高速カメラを活用した送電鉄塔の振動計測手法の予備的検討

東電設計㈱　正会員　○栗原　幸也
金沢大学　正会員　辻　徳生
東電設計㈱　フェロー会員　中村　秀治　正会員　山崎　智之

１．はじめに

図－１のような送電用鉄塔は，我が国全体で約25万基建設されており，部材腐食，ボルト緩み，基礎変位，部材変形，疲労亀裂などの経年劣化事象が確認されている．このような劣化事象を診断するには，熟練技術者による目視調査で診断せざるを得ないため，安全面の問題や，技術者によって診断レベルにばらつきが生じる可能性がある．そこで著者等は，客観的かつ定量的に劣化程度をクラス分けできる簡易な方法として，フルハイビジョン高解像度カメラを用いた計測手法および振動モード計算手法を提案している．本論文では，著者等が提案する手法を実規模の送電用鉄塔に適用し，加速度計の振動モードと比較することで，計測システムの精度検証を行った．

図－1　送電用鉄塔

２．計測原理について

本手法は，高解像度カメラで対象物体を動画撮影するため，物体の変形を時系列に従って画像で捉えることができる．対象物体の位置変化を追跡することにより，対象物体の変位計測が可能である．本研究では，対象物が送電用鉄塔であり，振動モードによる評価を行うことから，図－2のように主柱材基礎近辺にカメラを設置し，頂部から下部までの主柱材全てが撮影できるようする．

図－2　カメラ設置の様子

2.1　計測原理

通常のカメラの光学系は透視投影モデルに近似できる．画像座標を(X, Y)とすると，実空間の座標(x, y, z)との対応は以下の式(1)，式(2)で表現できる．

$$X = f\frac{x}{z} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1) \qquad Y = f\frac{y}{z} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

ここで，fは焦点距離である．したがって，光軸方向の距離zがわかっていれば，画像上でのX,Y方向の移動量は，実空間のx，y方向の移動量に変換することができる．鉄塔の振動は水平方向が主であるため，カメラを鉛直上方向に向ければ，その部材の高さを光軸方向の距離zとし，画像上での移動量から水平方向の変位を求めることができる．

2.2　特徴点の追跡

テンプレートマッチングにより特徴点の追跡を行う．追跡は，前回の推定位置の近傍領域内でテンプレート画像の位置を変えながら類似度を評価し，最も類似している領域の位置を求める．そのため，各時刻での位置から，テンプレート内に写っている物体の変位を求めることができる．画像の類似度の評価手法はいくつか提案されているが本研究では次の式(3)を用いる．

$$C = \sum_{y=1}^{Y}\sum_{x=1}^{X}\{I(x,y) - T(x,y)\}^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

$T(x, y)$は，テンプレートであり，そのサイズは(X, Y)である．$I(x, y)$は比較する画像の一部であり，そのサイズも(X, Y)である．対象物が回転する場合や，カメラの光軸方向に移動して画像上でのサイズが変化する場合には追跡精度が低下するが，本研究のように対象物が大きく移動しない場合には精度よく追跡できることが期待できる．

2.3　振動モード解析

本手法は多次元自己共分散行列を用いて，固有振動数，固有振動モードを算出する．時刻tでの各点における変位を $X_t = (x_{t1}, x_{t2}, \cdots, x_{tn})$ ，nは計測点数とする．これらを時系列で並べたベクトルを$S_t^T = (X_t^T, X_{t+1}^T, \cdots, X_{t+m}^T)$，mは離散過程の次元である．このベクトルの共分散行列を式(4)で求める．

キーワード　送電鉄塔，高速カメラ，振動モード，維持管理，部材交換
連絡先　〒135-0062　東京都江東区東雲 1-7-12　東電設計株式会社電気本部
Tel. 03-6372-5510　E-mail: t.kurihara@tepsco.co.jp

$$W = \sum_{t=1}^{l} S_t S_t^T \quad (4)$$

ただし，lはデータ数である．仮に，入力した$S_t(0 < t \leq l)$が単純な周期振動の重ね合わせであるとすると，このWの固有ベクトルは，各振動モードに対応する．そのため，固有値をλ_j，固有ベクトルをU_jとし，それを時刻ごとに成分を分けて，$U_j^T = (V_0^T, V_1^T, \cdots, V_m^T)$とすると，周波数fに対応する振動モードMを式(5)により求めることができる．

$$M(f) = \lambda_j \sum_{t=0}^{m} V_t e^{-j2\pi fTt} \quad (5)$$

ここで，Tは画像のサンプリング周期である．式(5)の周波数fを変えながら計算し，ノルムが最も大きい振動モードM(f)を固有ベクトルごとに求め，それを振動モードとする．

３．試験概要

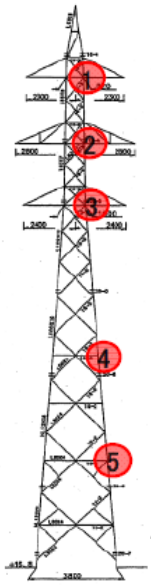
本実験は，図－3に示すようにカメラ(Canon社　PowerShot SX60HS)，加速度計（ZMP IMU-Z2），マーカおよび風向風速センサ（KDC-S04）を鉄塔に設置し，季節風（常時微振動）による変位および加速度を測定した．対象鉄塔は山形鋼鉄塔のW線No.2で，塔高は26.1[m]，鉄塔重量は3.842[Ton]である．また，各機具の設置高さは表－1の通りである．各々の固定方法は，加速度計は万力で地面と水平部材に設置し，マーカは主柱材に強力磁石で固定した．カメラは60Hz解像度1080×1920で15分間の撮影を行い，追跡対象は図－4のように鉄塔の昇塔用ステップボルトの先端およびマーカとし，加速度計近傍を選択して小領域画像の複数点で追跡を行った．

表－1　機具設置位置

加速度計マーカー	塔高 [m]
①	22.8
②	19.7
③	16.8
④	9.8
⑤	5.0

風速計設置位置：22.8m
カメラ設置：地上(c 脚)

凡例
：加速度計
マーカー設置

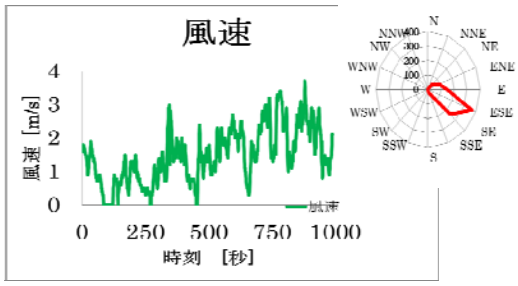


図－3　実験概要

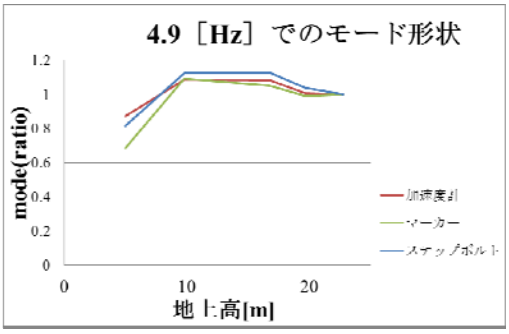
図－4　追跡画像（仮）

４．計測結果と考察

計測時の風向風速を図－5に示す．その結果，風速は最大で約4[m/s]，風向は東南東の風が主であった．また，追跡対象をステップボルトおよびマーカとした場合の振動モードと，加速度計による4.9Hzに対応する一次振動モードを図－6に示す．図－6の縦軸は，最高計測点（地上高22.8 m）の変位を1として，各高さ位置の水平方向変位を塔頂変位に対する比で示し，横軸は地上高とした．図－6より，追跡対象をステップボルトとして算出した振動モードと加速度計の振動モードを比較した結果，ほとんど振動モード形状が一致した．ただし，追跡対象をマーカとした場合の方がより加速度計の振動モードに近似したモード形状を確認した．この差は，追跡対象の大きさの違いから起こったと考えられる．



図－5　風向風速



図－6　振動モード

５．　むすび

人工加振を使用せず季節風（常時微振動）のみで，高速カメラを用いた計測システムの精度検証を行った．高速カメラを用いた手法は，マーカレスであっても，ステップボルトをターゲットにすることで加速度計およびマーカ追跡とほぼ同等の精度を確認できた．今後は，僅かな振動変位から振動モードを精度よく推定できる手法を確立する．また，ボルト緩み等の劣化を模擬して，その応答変化を確認する予定である．

謝辞　現場計測にあたり東京電力(株)に御協力いただきました．ここに深謝いたします．

参考文献　1) 佐竹亮一，中村秀治，石井抱，辻徳生，ビジョンシステムを用いた振動特性の変化による劣化検出方法の検討，土木学会平成19年度全国大会第62回年次学術講演会，I-385，2007.
2) 辻徳生，中村秀治，能勢晃太朗: 高速カメラを活用した送電鉄塔のボルト緩み箇所特定の試み，土木学会平成26年度全国大会第69回年次学術講演会，I-543，2014.