

ドライバ情報処理能力配分モデルの提案とその評価

荒 金 陽 助[†] 辻 ゆかり[†] 吉 開 範 章[†]

筆者らは、ドライビング環境を考慮してコミュニケーションを制御するコミュニケーション・ナビゲータの研究を行っている。この実現にはドライビング環境による運転負荷を定量化し、コミュニケーション制御に反映することが必要となる。本論文では、ドライバの情報処理能力の優先配分という視点に立ったドライバ情報処理能力配分のモデル化を行い、特にその認知プロセスに対して視覚情報処理の観点から、ドライバの情報処理能力推定手法と運転操作作業負荷推定手法を提案する。さらに、提案した推定手法を実車両を用いた視線解析により検証した。その結果、情報処理能力推定手法では平均誤差 8.5%の精度で、運転操作作業負荷推定手法では平均 9.0%の精度で推定結果が算出され、認知プロセスにおいて、提案推定手法のコミュニケーション制御への適応可能性を示した。

Driver Information Processing Model and Evaluation

YOSUKE ARAGANE,[†] YUKARI TSUJI[†] and NORIAKI YOSHIKAI[†]

“Communication Navigator” is an information providing system using the driving environments in order to keep safety and to improve comfort. To develop the system, quantitative analysis of driving environments is necessary. In this paper, we propose a driver's behavior model which focused on the distribution of information processing ability and a estimating method for the driver's load. To evaluate quantitatively we had an experiment of driver's glance analysis. The results shows our method estimates driver's load of error by 8.5 percent.

1. はじめに

モバイル技術の急速な発達により、ドライビング環境においても様々なメディアを通じて自動車内外環境とコミュニケーションを行うことが当たり前となってきている。普及が顕著なものに約 6,000 万加入になった携帯電話と、約 600 万台を出荷したカーナビゲーション装置がある。これらのメディアは、ドライバに高度なインタラクションを要求することからコミュニケーションへの没入性が高く、交通事故の要因の 1 つとなっており、社会問題として認識されてきている^{1)~3)}。一方、次世代車社会の標準として世界中で研究開発が進められている Intelligent Transport Systems (ITS) の普及・発展によって、情報提供サービスなどの片方向コミュニケーションや e-mail によるテキスト・携帯電話による音声などの双方向コミュニケーションといった自動車内でのマルチメディアコミュニケーションは今後ますます行われるようになる

といわれている⁴⁾。

これら、“快適性追求にともなう安全性の低下”という問題を解消するため、いくつかのインタフェースの提案が行われている。赤松は、ITS 機器からの運転に関わる情報呈示に際して、情報の優先度や通知タイミング、通知メディアを考慮するインタフェースの必要性を提案し、情報の優先度をその重大性と緊急性から定量的に求める手法を提案しており⁵⁾、内山らはドライバのアクセル操作からドライバにかかる運転負荷を推定し、その推定負荷に基づいてメッセージ通知を On/Off するインタフェースを提案している⁶⁾。また、筆者らは、主に運転に関わる交通情報の提供といった片方向コミュニケーションのみではなく、電話やメールといった主に快適性向上に関わる双方向コミュニケーションをターゲットとした「ドライビング環境適応型コミュニケーション・ナビゲータ」の研究を行ってきた^{7),8)}。

これらドライビング環境に応じたコミュニケーション制御を行うインタフェースの動作概要を図 1 に示

[†] 日本電信電話株式会社 NTT サービスインテグレーション基盤研究所
NTT Service Integration Laboratories, NTT Corporation

本論文での“ドライビング環境”とは、運転中、停車中も含め車両内における状況すべてを指す。

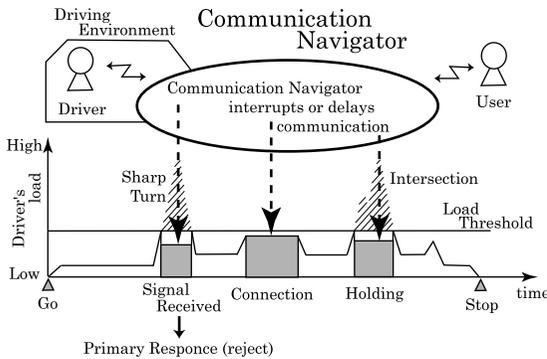


図1 ドライバにかかる負荷
Fig. 1 Driver's load.

す。図1は、横軸に時間経過、縦軸にドライバの作業負荷をとり、ドライビング環境とコミュニケーションの相乗作用によって、それらの作業負荷がドライバの作業負荷許容値を超えてしまう場合があることを示している。コミュニケーション・ナビゲータをはじめ前述のインタフェースは、運転負荷に応じたコミュニケーション制御を行うことによって、運転の安全性とコミュニケーションの快適性の両立をはかることを目的としている。

ドライバにかかる運転負荷に応じたコミュニケーション制御を行うためには、1. 運転負荷の計測・推定、2. 動的なコミュニケーション制御手法の確立、が必要である。前者については、ドライバにかかる負荷の推定に関して、ドライバ挙動のモデル化など様々な研究がなされてきている^{9),10)}。負荷を測定する手段としては、運転操作(ハンドル操作、ペダル操作)やボタン操作といった指標を用いた研究^{11),12)}と、ドライバに運転操作作業以外の作業を課し、その影響を用いる研究^{13)~15)}がある。後者については、音声通知をオン/オフするインタフェース⁶⁾や、電話に対する一次応答/保留を行うインタフェース¹⁶⁾などが提案されている。また、コミュニケーション制御を行う際に考慮すべきパラメータとしてドライバの情報処理能力が提案されており¹⁷⁾、特に携帯電話については、呼び出し音や会話による認知的情報処理能力への妨害が本質的な問題であるといわれている¹⁸⁾。

そこで本論文では、ドライバへの負荷を推定するために、情報処理能力の観点からドライバの情報処理能力配分のモデル化を行い、特に運転操作作業の認知プロセスに対して、ドライバの情報処理能力と運転操作作業負荷を推定する手法を提案する。この提案手法に対して、実車両での視線解析データを用いてその有効性を示す。

以下、2章でドライバが行う運転操作作業とコミュニケーション作業の分析を行い、その分析をもとに3章で認知および判断プロセスにおける優先度を勘案したドライバ情報処理能力配分のモデル化を行い、タスクを運転操作作業に限定した場合の作業負荷推定手法を提案する。続いて、4章では実車によるドライバ視線計測実験を行い、提案した負荷推定手法の有効性を実験データを用いて検討する。最後に、5章で本論文をまとめる。

2. ドライバ作業負荷分析

本章ではドライバの作業分析を行い、ドライバにかかる負荷について検討を行う。なお、本論文では簡単のため、ドライバに要求される作業負荷は、運転操作の負荷とコミュニケーションの負荷に限定する。

2.1 コミュニケーション制御のための負荷検討

コミュニケーション・ナビゲータにおいては、運転操作負荷(W_D)を算出し、これとコミュニケーション作業負荷(W_C)の和が、ドライバが許容できる負荷の総量(W_{MAX})を超えないようにコミュニケーションを制御する必要がある。これらの負荷の関係を表式(1)に示す。

$$W_D + W_C < W_{MAX} \quad (1)$$

つねに余裕状態を保つためには、コミュニケーション作業負荷(W_C)がドライバの負荷余裕($W_{MAX} - W_D$)を超えないようにコミュニケーション制御をすることが必要となる。そのためには、これらの負荷を共通の指標で検討する必要がある。人間の行う作業は「認知」「判断」「行動」のプロセスから構成されており¹⁹⁾、本論文では、このプロセスに沿って運転操作作業とコミュニケーション作業を分析することにより、共通する指標を検討する。

2.2 運転操作作業分析

運転操作作業において「認知」「判断」「行動」の各プロセスの実行誤り・実行遅延は交通事故の要因となりうるものである。本節では、交通事故への影響を各プロセスに沿って検討することによって運転操作作業の分析を行う。

(1) 認知誤り・認知遅延

“夜間の走行で車間距離を見誤った”、“歩行者を見ていなかった”、などがこれに含まれる。運転操作作業に影響を与えうるドライビング環境の変化を認知できなかつたり、認知するのが遅れたりする状態である。

(2) 判断誤り・判断遅延

“右折車が停止すると思って加速した”、“ウィンカー

を出すタイミングの遅延”，などがこれに含まれる．事故を防いだり，快適な運転操作を継続するためのドライバの意思を，自動車を通してドライビング環境に伝える方法・手段の選択を誤ったり，選択に時間がかかりすぎた状況である．

(3) 行動誤り・行動遅延

“アクセルとブレーキを間違えて踏んでしまった”，“ウinkerを出すつもりがワイパーを動かしてしまった”，などがこれに含まれる．実際に運転操作をする段階でドライバの意図とは異なった出力を自動車に伝えてしまう状態である．

自動車は，大きな質量を持ち，高速走行が可能なため，ドライバの運転操作を増幅してドライビング環境に伝える媒体となる．したがって，これらのプロセスの誤りや遅延の影響は，歩行時などと比較して非常に大きく，少しの実行誤り，短時間の実行遅延が致命的な事象を引き起こすことも少なくない．

2.3 コミュニケーション作業分析

コミュニケーション作業において，「認知」「判断」「行動」の各プロセスの実行誤り・実行遅延は，「会話が上の空である」というようなインタラクションが成立しない状態の要因となる．本節では，コミュニケーション相手（人間・機器）とのインタラクションへの影響を，各プロセスに沿って検討することによってコミュニケーション作業の分析を行う．

(1) 認知誤り・認知遅延

（カーナビゲーション装置指示の）曲がるべき交差点を見誤った”，“画面に情報が出ているのに気づかなかった”，（電話相手の）話している内容が聞き取れなかった”，“間違えて聞き取った”，などがこれにあたる．システム情報の出力や，コミュニケーション相手の発したメッセージの認知を誤ったり，気づかなかったりする状況である．

(2) 判断誤り・判断遅延

（目的地検索をするのに）間違ったカテゴリから探そうとしてしまった”，（電話相手の）意図に反する応答をしてしまった”，“応答を構成するのに時間を要した”，などがこれにあたる．機器操作やメッセージの出力内容構成を誤ったり，遅延が生じたりする状況である．

(3) 行動誤り・行動遅延

（必要以上に）大声で電話してしまった”，（カーナビゲーション装置の）間違ったボタンを押してしまった”などがこれにあたる．意図した出力が行われなかった場合である．

コミュニケーション作業は，2次元平面上での運転

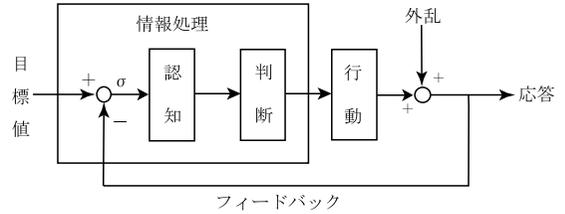


図2 各プロセスのブロック線図

Fig. 2 A block diagram of a feedback process.

操作作業と比較して，作業の自由度は非常に高い．しかし，特にコミュニケーション相手が人間の場合，上記プロセスの実行誤り・実行遅延の影響は大きく，深刻な作業負荷がドライバに課されることが多い．

2.4 指標としての情報処理

一般に，人間が各種作業を行う際には作業の目的・目標が存在する．本論文で対象としている作業について考えると，運転操作については「正確に道路をトレースする」や「一定の車間距離を保つ」などという目的・目標がある．また，コミュニケーションについては「対話相手・システムから欲しい情報を入手する」「対話相手との良好な人間関係を維持する」などという目的・目標が存在する．2.2節と2.3節で分析を行った各プロセスは，この目的・目標を実現するためのステップである．目的・目標実現のための各プロセスの役割を以下にまとめる．

(1) 認知

ドライビング環境/対話相手からの入力情報と目的・目標との偏差 (σ) の算出

(2) 判断

偏差 (σ) を最小にするための行動の選択とそのタイミングの決定

(3) 行動

ドライビング環境/対話相手への出力

これらのプロセスのつながりを考えると，環境を認知した結果が判断の入力となり，判断結果が行動の入力となる．そして，行動の出力が種々の外乱に影響された結果がドライビング環境/対話相手に反映され，それをフィードバック情報として認知における目標値との差分検出に用いられる．このプロセスのつながりを図2に示す．

ここで，認知と判断のプロセスはドライバの脳内で行われるプロセスであり，ドライバにとっては運転操作とコミュニケーションどちらも情報処理のプロセスとして扱われる．一般に，情報処理の負荷の多寡は情報処理量に比例する．そこで本論文では，これらのプロセスがドライバに与える負荷は各プロセスが要求す

る情報処理量に依存すると考え、情報処理量をドライバの作業負荷推定の指標として採用する。

3. ドライバ情報処理能力配分モデル

運転操作作業における認知のプロセスであっても、歩行者を認知するプロセスと、対向車を認知するプロセスでは、ドライバに要求される情報処理量は異なる。このように、認知・判断プロセスがドライバに要求する情報処理量は、そのプロセスの内容によって異なると考えられる。そこで本章ではブロック線図を用いて、運転操作作業、コミュニケーション作業のそれぞれについて、認知・判断プロセスの分析を行う。

次に情報処理の観点から運転操作作業とコミュニケーション作業の負荷について検討し、作業の優先度に基づいたドライバ情報処理能力配分のモデル化を行い、特に運転操作作業の認知プロセスに対して、情報処理負荷推定手法の提案を行う。

3.1 運転操作作業の情報処理

ドライバが行う運転操作作業は、フィードバック制御と予測制御に分類される。フィードバック制御は、自動車の挙動とドライバが考える（自動車の挙動の）目標値との偏差を減少させるように行う制御である。フィードバック制御は以下のような特徴を持つ²⁰⁾。

- 不安定系を安定化できる。
- 外乱や自動車の動特性変動に対する感度を下げることができる。

自動車には路面の凹凸や横風などによる外乱が加わるため、これを修正するために行うフィードバック制御は運転操作の基本的な制御である。このフィードバック制御を行うためには、自動車の挙動と目標値との偏差を認知する情報処理が必要となる。

しかし、大きな質量を持ち高速移動する自動車を制御するには、ある状況が発生してからそれに対する制御を実行するフィードバック制御だけでは間に合わない場合が存在する。そこで、起こりうる状況を予測して対処を実行する予測制御が必要となる。追従走行時に前車両のブレーキランプが点灯した際に、車間距離が減少する前に減速し始める制御や、歩行者用の信号が点滅した際に、車両用の信号が変化する前に減速する制御などがこれにあたる。非常に大きな外乱が加えられても事前にその影響を吸収できるのが予測制御の特徴である²¹⁾。予測制御を行うためには、ドライビング環境を認知し、次に起こりうる状況を推測する情報処理が必要となる。

また、運転操作作業において目標値を実現するためにドライバが行う判断は、操作する対象の選択と、そ

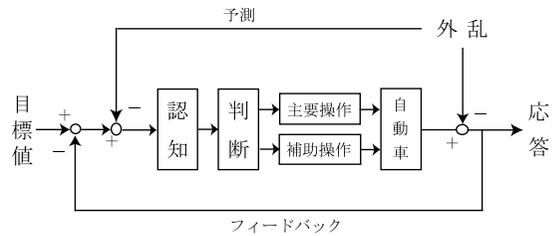


図3 運転操作作業の情報処理の流れ
Fig.3 A block diagram of driving operation.

れぞれの操作量の決定を行う情報処理である。運転操作作業における操作判断の対象は、大きく以下の2点に分類されると考えられる。

(1) 主要操作

ハンドル操作やペダル操作、ギア選択など自動車の挙動に直接影響を与える操作がこれにあたる。

(2) 補助操作

ワイパー操作やウィンカー操作、デフロスタ起動など、主要操作を容易にするために行う操作がこれにあたる。

ドライバはこれらの操作対象の選択とともに、その操作量を判断・決定するという情報処理を行いながら運転を行っている。運転操作作業における、情報処理の流れを図3に示す。

ドライバは、フィードバックされた自動車の挙動と、外乱の事前検知（予測）と目標値を入力として、目標からのずれを認知する。次に、認知した情報を基に判断プロセスを行い、主要操作と補助操作をそれぞれ行う流れになる。外乱は、自動車の挙動に影響を与えとともに、予測制御のための情報源となっている。

3.2 コミュニケーション作業の情報処理の流れ

自動車の物理的挙動がターゲットである運転操作作業に必要なとされる情報処理と比較して、コミュニケーション作業が要求する情報処理は、コミュニケーション相手の反応が予測しにくいという特徴がある。したがって、運転操作作業のように予測制御によって早期に情報処理を行い、外乱に対する情報処理負荷を時間軸上に分散させることが困難であり、相手の反応を認知してからその反応に対する情報処理を行うことが要求される。コミュニケーション相手への質問時など、相手の反応を予測しないことが前提のインタラクションでは、相手の反応を認知してから情報処理を開始するため、単位時間あたりの情報処理負荷は大きくなると思われる。

コミュニケーション作業は、情報処理の観点から以下のように分類できると考えられる。

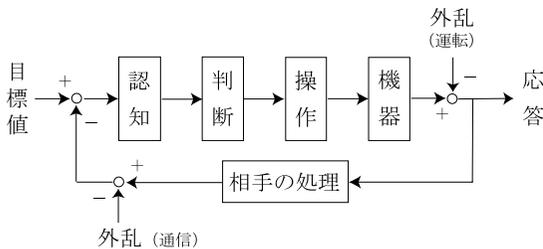


図4 コミュニケーション作業の情報処理の流れ

Fig. 4 A block diagram of communication operation.

(1) リアルタイム or ノンリアルタイム

カーナビゲーション装置の経路案内や電話はリアルタイムの情報処理が要求される。ドライバが認知しなければならない状況が時間とともに変化するため、認知プロセスの遅れが認知プロセスの失敗と直結する人が多い。したがって、つねに一定の情報処理量をそれらのコミュニケーション作業の認知のために割り当てておく必要がある。一方、目的地検索や e-mail などでは、停車や降車を待って対処作業を実施しても問題が発生しない場合が多く、要求される情報処理のリアルタイム性は比較的低い。

(2) 対人 or 対システム

電話や e-mail などの対人コミュニケーションは、ドライバに対する入力(相手の反応)が同一でも、友人か上司か、など相手によって応答(出力)を適切に判断する必要がある。カーナビゲーション装置やオーディオ機器などの対システムコミュニケーションに失敗した場合の影響は、「道を迷う」や「希望外の曲がかかる」など、最長でも運転終了時(降車時)までの影響にとどまるものが多い。一方、対人コミュニケーションでは、その影響は乗車時にとどまらない。

ドライバは、コミュニケーション相手の反応に応じて、認知プロセスの際にはリアルタイム性を、判断プロセスの際にはコミュニケーション失敗時の影響を考慮しながら、コミュニケーション作業を行っていると考えられる。コミュニケーション作業における情報処理の流れを図4に示す。

コミュニケーション相手である人やシステムが存在するため、相手に対する出力(応答)と、相手からの入力それぞれに影響を与える外乱が存在する。

3.3 作業の優先度

ドライバの持つ情報処理量には限界が存在するため、すべての作業が要求する情報処理を実行できるとは限らない。そのため、ドライバは優先度をつけて情報処理を行い、実行できる範囲の情報処理を行っている

考えられる。そこで本節では、運転操作作業とコミュニケーション作業における認知と判断の各プロセスにおいて、優先度の高い作業項目の特徴を検討する。

(1) 認知プロセス

運転作業においては、予測認知は先読みであるため時間の余裕があり、時間的余裕のないフィードバック認知が優先される。コミュニケーション作業では、メール確認や配信されたニュースの確認よりも、カーナビによる曲がる角の確認や、電話の相手が話す内容を認知することが優先される。以上のことから、認知時には、認知対象である情報源が時間とともに変化し認知遅れが認知誤りに直結するような、リアルタイム性の高い項目が優先されると考えられる。

(2) 判断プロセス

運転作業においては、一般に、付随操作よりもブレーキ操作やハンドル操作といった主要操作の優先度が高い(ただし、豪雨時にはワイパーの優先度が高くなるという状況もある)。一方、コミュニケーション作業では、世間話よりもビジネス相手との商談への判断処理が優先される。以上のことから、判断時には、その判断が誤ったり遅れたりした際の影響が大きい項目が優先されると考えられる。

3.4 情報処理能力配分モデル

以上の検討結果から本論文では、優先度に応じたドライバ自身の情報処理能力配分のモデル化を行う。本情報処理能力配分モデルは、全体として以下に示す流れでドライバの情報処理能力を各作業・プロセスに配分する。

- (1) 存在する作業ごとに、判断プロセス失敗時の影響を算出し、優先度を判断する。
- (2) 失敗時の影響に比例して情報処理能力を各作業に配分する。
- (3) 各作業ごとの認知プロセスに対して、リアルタイム性の高さを算出し、優先度を判断する。
- (4) リアルタイム性の高さに比例して、情報処理能力を各認知プロセスに再配分する。

本モデルにおける、情報処理能力の“再配分”とは、ある作業に配分された情報処理能力を、その作業が必要とする各認知プロセスにさらに細かく配分することを指す。本モデルの情報処理の流れの全体を図5に示す。図5中の番号は、上記の流れの番号と対応している。

判断プロセスに関係して、(1)、(2)が実行され、認知プロセスに関係して(3)、(4)が実行される。そこで本モデルでは、それぞれ(1)、(2)を判断プロセスの中に、(3)、(4)を認知プロセスの中を含める。以

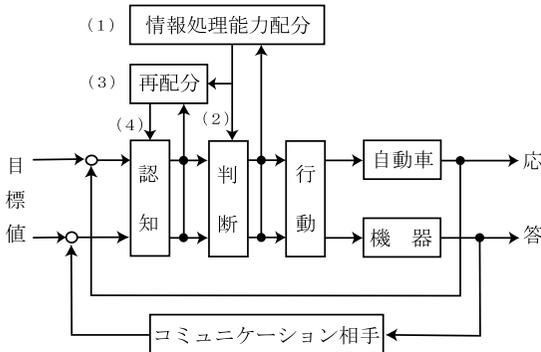


図5 提案モデルの情報処理の流れ

Fig. 5 A block diagram of processing ability distribution model.

下、本モデルの判断プロセスおよび認知プロセスの詳細を説明する。

● 判断プロセス

本モデルの判断プロセスにおいては、まず、各作業の認知プロセスからの出力に従って、行動の対象と行動量を選択決定する“対処決定”の実行が行われる。“対処決定”の結果は行動に反映されるとともに、決定された対処が間違っていた場合の負の影響を算出する“影響算出”のために用いられ、各作業の優先度が決定される。ここで、“対処決定”の結果の“影響算出”への反映は、即座に行われるとは限らない。状況や情報処理負荷に応じた時間間隔で“対処決定”の結果がサンプリングされ、“影響算出”に用いられる。一般に、“交差点を曲がる”や“着信操作をする”といった1つのタスクが実行されている間はサンプリングが行われず、優先度は固定となる。新たなタスクの発生や状況の大きな変化が発生した際にサンプリングが行われ、新たな優先度が決定される。

決定された優先度に従って、ドライバの情報処理能力が各作業に配分されるとともに、各作業の認知プロセスに通知される。判断プロセスにおいては、配分された情報処理能力は認知プロセスからの情報に基づいて対処を決定するために用いられる。本モデルの判断プロセスにおける情報処理の流れを図6に示す。

● 認知プロセス

本モデルでは、認知プロセスは各作業ごとに処理される。ある1つの作業が必要とする認知プロセスは、複数の状況(様々なドライビング環境やコミュ

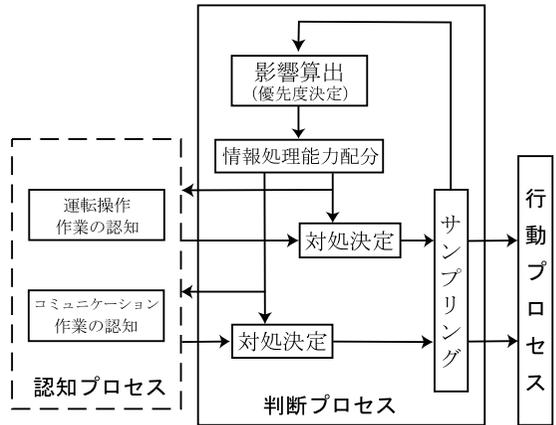


図6 判断プロセスの情報処理の流れ

Fig. 6 A block diagram of decision process model.

ニケーション相手の出力)を検出し、その作業の目標値との差分を算出する。ドライバを取り巻く様々な状況を検出する際に、すべての状況に対して一律の情報処理能力(注意力)を向けているわけではない。本モデルでは、状況のリアルタイム性の高さに比例して、各状況を検出するための情報処理能力の配分を行う。

判断プロセスと同様に、リアルタイム性の算出は、検出された状況をサンプリングすることによって行われる。サンプリング結果は即時にリアルタイム性算出に通知されるのではなく、状況の大きな変化をトリガとして通知される。また、配分される情報処理能力は、判断プロセスによってすでに当該作業に配分されている情報処理能力を再配分する。1つの作業においては、認知プロセスが完了してから判断プロセスに移行する 경우가多く、時間軸上でこれらのプロセスが衝突することは少ない。そこで本モデルでは、判断プロセスで配分された情報処理能力を認知プロセスで再配分して利用する。本モデルの認知プロセスにおける情報処理の流れを図7に示す。

$A_1 \sim A_4, A_T$ は状況を検出する増幅器である。本モデルでは、これらの増幅器の増幅率が各状況のリアルタイム性に応じて変化する。

本配分モデルの特徴は、ドライビング環境において外乱が発生した場合、その状況は一度「認知」および「判断」プロセスを通過し、サンプリングが実行されない優先度判断がなされないことにある。これにより、外乱発生時には優先度判断遅延が起り、コミュニケーション作業に没頭している場合の運転操作作業への対応遅れ(外乱を吸収する時間的余裕が少ない場合は交通事故)を説明することができる。

本論文では、運転操作作業やコミュニケーション作業を構成する、達成目標を持った一連の動作・情報処理の流れを“タスク”と呼ぶ。

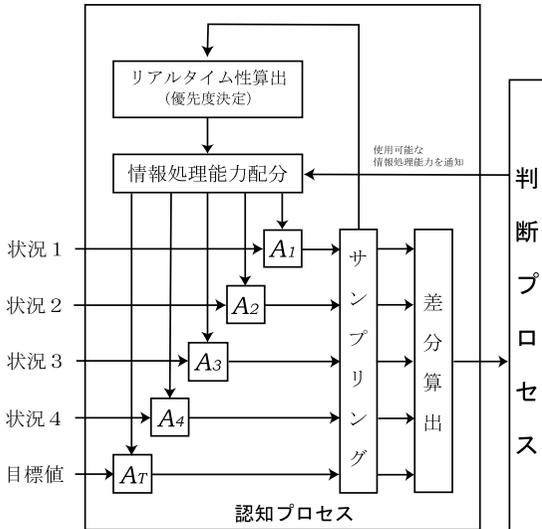


図7 認知プロセスの情報処理の流れ

Fig.7 A block diagram of recognition process model.

3.5 情報処理負荷推定手法

前節で示した情報処理能力配分モデルに従い、特にタスクが運転操作作業のみの場合の情報処理負荷推定手法を提案する。運転操作作業における認知プロセスでは、その情報源の90%が視覚からの入力に依存している²²⁾。そこで、視覚情報を用いて、視線の注視時間と移動量からドライバの情報処理能力および、認知プロセス負荷を推定する手法を提案する。

情報処理能力配分モデルの認知プロセスにおける情報処理は、判断プロセスに必要な情報を取得する処理であり、各対象(状況1~状況N)からの情報を適切に増幅する処理(A1~AN)を行う。一般に、入力が視覚情報の場合、より多くの情報を取得するためにはより長時間の注視が必要であり、増幅処理(A1~AN)は注視時間に反映される。そこで、認知プロセスにおける情報処理量は、単位時間あたりの対象への注視時間に比例すると考える。

ここで、ドライバの視線の動きと注視について考える。ドライバの視線は対象の注視と、次の対象への移動を繰り返す。k番目の対象(O_k)に対する注視時間をFT_k、k+1番目の対象(O_{k+1})への移動時間をMT_kとすれば、図8のように表すことができる。そこで、運転操作作業における認知プロセスが要求する情報処理量P_Fは以下のように定義できる。ただし、C_Fは比例定数であり、N_Fは対象の個数である。

$$P_F = C_F \sum_{N_F} \frac{FT_k}{FT_k + MT_k} \quad (2)$$

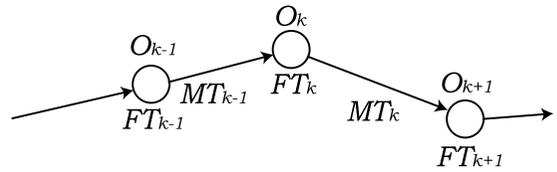


図8 ドライバ視線の移動

Fig.8 A movement of driver's glance.

通常の運転状況においては、ドライバの情報処理能力のすべて(P_T)を運転操作作業が要求することは少なく、余裕分は視覚の場合であれば運転操作作業に直接は関係のない“よそ見”に費やされることになる。“よそ見”においても興味の高い対象へはより多くの情報処理量が割かれ、結果として“よそ見”対象への注視時間が延びることになる。そこで、式(2)と同様に、k番目の“よそ見”対象(B_k)に対する注視時間をBT_k、k+1番目の“よそ見”対象(B_{k+1})への移動時間をMT_kとすれば、“よそ見”に消費される情報処理量P_Bは以下ようになる。ただし、C_Bは比例定数であり、N_Bは“よそ見”対象の個数である。

$$P_B = C_B \sum_{N_B} \frac{BT_k}{BT_k + MT_k} \quad (3)$$

ドライバの情報処理能力(P_T)は、各ドライバにおいてはドライビング環境によらずほぼ一定と考えられる。ここでは運転操作作業のみを扱っているので、式(2)と式(3)によりP_Tを以下のように表すことができる。

$$P_T = P_F + P_B = const \quad (4)$$

一方、視覚特性と負荷の関係では、高負荷状態において対象への視線の注視が起こり、周辺視野への視線移動が低下することによって視線の移動量が減少する^{23),24)}。また、“よそ見”状態では情報収集のリアルタイム性が低く低負荷状態のため、多くの“よそ見”対象を認識することが可能であり、視線の移動量は増加すると考えられる。そこで運転操作作業負荷(L)を以下のように定義する。

$$\frac{1}{L} = \sum_{N_F} |\vec{O}_k - \vec{O}_{k-1}| + \sum_{N_B} |\vec{B}_k - \vec{B}_{k-1}| \quad (5)$$

式(5)において、第1項は運転操作に関わる視線移動量を示し、第2項は“よそ見”に関わる視線移動量を示している。運転操作作業負荷が高い場合には、前項成分が減少するとともに、N_Bが減少することにより後項成分も減少し、Lは増加する。一方、運転操作作業負荷が低い場合には、N_Fが減少することにより前項成分が減少するが、N_Bが増加することによって個々の視線移動量の大きい後項成分が大幅に増加し、

結果として L は減少する。

式 (4) で示したドライバ情報処理能力 P_T は、各ドライバによって異なるが、同じドライバでは異なるドライビング環境下でも一定の値を示すと考えられる。一方、式 (5) で示した運転操作作業の認知プロセス負荷 L は、異なるドライビング環境においては運転操作作業の負荷（要求される情報処理量）も異なった値を示す。より多くの情報処理能力を持つドライバは、同じ認知対象に対してより短時間で必要な情報の収集を完了できると考えられる。すなわち、リファレンスとなるドライバ X について、情報処理能力 P_{TX} および、種々のドライビング環境における運転操作作業負荷 $L_{X1}, L_{X2}, \sim L_{XN}$ を測定することによって、情報処理能力 P_{TY} が既知のドライバ Y の種々のドライビング環境における運転操作作業負荷 $L_{Y1}, L_{Y2}, \sim L_{YN}$ を以下のように推定することができる。ただし、 $k = 1 \sim N$ とする。

$$L_{Yk} = \frac{P_{TX}}{P_{TY}} \times L_{Xk} \quad (6)$$

式 (6) は、情報処理能力 P_T と運転操作作業負荷 L が反比例の関係にあることを示している。

そこで、式 (6) を用いることによって、あるドライビング環境におけるあるドライバ Y の情報処理能力の余裕 E_{Yk} を以下のように推定することができる。ただし、 C_E は比例定数である。

$$\begin{aligned} E_{Yk} &= P_{TY} - C_E L_{Yk} \\ &= \frac{P_{TX}}{P_{TY}} (P_{TX} - C_E L_{Xk}) \end{aligned} \quad (7)$$

4. 視線解析による実験評価

本章では、3.5 節で提案した運転負荷推定手法について、コミュニケーション・ナビゲータへの適用という観点で、実験による有効性の評価を試みる。

コミュニケーションを制御して安全性を確保するというコミュニケーション・ナビゲータの目的を考えると、運転負荷が増加したことをシステムが認識した後にコミュニケーション制御を行うシーケンスでは、処理遅延から図 1 に示した過負荷の状態が生じる可能性がある。したがって、コミュニケーション制御はドライバへの運転操作作業負荷を先読みして行う必要がある。そこで本論文では、先読みが可能なドライビング環境情報として道路線形および比較的静的な道路状況（渋滞）を用いる。

そして、これらのドライビング環境における視線解析を行い、3.5 節で提案した認知プロセスにおける推定手法について以下の 3 点の有効性を検証する。

- 情報処理能力はドライビング環境に非依存でドライバごとに一定：式 (4)
- 運転操作作業負荷は視線移動量に反映：式 (5)
- リファレンスドライバを用いて運転操作作業負荷を推定可能：式 (6)

4.1 実験

実験は、20 代の男性 3 名の被験者に対して実施した。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。対象とした 5 種類の計測区間の特徴を以下に示す。すべての計測区間は片側 1 車線の一般道である。被験者には通常どおり運転するよう指示し、コミュニケーション作業負荷を排除した状態で実験を行った。ただし、通常の運転操作を行う範囲内の“よそ見”は制限なしとした。

(1) 通常時（交通量の少ない直線路）

見通しが良く前走車なしで対向車も少ない直線路。走行速度は約 50 km/h。車線幅は片側 4.5 m。運転タスクは、直線路のレーンキープのみ。

(2) 交通量多（前走車有、対向車多の直線路）

見通しが比較的悪く前走車が存在し対向車も多い。走行速度は約 50 km/h。車線幅は片側 4.5 m。運転タスクは、直線路のレーンキープ、前走車追従、対向車注意が要求される。

(3) 渋滞時（前走車有の直線路）

渋滞時の追従走行、見通しは良い。速度は 10 ~ 30 km/h 程度。対向車線は渋滞していない。車線幅は片側 4.0 m。運転タスクは、直線路のレーンキープ、前走車追従、対向車注意が要求される。

(4) カーブ（前走車有、対向車多のカーブ）

前走車があり対向車も多い下りのカーブ、見通しは比較的悪い。走行速度は約 40 km/h。車線幅は片側約 5.4 m。運転タスクは、カーブにおけるレーンキープ、前走車追従、対向車注意が要求される。

(5) 街路（路上駐車多、対向車多、歩行者多の直線路）

駐車車両多数で見通しが悪く、対向車も存在し歩行者の横断も多い、前走車は存在しない。走行速度は 10 ~ 40 km/h 程度。車線幅は片側約 4.0 m。運転タスクは、直線路のレーンキープ、駐車車両回避、駐車車両回避時の対向車との競合回避、対向車注意、歩行者注意が要求される。

なお、計測時間は対象ドライビング環境において長時間であることが望ましいが、渋滞や街路において停止した場合には認識プロセスのリアルタイム性がほぼゼロになることから本評価には不適切と判断した。そこで、連続して走行状態での評価が可能な計測データ

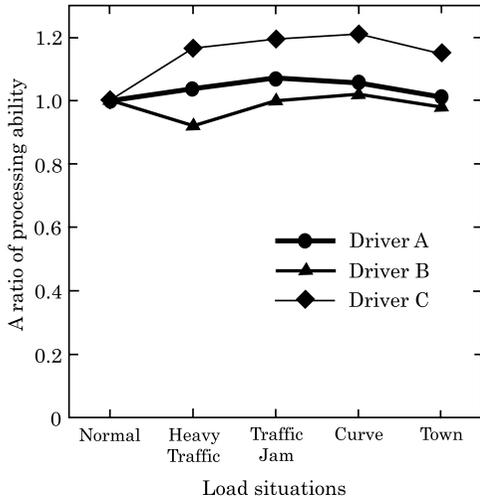
図9 情報処理能力 P_T

Fig. 9 Driver ability for information processing.

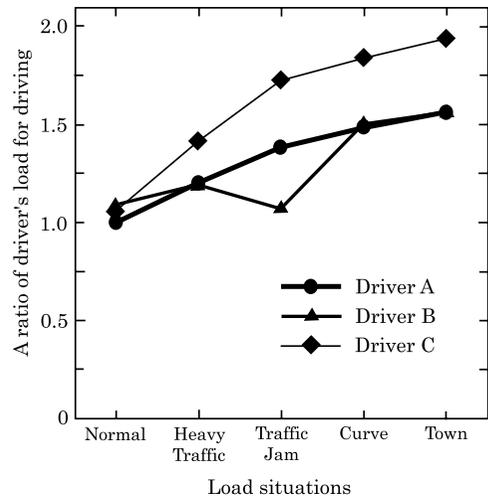
図10 運転操作作業負荷 L

Fig. 10 Driver's load for several driving situations.

を基準として、1024 サンプルデータ（約 17 秒間）を計測時間として評価を行った。

4.2 情報処理能力一定

まず、ドライバの情報処理能力 P_T がドライビング環境に依存せず一定であることを、計測値の注視時間を用いて検証する。視線データより、特定の物体を注視している場合の視線角度の変化は 1 サンプル点あたり 5 度以内に収まっていた。また、一般的に同一対象に 0.1 秒以上とどまったものを注視として用いる^{25),26)}。そこで本論文では「視線角度の変化が 1 サンプル点あたり 5 度以内に収まった状態が 0.1 秒（6 サンプル点）以上継続した」状態を、「対象を注視している」と判断する。

式 (4) から従って単位時間あたりの注視時間から情報処理能力を求めたものを図 9 に示す。なお、3 名の被験者それぞれについて通常時の値を 1 として正規化したものを示す。横軸はドライビング環境を示し、縦軸は正規化された情報処理能力を示す。

通常時と比較して、その他のドライビング環境では多少の変動が見られるが、各被験者ごとでは、ドライビング環境にかかわらずば一定の値を示していると思われる。最大誤差は 21.0%、最小誤差は 0.2%、誤差の平均は 8.5%であった。

4.3 運転操作作業負荷

次に、測定結果および式 (5) を用いて推定した運転操作作業負荷が、計測区間のドライビング環境を反映しているか検証する。式 (5) から従って視線の総移動量から運転操作作業負荷を求めたものを図 10 に示す。なお、被験者 A の通常時の値を 1 として正規化した

ものを示す。横軸はドライビング環境を示し、縦軸は正規化された運転操作作業負荷を示す。

通常時と比較して、街路走行において最大 1.8 倍程度の運転操作作業負荷が被験者にかかっていることが示されている。交通量多の場合においては車速は高速だが追従走行であるために、最も情報処理量を必要とされる前走車との相対速度は大きくなく、結果としてリアルタイム性の減少があるとともに、十分な車線幅があるために対向車の影響はそれほど大きくなかったと予想される。一方、車速は高速ではないが駐車車両を回避しつつ対向車両とすれ違う必要のある街路では、駐車車両や対向車両と競合・接触する恐れがあるため、相対速度の高さからリアルタイム性が高まり、負荷が増大したと考えられる。また、渋滞時には車速は低速だが車間距離が極端に接近しており、ある程度のリアルタイム情報処理が要求されていると思われる。

以上より、式 (5) より算出した運転操作作業負荷により、現実のドライビング環境の傾向を推定することが可能であると思われる。

4.4 運転操作作業負荷推定

さらに、式 (6) に基づき、被験者 3 名のうち 1 名をリファレンスドライバとし、その値を用いて他のドライバの負荷を推定したものを図 11 に示す。なお、リファレンスドライバは被験者 A とし、被験者 A の通常時の計測値を 1 として正規化したものを示す。線の太さが被験者を示し、実線および黒塗りマークが実測値、波線および白抜きマークが式 (6) による推定値を示す。横軸はドライビング環境を示し、縦軸は正規化された運転操作作業負荷およびその推定値を示す。

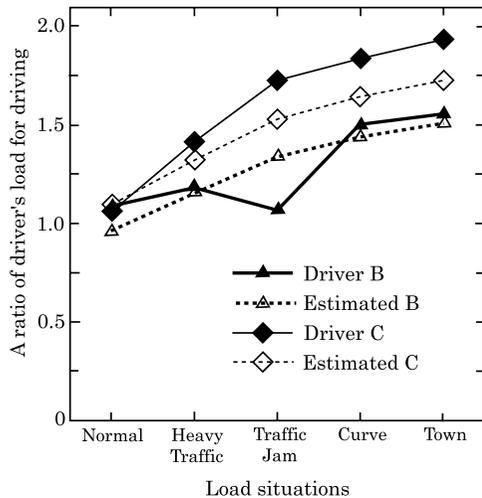


図 11 運転操作作業負荷 L の推定
Fig. 11 Estimated driving load.

最大誤差は 25.2%，最低誤差は 2.4%，平均誤差は 9.0%となった。被験者 B より被験者 C の運転操作作業負荷が高いことや，異なるドライビング環境における負荷の傾向を反映できている。本実験結果からは，自動運転などの精密な制御を行うためには十分な推定精度とはいえない。ここで，本論文でターゲットとしているコミュニケーション・ナビゲータが想定しているコミュニケーション制御は，電話の保留やメッセージ録音，メールの要旨抽出などである⁷⁾。抽出する要旨の長さ（文字数）やメディアの選択（音声/画面）などの離散的な制御に対しては高精度の推定が必ずしも必要でないため，提案手法による運転操作作業負荷をパラメータとしたコミュニケーション制御の可能性を，本実験結果は示唆していると考える。

5. ま と め

車内コミュニケーション環境における安全性と快適性の両立を目指したコミュニケーション・ナビゲータの実現には，ドライビング環境がドライバに与える負荷の定量的評価が必要となる。本論文では，情報処理能力配分の視点からドライバ情報処理能力配分のモデル化を行った。本モデルは，誤判断時の影響が大きい作業に対し多くの情報処理量を割り振り，その作業が要求する複数の認知プロセスに対し，リアルタイム性の高い認知プロセスにより多くの情報処理量を割り振るものである。さらに本モデルの認知プロセスに対し，視覚情報を用いたドライバの情報処理能力推定手法と，認知プロセス負荷推定手法を提案した。

実車両を用いた視線計測実験により，提案推定手法

の有効性を検証した。まず，ドライバの情報処理能力については平均 8.5%の誤差でドライビング環境に依存することなく一定の値が算出されている。これにより，前走車や対向車など運転操作作業に必要な対象を認知するための情報処理量消費と“よそ見”による情報処理量消費の和がドライバによって固有の値をとることを示した式 (4) が一定の有効性を持つことが示されたといえる。また，認知プロセス負荷推定手法においては，リファレンスドライバの値から算出した運転操作作業負荷は平均 9.0%の誤差で推定されており，認知プロセスにおいて，提案推定手法のコミュニケーション制御への適応可能性を示した。

謝辞 実験作業に多大なる支援を賜りました日本情報通信コンサルティング株式会社岡丈樹氏，伊東洋次氏に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) DOT. WebPage: An investigation of the safety implications of wireless communications in vehicles.
<http://www.nhtsa.dot.gov:80/people/injury/research/>
- 2) 警察庁交通局交通企画課：携帯電話の使用に係わる交通事故について，警察庁発表資料 (Mar. 1998).
- 3) 石田敏郎：携帯電話の使用が運轉行動に及ぼす影響に関する調査研究，自動車安全運轉センター (Mar. 1998).
- 4) U.S.A DOT.: Report to congress on intelligent vehicle highway systems (Mar. 1990).
- 5) 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 (May 1999).
- 6) 内山祐司，小島真一，本郷武朗，寺島立太，脇田敏裕：運轉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).
- 7) 荒金陽助，関 良明，吉開範章：ドライビング環境適応型コミュニケーション・ナビゲータのための実験評価システムの開発とその評価，信学論 (B)，Vol.J82-B, No.11, pp.1966-1973 (1999).
- 8) Aragane, Y., Maeda, F., Tsuji, Y. and Yoshikai, N.: Development and Evaluation of Communication Navigator, *Proc. ITSC-2000*, Dearborn, USA (Oct. 2000).
- 9) 岡村宏樹：前方視覚情報を用いたカーブ走行時のドライバーモデル，自動車技術会学術講演会前刷集，No.93-99, pp.1-4 (1999).
- 10) 佐藤稔久，大門 樹，川嶋弘尚，木下昌裕，池田 敦：ドライバの認知過程を考慮した狭路走行支援システムに関する研究，自動車技術会秋季

- 大会, No.107-99, pp.9-12 (Oct. 1999).
- 11) 川野常夫ほか: 自動車運転中の携帯電話の使用における運転・会話特性と加齢の影響, 人間工学, Vol.32, pp.8-9 (1996).
- 12) 小島真一, 本郷武朗, 星野博之, 内山祐司: 音声対話の運転への影響評価法の開発, 情報処理学会研究報告, Vol.99, No.ITS-3 (Oct. 1999).
- 13) Ogden, G.D., Levine, J.M. and Eisner, E.J.: Measurement of workload by secondary tasks, *HUMAN FACTORS*, Vol.21 No.5, pp.529-548 (1979).
- 14) 森田和元, 益子仁一, 岡田竹雄: わき見運転時の安全性に関する理論的解析, 自動車技術会秋季大会, No.80-99, pp.13-16 (Oct. 1999).
- 15) 堀野定雄: 人間工学からみたカーマルチメディア機器の安全性, 車載情報機器と HMI, 自動車技術会春季大会 (1997).
- 16) 荒金陽助, 関 良明: ドライビング環境適応型通信選択方式を採用した Dukas'98 の提案, DI-COMO ワークショップ, 7-B (Jul. 1998).
- 17) Atsumi, B., Akamatsu, M. and Ito, H.: Information management and human factors for multiple ITS systems, *Proc. IEA 2000/HFES 2000 Congress* (2000).
- 18) 阿山みよし, 目加田慶人, 春日正男: 視覚・会話負荷が道路走行画面上における有効視野に与える影響について, ケータイ・カーナビの利用性と人間工学シンポジウム, pp.175-180 (Feb. 2001).
- 19) 大野宏司, 本郷武朗: ドライビングシミュレータにおける運転判断エラーの ID3 による解析, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.5 (1997).
- 20) 藤岡健彦: 自動車技術基礎講座, 自動車技術, Vol.54, No.11, pp.82-87 (2000).
- 21) 稲葉正太郎: 自動制御入門, 丸善株式会社, 東京 (1967).
- 22) 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).
- 23) 皆川忠信, 藤田京介, 藤井 学, 百瀬桂子, 小宮一三: 自動車運転中の視聴覚応答特性の検討—携帯電話使用に関する一考察, 神奈川工科大学研究報告, B-23 (1999).
- 24) Tijerina, L.: Driver eye glance behavior during car following on the road, SAE technical paper series, SAE-1999-01-1300, 1999.
- 25) 飯田健夫, 伊藤孝幸: 自動車運転時における視覚特性への思考負荷の影響—眼球運動と反応時間による検証, 交通科学, Vol.28 No.1-2 (1998).
- 26) 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 (Dec. 1999).

(平成 12 年 12 月 12 日受付)

(平成 13 年 5 月 10 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. 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・交通運輸情報流通支援プロジェクト主任研究員. 電子情報通信学会会員.



吉開 範章 (正会員)

昭和 52 年熊本大学電子工学科卒業. 昭和 54 年同大学院修士課程修了. 同年電信電話公社(現 NTT)電気通信研究所に入所. 以来, 主として, 光ファイバーや同軸ケーブルを用いた高速デジタル伝送方式の研究実用化, ATM ネットワークに関する研究と ITU-T での国際標準化, および ITS (Intelligent Transport Systems) の研究開発に従事. 1992 年から 93 年には, Bell Communication Research (現: Telcordia Technologies, Inc.) の客員研究員. 工学博士. 著書「ネットワーク・アーキテクチャ」, 「ATM Transport and Network Integrity」. IEEE シニアメンバー.