

1-6 像差理論

評價光學系統的成像可以使用光線覓跡或像差理論來執行,光線覓跡對所追蹤的光束給於正確結果,而像差理論則對系統的整個視場與孔徑給於近似結果。

實際光學系統需考慮到物理光學的繞射影響,還有為了亮度、視場等的要求,光線並非是近軸的軌跡,所成的像和理想像點會有出入,這種成像的缺陷就稱為像差。連續光譜的像差為「色像差」,單一波長的像差為「單色像差」(monochromatic aberration)。

像差的產生有三種原因: 1. 繞射的影響。 2. 元件製造生產的公差 (tolerance) 要求。 3. 真實光線的幾何光學結果。

將正弦函數 $\sin q$ 對 $q = 0$ 作泰勒展開, 得

$$\sin q = q - \frac{q^3}{3!} + \frac{q^5}{5!} - \frac{q^7}{7!} + \dots \quad (1-6.1)$$

當 θ 很小時,

$$\sin \theta \approx \theta \quad (1-6.2)$$

滿足 (1-6.2) 式的光線就是高斯光學的近軸光線, 又稱第一階光學理論 (first order theory), 取展開式前面兩項, 稱第三階光學理論 (third order theory), 取展開式前面三項, 稱第五階光學理論 (fifth order theory), 品質要求越高的成像系統, 所討論的階數也越多。

1-6.1 球面像差 (spherical aberration)

球差是指軸上物點發出的光線以不同高度入射至系統，通過系統後卻無法會聚成像點的差異現象。球差會隨物點的位置而改變，通常取平行於軸的光線（無限遠的物點）入射至系統的情形為球差主值。

對一成像系統而言，要想完全消除大孔徑透鏡的球面像差是不可能的，但是我們可以利用下面的方法使透鏡的球差減到最小：

1. 使到達透鏡第一面的光線角度與離開第二面的角度差不多相等，拿平凸透鏡系統為例，以凸面對著物點時的球差就比平面對著物點的球差值來的小。2. 選擇適當的透鏡形狀，可使透鏡的球差最小，以薄透鏡來說，相同焦距且相同材料的透鏡，可以有不同的曲率半徑，這些不同形狀的透鏡可以計算出不同的球差值。3. 將透鏡的一面或兩面磨成非球面，可以使此透鏡的球差完全消除，然而非球面只能使某一物距的球差完全消除，其它的物距成像仍會有相當的球差存在。4. 要消除系統的球差，可以採用多透鏡組合，利用各個透鏡的正負球差相互彌補，使系統的總差值降低。

1-6.2 像散(astigmatism)

像散是離軸較遠的物點因成像位置不同而造成的成像差異現象，一個有像散像差的系統中，離軸物點所發出的光線中，其子午光線（Tangential）成像位置和弧矢光線（Sagittal）成像位置不同，成像不會在同一點，成像的形狀，在 T 位置上是一水平線，在 S 位置

上是一垂直線，如圖 1-12：

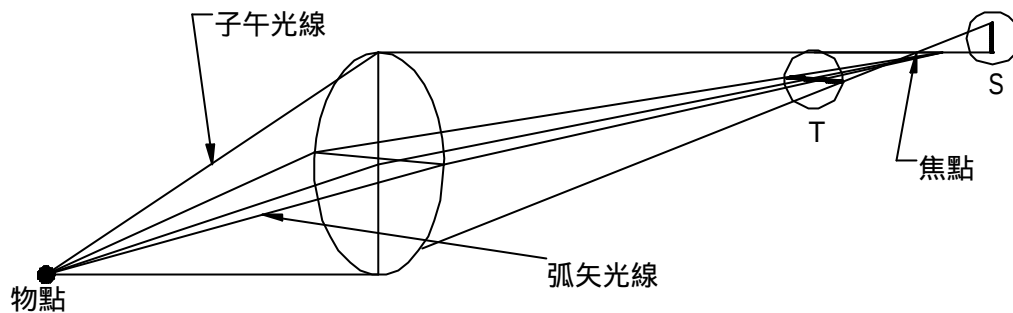


圖 1-12 像散像差

大體上來說，軸上的物點，是不會有像散像差發生的，物體離軸越遠則像散像差越明顯，由於產生像差的因素多半是離軸距離而造成，系統孔徑的大小影響較小，所以一般我們多採用選擇適當的透鏡形狀和適當的透鏡間距來達成消除像散目的。

1-6.3 場曲(field curvature)

一平面物體不能夠成像為一平面，而是成像為一曲面，即為像面彎曲，如圖 1-13，此現象會使的畫面周邊畫質模糊，縮小光圈也不能改善像面彎曲。

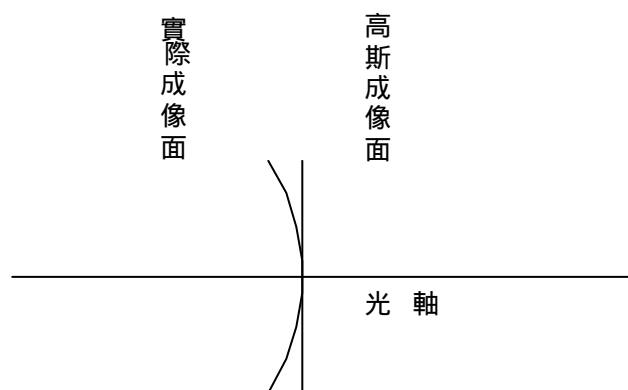


圖 1-13 場曲像差

實務上，掃描器鏡頭常會有場曲像差的問題，類似像散像差的改善方式，要減少場曲像差，也是選擇適當的透鏡形狀和適當的透鏡間距來達成，另外使用透鏡厚度配對也是減少場曲的方法之一，實際的例子詳見『第四章 4-3 場曲像差實務上的改善對策』。

1-6.4 畸變(distortion)

一條直線經過鏡頭拍攝後，變成彎曲的現象，稱為畸變像差。

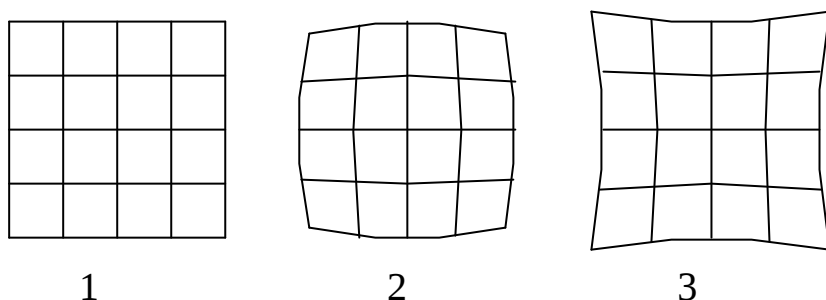


圖 1-14 畸變像差 1.理想成像，2.桶狀變形，3.枕狀變形。

如圖 1-14，向內彎的是「桶狀變形」(Barrel)，向對角線往外彎的是「枕狀變形」(Pincushion)，一支變焦鏡頭，通常在廣角端呈現桶狀變形，而在望遠端呈現枕狀變形。

1-6.5 色像差

透鏡的成像系統中應用的基本原理是折射定律，因為折射率為波長的函數，不同波長的入射光會造成不同的折射角，所以造成成像有色差(chromatic aberration)產生。

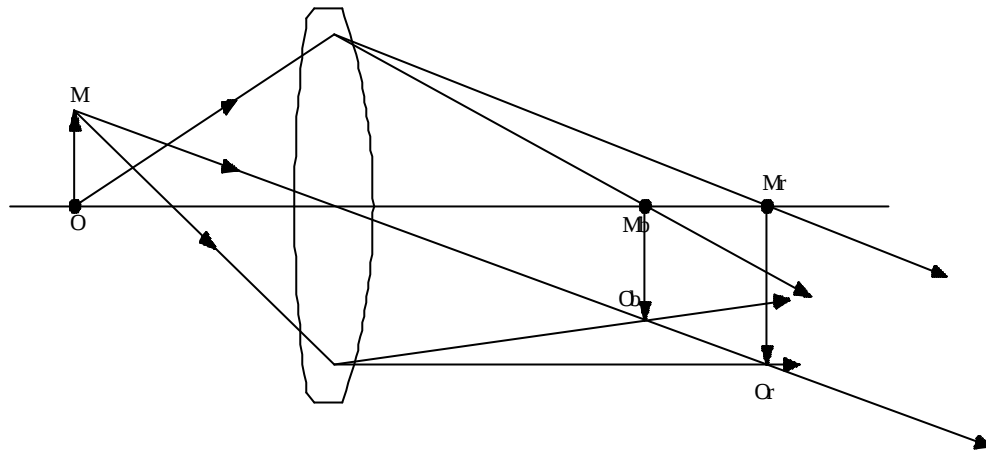


圖 1-15 色像差

如圖 1-15，軸上物點 M 對透鏡成像，因透鏡的折射率與波長成反比，使得各色光所成像點分開，紅光的像點為 Mr ，藍光的像點為 Mb ， $\overline{MbMr}$ 稱為縱向色像差，物 $\overline{MO}$ 成像會因光波長不同而有位置上的差異，成像的大小也會因不同光波長而有不同， $\overline{MrOr}$ 與 $\overline{MbOb}$ 的高度差就稱為橫向色像差。

若要消除色像差，通常是針對系統所使用的波長及需求來設計，若能矯正二個波長的色差並同時也矯正球差系統稱為消色差透鏡，一般來說最簡單的消色差方法，是利用二種不同材料做成的膠合系統，其中一個透鏡的正色像差和另一透鏡的負色像差抵消，使得兩特定波長的成像重合在一起。

若想以兩個透鏡的組合來消除色像差，除了上述的膠合系統外，還可採取分離式的設計。