

テレマティクスにおける思考負荷尺度の提案とその評価

荒 金 陽 助[†] 辻 ゆかり[†] 下 川 清 志[†]

運転タスクは道路環境を視認するという視覚情報処理が主体のタスクであり、テレマティクスサービスタスクは聞き取りと発話という言語情報処理を主に行うタスクである。運転タスクに影響を及ぼさないようなテレマティクスサービス制御を行うためには、言語情報処理と視覚情報処理との相互作用を定量化する必要がある。そこで本論文では、視線解析値とテレマティクスサービスの応答時間とをパラメータとした思考負荷尺度を提案する。次に、視覚情報と言語情報の相互作用を定性的に説明可能なワーキングメモリモデルの下位システムの動作に対応するテレマティクスサービスの抽出を行い、各サービスの思考負荷をリソース消費の観点から考察する。そして実車両を用いた被験者実験により、抽出したテレマティクスサービスを模擬したタスクに対して、提案尺度の有効性評価を試みる。その結果、ワーキングメモリモデルを用いた予想と同じ傾向を示すことを確認する。また、NASA-TLXを用いた主観評価値との間に高い相関があることを示す。

Proposal of a Workload Measurement Method of Telematics Services and Its Evaluation

YOSUKE ARAGANE,[†] YUKARI TSUJI[†] and KIYOSHI SHIMOKAWA[†]

While a task of driving mainly involves visual information processing, to recognize the road conditions visually, a telematics service mainly involves language processing, to listen to or utter messages. In order to develop a telematics service control system that does not adversely affect a driving task, it is necessary to quantify the interaction between language information processing and visual information processing. For this purpose, this paper proposes a measure of "thinking load" using, as parameters, a direction-of-sight analysis value and the response time to a telematics service. The paper then classifies telematics services using a working memory model, a model that can qualitatively explain the interaction between visual information and language information, in order to examine the thinking load of each telematics service qualitatively. Experiments were conducted using a real vehicle to verify the effectiveness of the proposed measure for various tasks that simulated the individual telematics services. The experimental results showed almost the same behavior as that which can be predicted from the working memory model. The paper also shows that there is a high correlation with the mental work load derived using NASA-TLX.

1. はじめに

通信を活用することで旬な情報をユーザに提供するオフボードコンテンツの形態をとることを特徴とした第2世代テレマティクスサービスが提供され始めている^{1),2)}。これらのサービスでは様々な情報を自動車内環境に導入することで、ユビキタスネットワーク端末としての自動車環境を提供している。しかしながら、快適性向上に資する情報化と、自動車運転の安全性は場合によってはトレードオフとなることがある。この問題を解決するためには、自動車運転に関わる運転環境負荷および、テレマティクスサービスに関わる思考

負荷を定量化し、それらのトレードオフの関係を明らかにする必要がある。そして、トレードオフの関係からテレマティクスサービスの制御手法を確立することがあわせて必要である。

昨今のカーナビゲーションシステム用インタフェースは、増大する情報量やメニューに対応するために音声インタフェースを採用するトレンドにあり³⁾、テレマティクスサービスタスクは主として言語情報処理で行われる傾向にある。一方、自動車運転はその入力情報の90%を視覚に依存しており⁴⁾、視覚情報処理を主体として行っていると考えられる。したがって、テレマティクスサービスタスクと自動車運転タスクのトレードオフを考察するためには、言語情報処理と視覚情報処理の関係を明らかにする必要があると考えられる。さて、テレマティクスサービスタスクも運転タスク

[†] NTT サービスインテグレーション基盤研究所
NTT Service Integration Laboratories

も人間の脳内で処理される思考負荷であるが、この思考負荷の評価には、その多次元性から主観的評価、生理心理的評価、そして他覚的評価（パフォーマンス）の3つの側面からの多角的アプローチが必要であるといわれている⁵⁾。主観的評価としてはNASA-TLXを用いた研究が多くなされている⁶⁾。また生理心理的評価では、脳内の事象関連電位（ERP）や機能的磁気共鳴画像法（fMRI）および、これらのデータなどからモデル化されており、視覚情報処理と言語情報処理とのトレードオフを扱うことが可能なワーキングメモリモデル^{7),8)}などを用いたドライバの運転情報処理に関する研究がある^{9),10)}。他覚的評価では、視線解析を用いた研究や^{11),12)}、反応時間を用いた研究がある^{13),14)}。さらに、音声インタフェースに関して「エーと」といったフィルターと運転行動の検討¹⁵⁾や、負荷計測値を元にメディアの制御を行う試みも提案されている^{16),17)}。

テレマティクスサービスは、交通情報の提供や携帯電話の使用といったサービスだけではなく、Webアクセスや電子メール送受信など様々なサービスを扱うようになってきている。ドライバの視覚情報処理および言語情報処理の負荷に関わる従来研究では、2次タスクとしてカーナビゲーションシステムの地点検索や数字復唱などをドライバに課した研究⁹⁾や、日本語リーディングスパンテストを2次タスクとしてドライバに課した研究⁶⁾などがある。筆者らの研究の目的は、運転タスク負荷が発生する運転環境において、思考負荷の異なる様々なテレマティクスサービスの思考負荷の影響を考慮した情報制御を行って、安全性と快適性との両立を目指すことである。思考負荷に関しては上記のような先行研究があるが、必ずしも単純でない複数のタスク間で思考負荷を比較検討したものは少ない。また将来的には、車載機におけるリアルタイム思考負荷推定によるテレマティクスサービス制御を目標としているため、思考負荷計測手段としては、車載実績が多く、リアルタイム処理が比較的容易なものを採用する必要がある。

そこで本論文では、車載実績の多い計測手段を用いて、テレマティクスサービスタスクがそれ自身と運転タスクに与える影響（負荷）の推定手法を提案し、実際のテレマティクスサービスに近いタスクを用いた実験評価によって提案手法の考察・検討を行うことを目的とする。なお、実験評価における考察においては、リアルタイム処理が困難であるが評価尺度として実績のあるNASA-TLXと、視覚情報処理と言語情報処理の相互関係を説明可能な生理心理的評価であるワーキングメモリモデルによる負荷予想と比較することで議

論を行う。

以下、2章では、テレマティクスサービスタスクが視覚情報処理および言語情報処理に与える影響を考察し、物理量として計測可能な視線解析値およびタスク応答時間を用いた他覚的評価である思考負荷尺度を提案する。続いて3章では、生理心理的評価に適用可能なワーキングメモリモデルを用いて、下位システムの動作に対応するテレマティクスサービスタスクの抽出を行い、リソース消費の観点から定性的にそれらのタスク間の負荷の大小を考察する。この考察の際に本論文では簡単のため、複雑な交差点や歩行者の飛び出しが想定されるような複雑な運転環境を除外し、定常的な運転タスクにおけるテレマティクスサービスタスクの負荷を議論対象とする。4章では、抽出を行ったタスクに対して実車両を用いた評価実験を行い、提案手法による思考負荷尺度の算出を行った。さらに、ワーキングメモリモデルから導かれる負荷の大小および、NASA-TLXから導かれる主観評価値との比較を行うことで、提案した思考負荷尺度の適応可能性について考察する。そして5章で本論文をまとめる。

2. 思考負荷尺度の提案

運転タスクは道路環境を視認するという視覚情報処理が主体のタスクであり、テレマティクスサービスタスクは聞き取りと発話という言語情報処理を主に行うタスクである。携帯電話での会話を行うことで運転がおろそかになったり、車間距離が急に縮まった場合に助手席のパASSEンジャーとの会話がとぎれたりといった現象が発生するように、これら視覚情報処理と言語情報処理はお互いに影響を及ぼし合う関係であると考えられる。すなわち、テレマティクスサービスタスクの負荷が高まることで、運転タスクが利用する視覚情報処理に影響が出たり、テレマティクスサービスタスク自体である言語情報処理にも影響が出たりする状態が考えられる。

本章では、視覚情報処理と言語情報処理それぞれに現出する影響を考察し、計測可能な物理値に思考負荷が与える影響を数式化することを試みる。そして、これらの数式を用いた思考負荷尺度を提案する。

2.1 視覚情報処理への影響

ドライバは通常走行時にも危なくない範囲で短時間の“よそ見”を行っていると考えられ¹⁸⁾、運転中の視認行動は、運転に必要な情報を取得する視認活動と、運転には直接必要ではない“よそ見”を行う視認活動が併存していると考えられる¹⁹⁾。このような状況で視覚情報処理に言語情報処理からの影響が発生すると、

まず運転には直接必要ではない“よそ見”が減少し、さらに影響を受けると運転に必要な視認活動までも減少して“視線の泳ぎ”が現れると考えられる。

運転に関わる視認行動を解明する手だてとして視線解析を用いた研究が行われている^{19),20)}。視線測定は人間が見ているものを100ms以下の細かい時間分解能で特定可能であるため高次認知処理の観察に適している、といわれている²¹⁾。そこで本論文では、視線解析を用いて視覚情報処理への影響を表すことを検討する。

ここで、人間の眼球運動についてその特徴を示す。人間は眼球を動かすことで視対象を視野中心に移動させ、視対象の情報を取得する。これは、人間の視機能は視野の中心部で非常に高く、周辺に向かうほど低下するという特徴による。このプロセスでは、周辺視処理を経て興味の対象となる情報のみが中心視処理のために選択され、その対象物の像はsaccadeと呼ばれる高速眼球運動により網膜中心に移動する。saccadeは数十ミリ秒の現象であるが、その前後を含めてsaccade suppressionと呼ばれる視対象を認識できない状態となる。このsaccade suppressionの期間は200msecという報告がある²²⁾。Saccade suppression期間後に視線は視対象に停留して視対象から情報を取得することが可能な状態となる。停留時間は一般的には100msecから300msec程度であるが、1,000msec以上になることもある²¹⁾。

2.1.1 よそ見の減少

運転に必要な視対象は道路沿いの構造物に限られており、運転自体にはそれほど大きい視野角は必要としない²³⁾。したがって大視野角の視線停留(周辺視)は、運転タスクにおいては“よそ見”である可能性が高いと考えられる。また、運転時に聴覚負荷を与えることで周辺視が低下するという報告がある²⁴⁾。そこで視覚情報処理への影響として、同様の運転環境における周辺視の低下を尺度として用いることが考えられる。周辺視の低下に関する先行研究では、被験者の周辺視領域に文字などを表示し、それを被験者に回答させる方式が採られている²⁴⁾。これを視線解析で定量的に計測するために、本論文では視野角度から周辺視の低下を検出することを試みる。すなわち、周辺視の低下は視野中心に視線が集中することであるから、“よそ見”の減少にともなって視野角度の標準偏差が減少すると考える。

2.1.2 視線の泳ぎ

視線が泳いでいる状態では、視界にある物体(視対象)から情報を取得することができていないと考えら

れる。これを眼球運動から考察すると、saccade suppression 期間には物理的に視対象から情報を取得することが不可能であるという特徴から、saccadeが頻発する状態がこれにあたる考えられる。saccadeの頻度は思考課題を与えることで増加するという報告があり²⁵⁾、本論文ではsaccade frequencyの増加が“視線の泳ぎ”を示していると考えられる。

2.2 言語情報処理への影響

運転中にテレマティクスサービスタスクの思考負荷が高まった場合には、運転タスクへの影響が生じるだけでなく、テレマティクスサービスタスク自身のパフォーマンスを制限するような言語情報処理抑制が働くことも考えられる。もちろんこの状態では運転タスクも余裕がない状態であり、前走車の急ブレーキなどの突発事象には対応できないことが考えられる。そこで本論文では、言語情報処理への影響も思考負荷を考える際に無視できないパラメータであると考えられる。

言語情報処理において難易度の高い質問を行ったり、二重課題として他のタスクを課したりした場合には、誤答や処理遅延といったパフォーマンスの劣化が観察されるようになる^{26),27)}。しかし誤答については、勘違いをしていたり、そもそも正答を知らなかったりといった思考負荷以外の影響が考えられる。一方応答遅延については、「知らない」という応答も言語情報処理をした結果の出力であり、物理値として計測可能である。そこで本論文では、応答遅延を言語情報処理への影響を示す指標として採用する。

2.3 思考負荷影響の定量化

前節で説明した各パラメータに現れる言語情報処理負荷を定量化することを試みる。なお本論文では、入力である各パラメータ値と出力である情報処理負荷の関係を近似する関数としてシグモイド関数を採用した。シグモイド関数は、脳内の処理である思考プロセスを司る並列相互作用するニューロンの平均的入出力関係²⁸⁾や、Saccadeに関わる視覚検出・定位の誤りなどの入出力関係²²⁾と類似の線形を持っており、入出力関係を表す関数として妥当であると考え、採用した。

2.3.1 視線角度標準偏差から定量化されるよそ見

被験者に前方のスクリーンに投影した走行映像を見せた状態で、複数桁足し算の思考負荷をかけたときの視線角度分散解析を行った中山らの先行研究²⁹⁾によれば、負荷なしの状態で分散値は $27(deg^2)$ 程度となっている。また、1桁~3桁の足し算では $15(deg^2)$ 程度、4桁や5桁の足し算で $8(deg^2)$ となっている。そこで本論文では、視線角度標準偏差が $3.0(\sqrt{9})$ のときの指標値を約0.99、 $5.5(\approx\sqrt{30})$ のときの指標

値を約 0.01 としてシグモイド関数による外挿を行う。計測した視線角度標準偏差を $s_a(deg)$ として、下記のようによそ見指数 L_S を定義する。

$$L_S = \frac{1}{1 + \exp(3.7s_a - 15.6)} \quad (1)$$

2.3.2 Saccade frequency から定量化される視線の泳ぎ

Saccade suppression および停留の時間は周囲の状況に応じて変動する。saccade は数十ミリ秒であり、saccade suppression は 200 msec 程度、停留時間が 100 msec 以上とすれば^{(21),(22)}、1 周期は 350 ~ 1,000 msec 程度であるとおける。これを周波数に置き換えれば、saccade frequency は 1 Hz ~ 3 Hz という幅になる。そこで、視対象から時間をかけて情報を取れる saccade frequency 1 Hz の状態での指標値を約 0.01、視対象からの情報をほとんど取れない状態である saccade frequency 3 Hz での指標値を約 0.99 としてシグモイド関数による外挿を行う。計測した saccade frequency を $f(Hz)$ として、下記のように非視認指数 L_f を定義する。

$$L_f = \frac{1}{1 + \exp(9 - 4.5f)} \quad (2)$$

2.3.3 応答時間から定量化される言語情報処理への影響

脳には連続する事象を統合するメカニズムがあり、この統合の時間的条件は約 3 秒であるといわれている(3秒の窓⁽³⁰⁾)。人間の会話の中で発せられる発言の 1 つ 1 つは、3 秒を超えることがほとんどないという。そこで本研究では、応答時間の区切りを 3 秒であると考え、応答時間が 3 秒のときの指標値を約 0.99、0 秒のときの指標値を約 0.01 としてシグモイド関数による外挿を行う。計測した反応時間を $t(sec)$ として、下記のように応答遅延指数 L_t を定義する。

$$L_t = \frac{1}{1 + \exp(5 - 3t)} \quad (3)$$

2.4 視線解析と応答時間を用いた思考負荷尺度

定量化し、正規化された上記の各パラメータを用いて思考負荷尺度を定義する。本章冒頭で述べたように、高負荷時には各パラメータは互いに影響し合い、独立な変数とはなっていない。しかし、視線が泳ぐ状態まではならないが、よそ見が減少する程度には余裕がないという、 L_S は大きい、 L_f は小さいといった状況や、よそ見が減ったり視線が泳いだりする状態まではならないが、考える時間が若干増加するという、 L_S や L_f は増加しないが、 L_t は増加するといった状況も考えられる。これらは低負荷時の状況であり、各パラ

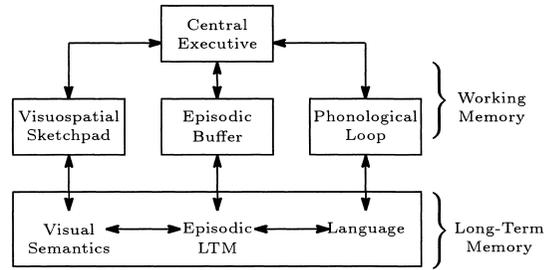


図 1 ワーキングメモリモデル

Fig. 1 Baddeley's working memory model.

メータが比較的独立していると考えられる。一方、各パラメータが相互に作用するような状況においては、視覚情報処理と言語情報処理が互いに影響を与え合うことによって、各指数の値が相乗的に増加してゆくと考えられる。そこで、各パラメータが相互に影響を与える状態はもとより、比較的各パラメータが独立している低負荷時の思考負荷も表現することが可能な、それぞれの指数の和を思考負荷尺度 L と定義する。なお、いくつかの指数の値が飽和してしまう高負荷時には、この思考負荷尺度では思考負荷の大小を比較することが不可能となるが、そのような高負荷時はテレマティクスサービスを利用すべきではなく、制御が不要な領域であることから本論文では議論の対象外とした。

$$L = L_S + L_f + L_t \quad (4)$$

3. ワーキングメモリモデルの動作とテレマティクスサービス

視覚情報処理と言語情報処理との相互作用を説明するモデルとして Baddeley が提案しているワーキングメモリの概念がある^{(7),(8)}。このワーキングメモリは視覚情報処理と言語情報処理とのトレードオフをモデル化可能となっており、脳医学的アプローチや心理学的アプローチで研究が進められていることから生理心理的評価として有効であると考えられる。そこで本章ではまず、運転タスクをワーキングメモリモデルを用いて説明し、主に視空間スケッチパッドでの処理であると推定される定常的な運転タスクに限定して考察することを述べる。次に、ワーキングメモリモデルの下位システムの動作に対応するテレマティクスサービスを抽出し、それらのサービス間の思考負荷の大小をリソース消費の観点から説明することを試みる。

3.1 ワーキングメモリモデル

Baddeley が提案しているワーキングメモリモデルを図 1 に示す。

ワーキングメモリは、短期記憶の一連の研究から生

まれてきた概念であり、状況の変化に応じて必要な情報の処理作業と保持作業を行う記憶機能であると定義されている³⁵⁾。このワーキングメモリは、主に言語活動を司る“音韻ループ”、視覚情報を司る“視空間スケッチパッド”、長期記憶を司る“エピソードバッファ”という3つの従属システムと、情報制御機構である“中央実行系”の計4つの下位システムからなっている³¹⁾。これらの下位システムは入力された情報を操作するためにそれぞれリソースを有し、そのリソースには一定の容量限界があると考えられている³⁵⁾。音韻ループ(Phonological Loop)では言語情報に関する短期記憶や処理を行う。この音韻ループは、音韻的情報を受動的に保持する音韻ストア(phonological store)と、音韻ストア内の情報の動的保持(反芻することで短期記憶の維持を図る“維持リハーサル”)に関与する構音コントロール過程(articulatory control process)の2つの要素からなると仮定されている。また、視空間スケッチパッド(Visuospatial Sketchpad)では視覚的・空間的短期記憶と処理を行い、エピソードバッファ(Episodic Buffer)では音韻ループと視空間スケッチパッドからの情報を統合して長期記憶として保持する処理を行う。そして、これら従属システムを統括する中央実行系(Central Executive)が存在し、各従属システムでは処理しきれない複雑な情報処理を行ったり、各従属システム間のリソーストレードオフの調整を行ったりする。これら下位システム間の関係やリソース配分状況を知るために二重課題法や相関分析法といった手法が用いられており、課題の困難度が高くなると間違いや処理遅延といったパフォーマンスの劣化が観察されるようになる^{31)~34)}。すなわち、音韻ループに過大な負荷をかけると、そのリソース容量限界から、中央実行系や視空間スケッチパッドのリソースやパフォーマンスに影響を及ぼすことが知られている³⁵⁾。

3.2 ワーキングメモリモデルにおける運転タスク

運転タスクは道路空間内に効率良く・安全に自車両を位置させるタスクであり、その入力情報の90%を視覚に依存しているといわれている⁴⁾。また、道路線形をトレースしたり前走車追従を行ったりして高速移動する自動車内において、運転操作は外界からの入力に対して瞬時の判断および操作が必要であり、外界からの入力を長期記憶する状況はあまり存在しない。したがって、運転タスクは基本的に視空間スケッチパッド内で処理されるタスクと考えられる。しかしながら、複雑な交差点の通過や右左折、前走車の急ブレーキ、歩行者の飛び出し、周囲車両が存在する状態での車線

変更といった相互作用の発生する不連続な事象については、道路線形をトレースするのみの定常状態と比較して高度な判断が要求されるため、中央実行系による処理が発生する場合も存在すると考えられる。本論文では簡単のため、まず視空間スケッチパッド内で処理される定常的な運転タスクを対象とし、中央実行系の処理が加わるような不連続事象については対象外とする。

3.3 下位システムの動作とテレマティクスサービス

主として言語情報処理が行われるテレマティクスサービスをワーキングメモリモデルにあてはめて考えると、基本的に音韻ループでの処理であるといえる。しかしながら、サービスの複雑さによっては音韻ループ内での処理に収まらずに、中央実行系や他の従属システムで処理を行うことも考えられる。本論文では言語情報処理を扱うテレマティクスサービスに限って議論するので、音韻ループ + 中央実行系でも処理しきれないタスクについては、エピソードバッファで処理を行うと考える。もちろん、リソース消費という観点からは、視空間スケッチパッドを含めたすべての下位システムのリソースがトレードオフ関係にあるため、音韻ループや中央実行系での処理が重い場合には、視空間スケッチパッドのリソースへ影響が及ぶことも考えられる。以下、特に言語情報処理を行わないタスクから順次、音韻ループ、中央実行系、エピソードバッファへとリソース要求が広がる状態について考察する。

3.3.1 言語情報処理なし(音楽タイプ)

言語情報処理をとまわらないテレマティクスサービスとしては、音楽のような言語情報を含まないサービスを受けている状況があげられる。音楽を聞き流しているような状態では、運転者が意識した言語的情報処理を行っていないため、音韻ループでの処理はほとんど行われていないと考えられる。したがって音韻ループでのリソース消費はほとんどなく、他の下位システムへのリソーストレードオフは発生しないと考えられる。

3.3.2 音韻ループ処理(復唱タイプ)

短期記憶のみで処理可能な言語情報処理は音韻ループでの処理となり、他の下位システムでの処理は行われないと考えられる。運転者自身に直接関係のないニュースや交通情報、天気情報を何となく聞いている状態がこれにあたる。「北の方は昨日寒かったのか」「東名は60km渋滞か、大変だな」といったように情報を反芻してはいるが、それに対して深く考察をしたりせず、聞き流して次の情報を聞くような状態では、音韻ループ内の音韻ストアでの処理を行っていると考えら

れる．この状況では音韻ループでのリソース消費は限定的なものであり，基本的にリソーストレードオフが発生せず他の下位システムへの影響はほとんどないと考えられる．

しかしながら復唱する文章の長さによっては音韻ストアの容量を超える場合も考えられる．この場合には短期記憶を継続するための“維持リハーサル”を行うために，構音コントロール過程の処理が発生する．そのため，処理の重さによっては他の下位システムのリソースを音韻ループが消費することで，他の下位システムに影響を与えることが考えられる

3.3.3 中央実行系処理の追加（判断タイプ）

カーナビゲーションシステムの音声コマンド入力などでは，システム操作体系や入力時の機器状態などを判断して発話入力することが求められる場合が多い．「ルート沿いに渋滞があります。」や「×さんから電話です。」というシステムからの問いかけに対して，「ルート変更する/しない」や「（電話を）つなぐ/切る」といった判断結果を発話する必要がある場合である．このような言語情報処理だけでない，様々な知識を活用するような高度な判断をとともう処理では中央実行系も動作することになる．したがって，音韻ループの処理に必要なリソースだけでなく，中央実行系の処理に必要なリソースも消費されることで，他の下位システムが必要とするリソースの不足を招き，その処理パフォーマンスへ一定の影響が発生していると考えられる．

3.3.4 エピソードバッファ処理の追加（記憶タイプ）

ある一定以上の内容の比較的長期の記憶をとともう処理では，音韻ループや中央実行系での処理に加え，エピソードバッファでの処理も必要となる．読み上げられたメールについて考えごとをしたり，提供された複数の情報にまたがる事柄について考えている状態では，音韻ループでは処理しきれない高次の情報処理が中央実行系で行われるとともに，記憶先としてエピソードバッファが利用されている状態であると考えられる．これはリソース消費が激しく非常に負荷が高い状態であり，他の下位システム（この場合は視空間スケッチパッド）へリソース欠乏という大きな影響を与えると考えられる．

3.4 ワーキングメモリモデルによるテレマティクスサービスタスクの思考負荷予想

上記で考察した内容を元に，ワーキングメモリモデルによる上記タスク間の思考負荷の大きさをリソース消費の観点から定性的に予想する．まず，言語情報処理なしの音楽タイプ（ β ）の場合は，運転タスクのみ

の状態（ α ）と差異がないと予想される．音韻ループのみの処理は，短い文章の反芻である短文復唱タイプ（ γ ）と長い文章の反芻である長文復唱（ δ ）に分けられ，短文復唱タイプ（ γ ）ではそれほどの思考負荷はないと予想されるが，長文復唱タイプ（ δ ）では一定の思考負荷が発生する予想される．一方，中央実行系処理が追加された状態である判断タイプ（ ε ）においては，中央実行系でのリソース消費が発生することからある程度の思考負荷が発生すると予想される．最後にエピソードバッファ処理を用いる記憶タイプ（ ζ ）では，音韻ループおよび中央実行系とエピソードバッファという3つの下位システムを必要としており，リソース消費が著しいと考えられることから大きな思考負荷がかかると予想される．これらの思考負荷予想の大小を式(5)に示す．

$$\alpha \approx \beta < \gamma < \delta < \varepsilon < \zeta \quad (5)$$

4. 実験評価

本章では実車両を用いた実験評価により，提案した思考負荷尺度の有効性を検証することを試みる．他覚的評価である提案思考負荷尺度の検証対象として，生地心理的評価としては3章で示したワーキングメモリモデルを用いた定性的負荷評価を用い，主観的評価としてはNASA-TLXによる負荷値を用いる．実験は，3章で抽出した各下位システムの動作を代表するようなタスクを被験者に課し，主に視線解析を用いた計測を行う．そして，2章で示した各パラメータへの負荷影響を示すとともに，提案した思考負荷尺度についてワーキングメモリモデルおよびNASA-TLXとの整合性による有効性評価を試みる．

4.1 実験条件

実験は，20代後半から30代後半までの男性7名に対して実施した．視線計測は視線計測装置を用いて60 Hzのサンプリング周波数で行った．計測区間は，交通量が少なく見通しの良い郊外路で，車線幅は片側4.5 mの道路を用い，交差点を含まない約60秒の走行区間を対象とした．被験者には下記(1)～(6)に示す各種タスクを実行しながら走行し，各タスク終了後にNASA-TLX評価用紙への記入を行うよう指示した．走行に関わる指示は特に行っていない．また，各タスクに対する応答時間を解析できるよう車両内の音声記録した．

(1) 運転タスク

運転以外のタスクを課さない純粋な走行タスク．テレマティクスサービスタスクの影響に対するリファレンスとして使用する．

- (2) 音楽タスク
カーオーディオ (CD) からクラシック音楽を聴きながらの走行．“音楽タイプ” に分類されるタスクである．
- (3) 短文復唱タスク
内容が 2～3 項目程度の短い文章 (読み上げ時間は平均 4.1 秒) をカーオーディオ (CD) で流し, 1 文ごとにそれを復唱するタスク．“復唱タイプ” の短文反芻に分類されるタスクである．
- (4) 長文復唱タスク
内容が 4～5 項目程度の中程度の長さの文章 (読み上げ時間は平均 7.0 秒) をカーオーディオ (CD) で流し, 1 文ごとにそれを復唱するタスク．“復唱タイプ” の長文反芻に分類されるタスクである．
- (5) クイズタスク
「今朝の朝食は何を食べましたか?」といった簡単な質問をカーオーディオ (CD) で流し, 1 問ごとに口頭で回答するタスク．“判断タイプ” に分類されるタスクである．
- (6) 記憶タスク
計測区間において 15 秒程度のメール文章 4 通を連続してカーオーディオ (CD) で流し, 被験者はその内容を記憶し, 停車後に各メールの内容に関する設問 (計 4 問) に答えるタスク．“記憶タイプ” に分類されるタスクである．

また, 視線解析は環境状態の影響を受けやすいため, 可能な範囲で環境条件の統一を図った．

- 交通量や日照の条件をほぼ同一とするため, 計測を行う時間帯を揃えた．
- 音楽や文章読み上げの音量や速度を揃えるため, CD に録音したものをカーオーディオで再生した．
- 計測区間に対する運転経験による差を抑えるため, 事前に計測区間の運転の習熟を十分に行った．
- 追従走行では視線の集中が生じるため, 前走車のいない状態で実験を実施した．

4.2 計測結果

2 章で採用した 3 つのパラメータについて, その計測値を以下に示す

4.2.1 視線角度標準偏差

周辺視の低下を表すと考えられる視野角度計測値の標準偏差の減少を検証する．図 2 にタスクごとの視線角度標準偏差を示す．運転タスクのみの状態を基準として正規化し, 標準偏差をエラーバーとして表した．

図 2 の平均値からは, “運転タスク” と比較して “長文復唱タスク”, “クイズタスク”, “記憶タスク” で

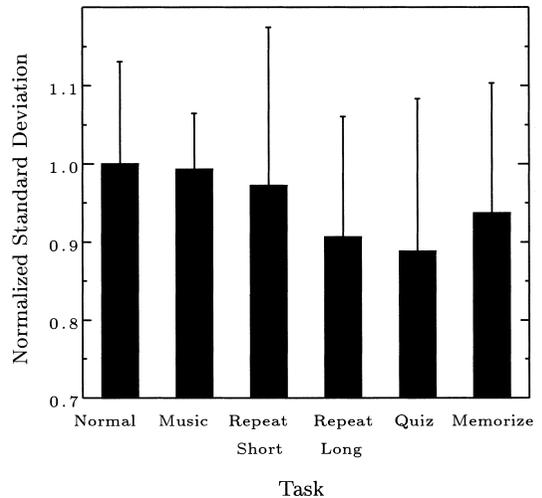


図 2 視線角度標準偏差の減少 (mean + SD)

Fig.2 Normalized standard deviation of sight angle (mean + SD).

は一定の視線角度標準偏差の減少が観測された．しかしながら t 検定では $t = -0.9 \sim -1.3$ 程度となり, t 分布の両側 5% 点である ± 2.179 を棄却したとはいえず有意な差があるとまでは示すことはできなかった．

4.2.2 Saccade frequency

視線は視対象への停留と saccade を繰り返すため, 視線の停留や saccade を視線解析データから特定するためには, 停留または saccade の数値的定義を行い, それに従って解析することが必要となる．ゆっくりと移動する物体を追尾するときに発生する滑動性眼球運動であっても 45 deg/s までしか追従できずそれ以上の速度では saccade が発生し²¹⁾, 停留時間のほとんどが 200 msec 以上である²²⁾ ということから, 本論文では視線角速度 45 deg/s 以下が 200 msec 以上継続する状態を “停留”, それ以外を saccade であると定義する．以下, 本定義に従って saccade を特定したデータについて議論する．

テレマティクスサービスタスクによる saccade frequency の計測値を図 3 に示す．“運転タスク” のみの状態を基準として正規化し, 標準偏差をエラーバーとして表した．

図 3 の平均値からは, 一定の saccade frequency 増加が認められる．“運転タスク” を基準とした両側 5% の t 検定を行うと, “音楽タスク ($t = 0.59$)”, “短文復唱タスク ($t = 1.73$)”, “クイズタスク ($t = 1.96$)” では優位な差を示すことはできないが, “長文復唱タスク ($t = 2.65$)”, “記憶タスク ($t = 2.46$)” では t 分布の両側 5% 点である ± 2.179 を棄却する有意な差が

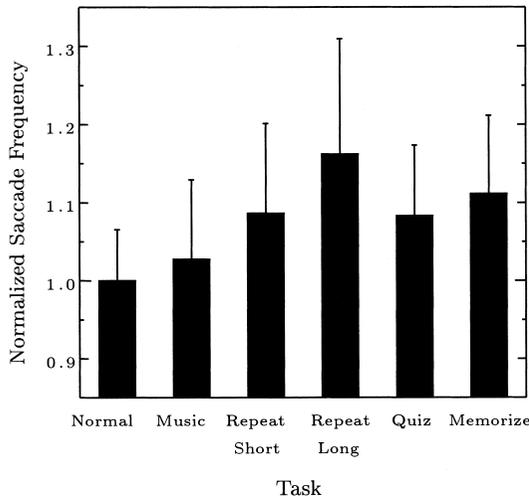


図3 Saccade frequency の増加 (mean + SD)
Fig. 3 Normalized saccade frequency (mean + SD).

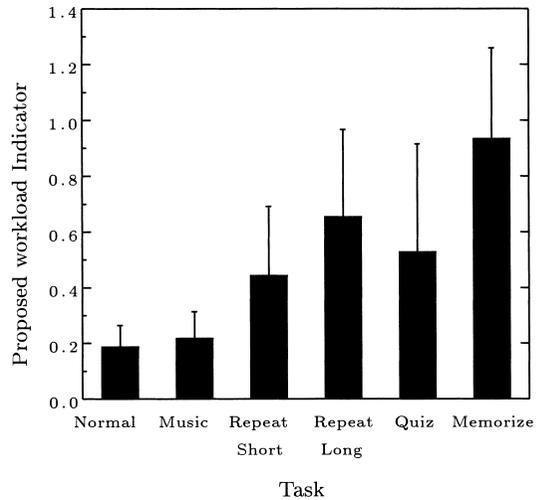


図5 思考負荷尺度 (mean + SD)
Fig. 5 Proposed workload indicator (mean + SD).

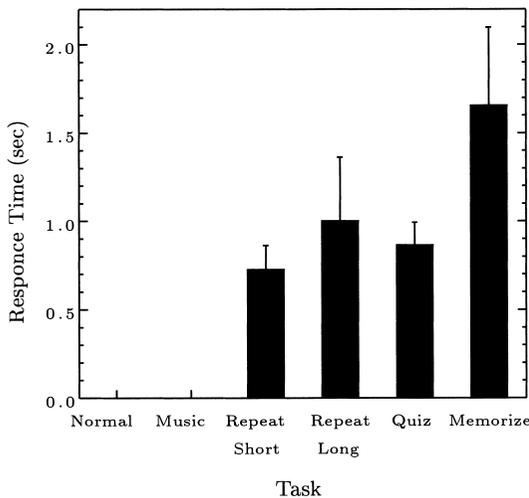


図4 応答時間の増加 (mean + SD)
Fig. 4 Response time (mean + SD).

観測された。

4.2.3 応答時間

復唱や質問といったタスクにおける応答時間を図4に示す。なお、応答が発生しない“運転タスク”や“音楽タスク”においては応答時間を0として示している。縦軸に応答時間を示し、標準偏差をエラーバーとして表した。

図3の平均値からは、一定の応答時間増加が認められる。両側5%のt検定を行うと、“短文復唱タスク”を基準として“長文復唱タスク ($t = 1.89$)”，“クイズタスク ($t = 1.96$)”では優位な差とはいえないまでも、比較的高いt値を観測した。一方“記憶タスク

表1 t検定による思考負荷尺度有意差の検証

Table 1 A verification of proposed workload indicator by t-test.

Task	t value
(B) Music	0.658
(C) Repeat Short	2.598
(D) Repeat Long	3.812
(E) Quiz	2.282
(F) Memorize	5.914

($t = 5.30$)”では大きなt値が観測され優位な差が示された。

4.3 思考負荷尺度

上記の3つのパラメータから式(4)で提案した思考負荷尺度を求めた結果を図5に示し、“運転タスク”を基準としたt検定の結果を表1に示す。

表1から考察すると、“運転タスク”と比較して、“音楽タスク”では思考負荷の差異は認められないが、その他のタスクにおいては有意な差異が観測されたと考えられる。t値を用いた負荷の度合いを不等号で式(6)に示す。なお、“運転タスク”を(A)とし、それ以外のタスクについては表1に示す記号に従って表記する。

$$(A) = (B) < (E) \simeq (C) < (D) < (F) \quad (6)$$

4.4 ワーキングメモリおよび主観評価値との比較
まず、式(5)で示したワーキングメモリモデルによる思考負荷予想と、式(6)で示した提案手法による思考負荷の大小について考察する。以下の点については2つのアプローチの整合性がとれていると考えられる。

- “運転タスク”と“音楽タスク”では思考負荷の差異が存在しないこと

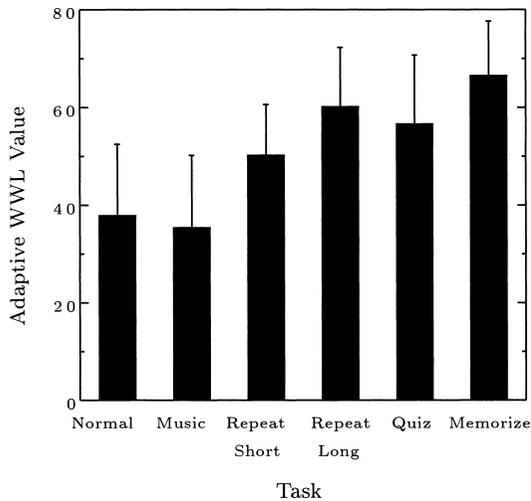


図6 NASA-TLX 主観評価 AWWL (mean + SD)

Fig. 6 NASA-TLX mental workload AWWL (mean + SD).

表2 t 検定による主観評価値有意差の検証

Table 2 A verification of NASA-TLX mental workload by t -test.

Task	t value
Music	0.3153
Repeat Short	1.816
Repeat Long	3.113
Quiz	2.443
Memorize	4.127

- “復唱タスク” では、文章の長さに応じて思考負荷が増加すること
- “記憶タスク” が最も思考負荷がかかること

次に NASA-TLX による主観評価の結果について図6に示し、“運転タスク” 時の AWWL 値³⁶⁾を基準とした t 検定の結果を表2に示す。

図6によれば、NASA-TLX による主観評価では、提案思考負荷尺度と同様の傾向を示していると考えられる。提案負荷尺度とメンタルワークロードとの相関は0.967であり、非常に高い相関があることが示唆された。

しかし、提案負荷尺度とワーキングメモリモデルから導かれる予想とを比較すると、短文復唱タスクの負荷尺度値がクイズタスクの負荷尺度値と同程度であるという不整合が見られた。また、NASA-TLX の主観評価値と比較しても、短文復唱タスクとクイズタスクの負荷値の大小が逆であるといった不整合が見られた。

5. ま と め

本論文ではテレマティクスサービス制御を実現するために、車載実績の多い計測手法を用いて、テレマティ

クスサービスタスクがそれ自身と運転タスクに与える思考負荷の推定手法を提案し、実際のテレマティクスサービスに近い複数のタスクを用いた実験評価によって提案手法の考察・検討を行うことを目的とした。本論文では簡単のため、複雑な交差点や歩行者の飛び出しが想定されるような複雑な運転環境を除外し、定常的な運転タスクにおいて反応時間が計測可能なテレマティクスサービスタスクを対象とした。

提案した思考負荷尺度は、車載計測手法として先行研究でも用いられることの多い視線解析および、テレマティクスサービスタスクの反応時間を用いて、視線角度標準偏差・Saccade Frequency・応答時間を指標化したものの和として算出される。また、ワーキングメモリモデルの下位システムの動作に対応するテレマティクスサービスの抽出を行い、定常的な運転タスクにおけるそれぞれのテレマティクスサービスの思考負荷の大小をリソース消費の観点から定性的に予想した。

上記で抽出したテレマティクスサービスを模したタスクを課した実車両での定常的な運転環境における実験評価を行った。計測値より提案思考負荷尺度を算出したところ、ワーキングメモリモデルから予想される思考負荷とほぼ同様の傾向を示した。また、NASA-TLX を用いた主観評価との比較では、0.967という高い相関を示した。提案思考負荷尺度と、ワーキングメモリモデルから予想される思考負荷、NASA-TLX から算出された主観評価値が同様の傾向を示す領域に関しては、提案思考負荷尺度に一定の有効性があると考えられる。しかしながら、復唱タイプと瞬時判断タイプのタスク負荷の大小については、ワーキングメモリモデルから導かれる負荷や、NASA-TLX から算出された主観評価値と異なった傾向を示した。これは、応答を必要としないタスクの応答時間を0としたため、応答時間が最も短い短文タスクの応答時間を過大に見積もっていることが考えられる。

今後の課題としては、式(3)で示される応答時間の指数化において、負荷をかけない場合の応答時間を最短時間とするなどの対策を考慮することが必要であると考えられる。また、本論文では判断タイプとしてクイズタスクを用いたが、これがテレマティクスサービスにおける判断をとまなう対話的操作を完全に模しているとはいえない。より実際の使用状況にあったタスク設定を行うとともに、より多くの被験者に対して実験を行った際の個人差や、様々な道路交通条件での負荷値の変動なども検討し、検証を確実なものにする必要があると考えられる。

さらに、提案した思考負荷尺度がシグモイド関数の

和となっているため、いくつかの課題が存在する。まず、シグモイド関数の入出力特性により、限界領域(両端)においては入力に対する出力の感度が鈍る、という問題がある。一般に、限界領域下部はテレマティクスサービスを問題なく利用できる領域であり、限界領域上部はテレマティクスサービスを利用してはならない領域と思われる。したがって、この両領域ではテレマティクスサービス制御がほとんど不要の領域と考えられる。しかし今後、自動車制御技術の発達による運転環境の変化や、魅力的な新サービス追加によるテレマティクスサービスタスク負荷の変動により、限界領域下部においても感度の高い思考負荷推定を行う必要が発生することも考えられる。そのためには、利用する関数特性などもあわせて検討を深める必要があると考えられる。次の課題としては、各指数の和としたため、相互作用の表現が十分でないことがあげられる。一般には、テレマティクスサービスタスクの負荷が高まるとともに、反応時間の遅れや視覚情報処理への影響が増大すると考えられる。しかし希に、完全にテレマティクスサービスタスクに集中してしまう場合も考えられる。本論文で提案した思考負荷尺度においては、運転タスクに関わるパラメータ数とテレマティクスサービスタスクに関わるパラメータ数を2対1とすることで、運転タスクへの影響を重要視しているが、完全にテレマティクスサービスタスクに集中して応答時間のみが極端に短くなった場合には、思考負荷尺度の大小関係に不整合が発生する可能性がある。いい換えれば、非常に魅力的で没入性の高いテレマティクスサービスが導入された場合には、“よそ見”および視線の泳ぎの増加の和をうち消すほどの応答時間の短縮が観測される可能性がある。今後の課題としては、このようなサービスへの対応も検討する必要があると考える。

謝辞 実験にあたって被験者となるとともに貴重な助言を多くいただきました NTT サービスインテグレーション基盤研究所テレマティクスプロジェクトの皆様には深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 畠山武敏, 菅原雅人, 奥村 章, 吉田青史, 岡田 誠: カーナビゲーションと携帯電話の連携サービス, *自動車技術*, Vol.57, No.2, pp.50-53 (2003).
- 2) 宮田博司, 柿原正樹: 新情報提供サービスについて, *自動車技術*, Vol.57, No.2, pp.54-59 (2003).
- 3) 岩崎知弘, 難波利行, 石川 泰: カーナビゲーション用音声インタフェース技術, *自動車技術*, Vol.57, No.2, pp.65-70 (2003).
- 4) 富永 茂, 関根太郎, 岡野道治, 長江啓泰, 高田裕史, 柳井達美, 下山 修: 視聴覚情報に対するドライバの視認行動の基礎検討, *ヒューマンインタフェースシンポジウム*, pp.527-528 (2000).
- 5) 三宅晋司, 神代雅晴: メンタルワークロードの主観的評価法, *人間工学*, Vol.29, No.6, pp.399-408 (1993).
- 6) 大桑政幸, 江部和俊, 稲垣 大, 土居俊一: ドライバの視聴覚認知に伴う負担度評価, *計測自動制御学会論文集*, Vol.36, No.12, pp.1079-1085 (2000).
- 7) Baddeley, A.: Working Memory, *Science*, Vol.255, No.5044, pp.556-559 (1992).
- 8) Baddeley, A.: The episodic buffer: A new component of working memory?, *Trends in Cognitive Sciences*, 4, pp.417-422 (2000).
- 9) 江部和俊, 大桑政幸, 稲垣 大: ドライバの視聴覚認知に伴う負担度評価, *豊田中央研究所 R&D レビュー*, Vol.34, No.3 (1999).
- 10) 中川剛士, 萩原 亨, 内田賢悦, 加賀屋誠一: ドライバの運転情報並列処理に関する研究, *自動車技術学会講演会前刷集*, No.106-01, pp.1-4 (2001).
- 11) 奥野昭宏: ドライバ視覚と運転支援技術, *自動車技術*, Vol.52, No.1, pp.22-27 (1998).
- 12) 木下正浩, 片倉正彦, 安藤滋芳: 道路視環境が運転者の注視点に与える影響, *交通工学研究発表会論文報告集*, Vol.19, pp. 1-4 (1999).
- 13) 伊藤敏行, 美記陽之介, 吉次律俊, 斎藤 浩, 松永充浩: 音声読み上げ聴取が運転に及ぼす影響評価, *ケータイ・カーナビの利用性と人間工学*, pp.133-138 (Apr. 2002).
- 14) 東 義隆, 川野常夫, 森脇俊道, 岩木 直: ケータイによる会話の内容が自動車運転に及ぼす影響, *ケータイ・カーナビの利用性と人間工学*, pp.127-132 (Apr. 2002).
- 15) 清水 司, 脇田敏裕, 武田一哉, 河口信夫, 板倉文忠: 電話番号案内タスクにおける停車中と運転中のドライバ発話の特徴, *音響学会春季講演論文集*, 3-P-26, pp.215-216 (2001).
- 16) 赤松幹之: ITS 機器からの情報内容の優先度の決定法, *日本人間工学会第 40 回大会*, Vol.35, pp.90-91 (1999).
- 17) 内山祐司, 小島真一, 本郷武朗, 寺島立太, 脇田敏裕: 運転状況適応型音声情報提示システム, *ヒューマンインタフェースシンポジウム 2000*, pp.375-378 (Sep. 2000).
- 18) 森田和元, 益子仁一, 岡田竹雄: 自動車の車室内表示装置を注視することによる反応時間の遅れについて, *照明学会誌*, Vol.82, No.2 (1998).
- 19) 荒金陽助, 辻ゆかり, 吉開範章: ドライバ情報処理能力配分モデルの提案とその評価, *情報処理学会論文誌*, Vol.42, No.7, pp.1770-1780 (2001).
- 20) 藤森 充, 上迫宏計, 川村幹也: 高速道路にお

- ける頭部運動を考慮した運転者の視線計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.4, pp.473-479 (1999).
- 21) 大野健彦: 視線から何がわかるか—視線測定に基づく高次認知処理の解明, 認知科学, Vol.9, No.4 (2002).
- 22) 苧阪良二, 中溝幸夫, 古賀一男(編): 眼球運動の実験心理学, 名古屋大学出版会 (1993).
- 23) 麻生 動, 塩坂行雄: 運転視界に関する人間工学的研究, 自動車技術, Vol.50, No.11, pp.40-44 (1996).
- 24) 阿山みよし, 長谷川光司, 春日正男: 道路走行画面上における有効視野—視覚・会話負荷及びターゲット色の影響について, ケータイ・カーナビの利用性と人間工学シンポジウム, pp.151-154 (2002).
- 25) 竹田眞里子: 問題解決時の精神活動が眼球運動に及ぼす影響, 人間工学, Vol.12, pp.175-181 (1976).
- 26) 豊田弘司: 人間の記憶モデル作動記憶と虚記憶について, 日本ファジィ学会誌, Vol.12, No.3, pp.358-366 (2000).
- 27) 近藤洋史, 森下正修, 苧阪直行: 読みのワーキングメモリとリーディングスパンテスト, 心理学評論, Vol.42, No.4, pp.506-523 (2000).
- 28) 甘利俊一: 神経回路モデルとコネクショニズム, 東京大学出版会 (1989).
- 29) 中山幸則, 小島夏樹, 中野倫明, 山本 新: 警戒情報のためのドライバの意識低下と意識集中の検出, 2001 信ソ大予稿集, pp.322-323 (2001).
- 30) 篠原一光: 時間作成における視空間作動記憶の役割, 大阪大学人間科学紀要, Vol.24, pp.213-229 (1998).
- 31) 三宅 晶, 齊藤 智: 作動記憶研究の現状と展開, 心理学研究, Vol.72, No.4, pp.336-350 (2001).
- 32) 苧阪直行: 21 世紀の科学を作る脳の謎に挑む第 15 回意識とワーキングメモリ, 数理科学, Vol.40, No.8, pp.68-77 (2002).
- 33) 津田一郎, 船橋新太郎: 脳の世紀への手紙 第 8 回 思考とワーキングメモリー, 科学, Vol.68, No.9, pp.726-738 (1998).
- 34) Smith, E. and Jonides, J.: Storage and executive processes in the frontal lobes, *Science*, 283, pp.1657-1661 (1999).
- 35) 近藤洋史, 苧阪直行: 空間性および言語性ワーキングメモリの相互作用, 基礎心理学研究, Vol.18,

No.1, pp.89-90 (1999).

- 36) 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, 人間工学, Vol.32, No.2, pp.71-79 (1996).

(平成 15 年 3 月 31 日受付)

(平成 15 年 9 月 5 日採録)



荒金 陽助 (正会員)

平成 7 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。平成 9 年同大学大学院総合理工学研究科博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社マルチメディアネットワーク研究所に入所。以来, ITS におけるコミュニケーションの研究に従事。平成 12 年情報処理学会高度交通システム研究会優秀論文賞受賞。平成 15 年マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウムベストカンパーサント賞受賞。電子情報通信学会, 日本音響学会, IEEE 各会員。



辻 ゆかり (正会員)

昭和 62 年筑波大学第 3 学群情報学類卒業。平成元年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。以来, ATM スイッチ開発, 企業網設計法, ITS におけるネットワーク構成法および情報流通プラットフォーム, 次世代ナビゲーションシステム等の研究に従事。現在, NTT サービスインテグレーション基盤研究所・企画部主幹研究員。電子情報通信学会会員。



下川 清志

昭和 51 年東北大学工学部電子工学科卒業。昭和 53 年同大学大学院工学研究科前期課程修了。同年日本電信電話公社(現 NTT)電気通信研究所入所。以来, 衛星通信システム, アクセス系無線システム, テレマティクス分野の研究実用化, 技術企画等に従事。電子情報通信学会会員。