

# 基礎光路架設

## 【目的】

對於一個光學實驗研究工作者來說，為了因應各式各樣的實驗所需，基本光路架設能力是必要的。本實驗目的在於，使學生擁有基礎光路架設技能，並將其應用在其他實驗上。以下條列出核心目標：

1. 學會如何準直光路，使光路平行於桌面，且各元件光軸趨近於一直線。
2. 學會空間濾波器的使用方式與其應用。
3. 學會利用擴束器來控制光束半徑。
4. 學會成像系統的架設、操作與校正。
5. 利用所學到的技能，架設干涉儀。

## 【原理】

### 一、光路準直

雷射光具有優良的光源同調性和方向性，因此，控制雷射光行進方向是光學系統建置的重要基礎。

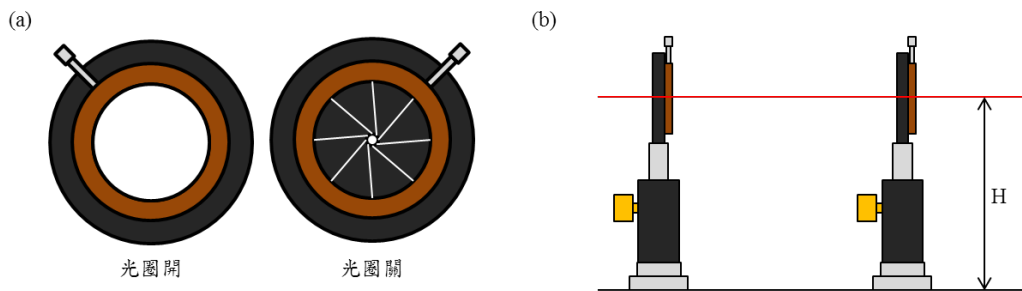


圖 1 (a)光圈外觀示意圖 (b)平行桌面光路示意圖

根據歐氏幾何，空間中相異兩點決定一條直線。如圖 1(a)所示，光圈關閉至最小時，可視為空間上的一點。假設有兩光圈高度同高，便能以這兩個光圈於光學桌上建置一道平行桌面的光路，如圖 2(b)所示。

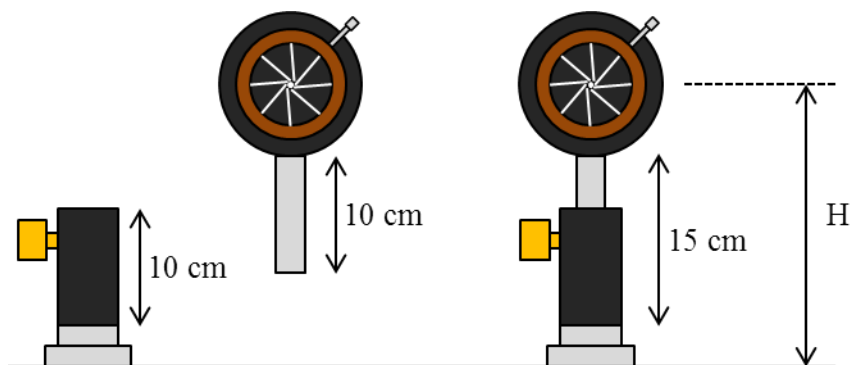


圖 2 光路高度設定範例。以光圈為圖例，支撐柱和座長度為 10 cm 時的架設方式。

如何訂定光圈的高度？參考圖 2，若手邊的支撐柱與支撐架皆為 10 cm，則以支撐柱一半的高度加上支撐架的高度附近為較好的範圍（不計光學元件半徑）。以圖 2 為例，15 cm 左右為最佳，此時支撐柱約還有  $\pm 4$  cm 的可調空間，一般光學元件大小都會落在此調控範圍。決定好光路高度範圍，接下來的問題就是如何使光圈同高？這裡介紹一個概念性的儀器—指高

器（參考圖 3），此儀器為可平穩放置光學桌面的剛體，不管其放置在光學桌上哪個位置，其指示高度都可視為同高。當指高器的高度確立後，就不能改變其高度，此指高器將成為光路高度指標，光學元件（包含雷射光源）都要設定與指高器同高。圖 3 為常用之指高器架設。

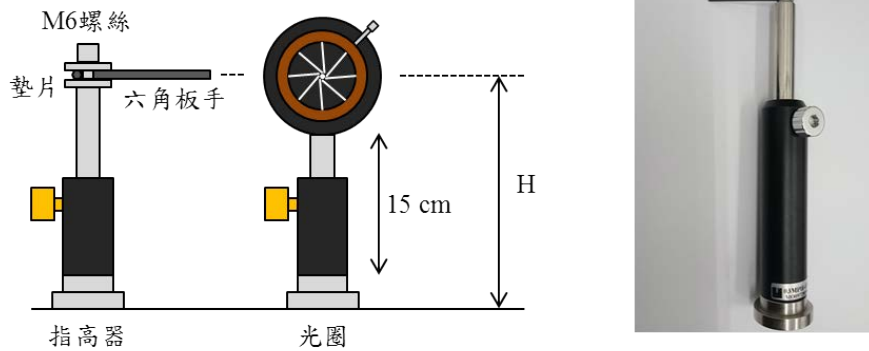


圖 3 指高器示意圖。由六角扳手、墊片、螺絲和支撐架與座組成之簡易指高器。

控制雷射行進方向的方法可參考圖 4，考慮一維方向上的光路控制，任意方向入射之雷射經兩互相垂直之平面鏡，入射與出射光束平行但方向轉 180 度。將兩鏡同時順時針轉  $\alpha$  角，則光束將會平移；偏轉後鏡，則可以改變光束前進方向。利用此原理，可以自由控制雷射光行進方向。

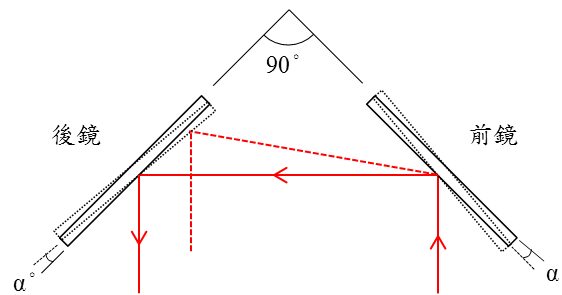


圖 4 光路控制示意圖

## 二、空間濾波

空間濾波器 (spatial filter) 主要目的為濾除光束的空間雜訊或光斑 (圖 5)。空間濾波器主要由一透鏡與置於其後焦點之微孔所組成 (圖 6)。

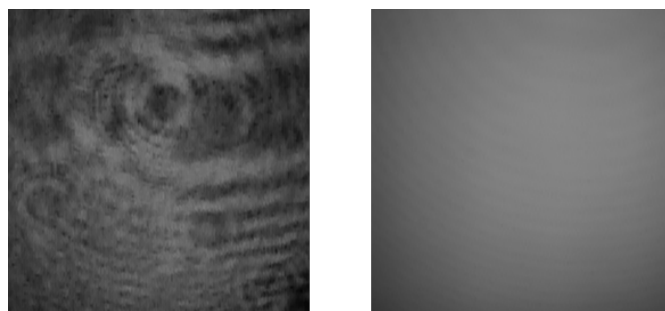


圖 5 濾波前(左)與濾波後(右)兩光斑比較圖

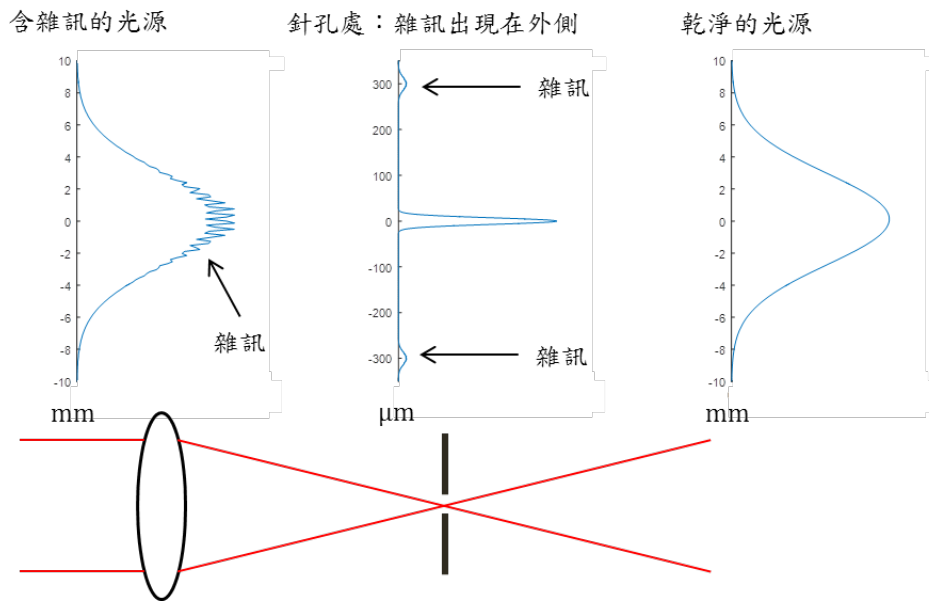


圖 6 空間濾波器工作原理示意圖

光束行進時，經過元件或是空氣中的灰塵會產生繞射，使光束強度於空間上出現具高空間頻率分布之雜訊（光斑），此一帶有雜訊之光束在通過透鏡後，雜訊將繞射至聚焦點外圍而無法通過微孔，故可於針孔後方得到乾淨無雜訊之光束分佈（圖 6）。詳細的原理推導與說明請參考傅氏光學。

### 三、擴束平行光束

許多光學實驗中需要用到較大直徑之雷射光束，或是不發散之雷射光束。實驗上通常稱不發散的雷射光束為平行光束。平行光束具有不隨位置而改變光束半徑的特性，理想高斯光束其發散半角  $\theta$  與雷射束腰半徑  $w_0$  之關係滿足  $\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$ ，當  $\theta$  為 0 時， $w_0$  為無窮大，因此，現實生活中無法找到完美的高斯平行光束。高斯雷射光束的原理推導與說明請參考近代光學教科書。

實驗上只要光束半徑足夠大，仍然可視為發散角趨近於零之理想平行光束，因此，擴束器（expander）經常被架設於光學實驗的系統當中。如圖 7 所示，擴束器通常由兩共焦點透鏡組成，前鏡焦距為  $f_1$ 、後鏡焦距為  $f_2$ ，擴束器之放大率為  $M = \frac{f_2}{f_1}$ 。

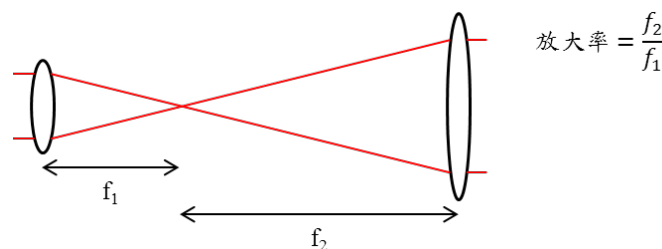


圖 7 Kepler 形式的擴束器示意圖

### 四、成像系統

成像系統通常由一透鏡組與感光耦合元件（charge-coupled device，簡稱 CCD）組成，透鏡組的透鏡無片數限制，可由一片透鏡或是數片透鏡組成。本實驗將使用單透鏡成像系統來做示範。

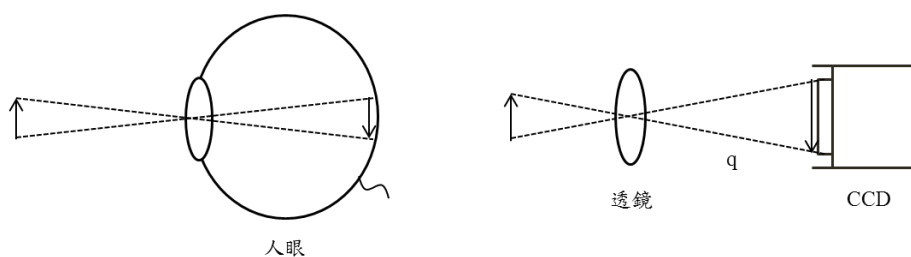


圖 8 成像系統示意圖

光學實驗通常不用眼睛觀察雷射系統成像，第一是有傷及眼睛的風險，第二是難以紀錄實驗結果，因此，用單透鏡與 CCD 的組合來取代眼睛作為偵測器。如圖 8 所示，成像系統類似於眼睛，滿足成像公式之物平面上的物體能於 CCD 上成清晰實像。成像系統在應用上，為使量測具有相同標準，會固定成像系統的放大率，所以當成像系統架設完畢，就不可以再次改變其像距  $q$ ，以確保成像皆來自相同之物平面。

#### 五、實際應用：架設 Mach-Zehnder 干涉儀

Mach-Zehnder 干涉儀於空氣動力學、電漿物理、量子力學和積體光學電路中都有廣泛的應用。Mach-Zehnder 干涉儀具有可調性佳、空間大等優點，相對於 Michelson 干涉儀更有雜訊少、能量使用率高等優勢。

Mach-Zehnder 干涉儀主要由兩道干涉光束組成，由於利用分光鏡分成兩道光路，因此，相當考驗各位同學對於實驗(一)的理解程度。Mach-Zehnder 干涉儀架設可參考圖 9，其中屏幕 A、B 將可得到明暗互補的干涉影像。

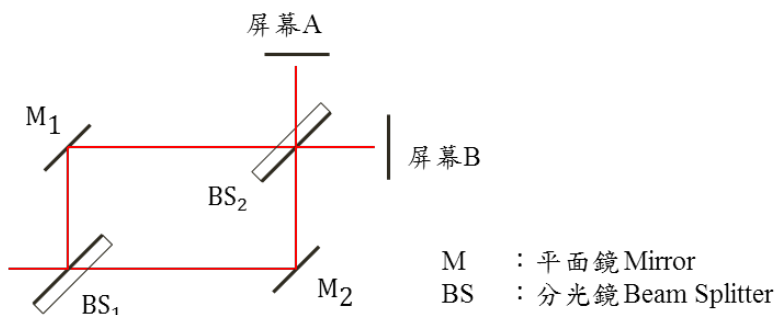


圖 9 Mach-Zehnder 干涉儀示意圖

#### 【實驗器材】

He-Ne Laser、平面鏡、光圈、空間濾波器（10 倍顯微鏡物鏡+孔徑  $10\ \mu\text{m}$  微孔）、 $f = 120\ \text{mm}$  透鏡（2 吋）、游標尺、標準片、Plate holder、平移台、顯微鏡物鏡鏡架、10 倍顯微鏡物鏡（數值孔徑  $\text{NA} = 0.25$ ）、中性濾光鏡（Neutral density filter、8 片）、濾光鏡鏡架、感光耦合元件（Charge-coupled device）、電腦、指高器、屏幕

註 1：游標尺和中性濾光鏡為共用器材，以 2 組操作進度決定使用的先後順序。

註 2：欲架設 Mach-Zehnder 干涉儀者，請向助教領取分光鏡、反射鏡和屏幕。

#### 【注意事項】

1. 調整光路時，請勿嬉鬧遊玩，若雷射不小心射入眼中，可能造成不適甚至失明。架設光路時，所有人員務必站立，不可坐下架設光路，且光路務必與桌面平行。當光路架設完畢且無須再次調整時，可坐下進行實驗記錄，但仍需小心眼睛勿與光路同高。

2. 顯微鏡物鏡為精密儀器，拿取與使用物鏡時，鏡頭務必朝上拿取（圖 10），避免灰塵從另一側進入物鏡中。

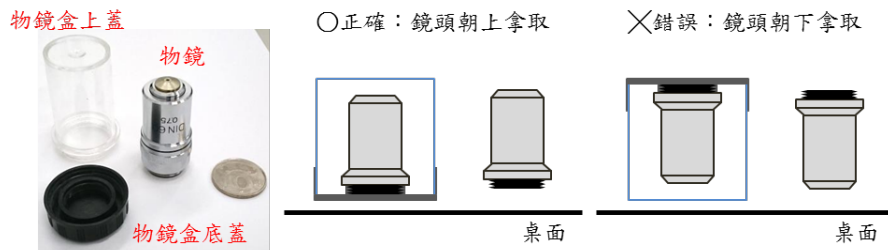


圖 10 顯微鏡物鏡取用示意圖

3. 使用空間濾波器時，切記不要使物鏡撞擊到微孔。另外，若長時間不使用時，請拆除顯微鏡物鏡並放置於物鏡盒當中。若短時間須拆除放置，鏡頭朝上並利用拭淨紙覆蓋鏡頭。

4. CCD 為高價格的精密儀器，任何的灰塵沾附將造成成像出現光斑，長時間不使用，請將鏡頭蓋起。另外，CCD 可探測微弱光線，使用時切記關閉電燈，並且適當使用濾波片。長時間使 CCD 處於過曝情況下，可能會造成 CCD 的損壞。

5. 中性濾光鏡每片價格為 3000 元，請小心拿取；濾光鏡鏡架為鏡片放置型鏡架，請小心輕放濾光鏡，並注意不要觸碰到架上的濾光鏡，避免造成損壞。

6. 標準片為高單價鏡片（約數萬元左右），請小心拿取；放置標準片時，請勿鎖太緊，避免元件龜裂或粉碎。

7. 請勿施力重壓光學桌板，以免桌板變形而影響光路。

### 【步驟】

#### 一、光路準直

1. 根據實驗器材決定光路高度後，定出指高器所需高度。

2. 將儀器依據設定高度架設如圖 11 之光路。先架設光圈 ( $I_1$ 、 $I_2$ )，再架設平面鏡 ( $M_1$ 、 $M_2$ )。光圈盡量平行光學卓板桌緣，或是平行於桌板的 M6 螺絲孔。架設平面鏡時，盡量使雷射光在光圈中心附近。

註：光圈  $I_1$ 、 $I_2$  的距離盡可能拉大，以免因放不下儀器而必須重新調整。（至少 60cm 以上）

3. 調整  $M_1$  鏡架，使雷射光對準  $I_1$  中心。

4. 調整  $M_2$  鏡架，使雷射光對準  $I_2$  中心。

5. 重複步驟 3、4，直到雷射光通過兩光圈之中心。若無法達成，請修正  $M_1$ 、 $M_2$  的鏡架位置。

註：光束高度是由指高器決定的，因此調整完雷射光以後，要用指高器檢查雷射光束於各處皆為同高。若否，則表示光圈高度與指高器有些微誤差，此時可微調光圈高度使其同高。

6. 調整好光路後請助教檢查。檢查完成後請不要拆除光路，此光路將用於後續實驗。

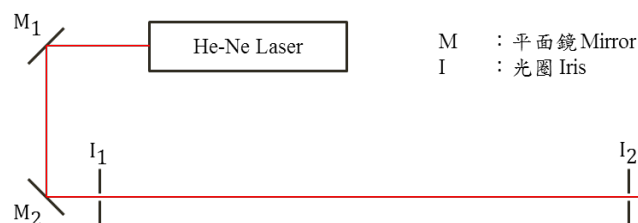


圖 11 光路準直實驗架設圖

## 二、空間濾波

1. 延續實驗(一)之光路。如圖 12 所示，將顯微鏡物鏡裝在空間濾波器台上，並架設於準直後的光路中，此時先不要急著裝上微孔。

2. 調整空間濾波器，使穿透顯微鏡物鏡的光束對準  $I_2$  正中心，反射光束對準  $I_1$  正中心。另外，反射光點應該會有數個，全部都要調回  $I_1$  中心，若高度無法維持相同表示光路不準直，或是空間濾波器光軸歪斜（需更換備品）。此步驟對初學者難度稍高，每一位同學都需實際獨立操作過一遍。

3. 觀察並記錄經空間濾波器後的雷射光束是否具有光斑？

4. 裝上微孔，開始進行空間濾波。

註：裝設微孔時，請先將物鏡退到遠離微孔的位置，以免傷及物鏡和微孔。

5. 調整微孔使其透光有最大值（目測）。如果目視無法觀測到光場，可將紙屏拉近。

6. 調整顯微鏡物鏡使其焦點更接近微孔，但必須確保光線可以通過微孔。

7. 重複步驟 5、6，直到通過微孔的光束呈現乾淨無雜訊的高斯分佈。

8. 觀察並記錄經空間濾波器後的雷射光束，並與濾波前的光束做比較。

9. 請助教檢查，並維持架設留做實驗(三)。

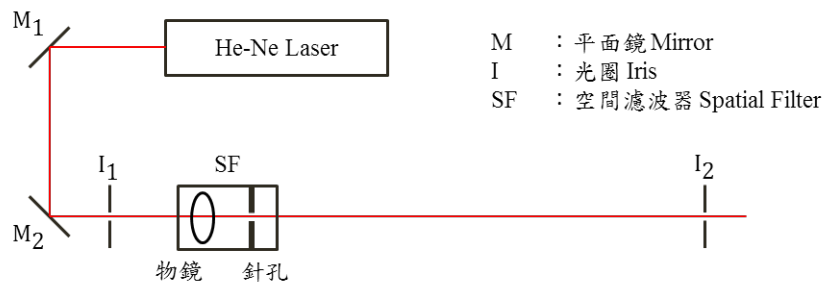


圖 12 空間濾波實驗架設圖

## 三、擴束平行光束

1. 將  $f=120\text{ mm}$  透鏡架設於空間濾波器後，如圖 13 所示。

2. 調整透鏡與空間濾波器的間距，使透鏡後面的光束為一平行光束，即無論紙屏置於何處，光束直徑皆相等。

3. 利用游標尺量測入射光束直徑和擴束後光束直徑各 3 次後取平均，計算擴束器放大率，並推算顯微鏡物鏡之焦距。

4. 請助教檢查，並維持架設留做實驗(四)。

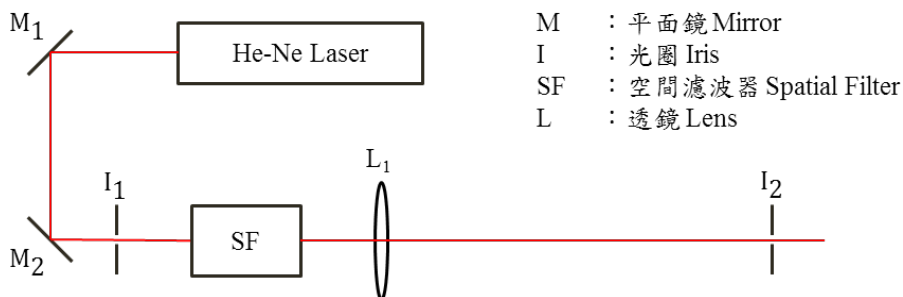


圖 13 擴束平行光束實驗架設圖

#### 四、成像系統

1. 實驗架設如圖 14 所示，標準片架設於平移台上，並將各元件按照成像公式放置於合適位置。另外，先不要打開 CCD 的蓋子。
2. 暫時移除標準片，並於濾光鏡鏡架上放置衰減率最高之中性濾光鏡 (neutral density filter, 簡稱 ND filter)。濾光鏡使用方式請參考附錄 A。
3. 啟動 CCD，並按照附錄 A 之方式更換濾光鏡直到 CCD 無明顯曝光。CCD 使用方式請參考附錄 B。
4. 將標準片放回鏡架上，並用平移台將其移動，直到 CCD 上有最清晰的影像。
5. 將 CCD 影像存檔，並用圖片處理軟體取出標準片垂直方向與水平方向條紋之 line profile (線剖面圖)。取出 line profile 的方法請參考附錄 C。
6. 根據標準片原始尺寸 (附錄 D) 和所拍攝的影像，計算垂直方向與水平方向的成像放大率，並解析物平面的解析度。【問題 2 (3)】

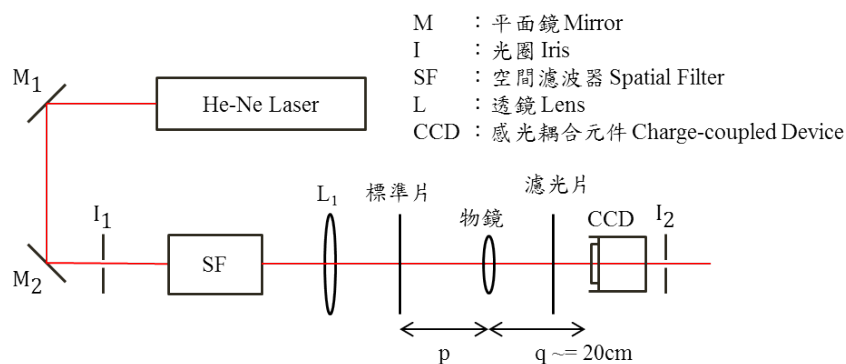


圖 14 成像系統實驗架設圖

#### 五、實際應用：架設 Mach-Zehnder 干涉儀 (加分)

1. 根據實驗一~四所學之技能，並參考圖 15，架設出 Mach-Zehnder 干涉儀。
2. 調整干涉儀，使其出現直線型的干涉條紋。
3. 繼續調整干涉儀，使其出現同心圓環的干涉條紋。

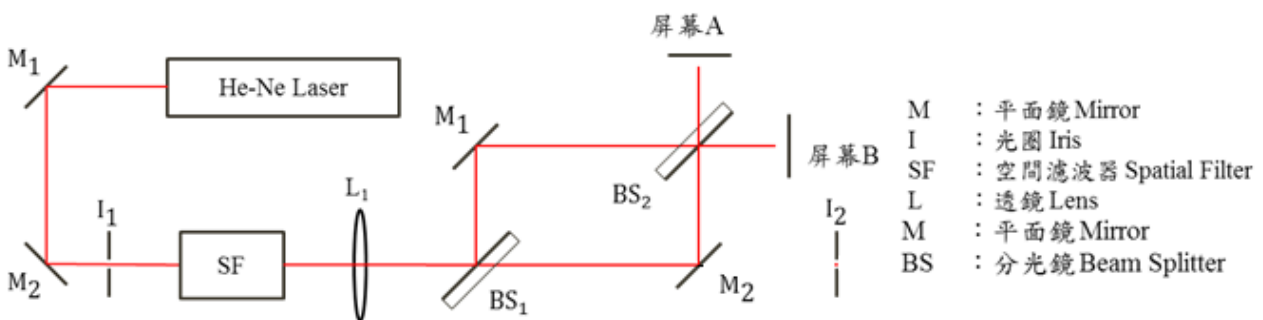


圖 15 Mach-Zehnder 干涉儀實驗架設圖

## 【問題與討論】

### 1. 一維光路的收斂

(1) 如圖 16 所示，考慮空間中雷射欲通過 A、B 兩點，雷射只能調整其兩端端點的位置 C、D。試問該如何調整，使得雷射光同時通過 A、B 兩點？請用文字敘述你的方法，或用圖片表示之。

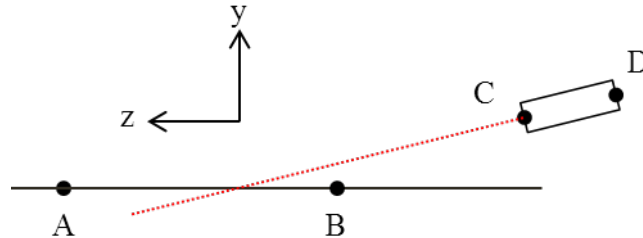


圖 16 一維光路準直模型(兩點平移)

(2) 承上題，見圖 17，若可調整的並非兩端端點 C、D，而是調整雷射旋轉點 E，點 E 可自由移動其 y 方向上的位置與旋轉整支雷射。試問該如何調整，使得雷射光同時通過 A、B 兩點？請用文字敘述你的方法，或用圖片表示之。

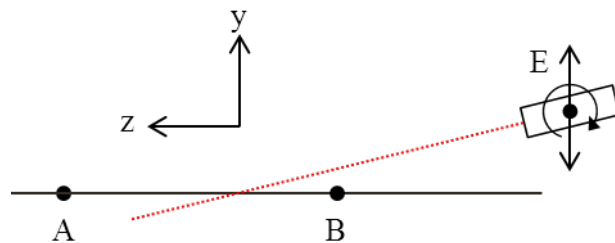


圖 17 一維光路準直模型(平移與旋轉)

(3) 承題 (1)、(2)，你認為你的答案存在的最大誤差為何？若雷射通過 A、B 兩點的誤差容許範圍為  $\pm 1\text{mm}$  (y 方向)，你的答案可適用嗎？

(4) 承題 (1)、(2)，試判斷實驗一的情況較接近 (1) 還是接近 (2)？

### 2. 成像系統的解析度

(1) 寫出單透鏡系統的繞射極限公式。(如欲使用代數表示，請定義各代數的意義。)

(2) 根據實驗條件，計算實驗四繞射極限的理論值。

(3) 如圖 18 所示，巨大物體邊界 10%~90% 能量所佔據的寬度常被作為成像系統的解析度指標。步驟四、6. 的物平面解析度與理論繞射極限相比，誤差多少？

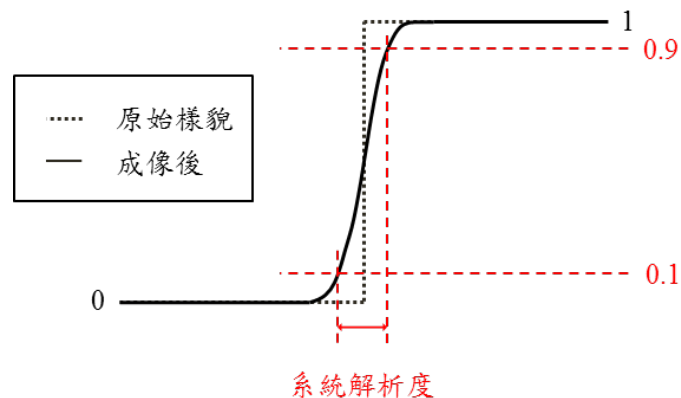


圖 18 成像系統解析度的定義方式



## 附錄 A 中性濾光鏡的使用

中性濾光鏡 (neutral density filter, 簡稱 ND filter) 為光學實驗以及攝影都很常見的鏡片, 主要的功能為不分波長地衰減一定倍率的光強。

以穿透式 ND filter 為例, 其穿透率  $\alpha$  滿足以下關係:

$$\alpha = \frac{I}{I_0} = 10^{-OD}$$

其中  $I_0$  為入射光強、 $I$  為出射光強, 而 OD (Optical Density) 常用來表示 ND filter 的衰減能力。下表為常見的 ND filter 對照表:

OD	穿透率
0.10	79.43%
0.20	63.10%
0.30	50.12%
0.50	31.62%
0.70	19.95%
1.00	10.00%
2.00	1.00%
4.00	0.010%

其中 OD0.3 與 OD1 是比較特別的數字, OD0.3 剛好約衰減一半; OD1 衰減十分之一。其餘數字的組合都能夠很快地由 OD0.3 與 OD1 估算出來。

通常 ND filter 使用方式由高 OD 往低 OD 使用, 以避免造成儀器過曝而損壞。另外, 在使用 ND filter 的時候也應該要注意雷射功率是否超過 filter 所能負荷之能量, 尤其在使用高 OD 值的 ND filter, 高吸收率使其在高功率雷射實驗上更易損壞, 因此要使用其他種類的衰減片來達成。

濾光鏡架通常可以放置複數 filter, 吸收率相乘相當於指數相加, 因此使用複數 ND filter 時, 直接把 OD 值相加即可。以 ND filter 表格為例, 你幾乎可以用任意兩片來組成你需要的吸收率。以兩片式濾光鏡架為使用範例, 請謹記以下要點:

(1) 從高 OD 值 ND filter 開始漸進往低 OD 值使用。

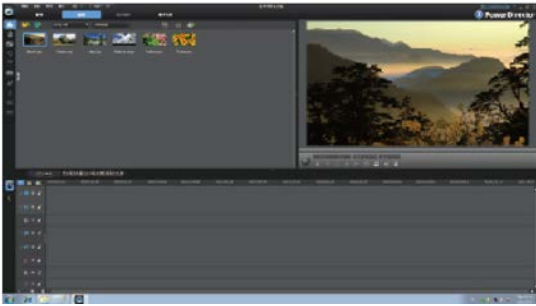
(2) 若不知道是否會過曝, 請隨時準備遮蔽光源。

舉例來說, 如有一 CCD 其最適使用之 ND filter 為 OD1:

- A. 放上 OD4 的濾光鏡。由於並未曉得是否會過曝, 請隨時準備好遮蔽光源。
- B. 打開 CCD。發現其未曝光, 但光線仍顯不足。
- C. 遮蔽光源, 換上 OD1、OD2 的濾光鏡 (OD3)。仍太暗。
- D. 抽掉 OD1。仍太暗。
- E. 放上 OD1, 抽掉 OD2。(由於 OD2 不過曝, 可省略遮光動作。)
- F. 放上 OD0.7, 抽掉 OD1。過曝, 請將光源遮蔽或是把抽掉的 OD1 放回。
- G. 放上 OD1, 抽掉 OD0.7。

## 附錄 B CCD 的使用

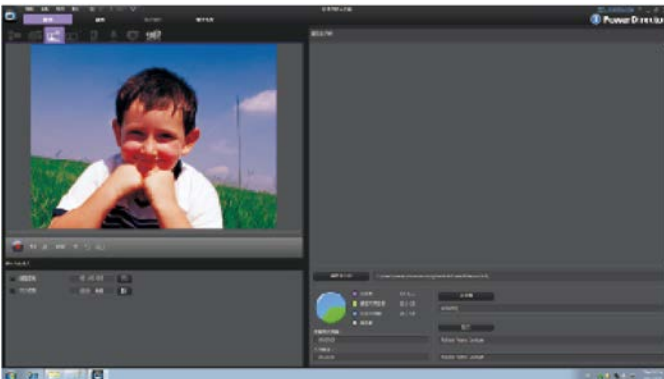
1. 進入桌面圖示 PowerDirector 後，軟體視窗如下圖所示：



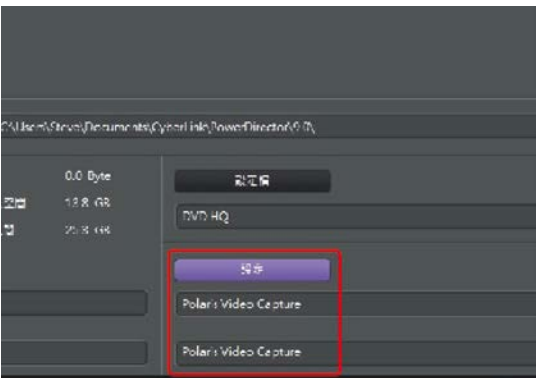
2. 若要開始擷取影像，請點選『擷取』，開啟影像擷取視窗。



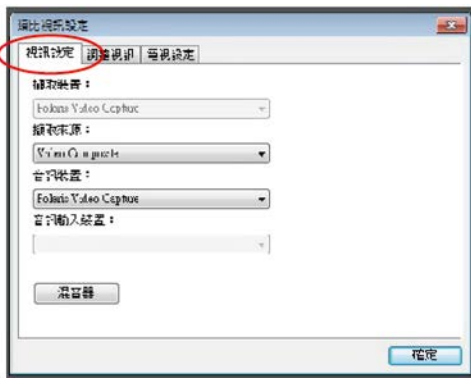
3. 影像擷取視窗如下圖所示：



4. 首先請確認影像擷取裝置為『Polaris Video Capture』，音效裝置設定為『Polaris Video Capture』，若出現的裝置名稱與上述不同，請點選『設定』進行修改。



5. 在『視訊設定』頁籤中，可切換影像輸入端子來源訊號，可選擇 Video Composite(AV 端子) 或 Video SVideo(S 端子)。



6. 在『調整視訊』頁籤中，可調整影像參數，如亮度、色調、飽和度、對比及清晰度。



7. 請點選『設定檔』，可設定動態錄影壓所格式。



8. 在『品質設定檔設定』視窗中，可選擇 MPEG-2 及 AVI 壓縮編碼格式，並可選擇錄影品質，各種範本詳細格式及內容，請點選『詳細資料』參考。





動態錄影檔案容量對照表(在此以 MPEG-2 格式為例)

格式	品質	影像解析度	錄製1小時容量
DVD HQ	高畫質	720×480	4.2GB
DVD HQ(快速)	高畫質(快速編碼)	720×480	4.0GB
DVD SP	標準畫質	352×480	2.1GB
DVD LP	低畫質	352×240	1.4GB

※ 此為參考數值，實際容量依影像內容有所差異。

※ 訊聯科技威力導演 PowerDirector 9.0 DE 詳細的功能及操作說明，請參考軟體說明檔，按下鍵盤上的『F1』按鍵，視窗如下圖所示。



※免責聲明

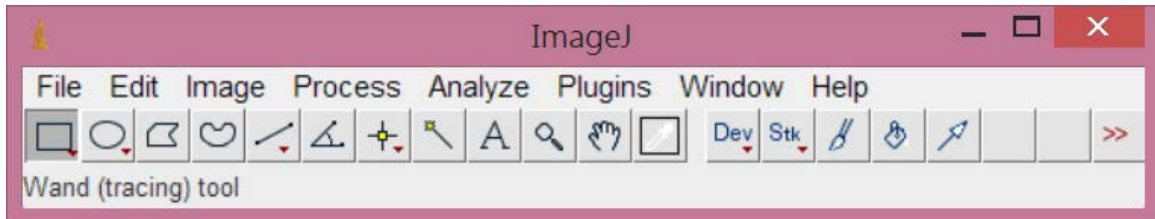
本附錄資料為參考登昌恆興業股份有限公司之 UPG310 產品使用說明書製作，其中所載之任何資料或數據僅供教學參考。如需取得本資料，請進入登昌恆興業股份有限公司官網下載本產品使用說明書電子檔。




## 附錄 C Line profile 的擷取--Imagej

光學影像研究常常需要取出影像的 line profile，有許多程式都具有此功能，本附錄將以 Imagej 做範例教學。

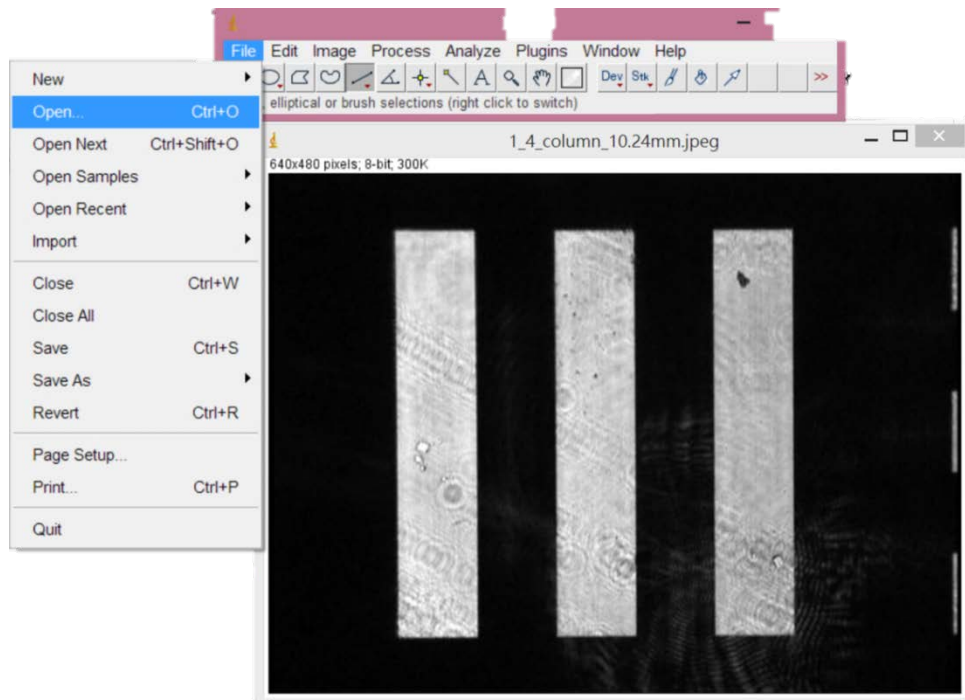
Imagej 為開程式碼的公用軟體，任何人都能免費下載並安裝插件或自行編寫，Imagej 的官網 <http://imagej.nih.gov/ij/index.html>。


程式開啟後，會出現以下介面：

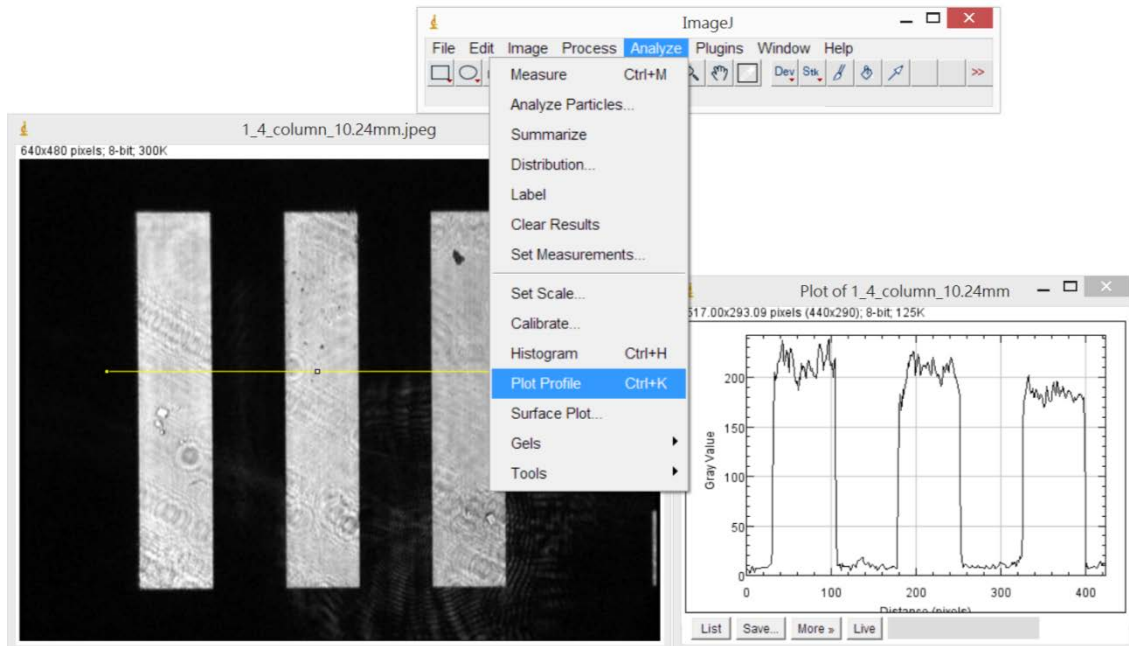


圖中有許多工具可以使用，常用的有矩形工具 、線段  以及角度量測  工具。

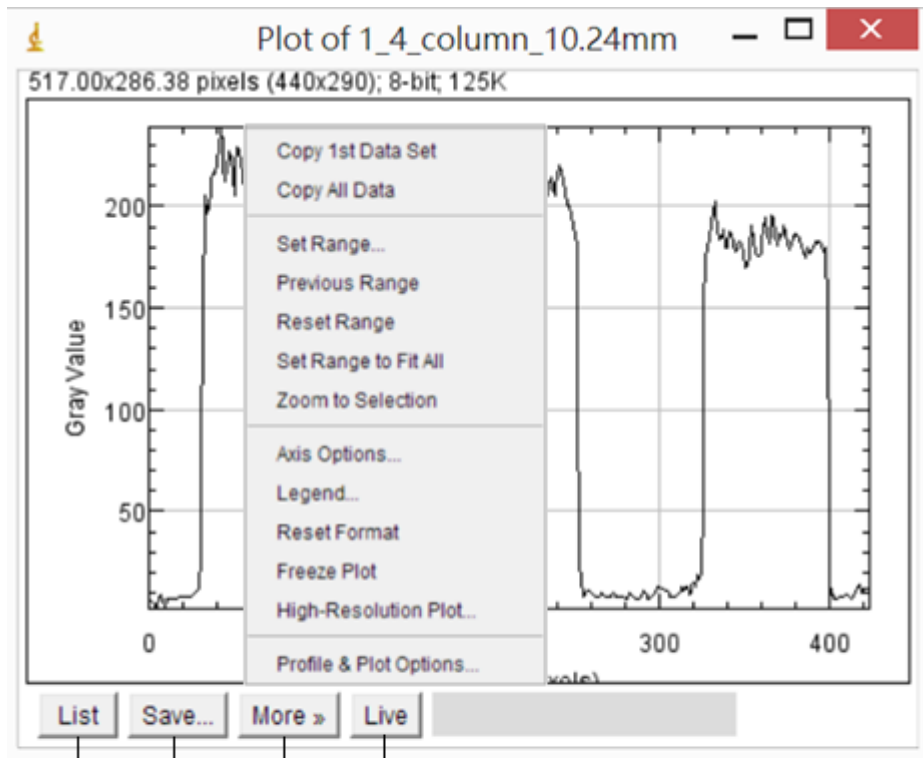
開啟圖片的方法可以直接將圖片拉進視窗中，或是點選 File>Open... (Ctrl+O) 來開啟圖片，如下圖所示。



如果要取出 line profile 會用到線段 ，選擇並於圖片中左鍵拖曳出一線段（按住 Shift 可畫出水平、垂直、45 度斜角線）。再選擇功能表的 Analyze>Plot Profile (Ctrl+K)，出現 Profile 視窗，如下圖所示。



Profile 視窗的功能如下圖所示



即時更新畫面

圖片標籤或是其他圖片設定

儲存 profile 的數據表單

列出 profile 的數據表單

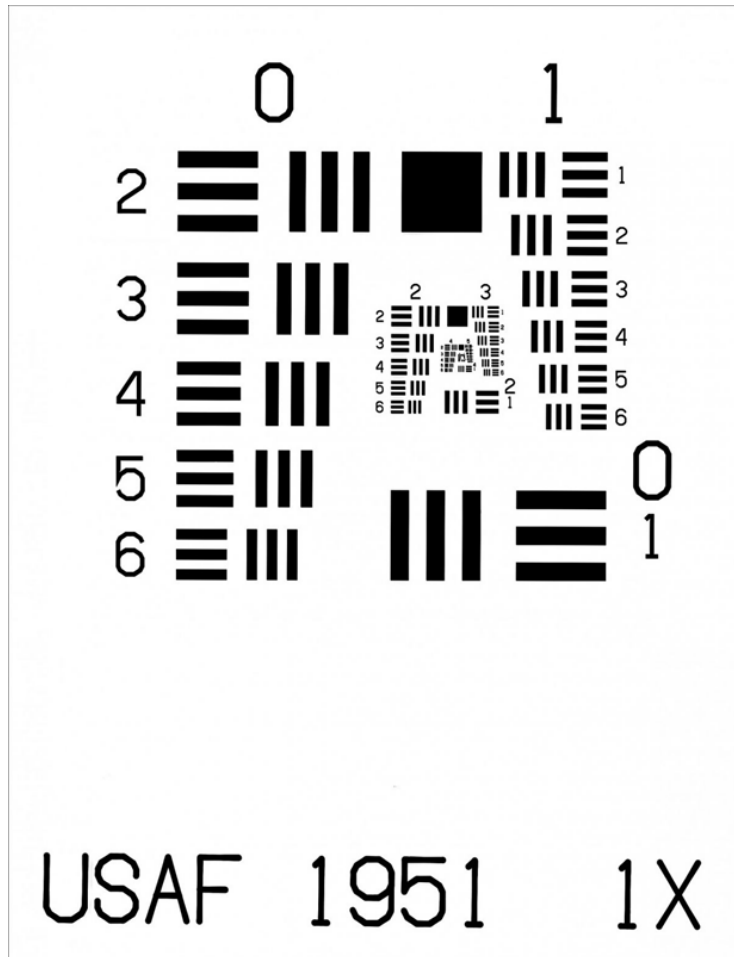
按下 Save 可存成 excel 檔案，方便檢視與繪圖。

點選功能表中的 File>Save as，可直接匯出圖片成檔案。

Profile 視窗中 More>Axis Options 和 Legend 可進行圖片設定

附錄 D 標準片 (1951 USAF 1X)

1951 USAF 分辨力測試圖 (1951 USAF resolution test chart) 是符合 MIL-STD-150A 標準的分辨力測試圖案，由美國空軍於 1951 年創建，廣泛地應用於測試光學成像系統 (如顯微鏡和相機) 的分辨能力。這種圖案有許多短線，3 條直短線和 3 條橫短線為一個組合，短線的尺寸由大到小。成像系統無法辨明的最大短線組為其分辨能力極限。



標準片上的橫軸數字為 Group Number (組序數)，縱軸數字為 Element (圖元序數)，短

線的等級與尺寸如下表，分辨力計算式為：分辨力(lp/mm) =  $2^{\left(\frac{Element-1}{6} + groupnumber\right)}$

Resolution Values for USAF 1951 Target (Line Pairs per mm)												
Element	Group Number											
	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.250	0.500	1.00	2.00	4.00	8.00	16.0	32.0	64.0	128	256	512
2	0.280	0.561	1.12	2.24	4.49	8.98	18.0	36.0	71.8	144	287	575
3	0.315	0.630	1.26	2.52	5.04	10.1	20.2	40.3	80.6	161	323	645
4	0.353	0.707	1.41	2.83	5.66	11.3	22.6	45.3	90.5	181	362	—
5	0.397	0.793	1.59	3.17	6.35	12.7	25.4	50.8	102	203	406	—
6	0.445	0.891	1.78	3.56	7.13	14.3	28.5	57.0	114	228	456	—