

スライディングモードアルゴリズムを用いた 高精度エンジン回転数制御

Accurate Engine Speed Control Using Sliding Mode Algorithm

安井 裕司*

Yuji YASUI

齋藤 光宣*

Mitsunobu SAITO

下城 孝名子*

Kanako SHIMOJO

玉川 裕*

Hiroshi TAMAGAWA

要 旨

オートマチックトランスミッションのシフトクオリティ向上のため、高精度なエンジン回転数制御が要求されている。しかしながら、エンジンの動特性は、運転条件や経年条件によって大きく変化する。このため、PID 制御のような従来制御は、目標回転数に対して大きなオーバーシュートを生じ、高い制御性を実現できなかった。そこで、適応外乱オブザーバとスライディングモードコントローラを組み合わせた制御を新たに設計し、これをエンジン回転数制御に適用した。この制御は、エンジンの動特性変化に対する高いロバスト性と優れたオーバーシュート抑制能力を有し、あらゆる動特性条件において高精度かつ高応答なエンジン回転数制御を実現した。

ABSTRACT

Accurate engine speed control has been required to improve the shift quality of automatic transmissions. However, engine dynamics dramatically change with engine load and with the aging of the engine. Therefore, conventional controls such as PID control cause large overshoots and can not ensure accurate controllability. A control composed of a sliding-mode controller and an adaptive disturbance observer was therefore designed and applied to engine speed control. The new control had high robustness against changes in engine dynamics and excellent ability to suppress overshoot. In addition, it provided accurate and rapid engine speed control under all engine conditions.

1. まえがき

オートマチックトランスミッションのシフトクオリティ向上のため、エンジン回転数制御の高精度化と高応答化の要求が高まっている。ところが、エンジンの動特性は、運転条件や経年条件によって大きく変化する。さらにばらつきを有する。このため、エンジン回転数制御はこれらの動特性変化に対するロバスト性を有する必要がある。

しかしながら、従来のエンジン回転数制御は、テーブルやマップを用いたオープンループ制御やPID 制御が主流であった。Fig. 1 はPI 制御によるエンジン回転数制御の結果であるが、エンジン回転数 N_e は、目標値 N_{er} に対して大きなオーバーシュートを生じており、従来制御は十分な制御性を実現できないことがわかる。

一方、近年、ロバスト制御のひとつであるスライディングモード制御⁽¹⁾のエンジン⁽²⁾、⁽³⁾やデバイス⁽⁴⁾への適用が行われている。

そこで、本研究では、スライディングモードコントローラ(以下、SMC)と適応外乱オブザーバによって構成される新たな制御を設計し、これをエンジン回転数制御へ適用した。

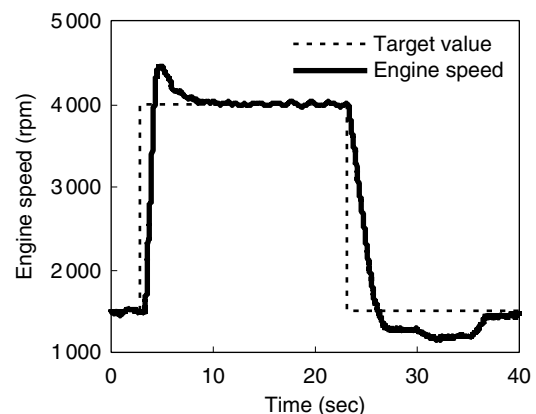


Fig. 1 Step response result using PI controller

2. エンジン回転数制御の課題

Table 1は実機テストに用いたプロトタイプエンジンの諸元であるが、このエンジンの N_e を各 N_{er} に整定するためのスロットル開度 T_h は、Fig. 2に示したようになる。図には、電気負荷の増減、エンジンの暖気状態に応じた N_e と T_h の相関が示されているが、各 N_{er} に整定するために要求される T_h は大きく変化する。例えば、 T_h が約 8deg の場合、 N_e は、電気負荷が低い場合は約 4000rpmとなり、高い場合は約 3000rpmとなる。

このことから、従来のようなオープンループ制御では、負荷条件により大きな定常偏差が発生する可能性がある。マップやテーブルをエンジン負荷や暖気状態に応じてスケジュールする手法を採用することもできるが、この場合にも、エンジンのトルク特性は経年変化やばらつきを生じるため、定常偏差の補償を行うことはできない。

一方、クローズドループ制御であるPID制御や適応スライディングモード制御⁽²⁾をエンジン回転数制御に適用した場合は、 N_e の N_{er} に対する定常偏差は補償できる。

しかしながら、いずれの手法においても、定常偏差を抑制するための積分器を使用しているため、Fig. 1のようなオーバーシュートを生じる。

Table 1 Specifications of experimental power train

Engine	In-line 3, 1.0 liter, SOHC
Air device	Electrical controlled throttle
Transmission	6-speed automated manual transmission

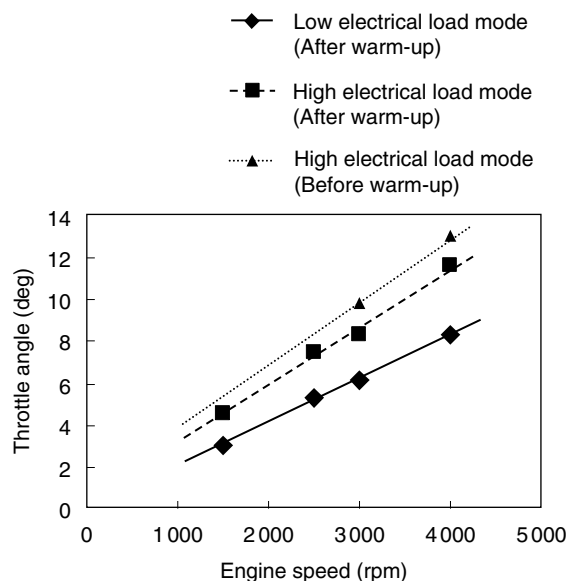


Fig. 2 Correlation of throttle angle with engine speed under several load conditions

3. アプローチ手法

オーバーシュートを抑制しつつ、エンジン動特性のばらつきや経年変化による定常偏差の発生を補償できる制御系を以下のように実現する。

まず、 T_h から N_e までのエンジン動特性を、マップやテーブルではなく、その周波数特性に着目し、離散時間系のARXモデル(Auto-RegressiveXogenousmodel, 自己回帰モデル)⁽⁵⁾を用いてモデル化する。

次に、適応スライディングモードの制御入力は、Fig. 3に示したように、等価制御入力 U_{eq} 、到達則入力 U_{rch} 、適応則入力 U_{adp} の三つの総和として算出される。ここで、 U_{eq} は、 N_e と N_{er} に基づいて算出され、 U_{rch} と U_{adp} は、それぞれ N_e と N_{er} の偏差によって算出される切換関数値 σ の比例項、積分項として算出される。また、 U_{adp} は、エンジンの動特性変化を補償する機能を有するが、 σ の積分項のため、 N_e の N_{er} に対するオーバーシュートの原因となる。

そこで、本研究では、Fig. 3 のスライディングモードコントローラから U_{adp} を消去し、その代わりに新たに N_e と制御入力に基づいて外乱推定値(以下、 c_1)を算出する適応外乱オブザーバを付加した。さらに U_{eq} の算出式を変更し、 c_1 を組み入れることによってエンジンの動特性変化を補償することとした。Fig. 4にその構成図を示し、詳細は後述する。

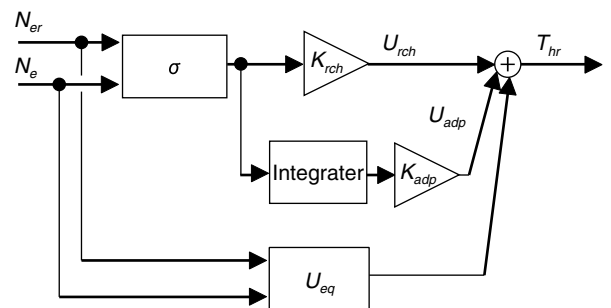


Fig. 3 Sliding-mode controller with adaptive law input

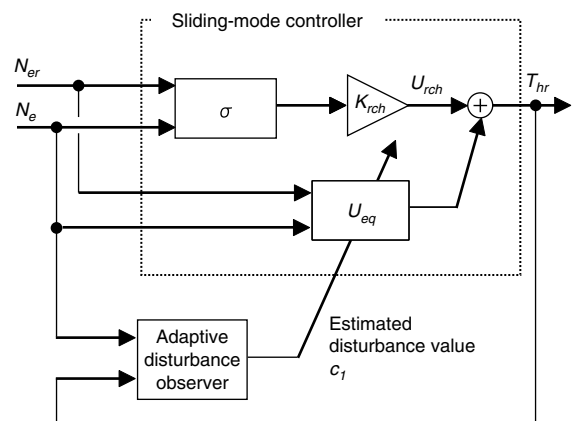


Fig. 4 Sliding-mode controller with adaptive disturbance observer

4. コントローラの設計

4.1. エンジンのモデル化

Fig. 5 は、 N_e が 1500rpm 2000rpm 3000rpm のときの T_{hr} 変化に対する N_e の応答特性，すなわち，エンジンの周波数特性である．図に示すように，エンジンの周波数特性は 1.0Hz 以上の周波数域においてゲインが低下し，通過域のゲインが N_e の上昇とともに大きくなるローパス特性である．

このことから，エンジンを次式によりモデル化した．

$$N_e(k+1) = a_1 N_e(k) + a_2 N_e(k-1) + b_1 T_{hr}(k) + b_2 T_{hr}(k-1) \quad (1)$$

a_1, a_2, b_1, b_2 : モデルパラメータ

T_{hr} : スロットル目標値

k : 制御時刻

Fig. 6 は，1500rpm におけるエンジンの周波数特性と Table 2 に示したモデルパラメータを用いたモデルの周波数

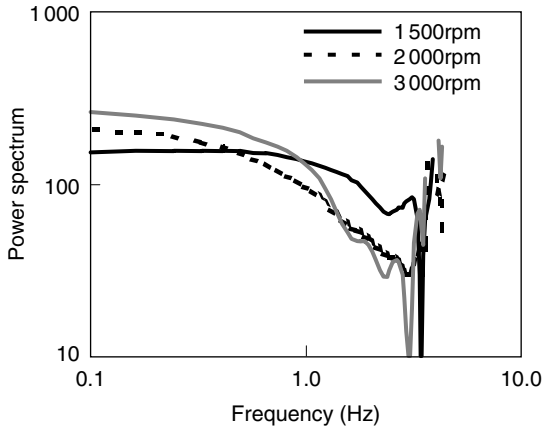


Fig. 5 Frequency characteristics under several engine speed conditions

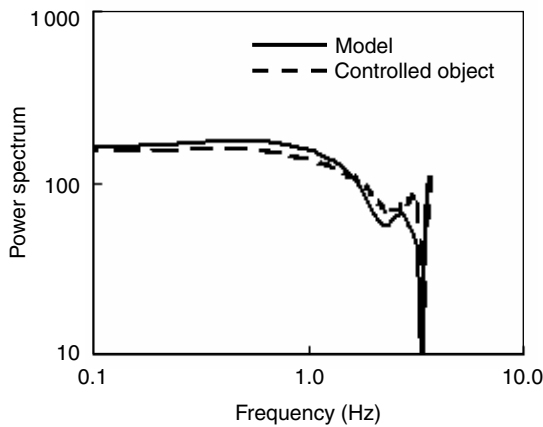


Fig. 6 Frequency characteristic comparison between model and controlled object at 1500 rpm

Table 2 Model parameters of controlled object model at 1500 rpm

a_1	a_2	b_1	b_2
1.83	-0.84	34.53	-31.84

特性を示している．モデルは制御対象のローパス特性を表現できることがわかる．

4.2. 適応外乱オブザーバ

適応外乱オブザーバは，式(1)の右辺を一制御時刻前にシフトし，さらに， c_1 を加えたものを N_e の推定値 N_{eh} として式(2)のように定義し，この N_{eh} と N_e の差が最小となるように c_1 を推定するものである．

$$N_{eh}(k) = a_1 N_e(k-1) + a_2 N_e(k-2) + b_1 T_{hr}(k-1) + b_2 T_{hr}(k-2) + c_1(k-1) \quad (2)$$

c_1 : 外乱推定値

ここで， c_1 の推定は，適応制御⁽⁶⁾で用いられる固定ゲイン法を用いて下式のように行われる．

$$c_1(k) = c_1(k-1) + \frac{P}{1+P} e_{dov}(k) \quad (3)$$

$$e_{dov}(k) = N_e(k) - N_{eh}(k)$$

P : 推定ゲイン

4.3. スライディングモードコントローラ

適応外乱オブザーバを併用する場合，スライディングモードコントローラの制御入力である T_{hr} は，以下のように入力 U_{eq} と U_{rch} の二つの入力の和として算出される．

$$T_{hr}(k) = U_{eq}(k) + U_{rch}(k) \quad (4)$$

この時， σ と偏差 E_{ne} を式(5)と式(6)により定義すると， U_{rch} は式(7)によって算出される．

$$\sigma(k) = E_{ne}(k) + S E_{ne}(k-1) \quad (5)$$

$$E_{ne}(k) = N_e(k) - N_{er}(k) \quad (6)$$

S : 切換関数設定パラメータ

$$U_{rch}(k) = \frac{-K_{rch}}{b_1} \sigma(k) \quad (7)$$

K_{rch} : 到達則ゲイン

さらに， U_{eq} は，偏差 $E_{ne}(k)$ と $E_{ne}(k-1)$ の組み合わせ(以下，状態量)を $\sigma=0$ が示す直線，いわゆる，切換直線上に拘束する入力として定義される．故に，式(8)に示した条件式の左辺に式(2)を代入し， T_{hr} について解くことにより式(9)のように求められる．

$$\sigma(k+1) = \sigma(k) \quad (8)$$

$$U_{eq}(k) = \frac{1}{b_1} \{ (1 - S - a_1)N_e(k) + (S - a_2)N_e(k-1) + N_{er}(k+1) + (S - 1)N_{er}(k) - SN_{er}(k-1) - b_2T_{hr}(k-1) - c_1(k) \} \quad (9)$$

ここで、式(9)による U_{eq} は、Fig. 3 に示した U_{adp} を併用する場合の U_{eq} に対し、外乱補償の役割を持つ最終項 $-c_l$ が追加されている.

5. シミュレーション結果

U_{adp} を用いた SMC と適応外乱オブザーバを用いた SMC の外乱抑制性能の比較をシミュレーションにより行うため、Fig. 7 に示したブロック図に Table 2 に示したモデルパラメータを代入したものを仮想エンジンとして設定した。この仮想エンジンには、Fig. 8 に示したようなエンジンのトル

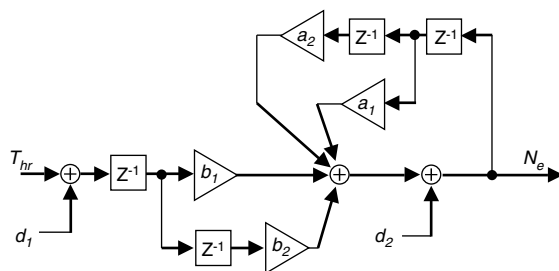


Fig. 7 Controlled object model for comparison between conventional and newly designed sliding-mode controller

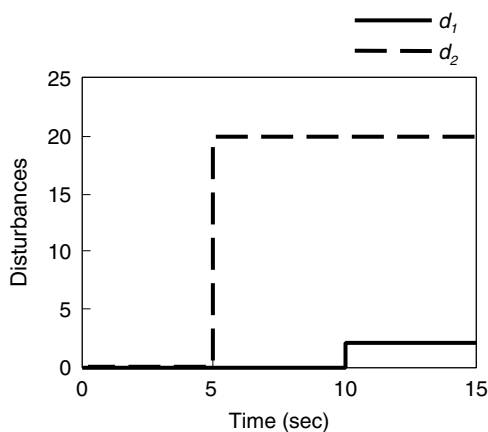


Fig. 8 Disturbances inputted to controlled object model

ク特性のばらつきや経年変化を想定した外乱 d_p 、電気負荷等を想定した外乱 d_2 が加えられている。また、シミュレーションにおいて、 N_{er} は 2000rpm とした。

このとき、 U_{adp} を用いた場合は、Fig. 9に示したように、 U_{adp} の積分特性により、 d_1 と d_2 のいずれに対しても振動的な収束挙動や大きなオーバーシュートを生じている。

一方、適応外乱オブザーバを用いた場合は、Fig. 10に示したように、 d_2 に対しては小さなオーバーシュートを生じるが、外乱によって生じた偏差の収束時間は U_{adp} を用いたものに対し半分程度であり、振動的な挙動を示すこともない。

この結果より、適応外乱オブザーバを用いたものは、優れたオーバシュート抑制能力と速応性を有していることがわかる。

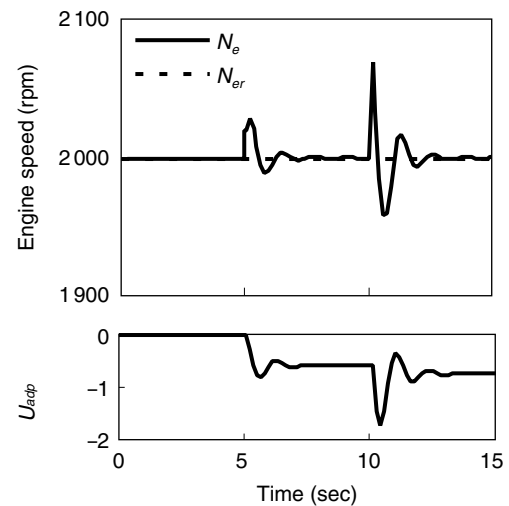


Fig. 9 Simulation results for sliding-mode controller with U_{adp}

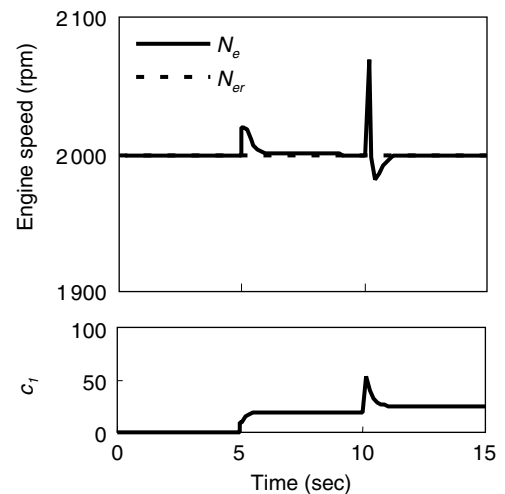


Fig. 10 Simulation results for sliding-mode controller with adaptive disturbance observer

6. テスト結果

6.1. ステップ応答比較

Table 1 に示したエンジンを用いて、PID 制御、適応則入力を用いた SMC、適応外乱オブザーバを用いた SMC のステップ応答比較を行った。Fig. 11 にその結果を示す。

適応外乱オブザーバを用いた SMC は、積分要素を持つ他の制御に比べてオーバーシュートの抑制能力が優れていることがわかる。

6.2. エンジン暖機条件に対するロバスト性

Fig. 12 は、エンジン始動直後の暖気前条件と暖機後条件において、適応外乱オブザーバを用いた SMC により N_e のステップ応答を比較した結果である。

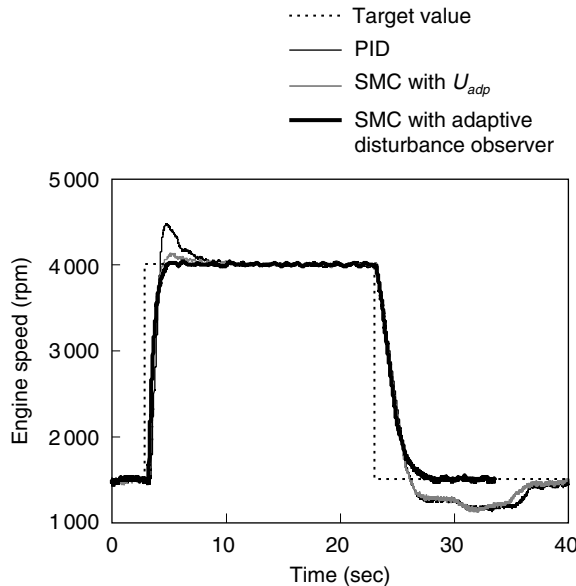


Fig. 11 Step responses controlled by PID, SMC with U_{adp} and SMC with adaptive disturbance observer

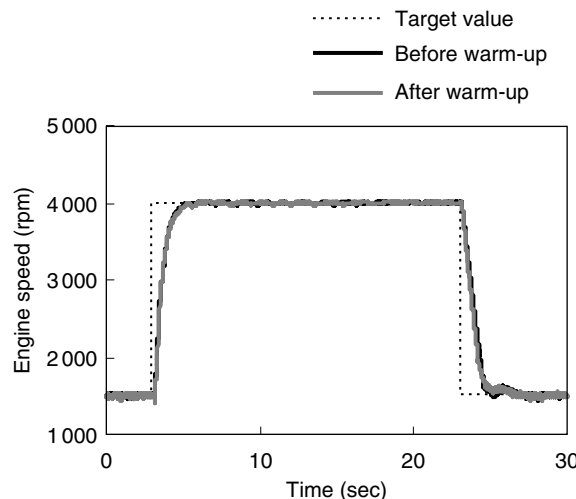


Fig. 12 Step responses before and after warm-up

適応外乱オブザーバを用いた SMC は、暖機条件に関わらず安定した目標値追従応答を示すことがわかる。

6.3. エンジンのトルク特性誤差に対するロバスト性

Fig. 13 は、エンジンのトルク特性誤差に対する適応外乱オブザーバを用いた SMC のロバスト性を確認するため、スロットル開度に +50%, 0%, -50% の誤差を与えた際の制御結果である。さらに、スロットル開度誤差を 0% とし、 U_{adp} を用いた SMC により制御を行った結果もあわせて示した。

適応外乱オブザーバを用いた SMC は、-50% の誤差を与えた場合にも、 U_{adp} を用いたものと同等の目標値への到達時間を実現しており、+50% の誤差を与えた場合にも、 U_{adp} を用いたものよりもオーバーシュートが小さい。

これより、適応外乱オブザーバを用いた SMC の優れたロバスト性を確認することができる。

7. まとめ

適応外乱オブザーバを用いたスライディングモード制御をエンジン回転数制御に適用することにより、以下のことを実現した。

- (1) 定常偏差の補償のための積分要素を持つ制御に対して飛躍的にオーバーシュートを低減した。
- (2) エンジンの暖気状態によらない安定した制御性を実現した。
- (3) エンジンのトルク特性ばらつきや経年変化に対して大幅にロバスト性を向上した。

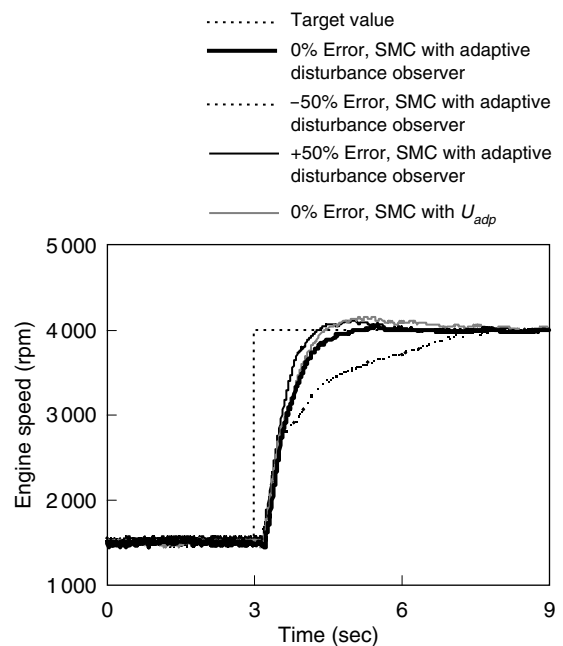


Fig. 13 Robustness against engine torque error

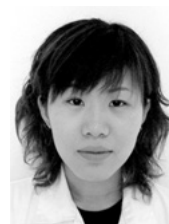
参考文献

- (1) 野波健蔵, 田宏奇: スライディングモード制御, コロナ社, 1994, 263p
- (2) Yasui, Y., Akazaki, S., Ueno, M., Iwaki, Y.: Secondary O2 Feedback Using Prediction and Identification Sliding Mode Control, SAE Paper 2000-01-0936(2000)
- (3) Kajitani, M., Nonami, K.: High Performance Idle Speed Control Applying the Sliding Mode Control with H Robust Hyperplane, SAE Paper 2001-01-0263(2001)
- (4) Hashimoto, E., Ishiguro, T., Yasui, Y., Akazaki, S.: High Reliability Electronic Throttle System, SAE Paper 2003-01-0708(2003)
- (5) 足立修一: ユーザのためのシステム同定理論, コロナ社, 1993, 222p
- (6) 寺尾満, 金井喜美雄: ロバスト適応制御入門, オーム社, 1989, 187p

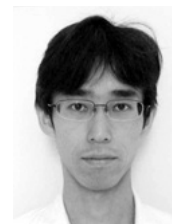
■ 著 者 ■



安井 裕 司



下城孝名子



齋藤 光 宣



玉川 裕