CN 53 - 1189/P ISSN 1672 - 7673

一种用于天文望远镜支撑机构的并联机器人控制方案*

徐淑干[1,2], 王 海[1]
(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 针对一种用于天文望远镜支撑机构的 6自由度的并联机器人, 提出了基于预测机制的控制方案, 描述了该机器人的结构和运动学, 设计并实现了控制方案的具体功能, 对控制过程的仿真结果进行分析, 验证了控制方案的有效性。

关键词: 天文望远镜; 支撑机构; 并联机器人; 预测; 控制方案; 仿真
中图分类号: P111 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672 - 7673(2009)03 - 0228 - 06

天文光学望远镜对其光学元件, 特别是主镜和副镜, 主镜和主焦点探测器之间的相对位置有极严格的要求。这些光学元件之间的距离较大 (可达 2m以上)。但在观测过程中, 重力作用和温度变化都会引起结构变形, 从而破坏了光学元件之间确定的位置关系, 导致像质下降和像位置的漂移[1-2]。因此如何高效地控制望远镜副镜的位姿, 保证副镜与主镜的相对位置保持不变, 是望远镜控制系统的设计者们所要面对的一个重大难题。从计算机控制工程的角度分析, 望远镜的工作环境有非线性、大滞后、多变量耦合以及易受外扰等特点, 要使望远镜主副镜之间的结构由 "被动维持 "发展到 "主动校正 ", 首要的工作是设计出可以自动调节望远镜副镜位姿的控制系统。由中国科学院南京天文光学技术研究所为法国研制的 2.5m望远镜项目中的副镜支撑机构, 是一种 6自由度的并联机器人, 并联机器人由于其机构本身的特点, 具有刚度大、承载能力强、响应速度快、误差小等特点, 因而在该项目中, 决定采用并联机器人作为望远镜副镜的支撑机构。本文重点针对该并联机器人的控制方案展开研究, 首先介绍并联机器人的结构, 并对并联机器人进行运动学分析, 然后针对并联机器人设计出控制方案, 并用阶梯式预测控制算法对并联机器人的控制过程、扰动影响过程、位姿重新调整过程进行仿真实验, 最后给出结论。

1 并联机器人的结构

在该项目中, 望远镜副镜的支撑机构采用的并联机器人的结构如图 1所示, 动平台圆周上有 6个固定点 S_1、S_2、S_3、S_4、S_5、S_6, 通过 6根固定长度为 R_3 的连杆, 与静平台平面上的 6个非固定点 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6 相连接, 静平台上的 6个点 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6 到静平台圆心 O_2 之间有 6道滑轨 X_1O_2、X_2O_2、X_3O_2、X_4O_2、X_5O_2、X_6O_2, 6根固定长度为 R_3 的连杆的下端点 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6, 通过在各自滑轨上滑动, 从而实现动平台位置和姿态的变化。6个连杆的下端点到静平台圆心 O_2 的距离, 定义为滑杆长度 L_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$); $\angle S_1O_1S_2 = \angle S_3O_1S_4 = \angle S_5O_1S_6 = 2\omega_1$ (动平台圆心为 O_1); $\angle X_1O_2X_6 = \angle X_2O_2X_3 = \angle X_4O_2X_5 = 2\omega_2$; XOY坐标系与静平台平面重合, $\angle X_4O_2X_5$ 的角平分线为 Y轴, X轴垂直于 Y轴, O_1O_2 为 Z轴; 动平台圆半径为 R_1; 静平台圆半径为 R_2, 滑杆长度 L_i 取值范围为 $[0, R_2]$。在该项目中, 望远镜的副镜放置在动平台上, 通过调节并联机器人的位姿, 从而驱动望远镜副镜位姿自动调整, 使副镜与主镜的相对位置保持不变。

*收稿日期: 2009 - 01 - 06; 修定日期: 2009 - 03 - 03
作者简介: 徐淑干, 男, 硕士, 研究方向: 计算机网络控制技术、望远镜控制系统设计

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

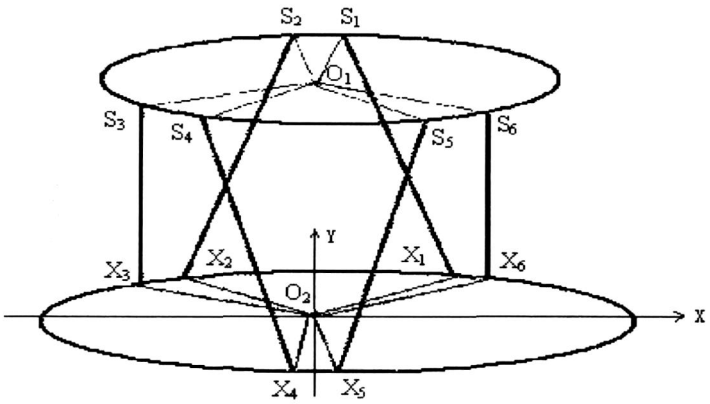

图 1　并联机器人结构图

Fig. 1　Structure of the parallel robot

2　并联机器人的运动学分析

在动平台局部坐标系中，动平台上的各点 S_1、S_2、S_3、S_4、S_5、S_6 坐标为 $(x_i,\ y_i,\ z_i)$ $(i=1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6)$：

$$x_i = R_1\cos\theta_i,\quad y_i = R_1\sin\theta_i,\quad z_i = 0, \tag{1}$$

式中，θ_i 为动平台上各点 S_i $(i=1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6)$ 的方位角：

$$\begin{aligned}&\theta_1 = \pi/2-\omega_1,\ \theta_2 = \pi/2+\omega_1,\ \theta_3 = 7\pi/6-\omega_1,\\&\theta_4 = 7\pi/6+\omega_1,\ \theta_5 = 11\pi/6-\omega_1,\ \theta_6 = 11\pi/6+\omega_1.\end{aligned} \tag{2}$$

根据计算机图形学中的空间变换理论，对动平台局部坐标系中的各点 S_i 坐标 $(x_i,\ y_i,\ z_i)$ 进行变换，可求得它们在并联机器人位置姿态为 $(x_w,\ y_w,\ z_w,\ \alpha,\ \beta,\ \gamma)$ 时的全局坐标 $(x_{Si},\ y_{Si},\ z_{Si})$：

$$[x_{Si},\ y_{Si},\ z_{Si}]^{\mathrm{T}} = R\cdot[x_i,\ y_i,\ z_i]^{\mathrm{T}} + [x_w,\ y_w,\ z_w]^{\mathrm{T}}, \tag{3}$$

其中，变换矩阵：

$$R = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\0 & \cos\alpha & -\sin\alpha\\0 & \sin\alpha & \cos\alpha\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\beta & 0 & \sin\beta\\0 & 1 & 0\\-\sin\beta & 0 & \cos\beta\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\gamma & -\sin\gamma & 0\\\sin\gamma & \cos\gamma & 0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{4}$$

静平台上的各点 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6 的坐标表示为 $(x_{xi},\ y_{xi},\ 0)$ $(i=1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6)$，动平台上的各点 S_1、S_2、S_3、S_4、S_5、S_6 的坐标表示为 $(x_{Si},\ y_{Si},\ z_{Si})$ $(i=1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6)$，静平台上各点与动平台上各点之间的距离满足关系：

$$(x_{xi}-x_{Si})^2 + (y_{xi}-y_{Si})^2 + z_{Si}^2 = R_3^2. \tag{5}$$

在静平台中，y_{xi} 与 x_{xi} 满足关系：

$$y_{xi} = x_{xi}\tan\Phi_i\quad (i=1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6), \tag{6}$$

其中，Φ_i 表示静平台上点 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6 的方位角：

$$\begin{aligned}&\Phi_1 = \pi/6+\omega_2,\ \Phi_2 = 5\pi/6-\omega_2,\ \Phi_3 = 5\pi/6+\omega_2,\\&\Phi_4 = 3\pi/2-\omega_2,\ \Phi_5 = 3\pi/2+\omega_2,\ \Phi_6 = \pi/6-\omega_2.\end{aligned} \tag{7}$$

滑杆长度 L_i 与 x_{xi} 满足关系：

$$L_i = x_{xi}/\cos\Phi_i \tag{8}$$

通过以上分析可知，由 (1) - (8) 式和已知位姿状态数值 $(x_w,\ y_w,\ z_w,\ \alpha,\ \beta,\ \gamma)$ 可求出 L_i，并联机器人的每一种位姿状态 $(x_w,\ y_w,\ z_w,\ \alpha,\ \beta,\ \gamma)$，都有 6 个滑杆长度 L_i 与其相对应，要控制并联机器人到达期望姿态，只需控制 6 个滑杆达到相应长度即可。在该项目中，望远镜副镜位姿的自动调整，依赖于该并联机器人位姿的自动调整，因此并联机器人控制系统起着至关重要的作用。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 并联机器人的预测控制

3.1 改进并联机器人装置

为了将控制算法应用到该并联机器人的控制系统中，必须将并联机器人装置进行内置电机改进和增加反馈改进，内置电机改进和增加反馈改进只是在原有的并联机器人装置上进行简单的改造。

内置电机就是在并联机器人的 6个连杆中放置 6台电机 D_1、D_2、D_3、D_4、D_5、D_6，以控制连杆在静平台滑轨上可以来回滑动。6台电机分别与控制计算机相连接，控制计算机发送控制命令给电机，从而驱动连杆在静平台滑轨上运动，促使并联机器人位姿发生变化。

增加反馈是实现准确控制并联机器人不可缺少的环节，控制过程中，需要实时测出 6个滑杆长度 L_i 值。在 6道滑轨上各自放置反馈装置 A_1、A_2、A_3、A_4、A_5、A_6，反馈装置负责实时测量 6个滑杆长度 L_i 值，并把数据发送给控制计算机。

3.2 预测控制的优点和控制律

目前整个工业控制中，大约有 90%以上的控制器采用 PD控制。对那些难以建立精确数学模型、非线性、时变的复杂系统，PD却不能很好地控制。PD控制器及其改进型是工业过程中最常见的控制器，单纯采用高级控制技术的控制回路数只占 10%左右。但是传统观念认为，当过程对象的滞后时间和主导时间常数之比大于 1时，常规 PD控制算法便无法达到满意的控制效果，而高级控制方法如预测控制就可以较好地处理这样的问题[3]。预测控制理论，是 J. Richalet和 C. R. Cutler各自研究的有关解决实时动态环境下带约束多变量耦合系统控制问题的成果[4]。据 J. Richalet估计，在剩余 10%无法用 PD控制的回路中可以通过采用预测控制获得收益[5]。

PD控制是在分析过去数据、现在数据的基础上，确定当前时刻的控制量，PD控制没有考虑未来数据对当前控制量的影响。在法国 2.5m望远镜项目中，未来数据对当前控制量的影响，远比过去数据对当前控制量的影响更重要。对并联机器人的控制，绝不能忽视未来数据对当前控制量的作用，并联机器人动平台上放置的副镜对位姿控制的实时性有较高要求，况且对并联机器人系统也难以建立精确的数学模型，因此，采用预测控制比采用 PD控制必然会有更好的控制效果。本文采用阶梯式预测控制算法来控制并联机器人，从全局角度统筹分析过去数据、现在数据、未来数据的状况后，确定出当前时刻的控制量。阶梯式预测控制算法控制律为：

$$\Delta u = \frac{H_1^{\mathrm{T}}(W - Y^1)}{H_1^{\mathrm{T}}H_1 + \lambda[1 + (1+a)^2 + \cdots + (1 + a + \cdots + a^{P-1})^2]} \tag{9}$$

式中，H_1 是 $P \times 1$ 的列向量；W 是柔化轨迹；Y^1 是预测输出矩阵；λ 是控制量的变化权重；a 是阶梯因子；P 是预测前景。

3.3 并联机器人的控制流程

在该项目中，望远镜副镜支撑机构的控制系统，主要由控制计算机、6台电机、反馈装置（A_1、A_2、A_3、A_4、A_5、A_6）、并联机器人组成，并联机器人控制系统如图 2所示，具体的控制步骤共有 4步：

1、控制计算机根据并联机器人的期望位姿（x_w，y_w，z_w，α，β，γ），计算出该期望位姿对应的 6个期望滑杆长度 L_i（$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$）；

2、控制计算机命令反馈装置 A_1、A_2、A_3、A_4、A_5、A_6 测量当前时刻状态下的 6个滑杆长度数据 L_{ti}（$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$），然后接收反馈装置发送的数据；

3、控制计算机采用预测控制策略，分析过去数据、现在数据（L_{ti}）和期望数据（L_i），预测出未来数据，从而确定出当前时刻下 6台电机的 6个控制量，然后分别发送控制命令给各电机，各电机依据各自接收到的控制量，控制连杆在滑轨上运动，从而实现滑杆长度向期望滑杆长度 L_i 靠近，也就是并联机器人的位姿向期望位姿（x_w，y_w，z_w，α，β，γ）靠近；

4、转到第 2步，直到滑杆长度与期望滑杆长度 L_i 相等。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

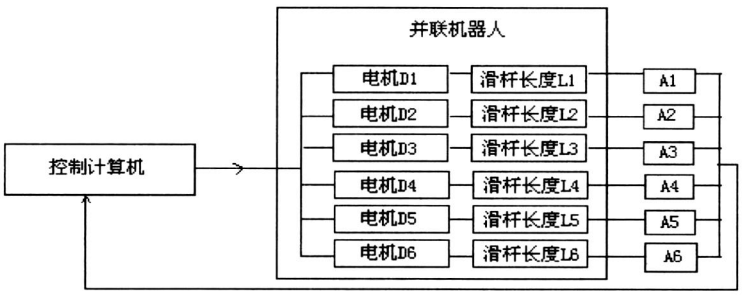

图 2　并联机器人控制系统

Fig. 2　Control system of the parallel robot

3.4　并联机器人的预测控制仿真实验

初始状态下，6个滑杆长度为 $L_{ti}=0$ $(i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$，现在要促使滑杆长度变化到期望长度 $L_i=(3, 6, 9, 12, 15, 18)^T$，以实现并联机器人位姿调整。用 VB 编写并联机器人的预测控制程序，令柔化因子为 0.3，阶梯因子为 0.3，在下列状态下进行仿真实验：

(1) 在理想状态下仿真

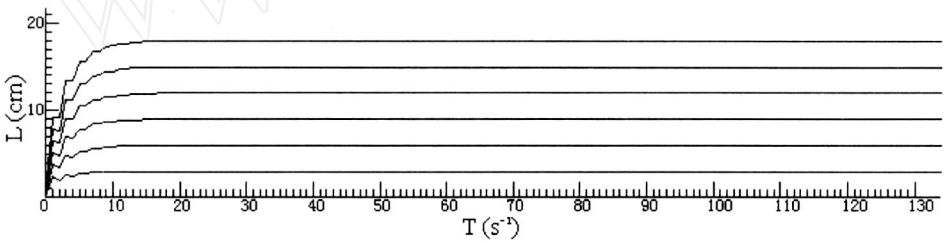

图 3　理想状态仿真图

Fig. 3　Simulated changes of the lengths of slide bars under the ideal situation

从图 3可以看出，6个滑杆长度在经过采样 17次之后，都达到了期望滑杆长度 $L_i=(3, 6, 9, 12, 15, 18)^T$，控制的快速性非常好。

(2) 在内扰存在状态下仿真

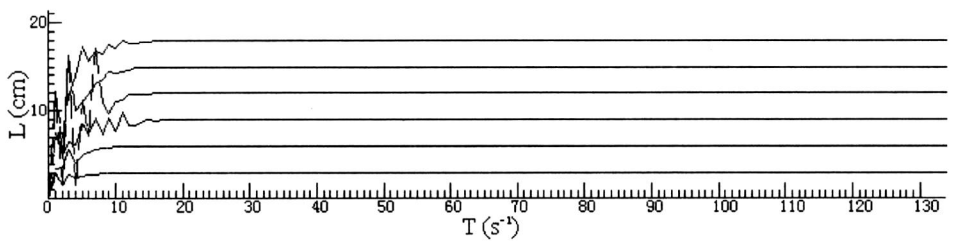

图 4　内扰状态仿真图

Fig. 4　Simulated changes of the lengths of slide bars under the influence of internal disturbances

从图 4可以看出，虽然为系统加入了最高幅值 2倍于 Δu的内部随机扰动，但在经过采样 18次之后，滑杆长度仍然可以迅速顺利地变化到期望滑杆长度 $L_i=(3, 6, 9, 12, 15, 18)^T$，并联机器人的预测控制系统在抗内扰能力方面是非常好的。并联机器人控制系统中的内扰，一般是由摩擦力等因素造成的，主要表现为电机运转不准确。仿真实验显示，通过并不十分精确的电机来准确控制并联机器人，采用预测控制策略是完全可以达到要求的。

(3) 在外扰存在状态下仿真

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

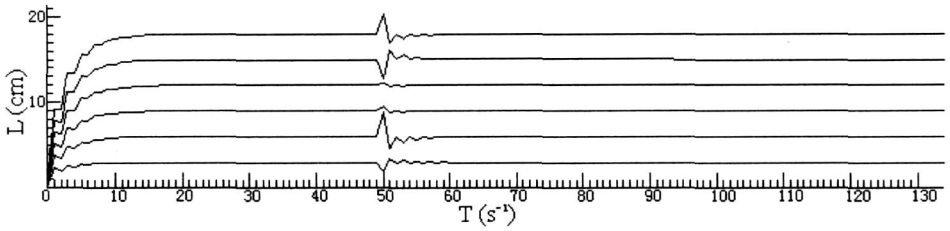

图 5 外扰状态仿真图

Fig. 5 Simulated changes of the lengths of slide bars under the influence of external disturbance

在采样第 50次时，为已稳定的系统加入一次最高幅值 6倍于 Δu的外部随机扰动，从图 5可以看出，并联机器人的预测控制系统，在抗外扰能力方面也非常好的。在继续采样不到 10次左右，滑杆长度基本重新回归到期望长度 $L_i = (3, 6, 9, 12, 15, 18)^T$。并联机器人控制系统中的外扰，主要是外力作用 (如地震)造成的，这些意外的外力促使滑杆长度偏离了本位。仿真实验显示，并联机器人在遭受强烈外扰时，滑杆长度可以在短时间内迅速回归本位，并联机器人的预测控制系统在应急状态下是完全可以达到控制要求的。

(4) 在位姿重新调整状态下仿真

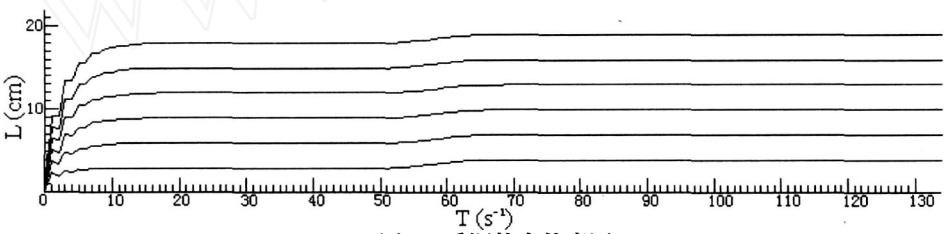

图 6 重调状态仿真图

Fig. 6 Simulated changes of the lengths of slide bars under the situation of resetting the configuration

在采样第 50次时，为已稳定的系统重新设定期望滑杆长度 $L_i = (4, 7, 10, 13, 16, 19)^T$，从图 6可以看出，在继续经历 20次采样后，并联机器人位姿得到重新调整，滑杆长度变化到期望长度 $L_i = (4, 7, 10, 13, 16, 19)^T$。仿真实验显示，通过采用预测控制策略，并联机器人可以快速调整自身的位姿。

4 结 论

在法国 2.5m望远镜项目中，通过对望远镜副镜的支撑机构编写阶梯式预测控制程序，来仿真并联机器人的控制过程、扰动影响过程、位姿重新调整过程。仿真实验的结果验证，在控制并联机器人方面，预测控制有很快的反应速度和较强的抗干扰能力。虽然仿真结果显示，采用预测控制策略，并联机器人在运动的灵活性和抗干扰能力方面都达到了要求，但必须指出的是，这些结果是基于数值模拟得到的，进一步的工作，将通过实践验证控制方案的有效性，并在项目中验证工程的可行性。

致谢：在论文撰写过程中，顾伯忠研究员和张振超研究员给予了支持和帮助，在此一并表示感谢。

参考文献：

[1] 文新荣，胡企千，周尊源. 望远镜主副镜实时自校正系统 [J]. 中国机械工程，2003，14 (14)：7.

[2] Duan B Y. The application of the Stewart Platform in the Next Generation Large Radio Telescope

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Journal of Robotic Systems [J]. Automatica, 2000, 17 (7): 375 - 383.
[3] 张云，刘红波，贾磊. 一阶系统预测 PD 控制器鲁棒稳定性分析 [J]. 计算机应用研究，2008, 25 (5): 1357 - 1360.
[4] 王树青等. 先进控制技术及应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2001.
[5] J Richalet Industrial Applications of Model Based Predictive Control [J]. Automatica, 1993, 29 (5): 1251 - 1274.

A Control Scheme for the Parallel Robot Used as the Supporting Mechanism of an Astronomical Telescope

XU Shu-gan[1,2], WANG Hai[1]
(1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China, Email: sgxu@niaot.ac.cn; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper proposes a control scheme of a 6-DOF parallel robot based on a prediction mechanism, which is used as the supporting mechanism of an astronomical telescope. The paper subsequently describes the structure and kinematics of the robot, and the implementation of the control scheme. The paper also analyzes simulation results of the control process and verifies the effectiveness of the control scheme.

Key words: astronomical telescope; supporting mechanism; parallel robot; prediction mechanism; control scheme; simulations

上接第 201页 (Continued from page 201)

A New High-Speed FFT Algorithm for Analyzing Solar Radio Spectra

CHEN Lin-jie[1,2], YAN Yi-hua[1], LIU Fei[1], CHANG Huan[3]
(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100871, China, Email: cljie@bao.ac.cn;
3. Changcheng Institute of Metrology & Measurement (CIMM) of AVIC1, Beijing 100095, China)

Abstract: In this paper, a new high-speed FFT algorithm is proposed for analyzing solar radio spectra. Based on separately treating even- and odd-number points in a data sequence, the 4N-point FFT transformation is achieved by two N-point FFT transformations to analyze real-time radio spectra in an FPGA. Simulations show that the new algorithm can yield accurate results and have a higher efficiency than common algorithms.

Key words: spectral analysis; FFT; FPGA

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net