

文章编号: 1001-2486(2003)03-0049-05

## 图像处理技术在消防灭火模拟训练中的应用\*

高广珠, 洪宇, 何智勇, 余理富

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 阐述了应用图像处理技术构建消防灭火模拟训练系统的方法, 对其中的技术要点从原理上进行了说明。提出了一种基于目标信息特征的灰度 Hough 变换实用加速算法用于直线检测, 使其运算量比传统算法下降了 4 个数量级。实验结果证明这种检测与提取灭火水柱中心线的方法快速、有效。用该方法构建的系统, 经实际运行证明是图像处理技术在消防灭火模拟训练方面的一个成功的应用。

**关键词:** 图像处理; Hough 变换; 直线检测; 几何校正

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A

## The Application of the Image Processing Technology in the Fire Fighting Simulative Training

GAO Guang-zhu, HONG Yu, HE Zhi-yong, YU Li-fu

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** This paper expounds a method for constructing the fire fighting simulative training system using the image processing technology and illustrates some key technical points of this system. An applied accelerative algorithm of gray scale Hough transform based on the information features of the target is proposed. This algorithm makes the burden of the operation decreased by four quantity degrees. The result of experiment shows that this method for detecting and extracting the center line of the fire fighting water column is fast and effective, and this system has proved to be a successful application of the image processing in the field of the fire fighting simulative training.

**Key words:** image processing; Hough transform; line detection; geometric calibration

近年来, 许多城市都建立了面向普通国民的消防训练基地, 消防模拟训练也应运而生。然而, 每次模拟灭火训练若以燃烧实物的方式进行, 则存在着诸如训练成本高、污染环境等许多缺点。我们根据消防灭火训练的特点, 用计算机多媒体技术虚拟再现灭火现场, 将现代图像处理技术应用于灭火过程的自动监测与控制, 实现了消防模拟灭火训练的自动化, 达到了理想的训练效果。

### 1 灭火模拟训练系统简介

灭火模拟训练系统由图像采集与处理计算机和播放控制计算机组成, 两台计算机之间通过以太网互联, 采用 TCP/IP 协议交换数据。系统工作过程如下:

由控制计算机播放火灾现场图像背投显示在大屏幕上, 训练者持灭火器材在正面对投影屏上的虚拟火场进行扑救; 大屏幕前方有两台 CCD 摄像机从不同角度将所摄火场扑救图像通过图形采集设备送往图像处理计算机; 根据实时采集的两幅不同角度的图像对灭火器喷水柱进行检测, 计算出灭火水柱的落点, 将落点在屏上的坐标通过网络送往控制计算机; 控制计算机根据落点坐标结合火势进行判断, 即时切换播放反映不同灭火效果的火场视频图像, 模拟火势消长, 从而构成一个闭环控制系统, 与灭火者的扑救活动产生互动效果。

\* 收稿日期: 2002-12-25

作者简介: 高广珠(1959-), 男, 副教授, 硕士。

## 2 由双目图像检测灭火水柱落点原理、方法与实现

### 2.1 双目图像检测灭火水柱落点原理

本系统的核心技术问题是如何判断水柱落点。由于水是透明的,水柱在屏幕上的落点很难直接从屏幕的图像上检测到,特别是当水柱落在屏幕上的高亮度区域(如火苗区)时,水柱的落点在摄取的可见光图像上几乎无法检测。然而,我们可以转而检测水柱,由于一个视点的图像不能给出深度信息,我们用两台摄机构成双目视觉系统,从左右两个角度获取水柱同一时刻的两幅图像。图1给出了这种双目图像检测系统的构成方式,其检测灭火水柱落点的原理描述如下:

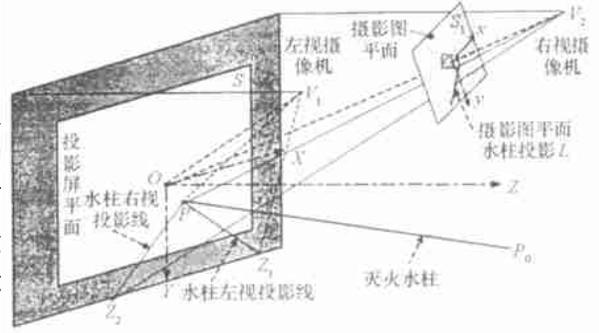


图1 双目图像检测灭火水柱落点原理  
Fig. 1 Principle of detecting the water column from binocular vision image

如图1所示, $OV_1$ 和 $OV_2$ 分别为两个摄像机的光轴, $P_0$ 为灭火器或消防栓喷水出口,记投影屏平面为 $S$ ,摄像机获取的图像平面为 $S_1$ 。灭火水柱射向平面 $S$ 上任意一点 $P$ ,则 $PZ_1$ 为水柱 $P_0P$ 由视点 $V_1$ 到 $S$ 的投影直线;同理,由视点 $V_2$ 投影 $P_0$ 到 $S$ 的直线为 $PZ_2$ 。在 $S$ 上,这两条直线相交于 $P$ 点, $P$ 点在平面坐标系中的坐标即为我们所要求的水柱落点参数。

实际上,我们获取的图像并不是水柱在 $S$ 上的直接投影图,而是投影图在摄像平面 $S_1$ 上的像,投影线 $PZ_2$ 在平面 $S_1$ 上的像为一条直线 $L$ ,它也是水柱 $P_0P$ 在平面 $S_1$ 上的投影。 $L$ 上各点在平面坐标系 $O-XY$ 中各点坐标与它在 $o-xy$ 坐标系中的坐标之间的关系为仿射变换。因此,由双目图像检测水柱落点的可按如下步骤进行:

- (1) 同时采集水柱左右目视点图像,分别分割提取水柱在图像平面的图像;
- (2) 由分割出的水柱图像提取水柱中心线的直线方程;
- (3) 将 $o-xy$ 坐标系中的直线方程变换到 $O-XY$ 坐标系中,解方程,计算两条直线的交点,该点即为水柱在屏幕上的落点坐标。

### 2.2 水柱图像的检测与分割

在模拟灭火系统中,由于火灾现场背景杂乱,由单幅图直接检测水柱目标很困难。系统中背景和摄像机都是固定的,而在燃烧的火苗区,由于火焰亮度很高,在火苗区中心部分图像的相对灰度变化很小,所以,在灭火期间所采集的图像中,灰度动态变化区域包含两部分,即水柱的投影区和燃烧的火苗区边缘部分。根据获取的图像序列中目标区域的变化特点,我们采用图像序列中对相邻帧差分的方法来提取目标区域。

设视图像第 $n$ 帧图像为 $f_n(x, y)$ ,目标区域的图像为 $g_n(x, y)$ ,则有:

$$g_n(x, y) = \begin{cases} f_n(x, y), & f_n(x, y) > f_{n-1}(x, y) + T \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $T$ 为适当选定的灰度门限,则图像 $g_n(x, y)$ 中只有灰度动态变化较大处的值为非零。 $T$ 的取值与图像中噪声的均值有关, $T$ 值过小,在图像 $g_n(x, y)$ 中的静态区域将存在一些灰度值不为零的斑点,一般这些斑点的灰度值小、面积小,斑点数目不多。当斑点面积较大或斑点区灰度值较大时,除了适当增大 $T$ 的值,还可对图像 $g_n(x, y)$ 进行适当的滤波处理以消除这些斑点对后续运算的影响。实际上,我们使用的检测水柱线的方法对图像中存在的斑点或火苗区域不敏感,亦即斑点和火苗区域的存在对水柱的检测精度影响很小。

### 2.3 灭火水柱投影线的提取

灭火水柱在图像平面的投影在分割图像 $g_n(x, y)$ 中呈直线, $g_n(x, y)$ 经平滑处理后在水柱中心线

附近灰度值较大,边缘附近灰度小。提取水柱就是要找到一条直线在整个水柱区域尽可能地逼近水柱中心线。Hough 变换可以用来提取和检测图像空间的任意解析曲线,特别是由于 Hough 变换具有较强的抗干扰能力和允许待检测曲线不连续的特点,在许多应用检测图像中的直线段时,它是首选的一种有效算法<sup>[1]</sup>。由于在图像中存在着噪声斑点或活动火苗区,我们采用一种改进的 Hough 变换方法提取水柱中心线。

### 2.3.1 图像灰度加权的 Hough 变换算法描述

位于图像平面中的任一条直线  $l$  可以用以下法线式方程表示:

$$l: \rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

$\rho$ —直线到坐标系原点的距离,  $\theta$ —直线法线与  $x$  轴的夹角。

对于图像平面中每一个像素点,其直线 Hough 变换可表示为:

$$H(\rho, \theta) = \left\{ \sum_l f(x, y) \mid l: \rho = x \cos \theta + y \sin \theta \right\} \quad (3)$$

其中:  $f(x, y) \in \begin{cases} \{0, 1\}, & \text{当 } f(x, y) \text{ 为二值图时} \\ \{0, 1, \dots, N-1\}, & \text{当 } f(x, y) \text{ 为 } N \text{ 级灰度图时} \end{cases}$

$\sum$  表示直线  $l$  上所有像素灰度之和。

在去除背景的水柱图像中,灰度值高的点为水柱中心轨迹点的可能性大,因此,可对灰度信息加以充分利用<sup>[2]</sup>。在变换过程中,按(3)式用图像像素的灰度值作为加权。由于图像中的斑点或火苗边缘像素不能构成可与水柱直线长度相比拟的直线,这样,在 Hough 变换空间选取的最大值点对应到图像空间的直线可以以最大的可能接近实际的水柱中心线。

### 2.3.2 水柱轨迹检测改进 Hough 变换算法的实现

标准 Hough 变换(SHT)及广义 Hough 变换(GHT)运算量特别大,快速 Hough 变换(FHT)将变换中的乘法运算变为递增、加法和移位,使运算速度提高了4倍。文献[3]提出了随机 Hough 变换(RHT),避免了标准 Hough 变换一到多映射的巨大计算量。但在处理图像时,由于无目标的随机采样会引入大量的无效采样与无用累积,使算法性能大大降低。文献[4]提出了改进的随机 Hough 变换,用于圆、椭圆的检测,主要通过降低随机采样的点数,从而减少无效采样的概率,降低了无效累积的计算。但是为降低随机采样的点数而必需的搜索操作也降低了算法的性能。由于应用中要求每秒钟分别对左右视图的图像能给出6~8次计算结果,因此,Hough 变换算法的实现必须大大简化。本文提出的灰度 Hough 变换实用加速算法可以极大地简化运算,提高运算速度,满足了系统实时性要求。算法思路是:在图像中选取具有水柱中心信息特征的点作为线索进行 Hough 变换,避免了大量的无用累积运算。

要检测的直线在图像  $g_n(x, y)$  上是一条由有高灰度值的像素点组成的直线,因此,将图像  $g_n(x, y)$  分为  $M$  个小块,小块的大小只要不同时包含全部火苗和水柱区,则必有至少一个小块包含水柱线的中心线或其邻近的像素(记为  $\{x_j, y_j\}$ ),且该像素的灰度在这个图像块中灰度值局部最大。由于水柱线是图像中目标图像的主体,故计算通过  $\{x_j, y_j\}$  点的灰度 Hough 变换,在 Hough 变换空间,必有某  $(\rho, \theta)$  点处的值取极大值,且  $(\rho, \theta)$  参数对应的图像平面的直线与水柱中心线拟合得越好,  $(\rho, \theta)$  处的值也越大。所以,灰度 Hough 变换实用加速算法步骤可以描述如下:

第一步:将图像  $g_n(x, y)$  均匀划分为  $M = m \times n$  个图块,记为  $S_i (i = 1, 2, \dots, M)$ ;

第二步:在  $S_i (i = 1, 2, \dots, M)$  中取灰度值最大的像素点,取其中灰度最大的  $N$  个点构成点集  $P, P = \{(x_j, y_j), j = 1, 2, \dots, N\}$ ;

第三步:计算图像通过点集  $P$  中各像素的灰度 Hough 变换;

第四步:取灰度 Hough 变换空间最大值点参数  $(\rho, \theta)$ ,此即为检测到的直线的法线式方程参数。

## 2.4 水柱轨迹坐标变换与落点校正

通过式(3)知,灰度 Hough 变换计算得到的直线方程是图像平面  $S_1$  上的参数方程,根据透视变换关系<sup>[5]</sup>可将它变为屏幕平面  $S$  上的方程。左右视图中检测到的直线方程均变为同一屏幕平面  $S$  上的

直线方程, 求解两条直线方程的解即可得到水柱在投影屏上落点的坐标。

### 3 试验结果及分析

实验采用 2.3.2 节的算法, 图块尺寸取  $32 \times 32$ , 取  $N = 10$ , 对参数  $\rho$  和  $\theta$  加一定的限制,  $\rho$  取值范围为  $0 \sim 150$  像素, 右视图像  $\theta$  取值为  $10^\circ$  到  $80^\circ$ , 左视图像  $\theta$  取值  $-10^\circ \sim -80^\circ$ , 采样间隔为  $0.5^\circ$ , 灰度 Hough 变换直接运算算法与本文所提出的加速算法的运算量对比在表 1 中给出。

表 1 Hough 算法运算量对比

Tab. 1 Computational burden comparison

算 法	图像空间尺寸	Hough 变换空间尺寸	计算点数	运算量	存储需求
SHT	$384 \times 288$	$150 \times 140$	110 592	100%	100%
FHT	$384 \times 288$	$150 \times 140$	110 592	约 25%	100%
RHT	$384 \times 288$	$150 \times 140$	与采样方式有关	优于 FHT (与采样方式有关)	优于 FHT (与采样方式有关)
加速算法	$384 \times 288$	$150 \times 140$	10	$9.04 \times 10^{-3}\%$	0.904%

实验所选的图像为灭火模拟训练系统现场运行时采集的原始图像, 图像分辨率为  $384 \times 288$ 。

图 2 为原始图像及 Hough 变换的检测结果, 表 2 给出了图 2 中左视摄像机图像的灰度 Hough 变换结果。

表 2 灰度 Hough 变换结果

Tab. 2 Gray scale Hough transform result

序号	像素坐标		Hough 参数		像素灰度值	Hough 变换值
	$x$	$y$	$\rho$	$\theta$ (度)		
1	240	221	201	- 63.5	18	1026
2	225	191	216	- 63	18	1082
3	223	187	137	- 62	17	1116
4	242	225	199	- 63	16	1002
5	223	195	- 239	- 61	14	654
<b>6</b>	<b>210</b>	<b>160</b>	<b>231</b>	<b>- 63</b>	<b>11</b>	<b>1180</b>
7	183	113	77	- 59	10	541
8	241	76	- 222	0	9	74
9	222	112	176	0	8	84
10	125	124	211	- 38	7	342

依据检测的结果参数在原图上画出的直线(10 个 Hough 变换参考点的坐标位置已在图中以白色方块绘出)。从直接的对比中可以看出, 以 6 号像素点为参考点得出的 Hough 变换值最大, 因此以此点检测结果作为水柱轨迹线的参数。

从图中可以看出, 该直线与水柱中心线重合比较好。试验用任意采集的近百幅图像都得到了很好的结果。

为检测算法的抗噪能力, 分别对实验图像加零均值正态噪声, 图 3 和图 4 为原始图加不同幅度的噪声后的试验结果, 表 3 给出了原图加不同幅度的噪声后的试验结果对比。对多幅图的试验结果显示当所加零均值正态噪声的方差  $\sigma < 30$  时, 算法检测结果依然基本正确, 表明算法抗干扰性能良好, 方差  $\sigma > 30$  时有的图像会出现检测错误。

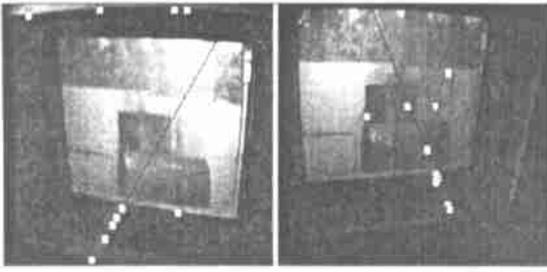


图2 原始图水柱轨迹线检测结果  
Fig.2 Result of water column detection

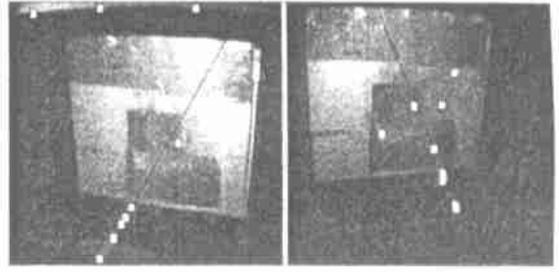


图3 加正态噪声( $\sigma=15$ )水柱轨迹线检测结果  
Fig.3 Result of water column detection with a Gaussian noise ( $\sigma=15$ )

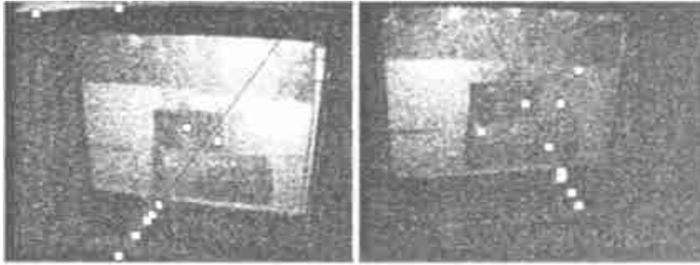


图4 加正态噪声( $\sigma=30$ )水柱轨迹线检测结果  
Fig.4 Result of water column detection with a Gaussian noise ( $\sigma=30$ )

表3 加噪后灰度 Hough 变换结果

Tab.3 Gray scale Hough transform results with Gaussian noise( $\mu=0$ )

方差	0	5	10	15	20	25	30
$\rho$	231	231	231	231	231	161	231
$\theta$	$-63^\circ$	$-63.5^\circ$	$-63.5^\circ$	$-63.5^\circ$	$-63.5^\circ$	$-63^\circ$	$-63.5^\circ$
Hough 变换值	1180	1180	1179	1164	1124	1063	987

## 4 结论

本文应用图像处理技术构建了一个消防灭火模拟训练系统,利用水柱图像灰度特征,运用灰度 Hough 变换方法通过双目视觉图像检测灭火水柱并提取其中心线。由于 Hough 变换具有抗干扰性能好的特点,图像中火苗变化对结果几乎没有影响。文中提出的基于目标信息特征的灰度 Hough 变换实用加速算法,使进行 Hough 变换的运算量下降了 4 个数量级,使实时运行系统在硬件速度不高的情况下运用 Hough 变换检测技术变为可能。用本文所述方法构建的消防模拟训练系统,自 2000 年投入实际运行以来一直可靠运转。

## 参考文献:

- [1] Castleman K R. Digital Image Processing[M]. Prentice Hall International Inc., 1998,3.
- [2] Rong C L, Wen H T. Gray Scale Hough Transform for Thick Line Detection in Gray Scale Images[J]. Pattern Recognition, 1995, 28(5): 647- 661.
- [3] Xu L, et al. Randomized Hough Transform(RHT): Basic Mechanisms, Algorithms and Computational Complexities[J]. Computer Vision Graphic Image Process: Image Understanding, 1993, 57(2): 131- 154.
- [4] 陈燕新,戚飞虎. 利用梯度方向信息的随机 Hough 变换[J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(5): 375- 379.
- [5] 曾文锋,李树山,王江安. 基于仿射变换模型的图像配准中的平移、旋转和缩放[J]. 红外与激光工程, 2001(1).