

基于 SIFT 算子的脑立体定向手术标记点自动定位方法^①

曹 彤^{②*} 王 烁^{*③} 倪自强^{**} 刘 达^{**}

(* 北京科技大学机械工程学院 北京 100086)

(** 北京航空航天大学机器人研究所 北京 100191)

摘 要 为提高脑立体定向手术中的图像注册效率,提出了一种基于尺度不变特征转换(SIFT)算子的标记点自动定位新方法。该方法使用了 A、B 两类人工标记点,先用 SIFT 算子对 B 类标记点进行粗检测,然后进行 B 类标记点的精确检测、A 类标记点的检测,最后进行标记点的双目匹配和三维重建。实验表明,该方法在实现自动定位的同时能很好地适应相机与患者距离变化、光照变化等情况,克服相机与患者距离、光照等变化对自动定位精度的影响。标记点的漏检率低于 0.43%,误检率均低于 0.85%,平均定位误差在 0.54mm 以内。

关键词 脑立体定向手术,图像注册,SIFT 算子,人工标记点

0 引 言

为提高我国海上医疗救助水平,将机器人技术应用于远程医疗系统则成为如今研究的热点,立体定向脑外科机器人技术是其中的一个重要分支。为实现机器人的准确定位,需要建立手术室空间和医学图像空间的坐标系映射关系,这个过程称为从手术室空间到医学图像空间的注册。基于点匹配的刚体配准方法是目前立体定向脑外科视频导航系统应用中使用最多的空间配准方法。该配准方法的基本原理是先找到标记点在手术室空间和医学图像空间中的坐标,再使用最小二乘^[1]等方法找到两个空间坐标系之间的旋转矩阵和平移向量。

朱艳菊等人^[2]研究了利用可见光和双目立体视觉技术实现注册的方法,该方法需要用鼠标依次点取左右图像中的标记点中心,并使用双目立体视觉技术重建标记点的空间坐标,操作过程较为繁琐,且识别精度受医生的经验影响很大。孟偲等人^[3]提出了一种自动定位方法,该方法虽然能实现精确的自动定位,但是不能很好适应手术过程中相机与患者距离变化和光照变化的影响,无法满足海上远

程急救手术系统对于机器人的要求。1999 年 Lowe 等人提出一种非常稳定的尺度不变特征转换(scale invariant feature transform, SIFT)算子^[4],该算子具有尺度、旋转、平移、仿射、光照不变性,目前已经广泛应用于机器人定位和导航、地图生成^[5]以及三维目标识别中。本文主要应用 SIFT 算子以及图像处理和计算机视觉技术,实现标记点的自动定位,该方法能在简化注册流程的同时,克服相机与患者的距离以及光照等变化对定位精度的影响。根据 SIFT 算子的原理,本文对标记点进行了特殊设计。自动定位方法分为 4 个步骤。第一步,用 SIFT 算子粗略检测 B 类标记并提取仅包含 B 类标记的局部图像和包含所有标记的局部图像;第二步,根据 B 类标记的形状、大小特征在仅包含 B 类标记的局部图像中精确检测 B 类标记;第三步,在包含所有标记点的局部图像中检测 A 类标记;第四步,实现标记点的双目匹配和三维重建。

1 标记点的设计

由于电极片(图 1(a))在 CT 和 MRI 断层成像的伪影具有向外辐射的特点(图 1(b)所示),不会

① 863 计划(2009AA045301)资助项目。

② 女,1962 年生,硕士,副教授;研究方向:机器人机构研究,工程及计算机图形学,机械 CAD 等;E-mail:caotong1601@163.com

③ 通讯作者,E-mail:WS_run@163.com

(收稿日期:2013-05-27)

干扰断层成像,而且其中心的凸起类似球形,从各个角度看其凸起的形心位置基本不变,因此上一代脑立体定向系统使用电极片作为标记点实现注册。因为电极片中心的凸起为反光度很高的金属,并且其周围的纹理较为复杂,所以很难实现标记点的自动识别。为此,本文对电极片做了改进处理,处理后的电极片如图 1(c)所示,两类具有不同纹理颜色的电极片分别被称为 A 类标记点和 B 类标记点。患者的头部需粘贴三个 A 类标记和一个 B 类标记,标记点的位置关系如图 2(a)、(b)所示。为了方便说明,本文定义 B 类标记外边复杂纹理为 S 区,此区为适应 SIFT 算子中寻找关键点而设计成格子状;中间的区域定义为 M 区,用于后期精确识别 B 类标记点,如图 2(c)所示。

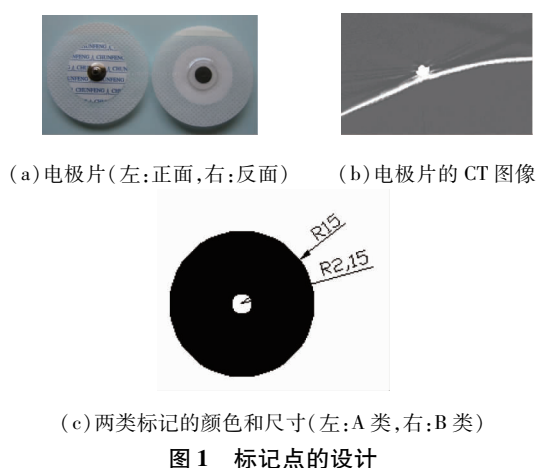


图 1 标记点的设计

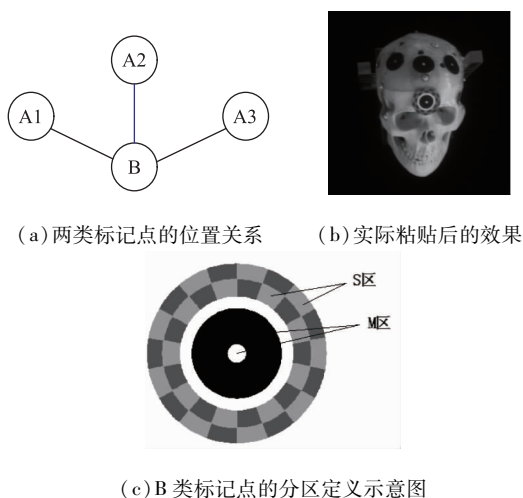


图 2 两类标记点的位置关系和实际粘贴效果

2 标记点的自动检测定位过程

可见光成像较 CT/MRI 成像更为复杂,表现在

患者头部成像的大小、亮度和均匀度会受到相机距头部的距离、光照和相机曝光时间的影响,因此可见光图像的干扰更多,根据此种情况,本文采用具有良好的尺度、旋转、光照等不变特性的 SIFT 算子实现标记点的自动检测。

2.1 SIFT 算法的匹配步骤

首先检测尺度空间的极值点,即用高斯卷积核建立尺度空间,再用高斯差分尺度空间的方法检测那些在局部位置的极值点。然后利用邻域像素的梯度方向分布特性为每个关键点指定方向参数,使算子具备旋转不变性。最后如图 3 所示生成特征描述符。图 3 左部分的中央黑点为当前关键点的位置,每个小格代表关键点邻域所在尺度空间的一个像素,箭头方向代表该像素的梯度方向,箭头长度代表梯度模值,图中蓝色的圈代表高斯加权的范围,在每 4×4 的小块上计算 8 个方向的梯度方向直方图,绘制每个梯度方向的累加值,即可形成一个种子点,如图 3 右部分所示。当两幅图像的 SIFT 特征向量生成后,采用关键点特征向量的欧式距离作为两幅图像中关键点的相似性判定度量。

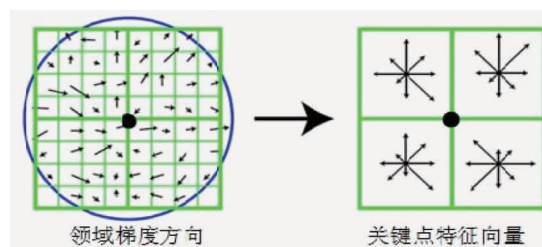


图 3 由关键点邻域梯度信息生成特征向量

2.2 粗略检测 B 类标记

SIFT 算子所寻找的关键点为图像中的角点、边缘点、暗区的亮点及亮区的暗点,据此设计出图 2(c)所示 B 类标记点的 S 区。首先通过用 SIFT 算子求得 B 类标记点模板与可见光图像的匹配点坐标,将所有匹配点坐标的平均坐标值作为 B 类标记点的粗略坐标 (x_B, y_B) ,各匹配点与平均坐标距离的最大值作为 B 类标记点的粗略半径 r_B ,其中 $r_B \leq 80$ (根据实际情况排除错配点的干扰);然后根据该半径求得局部图像,其中局部图像 I 的分割半径 $r_I = 1.2 \times r_B$,局部图像 II 的分割半径 $r_{II} = 4 \times r_B$,其中比例系数 1.2 和 4 均为多次实验所得经验值。图 4 为 SIFT 算子的匹配图,其中找到 29 个匹配点,0 个错配点(模板与原图匹配错误的点)。得到的局部图像如图 5 所示。

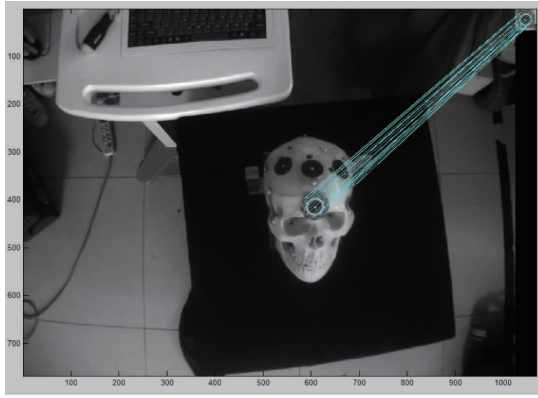


图 4 SIFT 算法匹配结果

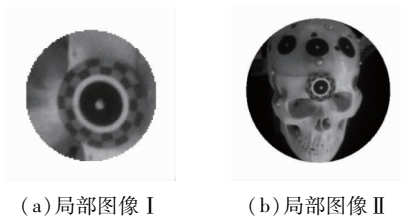


图 5 提取的局部图像

2.3 精确检测 B 类标记

本步操作在局部图像 I 的基础上进行,对图像进行自适应二值化操作和边缘检测操作,得到精确的 B 类标记点坐标,检测过程如图 6 所示。

首先对图像进行自适应二值化操作,用以克服光照强度或相机曝光时间的变化导致的图像亮度变化。由 B 类标记点的特点可知,二值化阈值 $T = V_{\min} + k(V_{\max} - V_{\min})$, 其中 k 是比例系数,可以通过训练集获取, $V_{\max}$ 和 $V_{\min}$ 分别是图像像素的最大值和最小值。二值化处理后的图像如图 6(a) 所示。

Canny 边缘检测算子^[6]充分反映了所有边缘检测器的数学特性,是对信噪比与定位能力的最优化逼近算子,因此本文应用 Canny 算子对二值图像进行边缘检测,得到的边缘图像效果如图 6(b) 所示。

B 类标记 M 区的特征包括外接矩形的边长尺寸、面积大小等,而这些特征的取值在一定阈值范围内,本文将超过阈值范围的候选 B 类标记认为是伪标记。其中矩形边长 $r_M = r_B/2$ 。如图 6(c),左图矩形为得到的所有特征,右图矩形为排除伪标记点后符合上述条件的特征。

最后计算模板匹配度,找出匹配度最高的 B 类标记点。此处利用 B 类标记 M 区的灰度分布特征及其粗略尺寸得到其模板如图 6(d) 所示。将模板中心依次放在剩余矩形的中心,计算模板与原图像

重叠部分所有对应像素的灰度值差的平方和,本文称此平方和为“反匹配度”,“反匹配度”最小对应着匹配度最高,将匹配度最高的矩形中心坐标记为 B 类标记点的中心坐标。匹配结果如图 6(e) 所示。

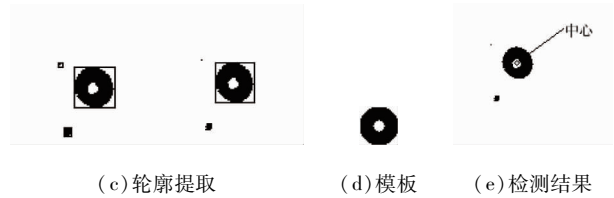
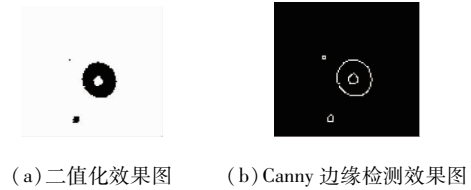


图 6 B 类标记点精确检测过程

2.4 检测 A 类标记点

A 类标记点的检测与 B 类标记点的精确检测的步骤基本一样,只不过是在局部图像 II 的基础上进行的。检测过程为二值化→边缘检测→轮廓提取→计算反匹配度。A 类标记点的半径 $r_A = 0.75 \times r_B$ 。图 7 示出了二值化,边缘检测和轮廓提取,图 8 为候选标记的“反匹配度”示意图,其中中间三个较短柱条对应着三个 A 类标记。模板及检测结果如图 9 所示。

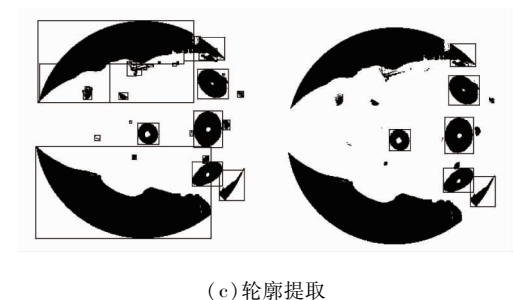
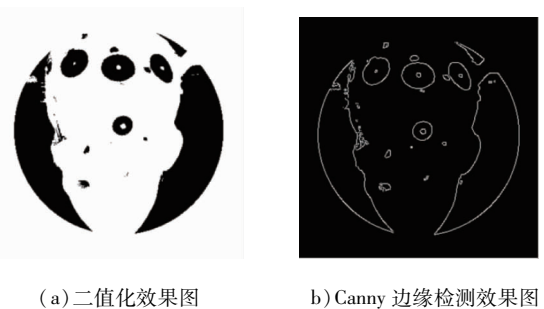


图 7 二值化、Canny 边缘检测和轮廓提取

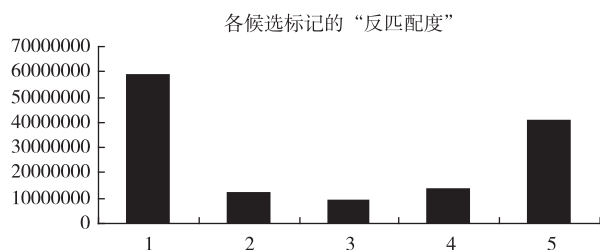


图8 各候选标记的“反匹配度”

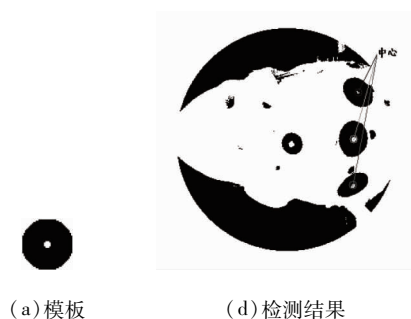


图9 模板及检测结果

2.5 标记点的双目匹配和三维重建

根据 A、B 类标记的区别和 A 类标记相对于 B 类标记的位置关系(图 2(a))实现标记的双目匹配,匹配结果如图 10 所示。根据标记的像素坐标和双目匹配结果,利用双目立体视觉技术,就可以计算出标记的空间坐标。

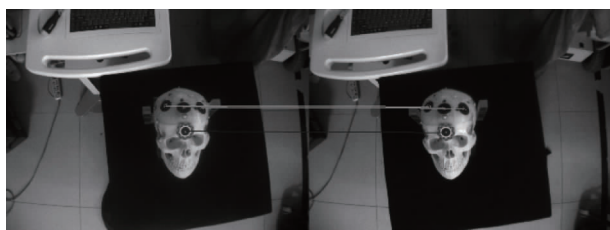


图10 标记点的最终检测和匹配结果

3 实验结果和分析

实验所用双目相机为加拿大 Claron 公司的 MicronTracker 相机,相机分辨率为 1024×768 ,纵向和横向视角分别为 52° 和 70° ,与被检测物体的垂直距离在 $30 \sim 115\text{cm}$ 之内,光照强度在 $50\text{lux} \sim 100000\text{lux}$ 之内,相机的标定误差可小于 0.25mm 。

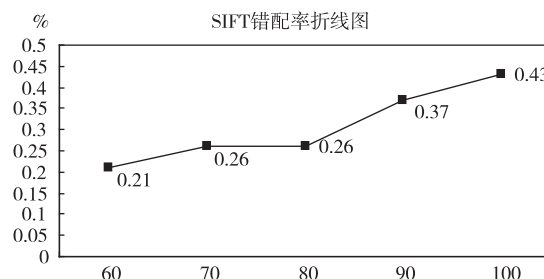
实验分为距离实验和光照实验,即在相机与患者头颅距离发生变化和光照强度发生变化的情况下测试本文提出的标记点定位方法的正确率和检测精

度。本文定义错配率为 SIFT 算子匹配中得到错误匹配点的概率,漏检率为未能检测到的标记点的概率,错检率为错误检测标记点的概率。该方法的正确率主要取决于第一步中 SIFT 算子特征点匹配的正确率,所以下实验分别通过检测 SIFT 算法特征点匹配的准确率,进而检验最终定位的准确率和定位精度。该方法的精度借助 CT 图像坐标下标记点的坐标(每个标记点首先请两位具有长期手术规划系统使用经验的专家手动识别其坐标,两位专家识别结果的平均值作为标记点坐标的标准位置)来检测,其中 CT 图像坐标下标记点坐标提取平均误差为 0.2mm 。由于欧式变换不改变线段的长度,因此可以根据两组空间下的点的距离特征来衡量定位精度。四个标记点在 CT 空间下两两之间的距离表示为 $l_{BA_1}, l_{BA_2}, l_{BA_3}, l_{A_1A_2}, l_{A_1A_3}, l_{A_2A_3}$,在摄像头空间下两两之间的距离表示为 $L_{BA_1}, L_{BA_2}, L_{BA_3}, L_{A_1A_2}, L_{A_1A_3}, L_{A_2A_3}$,定位误差 $\varepsilon = \left(\frac{1}{6} ((l_{BA_1} - L_{BA_1})^2 + (l_{BA_2} - L_{BA_2})^2 + (l_{BA_3} - L_{BA_3})^2 + (l_{A_1A_2} - L_{A_1A_2})^2 + (l_{A_1A_3} - L_{A_1A_3})^2 + (l_{A_2A_3} - L_{A_2A_3})^2) \right)^{\frac{1}{2}}$ 。

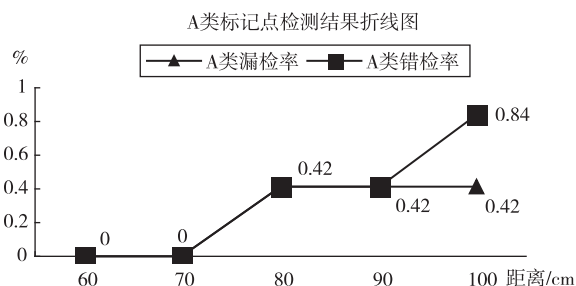
3.1 距离实验

为保证足够的视野同时保证相机精度,设置相机与病人标记点之间的距离在 $60 \sim 100\text{cm}$ 之内,每隔 10cm 采集 40 对图像,共采集 200 对,分别检测 SIFT 算子的特征点匹配的错配率、最终标记点定位的定位精度。

实验结果如图 11(a)、(b)所示。200 对图像的



(a) SIFT 错配率折线图



(b) A 类标记漏检率和错检率折线图

图11 距离实验结果折线图

SIFT 特征点匹配中,错配率小于 0.44%,且在 5 种距离情况下错配率没有明显变化。最终定位的 1600 个标记点中 B 类标记点全部检测正确,A 类标

记点的漏检率低于 0.43%,错检率低于 0.85%。从表 1 中可以看出标记点的平均定位误差上下浮动很小且不超过 0.53mm。

表 1 标记点定位精度检测结果

距离 (cm)	60	70	80	90	100
95% 置信区间 (mm)	(0,0.71)	(0,0.82)	(0,0.77)	(0,0.73)	(0,0.92)
平均定位误差 (mm)	0.43	0.47	0.49	0.49	0.52

3.2 光照实验

相机在光照强度在 50lux ~ 100000lux 下能保证 0.25mm 的检测精度。而一般手术室的光照强度在 1000lux 到 2000lux 之间,通过控制实验室中 6 盏灯的开关模拟了 8 种光照环境,用照度计测得其光照强度依次为 1828lux、1797lux、1624lux、1507lux、1398lux、1315lux、1174lux、1109lux,每种光照环境下采集 40 对图像,共采集 320 对,分别检测 SIFT 算法的特征点匹配的错配率、最终标记点定位的准确率以及定位精度。

实验结果如图 12(a)、(b)所示。320 对图像的 SIFT 特征点匹配中,错配率低于 0.55%,且 8 种光照环境下错配率没有明显变化。最终定位的 2560 个标记点中 B 类标记点全部检测正确,A 类标记点的漏检率低于 0.43%,错检率低于 0.85%,从表 2 中可以看出标记点的平均定位误差上下浮动很小且低于 0.54%。

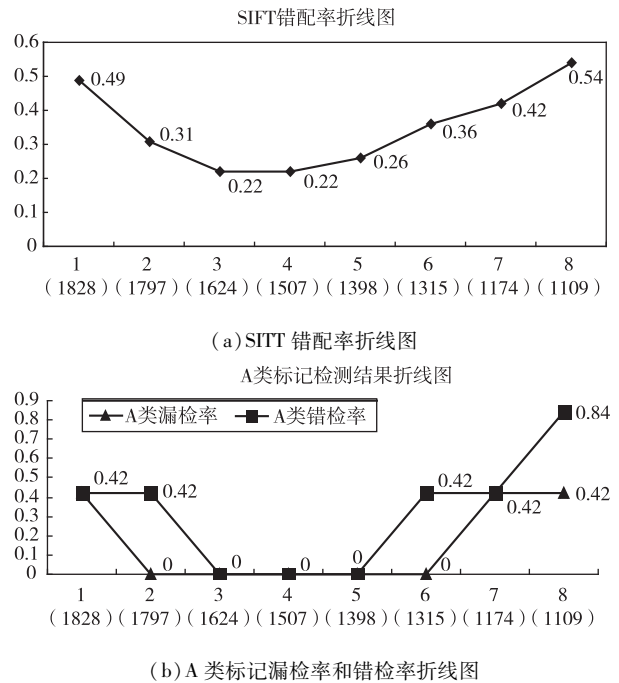


图 12 光照实验结果折线图

表 2 标记点定位精度检测结果

光照	1	2	3	4	5	6	7	8
95% 置信区间 (mm)	(0,1.13)	(0,0.96)	(0,0.66)	(0,0.95)	(0,0.97)	(0,1.21)	(0,0.87)	(0,0.91)
平均定位误差 (mm)	0.50	0.49	0.37	0.48	0.51	0.53	0.51	0.50

3.3 实验分析

从上述实验结果可以看出:本文的自动定位方法能很好地适应相机与患者距离的变化和光照强度变化的影响;基于 SIFT 算法提取的局部图像处理可以很好地解决标记点漏检、误检问题;算法的平均定位误差小于 0.54mm。

4 结 论

本文提出了一种基于 SIFT 算子的脑立体定向

手术标记点自动定位实现方法,该方法既很好地实现了标记点的自动定位,又克服了相机与患者距离变化和光照强度变化对检测标记点准确率的影响。该方法重点在第一步中 SIFT 特征点的匹配上。实验证明匹配正确率高达 99.4%,而且处理匹配点的过程能很好地排除极少数错配点对结果的影响,从而保证得到有效的局部图像。最终两类标记点的漏检率低于 0.43%,误检率均低于 0.85%,平均定位误差在 0.54mm 以内。由于 SIFT 算子寻找特征点的过程复杂,导致该方法的实时性不好,因此下一步

应该研究如何改进 SIFT 算法的匹配速度来提高匹配效率。

参考文献

- [1] Schonemann P H, Carroll R M. . Fitting one matrix to another under choice of a central dilation and a rigid motion [J]. *Psychometrika*, 1970, 35(2) :245-255
- [2] 朱艳菊, 孟偲, 刘静华等. 面向机器人辅助神经外科手术的视觉标定方法. 高技术通讯, 2004, 14(11) :69-74
- [3] 孟偲, 闫浩正, 李艳杰等. 脑外科立体定向手术中标记点的自动检测与定位. 高技术通讯, 2013, 23(3) :270-

276

- [4] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features. In: *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, 1999. 1150-1157
- [5] Stephen S, Lowe D G, Little J J. Vision-based global localization and mapping for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(3) :364-375
- [6] Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6) :679-698

Marker localization in robot-assisted stereotactic neurosurgery based on SIFT operator

Cao Tong^{*}, Wang Shuo^{*}, Ni Ziqiang^{**}, Liu Da^{**}

(^{*} School of Mechanical Engineering, Science and Technology Beijing, Beijing 100086)

(^{**} Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract

In order to improve the efficiency of image registration in robot assisted stereotactic neurosurgery, an approach for automatic detection and location of the markers glued on the head of patients based on the SIFT (scale invariant feature transform) operator was developed. This approach adopts two sorts of artificial markers, named A and B. It uses the SIFT operator to conduct the rough detection of B markers, and then, performs the accurate detection of B markers and the exact detection of A markers, and finally, the binocular match and 3D reconstruction of markers. The correct rate and positioning accuracy of the approach were tested by experiment, and the results show that the approach can overcome the influences of the camera-patient distance and the illumination on the localization accuracy. The marker false rate is below 0.43%, lost rate is below 0.85%, and average location error is less than 0.54mm.

Key words: stereotactic neurosurgery, image registration, SIFT operator, artificial marker