

DOI: 10.12086/oe.2018.170613

植保无人机结构光视觉的障碍物检测方法

吴开华*, 王文杰

杭州电子科技大学生命信息与仪器工程学院, 浙江 杭州 310018

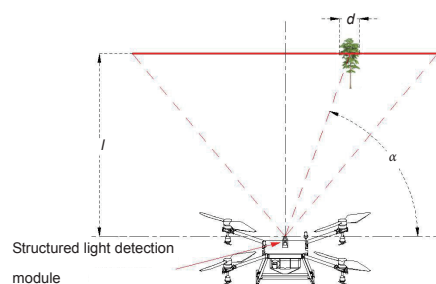
摘要: 针对存在障碍物农田区域的植保无人机避障问题, 提出了一种基于结构光视觉的植保无人机障碍物检测方法。本文基于激光三角测量原理, 通过半导体激光器与 CCD 传感器间特殊的光路, 设计了可探测前方障碍物信息的光学检测系统。激光器发出的线结构光经障碍物表面的反射, 成像于 CCD 靶面上, 通过图像采集、处理和计算提取出前方障碍物距离、方位角和宽度等参数信息。实验表明, 该方法能够有效检测出未知环境下障碍物的距离、方位角和宽度, 并且距离检测误差小于 0.06 m。

关键词: 植保无人机; 障碍物检测方法; 结构光视觉; 激光三角测量; 线结构光; CCD

中图分类号: TP216+.1

文献标志码: A

引用格式: 吴开华, 王文杰. 植保无人机结构光视觉的障碍物检测方法[J]. 光电工程, 2018, 45(4): 170613



Detection method of obstacle for plant protection UAV based on structured light vision

Wu Kaihua*, Wang Wenjie

College of Life Information Science & Instrument Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract: To solve the obstacle avoidance problem in plant protection UAV in operation, especially for farmland areas, a technology based on structured light vision was proposed. Based on the laser triangulation principle, through the special optical path design between the semiconductor laser and CCD sensor, an optical detection system to detect front obstacle information was designed. The line structured light emitted by the laser was reflected by the surface of the obstacle and was imaged on the CCD target surface. Through the image acquisition, processing and calculation, the distance, azimuth, width and other parameter information of front obstacle were extracted. Experiments show that this method can effectively detect the distance, azimuth and width of the obstacle in the unknown environment. The deviation of distance detection is less than 0.06 m.

Keywords: plant protection UAV; obstacle detection method; structured light vision; laser triangulation; line structured light; CCD

Citation: Wu K H, Wang W J. Detection method of obstacle for plant protection UAV based on structured light vision [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(4): 170613

收稿日期: 2017-11-09; 收到修改稿日期: 2018-02-11

基金项目: 企、事业单位委托项目(2016330101001380)

作者简介: 吴开华(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事检测技术及仪器、光机电一体化、精密测量、在线检测技术及仪器等方面的研究。E-mail: wukaihua@hdu.edu.cn

1 引言

近年来,随着中国劳动力人口老龄化以及城镇化率不断提高,农业生产对“机器换人”的需求越来越强烈,植保无人机的应用也越来越普遍^[1]。我国农田作业环境普遍存在树木、电线杆等障碍物,目前主要依赖飞手视觉观察,手动遥控无人机避开障碍物。自动避障技术的研究对于保障植保无人机的安全飞行,实现自主飞行具有重要意义。目前避障检测主要采用以下几种方法:1) 基于提前测绘的避障方法。在待作业的农田区域测绘出障碍物位置信息,并以此规划植保无人机作业航线。提前测绘的避障方法,人工成本高、作业效率低。2) 基于超声波的障碍物检测方法^[2]。超声波测量距离较近、对反射面有一定的要求,并且容易受到风速、气流、水雾等影响,检测精度低。3) 基于毫米波雷达的障碍物检测方法^[3]。毫米波雷达在视场增大后,其检测结果不稳定,波动较大。4) 基于机器视觉的障碍物检测方法^[4-10]。对于该检测方法,当作业环境复杂时,障碍物识别率难以保证。

针对植保无人机作业场景,以常见的树木、电线杆等典型障碍物为研究对象,提出了一种基于结构光视觉^[11-15]的障碍物检测新方法,并分析验证了其有效性。

2 基于结构光的障碍物检测方法

2.1 结构光检测原理

基于线结构光的植保无人机障碍物检测示意图如图 1 所示。图 1(a)为结构光扫描示意图,图 1(b)为结构光检测模块示意图。结构光检测模块由线结构光光源、CCD、镜头以及滤光片等组成。在图 1(a)中, l 、 α 和 d 分别表示障碍物的距离、角度和宽度;图 1(b)

中,设 z 表示线结构光光源出光孔与 CCD 成像光轴的距离, θ 表示线结构光光源的光轴与 CCD 成像光轴之间的夹角。

植保无人机在飞行作业过程中,当前方有障碍物时,检测模块发出的线结构光经障碍物表面反射成像于 CCD 靶面,该图像含有障碍物相关信息。线结构光成像光条在图像中纵向位置的不同对应障碍物的远近,横向相对位置的不同表示障碍物方位角的大小,横向像素点的个数对应障碍物的宽度。通过分析计算,得到障碍物的距离、角度和宽度等信息。

2.2 障碍物参数检测方法

2.2.1 障碍物成像分析

障碍物成像示意图如图 2 所示。 AB 表示照射到障碍物上被障碍物表面反射的线结构光,经光学系统成像于 CCD 像敏面上,即 $A'B'$ 。其中 C 和 C' 分别为 AB 与 $A'B'$ 的中点, $H \times Q$ 为距离 l 处的视场大小。障碍物像空间示意图如图 3 所示。设 h' 和 w' 分别表示 C' 到 X_i 轴和 Y_i 轴的距离, d' 表示 $A'B'$ 的长度, $H' \times Q'$ 为 CCD 靶面尺寸。

设 $A'B'$ 间横向像素点个数为 M 、CCD 有效分辨率为 $a \times b$, CCD 像元尺寸为 ε ,分析可得 h' 、 w' 和 d' 的计算公式如式(1)所示:

$$\begin{cases} h' = \varepsilon \times |Y'| \\ w' = \varepsilon \times |X'| \\ d' = \varepsilon \times M \end{cases} \quad (1)$$

设本光学系统的成像放大率为 β ,由图 2、图 3 的物像关系得,本系统的成像放大率 β :

$$\beta = \frac{H'}{H} = \frac{Q'}{Q} \quad (2)$$

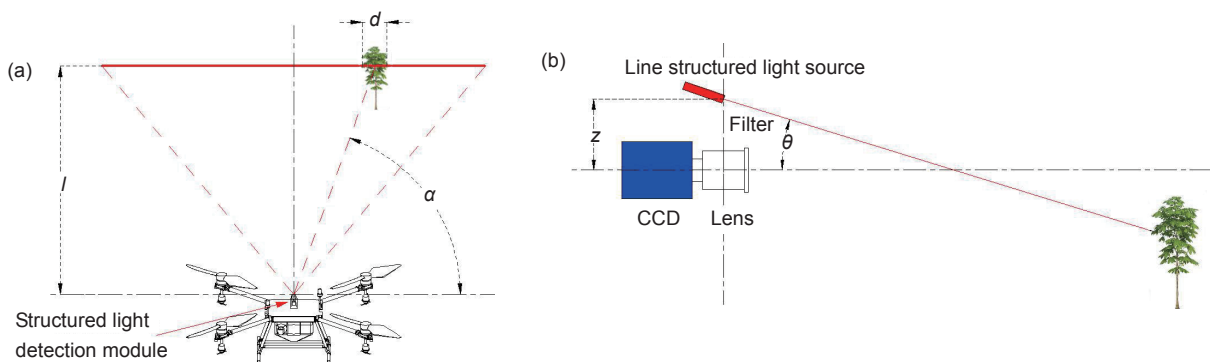


图 1 基于线结构光的植保无人机障碍物检测示意图。(a) 结构光扫描示意图; (b) 结构光检测模块示意图

Fig. 1 Illustration of plant protection UAV obstacle detection based on line structured light. (a) Illustration of structured light scanning; (b) Illustration of structured light detection module

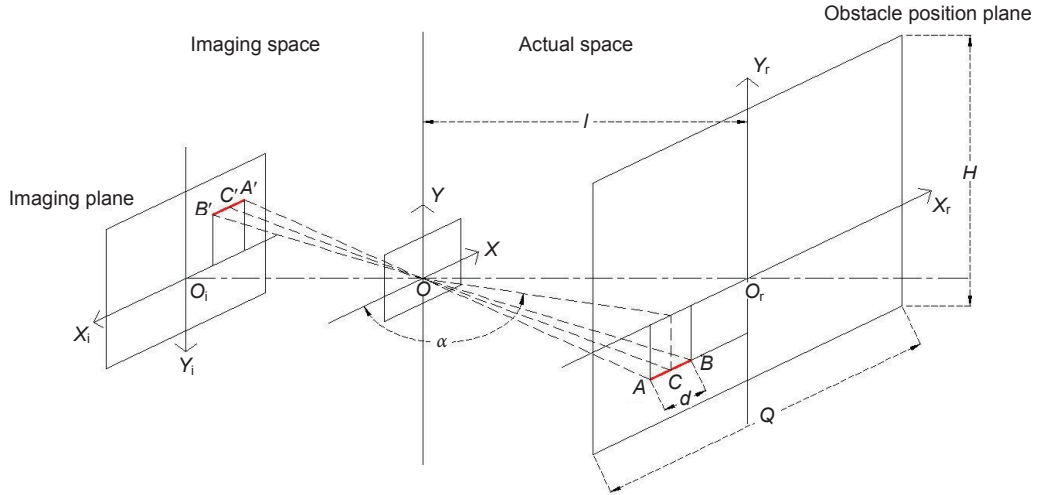


图 2 障碍物成像示意图
Fig. 2 Illustration of obstacle imaging

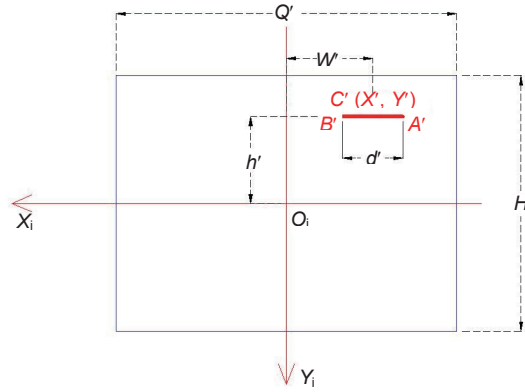


图 3 像空间示意图
Fig. 3 Imaging space illustration

2.2.2 距离参数检测

物空间垂直视场分析如图 4 所示, φ_h 是 CCD 的垂直视场角, H 为距离 l 处垂直视场的长度, h 是 C 点距离 CCD 成像光轴的距离。

结合图 3、图 4, 垂直方向上的几何成像关系为

$$\begin{cases} \frac{h'}{h} = \beta \\ H = 2 \times l \times \tan \frac{\varphi_h}{2} \\ h = l \times \tan \theta - z \end{cases} \quad (3)$$

再结合式(1)、式(2)得障碍物距离参数 l :

$$l = \frac{z \times H'}{H' \times \tan \theta - 2 \times \varepsilon \times |Y'| \times \tan \frac{\varphi_h}{2}} \quad (4)$$

2.2.3 角度参数检测

水平视场分析如图 5 所示, φ_w 为 CCD 的水平视场角, Q 为距离 l 处水平视场的尺寸, w 为 C 点距离 CCD 成像光轴的距离, α 为 C 点的方位角, d 为障碍

物的宽度。

结合图 3、图 5, 根据水平方向上的几何成像关系得:

$$\begin{cases} \frac{w'}{w} = \beta \\ Q = 2 \times l \times \tan \frac{\varphi_w}{2} \end{cases} \quad (5)$$

结合式(1)、式(2)得:

$$w = \frac{2 \times l \times \tan \frac{\varphi_w}{2} \times \varepsilon \times |X'|}{Q'} \quad (6)$$

由式(4)、式(5)得障碍物角度信息:

$$\alpha = \begin{cases} 90^\circ - \arctan \frac{w}{l}, & X' < 0 \\ 90^\circ + \arctan \frac{w}{l}, & X' \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

2.2.4 宽度参数检测

根据以上分析计算, 得距离 l , 根据图 3、图 5,

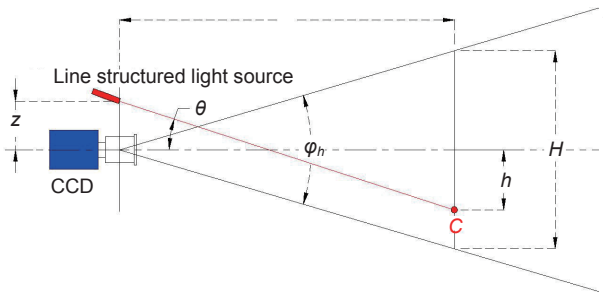


图 4 垂直视场分析示意图

Fig. 4 Illustration of vertical field of view analysis

由水平方向上的几何成像关系：

$$\begin{cases} \frac{d'}{d} = \beta \\ Q = 2 \times l \times \tan \frac{\varphi_w}{2} \end{cases} \quad (8)$$

结合式(1)、式(2)，障碍物宽度 d 的计算如式(9)：

$$d = \frac{\varepsilon \times M}{Q'} \times 2 \times l \times \tan \frac{\varphi_w}{2} \quad (9)$$

通过以上分析，计算出 $A'B'$ 中点 C' 对应的障碍物距离、角度和 $A'B'$ 间像素点个数对应的障碍物宽度。

电线杆表面的结构光成像为一条连续的光条，树木由于其树枝和树叶间存在空隙，结构光成像为间断不连续的光条。在计算障碍物信息时，首先确定结构光成像光条的左右端点 A' 、 B' 的坐标，然后根据端点坐标计算出光条中点 C' 坐标以及两端点之间的横向像素个数 M 。最终根据式(3)~式(9)，结合 C' 坐标以及 M 计算出障碍物距离、角度和宽度信息。

2.2.5 图像畸变的校正方法

为了对畸变进行校正，建立图像畸变的成像模型，通过确定目标靶的理想成像与实际成像对应关系的计算方法，标定出该光学系统成像的畸变量^[18]，理想成像由实际成像加上畸变量得到。图3中像空间点 $C'(X', Y')$ 经过畸变校正后得坐标 (X'', Y'') ，具体转换关系：

$$\begin{cases} X'' = X' + \delta_{X'} \\ Y'' = Y' + \delta_{Y'} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $(\delta_{X'}, \delta_{Y'})$ 为 (X', Y') 对应的畸变量。

在结构光检测系统确定后，检测模块设计参数 z 、 θ 以及光学系统参数 $Q' \times H'$ 、 φ_h 、 φ_w 、 ε 、 $\delta_{X'}$ 、 $\delta_{Y'}$ 等均为已知信息； M 、 (X', Y') 等参数为图像分析信息，通过图像处理确定其值。 l 、 α 和 d 为障碍物的计算信息。综合以上分析，结合式(3)~式(10)，根据已知参数信息，最终检测出了障碍物的距离、角度及其宽度等信息。

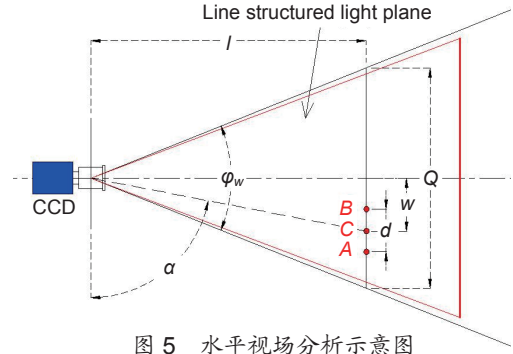


图 5 水平视场分析示意图

Fig. 5 Illustration of level field of view analysis

2.2.6 障碍物参数计算

图6为数据采集场景图。在检测模块前方距离 l_0 、角度 α_0 处存在宽度 d_0 的竖直摆放的障碍物。图7为 CCD 采集的原始和处理后图像的对比图。图7(a)为原始图像。其中 $A'B'$ 为被障碍物反射的线结构光图像， C' 是 $A'B'$ 的中点。原始图像信号弱且存在噪声，故对其进行图像分割、线性去噪和细化等处理。最后得到清晰的障碍物图像 $A'B'$ ，如图7(b)所示。

图7(b)中，障碍物图像 $A'B'$ 间的像素点个数为 M ，点 $C'(X', Y')$ 经式(10)校正后坐标为 (X'', Y'') 。最终由式(4)、式(6)、式(7)、式(9)、式(10)计算出障碍物距离、角度和宽度等信息：

$$\begin{cases} l_0 = \frac{z \times H'}{H' \times \tan \theta - 2 \times \varepsilon \times |Y''| \times \tan \frac{\varphi_h}{2}} \\ \alpha_0 = 90^\circ + \arctan \frac{w_0}{l_0} \\ d_0 = \frac{\varepsilon \times M}{Q'} \times 2 \times l_0 \times \tan \frac{\varphi_w}{2} \end{cases} \quad (11)$$

3 验证实验

3.1 障碍物检测要求

根据植保作业需求，设定障碍物在检测模块前方 3000 mm 位置处的距离检测误差不超过 ± 60 mm、角度检测误差不超过 $\pm 4^\circ$ 、宽度检测误差不超过 ± 10 mm。

3.2 实验平台设计

相机采用有效像素 $a \times b = 1280 \times 960$ 、靶面为 $1/3''$ 、帧率为 35 f/s 的 CCD，镜头焦距 $f = 6$ mm，在镜头前方的滤光片为专门订制，光源采用中心波长 661 nm、光功率为 200 mW 的线结构光光源，选择中心波长为 661 nm 的窄带宽滤光片。该光学系统对应参数如下：
 $Q' \times H' = 4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$ 、 $\varphi_h = 33.4^\circ$ 、 $\varphi_w = 44^\circ$ 、 $\varepsilon = 3.75 \mu\text{m}$ ，



图 6 图像采集场景图

Fig. 6 Image acquisition scene graph

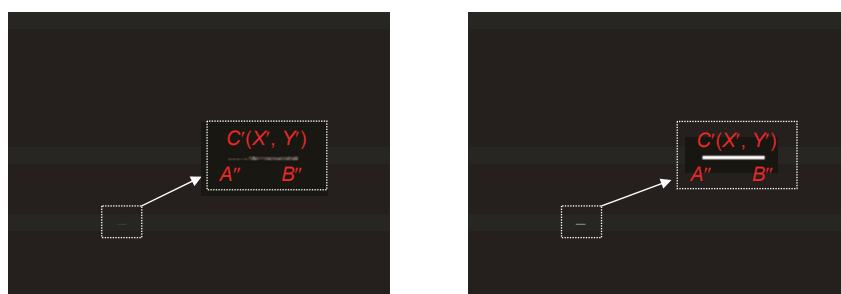


图 7 图像处理前后对比图。(a) 原始图像；(b) 处理后图像

Fig. 7 Contrast image before and after image processing. (a) Original image; (b) Post-processing image

检测模块设计参数 $\theta=10^\circ$ 、 $z=10\text{ mm}$ 。实验平台所选镜头的最大畸变率小于 0.1% ，由该畸变引起的检测误差在植保避障领域忽略不计。

实验场景示意图如图 8 所示。实验平台中，避障检测的主控模块采用小型工控机，避障检测模块通过安装支架与飞机平台连接。光源与工控机采用 12 V 供电，工控机、供电电池、电源线等安装固定于控制盒中，工控机与 CCD 相机之间基于 USB 通讯协议。

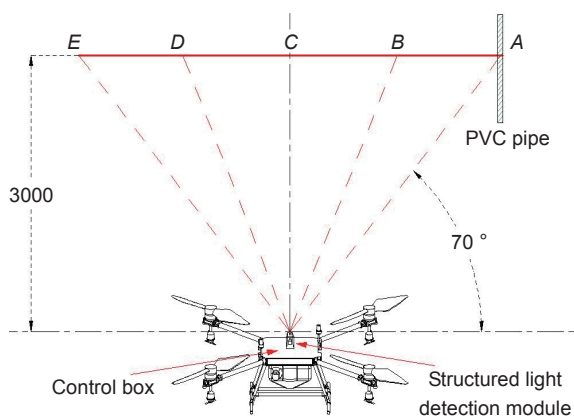


图 8 实验场景示意图

Fig. 8 Illustration of experimental scene

为验证距离、角度和宽度等检测的有效性，在图 8 中，飞机高度设定为 2500 mm 。在结构光检测模块前方 3000 mm 位置处，依次设置障碍物偏移角 70° 、 80° 、 90° 、 100° 和 110° ，分别对应图中 A、B、C、D

和 E 位置处，选取公称直径为 DN25、DN40、DN63、DN90、DN125 的 PVC 管材作为不同宽度的障碍物。在设定障碍物标准角度时，通过不断调整 PVC 管材的位置，使 PVC 管材的成像移动到图像中心位置的方法，来确定 C 点位置。然后以 C 为原点，以点 C 到检测模块的连线为纵轴，根据垂直关系确定横轴 AE 的位置。再通过标准角度计算出 CA、CB、CD、CE 的长度，以此确定点 A、B、D 和 E 位置。

3.3 距离检测实验

设定 $d=25\text{ mm}$ ，即选择 DN25 的 PVC 管材为障碍物，设定 $\alpha=90^\circ$ ，即障碍物竖直设置在图 8 中的 C 位置。对该障碍物进行 10 组、每组 10 次的距离重复检测实验，将检测距离 l_0 与设定距离 l 逐一对比，并计算检测距离与设定距离之间的检测误差 δ_i ，第 1 组距离检测实验数据见表 1。

为了便于对以上 100 次距离检测误差 δ_i 进行分析，以 5 mm 为间距对 100 次距离检测误差进行统计分析，并拟合成误差分布曲线，具体距离检测误差分布如图 9 所示。

图 9 中横坐标为障碍物距离误差 δ_i ，左右纵坐标分别表示误差频数和概率分布。通过分析可知，数据集中在 $\pm 40\text{ mm}$ 之间，经过计算，误差在 $\pm 40\text{ mm}$ 以内的概率为 98% ，在 $\pm 60\text{ mm}$ 以内的概率为 100% 。在 100 次检测结果中，满足检测误差小于 0.06 m 的要求。

表 1 距离检测实验数据

Table 1 Test data of distance detection

No.	l/mm	l_0/mm	δ_l/mm
1	3000	3012	12
2	3000	2994	-6
3	3000	3015	15
4	3000	3004	4
5	3000	2993	-7
6	3000	2988	-12
7	3000	2994	-6
8	3000	2997	-3
9	3000	3009	9
10	3000	2990	-10

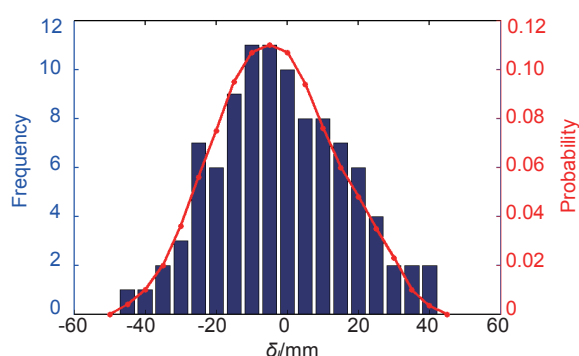


图 9 距离检测误差分布

Fig. 9 Distribution of distance detection deviation

3.4 角度检测实验

设定距离 $l=3000$ mm、障碍物宽度 $d=25$ mm、依次竖直放置在图 8 中 A、B、C、D 和 E 等位置的不同角度上, 分别对其角度进行 100 组、每组 5 次的重复检测实验, 将检测角度 α_0 与设定值 α 逐一对比, 并计算检测角度与设定角度之间的检测误差 δ_α , 第 1 组角度检测实验数据见表 2。

表 2 角度检测实验数据

Table 2 Test data of azimuth detection

No.	$\alpha/(^{\circ})$	$\alpha_0/(^{\circ})$	$\delta_\alpha/(^{\circ})$
1	70	72.4	2.4
2	80	81.9	1.9
3	90	90.6	0.6
4	100	98.8	-1.2
5	110	107.5	-2.5

同上距离误差相同的分析方法, 500 次角度检测误差分布如图 10 所示。

图 10 中横坐标为障碍物角度误差 δ_α , 左右纵坐标分别表示误差频数和概率分布。通过分析可知, 数据

集中在 $\pm 3^{\circ}$ 之间, 经过计算, 误差在 $\pm 3^{\circ}$ 以内的概率为 99.2%, 在 $\pm 4^{\circ}$ 以内的概率为 100%, 故满足角度检测误差不超过 $\pm 4^{\circ}$ 的要求。

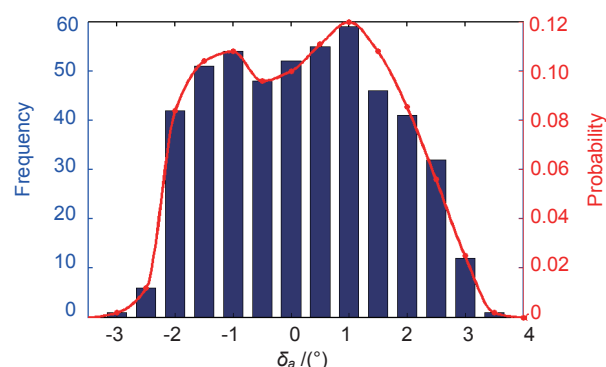


图 10 角度检测误差分布

Fig. 10 Distribution of azimuth detection deviation

3.5 宽度检测实验

设定距离 $l=3000$ mm、角度 $\alpha=90^{\circ}$, 依次选择 DN25、DN40、DN63、DN90、DN125 的 PVC 管材作为障碍物, 分别对其宽度进行 100 组、每组 5 次的重复检测实验, 将检测宽度 d_0 与设定宽度 d 逐一对比, 并计算检测宽度与设定宽度之间的检测误差 δ_d , 第 1 组宽度检测实验数据见表 3。

表 3 宽度检测实验数据

Table 3 Test data of width detection

No.	d/mm	d_0/mm	δ_d/mm
1	25	20.1	-4.9
2	40	35.8	-4.2
3	63	58.6	-4.4
4	90	85.1	-4.9
5	125	120.9	-4.1

同上分析方法, 500 次宽度检测误差分布如图 11 所示。

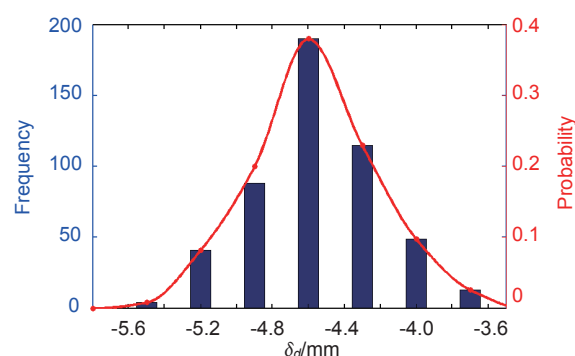


图 11 宽度检测误差分布

Fig. 11 Distribution of width detection deviation

图 11 中横坐标为障碍物宽度误差 δ_d , 左右纵坐标

分别表示误差频数和概率分布。通过分析可知,数据集中在-5.2 mm~-3.7 mm 之间,经过计算,误差在此范围内的概率为 99.2%,在-6 mm~-3 mm 以内的概率为 100%,故满足宽度检测误差不超过±10 mm 的要求。

3.6 实验分析

田间的障碍物多为外形不规则树木、宽度较大的电线杆,无法确切给出角度和距离值。因此,实验以不同规格的 PVC 管材为障碍物,并且预先测量出实验设置的参数。对于距离检测,选择的 CCD 有效像素值一定,随着检测距离的增大,视场增大,距离检测误差将随之增大;因此,对于同一光学检测系统,距离检测误差随着检测距离的增大而增大。图 9 中,在检测距离为 3000 mm 时,距离检测误差在允许范围内,故小于 3000 mm 也满足要求。距离检测误差上下波动较大,这是由检测装置本身存在的误差和实验设计误差等共同影响,但均稳定在±60 mm 范围内,满足本设计中的距离检测误差不超过±60 mm 的要求。

对于角度检测,500 次的角度检测均满足设计要求。

对于宽度检测,选择不同直径的 PVC 管材作为障碍物,从图 11 中可以看出,宽度检测误差均小于 0 且集中在-5.2 mm~-3.7 mm 之间。主要是由于选择的 PVC 管材为圆柱状,线结构光投射在其表面后,存在

边缘衰减,成像的有效像素存在边缘丢失情况,从而造成检测误差小于 0。由于 CCD 的水平分辨率一定,不同直径障碍物的边缘衰减一定,因此检测误差均稳定在-6 mm~-3 mm 之间,满足误差在±10 mm 的宽度检测要求。

3.7 动态检测实验

设计了针对典型障碍物树木的动态检测实验如图 12。规划 2 个无人机飞行航点,图 12(a)中的树木位于植保无人机飞行前方,如图 12(b)所示。无人机在寻找航点 1 后,沿航线飞行。当检测模块检测到前方树木距离小于 1500 mm 时,触发悬停动作,并记录检测的树木距离、角度和宽度信息。待飞机悬停稳定后,通过测量记录下飞机到树木的距离、角度及其宽度信息,对树木进行 10 组,每组 6 次的动态实验,并将第一组数据记录在表 4 中。表中 l 、 α 、 d 为相对于悬停位置人工测量的障碍物信息, l_0 、 α_0 、 d_0 是障碍物的检测信息。

同上统计方法,树木的距离、角度和宽度的动态检测误差分别在 50 mm~385 mm、-5.6°~3.9°、-208 mm~-52 mm 范围内。以上检测误差,除了受到检测模块本身的检测误差影响外,还受到检测模块图像处理速度、植保无人机悬停的响应距离以及人工测量误差等共同影响。但从实验结果来看,满足植保无人机避障

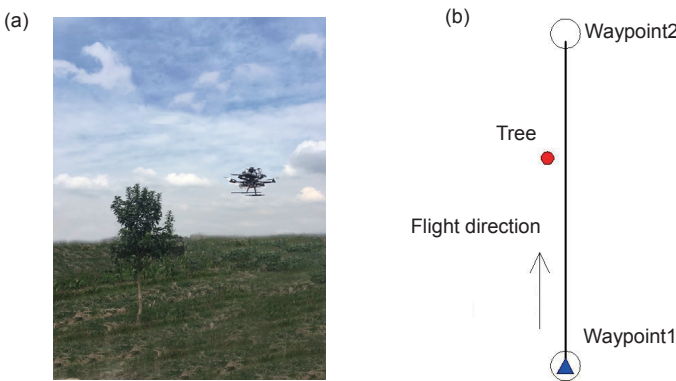


图 12 动态检测实验。(a) 树木;(b) 实验设计
Fig. 12 Dynamic detection experiment. (a) Tree; (b) Experiment design

表 4 树木检测实验数据
Table 4 Test data of tree detection

No.	l/mm	l_0/mm	δ_l/mm	$\alpha/(^{\circ})$	$\alpha_0/(^{\circ})$	$\delta_\alpha/(^{\circ})$	d/mm	d_0/mm	δ_d/mm
1	1360	1455	95	111.1	106.9	-4.2	850	651.9	-198.1
2	1106	1488	382	107.4	102.1	-5.3	850	794.2	-55.8
3	1228	1447	219	104.1	107.2	3.1	850	705.4	-144.5
4	1316	1462	146	102.9	106.5	3.6	850	787.1	-62.9
5	1409	1472	63	102.6	104.7	2.1	850	751.7	-98.3
6	1215	1476	261	106.9	102.4	-4.5	850	742.4	-107.6

的误差要求。

4 结束语

本文基于结构光视觉技术,为植保无人机作业提出了一种用于障碍物检测的新方法,研究了无人机前方障碍物的距离、方位角度及其宽度的检测方法。实验结果表明,该检测方法能够准确地检测出障碍物距离、方位角度和宽度等信息,检测误差均在植保作业检测要求的范围内。本方法的研究为进一步实现植保无人机的自动避障功能提供了理论依据。

参考文献

- [1] 温源, 薛新宇, 邱白晶, 等. 中国植保无人机发展技术路线及行业趋势探析[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(S1): 30–32.
- [2] Yue X J, Wang J, Lan Y B, et al. Impacts of small-size unmanned aerial vehicle vibration characteristics on ultrasonic transducers[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2016, 37(6): 10–15.
岳学军, 王健, 兰玉彬, 等. 小型无人机振动特性对超声波传感器的影响[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(6): 10–15.
- [3] Zhang M, Tang Y, Jing X. Power line detection processing of heliborne millimeter wave radar[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2016, 45(2): 7–11, 30.
张明, 唐尧, 景雄. 直升机载毫米波雷达高压线防撞处理研究[J]. 火控雷达技术, 2016, 45(2): 7–11, 30.
- [4] Xiao Z T, Zhang W Y, Geng L, et al. Accuracy analysis of binocular vision system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(2): 6–11.
肖志涛, 张文寅, 耿磊, 等. 双目视觉系统测量精度分析[J]. 光电工程, 2014, 41(2): 6–11.
- [5] Wang Y, Liu H B, Li H W. Design of disaster rescue robot obstacle surmounting system based on machine vision[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(4): 79–81, 85.
王宇, 刘泓滨, 李华文. 机器视觉的灾后救援机器人越障系统设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(4): 79–81, 85.
- [6] Song L M, Qin M C, Yang Y G, et al. Gear machining error detection based on laser vision method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(1): 1–5.
宋丽梅, 覃名翠, 杨燕翌, 等. 激光视觉方法用于检测齿轮加工误差[J]. 光电工程, 2015, 42(1): 1–5.
- [7] Zhang B H, Cai Z H, Wang Y X. Binocular stereo vision navigation for electric VTOL aircraft[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(7): 882–887.
张博翰, 蔡志浩, 王英勋. 电动 VTOL 飞行器双目立体视觉导航方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(7): 882–887.
- [8] Liang C J, Duan F J, Yang Y, et al. A vehicle outer contour dimension measuring method based on computer vision technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(1): 42–48, 54.
梁春疆, 段发阶, 杨毅, 等. 车辆外廓尺寸计算机视觉动态测[J]. 光电工程, 2016, 43(1): 42–48, 54.
- [9] Tian G H, Wang J C, Duan P. Research on obstacles avoidance for Ward inspection robot in complex environment[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2013, 41(S1): 312–315.
田国会, 王家超, 段朋. 病房巡视机器人复杂环境下的避障技术研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(S1): 312–315.
- [10] Liao P, Ren C, Yang X Y. Front-end design of high precision displacement sensor based on linear array CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(5): 498–504.
廖平, 任成, 杨小雨. 基于线阵 CCD 的高精度位移传感器前端设计[J]. 光电工程, 2017, 44(5): 498–504.
- [11] Wu K H, Chen K. Tsai non-coplanar calibration algorithm of wheel set online detection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(11): 1–7.
吴开华, 陈康. 轮对在线检测中 Tsai 异面标定算法研究[J]. 光电工程, 2015, 42(11): 1–7.
- [12] He W Y, Cao X D, Kuang L, et al. A preliminary based on structured-light for flatness measurement of large annular planes[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(11): 7–12.
何文彦, 曹学东, 匡龙, 等. 结构光检测大型止推环止推面平面度探究[J]. 光电工程, 2016, 43(11): 7–12.
- [13] Fan S H, Liu C R, Qi X T, et al. Accuracy analysis and verification of structured light 3D measurement system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(5): 52–56.
范生宏, 刘昌儒, 齐晓彤, 等. 结构光三维测量系统精度分析及验证[J]. 光电工程, 2014, 41(5): 52–56.
- [14] Zhang J F, Zhang J Y. Measurement system of inclination angle based on laser triangulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(1): 18–23.
张劲峰, 张继业. 基于激光三角法的倾斜角测量系统[J]. 光电工程, 2016, 43(1): 18–23.
- [15] Lin Z Q, Wang T Y, Nan G L, et al. Three-dimensional data measurement of engine cylinder head blank based on line structured light[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(5): 46–51.
林志强, 王天友, 南刚雷, 等. 基于线结构光的柴油机缸盖三维形貌测量[J]. 光电工程, 2014, 41(5): 46–51.
- [16] Xu Z P, Xu J H, Wang Y Q, et al. Research on system localization method of laser sensor scanning edge[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(2): 49–51.
许增朴, 许敬华, 王永强, 等. 激光传感器扫描边缘系统定位方法研究[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(2): 49–51.
- [17] Liu B, Wang L M, Zhao X. Cylinder-shaped dimensions measuring system based on laser displacement sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(5): 40–45.
刘宾, 王黎明, 赵霞. 基于激光位移传感器的缸套内部形廓尺寸测量系统[J]. 光电工程, 2014, 41(5): 40–45.
- [18] Xing M L, Liu J P, Lin J M, et al. Distortion measurement of CCD camera with a large-field, short focal length lens[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(3): 377–379.
行麦玲, 刘贱平, 林家明, 等. 大视场短焦距镜头 CCD 摄像系统的畸变校正[J]. 光学技术, 2003, 29(3): 377–379.

Detection method of obstacle for plant protection UAV based on structured light vision

Wu Kaihua*, Wang Wenjie

College of Life Information Science & Instrument Engineering, Hangzhou Dianzi University,
Hangzhou, Zhejiang 310018, China

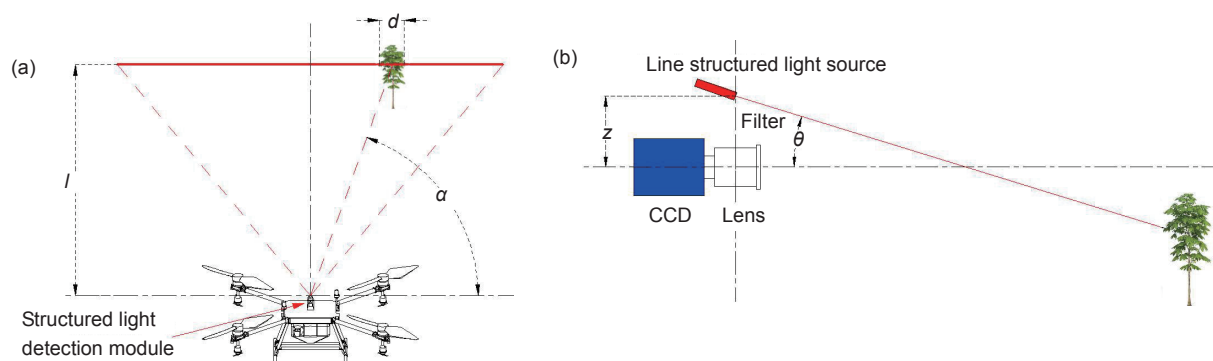


Illustration of plant protection UAV obstacle detection based on line structured light. (a) Illustration of structured light scanning; (b) Illustration of structured light detection module

Overview: With the rapid development of UAV technology, the applications of plant protection UAV are more and more common. At present, most of the plant protection UAV is a semi-automatic operation with manual intervention. UAV needs to manually avoid obstacles, when it encounters obstacles during plant protection operations. Developing the automatic plant protection UAV with automatic obstacle avoidance is particularly important. However, the current UAV obstacle avoidance technology is not mature. To solve the obstacle avoidance problem of plant protection UAV in operation, especially for farmland areas, a technology based on structured light vision was proposed as shown in Fig. (a). Based on the laser triangulation principle, through the special optical path design between the semiconductor laser and CCD sensor, an optical detection system to detect front obstacle information was designed. The compositions of this optical detection system were the line structured light source, CCD camera, optical lens and filter device as shown in Fig. (b). They were fixed by specific designed structure. The distance between the line structured light source exit hole and the CCD imaging optical axis was designed as ' z '. The angle between the optical axis of the line structured light source and the CCD imaging optical axis was designed as ' θ '. The parameters ' z ' and ' θ ' both required to be calibrated before detection. The line structured light emitted by the laser was reflected by the surface of the obstacle and was imaged on the CCD target surface. Because of the narrow bandwidth of the original image obtained by CCD maintained obvious image with line structured light and some optical noises. The processing such as image segmentation, linear image de-noise and refinement were needed to extract the clear image of the line structured light. The information of front obstacle was contained by the position of the line structured light image in the whole image and the length of it. Through the image acquisition, processing and calculation, the distance, azimuth, width and other parameter information of front obstacle could be extracted. Experiments show that this method can effectively detect the distance, azimuth and width of the obstacle in the unknown environment. The deviation of distance detection is less than 0.06 m. The deviation of azimuth detection is less than 4° . The deviation of width detection is less than 0.01 m. The study of this method provides a theoretical basis for further realizing the function of automatic obstacle avoidance of plant protection UAV.

Citation: Wu K H, Wang W J. Detection method of obstacle for plant protection UAV based on structured light vision[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(4): 170613

Supported by Projects Fund of Enterprises (2016330101001380)

* E-mail: wukaihua@hdu.edu.cn