



赤, 緑, 青色 LED 混色光を用いた高速視覚刺激装置

吉沢 達也・中野 靖久・内川 恵二

東京工業大学大学院総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1993年4月19日受付, 1993年7月2日受理)

Rapid Visual Stimulator Using Color Mixture of Red, Green and Blue LEDs

Tatsuya YOSHIZAWA, Yasuhisa NAKANO and Keiji UCHIKAWA

Tokyo Institute of Technology Graduate School,
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

(Received April 19, 1993; Accepted July 2, 1993)

We present a new psychophysical experiment apparatus which uses high luminant red, green and blue LED (light emitting diode) as light sources. It is possible to study various experiments concerned with human color vision because of an accuracy of time control and full color stimuli. This apparatus is composed of 6 optical channels. Luminance and exposure time of each LED are controlled by computer. The luminance is changed by varying duty ratio in high frequency flicker. We have shown that this apparatus is better than previous one for psychophysical experiments.

1. はじめに

色覚の心理物理学研究において用いられる実験装置はキセノン・ランプなどを光源としたマックスウェル視光学系やコンピュータ制御のカラー CRT ディスプレイなどさまざまなものがある。光学系による装置では刺激光の強度や分光特性を精度よくコントロールすることができるが、複雑なパターンを呈示するのは困難である。また、CRT ディスプレイはさまざまなパターン呈示には最適だが、刺激光の色度範囲が限られていること、画面内で色度が一定でないことなどの問題点がある。このような装置にはそれぞれ一長一短があり、その特徴をよく考慮して実験の目的に最もよく合うものを選択しなければならないが、刺激呈示の時間条件の制御という点からみると、これまでの装置ではどれも十分ではなかった。たとえば、視覚系の時間応答特性を解明するために、光学系では従来電磁シャッターや回転ディスクなどにより刺激の時間パラメータを制御していた¹⁻⁶⁾。しかし、これらの方法では刺激呈示の時間的立ち上がりおよび立ち下がり特性に限界があり、また、ある範囲でばらつきがあっ

た。そのため、輝度変化のない刺激の時間交替を行おうとしてもわずかな輝度ずれなどが生じ、それが結果に影響してしまうことがあった。また CRT ディスプレイを用いる場合⁷⁾でも刺激呈示がフレームレートで制限を受けるため、高周波数の刺激呈示に限界があった。

そこで本装置では光源として発光ダイオード (LED) を使用し、刺激の時間制御を電氣的に行うことにより上記のような刺激呈示の障害を取り除くことを目的とした。LED を用いた実験装置はこれまでも使用されているが⁸⁾、赤、緑色の LED だけを用いていたため呈示できる刺激の色度範囲が限られていた。本装置では高輝度の青色 LED⁹⁾ を従来からある赤色および緑色 LED とともに用い、刺激光の色度範囲を 2 次元的に広げることが可能とした。これにより色光の高速呈示が行え、特に、色光刺激の完全な交替呈示実験が可能となった。

2. 装置の構成と動作原理

Fig. 1 に装置の全体図を示す。パーソナルコンピュータ (PC-9801 F) から DI/DO ボード (AB 98-16 A) を通して制御部 (control unit) に各 LED の輝度 (8 bits,

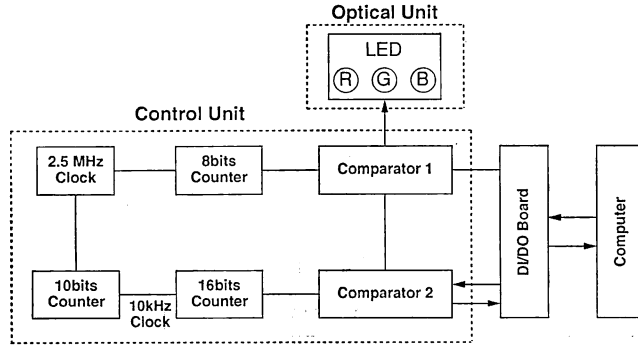


Fig. 1 Block diagram of our apparatus. See detail in text.

256 levels) と点灯時間 (16 bits) のデータが送られる。制御部では光学部 (optical unit) の赤, 緑, 青色 LED の輝度と発光時間を直接制御する。

LED の発光輝度は Fig. 2 に示すように, 10 kHz のフリッカーのデューティ比 (1 周期のフリッカー光のうち発光している時間の割合) を $1/256 \sim 1$ まで変えることにより決定される。すなわち, Fig. 2 (A) のようにデューティ比が小さいときには高周波フリッカー光の 1 パルスの発光している時間が短いため全体としては暗くなり, Fig. 2 (B) のようにデューティ比が大きときには発光している時間が長くなり全体として明るくなる。このように高周波数でフリッカーする刺激光に対する視覚系の応答は刺激光の時間平均された輝度と同じ輝度の定常な刺激光に対する応答と等しい (Talbot-Plateau の法則) ことが知られている¹⁰⁾。LED の輝度の制御にこのような方法を用いた理由は電流制御によりその輝度を変えると分光組成が変わるためである¹¹⁾。

上記の動作を実現する制御部は Fig. 1 に示すように 2.5 MHz の基本クロック (2.5 MHz clock), 8 bits カウンタ (8 bits counter), 10 bits カウンタ (10 bits counter), 16 bits カウンタ (16 bits counter), コンパレータ 1 (comparator 1), そしてコンパレータ 2 (comparator 2) から構成されている。8 bits counter は 2.5 MHz clock からの基本クロックを分周する。各 bit の出力は LED のデューティ比を決めるためにコンピュータから DI/DO ボード (DI/DO board) を介して入力された信号と comparator 1 で比較される。10 bits counter は 2.5 MHz 基本クロックを 10 kHz に分周し, これをクロックとして 16 bits counter に入力する。16 bits counter で分周された各 bit の出力は表示時間を決めるためにコンピュータから DI/DO ボードを通して出力された信号と comparator 2 で比較される。Comparator 2 が一致を検出するとデューティ比を決める comparator

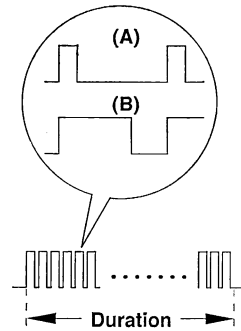


Fig. 2 Pulse train of high frequency flicker. (A); smaller duty ratio flicker, (B); larger duty ratio flicker.

1 からの信号が各 LED に送られ, 表示時間と輝度を決める。またこの信号は全カウンタをリセットし, 同時に DI/DO ボードを介してコンピュータに取り込まれ, 刺激条件が記録される。

二つの光学ユニットを組み合わせた光路図の例を Fig. 3 に示す。光学ユニット 1 (optical unit 1) は光路 1, 2, 3 (ch 1, 2, 3) からなり, 赤, 緑, 青色 LED; R 1, G 1, B 1 のそれぞれからの色光がビーム・スプリッタ BS 1 とハーフミラー HM 1 により混色される。ユニット 2 (optical unit 2) は光路 4, 5, 6 (ch 4, 5, 6) からなり, ユニット 1 と同様に赤, 緑, 青色 LED; R 2, G 2, B 2 からの色光が混色される。光学ユニット 1, 2 からの混色光はビーム・スプリッタ BS 3 を通って被験者へと至る。

同一ユニット内の LED は 10 kHz のクロックに同期しており, 表示時間は各ユニットごと制御する。また, 各 LED の輝度はデューティ比を変えることにより, それぞれ独立に制御する。

本装置は各ユニットの制御できる輝度レベルが 256 段階であり, 視覚の特性を測定するには不十分な場合が

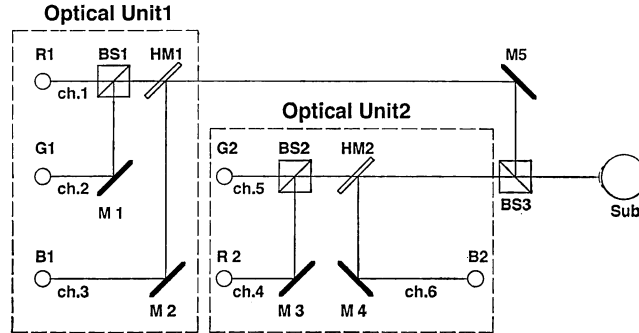


Fig. 3 Schematic diagram of apparatus. R 1, R 2, G 1, G 2, B 1, B 2; red, green and blue LED, M 1-5; mirror, HM 1, 2; half mirror, BS 1-3; beamsplitter, Sub; subject.

ある。そのため、ユニット1を一定の輝度レベルに固定し、ユニット2において256段階を制御して、両ユニットの色光を重ね合わせることで、刺激の輝度レベルの分解能を向上させることによりこの問題を解決している。例えば、100 Td の刺激を呈示する際に、ユニット

1において90 Td 一定の色光を作り、ユニット2において10 Td の色光を作り、その10 Td の色光を各 LED の輝度を256段階で制御することにより視覚特性の測定に十分な分解能を実現することができる。

3. LED の 特 性

本実験で用いた赤色 (HBR5566 X, スタンレー), 緑色 (HBG5566 X, スタンレー), 青色 (P-884-1, 三洋) の3種類のLEDの電気・光学特性を Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 と Table 1 に示す。Fig. 4 は各 LED の分光放射輝度特性を示し、縦軸は相対放射輝度、横軸は波長

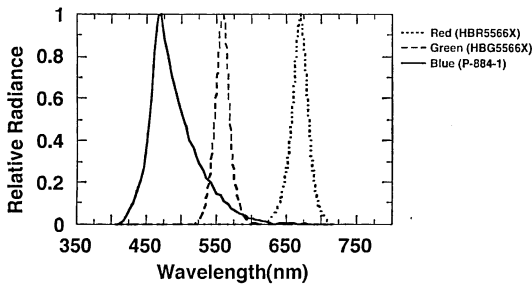


Fig. 4 Spectral distribution of each LED: A continuous line, broken line and dotted line represent a distribution of blue, green and red LED, respectively.

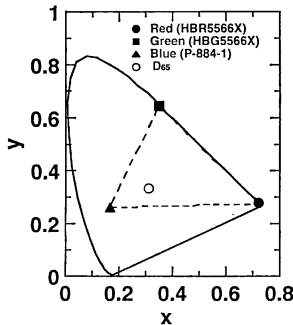


Fig. 5 *xy* chromaticity coordinate of each LED. ●, ■ and ▲ represent coordinate of red, green and blue LED, respectively. Our apparatus can present stimuli within a dashed triangle.

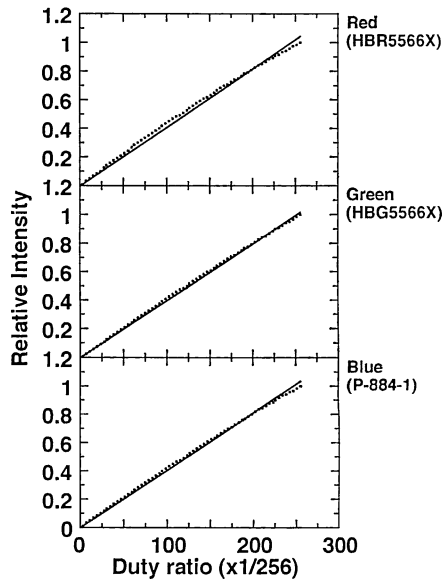


Fig. 6 Linearity of intensity to duty ratio: A top, middle and bottom panel are property of red, green and blue LED. Dots are calibration data and continuous lines are regression line.

である。この特性は LED のデューティ比が 1 で、絶対最大定格時の値 (Table 2 を参照) を用いて測定したものである。Fig. 5 は赤 (●), 緑 (■), 青 (▲) 色の LED の色度座標を表し、破線で囲まれた三角形内が本実験装置で表示することができる色度範囲である。Fig. 6 は各 LED のデューティ比に対する強度の線形性を示している。縦軸は測光した値の最高値を 1 として正規化した相対強度である。図中の各点は測光値、実線は測光値から最小二乗法により求めた回帰直線を示している。赤, 緑, 青色 LED の回帰直線の傾きはそれぞれ 0.0041, 0.0040, 0.0041 であり、相関係数はそれぞれ 0.9988, 0.9996, 0.9995 であった。各 LED ともデューティ比の増加に対して強度が線形に増加していることがわかる。

4. 本装置の有効性

従来より心理物理学研究において、視覚系の時間的応答特性の研究が行われてきた。最近でも輝度チャンネルと色チャンネルの時間的応答特性を比較する研究が行われている。その際に問題となるのが色チャンネルの時間的応答特性を選択的に調べるための刺激呈示方法である。輝度チャンネルを変化させずに色チャンネルだけから出力を取り出すには等輝度色相置換法⁵⁾などが用いられる。この場合刺激の時間と輝度を高精度に制御することが必要である。時間的に輝度変化のある刺激とない刺激では視覚系に与える効果が異なり、輝度変化のある刺激条件では輝度チャンネルの特性が得られ、輝度変化のない刺激条件では色チャンネルの特性が得られることが過去の研究^{1,3,8,12)}において報告されている。すなわち、等輝度刺激呈示において装置の都合上生じる時間的小輝

Table 1 Electrical and optical characteristics. For each LED peak wavelength and chromaticity coordinates were calibrated at absolute maximum ratings (see Table 2).

	R (HBR 5566 X)	G (HBG 5566 X)	B (P-884-1)
Rise time	50-100 ns	1-2 μ s	1-2 μ s
Fall time	50-100 ns	1-2 μ s	2-4 μ s
Peak wavelength	670 nm	560 nm	470 nm
Chromaticity coordinates (x, y)	(0.723, 0.276)	(0.363, 0.632)	(0.156, 0.231)

Table 2 Absolute Maximum Ratings of each LED.

	R (HBR 5566 X)	G (HBG 5566 X)	B (P-884-1)
Forward current	50 mA	50 mA	40 mA
Forward voltage	2V	2.5V	3.9V

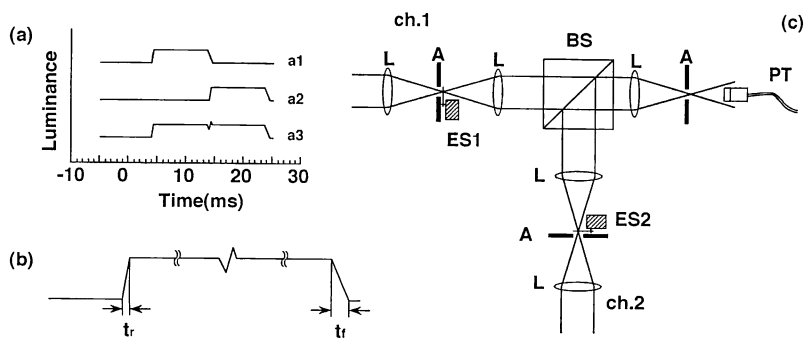


Fig. 7 Temporal property of electromagnetic shutter. (a): Time course of luminance. a1 and a2 represent luminance profile of light through shutter ES1 and ES2, respectively. a3 represents luminance profile at successive opening ES1 and ES2. (b): This is enlarged a3. t_r and t_f represent a rise time and a fall time, respectively. (c): Optical system for calibration. L: lens, A: aperture, BS: beamsplitter, ES1, ES2: electromagnetic shutter, PT: phototransistor.

度変化(例えば, 機械的シャッタなどの時間的な動作特性の限界やばらつき)の視覚系への影響が考えられる。

これに対し, 本装置は上述のように刺激の輝度と時間制御を高精度に行えるため心理物理学実験を行う上で非常に優れているといえる。ここで, Fig. 7 に電磁シャッタを用いて刺激の時間的置換を行ったときの刺激の輝度の時間過程を示す。Fig. 7 (a)中の a1 は Fig. 7 (c)中の電磁シャッタ ES1 だけを 10 ms 開いたときの刺激輝度の時間変化を示し, a2 は電磁シャッタ ES2 だけを ES1 が開いてから 10 ms 後に 10 ms 開いたときの刺激輝度の時間変化を示している。ただし, ch. 1 と ch. 2 の刺激の輝度はあらかじめ等輝度にしておく。そして, a3 はこの両方により刺激を時間的置換したときの刺激輝度の時間変化を示している。Fig. 7 (b)は a3 の拡大図である。電磁シャッタの立ち上がり時間 t_r と立ち下がり時間 t_f はそれぞれ 0.39 ms, 0.90 ms であり, その時間特性のため置換時に時間的小輝度変化を伴うことがわかる。Fig. 7 (c)はこれらの校正に用いた装置図である。L はレンズ, A はアパーチャ, BS はビーム・スプリッタ, PT はフォト・トランジスタ, ES1, ES2 は電磁シャッタをそれぞれ示す。

一方, LED を用いた本装置ではデューティ比の変えられる 10 kHz のパルス列により刺激を呈示するため, 刺激の置換時における刺激間の重なりは物理的にない。したがって, 電磁シャッタによる刺激の切り替えで見られる時間的小輝度変化はない。

5. ま と め

高輝度 LED を光源とした新しい心理物理学実験装置を提案した。本装置は, 刺激の時間制御を電気的に行うことにより, 従来の機械的シャッタによる刺激呈示では取り除くことのできなかつた輝度 artifact を除去することができた。光源として赤, 緑, 青色の3種の LED を用いることにより, フルカラーの刺激を使ったさまざま

な心理物理実験が可能となった。

本装置の製作にあたってご助言をいただいた九州芸術工科大学山下由己男先生, 東京理科大学渡邊健先生に感謝いたします。

文 献

- 1) R. W. Bowen, D. T. Lindsey and V. C. Smith: "Chromatic two-pulse resolution with and without luminance transients," *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 1501-1507.
- 2) M. E. Breton: "Hue substitution: Wavelength latency effects," *Vision Res.*, **17** (1977) 435-443.
- 3) R. W. Bowen: "Latencies for chromatic and achromatic visual mechanisms," *Vision Res.*, **21** (1981) 1457-1466.
- 4) V. C. Smith, R. W. Bowen and J. Pokorny: "Threshold temporal integration of chromatic stimuli," *Vision Res.*, **24** (1984) 653-660.
- 5) K. Uchikawa and M. Ikeda: "Temporal integration of chromatic double pulses for detection of equal-luminance wavelength changes," *J. Opt. Soc. Am.*, **3** (1986) 2109-2115.
- 6) H. G. Sperling and C. L. Jolliffe: "Intensity-time relationship at threshold for spectral stimuli in human vision," *J. Opt. Soc. Am.*, **55** (1965) 191-199.
- 7) P. Cavanagh, D. A. MacLeod and S. M. Anstis: "Equiluminance: spatial and temporal factors and the contribution of blue-sensitive cones," *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 1428-1438.
- 8) W. H. Swanson, T. Ueno, V. C. Smith and J. Pokorny: "Temporal modulation sensitivity and pulse-detection thresholds for chromatic and luminance perturbations," *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 1992-2005.
- 9) 新名達彦: "青色 LED", *光学*, **19** (1990) 150-154.
- 10) R. M. Boynton: *Human Color Vision* (Holt-Rinehart-Winston, New York, 1979).
- 11) T. Watanabe, N. Mori and F. Nakamura: "A new superbright LED stimulator: Photodiode-feedback design for linearizing and stabilizing emitted light," *Vision Res.*, **32** (1992) 953-961.
- 12) J. Kremers, B. B. Lee and P. K. Kaiser: "Sensitivity of macaque retinal ganglion cells and human observers to combined luminance and chromatic temporal modulation," *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1992) 1477-1485.