

文章编号 1004-924X(2007)03-0378-06

# 高速摄像技术在微型旋翼机性能测量中的应用

谢少荣, 周 焱, 邢兰兴, 罗 均

(上海大学 机械工程及自动化学院, 上海 200072)

**摘要:**提出了一种测量微型旋翼机桨距角及弹性连杆变形角度的新方法—高速摄像法。这种方法可以准确地测得高速旋转物体的角度,拍摄速度可达 15 000 帧/s。实验需要处理两个角度——桨距角和弹性连杆变形角度。实验中,首先对拍摄部位进行预处理,然后对微型飞行器在高速旋转时的不同状态进行拍摄,包括从正面拍摄桨距角和从侧面拍摄弹性连杆的变形角度,对拍摄到的图片进行筛选、存储并进行图像处理。图像处理部分是用 MATLAB 软件进行边缘检测,对比了四种不同的检测方法的效果,最后采用 Canny 算法。用最小二乘法拟和成直线,得到所需的角度的;利用采集电路将角度与电压实时地对应起来,得到了电机电压和桨距角及弹性连杆变形角度的八组关系曲线,并对得到角度的精度进行了分析。实验证明这种方法在微型飞行器高速旋转时信号弱、干扰强、其动态特性难以精确测量情况下,可有效测量微型飞行器的变距角度。

**关键词:**桨距角测量;高速摄像机;MATLAB;边缘检测;微型旋翼机

**中图分类号:**TB872;V465.3 **文献标识码:**A

## Application of high-speed camera to characteristic measurement of MAV

XIE Shao-rong, ZHOU Yan, XING Lan-xing, LUO Jun

(School of Mechanical and Electronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In order to measure the dynamic characteristics of high rotating MAV with weak signal and big interference, a new measurement way based on the high speed camera was presented. Being different from the traditional way measured only in theory, this kind of new way can measure angle of high rotating object accurately in camera speed of 15 000 frame/s. In this experiment, two angles, the blade angle and connecting rod angle, is need to measured in four steps, the angles are disposed for the convenience of next step, then the MAV are taken pictures in two different angles, front and side. For gaining the required angles, the pictures are saved and analyzed using MATLAB software by four different kinds of detecting ways, including checking the edge of the image and fitting curve. Finally, the relationship between the motor voltage, pitch angle and the distorting angle of the connecting rod in the eight groups of curves are achieved by corresponcling to the angles and voltage. The precision of the angles is analyzed, which is proved that this way is effective.

**Key words:** angle measurement; high speed camera; MATLAB; edge checking; MAV

收稿日期:2006-09-12;修订日期:2006-12-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50405046);上海市优秀青年教师培养计划项目(No. 04Y0HB094)

## 1 引言

微型飞行器由于其广泛的应用而成为最近几年各国研究的重点。微型飞行器分为固定翼、旋翼、扑翼等类型,其中旋翼飞行器是一个研究难点,因为传统的机械变距系统是采用自动倾斜器(又称倾斜盘、十字盘)来改变旋翼桨叶的桨距,采用4个舵机分别驱动:俯仰、横滚、偏航和油门总距拉杆,实现前后、左右、上下、偏航的机动飞行。这种传统的控制方法不仅机理复杂,而且旋翼机在尺寸和重量上都由于驱动自动倾斜器的伺服电机无法做小,很难实现本体微型化而成为近年来旋翼飞行器研究的一个瓶颈问题。本文提出了一种新型变距机理—非对称变距,即通过电机的瞬间加速,利用旋翼桨叶的惯性力使弹性连杆变形来达到控制旋翼的目的,仅由一个驱动旋翼主轴的电机来实现前后、左右、上下的机动飞行。尾桨另有一个驱动电机,用来实现偏航。

由于变距机理的不同导致传统的测量方法不可用。微型飞行器的尺寸小、重量轻、飞行速度快等特点决定了对其桨距角测量方法的局限性,常规的接触式传感器测量方法<sup>[1]</sup>不适用于此微型旋翼飞行器。本文提出了一种新型的分析方法—高速摄像法。高速摄像机的拍摄速度最高可以达到15 000 帧/s,而微型飞行器的速度为20~40 r/s,可以用高速摄像机拍摄出飞行器各状态的很清晰的动态过程,与传统的测量方法相比,它的精确度大大的提高了。而之后的MATLAB软件图像处理减小了角度的误差,分析的结果也很清楚地显示了桨距角的变化,证明了这种方法的可行性。

## 2 高速摄像实验系统

本文采用高速摄像技术对桨距角及弹性连杆变形角度进行测量<sup>[2]</sup>。高速摄像技术应用面很广,国外主要用在拍摄足球的运动轨迹<sup>[3]</sup>、观测弧光灯的变化<sup>[4]</sup>、人的面部表情的运动<sup>[5]</sup>等,但是应用到微型飞行器中的很少见。随着科学技术的不断提高,我国也陆续将高速摄像技术<sup>[6,7]</sup>运用到科学研究的各个方面,如在汽车被动安全性碰撞试验中的应用<sup>[8]</sup>;弹道曲线的绘制等<sup>[9,10]</sup>。

本文应用高速摄像实验系统来拍摄桨叶及弹

性连杆的变化角度,这种方法是通过高速摄像系统在一定时间内连续拍摄出飞机的某种状态,通过分析同一位置的桨距角和弹性变形角度的变化来得到它们和电机电压的关系曲线。实验装置主要由高速摄像机、拍摄对象(微型旋翼机)、光源、存储器(笔记本电脑)组成,根据预先设计好的拍摄方案拍摄。

本实验所用的高速摄像机为美国Readlake公司所生产的MotionPro HS series 4,分辨率为512 Pixel×512 Pixel,内存为4 GB,拍摄速度为5 000—14 000 帧/s。本实验选择的拍摄速度为10 000 帧/s,这样可与旋翼机的旋转速度相匹配,也可以选择多种触发模式以适应不同的记录要求。实验装置如图1所示。

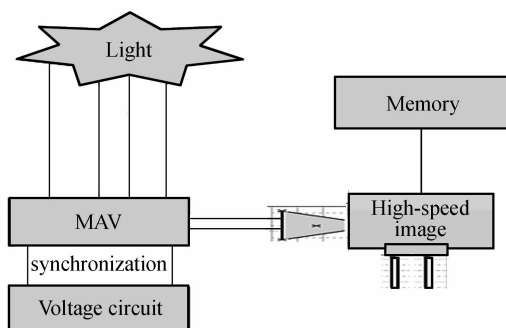


图1 高速摄像实验系统框图

Fig. 1 High-speed camera system

## 3 拍摄方案

为了寻找变距规律,即找到电机电压和桨距角及电机电压和弹性连杆变形量角度之间的关系,本文设想利用拍摄的方法找到桨距角和弹性连杆的变形角度。桨距角的定义为0.7桨叶处的直线与水平线的夹角。因此在桨叶的0.7处画了一条黑线,在进行边缘提取时就将这条黑线提取出来以待研究分析。对弹性连杆的变形量来说也是一样,提取出弹性连杆的右边缘线,因为它的角度可以反应出弹性连杆变形的大小,所以本文在拍摄前对弹性连杆进行了处理,即将弹性杆部分涂为白色,这样做是为了将弹性杆与其余背景部分形成明显对比,从而利于边缘提取。

拍摄前的处理部分具体涂法见图2:

微型旋翼机的控制器有四个通道:1横滚

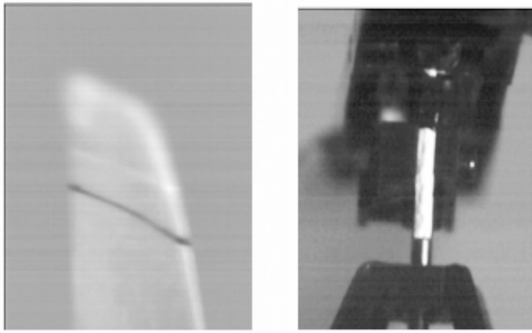


图 2 桨叶和弹性连杆的处理

Fig. 2 Image process of main rotor and connecting rod

(rolling)、2 俯仰 (pitching)、3 总距 (motor)、4 偏航 (yawing), 将主桨电机通道 3 的两个位置作为标准, 即 3 通道位于中间和最上方, 1, 2 通道分别选择三个位置, 通道 1 选择左中右, 通道 2 选择下中上, 可以利用这几种状态的不同组合来找到旋翼机的不同动态范围。桨距角和弹性连杆的变形角度分别测了四组数据, 即:

(1) 总距通道 3 打到中位时, 横滚通道 1 从左到右一次, 此时高速摄像机垂直于机身, 这样做是为了拍摄到桨距角变形的那一状态。

(2) 总距通道 3 打到最大时, 1 从左到右一次, 拍摄角度与上面一样。

(3) 总距通道 3 打到中位时, 俯仰通道 2 从上到下一次, 此时高速摄像机对准飞机的头部进行拍摄, 因为在这一状态飞机的变距角度容易拍摄到。

(4) 总距通道 4 打到最大时, 俯仰通道 2 从上到下一次, 拍摄角度与上面一样。

这样, 每个变量拍摄了四组, 总共八组, 得到了八个实验数据。

## 4 图像的处理

本文采用 MATLAB 软件对桨距角及弹性连杆变形角度图像进行边缘检测。边缘检测技术对于处理数字图像非常重要, 因为边缘是所要提取目标和背景的分界线, 提取出边缘才能将目标和背景区分开来。

### 4.1 边缘检测

常用的边缘检测算子有微分算子 (Roberts

算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、Isotropic Sobel 算子)、拉普拉斯高斯算子和 Canny 算子。在 MATLAB 图像处理工具箱中, 提供了 edge 函数利用以上算子来检测灰度图像的边缘。经过实验, 将这几种进行了对比, 结果如图 3 所示。这里采用桨毂部分作为例子, 因为这部分的检测结果比较清楚, 四种边缘检测方法都可以采集到比较清晰的边缘, 如果用桨叶或者是弹性连杆, 由于灰度的原因, 效果不是很理想。比较结果如下: Canny 算子法比较理想, 干扰较小。Canny 边缘检测是一种比较新的边缘检测算子, 具有很好的边缘检测性能。本文中主要用此算法来提取弹性连杆的边缘, 然后将提取出的近似直线的曲线的干扰项人为地去掉, 然后应用最小二乘法拟和成一条直线, 求出其斜率换算成角度, 即为所需的角度的。根据这些角度的变化, 和电机通道的电压同步对应起来, 即可找到对应关系。

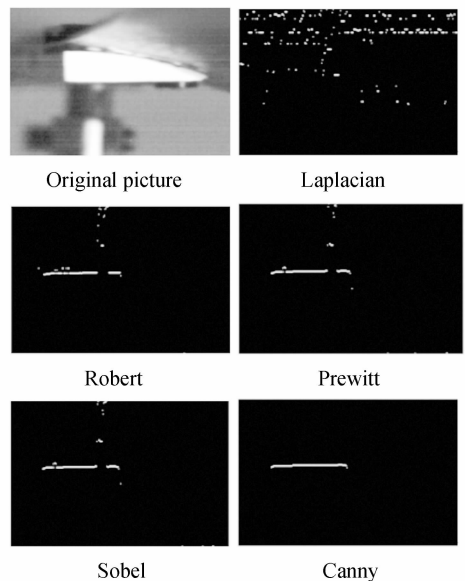


图 3 几种边缘检测算法比较

Fig. 3 Comparison of edge detecting arithmetics

通过大量实验可知, 不管是桨叶还是弹性连杆边缘的提取, Canny 算法都是可行的。

### 4.2 桨叶和弹性连杆图像的处理

拍摄到的照片须经过下面四个步骤进行处理:

步骤一: 边缘提取, 主要提取桨叶上的黑线和弹性连杆的右边缘—Canny 算子;

步骤二: 图片处理, 将有干扰的图片人为地去

掉—在画图板中进行处理;

步骤三:将像素点拟和成直线—最小二乘法;

经过处理的直线还必须经过直线拟和(最小二乘法)才能算出角度。最小二乘法:在科学实验的统计方法研究中,往往要从一组实验数据中寻找自变量  $x$  和因变量  $y$  之间的函数关系  $y = f(x)$ 。由于观测数据往往不够准确,因此并不要求  $y = f(x)$  经过所有的点,而只要在给定点上误差按照某种标准达到最小,通常采用欧式范数作为误差量度的标准。在 MATLAB 中实现最小二乘法拟和通常采用  $\text{polyfit}(x)$  函数进行。

步骤四:利用反正切函数算出角度— $\arctan(x)$  函数;

根据步骤三拟和出的直线斜率,利用反正切函数算出角度。

#### 4.2.1 桨叶边缘提取的结果

精度分析:由于桨叶的形状会使边缘的提取产生误差,不能反应桨距角的真实大小,所以必须将提取出的边缘进行人为处理。例如,不经过处理的桨距角为  $20.844^\circ$ ,处理过的角度为  $20.71^\circ$ ,差值为  $0.134^\circ$ ,相对误差为  $0.6\%$ (如图 4 所示)。



(a) 桨叶原图片 (b) 处理前 (c) 处理后  
(a) main rotor (b) before processing (c) after processing

图 4 桨叶图片干扰处理前后的对比

Fig. 4 Comparison of interference of main rotor before and after image processing

#### 4.2.2 弹性连杆变形角度的处理结果

说明:在步骤二的图片处理中,为了处理的方便,先将弹性连杆翻转了  $90^\circ$ ,然后在求角度时又翻转回  $90^\circ$ (如图 5 所示)。

精度分析:从上图可以还可以看出,除了提取出的直线外,还有干扰的像素,而且提取出的直线尾部存在一个很大的弯度,这是干扰,所以必须经过处理才能算出最后的角度。经计算,没有去掉干扰前的角度为  $81.264^\circ$ ,去掉干扰后的角度为  $84.783^\circ$ ,差值为  $3.519^\circ$ 。对于变化在  $5^\circ$  范围内

的角度来说,这个差值可以说误差相当大,所以必须经过人为去掉干扰相。



(a) 弹性杆原图片 (b) 处理前 (c) 处理后  
(a) connecting rod (b) before processing (c) after processing

图 5 弹性连杆干扰处理前后的对比

Fig. 5 Comparison of interference of connecting rod before and after image processing

## 5 实验结果及分析

### 5.1 桨距角分析

桨距角分析结果如图 6 所示:

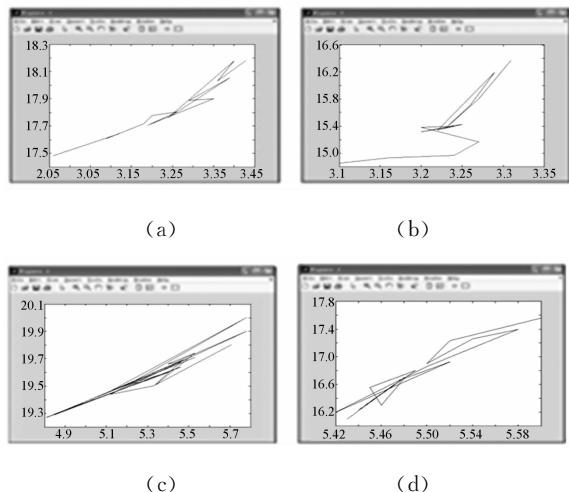


图 6 电机电压和桨距角的关系曲线

Fig. 6 Relationship between the motor voltage and the blade pitch

图 6(a)中,电压的变化为  $2.96 \sim 3.43 \text{ V}$ ,差值为  $0.47 \text{ V}$ ;桨距角变化为  $17.483 \sim 18.182^\circ$ ,差值为  $0.699^\circ$ 。

图 6(b)中,电压变化为  $3.10 \sim 3.31 \text{ V}$ ,差值为  $0.21 \text{ V}$ ;桨距角变化为  $14.852^\circ \sim 16.376^\circ$ ,差值为  $1.524^\circ$ 。

图 6(c)中,电压变化为  $5.3 \sim 5.46 \text{ V}$ ,差值为  $0.16 \text{ V}$ ;桨距角变化为  $19.269^\circ \sim 20.001^\circ$ ,差值为  $0.732^\circ$ 。

图 6d 中,电压变化为  $5.43 \sim 5.60 \text{ V}$ ,差值为

0.17 V; 桨距角变化为  $16.102^{\circ} \sim 17.562^{\circ}$ , 差值为  $1.46^{\circ}$ 。

从以上四图可以看出: 电压越大, 曲线的回折越是明显, 原因可能有两个:

(1) 电压的大小对桨距角的影响很大。电压越大, 飞机的稳定性越差, 振动现象越厉害, 所以会直接影响桨距角。

(2) 挥舞运动的影响。桨叶的运动是挥舞和变距倾斜运动的合运动, 挥舞运动会减小桨距角, 所以这两个运动的合运动表现出来的效果如图 6(a)、(b)、(c)、(d) 所示, 就是当电压越大时, 由于挥舞运动的作用, 总的角度有可能会减小。

但是总体趋势是不变的, 那就是电压越大角度也越大。

## 5.2 弹性连杆变形角度分析

分析图如图 7 所示。

图 7(a) 中, 电压变化为 2.96~3.45 V, 差值为 0.49 V; 变形角度变化为  $84.2 \sim 86.8^{\circ}$ , 角度差值为  $2.6^{\circ}$ , 基本处于稳定状态, 变形角度随着电压的增加而增大。

图 7(b) 中, 电压变化为 3.10~3.23 V, 差值为 0.13 V; 变形角度为  $99.1 \sim 100.16^{\circ}$ , 差值为  $1.06^{\circ}$ 。但是可以看出曲线有回折的现象, 原因可能为由于电压的加大, 飞机的抖动和振动变得很厉害, 这样就会影响角度的测量结果, 但是从整体来看, 角度随着电压的增大而增加。

图 7(c) 中, 电压变化为 5.31~5.71 V, 差值为 0.4 V; 变形角度变化为  $87 \sim 88.9^{\circ}$ , 角度差值为  $1.9^{\circ}$ 。

图 7(d), 电压变化为 5.43~5.60 V, 差值为 0.17 V; 变形角度变化为  $103.2 \sim 104.5^{\circ}$ , 角度差值为  $1.3^{\circ}$ 。

图 6 和图 7 说明了电压变化对角度的影响是一致的, 即电机从左到右加速的过程中, 无论是桨距角、弹性连杆变形量都是逐渐增加的。

## 参考文献:

- [1] 李智, 王向军. 微机电系统测试技术及方法[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(1): 37-42.  
LI ZH, WANG X J. MEMS measurement technologies and methods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1): 37-42. (in Chinese)
- [2] 蒋明, 杨福俊, 董萼良, 等. 基于高速摄像的双线性振动陀螺力学特性分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1): 121-126.

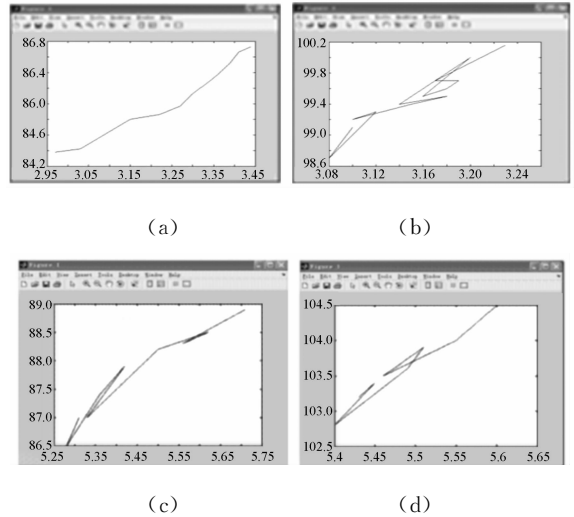


图 7 电机电压和弹性连杆变形角度之间的关系曲线

Fig. 7 Relationship between the motor voltage and the connecting rod

## 6 结 论

本文利用高速摄像的方法得到了两种角度: 电机电压和桨距角、弹性连杆变形角度之间的定性关系, 得出了以下结论:

(1) 利用高速摄像技术能够将飞机的动态飞行角度进行量化, 桨距角变化为  $15 \sim 20^{\circ}$ , 角度差值在  $2^{\circ}$  之内; 而弹性连杆角度为  $84 \sim 105^{\circ}$ , 角度差值在  $3^{\circ}$  之内。

(2) 利用高速摄像系统得到的连续图像, 可以研究桨距角和弹性连杆变形角度的动态过程, 得到了电机电压和角度之间的八组动态关系曲线, 为定量研究变距规律提供了很好的帮助。

(3) 从高速摄像系统的测量原理上讲, 该系统具有测量瞬间运动信息的能力。实验结论的八组数据可以证明这种方法的可行性。因此, 高速摄像技术是一种在科研和生产中记录高速变化物体运动状态的有效手段。

- JIANG M, YANG F J, DONG E L, *et al.*. Analysis of mechanical characteristics in the double linear vibratory gyroscope using high speed photography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):121-126. (in Chinese)
- [3] HUBERT S, TAKU K. Tracking the translational and rotational movement of the ball using high-speed camera movies[C]. Kowloon, Hong Kong SAR. HongKong: 2005:1084-1087.
- [4] SEKIKAWA J, KITAJIMA T. Observation of arc-emitted light between slowly opening electrical contacts using a high-speed camera[C]. Humamatsu, Japan, 2004:47-52.
- [5] SHIGEO M T. Dynamic micro aspects of facial movements in elicited and posed expressions using high-speed camera[C]. *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Japan, 2001:371-376..
- [6] 王德忠,黄震,童澄教,等. CCD摄像机在瞬变喷雾可视化中的应用[J]. *激光技术*, 1999,23(5):292-295.  
WANG D ZH, HUANG ZH, TONG CH J, *et al.*. Visualization of transient spray by means of CCD video camera [J]. *Laser Technol.*, 1998,23(5):292-295. (in Chinese)
- [7] 王军波,孙振国,陈强,等. 高速 CCD 摄像机驱动时序发生器的设计及基于 CPLD 技术的实现[J]. *光学技术*, 2002, 28(2):132-134.  
WANG J B, SUN ZH G, CHEN Q, *et al.*. Design on driving schedule generator for high-speed CCD camera driving and its achievement based on CPLD technology[J]. *Opt. Tech.*, 2002, 28(2):132-134. (in Chinese)
- [8] 孙振东,李向荣. 浅谈实车碰撞试验中的高速摄像[J]. *汽车技术*. 2002,1:46-48.  
SUN ZH D, LI X R. The application of high-speed camera in collision of cars[J]. *Auto Technol.*, 2002,1:46-48. (in Chinese)
- [9] 郭海云,李桓,陈育浩,等. 高速摄像技术在弹道碎石器探头运动参数测量中的应用[J]. *中国医疗器械杂志*. 2004, 28(6): 403-405.  
GUO H Y, LI H, CHEN Y H, *et al.*. The application of high-speed camera technique in movement parameter measurement of the pneumatic lithotrities[J]. *Chin. J. Med. Instrum.*, 2004,28(6):403-405. (in Chinese)
- [10] 王向军,韩双来. 弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析[J]. *光学精密工程*, 2005,13(6):686-690.  
WANG X J, HAN SH L. A high speed camera calibration method in coordinate measurement of bomb-fall and its precision analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(6):686-690. (in Chinese)

作者简介:谢少荣(1972—),女,湖北天门人,博士,副教授,主要研究方向为计算机视觉和智能控制等。E-mail: srxie@263.net

周焱(1980—)女,内蒙古通辽人,硕士研究生,主要从事微型飞行器研究。E-mail: zhouyan326@163.com