

流体動力のリアルタイム計測システム

眞田一志*

Real-Time Measurement System of Power of Fluid

Kazushi SANADA*

This study aims to develop a real-time measurement system of power of fluid flowing in a pipe. Power of fluid is a product of pressure and flow rate. In this system, incompressible fluid flow is targeted. Unsteady flow rate is estimated by a Kalman filter which inputs pressure signals at three points along a pipe. No restrictor is used in this method. From the estimated transient flow rate and pressure, power of fluid flow in a pipe can be obtained. Computational efficiency and real-time calculation are technical issues of this system. An experimental circuit is used to validate the real-time measurement system.

Key Words : Mechanical measurement, Real-time measurement, Power measurement, Kalman filter

1. はじめに

本研究は、配管によって伝達される流体動力をリアルタイムで計測するシステムを開発することを目的とする。流体動力は流量と圧力の積であるが、本手法は流れの抵抗となる流量センサを用いず、圧力センサだけを用いることが特徴である。管路動特性の数学モデルをもとに構成したカルマンフィルタによって非定常な流量を推定し、圧力センサ信号との積を計算することで流体動力をリアルタイムで計測する点が特徴である。

方程式で表せることから、制御理論を直接適用することができる。この特徴を活かして、Fig. 3に示すカルマンフィルタによって、管路の非定常流量を推定する手法を考案した^{2)~5)}。

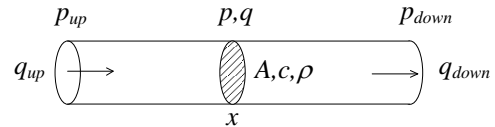


Fig. 1 Fluid flow through a pipe

2. 管内流体動力推定用カルマンフィルタ

管路動特性の数学モデルである最適化有限要素モデルが考案されている¹⁾。図1に、管路内を流体が流れる様子を示す。本研究では、非圧縮性流体を対象とする。管内流れの運動方程式と連続の式は、次式で表される。

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{A}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - p_f(q) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\rho c^2}{A} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (2)$$

これらの式を Fig. 2 の交互格子系で有限要素近似することにより、格子点における圧力と流量を状態変数とする次式の連立常微分方程式が導出される。

$$\frac{dx}{dt} = A_p x + B_p \bar{p} \quad (3)$$

管内流れの理論的な固有値と連立常微分方程式の固有値の誤差が最小となるように格子点配置を最適化した。本モデルは制御工学分野で用いられる状態

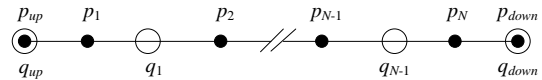


Fig. 2 Interlacing grid system

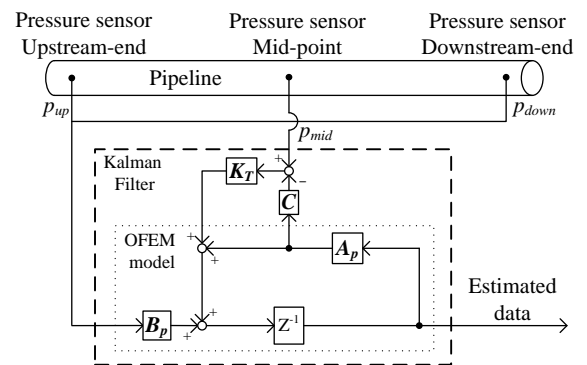


Fig. 3 Kalman filter system

カルマンフィルタは、予測ステップと修正ステップの2段の計算で構成される。まず、次式の予測ステップで事前推定値を計算し、

$$\hat{x}^-[n] = A\hat{x}[n-1] + Bu[n-1] \quad (4)$$

* 横浜国立大学大学院工学研究院
(〒240 - 8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
(E-mail: sanada-kazushi-sn@ynu.ac.jp)
* Yokohama National University

次に、最新のデータを用いて事後推定値を計算する。

$$\hat{x}[n] = \hat{x}^-[n] + \mathbf{K}_T (y[n] - \mathbf{C}\hat{x}^-[n]) \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{K}_T は、定常カルマンゲインを用いる。

$$\mathbf{K}_T = \mathbf{P}\mathbf{C}^T (\mathbf{R} + \mathbf{C}\mathbf{P}\mathbf{C}^T)^{-1} \quad (6)$$

\mathbf{P} は次式の代数リカッチ方程式の解である。

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}(\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{C}^T [\mathbf{C}\mathbf{P}\mathbf{C}^T + \mathbf{R}]^{-1} \mathbf{C}\mathbf{P})\mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{Q}\mathbf{B}^T \quad (7)$$

3. 実験の概要

カルマンフィルタ理論を適用し、管内流れの非定常流量が推定できることを実験によって示した²⁾。この実験では、デスクトップパソコンを使用したオフライン計測だった。そこで、本研究では、高速デジタル演算処理装置を使用してカルマンフィルタの演算を実行することで非定常流量を推定し、圧力センサの信号と乗じて流体動力をリアルタイムで計測するシステムを実現する。

本研究で製作する計測システムを Fig. 4 に示す。圧力センサの間隔である 330mm と 470mm は、管路の音速測定のための国際規格 ISO15068-2 で規定された寸法に準じており、非定常流量だけでなく、同時に音速測定も可能である。圧力センサには、ダイヤフラムが露出している比較的安価なひずみゲージ式を採用する。センサが流れを乱さないように、ダイヤフラム面が配管の内壁面と一致するように、計測孔を工夫する。また、気泡が停留しないように、圧力センサは鉛直下方から配管に取り付ける。

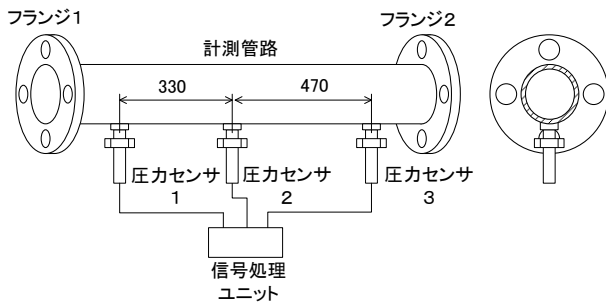
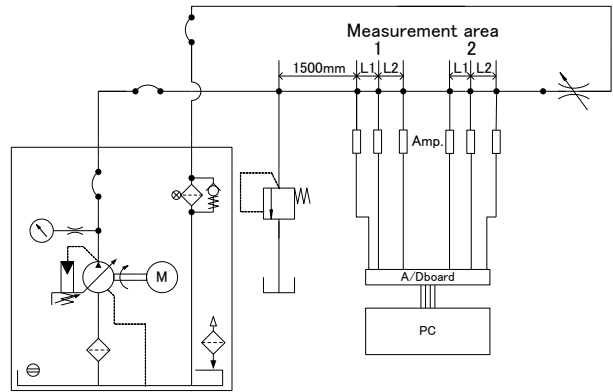


Fig. 4 A measurement unit

実験装置は Fig. 5 に示す回路である。申請者の研究室で所有している高速デジタル演算装置を用いて、カルマンフィルタのリアルタイム演算を実行する。この高速デジタル演算装置は、ブロック線図で作成したモデルをコンパイル・実行し、実行中の変数のモニタリングも可能である。特に、リアルタイム演算に特化したツールで、演算処理にかかる時間も測ることができ、リアルタイム演算用に広く用いられている。

本実験装置で計測されたデータを用いて、本手法のリアルタイム計測が可能であるか、検証する。カルマンフィルタで用いる管路のモデルを低次元化すると計算効率が改善するが、その低次元化についても適切な方法を明らかにする。



実験油圧回路図

Fig. 5 A oil-hydraulic circuit for test

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 17K06226 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) K Sanada, C W Richards, D K Longmore and D N Johnston, A finite element model of hydraulic pipelines using an optimized Fig.1 Figure caption nstn Mech Engrs, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, Vol.207, p.213/222, (1993)
- 2) カルマンフィルタを用いた管内非定常流量・圧力の推定, 小澤 明, 眞田一志, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 査読有, Vol.44, No.1, p.8/15, (2013)
- 3) Estimating unsteady flow in a pipe using Kalman filter, Kazushi Sanada, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol.6, No.4, p.440/444, (2012)
- 4) An Indirect Measurement Method of Transient Pressure and Flow Rate in a Pipe using Unsteady State Kalman Filter, Akira OZAWA, Kazushi SANADA, Proceedings of the 8th JFPS International Symposium on Fluid Power, Okinawa 2011, Oct. 25-28, 2011, 査読有, p.104/109, 2011
- 5) 管路動特性の最適化有限要素モデルを用いたカルマンフィルタに関する研究, 小澤明, 眞田一志, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 査読有, 第 42 巻第 5 号, p.89/94, (2011)