

ハイブリッド自動車における油圧ブレーキと電気モータの 協調制御による新しいABSの提案と基礎実験

学生員 岡野 隆宏 (東京大学)

正員 坂井 真一郎 (文部科学省 宇宙科学研究所)

正員 藤本 博志 (長岡技術科学大学)

正員 堀 洋一 (東京大学)

Experimental Studies of Novel Cooperative Control System of Hydraulic Brake and Electric Motor in Hybrid Electric Vehicle

Takahiro Okano, Student Member (The University of Tokyo), Shin-ichiro Sakai, Member (The Institute of Space and Astronautical Science), Hiroshi Fujimoto, Member (Nagaoka University of Technology), Yoichi Hori, Member (The University of Tokyo)

An electric motor has much better response characteristics than hydraulic actuators, and can generate rapid and continuous output torque. Therefore, by utilizing electric motors for braking we can realize the ideal ABS (Anti-lock Braking System). However the capacity of electric motor used in HEV's (hybrid electric vehicle) power train is small, and is thus unable to produce sufficient braking torque. In this paper, we propose a novel design method of cooperative control system of hydraulic actuator and electric motor, referring to the dual servo head-positioning system for Hard Disk Drive. We verified the effectiveness of proposed method through experiment.

キーワード : 電気自動車, ハイブリッド自動車, ABS, PQ-method, 協調制御系

1. はじめに

近年、自動車業界では内燃機関自動車にかわる新たな駆動源をもった自動車の研究が盛んに行われている。なかでも”プリウス”に代表されるハイブリッド自動車(HEV)は既に、相当な台数が市場に出回っている。ハイブリッド自動車はエネルギー効率の観点において非常に優れており、今後も新駆動方式の自動車で中心的な役割を担っていくと思われる⁽¹⁾。

ところで、ハイブリッド自動車に搭載されている電気モータは、低速領域における駆動力用と制動時におけるエネルギー回生装置として用いられており燃費の向上に貢献している。しかし電気モータの特長である”トルク応答が高速かつ正確である”という観点に立てば、現行のハイブリッド自動車は電気モータの潜在能力を最大限に発揮しているとは言い難い。

これまで、PEV(Pure Electric Vehicle)に搭載されている電気モータを活かすべく、ABSやTCSなどの空転防止装置に電気モータを適用する研究はいくつか発表されている⁽⁵⁾。しかし、これらの制御手法をそのままハイブリッド自動車に適用することは、ハイブリッド自動車に搭載されている電気モータの容量の小ささのために不可能である⁽⁴⁾。

しかし、従来型のABSに用いられている油圧アクチュエータと協調させることで、電気モータの容量不足という問題は解決できる。このような視点からの研究の例はあまり多くないが、著者らは従来型の油圧アクチュエータを用いたABSの制御則を変更することなく、電気回生ブレーキの制御則を付加することで制動性能の向上を図った⁽³⁾。しかし、電気モータの特長を十分に活かすためには、更に踏み込み油圧アクチュエータ側の制御則の再設

計を検討する必要があると考えられる。このような背景から、本論文では油圧アクチュエータ、電気モータ固有の応答特性を十分に生かすべく、従来型の油圧アクチュエータを用いたABSの制御則にとらわれることのない、油圧アクチュエータと電気モータの協調制御系を提案する。

2. 油圧アクチュエータを用いた従来型ABSの概要と問題点

現在市販されているハイブリッド自動車には油圧アクチュエータを用いた従来型ABSが搭載されている。従来型ABSは、空転発生時に油圧系統の切り替えを自動的に行なうことで、ブレーキトルクの調節を行なっている。油圧系統の切り替えには、ソレノイドバルブが用いられる。油圧系統には”増圧”、”圧力保持”、”減圧”3種類の系統構成がある。ABSコントローラはタイヤの空転を検知すると、ソレノイドバルブへの通電をon/offすることで油圧系統を切り替え、bang-bang制御を行うことで空転状態からの脱出を実現している⁽²⁾。

しかし、従来型ABSは滑りはじめの空転防止制御が十分達成できていないという問題点がある。油圧アクチュエータは応答特性が十分に速いとは言えず、また減圧方向の制御が不可能であるため、空転検出後より実際に作動するまでの間に車体は滑走を続けてしまう。この傾向は特に低 μ 路において顕著である。

3. 油圧アクチュエータと電気モータによる協調制御系の設計

3.1 電気モータを用いたスリップ率制御の設計 油圧アクチュエータと電気モータの協調制御系を設計するにあた

り、スリップ率制御器を設計する。電気モータを用いたスリップ率制御器の有効性は文献⁽⁵⁾において実証されている。

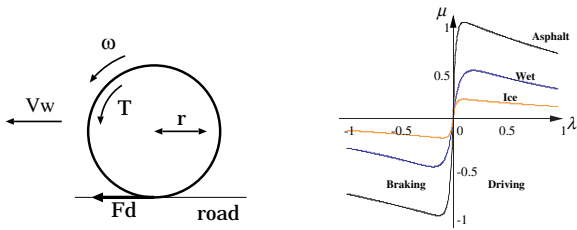


図1 車両の前後方向運動の一輪モデル 図2 $\mu - \lambda$ 曲線
Fig. 1. Single wheel model Fig. 2. $\mu - \lambda$ curve

まず、協調制御系を設計するための定式化を行う。制動時の車両挙動は図1より式(1)のように表される⁽¹⁰⁾。

$$\omega = \frac{1}{J_s}(T - rF_d), \quad V = \frac{1}{M_s}F_d, \quad V_w = r\omega \quad \dots \quad (1)$$

またスリップ率 λ と路面の摩擦係数 μ は、図2の $\mu - \lambda$ 曲線で表される。摩擦係数 μ を式(2)に代入することで駆動力 F_d が得られる。

$$F_d = \mu(\lambda)N \quad (N: \text{タイヤに働く垂直抗力}) \quad \dots \quad (2)$$

式(1)はタイヤの空転現象の数学的な理解の為に、非線形な方程式である点でやや複雑なものである。そのため本論文では、協調制御系の設計に際して、制動時における車両モデルの線形モデルを用いる⁽⁴⁾。線形モデルはブレーキトルク F_{brake} からスリップ率 λ までの伝達関数であり、駆動輪速度 V_{w0} に比例する一次遅れの形となり式(3)-(4)で表される。

$$\frac{d\lambda}{dF_{brake}} = \frac{1}{aN_e} \frac{1}{1 + \tau_r s} \quad \dots \quad (3)$$

ただし、

$$\tau_r = \frac{M_w V_{w0}}{a(1 + \lambda_0)N_e}, \quad a = \frac{d\mu}{d\lambda}$$

$$\frac{1}{N_e} = \frac{1}{N} \frac{1}{1 + (1 + \lambda_0)P_w}, \quad P_w = \frac{M_w}{M} \quad \dots \quad (4)$$

式(3)において求めた線形車両モデルに対して、スリップ率制御器を駆動輪速度 V_{w0} に比例する可変ゲインのPI制御器によって設計する⁽⁴⁾。スリップ率制御器の有効性は、文献⁽⁵⁾において実証されている。この時、 λ^* から λ までの伝達関数は、

$$\frac{\lambda}{\lambda^*} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} = \frac{\frac{K_P}{aN_e\tau_r}s + \frac{K_I}{aN_e\tau_r}}{s^2 + (\frac{K_P}{aN_e\tau_r} + \frac{1}{\tau_r})s + \frac{K_I}{aN_e\tau_r}} \quad (5)$$

となる。しかし、ハイブリッド自動車に搭載されている電気モータは小容量である為、十分な制動トルクを發揮できない場合や、出力飽和によるウィンドアップ現象を生じ、不安定状態に陥ることがある⁽⁴⁾。そこで次節以降、2段アクチュエータ型のハードディスクの位置決め制御を参考に、単独では優れた制動性能が得られない2種類のアクチュエータによる協調制御系を検討する。

3.2 PQ-method を用いて協調制御を行なう ABS の提案 ハードディスクでは、高密度に記録された情報へ高速でアクセスするために、アクチュエータによって駆動される磁気ヘッドを目的のトラックへ高速に移動させ、目的のトラック中心に高精度に追従させる高度な応答能力が要求される。こういった要求を満たすために、通常のボイスコイルモータを用いたアクチュエータの先端に、圧電素子による微動アクチュエータを取り付け、2段アクチュエータの機構制御問題として問題を捉えるアプローチがなされている。

2段アクチュエータ型のハードディスクの位置決め制御には、

Master-Slave Control、Parallel Control など様々な制御系の形が提案されており、それぞれ位置決め精度が向上することが実験によって検証、報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。その中で、Parallel Control 型の制御系の設計手法としてPQ-methodと呼ばれる手法の提案がなされている⁽⁹⁾。次節において、PQ-methodのハイブリッド自動車用ABSへの適用を検討する⁽⁴⁾。

3.3 PQ-method を用いた ABS 協調制御系の設計

PQ-methodとはParallel Control型の制御系を設計する際に、2種類のアクチュエータの相互干渉性を考慮しつつ、それぞれのアクチュエータの制御器を決定する手法である。図3に協調制御系の概念図を示す。ここで G_{motor}, G_{abs} は、それぞれ電気モータと油圧ブレーキの動特性であり制御系設計の際には一次遅れ近似する。また、 C_{motor}, C_{abs} はそれぞれのアクチュエータのコントローラである。まず図3における G_{SISO} を決定することから協調制御系の設計は始まる。 G_{SISO} は、式(6)で表される。

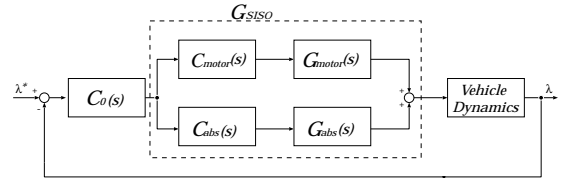


図3 ABSへPQ-methodを適用する際のブロック図

Fig. 3. Block diagram of PQ-method applied to ABS

$$G_{SISO} = C_{motor}G_{motor} + C_{abs}G_{abs} \quad \dots \quad (6)$$

G_{SISO} を決定するにあたりP、Qを式(7)のとおりに定義する。

$$PQ = \frac{G_{abs}C_{abs}}{G_{motor}C_{motor}}, \quad P = \frac{G_{abs}}{G_{motor}}, \quad Q = \frac{C_{abs}}{C_{motor}} \quad (7)$$

G_{SISO} の開ループにおける安定性は、式(8)の根を考慮することで補償される。

$$1 + \frac{G_{abs}C_{abs}}{G_{motor}C_{motor}} = 1 + PQ = 0 \quad \dots \quad (8)$$

ここでPQの絶対値は、以下の式(9)-(11)のとおりになるべきである。

$$|PQ| \ll 1 \quad (\text{高周波数帯: 電気モータが主として動作}) \quad \dots \quad (9)$$

$$= 1 \quad (\text{中間周波数帯: それぞれが同程度動作}) \quad \dots \quad (10)$$

$$\gg 1 \quad (\text{低周波数帯: 油圧ブレーキが主として動作}) \quad (11)$$

Pはプラントのみに依存するため、

$$P = \frac{G_{abs}}{G_{motor}} = \frac{\frac{1}{1 + \tau_{abs}s}}{\frac{1}{1 + \tau_{motor}s}} \quad \dots \quad (12)$$

となる。これに対して、Qを式(9)-(11)を満たすように設計する。またQを設計する際に $|PQ| = 1$ 、すなわち2種類のアクチュエータのゲインが等しくなる周波数帯において、2種類のアクチュエータの位相が甚だしく異なる状況は避けるべきである。この状況下において、2種類のアクチュエータは有害な干渉をする。これを防ぐために、PQの位相余角を60°以上確保する。本論文ではQに比例制御と位相遅れ補償を用いる。

$$Q = K_P \frac{1 + Ts}{1 + \alpha Ts} \quad \dots \quad (13)$$

このQに対して C_{motor}, C_{abs} を式(14)のとおりに分割する。

$$C_{motor}(s) = 1, \quad C_{abs}(s) = K_P \frac{1 + Ts}{1 + \alpha Ts} \quad \dots \quad (14)$$

設計した協調制御系のボード線図を図4に示す。motor, hydraulic, hydraulic+motor はそれぞれのアクチュエータのコントローラとプラントのボード線図である。ABSにおいては図3に示すように、 G_{SISO} の出力はブレーキトルク F_{brake} であり、スリップ率 λ ではない。そのため車体のダイナミクスを考慮した上で $C_0(s)$ を設計する必要がある。このとき、 $G_{SISO} \neq 1$ であるため $C_0(s)$ は G_{SISO} を考慮して設計する必要がある。ここでは、低周波数帯のゲインを稼ぐべく $C_0(s)$ にPI制御器を適用する。

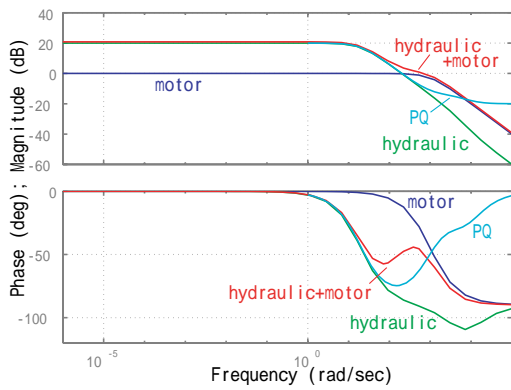


図4 油圧アクチュエータと電気モータのボード線図

Fig. 4. Bode diagram of hydraulic and electric actuators

3.3.1 シミュレーション結果と考察 PQ-methodを用いて設計したABS協調制御系の有効性の検討を、シミュレーションにより行った。ただし、シミュレーション開始後3秒間経過した時点において、路面状態 μ_{peak} を0.5、0.2と変化させた。その結果を図5に示す。スリップ率 λ の目標値追従性は良好である。2種類のアクチュエータ間における有害な干渉も見られない。また、路面状態の変化後も不安定状態に陥ることなく動作している。

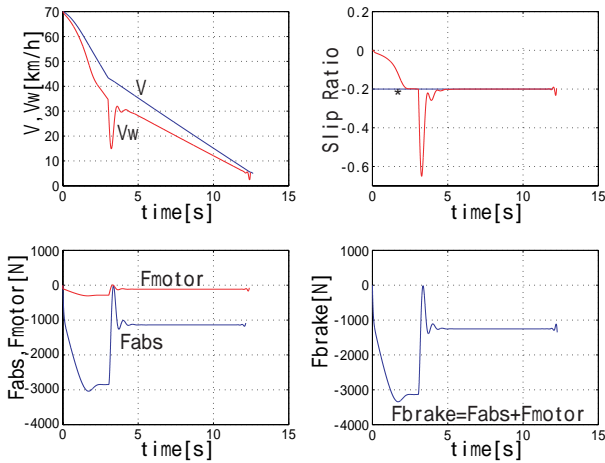


図5 PQ-method 協調制御系のシミュレーション結果

Fig. 5. Simulation results of PQ-method

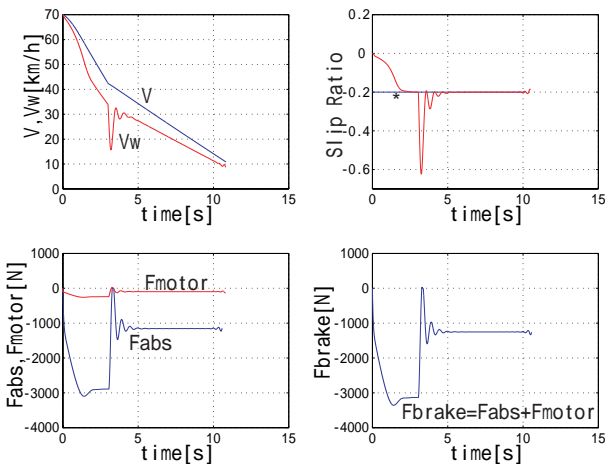


図6 油圧システムの不確かさを考慮したシミュレーション結果

Fig. 6. Simulation results considering offset-error in hydraulic brake

ところで、油圧システムにおいて最終的に制動トルクをホイールへ与えるのはブレーキパッドである。このパッド表面の状態などによって、油圧システムより伝達されるブレーキトルクには不確かさ

が生じる。その影響をここで示す。不確かさが生じるのは油圧システムからのトルクのみである。そこで、油圧アクチュエータのトルク指令値の1.2倍のトルクがホイールに与えられたとして、シミュレーションを行った。その結果を図6に示す。油圧アクチュエータ側の出力誤差の影響は見受けられず、不安定状態には陥らない。よって油圧システムの不確かさは、提案するABSの制動性能にはほとんど影響しない。

3.4 フィルタによる周波数分離を用いて協調制御を行ったABSの設計 前節では、PQ-methodを用いることで油圧アクチュエータと電気モータのゲインが等しい中間周波数帯における相互干渉を第一に考慮した、協調制御系を提案した。しかし、中間周波数帯における相互干渉性を考慮したために制御系の他の部分に無理が生じている可能性がある。また協調制御系の設計がやや複雑であるため、姿勢制御系等の上位の設計を行う際に困難が伴うことが考えられる。

そこで本節において、2種類のアクチュエータの作動周波数帯の分離に特化した協調制御系を検討し、更に簡単な協調制御系の設計法を提案する。

3.4.1 フィルタによる周波数分離を用いた協調制御系の設計 本提案手法では、まず2種類のアクチュエータの伝達特性を、

$$G_{motor}(s) \cong 1, \quad G_{abs}(s) \cong \frac{1}{1 + \tau_{abs}s} \quad \dots \dots \dots (15)$$

と仮定する。その上で図3における G_{SISSO} を

$$G_{SISSO} = C_{motor}G_{motor} + C_{abs}G_{abs} = 1 \quad \dots \dots \dots (16)$$

となるように設計する。これにより、 C_{motor}, C_{abs} でそれぞれのアクチュエータの作動周波数帯を分離し C_0 で、スリップ率制御を行うという役割分担を明確にする。設計した C_{abs} は、式(17)のとおりである。

$$C_{motor}(s) = \frac{s}{s + \omega}, \quad C_{abs}(s) = \frac{\omega}{s + \omega}(1 + \tau_{abs}s) \quad (17)$$

しかし式(17)をそのまま採用すると、電気モータは低周波数帯において全くトルクの負担をしない。電気モータの出力トルクに上限があるという側面はあるが、エネルギー回生の観点から好ましいことではない。そこで低周波数帯においても電気モータにトルクを負担させるべく C_{motor} を、

$$C_{motor}(s) = \frac{s + 0.1}{s + \omega} \quad \dots \dots \dots (18)$$

とする。このように C_{motor} で低周波数帯でのゲインを調節することで制動によるエネルギー回生効率を容易に設定することができる。式(18)を採用し、エネルギー回生効率を10%とした場合の G_{SISSO} のボード線図を図3.4.1に示す。この場合においても、中間周波数帯においてそれぞれのアクチュエータの位相は反転していない。

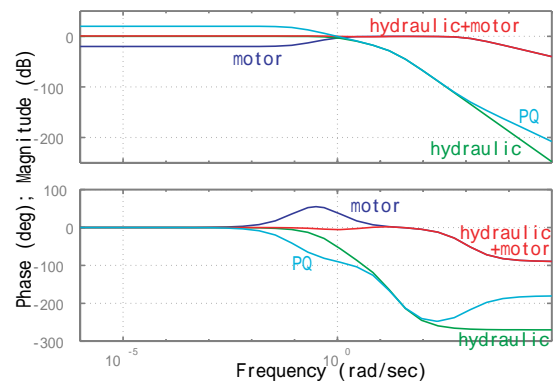


図7 エネルギー回生効率を10%とした場合のボード線図

Fig. 7. Bode diagram for the case of 10% energy regeneration

また、 $G_{SISSO} = 1$ であるため、 C_0 は制動時の車両の線形化モデル式 (3) に対して設計すればよい。そこで $C_0(s)$ は、駆動輪速度 V_w に比例する可変ゲインの PI 制御器を用いる。

3.5 シミュレーション結果と考察 フィルタによって、周波数分離を実現した協調制御系の有効性の検討を、シミュレーションにより行った。シミュレーション条件は PQ-method の場合と同様である。その結果を図 8 に示す。PQ-method を用いた制御系のシミュレーション結果、図 5 と比較して、電気モータが微動アクチュエータとして動作し、油圧アクチュエータが粗動アクチュエータとしてゆっくりと大きな出力をするという役割分担が明確である。路面状態の変化後は電気モータが正方向へトルクを出力し、空転状態からの素早い脱出を実現している。正方向へトルクを出力することは、油圧アクチュエータには不可能である。また、油圧アクチュエータの動作指令の低速化が実現されているため、指令通りに実際の油圧アクチュエータに動作させることが容易である。

また前節と同じく、油圧システムの不確かさを考慮したシミュレーションを行った。その結果を図 9 に示す。PQ-method を用いた提案手法と同じく、油圧アクチュエータ側の出力誤差の影響は現れず、不安定状態には陥らない。よって油圧システムの不確かさは、提案する ABS の制動性能にはほとんど影響しない。

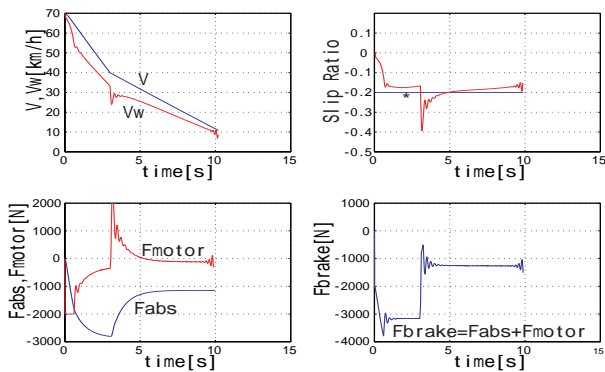


図 8 フィルタを用いた協調制御系のシミュレーション結果

Fig. 8. Simulation results of filter-method

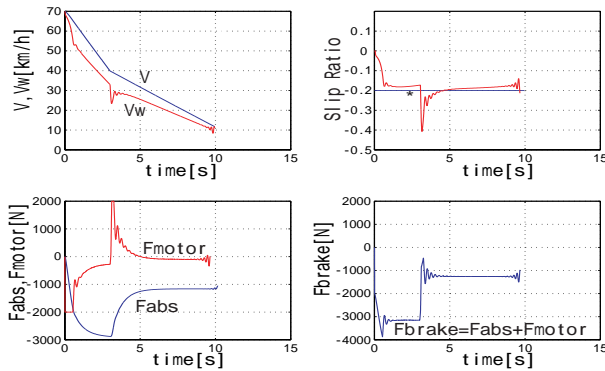


図 9 油圧システムの不確かさを考慮したシミュレーション結果

Fig. 9. Simulation results considering offset-error in hydraulic brake

4. 提案手法の検証実験に向けて

本論文で提案したハイブリッド自動車向け ABS 協調制御系の、パラメータに対する改善効果の依存性やモデル化誤差等の影響を検証するべく、新実験車両”東大三月号 II” (図 10,11) を用いた検証実験を行っている。”東大三月号 II”は電気自動車であり、油圧システムを用いた ABS は搭載されていない。そこで、油圧アクチュエータの動作を電気モータに模擬的に負担させることで実験的検証を行っている。現在実験が進行中であり、講演時に発表する予定である。



図 10 走行試験中の東大三月号 II 図 11 制動実験中の東大三月号 II
Fig. 10. UOT MarchII at test Fig. 11. Braking experiment

5. 結 論

ハイブリッド自動車に限らず、ほとんどの電気自動車には回生ブレーキが油圧ブレーキと共に用いられている。本論文では、ハードディスクの制御に用いられる PQ-method を応用して、電気モータと油圧アクチュエータの協調制御系を設計した。PQ-method を用いた ABS は、2 種類のアクチュエータのゲインが等しい中間周波数帯においてそれぞれの位相が反転することのない、相互干渉性を考慮した ABS である。

しかし、制御対象が自動車であることを考慮すると、PQ-method のように厳密に相互干渉性を考慮する必要はないと考え、フィルタによる周波数分離を用いた協調制御系を提案した。この手法は、2 種類のアクチュエータの作動周波数帯を分離することのみを目的とし、比較的容易に制御系を設計することができた。また、制動性能も十分なものが得られた。

現在は”東大三月号 II”を用いた検証実験が実行中である。今後は更に旋回中、Split- μ 路における制動力向上効果について検討する必要がある。

文 献

- (1) Hiroyuki Watanabe, "The Keyword of for the 21st Century -Hybrid-", The opening session of EVS17, 2000.
- (2) 松田 俊郎, "ABS の最新実用知識", 自動車工学, vol.11, pp.30-67, 1990
- (3) 坂井真一郎, 堀洋一 "油圧 ABS と協調した回生ブレーキ制御による空転防止効果の改善", 平成 12 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. 1, pp. 557-560, 2000.
- (4) 岡野隆宏, 堀洋一 "HEV における油圧アクチュエータと電気モータの協調制御による新しい ABS の提案", 電気学会産業計測制御研究会, IIC-01-8, 2001.
- (5) 鶴岡 慶雅, 豊田 靖, 堀 洋一, "電気自動車のトラクションコントロールに関する基礎研究", 電気学会論文誌 D, vol.118-D, No.1, pp.45-50, 1998.
- (6) 大槻治明, 森健次, 宗本隆幸, 赤城協 "磁気ディスク装置 2 ステージアクセスサーボ系のトラック追従制御", 電子情報通信学会論文誌 C-2, Vol .J75-C-2 No. 11 pp. 653-662, 1992.
- (7) Ding J., Numasato H., Tomizuka M., "Single/Dual-rate Digital Controller Design for Dual Stage Track Following in Hard Disk Drives", AMC2000-NAGOYA, pp. 80-85, 2000.
- (8) L.-S. Fan, H. H .Otesen, T. C. Reiley, R. W. Wood, "Magnetic recording head positioning at very high track densities using a microactuator-based, two-stage servo system", 42, 3, pp. 222-233, 2000.
- (9) Steven J.Schroeck.,William C.Messner., "On Controller Design For Linear Time-Invariant Dual-Input Single-Output Systems", AAC1999, pp. 4122-4126, 1999.
- (10) 安部正人, 『自動車の運動と制御』, 山海堂, 1992.