

文章编号: 0253-2239(2001)01-0054-05

离轴非球面三反射镜光学系统装调中计算机优化方法的研究

张 斌 韩昌元

(中国科学院长春光学精密机械研究所国家光学机械质检中心, 长春 130022)

摘要: 针对离轴非球面三反射镜光学系统, 采用多视场自准干涉检验, 得到表征系统失调的一系列像差值, 将之作为校正对象, 利用最小二乘优化算法来确定系统的失调量。当失调状态被确定后, 在理论上证明了通过单步校正达到理想装调要求是可行的。理论分析和计算机数值模拟结果表明这种指导装调的方法是行之有效的。

关键词: 计算机辅助装调; 自准干涉检验; 最小乘优化算法; 失调

中图分类号: TH741.4 文献标识码: A

1 引 言

长焦距、大视场、线阵 CCD 推扫式相机的高质量光学系统可采用离轴非球面三反射镜光学系统, 如图 1 所示。

这种光学系统的特点是无中心遮拦, 杂光少, 能量利用率高, 镜面少, 结构紧凑, 在指定的像面上一个狭长的视场光阑范围内的成像质量好。此光学设计结果优于传统的卡塞格林(Cassegrain)和格列果里(Gregorian)光学设计结果。

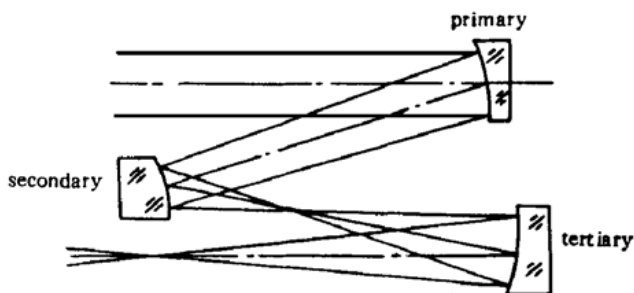


Fig. 1 Three-mirror off-axis aspherical optical design layout

虽然光学表面加工技术的发展已可以制造出面形良好的非球面元件, 光学设计也可以设计出这种比较理想的光学系统, 但是对这种多元件离轴系统的精确装调, 在实践中还未克服其困难。由轴对称元件组成的系统, 可以选择对称轴作为参考轴, 利用高精度对心仪人工地一件件装调, 就可以保证系统

足够的精度。而在离轴三反射镜系统中, 由于第一像面像质不是单独校正好的, 故不能按第一像面像质好坏为标准顺序地调整次镜、第三镜使第二像面像质变好。因此必须直接按第二像面像质同时调整次镜和第三镜。需调整的变数多, 仅根据检测人员的经验, 用随机尝试的方法去调整是不切实际的, 因此需要更有利的方法。

早在 1985 年, 美国的 Santa Barbara 研究中心就致力于大视场、全反射、多频谱望远镜计算机辅助装调技术的研究与应用。在一个与原型系统成比例缩小的实验室光学系统上进行实验, 获得了非常好的结果。波长 λ 为 632.8 nm 时, 整个系统的波像差保持在 0.055λ RMS, 完全满足系统的设计要求。这是以前人工装调所无法达到的^[1]。此后, 美国 Itek 公司、美国加州理工学院喷气推进实验室、美国 Arizona 大学光学中心、法国的 REOSC-SFIM 公司以及以色列光电工业公司也纷纷进行此项技术的研究^[2~4], 并取得了一些令人满意的结果。但是大部分仍限于实验室的研究阶段, 而且其具体方法未做详细的介绍。

本文就是针对焦距为 5 m、口径为 500 mm、视场角为 3° 的离轴三反射镜系统, 将干涉测量与优化技术相结合, 将计算机技术应用于光学系统装调中, 提出了一种行之有效的计算机辅助装调方法。根据已知光学设计数据, 在此方法的指导下, 可以快速、明确地找到系统的失调, 可视、定量、有序地将已加工好的三块非球面离轴镜装调成最佳成像状态。这个研究成果将可应用于其他复杂光学系统装调中。

2 理论分析

计算机辅助装调就是用干涉仪实际测量系统各视场的波像差,利用计算机指导装调过程,使设计的波像差和实测的波像差之差趋于零,达到装调要求,使成像质量最佳并稳定可靠。

2.1 波像差的测量

检验波面、获取数据的装置必须要稳定并易于操作,且输出结果数据有助于系统的优化。在此采用的是自准干涉检验方法,如图 2 所示。

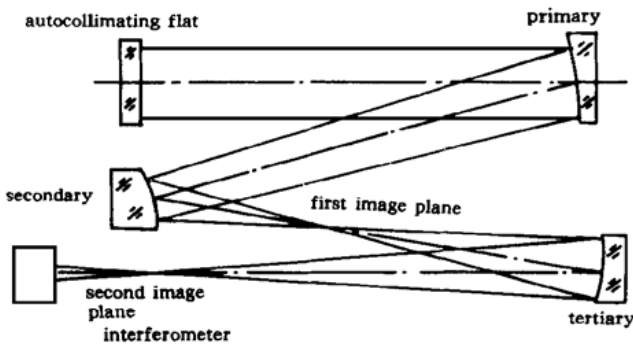


Fig. 2 Autocollimating interferometric test

在光学系统的最终像面(第二像面)放置激光球面干涉仪的会聚光焦点,由干涉仪发出的球面波经相机光学系统后变成平面波射出,在出射波面处放置一块标准平面反射镜用来自准返回该平面波,此波携带了元件的面形误差和系统的装调误差的波像差信息。这时由激光球面干涉仪内部的标准球面参考镜反射的参考光波和这个自准返回的被检光波干涉,产生干涉条纹,得到干涉图。它代表该像点处相机光学系统的波像差。从中可以看出系统失调引入了哪些像差及像差量。由于干涉图处理程序可以算出各视场处相机光学系统的波像差,这个波像差是用以策尼克(Zernike)多项式作为基底函数的线性组合来表示的,从而可以求得策尼克多项式各项的系数。策尼克多项式与常用的塞德尔像差有密切联系。表 1 给出了它们的关系^[5]。

从策尼克多项式中合并出与塞德尔像差有关的具体项:

初级球差有关的项: ρ^4 ,

初级彗差有关的项: $\rho^3 \cos \theta$ 和 $\rho^3 \sin \theta$,

初级像散有关的项: $\rho^2 \cos 2\theta$ 和 $\rho^2 \sin 2\theta$ 。

从每一张干涉图对应的策尼克多项式系数可算出该视场所对应的塞德尔像差的当前值,这些像差值将以一定格式输出,并作为优化的数据输入到优化软件中。

Table 1 The relationship of Zernike polynomials and seidel aberrations (up to fourth power)

n	Zernike polynomial	meaning (seidel aberration)
0	1	constant term
1	$\rho \cos \theta$	tilt in y direction
	$\rho \sin \theta$	tilt in x direction
2	$\rho^2 \cos 2\theta$	astigmatism with axis at 45°
	$2\rho^2 - 1$	focus shift
	$\rho^2 \sin 2\theta$	astigmatism with axis at 0° or 90°
3	$\rho^3 \cos 3\theta$	
	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	third order coma along y axis
	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	third order coma along x axis
4	$\rho^3 \sin 3\theta$	
	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	third order spherical aberration

2.2 系统失调的确定

系统失调的确定也就是优化过程。其目的是使重新调整后的光学系统实测波像差尽可能地接近光学设计的波像差。选择最小二乘法来进行优化。其原理表达式用矩阵表示为:

$$A \Delta X = \Delta F,$$

其中 $\Delta X = X_n - X_{0n}$ 为系统中各片非球面镜需要调整的量,是最小二乘求解的结果。调整变数多,将导致解的振荡。虽然各个镜子的移动是独立的,但在优化中也会有一些不同的自由度相关,并且一个元件调整的量很大,这个件上的误差就明显超出其他变量。这样在最小二乘优化中,即使有完好的数据也不能在有限的迭代中得到良好的解(由于计算机的舍入误差和有限的解空间)。因此必须根据光学系统的结构特性、光学设计数据来分析各调整变量对像差的影响,比较每个变量的作用,选择最敏感、最有效的一些变量,即尽可能用最少的调整来达到要求。一般来说,理想情况下,应一次迭代就收敛,但由于数据中的噪声及调整不当,会使迭代次数增加。

$\Delta F = F_n - F_{0n}$ 为各校正对象的实测值与光学设计值之差,是由当前的光学系统的波像差实测值和光学设计结果数据来确定。校正对象包括影响光学系统特性参数的高斯光学参数和代表系统成像质量的波像差。

A 为灵敏度矩阵,是由光学设计数据、利用公差计算程序确定的已知数据。

3 过 程

首先对光学系统进行粗装调。然后利用自准干涉测量方法检测轴上、轴外各个视场的波像差,得到

每个视场的干涉图。由干涉图处理软件算出各视场的波像差及该波像差对应的策尼克多项式系数,它代表各种像差量。将这些数据以一定格式输入到计算机优化装调软件中,从而可以解出系统的失调,即需调整的预测量,指定各镜面调整的倾斜、偏心、间隔的方向及数量等。一次调整完成,再重新检测波像差,再给出预测量,再重新进行装调。这样一直迭代下去,直到系统符合要求为止。

4 数值模拟及结果

通过现有的光学设计软件进行数值模拟来确定这种辅助装调方法的能力。为此,用光学设计软件,给定某些失调量,算出波像差,用此结果来代替实际装调过程中的干涉测量及数据处理过程。对于这样的离轴三反射镜系统,先将主镜固定好,依它为基准来调整次镜和第三镜。调整的变数为次镜、第三镜在垂直于光轴的 x, y 方向上的偏心和倾斜 $X_2, Y_2, X_3, Y_3, T_{x2}, T_{y2}, T_{x3}, T_{y3}$, 次镜与主镜、次镜与第三镜的轴向间隔 d_1, d_2 。偏心和间隔的单位是毫米,倾斜的单位是度($^\circ$)。这样共取 10 个调整变数。

在精装调过程中,由于高级像差变化不大,只取初级像差作为校正对象控制。而初级像差中色差部分,由于采用了全反射系统而可不用考虑;系统本身的像面弯曲在此过程中不变,所以也不用考虑;畸变在干涉图中反映不出来,故也不考虑。这样,拟选择初级球差 S_1 、初级彗差 S_2 、初级像散 S_3 为校正对象。由于在像面上采用拼接的线阵 TDI CCD 器件接收,所以应保证像面上一个狭长的视场光阑范围内的成像质量都良好。这里选择 5 个视场进行校正。因此校正对象共有 15 个。

由计算机模拟出失调情况,将之引入到光学设计软件中进行计算。假定失调量为主镜与次镜的沿轴间隔 $d_1 = -0.2$ mm, 即比设计值增大了 0.2 mm。根据光学设计数据计算系统波像差,并拟合成策尼克多项式。将这些多项式系数合并成 $S_1 S_2 S_3$ 的表示量,输入装调优化程序中,经计算解出的校正量如表 2 所示。

Table 2 The result of optimization

$d_1 = -0.19988$ mm	$T_{y2} = (4.75 \times 10^{-4})^\circ$
$d_2 = 1.466 \times 10^{-3}$ mm	$X_3 = 2.22 \times 10^{-3}$ mm
$X_2 = 2.6144 \times 10^{-3}$ mm	$Y_3 = 9.57 \times 10^{-3}$ mm
$Y_2 = -1.011 \times 10^{-3}$ mm	$T_{x3} = (6.83 \times 10^{-4})^\circ$
$T_{x2} = (1.6 \times 10^{-4})^\circ$	$T_{y3} = (-4.4 \times 10^{-6})^\circ$

可以明显看出 $d_1 = -0.19988$ mm, 接近 -0.2 mm, 而其他变量变化很小,表明装调软件可以判断系统的失调量,从而指导进行重新装调。

若给定次镜沿 x, y 方向有偏心量 $X_2 = 0.02$ mm, $Y_2 = 0.03$ mm, 这时装调优化程度求解的结果如表 3 所示。

Table 3 The result of optimization

$d_1 = -8 \times 10^{-5}$ mm	$T_{y2} = (2.11 \times 10^{-4})^\circ$
$d_2 = -1.304 \times 10^{-3}$ mm	$X_3 = -1.36 \times 10^{-3}$ mm
$X_2 = 2.148 \times 10^{-2}$ mm	$Y_3 = -1.912 \times 10^{-3}$ mm
$Y_2 = 2.904 \times 10^{-2}$ mm	$T_{x3} = (-2.7 \times 10^{-6})^\circ$
$T_{x2} = (1.98 \times 10^{-4})^\circ$	$T_{y3} = (-1.15 \times 10^{-5})^\circ$

可得出 $X_2 = 0.02148$ mm, $Y_2 = 0.02904$ mm, 接近给定量,而其他量变化很小。此数据可以判断系统的失调量。

若给定次镜沿 x, y 方向既有偏心又有倾斜量 $X_2 = 0.02$ mm, $Y_2 = 0.03$ mm, $T_{x2} = 0.01^\circ$, $T_{y2} = 0.02^\circ$, 也可以判断系统的失调量。其求解结果如表 4 所示。

Table 4 The result of optimization

$d_1 = 5 \times 10^{-5}$ mm	$T_{y2} = (1.967 \times 10^{-2})^\circ$
$d_2 = -1.1 \times 10^{-4}$ mm	$X_3 = -5.8 \times 10^{-3}$ mm
$X_2 = 1.82 \times 10^{-2}$ mm	$Y_3 = 3.37 \times 10^{-4}$ mm
$Y_2 = 3.13 \times 10^{-2}$ mm	$T_{x3} = (2.93 \times 10^{-4})^\circ$
$T_{x2} = (9.7 \times 10^{-3})^\circ$	$T_{y3} = (2 \times 10^{-4})^\circ$

最终判定系统是否调整到最佳状态,必须看调整后的波面形状和波像差是否接近设计值。对于此系统,由光学设计数据可知系统的最佳波面面形如图 3 所示。对波长 632.8 nm, 中心视场(0, 0.3)处的波像差为 0.2965λ 的 P-V 值, 0.056718λ 的 RMS 值, 斯特列尔比是 0.8807。若次镜沿 x, y 方向既有偏心又有倾斜量 $X_2 = 0.02$ mm, $Y_2 = 0.03$ mm, $T_{x2} = 0.01^\circ$, $T_{y2} = 0.02^\circ$ 时, 系统波面明显变坏, 如图 4 所示。中心视场处的波像差变为 0.7865λ 的 P-V 值, 0.14665λ 的 RMS 值, 斯特列尔比是 0.4278。根据装调软件判断的失调量(如表 4), 重新进行调整, 得到系统的改进波面, 如图 5 所示。中心视场处的波像差为 0.3029λ 的 P-V 值, 0.057813λ 的 RMS 值, 斯特列尔比是 0.8764。由调整前和调整后的波面三维图及波像差数据比较可以证明优化结果的准确程度, 用它来指导重新装调是行之有效的。0.7 视场调整前后系统的波面三维图及波像差数据见图 6、图 7、图 8。

RMS;0.056718 waves
Strehl ratio;0.88074

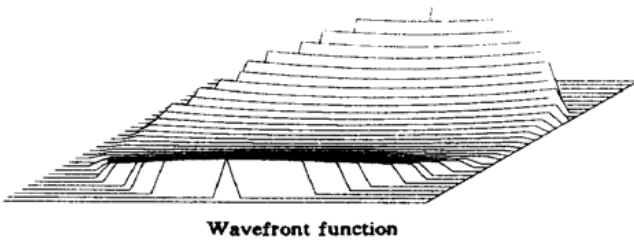


Fig. 3 Wavefront map of perfect system (centric field)

RMS;0.05781 waves
Strehl ratio;0.8764

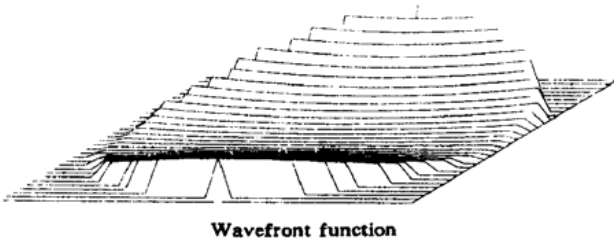


Fig. 5 Wavefront map of post-aligned system (centric field)

RMS;0.2271 waves
Strehl ratio;0.1305

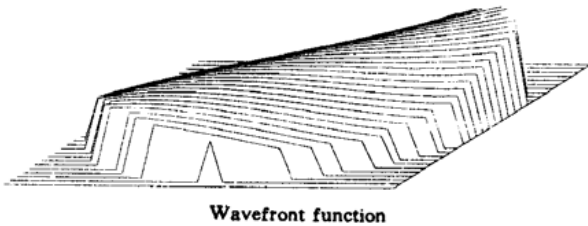


Fig. 7 Wavefront map of pre-aligned system (0.7 field)

RMS;0.14665 waves
Strehl ratio;0.4278

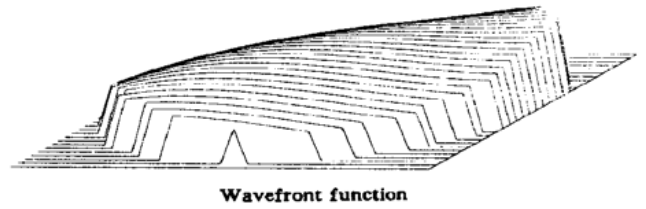


Fig. 4 Wavefront map of pre-aligned system (centric field)

RMS;0.095035 waves
Strehl ratio;0.7001

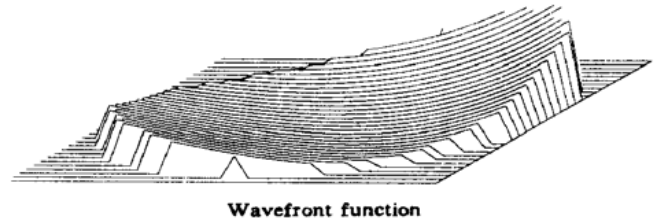


Fig. 6 Wavefront map of perfect system (0.7 field)

RMS;0.09537 waves
Strehl ratio;0.6983

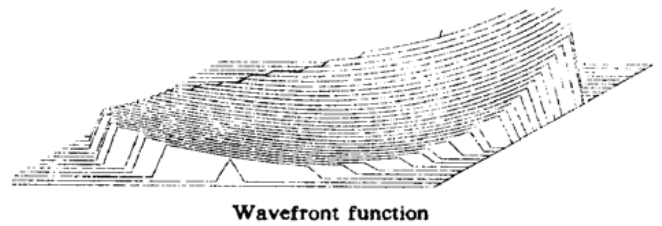


Fig. 8 Wavefront map of post-aligned system (0.7 field)

5 讨 论

由于校正对象和调整变数之间的关系是非线性的,同时光学系统复杂,调整变数很多,很可能若干调整变数之间出现近似相关的现象,这就使矩阵 $A^T A$ 的行列值接近于零, $A^T A$ 接近奇异,按最小二乘求出的解很大,大大超出了近似线性的区域。用它对系统进行修改,往往不能保证评价函数的下降。因此必须对解向量的模进行限制。方法为在灵敏度矩阵主对角线奇异值上增加阻尼因子 P 来抑制最小二乘解。 P 值越大,解的模越小,调整变数与校正对象之间越接近线性。根据实验发现,阻尼因子可以选择为 1,而且可以一个一个地加上去。在每一次增加阻尼后算出的数据中,有一些解是基本不变的,而另一些解的变化则非常大。那些变化大的解就是干扰解,而基本不变的解才是真实解,即系统的失调

量。例如当 $d_1 = 0.2 \text{ mm}$ 、 $d_2 = -0.1 \text{ mm}$ 时,第一次迭代及加阻尼因子的解在表 5 中作了比较。

Table 5 The comparison of the optimization result (units for $d_1, d_2, X_2, Y_2, X_3, Y_3$ are mm, and units for $T_{x2}, T_{y2}, T_{x3}, T_{y3}$ are degree)

iterating for first time	with damping (1)	with damping (1, 1)
$d_1 = 0.20026$	$d_1 = 0.200088$	$d_1 = 0.20007$
$d_2 = -8.79 \times 10^{-2}$	$d_2 = -9.144 \times 10^{-2}$	$d_2 = -9.14 \times 10^{-2}$
$X_2 = -2.093 \times 10^{-2}$	$X_2 = -7.93 \times 10^{-3}$	$X_2 = -8.4 \times 10^{-3}$
$Y_2 = 1.559 \times 10^{-2}$	$Y_2 = 6.32 \times 10^{-3}$	$Y_2 = 6.46 \times 10^{-3}$
$T_{x2} = -2.98 \times 10^{-3}$	$T_{x2} = -1.19 \times 10^{-3}$	$T_{x2} = -1.2 \times 10^{-3}$
$T_{y2} = -3.73 \times 10^{-3}$	$T_{y2} = -1.39 \times 10^{-3}$	$T_{y2} = -1.49 \times 10^{-3}$
$X_3 = -2.278 \times 10^{-3}$	$X_3 = -6.5 \times 10^{-3}$	$X_3 = -6.73 \times 10^{-3}$
$Y_3 = 6.96 \times 10^{-3}$	$Y_3 = 3.39 \times 10^{-3}$	$Y_3 = -9.9 \times 10^{-5}$
$T_{x3} = 9.66 \times 10^{-4}$	$T_{x3} = 3.02 \times 10^{-4}$	$T_{x3} = 5.1 \times 10^{-3}$
$T_{y3} = -5.44 \times 10^{-4}$	$T_{y3} = -9.89 \times 10^{-5}$	$T_{y3} = -7.58 \times 10^{-5}$

由结果可以看出,第一次迭代后, d_1 、 d_2 的变化已能够得出,但是 X_2 、 Y_2 及 X_3 相比较而言也似乎有影响。加阻尼(1)和加阻尼(1,1)后发现, d_1 、 d_2 基本没有大的变化,而 X_2 、 Y_2 及 X_3 的变化却很大,因此知道它们是干扰解,可以将之排除。

结语 计算机辅助装调技术是针对以往光学系统装调中随机成分多、不可视、不定量、装调周期长等缺点所提出的一种新方法。在参考国外有关工作的基础上针对离轴非球面三反射镜光学系统,提出了较简单易行的将干涉测量与计算机优化相结合的辅助装调方法。由自准干涉检验系统5个视场处的波像差,转换为校正对象的塞德尔像差。此数据输入到计算机优化算法中,可以预测出系统装调参数如倾斜、偏心、间隔的大小和方向,从而可以定量地指导装调。进行了理论分析和数值模拟计算,结果证明了此方法指导装调的有效性。

但是各镜面在加工时会有残余误差,并且机械件组装时装夹中镜面的变形也将产生残余误差。这些误差在自准干涉时会与装配失调引入的误差混合在一起,从而干扰装调优化程序,导致失调状态的缓

慢收敛或不收敛,使校正受限。此外,需调整的变化量是微小的位移及角度,而相应的测量和装配调整机构的误差也将影响装调优化的收敛。随着此项技术的不断深入并通过工程实践,将针对这些实际问题进行研究解决。

参考文献

- [1] Figoski J W, Shrode T E, Moore G F. Computer-aided alignment of a wide-field three-mirror, unobscured, high-resolution sensor. *Proc. SPIE*, 1987, **1049**: 166~ 177
- [2] Guire J P M, McGuire J P, Korechoff R P *et al.* Optical alignment and test of Wide-Field/ Planetary Camera. *Proc. SPIE*, 1993, **1996**: 159~ 166
- [3] Leigh D, Freiman D. Computer aided optical system alignment with CODETM. *Proc. SPIE*, 1988, **1038**: 288 ~ 294
- [4] Jeong H J, Lawrence G N, Nahm K B. Auto-alignment of a three-mirror off-axis telescope by reverse optimization and end-to-end aberration measurement. *Proc. SPIE*, 1987, **818**: 419~ 430
- [5] Malacara D. *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, Inc. 1978, Appendix 2

Study on Optimization of Computer-Aided Alignment of a Three-Mirror off-Axis Aspherical Optical System

Zhang Bin Han Changyuan

(National Test Center of Optomechanical Products, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

(Received 14 July 1999; revised 24 September, 1999)

Abstract: Assuming the requirements of optical design and the precision of the optical manufacturing are satisfied, the key of high imaging quality in an optical system is to assure the accuracy of alignment after assembling all the mechanical components. In accordance with a three-mirror off-axis aspherical system, a new way is put forward. Autocollimating interferometric measurement at multi-field of view is used to get a set of aberrations representing the system misalignments. The aberrations are regarded as the revised target. A least-square computer optimization algorithm is used to predict mirror adjustments. Once the misalignment is determined, it is proved the feasibility of correction theoretically. The theoretical and the numerical analysis are given. The results demonstrate the possibility and effectiveness of this computer-aided alignment method.

Key words: computer-aided alignment; Autocollimating interferometry; least-square optimization algorithm; misalignment