

基于改进的 SUSAN 法的摄像机线性标定方法

张 颖

(长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064)

(zhangying@chd.edu.cn)

摘 要:设计并实现了一种考虑径向畸变的逐步线性摄像机标定方法。结合边缘检测,缩小了 SUSAN 法检测角点的范围,并利用角点的邻域特征,剔除伪角点,从而提高了 SUSAN 法角点检测的速度和准确度。利用此改进的 SUSAN 法精确提取方格模板角点的亚像素坐标,并通过预标定获得主点坐标;然后在考虑摄像机径向畸变的情况下建立摄像机模型,并求解摄像机内外参数。最后通过实验及误差分析表明,本标定方法具有较高的精度和较好的实时性。

关键词:摄像机标定;角点提取;SUSAN 算法;亚像素

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

New linear approach for camera calibration based on improved SUSAN detector

ZHANG Ying

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: A new linear approach with radial distortion model for camera calibration was designed and realized. Firstly, SUSAN corner detector was combined with edge detection and false corner removal to enhance its speed and accuracy. Secondly, the improved SUSAN detector was used to obtain the sub-pixel coordinates of the corners. Thirdly, a camera model with radial distortion was established to calculate the intrinsic and extrinsic parameters of the camera. The experimental results and error analysis demonstrate high accuracy and efficiency of this approach.

Key words: camera calibration; corner extraction; SUSAN algorithm; sub-pixels

0 引言

摄像机标定是从二维图像提取三维空间信息必不可少的步骤,广泛应用于三维重建、导航、视觉监控等领域。摄像机标定包括确定摄像机内部几何和光学特性(内部参数),以及确定摄像机在世界坐标系中的三维位置和方向(外部参数)。标定结果的精度及算法的稳定性直接影响后续处理的准确性^[1,2]。

目前已提出了很多标定方法,按其求解算法大致可分为线性法、非线性法、两步法。传统的线性法采用最小二乘法求解线性方程组获得转换参数,算法速度快但未考虑摄像机镜头的畸变,准确度欠佳^[2];基于自标定的线性法需要控制摄像机做严格的运动,实验要求比较高,稳定性较差。非线性法考虑了镜头畸变,一般通过迭代优化求解,可以得到比较高的标定精度,但其算法比较繁琐,速度慢,而且对噪声和初值选择较敏感。两步法^[3]及多步法^[4],综合了以上二者的优点,先线性求解部分参数,然后考虑畸变引入非线性优化;这类方法的标定精度有所提高,但没有完全避免非线性优化,因此仍然费时费力,不适用于在线标定和不可能使用标定块的场合。因此,有必要寻求一种简单快速而又标定精度高的方法。

本文在传统摄像机标定的基础上,采用一幅角点信息已知的图样作为标定模板,利用改进 SUSAN 算法,自动获取图像中角点的亚像素坐标,通过预标定获得主点坐标,然后考虑径向畸变,建立摄像机模型,采用最小二乘法求解摄像机其他

内外参数,实现了精确快速的摄像机标定。

1 SUSAN 算法的改进

1.1 算法原理

SUSAN 算法是一种基于图像对象灰度和面积的特征点提取方法。其原理^[5]如图 1 所示,在白色的背景上有一个黑色的矩形,图像的不同位置用一个圆形的掩模进行计算,掩模的中心点像素称为核(圆心)。对于任意位置的掩模,求取掩模中的每一个像素与核的灰度差绝对值,如果灰度差绝对值在设定的灰度阈值范围内,则该像素称为 USAN(Univalue Segment Assimilating Nucleus),用白色表示,反之,用黑色表示,如图 2 所示。

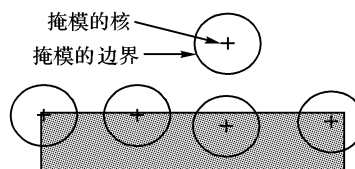


图 1 不同位置的掩模

由图中可以直观地看出,当圆形掩模完全在背景中或完全在矩形中时,USAN 区面积最大;而当掩模移向目标边缘时,USAN 区面积逐渐减小;当核(圆心)处在目标边缘时,USAN 区很小;当核在目标角点处时,USAN 区最小。并且可以证明,角点处的 USAN 值是其邻域内的局部极小^[5]。因此通过设定灰度阈值和 USAN 面积阈值,并采用非极大值抑制

策略,可以获取角点像素坐标。

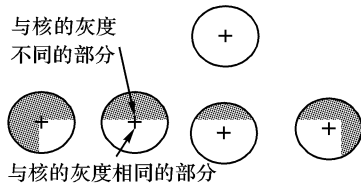


图2 图1中各掩模的USAN(用白色表示)

1.2 SUSAN 算法的改进

在实际应用中,由于光照环境、设备噪声等因素的影响,直接应用 SUSAN 算法往往会产生伪角点或位置偏差,且比较费时,因此需要进行改进以提高算法实时性及去除伪角点。

在对多幅图像采用 SUSAN 算法进行角点检测时,发现其伪角点大多出现在图像以下位置:1)图像的孤立点处,该类伪角点会严重影响对物体形状的判断;2)真实角点附近,该类伪角点对实际物体形状影响很小。通过研究发现,真正的角点除具有 USAN 值局部极小这一性质外,其周围像素的 USAN 值也具有特定的性质。首先给出如下定义,区分不同的角点。

定义 1 如果一个角点的 USAN 值小于整个掩模面积的 $1/2$,则称此角点为内角点。反之,如果一个角点的 USAN 值大于整个掩模面积的 $1/2$,则称此角点为外角点。

内角点和外角点的示例如图 3 所示。

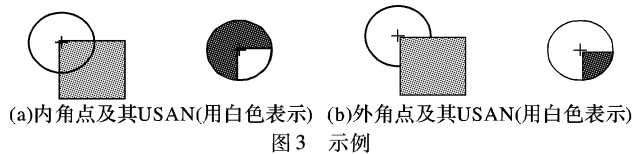


图3 示例

观察图 3(a)、(b) 可以发现, SUSAN 法检测出的角点实际上是内角点,并且内角点和外角点必定同时出现,而角点的真正位置位于内角点和外角点之间,由此有以下定理:

定理 1 直角角点定理。如果某一像素的 USAN 值为其 8 邻域内的最小值,且与其 8 邻域内某一对角像素的 USAN 值相差掩模面积的 $1/2$,则该像素为角点。

应用此定理,可以有效地消除伪角点。对于图像的孤立点,其邻域内不存在与其 USAN 值相差掩模面积的 $1/2$ 的点;而对于真实角点附近的伪角点,与其 USAN 值相差掩模面积的 $1/2$ 的点或者不存在,或者不是对角点,因此,伪角点的两种情况都可以通过应用定理 1 排除。

由于 SUSAN 法在检测角点时,要在每个点判断 USAN 值是不是局部极小,为减少运算量,考虑到角点肯定是边缘点,因此可采用经典边缘检测算子,如 Sobel 算子、Prewitt 算子、Canny 算子、Marr 算子等,先对原灰度图像进行边缘检测,获取边缘点的位置后,仅在边缘点,利用 SUSAN 算法中的 USAN 原理检测角点,同时利用定理 1,消除伪角点。

角点检测的精度决定了摄像机标定的精度。为提高标定精度,应获取角点的亚像素空间坐标。对于灰度图像,根据像素灰度值求取二维占空比获得其亚像素空间坐标简单而有效^[6]。

设 g 表示该像素的灰度值,令 $t = \sqrt{(255 - g)/255}$,则坐标增量 ∇ 为:

$$\nabla = \begin{cases} 0.5, & \text{当 } t = 0 \text{ 或 } t = 1 \\ t, & \text{当 } 0 < t \leq 0.5 \\ 1 - t, & \text{当 } 0.5 < t < 1 \end{cases}$$

例如像素坐标 (20, 30) 点的灰度值为 200,则其增量为

(0.464, 0.464),亚像素空间坐标为 (20.464, 30.464)。

综上所述,改进的 SUSAN 算法的具体步骤如下:

- 1) 用边缘检测算子对灰度图像进行边缘检测,得到一幅边缘图像;
- 2) 对边缘点,用 SUSAN 算法提取角点信息;
- 3) 利用定理 1 排除伪角点;
- 4) 根据二维占空比,计算已检测到角点的亚像素空间坐标。

2 摄像机标定

2.1 摄像机模型及空间定义

摄像机采用小孔模型,成像方式为透视投影,该模型中存在四个坐标系,其空间定义如图 4 所示。

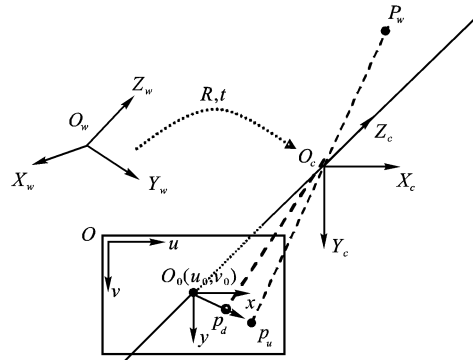


图4 摄像机模型

- 1) 摄像机坐标系:以光心 O_c 为原点,平行于图像行和列的方向分别为 X_c 轴和 Y_c 轴,光轴方向为 Z_c 轴,建立摄像机坐标系,单位为毫米。
- 2) 世界坐标系:以摄像机初始位置的坐标系作为世界坐标系 (O_w, X_w, Y_w, Z_w)。
- 3) 图像坐标系:以摄像机光轴与图像平面的交点原点 o_0 ,图像行和列分别为 x 轴和 y 轴,建立图像坐标系,单位为毫米。
- 4) 计算机图像坐标系:为处理方便还建立单位为像素的计算机图像坐标系,以图像左上角为原点 o , u 轴和 v 轴分别平行于 x 轴和 y 轴, u 和 v 分别为列数和行数。

小孔模型是比较理想的透镜成像模型,但在实际应用中,由于摄像机光学系统的加工误差和装配误差,现实中透镜并不完全满足小孔模型的条件,即摄像机像面上的实际成像与理想成像之间存在光学畸变误差。主要的畸变误差包括径向畸变和切向畸变,其中径向畸变是影响工业视觉精度的主要因素^[7, 8],因此一般情况下只考虑一阶径向畸变。如图 4 所示, p_u 表示针孔模型下 p 点的理想图像坐标, p_d 是由透镜径向畸变引起的偏离 p_u 的实际图像坐标。

从世界坐标系到计算机图像坐标系的变换可以分为如下四步:

- 1) 世界坐标系与摄像机坐标系的变换,可以用旋转矩阵 R 和平移向量 T 来描述:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + t; R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

- 2) 小孔模型的理想透视投影变换,即从摄像机坐标系到理想图像坐标系的变换:

$$\begin{cases} x_u = fx_c/z_c \\ y_u = fy_c/z_c \end{cases} \quad (2)$$

3) 理想图像坐标系与实际图像坐标系的转换,即考虑径向畸变,建立畸变模型:

$$\begin{cases} x_d = (1 + kR_d^2)x_u \\ y_d = (1 + kR_d^2)y_u \end{cases} \quad (3)$$

式中 $R_d^2 = x_u^2 + y_u^2$; k 为一阶径向畸变系数。

4) 实际图像坐标系到计算机图像坐标系的转换:

$$\begin{cases} u = c_x + s_x x_d \\ v = c_y + s_y y_d \end{cases} \quad (4)$$

式中 (c_x, c_y) 为主点坐标, (s_x, s_y) 为图像平面单位距离上的像素数 (pixels/mm)。

2.2 摄像机待标定的参数

由以上摄像机模型可以看到,需标定的参数有:1) 外部参数,包括(1)式中的旋转矩阵 R 以及平移矩阵 T ,因 R 为单位正交矩阵,必须满足 6 个单位正交约束,因此实际上只有 6 个外部参数需要标定;2) 内部参数,包括 (c_x, c_y) ; (s_x, s_y) ; f ; k 。其中 (s_x, s_y) 由硬件厂商提供,主点坐标 (c_x, c_y) 可由预标定获得^[9]。

2.3 摄像机标定方法

对所需求解的摄像机内外参数可按照以下步骤获取:

1) 预标定获得主点坐标。用相机的不同焦距拍摄同一景物,然后计算其缩放中心即得主点坐标。因为只有摄像机的有效焦距变化时,相应的图像发生缩放,而光轴不变,故光轴与图像平面的交点(即主点)不变。假定摄像机的焦距由 f_1 变为 f_2 ,由(4)式,考虑到 $x_{d1}/x_{d2} = y_{d1}/y_{d2}$,有:

$$\frac{u_1 - c_x}{u_2 - c_x} = \frac{v_1 - c_y}{v_2 - c_y} \quad (5)$$

整理可得:

$$\begin{bmatrix} v_1 - v_2 & u_1 - u_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} = u_2 v_1 - u_1 v_2 \quad (6)$$

式中 (u_1, v_1) 为在有效焦距 f_1 下某点的像素坐标, (u_2, v_2) 为同一点在有效焦距 f_2 下的像素坐标。选取多个特征点,利用最小二乘法即可线性解出 (c_x, c_y) 。

2) 由于本文标定模板采用共面点进行标定,故 $Z_w = 0$,参考文献[1],由(1)~(3)式:

$$\frac{x_d}{y_d} = \frac{r_1 X_w + r_2 Y_w + t_x}{r_4 X_w + r_5 Y_w + t_y} \quad (7)$$

整理得:

$$\begin{bmatrix} X_w Y_d & Y_w Y_d & y_d & -X_w x_d & -Y_w x_d & x_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t_x & 1 & r_4 & r_5 & t_y & 1 \end{bmatrix}^T = x_d - y_d$$

式中列向量的 6 个元素为未知量,对于每一个标定点均可列出如上的一个方程,取多个标定点(大于 6),用最小二乘法求该超定方程即可得到。

3) 根据 R 的正交性,计算 R 的其余参数:

$$\begin{aligned} r_3 &= \sqrt{1 - r_1^2 - r_2^2} \\ r_6 &= \pm \sqrt{1 - r_4^2 - r_5^2} \text{ (若 } r_1 r_4 + r_2 r_5 > 0, \text{ 则 } r_6 \text{ 取负号)}; \\ r_7 &= r_2 r_6 - r_3 r_5; r_8 = r_3 r_4 - r_1 r_6; \\ r_9 &= r_1 r_5 - r_2 r_4 \end{aligned} \quad (8)$$

如果下面计算的 f 为负号,则 r_3, r_6, r_7, r_8 的符号与上面相反。

4) 整理公式(3)得:

$$\begin{bmatrix} H & HR_d^2 & -x_d \\ J & JR_d^2 & -y_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ fk \\ t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d G \\ y_d G \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 $H = r_1 X_w + r_2 Y_w + t_x$; $J = r_4 X_w + r_5 Y_w + t_y$; $G = r_7 X_w + r_8 Y_w$ 用最小二乘法联合解线性方程组,即可得 f, k, t_z 的解。如果 $f < 0$,则将其反号,其余参数符号参考第 3) 步。

3 标定实验及结果分析

实验使用 SONY PD100 型摄像机,拍摄标定模板图像如图 5(a) 所示(有裁减),图像大小为 288×352 ,采用本文改进 SUSAN 法提取的角点如图 5(b) 所示。

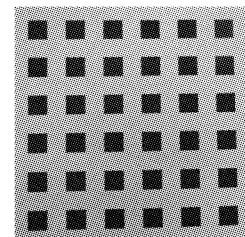
经预标定得主点坐标 $(c_x, c_y) = (153.9889, 162.4363)$; $(s_x, s_y) = (0.0278, 0.0254)$ 。实验中,提取的角点共有 144 个。取其中的 100 个点作为标定点,其余的 44 个作为测试点。为验证标定结果的精度,本文采用两项指标来进行误差分析,第一项指标为测试点的真实图像坐标与再投影后相应的图像坐标之差的模平均值(单位为像素),即:

$$E_{AVG} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(u_i^1 - u_i)^2 + (v_i^1 - v_i)^2]^{1/2}$$

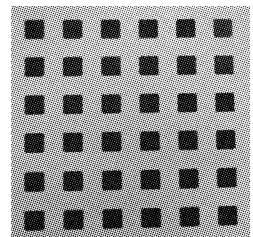
其中, (u_i, v_i) 为测试点的真实图像坐标, (u_i^1, v_i^1) 为再投影后的图像坐标, N 为点个数。

第二项指标为误差最大值,即:

$$E_{MAX} = \max_{1 \leq i \leq N} [(u_i^1 - u_i)^2 + (v_i^1 - v_i)^2]^{1/2}$$



(a) 本文的实验标定模板板



(b) 本文算法提取的角点

图 5 标定实验结果

利用本文标定方法获得的标定结果如下:

$$\text{旋转矩阵 } R = \begin{bmatrix} -0.9628 & -0.0121 & 0.2699 \\ 0.0119 & 0.9953 & 0.0961 \\ -0.2698 & 0.0957 & -0.9581 \end{bmatrix};$$

$$\text{平移矩阵 } T = \begin{bmatrix} 12.5342 \\ 69.3218 \\ 126.4537 \end{bmatrix};$$

有效焦距 $f = 18.5982\text{mm}$; 径向畸变系数 $k = 0.0014$ 。进行误差分析得 $E_{AVG} = 0.2961\text{pixels}$, $E_{MAX} = 1.09\text{pixels}$ 。在 Pentium 2.8G 的微机,利用 Matlab 平台实现整个标定过程所用的时间为 0.427s,可见,本文提出的方法在标定精度和实时性两方面均满足一般的工业视觉应用的要求。

4 结语

摄像机自标定技术是计算机视觉的一个重要研究内容。角点提取的精度和速度对标定算法的实用性有较大影响。本文首先对 SUSAN 角点提取算法作了改进,区分了两类角点,去除了常见的两类伪角点,提高了算法的实时性和精确性,然后在只考虑摄像机一阶径向畸变的情况下,逐步求解摄像机内外参数。最后,通过实验验证了该方法具有较高精度和实时性,能满足工业应用的实时要求。

(下转第 2521 页)

自动生成;

4) 危险废物转移联单打印与传输,生产设施运行工艺控制参数的存储、记录和数据统计处理;

5) 实时显示收运医疗废弃物的种类、单位、数量、重量;

6) 与市环卫局,卫生局或其他部门通讯,完成各类报表;

7) 车辆调度,自动寻找医院附近的医疗废弃物收运车辆;

8) 根据各医院医疗废物的数量、收运车的车辆动态位置与装载情况、距离、转运站的暂存量、冷藏情况、焚烧(或蒸煮)处理设备运行情况等条件,通过自动寻优软件模块自动给出动态的最优收运路线,使医疗废弃物处置运营中心在满足有关运行法规的条件下处于低成本运行状态,保证医疗废弃物处置运营中心经济效益的最大化;

9) 生产设施运行工艺控制参数记录、储存,便于掌握运行工况和分析事故原因。

3.2 收运车端子系统功能

收运车端子系统功能如下:

1) 自动识别用户身份和数字签名;

2) 电子称自动称重并将数据送给采集模块;

3) 自动识别废弃物种类,数量和重量;

4) 通过 MDCS 通讯控制器返回以上信息到主控制室内;

5) 定位车辆;

6) 接收从主控室发来的医院请求转移医疗废弃物的通知;

7) 驾驶室 LCD 屏显示用户身份、废弃物种类、数量、主控制室控制指令等。

4 系统特点

该系统具有以下特点:

1) 在医疗废物冷藏收运车上同时实现动态温度检测、客户识别和废物计量。

2) 专用多功能通讯控制器——MDCS 可同时实现与 GPS 和 GSM/GPRS 的通讯。

3) 系统综合卫星定位系统(GPS)技术、数字移动通讯系统(GSM/GPRS)技术、地理信息系统(GIS)技术和计算机网络通信技术,构成通信与定位相结合的指挥调度、监控报警的强大管理网,对收运车进行实时跟踪、调度;

4) 系统通过 GSM/GPRS 对收运信息进行实时管理,覆盖面大,传输量大;

5) 系统在 GIS 开发平台上开发,可使用全国各省市的电子地图,自主开发的动态数据库软件系统可以自由地增减电子地图区域,在全国范围内都可准确地地图上显现车辆的

位置,主控制室利用 GIS(地图信息系统)对收运车进行直观的监控;

6) 无需占用大量资金建立通信网络,利用遍布全球的移动通讯网,系统维护量小;

7) 在 GSM/GPRS 短消息/数据文件服务的许可下,可容纳大量移动用户和监控目标,扩充性强;

8) 所监控的移动目标范围甚广可全国甚至全球(移动通讯网覆盖区间),移动通讯网已在全国、全球建立,可对全国及周边 40 多个国家和地区进行漫游,实现对移动目标进行实时准确定位监控;

9) 具有数据、话音同时通讯、目标动态跟踪、自动报警、车辆远程控制等多种功能,可与 110、120 等系统链接。

10) 自动给出动态的最优收运路线,使医疗废弃物处置运营中心在满足有关运行法规的条件下处于低成本运行状态。

5 结语

本系统适用于医疗垃圾集中处置中心对医疗垃圾的收集、运输和处理过程的信息管理,旨在解决医疗垃圾集中处置中心在医疗垃圾收集、运输和处理网络中存在的技术落后问题,例如收运路线难以动态最优化、收集数量信息反馈滞后、生产调度不合理、“转移联单”传递繁琐、设备运行状态不能实时监控、运行效率低和运行成本高等等,使其营运过程符合政府关于医疗废物和危险废物收集、运输和处理方面法规的要求,具有广泛的市场应用前景。

致谢:本文作者在设计该系统时,四川科学城神工环保工程有限公司在系统需求方面给予了大力支持,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 李云. GMS 移动通讯技术在城市道路照明监控中的应用[J]. 道路照明, 2002, (4): 23.
- [2] 中华人民共和国固体废物污染环境防治法[EB/OL]. http://www.chinacourt.org/flwk/show1.php?file_id=98614, 2004 - 12 - 29.
- [3] 医疗废物集中处置技术规范[EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/eic/649086798147878912/20040106/1044658.shtml>, 2004 - 12 - 26.
- [4] 危险废物和医疗废物处置设施建设项目复核大纲(试行)[EB/OL]. <http://law.chinalawinfo.com/newlaw2002/slc/slc.asp?db=chl&gid=53735>, 2004 - 06.
- [5] 医疗废物管理条例[EB/OL]. http://news.xinhuanet.com/zhengfu/2003-06/27/content_940565.htm, 2003 - 06.
- [6] Vincent, Etienne, Laganière, Robert - Detecting and matching feature points[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation 2005, 16(1): 38 - 54.
- [7] ZHANG Z, LOOP C. Estimating the Fundamental Matrix by Transforming Image Points in Projective Space[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, 82: 174 - 180.
- [8] 张艳珍, 欧宗瑛. 一种新的摄像机线性标定方法[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6A(8): 727 - 731.
- [9] 邹凤娇, 苏显渝. 基于共面点的摄像机线性标定法[J]. 光电工程, 2005, 32(4): 70 - 74.
- [10] age processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45 - 78.
- [11] 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, 1998.
- [12] 邱茂林, 马颂德. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43 - 55.
- [13] TSAI RY. A versatile camera calibration for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses[J]. IEEE Journal of Automation, 1987, 3(4): 323 - 334.
- [14] BATISTA J. Iterative Multi-Step Explicit Camera Calibration[C]. 1998 IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV98), 709 - 714. Bombay, India, January 4 - 7, 1998.
- [15] SMITH SM, BRADY JM. SUSAN-A new approach to low level im-

(上接第 2518 页)

参考文献: