

小型宇宙推進機用の6自由度の推力ベクトルの測定装置

○前田和弥 (宮大工・院) 柏原健二 (宮大工)

矢野康之 (ものづくり教育実践センター) 各務聡 (宮大工)

1 緒言

宇宙開発は急速に進歩しており、そのさらなる発展には宇宙機用の推進機の高性能化が不可欠である。そのためには推力測定を行う必要があるが、宇宙機用の小型推進機では自重よりも推力が小さいことが多いため、その推力の測定には振り子が用いられてきた。これは外力である推力と振り子の変位角が比例していることを利用したものである。この推力測定装置は、図1のように、ヒンジを軸にした振り子に推進機、ダンパ、変位センサが取り付けられた構造をしており、バネ・マス・ダンパ系の力学で説明でき、測定精度も優れている。その一方で、対象の推進機の推力レベルに応じてダンパやバネを交換し、調整を行わねばならなかった。

この他の方式として零位法⁽¹⁾がある。これは、振り子の変位をセンサによって検出して、アクチュエータの制御量を調整し、変位を0にする方式である。この方法ならばダンパやバネの交換が不要となり、アクチュエータの制御を調整するだけで広い推力レンジに対応できるようになる。

そこで、本研究では、零位法を用いた6方向の推力ベクトルの評価装置を提案する。すなわち、ばねにより支持された6自由度の振り子の運動を6個のアクチュエータにより制御し、振り子の変位を一定に保ち、このときのアクチュエータの制御電流により推力を評価するのである。今回、その試作を行ったので報告する。

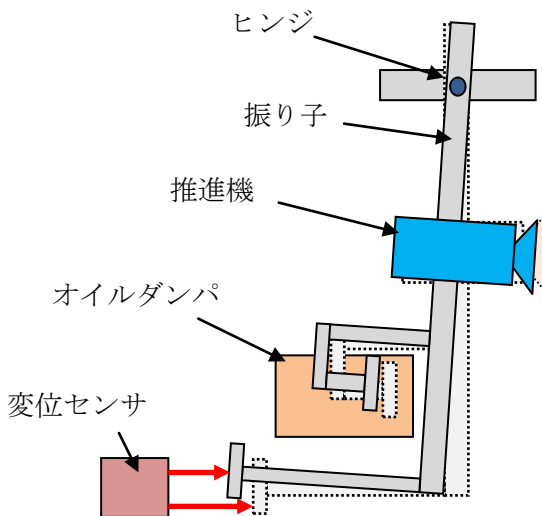


図1 従来の推力測定装置

2 原理

簡単のために1自由度の振り子を用いて零位法の原理を説明する。振り子の運動方程式は、振り子の変位角 θ 、慣性モーメント I_m 、粘性係数 c 、弾性係数 k 、振り子の支点からアクチュエータまでの長さ l_s 、推進機までの長さ l_t 、制御用アクチュエータの駆動電流 I として、

$$I_m \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + k \theta = l_t T + l_s F_0(\theta) I \quad (1)$$

と表される。ここで、 $\theta = 0$ は、重力等の外力が釣り合う平衡点であるとする。PID制御を利用したときに、 I は第2式から定まる。

$$I = k_p \theta + k_d \dot{\theta} + k_i \int \theta dt \quad (2)$$

ここで、 $\theta = 0$ を目標角度変位としている。このとき、定置制御の比例ゲイン k_p 、微分定数 k_d 、積分定数 k_i を適切に与えることにより、 $\ddot{\theta} \approx 0$ 、 $\dot{\theta} \approx 0$ 、 $\theta \approx 0$ とすることができる。そうすると、

(1)式の左辺の $I_m \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + k \theta$ を無視できる。また、ソレノイドアクチュエータの推力電流比 F_0 は定置制御を適用し、 $\theta \approx 0$ とすることにより一定とみなすことができ、 $F_0(\theta) = F_0$ (一定値) となる。以上より、

$$T = -\frac{l_s F_0}{l_t R} I \quad (3)$$

を得る。すなわち、推力 T は制御用ソレノイドアクチュエータの駆動電流 I を計測することにより評価できる⁽²⁾。本研究ではこの1自由度の運動方程式を参考に、6自由度の推力測定装置に適用する。

3 試作した装置

3.1 装置全体図

装置全体の概略図を図2に示す。PA51Aアンプを用いた電圧電流変換回路(アクチュエータ駆動アンプ)、アクチュエータ駆動用のスイッチング電源、変位センサ、制御用PCを用いている。制御用PCは6個の変位センサを用いてすべての方向の変位を求めて、アクチュエータ駆動アンプへ制御電圧を算出し、制御に必要な電流をアクチュエータに供給する。

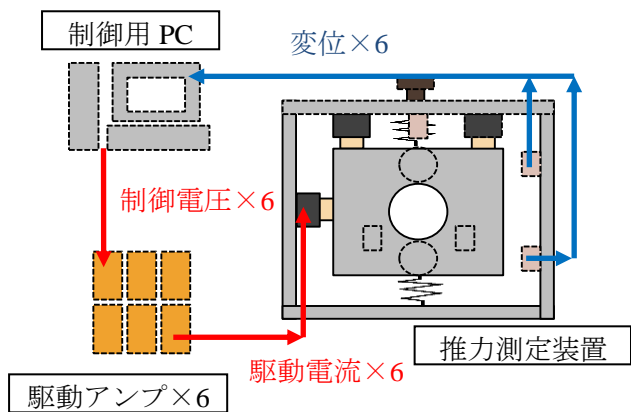


図2 装置全体の概略図

3.2 6自由度の装置の試作

本研究で試作した6自由度推力測定装置を図3、4に示す。推進機を取り付け用の平板があり、その重さをばねが支える構造になっている。すなわち、推進機と平板が6自由度の振り子に相当する。アクチュエータと変位センサを推進機取り付け用の平板の周りに配置し、各軸に対応しそれぞれ2つつ取り付けることによって、回転を含めた6方向の推力ベクトルを計測できるようにしている。

6方向全てに零位法を適用したことによって、ダンパやバネの取り換えを必要としなくなったことが利点として挙げられる。また、従来の振り子法の推力測定装置で用いられていたヒンジやアームをなくし、自重をバネで支えることにより部品点数を削減し、外形は $298 \times 90 \times 260 \text{ mm}^3$ となり装置の小型化を実現している。

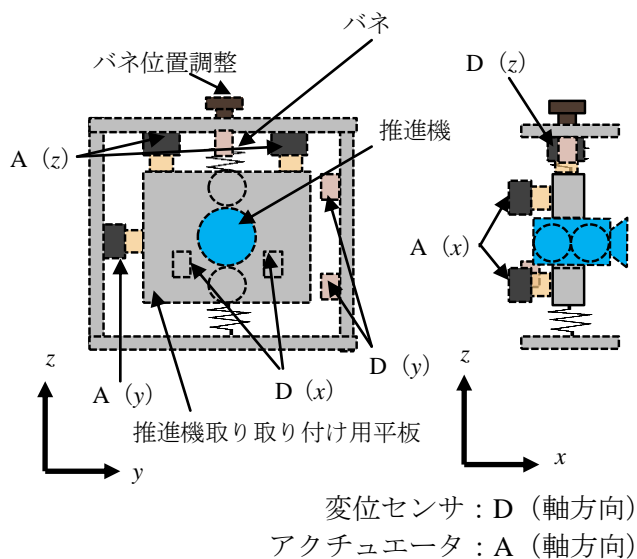


図3 6自由度推力測定装置

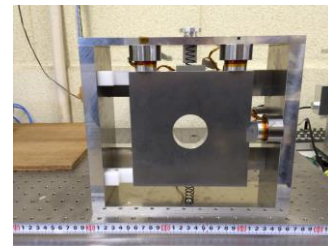


図4 6自由度推力測定装置

3.3 アクチュエータ

今回は、ボイスコイルモータをアクチュエータとして利用した。アクチュエータの推力が 1 N/A となるように、FEMMを使用して軸対称の解析を行い、設計を行った。アクチュエータを図5に、その仕様を表1に示す。

表1 アクチュエータ仕様

推力	1.01N/A
永久磁石	ネオジウム磁石
磁気回路	S45C
可動コイルの巻き数	80回
ボディサイズ	$\Phi 44 \times 20$

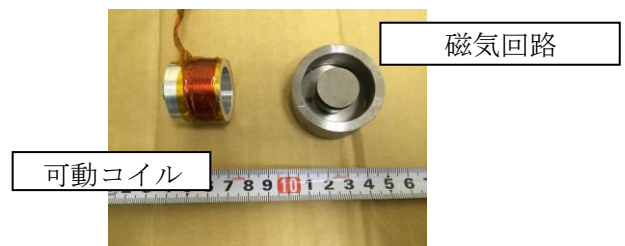


図5 アクチュエータ

4 まとめと今後の予定

本研究では推力ベクトル測定のためにバネで6自由度の振り子を支え、回転方向を含めた6方向の推力ベクトルを計測する装置を提案し、試作を行った。今後の予定として

- (1) 定置制御を適用して振り子を定位置に維持し、零位法による6方向の測定を実現する
- (2) 校正を実施して推力の精度評価を行う
- (3) 制御パラメータを調整し、測定可能な推力レンジを評価する

が挙げられる。

参考文献

1. 各務聡, 橘武史, 外乱オブザーバと定置制御とを併用した広帯域の推力測定, 日本航空宇宙学会論文集
2. 毎熊宗幸, 各務聡, 清水浩貴, 田丸雄摩, 橘武史, 1N級小型推進機の推力ベクトル測定に資する定置制御を利用した3軸推力測定装置, 平成23年度宇宙シンポジウム