ドライブロボットのための省燃費性を考慮した 目標車速波形の導出*

水谷 直人[†]・平田 成鏡[†]・松井 博和[†]・
矢野 賢一[†]・高橋 利道[‡]

Derivation of the Reference Speed Waveform Considering the Low Fuel Consumption for a Robotic Driver*

Naoto MIZUTANI[†], Nariaki HIRATA[†], Hirokazu MATSUI[†],
Ken'ichi YANO[†] and Toshimichi TAKAHASHI[‡]

Robotic drivers are used in the vehicle performance test. The robotic driver has been expected to test the vehicle performance for the long time with high reproducibility. Applying to driving on an actual road as well as a running test is also expected because improvement of a vehicle isn't required. In order to drive on actual road, it is necessary to drive with pedal operation like a person. However, unlike a professional driver, it is difficult for a robotic driver to drive with smooth pedal operations and low fuel consumption. First, we performed a preliminary test by a professional driver and a robotic driver. From this test, we found that the square value of the power of the vehicle was effective for driving with low fuel consumption. Therefore, we propose the objective function considering the square value of the power. Then, we derived the reference velocity in a driving cycle's tolerance for the robotic driver by the proposed objective function. Finally, we performed the vehicle test by the robotic driver. We made sure that the proposed system was effective from the result of the actual vehicle tests.

1. はじめに

アクセル・ブレーキペダルを操作し、任意の走行パターンを自動で走行することができるドライブロボットが、耐久試験などの車両走行試験において使用されている [1]。ロボットを使用することにより車両を改造する必要がないため、車両走行試験だけでなく路上での車両の運転での使用も期待される。人と同じように路上で運転するためには、人と同じようなペダル操作による運転が必要不可欠となるが、現在のドライブロボットのシステムでは、人のような車両特性を考慮した運転を行うことはむずかしく、近年注目されている省燃費を意識した運転の実現もむずかしい。

ドライブロボットは、従来さまざまな機関で研究・開発されており、H. Namil らは PID 制御を用い [2], G.

Chan らは協調制御とスライディングモード制御を組み合わせたフィードバック系の制御系の構築を行っている [3]。また、森らは強化学習を用いて PID 制御パラメータの調整を行っている [4]。フィードバック制御器は、検出された車速を基にして制御が行われる。しかしながら、自動車はペダルを踏んでから車速が出力するまでに時間の遅れが存在するため、検出された車速とペダル操作量にタイミングのずれが生じ、オーバーシュート量が大きくなり、車両特性を考慮した安定したペダル操作での運転は困難である。そこで、S. Sailer らは車両特徴を表現した駆動力マップなどをフィードフォワード制御器として使用する 2 自由度コントローラを適用し、アクセル操作の変動を小さくし、ペダル操作の安定化を図っている [5,6]。

フィードバック制御とフィードフォワード制御の 2 自由度制御系を適用することで、ペダル操作を安定させることは可能であるが、加速と減速が切り替わる目標車速の変曲点などでの急激なペダル操作の変動を低減することができず、省燃費走行を実現することは難しい。人が運転するときは、目標とする車速軌道に対して車両の特性を考慮した軌道をイメージした目標波形に対して追従する運転を行っている。そのため、人の運転の特徴や車両特性を考慮した目標車速をドライブロボットに入力として与えることができれば、より省燃費の走行を実現で

* 原稿受付 2015 年 3 月 11 日

[†] 三重大学 大学院 工学研究科 Department of Mechanical Engineering, Mie University; 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu-city, Mie 514-8507, JAPAN

[‡] 株式会社明電舎 MEIDENSHA CORPORATION; ThinkPark Tower, 2-1-1, Osaki, Shinagawa-ku, Tokyo 141-6029, JAPAN

Key Words: robotic driver, low fuel consumption, automatic driving control, vehicle dynamics, vehicle test.

きる。

そこで本研究では、導出した目標車速波形をドライブロボットの入力とし走行することで省燃費走行を実現する制御システムの開発を行う。与えられた目標車速波形から省燃費走行の実現に影響のある因子を特定し、影響している因子を評価関数としてドライブロボットへの目標車速波形の導出を行う。最終的には、導出した目標車速波形を用いた走行試験を実施し、提案手法の有効性を示す。

2. 装置概要

本研究で使用する Fig. 1 に示すドライブロボットは、それぞれが独立して動作する 1 自由度のアクセルペダル用とブレーキペダル用の直動アクチュエータにより構成される。車両のアクセルペダルとブレーキペダルをアクチュエータが踏み、伸縮量を調整することで車速制御を行う。

Fig. 1 Drive robot used by this experiment

自動車の駆動力特性を考慮したフィードフォワード制御系と、目標車速と検出車速の車速偏差に対する PI フィードバック制御の 2 自由制御系である Fig. 2 に示す制御系を使用する。ここで、 V_{ref} [km/h] は目標車速、 V_{det} [km/h] は検出車速であり、 V'_{ref} [km/h] は、 V_{ref} から走行試験の用途に合わせて導出された目標車速である。また、 M_v [kg] は車両重量、 F_x [N] は目標車速に必要な車両駆動力、 F_{RL} [N] はシャシダイナモメータによって模擬される走行抵抗、 F_{ref} [N] は目標駆動力、 TH_{ref} [%] はアクセルペダル踏込指令値、 TH_{det} [%] はアクセルペダル踏込検出値、 BK_{ref} [%] はブレーキペダル踏込指令値、

Fig. 2 Block diagram of the speed tracking system

BK_{det} [%] はブレーキペダル踏込検出値である。フィードフォワードコントローラは、事前に作成された駆動力 MAP であり、目標車速と目標駆動力から目標アクセルペダル踏込量を決定する。目標駆動力 F_{ref} は目標車速に必要な駆動力とシャシダイナモメータで模擬される走行抵抗値を加算した値である。 F_{ref} 、 F_x 、 F_{RL} を (1) 式から (3) 式に示す。

$$F_{ref} = F_x + F_{RL} \quad (1)$$

$$F_x = \frac{M_v}{3.6} \frac{d}{dt} V_{ref} \quad (2)$$

$$F_{RL} = AV_{det}^2 + BV_{det} + C \quad (3)$$

A 、 B 、 C は試験車両ごとに設定する定数である。(3) 式に示す走行抵抗 F_{RL} は、車両が受ける転がり抵抗、空気抵抗などを車速の二次関数に近似して演算し、抵抗値を試験車両に付加する。

本研究で行う走行試験は、一定条件下での燃費性能を評価するため、実際に燃費性能試験で使用されている Fig. 3 に示す JC08 モード走行波形を使用する。

Fig. 3 Velocity waveform of JC08 mode

JC08 モード走行波形には、Fig. 4 に示すように目標車速に対して車速 ± 2.0 [km/h] 以内、時間 ± 1.0 [s] 以内の許容範囲が設定されている。この許容範囲を超えた走行は逸脱とよばれ、総逸脱可能時間も 2.0 [s] と定められているため、本研究でもこの規定に従順する。

本研究では、各実験において燃料消費率を算出する。

Fig. 4 Tolerance of driving mode

燃料消費率の計算方法には、カーボンバランス法 [7] を使用する。カーボンバランス法とは、ガソリン車や LP ガス、軽油を燃料として用いる自動車において、エンジンに入る燃料中の炭素原子数と排出される排気ガス中の炭素原子数が同じであることを利用し、排気ガス中の一酸化炭素、二酸化炭素、炭化水素から燃料消費率を算出する方法である。カーボンバランス法に基づくガソリンを燃料とする自動車の燃料消費率の算出式を (4) 式に示す。

$$F_c = \frac{649}{0.429M_{CO} + 0.866M_{THC} + 0.273M_{CO_2}} \quad (4)$$

ここで、 F_c は燃料消費率 [km/l]、 M_{CO} は一酸化炭素量 [g/km]、 M_{THC} は総排出炭化水素量 [g/km]、 M_{CO_2} は二酸化炭素量 [g/km] を示す。

3. 人による走行試験

本研究では、人とドライブロボットの両方が運転可能である Fig. 5 の設備を用いる。試験車両には、前輪駆動 (FWD) の排気量 1.8[L]、4 速 AT の乗用車を使用する。

Fig. 5 Experimental image

人が運転する際に車速の追従性を意識して走行した場合 (1 回目) と、省燃費を意識して走行した場合 (2 回目) の結果を Fig. 6 に示す。この走行試験のドライバは日常頻繁に運転しており、モード運転についても熟練している者である。省燃費走行は、エネルギーを小さくする走行であると考えられるため、自動車の発揮エネルギーである (5) 式に示される仕事率 $W(t)$ に着目した。

$$W(t) = F(t) \cdot v(t) \quad (5)$$

ここで、 $F(t)$ は駆動力あるいは制動力から走行抵抗を引いた値、 $v(t)$ は車速である。さらに、正負の仕事率を考慮するため二乗値とした。グラフは 1 段目から順に車速、アクセルペダル操作量、ブレーキペダル操作量、仕事率の二乗値を示す。

Fig. 6 の 2 段目から、1 回目と 2 回目でのアクセルペダルの操作量が異なり、人による運転は目的によって運転方法を変化させていることがわかる。また、試験走行を繰り返し実施した際に、Fig. 6 最下段に示すように、ア

Fig. 6 Vehicle travel test by human driver

クセルペダルの操作量とブレーキペダルの操作量の変動に合わせて、仕事率の二乗値が変動し増加することがわかった。そこで、アクセル操作の中央周波数、ブレーキ操作の中央周波数、平均仕事率の二乗値、燃費を比較した。その結果を Table 1 に示す。ここでペダル操作量を微分した値に対して高速フーリエ変換を行い、得られたパワースペクトルのグラフからパワースペクトルの面積を求め、面積の半分となる周波数をペダル操作の中央周波数と定義する。

Table 1 Details of test results of human driver

Times	Central frequency of accelerator pedal operation [Hz]	Central frequency of brake pedal operation [Hz]	Fuel consumption [km/l]	Square value of average power [W ²]
1st	0.234	0.370	13.39	2.31×10^7
2nd	0.180	0.333	13.53	2.09×10^7

Table 1 に示されるように、仕事率の二乗値が低減されるとペダル操作の中央周波数が小さくなり、省燃費走行を実現する傾向がある。また、周波数が小さくなると操作周期は大きくなるため、ペダルの変動が小さくなる傾向がある。エコドライブ手法に関する代表例として、省エネルギーセンターでは「エコドライブ 10 箇条」を提言している [8] が、試験結果は、そこに示されているアクセル操作やブレーキ操作について意識した運転である。

4. 燃費に関する予備実験

一般的に、ペダル操作の変動 ($\dot{T}H_{det}$, $\dot{BK}_{det}$) が少ない運転は省燃費運転を実現し、仕事率の二乗値が小さくなる。また、前章の人による走行試験からも同様の結果が得られた。仕事率に着目することに関して、鶴川らの研究においても走行時のエネルギー消費を最小にするために、車両の消費する仕事量が最小となる车速波形を用いて燃費の向上を図る手法が提案されており [9]、また、野田らの研究では燃料消費量に直接影響する因子は走行仕事量としている [10]。これらの研究では、実際に車両が消費する仕事量を算出するために、ギア比やトルク伝達効率など車両パラメータがすべて既知であることを前提としている。しかしながら、これらのパラメータは車両ごとに異なるため、目標车速の導出に際して車両パラメータに依存しない因子を探す必要がある。そこで、何度も同じ状況で繰り返し走行試験が可能であるドライブロボットによる走行において、目標车速を変化させた際の走行結果への影響を調べるために目標车速における加速度や減速度のパラメータを変更させ試験を行った。

4.1 試験概要

シャシダイナモメータを用いた試験において使用する车速波形は、あらかじめ時間と车速で定義されており、车速を変更できる許容範囲には限りがある。そのため、车速波形内で変更できるパラメータとして、车速 v [m/s]、加速度 a [m/s²]、走行距離 d [m] に焦点を絞る。走行条件として走行距離を 1,500 [m]、また JC08 モードの最高车速が 81.6 [km/h] であることから最高车速を 80 [km/h] と固定して、加速度を変化させて試験车速波形を作成した。また、シャシダイナモメータでは、车速に応じた走行抵抗のほか、登坂勾配抵抗を模擬することも可能であるため、同一车速波形において道路勾配設定値を変化させた場合の燃費についても測定を行った。加速度評価試験では、前述した一定条件下において、加速部分の正の加速度を 0.2 [m/s²]、0.4 [m/s²]、0.6 [m/s²]、1.0 [m/s²]、1.4 [m/s²]、2.5 [m/s²] と変化させ、減速部分の加速度については、−1.0 [m/s²] で固定とした。減速度評価試験では、減速部分の加速度を −0.2 [m/s²]、−0.4 [m/s²]、−1.0 [m/s²]、−1.4 [m/s²]、−2.5 [m/s²] と変化させ、加速部分の加速度については、1.0 [m/s²] で固定とした。また、道路勾配を模擬的に変化させる試験では、加速度評価試験の加速度 1.0 [m/s²] の波形を用いて道路勾配設定値を 1.0%、3.0%、5.0%、7.0% と変化させた。試験回数は、試験のばらつきを考慮して各項目に対して 3 回とし、試験車両を十分に暖気した状態で評価する。

4.2 試験結果

1 回目の加速度評価、減速度評価、勾配評価の試験結果をそれぞれ Fig. 7 から Fig. 9 に、燃費の結果をそれぞれ Table 2 から Table 4 に示す。試験結果のグラフは上から順に车速、アクセル踏込量、仕事率、その時刻での

Fig. 7 1st evaluation by acceleration

Table 2 Details of test results of acceleration evaluation

	Reference acceleration [m/s ²]					
	0.2	0.4	0.6	1.0	1.4	2.5
1st	13.73	12.59	12.17	11.85	11.70	11.30
2nd	13.86	12.42	12.31	12.03	11.61	11.42
3rd	13.86	12.92	12.42	12.11	11.74	11.56
Ave.	13.81	12.64	12.30	12.00	11.68	11.43

Table 3 Details of test results of deceleration evaluation

	Reference deceleration [m/s ²]				
	−0.2	−0.4	−1.0	−1.4	−2.5
1st	15.54	13.74	12.22	11.81	11.35
2nd	15.18	13.49	11.99	11.77	11.34
3rd	15.20	13.35	11.93	11.64	11.32
Ave.	15.31	13.56	12.05	11.74	11.34

Table 4 Details of test results of gradient evaluation

	Reference road gradient [deg]			
	1.0	3.0	5.0	7.0
1st	11.21	9.36	7.95	6.94
2nd	11.00	9.36	7.97	6.94
3rd	11.15	9.41	7.99	6.96
Ave.	11.12	9.37	7.97	6.95

燃費値を示す。燃費については各時刻までの排気ガス物質質量、走行距離より (4) 式を使用して算出した値である。最終的な評価となる燃費は、(4) 式によって求められた

Fig. 8 1st evaluation by deceleration

値の最終値となる。また、アクチュエータの伸長の割合をペダル踏込量と定義し、最もペダルを踏み込んでいるときを100%とする。

加速度評価試験では加速度の増加に伴い、アクセル踏込量、仕事率が増加していることがわかる。また、加速部分の加速度の増加に伴い、燃費が悪くなる結果となった。

一方、減速度評価試験では、加速度評価試験よりも減速部分の加速度の差が燃費の計測結果に大きく現れている。また、減速部分の加速度の減少（負方向への増加）に伴い、燃費が悪くなる結果となった。

勾配評価試験では、シャシダイナモメータの道路勾配設定値を割合で指定することで、走行抵抗値を増加させた。道路勾配の増加に伴って、仕事率が増加していることがわかる。また、勾配値の増加により燃費が悪くなる結果となった。

各燃費評価試験において、最も燃費に差が出た試験は減速度評価試験と勾配評価試験であった。そこで、燃費に関してこの二つの要素を基に考察を行っていく。まず、勾配評価試験の Fig. 9 から仕事率が正方向へ増加する状態において、顕著に燃費の差が開いていることがわかる。また、Fig. 8 から負の仕事率が増加するにつれて燃費が悪くなっていることがわかる。これは、減速度が少ないほど走行抵抗のみによる減速となり、減速度が増加するにつれてブレーキの踏込量が増えることによって強制的な減速となるため、エネルギー損失が多くなるためと考えられる。

Fig. 9 1st evaluation by road gradient

以上のことから、仕事率の絶対値を抑制するアクセル操作とブレーキ操作を行えば、省燃費性の高い走行を実現できると考えられる。さらに、Fig. 9 の40~80[s]に示されるように高速度域において、より燃費の差が開いていることから、高速度域での仕事率の絶対値をとくに抑制する必要がある。つまり、仕事率の二乗値を低減することで、高速度域での仕事率の絶対値をより小さくすることができ、より省燃費性の高い走行を実現できると考えられる。このことは、前節における人のドライバの走行結果とも一致する。

5. 目標車速波形の導出

5.1 評価関数の提案

前節の予備実験の結果より省燃費走行に関する評価関数を仕事率の二乗値としてモード試験許容範囲内で目標車速波形の導出を行う。(5)式で示す仕事率の二乗値は、基となる目標車速波形の車速と加速度から導出できるため車両パラメータに依存しない。本研究では、目標車速波形を求めるために、時間ステップごとに評価関数が最も小さくなる加速度を算出し、算出速度点間を等加速度運動として(6)式によって漸進的に目標車速波形を求める方法を適用する。

$$v(t) = v(t - \Delta t) + a(t)\Delta t \quad (6)$$

ここで、 $a(t)$ は加速度、 Δt はサンプル時間である。

本研究で提案する評価関数 $J(t)$ を(7)式に示す。 $B(t)$ は(8)式で示す許容範囲からの逸脱を防ぐためのバリア

関数であり, $B_{est}(t)$ は (10) 式に示す算出した加速度において 1 秒先の車速 (以下, 先読み車速と記す) を見た場合, 逸脱しないようにするためのバリア関数である. バリア関数を設定することで, 許容領域の境界へ近づくほど評価関数値が増加し逸脱を防止することができる.

$$J(t) = W(t)^2 + B(t) + B_{est}(t) \quad (7)$$

拘束条件として, 走行試験の許容範囲からの逸脱を防止するために, (8) 式を設定する.

$$B(t) = \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\{T_{upp}(t) - v(t)\}^2} + \frac{1}{\{v(t) - T_{low}(t)\}^2} \right] \quad (8)$$

ここで, $T_{upp}(t)$ は t 秒時の許容上限値, $T_{low}(t)$ は t 秒時の許容下限値, r はバリア関数の影響度を決定する重み係数である.

また, 許容範囲直前において加速度が急に立ち上がることを防ぐため, 算出した加速度のまま 1 秒先 (先読み車速) の車速を計算し, その車速が許容範囲を逸脱しないことも条件とする. 同加速度での先読み車速を (9) 式に示す.

$$v_{est}(t) = v(t - \Delta t) + 2a(t)\Delta t \quad (9)$$

さらに, 先読み車速によるバリア関数を (10) 式に示す.

$$B_{est}(t) = \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\{T_{upp}(t + \Delta) - v_{est}(t)\}^2} + \frac{1}{\{v_{est}(t) - T_{low}(t + \Delta)\}^2} \right] \quad (10)$$

5.2 システムの動特性の考慮

ドライプロボットを用いた実システムは, 車速制御系の特性や試験車両の特性により, 目標車速に対しての遅れやオーバーシュートといった過渡部分による動特性が存在する. ランプ波形と一定速度波形を組み合わせた波形での試験結果の一部 (335[s] から 410[s]) を示した Fig. 10 からも, ドライプロボットがペダルを踏み込んでから車速が上昇, 減少するまでに遅れが発生し, 一定速度領域においてオーバーシュートが発生していることがわかる. そのため, 目標車速波形設計時において実システムで使用した際に逸脱しないよう考慮する必要がある. しかし, 実システムを用いた設計は決定車速ごとに試験を行い逸脱を考慮しなければならないため非効率である. そこで, システムの過渡特性を模擬するために特徴量を抽出した簡易的なモデル化を行う. 過渡部分に遅れとオーバーシュートが存在していることから, 台形波形を目標車速として入力した時の検出車速を (11) 式で示す 2 次遅れ系とむだ時間の伝達関数による特性として表現する. このモデルは, 詳細な車両パラメータが未知の場合においても簡単な走行試験によって同定することが可能である.

Fig. 10 Running test of 1015 mode by delay model

$$G(s) = \frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\tau\zeta s + 1} e^{-Ls} \quad (11)$$

ここで, 上式の係数を同定するため, 台形波形を用いる. また, 本来のシステムは非常に複雑であり, 制御ロジックや自動車の構成要素内に非線形要素を伴っているため, 線形モデルでは完全に近似することはできないことから, 各速度の台形波形において特性が近づくように同定を行った. Fig. 11 に台形波形での目標車速と実システムでの応答, 過渡特性近似モデルの応答を示す.

Fig. 11 Identification of transient property by delay model

最大遅れとオーバーシュートを考慮できるようにパラメータ調整を同定した結果, $K=1$, $\tau=0.752$, $\zeta=0.315$, $L=0.5$ となった.

(7) 式で提案した評価関数を用い, (11) 式の遅れ系モデルにより実システムの過渡特性を考慮したうえで最急降下法のアルゴリズムによって目標車速波形の導出を行う. 最急降下法とは, 非線形計画法の一つであり, 適当な初期推定解から出発して評価関数値が減るように解の推定値を少しずつ更新し, 局所最適解へ収束させる勾配法のアルゴリズムの一つである [11]. 本研究では, 初期加速度

$a_0(t) = 0$, 勾配ベクトルの収束条件を $\left| \frac{\partial f(a_0)}{\partial a} \right| < 10^{-4}$ と設定した. また, 解の探索ステップサイズは, Armijo 基準と Wolfe の基準を満たすように導出した.

5.3 目標車速波形

提案した評価関数を基に作成した JC08 モードによる車速波形の 570[s] から 680[s] の区間を拡大したものを Fig. 12 に示す. また, Table 5 に基準となる JC08 車速波形と導出した車速波形の走行距離, 最大車速, 仕事率の二乗値の平均値, 正の仕事量と負の仕事量を示す.

Fig. 12 Elements on larger scale of designed reference velocity

Table 5 Profile of proposed velocity

	Unit	JC08standard	Propoed velocity
Distance	km	8.172	8.142
Maximum speed	km/h	81.6	80.5
Square of average power	W ²	2.22×10^7	1.64×10^7
Total amount of positive work	J	7.84×10^5	6.82×10^5
Total amount of negative work	J	5.90×10^5	5.08×10^5

6. 提案目標車速波形を用いた走行試験

導出した目標車速波形の有効性を検証するために走行試験を行った. 従来, 追従性の向上のため目標車速波形に対し任意設定した時間の移動平均を取り, 位相を合わせた波形を目標波形とする方法も使用されている. そこで, 本研究では提案手法の比較として, JC08 モード標準波形と JC08 モードの 3 秒間を移動平均処理した車速波形での走行実験も行った. 今回も試験ごとのばらつきを考慮して試験車両を十分に暖気した状態において各 3 回測定を行った. JC08 標準車速波形と従来手法の JC08 の 3 秒間移動平均車速波形, そして提案した車速波形による試験結果のそれぞれ 1 回目の結果の 570[s] から 680[s] の区間を拡大したものを Fig. 13 に示す. また, Table 6 に各試験での 1 回目, 2 回目, 3 回目, 仕事率の二乗値の平均値, アクセルペダルとブレーキペダルの中央周波数, 燃費, 逸脱時間を示す.

Table 6 より, JC08 の標準波形, 移動平均波形, 提案波形ともに 1 回目から 3 回目のすべてにおいて逸脱せず許容範囲内で追従している. さらに, ペダル操作の中央周波数と燃費がともに標準波形, 移動平均波形, 提案波形の順に小さい値となっている. 仕事率の二乗値を最小とすることで, ペダル操作の変動が小さくなり結果とし

Fig. 13 Elements on larger scale of experimental result

Table 6 Details of experimental results

Reference for robotic driver	Times	Square of average power [W ²]	Central frequency of throttle pedal operation [Hz]	Central frequency of brake pedal operation [Hz]	Fuel consumption [km/l]	Deviation time [s]
Standard	1st	2.46×10^7	0.222	0.228	13.27	0.0
	2nd	2.45×10^7	0.223	0.225	13.21	0.0
	3rd	2.46×10^7	0.222	0.224	13.23	0.0
	Ave.	2.45×10^7	0.222	0.226	13.24	0.0
Moving averaged	1st	2.16×10^7	0.160	0.211	13.50	0.0
	2nd	2.15×10^7	0.162	0.211	13.46	0.0
	3rd	2.15×10^7	0.162	0.211	13.49	0.0
	Ave.	2.15×10^7	0.162	0.211	13.48	0.0
Proposed waveform	1st	1.85×10^7	0.155	0.212	13.62	0.0
	2nd	1.84×10^7	0.154	0.200	13.61	0.0
	3rd	1.84×10^7	0.155	0.202	13.68	0.0
	Ave.	1.84×10^7	0.154	0.205	13.64	0.0

て燃費が向上したと考えられる. 燃費の平均値を比較すると, 提案波形での燃費は標準波形と比較して 3.02%, 移動平均波形と比較して 1.19% 向上している. 以上より, 仕事率の二乗値を考慮した提案波形は, ペダル操作の変動を減らし, 燃費値の向上に有効であることが確認できた.

7. おわりに

本研究では, 本試験で使用した排気量 1.8L の 4 速 AT 車に対して, 試験車両を十分に暖気したホットスタートの状態において走行試験を実施した. モード走行試験の逸脱許容範囲内において, 仕事率の二乗値を評価値とす

る評価関数を提案するとともに、実機試験での過渡特性を 2 次遅れとむだ時間にて近似した。そして、提案した評価関数、近似した遅れ系モデルを用いた最急降下法のアルゴリズムにより、JC08 モードを省燃費で走行するための目標車速波形を導出した。さらに、実システムを用いて JC08 モード標準波形、JC08 移動平均車速波形、本研究で導出した目標車速波形の 3 種類を入力とし燃費走行試験を行った。試験結果より、シャシダイナモメータ上でのドライプロボットによる運転において、目標車速波形を変更することでペダル操作が変化すること、および燃費に影響のある因子として仕事率の二乗値が有効であることを確認した。本試験設備での試験結果から、提案した評価値の有効性と、従来の目標車速波形から提案波形での省燃費化を確認した。

今後は、本研究の有効性を他車種においても確認し、試験や評価の目的・用途に合った運転操作方法の実用化を目指す。

参考文献

- [1] 菅家: 排ガスモード走行試験における運転ロボットの車速追従制御; ファジシステムシンポジウム講演論文集, TA4-4 (2008)
- [2] N. Namil, T. Inamura and K. Stol: Development of a robotic driver for vehicle dynamometer testing; *Proc. of the 2006 Australasian Conference on Robotics & Automation* (2006)
- [3] G. Chen, W. Zhang and X. Zhang: Speed tracking control of a vehicle robot driver system using multiple sliding surface control schemes; *International Journal of Advanced Robotic System*, Vol. 10, 90 (2013)
- [4] 森, 二宮, 森田, 鵜飼: 強化学習を用いたアクセル・ブレーキペダル操作のためのドライバモデル-車速追従と人間らしい操作を実現する報酬関数の提案-; 第 13 回計測自動制御学会制御部門大会 (2013)
- [5] S. Sailer, M. Buchholz and K. Dietmayer: Driveaway and braking control of vehicles with manual transmission using a robotic driver; *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, pp. 235-240 (2013)
- [6] S. Sailer, M. Buchholz and K. Dietmayer: Adaptive model-based velocity control by a robotic driver for vehicles on roller dynamometers; *American Control Conference (ACC)*, pp. 1356-1361 (2013)
- [7] 株式会社堀場製作所 自動車計測システム統括部: エンジンエミッション計測ハンドブック (2006)
- [8] 国土交通省: エコドライブ 10 のすすめ (2012)
- [9] 鵜川, 北村: 省エネルギー速度制御による燃費改善; 自動車研究, 第 33 巻, 第 3 号 (2011)
- [10] 野田, 佐藤, 山本, 塚本: 自動車燃料消費への影響要因分析に基づく消費抑制対策効果の効果予測法に関する研究; 交通安全環境研究所報告第 5 号 (2004)
- [11] 大塚: 非線形最適制御入門, コロナ社 (2013)

著者略歴

みず 谷 直 人

2013 年 3 月三重大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了, 同年 4 月三重大学大学院工学研究科システム工学専攻博士後期課程に入学し, 現在に至る。ドライプロボットの性能向上に関する研究に従事。自動車技術会, 日本機械学会, 日本ロボット学会などの会員。

ひら 田 成 鏡

2014 年 3 月三重大学工学部機械工学科卒業, 同年 4 月三重大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程に入学し, 現在に至る。ドライプロボットの性能向上に関する研究に従事。自動車技術会, 日本ロボット学会などの会員。

まつ い 博 和

1997 年神鋼電機株式会社入社, 1998 年三重大学工学部助手。2000 年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 工学博士。2007 年三重大学工学部機械工学科助教, 現在に至る。機械学習, 画像処理, 自律移動ロボットに関する研究に従事。電子情報通信学会の会員。

や の 賢 一 (正会員)

1999 年 3 月豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系助手, 2004 年 4 月岐阜大学工学部機械システム工学科助教授, 2010 年 8 月三重大学大学院工学研究科機械工学専攻教授となり現在に至る。2002 年 8 月~2003 年 8 月ベルリン工科大学客員研究員。システム制御理論とその応用に関する研究に従事。2010 年計測自動制御学会学会賞 (論文賞) 受賞, 2012 年システム制御情報学会学会賞 (論文賞) 受賞。計測自動制御学会, 自動車技術会, 日本機械学会, 日本鋳造工学会, 日本ロボット学会, IEEE などの会員。

たか はし とし みち

1998 年 (株) 明電舎入社, 現在に至る。動力計応用製品の研究開発およびシステムエンジニアリングに従事。電気学会, 自動車技術会の会員。