

## PVDF 圧電フィルムセンサ・アクチュエータの非線形動作特性

## Experimental Study on the Characteristics of PVDF Film Sensor/Actuator

正 江 鐘偉 (東北大)                      正 長南 征二 (東北大)  
非 土屋 敏弘 (東北大・学)

Zhong-wei JIANG, Tohoku University, Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku,  
Sendai-shi, Miyagi

Seiji CHONAN, Tohoku University  
Toshihiro TSUCHIYA, Tohoku University

This paper presents an experimental study on the characteristics of a piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVDF) film. The film is bonded on a thin stainless steel beam and works as a distributed sensor or actuator. The sensing and the driving characteristics of PVDF are studied experimentally. The results obtained show that the PVDF can be used both as an effective distributed sensor and actuator for the control of flexible structures. It is also found that the PVDF shows significant nonlinear characteristics particularly when used as a sensor, which leads to an understanding that the nonlinear characteristics of PVDF should be taken into account in the design or the operation of a piezoelectric distributed film sensor.

**Key Words :** Piezoelectric PVDF Film, Characteristics, Sensor,  
Actuator, Nonlinear Behavior

## 1 緒 言

PVDF (ポリフッ化ビニリデン) に代表される高分子圧電フィルムは、張力や圧力などの歪みを加えると誘電分極や電界が発生し (圧電効果)、逆に電界を印加して分極させると歪みが発生する性質 (逆圧電効果) を有する。また PVDF は他の圧電材料に比べて環境変化に対して強く、柔軟性があり、かつ加工し易いため自由に形状を設定し大面積のシートに成形できる等いくつかの長所を備えている。このため PVDF 圧電フィルムは近年柔軟構造物駆動用分布アクチュエータ及びセンサとして注目を浴びている。

PVDF 圧電フィルムに関する研究は近年盛んに行われているが、一般に PVDF は線形素子として扱われ理論解析がなされている<sup>[1-6]</sup>。一方 PVDF をセンサやアクチュエータとして使用する場合、その周波数特性、特に非線形特性が対象物のセンシング及び制御にいかん影響するか明確にしておく必要があるがこの点については未だ十分な研究がなされておらず実験データも少ない。

以上の点に鑑み本研究は PVDF 圧電フィルムを弾

性薄肉はりに貼つけ、はりの振動を PVDF 並びに先端に取り付けたギャップセンサで計測、それらを比較することより PVDF のセンシング特性を考察する。さらに、PVDF の逆圧電効果を調べるため PVDF フィルム電極間に電圧を加えてはりを振動させアクチュエータとしての特性も調べるものである。

## 2. センサ特性

始めに、PVDF 圧電フィルムを振動センサとして使用した場合の特性を実験により検討する。振動センサは図 1 に示すように、0.1mm 厚のステンレス鋼のはりに接着した厚さ 30  $\mu$ m の PVDF 圧電フィルム (株) 呉羽化学:クレハ KF ピエゾフィルム) である。実験でははりを片持ちはりとして加振機に固定し、はりを自由振動および強制振動させることより PVDF 出力を計測する。実験装置の概略図を図 2 に示す。実験では、加振機の振動およびはり先端の振動をギャップセンサで計測するとともに PVDF 出力電圧も測定、それらの信号を直流アンプで増幅後 FFT アナライザに入力して周波数分析を行った。

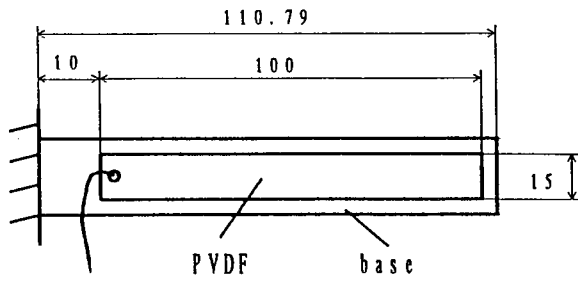


Fig.1 Configuration of test piece.

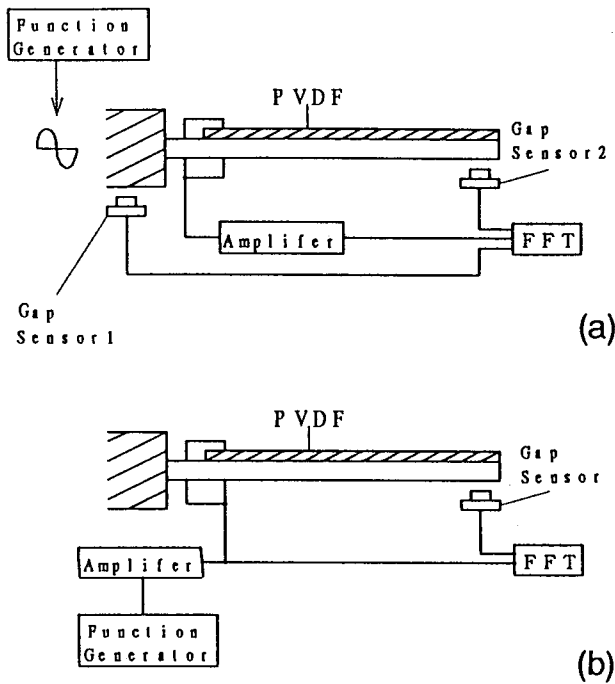


Fig.2 Experimental set up of (a) sensor and (b) actuator system.

### 2.1 自由振動の場合

実験より求められた試験片の3次モードまでの固有振動数はそれぞれ 6.2Hz, 37.5Hz, 108Hz である。はりを自由振動させ、ギャップセンサで得られたはり先端の振動波形および PVDF の出力電圧波形を図 3 に示す。また、それらのパワースペクトルを図 4 に示す。ここで図 (a) はギャップセンサで測定した先端の変位応答、図 (b) は PVDF の出力電圧応答である。図 3,4 の (a)(b) を比較すると、ギャップセンサ出力 (a) には単一周波数 (1次固有振動数) の振動曲線が見られ、PVDF 出力 (b) にはこれとは対照に 1次固有振動数 6.20Hz の成分以外に 2 倍 (12.40Hz) と 3 倍 (18.60Hz) の周波数成分を有する応答が現れている

ことが分かる。これは PVDF の電歪効果による非線形特性が生じたもので、PVDF は整数倍の周波数成分を含む非線形特性を有することが分かる。

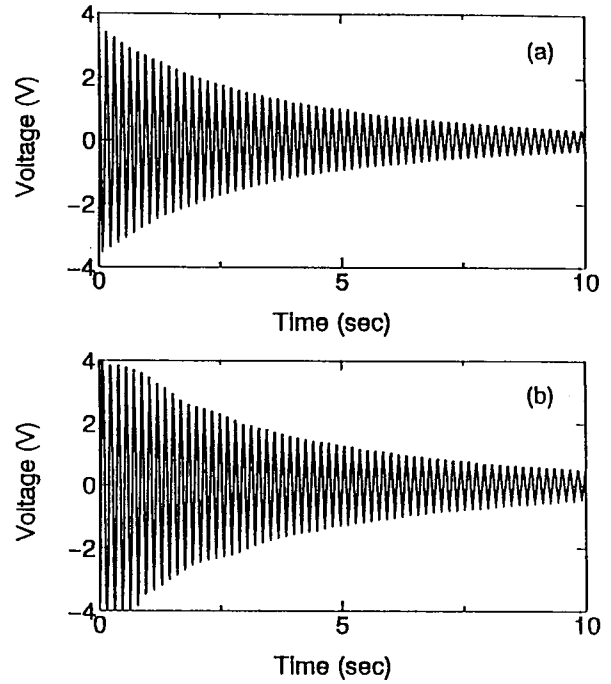


Fig.3 Free vibration response measured by (a) gap sensor and (b) PVDF.

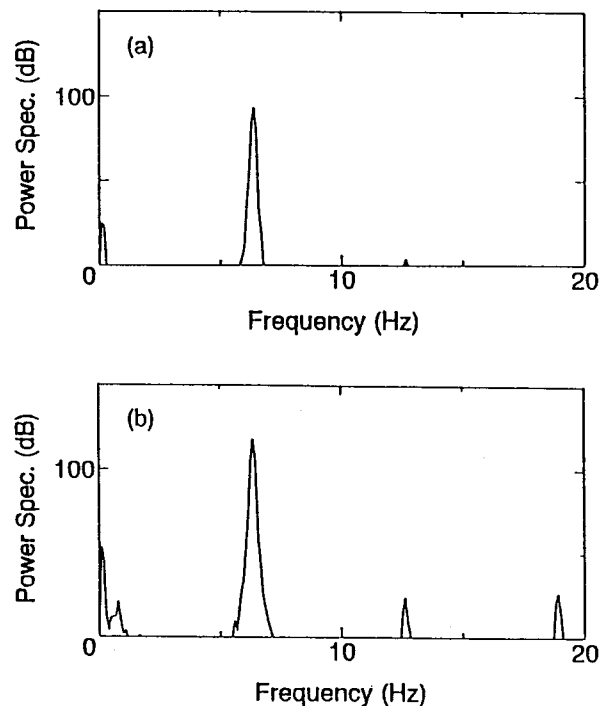


Fig.4 FFT analysis of the data given in Fig.3.

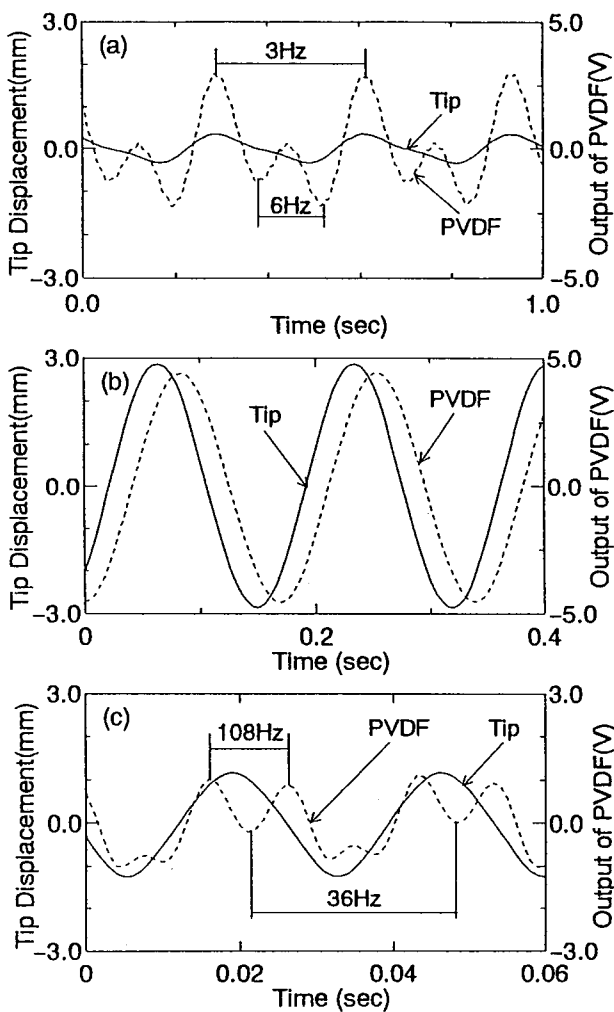


Fig.5 Tip displacement and PVDF output for the arm driven by base oscillation of frequency (a) 3.13Hz, (b) 6.02Hz and (c) 36.5Hz.

## 2.2 強制振動の場合

試験片を加振機に固定し、ファンクションジェネレータからの信号を加えて、はり根元を全振幅 0.6mm で振動させ、PVDF の出力信号を計測した。図 5 は加振周波数の変化に対するはり先端の変位と PVDF の出力電圧の変化を示す。図中、実線はギャップセンサにより測定したはり先端の変位（左縦軸=変位座標）、破線は PVDF の出力電圧（右縦軸=電圧座標）である。図 (a) は、はりの 1 次固有振動数の約半分の周波数 (3.13Hz) で加振した場合、図 (b) は 1 次固有振動数近辺 (6.02Hz) で加振した場合、図 (c) は 2 次固有振動数近辺 (36.5Hz) で加振した場合である。図 (a) より、3Hz で加振される場合、はり先端はほとんど加振周波数と同じ周波数で調和振動するが、PVDF の出力

電圧には 3Hz 以外の 2 倍の高調波成分も大きく含まれていることが分かる。しかしながら加振周波数がはりの 1 次固有振動数に近づくと先端変位と PVDF の出力は位相が多少ずれるもののほぼ単一の周波数成分の曲線が得られること (図 b)、さらに加振周波数をはりの 2 次固有振動数まで高めると図 (c) のように PVDF の出力電圧には加振周波数に加え 3 倍の高調波成分が大きく生じることが分かる。

以上の結果より、準静的な場合について圧電材料の出力電圧は歪みの非線形関数として以下のように定式化できる。

$$y(t) = a * x(t) + b * x^2(t) + c * x^3(t) \quad (1)$$

ここに、 $y(t)$  は PVDF の準静的な非線形出力電圧、 $x(t)$  ははりに生じる歪みである。(1) 式を用いると上記の実験結果は次のように明確に説明できる。例えば、はりが周波数  $\omega$  で調和振動している場合、はりに生じる歪みの時間変化は

$$x(t) = \sin \omega t \quad (2)$$

と表される。これを (1) 式に代入し整理すると次式を得る。

$$y(t) = f(a, b, c) * \sin \omega t + g(a, b, c) * \cos 2\omega t + h(a, b, c) * \sin 3\omega t + \dots \quad (3)$$

(3) 式から分かるように、はりの歪みの振動周波数が単一の  $\omega$  にかかわらず、PVDF の出力電圧  $y(t)$  には  $2\omega, 3\omega$  の成分が現れている。

図 6 は加振機の全振幅を 0.6mm と一定にし加振した場合の PVDF 出力電圧の周波数特性を示す。加振周波数が零近傍では PVDF の出力電圧は極めて微小であるが、加振周波数が大きくなるにつれて出力電圧は増加し、振動数がはりの固有振動数に近づくと大きな共振が現れている。また系の 1 次固有振動数の約  $1/2(3.1\text{Hz})$  及び 2 次の  $1/2, 1/3$  の周波数 (12.5Hz, 19.3 Hz) においてもピークが現れているがこれは 2 次及び 3 次の高調波が励起された結果である。これは、例えば (2) 式での歪みの周波数  $\omega$  が 2 次固有振動数  $p$  の  $1/2$  あるいは  $1/3$  であっても、(3) 式より PVDF の出力電圧  $y(t)$  に 2 次固有振動数  $p$  の振動が励起され大きな出力が生じるためである。

以上の結果より、PVDF 圧電フィルムを分布振動センサとして使用する場合は、その非線形特性を考慮して系の 1 次固有振動数近傍で使用するよう設定すべきであることがいえる。

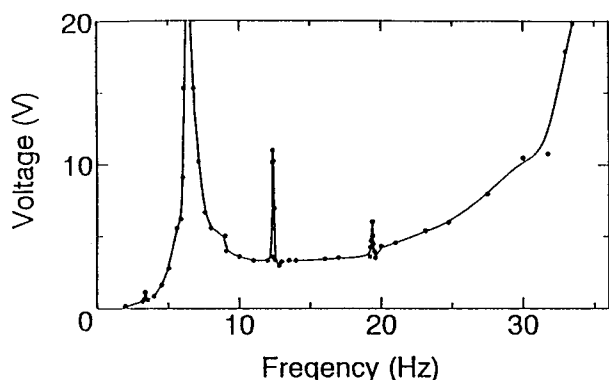


Fig.6 Frequency response of PVDF sensor.

### 3. アクチュエータ特性

次に PVDF 圧電フィルムを、片持ちはり駆動用アクチュエータとして使用した場合の特性を調べる。PVDF の駆動用電圧は、ファンクションジェネレータの正弦波出力電圧をさらに直流アンプで片振幅 80V まで増幅することにより得た。このとき、フィルムの逆圧電効果によって生じる曲げモーメントで駆動されるはりの先端振動をギャップセンサで計測し特性を調べた。

実験により得られたはり先端の振動応答を図 7 に示す。図中、実線は PVDF に印加する電圧、破線ははり先端の変位応答を表す。図 (a)-(f) はそれぞれ印

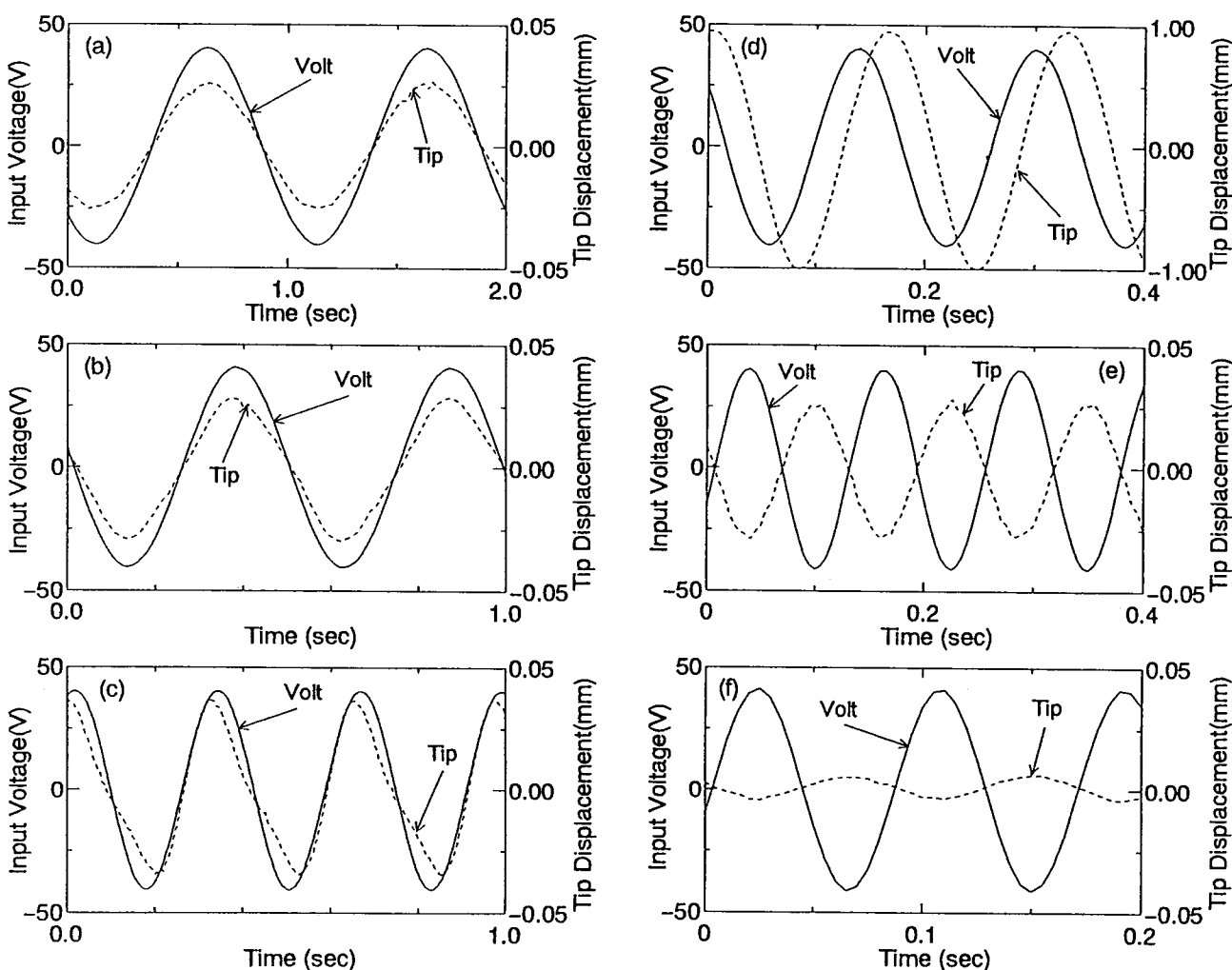


Fig.7 Tip displacement of the arm driven by PVDF actuator. Frequencies of applied voltage are (a) 1.0Hz, (b) 2.13Hz, (c) 3.07Hz, (d) 6.15Hz, (e) 8.05Hz and (f) 11.9Hz.

加電圧の周波数が 1.0Hz, 2.13Hz, 3.07Hz, 6.15Hz, 8.05Hz 及び 11.9Hz の場合を示す。図より、はりの 1 次固有振動数以下の印加電圧周波数に対してははり先端の変位波形は PVDF の駆動電圧波形によく対応している。しかしながら印加電圧の周波数がはりの 1 次固有振動数の 1/2 あるいは 1/3 のとき (図 b, c) は、はり先端の変位応答に 1 次固有振動数成分が現れている。印加電圧の周波数がはりの 1 次固有振動数を越える (図 e, f) と、印加電圧と先端変位の位相がかなりずれている。以上より、PVDF 圧電フィルムを分布アクチュエータとして用いる場合は、はりの 1 次固有振動数以下で使用し、かつ固有振動数の 1/2 及び 1/3 の周波数を避けることでオープンループ制御用アクチュエータとして使用できることがいえる。

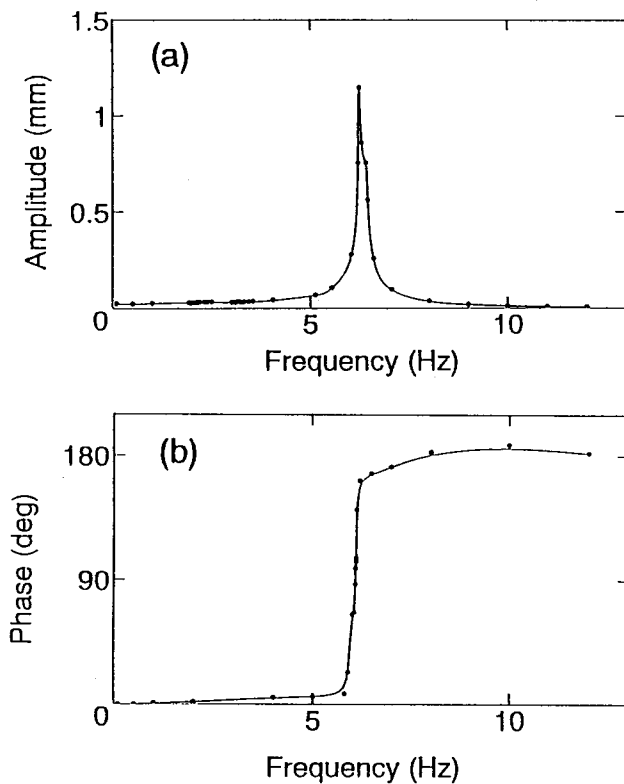


Fig.8 Frequency response of PVDF actuator. (a) Amplitude; (b) phase.

図 8 は PVDF をアクチュエータとして使用した場合のはりの周波数特性および位相変化を示す。図 (a) は印加電圧に対するはり先端の振幅、図 (b) はその位相特性を示す。図 (a) より、先端の振幅は 1 次固有振動数近傍で最も大きく、固有振動数から遠ざかると極めて小さくなるのがわかる。また、図面上では見分

けにくい印加電圧の周波数が 2.1Hz および 3.1Hz の近傍では高調波振動により振幅がわずかに増加している (PVDF の発生力が小さいため印加電圧の周波数の 1/2 および 1/3 近傍では PVDF 下の高調波振動がはっきり測定できなかったが、同様な実験をセラミックス圧電素子で行うと高調波振動が明確に認められる)。さらに図 (b) より、1 次固有振動数を境に位相は  $0^\circ$  から  $180^\circ$  へと急激に変化していることがわかる。このように位相が急激に立ち上がることは、PVDF の粘性減衰係数が非常に小さいことを示している。

#### 4. 結 言

PVDF 圧電フィルムの分布振動センサおよびアクチュエータとしての特性を計測し検討を行った。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) PVDF は入力周波数の 2 倍及び 3 倍の高調波成分を含む非線形特性を示す。
- (2) PVDF を分布振動センサとして使用する場合はその非線形特性を考慮し、系の 1 次固有振動数近傍で使用するのが良い。
- (3) PVDF を構造物の分布アクチュエータとして使用する場合、自身の粘性減衰係数は無視できる。また、系の 1 次固有振動数以下で使用しかつ固有振動数の 1/2 及び 1/3 の周波数を避ければオープンループ制御用アクチュエータとしての使用が可能である。

#### 参 考 文 献

- [1] Tzou H.S., Journal of Robotic Systems, 6-6(1989), 745-767.
- [2] Tzou H.S. and Tseng C.I., Journal of Sound and Vibration, 138-1(1990), 17-34.
- [3] Lee C.K. and O'Sullivan T.C., Journal of Acoustical Society of America, 90-2(1991), 945-953.
- [4] Hanagud S., Obal M.W. and Calise A.J., Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 15-5(1992), 1199-1206.
- [5] Gibbs G.P. and Fuller C.R., AIAA Journal, 30-2 (1992), 457-463.
- [6] Collins S.A., 他 5 名, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 15-2(1992), 396-403.