

面向微操作的显微视觉系统自动聚焦优化算法

吴云飞, 陈国良, 徐扬

(武汉理工大学 机电工程学院, 武汉 430070)

摘要: 研究了面向微操作的显微视觉系统自动聚焦评价函数和聚焦控制策略; 首先, 分析显微图像特点并做预处理; 接着引入像素相关性指标, 并结合梯度函数形成一种新的图形清晰度评价函数, 改善了函数的灵敏度和抗噪性; 最后对传统爬山算法进行改进, 在粗调阶段以大步长搜索并用曲线拟合的方法快速定位到峰值点附近, 精调阶段以小步长搜索到评价函数值下降点即可准确定位到焦平面, 该算法避免了复杂的阈值设定问题, 与传统爬山法相比, 在一定程度上提高了聚焦速度, 并大幅提高了聚焦成功率。

关键词: 显微视觉; 聚焦评价函数; 相关性加权; 曲线拟合

Autofocus Optimization Algorithm for Micro Vision System Based on Micromanipulation

Wu Yunfei, Chen Guoliang, Xu Yang

(Institute of Electrical and Mechanical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: This paper has done the research to the micro vision auto focusing evaluation function and focusing control strategy for micro operation. First of all, the characteristics of microscopic images are analyzed and pre-processed. Then the pixel correlation index is introduced and a new grayscale evaluation function is formed by combining with the gradient function to improve the sensitivity and noise immunity of the function. Finally improved the traditional hill-climbing algorithm. In the coarse tuning stage, a large step size is searched and the curve fitting method is used to quickly locate the near actual extreme value point. In the stage of fine tuning, a small step size is used to locate the focal plane accurately. The algorithm avoids the complex threshold setting problem. Compared with the traditional hill-climbing method, the focusing speed is improved to a certain extent, and the success rate of focusing is greatly improved.

Keywords: micro vision; focus evaluation function; correlation weighting; curve fitting

0 引言

显微视觉系统是面向微操作等精密作业系统的基本组成部分之一, 由于其景深短、视场小, 必须聚焦才能获取清晰的图像^[1-2]。传统的调焦方法为手动调焦, 不仅花费大量的时间, 而且不可避免存在人为误差, 因此研究准确、快速的聚焦技术成为精密作业的前提。同时自动聚焦技术也是实现微操作系统自动化的基础之一^[3]。

显微视觉自动聚焦技术通常是基于图像的被动式聚焦, 主要解决图像清晰度计算和聚焦面搜索两个问题^[4]。国内外学者对此开展了大量研究。翟永平等针对传统聚焦算法无法找到稀疏图像内容焦平面的问题, 提出一种基于图像内容重要程度加权的聚焦函数增强算法, 以像素点 z 轴变化率为图像内容重要程度因子, 进一步采用图像分块的方式来降低算法复杂度, 提高了稀疏内容图像的聚焦成功率^[5]。Rudnaya 等提出了一种基于 L_2 范数导数的清晰度评

价函数, 对于一个特定的人工模糊控制变量, 该算法可以在计算三幅图像后找到最佳聚焦位置^[6]。王焯茹等考虑到夜景照明情况下容易出现过亮区域, 导致无法判断真实的离焦状态, 提出一种饱和像素模板作用于梯度值矩阵的方法, 除去了饱和像素对聚焦评价函数的影响^[7]。上述的研究内容是将图像聚焦技术用在不同的环境和应用场合当中, 虽然取得了一定效果, 但其方法往往在灵敏度和抗噪性、快速性和成功率方面不能兼备。

本文以面向微操作的显微视觉系统为研究对象, 在已有研究的基础上进一步深入。首先, 引入一种改进的相关性清晰度评价指标, 并将该指标和传统梯度函数相结合, 提高了函数的灵敏度和抗噪性能; 针对传统爬山聚焦算法容易受到局部极值影响, 一般的变步长爬山算法又面临着一个复杂的阈值设定问题的缺点, 本文先用大步长曲线拟合法快速定位到聚焦面附近, 然后用小步长爬山法准确定位到图像聚焦面位置, 在保证准确性的基础上提高了算法的快速性; 最后实验验证了本文算法的有效性。

1 显微图像预处理

显微视觉系统利用计算机对聚焦过程中的一系列图像进行分析处理, 用聚焦函数评价离焦状态, 再通过平台运动控制器驱动调焦装置, 使 CCD 图像采集设备上下移动,

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-04-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61672396)。

作者简介: 吴云飞(1993-), 男, 河南西平县人, 硕士研究生, 主要从事计算机视觉方向的研究。

陈国良(1972-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 副教授, 主要从事智能控制与机器人技术、计算机视觉、机电一体化方向的研究。

自动搜索聚焦面的清晰图像。在使用显微镜、CCD 图像采集设备等生成图片的过程中, 由于受到光照、CCD 自身缺陷等因素的影响, 图像中会引入脉冲和加性等噪声。另一方面, 在显微视觉中, 图像的前景和背景的比例较为固定, 真正反映深度信息的也只是图像的前景部分, 如果我们把图像背景纳入到图像散焦特性的计算中, 由于背景在图像中所占的比例通常要大于前景部分, 则容易造成聚焦特征值在一个错误值附近振荡。

图像前景部分模糊点的灰度特性往往与背景点很相似, 有时候甚至完全一致。这里可以采用门限帧差技术来抑制背景点对散焦图像特征计算的干扰^[8], 如式 (1) 所示:

$$g(x, y) = \begin{cases} 255 - R(x, y), & R(x, y) > Q \\ 255, & R(x, y) < Q \end{cases} \quad (1)$$

式中, $R(x, y) = |f(x, y) - b(x, y)|$, $f(x, y)$ 为待处理显微图像灰度图, $b(x, y)$ 为背景灰度图, $g(x, y)$ 是门限帧差处理后的灰度图; Q 为灰度阈值, Q 值选取过大会降低散焦灵敏度, 过小无法抑制环境和图像采集所引起的噪声。图 1 为显微图像帧差处理结果。

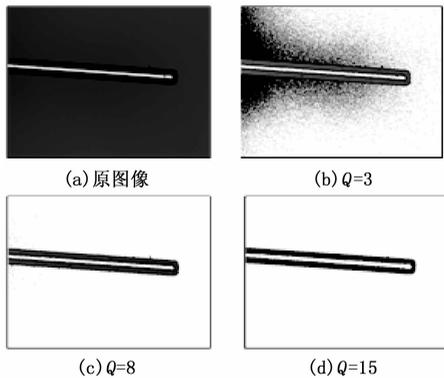


图 1 显微图像门限帧差处理结果

对比可以看出, 图 1 (b) 中的 Q 值选取过小, 背景对前景干扰严重; 图 1 (d) 中 Q 值选取过大, 导致很多前景点也被过滤掉; 而图 1 (c) 中 Q 值选取合适, 在去除背景干扰的同时又能够很好的保护图像的前景。

2 聚焦评价函数

聚焦评价函数一般可分为时域和频域两大类。典型的时域函数有灰度差分绝对值之和函数 (SMD)、Brenner 函数、Laplace 函数、方差函数 (Variance) 等; 频域函数主要包括傅里叶变换和离散小波变换 (DWT) 等^[9]。

理想的聚焦评价函数应具有无偏性、单峰性、灵敏度高以及足够的信噪比等特点^[10]。本文通过组合相关性指标和梯度函数, 形成一种新的聚焦评价函数, 具体如下所示:

2.1 相关性指标

相关性是图像的属性之一, 理想清晰的图像各部分之间存在一定的关联。当一副图像清晰时, 图像轮廓清晰可辨, 图像中各像素点的相关性较弱, 反之则相关性较强。

文献 [11] 通过计算图像像素点 (i, f) 与其四邻域像素 D_{ij} 的平均相关系数之和来评价图像清晰度, 方法如下:

$$P = \frac{\sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} \frac{1}{4} \times \sum_{d \in D_{ij}} [f(i, j) \times f(d)]}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j)^2}$$

其中: $f(d)$ 表示四邻域像素灰度平均值。为使任意像素的互相关取值小于 1, 先对邻域八个像素的灰度值求平均, 然后再取相关性。用 $f(x, y)$ 表示中心像素, D_{nei} 表示中心像素的八邻域, $\overline{f_{nei}}$ 表示八邻域灰度平均值, f_{cor} 表示每个像素的互相关取值。每个像素与其八邻域像素的相关性 q 可按下式计算:

$$\begin{cases} f_{cor} = \frac{2 \times \overline{f_{nei}} \times [f(x, y)]}{\sum_{ij \in D_{nei}} [f(i, j)]^2 / 8 + [f(x, y)]^2} \\ q = (1 - f_{cor})^2 \end{cases}$$

当 q 越大, 说明图像中该像素与其八邻域像素的相关性越小, 该点聚焦程度较高, 当 q 越小, 相应该点的聚焦程度较低。因为图像中的随机噪声与图像像素之间没有关系, 所以相关性在一定程度上可起到抗噪声的作用。

2.2 相关性加权梯度评价函数

Laplace 函数是经典的基于二阶偏导数的边缘检测算法。经过模板的变换可以得到一种常用的算子, 应用到图像清晰度评价方面, 表示如下:

$$\begin{cases} F_{La} = \sum_{x=2}^{M-1} \sum_{y=2}^{N-1} (G_{La})^2 \\ G_{La} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & -20 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} * f(x, y) \end{cases}$$

其中: $f(x, y)$ 为图像在点 (x, y) 的灰度值, G_{La} 表示 $f(x, y)$ 的卷积, 图像的大小为 $M \times N$ (M 列、 N 行) 个像素。该函数灵敏度很高, 但同时也对噪声很敏感。

受到噪声、光照强度变化等因素的影响, 单独使用 Laplace 函数无法保证聚焦效果。结合不同方法的优点, 将基于空域的拉普拉斯梯度函数和相关性函数结合使用, 用相关性对每个像素进行加权, 提出 La-Cor 清晰度评价函数, 具体如下:

$$F_{La-Cor} = \sum_i \sum_j [G_{La}^2 \times (1 - f_{cor})^2]$$

该算法使得小梯度值比重大幅度减少, 大梯度值比重增大, 能进一步突出清晰图像和模糊图像的区别, 一定程度上提高了函数的灵敏度。此外, 在二阶梯度算子中引入相关性, 可以削弱梯度函数对加性噪声敏感的特性, 提高了算法的抗噪性能。

3 聚焦搜索策略

对于被动式聚焦系统, 爬山法是经典的聚焦策略, 爬山法如同盲人爬山, 只能通过上坡或下坡来推测山峰的位置, 因此其对聚焦曲线的单峰性有严格要求。爬山法常采用变步长或自适应步长的搜索方式, 如文献 [12] 所述, 不过其都面临一个阈值设定的问题。一般来说, 阈值的设定只能通过大量的实验来得出, 但这样得到的阈值仅适用于固定的场景, 一旦聚焦环境发生变化, 就要重新设定阈

值, 这样无疑增加了工作量, 适应性比较差。

本文对爬山法进行改进, 并将曲线拟合算法应用到爬山法的粗调阶段, 从而避免复杂阈值设定问题。如图 2 所示, 在粗调阶段用大步长搜索到一些点, 并用曲线拟合的方法求出估计极值点 x_0 , 在精调阶段用爬山算法以小于焦距的步长搜索, 直到评价函数值减小为止, 具体步骤如下:

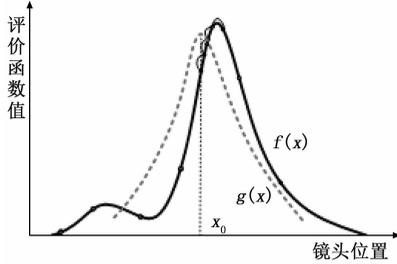


图 2 聚焦搜索策略示意图

1) 起始令镜头的移动方向固定, 基本搜索步长为 l , 其值小于焦距, 在粗调阶段, 采用步长 $L=4l$, 连续朝着一个方向搜索, 并计算其相应的评价函数值。

2) 当搜索位置越过极值点之后, 粗调停止, 越过极值点的判据如下: 假如连续三幅图像的评价函数值 $K_n < K_{n+1} > K_{n+2}$ 或 $K_n > K_{n+1} < K_{n+2}$ 则认为遇到局部极值干扰, 继续往前采集再判断, 如果 $K_n > K_{n+1} > K_{n+2}$, 并且 $K_{n+1} < K_n * \mu$ 和 $K_{n+2} < K_{n+1} * \mu$ 同时满足时, 则认为越过了峰值。其中 μ 为下降判断阈值, 文中采用 $\mu=0.88$, 此阈值拥有相当的通用性, 更换聚焦环境之后依然适用。

3) 对粗调阶段所得到的清晰度评价值求平均值得到 \bar{f}_c , 保留函数值大于 \bar{f}_c 的点进行二次多项式拟合, 根据拟合曲线求得估计极值点, 驱动电机移动到该位置, 并进入精调阶段。

4) 精调阶段调整步长为基本步长 l , 首先判断方向, 连续向同一个方向搜索三个位置, 设其评价函数值分别为 K_1, K_2, K_3 , 如果 $K_1 < K_2 < K_3$, 说明处于爬坡阶段, 继续朝同方向搜索, 直到搜索到评价值下降点为止; 如果 $K_1 > K_2 > K_3$, 则说明方向错误, 则进行反方向搜索; 如果 $K_1 < K_2 < K_3$, 则说明刚好越过极值点, K_2 点即为极值点。

4 实验与分析

实验所用设备为武汉理工大学机器视觉实验室的显微视觉系统, 实物如图 3 所示。此系统由微调平台、运动控制模块、显微视觉模块和 PC 机组成。微调平台由 X-Y-Z 三个高精度线性运动自由度平台组成, 重复定位精度 $2 \mu\text{m}$ 。运动控制模块为美国 EMAC 四通道高性能数据采集系统。显微视觉模块由 CCD 摄像机和显微镜头以及图像采集卡组成。人机交互模块是在 VS2012 环境下使用 C++ 语言编辑, 结合开源视觉库 Opencv2.4.9, 软件界如图 4 所示。

实验所用的图像传感器 CCD 分辨率为 2048×1536 , 镜头为 ZL0911 变倍缩放工业镜头, 放大倍率为 $\times 0.7 \sim \times 4.5$ 。实验以真空吸附式微操作手末端为聚焦目标, 该目标末端直径为 1 mm 。首先通过显微视觉模块进行图像的采集, 然后通过 PC 机对采集的图像进行处理并发送信号到运

动控制模块, 进而微调平台带动相机模块运动。为了保证自动聚焦的实时性, 常用的做法是选择图像的一部分像素参与运算, 但是在显微操作中, 当物镜放大倍率发生改变时, 被观察的物体在图像中的位置会发生改变, 实时选择聚焦窗口又会增加算法的复杂度。因此采用图形金字塔技术对整幅图像作降采样操作, 以降低其运算负荷。

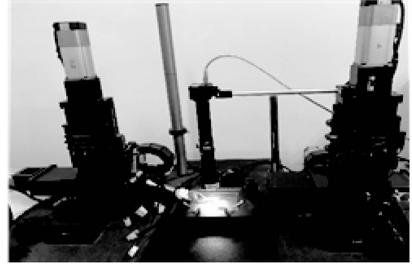


图 3 显微视觉微调平台



图 4 聚焦软件界面

4.1 聚焦评价函数性能实验

首先, 通过与传统算法的对比来验证所提出算法的可靠性。一共采样 150 幅图片, 相邻图片的采样间隔为 $10 \mu\text{m}$, 然后运用不同的算法绘制聚焦曲线。利用文献 [13] 中提出的部分评价指标并稍加修改来评价各聚焦曲线的性能, 四点评价指标如下:

1) 清晰度比率 $R=f_{\text{max}}/f_{\text{min}}$, 其中, f_{max} 为评价函数的最大值, f_{min} 为评价函数的最小值。

2) 陡峭区宽度, 将聚焦曲线分为平缓区和陡峭区, 设 (z_i, f_i) 为曲线上的离散点, 将满足 $f_n \sqrt{f_{n-1}} > a$ (a 取大于 1 的数) 的第一个点 (z_n, f_n) 作为左临界点, 其中 $\sqrt{f_{n-1}}$ 为前 $n-1$ 个点的评价函数值的平均值, 同理按相反方向获取右临界点坐标, 差值即为陡峭区宽度 W_x 。

3) 灵敏度因子, 定义灵敏度因子 SEN 为: $SEN = [f_{\text{max}} - f(z_{\text{max}} + \epsilon)] / f(z_{\text{max}} + \epsilon)$, 其中 f_{max} 为调焦评价函数的最大值, $f(z_{\text{max}} + \epsilon)$ 为横坐标变化 ϵ 时的函数值。

4) 处理一副图像平均所用时间 T 。

选取 SMD 函数、Brenner 函数、DWT 函数、Variance 函数以及本文中提出的函数 La-Cor 进行对比。绘制的聚焦曲线如图 5 所示 (纵坐标归一化)。

利用 4 种评价指标对各聚焦算法进行评估, 结果如 1 所示。

由图 5 和表 1 分析可知, Variance 函数曲线最平缓, 灵敏度和清晰度比率也都最差, SMD 函数和 Brenner 函数曲线峰值过于平缓, 且其灵敏度相对较低, DWT 函数和本文

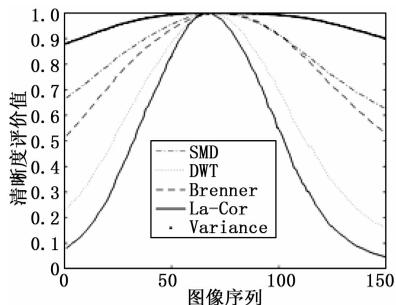


图 5 聚焦函数评价曲线

表 1 评价结果

算法	R	W_x	SEN	T/ms
SMD	1.60	100	0.62	9.6
Brenner	1.93	93	0.70	9.1
Variance	1.14	/	0.06	18.0
DWT	6.26	60	0.85	29.6
La-Cor	21.57	45	0.90	23.4

提出的 La-Cor 函数曲线都很好的满足单峰性和无偏性, 但 DWT 函数运算时间最长, 且其灵敏度和清晰度比率都不如本文提出的 La-Cor 函数。本文提出的 La-Cor 函数虽然其运算量稍大, 但其灵敏度和清晰度比率都最好, 综合性能最佳。

接着评价函数的抗噪性能, 截取 27 幅图像, 加入密度为 0.01 的椒盐噪声, 将本文算法与没有引入相关性的 Laplace 梯度算法做比较, 如图 6 所示。可以看出, 本文算法在有噪声干扰的情况下, 仍然能够保证单峰性和无偏性, 且灵敏度较高。

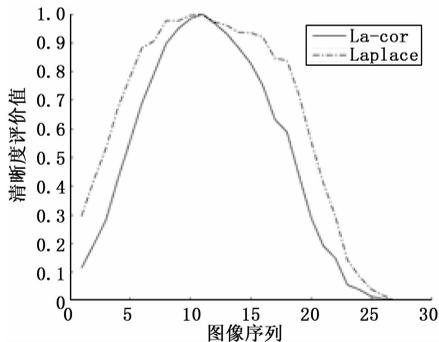


图 6 有噪声干扰的评价曲线

4.2 自动聚焦实验

将相关性加权的 Laplace 梯度函数作为聚焦评价函数, 采用第 3 节改进的爬山算法进行焦平面的搜索。大步长粗调阶段的步长设置为 $40 \mu\text{m}$, 精调阶段小步长设置为 $10 \mu\text{m}$ 。大步长曲线拟合阶段可以将聚焦范围缩小到焦平面 $80 \mu\text{m}$ 之内, 从而小步长可以准确地找到焦平面。

使用上述聚焦方案在 $\times 4.0$ 放大倍率下对真空吸附式微操作手末端进行自动聚焦, 聚焦过程如图 7 所示。该过程反映了图像由模糊到清晰的全过程, 验证了所提方案的有效性。

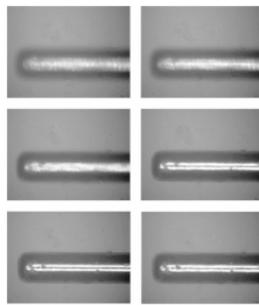


图 7 自动聚焦过程

5 结论

自动聚焦是显微视觉系统自动化的基本问题。重点对聚焦清晰度评价函数和极值搜索策略进行了研究改进。首先, 提出一种相关性加权的梯度清晰度评价函数, 相比传统评价函数增大了灵敏度, 且在一定程度上提高了抗噪性; 然后改进了爬山算法, 将曲线拟合用于粗调阶段, 避免了阈值设定的问题, 提高了算法适用性和成功率。实验表明, 所提出的聚焦方案具有可行性, 可用于微操作机器人的显微视觉系统的自动聚焦中。

参考文献:

- [1] Lee J Y, Wang Y H, Lai L J, et al. Development of an auto-focus system based on the micro method [J]. Measurement (S0263-2241), 2011, 44 (10): 1793-1800.
- [2] 尤玉虎, 刘 通, 刘佳文. 基于图像处理的自动对焦技术综述 [J]. 激光与红外, 2013, 02: 132-136.
- [3] 周丽平, 孙志峻, 张 泉. 显微视觉系统的自动聚焦及控制 [J]. 光学精密工程, 2013, 03: 807-812.
- [4] Maier A, Niederbrucker G, Stenger S, et al. Efficient focus assessment for a computer vision-based Vickers hardness measurement system [J]. SPEE, 2011, 8000 (17): 477-526.
- [5] 翟永平, 周东翔, 刘云辉. 极小景深条件下显微镜大范围聚焦算法 [J]. 光学学报, 2012, 04: 189-198.
- [6] Rudnaya M E, Morsche H G T. A derivative-based fast auto-focus method in electron microscopy [J]. Journal of Mathematical Imaging & Vision, 2012, 44 (1): 38-51.
- [7] 王焯茹, 冯华君, 徐之海, 等. 基于饱和像素剔除的自动对焦评价函数 [J]. 光学学报, 2016, 36 (12): 81-88.
- [8] 陈国良, 黄心汉, 王 敏, 等. 基于图像分析的显微视觉自动调焦方法研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2007 (05): 1-4.
- [9] 黄德天. 基于图像技术的自动调焦方法研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2013.
- [10] 王 健. 基于图像处理的自动调焦技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [11] 王 倩, 宋恩民, 许向阳, 等. 基于加权邻域相关性的显微镜自动聚焦函数 [J]. 光学精密工程, 2008, 01: 166-171.
- [12] 刘连杰, 陈 朋, 杨雷刚, 等. 一种用于平滑视频聚焦的自适应搜索算法 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2010, S1: 25-29.
- [13] 翟永平, 周东翔, 刘云辉, 等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取 [J]. 光学学报, 2011, 04: 242-252.