

无人机视觉着陆位姿参数估计方法

张小正, 周鑫, 陈丽娟, 袁锁中
(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 视觉导航方法是无人机自主着陆领域的一种有效的方法。设计了一种由一个圆环和一个三基色圆构成的地标,并基于该地标给出无人机位姿估计的研究方法。该方法首先利用图像外部的圆环来确定目标区域,然后根据内部的三基色圆及不同颜色区域的交界线估计飞机与着陆平台的姿态参量和相对位置。在不同高度位置展开实验验证,实验数据表明,该方法能精确解算出无人机与着陆区域的相对位姿参量,达到了无人机在下降过程中实时性的要求。

关键词: 视觉导航; 无人机; 人工地标; 位姿估计

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)05-0026-04

Position and Pose Estimation for UAVs in Visual Landing

ZHANG Xiao-zheng, ZHOU Xin, CHEN Li-juan, YUAN Suo-zhong

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Visual navigation method is an effective method for the autonomous landing of Unmanned Aerial Vehicle (UAV). This paper designs a landmark that consists of a ring and a circle made up of three primary colours, and a method for estimating the pose and position of UAVs based on the landmark is presented. The method first determines the target area through the detection of the outer ring, and then estimates the position and attitude parameters of the UAV relative to the platform according to the boundary lines of the internal tricolor circle and different color regions. Simulation experiments are conducted to the UAV at different heights. The results clearly show that the method can accurately determine the position and pose parameters of UAV relative to the landing pad, and can meet the requirement of real-time position and pose parameters measurement when UAV is landing.

Key words: visual navigation; UAV; artificial landmark; position and pose estimation

0 引言

无人机由于其执行能力强、成本低却效率高等优点广泛应用于环境监测、灾情监测、道路交通监控等越来越多的民事领域,当然,由于其自身无人驾驶的安全性,无人机在现代战场上的作用也日益突出^[1]。无人机着陆在无人机飞行过程中占有极其重要的地位,因而要求非常高的可靠性和控制精度。经过研究人员长期的钻研,到目前为止,惯导系统(INS)^[2]、GPS导航^[3]、视觉导航系统^[4-5]和以INS为主体的组合导航系统^[6]已经成

为了几种比较主流的导航技术。

视觉导航方法就是利用机载摄像机采集着陆目标的图像序列,并进行分析和处理,从而估计无人机相对目标平台点的位姿信息,再根据这些信息利用飞控计算机系统来引导无人机自主着陆。该方法实施简单,且基本不受电子干扰,能达到很高的精度,因此越来越受到研究人员的青睐。目前基于视觉信息进行位姿研究的方法大概有3种^[7]:1)位姿参数通过提取采集到的图像中人工地标特征的像面参数并利用投影的关系求出;2)通过建立几何关系并结合机载设备获取到的信息求得;3)位姿参数通过匹配当前模式与预定义模式求解,这里的当前模式由从图像中提取的特征量构成。目前,国外专门研究无人机视觉导航技术的机构有美国南加州大学^[8]、加州大学伯克利分校^[9-11]等,国内研究机构^[12-15]也有很多,并取得不错的研究成果。

基于人工地标完成无人机的自主着陆是视觉导航

收稿日期:2016-05-09

修回日期:2017-03-07

基金项目:国家自然科学基金(61273050,61573185);航空科学基金(20121352026)

作者简介:张小正(1992—),女,浙江衢州人,硕士,研究方向为模式识别与智能系统。

领域的重点及难点所在,原因是提取人工地标的过程极其复杂、计算量大,难以满足无人机着陆的实时性要求,因此,人工地标的的设计必须简单而且其特征易于提取。针对这个难题,本文设计了以简单的同心圆构成的人工地标,并采用方法1)进行无人机的位姿参量估计。

1 新型人工地标的的设计

为实现基于视觉的无人机位姿参数估计研究,本文设计了新型人工地标,如图1所示。

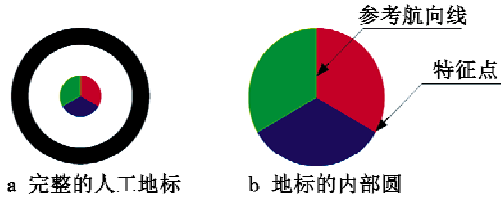


图1 人工地标图

Fig.1 Artificial landmark

如图1a所示,该地标的背景为白色,边缘是圆环,内部是由红、绿、蓝组成的三基色圆,且3个颜色区域均匀分割整个圆周。同心圆的作用是确定目标区域,彩色信息则是用来判断目标的真伪,而飞机与平台相对位姿参量则由内部的圆来估计。图1b所示为把3个颜色不同区域的交界线定义为参考航向线,用来确定无人机的航向角。参考航向线与圆的交点为特征点,用于消除利用圆的信息进行定位时存在的二义性。

在真正的飞行过程中,目标被部分遮挡的情况很难避免,图2所示为目标被部分遮挡的情况。

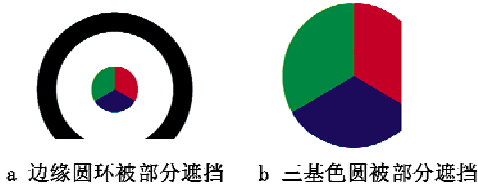


图2 目标被部分遮挡

Fig.2 Partial occlusion of the landmark

图2a所示,内部三基色圆完好,但目标区域仍可以由半圆环来确定;图2b所示,仍然可以确定出参考航向线和2个特征点。因此,即便存在图2a和图2b中人工地标被部分遮挡的情况,仍然可以确定出无人机的位姿参数。

2 人工地标检测与跟踪

在图像信息的采集过程中,各方面因素的影响势必会带来一定的噪声,从而影响检测精度。为了提高最后无人机位姿估计的精度,有必要对采集到的目标图片进行前期处理。前期处理可分为3个部分:1)图像预处理,包括图像灰度化、图像分割、滤波去噪等;2)

边缘检测,常用的算子有拉普拉斯算子、LOG算子等;3)轮廓提取,在已经被边缘化处理的图片上进行各个区域的轮廓线提取,轮廓提取的方法可以采用链码的方法进行操作。统计出每条轮廓线上点的数目,与设定的检测阈值相比较,如果小于阈值,就认为该轮廓是噪声并去除。

2.1 人工地标检测

利用1节中提出的新型地标中外围的圆环来确定降落区域。根据数学知识可知,椭圆的数学方程可以用来描述圆在图像上的成像。另外,如果2个圆是同心圆,那么它们的中心位置在图像上的位置很接近。由此,可以分析提取图像的轮廓线,找出轮廓线是椭圆区域的圆心位置并计算2个椭圆的圆心之间的距离。若2个圆心之间的距离小于给定的检测阈值,就认为这2个椭圆是地标中外圆环的成像,着陆区域就是椭圆所围的区域。

检测椭圆的方法有很多,本文采用的是最小二乘法。椭圆曲线的一般表达式为 $x^2 + gxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$ 。其中, $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N$,可以用来描述所有轮廓线上的点在图像上的坐标大小。椭圆方程中的未知参数为

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} x_i^2 y_i^2 & x_i y_i^3 & x_i^2 y_i & x_i y_i^2 & x_i y_i \\ x_i y_i^3 & y_i^4 & x_i y_i^2 & y_i^3 & y_i^2 \\ y_i^4 & x_i y_i^2 & x_i^2 & x_i y_i & x_i \\ x_i y_i^2 & y_i^3 & x_i y_i & y_i^2 & y_i \\ x_i y_i & y_i^2 & x_i & y_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} \\ \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} -x_i^3 y_i \\ -x_i^2 y_i^2 \\ -x_i^3 \\ -x_i^2 y_i \\ -x_i^2 \end{bmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} \quad (1)$$

接着,解算出椭圆的圆心坐标 (x_c, y_c) , 长短半轴 a, b 以及旋转角度 θ 这5个参数,即

$$\begin{cases} x_c = \frac{-2cd + ge}{4c - g^2} \\ y_c = \frac{-2x_c + d}{g} \\ \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{1-c}{g}\right) \\ a = \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{m_1 + m_2}} \\ b = \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{-m_1 \tan^2 \theta + m_2}} \\ m_0 = (x_c^2 + cy_c^2 + gx_c y_c - f) \cos^2 \theta \\ m_1 = g / (2 \tan \theta \cdot m_0) \\ m_2 = c / m \end{cases} \quad (2)$$

再计算椭圆的拟合均方差,即

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/a & 0 \\ 0 & 1/b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_c \\ y_i - y_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

边缘点坐标设为 (x_i, y_i) ,根据式(3)转换到标准圆上, (x'_i, y'_i) 为相应标准圆上的坐标。

$$e_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\sqrt{(x'_i)^2 + (y'_i)^2} - 1]^2 \quad (4)$$

式中, e_1 为拟合均方差,如果 e_1 小于给定的阈值,就认为当前的边缘为相对应的椭圆。

2.2 人工地标的鉴别与跟踪

受周围复杂多变环境的影响,在检测时极有可能将其他圆环类似物错判断为人工地标,因此,为了提高准确性,检测出目标还远远不够,还需要鉴别目标的真伪,以防系统错把伪目标区域当成真目标区域来跟踪。红色与蓝色在无人机着陆的空旷地带是比较鲜有的,因此,可通过人工地标中的3种颜色特征进行真伪目标的鉴别。方法是在判断出所有像素点的颜色的基础上,计算三基色分别占有的像素点个数,然后求得每种颜色所占的比例,若3种颜色的比例均大于设定值,即认为被跟踪的目标中三基色占了绝大部分,与预设的跟踪目标在颜色上存在很大的相似度,该目标区域则被认为真实着陆区域。

但实际应用情况又与理论情况有所差别,由于光照条件等因素的影响,图像中不可避免存在各像素点发生像素值微小漂移的问题,由此带来了颜色差距。于是可以采用调色板降阶的方法来近似估计颜色。具体方法是选取三基色(红、绿、蓝)作为代表性颜色,把其他有偏差的颜色都量化归并到这3种代表色上,从而实现以代表色再现原图像。为了减少颜色的量化量,还可进行二次降阶处理使颜色种类更少。根据代表色再现出来的图像,利用前文所述的颜色特征方法来鉴别检测出的一个或者多个目标,直到找出真实目标为止,若都不符合条件,就要重新采集图片序列。

图3所示为自然环境中可能出现的几种比较相似的情况,依次鉴别这些目标,结果表明,本文提出的方法具有可行性。



图3 不同颜色特征的目标

Fig. 3 Targets with different color feature

有了正确的目标,接下来就是对目标实行实时跟踪。在飞行过程中,由于飞机的姿态、速度都发生变化,造成了对人工地标进行跟踪就是复杂动态背景下的跟踪,给跟踪带来了更大的难度,算法的实时性和准确性就是一个亟待解决的问题,而普通的目标识别与跟踪算法并不能解决这个问题,由此必须寻找其他有

效的跟踪算法。为了克服上述缺点,提高系统的稳定性和实时性,本文采用Kalman滤波器来预估下一时刻的目标位置,具体的Kalman跟踪算法在本文中不详细叙述。Kalman滤波器跟踪效果如图4所示。

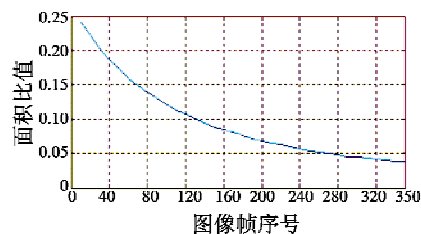


图4 Kalman滤波器跟踪效果

Fig. 4 Kalman filter tracking effect

从跟踪效果图可以看出,随着跟踪的进行,预测的目标位置越来越准,这表明Kalman滤波器具有较好的预测跟踪效果。

3 位姿参数估计

本文给出的位姿参数估计方法是根据地标中的圆和其图像的透视投影关系对无人机进行定位。实际成像过程中,圆形人工地标在摄像机中的成像为椭圆。将获得的图像进行前期处理后,根据椭圆的参数确定圆形目标所在的平面及圆形目标的中心位置。图5所示为圆的成像过程,已知地标在摄像机中成像的椭圆,将该椭圆与光心相连可形成一个圆锥,反向延长圆锥的母线,此时就是在世界坐标系中找一个平面,使得母线反向延长线与该平面的交面为一个已知半径的圆,该半径就是圆形地标的半径。

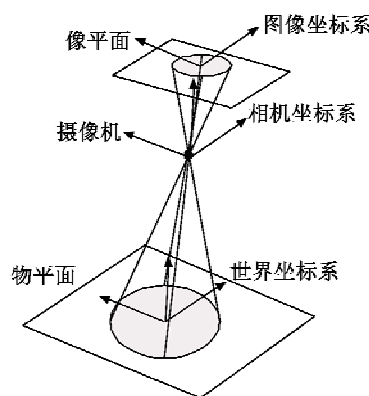


图5 圆的成像过程

Fig. 5 The imaging process of circle

在世界坐标系中求解目标平面时,与斜圆锥的交面是一个正圆的圆平面有很多,它们相互平行而半径不同,但是它们都拥有相同方向的法向量,故而可以用法向量表示这一系列平行的平面。已知所求平面的法向量和交面圆的半径,即可求出所要求的平面。但这种方法缺点就是有2个圆平面符合要求,即存在二义

性问题,针对这个问题,可利用地标中的特征点来确定唯一解集,消除二义性。

相对横滚角和俯仰角的具体求解步骤如下。

假设

$$A = (\theta \ \varphi \ \psi) \quad (5)$$

式中: A 为相机与平台的相对姿态角; θ 为俯仰角; φ 为横滚角; ψ 为偏航角。

T' 为由平台坐标系变换到相机坐标系的姿态变换矩阵,该变换矩阵可以根据平台坐标系与相机坐标系的转换关系求出。于是平台坐标系中向量为

$$V_c = (x_p \ y_p \ z_p)^T \quad (6)$$

转换到相机坐标系中为

$$V_p = T' V_c \quad (7)$$

由于人工地标是固定在平台平面上,那么圆平面的法向量就可表示为

$$V_o = (0 \ 0 \ 1)^T \quad (8)$$

该法向量变换到相机坐标系中为

$$V_{oc} = T' V_o \quad (9)$$

V_{oc} 被求出,而 V_{oc} 又可由 θ, φ 表示,于是横滚角和俯仰角也就求出。

同理,式(7)也可表示参考航向线在图像坐标系中的方向向量。根据上文所示方法求出俯仰角和横滚角,并且已知参考航向线在平台坐标系中的方向向量,因此,在图像中检测出参考航向线并确定出直线的方向向量,航向角也就求出了。

4 仿真实验

基于上述理论给出了仿真实验过程,如图6所示。首先给出了摄像机参数、相对位置与姿态及地标中圆的半径,经过传感器得到椭圆图像,再经过图像处理求解出像平面椭圆参数,最后根据本文的位姿求解方法求出位姿参数。实验过程中参数设置包括:从外到内圆的半径分别为 2 m, 1.5 m, 1 m, 相机参数包括焦距为 10 mm, 像元尺寸为 $5.6 \mu\text{m} \times 5.6 \mu\text{m}$ 。

实验选取 4 个高度,分别是 10 m, 8 m, 6 m, 4 m, 姿态角的变化范围都选为 $-15^\circ \sim 15^\circ$, 步长均为 2° , 在水平位置上允许存在一定的偏移。参数指定完毕后,进行一系列处理并按照本文的方法计算出无人机相对于平台的位姿参量及测量误差。在不同参数设定下求出各个高度点的位姿参数估计误差和均方根误差,最后的计算结果如表 1 所示。

从表 1 中的数据可以看出,各位置和位姿参数误差都在允许的范围内,表明本文所设计的人工地标和所提出的位姿参数估计的方法是可行的。

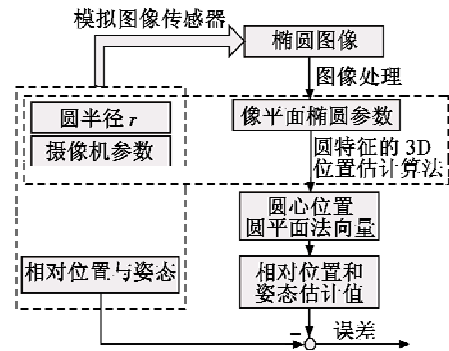


图 6 仿真过程

Fig. 6 Simulation process

表 1 位姿参数估计的均方根误差

Table 1 Root mean square error of position and pose parameter estimation

高度/ m	姿态角估计误差/(°)			各方向位移估计误差/mm		
	横滚角	俯仰角	航向角	y 向位移	x 向位移	高度
10	0.40	0.46	1.78	15.50	0.88	22.17
8	0.48	0.37	1.48	19.37	0.86	14.22
6	0.17	0.31	1.17	12.94	0.80	8.23
4	0.29	0.15	0.83	11.11	0.68	3.91

5 分析与结论

就无人机着陆而言,本文设计了一种新型地标,该地标由边缘的圆环和内部三基色圆所构成,并给出了一种位姿参数求解方法。该实验结果表明,本文设计的新型人工地标搭配位姿求解方法能够准确而快速地得到引导无人机自主着陆的信息参数,完成无人机的自主着陆,具有一定的理论与实际意义。为确保达到满意的效果,应该根据具体应用情况设置具体的地标尺寸和机载相机参数。

参考文献

- [1] 蔡昌军. 无人驾驶飞机的发展趋势[J]. 中国航天, 2000(3): 16-18.
- [2] 唐大全, 毕波, 王旭尚, 等. 自主着陆/着舰技术综述[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(5): 550-555.
- [3] NILSSON C C A, HEINZEN S N, JR HALL C E, et al. GPS auto-navigation design for unmanned air vehicles [R]. AIAA, 2002-0389, 2002.
- [4] 黄显林, 姜肖楠, 卢鸿谦, 等. 自主视觉导航方法综述[J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2010, 28(2): 158-165.
- [5] NI Z F, SUNDERRAJAN S, RAHIMI A, et al. Distributed particle filter tracking with online multiple instance learning in a camera sensor net-work[C]//Proceeding of IEEE 17th International Conference on Image Processing, 2010: 37-40.

(下转第 39 页)

化、尺度变化和旋转变化的情况下性能都优于 SIFT 算法。3 组实验中 SIFT 算法匹配的特征点对数量分别是 156,633 和 677, 去除误匹配点后的匹配率分别为 95.51%, 96.05% 和 95.27%, 而本文的改进算法的匹配点数量分别为 138,473 和 563, 匹配率分别为 100%, 100% 和 98.57%。本文算法采用曼哈顿距离与切比雪夫距离的线性组合作为相似性度量, 其计算过程比欧氏距离更加简洁, 且阈值要求更加严格, 因此, 虽然匹配点数有所下降, 但匹配精度却有所提升, 匹配稳定性得到提高。在匹配时间方面, 3 组实验中, SIFT 算法的匹配时间分别为 5.854 s, 6.335 s 和 6.854 s, 而本文的改进算法在处理相同数据时分别只需要 2.512 s, 3.071 s 和 3.272 s, 所用的匹配时间不到 SIFT 算法的 50%, 明显缩短了匹配时间, 提高了匹配效率。

4 结束语

本文针对 SIFT 算法处理遥感图像计算复杂度高和匹配时间长的缺点, 在 SIFT 算法的原理和基础上对极值点检测和相似性度量两个方面进行了优化改进, 改进后的方法将极值检测点与权重更高的 14 个邻域点进行比较来替代 SIFT 算法中的 26 个比较点, 从而减少检测极值点的计算量; 在相似性度量方面, 本文利用曼哈顿距离和切比雪夫距离的线性组合来替代欧氏距离, 降低了计算复杂度, 提高了匹配效率。实验表明, 本文的改进算法不仅对亮度变化、尺度变化和旋转变保持鲁棒性, 而且能够有效减少算法的匹配时间, 提高算法的匹配效率, 并在一定程度上提高匹配精度。

参考文献

- [1] BROWN L G. A survey of image registration techniques [J]. *ACM Computer Surveys*, 1992, 24(4):325-376.
- [2] 吴一全, 沈毅, 陶飞翔. 基于 NSCT 和 SURF 的遥感图像匹配[J]. *遥感学报*, 2014, 18(3):618-629.
- [3] 刘晓春. 基于实时图与卫片的景象匹配导航技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
- [4] 傅卫平, 秦川, 刘佳, 等. 基于 SIFT 算法的图像目标匹配与定位[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(1):163-169.
- [5] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]//*Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999:1150-1157.
- [6] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [7] ZHAO J, LIU H Z, FENG Y L, et al. BE-SIFT: a more brief and efficient SIFT image matching algorithm for computer vision [C]//*IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing (CIT/IUCC/DASC/PICOM)*, 2015:568-574.
- [8] 王钺旋, 李海军, 周春光. 高维空间中用计算街区 and 棋盘距离的线性组合代替计算欧氏距离[J]. *小型微型计算机系统*, 2004, 25(12):2120-2125.
- [9] 师硕, 于明, 于洪丽, 等. 基于相似性度量优化的 SIFT 图像匹配算法[J]. *电视技术*, 2013, 37(17):148-150.
- [10] SHAKERNIA O, VIDA R, SHARP C S, et al. Multiple view motion estimation and control for landing an unmanned aerial vehicle [C]//*International Conference on Robotics and Automation*, 2002:2793-2798.
- [11] MEINGAST M, GEYER C, SASTRY S. Vision based terrain recovery for landing unmanned aerial vehicles [C]//*Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, 2005:1670-1675.
- [12] 邱力为, 宋子善, 沈为群. 无人直升机自主着舰的计算机视觉算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(2):99-102.
- [13] 邱力为, 宋子善, 沈为群. 用于无人直升机着舰控制的计算机视觉技术研究[J]. *航空学报*, 2003, 24(4):351-354.
- [14] 潘顺良, 王晓剑, 沈为群, 等. 视觉导引的无人直升机自主着舰系统仿真[J]. *航天控制*, 2008, 26(2):63-67.
- [15] 丁萌. 基于计算机视觉的无人机自主着陆方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.

(上接第 29 页)

- [6] 王丹, 王玮. 机载光电/惯性组合着舰导引算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6):1311-1316.
- [7] 刘士清, 胡春华, 朱纪洪. 基于计算机视觉的无人直升机姿态估计方法研究[J]. *计算机工程与设计*, 2004, 25(4):564-568.
- [8] SARIPALLI S, NAFFIN D J, SUKHATME G S. Autonomous flying vehicle research at the University of Southern California [C]//*Proceedings of the 1st International Workshop on Multi-Robot System*, 2002:73-82.
- [9] SHARP C S, SHAKERNIA O, SASTRY S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001:1720-1728.
- [10] SHAKERNIA O, VIDA R, SHARP C S, et al. Multiple view motion estimation and control for landing an unmanned