

## 基于双目视觉的手术器械跟踪定位技术

马桂珍 谌海新 马丙辰

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘 要:**详细阐述了基于双目视觉的手术器械跟踪定位的工作原理与系统组成,并对手术器械跟踪定位技术中的摄像机标定、立体匹配等关键技术从原理和应用的角度分别进行了分析和讨论,最后指出了存在的问题和今后研究的方向。

**关键词:**立体视觉 摄像机标定 立体匹配 三维重建

### Tracking and Locating of Surgical Instrument Using Binocular Vision

MA Guizhen, CHEN Haixin, MA Bingchen

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

**Abstract:** In this paper, the mechanism and principle of tracking and locating for surgical instrument during operation using binocular vision is discussed in detail. Camera calibration and stereo matching are analyzed and discussed from the points of view of principle and application. The problem still remained to solve and direction for future research are also indicated.

**Keywords:** stereo vision, camera calibration, stereo matching, 3D reconstruction

计算机辅助外科手术(Computer Assisted Surgery, 简称CAS)是一门新兴的研究领域。它通过合理、定量地利用CT、MRI、SPET等医学诊断设备提供的多模图像数据和立体手术导航定位系统,辅助外科医生进行手术的计划 and 干预。将双目立体视觉技术应用于CAS中,建立CAS的手术导航定位系统,通过对手术器械进行跟踪定位,可以辅助外科医生完成高难度的手术,它对于选择最佳手术路径、提高手术定位精度、缩短手术时间、减小手术损伤和提高手术成功率等均具有十分重要的意义<sup>[1,2,3]</sup>。本文详细讨论了在CAS中利用双目立体视觉理论对手术器械进行跟踪定位的原理和关键技术。

### 1 双目立体视觉定位原理

双目立体视觉定位同人类双眼视觉的立体感知过程相类似。假设摄像机成像符合小孔成像模型,两台摄像机完全相同,焦距均为 $f$ ,左、右摄像机处于平行对准状态,即以左、右摄像机光心分别作为左、右摄像机坐标系(CCS)的原点 $O_L$ 和 $O_R$ ,以光心的连线作为它们共同的 $x$ 轴,光心之间的距离称为基线 $b$ ,两摄像机的光轴相互平行,作为各自的 $z$ 轴, $y$ 轴垂直于 $xz$ 平面(未画出),符合右手定则。成像平面坐标系(ICS)的原点分别为左、右 CCS 的 $z$ 轴与摄像机成像平面的交点,ICS的 $x$ 轴和 $y$ 轴分别平行于 CCS 的 $x$ 轴和 $y$ 轴,如

图1所示(只画出了在 $xz$ 平面上的投影)。

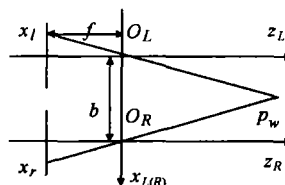


图1 双目立体视觉定位原理图

以左 CCS 作为参考世界坐标系(WCS)(其他情况可以通过坐标变换得到等效坐标),设空间点 $p_w(x_w, y_w, z_w)$ 在左、右成像平面上的图像坐标分别为 $(x_l, y_l)$ 和 $(x_r, y_r)$ ,由三角几何对应关系可得如下等式:

$$\begin{cases} z_w = \frac{bf}{x_r - x_l} \\ x_w = \frac{bx_l}{x_l - x_r} \\ y_w = \frac{by_l}{x_l - x_r} \end{cases} \quad (1)$$

记 $d = x_l - x_r$ ,称之为点 $p_w$ 的双目视差(disparity),由(1)式可以看出,只要得到任意空间点的左、右图像坐标就可以求得该点的三维空间坐标。

当然,实际上无法做到使两台摄像机光轴完全平行,所以需要首先对摄像机进行标定,求出任意配置的双摄像机的投影变换矩阵(或内、外部参数),得到两个 CCS 与 WCS 之间的变换关系,然后进行投影校正,使校正后的两摄像机等效为平行对准状态。这样找到并计算出目标点对应的 ICS 坐标,然后即可利用(1)式,计算出目标点的空间三维坐标。

## 2 基于双目视觉的手术器械跟踪定位系统

### 2.1 系统跟踪定位的实现思想和方法

两架摄像机固定安装在刚性金属框架内,摄像机外部装有同步触发信号,以保证采集到的图像是同步的。摄像机采集到的视频信号经图像采集卡接入计算机,通过图像采集程序采集视频图像。在标准手术器械、刚性内窥镜导管或显微镜等物体上贴有标记为特殊颜色的两个定位标记点,手术前已精确测知手术器械与两个定位标记点之间的相对位置和方向关系,这样,在手术进行中三维定位系统就是通过对两个标记点定位,推知目前手术器械当前的位置和运动方向。图像监视器可以显示病人头部配准后的三维立体图像,术前所作的手术路径规划,以及经定位系统计算得到的手术器械目前所在的位置。外科医生及其助手可以通过监视器观察目前手术器械的具体方位(可显示任意剖面),然后根据术前所作的路径规划,由医生本人或控制机械手进行下一步的操作,避开重要的功能区、神经以及血管,选择安全的手术路径。

### 2.2 系统组成

系统硬件包括:一台计算机主机、一台图像监视器、一块图像采集卡、两架摄像机,一个刚性摄像机支架。图 2 为一套双目视觉手术器械跟踪定位系统硬件结构示意图。

因为图像处理的数据量大、运算时间长,因而对系统硬件配置要求较高。为了加快图像的处理和显示速度,计算机图像处理系统的硬件配置要求:奔腾 IV 2.0G 以上 CPU, VGA 显示卡,内存容量不少于 128MB,硬盘不少于 20G,图像采集频率不少于每秒 30 帧。

系统软件包括:摄像机标定模块、立体匹配模块、三维定位模块、目标跟踪模块等四部分。

系统首先对双目视频图像进行采集,应用 VFW(video for windows)的 AVICap 窗口类实现。由于摄像机拍摄到的图像质量受噪声等因素的影响较大,所以必须对图像进行预处理,采用中值滤波算法,滤除高斯噪声。手术开始之前,首先要对摄像机进行标定,以便得到两台摄像机的内、外部参数;手术开始后,要对标记点进行跟踪定位,首先对靶点进行匹配,然后计算标记点的三维坐标位置,并绘制手术器械的三维模型,同时还要对标记点的位置进行预测和跟踪。图 3 为整个系统的软件工作流程图。

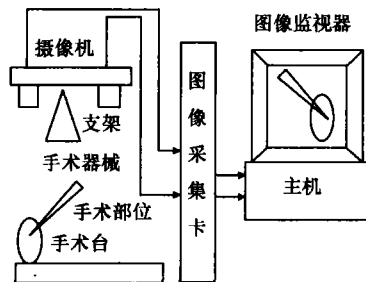


图 2 手术器械跟踪定位系统硬件结构图

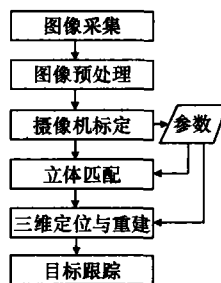


图 3 系统软件工作流程图

## 3 关键技术

### 3.1 摄像机标定

摄像机标定是系统工作的前提和基础,只有通过标定得到两台摄像机的内参数和外参数,才能得到跟踪点与计算机图像中的对应点之间的变换关系。摄像机的内参数主要包括:摄像机焦距  $f$ 、摄像机光轴与成像平面的交点(称为“主点”)坐标  $(x_0, y_0)$ 、每个像素在  $x$  轴、 $y$  轴方向的物理尺寸  $dx$ 、 $dy$ ,以及摄像机的畸变系数等;外参数即为 CCS 与 WCS 之间的相对位置参数矩阵,包括旋转矩阵  $R$  和平移矢量  $t$ <sup>[4]</sup>。

由于在每次手术进行前都需要医务人员对系统进行标定,所以要求标定过程简单、可靠。系统采用张正友的基于已标定平面网格的标定方法<sup>[5]</sup>,这种方法操作简单、使用灵活、标定精确,标定过程只需要一块平面标定模板。采用标准的棋盘格,方格角之间的距离关系是已知的。在标定的过程中,两架摄像机均固定不动,只需转动平面标定模板,使两架摄像机拍摄平面标定模板在几个(至少两个)不同方位的图像。对每一幅图像首先采用 SUSAN 算法<sup>[6]</sup>提取标定模板的方格角点。摄像机标定是利用 Homography 基础矩阵,采用 Levenberg-Marquardt 算法进行计算的,最后可求得每一架摄像机的内参数(这里只考虑一阶径向畸变系数),然后根据内参数计算在世界坐标系下(与手术中的坐标系重合)的摄像机的外参数。

经过标定之后,可得到两架摄像机的内参数以及它们相对于世界参考坐标系的外参数,从而为立体匹配和三维定位提供必要的参数。

### 3.2 立体匹配

为了求得标记点的三维坐标,必须知道标记点在左、右摄像机上对应的图像坐标,因此,立体匹配是三维定位中的关键一步。立体匹配的基本思想都是基于相似性度量和连续性假设的,手术器械跟踪定位系统中匹配问题相对比较简单,因为不必对图像中的所有点进行匹配,而只需对标记特殊颜色(系统采用绿色)的定位标记点进行匹配,所以在该系统中采用的是基于颜色的搜索和匹配策略。首先,左图像上搜索,设置像素的 R,G,B 门限,提取对应的绿色像素,然后在右图像中对左图中提取的特征像素进行匹配,匹配过程中,用到了外极线约束、连续性约束和 R,G,B 亮度约束;然后,采用最小距离的聚类分析算法,将得到的像素分成两组,即可作为两个标记点的图像;最后,计算每个标记点的重心作为对应的定位点对。

由于摄像机安放位置的偏差,两架摄像机的成像平面可能不在同一个平面上,为了更好的实现匹配和三维定位,在匹配前,首先对左、右两幅原始图像进行投影校正,使得校正后的左、右两幅图像的成像平面在同一个平面上,这样相应的外极线也在同一水平线上,并与  $x$  轴平行。投影校正采用 Andrea Fusiello 等提出的一种简单的校正算法<sup>[7]</sup>。这样校正后在右图像上进行匹配搜索时,只需在与左图中像素的列坐标相同的像素中进行。从而大大减少了匹配搜索的时间。由于摄像机视觉范围内的手术台及其周围基本为白色和红色,所以一般可以非常精确地检测到两个标记点。为了减少误检测发生的概率,同时缩短检测和匹配的时间,可以在系统工作之前,首先在图像上标记出手术器械最大的活动区域。

### 3.3 三维定位

立体匹配完成后,三维定位程序模块即可利用摄像机标定得到的参数,根据计算机图像上的标记点坐标,计算每一个定位标记点对应的成像平面上的坐标,然后根据(1)式计算每一个标记的空间三维坐标。由于手术器械与标记点之间的位置关系是已知的,因此,可以推算出手术器械目前所在的位置和方向,并根据得到的数据采用 OpenGL 绘制当前手术器械的模型,最后同配准后的手术部位的三维图像以及术前所作的路径规划一起显示在监视器上。监视器应该能够显示手术部位和手术器械任意剖面的图像,以便帮助医生更好地观察待治疗区域和手术器械的相对位置。

### 3.4 目标跟踪

为了更好地对手术器械进行定位跟踪,采用卡尔曼滤波的方法对手术器械的位置进行预测和估计<sup>[8]</sup>。被估计的状态是每一个二维标记点的位置,卡尔曼滤波在每一帧对每个点的新的测量位置与它的前一个估计位置相结合,迭代地更新和改进估计。应用卡尔曼滤波进行跟踪包括两个阶段:状态预测和修正。第一步是预测每一个标记在下一帧的可能位置;第二步是找到是否在下一帧的预测位置附近有一个实际

的提取的特征,并进行修正。预测和修正在连续的帧和跟踪的标记点之间不断地重复进行。随着帧数的增加,标记点的估计位置越来越准确,而不确定性逐渐减小。在手术器械的运动速度不是很快,视频采集频率足够大的情况下,完全可以实现对手术器械的实时跟踪。

基于双目视觉的手术器械跟踪定位系统是计算机视觉、图像处理学、数学、精密仪器等多学科高新技术的结晶。它的定位精度直接关系到计算机辅助外科手术的成败,它不但受摄像机标定的精确性、立体匹配的准确性等问题的影响,而且也受视频图像的分辨率和校正问题的制约。同时周围光线和金属物体可在摄像机视野中产生伪像,引起错误数据而使处理变得复杂<sup>[9]</sup>。今后对基于双目视觉的手术器械跟踪定位技术研究的重点放在进一步提高摄像机标定的精度,加快立体匹配的速度上,同时还要考虑其他因素对系统的影响,以及发生遮挡时的处理对策等。

### 参考文献

- 1 Taylor R H, Lavalley S, Burdea G C. Computer integrated surgery[M]. Cambridge: The MIT Press, 1995.
- 2 Marc Lievin, Erwin Kieve. Stereoscopic Augmented Reality System for Computer Assisted Surgery[C]. CARS, 2001.
- 3 孙九爱, 刘聚卓, 赵俊. 计算机辅助外科手术中立体定位技术的研究进展[J]. 生物医学工程学志, 2001, 18(3): 475~478
- 4 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- 5 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330~1334
- 6 S. M. Smith, J. M. Brady. SUSAN—A new approach to low level image processing[J]. Int. Journal of. Computer Vision, 1997, 23(1): 45~78
- 7 Andrea Fusiello, Emanuele Trucco, Alessandro Verri. A Compact Algorithm for Rectification of Stereo Pairs [J]. Machine Vision and Applications, 2000, 12: 16~22
- 8 罗忠祥, 庄越挺, 等. 基于双摄像机的视频特征跟踪算法研究 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(7): 646~650
- 9 费保蔚, 庄天戈. 计算机辅助外科手术(CAS)的方法和进展[J]. 生物医学工程学杂志, 1998, 15(2): 195~202

### 作者简介

马桂珍, 女, 硕士生, 研究方向: 图像处理、计算机视觉与模式识别。

湛海新, 男, 副教授, 研究方向: 可视化技术、图像处理、计算机视觉与模式识别。

马丙辰, 男, 硕士生, 研究方向: 计算机图形学、自动目标识别与环境仿真。