

宏/微双驱动定位台显微视觉自动聚焦清晰度评价方法*

于保军¹ 杨志刚² 田丰君² 董景石² 姜 斌³

(1. 长春工业大学机电工程学院, 长春 130012; 2. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025;
3. 空军航空大学航理系, 长春 130022)

【摘要】 在基于光学显微镜的微操作定位中,为了克服显微镜镜头在拍摄图像过程中的视场狭小、焦深短等问题,综合利用了基于梯度场的图像清晰度评价方法和基于小波变换的图像清晰度评价方法。将显微镜镜头安装在一维宏/微双精度定位平台上,用以保证显微镜镜头的运动精度。为了防止系统聚焦于面积最大的背景部分,采用了仅对目标区域进行清晰度评价计算的方法,保证系统仅对操作感兴趣的目标进行自动聚焦。通过以上技术实现定位机构的全闭环反馈控制。实验研究表明:系统的动态和稳定性能良好,系统的响应速度由0.3 帧/s 提高到3 帧/s,同时根据清晰度确定的空间位置关系还可以进行防碰撞控制。

关键词: 宏/微双重驱动 清晰度评价 显微视觉 自动聚焦

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)06-0199-05

Definition Evaluation of Auto Focus in Micro-vision
Based on the Macro-micro Dual-drive

Yu Baojun¹ Yang Zhigang² Tian Fengjun² Dong Jingshi² Jiang Bin³

(1. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China
2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China
3. Department of Aviation Theory, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract

In order to avoid small field-of-view and limited depth-of-field of micro-vision, image definition based on gradient field and wavelet transformation was used. Microscope was set on the macro-micro dual-drive table in order to ensure the positioning precision. A selective focusing technique was developed to auto focus on the objects in different depth. Closed-loop feedback control was carried out. Experimental results showed that dynamic performance and stability of the system was satisfied, the response velocity of system increased from 0.3 s⁻¹ to 3 s⁻¹, meanwhile, collision-avoidance was executed according to vertical position relations computed by image definition.

Key words Macro-micro dual-drive, Definition evaluation, Micro-vision, Auto focus

引言

由于微机电系统(MEMS)、生物医学工程、精密光学工程和超精密加工等领域的快速发展,迫切需要能够在亚微米级上进行精密定位的系统及装备。20 世纪 80 年代中后期,国内外学者相继提出宏/微双重驱动微操作系统的初步想法^[1~2]。目前它是实

现大行程、高精度定位的一种有效手段^[3~5]。而微操作过程中如何确定目标在 Z 方向上的位置,避免操作器件与被操作目标或操作台发生碰撞,是微操作中必须解决的一个关键技术。本文利用自行研制的宏/微双驱动精密定位微动台系统,通过显微镜头对目标进行拍摄获取序列图像。针对上述问题,利用图像清晰度评价函数来获取目标和操作背景的位

收稿日期: 2009-04-28 修回日期: 2009-07-10

* 国家自然科学基金资助项目(50735002)

作者简介: 于保军,副教授,主要从事压电驱动与控制 and 机电一体化研究, E-mail: bruce5257@126.com

通讯作者: 杨志刚,教授,博士生导师,主要从事压电驱动与控制研究, E-mail: yzg@jlu.edu.cn

置信息进行限位控制。

1 宏/微双驱动定位平台的组成与控制

宏/微双驱动定位平台的宏动部分(即宏动台)由精密级直线导轨和精密级滚珠丝杠组成,由交流伺服电动机直接驱动。交流伺服电动机采用日本三菱公司的 MR-J2S 系列驱动器驱动,该驱动器由台湾研华公司生产的伺服电动机控制卡 PCI-1240 控制。控制卡与驱动器的接口电路如图 1 所示。微动部分由压电驱动器构成,显微镜头、CCD、图像采集卡构成视觉位置传感器。该平台兼备伺服电动机和滚珠丝杠的大行程和压电陶瓷响应快、位移分辨率高等优点,微动部分的压电微驱动器可实现亚微米级的分辨率和定位精度。压电驱动器采用实验室自制的蠕动式直线驱动器^[6-10]。

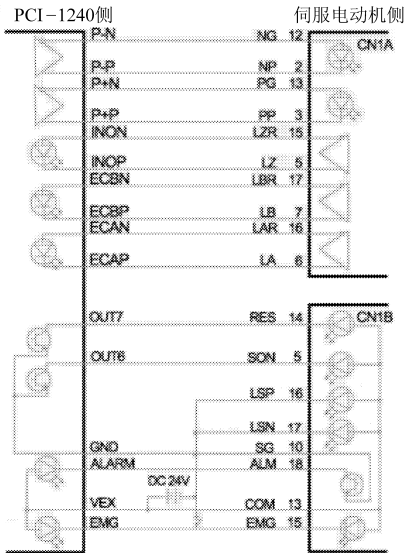


图1 伺服电动机驱动器与 PCI-1240 连接图
Fig.1 Link of servo driver and PCI-1240 card

2 清晰度评价函数

2.1 基于梯度场的清晰度评价函数

图像处理过程中常用微分法使图像尖锐化。最常用的处理方法是梯度法,清晰度评价函数的建立是以图像尖锐化的梯度法为基础^[11]。数量场的梯度定义如下:设一数量场 $u = u(x, y, z)$ 在场中某点 A 的方向导数在某一方向 p 上取到最大值,则称为 A 点的梯度,大小为 $\max(u)$,方向为 p 。由这个定义出发,如果给定一个函数 $f(x, y)$,在坐标 (x, y) 上的梯度可定义为一个矢量

$$\text{grad}[f(x,y)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{1}$$

由梯度的定义可以知道它有两个特点:矢量

$\text{grad}[f(x,y)]$ 是指向 $f(x,y)$ 最大增加率的方向;如果用 $G[f(x,y)]$ 来表示 $\text{grad}[f(x,y)]$ 的幅度,那么

$$G[f(x,y)] = \max \{ |\text{grad}[f(x,y)]| \} = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

就是说, $G[f(x,y)]$ 等于在 $\text{grad}[f(x,y)]$ 方向上每单位距离 $f(x,y)$ 的最大增加率。显然,式(2)是一个标量函数,并且 $G[f(x,y)]$ 永远为正。

在图像处理中常用差分运算代替微分运算。在计算机进行梯度计算时用绝对值运算,即

$$G[f(x,y)] \approx |f(x,y) - f(x+1,y)| + |f(x,y) - f(x,y+1)| \tag{3}$$

图2表示式(3)所表达的像素间关系。

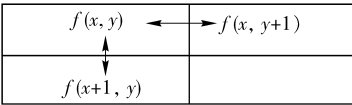


图2 式(3)表达的像素关系

Fig.2 Pixel relation of formula 3

关于梯度处理的另一方法是罗伯特梯度法。用绝对值近似计算式

$$G[f(x,y)] \approx |f(x,y) - f(x+1,y+1)| + |f(x+1,y) - f(x,y+1)| \tag{4}$$

图3表示式(4)所表达的像素间关系。

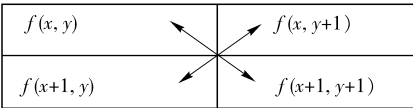


图3 式(4)表达的像素关系

Fig.3 Pixel relation of formula 4

由式(4)可知,梯度的近似值和相邻像素的灰度差成正比。梯度值可以近似表示出该相邻图像区域的尖锐程度,由此推及整个 $N \times N$ 图像区域,将各个相邻图像区域的梯度求和,即图像的对比度,则可以表征该图像的清晰程度。由此得到常用的清晰度评价函数^[11]。

(1) 4 邻域灰度差绝对值之和评价函数

$$P_1 = \sum_{x=1}^{N-2} \sum_{y=1}^{N-2} [|f(x,y) - f(x-1,y)| + |f(x,y) - f(x+1,y)| + |f(x,y) - f(x,y-1)| + |f(x,y) - f(x,y+1)|] \tag{5}$$

(2) 4 邻域灰度差方和评价函数

$$P_2 = \sum_{x=1}^{N-2} \sum_{y=1}^{N-2} \{ [f(x,y) - f(x-1,y)]^2 + [f(x,y) - f(x+1,y)]^2 + [f(x,y) - f(x,y-1)]^2 + [f(x,y) - f(x,y+1)]^2 \} \tag{6}$$

2.2 基于小波变换的清晰度评价函数

Yang 和 Nelson 提出了基于小波变换高频系数

的清晰度评价函数^[12]

$$M_1 = \frac{1}{MN} \left\{ \sum_{(x,y) \in E_{LH}} [W_{LH}(x,y) - \mu_{LH}]^2 + \sum_{(x,y) \in E_{HL}} [W_{HL}(x,y) - \mu_{HL}]^2 + \sum_{(x,y) \in E_{HH}} [W_{HH}(x,y) - \mu_{HH}]^2 \right\} \tag{7}$$

$$M_2 = \frac{1}{MN} \left[\sum_{(x,y) \in E_{LH}} |W_{LH}(x,y)| + \sum_{(x,y) \in E_{HL}} |W_{HL}(x,y)| + \sum_{(x,y) \in E_{HH}} |W_{HH}(x,y)| \right] \tag{8}$$

式中 M ——图像宽度 N ——图像高度
 W ——小波分解后的高频系数
 μ ——分解系数平均值

经实验比较,式(8)具有良好的特性,获得了更好的评价效果。

M_1 和 M_2 是图像小波分解高频系数的一阶矩和二阶矩。通过计算图像序列分解后的小波高频系数的变化特征来判定图像清晰度时,实验用图像序列中中间一幅图像最清晰,两侧图像逐渐变得模糊。图像最清晰时,小波分解后的高频系数也最大,随着图像离焦越远,图像越模糊,小波分解后的高频系数随之变小。

图像的低频系数随着图像模糊程度的加大而变大,这是由正交小波变换能量不变特性造成的^[12]。小波分解系数也呈相应的变化趋势,如图 4 所示。

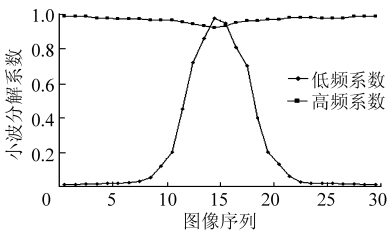


图 4 小波分解高、低频系数变化曲线

Fig.4 Curve of wavelet-based low frequency and high frequency coefficients

由图可以看出,图像清晰度的变化趋势与小波变换高频系数的变化趋势完全相同。所以,完全可以利用图像序列的小波变换高频系数来确认序列图像中哪一幅图像最清晰。

2.3 两种清晰度评价函数的综合应用

根据式(5)、(6)和(8)对图像的清晰度进行计算比较,可以获得图像清晰度比较图(图 5)。

从图中可以看出,基于小波变换的图像清晰度评价函数具有良好的判断性能,根据相同的方法可以将其它目前较常用的图像清晰度评价函数与小波变换的图像清晰度评价函数进行比较,完全可以得

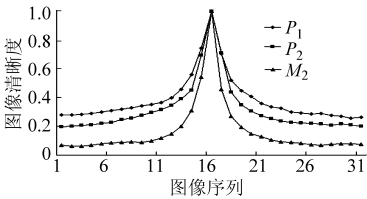


图 5 清晰度评价函数性能比较结果

Fig.5 Comparison result of image definition function

出相同的结论。然而,由于小波分析涉及到大量的各种方式的数学运算,因此,在计算机中进行小波变换时,需要占用较多的内存,耗时也大。表 1 是本文提到的几种图像清晰度评价函数在进行清晰度评价运算时在一帧图像处理所需的时间。

表 1 不同清晰度评价函数的运算耗时
Tab.1 Time consuming of different image definition function

definition function					ms
图像尺寸	P_1	P_2	DB 小波	COIF 小波	SYM 小波
768 × 576	125	138	1 549	1 653	1 856
320 × 240	31	43	376	395	427

可以看出, P_1 的耗时最小,而 SYM 小波的耗时最大。在实验和驱动器的实际使用过程中,如果仅使用基于小波变换的清晰度评价函数则会耗时非常高。为此,提出综合应用传统清晰度评价函数和小波变换清晰度评价函数的方法加以解决。既可以获得准确的清晰图像的位置,又可以避免消耗大量时间。具体过程如下:

(1) 从图 5 可以看出,传统清晰度评价函数与小波变换清晰度评价函数在序列图像的清晰度判断过程中的趋势是一样的。为此,首先利用传统清晰度评价函数对图像序列进行清晰度计算,可以粗略判断出在哪几幅图像位置附近图像清晰度最高。

(2) 利用小波变换的清晰度评价函数对第一步判断所得的几幅清晰度较高的图像进行进一步判断,最终确定哪一幅图像的清晰度最高。

(3) 在第一步的判断中,既可以在清晰度曲线的单边进行判断,也可以在双边进行。单边判断能节省时间,但无法去除奇异点。双边判断则相反。

3 实验与应用

实验系统由 7 部分组成:计算机、运动控制卡、显微镜、CCD、图像采集卡、伺服电动机及其驱动器、压电陶瓷驱动的微动工作台及其驱动器。压电驱动器采用日本 TOKIN 公司生产的型号为 AE0505D08 的压电叠堆,其具体参数为:截面尺寸为 5 mm × 5 mm;长度为 10 mm;最大变形量为 8 μm;最高承受电压为 150 V;最大输出驱动力为 850 N。

压电陶瓷电源采用哈工大博实精密测控公司研制的 HPV 系列产品。

3.1 目标的自动聚焦实验

由于在同一视场中,夹持器等操作器件与被操

作器件在某些时刻的高度可能不等,可能造成一幅图像中既有处于焦平面的目标,也有处于离焦状态的目标,如图 6 所示。图 6a 聚焦于夹持器上,而图 6b 聚焦于被操作目标上。图 6c 聚焦于背景上。

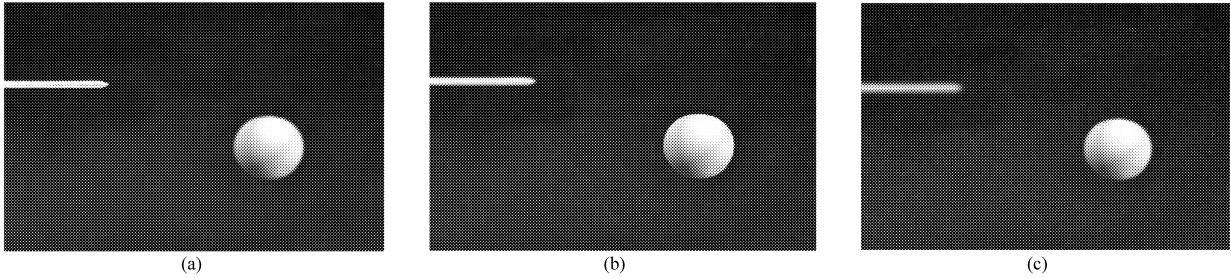


图 6 聚焦于不同目标上的图像
Fig. 6 Focus image of different object

如果只按照整体图像的清晰度来判断哪一幅图像最清晰,会将清晰图像固定在图 6c 上,因为该图中背景所占的比例最大,在背景最清晰的图像中背景对于清晰度计算的贡献也最大。如图 7 所示。

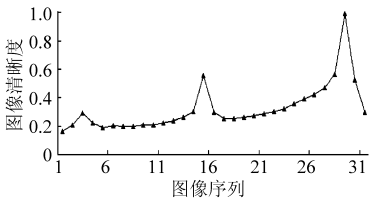


图 7 整体图像的清晰度变化曲线
Fig. 7 Curve of entire image definition

由图 7 看出,在图像序列 3 和 15 附近出现了 2 个尖峰点,而这两个位置正好是操作器和目标最清晰时图像的序列位置。如果根据整幅图像的清晰度进行判断,则只会得到在图像序列 29 附近的图像,从而造成误判断。

因此,为了能够正确的确定目标清晰度最高的位置,要将清晰度评价函数作用于目标所在的区域,来获得目标的最清晰位置。图 8 为分别在操作器、目标和背景局部区域内聚焦于操作器、目标和背景的图像清晰度变化曲线。

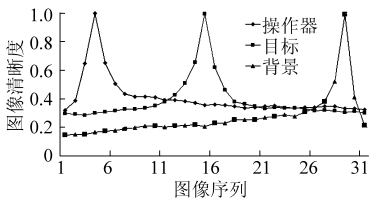


图 8 分别聚焦于操作器、目标和背景局部区域内的图像清晰度变化曲线

Fig. 8 Curve of image definition in different object

从图中可以看出,根据计算目标在各自区域内图像清晰度的变化可以找到目标最清晰的位置,从而为后续操作创造条件。

3.2 在接触碰撞控制中的应用

在自动调焦和操作过程中,操作器、目标和背景均处于同一视场内,而一个摄像头的一幅图像则只能提供平面信息,无法获取深度距离。然而,在操作过程中又必须知道三者之间在 Z 轴方向上的空间位置关系,为此利用了显微镜镜头具有的焦深短的特点,通过清晰度评价函数来判断各个器件之间的空间位置关系。具体操作控制过程如图 9 所示。

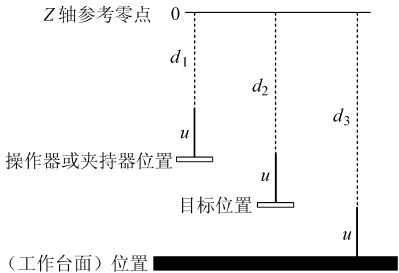


图 9 清晰度评价函数在 Z 方向接触碰撞控制中应用示意图

Fig. 9 Image definition application in Z direct collision control

(1) 系统上电时首先将所有运动部件回到坐标零点,此时处于 Z 轴上的摄像头回到了最上方。

(2) 首先将操作器件处于一个已知的距显微镜镜头最近的位置(由精密光栅尺反馈)。

(3) 将目标放置在载物台上,这样就能够获得操作器、目标和背景三者的空间位置关系。操作器在最上方,其次是目标,最后是背景。

(4) 在运动控制过程中分别对操作器、目标和背景区域的一部分求取清晰度,并在序列图像的清晰度变化过程中来判断三者之间的位置关系。由摄像头成像原理和图 9,设焦平面到摄像头的距离为 u ,为未知数。在运行过程中,首先由驱动摄像头的宏/微双精度微动台带动摄像头聚焦于操作器或夹持器所在位置,记此时摄像头在 Z 轴方向的运动距

离为 d_1 ,然后继续驱动摄像头使其聚焦于目标区域上,记此时摄像头在 Z 轴方向的运动距离为 d_2 ,最后将摄像头聚焦于背景(工作台面)上,记此时摄像头在 Z 轴方向的运动距离为 d_3 。

(5) 系统的碰撞控制规则如下:摄像头的运动距离 d 应不大于摄像头聚焦于背景上时的距离,即 $d < d_3$ 。

当操作目标确定后,目标区域获得最大清晰度值时系统已经聚焦于目标的最大边缘处。此时,控制夹持器向目标边缘运动,其运动距离 $d = d_2 - d_1$ 。操作器的运动方式及距离也是依据同样的原理,只是此时目标已经被夹持器固定。

通过以上控制策略可以避免系统在 Z 轴方向

上发生碰撞,并且可以使各个运动部件完成在 Z 轴上的定位,运动距离与焦平面到摄像头的距离 u 无关。

4 结束语

构建的综合应用传统清晰度评价函数和小波变换清晰度评价函数进行定位的方法,比仅使用基于小波变换的清晰度评价函数系统响应速度提高近10倍,从0.3帧/s提高到3帧/s,同时使系统具有较高的聚焦精度和聚焦分辨率。为了避免系统聚焦于非目标区域,采用目标区域选择的方法来实现对目标的自动聚焦,并可应用于避免系统运动器件在 Z 轴方向上发生碰撞。

参 考 文 献

- 1 Sharon A, Hogan N, Hardt D E. High bandwidth force regulation and inertia reduction using a macro/micro manipulator system[C]//1988 Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics&Automation, Philadelphia, 1988:126~132.
- 2 Weber T E, Hollis R L. A vision based correlator to actively damp vibrations of a coarse-fine manipulator[C]//1989 Proceedings of the IEEE international Conference on Robotics & Automation, Scollsdale, 1989:818~825.
- 3 Chen O J, Wolfgang H. Development of 4 DOF planar macro-micro manipulators system[C]//IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, Sevilla, 2002:2 231~2 236.
- 4 节德刚,刘延杰,孙立宁,等.一种宏微双驱动精密定位机构的建模与控制[J].光学精密工程,2005,13(4):171~178.
Jie Degang, Liu Yanjie, Sun Lining, et al. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism[J]. Optics and Precision Engineering, 2005,13(4):171~178. (in Chinese)
- 5 孙立宁,董为,杜志江.宏/微双驱动机器人系统的研究现状与关键技术[J].中国机械工程,2005,16(1):89~93.
Sun Lining, Dong Wei, Du Zhijiang. State of the art and key technologies of macro/micro dual manipulator system[J]. China Mechanical Engineering, 2005,16(1):89~93. (in Chinese)
- 6 于保军,杨志刚,周广禄.基于TMS320DM642和S3C2410的细胞注射装置控制系统[J].光学精密工程,2008,16(8):1 500~1 507.
Yu Baojun, Yang Zhigang, Zhou Guanglu. Control system for cell injection device based on TMS320DM642 and S3C2410 [J]. Optics and Precision Engineering, 2008,16(8):1 500~1 507. (in Chinese)
- 7 于保军,杨志刚,齐会良,等.基于显微视觉的宏/微双驱动微动台系统[J].农业机械学报,2008,39(2):125~129,174.
Yu Baojun, Yang Zhigang, Qi Huiliang, et al. The research of macro-micro dual-drive micro-locomotion platform based on micro-vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(2):125~129,174. (in Chinese)
- 8 于保军,张玮,王红东,等.基于显微视觉的宏/微双驱动微动台自动标定的研究[J].吉林大学学报:工学版,2008,38(6):1 326~1 331.
Yu Baojun, Zhang Wei, Wang Hongdong, et al. Research of auto calibration of macro-micro dual-drive micromotion stage based on micro-vision[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008,38(6):1 326~1 331. (in Chinese)
- 9 程光明,杨志刚,曾平,等.压电式移动机构的研究[J].压电与声光,2003,25(2):106~108.
Cheng Guangming, Yang Zhigang, Zeng Ping, et al. Study of piezoelectric locomotive mechanism[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2003,25(2):106~108. (in Chinese)
- 10 李欣欣,卢全国,杨志刚,等.蠕动式精密直线驱动器[J].吉林大学学报:工学版,2003,33(4):20~24.
Li Xinxin, Lu Quanguo, Yang Zhigang, et al. Precision linear actuator of piezoelectric based on wriggle principle[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2003,33(4):20~24. (in Chinese)
- 11 徐慧. Visual C++数字图像实用工程案例精选[M].北京:人民邮电出版社,2004:110~118.
- 12 谢晖.微操作显微视觉/微力控制及其混合控制技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005:41~43.
Xie Hui. Microscopic vision/microscale force control and their integration techniques for micromanipulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005:41~43. (in Chinese)