



國立交通大學
National Chiao Tung University

出國報告（出國類別：出國短期研究）

102 年國際百大合作計畫
短期出國研究報告(康乃爾大學)

服務機關：光電系
姓名職稱：黃乙白 副教授
派赴國家：美國
出國期間：2013/07/15~08/16
報告日期：2013/11/25

摘要

本次出國主要目的是與康乃爾大學陳祖翰教授所領導的 **Advanced Multimedia Processing (AMP) Lab**.進行 3D 影像方面的共同研究合作，期間因同時進行 3D 生醫影像擷取的應用，因此也至 **Prof. Javidi (University of Connecticut)**的實驗室進行 3D 顯微光學的實驗；最終成功的結合 [康乃爾大學的 3D 影像處理技術]、[康乃狄克大學的顯微光學系統]、以及 [本團隊的液晶透鏡陣列]，達成可即時拍攝長景深與高解析度的 3D 立體顯微影像，並可進一步應用於生醫相關的檢測。

研究內容摘要為應用本團隊開發出[主動式液晶透鏡陣列]，藉由可開關的半導體層來主動且任意的控制陣列中每一個透鏡，並將此主動式結構製作成 [微型環狀透鏡陣列應用於 3D 立體影像擷取]，搭配 **Prof. Javidi (University of Connecticut)** 團隊的光學運算與 **Prof. Tsuhan Chen(Cornell University)** 團隊的影像處理，便能拍攝到長景深與高解析度的 3D 立體影像。

目次

一、目的與緣起.....	4
二、過程.....	4
三、心得及建議.....	14

本文

一、目的與緣起

計畫主題: 光學深度感測陣列於 3D 影像擷取與生醫之應用 (Photonic Depth Sensor Array for 3D Capturing and Bio. Applications)

計畫目標: 此項國際合作為跨領域的長期合作，由於本團隊所開發的硬體(液晶透鏡)屬於前瞻元件，並無法於市面上直接購買取得，而 Cornell AMP Lab.的 3D 圖形辨識與影像處理也是大幅領先市面上所市售之軟體，因此兩相結合的情形下，藉由此國際百大合作計畫將可創造出新的價值與應用。本年度研究計畫目標主要以開發深度感知的深度感測器(Depth Sensor)為主要基本元件，此基本的深度感測器(Depth Sensor)將利用主動矩陣式液晶透鏡陣列(Active Matrix Liquid Crystal Lens Array)來感測 3D 深度，藉由深度感測器(Depth Sensor)再加上高階的光學設計與影像處理將可應用於 3 維生醫影像擷取。

計畫緣起: 本團隊原先於材料、製程、以及光學設計等都有相當的成果，然而一直缺少的就是影像與圖形辨識部分的專業實驗室來將所開發出的前瞻硬體更加有效的利用。陳祖翰教授所帶領的 Advanced Multimedia Processing (AMP) Lab. 在影像與圖形辨識以是世界知名的研究團隊，雙方早於 2011 年即開始合作，已共同發表超過 10 篇論文，本年度因台灣團隊開發出新的液晶透鏡陣列，可應用於 3D 顯微生醫的檢測，因此再次短期造訪康乃爾大學，共同測試最新的成果；期間也因實驗的需求至康乃狄克大學(UConn.) Prof. Javidi 的實驗室架設 3D 顯微系統測試。

預期達成成果: 預期能結合液晶透鏡陣列元件(交大)、立體影像處理(Cornell)、以及顯微光學設計(UConn.)來達到快速擷取、高解析度、高取像深度的立體顯微系統。

二、過程

出國行程: 2013/07/15~08/16 於康乃爾大學與康乃狄克大學進行短期研究

研究項目性質與主題: 項目性質屬國際研究合作，結合液晶透鏡陣列元件(交大)、立體影像處理(Cornell)、以及顯微光學設計(UConn.)來完成 [光學深度感測陣列於 3D 影像擷取與生醫之應用]的主題研究。

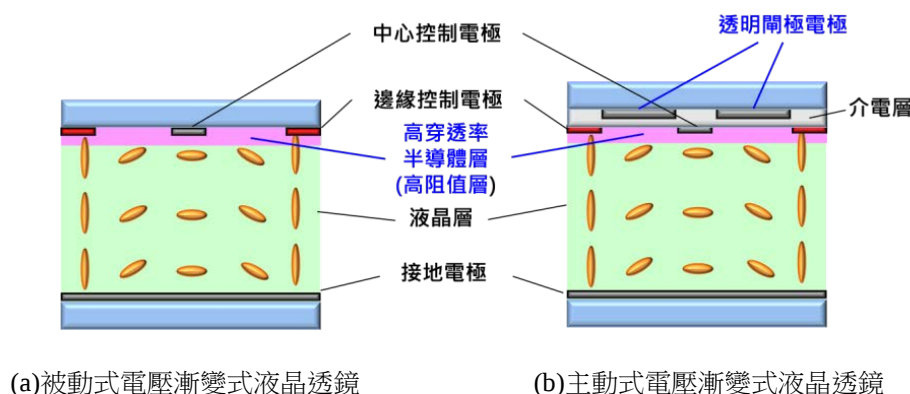
研究機關(機構、單位)介紹: Cornell University 是美國最重要的研究型大學之一，也是八所常春藤盟校之一，全美大學排名為前 10 名的頂尖學校；申請案中合作的研究單位是由 Prof. Tsuhan Chen 擔任主持人之 Advanced Multimedia Processing (AMP) Lab.，Prof. Chen 目前為 School of ECE 之 Director，並已獲選為 IEEE Fellow，Prof. Chen 主要研究的領域為多媒體影像處理，其中圖形辨識、3D 影像擷取以及 3D 立體影像模型處理一直是該實驗室研究與開發的重點，本計畫為 [Photonic

Depth Sensor Array for 3D Interactive and Bio. Application]，其中不論是影像辨識或是 3D 擷取之影像處理中相當重要的演算法架構將是本次合作研究的重點，也是該實驗室的專長領域。陳祖翰教授所帶領的 Advanced Multimedia Processing (AMP) Lab.在影像與圖形辨識最著名的 CVPR 以及 ICIP 等重要國際會議上均有多篇論文發表，且屢次於相關國際會議中獲得論文獎，提出創新的影像處理與高階的辨識演算法；此外，陳祖翰教授更為 IEEE Fellow 且於 2009 獲聘為 ECE Director of Cornell University，因此可見得陳教授於此領域的卓越表現與優勢。

University of Connecticut 為全美電機領域排名第 31 的學校，本次亦同時與 Prof. Bahram Javidi 所帶領的實驗室進行顯微光學系統的合作，Prof. Javidi 為生醫光學領域的資深研究學者，共擁有 7 個國際頂尖學會 Fellow 的頭銜，包括 IEEE、OSA、SPIE 等。

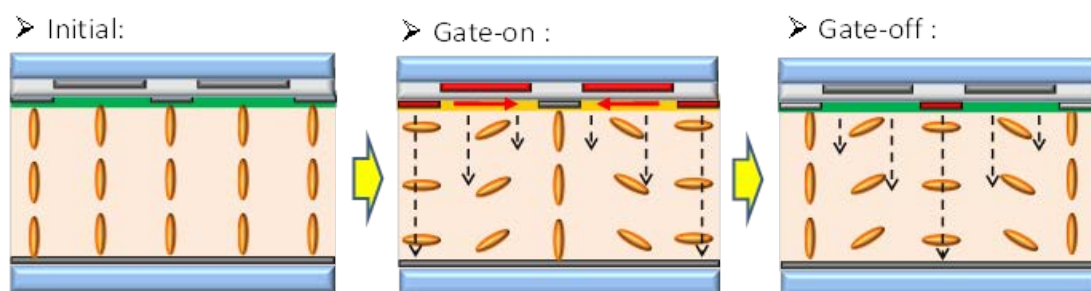
研究經過與成果：為了讓液晶透鏡有更廣更高階的應用，必須打破傳統僅只於單一元件且為被動式的液晶透鏡，本計畫所提出的主動式液晶透鏡元件的基礎是本團隊所成功開發的”電壓漸變式液晶透鏡”(Gradient-Driven Liquid Crystal Lens, 電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens))，如圖一(a)。電壓漸變式液晶透鏡(電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens))利用一高阻值層塗佈於控制電極間，靠電阻的分壓效果讓電場的分布產生漸變，進而得到具有透鏡曲率分布的液晶排列，由於此高阻值層可將電場能量有效的局限在液晶盒內因此可達到低電壓(<5Vrms)、快速反應(<0.8Sec)之功效。

本次計畫將電壓漸變式液晶透鏡(電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens))進一步製作成主動式結構，其詳細的結構示意圖如圖一(b)所呈現，由於半導體材料藉由製程的控制(如 Sputtering 時的通氧量等)，可調整其本身的電阻值，再加上金屬氧化物的半導體材料(如: IGZO)對可見光的穿透性極高，因此可當成一種高阻值材料來使用塗佈於透鏡內；而與被動式電壓漸變式液晶透鏡(電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens))最大的不同，就是會在控制電極中間加入透明的閘極電極(Gate-electrode)來控制此半導體層的導通與否，如此即可像傳統電晶體(TFT 或 MOSFET)的開關效果；甚至也可以藉由調整閘極之電壓，達到調整其相對應半導體區域之等效電阻率，而進一步改變透鏡的曲率與聚焦效果。



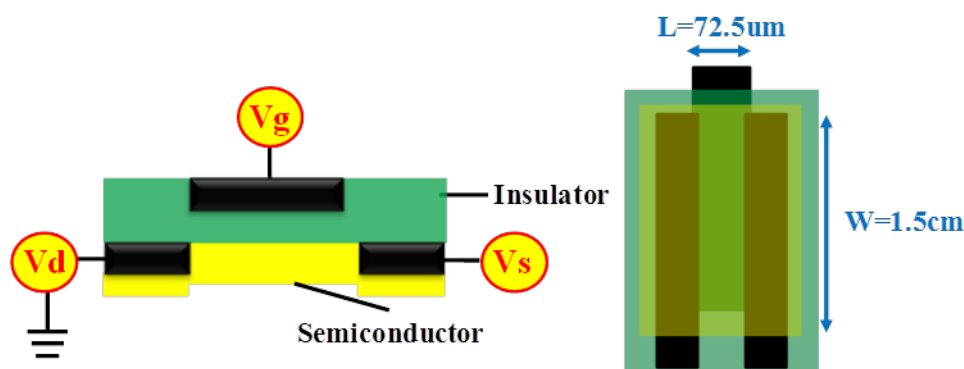
圖一 (a)被動式的電壓漸變液晶透鏡(電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens))結構與(b)所提出的主動式電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens)結構，主動式電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens)包含半導體層與 Gate-electrode，可具有如 TFT 般單獨開關的效果。

所提出的主動式電壓漸變式液晶透鏡(電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens))之新穎處除了在可獨立控制之外，其電晶體並非僅如一般的電晶體是額外的控制元件，會損失開口率，此結構將電晶體完全的融合在透鏡的主結構中，圖二是此主動式液晶透鏡操作的示意圖，此示意圖是以垂直配向(Vertical-Alignment(VA))的負型液晶為例子，其液晶分子的排列會與電場成垂直，因此在 Gate-on 時，半導體層為導通狀態，電訊號由邊緣電極開始送入中心電極，當中心電極充飽電荷後將閘級關閉，此時的半導體則成為具有電阻分壓效果的薄膜層，讓高電位的中心電極到低電位的邊緣電極中間呈現漸變的電壓分布，進而使液晶分子產生如透鏡曲率般的排列。



圖二 主動式電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens)操作過程示意圖(以 VA-mode 的負型液晶為例)。

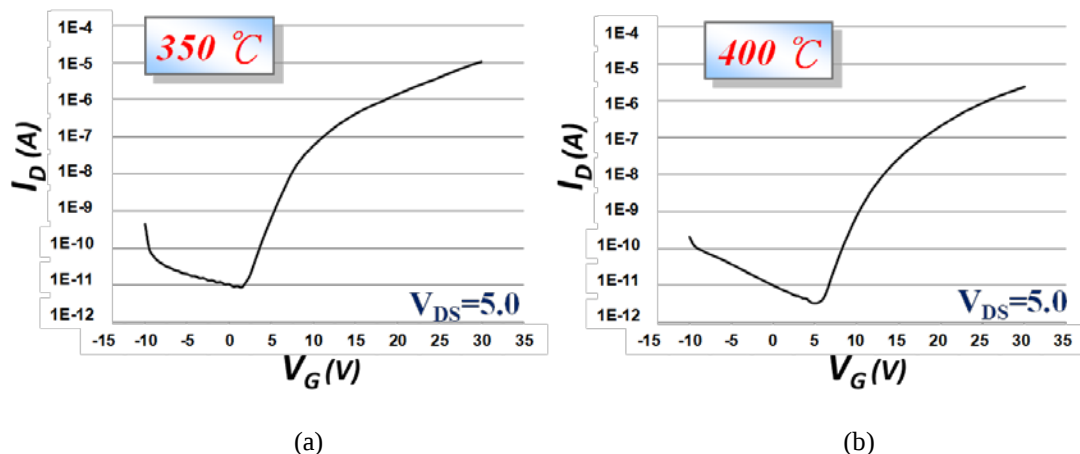
首先，依前述之概念來設計主動式電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens)之結構，並初步驗證其元件之功效，此結構設計為柱狀液晶透鏡，其結構設計如圖三所示。結構上，兩旁邊緣電極間距與中間的閘極長度為 $72.5\mu\text{m}$ ，此長度約為透鏡之半徑，柱狀透鏡長度為 1.5cm ，電極材料為銦錫氧化物(Indium Tin Oxide)，半導體材料為氧化銦鎵鋅(IGZO, Indium Gallium Zinc Oxide,)來作為可調控等效電阻率之主動層。



圖三 主動式電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens)規格初步結構設計。

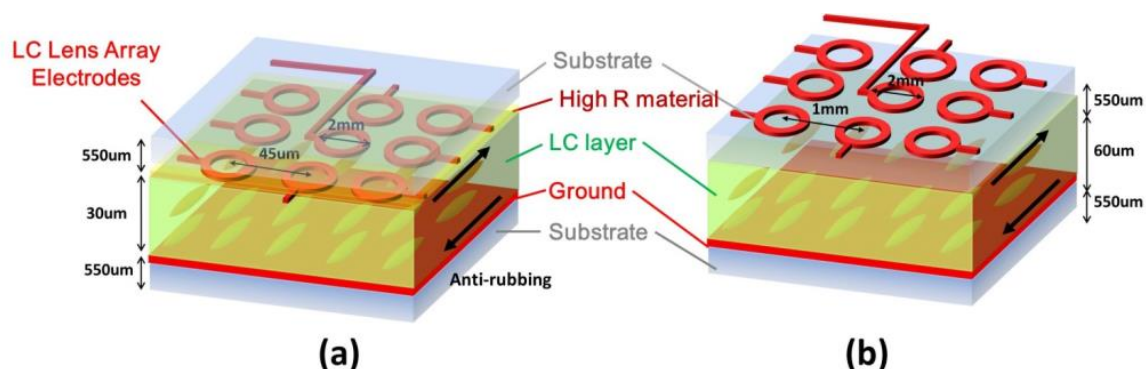
因為半導體材料 IGZO 的阻值將會影響透鏡形狀的好壞，必須經由實驗來調整 IGZO 的阻值至適當之大小，一般製程上調控 IGZO 阻值的方法有兩種，可藉由在鍍膜製程中控制通氧量或在成膜後退火來控制 IGZO 之阻值，而本研究為使用退火的方式來控制阻值。之後將其 IGZO 使用在主動式液晶透鏡元件中，來量

測其主動元件之 $I-V$ 曲線，將可由此判斷半導體層導電程度或等效電阻率的改變程度，得到其等效電阻率之可調控範圍，如圖四所示。經過 350°C 退火後，中間之閘極電壓可藉由控制電壓從 0 伏特到 30 伏特，在兩旁邊緣電極間有 5 伏特壓差之情況下，使其之間的電流值從 10^{-11} 安培變化到 10^{-5} 安培，由此可知，此設計可以有效的控制主動層之等效電阻值，未來將會使用此主動元件結合液晶材料，製作成主動式液晶透鏡來量測所形成變焦透鏡之可調焦距範圍與其透鏡形狀及曲率。



圖四 主動式電壓漸變式液晶透鏡(GDLC-lens)之 $I-V$ curve 於 (a)經過 350°C annealing 後; (b)經過 400°C annealing 後。

環狀液晶透鏡陣列分為兩種設計，如下圖五所示，亦即透明驅動電極設置於玻璃基板外側，擁有較佳的光學品質，但是驅動電壓較高($\sim 40\text{Volts}$) 的結構；以及將透明驅動電極設置於玻璃基板內側，利用高阻值材料 IGZO 使電場平滑化的結構，其具有驅動電壓較小($\sim 2.5\text{Volts}$)的優點，但同時有擴散電場(fringe field)分布較不容易控制，製程良率較低等問題。環狀透鏡陣列結構如圖五(a)所示，各個單元透鏡(elemental lens)的驅動電極彼此獨立，因此可以任意開關數個單元透鏡，也可以令每一個單元透鏡都操作在不同電壓之下，擁有不同的焦距。



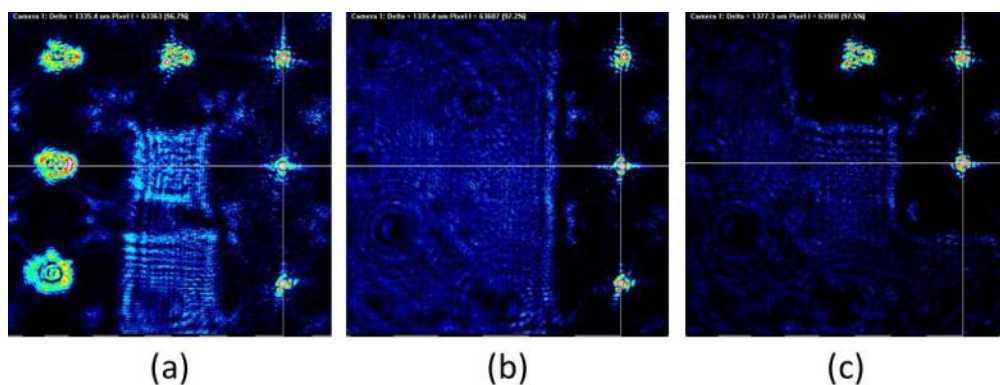
圖五、環狀液晶透鏡陣列之驅動電極設置於(a)玻璃基板內側和 (b)玻璃基板外側。

然而在驅動電極設置於玻璃基板內側的結構中，驅動電極直接接觸液晶層，使得各個單元透鏡之間的電場會嚴重地互相干擾。如圖六所示，相較於單一透鏡的實

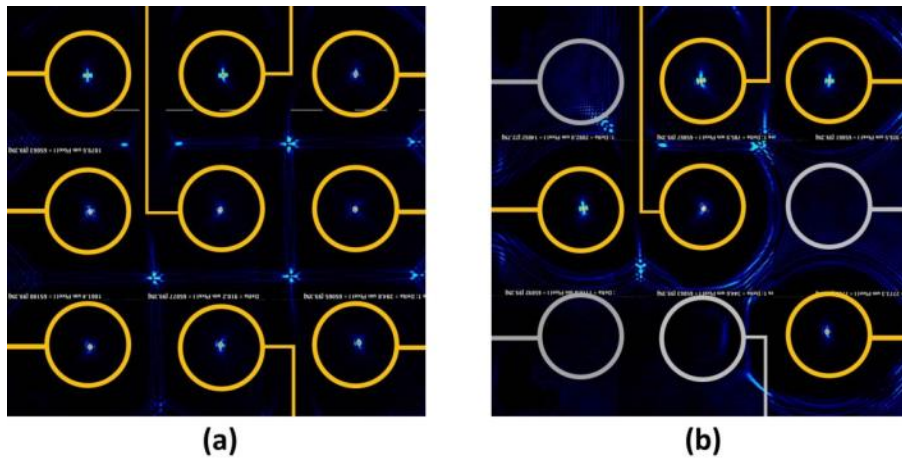
驗結果，可以明顯看出液晶透鏡陣列的聚焦能力較差，光學品質也不如單透鏡的結構。這樣的現象，推測是因為相鄰的數個液晶透鏡同時驅動時，來自周圍單元透鏡的擴散電場，會破壞原本平滑的電場分布，導致液晶分子排列混亂，進而影響透鏡的聚焦能力。如圖六(b)所示，當邊緣同一列的三個透鏡同時驅動時，中央的透鏡與兩側的透鏡聚焦狀況並不一致。儘管如此，我們依然證明了獨立驅動的液晶透鏡陣列結構是可行的。

為了降低擴散電場對液晶排列的影響，我們將驅動電極設計在玻璃基板外側，如圖五(b)所示，並且將單元透鏡之間間距增大為 1mm。其聚焦之光強度分布，如圖七所示，驅動電極設置在基板外側的透鏡陣列，聚焦能力與光學品質皆明顯優於電極設置於基板內側的透鏡陣列。然而如圖七(a)所示，在各個環狀透鏡的間隙處，會有光線聚焦的現象。進一步分析相位變化條紋(Fringe Pattern)後發現，在環狀透鏡間隙處的光程長度(optical path length, OPL)呈現菱形的階梯狀變化，如圖八(a)所示，造成了類似透鏡的效果，導致光線匯聚。儘管環形驅動電極與液晶層之間，間隔了 550um 的玻璃基板，擴散電場仍然在液晶層中形成了隨著遠離環形驅動電極而漸變的電位差，如圖九所示，導致液晶分子的分布不如預期平滑。

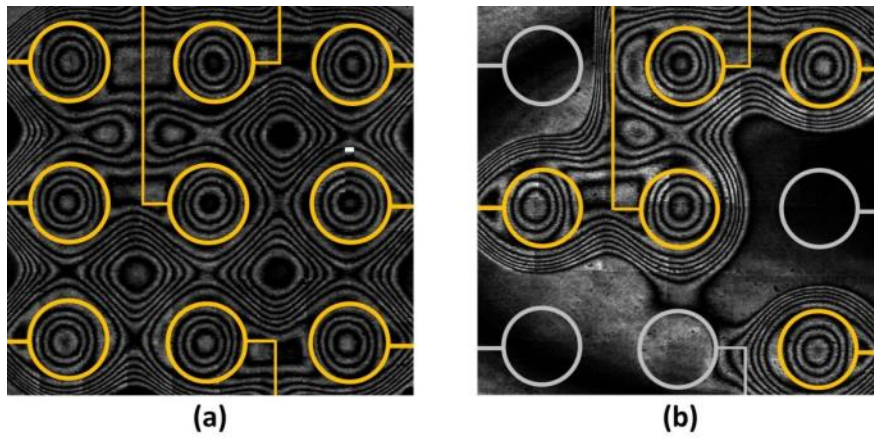
但是在驅動電極導線經過的區域，相位變化條紋卻沒有形成菱形的階梯狀分布，如圖八(a)左上角所示。換言之，導線上的高電位在液晶層中產生了另類的屏障效應，液晶分子不會在環狀電極的間隙處形成類似透鏡的漸變排列。下一步實驗，將會在基板內側加入縱橫排列的透明 ITO 電極，如圖八所示，在各單元透鏡之間建立屏障層，藉此隔絕單元透鏡的擴散電場互相干擾的問題。



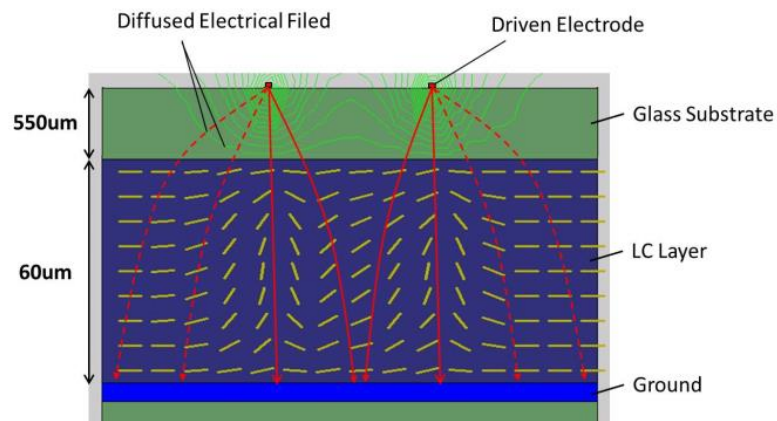
圖六、獨立驅動之環狀液晶透鏡陣列聚焦光強度圖：(a)全部驅動，(b)驅動單列，(c)部分驅動。



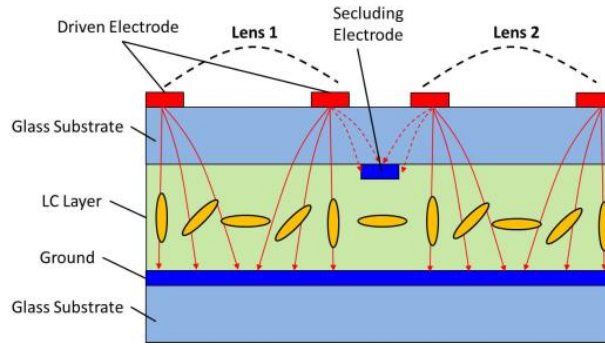
圖七、液晶透鏡陣列聚焦光強度圖，(a)全部驅動，(b)部分驅動。



圖八、液晶透鏡陣列相位變化圖，(a)全部驅動，(b)部分驅動。

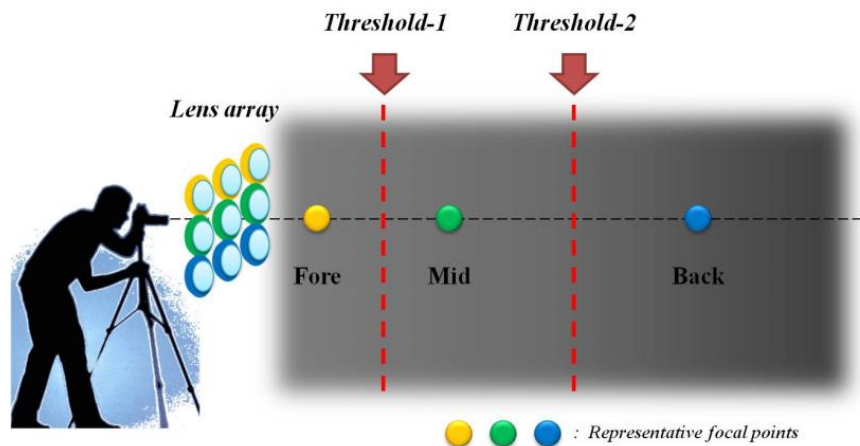


圖九、基板外側之驅動電極，產生擴散電場(diffused electric field)，影響鄰近的液晶分子排列。

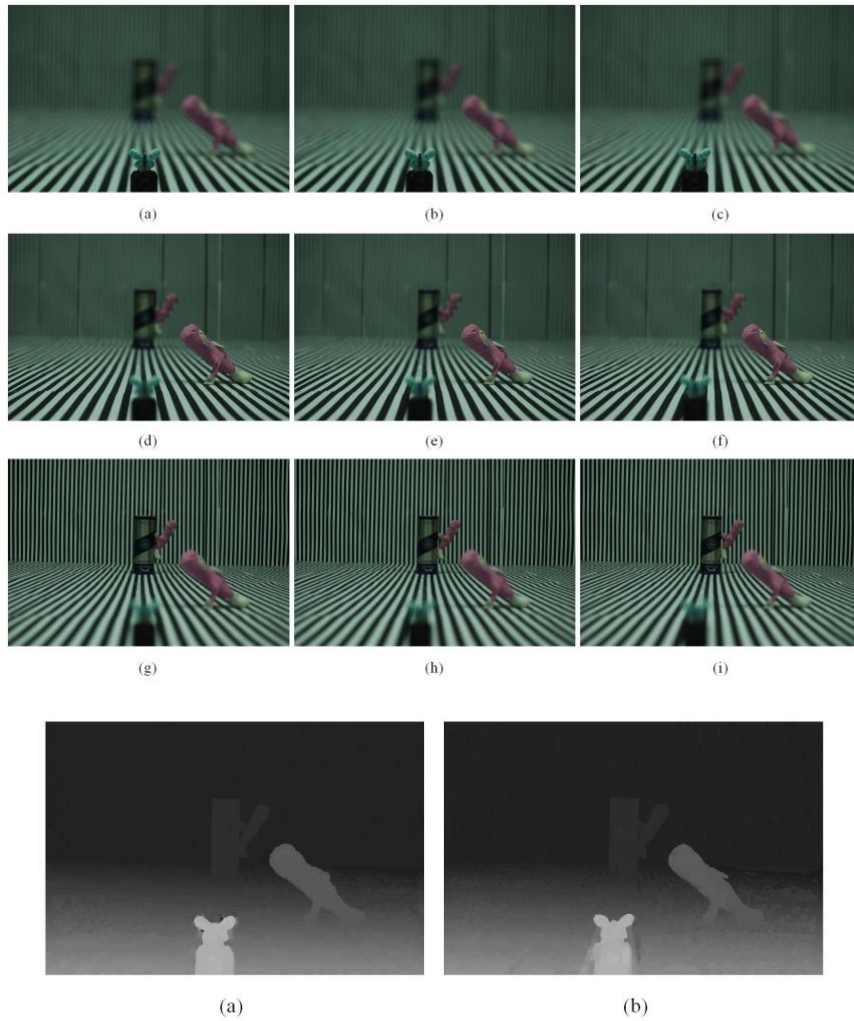


圖十、利用隔絕電極，阻隔擴散電場對鄰近液晶透鏡之影響。

在環狀液晶透鏡陣列中，每一個單元透鏡都擁有不同的焦距，可以聚焦在不同深度的物體上。利用此一特性，我們可以拍攝高動態深度範圍(high dynamic depth range, HDDR)的立體影像深度圖。如下圖十一所示，上排的三个透鏡聚焦於遠處的物體，下排的三个透鏡則聚焦於近處的物體，分別拍攝左、中、右三個方向的影像，並且利用影像的相對位置差異(disparity)，計算出物體的深度。由於透鏡的相對位置，以及聚焦平面位置皆已知，我們可以利用演算法將兩組深度圖，融合為一張同時具有近景與遠景的深度圖。如同高動態對比(HDR)相機的拍攝方式，HDDR 演算法可以克服相機的景深(DoF)範圍限制，無限制的延展立體影像拍攝範圍。而環狀之液晶透鏡陣列，則可以提供體積較小(<10mm)，以及一次性拍攝(single shot)的優點。此處我們使用一般相機，配合時序性的移動，以及焦距的變換，模擬獨立驅動之液晶透鏡陣列應用於高動態深度範圍的立體影像深度圖之擷取，如下圖十二所示。

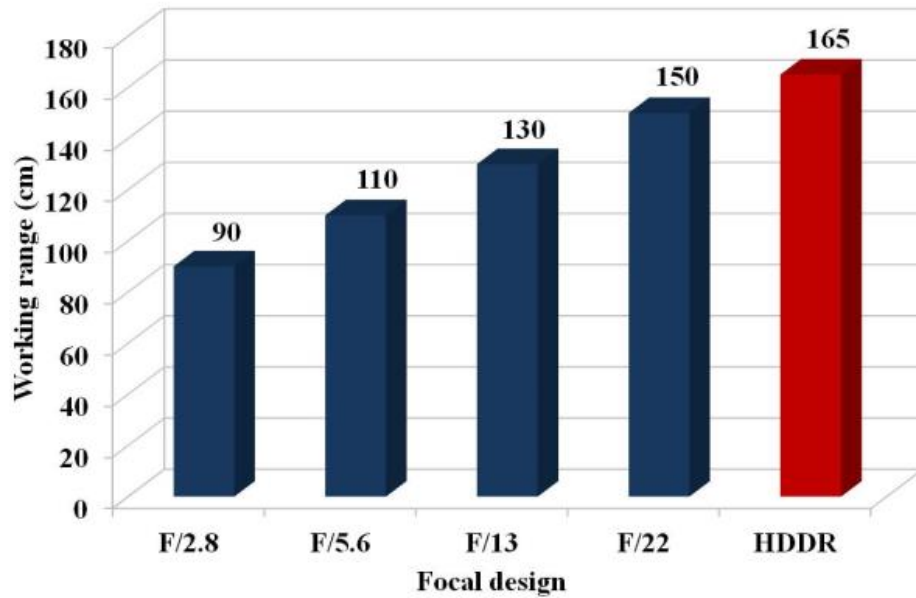


圖十一、利用透鏡陣列拍攝高動態深度範圍之立體影像。

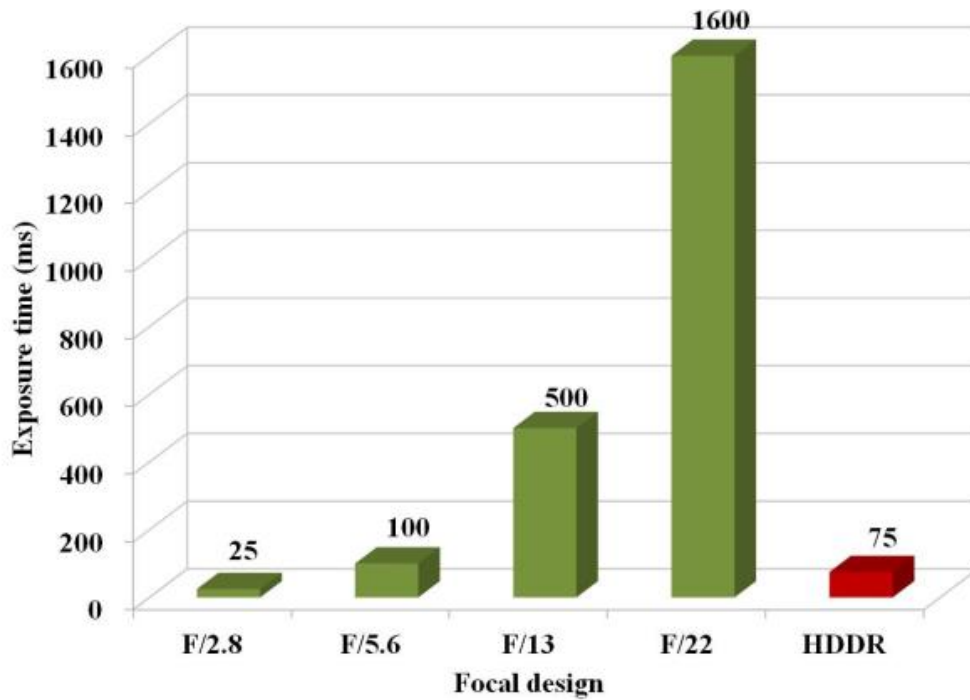


圖十二、立體物件深度圖(a)聚焦在前景，遠處物體的錯誤率較高，(b)聚焦在後景，近處物體的錯誤率較高，(c)高動態深度範圍(HDDR)剔除錯誤率較高的區域，保留並融合正確的深度資訊。

本研究所提出的透鏡陣列式高動態深度範圍系統(HDDR)不僅提供了更廣的深度範圍(165cm)，並且也同時縮短了至少 21 倍的曝光時間。而這樣的特性可以使得我們可以擷取快速移動的物體，卻不受一般相機大光圈的淺景深所限制，而且可以進一步應用於高解析度顯微系統影像擷取。



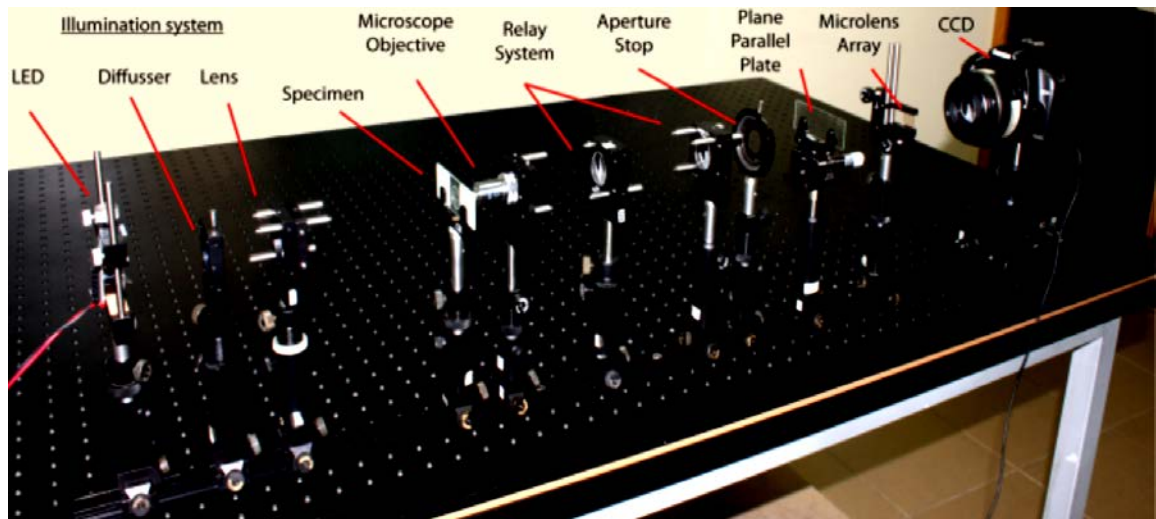
(a)



(b)

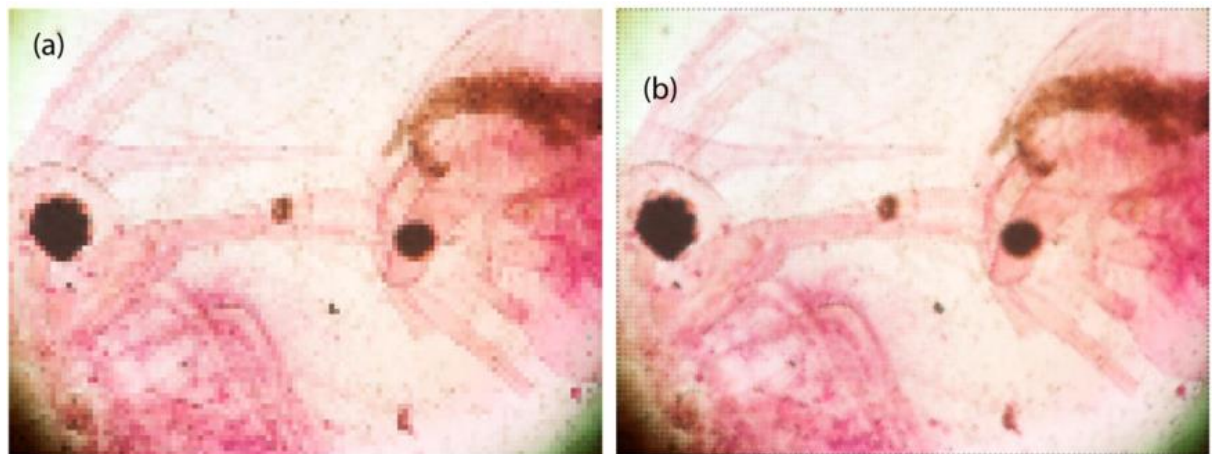
圖十二、立體物件深度圖(a)聚焦在前景，遠處物體的錯誤率較高，(b)聚焦在後景，近處物體的錯誤率較高，(c)高動態深度範圍(HDDR)剔除錯誤率較高的區域，保留並融合正確的深度資訊。

現行 3 維立體顯微系統主要可簡單分為全像以及光場影像等兩大類，本次的研究則是藉由先前所建立的元件與演算法，進一步的將液晶透鏡陣列應用於光場影像之立體顯微系統，來提高其影像解析度。所架設的立體顯微系統如圖十三所示。



圖十三 應用液晶透鏡陣列於光場立體顯微系統之架設圖

因為液晶透鏡陣列可利用電子式切換焦距，並執行 2D/3D 切換之功能，因此可動態的對影像進行調整，以達到最佳的成像品質；圖十四(a)是使用一般固定是透鏡陣列，而(b)則是使用液晶透鏡陣列之影像，很明顯的可以看到(b)圖中的影像解析度確實較(a)所提升；而雖然目前仍受限於液晶反應時間的問題，仍無法完成高解析度、長景深的即時動態擷取，但於本研究中已成功地整合元件、演算法與光學系統，完成初步的目標，因此可期待未來將有更多的應用價值。



圖十四 實際生物影像拍攝結果。(a)一般傳統透鏡陣列與(b)應用液晶透鏡陣列於光場立體顯微系統之高解析度影像。

於此計畫中共同發表之 SCI 期刊論文 (3 篇已獲接受或刊登)

1. Chih-Wei Chen, **Yi-Pai Huang**, Myungjin Cho, and **Bahram Javidi**, "Extended Field of View of Integral Imaging System Using Electronically Controlled Liquid Crystal Prism", Accepted by IEEE/OSA Jol. of Display Tech. (2013/08)

2. Guo-Zhen Wang, **Yi-Pai Huang**, and **Tsu-Han Chen**, “Bare Finger 3D Air-Touch System Using an Embedded Optical Sensor Array for Mobile Displays”, EARLY ACCESS ARTICLES by IEEE/OSA Jol. of Display Tech. (2013/08)
3. **Yi-Pai Huang**, Guo-Zhen Wang, Shu-Yi Huang, and **Tsu-Han Chen**, “Three-dimensional Virtual Touch Display with Multi-mark Algorithm for Multi-user Applications”, IEEE/OSA Jol. of Display Tech., Vol. 9, No. 11, pp.921 – 928 (2013/11)

三、心得及建議

本次出國行程主要是在 Cornell 陳祖翰教授 以及 UConn. Prof. Javidi 的實驗室進行 3D 顯微光學系統的生醫相關研究，為期約一個月，除進行研究與意見交流，並實際與此兩間國際頂尖實驗室的團隊成員討論合作的實際進行步驟，收穫良多。

這次的合作研究也讓本團隊從原先的消費性電子元件與系統，進一步的跨足到生醫光電與影像的研究領域，也讓液晶元件的應用可以更加的多元，不須僅只於顯示器上。

從三方的合作中，也都可看出兩位國際級教授不吝於分享且熱衷於研究討論的態度，在去年與 Cornell 的合作中，衍生了 X 光相關的研究課題，目前也已完成一篇碩士論文；在今年加入了 Prof. Javidi 於生醫光學方面的專長，便初步完成了 3D 顯微系統的研究，也同時衍生出將此構想再深入應用於 3D 內視鏡上，在此非常感謝百大國際合作計畫的支持，才能有如此正向循環的合作機制，也因此建議這類計畫可以繼續維持，以提供更多的國際合作與交流。