

II-50

セルフチューニングコントローラーによる河口堰ゲートの最適制御について

九州大学工学部 ○正員 河村 明

九州大学工学部 正員 神野 健二

九州共立大学工学部 正員 上田 年比古

1. はじめに これまで水資源の確保のための河口堰ゲートは規定の操作ルールに基づいて確定的に運用されている。しかし、より効率的な運用を図り水資源の有効利用を行うには、実時間で得られる情報を基に確率過程下での放流量を時々刻々決定してゆく方法の方がより現実的で有効と考えられる。本報では、未知パラメータを含みかつランダム入力のある不確定システムの実時間最適制御を行う方法としてのセルフチューニングコントローラー¹⁾（以下STCと記す）を取り上げ、STCの河口堰制御問題への適用を試みている。すなわちまず河口堰ゲート操作に対するSTCの定式化を行い、次いで、本手法を模擬発生データに適用して、STCの河口堰操作への有効性・特性について検討している。

2. 河口堰ゲート制御に対するSTCの定式化 図-1に示すような河口堰を含む河川システムを考え、本システムが次式で表されるとする。

$$y(k+1) = h_0 y(k) + b_0' Q(k) + c_0 I(k) + d_0 L(k) + v(k+1) \cdots (1)$$

ここに、 k : 時点 y : 被制御変数となる貯水池水位(m)

Q : 制御変数となるゲート総放流量(m^3/s) I : 流入量(m^3/s)

L : 取水量(m^3/s) v : 平均値0、分散 σ^2 の正規性白色雑音

h_0, b_0', c_0, d_0 : システムパラメーター

STCでは制御の目標となるコスト関数 $J(k)$ を次式で定義する。

$$J(k) \triangleq E\{[y(k+1) - y^*(k+1)]^2 + \lambda' [Q(k) - Q(k-1)]^2\} \cdots (2)$$

ここに、 $\triangleq$: 定義 $E(\cdot)$: 期待値演算 y^* : 目標水位 λ' : 操作変化量の重み定数。ここで、式(2)を最小にするような最適放流量 $Q(k)$ を以下のようにして求める。まず、 k 時点までの情報が得られたときの $y(k+1)$ の最適推定値 $\hat{y}(k+1|k)$ は

$$\hat{y}(k+1|k) = h_0 y(k) + b_0' Q(k) + c_0 I(k) + d_0 L(k) \cdots (3) \text{ で求められるので、式(1)より}$$

$$y(k+1) = \hat{y}(k+1|k) + v(k+1) \cdots (4) \text{ 式(3)を式(4)に代入し} Q(k) \text{ で偏微分して} 0 \text{ とおくと次式を得る。}$$

$$[\hat{y}(k+1|k) - y^*(k+1)] + \lambda [Q(k) - Q(k-1)] = 0 \quad (\text{ただし、} \lambda = \lambda' / b_0') \cdots (5)$$

$$\text{式(5)の左辺を} \Phi(k+1|k) \text{ で定義すると、} \Phi(k+1|k) \triangleq [\hat{y}(k+1|k) - y^*(k+1)] + \lambda [Q(k) - Q(k-1)] \cdots (6)$$

よって、式(3)を式(6)に代入し $\Phi(k+1|k) = 0$ として最適放流量 $Q(k)$ を求めると次式となる。

$$Q(k) = -[h_0 y(k) - \lambda Q(k-1) + c_0 I(k) + d_0 L(k) - y^*(k+1)] / (b_0' + \lambda) \cdots (7)$$

さて、式(7)の最適放流量 $Q(k)$ には式(1)の未知パラメーター h_0, b_0', c_0, d_0 が含まれるため、これらを同定しなければならない。そこでパラメーター同定にカルマンフィルタ理論を適用する。カルマンフィルタのシステム方程式、観測方程式はそれぞれ式(8)、式(9)で表わされる²⁾。

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + u(k) \cdots (8) \quad z(k) = M(k)x(k) + \beta(k) + w(k) \cdots (9)$$

ここに、 x : システムの状態量ベクトル Φ : 既知の状態遷移行列 u : システム雑音ベクトル

z : 観測量ベクトル M : 既知の観測行列 β : 既知の定数ベクトル w : 観測雑音ベクトル

以下に、未知パラメーター同定のため、カルマンフィルタの状態方程式(8)、観測方程式(9)を定式化する。まず、総合出力関数 $\Psi(k+1)$ を式(10)で定義し、これに式(1)を代入すると式(11)が得られる。

$$\Psi(k+1) \triangleq [y(k+1) - y^*(k+1)] + \lambda [Q(k) - Q(k-1)] \cdots (10)$$

$$= h_0 y(k) + b_0 Q(k) + b_1 Q(k-1) + c_0 I(k) + d_0 L(k) - y^*(k+1) + v(k+1) \quad (\text{ただし、} b_0 = b_0' + \lambda, b_1 = -\lambda) \cdots (11)$$

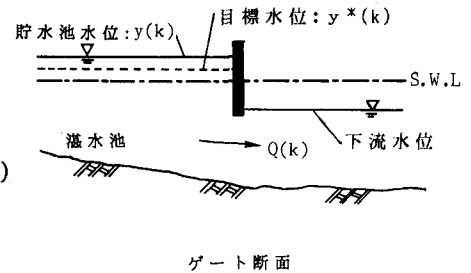


図-1 河口堰を含む河川システム

ここで式(8)のシステム状態 x として式(11)のパラメーターをとる。すなわち、 $x(k)=[h_0, b_0, b_1, c_0, d_0]^T$ (T :転置記号)とすると、式(8)の $\Phi(k)=E$ (E :単位行列)となる。また、式(9)の $z(k)$ として式(10)の $\Psi(k)$ をとると、式(9)の $M(k)=[y(k-1), Q(k-1), Q(k-2), I(k-1), L(k-1)]$, $\beta(k)=-y^*(k)$, $w(k)=v(k)$ に対応することがわかる。よって後はカルマンフィルターのアルゴリズムに従い各時点毎に状態量 x の最適推定値が求まり、その結果式(7)より最適放流量 $Q(k)$ が求まる。

3. 適用例とその考察 以上述べたSTCを以下の模擬発生データに適用し検討してみよう。まず、時間刻みを10分として流入量 I 、取水量 L 、目標水位 y^* を図-2(a), (b)に示すように288時点(=2日)ほど模擬発生させる。次に式(1)におけるシステムパラメーター $h_0=1.0$, $b_0'=-0.02$, $c_0=0.01$, $d_0=-0.015$ 、式(2)の $\lambda'=0.001$ と設定すると、式(5)の $\lambda=-0.05$ 、式(11)の $b_0=-0.07$, $b_1=0.05$ となる。以上のパラメーターを真値としてSTCによりパラメーターを逐次推定し最適放流量を求めていく。図-2(a)にSTCによる最適放流量 Q を、またこの Q に対応する水位 y を図-2(b)に示している。図-2(c)には Ψ , $\hat{\Psi}$ の変化を示している。また図-3にはパラメーターの同定結果を示している。

まず、図-3より各パラメーターとも40時点程度で収束し、精度よく真値が同定されている。この結果、図-2の Q 、 y 、 Ψ も当初変動が大きいものの40時点以降は安定している。また図-2(b)の y については目標水位 y^* にある程度外れて追隨しているが、これは式(2)の目標関数 J が目標水位からの差と同時に放流量の変化の両者を考慮して Q を制御するためである。これらの結果はパラメーターが既知である理想的な場合と比べてほとんど同じ結果となっていた。これらよりパラメーターの同定値が収束した後はSTCにより期待通り Q が制御されているといえる。次に上記以外に $\lambda'=0$ の場合にSTCを適用した結果、 Q はかなり小刻みに変動し、貯水池水位 y は目標水位 y^* に非常に良く追隨していた。これらは $\lambda'=0$ のため、評価関数に Q の変化量が考慮されないためと考えられる。さらに、目標水位を一定にとった場合でもパラメーターの同定結果、 Q および目標水位からの差などの結果にはほとんど影響ないことがわかった。

4. むすび 本報では、STCを河口堰ゲートの最適制御問題に適用するための定式化を行い、次いで模擬発生データを用いて数値シミュレーションを行った。その結果STCによる河口堰ゲート操作への有効性が確かめられまたその特性が明らかにされた。

参考文献 1) Clarke, D.W. and Gawthrop, P.J.: Self-tuning controller, Proc. of IEE., vol.122, No.9, pp.929-934, September, 1975. 2) 上田年比古・河村 明・神野健二: 適応的カルマンフィルターによる異常値検出について, 土木学会論文集, 第345号/II-1, pp.111~121, 1984年5月。

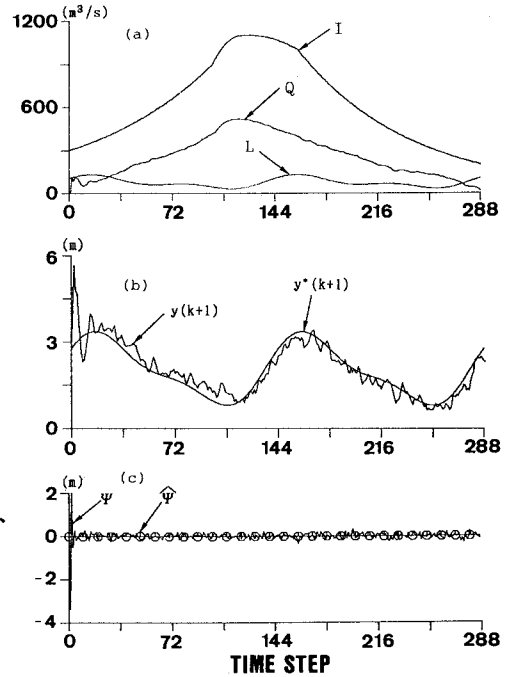


図-2 STCによる結果

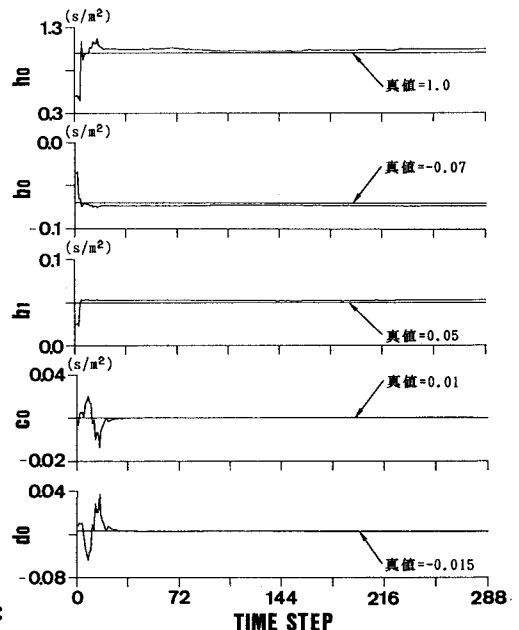


図-3 パラメーターの同定結果