自動車用ヘッドアップディスプレイにおける 前景情報と表示情報の認識について

正会員 岡林 繁* 古川 政光* 坂田 雅男* 正会員 畑田 豊彦**

Driver's Ability to Recognize the Forward View and Head-up Display Images for Automobiles

Shigeru Okabayashi (Member)*, Masamitsu Furukawa*, Masao Sakata*

(Electronics Research Laboratory, Central Engineering Laboratories, Nissan Motor Co., Ltd.)

Toyohiko Hatada (Member)**

(Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnics)

ABSTRACT

Although originally developed for aircraft use, head-up displays have found application in automobiles recently. A system for evaluating automotive HUDs has been developed which is based on the double task method and takes into account driving conditions. Seven kinds of correct response rates (CRRs) are defined as the evaluation standard. Using various kinds of HUDs evaluations are made focussing on the relation between the fineness of the images and the distance from a driver's eyes to the images. It can be concluded that the task of reading the HUD image rarely affects recognition of the forward view and is closely related to peripheral vision. This paper also discusses the index newly derived from the CRRs, which can represent the performance of HUDs. The results suggest there is an optimal fineness and distance to the HUD image.

1. はじめに

自動車走行中ドライバは、前景から種々の情報を取り入れると同時に、車内の表示装置から短時間に情報を取り込んでいる。表示装置の良否をマンマシンインタフェースの観点から見ると、短時間で表示情報を正しく視認できなかったり、表示情報の取り込みのため前景の視認が疎かになったりすることは、安全で快適な運転を実現する上で望ましくない装置と言える。

前景情報と表示情報を、ほぼ同時かつ短時間で受容処理する必要のある通常運転環境を想定した場合、ドライバの視覚情報処理過程は、前景からの情報受容をメインタスクと考え、表示情報の受容をサブタスクと考えたダブルタスクの試行と見做される。運転のために必要な情報の80%以上を視覚に依存していると言われる自動車走行¹⁾において理想的な表示装置を実現するということは、メインタスクである前景の視認性には影響を与えることなく、サブタスクである表示情報を正しく視認できるシステムを実現することと言える。

新しい自動車用ディスプレイとしてヘッドアップディスプレイ

(HUD)が検討され始めたのも、高齢者等のユーザの拡大や、増加する表示情報量に対応した、より確実な情報伝達システムが求められているために他ならない^{2), 3)}。

ヘッドアップディスプレイは、当初、戦闘機用表示装置として第二次大戦中に開発されたシステムである⁴⁾。航空機用ヘッドアップディスプレイについては、民間航空機への応用が検討され始めた頃から、NASAや各航空機メーカー等で装置を装着した航空機の操縦性や、目標ターゲットの見つけやすさ等について、多くの研究がなされた^{5), 6)}。しかしながら、前景視標の配置や種類、また、前景と表示像への注意の比重、ユーザのプロフェッショナルティ等の自動車走行・使用環境は、航空機のそれと比較して大きく異なる^{7), 8)}。特に自動車の場合、前景情報受容が常に優先され、表示情報受容が常に二次的であるが、航空機では前景情報と同等以上に表示情報のウェイトが大きい点が異なっている⁹⁾。ヘッドアップディスプレイの自動車への応用は、検討され始めてまだ日が浅いため、自動車の走行・使用環境を意識した前景と表示像との関係について、視覚光学の観点から論じた研究はまだ少ない^{10), 11)}。

筆者等は、先の論文^{12), 13)}で、通常走行を想定した時のヘッドアップディスプレイの視認環境条件を明らかにしてきた。

本論文では、それらの視認環境条件に基づいて試作した評価システムを用いて、ドライバの目と表示像との距離や、表示像の細

* 日産自動車中央研究所電子研究所

** 東京工芸大学工学部教授

本論文の一部は、平成2年度全国大会において発表した。

図 1 評価システム (上図は平面図, 下図は側面図)

図 2 評価システムのブロックダイアグラム

図 3 被験者側から見た前景スクリーン部 (N ; 実験前注視点, EE ; スネレン図形, 88 ; HUD 数字表示像)

かさ等のパラメータが、ヘッドアップディスプレイ表示像と前景の視認にどのような影響を及ぼすかを評価すると共に、ヘッドアップディスプレイを従来のヘッドダウンディスプレイと比較した場合の表示装置としての優位性についても述べる。

2. 評価システムの概要

評価システムの平面図と側面図を図 1 に示す。被験者の水平前方視野の中心を N とする。前景の構成は N を中心に、通常走行でドライバーの視点分布が 90 % 以上存在する。左右各 15 度、上下各 5 度の視野範囲¹²⁾に視標呈示ができるよう 9 つの CRT がスクリーン上に配置される構造をしている。スクリーンと CRT は、ともに被験者の目から 5 m の位置に設置されている。CRT の輝度は、市街地走行車の 80 % 以上が前照燈を点灯する路面輝度である約 2 cd/m² に¹²⁾、スクリーン面は中央部で約 2 cd/m²、周辺部で約 1 cd/m² に設定されている。

CRT には、前景視標として一対の黒色のスネレン図形 (図 4) が表示される。スネレン図形の背景は白地で、周囲のスクリーンとの色差を最小 ($\Delta E^*ab \leq 1.0$) に設定してある。

評価システムは、図 2 に示すブロックダイアグラムのように 6 つの部分から構成される。

- (1) 前景 (前景視標を表示する 9 台のカラー CRT と白色スクリーン)
- (2) ヘッドアップディスプレイ用緑単色 CRT
- (3) 表示像の距離や俯角を変化させる移動台と全反射ミラー
- (4) 片面無反射ハーフミラー
- (5) 色度計や輝度計測の計測系
- (6) システムを制御するコンピュータ

ヘッドアップディスプレイの表示像としては、2 桁数字を用い、表示色は航空機用、自動車用共に最も使われている緑色としている。CRT に表示された緑色の表示像は、全反射ミラーで反射された後、ハーフミラーで再度反射されて被験者の目に入る。被験者は、CRT 表示像の虚像を見ることになるが、移動台により被験者の目とヘッドアップディスプレイ表示像との距離は任意

に選択できる。また全反射ミラーの位置と角度とを変化させることによりヘッドアップディスプレイとヘッドダウンディスプレイのどちらかを選択する。ヘッドアップディスプレイ表示像が二重になるのを防ぐために、ハーフミラーは、裏面に反射防止膜のコーティングを施し、全反射ミラーは、表面反射鏡を用いている。

各種計測系は、前景スクリーンの輝度やスネレン図形のコントラスト、CRT 背景とスクリーンの色差計測のための色彩輝度計と、被験者の視点停留時間計測のためのアイマークカメラ等から構成されている。

制御系はヘッドアップディスプレイと前景視標用の、10 組の CRT の表示像を制御するサブコンピュータと、評価システム全体を制御するホストコンピュータで構成されている。サブコンピュータは、各種表示像を作成すると共に、被験者の目から表示像までの距離に応じて表示像サイズを変え、視標の視角が一定になるように制御している。ホストコンピュータは、設定パラメータである前景輝度 (CRT とスクリーン)、色差 (CRT とスクリーン)、スネレン図形のコントラスト、表示像までの距離、被験者の条件、各種条件下の正答率を記憶・処理する。

スネレン図形を呈示する CRT の選択と図形の開口部の方向は、一様乱数によりホストコンピュータで制御される。スネレン

図 4 前景視標 (スネレン図形対)

図形の大きさや表示タイミング等も、ホストコンピュータにより制御される。システム構成品の主な仕様を表 1 に示す。

評価システムは光学暗室に設置され、被験者から見てスクリーン部以外の光輝物は除くと共に周囲を黒色暗幕にしている。図 3 は、被験者の位置から、ハーフミラーを通して前景スクリーン部を見た写真である。中央部の CRT に一対のスネレン図形 (図 4) が表示されており、その近傍にヘッドアップディスプレイ表示像の 2 桁数字 (図 5) と実験開始時に注視する N 点が見える。

3. 実験条件

3.1 前景視標とヘッドアップディスプレイ表示像

前景視標としては前照燈評価で用いられる黒色または灰色の正方形現標 (CIE 1982)¹⁴⁾と同様の形状で、かつ視力定量評価に広く用いられているスネレン図形を用いている (図 4)。白地に黒色表示で白地背景地に対するスネレン図形の輝度対比^{*}は、0.80 ~ 0.85、図中の a は、表示像のセグメント線幅を示し、予め被験者によって、正規化されている (詳細実験手順参照)。

ヘッドアップディスプレイ表示像は前景視標と読み取り時の干渉を避けるため、7 セグメント構成の 2 桁数字を用いた (図 5)。図中の b は、表示セグメントの線幅である。線幅は、被験者の目から見て、視角 1.0、2.0、3.5、6.0 mrad の 4 種類を選んだ。前景に対するヘッドアップディスプレイ表示像の輝度対比^{**}は、1.2 ~ 1.5、表示色は緑色である。表示像までの距離は、被験者の目から、0.7 ~ 5 m、表示装置の種類として俯角 0 度に相当するヘッドアップディスプレイと 20 度に相当するヘッドダウンディスプレイ (HDD) 2 種を選んだ。実験での各条件を表 2 に示す。

3.2 視標呈示タイムチャート

Heintz や Haller, Bouis 等によれば⁹⁾、ドライバの視覚情報処理過程は、前景からの情報受容が常に優先的タスクで表示情報の受容は二次的タスクであると言われる。本実験では、前景からの情報受容を必須のタスク (メインタスク) とし、このタスクに表示情報の受容のタスク (サブタスク) を重畳することによりメインタスク遂行への影響とサブタスク遂行の度合いを評価することにより表示装置の良否を評価すると言う考え方を採った。この考え方に基づいて定めた 1 試行における前景視標 (スネレン図形) とヘッドアップディスプレイ表示像の表示タイミングチャートを図 6 に示す。1 試行は、ブザー音で開始され、1 秒後スネレン図

図 5 ヘッドアップディスプレイ表示像

表示像の仕様

セグメントの線幅 視角; b (mr)
6.0
3.5
2.0
1.0

表 1 評価システム構成品の主な仕様

構 成 品	主 な 仕 様
前景 (CRT スクリーン)	9 台の 15 インチ CRT (左右 15 度、上下 5 度) 白色スクリーン 5 m (CRT; 背景白地との色 差; $\Delta E_{ab} \leq 1.0$)
コンピュータ	ホストコンピュータ (16 ビット; HP9000) サブコンピュータ (16 ビット NECPC98)
表示像	14 インチ CRT 像の虚像 (0.34 mm スポット 径モノクロ緑色)
移動台	表示像距離: 0.7 ~ 5 m
表面鏡	俯角: 0 ~ 20 度
計測系	輝度計 (Spectral 980) 照度計 (Minolta) 色差計 (Topcon; BM 5) 照明器
ハーフミラー	片面無反射加工 (表面反射像と裏面反射像の 輝度比 $\leq 1/15$), 45 度傾斜

形を呈示、0.3 秒遅れてヘッドアップディスプレイ表示像が、0.5 秒表示される。最初の 1 秒は、被験者の瞬目を避けるためと注意力の統制のためで、次の 0.3 秒は、前景視標の検索のための視点停留時間内に、ヘッドアップディスプレイ表示像を被験者が見ないようにするためである¹⁵⁾。2 種の表示像の呈示時間は、通常走行時、ドライバが前景やメータ等の表示像を注視する代表的な時間^{16), 17)}を考慮すると共に、スネレン図形の正答率の飽和を避けるため 0.8 秒と 0.5 秒に設定した。

1 つの測定データを得るために、100 回以上の試行を繰り返している。100 回の試行を正答、誤答の繰り返し、ベルヌーイ試行と見做し、試行回数と正答率との関係を示すと図 7 のようになる。数十回を越えた時点で正答率は安定し始める。ベルヌーイ試行の多数回の繰り返しを正規分布近似し、5% の危険率で信頼区間を推定すると、約 8% となる。実験では、正答率の $\pm 5\%$ 変動を目処に安定したデータとした。また、被験者の疲労の効果を除くため、各試行毎に 2 ~ 3 分の休憩を取るとともに、正答率曲線を常時モニタし、データをチェックした。

3.3 視点停留時間計測

ケース 1 として線幅 b が 3.5 m rad、表示像の距離 5 m、俯角 0 度のヘッドアップディスプレイの場合、ケース 2 として線幅 b が 3.5 m rad、表示像の距離、0.7 m、俯角 20 度のヘッドダウンディスプレイの場合の 2 つのケースについて前景視標と表示像上の視点停留時間を計測した。

3.4 被 験 者

被験者は、運転免許を有する両眼視力 0.7 以上の男子、10 名。半数の 5 名は 20 代から 30 代前半の若年齢者層のグループ、残り

* スネレン図形の輝度対比 = (背景輝度 - スネレン図形輝度) / (背景輝度 + スネレン図形輝度)

= (CRT 白地面輝度 - スネレン図形輝度) / (CRT 白地面輝度 + スネレン図形輝度)

** ヘッドアップディスプレイ表示像の輝度対比 = 表示像のみかけの輝度 / 前景輝度
= (表示像輝度 + 前景輝度) / 前景輝度
= (表示像輝度 + コンバイナ越しに見た CRT 白地面輝度) / コンバイナ越しに見た CRT 白地面輝度

表 2 実験条件

項目	実験条件
前景	スネレン図形対
表示位置	被験者から 5 m 9 箇所 (左右 15 度, 上下 5 度, 中央)
スネレン図形の 輝度対比	0.80~0.85
前景輝度	1~2 cd/m ²
表示像輝度	0.2 cd/m ² (平均)
表示色	白地黒色
表示像サイズ	被験者に応じて正規化
表示	表示像
表示像の距離	被験者の目から 0.7~5 m
表示装置の種類	ヘッドアップディスプレイ (俯角 0 度) ヘッドダウンディスプレイ (俯角 20 度)
表示像輝度	0.8 cd/m ² (平均)
表示色	緑色 (色度座標 $x=0.26, y=0.62$)
表示像サイズ	セグメント線幅で 1.0, 2.0, 3.5, 6.6 mrad の 4 種

表 3 被験者リスト

	被験者名	年齢	視力 (右/左)	スネレンサイズ (α mrad)
高齢者層のグループ	K.S.	61	0.7/0.7	1.16
	M.T.	50	1.0/1.0	0.48
	I.K.	48	1.0/1.0	0.60
	B.S.	45	1.0/1.0	0.64
	S.A.	43	0.8/0.8	0.72
若年齢者層のグループ	M.F.	34	1.0/1.0	0.60
	S.H.	26	1.2/1.2	0.60
	K.T.	25	1.2/1.2	0.48
	Y.N.	24	1.0/0.8*	0.60
	H.S.	21	1.5/1.5	0.44

* 眼鏡による矯正視力

の 5 名は 40 代から 60 代前半の高年齢者層のグループの二つのグループを選んだ (表 3)。

4. 実験手順

実験は、つぎの手順で行なった。

4.1 準備

- (1) 前景輝度や色差, スネレン図形とヘッドアップディスプレイ表示像の輝度対比等, 評価システムのパラメータを設定する。
- (2) オートレフラクトメータにより屈折状態を含めた被害者の視機能 (視力等) を計測する。
- (3) 被験者の目を環境に順応させる (約十分間)。
- (4) 計測に慣れるため, 50 ~ 100 回の反応練習の正答率をチェックして, 安定度を調べる。(被験者は中心点 N を注視し, ブザーの合図後, スネレン図形の方角を口頭で答える。)
- (5) 各被験者の視機能データから, 2 種類のスネレン図形を選択する。
- (6) 選択したスネレン図形をそれぞれ 100 回ずつ呈示し, 正答率が 80 % になるスネレン図形サイズを内挿法により求める。

表 3 に各被験者のスネレン図形の方角のサイズを b (視角) で示す。

4.2 実験

- (1) 被験者は, 表示像にも慣れるため 25 ~ 50 回の練習を本実

図 6 タイムチャート

図 7 正答率と試行回数

- 験に先行して行なう (被験者は, 中心点 N を注視し, ブザーの合図で, まずスネレン図形を, 次いで, 表示像を見, 口頭で二つのスネレン図形の方角, 二桁の数字の読みを答える)。
- (2) 表示像の条件を種々に変化させ, 各種の正答率を計測, 評価する。各条件でのデータは, 100 回以上の試行に基づいて決定する。
 - (3) 表示像の条件の内, ケース 1 とケース 2 については, 被験者にアイマークカメラを装着させ, スネレン図形と表示像のそれぞれの視点停留時間を計測する。

5. 評価パラメータ

前景視認が確実に行なわれ, かつヘッドアップディスプレイの情報を正確に捕えられる度合いを評価するため, 評価パラメータとして, 次の 7 種類の正答率を定義し評価した。

- (1) η_{s0} ヘッドアップディスプレイの表示像がない場合の前景視標 (スネレン図形) のみの正答率。各実験では, 初期値として 80 % になるようスネレン図形の方角を正規化した。
- (2) η_{i0} スネレン図形の表示がない場合のヘッドアップディスプレイ表示像のみの正答率。ほぼ, 100 % であった。
- (3) η_{s+H} ヘッドアップディスプレイとスネレン図形の両方が呈示されたとき, 両方共正答する率。
- (4) η_s ヘッドアップディスプレイとスネレン図形の両方が呈示されたとき, スネレン図形の方に着目した正答率。
- (5) η_H ヘッドアップディスプレイとスネレン図形の両方が呈示されたとき, ヘッドアップディスプレイ表示像の方に着目した正答率。

図 8 正答率 (全平均)

(6) η_{HIS} ヘッドアップディスプレイとスネレン図形の両方が呈示されたとき、スネレン図形が正答した内でヘッドアップディスプレイ表示像が正答した割合、前景を視認するという負荷が存在するときのヘッドアップディスプレイの見やすさの尺度を与えと考えられる。実験では、前景視標の正答率を80%に正規化しているが、通常走行のように、前景視標を完全に認識することが要求されるケースでは、ヘッドアップディスプレイの視認性(正答率)は、 η_{HIS} そのものの値であると考えられる。

(7) $\eta_{S|H}$ ヘッドアップディスプレイとスネレン図形の両方が呈示されたとき、ヘッドアップディスプレイ表示像が正答した中でスネレン図形が正答する割合、この値が低いことは、被験者がインストラクションを守らなかったり、ヘッドアップディスプレイの表示像が先に見えてしまったケースと考えられるが、本実験では極めて高い値に維持されていた。

当然のことながら、条件付き確率の関係式から、 $\eta_{S|H}$ や、 $\eta_{H|S}$ 等は、次の式で表され、基本的には、 η_{S0} 、 η_{H0} 、 $\eta_{S \cdot H}$ 、 η_S 、 η_H の5つの値を求めればすべての正答率が知れる。

$$\eta_{S|H} = \frac{\eta_{S \cdot H}}{\eta_H}$$

$$\eta_{H|S} = \frac{\eta_{S \cdot H}}{\eta_S}$$

6. 実験結果

6.1 ヘッドアップディスプレイとヘッドダウンディスプレイ

表示像までの距離0.7mで、俯角0度であるヘッドアップディスプレイと俯角20度であるヘッドダウンディスプレイについて、正答率を計測した。計測結果の平均を年齢層別に表4に示す。表示像線幅サイズの大小による正答率の影響は、若干みられるものの、若年者層、高齢者層ともに、ヘッドアップディスプレイの正答率は、ヘッドダウンディスプレイのそれより高い。

6.2 正答率の距離依存

表示像の視認にどのような影響を与えるか、また前景視認をメインタスクにした場合、表示情報がどの程度正しく視認できるかを見るために、被験者の目から表示像までの距離を横軸に、 η_S

と $\eta_{H|S}$ とを、縦軸にプロットした。被験者全員の平均値を図8に示す。ドライバ(被験者)は、メインタスクの正答率 η_S を低下させることなく、表示情報を受容している。ヘッドアップディスプレイ表示情報を正しく認識できる目安を与える $\eta_{H|S}$ については、表示像までの距離が前景に近いほど良好である。

6.3 若年齢者層と高齢者層との比較

若年齢者層と高齢者層の2つのグループについて、 η_S と $\eta_{H|S}$ について各被験者の値と平均値を各層ドットと実線でそれ

表 4 ヘッドアップディスプレイとヘッドダウンディスプレイの正答率 ($\eta_{H|S}$)

表示の種類	文字の線幅 (b)				
		1.0mrad	2.0mrad	3.5mrad	6.0mrad
ヘッドダウン ディスプレイ (俯角 20度)	若年齢者層	0.2	3.6	10.0	18.0
	高年齢者層	0	0	0.4	3.2
	全平均	0.1	1.8	5.2	11.0
ヘッドアップ ディスプレイ (俯角 0度)	若年齢者層	2.2	13.2	23.4	31
	高年齢者層	0	0.6	2.6	6.4
	全平均	1.1	6.9	13.0	18.7

ぞれ図9、10に示す。 η_S では、両グループに差はみられないが、 $\eta_{H|S}$ については、異なった特性を示す。大まかに言って、若年齢者層では $\eta_{H|S}$ 自体が高い値を示すばかりでなく表示像の距離依存性も小さいが、高齢者層では $\eta_{H|S}$ 自体が低い値を示すばかりでなく距離依存性が高い。表示像までの距離0.7mでの $\eta_{H|S}$ の値に対する表示像を遠方5mに設けることによる $\eta_{H|S}$ の改善の程度を改善率($\Delta \eta_{H|S} / \eta_{H|S}(0.7m)$)で表現し表5に示す。高齢者層での改善率が若年齢者層に比較して高い。これは、高齢者では短時間視標判定の応答性の低下に加え、目の焦点調節応答の低下が原因と考えられる。

表示像の線幅が1mradのようにあまりに微細過ぎると、表示像を遠方に設けることによる正答率改善の効果は少なくなり、また、表示像の線幅が6mradのように十分に広く大きい場合にも、同様にこの効果は少なくなる。即ち、適当な線幅の領域では、表示像を遠方に設ける遠方結像型ヘッドアップディスプレイが望ましいが、極端に大きい(または、小さい)表示像では、表示像までの距離が第一義的な設計パラメータにはならないことを

図 9 正答率 (高齢者層平均)

図 10 正答率 (若年者層平均)

表 5 正答率の改善率
($\Delta \eta_{HIS} / \eta_{HIS}$)

線幅 b (mrad)	全平均	若年齢者層	高年齢者層
6.0	1.4	0.87	3.7
3.5	1.8	0.86	7.2
2.0	2.5	0.92	8.0
1.0	0.75	0.66	1.0

示唆している。

6.4 前景視標の視野位置による正答率の差

表示像までの距離 5 m、線幅として既に市販されている自動車用ヘッドアップディスプレイ表示像 (デジタル車速表示) に相当する 3.5 m rad の場合について、9 つの CRT の位置による η_s 、 η_{HIS} を計測し、図 11 に三次元的に示す。N 点に近い位置が正答率は高く、N 点から離れるに従い、正答率は低下してくる。

6.5 視点停留時間

前景視標のスネレン図形とヘッドアップディスプレイ表示像上の視点停留時間、 T_s と T_H の計測結果を表 6 に示す。停留時間はアイカメラの記録画面から、コマ 33 m sec としてコマ数読

図 11 CRT の位置による正答率 ($a=3.5$ mrad, $L=5$ m, $\theta=0$ deg.)

表 6 視点停留時間

	視点停留時間<秒>	
	T_s スネレン図形	T_H HUD
ケース 1 < $b=3.5$ mrad., 距離 5 m, 俯角 0 度>	0.39(0.06)	0.15(0.05)
ケース 2 < $b=3.5$ mrad., 距離 0.7 m, 俯角 20 度>	0.36(0.05)	0.14(0.06)

()内は標準偏差

み取りにより計測した。 T_s は、スネレン図形が正答したときのみカウントし、 T_H は、スネレン図形とヘッドアップディスプレイ表示像ともに正答したときのみカウントした。表示像の線幅は、全て 3.5 m rad をとり、ケース 1 では表示像の距離を 5 m、俯角を 0 度、ケース 2 では表示像の距離を 0.7 m、俯角を 20 度とし、目の焦点調節、視線移動の両方の観点から、最も負荷の軽いタスクと最も重いタスクについて評価した。結果は、タスクの軽重に関わらず視点停留時間には大きな差は認められなかった。

7. 良さの指数 (Merit Index)

ヘッドアップディスプレイの良さを評価するため、つぎのような考えから良さの指数を定義した。まず、前景情報とヘッドアップディスプレイの情報の両方が正しく認識できることが、基本的には、表示装置の良否を決めると考えるのが自然である (情報受容の相互作用)。また、ヘッドアップディスプレイ表示像が存在しなかった時と同じ程度に前景情報を正しく視認できれば、優れた表示装置と考えられる。同様に、前景情報を取り込んでも、前景の情報を認識する必要がない時と同程度にヘッドアップディスプレイ表示情報を正しく視認できれば、優れた表示装置と考えられる。

一方、同じ表示情報を伝えるならば、表示エリアが大きい表示像の方が、表示情報は正しく視認できるはずである (表示条件の許容範囲)。したがって、表示エリアの効果を除いて表示装置の良否を論ずるためには、ドライバの目から見た、表示エリアに対する立体角当たりの表示情報量で正規化した値により比較する必要がある。これらの観点から、最も優れた表示装置とは、前景情報の認識に影響を与えることなく、最小の表示エリア内に、最大の表示情報を、瞬時に正しく伝達できるシステムであると考えられる。

以上の考え方に立つて、表示装置の良さの指数を、次の式で表現してみる。表示情報量を Q 、ドライバの目から見た表示エリアが張る立体角を Ω とすると、

$$\text{Merit Index} = \frac{Q \eta_{s \cdot H}}{\Omega (W_1 + W_2)} (W_1 \frac{\eta_s}{\eta_{s0}} + W_2 \frac{\eta_H}{\eta_{H0}})$$

ただし、 W_1 、 W_2 は、走行状態や表示内容によって決まる重み定数である。

図 8 に示した正答率の値から、代表的な仕様のヘッドアップディスプレイの良さの指数を求めてみる。仮に $W_1 = W_2 = 1$ とすると、表示情報は全て同一なので、相対値のみの比較ならば、 Q は、便宜上 1 と置いても一般性を損わない。線幅の二乗が表示エリアに比例する本実験で用いた表示像のような例では、 Ω が表示像の線幅の二乗に比例する。概算値を計算し表 7 に示す。線幅 2 m rad で設計された遠方結像型ヘッドアップディスプレイが最も良さの指数が大きい。前述した改善率が同じ 2 m rad で最大にな

表 7 良さの指数 (Merit Index)

表示像の種類 (表示像の距離)	文 字 線 幅 (b)			
	1.0 mrad	2.0 mrad	3.5 mrad	6.0 mrad
ヘッドダウンディスプレイ 0.7 m	82	38	35	27
ヘッドアップディスプレイ 0.7 m	89	140	87	44
2.5 m	57	230	150	75
5.0 m	220	500	270	130

ることを考慮すると、良さの指数が最大となる表示装置では表示像の距離の効果の寄与が大きいのことを示唆している。関数の形や重み係数 $W1$, $W2$ については、詳細な官能評価結果を待たねばならないが、文字サイズと表示像の距離のトレードオフにおける一つの尺度を与える可能性が見られる。

定性的に言えば、細かい表示、微細な表示像は単位面積当たりの表示情報量は大きい、正答率に見られる情報伝達効率が低くなる。この情報伝達効率を改善する最も有効な方法が表示像を遠方に設けることと解釈される。

8. 考 察

ヘッドアップディスプレイの表示像を、前景と同程度の遠方に設けることにより、前景視標と表示情報の両方の正答率が維持・向上することは、目の調節力や調節の応答時間の差が大きな要因と考えられる。高齢者層のグループと若年者層のグループの比較データから見て、高齢者での改善率が高いことから、ヘッドアップディスプレイは、高齢者や疲労状態にあるドライバ等に有効な表示装置であるといえる。また、全平均のデータで改善率を見ると、2 m rad の線幅が最も改善率が高いことが分かる。これは、表示像距離を前景に近付けることによる表示装置としての“良さ”が 2 m rad の線幅で最も顕著であると解釈できる。

一様分布を持つ確率で 9 つの CRT の位置にスネレン図形が現われるとして、スネレン図形と表示像間の平均の距離を視覚で算出すると、ヘッドアップディスプレイで 11.4 度、ヘッドダウンディスプレイで 22.8 度となる。ドライバが前景視標を中心視で捕えたとき、ヘッドアップディスプレイはヘッドダウンディスプレイに比べて、表示像がより注視点に近い周辺視野にある。また、図 11 では前景視標が表示像と離れている位置の正答率 (η_{HIS}) は低く、近い位置の正答率が高い。これらのことを考慮すると、ヘッドアップディスプレイで高い正答率が得られるのは周辺視による知覚が大きな役割を果たしていると考えられる。

最も軽いサブタスクであるヘッドアップディスプレイ (ケース 1) と最も重いサブタスクであるヘッドダウンディスプレイ (ケース 2) とでは、正答率に大きな差があるにもかかわらず、正答した場合の視点停留時間に殆ど差は見られない (表 6)。この実験では、タスクの軽重は視線移動距離と表示像距離の差である。タスクの軽重によらず、停留時間はほぼ等しいが正答率が異なるということは、線幅は十分大きい視標を用いていることを考えると、各視標を中心視で捕えた時の目の調節応答遅れによる視標のボケの効果だけではなく、中心視標を注視しているとき周辺視標からどれだけの情報を得ているかが、正答率の高低に寄与していると考えられる。データの中には表示像上の視点停留時間が 0

(正確には 33 m sec 以下) でも正答する場合も見られることも周辺視による知覚の役割りを示唆している。

自動車走行時、認識すべき要件数が、増加するに従いドライバの探索のための有効な視野が狭くなると言われている¹⁸⁾。ヘッドアップディスプレイの視認性がヘッドダウンディスプレイに比較して優位である理由が、ドライバが前景視標を探索・注視しているとき、その有効視野内に表示像が存在するため、周辺視の知覚によりある程度の表示像情報を受容していると考え、より複雑な現実の運転環境でヘッドアップディスプレイは極めて有効な表示装置であると言えよう。

各実験では、前景視標の正答率については、予め、80 % という臨界的値に設定している。ヘッドアップディスプレイ表示情報を受容するという新たな負荷をかけても、前景視標の正答率 80 % は殆ど低下しないことも、ヘッドアップディスプレイの表示情報を取り込むと言うプロセスと、前景情報を取り込むと言うプロセスが、直列のプロセスと言うより、並列のプロセスの比率が高いことを示唆していると考えられる。

ヘッドアップディスプレイとヘッドダウンディスプレイの比較の結果や前景視標の正答率の結果を考えると、一つのモデルが想定できる。まず、前景視標を中心視で捕える時、または捕え終わる時、予め表示位置が予測できるヘッドアップディスプレイ表示像を周辺視で捕え始める。この時、完全でないにしても、ある程度の情報は目は知覚し始めている。次に視点がヘッドアップディスプレイ表示像上に移動した後、情報は確実に知覚され認識される。前者の情報の知覚が正答率に寄与していることが推測される。

周辺視視力は、中心から周辺に行くほど急激に低下する^{19), 20)}。通常走行の場合ヘッドアップディスプレイの表示像は前景視標と異なる距離にある。目の焦点が中心視で前景視標に合っている時、周辺の視標であるヘッドアップディスプレイ表示像の知覚には、周辺視力による知覚能力の低下に加え、焦点の違いから起こるボケにより知覚能力が低下するという二つの因子が作用する。前景とヘッドアップディスプレイ表示像とを同一の距離に設定すれば、前者の因子のみの知覚能力低下を考慮すればよい。図 12 にモデルの概念図を示す。目は中心視で距離 L_0 にある中心の視標を注視している。図中の四角い平面上の文字が、認識できる限界の視標サイズを表している。

図 12 中心視と距離が異なる視標を周辺視で見た場合のモデル

るとすると、周辺 (θ が大) に行くに従い、あるいは前景視標からの距離 L が変化する ($|L_0 - L|$ が大) に従い、この文字の大きさが大きくなる三次元の配置図となる。即ち、短時間呈示の正答率が視力値と密接な関係があるとする、前景視標に近い視野内に存在するヘッドアップディスプレイ表示像の正答率は、中心からの角度 θ と、目からの距離 L の二つの要素で決定される三次元配置図と同様の形状を示すと考えられ、前景視標とヘッドアップディスプレイでの正答率の変化の様子が定性的に説明できる。今後これらの因果関係をさらに明らかにすると共に、表示像と前景視標が完全に重なった場合や表示像がより複雑になり表示によりアテンションが必要な場合等の前景視標視認等について研究・報告していきたい。

9. ま と め

(1) 前景情報と表示情報を、ほぼ同時かつ短時間で取り込む必要のある通常運転環境を想定したとき、この二つのタスクをダブルタスクプロセスと見做し、表示装置の視覚特性を評価する評価システムを試作した。システムをヘッドアップディスプレイに適用して、定量的な評価実験データを得た。

(2) 前景情報と表示情報とを正しくドライバに伝達する度合いは、ヘッドアップディスプレイの表示像の位置を、より前景に近く設けた方が優れている。これは、ドライバの目の遠近調節の低減効果と考えられ、高齢者層や疲労運転者等に有効と考えられる。

(3) ヘッドアップディスプレイでは、表示情報の取り込みにより、前景を正しく視認する能力はほとんど影響されないで、表示情報をかなりの正確さで認識することができる。即ち、表示情報を十分読み取れてかつ、表示情報受容の負荷が存在しないときと同程度、前景情報を正しく認識できるマンマシンインタフェースを実現できる可能性を示唆している。

(4) ヘッドダウンディスプレイに比較してヘッドアップディスプレイの視認性が優れているのは、ドライバにとって前景視標を検索・注視する際にヘッドアップディスプレイ表示像を有効視野内に捕えられる効果に負うところが多いと考えられる。

(5) 表示像の遠方結像や俯角を小さくすることによる正答率改善の効果は、視野による視力変化に加え中心の視標と距離が異なる、ボケのある視標の認識能力を考慮したモデルで解析できる可能性が示された。

参 考 文 献

- (1) 黒木康之、麻生勤：運転中のドライバ注視線測定の方法、自動車技術、Vol. 31, No. 7 (1977) 625
- (2) 岡林繁：自動車用計器、電子技術、Vol. 30, No. 12 (1988) 48~53
- (3) Okabayashi, S. and Chiba, M.: Recent Trend in Electronic Displays for Automobiles, Proceedings of 6th International Display Research Conference (1986) 1. 2
- (4) Phaneuf, R. J. and O'Brien, J. E.: Head-Up Display in Commercial Aviation, AIAA Aircraft Systems & Tech-

nology Meeting (1977) 77-1241

- (5) Short, D. C.: The Head-Up Display in Operation, 29th International Air Safety Seminar (1976) 194~207
- (6) Shorrock, M. A.: Problems with Displays in Modern Military Aircraft, Electronic Display'80 (1980) 27~36
- (7) Okabayashi, S., Sakata, M., Fukano, J., Daidoji, S., Hashimoto, T. and Ishikawa, T.: Development of Practical Heads-Up Display for Production Vehicle Application, SAE Transactions Vol. 98 Journal of Passenger Cars (1989) Section 6 638~647
- (8) 岡林繁：ヘッドアップディスプレイの自動車への応用、日産技報 (1989) 第 25 号 65~72
- (9) Stokes, A., Wickens, C. and Kite, K.: Display Technology, SAE Inc. (1990) 2~3
- (10) Weihrauch, M., Meloeny, G. and Goesch, T.: The First Head-Up Display Introduced by General Motors, SAE International Congress and Exposition (1989) 890288
- (11) Okabayashi, S., Sakata, M., Furukawa, M. and Hatada, T.: How a HUD Affects a Driver's Ability to Recognize the Foreground Objects in Automobile Use, SID 1990 International Symposium Digest of Technical Papers Vol. XXI (1990) 8. 2
- (12) Okabayashi, S., Sakata, M., Furukawa, M. and Hatada, T.: How HUDs Affects Recognition of Objects in Foreground in Automobile Use, Proceedings Current Developments in Optical Engineering and Commercial Optics Vol. 1168 (1989) 283~295
- (13) 岡林、坂田、古川、畑田：自動車用ヘッドアップディスプレイにおける視覚特性に関する考察、照明学会全国大会予稿集 (平成 2 年度) 97~81
- (14) 岩本貞雄、横井清和、谷口実、神峰雄：前照燈の性能基準に関する研究、昭和 59 年度自動車工業会受託研究報告 (昭和 60 年) 2
- (15) 笠井健：眼球運動の制御機構、計測と制御 Vol. 19, No. 8 (1980) 12~23
- (16) 村田隆裕、中村良夫：自動車運転者の注視点、交通工学 Vol. 5, No. 5 (1970) 3~12
- (17) Zwahlen, H. T., Adams Jr., C. and Schwartz, P., J.: Safety Aspects of Cellular Telephones in Automobiles, ISATA 18th International Symposium on Automotive Technology & Automation (1988) 88058
- (18) 三浦利章：高速走行における視野の問題、交通科学研究会資料 第 26 集 (1985) 201~204
- (19) 神作博：視力、感覚知覚ハンドブック、和田、大山、今井、誠信書房 (昭和 56 年) 259
- (20) 大頭仁：眼球の光学、生理光学、応用物理学会論、朝倉書店 (昭和 50 年) 64

(受付 1990 年 9 月 11 日)