研 究

油圧管路の動特性を利用した遠隔瞬時流量計測手法*

(第2報 実時間準遠隔瞬時流量計測手法の検討)

金 道 泰** 横 田 眞 一***
中 野 和 夫***An Approach for Remote Measurement of Instantaneous Flow Rate
by Making Use of Hydraulic Pipeline Dynamics
(2nd Report : A study on the Quasi-Remote Instantaneous
Flow Rate Measurement in Real Time)

Do-Tae KIM, Shinichi YOKOTA, Kazuo NAKANO

Recently, we proposed remote and quasi-remote instantaneous flow rate measurement methods by making use of the dynamic characteristics between pressures and flow rates at two cross-sections (upstream and downstream of the pipeline) distant from the finite length along the hydraulic pipeline. By using these methods, an instantaneous flow rate at the location difficult to insert a flowmeter can be accurately estimated in real time. The remote instantaneous flow rate measurement method has been investigated using the experiment in the previous paper.

This paper describes the quasi-remote instantaneous flow rate measurement method. In the case of the upstream flow rate measurement, flow rate $q_u(t)$ is estimated by implementing convolutions of measured upstream pressure $p_u(t)$ and downstream flow rate $q_d(t)$ with corresponding weighting functions $g_p(t)$ and $g_q(t)$, respectively. The high-speed numerical operation of the convolutions is realized in real time by utilizing the preset tables on memories in the microcomputer system.

The weighting functions in the time domain are obtained by the inverse Laplace transform or inverse fast Fourier transform of the transfer functions in the frequency domain which are derived from the transfer matrix. In a similar manner, downstream flow rate $q_d(t)$ can be estimated from measured downstream pressure $p_d(t)$ and upstream flow rate $q_u(t)$.

The estimated flow rate waveforms by the method are compared with directly measured ones at the same instant by a cylindrical choke-type instantaneous flowmeter which is used for calibration. The results show good agreement between the estimated and measured flow rate waveforms under an unsteady laminar flow.

As a result of improving and scheming the high-speed operation of convolutions, data processing on the system in real time is achieved using only software.

1. ま え が き

油圧回路の任意の位置を通過する瞬時流量値を測定する場合において、測定したい位置の機器の構造やスペース上での制約のため流量計を組みこむことが不可能である場合、あるいは流量計による流れの乱れの影

響などが問題となることがある。

前報では¹⁾、このような点を解決する一手法としてある管路長離れた二点間（上流と下流）の圧力流量間の動特性を利用して、瞬時流量を測定したい位置に直接流量計を設けずに、その位置の断面を通過する瞬時流量値を遠隔的に求める二つの手法（遠隔計測、準遠隔計測）を提案した。このうち遠隔瞬時流量計測手法については、すでに400Hzを超える高い応答精度が確かめられている円筒形絞り形瞬時流量計²⁾と非定常流量測定実験を通して、比較検討を行い、実用上十分な動的精度をもつことを明らかにした。

*平成2年7月10日 原稿受付

**東京工業大学 大学院

***東京工業大学 精密工学研究所

(所在地 〒227 横浜市緑区長津田町4259)

本報では、提案した手法のうち瞬時流量値を実時間で求めることが可能であるもうひとつの準遠隔瞬時流量計測手法の応答性、計測演算処理の実時間化について検討を行う。

2. 記 号 表

a : 管半径, c : 音速, d : 絞り内径, dp : 絞りでの圧力降下, f : 周波数, $J_0()$, $J_1()$: 第一種零次および一次ベッセル関数, j : 虚数単位, L : 管路長, l : 絞り長さ, p : 圧力, q : 流量, $\hat{q}$: 流量推定値, s : ラプラス演算子, s_k : 極, t : 時間, ΔT : サンプル時間, $Z_0(s)$: 管路の特性インピーダンス, $\lambda(s)$: 伝ば定数, ρ : 密度, ν : 動粘度, ω : 角周波数, 下添字 u と d はそれぞれ管路の上流, 下流を表す。

3. 準遠隔流量計測の原理

3.1 流量計測の原理

前報で提案した準遠隔瞬時流量計測手法の原理について簡単に述べる。この手法は、Fig. 1aに示す管路上の離れた二点間の圧力と流量間の動特性を表す伝達マトリックスに基づいて³⁾、瞬時流量を計測したい断面上の圧力値（例えば $p_u(t)$ ）と管路で結ばれた他の断面上の流量値（例えば $q_d(t)$ ）を用いて、計測したい断面上の瞬時流量（例えば $q_u(t)$ ）を実時間で推定するものであり、瞬時流量を測定したい位置に直接流量計を挿入する必要がない利点がある。Fig. 1bは、この場合の管路の上流と下流の圧力と流量間の関係をブロック線図上に示したものである。下流を通過する瞬時流量 $q_d(t)$ に関しても同様に $q_u(t)$ と $p_d(t)$ より推定することが可能である。ここでは、主にFig. 1bに示す管路の上流を通過する瞬時流量について検討する。このとき、測定したい位置での上流の流量 $Q_u(s)$ は、管路の伝達マトリックスを書き直すことにより、次式で与えられる。

Fig. 1a Schematic of hydraulic pipeline

Fig. 1b Block diagram form of transfer matrix

$$Q_u(s) = G_p(s) \cdot P_u(s) + G_q(s) \cdot Q_d(s) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $G_p(s)$ は管路の上流圧力と上流流量間の伝達関数、 $G_q(s)$ は下流流量と上流流量間の伝達関数であり、つぎの式(2), (3)で与えられる。また大文字 P と Q はそれぞれ圧力 p と流量 q の変動分についてのラプラス変換を表す。

$$G_p(s) = \tanh[\lambda(s)L] / Z_0(s) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$G_q(s) = 1 / \cosh[\lambda(s)L] \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、伝ば定数 $\lambda(s)$ と管路の特性インピーダンス $Z_0(s)$ は非定常粘性抵抗を考慮に入れると、つぎのように与えられる。

$$\lambda(s) = (s/c) \{F(s)\}^{-\frac{1}{2}}, \quad Z_0(s) = Z_{0c} \{F(s)\}^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで、 $Z_{0c} = \rho c / \pi a^2$

$$F(s) = 1 - \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu}J_0(ja\sqrt{s/\nu})} \quad \dots\dots\dots(5)$$

Fig. 2a,bは、一例として、管路長 $L=170\text{cm}$ の場合、 $G_p(s)$, $G_q(s)$ の周波数特性（図中の実線）について、式(2), (3)から計算した結果をボード線図上に示したものである。横軸は実周波数 f , 縦軸はゲインと位相ずれを示す。

時間領域における管路上流の流量推定値 $\hat{q}_u(t)$ は、式(1)をラプラス逆変換することにより、伝達関数から求められた時間領域での重み関数 $g_p(t)$, $g_q(t)$ と測定された過去から現在までの上流の圧力値 $p_u(t)$ および下流の流量値 $q_d(t)$ とのたたみこみ積分により、つぎの式より与えられる。

Fig. 2a Frequency characteristics of $G_p(j\omega)$

Fig. 2b Frequency characteristics of $G_q(j\omega)$

Fig. 3a The weighting function $g_p(t)$ by inverse Laplace transform

$$\begin{aligned} \hat{q}_u(t) = & \int_{-\infty}^t g_p(\tau) \cdot p_u(t-\tau) d\tau \\ & + \int_{-\infty}^t g_q(\tau) \cdot q_d(t-\tau) d\tau \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

式(6)のたたみこみ積分演算を時間に関して差分化し、上流圧力 $p_u(t)$ と下流流量値 $q_d(t)$ を離散値化して、つぎの式(7)をマイクロコンピュータシステムを用いて実時間で実行する。

$$\begin{aligned} \hat{q}_u(n\Delta T) = & \sum_{i=0}^{N-1} g_p(i\Delta T) \cdot p_u(n\Delta T - i\Delta T) \Delta T \\ & + \sum_{i=0}^{N-1} g_q(i\Delta T) \cdot q_d(n\Delta T - i\Delta T) \Delta T \dots\dots(7) \end{aligned}$$

ここで、 ΔT はサンプリング時間間隔、 N はたたみこみ積分の積和を実行する項数であり、たたみこみ積和を行う時間間隔 $T_o = \Delta T \times N$ で与えられる。

3.2 重み関数の誘導

式(7)を用いて、油圧機器内のある任意の位置を通過する瞬時流量を実時間で求めるためには、式(2)、(3)の時間領域における重み関数（伝達関数の単位インパルス入力に対する時間応答） $g_p(t)$ と $g_q(t)$ を求める必要がある。ここでは、式(2)、(3)の伝達関数の極 s_k を求めて、ラプラス逆変換法により、それぞれの重み関数を求める。伝達関数 $G_p(s)$ と $G_q(s)$ の極 s_k は $\cosh\{\lambda(s)L\} = 0$ の根であり、次式の関係より極 s_k を求めることが可能である。

$$\begin{aligned} \lambda(s_k) = & \pm j[(2k-1)\pi]/2L \dots\dots\dots(8) \\ & k=1, 2, 3, \dots\dots\infty \end{aligned}$$

式(8)を満足する極 s_k は、無限個存在する。ここでは、低周波における有限な周波数範囲をカバーするために、極 s_k の絶対値が小さいものから順に数個求めて用いた。求めた極 s_k は、すべて異なる共役複素数の単根であり、それぞれの重み関数は留数の和として、次式で求めることができる。

Fig. 3b The weighting function $g_q(t)$ by inverse Laplace transform

$$\begin{aligned} g_p(t) = & \sum_{k=1}^5 \left\{ \left(\frac{\{F(s)\}^{\frac{1}{2}} \sinh[\lambda(s)L] \exp(st)}{Z_o \frac{d}{ds} \cosh[\lambda(s)L]} \right)_{s=s_k} \right. \\ & \left. + \left(\frac{\{F(s)\}^{\frac{1}{2}} \sinh[\lambda(s)L] \exp(st)}{Z_o \frac{d}{ds} \cosh[\lambda(s)L]} \right)_{s=s_k^*} \right\} \dots\dots(9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_q(t) = & \sum_{k=1}^5 \left\{ \left(\frac{\exp(st)}{\frac{d}{ds} \cosh[\lambda(s)L]} \right)_{s=s_k} \right. \\ & \left. + \left(\frac{\exp(st)}{\frac{d}{ds} \cosh[\lambda(s)L]} \right)_{s=s_k^*} \right\} \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

ここで、 s_k^* は s_k の共役複素数である。

Fig. 3a,bは管路長 $L=170\text{cm}$ の場合について、式(8)の $k=1\sim 5$ の極 s_k と s_k^* を用いて、式(9)、(10)から重み関数を求めた結果を示したものである。

またこの重み関数と正弦波入力とのたたみこみ積分を行い、その周波数特性を求めて、理論値と比較することにより、この重み関数の妥当性について検討を行った。その結果をFig. 2a,bに示す。図中の□は $k=1\sim 3$ 、○は $k=1\sim 5$ 、◇は $k=1\sim 7$ の極 s_k と s_k^* を用いて得られた重み関数を用いて、入力として正弦波を加えたときのたたみこみ積分を行い、その入出力間のゲインと位相を求めて示したものである。図中の実線は伝達関数の式(2)、(3)から直接計算した理論値であり、ゲイン、位相ともに理論値とよく一致しており、求められた重み関数のこの周波数領域での妥当性を示している。

またこの重み関数 $g_p(t)$ と $g_q(t)$ は高速フーリエ逆変換(IFFTと略す)を用いて、簡便に近似重み関数を求めることも可能であり、それを用いた演算結果も、ここには示さないが同様の結果が得られる。

4. 実時間流量計測の検討および実験

4.1 実験装置

Fig. 4は、本手法の妥当性を検討するために、提案している瞬時流量計測システムと400Hzを超える高い応答性が確かめられている円筒形絞り瞬時流量計（以下

Fig. 4 Overall experimental setup

Fig. 5 Comparisons of the estimated and measured flowrate waveforms for the number of convolution integral terms $N = 1000$, $N = 600$, and $N = 500$.

CCFMと略す)²⁾を組み込んだ実験装置の概略を示したもので、前報¹⁾と同様のものである。Fig. 4のCCFM1 (上流)は、本手法により推定された上流の瞬時流量値 $\hat{q}_u(t)$ と同時に直接測定された流量値 $q_u(t)$ を比較検討するため設けている。また、その片方(CCFM1の下流側)の圧力計は圧力値 $p_u(t)$ を得るために利用する。CCFM2(下流)により、瞬時流量値を推定しようとする位置(ここでは $q_u(t)$)から管路長 L だけ離れた点での入力値となる流量値 $q_d(t)$ が得られる。管路上流のCCFM1と下流のCCFM2に用いた円筒形絞りの形状は細管部の内径 $d = 2.55\text{mm}$ 、長さ $l = 15\text{mm}$ の同一寸法のものであり、その両端に生じる差圧 dp_u 、 dp_d はそれぞれ2台の半導体圧力変換器と低ドリフトの差動アンプにより計測され、A/D変換器を介して、マイクロコ

ンピュータシステム(PC9801)にとり込まれ、瞬時流量が得られる。

管路の下流のマニホールドには油温測定用のサーミスタ温度計および流体系に変動流量を生じさせるためのサーボ弁が取り付けられている。さらに下流側の低圧部には容積分算流量計を設けて、定常流量の較正に用いた。実験は 35°C で動粘度 $\nu = 0.4\text{cm}^2/\text{s}$ の作動油を用い、油温は $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、上流の圧力は 3.9MPa { 40kg f/cm^2 }で行った。

4.2 実験結果および考察

管路下流のサーボ弁の開度ある動作点を中心にして方形波状に変化させ、本手法により推定された上流の流量波形 $\hat{q}_u(t)$ とCCFM1から同時に直接測定された流量波形 $q_u(t)$ との比較をすることにより、応答性などについて検討を行った。

Fig. 5は、管路長 $L = 170\text{cm}$ の場合、サーボ弁に 10Hz 方形波状入力を加えたときの圧力と流量記録波形例を示す。図の上段と二段目は本手法の入力である上流の圧力値 $p_u(t)$ と管路長 L 離れた下流の流量値 $q_d(t)$ である。三段目はCCFM1から直接測定した上流の流量波形 $q_u(t)$ である。四段目から六段目までは、Fig. 3a,bに示した重み関数を用いて、式(7)のたたみこみ積和を浮動小数点演算で、サンプリング時間 $\Delta T = 0.2\text{ms}$ 、項数 $N = 1000$ 、 600 および $N = 500$ として、推定された上流の流量波形 $\hat{q}_u(t)$ である。図より、両方の流量波形 $\hat{q}_u(t)$ と $q_u(t)$ を比較してみると $N = 500$ の場合については、差異が目だが、 $N = 600$ の場合には測定した流量波形 $q_u(t)$ とよく一致している。

Fig. 6には、管路長 $L = 58\text{cm}$ の場合、 30Hz の方形波状入力を加えたときの、本流量計測手法により推定された上流の流量波形 $\hat{q}_u(t)$ とCCFM1から計測された流量波形 $q_u(t)$ の波形例を示したものである。

また本流量計測手法では、上流の流量 $q_u(t)$ と下流の圧力 $p_d(t)$ を用いて、逆に管路下流を通過する流量値 $q_d(t)$ を推定することも同様に行うことができる。その結果をFig. 7に示す。この場合も推定された流量波形 $\hat{q}_d(t)$ とCCFM2より直接測定された流量波形 $q_d(t)$ を比較してみると両方の波形が互によく合うことがわかる。

Fig. 5～Fig. 7より、たたみこみ積和を浮動小数点演算で行った場合には、提案した準遠隔瞬時流量計測手法が十分な精度と応答性を有することを確認することができた。演算の高速化のためには整数演算を導入することが必要となる。これについては次節で考察する。

4.3 流量計測システムの実時間化

式(7)のたたみこみ積和演算を実時間で実行するためには ΔT と N 、およびデータの離散値化値(bit)を定

Fig. 6 Typical recorded waveforms of the estimated and measured waveforms for rectangular wave input [30Hz, $L=58\text{cm}$]

める必要がある。

まず、たたみこみ積和を実行する時間 T_0 について考察する。たたみこみ積和を実時間で行うためには、ある有限時間の重み関数値しか用いることができない。すなわち、 T_0 をある有限時間に定める必要がある。また T_0 は演算時間の点からはできるだけ短いことが望ましいが、演算精度の点からは T_0 は長い方がよい。例えば、Fig. 3に示すように重み関数は時間経過とともに減衰し、管路長 $L=170\text{cm}$ の場合、時間が 0.12s を超えるとその値は無視できるほど小さくなることからわかる。ここでは、この時間間隔 0.12s をこの場合のたたみこみ時間 T_0 とした。Fig. 5中では、 $\Delta T=0.2\text{ms}$ 、 $N=600$ の場合がちょうど 0.12s に相当する T_0 を用いている。この図に示されている推定された流量波形と実験結果はよく一致していることから、この場合は $T_0=0.12\text{s}$ として十分であることがわかる。

この T_0 については、管路長 L 、動粘度 ν 、音速 c 、管半径 a などのシステムパラメータによって、最適値は多少異なる。ここでは、管路長と音速との比 $T_c=L/c$ および管半径の二乗と油の動粘度との比 $T_\nu=a^2/\nu$ を用いて、つぎのように整理した。いくつかのパラメータを変えて求めた重み関数の減衰の仕方をFig. 8a ($T_c=1.264\text{ms}$ の場合の $g_q(t)$ についてののみ示したが、 $g_p(t)$ についても同様である)のように片対数グラフにプロットして、実際にたたみこみ積和を実行する時間 T_0 との関係を求めた。Fig. 3の重み関数の場合 ($T_c=1.264\text{ms}$ 、 $T_\nu=1.225\text{s}$)、 $T_0=0.12\text{s}$ としたときの重み関数の振幅の対数減衰率 ($\log(g_q(t))$) を求めると $\log(g_q(t))=2$ となる。Fig. 8bの T_0 は、この値を基準として、Fig. 8aに示した重み関数の振幅の対数減衰率の

Fig. 7 Typical recorded waveforms of the estimated and measured waveforms for rectangular wave input [30Hz, $L=170\text{cm}$]

Fig. 8a Logarithmic decrement of envelope of weighting function with time elapsed.

Fig. 8b Calculation time interval T_0 of convolution versus T_ν

値が $\log(g_q(t))=2$ (図中の点線) となる時間ととっている。Fig. 8bの横軸は $T_\nu=a^2/\nu$ 、縦軸はたたみこみ積和を実行する時間間隔 T_0 をとって示した。図中の○は $T_c=1.264\text{ms}$ 、●は $T_c=0.431\text{ms}$ 、実線は最小二乗法により得た結果である。ここで $L=170\text{cm}$ の場合、 $T_0=0.12\text{s}$ とするとサンプリング周波数が 1.25kHz ($\Delta T=0.8\text{ms}$) では $N=150$ となる。

サンプリング周波数を変化させた場合の演算結果をFig. 9に示す。サンプリング時間 $\Delta T=0.2\text{ms}$ 、 0.4ms

Fig. 9 Comparisons of the estimated upstream flowrate waveforms for the changes of sampling time $\Delta T = 0.2\text{ms}$, $\Delta T = 0.4\text{ms}$, and $\Delta T = 0.8\text{ms}$.

および0.8msについて、重み関数については離散値化せずに計算した結果である。サンプリング時間が0.8msの場合の重み関数をFig. 10に示す。サンプリング周波数がここに示す程度の範囲内で、推定された流量波形 $\hat{q}_u(t)$ と実際に測定した流量波形 $q_u(t)$ を比較してみると大きな影響がないことがわかる。

実時間演算について、ここでは、 $\Delta T = 0.8\text{ms}$, $N = 150$, 重み関数データ ($g_p(t)$, $g_q(t)$) および入力データを8bitに離散値化した場合について主に検討を行う。入力データの離散値化についてはデータは12bitA/D変換器でとりこまれている。 $\Delta T = 0.8\text{ms}$ として ($N = 150$), 重み関数を16bit化, 8bit化した場合, またデータを8bit化した場合の上流の流量 $\hat{q}_u(t)$ の演算結果をFig. 11に示す。重み関数および入力データを8bitとした場合の結果は16bitの場合と比較して多少波形のノイズが目だが, 立ち上がりなどは十分にとらえられている。

実時間演算を考えると式(7)の右辺の第1項と第2項の積和算について $2N$ 回の乗算と加算が必要である。マイクロプロセッサを例えば80286(クロック20MHz)として, マシン語プログラムで演算処理を式(7)のまま行くと1点の流量 $\hat{q}_u(t)$ を求める演算時間が少なくとも2ms程度必要なため, このままでは $\Delta T = 0.8\text{ms}$ をこえてしまいサンプリング時間内に演算が終了しない。演算時間を ΔT 以下にするため, Fig. 12に示すように, ここでは8bit $\times$ 8bit=16bitの乗算結果をすべて格納しておき, 乗算を行うかわりにこのテーブルを参

Fig. 10a The weighting function $g_p(t)$ for sampling time $\Delta T = 0.8\text{ms}$

Fig. 10b The weighting function $g_q(t)$ for sampling time $\Delta T = 0.8\text{ms}$

Fig. 11 Influence of discetizations of the weighting functions on the estimated flowrate waveforms for sampling time $\Delta T = 0.8\text{ms}$.

照するだけで済む乗算マップを, $256 \times 256 = 65536$ の組み合わせについて, メモリ上にあらかじめ用意して行った。これにより積和算をデータ移動と加算のみで行うことが可能となり, 0.8ms以内(約0.5ms)で 2×150 項のたたみこみ積和算の結果を得られるようにすることができた。実時間演算の結果得られた流量波形の一例がFig. 11の下段に示すものである。多少ノイズが増え

Fig. 12 Table for high speed multiplication

て分解能が劣るが、応答性は損なわれておらず実用上は十分であると考えられる。

5. あとがき

本報では準遠隔瞬時流量計測手法について、円筒形絞り瞬時流量計との非定常流量測定実験を通して、その妥当性および応答性などについて検討を行った。その結果、瞬時流量値を測定したい位置に直接流量計を取り付けることなく、その圧力値と管路でつながっ

た他の離れた位置を通過する流量値を用いて、瞬時流量を推定する準遠隔瞬時流量計測手法が実用上十分な動的精度をもつことを確かめることができた。

またこの手法を組み込んだシステムの実時間計測について検討を行い、演算の高速化を達成して実時間計測を可能としている。

次報ではさらに本流量計測手法において、管路の動特性を表すパラメータの変化に対する推定された流量値に及ぼす影響について検討を行う予定である。

終わりに、本研究を進めるに当たり、実験に協力を得た当時本学学生磯野英夫君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 横田, 金, 中野: 油圧管路の動特性を利用した遠隔瞬時流量計測手法, 油圧と空気圧, 21—2, 187/193 (1990)
- 2) 横田, 井手, 中野: 円筒形絞りをを用いた瞬時流量計の高機能化, 機論 B 編, 53—489, 1548/1552 (1987)
- 3) A.F.D' Souza, R. Oldenburger: Dynamic Response of Fluid Line, Trans. ASME, ser. D, 86—3, 589/589 (1964)