

第三十三章 一階理論，機械補償變焦透鏡

(First-Order Theory, Mechanically Compensated Zoom Lenses)

在隨後的討論中，變焦透鏡是當像平面保持固定時焦距長（或放大率）變化的光學系統。（在三十八章我們討論像平面同時移動的變焦距透鏡。）這些系統全都是旋轉對稱的。將縮放的區域劃分為對數相等空間是有用的：每個有效焦距長（或放大率）是由前一焦距乘上常數所得。例如，對於一個 10 倍四個位置的變焦透鏡，這個乘數變成 10 的立方根（2.15443）。在呈現的資料中，這只是大約正確因為焦距長（或放大率）的滿意值被當作限制項的輸入到最佳化的程式中。在圖 33-1 顯示一個四部分的機械補償變焦系統。透鏡群組 A 為前端群組。其只因聚焦目的而移動。因此移動群組 B 和 C 對於所有共軛距離總能見到一固定的虛物。群組 D 是固定的。其通常包含光圈（孔徑光欄）以致於對所有縮放位置而言影像總是位於固定的數值孔徑。

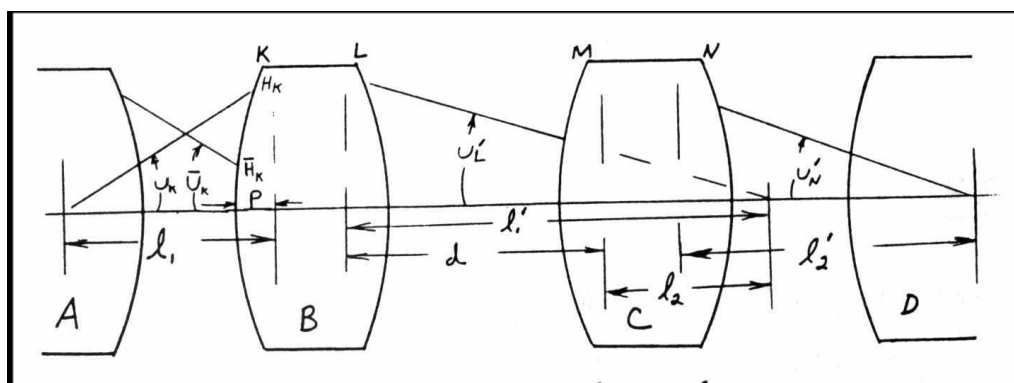


圖 33-1 機械補償變焦透鏡

讓我們覓跡二條從物體到像的近軸光線。為了方便，我們定義一條為軸上點所發出且將其與鏡面相交的高度標為 H 以及與光軸的夾角標為 u 。另一條將會是主光線且具有座標為 $\bar{H}$ 和 $\bar{u}$ （實際上任意二條近軸光線均滿足）。如圖 33-1 所示， $\bar{u}_k$ 為負數，因光線是下降的。

不變量 Ψ 由下式得出：

$$\Psi = \bar{H}Nu - HN\bar{u}$$

由於 Ψ 在每一面具有相同的值，我們可以在第一鏡面計算它。在這一面我們令 $\bar{H}$ 為零，且對於在空氣中的系統， $\Psi = -H_1\bar{u}_1$ 。

如更進一步簡化，我們覓跡 $H_1 = 1$ 和 $\bar{u} = 1$ 的近軸光線， $\Psi = 1$ 。

群組 B 的有效倍率由下式所給：

$$P_b = u_k \overline{u_k'} - \overline{u_k} u_L' \quad (\text{Hanau and Hopkins, 1962})$$

群組 C 可得到類似的表示法 P_c 及整個系統得到 P 。

如上所討論，群組 A 對群組 B 產生虛物。此離表面 K 的距離為 H_k / u_k 。

同樣地，在穿越群組 C 後影像離表面 N 的距離為 H_k' / u_k 。群組 B 的後焦距

長為：

$$BFL_b = \frac{-(\overline{H_L} u_k - H_L \overline{u_k})}{P_b}$$

群組 B 的前焦距長為：

$$FFL_b = \frac{\overline{H_k} u_k' - H_k \overline{u_L'}}{P_b}$$

當然，我們可以得到群組 C 的類似值。

主平面距表面 K 的距離 P 為：

$$\frac{1}{P_b} + FFL_b \quad (\text{如果像在左邊 } FFL_b \text{ 為負})$$

因此

$$l_1 = -\left[\frac{H_k}{u_k} + \frac{1}{P_b} + FFL_b \right] \text{ 因為 } l_1 \text{ 如所示為負數。}$$

B 和 C 群組的放大率為：

$$M = \frac{u_k}{u_N}$$

B 和 C 群組間的分隔 d (由主平面所測量) 由下所給：

$$d = \frac{P_b + P_c - Pb_c}{P_b P_c} = T(L) + \frac{1}{P_b} - BLF_b - \frac{1}{P_c} + FFL_c$$

令 S 為 B 與 C 群組的像與物間距離 (減掉主平面的間距) 則：

$$S = d + l_2' + l_1$$

當我們變焦時這個距離必須維持恆定。遵照 Clark (1973) 的命名法，我們將原始位置標示為 I 以及新的位置標為 L 。

現在我們將 B 與 C 透鏡群組移動到新的位置。其間隔為 D 。

$$L_1' = \frac{L_1}{1 + P_b L_1} \quad (1)$$

$$L_2' = \frac{L_2}{1 + P_c L_2} \quad (2)$$

$$M = \frac{L_1' L_2'}{L_1 L_2} = \frac{1}{(1 + P_b L_1)(1 + P_c L_2)} \quad (3)$$

$$S = -L_1 + L_1' - L_2 + L_2' \quad (4)$$

將方程式(1)及(2)代入(4)，我們有

$$S = \frac{-P_b L_1^2}{1 + P_b L_1} - \frac{P_c L_2^2}{1 + P_c L_2} \quad (5)$$

從(3)我們可得

$$\frac{1}{1 + P_c L_2} = M(1 + P_b L_1)$$

代入(5)式，我們可得

$$L_2 = \frac{1 - M(1 + P_b L_1)}{MP_c(1 + P_b L_1)} \quad (6)$$

將(6)式代入(5)式，我們得

$$S(1 + P_b L_1) = \frac{-P_b L_2' - [1 - M(1 + P_b L_1)]^2}{MP_c}$$

解 L_1 ，

$$L_1 = \frac{-b \pm [b^2 - 4ac]^{1/2}}{2a}$$

其中：

$$a = MP_b P_c + M^2 P_b^2$$

$$b = SMP_b P_c - 2MP_b + 2M^2 P_b$$

$$c = SMP_c + M^2 - 2M + 1$$

在式(7)中平方根項符號是為了找出新解而選， $L_1 = l_1$ 。該符號的值為

$$\frac{1al_1 + b}{\sqrt{b^2 - 4ac}}$$

其中代入 ± 1 的值。

從(1)式我們找到 L_1' 的新值。從(5)式我們找到 L_2' 的新值。B 和 C 群組的間

隔則變成

$$D = L_1' - L_2$$

同樣 D 是由 B 與 C 群組的主平面所測量。由於這些主平面在透鏡元件變焦時相對於其群組不改變位置，新的變焦間隔變成

$$TH1 = T(k-1) + l_1 - L_1$$

$$TH2 = T(L) + D - d$$

$$TH3 = T(k-1) + T(L) + T(N) - TH1 - TH2$$

其中 TH1 為 A 與 B 群組間的空間。同樣地 TH2 對應到 BC 之間以 TH3 對應到 CD 之間。Clark (1973) 給出一個不同的，對於這種機械補償系統的薄透鏡分析。在附錄 J 的 ZOOMSP 程式計算這些間隔。

參考文獻

- Chunken, T. (1992). Design of a zoom system by the varifocal differential equation, Appl. Opt., 31:2265.
- Clark, A. D. (1973). Zoom Lenses, American Elsevier, New York.
- Hanau, R., and Hopkins, R. E. (1962). In Optical Design, MIL-HDBK-141, Standardization Division, Defense Supply Agency, Washington, DC, Sect. 6.
- Kingslake, R. (1960). The development of the zoom lens, J. SMPTE, 69:534.
- Yamaji, K. (1967). Design of zoom lenses, in Progress in Optics, E. Wolf (ed.) Vol. 6, Academic, New York, Chap. 4.