

DESIGN OF NEW EFFICIENT LUMINAIRE CONSIDERING MULTIPLE INTER-REFLECTIONS BETWEEN LAMP AND REFLECTOR

Koichi IKEDA and Yoshio TORIYAMA

Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Tokyo Rika Daigaku

Reflected rays from the luminaire reflector may come back to the light source, and result in non-uniform luminance distribution on the surface of source. Then the light source installed within the luminaire can not be treated as an uniform source with equal luminance distribution. In this paper, multiple repeating calculations considering the inter-reflection have been executed, regarding the lamp surface and the reflector surface as secondary luminous sources, so that diffusely reflected rays are estimated and accumulated to predict non-uniform luminance distribution on the lamp surface. Several new unique luminaire reflectors have been desined using special curved surface to control precisely directions of reflected rays and to eliminate unnecessary rays causing glare so as to produce suitable light intensity distribution. Non-uniform luminance patterns on the lamp surface and the luminous intensity distributions of the luminaires have been estimated.

1. Introduction

The fact that lamp luminance increases non-uniformly due to the inter-reflection between the reflector surface and the lamp surface has been known experientially, but has not been evaluated experimentally and has not been estimated quantitatively yet. In this study, a new algorithm using the repeating ray-tracing method, which can estimate non-uniform increment of lamp luminance due to the inter-reflection, has been developed, and the non-uniform luminance distribution has been analyzed quantitatively.

Three dimensional optical analyzing system for luminaire design has been developed, and eminent luminaire reflectors which can control precisely light intensity distribution with high efficiency have been designed with the aid of computer analysis to actualize high comfortable lighting environment.

2. Luminaire reflector design

The shape of the reflector surface is designed by using the unique super parabolic curve which can control adequately and precisely reflected light direction by considering the finite diameter of a cylindrical coaxial source. The

luminaire reflector is divided into three sections as shown in Figure 1 and a suitable curved surface is applied to each section for proper control of reflected rays. The shape of each reflector surface with control angle of θ and cut-off angle of Φ is calculated approximately as a series of sequential hyperfine planes according to Runge-Kutta method by analyzing the parametric differential equation which specifies the function representing the shape of the reflector.

3. Curved surface for luminaire reflector

Super parabolic curved surface. Reflector using traditional parabolic curved surface cannot control exactly light intensity distribution, because the fluorescent tube is not a point source but a source having finite diameter. Then, Super parabolic curved surface is developed to control adequately and precisely light intensity distribution. This curved surface has focus on a circle with radius of R , i.e. on the surface of the fluorescent tube, and redirects rays emitted tangential to cylindrical surface of the tube to predetermined direction so that the reflected rays are confined within the angular domain bounded by the vertical control angle. Under the control angle, light returning to the tube surface does not exist. The parametric

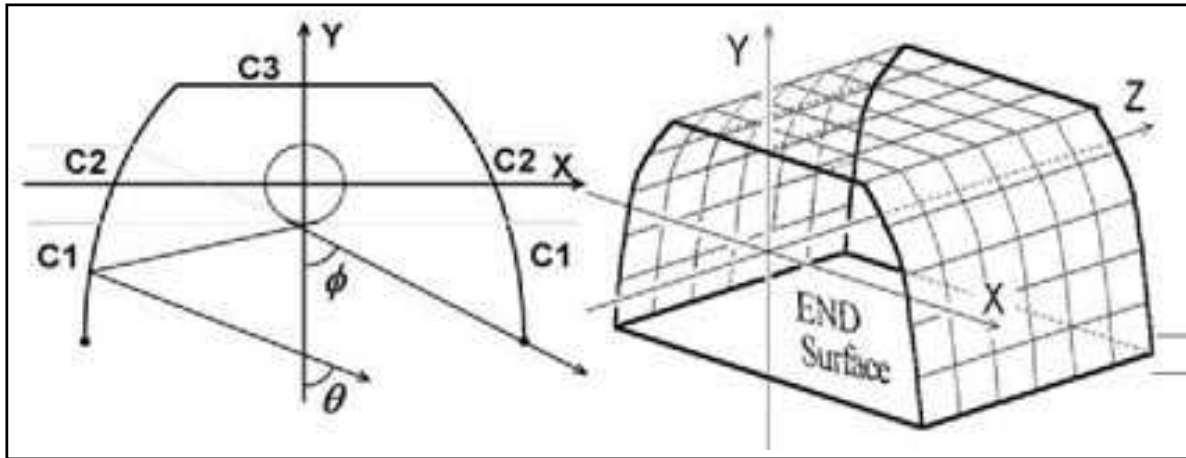


Figure 1 Typical shape of luminaire reflector

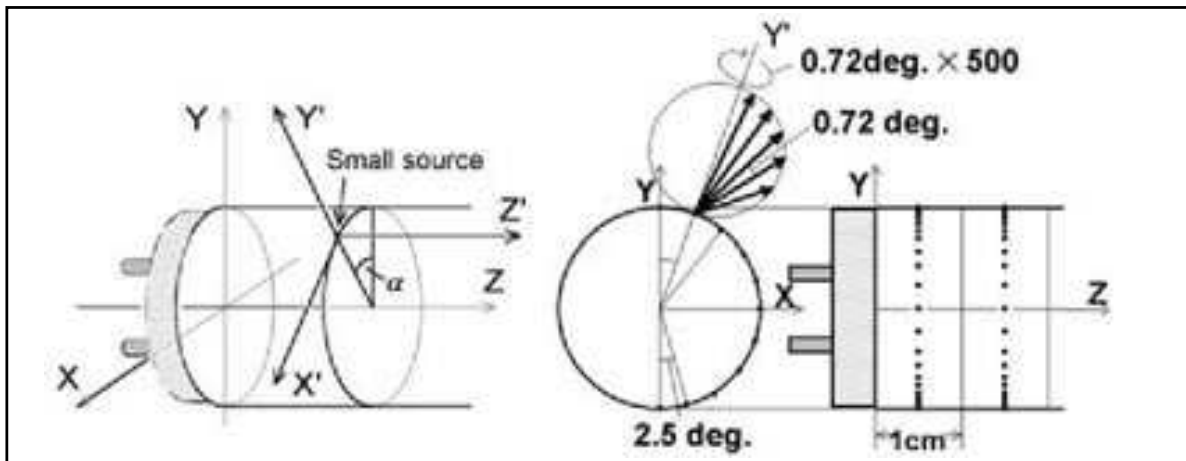


Figure 2 Arrangement of small sources

differential equation representing the cross section of new unique curved surface, which is invented and named as Super Parabolic Curved Surface, is given by

$$\frac{dy}{dx} = \tan \left[\frac{1}{2} \cos \left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \sin \left(\frac{R}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \theta \right]$$

where R is the radius of the fluorescent lamp tube, θ is the control angle of reflected light direction, and x and y are coordinates of the cross section of the reflector surface.

4. Summary of prediction method

The surface of the fluorescent tube is divided at intervals of 1cm along the tube axis and each section is divided into 144 sectors along a circle perpendicular to the axis. Each sector is regarded as a small source and is assumed to radiate three dimensionally 62,500 light rays

according to Lambert's cosine law as shown in Figure 2. In each calculation, light rays which are represented as vector flux multiplied by the solid angle are chased three dimensionally. For the analysis of optical paths of light rays, specularly reflected rays and diffusely reflected rays are analyzed separately on this program.

Specularly reflected rays are pursued by means of ray-tracing method. As for diffusely reflected rays, optical behavior is evaluated by calculating repeatedly according to secondary luminous source algorithm which is developed in our laboratory.

4.1 Treatment of diffusely reflected rays

Optical system including diffuse reflection element can be treated by regarding the reflector as secondary luminous source with proper luminance caused by incident light. The proper luminance on the reflector is

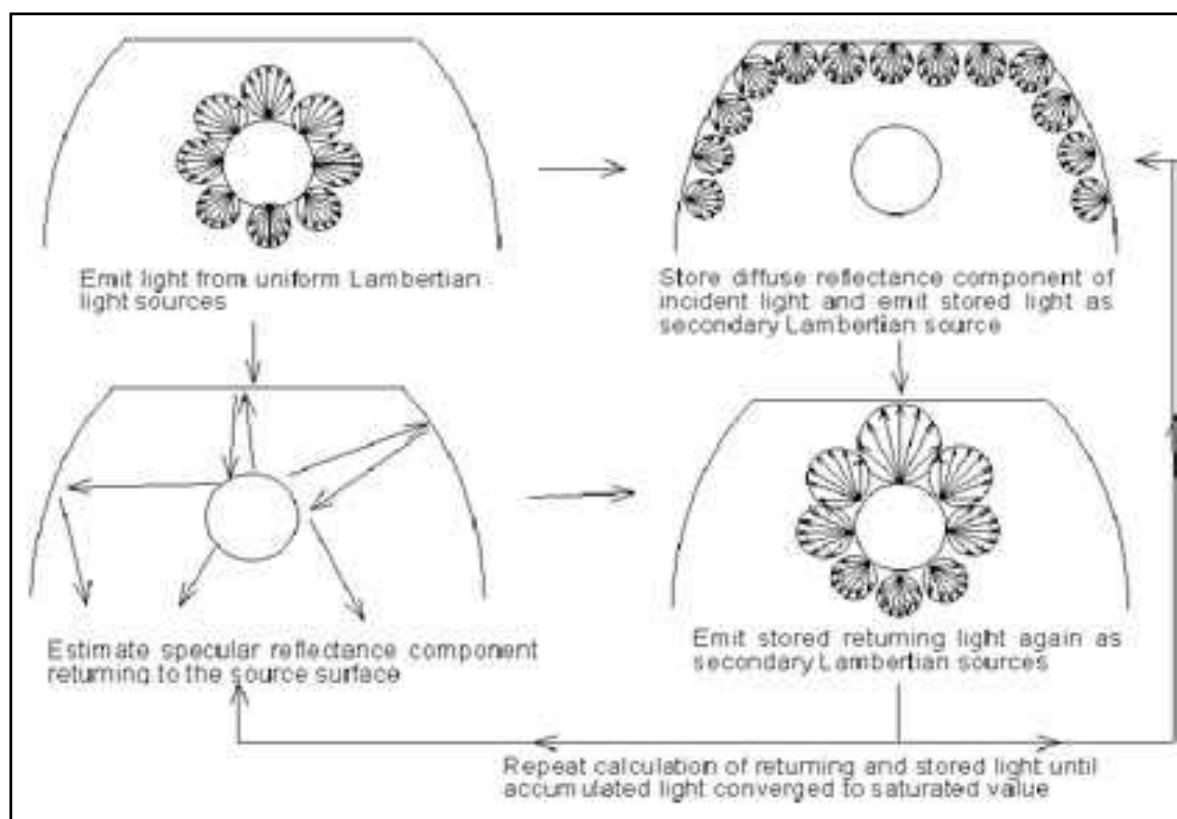


Figure 3 Secondary luminous source algorithm

analyzed by the secondary luminous source algorithm using the ray-tracing method. Diffusely reflected rays are traced and accumulated on the reflector surface until the light quantity on the surface reaches steady amount as shown in Figure 3. Then the light intensity distribution is estimated on the assumption that each element of the reflector is a diffuse light source.

4.2 Luminance distribution on the lamp surface

Returning light rays on the tube surface are divided in to specularly reflected rays on the glass surface, diffusely reflected rays and diffusely transmitted rays through the fluorescent layer. Specular reflectance, diffuse reflectance and diffuse transmittance of the fluorescent tube surface are obtained experimentally as a function of incident angle. For the analysis of luminance increment on the lamp surface, repeating calculation considering the interreflection between the reflector surface and the source surface is executed according to secondary luminous source algorithm. Diffusely reflected rays and diffusely transmitted rays are accumulated on the tube surface until the light quantity on the tube surface reaches steady

amount. Accumulated light rays are integrated in each sector on the tube surface. Luminance distributions on the lamp surface equipped in typical luminaire reflectors have been estimated. Several examples of non-uniform luminance increment on the tube within special curved reflectors are shown in Figure 4. The luminance increases non-uniformly around the tube from about 0%, to 60%.

4.3 Predicting calculation on light intensity distribution

After final luminance distribution on the tube is estimated, calculation starts again according to accumulated luminance distribution. Finally each ray emitted from the accumulated light flux on each sector of lamp surface is pursued in terms of ray tracing method and is classified into four sorts, i.e., directly exit ray without reflection, ray which is reflected by reflector surface and then goes out luminaire aperture, ray returning to the lamp surface after reflections then goes out luminaire aperture or extinguished ray on account of multiple reflections on the reflector surface. Diffusely reflected rays which accumulated on each sector of the reflector until quantity

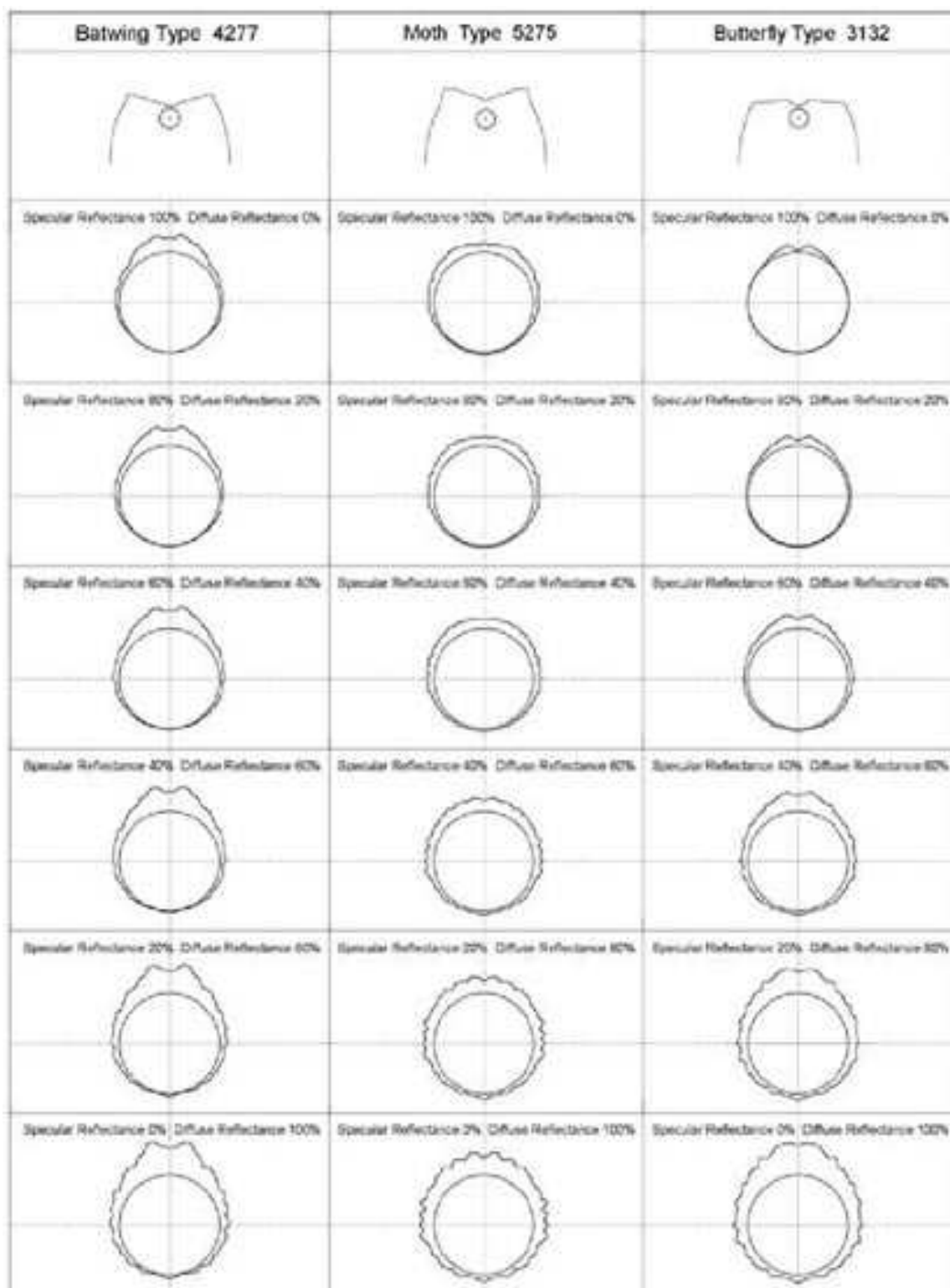


Figure 4 Some examples of luminaire reflectors with super parabolic curved surfaces and inhomogeneous luminance increment distributions on the tube surface as a function of specular and diffuse reflectance.

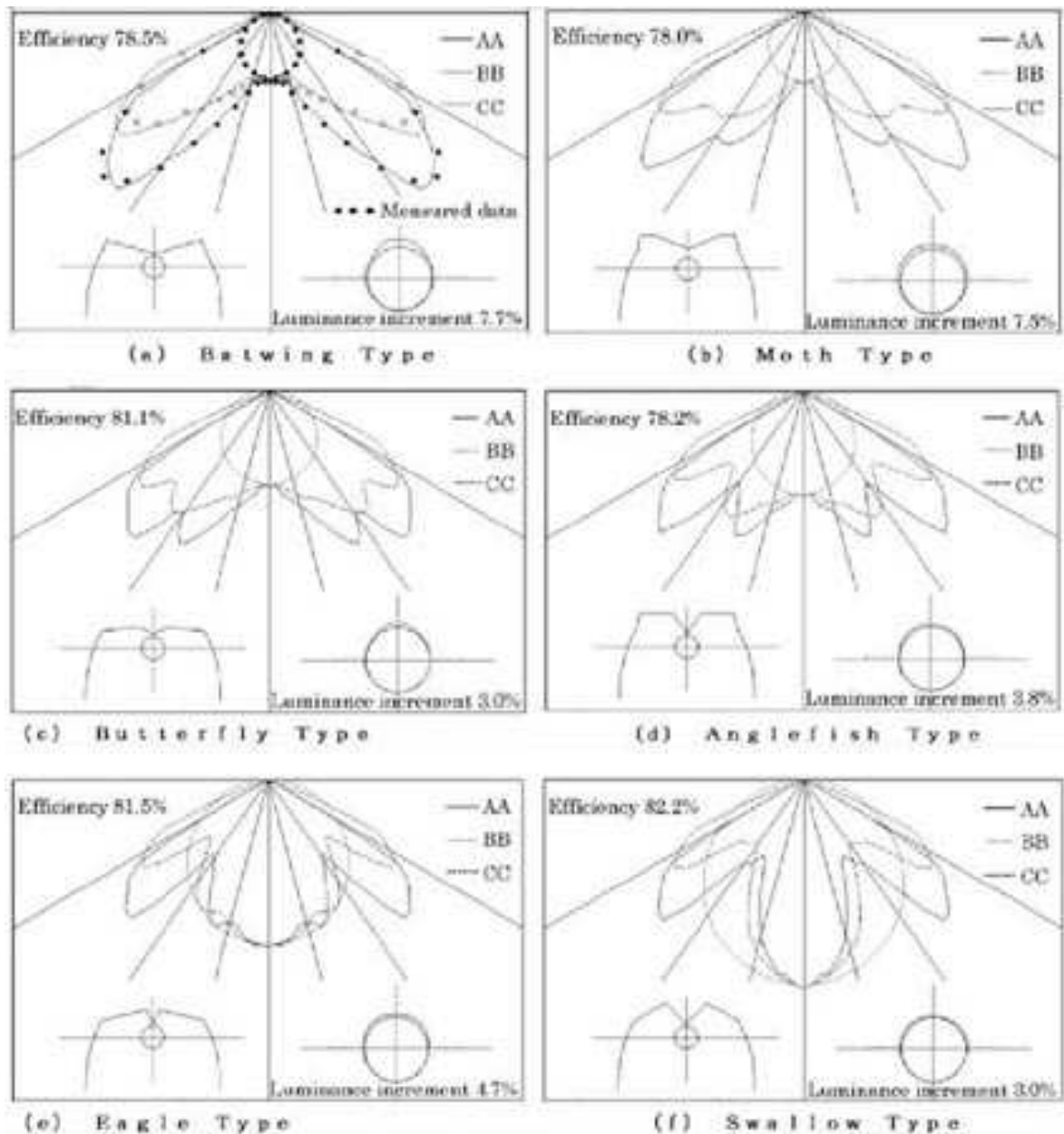


Figure 5 Some examples of luminaire reflectors and typical light intensity distributions of luminaires. Each figure shows light intensity distributions in A-A, B-B and C-C sections.

of light on the surface reaches steady amount is treated as secondary luminous source. Then the light intensity distribution is estimated on the assumption that each sector of the reflector is a diffuse light source.

5. Estimated light intensity distribution

By using unique super parabolic curved surface, typical 6

patterns of light intensity distributions, named “**Batwing Type**”, “**Moth Type**”, “**Butterfly Type**”, “**Angel Fish Type**”, “**Eagle Type**” and “**Swallow Type**”, have been obtained. Some examples of light intensity distributions for typical models of luminaire reflectors are shown in Figure 5. The non-uniform luminance increment on the lamp surface should be taken into consideration for the precise design of luminaire reflectors in the case that

the inter-reflections between the reflector surface and the source surface can not be ignored for the precise estimation of luminous intensity distribution. Adequately designed luminaire reflectors are desired to come into practice in the case that the characteristic of light intensity distribution, the efficiency, the quantity of glare are important matter for the design of comfortable visual environment.

6. References

1. Waldram, J. M., "Some developments in the design of specular reflectors", *Lighting Research & Technology* 2 (3), pp 164-173, (1970)
2. Bodmann, H. w. and Weis, B., "Flux distribution with perfect specular reflectors", *Lighting Research & Technology* 5 (2), pp 112-115, (1973)
3. Vizmanos, J. G. and Quintanilla, M., "Predicting intensity distribution from symmetrical reflectors with large sources of light", *Lighting Research & Technology* 16 (3), pp 140-142, (1984)
4. Kaida, R., Ikeda, K., et al., 1993, "Optical Design of Fluorescent Luminaire Reflectors Using Specially Curved Surfaces" *Proceedings, 2nd LUX PACIFICA*, pp. B11-B16, Bangkok, Thailand, (1993)
5. Ikeda, K., Kaida, R. and Naka, M., "High Efficiency Luminaire Reflector with Highly Controlled Light Intensity Distribution", *CIBSE NATIONAL LIGHTING CONFERENCE*, Cambridge, England, pp 307-318, (1994)



Koichi IKEDA

Doctor of Engineering
Professor of Tokyo Rika Daigaku
Department of Electrical
Engineering
Faculty of Science and
Technology
Yamazaki 2641, Noda-shi,
Chiba-ken, 278-8510, JAPAN
Tel : +81-4-7124-1501 (ex 3708)
Fax : +81-4-7122-9153
e-mail: Ikeda@ee.noda.tus.ac.jp

Akira TORIYAMA, Bachelor of Engineering
Tokyo Rika Daigaku
Department of Electrical Engineering
Faculty of Science and Technology
Yamazaki 2641, Noda-shi,
Chiba-ken, 278-8510, JAPAN

Received 2 February 2004

Proiectarea unui nou aparat de iluminat eficient considerând inter-reflexii multiple între lampă și reflector

Razele reflectate de reflectorul aparatului de iluminat pot ajunge înapoi la sursa de lumină și va rezulta o distribuție neuniformă a luminanței pe suprafața sursei de lumină. Sursa de lumină montată în cadrul aparatului de iluminat nu poate fi tratată ca o sursă neuniformă, cu o distribuție egală de luminanță. În această lucrare, s-au efectuat calcule multiple și repetate a inter-reflexiei, considerându-se suprafața lămpii și a reflectorului surse luminoase secundare, astfel încât razele reflectate difuz sunt estimate și cumulate pentru a estima distribuția neuniformă a luminanței pe suprafața lămpii. S-au proiectat câteva reflectoare noi, unice, a aparatelor de iluminat, utilizându-se suprafețe curbate speciale, pentru a realiza controlul precis al direcțiilor razelor reflectate și pentru a elimina razele inutile, cauzatoare de orbire, astfel realizându-se o distribuție corespunzătoare a intensității luminoase. S-au estimat modele de luminanță neuniformă pe suprafața lămpii și distribuții de intensitate luminoasă ale aparatelor de iluminat.

1. Introducere

Faptul că luminanța lămpii crește neuniform datorită inter-reflexiei dintre suprafața reflectorului și cea a lămpii se cunoaște din experiență, dar nu s-a evaluat experimental și nu s-a estimat cantitativ. În acest studiu, s-a dezvoltat un nou algoritm ce utilizează metoda repetată de calcul a traiectoriei razelor "ray-tracing", prin care se estimează creșterea neuniformă a luminanței lămpii datorată inter-reflexiei. Totodată, studiul analizează cantitativ distribuția neuniformă a luminanței. Pentru proiectarea aparatului de iluminat s-au realizat trei sisteme de analiză optică și dimensională, iar reflectoarele aparatelor de iluminat care să poată controla precis distribuția intensității luminoase cu eficiență mare s-au proiectat cu ajutorul analizei de calculator în vederea realizării unui mediu luminos cât mai confortabil.

2. Proiectarea reflectorului aparatului de iluminat

Forma suprafeței reflectorului s-a proiectat utilizând o curbă super-parabolică, unică care poate controla corespunzător și precis direcția razei reflectate considerând diametrul definit a unei surse coaxiale cilindrice. Reflectorul aparatului de iluminat s-a împărțit în trei secțiuni, conform Figurii 1 și fiecărei secțiuni i s-a aplicat o suprafață curbă adecvată pentru un control corespunzător al razelor reflectate. Forma fiecărei suprafețe a reflectorului cu unghiul de control θ și unghiul de prag Φ s-a calculat aproximativ, ca serie de planuri secvențiale hiperfine, conform metodei Runge-Kutta, analizându-se ecuația diferențială parametrică care specifică funcția formei reflectorului.

3. Suprafața curbă pentru reflectorul aparatului de iluminat

Suprafața curbă super-parabolică. Reflectorul utilizând curba parabolică clasică nu poate controla cu exactitate distribuția intensității luminoase deoarece tubul fluorescent nu este o sursă punctuală, dar este o sursă cu diamteru definit. Astfel, suprafața curbă super parabolică se utilizează pentru a controla corespunzător și precis distribuția intensității luminoase. Această suprafață curbă are centrul pe un cerc cu raza R , adică pe suprafața tubului fluorescent și redirecționează razele emise tangențial pe suprafața cilindrică a tubului pe o direcție predeterminată astfel încât razele reflectate sunt limitate în cadrul domeniului unghiular delimitat de către unghiul de control vertical. În unghiul de control, reîntoarcerea razei pe suprafața tubului nu are loc. Ecuația parametrică diferențială reprezintă secțiunea transversală

a noii suprafeței curbe unice, numită Suprafață Curbă Super Parabolică, unde R este raza lămpii fluorescente, θ este unghiul de control a direcției razei reflectate și x și y sunt coordonatele secțiunii transversale a suprafeței reflectorului.

4. Descriere sumară a metodei de estimare

Suprafața tubului fluorescent este împărțită în intervale de 1 cm de-a lungul axei tubului și fiecare secțiune este împărțită în 144 de sectoare de-a lungul unui cerc perpendicular pe axă. Fiecare sector este privit ca o sursă mică și este se estimează că emite 62.500 de raze luminoase tridimensionale, conform legii cosinusului lui Lambert (vezi Figura 2). Pentru fiecare calcul, razele luminoase care sunt reprezentate ca flux vectorial înmulțit cu unghiul solid sunt urmărite tridimensional. Pentru analiza căii optice a razelor de lumină, razele reflectate regulat și razele reflectate difuz sunt analizate separat. Razele reflectate regulat sunt urmărite prin intermediul metodei de calcul a traiectoriei razei "ray-tracing". Pentru razele reflectate difuz, comportamentul optic este evaluat prin calculul repetat conform algoritmului sursei luminoase secundare care este efectuat în laboratorul nostru.

4.1. Tratarea razelor reflectate difuz

Sistemul optic ce include elemente de reflexie difuză poate fi tratat considerând reflectorul ca sursă luminoasă secundară cu luminanță corespunzătoare cauzată de lumina incidentă. Luminanța corespunzătoare a reflectorului este analizată prin algoritmul sursei luminoase secundare, utilizându-se metoda "ray-tracing". Razele reflectate difuz sunt urmărite și cumulate pe suprafața reflectorului, în timp ce cantitatea de lumină de pe suprafață atinge valori stabile, așa cum este prezentat în Figura 3. Astfel, distribuția intensității luminoase este estimată presupunând că fiecare element a reflectorului reprezintă o sursă luminoasă difuză.

4.2. Distribuția luminanței pe suprafața lămpii

Razele luminoase revenite pe suprafața tubului sunt împărțite în raze reflectate regulat pe suprafața sticlei, raze reflectate difuz și raze transmise difuz prin stratul fluorescent. Reflectanța regulată, reflectanța difuză și transmitanța difuză a suprafeței tubului fluorescent sunt obținute experimental ca o funcție a unghiului incident. Pentru a analiza creșterea luminanței pe suprafața lămpii, s-au efectuat calcule repetate ale interreflexiei dintre suprafața reflectorului și suprafața sursei, urmând algoritmului sursei luminoase secundare. Razele

reflectate difuz și razele transmise difuz sunt colectate pe suprafața tubului, până când cantitatea de lumină de pe suprafața tubului atinge o valoare constantă. Razele de lumină colectate sunt integrate în fiecare sector pe suprafața tubului. S-au estimat distribuțiile de luminanță de pe suprafața lămpii echipate în reflectoarele clasice ale aparatelor de iluminat. În Figura 4 sunt prezentate câteva exemple de creștere neuniformă a luminanței pe suprafața tubului în cazul reflectoarele curbe speciale. Luminanța crește neuniform de-a lungul tubului de la 0% până la 60%.

4.3. Calcule preconizate privind distribuția intensității luminoase

După ce s-a estimat distribuția luminanței pe suprafața tubului, s-au efectuat din nou calcule în conformitate cu distribuția luminanței “acumulate”. În final, fiecare rază emisă de fluxul de raze colectat pe fiecare sector a suprafeței lămpii este urmărită conform metodei “ray-tracing” și este clasificată în patru categorii, adică raze evacuate direct, fără reflexie, raze care sunt reflectate de suprafața reflectorului și care ies prin deschiderea aparatului de iluminat, raze ce se reîntorc pe suprafața lămpii după reflexie și care ies prin deschiderea aparatului de iluminat și raze atenuate în urma reflexiilor multiple pe suprafața reflectorului. Razele reflectate difuz colectate

pe fiecare sector al reflectorului, până când cantitatea de lumină de pe suprafață atinge o valoare constantă, se tratează ca sursă luminoasă secundară. Apoi distribuția intensității luminoase este estimată pornind de la presupunerea că fiecare sector al reflectorului este o sursă luminoasă difuză.

5. Distribuția estimată a intensității luminoase

Prin utilizarea unei suprafețe curbe supe parabolice, unice, s-au obținut 6 tipuri clasice de distribuții ale intensității luminoase, intitulate “Batwing”, “Moth”, “Butterfly”, “Angel Fish”, “Eagle” și “Swallow”. Figura 5 prezintă câteva exemple de distribuții ale intensității luminoase pentru tipuri clasice de reflectoare. Pentru o proiectare precisă a reflectoarelor aparatelor de iluminat, trebuie luată în considerare creșterea neuniformă a luminanței pe suprafața lămpii, în cazul în care interreflexiile dintre suprafața reflectorului și suprafața sursei nu pot fi ignorate pentru estimarea precisă a distribuției intensității luminoase. Pentru punerea în practică sunt preferate reflectoare ale aparatelor de iluminat proiectate corespunzător în cazul în care caracteristica distribuției intensității luminoase, eficiența, gradul de orbire sunt factori importanți pentru proiectarea unui mediu vizual confortabil.