

目の順応特性を考慮した車載ディスプレイの表示

坂口靖雄，樋口和則，中野倫明，山本新

Display Method for On-board Visual Display Systems Considering Adaptation Property of Human Vision

Yasuo Sakaguchi, Kazunori Higuchi, Tomoaki Nakano, Shin Yamamoto

要 旨

最近，ナビシステムなどの車載ディスプレイが普及している。ドライバーは運転中，日変化や天候変化，走行環境の変化に伴う種々の視環境にさらされるため，車載ディスプレイは，あらゆる視環境の下でも視認性の高い表示方法が求められる。筆者らは，晴天下の積雪面のような高輝度視環境下においても高い視認性が得られる車載ディスプレイの表示方式を提案した。この表示方式は，晴天時のアスファルト路面走行時の表示画像を基準として，検出した車外輝度と目の順応特性に考慮して輝度と彩度を補正することで，つねに同じ見え方になるように表示するものである。さらに，空間周波数特性を用いた客観的評価実験と実際のナビゲーションシステム画面を提示する主観的評価実験によって，提案方式の有効性の検証実験を行った。その結果，どちらの評価実験においても，提案方式が従来方式に比べて相当の視認性改善があり，この方式が高輝度の環境条件下での車載ディスプレイの表示方式として非常に有効であることが示された。

Abstract

With an increasing number of on-board visual display systems including navigation systems, it has become important to improve the visibility of on-board display screens in various visual environments, such as driving on a snow-covered road in fine weather. We propose a new display method based on the luminance adaptation, one of the human vision properties, associated with environmental luminance changes during driving. In this method, the luminance and saturation of the display screens are compensated according to the adaptation luminance of the driver in order to perceive the constant brightness of the display screens even in the different environmental luminance. Experimental results of subjective and objective evaluations indicate the effectiveness of the method compared with conventional display methods.

キーワード

自動車，ディスプレイ，画像処理，視覚特性，順応，ナビゲーションシステム，輝度，彩度

1. まえがき

近年，自動車の情報化を背景に，車載のナビゲーションシステムが普及している。ナビゲーションシステムは従来の経路案内に加え，渋滞時の交通情報なども提供されるようになり，表示情報量も一層増えるものと考えられる。ナビゲーション

システムは今後，利便性に加えて安全性の視点での取り組みが重要となる。ナビゲーションシステムに代表される車載ディスプレイの視認性は，その安全性向上の重要な要因である。

自動車は，昼夜の日変化や天候および路面状態など様々な運転環境の下を走行する。ドライバーは，これらの車外の運転環境の明るさが変化する中で

車載ディスプレイを視認する。そのため、視認性の高い車載ディスプレイの実現には、運転環境への対応と目の視覚特性を考慮した表示方法が重要と考えられる。各種の運転環境の中でも、晴天時の太陽光下の積雪面を走行する場合のように極めて明るい環境下での表示は、検討すべき事項の一つである。

視認性の視点での従来の研究には、屋外の環境照明や屋外の照明下における看板や標識などについての研究^{1, 2)}、さらに屋内におけるOA機器のディスプレイに関する研究などがある^{3, 4)}。車載ディスプレイに関する研究では、メータやディスプレイの輝度とコントラストに関するもの⁵⁾やナビゲーションディスプレイの輝度コントラストや色度差についての研究⁶⁾がある。

これらの従来研究では、視認性に及ぼす要因を抽出し、その要因の中から官能評価などによって最適な要件を見出す方法が採られている。

筆者らの提案する方法は、運転環境の明るさとドライバの視覚特性を配慮してディスプレイの表示条件を決定するものである。すなわち、走行中の運転環境に対応する車外輝度を検出し、車外輝度が著しく高い場合には、目の順応特性に基づいてディスプレイの表示を制御しようとするものである。この方式により、晴天時の積雪面走行のような車外輝度が著しく高い場合にも、従来のアスファルト路面走行と同程度の視認性の良い表示を実現することができた。

本論文では、2章でこの研究の必要性と技術的課題、3章で提案する方式、そして4章と5章でその有効性を示す検証実験とその結果について述べる。

2. 技術課題

2.1 運転環境における車内/車外輝度変化

ドライバは、車外の運転環境を見つつ、必要に応じて車内のディスプレイから情報を得ながら自動車を運転する。Fig. 1は、筆者らの行った運転環境である走行路に存在する代表的な対象物の輝度と車内の車載ディスプレイの表示面の輝度の測定結果を示したものである。

この図から、晴天時では、アスファルト路面走行ではその輝度が2000cd/m²であるのが積雪面走行

では10000cd/m²にもなることを示している。一般に、運転中のドライバがナビゲーションシステムのディスプレイを視認するために、前方から目を離す時間は0.4～1.2秒である⁷⁾。このことから、前方視野を見ながら走行している時にディスプレイに視線を移す場合、晴天時のアスファルト路面走行では視線移動の間に目の受ける輝度変化は10倍程度であるのに対し、晴天時の積雪路面走行では約50倍の輝度変化を受けることになる。

2.2 運転環境変化に伴う目の順応特性

一方、目の視覚特性の一つに順応特性がある。順応特性には、高輝度の対象物を見ていて急に低輝度の対象物に目を移したときの暗順応とその逆の明順応がある。さらに、定常的な特性である静特性⁸⁾と視野内の輝度が急変した場合の順応の度合いの変化特性である動特性⁹⁾がある。また、太陽光下の一面の積雪面のように視野内が比較的均一な輝度である場合と、夜間にヘッドライトの直射光を浴びた場合のような視野内の輝度が局部的に大きく変化する場合がある。上述のような晴天時に一面が積雪面の中を走行する場合は、視野内の輝度が一様で、順応特性も静特性として取り扱うことができる。

Fig. 2はその順応の静特性を示したものである。この図は物理量としての対象物の輝度と人間の感

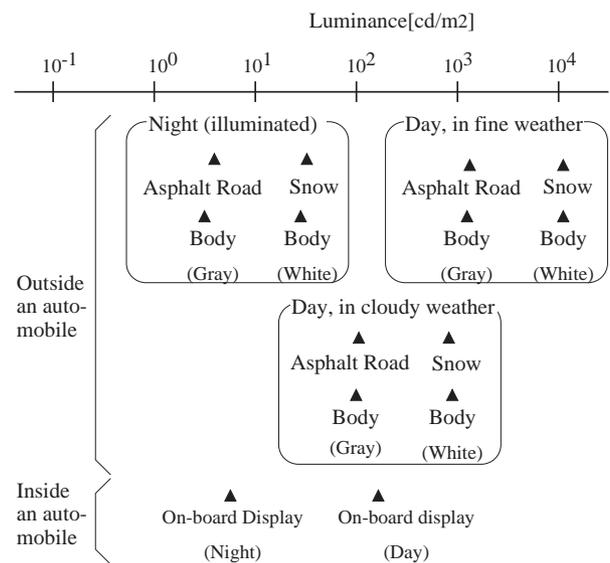


Fig. 1 Luminance of outside of the vehicle and an on-board display.

ずる感覚値との関係を示したものである。この図は、順応状態が異なれば、対象物の輝度が異なっても人間は感覚的に同じ明るさを感じていないことを示している。

このことは、Fig. 2の順応特性に基づいて人間の感じる感覚的明るさが変化しないようにすることで、晴天時の一面が積雪面のように車外の輝度値が高い場合でも視認性の良い車載ディスプレイ表示を実現できることを示唆している。この研究では、晴天時の一面が積雪面の走行時でも、アスファルト路面の走行と同等の視認性の得られる表示法の開発を目標としている。

3. ディスプレイ表示方式

3.1 基本方式

Fig. 3は、提案する表示方式の基本的な考え方を示したものである。まず、走行中の車外の輝度を検出する。この値はその時のドライバーの順応輝度に相当するもので、これが定まればFig. 2で示される順応の静特性から視対象の輝度と感覚的な明るさとの関係が求められる。

次に、基準とする感覚的明るさと同じ明るさとなるディスプレイの輝度を、順応の静特性に基づいて決定する。ここで、基準とする感覚的明るさは、晴天の昼間のアスファルト路面の走行中に、ディスプレイを見たときの感覚的明るさを示している。

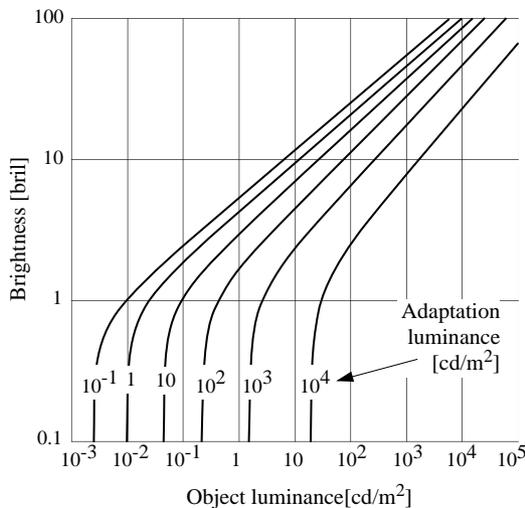


Fig. 2 Static property of adaptation.

この方式に基づいて決定された表示輝度に従い、原画像(ナビゲーションシステムの表示画面)の輝度を補正し、車載ディスプレイに表示する。なお、補正の輝度が表示装置の表示輝度の上限を越えた場合には、その最大の表示輝度に加えて彩度の補正が行われる。

3.2 表示画像生成

Fig. 4に、その表示画像作成の処理の流れを示す。まず、車外輝度として車の前方50mの路面の輝度を計測する。この輝度が、前方を見て運転してい

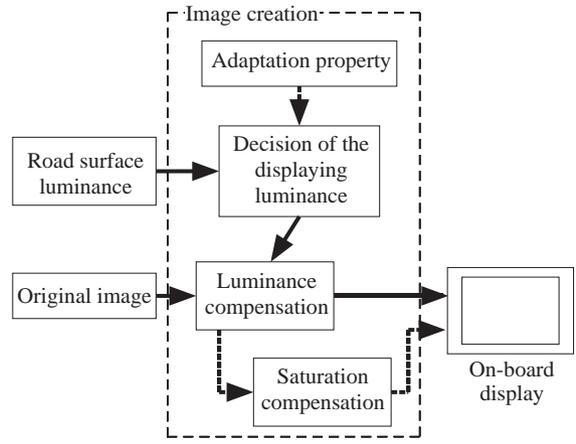


Fig. 3 Block diagram of the fundamental display method based on adaptation.

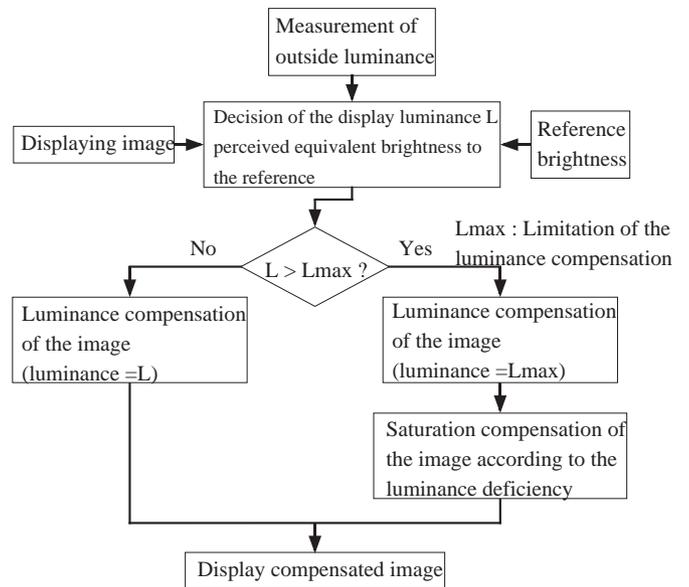


Fig. 4 The algorithm of the compensation of a display image.

るときのドライバの順応輝度に相当する。この計測された順応輝度から，Fig. 5の手順で基準と同じ明るさに感じるディスプレイの表示輝度Lを決定する。この決定された表示輝度Lが実際の表示装置で実現できる輝度値であればその値表示輝度となるが，表示装置の最大の輝度 L_{max} を越えている場合にはLの最大値が L_{max} となるように，各画素の輝度をシフトし，これに加えて，彩度の補正が行われる。

Fig. 5は，表示輝度決定の流れを示したものである。まず，基準とする感覚的明るさを得るため，晴天の昼間にアスファルト路面を走行しているときの，基準の順応特性 A_0 を，車外輝度(2000cd/m²)と感覚的明るさの関係から求める。この状態でのディスプレイの表示輝度分布 $L_0(i, j)$ (i, j はディスプレイ表示面の画素の座標値を示す)に対する人間が感ずる感覚的な明るさの分布 $B_0(i, j)$ を求める。この $B_0(i, j)$ が基準となる感覚的明るさとなる。次に，ドライバの順応輝度を示す計測された車外輝度に対応する順応特性Aを用いて，基準となる感覚的な明るさの分布 $B_0(i, j)$ と同じ感覚的明るさになるための表示輝度分布 $L(i, j)$ を計算する。この処理が，ディスプレイ中の全画素について行われる。

Fig. 6は彩度補正の考え方を示したもので，ディスプレイ上の表示色をCIEの $L^*a^*b^*$ 表色系で表現している。この表色系では，空間中の2点間の距離で

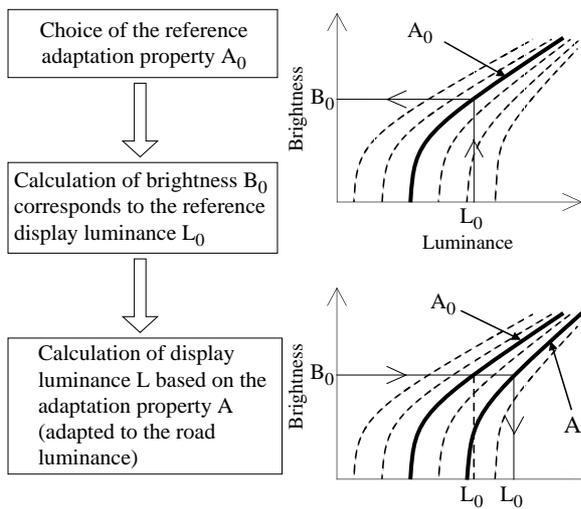


Fig. 5 The algorithm of deciding luminance level of the display.

表される2つの色の差(色度差)は人間の目に感ずる色の差に対応して表示される。順応輝度よりディスプレイの表示輝度が小さいと，背景と文字の色度差が小さいと文字が読み取り難くなるように，ディスプレイが見づらくなる。これは色度差が低下するからである。Fig. 6で，順応輝度から求めた表示輝度が実際の表示装置で実現できないと，その最大輝度で表示してもディスプレイは基準より暗くなってしまふ。これは，ディスプレイの輝度が等価的に低下したことに相当し， A_0 の色度は A_1 に， B_0 は B_1 になって，クロマ値(近似的に彩度に相関する値で， $L^*a^*b^*$ 表色系においては $(a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ で表わされる)が小さくなり(任意の色の輝度のみが低下した場合， $L^*a^*b^*$ 表色系では a^*, b^* ともに絶対値が小さくなる)，両者の色度差は D_1 となり，色度差が低下($D_0 > D_1$)してしまふ。そこで， A_1, B_1 の彩度を高めてクロマ値を基準画像の A_0, B_0 と同じ値に(A_2, B_2)変換することで，暗い状態でも基準画像と同程度の色度差が確保され，見やすいディスプレイ画像を生成することができる。

4. 実験方法

提案した方式の有効性を検証するために，輝度

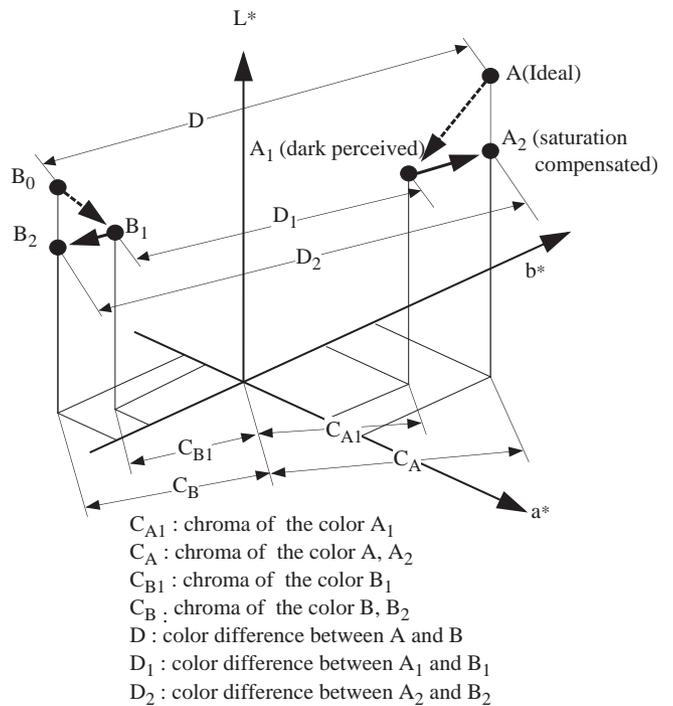


Fig. 6 Compensation of saturation.

に加えて彩度を補正表示する提案方式と、補正しない従来方式について、縞模様パターンを用いた客観評価実験と、実際のナビゲーションシステムの画面を用いた主観評価実験を行った。

4.1 客観的評価法

客観評価では、感覚的明るさの違いによる彩度コントラスト感度の変化を調べるため、一様な輝度で彩度のみを正弦波状に変化させた2種類（黄青、赤シアン）の縞模様パターンをCRT上に提示し、車外輝度に順応した状態で被験者がどこまで細かい縞模様まで視認できたかを判定する実験を行った。これは、視覚の空間周波数特性であるMTF(modulation transfer function)の測定に相当する。

(1) 実験条件

Table 1に実験条件を示す。被験者は、視力が1.0～1.5の年齢が20～30歳代の5名とした。走行環境として、晴天昼間の積雪面走行（輝度7500cd/m²）と晴天昼間のアスファルト路面（輝度1500cd/m²）を想定した。ディスプレイに表示するパターンは、従来方式では昼間の走行時の通常のディスプレイの輝度（輝度120cd/m²）を、提案方式では順応輝度が高い積雪面走行状態に対応して輝度と彩度を補正（輝度200cd/m²，彩度30%上昇）したものをを用いた。

走行環境とディスプレイ表示を組み合わせ、以下の3通りの実験を行った。

- (a) 晴天昼間の積雪面走行を想定
 - (a-1) 従来方式によるディスプレイ表示
 - (a-2) 提案方式によるディスプレイ表示
- (b) 晴天昼間のアスファルト路面走行を想定

Table 1 Experimental condition of the objective evaluation.

Subjects	20-35years old, 5 persons
Outside luminance	7500cd/m ² (assuming snowy road) 1500cd/m ² (assuming asphalt road)
Display	120cd/m ² (conventional method) 200cd/m ² + saturation compensated (proposed method)
Viewing distance	75cm
Shown patterns	Sinusoidal patterns (Blue-Yellow/Red-Cyan)

(b-1) 従来方式によるディスプレイ表示
視距離（被験者とディスプレイ間の距離）は、ドライバの目と車載ディスプレイとの代表的な距離である75cmとした。

想定した走行環境の輝度は、本来は積雪面が10000cd/m²，アスファルト路面が2000cd/m²であるが、本実験ではそれぞれの75%の輝度で行った。これは、後述する主観評価でナビゲーション画面の提示に用いた液晶ディスプレイ（以下、LCDと略す）の最大輝度が270cd/m²であるのに対して、本実験で縞模様を提示するCRTの最大輝度が200cd/m²である（LCDは解像度が低い縞模様の提示には不適）ため、両者を同一の条件で実験を行うために、環境の輝度とディスプレイの最大輝度の比率が同じになるように環境の輝度を下げる必要があるためである。この輝度の範囲では、感覚的明るさと輝度の関係がほぼ線型であるため、順応輝度と対象物輝度の比率を保ったまま輝度をシフトさせても見え方は変わらないと考えられる。

(2) 実験システム

Fig. 7に実験システムの構成を示す。前方のスクリーンは、被験者からみた輝度が一樣になるように上下から照明される。このスクリーンの輝度が車外輝度に相当する。被験者の視線の水平（真正面）方向から見て左20°，下15°（自動車のナビ画面位置に相当）にCRTが設置される。このCRTにはパソコンが接続され、後述の縞模様パターンが提

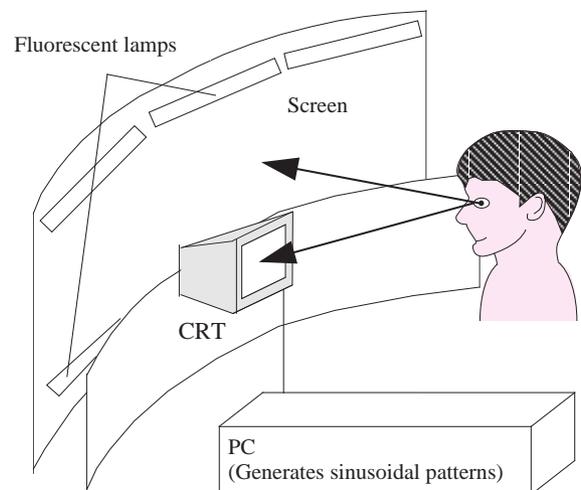


Fig. 7 Experiment setup for the objective evaluation.

示される。

(3) 提示方法

Fig. 8に、提示される縞模様パターンの一例を示す。縞模様パターンは、輝度を一定にして彩度のみを正弦波で変調させた青 黄と赤 シアンの縞模様パターンの2種類を用いている。この色を用いたのは、ディスプレイの表現可能な色の範囲をL*a*b*表色系で表わした場合、これらの色の組み合わせで色度範囲全体を代表できると考えられるからである。これらの縞模様パターンを、空間周波数と彩度のコントラストを変えて提示した。

Fig. 9に提示タイミングを示す。スクリーン視認時の順応状態（車外輝度に順応した状態を模擬）におけるディスプレイの見え方を評価するため、スクリーンを5秒間視認し続け、その輝度に順応させた後、音による合図とともにディスプレイにパターンを提示する。被験者は、合図を聞いてからディスプレイに視線を移動し、1秒間のみ提示されるパターンを視認し、縞模様が見えたかどうかを回答する。

(4) 評価方法

想定した走行環境下で、空間周波数特性をどの

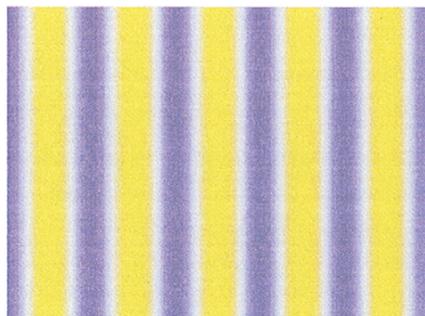


Fig. 8 Sinusoidal striped pattern.

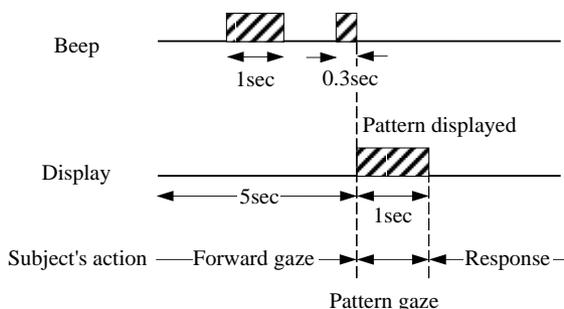


Fig. 9 Indication timing of the striped pattern.

程度改善できるかを評価するため、提案方式と従来方式による空間周波数に対する目のコントラスト感度を測定した。具体的には、最初にコントラストが最も低いパターンを提示し、順次提示するパターンのコントラストを高めてゆき、被験者が「縞模様が見えた」と回答した時点で提示を打ち切り、そのときのコントラストを記録する。これを0.225 ~ 15cpd(cycles per degree)の間の7通りの空間周波数について行った。

4.2 主観的評価法

主観評価実験は、実際のナビゲーションシステムの画面を対象として、従来方式と提案方式による表示をディスプレイ（LCD）上に同時に提示し、被験者にどちらがどの程度見やすいかを5段階評価で回答させた。

(1) 実験条件

Table 2に実験条件を示す。被験者は、客観評価の場合と同じである。走行環境として、晴天昼間の積雪面走行を想定し、車外輝度を10000cd/m²とした。ディスプレイは、従来方式として、昼間の走行時の通常のディスプレイ輝度（輝度160cd/m²）のものと、提案方式として、順応輝度が高い積雪面走行状態に対応して輝度と彩度を補正（輝度270cd/m²、彩度30%上昇）したものを横並びで表示し、両者を比較することで評価を行った。

視距離は、客観評価と同じ75cmとした。

(2) 実験システム

Fig. 10に、実験システムの構成を示す。自動車のボデーを模したモックアップをスクリーンの前に設置している。スクリーンは客観評価実験と同

Table 2 Experimental condition of the subjective evaluation.

Subjects	20-35years old, 5 persons
Outside luminance	10000cd/m ² (assuming snowy road)
Display	160cd/m ² (conventional method) 270cd/m ² + saturation compensated (proposed method)
Viewing distance	75cm
Shown patterns	map images of the navigation system

じものである。被験者の視線の水平（真正面）方向から見て左 20° ，下 15° （自動車のナビ画面位置に相当）にLCD（市販のナビモニタ）が設置され，後述の地図画面が提示される。被験者は運転席に座り，前方のスクリーンとLCDを後述する方法に従って視認し，地図画面の見やすさを評価する。

(3) 提示方法

Fig. 11に，提示される地図画面の一例を示す。これは，ナビゲーション地図画面（1種類）を，従来方式と提案方式の2通りによって，画面の左右半分ずつに表示したものである。提示画面は，Fig. 11に示したものの以外に，左右を入れ換えたものと，ダミーとして左右同じものを準備した。提示タイミングは客観評価の場合と同様である。被験者は1秒間のみ提示される地図画面を視認し，後述する評価方法による評点を答える。これを被験者1名当たり10回繰り返す。

(4) 評価方法

想定した走行環境下において，提案方式が従来方式に比べてどの程度見やすくなるかを検証するため，被験者には「画面の左側を基準とした右側の見やすさ」を5段階で評価してもらった。評価内容は，明るさとコントラストの観点からみた画面全体の見やすさとした。5段階の尺度は，テレビの画質評価法に準拠した評価尺度法¹⁶⁾に基づき，「非常に見やすい」，「見やすい」，「同程度」，「見づらい」，「非常に見づらい」とし，被験者の評点をそれぞれ5～1で表した。評価結果においては，この

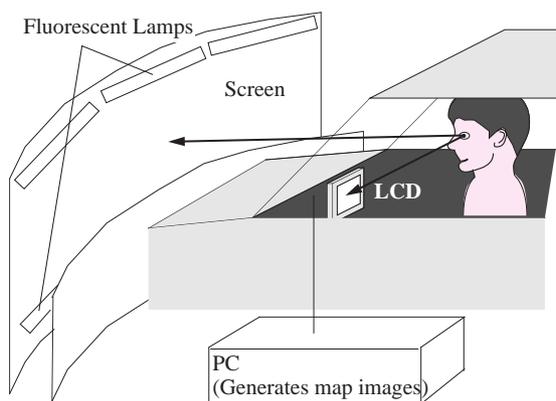


Fig. 10 Experiment setup for the subjective evaluation.

評点を「従来方式に対する提案方式の見やすさ」に換算（左側に提案方式，右側に従来方式を並べた画面の評価に対しては2を4に，1を5に読み替える）した。

5. 実験結果と考察

5.1 客観的評価法

Fig. 12に，客観評価実験の結果を示す。これは晴天昼間の積雪面走行を想定し，従来方式と提案方式による表示での空間周波数特性を示したものである。さらに，比較のために，従来方式による晴天昼間のアスファルト路面を場合の空間周波数特性も示している。

ナビゲーションシステムの画面に代表される車載ディスプレイでは，空間周波数で1～10cpdの範囲の視認性向上が重要である。これは，ディスプレイの解像度が20cpd程度，ナビ画面上での文字の大きさが16～24ドット，また，道路の太さが2～4ドットであることから，この周波数領域での見やすさの改善が重要なためである。

実験結果によると，提案方式による積雪面における空間周波数特性は，従来方式の空間周波数特性に比べ1.5～2倍のコントラスト感度の上昇が見られた。提案方式による空間周波数特性は，アスファルト路面でのそれにほぼ匹敵しており，提案方式による表示は積雪面を走行中でもアスファルト路面走行と同等の見やすさとなっていることを示しており，目標とする視認性が得られていることが確認された。

5.2 主観的評価法

Fig. 13に，主観評価実験の結果を示す。この図

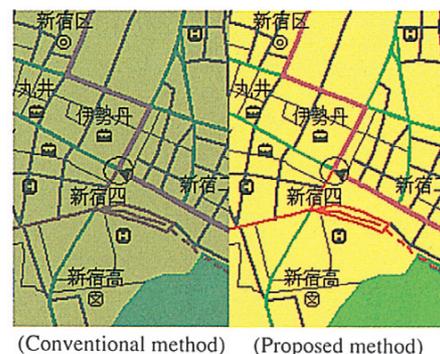


Fig. 11 An example of the map image.

は、被験者による評点（従来方式に対する提案方式の見やすさ）の平均値と標準偏差を被験者ごとに示したものである。

全ての被験者で、従来方式より提案方式の方が見やすいという結果になった。被験者5名の平均評点は、3.9であった。被験者ごとの評点の違いもほとんどなく、さらにどの被験者も見やすいとの結果から、提案方式の方が従来方式より有意に見やすいと考えられる。

晴天時の積雪面走行のように、前方注視時の順応輝度が高くなると、従来方式による表示ではデ

ィスプレイがかなり暗く見えるのに対し、輝度に加えて彩度を補正する提案方式では主観評価でもかなり効果的であることが確認された。

6. むすび

自動車は様々な環境条件下を走行する。車載ディスプレイは、どのような環境条件の下でも視認性が高い表示が望まれる。晴天時の太陽光下の雪道走行は、車載ディスプレイが見難い条件の一つである。このような高輝度環境下での新しい車載ディスプレイの表示方式を提案した。

この方式は、走行中の車外の輝度を検出し、目の順応特性に基づいてディスプレイ表示の輝度と彩度を制御した補正表示をする方法である。提案した表示方式を縞模様パターンを被験者に提示する客観的評価実験と実際のナビゲーション画面を提示する官能評価による主観的評価実験により、この方式の有効性を検証した。その結果、どちらの評価実験においても提案した方式が従来の方式に比べて相当の視認性改善が認められ、この方式が高輝度の環境条件下での車載ディスプレイの表示方式として非常に有効であることが示された。

今後に残された課題は、夜間の低輝度環境も含め様々な環境条件に対応できるより視認性の高い表示方式を開発することである。

参考文献

- 1) 田淵義彦, 中村肇: "サインの視覚的所要条件", 照明学会誌, 76-1(1992), 8

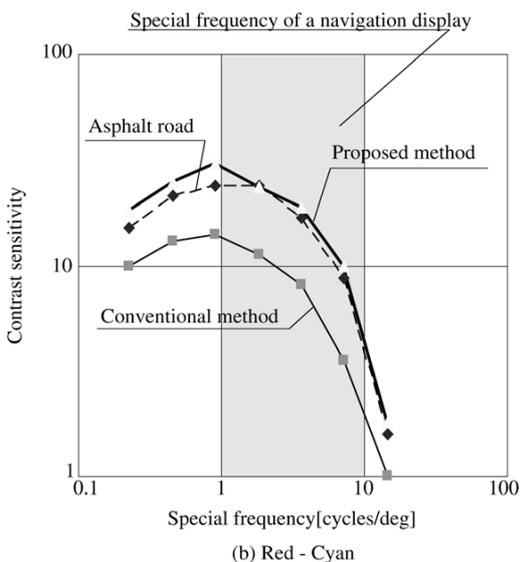
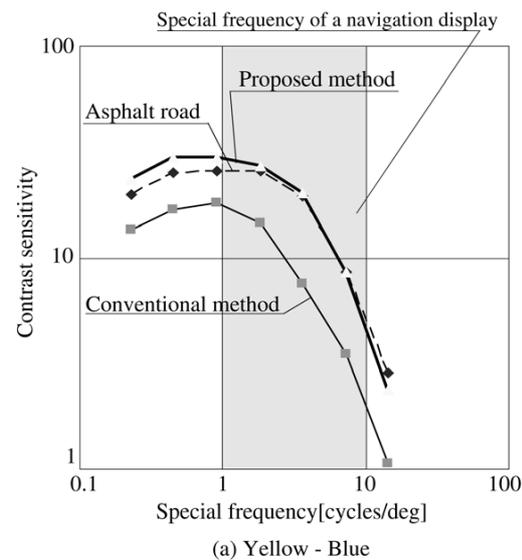


Fig. 12 Experimental results of the objective evaluation.

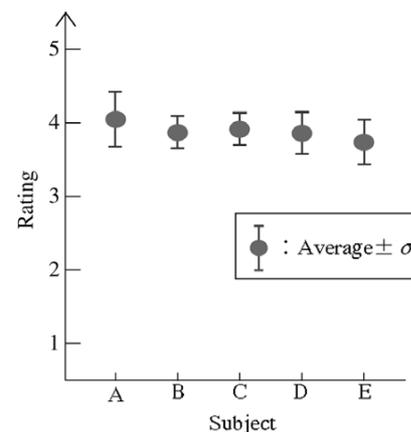


Fig. 13 Experimental results of the subjective evaluation.

- 2) 宮前あつ子, 武内徹二: "街路・防犯照明における顔の見え方と照明レベル", 照明学会誌, 73-6(1989), 303
- 3) 窪田悟: "透過型液晶ディスプレイに求められる表示輝度とコントラストの条件", テレビジョン学会誌, 50-6(1996), 768
- 4) 池田勇, 杉本賢: "VDT作業における視覚条件と生理的負担", 照明学会誌, 90-6(1990), 321
- 5) 梅田幸彦, 東重利, 今井豊: "デジタルメータの光学特性について", 自動車技術会論文集, 43(1990), 134
- 6) Kimura, K., Osumi, Y. and Nagai, Y.: "CRT Display in Automobiles", Ergonomics, 33-6(1992), 707
- 7) 坂口靖雄, 中野倫明, 山本新: "自動車用ディスプレイにおける視認性評価とその応用", テレビジョン学会誌, 50-11(1996), 1760
- 8) Stevens, J. C. and Stevens, S. S.: "Brightness Function: Effects of Adaptation", J. Opt. Soc. Am., 53-3(1963), 375
- 9) Crawford, B. H.: "Visual Adaptation in Relation to Brief Conditioning Stimuli", Proc. Royal Society, 134(1947), 283
- 10) テレビジョン学会編: テレビジョン画像の評価技術, (1988), 91, コロナ社

著者紹介



坂口靖雄 Yasuo Sakaguchi

生年: 1965年。

所属: 視聴覚情報研究室。

分野: 自動車におけるヒューマンインタフェース分野の研究開発。

学会等: 電子情報通信学会, システム制御情報学会, 映像情報メディア学会会員。



樋口和則 Kazunori Higuchi

生年: 1962年。

所属: 視聴覚情報研究室。

分野: 自動車におけるヒューマンインタフェース分野の研究開発。

学会等: 電子情報通信学会, 電気学会, 情報処理学会会員。



中野倫明 Tomoaki Nakano

生年: 1956年。

所属: 視聴覚情報研究室。

分野: 自動車におけるヒューマンインタフェース分野の研究開発。

学会等: 電子情報通信学会, 電気学会, 映像情報メディア学会, 自動車技術会会員。
工学博士。



山本新 Shin Yamamoto

生年: 1942年。

所属: システム2部 (1998年3月末にて退社)。

分野: 画像処理による計測・検査分野。自動車におけるヒューマンインタフェース分野の研究開発。

学会等: 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, 映像情報メディア学会会員。
工学博士。