

文章编号: 1002-0446(2001)04-0305-06

微操作机器人系统拟实环境的实现*

李 敏 赵 新 卢桂章 刘景泰 张 蕾

(南开大学机器人与信息自动化研究所 天津 300071)

摘 要: 本文实现了一个具有显微图像效果的 2D 增强现实的微操作拟实环境. 文中给出了微操作工具的生成算法和它的运动学建模算法, 并在虚拟显微镜的实现过程中对操作工具和操作对象的显微图像进行了优化处理, 实现了对微操作机器人系统的拟实, 并获得了很好的拟实效果. 该拟实环境可有效地用于实际微操作的预演、再现, 微操作路径规划及人员培训.

关键词: 微操作; 虚拟现实; 拟实环境

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

IMPLEMENTATION OF A VIRTUAL MICROOPERATION ROBOT SYSTEM

L I M in Z H A O X in L U Gu i-zhang L I U J ing-tai Z H A N G L e i

(Institute of Robotics & Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract: A 2D augmented reality environment with the characteristics of microscope image is implemented for a microoperation robot system in this paper. Generating micromanipulator, kinematics modeling for micromanipulator and micro image processing for both micromanipulator and microoperating object are the main problems in the implementing process. After the key algorithms for these problems have been successfully carried out, the virtual microoperation environment is implemented in this paper. The environment can be effectively used to preview or rehearse the real micro operation and do path planning for micromanipulator and train the operators.

Keywords: micro operation, virtual reality, virtual environment

1 引言(Introduction)

现代生物医学工程中有越来越多的工作需要涉及到对细胞、染色体等操作对象的微细操作, 比如细胞的注射、切割以及染色体的分离等. 这些操作通常都是在显微镜下进行的, 属于微米或亚微米级的微细操作. 目前此类操作都是由手工完成的, 手工操作精度低、成功率不高、实验人员的培训和工作效率都不能令人满意. 这些缺点制约了微操作技术的发展和运用, 因此迫切需要研制一台计算机控制的可自动进行操作的多自由度微操作机器人系统.

南开大学机器人与信息自动化研究所研制成功了我国第一台由计算机控制的微操作机器人系统, 该系统已经在生物工程研究中成功完成了若干实

验. 在该系统的应用中产生了一些问题, 比如显微镜下的微操作工具和微操作对象都无法直接测量, 只能用其它方法间接得到, 这样就会产生误差, 从而带来操作失误, 损坏操作工具或者样品. 另外, 如果用实际系统来对操作人员进行培训, 培训成本太高. 因此非常有必要设计一个能够与实际微操作系统对应的虚拟环境, 这样就可以用来在实际操作之前拟实规划好的操作, 得到成功的驱动方式和路径规划方案后再进行实际操作; 另外还可以再现实际微操作过程, 便于实验数据的分析处理; 此外也可以用于操作人员的培训与学习, 降低培训成本.

* 基金项目: 国家 863 计划(863- 512- 980407), 国家自然科学基金(69985006, 69773050), 教育部高等学校骨干教师资助计划共同资助项目.

收稿日期: 2000- 10- 26

2 实际微操作流程 (How real micro operation going)

微操作机器人的实际工作流程是: 首先是搜寻微操作工具(比如微针), 使其处于显微镜视野中心; 然后适当调整微操作工具的位姿, 把含有操作对象的载体(比如含有细胞的载玻片)置于微操作机器人系统的载物台上; 接下来, 在显微镜物镜光轴方向(z

方向)移动微操作工具使其达到清晰, 达到 z 方向重合; 最后, 移动微操作工具, 使其末端与操作对象的操作点重合, 达到水平面(x-y 平面)重合, 这样微操作工具和操作对象均处在焦平面上, 从而完成微操作. 图 1 描述了微操作机器人进行细胞注射时的操作流程.

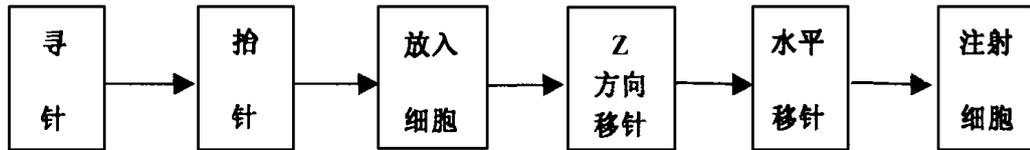


图 1 实际微操作流程

Fig. 1 Steps of real microoperation

针对以上描述的实际微操作过程, 这里设计的虚拟现实环境所要解决的主要问题为: 首先要实现将微操作工具和操作对象的显微图像送入虚拟环境, 这也就是传输现实的实现. 其次要能够根据显微镜模型对图像进行处理, 逼真地再现显微镜的调焦过程, 这也就是生成现实的实现. 生成现实的实现是建立微操作虚拟现实环境的核心, 它主要包括微操作工具的运动学建模以及虚拟显微镜成像技术. 最后该系统要能够按照系统识别出来的微操作工具的位姿数据把微操作工具的图像与操作对象的图像进行叠加, 这也就是增强现实的实现, 参考文献[1]中给出了实现方法. 这些工作完成之后, 就可以在这一环境中按照用户设计的运动规律(包括路径规划和操作控制)进行实际微操作的模拟, 并可以反复修

正、完善, 直至最后得到满意结果.

3 拟实环境的实现 (Implementation of virtual environment)

根据前面描述的微操作流程, 这里将从传输现实、生成现实和增强现实三个方面来实现微操作机器人系统的拟实环境. 在实现过程中有一些比较关键的问题, 比如虚拟微操作工具(微针)的生成、对微操作工具的运动学建模以及显微图像的处理等.

3.1 实现传输现实

把操作工具和操作对象(也就是微针和细胞)的显微图像送入拟实环境, 实现传输现实的结构如图 2 所示.

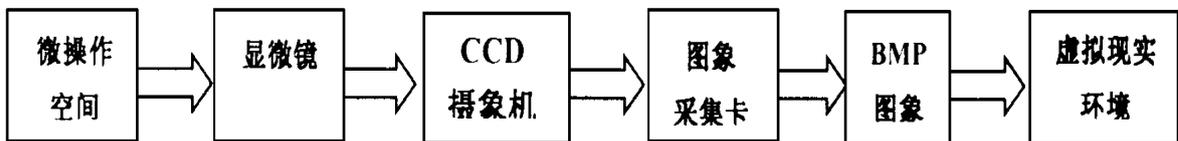


图 2 传输现实的实现

Fig. 2 Implementation of transferred reality

微针、细胞和实验环境的清晰显微图像经 CCD 摄像机摄取后, 计算机从图像采集卡获得相关数据, 然后将这些数据传递给虚拟操作环境, 实现传输现实.

该拟实系统采用的图像格式为 24 位 BMP 文件

格式, 这样有利于生成现实中对显微图像进行处理.

3.2 3D 微操作工具的生成

实际微操作工具为细长的玻璃针, 对其进行三维拟实比较困难. 对微针拟实的好坏直接关系到微针的运动学建模和微操作拟实的效果. 为兼顾真实

感与微针的运动学特性, 应该采用图像恢复的方法, 获取其三维图形描述: 首先, 利用实际微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; 其次, 通过图像处理得到玻璃针的平面图形; 第三, 利用玻璃针关于中心轴近似对称的特性, 将上述平面图形沿中心轴线旋转一周, 即可获得玻璃针尖端的三维图形描述, 生成了 3D 虚拟微操作工具。

在实现过程中, 为了获得微针的最佳拟实效果, 首先我们采集了大量由 CCD 摄像机拍摄到的微针显微图像, 对不同姿态时的采样图像进行分析, 进行特征抽取. 然后根据这些特征数据, 采用逐点描述的方法得到了微针的原始特征数据, 这些数据保存在数据文件 Needle. dat 中. 在微操作过程中, 微针的位姿是不断变化的, 在不同的位姿具有不同的特征数据, 而且各点的模糊度也是在不断改变的, 结合下面的微针运动学建模算法和虚拟显微镜成像的模糊化方法, 我们设计了一个算法来实现微针图像的动态改变, 这样就取得了较好的拟实效果。

需要说明的是, 用上面的方法拟实的微针是三维可运动的, 微针可以在 X、Y、Z 方向自由移动, 并且可以进行旋转, 这样就成功拟实了 6 个自由度微操作机器人的实际操作过程。

3.3 微操作工具的运动学建模

微操作工具的运动学建模是实现生成现实, 从而最终实现整个拟实环境的关键. 为了拟实微针的运动, 让虚拟环境真实地再现实际操作过程, 需要建立微针的运动学模型. 建模过程主要考虑以下几个问题, 即坐标系和观察空间的建立、几何变换、投影变换和视口变换. 此外, 为了提高运算速度, 在建模过程中还采用了大量的矩阵堆栈操作。

对微针进行运动学建模是通过几何变换、投影变换、视口变换等一系列变换最终生成可视的真实感图形. 在实际的建模过程中, 这是通过对微针的顶点及其它信息进行一系列坐标变换而实现的。

在拟实环境的构建过程中, 可以利用几何变换用来实现微针的重定位, 并协调微针和细胞的相互位置关系. 在本操作环境中用到的几何变换主要是平移变换和旋转变换, 通过设置相应的变换矩阵就可以实现这些操作。

为了让微针移动到进行细胞注射的恰当位置, 需要对其进行平移变换. 假设微针某个顶点 P 的当前坐标是 (x, y, z), (t_x, t_y, t_z) 是对应该顶点各个坐标的位移量, 则对该顶点进行平移变换得到的新位置可以用式(1)来计算. 为了调整微针注射细胞的角

度, 需要进行旋转变换. 旋转变换要比平移变换稍微复杂一些. 顶点 P 绕 X 轴正方向(逆时针方向)旋转角度 a 到达的新位置如式(2)所示. 同理, 顶点 P 绕 Y 轴正方向(逆时针方向)旋转角度 a 到达的新位置如式(3)所示. 顶点 P 绕 Z 轴正方向(逆时针方向)旋转角度 a 到达的新位置如式(4)所示。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{2}{right - left} & 0 & 0 & t_x \\ 0 & \frac{2}{top - bottom} & 0 & t_y \\ 0 & 0 & \frac{-2}{far - near} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

其中

$$\begin{aligned} t_x &= -\frac{right + left}{right - left} \\ t_y &= -\frac{top + bottom}{top - bottom} \\ t_z &= -\frac{far + near}{far - near} \end{aligned} \quad (5)$$

在微针的运动过程中, 为了让其到达一个合适的操作位置, 通常需要进行很多次以上描述的各种变换, 也就是组合变换。

在对微针进行运动学建模时, 必须进行投影变换. 投影变换选择并剪切场景, 形成视景物, 并对其进行透视. 视景物是一个空间区域, 一般为长方体或台锥. 无论场景多么大, 位于视景物以外的物体最终都将被剪掉, 因而不会在屏幕上显示。

同时, 微针的运动是受到一定的区域限制的, 结

合实际操作场景, 在建模时采用了平行投影方式来构造微针运动的空间大环境, 而采用实际用到的显微镜成像模型来规范微针的运动方式、具体位姿和成像规律. 平行投影变换的变换矩阵为式(5), 显微成像模型将在下一节说明.

为了让拟实环境最终显示在显示器窗口上, 还需要进行视口变换. 视口是一个用来绘制场景的矩形区域, 视口变换决定把场景中的点怎样映射到绘图区. 只有使视口的宽度与高度的比率与视景体的宽高比一致才能使微操作场景正确地显示出来.

此外, 为了清晰地描述微针的运动, 同时为了加快运算速度, 在建模时利用了堆栈来进行矩阵运算,

实现对微针的各种变换. 堆栈的特性之一是“先进先出”, 利用堆栈, 可以明确地表达物体间的相对位置关系和运动的层次关系, 快速准确地实现微针的定位.

3.4 微操作工具的模糊化

实际显微成像过程如图 3 所示. 首先, 由物体和显微镜的相对位置确定显微镜取景范围和离焦距离 ϵ ; 接着, 落在显微镜视野内的物点经显微镜的透镜组成像, 由 CCD 感光晶面获得图像信息, 并转换成电信号; 最后, 由图像采集卡将图像信息输入到计算机中, 并在显示器上显示出来.

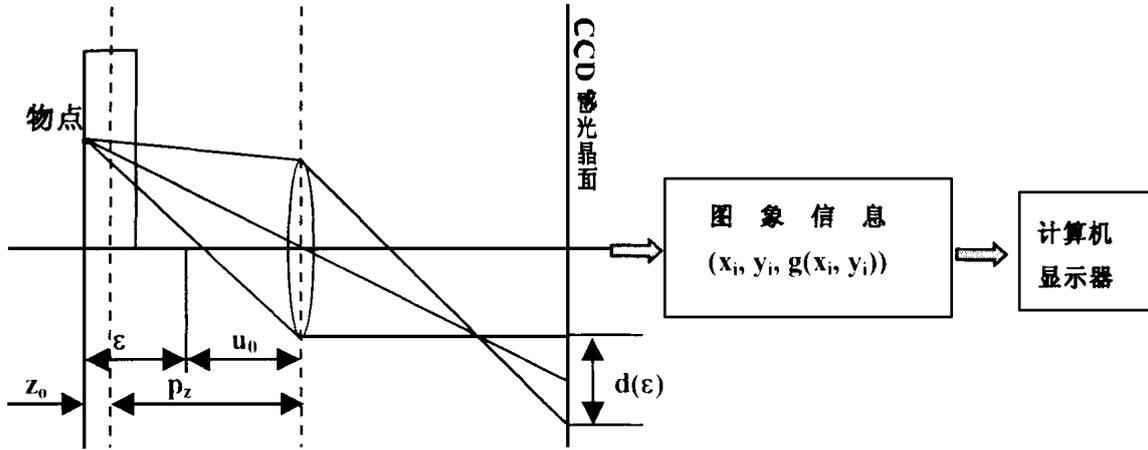


图 3 显微镜实际成像过程

Fig. 3 The process of 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. 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 $(x_v, y_v, d(\epsilon))$, $d(\epsilon)$ 表示模糊圆直径. 接着, 将视觉坐标经虚拟显微镜作投影变换可

得图像坐标 $(x_i, y_i, g(x_i, y_i))$, 其中 $g(x_i, y_i)$ 表示像素点 (x_i, y_i) 的灰度值. 最后, 定义虚拟视野, 经视口变换将可视部分的像素点坐标转换成窗口坐标 (x_d, y_d, z_d) 显示在显示器上.

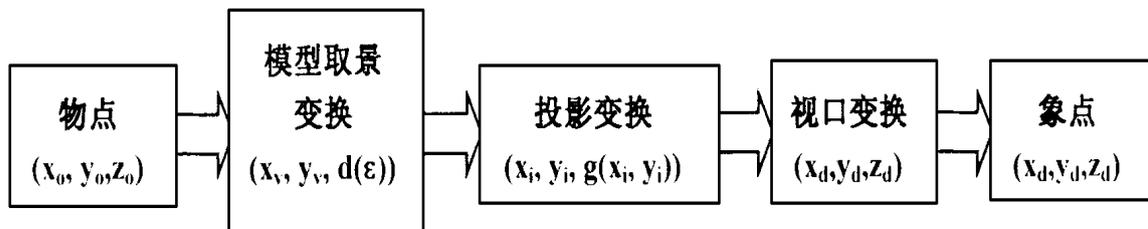


图 4 虚拟成像坐标变换过程

Fig. 4 Coordinate transform in virtual imaging

由显微光学成像原理可知, 如果实际成像平面与聚焦成像平面有一定距离, 那么物点在像平面上所成的像不再是一个清晰的像点, 而是一个模糊的圆区域. 这个模糊圆区域中各点的光强度分布可用二维高斯函数来近似:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

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. $\sigma = k \cdot d$, σ 为该透镜的扩展参数, k 为显微镜的特性常数. 因而可用有限个点扩散成的模糊圆区域去覆盖整个微操作工具模型. 根据显微镜的点扩散模型, 微操作工具上每一点由于离焦量不同而扩散成一定半径的圆区域, 离焦量与圆区域半径一一对应, 而离焦量正好对应 z 方向的定位. 对于整个微操作工具, 其上每一点扩散成的圆区域互相覆盖, 最终形成模糊的显微图像.

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

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (7)$$

式中 $*$ 为卷积操作, $h(x, y)$ 即为系统的点扩散函数. 由此可见, 像面上一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.

利用式(7)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

$$g(m, n) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) h(m-i, n-j) \quad (8)$$

$$((m-i)^2 + (n-j)^2 \leq \frac{d^2}{4})$$

由式(8)算出各像点灰度值后, 用点绘制方式即可生成相应的虚拟微操作工具.

3.5 增强现实的实现

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. 这种增强信息可以是在真实环境中与真实环境共存的虚拟物体. 本拟实系统利用灰度图像处理技术和真实感图形生成技术将微针、细胞和操作环境的显微图像进行叠加, 形成增强现实的拟实环境.

为了使微针注射细胞的虚拟微操作过程的效果更明朗, 在系统的实现过程中应用了图像的灰度化

处理技术. 实践证明, 采用加权平均值法来进行灰度化处理的效果最好.

假设显微图像中任意一个像素点的颜色分量分别为 R, G, B , 那么该点的灰度为

$$Gray = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (9)$$

利用该公式就可以得到显微图像所对应的灰度图像.

另外, 为了增加虚拟微操作环境的真实感, 在系统的实现过程中充分利用了计算机图形学中真实感图形生成技术. 首先, 依据实际微操作机器人系统的实际操作环境, 在虚拟环境的设计中采用了适当的光照模型. 其次, 在微针、细胞和操作环境的图形进行叠加时, 运用了图形融合技术, 并进行了适当的透明处理. 另外, 在系统的实现过程中还运用了纹理贴图技术和消隐、去噪技术以加强虚拟环境的真实感.

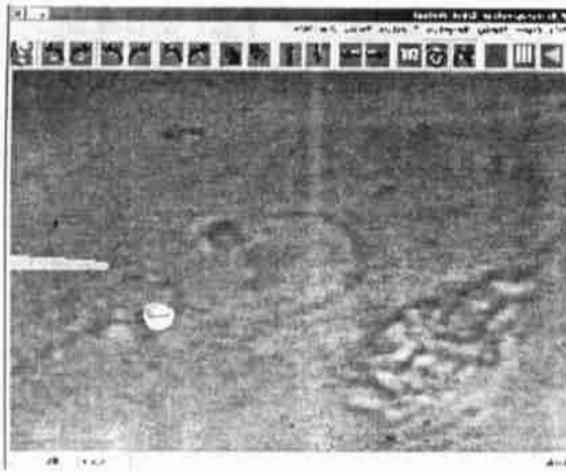
4 实验 (Experiments)

前面讨论的微操作虚拟现实系统已经在 PC 图形工作站上用 Microsoft Visual C++ 6.0 和 OpenGL 编程实现. 进行实验的硬件平台为 CPU 为 Intel Pentium III 450, 64M 内存, 16M TNT2 图形加速卡; 软件开发平台为 Microsoft Windows 98 操作系统.

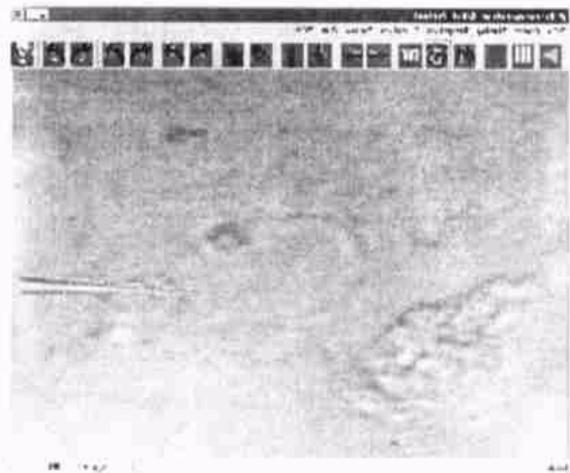
在利用该拟实环境进行操作之前, 首先应该生成虚拟微操作工具. 利用鼠标和键盘输入, 选择相应的菜单选项和操作按钮, 在拟实环境中可以很方便地实现微操作流程, 先进行寻针; 然后调整微针的位姿, 放入含有细胞的载玻片; 接下来在 z 方向和水平方向调整微针; 当微针末端与细胞操作点重合时, 即可完成微操作. 利用该拟实环境进行细胞注射操作的一组画面如图 5 所示.

图 5(a) 所显示的是搜寻到微针, 而且已经把含有细胞的载玻片置于系统载物台上之后, 但是还没有调焦时的情况, 这时微针是模糊的, 而且没有去除背景噪声, 微针在水平方向和 z 方向的位置还没有达到操作点. 图 5(b) 显示的则是去除了背景噪声, 在 z 方向移动微针, 调焦使其达到清晰, 并且在水平方向移动微针使其末端与细胞的操作点重合之后的情况, 此时已经可以完成微操作了.

实验表明, 该拟实环境具有很好的实时性, 利用该环境已高精度地再现了实际微操作过程, 可用于实际微操作过程的预演、预测、路径规划和人员培训.



(a)



(b)

图 5 利用拟实环境进行工作

Fig. 5 Operating with virtual environment

5 结论(Conclusion)

本文所讨论的拟实环境成功拟实了微操作机器人的实际工作流程,使微操作领域的实验人员摆脱大量的、复杂的、低效的手动实验操作,可以先利用该拟实环境对实际微操作过程进行预演、再现,不断调整优化实验方案,得到最佳方案后再应用于实际操作。另外,该系统还对实验人员的培训有很大的帮助,普通实验人员无需经过长时间的严格培训,即可在实际微操作装置上进行操作,这样就大大提高了工作效率,减小了误差,降低了实验的成本。

面向生物医学程的微操作机器人系统将机器人技术应用于微细操作,实现了微米级的操作精度,已经成为细胞级、亚细胞级实验操作的有力工具。这里讨论的显微注射在制造转基因动物、生物药等方面具有广泛的应用前景。随着细胞生物学、遗传学和基因工程科学的发展,这些高科技实验手段必将越来越被广泛应用。

为了适应生物医学工程中更广泛的实验要求,该虚拟现实系统的功能还将进一步加强,今后可考

虑从三维数据场可视化和实时视频捕捉方面完善该拟实系统,更好地实现微操作工具的 Z 方向定位和微操作的定量控制。

参考文献 (References)

- 1 赵新,卢桂章等.微操作机器人系统拟实环境研究.机器人,2000,22(7):545-549
- 2 John Vince. Virtual Reality Systems. Addison-Wesley Publishing Company, 1995
- 3 Kenneth R. Castleman. Digital Image Processing. Prentice-Hall, 1996
- 4 赵新,陆斌,卢桂章.微机械的虚拟现实系统体系结构.机器人,1997,19(6):408-411
- 5 赵新,卢桂章等.虚拟环境中微机械拟实组装的运动学描述.机器人,1999,21(2):92-97
- 6 王之江,伍树东.成像光学.科学出版社,1991
- 7 郑国昌,谷祝平.生物显微技术.高等教育出版社,1993

作者简介:

李敏(1976-),男,硕士研究生.研究领域:虚拟现实.

赵新(1968-),男,博士,副教授.研究领域:智能机器人,虚拟现实等.