



筑波大学
University of Tsukuba



移動センシングを用いたシステム同定において 計測ノイズが車両パラメータの推定精度に 及ぼす影響の数値的検討

Numerical Verification of Noise Influence on
Vehicle Parameter Estimation Accuracy of System Identification by On-going Monitoring

筑波大学大学院
理工情報生命学術院
システム情報工学研究群

秦 涼太

SHIN Ryota

筑波大学大学院
システム情報系
構造エネルギー工学域

井上 潤

INOUE Jun

筑波大学大学院
システム情報系 准教授
社会工学域

岡田 幸彦

OKADA Yukihiko

筑波大学大学院
システム情報系 助教
構造エネルギー工学域

山本 亨輔

YAMAMOTO Kyosuke

第24回 応用力学シンポジウム (令和3年5月14日・15日)

Background

Inexpensive and Quick Monitoring for Infrastructure Structures (安価で短時間なインフラ構造物モニタリング)

高齢化社会



建設後50年経過する橋梁 年間4000件超の道路陥没^[4]

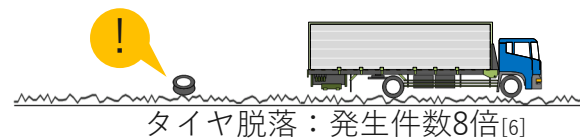


予算不足



維持管理・更新費用 増加^[2]
公共事業関係費 縮減^[3]

車両事故件数増加傾向



[1] 総務省統計局「令和元年 労働力調査年報」

[2] 国土交通省「令和2年版 国土交通白書」

[3] 国土交通省「令和2年度国土交通関係予算概要」

[4] 国土交通省「第6回道路技術小委員会 配付資料【資料3-2】これからの舗装マネジメント」

[5] 国土交通省「インフラメンテナンス情報 社会資本の老朽化の現状と将来」

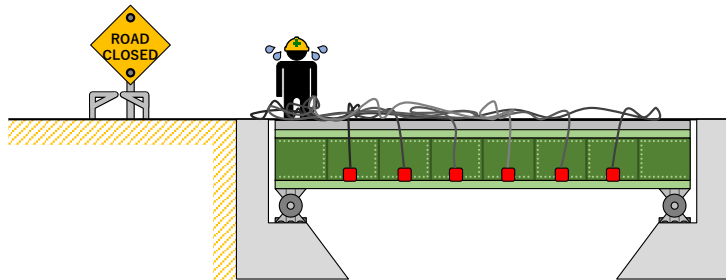
[6] 国土交通省「平成29年度大型車の車輪脱落事故発生状況」

Signal Processing for Structural Monitoring

橋梁応答分析

橋梁振動を直接計測

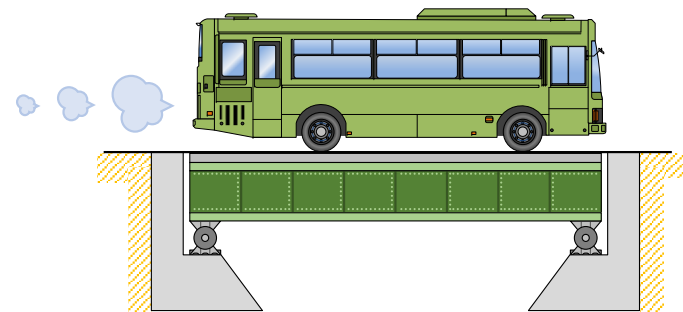
- 高精度かつ高感度
- × 設置費用が高く、時間がかかる



車両応答分析^[7]

橋梁振動を車両振動から推定

- 短時間かつ低コストで実施
- × 精度が低い



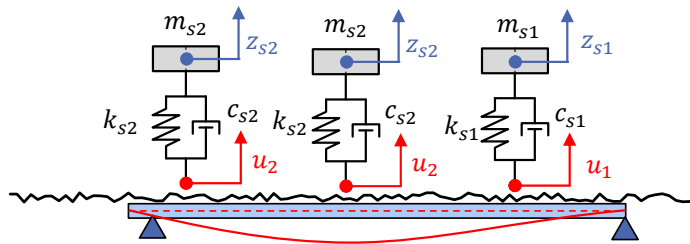
[7] Yang et al. (2004)

Existing Drive-by Monitoring

山本ほか(2011)^[8]

複数台を用いた

橋梁のモード形状の推定



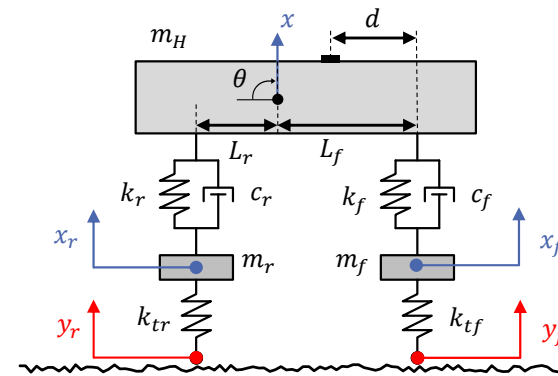
※山本ほか(2011)を参考に筆者が作成

複数台が同時に
橋梁上を走行する時間は短い

長山ほか(2019)^[9]

車両一台で

路面凹凸推定



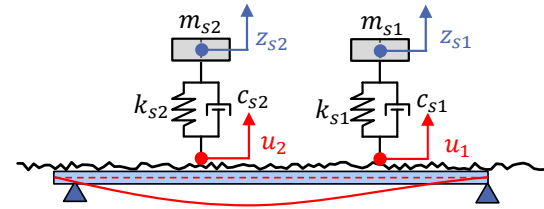
※長山ほか(2019)を参考に筆者が作成

車両パラメータの校正が必要

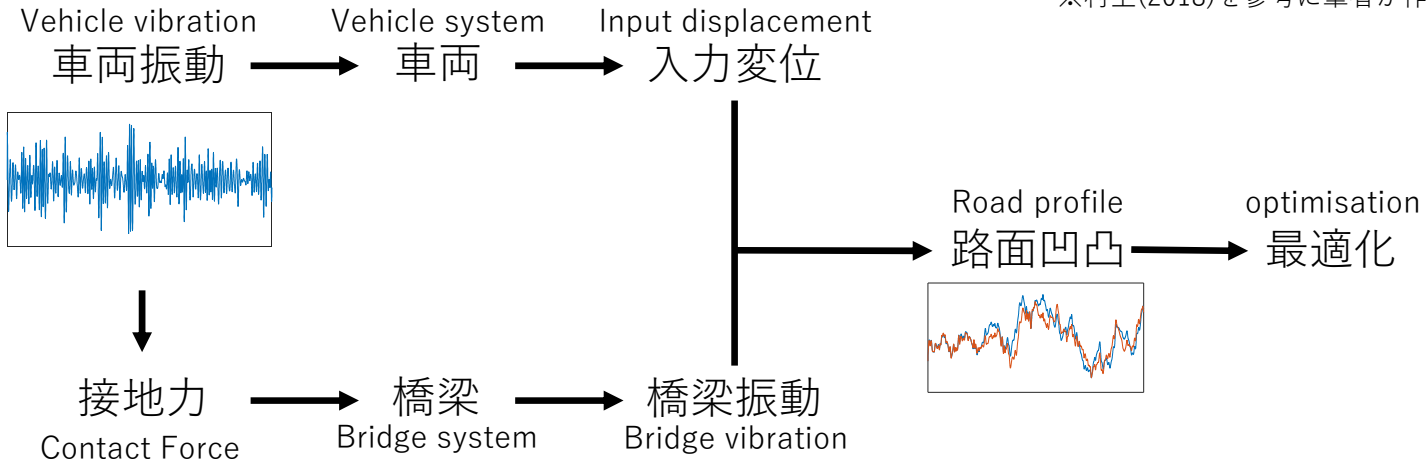
Existing Drive-by Monitoring

村上(2018)^[10]

複数台での車両-橋梁-路面の同時同定



※村上(2018)を参考に筆者が作成



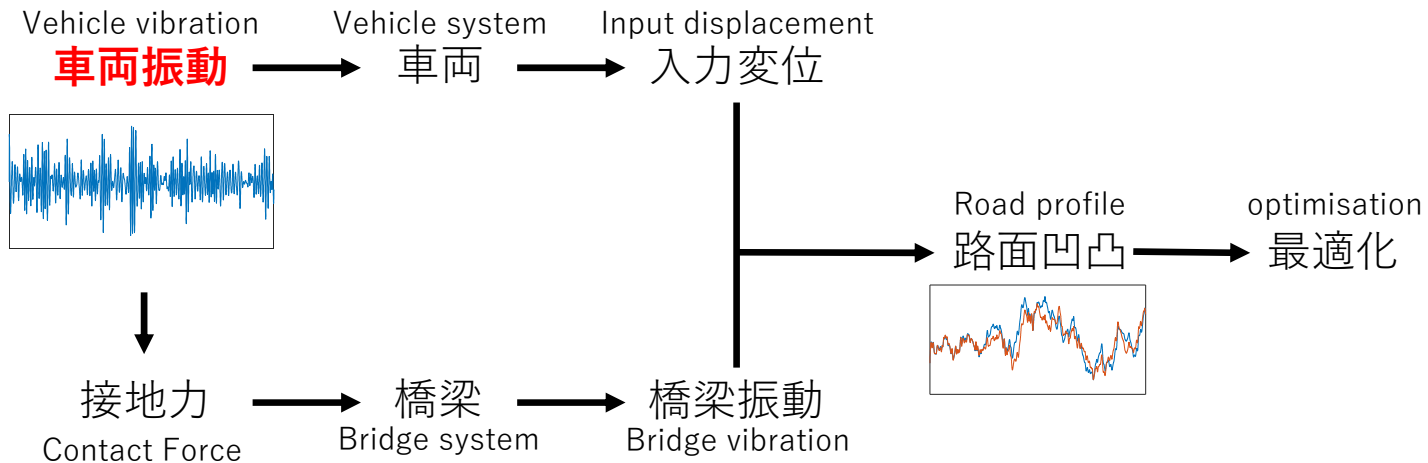
課題

目的関数の形状が不明

Existing Drive-by Monitoring

村上(2018)^[10]

車両振動が得られたとする



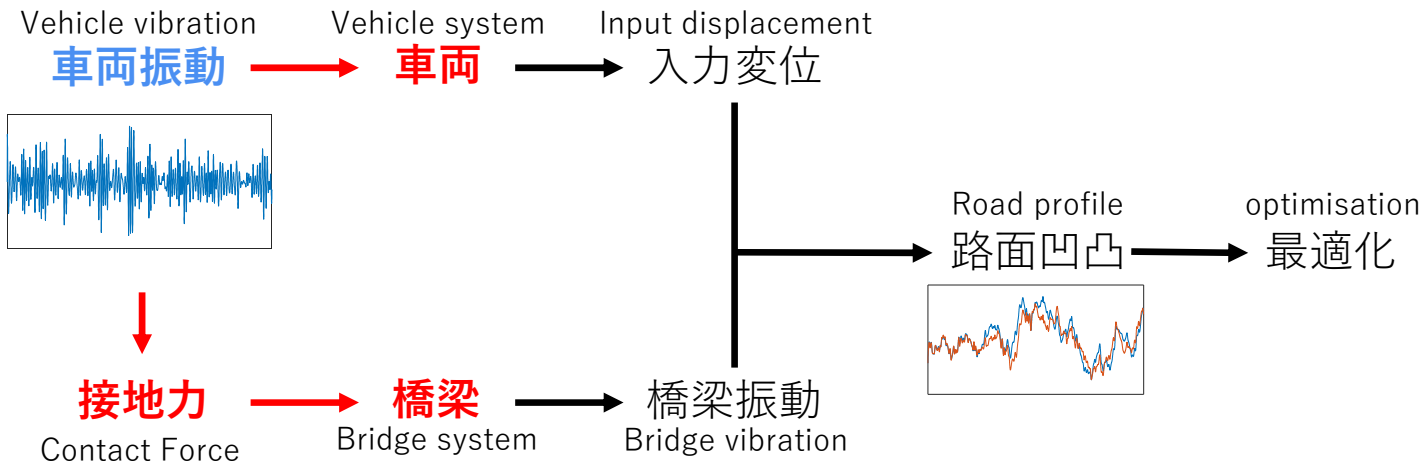
課題

目的関数の形状が不明

Existing Drive-by Monitoring

村上(2018)^[10]

力学的パラメータをランダム仮定



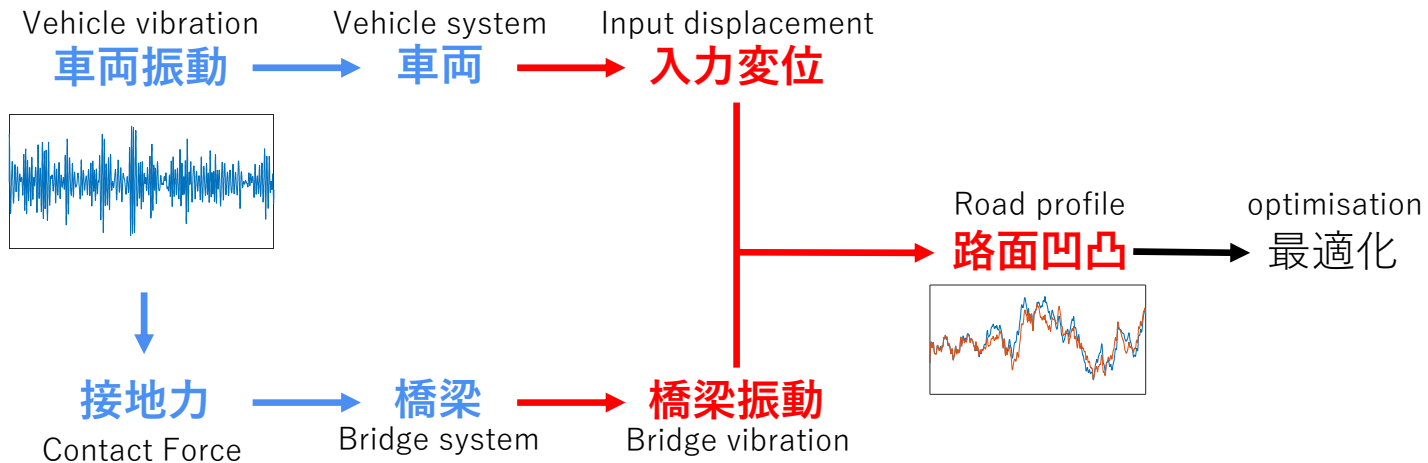
課題

目的関数の形状が不明

Existing drive-by monitoring

村上(2018)^[10]

先行車と後続車の路面凹凸を推定



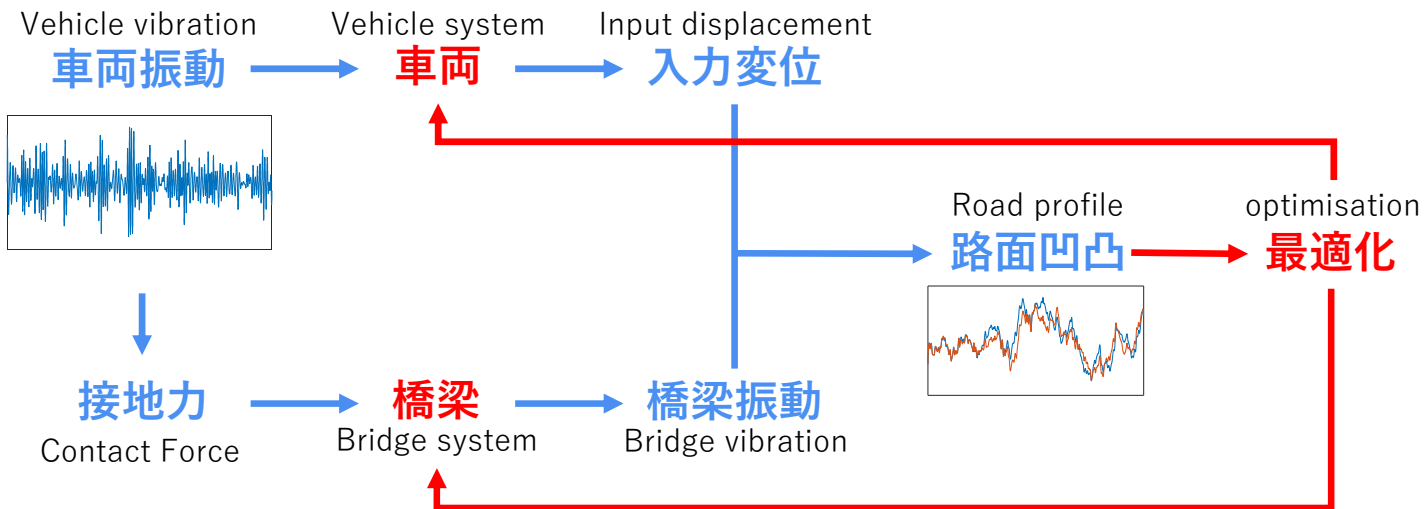
課題

目的関数の形状が不明

Existing Drive-by Monitoring

村上(2018)^[10]

粒子群最適化法を用いて、パラメータを更新する

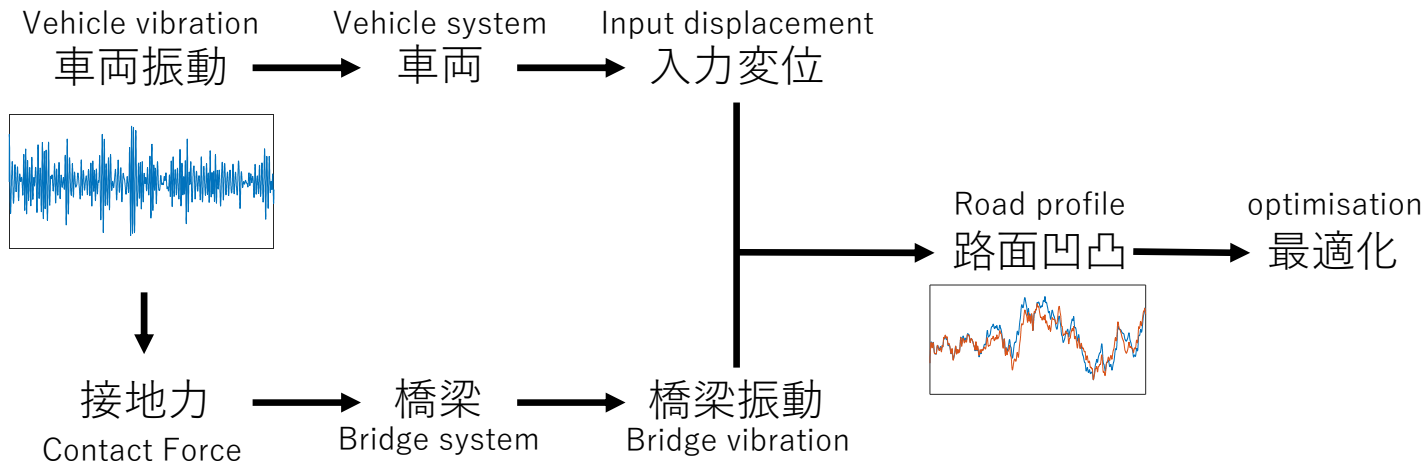


課題

目的関数の形状が不明

Existing Drive-by Monitoring

村上(2018)^[10]



課題

目的関数の形状が不明
→ 計算コストが高い

Purpose

車両一台で計測される**車両振動のみから**
車両・橋梁・路面凹凸の同時同定の理論構築

車両のパラメータの**目的関数形状の確認**

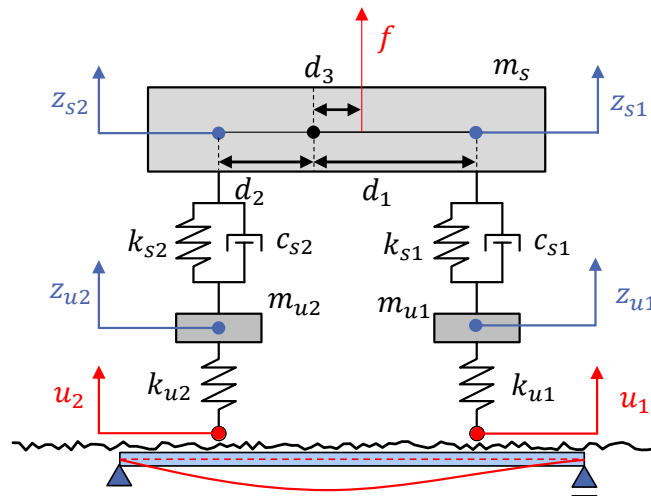
ノイズによる**パラメータ推定精度への影響を調査**

Modeling

数値計算

車両：剛体バネモデル（18t車）

橋梁：単純梁有限要素モデル



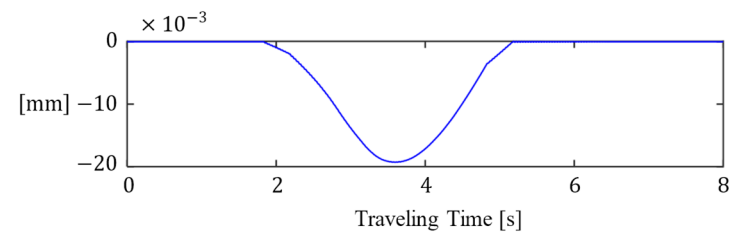
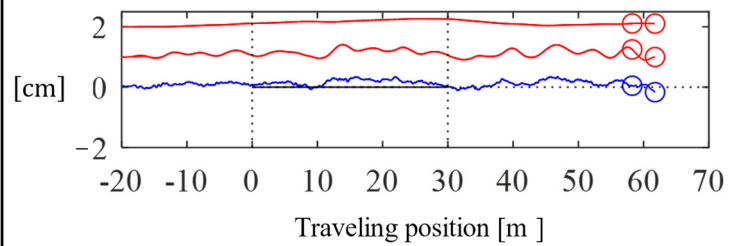
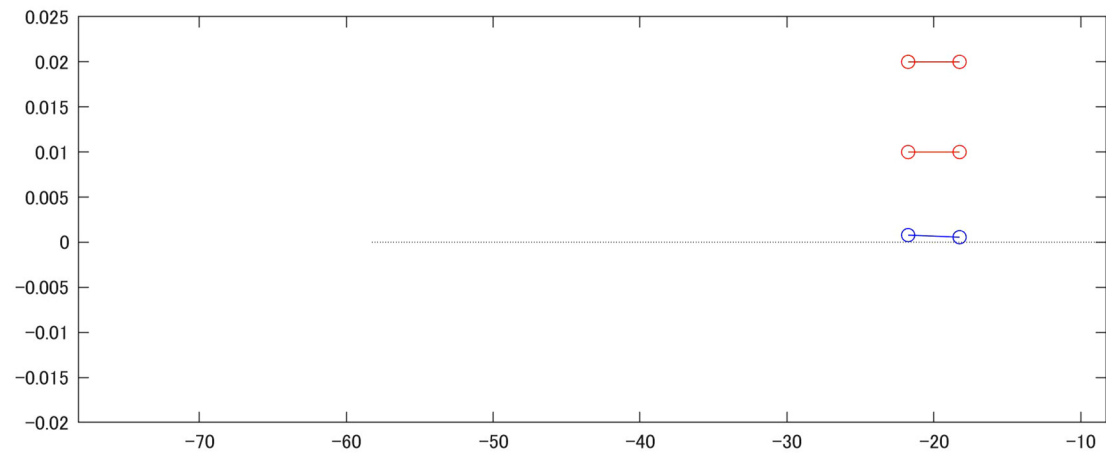
車両モデル

| | | |
|---------------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Mass: m_s | 9.00×10^3 | [kg] |
| Unsprung-Mass: m_{u1}, m_{u2} | 5.00×10^2 | [kg*m ²] |
| Damping (Sprung-mass): c_{s1}, c_{s2} | 2.00×10^3 | [kg/s] |
| Stiffness (Sprung-mass): k_{s1}, k_{s2} | 4.50×10^3 | [kg/s ²] |
| Stiffness (Unsprung-mass): k_{u1}, k_{u2} | 6.00×10^4 | [kg/s ²] |
| Distance between axles: $d_1 + d_2$ | 3.00 | [m] |

橋梁モデル

| | | |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Length | 30 | [m] |
| Number of Elements | 6 | |
| Mass per unit length values of all elements: ρA | 3000 | [kg/m] |
| Flexural Rigidities of all elements: EI | 1.56×10^{11} | [N*m ²] |

Movie – VBI Simulation



VBI System Identification

$$\mathbf{z}(t) = [z_{s1}, z_{s2}, z_{u1}, z_{u2}]^T$$

※ $\dot{\mathbf{z}}(t)$ が得られたとし,
 $\dot{\mathbf{z}}(t)$, $\mathbf{z}(t)$ はNewmark β 法で算出

The equation of motion of **Vehicle** System:

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

$$\mathbf{f}(t) = [f(t), d_3 f(t), k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

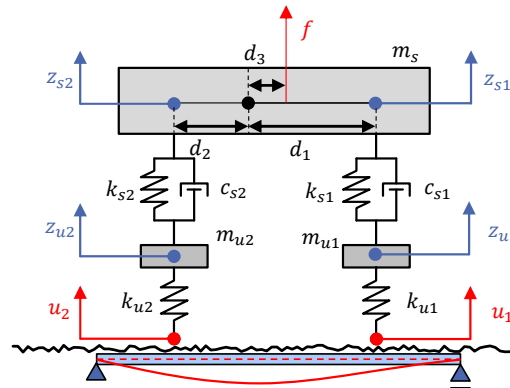
Input Profile:

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

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

移動点に変換

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



Contact Forces:

$$\mathbf{P}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{array} \right\}$$

The equation of motion of **Bridge** System:

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

$\mathbf{L}(t)$: 等価節点力マトリクス

VBI System Identification

① 車両振動 $\dot{z}(t)$ が得られる

$$\mathbf{z}(t) = [z_{s1}, z_{s2}, z_{u1}, z_{u2}]^T$$

※ $\dot{z}(t)$ が得られたとし,
 $\dot{z}(t)$, $\mathbf{z}(t)$ は Newmark β 法で算出

The equation of motion of **Vehicle** System:

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

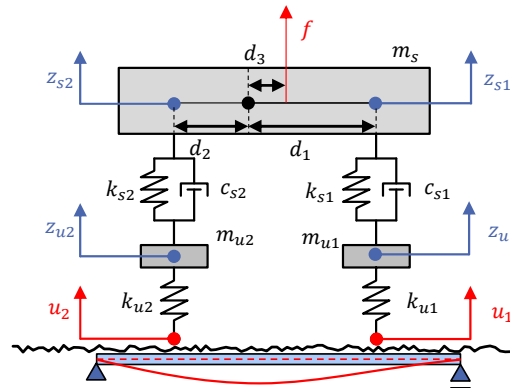
$$\mathbf{f}(t) = [f(t), d_3 f(t), k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

Input Profile:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= r_1(t) + y(x_1(t), t) \\ u_2(t) &= r_2(t) + y(x_2(t), t) \end{aligned}$$

移動点に変換

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



Contact Forces:

$$\mathbf{P}(t) = \begin{Bmatrix} \frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{Bmatrix}$$

The equation of motion of **Bridge** System:

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

$\mathbf{L}(t)$: 等価節点力マトリクス

VBI System Identification

②力学的パラメータを仮定する

$$\mathbf{z}(t) = [z_{s1}, z_{s2}, z_{u1}, z_{u2}]^T$$

The equation of motion of **Vehicle** System:

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

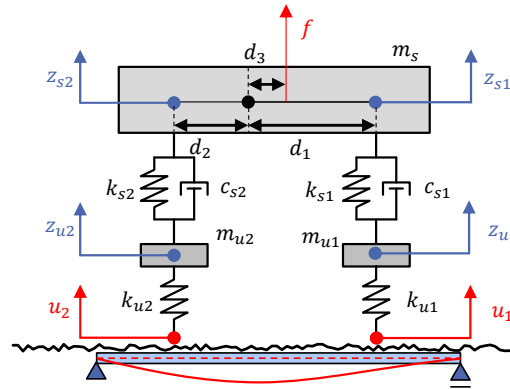
$$\mathbf{f}(t) = [f(t), d_3 f(t), k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

Input Profile:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= r_1(t) + y(x_1(t), t) \\ u_2(t) &= r_2(t) + y(x_2(t), t) \end{aligned}$$

移動点に変換

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



Contact Forces:

$$\mathbf{P}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{array} \right\}$$

The equation of motion of **Bridge** System:

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

$\mathbf{L}(t)$: 等価節点力マトリクス

VBI System Identification

③ 車両入力変位 $u(t)$ が得られる
 (同時にエンジン振動 $f(t)$ も推定)

$$\mathbf{z}(t) = [z_{s1}, z_{s2}, z_{u1}, z_{u2}]^T$$

The equation of motion of **Vehicle** System:

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

$$\mathbf{f}(t) = [f(t), d_3 f(t), k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

Input Profile:

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

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

移動点に変換

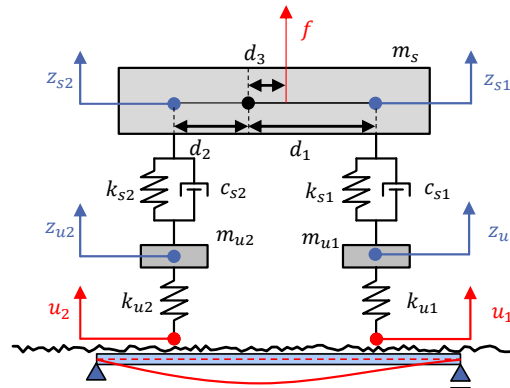
$$\mathbf{y}(x(t), t) = \mathbf{L}(t)^T \mathbf{y}(t)$$

The equation of motion of **Bridge** System:

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

Contact Forces:

$$\mathbf{P}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{array} \right\}$$



$\mathbf{L}(t)$: 等価節点力マトリクス

VBI System Identification

(再掲) ①車両振動 $\dot{z}(t)$ が得られる

$$\mathbf{z}(t) = [z_{s1}, z_{s2}, z_{u1}, z_{u2}]^T$$

②力学的パラメータを仮定する

The equation of motion of **Vehicle** System:

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

$$\mathbf{f}(t) = [f(t), d_3 f(t), k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

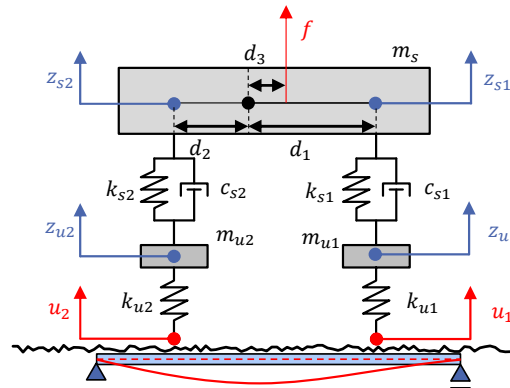
Input Profile:

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

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

移動点に変換

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



Contact Forces:

$$\mathbf{P}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{array} \right\}$$

The equation of motion of **Bridge** System:

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

$\mathbf{L}(t)$: 等価節点力マトリクス

VBI System Identification

④ **タイヤ接地力** $\mathbf{P}(t)$ が得られる

$$\mathbf{z}(t) = [z_{s1}, z_{s2}, z_{u1}, z_{u2}]^T$$

The equation of motion of **Vehicle** System:

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

$$\mathbf{f}(t) = [f(t), d_3 f(t), k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

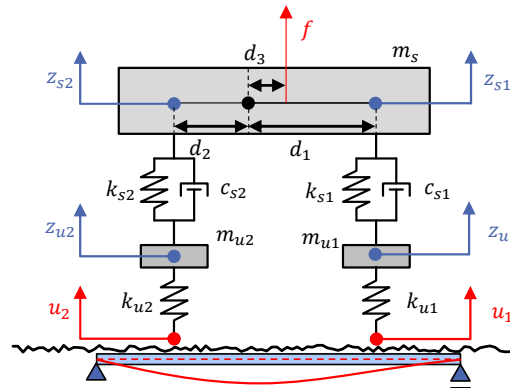
Input Profile:

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

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

移動点に変換

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



Contact Forces:

$$\mathbf{P}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{array} \right\}$$

The equation of motion of **Bridge** System:

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

$\mathbf{L}(t)$: 等価節点カマトリクス

VBI System Identification

⑤ 固定点の橋梁振動 $y(t)$ が得られる $z(t) = [z_{s1}, z_{s2}, z_{u1}, z_{u2}]^T$

The equation of motion of **Vehicle** System:

$$M_V \ddot{z}(t) + C_V \dot{z}(t) + K_V z(t) = f(t)$$

$$f(t) = [f(t), d_3 f(t), k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

Input Profile:

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

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

移動点に変換

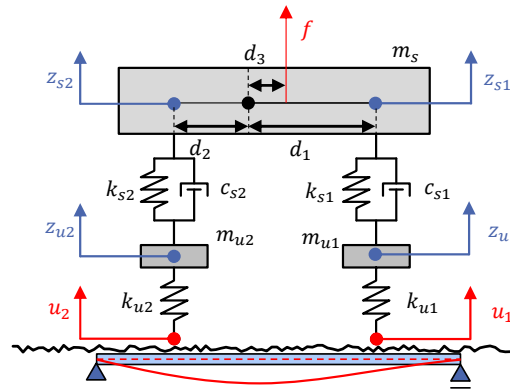
$$y(x(t), t) = L(t)^T y(t)$$

The equation of motion of **Bridge** System:

$$M_B \ddot{y}(t) + C_B \dot{y}(t) + K_B y(t) = L(t) P(t)$$

Contact Forces:

$$P(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{array} \right\}$$



$L(t)$: 等価節点カマトリクス

VBI System Identification

⑥移動点の橋梁振動 $y(x(t), t)$ を推定 $\mathbf{z}(t) = [z_{s1}, z_{s2}, z_{u1}, z_{u2}]^T$

The equation of motion of **Vehicle** System:

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

$$\mathbf{f}(t) = [f(t), d_3 f(t), k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

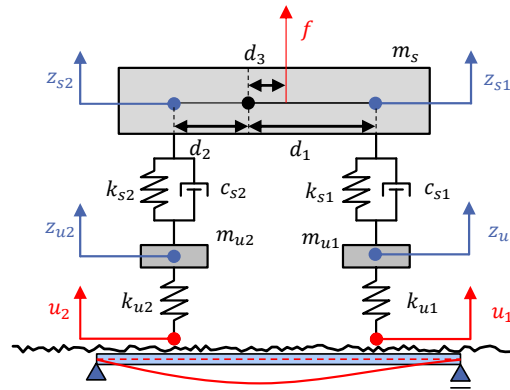
Input Profile:

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

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

移動点に変換

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



Contact Forces:

$$\mathbf{P}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{array} \right\}$$

The equation of motion of **Bridge** System:

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

$\mathbf{L}(t)$: 等価節点カマトリクス

VBI System Identification

⑥路面応答 $r(t)$ が得られる

$$\mathbf{z}(t) = [z_{s1}, z_{s2}, z_{u1}, z_{u2}]^T$$

The equation of motion of **Vehicle** System:

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

$$\mathbf{f}(t) = [f(t), d_3 f(t), k_{u1} u_1(t), k_{u2} u_2(t)]^T$$

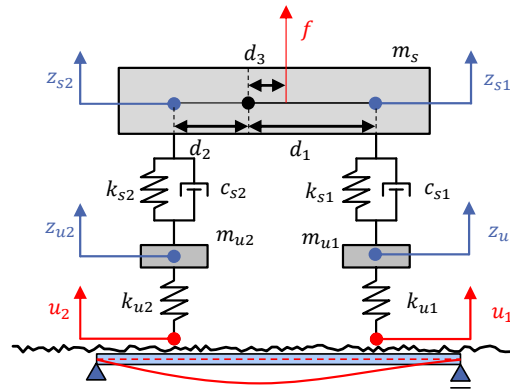
Input Profile:

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

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

移動点に変換

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



Contact Forces:

$$\mathbf{P}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{array} \right\}$$

The equation of motion of **Bridge** System:

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

$\mathbf{L}(t)$: 等価節点カマトリクス

VBI System Identification

⑥前輪と後輪位置の路面凹凸 $R(x(t))$ を求める

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

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

⑦目的関数の作成

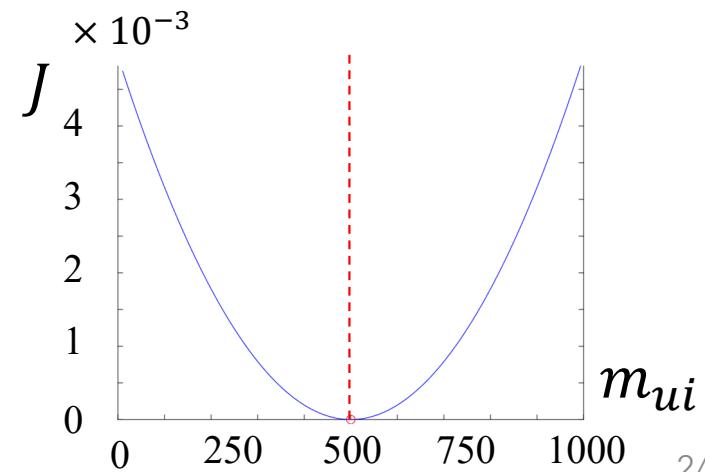
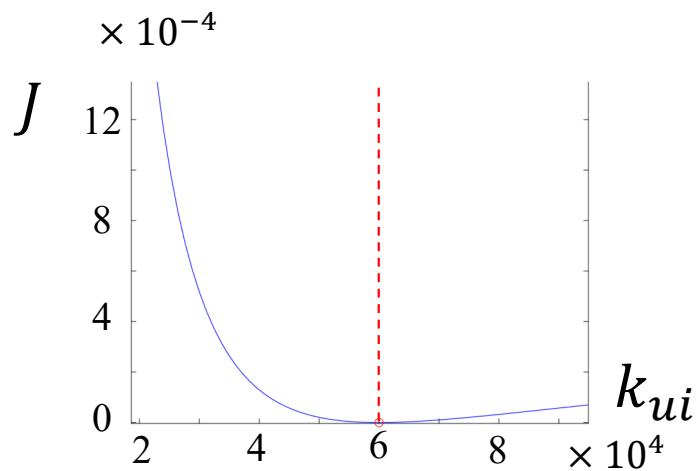
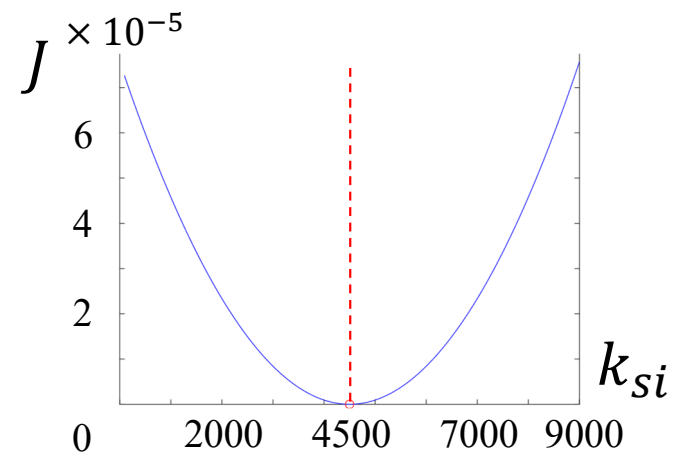
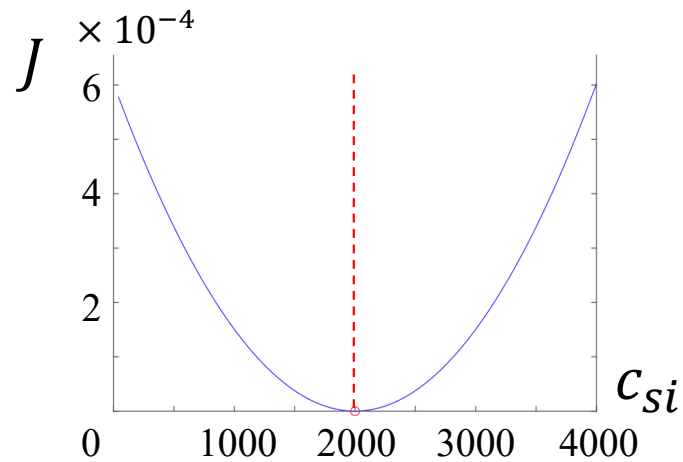
$$J = \sum |R_1(x) - R_2(x)|^2$$

⑧誤差が最小となるようにパラメータを更新する

村上(2018)_[10]では粒子群最適化(PSO, Particle Swarm Optimization)法

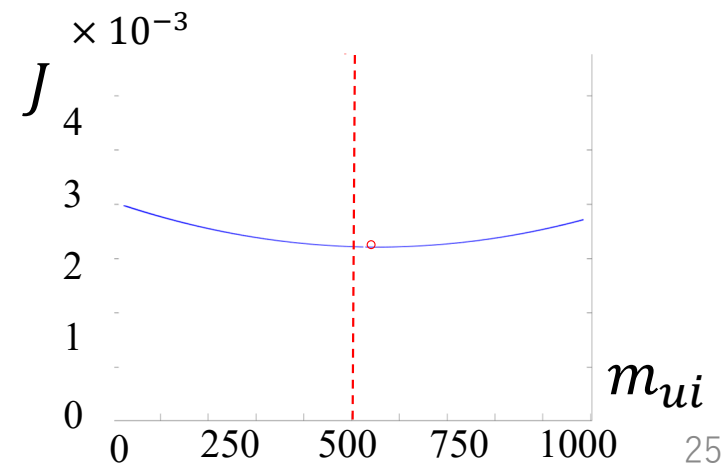
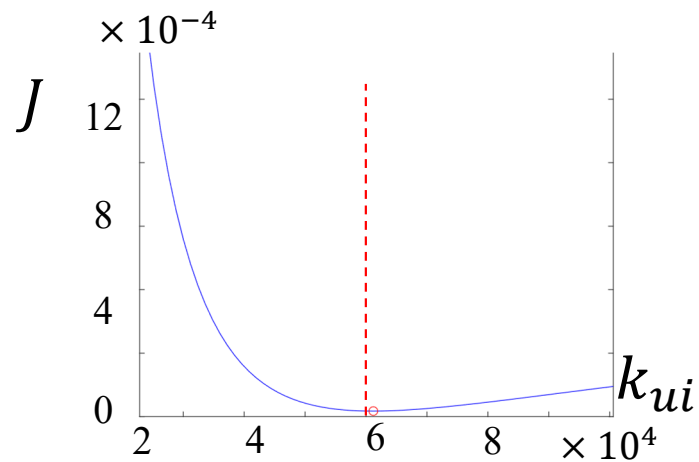
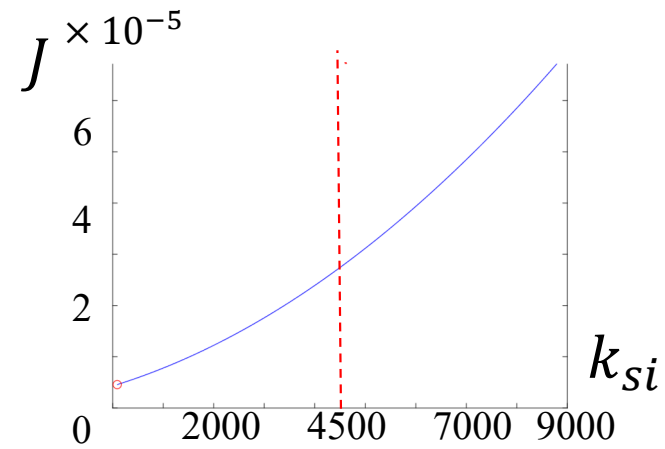
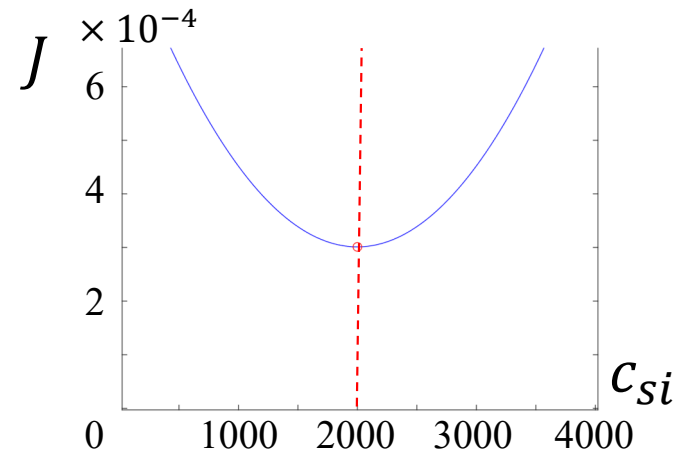
本論文では各パラメータを少しずつ変更し、目的関数の形状を確認

Result - Objective function shape [0% Noise]



24

Result - Objective function shape [1% Noise]



Conclusion & Future Works

- ①村上(2018)モデルを**ハーフカーモデル**に拡張した
(エンジン振動も推定可能)
- ②各パラメータの目的関数の形状は**下に凸**
- ③ノイズ下でも**形状は変わらないが、最適解が正解値からずれる**

減衰項や剛性項での正解値との誤差が大きい

→ノイズを加えた車両振動を数値積分するため不安定に

今後は

1. 異なるノイズ(環境・交通振動など)の影響
2. ノイズの頂点への影響緩和 or 誤差分をシフトする手法

Conclusion & Future Works

- ①村上(2018)モデルを**ハーフカーモデル**に拡張した
(エンジン振動も推定可能)
- ②各パラメータの目的関数の形状は**下に凸**
- ③ノイズ下でも**形状は変わらないが、最適解が正解値からずれる**

減衰項や剛性項での正解値との誤差が大きい

→ノイズを加えた車両振動を数値積分するため不安定に

今後は

1. 異なるノイズ(環境・交通振動など)の影響
2. ノイズの頂点への影響緩和 or 誤差分をシフトする手法

Comment & Question

鉄道総研：松岡弘大氏

車両応答分析を鉄道に適用した研究を蓄積

Q. 「推定される路面凹凸は，左右輪で異なるのでは？」

A. 「その通りです」

「実環境ではそんなに検討できてない」

Q. 「縦断勾配があるとどうなんでしょうか？」

A. 「影響を受けます」

References

1. 総務省統計局「令和元年 労働力調査年報」
<https://www.stat.go.jp/data/roudou/report/2019/index.html> (最終アクセス 2021/05/15)
2. 国土交通省「令和2年版 国土交通白書」
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/index.html>(最終アクセス 2021/05/15)
3. 国土交通省「令和2年度国土交通省関係予算概要」
https://www.mlit.go.jp/page/kanbo01_hy_007263.html(最終アクセス 2021/05/15)
4. 国土交通省「インフラメンテナンス情報 社会資本の老朽化の現状と将来」
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html(最終アクセス 2021/05/15)
5. 国土交通省「第6回道路技術小委員会 配付資料【資料3-2】これからの舗装マネジメント」
<https://www.mlit.go.jp/common/001145725.pdf>(最終アクセス 2021/05/15)
6. 国土交通省「平成29年度大型車の車輪脱落事故発生状況」
<https://www.mlit.go.jp/common/001258034.pdf>(最終アクセス 2021/05/15)
7. 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.
8. 山本亨輔, 大島義信, 杉浦邦征, 川野広隆:車両応答に基づく橋梁のモード形状推定法, *構造工学論文集A1*, 67, pp.242-257, 2011.
9. 長山智則, 趙博宇, 薛凱:走行時の車体振動を利用したハーフカーモデルの同定と路面縦断形状の推定, *土木学会論文集 E1*, 75(1), pp.1-16, 2019.
10. 村上翔:粒子群最適化に基づく複数車両の振動データを用いた車両・橋梁・路面のパラメータ同定, 筑波大学, 学士論文, 2018.



筑波大学
University of Tsukuba

