

文章编号: 1000-8152(2002)02-0220-05

## 微操作机器人系统拟实环境的建模与实现\*

谢少荣<sup>1</sup> 彭商贤<sup>2</sup> 赵新<sup>3</sup> 卢桂章<sup>3</sup>

(1. 上海大学精密机械工程系·上海, 200072; 2. 天津大学机械学院智能机械研究所·天津, 300072;  
3. 南开大学机器人与信息自动化研究所·天津, 300071)

**摘要:** 建立微操作机器人的拟实环境结构, 应包括微操作环境的建模、微操作工具的建模及模型叠加三部分; 本文就微操作环境的建模与实现和微操作工具的建模与实现这两部分的关键技术: 图像传输、虚拟微操作器的生成、虚拟显微镜、虚拟成像过程及虚拟控制器给出了实现方案, 并在基于微机的硬件结构和 Visual C++ 及 OpenGL 组成的软件环境里, 得到了虚拟微操作环境和虚拟微操作工具的动态模型。

**关键词:** 拟实环境; 虚拟显微镜; 虚拟成像; 微操作  
**文献标识码:** A

## Modeling and Implementation of Virtual Environment of Micro Operation Robot System

XIE Shaorong<sup>1</sup>, PENG Shangxian<sup>2</sup>, ZHAO Xin<sup>3</sup> and LU Guizhang<sup>3</sup>

(1. Department of Precision Machinery Engineering, Shanghai University · Shanghai, 200072, P. R. China;  
2. Intelligent Machine Institute, Tianjin University · Tianjin, 300072, P. R. China;  
3. Institute of Robot and Information Automation, Nankai University · Tianjin, 300071, P. R. China)

**Abstract:** Build of virtual micro operation environment is studied for micro operation robot system. It consists of modeling of micro operation environment, modeling of micro operation tool and combination of the two models. Then, techniques of transferring image, generating picture of virtual micro tool, virtual microscope, virtual imaging and virtual controller are discussed in detail. Finally, virtual environment and virtual tool of virtual micro operation system are obtained with personal computer and Visual C++ and OpenGL.

**Key words:** virtual environment; virtual microscope; virtual image; micro operation

### 1 引言(Introduction)

在现代生物医学工程中, 随着细胞生物学、遗传学、基因工程等科学的发展, 像细胞分离、细胞融合、细胞的转基因注射等细胞级的微细操作越来越被广泛应用。目前此类操作都是由实验人员通过显微镜观察微操作空间, 再由手工调节传动装置, 移动微操作工具作三维运动, 最终实现要求的操作。一般操作成功率低, 操作质量易受主观因素的影响等, 制约了这项技术的普及和应用。因此, 研制出一台计算机控制的自动或半自动进行操作的微操作机器人, 不仅会把技术人员从高精度、单调的微操作中解放出来, 还可提高操作质量和成功率。图 1 就是这样一台由计算机控制的微操作机器人, 该机器人显微操作系统包括四部分: 一是固定在微操作机器人系统右

臂上的微操作工具——注射用的微针; 二是固定在左臂上的捕捉器, 用于固定细胞; 三是载物台和倒置显微镜; 四是计算机显示器。进行微操作时, 首先搜寻操作对象, 让其处于显微镜视野中心, 再经调节显微镜, 使操作对象清晰; 然后移动右臂, 使微操作工具进入显微镜视野之内, 并沿 Z 方向移动微操作工具, 使其清晰, 最后沿 X, Y 方向移动微操作工具, 使其末端与操作对象的操作点重合<sup>[1]</sup>。

在上述微操作过程中, 微操作工具和被操作对象均需精确微定位以及到达目标点的高精度轨迹规划。而显微镜下的微操作工具和被操作对象都无法直接测量, 一般只能通过单目显微视觉间接获得, 存在一定的误差, 过大的误差会导致操作失误, 从而造成微操作工具的损坏或生物样品被破坏等严重后果。

\* 基金项目: 国家自然科学基金(69985006, 60173061), 教育部高等学校骨干教师资助计划, 973 计划“集成微光机电系统”项目和天津市自然科学基金共同资助项目。

收稿日期: 2000-06-06; 收修改稿日期: 2001-01-16。

因而希望有一个与实际显微操作系统相对应的拟实环境,以便在实际进行显微操作之前,在此环境中对操作过程进行预演,得到成功的操作方案后,再用来指导实际操作,这样就可大大提高操作成功率.本文正是要利用虚拟现实技术建立这样一个与微操作机器人实际操作系统相对应的拟实环境.

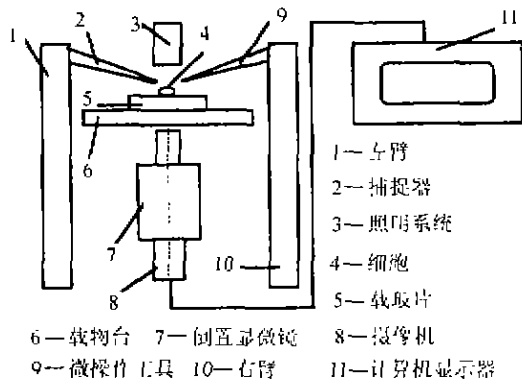


图 1 显微操作系统  
Fig. 1 Micro-operation system

## 2 拟实环境的结构 (Structure of virtual environment)

实际微操作环境如图 2 所示.为在拟实环境中能逼真地再现实际微操作过程,拟实环境中应包括:操作对象、微操作工具、操作环境及与实际驱动方式相一致的虚拟控制器.本文讨论的操作对象是生物体,经实际操作过程后,操作对象是作为后续操作的定位基准,不再改变位姿.因此在拟实环境中保持其显微图像表示方式.拟实环境中的操作环境利用这一显微图像.在拟实环境下的预演操作主要包括:通过虚拟控制器,移动微操作工具,使其末端与操作对象在同一焦平面上,并且在 X-Y 平面上与操作对象的操作点重合.为了方便地实现这一动态过程,微操作工具采用图形绘制的描述方式.

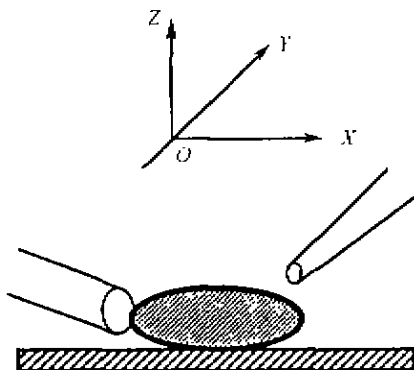


图 2 实际微操作环境  
Fig. 2 Real micro operation environment

实际微操作的全部过程都是操作者通过观察显

微图像的清晰度/模糊度变化情况来得知微操作工具在物镜光轴方向的移动情况,判断微操作工具是否到达操作对象所在的焦平面的判据也是显微图像的清晰度/模糊度.因此,为了逼真地再现实际调焦、成像过程,需引入显微镜光学模型,也就是虚拟显微镜技术.此外,还需采用实际微操作工具的控制方式操纵虚拟微操作工具,以保持拟实操作的高度有效,即虚拟控制器.

由上所述,建立此拟实环境应包括以下三个部分:

- 1) 微操作环境的建模与实现.即将位于显微镜焦平面上的被操作对象及其所在的操作环境的清晰图像传输到显示器上,作为拟实环境中的一部分“现实”,形成所谓传输现实.它是拟实环境的基准.
- 2) 微操作工具的建模与实现.即生成微操作工具的动态模型,形成所谓生成现实.首先,生成高精度的微操作工具三维图形模型,得到虚拟微操作工具的物体坐标;接着,经模型取景变换,得到虚拟微操作工具的视觉坐标;最后,经虚拟显微镜成像,利用虚拟控制器调节模型取景变换,使其达到清晰,逼真地再现显微镜的调焦过程.

3) 模型叠加.将在虚拟显微镜下生成的微操作工具虚拟图像作为前景,叠加到 1) 中的显微图像上,形成所谓增强现实.

## 3 微操作环境的建模与实现方法 (Modeling and implementing method of micro operation environment)

本系统采用基于微机的硬件结构和 Visual C++ 及 OpenGL 组成的软件环境.

图像传输结构示意图如下:

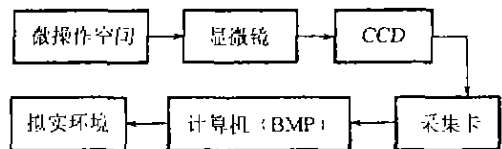


图 3 传输现实结构示意图  
Fig. 3 Block diagram of transferring reality

操作对象及其环境的清晰图像经摄像机摄取,计算机处理后,将“现实”传输到拟实环境中.从微操作空间到生成 BMP 图像文件均已在实际环境中实现.本文只将 BMP 文件中的图像数据传输到拟实环境中,作为拟实环境的背景.实现图像传输需如下三步:

- 1) OpenGL 窗口的创建和初始化.在 Visual C++ 中创建 MFC 应用程序框架;设置并选定像素

格式;生成并获得 OpenGL 绘图底板 RC;取得当前绘图区域及句柄。

2) 读取 BMP 文件中的图像数据.本系统获得的 BMP 文件格式为:54 个字节的头文件;图像属性为  $800 \times 514 \times 16M$ .因此像素  $(x, y)$  的读取指针为:

$$P_R = 54 + 3 \times 800 \times y + 3 \times x. \quad (1)$$

据此用 `fgetc(fin)`;按字节依次读取像素点的 RGB 三色强度。

3) 场景绘制.在 MFC 应用程序框架的视类中添加场景绘制函数 `drawscene()`.在此函数中,首先利用图像的强度模型:

$$\text{Grey} = 0.30R + 0.58G + 0.12B, \quad (2)$$

进行色彩空间转换,将步骤 2)中取得的每个像素点的强度转换成灰度值.然后通过 OpenGL 的命令对 `glBegin(GL-POINTS);/glEnd()`;中的 `glColor3f` 命令指定像素点的灰度值以及 `glVertex3f` 命令给定像素位置.从而逐点将图像映射到窗口中,实现理想的图像传输。

#### 4 微操作工具的建模与实现方法 (Modeling and implementing method of micro operation tool)

生成现实包含:虚拟微操作工具的生成、虚拟显微镜的生成、虚拟成像过程及虚拟控制器.是建立拟实环境的核心工作。

##### 4.1 虚拟微操作工具的生成 (Generating picture of virtual micro tool)

本文采用的微操作工具选用微注射用的玻璃针.利用图像恢复的方法,来获取其三维图形的描述.实现过程是:

首先利用实际操作系统取得将微操作工具水平放置在载物台上的清晰显微图像,通过图像处理识别出玻璃针的平面图形.假设玻璃针尖端沿自身的中心轴线每一截面都是圆,因而只需将上述平面图形沿其中心轴线旋转一周,即可获得玻璃针尖端的三维图形.也就是生成了虚拟微操作工具.以针尖端面圆心为坐标原点,以其中心轴线为  $x$  轴,建立物体坐标架,可用方程(1)来描述微操作工具:

$$\begin{cases} x_0 = x_i, \\ y_0^2 + z_0^2 = r_i^2. \end{cases} \quad (3)$$

式中  $(x_0, y_0, z_0)$  为物体坐标; $r_i$  为在从图像获得的平面图形上位于  $x_i$  处截面半径。

##### 4.2 虚拟显微镜的生成 (Virtual microscope)

1) 显微镜的光学模型.根据几何光学成像原

理,如果实际成像平面与聚焦成像平面有一定距离,那么物点  $P$  在像平面上所成的像不再是一个清晰的像点,而是一个模糊的圆,即焦斑.若透镜和成像平面的位置都固定不变,只改变物点的位置,则该模糊圆的直径  $d$  与物距之间的关系是:

$$d(\epsilon) = \frac{\epsilon \cdot f \cdot D}{(u_0 + \epsilon)(u_0 - f)}. \quad (4)$$

式中  $u_0$  为成清晰像时的物距; $\epsilon$  为物距  $u_0$  的偏差量.设定远离透镜方向为正,反之为负; $f$  为透镜的焦距; $D$  为透镜的直径.对于本显微系统, $f, D, u_0$  都是固定值,经标定得到。

由于光的衍射效应和透镜成像的非理想化,焦斑中的光强度分布可用二维高斯函数来近似<sup>[4]</sup>:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/(2\sigma^2)}. \quad (5)$$

式中  $h(x, y)$  的意义是点物体的像,称为该成像系统的点扩散函数. $\sigma = k \cdot d$ ,  $\sigma$  为该透镜的扩展参数, $k$  为显微镜的特性常数.因而可用有限个点的焦斑覆盖整个微操作工具模型。

2) 光学成像系统的物理行为建模<sup>[2,3]</sup>.显微镜成像是直接成像,即光学成像系统直接把物体各点转换为相应图像的各像元.若系统的输入代表被观察的物体,系统的输出代表最后得到的可观察的图像,则此成像系统的输入和输出的关系可完全表征这系统的特性.在实际光学成像系统中,虽然一般都不是严格线性的,但采用线性系统理论描述本系统的主要特性已足够.此外假设,在物空间等晕区内系统保持平移不变.这样对于系统的任何输入函数  $f(r)$  都可看成  $\delta$  函数的叠加,即有

$$f(r) = \int dr_0 f(r_0) \delta(r - r_0), \quad (6)$$

$r, r_0$  为二维坐标矢量.根据线性假设,由线性系统的叠加原理可知,只要知道系统对所有的  $\delta(r - r_0)$  的输出即可得到系统对  $f(r)$  的输出.根据平移不变假设,可设系统对  $\delta(r - r_0)$  的输出为  $h(r - r_0)$ , 则系统的输出为:

$$g(r) = \int dr_0 f(r_0) h(r - r_0). \quad (7)$$

由卷积的定义可知,式(7)描述的系统输出与输入间的关系就是输入  $f(r)$  与函数  $h(r)$  的卷积.也就是说卷积能出色地表达光学系统的成像.若给定的被观察物  $f(x, y)$ ,经一光学系统所成的像为  $g(x, y)$ , 则有

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y). \quad (8)$$

式中  $*$  为卷积操作,  $h(x, y)$  为系统点扩散函数.由

此可见像面上每点的强度是来自输入信号一定范围内的点的贡献的叠加,贡献的权重分布与点扩散函数分布一样.

若将微操作工具离散化为  $M \times N$  个点,则用来描述显微镜下模糊操作工具图形的像点光强为:

$$g(m, n) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) h(m - i, n - j) I_{d(i, j)} \left( \frac{d^2(i, j)}{4} \right) \quad (9)$$

式中  $h(m - i, n - j)$  是  $d(i, j)$  的函数;  $d(i, j)$  是点  $(i, j)$  处的模糊圆直径,由式(4)可得.

### 4.3 虚拟成像过程(Virtual imaging)

与实际显微成像过程相一致,虚拟成像过程如图4所示.

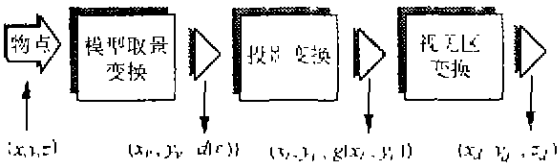


图4 虚拟成像坐标变换过程

Fig. 4 Change of coordinates during virtual imaging

首先,将模型取景变换作用于输入的物体坐标产生视觉坐标  $(x_v, y_v, d(\epsilon))$  如式(10)所示,  $d(\epsilon)$  表示模糊圆直径,  $(x_v, y_v)$  表示模糊圆圆心在 CCD 感光晶面上的位置;  $(x_0, y_0)$  表示物体坐标系原点在 CCD 感光晶面上的投影;  $z_0$  表示物体坐标系原点远离透镜的距离;  $(p_x, p_y, p_z)$  表示物点  $(x, y, z)$  在物体坐标系中的位置.

$$\begin{cases} x_v = x_0 + p_x, \\ y_v = y_0 + p_y, \\ d(\epsilon) = d(z_0 + p_z - u_0). \end{cases} \quad (10)$$

接着,将视觉坐标经虚拟显微镜作投影变换可得图像坐标  $(x_i, y_i, g(x_i, y_i))$  如式(9)所示:

$$\begin{cases} x_i = x_v, \\ y_i = y_v, \\ g(x_i, y_i) = g(d(\epsilon)), \end{cases} \quad (11)$$

$g(x_i, y_i)$  表示像点  $(x_i, y_i)$  的灰度值.将式(10)中的  $d(\epsilon)$  代入式(9),即可得出  $g(x_i, y_i)$ .

最后,定义虚拟视野,经视见区变换将可视部分转换成窗口坐标  $(x_d, y_d, z_d)$  显示在显示器上.

### 4.4 虚拟控制器(Virtual controller)

虚拟控制器应包括以下两个部分:友好的人——拟实环境交互界面和按实际微操作工具的控制方式对虚拟操作实时响应.虚拟驱动微操作工具的

响应就是实时更新模型取景变换.本系统已实现了按实际微操作系统的界面操纵拟实环境.

## 5 模型叠加 (Models overlapping)

增强现实是一种利用计算机对使用者所看到的真实世界产生的附加信息进行景像增强或扩张的技术.在增强现实的环境中,使用者可以在看到周围真实环境的同时,看到计算机产生的增强信息.这种增强信息可以在真实环境中与真实环境共存的虚拟物体.本系统正是将虚拟微操作工具按  $X-Y$  方向坐标位置叠加到实际微操作工具显微图像上,形成增强现实的拟实环境.

## 6 实验结果 (Experimental results)

### 1) 传输现实实验结果.

按第3节中微操作环境的模型与实现方法得到的拟实环境中微操作环境如图6所示,包含操作对象——细胞、微操作环境——细胞培养液等.

### 2) 生成现实实验结果.

在微操作工具实际图像中取尖端部分的清晰图像,按第4节中微操作工具的模型与实现方法生成的实验结果如图5所示.(a)是清晰的虚拟微操作工具,(b)是具有一定模糊度的虚拟微操作工具.



(a) (b)

图5 虚拟微操作工具

Fig. 5 Virtual micro tool out

### 3) 模型叠加实验结果.

在传输“现实”的基础上,以代表虚拟微操作工具的像素点灰度值覆盖对应的像素点,其结果如图6所示.

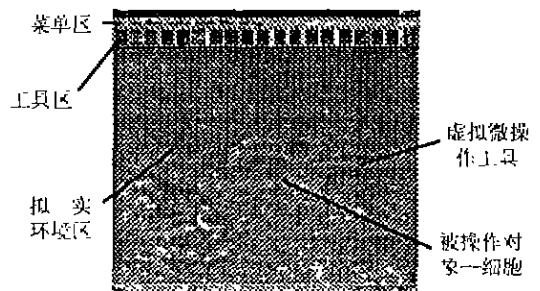


图6 微操作拟实环境

Fig. 6 Virtual micro operation environment

## 7 结论 (Conclusion)

本文构筑了一个与实际显微操作系统及其行为相对应的拟实环境.操作人员可以在此环境中预演

操作,获得成功的操作方案来指导实际操作.而且还可利用此拟实环境辅助微操作工具 Z 方向高精度定位(详见参考文献[5]和[6]),解决微操作系统难以用传统的检测、定位方法获取深度信息的问题,这是拟实环境对于实际微操作无可替代的促进作用.

### 参考文献(References)

- [1] Zhao X, Lu G Z and Zhang J X. Real and virtual micro operation environment [A]. Proceedings of the Lasted Int Conf., Robotics and Applications [C], Santa Barbara, California, 1999, 169 - 173
- [2] Born M and Wolf E. Principles of Optics [M]. London: Pergamon, 1965
- [3] Wang Zhujang and Wu Shudong. Imaging Optics [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1991 (in Chinese)
- [4] Liu Lianchen. Study on micro-operating robot and its micro-visual servo control system [D]. Tianjin: Nankai University, 1998 (in

Chinese)

- [5] Xie Shaorong, Peng Shangxian, Zhao Xin, et al. Study on Z-directional position method of micro-tool based on virtual microscope [J]. High Technology Letters, 2001, 11(9): 72 - 75 (in Chinese)
- [6] Xie Shaorong. Study on the virtual environment of micro systems [D]. Tianjin: Tianjin University, 2000 (in Chinese)

### 本文作者简介

谢少荣 1972年生,2001年3月于天津大学获博士学位,现在上海大学做博士后研究工作.主要研究方向:智能机器人及机电自动化,虚拟现实 Email: xieshaorong@x263.net

彭尚贤 1932年生,天津大学教授,博士生导师,智能机械研究所所长.主要研究领域:智能机器人及机电自动化.

赵新 1968年生,南开大学机器人及信息自动化研究所副教授.主要研究方向:智能机器人,虚拟现实.

卢桂章 1938年生,南开大学教授,博士生导师,信息学院院长.主要研究领域:机器人学,信息自动化.

## 第二十一届中国控制会议

### 征文通知

#### 征文范围

非线性系统;系统建模与辨识;专家智能控制;最优控制;稳定性分析;CIMS;鲁棒控制;变结构控制;机器人控制;H<sub>∞</sub>控制;分布参数系统;故障检测与诊断;预测控制;DEDS与HDS;电力系统;随机控制;大规模、复杂系统;交通系统;自适应控制;过程控制;社会经济系统;模型降价;模糊系统与控制;生态环境系统;优化方法;神经网络.

上述各方面的实际应用.

#### 投稿说明

1. 所有稿件(包括论文、邀请组说明及其论文摘要)务必投给程序委员会秘书处.
2. 既可以网上投稿,也可以通过邮局投稿.选择其中一种方式即可.千万不要两种方式都用,以免造成重复投稿.
3. 有关网上投稿的说明及注意事项请查看程序委员会的网页:<http://ccc.iss.ac.cn>
4. 通过邮局投寄的稿件,要求一式三份,并附页说明:论文题目、摘要、3~5个关键词,联系人的姓名、地址、电话、Email等.
5. 拟组织邀请组的组织者,需提供1000字的组织说明及该组全部拟邀请论文的详细摘要.同一特邀组论文的主题应鲜明、集中.

#### 重要日期

论文投稿截止:2002年3月15日;论文录取通知:2002年4月15日;激光稿寄到时间:2002年5月30日.

#### 程序委员会秘书处

刘智敏 教授

北京中关村,中国科学院系统科学所 邮编:100080

电话:86-10-62532161 传真:86-10-62587343

Email:ccc@control.iss.ac.cn 网址:<http://ccc.iss.ac.cn>

#### 组织委员会秘书处

黄承祉 高工

杭州玉泉,浙江大学控制系 邮编:310027

电话:0571-87951887 传真:0571-87951887

Email:sqwang@ripc.zju.edu.cn