# 光譜與光形調控應用於運動場照明設計

## Spectrum and Light Distribution Control Technology and Application in Stadium Lighting

徐可芳 K. F. Hsu、林志偉 C. W. Lin、崔智宣 C. H. Tsuei
工研院綠能所(GEL/ITRI) 研究員

隨著LED照明技術的演進，LED室內照明的市場逐漸由替換式的球泡燈朝向專業、高附加價值的燈具發展；對於戶外照明的領域，也逐漸由道路照明朝向運動場照明等高功率、低眩光、大範圍高均勻度之應用情境發展。因此，針對不同運動場地的照明需求，例如：田徑場照明、場館照明、競技場照明，需要搭配不同的運動項目、比賽類型與場地等級進行適當的調控，才能得到最佳的照明配置。隨著未來智慧運動場館與綠色場館的發展，智慧與節能的照明將會是其中非常重要的一環。因此，本文將介紹戶外球場的照明設計規範、國際相關照明應用與國內的研究發展。

As LED technology has gradually matured, the development of LED indoor lighting market has changed from replacement light bulb to high professional and high additional value fixtures. On the other hand, outdoor LED lighting industry has become sport lighting from street lighting, which with high power, low glare and large area illuminance uniformity applications. Different types of lighting are applied to different purposes. For example, athletic field, stadium lighting and arena lighting are different types of sport and competition levels, so they need several kinds of lighting arrangement to achieve their best lighting requirement. According to the developing trend of smart stadium and green stadium, the intelligent and energy-saving lighting are also important for outdoor lighting in the near future. In this study, we will focus on the introduction of sport lighting standards, and some stadium lighting relevant applications.

關鍵詞/Key Words
球場照明(Sports Lighting)、光譜(Lighting Spectrum)、光形(Lighting Distribution)

## 前　言

傳統的運動場(Athletic Field)照明設計，以高光通量為設計目標，因此多採用高強度氣體放電燈(High-intensity Discharge; HID)與複金屬燈。隨著LED照明技術的成熟與普及，高功率燈具朝向大面積照明場館應用，將會是未來的發展趨勢。新一代的智慧場館(Smart Stadium)設計，著重在運作效率(Operational Efficiency)、觀眾體驗

(Fan Experience)與場館安全(Stadium Security)。對於提高場館的效益來說，導入高效率的場館設備將可減少能源使用與維護成本，許多國外場館中最主要的是暖氣、通風與空調控制系統(Heating Ventilation Air Conditioning; HVAC)以及照明控制系統（圖一），而本文的討論重點即在照明品質部分的著墨。

建立於1853年的墨爾本板球球場(Melbourne Cricket Ground; MCG)，為世界第十大體育場，亦是南半球最大的體育場館，共有100,024個座位。自2014年開始，由照明廠商開始針對墨爾本板球場外觀的照明進行改造，採用可多色變化的LED照明燈具，因應比賽的隊伍不同與氣氛差異，外圍的照明也隨之變化（圖二）。隨著技術的演進，Cockram、IBM與Cisco等各大網通大廠自2015年開始，建置墨爾本板球球場智慧場館的相關技術（圖三），其中包含了高密度無線網路系統、先進LED照明系統、智慧轉播系統。由此可知，照明亦在智慧場館中扮演重要的腳色。

## 球場照明規範

對於球場照明(Sports Lighting)的設計

資料來源：Intel

▲圖一　Intel智慧場館監控系統畫面[5]

資料來源：IBM

▲圖三　墨爾本板球球場進行智慧場館改造

資料來源：Inlite

▲圖二　墨爾本板球球場進行外觀照明改善

需求，除了考量到球員運動時的基本照度、亮度、眩光等直接視覺需求之外，另外還需要兼顧其他使用者，例如：技術人員、裁判、球團成員、觀眾進/退場動線、現場攝影師與電視轉播等場地維護、拍照、攝影、觀賞與安全需求。另外，根據不同的場地使用等級(Class I to III)，例如：國際與國家級競賽、地方型競賽、訓練用場地等（表一），對於照明規範也有不同的水平照度、立面照度、均勻度、演色性、眩光等照明品質要求（表二）。除此之外，如有電視即時轉播的需求，根據歐洲EN 12193球場照明規範，水平照度將由最低75 lx提高到1,500 lx、垂直照度也需達到1,200 lx（表三）。因此，隨著高畫質電視(HDTV)、智慧手機的普及與數位直播潮流的趨勢，顯見高品質的運動場照明將越來越重要。然而，如何在滿足照明品質的前提下，同時兼具節能的要求將會是未來綠色場館的發展趨勢。

▼表一　照明場地等級（歐洲標準委員會(CEN)）[15]

| 活動等級 | Class I | Class II | Class III |
|---|---|---|---|
| 國家級競賽 | ● | | |
| 區域競賽 | ● | ● | |
| 地方型競賽 | ● | ● | ● |
| 訓練 | | ● | ● |
| 娛樂 | | | ● |

## 大面積球場照明技術

未來之球場照明將會朝向高品質光色和演色性演進，以符合電視台拍攝的要求，如日本大廠IWASAKI透過調整照明頻譜，補強傳統pc-LED較缺少之橘紅光與青光，使色彩更加鮮明（圖四、圖五）。因此，透過高精準之頻譜調控技術，將多色彩LED多晶光源進行頻譜最佳化演算，並以適當之光輸出比例回傳燈具，可以透過照明光品質有效提升球賽轉播影像品質。另一方

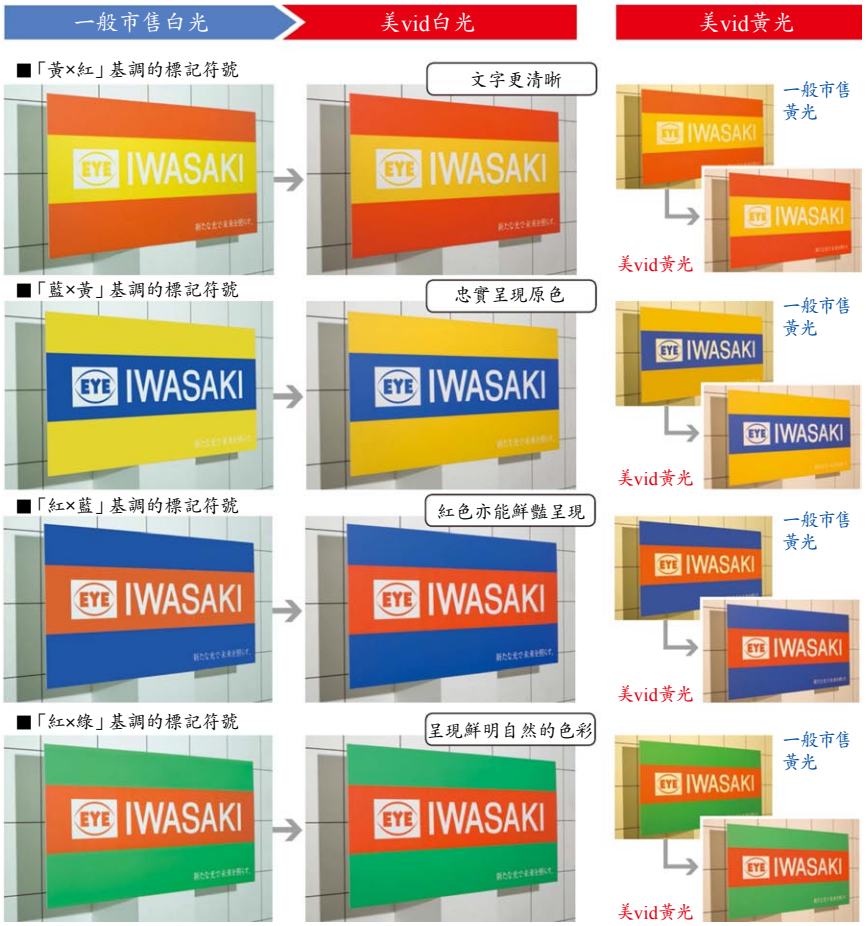
▼表二　EN 12193非電視轉播戶外活動照明設置建議[15]

| Class | 水平照度(lx) | 均勻度（最小/平均） | 演色性(Ra) | 眩光指數 |
|---|---|---|---|---|
| I | 500 | 0.7 | >60 | <50 |
| II | 200 | 0.6 | >60 | <50 |
| III | 75 | 0.5 | >20 | <55 |

備註1：適用於美式足球、田徑、籃球、自行車競賽、馬術、浮士德球、足球、籃網球、橄欖球、排球
備註2：Class III的場地進行田徑賽或馬術競賽，最小照度要求爲100 lx

▼表三　EN 12193電視轉播戶外活動照明設置建議[15]

| | 水平照度 | | | 立面照度 | | | 演色性(Ra) | 眩光指數 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 平均(lx) | 均勻度（最小/平均） | 均勻度（最小/最大） | 平均(lx) | 均勻度（最小/平均） | 均勻度（最小/最大） | | |
| HD TV | 1,500~3,000 | 0.8 | 0.7 | 2,200 | 0.7 | 0.6 | >90 | <50 |
| 慢動作 | 1,500~3,000 | 0.8 | 0.6 | 1,800 | 0.7 | 0.5 | >80 | <50 |
| 固定式相機 | 1,500~3,000 | 0.8 | 0.6 | 1,400 | 0.7 | 0.5 | >80 | <50 |
| 手持式相機 | 1,500~3,000 | 0.8 | 0.6 | 1,200 | 0.5 | 0.3 | >80 | <50 |



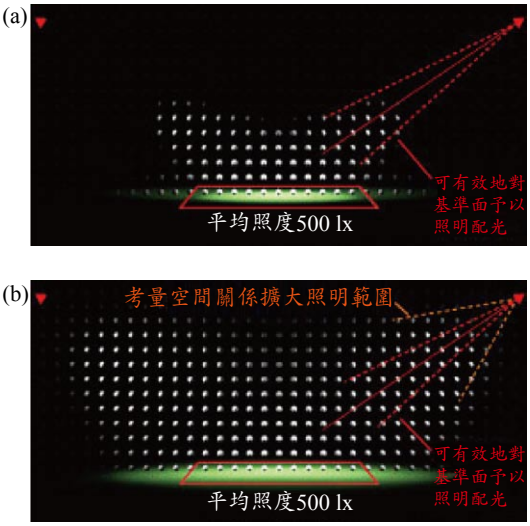

資料來源：IWASAKI

**▲圖四　一般照明與光譜調控照明比較（彩圖請見材料世界網http://www.materialsnet.com.tw）**

資料來源：IWASAKI

**▲圖五　利用LED光譜調控使得受照物更加鮮豔（對比彩圖請見材料世界網http://www.materials-net.com.tw）**

面，在光形(Lighting Distribution)與配置上不但須避免眩光導致球員無法看清現場狀況之問題，還需要兼顧立面與水平面照度均勻度，如圖六所示，適當的光形可以讓球員、裁判與觀賽者皆能清楚看到球場上發生的任何細節。另一方面，部分高功率燈具雖有足夠之光輸出流明，然而其被照範圍照度或輝度卻依然不夠，此乃由於照明光源之配光光形設計不佳所致，同時又造成不必要之光污染，故適當的配光不但要滿足基本照明，更應兼顧光源有效利




資料來源：IWASAKI

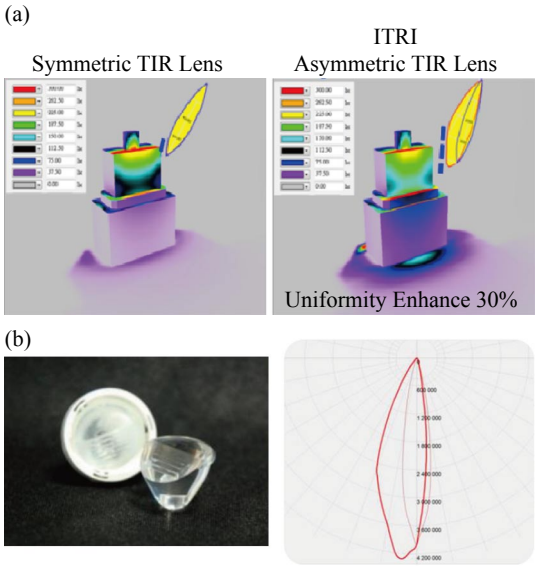
**▲圖六　燈具光形會影響立體空間中的光品質**
(a)一般LED；(b)LEDioc Flood Duell燈具示意圖

**▲圖七　德國聖保利足球俱樂部(FC St. Pauli)球場採用LED技術促進草皮養護[19]**

用之節能目標與低眩光之安全需求。由於LED可調控的特性，早已廣泛應用於植物工廠的建置，並且可依據不同的植物種類與成長周期，進行不同的光譜調控配置以達到更高的產量與較佳的品質。另外，由於LED小體積燈具的優勢，非常適合垂直農場(Vertical Farm)建置，使得空間使用與產量得以最佳化。對於大面積的運動場地，草皮的設置具有美觀與保護球員的用途，雖然現在已有人工草皮，但是考量建置與維護成本，天然草皮仍被廣泛的使用中。因為場地使用情況、場地的走向、看台、遮蔽物的影響，使得草地無法得到均勻的日照，因此LED照明即可發揮優勢。德國聖保利足球俱樂部(FC St. Pauli)球場，原本使用HID燈具進行草地養護，為了解決草皮養護的問題，採用了具備紅/藍光調配功能的可移動LED燈具，根據不同的草皮位置進行適當的照明養護。藉由可調控的LED照明，除了減少HID光源的高耗電量，亦減少燈具替換的維護成本（圖七）。

## 國內相關照明技術發展

由以上內容可知，隨著LED照明性價比與普及率的提升，應用於大面積球場照明已是未來發展的趨勢。工研院(ITRI)長期投入利基型的照明技術發展，例如：光形與光譜(Lighting Spectrum)的調控技術，已經陸續完成專利申請並且進行技術移轉。在光形調控的部分，傳統展示照明只針對光束角大小進行調整，然而光形多半皆是軸對稱之配光特性，此類光形在照亮展品時容易使展品局部過亮，且另一部分又過暗之立面照度不均勻之情形發生，同時不適當的光形容易在玻璃展示櫃表面產生反射眩光，干擾看展者觀賞效果。透過非對稱微結構透鏡，可以調控出非對稱三角光形，此類非對稱三角光形可以依照不同展

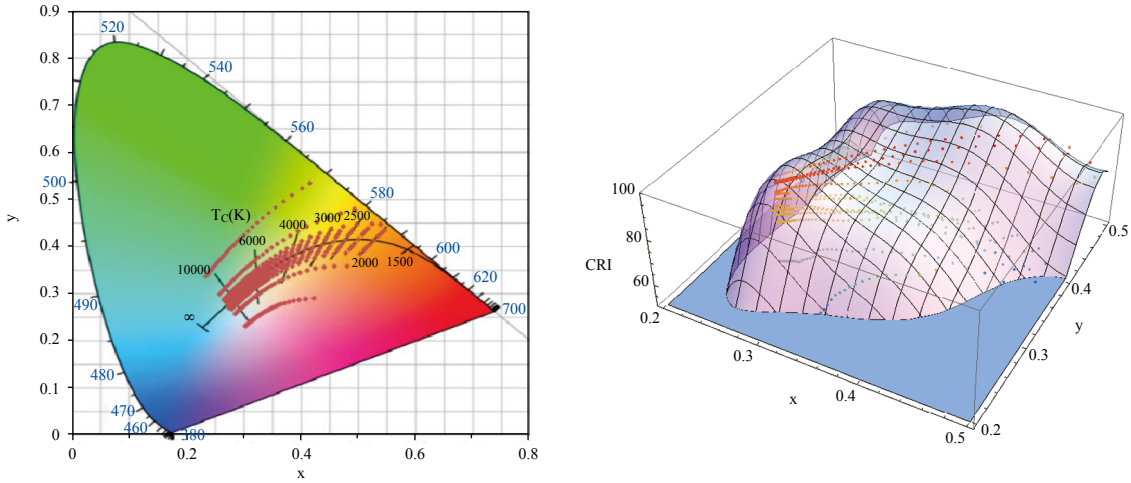



**▲圖八　利用特殊光形設計提高立面照度（彩圖請見材料世界網http://www.materialsnet.com.tw）**

品高度與寬度提供客製化透鏡設計，以達到高立面照度均勻度之光學設計目標。非對稱三角光形之光學設計適用於博物館、商業、戶外照明等多需要立面照度均勻度的場合。圖八為模擬傳統聚光光形與非對稱三角光形之立面照度情形，可發現使用非對稱三角光形，其立面照度均勻度提升30%，透過光形調整，即使將光源拉近至展櫃裡也不會造成局部過亮或過暗的問題，因此也不會造成燈具在展櫃外而使得光線在玻璃櫃表面反射之眩光問題。針對此一技術特點，未來亦可應用於球場照明中需要提升立面照度均勻度之情境，以提升球場照明光品質。

對於高解析度電視的即時轉播，球場照明的演色性要求將由Ra 80提升到Ra 90，因此高品質的照明頻譜調控對於未來照明的應用仍扮演非常重要的腳色。光品質是由最終的照明頻譜所決定的，照明頻譜的來源是不同的單一光源頻譜進行疊加求得，藉由調整個別比例即可獲得不同的疊加結果，進而影響最終的光品質指數。但是由於各種光品質指數係依據不同色卡的反射光譜對照參考光源的反射光譜進行計算，再加上不同的評價指數的色卡類型與數量不同，因此無法使用線性關係進行描述。在此非線性多變數的條件需求下，必須導入最佳化演算才能找到最佳解答。工研院建立完整光學頻譜演算模型，並且以梯度遞減法(Generalized Reduced Gradient Method)進行多變數的非線性最佳化分析，以其光品質演算結果作為照明品質優劣分析的依據。工研院目前已發表黑體輻射線上無段調控的技術，並延伸至廣色域範圍內之三維立體輪廓的評價方式（圖九），將可依據不同的需求加快特殊光譜建立。

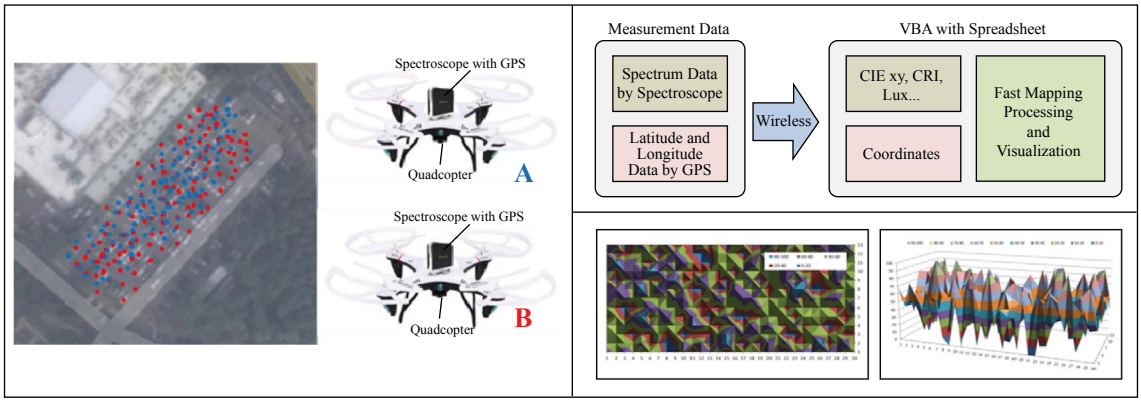
依據不同等級的球場照明需求，其照度、均勻度與眩光的需求也就不一樣。為了要確保照明品質符合需求，在燈具安裝之前必須先經過球場的照明模擬，例如：DIALux、Relux或Autodesk 3ds Max Design等商用軟體，以預估燈具安裝數量與投射角度，才能取得照明品質、成本與耗電量等條件的最佳平衡點，依據模擬的結果才進行實際的燈具安裝。然而，實際安裝時會因為安裝的情況，例如：安裝角度、風力影響、場館周圍照明等影響，造成安裝的效果與模擬有所差異，或者是需要依據不同的使用條件，例如：平時訓練、地區性競賽，所需要的照度有所差異，因此即時性的動態調整與大面積的照明品質回授有其必要。對於照明品質量測，一般常用的是採用手持式照度計，進行特定位置的



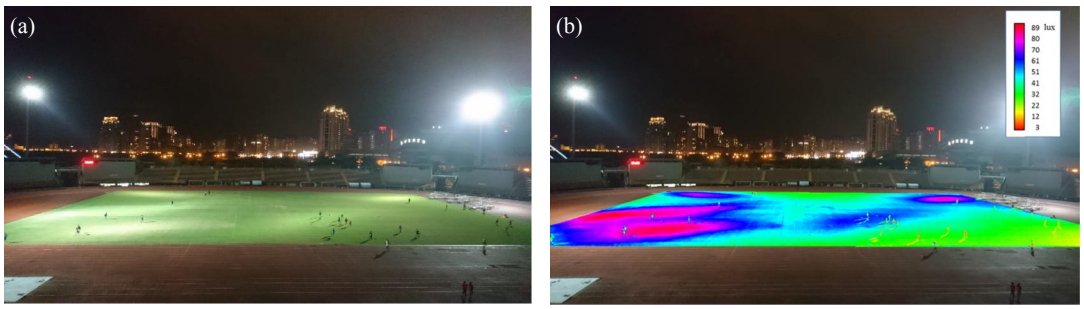

▲圖九　RGBAW廣色域照明演算與演色性三維立體輪廓分析（彩圖請見材料世界網http://www.materials-net.com.tw）

▲圖十　Intel Shooting Star無人機應用於空中編隊燈光秀[11]

照度、色溫與演色性量測，但是對於超大面積的即時量測與改善，如果用傳統的量測方式將會耗費相當大的人力與時間，因此必須導入創新的方法才能達到。無人機(Unmanned Aerial Vehicle; UAV)為近年相當受到關注的產業，隨著技術成熟與投入廠商增加，使用的門檻已經大幅的降低。國際大廠Intel於消費電子大展2016 Consumer Electronics Show(CES)，展出無人機的相關研發成果；2017年的美國超級盃中場秀，動用了300架Intel Shooting Star系列無人機與女神卡卡完成了一場凌空燈光秀，藉由無人機的燈光變化與編隊飛行達到不同的圖案（圖十），顯見數百架無人機同時飛行之操控、資訊傳輸技術已經成熟。為了達到即時性的大面積品質監控與量測，工研院於2016年國際光學與光電子學研討會(2016 SPIE Optics+Photonics)（圖十一）提出了無




▲圖十一　採用無人機進行大面積光品質量測與重建[12]

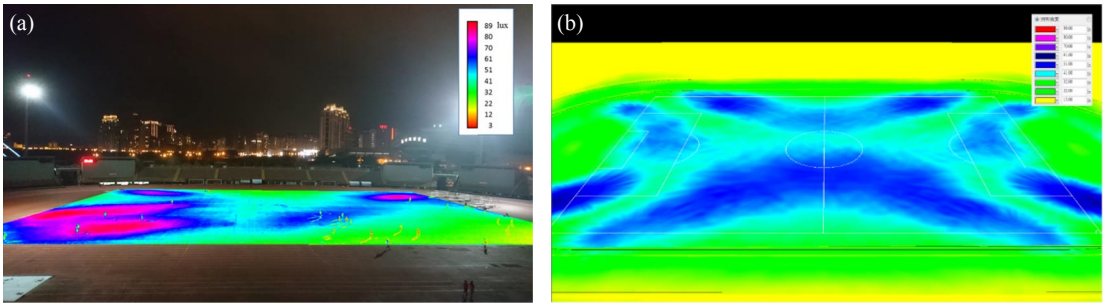



▲圖十二　結合特徵點量測與影像重建進行大面積光品質分析(a)大面積現場影像；(b)映射現場量測數據並進行大面積影像重建（彩圖請見材料世界網http://www.materialsnet.com.tw）

人機搭配微型光譜儀，進行即時大面積照明品質量測所需的空間座標與光品質映射演算機制，藉由即時重建並顯示大範圍的照明品質分析結果，以評估戶外燈具的光學或光源改善效益。另外，對於即時性且低成本的大面積品質分析，可以採用手持式照度計於特定點的數據搭配現場大範圍影像進行座標點與照度修正，藉由實測數據快速重建大範圍的照明品質，可以即時進行照度與均勻度分析與修正，確認是否符合場館的照明要求（圖十二）。

## 球場改善模擬案例

傳統大型球場包含足球、棒球等大型運動場館所需之照明設備多使用高瓦數複金屬燈(HID)，其功率皆超過千瓦以上，耗電量極高。且球場燈多安置於高桿燈上，其維修皆需使用大型吊車，更換作業時間與成本較高，因此選用高壽命、高穩定性、高節能且易於安裝之燈具作為替代光源為目前大功率照明燈具之趨勢。圖十三(a)為一國內體育場館，原始使用之HID光源單盞2,000 W，平日點亮7盞燈以確保夜間民眾運動安全，透過影像處理搭配特定量測點，將相片中呈現之照度分布差異以色彩梯度方式呈現，中間足球場區域平均照




▲圖十三　體育場館照明(Stadium Lighting)品質提升前後差異（彩圖請見材料世界網http://www.materials-net.com.tw）

度39 lx，照度均勻度($E_{min}/E_{avg}$)為0.28；跑道區域平均照度約18 lx，照度均勻度0.50。然而由於燈具安裝多年，部份燈具已損壞導致照度均勻度不佳，且燈具瓦數較高，因此評估將光源更換為LED燈具。透過利用DIALux軟體建立球場光環境，並利用其內建球場照明功能進行球場燈具配置與模擬，根據基本戶外照明模組建立之多盞燈具在燈具配置時，為簡化模擬，常會把多盞燈具重疊於單一座標點上，因此與實際燈具配置狀況存在差異，為了達到更精準的燈具配置照度模擬結果，除了需注意燈具照射配置外，還需要將多盞的燈具放置於高桿燈真實放置位置。另外若球場呈現軸對稱分布，則球場照明只需配置四分之一的球場範圍即可，然而若球場燈桿位置不對稱時，則需在排列時進一步調整每盞燈之燈具照射範圍，在此燈具左/右對稱而上/下不對稱，所以燈具照明位置在配置時要考慮不同之照射距離，調整燈具照射密度。在此選用250 W窄光束角LED投射燈32盞模擬球場照明效果（圖十三(b)），中間足球場區域平均照度43 lx，照度均勻度0.74；跑道區域平均照度約20 lx，照度均勻度0.62，可以接近原照明照度並且提升照度均勻度，於節能方面消耗功率也可省下42.8%。

根據國家照度標準CNS 12112之規範，若要兼顧足球場休閒活動情境下照明須符合規範，則足球場地休閒活動平均照度需要大於75 lx、田徑賽練習場平均照度需求為30~75 lx（圖十四），若針對此照明條件進行LED燈具照明配置，以窄角LED燈替換傳統HID光源在特定需求照度情況下，在此使用64盞250W投射燈進行照明設計，中間足球場區域平均照度84 lx，照度均勻度0.91；跑道區域平均照度約45 lx，照度均勻度0.91，方可符合休閒與練習之規範（圖十五）。

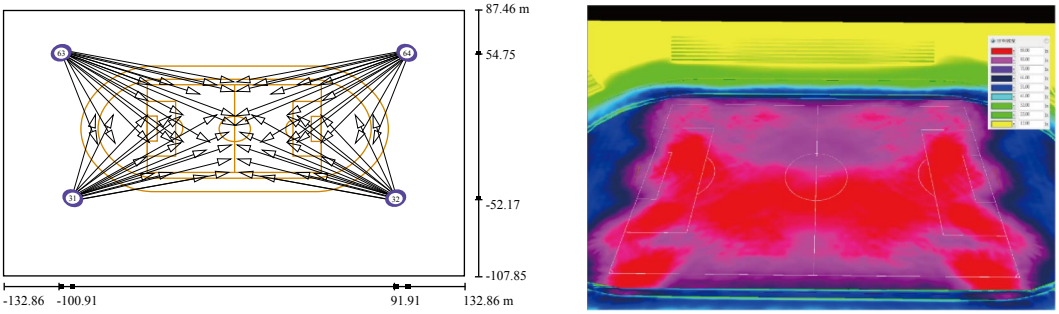
## 結　論

隨著智慧場館與綠色場館(Green Stadium)的推動，空調與照明控制系統都扮演相當重要的腳色。LED照明隨著技術發展與成本降低，使得普及率大幅提升，而隨著家用與商用照明市場的滲透率提高，利基型與高功率大面積照明將會是下一波受到關注的市場。工研院長期投入智慧照明

| 照度 Lux | 體操 | 陸上競賽 田徑 | 游泳 | 柔道 劍道 洋劍 | 摔角 拳擊 相撲 | 射箭 屋內 | 射箭 屋外 | 網球 | 桌球 羽球 | 籃球 排球 | 足球 橄欖球 美式足球 手球 曲棍球 | 棒球 硬式 | 棒球 軟式 | 壘球 | 滑雪 | 溜冰場 室內 | 溜冰場 室外 | 高爾夫球 (練習場) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5,000 | — | — | — | — | —<br>職業比賽<br>— | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 3,000 | | | | | | | | | | | | 職業比賽（內野） | | | | | | |
| 2,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,500 | 正式競賽 | | 正式競賽 | 正式競賽 | 正式競賽 | | | 正式競賽 | 正式競賽 | 正式競賽 | | 職業比賽（外野） | | | | 正式競賽 | | |
| 1,000 | | | | | | | | | | | | | 一般比賽（內野） | | | | | |
| 750 | 一般競賽 | 正式競賽 | 一般競賽 | 一般競賽 | 一般競賽 | (*)的標 一般 | | 一般競賽 | 一般競賽 | 一般競賽 | 正式競賽 | | | | | 一般競賽 | 正式競賽 | |
| 500 | | | | | | (*)的標 玩樂 | | | | | | | 一般比賽（外野） | | | | | |
| 300 | 集團體操 | 一般競賽 | — | 練習場 | 練習場 | 賽射場 一般競 | | 休閒活動 | 休閒活動 | — | 一般競賽 | — | 一般比賽（內野） | 一般競賽（內野） | 滑雪台場 | 休閒活動 | 一般競賽 | 打球台場 |
| 200 | | | | | | | 標的(*) | | | | | | 一般比賽（外野） | 一般競賽（外野） | | | | |
| 150 | — | — | 休閒活動練習 | — | — | 玩樂射場 | | — | — | 休閒活動 | 休閒活動 | — | 休閒活動（內野） | 休閒活動（內野） | 拖纜上山座(*) | — | 休閒活動 | 洞孔區域(*) |
| 100 | | | | | | | 射 | | | | | | 休閒活動（外野） | 一般競賽（外野） | | | | |
| 75 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 觀眾席 | 練習場 | — | 觀眾席 | 觀眾席 | — | 場 | 觀眾席 | 觀眾席 | 觀眾席 | — | 觀眾席 | — | 休閒活動（外野） | — | 觀眾席 | — | 打練習場球 |
| 30 | | 觀眾席 | 觀眾席 | | | | | | | | 觀眾席 | | 觀眾席 | 觀眾席 | 練習場 | | 觀眾席 | |
| 20 | — | | | — | — | — | — | — | — | — | | — | | | | — | | — |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

註(*)：依據垂直面照度。
備考：1. 彩色電視的攝影，特別考慮以1,500 Lux較佳。2. 營業設備等容納不特定多數人之休閒場所，應按欄中最高之照度。

▲圖十四　CNS 12112運動場照度規範[17]




▲圖十五　體育場館照度與均勻度提升（彩圖請見材料世界網http://www.materialsnet.com.tw）

技術的開發，在光譜與光形的調控已經累積相當多的成果並陸續技術移轉給廠商，期盼能夠藉由核心技術創造差異化的照明技術，並且協助產業擺脫削價競爭的壓力。

## 誌　謝

本研究承蒙經濟部能源局專案計畫「LED照明與系統節能技術研發計畫」經費支持與贊助，使本論文得以順利產出，特此致上感謝之意。

## 參考文獻


1. IWASAKI (https://www.eye.co.jp/)
2. OSRAM球場照明(https://www.osram.com/ls/verticals/sports/index.jsp)
3. Philips 球場照明(http://www.lighting.philips.com/main/systems/system-areas/public-spaces/sports.html) (http://www.lighting.philips.com/main/systems/packaged-offerings/public-spaces/arena-experience.html)
4. GE sports lighting (http://www.gelighting.com/LightingWeb/emea/products/outdoor-lighting/sports/)
5. Intel, Smart Stadium Take the Lead in Profitability, Fan Experience, and Security", Smart Buildings with Internet of Things Technologies, 2016. (http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/solution-briefs/iot-smart-stadiums-brief.pdf)
6. IBM: Melbourne Cricket Ground to take stadium technology and fan engagement to new levels (https://www-03.ibm.com/press/au/en/pressrelease/45998.wss)
7. INLITE: MCG Smart Stadium Upgrade commences (http://www.inlite.com.au/news/2014/12/inlite-mcg-smart-stadium-upgrade-commences/)
8. The Sports World Sees The (LED) Light (https://greensportsblog.com/2014/11/11/the-sports-world-sees-the-led-light/)
9. Gilles Page, "Sports Lighting", Living Reference Work Entry Encyclopedia of Color Science and Technology, pp 1-11, Date:10 October 2014.
10. Ke-Fang Hsu, Chih-Wei Lin, Mei-Wen Chen, Jung-Min Hwang, Li-Ling Lee, "Design of asymmetrical total internal reflection optics with microstructures for lighting museum exhibits", Optical and Quantum Electronics 48(4) · April 2016. (DOI: 10.1007/s11082-016-0497-y)
11. http://www.intel.com.tw/content/www/tw/zh/technology-innovation/aerial-technology-light-show.html
12. Chih-Wei Lin, Ke-Fang Hsu, Jung-Min Hwang, "Fast mapping algorithm of lighting spectrum and GPS coordinates for a large area", Proc. SPIE 9953, Optical Modeling and Performance Predictions VIII, 99530M (September 27, 2016); doi: 10.1117/12.2236770
13. Chih-Wei Lin, Ke-Fang Hsu,Jung-Min Hwang, "Stepless tunable four-chip LED lighting control on a black body radiation curve using the generalized reduced gradient method", Optical and Quantum Electronics 48(6):1-8 · June 2016. (DOI: 10.1007/s11082-016-0581-3)
14. BS EN 12193:2007 Light and lighting – Sports lighting
15. Gilles Page, "Sports Lighting", Encyclopedia of Color Science and Technology, pp 1-11 (October 10, 2014); doi: 10.1007/978-3-642-27851-8_144-3
16. CIE 112: Glare evaluation system for use within outdoor sports and area lighting – CIE Central bureau, Vienna, Austria, 1994
17. CNS 12112室內工作場所照明(Lighting of indoor work places) (https://www.cnsonline.com.tw/)
18. Science advances in matching LED lighting to horticultural needs (http://www.ledsmagazine.com/horticulture/articles/science-advances-in-matching-led-lighting-to--horticultural-needs.html)
19. 德國漢堡的足球俱樂部FC St. Pauli採用LED技術促進草皮養護 http://www.osram.tw/osram_tw/applications/case-studies/2014/greenkeeping-with-led-technology-at-soccer-club-fc-st.-pauli-in-hamburg/index.jsp?search_result=%2Fosram_tw%2Fapplications%2Fcase-studies%2Findex.jsp%3Faction%3Ddosearch%26entries%3D10