

文章编号: 1002-0446(2000)02-0108-06

双臂自由飞行空间机器人地面实验平台系统设计

洪炳熔 柳长安 郭恒业

(哈尔滨工业大学计算机系 哈尔滨 150001)

摘要: 本文主要讨论在地面上模拟的空间微重力环境下能够自主捕捉目标的双臂自由飞行空间机器人地面实验平台的系统设计方案。该系统由机器人实验模型、视觉系统、通讯系统、主机系统、气浮平台及浮动目标六个子模块组成。本文首先讨论系统各子模块的设计原则, 其中重点讨论机器人实验模型设计, 其次讨论基于层次递减式控制系统结构, 它由用户界面、策略控制及运动控制三个层次组成。最后讨论机器人本体飞行运动控制算法和机械手臂操作控制算法。

关键词: 自由飞行空间机器人; 地面实验平台; 控制结构; 运动控制算法

中图分类号: TP24 文献标识码: B

1 引言

自由飞行空间机器人(Free-Flying Space Robot, 简称 FFSR)是目前空间机器人领域的主要研究方向之一, 它由机器人本体和搭接在本体上的机械手臂组成, 可以在宇宙空间自由飞行(或浮游), 并完成作业。它不但能提高作业效率, 而且还能节省空间作业费用, 因此它是将来能代替宇航员舱外作业的主要手段。FFSR 的主要任务是建造空间站, 同时还用来对失效卫星进行捕捉、维修后重新投放使用。实际上, FFSR 是一颗具有多臂的小卫星, 它不但具有小型、廉价、灵活的特点, 而且比空间站上的大臂遥控机械手具有更多的自主作业能力。因此, 美国的 NASA、日本的 NASDA 都给予高度重视, 以巨额投资进行开发。日本于 1997 年 11 月上天的工程实验卫星 EST-VII 就是世界上第一台自由飞行空间机器人。

FFSR 与地面机器人的不同之处在于地面机器人的基座是固定的, 而 FFSR 处于浮游状态, 没有固定点, 机械手臂运动的反作用力影响机器人本体的位置和姿态, 从而使机械手臂的位置和姿态也会随着相应变化, 因此其运动学和动力学控制问题比地面机器人要复杂得多。为了研究 FFSR 在空间微重力环境下的运动学和动力学特性, 不但要研究计算机仿真系统, 而且还要在地面模拟微重力环境下做实际机器人模型控制算法的各种仿真实验。为此我们设计和研制了双臂自由飞行空间机器人地面实验平台。这一实验平台是课题组在“八五”研制的单臂自由飞行空间机器人地面实验平台^[1, 2]及“九五”初研制的双臂自由飞行空间机器人自主控制计算机仿真系统基础上开发的。

在地面上模拟空间微重力的方法有几种, 其中最简单而实用的方法是利用空气的浮力使机器人实验模型漂浮在平台上面。美国的斯坦福大学、俄亥俄大学及日本筑波宇宙航空研究所等研制的空间机器人地面实验平台都采用这种方法。尽管这种方法只能模拟二维平面的微重力环境, 但经济、实用, 因此本文所讨论的双臂自由飞行空间机器人地面实验平台就是采用的

基金项目: 本文得到 863 基金资助。

收稿日期: 1999-01-19

这种方法.

本文首先讨论地面实验平台的组成,在此基础上讨论控制系统结构及运动控制算法.

2 地面实验平台系统组成

FFSR 地面实验平台由机器人实验模型、视觉系统、通讯系统、主机系统、气浮平台及浮动目标六个子模块构成,如图 1 所示.现简要介绍各模块的设计原则.

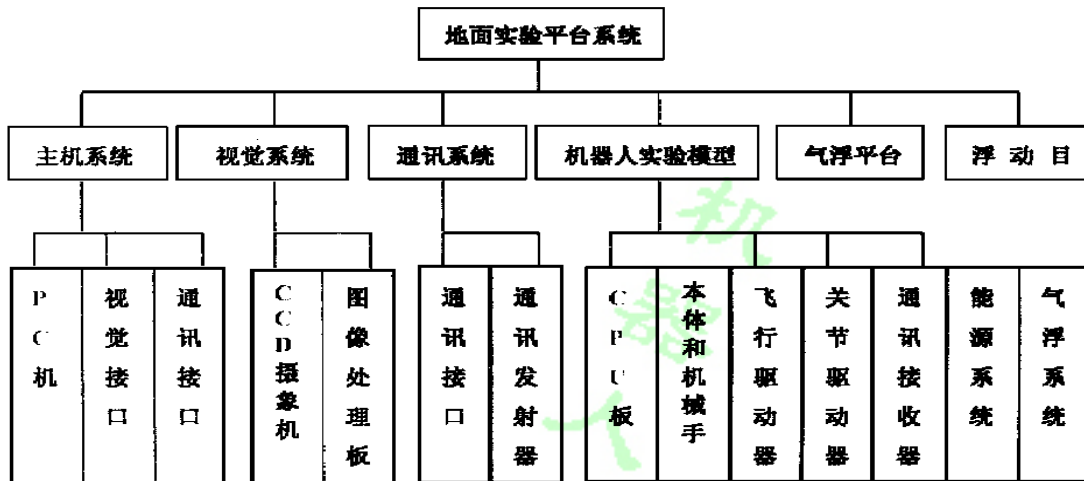


图 1 FFSR 地面实验平台系统组成框图

2.1 机器人实验模型

机器人实验模型是整个地面实验平台系统的主体.对它的设计原则是:(a)机器人是一个独立体,因此和主机的联系是通过无线通讯实现的,且电源和气源都装载在机器人上;(b)通过气浮系统来模拟微重力;(c)既能飞行,又能作业;(d)机器人既能遥控,又能自主控制.为实现这一目标,机器人实验模型由机器人本体、机械手臂、气浮系统、飞行运动驱动装置、关节驱动装置、通讯接收装置、CPU 板、储气装置和电源等模块组成.机器人实验模型机械结构各部分的主要参数如表 1 所示.

(1) 机器人模型:它是参考宇航员的基本功能而设计的,因此它由一个可移动的本体两个灵活操作的机械手组成见图 1.机器人本体里面装有 CPU 板和电源.两个操作机械手分别由三个转动关节和一个抓取机构组成.两个手臂在同一个水平面内自由运动.在机器人正面还设一个对应手臂,用来将捕捉的物体对接在本体上.为了减轻整个模型的重量,机器人本体和机械手臂均采用特种铝材料.

(2) 飞行驱动器:它操纵 FFSR 在水平面内的飞行运动,由电磁阀及气体推进器构成,气体推进器安装在本体的侧面.气体推进器在电磁阀控制下喷出一定压力的气体使机器人向反方向运动.本系统通过八个气体推进器的协调控制来改变飞行速度和方向.

(3) 关节驱动器:它是用来驱动机械手的各关节运动.本系统采用两只机械手,每只机械手有 3 个自由度,所以需要六个关节驱动电机.为了保证控制精度,本系统采用直流力矩电机直接驱动各关节,电机上装有光电码盘作为内部传感器.抓取机构采用电磁控制.

(4) 气浮系统:它用来将机器人和目标漂浮在平台上面,以实现微重力.它由空气轴承和能

承受一定压力的气罐组成。气罐的高压气体通过空气轴承往外喷射,使整个机器人模型在气浮平台上竖直浮起数 10 微米的高度。浮系统共有八个空气轴承,其中机器人本体下面安装四个,两臂的肘关节和腕关节下面各安装一个,它们由一组减压阀和开关控制阀来控制。

(5)CPU 板:它接受从主控计算机发送的控制命令,译码后,根据具体动作驱动飞行运动驱动装置和机械手关节驱动装置。

表 1 机器人实验模型的主要参数

模块名	参数	模块名	参数
①个体		④关节驱动器	
个体尺寸:	15× 15× 10cm	最大驱动力矩:	0.3N·m
质量:	6kg	最大转动速度:	60deg/s
②机械手臂		⑤空气轴承	
自由度数:	3	喷嘴直径:	0.15cm
长度:	22cm	气压:	2bar
手爪作用力:	5N	⑥气罐	
③飞行驱动器		尺寸:	2× 300× $\frac{1}{100}$
喷嘴直径:	0.15cm	压强:	10bar
气压:	2bar		

2.2 视觉反馈系统

视觉反馈系统的主要任务是准确地识别目标及定位,以便使 FFSR 准确地接近和抓取目标。视觉系统由 CCD 摄像机、专用图像卡和视觉处理软件组成。本系统采用原单臂自由飞行空间机器人地面实验平台中所用过的视觉系统。

2.3 通讯系统

通讯系统的主要任务是向机器人传送主计算机产生的策略和动作命令。本系统采用单向通讯方式,利用商用的 R/F 模块。

2.4 主机系统

主机系统采用一台 IBM/586-200 PC 机。它的主要任务是通过视觉反馈系统提供的环境信息产生任务规划和路径规划,向机器人发出命令,准确地捕捉目标。最初设计时将避障功能也设在机器人 CPU 板上,但导致机器人体积和功耗也加大,因此,最后决定将避障路径规划功能仍然由主机来完成。

2.5 气浮平台

气浮平台的主要任务是用来支持浮动的机器人模型和目标。平台的尺寸为 800× 800,材料为研磨的花岗石。花岗石平台要有较好的水平度,精度为 00 级。

2.6 浮动目标

浮动目标是机器人实验模型的操作对象,它完全独立于机器人本体。浮动目标采用立方体形状见图 1。浮动目标的两个对称面上分别设手柄,空间机器人捕捉目标时就用双臂抓这两个对称手柄。目标上装有一个气罐和一个空气轴承,目标在平台上自由漂浮。

3 地面实验平台控制系统结构

地面实验平台控制系统采用层次递减结构方案,主要由三层构成,最上层是图形用户界

面、中间层是策略控制系统、最下层是运动控制系统. 控制系统框图如图 2 所示.

(1) 图形用户界面是人-机接口. 它允许操作员对空间机器人进行遥控, 并通过显示系统了解现场工作状态. 本地面实验系统设有两种显示; 一个是通过 CCD 传来的现场; 另一个是在计算机上建模的虚拟环境机器人图形, 这一图形的动作与计算机决策的机器人动作是一致的.

(2) 策略控制系统是 FFSR 自主控制的核心, 它主要实现路径规划、任务规划、姿态控制和碰撞检测等算法. 操作员以任务文件形式给出控制命令, 规划器根据具体任务进行路径和轨迹规划, 将任务文件分解成低级的运动控制命令, 并通过无线通讯传送给运动控制系统, 从而驱动机器人运动.

(3) 机器人运动控制系统包括两个部分, 一个是飞行控制器, 控制本体在水平面内的自由运动. 另一个是关节转动控制器, 控制机械手各关节的运动.

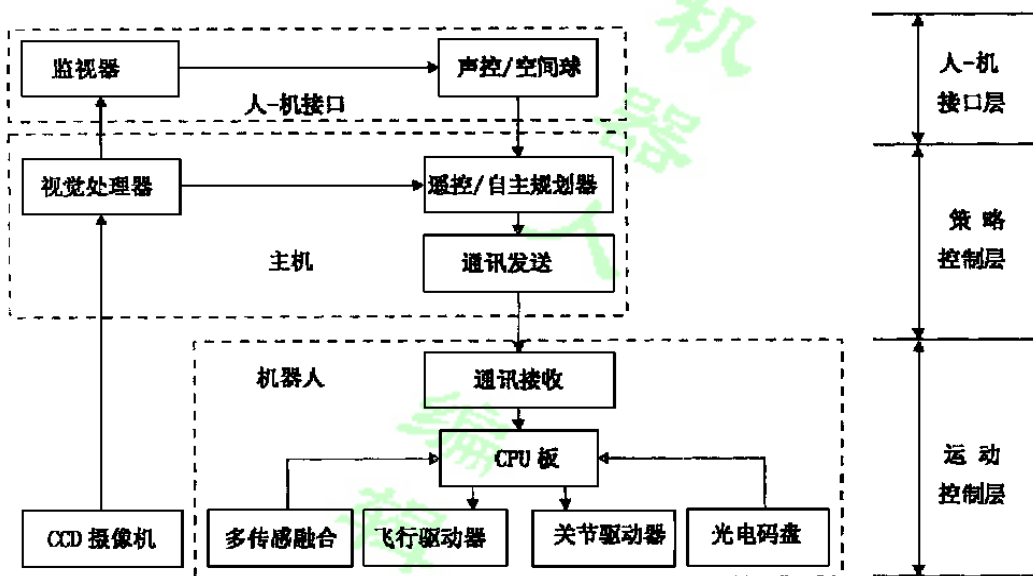


图 2 基于层次递减式的控制系统结构框图

4 运动控制算法

对于控制系统的三个组成层次, 本文重点讨论策略控制层的运动控制算法, 它包括机器人本体飞行运动控制算法和手臂关节运动控制算法.

4.1 本体飞行运动控制算法

FFSR 的主要特点是能够自由飞行, 并完成作业, 因此本体的飞行控制很重要. FFSR 的轨迹有直线运动和圆周运动, 但不管哪一种运动, 都有三个阶段: 加速运动、等速运动和减速运动. 假设飞行时间 $[0, T]$ 分成三个阶段, $[0, t_1]$ 为加速运动阶段, $[t_1, t_2]$ 为等速运动阶段, $[t_2, T]$ 为减速运动阶段, 则本体在任意时刻 t 的加速度 $a(t)$ 、速度 $v(t)$ 和位移 $s(t)$ 可用以下公式(1)、(2)、(3)描述:

$$a(t) = \begin{cases} a_1 & 0 \leq t < t_1 \\ 0 & t_1 \leq t < t_2 \\ a_2 & t_2 \leq t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

$$v(t) = \begin{cases} v_0 + a_1 t & 0 \leq t < t_1 \\ v_0 + a_1 t_1 & t_1 \leq t < t_2 \\ v_0 + a_1 t_1 + a_2(t - t_2) & t_2 \leq t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

$$s(t) = \begin{cases} s_0 + v_0 t + a_1 t^2 / 2 & 0 \leq t < t_1 \\ s_0 + v_0 t - a_1 t_1^2 / 2 + a_1 t_1 t & t_1 \leq t < t_2 \\ s_0 + v_0 t - a_1 t_1^2 / 2 + a_1 t_1 t + a_2(t - t_2)^2 / 2 & t_2 \leq t \leq T \end{cases} \quad (3)$$

上式表示在时间 $[0, t_1]$ 内, 机器人将以加速度 $a(t) = a_1$ 运动, 而在时间 $[t_1, t_2]$ 机器人将以 $v(t) = v_0 + a_1 t_1$ 等速运动, 其中 v_0 为机器人的初速度, 在 $[t_2, T]$ 时间段内机器人以加速度 $a(t) = a_2$ 运动, 其中 $a_2 < 0$. 同时描述了机器人在不同时刻在惯性坐标系内的速度和加速度.

卫星的主要能源-燃料是很重要的, 因此机器人能够以最大速度飞行的时间越长, 在固定距离内消耗的燃料就越少. 为节省燃料, 机器人在时间 $[t_1, t_2]$ 内做等速运动的速度应为机器人可以达到的最大速度 v_{\max} , 即机器人运动应满足下式:

$$v_{\max} = v_0 + a_1 t_1 \quad (4)$$

在时刻 T 机器人的速度应为 0 , 即有

$$v_{\max} + a_2(T - t_2) = 0$$

假设交互会合点 p_m 的位移为 S , 则有

$$S = v_0 t + \frac{1}{2} a_1 t_1^2 + v_{\max}(t_2 - t_1) + v_{\max}(T - t_2) + \frac{1}{2} a_2(T - t_2)^2 \quad (5)$$

从而可得

$$t_1 = \frac{v_{\max} - v_0}{a_1}$$

$$t_2 = \frac{2a_2 S + 2a_2 v_{\max} t_1 + v_{\max}^2 - 2v_0 a_2 t_1 - a_1 a_2 t_1^2}{2a_2 v_{\max}} \quad (6)$$

$$T = t_2 - \frac{v_{\max}}{a_2}$$

因此从式(6)可以求出机器人本体运动的加速运动时间、等速运动时间和减速运动时间.

4.2 基于广义雅可比矩阵的关节驱动控制算法

FFSR 双臂机械手操作的主要目的就是捕捉目标. 捕捉分三个过程完成: 第一个过程是用左臂捕捉目标的左手柄, 第二个过程是用左臂捕捉目标的右手柄, 第三个过程是用双臂将捕捉的目标对接到对的手臂上. 当 FFSR 到达会合点后, 关掉气体推进器, FFSR 在自由浮游状态下工作. 由于在捕捉过程中, 系统不受外力, 因此系统的线动量和角动量守恒.

地面机器人的雅可比矩阵表示在惯性坐标系下机器人末端效应器的速度与关节角速度关系, 从而导出运动分解速度控制(RMRC). 但是在自由飞行空间机器人, 由于其基座不固定, 机器人手臂的运动会对本体的位姿有影响, 从而也改变了手的位姿, 故而不能直接应用雅可比矩阵. 对此, 日本的 Y. Umetani 提出了在空间微重力条件下反映末端效应器的速度与关节角速

度关系的广义雅可比矩阵. 广义雅可比矩阵与地面固定基座机器人的雅可比矩阵不同的是, 广义雅可比矩阵不仅与机器人的各几何参数有关, 而且还与机器人的惯性参数, 如质量、转动惯量等有关. 因此有:

$$\dot{P} = J^* \dot{\Phi} \quad (7)$$

式中: J^* 为广义雅可比矩阵, \dot{P} 是机器人末端效应器的速度, $\dot{\Phi}$ 是机器人各关节速度. 对于本系统的双臂六自由度自由飞行空间机器人的广义雅可比矩阵的具体形式为^[4]

$$J^* = J_M - J_S I_S^{-1} I_M \quad (8)$$

I_S 和 I_M 分别为本体和机械手的惯量矩阵, J_S 和 J_M 分别与本体和机械手的运动有关.

要求机械手按某一轨迹捕捉目标, 是逆过程, 这时关节控制量可由下式给出

$$\dot{\Phi} = J^{*-1} \dot{P} \quad (9)$$

采用计算机控制, 速度项可以表示为单位时间里的位移增量, 故上式可以写成

$$\Delta\Phi = J^{*-1} \Delta P \quad (10)$$

式中: ΔP 为一个采样周期内的线位移; $\Delta\Phi$ 为同一时间间隔内的关节角增量.

当给定机器人运动轨迹时, 即已知 ΔP 时, 可将其代入上式求得关节角增量 $\Delta\Phi$, 得到关节角的给定值, 最后由角度伺服控制系统去实现位置控制, 这就是分解速度控制.

5 结论

本文提出了双臂自由飞行空间机器人地面实验平台系统设计方案. 整个系统由机器人实验模型、视觉系统、通讯系统、主机系统、气浮平台和浮动目标六个子模块构成. 本系统可以用来验证空间机器人的运动学和动力学模型、在空间微重力条件下自主地捕捉目标所必需的任务规划、路径规划的可行性. 同时给出了本系统的控制系统结构和所采用的本体飞行运动驱动控制算法和基于广义雅可比矩阵的关节驱动控制算法.

参 考 文 献

- 1 洪炳熔, 朱铁一. 机器人卫星自主控制系统研究. 高技术通讯, 1995, 10: 16- 19
- 2 洪炳熔等. 星载自主控制系统地面实验平台. 航天部鉴定, 1996
- 3 洪炳熔等. 双臂自由飞行空间机器人自主控制计算机仿真系统. 航天部鉴定, 1997
- 4 吴威. 双臂自由飞行空间机器人自主规划研究. 哈工大博士学位论文, 1997
- 5 朱铁一. 自由飞行空间机器人地面实验平台视觉系统研究. 哈工大博士学位论文, 1997
- 6 Kazuo Machida, *et al.* Sensor-based Proximity Operation of an Astronaut Reference Flying Robot. *Advanced Robotics*, 1995, 9(6): 653- 673
- 7 Ullman M A, Cannon R H. *Experiments in Autonomous Navigation and Control of a Multi-Manipulator*. *Space Robotics: Dynamics and Control*, MA: Kluwer Academic, 1991: 269- 284
- 8 Umetani Y, Yoshida K. Resolved Motion Rate Control of Space Manipulator with Generalized Jacobian Matrix. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(3): 303- 314

DESIGN OF TESTED SYSTEM ON GROUND FOR DUAL-ARM FREE-FLYING SPACE ROBOT

HONG Bing-rong LIU Chang-an GUO Heng-ye

(Department of Computer Science, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: This paper focuses on the design scheme of ground tested system on ground for dual-arm free-flying space robot, which can capture the floating target autonomously in an artificial micro-gravity environment. The system consists of six sub-system, such as robot vision, communication, host computer platform and floating target. Firstly, it discusses the design principle of the components of the system, with emphasis on the robot experimental model. Secondly, deliberates the control system architecture based on hierarchy descending which user interface, strategic control and dynamic control. Finally, it takes over the control algorithm of flying maneuver and arm slew.

Keywords: Free-flying space robot, ground test system, control architecture, motion control algorithm

作者简介:

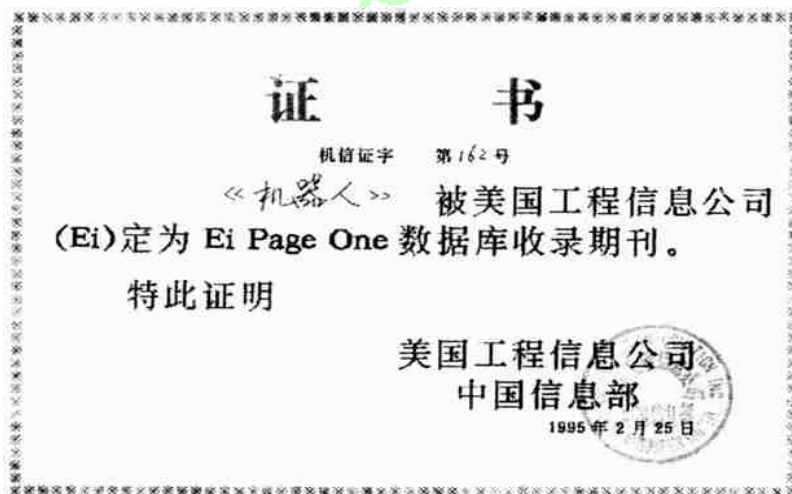
洪炳熔 (1939-), 男, 教授、博士生导师. 研究领域: 人工智能, 空间机器人, 虚拟现实.

柳长安 (1973-), 男, 博士研究生. 研究领域: 空间机器人, 多机器人协调.

郭恒业 (1948-), 男, 研究员. 研究领域: 空间机器人, 分布交互系统.

有关本刊的统计数据

据国家科技部委托中国科技信息研究所 1999 年 12 月发表的中国科技期刊引证报告(CJCR)的数据, 1998 年本刊的影响因子为 0.243。在 1286 种统计源期刊



中排名第 273。按学科分类, 本刊属“电子、通讯与自动控制”类。该类共有期刊 44 种。按影响因子排序本刊排名第 9。

据 CJCR 的资料, 本刊在 1999 年仍被 Ei 定为 Ei Page One 数据库收录期刊(从 1995 年开始)。