

八百萬畫素手機鏡頭設計

8 Mega-Pixels Mobile Camera Design

彭偉捷

Wei-Jei Peng

近年來手機內建相機已是目前手機的標準配備，尤其以八百萬畫素照相鏡頭更是高階機種如 iPhone 5 的主流規格。本文以光學設計軟體 Zemax 設計一款八百萬畫素之手機鏡頭，由光學規格設定、感測器選取、塑膠材料介紹及初階架構作起始，並以目前手機鏡頭常用之評價項目作設計完成分析。最後，再進行公差分析，以符合實際製造之需求。

Mobile phone with camera has become the standard function in recent years. Especially 8 mega-pixels camera is the primary specification of high-level mobile, such as iPhone 5. In this paper, we design a 8 mega-pixels mobile camera by Zemax. From the beginning of optical specification, selecting sensor, introduction of plastic material and structure of first order, then we analyze this design by items used to evaluate the performance of mobile camera. Finally we make tolerance analysis to fit for practice manufacture.

一、前言

手機相機的發展始於 2001 年，由最初的十萬畫素進展到今日的五百萬、八百萬畫素，已成為高階手機的主流配備。畫素又稱像素，為圖像顯示的基本單位。但隨著畫素的增加，體積卻沒有增加太多，這得歸功於互補式金屬氧化物半導體感測器 (CMOS sensor) 的迅速發展，畫素大小由最早的 $5\ \mu\text{m}$ 縮小到今日常見的 $1.4\ \mu\text{m}$ ，甚至是 $1.1\ \mu\text{m}$ 、 $0.9\ \mu\text{m}$ ，因此在相同畫素的條件下，體積卻能夠愈做愈小，也造就了如今 iPhone 5 的厚度雖降到 8 mm 以下，但八百萬畫素 f/2.4 的手機鏡頭模組仍能夠完全置入。表 1 所列為大立光電股份有限公司八百萬畫素鏡頭規格。採用光圈 (f number, f/#) 2.4，較一般常見 f/2.8 的規格，其亮度增為 1.36 倍。但鏡片數也隨著 f/# 的減少而增加，由一般 f/2.8 的 4

片增加到 f/2.4 的 5 片塑膠鏡片以達到較佳畫質。且由於奈奎斯特頻率 (Nyquist frequency) 高達 360 lp/mm，因此全部採用非球面以提升高頻解像力。此外鏡頭總長 (total track length, TTL) 亦是手機鏡頭相當重要的規格，若觀察大立光電股份有限公司或玉晶光電股份有限公司的產品表，可發現 TTL 與感測器對角的比例約落在 0.86–1.05 之間，較短的 TTL 雖降低了模組高度，但成像品質與良率也隨之下滑，因此若是鏡頭模組高度許可，稍長的 TTL 會有較好的成像品質及良率。全視場角 (field of view, FOV) 一般設計在 60° – 66° 之間。最大設計外徑 (max image circle) 則為感測器對角再加上 5% 長度以避免封裝偏移產生暗角，由表 1 換算感測器對角 5.71 mm。本文以上述大立光電股份有限公司的鏡頭光學規格為設計目標，以符合目前產業主流趨勢。

二、手機鏡頭初階設計

1. 光學規格

(1) 光圈

較早的手機鏡頭光圈 (f number, f/#) 多為 f/2.8，但後來逐漸有降低 f/# 以加大光圈之趨勢，目前一般手機鏡頭 f/# 最低約設計到 f/2。這次設計選擇 f/2.4，較一般 f/2.8 的光圈規格大了半級，當選擇較低感光度 (較低雜訊) 的時候，也能拍出曝光充足的照片。在拍攝近景時，也會有較出色的景深效果。另一個好處為調制轉換函數 (modulation transfer function, MTF) 在繞射極限 (diffraction limit) 的截止頻率 (cutoff frequency) 也隨著 f/# 降低而增加了⁽¹⁾，如公式 (1) 所列，這對於目前高畫素感測器的高頻 MTF 繞射極限增加量很有幫助。如 f/2.8：其截止頻率為 650 lp/mm，MTF = 30% 對應到的頻率約為 380 lp/mm；若是 f/2.4：其截止頻率為 760 lp/mm，MTF = 30% 對應到的頻率約為 450 lp/mm。例如用 1.1 μm 的畫素作設計，其奈奎斯特頻率將高達 454 lp/mm，又一般光軸 MTF 設計值需大於 30%，使用 f/2.8 在全頻 MTF 受限於繞射極限將無法達到 30%，此時使用 f/2.4 以下的鏡頭來搭配感測器則可解決此問題。

$$\text{截止頻率：} \nu = \frac{1}{\lambda(f/\#)} \quad (1)$$

(2) 調制轉換函數

調制轉換函數 (modulation transfer function, MTF) 綜合了所有像差對成像品質的影響，其空間頻率單位以線對除以毫米 (line pair/mm) 表示，對比度 (acutance) 與銳利度 (resolution) 因此能夠量化。對比度佳則影像邊緣輪廓鮮明、層次感豐富，以低頻 MTF 為指標；銳利度好則影像細節愈清晰細膩，以高頻 MTF 為指標。此外離軸 MTF 又分

為子午方向 (tangential, T) 與弧矢方向 (sagittal, S)，T 方向為不等光程之邊緣光線 (marginal ray) 所構成，在公差方面與等光程邊緣光線構成之 S 方向相對敏感，因此 MTF 實測鏡頭常發生 S 方向清晰，但 T 方向卻較為模糊之現象。設計時同一視場的 T 與 S 之 MTF 值不宜差距過大，以免造成視覺上的不適。另外，考量鏡頭與感測器的組裝公差，離焦 MTF (through focus MTF) 則相當重要，如一般定義 0.7 視場內 30% MTF 在半頻時的後焦偏移量 (de-focus) 至少在 0.01–0.03 mm 之間⁽²⁾。有較 de-focus 的離焦 MTF 對於組裝良率有所幫助，才不會導致如 0.7 視場內很難全部對到焦甚至對不到焦的狀況。

離焦 MTF 的焦深 (depth of focus, DOF) 與 f/# 相關，根據焦深公式 (2)，焦深與 f/# 成正比，降低 f/# 以加大光圈在製造上的副作用為焦深變淺，公差容忍度因此較敏感。此外愈高頻的離焦 MTF，其焦深也愈淺，原因為各視場 MTF 隨著空間頻率增加而降低，導致 MTF 疊加的部分也隨著空間頻率增加而減少，這也是鏡頭的高頻 MTF 公差較低頻敏感之原因。

$$\text{DOF} = 2 \times (\text{Circle of Confusion}) \times (f/\#) \quad (2)$$

(3) 光學畸變與電視畸變

視場角愈大則畸變愈大，光學畸變 (optical distortion) 一般須小於 ± 2%，電視畸變 (TV distortion) 必須小於 1%，以避免被人眼察覺。電視畸變的定義如公式 (3) 所列，但軟體計算通常為徑向畸變，參考圖 1 與推導，經過化簡的電視畸變可用 1.0 視場的徑向畸變減去 0.6 視場的徑向畸變再除以 2 的公式做計算，如公式 (4) 所列，因此設計上只要縮小 0.6–1.0 視場的光學畸變差距，電視畸變就能有效縮減。

光圈	鏡片數	全視場角	最大設計外徑	鏡頭總長	鏡頭總長／感測器對角
2.4	5P	65.5°	6 mm	5.3 mm	0.93

表 1.

大立光八百萬像素 f/2.4 鏡頭規格。

$$\begin{aligned}
 \text{TV distortion} &= \frac{\Delta H}{H} \times 100\% & (3) \\
 &= \frac{0.6\Delta h - \Delta h'}{2(0.6h + 0.6\Delta h)} \\
 &= \frac{1}{2} \left(\frac{0.6\Delta h}{0.6h + 0.6\Delta h} - \frac{\Delta h'}{0.6h + 0.6\Delta h} \right) \\
 &\doteq \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h}{h} - \frac{\Delta h'}{0.6h} \right) \quad (\Delta h \ll 0.6h) & (4)
 \end{aligned}$$

(4) 色差

橫向色差 (lateral color aberration)：由於不同波長光線對應到不同折射率，離軸的紅光與藍光其主光線像高之差定義為橫向色差。一般設計規範須小於 1 個畫素大小，以避免在感測器上色彩偏移狀況。

縱像色差 (chromatic focal shift)：不同波長在近軸上有不同的最佳焦點，定義紅光與藍光的焦點位移為縱像色差。

(5) 相對照度

相對照度 (relative illumination, RI) 定義為視場周邊照度與中心照度的百分比。由 $\cos^4 \theta$ 定律可知隨著鏡頭收光角度愈大，邊緣視場的相對照度會愈低。此外漸暈 (vignetting) 也會影響到鏡頭角落的相對照度，設計上需避免最外圍視場有過低的相對照度，否則易產生暗角。

(6) 主光線角度

鏡頭主光線角度 (chief ray angle, CRA) 定義為離軸主光線由出瞳到成像面法線之間的夾角，通常感測器廠商會有其建議曲線，鏡頭設計主光線必須落在感測器容忍區間內，否則主光線不匹配易產生白平衡色差 (color shading) 的問題⁽³⁾。手機鏡頭感測器的最大主光線角比起相機鏡頭大得多，因為主光線角度的增大有助於鏡頭長度的縮減，因此感測器廠商會以增大主光線角度作為開發目標之一，目前感測器的最大主光線角度在 25 到 30 度之間皆有。

2. 感測器的選取

感測器有電荷耦合元件 (CCD) 與互補金屬氧化物半導體 (CMOS) 兩種。早期 CCD 在靈敏度、訊雜比皆較 CMOS 來得優良，但 CMOS 有低成

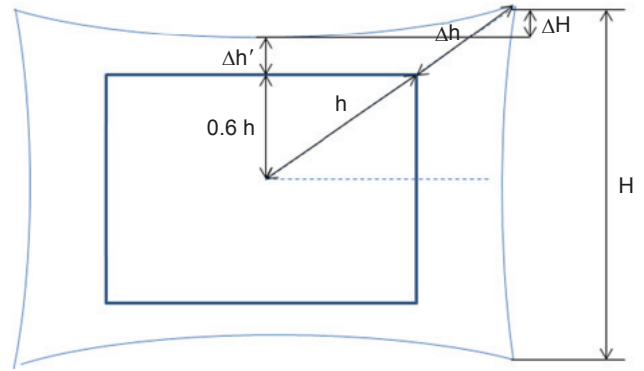


圖 1. TV distortion 示意圖。

本、低功耗及高整合度等優勢，因此各家廠商紛紛積極投入 CMOS 研發，如背面照度技術 (backside illumination, BSI) 的發展，使得畫素尺寸能夠縮減到 $0.9 \mu\text{m}$ (OmniVision 2008 年發布)⁽⁴⁾ 也不至於有畫素單元過暗之狀況。此技術將原本在底層收集光線的矽基移轉到上方，原本在上方的金屬和介電層移轉到下方，提升了填充係數 (fill factor)。因此雖然畫素做得更小了，但 BSI 使靈敏度增加、雜訊減少，提升了影像品質。目前 CMOS 已是手機相機感測器的主流，CMOS 主要廠商有 SONY、OmniVision、Samsung、Aptina、Toshiba、STMicro 等，本文選擇 OV8810 的 8 百萬畫素感測器作設計，其解析度為 3264×2448 ，畫素大小為 $1.4 \mu\text{m}$ ，對應到最大空間頻率為 360 lp/mm ，感測器對角為 5.71 mm ，一般設計需再加大 5% 以避免封裝偏移，因此設計最大外徑為 6 mm 。雖然感測器畫素愈做愈小，但鏡頭的匹配卻成了問題，如今雖有 $0.9 \mu\text{m}$ 畫素的技術，但實際產品卻遲遲未推出，可能原因在於對應到的全頻為 560 lp/mm 相當高，基於繞射極限，鏡頭光圈至少大於 $f/2$ ，鏡片數必定增加，再加上高頻 MTF 的公差敏感度更高，鏡頭製作成本會大幅增加。此外 MTF 量測也可能遇到瓶頸，因 Trioptics MTF 機目前最高僅能量測到 500 lp/mm ⁽⁵⁾。因此未來千萬以上畫素感測器已較難藉著不斷縮減畫素尺寸來減少面積，鏡頭體積會隨著畫素增加成等比例增加。

3. 塑膠材料介紹

基於成本、量產性、鏡頭總長等考量，目前無論搭配玻璃或是模造玻璃 (molding glass) 的手機鏡

	PMMA	Zeonex -E48R	Arton -LX3000	Topas -5013	Apel -5014DP	PC -AD5503	OKP4
折射率 (Nd)	1.49	1.53	1.53	1.53	1.54	1.58	1.61
色散係數 (Vd)	58	56	56	56	56	30	27
光穿透率 (%)	92.5	92	93	92	90	89	90
雙折射 (nm)	13	32.7	< 20	14.8	2	> 80	< 20
熱變形溫度 (°C)	101	122	135	123	125	124	105
吸水率 (%)	0.3	< 0.01	0.04	< 0.01	< 0.01	0.2	0.15

表 2.
常用塑膠材料比較表。

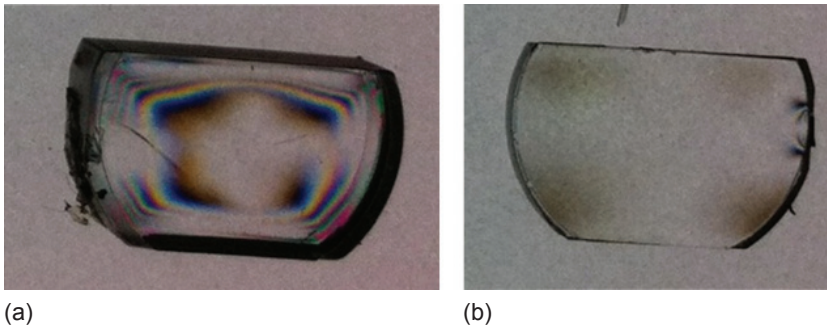


圖 2.
PC 與 Zeonex 在偏光儀下的拍攝結果，(a) PC，(b) Zeonex-E48R。

頭幾乎很難從廠商型錄找到，一般皆採用塑膠非球面。光學塑料有透光性好、質量輕、成本低、易加工等優點，但也有材料選擇少、折射率變異較大、易產生應力導致雙折射、膨脹係數大、硬度低、熱變形溫度低等缺點。由於塑膠材料折射率約在 1.49–1.63 之間，較玻璃材料折射率在 1.44–2 的區間小了許多，此為設計上較大之限制。常用塑膠材料如環烯烴聚合物 (cyclo olefin polymer, COP) 類的 Zeonex、Arton；環烯烴共聚物 (cyclic olefin copolymer, COC) 類的 Apel、Topas；壓克力 (PMMA)、聚碳酸酯 (polycarbonate, PC)、OKP4 等。表 2 所列為常用塑膠材料表供參考⁽⁶⁾。不同塑膠料各有其優缺點，如 PC 雖然折射率較高且便宜，但射出成形後雙折射相對其他材料嚴重許多，圖 2 為 PC 與 Zeonex 在偏光儀的拍攝結果，PC 的應力相對明顯，其造成之雙折射效應對於邊緣視場的解像力會有一定程度影響，若是在偏極成像系統則影響更劇烈。Apel 的雙折射效應雖然小，但成形後會有些微白點，鏡片若貼近感測器可能對成像造成影響。PMMA 價格便宜，但吸水率較高，不利環測，較少用於手機鏡頭。至於 OKP4 雖然折光率高，但是價格昂貴且色散係數 (Abbe number) 低，需與色散係數較高材料作搭配。

4. 鏡頭初階設計

關於初階結構，由於手機鏡頭 TTL 短，屬於焦距大於後焦的望遠型 (telephoto) 「正-負」架構，如圖 3 所示，因此手機鏡頭的第一片屈光率 (power) 通常為正。另一種為反焦型 (inverse telephoto)，如圖 4 所示，「負-正」架構則適用於後焦較長、焦距小於後焦的架構，如投影機後焦需包含分光稜鏡部分，因此會需要較長後焦，尤其短焦投影機常會出現第一片屈光率為負的架構。本文採用結構為「正-負-正-負-負」。

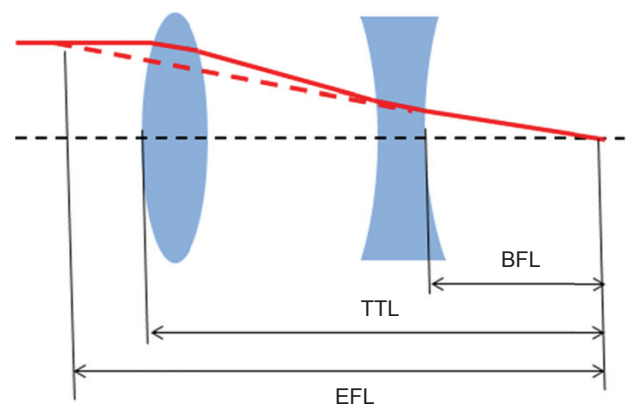


圖 3. 望遠型架構。

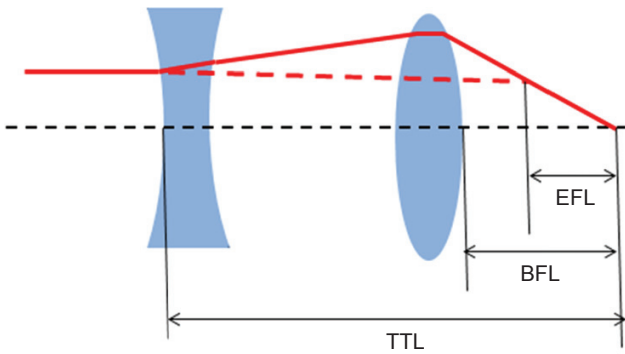


圖 4. 反焦型架構。

本文光圈位置選擇在第一個鏡片前方。手機鏡頭之光圈位置通常較靠近鏡頭物側方向，因主光線 (chief ray) 必定通過光圈中間，位在鏡頭最前方的光圈能使主光線在一開始就通過光軸即通過鏡片，進而降低 TTL，示意如圖 5 所示。

鏡片數的決定與光展量 (etendue) 有關，即 $f/\#$ 與成像面積。 $f/\#$ 愈小、成像面積愈大則需要愈多鏡片。此外 MTF 設計到更高頻、更大的視場角，也需要較多的鏡片數。可參考廠商型錄所提供的鏡片數目。

手機鏡頭基於鏡片數成本、鏡頭總長限制及 MTF 空間頻率高等因素，必須全部使用非球面，但事實上全部使用非球面對於公差是相當不利的，因此設計時必須避免太過敏感的公差，即便如此手機鏡頭的公差相對於其他產品來得嚴格許多，一再挑戰射出成形與鏡片組裝的極限。

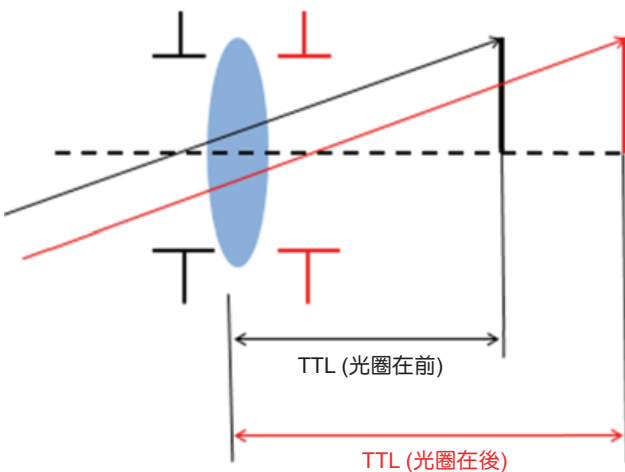


圖 5. 光圈前後對 TTL 影響。

材料方面，第一、三、五片是 Zeonex-E48R，第二片是 OKP4-HT，第四片是 PC，此外有 0.3 mm 厚度的紅外光濾光片 (IR-cut filter) 用來濾掉波長 650 nm 以上之紅外光，以及 0.4 mm 的感測器保護蓋。

鏡片屈光率的正負排列必須與折射率、色散係數作搭配，以達到消場曲及消色差目的。第一為消場曲：每個鏡片的屈光率除以折射率加總的合，稱為匹茲伐總合 (Petzval sum)，必須愈小愈好，如公式 5 所示。正負透鏡搭配可使屈光率相消，但所有鏡片之屈光率總和必須大於零以產生正焦距，若只使用一種材料必定無法降低 Petzval 總合，因此至少必須兩種以上折射率作高低搭配。第二是消色差：每個鏡片的屈光率除以色散係數加總的和必須愈小愈好，如公式 6 所示。同樣地若是只有一種材料，則不論片數多寡對於色差難有較好之修正。

但實際材料對於消場曲及消色差是矛盾的。以正負架構為例，凸透鏡的屈光率必須大於凹透鏡以產生正焦距，根據公式 (5) 與公式 (6)，凸透鏡需搭配較高的折射率與較高的色散係數，凹透鏡則需搭配較低的折射率與較低的色散係數。但實際材料無論是玻璃或塑膠其折射率高者則色散係數低，反之亦然。因此數學上無法讓消場曲及消色差同時等於零，只能在最小化時取得兩者平衡。

$$\sum \left(\frac{P1}{N1} + \frac{P2}{N2} + \dots \right) = 0 \quad (5)$$

$$\sum \left(\frac{P1}{v1} + \frac{P2}{v2} + \dots \right) = 0 \quad (6)$$

三、手機鏡頭設計結果

設計完成之鏡頭 $f/2.4$ ，TTL 為 5.82 mm，TTL 稍長以光學品質為優先考量，其為感測器對角 5.71 mm 的 1.02 倍，符合一般手機鏡頭 1.05 倍規範內。焦距 4.52 mm，後焦 (back focal length, BFL) (IR-cut 第二面到感測器) 為 0.78 mm，全視場角為 64° ，符合一般手機鏡頭 $60^\circ - 66^\circ$ 規格。設計最大外徑為 6 mm，為感測器對角 5.71 mm 加上 5% 封

裝偏移公差。主光線最大角度為 27° ，符合 OV 感測器規格 $27 \pm 2^\circ$ 。

1. 光路圖

圖 6 為中心、0.35、0.7 及全視場的光路圖。

2. 設計參數

設計之參數如表 3 及表 4 所列，屈光率排列為「正-負-正-負-負」。鏡片的中心厚度大於 0.35 mm，邊緣厚度大於 0.3 mm，以滿足射出成形需求。

關於消場曲優化結果，單面屈光率除以折射率加總和為 0.054，得 Petzval radius = 18.5 mm，為焦距的 4.1 倍，符合較低 f/# 時，其 Petzval radius 與焦距比值至少約 2-3 倍以上之原則⁽⁷⁾。

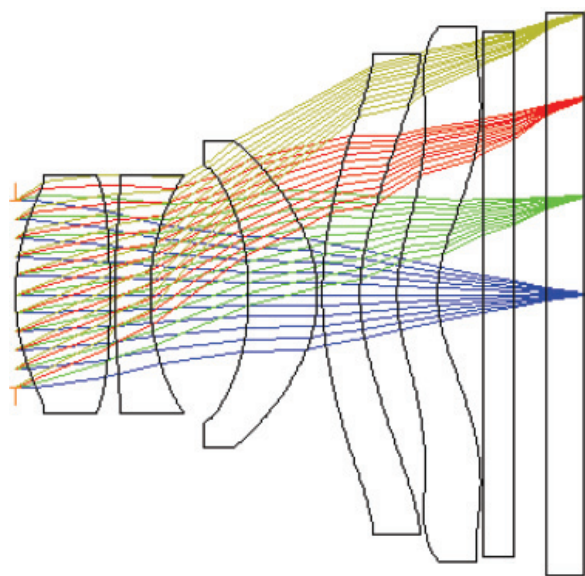


圖 6. 結構光路圖。

3. MTF

一般照相機 0.7 視場內為主要成像區域，因此設計半頻 180 lp/mm、0.7 視場、MTF 大於 0.5，全頻 360 lp/mm、0.7 視場、MTF 大於 0.2，如圖 7 所示。中心視場在 360 lp/mm 時 MTF 大於 0.35，符合一般手機鏡頭中心視場全頻 MTF > 0.3 之規範。關於離焦 MTF，半頻 180 lp/mm 時 MTF 0.3

的焦深約 0.016 mm，符合一般半頻 MTF 0.3 焦深在 0.01-0.03 mm 之間的規範，如圖 8 所示。

4. 畸變與場曲

畸變小於 1%，於一般規範 2% 內；電視畸變約 0.11%，於一般規範 0.5% 內。場曲最大約 0.045 mm，於一般規範 0.1 mm 內，如圖 9 所示。

Number	Type	Radius	Thickness	Material	Index	Abbe	Power
Object	Sphere	Infinity	1000				
Stop	Sphere	Infinity	0				
L1	ASP	2.15288584012	0.96	Zeonex-E48R	1.531	55.7	0.285
	ASP	-11.6110718497	0.05				
L2	ASP	6.31660938403	0.36	OKP4-HT	1.632	23.4	-0.168
	ASP	2.30598487495	0.98				
L3	ASP	-2.84684792538	0.69	Zeonex-E48R	1.531	55.7	0.216
	ASP	-1.4283632648	0.05				
L4	ASP	3.14339102489	0.38	Polycarb	1.585	29.9	-0.127
	ASP	1.78745783889	0.38				
L5	ASP	1.46520893695	0.41	Zeonex-E48R	1.531	55.7	-0.051
	ASP	1.16017476709	0.47				
IR-Cut	Sphere	Infinity	0.3	Schott-D263T	1.523	57.5	
	Sphere	Infinity	0.33				
Cover	Sphere	Infinity	0.4	Schott-AF45	1.526	62.6	
	Sphere	Infinity	0.05				
Image	Sphere	Infinity					

表 3. 設計參數。

表 4. 非球面設計參數。

Surface	Conic	4th	6th	8th	10th	12th	14th	16th
L1R1	-0.9874188 0774	0.00776471 627458	-0.0007966 4450029	-0.002918 51497504	-0.0006262 58933791	0.00011608 5023072	-0.0013421 6071016	0.00053446 8216885
L1R2	-0.1236878 1421	-0.0169552 790528	-0.0016800 9303049	-0.006245 73381379	-0.0024687 325267	5.17053912 625e-005	0.00052311 7936454	0.00012029 9440832
L2R1	-55.363220 6423	-0.0074070 053646	-0.0069016 5204032	0.0012277 6070783	-0.0001098 0518578	-0.0002369 45016521	0.00034452 8998335	0.00021553 3260004
L2R2	-3.6356531 6543	0.01935511 53982	0.00728581 611106	-0.001305 67611972	0.00108971 658998	0.00152666 641487	-0.0001561 07997564	-7.0042501 9055e-005
L3R1	1.09147407 492	-0.0188823 757951	-0.0034412 9398623	0.0004485 83054955	0.00031660 7638054	-0.0005964 60326097	-0.0004027 16639179	2.05286344 422e-006
L3R2	-2.1590794 4237	-0.0277768 602891	0.00015791 8036718	0.0005050 19903394	-0.0001158 57273595	-0.0001155 13035598	-5.0518197 604e-005	1.61678690 055e-005
L4R1	-21.892555 1513	0.01453059 61787	-0.0014965 591863	-0.000103 762187313	-3.5083257 9723e-006	1.89578040 793e-006	1.93204293 712e-007	-3.6032149 7568e-008
L4R2	-9.5635793 006	0.00556386 231946	-0.0008481 64381154	-5.460823 2409e-006	-7.2079345 2321e-006	-1.3433647 7706e-006	2.28197832 047e-007	8.98951881 695e-009
L5R1	-8.6822649 8996	-0.0241602 821911	0.00080107 9452459	0.0001842 6826039	1.24159730 396e-005	-1.6141402 2608e-008	-2.2217530 0403e-007	7.50695092 268e-009
L5R2	-5.3508470 3548	-0.0212575 140762	0.00042259 9514796	3.1811279 19e-005	5.79194776 245e-006	7.90825902 032e-007	9.58676515 265e-008	-1.1645567 7337e-008

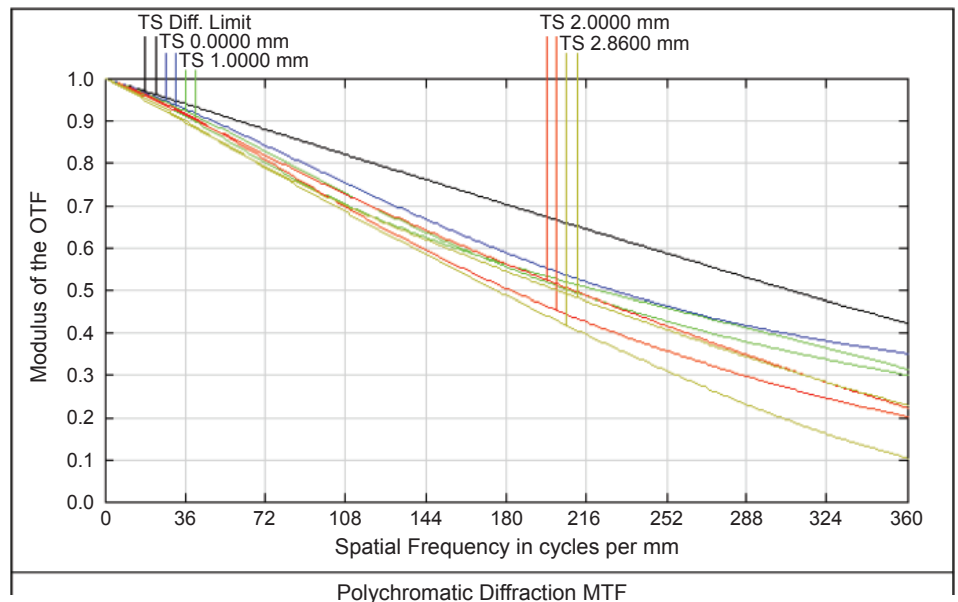


圖 7. 調制函數與頻率關係圖。

5. 橫向色差與縱像色差

橫向色差約 $0.45 \mu\text{m}$ ，如圖 10 所示，小於一個畫素 $1.4 \mu\text{m}$ 於規範內。縱向色差 $13.1 \mu\text{m}$ ，如圖 11 所示，接近縱向色差在 $1/4$ 波長波前像差前提下之繞射極限 $12.55 \mu\text{m}$ ，如公式 (7) 所列。由公式可

觀察到較低 $f/\#$ 對於降低縱向色差繞射極限值是有利的。

$$\text{縱向色差繞射極限焦深} = 4 \times \lambda \times (f/\#)^2 \quad (7)$$

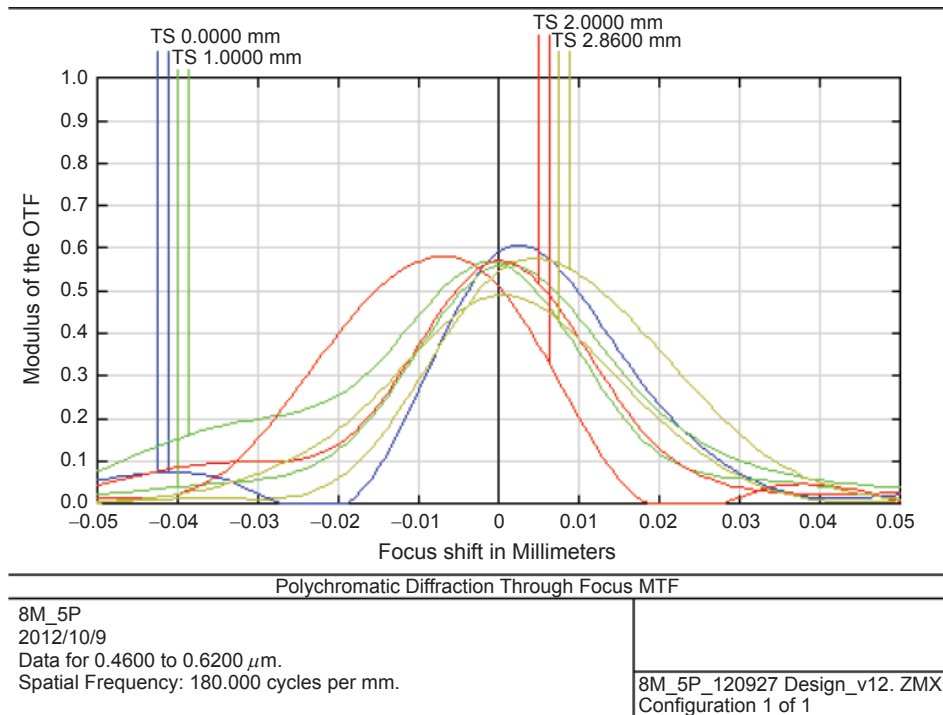


圖 8.
離焦 MTF。

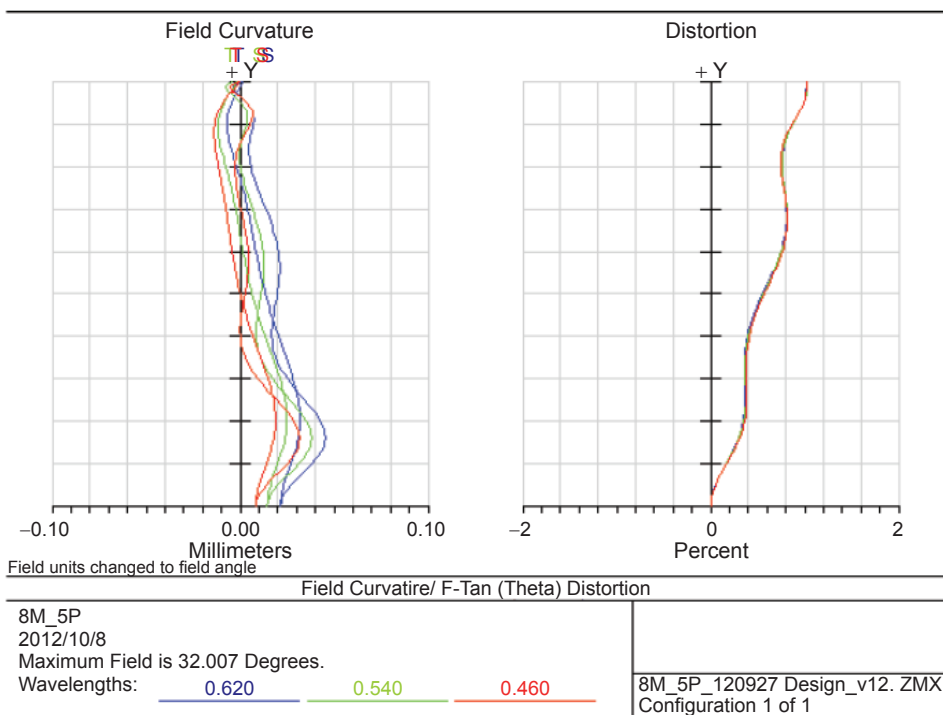


圖 9.
場曲與畸變。

6. 相對照度與主光線角

此鏡頭半視場角設計為 32° ，套入照度 $\cos^4\theta$ 公式得 51.7%，設計值為 50.4%，如圖 12 所示，與理想照度值接近。主光線角最大值 27° ，如圖 13 所示，符合感測器建議最大值 $27 \pm 2^\circ$ 內。

7. 公差分析

由於手機鏡頭全部使用非球面，因此公差分析相對更加重要。本文以 Zemax 的公差分析模組進行敏感度分析 (sensitivity analysis)⁽⁸⁾。Zemax 是以蒙地卡羅 (Monte Carlo) 的模擬方式進行公差

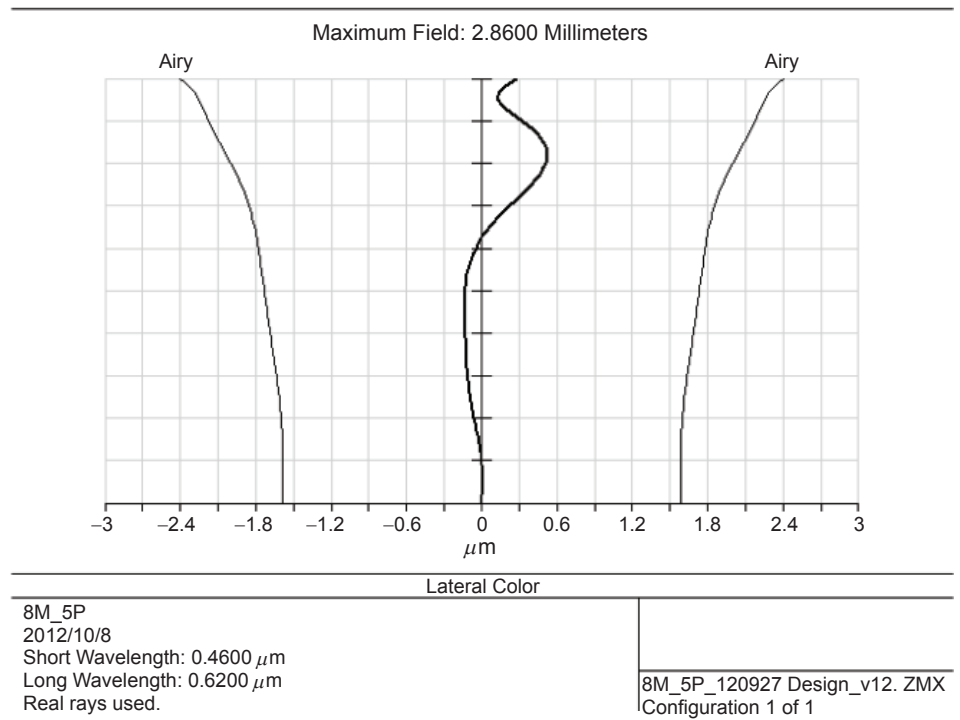


圖 10.
橫向色差。

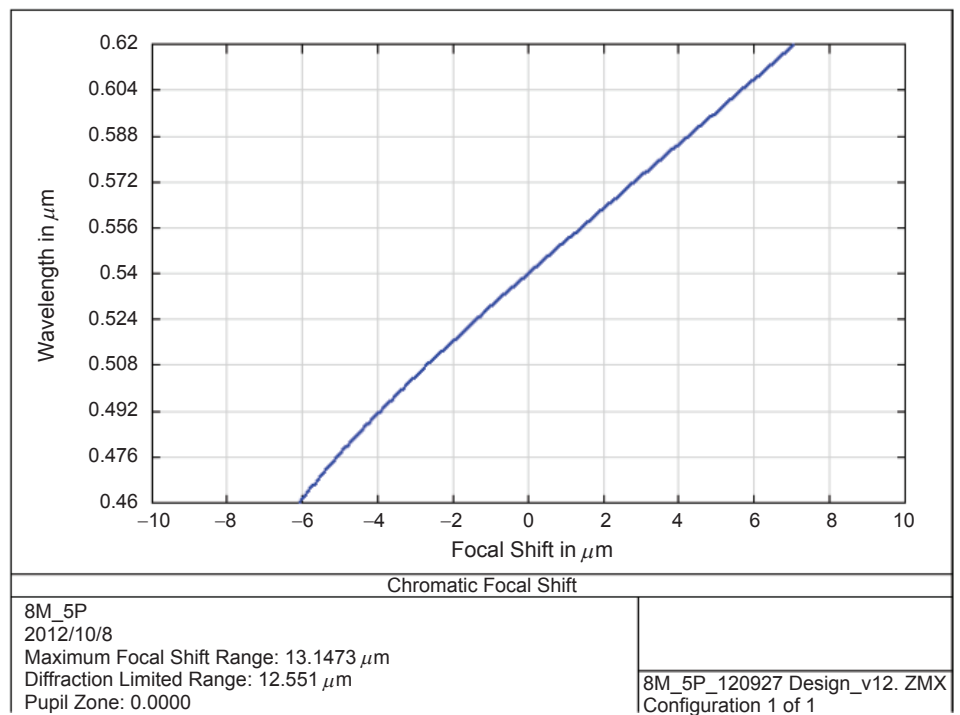


圖 11.
縱向色差。

擾動，最後再以常態統計分布 (normal statistical distribution) 進行良率計算，並可選擇要列出幾組最差的公差項目供組裝時參考。公差項目有許多必須考慮，如偏心、歪斜、厚度、面型、折射率

等。本文選擇對成像品質影響較大的單面偏心 $\pm 3 \mu\text{m}$ 、組裝偏心 $\pm 3 \mu\text{m}$ 與厚度 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 套入公差模擬，分析半頻 180 lp/mm MTF 的 T 方向公差，最後得到良率與 MTF 的對應值。其中良率 90% 對

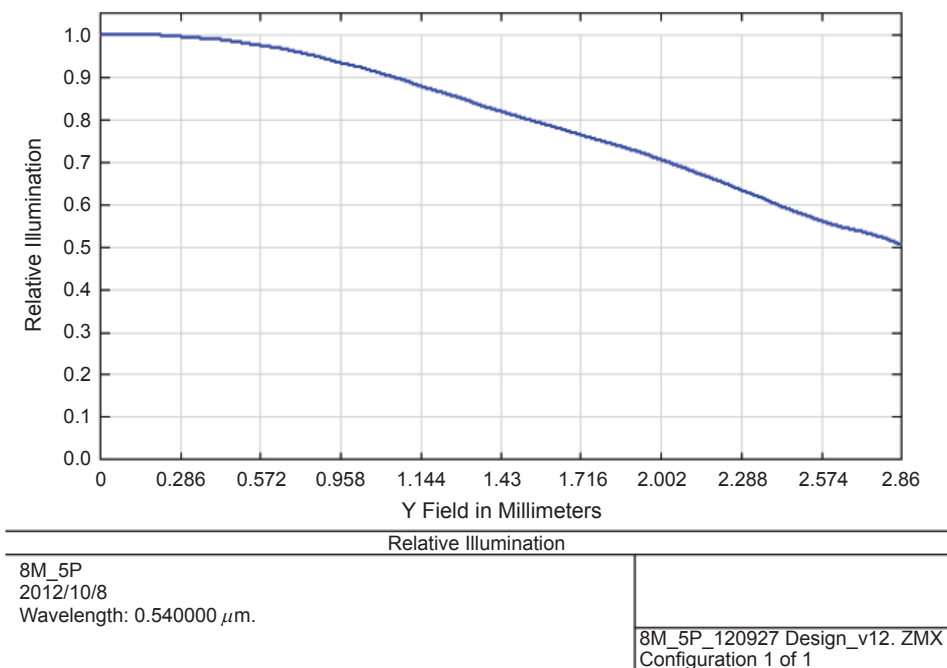


圖 12.
相對照度。

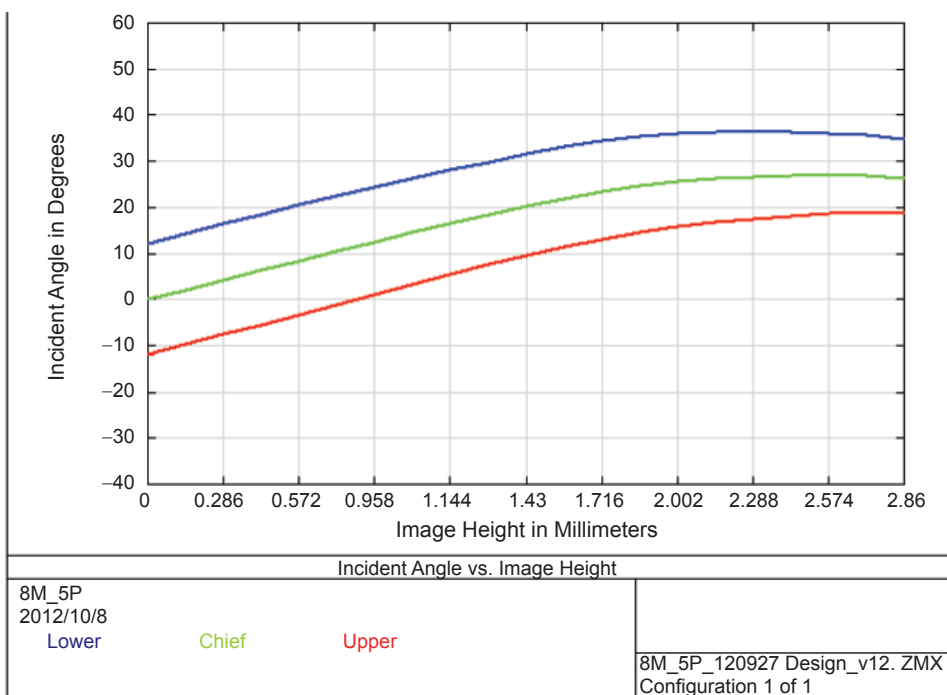


圖 13.
主光線與邊緣光線角度。

應到 MTF 為 0.32，如圖 14 所示，對半頻已可充分解析。又各項目輸入的公差值與每個光學廠的製程能力有關，可藉由公差分析取得設計與製造之間的關連性，預測未來每個新設計的鏡頭經過製造後的光學品質。

四、結論

本文以 Zemax 完成設計一款八百萬畫素、 $f/2.4$ 的手機鏡頭。此鏡頭由五片非球面塑膠鏡片與一片紅外光濾光片所構成。搭配感測器為

圖 14.
公差分析。

Criterion	: Diffraction MTF tangential at 180.0000 cycles per mm
Mode	: Sensitivities
Sampling	: 3
Optimization Cycles	: Automatic mode
Nominal Criterion	: 0.54839580
Test Wavelength	: 0.5400
	90% > 0.32551543
	80% > 0.36020581
	50% > 0.38960452
	20% > 0.46474007
	10% > 0.47571291

表 5. 設計完成主要規格。

Pixels	f/#	Lens Element	FOV	Max Image Circle	TTL	EFL	BFL
8 M	2.4	5 P	64°	6 mm	5.82 mm	4.52 mm	0.78 mm
0.7 field MTF at 180lp/mm	On-axis MTF at 360lp/mm	Distortion	TV Distortion	Lateral Color	Chromatic Focal Shift	RI	CRA
> 0.5	> 0.35	< 1 %	0.11%	0.45 μ m	13.1 μ m	50.4%	< 27°

OmniVision 1/3.2” 八百萬畫素感測器，畫素尺寸為 1.4 μ m，對應 Nyquist 頻率為 360 lp/mm。該鏡頭 MTF 設計值在 360 lp/mm 處，軸上 MTF > 0.35，0.7 視場內 MTF > 0.2；在 180 lp/mm 處，MTF 值均大於 0.5。鏡頭總長與感測器對角的比值接近 1，以達到手機鏡頭輕薄短小之目的。公差分析方面，在半頻 180 lp/mm 處，其 MTF > 0.32 的良率為 90%，可足夠解析，並考慮中心厚度與邊厚以符合製造需求。表 5 為設計完成規格整理，以上皆以符合手機鏡頭光學規格並滿足實際製造需求為本文設計標的。

參考文獻

1. 儀科中心, 光機電系統整合概論, 初版, 新竹: 國研院儀科中心, 399 (2005).
2. 牟益弘, 三百萬畫素二點七五倍光學變焦手機鏡頭設計, 國立中央大學光電科學研究所碩士論文 (2008).

3. 郭慧君, 手機鏡頭光學品質檢測, 儀科中心簡訊, 101 期, 10 (2010).
4. OmniVision, <http://ovt.com/>
5. Trioptics, <http://www.trioptics.com/>
6. S. Baumer, *Handbook of Plastic Optics*, Wiley-VCH (2005).
7. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, 4th, McGraw-Hill, 440 (2008).
8. Zemax User's Guide (2005).



彭偉捷先生為國立中央大學光電碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。

Wei-Jei Peng received his M.S. in optical science from National Central University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.