

# 運転意思を考慮した変速音および操作特性による心地よい変速操作感の創生

## Creation of Comfortable Shifting Operation Feeling by Shifting Sound and Operating Profile in Consideration of Driving Intentions

精密工学専攻 33号 清水 周作  
Shusaku Shimizu

### 1. はじめに

近年、クラッチ操作が不要で手動変速が可能なセミオートマチック(以降、AT)車が販売されており、AT限定免許でも変速操作によって運転を楽しむことができる。しかし、手動変速への不慣れや変速ショックのぎこちなさなどの影響で変速フィーリングが低いという問題がある。

先行研究ではこれらの問題を解決するために、変速時のフィードバックとして手動変速時に音や振動(以下、変速音および変速振動)を付加することで、これらの欠点を改善できる可能性が示唆されている<sup>(1)(2)</sup>。また、加速走行時における車室内音の研究<sup>(3)(4)</sup>がなされており、特に運転者の意思に応じた適切なエンジン音の周波数特性が存在する可能性が示唆されている<sup>(5)</sup>。これより運転意思に見合った変速音の創生が望まれている。また、操作タイミングに対する時間遅延に関する研究<sup>(6)</sup>がなされており、変速操作においても、時間遅延における操作感向上や悪化を感じる閾値などがあると考えられる。

そこで本研究では、運転者の意思と変速操作の変化に着目し、それに適した変速音により、心地よい変速操作感の創生を目指す。まず、運転者の意思の変化に対し、操作時間や操作力の変化を把握する。次に、操作への変化に対応した変速音の遅延時間や周波数特性、エンジン音との差分などの良条件の選定する。さらに、ドライビングシミュレータ(以降、DS)を用いた評価試験により行う。

なお、本研究は評価実験にて中央大学の倫理規定に準じ被験者に十分なインフォームド・コンセントを実施している。

### 2. 加速意思変化による操作への影響把握

本章では、運転意思の変化方法の定義について述べる。次にシフトレバーのストローク量と操作力それぞれの時系列変化に着目し、運転タスクを行うことで加速意思が変化した際の各パラメータの変化について特性把握を行う。

#### 2.1 運転意思の切り分けについて

本研究では、様々な運転に対し「運転者がどの程度加速したいか」という加速意思に着目する。加速意思の予測手法として、アクセル開度の変化率と車速による予測モデルが提案され、アクセル開度にメリハリをつけた際において有効性が示されている<sup>(6)</sup>。

加速意思をアクセル開度の大小によって切り分ける。加速意思が小さい場合はアクセル開度を低開度(Fig. 1に示すDS上で55% ± 5%)、加速意思が大きい場合はアクセル開度を高開度(DS上で100%)として走行タスクを行う。なお、各アクセル開度は実車走行時におけるものと同程度になるように設定している。

#### 2.2 操作特性取得の方法について

操作特性の取得にあたり、操作力とストローク量を1ms間隔で取得可能なシーケンシャルシフトレバー(以下、シフ

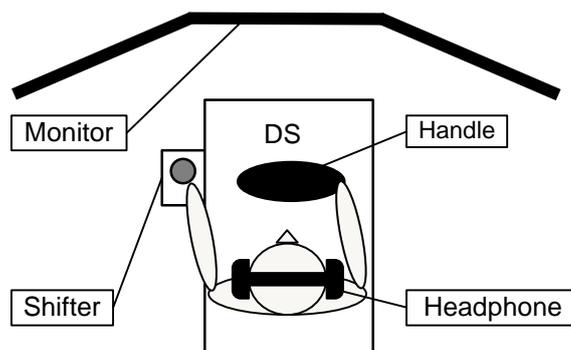


Fig. 1 Experimental setup

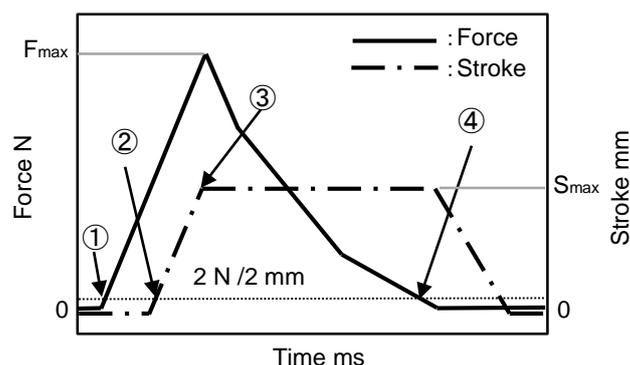


Fig. 2 Time characteristics in shift operation

タ)を使用する。シフトを倒すことでシフトアップし、この時の最大操作力 $F_{max}$ は約40N、最大ストローク量 $S_{max}$ は約20mmである。操作力およびストローク量データ取得にあたり計測開始および終了の閾値を設定する。取得する操作力とストローク量の時間特性の概略図をFig. 2に示す。指でシフトを触っている状態を想定し、①のシフト操作力2Nにて操作力データ取得の開始および④の終了とする。さらにストローク量の取得に関しても上記を加味し、②の2mmをストローク量のデータ取得の開始とし、③のシフトが止まった位置であるストローク最大値20mmを終了とする。以上の各タイミング間の時間計測を各被験者で行う。

#### 2.3 加速意思変化による変速操作への影響把握実験

本実験ではDS上にて被験者が加速走行タスクを行い、アクセル開度の変化によって操作特性にどのような変化があるか把握を行う。実験セットアップをFig. 1に示す。運転席左側に2.2節で示したシフトを設置する。被験者には走行時にエンジン音をヘッドホンにて提示する。提示する変速時のエンジン音のピーク音圧レベルは低開度で約70dB、高開

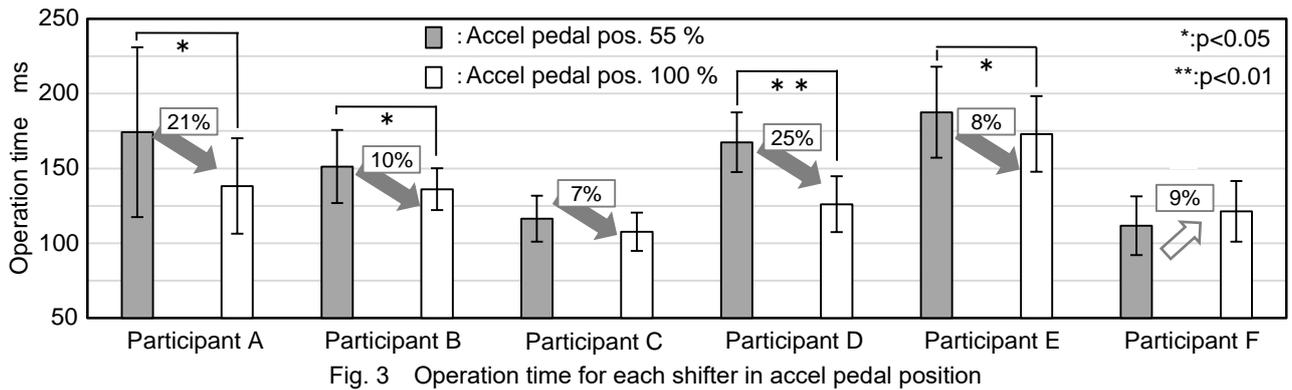


Fig. 3 Operation time for each shifter in accel pedal position

度で約 80 dBA とする。走行コースは全長 4 km のオーバルコースとし、操作特性計測時の加速走行はコース内の全長約 1 km の直線路にて行う。

実験の流れは 5 分間の練習走行を行った後、1-4 速で加速走行を行い、各変速回にてシフト操作力とストローク量の取得を行う。これを 8 セット繰り返し、各アクセル開度につき計 24 回操作特性を取得する。さらに、実車走行を模擬し、変速時のエンジン回転数は低開度の場合は 3000 rpm、高開度の場合は 6000 rpm と設定した。被験者は正常な聴覚を有し、運転免許を取得している 20 代 6 名である。

#### 2.4 操作特性取得結果と考察

Fig. 3 に 2.2 節に示した①-④各タイミングのうち、③-④間の時間を示す。③-④間はアクセル開度の変化により操作時間が短くなる傾向にあり、この時間は「シフトが止まった位置から操作力が抜けるまでの時間」と解釈できる。したがって加速意思変化によってシフトから操作力が抜けるまでの時間に変化が生じると考えられる。なお、以降はこの時間を操作時間と定義する。さらに、実験後の被験者への聞き取りによると「高開度ではシフト操作が軽くなったように感じた」との意見があった。したがって、加速意思によってシフト操作力に変化が生じると推測される。

以上より、アクセル開度変化で加速意思の変化が生じ、シフトの操作時間が変化し、操作時間変化に応じた変速音の変化により操作感の向上が期待できる。さらに、操作時間の差異より運転意思が推定できる可能性が示唆された。

### 3. 加速意思変化による変速音付加タイミングへの印象把握

本章では、使用する変速音付加タイミングの設定方法について述べる。さらに、加速意思変化をさせた際に変速音付加タイミングの遅延による印象への影響を把握する。

#### 3.1 使用する変速音について

本研究で用いる変速音は操作感向上のために情報音としてあえて付加し、再生時間 60 ms の様な周波数特性のピンクノイズを使用する。変速音を付加するタイミングは Fig. 4 中のエンジン回転数が最大となるタイミングであり、Fig. 2-③、シフトを引き切り、ストロークが止まった瞬間に変速音が発生する状態とした。本実験では先述の変速音発生タイミングを遅延時間 0 ms とし、0-250 ms の範囲で 50 ms ずつ変速音の発生タイミングを遅延させる。

#### 3.2 加速意思変化による変速音の遅延への印象評価実験

本実験では、変速音のタイミングを遅延させ被験者に提示した際の印象評価を行い、加速意思の変化による影響把握を行う。評価方法は SD 法による主観評価とし、8 形容詞対を用いた 7 段階評価とする。Fig. 5 にエンジン音および変速音のスペクトログラムを示す。使用する変速音はピーク音圧を

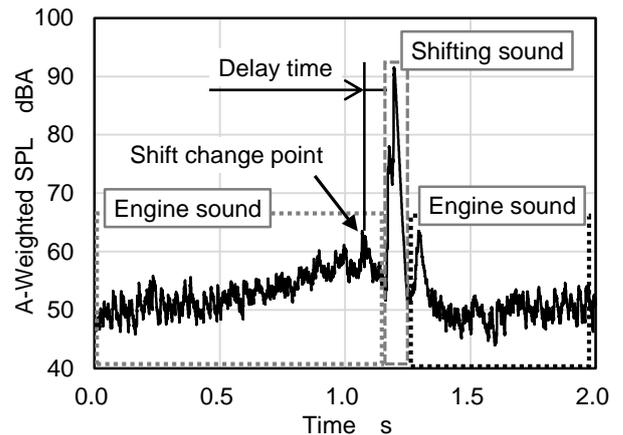


Fig. 4 Engine sound and delay of shifting sound

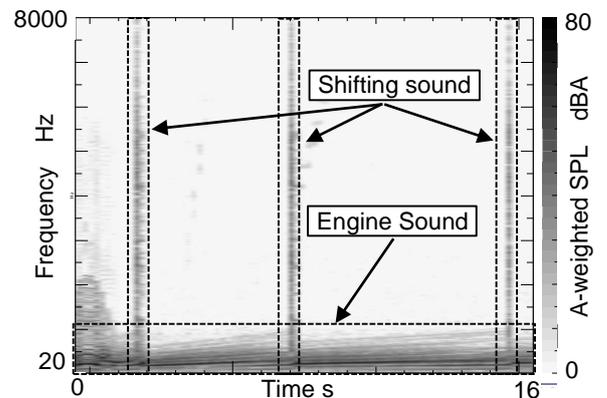


Fig. 5 Spectrogram of engine sound and shifting sound

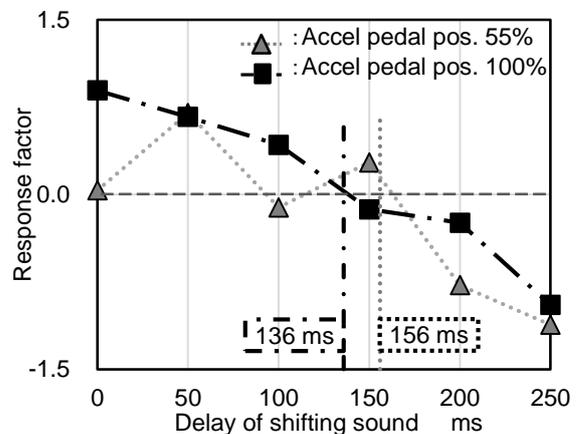


Fig. 6 Delay of shifting sound × response factor

約 70 dBA とし、2 章と同様の変速時のエンジン回転数および走行コースである。評価走行は 1-4 速の加速走行 2 回であり、走行後に評価を行う。なお、評価対象は加速走行のみとし、減速走行時は評価に含めない。

### 3.3 評価実験結果および考察

評価結果より因子分析を行い、「快適-不快」に代表される快適因子、「反応が良い-反応が悪い」に代表される反応因子の 2 因子に分類した。因子得点は「各被験者における快適感および反応感への影響の強さ」に対する指標として扱うものとする。

Fig. 6 に遅延時間に対し反応因子の得点に負の相関が見られた被験者 4 人における変速音遅延時間に対する反応因子の因子得点の平均値の推移を示す。このとき、各点が 0 のとき反応感の悪化が始まると解釈した場合、低開度では遅延時間 150 ms を超えると反応感悪化が始まるのに対し、高開度では 100 ms を超えると反応感悪化が始まる。これは 2 章の操作時間計測で得られた操作時間と同傾向であり、先述の被験者 4 人の平均をとると低開度で 156 ms、高開度で 136 ms であった。この操作時間と本実験での反応感悪化時の変速音遅延時間の閾値が概ね一致することがわかる。

したがって、シフト操作終了までの変速音付加により反応感悪化を防ぐことができ、加速意思に応じた適切な変速音発生タイミングが存在する可能性が示唆された。

## 4. 加速意思変化による変速音周波数特性変化への印象把握

本章では、変速音の周波数特性変更方法を述べる。また、この変速音を用いた評価試験を行い、加速意思変化時における変速音の周波数特性変更時の影響の検討を行う。

### 4.1 変速音の周波数特性変更について

本実験で使用する変速音は 3 章にて使用したピンクノイズを低域、中域、高域の 3 つの周波数帯域それぞれを強調し、加速意思の変化に対してどの帯域が影響するか検討する。

加工前後の変速音における周波数特性の差異を Fig. 7 に示す。無加工のピンクノイズを Pn\_ori として、Pn\_ori における 0-1000 Hz の帯域を +15 dB した音源を Pn\_low、1000-4000 Hz の帯域を +15 dB した音源を Pn\_mid、4000 Hz 以降の帯域を +15 dB した音源を Pn\_high と定義する。なお、各変速音は時間遅延がない状態としている。さらに Pn\_ori のピーク騒音レベルを 70 dBA とし、各加工音源のラウドネスレベルを Pn\_ori と同値に調整している。

Pn\_low では、アクセル開度の変化でエンジン音による変速音のマスクングが生じると予想される。また、Pn\_mid および Pn\_high は先述のエンジン音の主成分領域から外れており、エンジン音による変速音のマスクングは起こりにくいと予想される。さらに Pn\_mid は人の聴感特性上における感度が高い 1000-4000 Hz の領域を強調したものである。したがってこの領域を強調した変速音はアクセル開度によるエンジン音変化に左右されず、運転者に聴こえやすい変速音と予想される。

### 4.2 変速音の周波数特性変更による評価実験

本実験では周波数特性を変化した変速音を付加した際の評価実験を行い、加速意思の変化による影響を把握する。使用する変速音は 4.1 節で示した音源 4 種であり、これをランダムに提示する。その他の条件は 3 章と同様である。

### 4.3 評価実験結果および考察

評価結果より因子分析を行い、「快適-不快」に代表される快適因子、「反応が良い-反応が悪い」に代表される反応因子の 2 因子に分類した。

Fig. 8 に快適因子の因子得点の平均値の推移を示す。低開

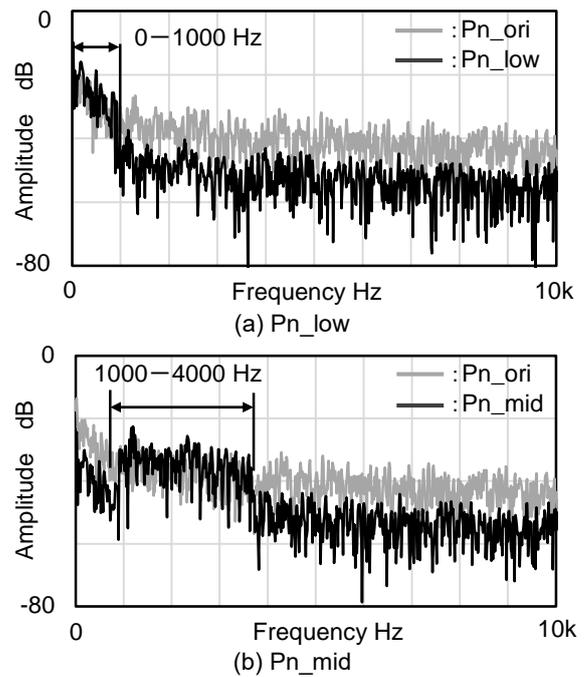


Fig. 7 Comparison between evaluation sound

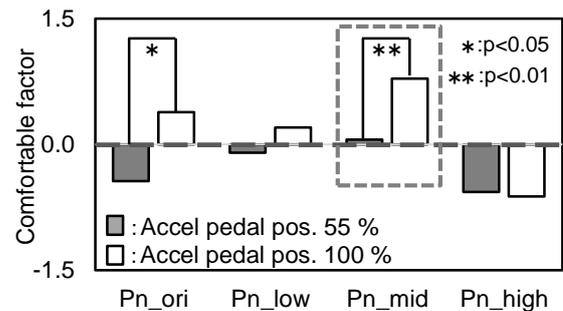


Fig. 8 Transition of Comfortable factor score for each accel pedal position

度および高開度で変速音の中帯域の強調により、快適感が向上する傾向が見られた。さらに、各音源の因子得点に対しアクセル開度変化による有意差検定を行った。Pn\_ori および Pn\_mid の快適因子の因子得点においてアクセル開度変化による有意差が得られた。両音源は変速音のうち中周波帯域が他の音源より強調されている。

以上より、変速音においてエンジン音の主成分外かつ聴感特性上の感度が高い 1000-4000 Hz の中周波帯域を強調すると加速意思による快適感への印象が大きく変化することが分かった。

## 5. 実車における音環境での変速音の音質要件検証

本章では、4 章で得られた加速意思に応じた変速音の要件を実車での音環境に適用し、音要件の妥当性を検証する。

### 5.1 実車における音環境について

本章ではピンクノイズによる変速音で得られた周波数特性を実車トランスミッションの変速時に発生する音(以降、実車変速音)に適用する。ピンクノイズによる変速音は時間に対する音圧変動がない状態としているが、実車変速音は変速段や変速時回転数によって複数の音の発生パターンが存在する。そこで実車変速音の特性として、音の減衰量と周波数特性二つのパラメータの違いによって大別した。

Table 1 Experimental shifting sound - vehicle

Sound name	Attenuation time	Sounds with matching frequency
TM_L-ori	Long	Pn_ori
TM_L-high		Pn_high
TM_M-mid	Middle	Pn_mid
TM_S-ori	Short (unified)	Pn_ori
TM_S-mid		Pn_mid
TM_S-high		Pn_high

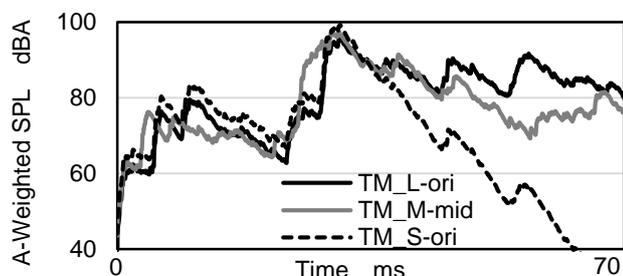
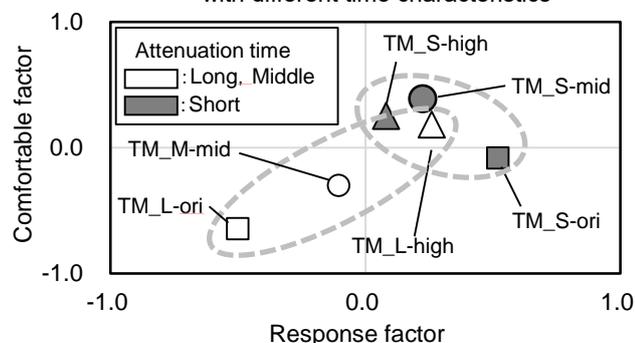
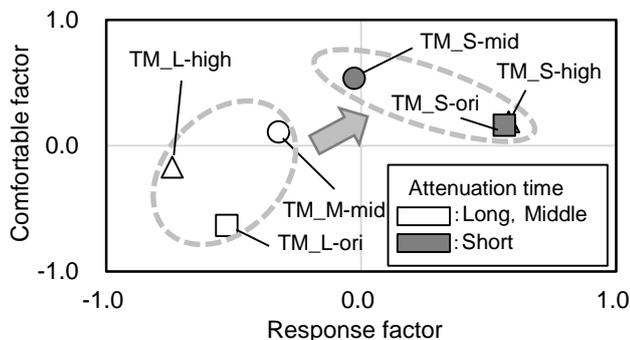


Fig. 9 3 types of shifting sounds with different time characteristics



(a) Accel pedal pos. 55 %



(b) Accel pedal pos. 100 %

Fig. 10 Result of verification experiment - Response factor × Comfortable factor

Table 1 に検証で使用する音源名および各特性を示す。音源名は「TM (収束時間の長さ)-(周波数特性)」の基準に則り作成した。まず、実車変速音におけるピーク音圧からの収束量に着目した。Fig. 9 に時間特性が異なる変速音 3 種類を示す。TM\_L-ori ではピーク音圧時以降も音が収束せず、複数回音が発生している。TM\_M-mid でそれに次ぐ収束量、TM\_S-ori は TM\_L-ori に強い減衰をかける加工をしており、ピーク音圧以降は音が素早く収束する。

次に周波数特性について着目すると、実車変速音においてピーク音圧時の周波数特性が 4 章の変速音に相当するものを抽出した。例えば、TM\_L-high の周波数特性が 4 章の Pn\_high

に相当することを示している。これらの収束特性と周波数特性が異なる 6 音源を用いて、4 章で抽出した変速音の音質の妥当性を 4 章と同条件の評価試験により検証する。なお、実験に際しエンジン音は実車を模擬したものを使用している。

## 5.2 評価実験結果および考察

評価結果より因子分析を行い、「反応が良い-反応が悪い」に代表される反応因子、「快適-不快」に代表される快適因子に分類した。Fig. 10 に反応因子と快適因子の因子得点の散布図を示す。TM\_S-mid でアクセル開度によらず快適感が高値となっている。減衰による差異に着目すると、一定の減衰を適用した変速音では反応感が向上が見られた。さらに、アクセル高開度では減衰の適用の有無により反応感の差異が顕著に生じる傾向が見られた。

以上により、時間特性を統一した際に変速音の中帯域強調により加速意思によらず快適感の向上が見られることを実車音環境でも検証できた。さらに、加速意思によって減衰時間に対する印象変化が生じることを明らかにした。

## 6. 研究成果

アクセル開度変更により、加速意思を変化させた際の手動変速における操作時間の変化に着目し、それに応じた操作感向上を目的とした変速音の要件を検討し、次の成果を得た。

- (1) 加速意思をアクセル開度の大小で変化させた場合、シフトを引き切ってから操作力が抜けるまでの時間が変化することを明らかにした。
- (2) 操作感向上のために変速音を付加する際はシフト操作力が抜け切るタイミングまでに変速音が発生すると反応感の低下を防ぐことができ、操作特性に見合った変速音付加タイミングの存在を明らかにした。
- (3) エンジン音の主成分である周波数領域から外れた中周波帯域を強調することで変速操作における快適感が向上し、加速意思の変化により快適感への印象が変化することを明らかにした。
- (4) 複数の減衰特性を有する実車変速音では、減衰特性を統一した際に (3) で得られた傾向が表れることを検証した。また、加速意思の変化により、変速音の減衰への印象に差異がみられることを明らかにした。

## 参考文献

- (1) 野島恵理子, 清水周作, 戸井武司, 自動または手動変速時における音および振動の影響把握, 日本音響学会講演論文集(春) (2020) pp. 1369-1370.
- (2) 野島恵理子, 戸井武司, 自動または手動変速時における音と振動を考慮した操作感の向上, 日本音響学会講演論文集(春) (2021) pp. 1175-1178.
- (3) 林毅, アクティブ制御を用いたエンジンサウンドのデザイン, 自動車技術会論文集, 47-6 (2016) pp. 1355-1359.
- (4) 能村幸介, 吉田準史, 加速運転時の車内音に対する嗜好性に関する研究, Honda R&D Technical Review 14-1 (2002) pp. 237-246.
- (5) 清水周作, 戸井武司, 加速意思に応じた加速感を得られるエンジン音の創生, 日本音響学会講演論文集(春) (2021) pp. 1157-1158.
- (6) 西堀佑, 多田幸生, 曾根卓朗, 遅延のある演奏系での遅延の認知に関する実験とその考察, 社団法人情報処理学会研究報告, 2003-127 (2003) pp. 37-42.
- (7) 小山修平, 廣瀬敏也, 澤田東一, 運転者の加速意図のモデル化に関する研究, 日本機械学会関東支部総会講演論文集 (2008) pp. 117-118.