

doi: 10.7690/bgzdh.2016.06.014

基于 DSP 的柔索驱动并联机构控制系统

周中喜, 张志安, 盛娟红

(南京理工大学智能弹药国防重点实验室, 南京 210094)

摘要: 针对某被动防护系统对平台姿态的控制要求, 设计了一种新型的柔性绳索并联机构, 并为该机构设计一款控制系统。建立基准坐标系和动平台固连坐标系, 在上述坐标系下分别用球坐标角和欧拉角表示动平台的姿态, 并给出 2 种姿态表示的转换关系。分析该机构的运动反解模型, 建立关于索长的 PID 控制模型。通过电机转动角度改变绳索的长度。根据建立的模型与控制要求设计控制系统的软件和基于 DSP 的硬件。实验和仿真验证结果表明: 该控制系统各个模块工作稳定、高效, 控制模型正确、有效, 达到控制要求, 实现了预期的功能。

关键词: 柔索并联驱动机构; 运动反解; PID 控制; 控制系统设计

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

The Control System of Cable-driven Parallel Manipulator Based on DSP

Zhou Zhongxi, Zhang Zhian, Sheng Juanhong

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To meet certain control requirements of a passive protection system of the platform attitude, this paper proposes a novel cable-parallel manipulator and designs a control system for the manipulator. Establishes two coordinate system, one is fixed on the static platform and the other one fixed on moving platform. Uses spherical coordinates and Euler angles to indicate the attitudes of the moving platform respectively, and then gives the transformational relationship between them. This method builds on the PID control model of cable length by analyzing inverse kinematic solution, and changes the length of the rope on the basis of the motor rotational angle. After that, the software of the control system and its hardware which is based on DSP are designed according to the established model and the control requirements. Finally, a series of experiments and simulations verify that: each module of the control system is stable, and the control model is also correct, the design meets the control requirements and realize the expected function.

Keywords: cable-driven parallel manipulator; inverse kinematic solution; PID control; control system design

0 引言

由于具有刚度大, 承载能力强, 精度高, 响应快, 运动性能好等优点, 并联机构得到迅速发展和广泛的应用。但是传统的并联机构由于其运动支链是由刚性连杆以运动副连接而成, 在高速、高精度、微型化等要求下不可避免会暴露出固有缺陷, 比如自身惯性所带来的振动, 运动副与刚性连杆联接所产生的间隙、摩擦、润滑、装配、误差等^[1]。笔者设计的纯转动并联机构采用柔索代替刚性连杆, 称为柔索并联驱动机构。这种机构只能承受拉力作用, 不能承受压力, 但相对于传统并联机构, 柔索并联驱动机构具有工作空间大, 模块化程度高, 价格低廉, 易拆装和可重组等显著优点^[2-3]。也正是这些优点使柔索并联驱动机构的研究受到国内外重视, 有很多应用及研究成果, 诸如绳索牵引摄像机^[4-6]、风洞支撑系统^[7]、医疗器材^[8]、大型射电望远镜^[9]等。

笔者研究的控制对象是针对某被动防护系统对

动平台的二自由度纯转动柔索并联机构。该机构主要由动平台、静平台、支撑杆、4 根绳索组成。支撑杆跟固定平台球副连接, 可以任意转动。通过控制动平台和固定平台的 4 根绳子的长度来调节动平台的姿态, 要求该控制系统能够实时、高效、高精度地控制动平台的姿态。

在固定平台上建立基准坐标系, 在动平台上建立固连坐标系。基准坐标系上用球坐标角、固连平台上用欧拉角表示动平台的姿态, 并给出 2 个姿态表示的转换关系。分析其运动反解模型, 得到动平台姿态和 4 根绳长的对应关系。建立关于索长的 PID 控制模型, 根据角度传感器传回的动平台的姿态开反馈控制电机的转动, 从而精确地改变绳长。根据建立的模型设计与控制要求设计控制系统的软件、硬件。

1 柔索并联机构总体介绍

如图 1 所示, 柔索并联机构由动平台 1、支撑

收稿日期: 2016-02-05; 修回日期: 2016-03-25

作者简介: 周中喜(1990—), 男, 湖北人, 硕士, 从事柔索并联机构的随动控制及运动分析、全方位移动平台的设计研究。

杆 2、4 根柔索 3、固定平台 4、步进电机 5、柔索转筒 6 和同步带 7 组成。支撑杆一端与固定平台球副连接，另一端固连动平台。柔索转筒通过同步带与步进电机相连。4 根柔索一端均匀固定在圆形动平台 4 个点上，另一端连接在 4 个柔索转筒上。柔索转筒沿支撑杆轴向均匀固定在方形固定平台 4 个顶角。通过控制 4 个步进电机的正转（逆转）的角度来控制 4 根绳索伸长量（缩短量），从而来控制动平台的姿态。

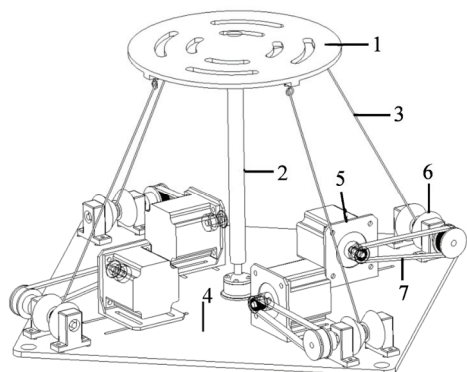


图 1 柔索并联驱动机构结构

柔索并联驱动系统中的柔索要保持刚性必须受拉力。在 4 根绳子拉力力矩作用下，当动平台的俯仰角和方向角确定时，自转角就确定了；因此，自由度为 2。Verhoeven^[10]提出了 n 自由度索并联机构需要 $n+1$ 根柔索进行牵引，才能保证为完全约束稳定机构，绳索数大于 $n+1$ 时为过约束并联机构。该系统为过驱动系统，需要考虑 4 个电机的驱动必须相容的问题。

电机与柔索转筒通过同步带传动，传动比为 1:2。电机驱动和控制板放在底面。将角度传感器 3 个坐标轴和动平台的 3 个坐标轴对准，固定在动平台中心。

绳长改变量为

$$\Delta l = \Delta \theta \cdot \frac{D}{2} \quad (1)$$

其中 $\Delta \theta$ 为柔索转筒转动的角度。

2 数学模型

2.1 坐标系的建立和姿态的表示方法

在固定平台上建立基准坐标系 A ，在动平台上建立与动平台固连的坐标系 B ，如图 2 所示。4 根绳子一端连接在 4 个柔索转筒上： $i(i=1,2,3,4)$ 。4 根绳子的另外一端连接在动平台上的 4 个点： $i'(i'=1',2',3',4')$ 。其中点 3 到点 1 的方向为基准坐标系

A 的 x 轴正方向 x_A ，点 4 到点 2 的方向为基准坐标系 A 的 y 轴正方向 y_A 。垂直于固定平台为基准坐标系 A 的 z 轴正方向 z_A 。以 3'到 1'为固连坐标系 B 的 x 轴正方向 x_B ，4'到 2'为固连坐标系 B 的 y 轴正方向 y_B 。垂直于动平台为固连坐标系 B 的 z 轴正方向 z_B 。初始状态下基准坐标系 A 和固连坐标系 B 3 个坐标轴的方向一致。由于该机构自由度为 2，且俯仰角和方向角不耦合；所以动平台的姿态可以用基准坐标系 A 的俯仰角和方向角表示，如图 3 所示。

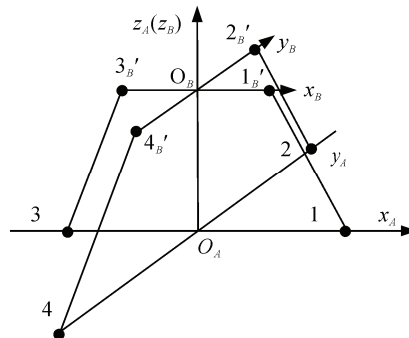


图 2 坐标系建立

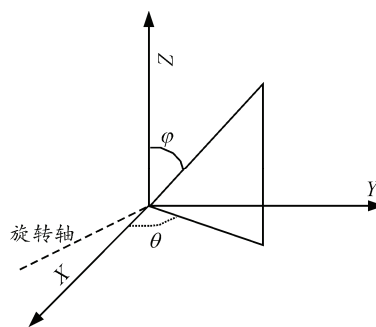


图 3 动平台姿态表示

$$q^A = (\varphi, \theta)^T \quad (2)$$

其中 φ 、 θ 分别为俯仰角和方向角。

角度传感器采用欧拉角法表示动平台的姿态，采用 $Z_{(\gamma)}-Y_{(\beta)}-X_{(\alpha)}$ 的转动方式。动平台的姿态在固连坐标系 B 下表示为：

$$q^B = (\alpha, \beta, \gamma)^T \quad (3)$$

由几何关系分别可以得到 x_B 、 y_B 、 z_B 的 q^B 、 q^A 的表示，而两者是相等的。由此可推出 2 种姿态表示的转换关系：

$$\tan \theta = \frac{-\sin \alpha}{\sin \beta \cos \alpha} \quad (4)$$

$$\cos \varphi = \cos \alpha \cos \beta \quad (5)$$

定义绳长向量：

$$l = [l_1, l_2, l_3, l_4]^T \quad (6)$$

其中 l_1, l_2, l_3, l_4 分别为 4 根绳子的长度。

固连坐标系 B 到基准坐标系 A 之间的坐标转换是通过关于欧拉角的 3×3 旋转矩阵。

$$\mathbf{R}_{B-A} = \begin{bmatrix} c\beta cr & -c\beta s\gamma & s\beta \\ c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta c\gamma & c\alpha c\gamma - c\alpha c\beta c\gamma & -s\alpha c\beta \\ s\alpha s\gamma - c\alpha s\beta c\gamma & s\alpha c\gamma + c\alpha s\beta s\gamma & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 c 、 s 在文中分别表示 \cos 与 \sin 的简写。

2.2 运动反解

动平台的中心的坐标：

$$\mathbf{o}_B = [0, 0, l_5]^T. \quad (8)$$

其中 l_5 为支撑杆的高度。

动平台上 i' 点的坐标在固连坐标系 B 下表示为 i'_B 。在基准坐标系 A 下表示为 i'_A 。

其中 i'_B 、 i'_A 两者的转换关系如下：

$$i'_A = \mathbf{o}_B + \mathbf{R}_{B-A} i'_B; \quad (9)$$

$$\mathbf{L}_i = i'_A - i_A. \quad (10)$$

其中 i_A 是 i 点在基准坐标系 A 上的坐标。

$$l_i = \|\mathbf{L}_i\|. \quad (11)$$

以上是通过固连坐标系 B 下欧拉角 q^B 表示姿态进行反解的。但用基准坐标系 A 下的俯仰角和方向角 q^A 表示更简单方便，更容易由几何关系得出。所以文中的姿态由 q^A 表示。在这之前需要解决的问题：用俯仰和方向 2 个角度参数表示姿态，转动的路径、顺序不一样， x_B 、 y_B 方向也不一样；所以要给机构的转动设定好特定的轨迹。

支撑杆从 (φ_1, θ_1) 运动到 (φ_2, θ_2) 的最短的轨迹：规定支撑杆在运动过程中始终在平面上转动，即绕一特定轴旋转。不妨将旋转轴定义为向量 \mathbf{R} ， \mathbf{R} 与支撑杆 (φ_1, θ_1) 和 (φ_2, θ_2) 的方向都垂直。

$$\mathbf{R} = (s\varphi_1 c\theta_1, s\varphi_1 s\theta_1, c\varphi_1) \times (s\varphi_2 c\theta_2, s\varphi_2 s\theta_2, c\varphi_2). \quad (12)$$

姿态 (φ_1, θ_1) 和 (φ_2, θ_2) 间的夹角就是支撑杆绕 \mathbf{R} 逆时针旋转的角度 ϕ ：

$$\phi = \arcsin(s\varphi_1 c\theta_1, s\varphi_1 s\theta_1, c\varphi_1) \cdot (s\varphi_2 c\theta_2, s\varphi_2 s\theta_2, c\varphi_2). \quad (13)$$

因此任意两点之间都可以通过一次这样的旋转完成，机构的第 k 次转动时，坐标系 B 的 3 个坐标轴方向在基准坐标系 A 下分别表示为：

$$x_{B-A}^k, y_{B-A}^k, z_{B-A}^k,$$

且有以下关系：

$$x_{B-A}^{k+1} = x_{B-A}^k c\phi + (\mathbf{R} \times x_{B-A}^k) s\phi + \mathbf{R}(\mathbf{R} \cdot x_{B-A}^k)(1 - c\phi); \quad (14)$$

$$y_{B-A}^{k+1} = y_{B-A}^k c\phi + (\mathbf{R} \times y_{B-A}^k) s\phi + \mathbf{R}(\mathbf{R} \cdot y_{B-A}^k)(1 - c\phi); \quad (15)$$

$$z_{B-A}^{k+1} = z_{B-A}^k c\phi + (\mathbf{R} \times z_{B-A}^k) s\phi + \mathbf{R}(\mathbf{R} \cdot z_{B-A}^k)(1 - c\phi). \quad (16)$$

初始状态：

$$x_{B-A}^0 = (1, 0, 0)^T; \quad (17)$$

$$y_{B-A}^0 = (0, 1, 0)^T; \quad (18)$$

$$z_{B-A}^0 = (0, 0, 1)^T. \quad (19)$$

上面给出了按规定轨迹转动后 x_B 、 y_B 、 z_B 在基准坐标系 A 下的表示。那么在运动 k 次后动平台上任一点坐标在基准坐标系下 A 的表示就可以给出。

点 i' 是动平台上的一点，所以在动平台固连坐标系 B 下的坐标表示为常数向量 i'_B 。不妨定义第 k 次运动时候 i' 点在基准坐标系 A 下坐标表示为 i'_{Ak} 。

$$i'_{Ak} = i'_B(x_k^{B-A}, y_k^{B-A}, z_k^{B-A}). \quad (20)$$

那么由式 (9)、式 (10) 可以得到第 k 次运动完成时 4 根钢丝绳的长度： $l_k^i (i=1,2,3,4)$ 。

要使支撑杆沿规定的轨迹转动，必须满足下式：

$$\frac{dl_k^i}{\omega dt} = \frac{dl_k^i}{d\phi_k} (i = 1, 2, 3, 4). \quad (21)$$

其中 ω 表示某时刻支撑杆绕其旋转轴转动的角速度。在该控制系统中，由键盘输入。

根据 $l_k^i (i=1,2,3,4)$ 可以得到式 (21) 的右边。所以 4 根绳长的改变速度可由一个参数 ω 确定，即当起始姿态和结束姿态给定，并给定杆运动的角速度，4 个电机的转动便可确定。

3 柔索并联机构的控制系统设计

3.1 控制系统硬件总体介绍

控制系统框图如图 4 所示。

笔者采用 TI 公司的 TMS320F28335 DSP 作为主控芯片。该芯片采用高性能静态 CMOS 技术，系统频率高达 150MHz，片上的单精度浮点单元 FPU，可减少算法的运行时间，满足控制系统对高实时性的要求，6 个独立的多功能 EPWM 外设模块能灵活、高效地完成控制系统对 4 个电机独立控制。该芯片拥有丰富的 GPIO 口和串口，可以轻松地满足按键、

液晶、角度传感器对 I/O 口的要求。

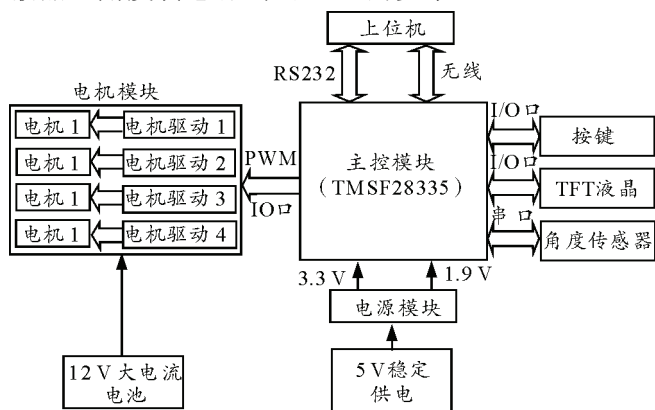


图 4 控制系统硬件结构

控制模块通过 GPIO 口控制电机的使能、运转的方向，通过控制 PWM 脉冲的周期、个数来控制电机转动的速度、角度。

笔者在动平台上安装了姿态角度测量模块 JY-901。JY-901 传感器测量误差 $< 0.01^\circ$ ，稳定性极好。JY-901 通过 SCI 串口与 TMS3220F28335 相连。

通过键盘输入动平台的目标姿态角、运动速度等信息，采用 TFT 液晶实时显示 JY-901 的数据、运动速度，起始及目标角。

3.2 柔索并联机构的软件系统

整个软件系统由系统初始化、人机交互、数学模型、传感器数据传输、电机控制 5 个模块组成。

初始化模块：包括对 I/O 口的初始化、时钟模块初始化、液晶显示、键盘输入、电机驱动控制、角度传感器等硬件驱动必要初始化程序。

人机交互模块包括键盘输入和 TFT 显示部分。

数学模型模块包括运动反解、不同坐标系姿态转换、细分插值和 PID 算法模块。

传感器数据采集模块通过串口 RS232 读取姿态传感器返回来的数据，并传送到上位机。

电机控制模块的主要功能是通过运动反解模型及 PID 模型得出的当前控制量来控制电机的转动角度及角速度。

系统的程序流程分主函数和中断函数 2 部分。

主程序流程如图 5 所示。程序先调用初始化模块，然后通过键盘输入此次运动的起始姿态角、目标姿态角、细分数、角速度等信息，并在 TFT 上显示。调用数学模型，将此次运动分解成若干个阶段（每个阶段转动角度相同）的离散运动，并计算出每个阶段对每个电机应输出的 PWM 波的个数和周

期。根据计算的结果配置 EPWM，打开每个 EPWM 模块的中断。然后不断接收 JY-901 传来的角度信息，并将其实时更新到上位机、TFT。

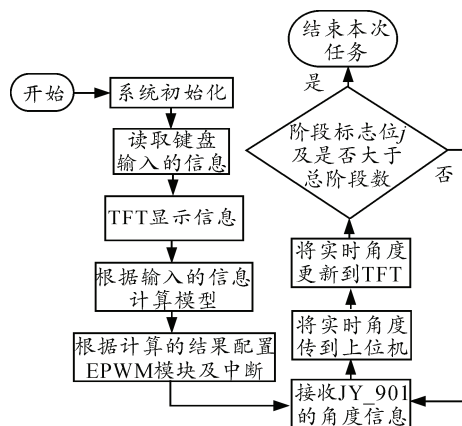


图 5 主程序流程

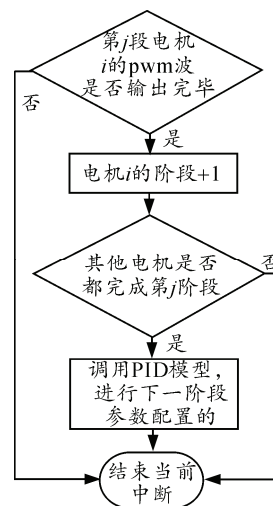


图 6 EPWM 中断函数 i 流程

EPWM 中断函数 i 流程如图 6 所示：EPWM 模块 i 每次输出一个 PWM 波，程序就进入对应的中断函数。中断函数中主要是对输出的 PWM 脉冲计数，判断当前的阶段是否结束。当前阶段结束，就根据最近更新的角度数据，得到理论和探测的误差，调用 PID 模型，更新下个阶段需要输出的 PWM 波的个数及 PWM 波的周期，并进入下一个阶段。

3.3 PID 控制系统的具体实现

通过坐标转换将 JY-901 实时传回来的动平台姿态的欧拉角 q^B 转换成用 q^A 表示，并通过运动反解模型获得的实时绳长： $l_r(t)$ 。由于采用的角度传感器精度、实时性远大于对机构控制精度、实时性的要求，所以这里认为角度传感器测得姿态即是实际动平台的姿态，那么由传感器返回数据转换成的当前绳长也可以认为是实际绳长。同时由式 (20) 得

知, 当笔者给定角速度 $\omega: l_d(t)$, 也可得到实时期望绳长。将绳长误差定义为

$$e = l_d(t) - l_r(t), \quad (22)$$

定义由 PID 得出的补偿绳长为 $e_u(t)$ 。

根据 PID 公式有:

$$e_u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]. \quad (23)$$

定义系统状态的执行输入绳长

$$l_u(t) = l_d(t) + e_u(t). \quad (24)$$

将式 (21)、式(23) 离散化。

$$\int_0^t e(t) dt \approx \sum_{i=0}^k e(i) \Delta t = T \sum_{i=0}^k e(i). \quad (25)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{\Delta e(k) - \Delta e(k-1)}{\Delta t} = \frac{\Delta e(k) - \Delta e(k-1)}{T}. \quad (26)$$

$$\frac{dl_k}{dt} = \omega \frac{dl_k}{d\phi_k} \approx \frac{\Delta l_{dk}}{\Delta t} = \frac{\Delta l_{dk}}{T}. \quad (27)$$

将式 (25)、式 (26) 代入式 (23) 中得:

$$l_u(n) = K_p \{e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]\} + l_d(k) = l_{up}(k) + l_{ui}(k) + l_{ud}(k) + l_d(k) \quad (28)$$

其中: l_{up} 是比例环节; l_{ui} 是积分环节; l_{ud} 是微分环节。

当角速度、起始姿态角、目标姿态角、细分阶段数通过键盘输入后, 那么每个阶段的周期 T 就可以确定。根据式 (28), 笔者在每个周期内只需要保存 3 个值: 所有误差的和 $\sum_{i=0}^k e(i)$ 、上次误差 $e(k-1)$ 、本次误差 $e(k)$, 不断迭代更新, 计算式 (28)。直到动平台的姿态达到要求的范围之内。PID 模块框如图 7。

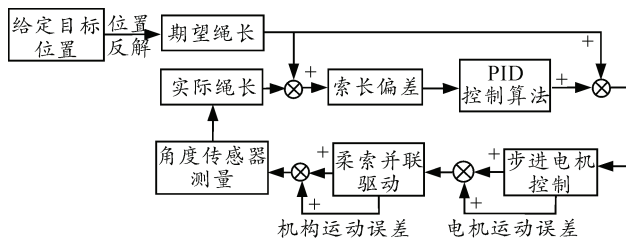


图 7 控制系统框

3.4 电机驱动模块的具体实现

电机驱动模块具体点就是实现式 (27)。

首先通过键盘输入在细分阶段数 div 。

将输入的起始姿态和目标姿态, 用三维单位向量表示: 起始向量 \mathbf{a} , 目标向量 \mathbf{b} 。可以求起始姿态和目标姿态之间的夹角 ϕ 。

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \cos \phi. \quad (29)$$

每个阶段支撑杆转动的角度为

$$\Delta \phi = \phi / div. \quad (30)$$

每个阶段的周期为

$$T = \Delta \phi / \omega. \quad (31)$$

求同时垂直起始姿态向量 \mathbf{a} , 目标姿态向量 \mathbf{b} 的单位向量 \mathbf{d} 。

那么第 j 阶段起始、结束后支撑杆的单位方向向量

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} \cos(j \cdot \Delta \phi) + \mathbf{d} \cdot \sin(j \cdot \Delta \phi). \quad (32)$$

可以根据每个阶段起始与结束的姿态, 调用数学模型得到每个阶段每个电机驱动应该接收的 PWM 波的个数。根据某个阶段周期和该阶段应输出的 PWM 波的个数就可以得到该阶段每个 PWM 波的 PRD 值。

4 实验结果与仿真分析

根据笔者设计的系统做了 2 组实验。实验中, 将给角速度设定为 $(\pi/18)$ rad/s, 动平台的姿态首先从 $(0, \pi/2)$ 运动到 $(\pi/6, \pi/2)$, 阶段数定为 30; 然后绕基准坐标系 z 轴逆时针旋转一周, 阶段数定为 120。将每个阶段每一周期传感器传回来的角度信息变量与笔者期望姿态的估计进行比较, 并观察动平台中心的实际轨迹与理想估计图。图 8 与图 9 的虚线为运动的理想轨迹, 实线为实际轨迹。

根据图 8、图 9, 笔者对实验结果分析如下:

1) 本控制系统实现了预期的目标, 能按照预定的轨迹运动, 各个模块运行正常。证明上述的模型和控制算法基本正确, 硬件及软件设计符合要求。

2) 控制精度不高。实际轨迹与理想轨迹有较大的偏差。

3) 俯仰角的实际值明显比理想值要大, 原因可能是平台加工存在一定误差、数学模型简化导致的误差。同时, 方向角实际值与理想值有一个角度偏差主要由于角度传感器安装时, 传感器的坐标轴与平台的坐标轴没有严格对准, 导致方向角存在一个静误差。

4) 运动轨迹呈锯齿形状, 不是理想的圆滑曲线, 这主要是将模型离散化而造成的。

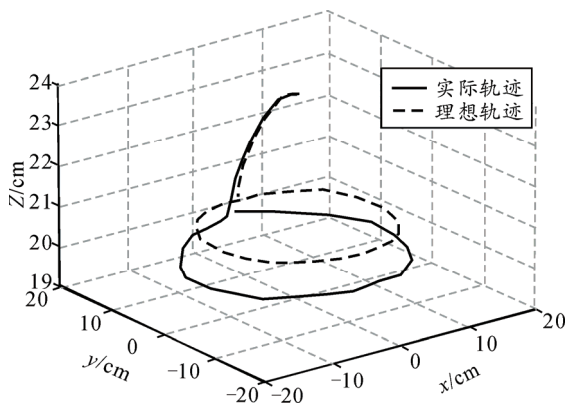


图 8 动平台中心三维轨迹

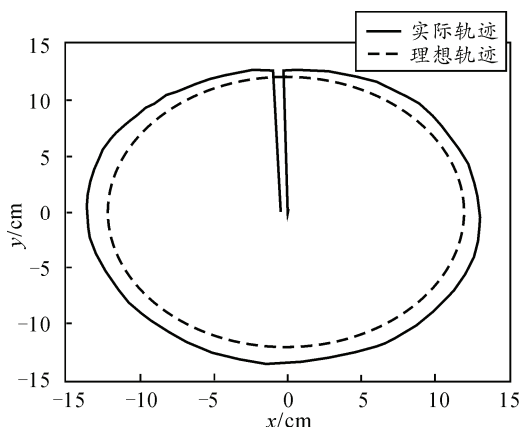


图 9 动平台中心轨迹图俯视

表 1 是从几个关键姿态角的数据比较。

表 1 实际姿态角与理想姿态角的比较

理想姿态	(0,90)	(30,90)	(30,180)	(30,360)
实际姿态	(1.2,-27.8)	(31.6,95.8)	(34.0,187.2)	(32.1,8.9)

从表 1 可以看出：俯仰角存在一个线性误差，大约在 10%。当俯仰角的理想值为 30°时，实际值在 33°左右浮动。在圆形轨迹中俯仰角的平均值为 33.36°。方向角存在一个净误差为 8.2°。在初始状态下方向角的偏差非常大，这是由于在初始状态下支撑杆垂直于平面，所以这个时候的方向角可以为任意值。

5 总结

笔者以柔索并联驱动机构为研究对象，分析了

其自由度和运动反解模型，建立 2 个坐标系，及 2 个坐标系下的动平台的姿态表示，并给出这 2 个坐标系的转换关系。给出了基于绳索的 PID 反馈控制模型。基于此，笔者设计了一款以 TMS320F28335 为主控芯片，基于 PID 算法的控制系统。经过试验结果和仿真分析可知：该款控制系统实现了预期的功能，各个模块运行高效、稳定，实时性较好，证明上述模型的控制算法基本正确。但同时由于机构本身的精度、安装误差、电机的步距角固定、芯片运算能力等限制，控制精度存在一定误差：俯仰角有 10%的误差，方向角有 8°左右的净误差。

参考文献：

- [1] 朱大昌, 李培, 崔祥府, 等. 2RPU-2SPS 全柔顺并联机构构型设计及刚度的研究[J]. 江西理工大学学报, 2012, 33(5): 1-2.
- [2] 李辉, 朱文白. 柔索牵引并联机构的静刚度分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 9-16.
- [3] 刘善增, 朱真才, 王洪欣, 等. 柔性并联机器人的研究进展[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(5): 1-7.
- [4] 曾金桥. 一种四索牵引平动并联机器人的运动分析与控制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [5] 于亮亮. 绳索牵引摄像机机器人的运动特性分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [6] 穆成龙. 一种三自由度索并联机构的分析与控制[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [7] 姚裕, 吴洪涛. 3-DOF 转动柔索驱动风洞机构的力雅克比矩阵[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(1): 75-78.
- [8] 王克义, 张立勋, 张今瑜, 等. 1R2T 绳索牵引骨盘康复机器人动力学[J]. 江苏大学学报, 2010, 31(2): 131-135.
- [9] Gabriel Meunier, Benoit Boulet. Control of an Overactuated Cable-Driven Parallel Mechanism for a Radio Telescope Application[J]. IEEE Transaction on Control Technology, 2009, 17(5): 1043-1054.
- [10] Verhoeven R, Hiller M, Tadoroko S. Workspace, stiffness, singularities and classification of tendon driven Stewart platforms[C]. Proceedings of the 6th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Strobl/Salzburg, 1998, 105-114 Theory, 2006, 41(6): 671-687.