

一种基于视觉的飞行器接近角估计方法*

祝海江, 吴福朝⁺, 胡占义

(模式识别国家重点实验室(中国科学院 自动化研究所),北京 100080)

A Vision Based Method for Aircraft Approach Angle Estimation

ZHU Hai-Jiang, WU Fu-Chao⁺, HU Zhan-Yi

(National Laboratory of Pattern Recognition (Institute of Automation, The Chinese Academy of Sciences), Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-82614521, Fax: +86-10-62551993, E-mail: fcwu@nlpr.ia.ac.cn, http://www.ia.ac.cn

Zhu HJ, Wu FC, Hu ZY. A vision based method for aircraft approach angle estimation. Journal of Software, 2006,17(5):959-967. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/959.htm>

Abstract: An algorithm for estimating aircraft approach angle using computer vision is proposed in this paper. During the landing of an aircraft, the descent of the aircraft may be approximately considered as a pure translation motion. In this case the epipole has the same coordinates in all images and is called the Focus-of-Expansion (FOE), and the vanishing line of the ground plane is termed the Horizon. Furthermore, how the Focus-of-Expansion and the Horizon are extracted from a few calibrated sequential images is first introduced, then the aircraft approach angle is derived from these parameters. Simulated and real experiments validate this algorithm.

Key words: aircraft approach angle; FOE (focus-of-expansion); horizon

摘要: 提出了一种基于图像序列的飞行器接近角的估计方法. 飞行器的接近角对于飞行器的着陆来说是一个非常重要的参数,是指飞行器在着陆时的飞行轨迹与地平面之间的夹角. 飞行器在着陆时近似作平移运动,在这种情况下,图像上的极点称作 FOE(focus-of-expansion),地平面的消失线被称作 Horizon. 首先给出了从已标定的图像序列中提取 FOE 和 Horizon 的方法,然后由这两个参数估计出飞行器的接近角. 模拟实验和真实图像实验表明该方法是可行的.

关键词: 飞行器接近角;FOE(focus-of-expansion);horizon

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

在过去的 20 多年中,无人驾驶飞机(unmanned aerial vehicle,简称 UAV)在许多领域获得了广泛的应用,如可应用于气象监测、人工降雨、大地测量、海岸巡逻、森林防火、交通管理等多个领域.许多研究人员对无人驾驶飞机进行了系统的研究^[1,2].近些年来,无人驾驶飞机在着陆时位置的估计逐渐成为一个研究热点^[3-10].早期的无人驾驶飞机通常是依靠飞机上的 GPS(global positioning system)和 INS(inertial navigation system)来定位和导航的.然而,随着计算机技术的迅速发展,计算机视觉在无人驾驶飞机着陆时的应用已经得到广泛关注,有许多学者提出了仅仅应用视觉来估计无人驾驶飞机的位置和运动^[5-10]的观点.与基于 GPS 的定位方法相比,基于视

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60075004, 60275009 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2002AA422230 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2004-07-02; Accepted 2005-10-20

觉的方法仅仅依赖于飞机上安装的摄像机,费用较低.

飞行器的接近角是指飞行器在着陆时近似作平移运动的飞行轨迹与地平面之间的夹角.飞行器的接近角对于飞行器的着陆是一个非常重要的参数.通常情况下,飞行员通过与机场地面控制人员的联系,从地面信号获得着陆时需要的接近角.然而,当无人驾驶飞机在野外执行任务时,就难以从地面信号获得着陆时所需要的接近角.为了自动地获得无人驾驶飞机着陆时的信息,文献[6]提出了一种基于视觉的飞行器着陆接近角的估计方法.该文献认为,在摄像机预先标定的情况下,估计接近角需要提取 3 个参数:飞行器着陆时的近似平移运动方向在图像平面上的图像点、地平面在图像平面上的消失线以及图像平面的主点(principal point).在此基础上,本文给出了一种基于图像序列的飞行器着陆的接近角的估计方法.

在本文中,我们研究仅仅应用计算机视觉的相关知识来估计飞行器着陆时的接近角.假设摄像机已经标定,飞行器上的摄像机在不同时刻对地平面拍摄一组图像,根据地平面上的特征点在图像上的像点可以计算出图像间的单应矩阵,若对单应矩阵进行特征值分解可以提取出摄像机平移运动方向的图像点和地平面在图像上的消失线,从而可以估计出飞行器的接近角.

1 接近角的估计

1.1 接近角的几何解释

我们首先考察飞行器的着陆过程.飞行器在着陆过程中是逐渐下降的,当飞行器下降到某一高度时,摄像机的运动可以近似为纯平移运动,通过飞行器上的摄像机可以获得地平面的一幅图像,依此类推,摄像机可以获得地平面的多幅图像.在纯平移运动中,所有图像上的极点(epipole)都是一个固定的点(即在所有图像上的极点有相同的坐标),此时的极点通常被称作 FOE(focus-of-expansion).如果在摄像机坐标系中,坐标原点设置在摄像机的光心,则摄像机的主轴(principal axis,或称光轴)是一条通过摄像机的光心并且与图像平面垂直的直线.主轴与图像平面的交点被称作主点,也被称作 FOVC(field of view center).地平面的消失线是地平面在图像平面上的投影,这条消失线在文中被称作 Horizon.

图 1 是飞行器着陆时,飞行器上摄像机的运动模拟示意图.在图 1 中,虚线 P_0P_n 表示摄像机的近似平移运动轨迹,它的延长线与图像平面相交于 FOE 点,与地平面相交于 W 点;虚线 P_nV 表示地平面的法线,它与图像平面和地平面分别相交于 VP 点和 V 点,点 VP 是地平面的法线在图像平面上的投影点(也称作法线的消失点);点 P_0, P_1, \dots, P_n 分别表示飞行器在时刻 t_0, t_1, \dots, t_n 摄像机的光心所在的位置;点 FOVC 表示图像平面的主点.图中角 α 表示飞行器的接近角.

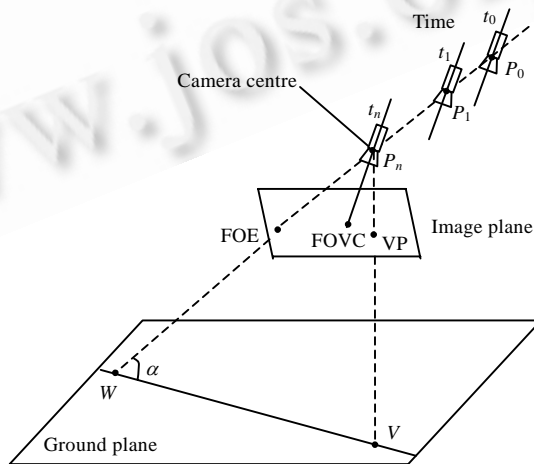


Fig.1 Geometry of the aircraft approach angle

图 1 飞行器接近角的几何示意图

1.2 计算接近角

飞行器接近角的详细示意图如图 2 所示.在图 2 中, P_n 是摄像机的光心;Horizon 是地平面的消失线;FOE 是摄像机平移运动的方向在图像平面上的投影点;VP 是地平面的法线的消失点.由简单的三角几何学可知,接近角 α 与角 β 是互为余角的关系,而角 β 可以看成是摄像机平移运动的方向和地平面的法线方向的夹角.由文献[11]可知,在摄像机内参数已知的情况下,角 β 可以由 FOE 和 VP 计算出来.

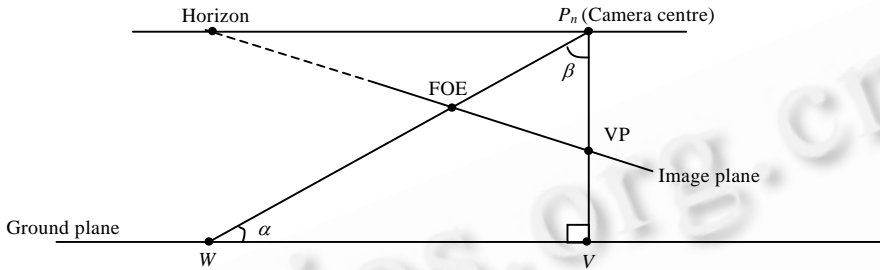


Fig.2 Measurement of the approach angle α

图 2 接近角 α 的测量

如果摄像机内参数矩阵为 K ,则绝对二次曲线在图像平面上的像为 $w=K^{-T}K^{-1}$,若 FOE 和 VP 分别用三维齐次向量 e 和 v 表示,则角 β 可以由下面的公式计算出来

$$\cos(\beta) = \frac{e^T (K^{-T} K^{-1}) v}{\sqrt{e^T (K^{-T} K^{-1}) e} \sqrt{v^T (K^{-T} K^{-1}) v}} = \frac{e^T \cdot w \cdot v}{\sqrt{e^T \cdot w \cdot e} \sqrt{v^T \cdot w \cdot v}} \quad (1)$$

计算出 $\angle\beta$ 之后,接近角 α 也就确定了.

2 估计图像点 FOE 和 VP

本节我们将提取估计飞行器的接近角所需要的参数.假设摄像机模型是针孔模型,而摄像机标定方法采用张正友的基于平面模板的方法^[12].

如图 2 所示,点 FOE 是摄像机的平移运动方向在图像平面上的像点,点 VP 是地平面的法线方向在图像平面上的像点.若已知 FOE 和 VP,则可以由式(1)计算出接近角.文献[13,14]提出了从多幅图像提取 FOE 的方法.下面,我们介绍一种基于单应矩阵的估计 FOE 和 VP 的方法.

假如三维点 X 是地平面上任意一点,它在第 1 幅图像上的像点是 x ,在第 2 幅图像上的像点是 x' ,则这两个图像点之间有如下关系: $sx'=Hx$,其中, H 为两幅图像间的单应矩阵,它是一个 3×3 的矩阵; s 是非零常数因子.

如果令两个图像点在图像平面上的坐标分别为 $x=[u,v,1]^T$ 和 $x'_i=[u',v',1]^T$,单应矩阵 H 为

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}, \text{ 则有}$$

$$s \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} u \cdot h_{11} + v \cdot h_{12} + h_{13} - uu' \cdot h_{31} - vv' \cdot h_{32} - u' \cdot h_{33} = 0 \\ u \cdot h_{21} + v \cdot h_{22} + h_{23} - uv' \cdot h_{31} - vv' \cdot h_{32} - v' \cdot h_{33} = 0 \end{cases}$$

因此,每一对图像点可以提供两个关于单应矩阵 H 中未知元素的 2 个线性约束.若两幅图像之间有 n 对对应点,即 $x_i \leftrightarrow x'_i (i=1,2,\dots,n)$,则有

$$A \cdot h = 0 \quad (2)$$

其中:

$$h = [h_{11} \quad h_{12} \quad h_{13} \quad h_{21} \quad h_{22} \quad h_{23} \quad h_{31} \quad h_{32} \quad h_{33}]^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 u'_1 & -v_1 u'_1 & -u'_1 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -u_1 v'_1 & -v_1 v'_1 & -v'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n & v_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_n u'_n & -v_n u'_n & -u'_n \\ 0 & 0 & 0 & u_n & v_n & 1 & -u_n v'_n & -v_n v'_n & -v'_n \end{bmatrix}$$

通过对矩阵 A 作奇异值分解,可以求解出单应矩阵 H .一般来说,在相差一个常数因子的意义下,由 4 对对应点可以唯一计算出两幅图像之间的单应矩阵 H .为了避免求解的图像之间的单应矩阵出现退化情况,要求 4 个空间点所在的平面不能通过摄像机光心,并且空间 4 个点中任意 3 个点不共线^[11].

由上面所述可知,由作平移运动的摄像机对地平面拍摄的两幅图像可以求出地平线在两幅图像之间诱导的单应矩阵 H .这个单应矩阵有一个不动的点和一条不动的直线^[15],如图 3 中的点 u_1 和直线 l .实际上,不动点 u_1 是摄像机作平移运动的方向在图像平面上的投影点,它在所有图像平面上具有相同的坐标;而不动直线 l 是地平面在所有图像平面上的消失线.

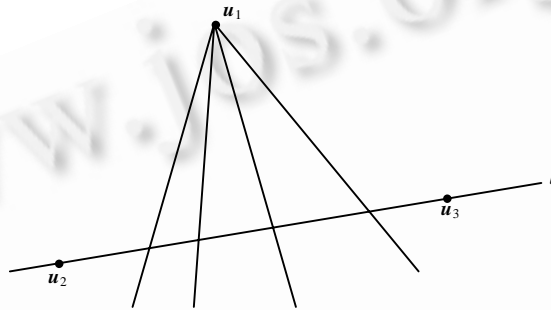


Fig.3 Geometry of Homography H
图 3 单应矩阵 H 的几何示意图

若对 H 进行特征值分解可得 $H \cdot U = U \cdot V$,其中: $U = [u_1 \ u_2 \ u_3]$ (u_i 是矩阵 U 的第 i 列向量); V 是一个 3×3 的对角矩阵,即

$$V = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$$

其中, $\lambda_i (i=1,2,3)$ 是单应矩阵 H 的特征值,并且有两个特征值相等.若令特征值 $\lambda_2 = \lambda_3$,则特征值 λ_1 对应的特征向量 u_1 就是我们所要估计的 FOE;特征值 λ_2, λ_3 所对应的特征向量 u_2 和 u_3 组成的直线 l 就是地平面在图像平面上的消失线 Horizon.

由文献[15]可知,如果空间中一条直线和一个平面是正交的,则这条直线和平面在图像上对应的消失点和消失线关于绝对二次曲线的像 w 是共轭的.即假如消失线和消失点分别为 l_p 和 v_p ,则它们之间的关系为

$$l_p = w \cdot v_p \tag{3}$$

因此,在估计出地平面的消失线 Horizon 之后,根据公式(3)可以估计出图像点 VP 来.

讨论:本文的方法在估计单应矩阵时,仅仅要求地平面上 4 个特征点中的任意 3 个点不在一条直线上,并且不需要已知 4 个特征点之间的相互位置.然而,当地平面上 4 个特征点之间的距离已知时,利用基于共面 P4P 方法^[16]是否也可以提取出图像点 FOE 和 VP 呢?

由于空间 4 点共面,我们可以将地平面 π 定义为世界坐标系中 $Z=0$ 的平面,则根据地平面与图像平面之间的 4 对对应点,可以求出地平面与图像平面之间的单应矩阵 H_{π} ,且 $H_{\pi} = K[r_1, r_2, t]$,其中: K 为摄像机内参数矩阵; r_1, r_2 为世界坐标系到摄像机坐标系间旋转矩阵 R 的前两列向量; t 为平移向量.在摄像机已经标定的情况下,我们可以从 H_{π} 很方便地求解出旋转矩阵 R 和平移向量 t .

若令 R_1, R_2 和 t_1, t_2 分别是第 1 幅图像及第 2 幅图像与地平面间的旋转矩阵和平移向量,则我们可以求出图

像平面上的极点:

$$e_1 = K(R_2 R_1^{-1})^T (t_2 - R_2 R_1^{-1} t_1), \quad e_2 = K(t_2 - R_2 R_1^{-1} t_1).$$

由于两幅图像是由摄像机经过平移运动得到,因而旋转矩阵 R_1 和 R_2 是相同的,从而我们可以得到图像极点 $e_1 = e_2 = K(t_2 - t_1)$, 这就是我们所要提取的图像点 FOE. 另外,根据地平面与两幅图像间的单应矩阵可以很方便地求取图像点 VP.

3 算法概述

综上所述,可以得到基于图像序列的飞行器接近角的估计算法.

- (1) 标定摄像机,如张正友基于平面模板的简易标定方法^[12];
- (2) 根据地平面上的特征点在图像平面上的图像点间的对应,由公式(2)计算出图像间的单应矩阵 H ;
- (3) 对单应矩阵进行特征值分解,计算出图像的极点 FOE 和地平面的消失线 Horizon;然后,根据公式(3)计算出地平面的法线方向的消失点 VP;
- (4) 最后,由第 1.2 节中的公式(1)计算出飞行器的接近角.

4 实验

4.1 模拟实验

在模拟实验中,模拟的摄像机内参数为 $f_u=1200, f_v=1000, s=0, u_0=320, v_0=240$.

(1) 不同噪声水平下的模拟实验

在该实验中,我们选择 4 个特征点分别为 A, B, C, D , 令这 4 个点所在的平面在世界坐标系中的坐标为 $Z=0$, 且这 4 个点的坐标分别为 $X_A=[10, 10, 0]^T, X_B=[40, 10, 0]^T, X_C=[50, 20, 0]^T, X_D=[20, 30, 0]^T$. 世界坐标系和摄像机之间的旋转轴方向设定为 $r=(0.8568, -0.3549, 0.3740)^T$, 旋转角 $\theta=0.5325\pi$ (由 r 和 θ 可求解出世界坐标系和摄像机坐标系之间的旋转矩阵 R). 摄像机平移运动方向和选择的平面所构成的接近角模拟真实值为 $\alpha \in [15^\circ, 75^\circ], |\Delta\alpha|=10^\circ, r=z/\tan(\alpha), z=200$. 第 1 个摄像机的光心坐标和平移向量分别为 $C_1=(0.707r, 0.707r, z)^T$ 和 $t_1=-R \cdot C_1$; 第 2 个摄像机的光心坐标和平移向量分别为 $C_2=(0.471r, 0.471r, 0.667z)^T$ 和 $t_2=-R \cdot C_2$. 根据上面的数据生成模拟图像,图像的大小为 600×600 像素.并在图像点分别加上均值为 0, 方差为 $\sigma(0-2.0)$ 的高斯噪声.于是,根据文中描述的方法提取出图像点 FOE 和 VP,并计算出接近角.对于每一个模拟的接近角真实值,我们在每一种噪声水平下进行了 100 次独立实验,本文的方法和基于共面 P4P 方法估计出的接近角均值如图 4(a)和图 4(b)所示.另外,我们计算了接近角的 RMS(root mean square)误差,图 5(a)和图 5(b)分别表示本文的方法与基于共面 P4P 方法估计的接近角在不同噪声水平下的 RMS 误差.从模拟实验结果来看,应用本文方法得到的接近角的均值更接近于模拟的真实值;估计的接近角的 RMS 误差基本上都随噪声增大而呈线性增大,但本文方法估计的接近角的 RMS 误差比基于共面 P4P 方法还要小一些.

(2) 不同图像数目对接近角估计结果的影响

这个模拟实验的目的是测试图像数目对接近角的估计结果的影响.该实验中,我们选择不同的摄像机光心和平移向量模拟生成 6 幅图像.我们分别采用 2, 3, ..., 6 幅图像来估计接近角.对每个图像数目,我们均进行了 100 次独立实验,每次实验所加的图像点噪声是均值为 0, 方差为 0.5 的高斯噪声.估计接近角的方法采用本文的方法.模拟实验结果如图 6 所示,其中,图 6(a)和图 6(b)分别是模拟接近角真实值为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时,在不同图像数目下的均值及 RMS 误差.从图中可以看出,随着图像数目的增加,接近角的估计值更接近模拟真实值,接近角估计值的 RMS 误差也呈降低的趋势.

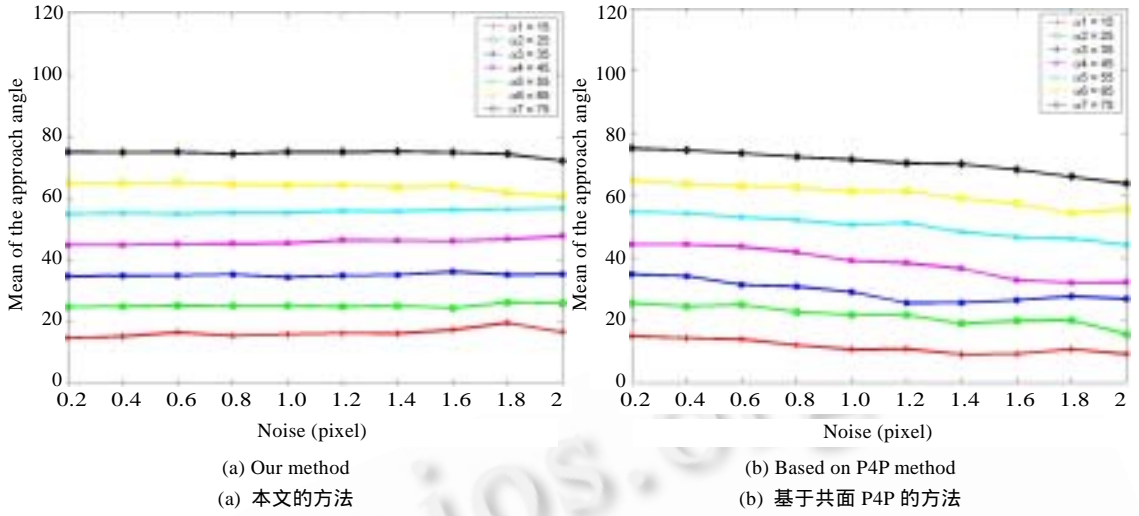


Fig.4 The averages of the estimated approach angle under different noise levels

图 4 在不同噪声水平下的估计接近角的均值

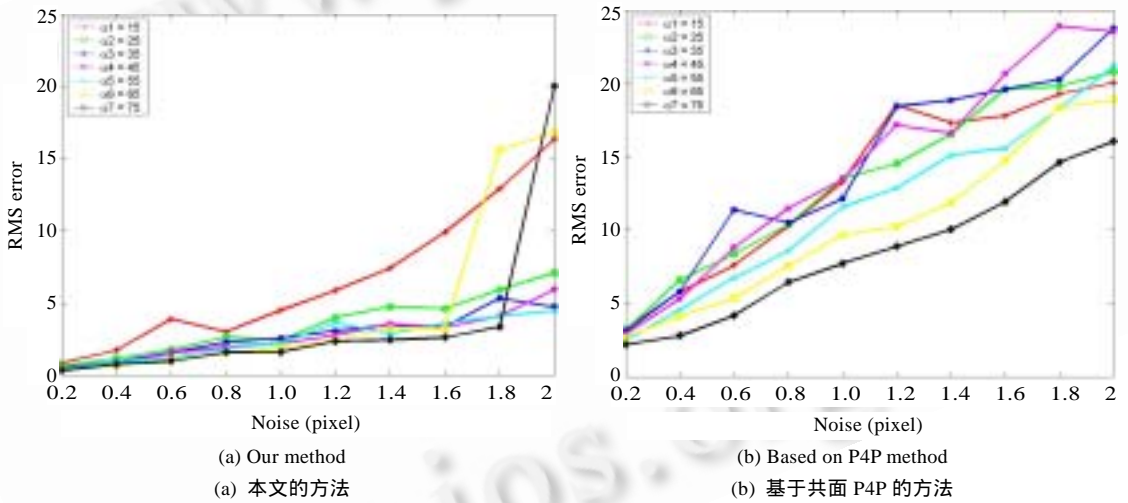


Fig.5 The RMS errors of the estimated approach angle under different noise levels

图 5 在不同噪声水平下的估计接近角的 RMS 误差

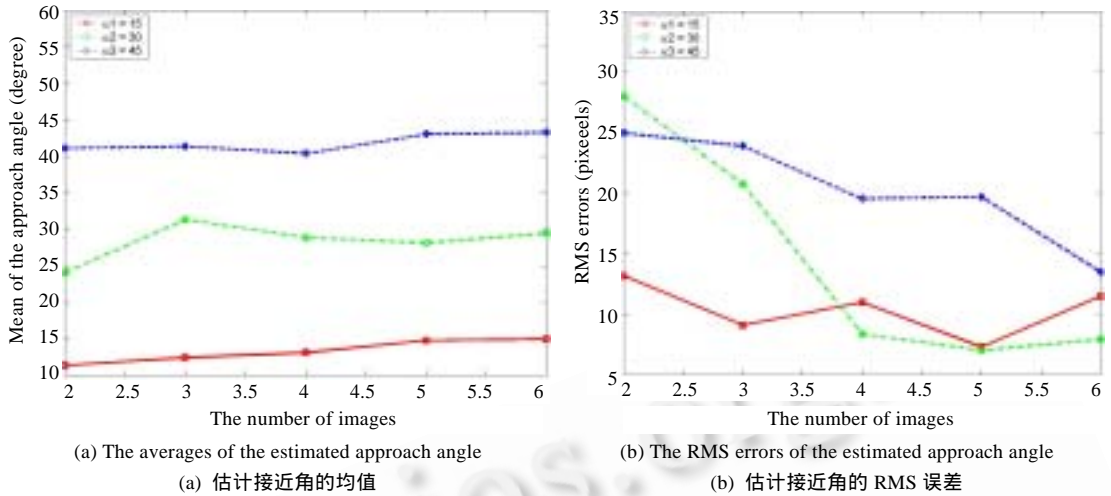


Fig.6 The averages and the RMS errors of the estimated approach angle under different number of images
图 6 在不同图像数目下的估计接近角的均值与 RMS 误差

4.2 真实图像实验

在实验室中,我们将电动位移台倾斜放置在桌面上,并将摄像机固定在电动位移台上,通过调节旋钮可以使摄像机从电动位移台的顶端平移至底端,这个过程模拟了着陆时飞行器上摄像机的运动.摄像机平移运动的方向与地平面的夹角可以通过测量得到.这个角被看作接近角的真实值.

我们对实验室内场景分别拍摄了两组图像,其中,图 7 为第 1 组图像序列中的 6 幅图像,摄像机的平移方向与地平面所构成的接近角真实值约为 15° ;图 8 为第 2 组图像序列中的 6 幅图像,此时的接近角真实值约为 35° .我们先根据张正友方法^[12]标定好摄像机,利用 Canny 算子提取出图像的边沿,并估计出实验室地平面上 4 个小球的图像坐标(如图中白色点所示);再根据本文的方法提取出图像的极点 FOE 和地面的消失线 Horizon,最后估计出的接近角.在实验中,我们由第 1 组图像估计的接近角为 15.37° ,由第 2 组图像估计的接近角为 35.81° .从实验结果来看,应用本文的方法估计的接近角都比较接近真实值.



Fig.7 The 1st image sequence of the lab. scene
图 7 实验室场景图像序列 1



Fig.8 The 2nd image sequence of the lab. scene

图 8 实验室场景图像序列 2

此外,为了进一步验证本文方法的可行性,我们通过调整电动位移台的倾斜角度,使得摄像机的平移方向与墙面所构成的接近角真实值近似为 72.6° ,摄像机对实验室室内的墙面拍摄了一组图像,其中的 3 幅如图 9 所示(图中白色点为提取的特征点).在标定好摄像机之后,应用本文的方法从图像序列中提取 FOE 和消失线 Horizon;估计出的接近角为 72.49° .真实图像实验结果说明该方法是正确而有效的.在实验中我们发现,提取特征点以及单应矩阵的计算精度对接近角的估计是非常关键的.



Fig.9 The 3rd image sequence of the lab. scene

图 9 实验室场景图像序列 3

5 结束语

在本文中,我们提出了一种基于多幅图像估计飞行器着陆时接近角的方法.在该方法中,必须从摄像机经过平移运动得到的图像序列中提取出极点以及地平面在图像平面上的消失线.当然,由于设备的限制,我们不能对无人驾驶飞机上的摄像机拍摄的图像进行实验.本文仅对实验室模拟飞行器着陆时获得的图像进行了实验.真实实验结果说明了本文方法的可行性.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室机器人视觉组的同学表示感谢.

References:

- [1] Suter D, Hamel T, Mahony R. Visual servoing based on homography estimation for the stabilization of an x4-flyer. In: Proc. of the 41st IEEE Conf. on Decision and Control, Vol.3. 2002. 2872-2877. http://www.ds.eng.monash.edu.au/suter_publications/cdc.ps

- [2] Beard RW, McLain TW, Goodrich MA, Anderson EP. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 2002,18(6):911–922.
- [3] Sim DG, Park RH, Kim RC, Lee SU, Kim IC. Integrated position estimation using aerial image sequences. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002,24(1):1–18.
- [4] Werner S, Fürst S, Dickmanns D, Dickmanns ED. A vision based navigation system for autonomous aircraft. 1998. http://www.unibw-muenchen.de/campus/LRT/LRT13/deutsch/artikel/fued_ias98.pdf
- [5] Beets E, Boukir S, Suter D. Aircraft pose estimation from Homography. 2004. <http://www.ds.eng.monash.edu.au/techrep/reports/2004/MECSE-1-2004.pdf>
- [6] Tung D, Suter D, Bab-Hadiashar A. Aircraft approach angle estimation: Vision based landing. 2003. <http://www.ds.eng.monash.edu.au/techrep/reports/2003/MECSE-28-2003.pdf>
- [7] Shakerniat O, Ma Y, Koo TJ, Hespanha J, Sastry SS. Vision guided landing of an unmanned air vehicle. In: Proc. of the 38th Conf. on Decision and Control, Vol.1.1999. 1–6. <http://citeseer.ist.psu.edu/235491.html>
- [8] Shakernia O, Sharp CS, Vidal R, Shim DH, Ma Y, Sastry S. Multiple view motion estimation and control for landing an unmanned aerial. In: Proc. of the Int'l Conf. on Robotics and Automation, Vol.1. 2002. 2793–2798. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~omids/papers/icra02.pdf>
- [9] Sharp CS, Shakernia O, Sastry SS. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle. In: Proc. of the Int'l Conf. on Robotics and Automation, Vol.1. 2001. 1720–1727. <http://citeseer.ist.psu.edu/653634.html>
- [10] Saripalli S, Montgomery JF, Sukhatme GS. Vision-Based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, Vol.2. 2002. 2799–2804. http://cres.usc.edu/pubdb_html/files_upload/334.pdf
- [11] Fishler MA, Bolles RC. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, 1981,24(6):381–395.
- [12] Zhang ZY. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000,22(11):1330–1334.
- [13] Negahdaripour S, Horn BKP. A direct method for locating the focus of expansion. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1989,46(3):303–326.
- [14] Chen ZZ, Pears N, McDermid J, Heseltine T. Epipole estimation under pure camera translation. In: Sun C, Talbot H, Ourselin S, Adriaansen T, eds. Proc. of the 7th Digital Image Computing: Techniques and Applications. Collingwood: CSIRO Publishing, 2003. 849–858.
- [15] Hartley RI, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 71–76.
- [16] Hu ZY, Lei C, Wu FC. A short note on P4P problem. ACTA AUTOMATICA SINICA, 2001,27(6):770–775 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [16] 胡占义,雷成,吴福朝.关于 P4P 问题的一点讨论.自动化学报,2001,27(6):770–775.



祝海江(1971 -),男,江西樟树人,博士,主要研究领域为计算机视觉,三维重建.



胡占义(1961—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机视觉,Hough变换,基于视觉的质量监控.



吴福朝(1957 -),男,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机视觉,人工智能.