

搭配手機的史林納攝影

周鑑恆

萬能科技大學 航空暨工程學院航空光機電系

壹、前言

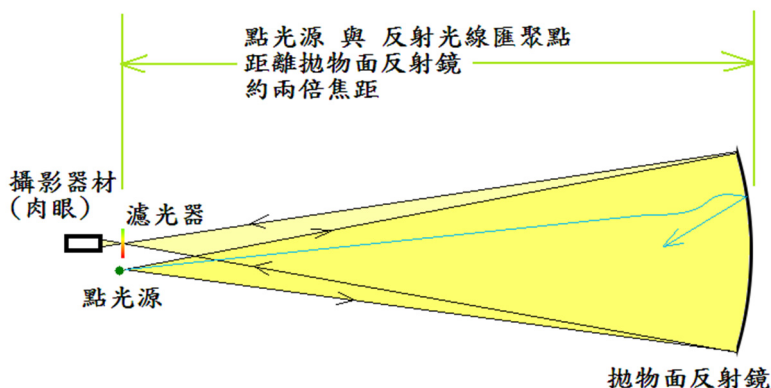
佛科試鏡 (Foucault knife-edge test)

【註 1,2】是用來檢視反射鏡是否完美的簡單方法。這個方法是 1858 年法國物理學家佛科 (Léon Foucault) 所發明的。原理十分簡單，利用一個點光源，向四面八方發出光線，此點光源發出的光線，經過反射鏡 (嚴格而言是拋物面鏡) 反射之後，如果反射鏡是完美的，理想的狀況是，所有的反射光會聚回一點，真實的點光源於是便形成完美的實像點光源。

但如果反射鏡不完美，由點光源發出的光線，經反射鏡某些不完美區域反射，就不會反射到同一點。此狀況下，經反射鏡反射，真實的點光源，就不能形成完美

的點光源。也就是說，物體上每一個點光源發出的光線，經反射鏡反射，就不能一一聚到相對應的點，就無法形成最佳的實像。這樣的反射鏡就有需要再修正。

如果在點光源發出的光線經反射鏡反射之後應該匯聚的聚集點，放上攝影機，或者以肉眼直接觀察，因為鏡面反射之光線都射入眼中或攝影機中，於是用肉眼看起來，或從攝影機中可以看到，完美的反射鏡全部都是明亮而均勻的。如果鏡面某些區域的反射光線，不能聚回到同一點，則在這一點位置上的眼睛或攝影器材就看不到這些區域的反射光線，於是鏡面那些有問題的區域看起來就比較不亮。



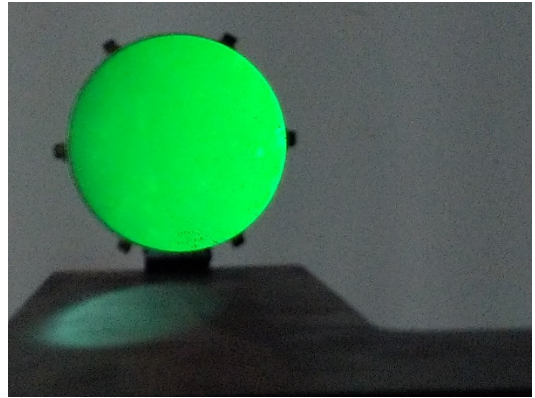
圖一、在理想狀況下，點光源發出的光線，經反射鏡反射都匯聚到某一點。在此光線匯聚點安裝濾光器(例如:刀片、顏色濾光片等)，即可察覺：鏡面上那些區域的反射光沒有精準地聚回此點。也就是說，鏡面那些區域製作得不十分完美。

用這種方法(見圖一),很容易找到反射鏡不完美的區域,再設法加以修正。為提高測試的精度,(1)用的點光源要愈小愈好。一般光源都有尺寸,要儘量縮小光源的尺寸使其逼近點光源(現代有了又亮又近似點光源的 LED,使這項實驗更容易進行);(2)在反射光線匯聚回到的那一點(理論上是很小的點)旁邊,用一片鋒利的刀片幾乎碰到這匯聚的光點,如此一來,雖然瞳孔及攝影器材的光圈不是很小,只要反射光線稍有失準,無法聚到同一點上,就會被刀片遮掉,則反射鏡上那些有缺陷的區域就看起來就是暗的,而且只要稍稍有缺陷,看起來就是暗的,更為敏銳。(3)點光源和眼睛都位於反射鏡 2 倍焦距附近,以便兩者不致於相互遮到而減損此方法之效果。

貳、佛科試鏡法的有趣應用

現代大天文望遠鏡都是反射式望遠鏡,用現代科技研製反射鏡,可以達到很高的品質。直徑二十公分以上的小尺寸反射鏡,其品質大多在水準之上,用佛科試鏡法觀察,鏡面通常都能呈現均勻的光亮。見圖二,筆者將綠光 LED 用鋁箔包裹起來,以美式圖釘將鋁箔刺一小洞,作為點光源進行實驗,鏡面就能呈現均勻的綠色。

但是,值得思考的問題是:只有因為鏡面某些區域不符完美曲面,而使部分反射光線無法聚回某一點,才會使某些區域



圖二、現代技術研製的反射鏡,基本上都能夠滿足佛科試鏡的要求。

看起來比較暗嗎?鏡面某些區域不完美是唯一的原因嗎?答案:當然不是!

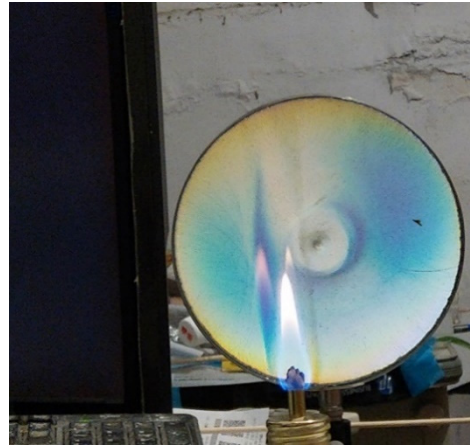
即使全鏡面都十分完美,但點光源發出的光線,在入射反射鏡之前,如果因為完美鏡面某些區域前方空氣密度稍有不同而折射,對完美鏡面的該區域而言,就如同點光源的位置被移動一小段距離,這些被異常折射過的光線經過完美鏡面的反射,就不會再聚回原本所有反射光應該匯聚的那一點。當這些被稍微改變方向的光線反射之後,因為點光源和肉眼(或攝影器材)靠得很近,反射光又會被不同密度的空氣再擾動一次,於是更不會匯聚到同一點上。完美鏡面該區域的反射光,就不會進入位於匯聚點的眼睛或攝影設備的鏡頭。於是鏡面前空氣密度變化就變成明暗變化,就可以很容易看到原本看不到的空氣密度變化。

這樣的光學技術原理,源自佛科試鏡,稱之為史林納光學攝影術(schlieren photography)【註 3-10】。因為早期的點光

源都不很亮，所以早期實驗多用刀片遮掉貼近光線匯聚點的某一側。現在 LED 製成的點光源都相當亮，其實也可以用一小孔遮住光線匯聚點之外的區域；或者直接用原本就尺寸很小的手機鏡頭，也可以達到不錯的效果。此外，也有人用不同顏色的濾光片，使得偏離光線匯聚點的那些光線的顏色變得不同【註 11】。

因為能呈現出鏡面前空氣密度的微小變化（也就是空氣折射率的微小變化），於是這方法就有許多用途。例如：可以看到冷、熱氣流，可以看到因為空氣被壓縮而產生的密度變化（空氣中的聲音、駐波，以及物體在空氣中超音速運動產生的衝擊波），可以看到因透明氣體成分不同而發生的明暗變化。使得這個方法有許多有趣、重要而又具有教學價值的運用。

用同樣的方法，也可以檢測透鏡品質。將一點光源置於透鏡一側、距透鏡兩倍焦距之處，在透鏡另一側通過與光源大小相同之小孔觀察，很容易察覺透鏡的品質。位於另一側的點光源向四面八方發出光線，如果經透鏡某些部分折射，不能再射向同一點而進入眼睛，看起來鏡面的那些部分就是暗的。稍作實驗就很容易發現，坊間書局有售的放大鏡（要精確磨好兩個折射面），其實品質都經不起這樣嚴格的檢測。當然，利用透鏡也能進行史林納光學攝影，但效果顯然較差（見圖三）。



圖三、在直徑 124 mm 的放大鏡對面的 2 倍焦距處（不是 2 倍焦距處也無妨），安置一個點光源。點光源發出的光線，凡是經過放大鏡折射，都會再聚到放大鏡這側某處。在此點觀察，可見放大鏡之鏡面並不十分理想，尤其近中心處有較大的偏差。在透鏡和觀察點之間放置一燭火，也能看見熱氣流。

參、自製史林納技術儀具

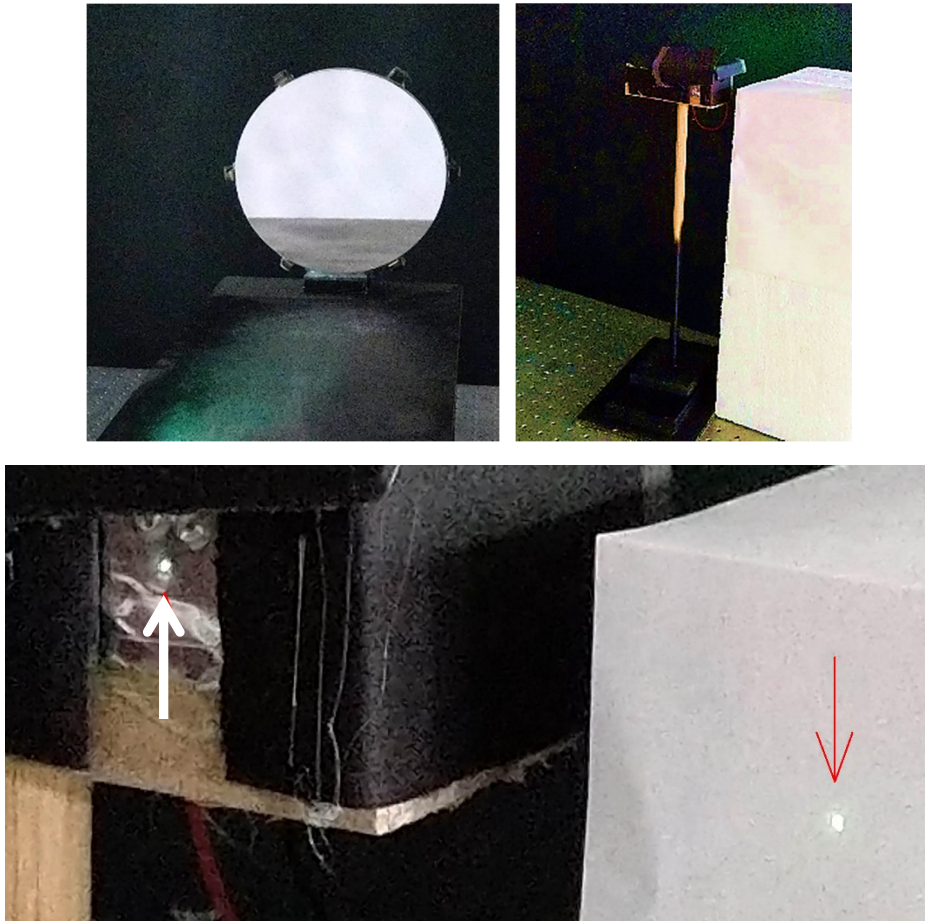
約 8000 元台幣即能買到一面不錯的拋物面鏡，以佛科試鏡法測試，會發現鏡面大致是均勻明亮的（見圖二）。實驗所需的其他器材（見圖四）包括有：(1) LED 燈點光源，因為不需要非常亮的 LED 光源，所以用細針在鋁箔上刺一個小圓洞，包裹在 LED 上，LED 點亮之後，此一小圓洞即成為一點光源。(2) 一刀片或另一小孔，以限制不能聚回一點的光線，使這些光線無法進入眼睛或攝影器材，而使明暗對比更為明顯。(3) 攝影器材：手機是不錯的選擇。

實驗時，先將點光源置於約兩倍焦距處（參見圖一及圖四）。可以用一白紙觀察

點光源的實像位置(見圖四(下)) 向下箭頭所指之聚光點),點光源和實像距鏡面的距離要幾乎相等,則點光源必須在 2 倍焦距的地方。再令聚光點和點光源都在鏡面的主軸附近,但不要妨礙觀察。因為手機鏡頭尺寸很小,其實不需要在反射光線匯聚點(也是一點光源)旁邊安裝擋光的刀片,

直接讓光線會聚點落入手機鏡頭即可。

在鏡面前方不到 10 公分處(筆者使用的反射鏡焦距約 80 公分,直徑 22 公分),設置燭火、酒精燈火、熱水、冰水,甚至可以噴出其他氣體的裝置,就可觀察空氣密度微小變化所呈現的現象。



圖四、實驗用的拋物面鏡,直徑 22 公分,焦距 80 公分(上左)。點光源為包裹在鋁箔中的 LED。鋁箔上有一小孔(直徑約 0.5mm)白色為成像的幕(上右)。點光源和其實像(匯聚光線的點)特寫(下)。手機鏡頭放在適當位置,使得整個光線匯聚點都能進入鏡頭中(下圖向下箭頭所指之聚光點)。

肆、實驗結果

因為手機鏡頭的尺寸很小，所以筆者就略作省略，也就不再加裝刀片。當然如果要加裝刀片，須注意刀片須加在點光源之實像位置（會聚點）的近旁，以便如果光線因空氣密度不同而有異常偏折，即不能進入鏡頭，而能非常敏銳地使空氣密度不同變成亮度不同，可以顯示更多的細節。

以此技術，筆者進行以下之觀察，就科學教育的眼光來看，都具有不錯的教學價值。

甲、溫度造成空氣折射率變化：

燭火造成的熱對流實驗。**圖五(a)**中可以明顯看出空氣因燭火而熱對流的情形。由此可見，火焰其實是燃燒後高溫的且發光的燃燒產物和空氣，當溫度下降後，雖

不再發出可見光，但其溫度仍高於四周空氣。所以燭火在其上方某一段距離內仍可引燃其他可燃物。

圖五(b)所示，是將雷射光筆（綠色）先用放大鏡聚焦，形成點光源，再照射燭火，再照到白色幕上的效果。其實，近乎平行光的太陽光也會造成類似的效果，也可以看見熱氣流（**圖五(c)**）。

酒精火焰，因酒精火焰較為猛烈，雖酒精火焰不甚明亮，所引起的上升氣流十分旺盛。酒精燃燒的產物是水蒸氣和二氧化碳，兩者完全透明，所以酒精燈火焰可見光亮度不高（見**圖六**）。

用高電壓起弧，電弧也引起空氣對流。電弧雖然不是燃燒，沒有燃燒產物，但高溫電弧引起的熱對流與燃燒十分相似（見**圖七**）。



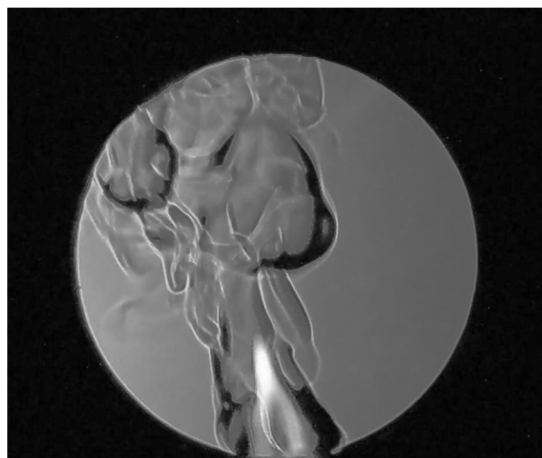
圖五(a)、燭火上方的熱氣流清晰可見。



圖五(b)、根據相同的原理，因為雷射光亮度很高，可以先將平行的雷射光經小放大鏡聚焦，形成點光源，再射到白色幕上。在幕和雷射光聚焦的點之間，置一燭火，一樣可以看到熱氣流。但效果仍不及用拋物面鏡的辦法。



圖五(c)、陽光下也可顯示出熱氣流(肉眼可以看得更清楚)。



圖六、酒精燃燒之氣流流動情形



圖七、史林納攝影下，電弧竟然與燃燒如此相似。

吹風機之氣流，也因為其溫度與周遭空氣不同而密度不同，也可以利用史林納攝影術看見熱氣流。吹風機完全沒有火焰，

因折射率稍不同只會引起景物稍異動（幾乎不能察覺），所以平時肉眼完全看不到吹風機吹出的熱空氣。但以史林納攝影法之

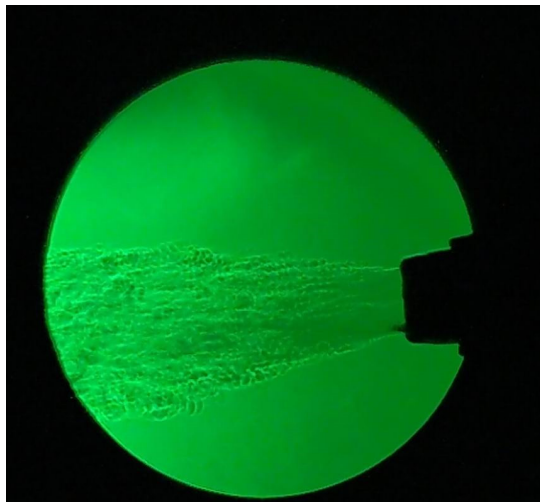
明暗對比，卻可明顯看到熱氣流(見圖八)。

乙、氣體成份不同造成折射率變化：

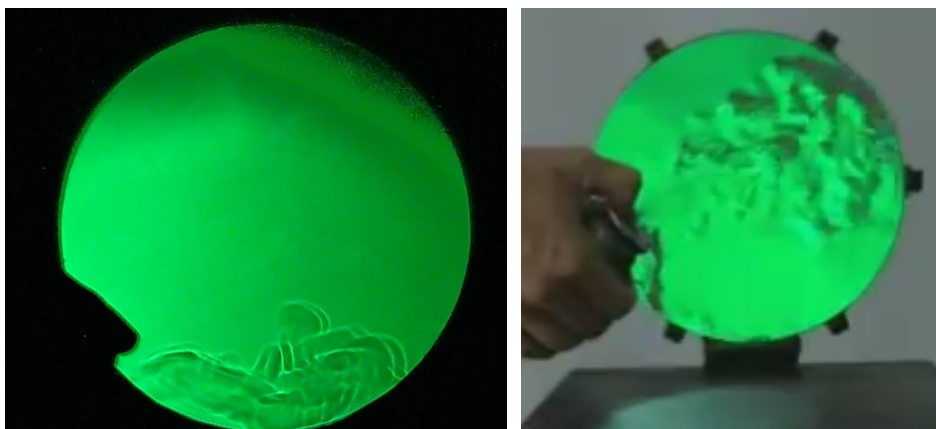
氣體成分不同，折射率也不同，也可以用史林納攝影術看到。圖九左圖為打火機瓦斯洩漏的影像，此時打火機並未點燃。右圖所示，是卡式瓦斯罐洩漏瓦斯的情形。

丙、史林納攝影用於航空工程實驗

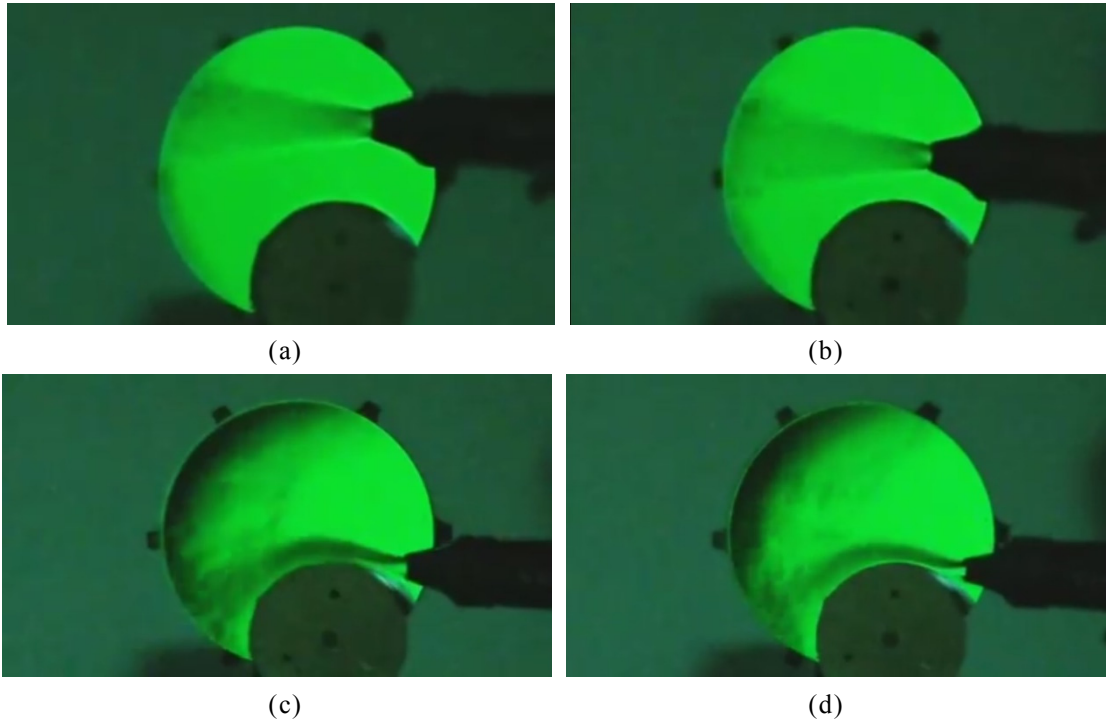
用史林納攝影也可演示康達效應 (Coandă effect)，而康達效應涉及許多航空工程重要應用。用吹風機吹出氣流，當氣流未沿著圓弧流動時，其方向不變(見圖十 a、b)；當氣流接觸圓弧時，即順著圓弧流動(見圖十 c、d)，此即為康達效應，在史林納攝影中清晰可辨。



圖八、史林納攝影法看到的吹風機熱氣流。



圖九、氣體成分不同也可用史林納攝影法觀察。



圖十、康達效應演示。

伍、結語

手機是現代生活常用的用具，幾乎人手一支。史林納攝影術，可以將不可見的透明氣體折射率細微變化，變成明暗變化而可見。這項光學技術甚至可以用來研究聲波在空氣中傳播、反射，以及形成駐波的情形，也可用於航空工程中衝擊波的研究（利用超音速風洞）。將手機與史林納攝影結合起來，因為手機的鏡頭尺寸很小，於是可以省掉刀片之類的零件而效果依然不錯，非常有利於推廣這項技術。此外，手機還有直播的功能，在教室中更容易在投影機銀幕上實際操作這項技術，讓全班同學共同欣賞其中的美與驚奇，非常有趣，其教學內容又涵蓋光學、聲學、熱學（對

流）等，又具有很高的教學價值。

致謝

感謝科技部科普傳播計畫（編號 MOST105-2511-S-238-006-MY2）的支持，使這項工作得以完成。

參考文獻及附註

1. Harbour, David A (July 2013). William J Welker, ed. Understanding Foucault: A primer for beginners (2nd edition). Sapphire Publications. ISBN 978-1-62374-003-0.
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Foucault_knife-edge_test
3. Burton, R. A., "A Modified Schlieren Apparatus for Large Areas of Field", J. Opt. Soc. Am. 39, 907-907 (1949).
4. Goulding, J. S., "A Study of Large-Scale

- Focusing Schlieren Systems", Masters Thesis, University of Witwatersrand (2006).
5. Settles, G. S., Schlieren and shadowgraph techniques: Visualizing phenomena in transparent media, Berlin:Springer-Verlag, 2001.
 6. <http://www.ian.org/Schlieren/>
 7. <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/schlieren-optics>
 8. <https://academiccommons.columbia.edu/doi/10.7916/D8TX3PWV>
 9. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvschlrn.html>
 10. <https://www.youtube.com/watch?v=MBPh410Gnes>
 11. <https://www.youtube.com/watch?v=K7pQsR8WFS0>