

用于太阳米粒图像相关的绝对差分算法和绝对差分平方算法的性能比较

周航成^{1,2,3}, 饶学军^{1,2}, 饶长辉^{1,2*}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在太阳自适应光学系统中, 通常需要利用太阳米粒结构等低对比度扩展目标采用相关算法测量波前误差。在对绝对差分算法和绝对差分平方算法在抛物线插值情况下的测量误差进行了理论分析比较的基础上, 利用实际采集的太阳米粒图像对这两种算法进行了实验验证。分析和实验结果表明, 太阳米粒图像绝对差分平方算法所得到的相关函数相比绝对差分算法更符合抛物面分布。采用抛物线插值时, 绝对差分平方算法的测量精度优于绝对差分算法。

关键词 图像处理; 抛物线插值; 绝对差分算法; 绝对差分平方算法; 太阳米粒图像

中图分类号 TN911.73 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.051004

Performance Comparison of Absolute Difference Function and Absolute Difference Function-Squared Using in Solar Granulation Images

Zhou Hangcheng^{1,2,3}, Rao Xuejun^{1,2}, Rao Changhui^{1,2}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In solar adaptive optics system, the correlation algorithm is commonly used with low contrast extended objects to measure wave-front error. On the basis of theoretical analysis and comparison of measurement error of absolute difference function and absolute difference function-squared using parabolic interpolation, the solar granulation images collected from real scene are used to validate the two algorithms experimentally. The result indicates that the correlation function of absolute difference function-squared better accords with parabolic distribution than the absolute difference function. The measurement accuracy of absolute difference function-squared is better than absolute difference function when using parabolic interpolation.

Key words imaging processing; parabolic interpolation; absolute difference function; absolute difference function-squared; solar granulation images

OCIS codes 100.3008; 110.1080; 110.1085

1 引言

波前传感器(WFS)是自适应光学系统^[1]中重要组成部分之一,其探测精度在很大程度上决定了自适应光学系统的性能。太阳自适应光学(SAO)中,探测目标通常为黑子、米粒等扩展目标,采用相关哈特曼波前传感器(CSHWFS)^[1-2]进行波前误差测量。CSHWFS是利用相关算法^[3-5]进行相对偏移量的计算。

收稿日期: 2016-12-22; 收到修改稿日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(11178004)

作者简介: 周航成(1989—),男,博士研究生,主要从事图像相关算法方面的研究。E-mail: sdoerhang@163.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事太阳自适应光学方面的研究。

E-mail: chrhao@ioe.ac.cn(通信联系人)

常用的相关算法有绝对差分算法(ADF)^[6-8]和相关因子算法(CCC)^[6-7,9]。这两种算法已在很多自适应光学系统^[10-13]中得到应用并取得较好的结果。基于上述两种算法也发展了其他相关算法,主要有平方差算法(SDF)^[14]、协方差算法(CFI)^[15]、绝对差分平方算法(ADF2)^[16]和频域中的协方差算法(CFF)^[17-18]等。

Löfdahl^[16]采用太阳米粒图像对 SDF、ADF2、CFI、CFF 和 ADF 算法进行了比较分析,指出在相同条件下 SDF 算法和 ADF2 算法测量精度相当且优于其他算法,但没有理论分析。

实际系统多采用 ADF 和 CCC 算法,在 SAO 系统^[10,19]中均采用 ADF 算法,根据现有的实验平台,ADF2 算法也较易实现。本文根据太阳米粒图像特征分析了 ADF 和 ADF2 的相关函数分布,并对这两种算法的测量精度进行了分析对比,在此基础上利用实际采集的太阳米粒图像对推导的结果进行了实验验证和性能评价。

2 算法介绍

2.1 差分算法

ADF 的数学公式^[11]为

$$\mathbf{F}_{AD}(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n |I_r(x, y) - I(x + \Delta x, y + \Delta y)|, \quad (1)$$

式中 $I_r(x, y)$ 为参考图像,大小为 $m \times n$, $I(x, y)$ 为实际图像,大小为 $M \times N$,且有 $m < M, n < N$, $\mathbf{F}_{AD}(\Delta x, \Delta y)$ 的最小值对应的位置 $(\Delta x, \Delta y)$ 为参考图像和实际图像的相对偏移量, $\mathbf{F}_{AD}(\Delta x, \Delta y)$ 为算法 ADF 的差分矩阵。

ADF2 的数学公式为^[20]

$$\mathbf{F}_{AD}^2(\Delta x, \Delta y) = \left[\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n |I_r(x, y) - I(x + \Delta x, y + \Delta y)| \right]^2. \quad (2)$$

各物理量含义参考 ADF 算法中的说明, $\mathbf{F}_{AD}^2(\Delta x, \Delta y)$ 为算法 ADF2 的差分矩阵。

2.2 抛物线插值

实际中采集的图像都是离散的,利用相关算法只能得到整像素偏移量,整像素级别的测量往往不能满足,这就需要对整像素偏移量进行插值,得到精度更高的亚像素偏移量^[21]。SAO 中常用曲线插值获得亚像素偏移量,主要包括抛物线插值、最小二乘法插值、高斯插值^[22]等,最常用的插值算法为抛物线插值。对于一维抛物线插值, x 和 y 方向上的亚像素估计偏移量分别为

$$x' = -\frac{1}{2} \frac{S_{1,0} - S_{-1,0}}{S_{1,0} - 2S_{0,0} + S_{-1,0}}, \quad (3)$$

$$y' = -\frac{1}{2} \frac{S_{0,1} - S_{0,-1}}{S_{0,1} - 2S_{0,0} + S_{0,-1}}, \quad (4)$$

式中 $S_{i,j}$ 分别为差分矩阵 \mathbf{S} 在峰值邻近区域幅值。

3 ADF 与 ADF2 算法测量误差比较

根据最小二乘法基本思想,如果在利用抛物线插值时,计算得到的误差方差量越小,对应算法测量精度越高,反之则越低。

考虑 x 方向,取抛物线插值公式中的亚像素估计项,如(3)式所示。

假设某条抛物线经过差分矩阵中 x 方向上最小值邻近区域的三个元素,如图 1 所示三种情形,即

1) $S_{1,0} > S_{-1,0}$ 时,如图 1(a)情形所示抛物线分布,有

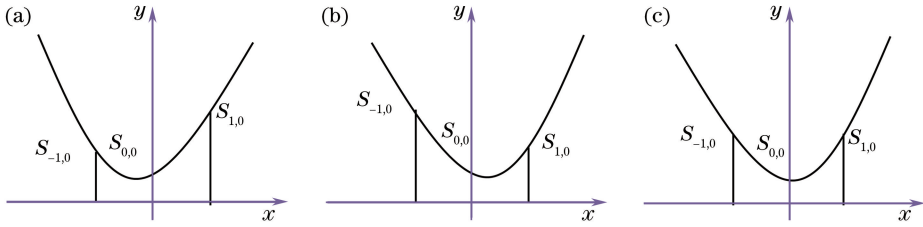
$$\frac{S_{1,0} - S_{-1,0}}{S_{1,0} - 2S_{0,0} + S_{-1,0}} > 0. \quad (5)$$

2) $S_{1,0} < S_{-1,0}$ 时,如图 1(b)情形所示抛物线分布,有

$$\frac{S_{1,0} - S_{-1,0}}{S_{1,0} - 2S_{0,0} + S_{-1,0}} < 0. \quad (6)$$

3) $S_{1,0} = S_{-1,0}$ 时,如图 1(c)情形所示抛物线分布,有

$$\frac{S_{1,0} - S_{-1,0}}{S_{1,0} - 2S_{0,0} + S_{-1,0}} = 0. \quad (7)$$

图1 抛物线插值在 x 方向上不同差分矩阵峰值分布情形。(a) $S_{1,0} > S_{-1,0} > S_{0,0}$; (b) $S_{-1,0} > S_{1,0} > S_{0,0}$; (c) $S_{-1,0} = S_{1,0} > S_{0,0}$ Fig. 1 Different situation of parabola interpolation with x axis around $S_{0,0}$.(a) $S_{1,0} > S_{-1,0} > S_{0,0}$; (b) $S_{-1,0} > S_{1,0} > S_{0,0}$; (c) $S_{-1,0} = S_{1,0} > S_{0,0}$

ADF 和 ADF2 计算所得差分矩阵中各元素幅值非负,综合(5)~(7)式可知,亚像素估计项同号,即

$$S_{ADF} \cdot S_{ADF2} \geq 0, \quad (8)$$

式中 S_{ADF} 和 S_{ADF2} 分别为 ADF 算法和 ADF2 算法经过抛物线插值得到的亚像素项,等号在图 1(c)情形时取得,实际中图 1(c)情形一般不满足。

且有下列式成立:

$$|S_{ADF}| < |S_{ADF2}|. \quad (9)$$

对(9)式简单证明如下:

$$|S_{ADF}| = \left| \frac{1}{2} \frac{S_{1,0} - S_{-1,0}}{S_{1,0} - 2S_{0,0} + S_{-1,0}} \right|, \quad (10)$$

式中 $S_{1,0}$ 、 $S_{0,0}$ 、 $S_{-1,0}$ ($S_{0,0} < S_{1,0}$, $S_{0,0} < S_{-1,0}$) 为 ADF 算法得到的差分矩阵峰值 x 方向上的元素,ADF2 算法得到的差分矩阵峰值 x 方向上元素为 ADF 中的相应元素的平方,即 $S_{1,0}^2$ 、 $S_{0,0}^2$ 、 $S_{-1,0}^2$ 。为了比较 $|S_{ADF}|$ 与 $|S_{ADF2}|$ 的大小,两式相除($S_{1,0} \neq S_{-1,0}$),可得

$$\frac{|S_{ADF}|}{|S_{ADF2}|} = \left| \frac{S_{1,0} + S_{-1,0} - 2S_{0,0}}{S_{1,0}^2 + S_{-1,0}^2 + 2S_{-1,0}S_{1,0} - 2S_{0,0}S_{1,0} - 2S_{0,0}S_{-1,0}} \right| = \left| \frac{A_1}{A_2} \right|, \quad (11)$$

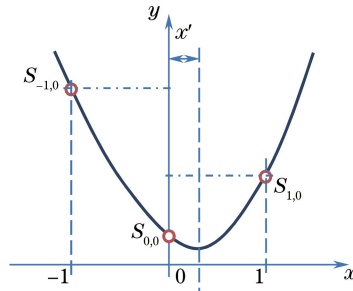
$$A_1 - A_2 = (S_{0,0} - S_{-1,0})(S_{1,0} - S_{0,0}) < 0. \quad (12)$$

综上所述:

$$\frac{|S_{ADF}|}{|S_{ADF2}|} < 1. \quad (13)$$

设实际图像 $I(x, y)$ 与参考图像 $I_{ref}(x, y)$ 的相对偏移量为 (b, b) , b 为实数,实际中 b 是未知的,但它总是可以分解为整像素与亚像素之和,整像素往往可以通过差分矩阵峰值坐标给出,亚像素为需要估计的量。根据差分矩阵可以得到极小值对应整像素坐标,设为 (k, k) 。假设抛物线插值得到的计算相对偏移量为 (b', b') ,则计算相对偏移量 (b', b') 与整像素相对偏移量 (k, k) 的绝对差值不大于 0.5 pixel,证明如下:取图 1(b)情形,抛物线的亚像素估计项满足

$$|x'| = |b' - k|, \quad (14)$$

图2 图 1(b)情形时有 $S_{0,0} < S_{1,0} < S_{-1,0}$ Fig. 2 Situation in Fig. 1 (b) with $S_{0,0} < S_{1,0} < S_{-1,0}$

为了求得 x' 的取值范围,把(3)式中 $S_{0,0}$ 和 $S_{-1,0}$ 看作常量, $S_{1,0}$ 为变量,则满足图 2 中情形的 $S_{1,0}$ 变化区间为 $(S_{0,0}, S_{-1,0})$, (3)式对变量 $S_{1,0}$ 求导得

$$\frac{dx'}{dS_{1,0}} = -\frac{S_{-1,0} - S_{0,0}}{(S_{-1,0} - 2S_{0,0} + S_{1,0})^2} < 0. \quad (15)$$

这说明抛物线插值亚像素项 x' 随变量 $S_{1,0}$ 在区间 $(S_{0,0}, S_{-1,0})$ 上是单调递减函数,有极限:

$$\lim_{S_{1,0} \rightarrow S_{0,0}} x' = \frac{1}{2}, \quad (16)$$

$$\lim_{S_{1,0} \rightarrow S_{-1,0}} x' = 0, \quad (17)$$

得到 x' 的取值范围为 $(0, 0.5)$ pixel。同理可以求得图 1(a)情形的 x' 取值范围为 $(-0.5, 0)$ pixel,图 1(c)情形中 $S_{1,0} = S_{-1,0}$, 必然有 $x' = 0$ 。综上可知 $|x'| \leq 0.5$, 因此,实际中经过抛物线插值算法得到的亚像素偏移量满足

$$0 < |x'| < 0.5. \quad (18)$$

算法 ADF 和 ADF2 通过抛物线插值得到的计算偏移量分别为 $b_1 = k + S_{ADF}$ 和 $b_2 = k + S_{ADF2}$, 则计算偏移量误差方差分别为

$$R_{ADF} = (b_1 - b)^2 = (k + S_{ADF} - b)^2, \quad (19)$$

$$R_{ADF2} = (b_2 - b)^2 = (k + S_{ADF2} - b)^2. \quad (20)$$

两式相减有

$$R_{ADF} - R_{ADF2} = (S_{ADF} - S_{ADF2}) (2k - 2b + S_{ADF} + S_{ADF2}), \quad (21)$$

真实偏移量为 b , 对应整像素偏移量为 $k (b \neq k)$, 则实际亚像素项为 $x_{sub} = b - k$, 且满足 $-0.5 < x_{sub} < 0.5$ 。

1) 当 $0 < x_{sub} < 0.5$ 时, 有 $0 < S_{ADF}, S_{ADF2} < 0.5$ 。

由(6)、(8)和(9)式可得(21)式中第一项, 即

$$S_{ADF} - S_{ADF2} < 0, \quad (22)$$

(21)式中第二项, 即

$$2k - 2b + S_{ADF} + S_{ADF2} = (S_{ADF} - x_{sub}) + (S_{ADF2} - x_{sub}). \quad (23)$$

抛物线插值是多项式插值的一种, November 等^[23]指出抛物线插值的最高次数为 2, 理论上能够获得较其他次数下多项式更好的结果。Löfdahl^[22]对基于抛物线插值下 ADF 和 ADF2 算法计算得到的相对偏移量与实际相对偏移量的误差进行了统计分析, 其误差结果服从正弦分布。Shimizu 等^[24]也对基于抛物线插值算法下各相关算法的误差量进行了详细分析, 结果表明: 当真值为 $(0.5n, 0.5n + 0.5)$ pixel 且 n 为偶数时, 利用抛物线插值会得到比真值过低的估计偏移量; 在实际亚像素偏移量为 $(0.5n, 0.5n + 0.5)$ pixel 范围内且 n 为奇数时, 利用抛物线插值会得到比真值过高的估计偏移量。

根据上面分析及实际亚像素偏移量取值范围可知, 抛物线插值得到亚像素偏移量过低估计实际亚像素偏移量, 则

$$S_{ADF} - x_{sub} < 0, \quad (24)$$

$$S_{ADF2} - x_{sub} < 0, \quad (25)$$

代入(23)式中可得

$$2k - 2b + S_{ADF} + S_{ADF2} < 0, \quad (26)$$

将(22)和(26)式代入(21)式可得

$$R_{ADF} - R_{ADF2} > 0. \quad (27)$$

2) 当 $-0.5 < x_{sub} < 0$ 时, 有 $-0.5 < S_{ADF}, S_{ADF2} < 0$ 。

由(6)、(8)和(9)式可得(21)式中第一项, 即

$$S_{ADF} - S_{ADF2} > 0, \quad (28)$$

同 1) 中分析, 此时利用抛物线插值得到亚像素估计量过高估计真值, 则

$$2k - 2b + S_{ADF} + S_{ADF2} > 0, \quad (29)$$

将(28)和(29)式代入(21)式可得

$$R_{ADF} - R_{ADF2} > 0. \quad (30)$$

综上所述,基于抛物线插值下,ADF2 算法测量精度高于 ADF 算法测量精度,或者说 ADF2 算法相对于 ADF 算法更符合抛物线插值。

4 太阳米粒图像模拟计算实验结果

4.1 图像数据

选用中国科学院光电技术研究所 2014 年于云南天文台 1 m 新真空太阳望远镜采集的 705 nm 波段远场米粒图像为原始数据源(共 70 帧连续远场米粒图像,大小为 2560 pixel×2160 pixel),像素分辨率为 0.071"/pixel。每帧远场图像中选出 6 幅米粒图像(红线区域部分,每幅图像大小为 500 pixel×500 pixel),图 3 和图 4 分别为某帧远场图像及其中 4 幅米粒图像。

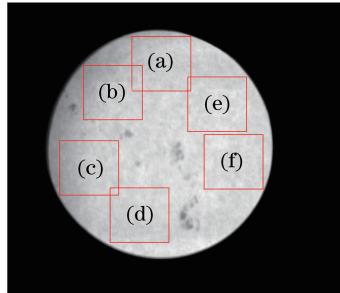


图 3 实际采集的远场米粒图像

Fig. 3 Actual collected far field granulation image

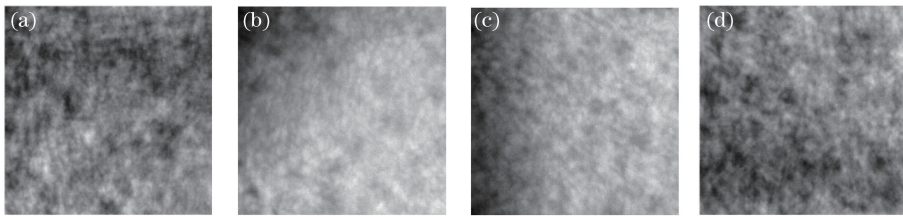


图 4 远场图像中所选出不同区域的米粒图像

Fig. 4 Granulation images of different regions from the far field images

利用上面方法共选出 $6 \times 70 = 420$ 帧米粒图像,根据文献[6]中对比度的定义,即

$$\gamma = \frac{(\Delta I)_{\text{rms}}}{I_m} \times 100\%, \quad (31)$$

式中 $(\Delta I)_{\text{rms}}$ 为图像强度起伏均方根值, I_m 为图像强度均值。利用(31)式计算各帧米粒图像对比度,选取其中 410 帧图像,平均对比度约为 3.5%。

4.2 采样率变化

图像采样率变化的目的是获得可控的实际相对偏移量,由于篇幅的限制,这里只给出了采样率为 10 pixel×10 pixel 的结果。对 410 帧米粒图像进行重采样,并从每帧图像选出 21 组偏移量各不相同的参考图像,各参量如表 1 和表 2 所示。

表 1 采样率为 10 pixel×10 pixel 时的实际相对偏移量

Table 1 Real relative offset with sampling rate of 10 pixel×10 pixel

Data type	Δr /pixel
Original image	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20
Resampling image	0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1,1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9,2

由表 1 可知,原始图像中两幅图像的相对偏移量 Δr 假如取 2 pixel,则经过 10 pixel×10 pixel 像素合并后,其相对偏移量变为 0.2 pixel,其他偏移量可以类似得到。

表 2 采样率为 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 时仿真模拟计算条件变化情况
Table 2 Different simulation conditions with sampling rate of $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$

Data type	Original size / (pixel \times pixel \times pixel)	Resolution / ("/pixel)	Size of ref. image and corresponding real image / (pixel \times pixel)
Original image	$500 \times 500 \times 410$	0.071	$160 \times 160 (320 \times 320)$
			$240 \times 240 (400 \times 400)$
			$300 \times 300 (500 \times 500)$
Resampling image	$50 \times 50 \times 410$	0.710	$16 \times 16 (32 \times 32)$
			$24 \times 24 (40 \times 40)$
			$30 \times 30 (50 \times 50)$

表 2 中给出像素合并前后不同大小的参考图像,考虑到其动态范围,也给出各参考图像大小下对应的窗口图像大小。

图 4 中远场米粒图像经过 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 像素合并后变为图 5 所示图像,大小都为 $50 \text{ pixel} \times 50 \text{ pixel}$ 。

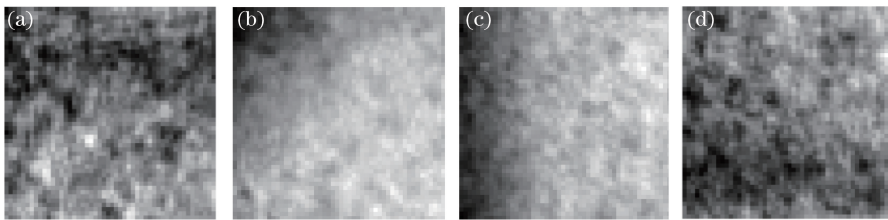


图 5 图 4 经像素合并后示意图

Fig. 5 Results of image using pixel combination from Fig. 4

4.3 判断准则

在前面理论推导中,根据误差方差对 ADF 与 ADF2 的测量精度进行了比较,在误差方差基础上并根据文献[25],给出下面判断准则。

设有实际相对偏移量为 (p, q) ,根据差分算法求得该实际相对偏移量的估计值(考虑 x 方向),共 N 个 (N 帧图像,每帧图像中都对应应有相同的相对偏移量),假设为 $P(i), i=1, 2, 3, \dots, N$ 。利用均方根误差对估计方法进行评价,考虑 x 方向(y 方向上可类似得到),该评价方法表达式为

$$E_{\text{error}}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [P(k, i) - p(k)]^2, \quad (32)$$

式中 k 为实际相对偏移量数目,4.2 节中已经提到实际相对偏移量数目为 21,所以 $k=1, 2, \dots, 21, i$ 为某个实际相对偏移量下对应的计算偏移量数目, $i=1, 2, \dots, N (N=410)$, p 为实际相对偏移量(表 1), P 为计算相对偏移量。

4.4 模拟计算结果

图 6 中给出 ADF 与 ADF2 算法在不同相对偏移量下均方误差的比较结果,其中 1QI 表示一维抛物线

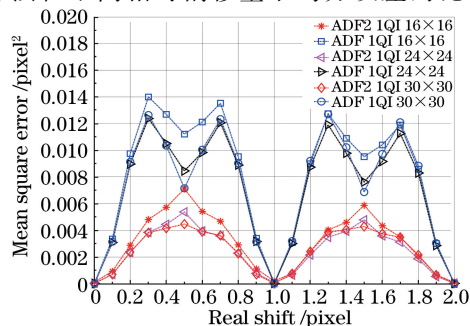


图 6 不同参考大小时 ADF 和 ADF2 算法的均方误差

Fig. 6 Mean square error of ADF and ADF2 under different reference sizes

插值。当参考图像大小相同时,不同偏移量下的 ADF2 算法均方误差都小于 ADF 算法均方误差,据此可判断 ADF2 算法的测量精度高于 ADF 算法。图 6 中还可以看出在不同参考图像大小时,相同算法下的均方误差曲线有所差异,且参考图像尺寸越大,得到的均方误差相对越小,本文并没有对参考图像大小变化引起的测量精度变化进行详细讨论。

5 结 论

介绍了 SAO 中所常用的 ADF 算法及其扩展 ADF2 算法,通过引入抛物线插值,对两种算法基于一维抛物线插值算法下的测量误差进行了比较分析,证明了 ADF2 算法相关函数更符合抛物线插值。从而说明 ADF2 算法的差分矩阵分布比 ADF 算法的差分矩阵分布在抛物线插值下更适合求取实际相对偏移量。

利用实际采集远场米粒图像对上述结论进行模拟计算验证,引入随机过程中的均方误差不仅能够单独对每个偏移量进行评价,而且也能对不同条件下的结果进行评价。

有必要指出,本文主要针对抛物线插值算法进行误差分析而没有深入地考虑其他因素所带来的影响;对于差分算法 ADF 的其他形式优劣没有进行深入的分析;对于参考目标扩展度也没深入的讨论和分析;ADF 算法和 ADF2 算法的差分矩阵分别对应适合哪种曲线插值没有进行深入的分析,而是针对同种插值方法判断两种算法谁更适合。这些因素的影响将会在以后的工作中进行讨论和分析。

致谢 感谢中国科学院光电技术研究所的姜文汉院士对本文的修改和指导,感谢田雨、马晓焯和郭友明等同志对本文工作的大力支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] Rimmele T R, Marino J. Solar adaptive optics[J]. *Living Rev Sol Phys*, 2011, 8(2): 30-31.
- [2] Rimmele T R, Radick R R. Solar adaptive optics at the national solar observatory[C]. *Proc SPIE*, 1998, 3353: 72-81.
- [3] Wirth A, Ruquist R. Adaptive optical correction for extended source imaging[C]. *Proc SPIE*, 1986, 551: 127-130.
- [4] Rimmele T R. Solar adaptive optics[C]. *Proc SPIE*, 2000, 4007: 218-231.
- [5] Rimmele T R. Recent advances in solar adaptive optics[C]. *Proc SPIE*, 2004, 5490: 34-46.
- [6] Rao Changhui, Jiang Wenhan, Ling Ning. Tracking algorithm for low contrast extended object[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2001, 42(3): 329-338.
饶长辉, 姜文汉, 凌 宁. 低对比度扩展目标跟踪算法[J]. *天文学报*, 2001, 42(3): 329-338.
- [7] Rao Changhui, Zhang Xuejun, Jiang Wenhan. Simulation study on correlating Hartmann-Shack wavefront sensor for solar granulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(3): 285-289.
饶长辉, 张学军, 姜文汉. 太阳米粒结构相关哈特曼-夏克波前传感模拟研究[J]. *光学学报*, 2002, 22(3): 285-289.
- [8] Peng X F, Li M, Rao C H. Architecture design of FPGA-based wavefront processor for correlating Shack-Hartmann sensor[C]. *Proc SPIE*, 2008, 7156: 71561B.
- [9] von der Lühe O. A study of a correlation tracking method to improve imaging quality of ground-based solar telescopes [J]. *Astron Astrophys*, 1983, 119(1): 85-94.
- [10] Zhu L, Gu N T, Chen S Q, *et al.* Real time controller for 37-element low-order solar adaptive optics system at 1 m new vacuum solar telescope[C]. *Proc SPIE*, 2012, 8415: 84150V.
- [11] Miura N, Yokoyama F, Nefu M, *et al.* Optical setup and wavefront sensor for solar adaptive optics at the domeless solar telescope, Hida observatory[C]. *Proc SPIE*, 2010, 7736: 773654.
- [12] Cao W, Gorceix N, Coulter R, *et al.* Scientific instrumentation for the 1.6 m new solar telescope in big bear[J]. *Astron Nachr*, 2010, 331(6): 636-639.
- [13] Lukin V, Botygina N, Emaleev O, *et al.* Wavefront sensors for adaptive optical systems [J]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2008, 44(4): 377-383.
- [14] Poyneer L A. Scene-based Shack-Hartmann wave-front sensing analysis and simulation[J]. *Appl Opt*, 2003, 42(29): 5807-5815.
- [15] Hardy J W, Hudgin R H. A comparison of wavefront sensing systems[C]. *Technical Symposium East*, 1978, 141: 67-73.

- [16] Löfdahl M G. Evaluation of image-shift measurement algorithms for solar Shack-Hartmann wavefront sensors[J]. *Astron Astrophys*, 2010, 524: A90.
- [17] von der Lühe O, Widener A L, Rimmele T, *et al*. A solar feature correlation tracker for ground-based telescopes[J]. *Astron Astrophys*, 1989, 224: 351-360.
- [18] Zeng Renchang, Liu Xiaohua, Hu Xinqi, *et al*. Frequency-domain iterative algorithm for extended scene Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0701006.
曾仁昌, 刘晓华, 胡新奇, 等. 扩展目标夏克-哈特曼波前传感器的频域迭代算法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0701006.
- [19] Rao C H, Zhu L, Rao X J, *et al*. 37-element solar adaptive optics for 26-cm solar fine structure telescope at Yunnan astronomical observatory[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(10): 966-968.
- [20] Jiang A, Ye B, Sun J, *et al*. Correlation tracker system for space solar telescope[C]. *Proc SPIE*, 2003, 4839: 307-311.
- [21] Tian Q, Huhns M N. Algorithm for subpixel registration[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1986, 35(2): 220-233.
- [22] 陈林辉. 用于点源目标哈特曼波前探测的相关算法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2011: 47-48.
- [23] November L J, Simon G W. Precise proper-motion measurement of solar granulation[J]. *Astrophys J*, 1988, 333(1): 427-442.
- [24] Shimizu M, Okutomi M. Sub-pixel estimation error cancellation on area-based matching[J]. *Int J Comput Vision*, 2005, 63(3): 207-224.
- [25] Yang Fusheng. Random signal analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990: 142-143.
杨福生. 随机信号分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 142-143.