

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06226

研究課題名（和文）流体動力のリアルタイム計測システム

研究課題名（英文）A real-time measurement system of fluid power

研究代表者

眞田 一志（SANADA, KAZUSHI）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30187265

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：研究期間全体を通じて得られた成果として、最適化有限要素モデルを管路動特性のモデルとして利用した流体動力リアルタイム計測システムを構築することができた。申請時に掲げた課題に対して、最適化有限要素モデルのサイズを適正化することで実時間計測が可能であることを示した。具体的には、管路分割数を5分割とすれば、演算時間約0.2ms（サンプリング周波数5kHz）として、非定常層流圧力損失を考慮した実時間計測が可能であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、配管によって伝達される流体エネルギーを実時間で計測するシステムを開発した。流体エネルギーは流量と圧力の積であり、本手法は流れの抵抗となる流量センサを用いずに、圧力センサだけを用いることを特徴としている。本手法を用いれば、アクチュエータを駆動する流体エネルギーを実時間で計測でき、機械の運転条件に応じたエネルギー回生制御の高度化が可能となり、燃費向上や地球環境問題の解決に大きく貢献する。

研究成果の概要（英文）：As a result obtained throughout the research period, it becomes possible to construct a fluid power real-time measurement system using the optimized finite element model as a model of pipe dynamics. It has been shown that the real-time measurement is performed by optimizing the size of the optimized finite element model for the issues listed at the application form. Specifically, it has been found that if the number of pipe divisions was set to 5, the calculation time is approximately 0.2 ms (sampling frequency 5 kHz), and real-time measurement taking into account unsteady laminar pressure loss is possible.

研究分野：制御工学

キーワード：機械計測 エネルギー 流量計測 推定 カルマンフィルタ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

管内流れの間接測定に関する従来の研究としては、管路における圧力と流量の伝達関数を利用した間接測定手法が提案されていた。これらの手法では、圧力センサのオフセットを自動修正する手段がなく、計測毎にオフセットを除去する煩雑な調整が必要であった。また、間接測定できるのは、指定した点のみに限られていた。本手法では、管路動特性の数学モデルを基にしたカルマンフィルタを構築し、管路中間点における圧力の実測値と推定値の誤差をフィードバックすることで、管路の流量を推定する。カルマンフィルタの原理により、ノイズはカットされ、オフセットは自動的に除去される。管路の任意の点の流量が推定されるため、流量センサを用いることなく流体動力を求めることができる。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究課題は、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目的とした。

(2) 本申請課題では、カルマンフィルタのリアルタイム演算の実現を目標として、最適化有限要素モデルの計算内容を見直す。特に、( ) 管路分割数、( ) 非定常層流圧力損失の近似項数、( ) サンプリング周波数、に着目した。

### 3. 研究の方法

本研究課題は、平成 29～31 年度の 3 年間の予定で、下記の 4 ステップを順次進めた。

- (1) 流体動力リアルタイム計測システムの製作 (平成 29 年度)
- (2) 流体動力リアルタイム演算アルゴリズムの実装 (平成 29 年度)
- (3) リアルタイム演算の高速化 (平成 30 年度)
- (4) 流体動力リアルタイム計測の実現 (平成 31 年度)

### 4. 研究成果

(1) 流体動力リアルタイム計測システムを製作した(図 1)<sup>1</sup>。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プログラムを制作し、実際にカルマンフィルタをリアルタイムで実行した。提案するカルマンフィルタによる流体動力の計測がリアルタイムで可能であることを実験により明らかにすることができた<sup>2,3</sup>。

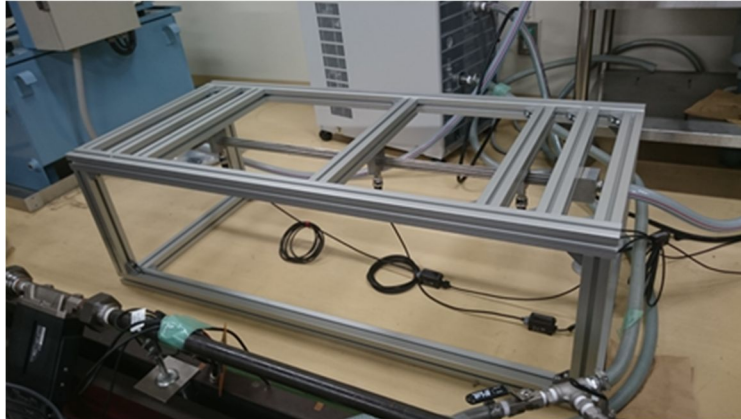


図 1 カルマンフィルタを適用した流体動力計測システムの実験装置<sup>1</sup>

(2) シミュレーションによって、管路モデルの演算時間の調査を行った<sup>4</sup>。集中定数系モデルおよび定常層流用モデルを用いた計測モデルは十分短い演算時間であった。その一方で、非定常層流用モデルを用いた場合は、計算量が多いことがわかった。集中定数系モデルおよび定常層流用モデルを使用した計測モデルの演算時間は、目標サンプリングタイムより十分短いと言える。しかし、非定常層流用モデルを用いた場合でも、分割数を調整することで十分短い演算時間でリアルタイム演算が可能であることがわかった。

本研究の過程で、定常カルマンフィルタを用いた管内流れの把握手法を応用した層流流量計システムをあらたに提案した(図 2)<sup>5</sup>。計測システム装置を予備的に製作し、層流における細管流量と全体流量の関係式を求めた。

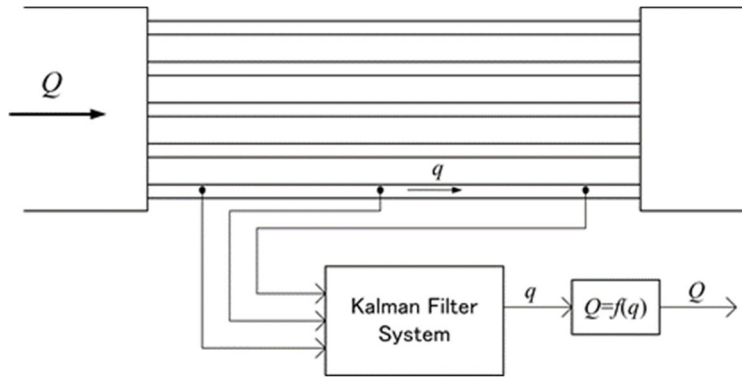


図 2 カルマンフィルタを適用した層流流量計<sup>5</sup>

(3) 定常カルマンフィルタを用いた管内流量の推定手法を応用した層流流量計システムの提案にもとづいて、実験装置を本格的に製作した。本研究では、計測システム装置を実際に製作し、非定常流量および正逆流について計測精度の検証実験を行った(図3)<sup>6,7</sup>。本手法のカルマンフィルタで利用した管路モデルは正逆流とも適用可能であり、逆流時には流量が負の値として出力される。そこで、順方向と逆方向の流れに対して、本手法で流量計測を行い、順流・逆流について高精度に流量計測できることを示した。

さらに、層流流量計の細管流量計測値から本管流量を推定する式の非線形特性について考察し、本管内の流れの状態、すなわち層流、乱流および遷移域における流速分布が推定式の非線形性に影響していると推察されることを示した。

計算負荷の軽減については、管路モデルの管路分割数を5以下に抑制することで、十分実時間で実行可能であることを確認した。

非定常流量の計測では、電磁弁を用いてできるだけ短時間で流れを切り替えることで階段状の流量変化をあたえ、本手法による流量計測が約50msの応答時間で非定常流量を精度よく計測できることを示した(図4)<sup>7</sup>。

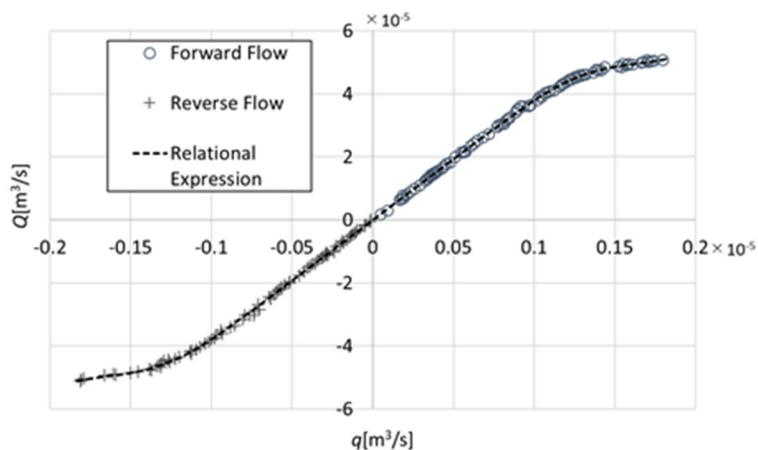


図 3 層流流量計の細管流量(横軸)と推定本管流量(縦軸)の校正結果<sup>6,7</sup>

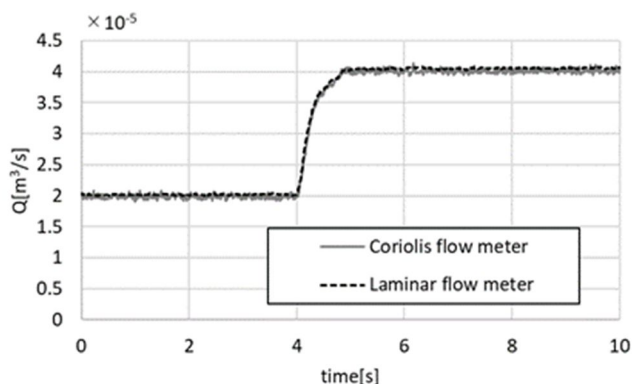


図 4 層流流量計のステップ応答<sup>7</sup>

研究期間全体を通じて得られた成果として、最適化有限要素モデルを管路動特性のモデルとして利用した流体動力リアルタイム計測システムを構築することができた。申請時に掲げた課題に対して、最適化有限要素モデルのサイズを適正化することで実時間計測が可能であることを示した。具体的には、管路分割数を5分割とすれば、演算時間約0.2ms(サンプリング周波数5kHz)として、非定常層流圧力損失を考慮した流体動力の実時間計測が可能であることがわかった。

#### 引用文献

1. 眞田一志, 非定常管内流れの推定のためのカルマンフィルタの実時間実装, 2017年産業応用部門大会(2017年11月20日・東京), p.65/66, 2017
2. Kazushi SANADA, Condition for Real-time Measurement of Power of Unsteady Fluid Flow in a Pipe by Kalman Filter, 11th International Fluid Power Conference, Group10-3, p.179-185, 2018
3. Kazushi SANADA, Real-time implementation of Kalman filter for unsteady flow measurement in a pipe, International Journal of Hydromechatronics, Vol.1, No.1, p.3-15, 2018, DOI: 10.1504/IJHM.2018.10011369
4. 平野 翔太, 眞田 一志, カルマンフィルタによる非定常動力推定計算の実装について, 平成30年度春季フルードパワーシステム講演会論文集, p.94-96, 2018.
5. 平野翔太, 千葉崇宏, 眞田一志, カルマンフィルタによる管内流れ推定法を応用した層流流量計システム, 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p.104-106, 2018
6. 平野翔太, 千葉崇宏, 眞田一志, カルマンフィルタを用いた層流流量計による非定常流量計測, 2019年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p.89/91, 2019
7. 平野翔太, 眞田一志, カルマンフィルタを用いた層流流量計システムによる逆流計測, 2019年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p.59/61, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kazushi SANADA	4. 巻 1
2. 論文標題 Real-time implementation of Kalman filter for unsteady flow measurement in a pipe	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Hydromechatronics	6. 最初と最後の頁 3/15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1504/IJHM.2018.10011369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 平野翔太, 眞田一志
2. 発表標題 カルマンフィルタによる非定常動力推定計算の実装について
3. 学会等名 平成30年度春季フルードパワーシステム講演会論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平野翔太, 千葉崇宏, 眞田一志
2. 発表標題 カルマンフィルタによる管内流れ推定法を応用した層流流量計システム
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazushi SANADA
2. 発表標題 Condition for Real-time Measurement of Power of Unsteady Fluid Flow in a Pipe by Kalman Filter
3. 学会等名 11th International Fluid Power Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 眞田一志
2. 発表標題 非正常管内流れの推定のためのカルマンフィルタの実時間実装
3. 学会等名 計測自動制御学会2017年産業応用部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平野翔太、千葉崇宏、眞田一志
2. 発表標題 カルマンフィルタを用いた層流流量計による非正常流量計測
3. 学会等名 2019年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野翔太、眞田一志
2. 発表標題 カルマンフィルタを用いた層流流量計システムによる逆流計測
3. 学会等名 2019年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----