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

正会員 窪 田 悟[†]

Luminance and Luminance Contrast Requirements for Legibility of Transmissive Liquid Crystal Displays

Satoru Kubota[†]

Abstract Two experiments were carried out to investigate the required luminance and luminance contrast for transmissive liquid crystal displays. In experiment 1, 30 subjects rated 156 luminance and luminance contrast combinations displayed on a transmissive thin-film-transistor liquid crystal display, under three kinds of ambient illuminance conditions: 70, 200 and 500 lx. The results indicate that under a 500-lx illuminance condition, the combination of a display luminance approximately 100cd/m² and a contrast ratio higher than 10 is the most preferable condition. In experiment 2, 20 subjects were asked to adjust the display luminance of the transmissive thin-film-transistor liquid crystal display as they most preferred every two minutes during a visual search task, under two ambient illuminance conditions: 70 and 500 lx. The results indicate that the preferable display luminance is affected by adaptation luminance for the display screen. The range of preferable display luminance between subjects is relatively wide. These results suggest that a wider adjustable range of the display luminance is required in order to adapt a preferable display luminance for each user.

1. ま え が き

コンピュータの表示装置として、液晶ディスプレイ(LCD: Liquid Crystal Display)が広範囲に利用されるようになった。LCDがコンピュータの表示装置として利用され始めた初期においては、表示輝度の不足、鏡面反射、視野角などの問題が指摘され、利用者の視点に立った改善の方向性を見いだすために実験的

な検討を重ねてきた^{1)~3)}。これらの問題は、LCD技術の進歩によって、改善の方向に向かっている。

しかし、LCDの表示輝度やコントラストをその調整範囲も含めてどのように設定すれば、表示文字の視認性が高く、利用者の視覚負担が少なくすむかについては、使用する場所の光環境、順応輝度、個人差、使用方法などを考慮する必要がある。また、この問題については、画素形状や輝度プロファイルが異なる

キーワード：液晶ディスプレイ，視認性，画質評価

1994年6月2日，日本人間工学会第35回大会および，1995年10月27日，日本人間工学会視覚エルゴノミクス研究部会で発表。

1996年1月22日受付

[†] 成蹊大学 工学部 (〒180 東京都武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1, TEL 0422-37-3772)

[†] Faculty of Engineering, Seikei University (3-3-1, Kichijoji-kitamachi, Musashino-shi, Tokyo 180, Japan)

CRT ディスプレイを対象とした従来の研究結果が必ずしも適用できない。吉武ら⁴⁾によると、LCDの方がCRTよりも好ましい表示輝度はかなり低い。

本研究では、透過型LCDに文字画像を表示する場合に、表示輝度、コントラストをその調整範囲も含めてどのように設定すれば読取りやすい表示が得られるかについて2つの実験により検討した。実験1では、LCDに様々な表示輝度とコントラストで文字画像を表示し、読取りやすさを被験者に主観評価させた。その結果から最適な表示輝度とコントラストの組合せ条件を明示した。実験2では、LCD画面上で文字の検索作業を被験者に課し、好ましい表示輝度を一定作業時間ごとに自己調整させた。そして、好ましい表示輝度の時間変動と個人差から表示輝度の調整範囲の要件について検討した。

2. 実験1：主観的に読取りやすい表示輝度とコントラストの関係

2.1 方法

(1) 装置

透過型のカラーTFT-LCDを実験に使用した。このLCDは、対角30cm、1120×750画素、画素ピッチ0.21mm、開口率約40%、文字の構成画素数24×24、文字サイズ5×5mm、16階調表示、表示輝度は暗室で0.8~150cd/m²であった。拡散反射輝度係数は、 5.9×10^{-3} cd/m²/lxであった。

(2) 観視条件と評価画面

環境照度が表示輝度とコントラストの評価に及ぼす影響を見るため、実験室の水平面照度が70lx、200lx、500lxの3条件において実験した。実験室には窓がなく、周囲の壁面は反射率60%であった。照度条件は、天井の調光式白色蛍光灯により設定した。各照度条件における被験者前方(LCDの背後)の壁面の輝度は、それぞれ、70lx条件：6~8cd/m²、200lx条件：15~25cd/m²、500lx条件：40~60cd/m²であった。

評価対象のLCD画面には、25文字×10行の漢字かな混じりの日本語の文章を表示した。表示色は無彩色で、相関色温度は6500Kであった。文字と背景の輝度条件は、16階調のうちの13階調を文字と背景に適用することによって設定した。すなわち、文字と背景が同じ輝度の条件を除いたすべての組合せ13×12=156条件からなる。陰画表示(文字輝度>背景輝度)と陽画表示(文字輝度<背景輝度)に分けると、それぞれ156/2=78通りである。水平面照度500lxにおける文字輝度と背景輝度のすべての組合せ条件を図1に

図1 500lx条件における156通りの文字と背景の輝度の組合せ条件

Text/background luminance combinations under the 500 lx ambient illumination condition.

示す。水平面照度70lxと200lxにおける各条件の輝度は、図1の500lx条件から外光拡散反射輝度の低下分、すなわち、70lx条件で1.0cd/m²と200lx条件で0.5cd/m²を減じた値となる。

表示輝度は、画面中央に5×5cmのブロックを表示し、法線方向50cmの距離から測定角2°の輝度計(TOPCON BM-5A)で測定した。測定値には、外光拡散反射成分を含めた。鏡面性の反射は無視できる程度に低かった。なお、コントラストは、陰画表示の場合、文字輝度/背景輝度、陽画表示の場合、背景輝度/文字輝度とする。また、画面の表示輝度は、文字か背景いずれか輝度の高い方の輝度とする。

(3) 被験者

被験者は、20~24歳の学生90名であった。コンピュータの使用経験は1年以上で、視力は0.3~1.5(矯正含む)であった。

(4) 手続き

90名の被験者を3つの照度条件に30名ずつ割り当てて一人ずつ実験した。各被験者は、3つの照度条件のいずれかで、156条件の輝度とコントラストの画面の読取りやすさを主観評価した。被験者は画面の法線方向約50cmから画面を観察した。評価尺度は7段階

- 1：非常に読取りにくい
- 2：読取りにくい
- 3：やや読取りにくい
- 4：どちらともいえない
- 5：やや読取りやすい

6: 読取りやすい

7: 非常に読取りやすい

で、用紙に印刷された番号に丸印を記入する。被験者がキーボードのスペースバーを押下するごとに156条件のいずれかの画面が1画面ずつ提示される。1画面あたりの評価時間は15秒から20秒であった。条件の提示順は、順序効果を相殺するために被験者ごとに変えた。被験者には、長時間使用を想定して評価するよう指示した。実験時間は、1被験者あたり約1時間であった。

2.2 結果と考察

結果は、各条件に対する30名の平均評定値を求め、

図2 表示輝度とコントラストに対する主観な読取りやすさ(陰画表示 70 lx 条件)

Subjective legibility as a function of display luminance and luminance contrast for negative images. Horizontal illuminance is 70 lx.

図3 表示輝度とコントラストに対する主観な読取りやすさ(陰画表示 200 lx 条件)

Subjective legibility as a function of display luminance and luminance contrast for negative images. Horizontal illuminance is 200 lx.

表示輝度とコントラストに対して、等評価尺度を与える曲線で表現した。各条件に対する評定値の被験者間のばらつきは、標準偏差で1.0~1.5であった。図2~図7が30名の平均評定値から求めた照度条件と表示極性ごとの結果を示している。これらの図は、各照度条件と表示極性に対して、最適な表示輝度とコントラストの関係があることを示している。また、照度条件が70 lx から500 lx に上昇するにつれて、最適な表示輝度とコントラストが高めに移動している。これは、照度の上昇によって、視覚の順応輝度が高まったためである。しかし、その変化は照度条件の変化に伴う被験者前方視野の輝度の変化と比較して小さい。こ

図4 表示輝度とコントラストに対する主観な読取りやすさ(陰画表示 500 lx 条件)

Subjective legibility as a function of display luminance and luminance contrast for negative images. Horizontal illuminance is 500 lx.

図5 表示輝度とコントラストに対する主観な読取りやすさ(陽画表示 70 lx 条件)

Subjective legibility as a function of display luminance and luminance contrast for positive images. Horizontal illuminance is 70 lx.

図 6 表示輝度とコントラストに対する主観な読取りやすさ(陽画表示 200 lx 条件)

Subjective legibility as a function of display luminance and luminance contrast for positive images. Horizontal illuminance is 200 lx.

図 7 表示輝度とコントラストに対する主観な読取りやすさ(陽画表示 500 lx 条件)

Subjective legibility as a function of display luminance and luminance contrast for positive images. Horizontal illuminance is 500 lx.

これは、被験者の視線が約 80% は評価画面に向けられていたことから、主に評価画面の平均輝度に順応していたためと考えられる。

オフィスの平均照度⁵⁾に近い水平面照度 500 lx の条件に対しては、評定値 5 の領域で見ると、どちらの表示極性も、表示輝度 100cd/m² を中心とする範囲でコントラスト 10 以上に最適条件がある。これらの結果は、CRT ディスプレイを用いた同一条件での実験結果⁶⁾とおおむね一致している。

評価尺度 4 もしくは 3 の曲線に注目すると、低い表示輝度領域では、同レベルの読取りやすさを確保するためには、より高いコントラストが要求されることが

わかる。この傾向は、CRT ディスプレイを対象とした研究で繰り返し指摘されてきた^{7)~12)}。しかし、長田ら⁹⁾の研究を除いて、背景輝度の対数と最適コントラストの対数との間の直線的な関係だけが示されてきた。この表現では、最適な表示輝度とコントラストの組合せ条件を明確にできない。また、表示輝度を広い範囲で見ると、表示輝度の対数と最適コントラストの対数との関係を一本の直線で近似するのは無理があることがわかる。

本研究では、文字放送画像の好ましいコントラストを求めた長田ら⁹⁾が行ったように、多数の条件に対する平均評定値から等評価尺度を与える曲線を求め、等高線図として結果を表現している。これによって、どのような表示輝度とコントラストの組合せが最適であるかが明確となる。また、特定の表示輝度とコントラストの組合せ条件に対する相対的な読取りやすさが予測できる。これらの結果は、液晶ディスプレイの輝度特性を設計する際に利用できる。

以上の結果は、順次提示される画面を短時間の観察により評価した結果である。実際にディスプレイから文字を視認する作業を遂行する過程で適正な表示輝度は変化し得る¹³⁾。また、被験者によって好ましい表示輝度は大きく異なる⁴⁾。これらの要因は、表示輝度の調整範囲の設計に影響する。そこで、実験 2 では、好ましい表示輝度の時間変動と個人差から表示輝度の調整範囲の要件について検討した。

3. 実験 2：作業時間経過に伴う好ましい表示輝度の変化および個人差

3.1 方法

(1) 装置と実験条件

ディスプレイは、実験 1 に用いた透過型のカラー TFT-LCD を使用した。実験室は実験 1 と同一である。水平面照度を 70 lx と 500 lx の 2 段階に設定した。表示色は相関色温度 6500 K の白、低輝度部の輝度は、70 lx 条件で 1cd/m²、500 lx 条件で 2cd/m² に固定した。表示輝度の調整範囲は、1~150cd/m²であった。

(2) 文字検索作業

LCD 画面に 16 画の漢字を 16 文字 × 5 行(一行間隔)で中央部に表示した。キーボードのスペースバーを押下すると、1 行目の先頭にターゲット文字が表示される。被験者はこの文字が右側の 1 行に何個含まれているか視覚検索し、その個数をテンキーから入力する。入力と同時に次の行の先頭にターゲット文字が表示される。5 行が終了すると次の画面が表示される。

入力はキーを見ないで行わせた。したがって、作業中は、作業者の視線は常にディスプレイ画面に向けられていた。作業中の視距離は40 cm～60 cmであった。作業は2分ごとに中断し、被験者に表示輝度の調整を行わせた。

(3) 被験者

被験者は、20～24歳の学生40名であった。コンピ

ュータの使用経験は1年以上で、視力は0.3～1.5(矯正含む)であった。

(4) 手続き

40名の被験者を70 lx条件と500 lx条件に20名ずつに分けて一人ずつ実験した。被験者は、まず、文字検索作業を短時間練習する。次に、実験室の照度条件に順応するため、前方の壁面に視線を向けた状態で5

図8 最適表示輝度と下限表示輝度の推移(陰画表示 500 lx 条件)
20名の平均値と標準誤差

Changes of the preferred display luminance and the minimum acceptable display luminance for negative image under the 500 lx ambient illumination condition.

図10 最適表示輝度と下限表示輝度の推移(陰画表示 70 lx 条件)
20名の平均値と標準誤差

Changes of the preferred display luminance and the minimum acceptable display luminance for negative image under the 70 lx ambient illumination condition.

図9 最適表示輝度と下限表示輝度の推移(陽画表示 500 lx 条件)
20名の平均値と標準誤差

Changes of the preferred display luminance and the minimum acceptable display luminance for positive image under the 500 lx ambient illumination condition.

図11 最適表示輝度と下限表示輝度の推移(陽画表示 70 lx 条件)
20名の平均値と標準誤差

Changes of the preferred display luminance and the minimum acceptable display luminance for positive image under the 70 lx ambient illumination condition.

分以上時間をおいてから、文字検索作業を開始する。作業は、2分間のブロックを15回合計30分間実行する。作業開始前と2分間の作業ブロック終了ごとに表示輝度の自己調整を行った。被験者の視線は、30分間の作業中、ほとんどLCD画面に向けられたままであった。

表示輝度の調整は、被験者がファンクションキーを操作し16階調のいずれかに設定する。ここで表示輝度とは、高輝度部の輝度すなわち陰画表示では文字輝度、陽画表示では背景輝度である。低輝度部の輝度は、実験条件の項で示した条件に固定されている。表示輝度の調整規準は、①この作業に最も好ましいレベル(最適値)、②この作業の遂行に差し支えない下限(下限値)の2条件とした。これらの規準に対して3回ずつ調整させ平均値を求めた。

上記の一連の手順を陰画表示と陽画表示について行った。ただし、2つの表示極性は異なる日に行った。

3.2 結果と考察

図8～図11に各条件における好ましい表示輝度(最適値)と下限許容限界輝度(下限値)の時間的推移を示した。いずれも20名の平均値と標準誤差で表した。低輝度部の輝度が固定されていたので、図の右側縦軸に示したようなコントラストの変化としても読取ることができる。

図8の500 lx条件の陰画表示は、作業開始前と比較して30分後では最適値が1/2近くまで低下している。図9の陽画表示では、この傾向はほとんど認められない。また、図10の70 lx条件の陰画表示は、図8の500 lx条件ほど最適値の低下傾向は顕著ではない。逆に、図11の70 lx条件の陽画表示では、作業開始後数分間に最適値が上昇している。

これらの結果は、ディスプレイの好ましい表示輝度が、視覚系の順応輝度の変化に影響されていることを示している。すなわち、500 lx条件の陰画表示は、背景輝度が2cd/m²、作業開始時点において文字表示領域の平均輝度は10数cd/m²である。この輝度値は、作業前の順応輝度40～60cd/m²より低い。したがって、画面だけを注視する作業を遂行する過程で順応輝度が低下したと考えられる。逆に、70 lx条件の陽画表示では、あらかじめ6～8cd/m²の輝度に順応していたために、作業開始時点では約20cd/m²の陽画表示画面の輝度に明順応したと考えられる。また、500 lx条件の陽画表示の作業開始時点の表示輝度は約60cd/m²であり、作業前の順応輝度40～60cd/m²に近い。そのために、最適値の設定に大きな変化が表れなかったと考えられる。さらに、70 lx条件の陰画表

図12 表示輝度の自己調整値の20名の分布(10, 25, 50, 75, 90パーセンタイル値を示す)

Distributions of self-adjusted display luminances for 20 subjects.

示は、背景輝度が1cd/m²であり、作業開始前の6～8cd/m²の順応輝度よりもさらに低いために、最適表示輝度の低下傾向が認められたものと考えられる。

これらの結果は、ディスプレイ周囲の輝度に近い背景輝度の表示画面を利用すれば、順応輝度の変化が少なくてすむことを意味している。能動的に光を発する透過型や自発光型のディスプレイについては、視覚系の順応輝度の変化を最小にする輝度制御機構を開発すべきだろう。これは利用者の視覚負担の軽減に寄与する。なお、陰画表示画面に対する順応輝度の低下は、CRTディスプレイよりもLCDでより顕著となろう。一般的にCRTディスプレイよりもLCDの方が外光拡散反射輝度が低く¹⁴⁾、陰画表示画面の背景輝度が低くなる傾向があるからである。この傾向はTFT-LCDで著しい。ただし、LCDの陰画表示での利用は少ない。

図12に作業開始前と作業開始30分後の輝度調整値の分布をパーセンタイル値で示した。極めて個人差が大きいことがわかる。これらの結果は、バックライトの輝度調整範囲の要件を示しているといえよう。

最適値の分布は、500 lx条件で見ると、10パーセンタイル値が約10cd/m²、90パーセンタイル値が約130cd/m²である。70 lx条件では、約3.5cd/m²～90cd/m²である。ただし、これらの結果は、低輝度部の輝度が一般的な透過型TFT-LCDの最低表示輝

度 $1\sim 2\text{cd/m}^2$ の条件における結果である。いずれにしても、利用者に好ましい表示輝度の設定を可能にするためには、表示輝度の調整範囲をかなり広く設計する必要がある。

また、下限許容限界の表示輝度の分布データは、吉武⁴⁾がすでに提案しているように、バックライトの消費電力の低減を優先する状況での表示輝度要件と考えることができる。例えば、 500lx 条件に対しては、約 35cd/m^2 の表示輝度が確保できれば、90%の利用者は、許容限界以上の表示輝度条件で作業が可能である。

4. む す び

透過型 LCD に文字画像を表示する場合に、表示輝度、コントラストをその調整範囲も含めてどのように設定すれば読取りやすい表示が得られるかについて 2 つの実験により検討した。

実験 1 では、多数の表示輝度とコントラストの条件に対する被験者 30 名の主観評定値から等評価尺度を与える曲線を求め、照度条件、表示極性ごとに最適な表示輝度とコントラストの組合せ条件を示した。その結果、水平面照度 500lx の条件下では、表示輝度 100cd/m^2 を中心とする範囲でコントラスト 10 以上に最適条件があることを示した。

実験 2 では、被験者 20 名の好ましい表示輝度の時間変動と個人差から表示輝度の調整範囲の要件について検討した。その結果、表示画面に対する輝度順応が被験者のディスプレイに対する好ましい表示輝度の設定に影響を及ぼしていることを示した。また、好ましい表示輝度は極めて個人差が大きいことを示した。ディスプレイの表示輝度の調整範囲の設計にあたっては、これらの要因を充分考慮する必要があることを指摘した。

利用者にとって、見やすく視覚負担の少ないディスプレイを開発していくためには、光環境が表示そのものに及ぼす影響、光環境が視覚系の順応輝度に及ぼす影響、ディスプレイの表示が視覚系の順応輝度に及ぼす影響、視作業の特性、利用者の視機能などの要因を

多角的に考慮し、ディスプレイ側で最適な条件に適応していく方策を考えるべきであろう。

本研究は、日産科学振興財団の第 19 回研究助成(一般研究 B)によって行われた研究の一部である。なお、実験にあたっては、小林由香さんと吉成つかささんの協力を得た。

〔参 考 文 献〕

- 1) 窪田：“平面ディスプレイの人間工学的要件”，照学誌，**76**，10，pp. 549-556 (Oct. 1992)
- 2) 窪田：“液晶ディスプレイの反射特性と反射グレアの関係”，照学誌，**79**，5，pp. 226-223 (May 1995)
- 3) 窪田：“液晶ディスプレイの視野角の評価”，テレビ誌，**46**，3，pp. 354-356 (Mar. 1992)
- 4) 吉武，田村：“TFT 液晶ディスプレイに要求される輝度に関する検討”，照学誌，**78**，6，pp. 268-275 (June 1994)
- 5) 高橋，窪田，西岡：“VDT 作業場の光環境に関する実態調査”，労働科学，**63**，4，pp. 181-191 (Apr. 1987)
- 6) 窪田：“液晶ディスプレイの人間工学的要件に関する実験的検討-I. 適正な輝度とコントラストに関する主観評価実験”，日本人間工学会第 35 回大会講演集 (June 1994)
- 7) 小川，堀口，望月：“主観評価実験により求めた CRT 漢字表示装置への文字表示条件”，テレビ誌，**32**，1，pp. 40-45 (Jan. 1978)
- 8) 鑑沢：“CRT 文字表示におけるコントラストと読み易さの関係”，電子情報通信学会・システム部門全国大会，I-115 (1983)
- 9) 長田，安田，長谷川，吉田，福田：“文字放送画像の好ましいコントラスト”，テレビ誌，**39**，6，pp. 516-522 (June 1985)
- 10) 高橋：“VDT 表示文字の見やすさと照明環境”，第 1 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集，pp. 239-244 (Oct. 1985)
- 11) 畑田豊彦：“ディスプレイに要求される機能”，照学誌，**73**，12，pp. 724-728 (Dec. 1989)
- 12) 窪田：“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，pp. 337-344 (Dec. 1990)
- 13) M. Takahashi, H. Iida, A. Nishioka and S. Kubota: “An Appropriate Luminance of VDT Character”, In E. Grandjean (ed.) Ergonomics and Health in Modern Offices, pp. 316-321, Taylor and Francis (Aug. 1984)
- 14) 窪田：“VDT 画面の表示特性の測定と評価”，ディスプレイアンドイメージング，**2**，2，pp. 131-141 (Dec. 1993)

くぼた けんじ 窪田 悟 昭和 51 年、成蹊大学工学部経営工学科卒業。現在、同大学助手。電子ディスプレイのヒューマンファクタに関する研究に従事。(財)労働科学研究所協力研究員。博士(工学)。正会員。