Vol.2019-MBL-92 No.9
Vol.2019-CDS-26 No.9
2019/8/30

眼球運動を利用した高速ラインディスプレイの開発と点滅周期の最適化

川崎直紀[†1]　若林恭平[†2]　三栖貴行[†3]　安部恵一[†4]　杉村博[†5]　奥村万規子[†6]

概要：本論文では，縦一列に並べたフルカラーLED 64 個を高速点滅させ，サッカードと呼ばれる人間の眼球運動を利用して，残像により二次元の画像を視認させるラインディスプレイを開発した．本ディスプレイは 16 個のフルカラーLED を点滅させるユニット基板 4 枚と各基板に画像データを転送する AVR マイコンから成る．2 次元画像を視認させるには LED を高速で点滅させる必要があるため，画像データの転送はすべて並列に処理をした．1 基のラインディスプレイと 2 つの指標を用いて実験を行い，点滅周期と知覚との関係を評価した結果，知覚しやすい点滅周期はおよそ 0.5~0.7ms であることがわかった．

キーワード：サッカード，ラインディスプレイ，LED，AVR マイコン

Development of Printed Circuit Board for High Speed Line Display Using Eyeball Movement And Optimization of Flashing Period

NAOKI KAWASAKI[†1]　KYOUHEI WAKABAYASHI[†2]
TAKAYUKI MISU[†3]　KEIICHI ABE[†4]
HIROSHI SUGIMURA[†5]　MAKIKO OKUMURA[†6]

Abstract: In this paper, we developed a saccade type line display with 64 LEDs which realized high speed flashing. The developed line display consists of four printed circuit boards that are flashed 16 LEDs and an AVR microcomputer which transfers image data to each circuit board. In order to recognize a 2D image by saccade, it is necessary to flash the LEDs at high speed, so all the transfers of image data were processed in parallel. We found that the most perceivable flashing period was about 0. 5 to 0.7 ms from experiment.

Keywords: Saccade, Line display, LED, AVR microcomputer

1. はじめに

我々は日常生活において，興味を引かれた対象に視線を向けるための視線の移動を繰り返し行っている．この時，起こっている速度の速い眼球運動がサッカードと呼ばれているものである[1]．このサッカードを利用したラインディスプレイが文献[2][3]で提案されている．これらは，観測者が 1 次元の光点列上を通過して視線を移動する間に，表示情報を縦に分割して高速に点滅させると，点滅パターンが空間に展開され，眼球運動により，網膜上に 2 次元の情報が知覚されるというものである．一方で，同様に一次元の点滅する光点列から，残像を利用して二次元の広がりを持たせる情報提示手法として，本体を高速に移動させる POV (Persistent Of Vision) やバーサライタと呼ばれている技術が古くから国内外の多くの場面で取り入れられている．この場合，本体を移動させる空間と動力が必要となるが，ラインディスプレイは，1 ラインに表示するだけで，人間の網膜に残像が知覚される．そのため，省エネ・省スペースで，広告用やエンターテイメントなど幅広い分野での応用が期待できる．

先行する研究において同様の装置で知覚像の大きさと眼球運動との時間関係についての報告がある[4]．また，文献[5]では，サッカードによる知覚特性に基づくコンテンツ画像の作成法が提案され，そこでは，装置の点滅周波数が 2kHz に設定されているが，点滅周波数については，その決定の根拠は明らかになっていない．

我々は以前，1 ラインの点滅周期と眼球運動の角度の関係を明らかにした[6]．ここでは，マスター・スレーブの I2C 通信で LED を駆動し，LED ドライバ IC 6 個を各 6 個のマイコンで制御し，高速点滅を可能にした．しかしながら，マイコン同士の同期が不十分であり，時間経過により表示画像にズレが生じてしまう問題や，マイコンを多数用いたため，プログラムの書き変えに時間がかかるなどの課題があった．

本論文では，マイコンは 1 つで，ラッチ回路に順次画像データを送る手法により，安定的に動作するラインディスプレイを製作する．サッカードの持続時間は，42±3ms というデータがあり[7]，この継続時間内に情報を知覚させるには LED を高速に点滅させる必要がある．そこで，画像データの転送はすべて並列に処理し，マイコンの出力を直接

†1 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-92 No.9
Vol.2019-CDS-26 No.9
2019/8/30

制御する手法でプログラムの高速化を図り，眼球運動を利用するディスプレイとして十分な高速点滅を実現する．本ディスプレイは，点滅周期可変機能を備えることで，個人差が出るとされているサッカード[8]を利用した知覚と点滅周期の関係を明らかにする．

2. 眼球運動を利用したラインディスプレイの原理

光点列をある一定以上の速さで移動させると，残像によりその軌跡が連続した線に知覚される.逆に光点列は動かず，眼球が一定以上の速さで運動することによっても同様の残像効果によって線が知覚される．これを応用して固定された光点列の発光パターンを時間変化させ，それをとらえる眼球のサッカードによって起こる定位誤り[5][9]を利用して画像などの情報を提示するのがラインディスプレイである[10].

ここで利用するサッカードは周辺視野でとらえられた視対象を補足する高速な眼球運動で，きわめて高速で視線を移動させる事ができるが，移動中はサッカード抑制が生じ視認特性が低下する[1]．しかし，一方でサッカード抑制は高空間周波数成分を多く含む輝度定義の形，および色刺激を用いると起こりにくい[11][12]．また,背景が暗い方が抑制を抑えられる特徴がある[2][13]．そのため，暗い部屋や夜間の屋外等の環境で使用する．

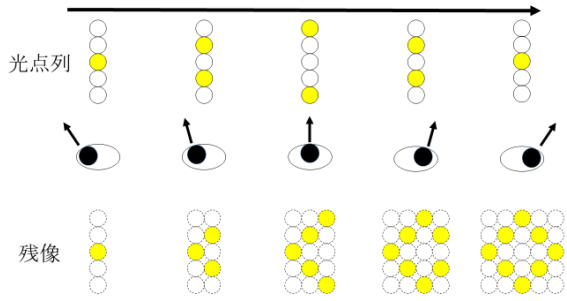


図 1　サッカードによる残像知覚

3. ラインディスプレイの概要

本ディスプレイは縦一列に並んだ 64 個のフルカラーLED を高速に点滅させる．製作したラインディスプレイの構成図を図 2 に示す．全体の構成は画像データを送信するマイコンと 16 個の LED を駆動するユニット基板を 4 枚の縦に接続した表示部と基板から成る．フルカラーLED の出力は RGB で構成されているので，64 個の LED に対しては 192 個の出力が必要になる．そこで，マイコンからは，8 画素ずつ 24 回に分けてデータを送信する手法を取った．

ユニット基板の構成図を図 3 に，LED 駆動回路タイミング図を図 4 に示す．1 枚の基板は，16 個の LED を点滅させるので，8 画素分ずつ 6 回に分けて転送する．それぞれの 2 階調 8 画素分のデータは 8 ビットのラッチ回路に保持する．4 枚の基板に 192 ビットのデータを全て転送し終わったら，マイコンからラッチ回路の Enable 端子をオンにする信号を送り，一斉にトランジスタアレイに出力し，LED を点灯させる．したがって，マイコンから 8 ビットデータを送る時は，何番目の基板の何個目のラッチ回路に送るデータかを区別する信号も同時に送らなければならない．そこで，デコーダを使って，基板とラッチ回路の選択をする．ラッチ回路の選択は 1 枚の基板に 6 個あるので，3to8 のデコーダを使用し，基板は 4 枚あるので，2to4 のデコーダと基板の番号を決める DIP スイッチを使用した．

マイコンの出力端子を図 5 に示す．マイコンからユニット基板へ送られる信号は，画像データを送る出力，ラッチ回路選択の出力，基板選択の出力，Enable の出力の計 14 の出力端子を使用する．

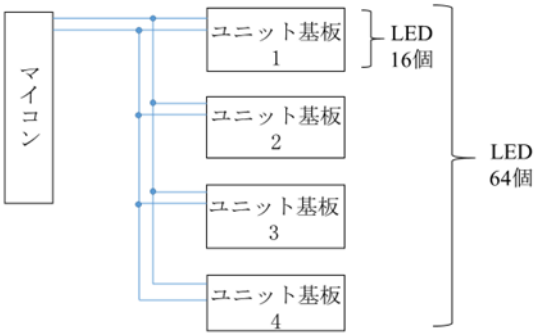


図 2　ラインディスプレイの構成図

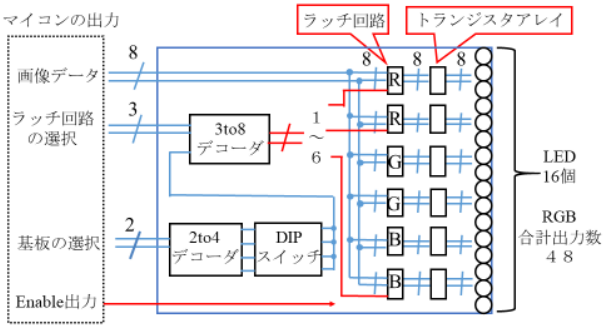


図 3　ユニット基板の構成図

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-92 No.9
Vol.2019-CDS-26 No.9
2019/8/30

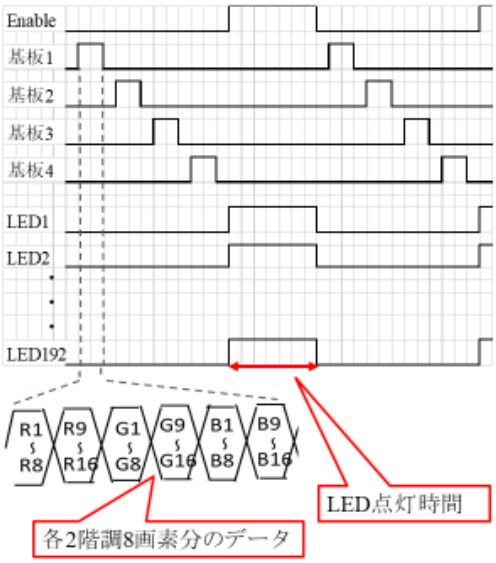


図 4　LED 駆動回路タイミング図

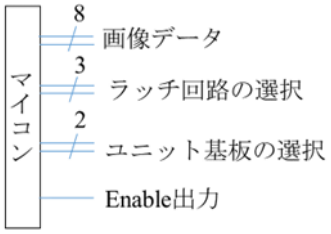


図 5　マイコンの出力端子

表 1　ユニット基板で使用する主な部品

名称	型式	個数
角型フルカラーLED	OSTA71A1D-1	16 個
トランジスタアレイ	TBD62083A	6 個
ラッチ回路	74HC573	6 個
2to4 ラインデコーダ	HD74LS138P	1 個
3to8 ラインデコーダ	TC74HCT139AP	1 個
インバータ	TC74HC04AP	2 個
DIP スイッチ 4P	KSD42	1 個
チップ抵抗	100Ω[3216]	16 個
	51Ω[3216]	32 個
チップ積層セラミックコンデンサ	1μF[1608]	16 個
電解コンデンサ	100μF	1 個

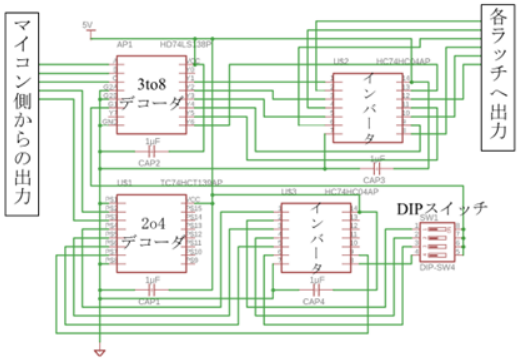


図 6　デコーダ部分の回路図

4.　ラインディスプレイの製作

4.1　ユニット基板の設計

ユニット基板 1 枚分で使用する主な部品を表 1 に示す．また，デコーダ周辺の回路図を図 6 に，フルカラーLED の Red 出力部の回路図を図 7 に示す．図 7 は，1 つの LED の R 端子をトランジスタアレイと接続した回路図であり，ラッチ回路とトランジスタアレイの出力は 8 端子で，6 セットの計 48（16×3）出力となる．

LED は基板と垂直に配置するため，L 型ピンソケットを使う．また，ユニット基板に信号を転送するために，フラットケーブルを使用し，電源と GND の導線は信号線とはケーブルを分けた．設計ソフト EAGLE で設計したパターン図を図 8 に，製作したプリント基板を図 9 に示す．基板の大きさは縦を LED16 個分の長さ 124mm，横を 102mm と設計した．

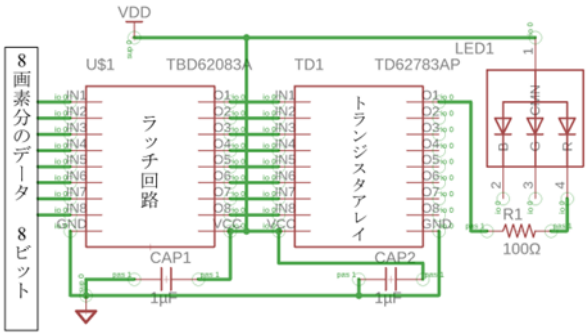


図 7　フルカラーLED の Red 出力部の回路図

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-92 No.9
Vol.2019-CDS-26 No.9
2019/8/30

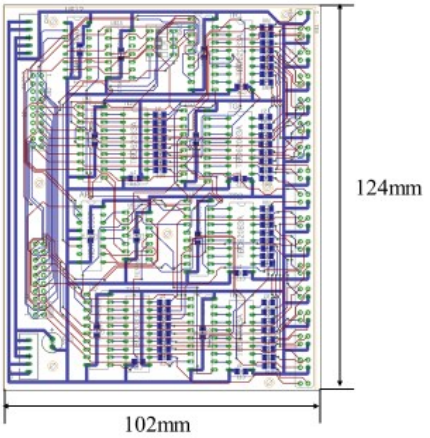


図 8　基板のパターン図

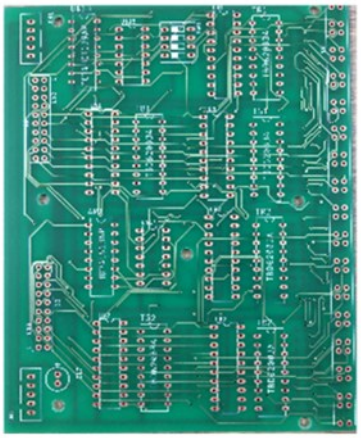


図 9　製造したプリント基板

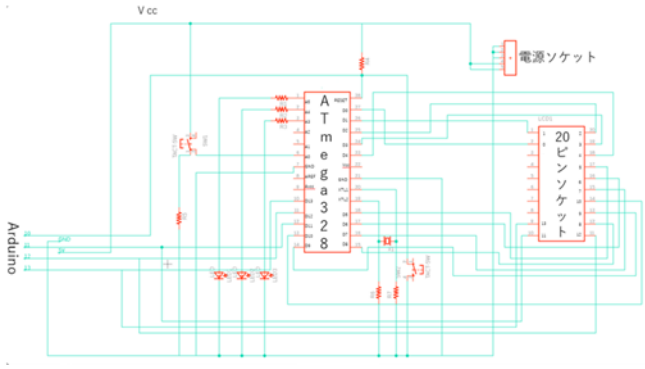


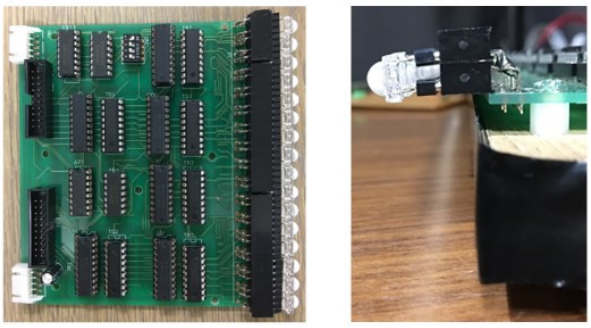
図 10　マイコン側の回路図

4.2 マイコン周辺回路の設計

AVR マイコン(ATmega328)と 16MHz の水晶発振器を用いて，4 枚のユニット基板に信号を送る回路を設計し，ユニバーサル基板上に製作した．回路図を図 10 に示す．ICSP（In-Circuit Serial Programming）を用いて，ATmega を基板に実装した状態で，書き込み装置として用いる Arduino を接続することで，プログラムを書き込むことができるようにした．図中の 20 ピンソケットで ATmega とユニット基板を繋げ，画像データを転送する．また，本ディスプレイはタクトスイッチで LED 点滅周期の変更を行うことができ，3 つの丸形 LED ランプにより，視覚的に現在の点滅周期を確認できるようにした．

4.3 ラインディスプレイの組み立て

製造したプリント基板に部品を実装したものを図 11(a)に，LED 実装部を基板の表から横で撮った写真を図 11(b)に示す．LED を基板の右外側で垂直に取り付けるために，L 型ソケットを使用し，拡散キャップを装着した．これにより，真正面から見ると，1 列の LED のみ見ることができる．マイコン側回路とラインディスプレイの駆動回路及び表示部の基板を取り付ける土台は木材を使用し，4 つのユニット基板とマイコン側の基板を接続した．製作したラインディスプレイを図 12(a)に，真正面からの写真を図 12(b)に，横からの写真を図 12(c)に示す．4 枚の基板を接続した長さは 496mm で，土台の高さは 650mm，幅は 360mm，奥行は 12mm で設計した． 64 個の LED をすべて白色に発光させたときに測定した結果，最大電流は 4.2A だったため，電源は 5V，6.2A の AC アダプタを使用する．

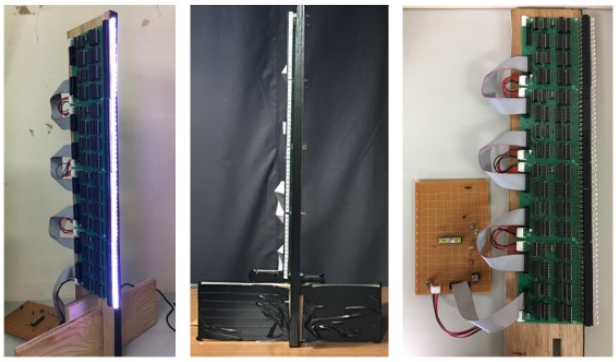


(a)部品を実装した基板　　（b）LED 実装部

図 11　部品を実装した基板

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-92 No.9
Vol.2019-CDS-26 No.9
2019/8/30



(a)表示部全体　　(b) 真正面　　(c) 真横

図 12　製作したラインディスプレイ

5. 点滅周期の高速化

Arduino のスケッチで既存の関数を使用すると時間がかかるため，Arduino のポートを直接制御する方法でプログラムの高速化を図った．画像データはフルカラーLED の各 RGB に分け，64×64 の配列で作成し．2 階調 8 画素の画像データを 8 ビットの 2 進数(character 変数)で一度にパラレルで転送した．このときのデータ転送時間を測定するために，オシロスコープによる観測を行った．ラインディスプレイの一番端のラインのみを点滅させる画像データを使い，点滅周期を 0ms に設定して，フルカラーLED の Green を出力し，観測を行った．オシロスコープの観測結果の写真を図 13 に示す．使用する LED はアノードコモンのため，波形が下がっている部分で LED が点灯する．結果から画像 1 ラインの最速点滅周期が 58μs，点灯している時間が 5μs，消灯している時間が 53μs であった．消灯している時間はデータを転送している時間であり，本ディスプレイでの 1 ラインのデータ転送時間は 53μs であり，高速点滅が実現できることがわかった．

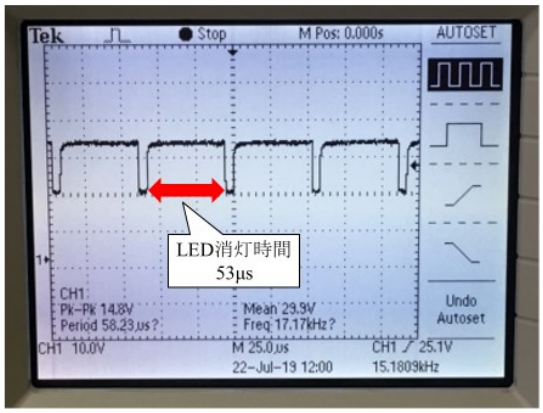


図 13　オシロスコープの観測結果

6. 点滅周期の主観評価実験

製作したラインディスプレイを用いて知覚と点滅周期の関係性を明らかにするため，20 人を対象に一種類の画像データを用い，ラインディスプレイの点滅周期だけを変化させて観測させる主観評価実験を行った．

6.1 実験方法と条件

図 14 に示すようにラインディスプレイ 1 基と，その左右に指標 2 基を暗室内に配置する．暗室内の高さ 655mm の机上に指標とラインディスプレイを指標間 0.5m，指標 2 基の中間地点にラインディスプレイという形で配置し，ラインディスプレイ被験者まで 2m に設定した．被験者の目線は机上から 385mm であるディスプレイの中心に合うように適宜調整した．図 15 は被験者から見た暗室内のラインディスプレイと右側の指標が点灯している時の写真である．実験時の照度はラインディスプレイ消灯時の暗室内が 43.4lx 点灯の暗室内が 110.3 lx，被験者が座った椅子の位置が 563.8 lx だった．また，図 16 のような黄色の 64×64 サイズの星の画像を使用した．シンプルな図形であることに加え中心が四角，丸などより分かりやすいことを理由に星の画像を選択した.画像の色については文献[14]を参考にした．指標を用いてサッカードを誘発する手法は文献[2]を参考にした．この指標は向かって左側の指標 A が点灯し，次に右側の指標 B が点灯，全消灯を繰り返し左から右への視線誘導を行う．点滅周期 0.2ms~1.2ms を 0.1ms 毎に評価した．

アンケートに用いた評価基準を表 2 に，各評価イメージ図を図 17 に示す．被験者は 20 人で表 2 に示した評価基準から選択する．結果を評価項目ごとに集計する．

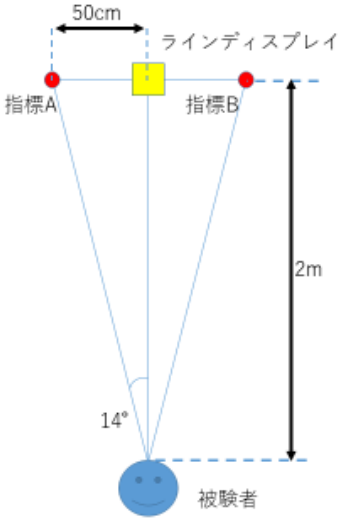


図 14　被験者と装置の位置関係

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-92 No.9
Vol.2019-CDS-26 No.9
2019/8/30

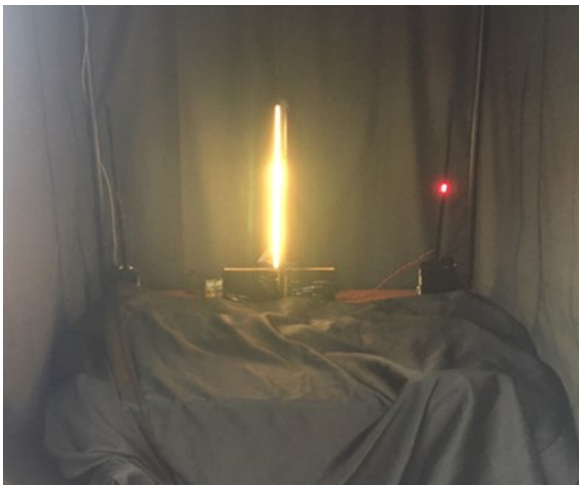


図 15　暗室内のラインディスプレイと指標

図 16　使用した画像データ

表 2　アンケートに用いた評価基準

1:画像の通りに見える
2:横幅が広く見える
3:横幅が狭く見える
4:形になっているのは分かるが星として認識できない
5:何も見えない

図 17　各評価のイメージ図

6.2　主観評価結果

項目毎に人数をまとめたグラフを図 18 に示す．グラフにおいて青線で示された「画像の通りに見える」部分から点滅周期 0.5ms，0.6ms，0.7ms 時に画像の通りに見えると回答した人数が一番多いことが分かった 0.5ms~0.7ms 内に最適な点滅周期が存在すると考えられる．また，実験①と同様に周波周期が早いと画像が狭く見える傾向が読み取れる．横幅が広く見えるという項目が点滅周期 1.0ms あたりから下降しているが，これは広く見えすぎて星の一部分のみが認識されたため被験者が「形になっているのは分かるが星として認識できない」の項目に入れたことが予想できるので「横幅が狭く見える」の項目が減った分，増加していると考えられる．

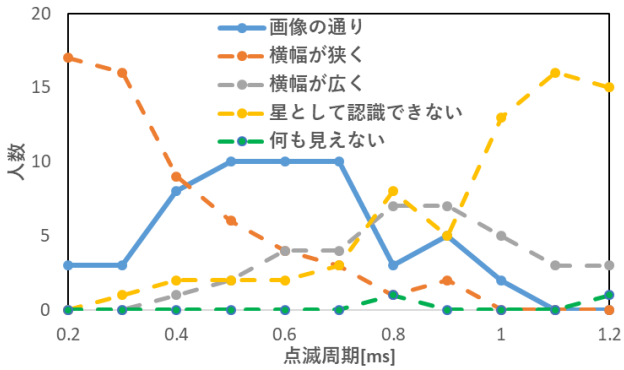


図 18　点滅周期に対する主観評価結果の人数

7.　まとめ

本研究では，64 個の LED を点滅するラインディスプレイを製作した．LED を点滅する基板を 4 枚に分けて回路を設計し，プリント基板を製造した．基板化することで，雑音の影響を受けずに安定した動作を確認することができた．また，データ転送の並列処理とマイコンのポートを直接制御するプログラムで高速化を図り，最速点滅周期 58μs を実現した．

ラインディスプレイ 1 基とサッカードを誘発させるための指標 2 基を使用した場合において画像が知覚しやすい点滅周期を主観評価実験によって 0.5ms，0.6ms，0.7ms の時であると分かった．また，点滅周期が速いと画像の幅が狭く見え，点滅集が遅いと画像の幅が広く見える傾向にあると分かった．これにより．ラインディスプレイの LED 点滅周期を 0.5~0.7ms に設定することで，人に画像を知覚させることができることがわかった．

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-92 No.9
Vol.2019-CDS-26 No.9
2019/8/30

謝辞 本論文の基板製作について，ご指導をいただいた神奈川工科大学　非常勤講師，有限会社マイクロチップ・デザインラボ 代表取締役 後閑哲也氏に心より感謝申し上げます．本論文は JSPS 科研費 JP18K04170 の助成を受けたものです．

参考文献

[1] 日本視覚学会 編, “視覚情報処理ハンドブック”, 朝倉書店, 2000.
[2] 渡邊淳司, 前田太郎, “サッカードを利用した新しい情報提示手法の提案”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.2, pp.79-87, 2001.
[3] 渡邊淳司, 坂本憲久, 則武厚, 前田太郎, 舘暲, “移動している観察者に対する Saccade-based Display を利用した情報提示の研究”. 電子情報通信学会, HIP104, pp.69-73, 2004-7.
[4] 渡邊淳司, 田畑哲稔, 前田太郎, 舘暲, “眼球運動を利用したディスプレイとパフォーマンスの融合”, 電子情報通信学会, HIP103, pp19-23, 2003-06.
[5] 有賀玲子, 斎藤英雄, 安藤英由樹, 渡邊淳司, “Saccade-based display の特性を活かした 呈示コンテンツの生成”, 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集 (2008 年 9 月).
[6] K. Kanazawa, S. Kazuno, M. Okumura “Optimization of Flashing Period for Line Display Using Saccade Eyeball Movement”, The 24th IDW, Japan, pp.1469-1472, Dec 7, 2017.
[7] J Otero-Millan, X G. Troncoso, S L. Macknik, I Serrano-Pedraza, S Martinez-conde “.Saccades and microsaccades during visual fixation, exploration, and search: Foundations for a common saccadic generator”,journal of vision, vol 8,dec 2008.
[8] Nash Unsworth,Randall W. Engle Georgia,Josef C. Schrock, “Working Memory Capacity and the Antisaccade Task: Individual Differences in Voluntary Saccade Control”, Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, Vol. 30, No. 6, 1302–1321,2004.
[9] 十河宏行, “サッカード実行時における視覚的空間定位”, 京都大学学術情報リポジトリ, 2001-03-23.
[10] 渡邊淳司, 前田太郎, 舘暲, “サッカード前中後にわたって表示される連続光点刺激の知覚と眼球運動の時間関係性”, 電気情報通信学会論文誌, vol.J86-D-Ⅱ No.9, pp.1350-1357, 2003-09-01
[11] 光藤宏行, ”サッカード眼球運動と知覚的安定”, 九州大学心理学研究, 12,pp.61-68, 2011-03-01.
[12] K Uchikawa,M Sato “Saccadic suppression of achromatic and chromatic responses measured by increment-threshold spectral sensitivity”, Journal of the Optical Society of America A,vol 12,no.4, April, 1995.
[13] M R. Diamond,J Ross,M.C. Morrone “. Extraretinal Control of Saccadic Suppression”,The Joural of Neuroscience,pp 3449-3455,May 1,2000.
[14] 豊田征岐, 遠藤大暉, 町田優希, 杉村博, 奥村万規子, “サッカード型ラインディスプレイの製作と評価”, 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, 2018.

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan