

二次タスクの負荷に応じた警告音に基づく 若齢者と高齢者の運転引継行動に関する研究

Study on the Behavior at Take-over Request of Young and Elderly People Based on Warning Sound According to Workload of Secondary Activities

精密工学専攻 4号 五十部 健太
Kenta Isobe

1. はじめに

近年、自動運転技術の研究開発が進んでおり、自動運転中は運転以外の作業、すなわち二次タスク(SA)を行うことが可能になると考えられている。ただし、自動運転の使用条件から外れる前に車両は警告音を提示し、ドライバは速やかに運転を引き継ぐ必要がある。この時、二次タスクの内容や作業負荷、警告音の音圧レベルや音質によって速やかにできない可能性がある⁽¹⁾⁽²⁾。また、同じ警告音でも年代により感度や印象が異なる可能性がある。

そこで本研究では、自動運転レベル3に着目し様々な年代のドライバが速やかに運転を引き継ぐことができる適切な警告音を開発するため、二次タスクの作業負荷とドライバの年代が運転引継行動に与える影響を調査した。まず、周波数、音圧レベル、吹鳴周期の中で緊急感に最も寄与しやすいパラメータを把握し、自動運転引継時に提示する警告音を選定する。次に、二次タスク単体の作業負荷を把握し、作業に必要なリソースや負荷の異なる二次タスクを選定する。最後に、若齢者と高齢者に対してドライビングシミュレータ(以下、DS)を用いた自動運転の実験を実施し、警告音、二次タスク、年代の違いによって、運転引継行動がどのように変化するか把握することを目的としている。

なお、本研究におけるすべての評価において、被験者には十分なインフォームドコンセントを得て実施している。

2. 警告音の選定及び印象評価

2.1 警告音の印象把握実験概要⁽³⁾

本実験では、実際の自動運転から手動運転への運転引継要請(以下、TOR)時を想定し、警告音に自動車の定常走行音を付加した音源について評価し、緊急感に寄与しやすいパラメータの把握する。

2.2 警告音の印象把握実験条件⁽³⁾

自動車の定常走行音は時速80 kmを想定したDSのサウンドプロファイルを使用し、ピーク音圧レベルは70 dBAを用いる。警告音の周波数は1200 Hz、1600 Hz、音圧レベルは50 dBA、60 dBA、70 dBA、吹鳴周期は2 Hz、4 Hz、6 Hz、8 Hzである。音源数はこれらを組み合わせた24個である。

評価方法はSD法を用いる。評価項目は「緊急感のある-緊急感のない」に対し、7段階の絶対評価で行う。評価は無響室で行い、評価音源はスピーカーで提示する。被験者は20歳代6名(平均23.0歳、標準偏差1.0歳)である。

2.3 警告音の印象把握実験結果⁽³⁾

Fig. 1に音の変動感に関する指標の一つである各音源の変動強度を示す。Fig. 2に緊急感の評価得点を示す。各周波数と各音圧レベルにおいて、吹鳴周期が短くなるにつれて緊急感が上昇するが、吹鳴周期が6 Hzでピークとなり、8 Hzでは緊急感が下降することが確認できる。吹鳴周期8 Hzが

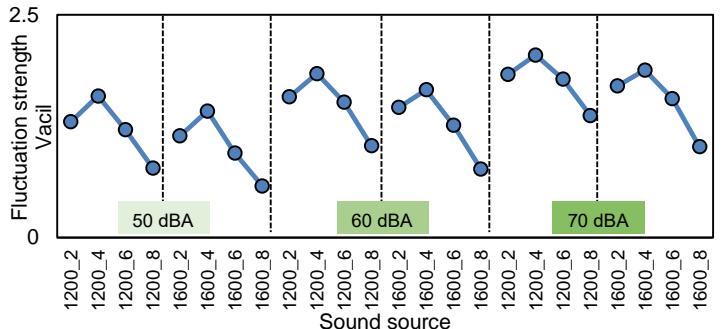


Fig. 1 Fluctuation strength

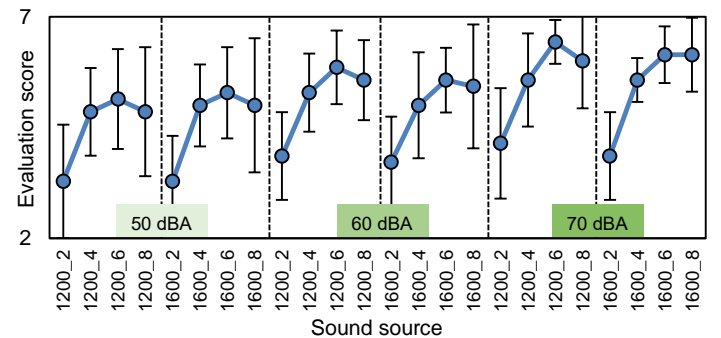


Fig. 2 Result of subjective evaluation

6 Hzよりも評価得点が低くなったのは、吹鳴周期が短くなることで、断続音に聞こえやすくなり、自動車の定常走行音に紛れやすくなったためだと考えられる。本実験において変更した周波数、音圧レベル、吹鳴周期の中で、緊急感には吹鳴周期が最も寄与しやすいと考えられる。

今後のDSを用いた実験において、TOR時に提示する警告音としては、周波数1600 Hz、音圧レベル60 dBA、吹鳴周期2 Hzと6 Hzを使用する。

3. 二次タスクの作業負荷把握

3.1 二次タスクの作業負荷把握実験概要⁽⁴⁾

本実験では、視覚や聴覚をはじめとする、作業における情報の入力経路と手操作や発話をはじめとする反応経路が異なるスマートフォンの操作を用いた二次タスクの作業負荷を把握する。

3.2 二次タスクの作業負荷把握実験条件⁽⁴⁾

3.2.1 評価対象とする二次タスク

二次タスクに使用したスマートフォンのサイズは、高さ149 mm、幅71 mmである。次に説明する動画課題、計算課題、画面1-Back課題、音声1-Back課題の4種類に加え、スマートフォン上の作業を行わない「二次タスク無」条件を検討した。

動画課題は、あらかじめ用意した6種類の中から、被験者自身が最も興味のある動画を視聴する課題である。また、課題終了後に動画に関する簡単な質問をすることをあらかじめ伝え、漫然と視聴しないよう注意を促した⁽⁵⁾。視覚および聴覚から得られた情報を理解する課題である。

計算課題は、画面上部に表示される3から9までの二つの数字を足し、計算結果の下一桁の数字を画面下部の数字ボタンを押して、解答する作業を続けてもらう課題である。Fig. 3に表示される画面の例を示す。視作業、思考、手操作を必要とする課題である。

画面1-Back課題は、画面上部に表示された一桁の数字を記憶し、2.25秒後に次の数字が表示された際に画面下部の数字ボタンを押して、解答する作業を続けてもらう課題である。Fig. 4に表示される画面の例を示す。視作業に加え、一時記憶を必要とする。

音声1-Back課題は音声で提示した数字を記憶し、2.25秒後に次の数字が提示された際に口頭で答える課題であり、聴覚、一時記憶、発話応答を必要とする課題である。

動画課題における動画の音声の等価騒音レベルは50 dBA、音声1-Back課題における提示する数字の音声のピーク音圧レベルは70 dBAである。

評価は無響室で行い、机に置いたスマートフォンを利き手で操作する。被験者は2.2節と同様である。

3.2.2 作業負荷の評価方法

二次タスクの作業負荷の評価は、メンタルワークロードを主観的に評価することが可能な数少ない手法の一つであるNASA-TLX⁽⁶⁾を用いて行った。評価項目は、精神的要求(MD)、身体的要求(PD)、タイムプレッシャ(TD)、作業達成度(OP)、努力(EF)、フラストレーション(FR)の6項目であり、5分間の作業終了後に評価させた。

評価項目の語句の解釈にズレが生じないようにするため、解釈をあらかじめ提示した。

3.3 二次タスクの作業負荷把握実験結果⁽⁴⁾

Fig. 5に各項目のレーダーチャートを、Fig. 6に6つの評価項目の平均値を示す。

動画課題は手操作や発話を伴わないため、6項目すべてで評価得点が低かった。一方、二次タスク無は動画課題よりも平均作業負荷が高く、何も作業を行わない状態を継続することがかえって「努力」や「フラストレーション」を高めたと考えられる。

計算課題の平均作業負荷は画面1-Back課題と音声1-Back課題よりも低かった。また、画面1-Back課題と音声1-Back課題は平均作業負荷の大きさが概ね等しかった。1-Back課題は計算課題と異なり、数字を記憶する要素があるため、作業負荷を高めたと考えられる。

したがって、視作業、聴覚、記憶、手作業など、二次タスクを遂行するための構成要素が増えるにつれて、作業負荷が上昇すると考えられる。また、中でも構成要素に「記憶」が含まれる場合、作業負荷が上昇しやすいと推察される。

4. 若齢者と高齢者の運転引継ぎ行動評価

4.1 運転引継ぎ行動評価の概要⁽⁷⁾

DSを用いた実験により、警告音の音質、二次タスクの種類、ドライバーの年代の違いが、自動運転から手動運転への運転引継ぎ行動に与える影響を評価する。

4.2 運転引継ぎ行動評価の実験条件⁽⁷⁾

4.2.1 被験者

若齢の被験者は、2.2節と同様である。高齢の被験者は、60歳代から80歳代19名(平均73.6歳、標準偏差4.2歳)である。被験者には実験前に聴力検査を実施し、年代の平均聴

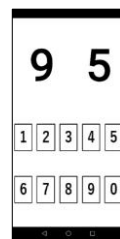


Fig. 3 Calculation

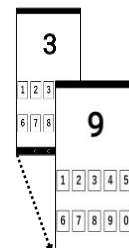


Fig. 4 Visual 1-Back

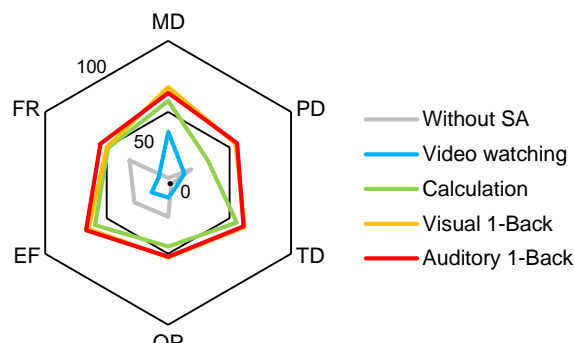


Fig. 5 Result of NASA-TLX

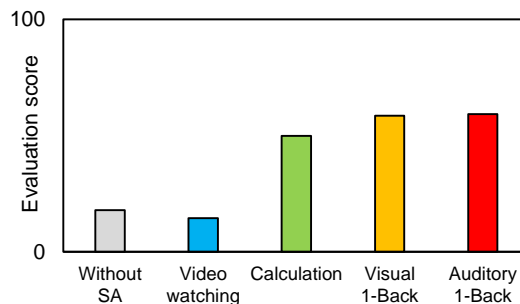


Fig. 6 Averaged workload in each secondary activity

力から大きく逸脱していないことを確認している。また、高齢の被験者には認知機能検査を実施し、認知機能に問題がないことも併せて確認している。

4.2.2 実施する二次タスク

本実験で自動運転中に実施する二次タスクは、3章より作業負荷と遂行するために必要な構成要素が異なることを確認した二次タスク無、動画課題および計算課題の3種類である。計算課題は、スマートフォンを利き手と反対の手で保持し、利き手で操作させた。二次タスク無と動画課題の場合は、スマートフォンを利き手と反対の手で保持させた。

4.2.3 走行条件

直線とカーブを組み合わせた片側3車線の高速道路の第2通行帯を時速80 kmで自動運転し、曲線半径300 mのカーブの途中で警告音を提示したのち、手動運転に移行する。Fig. 7に実験に使用する走行経路の一部を示す。警告音提示から10秒間は自動運転が継続する。その途中で操作を加えた場合は、その時点で運転権限が委譲される。10秒以上経過した場合は、自動運転モードが解除され、強制的に手動運転モードに移行する。自動運転解除後、ドライバーが操作を加えない場合は車線から逸脱する。そのため、被験者には警告音が提示されたら、二次タスクを中断し、スマートフォンを助手席に置いてステアリングを把持し、ペダルを踏み、運転を引き継ぐよう教示した。被験者は、DSの習熟走行を行い、操作に十

分慣れた上で実験を実施した。

Fig. 8 に高齢被験者における実験セットアップ⁽⁸⁾を示す。若齢者においては、Fig. 8 と互換性のある簡易型の DS を用いて実験を実施した。

4.2.4 提示する音の条件

定常走行音のピーク音圧レベルは 70 dBA であり、運転引継時に提示する警告音は、周波数は 1600 Hz、音圧レベルは 60 dBA、吹鳴周期は 2 Hz と 6 Hz である。

4.3 計測項目⁽⁷⁾

若齢者には、自動運転中の被験者の状態把握を行うため、心電計測を実施した。評価方法として、ストレスの評価方法の一つであるローレンツプロット⁽⁹⁾ (以下、LP) の面積を用いた。LP は、横軸を n 番目の心電図 RR 間隔、縦軸を n+1 番目の心電図 RR 間隔としてグラフ上にプロットした図であり、LP の分布形状から緊張状態とリラックス状態を推計する手法である。LP の面積が小さい場合、交感神経が優位になり緊張状態にあるとわかる。一方、LP の面積が大きい場合、副交感神経が優位になりリラックスした状態であるとわかる。Fig. 9 に緊張状態とリラックス状態における LP の測定結果の一例を示す。

若齢者および高齢者のどちらの実験においても、警告音提示後のドライバの運転引継行動も確認するため、足元と手元および DS の映像を記録した。記録映像の有効フレームレートは 30 fps である。警告音提示からステアリングを把持するまでの時間とアクセルペダルまたはブレーキペダルのいずれかのペダルに足を置くまでの時間を反応時間と定義し、記録映像から解析を行った。

運転引継後の行動評価の指標として、DS によって記録される時系列データから平均逸脱率を式 (1) で定義した。また、算

$$D_{ave.} = \sum \frac{|O_n - W/2|}{w/2} \times 100 \quad \dots (1)$$

但し、 $D_{ave.}$: 平均逸脱率、 O_n : 中央分離帯からの距離 [m]
 W : 片側道路幅 [m], w : 車線幅 [m], n : データ数

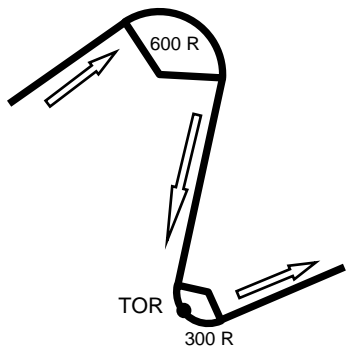


Fig. 7 Travel course

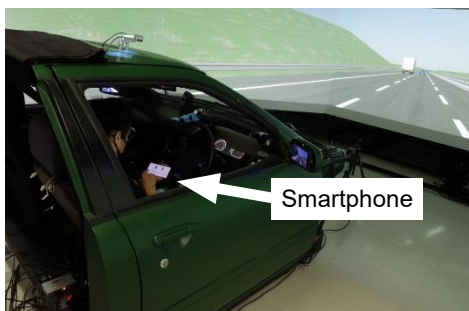


Fig. 8 Driving simulator

出した時間の中における最大値を最大逸脱率とし、各被験者の走行条件ごとに算出する。

4.4 運転引継行動評価の実験結果⁽⁷⁾

4.4.1 ローレンツプロット

Fig. 10 に自動運転中における LP の面積比を示す。心電は個人差が大きいため、二次タスク無の面積を基準として、計算課題と動画課題との比を算出することにより、正規化する。

計算課題は、LP の面積比が最も小さかった。自動運転中連続的に計算を行い、答えを入力することにより、集中力と覚醒が維持されるため、交感神経が優位になったと考えられる。一方、動画課題は LP の面積比が最も大きかった。作業負荷の評価結果から作業負荷が低く、リラックスしやすいため、副交感神経が優位になったためだと考えられる。

また、Fig. 5 と Fig. 6 の NASA-TLX を用いた主観評価の結果が示すように、二次タスク無は自動運転中に何も行わないため、それがかえってストレスとなり、動画課題より LP の面積比が小さくなったと考えられる。

4.4.2 警告音提示に対する反応時間

Fig. 11 と Fig. 12 にそれぞれ若齢者と高齢者の警告音に対する反応時間を示す。若齢者では二次タスク無の吹鳴周期 2 Hz では、手動運転への引継ぎが顕著に遅くなることを確認した。警告音の緊急感が小さいことに加え、作業負荷が低いため漫然としやすいと考えられる。

一方、計算課題は、他の二次タスクよりも反応時間が短かった。自動運転中に断続的にスマートフォンの手操作と思考を伴い、高い集中力を必要とするため、覚醒が維持されたためだと考えられる。

また、スマートフォンで作業している場合の、ペダルへの足掛け時間とステアリングの把持までの時間の差分に着目すると、若齢者と高齢者ともにステアリングの把持への時間の方が遅れていることが確認できる。これは、スマートフォンを置くための時間が含まれていると考えられる。また、二次タスクを行っている場合、若齢者より高齢者の差分が大きくなっている。加齢に伴い、スマートフォンへの意識から運転動作への意識の切替が遅れやすく、高齢者の腕部の動作は

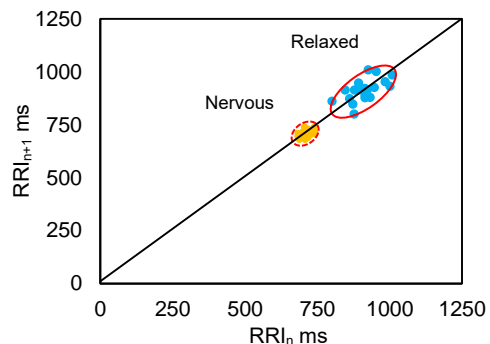


Fig. 9 Example of LP

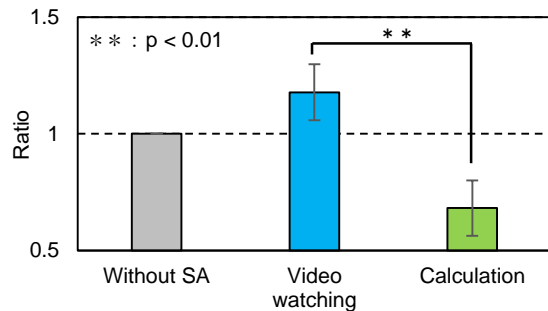


Fig. 10 Ratio of LPS

脚部の動作より遅延しやすいと推察できる。

4.4.3 逸脱率

Fig. 13 に若齢者と高齢者の算出した最大逸脱率の結果を示す。

若齢者では、反応時間と同様に、二次タスク無の吹鳴周期 6 Hz が 2 Hz よりも顕著に逸脱率が小さいことが確認できる。また、作業負荷が最も低い動画課題においても同様に、吹鳴周期 6 Hz において逸脱率が小さいことが確認できる。一方、作業負荷の高い計算課題は吹鳴周期 2 Hz の逸脱率が小さいことが確認できる。したがって、作業負荷の低い課題を行う場合は、自動運転中にドライバが漫然としてしまうため、緊急感の大きい警告音が適している。一方、作業負荷の高い課題は、課題を実行すること自体に集中力を要し、覚醒を維持する効果を持つため、緊急感が小さい警告音が適しており、緊急感が大きい警告音はかえって逆効果になる可能性があると考えられる。

高齢者では、概ねすべての条件において逸脱率が若齢者よりも大きかった。また、若齢者と同様に二次タスク無では、スマートフォンを用いた二次タスクを遂行しているときよりも逸脱率が大きかった。また、高齢者は警告音の吹鳴周期の違いによる差異が、若齢者よりも小さかったものの、二次タスク無と計算課題の逸脱率は吹鳴周期 6 Hz の方が小さく、動画課題では吹鳴周期 2 Hz の方が小さいことが確認できる。高齢者の場合、動画課題程度の作業負荷には緊急感の小さい警告音が適しており、漫然としやすい二次タスク無や、計算

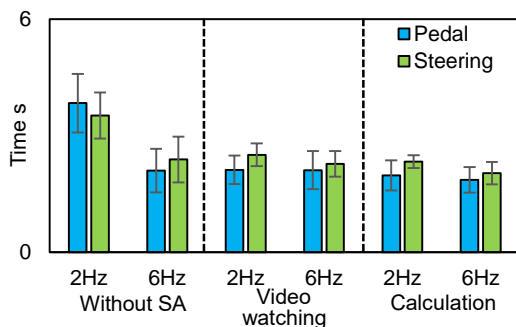


Fig. 11 Response time (Young people)

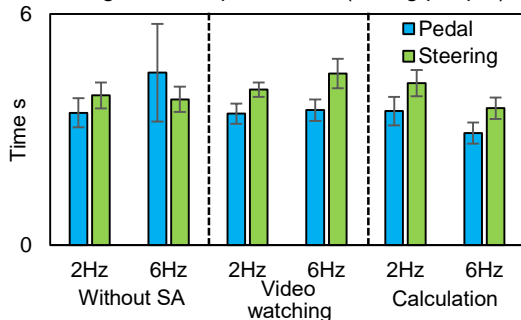


Fig. 12 Response time (Elderly people)

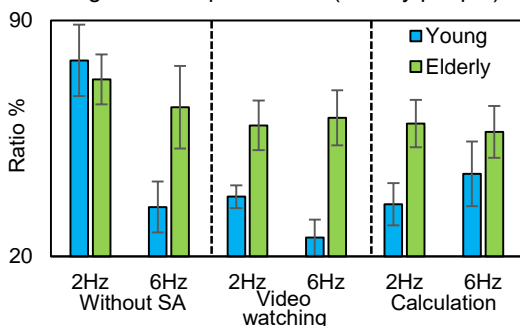


Fig. 13 Maximum deviation rate

課題のように作業負荷の高い二次タスクでは緊急感の大きい警告音が好ましいと考えられる。

したがって、年齢によって異なる警告音を提示することで、安全な運転引継行動につながることを示唆される。

5. 研究成果

- (1) 警告音において周波数、音圧レベル、吹鳴周期の3つのパラメータの中では、吹鳴周期が最も寄与しやすいことを示した。また、吹鳴周期が高すぎる場合、定常走行音に紛れて緊急感が減少する事を示した。
- (2) 主観評価により、自動運転中の二次タスクの作業負荷を実施した。視覚、聴覚、手操作、記憶、発話など、作業の遂行に必要な構成要素の多寡により負荷が大きく異なることを示した。また、二次タスク無が一定程度の負荷となる可能性を示した。
- (3) 自動運転中の作業負荷の大きさの違いにより、LPの面積比が変化することを確認した。作業負荷が低く漫然としやすい場合は面積比が大きくなり、作業負荷が高く覚醒が維持できる場合は面積比が小さくなることを示した。
- (4) 作業負荷の低い二次タスクは自動運転中に漫然としやすく、適切に運転引継行動ができない可能性があり、一定程度の作業負荷のある二次タスクを実行することにより覚醒を維持し、運転引継行動の成績が向上することを示した。
- (5) 年齢によって適切な警告音を提示することで、安全な運転引継行動につながることを示唆される。

参考文献

- (1) 五十部健太, 戸井武司, 生体情報を考慮した危険度に応じた警告音の選定, 第30回日本機械学会環境工学シンポジウム講演論文集(2020)No.136.
- (2) 五十部健太, 戸井武司, 生体情報を考慮したセカンダリアクティビティの受容性評価, 日本音響学会騒音・振動研究委員会(2020)N-2020-23, pp.1-6.
- (3) 五十部健太, 戸井武司, セカンダリアクティビティと警告音の差異による自動運転引継時の行動評価, 日本音響学会講演論文集(秋)(2021)pp.1245-1246.
- (4) 五十部健太, 戸井武司, セカンダリアクティビティの作業負荷に応じた警告音の選定, 日本音響学会講演論文集(春)(2021)pp1179-1180.
- (5) 関根道昭, 加藤洋子, 榎本恵, 五十部健太, 戸井武司, 自動運転中の二次タスクが運転引継ぎの安全性に及ぼす影響(第1報), 自動車技術会学術講演発表会予稿集(2021)No.98, pp.1-6
- (6) 芳賀繁, 水上直樹, 日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定, 日本人間工学会誌, 32-2(1996)pp.71-79.
- (7) 五十部健太, 加藤洋子, 関根道昭, 戸井武司, 二次タスクの作業負荷の差異を考慮した高齢者と若齢者の運転引継時の行動に関する研究, 日本音響学会講演論文集(春)(2022)1-11-1.
- (8) 加藤洋子, 関根道昭, 榎本恵, 五十部健太, 戸井武司, 自動運転中の二次タスクが運転引継ぎの安全性に及ぼす影響(第2報), 自動車技術会学術講演発表会予稿集(2021)No.99, pp.1-6.
- (9) 豊福史, 山口和彦, 萩原啓, 心電図 RR 間隔のローレンツプロットによる副交感神経活動の簡易推定法の開発, 日本人間工学会誌, 43-3(2007)pp.185-192.