



筑波大学
University of Tsukuba



複数回走行時の車両振動データを用いた VBIシステム同定の適用性に関する数値的検討

フロンティア工学研究グループ

山本研究室 M2

指導教員 山本亨輔

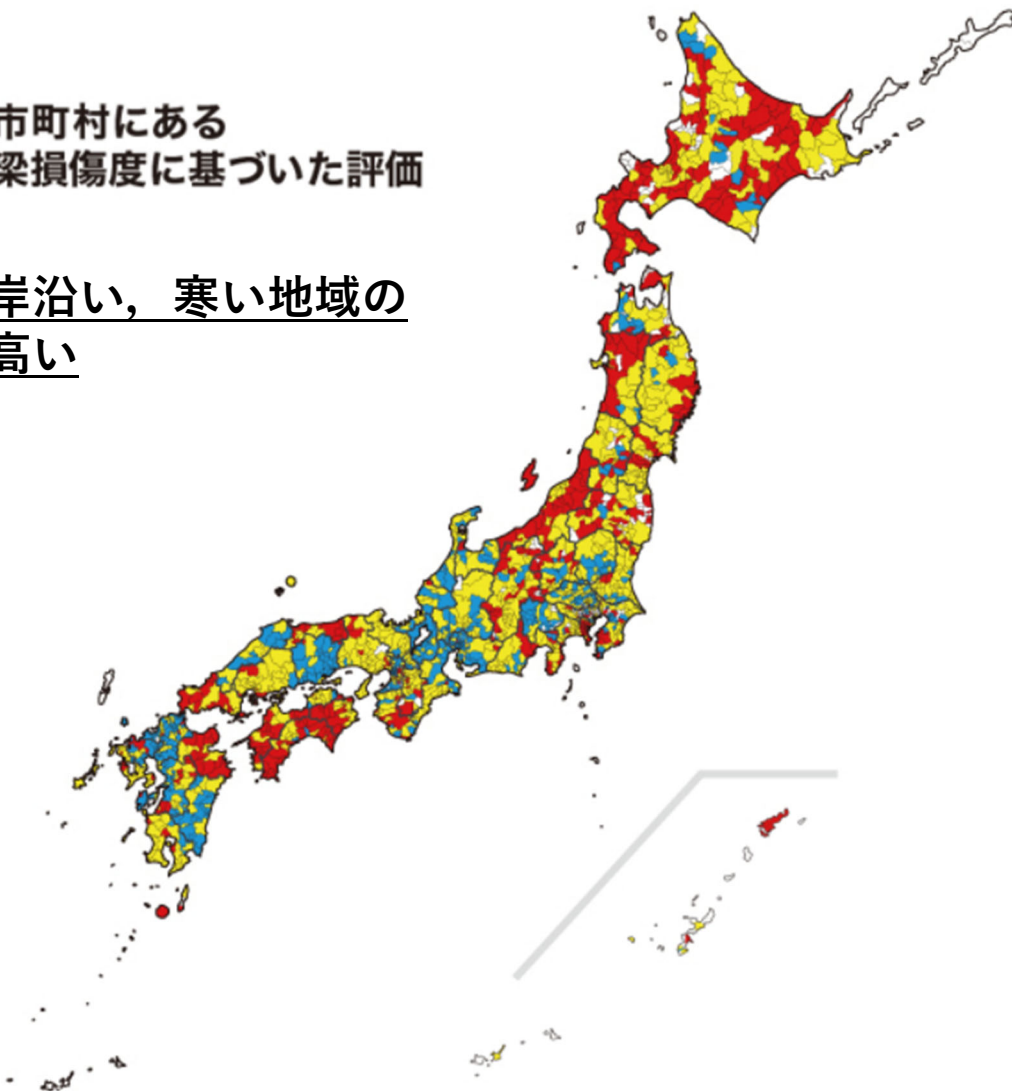
塚田 健人

Kento Tsukada

研究背景…橋梁点検の現状

各市町村にある
橋梁損傷度に基づいた評価

地方や海岸沿い、寒い地域の
損傷度が高い



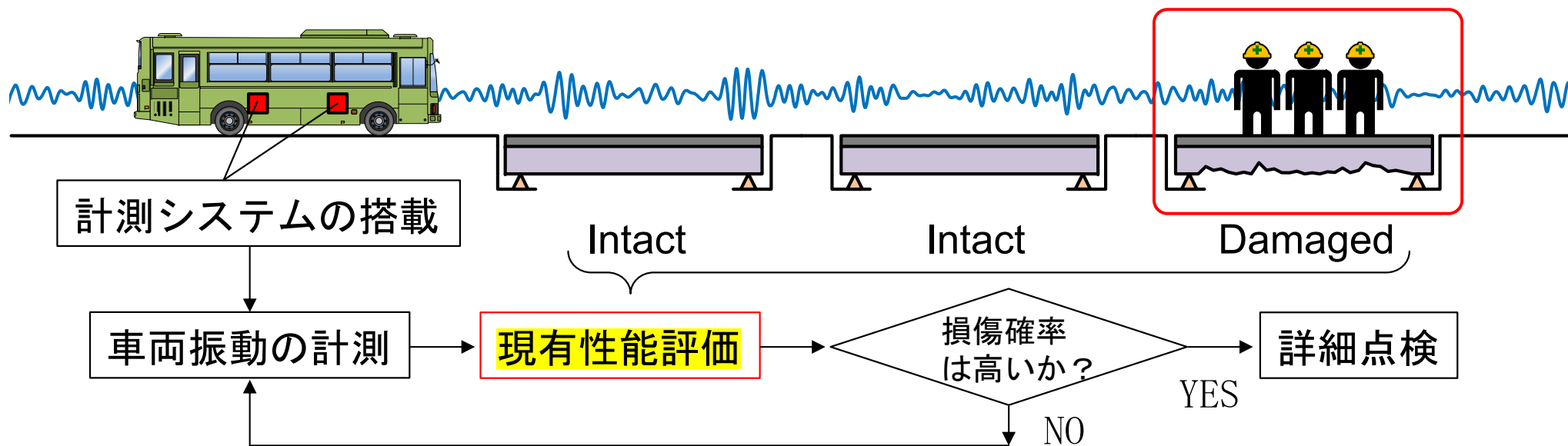
■ 青 上位25% (比較的健全)
■ 黄色 中位50%
■ 赤 下位25% (比較的損傷)

5年毎に全橋梁を詳細点検
(非効率かも?)



戦略的な維持管理
…損傷度の高い地域に
資源(人材・コスト)
を集中させたい

研究背景…Drive-by monitoringによる問題解決

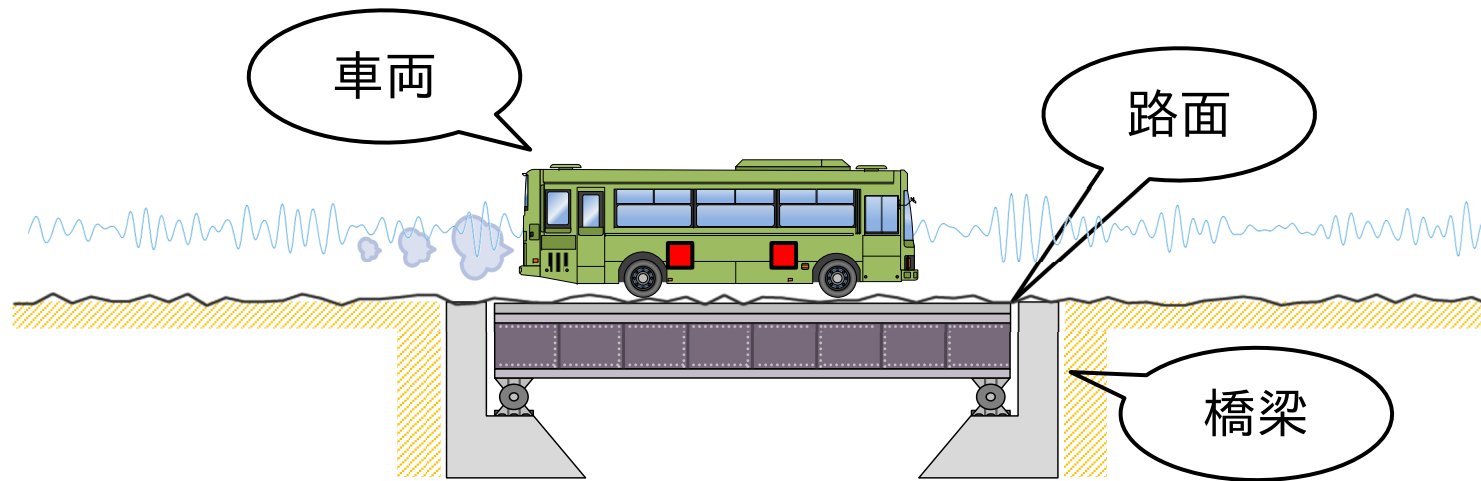


損傷度の高い橋梁のみを詳細点検



効率的な橋梁維持管理の実現

先行研究…VBISI (Vehicle-Bridge Interaction System Identification)



車両振動の取得(センサ)

力学パラメータ

質量値 減衰値
剛性値

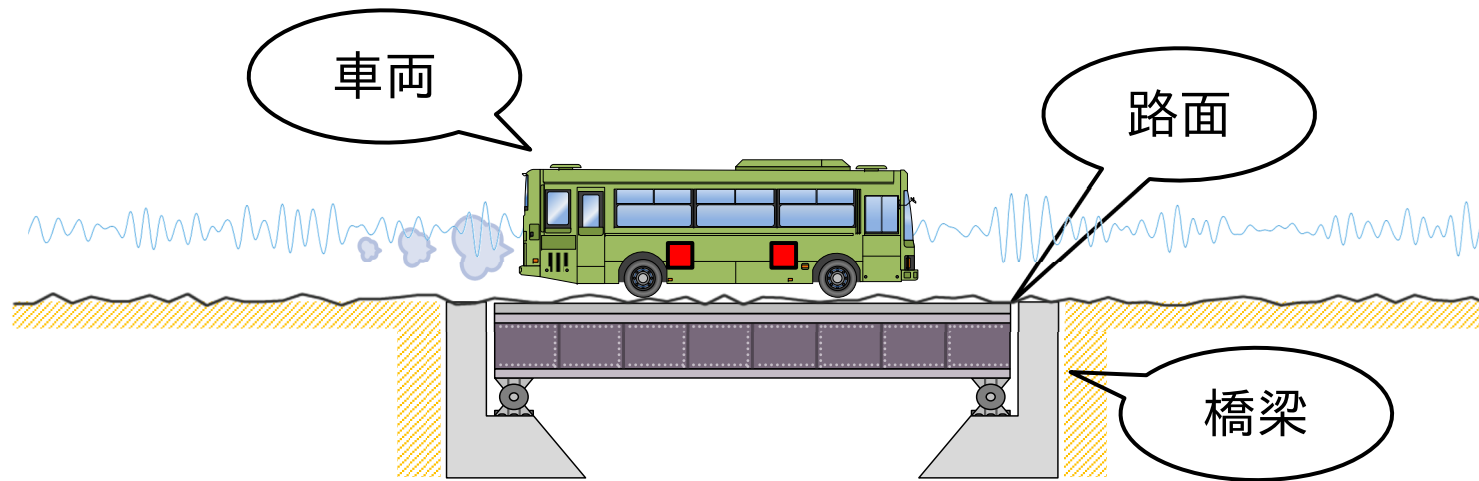
VBISI法

車両・橋梁・路面の状態を推定できる

[9]村上翔:車両振動へのカルマンフィルタ適用によるVBIシステム同定の可能性に関する数値的検討, 筑波大学, 修士論文, 2021

[11]秦涼太, 岡田幸彦, 山本亨輔:移動センシングを用いたシステム同定におけるパラメータ推定精度の数値的検討, 構造工学論文集 Vol.68A, pp.298-309, 2022

先行研究…VBISI (Vehicle-Bridge Interaction System Identification)



橋梁モニタリングに関する先行研究
…特徴量(固有振動, モード形状)を推定している

VBISI法の強み
…物性値(質量・減衰・**剛性**)を推定している
現有性能評価

[1] Y.B. Yang, C.W. Lin and J.D. Yau: Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle, Journal of Sound and Vibration, 272(3-5), pp.471-493, 2004.

[4] 山本亨輔, 大島義信, 杉浦邦征, 河野広隆: 車両応答分析に基づく橋梁モード形状推定手法の開発, 土木学会論文集, 土木学会論文集 A1, Vol.67, pp.242-257, 2011.

[5] Yoshinobu Oshima, Kyosuke Yamamoto and Kunitomo Sugiura: Damage assessment of a bridge based on mode shapes estimated by responses of passing vehicles, Smart Structures and Systems, pp.731-753, 2014.

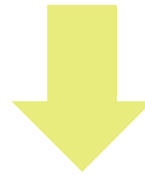
[9] 村上翔: 車両振動へのカルマンフィルタ適用によるVBIシステム同定の可能性に関する数値的検討, 筑波大学, 修士論文, 2021

[11] 秦涼太, 岡田幸彦, 山本亨輔: 移動センシングを用いたシステム同定におけるパラメータ推定精度の数値的検討, 構造工学論文集 Vol.68A, pp.298-309, 2022

研究目的…力学パラメータ推定精度の向上

これまでのVBISI法…1回の車両振動データのみ依存 ^{[9][10][11]}

⇒ノイズがある場合、力学パラメータの推定精度が大幅に低下
さらに、ばらつきが大きく信頼性に欠ける



本提案手法…複数回の車両振動データを活用

⇒各推定路面凹凸を一つの目的関数として集約することで、
効率的な力学パラメータの更新ができるのではないか

[9]村上翔:車両振動へのカルマンフィルタ適用によるVBIシステム同定の可能性に関する数値的検討,筑波大学,修士論文,2021

[10]井上潤:移動センシングを用いたシステム同定において計測ノイズが各パラメータの推定精度に及ぼす影響の数値的検討,筑波大学,修士論文,2021

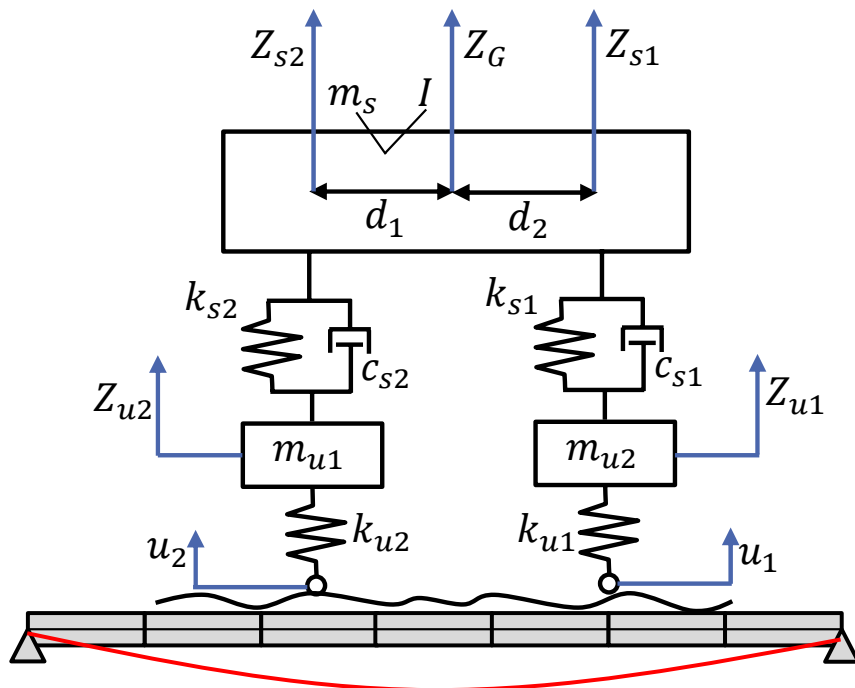
[11]秦涼太,岡田幸彦,山本亨輔:移動センシングを用いたシステム同定におけるパラメータ推定精度の数値的検討,構造工学論文集Vol.68A,pp.298-309,2022

車両-橋梁モデル

数値シミュレーション

車両：ハーフカーモデル

橋梁：1次元オイラーベルヌーイ梁



車両パラメータ (力学パラメータ) [12]

パラメータ名称	単位	記号	値
車体質量	[kg]	m_s	1.66×10^4
前輪バネ下質量	[kg]	m_{u1}	7.00×10^2
後輪バネ下質量	[kg]	m_{u2}	7.00×10^2
前サスペンション減衰	[kg/s]	c_{s1}	1.00×10^3
後サスペンション減衰	[kg/s]	c_{s2}	1.00×10^3
前サスペンション剛性	[N/m]	k_{s1}	4.00×10^5
後サスペンション剛性	[N/m]	k_{s2}	4.00×10^5
前タイヤ剛性	[N/m]	k_{u1}	1.75×10^5
後タイヤ剛性	[N/m]	k_{u2}	1.75×10^5
車体の慣性モーメント	[kg m ²]	I	9.36×10^4
ホイールベース長	[m]	d	4.750
重心と前輪軸との距離	[m]	d_1	2.375
総質量	[kg]	M_{total}	1.80×10^4

橋梁パラメータ (力学パラメータ) [11]

パラメータ名称	単位	記号	値
曲げ剛性	[Nm ²]	EI	1.56×10^{10}
単位長さあたり質量	[kg/m]	ρA	4.40×10^3
スパン長	[m]	L	30
レイリー減衰 (質量比)		α	0.7024
レイリー減衰 (剛性比)		β	0.0052
要素数			7

[11] 秦涼太, 岡田幸彦, 山本亨輔: 移動センシングを用いたシステム同定におけるパラメータ推定精度の数値的検討, 構造工学論文集 Vol.68A, pp.298-309, 2022

[12] Jennifer Keenahan, Yifei Ren, and Eugene J. Obrien: Determination of road profile using multiple passing vehicle measurements: Structure and Infrastructure Engineering

VBI (車両-橋梁相互作用 : Vehicle-Bridge Interaction) システム

車両の運動方程式

$$\mathbf{M}_V \ddot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}_V \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}_V \mathbf{z}(t) = \mathbf{F}_V(t)$$

$$\mathbf{F}_V(t) = [0, 0, k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

- 青 得られた加速度振動を数値積分
- 赤 力学パラメータ(質量・減衰・剛性)
⇒ 初期値はランダム

橋梁の運動方程式

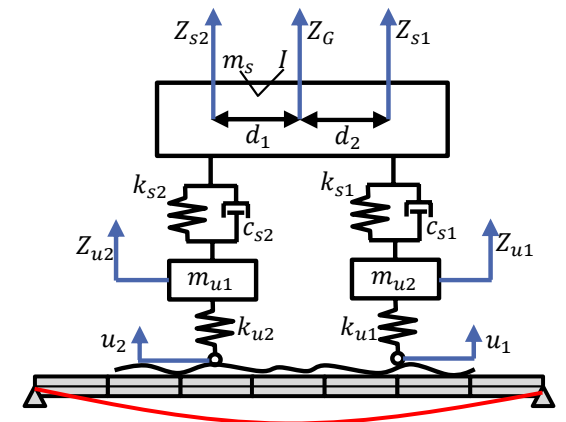
$\mathbf{L}(t)$: 等価節点力マトリクス

$$\mathbf{M}_B \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}_B \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_B \mathbf{y}(t) = \mathbf{L}(t) \mathbf{P}(t)$$

接地力

$$P_1(t) = \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} (g - \ddot{z}_{s1}(t)) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}(t))$$

$$P_2(t) = \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} (g - \ddot{z}_{s2}(t)) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}(t))$$



VBI (車両-橋梁相互作用 : Vehicle-Bridge Interaction) システム

車両の運動方程式

$$\mathbf{M}_V \ddot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}_V \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}_V \mathbf{z}(t) = \mathbf{F}_V(t)$$

$$\mathbf{F}_V(t) = [0, 0, k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

橋梁の運動方程式

$\mathbf{L}(t)$: 等価節点力マトリクス

$$\mathbf{M}_B \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}_B \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_B \mathbf{y}(t) = \mathbf{L}(t) \mathbf{P}(t)$$

接地力

$$P_1(t) = \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} (g - \ddot{z}_{s1}(t)) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}(t))$$

$$P_2(t) = \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} (g - \ddot{z}_{s2}(t)) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}(t))$$

橋梁プロフィールへ変換

$$\mathbf{y}(x(t), t) = \mathbf{L}(t)^T \mathbf{y}(t)$$

入力プロフィール

前輪 $u_1(t) = r_1(t) + y(x_1(t), t)$
後輪 $u_2(t) = r_2(t) + y(x_2(t), t)$

路面凹凸

$$R_1(x_1(t)) = r_1(t)$$

$$R_2(x_2(t)) = r_2(t)$$

VBI (車両-橋梁相互作用 : Vehicle-Bridge Interaction) システム

車両の運動方程式

$$\mathbf{M}_V \ddot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}_V \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}_V \mathbf{z}(t) = \mathbf{F}_V(t)$$

$$\mathbf{F}_V(t) = [0, 0, k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

入力プロフィール

$$u_1(t) = r_1(t) + y(x_1(t), t)$$

$$u_2(t) = r_2(t) + y(x_2(t), t)$$

路面凹凸

前輪

$$R_1(x_1(t)) = r_1(t)$$

後輪

$$R_2(x_2(t)) = r_2(t)$$

接地力

$$P_1(t) = \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} (g - \ddot{z}_{s1}(t)) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}(t))$$

$$P_2(t) = \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} (g - \ddot{z}_{s2}(t)) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}(t))$$

$\mathbf{L}(t)$: 等価節点力マトリクス

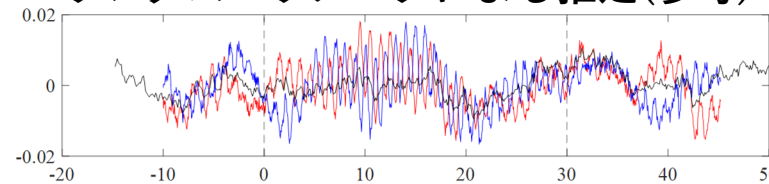
橋梁の運動方程式

$$\mathbf{M}_B \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}_B \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_B \mathbf{y}(t) = \mathbf{L}(t) \mathbf{P}(t)$$

橋梁プロフィールへ変換

$$\mathbf{y}(x(t), t) = \mathbf{L}(t)^T \mathbf{y}(t)$$

ランダムパラメータによる推定(参考)



VBI (車両-橋梁相互作用 : Vehicle-Bridge Interaction) システム

車両の運動方程式

$$\mathbf{M}_V \ddot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}_V \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}_V \mathbf{z}(t) = \mathbf{F}_V(t)$$

$$\mathbf{F}_V(t) = [0, 0, k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

入力プロフィール

$$u_1(t) = r_1(t) + y(x_1(t), t)$$

$$u_2(t) = r_2(t) + y(x_2(t), t)$$

路面凹凸

$$R_1(x_1(t)) = r_1(t)$$

$$R_2(x_2(t)) = r_2(t)$$

目的関数を設定

$$J = \sum_{\substack{\text{前輪} \\ \text{後輪}}} |R_1(x) - R_2(x)|^2$$

接地力

$$P_1(t) = \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} (g - \ddot{z}_{s1}(t)) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}(t))$$

$$P_2(t) = \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} (g - \ddot{z}_{s2}(t)) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}(t))$$

$\mathbf{L}(t)$: 等価節点力マトリクス

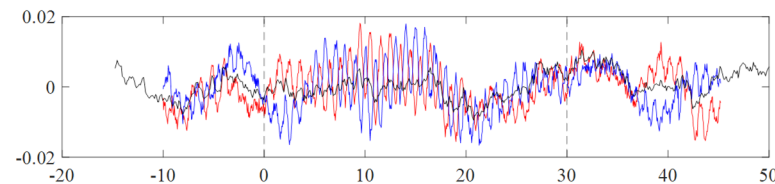
橋梁の運動方程式

$$\mathbf{M}_B \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}_B \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_B \mathbf{y}(t) = \mathbf{L}(t) \mathbf{P}(t)$$

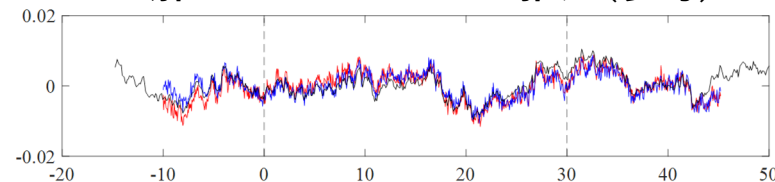
橋梁プロフィールへ変換

$$\mathbf{y}(x(t), t) = \mathbf{L}(t)^T \mathbf{y}(t)$$

ランダムパラメータによる推定(参考)

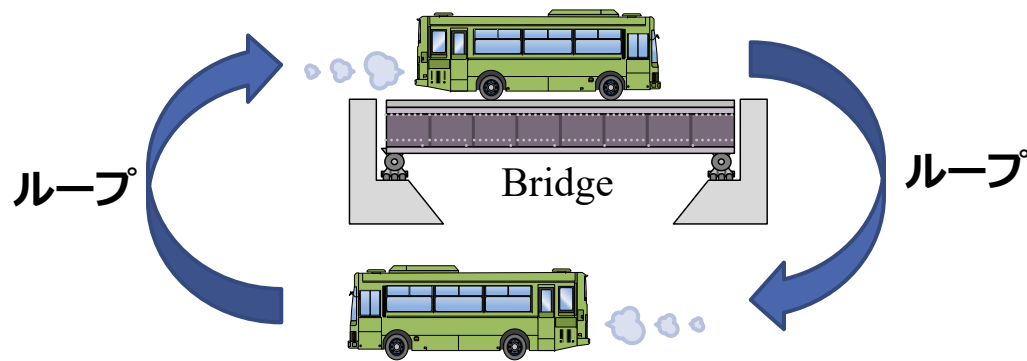


正解パラメータによる推定(参考)



提案手法…複数回走行データに対応したVBISI法

VBIシステムを順的に解くことで
車両振動データを複数生成します



VBISI法の適用

解析条件

- 車両と橋梁は同一
- 走行速度[28.8km/h~32.4km/h]
- 同一の路面凹凸を仮定
- ノイズ15%, 35%(白色ガウス)

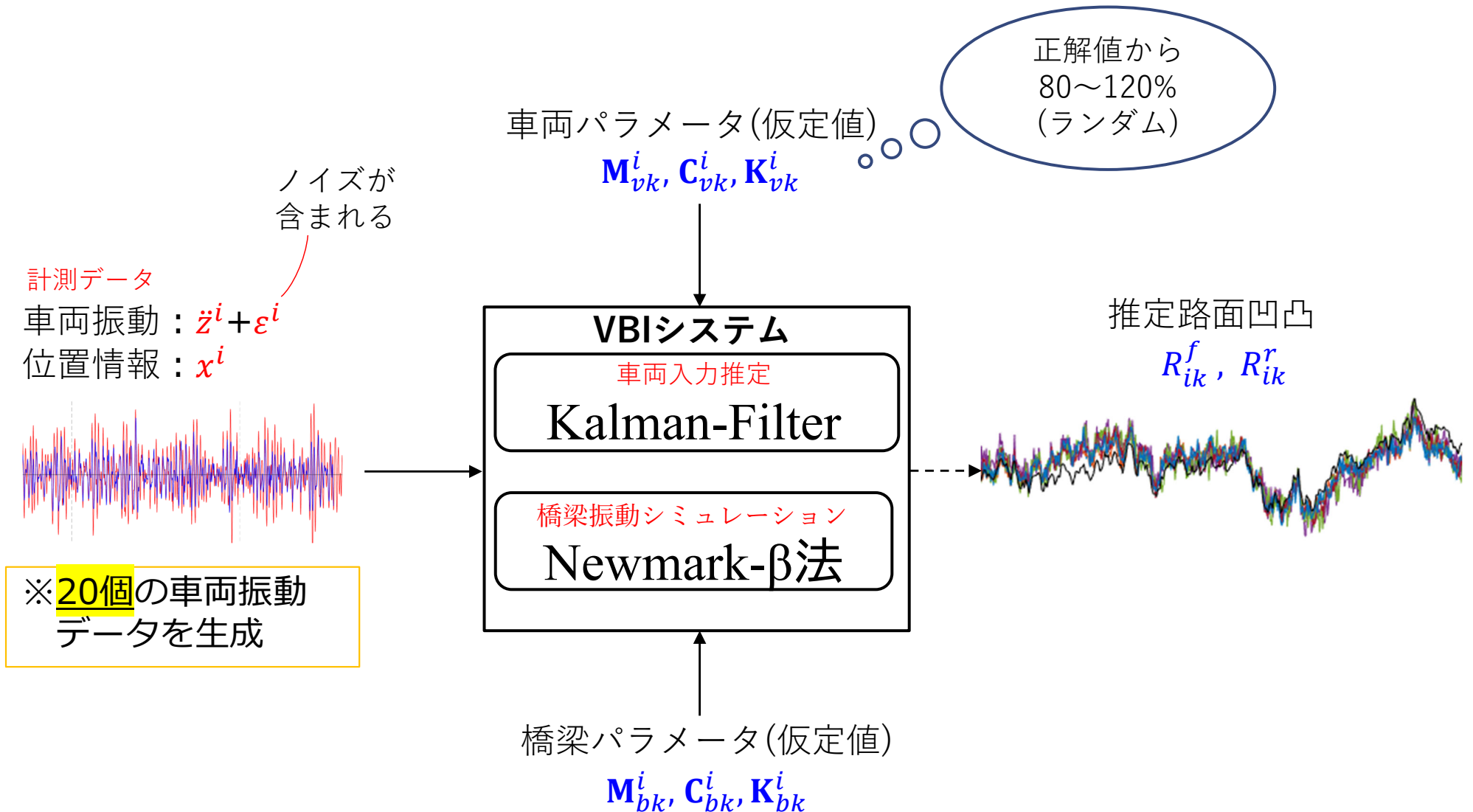
目的関数の変更

$$J = \sum \left| \underset{\text{前輪}}{R_f(x)} - \underset{\text{後輪}}{R_r(x)} \right|^2 \quad \longrightarrow \quad J = \sum_i \left\{ \left| \underset{\text{前輪}}{R_{ik}^f(x)} - \underset{\text{平均}}{\bar{R}(x)} \right|^2 + \left| \underset{\text{後輪}}{R_{ik}^r(x)} - \underset{\text{平均}}{\bar{R}(x)} \right|^2 \right\}$$

従来のVBISI法 本提案手法

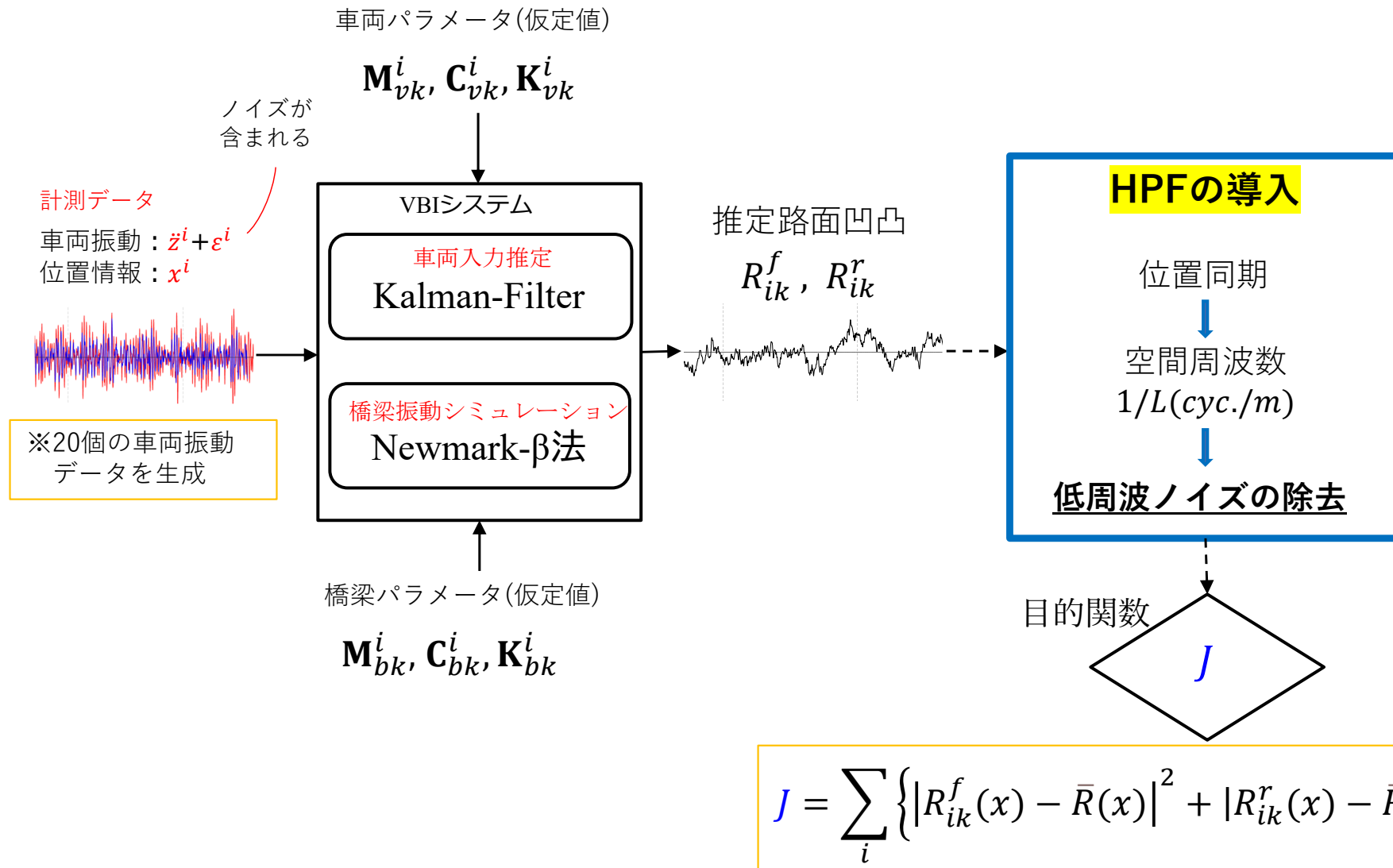
提案手法…力学パラメータの更新フロー

車両振動データの取得 → 各車両振動データに対する路面凹凸の推定



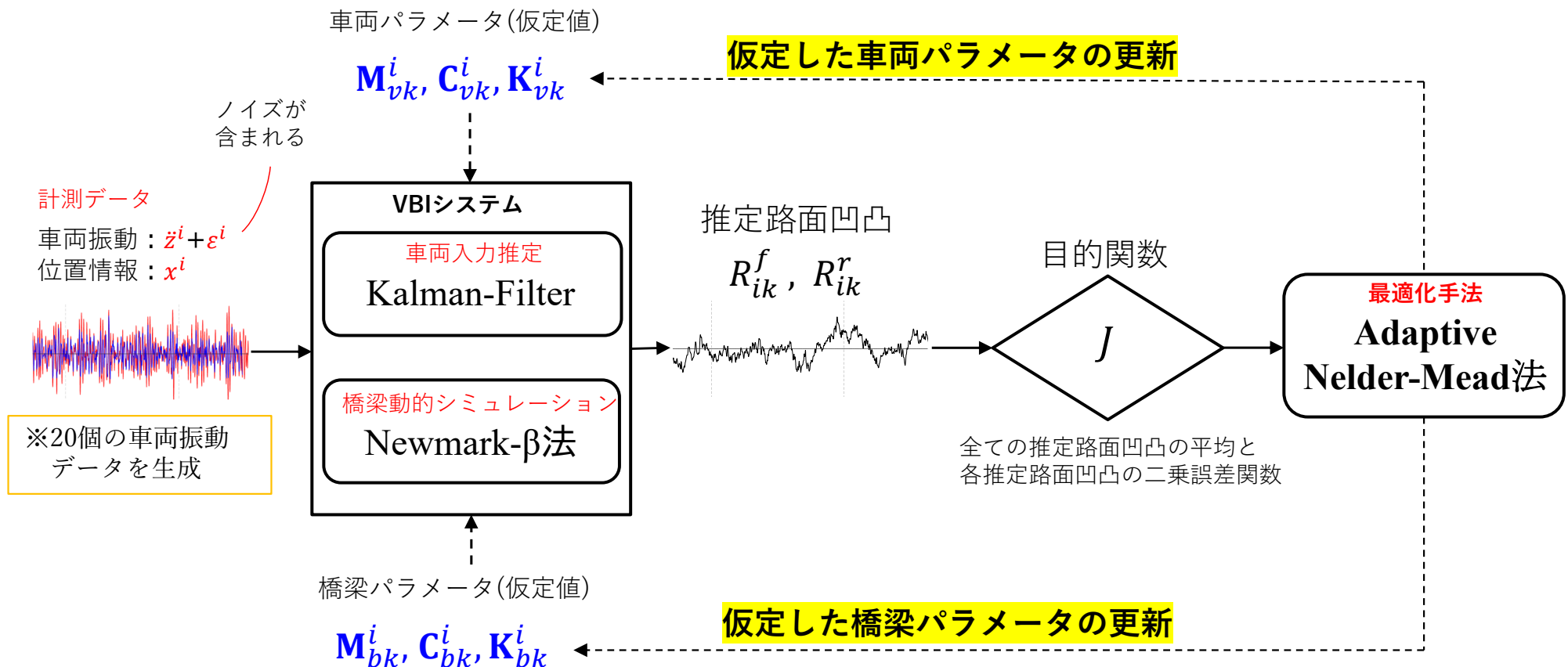
提案手法…力学パラメータの更新フロー

各推定路面凹凸 → HPFの導入 → 目的関数値の算出



提案手法…力学パラメータの更新フロー

目的関数値の算出 ⇒ Adaptive Nelder-Mead法による力学パラメータの更新



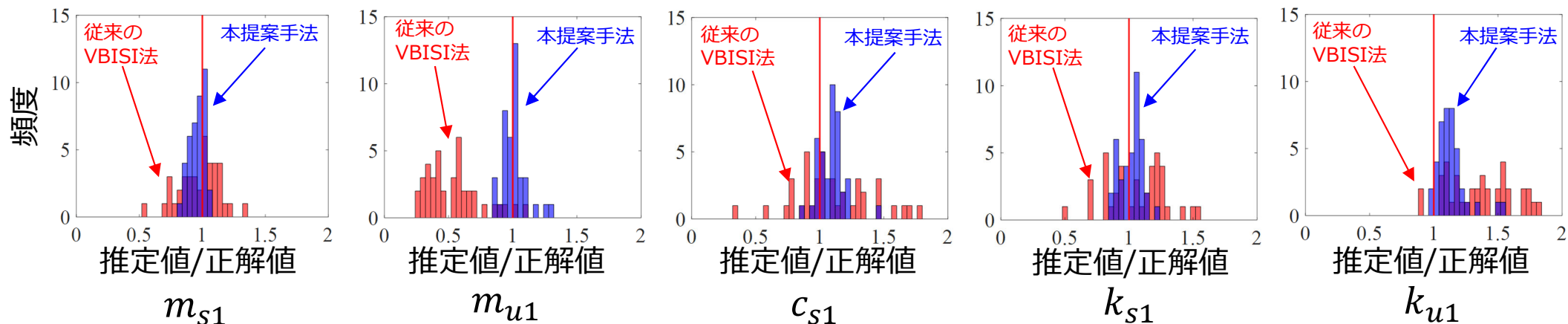
4.2提案手法の適用検証…力学パラメータ推定精度比較

従来のVBISI法(赤)と本提案手法(青)の比較結果…ノイズ15%, 走行回数[20], 実験回数[40]

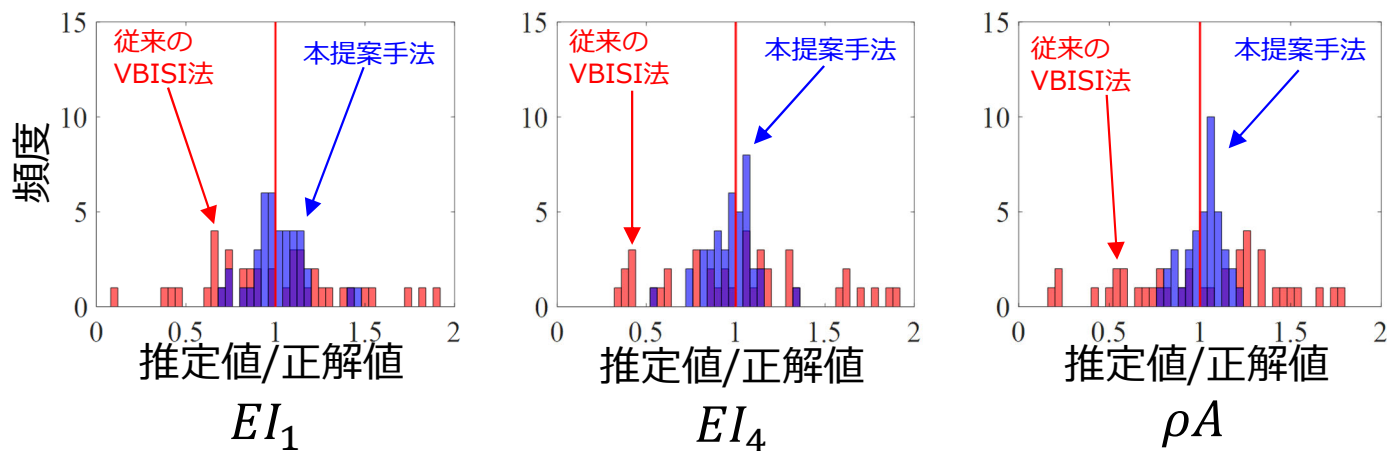
車両パラメータ…推定精度の改善に成功し, **ばらつきが大幅に抑制された**

※前輪のみの表示

一回の走行データのみ依存しないパラメータ更新が行われた為だと考えられる



橋梁パラメータ…推定精度は改善している為, 実環境への適用に期待



4.5提案手法の適用検証…異なる路面を走行したケース

異なる路面を走行したケースと同一の路面を走行したケースの精度比較

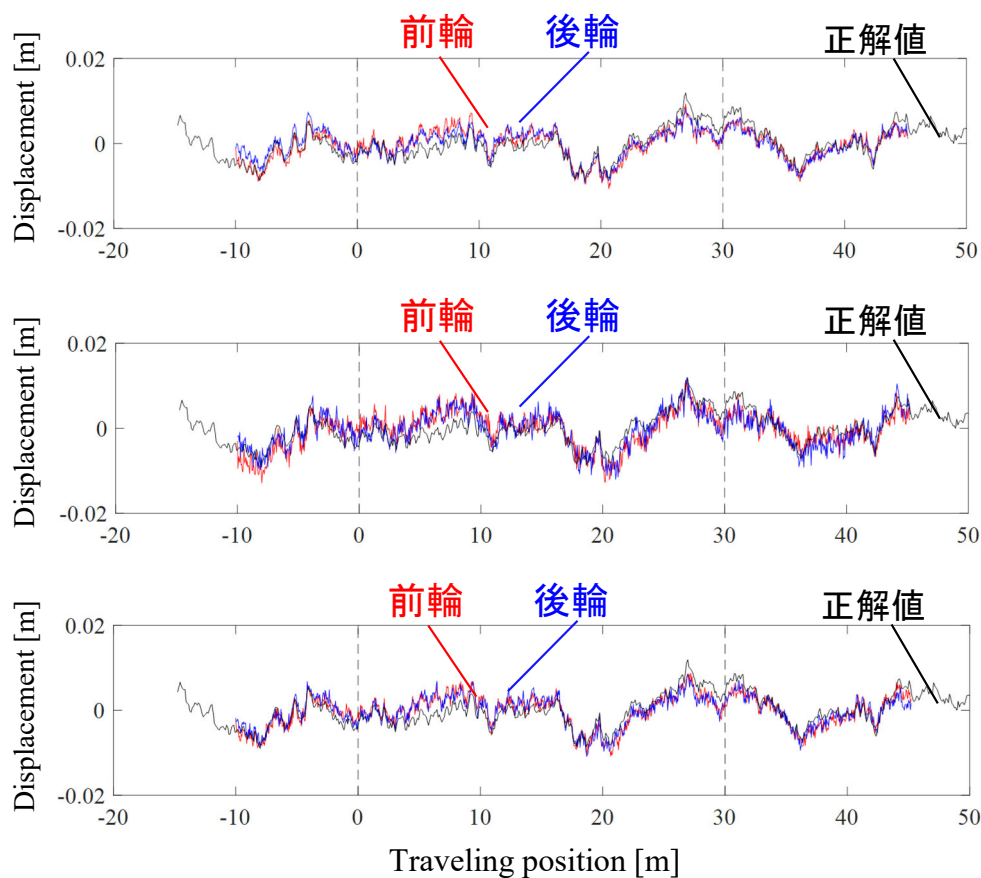
…異なる路面を走行した方が精度が良い事がわかる→本研究において最も懸念していた点

解析条件	ノイズ15%				ノイズ35%				青：精度の高い方
	同一の路面を走行		異なる路面を走行		同一の路面を走行		異なる路面を走行		
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
m_{u1}	1.010	0.091	1.035	0.061	0.923	0.127	0.989	0.109	信頼性と関係
m_{u2}	0.913	0.085	1.006	0.059	0.828	0.170	0.991	0.115	精度と関係
m_{s1}	0.960	0.058	0.970	0.049	0.997	0.129	0.965	0.109	
m_{s2}	1.039	0.058	1.029	0.049	1.002	0.129	1.034	0.109	
c_{s1}	1.087	0.103	1.082	0.099	1.271	0.250	1.163	0.157	
c_{s2}	1.007	0.110	1.059	0.085	1.154	0.219	1.163	0.211	
k_{s1}	1.017	0.081	0.997	0.063	1.231	0.175	1.018	0.135	
k_{s2}	1.164	0.087	1.075	0.064	1.327	0.200	1.104	0.142	
k_{u1}	1.133	0.113	1.111	0.069	1.434	0.221	1.216	0.141	
k_{u2}	1.075	0.099	1.072	0.070	1.379	0.287	1.202	0.150	
El_1	1.010	0.152	1.007	0.088	0.954	0.329	1.047	0.166	
El_4	0.968	0.136	0.993	0.083	0.995	0.342	1.045	0.179	
ρA	1.021	0.106	0.992	0.090	0.989	0.280	1.024	0.170	

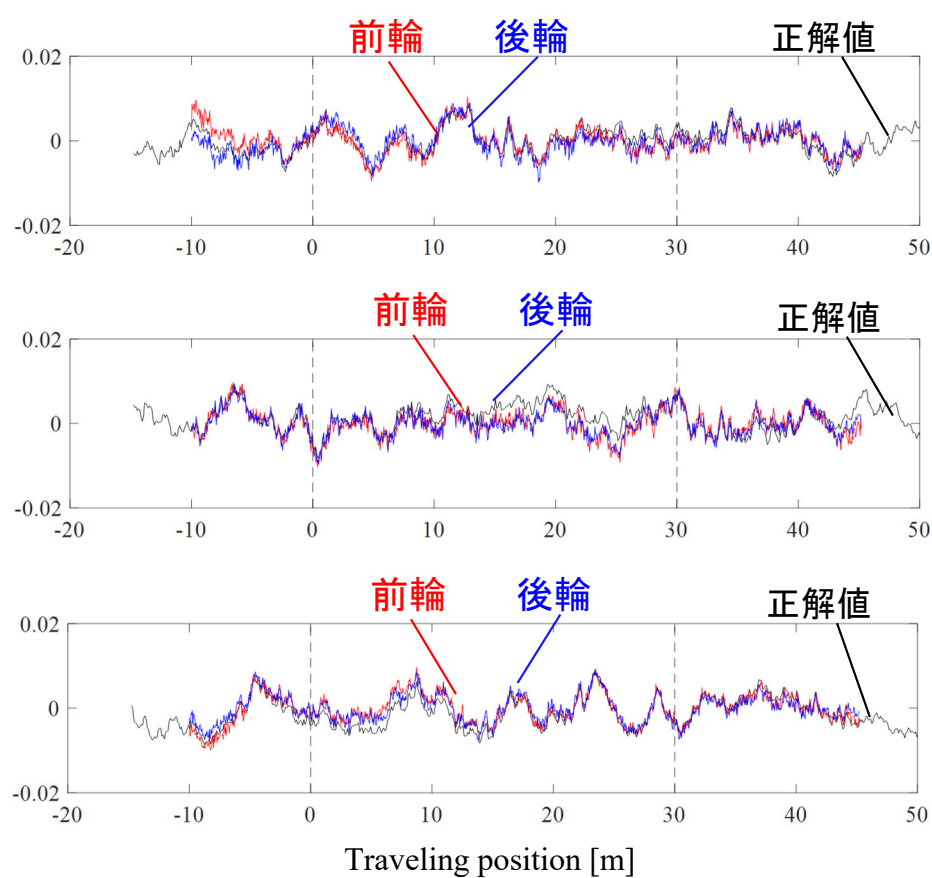
提案手法の適用検証…異なる路面を走行したケース

推定される路面凹凸による考察(ノイズ15%)

⇒推定される20個のうち適当な3個ずつを表示



同一の路面凹凸を走行したケース

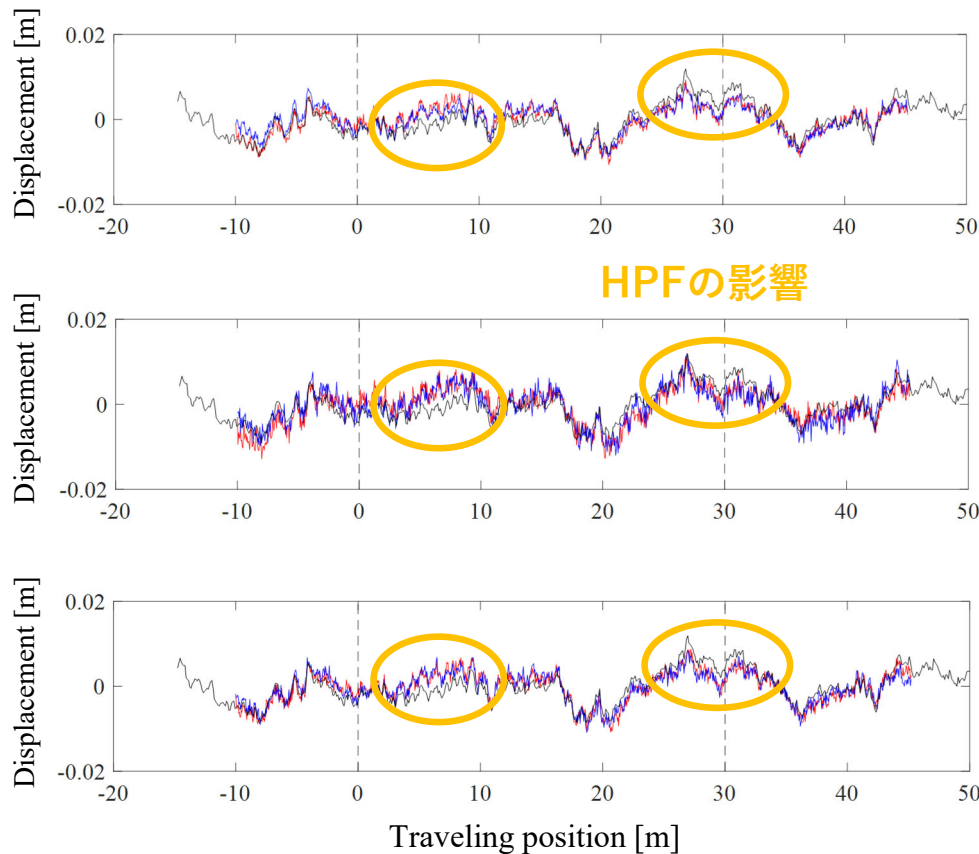


異なる路面凹凸を走行したケース

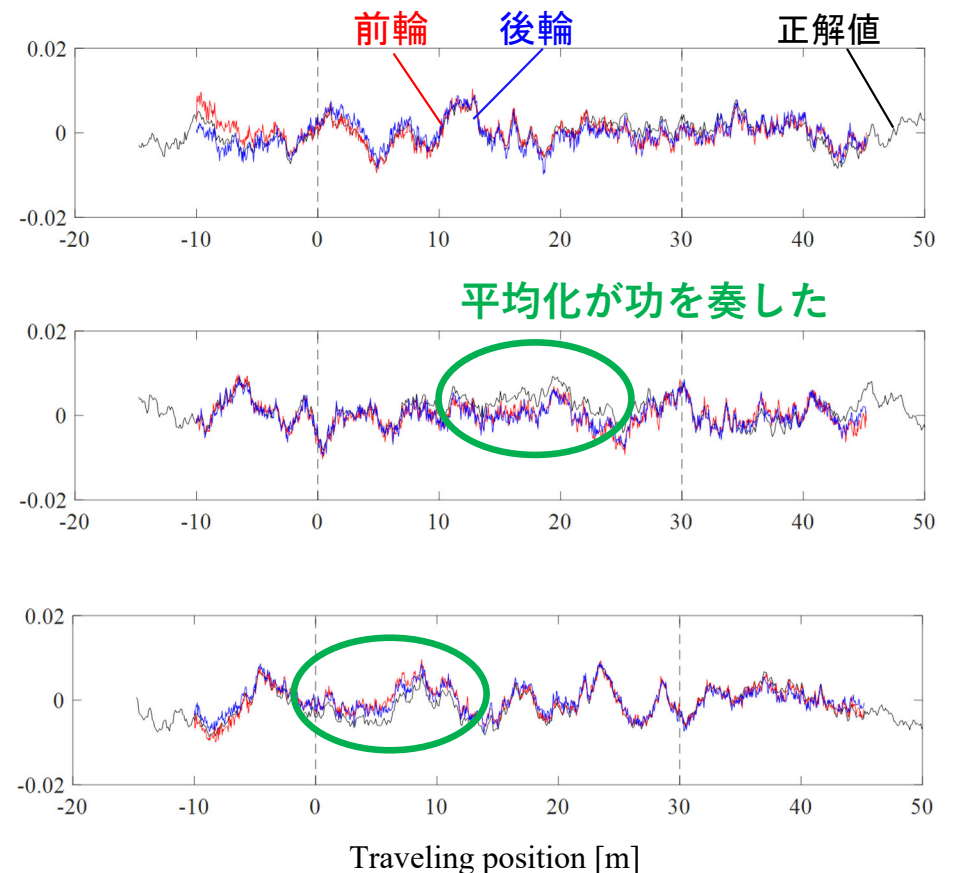
提案手法の適用検証…異なる路面を走行したケース

推定される路面凹凸による考察(ノイズ15%)

…HPFと白色ノイズの影響により、誤差の傾向が一致している→精度の限界を引き起こしている
⇒結果、異なる路面凹凸を走行したケースの方が効率的なパラメータ更新が行われた



同一の路面凹凸を走行したケース



異なる路面凹凸を走行したケース

まとめと今後の展望

本提案手法

複数回走行時の車両振動データに対して，車両・橋梁・路面を推定するアルゴリズムを新たに提案し，精度改善効果を検証



検証結果

- ・ 先行研究と比較し，複数回走行への対応により力学パラメータの推定精度の改善に成功した⇒実環境への適用に期待
 - … 1回の走行データのみには依存しないパラメータ更新が行われた為
- ・ 異なる路面凹凸を走行したケースにおいても推定精度の向上が確認できた
 - … 同一な路面凹凸ではノイズが一様であることが精度の限界を引き起こしており，目的関数に含まれる平均化が功を奏し，効率的なパラメータ更新が行われた

今後の展望

実環境への適用や3次元モデルへの拡張

