

# 基于双目视觉的无人机避障之研究

王 湔, 潘峥嵘, 朱 翔

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

**摘要:**小型无人机快速避障是无人机研究领域的一个重要问题。基于其自身具有诸多不同于地面智能机器人避障的特点,实现快速避障较为困难,文中在双目视觉的基础上研究了无人机避障的方法,即从水平放置的2台摄像机所得图像中获取场景的深度信息,从而达到自主快速避障。

**关键词:**无人机;自主快速避障;双目视觉;深度信息

**中图分类号:**TP751.1;V279 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-9944(2018)04-0034-05

## Research on UAV Obstacle Avoidance Based on Binocular Vision

WANG Hao, PAN Zheng-rong, ZHU Xiang

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The rapid obstacle avoidance of small UAVs is an important problem in the field of UAV research. It has many features that are different from the obstacle avoidance of intelligent robot on the ground. It is difficult to achieve the rapid obstacle avoidance of small UAV. Based on binocular vision research obstacle avoidance method of UAV, the depth information of the scene is obtained from the image obtained by the two cameras placed horizontally, to achieve autonomous obstacle avoidance quickly.

**Key words:** unmanned aerial vehicle(UAV); autonomous fast obstacle avoidance; binocular vision; depth information

无人驾驶飞机 UAV, 简称无人机。近年来, 小型无人机向自主化、智能化的方向迅速发展, 应用范围越来越广, 尤其是在无卫星导航条件下的使用需求日渐强烈。小型无人机由于飞行环境具有不确定性, 不能实现自主路径规划, 必须采用自主避障的方式; 体积小, 载重量有限, 不能承载重量较大的声波探测器; 飞行速度很快, 可达 50 m/s, 对测距和数据处理的实时性要求很高。因此实现小型无人机的快速避障较为困难。

无人旋翼飞行器的发展初期主要针对消费级用户, 并未过多地考虑其在工程或实际应用中可能遇到的场景。其主要由操控手依靠肉眼辨别飞行方

向, 在环境复杂的情况下, 即使技术高超也难以保证无人机的安全, 同时在夜晚缺少光线, 操控人员很难在没有外界的帮助下看清无人机本身。传统的由惯性测量单元和 GPS 组成的导航系统, 无法满足要求, 而双目立体视觉技术<sup>[1]</sup>利用在不同视角下获得的感知图像, 根据三角测量原理计算图像像素间的位置偏差, 进而获取场景的三维信息。

## 1 双目视觉中的图像原理

### 1.1 坐标系和双目视觉的测量原理

在双目视觉系统中主要涉及 3 个坐标系: 图像坐标系、相机坐标系、世界坐标系。3 个坐标系之间

收稿日期: 2017-12-12; 修订日期: 2018-02-26

作者简介: 王湔(1990—), 男, 硕士, 研究方向为图像处理; 潘峥嵘(1965—), 男, 学士, 教授, 研究方向为计算机控制、智能检测与控制; 朱翔(1980—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为智能控制。

的关系如图 1 所示, 点  $P$  为世界坐标系中的某一点;  $P_l$  和  $P_r$  分别为点  $P$  投影到左、右图像坐标系下的坐标。

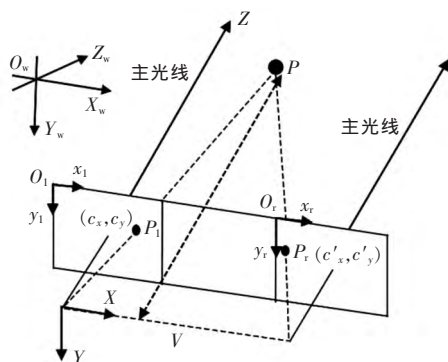


图 1 坐标系间的关系

Fig.1 Relationship between frames

坐标系  $O_l-x_l y_l$  和左边相机坐标系  $O-XYZ$  之间的关系为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = z \mathbf{M} \begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{M} = \frac{1}{f} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & -c_y \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix}$$

式中:  $z$  为对应图像坐标系点  $(i, j)$  处的深度信息;  $(c_x, c_y)$  为左图像平面的主点坐标;  $f$  为焦距信息;  $b$  为双目相机间的距离。  $c_x, c_y, f$  及  $b$  可以通过立体标定获取。左相机坐标系  $O-XYZ$  和世界坐标系  $O_w-X_w Y_w Z_w$  之间的关系为

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{i,m}_w \mathbf{H}_{i,m}^c \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  ${}^{i,m}_w \mathbf{H}$  为从惯性测量坐标系到世界系的齐次变换矩阵;  ${}^c_{i,m} \mathbf{H}$  为从相机坐标系到惯性测量坐标系的齐次变换矩阵。

式(2)所表示场景的三维信息的获取有多种手段, 如三维激光雷达、结构光传感器、双目视觉系统等, 在此选用双目视觉系统。其获取场景的深度信息的原理是: 获取 1 帧左右图像对, 对其进行矫正和校正; 进行立体匹配, 以获取视差图信息; 利用式(3)获取对应像素点的深度信息, 即

$$z_c = \frac{bf}{d} \quad (3)$$

式中:  $d$  为视差信息;  $b$  为左右相机之间的水平距离。式(3)对  $d$  求微分, 得

$$\Delta z_c = \frac{bf}{d^2} \Delta d \quad (4)$$

式中:  $\Delta z_c$  为对应视差信息  $d$  的深度测量分辨率。

## 1.2 双目视觉获取的图像

采用双目视觉获取图像信息的实例如图 2 所示。其中, 图 2a 和图 2b 分别为左右相机捕获的 1 帧图像对, 图 2c 为对应的视差图的信息, 图 2d 为利用 Open GL<sup>[2]</sup>画出的三维点云信息图。

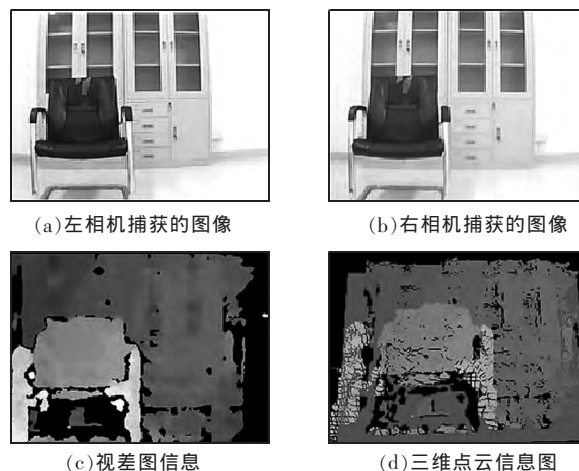


图 2 双目视觉获取环境三维信息

Fig.2 Binocular vision acquisition environment 3 dimension information

## 2 算法设计及流程

### 2.1 算法的处理流程

双目视觉系统的流程如图 3 所示, 左、右 2 个相机采集的图片在进行矫正、立体校正、立体匹配后输出视差图信息<sup>[3]</sup>, 基于该信息可以获取图像对应的实际场景的三维信息。

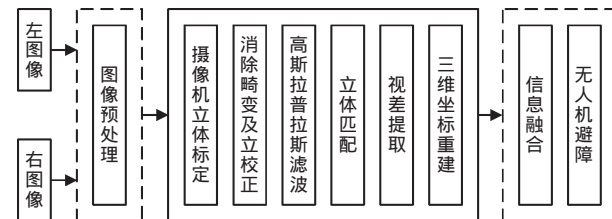


图 3 双目视觉系统流程

Fig.3 Binocular vision system flow chart

### 2.2 图像的预处理及特征点提取

具体来说, 图像预处理阶段是将相机采集到的

彩色图片转换为灰度图片。在消除畸变和立体校正阶段,基于相机的标定得到的相机参数计算畸变映射,再对图像进行矫正;立体校正主要是实现左右2帧图像的极线行对准。通过高斯拉普拉斯滤波可以最大程度地提高图像的纹理,同时减少左右摄像头获取的图像对之间的亮度差异<sup>[4]</sup>。

特征点的提取方法有很多,常用的有 Harris 角点检测<sup>[5]</sup>、SIFT 角点提取<sup>[6]</sup>等。

**Harris 角点检测算子** 是一种有效的角点特征提取算子方法,其优点在于计算简单,耗时少;提取的特征点均匀合理;对图像旋转、亮度变化、噪声等不敏感。但是,Harris 角点检测对尺度很敏感,不具有尺度不变性;提取的角点是像素级的。

**SIFT 特征匹配算法** 首先提取极值点作为特征点,然后进行后续的处理得到特征点对应的特征向量,具有尺度不变性、旋转不变性、受光照影响小、抗噪能力较好等特点。但是,该算法特征提取的方法较复杂,耗时很多;提取的特征点太多,很多特征点都无法准确地进行匹配,浪费大量时间;提取的特征点不是角点。

综合2种算法的优缺点,将两者结合起来,即将 SIFT 算法中的提取极值点作为特征点的步骤,替换为使用 Harris 提取的角点作为特征点,并对这些角点进行计算,得到 SIFT 特征向量,然后进行立体匹配。改进的算法,不仅克服了 Harris 算法不具有尺度不变性、提取的角点是像素级等缺点,也弥补了 SIFT 算法复杂度高、实时性不好、提取的特征点不是角点等不足。改进的算法的流程如图4所示。

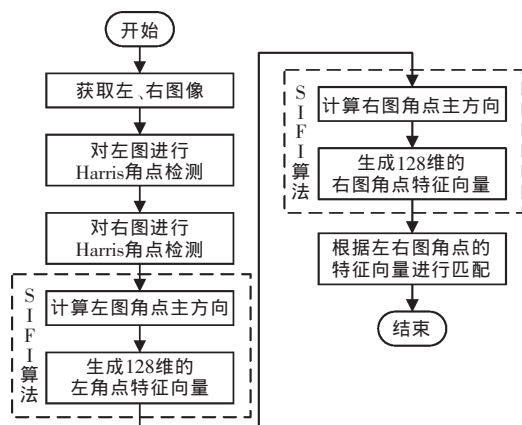


图4 Harris 和 SIFT 相结合的角点检测算法流程

Fig.4 Flow chart of angle point detection algorithm combining Harris and SIFT

## 2.3 立体校正与匹配

给定立体图像间的旋转和平移矩阵,使用立体校正的 Bouguet 算法<sup>[7]</sup>进行立体校正。立体校正的目的是使两摄像机拍摄的图像中对应匹配点分别在两图像的同名像素行中,从而将匹配搜索范围限制在一个像素行内。算法将右摄像机图像平面旋转到左摄像机图像平面的旋转矩阵  $R$  分离成2部分,即2个合成旋转矩阵  $r_l$  和  $r_r$ 。每个摄像机都旋转一半,这样的旋转可以使摄像机共面。为了计算将左摄像机极点变换到无穷远,并使极线水平对准的矩阵  $R_{rect}$  创建一个由极点方向开始的旋转矩阵  $R_{rect}$ 。

$$R_{rect} = \begin{bmatrix} (e_1)^T \\ (e_2)^T \\ (e_3)^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$e_1 = \frac{V}{\|V\|}, e_2 = \frac{[-V_y V_z O]^T}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}, e_3 = e_1 e_2$$

该矩阵将左图像绕着投影中心旋转,使得极线变成水平,且极点在无穷远处。这样,2台摄像机的行对准即可以通过以下2个旋转矩阵实现,即

$$\begin{cases} R_l = R_{rect} r_l \\ R_r = R_{rect} r_r \end{cases} \quad (6)$$

选择区域灰度相关法进行立体匹配。其计算简单、匹配速度快。对于无人机视觉导航来说,如果计算能够以很快的速度完成,则系统就可以提早探测到障碍物而及时采取有利的行动。这一点对于时刻处于不断变化的环境中的无人机导航系统的稳定性,是十分重要的<sup>[8-10]</sup>。

选用的相似性测度因子为像素灰度差的绝对值和,简称 SAD。

$$C_{SAD}(p, d) = \sum_{(x, y) \in W_p} |I_l(x, y) - I_r(x + d, y)| \quad (7)$$

式中:  $I_l(x, y)$  和  $I_r(x, y)$  分别为左图、右图的像素灰度值。假设匹配以左图作为参考图,则  $W_p$  为左图中以  $P_l$  点为中心的邻域窗口。对于左图像中的点  $P_l$  在右图像中沿着其对应的极线搜索匹配像素,当区域中的像素使相似性准则最小时,则认为是匹配的。

## 3 试验结果分析

### 3.1 系统的硬件平台

所使用的无人机平台如图5所示。平台主要搭

载 DSP+FPGA 的飞行控制计算机、图像处理单元、IMU 模块、二维激光雷达、双目视觉系统、声呐、数传、无线网卡等一系列模块。



图5 搭载双目视觉平台的无人机

Fig.5 UAV with binocular vision platform

### 3.2 双目立体视觉障碍物检测

无人机的实时导航需要一个复杂的障碍物检测系统,能够及时更新障碍物的相对位置信息,供相应的路径规划算法使用。文中利用双目视觉系统构造观测场景的视差图(如图6所示),然后从视差图上分离出障碍物。



图6 走廊中障碍物视差图

Fig.6 Obstacle parallax in the corridor

从视差图中分离出障碍物的方法有很多种。可以通过像素点的高度判断从视差图中去除背景像素点,剩下的点即被认为是障碍物。或者使用区域生长算法分离视差图上相近视差区域,并判断该区域中像素的是多少,决定是否为障碍物。视差图上每1个值代表位于摄像头前的某一距离值。视差越大表示距离越近。其中,灰度值越大的区域亮度越高,表示障碍物与摄像头的相对距离越近。

文中采用以下方法:先将视差图上所有像素点的值归一化到0~255范围内,然后遍历整个视差图,统计每个视差值出现的次数,如视差在某一范围内的像素点总个数超过某一阈值时,则认为可能是障碍物。再由立体视觉系统通过恢复特征点三维坐标去除背景的像素点。图7为使用该方法提取出的障碍物。

躲避障碍物的方法有以下步骤:

步骤1 因研究对象是三维避障问题,故首先判断是否可以直接越过障碍物。

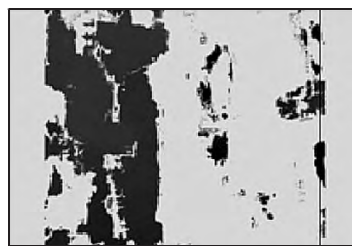


图7 提取出的障碍物

Fig.7 Extraction of obstacle

步骤2 对于不能越过的障碍物,通过双目立体视觉系统获取其相对距离以及大小,判断其危险等级。危险等级应与可通过区域的大小成反比,相对距离成反比。

步骤3 针对危险等级最高的障碍物,考虑加入立体视觉系统的位置不确定性和轮廓不确定性,生成危险区域。

步骤4 结合危险区域的范围、无人机的尺寸以及走廊环境内的空间,在障碍物附近生成一系列控制点,引导无人机安全飞过障碍物区域。

无人机最优路径的生成原则:

(1)检测到存在碰撞危险的障碍物时,首先判断其左右两侧存在的安全空间。如果该安全空间小于无人机的宽度,则判定此障碍物无法躲避。

(2)如果左右两侧的安全空间相同且大于无人机宽度,则判断无人机与障碍物左右边缘的角度,选择角度小的方向飞行。其第1个导航点高度与无人机当前高度相同。

(3)在穿越障碍物的过程中,实时判断无人机前方的横向安全空间是否明显变大以决定是否已经成功避障。

(4)避障成功后,无人机航向偏转回到新的安全空间的横向中心位置。至此,完成躲避障碍物的任务。

无人机躲避障碍物如图8所示。以危险区域最右侧点为圆心、无人机宽度的1/2为半径画圆,如图8所示,可见当无人机的飞行轨迹位于圆内时存在碰撞危险。虚线是生成的避障轨迹。

## 4 结语

文中利用双目视觉系统构造观测场景的视差图,通过三角测距精确计算障碍物距无人机的距离;通过摄像头从左右不同视点获取同一场景的图像,提取图像中的特征点;根据左右图像间特征点匹配视差关系;从视差图上分离出障碍物从而进行



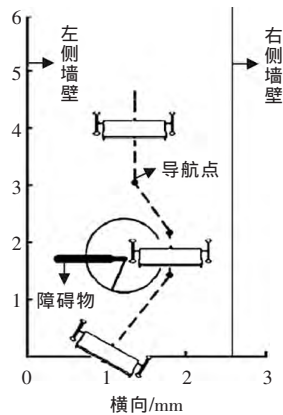


图8 无人机躲避障碍物示意

Fig.8 Schematic of UAV avoiding obstacles

避障。对于室内走廊环境这类弱纹理场景,使用灰度相关匹配算法很容易出现误匹配的情况,引入高斯拉普拉斯滤波对图像进行预处理,最大程度地提高了图像的纹理,同时减少了左右摄像头获取的图像对之间的亮度差异,避免了误匹配的出现。

## 参考文献:

- [1] 张博翰,蔡志浩,王英勋.电动 VTOL 飞行器立体视觉导航方法

研究[C]//中国制导、导航与控制学术会议论文集.北京:中国航空学会制导导航与控制分会,控制一体化技术国家重点实验室,2010:298-303.

- [2] Bradski G, Kaehler A. 学习 Open CV (中文版)[M]. 北京:清华大学出版社,2009:470-472.
- [3] 杜歆.用于导航的立体视觉系统[D].杭州:浙江大学,2003.
- [4] Morris W, Dryanovski I, Xiao J. 3D indoor mapping for micro-UAVs using hybrid range finders and multi-volume occupancy grids[C]//RSS 2010 Workshop on RGB-D: Advanced Reasoning with Depth Cameras. 2010.
- [5] 于舒春.双目立体视觉和三维重建关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [6] 高文,陈熙霖.计算机视觉算法与系统原理[M].北京:清华大学出版社,1999:22-28.
- [7] 周东翔,蔡宣平,孙茂印.一种基于特征约束的立体匹配算法[J].中国图象图形学报,2001,6(7):653-656.
- [8] Zhang N L, Zhang D. Robust mean-shift tracking with corrected background-weighted histogram[J]. IET Computer Vision, 2012(6): 62-69.
- [9] 桑瑞娟,王短,张华,等.一种改进的区域双目立体匹配方法[J].传感器与微系统,2012,31(8):57-59,63.
- [10] Afef Salhi, Ameni Yengui, Jammoussi. Object tracking system using camshift, meanshift and kalman filter[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2012, (64): 674-679. ■

(上接第4页)

Node evaluation									
File: c:\users\administrator\desktop\145\123.inp									
Comment: 2008年12月9日 15:54:00									
Date: 2008年12月9日 15:54:00									
Node 1: 天河北与体育西交叉路口									
aveQueue: Average Queue Length [m]									
Delay(All): Average delay per vehicle [s], All Vehicle Types									
maxQueue: Maximum Queue Length [m]									
Movement: Movement (Bearing from-to)									
Node: Node Number									
Veh(All): Number of Vehicles, All Vehicle Types									
ParaDelay(All): Average delay per person [s], All Vehicle Types									
sStop(All): Average stopped delay per vehicle [m], All Vehicle Types									
Stops(All): Average number of stops per vehicle, All Vehicle Types									
aveQueue:	Delay(All):	maxQueue:	Movement:	Node:	Veh(All):	ParaDelay(All):	sStop(All):	Stops(All):	
23.8:	28.1:	78.5:	W-S:	1:	86:	28.1:	23.2:	0.71:	
23.1:	27.5:	W-S:	1:	12:	28.1:	24.4:	0.71:		
0.0:	0.5:	0.0:	S-E:	1:	24:	0.5:	0.0:	0.00:	
14.5:	28.6:	57.8:	E-W:	1:	68:	28.6:	21.8:	0.69:	
29.3:	37.4:	128.8:	E-S:	1:	50:	37.4:	29.1:	1.04:	
0.0:	20.7:	33.3:	S-W:	1:	20:	20.7:	14.1:	0.70:	
0.0:	0.0:	0.0:	S-W:	1:	0:	0.0:	0.0:	0.00:	
11.9:	26.9:	128.8:	All:	1:	260:	26.9:	21.2:	0.70:	
11.9:	26.9:	128.8:	All:	0:	260:	26.9:	21.2:	0.70:	

图10 相位调整及信号配时优化 Vissim 仿真结果

Fig.10 Optimized Vissim simulation result for phase adjustment and signal timing

表4 现状及改善方案的仿真结果对比

Tab.4 Simulation results comparison of present situation and improvement scheme

参数	现状	改善后	效益
车均延误	27.4 s	21.29 s	22.30%
车均停车时间	25.74 s	19.5 s	24.20%
平均排队长度	15.26 m	13.38 m	12.30%
车均停车次数	0.65	0.62	4.60%

由表可知,实施新方案后交叉口的车均延误降低到了 21.29 s,降低了 22.3%;停车时间降低了 24.24%,平均排队长度和车均停车时间也有明显的改善。信号交叉口服务水平与延误时间的关系见表 5。

表5 信号交叉口服务水平与延误时间的关系

Tab.5 Relationship between service levels and delays at signalized intersections

服务水平	每辆车延误/s	运行情况
A	≤5.0	自由交通流(通畅)
B	5.1~15.0	稳定车流(稍有延误)
C	15.1~25.0	稳定车流(能接受的延误)
D	25.1~40.0	接近不稳定车流(能忍受的延误)
E	40.1~60.0	不稳定车流(拥挤,不能忍受的延误)
F	≥60.0	强制性车流(阻塞)

根据表 4 结果,对照表 5,可知交叉口改善前后交叉口的车均延误有了明显降低,交叉口的服务水平由 D 上升为 C。

## 参考文献:

- [1] 杨佩昆,吴兵.交通管理与控制[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 王玉鹏.基于 VISSIM 仿真的交叉口延误分析[J].中国市政工程,2006,31(2):85-87.
- [3] 邓文,彭愚.基于信号优化与 VISSIM 仿真的交叉口优化方法研究[J].交通标准化,2007,35(2):161-164.
- [4] 秦雅寝,熊坚.基于 VISSIM 仿真系统的城市路网评价—以昆明城市路网整治为例[J].昆明理工大学学报:理工版,2006,31(6):87-89,117.
- [5] 马万经,杨晓光.信号控制交叉口实时延误计算与仿真研究[J].交通与计算机,2006,24(3):1-4. ■