報告日:2021年 1月 19日

報告者:鹿児島大学 学術研究院理工学域工学系

中尾 光博

1. 研究概要

(和文)

- (1) 課題名(日本語) データ同化による空気圧システムの消費エネルギー計測に関する研究
- (2) 研究者氏名、職名

中尾 光博 鹿児島大学 学術研究院理工学域工学系 准教授

(3)研究概要(日本語)

近年,空気圧システムの省エネ化が強く求められている.本研究は,空気圧シス テムの安価かつ低損失な消費エネルギー計測の基盤技術を開発することを目的 として,計測値と管路内流れの一次元数値モデルをカルマンフィルタにより融合 した状態推定について検討した.まず層流領域から乱流領域までを統一的に扱え る一次元数値モデルの候補として,瞬時加速度モデルについて,実験との比較か ら検討した.次にカルマンフィルタによる状態推定の基礎特性を調べるために, 層流領域を対象として境界条件や観測点の選定が推定精度に及ぼす影響を調べ, その知見を踏まえて乱流領域を対象とした検討を行った.

(4) キーワード データ同化,カルマンフィルタ,数値計算,状態推定,瞬時加速度モデル

(英文)

(1) Research title

A Fundamental Study on Data Assimilation Measurement of Energy Consumption in Pneumatic System

(2) Name of researcher with title of position

Mitsuhiro Nakao, Associate Professor, Kagoshima University

(3) Summary

In recent years, there has been a strong demand for energy saving in pneumatic systems. The objective of this study is to develop a basic technology for inexpensive and low-loss energy consumption measurement of pneumatic systems. A state estimation was investigated by fusing the measured values and a one-dimensional numerical model of the flow in the pipeline with a Kalman filter. First, as a candidate for a one-dimensional numerical model that can handle the laminar flow region to the turbulent flow region in a unified manner, the instantaneous acceleration-based model was examined by comparison with experiments. Next, in order to investigate the basic characteristics of state estimation by the Kalman filter, we investigated the effect of boundary conditions and observation point selection on the estimation accuracy in the laminar flow region, and based on that finding, a study was conducted targeting the turbulent region.

(4) Key Words

Assimilation, Kalman filter, Numerical simulation, Estimation, instantaneous acceleration-based model

## 2. 本研究の意義・特色

工場全体の消費電力の 20~30%を占めている空気圧システムの省エネ化が強く求められ ている.そのためには各々の空気圧機器や配管における消費エネルギーを計測し,効率的 に管理することが重要である.しかし,その消費エネルギー(エアパワー)の計測に用い られるエアパワーメータ(APM)には,APM内部が狭い流路であるため,APMの設置に よって空気圧システムのエネルギー効率が低下する,APMは高価であり,各々の機器に取 り付けると安価であるという空気圧システムのメリットが損なわれるという問題点がある.

本研究では、これらの問題の解決に向けて、データ同化による空気圧システムの消費エ ネルギー計測の基盤技術を開発することを目的としている.データ同化は計測と数値計算 の融合により、計測だけでは得られない情報を得る技術である.エアパワーの低損失な計 測のために、本研究では計測と管路内流れの一次元数値モデルをカルマンフィルタにより 融合させることによる低損失な流量計測法を提案する.低損失な流量計測が実現出来れば、 空気圧システムのエネルギー効率を低下させることなく、かつ安価に消費エネルギーを計 測できるようになる.

3. 実施した研究の具体的内容、結果

具体的に実施した内容は,1)瞬時加速度モデルによる空気圧管路内過渡応答の推定,2) カルマンフィルタによる層流の状態推定に及ぼす境界条件と観測点の影響,3)カルマンフ ィルタによる乱流の状態推定であり,それらについて以下に述べる.

3.1 瞬時加速度モデルによる空気圧管路内過渡応答の推定

空気圧管路の過渡応答はその圧力振幅に応じて様相が異なり,約2kPa以下では微小振幅波として扱えることが知られており,特性曲線法による計算例が存在する.微小振幅波よりも振幅が大きな場合には非線形音波が生じるが,空気圧管路において詳細に扱った例はない.同様の圧力振幅をもつ非線形音波としてトンネル内微気圧波がある.こちらでは様々な計算方法が試みられている.また,瞬時加速度に基づく(IAB)非定常損失のモデル化もなされており,液体管路では層流領域以外にも適用例がある.本研究では IAB

モデルを用いた空気圧管路内の非線形音波の一次元簡易計算法について実験値との比較 から検討した.

一次元数値モデルにより空気圧管路内層流流れを計算するためには,非定常層流圧力 損失項*f*',*g*'を計算する必要がある.

$$f^{*}(x,t) = \frac{32\mu}{\rho D^{2}} \left[ u + \frac{1}{2} U(x,t) \right]$$
(1)

$$g^{*}(x,t) = \frac{16(\gamma - 1)\mu}{\Pr D^{2}} G(x,t)$$
(2)

トンネル圧縮波の非線形伝播の解析例としてとしては式(1)の代わりに式(3)を用いたものがある.式(3)は式(1)の非定常損失項部分に係数を掛けたもので、管壁の粗さ等に依存した値であり、実測データから推測する必要があるとしている.

$$f^*(x,t) = \frac{32\mu}{\rho D^2} \left[ u + \frac{1}{2} \varepsilon U(x,t) \right]$$
(3)

報告者は IAB モデルを用いた空気圧管路内層流流れのモデル化を行ったが,層流領域の波形の再現性は式(1)と式(2)を用いた計算に劣る.そこで,各計算格子内の瞬時レイノルズ数 Re を用いて場合分けし,層流は式(1)と式(2)で計算し,それ以外の領域は式(4)と式(5)の IAB モデルで計算する.

$$f^{*}(x,t) = \frac{\rho u^{2} \Delta x \lambda}{2D} + \varepsilon_{1} \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + (c+u) \operatorname{sign}(u) \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| \right]$$
(4)

$$g^{*}(x,t) = \varepsilon_{2} \left[ \frac{\partial p}{\partial t} - (c+u) \frac{\partial p}{\partial x} \right]$$
(5)

ただし*c*を音速, *D*を管路内径, *p*を圧力, Pr をプラントル数, *t*を時間, *u*を流速, *x*を 管路軸方向座標, *y*を比熱比,  $\Delta x$  を格子刻み, *c*をモデル係数, *µ*を粘性係数, *ρ*を密度 とする.式中の $\lambda$ は Blasius の式により計算し,モデル係数 *c*<sub>1</sub>, *c*<sub>2</sub>は試行錯誤的に決定し た.また sign は符号関数である.非定常損失の計算は以下 3 通りについて試行した.

計算方法①:式(1)と式(2)

計算方法②:式(3)と式(2)

計算方法③:式(4)と式(5)

検討対象管路系の概要を Fig. 1 に示す. 片方の管路端には微差圧計の片側を大気開放と して取り付け,他端はゴム膜で閉じた. 管路内を ΔP だけ加圧し,加圧後ハンドバルブを 閉じ,ゴム膜を針で破裂させることで管路内に圧力脈動を発生させ,そのときの圧力を 微差圧計で計測した.

Fig. 2 から Fig. 4 には  $\Delta P$  = 2.89, 4.92, 6.99 kPa における実験値と計算方法①,②,③ の計算値の比較である. IAB モデルである計算方法③は全ての場合で他の方法よりも実験 値とよく一致しているが、僅かに位相がずれてしまっている.



Fig. 1 Experimental apparatus



Fig. 2 Pressure response with  $\Delta P = 2.89$  kPa



Fig. 3 Pressure response with  $\Delta P = 4.92$  kPa



Fig. 4 Pressure response with  $\Delta P = 6.99$  kPa

3.2 カルマンフィルタによる層流の状態推定に及ぼす境界条件と観測点の影響

検討に用いる管路は内径 28 mm の真直な円管であり,長さ 3.03 m の区間を検討対象と し,その両端と上流側の圧力計から 1.01 m だけ下流の位置に圧力計,は供試管路の上流 と下流に流量計を設置した(Fig. 5).下流側の流量計は大気開放とした.Fig.6のように管 路の検討区間に対応する,格子点数 4 点の計算格子を設定した.特性曲線法に基づく方 法であるため,各格子点で流速,圧力が定義される.

境界条件が推定に及ぼす影響を調べるために, Table 1 のように圧力–圧力, 圧力–流速, 流速–流速の3 通りの境界条件を扱い, 観測点は格子点 *i* = 1 として, 管路途中の圧力 *P*<sub>2</sub>, または管路上流の流量から算出される平均流速 *U*<sub>1</sub>を格子点 *i* = 1 における流速としてフィードバックした. 定常流量を発生させているので, どの格子点でも流量は等しくなるはずであり, このように仮定しても問題ない.



Fig. 5 Experimental apparatus



Fig. 6 Computation grid

Table 1 Condition setting			
	Input	Output	Observation point
Case 1	Pressure	Pressure	$P_2$
Case 2	Pressure	Pressure	$U_1$
Case 3	Pressure	Velocity	$P_2$
Case 4	Pressure	Velocity	$U_1$
Case 5	Velocity	Velocity	$P_2$



Fig. 7 Comparison of  $u_3$  among the experimental value, calculation and the KF (Case 1)



Fig. 8 Comparison of u<sub>3</sub> among the experimental value, calculation and the KF (Case 2)



Fig. 9 Comparison of u<sub>3</sub> among the experimental value, calculation and the KF (Case 3)



Fig. 10 Comparison of u<sub>2</sub> among the experimental value, calculation and the KF (Case 4)



Fig. 11 Comparison of  $u_2$  among the experimental value, calculation and the KF (Case 5)

流量の実験値とフィードバックのない計算,カルマンフィルタによる推定値を比較し た結果を Fig. 7 から Fig. 11 に示す. これらの比較からわかることは,応答速度を高める ためには少なくとも1点の流速計測点が必要であること,推定精度はセンサの計測不確 かさに依存することである. 今回の検討範囲では十分な応答速度があり,かつ推定精度 が最も高いのは Case 2 であった. しかし流速フィードバックであるため,高速応答性の ある流量計を採用する必要があり,実用の観点からは, Case 3 が最も良い.

## 3.3 カルマンフィルタによる乱流の状態推定

乱流は非線形現象であるため、前節で採用した線形カルマンフィルタを適用すること ができない. そこで非線形カルマンフィルタとして Unscented カルマンフィルタ(UKF)を 適用し、その推定値を数値実験、計算値と比較した結果、Fig. 12 のように推定精度の向 上を確認した.

次に実際の空気圧管路内の定常流れを対象とした検討を行った.まず,境界条件のみ に計測値を用いた通常の計算を行った.Fig. 13 に示すのは計算によって求められた断面 平均流速 u3 と計測した流量から算出された断面平均流速 U2 の比較である.計算値では数 値粘性により計測値にみられるノイズがかなり小さくなっている.UKF を用いた推定を 行った結果を Fig. 14 に示すが,有意はみられなかった.この結果が Fig. 12 の場合と異な る傾向となったのは,システムノイズがローパスフィルタに近い作用をするものであり, UKF の前提とは異なるためであると考えられる.



Fig. 12 Comparison of  $u_3$  among the true value and calculation, and the UKF



Fig. 13 Comparison of  $u_3$  obtained with ordinary calculation and  $U_2$ 



Fig. 14 Comparison of  $u_3$  obtained with the UKF calculation and  $U_2$ 

4.本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名・職名中尾 光博 鹿児島大学 学術研究院理工学域工学系 准教授

## 5. 研究実施時期

2014年(平成26年)3月 1日から 2018年(平成30年)11月30日

- 6. 本研究に関連して発表した主な論文等
- [1] 中枌直貴, <u>中尾光博</u>, 空気圧管路内の非線形音波の計算について, 平成 27 年秋季フル ードパワーシステム講演会, 2015
- [2] <u>中尾光博</u>, Unscented カルマンフィルタによる空気圧管路内流れの状態推定, 平成 30 年春季フルードパワーシステム講演会, 2018
- [3] <u>中尾光博</u>,線形カルマンフィルタによる定常流量の推定,平成 30 年秋季フルードパワ ーシステム講演会,2018
- [4] 川田龍, <u>中尾光博</u>, Unscented カルマンフィルタによる気体管路内流の定常流量の推定, 計測自動制御学会産業応用部門大会, 2018

7. 内外における関連研究の状況

管路の一次元数値モデルに関する研究は,非常に古くから行われている.気体管路の過 渡応答の計算については,層流領域については Brown の研究を始めとして,1960 年頃か ら盛んに研究されていた.乱流遷移を含むような場合の研究例としては,トンネル内微気 圧波に関するものがあるが,報告者の知る限り統一的なモデルは存在しない.本研究で提 示されたモデルは,統一的なモデルとなりうる点で意義がある.

また、カルマンフィルタによる状態推定については、報告者による以前の研究の他に、 最適化有用現要素モデルを用いたものや粒子フィルタを用いたものなどがある.しかし、 適切な境界条件や観測点の選定、適用範囲などについては明らかになっていなかった.本 研究でそれらが明らかにされた点について、意義深い結果であると考えている.

8. 今後の発展に対する希望

管路内流れの一次元数値モデルについて,推定精度の向上と,モデル定数の適用範囲に ついての検討が必要である.