

# 遠端雷射光纖技術於遠洋漁船之集光燈之設計

王華昀<sup>1</sup> 李皓翔 蔣聖民 沈聖智

國立成功大學 系統及船舶機電工程學系

關鍵詞：光纖導光，光纖耦合透鏡，集魚燈

國科會計畫編號：112-2816-C-006-053-E

## 摘要

本研究研製遠端雷射光纖集魚燈系統，透過光纖輕巧及冷光等特性有效改善傳統集魚燈對船之負重及人員安危問題，並可依捕撈作業需要而調整光色。根據光纖規格設計新型之光纖準光透鏡，利用光學之共焦原理將入射光聚集於共焦點，再以相同曲面之透鏡將光束縮小後，以平行光之形式與光纖耦合，藉此降低光源與光纖耦合之損耗以提升傳輸效率；同時設計對應之準光器，使雷射光之配光形式修正為平行光，使其能通過聚光器進入光纖中，希望藉由本研究發揮光纖導光之優勢，有效降低遠洋漁船之能源耗損，以符合國際與環保的趨勢，朝向節能、安全之策略發展。

## 前言

台灣為秋刀魚及魷魚漁獲量最高的國家之一，為更有效率捕獲該魚種，利用魚群之趨光性會在船板處裝設多盞集魚燈。然而傳統之氣體放電式集魚燈(HID)有紫外線過強及耗電等缺點，又因為燈源溫度高，容易引起火災，對船體及船舶人員造成危險，再加上 HID 集魚燈所散發出的光線是向四周全向性放射，無法指定特定方向，代表著藉由消耗燃油所轉換的光能，有一部分都浪費在空氣中，造成資源無意義的消耗。

根據國際海事組織數據，國際航運每年的二氧化碳排放量超過 100 萬噸，約佔全球二氧化碳排放量的 2.9%。在 2023 年 1 月 1 日起，要求現有及新建船舶的碳排放量，需以 2008 年為基期減少 40%，目標是到 2050 年減少 70%。而為了有效捕撈，每艘遠洋漁船上都配備數百盞集魚燈。但傳統集魚燈耗電大，油耗成本高達數百萬；因此本計畫將研發遠端雷射光纖之集魚燈系統，透過光纖作為傳輸媒介，將多光色雷射光源配合生物趨光特性，藉此吸引魚群，使其效率更勝傳統集魚燈具。並可杜絕紫外線及紅外線直接照射，改善海上作業視力與皮膚之病變。並利用光纖可彎曲之性質，使裝設一條光纖便能取代多盞集魚燈，降低船體的總重量並改善船隻的油耗表現，實施綠能船舶理念。

在光纖耦合透鏡的發展史中，較為重要的是 1997 年 H.Arashi 等人利用凱薩格林氏反射鏡做為集光器[1]，並搭配複合式拋物面反射鏡(Compound Parabolic Concentrator,CPC)做為光纖耦合器如圖 4(a)所示，而此集光器可根據 CPC 之可接受角進行設計，使 CPC 能將光線再次聚焦於焦平面，其中高寬比(Aspect ratio)為衡量系統體積之重要參數。1998 年 D.Liang 等人利用典型牛頓氏反射鏡組建構太陽能光纖導光實驗[2]，該研究利用大口徑玻璃光纖磨成六角形並排列環狀，以減少隙縫增加光纖束口徑之使用率。2007 年 H.Kaiyan 等人設計應用於太陽能光纖照明之特殊成像型 CPC[3]，其設計原理和傳統 CPC 不同之處為不對焦點做旋轉，而利用圓柱反射筒將兩拋物線共焦，再利用共焦原理將光線透過反向器向下發出，最後由二階集光器進入光纖並設計筒套與光纖做連接，該設計沒有固定高寬比，比例依照設計而有所變動。然而，上述光纖耦合器僅有少數考慮入射端之角度與距離配置，但其耦合效率都不盡理想。因此，本計畫經改良之光纖耦合器可兼顧聚光、耦合、傳輸之品質與效率，提升整體遠端光纖照明系統之效能。

在集魚燈方面，藉由生物的趨光特性，根據魚種、魚群密度、潮流等因素，不同的光色與照度反應都會不同，其中又以藍光在海洋中具有出色的傳輸特性[4]。而在傳統使用白熾燈泡的集魚燈由於發

<sup>1</sup> 王華昀 (f14096033@gs.ncku.edu.tw)

光效率極低被淘汰後，金屬鹵化燈(HID)的出現使照明效率有很大的提升，然而其耗電量大且光線能量波長包含了可見與不可見光，在海水的穿透力並不高[5]，因此為了達到集魚的效果，集魚燈的功率與盞數則大幅增加，也意味著增加能源的耗損。最近幾年LED集魚燈的興起，LED光源具有溫度低、體積小與瞬間開關等優點，但LED的出光角大，使得光纖耦合效率低，光能量耗損大；而新興照明光源二極體雷射(Diode Laser)其耗電量低且光效率為LED的4倍，具有光束準直性高特性，可有效提高光纖耦合效率。

本計畫採用之光纖耦合系統，將雷射光源透過準直透鏡及聚光透鏡導入光纖管中，使大部分光線垂直進入光纖管內，並讓其餘發散光線在全反射角度之範圍內，使光傳遞效率提高。而藉由此導光照明系統，其創新之處與競爭性在於，對比傳統集魚燈需要多盞燈具消耗大功率且光線呈放射狀，大幅浪費能源之使用，而遠端雷射光纖系統藉由高聚光倍率、小高寬比、小收斂角度、高光纖耦合效率與高光纖傳輸效率等特性，可有效降低遠洋漁船之油耗，再搭配雷射光源之光色選擇，可依照魚種搭配色光，且塑膠光纖價格較為低廉，維修成本較低，能讓漁業人士更有替換燈具之意願，具有商業價值。

## 光學透鏡設計

本文之集光燈分為集光器及準光器兩部分，首先針對集光器之部分，高寬比及聚光倍率為設計上的兩項重要參數，並且需注意聚光角度，若角度過大，則在光線導入光纖中時會超過臨界全反射，導致傳遞效率降低，因此本文將同時兼顧高聚光倍率、小高寬比、小收斂角度與高光纖耦合率進行設計。

### 1. 雷射光源集光器

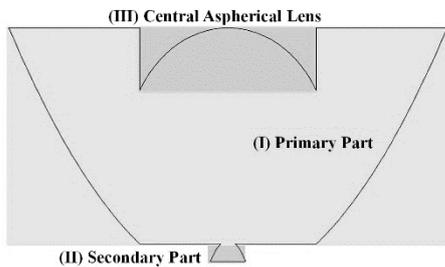


圖 1 雷射光源集光器 2D 輪廓圖

集光器可分為三個部分，分別為(I)上半集光部分、(II)下半出光部分、(III)中央非球面透鏡。上半集光部分為拋物線之鏡面，可將射入之平行光反射並匯聚到拋物線之焦點；中央非球面透鏡可將光線聚集於拋物線之焦點；下半出光區為上半集光部分

之縮小鏡射，將上半部匯聚在焦點之光源轉換成平行光輸出到光纖管中，以達成小收斂角之目的。

本文所使用的光纖為塑料光纖，根據方程式(1)可得出光纖孔徑值(Numerical Aperture, NA 值)及最大可接受角，光線需在此角度進入光纖，並以方程式(2)得出中央非球面透鏡之焦長比。

$$NA = \sqrt{n_f^2 - n_c^2} = n_i \sin \theta_{max} \quad (1)$$

$$f/\# = \frac{1}{2 \tan(\sin^{-1}(\frac{NA}{n_i}))} \quad (2)$$

其中 $n_f$ 為光纖核心層之介值折射率， $n_c$ 為被批覆層之折射率， $\theta_{max}$ 為光纖之最大接受角。

透過所得之透鏡焦長比，並配合訂定的中央非球面透鏡之直徑長 $D$ ，可得出透鏡之焦距 $f$ ，同時也建立上半集光部分之拋物線方程式為(3)

$$y = \frac{1}{4c} x^2, 2c < x < 2\sqrt{fc + c^2} \quad (3)$$

其中 $c$ 為拋物線之焦距， $f$ 為透鏡焦距，因中央非球面透鏡直徑為自定義的參數，且 $D=4c$ ，因此將方程式(3)之 $c$ 取代成 $D$ 得

$$y = \frac{1}{D} x^2, \frac{D}{2} < x < \sqrt{Dc + \frac{D^2}{4}} \quad (4)$$

並根據使用的光纖，得光纖之入射口徑大小 $D_{fob}$ ，為了讓光線能完全進入光纖中，因此集光器之下半出光部分的口徑應與 $D_{fob}$ 相同，並因下半出光部分為上半部之鏡射，故其拋物線方程式可藉由方程式(3)轉換後得

$$y = -\frac{1}{4c'} x^2 + c + c', 2c' < x < 2c' \sqrt{\frac{f}{c} + 1} \quad (5)$$

其中 $c'$ 為集光器下半出光部分之拋物線焦距。在光學設計中常定義集光器之幾何聚光比為收光面積除以出光面積之比值為(5)

$$g = \frac{c}{c'} = \frac{2\sqrt{Dc + \frac{D^2}{4}}}{D_{fob}} \quad (6)$$

其中 $g$ 為集光器之幾何聚光比。在本文無論是上半集光部分或是下半出光部分之焦距皆無法直接求出，因此透過(6)之關係式，將兩個焦距取代為可量測之光纖之直徑 $D_{fob}$ 及自定義參數之中央非球面透鏡直徑 $D$ 得

$$y = -\frac{2}{D_{fob}} \sqrt{\frac{4f+D}{4D}} x^2 + \frac{D}{4} \left( \frac{D_{fob}}{\sqrt{4Df+D^2}} + 1 \right) \quad (7)$$

$$, \frac{D_{fob}}{4} \sqrt{\frac{4D}{4f+D}} < x < \frac{D_{fob}}{2}$$

整合上述之參數後，中央非球面透鏡之輪廓則需藉由非球面公式(8)表示，然而實際應用上若要追求聚光品質，則無法再以近軸光學進行分析，因此本文使用光學設計軟體 ZEMAX 作為輔助設計鏡片，在標準序列光學系統為依序從光源、元件、成像做分析，但若將雷射光視為平行光，在模擬時較難對

光源進行定義，因此將分析的順序顛倒，改為焦點視為點光源經過非球面透鏡後以平行光射出，光源之發光角度由光纖之 NA 值求得，非球面透鏡之孔徑為中央非球面透鏡之直徑，為初始設定之參數。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \beta_1 r^2 + \beta_2 r^4 + \dots \quad (8)$$

其中  $z$  為透鏡之弛垂(sag)， $r$  為所對應之半徑， $c$  為曲率， $k$  為圓錐常數(conic constant)。 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  為非球面高階係數項。

## 2. 雷射光源準光器

準光器的部分，大多數使用於照明的雷射光線，其發光形式皆依照朗伯分布(Lambertian distribution)，意旨該光源會朝各個方向均勻輻射，其發光強度隨不同的角度依餘弦定理變化可得

$$L_\theta = \frac{I_\theta}{dA \cos\theta} = \frac{I_N \cos\theta}{dA \cos\theta} \quad (9)$$

其中  $L_\theta$  為不同角度之發光強度， $I_\theta$  為不同角度之光通量(Luminous flux)， $I_N$  為發光面法線方向之光通量， $A$  為光源面積。

由方程式(9)得知，朗伯光源在不同角度之發光強度會有變化，但其面積也會一同變化，估其輝度(Luminance)為定值，為使雷射光源能配合集光器之使用，本文將設計適用於雷射光源之準光器。

本文將準光器分為三個部分，分別為側邊拋物面鏡、中央輔助透鏡、下方聚焦拋物透鏡，與集光器之部分相似，將三個部分共焦，使雷射光源轉換成平行光射入準光器中，而中央輔助透鏡之大小及位置則由邊緣光原理決定。

邊緣光原理(Edge-ray principle)為設計非成像光學之重要方式，若映射(Mapping)為連續函數，且光源發出的所有邊緣光皆可映射至目標邊界上或目標內，則夾在邊緣光內部之光線均可映射至目標內。

下方聚焦拋物透鏡之功用為將雷射光源聚焦於焦點上，而側邊拋物面鏡之功用為將焦點的光源以平行光射出，為配合先前設計的集光器，側邊拋物面鏡之直徑需與集光器之上半部分相同，下方聚焦拋物透鏡與側邊拋物面鏡皆以集光器之相同方式進行設計，不同的地方在於集光器之上半部及光部分為透鏡，而準光器為反射鏡面。

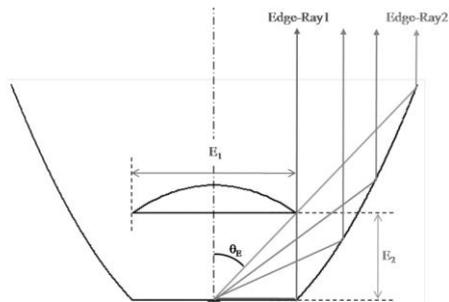


圖 2 邊緣光原理設計準光器輪廓

中央輔助透鏡之功用為位於透鏡之焦點的光經過透鏡後平行射出，其直徑為配合側邊拋物面鏡之輪廓，由第一條邊緣光 Edge-ray1 所決定，如圖 2，Edge-ray1 為經由拋物面鏡最底部所反射之邊緣光。且因準光器之拋物線方程式與集光器的相同，因此可得中央輔助透鏡之直徑  $E_1$  與集光器之中央非球面透鏡之直徑  $D$  相同即

$$E_1 = D = 4c \quad (10)$$

而中央輔助透鏡的位置由第二條邊緣光 Edge-ray2 決定，即經由拋物面最頂部所反射之邊緣光線，因透鏡之焦點與拋物線之焦點共焦，故透鏡位置等於透鏡之焦距，並符合以下關係式：

$$\begin{cases} E_2 = \frac{Df}{\sqrt{4Df+D^2}} \\ \theta_E = \tan^{-1} \frac{\sqrt{4Df+D^2}}{2f} \end{cases} \quad (11)$$

其中  $\theta_E$  為 Edge-ray2 和垂直線的夾角，若角度在  $\theta_E$  以內的光線會透過中央輔助透鏡折射，而超過  $\theta_E$  的部分則為兩條邊緣光涵蓋側邊拋物面鏡所能反射的光線束範圍。中央輔助透鏡的設計方式於集光器之中央非球面透鏡相同，藉由使用 ZEMAX 軟體做輔助設計，將已知透鏡之孔徑即焦距作為設計參數，透過 ZEMAX 得出透鏡之曲率即圓錐常數之數值。



圖 3 光纖耦合透鏡 3D 實體圖

## 光學性能模擬測試

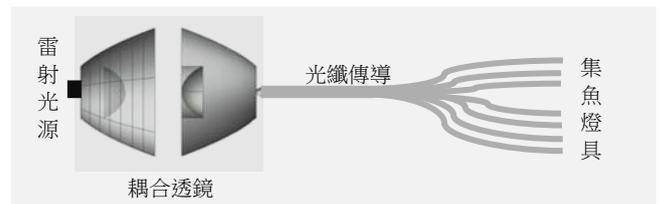
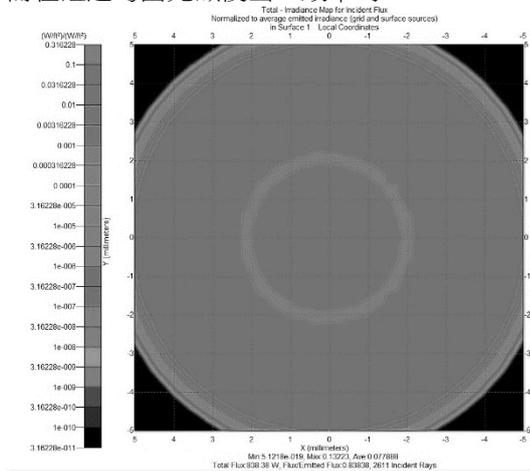


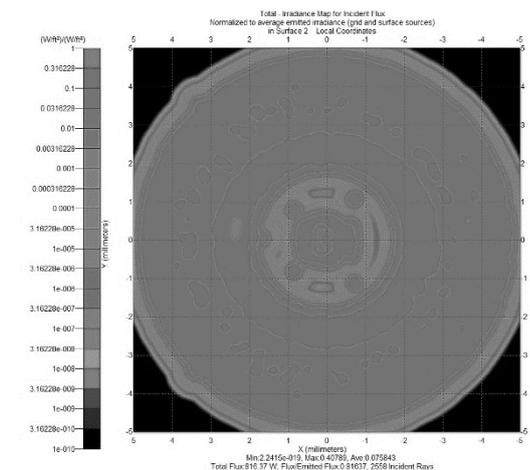
圖 4 雷射光纖集光系統架構圖

將本文所設計之雷射光纖耦合透鏡結合二極體雷射光源匯入 TracePro 軟體中進行光學性能模擬，並觀察光纖耦合透鏡之效率及分析各項光學性能。耦合透鏡材質設定為光學玻璃 BK7，折射率為 1.519；光纖芯材質設定為光學 PMMA，折射率為 1.494；被覆層材質設定為聚乙烯，折射率為 1.417。光源用二極體雷射並以總光通量 1000W 以 1mm 之誤差與

透鏡組合進行模擬，分析雷射光於 20m 光纖管傳導後傳導效率及光強度分布情形。如圖 5 為光強度分佈模擬結果，圖 5(a)為光纖入口表面(0m 處)的總光通量為 838.38W，圖 5(b)為光纖出口表面(20m 處)的總光通量為 816.37，耦合透鏡之耦合效率為 83.8% 而在經過彎曲光纖後出口效率為 81.6%。



(a) 光纖入口端



(b) 光纖出口端

圖 5 光形分佈模擬圖

由於本文所設計之集光器使用光學共焦原理，因此需仰賴高度之精度避免失焦導致光纖透鏡耦合失敗，故針對雷射光源之朗伯散射現象及不同入射角度進行分析。圖 6 為雷射光源朗伯散射現象對集光器及光纖傳輸之影響，由於雷射光源具有較高準直性，其光源出光角小於  $10^\circ$ ，因此針對  $10^\circ$  以下之朗伯散射現象進行模擬。從模擬結果可以看出出光角  $10^\circ$  之光源經過準直器調整後，光纖出口處尚可維持 72% 之光學效率。圖 7 為出光角  $5^\circ$  之雷射光源於不同入射角對集光器及光纖傳輸之影響。從模擬結果中可以看出當入射角偏移  $2^\circ$  內時，光纖入口處

及出口處皆可維持在 70%~80% 的光學效率，而當入射光偏移  $5^\circ$  以上時，光纖耦合效率急遽下降，在偏移  $7^\circ$  時光纖出口處僅剩 8.6%，說明本文之集光器其容忍角約為  $2^\circ$  至  $4^\circ$  之間。

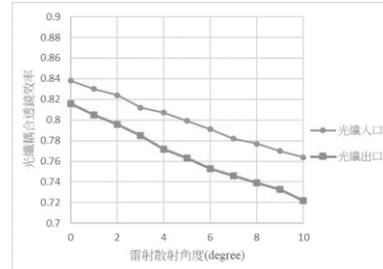


圖 6 朗伯散射現象對集光器及光纖傳輸之影響

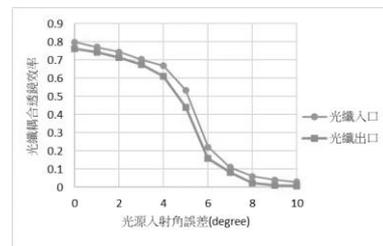
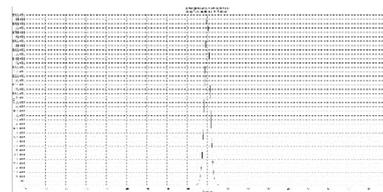
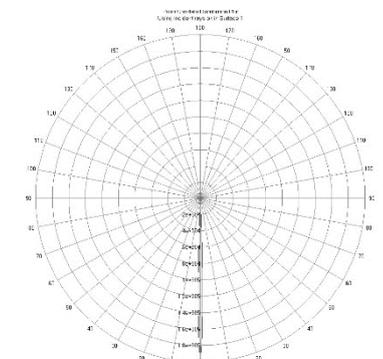


圖 7 不同入射角對集光器及光纖傳輸之影響

而集魚燈具須具備較強的光指向性，以避免光能量之浪費，因此分析光纖出口之出光角度。圖 8 為光纖出口配光曲線模擬圖，從圖中可以觀察到雷射光經過光纖傳導後，仍可維持其高度指向性，從其直角配光曲線圖可以得知其發光半角約為  $2.5^\circ$ ，非常接近準直光線。



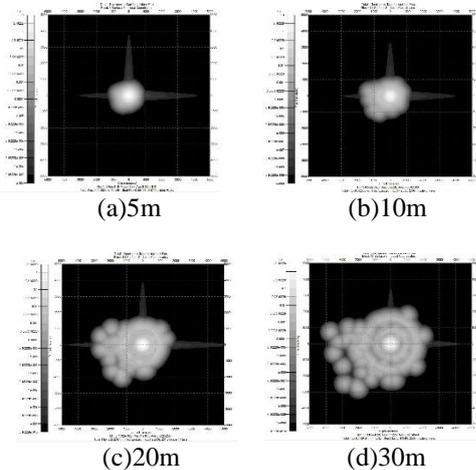
(a) 直角坐標



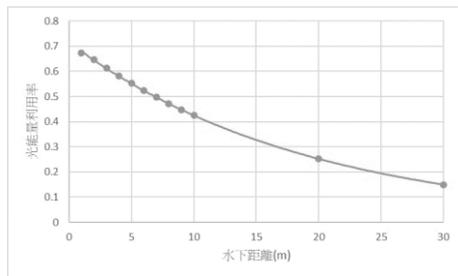
(b) 極座標

圖 8 光纖出口配光曲線模擬圖

結合上述光學性能，模擬遠端雷射光纖系統將白色雷射光傳導 20m 後照射於海面上之穿透程度，以及光強度之分佈。從模擬結果可以看出本文設計之遠端雷射光纖系統具備高穿透性及高指向性。



圖(9) 海水中光強度分佈



圖(10) 海水穿透效率曲線

## 結論

光纖照明系統為無污染之綠色照明系統，對比傳統集魚燈需要多盞燈具消耗大功率且光線呈放射狀，大幅浪費能源之使用，本文藉由高聚光倍率、小高寬比、小收斂角度、高光纖耦合效率與高光纖傳輸效率等光纖特性引入雷射光線，以光學共焦原理設計光纖耦合透鏡，將雷射光源透過準直透鏡及聚光透鏡導入光纖管中，使大部分光線垂直進入光纖管內，並讓其餘發散光線在全反射角度之範圍內，使光傳遞效率提高。由軟體模擬驗證，本文設計之遠端雷射光纖技術可有效傳遞雷射光並使其保留高光束準直性及穿透性，同時具備高光效率、小發光面積之集魚燈具。透過此系統可達到單一光源多盞燈具之效果。未來更可於光纖出口端結合不同光形之透鏡，達到出口光型之變化，使魚群更容易誘集，並且搭配雷射光源之光色選擇，可依照魚種搭配色光提高捕魚效率。

## 參考文獻

1. Arashi, H., Naito, H., Yugami, H., & Oka, T. (1997, July). Highly concentrated solar energy transmission through an optical fiber coupled with CPC. In *IECEC-97 Proceedings of the ThirtySecond Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* (Cat. No. 97CH6203) (Vol. 3, pp. 1871-1876). IEEE.
2. Liang, D., Monteiro, L. F., Teixeira, M. R., Monteiro, M. F., & Collares-Pereira, M. (1998). Fiber-optic solar energy transmission and concentration. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 54(1-4), 323-331.
3. Kaiyan, H., Hongfei, Z., Yixin, L., & Ziqian, C. (2009). An imaging compounding parabolic concentrator. In *Proceedings of ISES World Congress 2007* (Vol. I-Vol. V) *Solar Energy and Human Settlement* (pp. 589-592). Springer Berlin Heidelberg.
4. Jeong, H., Yoo, S., Lee, J., & An, Y. I. (2013). The reticular responses of common squid *Todarodes pacificus* for energy efficient fishing lamp using LED. *Renewable energy*, 54, 101-104.
5. 沈聖智、方銘川、蘇炎坤、黃信榮、葉俊毅(2008)，「高亮度 LED 集魚燈運用在漁船之研究」。行政院農業委員會漁業署九十七年度科技計畫研究報告
6. Malet-Damour, B., Bigot, D., & Boyer, H. (2020). Technological review of tubular daylight guide system from 1982 to 2020. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 5(3), 375-386.
7. Qin, X., Zhang, X., Qi, S., & Han, H. (2015). Design of solar optical fiber lighting system for enhanced lighting in highway tunnel threshold zone: A case study of Huashuyan tunnel in China. *International Journal of Photoenergy*, 2015.
8. Rosemann, A., Mossman, M., & Whitehead, L. (2008). Development of a cost-effective solar illumination system to bring natural light into the building core. *Solar Energy*, 82(4), 302-310.
9. Leslie, R. P., & Brons, J. A. (2002). An integrated skylight luminaire: combining daylight and electric luminaires for energy efficiency. In *Proceeding of Right Light* (Vol. 5).
10. Shackelford, J., Mathew, P., Regnier, C., & Walter, T. (2020). Laboratory validation of integrated lighting systems retrofit performance and energy savings. *Energies*, 13(13), 3329.
11. Regnier, C., Sun, K., Hong, T., & Piette, M. A. (2018). Quantifying the benefits of a building retrofit using an integrated system approach: A case study. *Energy and Buildings*, 159, 332-345.
12. Lingfors, D., & Volotinen, T. (2013). Illumination performance and energy saving of a solar fiber optic lighting system. *Optics express*, 21(104), A642-A655.
13. Mayhoub, M. S., & Carter, D. J. (2009). Hybrid lighting systems: A feasibility study for Europe. *Proceeding of the 11th LuxEuropa*, 265-272.
14. Aizenberg, J. B. (1997, November). Principal new hollow light guide system "Heliobus" for daylighting and artificial lighting of central zones of multi storey buildings. In *Proceedings of the 4th International Conference on Energy Efficient Lighting—Right Light* (Vol. 4, pp. 19-21).

# **DESIGN OF REMOTE LASER FIBER SYSTEM FOR FISHING LAMPS ON OCEAN FISHING VESSELS**

*H.Y.WANG H.H.LEE S.M.CHIANG S.C.SHEN*

\*Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering  
National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan

*Keywords: Optical fiber light guide, laser concentrator system, fishing lamps*

## **ABSTRACT**

This study develops a remote laser fiber fish aggregating device system, which effectively addresses the issues of traditional fish aggregating devices related to the burden on vessels and the safety of personnel by utilizing the light-weight and cool light characteristics of optical fibers. Additionally, the system allows for adjustment of light color according to fishing operation requirements. A novel fiber optic collimating lens is designed based on the specifications of optical fibers. Utilizing the optical principle of confocal focusing, the incident light is converged at the confocal point and then reduced in beam size by an identical curved lens. This process enables coupling of the light beam with the optical fiber in a parallel form, thereby reducing losses in the coupling between the light source and the optical fiber to enhance transmission efficiency. Simultaneously, a corresponding collimator is designed to correct the beam shaping of laser light into parallel light, enabling it to enter the optical fiber through a condenser. This research aims to leverage the advantages of optical fiber guidance to effectively reduce energy consumption on long-range fishing vessels, aligning with international trends towards environmental sustainability and energy efficiency, and promoting strategies towards energy conservation and safety.