

## 第九章 公差與容忍度分析

公差或容忍度(tolerance)關係到光學系統的製作花費, 是一個相當重要的課題。在國際上, 有一個公差規範(亦即 ISO 10110), 其中對各個透鏡或光學元件均有基本規範。在分析時, 我們可以針對部分元件乃至全部元件, 就這一些可能的公差範圍進行參數變動, 看對整個系統效能的影響為何, 以便更進一步作調整。另外也可以做整個系統效能需求, 倒回估算各個元件公差或容忍度的下限為何。這些都是很實際的課題。在這一章裡我們用一個雙分透鏡及雙高斯透鏡組為例, 示範公差容忍度分析。其中雙高斯透鏡組是源自中華衛星二號「紅色精靈」計劃的 CCD 影像儀。

### 9-1 雙透鏡(Doublet Lens)

延續第八章, 我們先考慮一個  $f/2$  雙透鏡組(圖樣見圖 9-1)。為了單純起見我們先假定空氣間隔是最重要的因子。這個假定其實也很合理, 因為這個間隔控制光束高度。我們可以使用 OSLO USER-defined 容忍度程式調整面 2 的容忍度, 來對其影響作個評估。整個步驟如下:

- 1、先對 lasrbd2.len 複製, 使用複製的檔案執行, 再對鏡組容忍度分析。面數據試算表除了像面的厚度, 將所有的變數(variable)改為直接指定(direct specification), 因為像面厚度被將被當作在容忍度分析期間的補償器, 所以不改為直接指定, 參見圖 9-2。
- 2、點選「Update>> Tolerance Data >> Surface Tolerance」開啓容忍度數據試算表(tolerance data spreadsheet)。目前最感興趣的只有在第二鏡面厚度的容忍度, 這一個厚度在 ISO10110 的內定值是 0.2mm, 但此值在目前的系統是非常不精確的。所以將容忍度改成 0.05mm 並關上試算表, 參見圖 9-3。

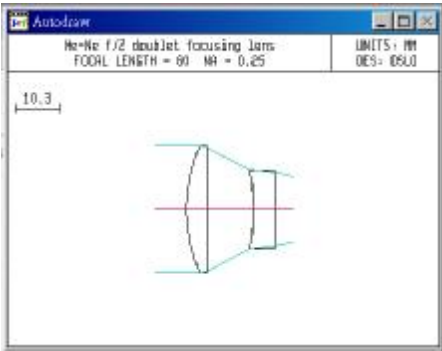


圖 9-1 f/2 雙透鏡組

Update surface data

No name View: ☒ Srf ☐ Grp Draw: ☐ Off ☒ On

Entrance beam radius (mm) 15.000000 Field angle (deg) 5.7296e-05

Wavelength (microns) 0.632800 Efl 60.000000

| SRF | RADIUS      | THICKNESS   | APERTURE RADIUS | GLASS  | SPECIAL |
|-----|-------------|-------------|-----------------|--------|---------|
| OBJ | 0.000000    | 1.0000e+20  | 1.0000e+14      | AIR    |         |
| AST | 36.991953   | 5.000000    | 15.000000 AS    | LASF35 | C       |
| 2   | -585.845108 | 10.827700   | 13.978756 S     | AIR    |         |
| 3   | -50.025871  | 5.000000    | 9.260431 S      | LASF35 | P       |
| 4   | -4.1560e+03 | 34.581152 S | 8.645304 S      | AIR    |         |
| IMS | 0.000000    | 0.000000 V  | 6.0000e-05 S    |        |         |

圖 9-2 面數據試算表

Update surface tolerances

容認度更改為

| SRF | RADIUS   | RD TOL | PWR FR | IRR FR | THICK  | TH TOL | GLASS  | RN TOL | DY TOL | TA TOL |
|-----|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | 36.992   | 0.0    | 10.00  | 2.00   | 5.000  | 0.2000 | LASF35 | 0.0010 | 0.0    | 0.3333 |
| 2   | -585.845 | 0.0    | 10.00  | 2.00   | 10.828 | 0.0500 | AIR    | 0.0    | 0.0    | 0.3333 |
| 3   | -50.026  | 0.0    | 10.00  | 2.00   | 5.000  | 0.2000 | LASF35 | 0.0010 | 0.0    | 0.3333 |
| 4   | -4.2e+03 | 0.0    | 10.00  | 2.00   | 34.581 | 0.2000 | AIR    | 0.0    | 0.0    | 0.3333 |
| 5   | 0.0      | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    |        |        | 0.0    | 0.0    |

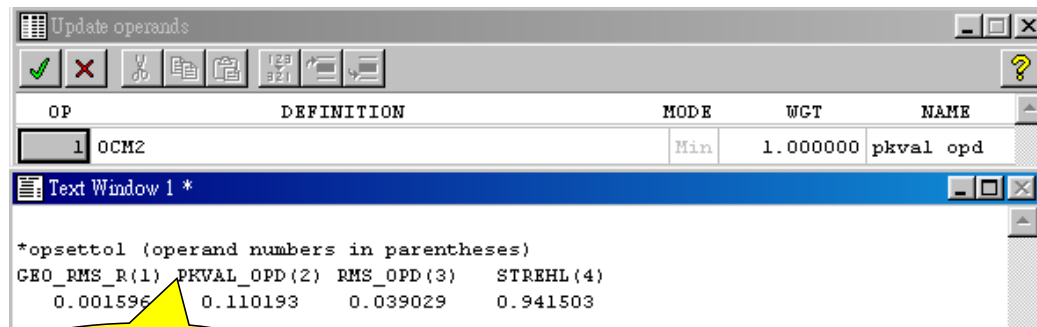
FRINGE WAVELENGTH: 0.546070

Fringes measured over clear aperture of surface unless indicated.  
Tilt tolerances are specified in degrees.  
Display all surface tolerances: ☐ Yes ☒ No

圖 9-3 面容忍度設定

3、點選「Optimize>>SCP Operands Setup >>Tolerance」,則「\*opsettol」星指令

將被執行,且運算元試算表會打開。輸入「OCM2」為容忍度運算元 (tolerance operand),並輸入名稱「pkval opd」,如圖 9-4 所示:



| OP     | DEFINITION | MODE | WGT      | NAME      |
|--------|------------|------|----------|-----------|
| 1 OCM2 |            | Min  | 1.000000 | pkval opd |

```
*opsettol (operand numbers in parentheses)
GEO_RMS_R(1) PKVAL_OPD(2) RMS_OPD(3) STREHL(4)
0.001596 0.110193 0.039029 0.941503
```

峰對谷運算元

圖 9-4 運算元試算表

4、欲計算在峰對谷光程差的 0.05mm 容忍度之效應,請點選

「Tolerance>>User-Defined Tolerancing>>Sensitivity」,則會出現一個選擇清單

(Option list),如圖 9-5 所示,選擇「Air Space」,並按「OK」。經過一段時

間後,文字視窗將有如圖 9-6 之分析數據顯示。

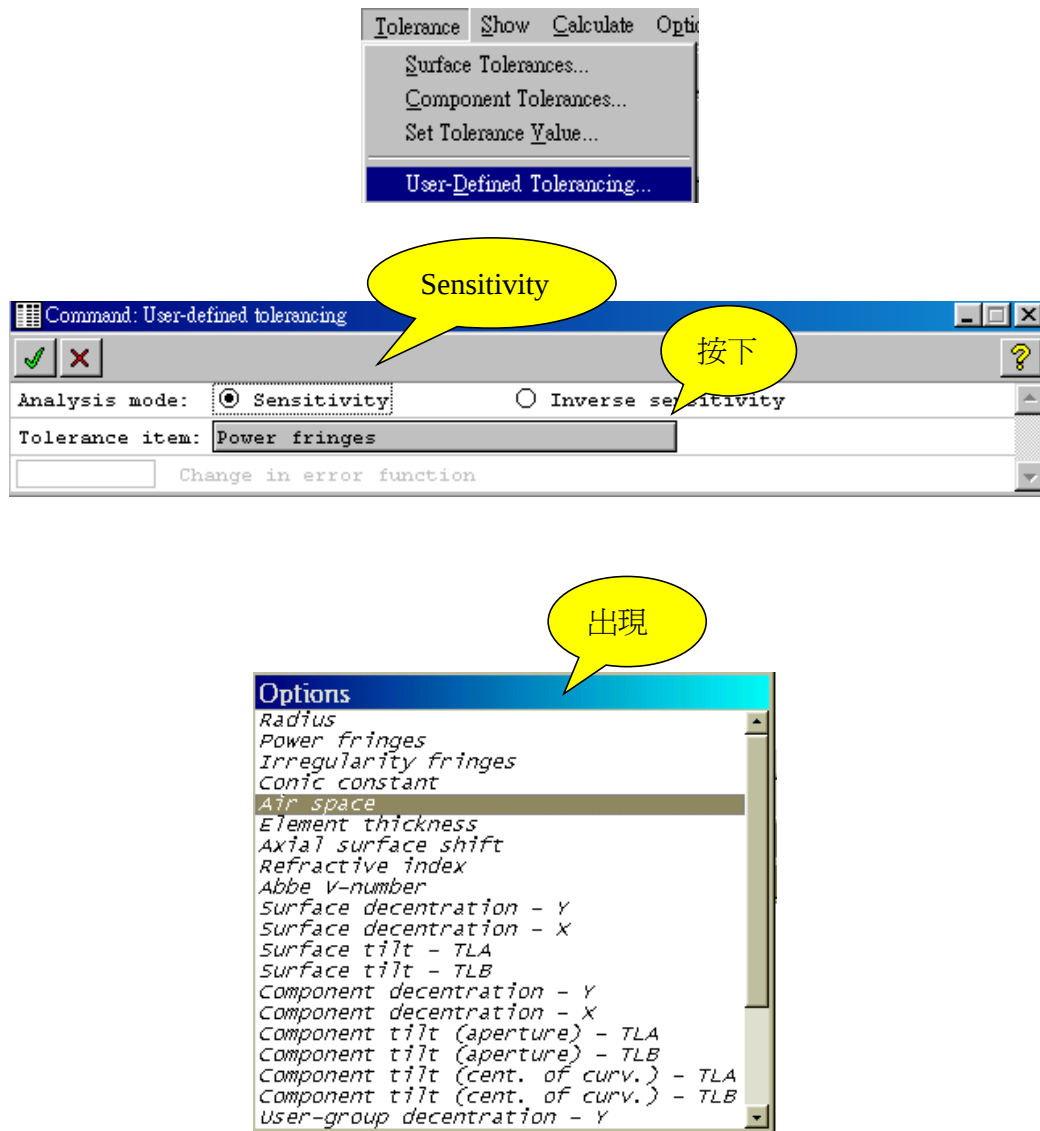
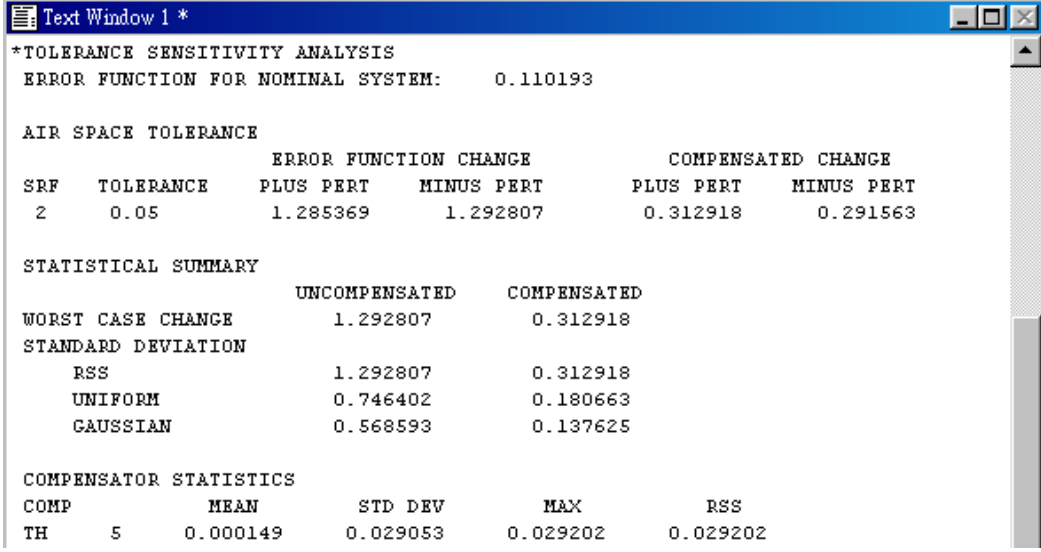


圖 9-5 「Tolerance>>User-Defined Tolerancing>>Sensitivity」之選單



Text Window 1 \*

```

*TOLERANCE SENSITIVITY ANALYSIS
ERROR FUNCTION FOR NOMINAL SYSTEM:    0.110193

AIR SPACE TOLERANCE

      ERROR FUNCTION CHANGE      COMPENSATED CHANGE
SRF  TOLERANCE  PLUS PERT  MINUS PERT  PLUS PERT  MINUS PERT
  2    0.05    1.285369    1.292807    0.312918    0.291563

STATISTICAL SUMMARY

      UNCOMPENSATED  COMPENSATED
WORST CASE CHANGE      1.292807    0.312918
STANDARD DEVIATION
  RSS      1.292807    0.312918
  UNIFORM    0.746402    0.180663
  GAUSSIAN    0.568593    0.137625

COMPENSATOR STATISTICS
COMP      MEAN      STD DEV      MAX      RSS
TH        5      0.000149    0.029053    0.029202    0.029202
    
```

圖 9-6 公差分析數據

5、上面的分析數據顯示在優值函數 (merit function) 上 0.05mm 容忍度的效應，而優值函數即代表峰到谷光程差 (peak-to-valley opd)。你也可以製造一個給定的容忍度「0.15mm」，此容忍度可使系統接近繞射極限，步驟為點選「Tolerance>>User-Defined Tolerancing >>Inverse Sensitivity」，然後選擇「Air Space」，接下來再輸入 0.15(參見圖 9-7)，則文字視窗(參見圖 9-8)將顯示在焦距未被調整時允許的容忍度 (allowed tolerance) 約 16 $\mu$ m，或是焦距被用做間隔誤差 (space error) 的補償器時是 34 $\mu$ m。

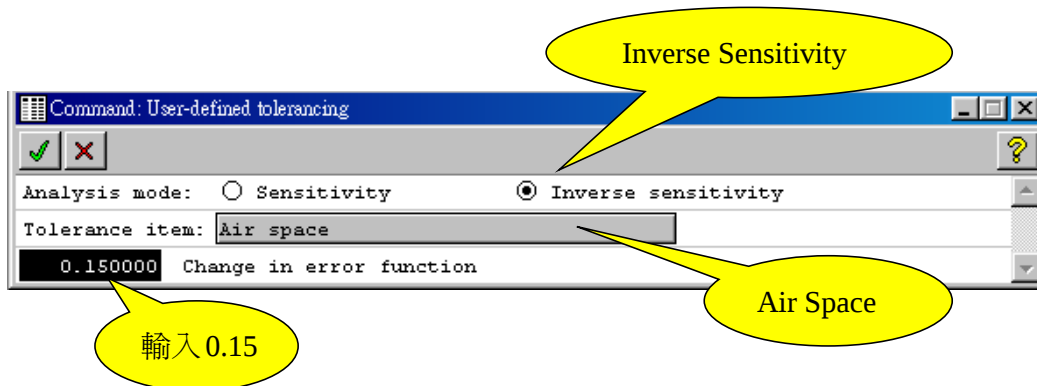


圖 9-7

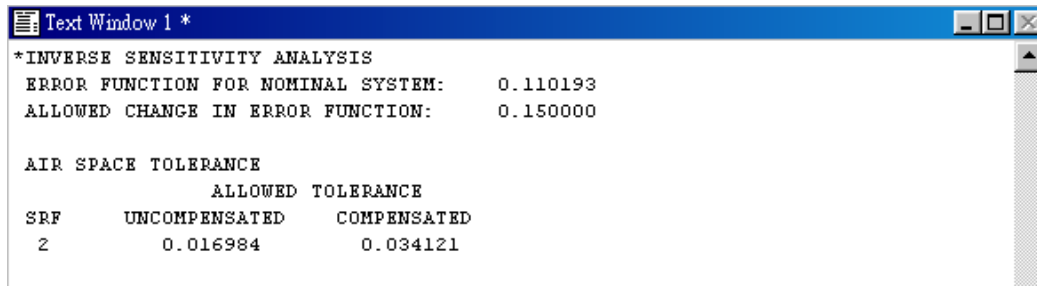


圖 9-8 「Inverse Sensitivity Analysis」數據

## 9-2 紅色精靈雙高斯鏡組 (Doublet Gauss Lens)

現在我們要討論的則是光學系統設計中的另外一個重點－公差分析 (Tolerance)。Tolerance 就其字面上的意義, 是有「容忍度」的意思, 所以我們可以將它想像成這個鏡組對於其結構參數 (鏡面曲率半徑、厚度、折射率、偏心、離軸...等等) 誤差的容忍度。這對於一個光學系統是相當重要的, 所謂一個「好」的光學設計, 除了符合設計需求, 有好的成像品質之外, 最重要的是它必須能夠被製造、被生產。如果說這個系統不能容許結構參數上的誤差, 那麼結構參數在製程或是組裝上必然產生的誤差一定會使得成像品質大打折扣, 無法符合設計的規格, 而原先的設計也只是紙上談兵。所以, 公差分析這個環節在實際設計上是不可或缺的。

一般而言, 我們在做公差分析時會有一個標準的依據, 在 OSLO 的內建分析是以 ISO 10110 作為標準。圖 9-9 則是簡單的列出幾項常用的公差標準:

| Property                            | Maximum dimension of part (mm) |                     |                                |                                |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                                     | Up to 10                       | Over 10<br>Up to 30 | Over 30<br>Up to 100           | Over 100<br>Up to 300          |
| Edge length, diameter (mm)          | $\pm 0.2$                      | $\pm 0.5$           | $\pm 1.0$                      | $\pm 1.5$                      |
| Thickness (mm)                      | $\pm 0.1$                      | $\pm 0.2$           | $\pm 0.4$                      | $\pm 0.8$                      |
| Angle deviation of prisms and plate | $\pm 30'$                      | $\pm 30'$           | $\pm 30'$                      | $\pm 30'$                      |
| Width of protective chamfer (mm)    | 0.1 – 0.3                      | 0.2 – 0.5           | 0.3 – 0.8                      | 0.5 – 1.6                      |
| Stress birefringence (nm/cm)        | 0/20                           | 0/20                | –                              | –                              |
| Bubbles and inclusions              | 1/3x0.16                       | 1/5x0.25            | 1/5x0.4                        | 1/5x0.63                       |
| Inhomogeneity and striae            | 2/1;1                          | 2/1;1               | –                              | –                              |
| Surface form tolerances             | 3/5(1)                         | 3/10(2)             | 3/10(2)<br>30 mm test diameter | 3/10(2)<br>60 mm test diameter |
| Centering tolerances                | 4/30'                          | 4/20'               | 4/10'                          | 4/10'                          |
| Surface imperfection tolerances     | 5/3x0.16                       | 5/5x0.25            | 5/5x0.4                        | 5/5x0.63                       |

圖 9-9 常用公差/容忍度標準

當然, 因為各個系統上的設計規格與限制, 有時候我們也必須要配合實際上的需要, 定義出適當的公差 (Tolerance) 來評估我們的系統。在這裡延續先前 CCD 影像儀雙高斯鏡組的例子(參見 7-2 節)(因為面數超過 12, 所以必須在 OSLO 5.4 才能操作), 我們會針對系統成像品質的特性進行公差的討論與分析。

在開始之前, 要注意到我們分析公差時所使用的評估條件必須要與當初設計鏡組的規格限制相同, 如此才是有意義的比較。

現在, 我們從幾何能量分佈 (geometrical energy distribution) 來評估公差對成像品質的影響, 因為在這個例子中, 由此鏡組接收的影像是成像於 CCD 之上, 所以其成像的斑點大小與能量分佈必須是 CCD 映像點 (pixels) 可以接受的範圍。而這裡的設計需求是對於每一個視角的成像點 (spot size) 必須最少有 80% 的能量是分佈在 40-micron 的直徑裡。表 9-1 是每個視角所對應的幾何能量分佈直徑 (設計值):

| 視角        | 幾何能量分佈直徑         |
|-----------|------------------|
| On-axis   | 16 $\mu\text{m}$ |
| 7-degree  | 22 $\mu\text{m}$ |
| 10-degree | 30 $\mu\text{m}$ |

表 9-1 幾何能量分佈直徑需求

所以如果我們以離軸視角 10 degree 來看的話, 在幾何能量分佈方面大約還可以容許成像斑點再向外延伸 4~5  $\mu\text{m}$  左右的誤差。因此我們可以利用這 4~5  $\mu\text{m}$  的預留空間來作為公差分析時的限制條件。

延續 7-2 節, 打開 Dgauss.len 的檔案。使用 OSLO 進行公差分析之前, 我們必須要先定義公差分析時所使用到的誤差函數 (error function)。因為在這裡的分析牽涉到鏡組成像斑點的 (RMS) 大小, 所以在決定誤差函數時也必須要從這個方向來考慮, 其做法如下:

1. 在 OSLO 主選單下選擇 Optimize>>Generate Error Function 打開 OSLO 預設的誤差函數試算表, 並且依照圖 9-10 作設定。

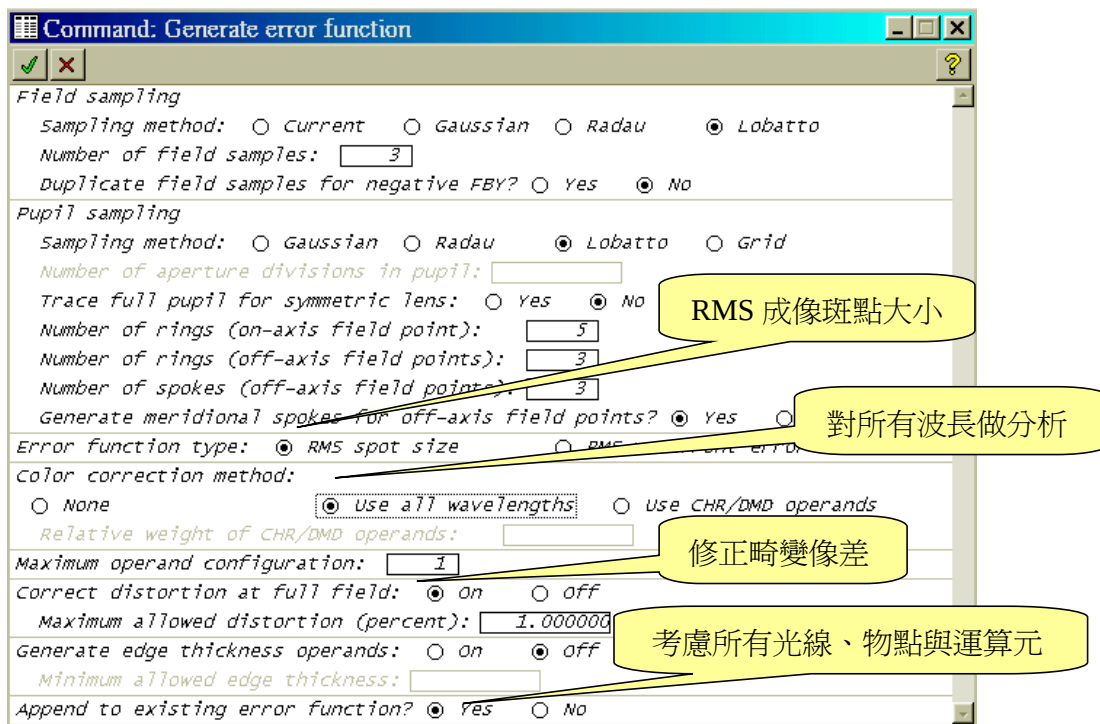
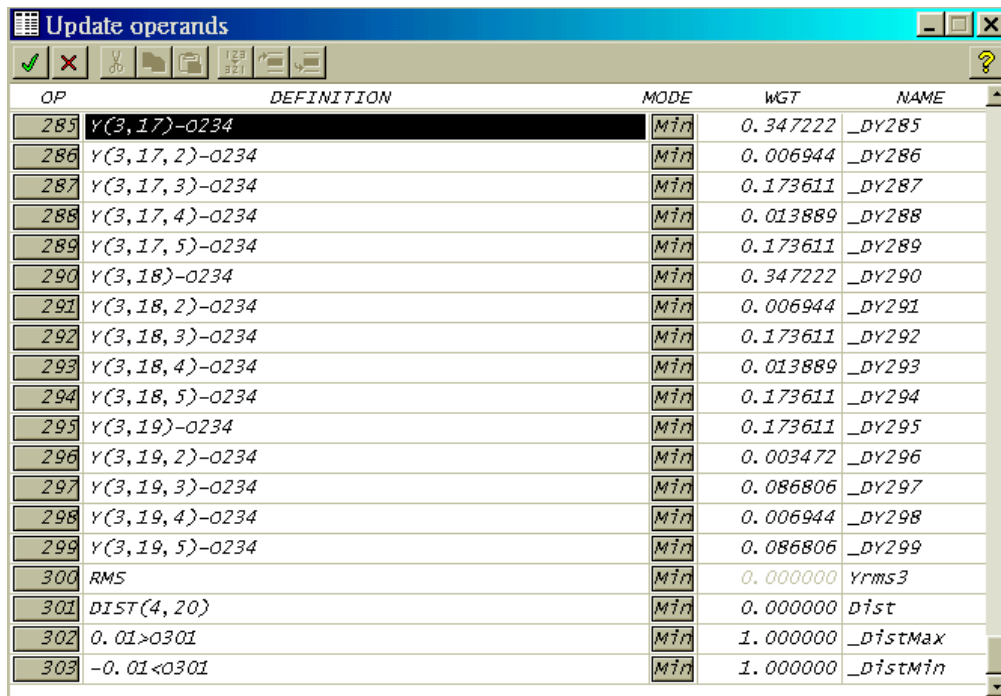


圖 9-10 誤差函數設定

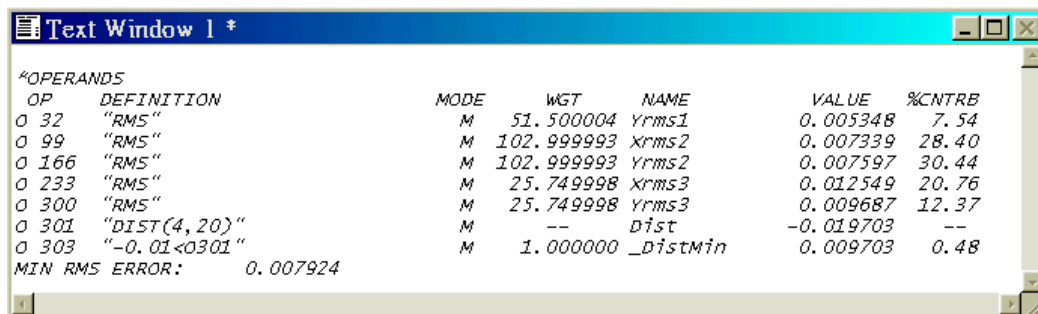
2. 選擇 OK 鍵後, OSLO 即會產生其預設的誤差函數, 我們可以在主選單中的 Optimize>>Operands 來加以確認, 因為我們考慮了所有光線與物點的運算元, 所以, 在這設定之下總共提供了 303 個運算元 (Operands) 來計算誤差函數, 參見圖 9-11。



| OP  | DEFINITION           | MODE | WGT      | NAME     |
|-----|----------------------|------|----------|----------|
| 285 | $Y(3, 17) - 0234$    | Min  | 0.347222 | _DY285   |
| 286 | $Y(3, 17, 2) - 0234$ | Min  | 0.006944 | _DY286   |
| 287 | $Y(3, 17, 3) - 0234$ | Min  | 0.173611 | _DY287   |
| 288 | $Y(3, 17, 4) - 0234$ | Min  | 0.013889 | _DY288   |
| 289 | $Y(3, 17, 5) - 0234$ | Min  | 0.173611 | _DY289   |
| 290 | $Y(3, 18) - 0234$    | Min  | 0.347222 | _DY290   |
| 291 | $Y(3, 18, 2) - 0234$ | Min  | 0.006944 | _DY291   |
| 292 | $Y(3, 18, 3) - 0234$ | Min  | 0.173611 | _DY292   |
| 293 | $Y(3, 18, 4) - 0234$ | Min  | 0.013889 | _DY293   |
| 294 | $Y(3, 18, 5) - 0234$ | Min  | 0.173611 | _DY294   |
| 295 | $Y(3, 19) - 0234$    | Min  | 0.173611 | _DY295   |
| 296 | $Y(3, 19, 2) - 0234$ | Min  | 0.003472 | _DY296   |
| 297 | $Y(3, 19, 3) - 0234$ | Min  | 0.086806 | _DY297   |
| 298 | $Y(3, 19, 4) - 0234$ | Min  | 0.006944 | _DY298   |
| 299 | $Y(3, 19, 5) - 0234$ | Min  | 0.086806 | _DY299   |
| 300 | RMS                  | Min  | 0.000000 | Yrms3    |
| 301 | $DIST(4, 20)$        | Min  | 0.000000 | Dist     |
| 302 | $0.01 > 0301$        | Min  | 1.000000 | _DistMax |
| 303 | $-0.01 < 0301$       | Min  | 1.000000 | _DistMin |

圖 9-11 303 個運算元, 285 項以上省略不列表

按下 OK 鍵後, 我們也可以選擇 Show>>Optimization Data>>Operands 檢視運算元計算後的結果, 參見圖 9-12。



| OP             | DEFINITION     | MODE | WGT        | NAME     | VALUE     | %CNTRB |
|----------------|----------------|------|------------|----------|-----------|--------|
| 0 32           | "RMS"          | M    | 51.500004  | Yrms1    | 0.005348  | 7.54   |
| 0 99           | "RMS"          | M    | 102.999993 | Xrms2    | 0.007339  | 28.40  |
| 0 166          | "RMS"          | M    | 102.999993 | Yrms2    | 0.007597  | 30.44  |
| 0 233          | "RMS"          | M    | 25.749998  | Xrms3    | 0.012549  | 20.76  |
| 0 300          | "RMS"          | M    | 25.749998  | Yrms3    | 0.009687  | 12.37  |
| 0 301          | "DIST(4, 20)"  | M    | --         | Dist     | -0.019703 | --     |
| 0 303          | "-0.01 < 0301" | M    | 1.000000   | _DistMin | 0.009703  | 0.48   |
| MIN RMS ERROR: |                |      |            |          | 0.007924  |        |

圖 9-12 運算元計算結果]

2. 在完成誤差函數的設定之後, 接著我們便可以開始分析這個鏡組的公差。在這裡, 因為我們已經大略的知道成像斑點的允許誤差範圍, 所以可以使用「使用者定義的公差分析」(user-defined tolerance), 在主選單下選擇 Tolerance>>User-Defined Tolerancing, 點選 Inverse sensitivity, 選擇所要輸出的公差項 (Tolerance item), 以及輸入被允許的誤差函數改變量 (以下會討論其計算方式)。

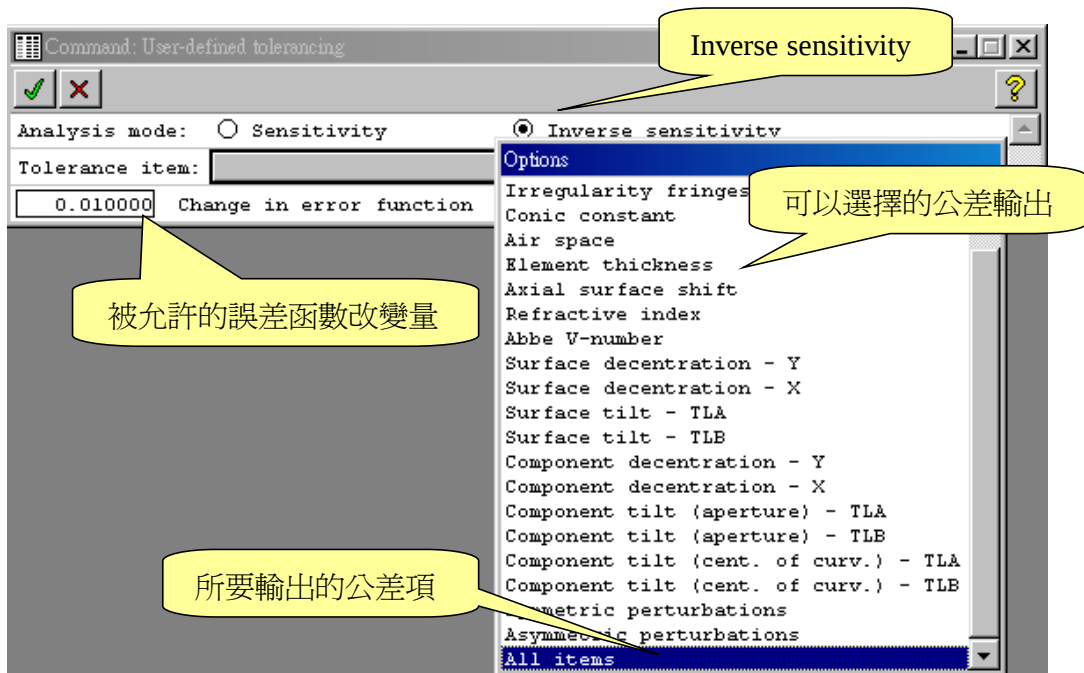


圖 9-13 分析模式的選定

3. 現在, 我們來討論允許的誤差函數改變量。首先假設所有的誤差項均為互相獨立而且有一個常態的機率密度分佈, 則允許誤差函數的改變量有下列的關係式:

$$\Delta S_{tar} = \frac{s_{ds}}{k \sqrt{n}}$$

其中  $s_{ds}$  為系統成像品質的誤差函數標準差 (standard deviation), 並且與最大允許的誤差值以及系統符合要求的機率 (probability of success) 有關。

| $\Delta S_{max} / \sigma_{ds}$ | Probability of success |
|--------------------------------|------------------------|
| 0.67                           | 0.50                   |
| 0.8                            | 0.58                   |
| 1.0                            | 0.68                   |
| 1.5                            | 0.87                   |
| 2.0                            | 0.95                   |
| 2.5                            | 0.99                   |

表 9-2 誤差函數改變量與標準差  
比跟成功率之間的換算

而  $n$  值是我們所考慮的公差項數量。  $k$  則是一個機率密度分佈常數。

| Distribution | $\kappa$ |
|--------------|----------|
| End point    | 1.0      |
| Uniform      | 0.58     |
| Gaussian     | 0.44     |

表 9-3 不同分佈下的  $\kappa$  值

有關的詳細內容可以參閱 OSLO 的 Optics Reference \Chapter 8 Tolerancing\ Effect of Tolerances on system performance。

4. 接著, 我們就可以利用先前定義的關係式來取得在這個例子的允許誤差改變量。在這裡, 我們詳細的考慮每一項結構參數的誤差 (表面的曲率、鏡面的厚度、空氣間隔、元件間的離心、位移等等) 並且評估其對成像品質的影響程度, 決定了 76 ( $n=76$ ) 項的公差項 (在此省略不加以列出)。至於誤差函數的標準差, 因為我們最大還可以容許成像斑點向外延伸  $4\mu\text{m}$ , 如果我們要求一個較佳的成功率 99%, 則可以得到誤差函數的標準差  $s_{ds} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。如果誤差函數為均勻分佈 ( $\kappa=0.58$ ), 最後, 我們可以得到其允許誤差函數改變量為  $0.00031643 \text{ mm}$ , 並且可以將其利用於 Inverse sensitivity analysis 之中。請參考圖 9-14。

5. 遵循著步驟 3. 打開試算表, 在允許的誤差函數改變量輸入  $0.00031643$ , 並且選擇所要顯示的公差項 (在這裡我們選擇 all terms 以列出所有的公差項, 事實上可以依照所需情況來選擇) 然後按 OK 鍵, 在離開試算表的同時 OSLO 將會幫助我們計算出每一項公差的允許範圍並且輸出在 Text Window 之中, 請參考圖 9-15。

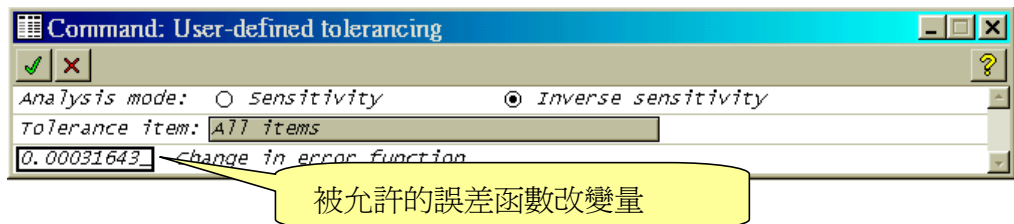


圖 9-14

現在在 Text Window 之中, 會出現所有公差項的允許誤差 (因為篇幅的關係不加以列出)。

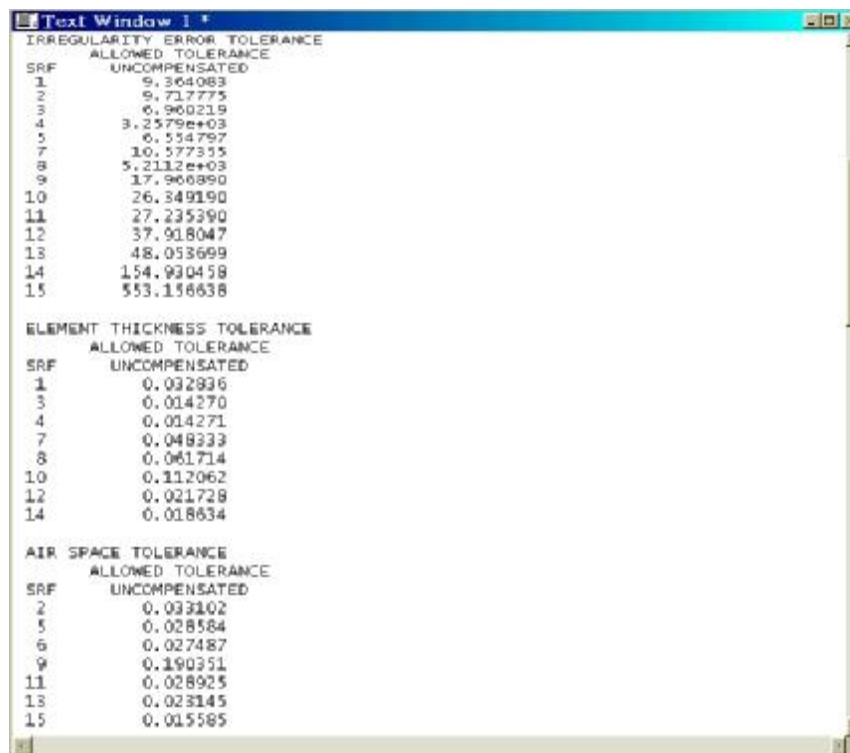
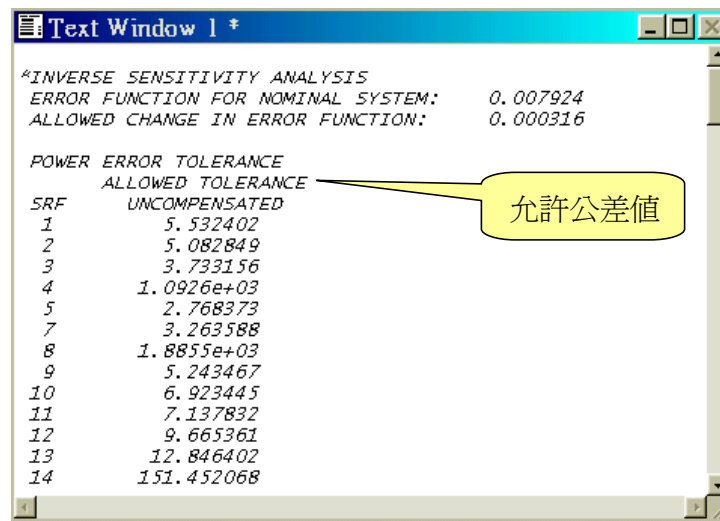
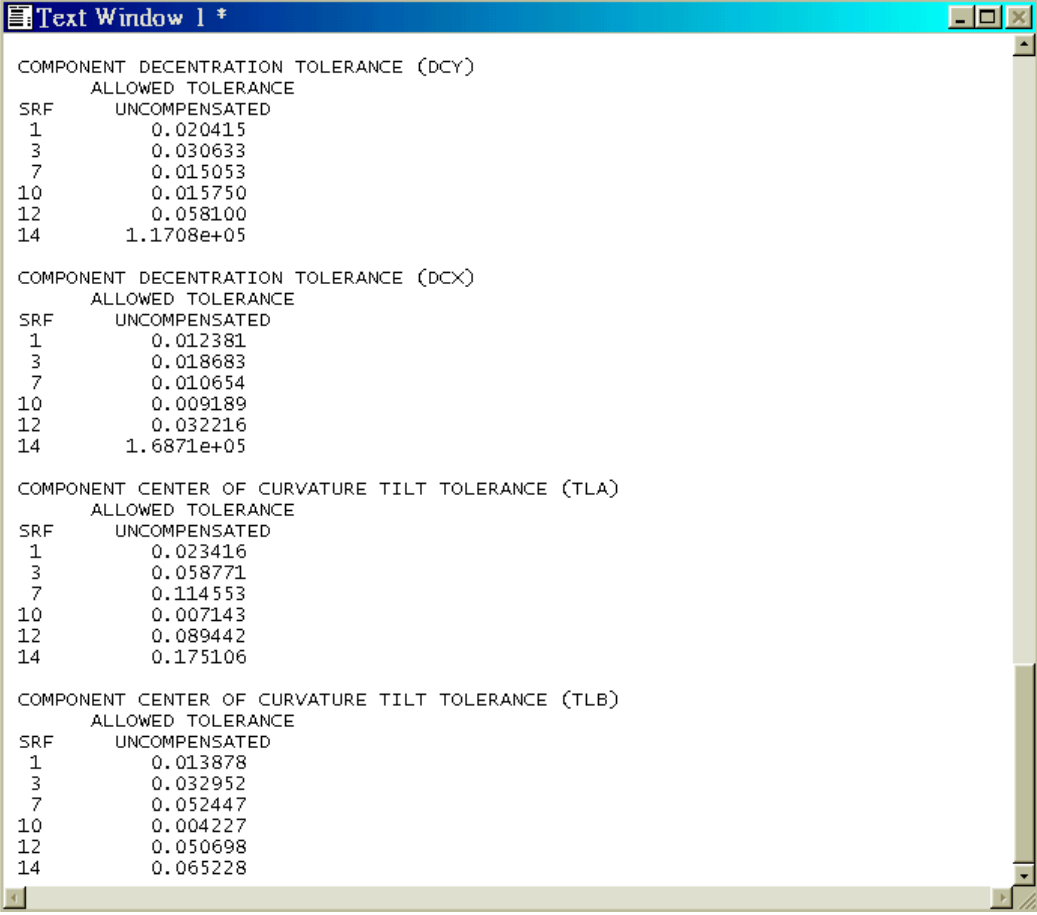


圖 9-15 inverse sensitivity analysis 的輸出



| COMPONENT DECENTRATION TOLERANCE (DCY) |                   |
|----------------------------------------|-------------------|
| SRF                                    | ALLOWED TOLERANCE |
| 1                                      | 0.020415          |
| 3                                      | 0.030633          |
| 7                                      | 0.015053          |
| 10                                     | 0.015750          |
| 12                                     | 0.058100          |
| 14                                     | 1.1708e+05        |

| COMPONENT DECENTRATION TOLERANCE (DCX) |                   |
|----------------------------------------|-------------------|
| SRF                                    | ALLOWED TOLERANCE |
| 1                                      | 0.012381          |
| 3                                      | 0.018683          |
| 7                                      | 0.010654          |
| 10                                     | 0.009189          |
| 12                                     | 0.032216          |
| 14                                     | 1.6871e+05        |

| COMPONENT CENTER OF CURVATURE TILT TOLERANCE (TLA) |                   |
|----------------------------------------------------|-------------------|
| SRF                                                | ALLOWED TOLERANCE |
| 1                                                  | 0.023416          |
| 3                                                  | 0.058771          |
| 7                                                  | 0.114553          |
| 10                                                 | 0.007143          |
| 12                                                 | 0.089442          |
| 14                                                 | 0.175106          |

| COMPONENT CENTER OF CURVATURE TILT TOLERANCE (TLB) |                   |
|----------------------------------------------------|-------------------|
| SRF                                                | ALLOWED TOLERANCE |
| 1                                                  | 0.013878          |
| 3                                                  | 0.032952          |
| 7                                                  | 0.052447          |
| 10                                                 | 0.004227          |
| 12                                                 | 0.050698          |
| 14                                                 | 0.065228          |

圖 9-16 inverse sensitivity analysis 的輸出

6. 接下來, 我們就可以利用這些允許誤差來進行 Sensitivity analysis , 分析這種程度的允許誤差在成像品質上的影響。在主選單上選擇 Tolerance>> Surface Tolerances... 打開面數據公差試算表, 並且依照次序輸入先前(參見圖 9-15)得到的各項允許誤差(在這裡我們不考慮材質上的誤差, 以及鏡組表面的離心與偏斜, 因此將 RN TOL、DY TOL、TA TOL 更改為零)請參考圖 9-17。

7. 另外, 選擇 Tolerance >> Component Tolerances..., 打開鏡組元件間的公差試算表, 同樣的, 依照各公差項目將允許誤差輸入(參見圖 9-16, 在 Text Window 之中, 鏡組元件間各公差的允許誤差通常列於面數據公差之後)請參考圖 9-18。注意, 當我們在輸入數據到試算表當中時, 必須要小心的確認輸入的位置, 以免出錯。

| SRF | RADIUS  | RD TOL | PWR FR | IRR FR | THICK  | TH TOL | GLASS   | RN TOL | DY TOL | TA TOL |
|-----|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 1   | 52.720  | 0.0    | 5.53   | 9.36   | 13.000 | 0.0328 | LAK9G15 | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 2   | 186.300 | 0.0    | 5.08   | 9.72   | 0.200  | 0.0331 | AIR     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 3   | 26.250  | 0.0    | 3.73   | 6.96   | 10.000 | 0.0143 | LAK9G15 | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 4   | 48.120  | 0.0    | 1e+0   | 3e+0   | 4.200  | 0.0143 | SF8G07  | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 5   | 16.540  | 0.0    | 2.77   | 6.55   | 11.900 | 0.0286 | AIR     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 6   | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 10.800 | 0.0275 | AIR     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 7   | -21.234 | 0.0    | 3.26   | 10.58  | 1.700  | 0.0483 | SF8G07  | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 8   | 91.420  | 0.0    | 2e+0   | 5e+0   | 11.100 | 0.0617 | LAK9G15 | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 9   | -30.530 | 0.0    | 5.24   | 17.97  | 5.806  | 0.1904 | AIR     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 10  | 126.700 | 0.0    | 6.92   | 26.35  | 6.200  | 0.1121 | LAK9G15 | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 11  | -53.270 | 0.0    | 7.14   | 27.24  | 0.200  | 0.0289 | AIR     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 12  | 30.660  | 0.0    | 9.67   | 37.92  | 10.000 | 0.0217 | LAK9G15 | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 13  | 33.070  | 0.0    | 12.85  | 48.05  | 15.285 | 0.0231 | AIR     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 14  | 0.0     | 0.0    | 151.5  | 154.9  | 6.000  | 0.0186 | SILICA  | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 15  | 0.0     | 0.0    | 194.7  | 553.2  | 0.0    | 0.0156 | AIR     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 16  | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0    |         |        | 0.0    | 0.0    |

FRINGE WAVELENGTH: 0.546070

Fringes measured over clear aperture of surface unless indicated.  
Tilt tolerances are specified in degrees.  
Display all surface tolerances: ☐ Yes ☒ No

圖 9-17 面數據公差試算表

| SRF | DECENTRATION |            | CLEAR APERTURE TILT |          | CENTER OF CURV TILT |          |
|-----|--------------|------------|---------------------|----------|---------------------|----------|
|     | DCY          | DCX        | ALPHA               | BETA     | ALPHA               | BETA     |
| 1   | 0.020415     | 0.012381   | 0.000000            | 0.000000 | 0.023416            | 0.013878 |
| 2   |              |            | 0.000000            | 0.000000 | 0.000000            | 0.000000 |
| 3   | 0.030633     | 0.018683   | 0.000000            | 0.000000 | 0.058771            | 0.032952 |
| 5   |              |            | 0.000000            | 0.000000 | 0.000000            | 0.000000 |
| 7   | 0.015053     | 0.010654   | 0.000000            | 0.000000 | 0.114553            | 0.052447 |
| 9   |              |            | 0.000000            | 0.000000 | 0.000000            | 0.000000 |
| 10  | 0.015750     | 0.009189   | 0.000000            | 0.000000 | 0.007143            | 0.004227 |
| 11  |              |            | 0.000000            | 0.000000 | 0.000000            | 0.000000 |
| 12  | 0.058100     | 0.032216   | 0.000000            | 0.000000 | 0.089442            | 0.050698 |
| 13  |              |            | 0.000000            | 0.000000 | 0.000000            | 0.000000 |
| 14  | 1.1701e+05   | 1.6871e+05 | 0.000000            | 0.000000 | 0.175106            | 0.065228 |
| 15  |              |            | 0.000000            | 0.000000 | 0.000000            | 0.000000 |

Tilt tolerances are specified in degrees.

圖 9-18 鏡組元件間的公差試算表

8. 在輸入並且完成確認之後, 按 OK 鍵離開試算表, 開始進行 sensitivity tolerance analysis。我們一樣是在主選單下選擇 Tolerance>>User -Defined Tolerance...。打開試算表之後, 這一次我們點選 sensitivity, 在 Tolerance item 則選擇 all items, 參考圖 9-19。按 OK 鍵後, OSLO 會自動的執行運算並且輸出各項公差項的誤差

函數改變量以及一些統計結果於 Text Window 上, 參考圖 9-20。

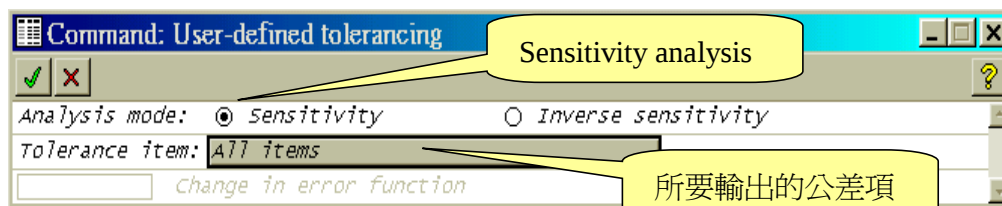


圖 9-19 公差分析模式的選定

\*TOLERANCE SENSITIVITY ANALYSIS  
ERROR FUNCTION FOR NOMINAL SYSTEM: 0.007924

POWER ERROR TOLERANCE

| SRF | TOLERANCE  | PLUS PERT   | MINUS PERT  |
|-----|------------|-------------|-------------|
| 1   | 5.532402   | 0.000490    | -0.000263   |
| 2   | 1.082849   | -0.000251   | 0.000440    |
| 3   | 3.733156   | 0.000426    | -0.000237   |
| 4   | 1.0926e+03 | -4.6536e-05 | 0.000312    |
| 5   | 1.768373   | -0.000208   | 0.000343    |
| 7   | 3.263588   | -0.000222   | 0.000332    |
| 8   | 1.8851e+03 | 0.000307    | -1.9700e-05 |
| 9   | 5.243467   | 0.000331    | -0.000211   |
| 10  | 6.923445   | 0.000328    | -0.000206   |
| 11  | 7.137832   | 0.000328    | -0.000198   |
| 12  | 9.665361   | 0.000322    | -0.000212   |
| 13  | 12.846402  | -0.000209   | 0.000316    |
| 14  | 151.452088 | -0.000191   | 0.000315    |
| 15  | 194.693814 | 0.000315    | -0.000230   |

IRREGULARITY ERROR TOLERANCE

| SRF | TOLERANCE  | PLUS PERT | MINUS PERT  |
|-----|------------|-----------|-------------|
| 1   | 0.364083   | 0.000316  | -0.000120   |
| 2   | 9.717775   | -0.000113 | 0.000315    |
| 3   | 6.960210   | 0.000315  | -0.000133   |
| 4   | 3.2579e+03 | 0.000313  | 0.000230    |
| 5   | 6.554797   | -0.000132 | 0.000314    |
| 7   | 10.577315  | -0.000115 | 0.000313    |
| 8   | 5.2112e+03 | 0.000171  | 0.000302    |
| 9   | 17.96089   | 0.000313  | -7.1754e-05 |
| 10  | 26.34919   | 0.000312  | 3.2936e-05  |
| 11  | 27.23539   | 0.000312  | 5.8785e-05  |
| 12  | 37.918047  | 0.000311  | 7.7914e-05  |
| 13  | 48.053690  | 0.000153  | 0.000311    |
| 14  | 154.930418 | 0.000313  | -5.7872e-05 |
| 15  | 553.156638 | -0.000236 | 0.000314    |

圖 9-20 sensitivity analysis 的輸出

注意: 因為篇幅的關係在沒有列出所有的公差項, 不過這裡的 all items 指的是之前步驟 6 與步驟 7 的試算表中有輸入值的公差項, 應該是我們之前所考慮的 76 個公差項。(在試算表中, 公差值為零表示我們不考慮該項公差或是該項公差沒有貢獻)。我們也可以選擇只對單一項作公差分析, 不過在 text window 顯示的結果也僅僅是該單項公差對於成像品質的貢獻。

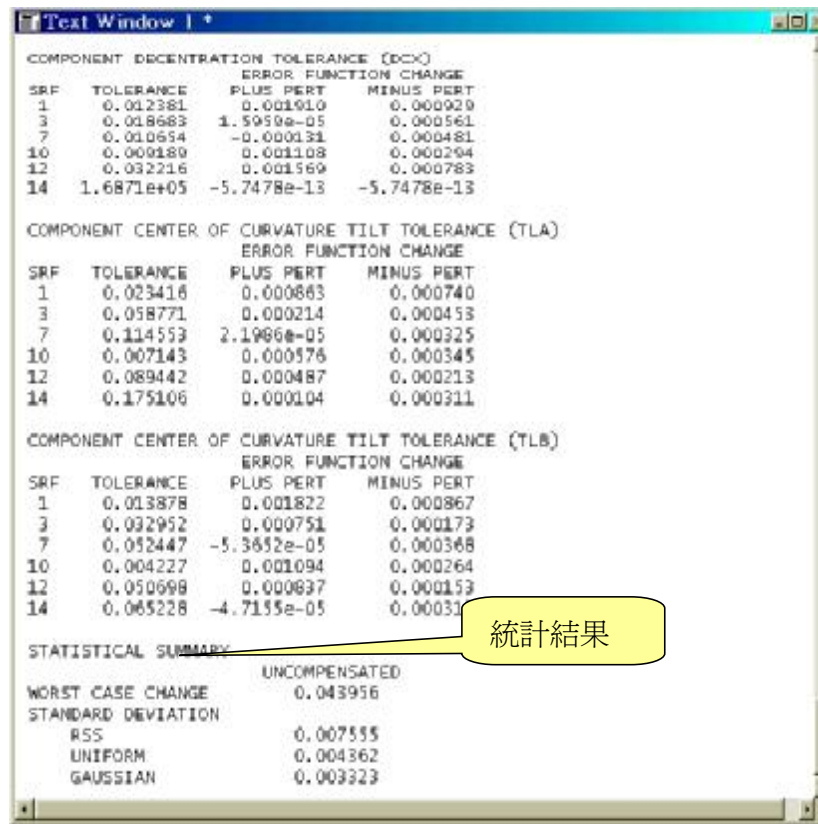


圖 9-21 sensitivity analysis 的輸出

9.現在我們可以從 Text Window, 圖 9-21 中的統計結果來判斷這樣的公差值是否得以被接受, 也就是說各個結構參數在這種程度的誤差之下, 整個系統的成像品質是否能夠維持、影像能夠被 CCD pixels 所辨別。所以, 我們回到 CCD pixel 對於成像斑點大小的要求, 我們知道其限制斑點大小必須小於  $40\ \mu\text{m}$  之內。

由圖 9-20 Text Window 中, 我們得知正常系統的成像斑點之半徑大小(誤差函數值)為  $0.007924\text{mm}$  (因為我們選擇對於成像斑點作分析, 所以誤差函數的意義為成像斑點的半徑。)再看看統計結果中對於成像斑點的標準差分析, 其標準差為  $0.004362\text{mm}$  (如果假設公差為均勻分布), 所以這表示了成像斑點會介於  $0.007924 \pm 0.004362\text{mm}$  的半徑大小內, 而最大的平均範圍為半徑  $12.286\ \mu\text{m}$ , 大約直徑  $24.6\ \mu\text{m}$ , 相較之下小於 CCD pixel 的限制範圍( $40\ \mu\text{m}$ )。因此, 表示我們之前利用 inverse sensitivity analysis 計算後所得到的允許公差值是可以接受的, 此系統的各個結構函數在允許誤差之下, 成像品質仍然可以被接受。

10.如果我們要獲得更大的允許公差則可以進一步利用  $24.6\ \mu\text{m}$  為基準點, 再一次的重覆步驟 3 到步驟 9, 利用 inverse sensitivity analysis 得新的允許誤差, 用 sensitivity analysis 來評估其對成像品質的影響, 並且加以確定允許誤差的範圍。

11.一般而言, 光學製造商會統計其製造商品與元件的允許誤差, 所以我們設計

(2001 年第一版; 僅供教學與研究參考, 請勿作商業用途。)

編者: 許阿娟、何承舫、張國輝、陳志隆

出的光學系統只要能符合製造商給定的允許誤差條件就算成功了。至於如何放寬我們系統的允許誤差來達成製造上的要求, 大致上可以運用”補償器(compensator)”或是減少公差項數來放寬允許誤差。所謂的”補償器(compensator)”就是利用改變最後一個元件的傾角, 或是移動焦平面來調整因為結構參數變動而改變的成像品質。以下為移動焦平面為補償(將成像面設定為補償面, 在主選單上選 Update>>Surface Data, 打開面數據試算表將成像面 IMS 的厚度(thickness)更改為變數(variable) 即可, 參考步驟 8 進行分析) 的分析結果。

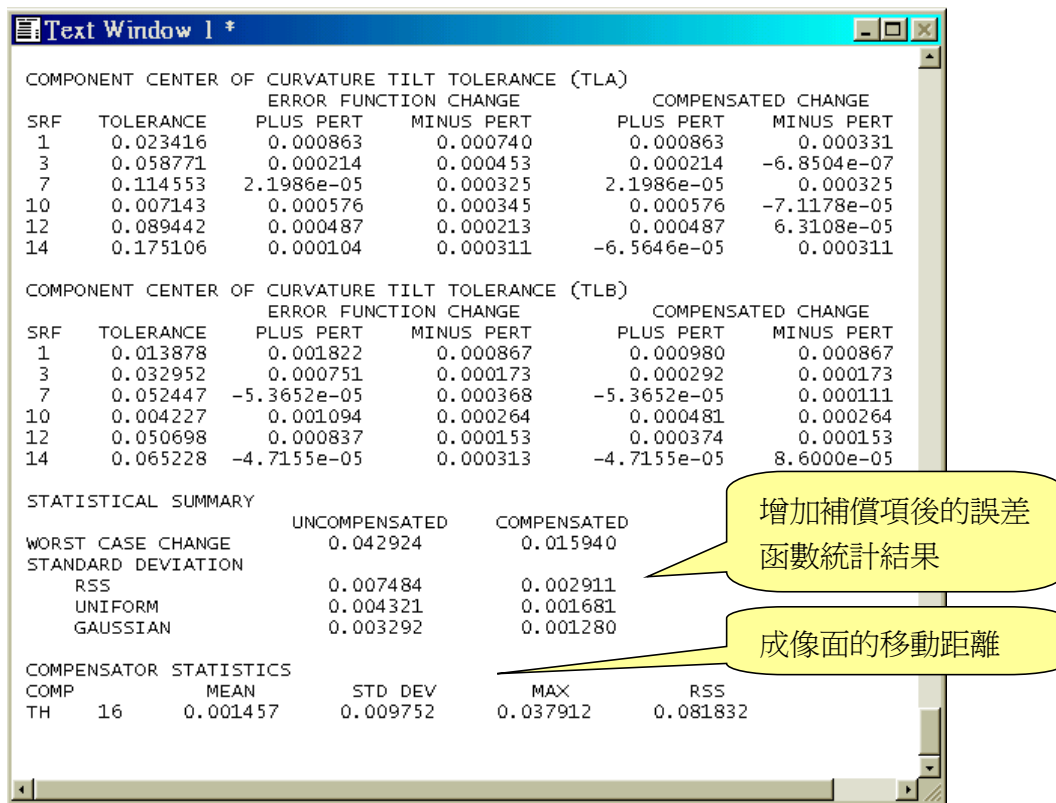


圖 9-22 增加補償項後的 sensitivity analysis 輸出

從圖 9-22 中的統計結果可以看出, 當我們增加補償項之後成像斑點半徑的標準差明顯變小, 也就是說其半徑的變化範圍變小, 最大只有 0.009605mm 即直徑 19 $\mu$ m, 離 CCD pixel 的標準 40 $\mu$ m 還有一段差距, 表示我們還可以放寬系統的允許誤差。

## 參考文獻

1. OSLO version 5 user's guide (Sinclair Optics, 1996) 。
2. OSLO version 5 program reference (Sinclair Optics, 1996)

## 習題

**9-1** 承習題 8-1, 將之前所設之變數取消, 請依照 9-1 頁至 9-3 頁中步驟 2 及步驟 3 的方式對其「元件厚度 (element thickness)」作公差分析。

**9-2** 承習題 8-2, 假設此望遠鏡可容忍的最大成像斑點半徑為  $50\mu\text{m}$ , 系統符合要求的機率必須為 99% :

- (1) 請針對組裝此望遠鏡時各元件的位置, 利用 9-10 頁步驟 3 的公式與表 9-2、表 9-3 推測出其允許誤函數 ( $\Delta\text{Star}$ )。
- (2) 請利用星指令「\*opsettol」、容忍度運算元 OCM1 以及習題 9-2 (1) 所得的結果進行 Inverse sensitivity analysis 與 sensitivity analysis, 分析元件間位置的公差以及其對成像斑點的影響。