

高集成度空间大型末端执行器的研制^①

介党阳^② 倪风雷 谭益松 刘 宏 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要 研制了一种高集成度且具有柔性捕获接口的空间大型末端执行器。该执行器由抓捕、拖动、锁定三个环节组成,集成了视觉、位置、力、温度及电流等多种传感器。基于机电一体化的设计思想,将三个环节的驱动控制系统集成在末端执行器内部。采用分布式控制策略,通过 M-LVDS 总线与中央控制器进行通信,实现了末端执行器控制参数的在线调整。而且,利用多传感器信息建立了局部自主的捕获策略,可实现对不同类型合作目标的抓捕。在搭建的地面微重力实验平台上进行的抓捕实验表明该末端执行器能在 X、Y 方向 65 mm 偏差,Z 方向 100 mm 偏差情况下,实现对目标负载的成功捕获,具有较大容差范围下的捕获能力。

关键词 末端执行器, 空间捕获, 柔性捕获接口, 高集成度, 捕获策略

0 引言

随着空间技术的发展,大型机械臂在空间得以成功应用,成为空间装配、搬运以及在轨维修的重要工具^[1]。目前空间站应用的大型机械臂主要有加拿大的空间站遥操作机械臂(space station remote manipulator system, SSRMS)、日本的实验舱遥操作机械臂^[2,3]和欧洲机器人臂(european robotic arm, ERA)^[4,5]。日本的实验舱遥操作机械臂最大负载能力为 6000 kg, ERA 为 8000 kg, SSRMS 能够搬运重达 116000 kg 的载荷^[6]。作为这类空间机械臂的执行部件,大型末端执行器发挥着重要作用。大负载能力的要求使得大型末端执行器不仅要有强度高、输出力大的特点,还应具备大容差范围的捕获能力,以克服因视觉精度及大型机械臂自身柔性引起的末端定位误差^[7,8]。空间极其复杂的环境增加了末端执行器在轨捕获的难度。小型目标负载会在捕获过程中因受到轻微的碰撞而在零重力环境中逃逸。回收自由飞行的失效卫星时,翻转运动的卫星^[9]也会在机械臂对其跟踪定位后末端执行器对其进行抓取时逃离出捕获范围。由于空间与地面通信上存在数秒的时延,利用地面控制平台抓取目标负载无法保

证实时性,且容易造成系统的不稳定^[10],很难取得理想的效果。

目前国际上在空间得以成功应用的大型末端执行器主要有加拿大臂的锁定末端执行器与 ERA 的末端执行器^[11],这两种大型末端执行器在国际空间站均已发挥了重要作用。国内空间末端执行器研究开展较晚,多数处于理论研究或原型样机研究阶段,研制出的末端执行器,如中科院合肥智能研究所研制的两指空间机器人手爪和哈尔滨工业大学机器人研究所中德联合实验室研制的三指形四连杆空间机器人手爪^[12],虽然具有较大的容差范围和较高的抓握精度,但实质上均为小型的空间末端执行器,捕获及拖动能力有限,无法承担空间大型载荷的装配及搬运任务。鉴于这种情况,哈工大机器人研究所研制了一个高集成度的空间大型末端执行器(space large end effector, SLEE)样机,该末端执行器由抓捕、拖动、锁定 3 个环节组成,它集成了视觉、力/力矩、位置、温度、电流等多种传感器,并基于机电一体化的设计思想将这三个环节的驱动控制系统集成在其内部。它采用分布式控制策略,实现了局部自主的捕获策略,使其实现了较大容差下对目标负载的可靠抓捕。

① 863 计划(2006AA04Z228)资助项目。

② 男,1984 年生,博士生;研究方向:空间机器人技术,空间大型机械臂技术;联系人,E-mail:jiedangyang@126.com
(收稿日期:2010-10-08)

1 SLEE 的机械本体结构设计

SLEE 的机械本体结构可以划分为 3 个子机构: 抓捕、拖动、锁定。SLEE 及其捕获接口如图 1 所示。捕获接口安装在目标负载上, SLEE 通过抓取捕获接口实现与目标负载的刚性连接。



图 1 SLEE 及其捕获接口

表 1 给出了 SLEE 及其捕获接口的外形尺寸及重量。

表 1 SLEE 及捕获接口的机械参数

名称	包络直径(mm)	轴向长度(mm)	重量(kg)
SLEE	718	730	138.5
捕获接口	793	191	48

下面分别对 3 个子机构进行介绍。

(1) 抓捕机构。由 3 根钢丝绳组成的捕获环, 实现对捕获接口上抓钩的抓捕, 使目标在轴向无法逃离。其中, 3 根钢丝绳的一端固定在拖动圆筒的基座上, 另一端固定在抓捕模块传动机构末端的转动环上, 且 3 根钢丝绳首尾相连, 构成一个封闭的包络环即为捕获环, 如图 2 所示。捕获环的关闭过程类似于照相机的镜头护罩, 边旋转边缩小, 如图 2 所示。到达指定位置后, 由电磁抱闸对电机输出轴抱紧, 锁定捕获机构当前位置。图 3(a) 表示抓捕环节结束后末端执行器与捕获接口的状态。

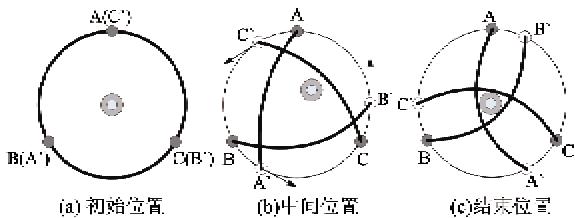


图 2 捕获环的封闭过程

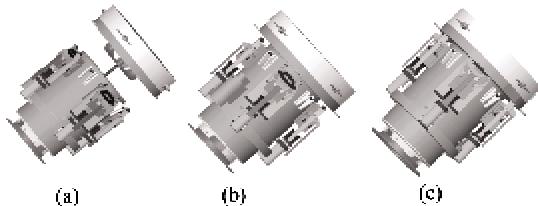


图 3 SLEE 捕获过程示意图

(2) 拖动机构。通过定位凸轮与凸轮槽的配合, 实现对目标载荷位姿的固定。在完成抓捕环节后, 由拖动电机输出经谐波减速器及齿轮组减速后驱动导程为 10mm 的滚珠丝杠, 将电机轴的旋转运动转换为整个拖动圆筒的轴向平移运动。定位凸轮与凸轮槽的配合实现了大范围容差的捕获, 同时限制了目标载荷的径向移动及沿轴线的旋转运动, 如图 3(b) 所示。

(3) 锁定机构。实现对目标载荷的锁紧, 如图 3(c) 所示。在 SLEE 完成对目标负载的拖动操作后, 锁定电机开始动作, 其输出经谐波减速器及齿轮组减速后同时驱动 4 个导程为 5mm 的滚珠丝杠, 带动 4 个锁定销作同步的直线移动。初始定位销为闭合状态, 当其伸入到对接装置的锁定槽后, 在驱动力的作用下, 4 个锁定销同步缓缓张开, 对捕获接口施加轴向锁紧力, 实现对目标载荷的锁紧, 完成整个捕获过程。

2 SLEE 的传感系统设计

SLEE 的传感系统如图 4 所示。SLEE 集成了视觉、位置、力/力矩、电流、温度等多种传感器, 在执行局部自主抓捕时, 为控制系统提供充分的反馈信息。表 2 给出了 SLEE 集成的传感器数量及用途。

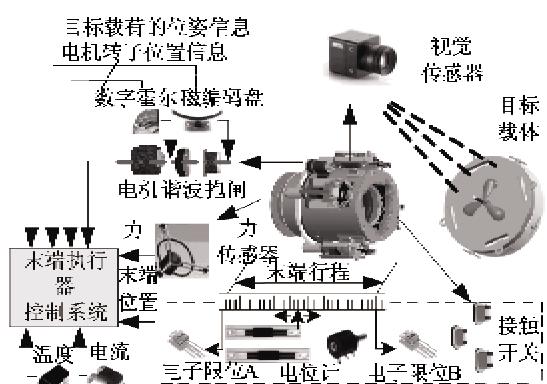


图 4 SLEE 的传感系统

表 2 SLEE 的传感器配置

传感器类型	数量(只)	用途
视觉传感器	1	提供目标载荷的位姿
接触开关	6	提供与目标载荷的接触情况,作为拖动环节结束的判据
数字霍尔	9	提供转子位置信息,6 脉冲/转
磁编码盘	3	提供精确的转子位置信息,1600 脉冲/转
力传感器	2	提供拖动或锁定力信息,作为拖动或锁定环节动作结束的判据
直线电位计	2	测量拖动及锁定环节末端位置
旋转电位计	1	测量抓捕环节末端位置
电子限位开关	6	起保护作用
温度传感器	3	起保护作用,防止功率场效应管因过热而烧毁
电流传感器	6	用以实现电机电流环控制

抓捕环节采用视觉传感器测得的目标载荷位姿信息作为实施抓捕的起始信号。当目标载体的钩伸入末端执行器的捕获环后,控制系统发出抓捕指令。抓捕环节的末端位置由旋转电位计测得。拖动力传感器和锁定力传感器,实现了末端力信息的测量,力传感器性能如表 3 所示。测得的力信息不仅可实现对末端执行器机械机构的保护,同时在拖动环节实现了约束空间的力矩控制,减小了在拖动过程中目标负载对末端执行器本体的冲击。

表 3 力传感器性能

传感器	线性度(%)	重复性(%)	迟滞(%)
拖动力传感器	1.92	0.61	2.37
锁定力传感器	1.88	0.52	2.86

在末端执行器的端面安装了 6 个自主研发的接触开关,作为拖动环节动作结束的判据。

采用数字霍尔和增量式磁编码器提供冗余的电机转子的位置信息。其中增量式磁编码器用以实现电机的正弦波驱动(SPWM),以获得优良的低速特性和力矩平稳特性,同时采用数字霍尔提供的转子位置信息完成了电机的方波驱动,做到了即使在磁码盘失效的情况下,利用数字霍尔仍能使电机稳定地运行,提高了系统的可靠性。利用电流传感器采集电机相电流,实现了伺服电机电流闭环控制,提高了系统的响应速度。在末端执行器内部安装了多个温度传感器,对控制驱动系统及电机等部件进行温度监测。

3 SLEE 的控制系统设计

3.1 硬件结构设计

本文采用分布式的控制策略,将 SLEE 的硬件结构分为一个上层控制单元、三个底层驱动单元以及视觉反馈单元。视觉信号由高精度的数字摄像头获得。由于视觉信息处理的计算量较大,采用专用处理器对采集的图像进行实时处理,通过百兆以太网将计算得到的位姿数据送给上位机,上位机将数据由 PCI 总线传至数字信号处理器(DSP)控制卡,DSP 控制卡经过计算将相应的指令通过多点低压差分(M-LVDS)总线发送给底层控制单元,用以实现执行器的自主抓捕操作,系统框图如图 5 所示。

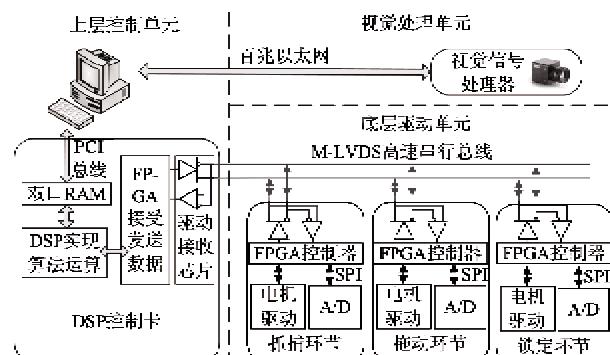


图 5 LEE 控制系统的硬件结构

上层控制单元由 DSP 控制卡和上位机组成,DSP 控制卡通过 PCI 总线与上位机桥接。DSP 控制卡采用一片现场可编程门阵列(FPGA)作为 M-LVDS 高速串行总线控制器,通过 M-LVDS 总线取得底层各环节驱动单元的传感器信息,再以并行总线的方式传送给浮点型 DSP。DSP 实现了各环节期望轨迹的生成、摩擦力的补偿和抓捕环节运动学的计算,并根据底层驱动单元的传感器信息在局部自主控制时进行指令的下达,实现三个环节的协调控制。

上位机定时读取底层驱动单元的传感器信息,通过良好的人机交互界面,实现了对末端执行器控制参数的在线调整、控制模式的选择以及控制指令的发送。

底层驱动单元采用 FPGA 作为主控制器,在 FPGA 内部嵌入了一 32 位 NIOS II 软核处理器,其通过 Avalon 总线实现对各功能模块的读写访问,如图 6 所示。

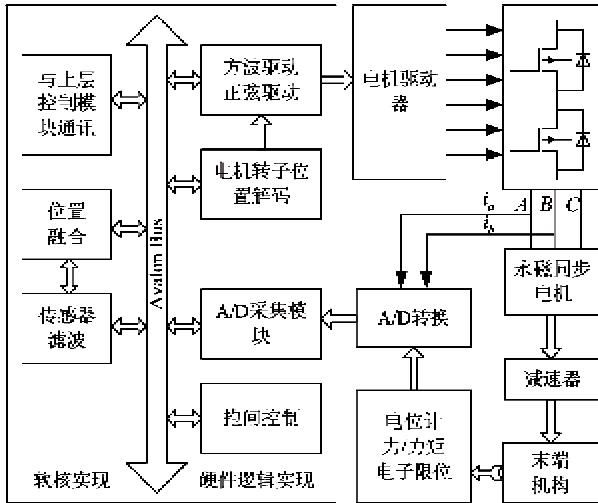


图 6 底层驱动单元设计

底层驱动单元主要实现以下功能：

- (1) 实现 A/D 数据的采集，并对采集到的数据进行处理；
- (2) 利用数字霍尔和磁编码器信息，实现对永磁同步电机的方波驱动和正弦波驱动；
- (3) 实现电机电流闭环控制；
- (4) 对电机转子位置信息与各环节末端位置信息进行数据融合，得到精确的末端位置；
- (5) 通过 M-LVDS 高速串行总线与上层控制器通信，通信波特率为 25Mbit/s；
- (6) 实现各环节电机抱闸的控制等功能。

3.2 捕获策略

为了实现末端执行器的可靠抓捕，采用多传感器信息来判断各环节的实施情况。

首先，在全局视觉的引导下，由大型机械臂实现末端执行器的初始定位。视觉信息判断出目标载体的抓钩伸入末端执行器的捕获环后，开始实施抓捕操作。

在拖动环节，当目标载荷的定位凸轮与末端执行器的凸轮槽角度偏差超出末端执行器的捕获容差范围时，定位凸轮无法滑入凸轮槽，此时拖动力传感器测得的拖动力急剧增大，但拖动环节尚未到达预定位置，接触开关并未触发。这种情况视为拖动不成功，末端执行器向中央控制器发出位姿调整请求，控制系统根据视觉信息反馈位姿对末端执行器进行姿态调整后，再次实施拖动。

在锁定环节，当锁定钳未伸入锁定槽时，锁紧力急剧增大视为故障情况，这时系统会首先将锁定环节释放到预定的安全位置，在末端执行器姿态调整后，再次实施锁定。

图 7 为大型末端执行器利用多传感器信息实现自主捕获的策略流程图。

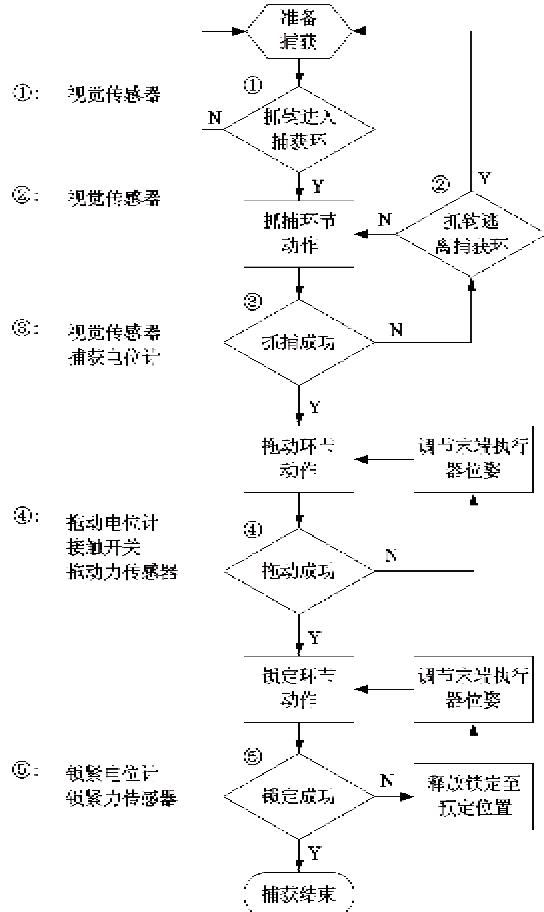


图 7 捕获策略流程图

4 抓捕实验

为了验证本文研制的大型末端执行器的抓捕性能，搭建了地面微重力实验平台，进行了末端执行器的抓捕实验和拖动实验。

4.1 地面微重力实验平台

地面微重力试验平台由两个关节的机械臂、大型末端执行器、目标负载、地面微重力模拟设备、滑轮支架和基座组成，如图 8 所示。

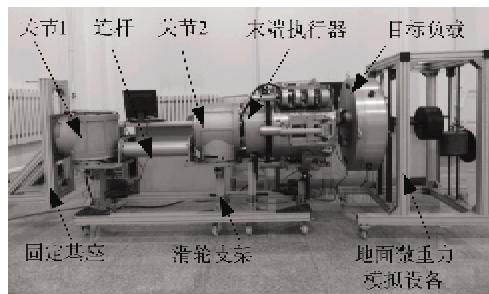


图 8 地面微重力实验平台

其中,地面微重力模拟设备采用平衡配重的原理,模拟空间微重力环境,可实现目标负载在 6 个自由度方向上的移动。

4.2 抓捕试验

利用图 8 所示微重力实验平台,采用本文设计的捕获策略,对具有不同位姿的目标负载进行抓捕实验。

在抓捕实验中,关节 1 固定,关节 2 实现末端执行器轴向的转动,用以调整末端执行器与目标负载的轴向姿态。实验中,目标负载初始状态被设置成具有不同的位置和姿态,末端执行器对其进行抓捕。图 9 为抓捕过程的实验图片。

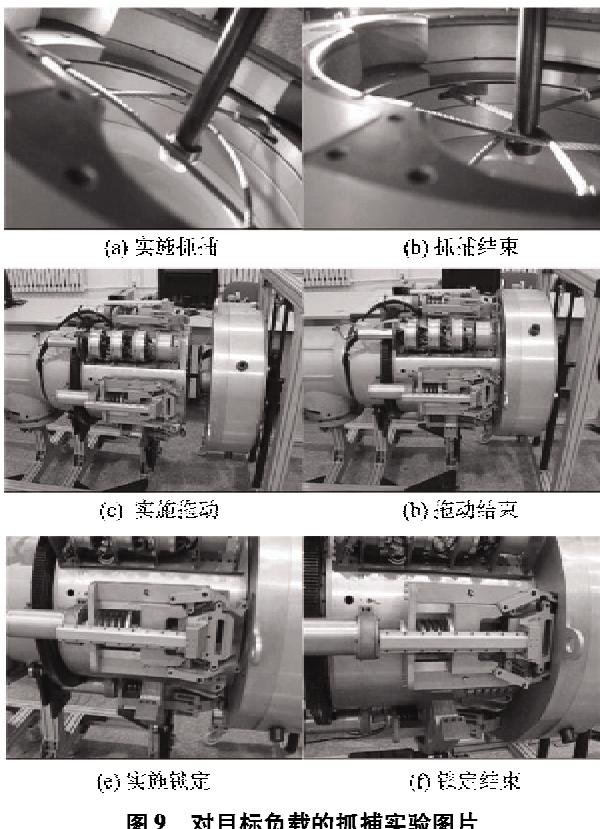


图 9 对目标负载的抓捕实验图片

实验表明,末端执行器在 X、Y 方向有 65mm 偏差,在 Z 方向存在 100mm 偏差,同时俯仰、偏转各 1°偏差,旋转 2°偏差的情况下,对目标负载实现成功抓捕。

4.3 拖动试验

在完成对目标载荷有效抓捕后,进行了载荷拖动实验。图 10 为拖动力实验曲线。图中 A 点对应拖动开始时的拖动力,目标负载在拖动力作用下开始加速移动,出现了一个力的峰值。在拖动过程中,由于实验平台的限制,需要克服地面的摩擦力,拖动

力渐渐趋于平衡地面摩擦力,A 至 B 段拖动力会逐渐减小,并产生轻微的力波动。当目标负载的定位凸轮接触到末端执行器的端面时,如图 10 中 B 点所示,定位凸轮和凸轮槽在对正地过程中会产生相互作用力,使定位凸轮以轴线为中心旋转,从而与末端执行器上的定位槽对准。C 点时目标载荷的端面已与末端执行器的端面接触,拖动力急速增大,接触开关接通,拖动过程结束。

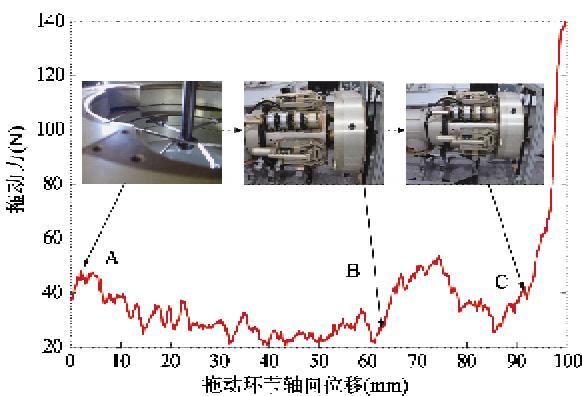


图 10 拖动过程拖动力曲线

5 结 论

本文研制了一种高集成度的空间大型机械臂末端执行器,介绍了其柔性抓捕环节和拖动、锁定环节的机械结构及工作原理,详细描述了大型末端执行器的传感器系统,基于高速 M-LVDS 串行总线设计了由 DSP 实现的上层控制和由 FPGA 实现的底层驱动控制相结合的分布式硬件结构,并利用集成的视觉、力及位置等传感器信息制定了局部自主的捕获策略。最后利用地面微重力实验平台,对该末端执行器的抓捕能力进行了实验验证,实验表明,该末端执行器能在 X、Y 方向各有 65mm 偏差,Z 方向 100mm 偏差,同时俯仰、偏转各 1°偏差,旋转 2°偏差的情况下成功实现对目标负载的自主抓捕,具有较大容差范围的捕获能力。

参考文献

- [1] Marvin D R, Ralph W W, Cuong C Q. Verification tests of automated robotic assembly of space truss structures. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1995, 32(4): 686-696
- [2] Lkeuchi M, Oda M. Space robotics in Japan. In: Proceedings of the AIAA/NASA 1st International Symposium on Space Automation and Robotics, Arlington, USA,

1988. 1-6
- [3] Sato N, Wakabayashi Y. JEMRMS design features and topics from testing. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space, Montreal, Canada, 2001. 1-7
 - [4] Boumans R, Heemskerk C. The European robotic arm for the international space station. *Robotics and Autonomous Systems*, 1998, 23(1-2): 17-27
 - [5] Heemskerk C J M, Visser M, Vrancken D, et al. Extending ERA's capabilities to capture and transport large payloads. In: Proceedings of the 9th ESA Workshop on Advanced Space Technology for Robotics and Automation, Nottingham, England, 2006. 1-8
 - [6] Pattern L, Evans L, Oshinowo L, et al. International space station robotics: a comparative study of ERA, JEM-RMS and MSS. In: Proceedings of the 7th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, Noordwijk, Netherlands, 2002. 1-8
 - [7] 樊晓平, 徐建闽, 周其节等. 柔性机械人的动力学建模及其控制. 控制理论及应用, 1997, 14(3): 318-329
 - [8] Benosman M, Le Vey G. Control of flexible manipulators: a survey. *Robotica*, 2004, 22(5): 533-545
 - [9] Nagamatsu H, Takashi K, Nakatani I. Capture strategy for retrieval of a tumbling satellite by a space robotic manipulator. In: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, USA, 1996. 70-75
 - [10] 李成, 梁斌. 空间机器人的遥操作. 航空宇航, 2001, 22(1): 95-98
 - [11] Nishida S, Yoshikawa T. A new end effector for on-orbit assembly of a large reflector. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, USA, 2006. 1-6
 - [12] Zhu Y Y, Gao X H, Xie Z W, et al. Development of a gripper for Chinese space robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Piscataway, USA, 2006. 973-978

Development of a highly integrated large space end effector

Jie Dangyang, Ni Fenglei, Tan Yisong, Liu Hong, Cai Hegao

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

A highly integrated large space end effector with a flexible capture interface was developed. It was composed of the three subsystems of catching, dragging and latching, with a variety of sensors being integrated, including the sensors of vision, position, force, temperature, current, etc. According to the mechatronics design thought, the motor driving and control systems of the three subsystems were integrated in the end effector. Using the distributed control strategy, on-line adjustment of the control parameters was achieved through the communication with the central controller by the M-LVDS bus. Meanwhile, the local autonomous capture strategy based on multi-sensory information was established to capture different types of cooperative target loads. Results of the experiments implemented on the ground microgravity testbed showed that the designed space large end effector was able to perform a successful capture to a target with a deviation of 65mm in the directions of X and Y, and a deviation of 100mm in the Z direction. The capture ability of the end-effector for targets with large tolerance was proved.

Key words: end effector, space capture, flexible capture interface, highly integrated, capture strategy