

電動サーボブレーキシステムの開発

Development of Electric Servo Brake System

大久保 直 人*

Naoto OHKUBO

赤 峰 宏 平*

Kohei AKAMINE

西 岡 崇*

Takashi NISHIOKA

波多野 邦 道*

Kunimichi HATANO

要 旨

電気自動車の電費向上、およびハイブリット車の燃費向上のため、回生ブレーキを有効に活用しつつ、良好なブレーキフィールを可能にする電動サーボブレーキシステムを開発した。本システムは、電動モータを動力源とする液圧シリンダによってブレーキ圧を制御する構成とした。この構成により、回生ブレーキと協調した精度の高いブレーキ圧制御を実現し、フィット EV において回生量が EPA 燃費基準で従来システム比 8% 向上した。また、ペダル操作部をブレーキ圧発生部から独立させて、ペダル踏力がブレーキ圧制御から影響を受けない構造にすることで、良好なブレーキフィールも実現した。

ABSTRACT

An electric servo brake system realizing good brake feel while making effective use of regenerative braking has been developed in order to increase power efficiency in electric vehicles and fuel efficiency in hybrid electric vehicles. This system controls brake pressure using hydraulic pressure cylinders with an electric motor as the drive source. By means of this configuration, it realizes high-accuracy brake pressure control that cooperates with regenerative braking, and its use in the Fit EV has increased power regeneration by 8% against a conventional system based on EPA fuel economy standards. In addition, the use of a configuration in which the pedal operation section is independent from the brake pressure generation section helps to prevent the pedal force from being affected by brake pressure control, making it possible to realize good brake feel.

1. はじめに

地球環境保護の観点から、低燃費化と CO₂ 排出低減への要求の高まりにともない、電気自動車（以下 EV）やハイブリット車（以下 HEV）などの電動パワープラント搭載車への注目が年々高まっている。これら EV や HEV は、減速時に回生ブレーキを作動させ、運動エネルギーを回生電力として回収することにより、電費および燃費を向上させることができる。したがって、減速時に効率よく発電させて回生電力量を増加させることが重要になる。そのため、ブレーキシステムには、システムの状態に応じて、ドライバが要求するブレーキ力を、摩擦ブレーキ力と回生ブレーキ力に協調配分する回生協調機能が要求される。回生ブレーキ力を発生させつつ、ドライバの意図するブレーキフィールを得るためには、回生ブレーキ力と摩擦ブレーキ力の合

計を、ドライバの要求する値に常に合わせる必要がある^{(1), (2)}。この時に、負圧ブースタを用いた一般的なブレーキシステムと同等の良好なブレーキフィールを得るためには、ペダル踏力はブレーキ圧制御の影響を受けないことが望ましい。

これまでに、回生協調機能を実現し、かつ良好なブレーキフィールを得るために、各輪のブレーキ圧を個別に制御するブレーキパイワイヤシステム⁽³⁾や、各輪同圧ながら任意のブレーキ圧が発生可能な油圧ブースタタイプ^{(4), (5)}、負圧ブースタタイプ⁽⁶⁾、電動ブースタタイプ⁽⁷⁾のブレーキシステム、などが提案されている。ペダル操作部とブレーキ圧発生部が連結したシステムでは、ペダル踏力がブレーキ圧制御の影響を受ける場合があるため、回生協調時の良好なブレーキフィール確保が課題であった。そこで、この課題を解決しつつ、回生協調機能を実現して、EV

*四輪 R&D センター

の電費向上およびHEVの燃費向上に寄与する電動サーボブレーキシステムを新たに開発した。本システムは、ペダル操作部とブレーキ圧発生部を独立させた構成とした。ペダル操作部は、ペダルストロークと踏力をシミュレートする機能を付加したものである。ブレーキ圧発生部は、電動モータを動力源とする液圧シリンダによるブレーキ圧制御で摩擦ブレーキ力を発生させ、ブレーキ圧を任意に制御するものである。

本稿では、開発した電動サーボブレーキシステムの概要、およびブレーキ圧制御、回生協調機能に関わる技術要素について述べる。

2. 開発のねらい

EVの電費、およびHEVの燃費向上とブレーキ性能を両立させるため、電動サーボブレーキシステムの開発では以下の点を主要なねらいとした。

- (1) 回生協調機能を実現し、かつ高い回生効率を実現する
- (2) 良好なブレーキフィールを確保する
- (3) 従来ブレーキシステム以上のノンサーボ性能を確保する

3. システム概要

本システムはFig. 1に示す、ペダルフィールシミュレータとタンデムモータシリンダ、ブレーキペダル、ペダルストロークセンサ、およびECUで構成される。ペダルフィールシミュレータは、ペダル操作時のペダルストロークと踏力を生成する。タンデムモータシリンダは、ペダルストロークセンサにより検出したペダル操作量に基づいてECUが指示したブレーキ圧を発生させる。

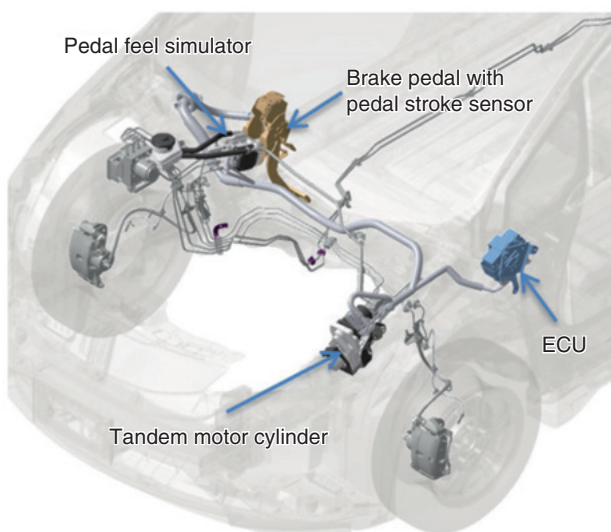


Fig. 1 Overview of electric servo brake system

3.1. ペダルフィールシミュレータ

ペダルフィールシミュレータはFig. 2に示すように、マスタシリンダとストロークシミュレータ、ソレノイドバルブ、および液圧センサで構成される。

マスタシリンダはブレーキペダルと連結され、ストロークシミュレータとは液路で接続される。その液路にはシミュレータカットバルブと液圧センサが設置される。シミュレータカットバルブはノーマルクローズのソレノイドバルブである。この構成により、ペダルストロークと踏力をシミュレートする機能を実現している。ペダル踏力特性は、ブレーキペダルのリンク比とストロークシミュレータのバネ反力特性を設定することで調整が可能である。

マスタシリンダとタンデムモータシリンダも液路で接続され、その液路にはマスタカットバルブと液圧センサが設置される。マスタカットバルブはノーマルオープンソレノイドバルブである。また、そのタンデムモータシリンダとVehicle Stability Assist (VSA) ユニットの液路は、マスタカットバルブの下流で液路が接続される。この構成により、タンデムモータシリンダで発生させるブレーキ圧を遮断するので、ペダル踏力はブレーキ圧制御の影響を受けない。また、システム起動時と停止時には、液圧回路を切り替える。

3.2. タンデムモータシリンダ

タンデムモータシリンダはFig. 3に示すように、ブラシレスモータと減速機、ボールねじ、スレーブシリンダで構成され、ブラシレスモータにはレゾルバが内蔵される。

ブラシレスモータとスレーブシリンダは減速機とボールねじを介して接続されている。ボールねじがスレーブシリンダピストンを直接押すことで、ブレーキ圧を発生させ、精度の高いブレーキ圧制御を可能にしている。

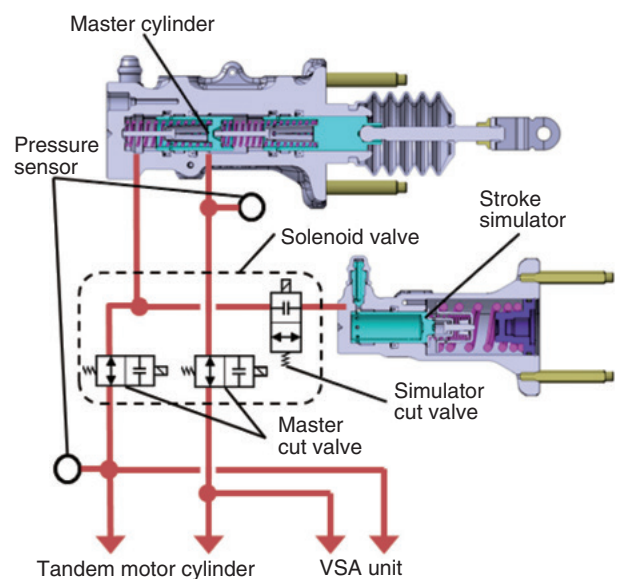


Fig. 2 Structure of pedal feel simulator

ブレーキ圧発生時の電動サーボブレーキシステムの動作を Fig. 4 に示す。ペダルストロークセンサで検出したペダル操作量に基づいて、ECU がブレーキ圧目標値を決定し、後述のブレーキ圧制御によりブラシレスモータを駆動すると同時にマスタカットバルブを閉弁することで、ブレーキ圧を発生させる。ブレーキ圧は、VSA ユニットの介してホイールシリンダに伝達される。

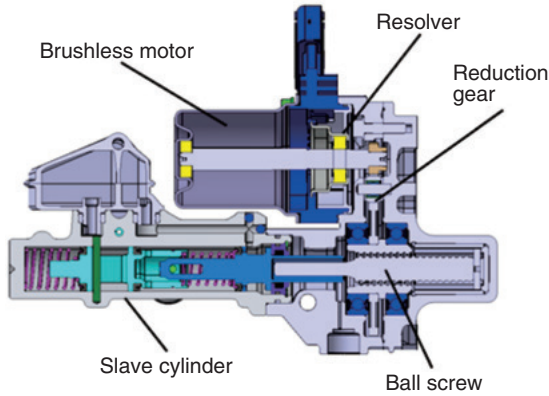


Fig. 3 Structure of tandem motor cylinder

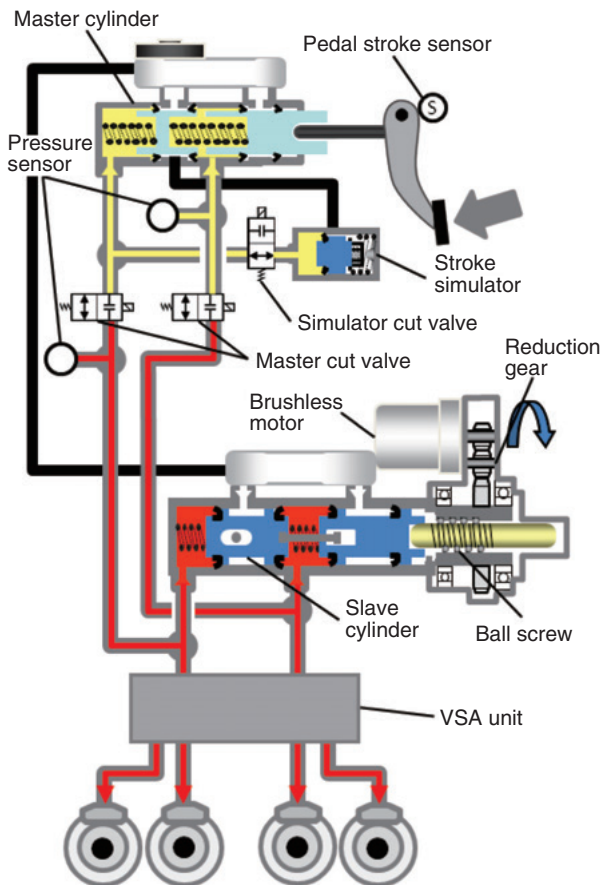


Fig. 4 System configuration diagram

4. ブレーキ特性

4.1. 基本ブレーキ特性

良好なブレーキフィールを実現するため、ペダル踏力特

性が一般的なブレーキシステムと同等になることをねらって、ブレーキペダルのリンク比とストロークシミュレータのバネ反力特性を調整した。Fig. 5 に、ペダル踏力特性について、電動サーボブレーキシステムと一般的なブレーキシステムの比較を示す。一般的なブレーキシステムと同等のペダル踏力特性を実現した。

また、制動効力も同様に、一般的なブレーキシステムと同等の特性にすることをねらい、ペダル操作量に対するブレーキ圧目標値の設定を調整した。Fig. 6 に、制動効力特性について、電動サーボブレーキシステムと一般的なブレーキシステムの比較を示す。一般的なブレーキシステムと同等の制動効力特性を実現した。この制動効力特性とペダル踏力特性により良好なブレーキフィールをもたらしている。

4.2. ノンサーボ性能

システムが停止しているなどの、ノンサーボ状態では、ペダル入力が直接マスタシリンダに伝わってブレーキ圧が発生し、ホイールシリンダに伝わる構造とした。ブレーキペダルのリンク比とマスタシリンダピストンの断面積を調整して、ノンサーボ状態でのペダル踏力 500 N 時の発生液圧を、負圧ブースタブレーキシステムの 2 倍に向上させている。

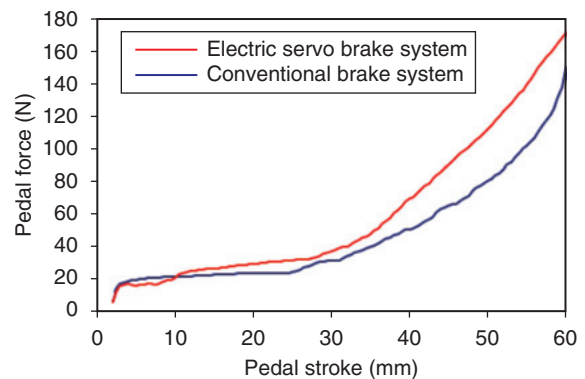


Fig. 5 Pedal force characteristic

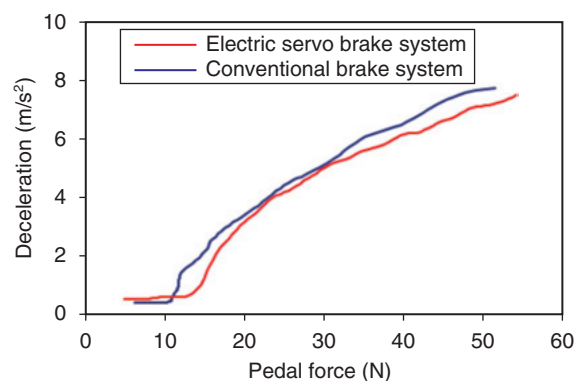


Fig. 6 Braking effectiveness

5. ブレーキ圧制御

ブレーキ圧制御は、次のようにおこなう。まず、ペダル操作量と電動パワープラントが発生できる回生トルク上限値の情報に基づきブレーキ圧目標値を決定する。次に、Fig. 7に示した液圧制御部とモータ角度制御部を介してブラシレスモータを駆動して目標のブレーキ圧を発生させる。

液圧制御部は、ブレーキ圧目標値に対応するスレーブシリンダピストンのストローク目標値を出力する。液圧制御部は、フィードフォワード部とフィードバック部から構成される。フィードフォワード部は、スレーブシリンダピストンのストロークと、発生ブレーキ圧の特性マップを用いる。フィードバック部には、マスタカットバルブ下流に配置した液圧センサ値を入力する。Fig. 8に、ブレーキ圧の応答性を示す。Fig. 8に示すように、この液圧制御構成により、ブレーキ圧の応答性と追従性を確保した。Fig. 9に、ABS作動中における、スレーブシリンダ圧の応答性を示

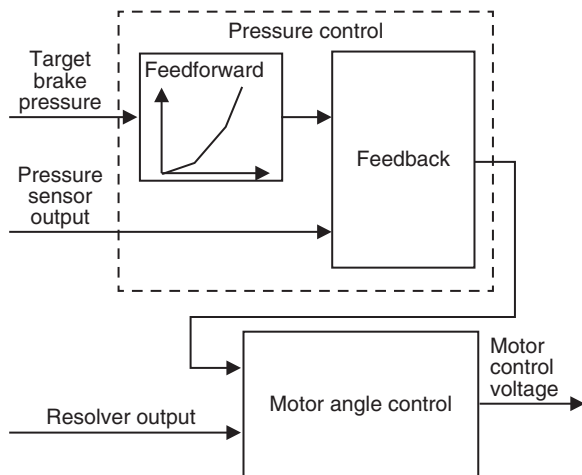


Fig. 7 Block diagram of brake pressure control

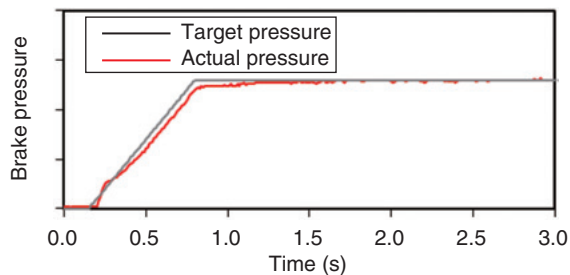


Fig. 8 Response of brake pressure

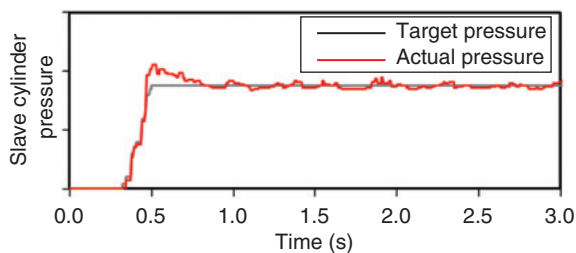


Fig. 9 Slave cylinder pressure response during ABS operation

す。ABS作動中のようなブレーキ負荷の変動がある場合に対しても、十分な制御安定性を示しており、高精度な液圧制御を実現している。

モータ角度制御部は、レゾルバによる角度フィードバック制御で構成され、モータ駆動電圧を出力する。加えて、コンパクトなモータで、高い応答性を実現するために、ブラシレスモータの高回転化を可能にする、弱め磁束制御 (Flux Weakening Control: FWC) を適用している⁽⁸⁾。Fig. 10に、ブレーキ圧とモータ速度の、ステップ応答における、弱め磁束制御ありとなしの比較を示す。弱め磁束制御の適用により、モータ回転数が30%速くなり、応答時間が25%短縮できた。その結果、コンパクトなモータで、高い応答性を実現できた。

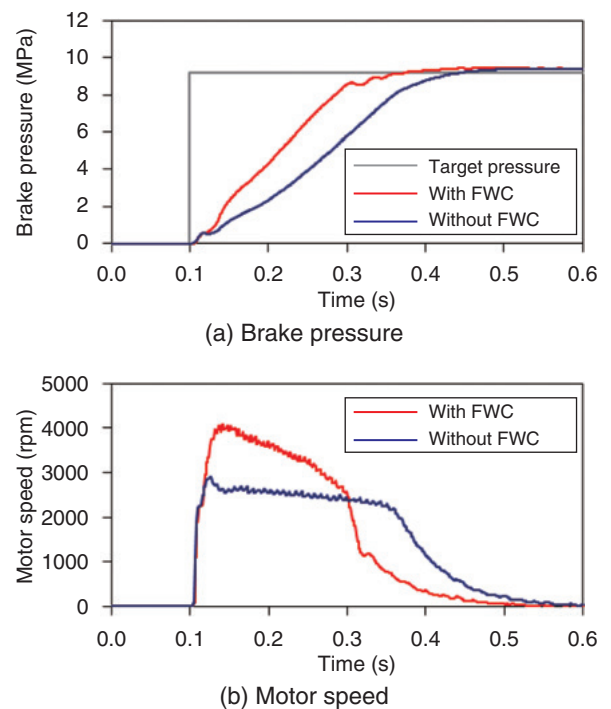


Fig. 10 Step response with flux weakening control (FWC)

6. 回生協調ブレーキ

EVおよびHEVにおいては、電費、燃費向上のために、車両走行における摩擦ブレーキの作動によるエネルギー損失の低減が、重要なポイントとなる。したがって、回生協調ブレーキに要求されるのは、摩擦ブレーキをできる限り使用しないことである。しかし、回生ブレーキは、高速走行時や停車直前など、パワープラント側の状況によっては発生できない場面がある。この場合は素早く摩擦ブレーキに切り替えなければ、ドライバの意図に反した減速度変動が発生してしまう。このため、回生協調ブレーキによって燃費を向上するには、高精度なブレーキ圧制御システムが必要となる。電動サーボブレーキシステムでは、ペダル操作部とブレーキ圧発生部を独立させた構成と、前述の高精

度なブレーキ圧制御により、高い回生効率と良好なブレーキフィールを両立させた。

Fig. 11 に電動サーボブレーキシステムにおいて、70 km/h から常用の減速をした時の、回生協調ブレーキ制御の時系列データを示す。停車間際まで摩擦ブレーキは一切使用せず、回生ブレーキのみで車両の運動エネルギーを回収している。減速度はドライバの要求どおり一定であり、回生によるブレーキフィールの変化も発生していない。停車間際から停車中にかけては、回生ブレーキが使えないため、摩擦ブレーキへの切り替えが必要となる。電動サーボブレーキシステムの高精度液圧制御の特性をいかして、摩擦ブレーキへの切り替えが完了する車速である V_e を 2 km/h まで低下させた。フィット EV では、電動サーボブレーキシステムによって回生量を EPA 燃費基準で従来システム比 8% 向上させた。

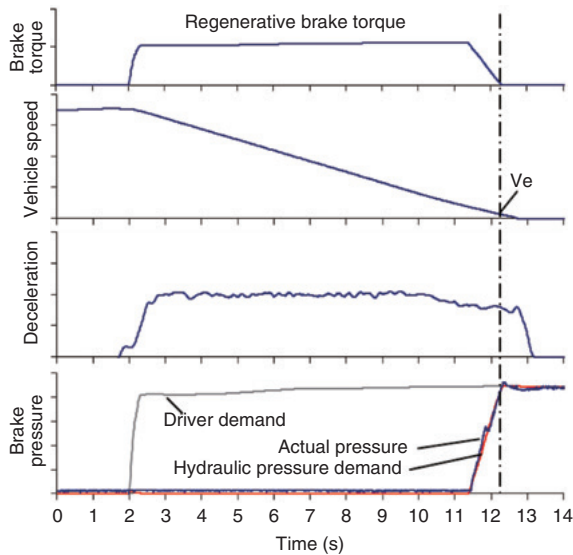


Fig. 11 Time chart of regeneration braking

7. まとめ

ペダル操作部とブレーキ圧発生部を独立させ、電動モータとボールねじ、および液圧シリンダという構造でブレーキ圧を発生させる、制御性に優れた電動のブレーキシステムを開発した。回生協調時のエネルギー回収効率を増大させるとともに、スムーズで自然なブレーキフィールをドライバへ提供できた。本電動サーボブレーキシステムの開発は、電動化車両の普及拡大に大きく貢献するだろう。

主要な技術についてまとめると

- (1) フィードフォワードとフィードバックで構成される液圧制御と弱め磁束制御を加えたモータ角度制御による、高精度で高応答の電動ブレーキ制御により、高い回生効率を実現した。
- (2) ペダル操作部をブレーキ圧発生部から独立させた構造と、シミュレータのパネ反力特性とブレーキペダル

のリンク比の最適化、および高精度で高応答の電動ブレーキ制御により、一般的なブレーキシステムと同等のブレーキフィールを実現した。

- (3) ブレーキペダルのリンク比とマスタシリンダピストンの断面積の最適化により、従来の負圧ブースタブレーキ以上のノンサーボ性能を実現した。

参考文献

- (1) Ogura, M., Aoki, Y., Mathison, S.: The Honda EV PLUS Regenerative Braking System, EVS14(1997)
- (2) Otomo, A., Sakai, A., Takasu, T., Nakamura, K.: Development of Regenerative Braking System for Hybrid Vehicle, SAE Paper, No. 1999-10-0062(1999)
- (3) Nakamura, E., Soga, M., Sakai, A., Otomo, A., Kobayashi, T.: Development of Electronically Controlled Brake System for Hybrid Vehicle, SAE paper, No. 2002-01-0300(2002)
- (4) 青木康史, 鈴木健二, 中野博士, 野尻欣主: ハイブリッド車用油圧サーボブレーキシステムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.2, p.60-66
- (5) 中田大輔, 中村栄治, 深澤司, 大矢健太郎: ハイブリッド車用 普及型電子制御ブレーキシステムの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.108-09, p.15-20(2009)
- (6) Albrichsfeld, C., Karner, J.: Brake System for Hybrid and Electric Vehicles, SAE paper, No. 2009-01-1217(2009)
- (7) 小畑卓也, 大谷行雄, 白川直樹, 伊藤義徳, 後藤進之介, 小池雄一: 回生協調対応電動型制御ブレーキアクチュエータの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.55-11, p.1-4(2011)
- (8) 杉本秀彦, 小山正人, 玉井伸三: AC サーボシステムの理論と設計の実例, 総合電子出版, 219p.(1990)

■著 者■



大久保直人



西岡 崇



赤峰宏平



波多野邦道