

アクセルペダルへのクリック感付与による操作性向上

Click-like Tactile Feedback for Accelerator Pedal Control

栗原洋輔¹⁾, 蜂須拓^{1) 2)}, 佐藤未知^{1) 2)}, 福嶋政期^{1) 2)}, 梶本裕之^{1) 3)}

Yosuke KURIHARA, Taku HACHISU, Michi SATO, Shogo FUKUSHIMA, Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学大学院 情報理工学研究科

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, kurihara, hachisu, michi, shogo, kajimoto@kaji-lab.jp)

2) 日本学術振興会特別研究員

3) 科学技術振興機構さきがけ

Abstract: Acceleration control is important for safety in vehicle driving. The accelerator pedal is controlled by the foot, but precise adjustment requires much training because the driver must rely on somatosensory cues, which have limited capacity. In this study, we propose a periodic click-like tactile feedback for a vehicle accelerator pedal that is synchronized with the position of the pedal. We expect that the feedback will emphasize the positional sense so that the driver can accurately control acceleration. We conducted an experiment using a driving simulator and confirmed that the feedback makes control easier.

Key Words: Tactile Feedback, Accelerator Pedal, Safe Driving, Click Feeling.

1. はじめに

自動車の加速度の調節は、安全運転のために非常に重要である。自動車の加速度は主にアクセルペダルの踏み込み量によって決定するが、この踏み込み量の把握は足の体性感覚のみに頼らなければならない。つまり通常の自己運動が視覚・聴覚等も統合して知覚しているのに対してより難しいタスクとなっている。運転免許取得訓練の過程でこの能力をある程度獲得すると思われるが、長時間の運転による疲労などの影響まで十分考慮されているとはいえない。

我々はヒトの運動に対して、離散的な触覚の手がかりを付与することで運動知覚能力を向上させる試みを行ってきた。例えば「カチカチ」という衝撃が伝わる簡単な機構を腕に装着することで、肘関節の運動感覚を鮮明化することができる[1]。このような離散的な触覚手がかりはダイヤル型スイッチなどの操作性向上に応用されている。例えば自動車内のダッシュボードに取り付けられたロータリスイッチによって、運転者は手元を見ることなくダイヤルを所望の位置に調整することができる[2]。触覚の手がかりの増強という意味で、一種のAR技術であるともいえる。

そこで我々は、アクセルペダルに対しその踏み込み量に同期した離散的な触覚手がかり、いわゆる「クリック感」を呈示することで、運転者の踏み込み量知覚能力を向上させることを試みる。これにより運転者はより正確なアクセル調節が可能になると考えられる。

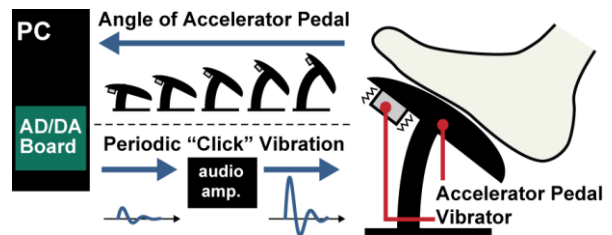


図 1: クリック感を付与したアクセルペダル

2. 先行研究

自動車の運転支援手法はこれまでも多数提案されてきた。例えば自動速度制限システムである Intelligent Speed Adaption [3]は、車の走行速度を強制的に減速させることで運転者の安全運転を助長している。車間距離維持システムである Adaptive Cruise Control [4]は渋滞中のアクセル・ブレーキ操作を自動化し運転者の運転負荷を軽減させることで安全運転に貢献している。

これらの先行研究で用いられている技術は全て基本的には自動運転制御技術である。ヒューマンインタフェースとしては、車の速度・車間距離などの環境情報を運転者に触覚的に呈示するものであると考えられる。言い換えれば、適正な速度・車間距離を「教える」ものである。

触覚インタフェースを用いて身体運動を教示する手法も様々な提案がされてきた[5][6]。これらはデバイスからの教示通りに運動することで正しい身体運動を学習するもの、すなわち受動的な運動学習である。一方で Saga ら

は運動学習においては訓練者の主体性が重要であると主張している[7].

これらに対し我々は、運転者のアクセル調節技能自体の向上を目指す。運転者によるアクセルペダルの踏み込みに対して触覚フィードバック(クリック感呈示)を行う。これは自動運転制御および受動的触覚教示とは異なり、正解(適切な踏み込み量)を教示するものではない。しかし触覚フィードバックによりどれだけアクセルペダルを踏み込んでいるかを運転者が知覚しやすくなり、アクセル調節の負荷が軽減され、運転精度の向上が期待される。またアクセルペダルの踏み込みは運転者の主体性行為であるため、運動の主体性を失っておらず、アクセル調節の学習にも効果を発揮することが予想される。

3. システム構成

システム構成を図1に示す。PlayStation2/3用アクセル/ブレーキペダルコントローラ(Logicool, Driving Force GT)を分解し、アクセルペダルのポテンショメータからの出力電圧をPCのAD/DAボード(Interface Corporation, PCI-3523A, $\pm 10V$, 12bit)で読み取ることでアクセルペダルの角度を得た。可動範囲全体を5分割した角度を通過するたびに瞬間的な正弦波をDA出力し、オーディオアンプ(Rastene Ststens Co., LTD, RSDA202)で増幅、アクセルペダル裏面の振動子(ALPS ELECTRIC CO., LTD, ForceReactor)を駆動することでクリック感を呈示した。振動の呈示には下記の減衰正弦波モデル[8]を用いた。

$$Q(t) = A(v)e^{-Bt} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

これは物体に触れた瞬間から時間 t が経過した際の振動 $Q(t)$ を再現するものであり、初期振幅係数 A 、衝突速度 v (本システムでは一定とした)、減衰係数 B 、振動周波数 f を適切に設定することで異なる材質感を呈示することが可能である。本実験ではクリック感を呈示するために、 $A = 66 \text{ m/s}^{-1}$ 、 $B = 150 \text{ s}^{-1}$ 、 $f = 240 \text{ Hz}$ に設定し、1~2 波長(4.2ms~8.4ms)で振幅がほぼ0となるように減衰パラメータを調整した。用いた振動周波数 240Hz は、人間の触覚受容器のうち最も敏感に振動を知覚する Pacini 小体の共振周波数であり、足裏全体という広い面積でクリック感を呈示するためには最適であると考えられる。振動子として ForceReactor を採用した理由は、時間応答性に優れ、240Hz での駆動が可能であるためである。

なお今回のクリック感呈示はアクセルの角度に対する純粋な振動呈示のため、アクセルペダルを踏むための物理的な抵抗となることはない。

4. 実験

クリック感の付与によりアクセルペダルの操作性が向上するかどうかを検証するため、ドライブシミュレータを用いた実験を行い、ラップタイム、コースアウト確率およ

び被験者のクリック感に対する評価について比較した。

4.1 実験環境

被験者は18~30歳の42名とし、クリック感を呈示する群(21名)と、呈示しない群(21名)に分けた。ドライブシミュレータとしてPlayStation3用ゲームGRAN TURISMO 5(Sony Computer Entertainment Inc.)を用い、ディスプレイには65V型3DTVを用いた。実験タスクは本ゲームのトレーニングコース(B-07, アクセル調節練習用コース)で運転するというものであった。トレーニングコースを用いた理由は、通常のレースシグコースではアクセルを限界まで押し込んだ状態(いわゆるべた踏み)と押さない状態の二つで切り替える方が良いタイムが出る傾向があり、アクセルの微調整を必要としないように観察されたためである。本コース1周を1試行し、本試行として30試行、その後クリック感条件を変えて追加試行3試行を行った。



図2: 実験の様子

4.2 実験手続き

まず実験者から被験者に対して運転に対する自信について尋ねた。これは被験者の運転スキルを見積もるためであり、被験者は「自信を持って運転できる」「恐る恐るなら運転できる」「ペーパードライバなので全く運転できない」「免許を持っていない」の4段階で回答した。本実験については、まずアクセルワークの練習であること、ゴールまで20~30秒のコースを30回走ること、コースアウトを避けつつ出来るだけ早くゴールすることを伝えたまた第1・6・11・21試行前に模範走行を確認し、出来るだけその通りに運転するように伝えた。

次に、ステアリング、アクセル、ブレーキのみで操作し、アクセルとブレーキは共に靴下を履いた状態の右足だけで踏むように伝えた。クリック感ありで実験を行う被験者に対しては、可動範囲内で等間隔に5回クリック感が呈示されることを伝えた。最後に3Dメガネとヘッドホンを装着して模範走行を見せ、試行を開始した。

各試行においてラップタイムを記録した。コースアウトした場合も試行数にカウントし、コースアウトの原因(アクセルミス/ステアリングミス)を実験者の主観で判断して記録した。本判断基準については予備実験における被験者の運転傾向を元に決定した。

本試行 30 回の後、クリック感条件を変えて追加試行 3 回を行った。これは被験者内でクリック感の効果を確認するためであり、データ分析からは除外した。最後にアンケート（クリック感付与による操作性向上に対する評価・クリック感の印象を回答）を行い、実験を終了した。

5. 実験結果・考察

被験者 40 名のうち以下の被験者を実験結果から省いた。

- (1) 普段からレースゲームを頻繁にプレイする者：経験者であるためナイーブとはいえない（クリック感ありの群から 3 名、無しの群から 1 名を除外）。
- (2) 30 試行中 15 回以上コースアウトした者：運転技能が極めて低いためデータ解析に含めるべきではない（クリック感ありの群から 1 名、無しの群から 3 名を除外）。なおこの時点で、コースアウトが原因で除外された被験者はクリック感無しの被験者よりもありの被験者のほうが少ないことが分かる。

以上の除外により、結局クリック感ありの群は 17 名（男性 13 名、女性 4 名）、クリック感無しの群も 17 名（男性 11 名、女性 6 名）となった。また 30 試行中最初の 5 試行は練習とし、データ分析には用いなかった。

5.1 ラップタイム

図 3 に平均ラップタイムの推移を示す。横軸は試行回数、縦軸は平均ラップタイム、エラーバーは被験者間の標準偏差を示す。全体の傾向としてクリック感ありの場合の方が無しの場合よりもラップタイムが大きく、すなわち遅くなっていることが分かる。全ラップタイムの平均は、クリック感ありの場合で 23.046s (S.D. 1.53s)、無しの場合は 22.879s (S.D. 1.72s)であった。同じ傾向は最速ラップタイムにおいても見られた。したがってクリック感を付与した場合走行速度が遅くなったと考えられる。

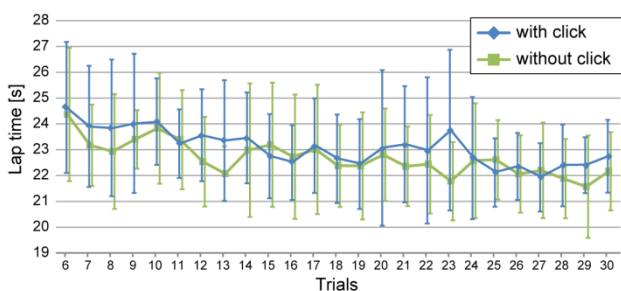


図 3：平均ラップタイムの推移

5.2 コースアウト確率

図 4 にコースアウト確率の推移を示す。横軸は試行回数、縦軸はラップタイムを示す。クリック感あり、なし共に線形フィッティング（破線）を行った（通常学習曲線に対するフィッティングは指数関数を用いるが、今回は簡易的な方法を用いた）。それぞれに対する線形フィッティングを見ると、クリック感ありの場合の方が線分の傾きが大きく、より学習効果が高いことが分かる。

図 5 にコースアウト回数の原因別推移を示す。アクセルミスとステアリングミスと比較すると、ステアリングミスによるコースアウト確率はクリック感あり・無しどちらも減少しているが、クリック感ありの方がより減少率が高い。またアクセルミスによるコースアウト確率は、クリック感あり・無しどちらも増加しているが、クリック感ありの方がより増加率が低い。したがってクリック感を付与するとアクセル制御ミスによるコースアウト確率が減少すると考えられる。ただし、ステアリング操作ミスの減少は、アクセル操作ミスの減少に伴って生じた副次的な効果である可能性が高い。

以上の結果をまとめると、クリック感を付与した場合、走行速度が減少し、コースアウト確率も低下している。つまりより「安全運転」になったといえる。

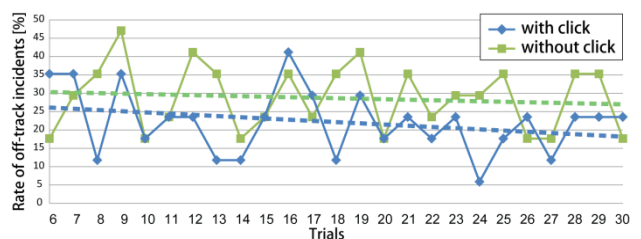


図 4：コースアウト確率の推移

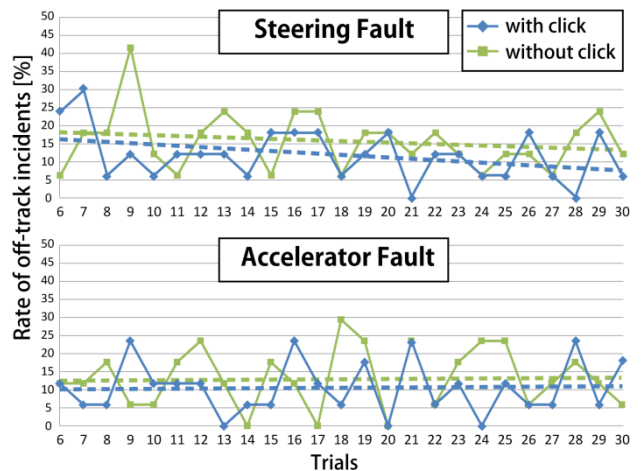


図 5：コースアウト確率の推移（原因別）

5.3 アンケート結果：操作性に対する評価

全試行終了後アンケートを行い、被験者は「クリック感によってアクセルを制御しやすくなったかどうか」を 1（制御しにくい）～5（制御しやすい）の 5 段階で評価した。

表 1 にアンケート結果を示す。まず運転スキルに関しては、「恐る恐るなら運転できる」群がクリック感を最も高く評価している。運転技能が低い被験者は運転に慣れていないため、クリック感が新たな触覚の手がかりとなり、アクセル調節の補助として働いていたと考えられる。一方で「自信を持って運転できる」群はクリック感を最も低く評価している。高い運転技能を持つ被験者はクリック感無しでの運転に慣れているため、クリック感の付与は逆に運

転の妨げになってしまったと推測される。

本試行でのクリック感条件に関しては、クリック感無しで本実験を行った群の方がよりアクセル調節をしやすくなったと回答している。逆にクリック感ありで本実験を行った群は、クリック感が無くなったことで解放感を感じ、これがクリック感の低評価に繋がったものと考えられる。

表 1：クリック感による操作性向上に対する評価

運転に対する自信	本試行のクリック感条件		平均
	あり	無し	
自身を持って運転できる	3.38	3.33	3.36
恐る恐るなら運転できる	3.00	4.67	3.83
ペーパードライバ	2.80	4.25	3.44
免許を持っていない	3.20	3.75	3.54
平均	3.14	3.86	3.50

5.4 クリック感の印象

操作性評価の他に、被験者はクリック感の印象について自由回答形式で回答した(表 2)。「アクセルの踏み込み量がよくわかる」という回答が 17 名で最も多く、他にも「より踏んでいる感がする」「アクセル調節が慎重になる」といった回答は運転がより安全運転側に变化したことを裏付けるものであるといえる。ネガティブな回答としては、クリック感がうるさくて運転の妨げになるという回答が 7 名から得られた。

表 2 に示す回答以外にも「抵抗感・力覚を感じる」「クリック感がする位置にロックされているように感じる」といった回答が得られた。本実験では減衰振動のみの呈示であったが、減衰振動により物体-皮膚間の摩擦係数を変化させることで擬似力覚が生起することがすでに知られている[9]。したがって本実験においてもこれに類する現象が発生し、被験者は擬似的な力覚を感じていたと推測される。

表 2：クリック感の印象

クリック感の印象	本試行のクリック感条件		小計	合計
	あり	無し		
踏み込み量がよくわかる	8	9	17	29
より踏んでいる感がする	1	4	5	
よりアクセルを意識する	0	3	3	
アクセル調節が慎重になる	0	2	2	
クリック感が気持ち良い	1	1	2	
うるさくて運転の邪魔	4	3	7	

6. 結論

本稿では、自動車のアクセルペダルにクリック感を模した減衰振動を呈示することで、運転者の踏み込み量知覚能力を向上させることを試み、これを検証する運転実験を行った。実験結果はクリック感を付与するとコースアウト確

率が下がり、ラップタイムがやや遅くなるというものであった。これはアクセル調節を行いやすくなった結果「安全運転」側に運転が变化したことを意味していると考えられる。またクリック感は「アクセル操作ミス」「ステアリング操作ミス」の双方に対して学習効果を発揮していることが明らかとなった。アンケート結果からは、クリック感の付与によりアクセル調節がしやすくなること、特に運転スキルが低い被験者群においてクリック感を高く評価していることが示唆された。

今回の実験タスクは「出来るだけ早くゴールする」というものであったが、一方で実際の運転環境を考えるとこれは適しているとはいえない。よって今後は走行速度を適切に保つ運転タスクで実験を行う必要があると考えられる。またクリック感の振動周波数・分解能・呈示部位などの最適解を探すことも今後の課題の一つである。

参考文献

- [1] Y. Kurihara, Y. Kuniyasu, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto: Augmentation of Kinesthetic sensation by Adding "Rotary Switch Feeling" Feedback, *Proc. Augmented Human International Conference*, 2012.
- [2] M. Badescu, C. Wampler, C. Mavroidis: Rotary Haptic Knob for Vehicular Instrument Controls. *Proc. 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp.342-343, 2002.
- [3] O. M. J. Carsten, F. N. Tate: Intelligent speed adaptation: accident savings and cost-benefit analysis, *Accident Analysis & Prevention*, vol.37 (4), pp.407-416, 2005.
- [4] P. A. Ioannou, C. C. Chien: Autonomous Intelligent Cruise Control, *Proc. IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.42 (4), pp.657-672, 1993.
- [5] L. B. Rosenberg: Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation. *Proc. Virtual Reality Annual International Symposium*, pp.76-82, 1993.
- [6] Y. Jang, Y. Yang, G. J. Kim: Designing a Vibro-Tactile Wear for "Close Range" Interaction for VR-based Motion Training, *Proc. International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, 2002.
- [7] S. Saga, N. Kawakami, S. Tachi: Teaching using Opposite Force Presentation. *Proc. IEEE WorldHaptics Conference*, 2005.
- [8] A. M. Okamura, M. R. Cutkosky, J. T. Dennerlein: Reality-Based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, vol.6 (3), pp.245-252, 2001.
- [9] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, S. Tadokoro: Alternative Display of Friction Represented by Tactile Stimulation without Tangential Force, *Haptics: Perception, Devices and Scenarios, Lecture Notes in Computer Science*, vol.5024, pp.619-629, 2008.