

# ピエゾアクチュエータを用いた回転機械に作用する外力計測装置のための 制御系設計

## Development of Control System for Measurement of External Forces Acting on a Rotating Machine Using a Piezo Actuator

名古屋大学 ○藪井 将太, 浦 健太郎, 井上 剛志

\* Shota Yabui, Kentaro Ura, Tsuyoshi Inoue

Nagoya university

**Abstract** In this research, in order to accurately estimate the external force acting on a rotating machine, we applied a motion control technology and developed a measuring device using a piezo actuator. From the experimental results, it was confirmed that the proposed measuring device can control the orbit of the rotating shaft in micro order. In this study, a mechanical seal was installed in the plant part to measure the external force generated in the mechanical seal part. The mechanical seals are parts that prevent fluids handled by rotating machines from leaking outside the machine. In the design of mechanical seals, the estimation of the force generated by coupling the fluid and structure in the machine is an important factor. We also confirmed that the force generated in the mechanical seal can be estimated in real time from the control signal.

**Key Words:** Controller design, Rotating machine, External force,

### 1 はじめに

モーションコントロールは様々な産業製品の開発に応用され、産業分野における重要な要素技術である [1]. 回転機械の開発において、構造と流体の動特性が相互作用する外力の測定において、アクチュエータを用いた測定装置の開発が進められている [2] [3]. 回転機械に作用する外力は回転軸の軌道に依存するため、測定時には実際の軸の軌道を高精度に再現することが重要である. 本研究では、回転機械に作用する外力を精度良く推定するため、モーションコントロールの制御技術を応用し、ピエゾアクチュエータを用いた測定装置を開発した. 実験結果から提案する測定装置は回転軸の軌道をマイクロオーダーで制御できることを確認した. また、本研究ではメカニカルシール部に発生する外力を測定するため、プラント部にメカニカルシールを設け、外力の測定を実施した. メカニカルシールは回転機械で取り扱われる流体が、機械の外部へ漏れることを防ぐパーツである [4]. 例えば、ロケット用ターボポンプでは燃料の漏れを防ぐために用いられ、回転機械の安全動作において重要なパーツである. そのメカニカルシール部で発生する力を、制御信号からリアルタイムで推定できることを併せて確認した.

### 2 提案する測定装置

Fig.1 に提案する測定装置を示す. 回転軸は一方がカップリングを介してサーボモータに接続され、他方はボールベアリングにより支持されている. また、回

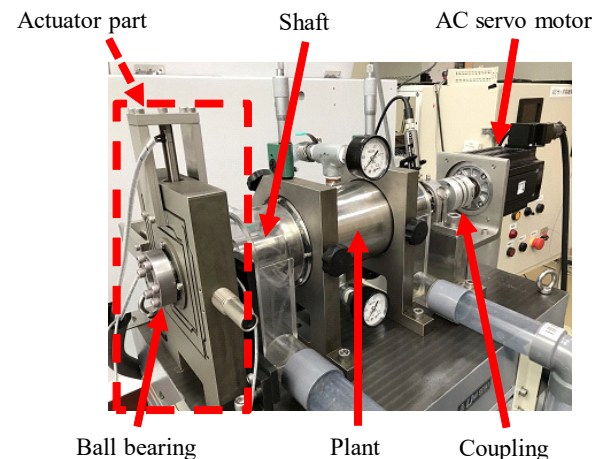


Fig. 1: Overview of the proposed experimental system

転軸の中心には測定対象である流体と構造を格納したプラントが設置されている. そして、ボールベアリングを固定する台座には積層型ピエゾアクチュエータが取り付けられており、ボールベアリングを介して回転軸の位置を制御できる. Fig.2 にアクチュエータの拡大図を示す. ピエゾアクチュエータは2つ取り付けられており、 $x-y$  平面上で任意に回転軸を制御できる. また、ピエゾアクチュエータに与圧により発生力と発生変位を調整するためのバネが取り付けられている. この実験装置の模式図を Fig.3 に示す. 本研究ではメカニカルシール部に発生する外力を測定するため、プラント部にメカニカルシールを設けている. メカニカルシールで封入す

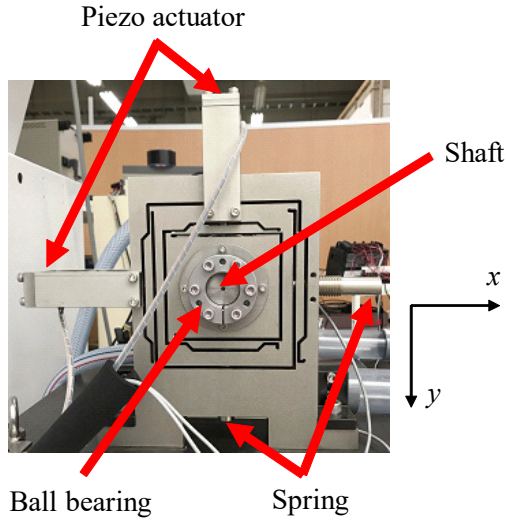


Fig. 2: Close up the actuator part in the proposed experimental system

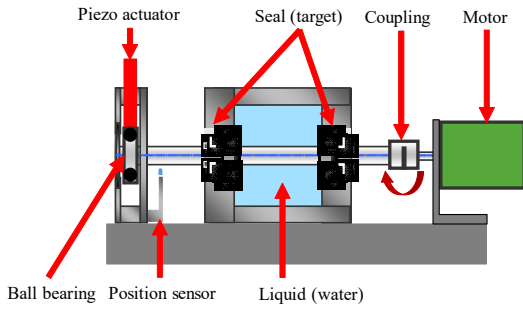


Fig. 3: Schematic diagram of the proposed experimental system

る流体は水とした。回転軸が動作したとき、流体と構造が連成して力を発生するが、これがシステムにとって外力となり、そして不安定化させる外力となり得る。Fig.4に示すように、 $F_r$  と  $F_t$  はそれぞれ半径方向と接線方向の力である。 $e$  は回転軸の振れ回り半径、 $\Omega$  は振れ回り周波数とすると、 $F_r$  と  $F_t$  と動特性の関連は次式で表現できる [5].

$$\frac{F_r}{e} = M\Omega^2 - c\Omega - K \quad (1)$$

$$\frac{F_t}{e} = -m\Omega^2 - C\Omega + k \quad (2)$$

ここで、 $M$  は直接質量係数、 $C$  は直接減衰係数、 $K$  は直接剛性係数、 $m$  は連成質量係数、 $c$  は連成減衰係数、そして  $k$  は連成剛性係数である。式 (1), (2) より、 $F_r$  と  $F_t$  は回転軸の振れ回り軌道、および周波数に依存することが分かる。そのため、運転中の回転機械で発生する  $F_r$  と  $F_t$  を測定するためには、運転中の回転軸の

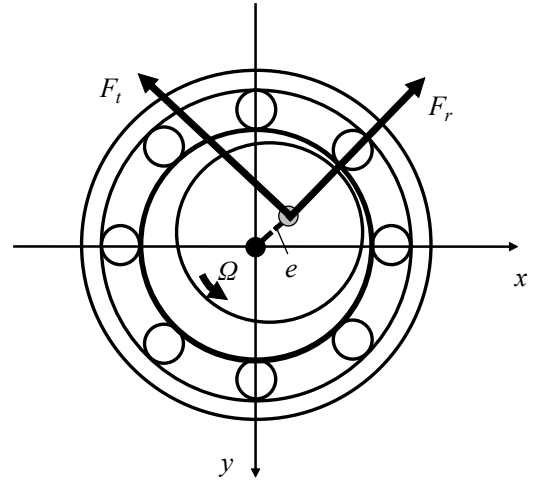


Fig. 4: Relationship between the external force and the orbit of the rotating shaft

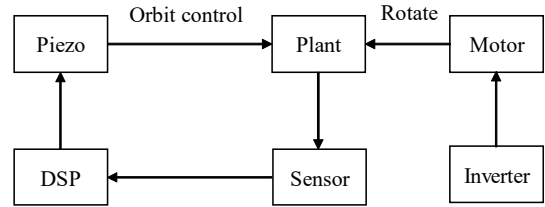


Fig. 5: Schematic diagram of the control system

軌道と周波数を正確に再現して測定する必要がある。

### 3 ピエゾアクチュエータに用いる制御系

回転軸を任意の軌道、周波数で振れ回らせるため、ピエゾアクチュエータに用いる制御系を設計した。Fig.5に制御系の概要を示す。回転軸はサーボモータによって自転し、その状態でピエゾアクチュエータにより回転軸の軌道を生成する。変位センサにより取得した軸変位を元に、制御アルゴリズムを書き込んだ digital signal processor (DSP) が生成した制御信号がピエゾアクチュエータへの入力信号となる。ピエゾアクチュエータは  $x, y$  制御向けに2つ実装されており、それぞれに制御系を設計しているが、両方向で同じ制御系であるため、ここでは  $x$  方向に注目して詳細を記述する。制御系のブロック線図を Fig.6 に示す。ここで、 $C$  はメインコントローラ、 $P$  はピエゾアクチュエータから回転軸までの動特性、 $r_x$  は  $x$  方向の目標軌道、 $e$  は位置誤差信号、 $x$  は軸変位、そして  $d$  は外力である。本測定装置は回転機械であり、メカニカルシールの外力は振れ回り周波数に同期した周波数で発生する。また、回転に伴い振れ回り周波数の整数倍に同期したにラン

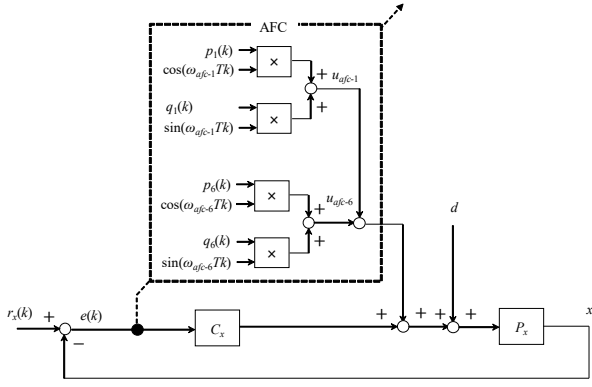


Fig. 6: Block diagram of the feedback control system in DSP for  $x$  direction

ナウトが発生する可能性がある。そこで、制御部には adaptive feedforward cancellation (AFC) を実装している。AFC はハードディスクドライブ、光ディスク、そして磁気軸受を用いた回転機械において、回転に同期した振動補償に有効な制御方式である [6][7][8]。AFC のアルゴリズムは下記で表現される。

$$u_i(k) = p_i(k) \sin(\omega_{afc-i} T k) + q_i(k) \cos(\omega_{afc-i} T k) \quad (3)$$

$$p_i(k) = p_i(k-1) + \lambda_i e(k) \sin(\omega_{afc-i} T k + \theta_i) \quad (4)$$

$$q_i(k) = q_i(k-1) + \lambda_i e(k) \cos(\omega_{afc-i} T k + \theta_i) \quad (5)$$

$p_i(k)$  と  $q_i(k)$  は学習パラメータ、 $\omega_{afc-i}$  は AFC 出力  $u_i$  の角周波数、 $\lambda_i$  は学習率、そして  $\theta_i$  は位相である。  $i$  は実装する AFC の数である。  $k$  はサンプル数であり、適応アルゴリズムは 1 サンプル前までの学習結果  $p_i(k-1)$ 、 $q_i(k-1)$  に、位置誤差信号  $e(k)$  に  $\lambda_i$  と補償する周波数の正弦波、余弦波を乗算した結果を加算し、更新していく。 AFC の適応アルゴリズムが係数  $p_i(k)$ 、 $q_i(k)$  を更新し、推定が完了したとき外力  $d_i$  の振幅は次式で表現される。

$$|d_i(k)| = \frac{P}{1+PC} \sqrt{p_i^2(k) + q_i^2(k)} \quad (6)$$

ここで、 $d_i$  は  $\omega_{afc-i}$  と一致する角周波数の外力である。また、外乱の位相は次式となる。

$$\arg(d_i(k)) = \arctan \frac{p_i(k)}{q_i(k)} \quad (7)$$

以上のように、その推定結果に基づいて AFC は外乱補償を行うことができる。

## 4 実験結果

提案する実験装置を用いて  $F_r$  と  $F_t$  を測定した。本実験においては、1000rpm(16.67Hz) で自転している回転軸に対し、半径 0.02mm、周波数 1300rpm(21.67Hz)

Table 1: Angular frequency  $\omega_{afc-i}$

$i$	1	2	3	4	5	6
$f_{afc-i}$ [Hz]	16.67	33.33	50	66.67	100	21.67

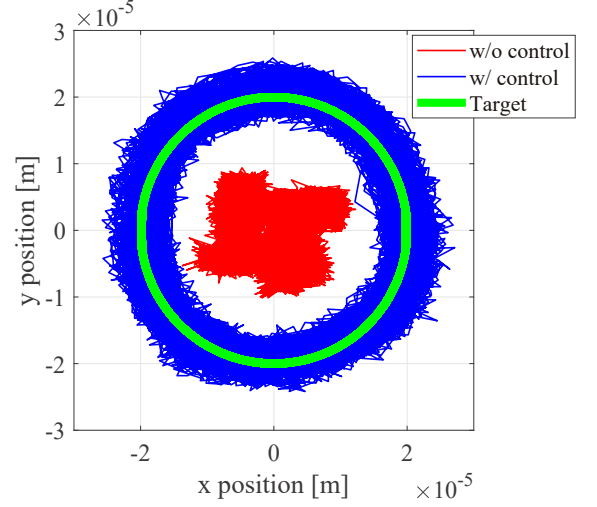


Fig. 7: Experimental results: orbit of the shaft

の振れ回り軌道を piezoアクチュエータを用いて生成した。AFC の数は  $i = 6$  であり、出力  $u_i$  の周波数  $f_{afc-i} = \omega_{afc-i}/2\pi$  を Table 1 に示す。  $i = 1 - 5$  の AFC は主に自転周波数に応じて顕著に発生したランナウトの補償のために実装した。  $i = 6$  は目標軌道に追従させた上で、 $p_6, q_6$  から振れ回り振動に応じてメカニカルシール部で発生する外力を推定するために実装した。回転軸の軌道を Fig.7 に示す。 piezoアクチュエータを用いて軸を制御することで目標軌道に沿って振れ回りしていることが分かる。位置誤差信号の標準偏差は約 1.5um であり、目標軌道に対する誤差は約 7.5% であった。回転軸の  $x$  方向の変位の振幅スペクトルを Fig.8 に示す。21.67Hz の振幅スペクトルは目標軌道の半径である 0.02mm にほぼ等しく、 $f_{afc-1} - f_{afc-5}$  の周波数成分はピーク値が減少していることが分かる。そして、 $p_6, q_6$  から算出した  $x, y$  方向の外力から回転座標系に変換して算出した  $F_r, F_t$  を Fig.9 に示す。  $F_r, F_t$  の振幅値は規格化しているが、ほぼ一定値に収束し、時間波形からその値を算出可能であることが分かる。以上の結果から、提案する実験装置を用いて回転軸を任意の振れ回り軌道に制御した上で、制御信号から外力を推定可能であることが確認できた。

## 5 結言

回転機械に作用する外力を推定するために、piezoアクチュエータを用いた測定装置を提案した。回転機械に作用する外力は回転軸の振れ回り軌道に依存する

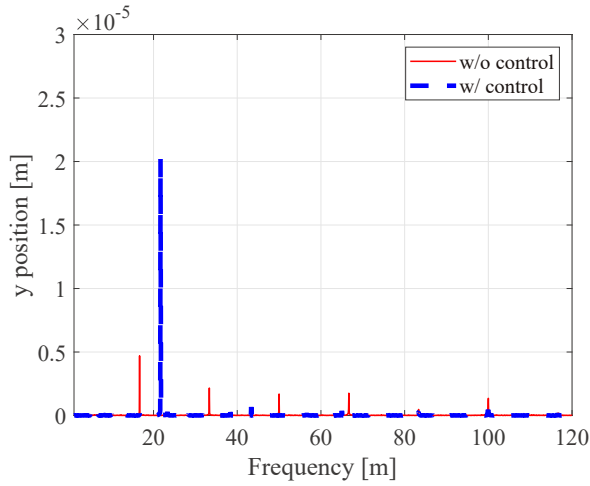


Fig. 8: Experimental results: amplitude spectrum of displacement in  $x$  direction

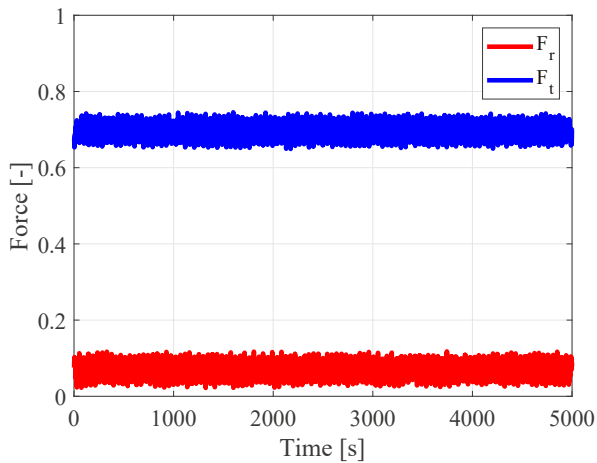


Fig. 9: Experimental results:  $F_r$  and  $F_t$

ため、実際に運転中の回転機械の状態を再現した上で測定する必要がある。提案する実験装置ではピエゾアクチュエータを用いて回転軸を任意の軌道に制御した上で、制御信号から外力を推定できる、本論文では、回転機械の重要な機械要素であるメカニカルシールを対象とした測定実験を実施した。実験結果から、ピエゾアクチュエータを用いて回転軸の軌道を誤差 7.5% で制御し、同時に制御信号から回転軸に作用する半径方向と接線方向に作用する力を推定できることを確認した。

## 参考文献

- [1] A. Alonso, Concheir, Real Time Digital Control Applications 1st Edition, *Proceedings of the IFAC/IFIP Symposium*, Guadalajara, Mexico, January 17-19, 656pages (1983).
- [2] M. Vance John, Rotordynamics of Turbomachinery, *John Wiley & Sons, Inc.*, NY (1988).
- [3] D. Childs, Turbomachinery Rotordynamics: Phenomena, Modeling, and Analysis, *John Wiley & Sons, Inc.*, NY (1993).
- [4] <https://www.ekkeagle.com/jp/technology/mechanical/>
- [5] 弘松, 内海, 長尾, 江口 : Floating Ring Seal に作用するロータダイナミック流体力 ; ターボ機械. 第 41 巻. 第 10 号, pp. 41-48 (2013)
- [6] S. Yabui, A. Okuyama, M. Kobayashi and T. Atsumi, Optimization of adaptive feedforward repeatable run-out cancellation for positioning control system of hard disk drives, *Microsystem Technologies*, Vol. 18, No. 9-10, pp 1703-1709 (2012).
- [7] J. J. Liu and Y. P. Yangt, Comparison of AFC and FACT Method for Periodic Disturbance Suppression in Optical Disk Drives, *Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2004)*, Busan, November 2-6, pp.1987-1992 (2004).
- [8] S. Yabui and T. Inoue, Development of a Measurement System for Analyzing External Forces Acting on Rotating Machineries, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 141, No. 10, 9pages (2019).