平面ディスプレイの人間工学的要件

正会員 窪 田 悟

Human Factors Requirements for Flat Panel Displays

Satoru Kubota (Member)

Faculty of Engineering, Seikei University

Abstract

This paper is concerned with the important visual variables that determine legibility of computer-controlled flat panel displays (FPDs). Thirty-five FPDs (29 LCDs, 3 PDPs, 2 ELDs, and 1 VFD) and five CRTs are analysed in relation to the following photometric properties: (1) Luminance and contrast ratio. (2) Specular reflectance. (3) Viewing angle dependency of contrast. Special equipments are developed and standardized conditions are applied to the measurements. For each visual variable the recommended level is determined on the basis of subjective evaluations and is compared with the presently used levels for that variable on several different displays. It can be concluded that manufacturers should pay more attention to human factors when designing displays.

1. はじめに

近年、軽量・薄型の平面ディスプレイ (Flat Panel Display: FPD) が、コンピュータの表示装置として広く使われるようになった。コンピュータの表示装置として使われている FPD には、液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display: LCD) をはじめ、プラズマディスプレイ (Plasma Display Panel: PDP), エレクトロルミネッセントディスプレイ (Electroluminescent Display: ELD), 蛍光表示管 (Vacuum Fluorescent Display: VFD) などがあ

る。このような FPD の人間工学的な側面、すなわち、表示特性と視認性や視覚負担との関係については、ほとんど検討されていない。CRT ディスプレイについては、視認性や視覚負担という側面から、具備すべき物理的条件がある程度明らかにされてきた。しかし、FPD については、従来の CRT ディスプレイを対象とした設計指針^{1),2)}が必ずしも適用できるわけではない。たとえば、非発光型として特徴づけられる LCD の輝度特性と視認性の関係については、自発光型の CRT ディスプレイによる実験結果が必ずしも利用できない。また、LCD の特徴であるコントラストの観視角依存性についても、視覚系に即した測定・評価の方法が求められている。さらに、各種 FPD の表示特性とオフィスの照明環境要因の関係についてもほとんど明らかにされていない。

そこで、本研究では、LCD を中心とする各種 FPD を対象と

して、どのような物理的条件を具備すれば、実際のオフィスの照明環境下で、ユーザにとって見やすい表示が得られるかについて、実験的に検討することを目的とする。

本研究は、表示特性の測定と見やすさに関する主観評価実験から構成される。まず、35 機種 (LCD-29, PDP-3, ELD-2, VFD-1) と比較対照のための 5 機種 (CRT ディスプレイ計 40 機種) のディスプレイについて、表示文字の視認性に関連した次のような表示特性を測定した。すなわち、(1) 輝度およびコントラスト、(2) 鏡面反射率、(3) コントラストの観視角依存性である。測定にあたっては、ディスプレイを使用するオフィスの照明環境要因を考慮できるようにした。次に、これらのディスプレイのうち 22 機種について、表示文字の見やすさに関する多次元の評価項目による主観評価実験を行った。その上で、物理的な測定結果とユーザの主観評価結果を対応づけ、見やすい FPD の物理的条件について検討した。これらの結果は、ユーザの視覚特性とオフィスの照明環境要因を考慮した FPD の設計指針を設定する際の基礎資料となり得る。

2. 表示特性の測定

2.1 測定・評価の対象機種

表 1 に測定・評価の対象とした 40 機種のディスプレイの動作モード、画素数などの一覧を示した。これらのディスプレイには、ごく一部ではあるが、試作機や実験用に特注されたものも含まれており、必ずしも市場に出荷されているものだけではない。また、ほとんどの機種は 1988 年以降に出荷を開始したもので、約半数は 1990 年以降に出荷を開始した製品である。なお、これらの機種は、日本電子工業振興協会 VDT 動向調査専門委員会を通じて、各メーカーから提供されたものである。

* 成蹊大学工学部経営工学科

〒180 武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1

TEL 0422-37-3772 (ダイヤルイン)

FAX 0422-37-3869

本論文の一部は、1992 年電子ディスプレイ/技術フォーラム (電子機械工業会主催)、第 25 回照明学会全国大会、日本人間工学会第 33 回大会で口頭発表した。

クリーン鉛直面照度120 lx で文字の形態がくずれない最大発光輝度に調節した。この測定結果から、コントラスト比を算出した。

2.2.2 測定結果

図2にスクリーン鉛直面照度120,300,750 lx における輝度とコントラストの測定結果を示した。図中の番号は機種を示し、3つの点を結ぶ線の長さは、スクリーン鉛直面照度の影響の大きさを示す。すなわち、この線が長い機種ほど、表示面の拡散反射係数が大きいことを示している。

図2 スクリーン鉛直面照度120,300,750 lx における各ディスプレイの輝度およびコントラスト比

図中の線(1)は、窪田¹⁾が示したCRTディスプレイの最適コントラストレベルで、線(2)は、日本電子工業振興協会のVDTガイドライン²⁾によって示されたCRTディスプレイの製造指針コントラストレベルである。また、比較のために、拡散反射率80%の紙に印刷されたコントラスト比13の一般的な印刷紙面を図中に示した。この図から、ディスプレイの輝度とコントラストに関する相対的な評価ができる。

機種番号36~40は、CRTディスプレイである。いずれもスクリーン鉛直面照度の上昇によって、コントラストが大きく低下することがわかる。これは、CRTディスプレイの表示面拡散反射係数が比較的大きいためである。ただし、発光輝度が十分出せるために、最適コントラストを示した直線(1)を大きく上回っている。

機種番号7~29は、冷陰極管をバックライトにしたLCDである。スクリーンの鉛直面照度によるコントラストの変化は、CRTディスプレイと比較して小さい。これは、バックライト型LCDの表示面拡散反射係数がCRTディスプレイと比較して一桁小さいためである。また、バックライト型LCDは、一部の機種を除いて、(1)の線を上回っていることがわかる。

機種番号1~6は、反射型LCDである。反射型LCDは、スクリーンの鉛直面照度に対して、コントラスト比は一定で、輝度に変化する。反射型LCDは、スクリーン鉛直面照度が750 lx あっても、輝度とコントラストが足りない。このうち、5と6はTFTの反射型である。これらは、暗部の輝度が低いため、他の反射型LCDよりコントラストは高いが、輝度が不足である。一般的な

オフィスでは、十分な輝度を確保するために、補助照明を利用する必要がある。反射型LCDについては、図中の印刷紙面と対比することによって性能が理解できよう。

その他、PDP(30~32)、ELD(33,34)、VFD(35)は、ほとんどが30cd/m²程度の輝度しか出せないために、スクリーン鉛直面照度をかなり制限しても十分な輝度とコントラストが確保できないものが多いことがわかる。

2.3 鏡面反射率

2.3.1 測定方法

拡散処理が施された表示面の鏡面反射率は、映り込む光源の大きさに依存する。そこで、次のような条件で、鏡面反射輝度を測定し鏡面反射率を求めた。光源の入射角7.5°；ディスプレイから光源および輝度計までの距離50cm；光源は、輝度が均一な円形で、大きさはディスプレイから見た視角で、1,3,5,7,10°の5条件；光源の輝度は、約10,000cd/m²、ただし光源の大きさ10°の条件では約5,000cd/m²；輝度計の測定角は光源の大きさ1°~5°の条件で0.2°、7°~10°の条件で2°とした。なお、光源は、輝度が均一なボール型の白色蛍光灯を用い、光源径は光源の直前に配置したアパーチャーを差し替えることによって変えた。

2.3.2 測定結果

図3に、各ディスプレイの鏡面反射率を、映り込み光源の大きさとの関係で示した。比較のために、屈折率1.5の一般的なガラス表面の反射率を図中に示した。

最も鏡面反射率が低かったのは、機種番号38のマルチコーティングが施されたCRTディスプレイである。次いで、機種番号37,39,40で、いずれも拡散処理が施されたCRTディスプレイである。LCDは、反射防止処理をしていない自発光型のディスプレイ(31,35,36)より鏡面反射率が高いものが多い。特に、最新のTFTのカラーLCD(27~29)は鏡面反射率が高い。これは、カラーフィルタの鏡面反射率が高いためである。カラーフィルタは、光学密度を高めるためにCrを使うことが多く、これが鏡面反射率を高めている原因と考えられる。何らかの改善が必要となる。

LCDは、陽画表示で使用する場合が多いので、陰画表示中心のCRTディスプレイよりは有利ではある^{1),5)}。しかし、測定した

図3 映り込み光源の大きさと鏡面反射率の関係

図4 観視角の定義

LCDの約1/3は、 10° の大きさの光源に対する鏡面反射率が0.1以上ある。鏡面反射率0.1という値は、ガラスの表面の鏡面反射率が0.05程度であるから、その約2倍である。CRTディスプレイでは、いわゆるポリッシュのディスプレイは、一般のオフィスでは使うべきではないとされている⁶⁾。LCDについても、できる限り鏡面反射率を下げるべきである。

ただし、映り込みの目立ちやすさは、鏡面反射率だけではなく、ディスプレイの表示輝度にも依存する。そこで、表示輝度の要因も考慮して、映り込みができるだけ目立たない物理的条件を明らかにする必要がある。この点については、主観評価実験の項で検討する。

2.4 コントラストの観視角依存性

2.4.1 測定方法

筆者は、図4に示したように、スクリーンの法線に対する角度を観視角と定義し、水平方向 $\pm 60^\circ$ 、垂直方向 $\pm 60^\circ$ の範囲について、 5° ごとに輝度とコントラストを測定した。輝度は、スクリーンの中央を50cmの距離から視角 2° で測定した。スクリーン中央には5cm $\times$ 5cmの全面素オンまたはオフのパターンを表示し、明部と暗部の輝度を別々に測定した。コントラストは、明部と暗部の輝度の比をとった。なお、法線方向において輝度とコントラストが最大になるように、あらかじめ輝度とコントラストを調整したうえで測定した。

反射型LCDについては、スクリーンの法線に対して 45° 上方に6Wの白色蛍光灯を配置し、スクリーンの測定対象位置の入射照度が300 lxになるようにして測定した。自発光型のディスプレイは、発光輝度の観視角依存性のみを測定し、暗部の輝度は、スクリーンの鉛直面照度が300 lxの場合の拡散反射輝度として評価した。なお、機種番号3と4のLCDは、測定しなかった。

2.4.2 測定結果

図5は、特定のコントラストを確保できる観視角の範囲を水平方向と垂直方向について示したものである。LCD以外の自発光型のディスプレイは、どのコントラストの基準に対しても、ほとんどが $\pm 60^\circ$ 以上であったので、ここでは、LCDだけを示した。従来、LCDのいわゆる視野角は、コントラスト比が2または3以上確保できる観視角の範囲で表現する場合が多かった。そこで、コントラスト比が2および3以上の観視角の範囲を示した。ただし、機種1と2は、法線方向のコントラスト比がすでに3または2に達していなかったため、表示していない部分がある。また、窪田⁷⁾が提案した視野角の評価基準、すなわち、法線方向の平方根以上のコントラスト比が確保できる観視角の範囲も同様に示した。

水平方向についてみると、機種番号5, 6, 24, 25, 27~29のアクティブマトリックスLCDは、コントラスト比が2以上確保できる観視角の範囲がすべて $\pm 60^\circ$ を越えている。このうち、バックライ

ト型(24, 25, 27~29)については、コントラスト比の基準が3になっても、 $\pm 60^\circ$ 以上となっている。単純マトリックスのバックライト型(7~23, 26)は、コントラスト比2以上の範囲でみると、 $\pm 30^\circ \sim \pm 60^\circ$ で、機種によってかなり差がある。

垂直方向については、水平方向と比較すると、特定のコントラストが確保できる観視角の範囲が概して狭い。また、機種間の差も比較的大きく、法線方向に対して、上方または下方にずれているものが多い。特に、機種番号24, 25, 27, 28のアクティブマトリックスは、上方にずれている。これは、ディスプレイの構造上の特徴によるものと考えられる。

これらの測定結果と、主観的な視野角の広さとの関係については、主観評価実験の項で検討する。

3. 表示文字の見やすさに関する主観評価実験

表示特性を測定した40機種のうち22機種について、多次元の評価項目について主観評価実験を行い、ユーザの視点からディスプレイが具備すべき物理的条件について検討した。

3.1 実験方法

評価対象機種は、表1の*を付した22機種である。これらは、主観評価実験を行った時点で実験室に存在したすべての機種である。結果として、ほとんどの方式を網羅できたと考えている。これらの機種を、2.の表示特性の測定を行った実験室(図1)に並べて設置した。実験室の水平面照度は500~600 lx、スクリーン鉛直面照度は200~300 lx、天井の蛍光灯の輝度は約1,500 cd/m²である。ディスプレイの表示は、最大輝度、最大コントラストに調節した。ただし、CRTディスプレイは、文字輝度75 cd/m²、背景輝度15 cd/m²に設定した。スクリーンには日本語の文章を表示した(15, 24, 33については日本語が表示できなかったためランダムな英文字またはデモ用の表示とした)。LCDは陽画表示、その他は陰画表示とし、カラー表示が可能な機種については白色表示にした。

被験者は、男性25名、女性5名の計30名である。いずれも工学部の学生で、VDT作業の経験を有している。年齢は21~26歳、視力は0.6~1.2(矯正含む)であった。

図5 特定のコントラスト比以上の観視角の範囲
(機種はすべてLCD； $\pm 60^\circ$ を越えるものは $\pm 60^\circ$ で表した)

図6 主観評価実験で用いた評価項目と評価尺度

図7 コントラストの主観評価値と総合的な見やすさの主観評価値

評価項目と評価尺度は、図6に示したとおりである。各被験者は、機種番号のラベルを付け、機種番号順に並べられている各ディスプレイを、データシートで指定された順に評価していく。順序効果を相殺するために、被験者ごとに異なった順序で各機種を評価するようにした。また、被験者には評価項目の意味と評価方法を説明した。たとえば、映り込みについては、天井の蛍光灯を映り込ませてみることで、視野角については、実際に視視角を変えて見ることを教示した。さらに、実際に長時間使用した場合のことを考慮して評価するように繰り返し指示した。図6の13項目を22機種について評価するのに、1被験者あたり約1時間を要した。

3.2 結果と考察

3.2.1 輝度およびコントラストと見やすさ

評価項目11の総合的な見やすさに、その他の見やすさに関連した12項目の評価値がどのように影響しているか、その関係を調べるために重回帰分析を行った。すなわち、30名の被験者の平均評価値について、評価項目11の総合的な見やすさを目的変数、残りの12項目を説明変数とする重回帰分析(Stepwise Regression)を行った。

その結果、互いに相関が高い評価項目が多かったために、図7に示したように、総合的な見やすさは、評価項目1のコントラストの評価値でほとんど説明がついてしまうことが明らかとなった。すなわち、総合的な見やすさを Y 、コントラストの主観評価値を

図8 ディスプレイ明部の輝度とコントラストの主観評価値

図9 ディスプレイの輝度およびコントラスト比と総合的な見やすさの関係

X とすると、

$$Y = 0.93X + 0.38 \quad (2)$$

($r = 0.83$, $r^2 = 0.69$, $F = 44.2$, $df = 1$, $p < 0.0001$)という単回帰式で表すことができる。

そこで、コントラストの主観評価値と表示特性の測定で得られた物理的なコントラスト値を対応づけてみた。しかし、コントラストの主観評価値とコントラスト比の間には有意な相関は認められなかった。ところが、図8に示したように、むしろコントラストの主観評価値は、スクリーンの明部の輝度に依存していることがわかった。すなわち、コントラストの主観評価値を Y 、スクリーン明部の輝度を X とすると、

$$Y = 1.79 \log X + 0.78 \quad (3)$$

($r = 0.73$, $r^2 = 0.54$, $F = 23.3$, $df = 1$, $p < 0.0001$)で表すことができる。この結果から、コントラストの主観評価値4の『ちょうどよい』に対応する輝度は、約60cd/m²となる。

図9は、評価したディスプレイの輝度およびコントラストと、評価項目11の総合的な見やすさの順位を対応づけた図である。丸で囲んだ数字は、総合的な見やすさの順位を表し、丸で囲ってない数字は機種番号であり、数字の位置は、明部の輝度とコントラスト比を示している。

見やすいとされたディスプレイは、比較的高輝度(50~60cd/m²以上)で比較的低コントラスト比(3~6)の領域にある。また、すでに述べたように、見やすさに対しては、単なるコントラスト比よりもスクリーン明部の輝度の方が重要であることがわかる。たとえば、機種番号5は、コントラスト比が5以上あるにもかかわらず、明部の輝度が10数cd/m²しかないために、見やすさの順位は、第14位と評価が低い。逆に、機種番号24は、コントラスト比が3程度しかないが、明部の輝度が100cd/m²以上あるために、見やすさの順位は、第2位で評価が高い。

したがって、見やすさの評価を高くするにはスクリーンを明るくする必要があるといえる。LCDについていえば、技術的な鍵は明るくて均一な輝度が出せるバックライトの開発にあると考えられる。アクティブマトリックスのTFTのLCDについては、開口率を上げパネルの透過率を向上させることも重要だろう。明部の輝度60cd/m²という値はその際のひとつの目安となり得る。マルチカラーのディスプレイでは、文字表示に緑を使うソフトウェアが多いので、緑単独でこの値を達成する必要がある。

3.2.2 鏡面反射率と映り込みの目立ちにくさ

スクリーンの鏡面反射率と映り込みの目立ちにくさの関係を調べたところ、1°の光源に対する鏡面反射率の対数値と映り込みの目立ちにくさの主観評価値の相関が最も高かった($r=0.79, r^2=0.62, F=32.4, p<0.0001$)。その結果は、図10に示したとおりである。その他の大きさの光源に対する鏡面反射率の対数値と映り込みの目立ちにくさの相関も有意であったが、光源が大きくなるほど寄与率が低下した。これは、主観評価実験で映り込ませた天井照明の大きさが視角1°以下であったためである。

図10の結果を機種ごとに検討してみると、鏡面反射率だけでな

図10 ディスプレイから見て視角1°の大きさの光源に対する鏡面反射率と映り込みの目立ちにくさの関係

図11 鏡面反射率と表示輝度を変数にした映り込みの目立ちにくさの予測値と映り込みの目立ちにくさの主観評価値の関係

く、ディスプレイの表示輝度が、映り込みの主観評価値に影響していることがわかる。すなわち、鏡面反射率が同程度でも、表示輝度が高い方が映り込みの目立ちにくさの評価が高い。

そこで、映り込みの目立ちにくさを目的変数、光源の大きさ1°に対する鏡面反射率の対数値と、ディスプレイの明部の輝度の対数値を説明変数にした重回帰分析を行った。結果は、式(4)および図11に示したとおりである。

$$Y = -1.64X_1 + 1.61X_2 - 2.4 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$(r=0.91, r^2=0.82, F=43.98, df=2, p<0.0001)$$

ただし、Y：映り込みの目立ちにくさ

X1：光源の大きさ1°に対する鏡面反射率の常用対数値

X2：ディスプレイの明部の輝度 (cd/m²) の常用対数値

X1とX2の標準回帰係数は、それぞれ-0.82と0.45であった。したがって、ディスプレイの表示輝度の要因も映り込みの目立ちにくさかなり影響していることがわかる。

ここで、窪田、高橋⁹⁾の反射の許容輝度を求めた実験結果をこの式(4)に代入して、映り込みの目立ちにくさの許容値を求めてみた。本実験で評価したディスプレイのほとんどが陽画表示であったので、窪田、高橋の陽画表示における反射の許容輝度を代入した。すなわち、陽画表示で明部の輝度が60cd/m²の場合、鏡面反射輝度の許容値は、16cd/m²であった。鏡面反射輝度16cd/m²は、光源の輝度が1,500cd/m²であるから、鏡面反射率では0.0107となる。鏡面反射率0.0107と明部の輝度60cd/m²を式(4)に代入すると、予測値は3.70になる。すなわち、1,500cd/m²の天井照明の映り込みを想定した場合、式(4)の値が3.70以上になるように、鏡面反射率と表示輝度を設定すれば、映り込みがほぼ許容できることになる。

そこで、式(4)のYを3.70とすると、1,500cd/m²の照明器具の映り込みが許容できる鏡面反射率と表示輝度の限界値の関係は、次のように表すことができる。すなわち、

$$\log S_r = (1.61 \log L_h - 6.10) / 1.64 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、S_r：鏡面反射率、L_h：明部の輝度 (cd/m²) である。また、鏡面反射率=鏡面反射輝度/光源の輝度であるから、映り

表2 ディスプレイに映り込んだ照明器具の反射映像の輝度を許容値以下にするための照明器具の輝度、ディスプレイの表示輝度、鏡面反射率の関係。ただし、ディスプレイの表示極性は陽画表示で、ディスプレイから見た光源の大きさは視角1°以下の場合：表中の数値はディスプレイから見て視角1°の大きさの光源に対するディスプレイの鏡面反射率を示す。

表示輝度 (cd/m ²)	照明器具の輝度 (cd/m ²)			
	50	200	2,000	8,000
10	.0549	.0137	.0014	.0003
20	.1084	.0271	.0027	.0007
30	.1613	.0403	.0040	.0010
40	.2140	.0535	.0053	.0013
50	.2664	.0666	.0067	.0017
60	.3186	.0796	.0080	.0020
70	.3706	.0927	.0093	.0023
80	.4226	.1056	.0106	.0026
90	.4744	.1186	.0119	.0030
100	.5260	.1315	.0132	.0033
110	.5776	.1444	.0144	.0036
120	.6292	.1573	.0157	.0039
130	.6806	.1701	.0170	.0043
140	.7319	.1830	.0183	.0046
150	.7832	.1958	.0196	.0049

込んでいる光源の輝度をL_oとすると、式(5)から、
 $\log(1500 \cdot S_r / L_o) = (1.61 \log L_h - 6.10) / 1.64$ (6)
 となり、映り込みの許容限界における、照明器具の輝度、表示輝度、鏡面反射率の関係が求められる。

表2に、これらの関係を示した。ただし、ディスプレイの表示極性は陽画表示で、映り込み対象物は、天井の照明器具のようなディスプレイからみた視角1°以下のものという前提である。面積が大きな対象物、たとえば、作業者の白いシャツなどの映り込みについては、この式は成り立たない。ただし、面積が大きな対象物の輝度は概して低いので、鏡面反射率が余程高くない限りあまり問題にはならないだろう。照明器具の輝度は、照明学会⁸⁾が提示したVDTを使用するオフィスの照明器具の輝度制限値V1～V3(それぞれ50, 200, 2,000cd/m²)と、蛍光灯の平均的な輝度として8,000cd/m²を適用した。

この表から、たとえば、照明器具の輝度が200cd/m²の場合、表示輝度が40～60cd/m²のディスプレイでは、鏡面反射率は0.05～0.08まで許容できることを示す。鏡面反射率0.05～0.08は、ポリッシュのCRTディスプレイの鏡面反射率に相当する。従来、DIN⁹⁾、CIE¹⁰⁾、照明学会^{11),12)}、日本電子工業振興協会²⁾などの多くが、VDT作業場の照明器具の輝度は、鉛直角50～60°以上で200cd/m²以下が望ましいとしているが、これはポリッシュのCRTを対象にしたものであることがこの結果からも理解できる。

最近になって、照明学会⁸⁾が提示した2,000cd/m²という照明器具の輝度制限値を適用すると、ディスプレイの表示輝度が60cd/m²の場合、鏡面反射率は、0.008が許容限界値である。この値は、CRTでは拡散処理で達成できる。しかし、本研究で測定した29

機種種のLCDのうち、この値を達成できているのは半数以下の13機種種である。

また、輝度制御をしていない一般的な蛍光灯の輝度が8,000cd/m²とすると、ディスプレイの表示輝度が60cd/m²では、鏡面反射率を0.002まで下げる必要がある。この値は、良質のマルチコーティングを施したCRT、もしくは極端な拡散処理を施したディスプレイでしか達成できない値である。しかし、輝度制御をしていないオフィスで使われているVDTの方が多い¹⁴⁾ことからすると、ディスプレイの鏡面反射率は、このレベルまで下げる必要があろう。本研究で測定した40機種種のディスプレイの中では、LCD2機種種を含む4機種がこの値を達成できている。

3.2.3 コントラストの観視角依存性と視野角の広さ

LCDの視野角は、コントラスト比が2または3以上、アクティブマトリックスでは10以上確保できる観視角の範囲と定義する場合が多い。この視野角の定義は、ユーザの視覚系に対応したものではなく、ディスプレイの物理的な性能を示すために便宜的に決められたものである。筆者は、主観的に表示文字の読み取り作業に差し支えない観視角の範囲を視野角と定義した。

図12は、視野角の広さの主観評価結果で、水平方向と垂直方向の視野角の評価結果を表したものである。ほぼ45°の直線上にデータが分布している。つまり、水平方向の視野角が狭く感じられているディスプレイは、垂直方向も狭く感じられていることを示す。また、単純マトリックスのLCD群と、アクティブマトリックスのLCDおよび自発光型ディスプレイ群に二分されることがわかる。したがって、バックライト型のアクティブマトリックスLCDは自発光型のディスプレイと視野角の面で主観的には遜色がないといえる。

LCDの視野角を主観評価実験により求めた研究⁷⁾によると、法線方向のコントラスト比と文字の読み取り作業に差し支えない許容限界の観視角におけるコントラスト比との間には、対数値で約2:1の関係があることが明らかとなっている。すなわち、法線方向のコントラスト比の平方根以上のコントラスト比が確保できる観視角の範囲を視野角とすると、ユーザの視覚系との対応がよく、現実的であるとしている。

そこで、水平方向の視野角の主観評定結果と、2.4節で求めたコントラスト比が法線方向の平方根となる観視角との対応を調べた。

図12 視野角の広さの主観評定結果

図13 コントラスト比が法線方向の平方根となる観視角と視野角の主観評定値の関係

その結果、視野角の主観評定値と、コントラスト比が法線方向の平方根となる観視角（左右の平均値）との間には、図13に示したように、きわめて高い相関関係が認められた($r=0.90$, $r^2=80$, $F(1,13)=53.0$, $p<0.001$)。

以上の結果は、法線方向のコントラスト比の平方根以上のコントラスト比が確保できる観視角の範囲を測定すれば、LCDの視野角の広さを評価できることを意味している。ただし、実作業において視野角をどこまで確保すればよいかについては、作業の特性も考慮にいたった広い視点からの検討を要する。現状では、できる限り視野角を広げることが、より広範囲のユーザに受け入れられるための条件であると考えられる。

今後、視覚パフォーマンスの側面から、有効な観視角の範囲を測定することが必要となろう。また、階調表示や多色表示に対する視野角の規定の仕方についても検討しなくてはならない。

4. まとめ

本研究では、LCDを中心とする各種FPDを対象として、どのような表示特性を具備すれば、実際のオフィスの照明環境下で、ユーザにとって見やすい表示が得られるかについて実験的に検討した。測定・評価した表示特性は、輝度およびコントラスト、鏡面反射率、コントラストの観視角依存性である。

主な結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) FPDの主観的な見やすさは、コントラスト比よりも、主にスクリーンの明部の輝度に依存しており、平均的なオフィスの光環境条件下では、約60cd/m²が好まれる。
- (2) 照明器具の映り込みの目立ちにくさは、視角1°の大きさの

光源に対するディスプレイの鏡面反射率と明部の輝度によって予測できる。この予測式に、鏡面反射の許容輝度値を求めた従来の研究結果を対応づけると、輝度8,000cd/m²の蛍光灯照明に対しては、明部の輝度が60cd/m²の陽画表示のディスプレイでは、鏡面反射率を0.002程度まで下げることがある。

- (3) 主観的な視野角の広さは、コントラスト比が法線方向の平方根以上確保できる観視角の広さに対応している。すなわち、コントラスト比が法線方向の平方根以上となる観視角の範囲が広いディスプレイほど、ユーザから見て視野角が広く感じられる。今後、主観評価実験だけでなく、視作業のパフォーマンスを指標にした実験を行い、視認性が高く視覚負担の少ないディスプレイの物理的条件について、検討していく予定である。

最後に、本研究に対して便宜を図っていただきました日本電子工業振興協会VDT動向調査専門委員会の関係者各位に対し厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 窪田 悟：CRTディスプレイの人間工学的設計指針の検討，人間工学，26-6，(1990)，337-344
- (2) 日本電子工業振興協会：VDTガイドラインに関する調査研究報告書，60-A-233，(1985)
- (3) 日本規格協会：業務用陰極線管及びけん盤，JIS X-6041，(1987)
- (4) 高橋 誠，窪田 悟，西岡 昭：VDT作業場の光環境に関する実態調査，労働科学，63-4，(1987)，181-191
- (5) 窪田 悟，高橋 誠：CRTディスプレイ上の光源の反射像の許容輝度，照明学会誌，73-6，(1989)，314-318
- (6) 労働省：VDT作業のための労働衛生上の指針，中央労働災害防止協会，(1985)
- (7) 窪田 悟：液晶ディスプレイの視野角の評価，テレビジョン学会誌，46-3，(1992)，354-356
- (8) 照明学会：オフィス照明新基準，オフィス照明新基準作成委員会報告書，(1991)
- (9) DIN：DIN 5035 Teil 7，(1986)
- (10) CIE：Vision and the Visual Display Unit Work Station，CIE Publication No.60，(1984)
- (11) 照明学会：VDT表面における照明の反射グレア・光幕反射の防止，新時代の照明環境研究調査委員会報告，照明学会技術指針 No.JIEG-005，(1986)
- (12) 照明学会：人間・機械系における照明環境研究報告書，人間・機械系における照明環境研究調査委員会報告，照明学会報告書 No.JIER-007，(1986)