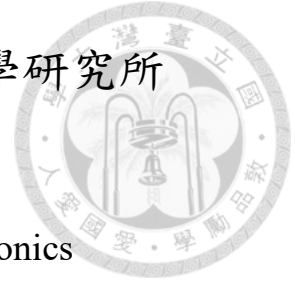


國立臺灣大學電機資訊學院光電工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics  
College of Electrical Engineering and Computer Science  
National Taiwan University  
Master Thesis



透明有機發光二極體螢幕之後景影像繞射演算與評估  
Evaluation of background image quality through  
transparent OLED degraded by diffraction effect

程啟瑞

Chi-Jui Cheng

指導教授：林晃巖 博士

Advisor: Hoang-Yan Lin, Ph.D.

中華民國 108 年 7 月

July 2019

## 致謝



能完成這篇碩士論文，首先要感謝我的指導教授林晃巖博士，謝謝老師當初讓我加入這個實驗室大家庭，並且在我的研究出現瓶頸與困難時能給予我重要的建議與幫助，同時也感謝擔任口試委員的黃定洧教授與陳鵬聿經理給予我研究上的寶貴建議。

感謝立人學長，在我兩年的研究所生涯中提點了許多，幫助我克服種種難關，我永遠記得整天跑去找學長問問題的那段日子，謝謝我的碩士班同學旻謙、盧奕和冠好，與我一起奮鬥了兩年，很高興大家能夠一起畢業，大家辛苦了，謝謝我的碩士班學長姐亦騰、明宇、雯婷、鼎盛，在我碩一時幫助我適應、融入這個實驗室，大家一起奮鬥一起努力，以及週末大家相約出去玩的快樂時光都是我最寶貴的回憶，謝謝亦均學長為實驗室的貢獻，畢業後仍是實驗室大家的好榜樣，謝謝智皓學長研究上的幫助，在出國參加研討會時提供許多的經驗與指教，也祝福碩士班學弟妹們嶸捷、李曜、韋成、昕好、彥文，實驗室的生活或許會遇到許多難關，但彼此互相扶持與鼓勵，努力過後的成果是相當有意義的事情。

最後，感謝我的家人，讓我能夠無牽無掛的投入學習與研究，最後完成學業，謝謝我的女友阿皮，陪伴我在碩士的兩年中遇到的每一次困難，給予我鼓勵與打氣，陪我度過任何難關，謹以本篇論文獻給你們。

## 摘要

隨著人們的生活水準與質量越來越高，對於顯示器的要求更是與時俱增。透明顯示器技術作為新型顯示器技術，有著相當龐大的應用前景。透明顯示器的特色在於讓使用者能夠在觀看顯示器的內容的同時，也能夠觀看到顯示器背後所展示的事物，在應用方面，在展場做為展示櫃、汽車使用的 HUD 抬頭顯示器 (head up display) ，或者搭配智慧顯示及觸控技術，能夠使用在冰箱、水族箱等生活家電，可以實現比一般顯示器更強的互動感與使用感。

目前常見的透明顯示器為 OLED 透明顯示器，設計原理是將畫素集中排列，而沒有畫素的部分使用透明材料，使觀看者可以透過顯示器觀看到顯示器後的影像。由於每個透明區域的面積都很小，因此光通過顯示器時會出現光的繞射現象，導致後景影像的影像品質下降。論文的目標是建立一個演算法，經由數學軟體即能夠快速且精確的演算出後景影像在經過透明顯示器後的成像結果與品質的評估，進而使用此演算法來開發出新型的透明顯示器，以減少繞射現象對後景影像的影響。

## ABSTRACT

Recently, transparent organic light-emitting diode (TOLED) display has presented itself to be a new choice in display technologies. As such, the research and development of TOLED is gradually seeing more focus in present display related fields. With transparent display technology, one can accomplish tasks which ordinary display technology cannot complete alone. While watching the contents of the display panel, contents behind the display can be seen as well. In terms of application, TOLED can be used as a head up display, or can be used in refrigerators, aquariums and other household appliances with touch technology, which can achieve more interactivity than general displays.

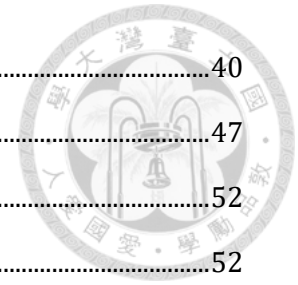
One of the most common transparent display is the OLED transparent display. The design principle is to concentrate the pixels in a certain area, and the areas without pixels are made to be the transparent part of the display. However due to the periodic nature of the display structure, diffraction phenomenon occurs as light passes through the panel, causing the blur in the background image. The aim of this work, therefore, is to develop a method to quickly and accurately evaluate the influence on the background image caused by the transparent display, as a transfer function acting on the background image, to assist in further optimization of the display structure.

## 目錄



致謝 .....	i
摘要 .....	ii
ABSTRACT .....	iii
目錄 .....	iv
圖目錄 .....	vi
第一章 緒論 .....	1
1-1 透明顯示器概論 .....	1
1-2 透明顯示器的分類 .....	2
1-2-1 非自發光透明顯示器 .....	2
1-2-2 自發光透明顯示器 .....	5
1-3 論文架構 .....	7
第二章 模擬原理與方法 .....	9
2-1 MATLAB .....	9
2-2 點擴散函數 .....	9
2-3 蒙地卡羅方法 .....	12
2-4 傅立葉轉換 .....	13
2-5 菲涅爾繞射 .....	15
第三章 面板實驗與傳遞函數 .....	20
3-1 研究目的與總述 .....	21
3-2 面板實驗介紹 .....	22
3-2-1 實驗架構 .....	22
3-2-2 實驗結果 .....	23
3-3 曲線擬合 (Curve Fitting) .....	27
3-4 傳遞函數 (Transfer Function) .....	32
3-5 傳遞函數演算程序 .....	33
3-6 傳遞函數演算成果 .....	36

3-7 方波調制-捲積.....	40
3-8 方波調制-亂數.....	47
第四章 透明顯示器的成像演算.....	52
4-1 研究目的與總述.....	52
4-2 成像演算程序.....	52
4-3 成像演算成果.....	58
第五章 結論與未來展望.....	61
參考文獻.....	66



## 圖目錄

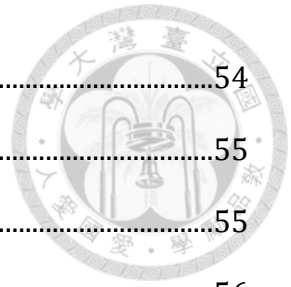


圖 1-1 顯示器技術的發展 .....	1
圖 1-2 電致變色透明顯示器 .....	4
圖 1-3 奈米顆粒散射透明顯示器示意圖.....	5
圖 2-1 MATLAB 使用者介面.....	9
圖 2-2 點擴散函數與點光源之捲積示意圖.....	11
圖 2-3 局部最小值與全域最小值之演算法示意圖 .....	13
圖 2-4 菲涅爾繞射之繞射面與觀察面示意圖.....	16
圖 3-1 人眼觀看透明顯示器之示意圖 .....	20
圖 3-2 人眼觀看透明顯示器之影像示意圖.....	21
圖 3-3 透明顯示器之結構示意圖 .....	22
圖 3-4 面板實驗之結構圖 .....	23
圖 3-5 透明顯示器之結構示意圖.....	23
圖 3-6 面板實驗之實驗拍攝結果.....	24
圖 3-7 面板實驗 Case1 結果之 x 方向截面.....	25
圖 3-8 面板實驗 Case1 結果之 y 方向截面.....	25
圖 3-9 面板實驗 Case2 結果之 x 方向截面.....	26
圖 3-10 面板實驗 Case2 結果之 y 方向截面 .....	26
圖 3-11 曲線擬合程序之流程圖 .....	29
圖 3-12 無透明顯示器的情況下，曲線擬合之結果.....	30
圖 3-13 有透明顯示器的情況下，曲線擬合之結果 (僅取零階繞射強度) .....	30
圖 3-14 曲線擬合之結果 x 方向 .....	31
圖 3-15 曲線擬合之結果 y 方向.....	31

圖 3-16 曲線擬合與面板實驗結果之比較圖，左圖為面板實驗之結果，右圖為曲線擬合之結果 .....	32
圖 3-17 傳遞函數之示意圖.....	33
圖 3-18 傳遞函數之流程圖.....	35
圖 3-19 面板實驗之二維結果.....	37
圖 3-20 傳遞函數演算之二維結果 .....	37
圖 3-21 傳遞函數演算之結果 x 方向截面疊圖.....	38
圖 3-22 傳遞函數演算之結果 y 方向截面疊圖.....	38
圖 3-23 演算之傳遞函數結果.....	39
圖 3-24 方波示意圖.....	41
圖 3-25 方波調制之捲積方法示意圖 .....	42
圖 3-26 捲積方法方波調制之示意圖 .....	43
圖 3-27 面板實驗之二維結果.....	44
圖 3-28 方波調制後的模擬結果.....	44
圖 3-29 面板實驗與模擬結果之 x 方向切面疊圖.....	45
圖 3-30 面板實驗與模擬結果之 y 方向切面疊圖.....	45
圖 3-31 經過方波調制後的傳遞函數結果.....	46
圖 3-32 亂數方法之方波調制示意圖 .....	47
圖 3-33 亂數方法之方波調制流程圖 .....	48
圖 3-34 面板實驗之二維結果.....	49
圖 3-35 方波調制後的模擬結果.....	49
圖 3-36 面板實驗與模擬結果之 x 方向切面疊圖.....	50
圖 3-37 面板實驗與模擬結果.....	50
圖 3-38 經過方波調制後的傳遞函數結果.....	51



圖 4-1 成像演算之流程圖 .....	54
圖 4-2 成像演算之球面波圖 .....	55
圖 4-3 成像演算之週期結構圖.....	55
圖 4-4 成像演算之週期結構放大圖 .....	56
圖 4-5 成像演算之繞射結果圖.....	56
圖 4-6 成像演算之繞射結果放大圖 .....	57
圖 4-7 成像演算之相機光圈圖.....	57
圖 4-8 成像演算之繞射光通過相機光圈圖.....	58
圖 4-9 成像演算之演算結果 x 方向切面圖 .....	59
圖 4-10 面板實驗結果圖 .....	59
圖 4-11 成像演算之演算結果圖 .....	60
圖 5-1 優化後的透明顯示器結構設計 .....	63
圖 5-2 演算過程中結構的穿透率變化 .....	63
圖 5-3 演算過程中結構的繞射強度比變化.....	64
圖 5-4 未經過優化演算的 x 方向強度切面.....	64
圖 5-5 經過優化演算的中心 x 方向強度切面 .....	65



# 第一章 緒論




至今，人們從對於傳遞訊息、分享生活中大小事物的重要，甚至到現在的商業運作與生活娛樂，顯示技術有著不可沒的貢獻，隨著人們對於顯示器需求的逐日增長，使得顯示器技術在近代得以快速成長，如下圖所示，顯示器技術最早在1897年就被發明，由德國物理學家卡爾·布勞恩 (Karl Ferdinand Braun) 發明了第一個陰極射線管，並使得人們在1920年製造出了人類第一部黑白電視機，也代表著顯示器的誕生，到了1953年，首台彩色電視機在美國問世。1990年，顯示器的技術又獲得了飛越性的成長，高畫質顯示器誕生。有了高畫質顯示器，顯示器的研究方向開始逐步的往各種領域發展，例如3D顯示器、曲面顯示器甚至電子紙等等，為了使顯示器能夠適應各種各樣的狀況，顯示器種類變得多彩多姿，其中透明顯示器更是熱門的領域之一。



圖 1-1 顯示器技術的發展

## 1-1 透明顯示器概論

隨著人們的生活水準與質量越來越高，對於顯示器的要求更是與時俱增。透明顯示器技術作為新型顯示器技術，有著相當龐大的應用前景。透明顯示器的特色在於讓使用者能夠在觀看顯示器的內容的同時，也能夠觀看到顯示器背後所展示的事物，在應用方面，在展場做為展示櫃、汽車使用的 HUD 抬頭顯示器



(head up display) ，或者搭配智慧顯示及觸控技術，能夠使用在冰箱、水族箱等生活家電，可以實現比一般顯示器更強的互動感與使用感。因此，在現在的顯示器市場上，透明顯示器獲得了越來越高的關注，相關的研究與開發更是日益劇增[1]。美國市場調研機構 Display Bank 在其發表的「透明顯示器技術與市場展望 (Transparent Display Technology and Market Forecast)」中指出[2]，在未來 2025 年，透明顯示器的市場規模可以到達 11.7 億台，產值約 872 億美元，是個十分龐大的前景。

## 1-2 透明顯示器的分類

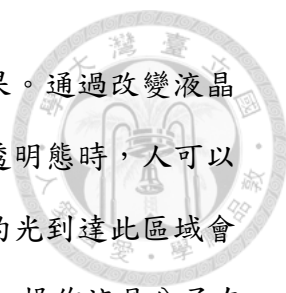
近年來，顯示器技術研究人員針對透明顯示器進行了大量研究工作。目前的透明顯示器可以根據顯示器類型的不同，主要分成兩種類別，首先第一種是非自發光透明顯示器，顯示器本身不能發光，需要外界光或環境光輔助才能做到透明顯示的功能。第二種是顯示器本身可以自主發光，可以在顯示器上自主顯示特定信息，需要採用透明度高的材料、提高顯示器整體透明度來實現透明顯示的效果。

### 1-2-1 非自發光透明顯示器

非自發光透明顯示器主要分為以下幾種：LCD 透明顯示技術、電致變色透明顯示技術、肥皂泡薄膜透明顯示技術以及奈米顆粒散射透明顯示技術。

#### a. 液晶顯示 (Liquid Crystal Display, LCD) 透明顯示技術

液晶顯示器為平面薄型的顯示裝置，由一定數量的彩色或黑白畫素所組成，放置于光源或者反面前方。液晶顯示器功耗較低，因此備受工程師青睞，適用於使用電池的電子設備。液晶顯示器可以達到透射顯示，亦可以反射顯示。



LCD 透明顯示技術使用液晶材料的特性實現透明顯示之效果。通過改變液晶排列方式，使螢幕分為散射態區域和透明態區域。當面板處於透明態時，人可以透過面板看到面板後方的物體。當面板處於散射態時，面板後的光到達此區域會發生散射，使得人眼無法清楚地觀看面板後面的物體[3]。所以，操作液晶分子在適當的區域排列成適當的形狀，便可以實現透明顯示。2010 年，夏普公司一個實驗小組製作了一個 60 吋的，由上述原理製造出的透明顯示器面板[3]。但若不使用其他方法，只能使顯示器顯示黑白兩色，若想要產生彩色圖像，傳統液晶顯示技術主要使用以下三種方法。一、使用紅、綠、藍三種顏色的濾色片；二、加入二色性 (dichroism) 的染料；三、使用背光源顏色高速變化的場序模式。但上述這三種方式均不適合透明顯示面板，因此這個實驗小組選擇了直接將彩色圖案投影到顯示幕上的方式產生彩色圖像。

由於液晶的特性，實現透明顯示並不困難，但是傳統背光源無法應用在這種技術上，因此需要依靠外界光或者增加導光板。若可以解決光源問題，液晶透明顯示技術會有很大的發展空間。

#### b. 電致變色透明顯示技術

電致變色是材料的光學特性 (反射率、穿透率、吸收率等) 在外加電場的作用下發生穩定且可逆的顏色變化的現象，在外觀上表現為顏色和透明度的可逆變化。具有電致變色性能的材料稱為電致變色材料，用電致變色材料做成的器件稱為電致變色器件。電致變色材料具有雙穩態 (bi-stable) 的性能，用電致變色材料做成的電致變色顯示器件不僅不需要背光燈，而且顯示靜態圖像時，只要顯示內容不變化，就不會耗電，達到節能的目的。電致變色顯示器與其它顯示器相比具有無視線死角、對比度高等優點。

2011 年，Yi-Wen Chung 和 Ai-Kang Li 等人開發出一種利用電致變色材料達到透明顯示效果的透明顯示屏[4]。首先利用乳化劑將分散的單聚苯乙烯微粒聚集，並使其堆積成膠狀晶體，最後將電致變色材料填充進晶體縫隙。向此晶體層

施加不同的電壓時，會顯示不同的顏色。-3V 時是紅色，1V 時是藍色，3.5V 時是綠色，當電壓為-4V 時該螢幕變為透明。此顯示技術可以有效阻擋陽光，因此在建築外牆和戶外範圍內使用具有較大前景。



圖 1-2 電致變色透明顯示器

#### c. 超薄薄膜透明顯示技術

2012 年，日本東京大學、築波大學和美國卡耐基-梅隆大學共同研發出超薄薄膜透明顯示屏，這種顯示螢幕的厚度僅為  $0.7 \mu\text{m}$ 。[5]

此技術使用了兩種膠裝液體的混合液，製作出一種超薄且具有柔性的螢幕。這種螢幕可以在超聲波的作用下顯示出圖像的不同質感，比如更平滑或是更粗糙。同時這個顯示幕還可以通過改變聲波的頻率改變投射在它上面影響的透明度，甚至可以將多個薄膜拼接在一起，實現立體效果。由於使用的材質特殊，這個肥皂泡並不需要擔心破損，即使有很尖銳的物體從它中間穿過，也不會導致薄膜爆裂。這種薄膜顯示技術適用於博物館及藝術家展示等場合。

#### d. 奈米顆粒散射透明顯示技術

2014 年，麻省理工、哈佛大學和美國愛德伍德生物化學研究中心 (U.S Army Edgewood Chemical Biological Center) 共同研發一種利用在透明介質中嵌入奈米粒子的技術來實現透明顯示[6]。研究人員在透明介質中嵌入可以散射特定波長的



奈米粒子，當此波長的光入射進顯示螢幕，會發生散射，而其他波長的光不受影響，以此實現透明顯示的目的。

當紅光穿透時，摻雜的粒子並不會影響光的穿透，紅光可以沒有阻礙的穿過顯示螢幕。當藍光穿透時，摻雜的粒子會使藍光散射，產生透明顯示效果。當在顯示器中按照一定比例摻雜可以反射出不同波長光線的粒子，便可以達到彩色顯示的效果。

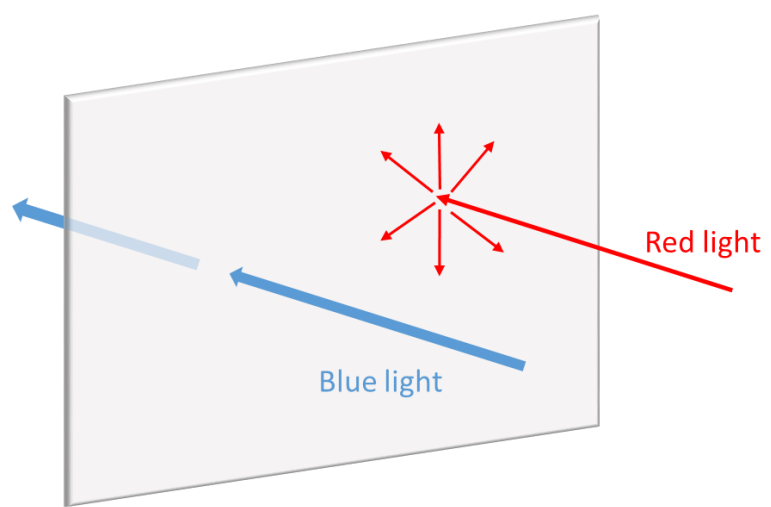


圖 1-3 奈米顆粒散射透明顯示器示意圖

### 1-2-2 自發光透明顯示器

自發光透明顯示器則分為 OLED 透明顯示技術和 PDP 透明顯示技術兩種。

a. 有機發光二級體 (Organic Light-Emitting Diode ,OLED) 透明顯示技術  
OLED 具有高亮度、高對比、無視角限制主動發光等優點[7]，並且 OLED 的結構較為適合作為透明顯示器，因此目前的透明顯示器領域，OLED 透明顯示是研究重點[8]。

對於 AMOLED 而言，想要實現透明顯示，需要解決兩個關鍵問題，即面板的透明度和穩定性。目前想要增加透明結構主要有兩種方法，一種是改變電極結構



本身，使用透明材料製作電極；第二種是改變電極排列，使電極集中於一個區域，其他區域使用透明材料，提高透明顯示的效果。

想要改變電極結構本身，現在主要使用兩種方法。第一種是採用上發光結構，第二種是使用銀材料作為陰極電極。不過第一種會導致面板亮度不均勻，第二種要考慮熱不穩定性。在 2010 年時，韓國大田一個研究小組提出了一種新型結構[9]，將 AMOLED 面板的透明度提高了 80%。2011 年，北京清華大學也提出了另一種 OLED 透明顯示板[10]。


2010 年，Jinkoo Chung 在 SID 會議上提出了基於下發光的透明顯示器技術[11]。在這種技術中，發光區域和投射區域分開排列。為提高面板透明度及成像效果，透明部分面積越大越好。Young W. Song 同樣提出了一種基於低溫多晶矽的透明顯示器，此顯示器具有較寬的色彩範圍、高亮度和高透明度，可以滿足日常生活的需求[12]。

#### b. 電漿顯示 (Plasma Display Panel, PDP) 透明顯示技術

電漿顯示器又稱為電漿顯示幕，是一種平面顯示螢幕，光線由兩塊玻璃之間的離子，射向磷質而發出。與液晶顯示器不同，放出的氣體並無水銀成份，而是使用氖氣及氙氣混合而成，這種氣體是無害氣體。

電漿顯示器為高亮度顯示，其亮度達 1000 lux 以上，可顯示更多種顏色，也可製造出較大面積的顯示螢幕，最大對角可達 381 mm (150 吋)。等離子顯示螢幕的對比度亦高，可製造出全黑效果，對觀看電影尤其適合。螢幕厚度僅 6 mm，連同其他電路板，厚度亦只有 10 mm。

電漿的發光原理是在真空玻璃管中注入惰性氣體或水銀蒸氣，加電壓之後，使氣體產生等離子效應，放出紫外線，激發螢光粉而產生可見光，利用激發時間的長短來產生不同的亮度。電漿顯示器中，每一個像素都是三個不同顏色 (三原色) 的等離子發光體所產生的。由於是每個獨立的發光體在同一時間一次點亮的，所以觀看體驗特別清晰鮮明。



PDP 顯示技術的製作工藝和結構簡單、不需要 TFT 作電路驅動，想要實現 PDP 結構的透明顯示，只需將傳統 PDP 結構中不透明的部分換為透明的部分即可。而且傳統 PDP 結構中介質層和玻璃基板本身就為透明，因此提高這些部分的透明度，就可以改善透明顯示器的顯示效果。因此，PDP 技術被認為是最適合製造大尺寸透明顯示器的技術。

2011 年，韓國大田大學研製出一種 PDP 透明顯示螢幕，該透明顯示器使用了透明度很好的絕緣層，使該顯示器的透明度接近 63%，而且此透明顯示幕使用的是傳統電路進行驅動，因此後續會將它應用於螢光粉的研究[13]。2012 年他們又對此顯示器進行了改良，使其在彎曲一定角度的情況下依然可以正常工作 [14]。

### 1-3 論文架構

論文的目標是建立一個演算法，經由數學軟體即能夠快速且精確的演算出後景影像在經過透明顯示器後的成像結果與品質的評估，進而使用此演算法來開發出新型的透明顯示器，以減少繞射現象對後景影像的影響。論文首先由一個面板實驗出發，為了能夠驗證演算法的正確性，故設計一面板實驗，來取得在有無透明顯示器的情況下，相機或人眼所觀察到的畫面狀況，有了這份數據後，便開始將數據導入演算軟體進行分析，但在開始分析前發現，所拍到的實驗結果有出現過度曝光的情況，所以，在真正進入分析之前，先進行了「曲線擬合」的動作，來彌補遺失的過度曝光強度。

有了面板實驗數據後，下一步即是藉由數學軟體探討「傳遞函數」，其中「傳遞函數」指的是點光源在經由透明顯示器後，因為繞射現象使得光路曲折，使得拍到的影像由一光點轉變成十字光點分佈的過程，中間的數學關係在本文中命名為「傳遞函數」。在完成此步驟後，會發現到傳遞函數的結果雖然部份合乎



實驗結果，但仍有些許誤差，故在演算過程中多加了些步驟來校正模擬結果的準確性，而此步驟即為「方波調制」，經過方波調制的程序後，演算結果也就與實驗結果有了極大的相似度，也就確認了此演算法的可能性，藉此有了下一步的程序開發。

在確認了面板實驗與傳遞函數的程序可行性之後，接下來要進行的是不再依靠面板實驗的結果，而是完全依靠數學的方式，再帶入所需的參數，例如透明顯示器的結構參數、後景與透明顯示器的距離以及透明顯示器與人眼的距離等等，就可以計算出人眼所觀察到的後景影像狀況，進而評估透明顯示器對後景影像的影響，未來有了這項技術，就可以運用此成像演算，快速且精確的計算出後景影像，對於將來透明顯示器的結構優化與改良將帶來極大的便利性。

藉由上述提及的成像演算法，在論文的最後提供了幾種能夠降低繞射現象的方法供參考，在光學的領域裡，當光通過尺寸小於入射光波長的孔徑後，無可厚非的會出現繞射現象，故如何降低繞射現象所帶來的後景影響是研發透明顯示器的一大學問。

## 第二章 模擬原理與方法



### 2-1 MATLAB

在此論文中，處理了大量的數學運算、數據分析、圖像處理以及演算法開發等等作業，而這些作業主要是由商業數學軟體 MATLAB 來完成。

MATLAB 是由 MathWorks 公司於 1984 年出品的商業數學軟體，其名稱由數學 Matrix 與實驗室 Laboratory 組成，有此可得知此程式最早的目標是一套專門處理矩陣的數學軟體，但隨著人們對於數值運算的需求越來越大，以及電腦科技的日新月異，MATLAB 已經在數學計算的方方面面都成為了一套標準的程式語言。至今，MATLAB 結合了大量的運算功能，包括深度學習、信號處理、金融量化與風險管理、控制系統等等。

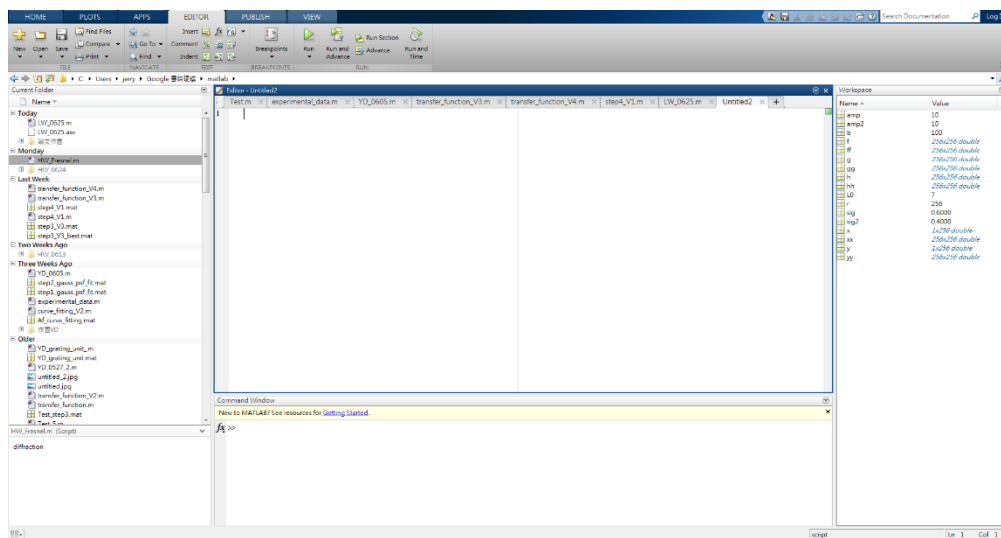


圖 2-1 MATLAB 使用者介面

### 2-2 點擴散函數

點擴散函數，又稱 Point Spread Function (PSF)，主要用於描述成像系統對於點光源的解析能力的函數，如同成像系統的空間域的光學傳遞函數 (Optical Transfer Function)，亦可以理解為聚焦光學系統的脈衝響應。因為點光源在經過任何光學系統後，皆會因為繞射而形成一個擴大的像點，故通過測量系統的點擴散函數，可以更準確的獲得圖像訊息。在數學上，可以視任何平面分佈為無數個點的集合，其中這每一個點均為不同的 $\delta$ 函數，在一成像系統中，若能得到平面中每一個點通過光學系統後所形成的強度分佈情形，理論上將平面與光學系統的點擴散函數進行通過線性疊加，即可求得此平面經過光學系統後的成像狀況，同時也可以反向操作，利用已知的 PSF 與成像後結果來推算更清晰的影像[15]。

由於點擴散函數與空間平面的位置無關，故稱為空間不變性，在一個完美、沒有失真的光學系統下，成像平面 $I(x_i, y_i)$  的影像即為物平面 $O(x_o, y_o)$  的座標線性放大

$$(x_i, y_i) = (Mx_o, My_o) \quad (2-1)$$

在此前提下，可以將物平面的數學表示為

$$O(x_o, y_o) = \iint O(u, v)\delta(x_o - u, y_o - v)dudv \quad (2-2)$$

即物平面下每一個座標點與 $\delta$ 函數的線性積分或捲積的結果，亦可理解為這是個完美的光學系統所呈現的完美成像，但當系統的 PSF 不為 $\delta$ 函數時，數學式則修改為

$$I(x_i, y_i) = \iint O(u, v)PSF\left(\frac{x_i}{M} - u, \frac{y_i}{M} - v\right)dudv \quad (2-3)$$



其中 $PSF(x_i/M - u, y_i/M - v)$ 即為系統的脈衝函數。

如今點擴散函數 PSF 已經廣泛的應用在傅立葉光學、天文學、醫學等等科學中，為不可或缺的重要概念，如天文望遠鏡、3D 顯微鏡等等皆需要點擴散函數的運用。[16]點光源的擴散程度是成像系統的成像品質的一大指標，在諸多的光學系統如顯微鏡、望遠鏡等非同調的成像系統中，影像的形成過程在功率上是線性的，並且可以用線性系統的理論描述之，故當 A 和 B 兩個物件同時進行成像時，其結果可以等於獨立的兩個影像的總和，換句話說，A 物件的成像並不受 B 物件的影響，反之可以將一個複雜的影像視為真實影像與光學系統的 PSF 的捲積。

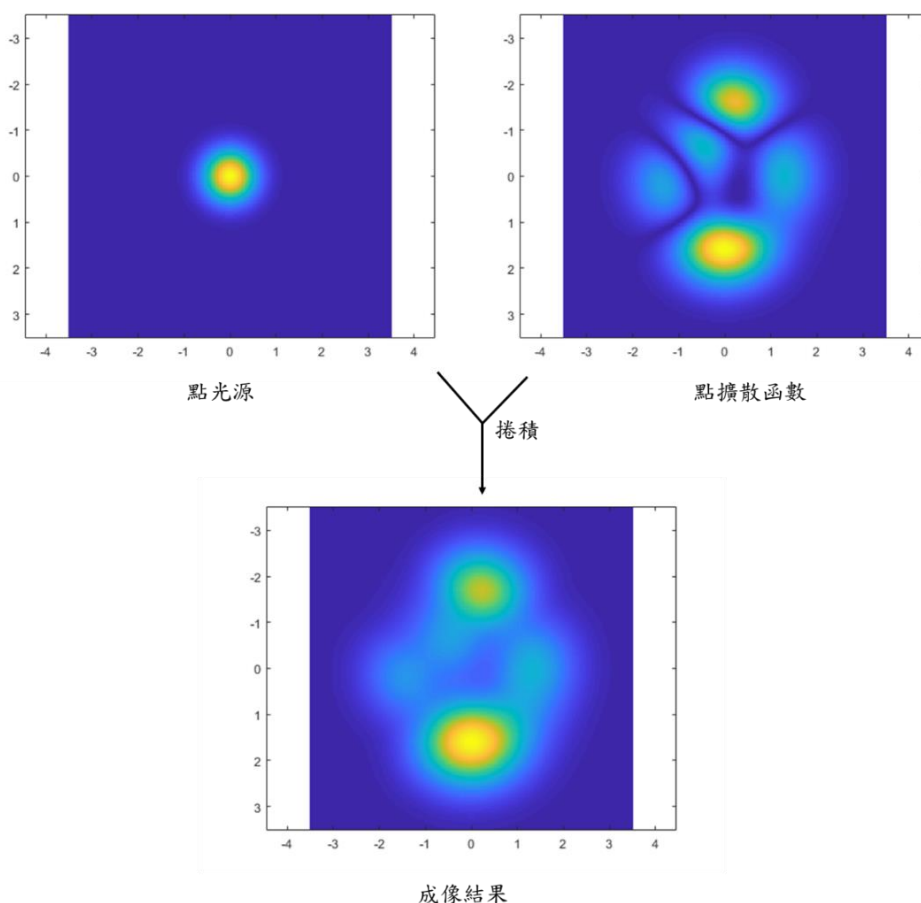


圖 2-2 點擴散函數與點光源之捲積示意圖



### 2-3 蒙地卡羅方法

蒙地卡羅方法，或稱蒙地卡羅實驗，是一種利用重複隨機抽樣的方法，來獲得最佳的數據結果，其核心概念就是使用隨機性來解決原則上已經確定的問題。

[17]蒙地卡羅方法是一種被廣泛使用的計算方法，他通常被使用在物理或數學的問題上，在進行優化或計算機率分布時更是常常被採用[18]。

原則上，只要機率能夠解釋的上的問題，蒙地卡羅方法都可以解決，根據大數法則，當模擬的次數越多，則其平均值即會越來越接近於理論值，可以利用取樣大量的獨立樣本，來近似模擬一個隨機變量的期望值的積分。

另外值得注意的是，在這類數值分析中，其方法種類之豐富，其中較具代表性的方法為 Simulated annealing (SA)，或稱退火法，對於解決統計力學或多組合之優化問題有極大的優勢[19]，退火法用於一給定的函數，利用迭帶法由亂數機率來求得其局部最低值 (global minimum)，其數學表示式為

$$P = \exp \left[ \frac{A \cdot \Delta f}{T} \right] \quad (2-4)$$

其中 P 代表接受概率 (acceptance probabilities)，此數值越高則接受新的狀態的機率越高，A 為任意常數，用以調變指數內的數值， $\Delta f$  代表變化幅度，當解由原狀態  $s$  變化至新狀態  $s'$  時，兩狀態的值變化量， $\Delta f$  可為負值，使此函數是有機率接受較壞之結果，這樣的分析方法能夠更有效的找出全域最佳解並且減少演算程式陷於局部最佳值的情況， $T$  為溫度，為一遞減數，隨著數值分析的次數增加， $T$  則逐漸降低，用以使接受概率 P 能夠收斂。

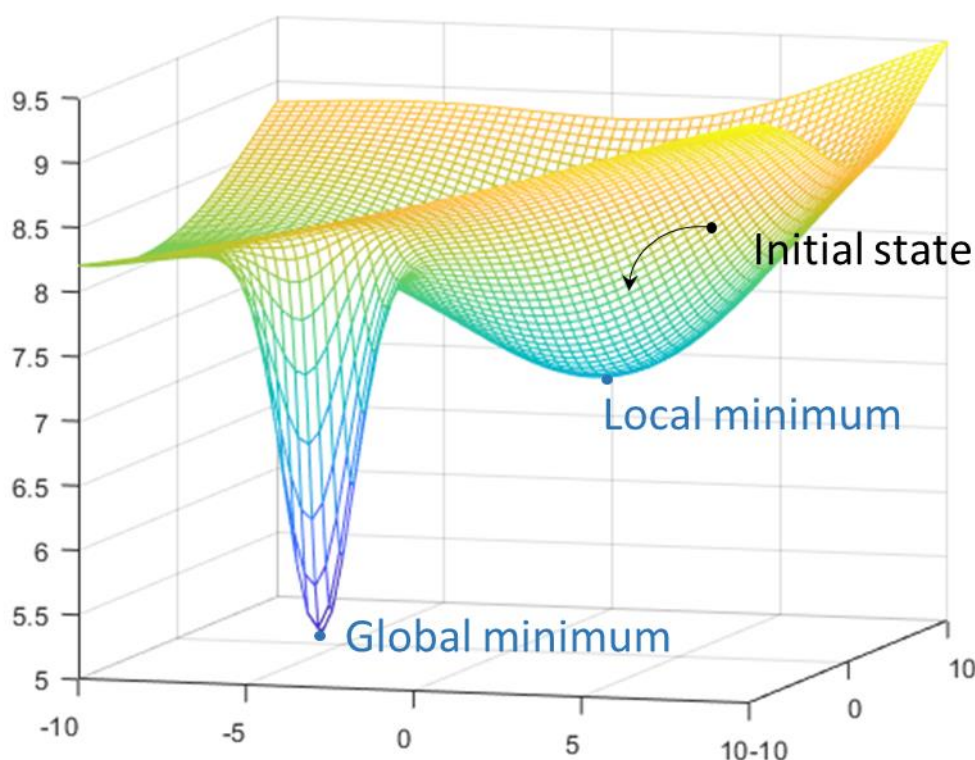


圖 2-3 局部最小值與全域最小值之演算法示意圖

## 2-4 傅立葉轉換

傅立葉轉換是一種分析方法，用以分析出一個函數或訊號的組成頻率，在數學意義上亦可以解釋為將一函數的空間域與頻域之間的線性積分變換，這樣的分析方式對於工程學物理學等等有極大的貢獻，例如訊號處理，傅立葉轉換現在也已經被大量的運用在不同領域中。[20]

傅立葉轉換最早是出發於傅立葉級數的研究，在傅立葉級數的理論中，任何複雜但具週期性的函數皆可以由不同週期的正弦波與餘弦波所組成，假設一函數  $s(x)$ ，而其傅立葉級數即為

$$s_N(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{P}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nx}{P}\right) \right) \quad (2-5)$$



其中 $s$ 為一變數 $x$ 的函數， $a_n$ 與 $b_n$ 為傅立葉係數， $P$ 為週期數，當 $N$ 趨近於無限大時，其傅立葉級數 $s_N(x)$ 會趨近 $s(x)$ ，基於這樣的諧波特性和[21]，故傅立葉轉換可以視為傅立葉級數的延伸，將一函數的週期延長趨近於無窮大，再利用積分的方式來計算傅立葉轉換。

$$G(s) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)e^{-i2\pi xs} dx \quad (2-6)$$

其數學表示式為

$$G(s) = F\{ g(x) \} \quad (2-7)$$

此為傅立葉轉換基礎的定義，其中 $G(s)$ 即為 $g(x)$ 的傅立葉轉換， $x$ 為實變數， $s$ 則代表頻域變數，其單位在不同領域下有不同的常用單位，通常為 Hz 或 cycles/mm 等，此轉換為從空間域轉到頻域。在其他狀況下也會看到傅立葉轉換經過尤拉公式的表示法

$$G(s) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \cos 2\pi xs dx - i \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \sin 2\pi xs dx \quad (2-8)$$

在定義傅立葉轉換同時，亦有定義從頻域到空間域的轉換，稱為傅立葉逆轉換

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(s)e^{+i2\pi xs} dx \quad (2-9)$$

其數學表示式為



$$g(x) = F^{-1}\{ G(s) \} \quad (2-10)$$

傅立葉轉換另有許多特性與關係，這邊主要討論傅立葉轉換與捲積定理的關係。捲積為一種數學運算，將兩種函數 $f$ 與 $g$ 進行運算生成出一種新的函數 $h$ ，可以理解將函數 $f$ 對函數 $g$ 做平移並且積分的動作，類似於濾波，捲積的數學式為

$$h(x) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} f(u) g(x-u) du \quad (2-11)$$

捲積的數學符號為「\*」，其數學表示式為

$$h(x) = f(x) * g(x) \quad (2-12)$$

而在捲積定理中定義到，當將捲積的兩函數進行傅立葉轉換的動作，可以視為兩空間域的函數轉換到頻域下的逐點相乘，亦即

$$F\{f * g\} = F\{f\} \cdot F\{g\} \quad (2-13)$$

在線性時域系統中，也時常利用此捲積定理，定義 $g(x)$ 為一脈衝函數，利用傅立葉轉換來計算捲積的動作。[21][22]

## 2-5 菲涅爾繞射

在古典物理學中，光線或波動在空間中傳遞時，會因為遇到障礙物或者狹縫，而發生傳遞方向偏離原先之路徑、繞到障礙物後方的幾何陰影區等狀況，稱之為光的繞射現象。繞射現象由惠更斯-菲涅爾原理中描述，其原理將向前傳遞的



波前定義為許多小的球面波的集合，當一同調光遇到尺寸與其相近的障礙物或狹縫時，會出現具特徵性的條紋圖案，這個現象是因為從孔徑處到繞射面的各點上的光路徑並不相同，使得部份區域產生建設性干涉，其餘部份產生破壞性干涉，故產生條紋狀的圖案，如圖 2-4 所示，從點光源出發，Q 平面處為一不透光之遮板而中心點有一幾何孔徑，或稱繞射面，而 P 平面處為觀察面，當 Q 平面之孔徑尺寸皆近光線波長時，即會發生繞射的現象，造成在 P 平面接收到的影像不為幾何形狀的光點，而是類似同心圓形狀的光分佈。P 平面接收到的影像會因改變孔徑的尺寸而發生變化，當圓形孔徑尺寸遠大於光線波長時，則繞射現象不明顯，故觀察面的結果接近圓形光點，隨著孔徑逐漸縮小，原先的圓形光點的邊緣部份會漸漸模糊，最後形成條紋狀。

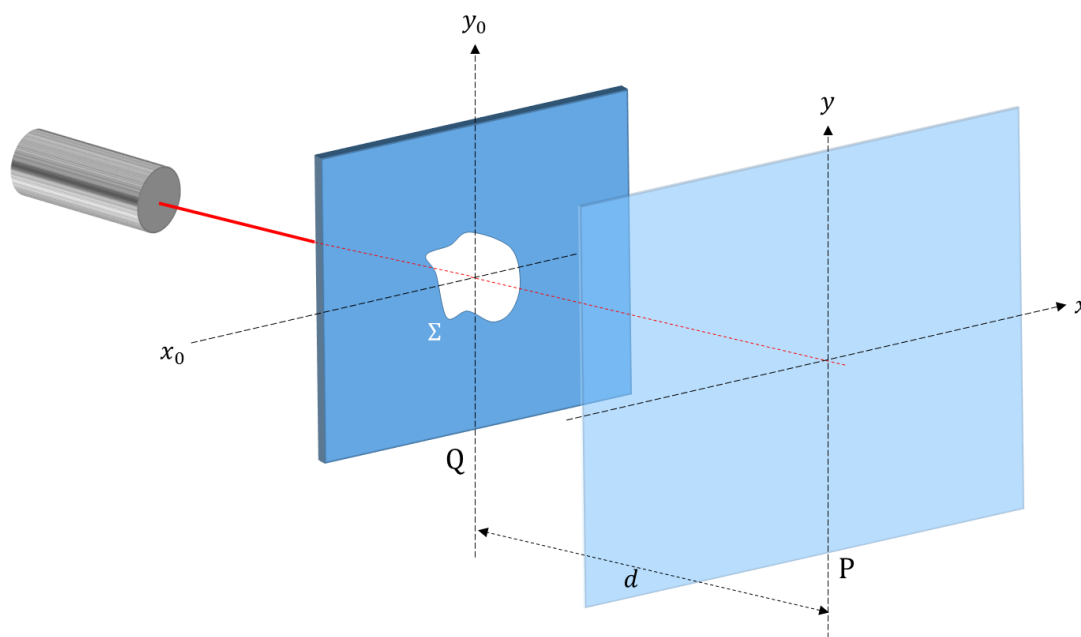


圖 2-4 菲涅爾繞射之繞射面與觀察面示意圖

經由上述的解釋後，如何由數學來處理光線經過繞射現象後的振幅分佈變成為一大重要學問，若要推導出光線經過繞射後的振幅分佈狀況，最早由基爾霍夫 (Kirchhoff) 與索末菲 (Sommerfeld) 提出的繞射積分公式開始說起，兩人雖然分別提出了各自的繞射積分式，但在近軸的情況下均可以簡化成



$$\tilde{U}(P) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} \tilde{U}_0 \frac{\exp(jkr)}{r} ds \quad (2-14)$$

上式中， $\tilde{U}(P)$ 與 $\tilde{U}_0$ 分別代表光場在觀察面與繞射面上的振幅，其中 $\lambda$ 為此入射光之波長，經由直角坐標系轉換，該繞射積分公式可以化為

$$\tilde{U}(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}_0(x_0, y_0) \tilde{h}(x, y; x_0, y_0) dx_0 dy_0 \quad (2-15)$$

$$\tilde{h}(x, y; x_0, y_0) = \frac{1}{j\lambda r} \exp(jkr) \quad (2-16)$$

$$r = \sqrt{d^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (2-17)$$

其中 $\tilde{h}(x, y; x_0, y_0)$ 代表繞射面上位於 $(x_0, y_0)$ 的點光源，經過光學系統後在觀察面上的光分佈，或稱為脈衝響應 (impulse response)，而波數 $k = 2\pi/\lambda$ ， $d$ 為繞射距離， $r$ 為觀察面任意點對於繞射面的幾何距離，經過代換後脈衝響應可以表示為

$$\tilde{h}(x, y; x_0, y_0) = \frac{1}{j\lambda r} \exp\left(jk\sqrt{d^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}\right) \quad (2-18)$$

$$= \tilde{h}(x - x_0, y - y_0) \quad (2-19)$$

由此可之，只要 $(x, y)$ 與 $(x_0, y_0)$ 兩者之相對位置相同時，其脈衝響應即不變，稱此為空間不變性，故可以將式(2-12)由積分式改為捲積形式

$$\tilde{U}(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}_0(x_0, y_0) \tilde{h}(x, y; x_0, y_0) dx_0 dy_0 \quad (2-20)$$

$$= \tilde{U}_0 * \tilde{h} \quad (2-21)$$



再來將繞射面上之原點坐標定為孔徑 $\Sigma$ 中心，則其脈衝響應即可代表整個繞射系統

$$\tilde{h}(x, y; 0, 0) = \frac{1}{j\lambda r} \exp\left(jk\sqrt{d^2 + (x)^2 + (y)^2}\right) \quad (2-22)$$

在近軸光學的情況下，因為  $x$  與  $y$  較於  $r$  可忽略，不影響其積分值，故在脈衝響應中的分母的  $r \approx d$ ， $r$  可以置換為  $d$ ，但在指數中的  $r$  則不同，其改變會對積分值影響較大，故將指數中的  $r$  由二項式展開做近似

$$\sqrt{1+b} = 1 + \frac{b}{2} - \frac{b^2}{8} + \dots \quad (2-23)$$

$$\Rightarrow r = d \sqrt{1 + \left(\frac{x-x_0}{d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{d}\right)^2} \quad (2-24)$$

$$\Rightarrow r \approx d \left[ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x-x_0}{d}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{y-y_0}{d}\right)^2 + \dots \right] \quad (2-25)$$

由於上述的近軸性質，在式(2-25)中第二項及其餘高階項皆可相對忽略，再將化簡後的  $r$  帶入式(2-20)中，則其繞射積分式為

$$\tilde{U}(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}_0(x_0, y_0) \tilde{h}(x-x_0, y-y_0) dx_0 dy_0 \quad (2-26)$$

其中脈衝響應為

$$\tilde{h}(x, y) = \frac{e^{jkd}}{j\lambda d} \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y^2)\right] \quad (2-27)$$



在式(2-18)中已證明，脈衝響應具有空間不變性，故上式依然可以由捲積來代替積分式

$$\tilde{U}(x, y) = \tilde{U}_0(x_0, y_0) * \tilde{h}(x, y) \quad (2-28)$$

式(2-28)展開得

$$\tilde{U}(x, y) = \frac{e^{jkd}}{j\lambda d} \cdot \left\{ \tilde{U}_0(x_0, y_0) * \exp \left[ \frac{jk}{2d} (x^2 + y^2) \right] \right\} \quad (2-29)$$

上式即為捲積形式的菲涅爾繞射公式，但由於在空間域下進行捲積是需要消耗大量的軟體運作時間，故將式(2-29)進行傅立葉轉換至頻域來完成，即

$$\tilde{U}(x, y) = \frac{e^{jkd}}{j\lambda d} \cdot F^{-1} \{ \tilde{U}(u, v) \} \quad (2-30)$$

$$\tilde{U}(u, v) = F \{ \tilde{U}_0(x_0, y_0) \} \cdot F \left\{ \exp \left[ \frac{jk}{2d} (x^2 + y^2) \right] \right\} \quad (2-31)$$

其中 $(u, v)$ 為 $\tilde{U}(x, y)$ 在頻域下的空間頻率單位，其取決於給定的實驗參數繞射面的空間頻率，假若在實際寬度為 $L_x * L_y$ 且取樣點為 $N_x * N_y$ ，則其空間頻率最高為

$$u_{max} = \frac{N_x}{2L_x} \quad , \quad v_{max} = \frac{N_y}{2L_y} \quad (2-29)(2-32)$$

轉換後獲得傅立葉轉換形式的菲涅爾繞射公式。[23][24]

### 第三章 面板實驗與傳遞函數



近年來，透明顯示器已經成為顯示器技術中的新選擇，因此，透明顯示器的研究與開發在目前的顯示器領域逐漸受到重視與關注。

為了能夠實現透明之效果，顯示器的結構是由許多細小的金屬走線組成的週期結構，細微到走線間的開口足夠透明顯示器後方之影像（或稱後景影像）穿過顯示器並且到達人眼，如圖 3-1、圖 3-2 所示，使得人眼可以同時觀察到顯示器本身顯示之畫面與透明顯示器後方之影像，到達透明的效果，然而，可以發現當後方影像穿過透明顯示器時會發生明顯的模糊現象，這可能是因為當後方光線穿過透明顯示器的週期結構時，因週期結構中之開口物理尺寸甚小，導致如同穿過針孔陣列般產生繞射現象，並造成影像模糊的狀況，因此，顯示器結構如何影響後景影像品質是研究與開發透明顯示器最重要的課題之一。

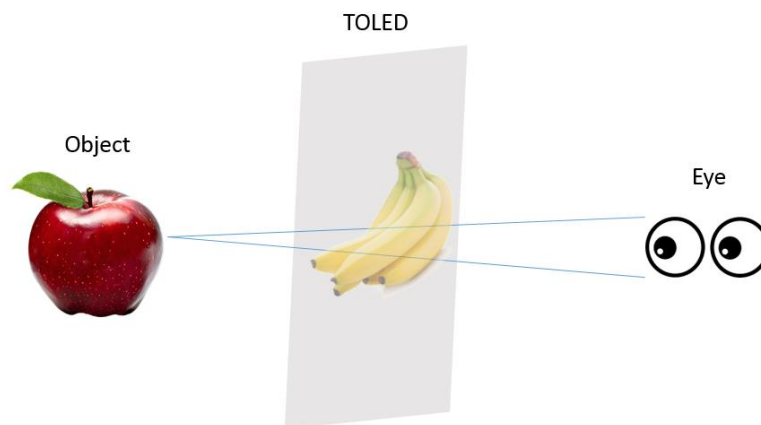


圖 3-1 人眼觀看透明顯示器之示意圖

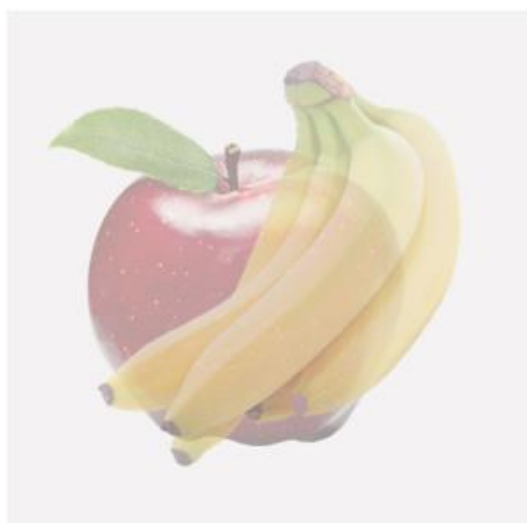


圖 3-2 人眼觀看透明顯示器之影像示意圖

為此，這篇論文主旨是在研究出一個能夠快速且精確地演算透明顯示器對後景影像的影響，在輸入透明顯示器的結構與後景影像、透明顯示器及觀察者之間的距離等等參數後，計算出該環境下觀察者所觀測到之結果，進一步設計出後景影像更清晰的顯示器結構，對於未來在開發透明顯示器與評估繞射影響有極大的幫助。

### 3-1 研究目的與總述

現今的 OLED 透明顯示器主要是將 OLED 上的電極盡量靠齊排列，使得透明顯示器的電極能夠具極在一區塊中，而其他部份則選擇使用透明材料來增加穿透率，來達到透明顯示器的效果。

圖 3-3 為透明顯示器簡單的結構示意圖，當光線穿過顯示器的針孔陣列時，在針孔邊緣會發生繞射現象使得傳播方向彎曲，導致光進入針孔遮蓋範圍的幾何陰影區域，若一點光源在合理之情況下，觀察面觀測到的理應也是一點光源，但當點光源傳播穿透一個針孔陣列時，會發現點光源在觀察面繞射成十字排列的光點分布，而影像穿過孔徑陣列時，其影像在觀察面會發生模糊的狀況，在這有無



孔徑陣列 (或透明顯示器) 情況下後景影像的變化影響，本文簡單的稱之為「傳遞函數」。

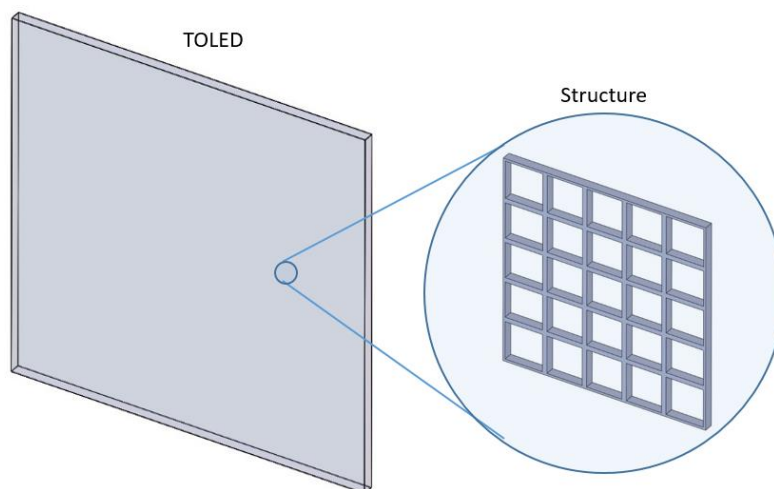


圖 3-3 透明顯示器之結構示意圖

## 3-2 面板實驗介紹

### 3-2-1 實驗架構

為了驗證繞射演算程式之正確性，建立了一個面板實驗來採集實驗數據，一方面可以當作驗證用途，另一方面也能夠作為模擬初期的基礎數據，其實驗設備示意圖如圖 3-4 所示，實驗中包含了氦氖雷射光源 (Laser)、勻化片 (Diffuser)、針孔 (Pinhole)、透明顯示器面板 (TOLED)、透鏡 (Lens)、感測器 (Sensor)，為模擬出接近完美點光源，此實驗光源由氦氖雷射、勻化片、針孔等光學儀器組合而成，其中雷射的波長為 632.8 nm 的氦氖雷射，無其他環境光的情況下進行。透明顯示器之結構示意圖如圖 3-5 所示，其週期排列針孔的週期  $\Lambda = 250 \mu\text{m}$ ，井字遮蓋區的金屬走線寬度分別為 x 方向  $w_x = 50 \mu\text{m}$ ，y 方向  $w_y = 40 \mu\text{m}$ ，而觀察面之相機等同於人眼，在實驗中，光源傳播至透明顯示器距離為  $s_1$ ，及透明顯示器與相機距離為  $s_2$ ，利用此實驗來測得在固定距離下，在有/無透明顯示器時人眼會觀察到的點光源之變化。

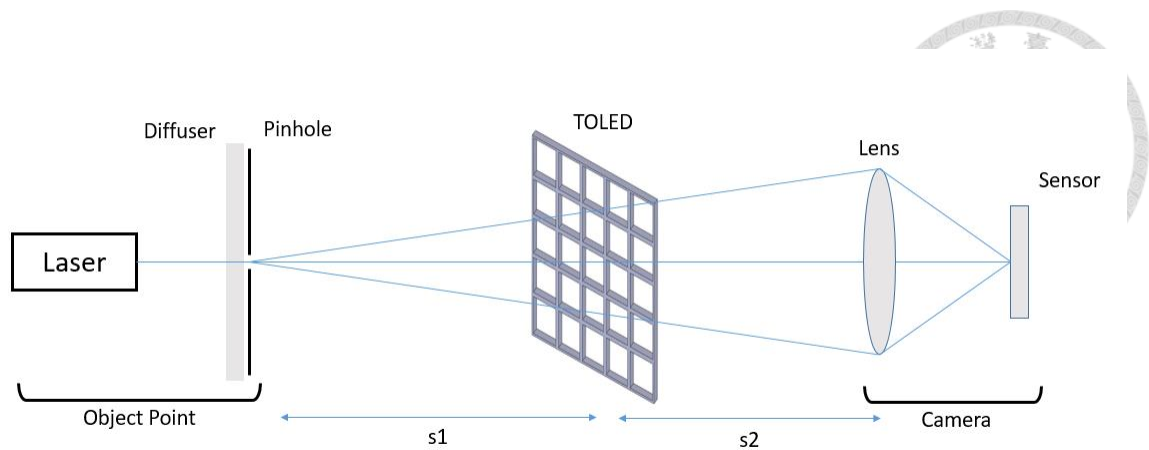


圖 3-4 面板實驗之結構圖

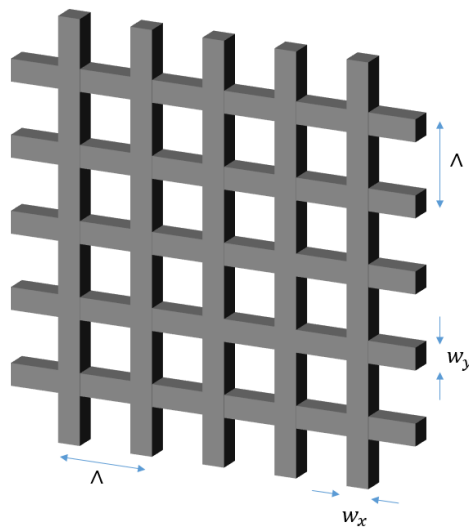


圖 3-5 透明顯示器之結構示意圖

### 3-2-2 實驗結果

此面板實驗共設定在兩種情況下作拍攝，分為狀況一與狀況二，狀況一的光源與透明顯示器的距離為 1 m，透明顯示器與相機的距離亦為 1 m，而狀況二的光源與透明顯示器的距離為 25 cm，透明顯示器與相機的距離為 0.5 cm，實驗拍攝結果如圖 3-6 所示，由圖中可以發現，在沒有透明顯示器時拍攝到的為一光點，而當加上透明顯示器後，原先的光點會繞射成十字排列的光點分布，在開始編寫演算之前，為確認實驗結果的正確性，將影像載入數學軟體 MATLAB 進行數據分析如圖 3-7、圖 3-8、圖 3-9、圖 3-10 所示，圖中可見分析 x 方向截面的結



果顯示，無論是有無透明顯示器，所拍攝到的影像最中間之零階繞射光點有過度曝光的狀況，其原因認為是相較於其他高階繞射，零階繞射的強度高出太多，導致相機在曝光時間的校準產生錯誤評估，這樣的狀況會影響到接下來的演算，其並不是模擬所樂見的，所以在進行繞射演算之前，應先解決實驗數據的過度曝光問題，故在下一步中進行了一個曲線擬合的動作。

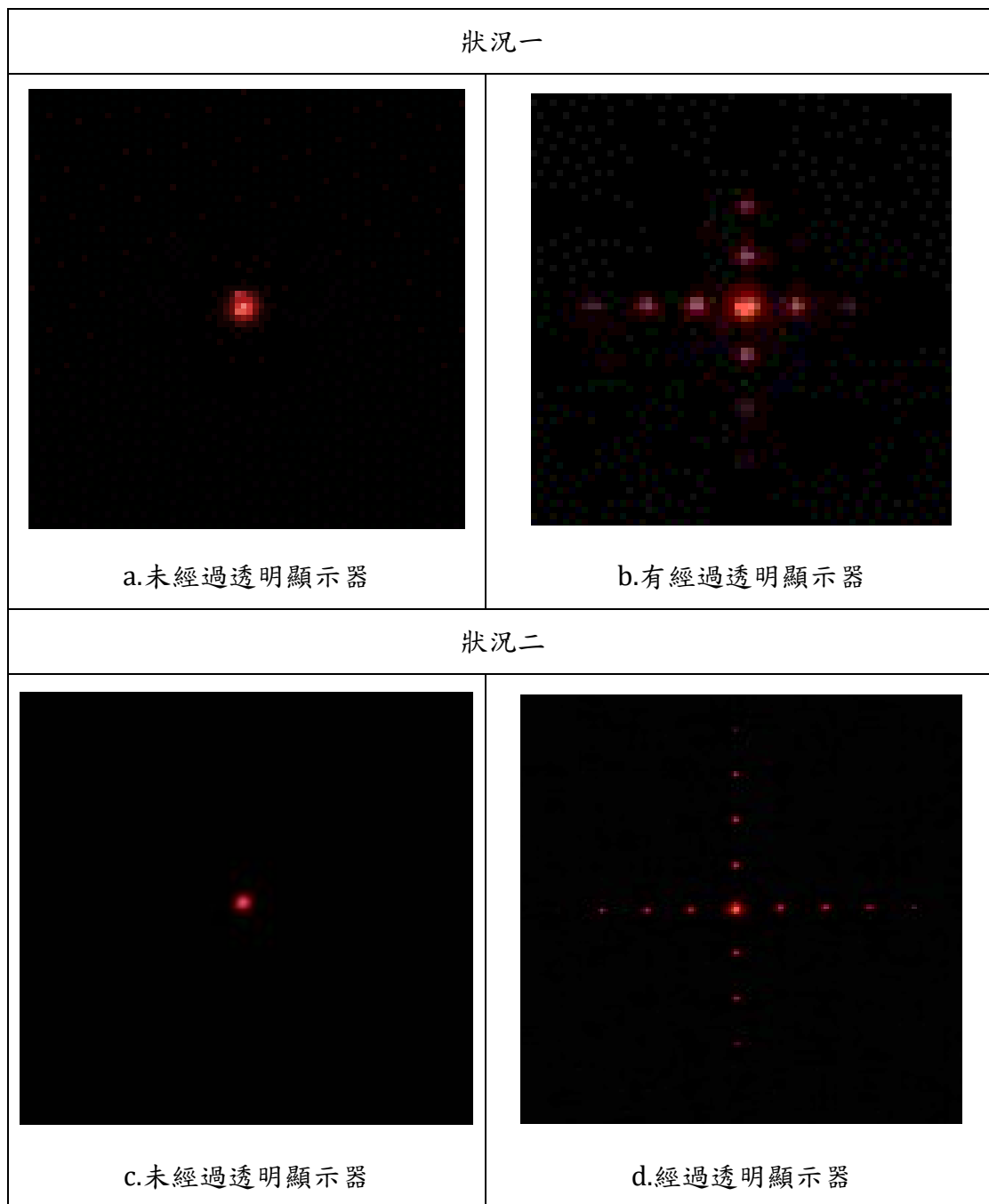


圖 3-6 面板實驗之實驗拍攝結果

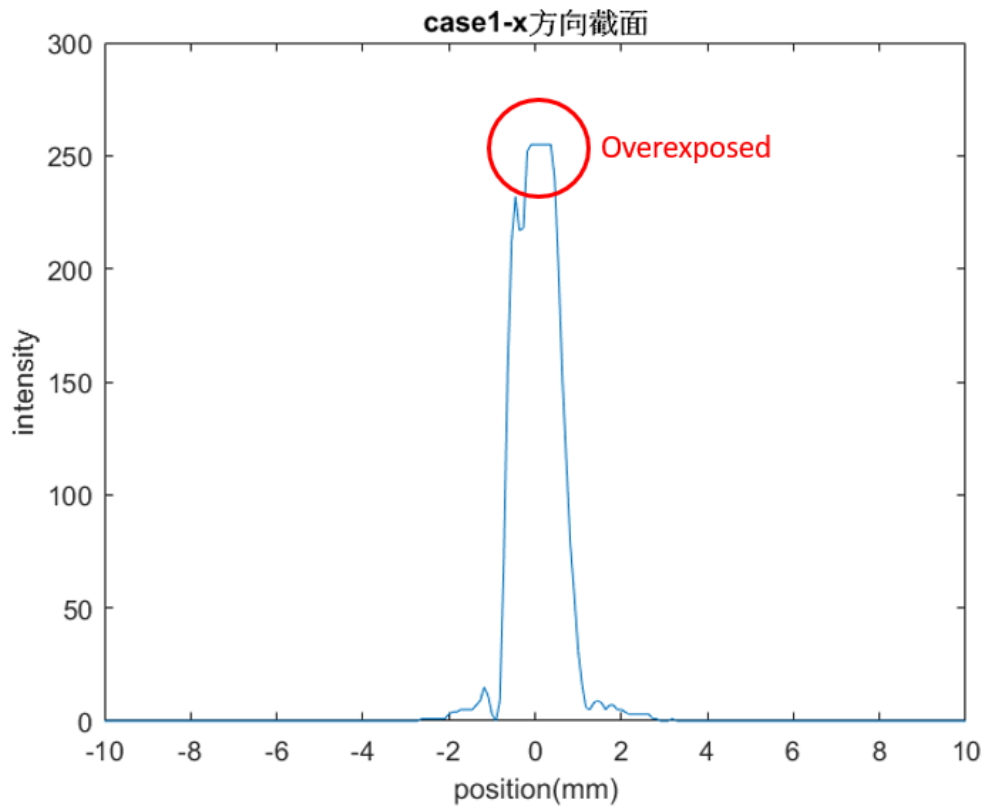
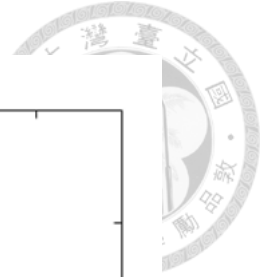


圖 3-7 面板實驗 Case1 結果之 x 方向截面

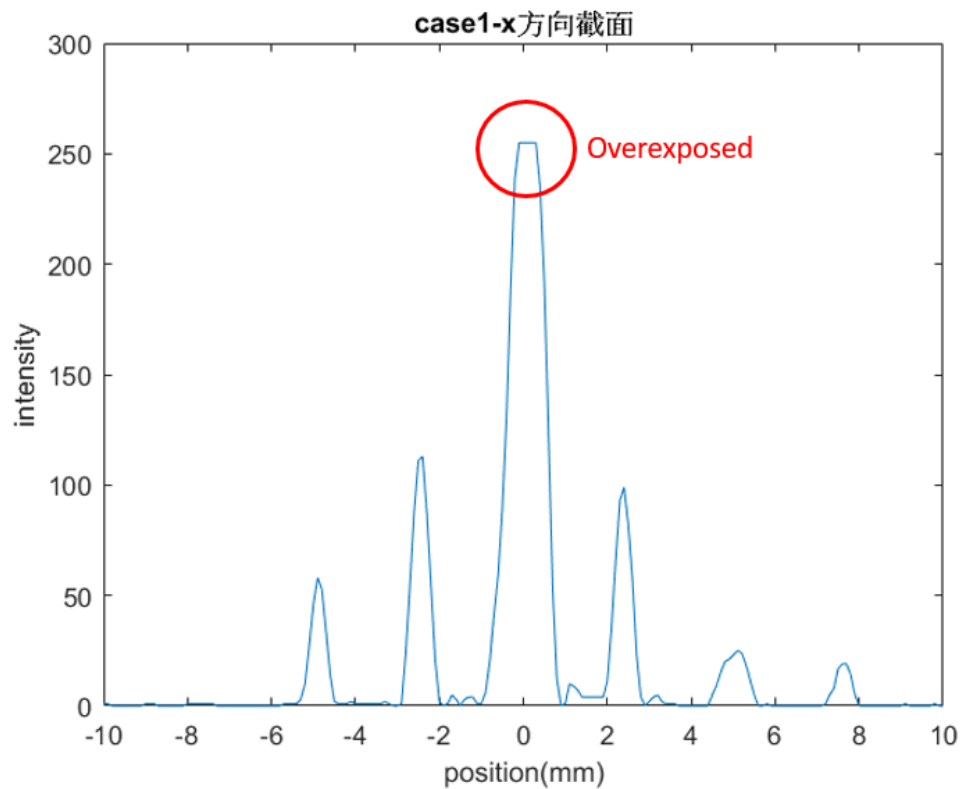


圖 3-8 面板實驗 Case1 結果之 y 方向截面

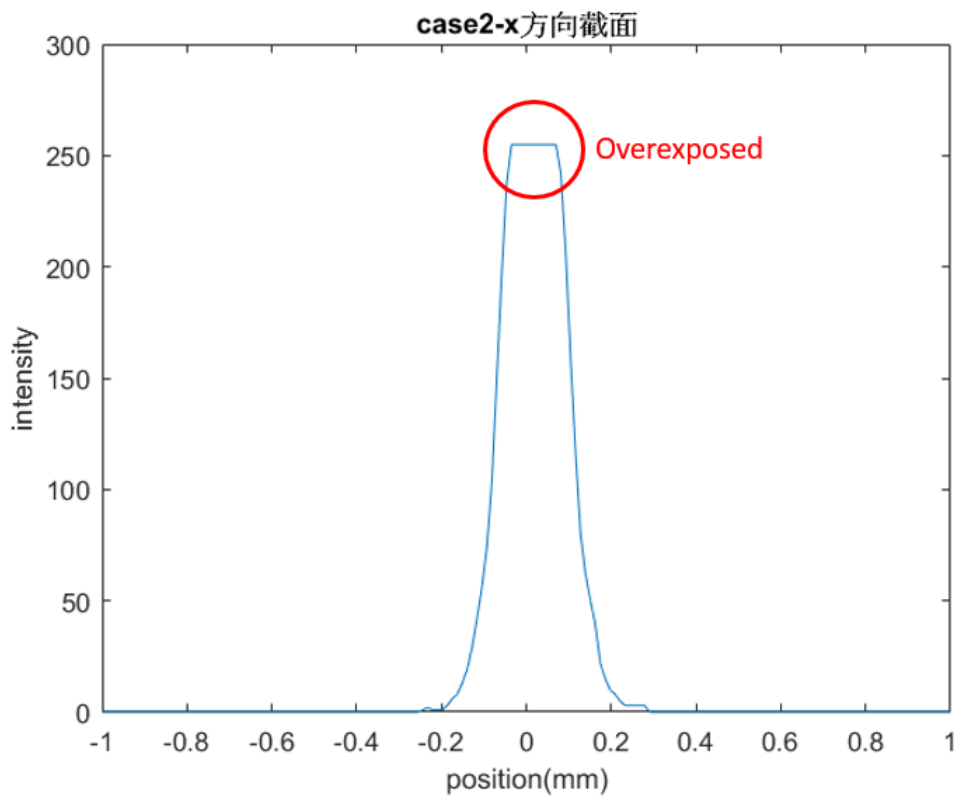
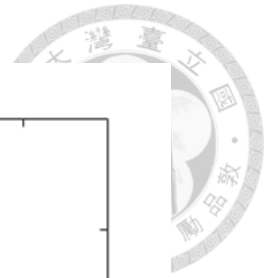


圖 3-9 面板實驗 Case2 結果之 x 方向截面

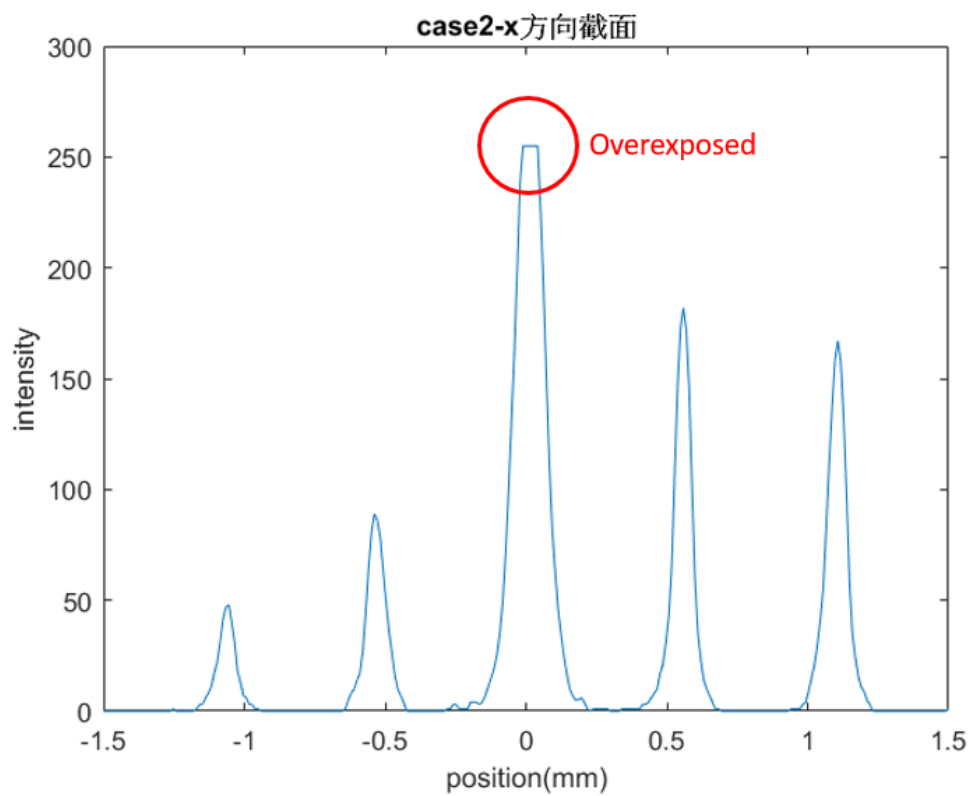


圖 3-10 面板實驗 Case2 結果之 y 方向截面



### 3-3 曲線擬合 (Curve Fitting)

為了彌補過度曝光所導致的訊息流失，設計了一個曲線擬合的程序，在觀察各階繞射之強度後可以發現，各個強度皆近似於高斯分布，其原因之一可能為實驗所使用的光源即為雷射光源，雷射光的強度即為高斯分布，而高斯分布的峰值、位置及腰寬是由「位置參數 $\mu$ 」與「尺度參數 $\sigma$ 」兩參數來決定，其數學表示如下

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-1)$$

曲線擬合這個程序主要任務即為找到這兩參數，來彌補出因為過度曝光而流失的強度資訊，[25]其流程圖如圖 3-11 所示，首先輸入位置參數 $\mu$ 與尺度參數 $\sigma$ 之預設值以及一振幅常數，由這些數據可以計算出一組高斯分布曲線，將這組高斯分布曲線與實驗數據的零階繞射強度曲線相減獲得誤差值 $\varepsilon$ ，可知這個誤差值越低表示算出之高斯分布越接近實驗數據，下一步，在 MATLAB 中產生一個隨機亂數，其範圍介於 0.9 至 1.1，將位置參數 $\mu$ 與尺度參數 $\sigma$ 乘上新生成的亂數，即獲得一組新位置參數 $\mu_{new}$ 與新尺度參數 $\sigma_{new}$ ，並計算出新的高斯分布曲線與新的誤差值 $\varepsilon_{new}$ ，再來比較新舊誤差值 $\varepsilon$ 與 $\varepsilon_{new}$ ，若原先的誤差值 $\varepsilon$ 較低，表示新的運算結果比較遠離實驗數據，故選擇放棄組新位置參數 $\mu_{new}$ 與尺度參數 $\sigma_{new}$ ，程序回到亂數步驟，產生第三組的數據依此類推重複循環。若新誤差值 $\varepsilon_{new}$ 較低，則表示新的運算結果比較接近實驗數據，將新位置參數 $\mu_{new}$ 與尺度參數 $\sigma_{new}$ 儲存下來，並將新誤差值 $\varepsilon_{new}$ 定為新的參考值，程序回到亂數步驟，再產生第三組數據依此類推重複循環，並在擬合最後將線段的左右數值取平均，以獲得較為理想的數據。[26]

關於誤差值的定義方式，由於相機記錄下來的強度數值，範圍最低值為 0、最高值為 255 的整數，當過度曝光發生時，即使實際的強度數值再高，相機只能

紀錄為 255，故認定所有強度數值中，其數值為 255 的即判定為錯誤數值，不加入誤差值計算中以確保擬合程序的正常運作。在擬合過程中計算出一組高斯分布曲線，將其與實驗數據做相減的動作並予以積分，定義此數為誤差值。

經過多次循環後，曲線擬合結果如圖 3-12、圖 3-13 所示，其中圖 3-13 僅顯示十字光點分布中的中心光點，即零階繞射，因各光點中只有零階繞射有過度曝光的狀況，故僅取出零階繞射來進行曲線擬合的程序，圖 3-14 圖 3-15 為將擬合後的零階繞射補回實驗數據中的結果，圖 3-16 為曲線擬合與面板實驗結果之比較圖。擬合結果可以注意到原先因為過度曝光而導致的訊息流失已補償，或許這樣的補償方式可能會與實際結果有些許誤差，但能確保接下來的演算編寫能順利進行。

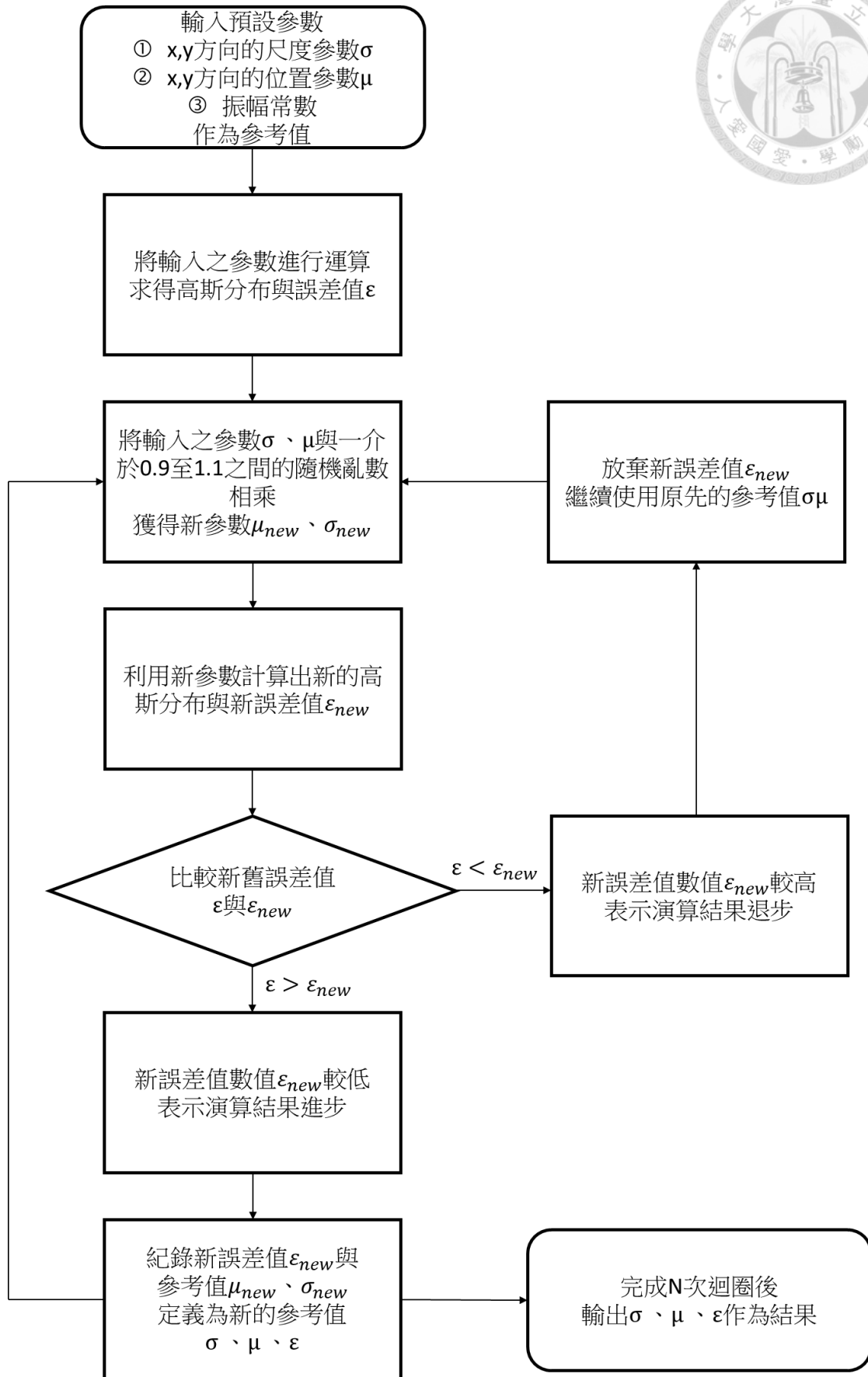


圖 3-11 曲線擬合程序之流程圖

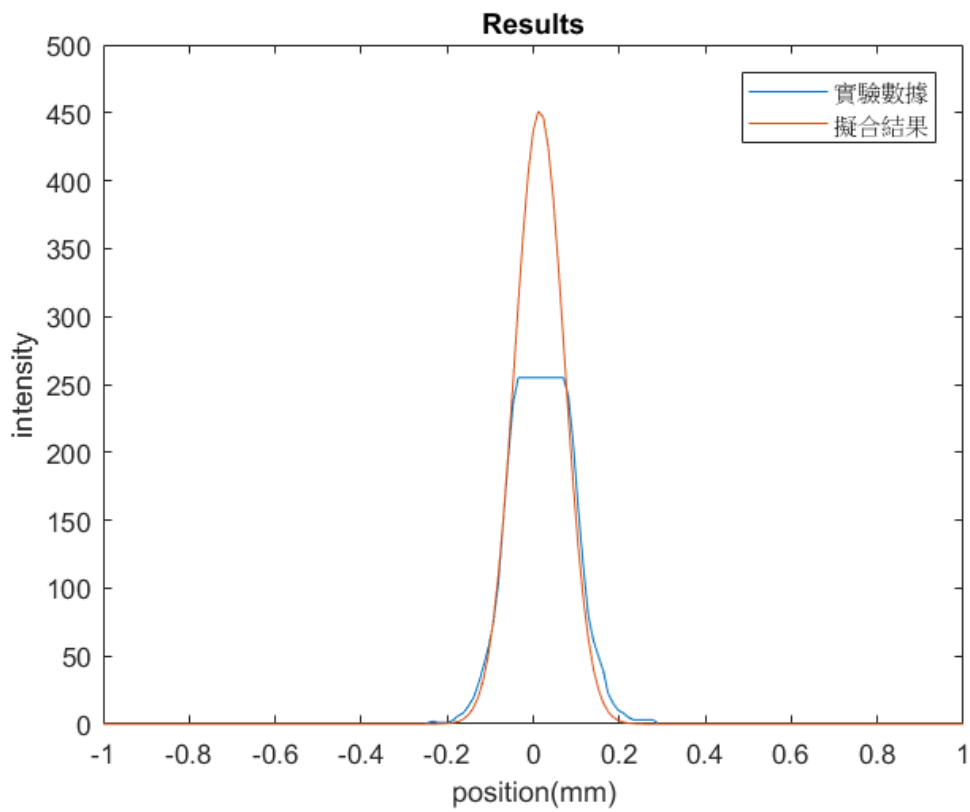


圖 3-12 無透明顯示器的情況下，曲線擬合之結果

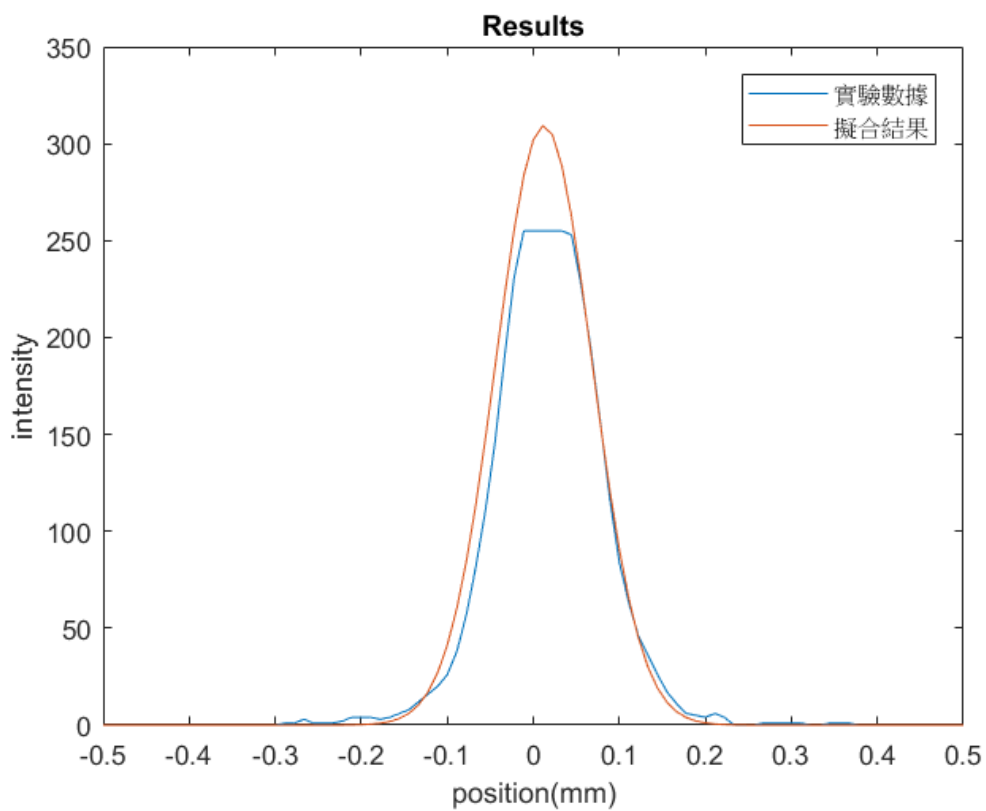


圖 3-13 有透明顯示器的情況下，曲線擬合之結果 (僅取零階繞射強度)

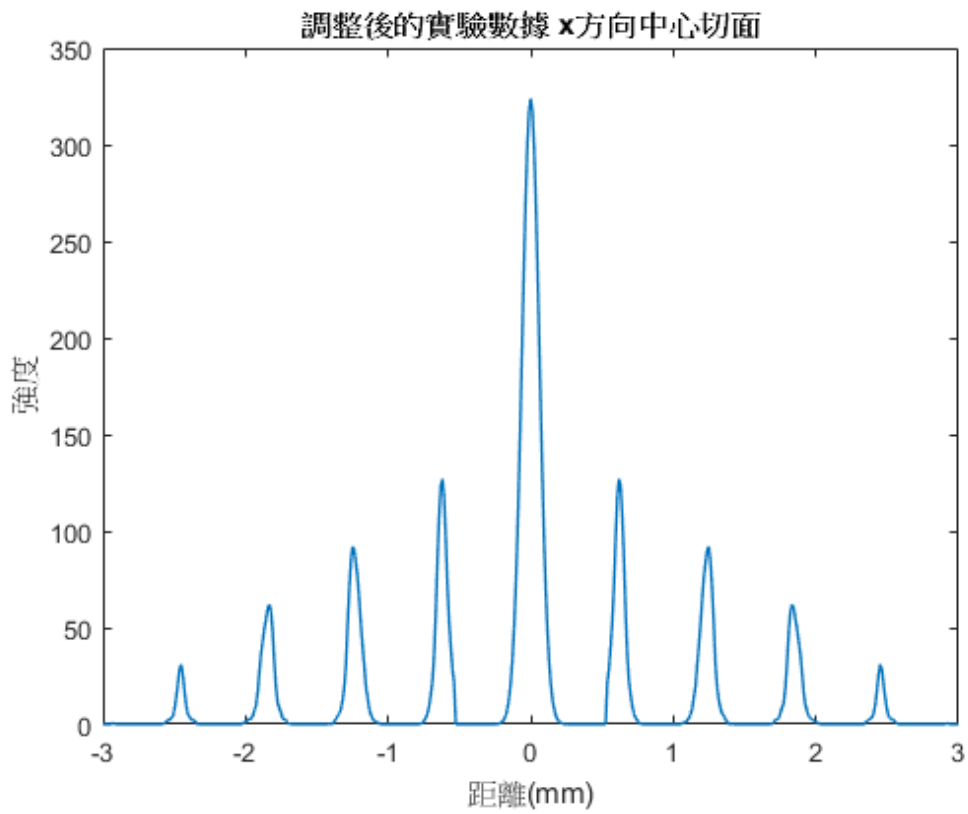


圖 3-14 曲線擬合之結果 x 方向

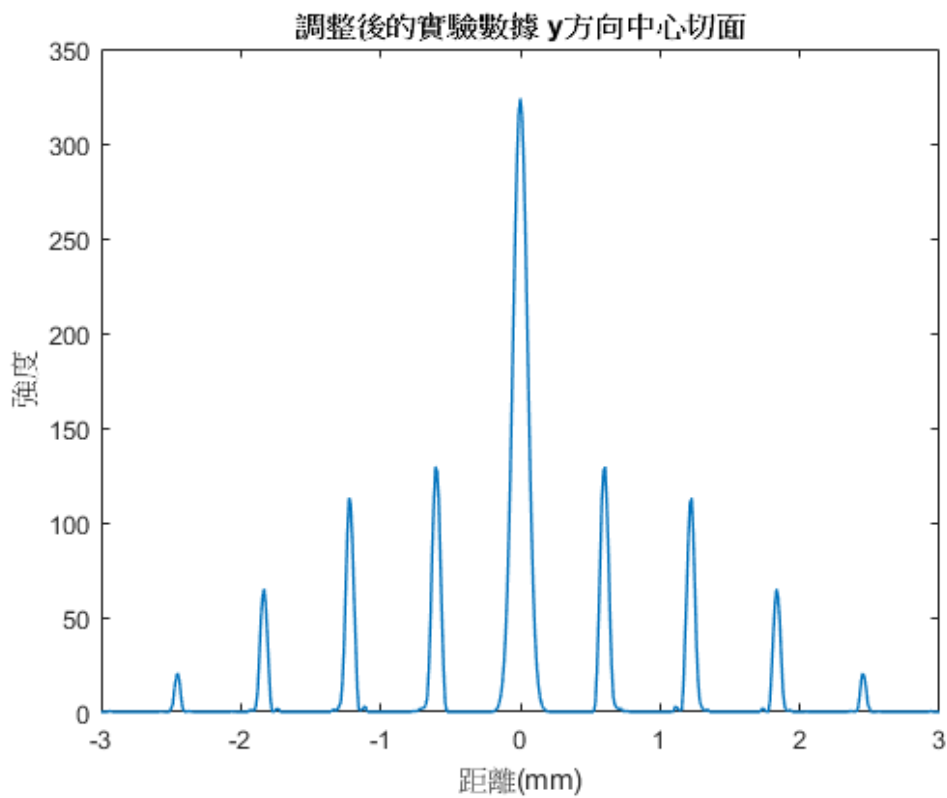


圖 3-15 曲線擬合之結果 y 方向



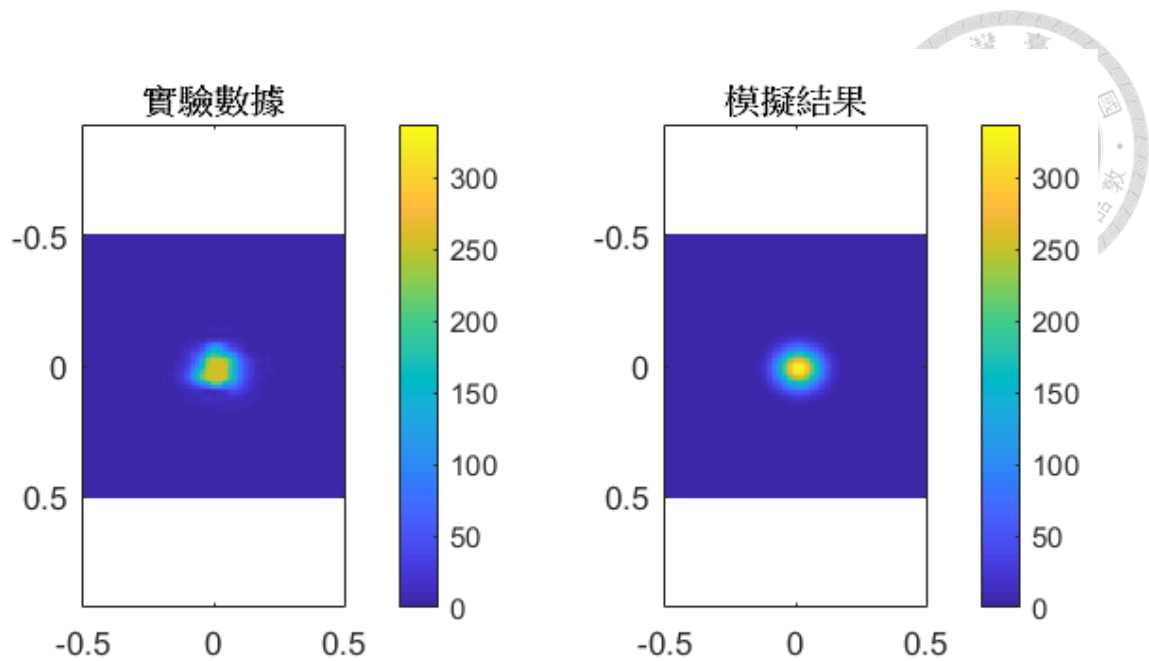


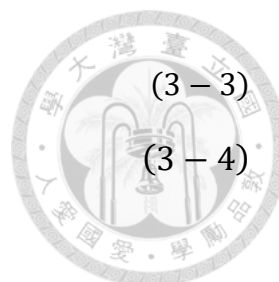
圖 3-16 曲線擬合與面板實驗結果之比較圖，  
左圖為面板實驗之結果，右圖為曲線擬合之結果

### 3-4 傳遞函數 (Transfer Function)

如同上文提及的，在有無透明顯示器情況下後景影像的品質影響，中間的變化過程在本文定義稱為「傳遞函數」，而傳遞函數的簡單數學定義如下

$$y = h(x) = h * x \quad (3-2)$$

其中 $x$ 代表並未加上透明顯示器時所拍攝的點光源影像，如圖 3-6a 的實驗結果圖所示，亦可解釋為點擴散函數 (Point Spread Function, PSF)， $y$ 代表加上透明顯示器後所拍攝的點光源影像，如圖 3-6b 所示， $h$ 代表傳遞函數。傳遞函數由許多參數決定，例如週期結構的形狀、單位週期尺寸、金屬走線寬度等等，當傳遞函數 $h$ 與 $x$ 進行捲積即可獲得 $y$ ，但捲積在數學軟體中運算量較高，根據傅立葉轉換定義，捲積可以視同兩者在頻域下的相乘，故將影像 $xy$ 以及傳遞函數 $h$ 經過傅立葉轉換處理轉換至頻域，故數學關係式可以改寫為



$$F\{y\} = F\{h * x\} \quad (3-3)$$

$$\hat{y} = \hat{h} \cdot \hat{x} \quad (3-4)$$

其中  $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$ 、 $\hat{h}$  分別代表 PSF、受透明顯示器影響的後景影像以及傳遞函數的傅立葉轉換結果，因此 式(3-4) 可以表達為

$$y = F^{-1}\{\hat{h} \cdot F\{x\}\} \quad (3-5)$$

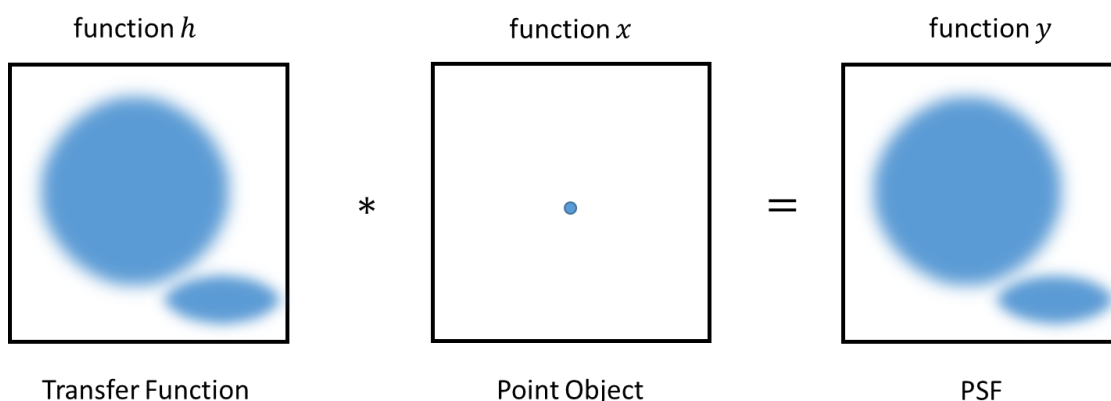


圖 3-17 傳遞函數之示意圖

### 3-5 傳遞函數演算程序

關於傳遞函數的演算程序主要是使用 MATLAB 來執行，程序的演算流程圖如圖 3-18 所示，其原理與蒙地卡羅方法相似。根據傅立葉光學，一點光源傳播至相機之透鏡，其光線的聚焦狀況可由傅立葉轉換來求得，同時算出成像後的光強分佈，如同在頻域下，點光源的強度分佈在進入相機前，受到頻域下之週期性結構的濾波。

為了能夠模擬出傳遞函數，首先在 MATLAB 建立出一個週期結構矩陣，元素僅包含 0 與 1 兩種整數，其中 0 代表遮蓋區，1 代表穿透區，對應現實中的透明

顯示器週期性結構，單位周期結構的尺寸 $\Lambda$ 與縱向橫向之金屬走線的寬度 $w_x$ 、 $w_y$ 皆為初始設定，令為輸入參考值，故可求得一初始的傳遞函數，並且可以通過傳遞函數代入式(3-5)來獲得強度分佈 $I_1$ ，演算程序中將此輸入參考值先設定為最佳解。此時，模擬計算出的強度分佈 $I_1$ 與面板實驗測得的強度分佈(如圖 3-14)可以計算出一個初始誤差值 $\varepsilon_1$ 。

再來，與輸入參考值之 $\pm 10\%$ ，亂數生成一組新的輸入對照組 $\Lambda$ 、 $w_x$ 、 $w_y$ ，隨後即可計算出一個對照組強度分佈 $I_2$ 與誤差值 $\varepsilon_2$ ，比較 $\varepsilon_1$ 與 $\varepsilon_2$ ，判斷何者結果較接近已知的實驗結果，即為較接近之傳遞函數結果。假若 $\varepsilon_2$ 數值較小，則表示對照組較接近正確的傳遞函數，則將此對照組數據 $\Lambda$ 、 $w_x$ 、 $w_y$ 記錄為新的輸入參考值，下一步，比較此新的輸入參考值是否比最佳解優秀，若是，則取代為新的最佳解。

若在 $\varepsilon_1$ 比 $\varepsilon_2$ 數值較小的情況下，則表示對照組之結果相較於參考組之結果並未獲得改善，理論上應該直接選擇放棄對照組，但是，為使得此演算程序有機率能夠脫離局部最低值極小值 (local minimum)，演算程序會有部分機率接受此較差結果，其數學式可以表示為

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} > Random \quad (3-6)$$

其中 $\varepsilon_1$ 與 $\varepsilon_2$ 表示新舊誤差值，而 $Random$ 則代表為一個介於0~10的亂數，此假設已知 $\varepsilon_2$ 大於 $\varepsilon_1$ ，故 $\varepsilon_1$ 與 $\varepsilon_2$ 之比值為一介於0~1之常數，使得此程序接受較差結果之機率為不定數，若新誤差值 $\varepsilon_2$ 越接近參考值 $\varepsilon_1$ ，則有越高機會能夠反轉結果使對照組成為新的參考值，並進入下一步驟，比較新參考值與最佳解，若新參考值比最佳解更理想，則取代最佳解，若無則否。而若 $\varepsilon_1$ 與 $\varepsilon_2$ 之比值小於亂數 $Random$ ，則放棄對照組，進入下一個迴圈。在無數地迴圈中，最佳解的 $\Lambda$ 、 $w_x$ 、 $w_y$ 持續地在更新。

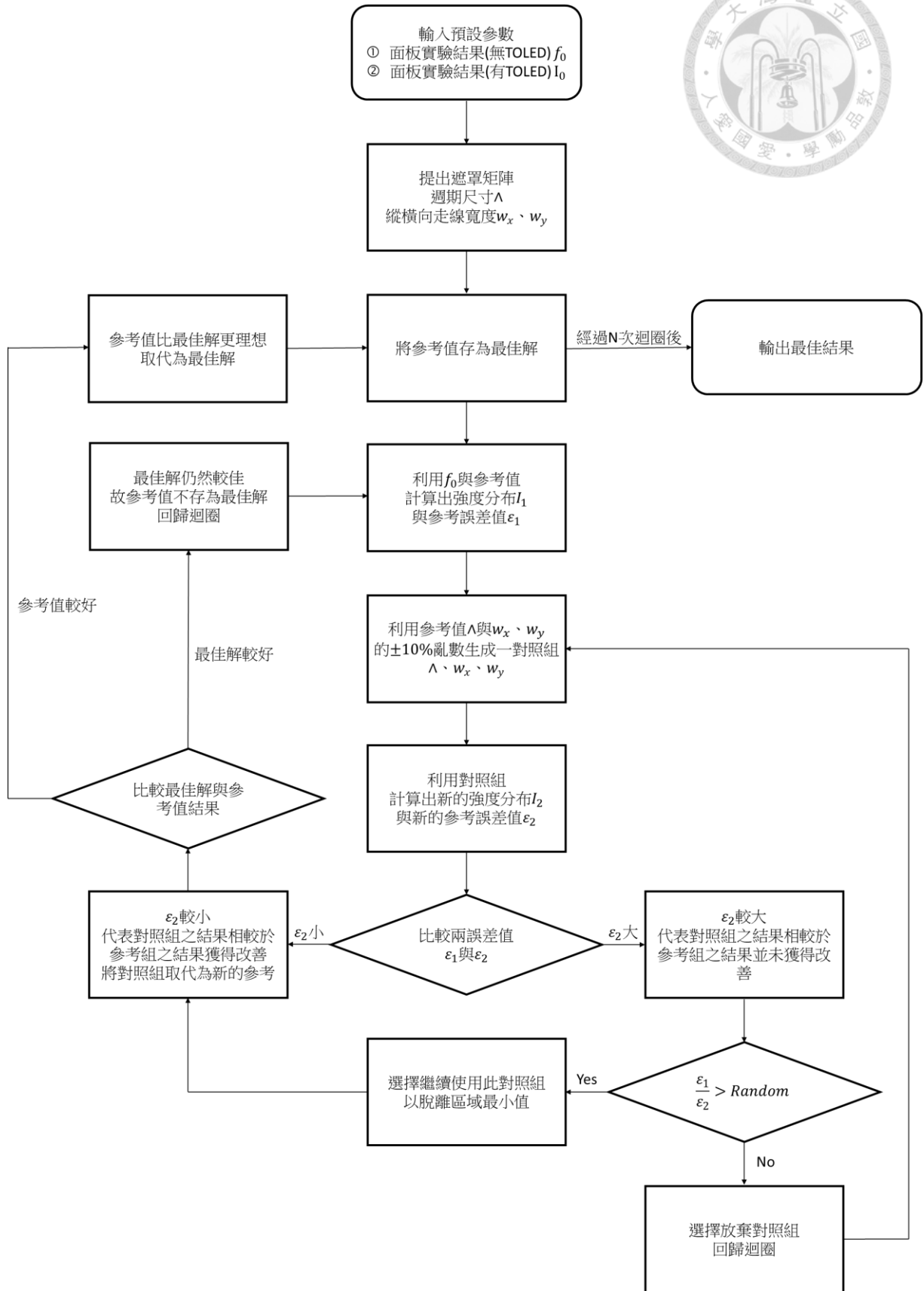


圖 3-18 傳遞函數之流程圖



### 3-6 傳遞函數演算成果

傳遞函數演算成果如圖 3-20 所示，首先討論模擬結果與面板實驗拍攝結果，可以注意到各階繞射中模擬結果與實驗結果有著相近的位置，第一階繞射皆在 0.6 mm 左右的位置上，再來討論 x 方向與 y 方向的中心切面疊圖，如圖 3-21 與圖 3-22 所示，其中藍色線段為經過曲線擬合後的實驗結果，橘色線段為模擬結果，可以注意到無論 x 方向或 y 方向，模擬數據中各繞射階的位置皆接近實驗結果，但仍就有些瑕疵，即各階繞射的強度不足，模擬結果與實驗數據的強度仍有落差，以下是幾種可能的原因，首先因為實驗結果的零階繞射是由曲線擬合後的結果，可能還是與真實結果有誤差，導致零階繞射的強度有些差異，使得傳遞函數結果強度無法補足，另外亦有可能是因為雜訊，在各階繞射之間可以注意到有一些強度較弱的雜訊，這些雜訊雖然看似微弱，但仍舊會影響結果。

最後，傳遞函數的結果如圖 3-23 所示，由以上討論可以確認傳遞函數是能夠推得透明顯示器對於拍攝點光源所造成的影響，即透明顯示器之 PSF，運用傳遞函數模擬出經過透明顯示器後的影像結果，但仍有改善的空間。

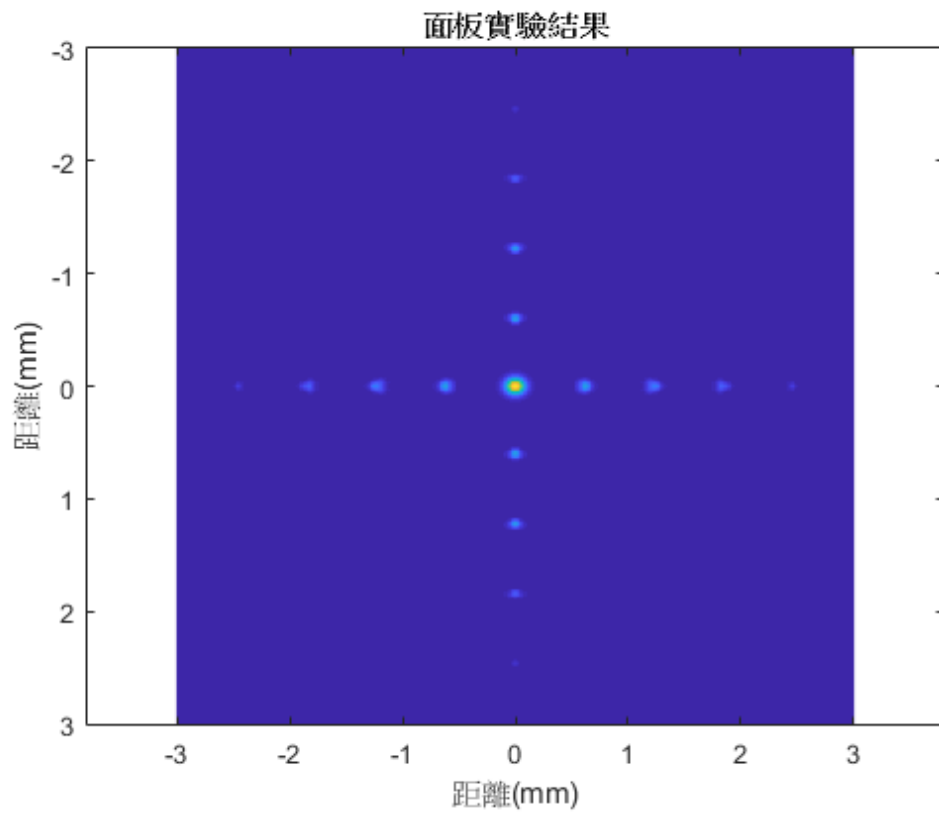


圖 3-19 面板實驗之二維結果

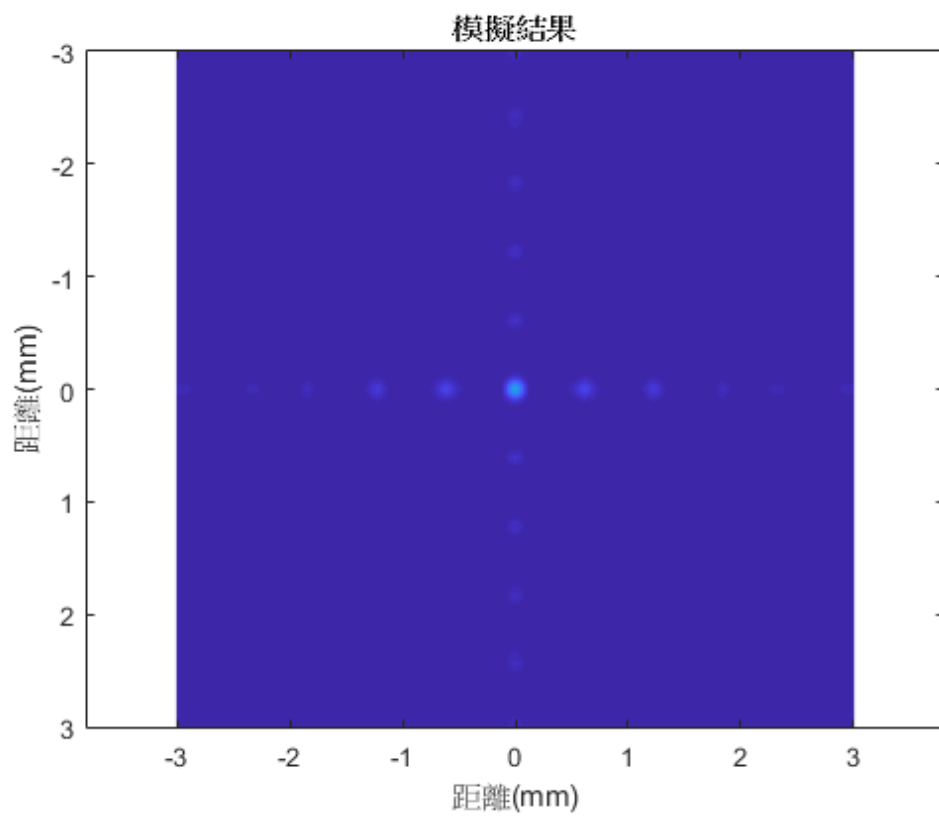


圖 3-20 傳遞函數演算之二維結果

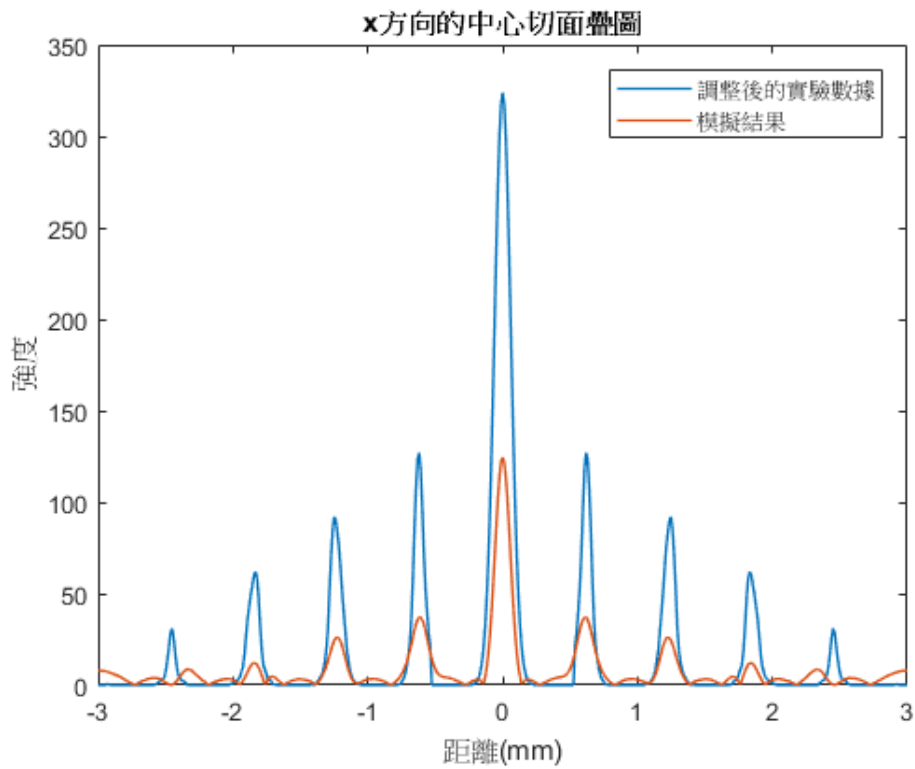


圖 3-21 傳遞函數演算之結果 x 方向截面疊圖

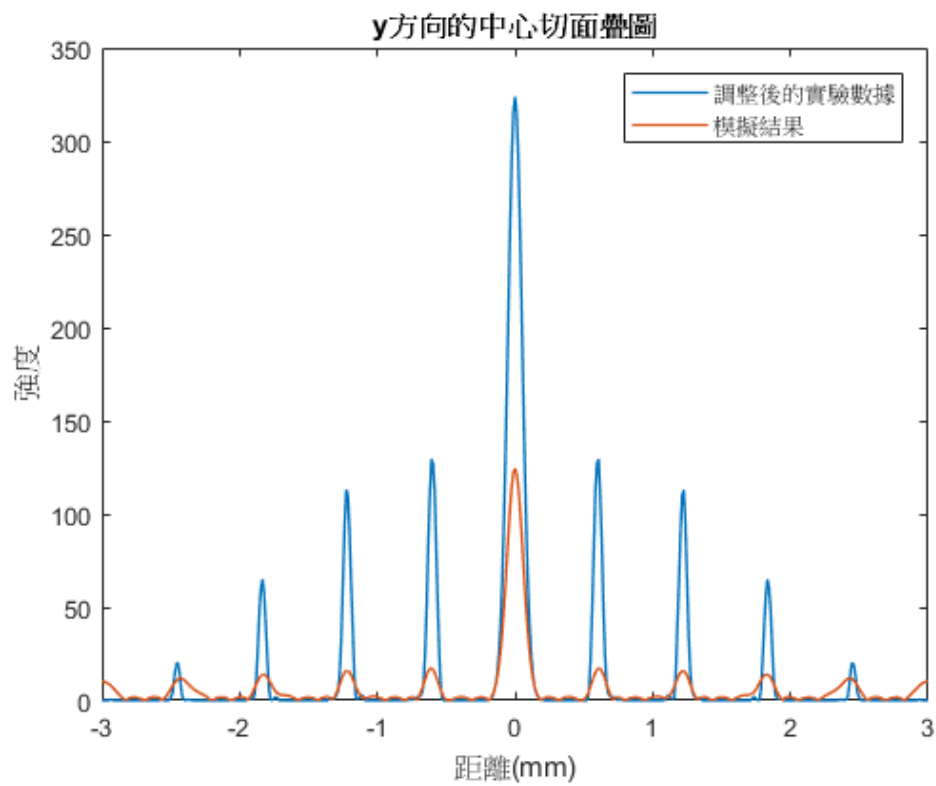


圖 3-22 傳遞函數演算之結果 y 方向截面疊圖

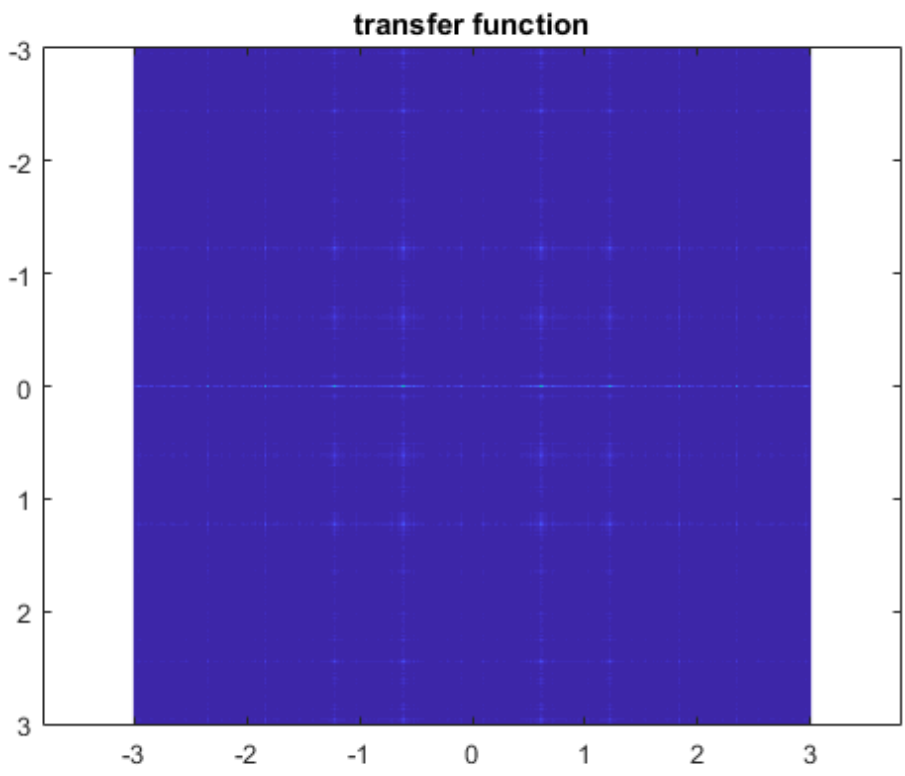
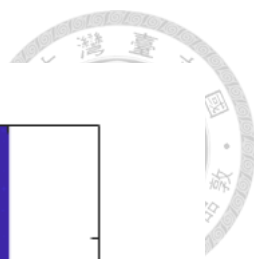


圖 3-23 演算之傳遞函數結果





### 3-7 方波調制-捲積

如同章節 3-6 的結果所示，可見到各階繞射的位置已經能夠準確地算出，但此演算結果仍舊存在些瑕疵，例如除了零階繞射以外，其餘繞射階的強度仍與實驗結果有所誤差，以及，演算結果在各階繞射之間仍出現了些許雜訊，本文定義為「高頻雜訊」，亦有可能因為這些高頻雜訊，導致演算產生誤差，造成除零階以外的繞射強度都沒辦法補足至實驗結果的強度。故針對高頻雜訊做了一項處理的步驟，能夠減少高頻雜訊且使得繞射結果更接近實驗結果。

此程序的目的是找出最接近實驗結果的模擬結果，利用調變週期結構的矩陣來達到。目前使用的週期結構矩陣由 0 與 1 兩種元素組成，其中遮蓋區的元素為 0，原因是遮蓋區的光會被吸收，故數學上意即 0，反之穿透區為 1，其示意圖如圖 3-24 所示，如同週期的方波函數一般。可以注意到元素 0 與 1 交界處，其波型會有著十分銳利的直角，在傅立葉光學中，方波在經過快速傅立葉轉換後會出現大量的高頻訊號，因為快速傅立葉是由 N 項的正弦波疊加而成，N 數越大，則疊加出的波型越接近原始方波之波型，高次項的 N 為高頻諧波，故在快速傅立葉轉換後，方波會出現大量高頻訊號，造成如同章節 3-6 的結果底下的高頻雜訊。

為了減少高頻雜訊的干擾，進行方波調制的程序，根據上述之推理，目前要做的是將週期結構矩陣的銳利直角削弱，其方法如圖 3-25 所示，假設一個高斯分布，其半腰全寬相較於方波窄了許多，將這個高斯分布與方波進行捲積計算，利用捲積的方法來使得方波的邊緣不再如此銳利。

方波調制的程序流程示意圖如圖 3-26 所示，在之前的演算程序(如圖 3-18)中的提出遮蓋矩陣的過程中，多加一道程序，首先輸入一個高斯分佈的尺度參數  $\sigma$ ，利用此尺度參數  $\sigma$  計算出一高斯分佈，將此高斯分佈與原先程式已經計算出的週期結構矩陣進行捲積，即完成了方波調制的動作，再將此矩陣帶回原先程式繼續計算，每當完成一次迴圈後，將先其提出的尺度參數  $\sigma$  乘上  $\pm 10\%$  的常數，讓尺

度參數在小幅度內微調，再帶到下一次的迴圈中。經過多次迴圈後輸出結果。

調後的結果如圖 3-29 與圖 3-30 所示，首先討論模擬結果與面板實驗拍攝結果的 x 與 y 方向切面結果，可以注意到相較於為進行方波調制之前的結果，方波調制後的結果在強度上有了顯著的改善，尤其零階繞射的強度已經趨近於實驗結果，在經過方波調制後的結果可以看到，模擬結果的高頻雜訊衰減許多，這部份與預期的結果相同。

由結果可以見到最終的模擬結果與實驗數據十分接近，其各階繞射的位置相當接近實驗數據，且高頻雜訊也低了許多，但仍存有些問題，即其高階繞射的強度仍然明顯不足，原因可以歸咎於此實驗數據是經過曲線擬合的程序，而曲線擬合的結果可能相較於真實結果，零階繞射高出了一些，倘若曲線擬合後的零階繞射強度低一些，會使得在傳遞函數程序中的誤差計算的錯誤減少許多，使得高階繞射的強度更接近正確結果。

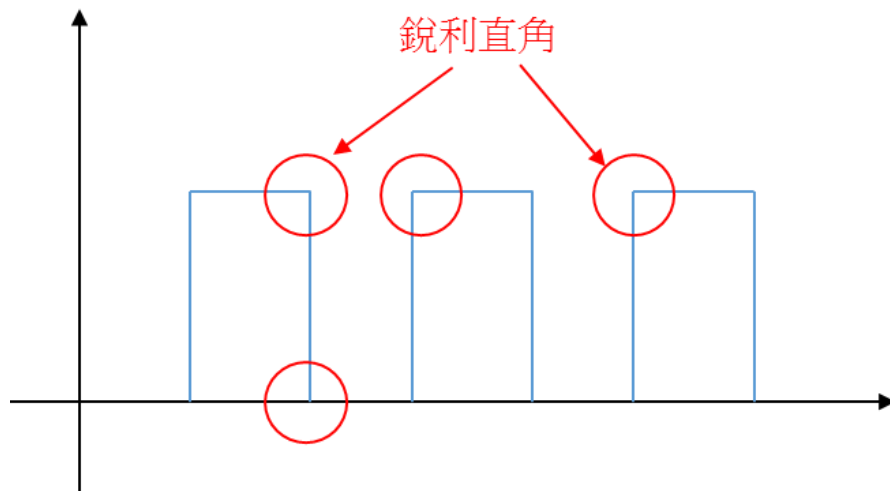


圖 3-24 方波示意圖

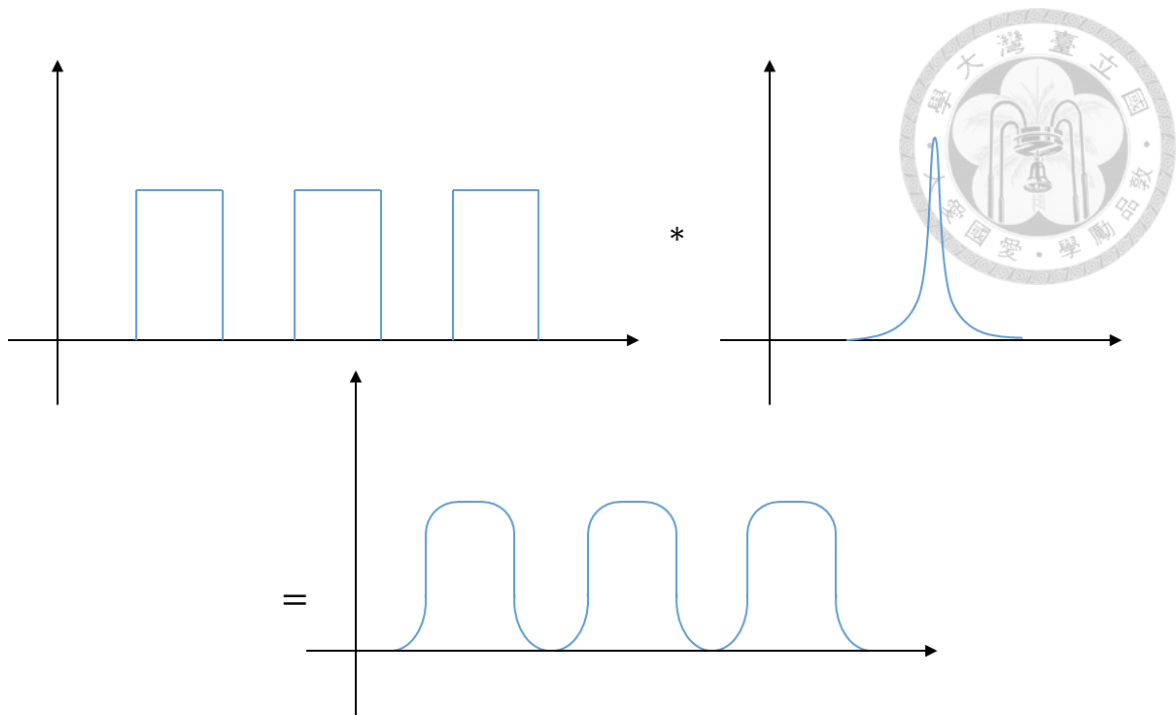


圖 3- 25 方波調制之捲積方法示意圖

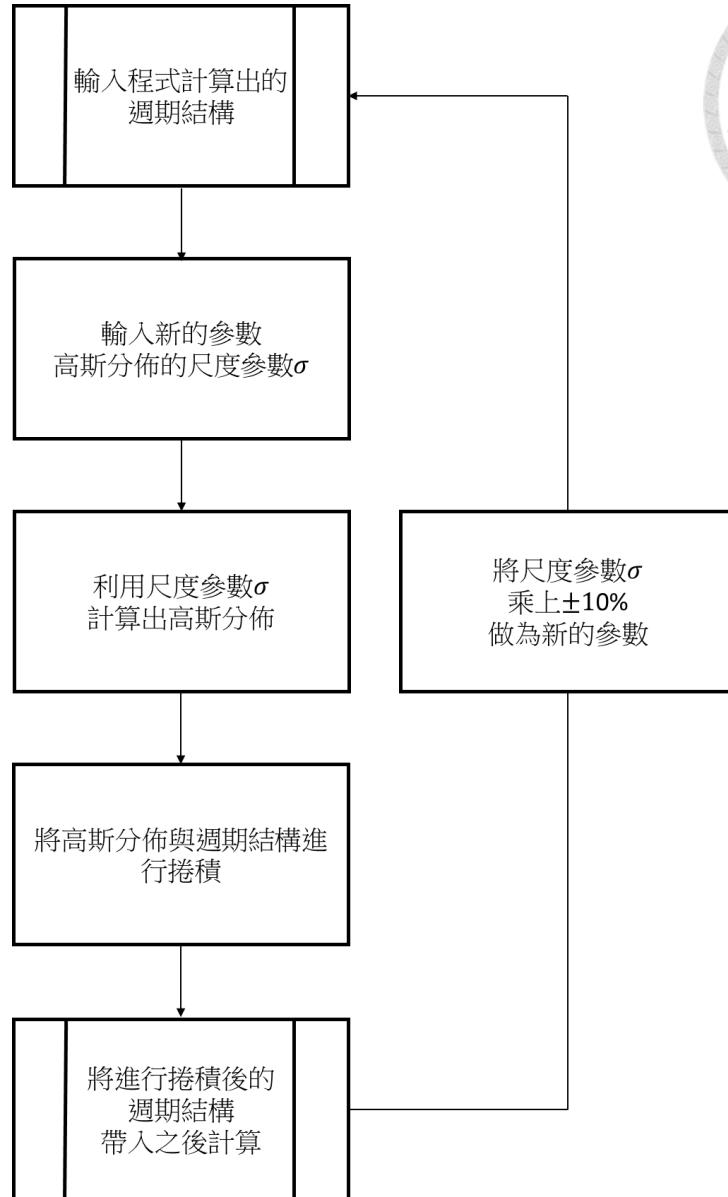


圖 3-26 捲積方法方波調制之示意圖

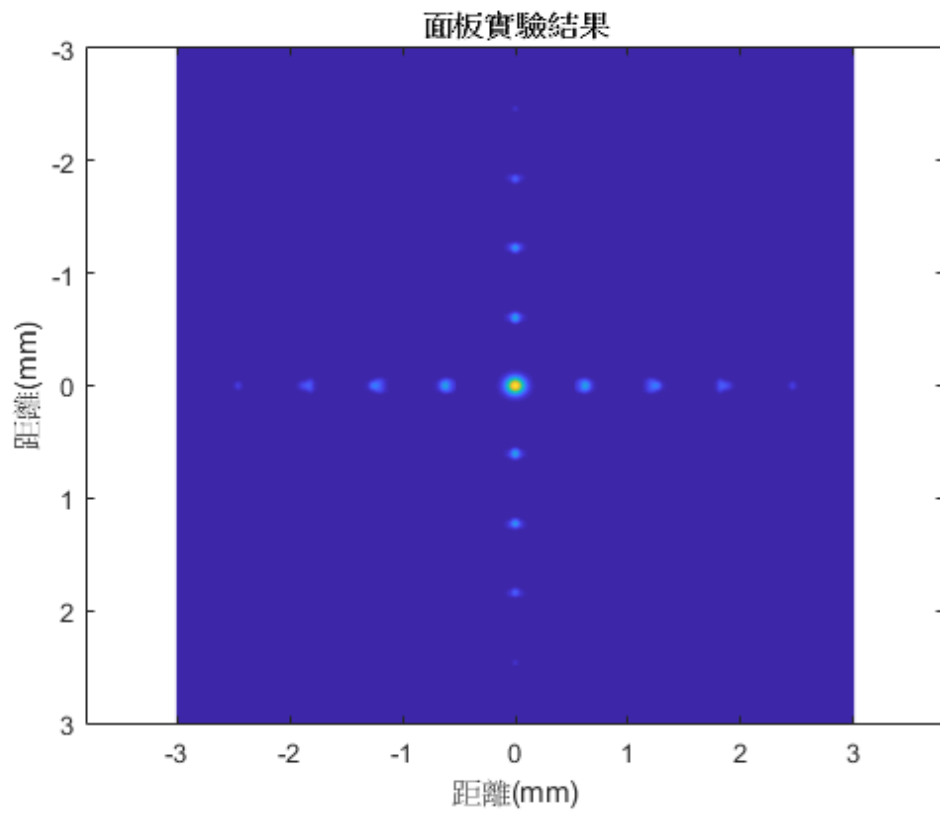


圖 3-27 面板實驗之二維結果

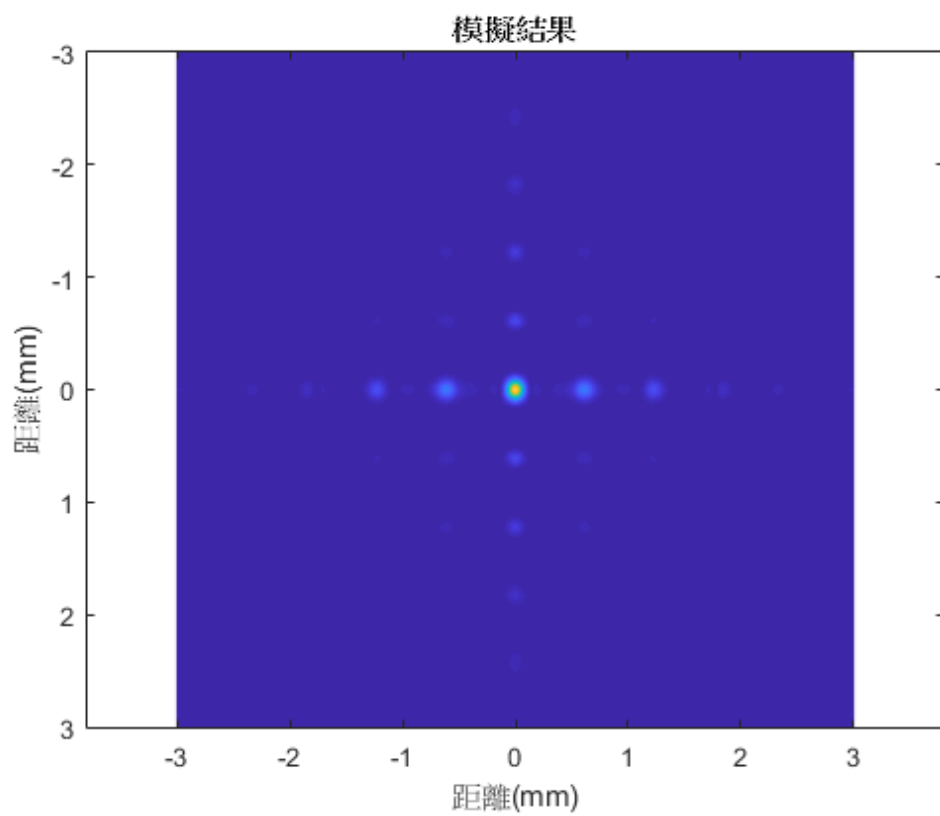


圖 3-28 方波調制後的模擬結果

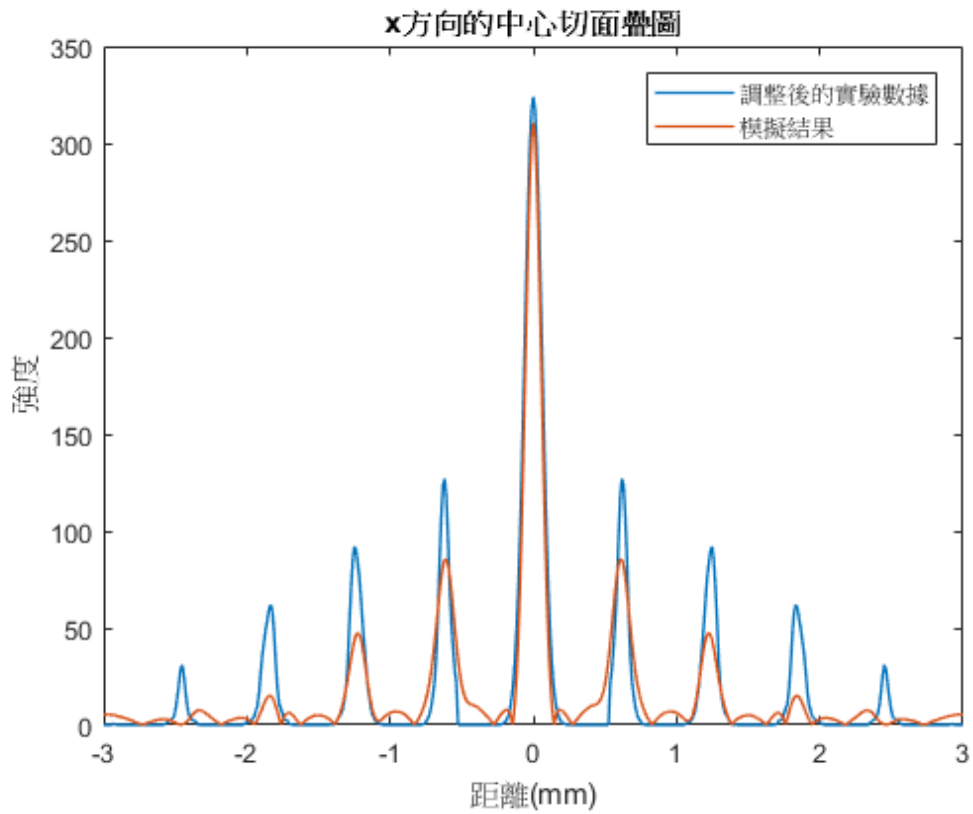


圖 3-29 面板實驗與模擬結果之 x 方向切面疊圖

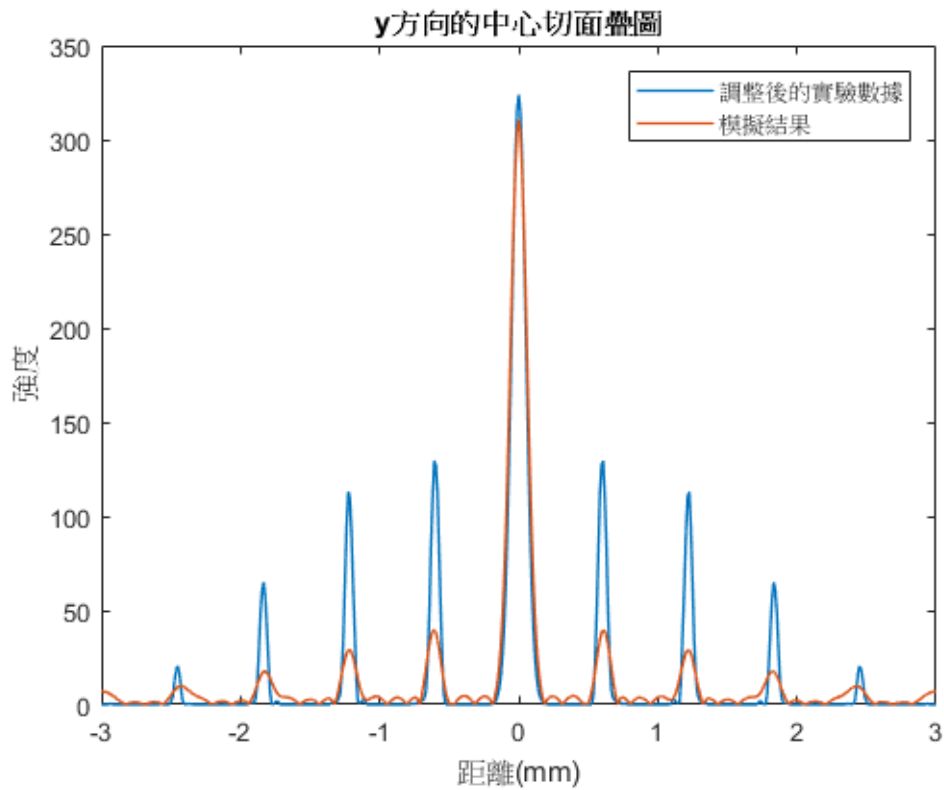


圖 3-30 面板實驗與模擬結果之 y 方向切面疊圖

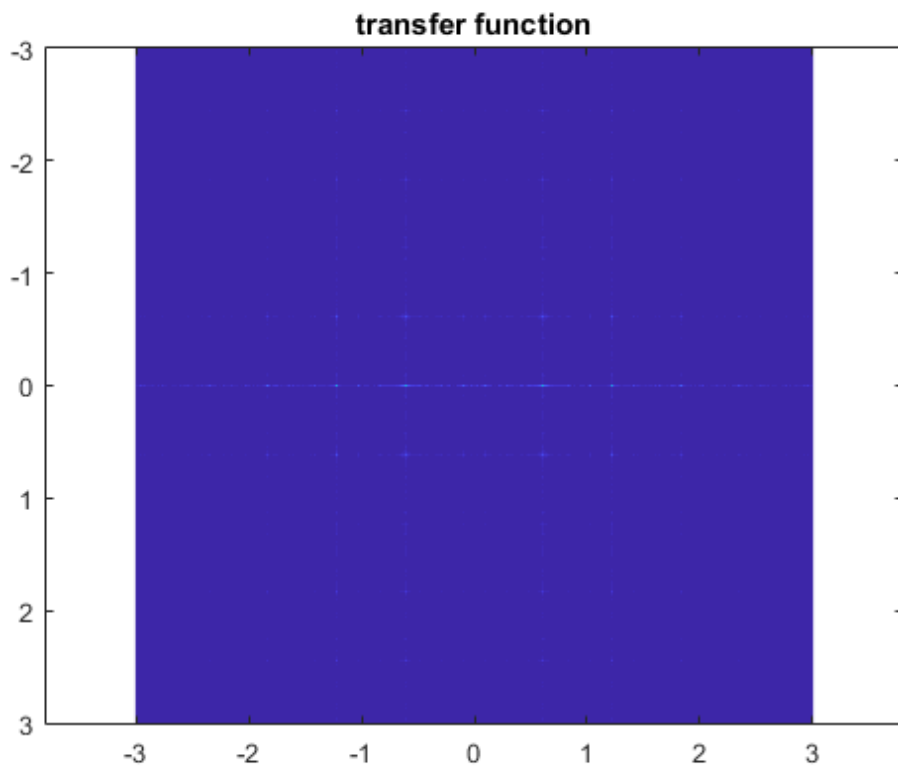
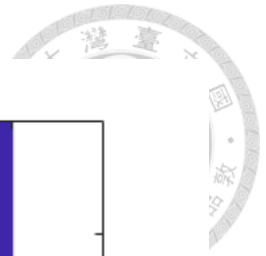


圖 3-31 經過方波調制後的傳遞函數結果



### 3-8 方波調制-亂數

在 3-7 章節中，我們利用週期結構與高斯分佈進行捲積，得到調制後的方波，利用這個方法來得到更好的模擬結果，再接下來的研究中，我們嘗試了另外一種方波調制的方法，可以計算出更精確的模擬結果。

此程序的目的是找出最接近實驗結果的模擬結果，利用調變週期結構的矩陣來達到。有別於與高斯分佈捲積，此章節採用的方法是直接將週期結構中任意格子點都隨機加上 $\pm 0.001$ 的數值，讓原本是 0 與 1 的兩種元素隨機變化，其原理與蒙地卡羅方法相似，利用隨機取樣的方法來近似出最佳解，方法示意圖如圖 3-32 所示，由於相較於 0 與 1， $\pm 0.001$ 是個極小的數值，可以用來隨機調變，在經過多次的迴圈後，解出最精確的模擬結果，模擬流程圖如圖 3-33 所示。

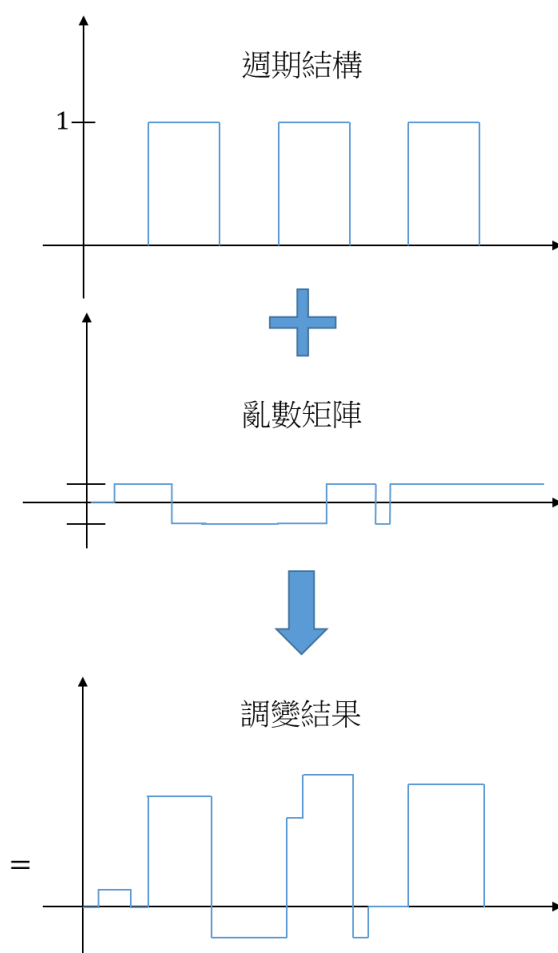


圖 3-32 亂數方法之方波調制示意圖



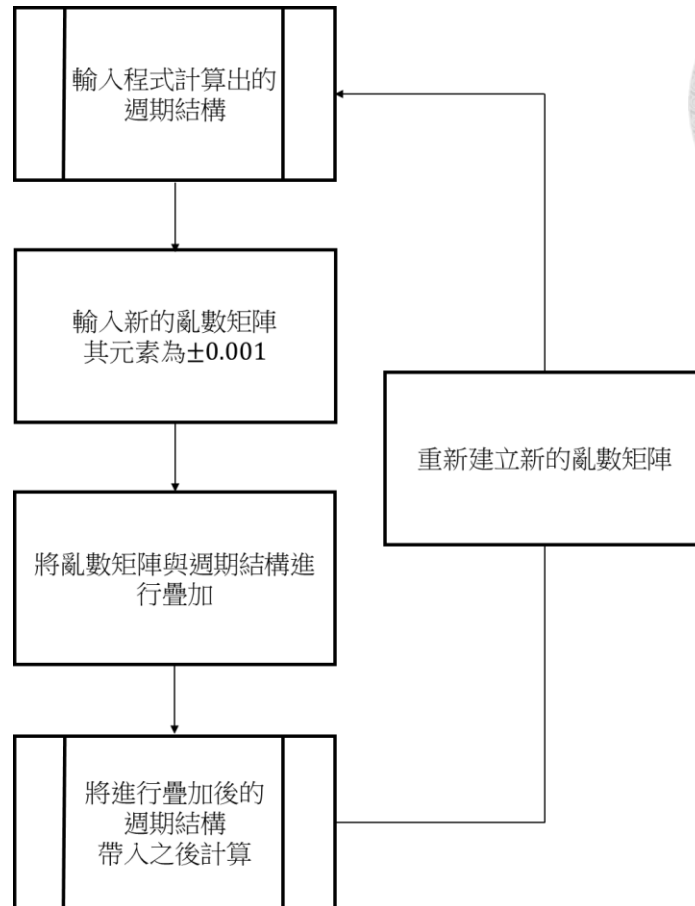


圖 3-33 亂數方法之方波調制流程圖

模擬成果如下，首先討論面板實驗結果與模擬結果 x 方向與 y 方向的切面疊圖如圖 3-36 與圖 3-37 所示，可以注意到相較於 3-7 章節的結果，強度又更加補足，尤其零階繞射的強度已經幾乎等於實驗結果，並且原先會影響模擬結果的高頻雜訊也獲得大幅的減弱，如今已經幾乎沒有高頻雜訊，也因如此，各階繞射的強度才得以補足，否則高頻雜訊會影響誤差值的計算，在強度的部份，目前僅剩零階以外的高階繞射其強度沒辦法補足，這部份的原因歸咎於零階繞射的強度，因為零階繞射的強度是由曲線擬合的結果補出的，所以結果仍就可能與實際結果有誤差，導致補出的零階繞射強度不正確，就此結果可以推測，可能曲線擬合的結果強度過低，使得相較於其餘高階繞射，零階繞射的強度沒有實際的高，導致在後來的模擬中，即使零階的強度已經補足，但其他高階繞射仍不足以抵到實際結果，雖然如此，模擬的結果已經與實際結果有高度的相似。

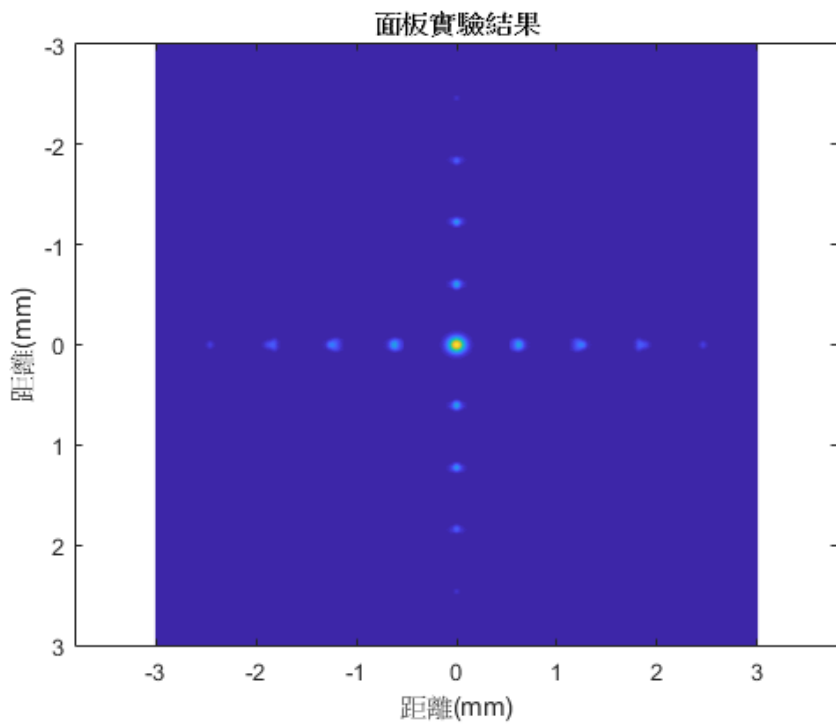


圖 3-34 面板實驗之二維結果

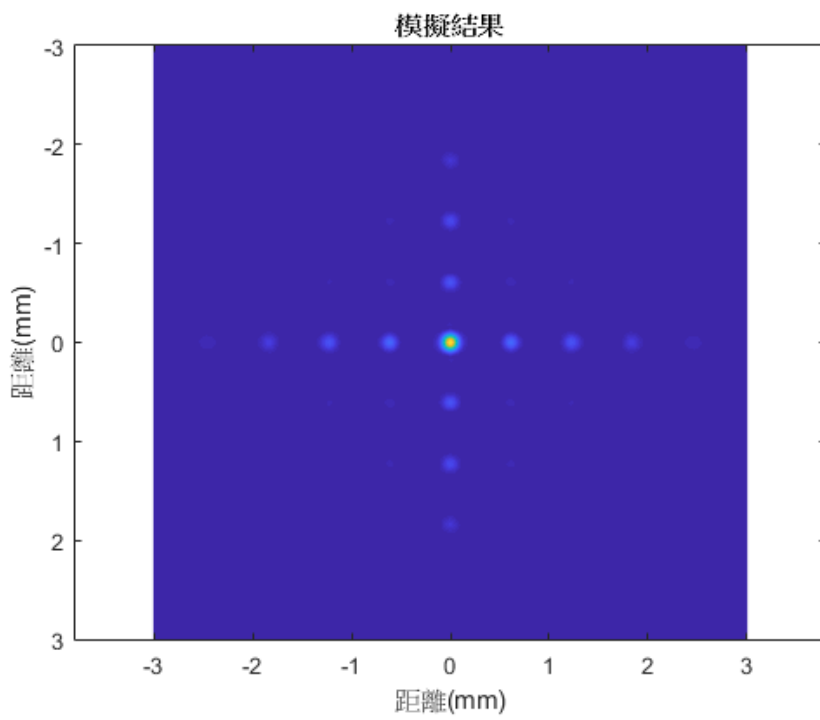


圖 3-35 方波調制後的模擬結果

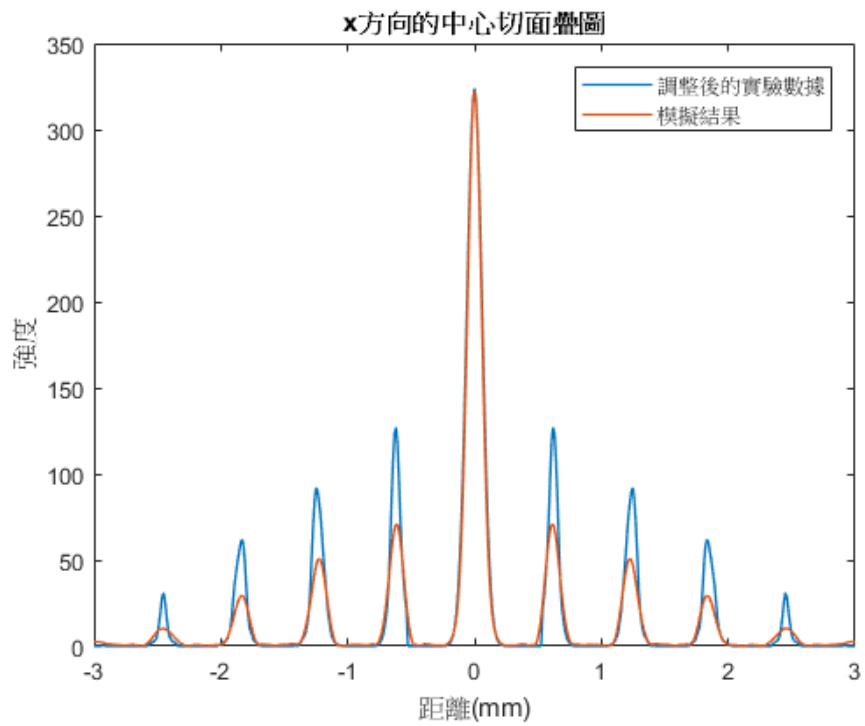


圖 3-36 面板實驗與模擬結果之 x 方向切面疊圖

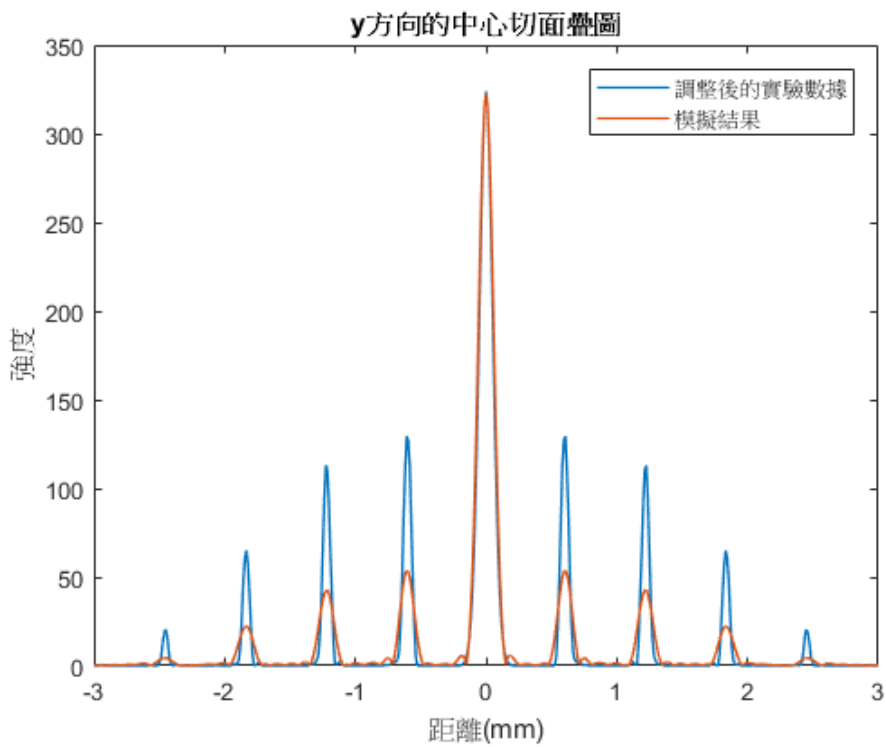


圖 3-37 面板實驗與模擬結果

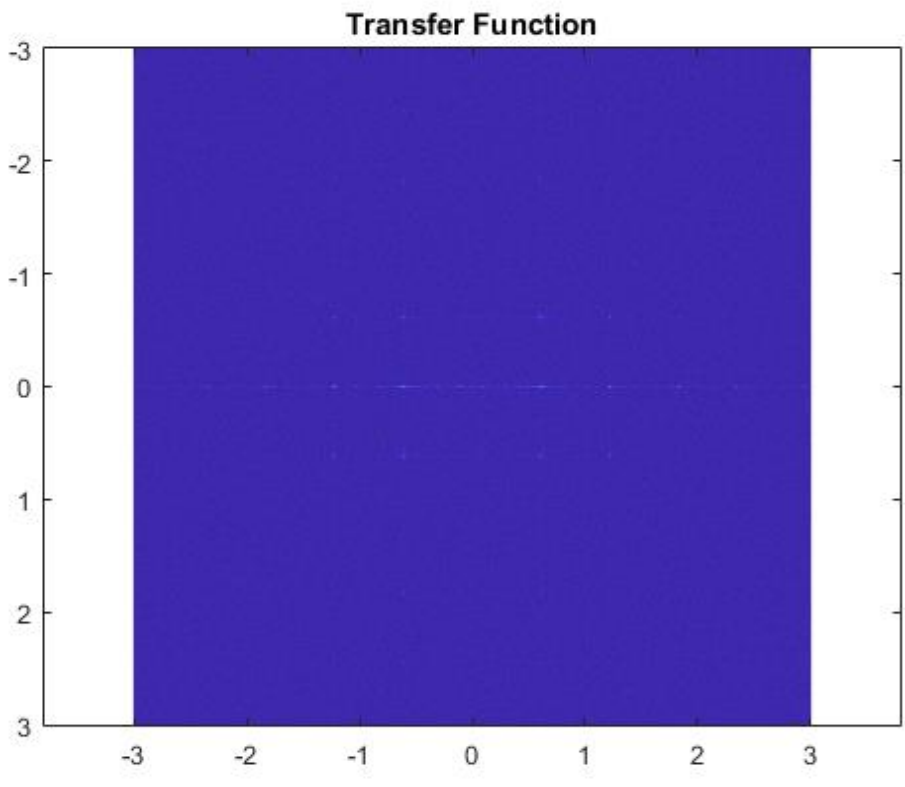
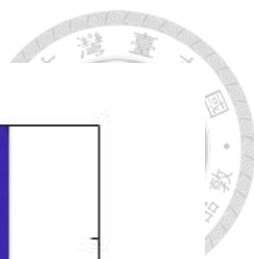


圖 3-38 經過方波調制後的傳遞函數結果

## 第四章 透明顯示器的成像演算



### 4-1 研究目的與總述

在第三章中，經由透明顯示器所拍攝之點光源的實驗數據，已經可以利用所拍到的點光源以及透明顯示器的週期結構參數計算出繞射後的十字光點分布，且經由第三章的演算結果，也確認到透明顯示器的後景圖像是可以利用數學軟體模擬計算出來的，綜合上述結論，下一步要編寫出一個成像演算程序，在不依靠任何拍攝得到的實驗數據情況下，經由輸入透明顯示器的結構參數、後景與透明顯示器的距離以及透明顯示器與人眼的距離，就可以計算出人眼所觀察到的後景影像狀況，即透明顯示器與光學系統的 PSF，進而評估透明顯示器對後景影像的影響，未來有了這項技術，就可以運用此成像演算，快速且精準的計算出後景影像，對於將來透明顯示器的結構優化與改良將帶來極大的便利性。

### 4-2 成像演算程序

成像演算的流程圖如圖 4-1 所示，此演算法的矩陣皆為 8192 x 8192 個格子點，對應的實際長寬距離為 10 cm x 10 cm，而預設的傳播距離參數與面板實驗狀況二相同，光源到透明顯示器的距離為 25cm，透明顯示器與觀察面距離 0.5cm，透明顯示器的結構參數也與 3-2 章節的相同。

就如同面板實驗一般，起初的光源同樣選擇點光源，考慮到點光源在傳播距離較短時光強分佈為球面波，故程序中光源的數學表示式為

$$u(R) = \frac{A}{R} e^{-ikR} \quad (4-1)$$

其中  $u$  代表球面波， $A$  代表振幅， $R$  代表空間中任一點與光源的距離， $k$  代表波數，在光源傳播 25cm 後抵達透明顯示，如圖 4-2 所示。再來，光源穿過透明顯



示器時發生了繞射，透明顯示器之示意圖如圖 4-3 與圖 4-4 所示，穿過透明顯示器後，並再傳播 0.5cm 後到達相機光圈位置，此處為一菲涅爾近場繞射，帶入近場繞射公式

$$U(x, y) = \iint U(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad (4-2)$$

$$h(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{\frac{jk}{2z}(x^2+y^2)} \quad (4-3)$$

其中  $U(x, y)$  代表觀察面的光場分佈，即為所求， $U(\xi, \eta)$  代表繞射面的光場分佈，在上一個步驟中已經求得， $h(x - \xi, y - \eta)$  代表脈衝響應， $k$  代表波數， $\lambda$  代表入射光波長， $z$  代表傳播距離，其處傳播距離為 0.5cm， $(x, y)$  代表觀察面的座標軸， $(\xi, \eta)$  代表繞射面的座標軸，代入公式後求得繞射結果，繞射結果如圖 4-5 所示。

再來下一步，光線將會進入相機或人眼進行接收，首先會先經過光圈或瞳孔，此處對應到面板實驗所使用的相機光圈，光圈之數學表示式如數學式(4-4)所示，光圈之示意圖如所示，光線穿過後結果如圖 N 所示。

$$\text{Aperture} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4-4)$$

經過光圈的過濾後，光線將進入透鏡並到達感測器進行接收，光線經由薄透鏡之後的成像結果可由傅立葉轉換計算得出，後焦面的光場分佈是透鏡前光場的傅立葉轉換，數學式如下



$$U_f(u, v) = \frac{\exp\left[j\frac{k}{2f}(u^2 + v^2)\right]}{j\lambda f} F\{U_0\} \quad (4-5)$$

其中 $U_f(u, v)$ 代表後焦面的光場分佈， $U_0$ 為透鏡前的光場， $\lambda$ 為入射光波長， $f$ 代表透鏡之焦距，又後焦面的光場分佈的座標 $(x, y)$ 可以由下列公式轉換

$$f_\xi = \frac{x}{\lambda f}, f_\eta = \frac{y}{\lambda f} \quad (4-6)(4-7)$$

其中 $f_\xi$ 、 $f_\eta$ 代表繞射面的場頻率，經由計算可得後焦面的座標 $(x, y)$ 。[28]

由以上計算流程，可得到點光源在通過透明顯示器後，由相機接收到的影像結果。

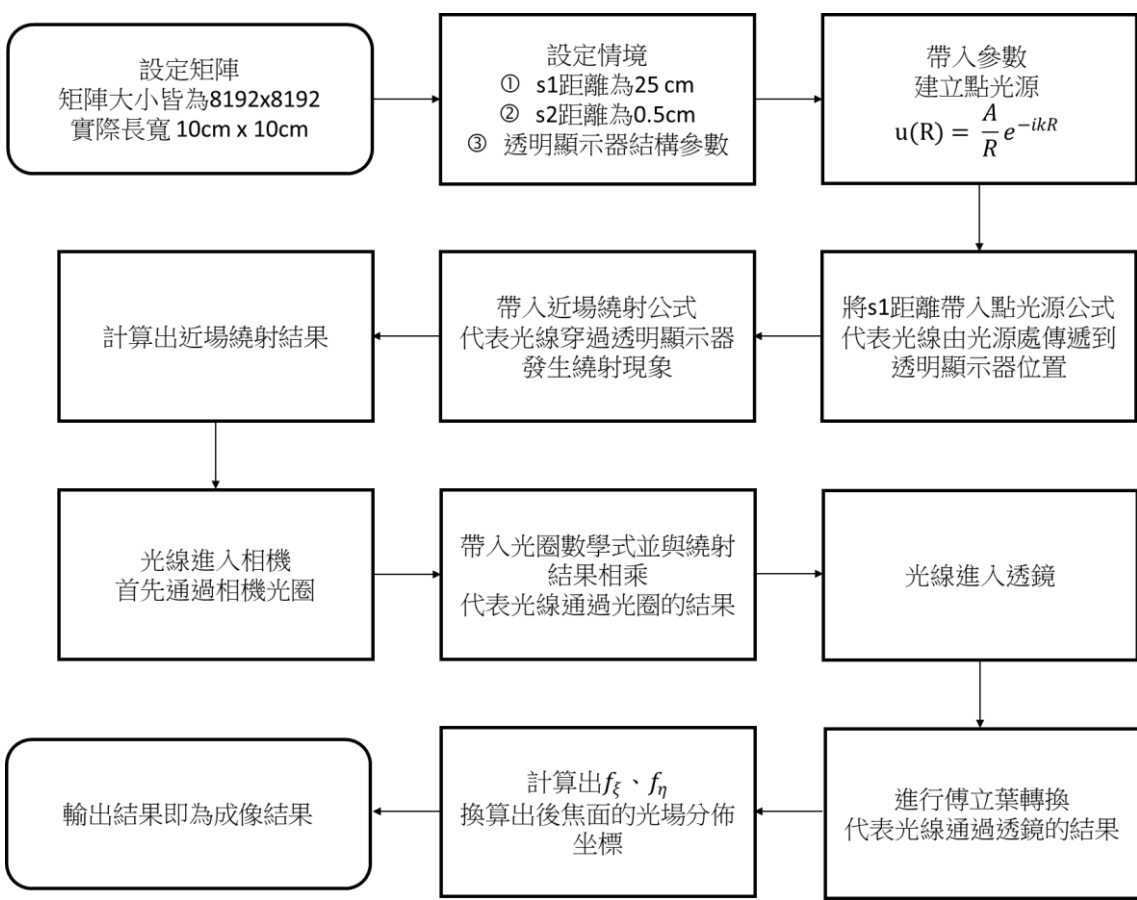


圖 4-1 成像演算之流程圖

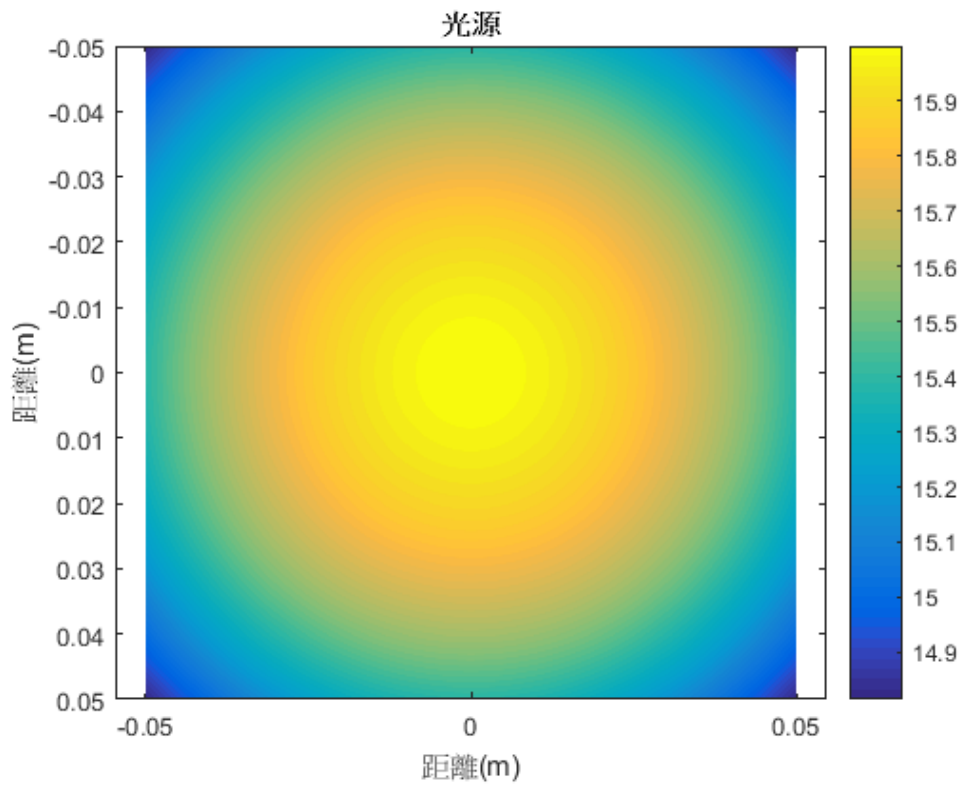
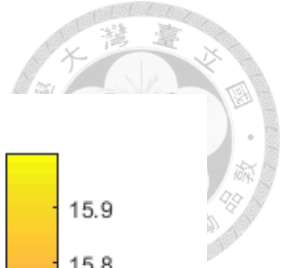


圖 4-2 成像演算之球面波圖

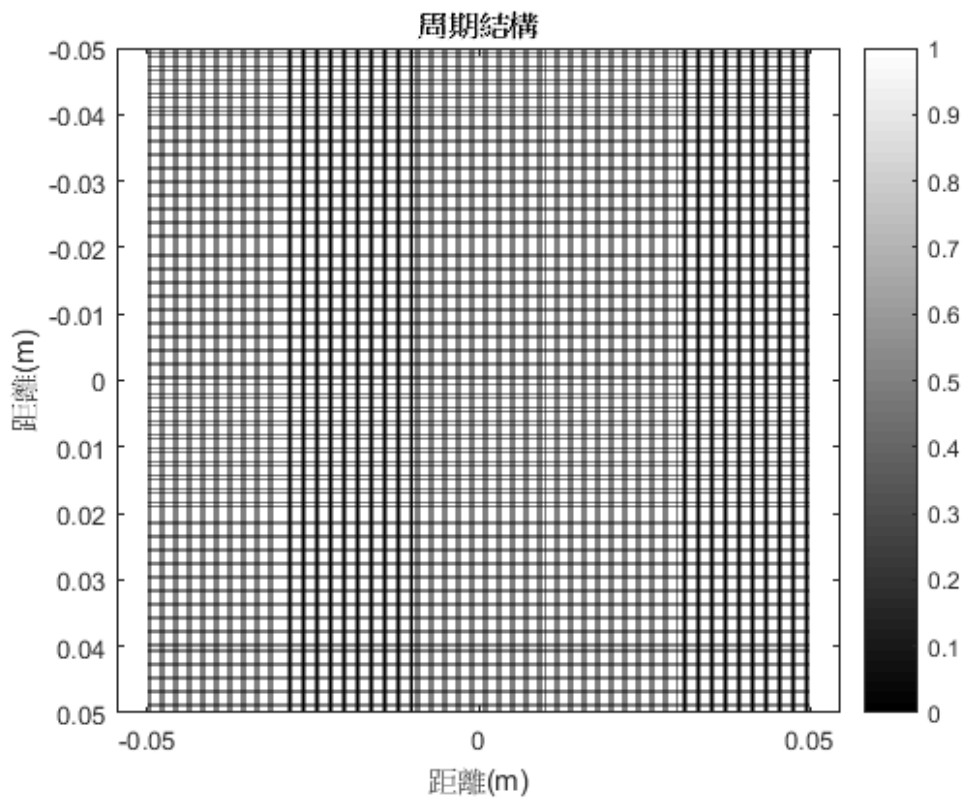


圖 4-3 成像演算之週期結構圖



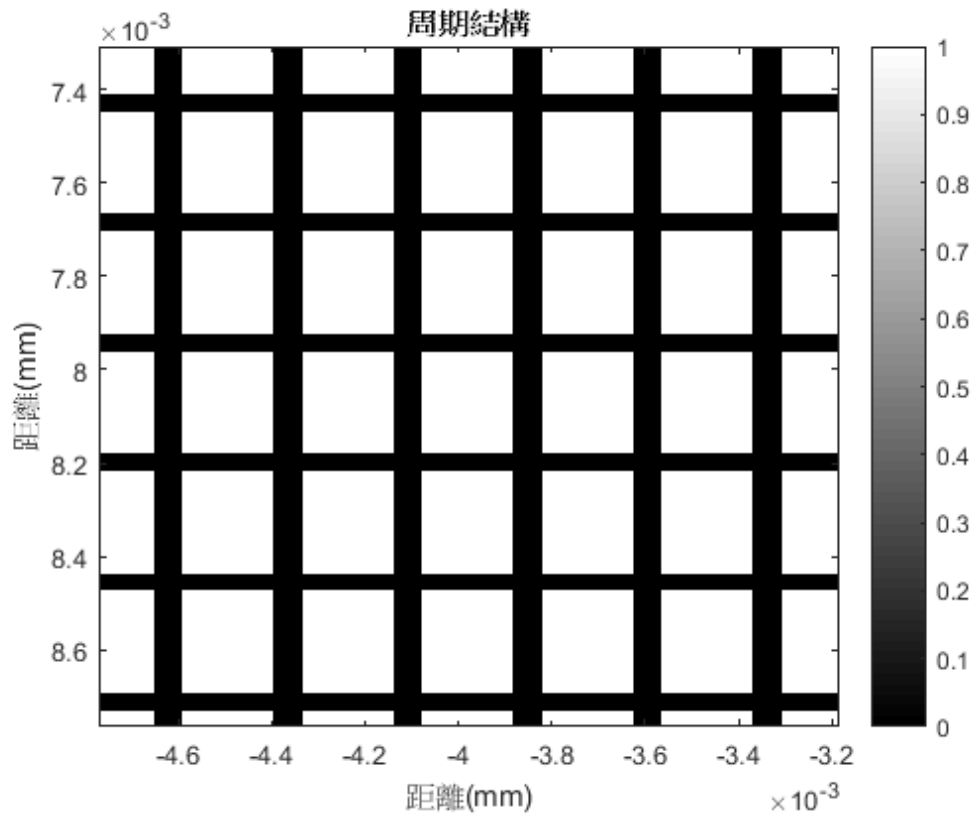
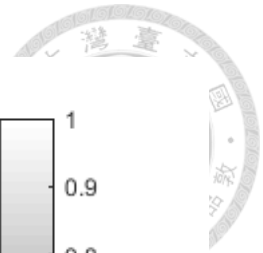


圖 4-4 成像演算之週期結構放大圖

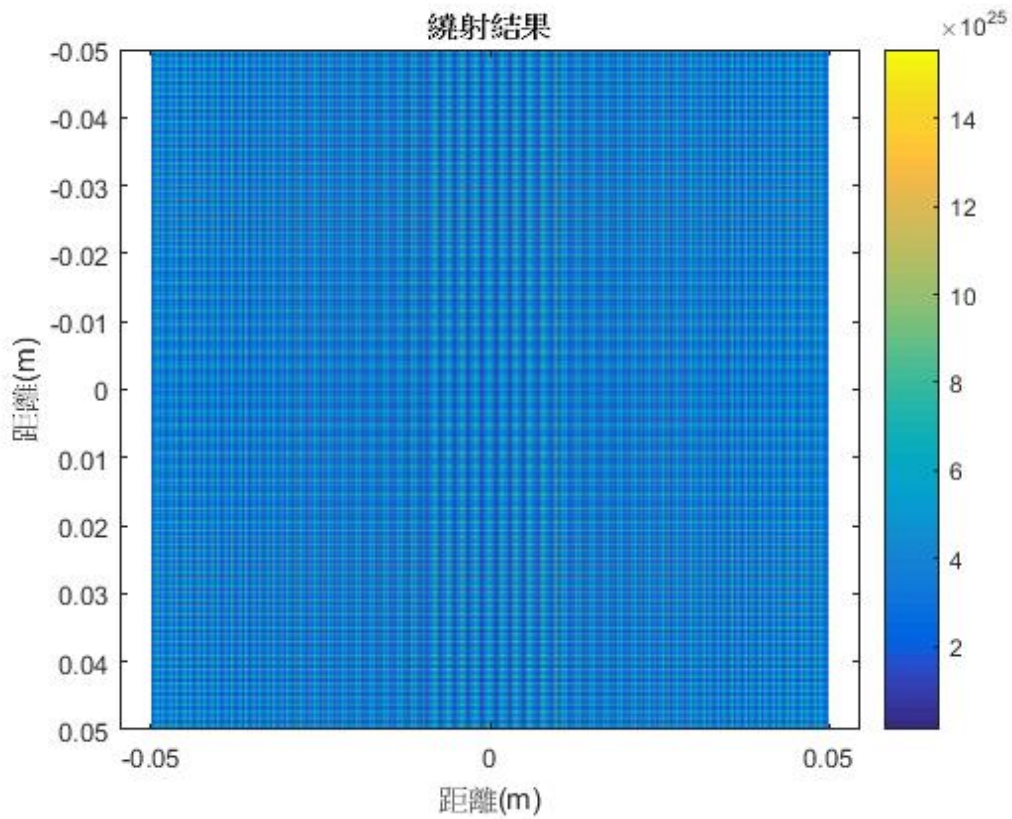


圖 4-5 成像演算之繞射結果圖

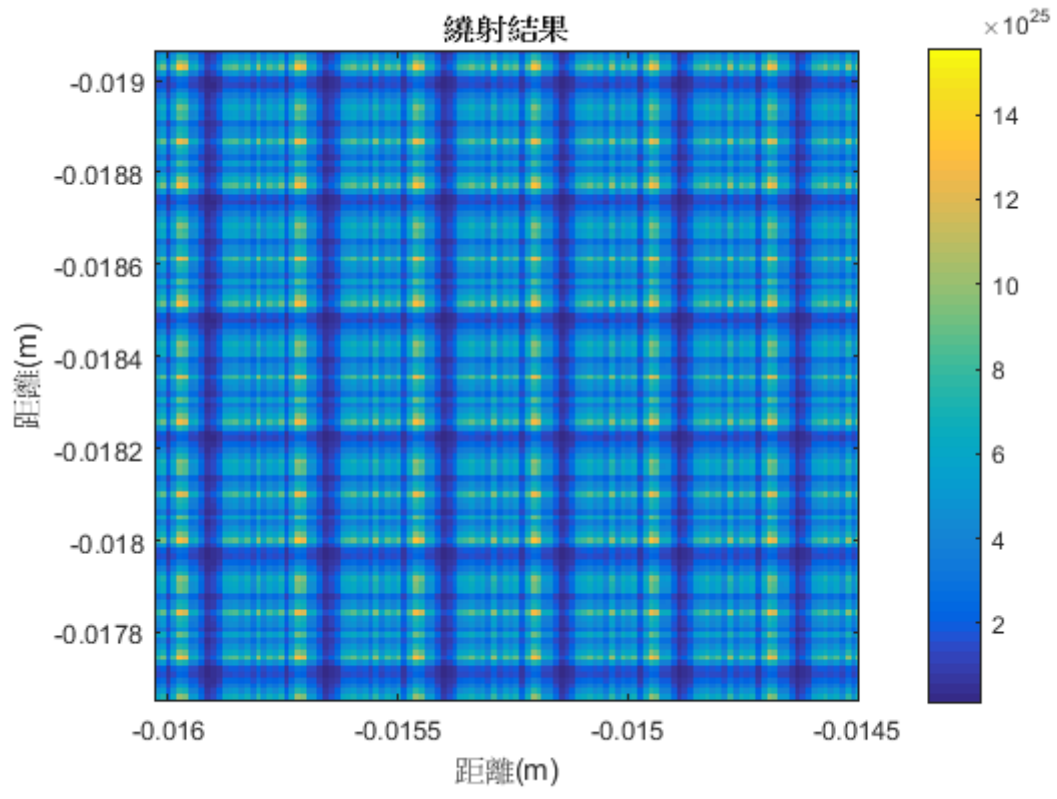
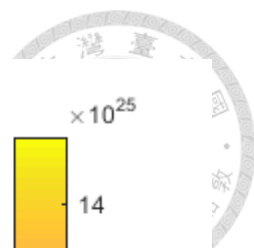


圖 4-6 成像演算之繞射結果放大圖

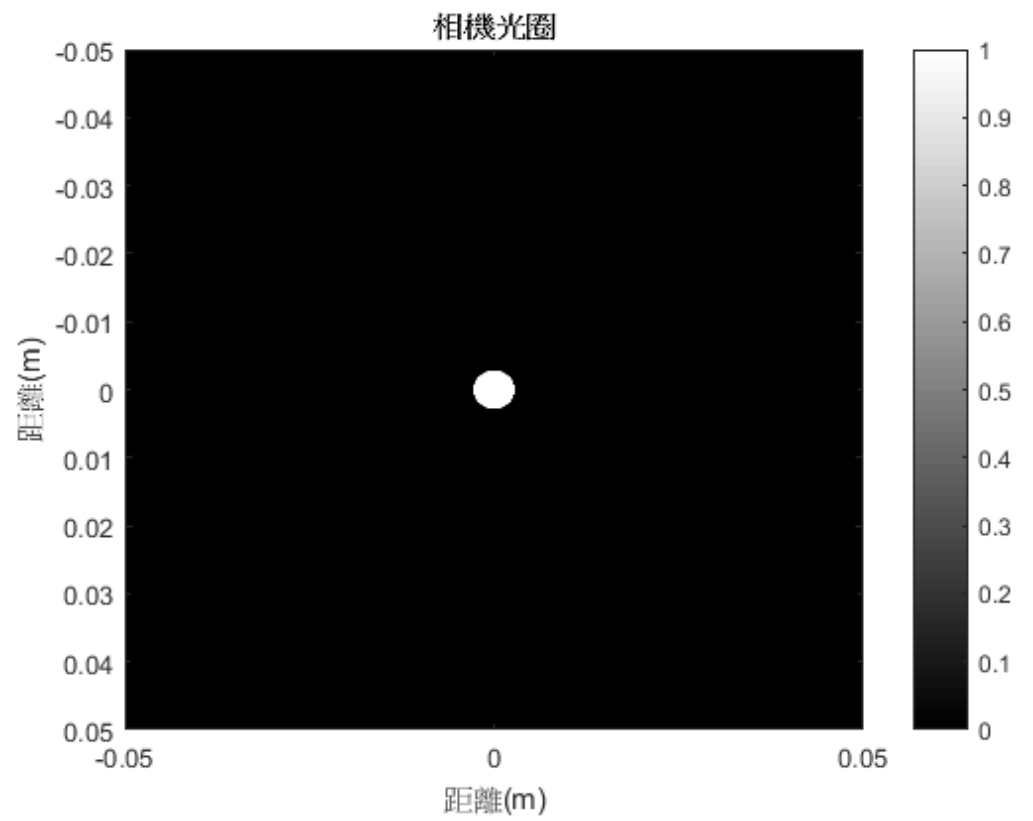


圖 4-7 成像演算之相機光圈圖

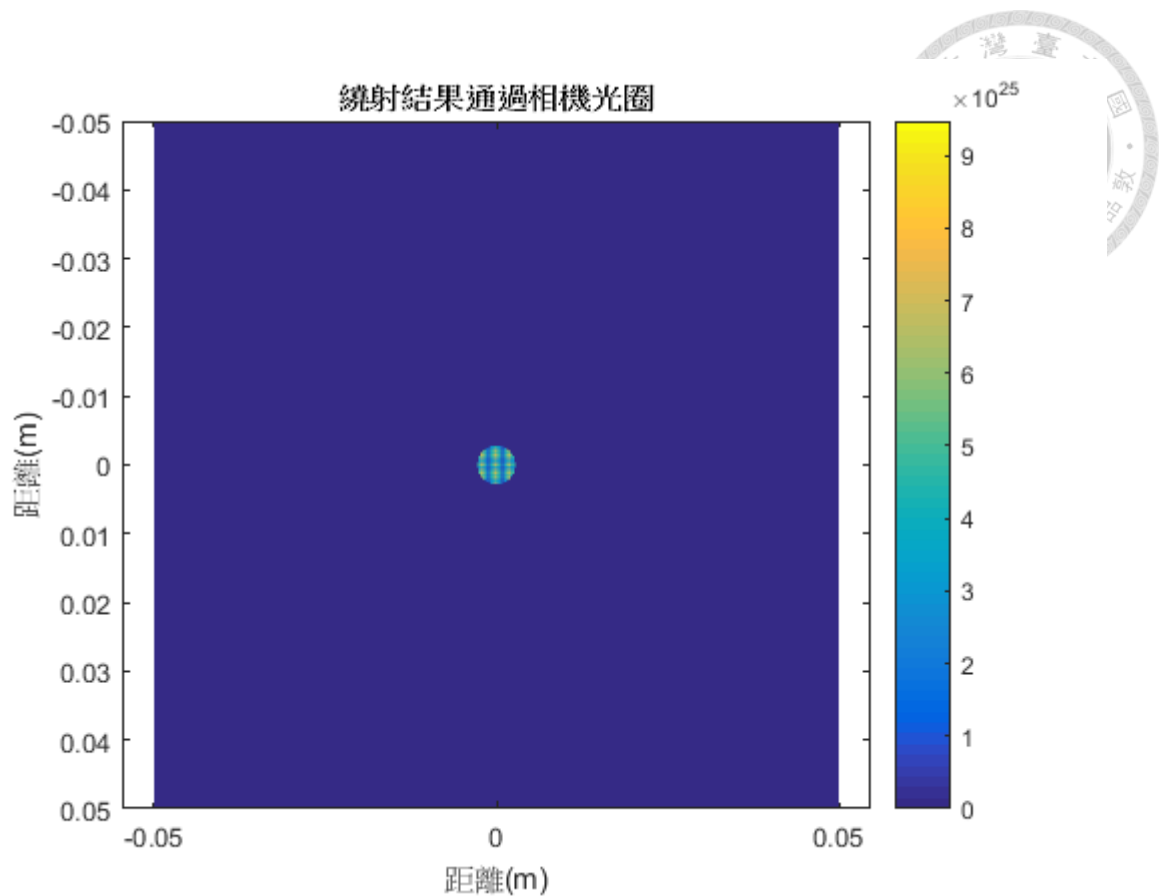


圖 4-8 成像演算之繞射光通過相機光圈圖

#### 4-3 成像演算成果

成像演算的結果如圖 4-9 與圖 4-11 所示，首先可以注意到各峰值的位置近乎完全一致，圖 4-10 為面板實驗數據之結果，其各階繞射之位置符合光柵繞射公式，在約±6階的繞射，會發生強度回升的現象。

另外可以注意到，由模擬結果可發現在各階繞射之間，仍存有些許能量，但觀察面板實驗結果並未發現類似的情況，其原因主要歸咎於相機的感測器有關，相較於中心的零階繞射強度，其餘繞射階的強度低上去多，而各階繞射外的能量更是，故相機無法接收到如此微弱的能量，且有可能在拍攝後因為相機內部的影像後處理，將這些微弱能量減弱至零。

經過演算結果可知，此演算程序能夠快速且精準的計算出透明顯示器的 PSF，即點光源經過透明顯示器後，被相機或人眼接收的結果，在未來，利用此

程式能夠輔助許多的透明顯示器的開發與優化。

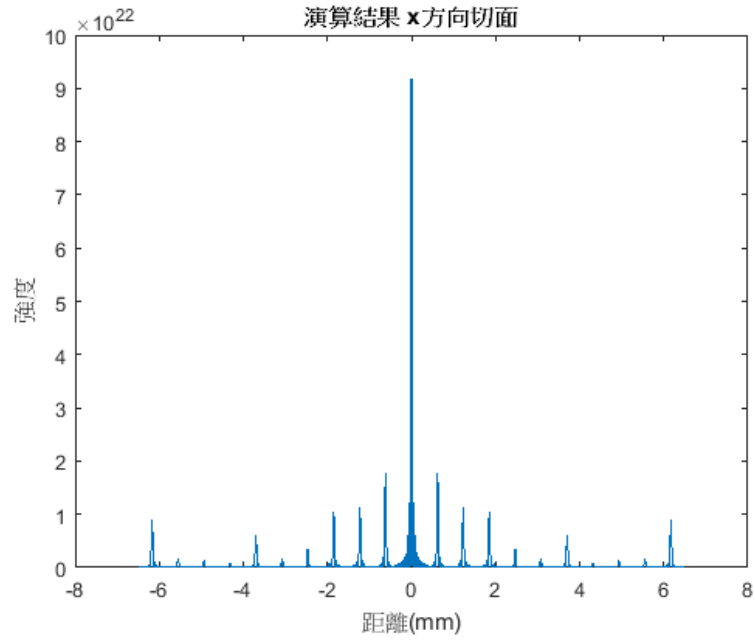


圖 4-9 成像演算之演算結果 x 方向切面圖

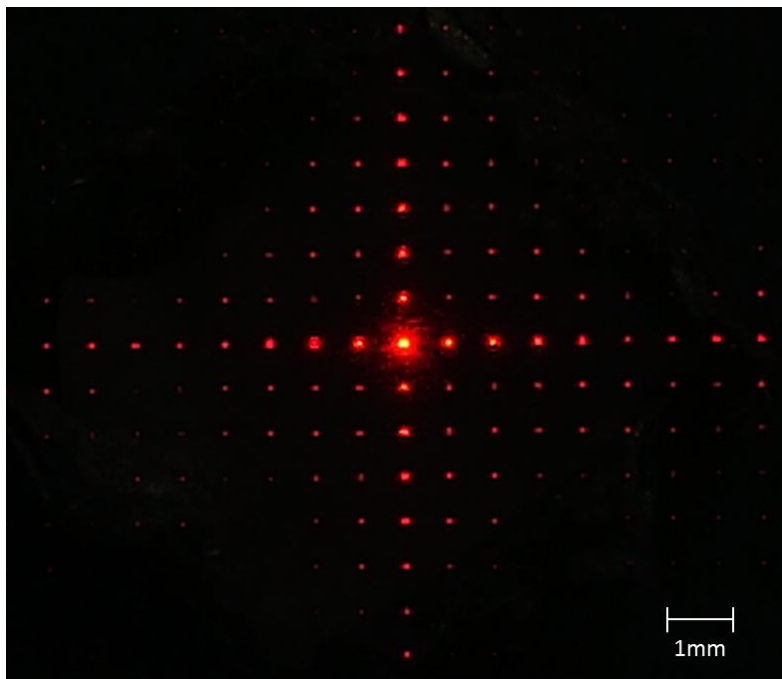


圖 4-10 面板實驗結果圖

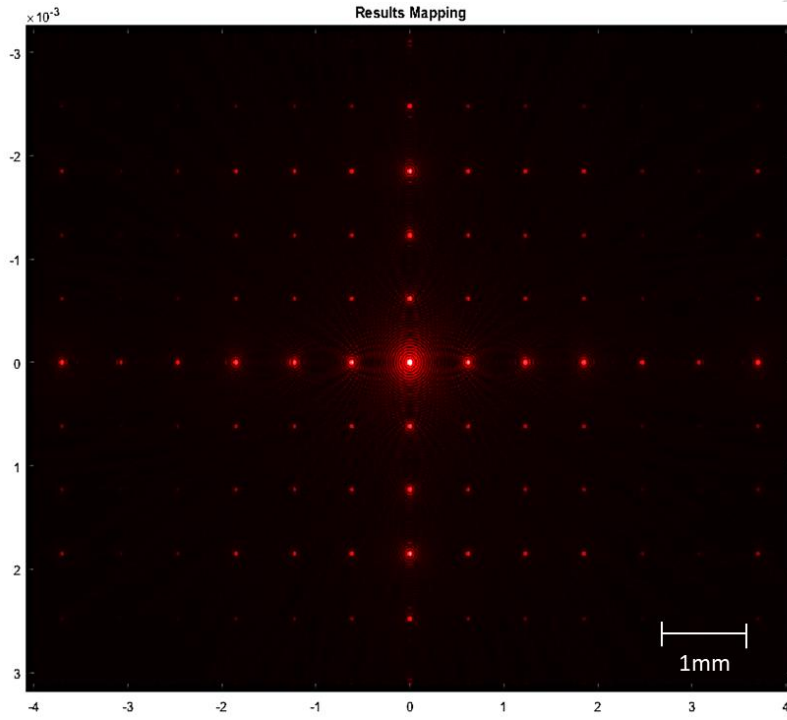


圖 4-11 成像演算之演算結果圖

## 第五章 結論與未來展望



總結傳遞函數與成像演算的結果，在第三章節中利用面板實驗得到在有無透明顯示器下的後景影像數據，首先因為發現數據有過度曝光的狀況，在進行傳遞函數的計算之前，使用了曲線擬合的方法，將因為過度曝光而流失的強度資訊補足。彌補完成後，進而利用傅立葉轉換的方法找到兩圖像之間的傳遞函數，過程中使用了蒙地卡羅演算法來進行傳遞函數的優化演算，並在算得傳遞函數後利用捲積與亂數等方法，進一步地計算出更精準的傳遞函數結果。在第四章節中，我們建立了一個全新演算程序，在不利用面板實驗的實驗數據，且加入距離參數，來達到可以計算出在任意距離下的透明顯示器的點擴散函數，演算從最開始的點光源開始，經過透明顯示器的結構參數，到最後進入相機，其中相機的光圈與透鏡參數皆可自定義，最後演算出的結果與面板實驗進行比對，也具有高度相似，其各階繞射的空間位置幾乎完全一致，觀察兩者結果也可以發現各階繞射的強度也有相近的趨勢，皆在約正負六階的位置會有回升的現象。

在建立完成以上的成像演算之後，下一步就可以運用此成像演算，快速且精準的計算出後景影像，對於將來透明顯示器的結構優化與改良將帶來極大的便利性。

在建立完成第四章的成像演算後，試著使用此演算來執行透明顯示器的結構優化，若原結構為井字結構，則此優化利用亂數的方式來建立透明顯示器結構，代入蒙地卡羅演算法，試著設計出能夠降低繞射現象的透明顯示器結構，模擬的初步理念為利用亂數結構能盡量破壞結構的週期性，使得平面波穿過透明顯示器後的干涉現象不會如此強烈，進而達到減少影像模糊的效果。

程式的流程為建立最初的井字結構矩陣，其單位週期中外圍為遮蓋區，中心矩形為穿透區，再來，將穿透區中任意元素由一給定之機率係數進行翻轉，由穿透改為遮蓋，隨著機率係數越高，則單位週期中的遮蓋區佔比越來越高，其機率

係數由 0 至 1，切成 100 個等距值，使結構從原始井字結構，經過亂數矩陣將穿透區反轉，到最後完全遮蓋。此程式不僅探討亂數結構對於降低繞射現象的影響，能否使得後景更加清晰，另外更討論到同為亂數結構的情況下，在多少穿透率的情況下能夠最有效的壓制繞射現象。

其中，此程式的優化評估標準稱為「繞射強度比 (Diffraction ratio)」，由於完美點光源經過透明顯示器後，成像會由一個 $\delta$ 函數變成十字光點分布，而光點分布中，僅有零階繞射的中心強度為所需的「訊號」，其餘高階繞射則屬於「雜訊」，須盡量減少，故「繞射強度比」的定義為零階繞射佔總能量的百分比，若繞射強度比越高代表零階繞射相較於其他高階繞射佔有更高的比例，則成像品質更佳。

其成果如下圖，首先圖 5-1 是優化後的透明顯示器結構，經過程式亂數影響後的結構在穿透區出現數個小點，這些小點即為亂數遮蓋，此圖為提取該次優化後最佳的結果，圖 5-2 是穿透率，隨著程式迴圈次數的增加，穿透率由原先的 64.81%，因為亂數遮蓋越來越多而逐漸下降。圖 5-3 為繞射強度比，可以發現對於原結構加上亂數遮蓋是能夠有效壓制繞射現象的，最高的繞射強度比可達 64.54%，但穿透率須降至 48.7%，在其中需要做取捨，圖 5-4 圖 5-5 為加入亂數遮蓋後的 x 方向的繞射強度切面。以上是利用我的程式所完成的研究，其主要概念是建立在震幅調制的應用上，往後若延續此研究，亦可以考慮嘗試使用相位調制的方法，藉由改變介質材料使得光程產生變化，進而改變光的相位，達到降低繞射現象的效果。

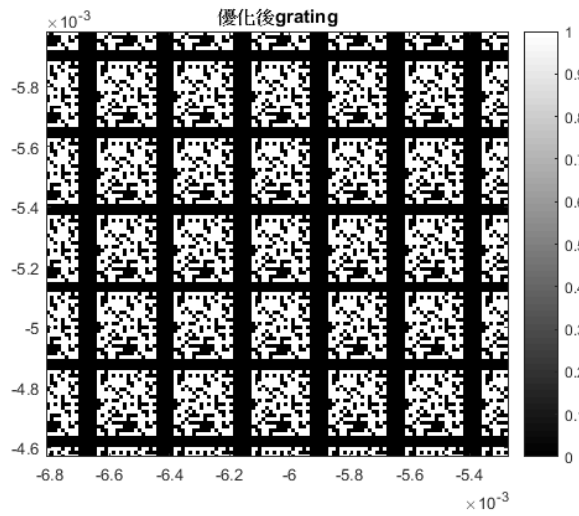


圖 5-1 優化後的透明顯示器結構設計

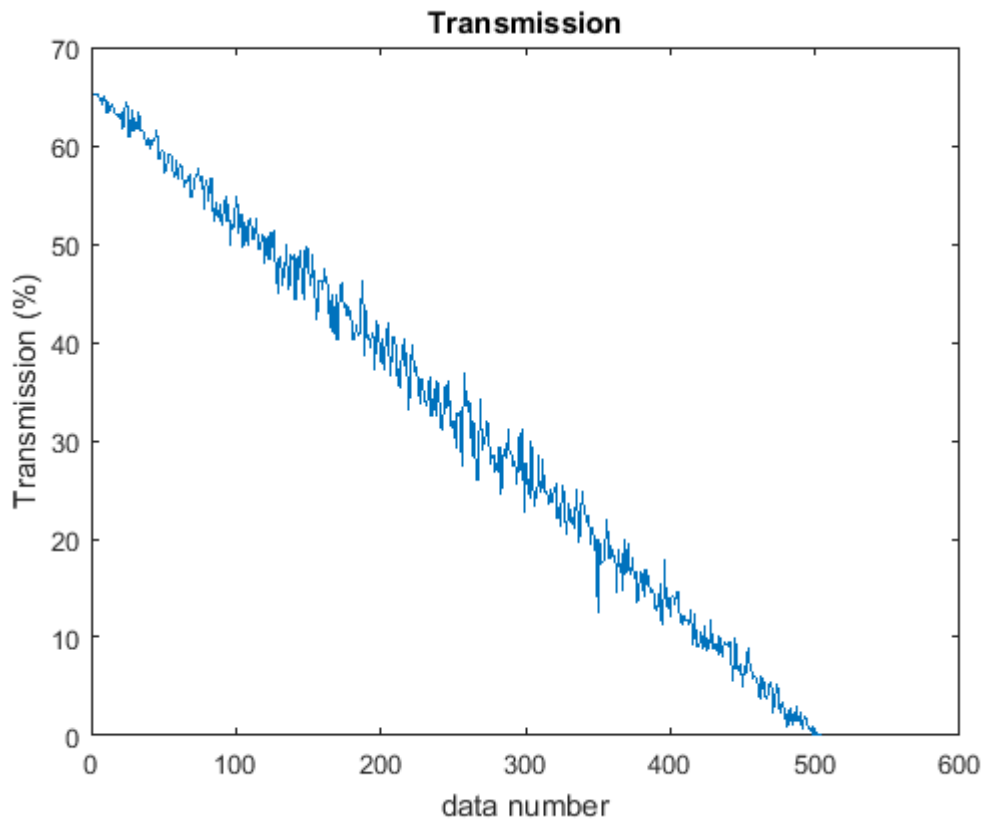


圖 5-2 演算過程中結構的穿透率變化



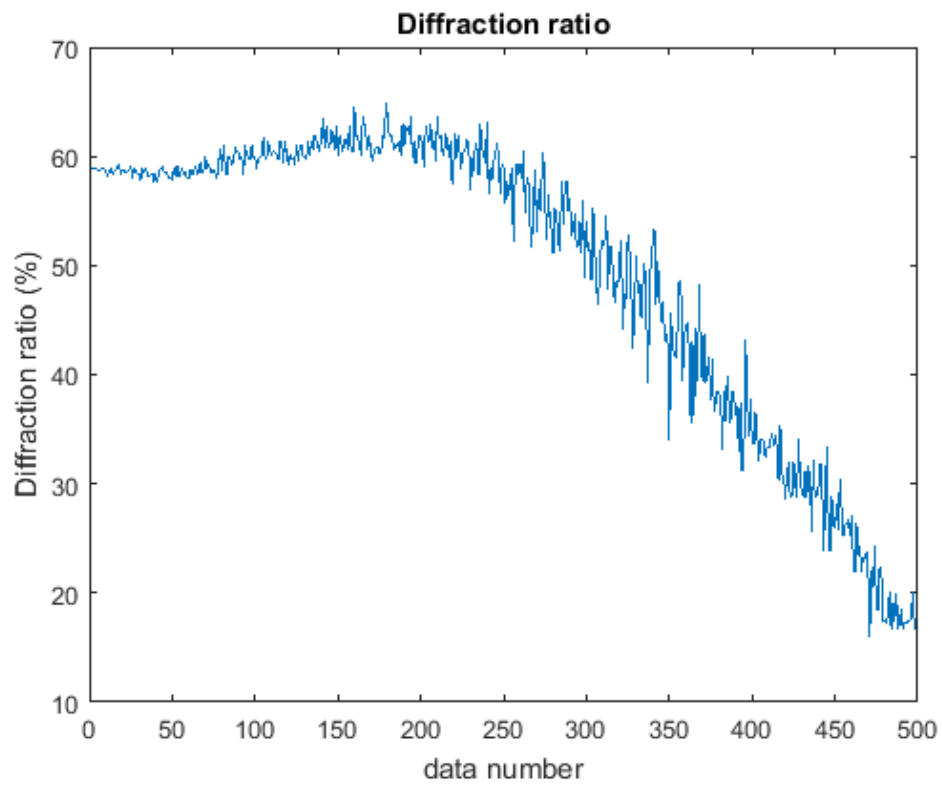
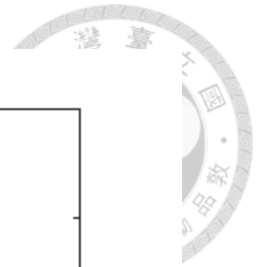


圖 5-3 演算過程中結構的繞射強度比變化

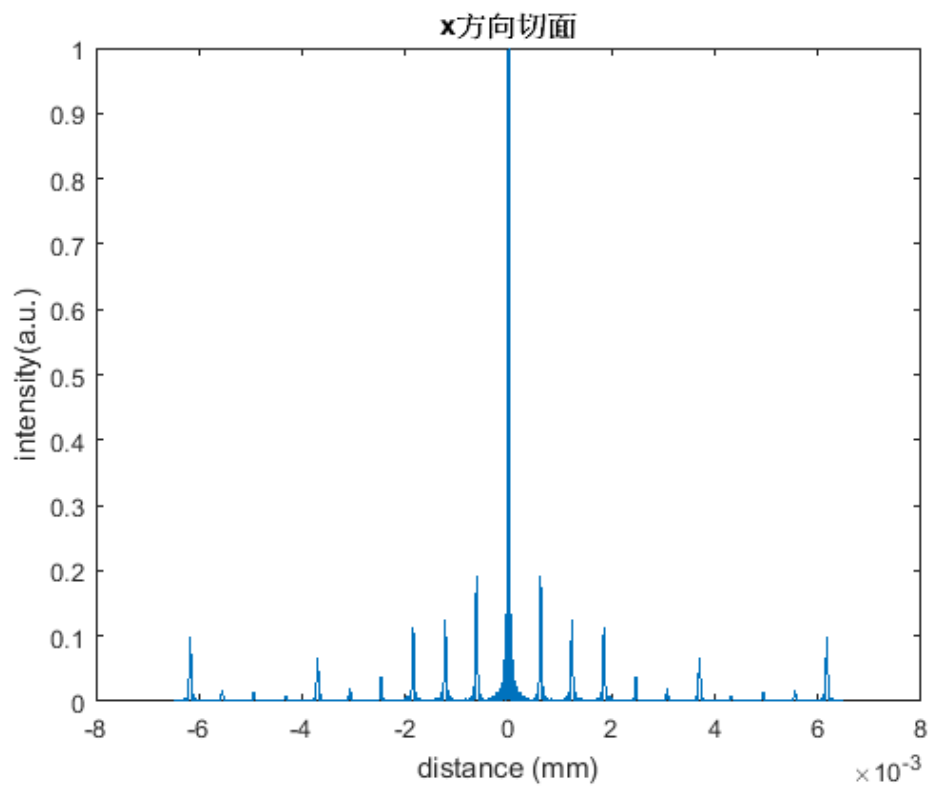


圖 5-4 未經過優化演算的 x 方向強度切面

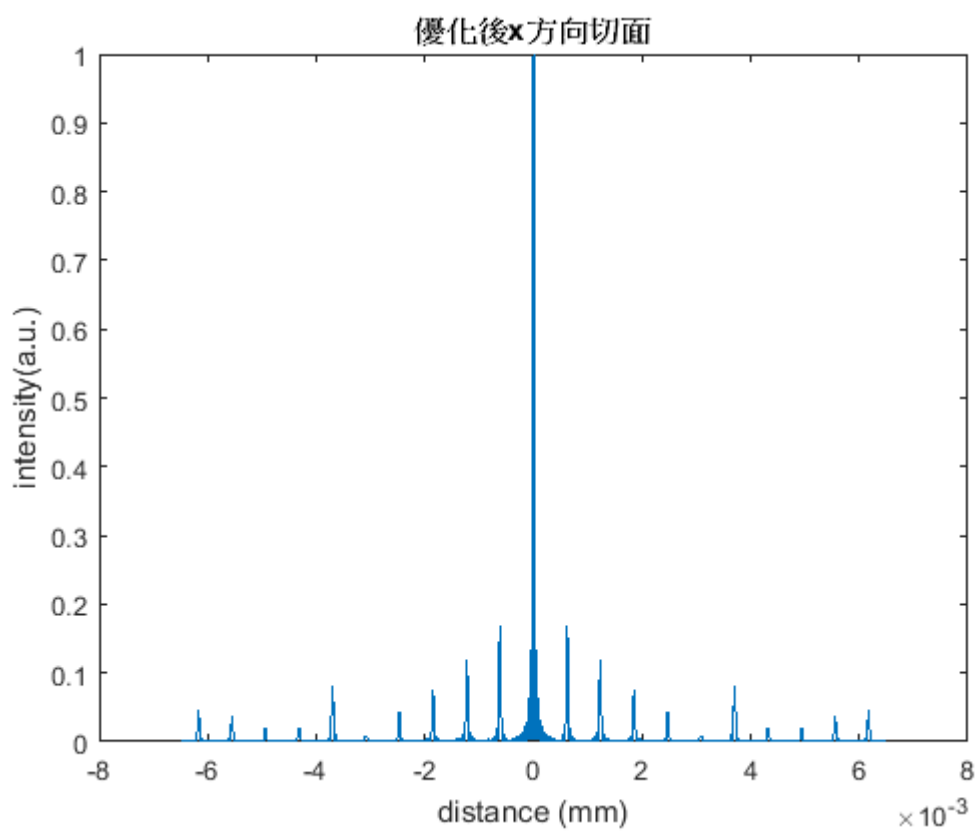




圖 5-5 經過優化演算的中心 x 方向強度切面

## 參考文獻



- [1] 來航曼，張志英，張志剛，《透明液晶顯示光學測試方法》國際提案要點解讀，京東方科技集團股份有限公司
- [2] Display Bank, "Transparent Display Technology and Market Forecast", 2011
- [3] Satoh E, Asaoka Y, Deguchi K, et al. "60-inch Highly Transparent See-Through Active Matrix Display without Polarizers", Journal of the SID 2010 80(2):1192-1195.
- [4] ChungYW, Li A K, Lee J H et al. "Full-color Technology, Flexible, Roll-to-Roll Processing Etc", Journal of the SID, 2011 13(1):147-148
- [5] "日本科學家用肥皂泡製成世界最薄透明顯幕", <http://world.huanqiu.com/hot/2012-07/2881698.html>
- [6] Chia Wei Hsu, Bo Zhen, Wenjun Qiu, et al "Transparent displays enabled by resonant nanoparticle scattering", Nature Communications volume 5, Articlenumber:3152 (2014)
- [7] V. Mann and V. Rastogi, "Dielectric nanoparticles for the enhancement of OLED light extraction efficiency," Optics Communications, vol. 387, pp. 202-207, 2017
- [8] D.B. To, "Light extraction efficiency enhancement of organic light-emitting diodes fabricated on silica network substrate," in frontiers in Optics 2016, Rochester, New York, 2016, p. JW4A. 138: Optical Society of America.
- [9] Park S K, Ryu M, Yang S, et al. "Oxide TFT Driving Transparent AMOLED". Journal of the SID, 2010 18(1):245-248
- [10] Dong Y B, Xie J, Zhang G H, et al, "Novel Transparent Cathode Application in Transparent Lighting and Transparent Display", Asia Display 2011 8(6)212-214

- 
- [11] Chung J, Lee J, Choi J, et al, "Transparent AMOLED Display Based on Bottom Emission structure", *Journal of the SID*, 2010, 11(4):148-151
- [12] Song Y W, Hwang K H, Yoon S G, et al, "LTPS-based Transparent AMOLED", *Journal of the SID*, 2010 11(3):212-214
- [13] Lee S M, Oh S H, Choi K C, "Highly Transparent SU-8 Photoresist Barrier Rib for a Transparent AC Plasma Display Panel", *Journal of Display Technology*, 2011 7(1):40-43
- [14] Jang C, Kim K, Choi K C, "Toward Flexible Transparent Plasma Display Optical Characteristics of Low-Temperature Fabricated Organic-Based Display Structure", *IEEE Electron Device Letters*, 2012 33(1):74-76
- [15] Ahi, Kiarash, and Mehdi Anwar. "Developing terahertz imaging equation and enhancement of the resolution of terahertz images using deconvolution." *Terahertz Physics, Devices, and Systems X: Advanced Applications in Industry and Defense*. Vol. 9856. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [16] LAFRENIERE, David, et al. A new algorithm for point-spread function subtraction in high-contrast imaging: a demonstration with angular differential imaging. *The Astrophysical Journal*, 2007, 660.1: 770.
- [17] KROESE, Dirk P., et al. Why the Monte Carlo method is so important today. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2014, 6.6: 386-392.
- [18] SAWILOWSKY, Shlomo S. You think you've got trivials?. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 2003, 2.1: 21.
- [19] KIRKPATRICK, Scott; GELATT, C. Daniel; VECCHI, Mario P. Optimization by simulated annealing. *science*, 1983, 220.4598: 671-680.

- 
- [20] BAILEY, David H.; SWARZTRAUBER, Paul N. A fast method for the numerical evaluation of continuous Fourier and Laplace transforms. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1994, 15.5: 1105-1110.
- [21] DORF, Richard C.; TALLARIDA, Ronald J. *Pocket book of electrical engineering formulas*. CRC Press, 1993.
- [22] PALEY, Raymond Edward Alan Christopher; WIENER, Norbert. *Fourier transforms in the complex domain*. American Mathematical Soc., 1934.
- [23] GOODMAN, Joseph W. Frequency analysis of optical imaging systems. *Introduction to Fourier Optics*, 1996, 126-171.
- [24] GILLEN, Glen D.; GUHA, Shekhar. Modeling and propagation of near-field diffraction patterns: a more complete approach. *American journal of physics*, 2004, 72.9: 1195-1201.
- [25] GUO, Hongwei. A simple algorithm for fitting a Gaussian function [DSP tips and tricks]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2011, 28.5: 134-137.
- [26] HAUSER, John R. *Numerical methods for nonlinear engineering models*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [27] AHN, Sung Joon. Geometric Fitting of Parametric Curves and Surfaces. *JIPS*, 2008, 4.4: 153-158.
- [28] SCOTT, Craig. Introduction to optics and optical imaging. *Introduction to Optics and Optical Imaging by Craig Scott New York, NY: IEEE Press, 1998*, 1998.