

第 E.13 章 ►► 細說景深

本章的重點是為景深給出一個正式而且明確的定義。這是相當長、而且也相當技術性的一章。如果對技術性的討論沒有興趣，不妨只看第E.13.1節的複習；如果想知道景深是怎麼來的，請繼續看第E.13.2與E.13.3節，那兒會談到景深的成因與最大模糊圓的定義；接下來的幾節是非常技術性的，會講到算景深的公式(第E.13.4節)、算泛焦距離的公式(第E.13.5節)、與景深和泛焦距離的計算實例(第E.13.6節)；第E.13.7節比較使用不同大小晶片相機的景深、說明小感光晶片不太可能做到底片相機的淺景深；第E.13.8節討論一個景深的應用；最後的第E.13.9節是個十分簡短的結論。於是，本章就把最基礎的景深知識做了個十分完整的介紹。

E.13.1 複習景深

照片E-13-1是一組八張照片，它們是用單眼數位相機與微距鏡頭拍的，用這個組合是因為消費型數位相機很難做到類似的景深效果。相機位置(也就是對焦距離)與鏡頭焦距是固定的，但用不同的光圈拍攝，於是就可以很清楚地看到光圈對景深的影響；使用的光圈依次是f/3.5、f/5.0、f/7.1、f/10、f/14、f/20、f/29與f/32，兩兩之間的差異大致是+1 EV(也就是一級光圈)。

相機以大約45度的角度、對尺上

「2」這個標記右方的豎線對焦拍攝，所以在每一張照片中「2」與它右邊的豎線都十分清晰，而且離開這部份愈遠、模糊程度就愈高。照片E-13-1(a)是用f/3.5拍的，我們可以看到極清晰部份是在豎線左右方長度大致四分之一英吋的範圍，這就是f/3.5的景深；到了用f/7.1時，這段清晰範圍加大到四分之三英吋上下，而且整個畫面也都比較清晰，這從「1」左邊的金屬環看得最清楚。隨著收小光圈，景深愈來愈大；譬如說，f/14(照片E-13-1(e))有大約1.5英吋，到了f/32時(照片E-13-1(h))，在「4」左邊的部分都十分清晰。所以，當焦距與對焦距離固定時，光圈愈大(亦即f值愈小)景深就愈淺。

另外，這幾張照片告訴我們，景深範圍內的清晰與景深範圍外的模糊並不是突變、而是逐漸從清晰變到模糊的，我們很難判定清晰與模糊的界限何在。

E.13.2 為什麼會有景深？

看過景深效果之後，下一個問題是：為什麼會有景深？請看圖E-13-1；圖中L代表鏡頭，I是感光晶片或底片，F是鏡頭的焦點。考慮在鏡頭前方的一個點S，如果鏡頭以S對焦，於是從S出發與鏡頭軸線平行的光線被折射後會經過焦點F再到達感光晶片上的點s，同時從S出發並且經過鏡頭中心的光線

(a) $f/3.5$ (b) $f/5.0$ (c) $f/7.1$ (d) $f/10$ (e) $f/14$ (f) $f/20$ (g) $f/29$ (h) $f/32$

照片 E-13-1

也會到達 s ，所以感光晶片上的 s 就是 S 的像 (image)。因為鏡頭以 S 為對焦對象， s 就是非常清晰的。

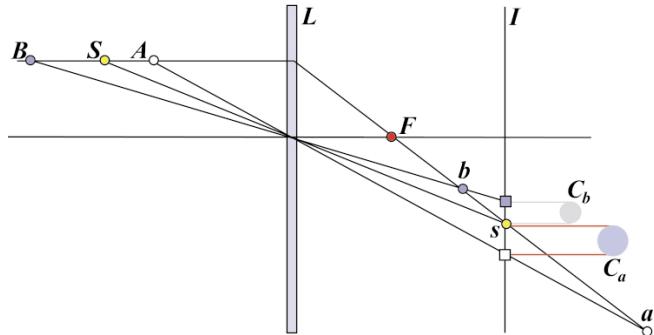


圖 E-13-1

再看在 S 前方的另一個點 A ，因為鏡頭並非以 A 做對焦對像，它在感光晶片上就是模糊的；在圖中，自 A 出發經過折射與經過鏡頭中心的兩條光線在 a 處相交，所以 A 的像在感光晶片後方，而在感光晶片上 A 的像是一個圓 C_a 。同理，點 B (在 S 後方) 的像 b 出現在感光晶片前方，而 B 在感光晶片上的像則是圓 C_b 。由此看來，在精確對焦的點 S 前方與後方的點在感光晶片上的像都是圓；另外，從圖E-13-1不難看出，一個點離 S 愈遠，它在感光晶片上的像(一個圓)就愈大，這些圓就叫做**模糊圓**(circle of confusion)。因為在觀賞影像時，我們的眼睛無法分辨很小的模糊圓，於是這些小模糊圓對應的點就被認為是精確對焦的所在；當模糊圓大到肉眼可以分辨時，我們就會覺得它們是圓而不是點，於是那一部份的影像就是模糊的了。

有一點是值得說明的。當收小光圈之後，能夠通過光圈開孔而到達感光晶片的光束也變小，所以模糊圓的直徑也變小，當然在影像中對應的點也會比較

清晰。這就是為什麼在照片E-13-1中光圈愈來愈小時，整張照片也愈來愈清晰的理由。

所以景深也者，就是那一段使模糊圓小到肉眼無法分辨、而看成是點的範圍。但是，模糊圓要小到什麼程度才會被視為一個點呢？

E.13.3 最大模糊圓直徑—CoC

試想我們用兩部相機(A與B)拍攝同一景，但A的感光晶片比B的小。如果我們要把拍攝的結果印成同樣大小的相片(比如 8×10)，於是在A上的影像就要放得比B上的影像來得大，當然A的模糊圓也放得比B的大。基於這個道理，如果兩者會得到同樣銳利的 8×10 照片，小感光晶片上可以視為一個點的模糊圓就要比大感光晶片上的模糊圓小才行。

以前決定模糊圓的方式是透過照片大小與觀賞距離定出來的，但是當Leica(萊卡)發展35mm相機時，他們的

工程師擇棄了這個麻煩的方式，而建議使用 $1/30\text{mm}$ 這個值，也就是說模糊圓的直徑（在 135 底片相機上）小於或等於 $1/30\text{mm} = 0.03\text{mm}$ 時，肉眼就無法分辨它究竟是一個點還是一個圓，這就是所謂的 **最大可接受模糊圓直徑** (diameter of the maximum permissible circle of confusion)，在本書中簡稱為 **最大模糊圓直徑**，而且在不會引起誤解的情況下就叫做 **模糊圓直徑**、簡稱 CoC。之後，國際標準採納了 Leica 的觀念，把模糊圓直徑定義成： $\text{CoC} = (\text{底片的對角線長})/1000$ 。因為 135 底片是 $24\text{mm} \times 36\text{mm}$ ，它的對角線長為 $43.27\text{ mm} = \sqrt{24^2 + 36^2}$ ，所以在這個標準之下，135 底片的 CoC 是 $43.27/1000 = 0.04\text{mm}$ 。

不過這個標準是基於二次大戰前的底片與鏡頭解像力定出來的，戰後底片工業與鏡頭設計製造技術突飛猛進，上面的式子在今天已經很少人使用。為了配合底片與鏡頭的解像力，Carl Zeiss (蔡司) 建議把 1000 換成 1500，而 Kodak (柯達) 則用過 1750。總之，解像力愈高，這個值就愈高。以目前的趨勢，1500 似乎是個廣為流傳而且被接受的值，所以本書對 CoC 的定義如下：

$$\text{CoC} = \frac{\text{底片或感光晶片對角線長度}}{1500}$$

在這個定義下，135 底片的 CoC 就是 $43.27/1500 = 0.029\text{mm}$ （或 0.03mm ）。如

果一個感光晶片的規格是 $13.5\text{mm} \times 8\text{mm}$ (Olympus/Kodak 的 4/3 系統)，它的對角線長是 22.5mm ，於是對應的 CoC 就是 $22.5/1500 = 0.015\text{mm}$ ；因為這個感光晶片比 135 底片來得小，它的 CoC 也比較小。在第 E.13.5 節講景深計算時會看到更多的例子。

E.13.4 計算景深的公式

請記住一點，所有常見的景深計算公式都是近似值，不但在推導式子的過程中用了近似的概念（比如單片薄透鏡），有些式子為了容易記憶更刪除了影響不大的部份，而且還做了鏡頭是完美的假設；不過在實際應用上，近似值就相當夠用，而不必計較微小的差異。另外，**本節的公式並不適合在近拍的場合使用**，我們會在討論近拍時再講解近拍的景深計算（第 K.7 章）。

一般的景深計算要用到四個參數：對焦距離 u （或說是物距），焦距 f ，光圈的 f 值 N ，與最大模糊圓直徑 C 。景深的範圍是由兩個距離決定的，第一個是 DOF_{near} ，**景深前緣**，它是從感光晶片（或底片）到模糊圓可以被視為一個點的最近距離；第二個是 DOF_{far} ，**景深後緣**，它是從感光晶片（或底片）到模糊圓可以被視為一個點的最遠距離；所以，在這段距離內的點都是清晰的，是故景深就是 $\text{DOF} = \text{DOF}_{\text{far}} - \text{DOF}_{\text{near}}$ ，也就是「景深 = 景深後緣 - 景深前緣」。計算景深前緣與景深後緣的公式如下：

$$\text{DOF}_{\text{near}} = \text{景深前緣}$$

$$= \frac{u \times f^2}{f^2 + N \times C \times u}$$

$$\text{DOF}_{\text{far}} = \text{景深後緣}$$

$$= \frac{u \times f^2}{f^2 - N \times C \times u}$$

於是景深就是

$$\text{DOF} = \frac{2 \times f^2 \times N \times C \times u^2}{f^4 - N^2 \times C^2 \times u^2}$$

我們看個例子。如果一部相機的最大模糊圓直徑是0.015mm，若用一個焦距為100mm的鏡頭、光圈為f/5.6、並且對焦在兩公尺，我們有C=0.015，f=100，N=5.6，而且u=2000mm。代入景深前緣與景深後緣的公式得到DOF_{near}=1966.96 mm 與 DOF_{far}=2034.17 mm，於是景深就是從相機前方1966.96 mm 起到 2034.17mm 止的 67.21mm。

從景深的公式我們會得到幾個重要的結論。第一，**景深與對焦距離的平方成正比**；第二，**景深與焦距的平方成反比**；第三，**景深與f值成正比**；第四，**景深與最大模糊圓直徑成正比**。在這四個參數中，最大模糊圓直徑一定小於一，對景深影響有限；f值在一般鏡頭中最大也不過是f/32上下，影響也是有限；同樣的道理，常用的焦距也不會超過1000mm。但是對焦距離卻常在一公尺(亦即1000mm)以上，所以景深公式中最大的值可能就是對焦距離，但因為

景深與對焦距離的平方成正比，所以對焦距離是造成大景深的主要因素。反過來看，如果能夠把對焦距離降低，再用長焦距與大光圈，對焦距離的比重就相對地降低，於是就會得到淺景深。

在上面提到的四點中唯一與一般「直覺」不太吻合的，就是模糊圓直徑與景深成正比(也就是大模糊圓會造成大景深)。我們到處聽到「單眼數位相機因為感光晶片比消費型數位相機的大，所以景深就比較淺」這個說法似乎與此地的結論矛盾！但事實並非如此，當感光晶片變小，為了要拍攝相同視角的焦距也會縮短，於是這兩者在景深的公式中就會相互抵消一部份；但因為景深與焦距的平方成反比，因而短焦距所造成的效果遠比小模糊圓直徑(小感光晶片的結果)來得強，於是景深不降反增。

E.13.5 泛焦距離

景深公式最重要的一個應用就是計算**泛焦距離**(hyperfocal distance)。在什麼情況下會有最大的景深？相信這是拍風景與自然時很容易想到的問題，因為在拍風景時我們總是期望把從相機前方到無限遠的景物都拍得一清二楚。要得到最大景深，把景深後緣推到無限遠就行了；回頭看景深後緣的公式，我們只要把分母定成零，景深後緣就是無窮大，所以 $f^2 = N \times C \times u$ 。於是 $u = f^2 / (N \times C)$ ，這表示若鏡頭的對焦距離是 $f^2 / (N \times C)$ 時景深後緣是在無限遠。把 f^2 的值代入景深前緣的式子，我們得到

景深前緣是 $f^2/(2 \times N \times C)$ 。換言之，如果鏡頭是以 $f^2/(N \times C)$ 這個距離對焦，從感光晶片(或底片)前方距離 $f^2/(2 \times N \times C)$ 的地方起到無限遠都在景深範圍內。 $f^2/(N \times C)$ 這個對焦距離就叫做**泛焦距離**。綜合起來，我們有：

$$H = \text{泛焦距離} = \frac{f^2}{N \times C}$$

泛焦距離的景深前緣

$$= \frac{f^2}{2 \times N \times C}$$

讓我們看個計算的例子。上一節計算過焦距為 $f = 100\text{mm}$ 、 f 值為 5.6、而且最大模糊圓直徑為 0.015mm 的景深；用同樣的值，若鏡頭的對焦距離是 $119047.6\text{ mm} = 100^2/(5.6 \times 0.015)$ 的所在(大約 120 公尺)，景深就會從 60 公尺延伸到無限遠；如果焦距換成 18mm ，若對焦距離為 $3857\text{mm} = 18^2/(5.6 \times 0.015)$ 的所在(大約是 4 公尺)，景深就會從 2 公尺延伸到無限遠。

仔細看看泛焦距離的式子，我們會發現：第一，**泛焦距離與焦距平方成正比**，於是愈短的焦距就有愈短的泛焦距離；第二，**泛焦距離與 f 值以及最大模糊圓直徑成反比**，於是愈小的光圈(愈大的 f 值)與愈大的最大模糊圓直徑，泛焦距離就愈短；第三，**泛焦距離的景深前緣正好是泛焦距離的一半**。

景深的式子也可以用泛焦距離表示。因為泛焦距離是 $H = f^2/(N \times C)$ ，我們有 $f^2 = H \times N \times C$ 。把 f^2 代入景深前緣與景深後緣的式子就會得到：

$$\text{DOF}_{\text{near}} = \text{景深前緣} = \frac{H \times u}{H + u}$$

$$\text{DOF}_{\text{far}} = \text{景深後緣} = \frac{H \times u}{H - u}$$

於是景深就是

$$\text{DOF} = \text{景深} = \frac{2 \times H \times u^2}{H^2 - u^2}$$

因為當對焦距離與泛焦距離相等時，景深後緣就會到達無限遠，所以，在計算景深時，對焦距離永遠小於泛焦距離。

E.13.6 計算實例

景深與泛焦距離的公式需要用到對焦距離、 f 值、焦距、與最大模糊圓直徑，這些資料中焦距是鏡頭的實際焦距，而不是底片相機鏡頭的等效焦距；因為最大模糊圓直徑與感光晶片的對角線長有關，我們還得找出感光晶片的規格。感光晶片規格在相機的使用手冊上一定有，但麻煩的是這些規格清一色地用 1950 年代電視錄影機影像管的「類型」(type)，標上的是 $1/2.5''$ 與 $2/3''$ 這樣的值，而不是感光晶片的對角線長。好在是感光晶片「類型」並不多，我們把常見的類型、長寬比、長／寬／對角線長度，以及用 1500 為基準算出來最大模糊圓直徑放到表 E-13-1 中；表中除了晶

表 E-13-1：感光晶片規格

晶片類型(英吋)	長寬比	長	寬	對角線	最大模糊圓直徑
1/3.6	4 : 3	4.000	3.000	5.000	0.0033
1/3.2	4 : 3	4.536	3.416	5.680	0.0038
1/3	4 : 3	4.800	3.600	6.000	0.0040
1/2.7	4 : 3	5.371	4.035	6.721	0.0045
1/2.5	4 : 3	5.760	4.290	7.182	0.0048
1/2	4 : 3	6.400	4.800	8.000	0.0053
1/1.8	4 : 3	7.716	5.319	8.933	0.0060
2/3	4 : 3	8.800	6.600	11.000	0.0073
1	4 : 3	12.800	9.600	16.000	0.0107
4/3	4 : 3	18.000	13.500	22.500	0.0150
APS-C	3 : 2	25.100	16.700	30.100	0.0201
135 底片	3 : 2	36.000	24.000	43.300	0.0289

片類型的單位是英吋之外，其它長度單位都是毫米 (mm)。要注意的是，感光晶片上用來記錄影像的區域要比實際的長寬小一些，但因為相差實在有限，我們就直接用實際的長與寬計算對角線。

除了最大模糊圓直徑 C 之外，景深的公式還需要對焦距離 u 、光圈的 f 值 N 、以及焦距 f ；最大模糊圓直徑 C 可以從相機規格的感光晶片類型與表 E-13-1 找出來，其它三者就是變量了。通常的做法是固定焦距 f 的值，再用 $f/2.8$ 、 $f/4$ 、 $f/5.6$ 、 $f/8$ 等常用的 f 值，配上不同的對焦距離 (比如 1 公尺、1.5 公尺、2 公尺等等) 算出一張景深表；然後換一個焦距值，再算一張景深表。在使用時，我們可以依焦距選出一張合用的表，再從該表查出在實際對焦距離之下需要用什麼光圈才能得到期望的景深，或者是從景深找出合用的 f 值。用試算

表軟體 (比如 Microsoft 的 Excel) 就可以很容易算出這些景深表的；如果會寫程式，圖 E-13-2 就是讀取 C 、 N 與 f ，再算出不同對焦距離下景深的演算法。了解這個演算法之後，相信不難寫出與不少網上算景深一樣好的程式。

E.13.7 比較

讓我們用不同的感光晶片大小與底片做個比較。表 E-13-2 收集了 1/2.5" (比如 Panasonic FZ-10)、1/1.8" (比如 Canon A95)、2/3" (比如 Nikon 8800) 與底片相機的值，我們把焦距定在底片相機的等效焦距 35mm，在對焦距離 1000mm、1500 mm、2000mm 與 2500mm 之下算出景深前緣、景深後緣、與景深的值，這些值以斜線分開；如果有「-」這個符號，就表示對焦距離大過泛焦距離，因而景深不具任何意義。從這個表可以

```

讀取  $C$ 、 $N$  與  $f$ ；  

令  $\Delta$  = 合理的間距值；  

計算並且印出泛焦距離  $H = f^2 / (N \times C)$ ；  

for  $d :=$  最短的對焦距離 (比如 1000mm) to  $H$  step  $\Delta$  do  

    begin  

         $DOF_{near} := (H \times d) / (H + d)$ ; // 景深前緣  

         $DOF_{far} := (H \times d) / (H - d)$ ; // 景深後緣  

         $DOF := DOF_{far} - DOF_{near}$ ; // 景深  

        印出  $d$  (對焦距離)、 $DOF_{near}$ 、 $DOF_{far}$  與  $DOF$ ；  

    end

```

圖 E-13-2

表 E-13-2：景深比較 (f/4 與 35mm)

晶片類型	1/2.5" (FZ-10)	1/1.8" (A95)	2/3" (8800)	35mm 底片
最大模糊圓直徑 C	0.0048	0.0060	0.0073	0.0289
焦距 f	6 (35mm)	7.8 (38mm)	8.9 (35mm)	35mm
泛焦距離 H	1875	2535	2712	10597
對焦距離 1000	652/2143/1491	717/1651/924	731/1584/853	914/1104/190
對焦距離 1500	833/7500/6667	942/3674/2732	966/3355/2390	1314/1747/433
對焦距離 2000	986/-/-	1118/9477/8359	1151/7613/6461	1682/2465/783
對焦距離 2500	-/-/-	1259/181071/ 179812	1301/31888/ 30587	2022/3272/1249

看出，愈小的感光晶片景深愈大，而且對焦距離愈大差異就愈大；譬如說，在對焦距離是 2500mm (2.5 公尺) 時，1/1.8" 感光晶片的景深是 179812mm (近 180 公尺)，但底片相機卻只有 1249mm (1.2 公尺)。

再看一個望遠端的例子，表 E-13-3 中的值是以等效焦距 105mm 算出來的。比較表 E-13-2 與表 E-13-3 就會發

現，長焦距時的景深要比短焦距時淺得多；譬如，當對焦距離是 1.5 公尺時，2/3" 類型晶片在等效焦距 105mm 的景深只有在等效焦距 35mm 時的 $7.7\% = 185/2390$ ！如果以 2/3" 類型的晶片與 35mm 底片相機相比，在等效焦距 105mm 以及對焦距離 2.5 公尺時，後者只有前者的 $25\% = 131/517$ 。不但如此，小感光晶片的景深都比大感光晶片的景深大得

表 E-13-3：景深比較 (f/4 與 105mm)

晶片類型	1/2.5" (FZ-10)	1/1.8" (A95)	2/3" (8800)	35mm 底片
最大模糊圓直徑 C	0.0048	0.0060	0.0073	0.0289
焦距 f	18 (105mm)	23.4 (114mm)	26.7 (105mm)	105mm
泛焦距離 H	16875	22815	24414	95375
對焦距離 1000	944/1063/119	958/1046/88	961/1403/82	990/1011/21
對焦距離 1500	1378/1646/269	1407/1606/198	1413/1598/185	1477/1524/47
對焦距離 2000	1788/2269/481	1839/2192/353	1849/2178/330	1958/2043/84
對焦距離 2500	2177/2935/757	2251/2808/555	2268/2786/517	2436/2567/131

多，這就是為什麼消費型數位相機永遠拍不出底片相機的平滑油潤背景的主要理由。

$$L_2 = \frac{u \times f^2}{f^2 - N \times C \times u}$$

從這兩個式解 f^2 得到

$$f^2 = N \times C \times u \times \frac{L_1 + L_2}{L_2 - L_1}$$

把 f^2 代入 L_1 的式子解 u 得到：

$$u = \frac{2 \times L_1 \times L_2}{L_1 + L_2}$$

這表示對焦距離是 $2 \times L_1 \times L_2 / (L_1 + L_2)$ 時，景深會從 L_1 到 L_2 。如果 f 值 N 已知，把 N 與上面求出的 u 代入 f^2 的式子就可以算出該用的焦距 f ：

$$f = \sqrt{2 \times N \times C \times \frac{L_1 \times L_2}{L_2 - L_1}}$$

反之，如果焦距 f 已知，把 u 與 f 代入 f^2 的式子、並且解出 N ：

$$N = \frac{f^2}{2 \times C} \times \frac{L_2 - L_1}{L_1 \times L_2}$$

這個 N 值就是該用的 f 值。

$$L_1 = \frac{u \times f^2}{f^2 + N \times C \times u}$$

與

看個例子。如果我們用 $1/2.5"$ 的相機 ($C = 0.0048\text{mm}$ ，見表E-13-1)、並且希望在 3 公尺 (3000mm) 到 10 公尺 (10000mm) 這段範圍都清晰，於是 $L_1 = 3000$ 與 $L_2 = 10000$ ，使用 u 的式子得到對焦距離

$$u = 4615 \text{ mm}$$

也就是 4.6 公尺所在。如果希望用光圈 $f/8.0$ ，於是 $N = 8$ ，用 f 的式子得到焦距

$$f = 18 \text{ mm}$$

反之，如果已經選定了焦距 $f = 10\text{mm}$ ，用 N 的式子可以算出光圈的 f 值

$$N = 2.4$$

也就是說，要用 $f/2.4$ 拍攝。

E.13.9 小結

本章用相當長的篇幅把景深的由來、觀念、計算公式、泛焦距離等做了個仔細介紹，並且也有計算實例，但並

沒有導出景深公式（見第E.15章）。景深公式是用單片薄透鏡的光學原理導出來的，然而沒有相機鏡頭是單片薄透鏡，所以本章（與各網站上）的公式只能看做是參考用的近似值。事實上，只有鏡頭廠商才有能力基於鏡頭的光學設計提供較準確的景深值，不過通常只有定焦鏡頭的使用手冊才會有這一項資訊；如果比對這些景深值，就會發現不同光學結構在相同光圈與對焦距離下，景深可能有相當的差異。表E-13-4就是一例，這三個鏡頭都是 $200\text{mm } f/4$ ，第二個是第一個的改良版，第三個是完全不同設計的微距鏡頭，它的景深很明顯地與前兩者有相當差異；但是，當把焦距 200mm 、光圈 $f/16$ 、與對焦距離代入景深公式得來的結果卻完全相同。所以，這個例子很明白地指出，因為沒有考慮到光學結構上的差異，本章的景深公式只能視為參考用的近似值。

表 E-13-4：三個鏡頭的實際景深比較

對焦距離	Nikkor-Q 200mm f/4	Nikon 200mm f/4	Nikon Micro Nikkor 200mm f/4
10	8.88 – 11.40	8.91 – 11.4	9.87 – 10.13
15	12.60 – 18.60	12.60 – 18.60	14.69 – 15.31
30	21.60 – 49.40	21.60 – 49.50	28.72 – 31.28

（單位：公尺 光圈： $f/16$ ）