



# 繰り返し実験による 速度-SSMAのMahalanobis距離を用いた 橋梁点検手法の検討

Feasibility study for bridge inspection method by repeatable experiment  
using Mahalanobis distance of vehicle speed Spatial Singular Mode Angle (SSMA)

筑波大学  
人工知能科学センター  
研究員

高橋 悠太

筑波大学大学院  
システム情報工学研究科  
構造エネルギー工学専攻

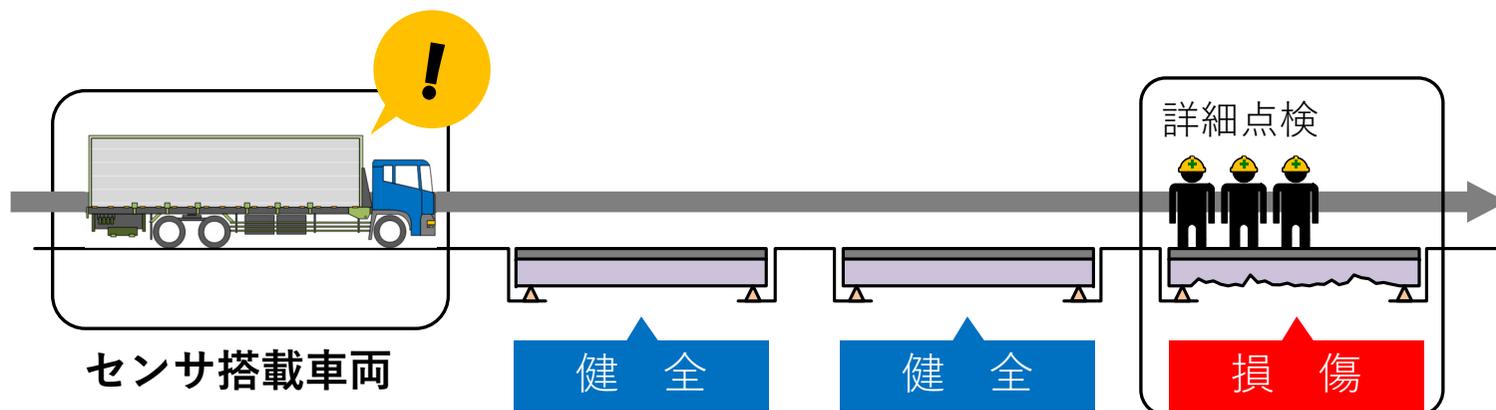
井上 潤

筑波大学  
システム情報系 助教  
構造エネルギー工学域

山本 亨輔

はじめに

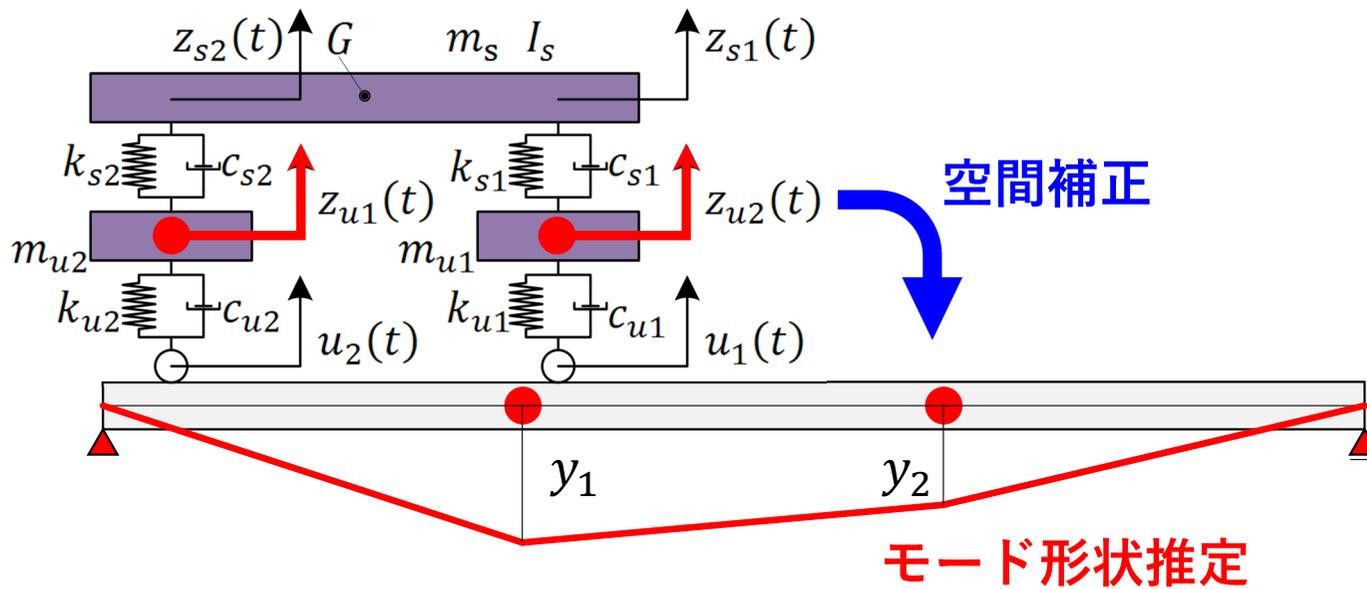
## 走行車両の振動データを用いた橋梁点検



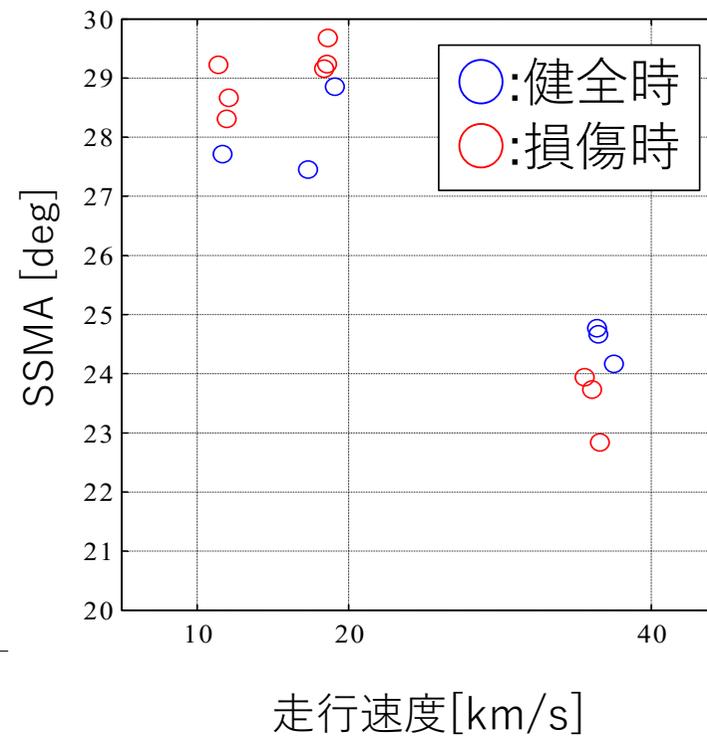
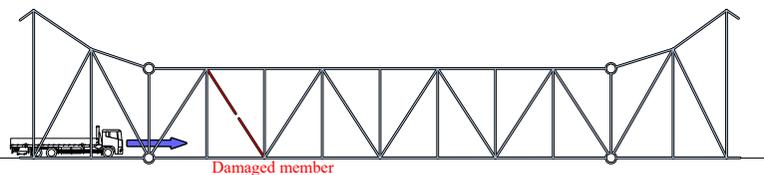
手法

# SSMAを用いた損傷検知

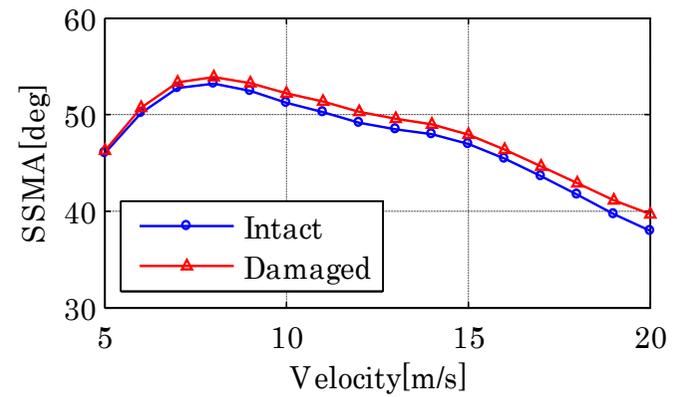
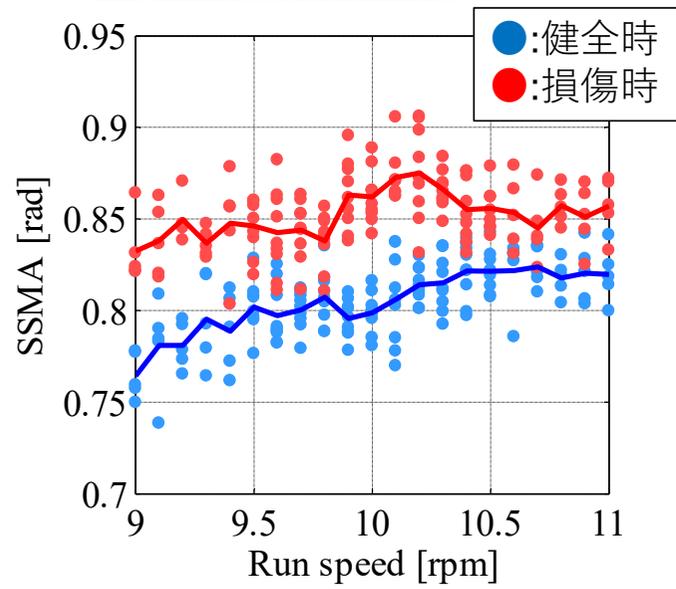
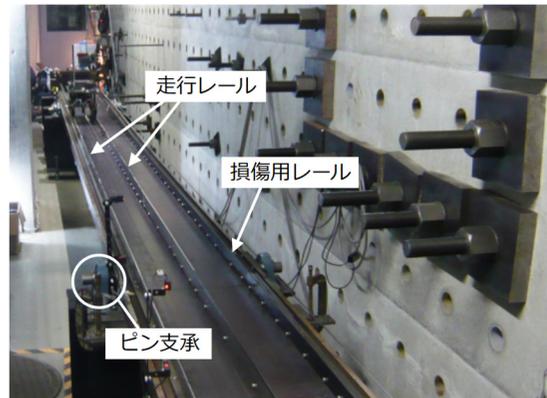
(空間特異モード角) (有無の判定)



# 既往の研究成果

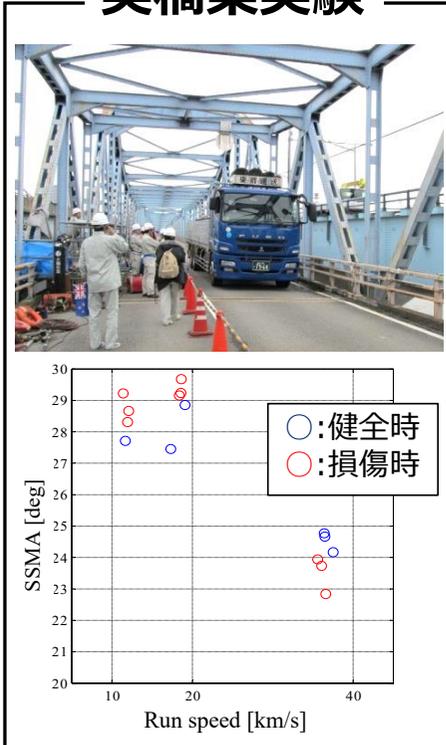


## 既往の研究成果

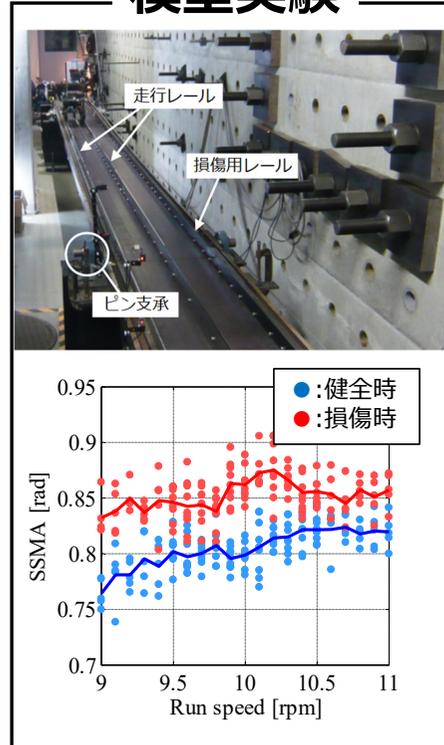


## Previous study about SSMA

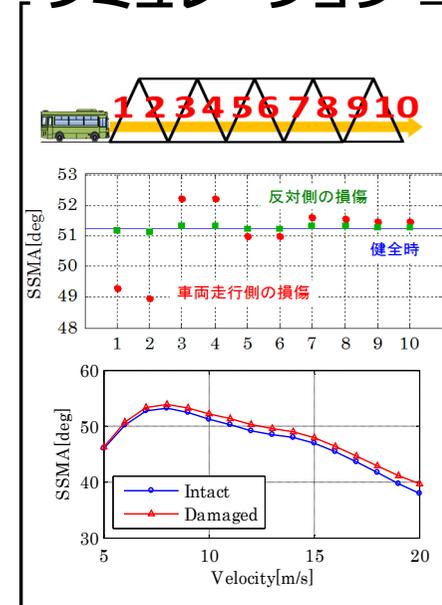
### 実橋梁実験\*



### 模型実験\*\*



### シミュレーション\*\*\*



\*山本亨輔, 伊勢本遼, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征: 鋼トラス橋の部材破断が橋梁および走行車両の加速度応答に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.180-193, 2012

\*\*中金祐太: 模型桁実験による車両応答を用いたモード形状推定法の桁損傷検知への適用性に関する検討, 筑波大学理工学群工学システム学類卒業論文, 2014.

\*\*\*Kyoosuke Yamamoto, Mikio Ishikawa: Relationship between SSMA and vehicle run speed, the 27th KKHTCNN Symposium on Civil Eng., Shanghai, China, 2014.

損傷検知感度：良好 ▶ 速度の影響を受ける

## Repeatable experiment by paper bridge

- 実橋実験や数値計算の課題
  - 実橋：繰り返し回数には限界
  - 数値計算：実橋の再現性？（未知の不確定因子の影響）
- **ペーパーブリッジ**を用いた模型実験：繰り返し実験可能
  - 第1条件：細部のディテール（副構造やボルト接続）を再現
  - 第2条件：固有振動数は実橋に近い値（5Hz程度）
  - 第3条件：路面凹凸を再現できる

実験全体の概観



橋梁模型概観



車両模型概観



橋梁諸元

Overview	Span Length [m]	4.24
	Natural frequency [Hz]	5.30
Deck	Thickness [mm]	52
Paper Material	Thickness [mm]	1
	Flange span [mm]	70
	Web Height [mm]	260

車両諸元

Overview	Length [mm]	400
	Wide [mm]	280
	Spring Ratio [N/m]	124.8
	Natural Frequency [Hz]	2.77

## Mahalanobis Distance as the bridge inspection index

### □ Mahalanobis距離 (MD) : 2つのデータ群の類似性

$x$  : 得られたデータ群

$\mu$  : 既知データ群の平均

$\Sigma$  : 既知データ群の分散共分散行列

$d$  : 既知標本に対する得られたデータの異常度

$$d = \sqrt{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)}$$

### □ 橋梁振動を用いた損傷検知指標に利用

- 例えば, 金ら\*によるMahalanobis-Taguchi System(MTS)による手法

### □ SSMAは速度変化や重量変化の影響を受ける

- 多次元データとしてまとめる (特徴量を増やす)
- 速度-SSMAのMDの有効性を鋼製橋梁模型\*\*、ペーパーブリッジにて検証

\*金哲佑 他: 多径間連続鋼トラス橋の交通振動を用いた損傷検知手法, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.3, pp.557-571, 2013.

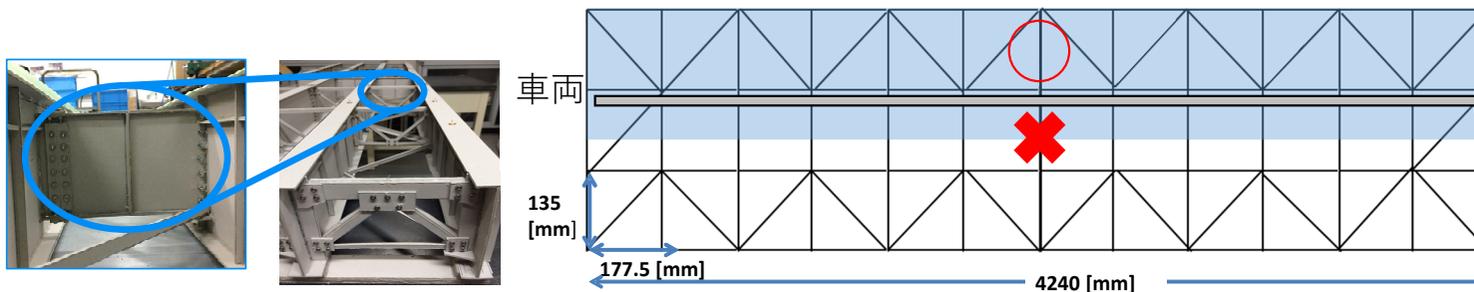
\*\*高橋悠太 他: 空間特異モード角度を用いた比較的軽度な橋梁損傷検知の可能性検討, 構造工学論文集65A, 2019.

## Purpose & Experiment detail

□ 繰り返し模型試験により，**速度-SSMAのMD**を用いた損傷検知手法の再現性を確認する．

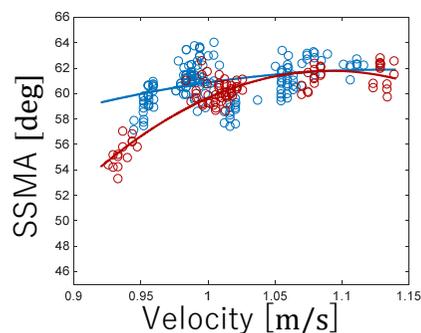
### □ 実験概要

- 橋梁模型の赤部分の部材を取り外し，損傷を模擬
- ○：分配横桁除去（損傷：軽），○&×：分配横桁除去（損傷：重）  
※耐力が実橋梁に比して大きいと考えられるため，かなり大きな損傷を付与  
※手法の効果を確認するため実際の損傷を想定はしていない
- 各ケースで50～100回程度の繰り返し走行実験を実施

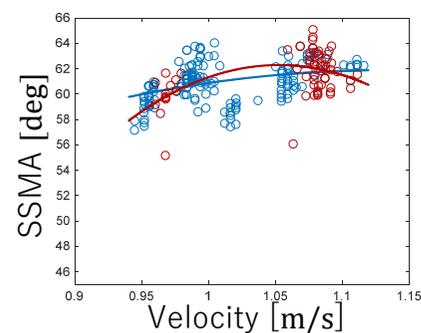


## Result & Discussion (1/2)

### □ 速度-SSMA：損傷の有無で速度変化が異なる



軽度損傷時の速度-SSMA



重度損傷時の速度-SSMA

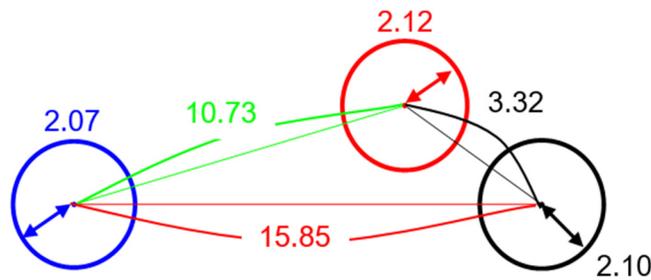
青：健全  
赤：損傷

### □ ただし、定量的な評価は難しい：マハラノビス距離による比較

- それぞれの橋梁状態内部で、データを等分して算出し平均化（基準MD）
- それぞれ異なる橋梁状態で算出（基準MDを超える = 異なるデータ群 = 損傷発生or損傷進展）

## Result & Discussion (2/2)

### □ MDによる損傷検知



速度-SSMAのMD概念図

青：健全，赤：軽度，黒：重度

各橋梁状態でのMDと正解率

$x$	1	2	3	1	1	2
$y$	1	2	3	2	3	3
$D$	2.07	2.12	2.10	10.7	15.9	3.32
Ar [%]	-	-	-	62.9	85.1	35.1

(※ 1…健全，2…軽度，3…重度)

※※正解率：基準MDを超えたデータの比率

### □ 考察：健全時と損傷時で速度-SSMAは大きく異なる

- 損傷が大きいほど，正解率が高い
- 軽度から重度で，正解率が下がる：軽度損傷が過大で，変化がほとんどない？

### □ スケールが変わっても，提案手法による損傷検知は可能

- より軽度の損傷（ボルト脱落）の影響などは今後の課題

## Conclusion & Future works

### □ まとめ：速度-SSMAのMDを用いた橋梁点検手法の検証

- ペーパーブリッジを用いた模型実験にて，繰り返し走行を行い検証した
- 速度-SSMAを単純に比較するだけでは定量的な損傷検知はやはり困難.
- 提案手法を用いることで，定量的な損傷検知が可能.
- 本模型試験にて，スケール（材料）が異なっても適用可能とわかった.

### □ 今後の課題

- ボルトの脱落など，より軽度の損傷検知が可能か
- 重量（あるいは温度）を特徴量として，組み入れ可能か（機械学習適用の利点が出てくる）



筑波大学

*University of Tsukuba*

