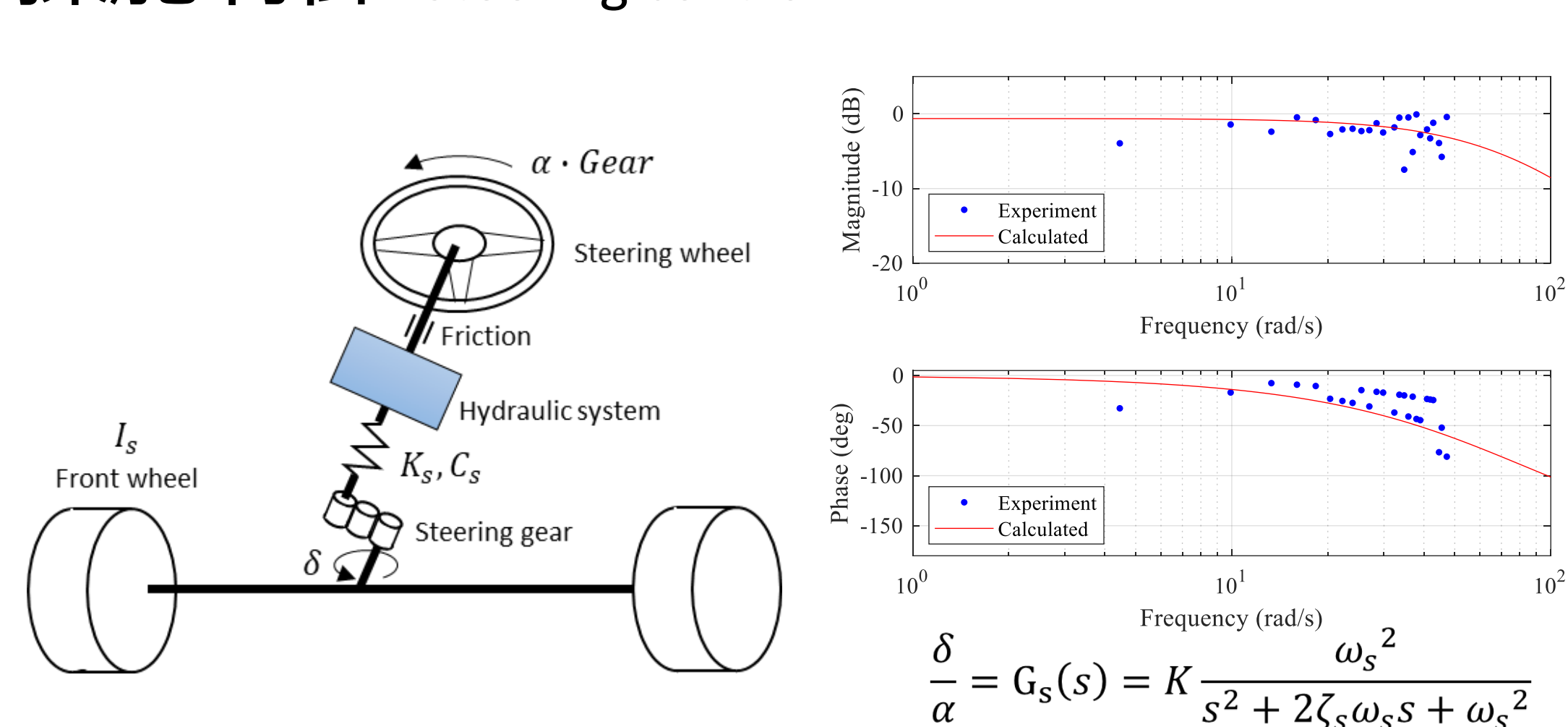
$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + G_k (y_k - C_k \hat{x}_{k-1})$$

磁気ポジショニングシステムと拡張カルマンフィルタ (EKF) を組み合わせることで、現状では2mの間隔で設置している磁気マーカ間隔を、直線部では30m、交差点部でも10m程度まで広げられる可能性がある。



道路曲率と磁気マーカ間隔との関係

操舵制御 Steering control



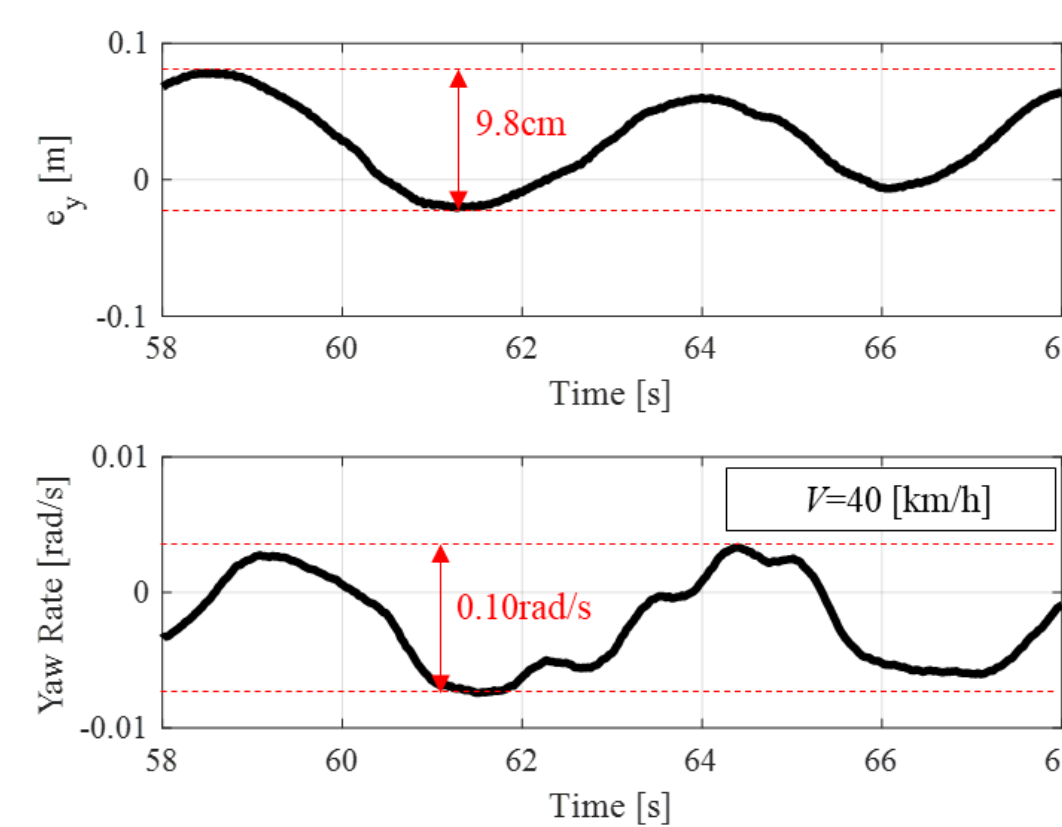
操舵系のモデル化

ハンドル角からタイヤ角までの伝達遅れを測定し、二次遅れ系としてモデル化した。車両系と操舵系の6状態量をフィードバックすることで、極配置を用いてシステムの最適な減衰比が得られるフィードバックゲインを決定した。

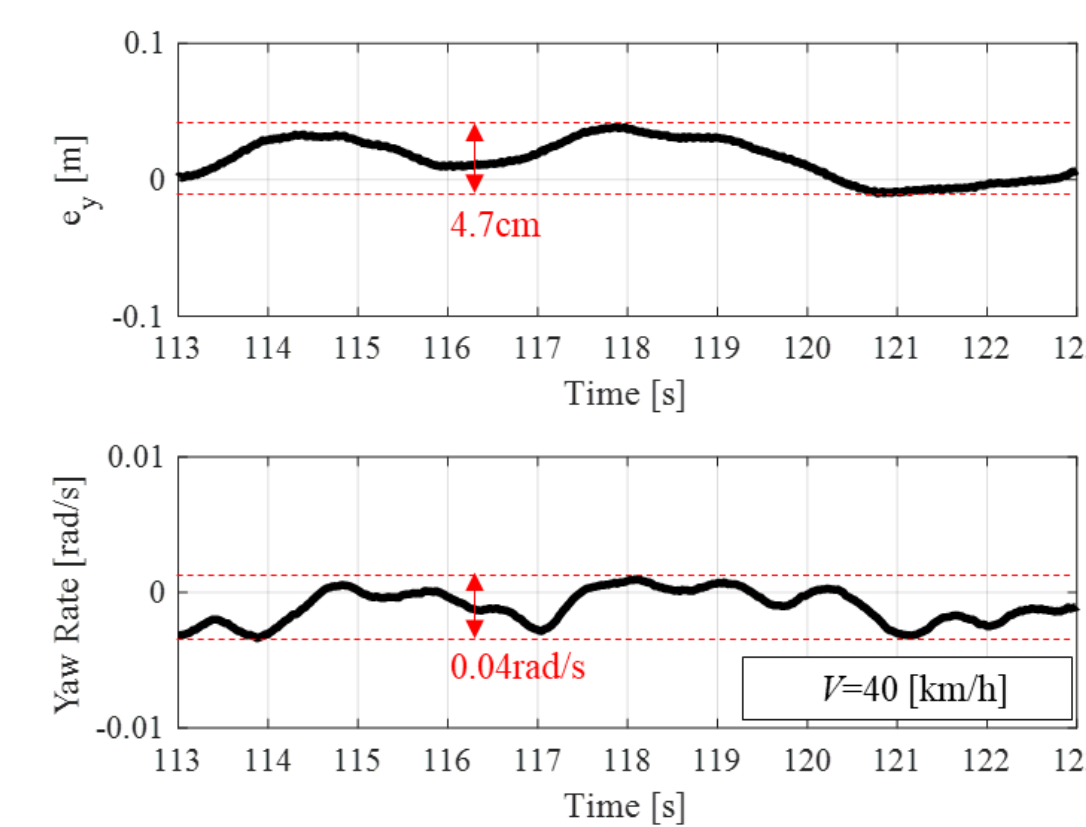
誤差の定義

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_1 & -a_2 & -a_3 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -a_4 & -a_5 & -a_6 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_s^2 & -2\zeta_s \omega_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \alpha \end{bmatrix}$$

$$\alpha = -[K_y \quad K_{\dot{y}} \quad K_\theta \quad K_{\dot{\theta}} \quad K_\delta \quad K_{\dot{\delta}}] \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix}^T$$



2状態量 (y, θ) フィードバック



6状態量フィードバック

実証実験 Pilot tests



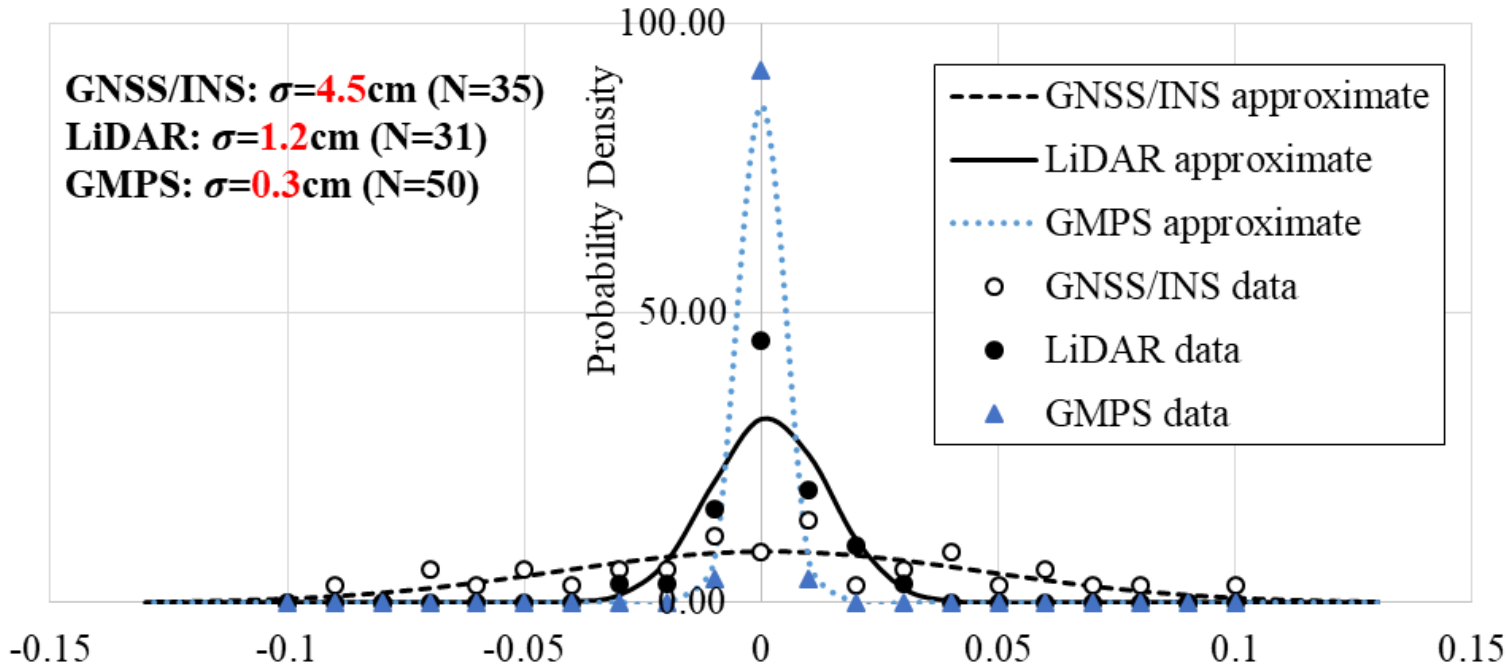
(a) GNSS使用不可

(b) 雪道

実験条件



(a) バスの正着制御



(b) 正着精度

正着制御結果

日本の都市部から郊外までの様々な環境において実証実験を行い、自動運転バスはこれまでに10,000km以上走行している。正着制御においては、磁気ポジショニングシステムまたはLiDARを用いることで、1.25cm以内という高い要求精度を達成できることがわかった。また、磁気ポジショニングシステムは雪などの厳しい環境でも高い精度を保ち、ロバスト性も高いことが示された。

Publications

Ando T., Kugimiya W., Hashimoto T., Momiyama F., Aoki K., and Nakano K., "Lateral Control in Precision Docking Using RTK-GNSS/INS and LiDAR for Localization," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Vol.6, No.1, 2021, pp. 78-87.

Ando T., Mukumoto, H., Aoki K., Okazaki S., Nagao T., Aoyama H., Yamamoto M., Nakano K., "Localization Using Global Magnetic Positioning System for Automated Driving Bus and Intervals for Magnetic Markers," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, online:2022.3, DOI:10.1109/TIV.2022.3155324