

# 音声操作中の警報音聴取に対する注意配分改善手法の検討<sup>1</sup>

伊藤一也<sup>2</sup>, 田中健次<sup>3</sup>

The warning sound of the driver assistance system has become more and more important for safe driving. However, the auditory stimuli response time of the warning sound with a sound expression may be longer while using the voice activation system. The purpose of this study is to clarify the parameters for estimating the auditory stimuli response times of warning sounds with sound expressions in the case of using the voice activation system while driving and verifying the effects of the visual presentation of predicted auditory stimuli response times. As a result of our two experiments using a driving simulator, the first frequency standard deviation of the steering angle estimated the auditory stimuli response time for the warning sound. Moreover, the auditory stimuli response time was shown to be closer to the results of concentrating on driving conditions with the visual stimuli color change based on predicted auditory stimuli response times and the sense of anxiety when driving.

運転支援機能の普及により警報音等の聴覚情報が安全運転のために重要となる。しかし、音声操作中は、音像表現を付加した警報音の聴覚刺激反応時間が長くなる可能性が考えられる。本研究の目的は、運転中に音声操作を行いながら音像表現を付加した警報音を聴取する場面において、警報音の聴覚刺激反応時間を推定するパラメータを明確にすること、および、視覚刺激でドライバーの聴覚刺激反応時間の推定結果を提示する効果を検証することである。そのため、ドライビングシミュレータ(DS)を用いて2種類の実験を実施した。結果、警報音の聴覚刺激反応時間はステアリング操舵角の基本周波数標準偏差で推定可能なことが示された。また、聴覚刺激反応時間に基づく視覚刺激の色変化と、運転への不安感を感じるタイミングが合うと、聴覚刺激反応時間は運転に集中した場合の結果に近づくことが示された。

(キーワード：注意配分、音声操作、聴覚刺激反応時間、ドライビングシミュレータ)

## 1. はじめに

近年、自動車の利便性向上を目的に、カーナビゲーションに代表される情報提示装置が普及しており、情報提示装置の操作方法として音声操作を採用する傾向がある。情報提示装置の音声操作は、タッチパネルなどの手操作と比べて、操作時に車両ふらつきなどの運転への影響が小さい<sup>1)</sup>、車両前方の視覚情報を多く取得できる<sup>2)</sup>というメリットが先行研究で示されている。ドライバーが音声操作を行う際は、発話内容を短期的に記憶して処理するだけでなく、発話した自分の声を聴いて正しく発

話出来ているかを確認する作業も同時に行っている。つまり、ドライバーは運転時の注意リソースをワーキングメモリと聴覚に多く配分しているものと考えられる<sup>3)</sup>。一方、自動車の運転支援機能の普及に伴い、運転支援機能の警報音が増加傾向にある。ドライバーは、警報音を聴取して各警報の意味を認知し、判断に基づき対応するが、この時、発話と同じ聴覚リソースの量がドライバーの認知反応時間に影響があると考えられる。特に、運転中に運転以外のタスク処理が得意ではないドライバーにとっては、運転以外のタスクである音声操作に聴覚リソースを長時間費やすことで、安全な運転が阻害される懸念がある。本研究では、運転中に音声操作を行いながら警報音を聴取する場面において、ドライバーの音像の弁別を考慮した警報音(以下、聴覚刺激)反応時間や車両のふらつきに与える影響を調査する。その調査により得られた基礎的な知見に基づき、音声操作中の警報音聴取に対する注意配分改善手法としてのドライバー状態推定技術の検討を行う。

先行研究では、音声操作時における運転への影響の少

1 受付：2016年8月28日 受理：2017年4月2日

2 電気通信大学大学院 情報システム学研究所 Graduate School of Information System, University of Electro-Communications, 一関工業高等専門学校 未来創造工学科 National Institute of Technology, Ichinoseki College (2017.4~)

3 電気通信大学大学院 情報システム学研究所 Graduate School of Information System, University of Electro-Communications

なさ<sup>1)</sup>以外にも、警報音に音像表現を付加することでリスクの認知時間が0.3～0.5秒短縮可能<sup>4)</sup>であることや、音像表現を付加した注意喚起音は、文字表記と比べて認知反応時間が最大0.5秒程度短縮する検証結果<sup>5)</sup>が示されているが、音声操作と音像表現を付加した警報音の聴取を同時に行った研究結果は示されておらず、音像表現を付加した警報音の聴覚刺激反応時間と関連するパラメータは明確ではない。

また、音声操作中における車両のふらつきに着目すると、伊藤ら<sup>1)</sup>は、機器操作時において、車両横方向の位置の標準偏差に影響が表れやすいことを示している。車両のふらつきは、同じ運転操作であっても車両の諸元によってふらつき量が異なるため、ドライバーのステアリング操作から状態を推定することが重要である。ドライバーのステアリング操作の特徴に関する先行研究として、田中ら<sup>6)</sup>は、ドライバーが実車の直進状態を維持する実験において平均基本周波数0.2～0.3 Hzで操舵を行う傾向を示している。これより、音声操作中に修正操舵が頻繁に行われる場合は、基本周波数の平均値が0.3 Hzよりも高くなり、標準偏差が相対的に小さくなると考えられる。さらに、ドライバーの状態を推定する手法に着目すると、Boerらは、ステアリングエントロピー法と呼ばれるドライバーの疲労状態の推定手法を提案している。この手法では、カーブ走行中におけるステアリング操舵角の予測値と実測値の誤差分布から得られた標準偏差と閾値を比較することでドライバーの疲労の有無を判定する<sup>7)</sup>が、聴覚刺激反応時間の推定に適用できるか不明である。

以上より、本研究では音声操作中における音像の弁別を考慮した聴覚刺激反応時間を推定するパラメータを明確にして、推定した聴覚刺激反応時間を、視覚刺激など聴覚以外の手段でドライバーへ提示することによる効果の検証を目的に、ドライビングシミュレータ(DS)を用いた2種類の実験を行った。まず、実験1では、音声操作の負荷が増えた場合に、音像の弁別を考慮した警報音への反応時間や車両のふらつきがどのように変化するか計測し、ドライバーの状態を推定するパラメータの特定と推定式を確立する。また、実験2では、推定したドライバー状態を視覚刺激で提示する効果を検証した結果について考察する。

## 2. 提案する手法

本研究では、ステアリング操舵角を計測してドライバーの状態を推定し、その状態をフィードバックする手法を提案する。

はじめに、ステアリング操舵角の計測方法について提案する。予備実験においてドライバーの運転行動を観察したところ、発話中に手が止まり、再度ステアリングを動かす傾向が特徴として見られた。ステアリングの角度自体は運転に集中した場合と差は見られなかったが、修正操舵のためのステアリングの急な動きがランダムに発生しやすい特徴が目視で確認された。先行研究として、福井<sup>8)</sup>は、ドライバーの操舵機能の低下を検出するために修正操舵に着目し、操舵角データから高周波成分をフィルタで抽出して修正操舵の有無を検出している。しかし、フィルタの使用によってドライバーの修正操舵の発生有無は抽出可能になるが、フィルタのパラメータ設定が不適切な場合、ドライバーの操舵機能が低下する程度を数値で抽出することが困難である。

以上より、本研究ではドライバーの操舵機能が低下する程度を数値で抽出するために、フィルタを用いずに操舵角の変化を直接測る方策を検討した。ここで、操舵角の変化を直接測る手法として、操舵角の振幅を測る方法や操舵角の振幅の標準偏差を測る方法、操舵角速度を測る方法が考えられるが、操舵角の振幅および振幅の標準偏差を測る方法は、車両の走行状態によって値が変化するため適用が困難である。また、操舵角速度を測る方法は、ドライバーの修正操舵において操舵角が変化する傾きが大きくても、操舵角の変化量が小さい場合には操舵角速度が小さくなり、ドライバーの操舵機能の低下を正確に把握するのが困難となる。

そこで、本研究では、ドライバーの修正操舵において操舵角の変化量によらず、操舵角の傾きの大きさを数値化が可能な操舵角の基本周波数に着目した。特に、修正操舵の頻度は基本周波数の標準偏差に影響するため、基本周波数の標準偏差からドライバーの操舵機能の低下度を数値化し、ドライバー状態を推定する手法を検討した。本研究においては、操舵角の基本周波数を求める手法としてFFT(高速フーリエ変換)を適用した。DSでは操舵角をサンプリング周波数120 Hzで計測しており、短い解析区間で0.25 Hz以上の分解能を求めるために、解析対象となる時間窓のポイント数を512点(約4.4秒間)とし、データ両端のゼロ詰めポイント数を1024点に増やして周波数スペクトルの分解能を約0.12 Hzとした。また、田中らの先行研究では0.1 Hz単位で基本周波数成分を求めており、より微小な変化として表れることを想定して、基本周波数を0.01 Hz単位で求めるために高澤の周波数補間公式<sup>9)</sup>を適用した。この公式は、Fig. 1のような周波数スペクトルにおいて、ハニング窓の適用と式(1)で容易に算出できる。ここで、mは本来の周波数ピークの直

前にあるFFTの周波数成分であり、周波数ピークの位置を示す $m$ からの周波数オフセット $\beta$ は、周波数 $m$ と $m+1$ の各パワー $r_m$ と $r_{m+1}$ から求められる。

$$f = m + \beta = m + \left[ \frac{3}{1 + r_m / r_{m+1}} \right] - 1 \quad (1)$$

なお、操舵していない時間窓の区間で最も大きいスペクトルが0 Hz (DC成分) となる場合は基本周波数0 Hzとして算出した。この手法を用いて、実験参加者毎にFig. 2のように解析対象の時間窓4.4秒間で基本周波数を算出、試行毎に時間窓を120ポイントずつずらしながら複数の基本周波数を求めて基本周波数の平均と標準偏差を求めた。その後、実験参加者毎に求めた標準偏差の平均を求めた。

次に、ドライバーの状態を推定し、その情報をフィードバックする手法についての提案を行う。本研究では、前述のステアリング操舵角によりドライバー状態を推定し、視覚刺激を用いて提示することに着目する。視覚刺激を用いる妥当性について、田ノ上<sup>10)</sup>は、数値による平均燃費を1秒間隔で提示することで、周囲への注意配分を損なわずにドライバーの燃費改善に効果があることを示している。一方、視覚刺激の手段として、数値表示

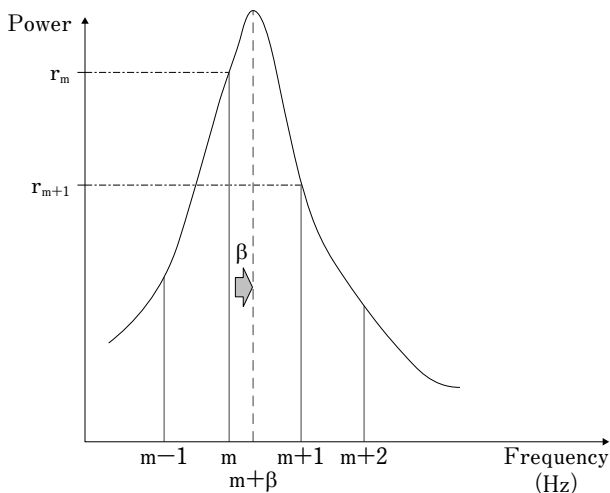


図1 周波数補間のイメージ<sup>9)</sup>

Fig. 1 Frequency Interpolation.

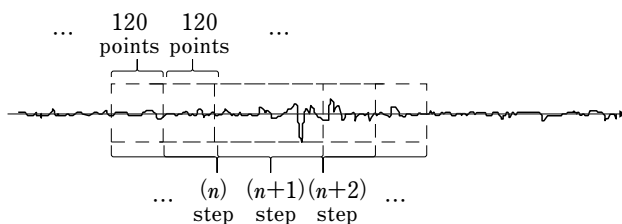


図2 操舵角周波数解析の時間窓

Fig. 2 FFT time window for steering angle data.

より直感的なメーター盤面の色変化によるアンビエント表示も実用化されている<sup>11)</sup>。本研究では、運転中に運転以外のタスク処理が得意ではないドライバーに適用することを考慮し、4章に示す、より直感的に理解しやすいアンビエント表示で聴覚刺激反応時間を提示するシステムを適用した。

### 3. ドライバー状態推定式検討実験 (実験1)

#### 3-1. 対象および方法

聴覚刺激反応時間と関連するパラメータを明確にするため、ドライバーが運転中に音声操作を利用しながら車室内から提示される警報音を聴取する場面において、聴覚刺激への反応時間と運転への影響をDS実験で検証した。この実験において、以下2点を仮説とした。

- (1) 聴覚刺激の反応時間は音声操作の負荷に応じて増加する。
- (2) 発話の負荷と音声認識結果を確認する視認負荷が高い音声操作では、操舵がおろそかになり、車両のふらつき増大などの影響が見られる。

##### 3-1-1. 実験参加者

実験参加者は、運転免許を保有する10名 (男性7名, 女性3名。内、20歳代男性5名, 40歳代男性2名, 女性3名, 50歳代男性1名) が参加した。全員、事前に刺激提示に対する反応時間とDSでの運転習熟の練習を行った上で実験を実施した。実験時間は、1人当たり120分で、途中適宜休憩を設けた。また、本実験は電気通信大学における人間を対象とする実験に関する倫理規定に基づき、安全と実験に配慮した形で計画、事前承認を得た上で実施した。

##### 3-1-2. サブタスク

実験1では、Tab. 1に示す負荷の異なる5つのサブタスクを課した。サブタスクは、聴覚刺激反応時間の計測が完了するまで繰り返し試行してもらった。サブタスクC)とD)では、試行毎の操作負荷を平準化するため毎回異なる目的地とするよう実験参加者へ教示した。サブタスクE)は音声操作によるジャンル検索、視認による検索候補の確認、再び音声操作で目的地設定という3種類の行為を連続で行わせるため、最も操作負荷が高いタスクとして適用した。

##### 3-1-3. 刺激提示装置

刺激提示装置は、ステレオスピーカ2セットを運転席のヘッドレストから前後約1mの位置に配置して、聴覚刺激を約5~15秒程度の間隔でランダムに提示した。ま

た、聴覚刺激の音色は、基本周波数1100 Hzの矩形波に2200 Hzの正弦波を付加した警報音<sup>4)</sup>を、ドライバー耳元の音圧約71～72 dBA、周期125 msec.で1秒間提示した。左右方向の音像は、左右の音圧差18 dBA、時間差2 msec.で表現した。DSのアイドリング時の音圧は約56 dBA、80 km/h巡航での走行音の音圧は約62 dBAであった。また、サブタスク試行中に、ドライバーの右前、左前、右後、左後、正面、背後からそれぞれ3回ずつ、計18回聴覚刺激が提示され、音像の方向を認知するまでの時間を聴覚刺激反応時間として計測した。サブタスクの試行時間は平均3分半である。なお、本研究では聴覚刺激反応時間は、全ての音像に対する反応時間の平均と標準偏差を求めた。

### 3-1-4. 実験条件

電気通信大学内にある定置型DSに、聴覚刺激の提示と反応時間の計測を行うシステムを搭載した。使用したDSのコースは、全長100 kmの2車線コース、車線幅は1車線当たり3.5 mである。本研究の実験では、左側車線を走行車線として使用した。聴覚刺激は、車線逸脱警報や後側方車両衝突警報を模擬した警報音を、ドライバーの四隅と正面、背後の6方向に音像を定位させて提示した。実験参加者には直線コースを先行車に80 km/hで追従しながらTab. 1のタスクを課し、その間のハンドルやブレーキの操作、車両のふらつきを求めるために必要な車両の走行位置を計測した。また、実験参加者には、聴覚刺激の音像の方向を認知したら右手親指上に装着したタクトスイッチをステアリング上に押しつけて反応するよう教示した。なお、各実験タスクの前に、停車状態で各タスクの操作を習熟してもらった後に計測を実施した。

本実験では、音声操作機能を搭載したカーナビゲーションシステムを用いた。また、操作負荷が高いタスク

表1 サブタスク

Tab. 1 Subtasks.

Subtask	Device	Number of interaction	Total Task Time (sec.)
A) 運転に集中			
B) 自宅を目的地設定	Navigation system	1	15
C) 周辺施設を目的地設定	Navigation system	5	70
D) 住所を目的地設定	Navigation system	7	85
E) 音声操作で行き先のエリアと施設ジャンルを検索後、候補一覧を確認して、音声操作で目的地設定	Smartphone	3	95

としてスマートフォン音声操作によるジャンル検索と目的地設定を連続で行わせるため、音声によるWeb検索が可能なアプリケーション (Googleアプリ) を画面サイズ4.7インチのスマートフォンにインストールして実験に用いた。スマートフォンの画面の向きは、情報検索性と音声操作の起動ボタンの押しやすさを考慮して縦長画面とした。これらの機器の画面は、DSのオートマチックシフトレバー前付近に設置し、ドライバーは左手で操作出来るようにした。また、アイポイントからナビゲーションシステムの画面中心およびスマートフォンの画面中心までの下方角は、JIS D0021で規定されるドライバーのアイポイントから下方角約30°の位置に調整した。なお、本実験における手操作は、全てタッチパネル操作で統一した。

伊藤ら<sup>1)</sup>は、運転中の機器操作の複雑さが高まるにつれて、運転操作に対する不安感を感じやすくなる傾向があることを示している。そのため、本研究では、各タスクを実施後に、実験参加者に対して運転操作に対する不安感を5段階で相対評価してもらった。その際、実験参加者の運転スキル差による評点のバラツキを減らすことを考慮し、ナビ操作なしで運転に集中しているサブタスクA)での走行時を5点、運転中の許容限界を3点として評価してもらうよう教示した。

なお、本研究の有意差検定は、サブタスク間など複数の群間で多重比較を行うため、Tukey-Kramer法を適用した<sup>12)</sup>。

## 3-2. 実験結果

聴覚刺激に対する反応時間の結果をFig. 3に示す。聴覚刺激に対する反応時間は、音声操作タスクの負荷が高くなるほど長くなりやすい傾向が見られた。また運転操

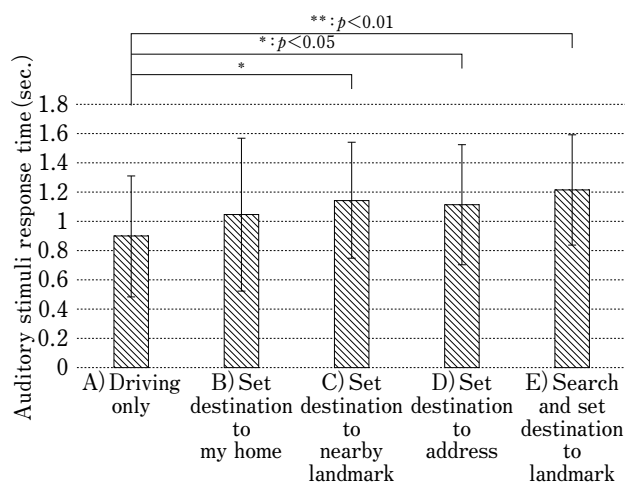


図3 実験1 聴覚刺激反応時間

Fig. 3 Auditory stimuli response time (experiment 1).

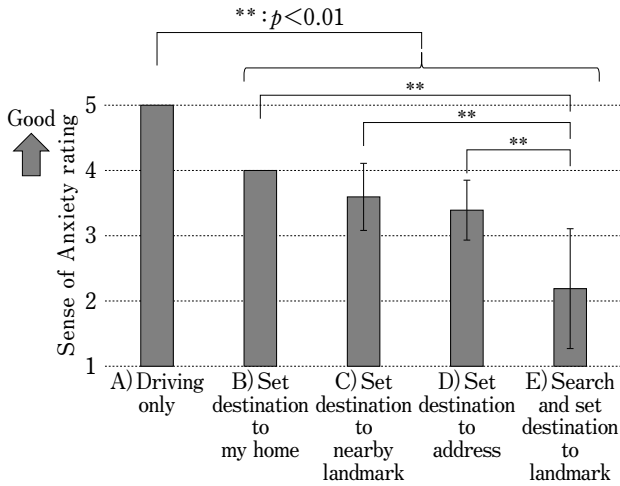


図4 実験1 運転操作に対する不安感

Fig. 4 Sense of anxiety rating (experiment 1).

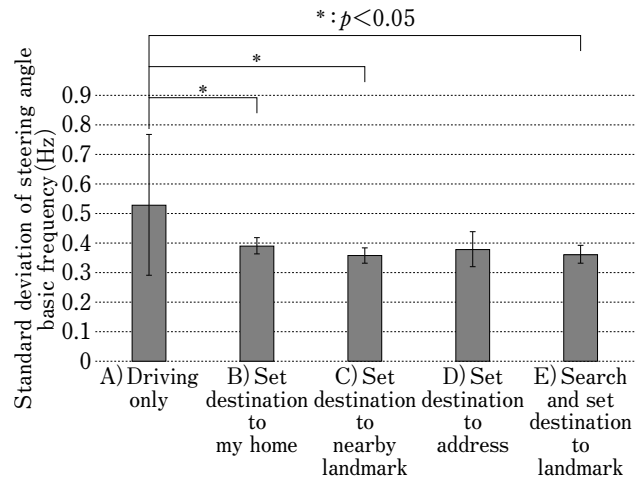


図6 実験1 操舵角基本周波数標準偏差

Fig. 6 Standard deviation of steering angle basic frequency (experiment 1).

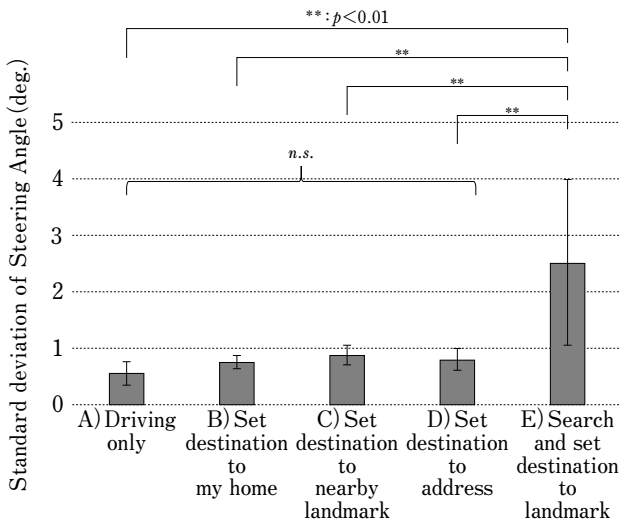


図5 実験1 操舵角標準偏差

Fig. 5 Standard deviation of steering angle (experiment 1).

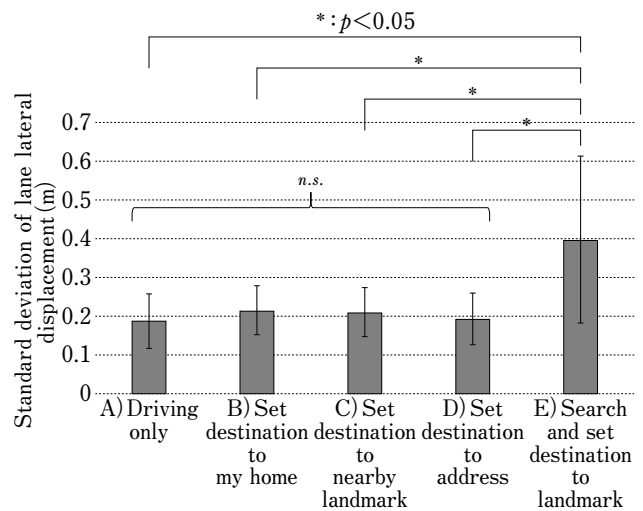


図7 実験1 車線内横位置標準偏差

Fig. 7 Standard deviation of lane lateral displacement (experiment 1).

作に対する不安感をFig. 4に示す。ナビゲーションシステムの音声操作タスク (サブタスクB) ~ D)) は、不安を感じにくい傾向が見られた。一方、サブタスクE) は他のサブタスクと比べて不安感が大きい傾向が見られた。各サブタスクにおける操舵角の標準偏差をFig. 5, 同様に操舵角の基本周波数の標準偏差をFig. 6, 自車両のふらつきを表す車線内の横位置の標準偏差をFig. 7に示す。Fig. 5から、タスクの負荷が高いサブタスクE) では平均操舵角の標準偏差が顕著に大きくなることが示された。また、Fig. 6から、音声操作中は運転に集中しているサブタスクA) と比べて平均操舵角基本周波数の標準偏差が小さくなる傾向が示された。車線内横位置標準偏差 (Fig. 7) は、ナビゲーションシステムの音声操作は運転への影響が現れにくく、伊藤ら<sup>1)</sup>の実験と同じ傾向が見

表2 操舵角パラメータと聴覚刺激反応時間の相関係数

Tab. 2 Correlation of steering angle parameters and auditory stimuli response time.

Steering Angle ( $1\sigma$ )	Steering Angle Basic Freq. ( $1\sigma$ )
0.67	-0.93

られた。また、タスクE) は他タスクと比べて、車両横位置の標準偏差が拡大した。

一方、運転操作と聴覚刺激反応時間の関係を知るため、Figs. 5~6の各指標と聴覚刺激反応時間との相関関係を求めた (Tab. 2)。この結果から、聴覚刺激反応時間との相関関係が高いのは、操舵角基本周波数の標準偏差であることが示された。また、操舵角基本周波数標準偏差と

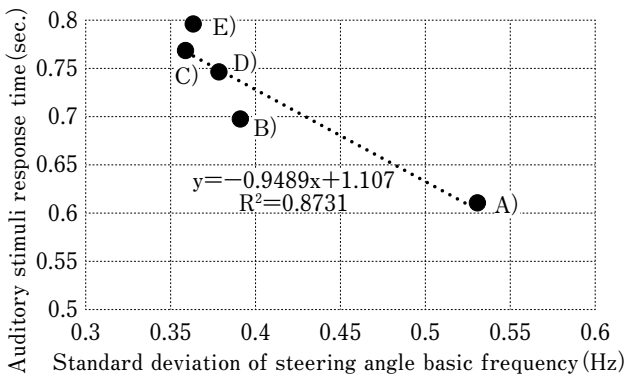


図8 操舵角基本周波数標準偏差と聴覚刺激反応時間  
 Fig. 8 Relationship of steering angle basic frequency standard deviation and auditory stimuli response time.

聴覚刺激反応時間の関係を示すグラフと回帰式 (Fig. 8) から、操舵角の基本周波数標準偏差から、ドライバーの聴覚刺激反応時間は操舵角の基本周波数標準偏差から予測可能であることが示された。

#### 4. ドライバー状態推定技術の構築

##### 4-1. ドライバー状態推定技術の概念

実験1の結果を受けて、ドライバーの音声操作中における聴覚刺激反応時間の増加を抑えるための方策を考える。ドライバーの音声操作中は、聴覚に注意リソースが多く配分されているが、同時に、運転操作に必要な他の感覚への注意リソースも配分されている。そのため、聴覚以外の感覚を用いた刺激提示により、聴覚刺激反応時間をドライバーへ提示する方法を検討した。先行研究によると、伊藤ら<sup>1)</sup>は、ドライバーのナビゲーションシステムの音声操作中において、視覚刺激に対する反応時間が手操作より短いことを示している。そのため、ドライバーの注意配分を改善することを目的に、以下の2つの技術を検討した。

- (1) 音声操作中の聴覚負荷を推定する技術
- (2) 推定した聴覚負荷を視覚刺激で提示する技術

##### 4-2. 音声操作中のドライバー状態を推定する技術

音声操作中のドライバー状態をリアルタイムで推定するために、Fig. 9の手順で過去の操舵角データより求めたステアリング操舵角の基本周波数標準偏差から、ドライバー状態を算出するシステムを構築した。

操舵基本周波数データキューの解析対象区間を決定する際に、本研究の実験では、5~10秒のランダムな間隔

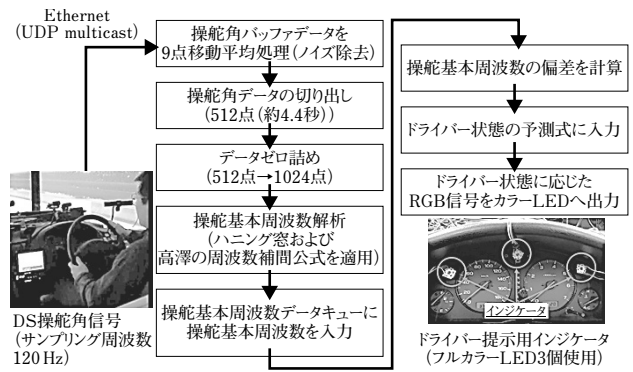


図9 ドライバーモニタの解析手順  
 Fig. 9 Flow chart of driver monitor.

で聴覚刺激を提示していることを考慮した。本推定技術では、直前の聴覚刺激に反応してから次の聴覚刺激が提示されるまでの最長時間である過去10秒間をステアリング操舵角の解析対象とした。

##### 4-3. 推定した聴覚負荷を視覚刺激で提示する技術

推定された音声操作の聴覚負荷を視覚刺激で提示するため、推定された聴覚刺激反応時間をカラーLEDによる光刺激の色変化で提示する。カラーLEDはメーター内の上端中央、上端左右の計3か所に設置した。これにより、ドライバーの視線が車両前方やナビ画面を向いても周辺視でLEDの色変化を直観的に把握出来ることを可能にした。カラーLEDの輝度は、室内の照度でも眩しくないよう、カラーLEDの設計仕様から電流値を調整して約10 cd/m<sup>2</sup>に合わせた。ドライバーの聴覚刺激反応時間の推定値が運転に集中した状態から増加すると、輝度を一定に保ちながら、推定反応時間が1.4秒の時を中間としてカラーLEDの色を緑色から赤色へ段階的に変化するようにした。

##### 4-4. ドライバーモニタシステムの妥当性検証

以上の技術を組み合わせて、ドライバー状態を推定してドライバーへ提示するためのドライバーモニタシステムを構築した。

ここで、Fig. 8で得られたドライバーモニタシステムの推定式に着目すると、ステアリング操作に影響する操舵反力特性が異なる車両でも同一の推定式が適用可能かどうかを検証する必要がある。また、ドライバーモニタシステムが運転以外のタスク処理との両立が得意ではないドライバーに適用して効果が得られることも検証する必要がある。

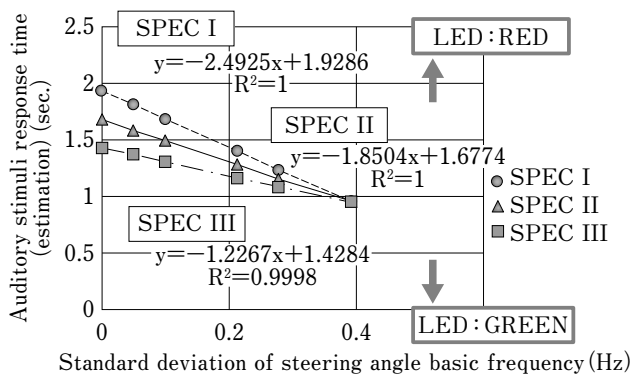


図10 ドライバー状態推定式の仕様

Fig. 10 Specification of auditory stimuli response time estimation.

そのため、実験1で取得した実験データから、Fig. 3で示されたサブタスクE)の聴覚刺激反応時間の平均値が、サブタスクA)と比べて0.5秒以上増加した6名分のデータを用いて、Fig. 10に示す3仕様の推定式を構築した。ここでデータを適用した6名は、最も音声操作負荷が高いサブタスクE)とサブタスクA)の聴覚刺激反応時間の差が、サブタスクA)の標準偏差である約0.5秒を超えていた。そのため、この6名を運転と音声操作の両立が難しいドライバーと定義して、ドライバーモニタシステムの効果を検証する対象者のデータと仮定した。

その上で、運転に集中した場合と、音声操作負荷が大きい場合のドライバー状態を明確に推定するために、運転に集中した場合を表すサブタスクA)と、サブタスクの総操作時間が長く操作負荷が大きいサブタスクD)とE)の3種類を用いた推定式を仕様Iとした。また、実験1を実施した後、DSの操舵反力装置の改修によって、ステアリングの中立位置から±5°の操舵反力が平均で3Nから2Nに減少した。これより、直線走行時に操舵角がふらつきやすくなり、仕様IではカラーLEDの色変化が不安定になる可能性がある。そのため、仕様Iに対して推定式の傾きを操舵反力の減少率に近い3/4にした仕様II、傾きを1/2にした仕様IIIを作製し、これらにドライバーモニタ未使用を加えた計4水準を用いて、推定式の妥当性を検証することとした。

## 5. ドライバー状態推定式 評価実験 (実験2)

### 5-1. 対象および方法

実験2は、ドライバーモニタの適用による効果を明らかにするための計測実験を実施した。

#### 5-1-1. 実験参加者

実験参加者は、運転免許を保有する12名(男性11名、女性1名)が参加した。内、20歳代男性8名、40歳代男性3名、女性1名)が参加した。実験1と同様に、刺激提示に対する反応とDSでの運転習熟の練習を行った上で実験を実施した。また、停車状態で各タスクの操作を習熟してもらった後に計測した。実験時間は、1人当たり約90分で、途中適宜休憩を設けた。なお、本実験は電気通信大学における人間を対象とする実験に関する倫理規定に基づき、安全と実験に配慮した形で計画、事前承認を得た上で実施した。

#### 5-1-2. サブタスク

サブタスクは実験1と同じTab. 1を適用した。ただし、実験時間短縮のため、サブタスクは実験1でインタラクション回数および実験結果がサブタスクD)に近かったサブタスクC)を削除して実施した。

#### 5-1-3. 実験条件

走行条件、サブタスクの習熟および反応方法は実験1と同じとした。一方、実験2ではメーター内にドライバー状態を推定するためのカラーLEDが装着されているが、運転操作への不安と無関係に変動するとドライバーがシステムを信頼しなくなり、聴覚刺激反応時間の短縮や車両のふらつき減少などの効果が得られにくくなる可能性がある。これを検証するため、実験1で用いた運転操作に対する不安感の他に、ドライバーモニタの告知タイミングの適切さに関する官能評価項目を追加した。評点は、タイミングが丁度良い場合を0点とし、+1点:告知タイミングが早い、+2点:告知タイミングが早すぎる、-1点:告知タイミングが遅い、-2点:告知タイミングが遅すぎる、の5段階評価とした。

なお、実験2におけるドライバーモニタの仕様I~IIIの提示順はランダムとした。また、実験参加者に対しては「カラーLEDの色変化は直進走行の運転に対する集中度合を表している」ことを教示し、聴覚刺激への反応に注意が偏らないよう配慮した。

また、実験結果の有意差検定は、実験1と同様にサブタスク間など複数の群間で多重比較を行うため、Tukey-Kramer法を適用した<sup>12)</sup>。

## 5-2. 実験結果

聴覚刺激反応時間の結果をFig. 11に示す。この結果、ドライバー状態推定式の仕様IIにおいて、明らかな有意差ではないが、全てのタスクで他の仕様と比べて平均反応時間が短く、運転に集中したサブタスクA)に近づく傾向が示された。また、車両のふらつきに関する結果を

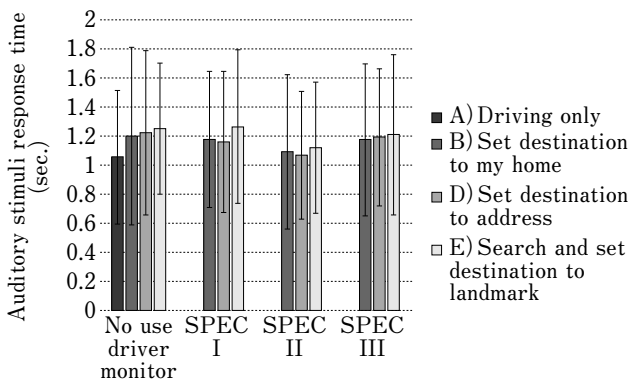


図11 実験2 聴覚刺激反応時間

Fig. 11 Auditory stimuli response time (experiment 2).

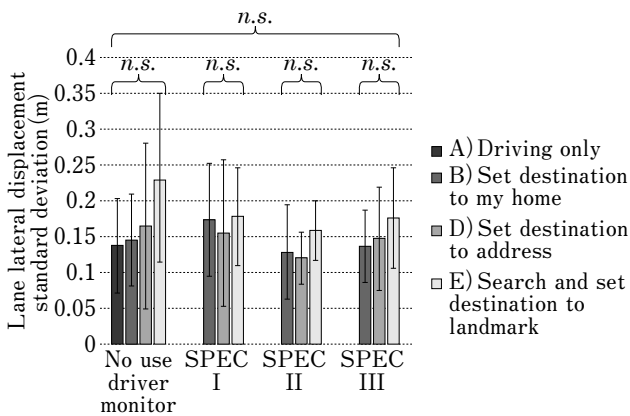


図12 実験2 車線内横位置標準偏差

Fig. 12 Lane lateral displacement standard deviation (experiment 2).

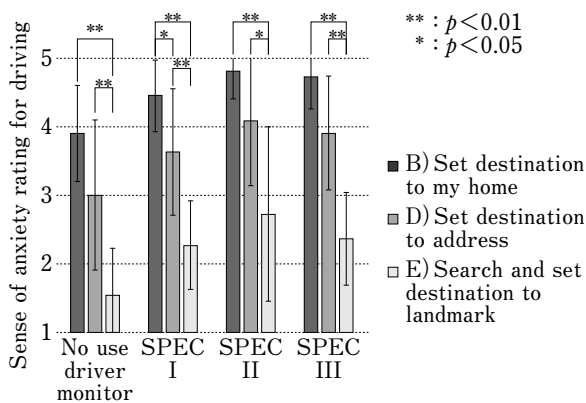


図13 実験2 運転操作に対する不安感

Fig. 13 Sense of anxiety rating (experiment 2).

Fig. 12に示す。全てのサブタスク間、およびドライバーモニタの仕様間で有意差は見られなかったが、ドライバー状態推定式の仕様IIにおいて、いずれのサブタスクでも車両のふらつきが総じて小さい結果が得られた。運転操作に対する不安感の結果 (Fig. 13) から、ドライバー

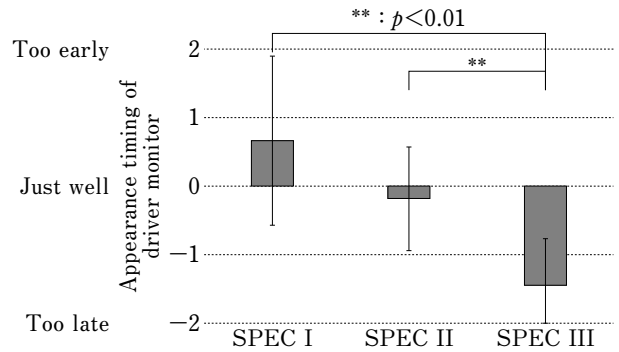


図14 実験2 ドライバーモニタの告知タイミング

Fig. 14 Appearance timing of driver monitor.

モニタを適用することによって、不安感の評点が1点程度向上し、不安感を感じにくくなる傾向が見られた。また、仕様IIは、どのサブタスクにおいてもドライバーモニタを使用していない場合と比べて有意に不安感を感じにくくなる結果も示された。また、ドライバーモニタの告知タイミングの適切さの評価結果をFig. 14に示す。仕様IIが3種類の仕様の中で最も適切であることが示された。

## 6. 考察

### 6-1. ドライバー状態推定手法の妥当性

実験1において、Fig. 4の実験結果から、ドライバーは、音声操作中において運転操作に対する不安感を感じにくい、サブタスクE)のように画面を注視する頻度が多い場合は、音声操作でも、ナビゲーションシステムの手操作と同様に、運転操作に対する不安を感じやすくなると推測される。また、操舵角基本周波数標準偏差と聴覚刺激反応時間の関係 (Fig. 8) から、運転中の音声発話によって、運転操作に注意が向かず修正操舵を行う頻度が増えることで、運転に集中した場合と比べて、基本周波数の平均が高くなり、一方で、基本周波数標準偏差が相対的に減少したものと考えられる。これより、音声操作の負荷が増えると音像の弁別を考慮した警報音への反応時間が増加すること、聴覚刺激反応時間が操舵角基本周波数の標準偏差との相関が高く、聴覚刺激反応時間が操舵角基本周波数から予測可能であることが示された。以上より、ドライバーの聴覚刺激反応時間を操舵角基本周波数の標準偏差で推定することが妥当であることが示唆された。

### 6-2. 視覚刺激によるドライバー状態提示の有効性

実験2において、Fig. 11の仕様IIにおける聴覚刺激反



応時間より、運転と音声操作の両立が難しいドライバーがドライバーモニタの告知を信頼して、聴覚刺激に対する注意配分を調整したことで、ドライバーモニタを使用しない場合と比べて反応時間が短縮したものと考えられる。ここで、実験1と比べて平均値が0.3点程度上昇しているのは、運転経験が浅い20代の実験参加者の割合増加の影響と考えられる。更に、Fig.13の官能評価の結果は、ドライバーモニタで注意配分状態を可視化することにより、注意配分を調整して運転への不安を感じにくくなったことが影響していると考えられる。また、Fig.14の結果を踏まえると、ドライバーが、ドライバーモニタの告知タイミングと運転操作に対する不安感を自覚するタイミングが合っていると感じるとドライバーモニタを信頼するようになり、注意配分を適切に配分して聴覚刺激反応時間の増加を抑え、運転操作に注意してふらつきを抑える結果につながったものと考えられる。更に、聴覚刺激反応時間の増加の抑制や、車両のふらつき低減の効果が見られた。このことから、ドライバーが音声操作を行う際は、音声操作に注意が集中しやすいが、視覚刺激の提示タイミングを適切にすることで注意配分の改善が可能であることが示されたと考えられる。また、実験1より求めたドライバー状態推定式の仕様Ⅰよりも、変化の傾きが小さい仕様Ⅱの方が最も反応時間の増加が少なく、運転への影響が小さい結果が示されたことは、DSの操舵反力特性が中立より $\pm 5^\circ$ 付近で実験1より2/3程度軽いためにドライバーの運転操作の傾向が変わり、結果的にドライバー状態推定式の仕様Ⅱが適切だったためと考えられる。以上より、運転と音声操作の両立が難しいドライバーに対して視覚刺激によって推定されたドライバー状態を適切に示すことは、ドライバーの聴覚刺激反応時間の増加を抑える上で有効であることが示唆された。

### 6-3. ドライバー状態推定技術の妥当性

ドライバーの音声操作におけるドライバー状態への影響は、音像の弁別を考慮した警報音への反応時間の増加として確認された。一方、警報音への反応時間は、ステアリングの操舵角から予測可能であり、予測した結果をLEDの色変化による視覚刺激で適切に示すことで、警報音への反応時間の増加が抑制できる効果があると考えられる。以上より、本研究におけるステアリング操舵角の基本周波数標準偏差を用いたドライバー状態推定技術は、運転と音声操作の両立が難しいドライバーが運転中に音声操作を利用する場面において妥当であることが示された。

## 7. おわりに

本研究では、ドライバーが直線走行中に音声操作を行った際における音像の弁別を考慮した警報音への反応時間について、ドライビングシミュレータ実験で検証した。結果、音声操作の負荷が総操作時間の増加につれて警報音への反応時間が長くなることが示された。

また、ステアリング操舵角の基本周波数標準偏差から警報音への反応時間が推定可能であることが示された。

さらに、ドライバーモニタによってリアルタイムで警報音への反応時間を推定して、視覚刺激を用いてドライバーに推定した警報音の反応時間を提示する効果についてドライビングシミュレータ実験で検証した。結果、ドライバーモニタによる視覚刺激の変化と運転操作に対する不安感を自覚するタイミングが合うと、警報音への反応時間が運転に集中した場合に近づく傾向が見られた。

以上より、本研究におけるステアリング操舵角の基本周波数標準偏差による警報音への反応時間の推定と色変化の視覚刺激による提示を組み合わせた手法は、音声操作中の警報音聴取に対する注意配分改善に寄与するものと考えられる。

## 参考文献

- 1) Itoh K, Miki Y, et al: Evaluation of a Voice-Activated System using a Driving Simulator, SAE Technical Paper 2004-01-0232, 2004
- 2) Itoh K, Miki Y, et al: A Study on Estimating the Variation of Driver's State by EEGs and EOGs, SAE Technical Paper 2006-01-0575, 2006
- 3) Kahneman D: Attention and Effort, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 13-27, 1973
- 4) 伊藤一也, 山中高章, 他: 車室内音響特性を考慮した報知音の音像定位技術の検討, 自動車技術会論文集, 45(5), 877-882, 2014
- 5) 岩男真由美, 小林正巳, 他: 車載情報機器によるドライバーへの情報提供方法の研究, 日本機械学会 交通・物流部門大会講演論文集, 2002(11), 237-240, 2002
- 6) 田中克則, 景山一郎: 車両運動特性向上のためのタイヤ設計手法に関する研究 (乗用車の直進性に対する評価指標とタイヤ特性について), 日本機械学会論文集 (C編), 68(674), 877-882, 2002
- 7) ステアリング・エントロピー: 自動車技術ハンドブック 人間工学編<第3分冊>, 457-460, 自動車技術会, 東京, 2016
- 8) 福井勝彦: 連続運転時における操舵機能低下の評価法, 豊田中央研究所R&Dレビュー, 30(3), 57-65, 1995
- 9) 高澤嘉光: 離散的フーリエ変換における補間公式, 日本音響学会 音楽音響研究会資料, 8(7), 9-18, 1990
- 10) 田ノ上明宏, 伊藤誠, 他: 燃費情報の視覚提示が自動車運転に及ぼす影響について, 自動車技術会論文集, 41(6),

1421-1426, 2010

- 11) 省燃費運転の支援システム：自動車技術ハンドブック 人間工学編<第3分冊>, 478-479, 自動車技術会, 東京, 2016
- 12) 永田靖, 吉田道弘：統計的多重比較法の基礎, 33-40, サイエンティスト社, 東京, 1997

#### 著者情報



**伊藤一也 (いとうかずや, 正会員, 連絡著者)**

1999年電気通信大学大学院電気通信学研究科卒. 修士(工学). 日産自動車株の勤務を経て, 2017年より一関工業高等専門学校未来創造工学科准教授. 専門領域: ドライバーディストラクション, 聴覚インターフェースほか. 日本人間工学会会員ほか.

連絡先: [kazuitoh@ichinoseki.ac.jp](mailto:kazuitoh@ichinoseki.ac.jp)



**田中健次 (たなかけんじ)**

1989年東京工業大学大学院総合理工学研究科卒. 理学博士. 茨城大学工学部を経て, 2004年より電気通信大学大学院情報システム学研究科教授. 専門領域: 知能情報学, 社会システム工学ほか. 計測自動制御学会会員ほか.