

What's fun in EE

臺大電機系科普系列

試看紅塵的深度 —— 漫談 3D 立體顯示器的發展

林晃巖 / 臺大電機系教授

自然視覺的追求

2009 年阿凡達電影帶起 3D 的風潮，然而這一切並非出於偶然，3D 技術的發展是源於人類對於自然視覺滿足的渴望，並且是長期技術與產業發展成熟的結果。

紀錄與播放影像是人類對記憶與分享的需求，因此顯示器是與人類接觸最密切的電子產品，而顯示技術進步的歷程，正代表著人類不斷追求更接近真實自然視覺感受的努力。綜觀顯示器的發展歷史，如圖 1 所示，因為人類的眼睛具有色彩感知細胞，技術發展將早期的黑白電視推展到彩色電視；因為人類的眼睛具有 10^9 個視覺細胞，因此標準畫質電視再演進到高畫質電視；而近年來，3D 立體顯示器的發展除了可以提供一般的影像與色彩外，更進一步提供三維立體空間的深度感受，這是人類追求更自然逼真的影像品質所帶動的顯示技術變革。

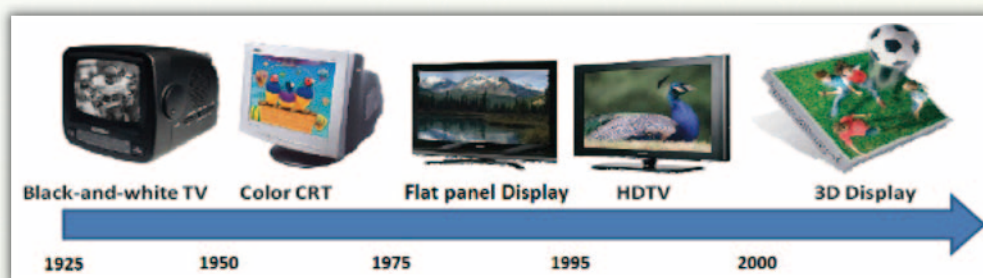


圖 1 顯示器的發展 [1]

早期的立體顯示器大部份是戴眼鏡式的，然而，這些立體顯示器觀賞時都需要佩帶特殊眼鏡裝置，常會阻礙人眼自然的視覺，並且不符合人們日常生活的使用習慣，僅限使用於電影院、動感電影院或家庭電影院；因此，不需要配戴任何特殊眼鏡裝置即能觀賞到立體影像的裸眼式立體顯示器受到更多期待，其應用將不僅止於 3D 電影或平面電視，舉凡數位電子看板、網路、數位相框、手機等，都是穿透力更高、爆發力更強、商機更為龐大的 3D 顯示器的未來應用。

立體視覺之基本原理

在了解立體顯示器的工作原理之前，必須先了解人類的視覺系統如何感知深度。人類存在的空間為三維空間，但是在人類視覺系統的視網膜上形成的影像卻是兩維空間的強度分布，然而，人類的視覺系統可經由多種視深線索（Depth Cue）而將這些平面強度分布的影像轉化為具有深度的效果。一般而言，視深線索可分為心理視深線索（Psychological Depth Cue）和生理視深線索（Physiological Depth Cue），分述如下 [2]。

心理視深線索

即使在同一畫面距離的物體，舉例而言如圖 2，顏色較鮮艷或較亮的物體感覺距離觀者較近。又如圖 3 所示，羊的相對大小較小者，感覺距離觀者較遠，這是因為在視網膜上成像之大小取決於物體對眼睛的張角；兩條平行線在視覺上的間距會隨距離觀察者增加而減少，這是線性透視（perspective）的線索；從光線與陰影（light and shadow）變化可以感受到物體的立體感；近距離的物體在視線中會阻擋住距離較遠的物體，故從兩物體的遮蔽（occlusion）關係，亦能分別出距離遠近；近景的物體較遠方的物體可以觀察到更多紋理細節（texture gradient）；由於雲霧的影響與折射作用，天際遠景（aerial perspective）通常較為模糊且偏藍。

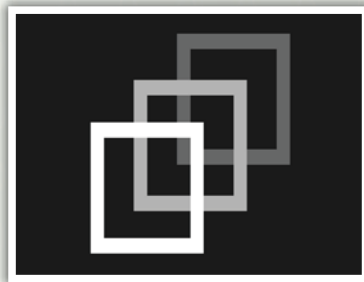


圖 2 顏色較亮的物體在視覺上感覺較近 [3]

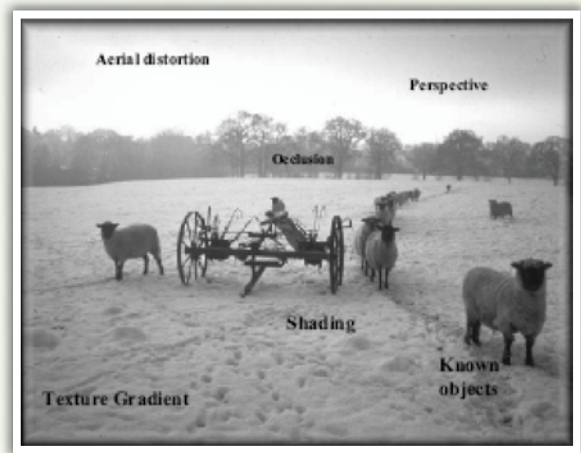


圖 3 2D 影像中提供深度資訊的視深線索 [3]

生理視深線索

眼睛構造中水晶體相當於相機的對焦透鏡，能夠將影像成像在視網膜上。依照水晶體的調節（accommodation）可以感覺出物體的深度遠近。兩眼視線對一物體之交叉角即為輻輳（convergence），從觀者與物體之距離不同，兩眼視線的交叉角也隨之改變：彼此距離近則交叉角大；距離遠則交叉角小，依照觀測物的距離遠近，兩眼視線的角度也會跟著調整，於是便可以感覺出物體遠近深度的距離。人類兩眼平均相距約六點五公分，因為兩眼在水平位置上的差距，造成觀看物體的角度略有不同，因此物體在兩眼視網膜上的相對成像位置略有差異，而人眼可藉由此雙眼視差（binocular parallax）感知和判斷物體間的相對深度。當觀賞者的眼睛位置移動時，由於對物體的觀看角度也會隨之改變，故人眼接收到的影像也會不同，我們稱之為移動視差（motion parallax），移動視差也能夠提供觀賞者對於物體深度遠近的感覺。

一般而言，立體顯示器應用雙眼視差或移動視差的生理視深線索，如圖 4 所示 [4]；也就是若我們想觀賞到 3D 立體影像，必須想辦法利用立體顯示器讓左眼與右眼分別只接受到有視差的個別影像。

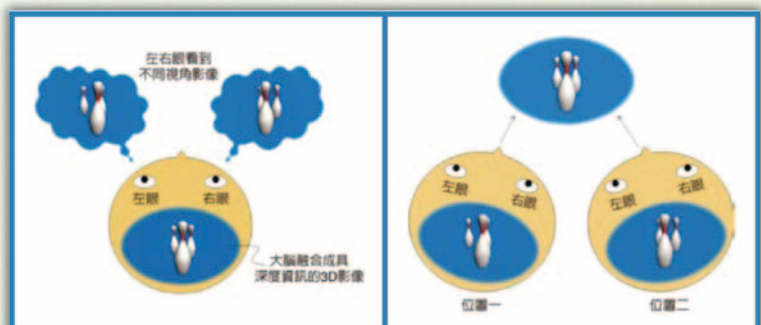
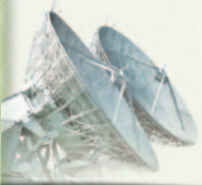


圖 4 兩眼視差及移動視差 [4]



3D 立體顯示技術之分類

3D 立體顯示技術的發展的基本想法是：對於（靜止的）觀者利用雙眼視差的生理視深線索，也就是左右眼分別接受來自不同角度的影像。實施方式可分為戴眼鏡式（Stereoscopic）以及裸眼式（Autostereoscopic）立體顯示器。從十九世紀至二十世紀立體影像顯示器大部份是戴眼鏡的立體顯示器，然而這些立體顯示器受限於需要佩帶特殊的眼鏡及其他技術問題，因此二十世紀末以來，許多科技大廠相繼投入裸眼式立體顯示器的研究。3D 立體顯示技術的分類如圖 5 所示，以下我們將針對這幾種技術的原理及其優缺點作詳細的介紹。

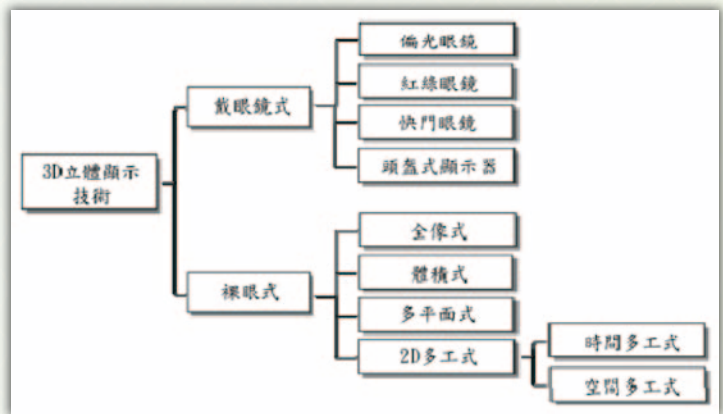


圖 5 3D 立體顯示技術之分類

戴眼鏡式 3D 顯示技術

偏光眼鏡（Polarizing Glasses）：

我們將所有的畫素分成奇數列及偶數列，而在其顯示器外相對應之位置配置相位延遲膜（Micro-Retarder Film）使其輸出之光具有互相呈正交之偏極狀態。而觀眾所配戴之偏光眼鏡設計成對應奇數列及偶數列之偏極狀態，則雙眼可接收其對應之偏極狀態的影像，而另一個影像會被與其正交之偏光鏡片阻擋，而達到顯示雙眼視差所需的影像，其架構如圖 6 所示。由於在觀賞立體影像的過程中，觀眾頭部並不會一直保持直立，若是利用線性偏極的設計，在頭部偏轉時會造成左右眼影像互相干擾的現象；因此在設計上應儘量使用圓偏極的設計，換句話說，其正交的偏極狀態為左旋和右旋圓偏極，不受頭部偏轉角度之影響。但偏光眼鏡式立體顯示系統主要缺點是觀賞者所感受到的畫面解析度僅為播放 2D 影像時的一半。目前顯示器解析度已大有進步，故近年已有電視與電腦監視器之產品上市。

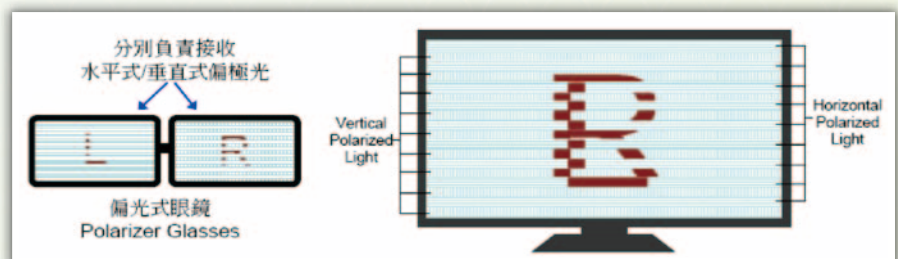


圖 6 偏光眼鏡式立體顯示器 [5]

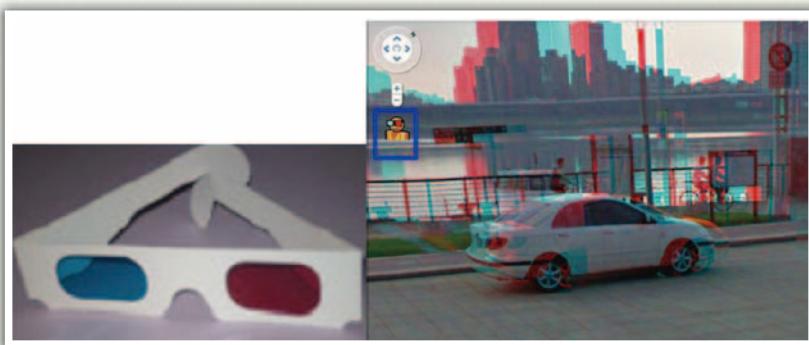


圖 7 紅藍眼鏡式立體顯示器（取自網路）

紅藍眼鏡（Anaglyph）：

又稱紅綠眼鏡，其原理為將給左右眼的影像用互補顏色穿插顯示於同一畫面中（如圖 7），當戴上紅藍或紅綠眼鏡後，兩眼鏡片過濾不同顏色的光，左右眼就能看到有角度差異的影像而形成立體視覺，但其缺點是因部分顏色被有色鏡片所濾除影像色彩不佳；觀賞者所感受到的畫面解析度僅為播放 2D 影像時的一半。

快門眼鏡 (Shutter Glasses) :

如圖 8 所示，在影像播放時，顯示器以正常播放速度 (Frame Rate) 的兩倍頻率輪流播放左右眼視角的畫面，而觀者配戴液晶快門眼鏡利用液晶控制透光度，藉由有線或無線裝置與顯示螢幕左右眼畫面同步，以交替開關切換左右眼之液晶快門，使雙眼分別看見各自視角的畫面，因為視覺暫留，如此左右交替便可達到立體視覺效果，目前顯示器處理影像與元件切換速度已大有進步，故近年已有電視與電腦監視器之產品上市。但其缺點為眼鏡的成本較高、且為主動式需要電池；而當動態影像變化速度較快時，播放 R_n 切換到 L_{n+1} 的畫面會因影像大幅的變化而產生問題。

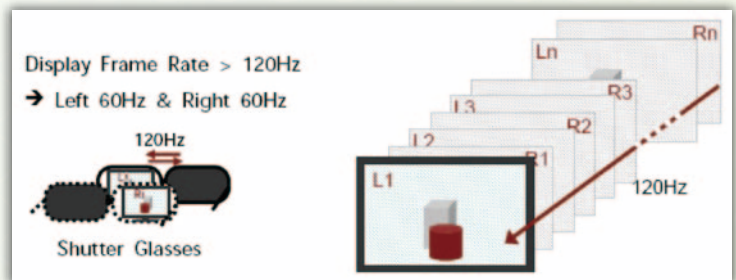


圖 8 快門眼鏡式立體顯示器 [5]



圖 9 頭盔式立體顯示器 [6]

頭盔式顯示器 (Head Mounted Display) :

如圖 9 所示，其方便性在於直接在眼鏡上分別播放兩個左右眼畫面，直接分別給左右眼觀賞，所以只要分別給兩邊不同的訊號即可；而且不會有兩眼影像串音的問題，因此 Sony 在 2011 年仍發售新型的頭盔式顯示器。但其缺點是只能供單一觀眾觀賞，並且眼鏡造價高昂、且重量通常不輕，會造成觀者配戴不舒適。

以上這幾種方式藉著眼鏡即可將左右眼影像分別讓觀者的左右眼觀看，而產生立體視覺，因此從 1850 年代紅藍眼鏡立體影片 (D' Almeida)、1920 年代快門眼鏡式立體影片 (Hammond)、1936 年 MGM 公司推出紅藍眼鏡商業電影、1939 Chrysler 公司推出偏極眼鏡立體影片，到 2009 年以來大眾化的 3D 電視或電腦螢幕也以偏極眼鏡式或快門眼鏡式為主。但無論成本高低，在觀賞時使用者都需要配戴額外的眼鏡，對於一般的使用者多少都會造成不便，因此自二十世紀末以降，前瞻技術發展均著重於開發使用時不需配戴額外眼鏡的裸眼式 3D 立體顯示器。

裸眼式 3D 顯示技術

電子全像術 (E-holography) :

如圖 10 所示，主要是麻省理工學院的 Benton 教授所發展的，是利用紅、綠、藍三色雷射光源，各自經過聲光調制器 (Acoustic Optical Modulator, AOM) 晶體，產生相位型光柵，帶著光柵訊息的雷射光，利用垂直掃描鏡 (Vertical Scanning Mirror) 及多面鏡 (Polygonal Mirror)，進行垂直及水平的掃描，合併產生如全像片之效果，進而將立體影像呈現出來 [7]，其優點為全像片的動態變化容易；然而，影像大小常受限於聲光調變器晶體的大小，且多面鏡的掃描速度必須與三色雷射光源在晶體傳播速度同步，當影像大小變大時所需資訊處理速度、硬體速度皆非現今系統與元件可以達成。

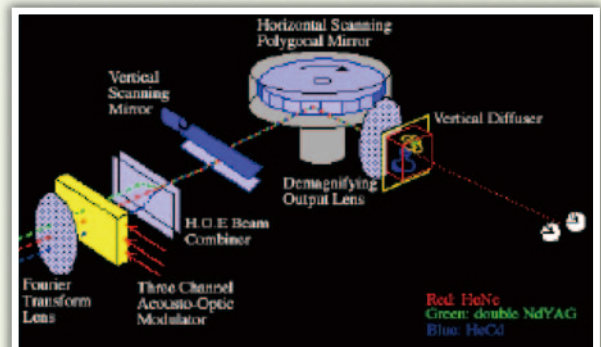
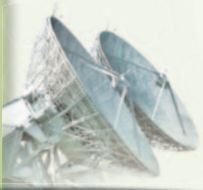


圖 10 全像式立體顯示器 [7]



體積式 (Volumetric) :

德州儀器 (Texas Instrument, TI) 提出一種利用雷射掃描立體影像顯示器，或稱之為體積式顯示器。如圖 11 所示，主要是利用一個快速旋轉的螺旋面，配合由底下投影的雷射光源，藉由雷射光源投射到快速旋轉的旋轉面時，會產生散射，當掃描過空間中的每一點即可形成立體影像，其缺點是影像為透明而不具有遮蔽之視深線索；影像中央必須有一個旋轉軸，靠近軸心的影像旋轉速度較慢，立體影像較不清晰。

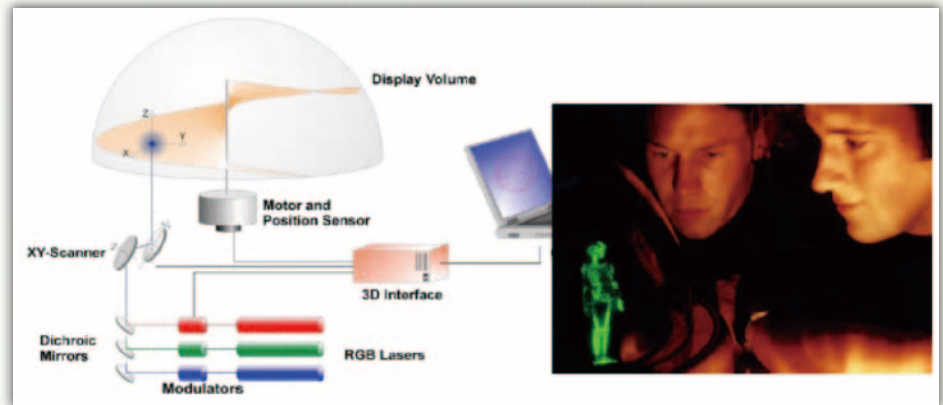


圖 11 體積式立體顯示器 [8]

多平面式 (Multi-Planar) :

如圖 12 所示，日本 NTT 提出一種利用兩個重疊的液晶面板，在兩個面板顯示大小相同的影像，利用物體離觀賞者的遠近距離不同，會有陰暗及顏色上的差別，進而將前後物體影像重疊在一起，讓觀賞者產生立體感，其缺點是前後面板的對位困難，且因為是由兩個二維影像重疊的結果，所以只有在正視方向觀賞，立體效果較佳，其餘觀賞角度則不易顯出立體效果。

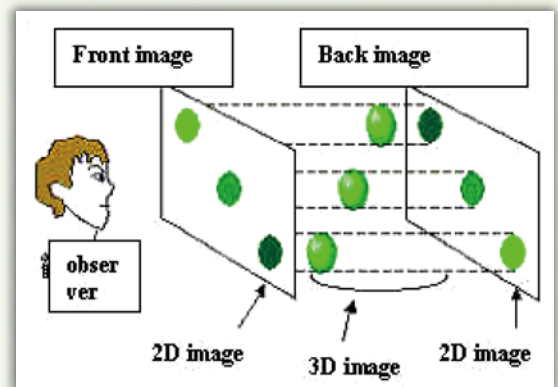


圖 12 多平面式立體顯示器 [4]

2D 多工式 (Multiplexed 2D) :

近幾年來各顯示器廠商普遍採用的方式，是在同一個顯示系統上分別提供觀賞者左右眼各一個視角不同的平面影像，經由大腦把左右眼看到的不同影像融合在一起，而產生立體影像的感覺。這種便是立體影像顯示的 2D 多工方式，而 2D 多工方式又可再細分為時間多工式與空間多工式。

如圖 13 所示，所謂時間多工式是利用特殊設計的分光機制，在某一個時間點，立體影像顯示器將左眼影像放送到觀賞者的左眼；在下一個時間點，則將右眼影像放送到觀賞者的右眼，左右眼影像連續地被放送至相對應的眼睛，當左右眼的影像切換速度夠快時，大腦將不會感受到影像的切換，於是形成 3D 立體影像的感覺。

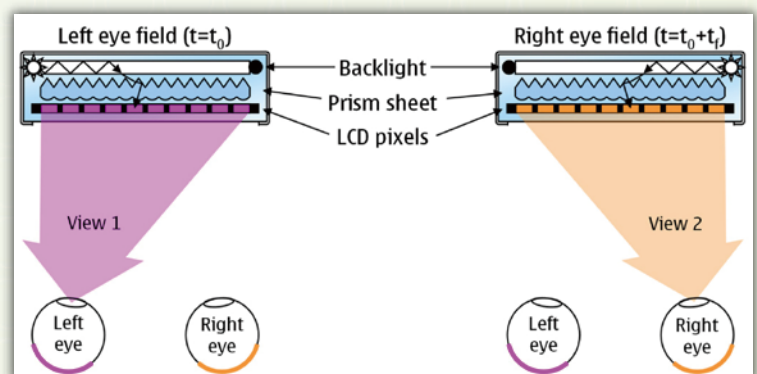
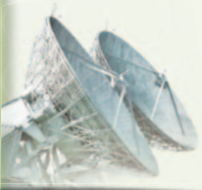


圖 13 時間多工式立體顯示器 [9]

在空間多工式方面，日本的三洋 (SANYO) 最先提出利用立體影像對的方式來產生立體影像顯示系統，是將液晶面板的畫素分成若干個奇數畫素及偶數畫素的影像對，奇數畫素影像對提供觀賞者一眼的影像，偶數畫素影像對則提供觀賞者另一眼的影像，並利用柱狀透鏡



(Lenticular Lens) 的聚焦與光線折射原理改變光的行進方向將光線分光，進而將奇數畫素與偶數畫素的影像，分別放送至觀賞者的相對應的眼睛 [10]，如圖 14 所示，因此產生立體的印象，而影像組數的多寡，則決定了顯示器視域數 (Number of Views) 的多寡，顯示器的視域數是指可以提供幾個觀看視角的影像，如圖 15 為提供六個觀看視角的影像即六個視域的柱狀透鏡式顯示器。除了柱狀透鏡，日本 Sharp 與韓國三星公司則皆是利用視差屏障 (Parallax Barrier) 來進行分光 [11,12]，如圖 16 所示。所謂視差屏障，是以黑色與透明相間的直線條紋來限制光的行進路線，將其置於離液晶面板一小段距離，讓觀賞者的其中一眼只能看到液晶面板奇數畫素的影像，觀賞者另一眼則只能看到液晶面板偶數畫素的影像，相較於柱狀透鏡式顯示器，視差屏障的製作與 2D/3D 切換較容易；缺點則是能量損失較多。

2D/3D 切換是裸眼式立體顯示器的熱門探討主題，對於戴眼鏡式立體顯示器而言，觀看 2D 內容時只要拿下眼鏡就好；對於裸眼式立體顯示器，不想損失解析度或亮度觀看 2D 內容，就必需有 2D/3D 切換機制的設計。

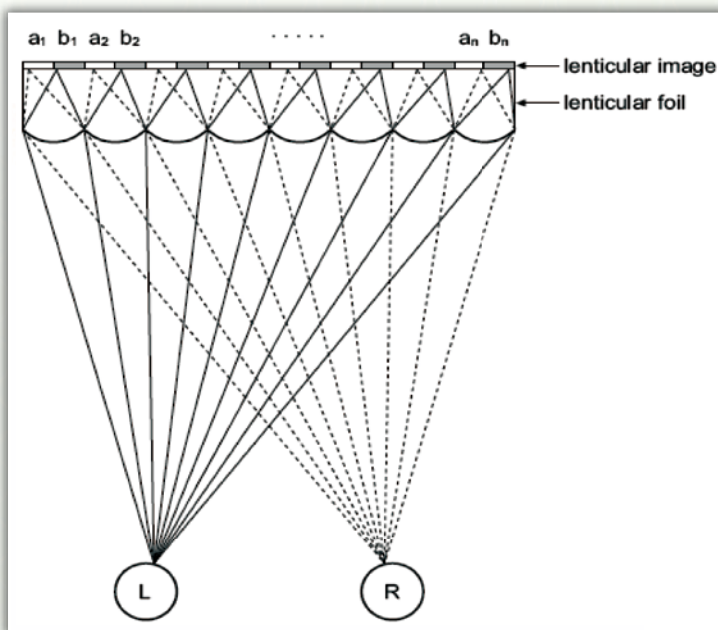


圖 14 柱狀透鏡式立體顯示器 [13]



圖 15 提供六個視域之柱狀透鏡式顯示器 [10]

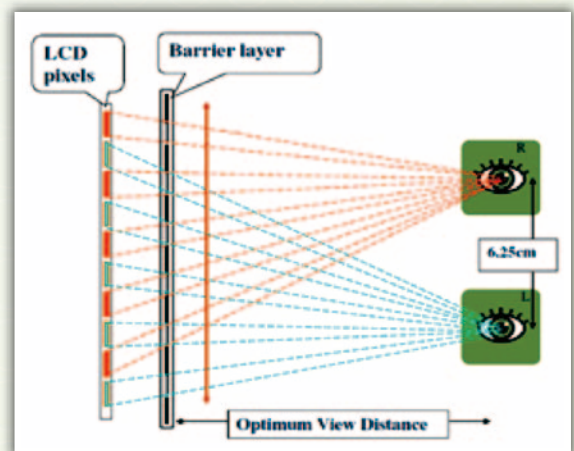
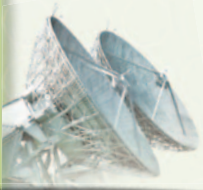


圖 16 視差屏障式立體顯示器 [14]

裸眼式立體顯示器無論在技術困難度與製作成本上都較戴眼鏡式立體顯示器有待克服，目前有少許產品出現；但仍有許多研究在進行。

立體風潮之未來

記得以前有部電影：「遠離非洲」，導演透過女主角（梅莉史翠普飾）搭乘男主角（勞勃瑞福飾）所駕駛的飛機翱翔非洲大陸天際所見，來表達「以上帝之眼所見的世界」；用這個來類比，3D 顯示器所呈現的應該是模擬「以凡人之眼所見具有深度的紅塵」吧，所以我們說：這是對於自然視覺的追求！2009 年阿凡達電影帶起 3D 的風潮，兩年多來，由於硬體技術的成熟，從 3D 取像設備如：相機、攝影機；到 3D 播放設備如：藍光碟片與碟機；到 3D 顯示設備如電視、監視器、投影機、筆記型電腦；乃至於手機、平板電腦更是兼具取像、播放與顯示的 3D 隨身裝置都如雨後春筍般大量出現。



然而硬體齊備後的問題是軟體內容是否足以支撐這風潮的滔滔不竭呢？因此更多 3D 電影開拍（如龍門飛甲、畫皮二、鐵達尼號 3D），不足者以 2D 轉 3D 技術翻拍或直接播放舊片、配合體育盛會（如南非世足賽、中國的春晚）製作 3D 轉播節目、甚至開播 3D 頻道（如大陸中央電視台等六台聯合開辦），更多軟體內容的出現加上硬體的價格趨近合理，才能有助於帶動 3D 硬體的換機潮。

接下來的問題是健康 3D 的議題，從以上 3D 技術的介紹，大家不難看出各種技術無非是藉著 2D 的左右眼影像，讓大腦以為我們正看著 3D 的景物，在生理的層面，如何使左右眼只接收到各自對應的影像，不只影響大腦感知的立體感，甚至會影響在觀看 3D 內容時在認知或心理層面的舒適度。例如影像的串音（Crosstalk）會使重影（Double Image）或鬼影（Ghost Image）造成立體感的破壞，也會造成眼睛的疲勞；又如眼睛的調節（Accommodation）使得聚焦在螢幕上，但立體影像的輻輳點（Convergence）卻是凸出或深入於螢幕，這種衝突也會造成看不清楚過凸或過凹的景物，而造成眼睛的疲勞。甚至有眼科醫師提醒 [15]：人在觀看自然立體景物時多數是應用心理視深線索，而目前 3D 顯示器則是充分應用生理視深線索，除了造成眼睛的疲勞外，長期使用是否會引起眼科疾病，是有待探討的問題；而目前大部份 3D 產品都在說明書標註如有使用不適的情況應停止使用，可見這種對自然視覺追求的顯示技術變革，還有待更多生理與心理的研究。

參考文獻

1. J. A. Castellano, "Handbook of Display Technology," Academic Press, San Diego (1992).
2. N. Holliman, "3-D Display Systems," Department of Computer Science, University of Durham (2005).
3. N. Holliman, "3D Display Systems," Handbook of Optoelectronics, IOP Press (2002).
4. 黃怡菁、黃乙白、謝漢萍，「3D 立體顯示技術」，《科學發展》，451 期，46~52 頁，2010 年 7 月。
5. 群益金融證券，「3D 產業初探」，2010 年。
6. http://www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/cg/Web/intro_graphics/vr.html
7. J. S. Kollin, S. A. Benton, M. L. Jepsen, "Real-Time Display of 3-D Computed Holograms by Scanning the Image of an Acoustic-Optic Modulator," SPIE Proceedings, Vol. 1212, p. 174 (1990).
8. 蔡朝旭，「前瞻 3D 顯示技術」，2006 年 1 月。
9. Toni Järvenpää, Marja Salmimaa, "Optical characterization of autostereoscopic 3-D displays," Journal of the SID, Vol. 16, p. 825 (2008).
10. C. Berkel, "Image Preparation for 3D LCD," SPIE Proceeding, Vol. 3639, p. 84 (1999).
11. I. Sexton, "Parallax Barrier 3-D TV," SPIE Proceeding, Vol. 1083, p. 84 (1989).
12. Hui Nam, Jangdoon Lee, Hyoungwook Jang, Myoungseop Song, Beomsik kim, "Auto-Stereoscopic Swing 3D Display," SID Digest, P. 94 (2005).
13. M. F. Buchroithner, O. Wälder, K. Habermann, B. König, T. Gründemann, G. Neukum and the HRSC Co-Investigator Team, "True-3D Visualization of the Martian Surface Based on Lenticular Foil Technology Using HRSC Imagery," Commission IV, WG IV/9.
14. Planar Systems, Inc, "3D Displays –Technologies & Testing Methods" (2011).
15. 陳瑩山，「雙黃成 3D? 探討 3D 的形成與壓力的由來」，《健康世界》，44~49 頁，2011 年 1 月。

（部份內容修改自陳相如台大光電所碩士論文，「不同的裸眼式 3D 立體顯示器觀賞品質之比較研究」，100 年 7 月），44~49 頁，2011 年 1 月。

