

二維彎曲組合式導光條模組的光學設計

林士凱、余志成*

國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

*Email: jcyu@nkfust.edu.tw

摘要

本文探討具獨立光源的組合式導光條模組光學設計，設計積木式一維可組合導光模組，包括直段、水平、垂直彎曲單元模組，以頭尾相接組裝方式，改善現有長條導光棒常有照度不足、均勻性不佳等問題，利用 TracePro 光學模擬軟體分析導光模組光耦合效率，計算分析光在各導光條之間傳遞分佈，推導出最佳光源以達到整體最佳照度均齊性，並分析水平及垂直兩種彎曲方向對於光型所產生的影響進行特徵深度最佳化，達到即使長條導光應用，組合彎曲部分整體也有均勻照度，並提出組合式導光模組在指示照明及車用晝行燈應用例做為設計驗證。

關鍵字：導光條、導光積木、光追跡模擬、彎曲導光、TracePro

1. 簡介

LED 具有壽命長、低耗電量等優點，已成為主要的照明燈源，近年來廣泛被應用在照明燈具設計上，主要分為反射式、直下式、混合式、導光式等四類，前三者容易有眩光、高指向性等問題，而導光式則沒前述問題但易有導光不均的現象。LED 導光技術應用於顯示裝置已是成熟的技術[1]，藉由分佈在薄板上的微特徵控制出光的位置，將線光源轉變形成平面光源，來達到均勻出光的效果，其出光特性受到特徵幾何形狀影響[2]。

側光式導光技術應用於車用側光導光元件如晝行燈等，其外觀隨車輛外型而會有彎曲的外型，當元件彎曲後會產生一些問題，像是漏光、出光效率不佳等問題，如何能達成均勻出光、降低漏光因素和提升出光效率成為側光導光元件的設計重點。

V-cut 為典型的導光特徵，單側入光時 V-cut 對稱設計在出光會有偏向一側的現象，微結構 V-cut 角度將可改變主要光強度的方向[3]如圖 2，因此，調整微結構的兩側導角 α 與 β ，將可導引光源於主觀測方向出光，並控制微結構高度以調整導光條出光量。部分整合式導光板相關之文獻研究改變微結構角度的方式，來控制出光特性[4]。而彎曲導光條技術大多也是藉由微特徵破壞光的行進方向，使其正向出光。Futami[5]指出，反射特徵可使用 V-cut 來控制其出光的特性，但仍是具有尾端光線不足的現象，而 Leclercq[6]利用側面導光原理，在導光條兩側設置 LED 燈源並藉由導光

條的光學特徵使導光條發光，並避免眩光的問題，但在導光條前後兩端有亮度不均的問題，且導光條曲線化的設計更增加出光均勻化的困難度。現有彎曲較大之導光條的車燈設計，在彎曲段不使其出光，改以光傳導作用降低光損失[7]。Van Derlofskel 與 Hough[8]提出以不同入光面的形狀影響出光的位置，在直段與直段間有個夾角的彎曲，此種導光條不須特徵結構就具有破壞光線行進的功能。

本文將研究具有獨立光源的二維彎曲組合式導光模組的光學設計，設計如同積木可組合的導光模組[9]，包括直段、平面彎曲、垂直彎曲導光模組等，著重於組合式導光元件的光學設計並將其設計應用於產品上，如晝行燈與室內情境照明燈具等，來驗證此設計方法的可行性。

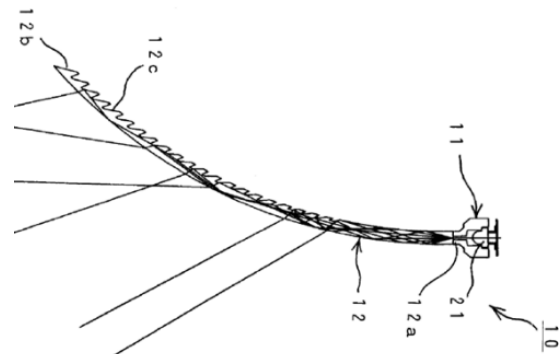


圖 1: V-cut 為反射特徵的導光元件[6]

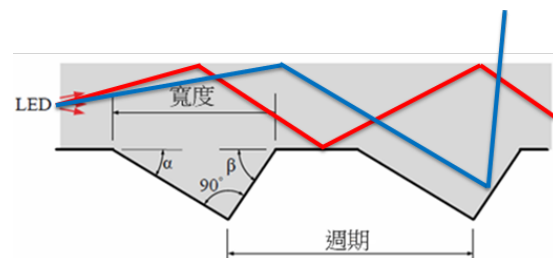


圖 2: 導光條 V-cut 設計示意圖

2. 直條導光模組設計

當導光體長度越長，尾部可用的光也越少，優化整體亮度平均值後長度越長出光效率也會越低，因此本文提出一維可組合導光積木設計如圖 3，每個模組皆具有單側獨立光源，採用日亞化 (Nichia)

NS2W757AT-V1 系列 R8000 的 LED，發光角為 120° ，流明值為 31.2 lm。採用 L 型外觀，長度為 50 mm，寬度為 12 mm，高度為 5 mm，導光板為楔型以提升整體亮度，而 V-cut 設置在導光板的下側，採等間距分布，以變化特徵高度來進行照度均勻分布。

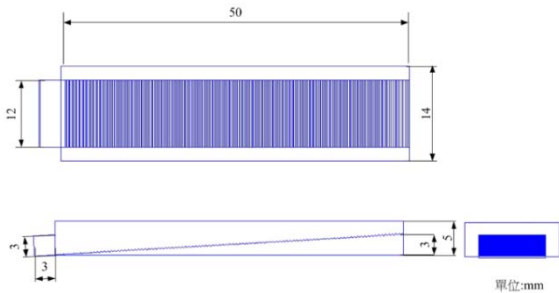


圖 3：組成型直段導光條示意圖

2.1. 照度均勻度優化設計

本研究以 TracePro 進行光追跡分析照度分布，在導光條設立特徵高度控制點，控制點間的特徵高度採用內差線性分佈（圖 4），若控制點附近區域平均照度與整個導光柱平均照度的比值 (Local Illuminance Ratio, LIR) 大於 1，則將降低控制點特徵高度，反之則增加控制點特徵高度，並提出模糊推論法則作為高度調整機制，以出光照度 RMSE 為目標函數，反覆優化在 RMSE 達到收斂後即可得到均勻的照度分布。

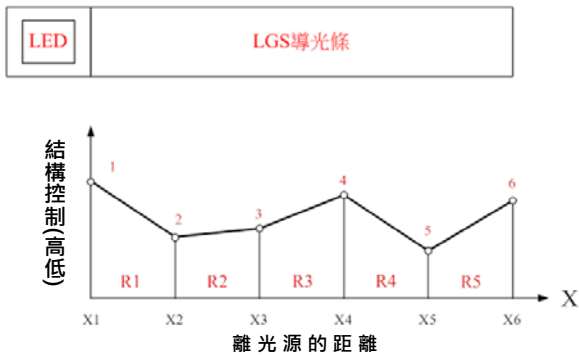


圖 4：導光條特徵高度分布控制點示意圖

2.2. 直條導光模組優化

圖 5 為四個直段導光模組組合後示意圖，整體照度圖取樣為第二到第四模組，如圖 6 所示，優化樣本採用第二條為基準並全部使用優化後的導光條模組進行分析，以模糊最佳化經 14 次迭代後收斂（圖 8），優化後組合導光模組照度圖如圖 7 所示，可以看出照度均勻度明顯提升，照度 RMSE 從 4266 降低到 3629，改善約 15%。



圖 5：直條導光模組優化採樣示意圖

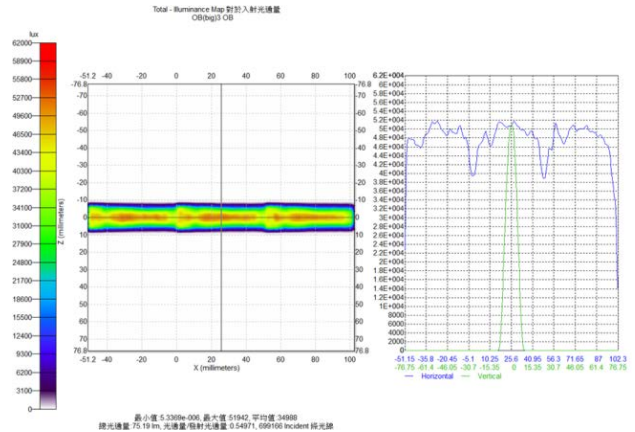


圖 6：初始直段導光條照度分布圖

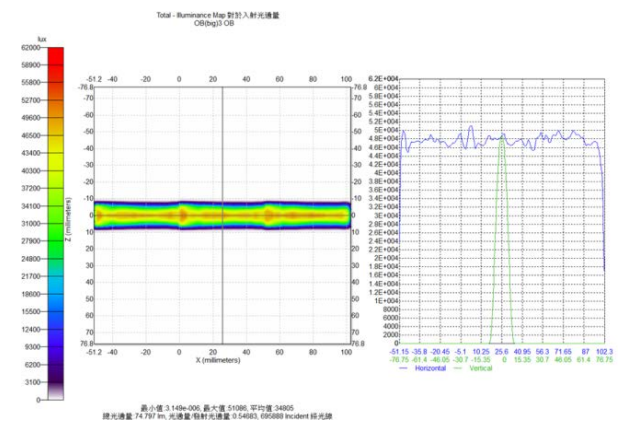


圖 7：優化後整體照度分布圖

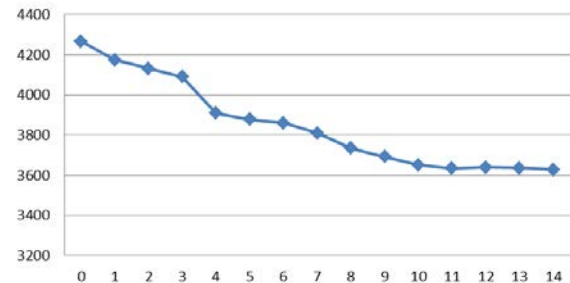


圖 8：模組之間結合處 RMSE 迭代優化圖

3. 彎曲導光條模組的光學設計

為組合出二維彎曲的長導光條，本文研究彎曲導光模組的設計。矩形導光條的彎曲曲率對光在導光管傳遞有明顯的影響，在水平彎曲為 0.02 以下而垂直彎曲在 0.05 以下時，在彎曲處會有非預期出光現象 [10]，因此本計畫在容許之最大曲率下，設計 45° 垂直與水平彎曲的導光模組，進行個別進行照度均勻分布。

3.1. 水平彎曲導光模組

直段與水平彎曲的模組組合設計如圖 9 所示，為分析水平彎曲導光條的出光效率，以導光條中心線作為改變的基準，彎曲角度為 45° ，分析水平彎曲導光條與整體照度的分析，對彎曲段 v-cut 高度進行優化

分布如圖 10 所示，彎曲角度變化時光線傳遞方向亦會跟著改變，隨著彎曲角度漸漸往中心線集中，45° 水平彎曲模組經優化後 RMSE 約 5241，相較於直段模組的 RMSE 為大，且相接於彎曲段後的直段光型雖然不變但亮度卻小幅下降，因為彎曲段因漏光比例較直段高，造成向後傳遞的光通量下降。

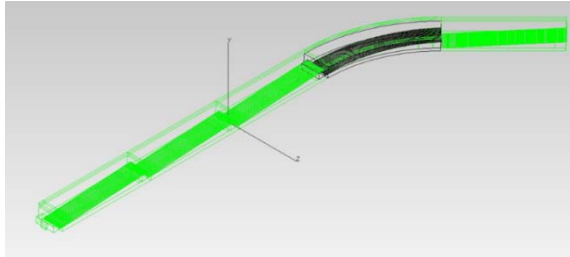


圖 9：水平彎曲 45° 導光模型示意圖

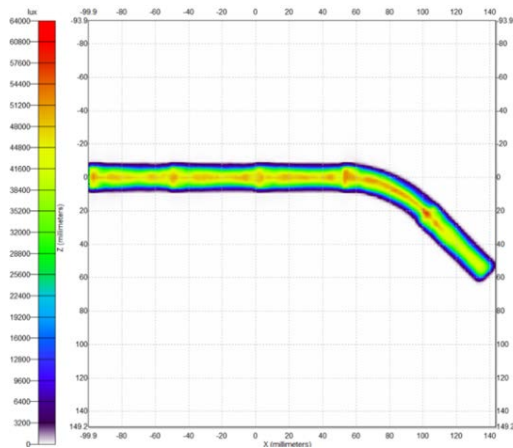


圖 10：水平彎曲 45° 整體照度圖

3.2. 垂直彎曲導光模組

垂直彎曲導光條主要的問題發生在光線因彎曲段折射的關係而導致出光，若要導光條有效的均勻在轉彎段處出光時，設計上應符合彎曲建議設計以減少漏光情形產生，因此以曲率在 0.05 角度為 45°，並以導光條中心線作為改變的基準如圖 11 所示。

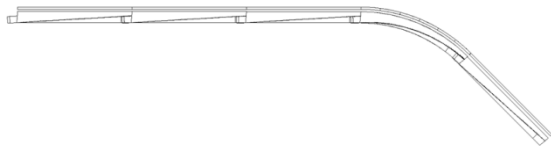


圖 11：垂直彎曲 45° 導光條分析模組

為了準確分析光線在垂直彎曲導光條行進時，在彎曲角度增加時的出光光型，因此在距垂直彎曲出光面 1(mm) 處建設 6 個小觀察面如圖 12 所示，觀察在各彎曲角度下的出光效率，以便分析垂直彎曲導光條在角度改變對於整體導光模組的出光效率與平均照度之影響。

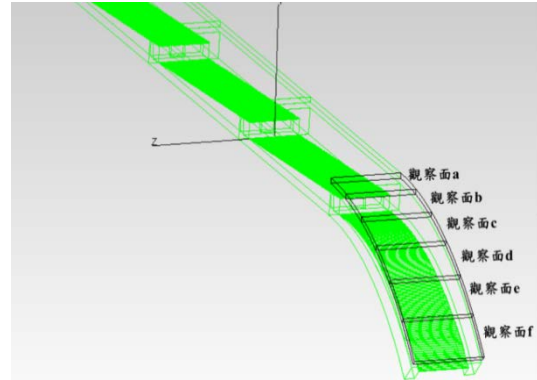


圖 12：小觀察面測量示意圖

優化分析結果如圖 13，出光效率為 81.2%，可以發現在垂直彎曲角度到 22.5° 之前，出光光型與直條導光條大致相同，但觀察面 e 及 f 在出光均勻度的設計上較困難，主要是導光條彎曲造成光線折射出光，而非法線方向的微結構高度分布所能控制。

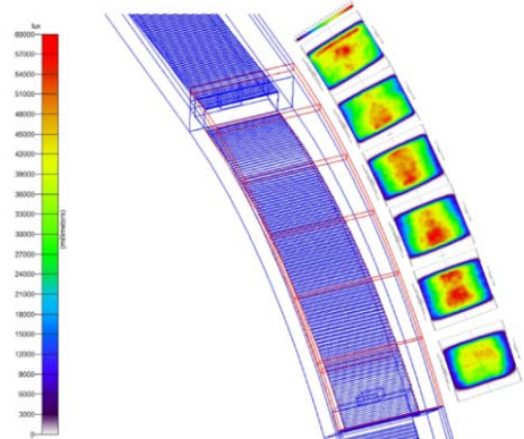


圖 13：垂直彎曲 45° 照度圖

4. 首段模組的優化設計

因首段導光直條並無前一段導光條光源的導入，故其照度相較於後續直段較低，本文將所分析出的組合式導光條進行光源調整、對首段導光條微結構優化及中間段的影響、整體光型的影響等結果。整體導光模組出光效率平均約 78%，但直段導光條本身 LED 光源的在該段出光面所貢獻的出光效率約 57.3%，尤其在光源接合處的照度較低，係由前面相接導光條向後傳遞的光線來提升整體的照度，尤其是在結合處，但首段導光條由於沒有前段的光源，亮度及均勻性都不足如圖 14，因此針對首段的光源進行提升。

本研究將直導光段相接如圖 15，並關閉 B, C, D 光源，分析 A 段光源從入光段向後續相接的直導光段出光的分布如表 1，進而以小均方差方式求首段導光條的最佳 LED 光源強度，以達到整個組合導光的光照均勻度，並將微結構分布進行獨立優化。分析結果圖

如圖 16 所示，且 RMSE 從原先的 5859.3 下降至 3513.9 改善約 40%。

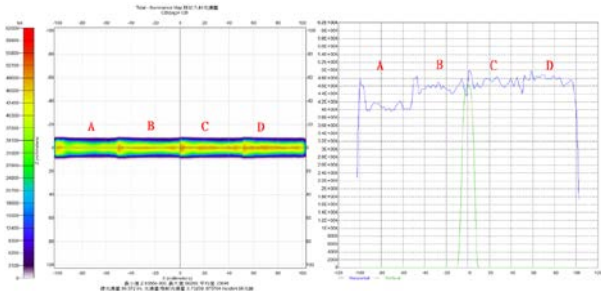


圖 14：每個直段相同光源強度下照度分布圖

表 1：首段光源對後段導光條出光比例分布

	第一段	第二段	第三段	第四段
影響值	57.3%	15.9%	5.1%	1.88%



圖 15：各觀察面影響示意圖

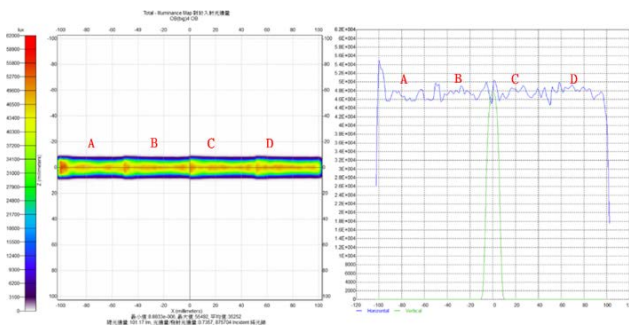


圖 16：首段光源強度調整後整體照度圖

5. 組合應用例

本文將所開發的導光模組應用在情境照明與畫行燈作為設計驗證，圖 17 為心型圖樣的組合應用，以 6 直段與 10 個水平彎曲模組組合而成，從圖面可以看出整體照度相當均勻，出光效率 76.9%，平均照度 393.5(lm)，RMSE 值約 3132。

圖 19 為一使用五個直段與兩個垂直彎曲導光模組應用在牆角轉角處的指示燈應用例，其組合光條上加上擴散外套，以變化外觀作為指示燈飾，使用參數數據為 Absorbance =0.35, BTDF=0.65, A=0.026, B=0.03, g=2.3, 整體照度為 117.1 (lm), 出光效率 53.4%，RMSE 值 9170。

從圖面可看出即使用擴散外套在轉彎處約 60 度的部分發生出光不均問題，主要是大角度的光直接出光造成，對於轉彎處法線方向觀察者而言影響並不明顯，且對於後面直線段影響並不嚴重，說明了主要亮點所利用到為原本會損失的部分受到彎曲的影響而造成。

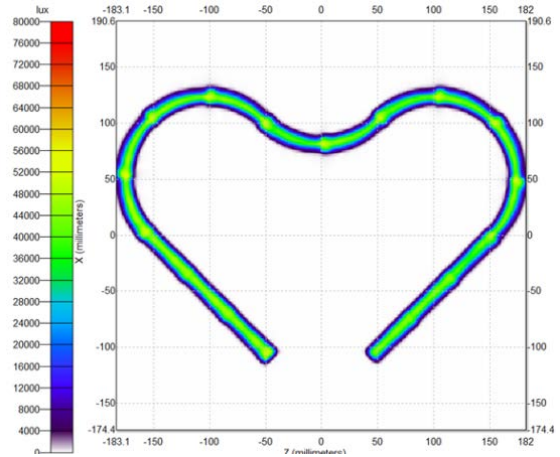


圖 17：心型圖樣應用例照度圖

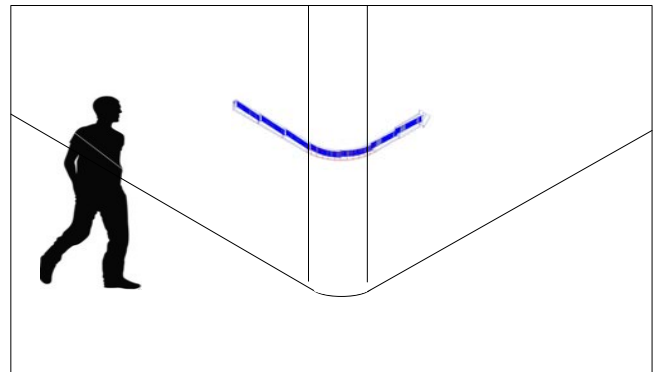


圖 18：牆角轉角處指示燈應用例

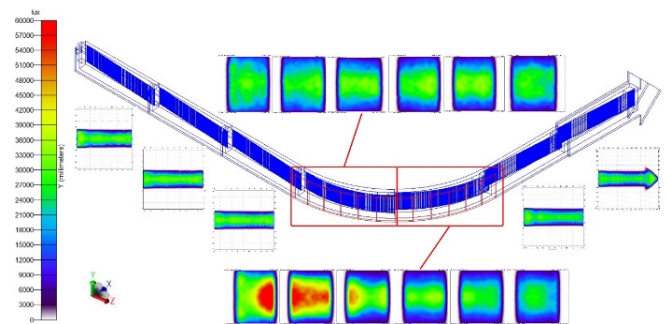


圖 19：組合導光條加上擴散外套指示燈照度圖

圖 16 為天使眼光圈應用示意圖，右圖為近觀察面照度圖為一完整的光圈，使用 8 個 45 度的水平彎曲導光單元組合，具有相當均勻及高照度的出光，且避

免了原天使眼晝行燈 LED 裝設底端造成出光缺口的問題。

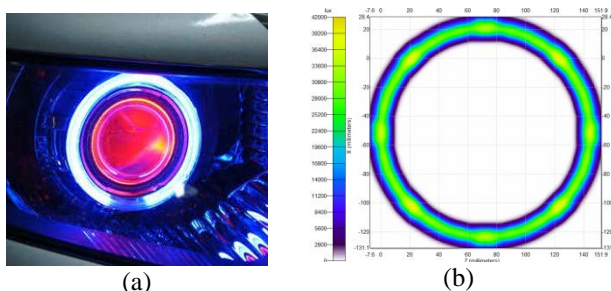


圖 20：車用晝行燈應用例 (a)原始設計(b)水平導光

6. 結論

本文探討二維彎曲組合式導光模組的光學設計，如何改善各導光條光線耦合效率、出光角度與照度均勻性及組合後的協調性，另外導光條受不同平面向彎曲後，受彎曲特性的影響，針對彎曲特性分析出建議設計調整方法，本設計可簡便的應用於直段、水平彎曲與垂直彎曲的任意組合，簡化二維彎曲導光條的設計成本。

7. 誌謝

本論文為科技部計畫編號 MOST-103-2221-E-327-013 之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

8. 參考文獻

- [1] Yu, J., Chen, Z.-Y., and Kao, B.-D. "Optical design and optimization of planar curved LED end-lit light bar," *Applied Optics*, Vol. 53, Issue 29, pp. H67-H75, 2014.
- [2] Rosemann, A., Mossman, M., Whitehead, L., "Development of a cost-effective solar illumination system to bring natural light into the building core", *Solar Energy*, Vol. 82, pp. 302 – 310, 2008.
- [3] Shinohana, M. and Aoyama, S., "Surface light source device, elements therefor and apparatus using the SAME", US pattern 6231200, 2001.
- [4] Feng, D., Jin, G., Yan, Y., and Fan, S., "High quality light guide plates that can control the illumination angle based on microprism structures", *Applied Physics Letters*, Volume 85, Issue 24, 2004.
- [5] Futami, T., "Vehicle Lamp", US patent 7695175B2, 2010.
- [6] Leclercq, P., "Surface Configuration of a Taillight for a Vehicle", US Patent D552769S, 2007.
- [7] Taleb-Bendiab, A., Sharma, M. N., Stadtherr, D. L., "Dual-direction light pipe for automotive lighting", US Patent 8333493 B2, 2012.
- [8] Van Derlofske1, J. F., Hough, T. A., "Flux Propagation in Light Pipes: Further Development of

the Flux Confinement Diagram", *Proc. of SPIE*, Vol. 5529, 2004.

- [9] 賴彥璋、高榜德、林士凱、余志成, "LED 組合式導光條的設計與應用", 全國精密製造研討會, 國立高雄第一科技大學, 台灣, 2014。
- [10] 高榜德、林士凱、余志成, "側入光垂直彎曲導光條的光學設計與分析", 中國機械工程學會第三十一屆全國學術研討會, 逢甲大學, 2014。

Optical Design of Assemblable Light Guide Bar Modules with Two Dimensional Bent

Shin-Kai Lin and Jyh-Cheng Yu*

Department of Mechanical and
Automation Engineering
National Kaohsiung First University of
Science and Technology

*Email: jcyu@nkfust.edu.tw

Abstract

This study investigates the optical design and applications of assemblable LED light guide module with independent LED light. Current light guide bars often have the problem of low uniformity of illumination especial for long and curved bars. The optical design has to be redesign if the light guide bar geometry changes. The thesis will focus on linearly extendable light guide bars, including straight section, planar curve section, and transverse curve section. Each light guide building block has independent LED light source and socket design for optical and electrical connection. This study applies the optical simulation software, TracePro to simulate optical characteristics of a light bar with various light guide features and the related geometric parameters to achieve an optimum design. A Fuzzy optimization scheme is applied to vary the v-cut size distribution along the light bar. The optical design also considers the light distributed from the upstream light guide modules to achieve the overall illuminance uniformity. The proposed modules will be applied to the design of atmosphere lighting, automotive day driving light and decorating lighting to demonstrate the feasibility of the design.

Keywords: Assemblable LED light guide bars, Light guide brick, Curved light guide, LED edge-lit light guide, TracePro.