

文章编号: 1000-6893(2004)05-0492-05

基于激光扫描和计算机视觉的无人机 全天候自主着陆导引技术

徐贵力, 程月华, 沈春林

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

Unmanned Air Vehicle's Navigation and Automatic Accurate Landing in All Weather Based on
Infrared Laser Scan and Computer Vision
XU Guoli, CHENG Yuehua, SHEN Chunlin

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

摘 要: 为了解决基于 GPS 导航的无人机受他国控制和易受干扰的潜在危险问题, 提出以 GPS 导航系统为主, 以捷联惯性导航结合主动式红外激光扫描定位及计算机视觉识别着陆跑道为辅的无人机导航和着陆精确导引新技术, 实现无人机全天候的自主精确着陆。提出了该技术的具体工作原理和工作过程, 对激光扫描系统的工作原理和扫描模型及扫描参数的确定、着陆点的激光反射装置的确定、着陆点坐标与着陆跑道方向的确定问题和防止发生由其它反射物或红外光源误导的措施等问题进行了分析和研究。

关键词: 无人机; 导航; 自动着陆的导引; 红外激光扫描; 计算机视觉

中图分类号: U666.1; V249

文献标识码: A

Abstract: In order to resolve the danger of GPS to be jammed and turned off by other country in the special time, a new method of Unmanned Air Vehicle(UAV)'s navigation and automatic landing's guidance is proposed. When GPS is abnormal, the SINS began to navigate, the infrared laser scan can search the airstrip, and the computer vision can guide the UAV's landing. The model and parameters of the infrared laser scan system, the design of the special reflector in the airstrip composed of reflective prisms and laser lamps, the computer vision algorithms for coordinate and direction of airstrip structured with the special reflector on the square or the highway, and the criterion of GPS on the rails are analyzed. The method of avoiding misguidance caused by others reflector and other infrared laser is made by the special reflector and special frequency laser. The results show that the new method is feasible in practice.

Key words: UAV; navigation; automatic landing's guidance; infrared laser scan; computer vision

无人机导航一般有 3 种方式^[1-3]: 第 1 种是采用惯性制导、地形匹配制导、卫星定位系统制导或者复合制导, 由自动驾驶仪按预编程序控制无人机飞行; 第 2 种是通过电视图像遥测遥控系统, 由地面、舰艇或发射母机上的遥控手进行实时控制; 第 3 种也是大多数情况下是将前两种控制方式复合使用, 在远离目标时采用预编程序控制, 在接近目标时采用实时遥测遥控。当前, 大多数无人机的导航和着陆导引是利用卫星定位系统结合高度表。

当前的卫星定位系统包括美国的 GPS、俄罗斯的 Glonass 及中国正在研究中的双星定位系统。前两者受控与人, 而中国的双星定位系统正处于研究阶段。在前不久的美国与伊拉克战争中卫星定位系统很容易被干扰, 且基于该系统的导弹被误导。惯性导航系统具有较强的抗干扰能力, 可

以独立自主地导航飞机, 但是其导航误差具有随时间逐渐累积的缺陷, 尽管已有利用飞行途中的地形匹配来不断修正惯性导航误差, 但是这种方法要求所飞路径中必须具有明显的地形地貌特征, 而现有的景象匹配设备(可见光和红外 CCD 成像设备)由于是被动式探测景物, 即 CCD 是接收景物反射的自然光成像的, 所以探测距离近, 无法实现无人机全天候精确自主着陆^[4,5]。遥控手遥控的着陆方式, 只能近距离遥控, 且人具有一定的主观因素(视力的能见度、情绪等), 受外界因素影响时很容易出错。

有人飞机的着陆方式主要有 4 种^[6], 即 ILS、GCA、MLS 和 GPS。它们的隐蔽性不好。另外, 因无人机体积较小, 无法安装中国现有的微波雷达设备。

1994 年激光导航公司和雷声公司合作把激光中线定位仪引入到航空母舰的空军联队^[7], 帮助飞机驾驶员改善夜着陆。机场的激光灯标在夜

收稿日期: 20030218; 修订日期: 20040315

间能够大大改善飞机的着陆, 激光灯使飞行员对准着陆跑道的准备时间延长了 215 倍。

1998 年俄罗斯的 Boguslavskii. I. A. 等^[8]提出利用激光定位来引导有人飞机的着陆。他们采用 CO₂ 激光器发射远红外激光, 全天候条件下, 在 4~6km 距离内能够探测到着陆点, 指引飞行员驾驶飞机着陆。但是由于无人机无人驾驶, 所以还需要研究出针对无人机的总体方案以及对其中的关键技术问题进行研究。

1 总体方案的提出

根据以上的国内外研究现状, 提出以 GPS 导航系统为主, 以捷联惯性导航系统结合主动式红外激光扫描定位和计算机视觉识别着陆跑道为辅的无人机导航和着陆精确导引方案, 实现无人机全天候自主精确着陆。

在 GPS 被关闭或受干扰情况下, 捷联惯导引导飞机到着陆点附近, 再利用主动式红外激光扫描结合计算机视觉技术探测和识别着陆点, 最后计算机视觉技术近距离识别着陆跑道方向, 实现无人机全天候精确自主着陆。着陆跑道可以利用激光反射装置在广场或者公路上临时构建, 从而提高无人机的生存能力。红外激光主动探测隐蔽性差一些, 但仍然比 MLS(微波雷达) 隐蔽性好, 因为雷达是向天空大角度发射微波, 而红外激光是一很窄的光束。总体方案中的控制流程图如图 1 所示。

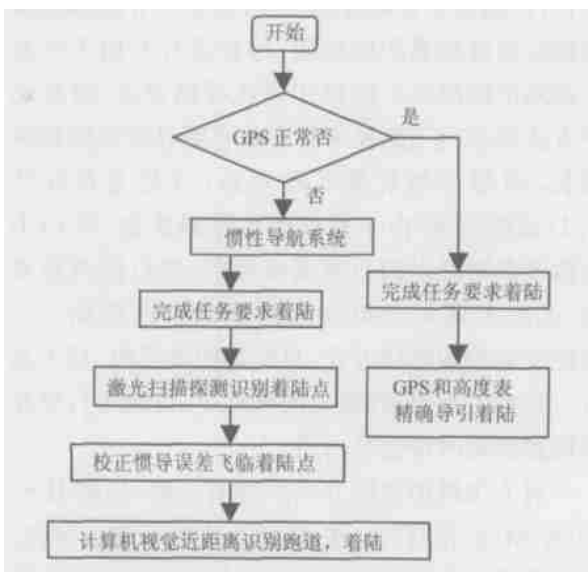


图 1 无人机导航和精确着陆总体方案的流程图

Fig. 1 Flow chart of navigation and automatic landing scheme

方案的具体内容如下: 无人机起飞前, 捷联惯性导航系统和 GPS 导航系统同时启动工作, 并

由无人机的飞行控制系统自动判断 GPS 定位是否与起飞点的已知坐标相同。若相同则利用 GPS 导航, 并在飞行过程中实时校正捷联惯导的飞行误差; 若不相同则利用捷联惯导系统制导。并根据飞行途中 GPS 系统所接收信号的有无、波动大小来确定是用 GPS 导航还是用捷联惯导系统导航。执行完任务时, 若 GPS 正常则利用 GPS 和高度表导航并指引无人机着陆; 若不正常, 则切换到单独的捷联惯导系统来导航并引导无人机飞回到着陆跑道附近。因为惯性导航系统有误差, 所以需要激光扫描探测着陆点, 即无人机首先下降到一定的飞行高度, 以惯性导航系统自认为正确的着陆点为圆心, 在该惯性导航系统的一般规律累积误差(飞行时间和单位时间误差的乘积, 设为 R_k) 为半径的范围内, 进行以激光扫描幅宽 f_k 为步长的螺旋线(图 2) 飞行轨迹盘旋寻找着陆点。当激光光斑扫描到由角锥反射棱镜构成的反射装置时, 有很强的激光反射回来, 无人机上的激光探测器(红外 CCD) 就可以获得红外图像, 然后进行识别和确定出着陆点坐标, 校正惯性导航系统误差, 指引无人机飞临到着陆点附近。这时反射装置因接收到指定波长和频率的激光, 则自动打开反射装置上指示跑道方向的红外激光灯, 规则排列的激光灯就会在红外 CCD 上成像, 利用计算机视觉技术确定出着陆跑道方向, 调整无人机航向, 从而引导无人机对准跑道确定着陆切入点, 实现自动精确着陆。

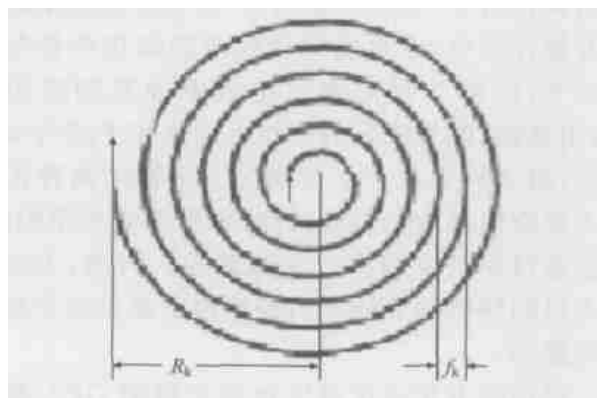


图 2 扫描探测时的飞行轨迹示意图

Fig. 2 Sketch of track on scan

2 关键问题研究

(1) 无人机机载红外激光扫描系统

1 红外激光器的确定

根据光在大气中传输的大气窗口和有烟雾时不同波长光的透过率^[9,10], 选择波长为 10106nm 的

红外激光。根据文献^[10]资料在 1979 年前,美国的 LRR2103 炮兵轻型激光测距仪在雨雾情况下可探测的距离为 517km;1980 年美国麻省理工学院研制的只有 10W 的 CO₂ 激光雷达对于非合作的漫反射目标的探测距离为 3km。根据激光在大气中的衰减原理,可以通过计算确定满足探测条件要求的激光器功率。本研究选用的 CO₂UL 激光器的功率、体积和重量可以满足无人机要求。

° 扫描数学模型的研究

激光扫描系统的构成如图 3 所示,红外激光器把激光发射到由反射镜组成的扫描速度高的可连续回转的扫描转鼓上(取代传统的惯性大的往复式反射镜),扫描转鼓由调速电机带动。激光以一定角度和横向扫描速度向地面扫描,同时飞机以一定的飞行速度前进,则激光光斑就会在地面形成连续扫描轨迹(如图 3 和图 4 所示)。

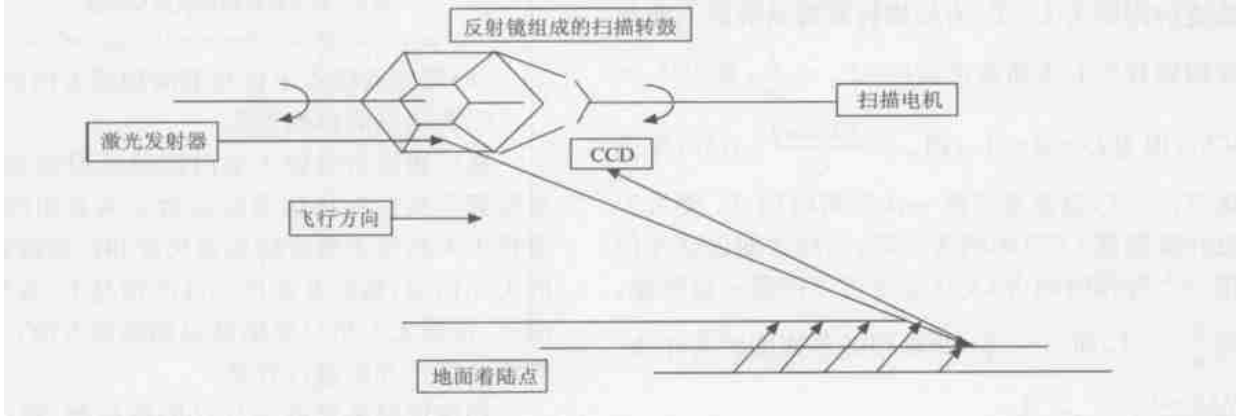


图 3 扫描系统工作原理简图

Fig. 3 Sketch of scan system's principle

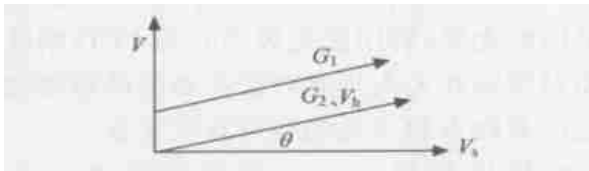


图 4 扫描幅宽求解原理图

Fig14 Sketch of principle of getting scan range

其中扫描速度(扫描转鼓角速度 X)和扫描幅度 f_k 由具体无人机的飞行速度 V、低空寻找着陆点的飞行高度 H、激光在地面形成的光斑的直径 S(由激光器的发散角 R 和飞行高度 H 确定)和扫描系统探测器响应时间 T 决定。这样,扫描数学模型为

$$F(X, f_k) = G(V, H, S, T)$$

其中 $S = S(R, H)$ 。

(a) 飞行高度 H 和扫描幅宽 f_k 的确定 为了易于寻找着陆点和方便着陆,下降高度由能见度、具体无人机着陆的切入点高度、导航误差半径决定。导航误差半径越大,那么要求扫描幅宽越宽,这样扫描时间越短,效率越高。这里初步定为 H = 3km。设扫描转鼓的扫描角度为 K,这样由图 5

可以得到扫描幅宽为 $f_k = 2H \frac{\tan \frac{K}{2}}{\cos \alpha}$, 设 $K = 120^\circ$

时,则 $f_k = \frac{10.36}{\cos \alpha}$ km, A 为扫描光束与飞机垂直横

切面的夹角。这样若惯性导航的时间累计误差为 50km 时,无人机只要以图 2 所示飞行轨迹飞行大约 5 圈即可扫描到着陆点。

(b) 扫描激光到达地面光斑直径 S 的确定 选择的激光器为 CO₂UL 型号,光束发散角(全角)为 $R = 5mrad$ 。则光斑的最小直径为 $S = 2H \tan \left[\frac{1}{2} @ 5 @ 10^{-3} @ \frac{180}{3.1415926} \right] = 15m$, 利用倒置的配套激光扩束镜 BEBYAG28, 可以使光束直径减小为: $S_1 = \frac{1}{8} S = 1.875m$ 。

(c) 无人机扫描轨迹的运动规律研究 根据速度矢量合成,可以得到扫描轨迹如图 5 所示。G₁ 为第 1 条扫描轨迹, G₂ 为第 2 条扫描轨迹。V 为飞机前进速度, V_s 为光斑沿飞机横向的扫描线

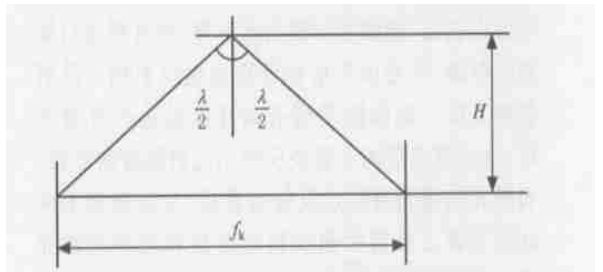


图 5 扫描速度和轨迹

Fig. 5 Sketch of getting scan speed and track

速度, 则 $V_s = \frac{H}{\cos A \cos B} X$, 其中 A, B 分别为扫描光束与飞机垂直横切面和纵切面的夹角, V_h 为激光光斑的真实扫描速度, H 为真实扫描速度与飞机前进方向夹角的余角, 则 $V_h = V + V_s$, $V_h = \sqrt{V^2 + V_s^2}$, $H = \arctan V / V_s$ 。

(d) 扫描角速度确定 为了保证能够扫描到地面的反射装置, 要求相邻光斑扫描轨迹间距小于地面反射装置的长度 L_r , 这样有: 设相邻扫描轨迹的间距为 L ; T_1 为扫描转鼓转动转鼓上相邻反射镜片中心夹角所需时间, $T_1 = \frac{K}{X}$, 则有 $L = V T_1$, 因为 $L \cos H \leq L_r$, 则 $X \leq \frac{V K \cos H}{L_r}$ 。另外, 要保证 $T_1 > T$, 也就是扫描一次所需时间 T_1 要大于红外探测器 CCD 的响应时间, 这样才能保证在扫描一个行程时间内 CCD 至少可以拍摄一幅图像, 则 $\frac{K}{X} \leq T$, 即 $X \geq \frac{K}{T}$, 所以扫描角速度的条件为: $\frac{V K \cos H}{L_r} \leq X \leq \frac{K}{T}$ 。

(2) 着陆点的激光反射装置研究

由于角锥反射棱镜具有沿入射光方向高效率反射的性能, 而且对安装的工艺要求远低于全反射棱镜, 所以我们选择角锥反射棱镜作为反射装置的构成单元器件。反射装置的几何尺寸要大于相邻激光光斑扫描轨迹的间距 L 。由于扫描一次所需时间 T_1 要大于红外探测器 CCD 的响应时间, 采用的红外 CCD 的响应时间为 $T = 1/600s$, 设扫描一次可拍摄 5 幅图像, 则 $T_1 \leq 1/120s$, 则有, $L = V T_1 = 300 @ 1/120 = 215m$ 。反射棱镜的布局如图 6 所示, 长臂对应着陆跑道的纵向, 其中尺寸要求如下:

$$L_d \leq \sqrt{2}L / \cos H$$

$$L_c > L_b > \left[\sqrt{2} - \frac{1}{2} \right] L / \cos H$$

这样的布局(计算过程略)可以保证无论激光从什么方向扫描, 都能够扫描到反射器, 而且容易扫描到反射器, 不会由于形状特殊发生误识别。反射装置上按一定间距安装有高亮度的远红外激光灯, 这些激光灯的布置要反映出反射装置的形状。当激光扫描到着陆点反射装置后, 反射装置上的红外光敏二极管探测到指定波长和频率的激光后, 打开反射装置上的激光灯, 则无人机上的红外 CCD 能够获得反映跑道方向的激光灯红外图像(如图 6 所示), 从而识别出跑道方向, 这样无人机

才能够确定着陆切入点, 实现安全精确着陆。

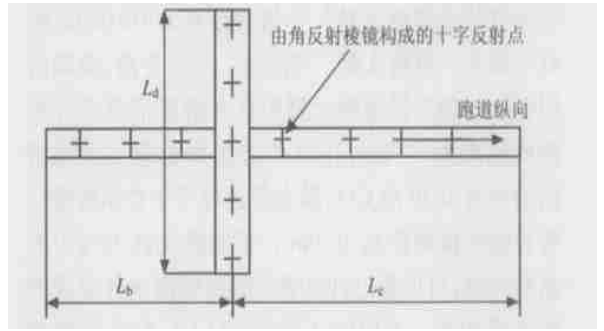


图 6 角反射棱镜构成的反射器

Fig 6 Sketch of reflector with angle prisms

(3) 确定着陆点坐标和着陆跑道方向的研究

1 着陆点坐标的确定

在广场或者公路上临时摆放反射装置, 该反射装置安放在着陆跑道的起始点或者中间点, 这要视无人机要求的着陆跑道长度和广场或者公路的大小而定, 最好在条件允许的情况下, 安放在中间点, 这样无人机只要能够识别跑到方向, 而不必判断向哪个方向进行着陆。

构成反射装置的全反射棱镜很薄, 所以只要将它铺放在着陆跑道中心线上即可, 这样在远距离时, CCD 上的图像为激光光斑扫描到反射装置所反射回的光斑, 利用此光斑中心与 CCD 面阵中心的相对坐标和无人机此时距离地面的高度就可以确定出着陆点和飞机的相对真实坐标。

探测精度的保证 系统选用的红外面阵 CCD 的 X 和 Y 方向探测分辨率都为 $l_x = l_y = 30 \mu m$, 即相邻像元的中心尺寸。远距离扫描时, 透镜的扫描焦距设定为 $f = 150mm$, 由计算机视觉成像几何关系可以得到地面着陆点坐标的 X 和 Y 方向分辨率或者是误差 L_x 和 L_y

$$l_x / f = L_x / H$$

则 $L_x = \frac{H @ 30 @ 10^{-6}}{150 @ 10^{-3}} = 2 @ 10^{-4} @ H$, 若 $H = 3000m$, 则 $L_x = 0.6m$; 同样, 则 $L_y = 0.6m$ 。这个误差是完全满足无人机着陆要求, 而且随着无人机着陆过程中, 飞机距离地面越来越近, 则误差会越来越小。

° 着陆跑道方向的确定

当无人机探测到着陆点后, 红外 CCD 就会有反射装置形状的图像。通过图像的识别算法^[11, 12]判断是否是着陆点的反射装置, 若是则以此像的长轴中心线与 CCD 纵轴(CCD 纵轴和飞机纵轴一致)的夹角来得到着陆跑道的方向, 调整无人机的航向, 再根据无人机着陆曲线就可以指引

无人机进场实现着陆。

(4)防止无人机被误导引的措施

在寻找着陆点时的激光光斑到达地面的直径为 $S = 11875\text{m}$, 这样为了保证当扫描光斑扫到着陆点反射装置时一定要有强激光反射回来, 要求在反射装置上的由角锥反射棱镜构成的相邻反射点间距要小于 S 。为了防止地面其它强反射物造成对无人机的误导, 要求反射光斑图像中至少有3个反射亮点, 这样就要求反射装置上的相邻反射点间距小于 $S/2$ 。反射点可以沿反射装置的各条中心线均匀分布, 如图6所示, 红外成像的示意图如图7所示。为了进一步防止强反射物的误导, 要求角锥反射棱镜构成的反射点形状为十字形, 如图6所示, 可以利用数字图像处理技术识别反射光斑图像中的亮点是否为十字形, 来判断是否扫描到着陆点的反射装置。为防止其它红外光源的误导, 可以使激光器发射指定频率的激光, 则无人机上的相应红外光敏二极管就可以探测出反射光的频率, 从而识别是否为其它光源, 防止误导。



图7 着陆跑道的红外图像

Fig. 7 Infrare image of airstrips

参 考 文 献

- [1] 沈春林. 低空突防与精确打击技术报告[R]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
(Shen C L. Low altitude penetration and precision attack[R]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002.)
- [2] 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.
(Qiu L W, Song Z S, Shen W Q. Computer vision scheme used for the automate landing of unmanned helicopter on ship desk[J]. Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(4): 351- 354.)
- [3] Cao Y F. Guidance and control for automatic landing of UAV[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. 2001, 18(2): 229- 232.

- [4] 廖兴和, 孟祥功, 赵伟东. 抗击军用无人机问题研究[J]. 现代防御技术, 2001, 29(4): 12- 16.
(Liao X H, Meng X Q, Zhao W D. Study of anti uninhabited air vehicle[J]. Modern Defence Technology, 2001, 29(4): 13- 16.)
- [5] Audenino M, Gaggio A, Faggion P. Target tracking and location techniques applied to optical payload son remotely piloted vechicle in AGARD[J]. Air Vehicle Mission control and Management, 1992(5): 32- 36.
- [6] 孙耀辉. 机动式MLS在着陆领域中的发展[J]. 导航, 2002, 6(2): 113- 116.
(Sun r H. The develop of mobile MLS on landing field[J]. Navigation, 2002, 6(2): 113- 116.)
- [7] Vetter A A. Dual Use of the laser center line localizer[J]. SPLE, 1994, 2460: 43- 47.
- [8] Boguslavskii I A, Egorova. Instrumental complex of an aircraft for an autonomous informational landing support[J]. Tekhnicheskaja Kibemetika, 1998, 37(2): 313- 317.
- [9] Co2 Laser Radar System for target acquisition and guidance[J]. AGARD2CP, 1989. 25- 29.
- [10] 何照才. 光电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 196- 200.
(He Z C. Photoelectric measurement[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 196- 200.)
- [11] Le Guilloux Y, Fondeur J C. Using image sensors for navigation and guidance of aerial vehicles[J]. SPLE, 1997, 2220: 157- 168.
- [12] Brown L G. A survey of Image registration techniques [J]. Computing Surey, 1992, 24(4): 325- 376.

作者简介:



徐贵力(1972-) 男, 黑龙江, 南京航空航天大学自动化学院讲师, 博士, 光电检测, 计算机视觉。E-mail: guiliku2002@163.com。



程月华(1977-) 女, 安徽人, 南京航空航天大学自动化学院工程师, 硕士, 飞行控制技术。



沈春林(1943-) 男, 南京航空航天大学自动化学院, 博士生导师, 飞行控制, 变结构控制, 超低空突防飞行控制技术。

(责任编辑: 李泓洁)