研究報告

視覚特性に基づくディスプレイ表示法の開発

水野守倫，樋口和則，杉山和彦，中野倫明，山本　新

Display Technology Based on the Human Vision Properties

Morimichi Mizuno, Kazunori Higuchi, Kazuhiko Sugiyama,
Tomoaki Nakano, Shin Yamamoto

要　　旨

近年，ナビゲーションシステムをはじめとする車載情報機器が普及しつつある。今後も自動車の情報化の進展が予想され，車載ディスプレイ装置の視認性向上が重要な課題となっている。一方，高齢ドライバの増加に伴い，高齢者にも見やすいディスプレイは今後不可欠である。本報告では，若年者から高齢者までの幅広い年齢層のドライバに見やすいディスプレイを提供するため，年齢による視覚特性の違いを考慮したディスプレイの表示方式を提案する。この方式は，視覚特性 (空間周波数特性，分光特性) の生理計測データを用い，年齢に応じた視覚機能の低下を補う処理をした画像を表示する方法に加えて，空間周波数特性に基づいて，年齢に対応した最適な文字サイズで表示する方法である。文字画像を用いた可読限界の測定実験により，妥当性を検証し，本方式をナビ画像に適用した例について効果を確認したので報告する。

Abstract

In recent years, on-board information display equipment, including navigation systems, has been rapidly spreading. On the other hand, with the increasing number of elderly drivers, such displays as easy to see for elderly drivers are desired. In this paper, we propose a new approach to designing visual displays based on a human vision model. The proposed method is implemented by image processing techniques, which are intended to compensate the deterioration of human vision with age using visual properties; the spatial sensitivity of eyes, the spectral transmittance of crystalline lens. Images are processed by sharpening edges and by changing color balance, and the optimum character size is determined based on the human visual properties. The validity of the method was confirmed by measuring the minimum legible character size. We demonstrate the results applied to navigation images.

キーワード　ディスプレイ，表示，高齢者，文字，視覚特性，画像処理，人間工学，ITS

1．はじめに

近年，高度道路交通システム (ITS) の研究・開発が活発に行われ，自動車の情報化が急速に進展しつつある。ここ数年急速に普及したカーナビゲーションシステムでは，現在位置や経路案内の情報が提供[1)]され，さらに，渋滞，事故，旅行時間の情報など，安全で快適な運転を支援するための情報[2)]が提供されるようになってきている。このような情報の多くは文字や画像の表示により提供されるため，車載ディスプレイ装置 (以下，ディスプレイ) の見やすさの向上は重要な課題である。従来，ディスプレイの見やすさについては，運転環境の昼夜の明るさに応じた表示の輝度，コントラストや運転席における表示位置などについて，主として官能評価によって検討されてきたが[3，4)]，

見る側の人間の定量的な視覚特性に基づいて設計されたディスプレイは見当たらない。また，いずれも年齢差による視覚機能の違いを考慮していない。

一方，我が国は高齢化が急速に進展しつつあり，2020年には4人に1人は65歳以上という高齢社会が到来すると言われている。さらに，ライフスタイルの変化に伴って高齢ドライバの増加が予想され，高齢者を配慮した見やすいディスプレイの開発は今後不可欠と考えられる[5,6]。

本報告では，若年者から高齢者までの幅広いドライバに見やすいディスプレイを開発するため，年齢差による視覚特性の違いを考慮した表示方式を提案する。この方式は，視覚特性（空間周波数特性，分光特性）の生理計測データを用い，年齢に応じた視覚機能の低下を補った画像を表示する方法[7]に加え，空間周波数特性に基づいて，年齢に対応した最適な文字サイズで表示する方法である。以下では，その方式と有効性について述べる。

2．加齢による視覚機能の低下

自動車運転中の情報提供では，運転タスクとしての前方視界の確認を妨げないように情報内容を短時間に把握できることが最も重要である。ここでは，ディスプレイの視認性の点から画面の明瞭さが肝心である。加齢による視覚機能の低下を表す視覚特性には，空間周波数特性，分光特性，焦点調節特性，眼球運動特性，グレア特性などがある[8]。本稿では，表示画像の画質向上の点から，空間周波数特性と分光特性に基づくディスプレイの視認性向上を検討する。

空間周波数特性は網膜から大脳に至る視覚系の特性で，一般にコントラスト感度（明暗の縞模様を判別できる最小コントラストの逆数）と空間周波数（縞模様の細かさの程度，単位：cpd）との関数で表される。この関数は3～5cpdにピークを持つバンドパス特性で，年齢が高くなるにつれて高周波領域での感度が低下する[9]。

分光特性は水晶体の分光透過率と波長との関係を示したものである。高齢になると水晶体の黄色化により分光透過率は低下し，特に短波長光（青色成分の光）に対する透過率の低下が顕著になる[10,11]。高齢者の色知覚については，若年者に比べて赤や緑などの色を見た場合に黄色味を帯びた色に知覚されるとの報告もある。

3．視覚特性に基づく表示法

3．1　視覚特性に基づく表示画像の補正

Fig. 1は，視覚特性に基づくディスプレイ表示方式の考え方を示したものである。これは，二つの視覚特性（空間周波数特性，分光特性）の生理計測データを模擬した視覚特性Hから，年齢ごとの視覚機能の低下を打ち消す補正処理H^{-1}を予め計算しておき，その補正処理H^{-1}を原画像に施したものを表示する方法である。以下，補正処理された表示画像を補正画像と称し，補正画像をディスプレイに表示することを補正表示と呼ぶことにする。実際には，ノイズや処理の有限性から，視覚機能の低下を完全に打ち消すことはできず緩和する程度であるが，特に高齢者にとっては現状のディスプレイの表示をより見やすくする上で有効と考えられる。以下，二つの視覚特性についてそれぞれ補正表示の方法を説明する。

＜空間周波数特性＞

視覚の空間解像度の低下（視力の低下）は，網膜にピントが合わなくなること（焦点調節特性）と，網膜以降の視覚機能として高い空間周波数に対するコントラスト感度が低下すること（空間周波数特性）の両者によって起こる。ここでは，眼鏡などの補正手段を用いて網膜にはピントが合う状態で画像がぼけること，すなわち年齢ごとの空間周波数特性を検討する。ぼけた画像を補う処理として，画像細部の鮮鋭度を上げる方法と，画像

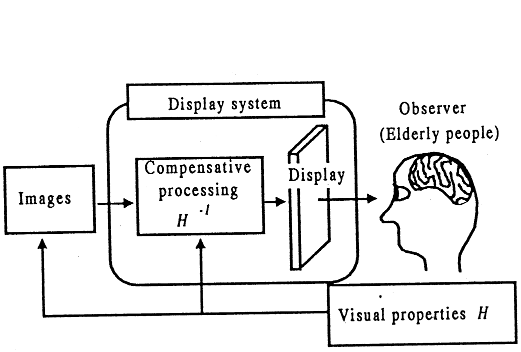


Fig. 1　Concept of improving visibility of display based on visual properties.

の解像度を高くする方法がある。

Fig. 2は，空間周波数特性に基づく鮮鋭度の向上方法を示したものであり，空間周波数特性の高域部分を高め，輪郭部分（エッジ）を強調して細部の明瞭さを向上させる方法である。

まず，周波数領域での空間周波数特性H_cを標準偏差σのガウス関数で近似する（Fig. 2(a)）。σの値は年齢に対応した値である。このとき，画像の比較的細かい部分（空間周波数が2～5cpd以上）を近似対象とする。年齢に応じたσと空間周波数fを変数として，H_cは式(1)で表される。

$$H_c(f) = \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma^2 f^2\right) \quad \cdots\cdots(1)$$

次に，空間周波数特性H_cの補正処理H_c^{-1}を式(2)によりモデル化する（Fig. 2(b)）。

$$H_c^{-1}(f) = \frac{H_c}{H_c^2 + B^2} \quad \cdots\cdots(2)$$

（B : dumping factor）

この式では，Bが0のときH_c^{-1}は視覚機能の低下を完全に打ち消す理想的な補正処理になることを表している。実際の鮮鋭度向上の処理として，ラプラシアンフィルタによるエッジ強調を考える。年齢に応じた強調の程度をkとすると，原画像$f(x, y)$と補正画像$g(x, y)$との関係は，

$$g(x, y) = f(x, y) - k \cdot \nabla^2 f(x, y) \quad \cdots\cdots(3)$$

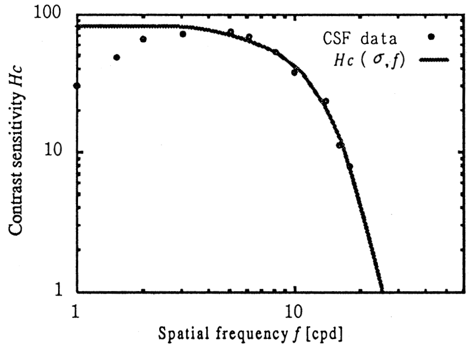
周波数領域では，

$$G(u, v) = \{1 + k(u^2 + v^2)\} \quad \cdots\cdots(4)$$

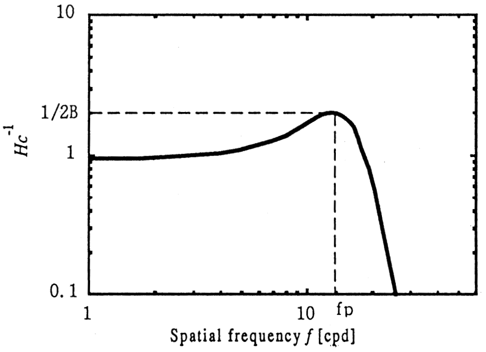
kの値を決めるため，Bを一定値として，上記モデルのH_c^{-1}に対してラプラシアンフィルタによる補正処理H_c^{-1}（$= 1 + k(u^2+v^2)$）の近似を行う（Fig. 2(c)）。このとき，Bの値は上記モデルにうまくフィッティングできるような値（ここでは0.25程度）を設定する。この結果，年齢ごとのkの相対値が求められる。kの絶対値を決めるため，基準となる年齢（ここでは60歳）の実際のkの値（k_e）を標準画像から推定する。標準観察者（若年者）が，基準となる年齢（高齢者）用の補正画像をその年齢の視覚特性H_cを通して見た画像と，原画像との2乗平均誤差を計算し，その誤差が最小となるようにk_eを求める。標準画像は，明暗の縞模様の間隔とそのコントラストを変化させた画像を用いることにする。先に求めた年齢ごとのkの相対値とk_eから，各年齢のkの絶対値を計算する。

＜分光特性＞

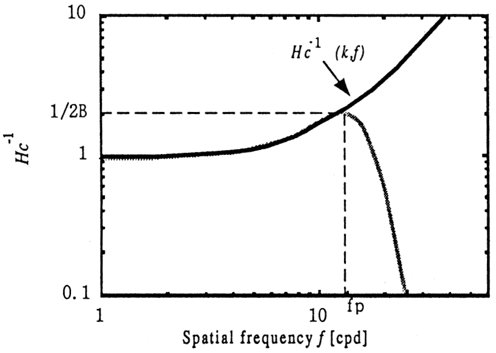
Fig. 3は，分光特性に基づくコントラストの補正方法である。基本的な考え方は，加齢による水晶体の分光透過率の変化を打ち消すような補正特性（色温度変換フィルタに相当）を通した画像を生成するというものである。ここで，$T_n(\lambda)$は年齢n歳の水晶体の分光特性，$T_c(\lambda)$は補正フィルタの



(a) Gaussian curve and the contrast sensitivity.



(b) Approximate inverse function of H.



(c) Approximation to H^{-1} by Laplacian filter.

Fig. 2 Method of improving sharpness based on the spatial sensitivity of eyes.

分光透過率である。補正フィルタの特性は網膜への入射光が補正フィルタなしの標準観察者の場合と同じになる条件から求める。網膜のRGB各チャンネルで知覚されるRGB値は，網膜細胞の感度特性と網膜への入射光の積の波長領域での積分で計算される。そこで，原画像を標準観察者の知覚するRGB値と仮定し，補正フィルタ$T_c(\lambda)$を通して標準観察者が見るRGB値をそれぞれ計算し，補正画像を作成する。

３．２　空間周波数特性に基づく文字サイズの決定法

車載ディスプレイの視認性向上のためには，適切な文字サイズで表示することが重要である。**Fig. 4**は，空間周波数特性に基づき解像度向上を図る試みとして，最適な文字サイズを決定する方法を示したものである。これは，文字を特徴付けている空間周波数帯域が年齢に応じた空間周波数特性における読み易い帯域（カットオフ周波数以下の帯域）となるように文字の大きさを変えることである。

まず，**Fig. 5**に示す空間周波数特性H_cから，最大コントラストの$1/e$のコントラスト感度に対応する空間周波数をカットオフ周波数f_c[cpd]と定義する。文字を判別できる最小分離視角θ_d[rad]は，最大コントラストの明暗縞模様を判別できる最も高い空間周波数f_{max}[cpd]から式(5)で求められる。

$$\theta = \frac{\pi}{360 \cdot f_{max}} \qquad \cdots\cdots(5)$$

一方文献[12)]から，最適文字視角（読み易さの点で最適なサイズの文字を見込む視角）θ_c[rad]は視距離に依らず最小分離視角θ_dのほぼ定数倍であることが報告されている。空間周波数f_{max}はカットオフ周波数f_cに比例するため，θ_cはf_cに反比例する。また，表示画面での最適な文字サイズQ_c[dot]は，画面サイズS[mm]，表示画素数N[dot]，視距離Z[mm]，および最適文字視角θ_cから，式(6)

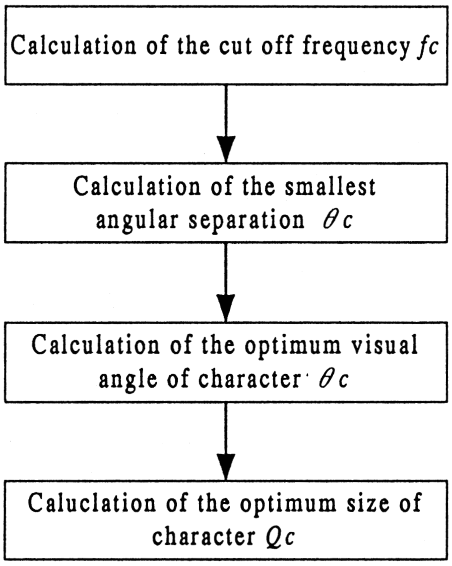


Fig. 4　Flowchart of determining the optimum character size based on the spatial sensitivity.

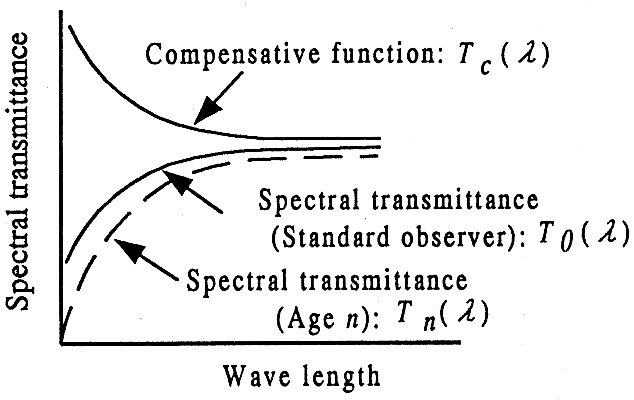


Fig. 3　Method of contrast compensation based on the spectral transmittance.

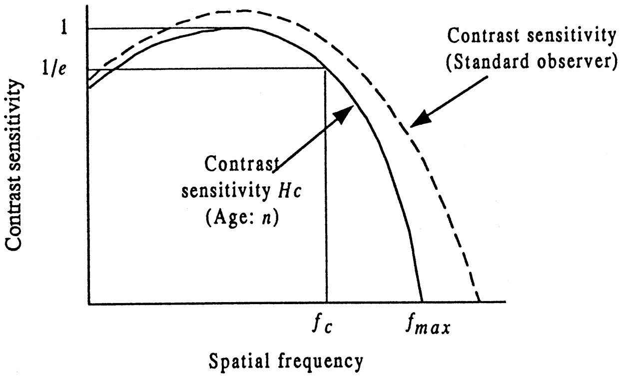


Fig. 5　Definition of f_c, f_{max}.

で計算される。

$$Q_c = \frac{N \cdot Z \cdot \theta_c}{S} \quad \cdots\cdots(6)$$

標準観察者を20歳とし，文献[1 2)]の被験者が標準観察者とすると，標準観察者の最適文字視角θ_{cr}およびカットオフ周波数f_{cr}を用いて，Q_cとf_cとの関係は，式(7)で与えられる。

$$Q_c = \frac{f_{cr} \cdot \theta_{cr} \cdot N \cdot Z}{S \cdot f_c} \quad \cdots\cdots(7)$$

ただし，f_{cr}＝26.3[cpd]，θ_{cr}＝0.008[rad]

従って，最適な文字サイズは画面サイズ，表示画素数，視距離，ならびに年齢ごとのカットオフ周波数により近似的に計算できる。

4．検証実験

4．1　実験方法

提案する年齢に応じた最適文字サイズ決定法の妥当性を確認するため，文字画像を用いた可読限界の測定実験を行った。被験者の判読のばらつきの影響をなるべく少なくするために，年齢に応じた空間周波数特性の劣化に相当するぼけを与えた画像を，被験者（視力の正常な若者）に提示し，読み取れる最小の文字サイズ（可読限界）を測定した。この方法は，若者に各年齢ごとの見え方を模擬した状態での可読限界を測定するというものである。

対象とする画像は，**Fig. 6**に示すような単漢字20種類で，東名高速道路のインターチェンジの名称の漢字のうち，画数が8から14画のものを選んだ。これらの20種類の漢字について16～80ドットの7段階のサイズの画像を用意し，さらに，これらに20～80歳の10歳毎の年齢に対応するぼけを与えた画像を作成した。実験では，あらかじめ被験者に全文字種を教示し，十分慣れるまで練習してもらった。視距離1.5mにおかれたディスプレイに文字画像をランダムに提示し，被験者に答えさせた。提示条件，被験者などは，**Table 1**に示したとおりである。

4．2　結果

Fig. 7に実験結果を示す。Fig. 7は，被験者7名がそれぞれ，若年から高齢者の見え方を模擬したときに読み取れた最小の文字サイズを，年齢ごとに集計してプロットしたものである。また，Fig. 7

Table 1　Experimental conditions.

Subjects	7people (20～30years)
Contents	Kanji (20characters, 8～14strokes) Size (16～80dots, 7levels)
Viewing Distance	1.5m
Display	CRT
Exposure duration	200ms

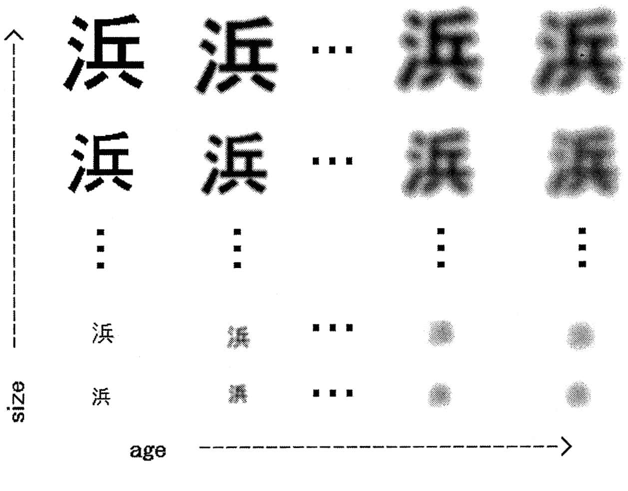


Fig. 6　Examples of the test images.

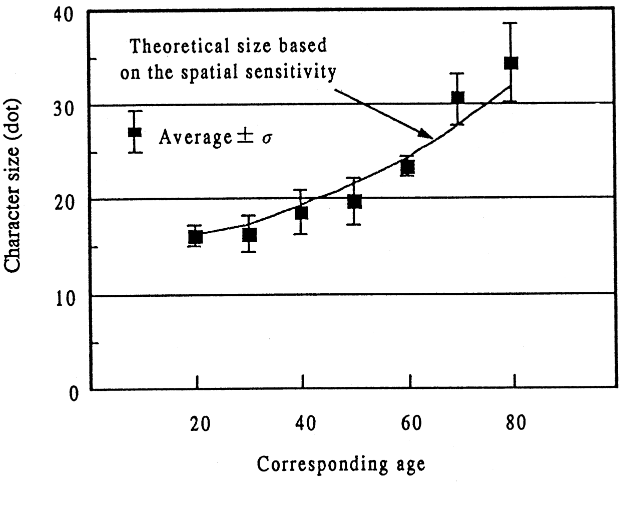


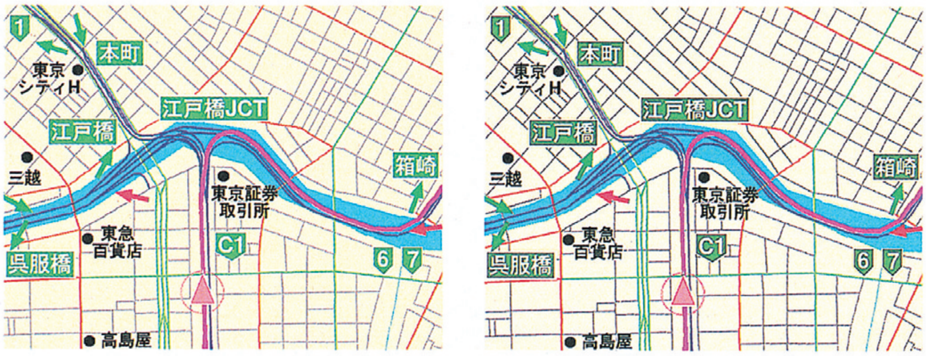
Fig. 7　Experimental results.

の実線の曲線は，**3.2**で述べた方法により視覚の空間周波数特性に基づいて求められた最小の文字サイズ（理論値）である。理論値では，可読限界は20歳を基準として，60歳で約1.5倍，80歳では，約2倍となる。この図からわかるように，可読限界の測定値と理論値はよく一致している。ここで，最適文字サイズは可読限界の整数倍である[12]ことより，可読限界の実測値とその理論値の一致から，提案する最適文字サイズ決定法は妥当であるといえる。

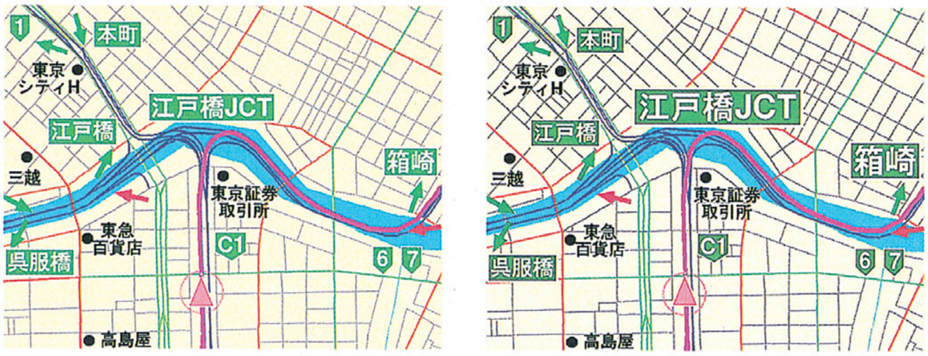
5．車載ディスプレイへの応用例

Fig. 8は，ナビゲーション画面について，40歳と60歳の高齢者の空間周波数特性と分光特性の低下に基づく色補正とエッジ強調を施した例（Fig. 8(b)），ならびに空間周波数に基づいて決定した文字サイ

(a) Original image



(b) Image with the edge enhancement and the color compensation.
(Left for age 40, Right for age 60)



(c) Image with the additional change of character size.
(Left for age 40, Right for age 60)

Fig. 8　Examples of the processed image based on the proposed method (navigation display).

ズで表示した例(Fig. 8(c))を示したものである。ここで，すべての文字を決定された文字サイズで表示すると，限られた画面サイズでは，かえって見にくくなることが予想される。そこで，画面上のすべての文字のサイズを変更するわけではなく，ドライバが必要と思われる重要な情報のみに絞って文字サイズを変更し表示することを試みた。Fig. 8(c)では，高速道路の進行方向上にあるインターチェンジの名称の重要度が高いという理由から，それらの文字のみを決定された文字サイズで表示している。Fig. 8(c)に示す画像は，色補正とエッジ強調によって，文字や細い道路の表示が見やすくなる上に，年齢に応じて必要な文字サイズで表示されているだけでなく，重要な情報に注目しやすくなることがわかる。

6．まとめ

若年者から高齢者まで幅広い年齢層のドライバに見やすいディスプレイ表示の方式として，視覚特性のうち空間周波数特性と分光特性に基づく表示方式を開発した。この方式では，年齢に応じた補正処理(エッジ強調，色補正)を行い，さらに，空間周波数特性に基づいて，年齢に応じた最適文字サイズを決定する。文字画像を用いた可読限界の測定実験の結果から，提案する文字サイズ決定法の妥当性を確認した。また，本方式をナビゲーション画面に適用し，その効果を確認した。ここでは，重要度に基づいて必要な文字を選択的に最適なサイズで表示することにより，一層見やすい表示とする試みを行った。今後，運転環境の変化への対応や情報量の最適化などが課題である。

参考文献

1) 清水修 : "カーナビゲーションシステムの技術動向", システム／制御／情報, **40**-6 (1996), 239～244
2) 宮田穣 : "快適な自動車交通を目指して－VICSの挑戦－", 自動車技術, **47**-8(1993), 11～17
3) 岸浩司, 杉浦精一, 木村賢治 : "自動車用ナビゲーション画面の視認性検討", 自動車技術, **46**-9(1992), 61～67
4) 岡林繁, 古川政光, 畑田豊彦 : "自動車用ヘッドアップディスプレイにおける視覚情報受容の優位性", テレビジョン学会誌, **47**-5 (1993), 714～721
5) 佐々木紫郎 : "高齢者用の車は非高齢者に作れるか", 自動車技術会中部支部報, No.45(1996), 2～3
6) 深野純一 : "自動車用ディスプレイの技術動向とヒューマンファクタ", テレビジョン学会技術報告,IDY93-50(1993), 25～30
7) 樋口和則, 中野倫明, 山本新 : "高齢者の視覚特性模擬技術の開発", 電気学会論文誌C, **117**-1(1997), 27～34
8) 福田忠彦 : "高齢者の視覚機能", テレビジョン学会技術報告, IDY91-29(1991), 1～8
9) 大頭仁, 行田尚義 : "年齢による時空間周波数特性の変化", 日本眼光学会誌, **8**-1(1987), 32～41
10) 金谷末子, 明石行生, 矢野正 : "高齢者の視覚と視環境", National Technical Report, **38**-6(1992), 89～97
11) Said, F. S., Weale, R. A. : "The Variation with Age of the Spectral Transmissivity of the Living Human Crystalline Lens", Gerontologia, **3**(1959), 213～231
12) 鎧沢勇, 長谷川敬, 村崎圭助 : "6.文字画像の評価 6-1 表示文字の評価", テレビジョン学会誌, **40**-4(1986), 298～304

著者紹介

水野守倫　Morimichi Mizuno
生年：1965年。
所属：視聴覚情報研究室。
(1998年7月末にて退社。)
分野：画像処理による計測・検査および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：電子情報通信学会会員。
1996年IEEE Intelligent Vehicles Symposium "The Best Paper Award in the Interactive Sessions"受賞。

樋口和則　Kazunori Higuchi
生年：1962年。
所属：視聴覚情報研究室。
分野：三次元画像計測・検査および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。

杉山和彦　Kazuhiko Sugiyama
生年：1960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：自動車技術会会員。

中野倫明　　Tomoaki Nakano

生年：1956年。
所属：視聴覚情報研究室。
分野：画像処理による計測・検査および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。
1996年IEEE Intelligent Vehicles Symposium "The Best Paper Award in the Interactive Sessions"受賞。
工学博士。

山本新　　Shin Yamamoto

生年：1942年。
所属：名城大学理工学部教授。
分野：画像処理による計測・検査および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，映像情報メディア学会，日本ロボット学会会員。
1984年IEEE-VTS Paper Award受賞。
1996年IEEE Intelligent Vehicles Symposium "The Best Paper Award in the Interactive Sessions"受賞。
工学博士。