

単純適応制御系設計におけるスケーリングの導入と拮抗型空圧人工筋駆動機構の位置決め制御への応用*

札幌 勇大[†]・蛭原 義雄[†]・萩原 朋道[†]・岡崎 安直[‡]・小松 真弓[‡]

Simple Adaptive Control Synthesis Enhanced by Scaling and Its Application to Positioning Control of Antagonist-Type Pneumatic Actuation Mechanism*

Yudai FUDABA[†], Yoshio EBIHARA[†], Tomomichi HAGIWARA[†],
Yasunao OKAZAKI[‡] and Mayumi KOMATSU[‡]

In this paper, we aim at achieving accurate positioning control of a pneumatic actuation mechanism of antagonist-type by means of the simple adaptive control (SAC) method. Since this plant does not satisfy the ASPR-ness condition, we introduce a parallel feedforward compensator (PFC) so that the SAC strategy can be applied. However, the introduction of PFC leads to performance deterioration and in particular causes a steady state error. To suppress the steady-state error while keeping the fundamental structure of the SAC system, we introduce a “constant scaling” to the SAC system. We also consider a “dynamic scaling” so that the transient response of the controlled system can be improved. Through experiments, we show that the SAC strategy with these scalings is indeed effective in achieving accurate positioning control.

1. はじめに

近年、医療、介護、福祉の現場における労働負担を軽減するための、ロボットの開発が注目を集めている。とくに空気圧を駆動源とするロボットには、油圧や電動モータを駆動源とするロボットにはない軽量、柔軟、清潔という特長があるため、上記のような人とロボットが密接に関わり合う環境下において積極的な導入が試みられている。しかしながら、空気の圧縮性に起因する剛性の低さにより、空気圧系に対するフィードバック制御系の設計は一般に容易ではない[1–3]。以上の背景のもと、本論文では、空気圧を駆動源とする拮抗型空圧人工筋駆動機構とよばれる実験装置を制御対象とし、この制御対象に対して単純適応制御 (Simple Adaptive Control; 以下 SAC と略記)[4–6] を適用して、高精度の位置決め制御を達成することを目的とする。

SAC 系の特長は、制御器構造が従来の適応制御方式に比べて非常に簡単化されるにもかかわらず、制御性能およびロバスト安定性に優れていることである。その反面、SAC 系が構成可能となるためには制御対象がいくつかの前提条件を満足する必要がある、その一つが概強正実 (Almost Strictly Positive Real; 以下 ASPR と略記) 条件 [4–7] である。ASPR 条件とは、ある定数ゲイン出力フィードバックを制御対象に施して得られる閉ループ系が強正実となるという条件である。しかし、実際の制御対象はこの ASPR 条件を満たさない場合が多く、本論文で制御対象とする拮抗型空圧人工筋駆動機構もこの条件を満たさない。そこで、ASPR 条件を満たさない制御対象に対して SAC 系を構成するために、並列フィードフォワード補償要素 (Parallel Feedforward Compensator; 以下 PFC と略記) を導入する方法が古くから提案されている [4–6, 8, 9]。制御対象に PFC を付加した拡張系が ASPR 条件を満たすように PFC を設計することで、この拡張系に対して SAC 系を構成することが可能となる。しかしながら、PFC を導入すると規範モデルの出力への厳密な追従は達成されず、また制御対象が非積分性のものである場合には定常偏差が生じるという問題がある [10]。

そこで、本論文ではこの問題を回避するための一手法として、SAC 系にスケーリングを施すという手法を提案する。制御対象および PFC の定常ゲインに基づいた定

* 原稿受付 2009 年 1 月 28 日

[†] 京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University; Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyō-ku, Kyoto 615-8510, JAPAN

[‡] パナソニック (株) Panasonic Corporation; 3-4 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0237, JAPAN

Key Words: simple adaptive control, a pneumatic actuation mechanism of antagonist-type, positioning control, scaling.

数のスケーリングを施すことで，SAC系の基本的な構成を維持しつつ，非常に簡明な手順で定常偏差を0とすることが可能となる．また，過渡応答においても良好な追従特性が得られるよう，定数のスケーリングだけでなく，制御対象およびPFCの周波数応答に基づいた動的なスケーリングを導入することを提案する．最後に，これらのスケーリングを用いた制御系設計手法の有効性を，実機での実験を通して明らかにする．

なお，文献[9]では，規範モデルにPFCの情報を付加した拡張型規範モデルを構成することで，PFCの影響を抑制できることが示されている．また文献[6]では，文献[9]の結果が，基本的なSAC系のブロック線図に対する等価変換により簡単に実現できることが述べられている．これらは，PFCの導入に起因する問題を回避するための非常に有効な手法である．本論文で提案する手法は，これらとは本質的に異なるスケーリング要素の導入に基づくものであり，最終的な制御系 (Fig. 2のブロック線図を参照) も文献[6,9]のものとは異なるものとなっている．また，本論文で提案するスケーリングの導入に基づく手法は，基本的な考え方が極めて簡明であるという利点を有しており，したがって，とくに定数のスケーリング要素に関しては，実際の応答をみながら容易に調整可能なものとなっている．

2. SAC系とスケーリングの導入

2.1 SAC系の基本構成

本項では，SAC系の設計法の概要を文献[4-6]に則して述べる．次式で表される，可制御かつ可観測な1入出力 n 次の制御対象を考える．

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + bu(t) \\ y(t) &= cx(t)\end{aligned}\quad (1)$$

ただし，この制御対象はASPR条件[4-7]を満足するものとする．この制御対象に対して，次式で表される1入出力 n_m 次の規範モデルを考える．

$$\begin{aligned}\dot{x}_m(t) &= A_m x_m(t) + b_m u_m(t) \\ y_m(t) &= c_m x_m(t)\end{aligned}\quad (2)$$

SAC系は，制御対象の係数行列 A, b, c が未知であっても，ASPR条件のもとで制御対象の出力 $y(t)$ が規範モデルの出力 $y_m(t)$ に追従するような制御入力 $u(t)$ の構成を可能とするものである．実際の制御入力の構成法は，次式となる．

$$\begin{aligned}u(t) &= k(t)^T z(t) \\ z(t) &= [e_y(t), x_m(t)^T, u_m(t)]^T \\ k(t) &= [k_e(t), k_x(t)^T, k_u(t)]^T \\ e_y(t) &= y(t) - y_m(t)\end{aligned}\quad (3)$$

ただし， $k(t)$ は以下のように適応的に変化させる．

$$\begin{aligned}k(t) &= k_p(t) + k_I(t) \\ k_p(t) &= -\Gamma_p z(t) e_y(t) \\ \dot{k}_I(t) &= -\Gamma_I z(t) e_y(t) - \sigma k_I(t) \\ k_I(0) &= 0, \quad \sigma > 0 \\ \Gamma_p &= \text{diag}(\Gamma_{pe}, \Gamma_{px}, \Gamma_{pu}) > 0 \\ \Gamma_I &= \text{diag}(\Gamma_{Ie}, \Gamma_{Ix}, \Gamma_{Iu}) > 0\end{aligned}\quad (4)$$

ここで， $\Gamma_{pe}, \Gamma_{px}, \Gamma_{pu}, \Gamma_{Ie}, \Gamma_{Ix}, \Gamma_{Iu}$ は調整パラメータである．なお上式は，実機への適用時に外乱などの影響によりゲインが発散することを防止するための， σ -修正項[4]を付加したものとなっている．

2.2 PFCの導入とその問題点

上記のように，SAC系を構成するうえでは制御対象がASPR条件を満たす必要があるが，実際の制御対象はこのASPR条件を満たさない場合が多い．この問題に対処するために，制御対象にPFCを付加するという手法が提案されている[4-6,8,9]．これは制御対象 $G(s)$ に補償要素 $F(s)$ (すなわち，PFC)を並列に付加した拡張系 $G_a(s) := G(s) + F(s)$ を考え， $G_a(s)$ がASPR条件を満たすように $F(s)$ を設計し， $G_a(s)$ に対してSACを適用するものである．PFCを導入した場合のSAC系の構成をFig. 1に示す．

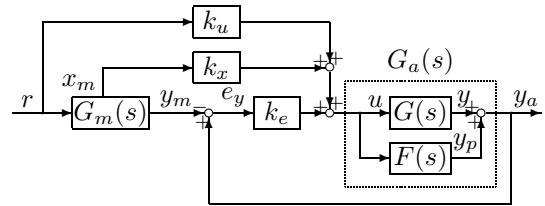


Fig. 1 SAC system with PFC

拡張系 G_a の出力 $y_a(t) (= y(t) + y_p(t))$ が規範モデルの出力 $y_m(t)$ に追従することから，補償要素 F の出力 $y_p(t)$ が制御対象 G の出力 $y(t)$ に比べて相対的に小さい場合には，良好な目標値追従が期待できる．しかしながら，PFCの出力 $y_p(t)$ は非零であることから厳密な目標値追従は達成されず，また制御対象 G が非積分性のものである場合には定常偏差が生じるという問題がある．この制御性能の劣化は，PFCを導入してSAC系を構成する際に生じる本質的な問題であるといえる．

2.3 スケーリングの導入

前項で述べた問題に対処するために，本論文ではSAC系にスケーリングを施すという手法を提案する．これはFig. 1に示すSAC系に対して，パイプロパーかつ安定で最小位相なスケーリング $W(s)$ をFig. 2に示すように施すものである．

制御対象が1入出力系であることから，Fig. 2における u から y_a までの(開ループ)伝達関数は $(W(s) \text{ と } W(s)^{-1} \text{ とがキャンセルされて}) G_a(s)$ となる．これより， $W(s)$ を導入しても安定性などといったSAC系の基本的な特性が影響を受けることはない．また，Fig. 2の $y_a(t)$ ，

Table 1 Technical data of rubber muscle

メーカー	FESTO
品番	MAS-10-N500-AA-MCFK
全長	500mm
マッスル径	$\phi 10\text{mm}$
収縮率	-3% ~ 20%
最高運転圧力	0.8MPa
最大張力	400N

Table 2 Technical data of servo valve

メーカー	FESTO
品番	MPYE5-M5-010-B
入力空気圧	0 ~ 0.6MPa
限界周波数	125Hz

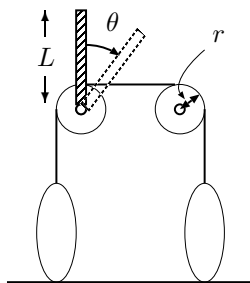


Fig. 4 Arm load

$$(\text{制御量}) = 8000 \times \frac{(\text{角度})}{360} \quad (8)$$

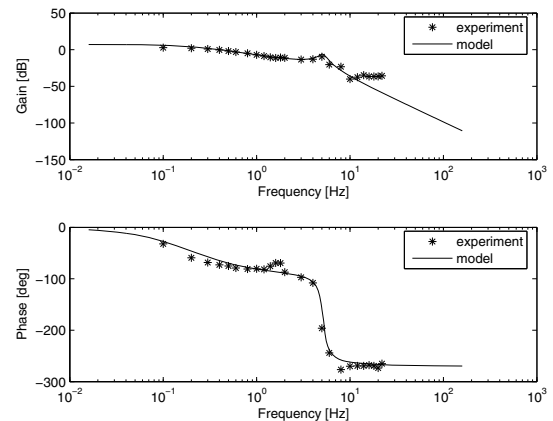
すなわち，制御量 1 カウントは 0.045 度に相当する．この制御量は制御用計算機に取り込まれ，制御用計算機では制御量と目標値に基づき，操作量 (0 ~ 4095 カウントのデジタル信号) を算出する．この操作量は，D/A 変換器により 0 ~ 10 V の電圧に変換され，空気圧サーボバルブの入力電圧となる．操作量 1 カウントは約 0.0024 V に相当することになる．

つぎに，入出力信号を上記のデジタル信号 (単位はカウント) とした制御対象部分の伝達関数を，周波数応答同定法 [11] により導出する．制御対象に入力する正弦波の周波数範囲は 0.1Hz から 20Hz までとし，対数軸上でほぼ等間隔となるようないくつかの周波数を選択して同定実験を行った．また，入力する正弦波の振幅は 600 カウント (約 1.5V) とした．得られた入出力データからそれぞれの周波数におけるゲインおよび位相を算出した．

実験結果に対して最小二乗法を施すことで得られた，制御対象の伝達関数 $G(s)$ を以下に示す．

$$G(s) = \frac{2916.7}{s^3 + 6.9s^2 + 1056.6s + 1291.9} \quad (9)$$

また， $G(s)$ のボード線図を，実験により得られた周波数応答と合わせて Fig. 5 に示す．


 Fig. 5 Bode diagram of $G(s)$

4. 位置決め制御実験

本節では，拮抗型空圧人工筋駆動機構に対して SAC 系を構成し，位置決め制御実験を行った結果を示す．とくに，Figs. 1, 2 に示す二つの制御系を構成してステップ応答実験およびランプ応答実験を行うことにより，提案手法 (すなわち，Fig. 2 の制御系) の有効性を示す．

2.1 項の (4) 式に記したように，SAC 系を構成するうえでは調整パラメータ Γ_{pe} , Γ_{px} , Γ_{pu} , Γ_{Ie} , Γ_{Ix} , Γ_{Iu} を適切に定め，フィードバックゲイン k_e ，フィードフォワードゲイン k_x , k_u を適応的に変化させる必要がある．しかしながら，予備的に行った実機実験において k_e を適応的に変化させると，制御系が不安定になるという状況が顕著に見られた．そこで以下で記す，すべての実機実験においては， k_e はある適当な定数 $k_{e0} (< 0)$ とし， k_x , k_u のみを (4) 式にしたがい適応的に変化させるものとした．この実現のため，以下では (3), (4) 式において $\Gamma_{pe} = \Gamma_{Ie} = 0$ とし，かつ $k(t)$ の初期値を k_{e0} としたうえで， Γ_{px} , Γ_{pu} , Γ_{Ix} , Γ_{Iu} を調整パラメータとした．

一方，PFC の設計に関しては，(9) 式で示すように制御対象の伝達関数 $G(s)$ の相対次数が 3 であることから，文献 [4, 12] にない次の二次系で定めるものとした．

$$F(s) = \frac{k_1}{(1+T_1s)(1+T_2s)} + \frac{k_2}{1+T_2s} \quad (10)$$

さらに，調整すべきパラメータの数を減らすため，上式中の k_1 , k_2 , T_1 , T_2 を

$$k_1 = 0.01K_p, \quad k_2 = 0.001K_p, \quad T_1 = T_2 = T_p \quad (11)$$

とし， K_p , T_p を調整パラメータとした．

4.1 ステップ応答実験

本項では，ステップ応答実験を行った結果を示す．目標値は周期 2 秒，振幅 400 カウント (18 度に相当) の矩形波とした．規範モデルは，次式で示すものを用いた．

$$G_m(s) = \frac{1}{(1+Ts)^3}, \quad T = 0.08 \quad (12)$$

また, SAC系および PFC を定める各パラメータの値は, 試行錯誤の結果, Table 3 に示すものを用いた.

Table 3 Values of parameters

K_p	T_p	k_{e0}	Γ_{px}	Γ_{Ix}	Γ_{pu}	Γ_{Iu}	σ
33	0.043	-80	0.0002	0.02	0.0002	0.02	1900

まず, スケーリングを導入しない SAC 系 (ブロック線図は Fig. 1) の実験結果を Fig. 6 に示す. ただし, 実線は実験結果, 破線はシミュレーション結果, 一点鎖線は規範モデルの応答結果を示す. 2.2 項で述べたように, PFC の導入により偏差が生じていることが確認できる.

つぎに, スケーリングを導入した SAC 系 (ブロック線図は Fig. 2) における実験結果を示す. まず, スケーリングを定数とした場合の有効性を検証する. (9) 式より定まる $G(0)$ の値と, Table 3 および (10), (11) 式から定まる $F(0)$ の値に基づき, (5) 式にしたがって $W = 1.19$ とし, 実験を行った. 実験結果を Fig. 7 に示す. Fig. 7 より, スケーリングを導入することで偏差を大幅に低減できていることが確認できる.

つぎに, 動的なスケーリングを用いた場合の有効性を示す. まず, スケーリング $W(s)$ の具体的な選定について述べる. (7) 式において $G(s)$ および $F(s)$ の相対次数

はそれぞれ 3, 1 であるので, $W(s)$ はプロパーとはならない. そこで, 低周波帯域で (7) 式の $W(s)$ と周波数特性がよく一致するような, バイプロパーかつ安定で最小位相な $W'(s)$ を最小二乗法により算出した. 具体的には, $W(s)$ の周波数応答を 0.1Hz から 20Hz までの適当な周波数で計算し, 0.1Hz から 2Hz の範囲でこの周波数応答によく合致するようなバイプロパーかつ安定で最小位相な伝達関数を最小二乗法により求め, これを $W'(s)$ とした. 得られた結果を Fig. 8 に示す. ただし, 実線が最小二乗法により求めた $W'(s)$ の, 破線が (7) 式の $W(s)$ の周波数応答である. 以上の手順で求めた $W'(s)$ の伝達関数は, 次式となった.

$$W'(s) = \frac{2.5938s^2 + 16.3927s + 18.1552}{s^2 + 12.6317s + 15.6405} \quad (13)$$

この $W'(s)$ を用いて, 先と同様のステップ応答実験を行った結果を Fig. 9 に示す. Fig. 9 より, 動的なスケーリングを用いることで偏差を大幅に低減でき, スケーリングを定数とした場合と比較しても, 規範モデルにより精度よく追従した応答が得られていることが確認できる.

以上, スケーリングを導入することによって良好な応答が得られたが, Fig. 7, Fig. 9 から明らかなように, 実機実験において定常偏差を完全には抑圧できていない.

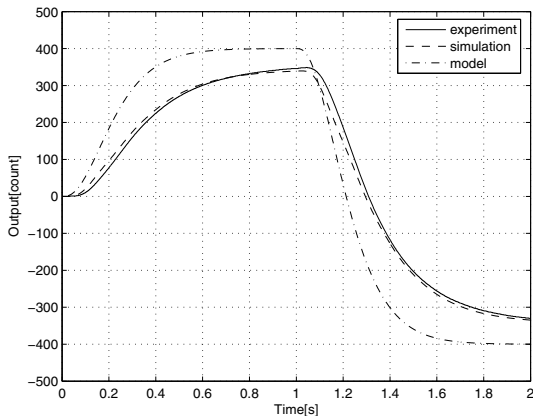


Fig. 6 Step response of SAC system without scaling

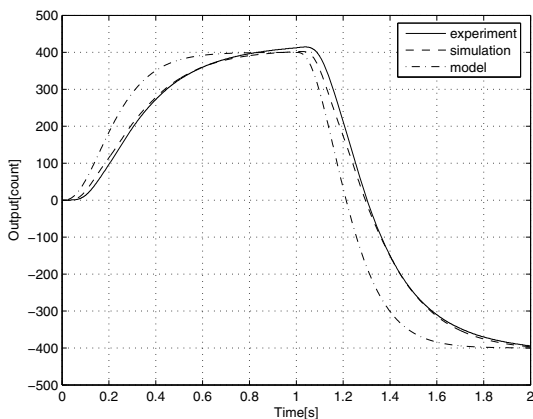


Fig. 7 Step response of SAC system with a constant scaling

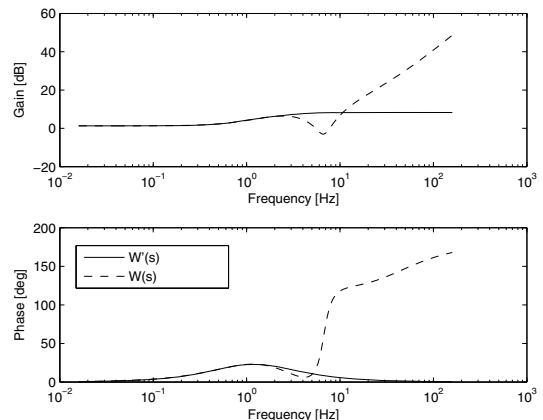


Fig. 8 Bode diagram of $W'(s)$

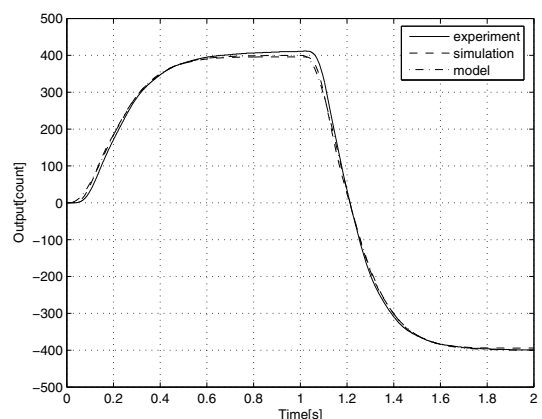


Fig. 9 Step response of SAC system with a dynamic scaling

これは、制御対象のモデル化誤差に起因するものと考えられる。提案するスケーリングの設計手法はモデル化誤差の影響の抑制を積極的に考慮したものとはなっていないため、よりよい応答を得るためには制御対象の低周波帯域での動特性をより精度よく同定することが必要である。

4.2 ランプ応答実験

本項では、ランプ応答実験を行った結果を示す。目標値は、振幅 600 カウント (27 度)、周期 3 秒の三角波とした。この三角波の傾きは、800 カウント/秒 (36 度/秒) に相当する。PFC は (10), (11) 式で表されるものを用い、SAC 系および PFC を定める各パラメータの値は、再び Table 3 に示すものを用いた。一方、規範モデルは次式で表されるものを用いた。

$$G_m(s) = \frac{1+3Ts}{(1+Ts)^3}, \quad T=0.03 \quad (14)$$

この規範モデルは、ランプ状の入力信号に対して定常偏差なく追従するものとなっている。なお、実験時間は 3 秒間とした。

まず、スケーリングを導入しない SAC 系 (ブロック線図は Fig. 1) の実験結果を Fig. 10 に示す。ステップ応答実験の場合と同様に、大きな偏差が生じていることが確認できる。

つぎに、スケーリングを導入した SAC 系 (ブロック線図は Fig. 2) における実験結果を示す。ここでは、動的なスケーリングをステップ状目標値の場合と同じ (13) 式で定め、ランプ応答実験を行った。得られた結果が Fig. 11 である。Fig. 11 より、ステップ状目標値の場合と同様に、動的なスケーリングを導入することで良好な応答が得られていることがわかる。

なお、以上のランプ応答実験に用いた制御系は、Fig. 4 で示すようにアーム負荷の初期角度を鉛直方向に対して 0 度とした際の制御対象モデル (すなわち (9) 式) に基づいて設計されたものである。そこで、アーム負荷の初期角度を 90 度および 180 度として、同じ制御系で同様のランプ応答実験を行った。アーム負荷の初期角度を変化させると、重力の影響が変化するためモデル化誤差が大きくなると考えられる。このような状況下でも、(13) 式で表される動的なスケーリングを用いることで、Fig. 11 と同様の良好な応答が得られることを確認した。

5. おわりに

本論文では、PFC の導入による制御性能の劣化という SAC 系を構成するうえでの問題点を回避するために、SAC 系にスケーリングを施すという手法を提案した。拮抗型空圧人工筋駆動機構を制御対象とした実機での実験結果より、スケーリングを導入することで偏差を大幅に低減できることが確認できた。とくに、制御対象と PFC の周波数応答に基づいて適切に定めた動的スケーリング

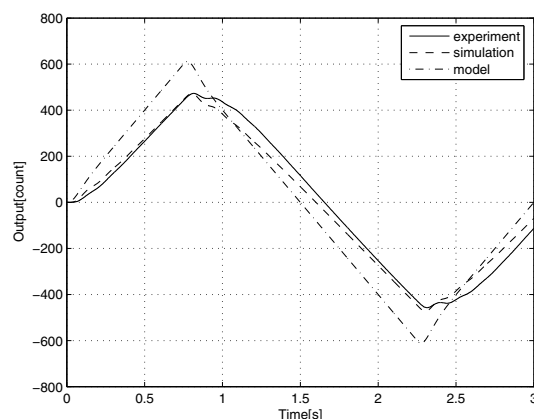


Fig. 10 Ramp response of SAC system without scaling

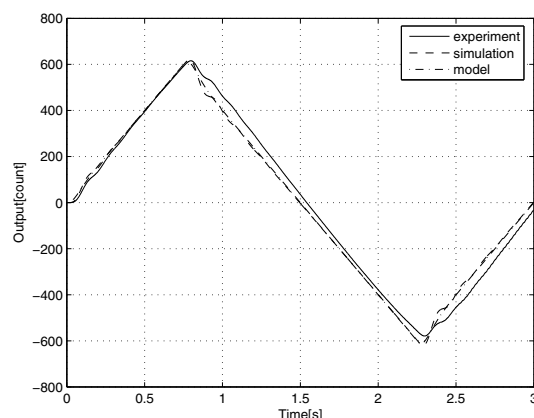


Fig. 11 Ramp response of SAC system with a dynamic scaling

を用いることにより、規範モデルの応答に精度よく追従するような良好な応答が得られた。

本論文で提案した手法は、基本的な手順で SAC 系を設計した後に付加的にスケーリングを導入するというものであり、設計手順が簡単であるという SAC 系の特長を損なうものではない。また、本論文で示したように、制御対象の低周波帯域での周波数特性がある程度正確に把握できる場合には、簡便な形で設計可能な動的スケーリングを用いることで、制御性能の向上に大きく寄与できるものと考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、パナソニック (株) の足達勇治様には多大なるご協力を賜った。また、本論文の執筆にあたり、査読者の方々には数々の貴重なご助言を頂いた。記して深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] 藤谷: さまざまな空気圧; 油圧と空気圧, Vol. 25, No. 5, p. 581 (1994)
- [2] 川上: 空気圧シリンダの高速位置決め; 油圧と空気圧, Vol. 24, No. 7, pp. 769-774 (1993)
- [3] 則次: 空気圧シリンダの制御特性; 油圧と空気圧, Vol.

24, No. 7, pp. 775–780 (1993)

- [4] 岩井: 適応制御の実用に向けての新しい動向 – 単純適応制御 (SAC) 法; システム/制御/情報, Vol. 37, No. 5, pp. 277–283 (1993)
- [5] 岩井: SAC (Simple Adaptive Control) の理論と応用; SICE セミナー「適応制御」テキスト (1994)
- [6] 水本, 岩井: 単純適応制御 (SAC) の最近の動向; 計測と制御, Vol. 40, No. 10, pp. 723–728 (2001)
- [7] 市川, 金井, 鈴木, 田村: 適応制御, 昭晃堂 (1984)
- [8] 水本, 岩井, 西山: 非モデル化動特性を有する系に対する SAC 系設計; 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 9, pp. 1366–1374 (1995)
- [9] H. Kaufman, I. Bar-kana and K. Sobel: *Direct Adaptive Control Algorithms, Theory and Application*, Springer-Verlag (1994)
- [10] 水本, 道野, 公文, 岩井: 線形システムに対する 1 ステップバックステップングによる適応出力フィードバック制御系設計; 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 10, pp. 829–837 (2005)
- [11] 相良, 秋月, 中溝, 片山: システム同定, 計測自動制御学会 (1981)
- [12] 京和泉, 藤田, 蛭原: 単純適応制御手法による空圧サーボ位置決め制御 – PFC のオートチューニング機構の導入; システム制御情報学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 102–109 (2001)

著者略歴

ふだ ば ゆう だい
札 場 勇 大



2007 年 3 月京都大学工学部電気電子工学科卒業。2009 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月, パナソニック (株) 入社, 現在に至る。

えび はら よし お
蛭 原 義 雄 (正会員)



計測自動制御学会, IEEE などの会員。

2002 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。同年 4 月京都大学大学院工学研究科助手, 2006 年 4 月同研究科講師となり現在に至る。数値最適化手法を用いた制御系の解析, 設計に関する研究に従事。京都大学博士 (工学)。

はぎ わら とも みち
萩 原 朋 道 (正会員)



大学工学博士。計測自動制御学会, 電気学会, IEEE などの会員。

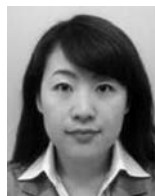
1986 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年京都大学工学部助手, 1991 年助教授, 改組に伴い, 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻助教授を経て, 2001 年より教授。サンプル値制御理論, 2 自由度制御系の設計法などの研究に従事。京都大学工学博士。計測自動制御学会, 電気学会, IEEE などの会員。

おか ざき やす なお
岡 崎 安 直 (正会員)



1991 年 3 月京都大学大学院工学研究科応用システム科学専攻修士課程修了。同年松下電器産業 (現パナソニック) (株) 入社, 現在に至る。ロボットの機構, 制御開発に従事。

こ まつ ま ゆみ
小 松 真 弓



2001 年 3 月京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻修士課程修了。2007 年 1 月松下電器産業 (現パナソニック) (株) 入社, 現在に至る。ロボットの制御開発に従事。計測自動制御学会の会員。