

レーザレンジファインダを用いた柔軟宇宙構造物のパラメタ同定の地上実験

Ground Evaluation Experiment on Vibration Estimation Algorithm of Flexible Space Structures using Laser Range Finder

○巴谷 真司, 上野 浩史 (JAXA), Matthew D. Lichter, Steven Dubowsky (MIT)

Shinji MITANI, Hiroshi UENO, JAXA, Matthew D. Lichter, Steven Dubowsky, MIT

Future space missions are expected to use robotic systems to assemble, inspect, and maintain large space structures automatically in orbit. For effective planning and control, robots must know the deformations and motions of the structures with which they interact. We have developed a method for estimating the shape, motion, and dynamic model parameters of a vibrating space structure using asynchronous raster-scanning range imagers. This paper presents evaluation experiments as well as experimental system. The flexible panel emulating the motion of the large space structure are mounted on the friction-free air table. The experiments were conducted using the representative structure and asynchronous raster-scanning range imagers to evaluate the performance of the estimation algorithm.

Key Words: Vibration Estimation Algorithm, Flexible Space Structures, Laser Range Finder

1. はじめに

将来, ロボットが自律的に軌道上での大型宇宙構造物の組立や不具合検知, 修理を行うことが期待される。その際に計画立案や制御を効率よく行うためにはロボット自身と相互作用する構造物の変形や動きを知る必要がある。その同定手段として著者らはレンジファインダを用いて振動する宇宙構造物の形状や動き, モーダル係数・周波数・ダンピング係数等を推定する手法を研究している。本稿は, 宇宙空間での柔軟構造物の低周波部分の動きを模擬できるシステムを構築し本手法の有効性を実験により検証した結果について述べる。

2. アルゴリズムの概要^[1]

アルゴリズムの概要を簡単に説明する。レンジファインダは構造物までの3次元距離データを既知の周期・タイミングで取得できるものとする。また柔軟構造同定対象物に本アルゴリズムを適用するための3つの仮定を満足する必要がある。それは(1)各モーダル周波数 f_i が20%以内の精度で既知であること(2)構造物の各モードシェイプ $\Phi_i(\mathbf{x})$ は事前のオフライン解析により適切に知られていること(3)構造物の入力応答変位が線形性を有していることである。仮定(1)と(2)は, 近年のFEM解析の発展により宇宙構造物の $\Phi_i(\mathbf{x})$ と f_i を比較的良い精度で求められる。(3)の仮定が成り立つとき, 構造物の振幅変化は各固有モードの和であらわすことができる。更に各モーダル係数 q_i は減衰周期項で近似すると柔軟構造物変位 $z(\mathbf{x}, t)$ は

$$z(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^m q_i(t) \Phi_i(\mathbf{x}) \quad \cdots(1)$$

$$q_i = e^{\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad \cdots(2)$$

で表される。ここで t は時刻, \mathbf{x} は柔軟構造面レーザ照射位置であり, $\omega_i, \alpha_i, \varphi_i$ は各モード i の固有角周波数・ダンピング係数・位相である。各スキヤンの距離データは仮定された各モードの取得時間の $q_i(t)$ にモード分解され, 擬似観測値として式(1),(2)から導出される非線形プロセスモデルを用いてフィルタリング処理された推定値 $\hat{q}_i, \hat{\omega}_i, \hat{\alpha}_i$ が求まる。その結果を式(1)から再びモード合成することにより推定形状 $\hat{z}(\mathbf{x}, t)$ が求まる。

プロセス方程式は拡張Kalman Filter等を適用する。今回は非線形モデル推定に効果のあるUnscented Kalman Filterを用いた^[2]。

3. 地上実験設備の説明

図1に実験設備の構成を示す。推定アルゴリズムの性能を評価するため, 空気浮上板の上に複数の空気浮上式タンクを連結しアルミ製の梁を支持した柔軟構造物を構築した。重力方向に垂直な方向に衛星の太陽電池パドルのような柔軟構造物の動きを模擬できるものであり, 最低固有振動数が0.04Hzと実際の衛星に近いモードを現出させることが可能である。また梁の支持端と中央に加振器を搭載することにより, 3次までのモードをプログラム位置制御により様々な入力振動を付加することができる。レンジファインダとして3Dレーザスキャナ(Pulstec社製TDS-3100B一部改修)を用いて構造物の表面をスキヤンした。LRFはエアースキャン型で, 上から下の走査の後, 下から上に走査を行う。柔軟構造物とLRFの主要緒元をそれぞれ表1,2に示す。推定した動きや形状が妥当かどうか比較するために柔軟構造物の真上からCCDカメラ(SONY社製XC-711)で動きを30Hzで記録し, 構造物上部のマーカ位置を画像処理により同定したデータを地上較正値として用いた。カメラの画像を図2に示す。位置解析精度は約5mm程度(1 σ)である。



図1 Configuration of experimental system

表1 Characteristic of flexible structure

Size of flexible beam(WHD)	2500 × 500 × 3mm
Total weight	Approx. 150kg
Eigen frequency(1 st , 2 nd , 3 rd)	Approx. 0.04, 0.25, 0.67Hz
Max torque of vibrator	0.0955N · m

表2 Characteristic of Laser Range Finder

Field of view	Approx. 8 × 7deg
Scan points	55 × 36pts.
Scan time	550msec
Interval time each point	Average 193 μ sec
Resolution(1 σ)	5 ~ 20mm (range 1 ~ 5m)



図2 CCD camera image of flexible structure (upper view)

4. 実験結果

アルゴリズムを適用する前に仮定が満足されているかどうかの準備実験を行った。仮定(1),(2)に関しては加振器によりトルク周波数を変化させることにより各モードが現出する値を事前に求め、その際の梁が最大に変位した瞬間の形状をCCDカメライメージの画像解析により求めた。結果を図3に示す。丸印はCCDカメラからの実際の梁変位位置を表し、実線は固定端境界条件時のBellunuli-Euler梁の理論値 Φ_i^{BE} である。変位形状との誤差は、1,2次で最大誤差3%未満,3次で10%程度の精度で一致しており、推定アルゴリズムに Φ_i^{BE} を簡易的に適用しても問題ないと判断した。仮定(3)についても線形性を入力トルク変化時の最大振幅の応答を調べ加振トルクの範囲内での振幅応答の線形性を確認した。よって、本実験系に本アルゴリズムを適用することは妥当であると考えられる。

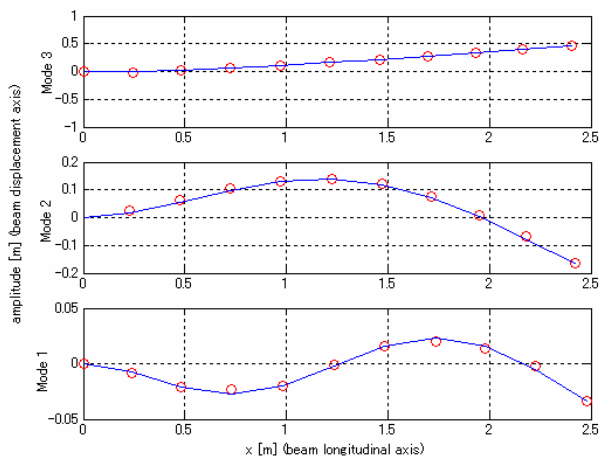


図3 Ground truth position and theoretical mode shape Φ_i^{BE}

系に初期ランダム外力を加え、自然減衰させた場合の推定結果を表3に示す。また同表に梁自由端振幅から求めた振動数とダンピング係数を示す。モード1,2の推定周波数は地上較正值結果と比較するとそれぞれ誤差2%,10%となった。1次ダンピング係数は50%の誤差で異なるが、これはテーブルの状態が

一様でないため乾性摩擦の影響等を考慮する必要があり、粘性減衰項のモデリングのみでは不十分であることを示していると推察される。

表3 Result of estimation at natural decay

value	estimation	ground truth	initial value
$f_1(= \omega_1 / 2\pi)$	0.0403[Hz]	0.0410[Hz]	0.0400[Hz]
$f_2(= \omega_2 / 2\pi)$	0.247[Hz]	0.275[Hz]	0.255[Hz]
α_1	0.0150[1/s]	0.0109[1/s]	0.0100[1/s]

次にモード1の強制振動を付加して解析した結果を示す。前半60秒間加振を行い、残り時間で自然減衰させた。先端の振幅は最大で約0.5m程度振れた。図4は周波数推定値の時系列変化を示したものである。点線が加振器を用いて調べた共振周波数である。2次は1次のモーダル推定周波数に漸近する様子が分かる。これは一定周期での強制振動時は、理想的には運動モードには外力の振動数のみしか現出しないことをあらかじめフィルタに考慮しない結果であると考えられる。図5は推定結果からモード再構成を行い求めた $\hat{z}(x,t)$ と、地上較正值との誤差を求めたものである。推定形状は実際の形状と比べて7cm程度の最大誤差で一致していることが分かる。このようにモード2の推定結果が不正確にも関わらず、モード再構成した $\hat{z}(x,t)$ が実際の形状をよく推定しており、本アルゴリズムの実用性を示す結果であると考えられる。

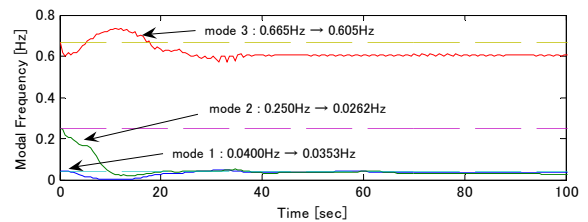


図4 Estimation result of modal frequencies

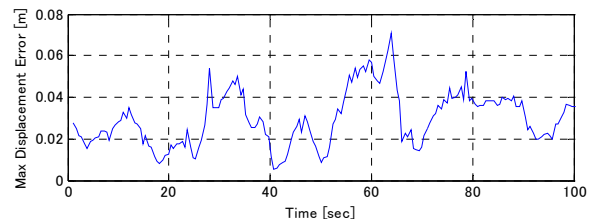


図5 Maximum $\hat{z}(x,t)$ error

5. 今後の予定

現在、引き続きセンサ揺動時の推定値への影響の評価や宇宙構造物のFailモードの検知システムへの適用など実ミッションでの利用性を念頭に入れた評価・検討を実施している。

6. 謝辞

助言頂いた慶應義塾大学狼嘉彰教授, JAXAシステム誘導技術G小田光茂氏, 遠藤達也氏, 石島義之氏並びに実験にご協力頂いた稲葉一幸氏, 鈴木悟史氏に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Lichter, M.D., Dubowsky, S., Ueno, H., and Mitani, S. "Shape, Motion, and Parameter Estimation of Flexible Space Structures using Laser Rangefinders." Proceedings of Robotics: Science and Systems, Cambridge, MA, June 2005.
- [2] Wan, E.A., and R. Van der Merwe. "The Unscented Kalman Filter." Kalman Filtering and Neural Networks, pp. 221-280, Edited by Simon Haykin, New York: Wiley Publishing, 2001.