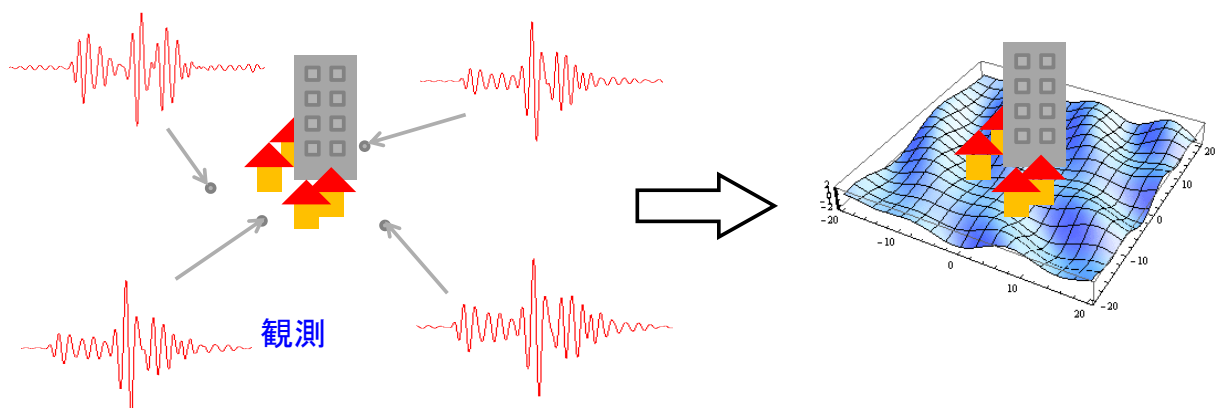


観測に基づく 都市の地震被害評価技術の開発

東京大学 堀宗朗
東京工業大学 廣瀬壮一

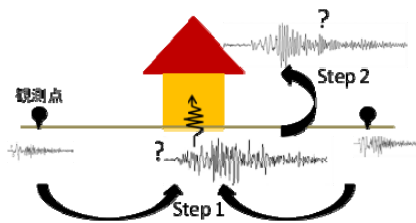
MeSO-netによる地震動のイメージング

- MeSO-netの観測網を活かした, 地表面の任意の地点における地震動分布の推定
- 構造物地震応答シミュレーションの, 一棟一棟の構造物への入力地震動に利用

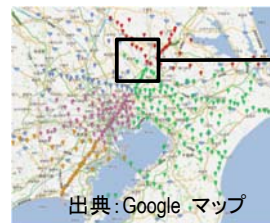


水迫覚信(修士論文2015)
※社会基盤学専攻 古市賞受賞

スパースモデリングに基づく地震動推定



地震計よりも圧倒的に密に分布する構造物の即時被害予測に必要な入力地震動の推定



首都圏地震観測網
MeSO-net



出典: Google マップ

Taylor展開

$$u_k(x_0 + \Delta x, \omega) = u_k(x_0, \omega) + \sum_i \frac{\partial u_k(x_0, \omega)}{\partial x_i} \Delta x_i + \sum_i \sum_j \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u_k(x_0, \omega)}{\partial x_i \partial x_j} \Delta x_i \Delta x_j + \dots$$

未知

構造物直下の地震動

偏微分係数

線形重回帰モデルに帰着

$$Y_k = \beta_{k0} + \sum_i \beta_{ik} X_i$$

LASSO (L_1 正則化に基づくスパース推定)

$$y_i = \beta_{i0} + \sum_k \beta_{ik} x_k$$

損失関数

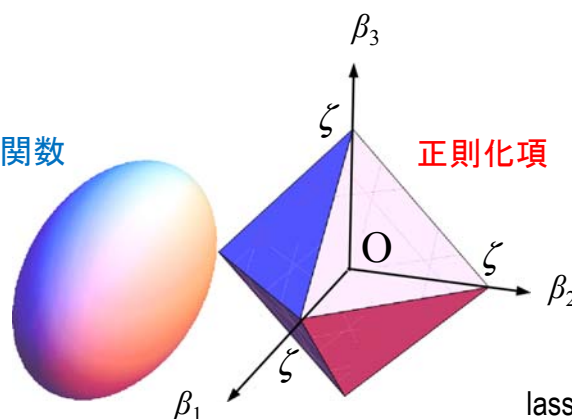
正則化項

$$\hat{\beta}^{\text{lasso}} = \arg \min_{\beta} \frac{N}{2} \log 2\pi\sigma^2 + \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N \left\{ y^{(n)} - \left(\beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k x_k^{(n)} \right) \right\}^2 + \frac{N\lambda}{\sigma^2} \sum_{k=1}^K |\beta_k|$$

$$\Leftrightarrow \hat{\beta}^{\text{lasso}} = \arg \min_{\beta} \frac{N}{2} \log 2\pi\sigma^2 + \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N \left\{ y^{(n)} - \left(\beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k x_k^{(n)} \right) \right\}^2 \quad s.t. \quad \sum_{k=1}^K |\beta_k| \leq t$$

損失関数

正則化項

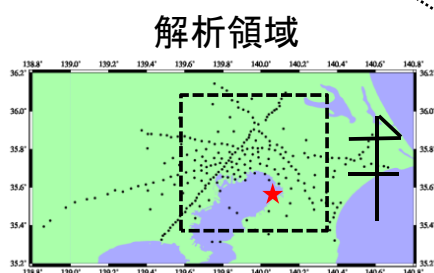
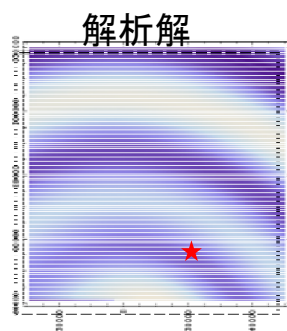
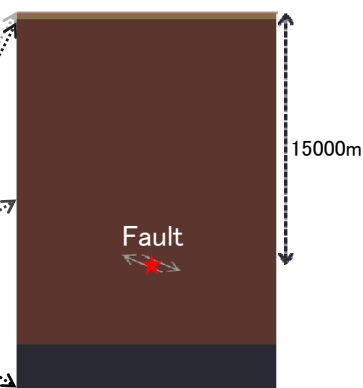


lassoの幾何学的解釈

解析解を用いた検証

- ・首都直下地震を想定
- ・水平成層構造モデル
- ・MeSO-net観測点で得られる擬似データ

Layer #	density(kg/m ³)	Vp(m/s)	Qp0	Qpf	Vs(m/s)	Qs0	Qsf	Thickness(m)
1	1900	1800	200	0	500	200	0	10
2	2100	2300	200	0	900	200	0	100
3	2500	5000	400	0	3500	400	0	20000
4	3000	7500	800	0	4500	800	0	∞



地震動分布 (0~0.1 Hz, NS)

提案手法

GROUP LASSO
3rd order

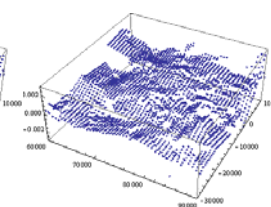
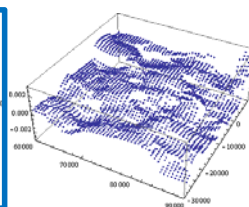
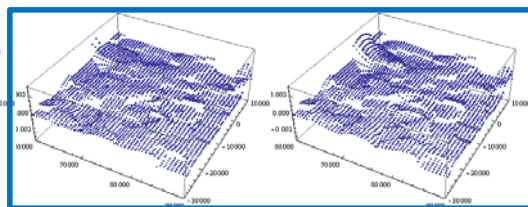
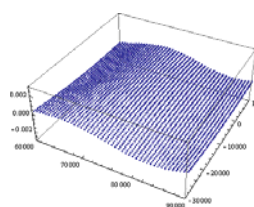
LASSO
3rd order

RIDGE
3rd order

従来の手法

OLS
1st order

TRUE

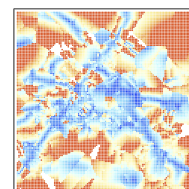
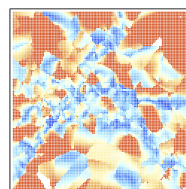
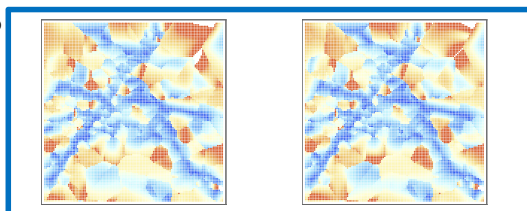


波形分布

誤差

200%

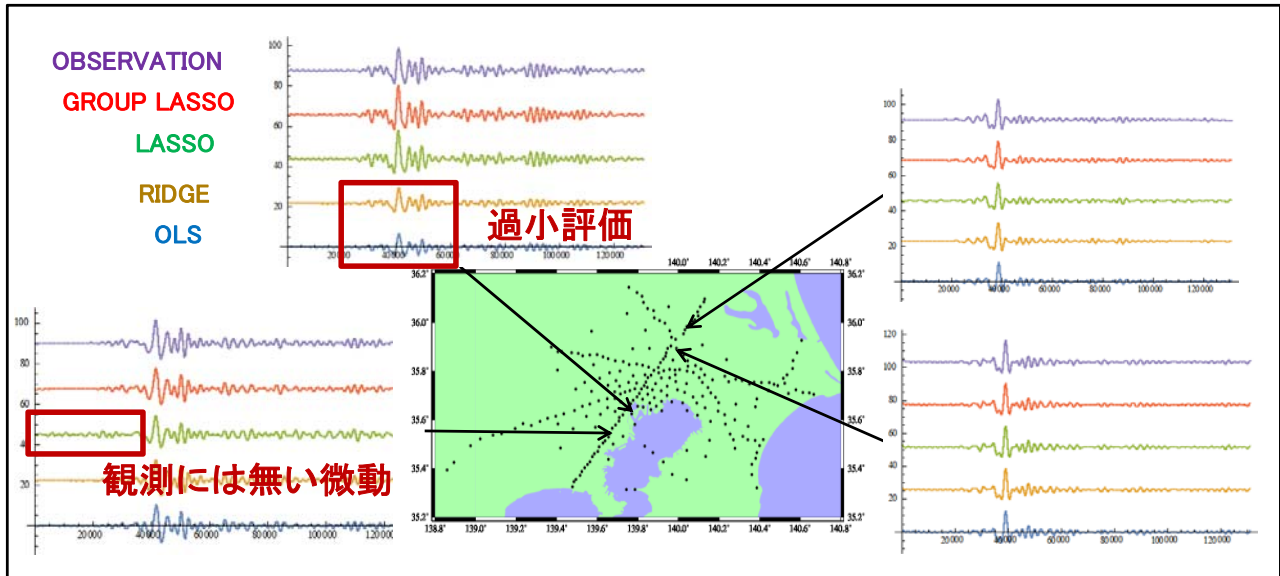
0%



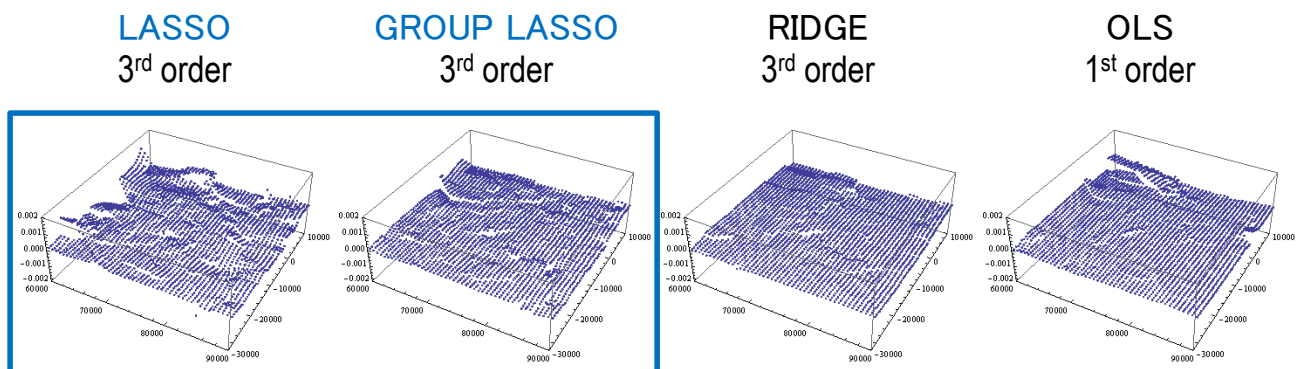
相对推定誤差

2011年東北地方太平洋地震への適用

観測波形・推定波形の例(0~0.1Hz, NS)



推定された初期微動の地震動分布(0-0.1 Hz, NS)



著しく不連続

不連続が緩和

まとめ

◆ MeSO-netデータとスパースモデリングを使った地震動イメージングに成功

- 従来手法よりは高精度が期待
- 首都圏全域では周波数は0.2Hz程度
- 観測点近くは高精度

◆ 構造物入力地震動の推定

- 10Hzまでの地震動を外挿する方法
- 観測, スパースモデリング, シミュレーションの一連のフローをシステム化

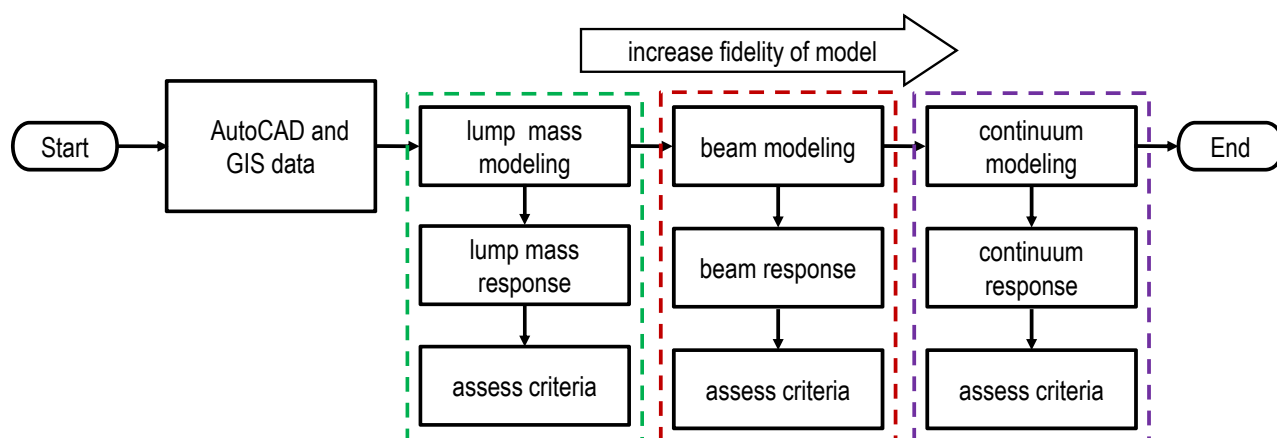
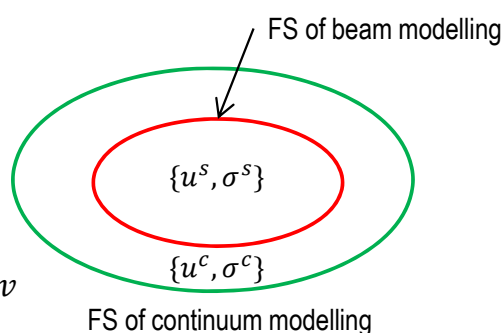
META-MODELING理論

$$L[\mathbf{v}, \boldsymbol{\epsilon}] = \int_V \frac{1}{2} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} - \frac{1}{2} \boldsymbol{\epsilon} : \mathbf{c} : \boldsymbol{\epsilon} \, dv$$

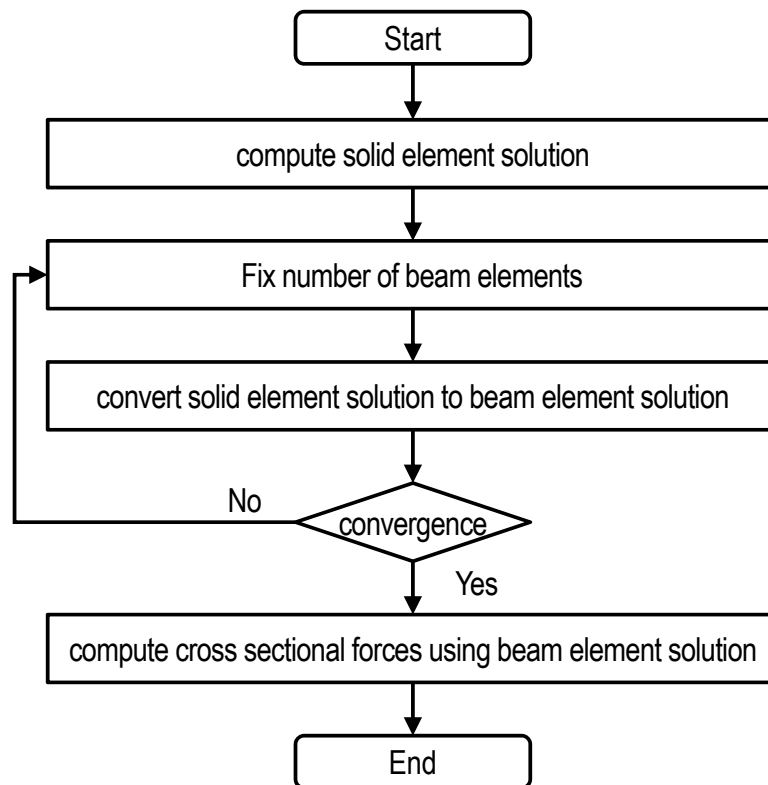


$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \dot{\mathbf{u}} \\ \boldsymbol{\epsilon} &= \text{sym} \nabla \mathbf{u} \end{aligned}$$

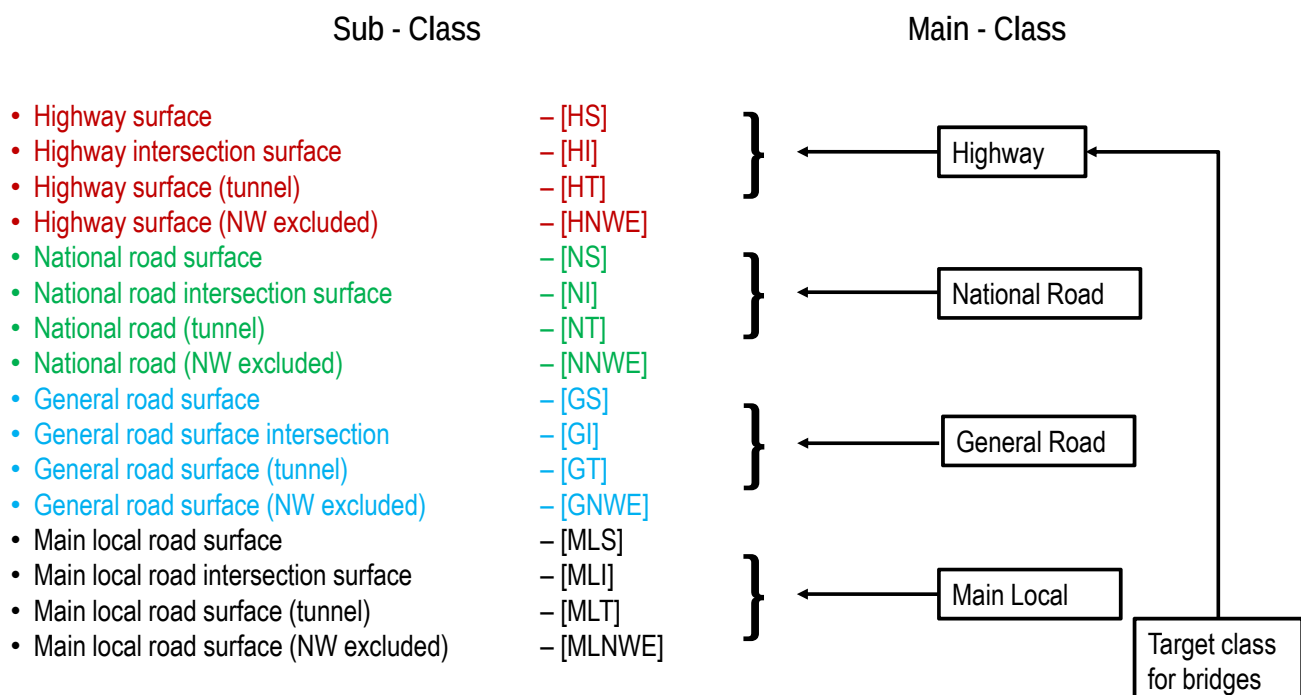
$$L^*[\mathbf{v}, \boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\sigma}] = \int_V \frac{1}{2} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} - \left(\boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\epsilon} - \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{c}^{-1} : \boldsymbol{\sigma} \right) \, dv$$



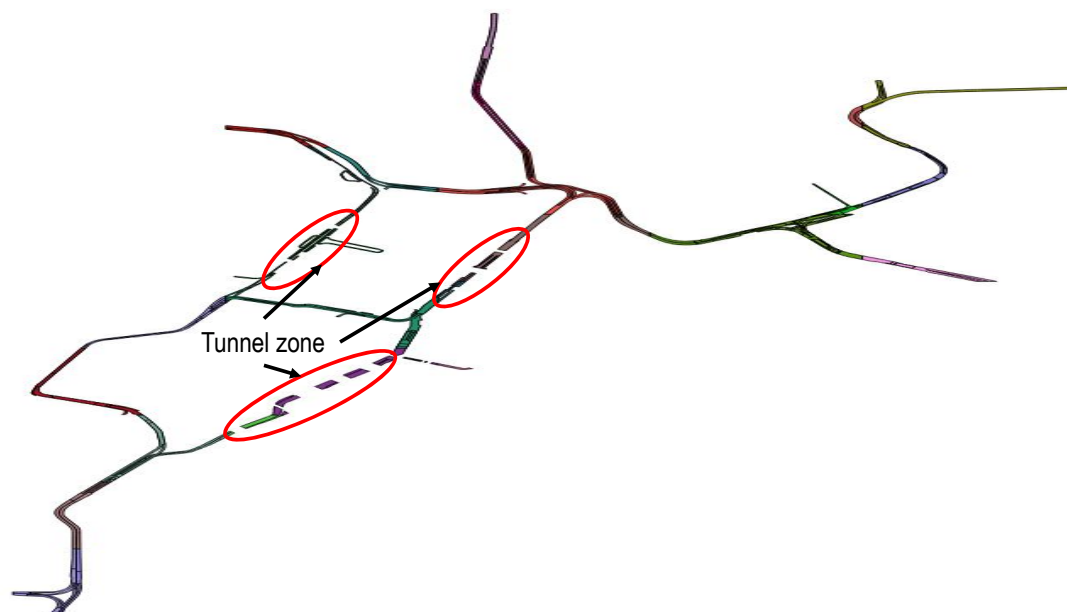
解の変換



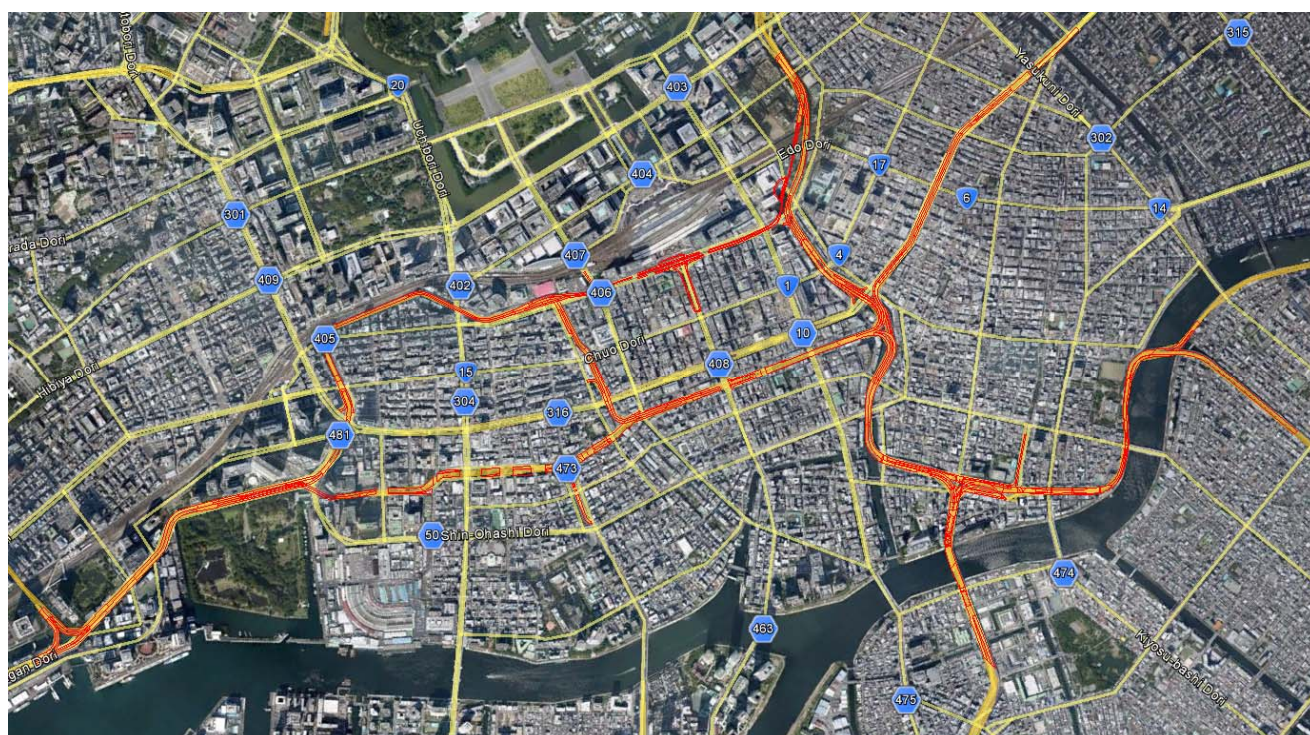
GISデータ変換



高速道路ネットワークの線形

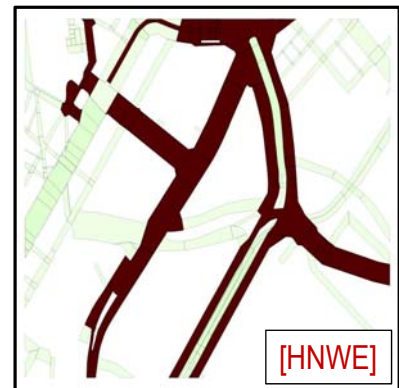
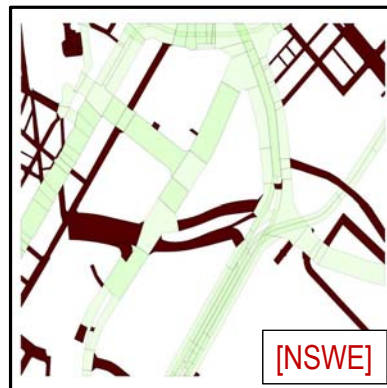
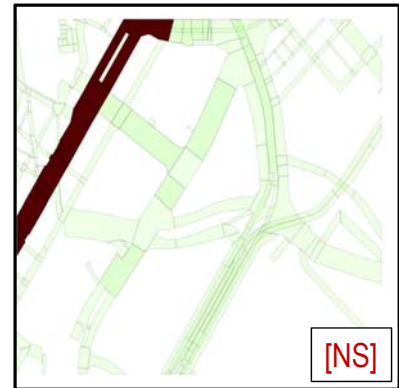


高速道路ネットワークの線形



yellow: Google Earth, red: filtered data

GISデータの詳細



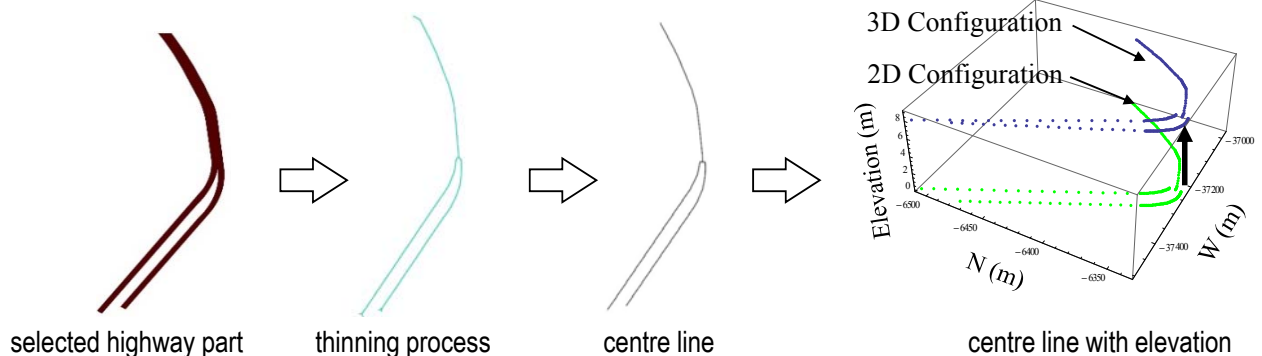
データ変換

Decoding of GIS data: GIS data need to be interpreted in order to construct an analysis model.

1. Plane configuration of line is interpreted by using 2D GIS data, as follows:

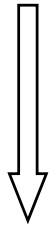
- convert vector data of polygons to raster data
- apply thinning to identify the center line
- prune line segment shorter than 10 m in each junction
- separate line segments at each junction, removing complexity at junctions

2. Elevation of center line is estimated by using difference between profile and terrain data that are stored in 3D GIS data.



LUMP MASS MODELING

$$L^*[v, \epsilon, \sigma] = \int_V \frac{1}{2} \rho v \cdot v - \left(\sigma : \epsilon - \frac{1}{2} \sigma : c^{-1} : \sigma \right) dv$$



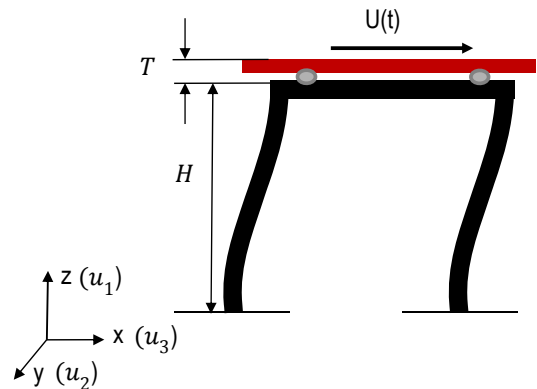
$$\{u_1, u_2, u_3\} = \begin{cases} U(t)\{-xw'(z), 0, w(z)\} & 0 < x < H, \\ U(t)\{-xw'(H), 0, w(H)\} & H < z < H + T. \end{cases}$$

$$\{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \sigma_{31}, \sigma_{12}\} = \{s(z), 0, 0, 0, 0, 0\}$$

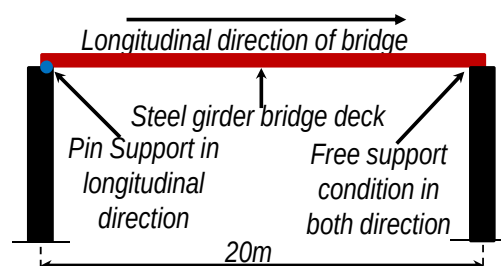
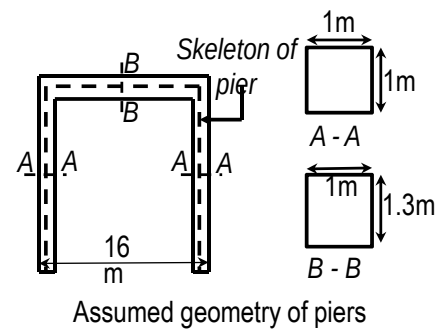
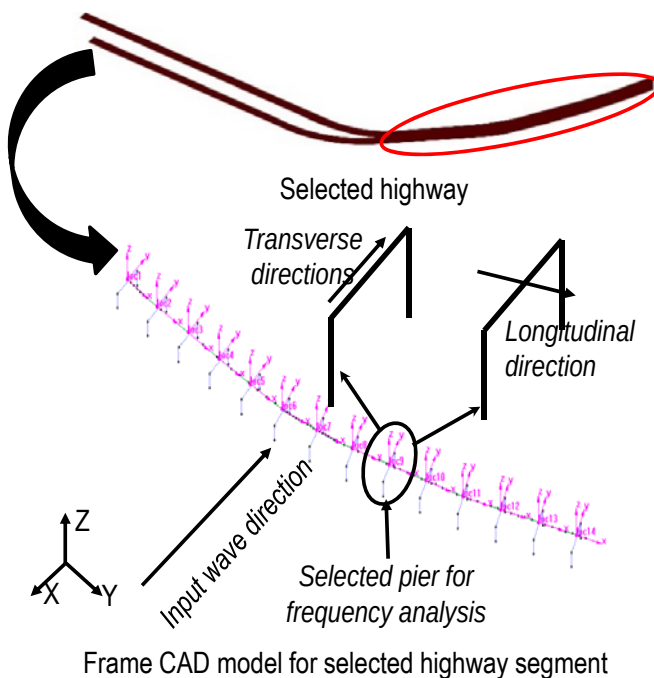
$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} M \dot{U}^2(t) - \frac{1}{2} K U^2(t)$$

$$M = M_d + \int_0^H \rho (A w^2 + I (w')^2),$$

$$K = \int_0^H EI (w'')^2 dz,$$



数値実験によるモデルの検証



まとめ

- ◆社会基盤施設(交通ネットワーク)の都市モデルの自動構築手法を考案
- ◆メタモデリング理論に基づき, ソリッド要素モデルと梁要素モデルの変換が実現
- ◆2次元GISと3次元GISを組み合わせることで, 線形判定に成功
- ◆集中マスモデルの自動構築に成功

構造部材損傷をバイナリで判定する 簡易センサの開発

設計コンセプト

- 構造部材が壊れたかどうかをバイナリで判定
 - ⇒ 最低でも単精度(Float)の演算機能を要するマイクロコントローラー
- 将来的に1万円／台とできる程度の性能
 - ⇒ MEMS加速度センサ & MEMSジャイロセンサ
- 大地震後(停電後)もしばらく計測
 - ⇒ 小型バッテリー & 低消費電力部品

単4バッテリー3本で1週間を目標
• MEMS加速度計は常時電力を供給(0.1 mA程度)
• MEMSジャイロは地震検出直後にON(6.1 mA程度)



構造部材の損傷を判定する方法は？

今後、以下の3つの方法を検討予定
SI値のような、地震被害と相関が高い指標をみ
つける問題として考えない。
最後は同じになるかもしれないが...

- 方法1: 変形を計測

- ⇒ 地震後の応急危険判定:

- W造の層間変形角が $1/60$ 以上だと要注意(黄色)

- $1/60 \text{ [rad]} = 1 \text{ [deg]}$ > 目標分解能 0.1 [deg]



- 方法2: 非線形応答を検出

- ⇒ 応答をAuto-Regressiveモデルで記述し、推定残差から非線形性を検出

- 方法3: 地震応答解析とデータマッチング

- ⇒ 予め多数回の地震応答解析

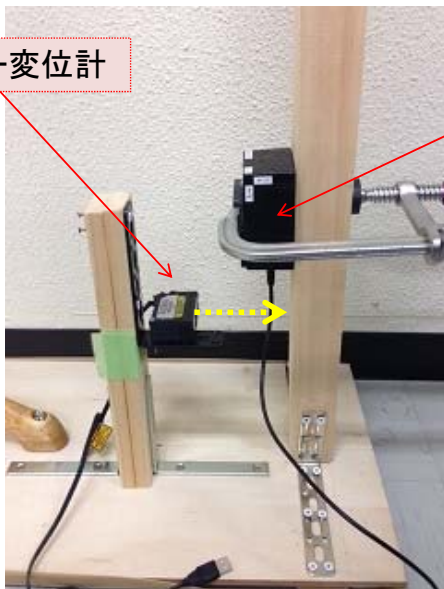
- 地震時にはセンサに保存されたデータベースとマッチング or 特徴検出

方法1: 層間変形角の計測

地震応答を模して揺らす



レーザー変位計



バイナリ地震計

層間変形角の計算

レーザー変位計

$\theta = \text{水平変位} / \text{回転中心からの高さ}$



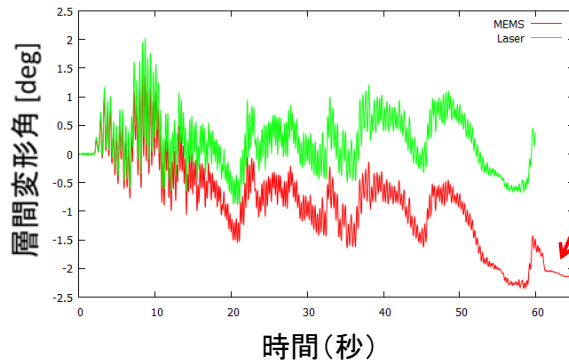
比較!

MEMSジャイロセンサ

$\theta = \text{角速度を時間積分}$

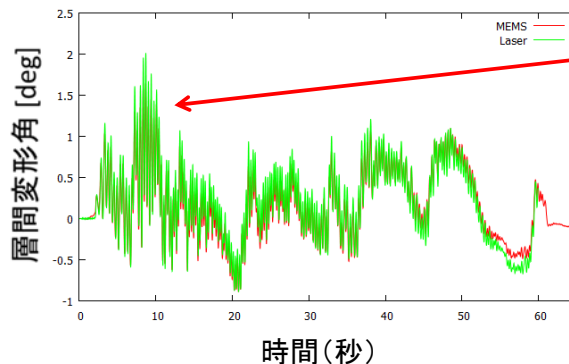
結果

■ 単純なバイアス補正(角速度のバイアスを求め補正後に積分)



地震後も傾きが拡大していく不自然な計算結果. バイアスの補正ミスが原因
バイアスが60秒の間に徐々に変化

■ 地震後, 層間変形角が変化しない条件でバイアス補正



よく一致しているように見えるが, 実際には0.5度程度のずれ
バイアスが一定ではない事が原因

地震後, 層間変形角は変化しない

まとめ

- 層間変形角を計測する簡易な地震センサを試作
 - － センサの電気的なバイアスが短時間でも変動
電源を常時供給できれば軽減可能
地震時を考えるとバッテリーの確保は不可欠
 - － バイアス変動に対するハード的対応
他のジャイロセンサの利用
電子回路の再設計
 - － バイアス変動に対するソフト的対応
バイアスを一定値ではなく, 多項式でモデル化
- 他の二つの計測方法の検討
 - － 方法2 非線形応答の検出
 - － 方法3 地震応答解析とデータマッチング