

快速精确定位探针的微操作系统控制方法

席文明, 雷李辉, 朱晓明
(厦门大学机电工程系, 厦门 361005)

摘要: 为了快速、精确定位操作细胞的探针, 利用视觉空间的特征运动误差对视觉空间与机械手空间的映射矩阵进行校正, 研究了局部视觉空间重复校正方法以及误差趋近极小值的最小二乘全局校正方法. 为了减小随机噪声对精度的影响, 用校正后的映射矩阵替换卡尔曼滤波器状态方程中的输入系数矩阵, 利用卡尔曼滤波器估计方程控制特征运动. 通过实验求取映射矩阵校正后的特征运动误差, 由于取点有限以及影响精度的参数较多, 经过重复校正使误差趋近极小值. 应用最小二乘全局校正方法, 可使特征运动误差控制在 5 个像素范围内. 采用全局校正后的映射矩阵替换卡尔曼滤波器状态方程中的输入系数矩阵, 并用卡尔曼滤波器控制特征运动, 可使特征运动误差控制在 1 个像素范围内. 系统校正后, 当探针跟踪孔直径为 100 μm 、相邻孔间距为 400 μm 的孔阵列时, 跟踪 10 个孔的时间为 14 s.

关键词: 快速精确定位; 微操作系统; 最小二乘法; 卡尔曼滤波器

中图分类号: TP24 文献标志码: A 文章编号: 1672-6030(2011)06-0521-05

Control Method of Micro-Manipulation System for Fast Precision Probe Positioning

XI Wen-ming, LEI Li-hui, ZHU Xiao-ming

(Department of Mechanical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to position the probe that operates cells fast and precisely, the movement error of characteristic point in vision space was used to revise mapping matrix of vision space and manipulator space. Repeat revision method based on local vision space and the least squares method based on global revision which can make errors approach the minimum were researched. In order to reduce the influence of random noise on precision, the input coefficient matrix of state equation of Kalman filter was replaced by the revised matrix, and the movements of characteristic points were controlled by the estimate equation of Kalman filter. Through the experiments, the movement errors of characteristic points after revising were obtained. In addition, to make errors approach the minimum, repeat revision was needed due to limited points and too many parameters which influence precision. The movement errors of characteristic points were controlled within 5 pixel if the least squares method based on global revision was used. When the input coefficient of state equation of Kalman filter was replaced by the revised matrix and the movements of characteristic points were controlled by the Kalman filter, the movement error can be controlled within one pixel. After revising, the time spent on tracking 10 holes of array is 14 s when the diameter is 100 μm and distance between holes is 400 μm .

Keywords: fast precision positioning; micro-manipulation system; least squares method; Kalman filter

收稿日期: 2010-12-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875222); 福建省自然科学基金资助项目(2009J01265).

作者简介: 席文明(1965—)男, 教授.

通讯作者: 席文明, wmxixi@xmu.edu.cn.

细胞操作广泛应用于生物医学工程中的遗传物质注射、药物研究、细胞生物力学参数检测、动物克隆和转基因产品研究等。细胞操作也称为微操作，利用玻璃探针操作细胞。由于细胞尺寸小、结构脆弱，一些研究需要在单位时间内完成大批量细胞注射，所以探针操作时需要快速精确的位置控制。由于人工操作训练时间长，效率低，易对细胞造成毁坏，已不能满足现代生物医学研究的需要。为快速精确定位操作探针，基于视觉控制的自动细胞操作被广泛研究^[1-4]，在探针的自动控制中，一个重要方面是建立视觉空间与机械手空间的映射模型，传统方法是利用各种标定板标定系统^[5-6]，该方法需要对摄像机内外参数分别进行标定，过程复杂，精度有限。现在普遍采用视觉空间的特征点进行系统标定^[7-9]，利用视觉系统的闭环特性，将摄像机内外参数一起标定，通过多次校正后，可以获得精确的映射矩阵^[8-9]。

本文结合文献[8-10]的方法，首先给出简单的视觉空间与机械手空间的映射矩阵，然后利用特征点的运动误差校正该映射矩阵，在此基础上，利用最小二乘法对不同区域的映射矩阵进行优化，获得全局最优的转换矩阵。在实验中发现，实时递归校正转换矩阵并不能进一步提高探针顶端的定位精度，分析发现，文献[8-9]标定方法不能有效减小振动以及图像处理噪声产生的随机误差。为进一步提高探针定位精度，本文利用卡尔曼滤波器控制探针的运动，即利用最优转换矩阵替换卡尔曼滤波器状态方程中的输入系数矩阵，利用卡尔曼滤波器的估计方程控制特征点运动。

1 视觉与机械手空间映射关系的建立

图1为显微镜成像模型， C 为视觉空间坐标系， T 为机械手坐标系。设空间一点 P ，它在 C 中的坐标为 $C_p(x_{cp}, y_{cp}, z_{cp})$ ，它在 T 中的坐标为 $T_p(x_{tp}, y_{tp}, z_{tp})$ ，它在像平面上的坐标为 $p(x_p, y_p)$ 。设显微镜的放大倍数为

$$m = \frac{T_{op} + f}{f + d}$$

式中： T_{op} 为显微镜镜筒长度； f 为显微镜焦距； d 为物体距离显微镜前焦点的距离。则有

$$X = JD \tag{1}$$

$$X = [x_p \quad y_p \quad z_p]^T$$

$$D = [x_{cp} \quad y_{cp} \quad z_{cp}]^T$$

$$J = \begin{bmatrix} m/d_x & 0 & 0 \\ 0 & m/d_y & 0 \\ 0 & 0 & m'/d_y \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：由于图像是二维的，显微镜不能检测 z_{cp} ，该坐标由另一台显微镜测量，并且两显微镜光轴互相垂直，即 z_p 是 z_{cp} 在另一台显微镜上所成像； d_x 和 d_y 是CCD像素点在 x 和 y 向的大小，两台摄像机相同，所以它们的像素点大小一致； m' 为另一台显微镜的放大倍数， m'/d_y 表示 z_{cp} 成像在另一显微镜像平面的 y 轴方向。

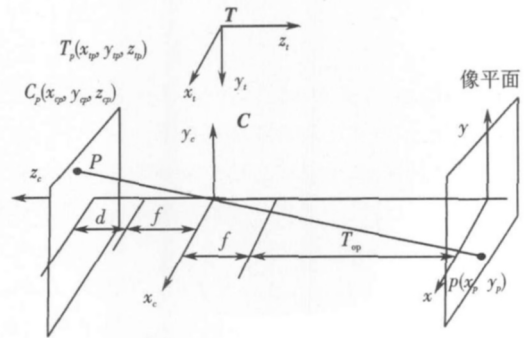


图1 显微镜成像模型

假设机械手坐标与视觉单元坐标重合，则

$$X = JU \tag{3}$$

式中 $U = [x_{ip} \quad y_{ip} \quad z_{ip}]^T$ ， x_{ip}, y_{ip}, z_{ip} 为特征点在机械手空间的坐标。

在实际应用中，机械手和视觉单元坐标很难重合在一起。在微操作系统中，这两个坐标系间的微小位置与姿态误差可以产生几十微米的位置误差，影响探针定位的准确性。两坐标系产生的位置与姿态误差最终反映在探针运动的位置偏差上，这样就可利用探针的运动偏差校正两坐标系间的映射矩阵 J 。

为表达两坐标系的不一致，式(3)可写成

$$\hat{X} - \Delta X_0 = J_0 U \tag{4}$$

式中： $\hat{X} - \Delta X_0$ 为机械手在实际空间中所走的距离 U 在图像空间的映射； $\hat{X} = [\hat{x}_p \quad \hat{y}_p \quad \hat{z}_p]^T$ 为当两坐标间不存在误差时特征点在图像空间的期望距离； $\Delta X_0 = [\Delta x_p \quad \Delta y_p \quad \Delta z_p]^T$ 为当两坐标间存在误差时映射产生的特征点位置偏差； $J_0 = J$ 。式(4)可写为

$$\hat{X} = \Delta X_0 + J_0 U \tag{5}$$

令

$$\Delta X_0 = J_0 W_0 U \tag{6}$$

$$J_0 W_0 = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} \end{bmatrix}$$

式中 W_0 为 3×3 的误差矩阵。式(6)可看成对 U 进行旋转，再乘上比例因子 J_0 ，使得 U 与 ΔX_0 向量方向一致。由式(5)和式(6)得

$$\hat{X} = J_0(I + W_0) U \tag{7}$$

对于式(6), 可以写成如下的形式:

$$\Delta X_0 = \tilde{U}^T \tilde{W}_0 \tag{8}$$

$$\tilde{W}_0 = [w_{11} \ w_{12} \ w_{13} \ w_{21} \ w_{22} \ w_{23} \ w_{31} \ w_{32} \ w_{33}]^T$$

$$\tilde{U} = \begin{bmatrix} x_{ip} & y_{ip} & z_{ip} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{ip} & y_{ip} & z_{ip} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{ip} & y_{ip} & z_{ip} \end{bmatrix}^T$$

式中 \tilde{W}_0 是将 $J_0 W_0$ 拉直的一个向量. 机械手在空间运动经过 3 个点, 根据机械手运动距离与该距离在图像空间的误差, 就可以求出误差矩阵.

由于 J 的不精确, 一次标定并不能完全消除误差, 即式(7)中的 \hat{X} 并不与期望值重合. 实际上式(7)也可以看成是对映射矩阵的校正, 故式(7)变换为

$$\hat{X} - \Delta X_1 = J_0(I + W_0) U \tag{9}$$

式中 ΔX_1 是特征点第二次运动在像平面上产生的误差. 同样, 为了消除误差, 在式(9)中设置 3×3 误差矩阵 W_1 , 式(9)可写为

$$\hat{X} = J_0(I + W_0 + W_1) U \tag{10}$$

用式(10)与式(9)相减, 得到

$$\Delta X_1 = J_0 W_1 U \tag{11}$$

通过 n 次标定后, 得

$$\hat{X} = J_0(I + W_0 + W_1 + \dots + W_n) U \tag{12}$$

多次修正后, 特征点运动误差会收敛到一个极小值. 值得注意的是上面只是进行局部区域标定, 即对局部映射矩阵进行多次调整.

仿造式(8), 可以将式(12)写成如下的形式:

$$Y = \tilde{U}^T Q \tag{13}$$

式中: Q 是将矩阵 $J_0(I + W_0 + W_1 + \dots + W_n)$ 拉直后的 9×1 向量; $Y = \hat{X}$; \tilde{U}^T 是由 U 扩展成的 3×9 循环矩阵.

2 系统全局标定与特征点控制

将 Y 看成测量值, $\hat{Y} = \tilde{U}^T \hat{Q}$ 看成期望值, 利用测量值和期望值存在的误差, 可以得到如下公式:

$$\epsilon(t, Q) = Y(t) - \hat{Y}(t) = \tilde{U}^T(t) Q(t) - \tilde{U}^T(t) \hat{Q}(t) \tag{14}$$

为了对全局误差进行优化, 建立如下公式:

$$E_N(Q) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{1}{2} \beta(t) [Y(t) - \tilde{U}^T(t) \hat{Q}(t)]^2 \tag{15}$$

式中: $\beta(t)$ 为权重系数; N 为特征点运动次数.

对式(15)求最小值, 得

$$\hat{Q}_{\min} = \arg \min(E_N(Q)) \tag{16}$$

这样, 就可以求得

$$\hat{Q}_{\min} = M^{-1}(t) N(t) \tag{17}$$

式中:

$$M(t) = \sum_{i=1}^N \beta(t) [\tilde{U}(t) \tilde{U}^T(t)]$$

$$N(t) = \sum_{i=1}^N \beta(t) [\tilde{U}(t) Y(t)]$$

采用卡尔曼滤波器消除随机噪声产生的特征点运动误差. 特征点的运动控制方程可写成卡尔曼滤波器状态方程的形式如下:

$$\begin{cases} X_{k+1} = AX_k + BU_k + S_w' \\ Y_k = CX_k + S_z' \end{cases} \tag{18}$$

式中: X_k 为特征点的当前位置; X_{k+1} 为特征点的未来位置; U_k 为机械手的当前位置; Y_k 为特征点的测量位置; S_w' 为特征点的估计噪声; S_z' 为特征点的测量噪声, 它们都是 3×1 列向量; A 和 C 是系数矩阵, 为 3×3 单位阵; B 是由 \hat{Q}_{\min} 列向量构成的 3×3 矩阵; k 为系统采样时间点. 由于进行了全局优化标定, 可以把式(18)看成线性时不变系统.

由式(18)可得到卡尔曼滤波器的估计方程、卡尔曼因子以及估计方程的修正参数方程, 即

$$\begin{cases} K_k = AP_k C^T (CP_k C^T + S_z)^{-1} \\ \hat{X}_{k+1} = (A\hat{X}_k + BU_k) + K_k(Y_k - C\hat{X}_k) \\ P_{k+1} = AP_k A^T + S_w - AP_k C^T S_z^{-1} CP_k A^T \end{cases} \tag{19}$$

式中: \hat{X} 为特征点的期望值; P 为 3×3 噪声协方差矩阵; K 为 3×3 卡尔曼因子; S_w 为 3×3 估计噪声方差; S_z 为 3×3 测量噪声方差; 在开始计算时 $P_0 = S_w$.

3 实验结果

微操作实验系统由高精度生物操作机械手(MP-285)、顶视觉(AE31, UI-1540-M)、侧视觉(Navitar, UI-1540-M)、二维纳米扫描平台(M-112.1DG)以及光源等组成. 机械手末端安装有玻璃探针. 图2是计算误差矩阵的软件界面, 让机械手运动经过3个点, 利用机械手移动量和探针顶端在图像空间的测量坐标与期望坐标之差, 求解方程(11), 上述过程共进行3次, 解得的误差矩阵为

$$W_0 = \begin{bmatrix} -0.1302 & -0.0110 & -0.0003 \\ 0.0063 & -0.1284 & 0.0128 \\ -0.0208 & -0.0041 & 0.2621 \end{bmatrix}$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} -0.1326 & -0.0077 & 0.0010 \\ 0.0094 & -0.1324 & 0.0120 \\ -0.0253 & -0.0012 & 0.2610 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} -0.1329 & -0.0100 & 0.0017 \\ 0.0079 & -0.1325 & 0.0125 \\ -0.0230 & -0.0039 & 0.2642 \end{bmatrix}$$

机械手运动坐标与运动偏差结果见表 1。从表 1 可以看出,进行第 1 次和第 2 次标定时,误差能够收敛,而当进行第 3 次标定时,误差发生振荡。分析表明,振荡原因为:①由于取点有限,光学系统的畸变和摄像机内参数产生的误差不能进一步消除;②机械手沿显微镜光轴运动时产生图像离焦,从而引起提取的特征点与实际点不相符;③两个摄像机中特征点匹配不一致。图 3 是系统标定后,机械手在整个图像空间运动 50 个点后,绘制的图像空间位置和误差的三维图,从图中可以看出,峰谷为标定时的取点处,各种误差被有效抑制,在峰谷的两边,光学系统畸变和摄像机内参数产生较大的标定误差,而在图形的最右端,由于摄像机离焦,标定误差变大。

为进一步提高标定精度,在图像空间中的 9 个区

域分别让机械手运动多个点,将这些点代入式(17)得 \hat{Q}_{\min} , 将其写成矩阵形式

$$B = \begin{bmatrix} -0.1323 & -0.0078 & 0.0004 \\ 0.0086 & -0.1326 & 0.0131 \\ -0.0226 & -0.0015 & 0.2620 \end{bmatrix}$$

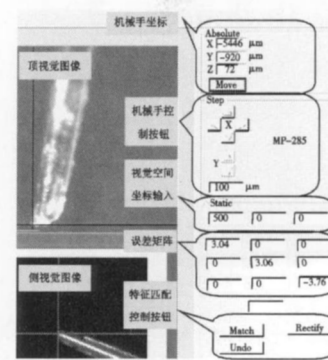


图 2 计算误差矩阵的软件界面

表 1 机械手运动坐标与运动偏差

| 机械手运动经过的点 | 探针图像坐标/像素 | 第 1 次标定 | | | | 第 2 次标定 | | 第 3 次标定 | |
|-----------|-----------|----------------------|---------------|--------------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|--|
| | | 机械手坐标/ μm | 探针图像偏差/像素 | | 机械手坐标/ μm | 探针图像偏差/像素 | 机械手坐标/ μm | 探针图像偏差/像素 | |
| | | | 前 | 后 | | | | | |
| 点 0 | (500 0 0) | (1 538, -211 207) | (6, -69, -55) | (-5, -6, -6) | (1 520, -228 228) | (1, -3 0) | (1 522, -237 229) | (1, -2 0) | |
| 点 1 | (0 250 0) | (106 774, -56) | (35 3, 15) | (4, -7, -3) | (116 751, -42) | (1, -3 0) | (117 738, -41) | (2, -2 0) | |
| 点 2 | (0 0 400) | (-9 9, -1 500) | (-3 3, -1) | (4, -3 0) | (2, -2, -1 498) | (0, -3 0) | (1, -11, -1 497) | (2, -2 0) | |

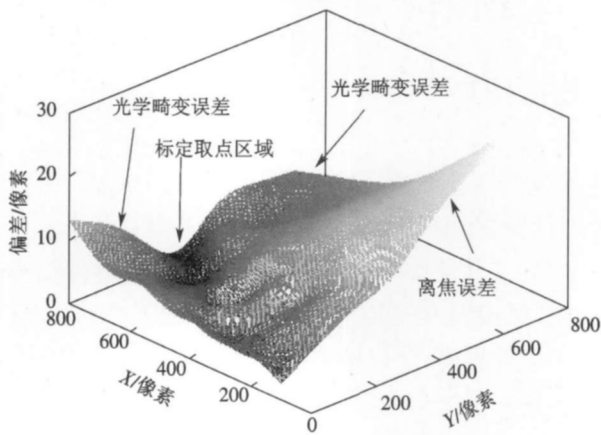


图 3 视觉空间局部标定误差

让机械手在图像空间运行 50 点后得到的误差如图 4 所示。从图中可以看出,局部区域误差可能变大,但在整个图像空间,误差整体变小,其最大误差为 5 个像素。由于测量误差为 1 个像素,估计误差为 5 个像素,可以写出

$$S_w = \begin{bmatrix} 5 \\ 5 \\ 5 \end{bmatrix} [5 \ 5 \ 5] = \begin{bmatrix} 25 & 25 & 25 \\ 25 & 25 & 25 \\ 25 & 25 & 25 \end{bmatrix}$$

$$S_z = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} [1 \ 1 \ 1] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

图 5 是在全局标定的基础上,利用卡尔曼滤波器控制特征点运动产生的误差,从图中看出误差最大值为 1 个像素,卡尔曼滤波器可以有效抑制随机噪声产生的误差。图 6 是利用本文研究的方法,完成特征点的自动跟踪,图中圆孔直径为 100 μm ,跟踪的特征是圆孔的中心。探针从一个孔中心运动到其相邻的孔中心,对于卡尔曼滤波器来说,特征点在一个采样间隔内运动的距离为相邻孔之间的距离。在一个采样间隔后,对运动的特征点进行测量,利用测量误差校正特征点的运动误差,利用校正后的误差控制特征运动到下一个相邻孔的中心位置。相邻孔之间的距离为 400 μm ,当生物操作机械手的速度为 1 mm/s 时,跟踪 10 个孔的时间为 14 s。

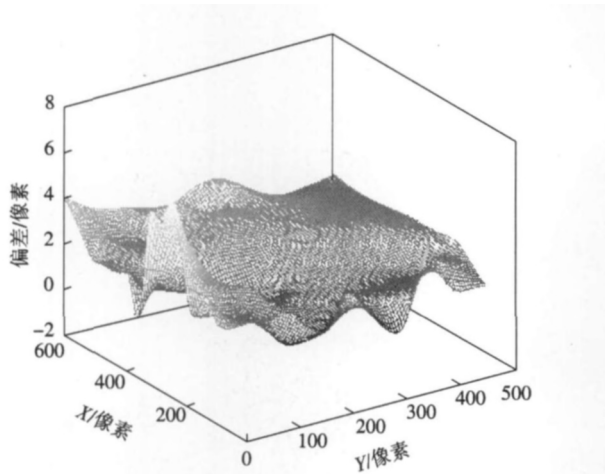


图 4 视觉空间全局标定优化误差

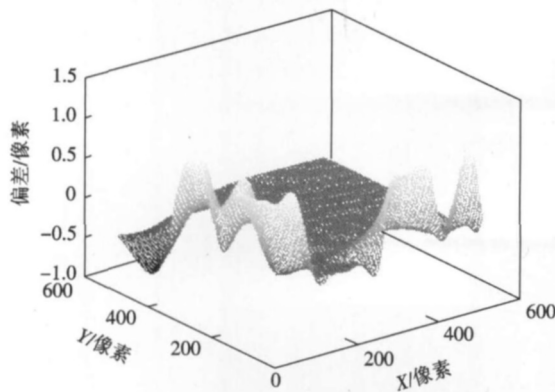


图 5 卡尔曼滤波器控制的特征点运动误差

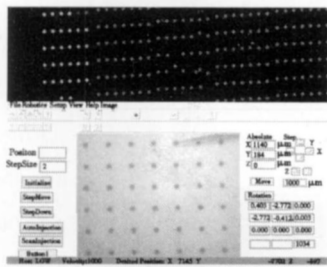


图 6 系统标定后探针自动跟踪圆孔中心

减小局部区域的误差,而全局标定可以有效减小全局的误差.利用卡尔曼滤波器控制特征点运动,进一步减小随机噪声产生的误差.标定后的系统,可以利用视觉跟踪方法控制探针顶端快速、精确运动到孔阵列中心.

参考文献:

[1] Putra A S ,Huang Sunan ,Tan Kok Kiong , et al. Design , modeling , and control of piezoelectric actuators for intracytoplasmic sperm injection [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* ,2007 ,15(5) : 879-890.

[2] Zhang Yi ,Tan Kok Kiong ,Huang Sunan. Vision-servo system for automated cell injection [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* ,2009 ,56(1) : 231-238.

[3] Mattos L ,Caldwell D. Interface design for microbromanipulation and teleoperation [C]// *The 2nd International Conferences on Advances in Computer-Human Interactions*. Cancun , Mexico ,2009: 342-347.

[4] Huang H B ,Dong S ,Mills J K ,et al. Robotic cell injection system with position and force control: Toward automatic batch biomanipulation [J]. *IEEE Transactions on Robotics* ,2009 ,25(3) : 727-737.

[5] Estana R ,Seyfried J ,Schmoeckel F ,et al. Exploring the micro and nano world with cm³ sized autonomous microrobot [J]. *Industry Robot* ,2004 ,31(2) : 159-178.

[6] Bert J ,Dembele S ,Lefort-Piat N. Performing weak calibration at the microscale: Application to micromanipulation [C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome , Italy ,2007: 4937-4942.

[7] Ammi M ,Fremont V ,Ferreira A. Automatic camera-based microscope calibration for a telebromanipulation system using a virtual pattern [J]. *IEEE Transactions on Robotics* ,2009 ,25(1) : 184-191.

[8] Bilen H ,Hocaoglu M A ,Baran E A , et al. Novel parameter estimation schemes in microsystems [C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Kobe , Japan ,2009: 2394-2399.

[9] Mattos L S ,Caldwell D G. A fast and precise micropipette positioning system based on continuous camera-robot recalibration and visual servoing [C]//*IEEE Conference on Automation Science and Engineering*. Bangalore , India ,2009: 609-614.

[10] 席文明,钟辉,郭阿全,等. 细胞注射显微系统的空间精确定位方法研究 [J]. *西安交通大学学报* ,2007 ,41(7) : 829-832.

Xi Wenming Zhong Hui ,Guo Aquan ,et al. Space precision orientation method for cell micro-injection system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University* ,2007 ,41(7) : 829-832 (in Chinese) .

4 结 语

本文给出了一种微操作系统中玻璃探针快速精确定位的控制方法,利用视觉系统的成像模型建立视觉空间与机械手空间的映射,然后应用最小二乘法对视觉空间不同区域的映射矩阵进行优化,得到全局误差最小的转换矩阵.从实验结果可以看出,局部标定只是