

非球面量測技術 - 波前補償設計

非球面鏡已廣泛應於衛星及光電等科技產業，例如遙測鏡頭、望遠鏡頭、CD/DVD 讀寫頭、數位相機及投影機等，但市面上用於非球面鏡檢測的方法卻相當分歧，且量測準確度亦會因操作條件的不同而有差異。目前較具參考價值的量測方法有 CGH 電腦全像及波前補償法，由於 CGH 電腦全像玻片十分昂貴且製作不易，故本文以市面上常用的 Fizeau 干涉儀搭配附加補償器的方式作各種非球面量測的探討。

黃國政、林洵焜、王必昌、廖俛境

一、前言

早在西元 1927 年，Couder 就以陰影法 (knife-edge) 加兩片式補償器來作一直徑 30 mm-F/5 的拋物面鏡的量測 (如圖 1)，其量測的方式是使用附加波前補償器 (wavefront corrector/compensator) 的方式，將從拋物面鏡反射回來的非球面波前 (sphere wavefront) 折射成近似球面波前，以量測其拋物面

鏡之形狀所造成的高低陰影落差。此後，Burch (1936)、Ross (1943)、Dall (1947) 及 Offner (1969) 等人，陸續以各種波前補償的方式檢測拋物面鏡及雙曲面鏡等。另外，也有針對離球面 (sphere departure) 較小者 ($< 10 \mu\text{m}$) 的量測方法，如 Yatagai (1983) 的剪切干涉法及 $10.6 \mu\text{m}$ (carbon-dioxide laser) 長波長的干涉法等。

目前已有的非球面量測依檢驗圖的型式之不同可分為干涉圖法、陰影圖法 (knife edge test)、成像點法 (screen test) 及表面輪廓法 (如表 1)。其中干涉圖法又細分為兩種，一是波前補償法 (null-test)，如 CGH 電腦全像干涉法及附加補償器法等，另外一種是無波前補償法 (non-null test)，如各式剪切干涉法 (shearing interferometry)、雙波長干涉法及 Moiré 疊紋法等。雖然非球面檢測的方法有數十種，但適合廣範圍的量測且精度可達 $\lambda/4$ 以上的方法只有波前補償法 (null-test)，尤其是 CGH

黃國政先生為國立台灣大學機械博士，現任國科會精密儀器發展中心工程師兼課長。

林洵焜先生畢業於明新技術學院，現任國科會精密儀器發展中心技術員。

王必昌先生為國立成功大學航太工程博士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。

廖俛境先生為國立台灣大學機械碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。

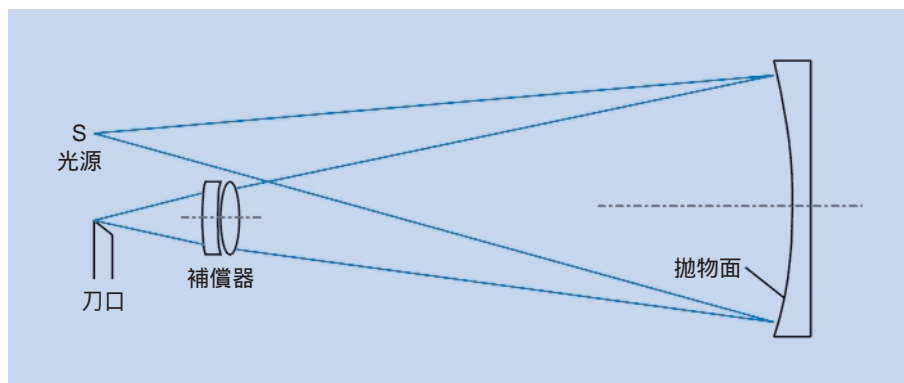


圖 1.
Couder 兩片式補償器。

(computer generating hologram) 電腦全像干涉法與附加波前補償器的方式，最近幾年已逐漸成為非球面檢測的標準方法，例如圖 2 至圖 4，為一折反射式的衛星遙測鏡頭中的主次鏡的檢測架設，其主鏡為圓錐常數 $k = -1.2$ 的凹雙曲面反射鏡，次鏡為圓錐常數 $k = -7.8$ 的凸雙曲面反射鏡。由於電腦全像干涉法的繞射玻片需以電子束加工而成，其條紋製作不易且昂貴，故本文選擇以附加波前補償器的方式設計各種非球面鏡的檢測補償，以及分析各種非球面參數對波前補償器的影響。

在設計波前補償器 (wavefront compensator) 之前，須先了解各種非球面參數的定義，一般非球面曲線方程式可表示如下式 [$A, B \dots G, H$ 為高階非球面係數值， k ：圓錐常數， R_0 ：中心曲率半徑， $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$]：

$$Z(r, k) = \frac{r^2}{R_0} \left[1 - \left(1 - \frac{(1+k)r^2}{R_0^2} \right)^{1/2} \right] + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + Er^{12} + Fr^{14} + Gr^{18} + Hr^{20}$$

二、波前補償設計的理論基礎

表 1.
非球面量測法分類表。

檢驗圖形	量測法名稱	光學原理	適用範圍
干涉圖法	長波長干涉法	干涉	離球面小者
	剪切干涉法 (Shearing interferometry)	干涉	離球面小者
	附加補償器法	干涉、折射	皆可
	全像干涉法	干涉、繞射	皆可(精度低)
	CGH 電腦全像干涉法	干涉、繞射	皆可
	雙波長干涉法 改良式相轉移干涉法 (Sub-Nyquist interferometry)	干涉	離球面小者
陰影圖法	附加補償器法	陰影、折射	定性分析
	Ronchi 法	陰影、折射、繞射	定性分析
成像點法	Harmann 法	投影	大鏡片
	螺旋光罩法 (Helical screen)	投影	大鏡片
表面輪廓法	光學式(非接觸)	干涉	小面積
	機械式(接觸)		一直線

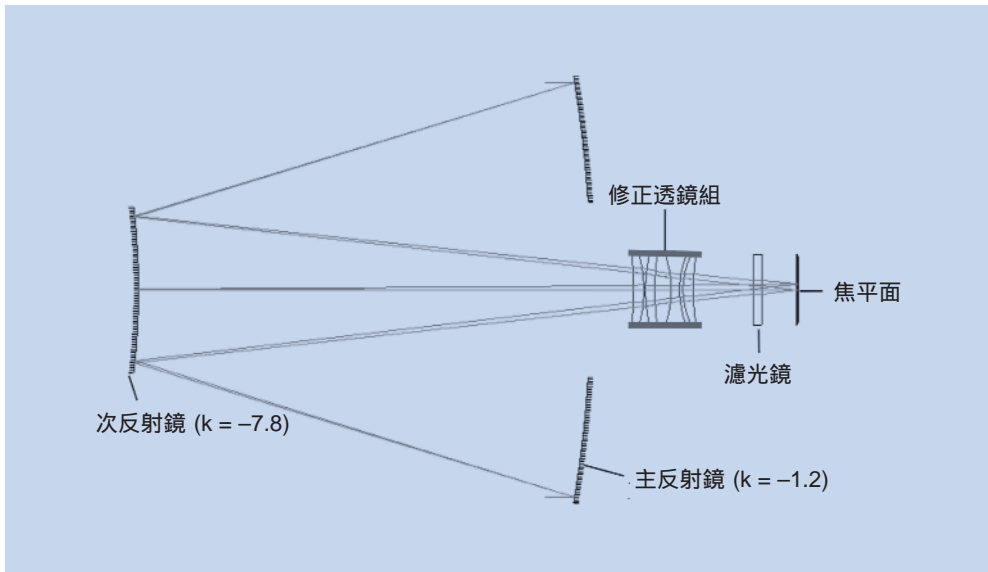


圖 2.
折反射式衛星遙測鏡頭
之光路示意圖。

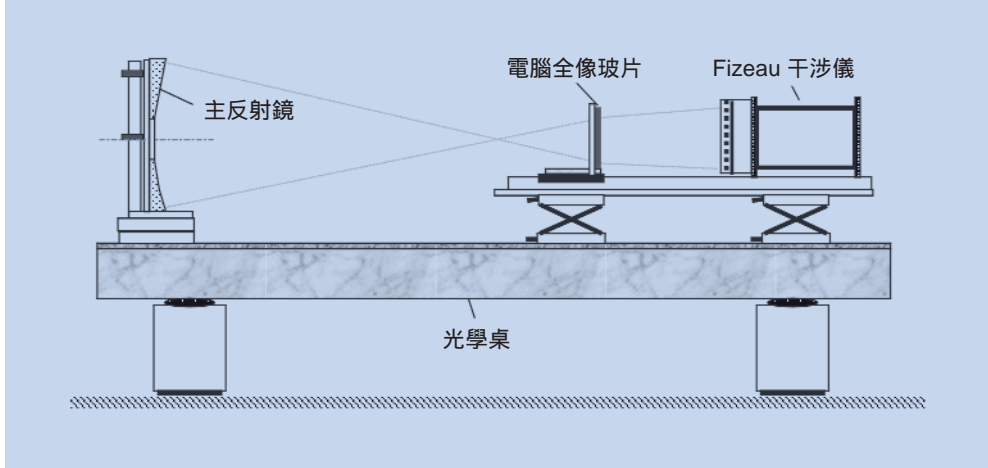


圖 3.
折反射式衛星遙測鏡頭
之主鏡檢測架設圖。

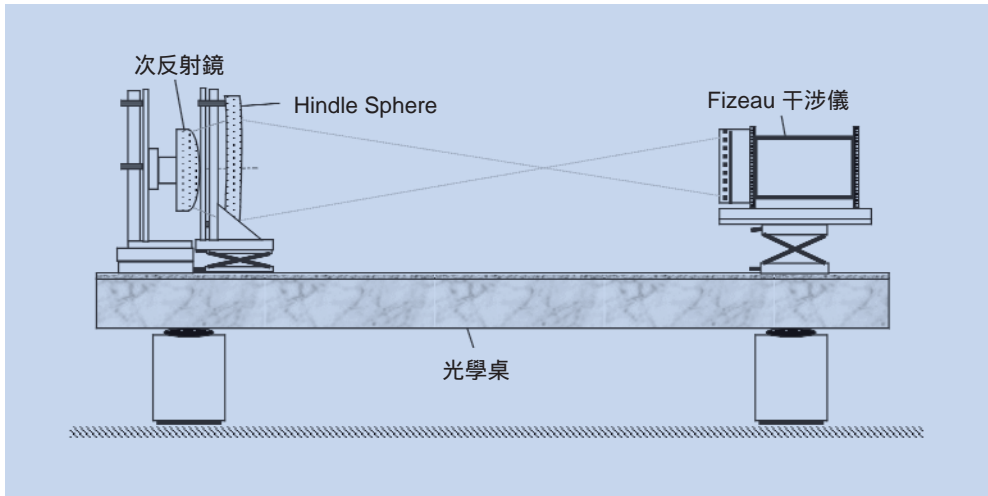


圖 4.
折反射式衛星遙測鏡頭
之次鏡檢測架設圖。

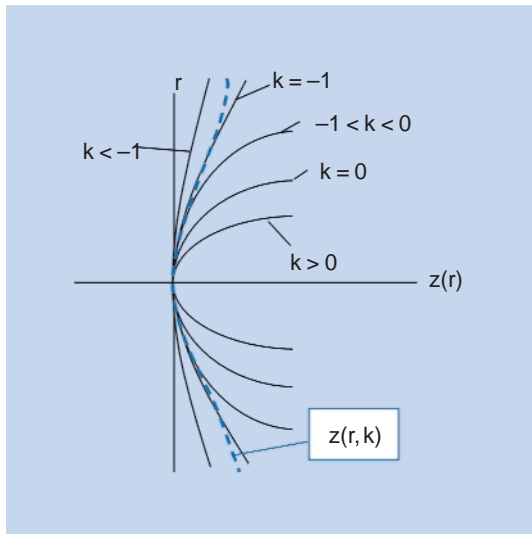


圖 5. 非球面曲線方程式 $Z(r, k)$ 。

如果非球面為二次曲線，則可簡化為（即高階項係數值為 0）：

$$Z(r) = \frac{\frac{r^2}{R_0}}{1 + \left[1 - \frac{(1+k)r^2}{R_0^2} \right]^{1/2}}$$

如圖 5 所示，當 $k = 0$ ，曲線 $Z(r)$ 為一球面，若 $k < -1$ ， $Z(r)$ 為一雙曲球面 (hyperboloid)、若 $k > -1$ ，則 $Z(r)$ 為一橢球面 (ellipsoid)；若 $k = -1$ ，則 $Z(r)$ 為拋物球面 (paraboloid)。其中，紅色虛線為一含高階項次之非球面曲線。

不管是整套光學系統或單一鏡片，最佳的成像波前皆為球面，例如平行光源經過一平凸的球面透

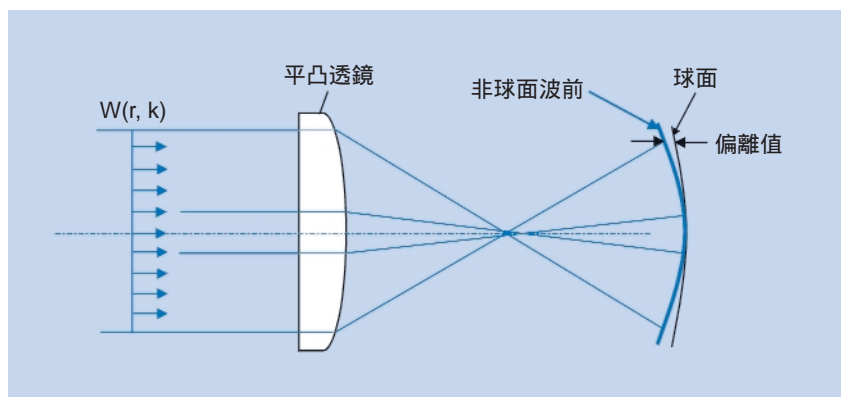
鏡，它的成像波前並不是球面，而是有稍許偏離球面的非球面波前（如圖 6），波前補償的原理即是利用球面透鏡所產生的非球面波前來檢測非球面表面，而若將一片或幾片的球面透鏡或反射鏡組成一可將球面或平面的波前修正成與待測面近似的波前之鏡組，則此鏡組即稱為波前補償器 (wavefront compensator)。

波前補償器架設的方式有折射式、反射式及折反射式三種。折射式波前補償器是由球面透鏡組成，至於使用多少片透鏡，端看其使用之入射波前（平面波或球波）與非球面之離球面值決定之，如圖 7 至圖 8，波前補償器由兩片透鏡所組成，以球面光源入射，分別檢測凹 (concave) 與凸 (convex) 的非球面鏡。

反射式波前補償器因為架設需要較精準的定位，不然易產生慧差 (coma) 現象，所以通常以一片反射鏡構成，由於是藉助補償器的反射原理，故所量測出的誤差數值會有兩倍的效果。如圖 9 所示，待測物面（拋物面）將球面波源反射成平面波，再由補償器反射經待測物面回到干涉儀內做干涉，需注意的是這種架設通常量測不到待測物面的中心誤差。

為了改善反射式波前補償器量測不到待測物面中心誤差的問題，Hindle 將圖 9 的反射鏡改成透鏡，如圖 10，波前補償器為一 Hindle sphere，除可透射外亦可反射其波前，但是必須在反射面處鍍一層 50/50 的薄膜，以增加反射率。此種檢測架設若量測一凸非球面，則其所搭配的 Hindle sphere 之外徑必定大於待測物外徑，故當待測物外徑非常大時，應考量其製作成本，宜改用其它方式。

圖 6. 偏離球面的非球面波前。



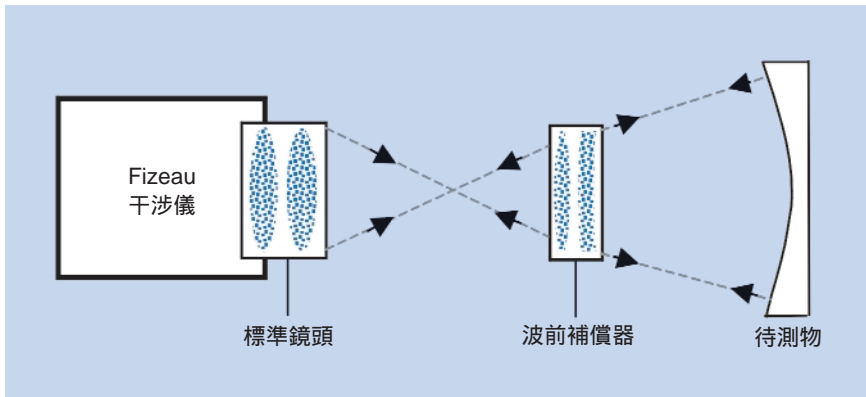


圖 7.
凹非球面鏡檢測之架設示意圖。

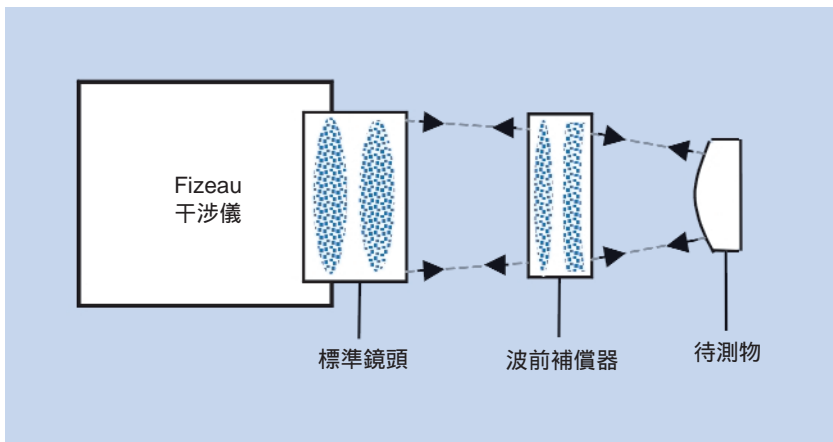


圖 8.
凸非球面鏡檢測之架設示意圖。

至於如何選用平面波或球面波當入射波源，則依待測面的形狀與補償器的位置而定，以折射式波前補償器為例，當待測面圓錐常數 k 大於 -1 時，曲線為橢球面，使用平面波源較易修正；反之，若待測面圓錐常數 k 小於 -1 (即雙曲球面)，使用球面波源較易修正。另外，當補償器位於球面波源之焦點前 (如圖 8)，適合用在檢測凸的雙曲球面鏡；但若補償器位於球面波源之焦點後 (如圖 10)，則適合用於檢測凹的橢球面鏡。

決定補償的方式與檢測系統的架設後，補償器的元件數 (即透鏡 / 反射鏡的片數) 之決定亦是一重要的課題。一般來說，無高階項或離球面小 ($F/\#$ 大者) 的待測非球面僅需一片透鏡或反射鏡即可，但具高階項或離球面大者，則需兩片以上。本文即選擇兩片式補償器，並以光學設計軟體 Code-V 之 auto-design 功能做設計及分析，以提供從事檢測人員做參考。

三、波前補償量測法的設計實例

1. 凹拋物球面

待測物表面參數：(圓錐常數 (conic constant) k , 中心曲率半徑 (radius in center) R_0 , 外徑 (outside diameter) ϕ)

$$k = -1, R_0 = 150 \text{ mm}, \phi = 45 \text{ mm},$$

$$A = B = C = \dots = H = 0$$

雷射波源：球面波

標準鏡頭：Zygo - F/1.5 - $\lambda/10$

光路 layout 與數據：如圖 11 與圖 17

補償後波前誤差： 0.013λ (如圖 14)

2. 凸雙曲球面

待測物表面參數：

$$k = -7.85, R_0 = 300 \text{ mm}, \phi = 63 \text{ mm},$$

$$A = B = C = \dots = H = 0$$

雷射波源：球面波

圖 9.
反射式波前補償器之架設示意圖。

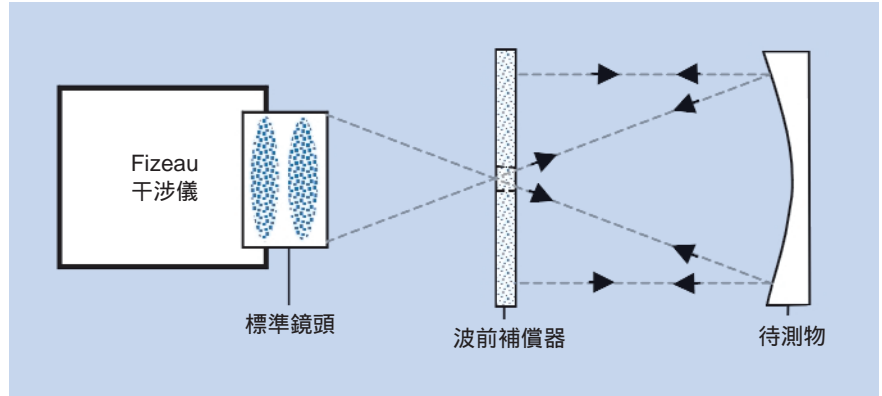


圖 10.
折反射式波前補償器之架設示意圖。

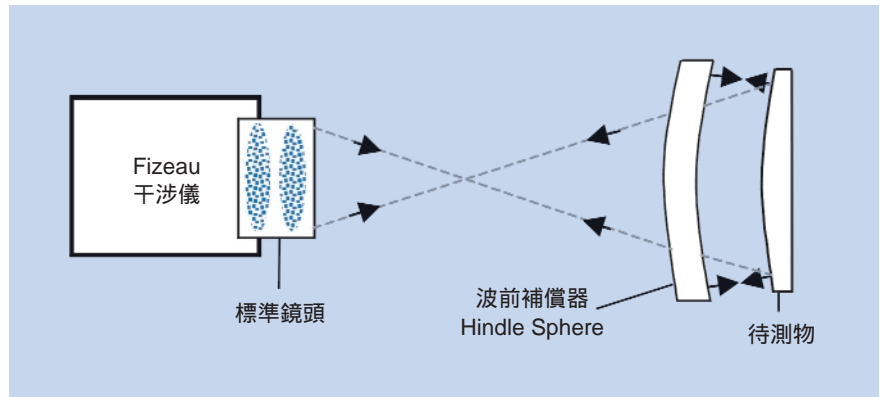
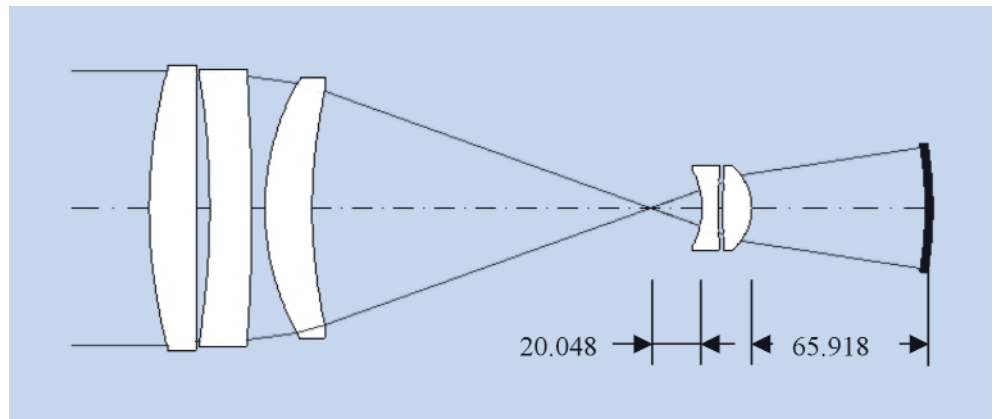


圖 11.
凹拋物球面 - 波前補償器之光路圖。



標準鏡頭：Zygo - F/3.3 - $\lambda/10$
光路 layout 與數據：如圖 12 與圖 18
補償後波前誤差： 0.001λ (如圖 15)

$$k = 3, R_0 = 350 \text{ mm}, \varphi = 120 \text{ mm}$$

$$A = -0.11394030 \times 10^{-8}$$

$$B = -0.11855502 \times 10^{-12}$$

$$C = -0.52343657 \times 10^{-17}$$

$$D = -0.53149147 \times 10^{-21}$$

3. 凹橢球面

待測物表面參數：(圓錐常數 k , 中心曲率半徑 R_0 , 外徑 φ)

雷射波源：平面波

標準鏡頭：Zygo - Plano - $\lambda/20$

圖 12.
凸雙曲球面 - 波前補償器之光路圖。

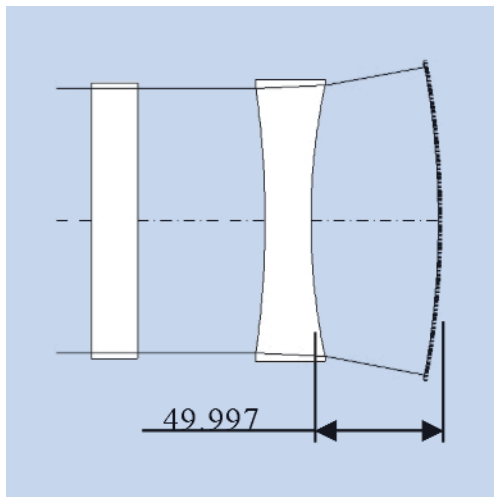
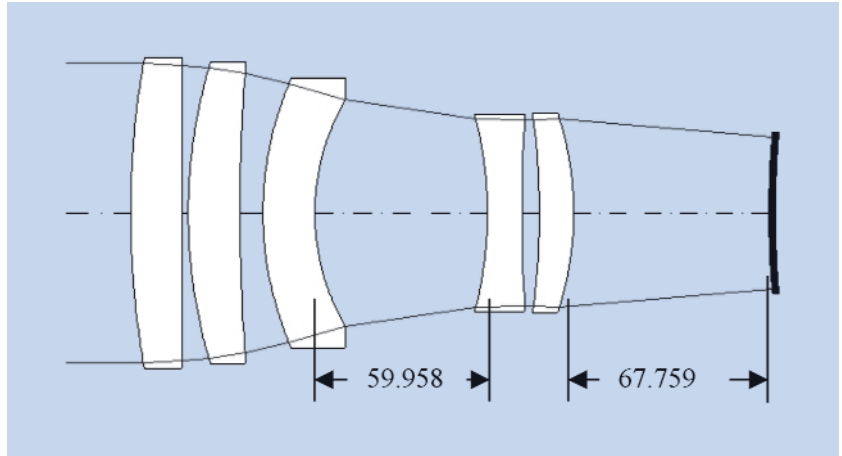


圖 13. 凹拋球面 - 波前補償器之光路圖。

光路 layout 與數據：如圖 13 與圖 19
補償後波前誤差：0.001 λ (如圖 16)

四、影響波前補償量測的因素

1. 設計後的波前誤差

依照 Code-V 軟體之 auto-design 的功能設計後，以 PMA 指令可得到波前誤差的設計值，波前誤差愈小，量測精度愈佳；反之愈差。一般輪廓為二階曲線之待測物，其曲線大小與中心曲率半徑成正比，波前補償設計誤差亦然。如果補償後的波前誤差很小，則設計出來的波前補償器有如球面的標準鏡頭般，可適用於某一範圍的 R_0 值或者是 k

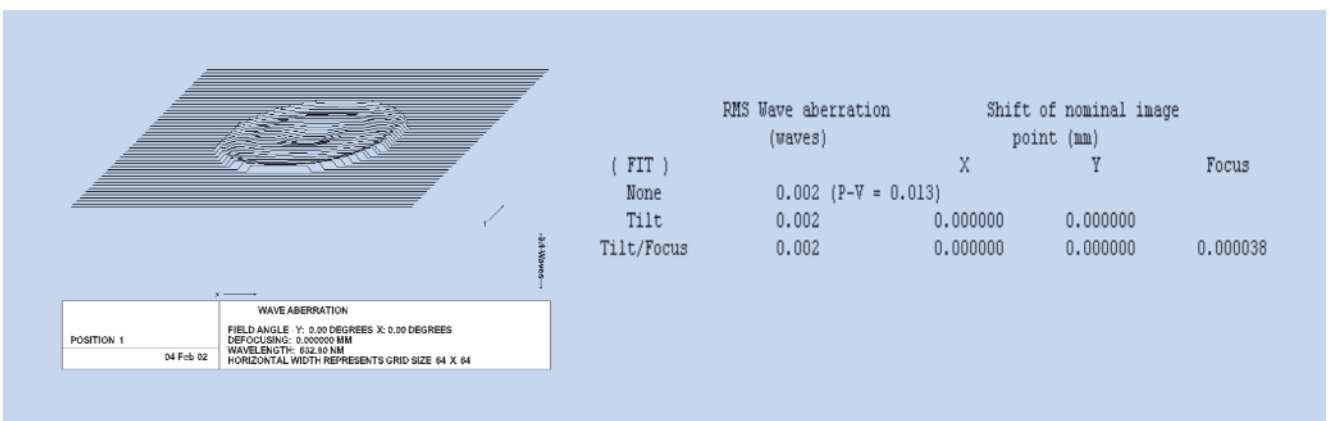


圖 14. 凹拋球面 - 波前補償器之波前設計誤差。

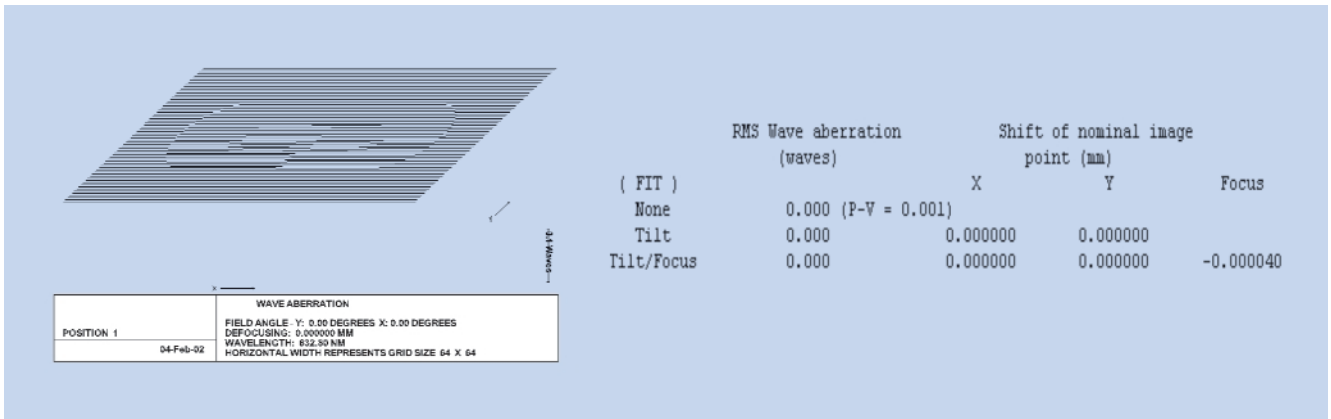


圖 15. 凸雙曲球面 - 波前補償器之波前設計誤差。

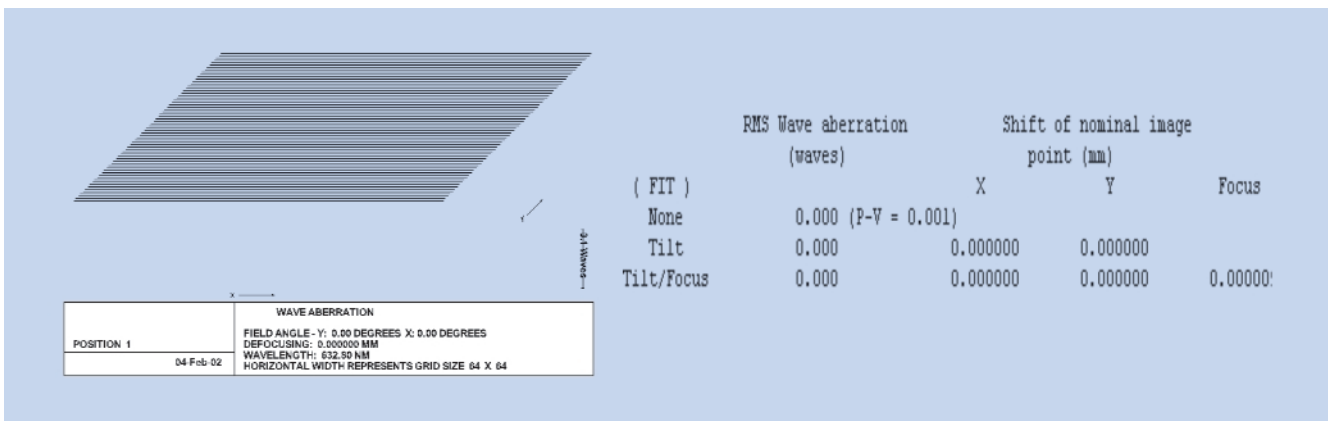


圖 16. 凹橢球面 - 波前補償器之波前設計誤差。

值，甚至連補償器的位置都可容許有 5 mm 以上的誤差。以設計實例一之凹拋物球面鏡來說，將 R_0 值變化，但 k 值維持為 -1 ，即可得到設計誤差之變化值 (如表 2)；同理，若 R_0 值不變，亦可得到 k 與設計誤差之關係 (如表 3)。

2. 補償器的組裝誤差

波前補償器若由兩片或兩片以上的光學元件 (透鏡) 所組成，則此兩元件在做檢測前，需先行組裝在一機構內，如果補償器的機構尺寸不正確或元件與機構膠合後有偏心 (decenter) 或傾角 (tilt) 等誤差，則在待測物之表面形狀檢測值中會有慧差 (coma) 存在。一般補償器在組裝後，其偏心應在 30 角秒以內，方不致在量測時有組裝誤差。

3. 補償器元件的表面形狀精度

補償器是由透鏡或反射鏡組成，折射式補償器因光程對透鏡的形狀精度的敏感度不高，故一般透鏡形狀精度要求在 $\lambda/4$ 以內即可，但若引用在量測的是反射式補償器，則檢測之光程將會有兩倍反射鏡的形狀誤差，故一般會要求參與量測的反射鏡之形狀精度必須小於 $\lambda/10$ 。

4. 補償器與待測物的平台定位精度

在做非球面檢測時，補償器與待測物通常都使用三至五軸定位平台當夾具，而在檢測中，若平台傾斜或在光軸上的位置不正確，則所量測出待測物之表面形狀精度將會有慧差 (coma) 或是離焦 (defocus) 等誤差，故量測上，必須藉著一片平行度

CODE V - Optical Research Associates - [Input Window]

File Edit Lens Surf Display Analysis Image Auto Mech Systems Macro Window Help

LEN1 Lens Data CODE V

Surf Type	Radius	Thickness	Glass/GL1	RMD	Aperture Dec
OBJ	INFINITY	INFINITY			
STO	206.839573	18.00000000	SF4_SCHOTT	REFR	52.0000
2	INFINITY	5.00000000			50.7463
3	-319.582824	16.00000000	SF4_SCHOTT	REFR	50.5554
4	-720.528937	5.00000000			49.8320
5	98.154715	18.00000000	SF4_SCHOTT	REFR	47.5076
6	206.151641	128.39922562			44.3574
7	INFINITY	20.04895662	v		0.0002
8	-30.530000	6.00000000	BK7_SCHOTT	REFR	15.0000 u
9	126.210000	2.00000000			15.0000 u
10	512.030000	11.00000000	BK7_SCHOTT	REFR	15.0000 u
11	-20.750000	65.91831115	v		15.0000 u
12 ASP	-150.000000	-65.91831115	p REFL	REFL	22.8700
IMG	INFINITY	0.00000000			

圖 17.
凹拋物球面 - 波前補償器
之元件表。

CODE V - Optical Research Associates - [Input Window]

File Edit Lens Surf Display Analysis Image Auto Mech Systems Macro Window Help

LEN1 Lens Data CODE V

Surf Type	Radius	Thickness	Glass/GL1	RMD	Aperture Dec
OBJ	INFINITY	INFINITY			
STO	305.267928	18.00000000	BK7_SCHOTT	REFR	52.0000
2	INFINITY	2.00000000			51.2070
3	181.108819	18.00000000	F2_SCHOTT	REFR	50.3930
4	662.914671	8.00000000			48.3204
5	118.030445	18.00000000	BK7_SCHOTT	REFR	44.9577
6	79.769940	59.95817038	v		39.4002
7	-132.370000	12.00000000	BK7_SCHOTT	REFR	32.5457
8	558.980000	6.00000000			32.3712
9	-260.810000	12.00000000	BK7_SCHOTT	REFR	32.4148
10	-108.460000	67.75929964	v		32.8781
11 ASP	300.000000	-67.75929964	p REFL	REFL	26.5064
IMG	INFINITY	0.00000000			

圖 18.
凸雙曲球面 - 波前補償器
之元件。

及形狀精度極佳的平面鏡之反射來修正平台的傾斜狀況，以及引用精度高且具回授控制的平台以確保正確位置。

5. 量測時的環境條件

一般光學檢測實驗通常要求佈置黑色背景，溫度變化在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以內，濕度在 $45 \pm 5\%$ ，振動值在一定的限度以下，所檢測的待測物亦需在架設後幾

The screenshot shows the CODE V software interface with the 'Lens Data' table. The table has columns for Surface Type, Radius, Thickness, Glass/GLL, RMD, and Aperture Dec. The data is as follows:

Sur	Type	Radius	Thickness	Glass/GLL	RMD	Aperture Dec
OBJ		INFINITY	INFINITY			
STO		INFINITY	18.00000000	BK7_SCHOTT	REFR	52.0000
2		INFINITY	50.00000000			52.0000
3		-378.210000	18.00000000	BK7_SCHOTT	REFR	52.0000
4		258.440000	49.99689137			53.2782
5	ASP	-350.000000	0.00000000	REFL	REFL	60.5410
IMG		INFINITY	0.00000000			

圖 19. 凹橢球面 - 波前補償器之元件表。

小時始能測試。如果在測試中，溫度變化超過 1 °C，以 BK7 的透鏡、尺寸 50 mm 為例，則其尺寸變化將超過 0.1 μm，此誤差值足以影響其檢測精度。

五、結論

非球面量測技術發展至今已有數十年的歷史，但仍未有一套標準的量測技術，除了技術觀念的保守及人才培養不易外，檢測之成本居高不下亦是主要原因，以製作一片直徑 50 mm、形狀精度為 λ/4 的雙曲球面鏡為例，並以 CGH 全像干涉儀為量測

依據，其製作單價竟是同尺寸及精度之球面鏡單價的數千倍以上。所以目前使在 CD/DVD 讀寫頭或數位相機中非球面元件的量測的方式，是以表面輪廓儀之檢測數值作比對依據。但不久的未來，光電產品在講求輕、薄、短、小的要求下，直徑 0.5 mm 以內的 CD/DVD 讀寫頭、光纖對位器及形狀精度為 λ/4 的數位相機之非球面元件即將問世，而表面輪廓儀的直線數據已不符實用，故建立一套標準的非球面量測系統確為需要。本文所提之波前補償法，除了可廣泛利用在各種非球面的檢測上，亦可節省製作非球面時之大半的檢測成本。

設計誤差 $w(\lambda)$	0.128	0.062	0.031	0.013
中心曲率半徑 R_0 值 (mm)	-170	-160	-155	-150
設計誤差 $w(\lambda)$	0.043	0.075	0.136	
中心曲率半徑 R_0 值 (mm)	-145	-140	-130	

表 2. 中心曲率半徑 R_0 值與設計誤差 w 之關係。

設計誤差 $w(\lambda)$	0.087	0.043	0.018	0.013
圓錐常數 k 值	-1.1	-1.05	-1.02	-1
設計誤差 $w(\lambda)$	0.029	0.055	0.098	
圓錐常數 k 值	-0.98	-0.95	-0.9	

表 3. 圓錐常數 k 值與設計誤差 w 之關係。

參考文獻

1. 薛興國, 非球面鏡技術, 精儀中心 88 年授課講義.
2. W. Silvertooth, *Journal of the Optical Society of America* **30**, 140 (1940).
3. J. Schlauch and R. E. Cox, *Sky and Telescope*, **18**, 222 (1959).
4. D. E. Stoltzmann, M. Hatch, and R. E. Cox, *Sky and Telescope*, **52**, 210 (1976).
5. D. G. Bruns, *Applied Optics*, **22**, 12 (1990).
6. A. Offner, *Applied Optics*, **2**, 153 (1963).
7. R. T. Holleran, *Applied Optics*, **5**, 124 (1966).
8. J. M. Rodgers and R. E. Parks, *Applied Optics* (1984).
9. F. A. Simpson, B. H. Oland, and J. Meckel, *Optical Engineering*, **13**, G101 (1974).
10. R. E. Parks and L. Z. Shao, *Optical Engineering*, **27**, 1057 (1988).
11. A. B. Meinel and M. P. Meinel, *Applied Optics*, **22**, 520 (1983a).
12. S. M. Arnold, *Optical Engineering*, 19-20 Jan. 1052 (1989).
13. S. M. Arnold and K. Anil, *SPIE*, **1396**, 27 (1990).
14. K. M. Leung, S. M. Arnold, and J. C. Lindquist, *SPIE*, **306**, 112 (1981).
15. M. Daniel, *Optical Shop Testing*, Ch. 8 (1982).
16. T. Yatagai and T. Kanou, *SPIE*, **429**, 136 (1983).
17. H. E. Dall, *J. Br. Astron. Assoc.*, **57**, 201 (1947).
18. F. E. Ross, *Astrophys J.*, **98**, 341 (1943).