

基于机载光电载荷图像的无人机自主循迹导引

冯宇^{1,2}, 孙丹^{1,2}, 潘登^{1,2}, 高东^{1,2}

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 文章研究无人机搭载视觉传感器沿指定路径自主循迹飞行, 针对如何统一确定不同形状路段的目标路径点序列的问题, 提出基于无人机速度在图像中投影的矢量与无人机重心指向各候选路径点矢量的最小夹角确定目标路径点的方法。首先从采集的图像中提取出的路径区域, 从图像层面提取路径的中间线, 将图像栅格化并分别计算各栅格里路径中间线的中心点的坐标; 然后计算图像中无人机速度矢量投影与无人机重心到各路径中心点矢量的夹角, 在约束范围内选取最小夹角对应的中心点作为局部目标点。设置了包含不同形状拐角的路径, 检验无人机飞行过程中采集图像的处理方法和路径引导算法结合的有效性, 飞行结果表明提出的方法能够满足无人机的循迹飞行要求, 轨迹偏离误差小于 0.1 m。

关键词: 无人机; 图像处理; 目标路径点序列; 循迹飞行

中图分类号: V249.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.03.021

Autonomous tracking guidance of UAV based on airborne photoelectric payload images

FENG Yu^{1,2}, SUN Dan^{1,2}, PAN Deng^{1,2}, GAO Dong^{1,2}

(1. National Space Science Center, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the autonomous trajectory flight of UAV's with visual sensors along a designated path is studied. To unify the target points sequence in the path planning of different shapes road sections, an algorithm is proposed to determine the target path points based on the minimum angle between the vector projected by the UAV's speed and the vectors of UAV's gravity center pointing to each candidate path point in the image. Firstly, the path area is exacted from the collected image, the middle line of the path is exacted from the image level, the image is rasterized and the coordinates of the center points of the path middle line in each grid is calculated; then, the angles between the vector of UAV's velocity projection in the image and vectors from the centre of gravity the UAV's to the centroid of each path is calculated, and the centroid corresponding to the smallest angle within the constraint is selected as the local target point. Paths containing different shapes of corners are designed to test the effectiveness of the combination of image processing methods and the path guidance algorithm used during the flight of the UAV. The flight results show that the proposed method can meet the UAV's tracking flight requirements, and the trajectory deviation error is less than 0.1 meters.

Keywords: UAV; image process; target points sequence; tracking flight

基金项目: 北京市科技计划_空间科学国家实验室培育项目 (No. Z191100004319004) 资助。

作者简介: 冯宇 (1996 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机自主导航技术。E-mail: 15101647133@163.com

通讯作者: 高东 (1978 -), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为飞行器导航制导与控制技术。E-mail: gaodong@nssc.ac.cn

收稿日期: 2022-03-25; **修订日期:** 2022-04-20

1 引言

近年来,随着研究的深入和成果的转化进程加快,无人机的应用领域不断扩展,执行的任务也更趋复杂化。基于多传感器数据融合的导航系统在为无人机提供精确的状态估计的同时,衍生出障碍识别、路径规划等功能,是无人机自主执行复杂任务的基础。

文章研究在没有路径先验位置信息的前提下,基于视觉辅助导航的无人机沿指定路径飞行过程中的实时路径规划算法。其中关键技术是从实时采集图像中提取路径的延伸信息,并基于当前时刻无人机相对于路径的状态确定实时局部目标路径点坐标,驱动无人机朝目标点机动。

国内外针对无人机的路径规划进行了大量研究,根据是否有环境先验信息,分为传统算法和智能反应算法。传统算法如 A* 算法^[1]、细胞分解法^[2]、人工势场法^[3]等需要提前载入执行任务环境信息。智能反应算法如遗传算法、粒子群算法、蜂群算法等实时采集环境信息,根据机体在环境中的状态进行路径规划。

上述路径规划算法用于复杂环境中寻找最优路径,有异于无人机自主循迹飞行的场景。关于无人机的自主循迹的研究主要集中在解算无人机相对目标路径的位置偏差,确定导引指令修正偏差。文献[4]提出一种基于 Hu 不变矩的快速算法,匹配采集图像中的导引轨和模板,根据匹配结果进行路径规划。文献[5]基于 OpenMV 采集的图像计算无人机的飞行偏差,结合其他传感器进行位姿调整,控制无人机沿确定路线飞行。此外,无人机应用于线路巡检也可视为自主循迹飞行,并有相应研究。

目前无人机自主循迹飞行的路径规划算法的不足是没有统一的确定不同形状路段和拐角的目标路径点坐标的方法,在与模板匹配的基础上设置对应的指令,或依赖解算相对位置偏差再修正,为了解决这一现象导致的循迹飞行效率低,飞行轨迹地面与路径重合度较低的问题,在提取出路径中间线、图像栅格化将中间线分段,并计算各段中间线的中心点坐标,即各路径中心点的坐标;分别计算图像中间点到各路径中心点矢量与机体速度在图像中投影矢量

的夹角,选取最小夹角对应的路径中心点作为局部目标路径点。为了避免确定的目标点距离当前位置较近引起循迹效率低,同时也为了避免确定的目标点在视野内的最远点,设定候选区域,将目标点约束在候选区域内。设置了包含不同形状拐角的路径环境,使用无人机平台在此环境中进行算法验证。飞行结果表明设计的算法对不同形状路径有通用性,满足了自主循迹飞行的需求,同时极大提高了轨迹的重合度和规划的效率。

2 视觉导引的无人机飞行控制

无人机本体系定义如下图所示,以重心为原点, ox_b 轴正方向沿机体纵轴指向机头, oz_b 轴正方向指向机体正下方。 oz_b 、 ox_b 和 oy_b 轴构成右手定则^[6-7]。对于没有搭载磁力计的飞行平台,导航系与无人机起飞前位于地面时的本体坐标系重合。



图1 无人机本体坐标系

Fig.1 UAV's body coordinate system

数字图像坐标系(如图2) OUV :原点在图像左上角, OU 轴平行于图像横轴向右, OV 轴平行于图像纵轴,向下。

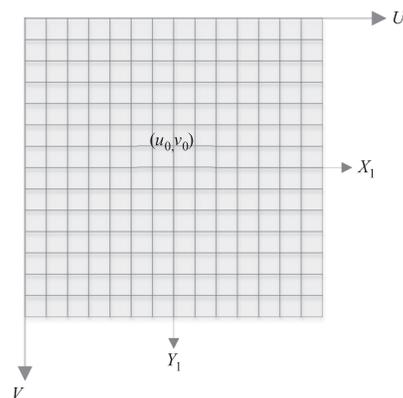


图2 物理图像坐标系与数字图像坐标系

Fig.2 Physical image coordinate system and digital image coordinate system

多旋翼底层飞行控制分为四个层次,分别为位置控制、姿态控制、控制分配和电机控制,如图3所示。

X 型四旋翼飞行器的动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{P} = V \\ \dot{V} = -\frac{u}{m}Re + ge \\ \dot{\Theta} = W\omega \\ J\dot{\omega} = -\omega \times (J\omega) + G_\tau + \tau \end{cases} \quad (1)$$

其中, P 为无人机位置向量; V 为无人机速度矢量; e 为导航坐标系 D 轴方向的单位向量; R 是由无人机本体系到导航系的旋转矩阵; u 是无人机旋翼产生的升力; Θ 表示无人机的姿态角; W 是机体姿态角变化率与机体角速度之间的转换矩阵; ω 表示无人机三轴角速度; J 表示无人机的转动惯量; G_τ 表示陀螺力矩; τ 表示三轴力矩。各向量分量如下式定义:

$$\begin{cases} P = [P_x \ P_y \ P_z]^T \\ V = [V_x \ V_y \ V_z]^T \\ \Theta = [\phi \ \theta \ \psi]^T \\ \omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T \\ G_\tau = [G_{\tau,x} \ G_{\tau,y} \ G_{\tau,z}]^T \\ \tau = [\tau_x \ \tau_y \ \tau_z]^T \end{cases} \quad (2)$$

水平位置通道动力学方程:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \end{bmatrix} = -g \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

其中, ϕ, θ, ψ 分别表示无人机的滚转角、俯仰角和偏航角。

高度通道动力学方程:

$$\begin{cases} \dot{P}_z = V_z \\ \dot{V}_z = g - \frac{u}{m} \end{cases} \quad (4)$$

姿态动力学方程:

$$\begin{cases} \dot{\Theta} = \omega \\ J\dot{\omega} = \tau \end{cases} \quad (5)$$

针对式(3)、式(4)和式(5)表示的线性系统模型,设计 PID 控制器。控制目标是期望状态与真实状态的误差为 0。多旋翼飞行器是欠驱动系统^[8], 有 4 个输入 ($u \in \mathbb{R}, \tau \in \mathbb{R}^3$), 6 个输出 ($P \in \mathbb{R}^3, \Theta \in \mathbb{R}^3$), 因此多旋翼只能跟踪 4 个指令 ($P_d \in \mathbb{R}^3, \psi_d \in \mathbb{R}$), 剩余的指令 (期望滚转角 $\phi_d \in \mathbb{R}$, 期望俯仰角 $\theta_d \in \mathbb{R}$) 由期望位置指令 $P_d = [P_{d,x} \ P_{d,y} \ P_{d,z}]^T$ 和期望偏航角 ψ_d 确定。因此, 无人机机动的关键在于给出期望位置和期望偏航角。

当一个飞行任务没有特殊的载荷指向要求, 多旋翼无人机的飞行前进方向不必严格要求与机体的某一轴指向重合, 即不必改变偏航角来调整无人机前向和侧向指向, 以固定的偏航角飞行基本保证无人机在小姿态角飞行过程中本体坐标系与起飞前的本体坐标系保持平行, 为无人机姿态解算带来便利。且若设置初始时刻本体系与导航坐标系平行, 数字图像坐标系的坐标转换至导航坐标系的过程就极为简化。基于此前提, 提出了确定目标路径点的方法。

3 候选目标点提取

对于循迹飞行, 关键点之一在于确定下一时刻的目标点, 由此生成相对于当前时刻的期望位置。搭载的相机能够获取丰富的环境信息, 包含干扰项, 目标点获取的前提是去除干扰项, 将路径处理为离

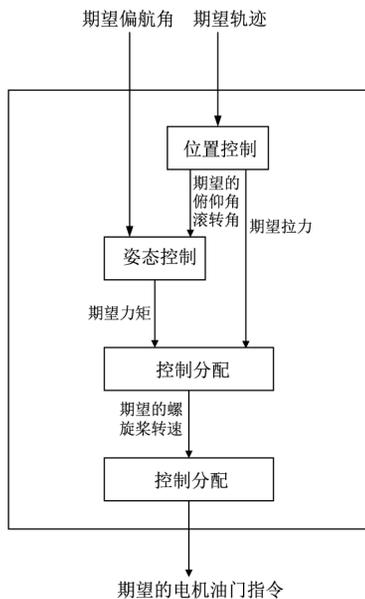


图 3 无人机组联控制

Fig. 3 UAVs' cascade control

在滚转角和俯仰角较小的飞行姿态下, 忽略高阶项, 对动力学方程进行线性化, 得到解耦的动力学方程。

散的各个点。

3.1 路径预提取

采集的图像根据色彩模型不同有不同的格式,为了便于处理,输出的图像为 RGB 格式。路径提取方法之一是将 RGB 图像转换为灰度图,根据不同灰度分布转换为二值图。例如当背景为绿色,主路径为红色,一般二值处理后,主路径为黑色,对应像素值为 0,背景为白色,对应像素为 1,进而求补图,主路径变为白色 1,背景变为黑色 0,便于后续处理。但当主路径周边出现干扰,如白色条纹等,由于灰度分布改变,二值化后,主路径可能被处理为背景。为了避免丢失主路径信息,采用根据主路径 RGB 阈值范围直接提取主路径、其余在阈值外的像素点统一处理为背景的方法去除干扰。在实时采集的图像中,主路径对应的像素点三通道 RGB 的值满足:

$$\begin{cases} r_{\min} \leq R \leq r_{\max} \\ g_{\min} \leq G \leq g_{\max} \\ b_{\min} \leq B \leq b_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

由此关系提取出主路径区域。

3.2 路径分段离散

二值处理后的图像中,主路径仍为连通区域,为了确定期望位置,将连通区域分段并计算各段的中心坐标。

流程如下:

- ①输入经过路径提取的二值图;
- ②将路径细化成线,使用腐蚀^[9]和细化^[10]处理;
- ③将路径细化为线的图片均匀分为 $M \times N$ 格,如 10×10 ,分别计算各个小格的像素中心点在数字图像坐标系中的坐标;
- ④输出各中心点坐标矩阵。

仅仅经过二值处理的图像中路径区域宽度跨过几个像素,路径的中间线上的像素点是最具有代表性的点。将路径宽度压缩到中间线附近,对应图像中由面转换为线。

腐蚀属于图像形态学处理,结构元 B 对像素集合 A 进行相关操作,结构元的大小为 3×3 ,原点为中心,图像操作的结构元添加最小可能数量的背景元素来形成一个矩形阵列转化成矩形。结构元 B 在 A 上运行,以便 B 的原点能够访问 A 的每个元素,来创建一个新的集合。在 B 的原点所在的每个

位置,如果 A 能够完全包含 B ,则将该位置标记为新集合的一个元素;否则标记为非新集合的元素。即定义如下 B 对 A 的腐蚀:

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (7)$$

此处,使用 \ominus 表示腐蚀处理。 B 对集合 A 的腐蚀结果如图 4(e)所示。

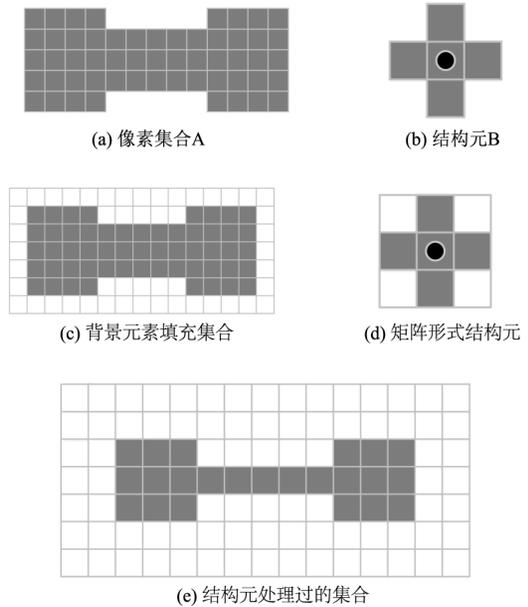


图 4 腐蚀基本过程

Fig. 4 Basic erosion process

图 4(c)是用最小可能数量的背景元素将集合转换成矩阵,当结构元的原点位于原始集合的边缘,背景边界大到足够容纳整个结构元。

图像形态学匹配的含义:

$$A \odot B = (A \ominus B_1) \cap (A^c \ominus B_2) \quad (8)$$

其中,使用 \odot 表示匹配过程(如图 5 所示),定义 $B = \{B_1, B_2\}$,定义 B_1 为结构元 D ,小窗口 W 包围结构元 D ,关于 W 的 D 的局部背景定义为差集 B_2 。

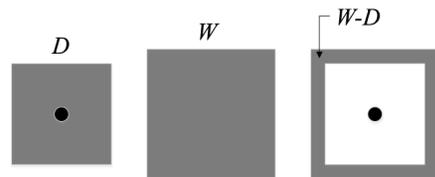


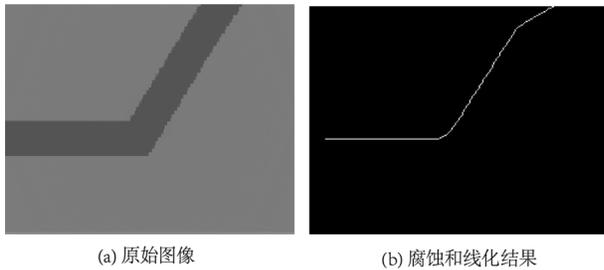
图 5 匹配过程

Fig. 5 Matching process

形态学 B 对 A 的细化定义为:

$$A \otimes B = A - (A \odot B) \quad (9)$$

其中, \otimes 表示细化。在步骤②中设置相应结构元模板,将在原始图像中呈宽条状的路径处理为线状,效果如图 6 所示。



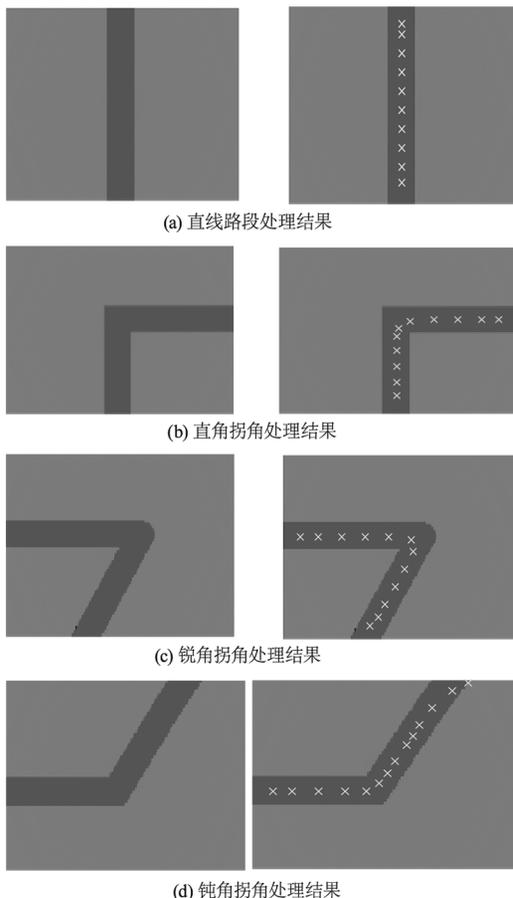
(a) 原始图像 (b) 腐蚀和线化结果

图 6 路径线化结果

Fig. 6 Make path thinned

一方面便于步骤③图像栅格化,避免出现路径宽度方向横跨相邻两格的现象;另一方面,由腐蚀的原理可知,设置相应的结构元实现宽条状路径图像腐蚀的方向是从路径两侧指向路径的中间线,提取的中心点序列连线与路径的理想中间线重合度较高,将提取出的中心点称为“路径中心点”。

图 7 分别为直线、曲线、锐角、直角、钝角形状路径的成像以及提取的路径中间线的点。结果表明,提取的点基本为路径中心线,靠近图片边缘的略有偏差,原因是腐蚀和减薄细化处理有误差,但经过后续设定候选区域的处理,靠近图片边侧的中间线解算误差对路径规划影响可忽略不计。

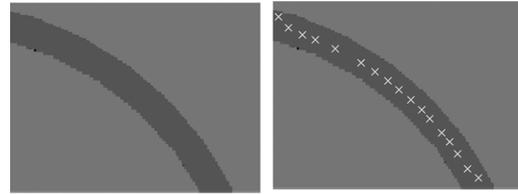


(a) 直线路段处理结果

(b) 直角拐角处理结果

(c) 锐角拐角处理结果

(d) 钝角拐角处理结果



(e) 弧线路段处理结果

图 7 不同拐角和路段处理结果

Fig. 7 Results of processing different corners and sections

4 路径规划与指令生成

前文论述了对实时采集图像的处理过程,得到一系列路径中心点的坐标。循迹飞行的关键技术在于能实时根据无人机和路径信息,确定无人机运动的局部目标路径点的坐标,整个飞行过程拼接出全局目标路径点序列,为了保证无人机自主循迹飞行的效率和精确度,目标路径点序列的投影应尽可能反映出路径的延伸情况。本章论述局部目标路径点的确定过程。

若依次经过前进方向上的每个点,则效率低下,若选取视野中最远的目标点作为期望位置,则无人机飞行轨迹的投影不能完全地与路径重合,尤其在拐角处。论文提出一种结合无人机飞行速度矢量在图像中投影来确定局部目标路径点的方法。该方法为了提高循迹飞行的效率,也为了避免因 2.2 节路径离散处理时靠近图片边缘的路径中心点提取产生的偏差导致无人机按此规划飞离路径上方,在选择目标点前,对离散的中心点进行处理,剔除距离当前无人机重心在图像中投影点 U 较近和较远的路径中心点。为以图片中心为原点,剔除半径 r_1 圆内的路径中心点,剔除半径 r_2 ($r_1 < r_2 < \min(w, h)/2$) (w 为图像的宽度, h 是图像的高度,单位是像素) 圆外的路径中心点,在圆环内的路径中心点作为候选目标点,此处称为“候选航迹点集 $S = \{p_i(x, y) \mid i = 1, 2, \dots, m\}$ ”,即 p_i 在数字图像坐标系中满足:

$$r_1 < |p_i - U| < r_2 < \min(w, h)/2 \quad (10)$$

式中, $|\cdot|$ 表示取模值,基于上述处理,定义图像中无人机重心在图像中的投影点 U 到各候选航迹点 $p_i(x, y)$ 的向量 T_i :

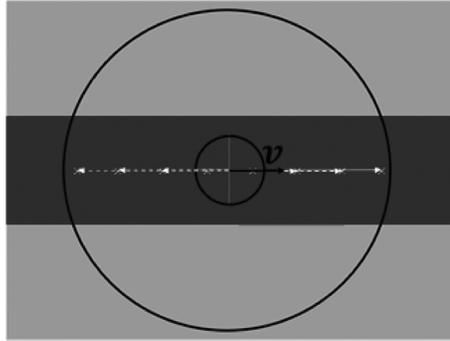
$$T_i = p_i - U, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (11)$$

T_i 与当前无人机速度矢量在图像中投影的单位矢量 v 的夹角 $\langle T_i, v \rangle$,选取最小夹角对应的有效航迹点 p_k 作为局部目标路径点:

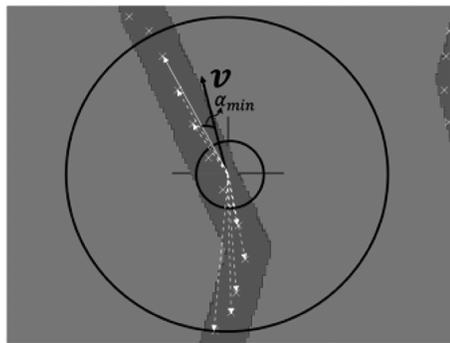
$$p_k(x_i, y_i) = \underset{p_i}{\operatorname{argmin}}(\langle p_i - U, v \rangle) \quad (12)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 为计算两个向量的夹角运算。

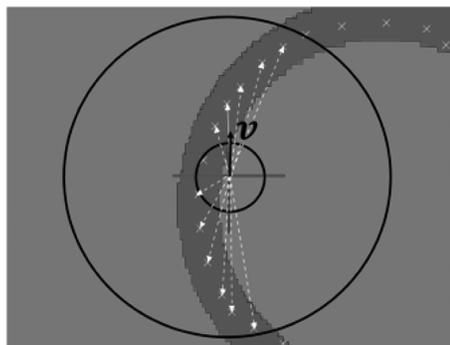
图8表示直线、拐角和弧线段的目标点选取情况,其余未涉及的形状的路径目标点选取原理相同。



(a) 直线路段确定目标路径点



(b) 拐角处确定目标路径点



(c) 弧线段确定目标路径点

图8 不同路段路径规划

Fig.8 Target waypoints for different sections of path

在图8中,“×”表示提取的路径中心点,“+”表示无人机滚转角和俯仰角较小时的无人机中心在图像中的投影点 U ,选航迹点位于大圆和小圆构成的圆环内,无人机速度矢量在图像中投影用黑色箭头表示,图像中无人机重心投影点指向各候选航迹点的向量用白色虚箭头表示。

无人机重心投影点指向候选航迹点的向量 T_i 与 v 夹角小于 90° 的候选航迹点的向量方向是无人机下一时刻的可能运动方向。选取向量夹角 \langle

$T_i, v \rangle$ 最小的 T_i 对应的点作为目标点,图中用白色实箭头表示对应向量,如果满足角度条件的向量不唯一,选取其中模值最大的向量,即距离最远的有效航迹点作为目标点,对应直线路段的选取结果。

目标路径点坐标从数字图像坐标系转换到导航坐标系中的坐标 $P(p_{wx}, p_{wy}, p_{wz})$:

$$\begin{bmatrix} p_{wx} \\ p_{wy} \\ p_{wz} \\ 1 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} (R_{wb})_{3 \times 3} & (T_{wb})_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (R_{bp})_{3 \times 3} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t - u_0 \\ y_t - v_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, k 为图像像素与实际环境之间的尺度因子,可以通过路径宽度与的定高飞行时采集图像中对应路径区域的像素大小的比值确定; R_{wb} 为无人机本体坐标系到导航坐标系的旋转变换矩阵,由于没有偏航角变化,导航系与初始本体系重合; T_{wb} 为无人机的位置向量,对应无人机位置状态变化量的累积值; R_{bp} 为数字图像坐标系到无人机本体坐标系的旋转变换矩阵; (u_0, v_0) 为图2所示图像中间点在数字图像坐标系中的坐标。

$$R_{bp} = \begin{bmatrix} \cos(-90^\circ) & \sin(-90^\circ) & 0 \\ -\sin(-90^\circ) & \cos(-90^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由连续实时采集图像确定的局部目标路径点拼接成全局目标路径点,形成目标路径点序列:

$$L = \{P_i(p_{wxi}, p_{wyi}, p_{wzi}) \mid i = s, 1, 2, \dots, e\} \quad (15)$$

其中, P_s 表示起始点; P_e 表示飞行路径终点。

式(15)为规划的全局目标路径点序列,在没有路径先验知识的前提下是无法获取的,且该路径规划结果基于实时飞行状态和实时采集图像。前文提到无人机飞行控制输入是期望位置和期望偏航角,根据路径规划的前提,保持偏航角不变,则期望偏航角与初始偏航角保持一致,无人及本体坐标系与导航坐标系基本平行。期望位置由无人机实时位置矢量和目标路径点相对于无人机的实时位置矢量的偏差确定。相对位置偏差由数字图像坐标系坐标偏差转换到本体坐标系中。

无人机保持定高飞行,因此只需解算水平面的位置偏差。由路径规划结果得到位置偏差:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_X \\ \Delta P_Y \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos(-90^\circ) & \sin(-90^\circ) \\ -\sin(-90^\circ) & \cos(-90^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t - u_0 \\ y_t - v_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

由于无人机在飞行过程中保持指向不变,因此无人机在小角度飞行时,本体系到导航系的旋转矩阵为单位阵,则无人机的实时期望状态为:

$$\begin{bmatrix} P_{d,X} \\ P_{d,Y} \\ P_{d,Z} \\ \psi_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{t,X} + \Delta P_X \\ P_{t,Y} + \Delta P_Y \\ P_{t,Z} \\ \psi_t \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, $P_{t,X}, P_{t,Y}, P_{t,Z}, \psi_t$ 为无人机实时状态。将期望状态输入飞控系统,驱动无人机向目标位置点机动。

5 飞行实验

算法的应用平台是 Parrot Mambo 无人机,搭载以下传感器:

- ①底部搭载分辨率为 120×160 , 帧率为 60 f/s 的相机;
- ②底部搭载超声波传感器,距离 4 m 的范围内测量高度;
- ③气压测量机,用于高度估计;
- ④惯性测量单元。

设定导航系与起飞前地面位置上的本体系重合,小范围内,式(13)中 R_{wb}, T_{wb} 由惯性测量单元测得的姿态和位置替代。

Parrot mambo 搭载 STM32 系列芯片执行数据处理和指令生成等任务,可以根据设定程序执行自主飞行任务。设定三条不同形状路径来验证路径规划算法,路径宽度为 0.2 m,如图 9 所示。

无人机在飞行的同时进行路径规划,规划的路径点序列与飞行轨迹投影如图 10 所示。

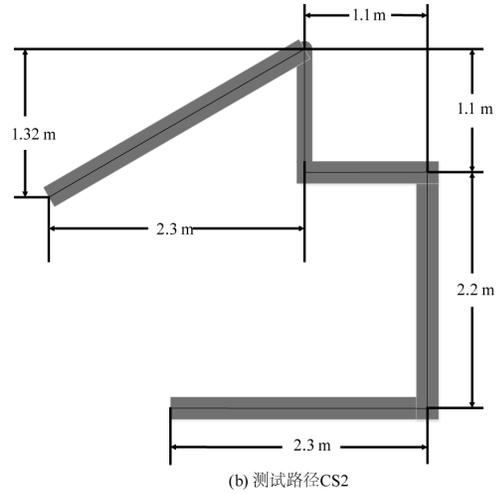
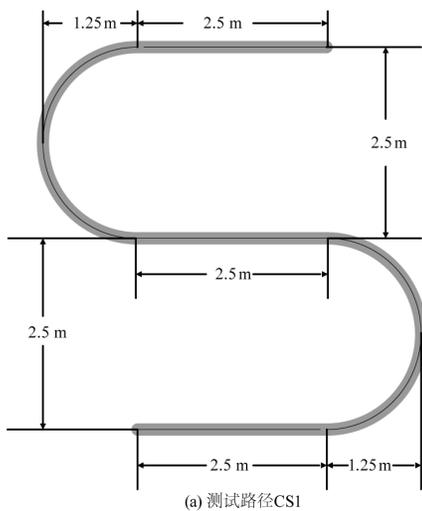


图 9 测试路径及其中间线

Fig. 9 The test paths and intermediate lines

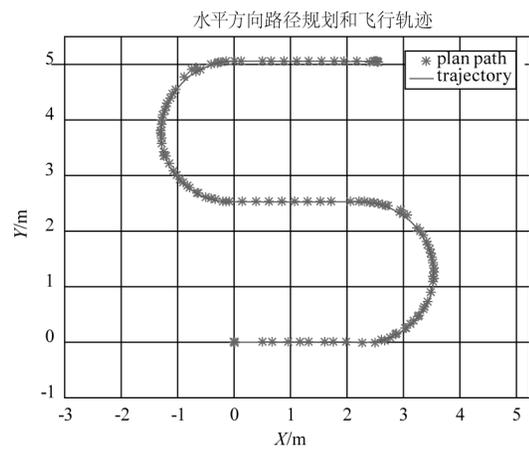


图 10 路径 CS1 目标路径点投影及飞行轨迹投影
Fig. 10 Target waypoints projection and flight trajectory projection on path CS1

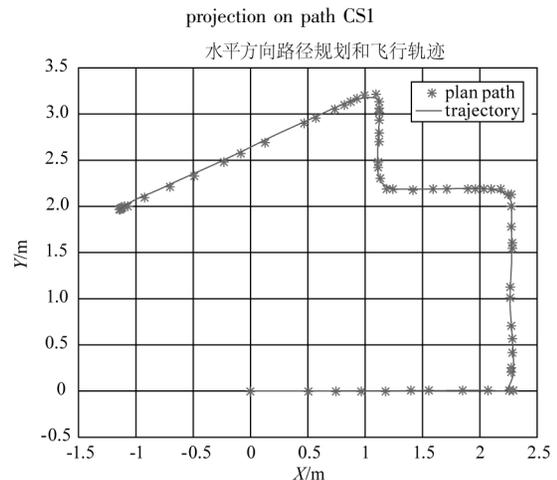
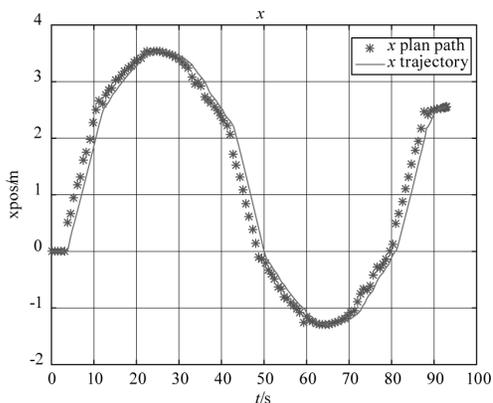
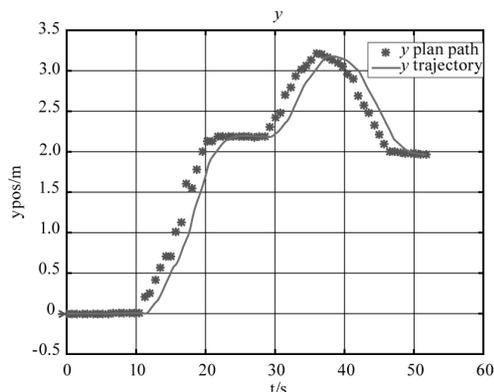


图 11 路径 CS2 目标路径点投影及飞行轨迹投影
Fig. 11 Target waypoints projection and flight trajectory projection on path CS2

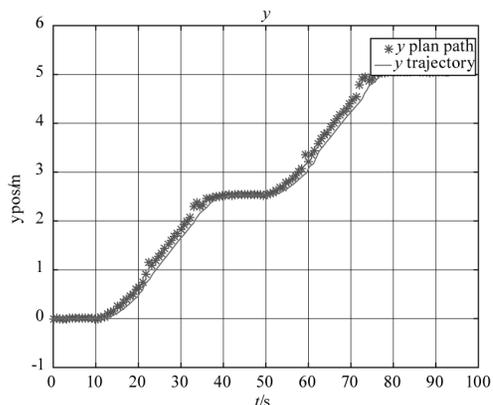
飞行的同时路径点坐标与当前位置差值就是控制系统的输入,在飞行过程中的控制指令和状态之间的关系如图 12 ~ 14 所示。



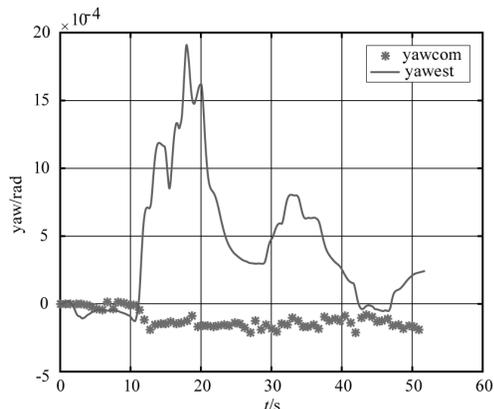
(a) 沿路径CS1飞行在导航系x轴的指令和状态



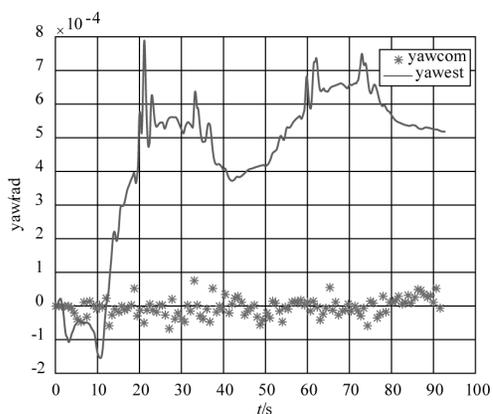
(b) 沿路径CS2飞行在导航系y轴的指令和状态



(b) 沿路径CS1飞行在导航系y轴的指令和状态



(c) 沿路径CS2飞行在导航系的偏航角指令和状态



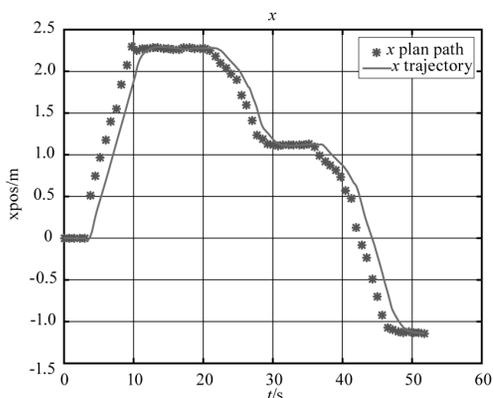
(c) 沿路径CS1飞行在导航系的偏航角指令和状态

图 13 路径 CS2 飞行过程指令

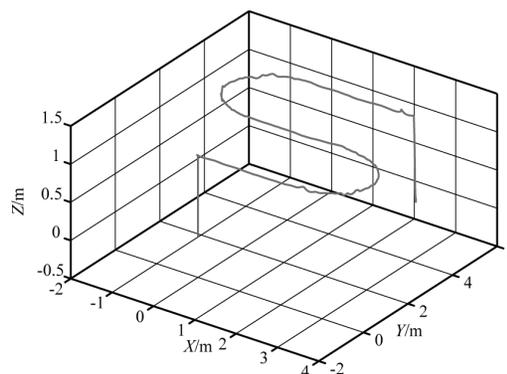
Fig. 13 Instructions for flight along path CS2

图 12 路径 CS1 飞行过程指令

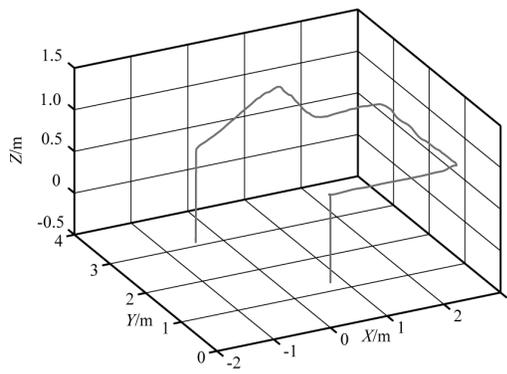
Fig. 12 Instructions for flight along path CS1



(a) 沿路径CS2飞行在导航系x轴的指令和状态



(a) 沿路径CS1循迹飞行轨迹



(b) 沿路径CS2循迹飞行轨迹

图 14 无人机循迹飞行轨迹

Fig. 14 UAV's tracking flight trajectories

为了验证提出的算法对于无人机自主循迹效率的影响,设置同一路径下,将使用论文提出算法和经典的路径像素分布导引的算法循迹飞行过程进行比较,结果如图 15 ~ 19 及表 1 所示。

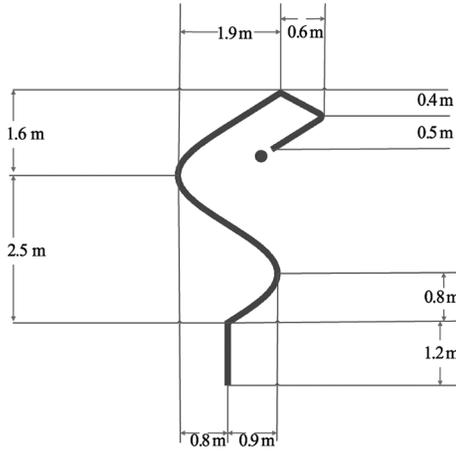


图 15 对比飞行路径

Fig. 15 Flight path for comparison

水平方向路径规划和飞行轨迹

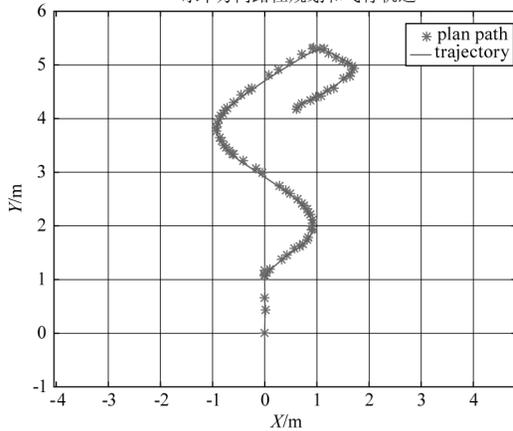


图 16 速度/目标最小夹角导引的路径点及飞行轨迹

Fig. 16 Target waypoints and flight trajectory guided by minimum

angle between velocity and target vector

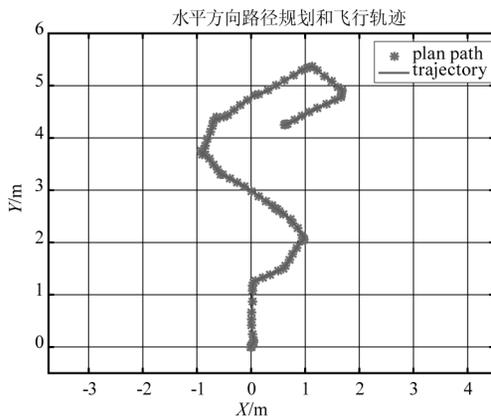


图 17 基于路径像素分布统计结果规划的路径点及飞行轨迹

Fig. 17 Target waypoints and flight trajectory guided by

pixel distribution statistical result

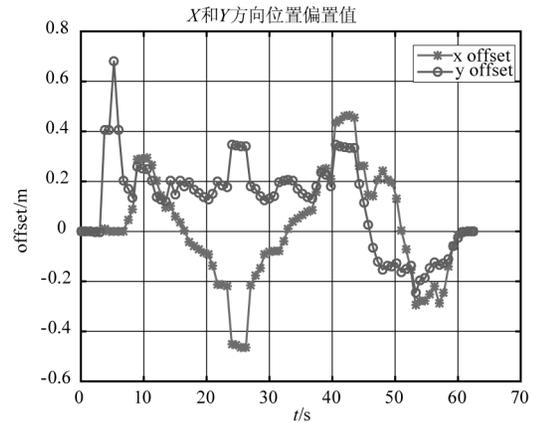


图 18 速度/目标最小夹角导引的飞行指令偏置值

Fig. 18 Instruction values guided by minimum angle

between velocity and target vector

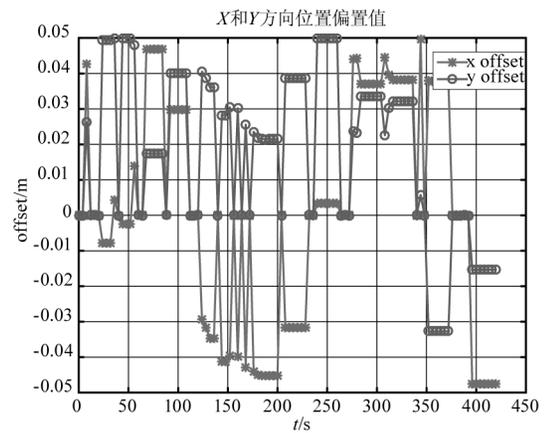


图 19 基于路径像素分布统计结果导引的

飞行指令偏置值

Fig. 19 Instruction values guided by pixel distribution statistical result

表 1 不同方法对比

Tab. 1 Comparison of different algorithms

	论文算法	基于路径像素分布统计
飞行时间/s	63	460
单次最大位置偏置值/m	0.7	0.05
运动方向	任意方向	本体 ox_b 轴

分析总结:

1) 将图像目标连通域提取后,使用腐蚀和细化处理,可以有效提取图像中的路径中心线,将细化得到的中心线连续像素离散为栅格中心点,能获得严格沿路径中心分布的路径点;

2) 计算目标路径点与路径中间线的水平距离作为重合度误差评判标准,提出的路径规划算法确定的目标路径点序列拟合出的曲线与路径中间线重合误差小于 0.1 m,即无人机重心在地面投影在路

径两侧内。

3) 选取最小夹角对应的候选路径中心点,在弧线和拐角处,确定的目标路径点与无人机的水平距离较近,无人机在此形状的路段需要多次规划局部目标路径点;在直线路段确定的局部目标路径点处于候选区中较远位置,规划次数少,与图中目标路径点的稠密程度对应。

4) 无人机沿锐角拐角的一条边进入拐角前,实时采集的图像形态学处理避免了将拐角顶点处理为候选目标路径点,提前将另一条边的路径中心点纳入候选目标点中,无人机重心到候选目标点的矢量与速度矢量夹角保持小于 90° 。

5) 在飞行过程中,实时进行路径规划,规划的局部路径点坐标与当前无人机的位置坐标的差值作为飞控输入,因此,在指令和状态的结果图中,在中间路段,状态滞后于指令。而在平行于导航系坐标轴的方向上运动时,出现指令和状态重叠的现象。局部路径点坐标既能导引无人机向终点位置运动,又能修正无人机飞离路径的偏差。

6) 无人机飞行过程中保持固定指向,偏航角指令为0,但在机动过程中,出现震荡现象,但幅度极小。

6 结 语

为了解决自主循迹飞行过程中的路径规划问题,文章研究了搭载视觉传感器的无人机从采集的图像中获取路径信息,实时确定局部目标路径点坐标的方法。根据路径区域的像素三通道阈值提取出路径信息,对图像中有宽度的路径区域进行形态学处理,获取路径中心点。为了保证循迹飞行的效率和准确率之间的平衡,设定目标路径点的候选区域,提出了分别计算无人机重心到各路径中心点的矢量与无人机速度向量在图像上投影的夹角,选取最小夹角对应的路径中心点作为局部目标路径点,在拐角处选出较近的路径中心点,且需要多次进行规划;在直线段选取出候选区内较远的路径中心点,规划次数较少。最后设定了包含不同形状路段的路径对算法进行测试,基于以上方法,无人机依次经过规划出的目标路径点序列的轨迹投影与设定的路径重合度高,在拐角段循迹精确度高,在直线段,既保证了精确度,又提高了效率。但仍然面临硬件实现过程中,执行的指令落后于实时发布的指令的现象。

参考文献:

[1] Anh L, Veerajagadheswar P, Vinu S, et al. Modified A-star algorithm for efficient coverage path planning in tetris in-

spired self-reconfigurable robot with integrated laser sensor[J]. Sensors, 2018, 18(8): 2585.

- [2] Zhang S Y, Shen Y K, Cui W S. Path planning of mobile robot based on improved artificial potential field method[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 644-650: 154-157.
- [3] Li Min, Huang Min, Cheng Zhifeng, et al. Application of genetic algorithm in path planning[J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(8): 255-260. (in Chinese)
李敏, 黄敏, 程智锋, 等. 遗传算法在路径规划上的应用[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(8): 255-260.
- [4] Lin Yong, Qin Wenjing, Qi Guoqing. Research of the UAV autonomous tracking based airborne visual navigation[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(8): 21-24. (in Chinese)
林勇, 秦文静, 戚国庆. 基于机载视觉引导的无人机自主循迹研究[J]. 电子设计工程, 2018, 26(8): 21-24.
- [5] Yu Haiyang, Wu Yakun, Zhou Meng. Design of indoor visual tracking system for multi-rotor UAV[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019, (13): 89-90. (in Chinese)
余海洋, 吴亚昆, 周梦. 多旋翼无人机室内视觉循迹系统设计[J]. 科学技术创新, 2019, (13): 89-90.
- [6] Fang Xu, Liu Jinkun. Dynamic surface control for quadrotor unmanned air vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 42(8): 1777-1784. (in Chinese)
方旭, 刘金琨. 四旋翼无人机动态面控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(8): 1777-1784.
- [7] Khalifa A, Fanni M. A new quadrotor manipulation system; modeling and point-to-point task space control[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2016, 15(3): 1-13.
- [8] Suo Wenkai, Hu Wenming, Ban Liming, et al. Research on flight control of quadrotor UAV based on visual image[J]. Laser Technology, 2020, 44(4): 451-458. (in Chinese)
索文凯, 胡文刚, 班利明, 等. 基于视觉图像的四旋翼无人机飞行控制研究[J]. 激光技术, 2020, 44(4): 451-458.
- [9] Du Huimin, Jiang Bianbian, Chang Libo, et al. Improvement and parallel implementation of dilation and erosion algorithms[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2017, 22(1): 88-93. (in Chinese)
杜慧敏, 蒋怏怏, 常立博, 等. 膨胀与腐蚀算法的改进及并行实现[J]. 西安邮电大学学报, 2017, 22(1): 88-93.
- [10] Lü Junbai. AN efficient thinning algorithm for binary images[J]. Computer Engineering, 2003, 29(18): 147-148. (in Chinese)
吕俊白. 一种有效的二值图像细化算法[J]. 计算机工程, 2003, 29(18): 147-148.