无人直升机自主着舰的计算机视觉技术

王晓剑 潘顺良 宋子善 沈为群

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 采用自主设计特征图案的方法,研究了一种基于视觉导引实现无人直升机自主着舰的快速算法.分析了制约位姿参数估计实时性的瓶颈,提出了一种基于信息分块的图像处理方法.引入选择性坐标变换的方法,获取图像处理的理想区域;采用直线方向粗识别的途径,确定参数区间,缩小了直线 hough 变换遍历空间,减小了底层图像处理的运算量.对真实图像的测试结果表明:对于 768 像素×576 像素大小的图像帧,完成目标检测和位姿参数识别任务耗时小于 30 ms,实现了视频流的实时处理;等效直升机与舰船相距 10 m 时,位置参数的均方根(RMS, Root Mean Square)误差在 2 cm 内,姿态参数的 RMS 误差小于 1.5°.算法能够满足自主着舰控制的实时性和实用性要求.

关 键 词: 无人飞行器; 自主导航; 计算机视觉; hough 变换

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)06-0686-04

Computer vision scheme for autonomous landing of unmanned helicopter on ship deck

Wang Xiaojian Pan Shunliang Song Zishan Shen Weiqun

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A computer vision solution based on landing mark for guiding an unmanned helicopter to the ship deck was studied. Factors which limited the pose estimation efficiency were analyzed and a novel information-blocking based image processing method was proposed. With the optional coordinate transformation the ideal region for image processing was obtained, and by applying the technique of line direction coarse identification, the line parameters scope was determined and the space need to be traversed in line hough transformation was narrowed. The computation of low layer image processing was reduced. Tests on real image show that the target detection and state estimations in a 768 576 pixel size image may be completed within 30 ms. The state estimations are accurate to within 2 cm in each axis of translation and 1.5° in each axis of rotation when the equivalent distance between the helicopter and the ship deck is about 10 m, and the algorithm is effective for the control of unmanned helicopter autonomous landing on ship deck.

Key words: unmanned vehicles; autonomous guidance; computer vision; hough transforms

近年来,基于视觉导引的无人直升机着舰(陆)在国内外成为一个活跃的研究领域[1-4].文献[1]利用舰船甲板固有的靶标特征图案作为分析对象来提取信息,技术方案的选择缺乏自主性和灵活性.文献[2]提出了自主设计特征图案作为靶标的方法.由于特征图案可以由拟采用的技术路线灵活设计,根据需要在图案中配置特征元,所以能简化问题的求解.自主设计特征图案的方法也成为该研究领域所采用的主流方法[3-4],文献[3]的飞行试验表明了该方法的可行性.

采用计算机视觉的方法实现无人直升机自主着舰的技术关键是如何准确、实时地从图像中识

收稿日期: 2006-11-24

作者简介: 王晓剑(1974—),男,湖北京山人,博士生,morningsword@gmail.com.

别出着舰所需要的信息.准确性与图像解像率直接相关,采用解像率更高的图像帧,会获得更精确的解,但对高解像率图像帧的处理会更耗时.研究高运行效率的视觉算法,不仅是满足系统实时性的需要,也是提高信息识别准确性的要求.

本文研究了一种基于特征图案的无人直升机自主着舰的计算机视觉技术,重点对影响视觉处理实时性的环节进行了深入分析,提出了一系列快速处理方法,包括选择性坐标变换的信息集中,基于信息块的图像子分割,以及基于先验知识的 hough 直线变换等,最后进行了验证实验.

1　着舰过程中视觉系统的任务

无人直升机在舰上指挥信号的导引下进入舰船附近,接收到着舰程序开启指令时,着舰系统开始工作.着舰过程中,系统可工作于 3 个模式:目标搜索模式、跟踪模式和着舰模式.视觉系统的任务是进行目标检测和直升机与舰船之间相对位姿参数估计,所得信息进入控制回路参与实现系统工作模式的转换控制、着舰指令的生成等.

2　视觉算法

2.1　特征图案的设计和视觉算法流程

本文设计的特征图案如图 1 所示,其中大正方形为主特征,设置为红色,用于目标识别和位姿计算,其 4 个顶点为特征元;小正方形为方向特征,设置为蓝色,用于指向;特征图案背景为乳白色.$Oxyz$ 为舰船坐标系,xy 面平行于甲板平面,x 轴指向舰船结构纵轴方向,也是直升机着舰过程中的参考航向.摄像机与直升机采用固联方式,主光轴垂直于直升机机体向下.

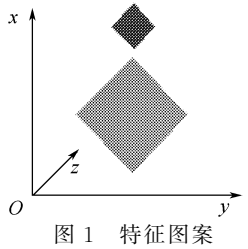

图 1　特征图案

视觉计算过程中,首先对采集到的图像进行目标检测,如果不含目标,则进入下一帧的处理;如果检测到目标,则进行图像分割、滤波、特征元参数识别和相对位姿计算等.常把获取特征元参数之前的部分称为底层图像处理,以特征元作为输入获取位姿参数的过程称为高级视觉计算.

2.2　底层图像处理

基于图 1 特征元的位姿估计,高级视觉计算可以采用解析算法[5],所以制约实时性的瓶颈在于图像的底层处理.要提高算法的速度,必须缩短该部分处理时间.

为了提高特征元参数的识别精度,采用先检测大正方形四边成像所在直线,然后求解两两直线交点的方案.传统算法流程如图 2a 所示.在进入着舰最后阶段,摄像机与甲板距离接近,特征图案基本上占据整个图像画面,图像分割之后的目标区域仍然很大,对该区域的边缘检测和直线 hough 变换相当耗时.实验结果表明,这 2 部分的处理时间占整个视觉计算的 3/4 以上.为了打破这一制约运算速度的瓶颈,本文提出了图 2b 所示的算法流程.其主要思想是在进行边缘检测和直线检测之前先确定 4 条直线所在的小区域,使后期的图像处理只对这 4 个小区域进行.

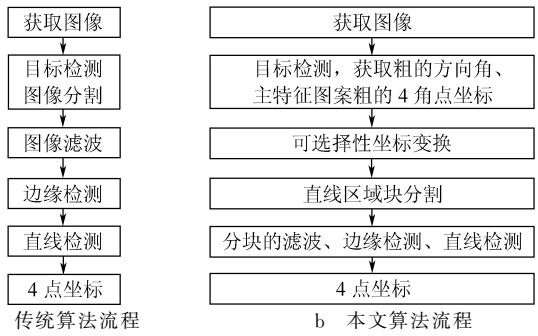

图 2　底层图像处理算法流程

2.2.1　目标检测

此步的目的是识别目标,检测出主特征和方向特征,同时确定主特征正方形粗的 4 角点坐标,进一步确定粗的偏航角,为后期的子信息块的分割和 hough 直线变换做准备.为了提高目标检测的有效性和精度,采用了多尺度的方法,用大的尺度发现目标,小的尺度实现目标定位.

1) 主特征检测

以像素的色调 H 值作为特征量,在整幅图像中搜索红色主特征块.具体步骤是:①将 768 像素×576 像素的整幅图像按 32 像素×32 像素尺度划分为小块,统计每一小块内满足 $|H-H_r|<\Delta h$ (H_r 为红色主特征块色调标准值,Δh 为允许偏差)的像素点数,点数大于 500 的判定为有效块,有效块集中的区域必定是主特征图案区;②将此区域上下左右各外扩一个 32 像素长度单位,作为新的搜索范围,用较小 4 像素×4 像素尺度进行划分,重复上述特征点数的统计,判断点数大于 1 的为有效块,从而获得更准确的目标区域.

2) 方向特征检测

以主特征图案为中心,在以1.25倍其大小范围的去主特征块的区域(由设计图案时确定)进行搜索,方法同主特征的检测.

3) 确定粗的偏航角

通过计算连接主特征区域中心与方向特征区域中心直线的斜率可获得粗的偏航角.

2.2.2 选择性坐标变换

在像平面坐标系中,以沿坐标轴方向进行矩形区域块的分割,让图1中大正方形成像的边位于一最小区域中,当偏航角在0°附近时,区域中包含的非直线边缘信息像素点量仍然是很大的.为此,在进行图像分割前先进行坐标的平移、旋转变换,让包含直线边缘信息的像素点在新的坐标系下集中于坐标轴方向附近.原坐标系 uOv 到新坐标系 $u'O'v'$ 的映射关系为

$$g(u,v)=g'(u-u_0+v-v_0+d,\ -u+u_0+v-v_0+d) \quad (1)$$

其中,(u_0,v_0) 为主特征区域中心点坐标;d 为 uOv 坐标系下主特征区域的宽度.

新坐标系的刻度是原坐标系刻度的2倍,图像被放大了,但信息量不变(映射后新坐标下有些点为空).图3显示了一次坐标变换的效果.

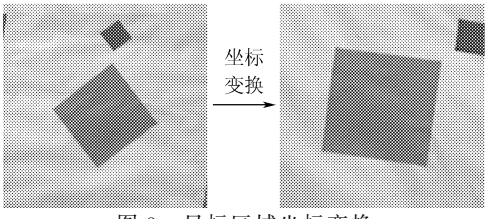

图3 目标区域坐标变换

理论上讲,对于任意方向特征图案的成像,选择一定的旋转角,都可进行坐标变换而让在新的坐标系下大正方形成像的4条边尽可能地处于坐标轴方向附近.但是,一般角度旋转变换下的坐标映射会涉及到三角正余弦运算.为了减小运算量,采用了折衷方案,即在特征图案主对称轴与任一坐标轴夹角小于17°时,进行坐标变换,其它情况则不进行.

2.2.3 基于信息块的图像子分割

如果未作坐标变换,就在原图像坐标系下进行,否则在新的坐标系下进行.具体步骤如下:

1) 将主特征图案4顶点按在坐标系下所处的位置进行排序:左上、左下、右下和右上;

2) 以上述排序下相邻2点作为一组进行分组;

3) 以一组内2点为矩形的一组对角点,定义一小矩形,矩形的边分别平行于2个坐标轴,如果此矩形的宽度小于20像素,则将宽度由中心向两边各外扩10像素.

图4显示的是一次进行图像子分割的效果.

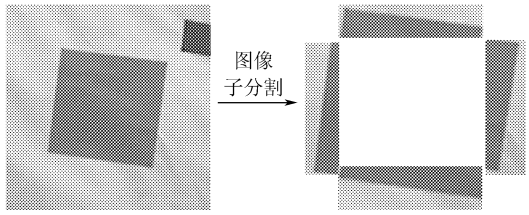

图4 基于信息块的子分割

2.2.4 基于信息块的滤波、边缘检测和直线检测

要提取的边缘由单一红色主特征与乳白色背景所形成,进行了灰度、色度、饱和度等彩色图像特征量的边缘效果对比实验,发现灰度特征效果最优.下面对图像的处理在灰度特征量上进行.

图1中特征图案成像的边缘属阶跃边缘,中值滤波器具有不影响阶跃函数的数学性质,能在抑制噪声的同时保持边缘少受模糊[6],所以成为本文的理想选择.边缘检测采用经典的sobel算子;直线检测采用hough变换和最小二乘回归拟合相结合的方法,hough变换以2.2.1节目标检测中得到的粗的偏航角为先验知识缩小角度的遍历空间,最小二乘回归拟合以hough检测的直线参数为初始值确定参与拟合的像素点范围.

2.3 高级视觉位姿计算

采用摄像机针孔模型,以4点特征元的物理坐标和对应的成像点像平面坐标作为输入,来获得特征图案所代表的舰船相对于摄像机的位置和姿态6个参数的解析解,算法详见文献[5].

3 实验验证

为了验证算法的有效性,在实验室环境下进行了真实图像的测试实验.主要的实验设备有:自制的特征图案目标板(特征图案中大正方形边长设置为0.1 m,等效于实际舰船甲板中的1 m),TPS-66三轴手动机械转台,敏通TOTA2400 II摄像机,精工SE1212镜头,大恒CG300图像采集卡,SS51G XPC计算机(2.4 GHz CPU,Win2000操作系统).视觉算法由Visual C++编写实现.实验方案是:将特征图案板固定在三轴转台上,由人工操纵转台改变被测目标相对于摄像机的位置和姿态,视觉系统对采集到的图像进行分析处理.

3.1 功能性验证

对于相对距离小于2 m(等效于舰船与直升

机相距小于 20 m),目标板相对摄像机成像平面倾斜角小于 20°范围内,以随机位姿状态进入视野的完整目标特征图案,视觉系统都能有效地检测目标,并识别出目标相对于摄像机的位置和姿态.

3.2　实时性分析

由于采用了选择性坐标变换,耗时量受偏航角的变化影响以 45°为周期. 图 5 是特征图案成像占图像约 4/5,偏航角从 0°～45°变化时,算法的耗时量统计. 可见,处理一 768 像素×576 像素大小的图像帧,最大耗时量小于 30 ms. 因此,不论 25 Hz 的 PAL(Phase Alternating Line)制式(本实验采用的制式),还是 30 Hz 的 NTSC(National Television Standards Committee)制式图像,均能实现视频流的实时处理. 而图 2a 的传统算法的帧处理时间为 60 ms 左右. 本文视觉系统的性能也要优于文献[3]中 320 像素×240 像素图像帧的 30 Hz 水平.

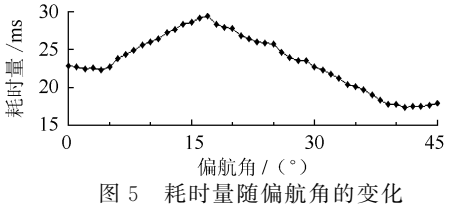

图 5　耗时量随偏航角的变化

3.3　稳定性分析

保持目标板与摄像机在主光轴方向相距 1 m(等效于直升机与舰船距离 10 m)左右,随机操纵转台,使图案板停止于某一位姿,记录连续测量 50 次的结果数据,计算每一位姿参数估计的均方根(RMS, Root Mean Square)误差值. 重复上述实验 20 次,最后计算每一参数 RMS 误差的平均值. 表 1 是 20 次随机相对位姿下测量结果的 RMS 误差平均值. 可以看出,位置参数的 RMS 误差在 0.2 cm(等效于实际中的 2 cm)内,姿态参数的 RMS 误差小于 1.5°,算法表现出了很好的稳定性.

表 1　位姿估计 RMS 误差

相对位置/cm			相对姿态/(°)		
x	y	z	ψ	θ	φ
0.046	0.068	0.187	0.360	1.293	1.054

实验的视觉算法判据中用到了一些经验值,比如 2.2.1 节目标检测中特征块的标准色调值等. 经验值的大小是在实验室条件下获取的,在真正的海洋环境下,取值的大小会有所变化,由对海洋环境下获取的图像分析实验决定,在飞行前进行参数的经验值装订.

4　结 束 语

任务要求直升机在 4 级海况下实现安全着舰,着舰时要求直升机与甲板的相对速度小于 1.5 m/s,同时要求机体触舰时甲板的水平倾角小于 5°,着舰位置误差小于 1.25 m. 从实验数据可以看出,本文算法能够满足无人直升机着舰的精度要求;每帧图像的处理时间小于 30 ms,满足任务实时性要求. 该算法可用于无人直升机着舰中相对位姿等相关信息的获取,为着舰视觉系统的工程化实现做了理论上的准备.

参考文献(References)

[1] Sato M. Position and attitude estimation from an image sequence of a circle[J]. The Academic Reports, the Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnic, 1995:18(1):28－35

[2] 邱中伟. 计算机视觉技术在无人驾驶直升机自主定点着舰系统中的应用[D]. 北京:北京航空航天大学自动控制系,1996
Qiu Zhongwei. Application of computer vision technology to unmanned helicopter landing[D]. Beijing: Department of Automation Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996(in Chinese)

[3] Sharp C S, Shakernia O, Sastry S S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle[C]//Proc IEEE Int Conf Rob Autom. Piscataway, NJ: IEEE, 2001, 2:1720－1727

[4] 邱力为. 用于无人直升机自主着舰控制的计算机视觉技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,2003
Qiu Liwei. Research of computer vision technology for autonomic landing system of unmanned helicopter[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese)

[5] Pan Sunliang, Wang Xiaojian, Shen Weiqun, et al. A faster relative 3D position and attitude algorithm based on special four feature points[C]//Fang Jiancheng. Proc SPIE Int Soc Opt Eng. Bellingham WA: International Society for Optical Engineering, 2006, 6357 I: 63571A

[6] 朱学刚. 数字图像处理[M]. 北京:机械工业出版社,2001:177－181
Zhu Xuegang. Digital image processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2001: 177－181(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)