

LED 照明用之二次光學透鏡最佳化設計

Optimization of Secondary Optical Lens Design for LED Lighting

林奇鋒、方育斌、楊博華

Chi-Feng Lin, Yu-Bin Fang, Po-Hua Yang

本研究利用模式搜尋法最佳化 LED 照明之二次光學透鏡。在假設點光源條件之下，利用能量轉換關係與斯乃爾定理，可建構出具有均勻照度功能的光學透鏡。然而，因為尺寸效應的存在，實際的 LED 光源燈具還是會造成照度不均的現象。放大 LED 透鏡尺寸則可消除 LED 尺寸效應，但會影響燈具的機構配置與增加透鏡的製造成本。因此本研究使用模式搜尋法修正 LED 光學透鏡之設計參數，降低 LED 的尺寸效應讓燈具維持高均勻照明，並達到縮小透鏡尺寸的目的。

In this study, pattern search was used to optimize the secondary optical lens for LED lighting. Under the assumption of point light source, the lens with uniform illumination can be constructed by using energy mapping relationship and Snell's law. However, the non-uniform illumination is found in the luminaire designed with LED light source due to the size effect. Although larger LED lens can eliminate the size effect, the drawbacks are complex mechanical assembly of luminaire and higher production cost. Therefore, the pattern search was implemented to adjust the designed parameters of lens for keeping a uniform illumination without increasing the size of lens, so that the size effect of LED is less obvious.

一、前言

近年來 LED 的發光功率、散熱效能不斷地提升，與傳統光源如日光燈、白熾燈比較，具有環保、低耗電之優點，在市場應用面上有逐漸取代傳統光源的趨勢。然而 LED 體積小、發光指向性高之因素，對於應用需要照明均勻的環境，如室內照明與道路照明等，使用僅有 LED 之燈具無法達到照度均勻，因此透過二次光學的光學元件開發，如

反射鏡、透鏡與擴散板等⁽¹⁻⁵⁾，重新改變 LED 的光路，使燈具達到照明均勻的效果。

有關 LED 照明燈具之二次光學透鏡設計文獻中，Sun 等人⁽⁶⁾提出利用 Snell's law 與 edge-ray principle，設計聚光鏡上的自由曲面之微透鏡，LED 光線經過聚光鏡部分時轉變成直射光線，微透鏡的曲面可將直射光改變成任意的設定照明區域形狀，並使其照明區域均勻。在聚光鏡上切割數等分的網格來設計微透鏡，LED 光線經過聚光

鏡部分時轉變成直射光線，微透鏡可將直射光改變成任意的射透鏡，其用意為不需考慮光通量在聚光鏡上的分布，亦即無論 LED 採用 Lambertian 型或 Batwing 型，均可達到相同的照度分布。Chen 等人⁽⁷⁾ 提出一種 LED 閱讀燈具的設計方法，該燈具的光源由複數個 LED 組成，LED 上方需放置 Fresnel lens 來達到有效的光使用率與均勻度，其中 Fresnel lens 鋸齒結構的角度是主要的設計參數，因此筆者採用基因演算法來設計此參數，以達到最佳之結果。Ding 等人⁽⁸⁾ 提出以折射方程式與能量守衡定理理解出一階偏微方程組，計算透鏡之自由曲面，使照射區域達到照度均勻度 90% 以上，且照射區域可為任意形狀，邊界處無模糊光圈產生。該理論應用在電腦計算上，可減少自由曲面透鏡開發時程。

本研究提出應用於 LED 照明之二次光學透鏡設計之最佳化演算法。首先，利用能量映射關係與斯乃爾定理來建構二次光學透鏡。此透鏡建構方法乃基於假設光源為理想點光源，但實際上將透鏡用於大發光面積 LED (例如 top-view LED、COB LED) 時會降低照度均勻，產生光圈等或照射範圍縮小的缺點，若增加均勻度時，必須藉由放大透鏡尺寸，使 LED 發光面積相對較小，LED 對於大型透鏡而言被視為點光源。但大型透鏡會影響燈具的機構配置與透鏡的製造成本，因此需藉由最佳化演算法—模式搜尋法 (pattern search)⁽⁹⁾ 來修正二次光學透鏡的幾何參數，使用大發光面積 LED 的燈具仍維持高均勻照明，同時並達到縮小透鏡尺寸之目的。

二、二次光學透鏡模型建構演算

1. 能量映射關係

首先，排除光線經過透鏡所產生的能量損耗 Fresnel loss，假設 LED 的發光量與照明區域的受光量是相等的，因此將 LED 的發光分布與照明區域依照等光通量條件來切割相同數量的網格，即每個網格上的 LED 發光量都是相同，亦同於照明區域的每個網格所接受的光通量也相同。LED 的發光分布屬於對光軸對稱之發光分布，照明區域的形狀為圓形，因此對於 LED 之發光分布與照明區分

割成 M 個同心圓的網格，每個網格都有相同的光通量 Φ_g 。LED 之發光分布為角度 θ 之函數 $I(\theta)$ ，其中 θ 為發射光方向與光軸方向的夾角，因此網格的光通量如下所示：

$$\Phi_g = \int I(\theta) d\omega \quad (1)$$

其中 $d\omega$ 為單位立體角，在極座標系統表示為

$$d\omega = \sin\theta d\theta d\phi \quad (2)$$

所以，LED 發光的網格光通量為

$$\Phi_g = \int_0^{2\pi} \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} I(\theta) \sin\theta d\theta d\phi \quad (3)$$

其中 θ_i ($i = 1, 2, \dots, M$) 表示第 i 網格的邊界角。

在照明區域上的平均照度為 E ，網格的光通量為 $\Phi_g = E da$ ，其中 da 為每個同心圓網格的面積，因此目標區網格的光通量為

$$\Phi_g = E\pi(\gamma_i^2 - \gamma_{i-1}^2) \quad (4)$$

其中 r_i ($i = 1, 2, \dots, M$) 表示第 i 網格的邊界半徑。

2. 建構光學透鏡模型

經由能量映射關係來決定所有網格邊界角 θ_i 與邊界半徑 r_i 之後，就可分別計算出入射光向量 I_i 與出射光向量 O_i ，利用 Snell's law 可算出兩光線在透鏡出光表面上的交點 P_i ，如圖 2 所示，根據網格的交點就可描繪出光學透鏡模型。透鏡模型完成

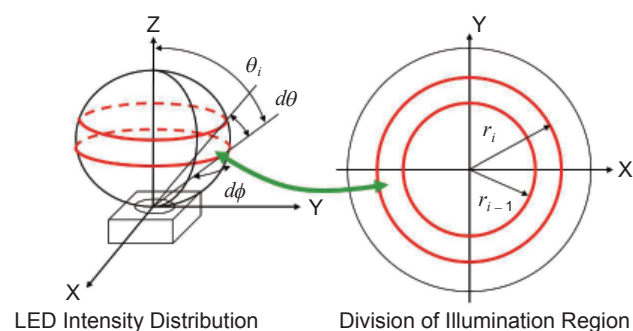


圖 1. LED 與照明區域之能量映射示意圖。

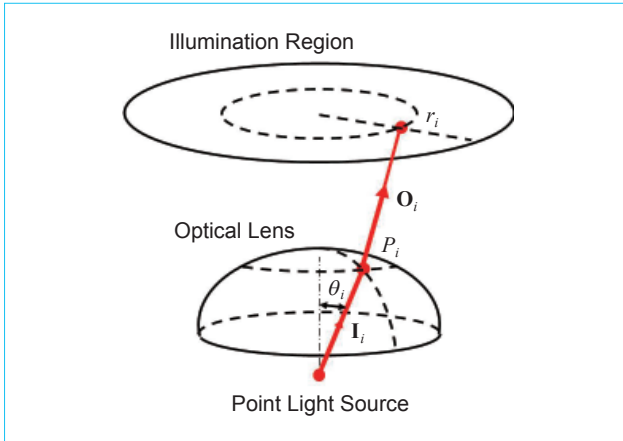


圖 2. 建構二次光學透鏡之示意圖。

後，匯入光學模擬軟體進行光線追跡與照明分析。本研究使用理想點狀光源，發光分布為 Lambertian 型，透鏡材質為 PMMA，照明區域到光源為 1 公尺，照明區域的最大半徑為 1 公尺，根據點光源和照明區域的條件來建構出光學透鏡，將透鏡模型匯入光學軟體，經光線追跡後所得到的照度分布如圖 3 所示，可得出圓形之均勻照度分布。

3. 使用 Top-View LED 所遇到照度不均的問題

實際上，LED 並非是單純的點光源，由於 LED 的構造是在晶片上填充大面積之螢光

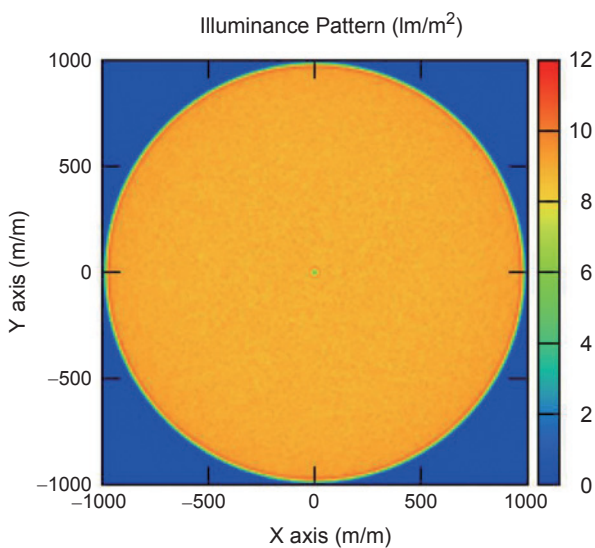
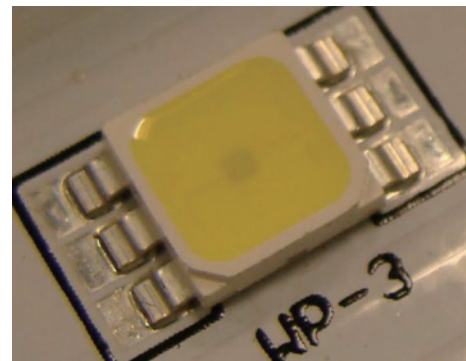
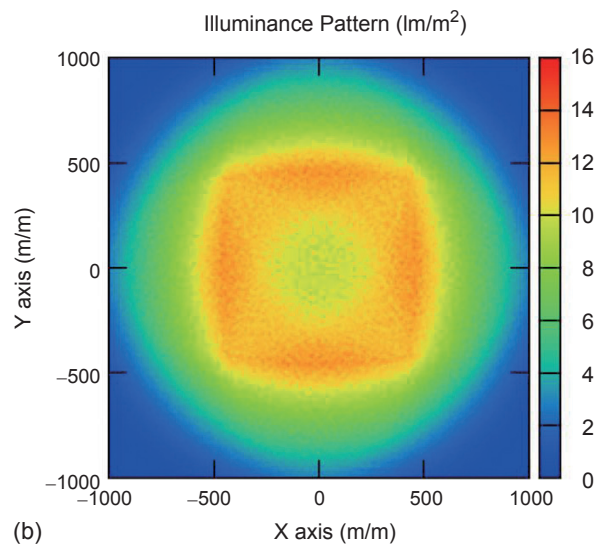


圖 3. 點光源光線行經光學透鏡之照度分布。

粉，例如本研究所選用 Wellypower 公司提供的 LH5070LBN1.LW01 LED，該 LED 的螢光粉塗佈區的尺寸為 4 mm × 4 mm，因此 LED 應被視為面發光源。由於二次光學透鏡是根據點光源建立，將光學透鏡用於 LED 時，得到不均勻之照明，如圖 4(b) 所示，由於 LED 的發光形狀為正方形，在照度分布上可看出正方形的光斑，整個照明範圍縮小。傳統上，一般解決均勻度方法是放大光學透鏡的尺寸，LED 對於光學透鏡來說，會被視為點光源，但光學透鏡的體型過大，會影響透鏡在燈具上的裝配，例如 MR16、筒燈與球泡燈等。另外也有透鏡製造成本的考量，如透鏡射出的原料用量。因此我們運用模式搜尋法，自動調整二次光學透鏡的幾何參數，使用大發光面積 LED 的燈具仍維持高均勻照明，且同時達到縮小透鏡尺寸的目的。



(a)



(b)

圖 4. (a) LH5070LBN1.LW01 LED 的外形，(b) LED 光線行經光學透鏡之照度分布。

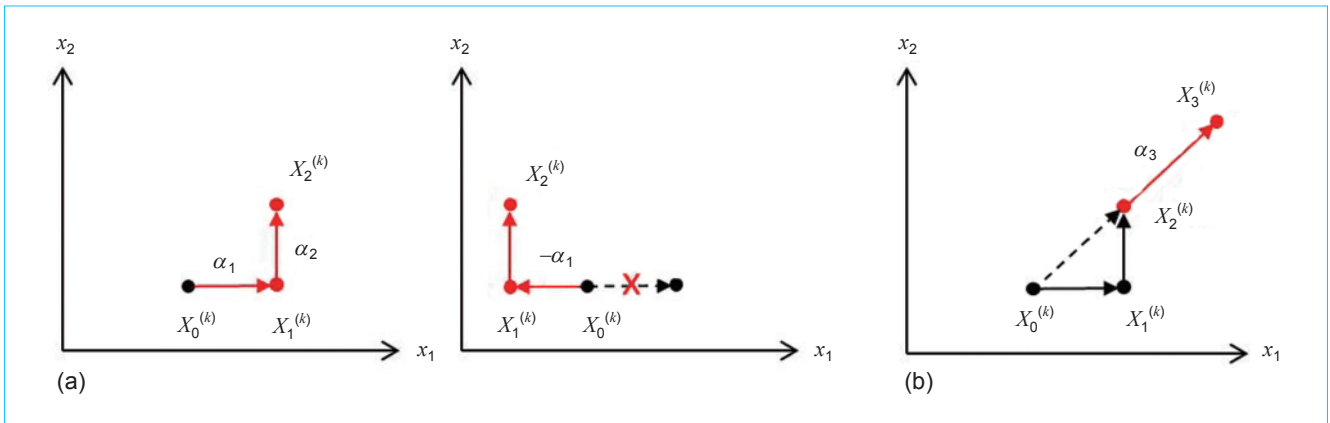


圖 5. 第 k 輪之 (a) 探測性移動與 (b) 模式性移動。

三、最佳化設計與結果

1. 模式搜尋法

模式搜尋法是一種簡易的參數最佳化方法，其特點為程序簡單、適應性強，在每輪搜尋中依序沿座標軸移動，花費較多的搜尋時間，但搜尋性能比其他演算法強。每輪參數移動方式分為探測性移動 (exploratory move) 和模式性移動 (pattern move)。前者用於找出目標函數的變化規律、探測目標函數的下降方向；後者則在發現目標函數變化趨勢後，沿著下降方向加速移動。在執行模式搜尋法時，先給定第一輪初始點 ($X_0^{(1)}$) 和沿座標軸 (x_1, x_2, \dots) 移動的步階長度 ($\alpha_1, \alpha_2, \dots$)，算出初始點之目標函數，接下來算出初始點沿座標軸之步階長度變化，尋找下降點，若找到下降點，則探測成功，設計參數為下一輪的初始點，參數移動如圖 5(a) 左圖表示。若目標函數非下降點，則將初始點沿反向移動，得到下降點，參數移動如圖 5(a) 右圖所示。從探測式模式找到目標函數的下降趨勢，可用模式性移動找出下一個最佳化參數，用新的初始點和前一輪的初始點來求出下一個參數。若模式性移動無法使目標函數下降時，則改用探測性移動，沿座標軸擴大搜尋範圍，找出最佳的设计參數。模式搜尋法之流程如圖 6 所示。

2. 模式搜尋法用於透鏡之設定

根據模式搜尋法的原理，先選定設計參數，分別為透鏡高度、入光面之深度與寬度，如圖 7 所

示。其中透鏡高度為出光面在光軸上的高度。入光面為球形表面，深度表示入光面在光軸上之交點到 LED 之距離，寬度為入光面開口的長度。限制條件方面分為幾何與光學條件。幾何條件為入光面深度必須低於透鏡高度，另一項是入光面為球面之關係，寬度必須大於深度之兩倍。光學條件為均勻度必須高於 80%。最佳化之目標值為透鏡體積最小

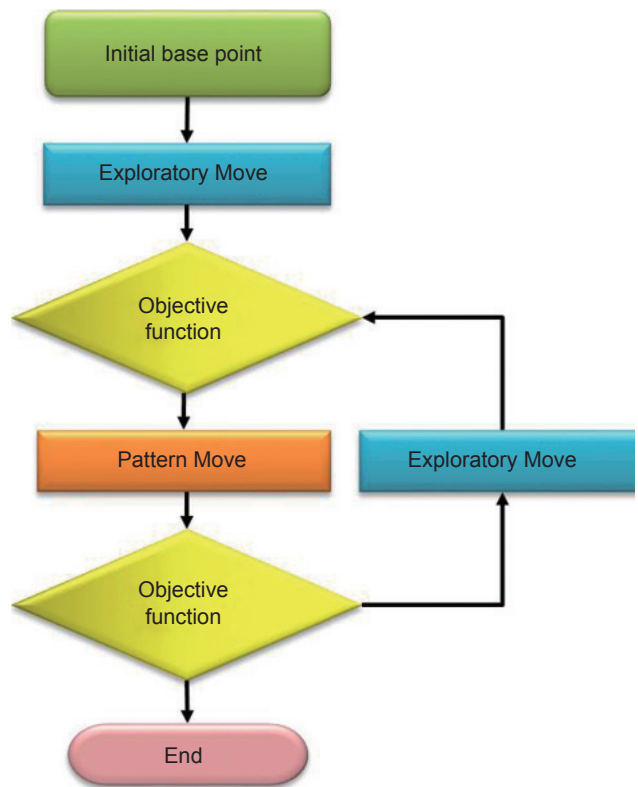


圖 6. 模式搜尋法流程圖。

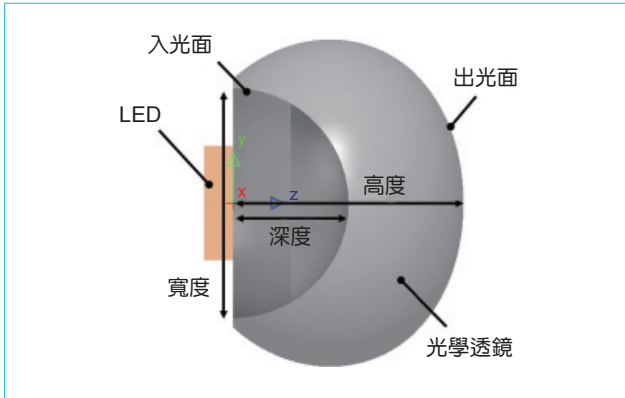


圖 7. 最佳化光學透鏡參數說明。

化，在此以透鏡的剖面積來代表透鏡體積，剖面積的公式如下所示

$$A_p = 0.5 \int_0^{\pi/2} l^2(\theta) d\theta \quad (5)$$

其中 $l(\theta)$ 表示從原點到出光面之長度。由於透鏡外觀體積是否影響透鏡與燈具的裝配，因此公式不扣除入光面所佔用的剖面積。

3. 最佳化過程之結果與討論

在最佳化過程中，設定初始值參數是以高均勻度為最優先考量，透鏡高度為 30 mm，入光

面深度 5 mm，寬度 15 mm，此時所產生的光學透鏡之體型較大，剖面積為 628 mm^2 ，均勻度為 95.8%，照度分布如圖 8(a) 所示。高度的步階長度為 1 mm，深度與寬度的步階長度均為 0.3 mm。經過 36 次迭代計算後，得到最佳化參數為高度 17 mm，深度 4.1 mm，寬度 10.2 mm，剖面積為 194 mm^2 ，均勻度為 80.7%，其均勻度符合限制條件範圍，照度均勻如圖 8(b) 所示。圖 9 為最佳化前、後的光學透鏡的尺寸比較，最佳化後的剖面積為最佳化前之剖面積的 30%。另外，本研究雖不討論以發光效率作為限制條件，但發光效率是 LED 燈具另一重要的光學指標，本研究求得最佳化前與最佳化後的發光效率為 90% 與 88%，亦即在最佳化設計過程中，發光效率不會有太大變化。

四、結論

由於利用能量映射關係和斯乃爾定理所建構二次光學透鏡，在使用理想點光源狀態下達到照度均勻，但用於實際的大發光面積 LED 燈具時產生照度不均勻的問題。一般解決均勻度方法是放大光學透鏡的尺寸，LED 對於光學透鏡來說會被視為點光源，但光學透鏡的體型過大會影響透鏡在燈具上的裝配與增加透鏡製造成本。因此，本研究使用模

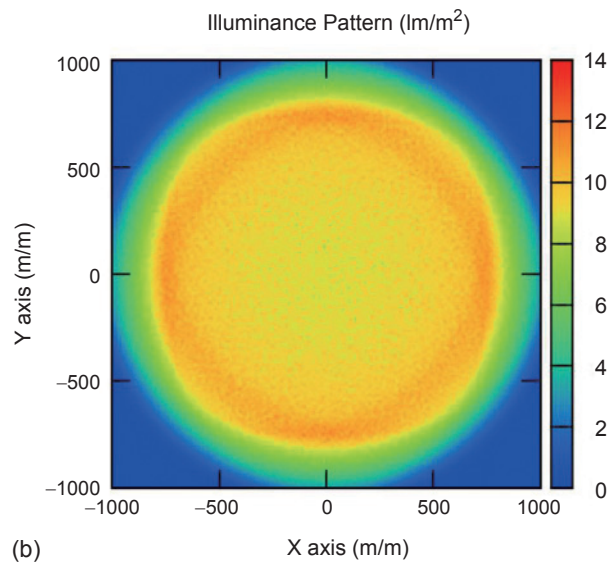
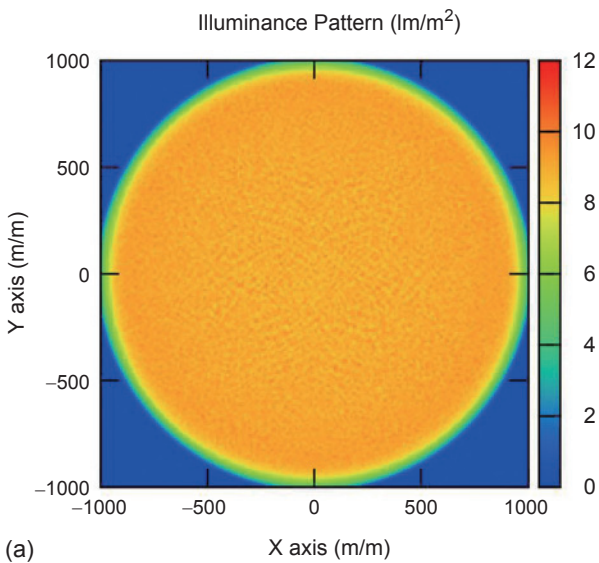


圖 8. 最佳化前 (a) 與最佳化後 (b) 之照度分布。

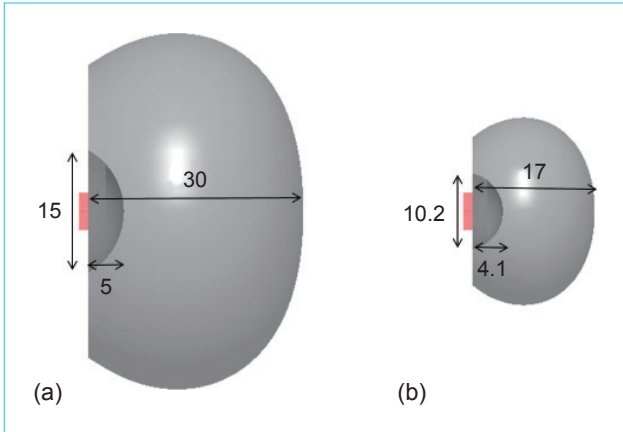


圖 9. 最佳化前 (a) 與最佳化後 (b) 之光學透鏡的尺寸比較。

式搜尋法來修正光學透鏡的設計參數，在高均勻度照明的限制條件下，自動縮減透鏡的尺寸，以便透鏡裝配在照明燈具裡。另外，LED 燈具的另一重要指標—發光效率，在最佳化過程中仍保持高發光效率之水準。

誌謝

感謝國科會產學合作計畫 (NSC-100-2622-E-492-004-CC3) 對本研究所提供的預算支持。

參考文獻

1. W. Parkyn and D. Pelka, *Proc. SPIE*, **5942**, 59420L (2005).
2. U. Rohlfling and A. Domhardt, *Proc. SPIE*, **7103**, 710305, (2008).
3. K. Wang, X. Luo, Z. Liu, B. Zhou, Z. Gan, and S. Liu, *Optical Engineering*, **47** (1), 013002 (2008).
4. A. Timinger and H. Ries, *Proc. SPIE*, **7103**, 71030H (2008).
5. D. Brown, D. Nicol, and I. Ferguson, *Optical Engineering*, **44** (11), 111310 (2005).

6. L. Sun, S. Jin, and S. Cen, *Applied Optics*, **48** (29), 5520 (2009).
7. W. Chen and C. Uang, *Optical Engineering*, **45** (6), 063001 (2006).
8. Y. Ding, X. Liu, Z. Zheng, and P. Gu, *Optics Express*, **16** (17), 12958 (2008).
9. R. Hooke and T. A. Jeeves, *Journal of ACM*, **8** (2), 212 (1961).



林奇鋒先生為國立成功大學機械工程博士，現任國家實驗研究院國家高速網路與計算中心副研究員。

Chi-Feng Lin received his Ph.D. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently an associate researcher at National Center for High-Performance Computing, National Applied Research Laboratories.



方育斌先生為國立成功大學工程科學碩士，現任國家高速網路與計算中心副研究員。

Yu-Bin Fang received M.S. in engineering science from National Cheng Kung University. He is currently an associate researcher at National Center for High-Performance Computing, National Applied Research Laboratories.



楊博華先生為美國俄亥俄州立大學機械工程博士，現任國家高速網路與計算中心副研究員。

Po-Hua Yang received his Ph.D. in mechanical engineering from Ohio State University, USA. He is currently an associate researcher at National Center for High-Performance Computing, National Applied Research Laboratories.