

低照度双目立体显著目标距离测定方法与实现

万一龙, 柏连发, 韩静, 张毅

(南京理工大学 电光学院 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对位置已固定的双目立体装置, 提出了一种基于非平行模式测距原理的双目系统光轴-光心参数标定方法, 减小了光轴-光心位置误测量带来的测距误差; 为解决低照度下双目立体视觉中存在的立体匹配误匹配点多、目标识别度低的问题, 采取了最大熵法结合整体光强变化的阈值选取方法提取显著目标, 提高了目标识别率, 搭建了显著目标测距系统。结果表明: 采用文中的系统标定与阈值选取方法的双目立体视觉装置在低照度下具有较高的测距精度及目标识别率。

关键词: 双目测距; 相机标定; 目标识别; 硬件实现

中图分类号: TN29; TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-1053-08

Method and realization of significant target recognition and distance ranging in the binocular stereo vision under low illumination

Wan Yilong, Bai Lianfa, Han Jing, Zhang Yi

(Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense, School of Electronic Engineering & Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A calibration method based on the principle of a non parallel ranging model was presented to obtain the parameters of the binocular stereo vision device. The ranging error caused by the non parallel optical axis and the measurement error of optical center distance were decreased. In order to solve the problem that there were lots of error matching pixels and target recognition rate was low under low illumination in the binocular stereo vision, the threshold selection method which combined the maximum entropy and change of light intensity was proposed to extract significant object, the recognition rate was improved. Finally, the significant target recognition system was build. The results show that the binocular stereo vision device, utilizing the method of camera calibration and threshold selection proposed in this paper, has a higher target recognition rate and ranging precision under low illumination.

Key words: binocular vision ranging; camera calibration; target recognition; hardware implementation

收稿日期: 2014-07-05; 修订日期: 2014-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61231014, 61373061)

作者简介: 万一龙(1988-), 男, 硕士生, 主要研究方向为光电信息探测与图像处理。Email: apm027@163.com

导师简介: 张毅(1966-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电信息探测与图像处理。Email: zhy441@sina.com

0 引言

计算机视觉中,现实三维物体的大小、形状、位置等主要信息主要是从摄像机获取的二维图像中提取^[1]。

常用的测距系统是光轴平行的双目测距系统。两摄像机光轴平行的双目模型又叫做规范结构的摄像机安装方式。由于两摄像机相同,这种安装方式下基线与摄像机像平面的水平轴平行,光轴平行且等高。目前多数双目测距方法就是针对这种光轴平行的双目测距模型,采用该模型的有岳荣刚,王少萍等的基于相似原理的新型双目测距法^[2]。

但在实际安装过程中总是会偏离理想安装位置,其中的偏移量会影响测距精度。文中提出了一种对于已经固定位置的非平行模式下双目系统光轴-光心参数标定方法,降低由于安装导致光轴不平行,以及光心距的误测量造成的较远距离的测距误差。

目前立体匹配方法局部匹配方法、全局匹配方法,他们的匹配工作一般都是在较好的光照条件下进行的,在正常光照条件下可以取得较理想的视差图,但在实际工程监测应用中照度低于正常情况,如阴天或夜晚,此时获得的图像噪声大,对比度低,图像中存在的较多的噪声给匹配精度带来了影响。考虑到应用的特殊性,只对所要监测的目标感兴趣,所以文中采用了显著目标提取的方法。可见光目标提取相关工作已经做了很多:如王阿妮,马彩文,马冬梅的序列图像中运动目标的自动提取方法^[3];何莲,蔡敬菊,张启衡的改进的基于弦切变换的目标检测方法^[4]。但是低照度场景下图像中叠加了明显的随机噪声,图像对比度低、灰度动态范围小,这些可见光方法并没有针对低照度情况下的获得的图像做处理,会造成很多伪目标的探测。文中设计了一种适用于 DSP 系统的低照度目标提取算法,通过对低照度图像的分析处理,可以获得低照度场景下的目标图像。

1 测距系统的原理以及标定

1.1 非平行模式系统标定模型

摄像机系统采集目标场景的三维信息,空间立体目标场景经摄像机透镜系统的光学变换,投影于两个二维成像平面上。双目测距系统根据左右摄像

机的图像信息计算出深度信息。文中为了能满足人眼的立体观测,模仿人眼,采用了两台处于同一平面且光轴平行的摄像机同时拍摄完成信息的获取。

如图 1 所示,两个相机的水平高度相同,场景目标 P ,距离左相机的距离记为 Z ,在左右摄像机上的成像位置分别为 $(x_l, y_l), (x_r, y_r)$; f 为像距,当 Z 远大于 B 时,由于该系统的相机处于已固定状态,左右相机的成像平面不是处于理想的平行状态,假设以左摄像机为参考,右摄像机成像平面与其夹角为 θ (逆时针为正),即左右相机光轴夹角,左右摄像机的焦距相同,成像平面与透镜的距离分别 f_l, f_r ,左右摄像机的光心分别为 O_l, O_r ,光心距离记为 B ,物点距离左相机的水平距离记为 B_l ,左右光心在成像面上的投影点分别为 O'_l, O'_r ,左右摄像机的光心连线与参考相机成像平面的夹角为 α (逆时针为正),物体与右摄像机光心连线与左摄像机光轴夹角为 β 。所假设的成像方式是基于小孔的成像方式,同时假设两个相机的透镜与成像平面是平行的。图中的物点 P 在左右摄像机中的像点分别为 x_l, x_r ,左右相机的每个像素实际宽度为 dx_l, dx_r 。

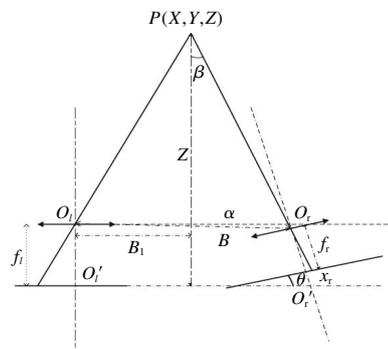


图 1 双目测距示意图

Fig.1 Sketch map of binocular vision ranging

由相似三角形得:

$$\frac{B_l}{Z-f_l} = \frac{(x_l - O'_l) dx_l}{f_l} \quad (1)$$

$$\frac{B \cos \alpha - B \sin \alpha \tan \beta - B_l}{Z-f_l} = \tan \beta \quad (2)$$

由公式(1)和(2)相加可得:

$$\frac{B \cos \alpha - B \sin \alpha \tan \beta}{Z-f_l} = \tan \beta + \frac{(x_l - O'_l) dx_l}{f_l} \quad (3)$$

在三角形中可得如下关系:

$$\tan(\theta + 90^\circ - \beta) = \frac{f_l}{(O'_r - x_r) dx_r} \quad (4)$$

将公式(4)与公式(3)联立可得:

$$B[f_r \cos \alpha - (O'_r - x_r) dx_r \cos \alpha \tan \theta - (O'_r - x_r) dx_r \sin \alpha - f_r \sin \alpha \tan \theta] = (Z - f_l) [(O'_r - x_r) dx_r + f_l \tan \theta + \frac{f_r - (O'_r - x_r) dx_r \tan \theta}{f_l} (x_r - O'_r)] \quad (5)$$

可得:

$$B[\frac{f_r}{dx_r} \cos \alpha - (O'_r - x_r) \cos \alpha \tan \theta - (O'_r - x_r) \sin \alpha - \frac{f_r}{dx_r} \sin \alpha \tan \theta] = (Z - f_l) [(O'_r - x_r) + \frac{f_r}{dx_r} \tan \theta + \frac{\frac{f_r}{dx_r} - (O'_r - x_r) \tan \theta}{\frac{f_l}{dx_r}} (x_r - O'_r)] \quad (6)$$

其中 $f/dx_r, f_r/dx_r$ 可由实验测得,原理以及实验如图 2 所示。

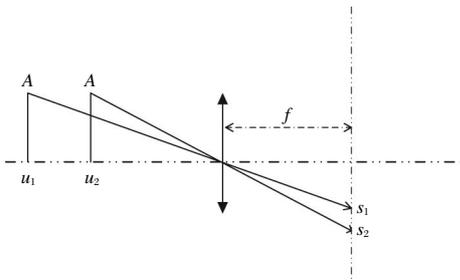


图 2 小孔成像模型

Fig.2 Sketch map of pinhole imaging mode

如图 2 所示,在小孔成像模型^[5]下,设该参考物的长度为 A,第一次以及第二次拍摄时参考物距离摄像机分别为 u_1, u_2 (cm),成像长度分别为 s_1, s_2 (cm),通过图像获得对应图像的长度为 m_1, m_2 (pixel),设每个像素实际宽度为 dx,高度为 dy,对于方形像素摄像设备,dx 与 dy 可认为相等,那么:

$$m_1 = s_1 / dx \quad (7)$$

$$m_2 = s_2 / dx \quad (8)$$

由相似三角形得:

$$\frac{A}{u_1} = \frac{s_1}{f} \quad (9)$$

$$\frac{A}{u_2} = \frac{s_2}{f} \quad (10)$$

两式相减得:

$$u_2 - u_1 = f \left(\frac{A}{s_2} - \frac{A}{s_1} \right) \quad (11)$$

代入得:

$$u_2 - u_1 = \frac{f}{dx} \left(\frac{A}{m_2} - \frac{A}{m_1} \right) \quad (12)$$

即

$$f/dx = (u_2 - u_1) / (A/m_2 - A/m_1) \quad (13)$$

根据公式(13),对左右摄像机的 f/dx 进行标定见图 3;数据及结果如表 1 所示。

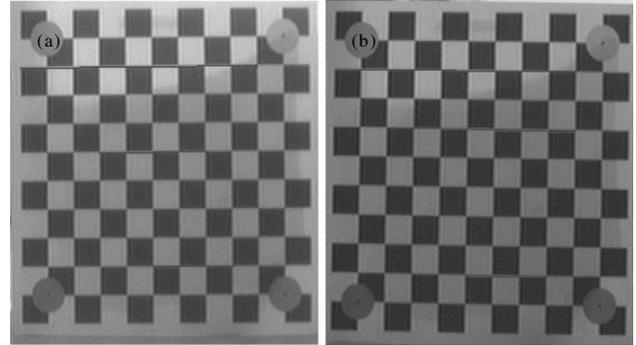


图 3 标定拍摄的图像对

Fig.3 Calibration image pairs

表 1(a) 系统标定实验数据(左相机)

Tab.1(a) Data of system calibration(left camera)

Length of image m_1 /pixel ($u_1=240$ cm)	Length of image m_2 /pixel ($u_2=150$ cm)	Real length A/cm	Calibration parameter f/dx	Average
501-328	586-311	45	932.843 1	
482-385	558-403	25	933.206 9	932.926
520-463	619-529	15	932.727 3	

表 1(b) 系统标定实验数据(右相机)

Tab.1(b) Data of system calibration(right camera)

Length of image m_1 /pixel ($u_1=240$ cm)	Length of image m_2 /pixel ($u_2=150$ cm)	Real length A/cm	Calibration parameter f/dx	Average
431-258	498-222	45	927.145 6	
411-315	466-313	25	927.663 2	926.498
449-391	527-434	15	924.685 7	

由数据可得左摄像的 $f_l/dx_l=933$,右摄像机 $f_r/dx_r=926$;由于相机是近似平行放置,所以左右摄像机的光心连线与参考相机平面的夹角为 α 以及左右摄像机的光轴夹角 θ 都比较小,在 $\pm 5^\circ$ 变化范围内,所以可以得出:

$$\frac{f_r}{dx_r} \cos \alpha \gg (O'_r - x_r) \cos \alpha \tan \theta + (O'_r - x_r) \sin \alpha + \frac{f_r}{dx_r} \sin \alpha \tan \theta \quad (14)$$

由已经标定好的参数可得 $\frac{f_l/dx_l}{f_r/dx_r}$, 可得如下关系:

$$\frac{(x_l - O'_l)(O'_r - x_r) \tan \theta}{\frac{f_l}{dx_l}} \ll x_l - x_r + O'_r - O'_l + \frac{f_r}{dx_r} \tan \theta \quad (15)$$

最终公式(6)简化可得测距公式为:

$$Z = \frac{B * \frac{f_r}{dx_r} * \cos \alpha}{x_l - x_r + O'_r - O'_l + \frac{f_r}{dx_r} \tan \theta} + f_l \quad (16)$$

当 $Z \gg f_l$ 时

$$Z = \frac{B * \frac{f_r}{dx_r} * \cos \alpha}{x_l - x_r + O'_r - O'_l + \frac{f_r}{dx_r} \tan \theta} \quad (17)$$

所以对于已经标定好的系统只需要知道左右视差 $x_l - x_r$ 就可测得深度信息。

以下是对于相机光心距 B , 左右摄像机的光心连线与参考相机成像平面的夹角 α , 光轴夹角 θ , 以及光心在左右成像面上的投影点为 O'_l, O'_r 的标定。采入的视频为 PAL 制式, 分辨率为 720×576 , 由于垂直方向的可以通过调节相机使其处于同一水平高度, 所以假设只存在水平方向的误差。在标定过程中, 测得几组已知距离的特征点在左右相机中的成像位置, 以及深度信息。通过多组数据, 可以求解出已经固定好的相机的参数, 所求得的标定参数趋近于系统的真实参数。

确定 O_l, O_r 的初始搜索范围 $360^\circ \pm 15^\circ$, 初始测量相机间距为 9 cm , 所以光心距的最优解范围为 $9.00 \pm 1.00 \text{ cm}$, 设定的初始偏移角度为 0 , 由于安装过程是平行安装, 所以位置偏移应该是一个较小的偏移量, 设定其两个偏移角度最优值处于 $0^\circ \pm 5^\circ$ 之内。确定了这些范围, 在已知距离信息以及特征点的成像位置, 求解到几个参数的值, 见表 2。

表 2 相机参数

Tab.2 Parameters of camera

O'_l	O'_r	B	α	θ
345	352	9.01	$1^\circ 6'$	$-1^\circ 42'$

1.2 测距与结果分析

获得相机的标定参数后, 根据测距公式(17)计算

空间点距离摄像机的距离, 实验数据如表 3 所示。

表 3 测距实验结果

Tab.3 Measurement results

Disparity /D	Measured value Z /cm	Real value Z_0 /cm	Precision ratio E
95	152.84	150	+1.9%
70	241.40	240	+0.6%
60	339.86	340	-0.04
56	406.13	420	-3.3%

根据测距公式(17), 结合误差公式可得, 测距系统的误差表示为:

$$\Delta Z = \Delta B \frac{\partial Z}{\partial B} + \Delta \alpha \frac{\partial Z}{\partial \alpha} + \Delta(O'_r - O'_l) \frac{\partial Z}{\partial(O'_r - O'_l)} + \Delta(x_l - x_r) \frac{\partial Z}{\partial(x_l - x_r)} \quad (18)$$

由误差公式可得, Z 对 B 的导数要比 Z 对于其他参数的倒数要大, 所以光心距的正确标定对于 Z 的精度影响较大, 所以在标定时对于 B 的标定要达到足够的精度, 而视差的导数、左右光心位于左右成像面上的点差值的导数以及 Z 对于光轴夹角 θ 的导数处于一个量级, 所以在组装系统时, 尽可能的确保平行, 即确保光轴之间的夹角为一个较小的值, 也可以降低由于标定误差而产生的误差值。

2 低照度双目立体视觉下显著目标距离测定

在低照度场景下, 系统表现为场景中出现很多杂散噪声, 而且一般噪声还比较大, 图像的对比特度低, 灰度动态范围小, 信噪比低, 此时如做常规的图像匹配想要获取整体场景视差, 一方面从计算量考虑, 不利于实时系统实现; 另一方面, 噪点的过多存在以及增强导致的细节缺失必定会出现过多的误匹配点, 针对文中应用的特殊性, 只需捕获到场景中的显著目标, 并进行匹配, 在减少了不必要的计算的同时, 可以保证目标匹配精度, 即文中提出的针对显著目标测距的方法。

2.1 实时立体监视

观测者选择系统的实时立体监视功能, 将左右摄像机获得的信息送入 DSP 进行处理, 针对该低照度的场景, 做直方图均衡增强, 提高了信噪比。对获得的左右摄像机的视频做水平方向的降维显示, 做

直方图均衡增强处理获得符合观测的左右格式视频信号。如图4所示。



图4 最终视屏信号

Fig.4 Final video signals

2.2 显著目标检测

运动目标检测的方法主要有帧差法、背景差法、以及光流法。帧差法适用于动态变化的环境,但是当运动目标速度较慢时,不能够完整地分割运动对象,不利于进一步的对象分析和识别。光流法的优点在于能够检测独立运动的对象,但其较大的计算量与计算速度限制了在硬件上的实现。背景差法相对比较容易,容易实时实现,也是目前应用最成功,最广泛的目标检测算法,在算法速度和效果两个方面综合性能最好^[6]。该方法算法实现简单,程序设计复杂度低,利于硬件实现,经综合考虑,文中采用的就是背景差分法。

2.2.1 初始背景及差分图像

现有的初始背景获取方法大都是在场景中没有运动目标的情况下获取的,而在低照度情况下考虑到原始图像中的信噪比,采用高斯滤波,先对每帧图像进行滤波,去除尖锐变化的部分,以及一些不相干的细节。针对于低照度图像本身的特点,取单帧图像作为背景,带来的随机噪声会对目标的提取造成较大误差;所以文中采用取连续的四帧图像,分别为 I_1, I_2, I_3, I_4 ,经过滤波处理后,得到初始背景为 I ,如下式所示:

$$I[i,j]=(I_1[i,j]+I_2[i,j]+I_3[i,j]+I_4[i,j])/4 \quad (19)$$

当收到观测者的测距指令时,将进行背景差分计算得到差分图像,对差分图像中变化较大点进行统计,当数目超过一定值,即认为目前场景下有目标出现,否则返回未检测到目标的信号至当前视屏。

图5是两组出现车辆的场景以及差分图像。

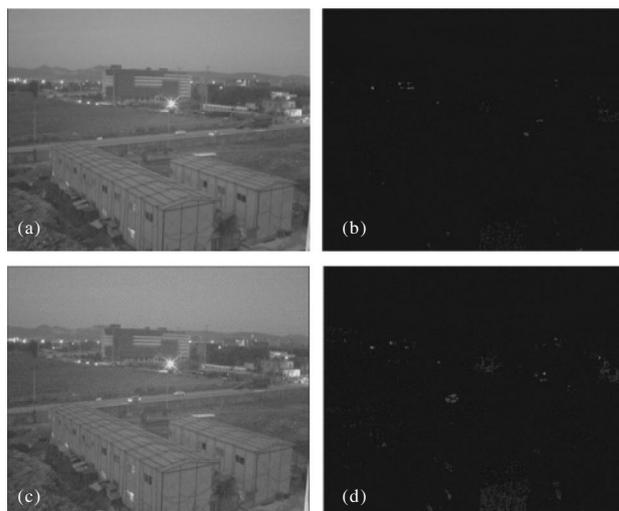


图5 目标车辆图及其差分图像

Fig.5 Target vehicle graph and differential image

2.2.2 阈值分割

在获得目标的差分图后,接下来就要对目标进行提取,采用的是基于阈值的提取方法。阈值选取有多种方法,常规的主要有全局阈值法和局部阈值法^[7]。

由于在低照度的路面上,背景差分后的图像较为复杂,基于熵的图像二值化方法^[10]尽可能减少了图像信息的损失,因此可用于复杂背景图像的分割。由Pun^[8]首先提出的基于最大熵原则选择阈值是常用的阈值选择方法之一。这种方法的目的将图像的灰度直方图分成独立的类,使得各类的总熵最大。

文中考虑到背景差分方法对于光线变化敏感度高,所以在进行目标提取时,在最大熵法的基础上引入整体亮度变化,来调节分割阈值,提高了目标的识别率,减小了由于整体光线变化的影响。增加一个动态阈值 Δt ,它反映了图像的整体变化情况,表达式为:

$$\Delta t = \frac{\lambda}{M \times N} \sum_{j=0}^N \sum_{i=0}^N I(i,j) \quad (20)$$

$M \times N$ 为图像大小, λ 为调节系数,文中场景中设为1时取得较好结果,修正过的阈值 T 为:

$$T = H + \Delta t \quad (21)$$

式中: H 为图像基于最大熵法的最佳阈值。

图6是采用文中计算出的阈值二值化后的目标图像。

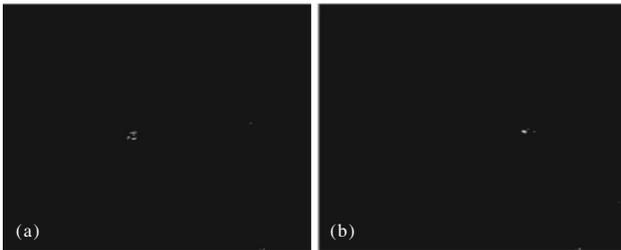


图 6 二值化后的车辆图像

Fig.6 Binary image of the target vehicle

由图 6 可以看出, 阈值分割后的图像中出现了一些杂散点的影响。要滤除这些噪点的影响, 需进行形态学处理^[9], 首先腐蚀去除杂散噪声影响, 再进行膨胀运算, 最终得到目标图像。图 7 是对目标的进行形态学处理后的二值化结果。

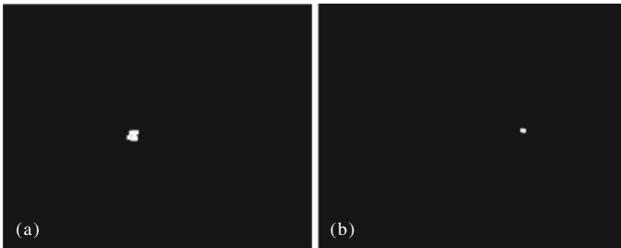


图 7 目标车辆经过形态学处理后的结果

Fig.7 Results of the target vehicle after morphological processing

2.2.4 背景更新

在实际应用中, 通常不需要每一时都对背景进行更新, 只有在一定情况下, 如外界光照亮度发生改变或者当有目标进入视场范围内静止导致局部变化剧烈, 如需更准确的测定动态目标, 就需要进行背景的更新。

整体亮度的变化反映在了计算所求的差分图像中, 文中对差分图像的直方图分布做了计算分析, 当直方图显示图像的整体灰度级上升, 而不是局部上升, 就可以认为是外界光照发生变化, 此时需要进行背景更新。

还提供一种由观测者自主控制的背景更新控制, 即初始背景校准选取的过程。即在没有运动目标的情况下, 由观测者发布距离测定信息, 当系统多次返回了一个固定距离值, 就认为在一个固定的位置, 光强发生了变化, 即有物体进入视场并静止其中, 导致亮度信息发生变化, 在这种情况下系统会多次检测到一个固定的距离值, 此时就要进行背景更新。

2.3 距离计算

在获得了左右摄像机计算获得的目标图像后, 对他们进行匹配, 针对此二值化图像的匹配。在文中应用中, 针对显著目标测定, 而对于背景不在计算范围。所以针对获得到的二值化目标图像, 匹配过程可以简化为如下: 取其中一幅图像作为参考图, 设定一个视差搜索范 $d \in (0, d_{\max})$, 由于相机是之前已经校准好的, 所以针对目标场景, 理论上只存在水平偏移。

$$X(d) = \sum_0^{d_{\max}} I(x, y) \quad (22)$$

式中: $I(x, y) = \sum_{x=0}^{\text{height}} \sum_{y=0}^{\text{width}} (I_L(x+d, y) \&\& I_R(x, y))$; $I_L(x, y)$, $I_R(x, y)$ 分别为左图右图的灰度值; height、width 为图像的高度, 宽度值。

由上述关系可见, 当 X 出现最大值时, 为左右目标匹配最佳, 此时视差记录 d_1 。同理, 已另一幅作为参考, 进行同样的匹配过程, 得出最佳结果, 记录为 d_2 。最终得出目标视差为 $d = (d_1 + d_2) / 2$ 。应用这种匹配方法, 主要是考率到硬件运算效率, 简化运算量; 另外就是在低照度这种特殊场景下, 二值化后的目标尺寸远大于噪声杂散点, 所以可以认为最大值出现时就是目标重合位置。

在得到视差之后, 采用已经标定好的系统参数, 运用公式(17)计算求取目标的深度信息, 经过计算后的距离信息反馈到视频中央以供观测者观察。

3 系统实现与结果分析

3.1 系统流程

系统首先获取当前路面背景, 运用多帧累加与直方图均衡提高信噪比。由观察者选择是否进行检测模式或者立体显示模式, 当进入距离测定模式时, 针对低照度图像灰度级低, 对比度不高的特点, 对低照度环境下的初始背景以及当前目标帧进行高斯平滑, 降低噪声; 利用背景差分法获得差值图, 对差分图像特性进行分析, 选取合适的二值化方法进行二值化; 进行形态学处理, 腐蚀运算减少杂散点影响, 再进行膨胀运算, 得到目标的二值化图像。最后对得到的二值化目标图像进行匹配, 获得视差, 根据标定好的摄像机参数, 求得目标的距离, 并将距离信息反

馈给观测者观察。应用测得的距离信息对背景是否要更新进行判断,相对于不断在线更新背景降低了运算量,更能适应实时性的要求。

整体流程如图 8 所示。

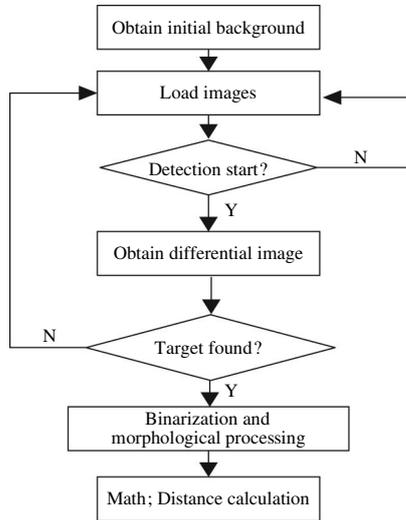


图 8 测距系统流程图

Fig.8 Flow chart of the ranging system

DSP 芯片以数字器件特有的高速性、可重复性、可大规模集成、可编程等特点,在数字图像处理上得到了广泛的应用。其中 TMS320DM642 其主频达到 600 MHz,可同时执行 8 条指令,进行流水线工作,满足视频图像的实时性要求。DM642 硬件系统主要由图像采集模块、视频解码模块、存储模块、DSP 核心运算控制模块、视频编码模块和图像显示模块 6 个部分组成。系统框图如图 9 所示^[10]。

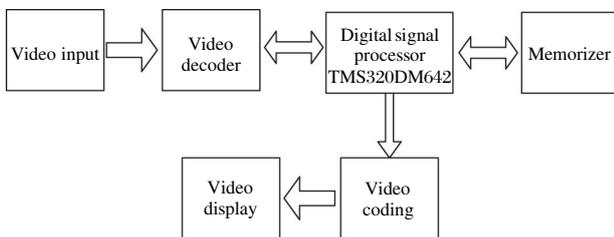


图 9 DSP 工作流程图

Fig.9 Flow chart of DSP

3.1 显著目标提取及距离测定

以下是目标提取实验结果图,实验结果表明,在低照度下,能够提取出所需的显著目标,提取结果如图 10 所示。

在低照度场景下,进行了相关距离测定的实验,

效果图以及测量数据如图 11 和表 4 所示。



图 10 显著目标提取

Fig.10 Extraction of salient object



图 11 测距界面

Fig.11 Interface of ranging system

表 4 测距实验数据

Tab.4 Measurement results

Item	Disparity <i>D</i>	Measured value <i>Z</i> /m	Real value <i>Z₀</i> /m	Precision ratio
1	28	11.12	11	+1.10%
2	26	15.16	14	+8.29%
3	25	18.53	17	+9.00%
4	23	33.36	30	+11.20%

该部分的测距误差主要包括系统标定误差以及目标匹配时的计算误差,可由下式表示:

$$\Delta Z = \Delta Z_1 + \Delta d * \frac{\partial Z}{\partial d} \quad (23)$$

其中第一部分主要是由系统标定过程引入的误差,第二部分的误差主要是匹配精度造成的,由于视差变化范围较小,到达一定距离时,匹配视差如果仍

设定在在整数级的搜索范围时,会造成较大的误差。

4 结 论

文中提出的非平行状态下的相机标定方法,针对的是位置已经固定的相机对的空间位置相关参数进行标定,能够有效的提高测距精度,实验过程表明,特征点位置的正确读取与否对于标定精度有着较大的影响,所以如何更精确选取特征点有待进一步研究。针对低照度下目标识别错误率低的问题,设计了一种具有实时性的运动目标测距算法。针对的是处于静态位置的相机,采用图像增强、去噪,对低照度下的图像进行了处理,采用了最大熵法与整体亮度结合的阈值处理,提高了目标车辆的识别度,但对于杂散点的影响处理需要通过形态学方法进一步处理,如何选取阈值更精确的提取目标以及整个过程的计算复杂度的降低都今后研究的重点。另外,由于的匹配精度为像素级的,当在距离较远时,像素级的匹配精度已经不能满足更高精度的要求,今后达到亚像素级的匹配精度将是提高精度的另一个研究方向。

参考文献:

- [1] Zhang Dan, Duan Jin, Gu Lingjia, et al. Method of camera calibration based on image processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 293-298. (in Chinese)
张丹, 段锦, 顾玲嘉, 等. 基于图像的模拟相机标定方法的研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 293-298.
- [2] Yue Ronggang, Wang Shaoping, Li Kai, et al. New ranging method using two cameras based on similarity principle[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(4): 64-68. (in Chinese)
岳荣刚, 王少萍, 李凯, 等. 基于相似原理的新型双目测距法[J]. 光电工程, 2008, 35(4): 64-68.
- [3] Wang A'ni, Ma Caiwen, Ma Dongmei. Moving object auto-extraction in image sequences [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(3): 565-570. (in Chinese)
王阿妮, 马彩文, 马冬梅. 序列图像中运动目标的自动提取方法[J]. 光子学报, 2010, 39(3): 565-570.
- [4] He Lian, Cai Jingju, Zhang Qiheng. Improved method of object detection based on chord-tangent transformation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 239-247. (in Chinese)
何莲, 蔡敬菊, 张启衡. 改进的基于弦切变换的目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 239-247.
- [5] Jing Xin. Study on matching techniques in binocular stereo vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
荆鑫. 计算机视觉中双目立体匹配技术的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [6] Zhou Bing, Wang Yongzhong, Sun Lihui, et al. Study on local entropy used in small target detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 381-387. (in Chinese)
周冰, 王永仲, 孙立辉, 等. 图像局部熵用于小目标检测研究[J]. 光子学报, 2008, 37(2): 381-387.
- [7] Oivind D T, Torfinn T. Evaluation of binarization methods for document image [J]. *IEEE Trans PAMI*, 1995, 19(3): 312-315.
- [8] Pun T. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram [J]. *Signal Processing*, 1980, 2: 223-237.
- [9] Ruan Qiuqi. Digital Image Processing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012. (in Chinese)
阮秋琦. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [10] Li Wenyan, Wang Yueqin, Zhang Xiaowei. Development and application of DSP[J]. *Control & Automation*, 2008, 24(14): 58-60. (in Chinese)
李文艳, 王月琴, 张笑微. DSP 开发与应用[J]. 微计算机信息, 2008, 24(14): 58-60.