

平面彎曲 LED 側入光式導光柱的光學設計與最佳化

陳致堯、高榜德、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 LED 側入光式導光柱的光學設計，使用 V-cut 為其導光特徵結構，改變 V-cut 導角與結構分佈高度變化，來提升出光效率及均勻性。以 TracePro 光學模擬軟體來分析單側與雙側入光導光柱的出光特性，找出具有軸向集中出光之 V-cut 導角，另外也分析了圓形與矩形截面的導光柱尺寸參數對出光的影響。矩形截面的彎曲導光柱中，光線有集中於彎曲段外側的現象，本文使用彎曲段內、外側特徵高度的變化來減小內、外側出光平均照度的差異，再經由 V-cut 高度變化控制區域照度來調整導光柱的照度均勻性，藉由控制點上的局部照度與整體平均照度間的比值來調整控制點的 V-cut 尺寸，以線性方式變化控制點間的特徵高度，並利用模糊最佳化方法，經由迭代的方式來達到照度均勻性的最佳化，最後以一彎曲導光條與一圓形導光環的設計作為設計方法的驗證。

關鍵字: LED 側入光式導光、彎曲導光、出光均勻性、模糊最佳化、TracePro

1. 簡介

由於綠色科技的提倡與發光二極體 (LED) 技術不斷的進步，傳統照明設備中的白熾燈泡已經逐漸的被 LED 取代，這股風潮也導入汽車警示照明應用上，但傳統的 LED 車用照明應用，多採用 LED 直下式的排列設計[1][2]，來達到亮度與燈具形狀的需求，但是 LED 光指向性強，會使路上其他駕駛產生眩光的問題，且多顆 LED 也會造成成本增加的問題。

隨著高功率 LED 的問世，開始出現把 LED 放在側邊單側或雙側，配合條狀的導光柱，藉由導光柱上的微結構將光導引出光，如圖 1 所示。此種方式能大量減少 LED 數量，且具有出光柔和與美觀的特性。但在彎曲導光條的設計則有漏光、出光不均、光線集中於一處的問題[3][4][5]。

車尾燈組設計是最早導入導光柱的應用，典型的車尾燈導光柱設計，大多利用圓柱結構或 V-cut 大小來控制出光的均勻性，Matthias 和 Steffen[7]提出控制 V-cut 三角形的導角 α 、 β 來控制光的行進方向，如圖 2 所示。但現有文獻多集中在車尾燈應用設計專利的發表[8][9]，並未探討導光柱特徵參數與分佈的設計。而一般導光柱採用等間距的特徵分佈，使得大部分的光線集中在靠近 LED 的地方，而離光源較遠的地方則

明顯較暗，均勻性差，雖可採用特徵的疏密分佈[10]或特徵的大小改變，或雙側光源來改善出光分佈，但在彎曲部分內外側出光不對稱，以及彎曲導光柱如何進行出光均勻化的設計，並未提出解決方案。

本文將對於彎曲導光柱所導致出光不均的問題做一個探討，並分析不同入光面的設計搭配微結構的影響、V-cut 的導角度的出光特性，並針對如何改善彎曲處內外亮暗不對稱，與導光柱出光均勻進行設計最佳化。



圖 1 LED 導光柱車尾燈[6]

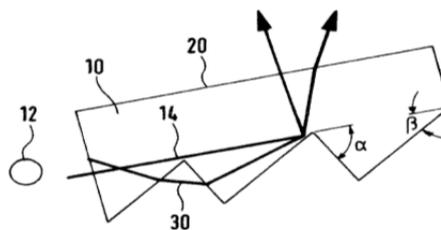


圖 2 側光式導光柱設計[7]

2. 模型建構與出光角度分析

導光柱的光學設計包括特徵設計與分佈兩部分，本研究探討的導光柱微結構為 V-cut，利用 Pro-ENGINEER 作為 3D 建模，以典型 PMMA 直條導光柱為載具，分析 V-cut 左右導角對出光強度分佈的影響，利用 TracePro 的光強度分佈來找出最佳的 V-cut 導角，以提升正軸向光強度，進而作為導光柱後續出光均勻分佈的基準特徵。

在單側入光的設計，初始設計 V-cut 以單純的左右 45° 對稱導角，結構為 0.6 mm 的寬度，以 1.2 mm 等週期分佈，其模擬結果如圖 3 所示，出光強度分佈較為分散，主峰值呈現 19° 的偏角。本文變化 V-cut

左右導角 α 與 β 如圖 4 所示，來調整導光柱的出光方向，使光能往軸向集中。在實驗中使用的結構角度符號註記為 α LED β ， α 較為靠近 LED 光源端， β 較為遠離 LED 端的導角。

由基本光折射與反射原理，可得導角的調整公式如式(1)， β_0 為原本的右導角， θ 為原光強度峰值的偏角， β_1 為調整後之角度。在此初始導角為 45° ，由圖 3 中可看出主峰值的偏角 $\theta = 19^\circ$ ，調整後的右角度 β_1 約為 54° ，其調整後 36LED54 之光強度角度分布模擬結果如圖 5 所示，可以發現其出光峰值往軸向集中，而且軸向光強度也從原本的 3.6 提升至 4.1cd。

$$\beta_1 = \beta_0 + (\theta/2) \quad (1)$$

在雙側入光方面，對於對稱形狀設計的導光柱，其 V-cut 導角 α 、 β 角應採用等腰三角形的方式，以保持其出光的對稱性，所調整導角與其對應的光強分佈如圖 6 所示，其中 50LED50 具有最高軸向光強的特性，因此以此結構作為後續設計之光學特徵。

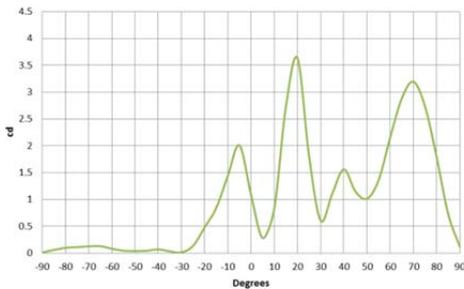


圖 3 單側入光 45LED45 光強度分佈圖

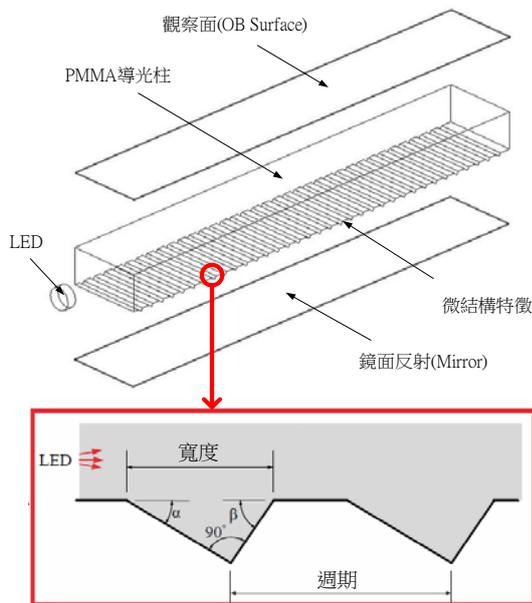


圖 4 V-cut 結構導角示意圖

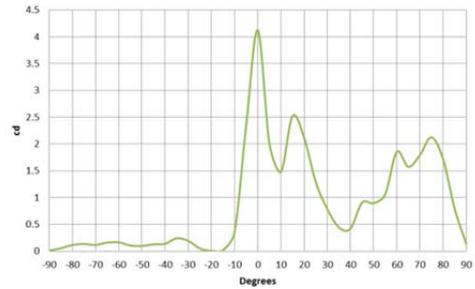


圖 5 單側入光 36LED54 發光強度分佈圖

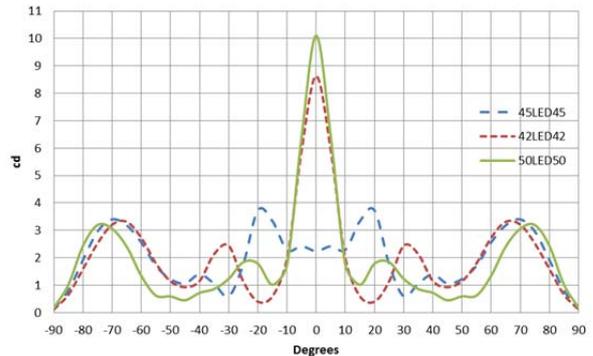


圖 6 雙側入光不同導角對應之發光強度分佈圖

3. 導光柱截面對出光的影響

矩形與圓形為常見的導光柱截面，本節改變不同的截面大小，分析幾何尺寸對出光的影響，兩種截面的導光柱長度為 100mm。

3.1. 矩形截面

本研究以實驗計畫的方式設計了 9 組，寬度分別為 6、8、10 mm，搭配 3、4、5 mm 的厚度進行分析，以回應表的方式呈現寬度與厚度對其出平均照度、出光效率、發光強度的趨勢。

從圖 7~9 的折線圖來看，厚度較薄具有較佳的平均照度、出光效率、軸向發光強度；而較小寬度對於平均照度較佳，因為光源光通量是固定的，較窄截面的出光面所平均下來的照度會較高，而出光效率卻是較寬截面較佳，這是因 V-cut 大小隨截面變寬而變長，因 V-cut 的反射使出光的光線變多所致，而截面寬窄對於軸向光強影響則不明顯。

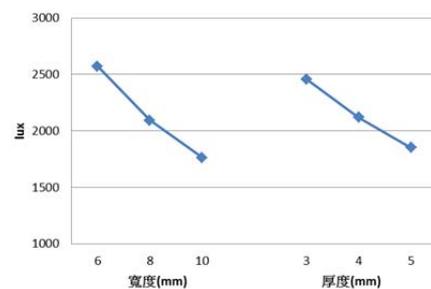


圖 7 矩形截面平均照度折線圖

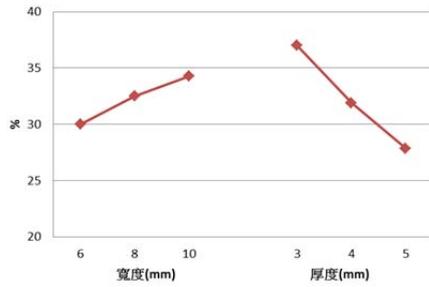


圖 8 矩形截面平均出光效率折線圖

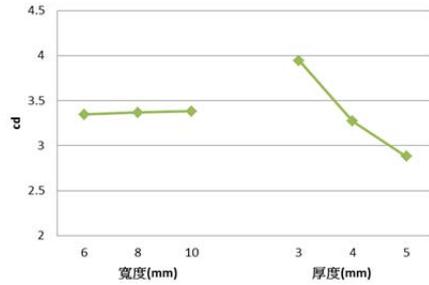


圖 9 矩形截面平均軸向發光強度折線圖

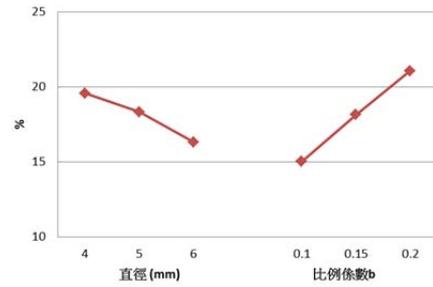


圖 12 圓形截面平均出光效率折線圖

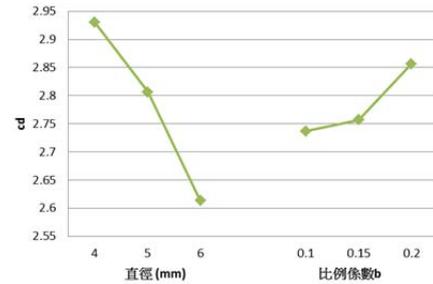


圖 13 圓形截面軸向發光強度折線圖

3.2. 圓形截面

圓形截面的導光柱下方切出一作為分佈微結構所需基準平面，同矩形截面以實驗計畫方式設計九組不同參數的導光柱，主要採取三種不同直徑 4、5、6mm 搭配直徑倍率 b 的作為結構分佈所需平面，倍率 b 設為 0.1、0.15、0.2，如圖 10 所示， b 愈大代表結構分佈平面愈大且導光柱的截面積也會隨之變小，經模擬分析以折線圖呈現直徑與結構切面寬度比例係數 b 對平均照度、出光效率、發光強度的趨勢如圖 11~圖 13。

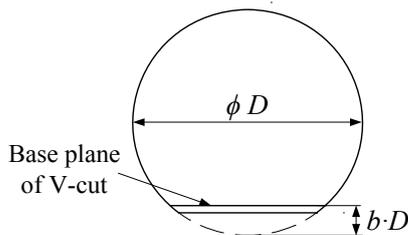


圖 10 圓形截面導光柱示意圖

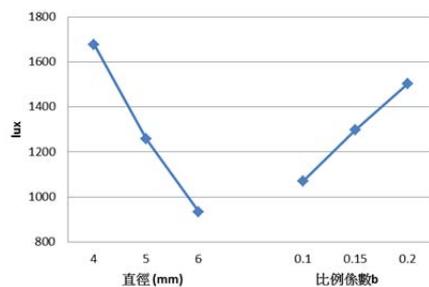


圖 11 圓形截面平均照度折線圖

從以上折線圖可以發現趨勢一致，直徑愈小而比例係數 b 愈大對出光的平均照度、出光效率、軸向發光強度，這與矩形截面之結果大致吻合，截面厚度與小愈好。

4. 彎曲處內外側出光差異的改善

圖 14 為一矩形而長 110mm、寬 15mm、厚 5.5 mm，彎曲段內側曲率為 0.02 的導光柱的彎曲段照度圖，使用單側入光的形式，關於內側曲率為 0.02 方面，由文獻可知[11]，曲率大於 0.02 後光線從導光柱側面漏光會變的嚴重，故只設定曲率在 0.02，在彎曲段長度為 50mm，只在彎曲段分佈 36LED54 結構，用以分析彎曲段的出光情形，從圖 14 可以看到在彎曲段內外側亮暗不均的情形。

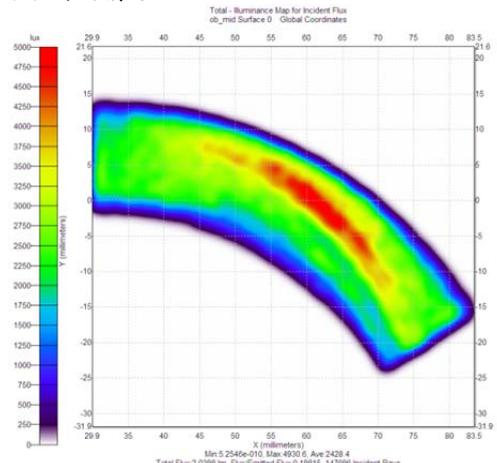


圖 14 $h_o=0.3$ mm, $h_i=0.3$ mm 導光柱照度圖

在彎曲導光條的外側亮度會高於內側，因此本文提出調整內外側微結構高度比如圖 15 所示，降低外側的特徵高度，為了使導光條的光線能夠減少在轉彎處出光並且將光線傳遞到尾端，而採用這種降低導光條外側高度的設計，外側高度 h_o ，內側高度 h_i ，藉以降低彎曲段外側的亮度。

$$c = \frac{h_i - h_o}{h_i} \quad (2)$$

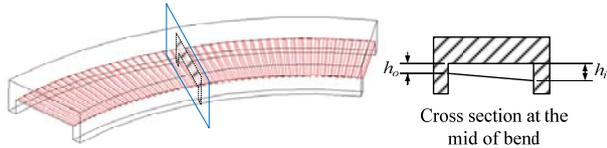


圖 15 導光柱彎曲段厚薄變化示意圖

其中特徵最小處設在彎曲段的中心位置，而以漸變的雲形線來變化微結構的外邊高度，可以發現微結構外側高度變低時，內外側平均照度的差異會減少如表 1，其值愈接近 0 代表差異愈小，但 c 大於 0.6 時，微結構外側高度會低於 0.1 mm，在模具加工製造上較為困難，在 c 為 0.55 時具有較佳的內外側出光對稱性及平均照度。

表 1 微結構內外側高度變化之模擬結果

c	內側	外側	整體	(外側-內側)/平均
	平均照度	平均照度		
0.3	2812	2523.9	2336	0.12
0.4	2748	2516.4	2303.5	0.10
0.5	2683.8	2511.1	2274.1	0.08
0.55	2658.4	2507	2261	0.07
0.6	2635	2509	2250.8	0.06
0.7	2577.6	2499.5	2223.2	0.04
0.8	2521.2	2489.7	2196.8	0.01

5. 導光柱出光均勻性改善

為改善整體導光柱的出光均勻性，本文採用模糊最佳化(Fuzzy Optimization)進行導光柱的特徵分佈。再藉由 TracePro 進行導光柱出光分析時，從照度圖可發現因結構分佈產生的亮暗區域，這會影響其他駕駛的視覺和外觀的美觀程度，而為了提高其品質與價值，必須改善這些亮暗不均的情形，前面小節所改善的是出光角度的峰值，即從導光柱的法線方向附近觀看能看到最亮的亮度，但是整條導光柱看起來靠近光源的地方會較亮，離光源愈遠的地方看起來會愈暗，無法得到高均勻性的導光柱，所以利用太亮及太暗的特性來進行模糊理論中的解模糊化，也就是說如果太亮，則將微結構高度調低，若是太暗則將高度調高。以下將介紹利用此模糊理論運用在導光條的微結構分

佈優化上，以求提高均勻性的出光特性，於照圖度上的亮暗區作為控制點位置。

利用控制點的改變即可使相鄰的兩區塊微特徵 [10] 的分佈受到此控制點的影響，因此相鄰的控制點間距就會線性內插至此控制點高度，假設降低某控制點的高度，相鄰兩塊的結構分佈就會由外部往此點逐漸減少結構高度

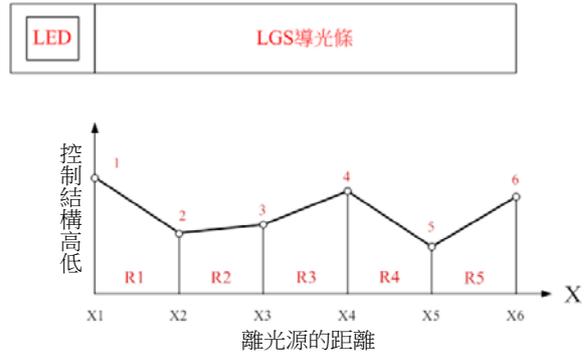


圖 16 導光柱控制點示意圖

本文提出照度比歸屬度之名稱定為局部照度比 (Local Illuminance Ratio, LIR)，即控制點附近區域平均照度與整個導光柱平均照度的比值，定義如式(3)。

$$LIR_i = \frac{\text{控制點 } i \text{ 的局部照度}}{\text{導光柱整體平均照度}} \quad (3)$$

描述照度指標所使用的為三角形歸屬函數，在輸入端的歸屬函數方面，控制整體亮度的部份為 LIR ，根據實驗歸納出，如圖 17 所示，並針對模糊詞進行歸屬度的分類，其模糊詞分為五項，包括有太亮、稍亮、剛好、稍暗、太暗等定義，其中所對應的 LIR 數值可以根據不同狀況或經驗做更改。

接著針對其歸屬度定義其太暗或太亮時其週期要增大或減少多少倍率，在此也定義了改變週期倍率的歸屬函數，來控制整體亮度的部份，其調整方式如圖 18 所示，而調整的倍率可以做更改，在頭幾次的調整中，倍率大小的區間可以設定大一點，以提高調整速度，我們以照度的標準差(Root Mean Squared Error, RMSE)為最佳化設計的目標函數，愈小代表與均勻，不同導光柱間 RMSE 無法做比較。

最後則為解模糊化，而本研究運用重心法以及 Matlab 程式來輔助運算，每一次都將控制點或更多的控制點帶入程式運算，運算出新的間距之後，再輸入光學模擬軟體 TracePro 裡面分析出新的結果，如此反覆進行，以期能達到照度優化的光學設計結果。

利用模糊規則中 If x is A THEN y is f(x) 方式，即如果...則...來建立，將圖 18 與圖 19 的調整法則，歸納出以下五條控制整體亮度的規則如下：

- R1:如果 LIR 太高則減小結構高度
- R2:如果 LIR 稍高則稍微減小結構高度

R3:如果 *LIR* 差不多則維持原來結構高度
R4:如果 *LIR* 稍低則稍微增加結構高度
R5:如果 *LIR* 太低則減增加構高度

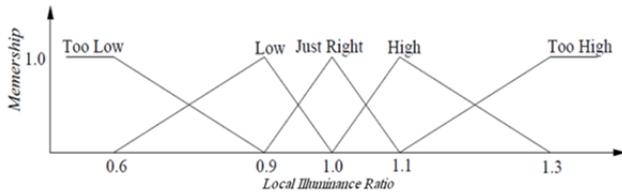


圖 17 *LIR* 歸屬函數定義

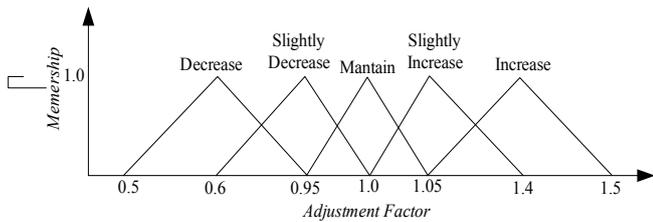


圖 18 結構高度倍率調整歸屬函數

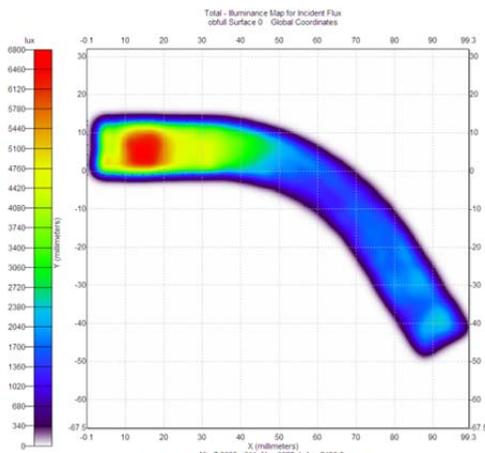


圖 19 $c=0.55$ 初始照度圖

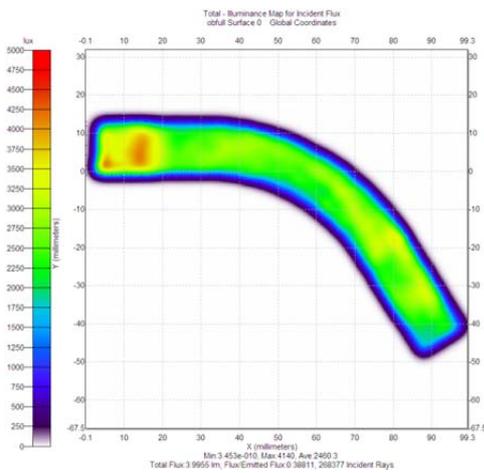


圖 20 $c=0.55$ 第 6 次優化照度圖

圖 19 為彎曲段外側高度降低比 c 等於 0.55 時尚未做高度分佈的照度圖，經模糊最佳化後結果如圖 20，均勻性大幅提昇，RMSE 的變化從 1394.1 降至 592.3 lux 如圖 20。

6. 環狀導光柱的設計應用

圓形截面的導光柱不同與矩形截面，不會出現內外側照度過大的差異，圖 22 為一內側曲率 0.02 之圓環導光柱，其截面直徑為 10mm，比例係數 b 為 0.2，採用雙側入光形式，採用前面 3.2 節得出之 50LED50 結構，其等高度初始結構照度圖如圖 23，可以發現仍有出光不均勻性的問題，選擇明顯的亮、暗區當作控制點，經模糊最佳化後其照度圖如圖 24，可以看到改善了頭段光線段開處，而中後段出光照度變得更均勻，RMSE 的變化如圖 25，從 1979 降至 1559 lux。

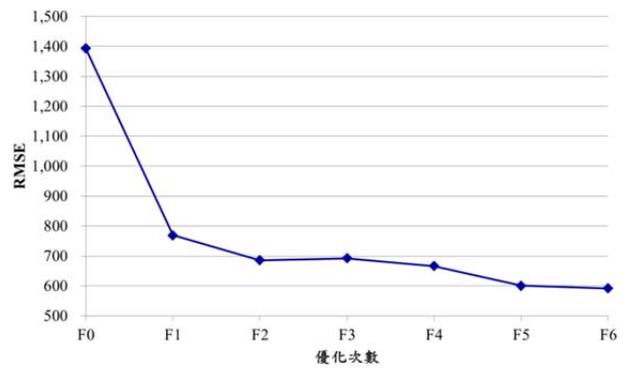


圖 21 $c=0.55$ 優化 → RMSE 變化

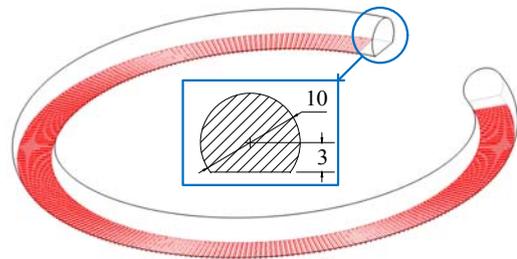


圖 22 圓環導光柱模型圖

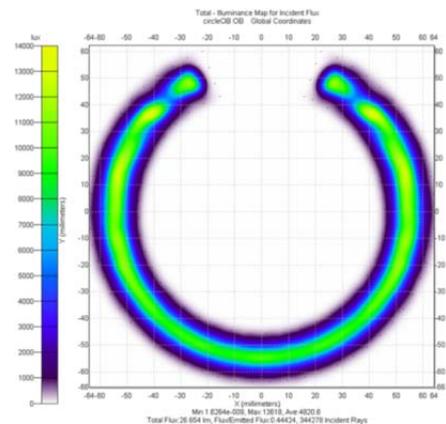


圖 23 圓環導光柱初始照度圖

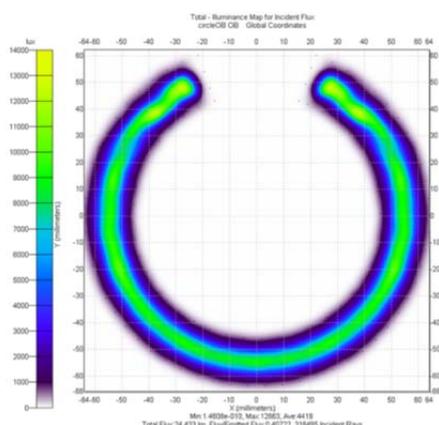


圖 24 圓環導光柱第 5 次優化照度圖

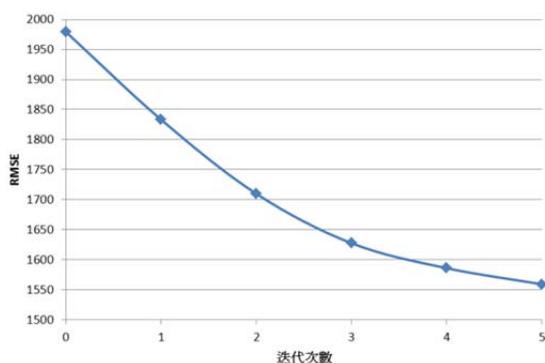


圖 25 圓環導光柱優化之 RMSE 變化

7. 結論

本文探討 LED 側入光導光柱的設計，分析導光特徵設計與分佈，使用成熟的 V-cut 設計與側入光導光柱技術，應用於曲面導光設計，並控制 V-cut 角度來調整導光柱的出光方向。彎曲的導光柱中，矩形截面藉由改變彎曲段內外側 v-cut 高度，使得內外側出光的差異減少 13%，最後由模糊最佳化的方式來提升出光的照度均勻度，RMSE 降低了 52%；而圓形截面則無內外側出光差異較大的問題，於雙側入光的環狀導光柱設計例子，經模糊最佳化後，RMSE 降低了 21%。

8. 誌謝

本研究承蒙國科會經費支持，計劃編號 NSC 101-2221-E-327-007，特誌謝意。

9. 參考文獻

- [1] Hsu, H. M., 2008, "Exterior Surface Configuration Of Vehicle Rear Light," US Patent D567972S.
- [2] Lin, B., 2005, "Vehicle Rear Light", US Patent D506557S.
- [3] Lin, Y. C., 2007, "Exterior Surface Configuration Of A Vehicle Rear Light", US Patent D550870S.

- [4] Pfeiffer, P., 2009, "Taillight For a Vehicle," US Patent D590526S.
- [5] Weil, C., 2009, "Taillight For a Vehicle," US Patent D605793S.
- [6] Bmw 台灣官方網站網, www.bmw.com.tw.
- [7] Gebauer, M., Wiersdorff, S., 2009, "Lighting Mechanism," US Patent 7494257B2.
- [8] Shinohara, M., Aoyama, S., 2009, "Surface Light Source Device Elements Therefor And Apparatus Using The Same," US Patent 7494257B2.
- [9] Jin, G., Yan, Y., Fan, S., "High quality light guide plates that can control the illumination angle based on microprism structures," Applied Physics Letters, vol. 85, no. 24, December 2004.
- [10] Yu, J. and Hsu, P.-K., 2009, "Integration of Stamper Fabrication and Design Optimization of LCD Light Guides Using Silicon-based Microfeatures," Microsystem Technologies, Vol. 16, Issue 7 (2010), pp. 1193-1200.
- [11] 劉世強、陳致堯、余志成，彎曲導光柱特徵設計與曲率對其導光特性的影響，中國機械工程學會第二十九屆全國學術研討會論文集，新興科與其他，E11-2042，高雄，台灣，2012。

Optical Design and Optimization of Planar Curved LED Edge-lit Light Bar

Zhi-Yao Chen, Bang-De Kao, Jyh-Cheng Yu*

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

*Corresponding: jcyu@ncku.edu.tw

Abstract

This study investigates the design of LED edge-lit light bar using V-cut as light coupling structures to divert the light out of light guide. We control the lead angles of v-cut and the distribution of the size of v-cuts to improve the efficiency and uniformity of illuminance. This research applies the optical simulation software, TracePro to analyze the optical characteristics of a typical light bar with light sources at one and both ends to identify the corresponding optimum lead angles of the V-cut for peak axial luminous intensity. Circular and rectangular cross sections of light bar are investigated. For a planar curved light bar, the light is likely bound to the outer portion of the curve. The variation of the bilateral thickness of light bar is proposed to reduce the illuminance difference between the inner and the outer

portions of the curved section. The v-cuts are evenly distributed on the light bar. The local illuminance is controlled by the size of v-cut will determine the illuminance uniformity. The size distribution of v-cut is modeled as a line graph with pivot points selected at the peaks and valleys of the illuminance distribution. The local illuminance at the pivot point is compared with the average illuminance to adjust the pivot value. By manipulating the pivot points, we can control the illuminance distribution. Next, a fuzzy optimization scheme is applied to iterate the pivot values of the line graph for optimum illuminance uniformity.

Keywords: LED edge-lit, Curved light guide, TracePro, Optimization, Illuminance uniformity, Fuzzy