

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.02.015

面向货物运输的移动平台设计与无人直升机追踪控制

王 诚 徐锦法 张 梁 于永军

(南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室,南京,210016)

摘要:由于无人直升机具有垂直起降、机动性好的特点,使其可用于移动平台之间的货物运输,因此,提出了无人直升机跟踪移动平台的货物运输方法。设计了一套用于无人直升机追踪实验的动平台,动平台上可放置物品,无人直升机在追踪动平台过程中同时完成物品的拾起和码放。动平台系统由移动小车平台、运动控制器、引导装置以及地面监视软件等组成,采用 MEMS-SINS/GPS 组合导航系统作为引导装置的核心部件,完成对移动小车平台的位置和速度估计。提出了由单点 GPS 测量点提供多个目标点位置的方法,可使无人直升机方便快捷地知道需要拾起和码放物品的目标点。设计开发了一套操作简便、显示友好的地面监控软件,辅助移动平台正常运行,能有效监控引导装置与无人直升机的通信。

关键词:无人直升机;追踪;动平台;引导装置;货物运输;地面监控软件

中图分类号:V249

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2016)02-0244-07

Design of Mobile Platform and Tracking Control of Unmanned Helicopter for Cargo Transportation

Wang Cheng, Xu Jinfa, Zhang Liang, Yu Yongjun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Considering that the vertical takeoff and landing (VTOL) unmanned helicopter has good maneuverability, a method for tracking mobile platform and transporting cargo by unmanned helicopter is presented. A mobile platform is designed for tracking experiment by the unmanned helicopter. The cargo, placed on the mobile platform, can be picked up and stacked by unmanned helicopter while tracking the platform. The mobile platform system consists of a mobile car platform, a motion controller, a guiding device and a ground control system (GCS). The integrated navigation system based on MEMS-SINS/GPS is the core of the guiding device to estimate the position and the velocity of mobile car platform. Moreover, a method is proposed for providing multiple target locations by single GPS antenna position, which helps the unmanned helicopter to pick up and stack goods conveniently. A set of GCS with kind interface is also developed to monitor the communication between the guide device and the unmanned helicopter.

Key words: unmanned helicopter; tracking; mobile platform; guiding device; cargo transportation; ground control system(GCS)

基金项目:武器装备预研基金资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目;南京航空航天大学基本科研专项研究基金(NEZ014407)资助项目。

收稿日期:2015-10-01;**修订日期:**2016-01-01

通信作者:徐锦法,男,教授,博士生导师,E-mail:xjfae@nuaa.edu.cn。

引用格式:王诚,徐锦法,张梁,等.面向货物运输的移动平台设计与无人直升机追踪控制[J].南京航空航天大学学报,2016,48(2):244-250. Wang Cheng, Xu Jinfa, Zhang Liang, et al. Design of mobile platform and tracking control of unmanned helicopter for cargo transportation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(2):244-250.

近年来无人机技术发展迅猛,无论是在民用还是军用领域都展现出了巨大的应用前景。无人直升机^[1]具有垂直起降、机动性好、对起飞环境条件要求低等优势,已成为无人机领域的研究热点,特别是在物资运送^[2]、救援救灾等场合发挥着不可替代的作用。在航母等舰船平台之间的货物运输中,要求无人直升机具有自主起降、跟踪动目标以及抓取投掷目标物的能力。正是在这样一种背景下,“国际无人飞行器创新大奖赛”专门创立了一项竞技比赛。竞技赛任务要求是:自行设计制造或选用旋翼飞行器平台,通过自行设计开发具有全自主飞行能力的飞行控制系统,完成自主起飞着陆、自动跟踪移动目标,并完成物品的自动拾取和码放。这就要求无人直升机在复杂环境下很好地跟踪移动目标并完成物品的抓取和投放。技术难点涉及移动目标的实时探测和状态估计,无人飞行器航迹规划^[3],以及物品的自动抓取码放、任务调度等。

从文献[4~6]来看,应用图像识别跟踪移动目标是一种可行的方法。按照其组成又可分为纯图像导航和 GPS/图像组合导航。前一种方法是完全依靠图像跟踪移动目标,必须确保跟踪目标在视野范围以内,同时对图像处理器的计算能力要求很高。后一种方法是在视野范围以外使用 GPS 导航,到达目标附近切入图像导航,对图像要求可以降低。纯图像导航又可以分为单目视觉和双目视觉导航。单目视觉导航难以得到深度信息和真实位置偏差。双目视觉可以得到真实位置偏差和深度信息,但会增加引导负载和处理器计算负担。无论是哪种视觉导航,都是通过对实时拍摄得到的图像处理求解估计目标状态,要提高观测精度,都需要规划最优观测路径以及高质量的相机和云台。此外,由于图像易受环境光线的影响,抗干扰能力差,这在一定程度也影响了其应用效果。

本文以“国际无人飞行器创新大奖赛”为背景,着重研究无人直升机在移动平台间的货运问题。提出了仅依靠单套 GPS 完成对多移动目标的跟踪和移动平台间的货物运输,相比较图像导航而言成本低,对户外环境要求小。为了验证该方法的可行性,自行设计可用于无人直升机追踪、物品拾取码放的模拟移动平台,利用单 GPS 天线测量出多个拾起点和多个码放点位置信息。移动平台运动控制器兼具引导装置功能,为无人直升机目标跟踪提供目标点的位置、速度以及平台航向角等信息。开发了一套操作简便、显示友好的地面监控软件,辅助移动平台正常运行,确保引导装置与无人直升机

机载飞控计算机的正常通信。

1 动平台运动与控制

1.1 动平台机械设计

实际运动平台是在一个三维空间中运动的,由于竖直方向上运动较小,动平台设计以水平面内的运动为主。考虑到目标位置信息以经、纬度来度量,属球面坐标系,需要转换为平面坐标系。为此,需要对移动平台的运动模型进行抽象,在实际处理过程中做如下假设:

(1) 移动平台竖直方向上运动较小,视为水平面内的二维运动。

(2) 移动平台运动范围较小,相对于整个地球视为平面。

(3) 移动平台运动速度小于无人直升机最大飞行速度。

移动平台设计采用四轮小车加装钢架置物平台方式,模拟两个平行同步移动的取货区域平台和放货区域平台。移动速度为 1.5~2.0 m/s。用组合导航设备,实时测算出当前动平台与拾取、放置物品目标点的位置和速度信息,并通过无线数传模块将位置、速度信息实时传输给无人直升机。运载小车车身高 817 mm、宽 480 mm、高 255 mm。后轮驱动,前轮转向,前后轴上都装有减震器,电池装于车身中央部分,电源开关位于小车驱动轴部位。车身左右两边各安装有一个置物钢架,左右两端各架一个矩形置物平台,分别代表两个平行移动的取货区域和放货区域,两个区域均为 1.2 m×2.4 m,距小车中心 6 m。目标货物为带手把的水桶,初始放置于取货区域的红色圆圈内,需要由无人直升机将目标水桶搬运至放货区域的绿色圆圈内。图 1 为实际效果样例图。



图 1 动平台

Fig. 1 Mobile platform

1.2 移动平台运动控制

小车的运动控制器设计采用 STM32F405 ARM 处理器^[7]作为计算核心,通过两路 PWM 输出分别控制小车的运动速度和方向。此外,平台上

还配置有惯性测量单元(MTI)、GPS卫星接收机(OEM615)两类传感器构成捷联惯导/GPS组合导航系统(Integrated navigation system, INS),如图2所示,可以克服各自单独工作所固有的缺点,其导航精度高于两个系统单独工作且抗干扰能力也得以提高,属于目前应用最为广泛组合导航系统。ARM处理器实现的功能有:

(1) 姿态解算:确保无GPS信息时姿态解算的稳定性。

(2) 速度位置解算:有GPS信号时,完成速度、位置的精确解算。

(3) 小车控制回路计算:利用速度和航向角、航向角速率反馈信息完成经典PID控制律计算。

(4) 兼顾与无人直升机通信和任务引导工作。

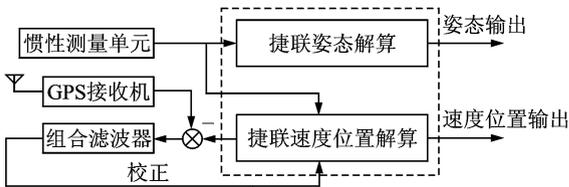


图2 组合导航原理结构图

Fig. 2 Schematic principle of integrated navigation

小车运动控制航向控制律设计的方法有许多,比如现代控制理论的特征结构配置法、二次型最优设计方法以及鲁棒 H_∞ 设计方法等。这些方法理论意义强,对被控对象理论模型的准确性要求比较高,对处理器的计算能力要求比较高,工程性较弱,难以应用到实际工程项目中。动平台航向控制回路设计以航向角速率为反馈信号构成经典的PID控制回路,如图3所示。图4为小车控制器实物图。实际控制效果表明控制律设计简单实用。

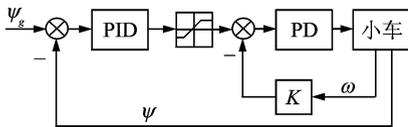


图3 航向控制回路方框图

Fig. 3 Block diagram of yaw control

1.3 移动平台上目标位置信息输出

动平台状态变量包括取货区域4个抓桶点位置、放货区域4个放桶点的位置、动平台速度和航向。动平台移动速度直接取自GPS系统,桶点8个位置则需要根据当前GPS测点位置导出。首先要确定8个桶点与GPS测点的相对位置,然后根据运动实时测到的GPS测点位置信息和先前得到的相对位置信息反算出各桶点当前经、纬度,并实



图4 动平台运动控制器

Fig. 4 Motion controller of mobile platform

时发送给无人直升机。图5所示为两个平行移动平台取货区域4个抓桶点和放货区域4个放桶点以及GPS测点的位置关系图。

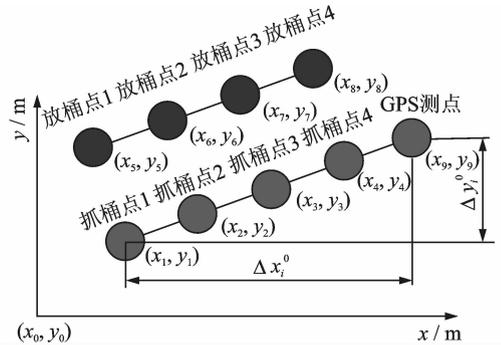


图5 目标点位置关系示意图

Fig. 5 Schematic of target location relationship

(1) 目标点相对位置确定

首先利用GPS系统测得各目标桶点与动平台测点的经纬度,而后运用地球大地坐标系到当地地轴坐标系的转换关系,得到目标桶点到动平台测点间的相对位置关系,转换关系为

$$\Delta x = (l_c - l_0) \times (r_m + h) \quad (1)$$

$$\Delta y = (\lambda_c - \lambda_0) \times \cos(l_c) \times (r_n + h) \quad (2)$$

式中: λ_c, l_c 为某一目标桶点经、纬度; λ_0, l_0 为动平台测点经、纬度,单位为弧度; h 为载体离地高度,单位为米。

$$r_n = r_e (1 + f \sin^2 l_c) \quad (3)$$

$$r_m = r_e (1 - 2f + 3f \sin^2 l_c) \quad (4)$$

式中:地球半径 r_e 取6 378 137.0 m; f 为地球的椭圆率,取 $f=1/298.257$ 。考虑到 f 以及 $\sin^2 l_c$ 皆是少量,实现时将 r_m 及 r_n 都近似为 r_e ,载体离地高度为十几至几十米,相对 r_e 忽略不计。因此式(1,2)近似为

$$\Delta x = (l_c - l_0) \times r_e \quad (5)$$

$$\Delta y = (\lambda_c - \lambda_0) \times \cos(l_c) \times r_e \quad (6)$$

由此可以求得各目标桶点与动平台测点的初始相

对误差,记为 $\Delta x_i^0, \Delta y_i^0$ (i 取 1~8)。

(2) 目标位置信息输出

当动平台在平面内可以转动时,可以通过测得的平台方向角和动平台测点位置信息直接导出平台上目标桶点的位置信息。直线 AB 表示目标桶点 B 与动平台测点 A 之间的连线; ψ_0 为平台初始航向角, ψ_1 为当前航向角; $\Delta x_0, \Delta y_0$ 为初始状态下 B 点相对于 A 点的坐标; $\Delta x_1, \Delta y_1$ 为当前状态下 B 点相对于 A 点的坐标,如图 6 所示。

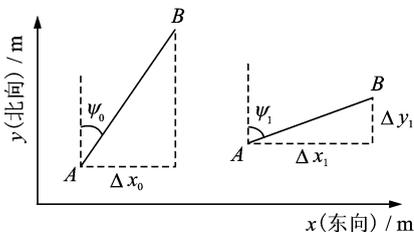


图 6 几何关系图

Fig. 6 Schematic of geometric relation

根据目标桶点与动平台测点相对位移不变原则,有以下几何关系

$$\Delta x_1 = \frac{\sin\psi_1}{\sin\psi_0} \Delta x_0 \quad (7)$$

$$\Delta y_1 = \frac{\cos\psi_1}{\cos\psi_0} \Delta y_0 \quad (8)$$

即

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sin\psi_1}{\sin\psi_0} & 0 \\ 0 & \frac{\cos\psi_1}{\cos\psi_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(5,6)变形得

$$l_c = \Delta x_1 / r_c + l_0 \quad (10)$$

$$\lambda_c = \Delta y_1 / (\cos(l_c) \times r_c) + \lambda_0 \quad (11)$$

将 $\Delta x_i^0, \Delta y_i^0$ 代入式(9)可以得到各目标桶点与动平台测点的当前相对误差,记为 $\Delta x_i^c, \Delta y_i^c$ 。将 $\Delta x_i^c, \Delta y_i^c$ 代入式(10,11)可以得到各桶点当前状态下的经度 λ_i 和纬度 l_i ,随即将此时的各桶点经、纬度信息报告给无人直升机用于其目标跟踪控制。

1.4 通信链路

移动平台控制器有两条通信链路,一条与无人直升机通信,用于发送各桶点速度、位置和平台航向信息,作为无人直升机跟踪目标任务制导指令;另一条链路及配套开发的地面监视软件通信。两个硬件通信口上传的数据帧格式相同。

移动平台控制器解算出新的导航信息需立即发送给无人直升机。当经、纬度变量均用 double 类型,直接发送全部桶点位置信息时,数据帧长度

过长、误码率较高。这是由于当前选用的通讯模块设备带宽有限。为了保证实际使用过程中发送的数据有效、可靠、实时,对传送的数据帧协议进行了调整,调整后的通讯协议格式如表 1 所示。

表 1 动平台数据帧协议通信数据

Tab. 1 Communication data of mobile platform

变量名	数据类型	字节数
1 号桶经、纬度	Double	16
其余 7 个桶相对于 1 号桶的位置经、纬度差值	Short	28
平台实时速度	Short	4
平台实时航向	Short	2

与地面站通信的数据,既可以按照上述协议格式传输,也可以根据地面站的要求确定要发送的数据内容,除了需要监视发送到无人直升机的数据外,还可以发送:(1) 起飞点经、纬度;(2) GPS 测点实测经、纬度;(3) GPS 状态、可见星数、影响因素等。

2 无人直升机跟踪控制

2.1 跟踪策略

无人直升机需要根据移动平台的状态信息来调整自身的状态、计算动平台和无人直升机之间的相对速度和相对位置。图 7 为无人直升机跟踪任务过程框图。无人直升机位置回路解算量作为速度回路的输入量,速度回路的解算量作为姿态内回路的输入量。通过位置回路规划运动轨迹,通过速度回路来实现无人直升机加速、减速、巡航飞行等运动状态。

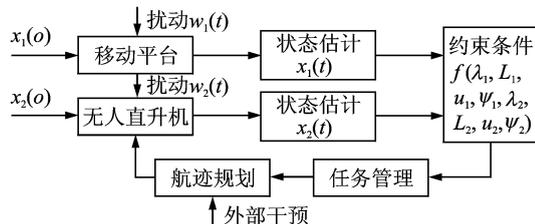


图 7 无人直升机跟踪任务过程框图

Fig. 7 Block diagram of tracking task for unmanned helicopter

2.2 无人直升机控制律设计

无人直升机是一个非线性强耦合系统,由小扰动线性化模型^[8]可设计并验证纵向、横向、航向及高度 4 个通道的飞行控制律^[9]。由增稳回路、姿态回路、速度回路及导航回路 4 个回路构成串级 PID^[10]控制。各通道控制结构如图 8~11 所示,其中航向、高度为单回路结构,纵向和横向通道为内外回路结构,控制律均用经典 PID 控制实现。

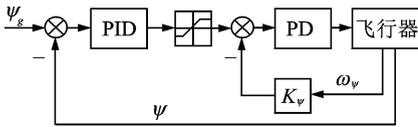


图8 航向控制方框图

Fig. 8 Block diagram of yaw control

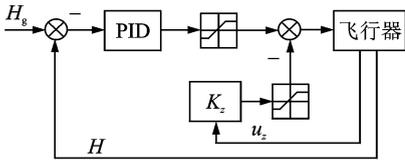


图9 高度通道控制方框图

Fig. 9 Block diagram of vertical channel control

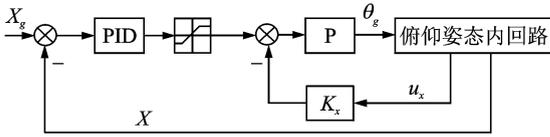


图10 纵向通道控制方框图

Fig. 10 Block diagram of longitudinal channel control

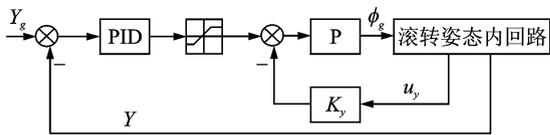


图11 横向通道控制方框图

Fig. 11 Block diagram of lateral channel control

姿态角回路控制律模型整体构架以经典PID控制为基础,当涉及具体某一姿态角回路时,根据其控制特性和响应性能,适当增加或较少积分项。姿态角回路包括姿态角位置回路和姿态角速率回路,其中姿态角速率回路作为内环增稳回路。因本文所用的无人直升机平台为传统的单旋翼带尾桨构型无人直升机,本身不带伺服小翼,所以需通过三轴角速率反馈构成角速率增稳,弥补飞行器自身阻尼力的不足。姿态角位置回路通过角位置反馈弥补飞行器静稳定性的不足。增稳控制回路是飞行控制回路的最内环回路,是整个飞行控制回路的基石。增稳回路的控制效果直接决定无人直升机抗干扰能力以及飞行的稳定性和动态性能。

航向控制通过尾桨实现,目标航向角与移动平台的移动方向一致,保证无人直升机在追踪移动目标时机头方向正对目标。

外层位置回路以无人直升机和移动平台的位置差作为输入量。位置回路得到的输出量作为速度回路的输入量,可以理解为告诉无人直升机什么

样的情况、以怎样的速度跟踪移动目标,速度回路以无人直升机和移动平台的速度差值作为反馈量。速度回路设计的好坏影响无人直升机跟踪飞行的品质。

2.3 货运任务调度

无人直升机在巡航飞行阶段实施抓取任务。机械臂系统一旦成功抓取目标,无人直升机立刻提升进入货物运输投放任务阶段,跟踪投放目标区进行投放,然后再进入到下一个任务,依此类推完成整个货运任务,最后自主返航,结束飞行任务。货运任务流程图如图12所示。

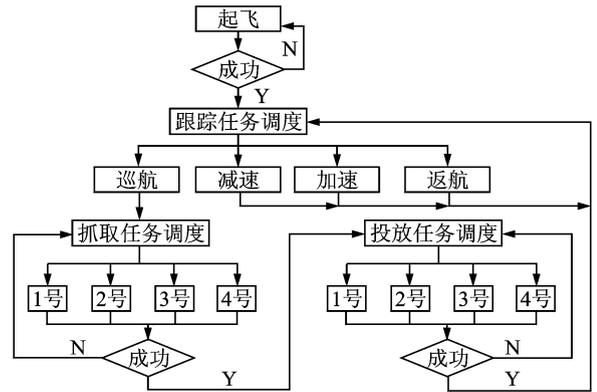


图12 货运任务流程图

Fig. 12 Flow chart of cargo transporting

3 实验验证

3.1 地面监控软件

地面监控软件^[11]与动平台控制器之间通过无线数传电台建立数据链,既有监控动平台运动状态了解与无人机之间的通讯状况等功能,也承担着目标点相对位置确定所进行的打点准备任务。

地面监控软件在VS2010环境下开发,运用SQL Server数据库^[12]系统以及WPF框架,用C#语言设计开发完成,具有通信、数据帧解析、位置计算、实时储存数据等功能。图13所示为用户使用显示界面样例,实现了:(1) Windows下的高速实时串口通信;(2) 基于WPF框架的矢量图显示;(3) 可选择实时存储数据,防止数据意外丢失。

3.2 实验结果与误差分析

以动平台运动为例,应用该计算方法得出的当前8个桶点的经纬度、单独测量的当前8个桶点的经纬度,以及两者在平面坐标系下的差值(由式(5, 6)得出),如表2所示。移动平台来回运动过程中测点经纬度动态时间历程响应曲线如图14所示。

从表2中可以看出,差值x、差值y都在厘米

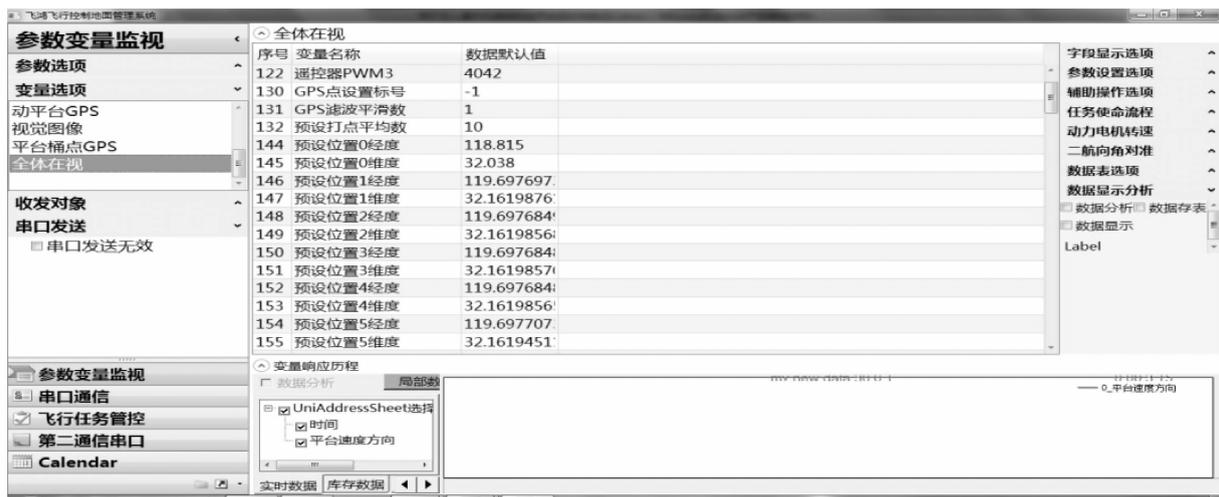


图 13 地面监控软件界面

Fig. 13 Interface of ground control station

表 2 动平台运动试验

Tab. 2 Exercise test of mobile platform

桶号	计算得到的桶点经纬度/(°)		单独实测的桶点经纬度/(°)		差值 x /m	差值 y /m
1	118.814 568 333 333	32.035 571 666 666 7	118.814 568 333 252	32.035 571 700 000 9	-0.003 710	$7.643\ 96 \times 10^{-6}$
2	118.814 566 666 667	32.035 561 666 666 7	118.814 566 666 580	32.035 561 699 996 3	-0.003 710	$8.209\ 88 \times 10^{-6}$
3	118.814 565 000 000	32.035 550 000 000 0	118.814 564 999 898	32.035 550 033 332 9	-0.003 710	$9.626\ 02 \times 10^{-6}$
4	118.814 562 800 000	32.035 538 333 333 3	118.814 561 666 554	32.035 538 366 660 8	-0.003 710	0.106 960 664
5	118.814 631 983 333	32.035 564 091 666 7	118.814 631 666 581	32.035 563 366 663 8	0.080 707	0.029 891 142
6	118.814 630 355 967	32.035 553 307 166 7	118.814 629 999 907	32.035 553 366 667 7	-0.006 620	0.033 600 549
7	118.814 628 333 333	32.035 542 333 333 4	118.814 628 333 227	32.035 542 033 329 2	0.033 396	$1.000\ 29 \times 10^{-5}$
8	118.814 626 500 000	32.035 532 033 333 4	118.814 626 666 549	32.035 531 699 999 7	0.037 107	-0.015 716 843

级。造成厘米级差异的主要原因是 GPS 的精度是厘米级,此外为了计算方便做了一些简化处理(式(5,6))也会影响计算精度。另外,GPS 的特性决定同一点的测量误差具有随机性,一般呈高斯分布,但这种大误差点出现的概率较小,持续的时间较短,整体来看可以满足无人机跟踪的精度要求。

GPS 测点动态时间历程响应曲线(图 14)表明

系统工作正常,开发的地面监控软件可以很好地反应移动平台当前的运动状态。另外注意到,影响无人直升机跟踪移动平台很重要的一个指标是目标点位置、速度的解算周期。简单估算一下,GPS 位置更新速率达到 20 Hz,不考虑跟踪过程中任何环节的损耗,假设移动平台的移动速度为 2 m/s,那么最大会产生 0.1 m 的静态误差。

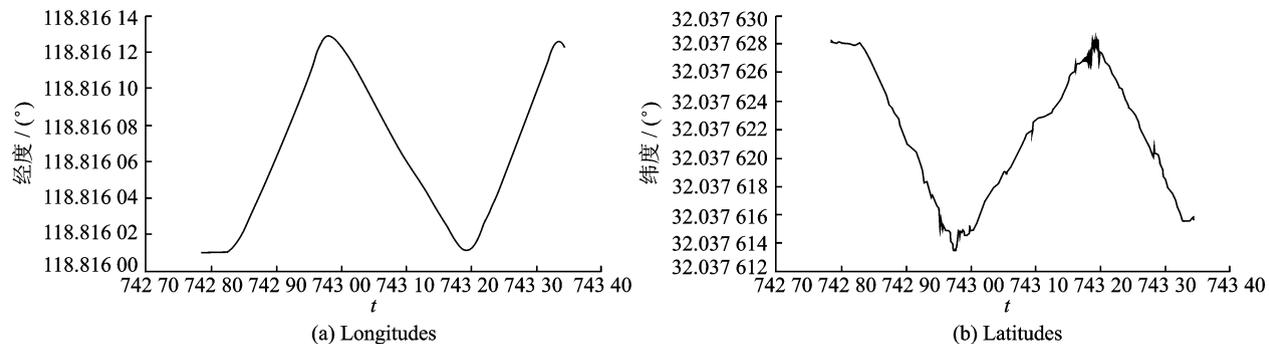


图 14 GPS 测点动态时间历程响应曲线

Fig. 14 Dynamic time-history response curve of GPS antenna placement

4 结 论

本文以无人直升机跟踪移动平台,实施货物运输为设计背景,研究了依靠单 GPS 确定移动平台上多点位置和速度的方法,无人直升机跟踪移动目标的方法,设计了一套移动平台,用于无人直升机的跟踪、抓投货物试验。实际检验可行,并在“国际无人飞行器创新大奖赛”上成功跟踪到移动目标并完成货物的抓取和投放任务。试验结果表明:

(1) 设计的移动平台运行良好,可用于无人直升机追踪,货物运输。

(2) 依靠单 GPS 估计移动平台上多点位置和速度的方法可行,精度达到厘米级别,满足无人直升机的跟踪要求。

(3) 开发的地面监控软件实践检验效果好,具有友好的人机交互功能,可以实时监控系统的工作状态。

参考文献:

- [1] 吴希明. 高速直升机发展现状、趋势与对策[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(2):173-179.
Wu Ximing. Current status, development trend and countermeasure for high-speed rotorcraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(2):173-179.
- [2] Macsween-George S L. Will the public accept UAVs for cargo and passenger transportation? [C]// IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana: IEEE, 2003:357-367.
- [3] 王林, 彭辉, 朱华勇, 等. 应用无人机跟踪地面目标——最新研究进展[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(S1):172-177.
Wang Lin, Peng Hui, Zhu Huayong, et al. Ground target tracking using UAVs: Recently development [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(S1): 172-177.
- [4] Feng L, Lum K Y, Chen B M, et al. Development of a vision-based ground target detection and tracking

system for a small unmanned helicopter[J]. Science in China, 2009, 52(11):2201-2215.

- [5] 徐伟杰. 基于视觉的微型无人直升机位姿估计与目标跟踪研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
Xu Weijie. Research on vision-based pose estimation and object tracking for miniature unmanned helicopter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [6] 安敬蕊. 海上搜寻无人机移动目标识别与跟踪[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
An Jingrui. Identificating and tracking moving target of maritime searching UAV[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [7] 廖义奎. ARM Cortex-M4 嵌入式实战开发精解:基于 STM32F4[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2013.
Liao Yikui. ARM Cortex-M4 embedded development: based on STM32F4[M]. Beijing: Beihang University Press, 2013.
- [8] 杨一栋. 直升机飞行控制[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
Yang Yidong. Helicopter flight control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [9] 陈健. 无人直升机飞行控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
Chen Jian. Research on flight control technology of the unmanned helicopter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [10] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社, 2001.
Hu Shousong. Automatic control principle[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [11] 肖征宇. 无人机地面站软件的设计与实现[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
Xiao Zhengyu. The design and implementation of the software of the ground station software for UAV [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [12] 张奇, 李律松, 卫建伟. Visual c# 数据库项目案例导航[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
Zhang Qi, Li Lüsong, Wei Jianwei. Visual c# database project case navigation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

本文已收编于 2015 年全国直升机年会内部交流论文集

