CONTRAST THRESHOLDS OF FLASHING COLOURED STIMULI IN PERIPHERAL VISION AT LOW LIGHT LEVELS

Pasi ORREVETELÄINEN, Marjukka ELOHOLMA, Liisa HALONEN Helsinki University of Technology, Lighting Laboratory

Contrast threshold was examined with the method of limits to determine the visual performance of the human eye in peripheral vision at low photopic and high mesopic light levels. Three stimulus colours were used to determine the contrast thresholds of eight subjects. Measurements were conducted at four eccentricities: 0° , 10° , 30° , and 60° . The results revealed that while the blue stimuli caused only moderate changes in the contrast threshold according to target eccentricity and light level, the changes for the red stimuli were much larger. It was found that the $V(\lambda)$ function did not describe the visual performance sufficiently well in the peripheral vision at low photopic light levels. An attempt was made to determine a new luminous efficiency function for the peripheral vision at low photopic light levels. This new function described the measurement results with best accuracy at 10 cd/m^2 .

1. Introduction

This research was inspired by reaction time experiments conducted by the authors at low photopic and high mesopic light levels. In these experiments, the red and amber stimuli of low contrast (C=0.2) presented in peripheral vision (10° eccentricity) were perceived very poorly by some subjects, but well by other subjects. Stimuli presented with higher contrast (C=0.5 or 3.0) were detected with higher accuracy by all subjects. The reaction time measurements were conducted in Mesopic Optimisation of Visual Efficiency (MOVE) project funded by the European Commission. The objective of MOVE project was to define relevant spectral sensitivity functions for the mesopic luminance range and to establish appropriate working practices [1]. A linear mesopic model was developed during the project [2].

The aim of the work presented in this paper was to find the contrast threshold for three different stimulus colours presented in foveal and peripheral vision at low photopic and high mesopic light levels (between 0.1 and 10 cd/m²). Short, 500-ms rectangular shaped flashes were used as targets in the measurements.

According to Zuidema et al. [3], two temporal parameters affect the threshold energy, namely the duration of the flash and the interval between two flashes. The interval between two flashes should be at least 1 s, otherwise the two flashes affect each other, and eventually they are seen as continuous light if the interval becomes very short (approximately 100 ms). For flashes shorter than 100 ms, the threshold energy is independent of flash duration. For flash durations between 100 and 500 ms, the relation between the log threshold energy and log flash duration has a constant positive slope. For larger values of flash duration, the threshold energy becomes linearly proportional to the flash duration.

Blackwell [4] conducted very extensive research in 1946 on contrast thresholds, which indicated that very long (over 60 s) presentation times were required to achieve the minimum contrasts under certain circumstances. He also found out, that below a certain luminance level, the subjects started to use the peripheral vision instead of foveal vision to detect the stimuli. This change was noticed at approximately 0.0024 cd/m². At background luminances above 3.4 cd/m², the contrast thresholds were constant with respect to adaptation luminance.

2. Measurement system

The measurement system consisted of a large hemisphere (diameter 1980 mm), which interior was painted white. This surface served as the background for the visual stimuli. The background was uniformly illuminated with fluorescent lamps with dimmable electronic ballasts. In order to achieve the desired light levels, it was necessary to use neutral density filters wrapped around the lamps. The final adjustments of light levels were made with the dimmable ballasts. The filters affected the spectral power distribution of the lamps. The spectral power distributions of the light at different light levels can be seen in Figure 1. The correlated colour temperature of the light was 4920 ± 100 K.



Figure 1 Radiances of the background luminances at three background luminance levels.

The visual stimuli were produced with light emitting diodes (LED). Small holes were drilled through the surface of the hemisphere. The LEDs were attached outside the hemisphere pointing towards the location of the subject. The holes were covered with white diffusers, so the LEDs were not directly visible to the subjects. Filters and diffusers were used to reduce the intensity of the light produced by the LEDs. The light output of the LEDs was controlled with a computer. It was possible to adjust the luminous intensity and the duration of the light flash of each LED individually. The diameter of the circular stimuli was 5 mm, which corresponds to stimuli size of 0.29° at the viewing distance of 990 mm.

 Table 1
 The peak wavelengths and half-bandwidths of the three coloured stimuli (LEDs) used in the measurements.

| Stimulus spectra | Blue | Green | Red |
|----------------------|------|-------|-----|
| Peak wavelength (nm) | 467 | 525 | 638 |
| Half-bandwidth (nm) | 26 | 36 | 18 |

2.1 Stimulus contrasts

The stimulus contrasts were measured against the immediate surrounding of the stimulus. The luminance of the immediate surrounding was measured with a calibrated LMT L1009 luminance meter. Equation 1 was used for the contrast calculations

$$C = \frac{L_{\bullet} - L_{\bullet}}{L_{\bullet}} \qquad (1)$$

where C is the contrast, L_t - the target luminance, and L_h - the background luminance.

The luminance of the stimulus consisted of two parts. The first part was the luminance produced by the LED on the diffuser visible to the subject. This luminance was measured with the luminance meter using a close-up lens. The luminance was measured for the maximum light output of the LEDs at each location after positioning the required filters and diffusers in front of the LEDs. The second part of the stimulus luminance consisted of the luminance produced by the fluorescent lamps. The reflectance of the diffuser was approximately 12% lower than the overall background luminance. Because of this feature, the contrasts could be negative.

2.2 Stimulus and background radiances

In order to apply also other luminous efficiency functions than the $V(\lambda)$, it was necessary to know the radiance produced by the background and the stimulus light. The spectral power distribution of the LEDs and the background light was measured with an Optronics OL 754 Portable High Accuracy UV-Visible Spectroradiometer by Optronic Laboratories, Inc.

The spectral power distribution of the background light was measured at the desired light levels. The measured relative spectral power distribution was converted into radiance using Equation 2 [5] and the measured background luminance. The integral was computed with the measured spectral power distribution without units. The integral was multiplied with K_m (683 lm/W). The gained value was compared with the measured luminance L. As the values did not usually match, a correction coefficient for the radiance was calculated by dividing the measured luminance.

$$L = K_{\pi} \left[L_{\alpha, \mathbf{i}} V(\hat{\lambda}) d\hat{\lambda} \right]$$

where L is the luminance, K_m - the maximum spectral luminous efficacy, $L_{e\lambda}$ - the integrated radiance of the source (spectral distribution of the radiance), and $V(\lambda)$ - the photopic luminous efficiency function.

The radiance of the stimuli was calculated in a similar way except that the transmission of the filters and diffusers in front of the LED was taken into account. The transmittances of the filters and diffusers were measured with the OL 754 spectroradiometer. The reflectance of the visible diffuser was determined by measuring the direct and reflected spectral power distributions using a tungsten-filament lamp.

3. Subjects

Eight voluntary students and employees (2 females and 6 males) of Helsinki University of Technology participated in the tests as subjects. The ages of the subjects ranged between 23 and 31 years, and the mean age of the subjects was 25.5 years.

Except for one subject, their visual acuity, visual field, and colour vision were tested by an ophthalmologist, and found to be normal. The eighth subject had her eyes examined by an optician one year earlier. She reported no anomalies in her vision. None of the subjects wore glasses or contact lenses in their daily life.

4. Method

The method of limits was used to determine the contrast thresholds [6]. The threshold is determined as the mean value of the last seen and first unseen stimuli. Rectangular shaped flashes with duration of 500 ms were presented to the subjects. For large values of interval between two flashes (over 1 s), the threshold is independent of the interval [3]. In our work, we used an interval of 1.5 s, which satisfies this condition.

47 different stimulus luminances were programmed for the LED controllers. These luminances were divided into five groups each consisting of 13 to 15 luminances. The luminances were selected so that the ratio between two consecutive luminances was approximately 0.93, although this was not achieved for the lowest luminance settings. The five luminance ranges partially overlapped each other in order to make it easier to select the proper range.

The intensity of the short flashes was measured with an LMT SF 105 Version B System Flash Meter. The intensities were determined for all LED colours and luminance settings. Only the luminance of the maximum driving current was measured directly for each LED colour with constant driving current. The luminances of the short flashes were calculated by using the intensity measurements done with the flash meter.

4.1 Measurement procedure

The subject positioned himself or herself in the centre of the hemisphere's opening fixating both eyes to the foveal stimulus location. Forehead and chin rests were used to keep the head in correct position. The peripheral stimuli located on the right side of the foveal stimulus at eccentricities 10° , 30° , and 60° . The large size of the hemisphere ensured that the eccentricities. Taken distance between the pupils to be 70 mm, the deviation in the viewing angle was less than 0.3° at other eccentricities than 60° , where it was approximately 1° .

The contrast threshold was determined by presenting the light flashes in either descending or ascending order of intensity. The task of the subject was to count the visible flashes when the stimuli were presented in descending order, and to press a response button when the order of intensities was ascending.

The order of presentations was descending, ascending, descending, ascending, yielding four measured contrast thresholds at each measurement point. All measurements at one background luminance level were conducted during one session. A single session lasted for approximately 50 to 75 minutes, depending on the experience of the subject and time spent finding the correct range of luminances. All subjects participated in three sessions, once at each light level.

5. Results

The results show that the contrast threshold was affected by the background luminance level and the eccentricity of the stimulus (Figure 2). While the contrast threshold for the blue stimulus increased moderately when the eccentricity increased, for the red stimuli the differences were much larger. Especially at the lowest luminance level (0.1 cd/m^2) , the contrast threshold was much higher at 30° and especially at 60° for the red stimuli. With the green stimuli, the effect was in between the red and blue stimuli. With increasing eccentricity, the standard deviations of the results increased strongly for red stimuli. For blue stimuli, the change was much smaller.

At 10 cd/m² luminance level, which is considered to be in the photopic region [4, 7], the blue stimulus had lower contrast threshold in the peripheral visual field than the red and green stimuli. The luminances were calculated using the $V(\lambda)$ function, which is known to underestimate the short wavelengths of the visible spectrum [4]. Other standard luminous efficiency functions were applied to see whether they would describe the difference. The applied luminous efficiency functions were $V_M(\lambda)$, $V_{10}(\lambda)$, and $V'(\lambda)$. $V_M(\lambda)$ is the $V(\lambda)$ function modified by Judd, $V_{10}(\lambda)$ is the supplementary function for 10° standard observer, and $V'(\lambda)$ is the scotopic luminous efficiency function. New contrast thresholds were computed with these functions using Equation 2 and the calculated radiances. Standard deviation of the contrasts was used to describe the differences between the various calculations. Lower standard deviation indicates better description of the visual performance.

In foveal vision, both $V(\lambda)$ and $V_M(\lambda)$ functions described the situation with best accuracy (Table 2). This result was expected because the central foveal vision is known to follow the $V(\lambda)$ function even at mesopic light levels [8]. There are no rods in the central fovea. Rods become active at low light levels [9], and therefore no Purkinje shift occurs in the foveal vision.

In peripheral vision, the situation was found to be different. $V(\lambda)$ or $V_M(\lambda)$ functions were no longer the best descriptors even at the highest luminance level of 10 cd/m². Instead, $V_{10}(\lambda)$ became the best descriptive function at that luminance level. Again, this was not surprising because the $V_{10}(\lambda)$ includes also a large part of the peripheral vision.



Figure 2 Mean contrast thresholds and standard deviations for the red, green, and blue stimuli. The range of contrasts is different for each colour.

At 1 cd/m² luminance level the situation was similar, $V_{10}(\lambda)$ function being the best descriptive function. At the lowest luminance level (0.1 cd/ m²), the $V'(\lambda)$ was the best descriptive function in the peripheral vision with one exception. At 10° eccentricity, the $V_{10}(\lambda)$ function had better match than $V'(\lambda)$. The standard deviations became larger with increasing eccentricity. At 1 cd/m² luminance level and 10° eccentricity, the standard deviation was 0.072 with the best matching function, $V_{10}(\lambda)$, which implies a satisfactory match. Otherwise, the standard deviations at the mesopic light levels were between 0.23 and 1.14 with the best matching functions, $V_{10}(\lambda)$ at 1 cd/m² and $V'(\lambda)$ at 0.1 cd/m². Table 3 includes the results for 1 and 0.1 cd/m² luminance levels.

The difference in descending and ascending order of thresholds was small in foveal vision, except at 0.1 cd/ m², where the red and green stimuli had relatively large differences. The contrasts were, however, very low between -0.037 and -0.015. In the peripheral vision, the descending order thresholds were usually higher than the ascending order thresholds, although usually not very much. A possible explanation is that when the luminances descend rapidly from a higher level in discrete, separate steps, the eye is adapted to higher intensities and does not recognise lower intensities. Another explanation could be that some of the flashes were missed when they were counted. The ratio between descending and ascending order thresholds was usually between 0.9 and 1.1, indicating relatively small differences, but the highest ratio of 1.69 was achieved in the foveal vision for the green stimuli at 0.1 cd/m² luminance level.

6. Peripheral V(λ)

When the standard deviations of the contrast thresholds were calculated with the standard photopic luminous efficiency functions (i.e. $V(\lambda)$, $V_{M}(\lambda)$, $V_{10}(\lambda)$) at 10 cd/m², it was found that the lowest standard deviation increased with increasing eccentricity, implying that the functions describe the spectral sensitivity of the eye with decreasing accuracy. It was therefore tempting to test, whether another luminous efficiency function would improve the situation.

The contrast thresholds for the red and green stimuli remained similar at all eccentricities, whereas for the blue stimuli, the contrast thresholds were smaller. This implies that the blue region of the visual spectrum is underestimated by the three photopic luminous efficiency functions. For $V'(\lambda)$ the situation is the opposite, thus, it overestimates the blue region.

A new luminous efficiency function for peripheral vision that is based on the $V_{10}(\lambda)$ function was determined. $V_{10}(\lambda)$ was the best descriptor in the peripheral vision. The blue part of the function was enhanced by adding the difference between the $V_{10}(\lambda)$ and the $V(\lambda)$ functions multiplied with a coefficient (Equation 3). Wavelength 557 nm was selected as the transition point, because it is the peak wavelength of the $V_{10}(\lambda)$ function. The research of Wald [10] supports this selection, as he found that the spectral sensitivity of λ <550 nm is more enhanced in the peripheral vision:

$$V_{per}(\lambda) = V_{10}(\lambda) + k \cdot (V_{10}(\lambda) - V(\lambda)), \ \lambda < 557 \text{ nm}$$

$$V_{per}(\lambda) = V_{10}(\lambda), \ \lambda \ge 557 \text{ nm}$$
(3)

The calculations were conducted with the new function yielding the results presented in Table 2. It turned out that the new function, here designated as peripheral $V(\lambda)$ or $V_{per}(\lambda)$, was the best descriptor in peripheral vision of all the presented luminous efficiency functions. The optimisation of the coefficient k was made with the "Goal seek" routine included in the Microsoft® Excel 2000 program. When the coefficient k was optimised for all eccentricities simultaneously, the standard deviations were smaller for all eccentricities when compared with results gained with the other luminous efficiency functions.

 Table 2 Mean contrasts and standard deviations for each stimulus

 eccentricity calculated with different luminous efficiency functions.

 Measurements were made at 10 cd/m². Smallest standard deviations

 are marked with bold. Coefficient k is 1.732.

| n | | | | | |
|--------------------|-----------------------|--------------|--------|--------------|--|
| | Stimulus eccentricity | | | | |
| | 0° | 10° | 30° | 60° | |
| V(2) | -0.1138 | -0.0495 | 0.0996 | 0.4323 | |
| st. dev. | 0.0149 | 0.0391 | 0.1116 | 0.2681 | |
| $V_M(\lambda)$ | -0.1140 | -0.0499 | 0.0988 | 0.4307 | |
| st. dev. | 0.0149 | 0.0388 | 0.1109 | 0.2660 | |
| V10(2) | -0.1111 | -0.0451 | 0.1177 | 0.4713 | |
| st. dev. | 0.0195 | 0.0246 | 0.0617 | 0.1663 | |
| V'(2) | -0.0858 | -0.0093 | 0.2520 | 0.7423 | |
| st. dev. | 0.0816 | 0.1293 | 0.4334 | 0.9014 | |
| $V_{per}(\lambda)$ | -0.1069 | -0.0392 | 0.1422 | 0.5219 | |
| st. dev. | 0.0290 | 0.0121 | 0.0292 | 0.0072 | |
| $V_{mes}(\lambda)$ | -0.1133 | -0.0487 | 0.1028 | 0.4388 | |
| st. dev. | 0.0158 | 0.0364 | 0.1017 | 0.2453 | |
| | | | | | |

7. Mesopic contrast thresholds

The results at 1 and 0.1 cd/m² show that the contrast thresholds increase with decreasing luminance level and increasing eccentricity. The shift depends strongly on the colour of the stimulus. This is due to increasing activity of the rods, which spectral sensitivity follows the scotopic $V'(\lambda)$ function, having its peak at approximately 507 nm [7]. With decreasing light levels, the cones become less active and this yields to higher spectral sensitivity at short wavelengths.

The mesopic results were modelled using the previously mentioned luminous efficiency functions, and in addition, the practical system for mesopic photometry developed in the MOVE project. The details of the calculation process of the developed mesopic model can be found from the CIE TC1-58 website [2]. This practical mesopic system (designated as $V_{mes}(\lambda)$) is a linear transition function between the $V(\lambda)$ and $V'(\lambda)$ functions throughout the mesopic region. It has been optimised for visual performance in night-time driving and is based on a large set of experiments. The $V_{mes}(\lambda)$ function was developed using different performance based visual tasks, such as reaction time, contrast threshold, and achromatic detection thresholds [1].

The practical mesopic system takes into account the S/P-ratios of both stimulus and background. This ratio is possible to achieve by measuring the photopic and scotopic luminances. In our case, we made the calculations using the radiance data and weighing it with both $V'(\lambda)$ and $V(\lambda)$ functions. The x-values of the practical mesopic system were computed for mesopic luminance levels using the MATLAB modules included in reference 2. The x-values was used to compute the new $V_{mes}(\lambda)$ functions for each luminance level individually. The new contrasts were calculated using the $V_{mes}(\lambda)$ function and radiance data.

The results presented in Table 3 show that for foveal vision, both $V(\lambda)$ and $V_{M}(\lambda)$ are the best descriptive functions at mesopic light levels. The $V(\lambda)$ is only slightly better based on these results. In peripheral vision, the newly developed $V_{mes}(\lambda)$ is the best descriptor at all eccentricities at both mesopic luminance levels.

 Table 3. Mean contrasts and standard deviations for each stimulus eccentricity calculated with different luminous efficiency functions.

 Measurements were made at 1.0 and 0.1 cd/m². Smallest standard deviations are marked with bold.

| 1.0 cd/m^2 | Stimulus eccentricity | | | | |
|---|---|--|--|---|--|
| _ | 0° | 10° | 30° | 60° | |
| V(A) | -0.1112 | 0.0524 | 0.2575 | 0.8919 | |
| st. dev. | 0.0154 | 0.1016 | 0.2805 | 0.8990 | |
| $V_M(\lambda)$ | -0.1113 | 0.0519 | 0.2564 | 0.8890 | |
| st. dev. | 0.0156 | 0.1006 | 0.2784 | 0.8939 | |
| $V_{10}(\lambda)$ | -0.1047 | 0.0611 | 0.2687 | 0.9099 | |
| st. dev. | 0.0300 | 0.0724 | 0.2325 | 0.8069 | |
| V'(A) | -0.0443 | 0.1164 | 0.2861 | 0.7443 | |
| st. dev. | 0.1653 | 0.2517 | 0.4046 | 0.8122 | |
| $V_{mes}(\lambda)$ | -0.0944 | 0.0684 | 0.2647 | 0.8549 | |
| st. dev. | 0.0522 | 0.0214 | 0.1163 | 0.4701 | |
| | Ť | | | | |
| 0.1 cd/m ² | Stimulus eccentricity | | | | |
| | | Stillulus ee | contrienty | | |
| | 0° | 10° | 30° | 60° | |
| | 0° -0.0225 | 10° 0.2360 | 30° 0.7237 | 60° 2.8330 | |
| | 0° -0.0225 0.0091 | 10° 0.2360 0.2736 | 30° 0.7237 0.8425 | 60° 2.8330 3.4829 | |
| $\frac{V(\lambda)}{\text{st. dev.}}$ | 0° -0.0225 0.0091 -0.0228 | 10° 0.2360 0.2736 0.2347 | 30° 0.7237 0.8425 0.7206 | 60° 2.8330 3.4829 2.8226 | |
| $\frac{V(\lambda)}{\text{st. dev.}}$ | 0° -0.0225 0.0091 -0.0228 0.0094 | 10° 0.2360 0.2736 0.2347 0.2723 | 30° 0.7237 0.8425 0.7206 0.8390 | 60° 2.8330 3.4829 2.8226 3.4693 | |
| $V(\lambda)$ st. dev. $V_{M}(\lambda)$ st. dev. $V_{10}(\lambda)$ | 0° -0.0225 0.0091 -0.0228 0.0094 -0.0022 | 10° 0.2360 0.2736 0.2347 0.2723 0.2446 | 30° 0.7237 0.8425 0.7206 0.8390 0.7301 | 60° 2.8330 3.4829 2.8226 3.4693 2.8365 | |
| $ \frac{V(\lambda)}{V_{M}(\lambda)} $ st. dev. $ \frac{V_{10}(\lambda)}{V_{10}(\lambda)} $ st. dev. | 0° -0.0225 0.0091 -0.0228 0.0094 -0.0022 0.0503 | 10° 0.2360 0.2736 0.2347 0.2723 0.2446 0.2406 | 30° 0.7237 0.8425 0.7206 0.8390 0.7301 0.7927 | 60° 2.8330 3.4829 2.8226 3.4693 2.8365 3.3513 | |
| $V(\lambda)$ st. dev. $V_{M}(\lambda)$ st. dev. $V_{10}(\lambda)$ st. dev. $V'_{10}(\lambda)$ | 0° -0.0225 0.0091 -0.0228 0.0094 -0.0022 0.0503 0.1783 | 10° 0.2360 0.2736 0.2723 0.2446 0.2406 0.2022 | 30° 0.7237 0.8425 0.7206 0.8390 0.7301 0.7927 0.3984 | 60° 2.8330 3.4829 2.8226 3.4693 2.8365 3.3513 1.2283 | |
| $V(\lambda)$ st. dev. $V_{M}(\lambda)$ st. dev. $V_{10}(\lambda)$ st. dev. $V'(\lambda)$ st. dev. | 0° -0.0225 0.0091 -0.0228 0.0094 -0.0022 0.0503 0.1783 0.4680 | 0.2360 0.2736 0.2347 0.2723 0.2446 0.2406 0.2022 0.3258 | 30° 0.7237 0.8425 0.7206 0.8390 0.7301 0.7927 0.3984 0.4718 | 60° 2.8330 3.4829 2.8226 3.4693 2.8365 3.3513 1.2283 1.1368 | |
| $V(\lambda)$ st. dev. $V_{M}(\lambda)$ st. dev. $V_{10}(\lambda)$ st. dev. $V'(\lambda)$ st. dev. $V'(\lambda)$ st. dev. $V_{mes}(\lambda)$ | 0° -0.0225 0.0091 -0.0228 0.0094 -0.0022 0.0503 0.1783 0.4680 0.0806 | 0.2360 0.2736 0.2347 0.2723 0.2446 0.2406 0.2022 0.3258 0.2186 | 30° 0.7237 0.8425 0.7206 0.8390 0.7301 0.7927 0.3984 0.4718 0.5566 | 60° 2.8330 3.4829 2.8226 3.4693 2.8365 3.3513 1.2283 1.1368 2.0087 | |

Table 2 shows that $V_{per}(\lambda)$ is more accurate at 10 cd/m² than $V_{mes}(\lambda)$. The practical system for mesopic photometry was optimised for 10° eccentricity, which can be seen as the lowest standard deviations at that eccentricity. The results of this paper indicate that it is the best descriptive function for the peripheral vision at mesopic light levels.

8. Discussion and error analysis

The stimuli were produced by LEDs that had halfbandwidths between 18 and 36 nm. LEDs were used as visual stimuli, since they have become a major light source type in various signalling applications, such as beacons and traffic lights.

The background luminance of the hemisphere was not entirely even. At 10 and 1 cd/m² background luminance, the luminance of the immediate surrounding of the stimulus was approximately 4 to 5% lower at 60° eccentricity than for the other eccentricities. The luminance of the stimuli was

also lower respectively. At 0.1 cd/m², the luminance was approximately 8 to 9% lower at 60° compared to other eccentricities. Otherwise, the background luminances were within 1% range.

The stimuli had rather discrete steps in their luminances due to the use of 500-ms flashes. The use of the mean value of the last seen and first unseen intensity is subject to errors. However, the differences in the results between colours are so large that these inaccuracies cannot describe but a small part of them.

The LMT L1009 luminance meter used in the measurements was calibrated by the manufacturer. According to the calibration certificate, the error in reading was less than -0.9%, which was corrected during the calibration. The error in the luminance measurements and radiance calculations is estimated to be less than 4% for the blue stimuli and less for the other measurements. Main source of error is the imperfect $V(\lambda)$ -correction of the luminance meter, which was approximately -2% for the blue stimuli with the use of the close-up lens. The absolute values of the spectral measurements were not used, only the relative spectral power distributions. The non-linearity in the response of the Optronics OL 754 was estimated to be less than $\pm 1\%$ over the measurement ranges.

9. Conclusions

The results show that the currently used standard luminous efficiency functions do not describe the visual performance well enough in the peripheral vision at low photopic light levels. $V(\lambda)$ function is already known to underestimate the blue part of the visible spectrum. $V_{10}(\lambda)$ function describes better peripheral vision, but the short wavelengths are still underestimated.

The presented new luminous efficiency function for peripheral vision, $V_{per}(\lambda)$, describes the visual performance with best accuracy at 10 cd/m² according to these experiments.

Visual performance at mesopic light levels is often described as a combined function between $V(\lambda)$ or $V_{10}(\lambda)$ and $V'(\lambda)$. According to these measurements, this might be an inaccurate starting point. Instead, a new luminous efficiency function should be established for the peripheral vision before accurate results can be gained.

At mesopic light levels, the $V(\lambda)$ and the $V_M(\lambda)$ functions were the best descriptors for contrast thresholds in foveal vision. This was true for both 1 and 0.1 cd/m² luminance levels. In peripheral vision, $V_{10}(\lambda)$ and $V'(\lambda)$ functions described best the contrast thresholds among the standard CIE luminous efficiency functions. A better result was found, however, when the new practical model for mesopic photometry developed in the MOVE project was applied.

Acknowledgements

This project was funded by the Academy of Finland (contract no. 78093). The authors acknowledge for the support. The authors also acknowledge Oy Airam Electric Ab for donating their integrating sphere to the Lighting Laboratory and Agilent Technologies for donating the LEDs used in this research.

References

- 1 http://lightinglab.fi/Research/International_ Projects/MOVE/ProjectBackground/index.htm
- 2 http://lightinglab.fi/CIETC1-58/index.htm
- 3 Zuidema P., Bouman M. A. & Koenderink J. J. 1985. Detection of light and flicker at low luminance levels in the human peripheral visual system. II. A mechanistic model. *Journal of the Optical Society of America A*. 2(3): 408-415.
- 4 Blackwell H. R. 1946. Contrast threshold of the human eye. *Journal of the Optical Society of America*. 36(11): 624-643.
- 5 CIE. 1978. *Light as a true visual quantity: Principles of measurement*. Publ. CIE No 41. CIE Central Bureau.
- 6 Goldstein E. B. 2002. *Sensation and perception*. 6th edition. Wadsworth-Thomson Learning, USA.
- 7 IESNA (ed. Rea M.S.). 2000. The IESNA Lighting Handbook. Reference & application. 9th edition. Illuminating Engineering Society of North America.
- 8 Eloholma M., Halonen L. & Setälä K. 1999. The effects of light spectrum on visual acuity in mesopic lighting levels. EPRI/LRO Fourth International Lighting Research Symposium. Proceedings: Vision at Low Light Levels. EPRI. 149-161.

- Forrester J., Dick A., McMenamin P. & Lee W. 1996.
 The eye. Basic sciences in practice. London, UK.
 W.B. Saunders Company Ltd.
- 10 Wald G. 1945. Human vision and the spectrum. *Science*. 101, 653-658.



Pasi ORREVETELÄINEN Lic.Sc. (Tech.), Research Scientist Helsinki University of Technology Lighting Laboratory P.O.Box 3000; FI-02015 HUT; Finland phone +358 9 4512403 fax + 358 9 4514982 e-mail: pasi.orrevetelainen@hut.fi

Graduated from the Department of Electrical and Communications Engineering of Helsinki University of Technology in 1995 and obtained Lic.Sc. in 2003. Research Scientist at the Lighting Laboratory of Helsinki University of Technology. Research areas include vision, measurements, and testing.

Marjukka ELOHOLMA

M.Sc. (Tech.), Research Scientist Liisa HALONEN D.Sc. (Tech.), Professor

The authors are members of the Traffic Lighting and Vision research group in the Lighting Laboratory. The research group is currently working in the area of mesopic lighting and vision. The work at Lighting Laboratory in this field started in 1998. A large European research project MOVE funded by the European Commission was conducted in 2002-2004 and was concerning the modelling of mesopic vision. Currently two related projects are ongoing funded by the Academy of Finland. Professor Liisa Halonen is the head of the research group.

Received 30 December 2004 Reviewers: Prof. Luciano DI FRAIA, Prof. Ramon SAN MARTIN, Dipl. eng. Axel STOCKMAR

PRAGUL DE CONTRAST AL STIMULILOR STRĂLUCITORI COLORAȚI ÎN VEDEREA PERIFERICĂ LA NIVELURI DE LUMINĂ SCĂZUTE

Pragul de contrast a fost examinat prin metoda limitelor pentru a determina performanța vizuală a ochiului uman în cazul vederii periferice la niveluri fotopic scăzut și mezopic ridicat. Trei stimuli colorați au fost folosiți pentru a determina valorile pragurilor de contrast pentru opt subiecți. Măsurările au fost realizate la patru excentricități: 0°, 10°, 30° și 60°. Rezultatele au evidențiat că în timp ce stimulul albastru cauzează modificări moderate ale pragului de contrast, conforme cu excentricitatea sarcinii și nivelul de lumină, în cazul stimulului roșu modificările au fost mult mai însemnate. S-a găsit că funcția $V(\lambda)$ nu descrie performanța vizuală suficient de corect în vederea periferică la niveluri de lumină fotopice scăzute. A fost efectuată o încercare de a determina o nouă funcție a eficacității luminoase pentru vederea periferică la niveluri de lumină fotopice scăzute. Această nouă funcție a descris rezultatele măsurărilor cu cea mai bună exactitate la nivelul de 10 cd/m².

1. Introducere

Acest studiu a fost rezultatul experimentelor realizate de autor asupra timpului de reacție la niveluri de lumină fotopic scăzute și mesopic ridicate. În cadrul acestor experimente, stimulii de culoare roșie și chihlimbarie cu contrast scăzut (C=0,2), prezenți în vedere periferică (10° excentricitate), au fost foarte slab percepuți de către unii subiecți, dar foarte bine de către alții. Stimuli cu un contrast mai ridicat (C=0,5 sau 3,0) au fost percepuți cu o acuratețe ridicată de către toți subiecții. Măsurările timpului de reacție s-au făcut în cadrul proiectului Optimizarea Mesopică a Eficacității Vizuale (MOVE), finanțat de Comisia Europeană. Obiectivul proiectului MOVE a fost acela de definire a functiilor relevante ale sensibilității spectrale pentru domeniul luminanței mezopice și de stabilire a unor modalități de lucru corespunzătoare [1]. În acest proiect a fost dezvoltat un model linear mesopic [2].

Scopul lucrării prezentate este de a determina pragul de contrast pentru trei valori diferite ale stimulilor de culoare prezenți în vederea periferică și foveală, la un nivel fotopic scăzut și mesopic ridicat (între 0,1 și 10 cd/m²). Străfulgerări rectangulare scurte, de 500 ms, au fost folosite ca ținte în cadrul măsurărilor.

Conform Zuidema și alții [3], doi parametrii temporali influențează pragul de contrast: durata fleșului și intervalul de timp dintre două străfulgerări. Intervalul dintre două străfulgerări ar trebui să fie de cel puțin 1 s, altfel cele două străfulgerări se influențează unul pe celălalt și, eventual, pot fi văzute ca și o lumină continuuă dacă intervalul devine foarte scurt (aproximativ 100 ms). Pentru străfulgerări mai scurte de 100 ms, pragul de energie este independent de durata fleșului. Pentru intervale cuprinse între 100 ms și 500 ms, între valoarea pragului de energie și logaritmul duratei străfulgerării există o pantă constantă pozitivă. Pentru valori mai mari ale duratei străfulgerării, pragul de energie variază linear cu durata fleșului.

Blackwell [4] a coordonat cercetări intensive în 1946 asupra pragului de contrast, observând că expuneri cu timp foarte lung (peste 60 s) au fost necesare pentru a atinge contrastele minime în anumite condiții. De asemenea, a arătat că subiecții încep să folosească vederea periferică în locul celei foveale pentru detectarea stimulilor sub un anumit nivel de luminanță. Această schimbare a fost înregistrată la aproximativ 0,0024 cd/m². La un nivel de luminanță a fondului de peste 3,4 cd/m², pragul de contrast a fost constant ținînd seama de luminanța de adaptare.

2. Sistemul de măsurare

Sistemul de măsurare este compus dintr-o emisferă mare (diametrul 1980 mm), vopsită în alb la interior. Acestă suprafață a servit ca fundal pentru stimulii luminoși. Fundalul a fost iluminat uniform cu lămpi fluorescente echipate cu balasturi electronice și dispozitive pentru diminuarea fluxului luminos. Pentru a obține nivelurile de lumină dorite, a fost necesară montarea unor filtre de densitate neutrală. Ajustările finale ale nivelurilor de lumină au fost realizate cu ajutorul balasturilor dimabile. Filtrele au afectat distribuția spectrală a lămpilor. Distribuția spectrală a luminii în cazul diferitelor niveluri de lumină poate fi observată în Figura 1. Temperatura de uloare corelată a fost de 4920±100 K.

Stimulii vizuali au fost realizați cu diode emitente de lumină (LED). Au fost făcute orificii mici în suprafața emisferei. LED-urile au fost așezate în aceste locașuri, în afara emisferei, îndreptate spre locul în care se afla subiectul. Orificiile au fost acoperite cu materiale difuzante de culoare albă, pentru ca LED-urile să nu fie văzute direct de către subiecți. Filtre și difuzoare de lumină au fost folosite pentru reducerea intensității luminii emise de LED-uri. Fluxul luminos al acestora a fost controlat cu ajutorul unui calculator, fiind realizat un control individual al intensității luminoase și duratei străfulgerării pentru fiecare LED. Diametrul unui stimul circular de 5 mm corespunde uneidimensiuni de 0,29° la distanța de vedere de 990 mm.

2.1 Contrastele stimulilor

Contrastele stimulilor au fost măsurate în imediata vecinătate a acestora. Luminanța a fost măsurată cu un luminanțmetru calibrat LMT L1009. Ecuația 1 a fost folosită pentru calculul contrastelor, unde C este contrastul, L_t - luminanța țintei și L_b - luminanța fondului.

Luminanța stimulilor este alcătuită din două părți. Prima, luminanța produsă de LED pe difuzorul vizibil pentru subiect. Aceasta luminanță a fost măsurată cu luminanțmetrul folosind o lentilă specială de apropiere. Luminanța a fost măsurată pentru fluxul de lumină maxim al LED-ului, în fiecare poziție, după atașarea filtrelor și difuzoarelor în fața LED-urilor. Cea de-a doua parte constă în luminanța produsă de lămpile fluorescente. Reflectanța difuzorului a fost de aproximativ 12% mai scăzută decât luminanța totală a fondului. Datorită acestui fapt, contrastul ar putea fi negativ.

2.2 Radianțele stimulilor și a fundalului

Pentru aplicarea altor funcții în afară de $V(\lambda)$, a fost necesară cunoașterea radianței produse de fond și lumina stimulilor. Distribuția spectrală a luminii produse de stimuli și de fond a fost măsurată folosind un dispozitiv spectral portabil de înaltă acuratețe pentru măsurarea lungimilor de undă vizibile și a celor din domeniul ultravioletelor, Optronics OL 745, produs al Optronic Laboratories, Inc.

Distribuția spectrală a luminii fondului a fost măsurată la diferitele niveluri de lumină dorite. Distribuția spectrală relativă măsurată a fost transformată în radianță folosind Ecuația 2 [5] și luminanța fondului măsurată. Integrala a fost calculată cu ajutorul distribuției spectrale măsurate, fără unități de măsură, și apoi multiplicată cu K_m (683 lm/W). Valoarea obținută a fost apoi comparată cu luminanța măsurată *L*. Deoarece valorile nu se potrivesc în general, a fost calculat un coeficient de corecție al radiației, obținut prin împărțirea luminanței măsurate *L* la valoarea calculată (Ecuația 2), unde *L* este luminanța radianței) și $V(\lambda)$ - funcția de eficiență luminoasă fotopică.

Radianța stimulilor a fost calculată în mod asemănător, excepție făcând faptul că a fost luată în considerare transmisia luminii prin filtrele și difuzorii din fața LED-urilor. Transmitanțele filtrelor și difuzorilor a fost măsurată cu spectroradiometrul OL 745. Reflectanța difuzorului vizibil a fost determinată prin măsurarea distribuției puterii spectrale directe și reflectate, utilizând o lampă cu incandescență.

3. Subiecții

Opt voluntari, studenți și angajați (2 femei și 6 bărbați) ai Universității Tehnice din Helsinki au participat la aceste teste ca și subiecți. Vârsta subiecților a variat între 23 și 31 de ani, cu o medie de 25,5 ani.

Cu excepția unui singur subiect, acuratețea vizuală, câmpul vizual și vederea culorilor au fost testate de către un medic oftalmolog și diagnosticate ca fiind normale. Cel de-al optulea subiect a fost supus unui examen optic cu un an în urmă și raportat ca neavând anomalii vizuale. Nici unul dintre subiecți nu purta ochelari de vedere sau lentile de contact în viața de zi cu zi.

4. Metoda

Metoda limitelor a fost folosită pentru determinarea pragului de contrast [6]. Pragul a fost determinat ca valoare a a ultimului stimul văzut și a primului nevăzut. Străfulgerări de lumină de formă rectangulară și cu o durată de 500 ms au fost prezentate subiecțiilor. Pentru intervale de timp mari între străfulgerări (peste 1 s), pragul este independent de interval [3]. În lucrarea noastră s-a folosit un intervale de 1,5 s care a satisfăcut această condiție.

47 de stimuli de lumină diferiți au fost programați pentru dispozitivele de control ale LED-

urilor. Aceste luminanțe au fost împărțite in cinci grupuri, fiecare constând în câte 13 - 15 luminanțe. Luminanțele au fost selectate în așa fel încât raportul a două consecutive să fie de aproximativ 0,93, cu toate că acest raport nu a putut fi atins și pentru valorile cele mai scăzute ale luminanței. Cele cinci grupuri s-au suprapus parțial în scopul facilitării alegerii unei variante optime.

Intensitatea străfulgerărilor scurte a fost măsurată cu un dispozitiv de măsurare LMT SF 105 Versiune B. Intensitățile au fost determinate pentru toate LED-urile și pentru toate setările luminanței. Doar luminanța curentului maxim a fost măsurată direct pentru fiecare culoare de LED la un curent constant. Luminanțele străfulgerărilor scurte a fost calculată folosind valorile obținute în urma măsurării intensităților cu ajutorul fleșmetrului.

4.1 Procedeul de măsurare

Subiectul s-a poziționat în centrul deschiderii emisferei, cu ambii ochi fixați în direcția locației stimulului foveal. Fruntea și barba au fost menținute în poziția normală. Stimulii perimetrali au fost localizați la dreapta stimulului foveal la unghiuri de 10° , 30° și respectiv 60° . Dimensiunile mari ale emisferei au asigurat ca excentricitatea să fie lângă locția dorită chiar și pentru excentricități mari. Considerând distanța între pupile de 70 mm, deviația unghiului de vedere a fost mai mică de $0,3^{\circ}$ la alte excentricități decât 60° , pentru care a fost de aproximativ 1° .

Pragul de contrast a fost determinat prin prezentarea străfulgerărilor atât în ordinea crescătoare cât și în cea descrescătoare a intensitățiilor. Sarcina subiectului a fost de a număra străfulgerările vizibile, în ordine descrescătoare și de a apăsa un buton de răspuns, când ordinea intensitățiilor a fost crescătoare.

Ordinea prezentării stimulilor a fost descrescătoare, crescătoare, descrescătoare, crescătoare, obținânduse la final patru valori ale pragului de contrast pentru fiecare punct de măsurare. Toate măsurările efectuate pentru o valoare a luminanței fondului au fost realizate într-o sesiune. O singură sesiune a durat aproximativ 50 – 75 de minute, în funcție de experiența subiecțiilor și de timpul necesar căutării luminanțelor dorite. Toți subiecții au participat la trei sesiuni, una pentru fiecare nivel de lumină.

5. Rezultate

Rezultatele au arătat că pragul de contrast a fost influențat de nivelul de iluminare a fondului și de excentricitatea stimulilor (Figura 2). În timp ce pragul de contrast pentru stimulii albaștri a crescut moderat o dată cu creșterea excentricității, în cazul stimulilor roșii diferențele au fost mult mai mari. Mai ales în cazul celui mai redus nivel de luminanță (0,1 cd/m²), pragul de contrast pentru stimulii rosii a fost mult mai mare la 30° și în mod special la 60°. Pentru stimulii verzi, efectul s-a situat undeva între acela al stimulilor albaștri și a celor roșii. Cu creșterea excentricității, deviațiile standard ale rezultatelor au crescut puternic pentru stimulii roșii. În cazul stimulilor albaștri, schimbările au fost mult mai mici.

La un nivel al luminanței de 10 cd/m², considerat a fi în zona fotopică [4, 7], stimulii albaștri au avut un prag de contrast mai scăzut pentru vederea perimetrală fată de cei roșii și verzi. Luminanțele au fost calculate folosind funcția $V(\lambda)$, care se cunoaște că subevaluează lungimile de undă scurte ale spectrului vizibil [4]. Alte funcții standard ale eficacității au fost aplicate pentru a se vedea dacă ar putea să descrie această diferență. Acestea au fost: $V_{M}(\lambda)$, $V_{10}(\lambda)$ și V'(λ). $V_{M}(\lambda)$ este funcția V(λ) modificată de Judd, $V_{10}(\lambda)$ este o funcție suplimentară pentru observatorul standard la 10° și $V'(\lambda)$ este funcția vederii pe timp de noapte. Noi valori ale pragului de contrast au fost calculate cu aceste funcții, folosind Ecuația 2 și radianțele calculate. Deviația standard a contrastelor a fost folosită pentru a descrie diferențele între diferitele calcule. O deviatie standard mai mică indică o descriere mai bună a performanței vizuale.

În cazul vederii foveale, ambele funcții $V(\lambda)$ și $V_M(\lambda)$ descriu situația cu o foarte bună acuratețe (Tabelul 2). Acest rezultat era de așteptat, deoarece se știe că vederea foveală corespunde funcției $V(\lambda)$, chiar și pentru nivelurile mesopice ale luminii [8]. Nu există bastonașe în zona foveală a retinei. Bastonașele devin active pentru niveluri reduse ale luminii [9] și de aceea nici o deplasare Purkinje nu intervine la vederea foveală.

În cazul vederii periferice, s-a determinat că situația este diferită. Funcțiile $V(\lambda)$ și $V_M(\lambda)$ nu mai reprezentau cel mai bine procesul chiar și pentru niveluri ridicate ale luminanței de 10 cd/m². În schimb, $V_{10}(\lambda)$ a devenit cea mai bună funcție descriptivă la acel nivel de iluminare. Nici aceasta nu a fost o surpriză, deoarece se știe că $V_{10}(\lambda)$ include și o mare parte din vederea periferică.

Situația a fost similară la un nivel al luminanței de 1 cd/m², funcția $V_{10}(\lambda)$ fiind cea mai bună funcție descriptivă. La cel mai redus nivel al luminanței (0,1 cd/m²), funcția $V'(\lambda)$ a fost cea mai bună funcție descriptivă a vederii periferice, cu o singură excepție.

La 0,1 cd/m² și 10° excentricitate, deviația standard a fost de 0,072 cu cea mai bună potrivire a funcției $V_{10}(\lambda)$, care implică o potrivire satisfăcătoare. De altfel, deviațiile standard la niveluri mesopice au fost între 0,23 și 1,14 cu cea mai bună potrivire a funcțiilor, $V_{10}(\lambda)$ la 1 cd/m² și $V'(\lambda)$ la 0,1 cd/m². Tabelul 3 include rezultate pentru niveluri ale luminanței de 1 și 0,1 cd/m².

Diferențele pragului de contrast în ordine crescătoare sau descrescătoare au fost mici pentru vederea foveală, excepție luminanța de 0,1 cd/m², unde au fost observate diferențe relativ mari între stimulii roșii și cei verzi. Contrastele au fost, cu toate acestea, foarte scăzute între -0,037 și -0,015. În cazul vederii periferice, pragurile în ordine descrescătoare au fost, de regulă, mai mari decât cele în ordine crescătoare. O posibilă explicatie ar fi aceea că atunci când lumina descrește rapid de la un nivel ridicat, cu pași discreți, separați, ochiul este adaptat la intensități mai mari și nu recunoaște intensitățile mai scăzute. O altă explicație ar putea fi aceea că unele străfulgerări nu au fost numărate. Raportul între pragurile în ordine descrescătoare și cele în ordine crescătoare a fost, de obicei, între 0,9 și 1,1, indicând diferențe relativ reduse, dar cel mai mare raport 1,69 s-a înregistrat în vederea foveală pentru stimulii verzi la un nivel al luminanței de 0,1 cd/m².

6. V(λ) periferică

Atunci când deviațiile standard ale pragului de contrast au fost calculate cu funcțiile fotopice standard ale eficacității luminoase, (de exemplu $V(\lambda)$, $V_{M}(\lambda)$, $V_{10}(\lambda)$) la 10 cd/m², s-a observat că deviația standard cea mai mică crește o dată cu creșterea excentricității, implicând faptul că aceste funcții descriu sensibilitatea spectrală a ochiului cu o acuratețe în scădere. A fost așadar necesară o testare, pentru a vedea dacă o altă funcție a eficacității luminoase ar îmbunătăți situația.

Pragurile de contrast pentru stimulii roșii și verzi au rămas constante la toate excentricitățile, pe când în cazul stimulilor albaștri, pragul de contrast a fost mai mic. Aceasta dovedește faptul că regiunea albastră a spectrului vizual este subevaluată de către cele trei funcții luminoase fotopice. Pentru $V'(\lambda)$ situația este contrară, astfel, zona spectrală albastră este supraevaluată.

A fost determinată o nouă funcție a eficacității luminoase pentru vederea periferică, bazată pe funcția $V_{10}(\lambda)$, care a avut cea mai exactă descriere în cazul

vederii periferice. Partea funcției ce corespunde culorii albastre a fost îmbunătățită prin adăugarea diferențelor dintre funcțiile $V_{10}(\lambda)$ și $V(\lambda)$ multiplicate cu un coeficient (Ecuația 3). Ca punct de tranziție a fost aleasă lungimea de undă de 557 nm, deoarece este lungimea de undă a vârfului funcției $V_{10}(\lambda)$. Cercetările lui Wald [10], susțin această alegere, el găsind că sensibilitatea spectrală pentru λ <550 nm este mai dezvoltată în cazul vederii periferice (Ecuația 3).

Calculele au fost efectuate cu noua funcție, conducând la rezultatele prezentate în Tabelul 2. Se observă că noua funcție, definită ca $V(\lambda)$ sau $V_{per}(\lambda)$ periferică, a fost cel mai bun descriptor al vederii periferice, comparativ cu celelalte funcții. Optimizarea coeficientului k a fost făcută cu ajutorul subrutinei "Goal seek" (căutarea țintei), inclusă în programul Microsoft® Excel 2000. Când coeficientul k a fost optimizat pentru toate excentricitățiile în mod simultan, deviațiile standard au fost mai reduse pentru toate excentricitățile, comparativ cu rezultatele opținute prin utilizarea celorlalte funcții de eficacitate luminoasă.

7. Pragurile de contrast mesopice

Rezultatele pentru 1 și 0,1 cd/m² arată că pragurile de contrast cresc cu scăderea nivelului luminanței și creșterea excentricității. Modificările depind puternic de culoarea stimulilor. Aceasta se datorează intensificării activității bastonașelor, a căror sensibilitate spectrală urmărește funcția scotopică $V'(\lambda)$, cu vârful la 507 nm [7]. O data cu scăderea nivelelor de lumină, conurile devin mai puțin active și aceasta conduce la sensibilități spectrale mai mari pentru lungimi de undă scurte.

Rezultatele mesopice au fost modelate folosind funcțiile eficacității luminoase menționate anterior și, în completare, sistemul practic pentru fotometria mesopică dezvoltat în proiectul MOVE. Detaliile procesului de calcul al modelului mesopic se pot găsi pe site-ul CIE TC1-58 [2]. Acest sistem mesopic (denumit $V_{mes}(\lambda)$), este o funcție de tranziție liniară între funcțiile $V(\lambda)$ și $V'(\lambda)$ în regiunea mesopică. Modelul a fost optimizat pentru performanțele vizuale în cazul conducerii pe timp de noapte și este bazat pe un întreg set de experimente. Funcția $V_{mes}(\lambda)$ a fost dezvoltată folosind diferitele performanțe ale sarcinii vizuale, cum ar fi timpul de reacție, pragul de contrast, pragul detecției acromatice [1].

Sistemul practic mesopic ia în considerare raportul S/P al stimulilor și fondului. Acest raport se poate obține prin măsurarea luminanțelor fotopice și scotopice. În cazul de față, calculele s-au făcut folosind datele radianței, ponderate prin utilizarea ambelor funcții $V'(\lambda)$ și $V(\lambda)$. Abscisele x ale sistemului practic mesopic au fost calculate pentru niveluri mesopice ale luminanței, folosind module MATLAB, incluse în referința 2. Valorile lui x au fost folosite pentru calculul noii funcții $V_{mes}(\lambda)$ pentru fiecare nivel al luminanței în mod individual. Noile contraste au fost calculate folosind funcția $V_{mes}(\lambda)$ și datele radianței.

Rezultatele prezentate în Tabelul 3 arată că pentru vederea foveală, atât $V(\lambda)$ cât și $V_M(\lambda)$ sunt cele mai bune funcții descriptive pentru niveluri mesopice ale luminanței. $V(\lambda)$ este ceva mai bună pe baza acestor rezultate. În vederea periferică, nou elaborata $V_{mes}(\lambda)$ reprezintă cel mai bun descriptor pentru toate excentricitățile, la ambele niveluri mesopice ale luminanței.

Tabelul 2 arată că $V_{per}(\lambda)$ are o acuratețe mai mare la 10 cd/m² decât $V_{mes}(\lambda)$. Sistemul practic pentru fotometrie mesopică a fost optimizat pentru excentricitate de 10°, care poate fi considerată ca cea mai scăzută deviație standard pentru acea excentricitate. Rezultatele acestui studiu arată că este cea mai bună funcție descriptivă a vederii periferice pentru niveluri de lumină mesopice.

8. Discuții și analizarea erorilor

Stimulii au fost realizați cu LED-uri cu lățimi de bandă între 18 si 36 nm. LED-urile au fost folosite ca stimuli vizuali, deoarece au devenit o sursă de lumină importantă în diferite aplicații de semnalizare, cum sunt turnurile de semnalizare și luminile semafoarelor.

Luminanța fondului emisferei nu a fost perfect uniformă. La valori de 10 și 1 cd/m² ale luminanței fondului, luminanța din imediata vecinătate a stimulilor a fost cu aproximativ 4-5% mai scăzută la excentricitate de 60°, decât pentru alte excentricități. Luminanța stimulilor a fost și ea mai redusă, în mod corespunzător. La 0,1 cd/m², luminanța a fost cu aproximativ 8-9% mai mică la 60° în comparație cu alte excentricități. Luminanțele fondului au fost în domeniul de 1%.

Stimulii au avut pași discreți în luminanțele lor, în principal datorită folosirii fleșurilor de 500 ms. Folosirea valorii intensității ultimului văzut și primului nevăzut este deasemenea subiect de erori. Cu toate acestea, diferențele rezultatelor între culori sunt atât de mari încât aceste inexactități nu pot fi responsabile decât pentru o mică parte a acestor diferențe.

Luminantmetrul LMT L1009 folosit în măsurări a fost calibrat de producător. În conformitate cu certificatul acestuia, erorile în citire au fost mai mici de -0,9%, acestea fiind corectate în timpul calibrării. Erorile în măsurarea luminanțelor și calculele radianței se estimează a fi sub 4% pentru stimulii albaștrii și mai mici pentru celelalte măsurări. Principala sursă de erori este corecția $V(\lambda)$ imperfectă a luminanțmetrului care a fost de aproximativ -2% în cazul stimulilor albaștri și folosirea lentilei de apropiere. Valorile absolute ale măsurărilor spectrale nu au fost folosite, ținânduse cont doar de distribuția spectrală relativă. Neliniaritatea răspunsului Optronics OL 754 a fost estimată ca fiind mai mică de $\pm 1\%$ pentru întregul domeniu de măsură.

9. Concluzii

Rezultatele arată că funcțiile eficacității luminoase standard folosite în mod curent nu descriu performanța vizuală destul de exact în cazul vederii periferice, la niveluri de lumină fotopice scăzute. Este cunoscut faptul că funcția $V(\lambda)$ subevaluează partea albastră a spectrului vizibil. Funcția $V_{10}(\lambda)$ descrie mai bine vederea periferică, dar lungimile de undă scurte sunt și în acest caz subevaluate.

Noua funcție a eficacității luminoase pentru vederea periferică $V_{per}(\lambda)$, descrie performanța vizuală cu cea mai bună acuratețe la 10 cd/m², potrivit acestor experimente.

Performanța vizuală pentru niveluri de lumină mesopice este adesea descrisă ca o funcție combinată între $V(\lambda)$ sau $V_{10}(\lambda)$ și $V'(\lambda)$. Potrivit acestor măsurări, această apreciere ar putea fi un punct de plecare inexact. În locul lor, o nouă funcție a eficienței luminoase ar trebui stabilită în cazul vederii periferice, în scopul obținerii unor rezultate cât mai exacte.

Pentru niveluri de lumină mesopice, funcțiile $V(\lambda)$ și $V_M(\lambda)$ au fost cei mai buni descriptori pentru pragurile de contrast ale vederii foveale. Această afirmație a fost adevărată pentru ambele niveluri de luminanțe de 1 și 0,1 cd/m². În cazul vederii periferice, funcțiile $V_{10}(\lambda)$ și $V'(\lambda)$ descriu cel mai bine pragurile de contrast în conformitate cu funcțiile eficienței luminoase standard CIE. Un rezultat mai bun a fost găsit, cu toate acestea, prin aplicarea noului model practic pentru fotometria mesopică dezvoltat în cadrul proiectului MOVE.