基于模板识别的高精度自动定位系统

刘 荣 彭艳敏

（北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191） （天津医科大学 医学影像学院，天津 300203）

唐 粲 毛 建

（昆山市工业技术研究院，昆山 215300） （中国电子科技集团 第26研究所，重庆 400060）

摘 要：为满足机器人辅助医疗手术中高精度自动识别物体的需要，利用 Bumblebee 2 摄像头拍摄图像，把黑白交互的椭圆和圆作为一个模板，用改进的角点提取方法提取出图像中的角点；在对图像进行增强之后，利用模板黑白格的几何对称性特征提取模板中的角点，然后区分出椭圆中的角点和圆中的角点，最后利用向量垂直关系提取出椭圆中的目标角点，识别出模板. 通过 Bumblebee 2 自带的深度函数，提取模板的深度，得到模板在摄像头空间中的坐标，达到高精度自动定位物体的目的，克服传统摄像机需要标定内外参数的步骤. 实验表明，定位误差在 0.42 mm 之内，基本上可以满足手术的要求.

关 键 词：角点；黑白格模板；机器人辅助手术；Bumblebee 2 摄像头

中图分类号：TP 391

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2012)06-0804-06

High-accuracy automatic locating system based on templates

Liu Rong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Peng Yanmin

(School of Medical Imaging, Tianjin Medical University, Tianjin 300203, China)

Tang Can

(Kunshan Industrial Technology Research Institute, Kunshan 215300, China)

Mao Jian

(The 26th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: In order to meet the requirement of robot assisted surgery which identified the object automatically with high precision, the Bumblebee 2 camera systems were used, and the ellipse and the circle were regarded as a template. The corners in the image were detected by the proposed algorithm. After the image enhanced for improving the contrast, using the symmetric properties of the black block and white block in the templates, the corners in the ellipse and in the circle were detected. At last using the vector vertical relationship, the goal vertex in the ellipse was extracted, and then the template was identified. Through the depth function of the Bumblebee 2, the world position of the templates was obtained automatically with the high accuracy. The system overcame the problem that the traditional cameras calibrated the inside and outside parameters. Finally, experiments show that the positioning accuracy will reach to 0.42 mm, which is satisfactory to the requirement of the surgery.

Key words: corners; template; robot assisted surgery; Bumblebee 2 camera

收稿日期：2011-03-12；**网络出版时间**：2012-06-15 15:43

网络出版地址：www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120615.1543.022.html

基金项目：江苏省科技项目(BE2009078)

作者简介：刘 荣(1968－)，男，重庆人，教授，rliu@buaa.edu.cn.

机器人辅助外科手术在医疗手术中占有越来越重要的地位,不仅能减少对病人的伤害,降低医生的劳动量,还可提高手术成功的概率. 在机器人辅助外科手术中,需要标定标记点的位置,一般需设定一些模板,最终目的是有利于摄像头对模板的识别,来达到对标记点的定位. 在机器人或者手术切口附近贴上不同的模板,根据不同模板的位置,可以检测到机器人或者穿刺针要到达的位置,规划手术路径对手术导航,辅助医生高质量的完成手术. 文献[1]利用棋盘格式的模板识别机器人运动的位置,但这种模板只有一种类型,不能识别多个位置的运动. 文献[2]可定位多种运动,定位精度高,定位误差为 0.25 ~ 0.5 mm,能够满足医疗机器人辅助手术对标记点的定位要求,但价格昂贵,不利于医疗机器人辅助手术的推广. 被动式红外光学定位仪(PPS, Passive Polaris Spectra)[3]虽然定位精度高(0.2 mm)、性能稳定,但价格昂贵、技术封闭,而且定位仪输出的视频信息单一,反射红外光标志物手术时消毒困难. Micron Tracker 和 PPS 都不便于二次开发. 普通 CCD 摄像头[4]每次都需要标定内外部参数,并制作相应的标定工具,当摄像头发生位移时,获得摄像头的内外部参数就不再准确,需要重新标定,这不仅浪费时间,而且还要求医生了解摄像头标定的原理,增加了医生的任务,不利于手术的推广. 国内外也有一些其它摄像头虽然也能达到定位目的,价格也比较便宜,但定位精度比较低,不能满足外科手术的需要.

本文通过对模板的识别来达到对物体定位的目的,而对模板识别可通过对模板特征点的提取来识别,提取物体的特征点有多种方法,主要有基于边界和基于灰度的方法. 基于边界的算法[5],利用协方差矩阵[6-7]的特征值来检测角点,利用 Radon 变换[8]先来检测直线,这些方法首先要提取出边界,但边界在提取时会出现“毛刺”,从而会提取出许多伪角点;基于灰度的算法,这种方法不需要提取边界,利用 Hessian 矩阵[9]、拉普拉斯高斯滤波、文献[10]直接在图像上提取角点. 这些方法都是 Harris 算法[11]的变形,使用灰度的高斯梯度作为响应值判断角点. Harris 算法计算简单,提取的点特征均匀合理,并且对图像旋转、灰度变换和噪声的影响不敏感,但 Harris 算法受高斯滤波的窗口和 σ 值影响较大,会影响到角点提取的精度. 本文根据实际手术环境的要求,摄像头一般离手术床的距离为 70 ~ 120 cm 之间,而且手术中光线都比较充足,采用拉普拉斯高斯滤波对图像进行预处理,然后通过求取多个灰度共生矩阵的熵均值,自适应得到最佳的 σ 值,提取角点;根据模板的几何对称性,识别出模板;通过调用 Bumblebee 2 摄像头提取图像深度的库函数,得到模板在摄像头空间中的坐标,最后通过实验验证,误差在可接受范围内,减少了手术成本,有利于机器人辅助外科手术的推广.

1　基于 σ 自适应值的角点提取法

目前基于 Harris 算法提取角点的方法,角点误差有时候会超过 1 个像素或者更多,原因有 3 个:①采用了固定的高斯平滑窗口和 σ 值,但实际运用中不同的高斯窗口和 σ 值对角点的提取影响很大. 若选用较小的高斯平滑窗口,则会因为边缘细节的影响导致众多伪角点的出现;若用较大的高斯平滑窗口,则会因为卷积的圆角效应使得角点的位置产生较大的偏移,而且增加了算法的计算量. 由于边缘和噪声在图像中都是高频信号,较小的 σ 值能反映更多的边缘细节,对角点能进行准确的定位,但对噪声的抑制不足,会出现较多的伪角点. 较大的 σ 值虽然能够很好的平滑图像的噪声,但图像的大部分边缘也被消除了,对角点不能准确定位. ②使用高斯函数对图像作平滑滤波. 图像平滑的主要目的是提高信噪比,消除噪声. 然而对图像平滑时,边缘作为高频成分将被平滑掉,而且有些边缘变成缓变的边缘,这样在非极大值抑制时,角点就有可能丢失. ③对提取的近距离的角点只是简单的去除,只保留检测到的第一个角点,这样会使真实的角点丢失,而取了一个伪角点.

一阶微分处理通常会产生较宽的边缘;二阶微分处理可产生比较精细的边缘,如细线和孤立点;一阶微分处理一般对灰度阶梯有较强的响应;二阶微分处理对灰度级阶梯变化产生双响应;而拉普拉斯算子是二阶微分处理,可产生比较精细的边缘. 因此,本文先应用高斯算子对图像进行平滑,然后采用拉普拉斯算子根据二阶微分过零点来检测图像的边缘,即高斯拉普拉斯算子(LOG, Laplacian of Gaussian),这种算子即具有高斯算子的平滑特点又具备拉普拉斯算子锐化特点.

高斯平滑滤波算子的表达式为

$$G_\sigma(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \tag{1}$$

对式(1)分别求 x,y 方向的二阶偏导:

$$\frac{\partial^2}{\partial^2 x} G_\sigma(x,y) = \frac{x^2-\sigma^2}{\sigma^4} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \tag{2}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial^2 y}G_\sigma(x,y) = \frac{y^2-\sigma^2}{\sigma^4}\mathrm{e}^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \tag{3}$$

高斯拉普拉斯算子的表达式为

$$\mathrm{LoG} = G_\sigma(x,y) = \frac{x^2+y^2-2\sigma^2}{\sigma^4}\mathrm{e}^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \tag{4}$$

对图像进行高斯拉普拉斯算子处理,其表达式为

$$r(x,y) = \mathrm{LoG}\otimes I(x,y) \tag{5}$$

其中,⊗为卷积符号,下同.

每个角点周围小窗口的自相关矩阵为

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} r_x^2 & r_x r_y \\ r_x r_y & r_y^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中,$r_x = \mathrm{LoG}\otimes I_x(x,y)$;$r_y = \mathrm{LoG}\otimes I_y(x,y)$;$I_x(x,y)$为 x 方向差分;$I_y(x,y)$为 y 方向差分.

用式(7)来判断角点:

$$R = \det(\boldsymbol{H}) - k\cdot\mathrm{trace}(\boldsymbol{H})^2 \tag{7}$$

其中,$\mathrm{trace}(\boldsymbol{H}) = r_x^2 + r_y^2$,为矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的迹;$\det(\boldsymbol{H}) = r_x^2\cdot r_y^2 - (r_x\cdot r_y)^2$,为矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的行列式值.

采用非极大值抑制法,当一个像素的 R 值大于某一个值时,即为角点. 角点的位置和窗口[x y]及其 σ 值有关. 本文根据每幅图像的具体特征自动获取 σ 值.

一幅图像的灰度共生矩阵能反映出图像灰度关于方向、相邻间隔、变化幅度的综合信息,因此图像自身的特征可以通过该图像的灰度共生矩阵来体现. 可用灰度共生矩阵的熵来反映图像中所含噪声的程度,σ 可以用熵的合理映射来获得[12]. 灰度共生矩阵为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{P}(g_1,g_2,d,\theta) = \{&p \mid I(x_1,y_1) = g_1,\\ &I(x_2,y_2) = g_2, D[(x_1,y_1),(x_2,y_2)] = d,\\ &[(x_1,y_1),(x_2,y_2)] \in N_x\times N_y\}\end{aligned} \tag{8}$$

设图像 $N_x\times N_y$,$I(x,y)$为坐标为(x,y)像素的灰度值,N_x为 x 方向像素总数,N_y为 y 方向像素总数,$I(x,y)\in[0,N_g]$,$x\in\{1,2,\cdots,N_x\}$,$y\in\{1,2,\cdots,N_y\}$,N_g为灰度值的最大值. 在图像域 $N_x\times N_y$范围内,$D[(x_1,y_1),(x_2,y_2)]$表示图像中任意两点(x_1,y_1)和(x_2,y_2)之间的距离,其间距为 d,两点之间连线与 x 轴之夹角为 θ,这样的灰度对在图像中出现的次数为 p. 遍历完所有的灰度对,可形成共生矩阵 $\boldsymbol{P}$,对 $\boldsymbol{P}$ 进行归一化处理,形成新的灰度共生矩阵 $\boldsymbol{M}$.

令 T 为熵,$M_{i,j}$是灰度共生矩阵的元素.

$$T = -\sum_i\sum_j M_{i,j}\log_2 M_{i,j} \tag{9}$$

用 Bumblebee 2 摄像头拍摄 100 张需要处理的图像,这些图像在相同的条件下拍摄,拍摄的物体也是相同的. 对于每一幅图像取 $d=1$,θ 取 0°,45°,90°,135° 4 个方向的灰度共生矩阵 $\boldsymbol{M}_1$,$\boldsymbol{M}_2$,$\boldsymbol{M}_3$,$\boldsymbol{M}_4$. 然后由式(9)求得每个矩阵的熵:T_1,T_2,T_3,T_4. 对每幅图像交互的调整 σ 值以获取最佳的角点检测效果,得到每幅图像的熵均值 S 和最佳 σ 值. 由三次多项式拟合得到 S 与 σ 的映射函数:

$$\sigma = p_1S^3 + p_2S^2 + p_3S + p_4 \tag{10}$$

要实现角点提取步骤如下:

1) 由式(8)求出 100 张图片中每幅图片的 $d=1$,$\theta=0°,45°,90°,135°$ 4 个方向上的灰度共生矩阵,然后由式(9)计算出每个方向上的灰度共生矩阵的熵,最后求出这 4 个熵的平均值 S;

2) 由式(10)求出 σ 的值;

3) 把 σ 值代入式(5),对图像进行卷积;

4) 对卷积后的图像,由式(7)求角点.

2 提取模板中的角点

本文采用 Micron Tracker 使用的模板,如图 1 所示. 黑块与黑块对应,白块与白块对应,黑块不能与白块对应,不同的 d 值,即椭圆和圆之间不同的距离可形成不同的模板. 模板识别的目的,是分别识别出椭圆中角点 a_i 和圆中角点 b_i,并把椭圆和圆组合在一起作为一个模板. 识别模板步骤如图 2 所示.

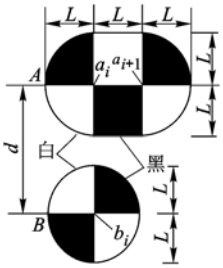
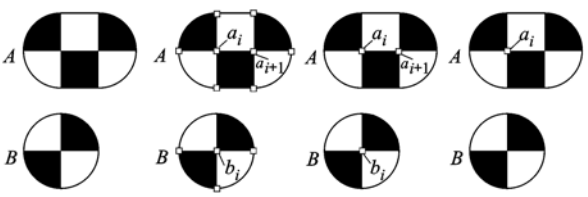


图 1 黑白格模板



a 原图 b 提取角点 c 提取 X 型角点 d 提取角点 a_i

图 2 提取角点步骤

1) 识别出图像中所有的角点.

根据第 1 节的角点提取法求取图像中所有的角点,如图 2b 所示.

2) 增强图像的对比度.

对比度指的是一幅图像中明暗区域最亮的白和最暗的黑之间不同亮度层级的测量,即指一幅图像灰度反差的大小. 利用下式对图像的对比度进行增强,方便后面角点的识别.

$$v = 255(t-b)[(I(x,y)-255l)/(255(h-l))]^{\lambda} \tag{11}$$

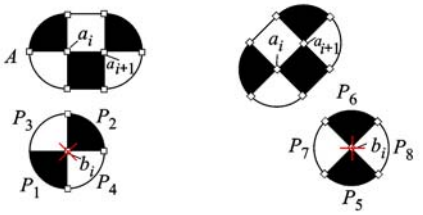
其中,$l,h,\lambda,t,b\in[0,1]$.

3) 利用几何对称性识别椭圆中 a_i,a_{i+1} 和圆中 b_i 类型的角点.

角点 a_i,a_{i+1} 和 b_i 周围都具有 4 个距离为 L 的角点,如图 1 所示. 根据这个条件判断出角点 a_i,a_{i+1} 和 b_i. 但在摄像头空间下,由于环境的复杂性和光线等多种因素的影响,还会提取出很多角点,并且还会有一些角点的附近具有 4 个距离为 L 的角点. 因此,还需考虑模板的几何对称性,以角点 b_i 为例:令 P_1,P_2,P_3 和 P_4 是如图3a 所示的像素,并分别求 P_1,P_2,P_3 和 P_4 一定范围邻域像素的平均值,P_1 和 P_2 点灰度相差很小,P_3 和 P_4 点灰度相差很小,P_1 和 P_4 点灰度相差很大,P_2 和 P_3 点灰度相差很大. 即

$$\left.\begin{aligned} &I(P_1x,P_1y)\cong I(P_2x,P_2y)\\ &I(P_3x,P_3y)\cong I(P_4x,P_4y)\\ &|I(P_1x,P_1y)-I(P_4x,P_4y)|>R_1\\ &|I(P_2x,P_2y)-I(P_3x,P_3y)|>R_2 \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

其中,R_1 和 R_2 为事先设定好的阈值.



a　45°中心对称　　b　90°中心对称

图 3　模板的对称性

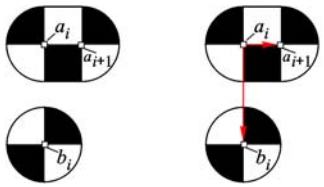
对于模板倾斜角度小于一定程度的情况下,由式(12)提取角点 b_i. 但是当模板倾斜角度大于一定范围的时候,上述约束条件就不再适用,因此还要再加上其他的约束条件:P_5 和 P_6 灰度相差很小,P_7 和 P_8 灰度相差很小,P_5 和 P_7 灰度相差很大,P_6 和 P_8 灰度相差很大,如式(13)所示. 由式(12)和式(13),可提取椭圆中 a_i 和 a_{i+1}类型的角点,圆中 b_i 类型的角点,如图 3b 所示.

$$\left.\begin{aligned} &I(P_5x,P_5y)\cong I(P_6x,P_6y)\\ &I(P_7x,P_7y)\cong I(P_8x,P_8y)\\ &|I(P_5x,P_5y)-I(P_7x,P_7y)|>R_3\\ &|I(P_6x,P_6y)-I(P_8x,P_8y)|>R_4 \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

其中,R_3 和 R_4 为事先设定好的阈值.

4) 找到角点 a_i.

由图 4 可知,如果椭圆和圆是一个模板,必须满足以下条件:①角点 a_i 和 a_{i+1} 距离为 L;②a_i 和 b_i 两点之间的距离 d_i 在一定的范围之内;③向量 $\overrightarrow{a_ia_{i+1}}\perp\overrightarrow{a_ib_i}$. 满足上述 3 个条件的即为 a_i.



a　X 型角点　　b　两向量垂直

图 4　向量垂直关系

5) 识别模板.

从 b_i 点到 a_i 的距离为 d_i,两个模板如果 d_i 不同,则表示不同的模板.

6) 图像的深度提取.

Bumblebee 2 摄像头可通过 triclopsRCD16ToWorldXYZ (TriclopsContext context, int row, int col, unsigned short disp, float * x, float * y, float * z) 函数实现图像坐标到世界坐标的转换,该函数的各个参数含义如表 1 所示.

表 1　函数参数

参数	含义
context	图像
row	像素在图像中行数
col	像素在图像中列数
disp	像素之间的间距
x	三维空间中 x 坐标值
y	三维空间中 y 坐标值
z	三维空间中 z 坐标值

3　实验和分析

实验目的是通过与目前较好的角点检测算法和视觉定位系统相比较,评判本文视觉定位系统的精确性. 因此误差分析主要包括以下两部分:角点定位误差和系统定位误差. 本文算法是由 OpenCV 和 VC 实现的,所有实验结果都是在同一台计算机上实现的,配置为:4 GB 内存,英特尔 Core 2 Duo E7400 处理器,XP 操作系统,摄像头为 Bumblebee 2,频率是 15 Hz.

3.1　角点定位误差

图 5 是距离 Bumblebee 2 摄像头 75 cm 处拍摄的图像,图像大小为 1 024 像素 ×768 像素,利用本文算法提取图像中的角点,加上约束条件后提取的角点和最终提取的 a_i 类型的角点. 同时,

本文还在以下条件下拍摄不同的图像:距离摄像头范围从70 ~ 120 cm、模板倾斜角度从 10° ~ 70°,部分识别结果如图 6 所示. 由图 5、图 6 可知,本文算法可以正确的识别出目标角点.

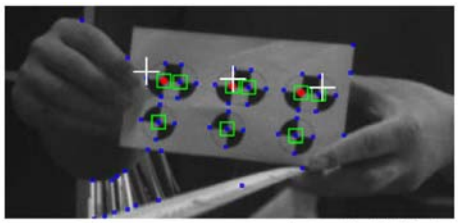
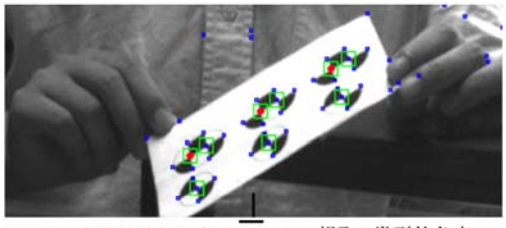
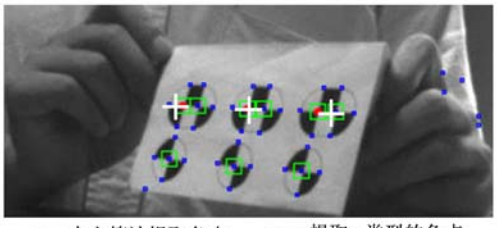


图 5 识别模板中的角点



a 模板倾斜 30°



b 模板倾斜 60°

图 6 倾斜不同角度识别出模板中的角点

为验证角点定位的误差,本文利用交比定律,如式(14)所示.

$$C(P_1,P_2,P_3,P_4) = \frac{(P_3 - P_1)(P_4 - P_2)}{(P_3 - P_2)(P_4 - P_1)} \tag{14}$$

其中,P_1,P_2,P_3 和 P_4 是在一条直线上的 4 个点.

由式(15)计算误差:

$$e = C - C' \tag{15}$$

选取 6 组角点,每组角点含有 4 个角点,每组角点之间的距离都相等,所以真实的 $C' = 4/3$. 让模板离摄像头不同距离,并把模板倾斜不同角度,提取这些图像中的角点.

由式(14)和式(15)得到的误差,如图 7 所示. 可见,利用本文算法提取出角点的误差明显要好于 OpenCV 里面的算法.

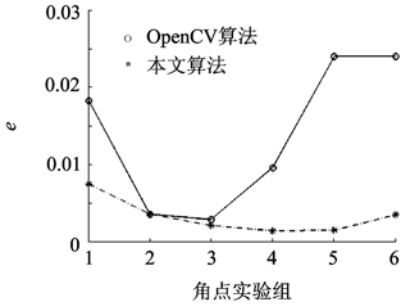


图 7 角点定位误差

3.2 系统定位误差

把 Bumblebee 2 摄像头和模板放在水平的花岗岩桌面上,利用水平仪进行测试,保证摄像头和模板相互平行,并与花岗岩桌面垂直,如图 8 所示. 模板放在花岗岩桌面上,保证摄像头与花岗岩桌面平行,如图 9 所示. 分别拍摄距离摄像头不同距离的图像,距离在 60 ~ 90 cm 之间,由 triclops-RCD16ToWorldXYZ 获取角点的深度信息,误差如图 10 所示. 可见,误差在 0.01 ~ 0.35 mm 之间.

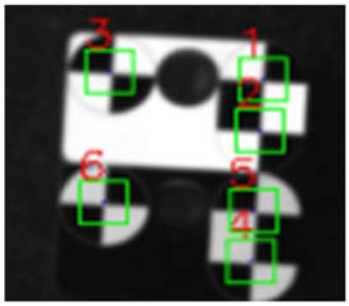


图 8 模板和摄像头平行垂直放在桌面上

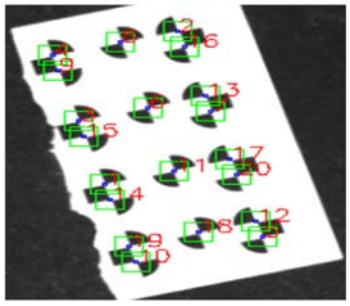


图 9 模板、摄像头平行于桌面

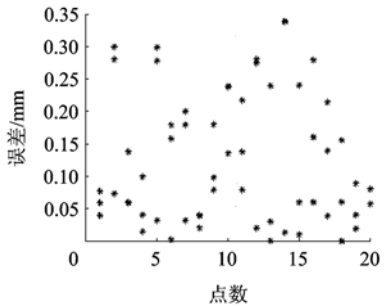


图 10 深度误差

把模板倾斜各种角度,图 11 为其中之一,提取目标角点,然后再结合图 8 和图 9 所提取的角点,计算出两角点之间的距离,可得距离的误差如图 12 所示. 可见,误差在 0.02 ~ 0.42 mm 之间,而且大部分在 0.1 mm 左右. 现有 Micron Tracker 定位精度平均为 0.25 mm,PPS 定位精度平均为 0.2 mm. 本定位系统和目前这些比较成熟的定位系统的定位精度相差不大. 同时,也说明本文改进的 Harris 角点定位精度较高.

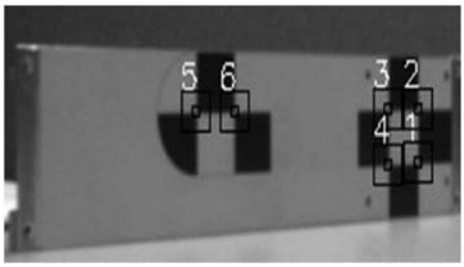


图 11　模板倾斜一定角度

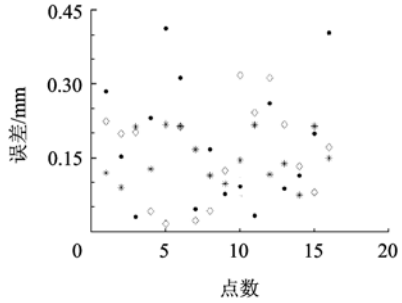


图 12　视觉定位系统误差

4　结　论

本文提出了改进的 Harris 角点提取法,该方法可以自适应的调节 σ 参数,从而能够较好的提取出角点. 通过 Bumblebee 2 摄像头可实现自动获得模板的空间坐标,对目标物体进行高精度的定位,免去繁琐的摄像头内外参数标定的过程. 该定位系统能够满足医疗机器人手术定位的要求,对机器人辅助手术的推广具有重要意义.

参考文献 (References)

[1] Ha Jongeun. Automatic detection of chessboard and its applications[J]. Optical engineering,2009,48(6):067205

[2] Maier H L M, Franz A, Meinzer H P, et al. Comparative assessment of optical tracking systems for soft tissue navigation with fiducial needles[C]//Proceedings of SPIE, Medical Imaging. Bellingham:SPIE,2008:69181z

[3] Wiles A D, Thompsona D G, Frantz D D. Accuracy assessment and interpretation for optical tracking system[C]//Proceedings of SPIE, Medical Imaging. Bellingham:SPIE,2004:421 - 432

[4] Arturo dela Escalera, Jose María Armingol. Automatic chessboard detection for intrinsic and extrinsic camera parameter calibration[J]. Sensors,2010,10(3):2027 - 2044

[5] Van de Weijer J, Gevers T, Geusebroek J M. Edge and corner detection by photometric quasi-invariants[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(4): 625 - 630

[6] Zhu Qingsheng, Wang Yanxia, Liu Huijun. Auto-corner detection based on the eigenvalues product of covariance matrices over multi-regions of support[J]. Journal of Software, 2010, 5(8): 907 - 914

[7] Tsai D M, Hou H T, Su H J. Boundary-based corner detection using eigenvalues of covariance matrices[J]. Journal Pattern Recognition Letters, 1999, 20(1): 31 - 40

[8] 胡海峰,熊银根. 一种基于两次 Radon 变换检测棋盘格方格点的新算法[J]. 中山大学学报:自然科学版,2003,42(2):23 - 26
Hu Haifeng, Xiong Yingen. A new algorithm for chessboard grid corners detection based on two successive Radon transform[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(2):23 - 26(in Chinese)

[9] Beaudet P R. Rotationally invariant image operators[C]//International Joint Conference on Pattern Recognition. New York, NY:IEEE,1979,1:579 - 583

[10] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91 - 110

[11] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]//Proceeding of the Fourth Alvey Vision Conference. Manchester:The University of Sheffield Printing Unit,1988:147 - 151

[12] 赵景秀,韩君君,王菁,等. 一种改进的 LoG 图像边缘检测方法[J]. 计算技术与自动化,2009,28(3):74 - 77
Zhao Jingxiu, Han Junjun, Wang Jing, et al. An improved LoG image edge detection method[J]. Computing Technology and Automation, 2009, 28(3):74 - 77(in Chinese)

(编　辑:文丽芳)