

计算机应用研究 优先出版

原创性 时效性 就是科研成果的生命力
《计算机应用研究》编辑部致力于高效的编排
为的就是将您的成果以最快的速度
呈现于世

* 数字优先出版可将您的文章提前 8~10 个月发布于中国知网和万方数据等在线平台

基于 LeapMotion 和 S 曲线的飞行机器人机械臂控制研究

作者 包军, 仓宇, 邓经枢, 童明波

机构 南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室

基金项目 航空科学基金资助项目 (2016ZC52031); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

预排期卷 《计算机应用研究》 2018 年第 35 卷第 11 期

摘要 针对带有多自由度机械臂的飞行机器人, 提出基于 Leap Motion 的控制方法以实现机械臂跟随人体手掌位置姿态运动的功能。采用 DH 方法建立了机械臂数学模型, 给出了将 Leap Motion 获取的人手运动映射到机械臂末端的推导过程。利用 7 段 S 型曲线调速方法近似实现舵机角加速度连续没有突变, 减轻了舵机快速响应给飞行器带来的冲击问题。设计制作了实物样机对控制方法的可实现性进行验证测试, 在飞行测试中, 成功地利用 Leap Motion 控制远端的机械臂抓取到地面目标。

关键词 飞行机器人; 机械臂; Leap Motion; 手势控制; S 曲线

作者简介 包军 (1992-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要研究方向为 CAD 技术、飞行器设计 (june_bao@163.com); 仓宇 (1993-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要研究方向为计算流体力学; 邓经枢 (1993-), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为飞行器设计; 童明波 (1966-), 男, 四川眉山人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为 CAD 技术与软件开发、飞行器设计。

中图分类号 TP242

访问地址 <http://www.arocmag.com/article/02-2018-11-056.html>

发布日期 2017 年 11 月 10 日

引用格式 包军, 仓宇, 邓经枢, 童明波. 基于 LeapMotion 和 S 曲线的飞行机器人机械臂控制研究[J/OL]. 2018, 35(11). [2017-11-10]. <http://www.arocmag.com/article/02-2018-11-056.html>.

基于 LeapMotion 和 S 曲线的飞行机器人机械臂控制研究 *

包 军, 仓 宇, 邓经枢, 童明波

(南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016)

摘 要: 针对带有多自由度机械臂的飞行机器人, 提出基于 Leap Motion 的控制方法以实现机械臂跟随人体手掌位置姿态运动的功能。采用 DH 方法建立了机械臂数学模型, 给出了将 Leap Motion 获取的人手运动映射到机械臂末端的推导过程。利用 7 段 S 型曲线调速方法近似实现舵机角加速度连续没有突变, 减轻了舵机快速响应给飞行器带来的冲击问题。设计制作了实物样机对控制方法的可实现性进行验证测试, 在飞行测试中, 成功地利用 Leap Motion 控制远端的机械臂抓取到地面目标。

关键词: 飞行机器人; 机械臂; Leap Motion; 手势控制; S 曲线

中图分类号: TP242

Control method study for robotic arm of aerial manipulator system based on leap motion and S curve

Bao Jun, Cang Yu, Deng Jingshu, Tong Mingbo

(Ministerial Key Discipline Laboratory of Advanced Design Technology of Aircraft, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Setting the multi degree-of-freedom robotic arm of aerial manipulator systems as study object, this paper proposed a new approach based on Leap Motion through which robotic arm can follow the movement of human hand. It used DH method to build mathematical model of the robotic arm and presented derivation process of mapping human hand movement captured by Leap Motion to the end of robotic arm. To avoid abrupt change of servo's angular acceleration and ease the impact on the aircraft, it adopted 7-sections S curve method to adjust the servo speed. This paper designed and fabricated a prototype machine to test realizability of the control method, and during flight test, the method successfully control the robotic arm to pick up an object in the distance by using Leap Motion.

Key Words: aerial manipulator system; robotic arm; Leap Motion; hand gesture control; S curve

0 引言

多旋翼无人机近年来发展迅速, 技术日趋成熟, 其在日常生活中的应用一般结合其他部件来完成, 如与云台拍摄设备结合实现高空侦查拍摄功能、与喷洒装置结合实现农田植保的功能; 为进一步提高无人机的作业能力, 扩展其应用范围, 人们提出将旋翼无人机和机械手爪或机械臂等更复杂装置相结合的概念, 这类系统被称为飞行机器人^[1]。由于手爪装置或者机械臂本身不具备自主作业的能力, 因此对于飞行机器人, 作业装置如何控制是必须解决的问题, 也是实现其功能的难点所在。

对于早期的飞行机器人, 其结构较为简单, 一般只是在飞行器腹部安装一个手爪装置, 如宾夕法尼亚大学设计的四旋翼飞行手爪^[2], 耶鲁大学研制的将手爪和单旋翼飞行器结合的作

业系统^[3], 这类机器人系统的手爪能够完成抓取操作, 但作业能力较为有限, 控制方式也相对简单。之后, 人们将多自由度机械臂和飞行器相结合^[4-6], 并对机械臂运动学和动力学问题进行建模分析^[7], 在控制方式上, 有学者提出基于图像识别的操控方式, 这种操控方式利用图像识别技术对目标进行定位, 进而规划飞行器的飞行路径和机械臂的运动方式, 同时兼顾了飞行器的机动性和机械臂的灵活性, 此方法在仿真中体现出较好的控制效果^[8], 但在实验测试方面还未见有文献公开发表。

本文为飞行机器人的多自由度机械臂提出了一种新的控制思路, 并制作了实物样机进行了验证测试。本文提出的思路如下: 将传统的多旋翼飞行器作为飞行平台并与六自由度机械臂相结合, 利用地面端与计算机连接的手势捕捉设备检测手掌运动, 由检测到的手掌运动解算出机械臂各关节转角, 反馈到飞

基金项目: 航空科学基金资助项目 (2016ZC52031); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 包军 (1992-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要研究方向为 CAD 技术、飞行器设计 (june_bao@163.com); 仓宇 (1993-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要研究方向为计算流体力学; 邓经枢 (1993-), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为飞行器设计; 童明波 (1966-), 男, 四川眉山人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为 CAD 技术与软件开发、飞行器设计。

行机器人的控制器上, 实现机械臂跟随人手运动的效果; 在飞行器上搭载有图像采集设备, 可实时将其周围环境的图像信息无线传输至地面的计算机端, 机械臂控制信号同样通过无线传输, 操作者可在地面对照飞行器端传送回的图像信息利用手掌操控机械臂进行抓取目标或完成其他作业。

1 系统组成简介

1.1 飞行机器人结构形式

本文的飞行机器人以一个传统的六轴飞行器为平台, 六自由度机械臂安装于其腹部下方, 结构形式如图 1 所示。



图 1 本文飞行机器人结构形式

六自由度机械臂由与飞行器底盘结合结构、底座、大臂、小臂、肘部、连杆、腕部等结构组成, 如图 2 所示。机械臂驱动装置为舵机。



图 2 机械臂结构组成

1.2 体感检测设备

目前较为主流的体感设备有 Kinect 和 Leap Motion。Kinect 可实现对其可视范围内物体深度数据的获取, 特别地还能对人体全身主要关节进行捕捉和定位, 常被用于人体动作识别和场景建模; Leap Motion 的特征是可以检测手掌的运动并定位人体手掌的各主要关节, 可以达到 0.01mm 的高精度识别^[9], 常被用于手势识别、人机交互领域^[10-11]。

在硬件层面上, Leap Motion 体积小, 识别精度高, 对计算性能需求较小、数据更新帧率快; Kinect 体积较大, 识别精度较低, 对计算性能需求大、数据更新帧率低。在控制方法上, Kinect 可直接获得手臂关节坐标, 从而解算出手臂关节间的夹角, 将求解得到的角度映射到机械臂的关节间夹角实现对其控制, 这是一种正向控制方法; Leap Motion 可获取手掌的空间位

置姿态, 通过建立机械臂逆向运动模型, 将 Leap Motion 的数据作为输入, 解算出机械臂各关节间的夹角, 是一种逆向控制方式。在实际测试中, 基于 Kinect 的控制方法由于 Kinect 自身的精度和遮挡问题, 控制效果较差。本文中主要讨论基于 Leap Motion 的逆向控制方法。

Leap Motion 装置主要由两个高帧率摄像头、红外 LED 光源、USB 芯片组成, 当目标对象发生移动时, 就会引起红外线反射变化而反映目标对象的方位, 两个高帧率摄像头模拟双目视觉, 利用三角测量法对空间物体进行三维坐标定位。Leap Motion 外观及主要组成部分如图 3 所示。

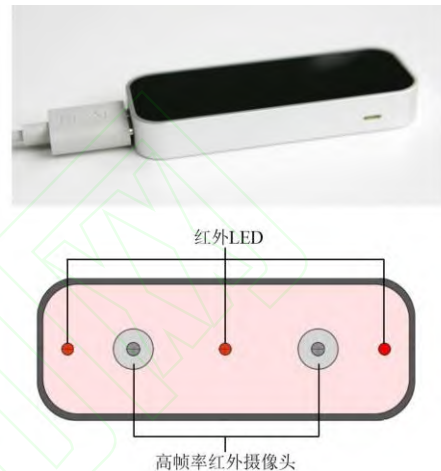


图 3 Leap Motion 设备外观及主要组成部分

2 基于 Leap Motion 的机械臂逆向控制方法

通过 Leap Motion 对手掌运动进行检测, 可以获取手掌的 6 自由度信息: 3 个位移量、3 个姿态角。利用这 6 自由度信息作为机械臂末端关节位置姿态条件, 可逆向求解出各个关节之间的夹角。在对机械臂进行运动学分析时, 一般采用 DH 法建立各连杆坐标系, 然后依据各连杆坐标系间的关系, 得到机械臂的 DH 参数^[12]。考虑到机械臂连杆机构只是作为动力传动机构, 在推导机械臂的运动学逆解时不考虑连杆。采用 DH 法确定各关节坐标系, 如图 4 所示。

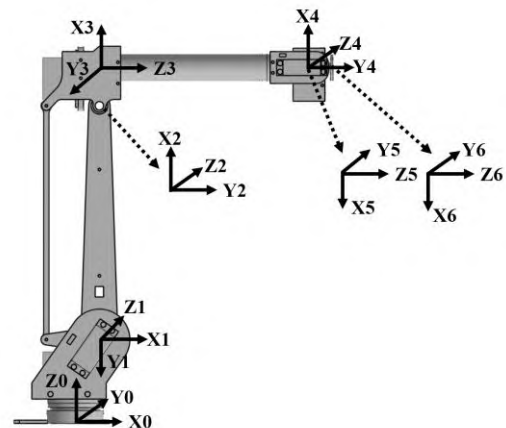


图 4 机械臂 DH 坐标系

依据图 4 中建立的坐标系, 结合机械臂结构参数, 得到机械臂 DH 参数如表 1 所示。

表 1 机械臂 DH 参数

i	$a_i(\text{mm})$	$\alpha_i(^{\circ})$	$d_i(\text{mm})$	$\theta_i(^{\circ})$
1	22.8	-90	79.4	θ_1
2	220	0	0	θ_2
3	36	-90	0	θ_3
4	0	90	177.5	θ_4
5	0	-90	0	θ_5
6	0	0	24	θ_6

将相邻坐标系 $i-1$ 和 i 的齐次变换记为 T_i , 如以 T_1 表示坐标系 1 相对于坐标系 0 的位置姿态, T_i 由参数 a_i 、 α_i 、 d_i 、 θ_i 决定:

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由此得到机械臂末端关节坐标系 6 相对于机械臂底座坐标系 0 的总变换 T_{all} 为:

$$T_{all} = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \quad (2)$$

对于本文构型的机械臂, 已知其末端关节的位置和姿态, 可逆向推导出各关节间夹角的解析解, 但解的个数不唯一, 对于某一给定定位姿有八组逆解, 在实际应用中需要结合舵机特性和机械臂的结构与安装方式, 选择一组合适的解。

Leap Motion 自身的数据更新频率在测试用的计算机上约为 120Hz, 在控制程序中, 需以低于此频率的更新速率计算求解。设更新间隔时间为 Δt , Δt 间隔内程序检测到的手掌位姿信息变化记为

$$A_{\Delta t} = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta \alpha \ \Delta \beta \ \Delta \gamma]^T \quad (3)$$

其中: x 、 y 、 z 为手掌在 Leap Motion 坐标系下的相对位移, α 、 β 、 γ 为手掌在 Leap Motion 坐标系下的回转角、俯仰角、偏转角。

记时刻 t 机械臂末端在底座坐标系下的位置姿态为

$$A_t' = [x_t' \ y_t' \ z_t' \ \alpha_t' \ \beta_t' \ \gamma_t']^T \quad (4)$$

其中: x' 、 y' 、 z' 为机械臂末端在底座坐标系下的位置坐标, α' 、 β' 、 γ' 为机械臂末端在底座坐标系下的回转角、俯仰角、偏转角, 将 Leap Motion 检测到的人手的位姿变化映射到机械臂末端的位姿, 则 $t+\Delta t$ 时刻机械臂末端位置 $A_{t+\Delta t}'$ 为

$$A_{t+\Delta t}' = \begin{bmatrix} x_t' \\ y_t' \\ z_t' \\ \alpha_t' \\ \beta_t' \\ \gamma_t' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 T [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T \\ k_2 T [\Delta \alpha \ \Delta \beta \ \Delta \gamma]^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t+\Delta t}' \\ y_{t+\Delta t}' \\ z_{t+\Delta t}' \\ \alpha_{t+\Delta t}' \\ \beta_{t+\Delta t}' \\ \gamma_{t+\Delta t}' \end{bmatrix} \quad (5)$$

k_1 、 k_2 分别为手掌位置、姿态的控制灵敏度系数, 通过变化

k_1 、 k_2 的值可改变手掌运动映射到机械臂末端的幅度大小。 T 为一 3×3 矩阵, 是 Leap Motion 坐标系到机械臂底座坐标系的方向变换。将 $A_{t+\Delta t}'$ 转换为与 T_{all} 对应的齐次形式, 其中姿态表示方法采用 X-Y-Z 固定角坐标系, 记转换后的齐次形式为

$$A_{t+\Delta t}'' = \begin{bmatrix} n_x & o_x & m_x & x_{t+\Delta t}' \\ n_y & o_y & m_y & y_{t+\Delta t}' \\ n_z & o_z & m_z & z_{t+\Delta t}' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & m_x \\ n_y & o_y & m_y \\ n_z & o_z & m_z \end{bmatrix} = R_z(\gamma_{t+\Delta t}') R_y(\beta_{t+\Delta t}') R_x(\alpha_{t+\Delta t}') \quad (7)$$

式 (7) 中 $R_z(\gamma_{t+\Delta t}')$ 、 $R_y(\beta_{t+\Delta t}')$ 、 $R_x(\alpha_{t+\Delta t}')$ 为旋转矩阵, 其表达式分别为

$$R_z(\gamma_{t+\Delta t}') = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{t+\Delta t}' & -\sin \gamma_{t+\Delta t}' & 0 \\ \sin \gamma_{t+\Delta t}' & \cos \gamma_{t+\Delta t}' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_y(\beta_{t+\Delta t}') = \begin{bmatrix} \cos \beta_{t+\Delta t}' & 0 & \sin \beta_{t+\Delta t}' \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_{t+\Delta t}' & 0 & \cos \beta_{t+\Delta t}' \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R_x(\alpha_{t+\Delta t}') = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{t+\Delta t}' & -\sin \alpha_{t+\Delta t}' \\ 0 & \sin \alpha_{t+\Delta t}' & \cos \alpha_{t+\Delta t}' \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式 (6) 与 (2) 联立:

$$T_{all} = A_{t+\Delta t}'' \quad (11)$$

即可解出各关节角度 $\theta_1 \sim \theta_6$, 进一步地将 $\theta_1 \sim \theta_6$ 映射到机械臂的关节间夹角实现对其控制。

3 机械臂动力装置的 S 曲线调速控制

3.1 用于舵机的近似调速方法

舵机作为机械臂的动力装置, 在工作过程中, 需根据控制信号转动到目标角度。在实际测试中发现: 舵机过于快速的响应会造成机械臂运动的不稳定, 且由机械臂运动导致的对飞行器的耦合影响使得飞控系统难以处理。因此为维持系统的稳定性, 有必要寻求一种能够使机械臂响应平滑、减缓其对飞行器冲击的动力控制方式。

舵机自身的动力控制特性决定了难以直接对其工作时的角加速度和角速度进行干预, 所以可以采取一种近似的方式: 即先让舵机以固有的角速度/角加速度转动 t_1 个单位时间, 然后再停下 t_2 个单位时间, 这样在 $dt = t_1 + t_2$ 这个时间段内的平均速度即可通过 t_2 来调节, 若 dt 取得足够小 (不小于舵机控制信号周期), 则可近似地认为舵机的平均角速度在 dt 时间内等价于所需的真实角速度。

3.2 段 S 型曲线调速

为了使机械臂的运动足够平滑, 需要保证舵机的角加速度

连续没有突变。记舵机转动的角速度、角加速度分别为 $\omega(t)$ 、 $\dot{\omega}(t)$ 。将舵机转动至目标角度的整个运动过程分为 7 段: 加加速、匀加速、减加速, 匀速, 加减速, 匀减速, 减减速, 这 7 段的运动特征表现在各段中角加速及其对时间的导数特点如下:

$$\begin{aligned} \text{加加速: } \dot{\omega}(t) > 0, \quad \frac{\partial[\dot{\omega}(t)]}{\partial t} > 0 \\ \text{匀加速: } \dot{\omega}(t) > 0, \quad \frac{\partial[\dot{\omega}(t)]}{\partial t} = 0 \\ \text{减加速: } \dot{\omega}(t) > 0, \quad \frac{\partial[\dot{\omega}(t)]}{\partial t} < 0 \\ \text{匀 速: } \dot{\omega}(t) = 0, \quad \frac{\partial[\dot{\omega}(t)]}{\partial t} = 0 \\ \text{加减速: } \dot{\omega}(t) < 0, \quad \frac{\partial[\dot{\omega}(t)]}{\partial t} < 0 \\ \text{匀减速: } \dot{\omega}(t) < 0, \quad \frac{\partial[\dot{\omega}(t)]}{\partial t} = 0 \\ \text{减减速: } \dot{\omega}(t) < 0, \quad \frac{\partial[\dot{\omega}(t)]}{\partial t} > 0 \end{aligned}$$

从舵机转动的角加速度着手, 推算出舵机在每一个时刻的位置 $\theta_s(t)$, 在控制时以此为基准来改变对舵机输出的 PWM 脉宽从而达到平滑控制舵机运动的目的, 在整个过程中的舵机转角 $\theta_s(t)$ 曲线即为 S 型曲线。

对于舵机转角为 L 、转动时间为 T 的一次运动, 取边界条件为 $\omega(0) = 0$ 、 $\omega(T) = 0$ 、 $\theta_s(0) = 0$ 、 $\theta_s(T) = L$, 即运动始末角速度为 0, 运动角位移为 L 。设 7 段运动的时间分别为: $t_0 \sim t_6$ 。S 曲线在给定每一段的时间长度和整条曲线的起始位置后便可唯一确定, 其中最核心的两个参数是加速段的最大加速度 a 和减速段的最小减速度 b , 通过积分推导出 S 曲线的形式, 进而由边界条件得到 a 和 b 。对于 $t_0 \sim t_6$ 七个阶段每段的角加速度, 将其表示为

$$\dot{\omega}(t) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{a}{p_0} \\ a & 0 \\ \frac{ap_2}{t_2} & -\frac{a}{t_2} \\ 0 & 0 \\ -b\frac{p_3}{t_4} & \frac{b}{t_4} \\ b & 0 \\ bp_6 & -\frac{b}{t_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ t \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中: p_i 表达式为

$$p_i = \sum_0^i t_i \quad (13)$$

对式 (12) 的角加速度积分得到二次形式的角速度, 七个阶段每段的角速度为

$$\omega(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{a}{2p_0} \\ -\frac{ap_0}{2} & a & 0 \\ \omega(p_1) - \frac{ap_1}{t_2}(p_2 - \frac{p_1}{2}) & -\frac{ap_2}{t_2} & -\frac{a}{2t_2} \\ \omega(p_2) & 0 & 0 \\ \omega(p_3) + \frac{bp_3^2}{2t_4} & -\frac{b}{t_4} & \frac{b}{2t_4} \\ \omega(p_4) - bp_4 & b & 0 \\ \omega(p_5) - \frac{b}{t_6}(p_5p_6 - \frac{p_5^2}{2}) & \frac{bp_6}{t_6} & -\frac{b}{2t_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由角速度的连续性, 式 (14) 中的 $\omega(p_i)$ 可根据上一时间段末的角速度值依次求出, 对角速度积分得到三次形式的角位移, 每段的角位移为

$$\theta_s(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{a}{6t_0} \\ \theta_{s1} & \omega[1][0] & \frac{\omega[1][1]}{2} & \frac{\omega[1][2]}{3} \\ \theta_{s2} & \omega[2][0] & \frac{\omega[2][1]}{2} & \frac{\omega[2][2]}{3} \\ \theta_{s3} & \omega[3][0] & \frac{\omega[3][1]}{2} & \frac{\omega[3][2]}{3} \\ \theta_{s4} & \omega[4][0] & \frac{\omega[4][1]}{2} & \frac{\omega[4][2]}{3} \\ \theta_{s5} & \omega[5][0] & \frac{\omega[5][1]}{2} & \frac{\omega[5][2]}{3} \\ \theta_{s6} & \omega[6][0] & \frac{\omega[6][1]}{2} & \frac{\omega[6][2]}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ t^3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中: $\omega[i][j]$ 为式 (14) 中角速度 ω 矩阵中的 i 行、 j 列元素, θ_{si} 为

$$\begin{aligned} \theta_{si} = \theta_s(p_{i-1}) - \frac{1}{3}(\omega[i][0]p_{i-1} + \omega[i][1]\frac{p_{i-1}^2}{2} \\ + \omega[i][2]\frac{p_{i-1}^3}{3}) \end{aligned} \quad (16)$$

由角度的连续性, 式 (16) 中的 $\theta_s(p_{i-1})$ 可根据上一时间段末的角度值依次求出。最终, 根据运动终点的位移边界条件, 推导得出两个重要参数 a 、 b 如下:

$$\begin{aligned} a &= \frac{6L(t_4 + 2t_5 + t_6)}{M(p_i, t_i)} \\ b &= \frac{a(t_0 + 2t_1 + t_2)}{t_4 + 2t_5 + t_6} \end{aligned} \quad (17)$$

其中: $M(p_i, t_i)$ 可由时间量 p_i 和 t_i 得到。可以看出, 一旦给定每段的运动时间, 即可确定两个加速度量 a 、 b , 将 a 、 b 进一步代入角速度矩阵与角位移矩阵, 便可得到满足加速度不突变的舵机角度平滑运动轨迹。

以舵机在 1s 内转动 100° 、 $t_0=80$ ms、 $t_1=140$ ms、 $t_2=80$ ms, $t_3=400$ ms、 $t_4=80$ ms、 $t_5=140$ ms、 $t_6=80$ ms 为例, 图 8 给出了基于上述方式得到的舵机角位移、角速度、角加速度随时间的变化。

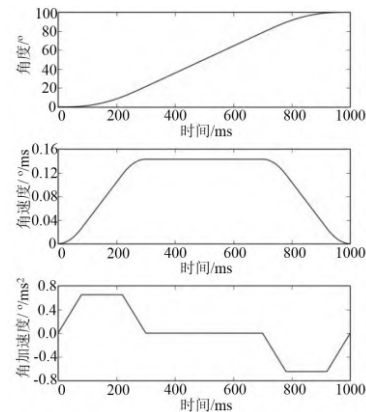


图 5 舵机在 1s 内转动 100° 其角位移、角速度、角加速度随时间的变化

由图 5 中角加速度随时间的变化图可清晰地看出整个运动分为加加速、匀加速、减加速, 匀速, 加减速, 匀减速, 减减速 7 个阶段, 角加速度连续没有突变。

4 实验测试

4.1 实验样机

为验证本文提出的飞行机器人机械臂控制方法的可实现性, 制作了实物样机进行实验测试。样机如图 6 所示, 飞行器轴距 1.5 m, 载重最大可达 5 kg。机械臂由铝合金加工制作而成, 重量约 1.3 kg, 机械臂末端执行器为一机械手爪。



图 6 本文飞行机器人样机

4.2 远距离机械臂抓取测试

在测试中使用 Leap Motion 可获得手掌的握紧程度, 将之映射到手爪端, 以便控制其夹取和张开。测试中, 一位操作者通过飞行器传回的图像数据控制飞行器飞到目标物附近, 另一位操作者通过图像数据利用手掌控制机械臂夹取目标物。在测试中, 整套系统显示出较好的稳定性, 通过舵机的曲线调速方法, 使得机械臂运动对飞行器产生的耦合影响处于飞行控制器的可控范围内, 飞行机器人从地面抓起目标物的过程如图 7 所示。



图 7 飞行机器人从地面抓起目标物的过程

5 结束语

本文针对飞行机器人多自由度机械臂的控制问题, 提出基于 Leap Motion 的利用人体手掌位置姿态控制机械臂, 实现其随动人手运动的控制方法。通过这种方式, 在拓展飞行器和机械臂应用范围的同时, 使其能够更加自然灵活地执行操作者的想法。

在测试中, 基于 Leap Motion 的逆向控制方式显示出良好的控制精度和稳定性。通过 7 段 S 曲线实现对机械臂动力装置响应进行调速, 使机械臂运动更加平滑, 减小其对飞行器的耦合影响。在实际飞行测试中, 成功控制飞行机器人抓起远处目标物。

参考文献:

- [1] 杨斌, 何玉庆, 韩建达, 等. 作业型飞行机器人研究现状与展望 [J]. 机器人, 2015, 37 (5): 628-640.
- [2] Mellinger D, Lindsey Q, Shomin M, et al. Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation [C]// Proc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2011: 2668-2673.
- [3] Pounds P E I, Bersak D R, Dollar A M. Grasping From the Air: Hovering Capture and Load Stability [C]// Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011: 2491-2498.
- [4] Caccavale F, Giglio G, Muscio G, et al. Adaptive control for UAVs equipped with a robotic arm [C]// Proc of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control. 2014: 11049-11054.
- [5] Kondak K, Huber F, Schwarzbach M, et al. Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 degrees of freedom industrial manipulator [C]// Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2014: 2107-2112.
- [6] Jimenez-Cano A E, Martin J, Heredia G, et al. Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks [C]// Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013: 4916-4921.
- [7] Arleo G, Caccavale F, Muscio G, et al. Control of quadrotor aerial vehicles equipped with a robotic arm [C]// Proc of the 21st Mediterranean Conference on Control and Automation. 2013: 1174-1180.
- [8] Mebarki R, Lippiello V. Image-based control for aerial manipulation [J]. Asian Journal of Control, 2014, 16 (3): 646-656.
- [9] Guna J, Jakus G, Pogaanik M, et al. An analysis of the precision and reliability of the leap motion sensor and its suitability for static and dynamic tracking [J]. Sensors, 2014, 14 (2): 3702-3720.
- [10] 李杨韬, 禹东川, 靳来鹏, 等. 基于 Leap Motion 手势识别的认知训练系统的设计和实现 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (9): 12-14.
- [11] 黄俊, 景红. 基于 Leap Motion 的手势识别在虚拟交互中的研究 [J]. 计算机应用研究, 2017, 34 (4): 1231-1234.
- [12] 李宪华, 张雷刚, 疏杨, 等. 六自由度模块化机械臂腕部工作空间量化对比分析 [J/OL]. [2016-09-18]. <http://www.aocmag.com/article/02-2017-09-031.html>.