

車載用 HMI デバイスの評価手法の研究 — 静止時および運転時のデバイス操作性分析 —

溝渕 佐知^{*1} 栗谷川 幸代^{*2}, 景山 一郎^{*2}, マーク チグネル^{*3},
那和 一成^{*1}, 古賀 光^{*4}, 久門 仁^{*4}

Evaluating HMI device for in-car systems – Device usability in static/driving conditions -

Sachi Mizobuchi^{*1}, Yukiyo Kuriyagawa^{*2}, Ichiro Kageyama^{*2}, Mark Chignell^{*3},
Kazunari Nawa^{*1}, Ko Koga^{*4}, Hitoshi Kumon^{*4}

Abstract - Since there are many different types of user and context, evaluating usability and safety of devices and interfaces used while performing tasks like driving is challenging. Can rated usability of a device in single-task use (core usability) predict safety and performance in multi-tasking contexts, at least as a first approximation? The experiment reported below examined this issue by evaluating three different HMI (human-machine interaction) devices for in-car systems. Thirty-one people performed a menu-selection task with the three devices. Device usability was assessed both with and without an accompanying simulated driving task. The reflected device was clearly worse than the other two (haptic and touchscreen) with respect to its usability in a single task setting, and the reflector interface was also found to be more distracting while driving. This result was confirmed in the driving context by a number of different measures including usability, safety, eye gaze, and steering. In addition, direction of eye gaze and steering stability were found to be useful and unobtrusive measure for evaluating the usability and safety of the HMI. It is concluded that single-task ratings of (core) usability may be useful predictors of the safety and efficiency of HMI devices in vehicles for some contexts.

Keywords: In-car systems, usability evaluation, multitasking, driver distraction, risk compensation

1. はじめに

自動車内で人が行うタスクには、ハンドルやアクセル、ブレーキ操作といった運転そのものに関する操作はもとより、エアコンの温度調節や音量調整といった車内環境の調整作業もある。また、車内だけでなく、各種サイン・交通状況・他車・歩行者など車外の様々な状況への注意・対応が必要である。これらに加え、近年、車載情報機器の高度化に伴い、ナビゲーションシステムや AV システムの操作など、ますます多くの情報源とのインタラクションが生じる状況となってきている。

車載情報機器の HMI デザインという観点からは、こうしたマルチタスキング状況の中でも運転の安全性を損ねることなく、かつ有用で効率的なインタラクションを提供することが課題になる。HMI においてはこれまで様々な入出力方式・デバイスが提案されてきているが、こうした様々な手法を共通の観点から汎用的に評価できる

手法が必要である。

2. 関連研究

2.1 サブタスクが運転安全性に及ぼす影響

運転安全性を阻害する要因については、これまで数多くの研究が行われてきた。特に近年は、自動車運転中の携帯電話の利用の影響について、多くの報告がなされている。たとえば Redelmeier[1] や McEvoy ら[2]は自動車運転中の携帯電話の使用は事故リスクを4倍にも増大させると報告しており、いずれの研究においても、ハンズフリーモードで電話を使用してもこのリスクは低減されないとしている。

一方で、適切にインタラクションがデザインされれば、車内でデバイス操作をするリスクを低減させることができることを示唆する研究例もある。Manalavan ら[3]によれば、運転時の重要な局面で通話者が会話レベルを減らすことによって（シミュレータでの）運転パフォーマンスが向上した。

デバイスやタスク内容によって、運転への影響の度合いが異なるという報告もある。Hosking ら[4]の報告によれば、運転しながらのテキスト入力には特に危険で、視線が前方から離れる時間が4倍にもなる。一方、Srinivasan ら[5]は、よくデザインされたルート案内システムは、紙

*1: 株式会社トヨタ IT 開発センター

*2: 日本大学

*3: トロント大学

*4: トヨタ自動車株式会社

*1: Toyota InfoTechnology Center, Co., Ltd.

*2: Nihon University

*3: University of Toronto

*4: Toyota Motor Corporation

の地図よりも運転を阻害する度合いが低いとしている。

最近の研究 (McEvoy ら[2]) では、自動車運転中のサブタスクが要求する認知機能の深度によって運転へのインパクトが異なることを示し、携帯電話使用においても会話内容によって危険度が異なることを示唆している。

まとめると、情報機器へのアクセスが運転を阻害する要因としては、手がデバイス操作に向けられるといった「物理的な負荷」、視線がデバイスに向けられるといった「知覚的負荷」、タスクの難度などによる「認知的な負荷」が考えられ、これらの組み合わせによって全体的な負荷の大きさが変わると考えられる。

2.2 リスク補償

リスク補償とは、人々が、知覚されたリスクに応じて行動を変えるプロセスのことを指す。安全性を高めるための技術革新が、期待されるだけの事故や怪我の低減につながらないことがしばしばあるが、この背後には「(新技術によって) リスクが少なくなったと感じると、安心した人間側が却ってリスクを高めるような行動 (リスク補償行動) を取る」というメカニズムが働いていると考えられる。たとえば Winston ら[7]によれば、エアバッグやアンチロックブレーキの使用が衝突や怪我の低減に対し有意な効果をもたらさない理由を考察し、技術による安全性の向上が、ドライバが走行速度を上げることによってトレードオフされている可能性を示唆している。

走行速度は運転の安全性に関する重要な指標である。数多くの研究が、走行速度が上がると事故のリスクや深刻度が上がることを示している (たとえば Aarts ら[8])。

運転者がある走行速度を選択するのに影響する要因は様々だが、Godley ら[9]によれば、知覚されたリスクが高まった時や視認性が低下した時には走行速度は下がる傾向にあり、このため速度はリスク知覚のレベルと関連していると考えられる。

3. 本研究のアプローチ

本研究では、車載 HMI のよしあしを評価するにあたって重要な指標を明らかにすることを目的とし、3 種類の HMI システムを静止状態および運転状態で操作し様々な指標を用いて比較する実験を行った。汎用的なデバイス評価手法構築に向けた基本的考え方については既に栗谷川ら[6]によって報告されているが、本稿では、実験データを以下の観点から分析した結果を報告し、車載 HMI の評価に有効な指標について考察する。

- ・ デバイス単独での操作性
- ・ 運転が HMI 課題に及ぼす影響
- ・ HMI 課題が運転に及ぼす影響
- ・ リスク補償行動

4. 実験

4.1 方法

4.1.1 被験者

自動車運転経験のある 20~60 歳の男女 31 名 (平均 39.3 歳 (SD=11.6)、男性 14、女性 17 名) が実験に参加した。全員が右利きであった。なお、実験前には実験内容を説明した上で、書面にて実験参加の承諾を得た。

4.1.2 装置

タッチディスプレイ (以下タッチ)、反射型インタフェース (以下反射)、ハプティックインタフェース (以下ハプティック) の 3 種類の入力装置を備えた実験用システムを開発した (図 1)。タッチは画面上のオブジェクトに直接触れることによって操作するもの、反射型は、ディスプレイの下に設置したタッチパネル上での被験者の手の操作が、左前方のディスプレイに鏡を用いて映し出されるもの、ハプティックはジョイスティック様のコントローラで、画面上オブジェクトに対する引き込みを反力として被験者にフィードバックするものであった。いずれの方式も、ドライビングシミュレータのシートに着座した際に左手で操作できる位置に設置された。



図 1. 実験で用いた 3 種のデバイス

Figure 1. Evaluated three devices.

4.1.3 タスク

3 段階の階層メニューを選択する課題を行った (図 2)。被験者が「スタート」ボタンを押すとタスク指示 (例:「オーディオの音量を上げてください」) が音声により与えられ、第一階層 (「映像」「音声」「A/C」) が提示された。間違ったメニューを選択した場合には「戻る」キーで修正し、第三階層の選択まで終了したら「終了」キーを選択するよう教示した。

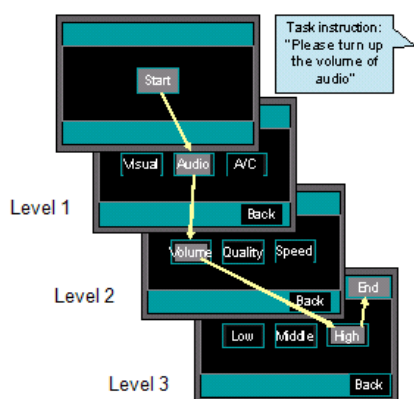


図 2 階層メニュー選択課題
Figure 2. Menu selection task

4.1.4 手続き

被験者は一人ずつ実験に参加した。3種類のデバイス操作、ドライビングシミュレータ (DS) での運転それぞれについて事前に練習を行った上で本試行に移行した。被験者は DS のシートに着座し、まず静止状態で上記のメニュー選択課題を行なった。この際、用いるデバイスの順序は被験者ごとに変化させた。被験者は1つのデバイス条件が終わる毎に質問紙を用いて主観的操作性を評価した。静止状態での3種類のデバイス条件終了後、DSで運転しながらメニュー選択課題を行う条件で同様の評価を行なった。課題遂行にあたっては「できるだけ連続して」行うよう指示し、走行速度については、前車なしの条件では「できるだけ一定の速度で」、前車ありの条件では「一定の車間距離を保って」走行するよう指示した。

4.2 実験デザイン

独立変数は運転条件 (運転なし/あり)、デバイス条件 (タッチ/反射/ハプティック/デバイスなし)、前車条件 (あり/なし) と道路条件 (直線/曲線) であった。従属変数はデバイスの主観的操作性および運転に関する主観的评价(それぞれ13項目をVAS¹を用いて評価したものを実験者が-100から+100で得点化)、タスク遂行時間、エラー率 (タスク中に「戻る」ボタンが押された率)、デバイス視認時間と回数、走行スピードと操舵角であった。

全ての独立変数について、繰り返しのある被験者内要因計画を適用した。

4.3 結果

4.3.1 タスク遂行パフォーマンス

図3は1タスクあたりの遂行に要した時間と、運転あり条件におけるエラー率の平均値をデバイス毎および運転条件毎に示したものである。タスク遂行時間について繰り返しのある二元配置分散分析を行った結果、デバイスの主効果(F[2, 56]=42.5, p<.001)と運転条件の主効果F[1, 28]=130.5, p<.001)が認められた。また、エラー率について繰り返しのある一元配置分散分析を行った結果で

もデバイスの主効果(F[2, 48]=6.1, p<.01)が有意であった。

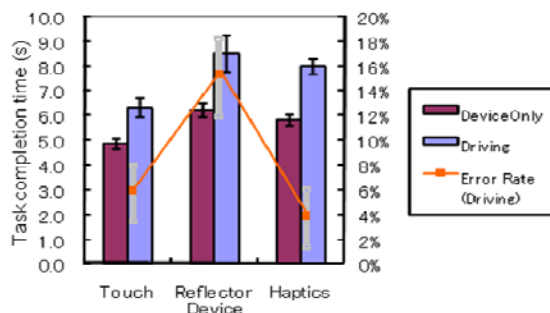


図 3 タスク達成時間とエラー率の平均値と標準誤差
Figure 3. Task completion time and Error rate.

全体に、運転あり条件ではタスク遂行時間が長くなり、タッチにおける遂行時間が最も速い。反射型では他の2デバイスに比べ遂行時間が長くエラー率も高くなっている。

4.3.2 デバイス視認行動

各デバイスの操作に要する視覚的注意量を評価するため、アイマークレコーダを用いて被験者の視点を記録したビデオ画像を元に、デバイスの方に視線を向けた時間(1回あたり)および回数(1タスクあたり)を測定した。図4にデバイスおよび道路条件毎の平均値を示す。

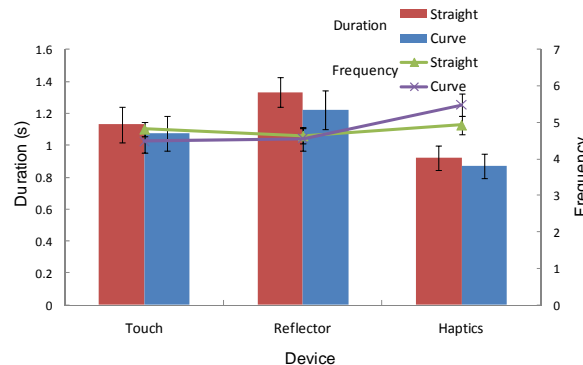


図 4 デバイス視認時間 (棒グラフ) と回数 (線グラフ)
Figure 1. The duration (bar) and the frequency (line) of eye fixation on the device.

繰り返しのある二元配置分散分析の結果、視認時間に対するデバイスの主効果が認められた(F[2, 18]=4.6, p<.05)。下位検定の結果、ハプティックの視認時間は反射型よりも 300-400 msec 程度短いことが示された(直線で p<.01, 曲線で p<.05)。視認回数については、デバイス間の有意な差は見られなかった(F[2, 16]=3.15, p=.07)

3種類のデバイスの客観的操作性評価結果をまとめると、ハプティックは他の2つのデバイスよりも視覚的的要求度が低い。タスク遂行時間ではタッチが最も速いが精度においてはハプティックがより優れているといえる。

4.3.3 デバイスの主観的操作性

デバイスの操作性に関する13項目に対する評価得点

¹ Visual Analog Scale

の平均値を運転条件毎、デバイス条件毎に図 5に示す。運転条件、前車条件に関わらず、反射型に対する評価は他の 2つのデバイスに比べ、どの項目についても一貫して低くなっている。

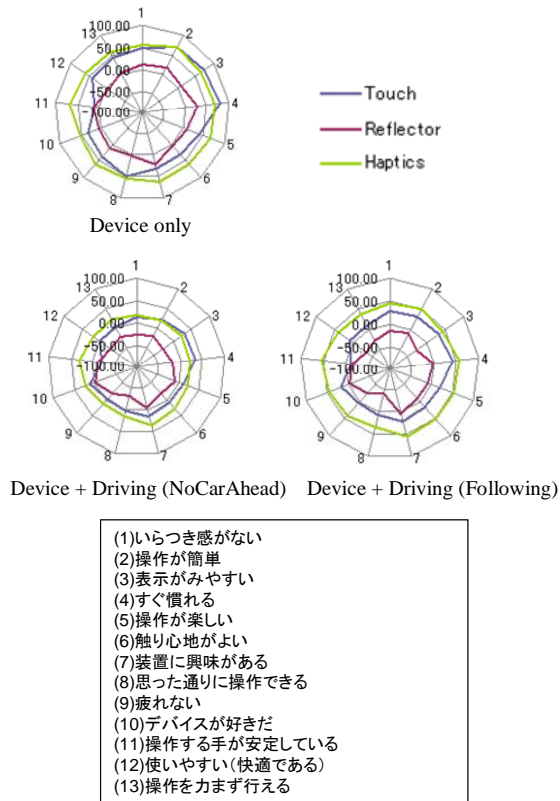


図 5 主観的操作性に関する 13 項目と得点の平均値
 Figure 5. Mean scores for 13 usability items

主観的操作性に対する評価得点に対して因子分析（主因子解、バリマックス回転）をし、寄与率が0.5以上のものに対してCronbach の α 得点に基づき信頼性分析を行った。寄与率の低い項目を除くことによって(1) (2) (4) (8)の4項目に絞り込んだ上で、それらに対する因子得点の平均値をデバイスおよび運転条件毎に求めたところ、図 6が得られた。

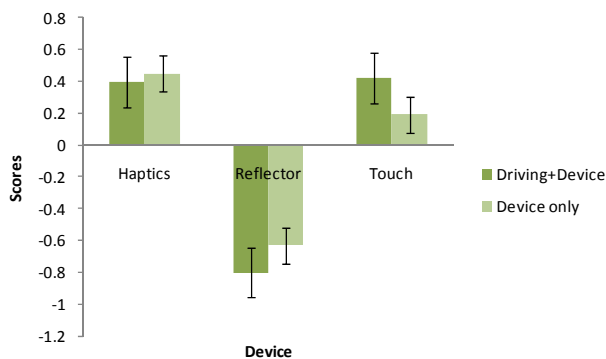


図 6 デバイス操作性に関する因子得点の平均値と標準誤差
 Figure 6. mean usability scores by device and driving conditions.

得点の差を繰り返しのある二元配置分散分析で検定した結果、デバイスの主効果が認められた。図 5でも示された通り、操作性評価は運転時には全体的に低くなるが、ハプティックが 1 位、タッチが 2 位、反射型が 3 位というデバイス操作順位は一貫していた。

4.3.4 主観的運転安全性

運転に関する主観評価 13 項目に対する評価得点の平均値を、前車条件毎、運転条件毎、デバイス条件毎に図 7 に示す。

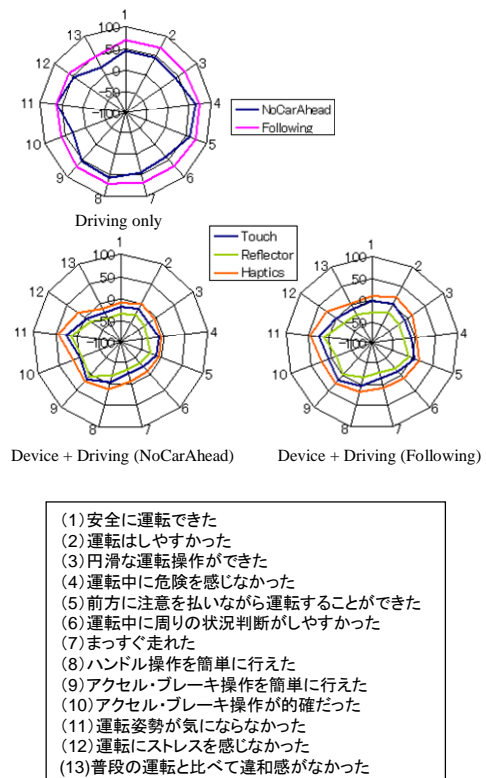


図 7 主観的運転評価に関する 13 項目と得点の平均値
 Figure 7. Mean scores for 13 safety items by device and conditions

主観的操作性の得点と同様、運転安全性に関する評価得点についても因子分析を行い、信頼性分析手続きを経て(1) (2) (3)の 3 項目に絞り込んだ。この 3 項目に対する因子得点の平均値をデバイスおよび運転条件毎に求め、平均値間の差を繰り返しのある二元配置分散分析を用いて検定した結果、運転のみの条件に比べてデバイス操作時には運転安全性に関する因子得点は有意に低いことが示された ($F[1, 25] = 28.9, p < .001$)。デバイス間の差を下位検定で比較すると、反射型における安全性評価はハプティックに比べ有意に低かった ($p < .01$)。また、被験者を 35 歳以下 (14 名) と 45 歳以上 (12 名) の 2 群に分けて見ると、タッチについては年齢による顕著な差が見られ、特に高齢年齢群において安全性評価が低くなることが分かった (図 8)。

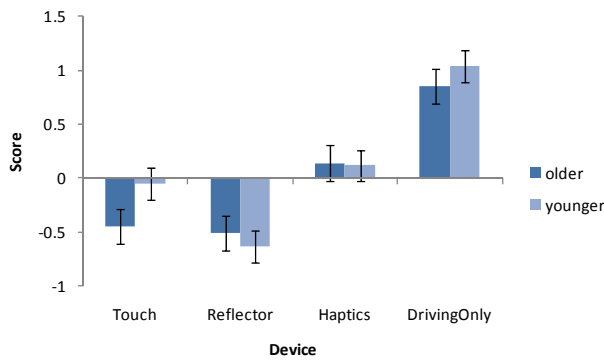


図 8 運転安全性に関する因子得点の平均値と標準誤差

Figure 8. Effect of Device and Age on Perceived Safety.

4.3.5 デバイス操作と運転行動

操舵の滑らかさを表す指標として、操舵角偏差 SVe を算出した。操舵角の時系列データから、現在の操舵角速度 $SV(t)$ と 3 秒前の操舵角速度 $SV(t-3)$ の偏差を求めて $SVe(t)$ とした。この値が小さいほど、操舵が緩やか（滑らか）であると考えられる。図 9 にデバイス条件および道路条件毎の SVe の平均値を示す。

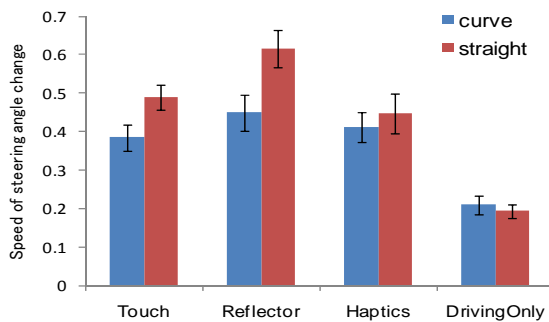


図 9 操舵角偏差 SVe の平均値と標準誤差

Figure 9. Mean deviation of steering angle and standard errors.

繰り返しのある二元配置分散分析の結果、デバイス条件の主効果 ($F[3, 75]=20.0, p<.001$) および道路条件による主効果が認められた ($F[1, 25]=10.8, p<.01$)。デバイスと道路条件の交互作用は見られなかった。全般に、デバイス操作を行うことによって、運転のみの時よりも操舵角の変化がより急になる（すなわち操舵の滑らかさが低下している）ことが分かる。デバイス間で比較すると、反射型において、他の 2 デバイスよりも操舵の滑らかさが低くなっている。

4.3.6 走行速度

走行速度の平均値を被験者毎およびデバイス条件毎に示したものが図 10 である。全般に、デバイス操作条件では運転のみの時よりも走行速度の被験者によるばらつきが小さくなっている。

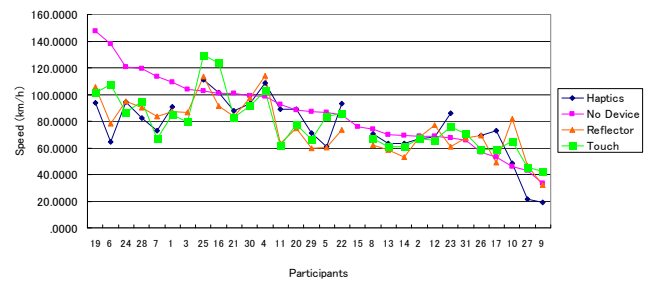


図 10 被験者毎の走行速度の平均値（横軸左から、運転のみ条件の時の走行速度が速い被験者順）

Figure 10. driving speed by device condition (sorted by the speed in driving-only condition).

走行速度のデータが有効であった被験者 27 名中 18 名は、デバイス操作時は運転のみの時と比べ平均速度が遅くなったのに対し、9 名は速くなった。年齢別に見てみると、この 9 名のうち 7 名は 35 歳以下のグループであり、残り 2 名が 45 歳以上のグループであった。

デバイス操作時の走行速度が上昇した群と低下した群とで別々に、走行速度へのデバイスの効果を分散分析で検定した結果、いずれの群においてもデバイスによる有意な差は見られなかった ($F<1$)。

5. 考察

デバイスの操作性：静止状態でのデバイス評価では、タスク遂行パフォーマンスからは反射の操作性が他の 2 つのデバイスよりも低いことが伺われ、主観的評価の結果はこれを裏付けるものであった。タッチはポインティング速度では最も優れていたが、年齢によって評価が大きく分かれ、高齢者群における評価が低かった。ハプティックは主観的操作性、主観的安全性、ポインティング精度の観点からタッチよりも優位であった。

デバイスが要求する視覚的注意の観点から比較すると、ハプティックは 1 回あたりの視認時間が他の 2 デバイスよりも短く、視認回数についてはデバイス間で有意な差は見られなかった。短い視認時間でも操作できるという点も、ハプティックの操作性評価が高かった一因と考えられる。

運転が HMI 課題に及ぼす影響：デバイス単独での操作時と比べ、運転操作が加わると、デバイスの操作性はパフォーマンス・主観評価の両面で低下したが、デバイス評価の順位はデバイス単独での操作時の評価と一貫していた。つまり、静止状態での操作性評価によって運転時のデバイス間の優劣も予測できると考えられ、開発の初期段階でまず静止状態で複数のインタフェースを評価し、有望な手法のスクリーニングを行うというプロセスが有効であることを示唆している。先行研究で平尾ら[10]は静止状態における一次評価と運転状況における二次評価によって最適なインタフェースを選定するプロセスを提案しているが、これを支持する結果といえる。

HMI 課題が運転に及ぼす影響: 操舵角偏差 S_{Ve} の分析の結果、HMI 課題によって全般に操舵の滑らかさが低下することが示された。デバイス間の比較では、反射デバイスにおいてこの傾向が最も顕著であり、デバイス操作の負荷が大きい時に操舵の乱れが生じやすいとすれば、操作性評価の傾向と整合する結果といえる。

リスク補償行動: 走行速度の分析からは、デバイス操作性に基づくリスク知覚が走行速度に影響するという明確な関係は見出されなかった。被験者の 2/3 は運転のみの時よりもデバイス操作時において速度の低下が見られたが、残り 1/3 はデバイス操作時においてむしろ速度の上昇が見られた。また、いずれの群においてもデバイス操作性の主観的評価やタスク実施パフォーマンスおよび主観的安全性評価と走行速度との間に有意な関係は認められなかった。

比較的簡単な走行条件で行われた今回の実験では、静止状態で行われるデバイスの操作性評価は、そのデバイスを用いた際の運転の主観的安全性や運転操作を予測する指標として有効であることが示された。

しかしながら、走行状況がより複雑になった場合においてもこの予測が有効であるかは今後検討する必要がある。また、今回用いた 3 種のインタフェースはいずれも視覚に依存していたが、音声入力などの別モダリティを使用するインタフェースが比較対象に加わった場合に、静止状態での評価と運転状態での評価のパターンが変わる可能性が考えられる。

6. まとめ

車載情報システムは、適用の仕方によって運転支援にも阻害にもなり得る。阻害要因を最小化するため、インタフェースのデザインは重要である。

本研究では、車載 HMI の評価に重要な指標を明らかにすることを目的とし、3 種類のデバイスを用いた様々な条件下で階層メニュー選択課題を行う実験を行った。

デバイスの主観的操作性の評価順位は、静止状況と運転状況で間一致しており、また、それらのデバイスを用いた際の主観的運転安全性評価、操作中のデバイス視認時間の短さや操舵の滑らかさの順位とも一致していた。しかし、デバイス操作性がリスク知覚に影響し、これが走行速度に影響するという仮説は支持されなかった。

これらの結果から、静止状況でのデバイス操作性評価は運転状況での操作性・安全性を予測する指標として有効であると考えられる。また、視認行動と操舵角偏差が客観的指標として有望であることが示唆された。

謝辞

本実験の実施にあたってご尽力いただいた日本大学卒業生の小林祥生さん、椎名康晴さん、石原寿和さん、およびトヨタ IT 開発センターの渡部聡彦さん、倉本秀治さ

んに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Redelmeier, D. A. and Tibshirani, R. J. (1997) Association between Cellular-Telephone Calls and Motor Vehicle Collisions. *The New England Journal of Medicine*. 336(7), 453-458
- [2] McEvoy, S. P., Stevenson, M. R., McCartt, A. T., Woodward, M., Haworth, C., Palamara, P. and Cercarelli, R. (2005) Role of mobile phones in motor vehicle crashes resulting in hospital attendance: a case-crossover study. *BMJ* 2005, 331- 428.
- [3] Manalavan, P., Samar, A., Schneider, M., Kiesler, S., and Siewiorek, D. 2002. In-car cell phone use: mitigating risk by signaling remote callers. In *CHI '02 Extended Abstracts*, 790-791
- [4] Hosking, S.G., Young, K.L., and Regan, M.A. (in press). The effects of text messaging on young drivers. *Human Factors*.
- [5] Srinivasan, R. and Jovanis, P.P. (1997) Effects of In-vehicle Route Guidance Systems on Driver Workload and Choice of Vehicle Speed: Findings from a Driving Simulator Experiment. In: Noy, I. (Ed.), *Ergonomics and Safety of Intelligent Driver Interfaces*, pages 97-114. New Jersey: Erlbaum.
- [6] 栗谷川, 景山, 渡部, 倉本, 溝渕, 那和, 久門 (2009) 表示操作系 HMI の評価手法に関する研究, 自動車技術会 2009 年度春季大会学術講演会前刷集 No.35-09
- [7] Winston, C., Maheshri, V. and Mannering, F. (2006) An exploration of the offset hypothesis using disaggregate data: The case of airbags and antilock brakes *J Risk Uncertainty*, 32, 83-99.
- [8] Aarts, L. and van Schagen, (2006) I. Driving speed and the risk of road crashes: A review. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2), 215-224.
- [9] Godley, S. T., Triggs, T. J. and Fildes, B. N. (2004) Perceptual lane width, wide perceptual road centre markings and driving speeds. *Ergonomics*, 1366-5847, 47(3), 237 - 256.
- [10] 平尾, 小坂, 西谷 (2008) 車載 HMI 評価プロセスについての考察, 計測自動制御学会関西支部シンポジウム講演論文集, 2007, 65-68