

文章编号: 0253-2239(2008)06-1117-07

基于标准互相关函数的图像分辨率自动标定方法

孙明磊¹ 宗光华¹ 董代² 石晶欣¹

(¹ 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083; ² 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039)

摘要 理想规则图像特征经标准互相关函数匹配后, 相似函数 $C^*(x)$ 可用确定的解析式 $Z(x)$ 表达。但是对于含噪声图像, 相似函数 $C(x)$ 较之 $C^*(x)$ 发生了变化, 但存在“零相似不变性”。将此原理应用于显微视觉中图像物面分辨率的在线标定, 推导了矩形图像特征的一维相似函数解析式 $Z(x)$; 求解 $C(x)=0$ 作为 $Z(x)$ 的近似, 并给出了具体标定算法; 通过仿真图像实验, 给出标定算法的正确度在 $0.1\sim 0.2$ pixel; 最后, 将标定算法应用于可连续变焦的微对准装配系统, 实测算法的精密度可达 0.08 pixel。实验结果表明, 基于“零相似不变性”的标定算法是具有实用性的亚像素标定方法。

关键词 信息光学; 显微视觉; 图像; 标定; 标准互相关

中图分类号 TP242.6⁺2 **文献标识码** A

A Method of Image Resolution Calibration for Automatic Microscopic Zooming Based on NCCO

Sun Minglei¹ Zong Guanghua¹ Dong Dai² Shi Jingxin¹

¹ School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China
² Beijing Aerospace Control Device Institute, Beijing 100039, China

Abstract Pattern matching tool of normalized cross correlation operator (NCCO) computation $C^*(x)$ for ideal images can be determined by analytical expression $Z(x)$. Compared with $C^*(x)$, $C(x)$ of NCCO matching between images containing noise shows a little difference. But there is a property of zero similarity invariance (ZSI). A method of image resolution calibration in microscopic vision was proposed. Firstly, similarity functions of rectangular feature in x direction $Z(x)$ were derived and proved. Then $C(x)=0$ was solved as an approximation of solution of $Z(x)$. The detailed ZSI based calibrating algorithm was illuminated. The results of simulating image experiments show that the calibration accuracy of the algorithm can reach $0.1\sim 0.2$ pixel. Finally, the practical experiments were conducted on a hybrid microassembly workcell. Experimental results show that the calibration precision of the algorithm can reach 0.08 pixel. The ZSI based calibrating algorithm is a method with practical value and subpixel precision.

Key words information optics; microscopic vision; image; calibration; normalized cross correlation

1 引 言

显微视觉中存在两个基本矛盾, 分辨率高, 则景深小, 要求大景深, 需降低分辨率; 分辨率(放大倍数)高, 则视场小, 要求大视场, 需降低分辨率。这种分辨率是指对光学图像最小细节的分辨能力, 通常需要通过标定实验对图像的物面分辨率进行准确标

定^[1]。仅具有单一或有限的放大倍数的显微视觉系统较容易标定, 但是传统标定方法难以胜任针对多尺度对象的微操作信息标定。对于能够“连续变焦”的显微视觉光路, 依靠有限的标定实验获取空间位置参量不够现实。理想的办法是找到一种实用的自标定方法, 或者建立放大倍数与图像物面分辨率之

收稿日期: 2007-09-07; 收到修改稿日期: 2008-01-03

基金项目: 国家 863 计划(2004AA404260)和中国博士后科学基金(20070420287)资助课题。

作者简介: 孙明磊(1974—), 男, 博士后, 主要从事显微视觉、微机器人技术等方面的研究。

E-mail: sunminglei@gmail.com

间的数学模型。

本文从推导规则图像特征的标准互相关函数(Normalized cross correlation operator, NCCO)匹配入手,在得到了标定特征相似函数解析形式的基础上,利用“零相似不变性”原理对图像物面分辨率自动标定方法展开了研究。

2 算法理论基础

设 \mathbf{I}^* 是大小为 $u \times v$ 的目标灰度图像; \mathbf{T} 是大小

为 $m \times n$ 的匹配模板灰度图像阵列。 \mathbf{I}^* 与 \mathbf{T} 均为只包含两种灰度的二值图像。

设 \mathbf{T} 中包含 n_{th} 个灰度值为 g_{th} 的像素构成了图像特征,同时由 n_{tl} 个灰度值为 g_{tl} 的像素构成了图像背景。 \bar{T} 表示图像 T 的平均灰度值。 I_{xy} 是 I 在任意位置 (x, y) 子图,其大小为 $m \times n$; 设 I_{xy} 中包含 n_{oh} 个灰度值为 g_{oh} 的像素构成了图像特征,同时包含 n_{ol} 个灰度值为 g_{ol} 的像素构成了图像背景。以 \bar{I}_{xy} 表示子图的平均灰度。对于标准互相关函数^[2]

$$C(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{ [I_{xy}(i, j) - \bar{I}_{xy}] \cdot [T(i, j) - \bar{T}] \}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [I_{xy}(i, j) - \bar{I}_{xy}]^2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [T(i, j) - \bar{T}]^2}}, \quad (1)$$

令 n_1, n_2, n_3, n_4 分别表示为 $n_{ol}n_{tl}, n_{ol}n_{th}, n_{tl}n_{oh}$ 及 $n_{oh}n_{th}$ 四种乘积形式出现的频数,并有

$$n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = mm, \quad (2)$$

有二值图像的标准互相关函数计算式^[3]

$$Z(x, y) = \frac{\Phi}{\Psi} = \frac{n_1 n_{ol} n_{tl} - n_2 n_{ol} n_{th} - n_3 n_{oh} n_{tl} + n_4 n_{oh} n_{th}}{mm \sqrt{n_{oh} n_{ol} n_{th} n_{tl}}}. \quad (3)$$

标定图像在 x 向的物面分辨率,如图 1 所示。图 1(a) 为模板图像 \mathbf{T} , 特征参量 c 为已知; 图 1(b) 为目标图像 \mathbf{I}_{xy} , 特征参量 a 为未知。对二者进行一维标准互相关匹配, 图 2 给出了利用(1)式计算的相似函数曲线 $C(x)$ 。图 2(a) 为 $a = c$ 的特殊情况; 图 2(b)、图 2(c) 概括了 $a > c$ 的两种情况。可依据(3)式, 求解 $Z_1(x)$ [参见图 1(c)], $Z_4(x)$ 及 $Z_5(x)$ [参见图 1(d)], $Z_2(x)$ 、 $Z_3(x)$ [参见图 1(e)] 的理论表达式。

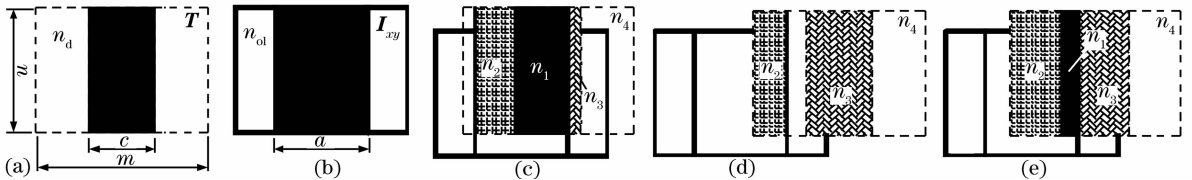


图 1 理想模板图像与目标图像。(a) 模板图像, (b) 目标图像, (c) 求解 $Z_1(x)$, (d) 求解 $Z_4(x)$ 、 $Z_5(x)$, (e) 求解 $Z_2(x)$ 、 $Z_3(x)$

Fig. 1 Ideal template images and target image. (a) Template image, (b) target image, (c) solving $Z_1(x)$, (d) solving $Z_4(x)$ and $Z_5(x)$, (e) solving $Z_2(x)$ and $Z_3(x)$

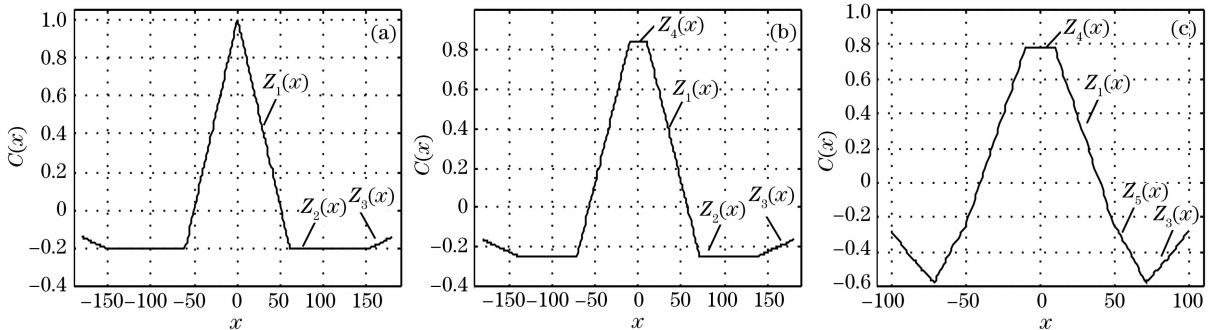


图 2 理想图像标准互相关函数匹配的相似函数。(a) $a = c$, (b) $a > c$, (c) $a > c$

Fig. 2 Computation results of NCCO on simulating template image and target image in one dimension.

(a) $a = c$, (b) $a > c$, (c) $a > c$

对于 $Z_1(x)$, 有

$$\begin{cases} n_{\text{oh}} = an, \\ n_{\text{th}} = cn, \\ n_{\text{ol}} = mn - an, \\ n_{\text{tl}} = mn - cn, \\ n_1 = (an + cn - 2nx)/2, \\ n_2 = (an - cn + 2nx)/2, \\ n_3 = (cn - an + 2nx)/2, \\ n_4 = [2mn - (an + cn + 2nx)]/2, \end{cases}$$

从而

$$\begin{cases} \Phi = \frac{mm^3}{2}(am + cm - 2ac - 2mx), \\ \Psi = mn^3 \sqrt{ac(m-a)(m-c)}, \end{cases}$$

根据(3)式, 得到

$$z_1(x) = \frac{am + cm - 2ac}{2 \sqrt{ac(m-a)(m-c)}} - \frac{m}{\sqrt{ac(m-a)(m-c)}}x, \quad (4)$$

对于 $Z_2(x)$, 有

$$\begin{cases} n_{\text{oh}} = an, & n_1 = 0, \\ n_{\text{th}} = cn, & n_2 = an, \\ n_{\text{ol}} = mn - an, & n_3 = cn, \\ n_{\text{tl}} = mn - cn, & n_4 = mn - an - cn \end{cases}$$

从而

$$\begin{cases} \Phi = -mn^3(ac), \\ \psi = mn^3 \sqrt{ac(m-a)(m-c)} \end{cases}$$

根据(3)式, 得到

$$z_2(x) = -\sqrt{ac} / \sqrt{(m-a)(m-c)}, \quad (5)$$

对于 $Z_3(x)$, 有

$$\begin{cases} n_{\text{oh}} = an, \\ n_{\text{th}} = cn, \\ n_{\text{ol}} = mn - an, \\ n_{\text{tl}} = mn - cn, \\ n_1 = 0, \\ n_2 = (an + mn - 2nx)/2, \\ n_3 = cn, \\ n_4 = (mn - 2cn - an + 2nx)/2, \end{cases}$$

从而

$$\begin{cases} \Phi = \frac{mn^3}{2}(-mc - ac + 2cx), \\ \psi = mn^3 \sqrt{ac(m-a)(m-c)}, \end{cases}$$

根据(3)式, 得到

$$z_3(x) = \frac{-mc - ac}{2 \sqrt{ac(m-a)(m-c)}} + \frac{c}{\sqrt{ac(m-a)(m-c)}}x, \quad (6)$$

对于 $Z_4(x)$, 有

$$\begin{cases} n_{\text{oh}} = an, & n_1 = cn, \\ n_{\text{th}} = cn, & n_2 = an - cn, \\ n_{\text{ol}} = mn - an, & n_3 = 0, \\ n_{\text{tl}} = mn - cn, & n_4 = mn - an, \end{cases}$$

从而

$$\begin{cases} \Phi = mn^3[c(m-a)], \\ \psi = mn^3 \sqrt{ac(m-a)(m-c)}, \end{cases}$$

根据式(3), 得到

$$z_4(x) = \sqrt{c(m-a)} / \sqrt{a(m-c)}, \quad (7)$$

对于 $Z_5(x)$, 有

$$\begin{cases} n_{\text{oh}} = an, \\ n_{\text{th}} = cn, \\ n_{\text{ol}} = mn - an, \\ n_{\text{tl}} = mn - cn, \\ n_1 = (an + cn - 2nx)/2, \\ n_2 = (mn - cn)/2, \\ n_3 = (cn - an + 2nx)/2, \\ n_4 = (mn - cn)/2, \end{cases}$$

从而

$$\begin{cases} \Phi = \frac{mn^3}{2}[am - ac - 2(m-c)x], \\ \psi = mn^3 \sqrt{ac(m-a)(m-c)}, \end{cases}$$

根据(3)式, 得到

$$z_5(x) = \frac{a(m-c)}{2 \sqrt{ac(m-a)(m-c)}} - \frac{m-c}{\sqrt{ac(m-a)(m-c)}}x. \quad (8)$$

3 标定原理

用理想模板图像 T 对理想目标图像 I_{xy}^* 进行标准互相关函数匹配, 离散形式的相似函数设为 $C^*(x)$, 其解析式 $Z(x)$ 可以利用(3)式得到。理想模板图像 T 对实际目标图像 I_{xy} 进行匹配, 其离散形式的相似函数设为 $C(x)$ 。实际目标图像往往含有噪声或其他降质因素, 导致目标与模板的相似度降低, 必有 $|C(x)| \leq |C^*(x)|$, 见图 3。该特点使得 $C(x)$ 与 $C^*(x)$ 必具有交点 $P_1^* [\chi_1^*, C(\chi_1^*)]$ 、

$P_2^*[\chi_2^*, C(\chi_2^*)]$, 参见图 3(b); 通常, 此交点位于 $C(x)=0$ 的小邻域内, 此原理可称之为“零相似不变性”。由于 $C^*(x)$ 具有确定的表达式 $Z(x)$, 若能在

$C(x)$ 中找到 $P_1^*、P_2^*$, 将其带入 $Z(x)$, 反算求解, 即可得到标定未知数 a (a 的定义参见图 1)。

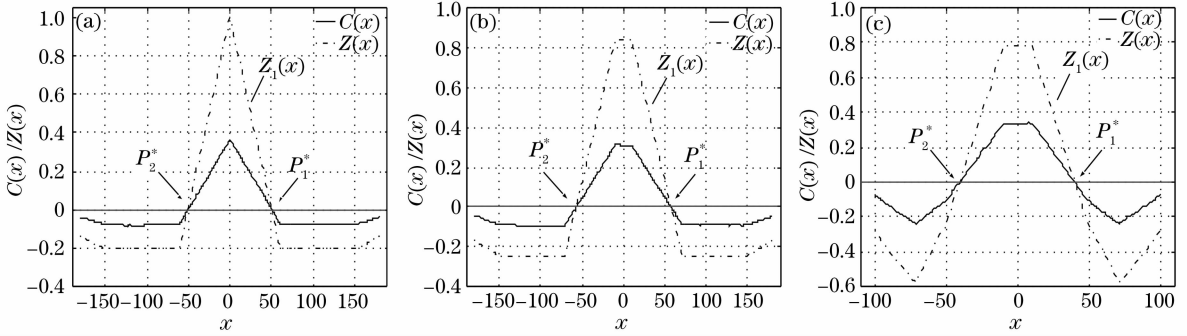


图 3 含噪声图像标准互相关函数匹配的相似函数。(a) $a=c$, (b) $a>c$, (c) $a>c$

Fig. 3 Computation results of NCCO on simulating template image and target image with noise.

(a) $a=c$, (b) $a>c$, (c) $a>c$

对模板图像 T 与目标图像 I_{ij}^* 进行标准互相关函数的行计算, 得到 $C(x)$ 的离散数列 $C(i)$ 。对 $C(i)$ 进行遍历, 找到 $C(i_1)$ 及 $C(i_2)$, 有

$$\begin{cases} C(i_1) \cdot C(i_1 + 1) < 0, \\ C(i_2) \cdot C(i_2 - 1) < 0, \end{cases}$$

得到 $P_{i_1}[i_1, C(i_1)]、P_{i_1+1}[(i_1 + 1), C(i_1 + 1)]、P_{i_2}[i_2, C(i_2)]$ 及 $P_{i_2-1}[(i_2 - 1), C(i_2 - 1)]$ 4 点。图 4 是对图 3(b) 中 P_1^* 区域的局部放大图。

分别求解直线 $\overline{P_{i_1} P_{i_1+1}}、\overline{P_{i_2} P_{i_2-1}}$ 与直线 $C(i) = 0$ 的交点, 得到 $P_1(i'_1, 0)、P_2(i'_2, 0)$; 将 $P_1、P_2$ 作为 $P_1^*、P_2^*$ 的近似, 这是本方法的核心。

对 $i'_1、i'_2$ 进行坐标变换, 令

$$\begin{cases} \chi_1 = i'_1 - (i'_2 + 1)/2, \\ \chi_2 = -i'_1 - (i'_2 + 1)/2, \end{cases}$$

则有 $P_1(\chi_1, 0)、P_2(\chi_2, 0)$ 。

将(4)式整理为

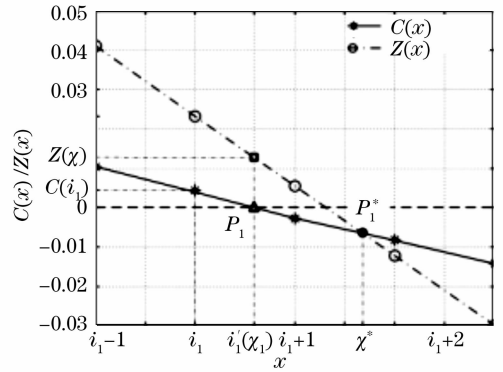


图 4 标定算法示例

Fig. 4 A detailed example of calibration algorithm

$$a^2[(m - 2c)^2 - 4C(\chi)^2 c(c - m)] + a[2m(m - 2c)(c - 2\chi) - 4C(\chi)^2 c(m^2 - cm)] + m^2(c - 2\chi)^2 = 0. \tag{9}$$

将 $m、c、\chi_1$ 和 χ_2 等已知量代入(9)式, 整理出关于未知数 $a_1、a_2$ 的一元二次方程组, 有

$$\begin{cases} a_1^2[(m - 2c)^2] + a_1[2m(m - 2c)(c - 2\chi_1)] + m^2(c - 2\chi_1)^2 = 0, \\ a_2^2[(m - 2c)^2] + a_2[2m(m - 2c)(c - 2\chi_2)] + m^2(c - 2\chi_2)^2 = 0, \end{cases}$$

取方程组的正解 $a_1、a_2$, 令

$$a = (a_1 + a_2)/2. \tag{10}$$

4 仿 真

以参量 Δ_n 考察对仿真图像的标定精度, 定义

$$\Delta_n = |a_n - a^*|, \tag{11}$$

式中 a_n 为测量值; a^* 为理论值。制作模板图像[图 1(a)] 与目标图像[图 1(b)], 并在目标图像中分别加入强度不同的高斯噪声、乘积性噪声、及椒盐噪声以及包含上述 3 种噪声的混合噪声(ϵ 表示噪声强度)。图 5 中分别给出了含有 $\epsilon = 0.05$ 的高斯噪声[图 5(a)], 椒盐噪声[图 5(b)], 乘积噪声[图 5(c)] 以及混合了上述三种噪声[图 5(d)] 的仿真图像^[4~7]。

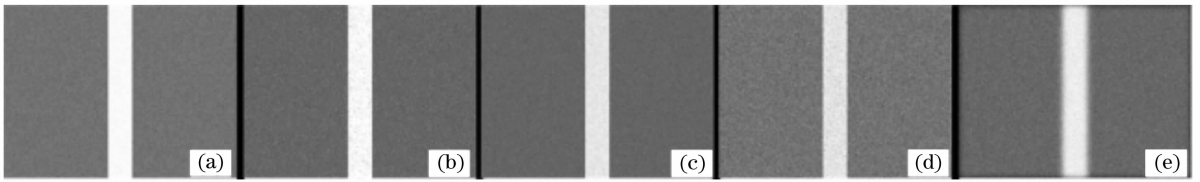


图 5 噪声仿真图像与离焦退化仿真图像。(a) 高斯噪声, (b) 椒盐噪声, (c) 乘积噪声, (d) 混合噪声, (e) 离焦退化
 Fig. 5 Simulating template image and target image with different noise and blur degradation. (a) With Gaussian noise, (b) with S&P noise, (c) with speckle noise, (d) with blend noise, (e) with blur degradation

绝大多数的实际显微图像要低于这种噪声强度。使用本文标定算法对上述 4 类含噪声仿真图像进行多次重复实验($n=100$),图 6 中给出了多次重复标定误差的平均值(ordinal 为实验序号)。由图 6

可知,标定算法对高斯噪声的稳健性最好,对混合噪声则标定精度最差。就整体而言,算法的标定正确度为 0.1~0.2 pixel。

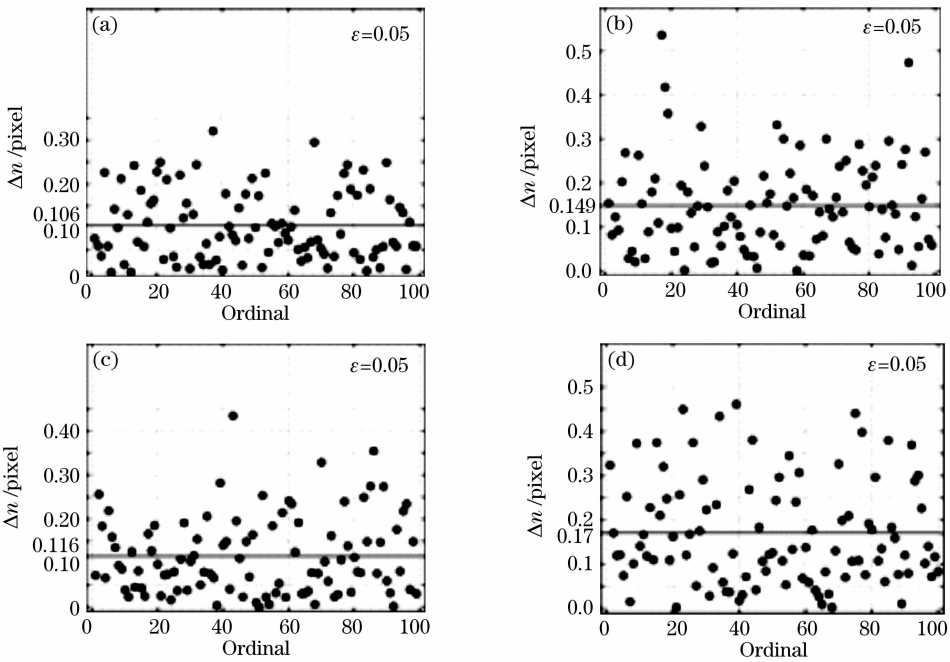


图 6 标定精度重复性实验。(a) 高斯噪声, (b) 椒盐噪声, (c) 乘积噪声, (d) 混合噪声

Fig. 6 Experimental results of calibrating accuracy through ZSI algorithm. (a) with Gaussian noise, (b) with S&P noise, (c) with speckle noise, (d) with blend noise

改变噪声强度,图 7 给出了实验结果。目标图像中高斯噪声或椒盐噪声能量的增加,对算法标定效果的影响并不明显。但对于乘积噪声或混合噪声,标定准确性随噪声强度的增加而降低;尤其是混合噪声对算法的干扰十分明显,标定准确度已降至整像素级。

显微视觉领域中,由于光学系统的局限性,图像的离焦退化客观存在。离焦退化影响图像质量,进而影响标定精度。使用高斯模型模拟图像的离焦退

化机理,用 σ 表示高斯滤波器的尺度空间常量。图 5(e)给出了中度离焦($\sigma=5$)并含有混合噪声($\epsilon=0.01$)的典型图像。图 8 所示的实验结果表明:随着图像的离焦退化程度加剧,标定的准确性降低;但降低程度较慢, $\sigma \leq 5$ 时, $\Delta n \leq 0.05$ pixel;随着图像严重离焦,标定准确度才开始大幅下降。在离焦图像中加入混合噪声($\epsilon=0.01$),噪声干扰的引入使得标定的准确度以近似线性迅速降低。说明图像噪声比离焦退化对本文标定算法的影响更加明显。

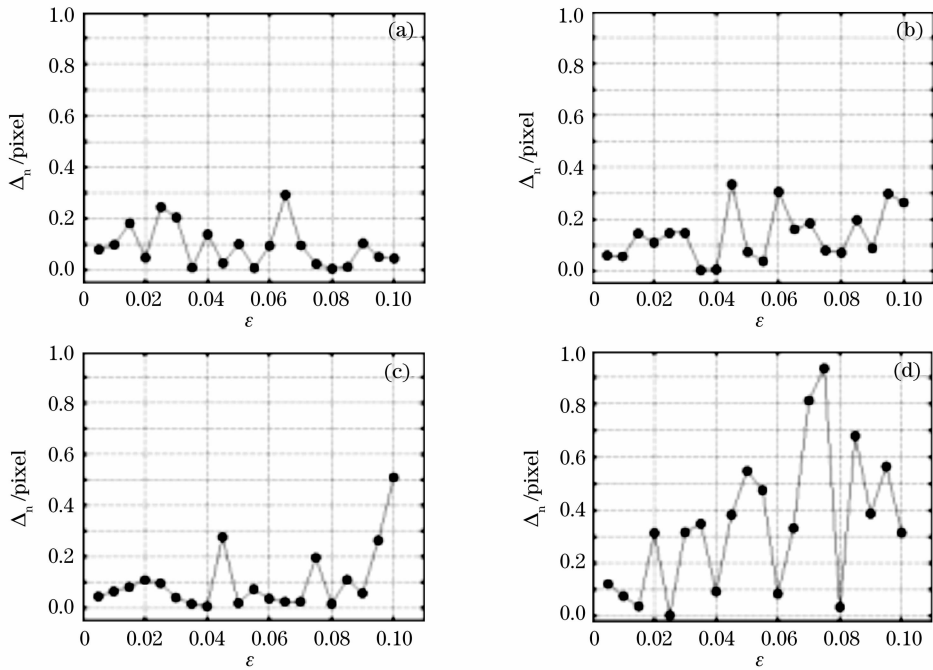


图 7 噪声强度变化后的标定精度。(a) 高斯噪声, (b) 椒盐噪声, (c) 乘积噪声, (d) 混合噪声

Fig. 7 Experimental results of calibrating precision through ZSI algorithm under the increasing intensity of noise.

(a) with Gaussian noise, (b) with S&P noise, (c) with speckle noise, (d) with blend noise

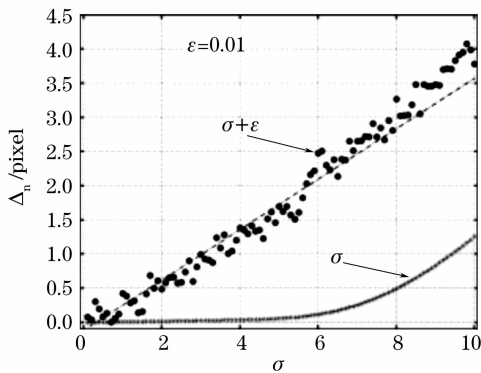


图 8 含噪声及图像离焦退化后标定的实验结果

Fig. 8 Experimental results of calibration on images with constant intensity of noise and defocus degradation using ZSI calibrating method

5 实 验

显微视觉系统需要工作在低分辨率、大视场状态下,以观其全貌,提高效率;而后,为达到精度要求,视觉系统则应工作在高分辨率、小视场下。视觉系统需要不断在“宏-微”状态下调整,以适应效率与精度的矛盾。以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微流控芯片全自动对准装配系统为例^[8][见图 9(a)],其显微镜在最高放大倍数下的视场约为 $250\ \mu\text{m} \times 180\ \mu\text{m}$,对准标记的线宽约为 $90\ \mu\text{m}$,仅靠机器人以中间尺度级的定位精度将芯片放置于微装配承物台^[9],不足以保证芯

片对准标记出现在视场中心区域,需要视觉系统以“宏-微”结合的方式工作,即显微视觉系统在一次完整操作中需要在不同的放大倍数下工作。全自动对准装配系统具有“连续变焦”的显微视觉光路,由步进电机驱动齿轮机构传动,变倍的重复精度较低,需要对图像的物面分辨率进行实时自动标定。

不同放大倍数下的对准标记图像见图 9,设计仿真图像作为模板,使用本文所述的算法对十字型特征的 x 向物面分辨率进行标定,对每例图像随机选取 45 个测点,实验结果见图 10。

对图 10 中的实验数据进行统计分析,计算其均值与方差,见表 1。对于实际图像,由于 a^* 不可知,因此 \bar{a}_n 仅作参考,但 $\bar{\sigma}_n$ 综合反映了本文标定算法在测量结果上的一致性,即基于“零相似不变性”的标定算法可达 0.08 pixel 的精密度。

表 1 实际图像标定的统计规律

Table 1 Statistical results of ZSI calibrating experiments

Statistical results /pixel	\bar{a}_n /pixel	σ_n /pixel
8×	184.62	0.076
11×	133.34	0.108
14×	106.76	0.085
17×	86.83	0.068
20×	69.62	0.072
$\bar{\sigma}_n$		0.0818

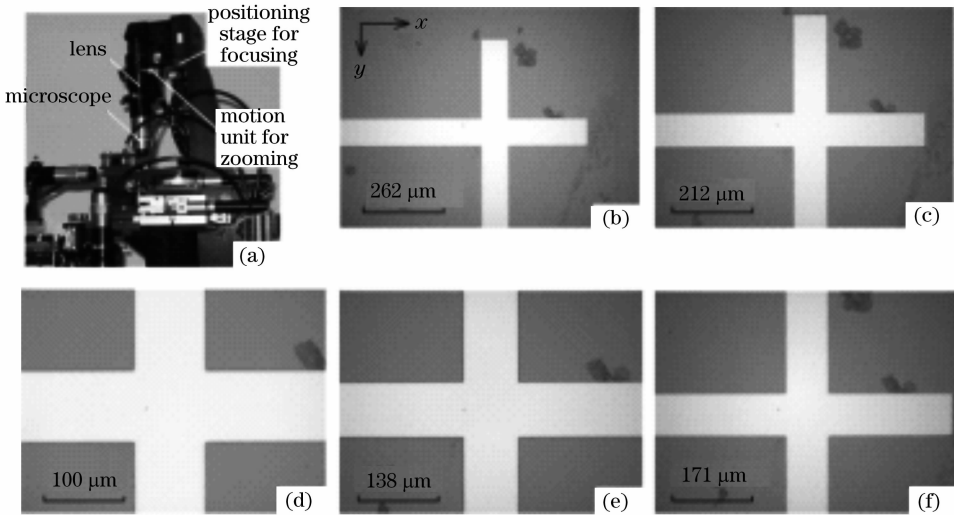


图 9 实验平台与显微图像。(a) 实验平台, (b) 6×, (c) 10×, (d) 15×, (e) 20×, (f) 25×

Fig. 9 Experimental workcell and microscopic images. (a) Workcell, (b) 6×, (c) 10×, (d) 15×, (e) 20×, (f) 25×

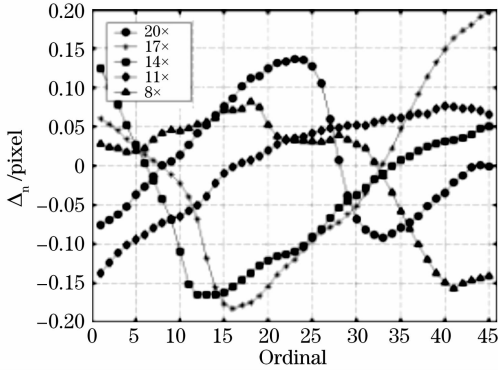


图 10 实际图像标定实验结果

Fig. 10 Experimental calibrating results on microscopic images using ZSI method

上述实验仅给出了图像在 x 向的物面分辨率实验结果, y 向的标定方法与 x 向完全相同。

6 结 论

理想规则图像特征经标准互相关函数匹配后, 相似函数可用确定的解析式表达。对于含噪声图像, 相似函数虽发生很大变化, 但存在“零相似不变性”。将此原理应用于显微视觉中图像物面分辨率的在线标定,

提出了“零相似不变性”;

提出了基于“零相似不变性”原理的标定方法;

利用仿真方法给出标定算法的正确度在 $0.1 \sim 0.2$ pixel;

将标定算法应用于“变焦”视觉微装配工作站, 实测算法的精密密度为 0.08 pixel。

下一步工作将对标定精度的影响因素进行深入

探讨。

参 考 文 献

- 1 Yu Qifeng, Lu Hongwei, Liu Xiaolin. *Precision Measurement and Motion Measurement Based on Image* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 132~134
于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 132~134
- 2 Lisa Gottesfeld Brown. A survey of image registration techniques [J]. *ACM Computer Surveys*, 1992, 24(4): 325~376
- 3 Sun Minglei. Application and experimental research on image-analysis based methodology in microscopic computer vision[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006
孙明磊. 显微视觉图像分析技术应用及实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006
- 4 Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision* [M]. Beijing: People's Post and Telecommunications Publishing House, 1998. 622~623
- 5 Xue Lixia, Rao Xuejun, Wang Cheng *et al.*. Higer-order aberrations correction and vision analysis system for human eye [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 893~897
薛丽霞, 饶学军, 王成等. 人眼高阶像差校正和视觉分析系统 [J]. 光学学报, 2007, 27(5): 893~897
- 6 Ni Guoqiang, Xiao Manjun, Hu Hongqing *et al.*. New progress and prospect of realistic image rendition based on visual characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 451~460
倪国强, 肖蔓君, 胡宏清等. 基于视觉特性的真实影像再现技术进展及展望[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 451~460
- 7 Zheng Defeng, Wang Xiangzhao. Angular displacement measurement based on lateral shearing interferometer using plane-parallel plate[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, 34(8): 1125~1129
郑德锋, 王向朝. 一种基于平板横向剪切干涉的角位移测量方法 [J]. 中国激光, 2007, 34(8): 1125~1129
- 8 Zong Guanghua, Sun Minglei, Bi Shusheng *et al.*. Research on autofocus technique in micro-vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(9): 1226~1232
宗光华, 孙明磊, 毕树生等. 显微视觉自动聚焦研究[J]. 光学学报, 2005, 25(9): 1226~1232
- 9 Zong Guanghua, Sun Minglei, Bi Shusheng *et al.*. A microassembly workcell with macro to micro automatic operations [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(20): 2125~2130
宗光华, 孙明磊, 毕树生等. 宏-微操作结合的自动微装配系统 [J]. 中国机械工程, 2005, 16(20): 2125~2130