

文章编号 1004-924X(2010)06-1361-06

显微视觉快速自动调焦方法及实验

陈立国,王明月,杨治亮,荣伟彬

(哈尔滨工业大学 机器人研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:分析了显微视觉与计算机宏观视觉的特性,得出显微视觉下模糊效果是由几何光学和波动光学两部分造成的结论,并用标定实验验证了显微视觉下扩散参数与物距呈线性关系这一假设。研究了现有基于聚焦的自动调焦 DFD (Depth from Focus)方法,提出了显微视觉下一种新型的基于离焦(Depth from Defocus)的快速自动调焦算法,该算法只要给定两幅模糊图像,就可直接计算出目标聚焦平面位置。实验结果显示,该方法的聚焦速度比传统 DFF 方法(本文选择 SML 法)快 2~4 倍。改进了的 DFD 算法提高了自动调焦性能,增强了显微光学鲁棒性,调焦精度较高,且具有较好的实用性。

关键词:计算机显微视觉;自动调焦;扩散参数;函数关系

中图分类号:TP391;TH742.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101806.1361

Fast autofocus method for microscopic computer vision

CHEN Li-guo, WANG Ming-yue, YANG Zhi-liang, RONG Wei-bin

(*Robotic Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: The characteristics of macro and micro computer visions were analyzed, obtained results demonstrate that micro-vision blurred effects are caused by both geometrical and wave optics. A calibration experiment was carried out, which verifies the assumption of the linear relationship between spread parameter and step number. On the basis of above research, the existing autofocus technology based Depth from Focus (DFF) was introduced and a fast autofocus algorithm based Depth from Defocus (DFD) was presented in micro computer vision. The algorithm can calculate the focusing position of a target directly by giving two frames of blurred images. Experimental results indicate that the focusing speed obtained by proposed algorithm is 2-4 times faster than that gotten by traditional method (Sum Modified Laplacian Method, SLM). It is shown that the proposed method has better focusing performance and robustness and can be used in the autofocus for micro computer vision systems.

Key words: microscopic computer vision; auto focus; spread parameter; function relation

收稿日期:2009-04-22;修订日期:2009-05-26.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA04Z343);哈尔滨工业大学校基金资助项目(No. HIT. 2003. 25)

1 引言

微操作机器人系统是一个集机器人操作手、力感觉系统、显微视觉系统为一体的微型物体作业系统,在微型零件装配、细胞操作、集成电路组装等技术领域有广泛的应用前景和重要的研究意义^[1-2]。微操作对象的尺寸微小,其位置、方向、与操作工具的距离甚至微操作对象的存在等信息只能通过显微镜放大后才能精确获得。因此,显微视觉已成为微操作机器人系统获取操作信息的最主要的技术手段之一^[3-5]。

显微视觉中由于放大倍数很大,导致景深很短,因此,在显微视觉微装配过程中无法保证 Z 向高度变化时视场中每个目标都保持清晰。而在大部分情况下,微装配过程要求自动完成,对于模糊对象的定位只能通过自动调焦获得清晰图像后实现。因此,有必要研究显微视觉快速自动调焦技术来保证操作过程的实时性和准确性^[6-7]。

显微视觉系统的自动调焦通常通过改变显微镜的物距来实现,具体方法主要有两类:一类是基于聚焦(Depth-From-Focus, DFF)的方法;另一类是基于离焦(Depth-From-Defocus, DFD)的方法。DFF 是一种搜索的方法,通过不断移动显微镜采集目标样本的序列图像,评价每幅图像的聚焦程度决定目标清晰的位置,从而完成自动调焦^[8-9],由于调焦过程需要采集多幅图像,因而在实现上效率较低;与 DFF 不同,DFD 根据图像的模糊程度直接估计聚焦位置,首先采集模糊程度不同的几幅图像(2~3 幅),然后通过计算这几幅图像的模糊程度直接得到聚焦位置,最后移动显微镜完成自动调焦^[10-11]。因此,基于 DFD 的调焦方法更能保证调焦的实时性。

本文研究了现有基于 DFF 的自动调焦方法,提出了一种基于 DFD 的快速自动调焦方法并验证了该方法的可行性。该方法只需给定两幅模糊图像即可推导出目标的聚焦位置,从而控制显微镜完成自动调焦。

2 基于 DFD 的自动调焦方法

空间域卷积/反卷积变换(S 变换)在图像和 n 维信号处理中为任意次多项式的形式^[12]。若 $f(x, y)$ 是一幅图像,即为一个二维三次多项式。

定义为:

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^{3-m} a_{mn} x^m y^n,$$

其中: a_{mn} 为多项式系数; m, n 为多项式阶次。

对图像进行多项式拟合最小二乘平滑滤波确定 $f(x, y)$ 的阶次。模糊(离焦)图像 $g(x, y)$ 可表示为聚焦图像 $f(x, y)$ 与点扩散函数(PSF) $h(x, y)$ 卷积的结果:

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x - \xi, y - \eta) h(\xi, \eta) d\xi d\eta,$$

将 $f(x - \xi, y - \eta)$ 进行 Taylor 展开:

$$g(x, y) = \sum_{0 \leq m+n \leq 3} \frac{(-1)^{m+n}}{m!n!} f^{m,n}(x, y) h_{m,n}, \quad (1)$$

$$\text{其中, } h_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^m y^n h(x, y, \delta) dx dy.$$

因为 $h(x, y)$ 具有圆对称性,方程(1)变换为:

$$f(x, y) = g(x, y) - \frac{h_{2,0}}{2} [f^{2,0}(x, y) + f^{0,2}(x, y)],$$

用一个标准的扩散参数 δ 来对应任意函数 $h(x, y)$:

$$\delta^2 = \int_{+\infty}^{-\infty} \int_{+\infty}^{-\infty} (x^2 + y^2) h(x, y) dx dy = h_{2,0} + h_{0,2}$$

$$h_{2,0} = h_{0,2} = \delta^2 / 2$$

根据上面各方程得出:

$$f(x, y) = g(x, y) - \frac{\delta^2}{4} \nabla^2 g(x, y), \quad (2)$$

其中: ∇^2 为拉普拉斯算子。

上式提供了一种空间域计算扩散参数的方法。

由于显微镜景深非常小,物距 u 的一个微小位移都可导致视场中的目标模糊不清。因此,离焦图像可通过改变物距 u 来获取,这种方法比改变相机内部参数设置要简单。

宏观尺度摄像机给定参数设置只需考虑几何光学的影响,因此,扩散参数 δ 与物距倒数 $1/u$ 成线性关系。如果测量了一幅模糊图像的扩散参数,就可以得到聚焦位置: $\delta_{\text{geom}} = m_1 u^{-1} + c_1$, m_1 和 c_1 是和内部参数相关的约束。但是,对于显微镜必须要考虑波动光学的影响,这是显微光学成像与宏观光学成像的一个根本区别。因此,模糊效果由两部分造成。

首先,假设扩散参数与物距成线性关系,即: $u = k\delta + b$,关于它的证明将在后面介绍。

在显微测量下,记录两幅模糊图像和他们的物距。根据式(2)可得:

$$g_1(x, y) - \frac{\delta_1^2}{4} \nabla^2 g_1(x, y) = g_2(x, y) - \frac{\delta_2^2}{4} \nabla^2 g_2(x, y).$$

由于两幅模糊图像位置很接近,因此可作简单近似:

$$\nabla^2 g_1(x, y) = \nabla^2 g_2(x, y) = \nabla^2 g(x, y)$$

可得: $g_1(x, y) - g_2(x, y) = \frac{1}{4}(\delta_1^2 - \delta_2^2) \nabla^2 g$

上式可表示为: $(\delta_1^2 - \delta_2^2) = G^2$

$$G^2 = 16 \frac{\iint (g_1 - g_2)^2 dx dy}{\iint (\nabla^2 g)^2 dx dy}, \quad (3)$$

将 $u = k\delta + b$ 代入式(3)得:

$$\frac{(u_1 + u_2) 2d}{2} - \frac{2bd}{k^2} = G', \quad (4)$$

其中, d 是两幅模糊图像在 Z 向上的距离, $G' = \delta_1^2 - \delta_2^2$.

上述关系式表明 G' 与 $(u_1 + u_2)/2$ 成线性关系。因此,可以利用这一函数关系完成自动调焦。图像的方差决定显微镜聚焦脉冲数:

$$u = \begin{cases} \frac{u_1 + u_2}{2} - \frac{d}{2}, & var_1 > var_2 \\ \frac{u_1 + u_2}{2} + \frac{d}{2}, & else \end{cases}, \quad (5)$$

其中: var_1 和 var_2 是两幅图像的方差。

由上述公式推导可知:给定两幅模糊图像,不必计算每幅图像的扩散参数,只需得到它们之间关系 G' ,通过式(4)得到 $(u_1 + u_2)/2$,就可由式(5)得出显微镜聚焦脉冲数,从而控制显微镜完成自动调焦。

3 实验分析

3.1 实验系统

实验系统由光学变倍显微镜和 CMOS 数字摄像机组成,如图 1 所示。本实验系统中显微镜放大倍数为 1.8。由于变倍显微镜所具有的独特属性,它的景深比相同放大倍数的传统显微镜要大一些。实验所用放大倍数的景深约为 600 μm 。

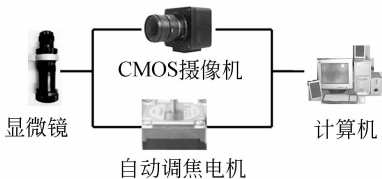


图 1 显微视觉系统

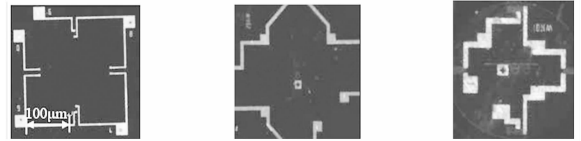
Fig. 1 Microscopic computer vision system

光学显微镜可通过步进电机调焦,沿 Z 方向获得聚焦平面位置。调焦电机位置精度为 0.1 μm ,对应电机的一个脉冲数。步进电机的速度为 5000 step/s。

3.2 标定实验

为分析显微图像模糊效果与物距大小之间的关系,本文建立了标定实验:

首先将目标放置在视野中心,光学显微镜移动到聚焦平面位置,得到一幅聚焦图像 $f(x, y)$ (由于改进的拉普拉斯方法 SML 被认为是在显微视觉中最有效的方法,因此实验中将 SML 所得到的聚焦位置作为焦平面位置)。然后移动显微镜在每一个模糊位置采集图像,记录模糊图像 $g(x, y)$ 并通过式(2)计算 δ 值。



(a)目标 1 (b)目标 2 (c)目标 3
(a)Target 1 (b)Target 2 (c)Target 3

图 2 标定目标聚焦图

Fig. 2 Auto focus images of calibration objects

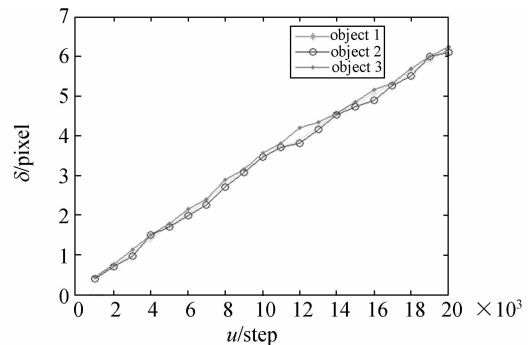


图 3 标定图

Fig. 3 Calibration plots

实验表明:总扩散参数 δ 与物距 u 呈线性关系。这是因为显微图像必须考虑由波动光学造成的模糊效果,说明之前的假设是正确的。

3.2 算法验证实验及结果

这里选择目标 2 作为实验对象来验证算法。先标定脉冲数和 δ 线性关系,标定结果见表 1。

表 1 标定实验结果

Tab.1 Calibration results ($\times 10^3$)

δ	脉冲数	δ	脉冲数
0.42	1	3.75	11
0.73	2	3.97	12
1.05	3	4.26	13
1.47	4	4.56	14
1.74	5	4.81	15
2.07	6	5.05	16
2.35	7	5.31	17
2.81	8	5.62	18
3.14	9	5.97	19
3.50	10	6.18	20

表 2 基于函数关系算法的自动调焦结果

Tab.2 Autofocusing results based on function relation

位置号	距焦平面距离 d_1	时间 t/s	G'	调焦 d_2
1	4 000	2.80	2.28	6 366
2	10 000	7.00	4.82	13 274
3	13 000	9.10	6.39	16 538
4	14 000	9.80	6.13	16 837
5	16 000	11.20	5.23	13 389
6	17 000	11.90	7.21	19 774
7	18 000	12.60	5.58	15 341
8	20 000	14.00	5.72	17 668

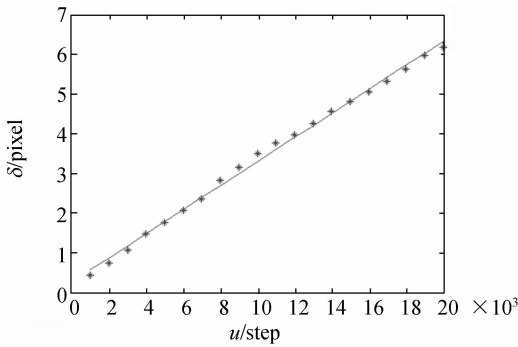


图 4 脉冲数与 δ 的线性关系

Fig.4 Linear relationship of step number and δ

线性关系如图 4 所示,方程如下:

$$\delta = 0.3032u + 0.2569$$

然后可得到 G' 与 $(u_1 + u_2)/2$ 的线性关系(两

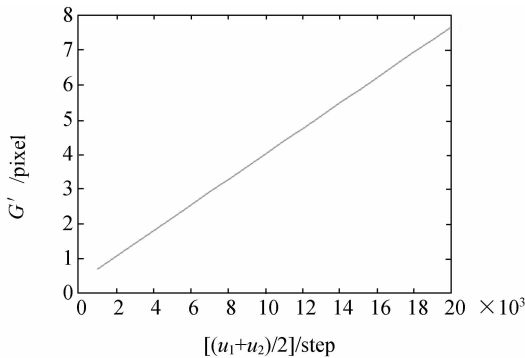


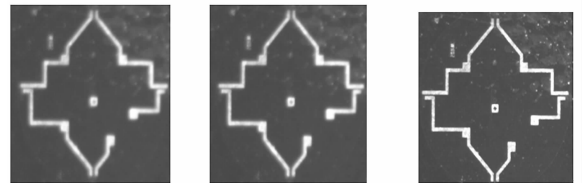
图 5 G' 与 $(u_1 + u_2)/2$ 的线性关系

Fig.5 Linear relationship of $(u_1 + u_2)/2$ and G'

幅模糊图像 Z 向间距 d 为 2000 脉冲数),如图 5 所示:

$$G' = 0.3677 \frac{(u_1 + u_2)}{2} + 0.3067.$$

实验结果表明,基于函数关系的自动调焦方法比传统的 SML 方法快 2~4 倍。两幅模糊图像和自动调焦图像如图 6 所示,平均脉冲误差如图 7 所示,基于函数关系方法的误差为 2 811 step,相当于 $281.1 \mu\text{m}$ 。由这一小误差引起的模糊对人眼视觉造成影响并不大,平均误差尚在景深范围内($600 \mu\text{m}$),因此这种方法能够为显微视觉自动调焦得到满意的结果。

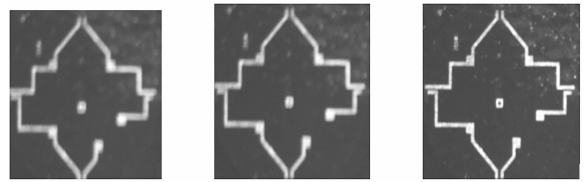


Frame 1

Frame 2

After focusing

(a) 位置 2
(a) Position 2



Frame 1

Frame 2

After focusing

(b) 位置 6
(b) Position 6

图 6 基于函数关系的自动调焦图像

Fig.6 Autofocus image based on function relation

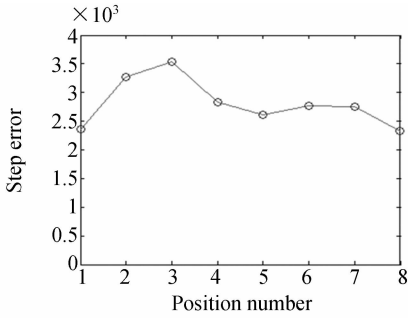


图7 脉冲误差

Fig. 7 Step error

4 结 论

本文提出一种基于 DFD 的快速自动调焦方

法,并验证了该方法的可行性。与传统方法相比,该方法聚焦效率高,比传统的 SML 方法快 2~4 倍,并且平均误差在景深范围内(600 μm)。该方法只需给定两幅模糊图像,就可由算法推导出目标的聚焦位置,从而控制显微镜完成自动调焦。另外,该方法对于中度模糊图像能得到较高的准确率,对高度模糊图像准确率则会降低。为了减少脉冲误差,可以结合传统方法(如:SML 方法)使用,但需增加图像的数量。为了提高微装配系统的精度,在某些情况下要采用变倍显微镜获得若干不同倍数的图像。基于变倍图像的 DFD 自动调焦方法将成为下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] ALLEGRO S, CHANEL C, JACOT J. Autofocus for automated microassembly under a microscope [J]. *Image Processing*, 1996:677-680.
- [2] 孙立宁,陈立国,刘品宽,等. 微操作机器人显微视觉系统若干问题[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2): 171-175.
SUN L N, CHEN L G, LIU P K, *et al.*. Some issues on the micro-vision system for a micromanipulation robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2):171-175. (in Chinese)
- [3] 段瑞玲,段惠波,李庆祥,等. 基于图像处理的微装配自动调焦系统[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 468-472.
DUAN R L, DUAN H B, LI Q X, *et al.*. Micro-assembly auto-focusing system based on image processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 468-472. (in chinese)
- [4] 王义文,刘献礼,谢晖. 基于小波变换的显微图像清晰度评价函数及 3-D 自动调焦技术[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6):1063-1069.
WANG Y W, LIU X L, XIE H. A wavelet-based focus measure and 3-D autofocusing for microscope images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1063-1069. (in chinese)
- [5] LIU X Y, WANG W H, SUN Y. Autofocusing for automated microscopic evaluation of blood smear and pap smear [J]. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 2006:4718-4721.
- [6] JIANG Z M, XU D, TAN M, *et al.*. MEMS Assembly with the simplex focus measure [J]. *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics & Automation*, 2005:1118-1122.
- [7] NAYAR W. Real-time computation of depth from defocus [J]. *IEEE Computer Society Press*, 1995: 14-25.
- [8] HUANG J T, SHE C H. Robust measure of image focus in the wavelet domain [J]. *Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 2005: 157-160.
- [9] DUTHALER Y S, NELSON S. Autofocusing algorithm selection in computer microscopy [J]. *Intelligent Robots and Systems*, 2005:70-76.
- [10] XIAN T. *Three-Dimensional Modeling and Autofocusing technology for New Generation Digital Cameras* [D]. Dept. of Electrical Engg, SUNY at Stony Brook, 2006.
- [11] MMRENO N F, BELHUMEUR P N, NAYAR S K. Active refocusing of images and videos [C]. *SIGGRAPH (ACM Transactions on Graphics)*, 2007:907-915.
- [12] SUBBARAO M, SURGA G. Application of spatial-domain convolution/deconvolution transform for determining distance from image defocus [J]. *SPIE*, 1994.:159-167.

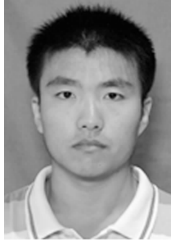
作者简介:



陈立国(1974—),男,辽宁葫芦岛人,副教授,主要研究方向为微操作、微驱动机器人等。E-mail: clg@hit.edu.cn



杨治亮(1982—),男,山东菏泽人,硕士研究生,从事微驱动及微操作机器人的研究。E-mail: yzl888@yahoo.com.cn



王明月(1985—),男,内蒙满洲里人,硕士研究生,从事微驱动及微操作机器人的研究。E-mail: 14030218@163.com



荣伟彬(1972—),男,黑龙江兰西人,教授,主要研究方向为微操作、微驱动机器人等。E-mail: rwb@hit.edu.cn

● 下期预告

眼模型的非球面眼底荧光相机的设计

王肇圻,王尧,全薇

(南开大学 现代光学研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071)

运用非球面光学理论,设计了一款基于 Gullstrand-Le Grand 眼模型的便携式非球面眼底荧光相机。该相机根据滤光片选择原则,选用 Nikon 公司的 B-2A 滤光组合作为滤光系统进行光谱滤光;为避免角膜中心较大曲率引起的杂散光,采用环形光阑和共轴式照明相结合的照明方式,实现眼底均匀照明;摄影系统中引入眼模型结构,综合校正了人眼及系统的像差,实现了全视场 200 万像素的高清晰成像。该摄影系统包含有两个非球面结构,使系统由 9 片镜结构简化为 7 片镜结构。结果表明,本相机具有较大的调节能力,对 $-12 \text{ m}^{-1} \sim +12 \text{ m}^{-1}$ 的人眼普遍适用,其视场角为 30° ,像面成像分辨率为 120 lp/mm ,畸变值 $< 3.9\%$ 。非球面光学元件的使用,有效地简化了系统,减小了系统体积和质量,提高了成像质量。