无人飞行器基于前视序列图像的地形跟随技术

魏东辉[1,2],陈万春[1],程 进[2]

(1. 北京航空航天大学 宇航学院,北京 100191; 2. 先进制导控制技术国防重点实验室,北京 100074)

摘 要: 针对飞行器未知环境下自主地形跟随问题,提出了基于前视序列图像天地线的地形跟随方法,并利用适应角法设计了制导律,该方法利用被动成像实时探测飞行前方地形信息,降低了对数字地图保障及高精度导航的需求。六自由度非线性数学仿真结果表明:基于前视序列图像天地线的方法较传统基于数字地图的方法,地形跟随平均离地高度可降低35%以上,可大幅提高飞行器超低空突防性能。

关键词: 地形跟随; 前视序列图像; 制导律

中图分类号: TG174.44 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0428002

Terrain following based on forward-looking image sequences for unmanned air vehicles

Wei Donghui[1,2], Chen Wanchun[1], Cheng Jin[2]

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Guidance and Control, Beijing 100074, China)

Abstract: According to the problem of autonomous terrain following in unknown environment for UAVs, a novel terrain following method was introduced based on the skyline of the forward-looking image sequences. And the guidance law of adaptive angle method was designed in detail, where the forward terrain information was detected by the passive images in real time, so the digital map and the high precision navigation requirement were reduced. The 6DOF simulation results demonstrate that the method is better than the traditional method based on digital map, the average terrain following height from the ground can be reduced by over thirty-five percent, so the method can improve the penetration performance significantly.

Key words: terrain following; forward-looking image sequences; guidance law

收稿日期: 2016-08-11; **修订日期:** 2016-09-15

作者简介: 魏东辉(1987-),男,博士生,主要从事飞行器制导导航与控制方面的研究工作。Email:weidonghui2652@sina.com

导师简介: 陈万春(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事飞行器总体设计方面的研究工作。Email:wanchun_chen@buaa.com

程进(1970-),男,研究员,博士生导师,主要从事飞行器制导导航控制方面的研究工作。Email:13301102393@189.cn

0 引 言

地形跟随(Terrain Following,TF)即飞行器随地形起伏贴地飞行，目的是充分利用地球曲率和地面杂波干扰,大幅降低被探测概率,增大敌方防御系统的拦截难度，提高对抗条件下的突防概率和生存能力。地形跟随技术是提高亚声速无人飞行器突防能力的关键而有效的手段,如何进一步降低离地高度,改善地形跟随性能是当前的研究热点。

目前工程上地形跟随主要有以下两种实现方式:(1)基于前视雷达探测的方式,早期有人飞机地形跟随就是通过前视雷达来探测获得前方地形信息,但受成本、体积、重量、隐身性能等多方面的限制，该方式在无人飞行器上的适用范围很小;(2)基于“数字地图+高精度导航+离线航路规划”的方式,该方式对飞行器的导航系统精度和数字地图保障要求很高,在一定的导航精度和数字地图精度条件下,为确保飞行安全,只能设定足够大的安全高度裕度,因而飞行航迹往往无法很好地贴近地面，对地形遮挡作用和近地杂波的利用程度有所降低[1-2]。

基于地形跟随技术发展现状和发展需求，文中提出并研究了一种新的技术途径——通过单目视觉序列图像获取飞行前方地形和障碍物信息，利用解算出的视场“天地线”相对位置信息生成制导指令,从而实现地形跟随飞行。该方法能够克服雷达探测存在的体积、重量、隐身等问题;较“数字地图+高精度导航+离线航路规划”的方式,由于可以应用前视实时障碍物信息,因此能有效降低导航精度、地图保障精度的需求,同时大幅降低离地飞行高度。

近年来随着计算机视觉技术的飞速发展，国内外利用前视序列图像实现障碍物检测和距离解算的技术研究已经取得一定成果,文中以此为基础,以亚声速无人飞行器超低空突防为应用背景，开展了基于前视序列图像的地形跟随方案及制导律设计方法研究。

1 基于前视序列图像的障碍物/地形探测技术基础

目前利用前视序列图像进行障碍物/地形探测及距离解算的研究已取得了一定成果，具体包括以下几个方面[3]:

(1) 基于特征提取的障碍物探测技术

该技术将整个视觉探测分为障碍物特征提取和距离解算两步,主要应用包括基于 Canny 算子、OTSU 准则分割等经典算法的特征提取技术，应用特征提取可以从序列图像中提取出视场的天地线,如图 1 所示。

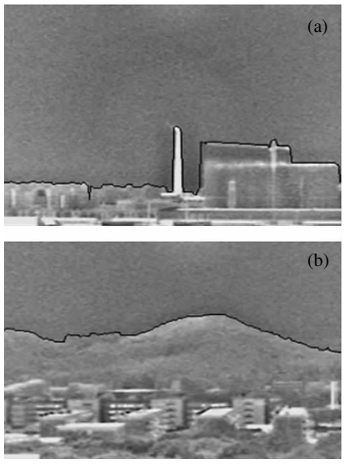

图 1 基于经典算法的天地线提取结果

Fig.1 Results of skyline extraction based on the classical algorithm

(2) 基于场景分层和深度标记的障碍物检测与测量技术

该方法将障碍物检测和测量统一为一个优化求解问题。首先,基于惯导的姿态等信息建立飞行器的前视运动视觉模型，然后将前视三维场景分解为一组平行的，垂直于航向的，具有不同深度的层的集合，序列图像总的运动可以看作由各个层的运动混合而成，这样将复杂的场景重建问题简化为对各层深度集和像素标记场的估计。应用该技术的障碍物检测结果如图 2 所示,颜色越深表明距离越远。

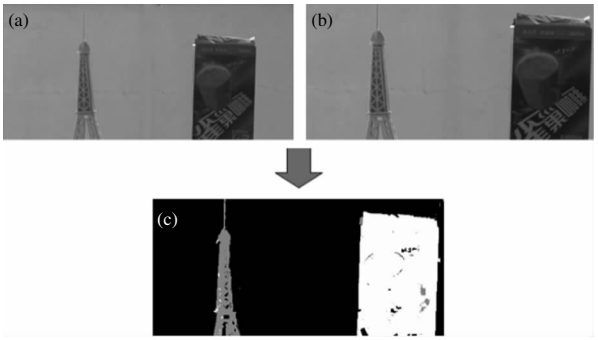

图 2 基于场景分层的障碍物检测结果

Fig.2 Obstacle detection results based on scene layering

(3) 障碍物/地形距离解算技术

距离解算基本原理如图 3 所示，系统通过安装

在飞行器上的光学传感器采集前视序列图像，然后对序列图像进行分析，测量出前方某个固定目标在图像平面上的坐标变化，最后将测量结果输入到测距模型中通过卡尔曼滤波方法计算出距离，其核心问题是卡尔曼滤波器的设计。通过卡尔曼滤波的过程可以逐步测得在每一帧图像拍摄的时刻目标点距光学传感器的距离。

利用前视序列图像对障碍物进行被动测距定位,距离解算仍存在一定误差,不容忽视。

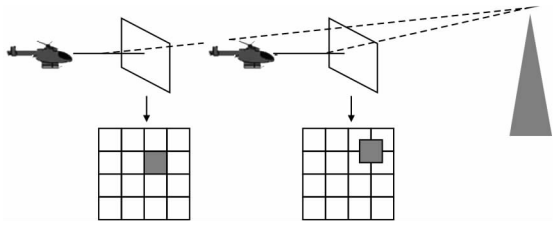

图 3 前视测距示意图

Fig.3 Principle diagram of looking forward distance estimation

2 基本假设

文中开展研究基于以下假设条件：

(1) 光学传感器光轴水平投影与速度矢量水平投影重合；

(2) 假设在俯仰方向上,通过光学传感器的机械扫描，可以保证飞行器在任意飞行状态下都能看到前方地形最高点；

(3) 光学传感器的作用距离大于 5 km，以场景分层和深度标记等障碍物检测和距离解算技术为依据，假设光学传感器视场中所有物体在成像平面上对应的像素点,可以根据场景分层技术分为两类:一类为距飞行器 5 km 以内的物体对应的像素点;一类为距飞行器大于 5 km 的物体对应的像素点,然后将距飞行器大于 5 km 的物体对应的像素点当做远处的天空背景处理,从而提取出图像中 5 km 范围以内的天地线上,如图 4 所示；

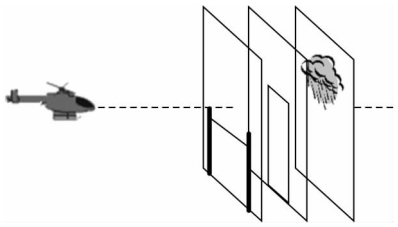

图 4 场景分层示意图

Fig.4 Principle diagram of scene layering

(4) 在任意一个指令周期中,光学传感器均能提供天地线上各物理点与飞行器的相对距离、相对高度信息。

3 基于视场天地线的地形跟随制导律设计

3.1 视场天地线概念

定义成像视场中天空和地面 (包括地面建筑物) 的分界线为天地线,参见图 1,图中深色轮廓线即为此处定义的天地线。

直观分析，当飞行员驾驶飞机进行超低空飞行时，若飞行员发现前方天地线高于飞机当前飞行高度 (如前方出现高山时)，那么飞行员总是会拉起飞机企图使飞机以一定的安全高度飞越天地线；如果飞行员发现视场中天地线的高度低于当前飞机的飞行高度 (如刚越过高山时)，那么飞行员会适当降低飞行高度以提高隐蔽性，但仍然要保证飞机以一定的安全高度飞越前方天地线。

文中以上述思想为基础，提出了一种新的地形跟随实现方式，拟利用从前视序列图像中提取的视场天地线,来描述飞行前方地形信息,并在此基础上研究有效的地形跟随策略及算法，以实现无人飞行器的自主超低空地形跟随飞行。

3.2 基于视场天地线的地形跟随方案

基于视场天地线的地形跟随总体方案如图 5 所示，其思路是前视光学传感器将摄取的序列图像输入到图像处理系统，经分析处理后提取出视场的天

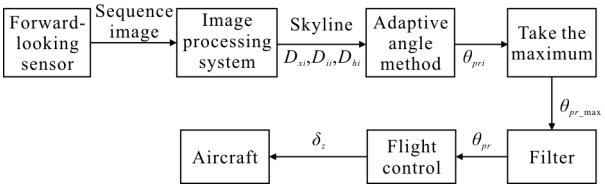

图 5 基于天地线的地形跟随方案

Fig.5 Scheme of terrain following based on skyline

地线，并解算出天地线上每一个像素点所对应物理点与飞行器的相对距离 D_{xi},D_{yi} (深度和侧向距离)和相对高度 D_{hi},如图 6 所示。在每个指令周期开始时，制导计算机针对视场天地线上每一参考点，应用适应角算法计算相应的航迹倾角指令 θ_{pri},然后经最正逻辑判断后取最大者 θ_{pr_max},再经滤波平滑处理得到最终的地形跟随控制指令 θ_{pr} 输入到飞行控制系统，

控制飞行器飞越天地线,实现地形跟随飞行。

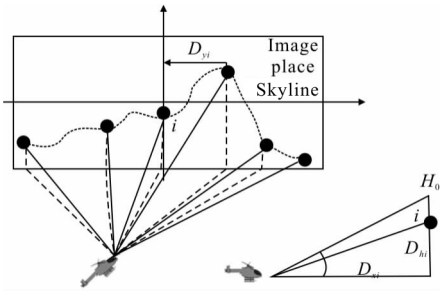

图 6 基于视场天地线的地形跟踪指令生成示意图

Fig.6 Diagram of terrain following command generation based on skyline

3.3 地形跟随制导律设计

根据上述方案，地形跟随制导律即航迹倾角控制指令 θ_{pr} 算法设计,文中以适应角法[4]原理为基础,设计了地形跟随制导律,形式如下：

$$\begin{cases}\theta_{pri}=k_\theta\times(\theta^*-F_S)\\ \theta^*=\lambda+\vartheta+\dfrac{H_0}{R}\\ \theta_{pr}=\max(\theta_{pri})\end{cases}\tag{1}$$

如图 7 所示,其中 λ 为视线角(即视线 OP 与飞行器纵轴 OX 的夹角),R 为前方山顶 P 点与飞行器质心 O 点的距离,H_0 为安全偏置高度。F_S 为抑制函数,k_θ 是信号整形角增益。

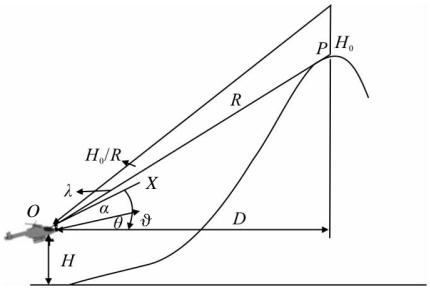

图 7 适应角法

Fig.7 Adaptive angle approach

抑制函数的设计有多种形式，文中通过研究和对比分析,将 F_S 函数设计成三段线性函数,如下所示：

$$F_S=\begin{cases}0 & D<D_1\\ \omega_1(D-D_1) & D\in[D_1,D_2)]\\ \omega_1(D_2-D_1)+\omega_2(D-D_2) & D>D_2\end{cases}\tag{2}$$

式中：ω_1,ω_2 为比例系数；D_1,D_2 为距离分段界限；D 为飞行前方地形点与飞行器沿水平飞行方向的相对距离。

关于角增益的选取,为了安全起见,在爬升时取 $k_\theta=1.2$,下滑时取 $k_\theta=1$。

3.4 考虑天地线距离解算误差的制导律修正策略

在计算控制指令 θ_{pr} 时,需考虑前视序列图像距离解算误差的影响。根据距离解算误差模型(纵向距离误差为相对距离的 10%,相对高度、侧向距离误差均为 20 m)，可以确定天地线上地形点的散布区,如图 8 所示。散布区中心坐标(D_{xi},D_{yi})分别为解算得到的障碍物与飞行器沿水平飞行方向的相对距离和相对高度信息,由于测距误差的存在,天地线上地形点 i 的实际位置散布于图中 $2E_{x\max}\times2E_{h\max}$ 的长方形网格区域内。为充分保证飞行器飞行的安全性,应取散布区左上角 i 为参考点计算航迹倾角控制指令，它为该散布区内各点对应航迹倾角指令的最大值。

于是，在距离解算误差的影响下地形跟踪控制指令 θ_{pri} 修正后的表达式为：

$$\begin{cases}\theta_{si}=\arctan\dfrac{D_{hi}+E_{h\max}+H_0}{D_{xi}+E_{x\max}}\\ \theta_{pri}=k_\theta\times(\theta_{si}-F_S)\end{cases}\tag{3}$$

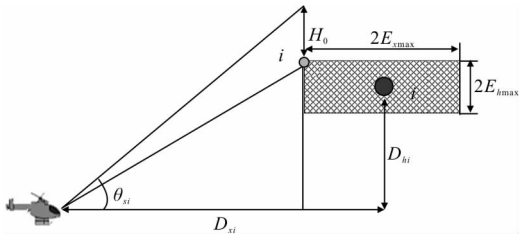

图 8 考虑测距误差时地形跟踪控制指令生成方法

Fig.8 Approach for terrain following command generation when considering ranging error

4 六自由度非线性仿真

4.1 天地线提取建模仿真方法

由于没有条件获取地形跟随条件下的真实序列图像,故为便于研究开展和验证,文中利用真实的数字地图,通过数学仿真的方法模拟提取视场的天地线。

如图 9 所示,飞行器飞行前方以航向视场角范围确定的扇形区域内的地形将投影到成像平面上,扇形区域即为光学传感器视场范围,文中采用扫线

法,利用数字高程数据模拟提取飞行前方视场 5km 范围内的天地线。扫线法即以光学传感器视场中心线水平投影为中心,向两侧按固定角度间隔 $\Delta\tau$ 选取扫描线,每条扫描线上按 50 m 间隔选取采样点,从数字地图中依次读取每条扫描线上每个采样点的高度信息。图中每个网格点对应数字地图中存储的地形点,“◆”为每条扫描线上的采样点。

以图中第 k 条扫描线为例,其扫描角为 τ,该扫描线上第 i 个采样点与飞行器质心 M 的距离为 $i\times50$m,利用数字地图可以插值获取采样点 i 的地形高度 h_i,该点相对飞行器的高低角为 $\eta_i=\mathrm{arcran}(\frac{H_i-H_M}{i\times50})$。

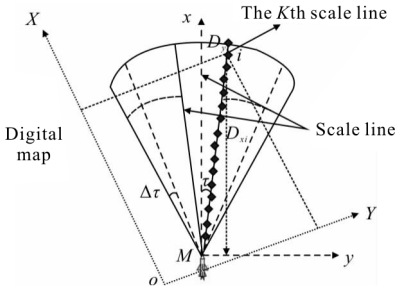

图 9 基于数字地图视场天地线提取方法

Fig.9 DEM based approach for skyline extraction

根据天地线的定义,并结合图 10 可知,每条扫描线上相对飞行器高低角最大的点即为天地线上的点。因此,当依次获取扇区内每条扫描线上相对飞行器高低角最大的地形点后,将这些地形点依次连接起来,就勾勒出了当前时刻导引头视场的天地线。

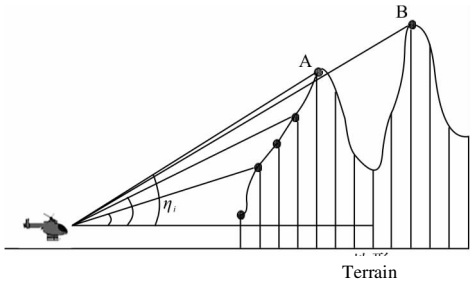

图 10 第 K 条扫描线对应的纵向平面

Fig.10 Vertical plane corresponding to the Kth scan line

已知前视成像像素分辨率和视场角,便可获得成像的角分辨率,角分辨率可由下式计算得到:

$$\mu_H=\frac{\tau_H}{n_{\mathrm{row}}},\mu_V=\frac{\tau_V}{n_{\mathrm{col}}} \tag{4}$$

式中:μ_H、μ_V分别为航向、纵向成像角分辨率;n_{row}、n_{col}分别为前方视场在成像平面上横向和纵向的像素点个数;τ_H、τ_V分别为航向和纵向视场角。扇区内扫描线间隔的选取,理论上应取航向角分辨率作为扫描线间隔,经计算考虑到计算机计算能力的限制,为提高数学仿真速度,在研究中将模型航向视场分为 32 份,取 33 条扫描线。

因此,利用此节所建立的导引头视场天地线模型,就可以用一个 33×3 的矩阵来描述导引头视场天地线信息,矩阵的第 n 行依次为天地线上第 n 个物理点与飞行器的相对距离 D_x、D_y、D_h。

4.2 地形跟随飞行仿真

仿真条件及关键参数的选取:

(1)仿真飞行器数学模型采用 6 自由度非线性模型;

(2)视场建模及天地线提取利用网格大小为 50m×50 m 的真实数字高程图;

(3) 利用视场中 5 km 范围以内的地形数据提取视场天地线;

(4)初始时刻飞行器在 1300 m 高空,以 200 m/s 的速度匀速平飞,15 s 后开始进入超低空地形跟随区域;

(5) 利用天地线上各物理点信息计算纵向控制指令信号 θ_{pr},指令周期取 0.25 s;

(6) 航迹倾角约束为$-5°<\theta<7°$,飞行器的安全离地高度 H_0 取 50 m;

(7) 抑制函数形如式前所述,其中各参数取值:$\omega_1=0.03/4\,000$,$\omega_2=0.03/2\,000$,$D_1=2\,500$,$D_2=3\,500$;

(8) 地形跟随飞行控制器采用基于 H_∞/混合灵敏度理论设计的鲁棒控制器,控制器设计过程和结果详见参考文献[5]。

仿真结果如图 11~14 所示。图 11 是某时刻提

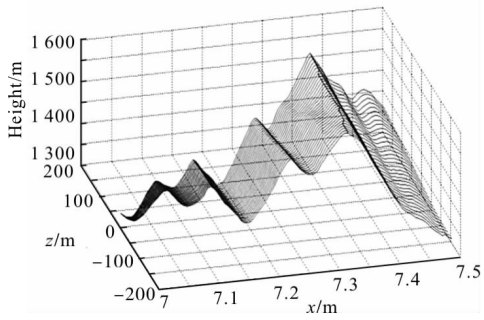

图 11 某时刻导引头视场天地线仿真结果

Fig.11 Skyline extraction result on sometime

取前方视场天地线的仿真结果,图中曲线是对应扫描线所在纵向平面的地形轮廓。基于天地线的地形跟随飞行,在每个指令周期,首先要利用模拟的地形轮廓线提取出视场的天地线,然后利用天地线上各地形参考点与飞行器的相对距离和相对高度信息,生成纵向航迹倾角控制指令。基于天地线的地形跟随飞行,在每个指令周期,首先要提取出视场的天地线,然后利用天地线上各地形参考点与飞行器的相对距离和相对高度信息, 生成纵向航迹倾角控制指令。

图 12~14 仿真结果表明：采用基于光学传感器视场天地线的地形跟随方案生成航迹倾角控制指令,再应用所设计的鲁棒控制器,可以控制飞行器实现自主的地形跟随飞行, 飞行航迹距正下方地形平均离地高度为 151.7 m。

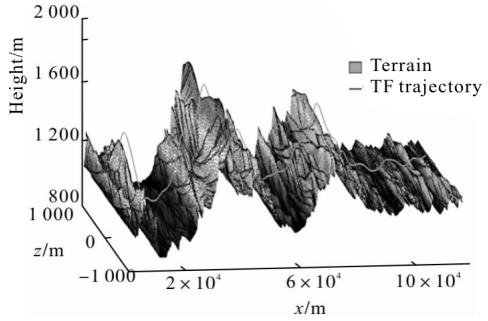

图 12 基于天地线的 TF 飞行 3D 仿真结果

Fig.12 3D simulation results of terrain following based on skyline

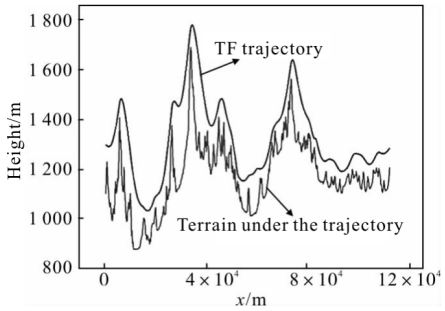

图 13 基于天地线的 TF 飞行仿真纵向剖面结果

Fig.13 Vertical plane simulation results of terrain following based on skyline

为进一步说明基于天地线的地形跟随方法对提升地形跟随性能的意义,文中利用相同地形跟随区数字地图,进行了基于“数字地图+高精度导航+离线航路规划”方法(也称为基于走廊轮廓线的地形跟随方法)的数学仿真,并将两种方法的结果进行了对比分析,飞行航迹距正下方地形平均离地高度为 237.2 m,仿真对比结果如图 14 所示。

基于天地线的地形跟随方法较基于数字地图轮廓线的方法相比,地形跟随平均离地高度可降低约 36%,因此能更有效地利用近地杂波干扰,隐蔽性更强。

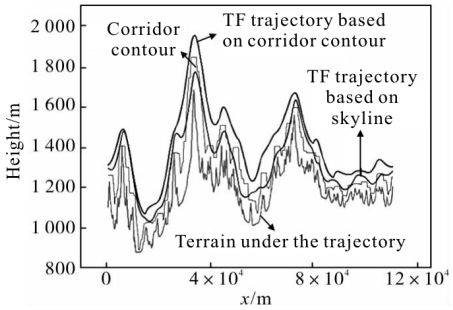

图 14 两种地形跟随方案仿真结果对比图

Fig.14 Simulation results contrast by using two different terrain following approaches

5 结 论

文中以基于前视序列图像的地形/障碍物探测及距离解算技术为基础, 提出了利用视场天地线信息实现无人飞行器自主地形跟随飞行的方法, 并设计了相应的制导律。数学仿真表明基于天地线的地形跟随技术能够有效降低飞行器地形跟随离地高度。

文中开展研究基于利用序列图像能够提取飞行器前方 5 km 范围的天地线这一假设, 欲达到该目标, 后续尚需对基于序列图像的地形探测算法开展深入的研究和改进。

参考文献:

[1] Fang Aiqing. Passive terrain following system constituted by digital map and GPS[J]. ***Avionics Technology***, 1994(1):26-31. (in Chinese)
方爱青. 数字地图和 GPS 构成的无源地形跟随系统[J]. 航空电子技术, 1994(1): 26-31.

[2] Kurt Konolige, Motilal Agrawal. Large -Scale Visual Odometry for Rough Terrain [M]. Berlin: Springer-verlag, 2011, 66: 201-212.

[3] Zhang Dazhi, Wang Yongtao. Efficient 3D reconstruction using monocular vision [J]. ***Journal of Astronautics***, 2008,

29(1): 289-294. (in Chinese)
张大志, 王勇涛. 基于单目视觉系统的远距离场景重建算法研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 289-294.

[4] Wang Jianping, Shen Chunlin. The adaptive angle control method of terrain following [J]. ***Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica***, 1993, 13(12): 671-677. (in Chinese)
王建平, 沈春林. 地形跟随适应角控制方法[J]. 航空学报, 1993, 13(12): 671-677.

[5] Wei Donghui, Xu Cheng. Terrain following and terrain avoidance controller design for BTT missile [C]//2011 Flight Dynamics Academic Conference Proceeding, 2011. (in Chinese)
魏东辉, 徐骋. 倾斜转弯导弹的地形跟踪/地形回避控制器设计方法研究[C]//2011 年中国飞行力学学术年会论文集, 2011.

[6] Stewart Geyer M, Johnson Eric N. 3D obstacle avoidance in adversarial environment for unmanned aerial vehicles [R], AIAA2006-6542, 2006.