

# 微小四旋翼无人机自主着陆视觉系统研究

何 昱, 王 彪, 谷世宁, 徐贵力

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 以实现微小四旋翼无人机依靠视觉信息完成自主着陆为目的, 采用 TI 公司 DM3730 芯片作为核心处理器, 构建一套自主着陆视觉导引信息处理系统; 充分考虑了视觉系统的特点, 选用小巧、便携、合理的实验硬件, 通过对图像的前期处理, 采用相对简单的视觉处理算法, 识别出着陆标识, 通过解算得到着陆信息并完成飞行器的自主着陆过程; 实验结果表明, 系统较为可靠, 在常规条件下, 该系统能够有效识别人工着陆标识, 准确解算出着陆标识与飞行器的相对位置信息用于自主着陆导引。

**关键词:** DM3730; 自主着陆; 视觉导引; 微小四旋翼

## Vision System for Autonomous Landing of a Micro four rotor UAV

He Yu, Wang Biao, Gu Shining, Xu Guili

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to complete micro four rotor UAVs autonomous landing based on visual information for the purpose of, a vision-based guidance system is developed, which takes advantage of the DM3730 dual-core processor produced by TI company. Consider the characteristics of the visual system, we select portable and reasonable hardware, through the pre-processing on the image, using a relatively simple visual processing algorithm, identify the landing mark and calculate the information to complete aircraft autonomous landing. The experimental results show that system is reliable, under normal conditions, the system can effectively identify manual landing mark, calculate the relative position information of landing mark and aircraft for autonomous landing guidance.

**Keywords:** DM3730; autonomous landing; visual guidance; miniature quadrotor

## 0 引言

传统的导航方法有: 惯性导航、电磁导航、卫星导航、激光导航、红外导航、无线电导航等。惯性导航的定位误差会不断累加, 导致定位精度下降; 电磁导航成本高, 改造和维护困难; 激光导航向外界发射能量, 不易隐身; 红外导航受日光影响较强; 无线电导航信号强度定位精度不高<sup>[1]</sup>。近些年来, 计算机视觉技术飞速发展, 由于其经济、无源、信息丰富的特性, 使得利用视觉信息导航成为可能<sup>[2]</sup>。

目前, 在相关方面已经取得的一些研究成果有: 清华大学的 Zeng Fucen, Shi Haiqing 等人采用 DSP 构建了小型直升机的视觉着陆系统<sup>[3]</sup>; 南加州大学的 Srikanth Saripalli, James E Montgomery 等人采用 PC-104 平台在小型直升机上搭建了视觉着陆系统<sup>[4]</sup>; 加州大学伯克利分校 Courty S Sharp 等人的视觉系统采用了 Pentium 233 MHz Ampro 小型开发板<sup>[5]</sup>; 杨百翰大学 David Hubbard, Bryan Morse 等人使用 Pentium-III 700 MHz 处理器以及 Firewire Point Grey Flea 摄像机对地面标识进行识别<sup>[6]</sup>; 新加坡国立大学的 Lin 等, 提出了基于不变矩和两阶段的模式识别的自动地标检测实时视觉算法。

收稿日期: 2014-09-05; 修回日期: 2014-09-30。

基金项目: 国家自然科学基金(613741116)。

作者简介: 何 昱 (1989-), 男, 新疆人, 硕士研究生, 主要从事微小四旋翼无人机自主着陆视觉系统开发研究。

王 彪 (1975-), 男, 辽宁人, 博士研究生, 副教授, 主要从事飞行控制与仿真、计算机视觉应用方向的研究。

徐贵力 (1972-), 男, 黑龙江人, 博士研究生, 教授, 主要从事计算机视觉与智能系统、光电检测方向的研究。

上述研究中, 都以长度 1 m 以上的直升机作为实验平台。相比于直升机, 四旋翼控制简单, 成本低廉, 利于小型化, 由于上述视觉系统体积过于庞大、重量过重, 不适合应用在微小四旋翼平台上。本文采用 TI 公司高性能 DM3730 双核处理器, 设计了一套应用于微小四旋翼无人飞行器自主着陆的视觉处理系统。

## 1 平台概述

### 1.1 系统方案

搭建小型四旋翼视觉着陆平台时, 由于小型四旋翼载重量小, 大大限制了控制板和摄像头的选择范围, 系统要求一款既轻量化, 又能处理复杂视觉算法的处理核心, 在减轻重量的同时, 还要具备强大的运算能力。摄像头方面, 需要配置一款重量轻、视角广、图像清晰的迷你摄像头。软件开发上, 尽量选择驱动完善、易于编程开发的平台环境, 可有效降低底层开发时间, 加速任务的完成。

ARM 体积小、功耗低、成本低, 并且外部接口丰富, 易嵌入 Linux、QNX、 $\mu$ COS、NuttX 等操作系统, 实现实时操作, 采样、控制等任务处理性能很大; DSP 处理数字信号速度快, 运算能力强, 算法灵活, 有专门针对图像处理的系列产品, 同时很多的较成熟程序包可以利用, 比如 OpenCV 等, 但其它通用功能相对较弱, 外部接口较少; FPGA 实时性好, 但成本较高, 开发技术难度大, 不太适合处理含有大量计算的视觉算法程序, 算法更改不够灵活, 不适用于算法开发研究阶段, 适用于定型产品; PC-104 功能强大, 驱动完善, 开发技术难度低, 通用性好, 但由于重量较重和功耗较大, 限制了其在微小无人飞行器上的使用。综合以上各种处理器的优势, 同时考虑微小四旋翼平台上的应用需求, 以及与控制处理的

紧密结合, 选用 ARM+DSP 的方案比较具有实用性与可扩展性, 其中 TI 公司生产的 DM3730 芯片集成了 ARM 与 DSP 两种内核, 尤其适用于本文的应用研究。

如图 1, 本文初步开发的视觉处理硬件系统分为空中和地面两个部分。地面部分主要包括以 DM3730 处理器为核心的开发平台, 上位 PC 机, 监视器, 数据存储设备和图传接收装置; 空中部分主要包括四旋翼飞行器, 航拍摄像头和无线图传发射装置。上位 PC 机发送指令, 命令机载摄像头开始采集图像, 所得图像通过无线图传装置发送至主处理器 DM3730, 经过其处理其中是否含有着陆标识进行检测, 再依据提取出的着陆标识信息, 解算出可用于着陆导引的相对位置信息。该系统还可以通过监视器实时监视图像处理过程, 同时利用高速 SD 卡记录飞行数据和图像信息, 用于离线分析。地空分离的整体构架保留了系统的完整性, 却使得前期的实验、调试简单化, 尤其可以在前期直接使用 DM3730 开发板, 节约底层开发时间, 大大缩短工作周期。另一方面, 技术成熟定型后, 可以基于 DM3730 裁剪制作专用的视频控制、处理板, 构成机载视觉处理系统, 从而满足微小型四旋翼无人飞行器机载视觉处理的使用需求。下文仅就本系统的关键部分加以较为详细论述。

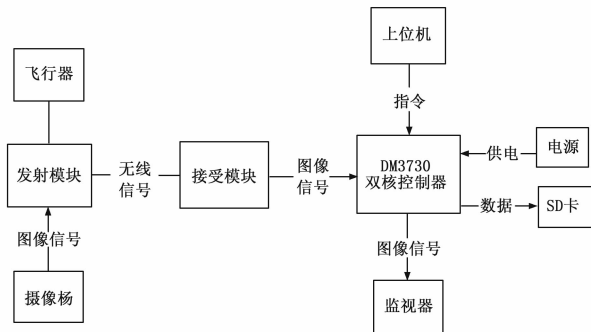


图 1 原理结构图

## 1.2 硬件平台简介

TI 公司的 DM3730 是由一个 1 GHz 的 ARM Cortex-A8 核心和一个 800 MHz 的 TMS320C64x+ DSP 核心组成的双核处理器, 其中的 ARM 内核面向应用开发, 接口丰富, 适用于作为控制系统核心数字处理器, 而 DSP 内核是面向图像处理的 6000 系列产品, 将 ARM 核心与 DSP 核心集成在一块芯片内, 不但节省了空间, 降低了成本、功耗、体积、重量, 也为以后实现 ARM 管理飞控, DSP 管理图像处理的方案提供了理想平台, 并且两者硬件独立, 执行在 ARM 中的控制部分不会因为执行在 DSP 中的视觉处理部分而影响飞行安全。DM3730 处理器的主频速度完全满足我们对于视频处理实时性的要求, 内部 512 M 200 MHz 的 32 位 SDRAM 为大数据量的视频处理提供了有力保证, 512 M 16 位的 NAND Flash 为实验数据的快速存储提供了支持, 另外, DM3730 集成了 3D 图形处理器, 视频加速器 (IVA), 完善的底层驱动程序和丰富的外设接口, 加之其强大的数据运算处理能力, 使得其成为工业控制、多媒体处理、视频监控等领域的最佳选择之一。

成像设备方面, 鉴于 USB 摄像头成像质量较差, 以及在 Linux (采用 Linux 操作系统的原因在后文阐述) 环境下必须使用支持 UVC (USB video class) 协议的免驱设备, USB 摄像头并不是视觉着陆系统中摄像机的最佳选择。本系统选用 1/3" SONY Exview HAD CCD II + SONY Effio DSP 影像处

理 IC 芯片组构成的摄像头, 采用 FPV 专用 3P 接口。相比于 USB 数字摄像头, 此款模拟相机采集的视频更为清晰, 更利于后期对图像的处理。另外, 24 mm×24 mm 的超小外围尺寸以及仅仅 29.0 g 的重量大大低于微小型四旋翼的载重限制, 使得在四旋翼平台上安装其它传感器成为可能。SONY CCD 具备 700TVL 和 F1.2 高清镜头, 加之 3.6 mm 超短焦距和 96° 超广视角 (如果需要, 此款摄像头可配备 2.8 mm 焦距和 115° 视角的镜头), 使其即使在 1 m 范围之内, 也能得到清晰的影像信息, 适用于着陆标识检测。更为重要的是, 此摄像头独有的宽电压设计, 支持 9~16 V 的电压输入, 可与市面上主流的各种电池配套使用, 包括微小型四旋翼飞行器上广泛使用的三芯、四芯锂聚合物电池, 十分适合飞行器电源电压不稳定的工作环境, 有效避免了因电压不稳引起的画面干扰或中断等问题。

图传模块选用 TS353 和 RC805 配套使用, 5.8 G 传输频率, 抗干扰能力强, 支持 8 个通道, 理想条件下传输距离可达 3 500 m。TS353 发射模块尺寸仅 55×26×17 mm, 重量只有 43 g, 利于机载。

地面监视器选用利视达便携式多媒体数字播放器, 该监视设备内置锂电池, 方便携带, 配备多种视频设备输入接口, 并且具备多个通道、多种视频制式切换的功能, 可实现视频处理过程以及摄像头采集过程的实时显示, 方便实验时及时发现异常或故障, 保证系统稳定安全的运行。

所开发的平台还提供了外部 USB 接口和 SD 卡接口来存储实验数据, 实际测试表明, SD 卡的存储速度具有明显的优势, U 盘则存在较大的延迟, 容易导致数据的丢失。

整个地面系统使用 12 V 7.2AH 的蓄电池供电, 易携带、易更换, 极大的方便了室外实验。

## 1.3 软件系统

由于视觉处理与控制处理分开, 前者任务单一, 并不需要实时操作系统配合, 因此本系统 DM3730 的 ARM 内核上运行 Ubuntu10.04LTS 操作系统, 该操作系统开源稳定, 方便进行嵌入式的移植, 具备完善的底层驱动和友好的编程环境, 提供了简单易用的嵌入式开发工具包, 方便初级开发者进行嵌入式编程开发。

视频采集过程中, 使用了 Linux 驱动架构下的 V4L2 (video 4 Linux 2) 多媒体开发框架<sup>[7]</sup>。V4L2 可以支持多种设备接口, 包括视频采集和视频输出, 它支持直接视频传输功能, 在只要求采集图像并不需要处理图像的情况下, 这种接口是最佳的选择。V4L2 提供一系列 API 给开发人员使用, 并使用一系列回调函数来实现对摄像头参数的设置, 简洁直观的函数调用大大降低了开发难度。

视频格式选择 YUV422 格式, 将亮度参数和色度参数分开存储, 这样不但可以避免相互干扰, 还可以降低色度的采样率而不会对图像质量影响太大, 色度采样率的降低有利于提高图像处理的速度。此外, 与 RGB 视频信号传输相比, 它最大的优点在于只需占用极少的频宽 (RGB 要求 3 个独立的视频信号同时传输), 而且在图像的后期处理中, YUV 格式的图像更容易得到灰度图像。算法流程图如图 2 所示, 详细算法将另外撰文描述。

本系统的着陆标识设计为黑色圆盘中心白色 H 标记。对着陆标识的前期图像预处理部分, 应用了 OpenCV 的部分函

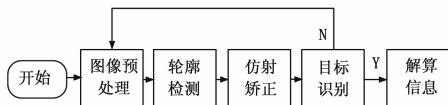


图 2 算法流程图

数。OpenCV 是一个基于开源发行的跨平台计算机视觉库，可以运行在 Linux、Windows 和 Mac OS 操作系统上，其简单易用而且高效，由一系列 C 函数和少量 C++ 类构成，同时提供了 Python、Ruby、MATLAB 等语言的接口，实现了图像处理和计算机视觉方面的很多通用算法。充分利用 OpenCV 库进行必要的视觉处理，缩短开发周期的同时，其经过优化的代码对其执行速度也带来了可观的提升。

在图像的分割处理中，应用仿射不变矩<sup>[8]</sup>来确定图像中的 ROI (region of interest) 区域，缩减图像尺寸，保留感兴趣的区域，提高处理速度的同时降低了识别难度。在着陆标识检测方面，其基本原理采用以 H 中心为圆心检测不同半径圆上灰度值序列的方法，通过对不同半径圆上灰度值序列的采样，得到几列特定的黑白相间的波形，将这些波形分别与理论波形进行比对，最终判定中间的标记是否为 H。检测效果如图 3 所示。图中，最外圈线条为最初轮廓检测的结果，内部的五圈线条为灰度值采样序列的轨迹。



图 3 算法示意图

整个系统的软件工作过程如图 4。系统初始化后摄像头采集的图像通过无线图传传输给地面的处理器，经过预处理和检测算法得到有用信息，保存数据并实时显示。

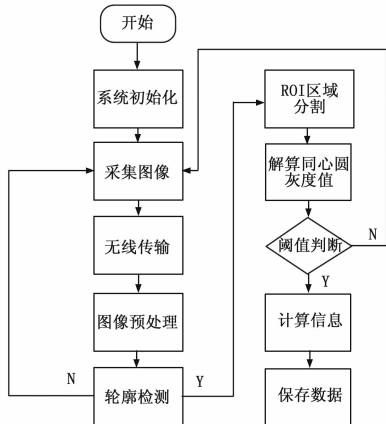


图 4 软件流程图

## 2 实验结果

实际测试中，采用 720×576 标准 PAL 制式，三通道深度为 24 b 的彩色图片进行测试，四旋翼飞行器在距着陆标识 10 m 左右的高度时即可开启视觉着陆系统。系统识别着陆标识后，解算得到的着陆点位置信息实时显示在上位机的串口终

端，目标检测的图像处理信息在便携式监视器上实时显示。经过多次室外实验，系统各环节供电正常，工作稳定。

实际实验环境如图 5。在空旷草坪上手动控制四旋翼飞行器飞至着陆标识上空 10 m 处，开启摄像头并进行着陆标识识别实验。

图 6 为实验环境中实际图片处理效果图，其中的着陆标识已被自动检测并计算的圆形圈出，同时计算出其中心位置（以“十”字标识）作为飞行器着陆的目标点。



图 5 实验环境图



图 6 采集效果图

如图 7 所示，记录了 200 帧整个视觉系统的运行时间，每帧处理时间在 1 s 左右，当飞行器晃动幅度较大或处理场景较复杂时，处理时间相应延长，整个处理周期不超过 1.2 s。

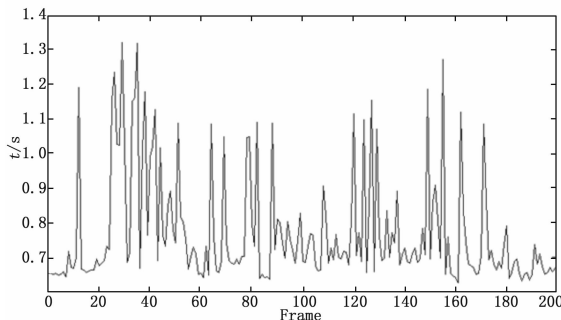


图 7 处理时间记录图

## 3 结论

基于 DM3730 视频处理器的视觉着陆系统可以实现小型四旋翼自主着陆的目标检测和位置估计，并且在实际应用中得到验证，整套系统工作稳定。

鉴于研究时间所限，系统还有很多需要改进的方面。首先，由于本实验视觉处理程序只在 ARM 核上运行，并未调用 DSP 核，所以运算速度较慢，处理周期大约为 1 Hz，ARM+DSP 的双核工作模式是后续亟需改进的工作。另外，无线图传设备受距离远近影响较大，在距离太远时传输的信号质量下降明显，可以选择更为合理的安装位置和天线方向来改善，必要时可以选用传输距离更远、信号更强的图传设备。

摄像头的标定是必不可少的，图像的畸变对目标的识别影响较大，提高标定的准确度可有效避免因图像中目标变形带来的后期识别困难。在实际实验中，阳光的反射也应该被考虑，

当阳光较强时, 着陆标识由于反射不易被识别, 且图像中会有光晕出现, 着陆标识应优先选择非镜面反光的材料。

参考文献:

[1] 李谷全, 陈忠泽. 视觉跟踪技术研究现状及其展望 [J]. 计算机应用研究, 2010 (8).

[2] 韩雪岭, 李成贵. 基于机器视觉的发动机喷嘴检测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012 (6): 1455-1457.

[3] Zeng F, Shi H Q, Wang H. The object recognition and adaptive threshold selection in the vision system for landing an unmanned aerial vehicle [A]. International Conference on Information and Automation [C]. Zhuhai, China, 2009: 117-122.

[4] Saripalli S, Montgomery J F, Sukhatme G S. Vision-based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle [A]. IEEE Interna-

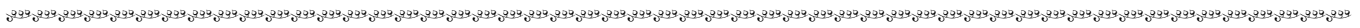
tional Conference on Robotics and Automation [C]. Washington, DC, USA, 2002: 2799-2804.

[5] Sharp C S, Shakernia O, Sastry S S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Seoul, Korea, 2001, 2: 1720-1727.

[6] Hubbard1 D, Morse1 B. Performance Evaluation of Vision-Based Navigation and Landing on a Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle [A]. IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV 07) [C]. 2007, 0-7695-2794-9/07.

[7] Michael H Schimek, Bill Dirks, Hans Verkuil, and Martin Rubli. Video for Linux Two API Specification [Z].

[8] Flusser J, Suk T. Pattern recognition by affine moment invariants [J]. Pattern Recognition, 1993, 26 (1): 167-174.



(上接第 1681 页)

3.3 检测效率对比分析

测试图像为 768×1 024 像素的伪造图像, 结果见表 1。从表中可知, 虽然本文的非局部降噪的复杂度略大于 Mihcak 降噪, 时耗为 1.12 s、0.73 s; 但由于本文设计了凸优化机制, 大幅度减少了真伪决策时间, 为 0.27 s, 而 A、B 算法则需要 0.85 s、0.77 s, 从而使得本文算法总体时间要低于对照组算法。主要原因是本文算法将图像伪造检测转换为凸问题, 设计凸优化机制, 大幅度缩减了真伪像素的决策时间; 而 A、B 算法都是采用了经典的逐级检测思想, 其复杂度较大, 继而降低了其算法的总体检测效率。

表 1 不同算法的检测效率

名称	本文算法	A 算法	B 算法
降噪	1.12 s	0.73 s	0.73 s
相关性引擎场计算	1.3 s	1.3 s	1.3 s
真伪决策/优化	0.27 s	0.85 s	0.77 s
总体	2.69 s	2.88 s	2.8 s

4 结论

本文根据成像传感器的独特随机特性, 设计传感器模式噪声检测思想; 并提出了凸优化机制耦合传感器模式噪声的图像伪造检测算法, 以克服当前算法存在的鲁棒性不佳, 难以检测微小尺寸伪造以及效率较低等不足。仿真结果表明: 与当前图像伪造检测算法相比, 本文算法具备更好的接收机工作特征以及更高的检测精度与效率。

参考文献:

[1] 王小刚, 田小平. 基于压缩感知的图像融合算法 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (3): 788-790.

[2] 张永梅, 王世伟, 李强, 等. 基于希尔伯特黄变换的图像去噪方法 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 3060-3062.

[3] Muhammad G, Al-Hammadi M H. Image forgery detection using steerable pyramid transform and local binary pattern [J]. Machine Vision and Applications, 2014, 25 (4): 985-995.

[4] 焦雨鑫, 杜振龙. 基于均值漂移的图像复制粘贴伪造盲检测 [J].

计算机应用, 2014, 34 (3): 806-809.

[5] 欧红玉, 陈 曦, 宋燕辉. 基于 LBP 的图像复制篡改检测 [J]. 计算机应用与软件, 2014, 30 (9): 170-173.

[6] Muhammad Hussain, Ghulam Muhammad, Sahar Q. Saleh. Image Forgery Detection Using Multi-Resolution Weber Local Descriptors [J]. EuroCon, 2013, 7 (1): 1569-1577.

[7] Bai L F, Zhang L Q, Jing X. A Registration Method Based on Image Edge Normalized Correlation [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 241 (67): 3082-3097.

[8] Mohammadi A, Taban M R, Abouei J. Cooperative spectrum sensing against noise uncertainty using Neyman-Pearson lemma on fuzzy hypothesis test [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13 (7): 3307-3313.

[9] Ryu S J, Kirchner M, Lee M J. Rotation invariant localization of duplicated image regions based on zernike moments [J]. Information Forensics and Sec, 2013, 8 (8): 1355-1370.

[10] Chen M, Fridrich J, Goljan M. Determining Image Origin and Integrity Using Sensor Noise [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2008, 3 (1): 74-90.

[11] 杨庆海, 卢 波, 颜子夜. 基于马尔科夫随机场的粘连字符串切分算法 [J]. 计算机工程, 2013, 39 (4): 258-262.

[12] Picco M, Sourlas N. On the phase transition of the 3D random field Ising model [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2014, 10 (7): 217-229.

[13] Pock T, Cremers D, Bischof H. Global solutions of variational models with convex regularization [J]. SIAM J. Img. Sci, 2010, 3 (12): 1122-1145

[14] Dabov K, Foi A, Katkovnik V. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16 (8): 2080-2095.

[15] Christlein V, Riess C, Jordan J. An evaluation of popular copy-move forgery detection approaches [J]. Information Sciences, 2013, 239 (1): 253-265.

[16] Chierchia G, Cozzolino D. Guided filtering for PRNU-based localization of small-size image forgeries [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2013, 67 (8): 1205-1214.