

空間濾波

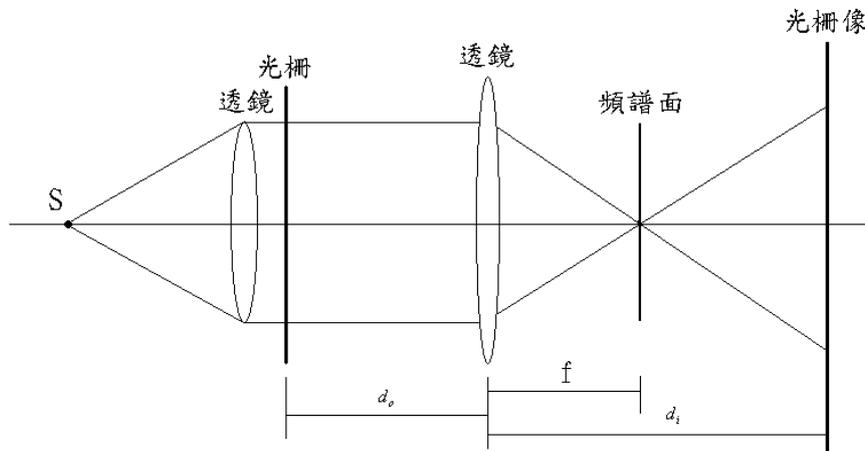
【目的】

1. 認識空間濾波器，並學習光學系統的成像理論。
2. 觀看圖像訊號的成像（十字網格的像），探討並分析「空間頻率」的頻譜分布。
3. 瞭解圖像訊號「空間頻率」的濾除方法與功效。

【原理】

空間濾波 (optical filter) 是在光學系統的空間頻率平面上放置適當的濾波器，去掉或選擇通過某些空間頻率，或改變它們的振幅和相位，使平面物體的像按照要求得到改善。

1873年，阿貝 (Abbe) 提出的二次繞射成像理論為空間濾波奠定了理論基礎，1906年完成的阿貝-波特空間濾波實驗 (Abbe-Porter spatial filter experiment) 應用了空間濾波技術，並使用了二元振幅濾波器。



圖一 阿貝-波特空間濾波實驗原理圖

阿貝-波特空間濾波實驗的原理如圖一所示，物是一個二維矩形光柵，位於透鏡前焦面之前，到透鏡的距離為 d_o ；用垂直入射的平面相干光照明，在透鏡後 d_i 處得到光柵的像。按照阿貝成像理論，可以將成像過程解釋為：相干光照明矩形光柵時，光柵對光波進行第一次繞射，繞射光通過透鏡在透鏡的後焦面上形成光柵的傅立葉頻譜 (Fourier frequency spectrum)，即照明光源的各級繞射像 $I'_{\pm m}$ (光斑陣列)。這一過程也可以解釋為對物進行了一次傅立葉變換 (Fourier transform)，也就是將物函數分解為一系列分立的頻譜分量，後焦面即是物體的頻譜面。至於第二次繞射則是在焦平面和像面之間進行的，照明光源的各級繞射像 $\dots I'_{-2}$ 、 I'_{-1} 、 I'_0 、 I'_{+1} 、 I'_{+2} \dots 在像面上疊加形成干涉條紋，且頻譜面和像面向上的光波場分佈滿足 Fourier 變換的關係。兩次繞射 (兩次 Fourier 變換) 的結果得到了光柵的像。

實驗過程中，當把各種不同形狀的光柵 (如圓環、狹縫和圓形光柵等) 放置在透鏡的後焦平面上時，像平面上就會出現不同形式的像結構。其原因在於不同形狀的光柵允許通過的物體的空間頻譜成分不同，所以得到了二元空間濾波器的作用。

使用二元濾波器的空間濾波技術能夠改變成像系統中像場中的光強分佈。二元振幅濾波器根據實際使用要求可分為下列四種：

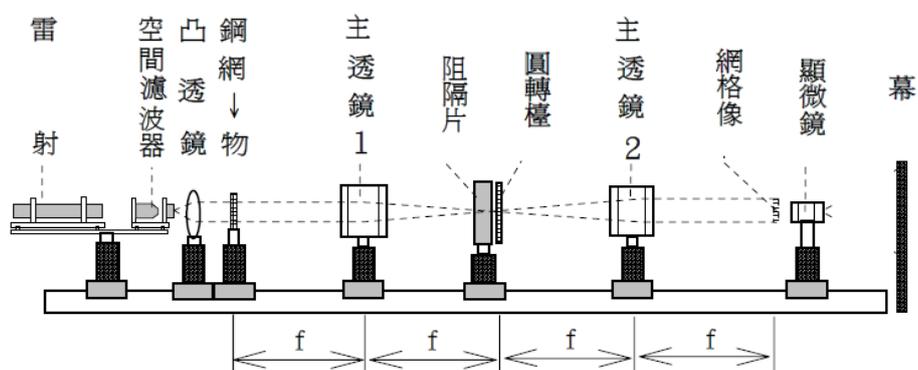
- (1) 低通濾波器 (low-pass filter)：作用是去掉高頻成分，僅使靠近零頻的低頻成分通過，可以用來濾掉高頻雜訊。
- (2) 高通濾波器 (high-pass filter)：作用是濾掉低頻成分，允許高頻成分通過，可用來突出像的邊緣部分，或者實現像的對比度翻轉。
- (3) 帶通濾波器：可以使某些需要的頻譜通過，其餘被濾掉。
- (4) 方向濾波器：做成一定方向的阻擋光柵，用來濾掉不需要的頻譜，以突出圖像的某些特徵。

相位濾波器 (phase filter) 只改變物體頻譜的相位，不改變它的振幅分佈。1935 年澤尼克 (Zernike) 提出的相位顯微鏡就是相位濾波器應用的一個很好的例子。這種方法適合觀察弱相位物體。相位物體只有折射率的不同或厚度的不同，當相干照明光波通過這種物體時，光波的振幅不發生變化，只是相位發生變化，所以光強度分佈與照明光波相同，用平常顯微鏡是無法觀察到的。

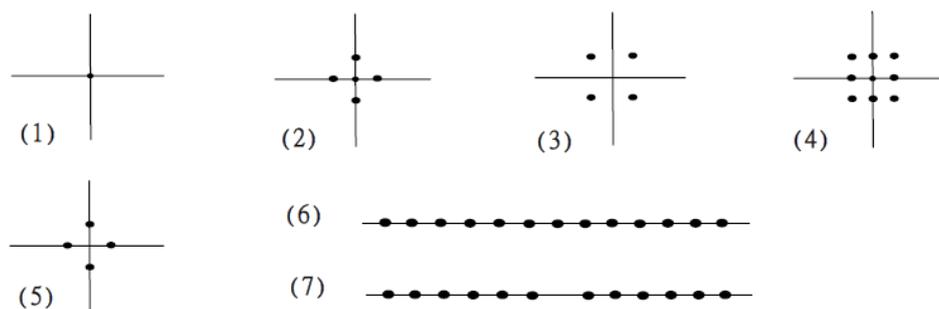
相襯顯微鏡 (phase-contrast microscopy) 的原理是利用相位濾波器將物體的相位變化轉換成光的強弱變化，從而使物體能夠被觀察到。這對於研究生物細胞組織、金相表面、拋光表面以及透明材料的不均勻性等非常有用。

【實驗器材與裝置】

光具座組、He-Ne 雷射(波長=632.8nm)、空間濾波器(20 倍顯微物鏡+孔徑 10 μm 微孔)、凸透鏡 ($f=8\text{ cm}$)、極細目鋼網(100 格/cm)、主透鏡(焦點位於鏡後 30.2 cm)、阻隔片(7 片)、圓轉檯、顯微鏡(影像放大)、捲尺、數位相機架



圖二 空間濾波器實驗裝置圖



圖三 阻隔片圖

【注意事項】

1. 因為時間的關係，雷射及空間濾波器的準直調整於實驗開始前已調整妥當，請勿隨意調整。違者該實驗成績零分計算，並請自行調整。
2. 微孔是極敏感的高價器材，嚴禁碰觸、擦拭、吹氣。
3. 主透鏡‘厚重’，調整其高低時，務必鎖緊，避免其緩慢下滑而影響成像的觀察。

【實驗步驟】

1. 實驗器材的安裝

- (1) 將雷射及其安裝架置於光具座最左側，調整光束與光具座平行，在幕上標示光束的位置。
- (2) 利用器材的規格資料，大略算出各元件的位置，先安放第二個主透鏡，使光點打在主透鏡鏡心上，由主透鏡反射回來的各光點，要全部重合在雷射輸出孔上，通過主透鏡後，光束的中心點，仍落在標示點上。
- (3) 利用上述方法放入第一個主透鏡後再裝上凸透鏡。
- (4) 在空間濾波器上裝好顯微物鏡，仔細調整空間濾波器架上各旋鈕（不可再動雷射），使光束中心點仍落在標示點上，且由顯微物鏡反射回來的各光點，要全部重合在雷射輸出孔上。
※經過上述的調整，才可確認各元件光軸精確共軸，以提高成像品質。

2. 空間濾波器的調整

- (1) 顯微物鏡後退遠離微孔架，裝上微孔，在凸透鏡上覆蓋一張白紙。
- (2) 調整微孔位置，使雷射光通過微孔落在白紙上。
- (3) 緩慢的前移顯微物鏡，同時精確修正微孔位置，使雷射光在白紙上的像保持同心環紋。
- (4) 繼續上述調整，直到所有同心環紋消失，紙上只剩下非常純淨的第零級亮點為止。
- (5) 阻隔片架放在正確位置上，調整凸透鏡前後位置，在阻隔片架上成精確焦點像（產生平行光），移開阻隔片，非常仔細的調整空間濾波器和凸透鏡，使光束中心點仍落在標示點上，且光束品質不變。

※這一部份的調整是非常困難的，熟手幾十分鐘左右，生手數小時也很正常。

※助教會作雷射的準直校正，並讓雷射光通過空間濾波器後，有非常純淨的第零級亮點。

- (6) 依照圖二所示，放置儀器，並微調其位置，使原光路不變。

※實驗前上述的調整均已完成，步驟 3. 只可更動阻隔片架、顯微鏡架、數位相機架。

3. 觀察各阻隔板的濾波效果

- (1) 網格放置在主透鏡 1 前焦點上，顯微鏡架放在主透鏡 2 後 30.2 cm 處，仔細調整其焦距，由目鏡看使呈現清晰的網格放大像。

註：請確認網格放大像正好對準顯微物鏡的鏡頭中央，以免觀察到錯誤影像。

- (2) 放上阻隔片，網格的繞射花紋會落在阻隔片的正中央上，分別更換 7 種不同的阻隔片（不要再動顯微鏡的焦距），只允許網格的繞射花紋通過特定的部份，觀察並記錄各阻隔片所對應的圖像。

註：利用數位相機直接拍攝是不錯的方法（有數位相機架），但對於相機的操作（手動調焦）及規格（最近拍攝距離要小於 10 cm）要事先弄清楚，並攜帶 AC 電源（電池電力絕對不夠用），且在拍攝過程中不可改變 Zoom 的設定，否則相片的尺寸無參考價值。

【分析】

1. 比較阻隔片（6）與（7）有何不同，即中央第零階繞射光點對影像有何影響。
2. 比較阻隔片（2）與（5）有何不同，即中央第零階繞射光點對影像有何影響。
3. 比較阻隔片（3）與（5）有何不同。
4. 比較阻隔片（2）與（3）的疊加效果，是如何產生阻隔片（4）的成像。
5. 仔細觀察阻隔片（1）的成像（並不是全部空白的），到底網格像還剩下什麼，並解釋產生的原因。

【問題】

1. 請解釋四焦距空間濾波器中的物體平面(object planes)、轉換平面(transform planes)、成像平面(image planes)。
2. 空間頻率(spatial frequency)與時間頻率(temporal frequency)有何差別？
3. 請列舉一個應用空間濾波器的實例。

【參考資料】

1. 現代光學，劉繼芳編著，張勝雄、梁財春編修，台北縣中和市，新文京開發出版股份有限公司，2006年9月，CH 5.1。
2. Optics, by Eugene Hecht, 4th Edition, Ch 11、Ch 13.2-13.2.3。