视觉辅助遥操作在卫星在轨自维护中的应用

张国亮 刘 宏 蒋再男 王 捷

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 为了克服时延对空间机器人遥操作的影响,提出了利用视觉技术辅助遥操作进行卫星自维护的方法.针对遥操作数据传输滞后的问题,设计并实现了一种基于视觉的共享控制策略,该策略将维护任务分为自由空间控制与自主视觉伺服控制.在自由空间控制阶段,通过3D图形预测仿真以及实时反馈的视频流,提高了遥操作者的视觉临场感.在自主控制阶段,采用冗余特征视觉伺服控制,克服了系统对标定精度的依赖性,从而提高了整个系统的智能化程度.最后,通过对典型的卫星维护任务实例的分析,验证了该方法的有效性.

关 键 词: 卫星自维护; 空间机器人; 3D图形预测仿真; 视觉伺服

中图分类号: TP 242.6

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)07-0882-05

Visual aid for teleoperation applied to satellite on-orbit self-servicing

Zhang Guoliang Liu Hong Jiang Zainan Wang Jie

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: To overcome effect of time delay on space robot teleoperation, a novel method of vision aid for teleoperation applied to satellite on-orbit self-servicing was presented. A vision-based shared control scheme was designed and implemented to deal with data transmission delay. The scheme consists of free space control and auto visual servo control. In the process of free space control, 3D graphic prediction simulation and real feedback video stream make teleoperator achieve the best telepresence experience. In the process of auto visual servo control, the visual servoing of redundant features eliminates system dependency on calibration accuracy and improves system intelligence. Finally, a typical satellite servicing experiment demonstrates the effectiveness of this method.

Key words: satellite self-servicing; space robot; 3D graphic predictive simulation; visual servoing

一颗卫星的成本很高,动辄几百万甚至几亿元.例如,中国首颗探月卫星嫦娥一号整个项目耗资14亿元人民币,然而,卫星一旦出现故障,其带来的经济损失和各方面的影响将是不可估量的.目前,卫星的维护主要是通过宇航员太空舱外行走或远程操作机械臂完成,例如,哈勃空间望远镜在轨10 a间经历了4次这样的维护[1],但这两种方法都离不开宇航员的参与,从经济性和安全性两方面来考虑,两种处理方法都不甚理想.

考虑到空间环境的特殊性,为减小宇航员从事危险的卫星维护的代价和成本,遥操作空间机器人的方法正成为目前卫星维护研究的热点,许多机构已开展了相应的研究项目,如ETS-VII, ROTEX, SSRMS[2]等.但是,空间机器人遥操作最突出的问题是空间与地面存在通讯时延.时延对空间机器人遥操作最大的影响是使连续遥操作闭环反馈控制系统变得不稳定[3].

针对传统的直接遥操作方法的不足,本文依据所建立的卫星自维护系统地面遥操作试验平台,利用3D图形预测仿真、视觉伺服等技术辅助遥操作,使得遥机器人具有局部自主性,实现了附有视频反馈的遥操作以及自主视觉伺服操作结合

收稿日期: 2008-06-10

基金项目: 国家"863"高科技资助项目(2006AA04Z225); 长江学者和创新团队发展计划资助项目

作者简介: 张国亮(1978—),男,博士生,辽宁抚顺人,zgl0227@sina.com.

的共享式遥操作,完成了卫星自维护系统的一个典型维护任务——打开出现故障的太阳能帆板.

1　卫星自维护遥操作视觉辅助系统

与传统的利用服务飞船上的机械臂对卫星进行维护的方法不同,本文提出了利用视觉辅助方法进行卫星自维护,即在卫星本体上安装一个轻型机械臂,臂的末端安装操作器(HIT/DLR 灵巧手).在臂的第 3 关节和第 4 关节上分别安装双目立体相机以及单目视觉伺服相机.当卫星的机械展开部件出现故障时,利用视觉信息控制操作器排除故障,从而完成卫星的自我维护.该系统主要包括 2 个部分:位于武汉的遥操作客户端和位于哈尔滨的遥机器人端.二者之间通过 Internet 进行通讯,其系统结构如图 1 所示.

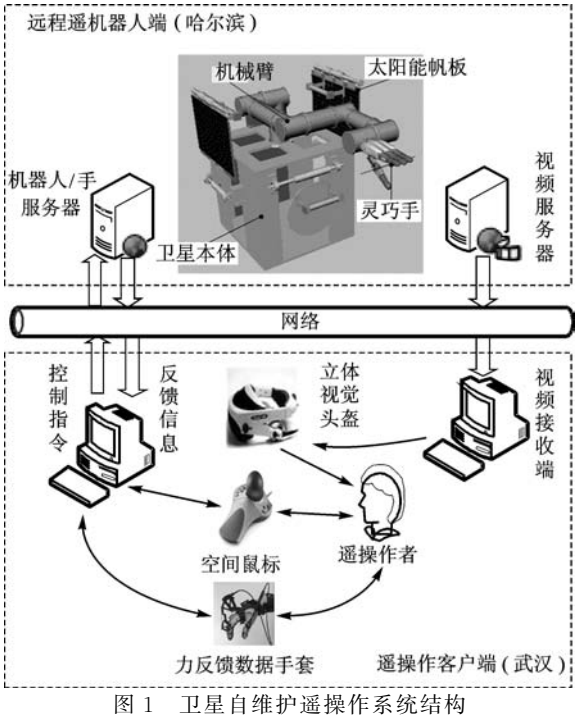


图 1　卫星自维护遥操作系统结构

为了克服时延对于遥操作的影响,本文基于共享自治控制理论,通过在人与机械间共享控制权完成卫星的维护任务.整个维护任务分为自由空间控制与自主视觉伺服控制 2 个阶段.

在自由空间控制阶段,操作者以 6 维空间鼠标和力反馈数据手套作为输入控制装置,通过图形预测方法以及实时反馈的遥操作现场信息,控制仿真计算机里的虚拟机器人和灵巧手,生成控制指令通过 Internet 发送给远程实际遥机器人和灵巧手,完成从自由空间到适合视觉伺服位置的任务.自主视觉伺服阶段,利用机器人手眼视觉形成局部闭环,结合前期合作目标识别和后期敏感性校验,利用冗余图像特征完成无时延的情况下自主视觉伺服任务.

2　3D 图形预测仿真

在实际系统进行动作之前,在虚拟场景中进行仿真运动,称为虚拟预测的方法[4].建立虚拟场景的目的是一方面可以模拟任务场景,给予操作者关于任务规划和控制方面逼真的信息;另一方面,通过仿真模型对下一步动作进行预测,克服了数据传输滞后带来的不利影响.图 1 显示了本文所建立的基于 3D 图形预测仿真的卫星、机械臂和灵巧手的模型.

由于卫星自维护场景复杂,且涉及的运动实体多,为实现整个操作场景的精确建模,首先采用 ProE 对场景中所有物体建立几何模型,转化为.iv 模型文件后,利用 OpenInventor 生成虚拟场景.其中,模型文件以节点的方式调入场景,并按运动的逻辑关系进行组装.根据机器人运动关系,将机器人的基座作为根节点,依次装配机器人的各关节、手掌和手指各关节.这样,在驱动虚拟模型时,父节点的运动就可以传递到子节点上,而不需要经过繁琐的机器人正运动学计算.

虚拟场景建立后,操作者通过空间鼠标和数据手套等虚拟外设操作虚拟机器人.虚拟机器人实时响应操作者的指令,经过碰撞检测算法及操作者确认指令正确无误后,发送给远端的实际机器人,否则删除该指令;而远端实际机器人则经过一定的网络时延后才能接收到正确的指令并执行.由于虚拟机器人实时响应了操作者的指令,避开了时延的影响,从而实现了图形预测仿真.同时,远端机器人的实际位姿反馈给图形仿真环境,当虚拟机器人与实际机器人的位姿误差超出预先设置的阈值时,采用实际机器人的位姿来更新虚拟机器人的位姿,从而消除预测误差的影响.

3　视频编码传输算法

由于目前 Internet 的带宽和延迟是随时间变化的,因此,为克服网络状态变化的随机性对视频传输的影响,必须采取一定的视频编码传输算法.针对波动带宽与视频流码率的不匹配问题,本文提出一种基于分层码率控制的视频传输策略.利用实时探测到的带宽选择不同码率的视频流分层,使得视频传输对于不同的网络带宽具有自适应性.图 2 表示视频编码传输流程.

首先,视频服务器收集远程遥机器人场景信

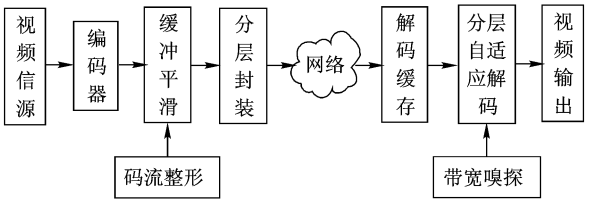
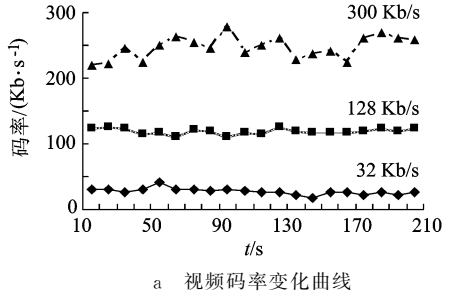


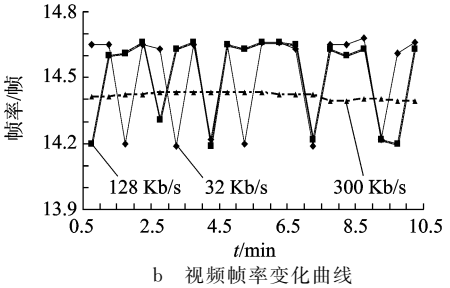
图2 视频码率控制

息,送入编码器进行编码,然后根据用户需求的服务等级建立所需的不同速率的多个流,平滑去抖动后,在码流控制之下进行码流整形.最后,将码流分层封装到同一个文件中,使得各个传输数据流保持在一个相对恒定的码率范围内,从而充分发挥了网络以平稳速率传输最为稳定的优势.在遥机器人端,依据嗅探到的网络带宽,确定本次连接实际可用的网络带宽,然后,选择传输码率最高的数据层,如果没有发生网络拥塞,则认为这次连接是成功的.否则,尝试连接次一级的数据层,依次类推,直到找到相匹配的数据连接.

由于采取了分层多码率传输的策略,从而实现了码率与帧率同时控制,不同的帧率适应不同的视频带,达到了视频帧率与传输速度相适应的目的.图3显示了3个视频分层(32 Kb/s,128 Kb/s,300 Kb/s)在传输过程中码率和帧率变化的趋势.



a 视频码率变化曲线



b 视频帧率变化曲线

图3 分层码率传输过程中码率和帧率变化曲线

由图3a,各个视频分层都保持在一个相对稳定的码率范围内.其中,在低码率32 Kb/s时曲线变化最为平稳,这是因为在低码率时,分层数据中图像信息最少,如果码率波动过大,会造成视频质量的不稳定,影响输出效果;而在高码率时,由于图像细节信息丰富,为适应网络状况和图像场景的变化,允许码率在相应的范围内小幅波动.图3b显示了传输过程中帧率变化情况.从图3b中可以看出,在中、低码率时,帧率呈振荡变化,但振荡范围很小,而在高码率时帧率变化平缓.

通过纵向比较图3a和图3b可以发现,在高码率传输时码率有一定的振荡,而帧率变化平缓,而在低码率时情况恰巧相反.这是由于在低码率传输时,为了保证视频图像的质量,有时不得不丢弃一些冗余帧.从整个的试验结果来看,每层15帧/s左右的视频帧率确保了视频的流畅和传输质量的平衡性.

4 视觉伺服自主控制

通讯时延是影响地空遥操作的关键性问题,而目前的直接遥操作方法,无论是双向遥操作还是主从遥操作,都无法从根本上消除时延.为此,本文将视觉伺服方法引入到遥操作控制当中,使得卫星维护系统具有辨识卫星位姿的能力,实现了遥机器人的局部自主性.这种自主伺服控制一方面减轻了操作者的劳动强度,提高了操作效率,另一方面,由于不需要遥操作控制指令,客观上切断了通讯时延,因此,避免了时延所带来的问题.

针对传统的视觉伺服控制方法需要摄像机-机器人间的精确标定问题,本文提出一种冗余特征伺服控制方法.该算法无需精确的视觉场景重建,仅依靠简单的视觉特征建立反馈控制.由于任务定义在图像空间,因此,系统无需精确的标定信息,只要保证摄像机内参数和手眼粗标定就能实现指定的伺服任务.

伺服控制的目标是使选择的图像特征值 s 最终到达期望的特征值 s^*.为实现从期望的图像特征变换到期望的摄像机运动的映射,需要建立图像雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}_s$.

$$\dot{s}=\left(\frac{\partial s}{\partial r}\right)\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{J}_s T \tag{1}$$

其中,r 为机器人手相对于基坐标系的位姿;$T=\mathrm{d}r/\mathrm{d}t$ 表示摄像机的速度旋量;$\dot{s}$ 表示图像特征速度.在单位焦距长度下,利用经典的小孔透射模型,$\boldsymbol{J}_s$ 可以直接表示成下式:

$$\begin{bmatrix}\dot{X}\\ \dot{Y}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{1}{z} & 0 & \frac{X}{z} & XY & -(1+X^2) & Y\\ 0 & -\frac{1}{z} & \frac{Y}{z} & 1+Y^2 & -XY & -X\end{bmatrix}T \tag{2}$$

其中,X,Y 表示图像特征点的坐标;z 表示特征点到相机坐标系的深度.

由于 $\boldsymbol{J}_s$ 中的参数是非线性强耦合的,且为获得 T 必须对 $\boldsymbol{J}_s$ 求逆.考虑到视觉伺服中对非线性和实时性的要求,本文根据期望点的冗余特征来对图像雅可比进行重构.取 m 个特征点对式(2)叠加,建立扩展图像雅可比矩阵,形成冗余 s 特征雅可比:

$$\boldsymbol{J}_{ms}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{J}_s(s_{x1},s_{y1},z^*)\\ \vdots\\ \boldsymbol{J}_s(s_{xm},s_{ym},z^*)\end{bmatrix} \tag{3}$$

其中,z^* 为期望点的深度.构建冗余图像特征雅可比的点特征,只要其中有 3 个点不共线,就可以保证 $\boldsymbol{J}_{ms}$ 的广义伪逆矩阵 $\boldsymbol{J}_{ms}^{+}$ 满秩,能够满足非线型系统全局稳定性充分条件[5]:

$$\hat{\boldsymbol{J}}_{ms}^{+}\boldsymbol{J}_{ms}(s(t),z^*(t))>0,\forall t \tag{4}$$

式中,$\hat{\boldsymbol{J}}_{ms}^{+}$ 为 $\boldsymbol{J}_{ms}^{+}$ 的估计值.

通过选择合适的冗余特征能够满足式(4)的条件,此时雅可比矩阵非奇异.但是通过观察式(3)的结构可以得知,$\boldsymbol{J}_{ms}$ 中的参数是非线性强耦合的,当该矩阵处于病态或接近奇异时,将对图像的测量噪声非常敏感.为此,本文提出一种基于雅可比矩阵最小条件数的特征选择方法,即通过奇异值分解求取矩阵的最大奇异值和最小奇异值,用二者的比值(矩阵的条件数)作为元素敏感性的度量准则.

通过试验发现,敏感性的平面特征选择基于以下 2 条准则:

1) 特征选择的数目越多,矩阵的条件数越小;

2) 共线特征会使矩阵的条件数增加.

根据以上 2 条准则,可以确定冗余特征的最佳配置.这样根据选择的冗余特征能够确定 $\boldsymbol{J}_{ms}^{+}$,通过结合相应的控制算法,如 PID、最优控制器等,可以确定摄像机在笛卡尔空间的速度旋量 $T(v,\omega)$,然后根据笛卡尔关节空间控制方法获得机器人运动的关节角度,从而最终实现对机器人的伺服控制,其控制结构如图 4 所示.

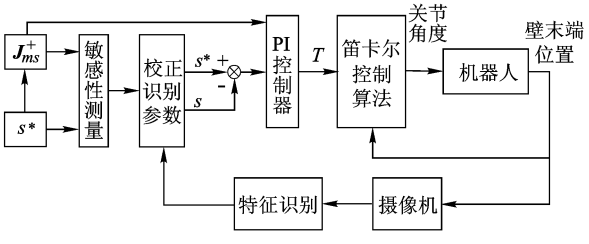
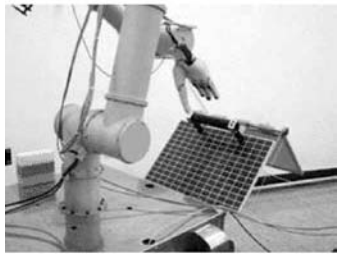


图 4　冗余特征视觉伺服控制

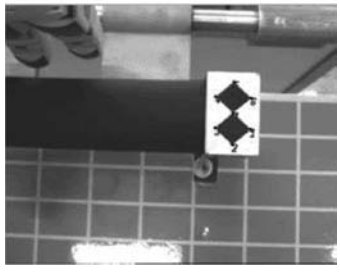
5　实验结果

为验证本文所述共享式遥操作方法,在实验室环境下建立了视觉系统的原型,利用视觉辅助遥操作的方法实现了卫星维护中的典型任务——打开发生故障的太阳能帆板.

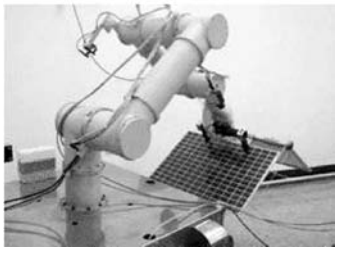
图 5 为试验过程中获取的图片,图 5a～图 5d 分别表示试验中 4 个行为.图 5b 表示在接近处理过程中视觉系统获取到的图像,图中黑白马赛克图形为待识别合作目标,目标角点上的数字表示识别到的伺服控制点.



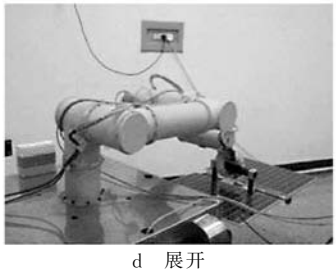
a　初始位置



b　接近



c　抓取

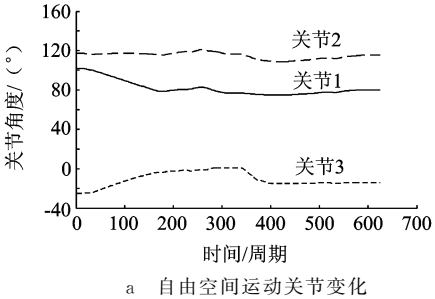


d　展开

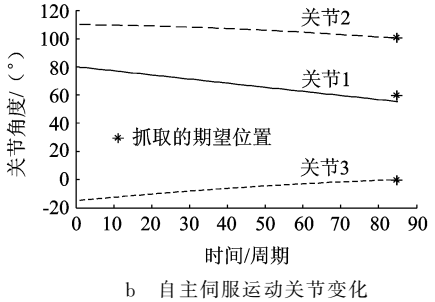
图 5　展开折叠的太阳能帆板

操作者首先在虚拟仿真模型和实际视频反馈的辅助下,在操作场景中初步搜索合作目标,当发现合作目标后,驱动机械臂到达一个初始定位位置,准备进行后续的视觉自主伺服操作.图 6a 表

示遥操作者利用空间鼠标控制机器人运动过程中关节角度变化曲线，由于遥操作者在利用空间鼠标进行手动控制时，无法实现精确的操作，所以关节角度有一定的震荡. 当成功识别合作目标后，操作者将控制权移交给视觉伺服控制器，在接下来的整个伺服过程中，机械臂一直由视觉控制算法进行控制，操作者此时作为监控者存在. 图 6b 表示在视觉伺服控制下关节角度变化曲线. 在自主伺服控制时，由于对关节运动的轨迹进行了规划，所以运动过程较自由空间平稳. 当视觉伺服任务完成后，操作者取回机械臂的控制权，进行最后的展开、调整工作. 这样，通过这种共享控制的方式实现了灵活、连续、安全的操作.



a 自由空间运动关节变化



b 自主伺服运动关节变化

图 6 关节空间变化曲线

6 结 论

1) 本文避开了传统的遥操作方式，运用 3D 图形预测仿真和视觉伺服等技术辅助遥操作，实现了卫星系统自维护.

2) 视觉伺服方法的引入实现了遥机器人的局部自主性，提高了系统的连续操作性能，减少了操作时间及接触力，使得操作平稳安全. 对于解决遥操作的典型时延问题帮助很大.

3) 实验验证了共享式遥操作控制方法的可行性和有效性，对进一步研究完全自主卫星维护具有重要的参考意义和实用价值.

参考文献（References）

[1] Liu Michael. Jasiobedzki P. Behavior based visual servo controller for satellite capture[C]//Proc of the 7th ESA Workshop on Advance Space Technologies for Robotics and Automation: ASTRA 2002. Noordwijk, The Netherlands: [s. n.], 2002: 119－126

[2] ODA M. ETS-VII: achievements, troubles and future [C]// Proc of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS. Quebec, Canada: Canadian Space Agency, 2001: 18－22

[3] 李成，梁斌. 空间机器人的遥操作[J]. 宇航学报，2001，22(1)：95－98
Li Cheng, Liang Bin. Teleoperation of space robotics[J]. Journal of Astronautics, 2001, 22(1): 95－98(in Chinese)

[4] 蒋再男，刘宏，谢宗武，等. 3D 图形预测仿真及虚拟夹具的大时延遥操作技术[J]. 西安交通大学学报，2008，42(1)：78－81
Jiang Zainan, Liu Hong, Xie Zongwu, et al. Teleoperation with large time delay based on 3D graphic predictive simulation and virtual fixture[J]. Jounal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(1): 78－81(in Chinese)

[5] 王麟琨，徐德，谭民. 机器人视觉伺服研究进展[J]. 机器人，2004，26 (3)：277－282
Wang Linkun, Xu De, Tan Min. Survey of research on robotic visual servoing[J]. Journal of Robot, 2004, 26(3): 277－282(in Chinese)

(责任编辑：赵海容)