

成功大學物理系近代光學實驗課程
2016 年 第一版

基礎光路架設

國立成功大學物理系

張國誌 編著

朱淑君教授 校訂

基礎光路架設

一、實驗目的

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。

二、實驗器材

✓ He-Ne Laserx1	✓ 雙濾光鏡鏡架x1
✓ 平面鏡 Mirrorx4	✓ 感光耦合元件
✓ 光圈 Irisx4	Charge-coupled devicex1
✓ 空間濾波器 Spatial filterx1	✓ 2 吋楔形分光鏡
✓ 10X 顯微鏡物鏡x2	Wedge beam splitter.....x2
✓ 25 μ m 針孔x1	✓ 光學鏡架x4
✓ f=150mm 透鏡 (2 吋)x1	✓ 分光鏡鏡架x2
✓ 可調式透鏡架x1	✓ 顯微鏡物鏡鏡架x1
✓ 標準片x1	✓ 支撐柱 (Post)x17
✓ Plate holderx1	✓ 支撐座 (Holder)x17
✓ 平移台x1	✓ 底板基座+壓板
✓ 中性濾光鏡 (8 片)	Bottom+Base clampx17
Neutral density filter (8 片) ...1 組	✓ 電腦x1

【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。

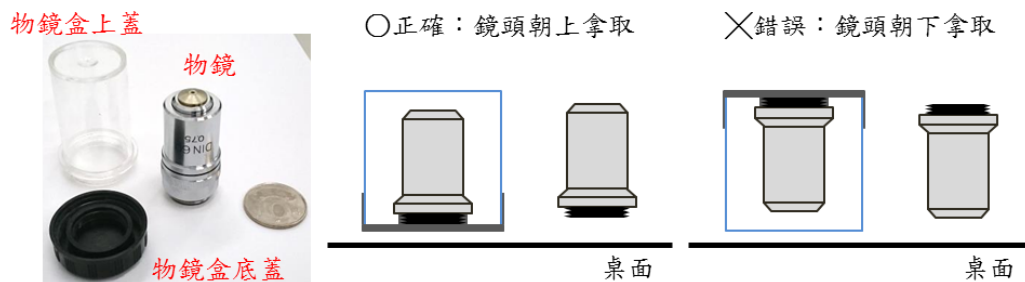


圖 1、顯微鏡物鏡取用示意圖。

- 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 1），避免灰塵從另一側進入物鏡中。
- 使用空間濾波器時，切記不要使物鏡撞擊到針孔。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。
- 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。
- 雙濾光鏡鏡架為鏡片放置型鏡架，請注意不要觸碰到架上的濾光鏡，避免造成損壞。
- 安放光學元件時請勿鎖太緊，避免元件龜裂或粉碎。

三、實驗

(一) 光路準直

原理：

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

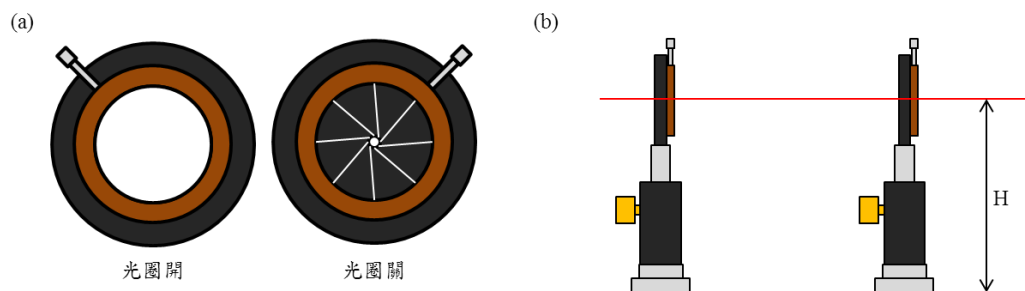


圖 2、(a)光圈外觀示意圖。(b)平行桌面光路示意圖。

根據歐氏幾何，空間中相異兩點決定一條直線。如圖 2a，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（圖 2b）。

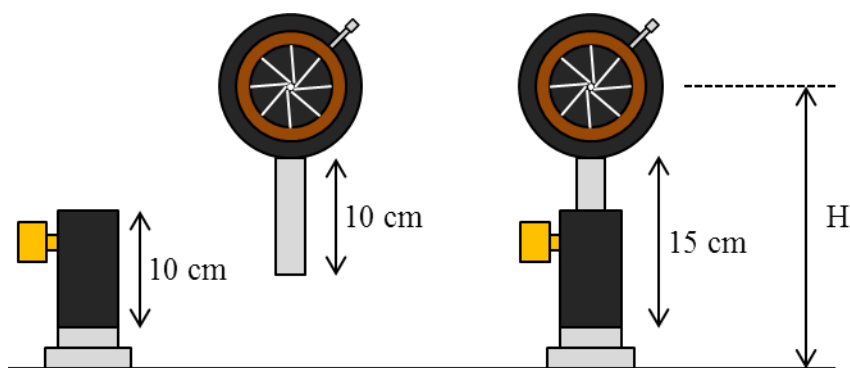


圖 3、光路高度設定範例。以光圈為圖例，支撐柱及座長度為 10cm 時的架設方式。

如何訂定光圈的高度呢？參考圖 3，若手邊有的支撐柱與支撐架皆為 10cm，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 3 為例，15cm 左右為最佳，此時支撐柱約還有 ± 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 4），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 4 為筆者常用之指高器架設。

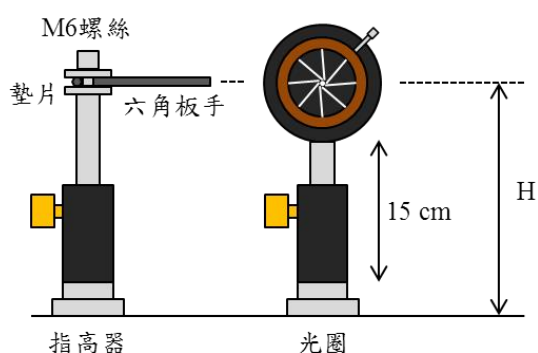


圖 4、指高器示意圖。由六角板手、墊片、螺絲以及支撐架與座組成之簡易指高器。

控制雷射行進方向的方法可參考示意圖圖 5，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 α 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。

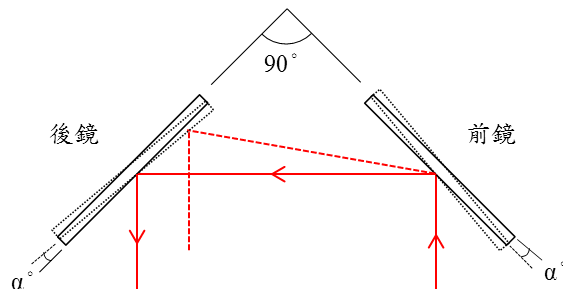


圖 5、光路控制示意圖。

實驗步驟：

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 6 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。
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。

〔小提示〕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。

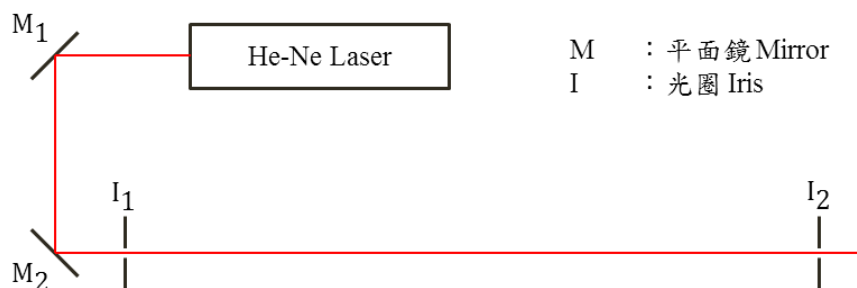


圖 6、光路準直之基本架設。

(二) 空間濾波

原理：

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 7)。空間濾波器的組成主要由一透鏡與置於其後焦點之針孔組成 (圖 8)。

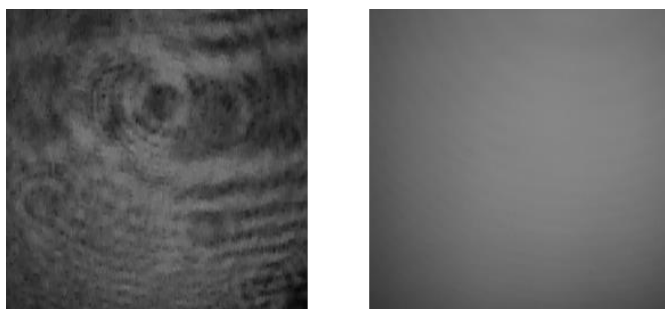


圖 7、濾波前 (左) 與濾波後 (右) 兩光斑之比較。

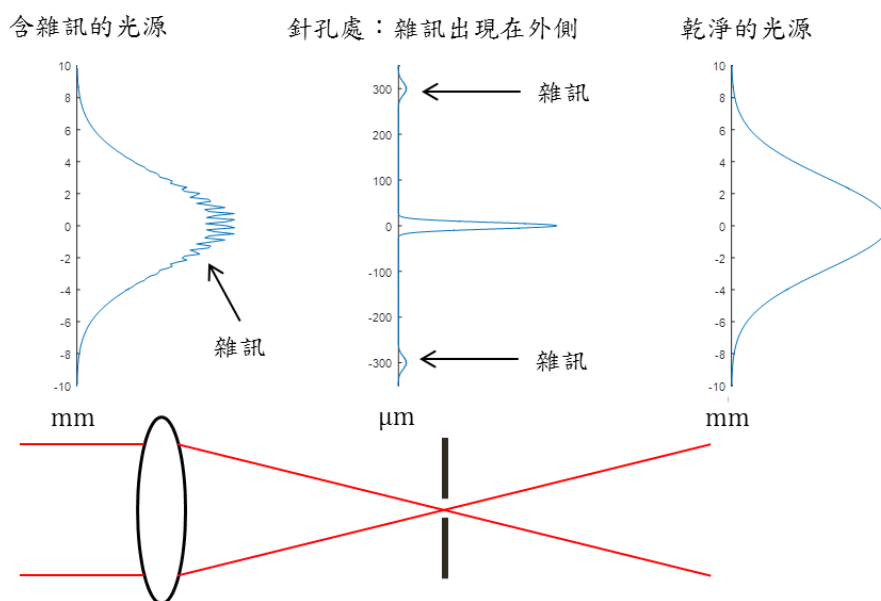


圖 8、空間濾波器工作原理示意圖。

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針孔，因此可於針孔後方得到乾淨無雜訊之光束分佈 (圖 8)。詳細原理可自行參考有關傅氏光學之參考書，裡面有更詳細的推導與說明。

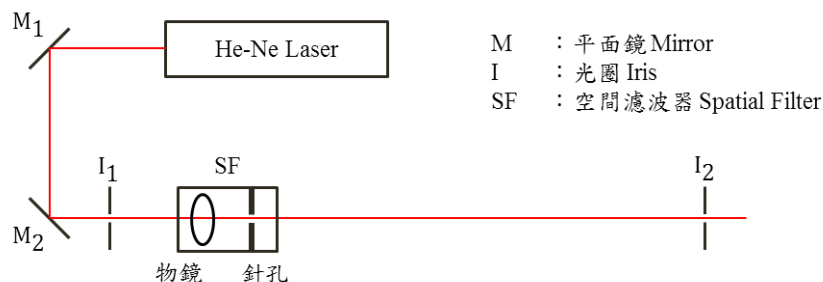


圖 9、空間濾波實驗架設圖。

實驗步驟：

1. 延續實驗(一)之光路。如圖 9，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針孔。
2. 調整空間濾波器，使穿透顯微鏡物鏡的光束對準 I₂ 正中心，反射光束對準 I₁ 正中心。另外，反射光點應該會有數個，全部都要調回 I₁ 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. 裝上針孔開始進行空間濾波。裝設針孔時，請先將物鏡退到遠離針孔的位置，以免傷及物鏡及針孔。
5. 調整針孔使其穿透光有最大值（目測）。如果目視無法觀測到光場，可將紙屏拉近並關閉燈光。
6. 調整顯微鏡物鏡使其聚焦點更接近針孔，但必須確保光線可以通過針孔。
7. 重複步驟 5、6，直到通過針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)。

(三) 擴束平行光束

原理：

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 θ 與雷射束腰半徑 w_0 之關係滿足 $\theta = \lambda / \pi w_0$ ，當 θ 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。關於高斯雷射光束，於近代光學教科書中都會有詳細討論，本實驗講義不作深入探討。

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 10，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 $M=f_2 / f_1$ 。

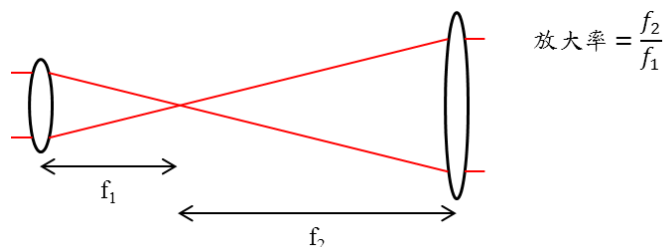


圖 10、Kepler 形式的擴束器。

實驗步驟：

1. 將 $f=150\text{mm}$ 透鏡裝在可調式透鏡架上，並將透鏡架設於空間濾波器後（圖 11 錯誤！找不到參照來源。）。)
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以及擴束後光束直徑，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)。

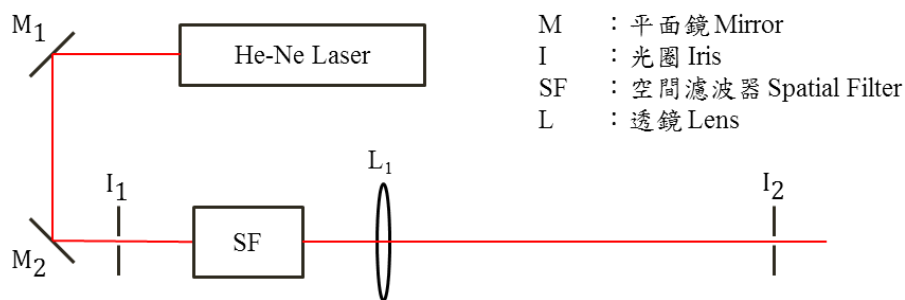


圖 11、擴束平行光束實驗架設。

(四) 成像系統

原理：

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，透鏡組的透鏡並無片數限制，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。

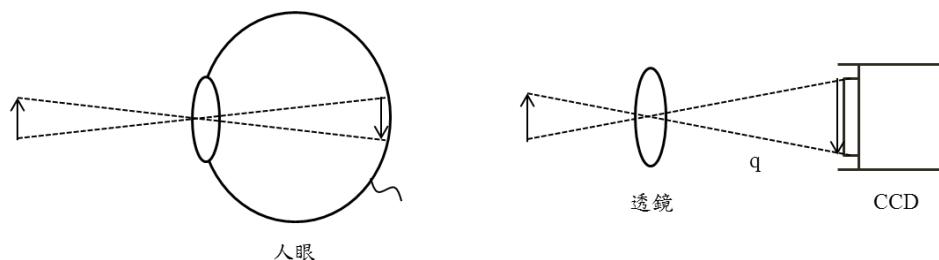


圖 12、成像系統示意圖。

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 12，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 上面成清晰實像。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。

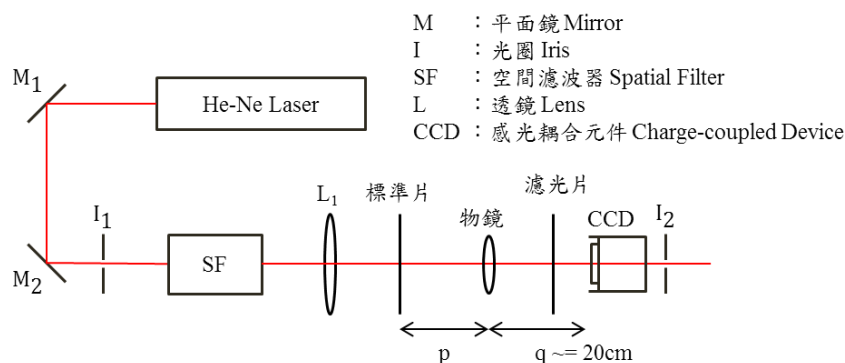


圖 13、成像系統實驗架設。

實驗步驟：

1. 實驗架設如圖 13，標準片請架設於平移台上，且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）。濾光鏡使用方式可參考附錄 A。
3. 關閉實驗室燈光、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. 將標準片放置回鏡架上，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 的方法可參考附錄 C。
6. 根據標準片原始尺寸以及所拍攝的影像計算成像放大率。

(五) 實際應用：Mach-Zehnder 干涉儀架設

原理：

Mach-Zehnder 干涉儀於空氣動力學、電漿物理、量子力學以及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 14，其中屏幕 A、B 將可得到明暗互補的干涉影像。

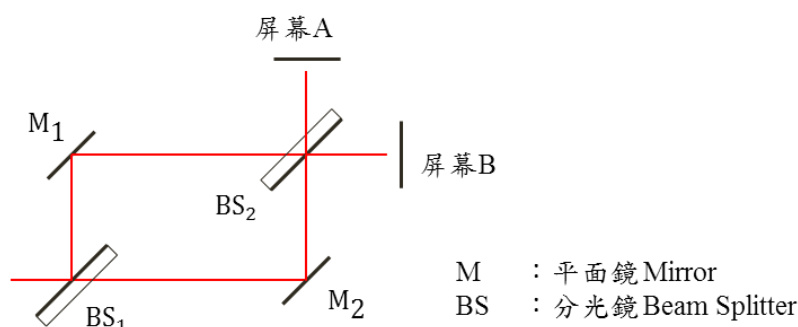


圖 14、Mach-Zehnder 干涉儀示意圖。

實驗步驟：

1. 根據實驗(一)~(四)所學之技能，並參考圖 14，架設出 Mach-Zehnder 干涉儀。
2. 調整干涉儀，使其出現同心圓環之干涉條紋。
3. 將屏幕 A、B 換成 CCD，紀錄所得之干涉影像，觀察其互補的效果。

四、問題與討論

(一) 一維光路的收斂：

- i. 如圖 15，考慮空間中雷射欲通過兩點 A、B，雷射只能控制其兩端端點的位置 C、D。請問該如何使雷射光同時通過 A、B 兩點？請用文字敘述你的方法，或是用圖片表示之。

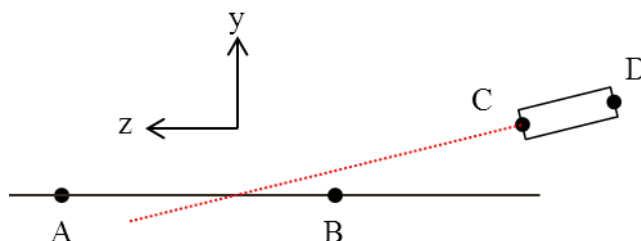


圖 15、一維光路準直模型（兩點平移）。

- ii. 承上題，見圖 16，若現在可控制的並非兩端端點 C、D，而是控制雷射旋轉點 E，點 E 可自由控制其 y 方向上的位置與旋轉整支雷射。請問該如何使雷射光同時通過 A、B 兩點？請用文字敘述你的方法，或是用圖片表示之。

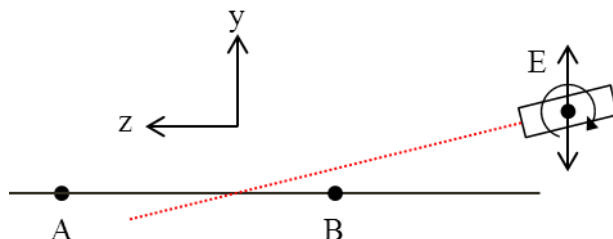


圖 16、一維光路準直模型（平移與旋轉）。

- iii. 承題 i、ii，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？
- iv. 承題 i、ii，你覺得實驗(一)的情況較接近是 i 還是 ii？
- (二) 成像系統的解析度：
- i. 寫下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。)
- ii. 根據你的實驗，計算實驗(四)繞射極限的理論值。

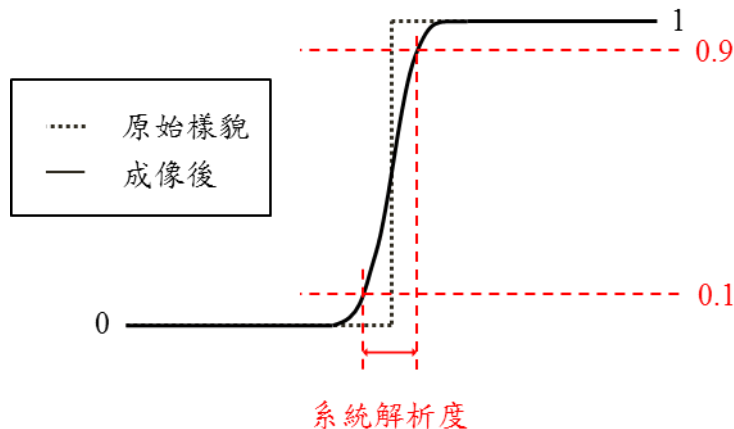


圖 17、成像系統解析度的定義方式。

- iii. 如圖 17，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。根據你的實驗結果，你可以解析物平面的解析度為何？與理論繞射極限相比誤差多少？

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 α 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:

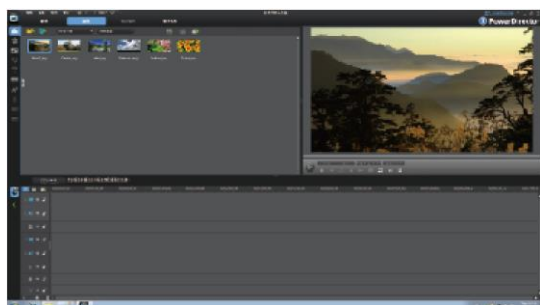
- (1) **從高 OD 值 ND filter 開始漸進往低 OD 值使用。**
- (2) **若不知道是否會過曝, 請隨時準備遮蔽光源。**

舉例來說, 如有一 CCD 其最適使用之 ND filter 為 OD1:

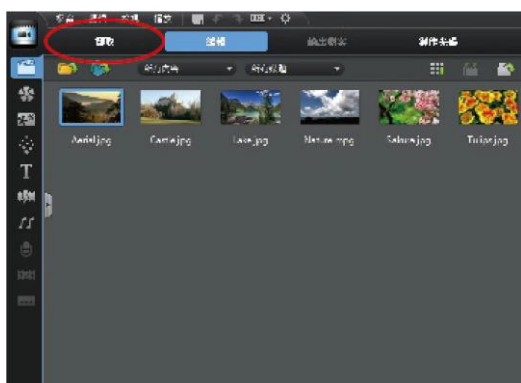
- A. 放上 OD4 的濾光鏡。由於並未曉得是否會過曝, 請隨時準備好遮蔽光源。
- B. 打開 CCD。發現其未曝光, 但光線仍顯不足。
- C. 遮蔽光源, 換上 OD1、OD2 的濾光鏡 (OD3)。仍太暗。
- D. 抽掉 OD1。仍太暗。
- E. 放上 OD1, 抽掉 OD2。(由於 OD2 不過曝, 可省略遮光動作。)
- F. 放上 OD0.7, 抽掉 OD1。過曝, 請將光源遮蔽或是把抽掉的 OD1 放回。
- G. 放上 OD1, 抽掉 OD0.7。

附錄 B CCD 的使用

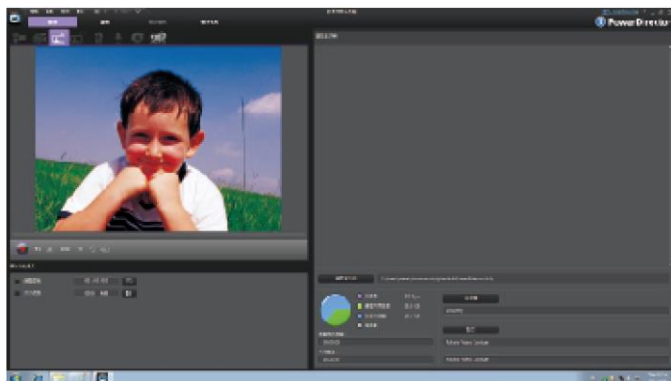
1. 進入桌面圖示 PowerDirector 後，軟體視窗如下圖所示：



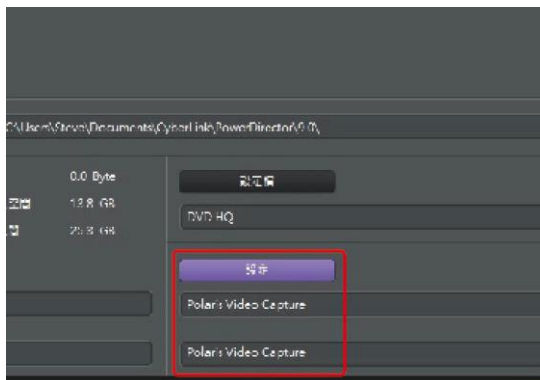
2. 若要開始擷取影像，請點選『擷取』，開啟影像擷取視窗。



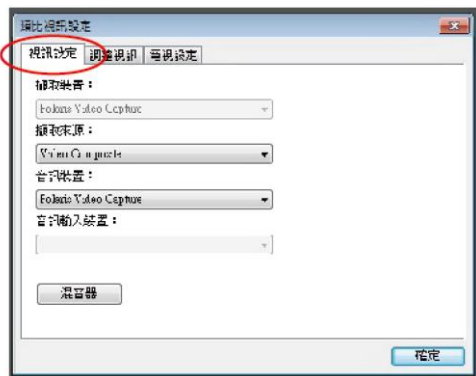
3. 影像擷取視窗如下圖所示：



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。



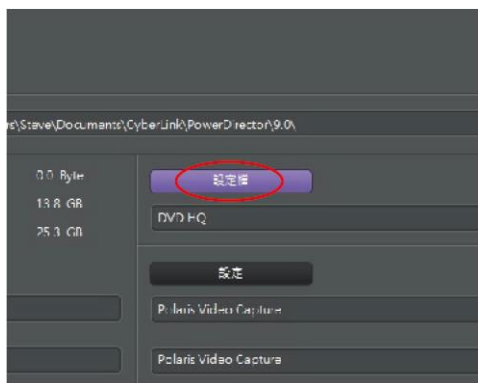
5. 在『視訊設定』頁籤中，可切換影像輸入端子來源訊號，可選擇 Video Composite(AV 端子)或 Video SVideo(S 端子)。



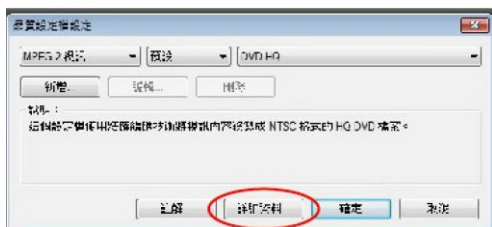
6. 在『調整視訊』頁籤中，可調整影像參數，如亮度、色調、飽和度、對比及清晰度。



7. 請點選『設定檔』，可設定動態錄影壓所格式。



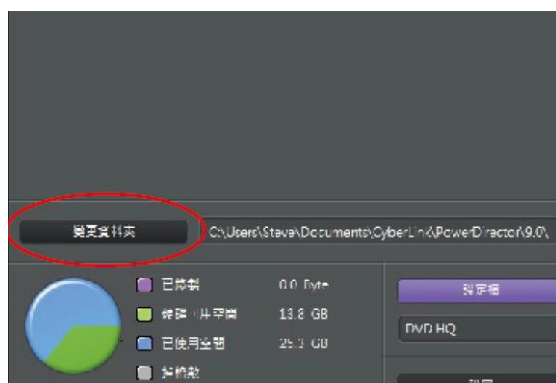
8. 在『品質設定檔設定』視窗中，可選擇 MPEG-2 及 AVI 壓縮編碼格式，並可選擇錄影品質，各種範本詳細格式及內容，請點選『詳細資料』參考。



9. 若要錄影自訂範本格式，請點選『新增』，由此處可自訂影像解析度、資料位元率，聲音品質...等參數，如下圖所示。



10. 若要修改影像儲存資料夾位置，請點選『變更資料夾』。



11. 完成以上設定後，接下來開始進行擷取操作，如下圖所示：



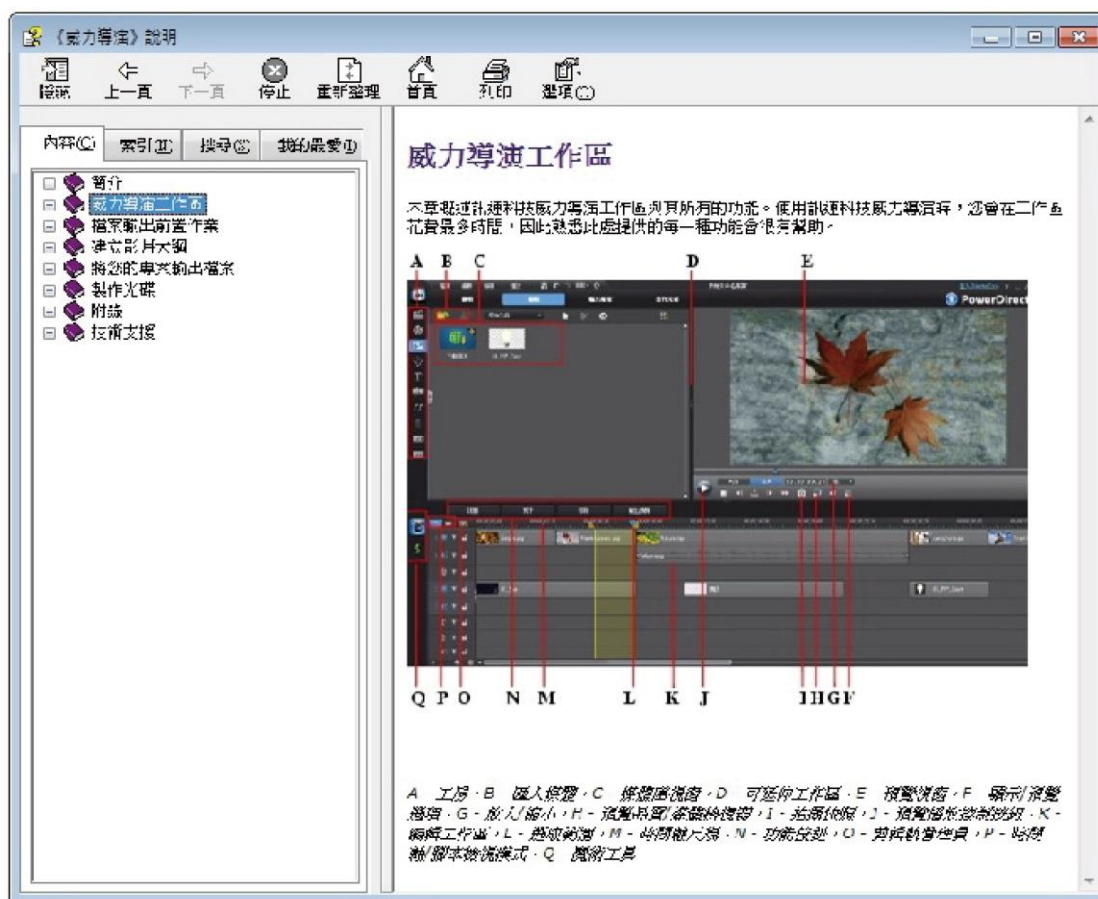
- (1) 開始/停止動態影像擷取
- (2) 靜態單張擷取
- (3) 勾選後，可設定錄影時間長度，時間到達即停止錄影
- (4) 勾選後，可設定錄影檔案大小，容量到達即停止錄影

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。



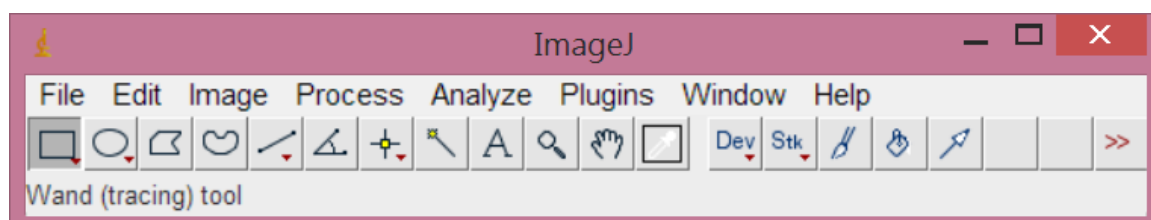
※免責聲明




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

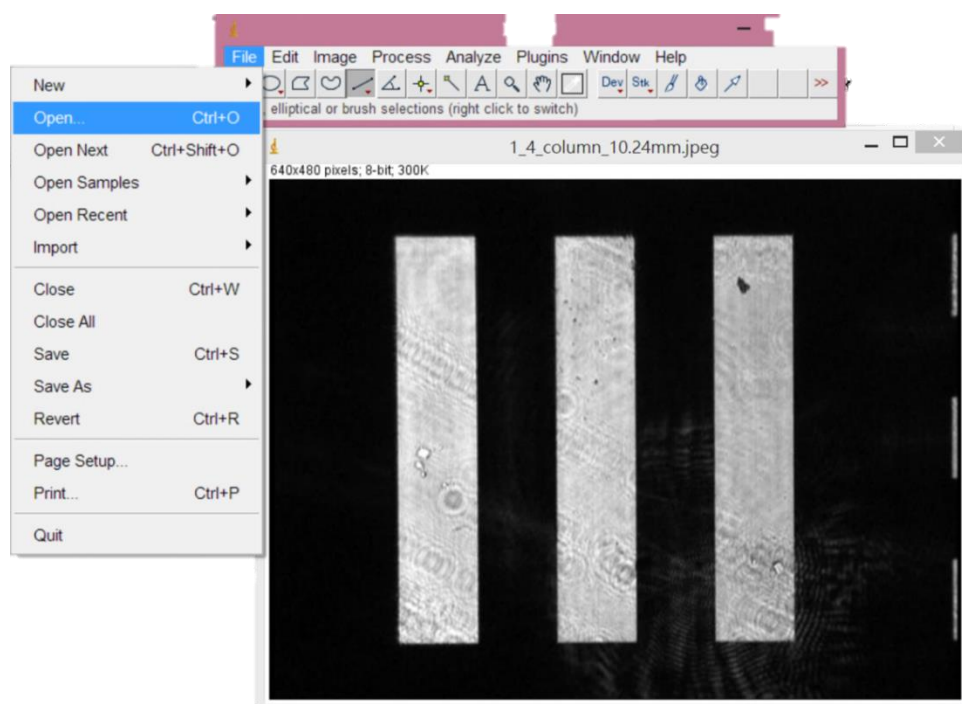
光學影像研究常常需要取出影像的 line profile，有許多程式都具有此功能，筆者接觸過的就有 MaxIm DL、Matlab、Imagej 等。本附錄將以 Imagej 做範例教學。


Imagej 為開程式碼的公用軟體，所以任何人都能免費下載並安裝插件或自行編寫，想要使用的人請去 Imagej 的官網下載 (<http://imagej.nih.gov/ij/index.html>)。程式開啟後會有以下介面：

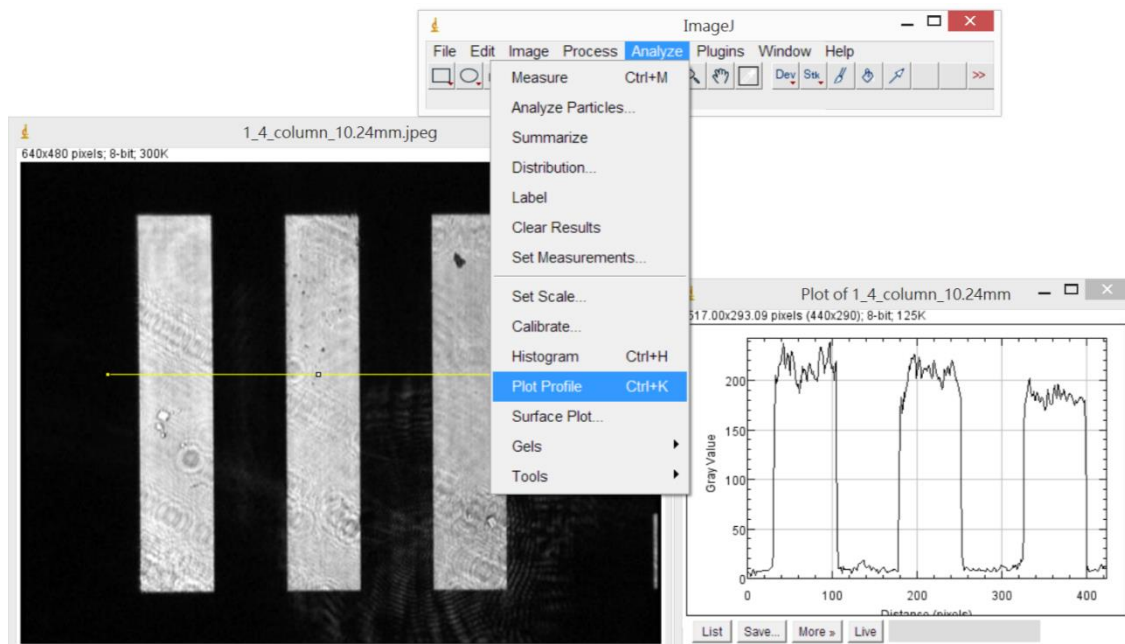


圖中有許多工具可以使用，常用的有矩形工具、線段以及角度量測工具。

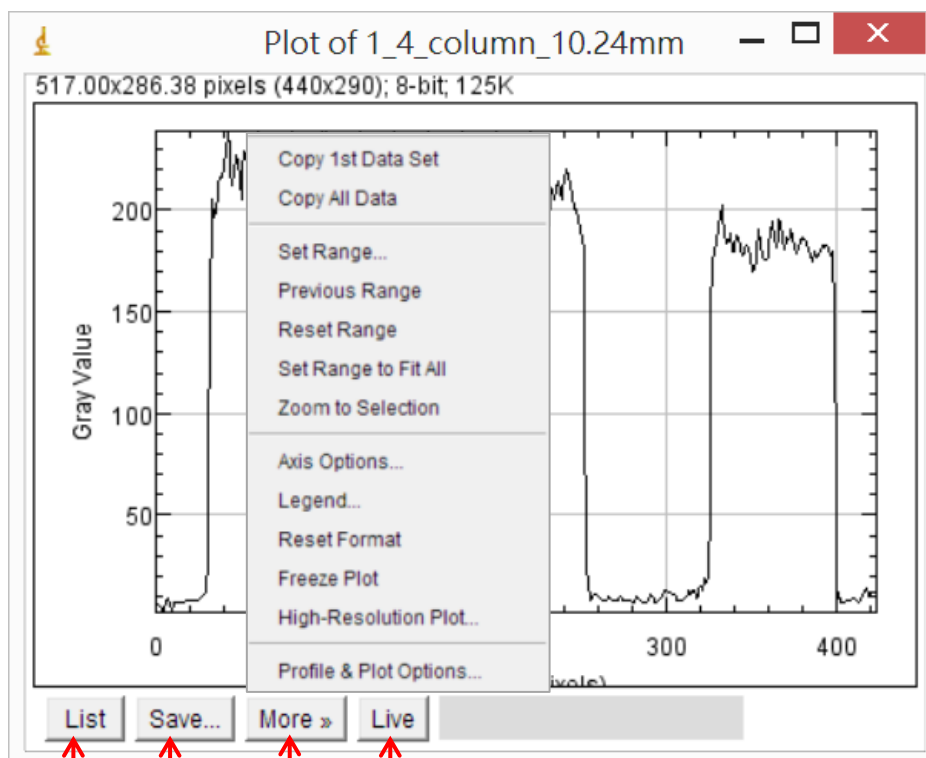
開啟圖片的方法可以直接將圖片拉進視窗中，或是點選 File>Open... (Ctrl+O) 來開啟圖片。



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）。然後選擇功能表列的 Analyze>Plot Profile (Ctrl+K) 叫出 Profile 視窗：



Profile 視窗的功能：



筆者建議存檔不要只存圖片，存數據比較有意義，按下 Save 可存成 excel 檔案，方便檢視與繪圖。

若想直接匯出圖片也可以點選功能表中 File>Save as 來匯出檔案。

另外圖片設定可用 Profile 視窗中 More>Axis Options 和 Legend 來設定

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