



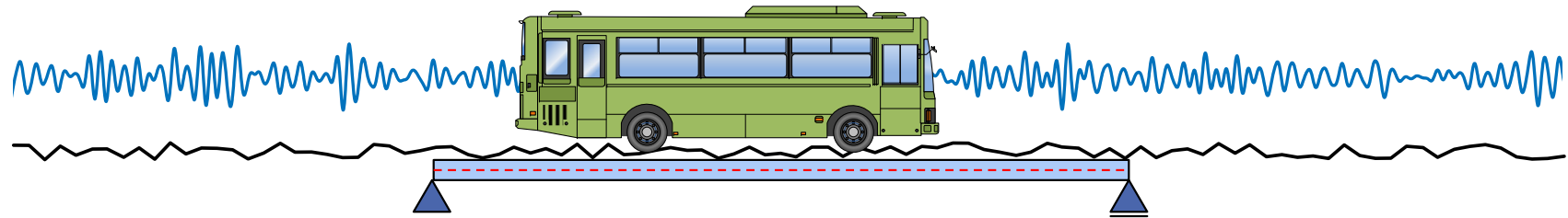
筑波大学
University of Tsukuba



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

フロンティア工学研究グループ
山本研M2
201920887
井上潤

車両・橋梁・路面は日々,劣化



道路ネットワーク・システム全体の劣化と捉えて、
システム全体の点検・モニタリング技術を導入したい

迅速かつ低コストに収集可能な

車両振動データ を利用

車両パラメータ

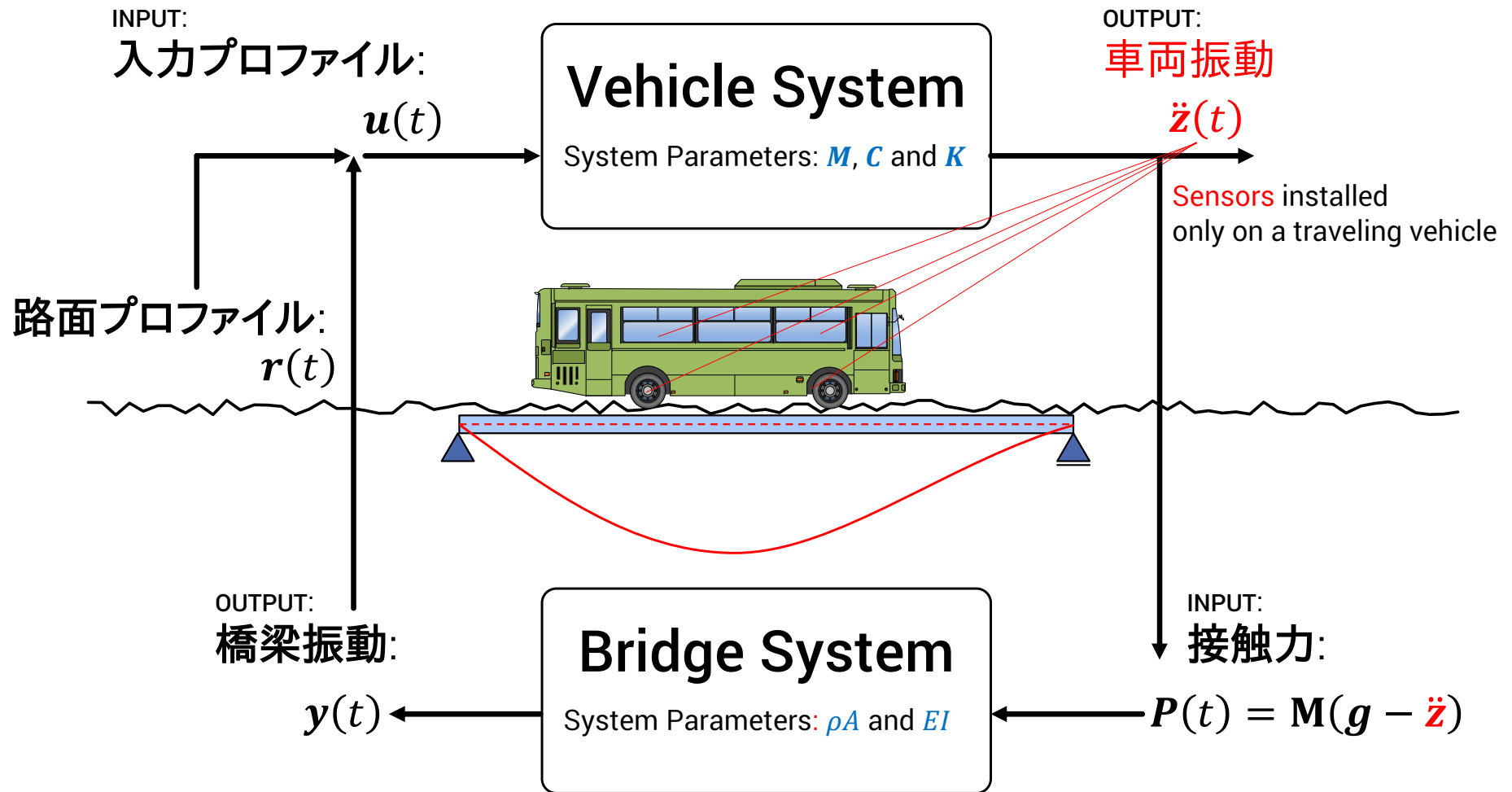
車体質量
サスペンションの剛性・減衰
各タイヤの剛性, 質量
エンジン振動

橋梁パラメータ

曲げ剛性の空間分布
単位長さ当たり質量
減衰係数

路面凹凸

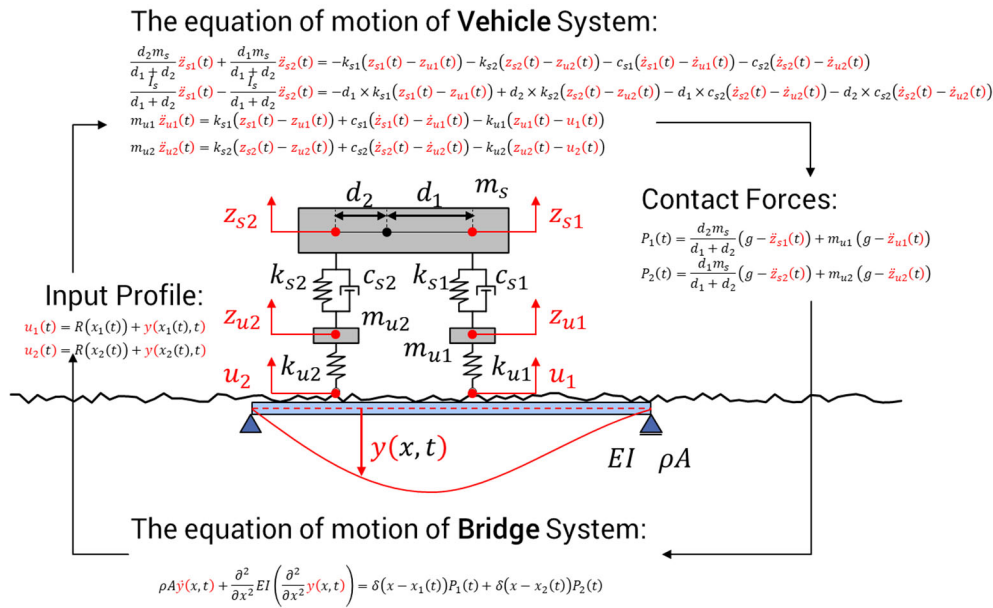
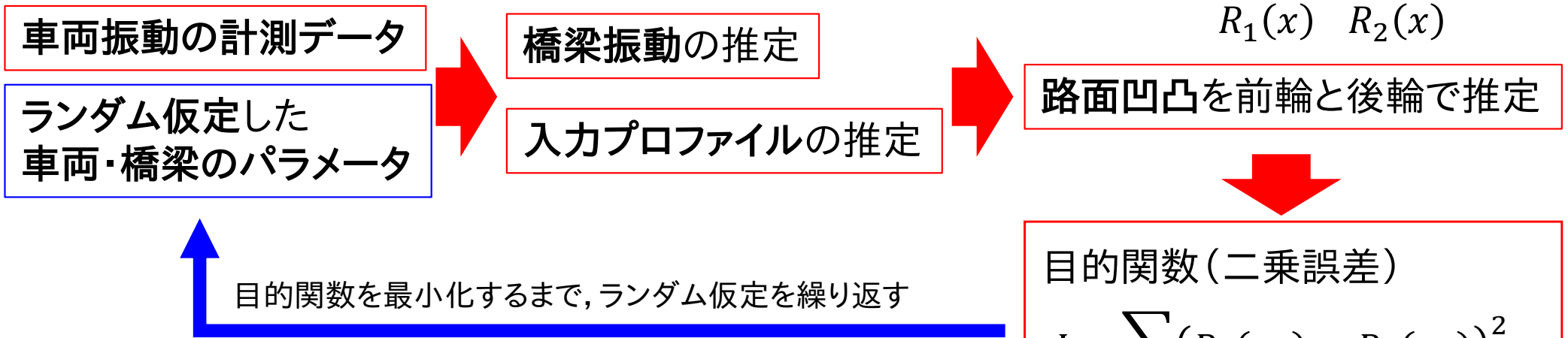
車両-橋梁-路面の力学的システム



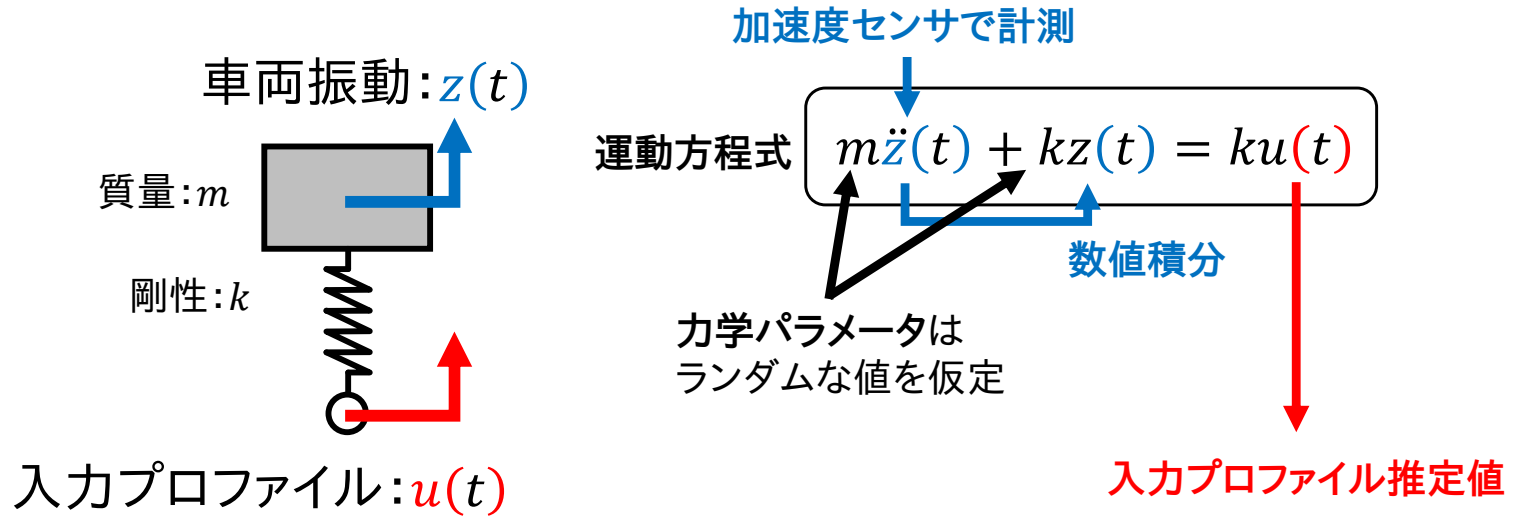
車両振動データには, 車両だけでなく橋梁・路面の情報が含まれる

車両・橋梁・路面の推定には村上らが提案した方法が利用可能

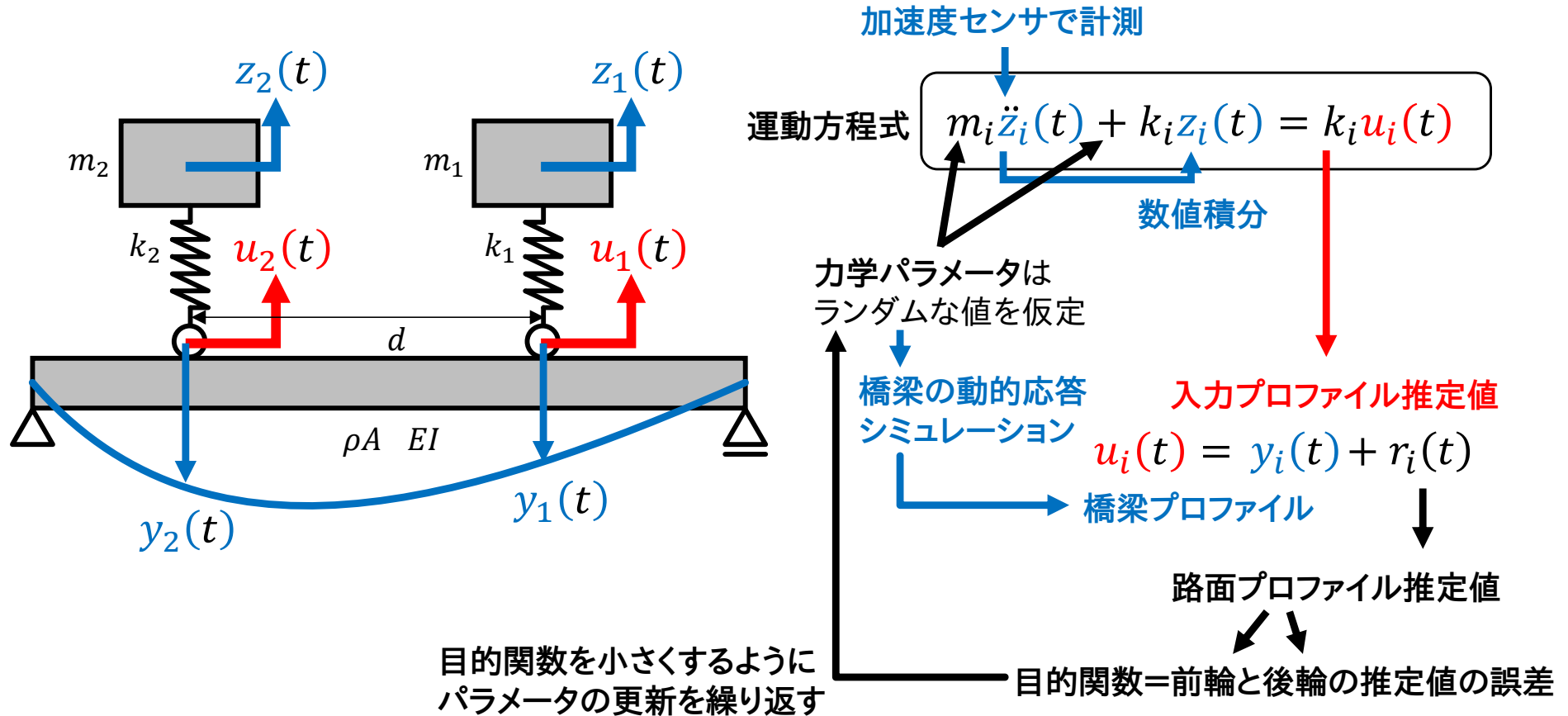
工学システム学類卒業論文, 2019



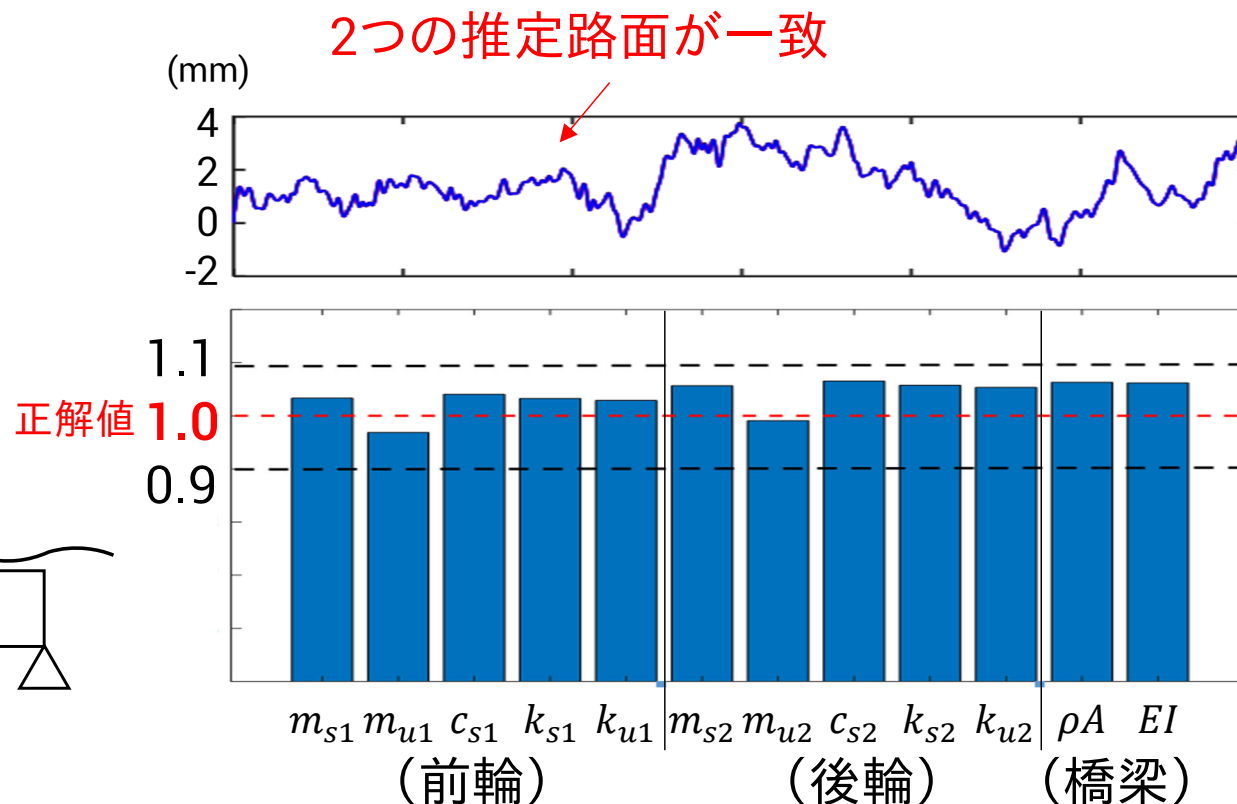
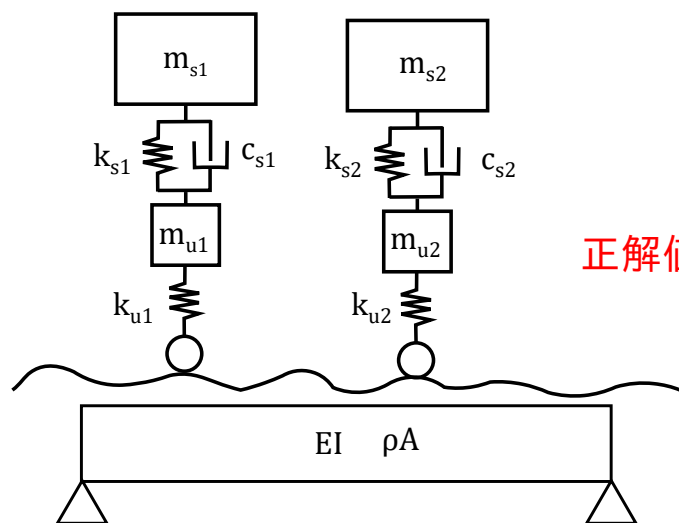
推定手順



推定手順



村上^[3]の手法の結果



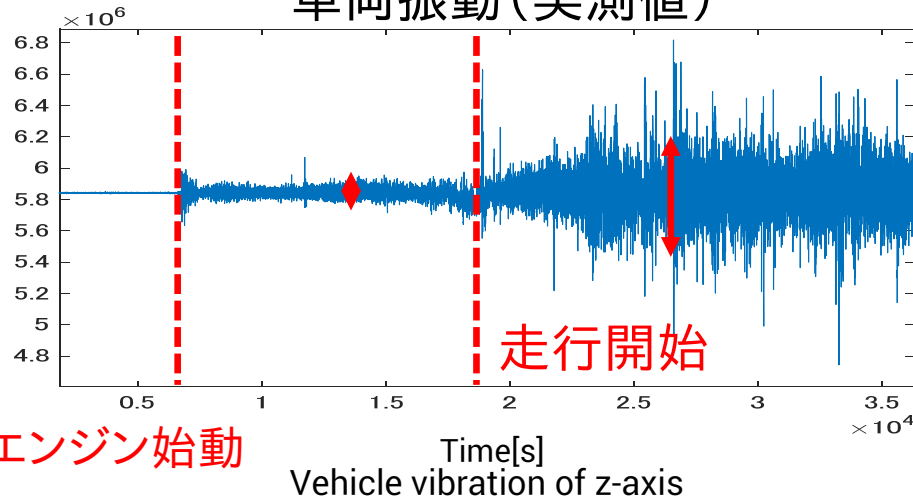
車両・橋梁・路面凹凸を高精度に推定できた

課題)

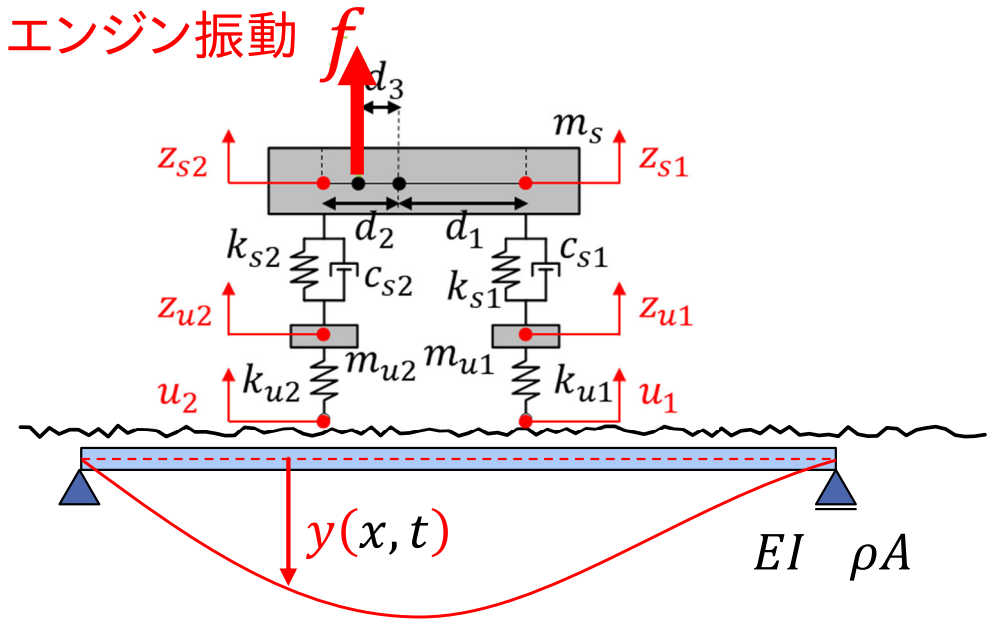
- ① 計算コストが大きい(ランダム仮定値の更新時に毎回, FEMを実施)
- ② ノイズの影響を考慮していない(実際はエンジン振動等が卓越)

エンジン振動

車両振動(実測値)



エンジン振動 f



バネ上の運動方程式

$$\frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s1}(t) + \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s2}(t) = -k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) - k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) - c_{s1}(\dot{z}_{s1}(t) - \dot{z}_{u1}(t)) - c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) + \frac{d_2 + d_3}{d_1 + d_2} f + \frac{d_1 - d_3}{d_1 + d_2} f$$

エンジン振動の影響

$$\frac{I_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s1}(t) - \frac{I_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s2}(t) = -d_1 k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) + d_2 k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) - d_1 c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) - d_2 c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) + d_3 \times f$$

エンジン振動の影響

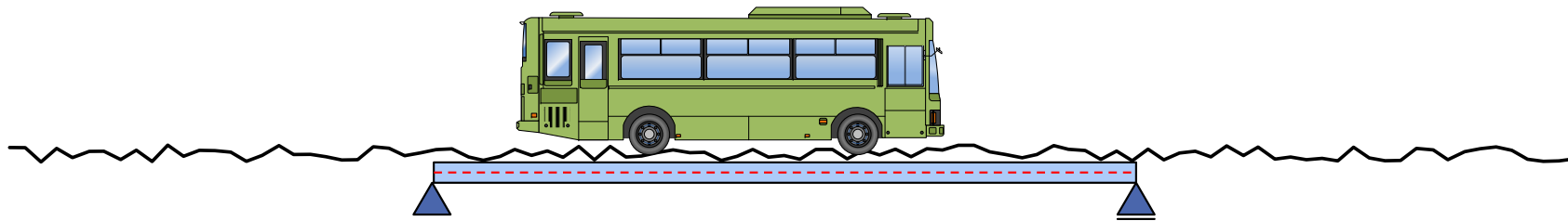


研究背景

- ・車両
- ・橋梁
- ・道路(路面)

日々利用され
劣化していく

日常的な点検
が必要



理想的な点検手法

簡易的

低コスト

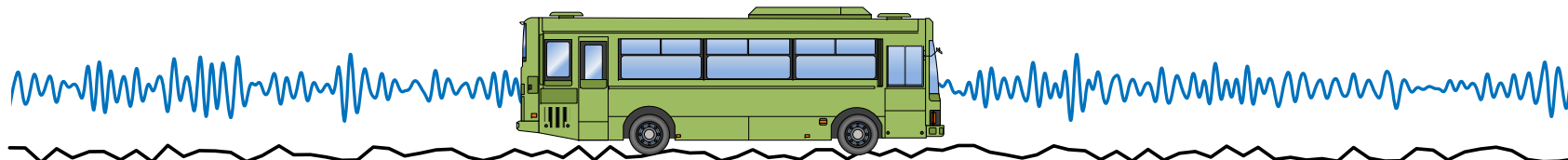
全て点検

理想的な点検手法

計測するデータ



車両振動



車両・橋梁・路面のパラメータを推定

車両

- ・車重
- ・サスペンション
- ・エンジン振動

橋梁

- ・剛性
- ・質量

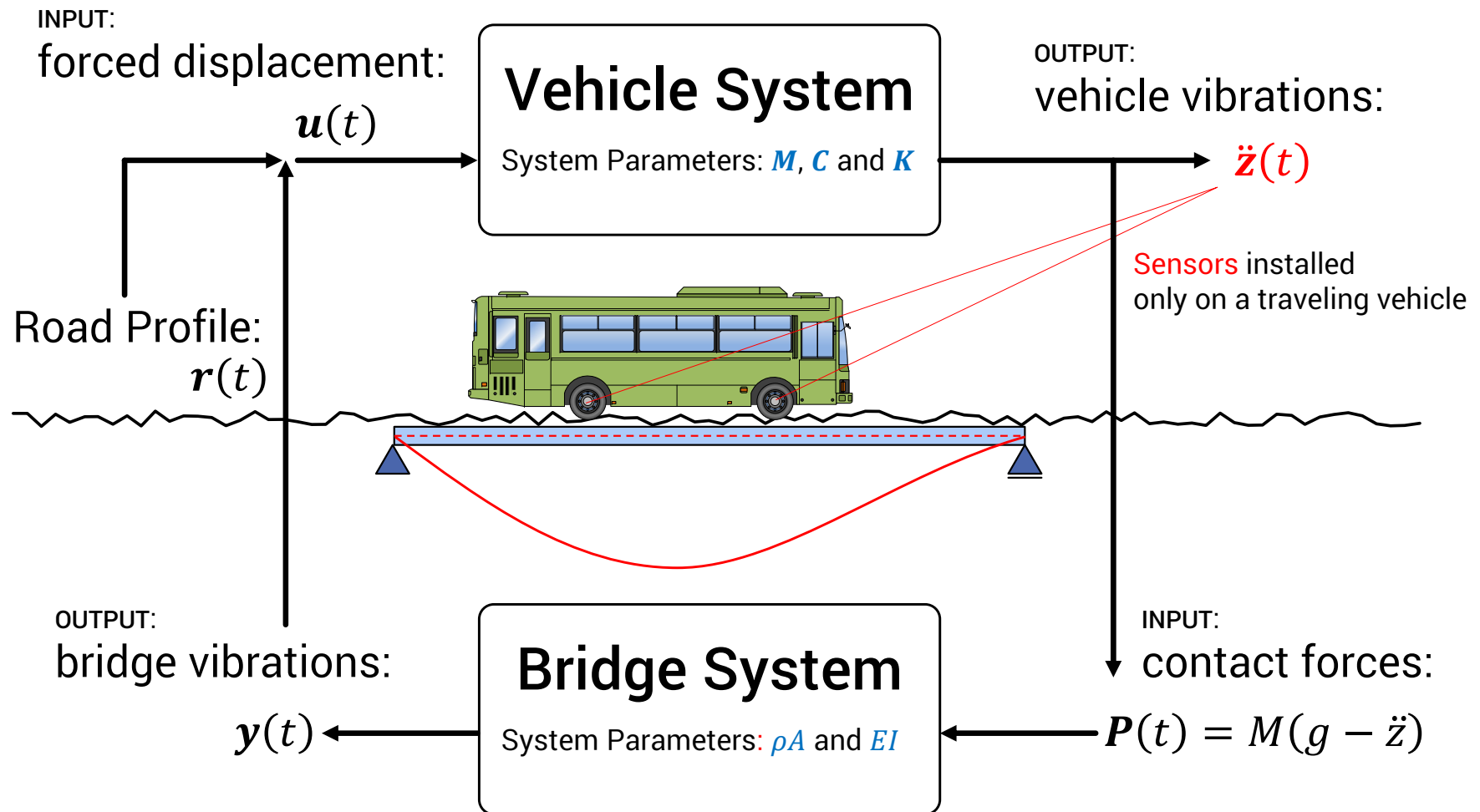
路面

- ・路面凹凸

車両振動のみで各パラメータを推定

車両一橋梁の相互作用

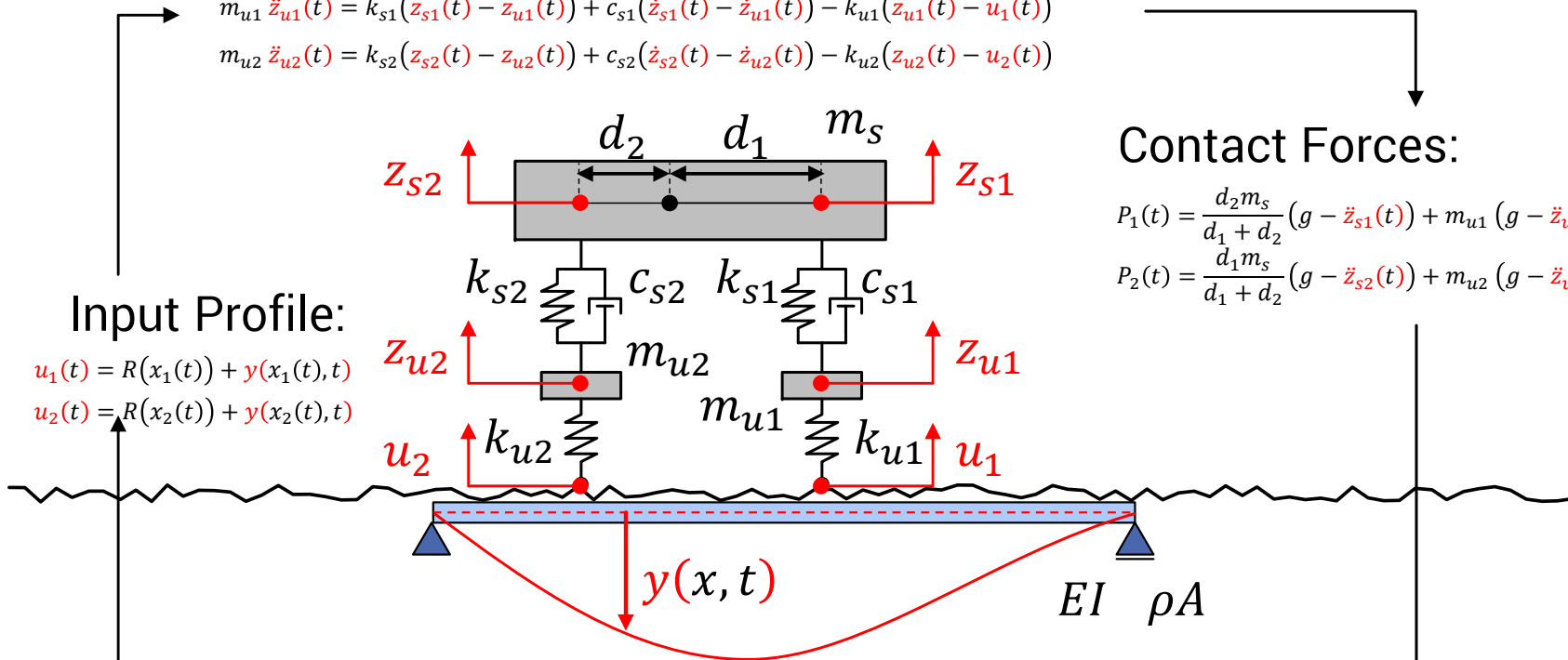
Vehicle-Bridge Interaction System



基礎方程式

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

$$\begin{aligned} \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s1}(t) + \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s2}(t) &= -k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) - k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) - c_{s1}(\dot{z}_{s1}(t) - \dot{z}_{u1}(t)) - c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s1}(t) - \frac{d_2}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s2}(t) &= -d_1 \times k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) + d_2 \times k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) - d_1 \times c_{s1}(\dot{z}_{s1}(t) - \dot{z}_{u1}(t)) - d_2 \times c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) \\ m_{u1} \ddot{z}_{u1}(t) &= k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) + c_{s1}(\dot{z}_{s1}(t) - \dot{z}_{u1}(t)) - k_{u1}(z_{u1}(t) - u_1(t)) \\ m_{u2} \ddot{z}_{u2}(t) &= k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) + c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) - k_{u2}(z_{u2}(t) - u_2(t)) \end{aligned}$$



Input Profile:

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

Contact Forces:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} (g - \ddot{z}_{s1}(t)) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}(t)) \\ P_2(t) &= \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} (g - \ddot{z}_{s2}(t)) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}(t)) \end{aligned}$$

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

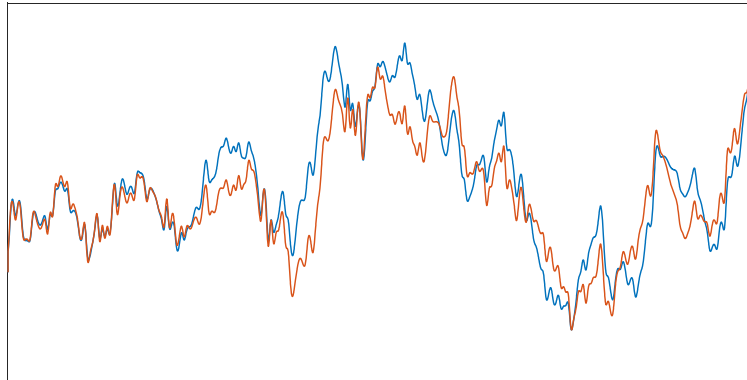
$$\rho A \ddot{y}(x, t) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} EI \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} y(x, t) \right) = \delta(x - x_1(t)) P_1(t) + \delta(x - x_2(t)) P_2(t)$$

目的関数 Objective function

路面凹凸

前輪: $R(x_1(t)) = u_1(t) - y(x_1(t), t)$

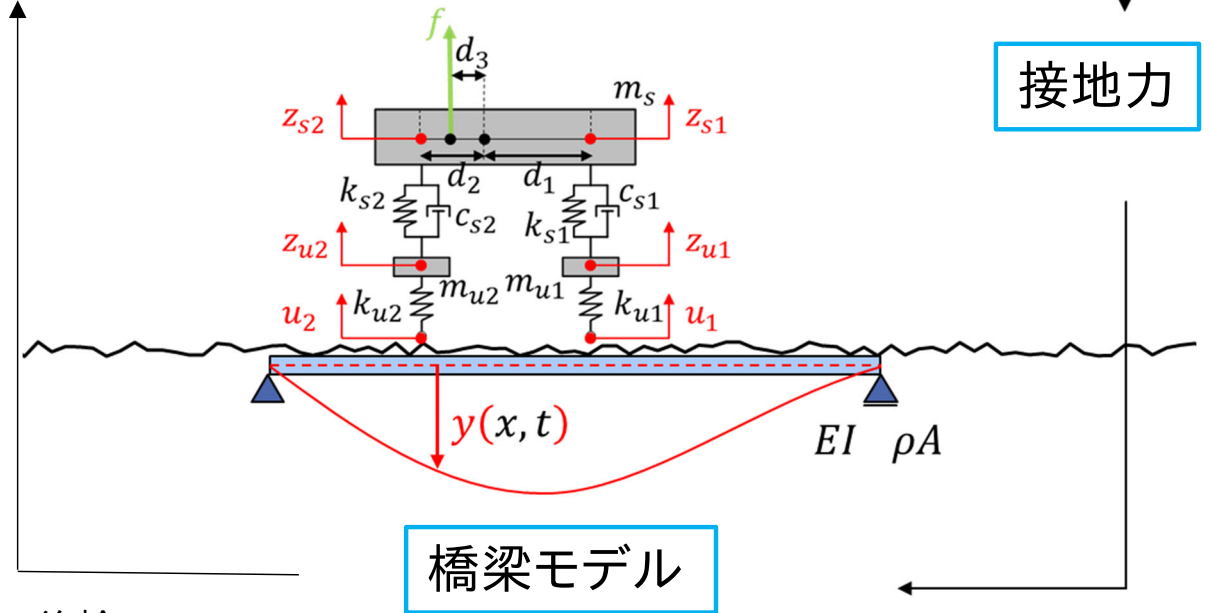
後輪: $R(x_2(t)) = u_2(t) - y(x_2(t), t)$



Input Profile:

車両モデル

接地力

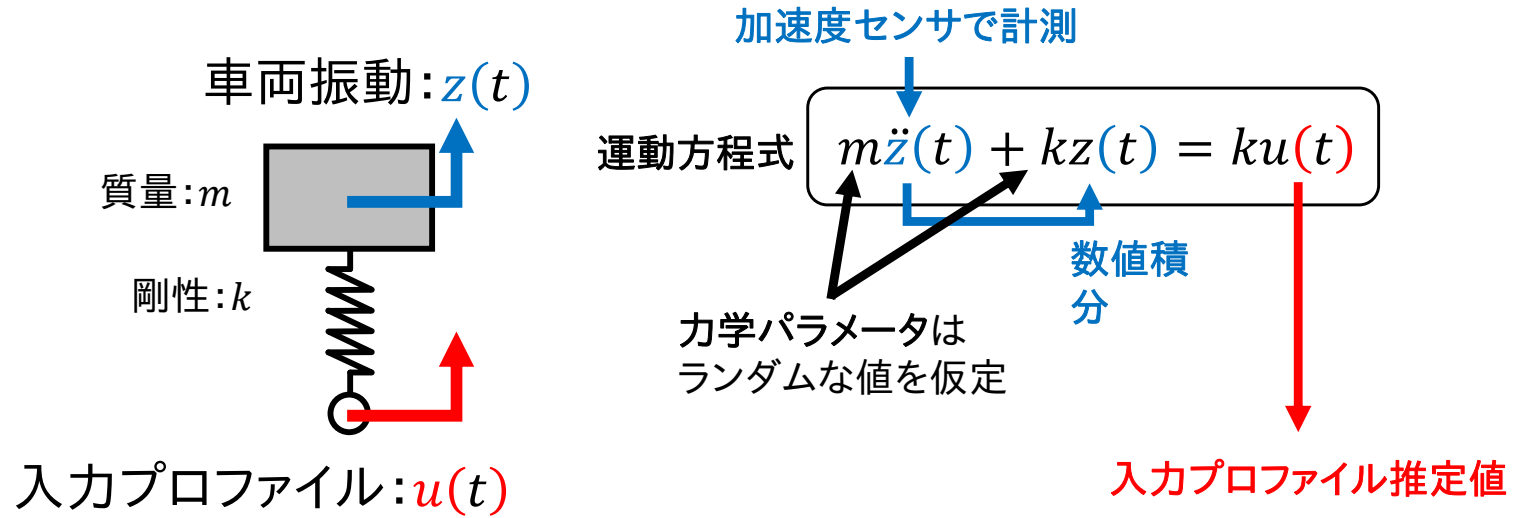


橋梁モデル

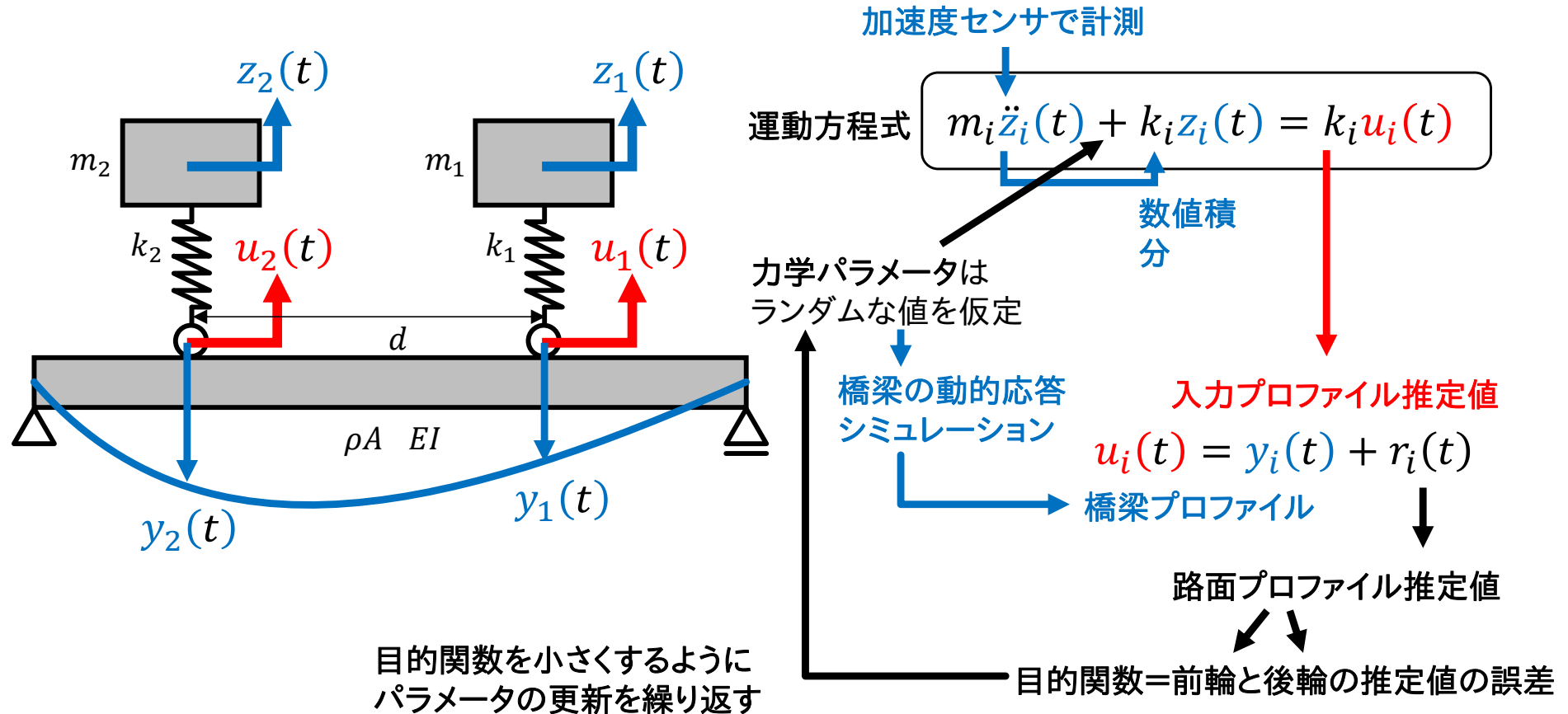
目的関数 : $J = \sum_{\text{前輪}}^{\text{後輪}} |R(x_1(t)) - R(x_2(t))|^2$
Objective function

$R(x_1(t))$ と $R(x_2(t))$ が一致するように各パラメータを更新する。

推定手順

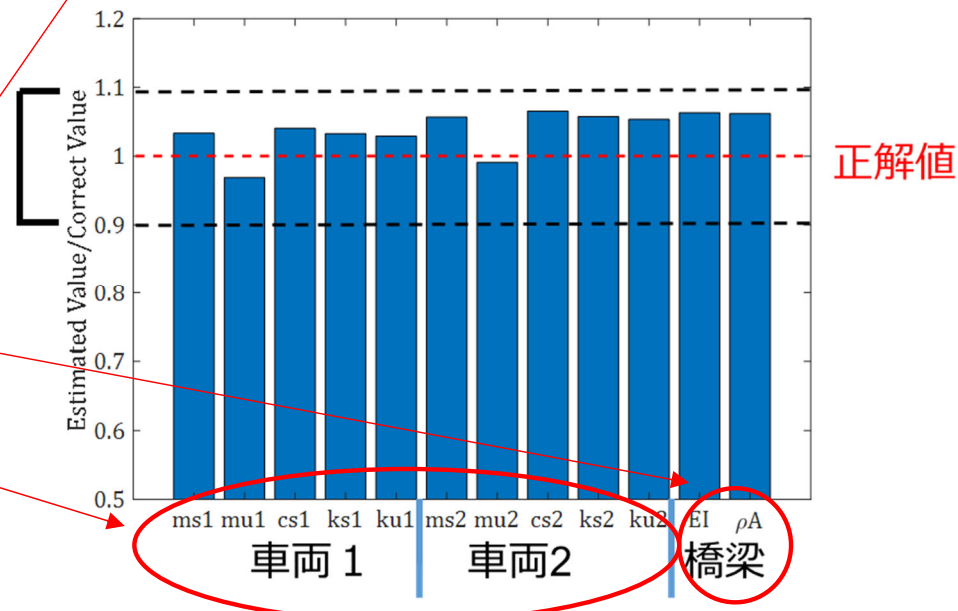
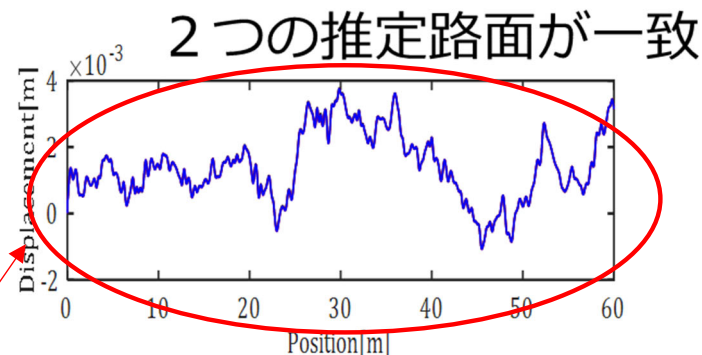
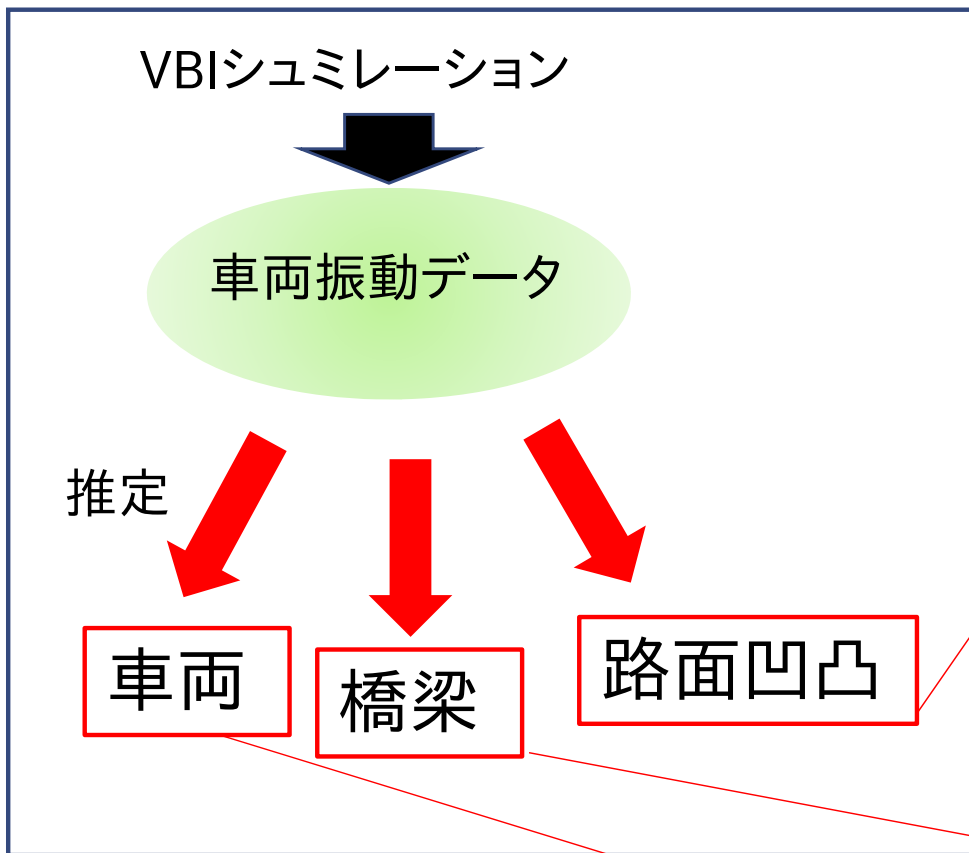
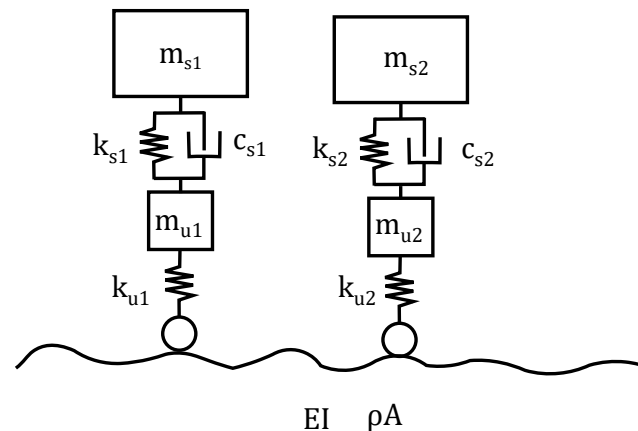


推定手順



村上らの手法の結果

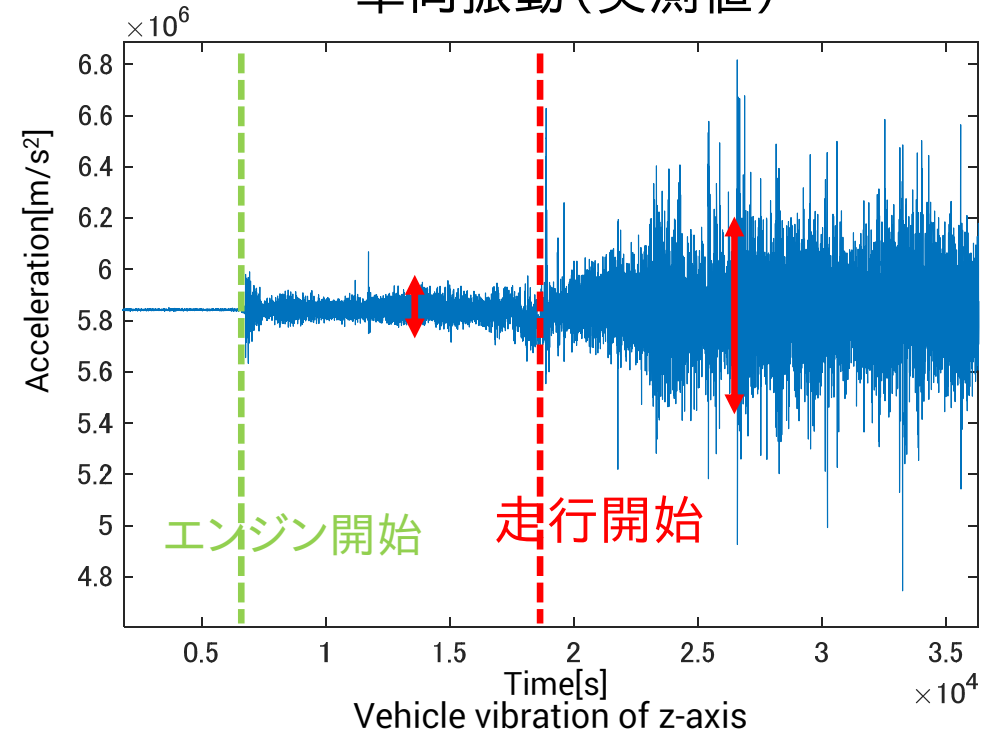
村上ら^[3]の研究
 PSO法を用いて**車両・橋梁パラメータ、路面凹凸を推定**



技術的課題

1. 村上らの手法(エンジン振動なし)
↳ 実際はエンジン振動の影響が大きい
2. 最適化にかかる計算コスト大
最適な探索アルゴリズムが必要
3. 計測ノイズの影響の検討

車両振動(実測値)



新しいモデルで目的関数の形状を調べる

エンジン振動の適応

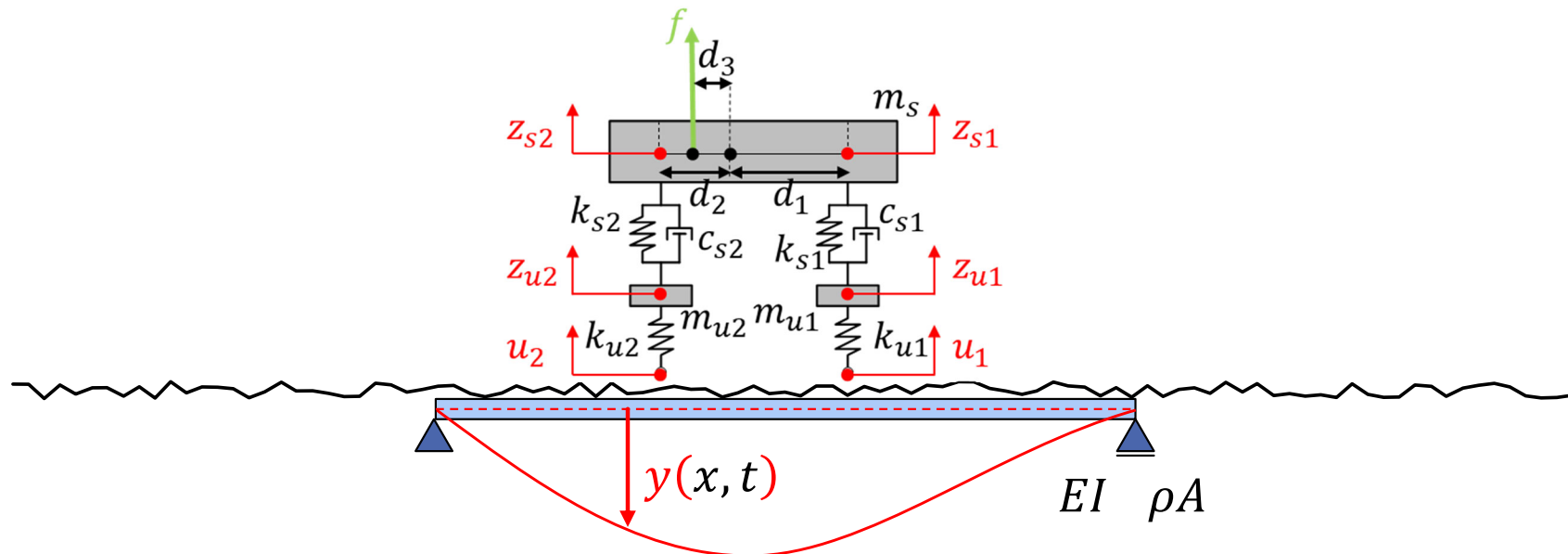
車両のばね上の運動方程式

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s1}(t) + \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s2}(t) &= -k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) - k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) - c_{s1}(\dot{z}_{s1}(t) - \dot{z}_{u1}(t)) - c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) \\ \frac{I_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s1}(t) - \frac{I_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s2}(t) &= -d_1 \times k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) + d_2 \times k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) - d_1 \times c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) - d_2 \times c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) \end{aligned} \right.$$



変更

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s1}(t) + \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s2}(t) &= -k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) - k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) - c_{s1}(\dot{z}_{s1}(t) - \dot{z}_{u1}(t)) - c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) + \frac{d_2 + d_3}{d_1 + d_2} f + \frac{d_1 - d_3}{d_1 + d_2} f \\ \frac{I_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s1}(t) - \frac{I_s}{d_1 + d_2} \ddot{z}_{s2}(t) &= -d_1 \times k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) + d_2 \times k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) - d_1 \times c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) - d_2 \times c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) + d_3 \times f \end{aligned} \right.$$



目的

Purpose

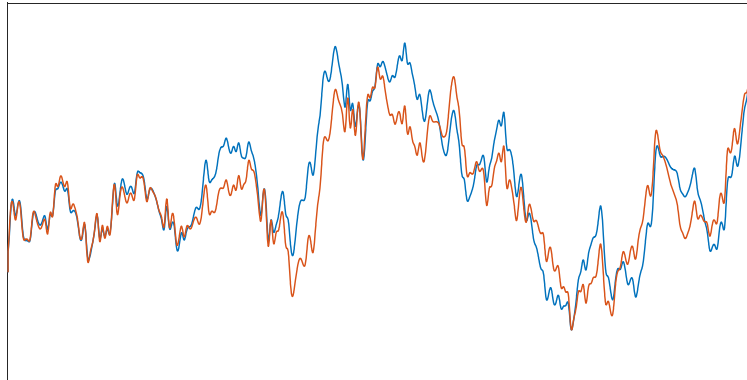
エンジン振動を考慮した最適化アルゴリズムの開発と目的関数の形状を明らかにし、計測ノイズの影響を検討する。

目的関数 Objective function

路面凹凸

前輪: $R(x_1(t)) = u_1(t) - y(x_1(t), t)$

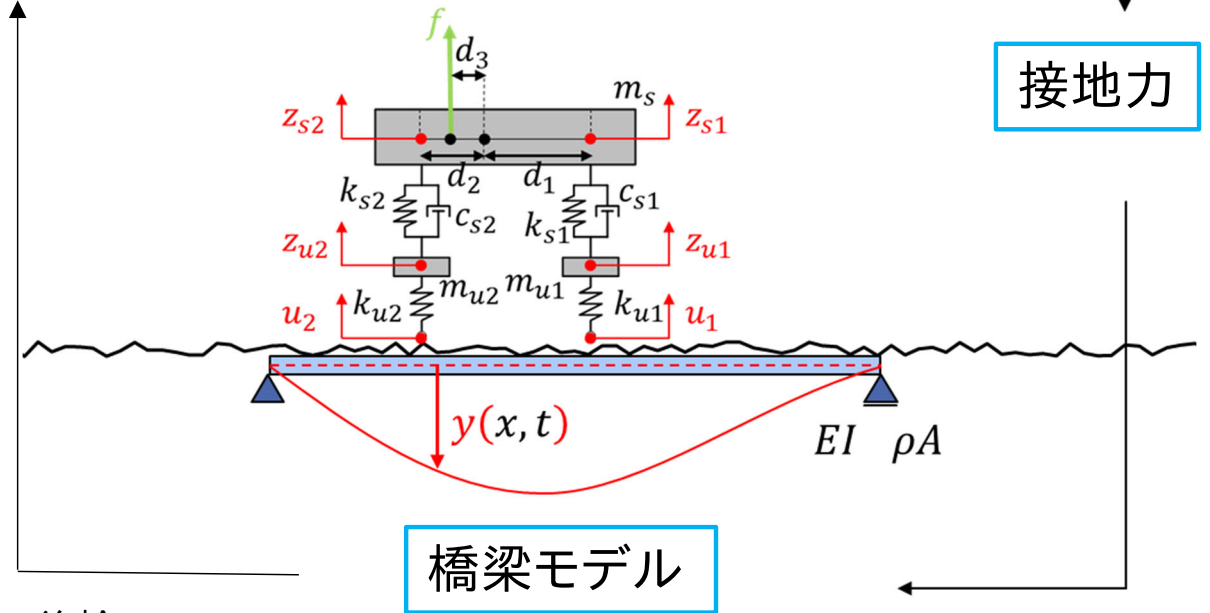
後輪: $R(x_2(t)) = u_2(t) - y(x_2(t), t)$



Input Profile:

車両モデル

接地力



橋梁モデル

目的関数 : $J = \sum_{\text{前輪}}^{\text{後輪}} |R(x_1(t)) - R(x_2(t))|^2$
Objective function

$R(x_1(t))$ と $R(x_2(t))$ が一致するように各パラメータを更新する。

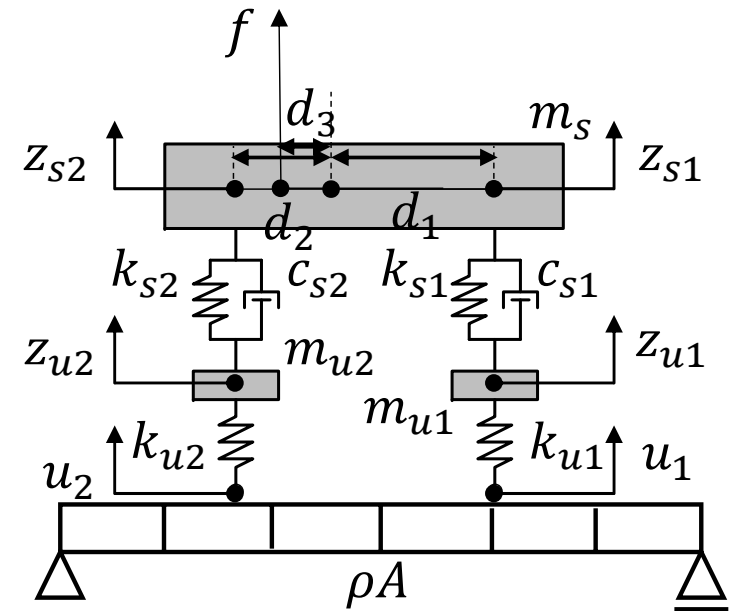
車両・橋梁モデル

車両と橋梁のパラメータは以下を正解値とする

車両のパラメータ

m_{u1} [kg]	5.0×10^2	k_{s1} [N/m]	4.5×10^3
m_{u2} [kg]	5.0×10^2	k_{s2} [N/m]	4.5×10^3
c_{s1} [kg/s]	2.0×10^3	k_{u1} [N/m]	6.0×10^4
c_{s2} [kg/s]	2.0×10^3	k_{u2} [N/m]	6.0×10^4
m_s [kg]	9.0×10^3	d_1+d_2 [m]	3.0

※車両の重量 $M(m_s + m_{u1} + m_{u2})$ と
車軸間距離 $D(d_1 + d_2)$ は固定

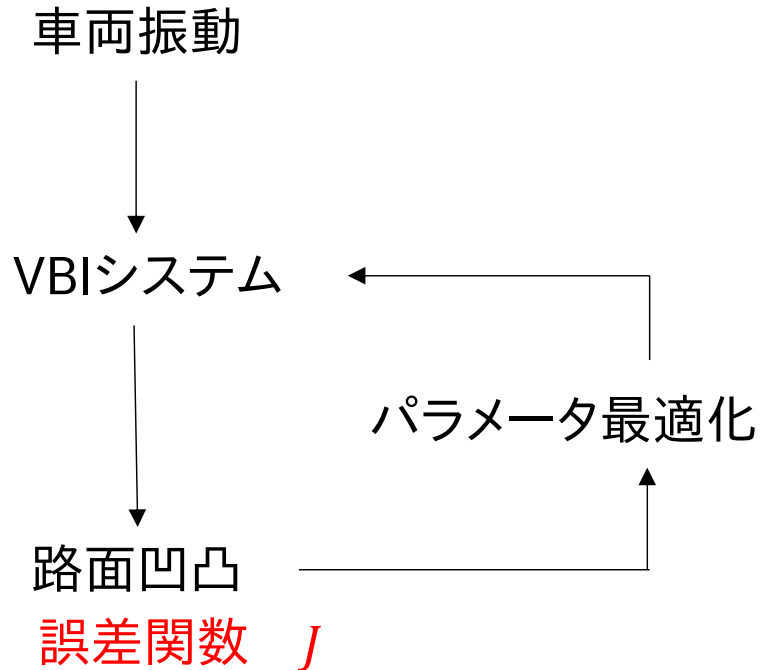


橋梁パラメータ

橋長 [m]	30.0
要素の長さ[m]	5
EI [Nm ³]	1.56×10^{11}
ρA [kg/m]	3.00×10^3

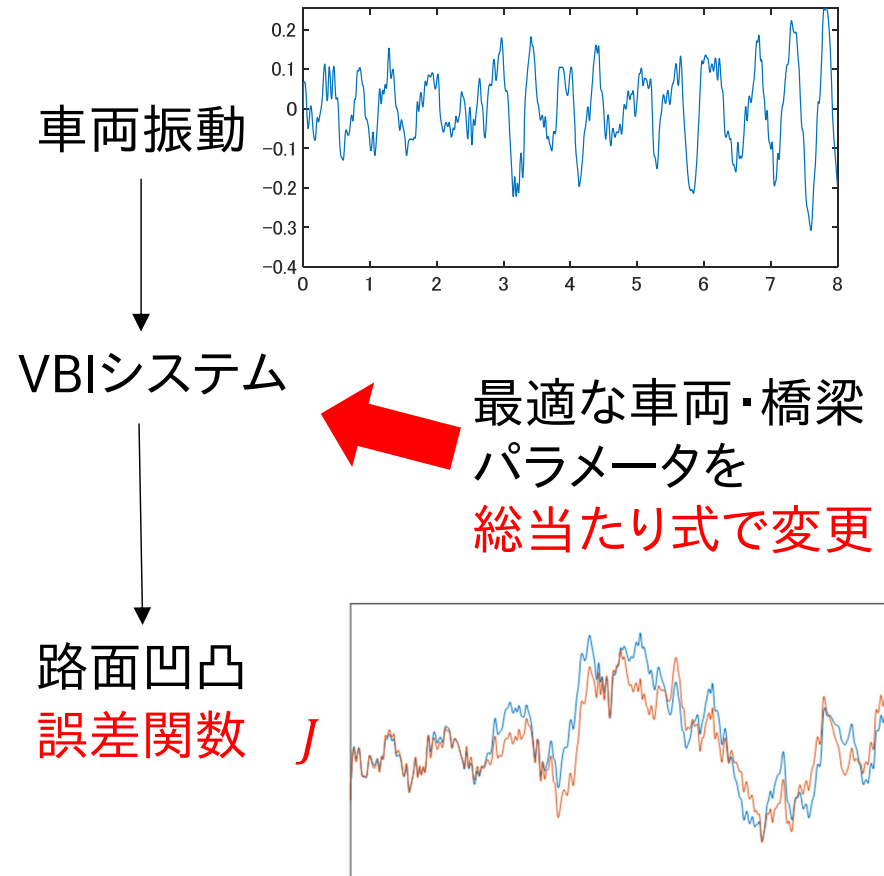
研究手法

<提案手法>



<本研究の実施内容>

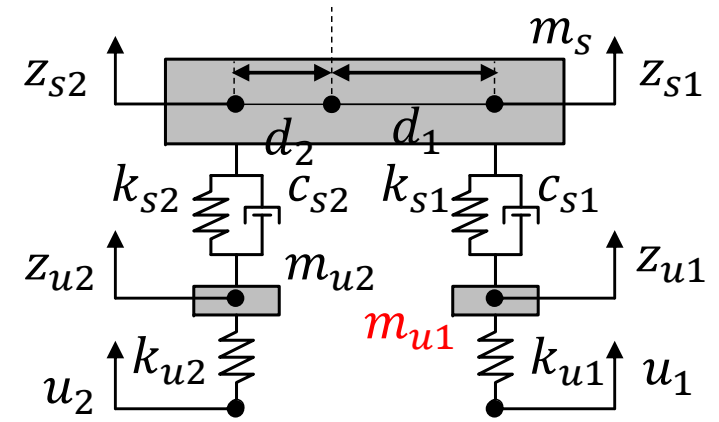
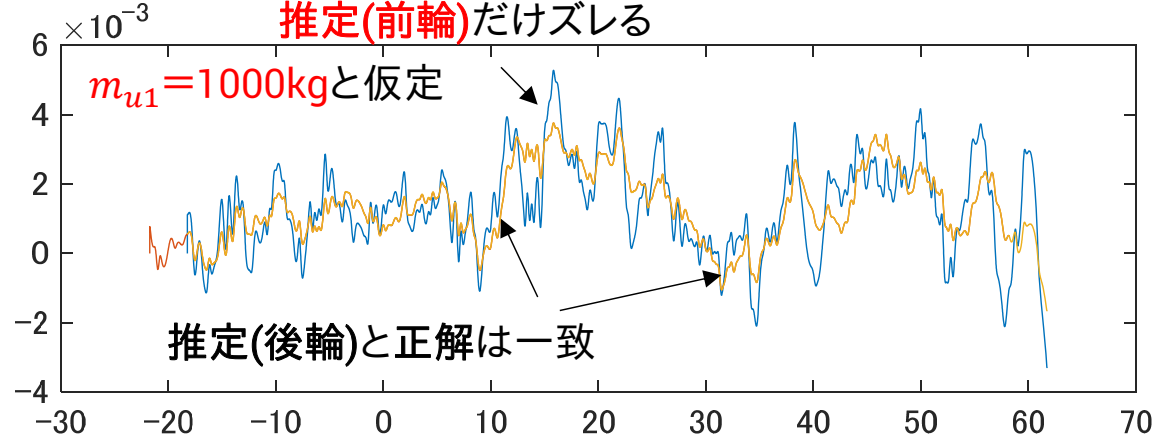
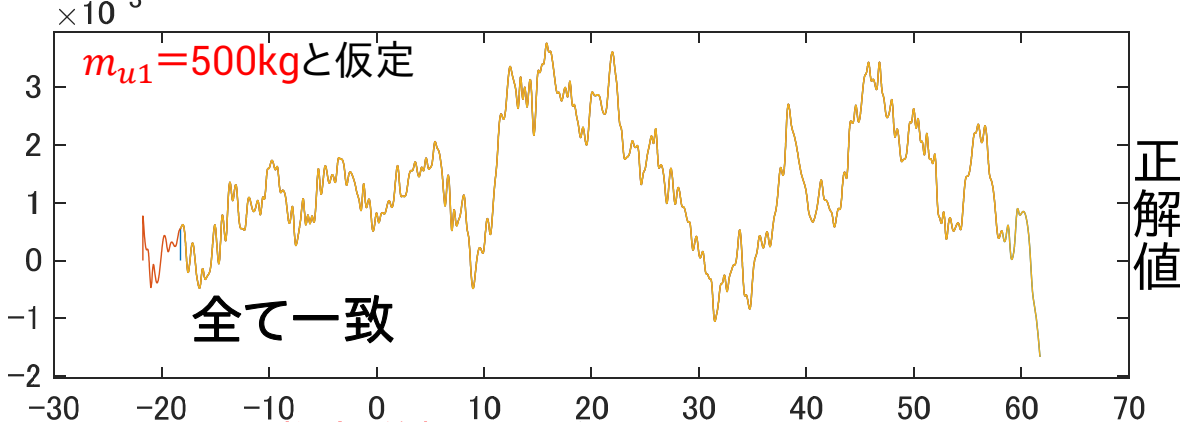
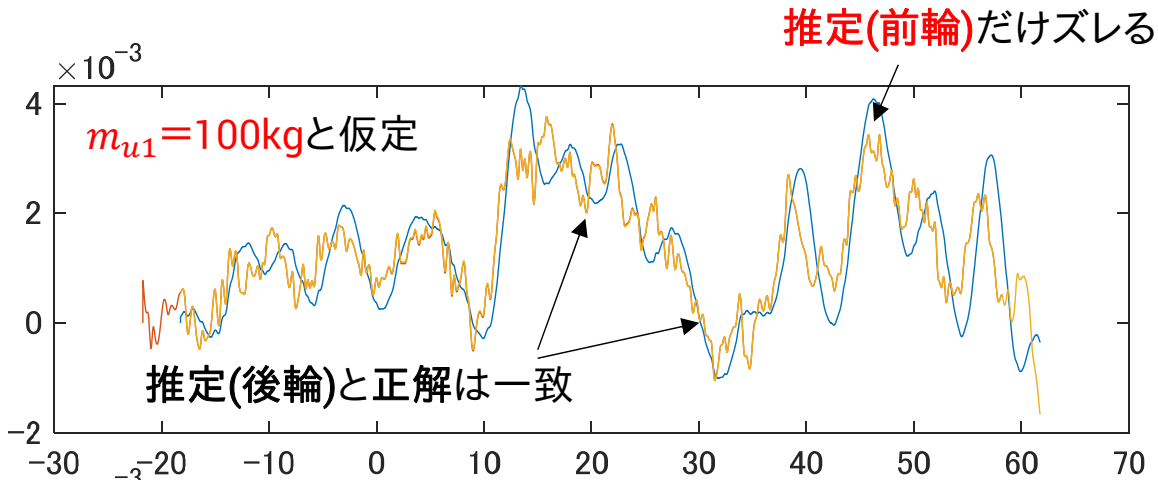
数値計算上で車両振動を取得



各パラメータを変化させたときの誤差関数の形状を調べる (各パラメータを1つずつ変化)

m_{u1} を変化させた場合

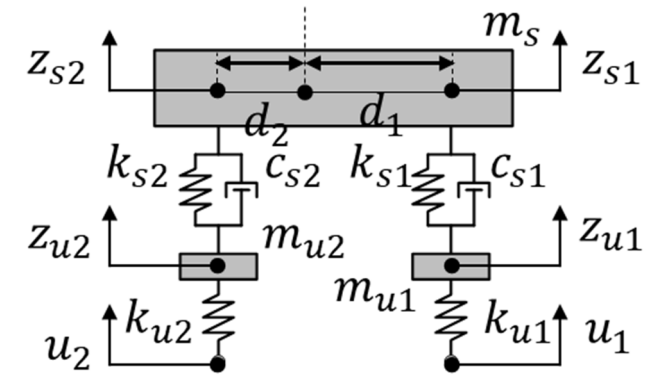
路面凹凸の推定値



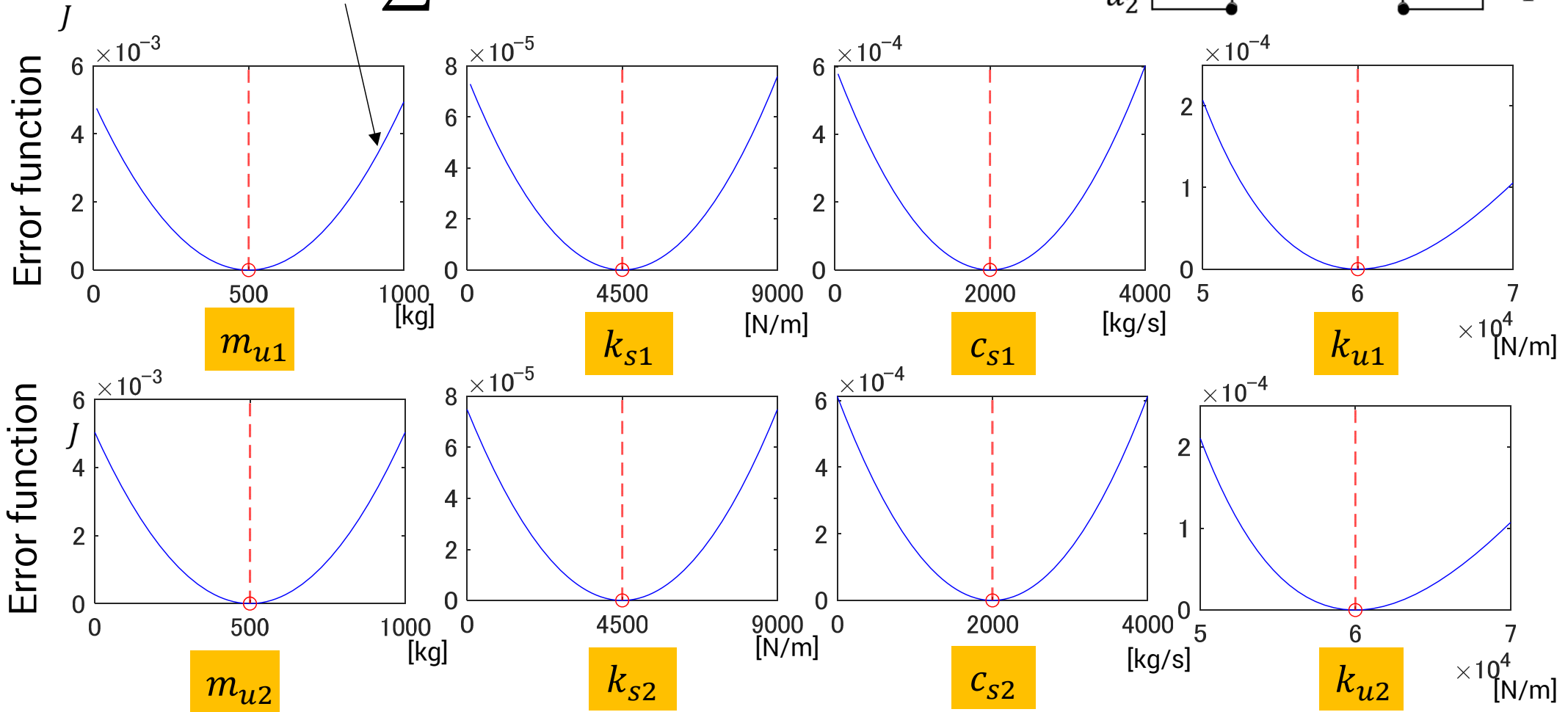
パラメータを変化させた車輪の路面凹凸だけが正解値とズれる

Estimated value of road profile

車両のパラメータを変化させた場合



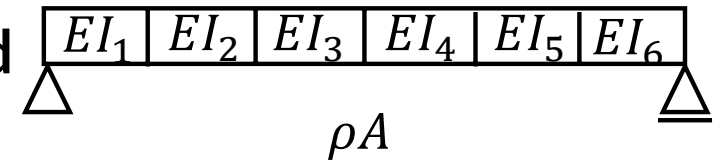
$$J = \sum |R(x_1(t)) - R(x_2(t))|^2$$



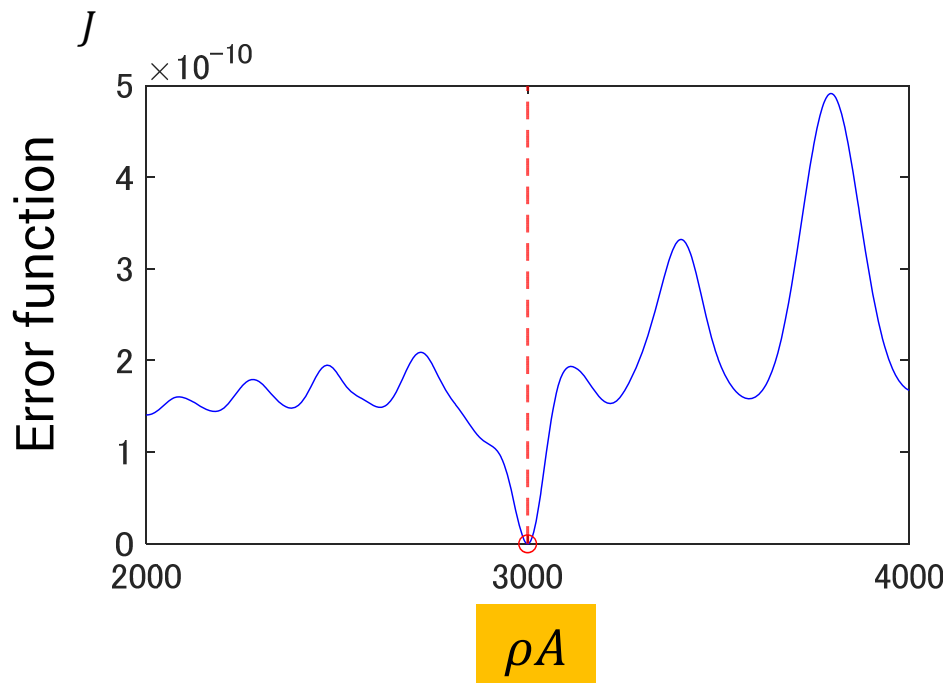
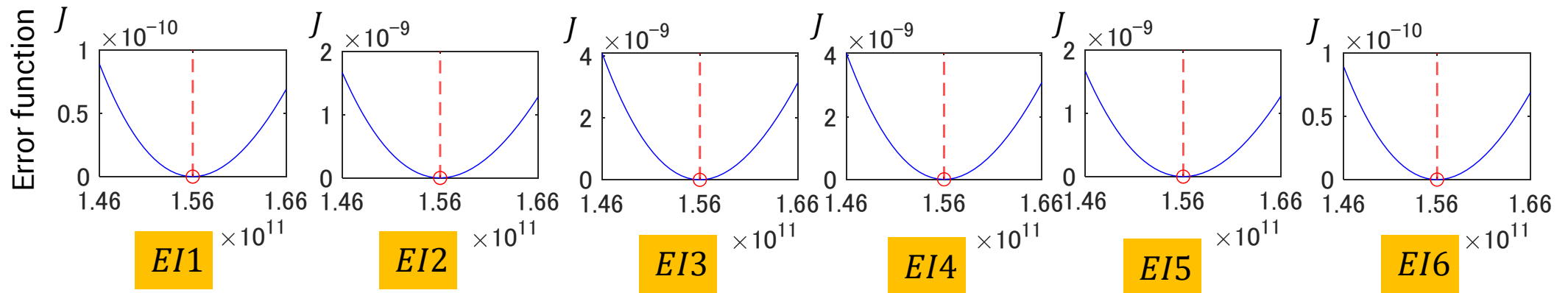
誤差関数は下に凸の曲線になることが分かった

橋梁のパラメータを変化させた場合

When the parameters of the bridge are changed



EI は車両のパラメータの同様に下に凸の曲線となったが、 ρA は多峰性を持つことが分かった

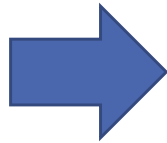


勾配降下法のような誤差関数の接線を求めて正解値に最適化する簡易的な手法が適用可能?

ノイズを加えた場合

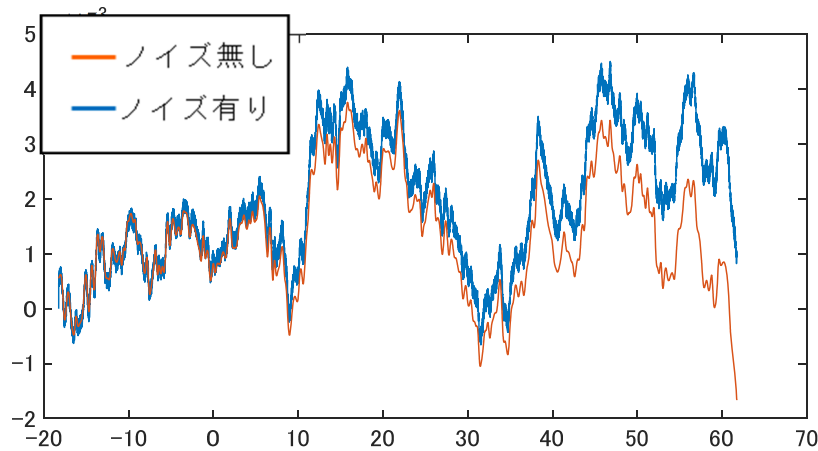
車両振動の最大振幅に対して
1%のノイズを加えた

ノイズの影響

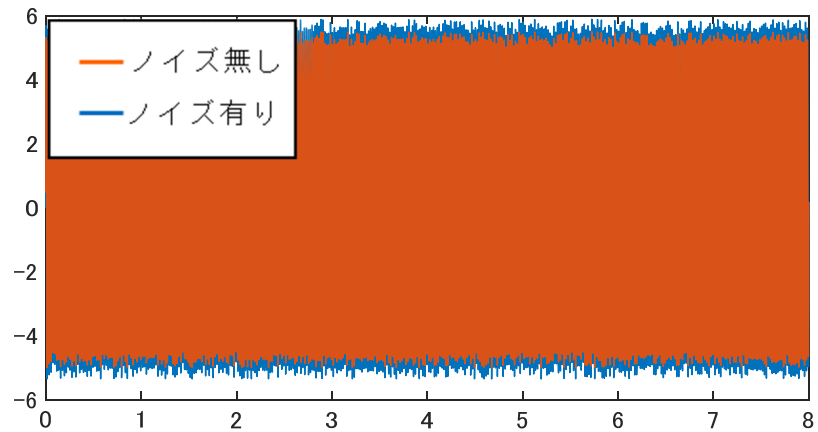


車両振動、
路面凹凸にずれ

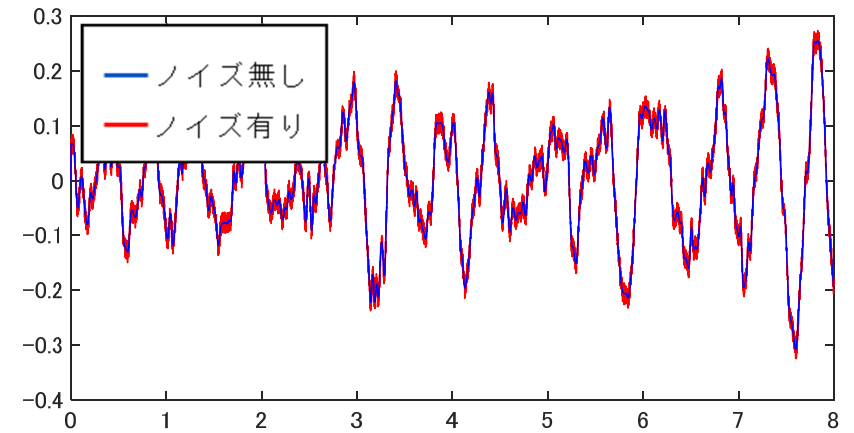
路面凹凸



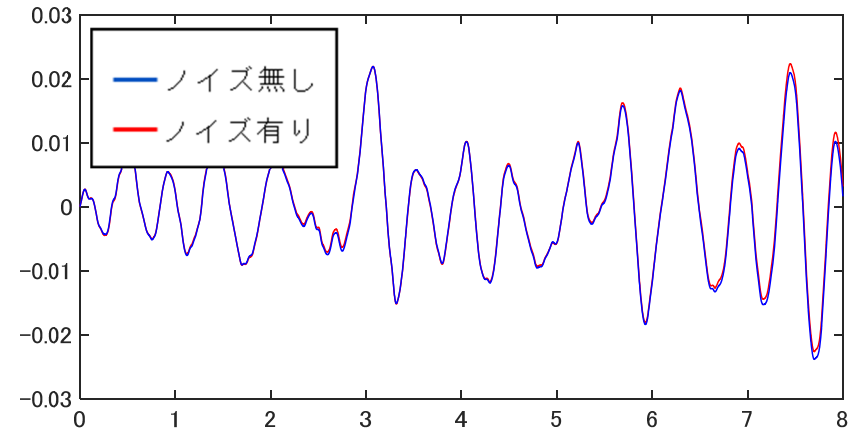
エンジン振動



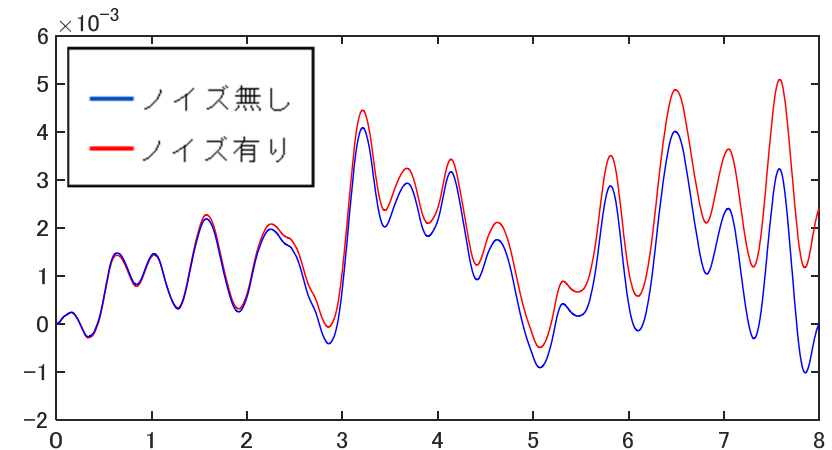
車両振動



速度振動



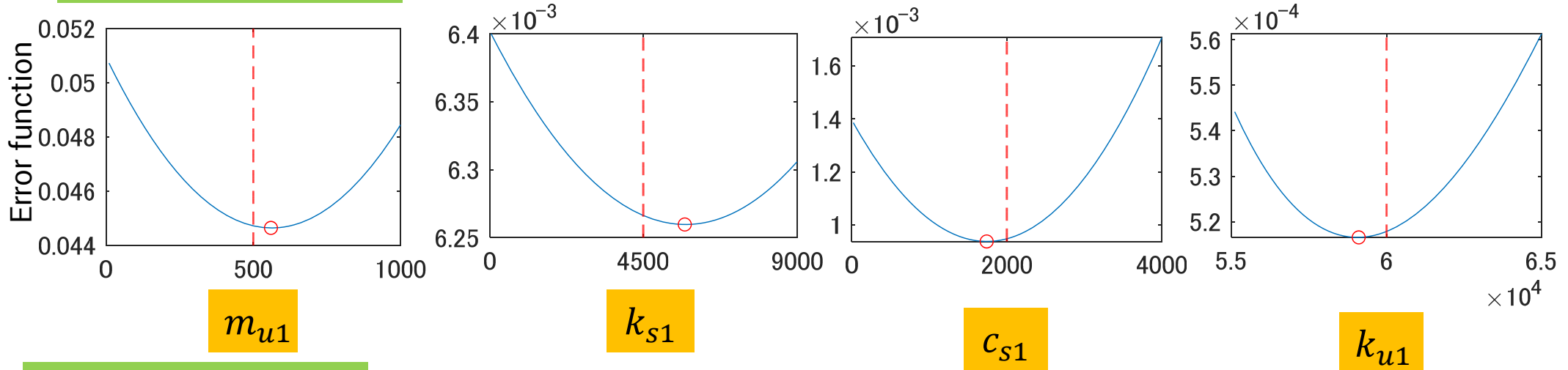
変位振動



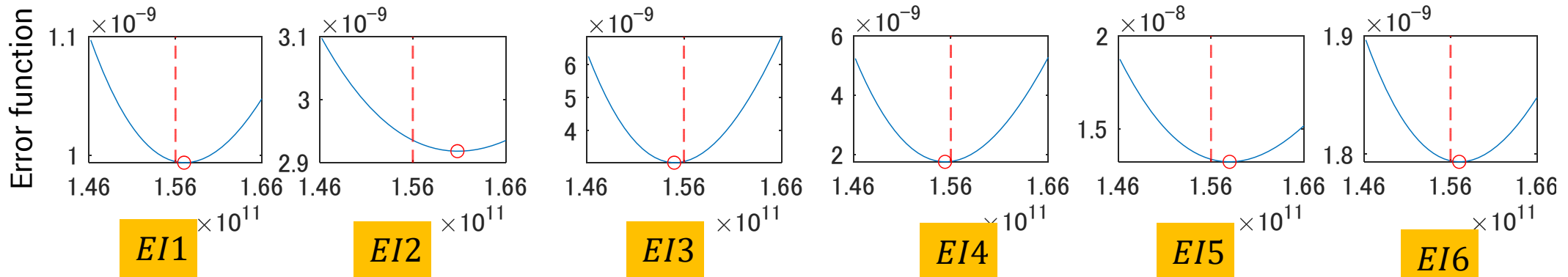
計測ノイズを加えた場合(車両)

全て下に凸の曲線

車両のパラメータ



橋梁のパラメータ



ノイズを加えても誤差関数の形状は変化しないことが分かった。

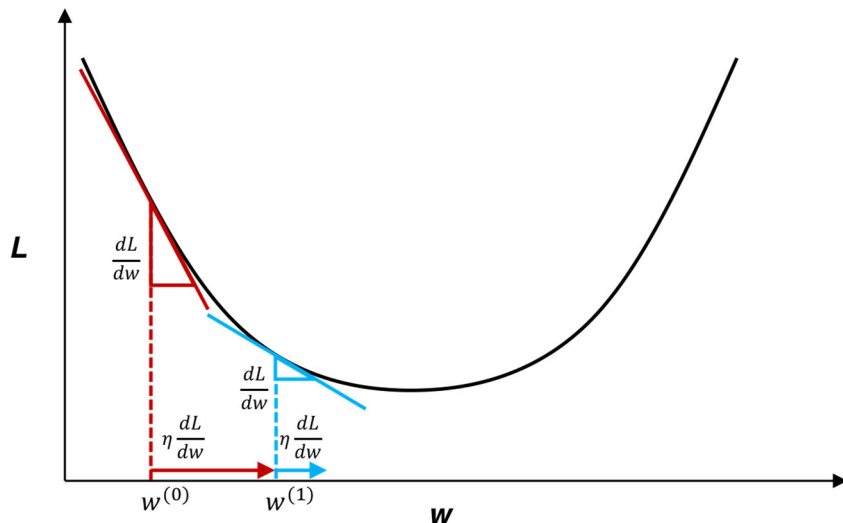
勾配降下法を用いた最適解探索

誤差関数の形状の結果から
勾配降下法を用いて最適化探索を行う

勾配降下法: 関数の傾きのみから関数の最小値を探索する
連続最適化問題の勾配法のアプローチの一つ

$$h_{k+1} = h_k - J_k \frac{h_k - h'}{J_k - J'}$$

<ノイズ無しの場合>



パラメータ	求めた最適解	正解値
m_{u1} [kg]	500.01	500
k_{s1} [N/m]	4500.01	4500
c_{s1} [kg/s]	2000.02	2000
k_{u1} [N/m]	59999.90	60000
EI_1 [Nm ³]	1.56×10^{11}	1.56×10^{11}
EI_2 [Nm ³]	1.56×10^{11}	1.56×10^{11}
EI_3 [Nm ³]	1.56×10^{11}	1.56×10^{11}
EI_4 [Nm ³]	1.56×10^{11}	1.56×10^{11}
EI_5 [Nm ³]	1.56×10^{11}	1.56×10^{11}
EI_6 [Nm ³]	1.56×10^{11}	1.56×10^{11}

計測ノイズを加えた場合

変化させた
パラメータ

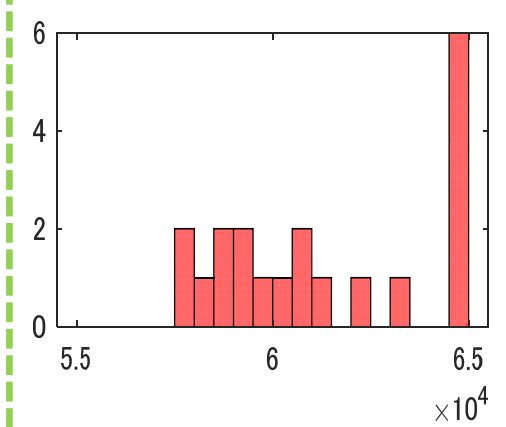
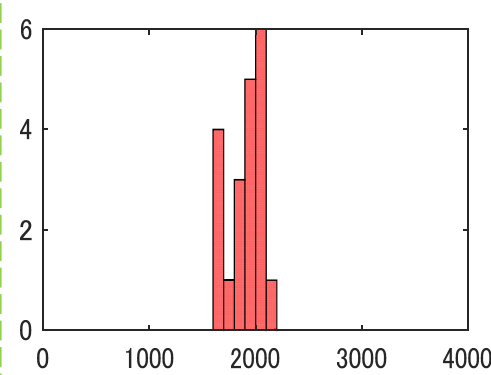
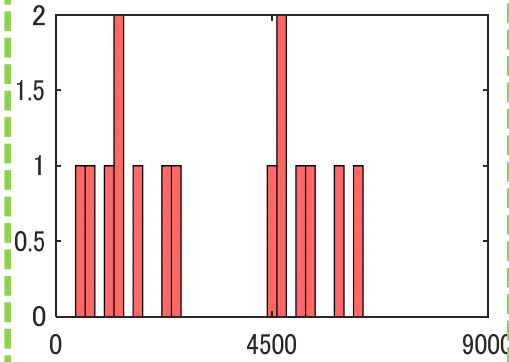
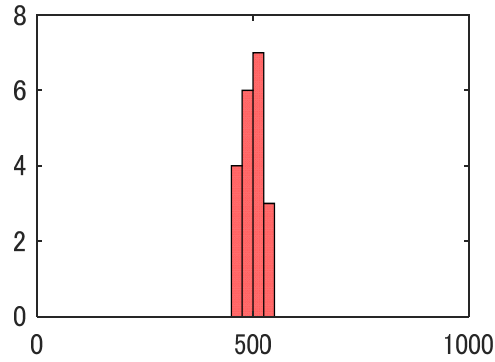
m_{u1} [kg]

k_{s1} [N/m]

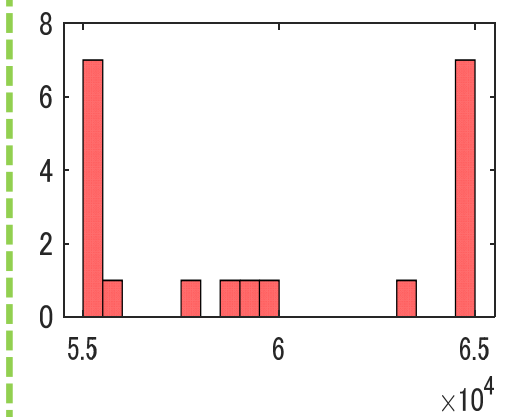
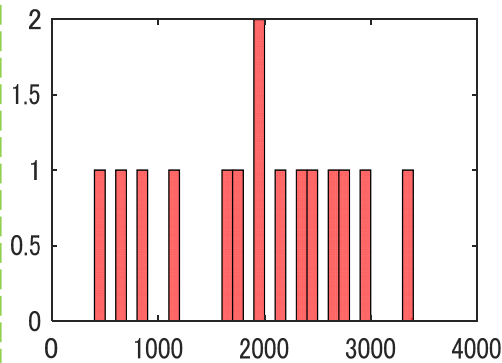
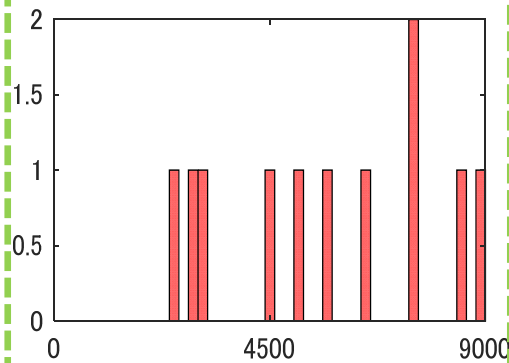
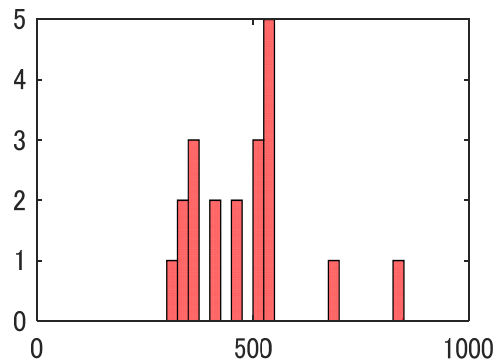
c_{s1} [kg/s]

k_{u1} [N/m]

1 %



5 %



計測ノイズを加えた場合

変化させた
パラメータ

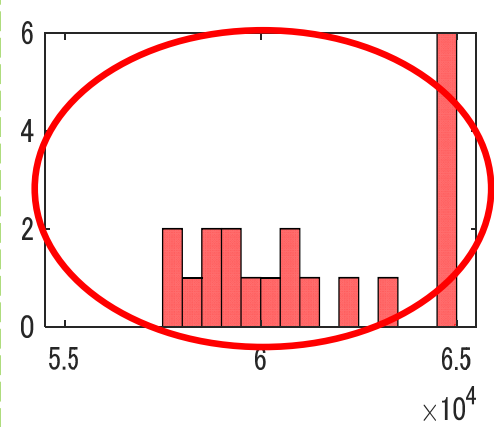
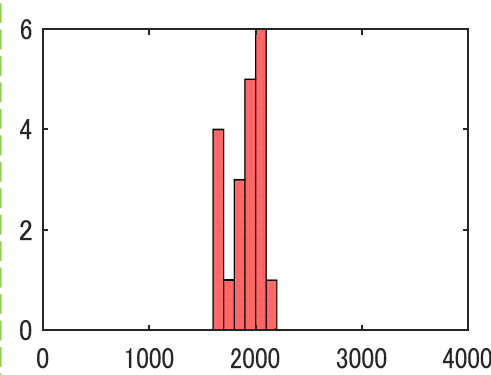
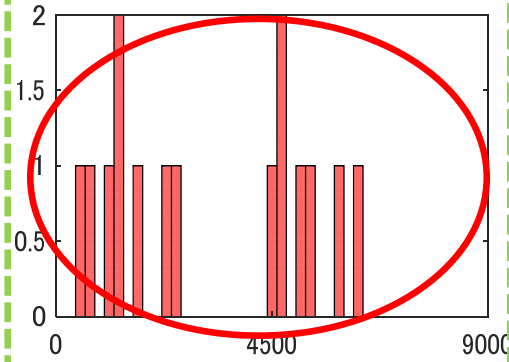
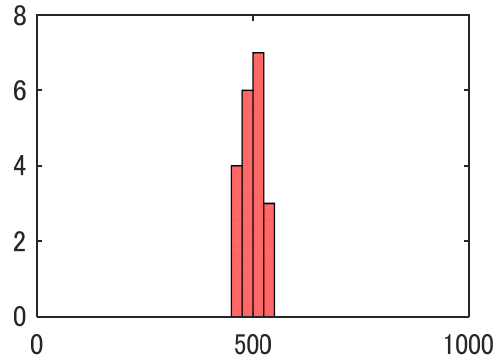
m_{u1} [kg]

k_{s1} [N/m]

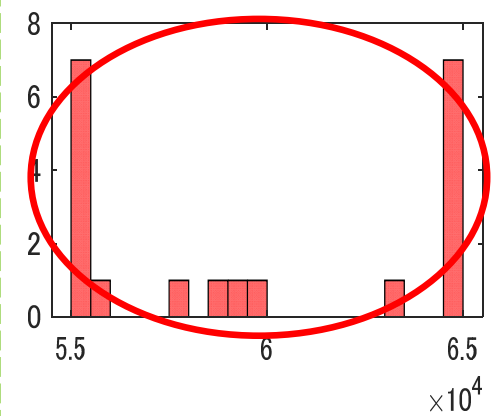
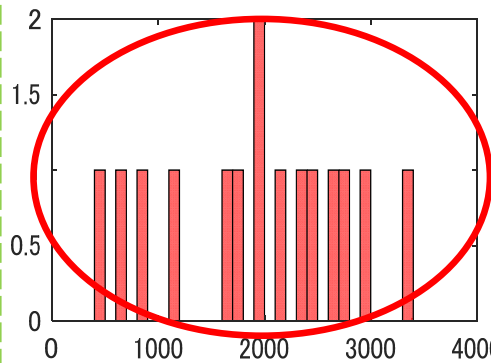
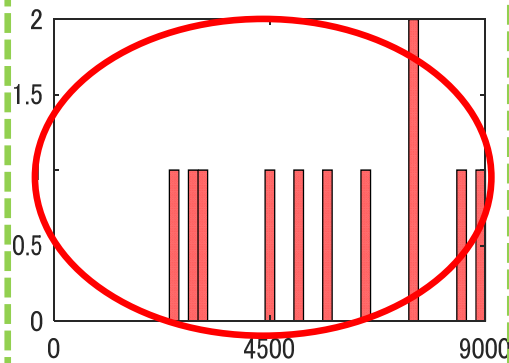
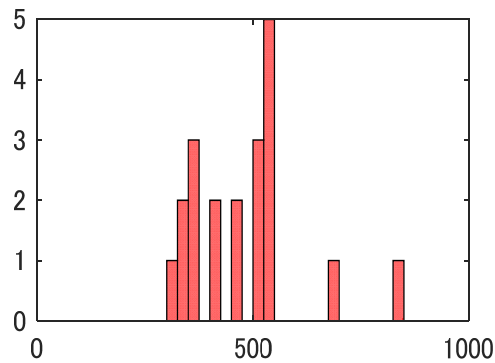
c_{s1} [kg/s]

k_{u1} [N/m]

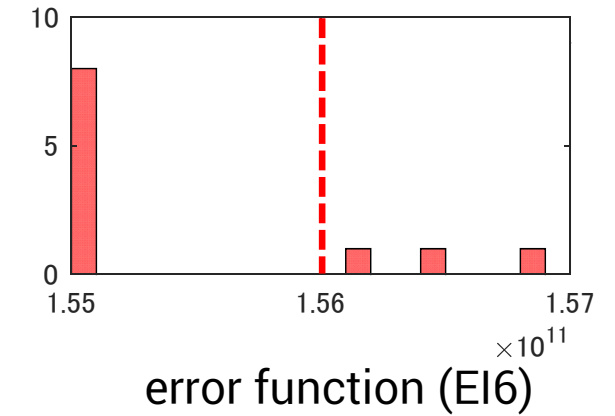
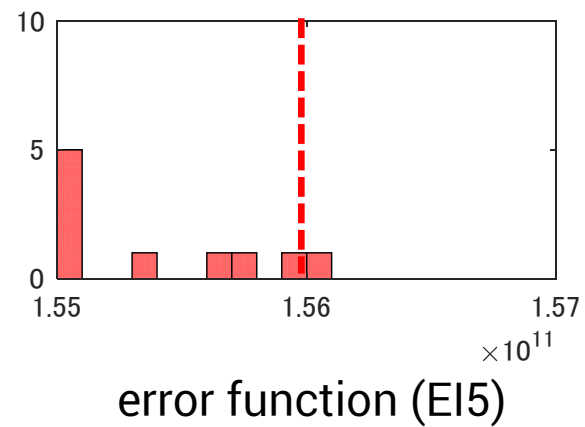
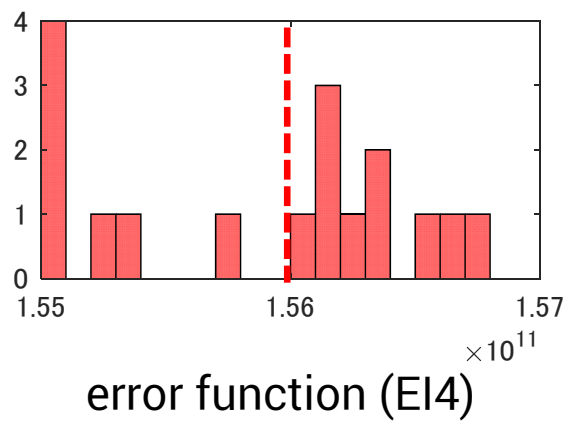
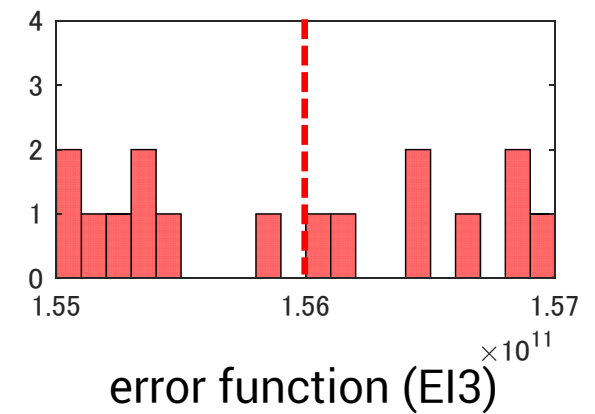
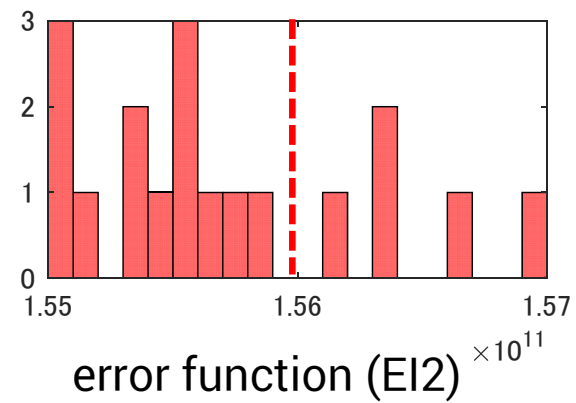
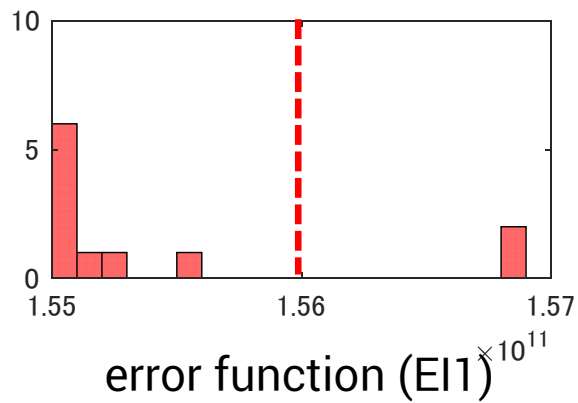
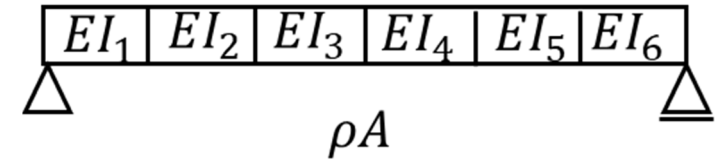
1 %



5 %



計測ノイズを加えた場合

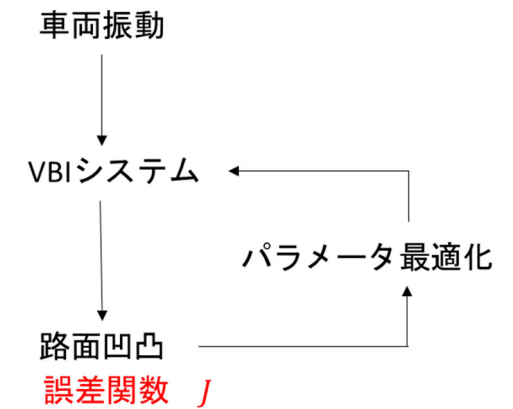


まとめと今後の課題

Conclusion and Future Work

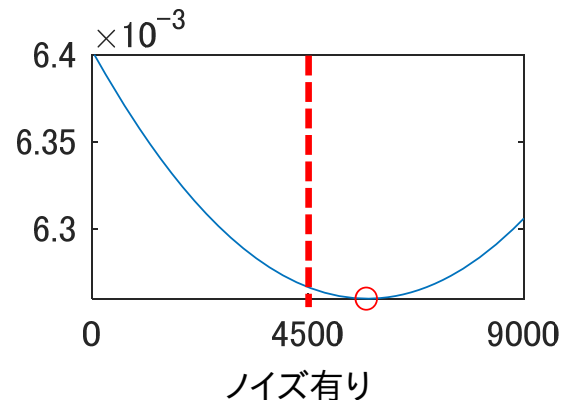
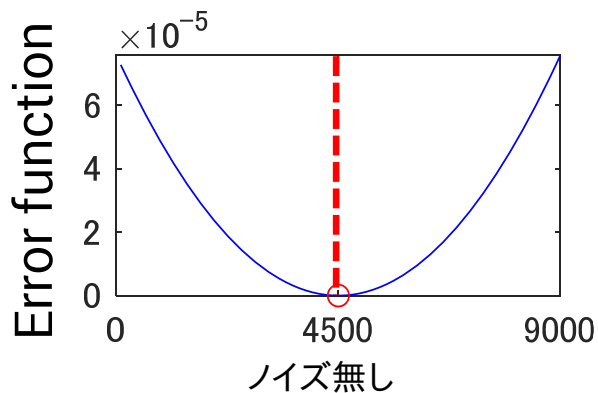
<まとめ>

- ・エンジンノイズを考慮したモデルの構築を行った。
- ・橋梁の単位長さ当たりの質量 ρA を除く車両・橋梁パラメータは下に凸の曲線となることが分かった。
- ・計測ノイズは誤差関数の形状に影響しない。
- ・勾配降下法を用いてパラメータを最適化することができた



<今後の課題>

- ・ノイズを加えた場合の精度向上
- ・複数のパラメータを同時に変化させた場合の影響の検討
- ・勾配降下法だけを使うのではなく、PSO法やMCMCのような最適解を探索する方法も用いて精度を向上させる。



パラメータ	ノイズの影響 受けにくさ
mu1	○
ks1	×
cs1	△
ku1	×
EI	×