

# コック開閉時間予測に基づく消防車用パワーアシストコックの操作性向上

○モリタ 山野 光一, モリタ 小山 秀人, モリタ 関 修治, モリタ 坂本 直久  
北海道大学 中野 基輝, 北海道大学 田中 孝之, 北海道大学 金子 俊一

## 要 旨

本研究では消防用ポンプ車に搭載された放水用コックを電磁モーターでパワーアシストすることを目的としている。初期操作トルクからコックの開時間を予測し開時間に合ったインピーダンスパラメータを SIM 法に基づいて設定する。この手法に摩擦補償を加えたことによって大幅な省力化出来たとともに、操作者がコックにレバーに力を与えてから実際に動き始めるまでの時間差が 0.2 秒から 0.03 秒へと短縮する事ができた。

## 1. 序論

本研究では消防士の負担軽減、省力化に貢献すべくパワーアシストコックを開発している。文献 [1] によると日本では年々消防士の数が減少傾向にある。消火活動の省力化が求められるが放水用コックは消防法によって人の配置が義務付けられているため全自動化が出来ない。よってパワーアシスト可能なコックを開発し、インピーダンス制御により人が意図した操作しやすいアシストを実現する事を目的とする。ここで、実験によりコックの開時間と人が操作しやすいインピーダンスパラメータとの関係を確認する。さらに、コックレバーへの操作力の初期値からコックの開時間を予測し、それに応じたインピーダンスパラメータを設定する方法を確立する。

また、コックを開ける際には人間が力を加えてからコックが開き始めるまでに平均して 0.2 秒のタイムラグがあるため、これを短縮することを目的とする。それには静止摩擦補償制御と文献 [2] による SIM 法を併せた制御を行い、放水用コック独特の摩擦特性を補償する必要がある。

以上の内容を実験的に検証する。

## 2. パワーアシストコック

### 2.1 インピーダンス制御に基づくパワーアシスト制御

本研究ではコックの開閉をモーターでパワーアシストするというものであり、人間が操作する際にレバーに加えられる力とコックの回転角度の 2 つを用いて制御系を構成する。装置は消防ポンプ車に搭載されている放水用コックを特製の台に固定することにより開閉実験を行えるようにした。モーターはレバーを介してコックにつながっている (図 1)。また、被験者は 20 代の男性 1 名である。コックは地面に対して

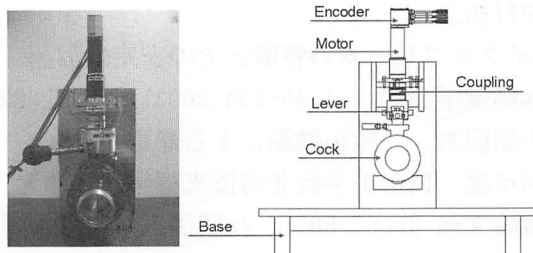


Fig. 1: Power Assist Cock

垂直な回転軸を持つ 1 リンクマニピュレータとみなし、(1) 式によってインピーダンス制御を用いる。

$$\ddot{\theta}_d + 2\omega_n\zeta\dot{\theta}_d + \omega_n^2\theta_d = \alpha\tau_h \quad (1)$$

(1) 式において  $\alpha$  は増力比 ( $\alpha=1$ )、 $\omega_n$  は固有角周波数、 $\zeta$  は減衰比である。

### 2.2 インピーダンスパラメータ、コック開時間および操作性の関係

この研究では操作者の意図通りに操作できるコックを目指しており、それを評価するために操作トルク平均と追従誤差平均の 2 つを用いる。(2) 式で総合評価  $J$  を定める。

$$J = \frac{1}{2}(\hat{\tau} + \hat{\theta}) \quad (2)$$

ここで、 $\hat{\tau}$ 、 $\hat{\theta}$  はそれぞれ (3) 式と (4) 式で表される操作トルク平均と視覚追従誤差平均であり、補助の無い状態での各評価  $\tau_{no}$ 、 $\theta_{no}$  との比率で表現したものである。

$$\hat{\tau} = \frac{1}{\tau_{no}n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \tau_{hi}^2} \quad (3)$$

$$\hat{\theta} = \frac{4}{\pi n \theta_{no}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{di} - \theta_i)^2} \quad (4)$$

(4) 式の  $\theta_{di}$  とは指令開時間  $T_C$  を半周期の正弦波で与えた指令角度である。以上の評価式を用いて  $T_C=500 \sim 1500$  msec において表 1 の条件の組み合わせで実験を行い、 $J$  が最も小さくなる組み合わせを調べた。それによりコックの開時間  $T$  とインピーダンスパラメータの間に式 (5) および式 (6) の関係がわかった。

Table 1: Combination of impedance parameters

$T_C$	$\omega_n$	$\zeta$
500	3.5, 4.0, 4.5	0.1, 0.2, 0.3
750	2.5, 3.0, 3.5	0.1, 0.2, 0.3
1000	1.5, 2.0, 2.5	0.1, 0.2, 0.3
1250	0.5, 1.0, 1.5	0.1, 0.2, 0.3
1500	0.5, 1.0, 1.5	0.1, 0.2, 0.3

$$\omega_n = -2.736 \ln T + 21.081 \quad (5)$$

$$\zeta = 0.069e^{0.0005T} \quad (6)$$

## 3. コック開閉時間予測と静止摩擦補償

### 3.1 コック開時間予測に基づく SIM 法

先に求めたコックの開時間毎の最適インピーダンスパラメータを予測するために初期操作トルクを設定する。初期

操作トルクとは、操作者が 0.2Nm 以上のトルクをコックに与えてから 0.1 秒間の操作トルクである。操作トルクが 0.2Nm を超えてから 0.1 秒間のトルク値のデータ (100 個) を収集し、式 (7) の最小二乗法で求められた値を  $a$  とおく。

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i \tau_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n \tau_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (7)$$

式 (7) における  $n$  は操作トルク値データ個数 ( $n = 100$ ),  $t_i$  は時間,  $\tau_i$  は操作トルクである。この  $a$  をトルク勾配と名づけ、コックの開時間  $T$  との関係調べたところ、図 2 のようになった。この関係を対数曲線で近似し、式 (8) を

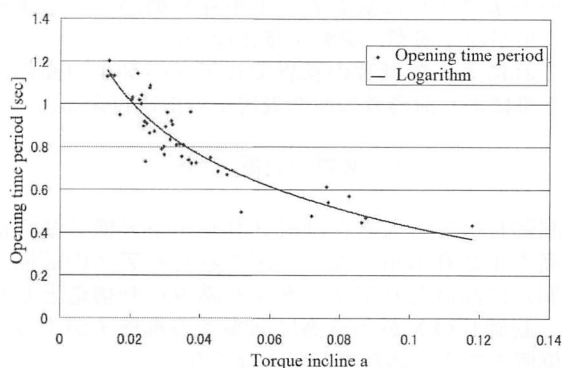


Fig. 2: Relation of Cock's opening time period and torque incline

得た。

$$T = -0.36 \ln(a) - 0.41 \quad (8)$$

以上 (5),(6),(7),(8) 式によってコックレバーへの操作力の初期値からコックの開時間を予測し、それに応じたインピーダンスパラメータを設定する方法を確立した。この方法を開時間指令値で各 10 回ずつ実験した結果が表 2 である。

Table 2: Estimating of SIM based on predicting opening time period

$T_C$	$PE_{SIM}$	$T_{lag1}$	$T_{lag2}$	$J_{z500}$	$J_{SIM}$
500	48	170	43	0.26	0.57
750	82	186	45	1.78	0.53
1000	69	169	42	0.91	0.54
1250	48	224	44	1.37	0.56
1500	155	291	42	1.12	0.55
平均	80	209	43	1.09	0.55

$PE_{SIM}$  は予測時間誤差であり、その平均は 80msec であった。 $J_{z500}$  は、開時間を予測せずに  $T_C=500$ msec の条件でインピーダンスパラメータを固定したときの評価である。 $J_{z500}$  と  $J_{SIM}$  の平均値を比較すると評価値がほぼ半分まで向上している。さらに、パワーアシスト無しのコックに操作トルクを与えてからコックが開き始めるまでのタイムラグ  $T_{lag1}$  が平均して 209msec あったのに対し、コックの開時間予測に基づく SIM 法でパワーアシストしたコックのタイムラグ  $T_{lag2}$  は 43msec にまで短縮されている。また、開時間の長さによらずほぼ一定の評価が得られている。これによってコックの開時間予測に基づく SIM 法の有効性が確認できた。

### 3.2 静止摩擦補償制御と SIM 法の合成

コックの開時間予測に基づいた SIM 法によって  $T_{lag1}$  が短縮されたが、コックの固体摩擦を補償することでさらに  $T_{lag1}$  を短縮することを目指す。操作トルクの初期入力値をコックの回転角度が 0rad から 0.01rad までのものとし、この区間で摩擦補償を施した。摩擦補償にはコックの慣性力や粘性力を取り除いた固体摩擦を、角度と摩擦の関係をマップにしたものを使用した。この方法を開時間指令値  $T_C = \{500, 750, 1000, 1250, 1500\}$  msec で各 10 回ずつ実験した結果が表 3, グラフ 3 である。

Table 3: Estimating of SIM and Predicting Opening Time Period and Friction Control

$T_C$	$PE_{FC}$	$T_{lag1}$	$T_{lag3}$	$J_{z500}$	$J_{FC}$
500	54	170	34	0.26	0.54
750	50	186	31	1.77	0.53
1000	47	169	31	0.91	0.53
1250	96	224	29	1.37	0.53
1500	155	291	29	1.12	0.53
平均	81	210	31	1.09	0.53

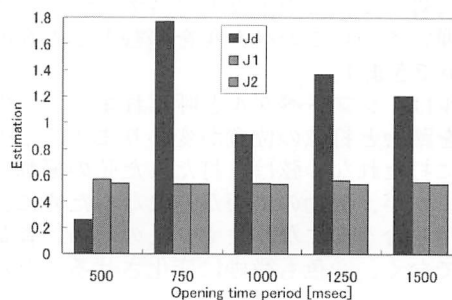


Fig. 3: Estimating of SIM based on predicting opening time period

摩擦補償と SIM 法を合成して制御した場合のタイムラグ  $T_{lag3}$  と  $T_{lag2}$  を比べると 12msec 短縮されていることが確認できた。評価  $J_{FC}$  および予測誤差  $PE_{FC}$  に関しては表 2 と表 3 より、ほとんど変化していないことがわかる。

### 4. 結論

この研究の結論は以下の 3 つである。

- (1) パワーアシストコックを開発した。
- (2) コックレバーへの操作力の初期値からコックの開時間を予測し、それに応じたインピーダンスパラメータを設定する方法を確立した。
- (3) 予測した開閉時間に基づく SIM 法および静止摩擦補償制御によってタイムラグを 209msec から 31msec へと 85% 短縮できた。

### 文献

- [1] 総務省消防庁：“消防団員確保の更なる推進” (2007).
- [2] S.Morishita, et al: "Improvement of Maneuverability of the Man-Machine System for Wearable Nursing Robots", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.11, No.6, 461-467 (1999).
- [3] 藤田政之, 平田研二: "スイッチング制御", 計測と制御, Vol.38 No.3, 176-181 (1999).