

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311399

地外风化层采样机械臂自主避障控制方法*

赵子弈, 朱利丰, 宋爱国

(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘要: 由于地外天体风化层环境的不确定性, 执行浅层钻取采样任务时易受到潜在障碍物的干扰, 而对于采样时感知环境并进行机构姿态调整的研究相对较少。为提高采样成功率、改善作业时末端机构受力情况, 提出了一种应用于地外风化层采样任务的机械臂自主避障控制方法。设计了能够辅助旋转避障与平移探进的三自由度机械臂, 并进行了运动学分析。通过搭载三维力传感器获取采样器受力信息, 结合导纳控制与旋转避让进行障碍规避。为验证方法可行性, 进行了多组仿真实验和实物实验。实验结果表明, 所提出的方法能够有效帮助采样器避让障碍物体, 显著减小了作业阻力, X 、 Y 、 Z 三方向最大受力的改善分别达到 46.7%、57.0%、64.9%, 改善了常规柔顺方法应用于浅层钻取时易受干扰的不足。

关键词: 风化层采样; 地外探索; 采样机械臂; 自主避障; 导纳控制

中图分类号: TH702

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.4020

Autonomous obstacle avoidance control for extraterrestrial regolith sampling manipulator

Zhao Ziyi, Zhu Lifeng, Song Aiguo

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Due to the inherent uncertainties associated with extraterrestrial bodies' regolith environments, the implementation of shallow drilling sampling tasks can be easily hindered by potential obstacles. There is few researches addressing the perception of the environment and the adjustment of mechanism posture during the sampling process. To improve the success rate of sampling and ameliorate the resistance of end-effector during operations, a novel autonomous obstacle avoidance control method is proposed for extraterrestrial regolith sampling tasks. A three-degree-of-freedom manipulator is designed, which is capable of assisting drilling with rotational motion for obstacle avoidance, and kinematic analysis is performed. By utilizing a three-dimensional force sensor to acquire the sampler's force information, the admittance control and rotational motions are combined for obstacle avoidance. To evaluate the feasibility of the method, several sets of simulation experiments and physical experiments are conducted. Experimental results show that the proposed method can effectively assist the sampler in avoiding obstacles, and significantly reduce the resistance encountered by the end effector during sampling, with improvements in the maximum forces experienced in the X , Y , and Z directions reaching 46.7%, 57.0%, and 64.9%, respectively. In addition, the method addresses the deficiencies of conventional compliant methods, which are prone to interference when applied to shallow drilling.

Keywords: regolith sampling; extraterrestrial exploration; sampling manipulator; autonomous obstacle avoidance; admittance control

0 引言

地外风化层采样(regolith sampling)任务对研究宇宙发展、生命起源等方面问题具有重要意义^[1]。通过搭载

采样器机械臂, 星球巡游车(rover)能够在天体表面风化层进行样本取样与原位分析^[2]。来自美国火星科学实验室的好奇号(curiosity)火星车, 在执行探索夏普峰任务时, 就于火星表面风化层进行连续的原位采样以及样本分析工作^[3]。钻取(drilling)作为主流的地外采样方式之

收稿日期: 2023-05-07 Received Date: 2023-05-07

* 基金项目: 电子学会-腾讯 Robotics X 犀牛鸟专项研究计划项目资助

一,能够有效保存土壤层理信息,应用较广,典型的钻取采样任务有美国的阿波罗系列任务、前苏联的月球(luna)系列任务以及中国的嫦娥五号探月任务^[4]。然而航天任务对于载荷有严重的限制,飞行器着陆过程会消耗大量燃料^[5],星球漫游车也大都利用太阳能工作,能够提供给车载采样机构的功率有限^[1],因此在风化层表面进行浅层钻取更为现实。此外,通信延时的存在使得地面遥操作的控制方式难以在火星等更远的天体上实施,实现自动的采样过程尤其重要^[6]。

地外自动采样任务的一大难点在于环境信息往往是未知的^[6-7],Feng等^[8]通过对嫦娥五号月球层穿透雷达观测数据进行分析,发现月面浅层可能出现岩石带与岩石碎片。研究发现,火星表面同样也具有多种岩石^[9-10]。因此,采样装置在地外作业过程中很可能触及硬物,产生较大的接触力,引起采样器损伤或采样任务失败的后果^[11]。而在地外采样任务中,根据末端机构与环境介质的相互作用进行策略调整的研究较少,Yun等^[11]和Lu等^[12]提出了一种基于振动信号的岩石接触识别方法,在振动采样任务中判断个工作环境是否可采。Li等^[13]提出了一种通过识别介质性质来调整钻取时每转渗透率的采样策略,但是无法处理土层下遇到坚硬障碍物的情形。即便如此,传统采样机器人仍沿着预设的轨迹机械运动,不具备柔顺探进能力以减少采样系统撞到土下障碍物的受损风险。如果能够通过姿态调整对障碍物进行规避,则可以有效改善末端采样器工作时的受力情况,减小机构磨损,提高采样作业的成功率。

因此,为在地外风化层的浅层钻取作业过程中实现障碍物规避功能,本文在地外天体采样系统中引入柔顺采样策略,并配套进行采样机械臂结构简化,设计实现了具备采样探进功能与旋转避障功能的三自由度机械臂,优化了系统复杂度并可搭载于月面巡游器,采样任务以到达指定深度为目标,通过搭载在采样器末端的三维力传感器,实时感知采样器的受力情况,当末端采样器与硬物发生接触且接触力超出安全受力范围时,进行柔顺规避。

为达成柔顺避障,柔顺控制技术在相关任务中得到了应用。Bae等^[14]提出了一种挖掘避障算法,通过模型参考阻抗控制,将挖掘任务进行动作拆解,并通过力传感器监测末端受力情况,引导末端执行器向所受外力的合力右法向量方向移动,达到了贴合障碍表面作业的效果。Yajima等^[15]基于探地雷达和深度学习的避障方法,在挖掘时探测并避让埋藏的管道。然而挖取机构与钻取机构的运动差异较大,常规柔顺方法如模型参考阻抗控制、导纳控制等重点关注受力跟踪,贴合障碍硬物的作用效果易受干扰,受力改善有限,影响作业重复性,而地外风化

层层钻取机构对采样避障的效果要求更高,传统柔顺控制技术依然有待改善。

针对常规柔顺方法应用于浅层钻取采样任务时易受干扰、受力改善有限的问题,本文进一步应用导纳控制以及关节位置控制,提出一种新型采样避障柔顺控制方法,并成功进行了仿真与实物实验。运用前端串联旋转避让运动的导纳控制算法在采样方向法平面上进行实时位置调整,大大改善了各向接触阻力,使得采样机构远离障碍物,平稳过渡至安全区域,弥补了常规柔顺方法易受干扰的不足,提高了作业重复性。建立了物理仿真环境进行多重力环境下的方法可行性验证,并搭建实物实验平台,在多种介质环境下进行了方法对比实验,对实验结果进行了定量分析。

本文的创新点包括:在采样任务上,本文提出的采样系统可以在土下具有不可见障碍的情形下柔顺探进,具备自主抵抗损伤风险的能力。对比现有着陆器采样系统及其控制方案,已有的多自由度大型采样机械臂仅能机械执行预设的捞取动作,在结构设计上,本文所提出的采样装置具有小型便携的优势,作业机械臂经过了精简自由度设计,可搭载在巡游器上,为就位采样分析提供支持;在控制算法上,本文在验证了常规导纳型柔顺控制在采样任务上的优势的同时进一步提出了旋转增强策略,提高了采样任务中的旋转避障能力,改善了常规柔顺控制易受干扰的问题,进一步降低了作业阻力。

1 机械臂结构与运动学分析

1.1 采样机构结构设计

现有采样任务多采用四自由度及以上机械臂构型,且均为旋转自由度,如美国“好奇号”火星车搭载的机械臂具有5个旋转自由度,嫦娥五号月面采样机械臂具有4个旋转自由度,如图1所示。作业子运动如递送探进、姿态调整等过程需所有关节协同运作^[2]。

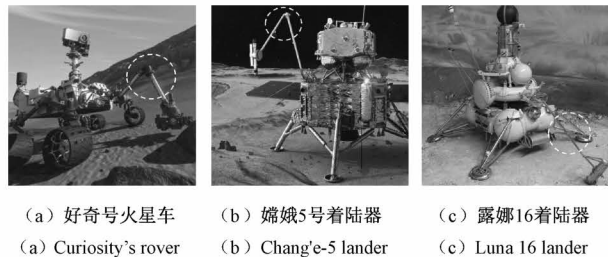


图 1 现有采样机械臂

Fig. 1 Pre-existing sampling mechanical arm

为进一步优化系统复杂度,便于航天控制与应用,本文设计实现了能够满足浅层钻取采样任务需求的三自由

度机械臂。机械臂的结构如图 2 所示,前两个关节为旋转关节,提供两个方向的旋转运动,辅助实现末端机构的灵活避障。第 3 个关节为平移关节,辅助实现末端钻进,平移方向与采样方向一致。允许旋转避让运动与钻进运动独立进行,并且可搭载在漫游车前部,提高了采样作业时进行避障操作的灵活性。

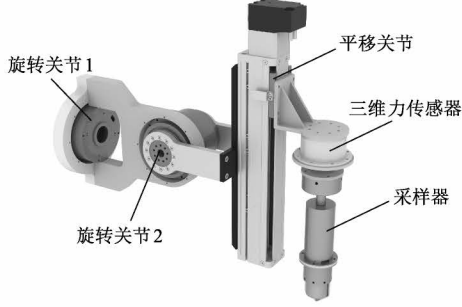


图 2 机械臂结构

Fig. 2 Manipulator structure

驱动方式上,旋转关节使用谐波减速直流无刷电机驱动,平移关节使用电机与丝杠滑块组合形成的微型伺服电缸驱动,各关节电机均搭载有位置传感器,采用位置控制的方式作业。

搭载有适配机械臂运动方向的三维力传感器的采样器被安装在平移关节的滑块上,由于采样器近似为刚体结构,传感器可对末端三维受力情况进行感知。实验用采样器在顶部搭载振动电机,辅助采样器钻进,并最终通过末端挖勺旋转一周实现指定深度土壤的取样。所搭载的多维力传感器为广泛应用于智能机器人、航空航天等领域的电阻应变类型^[16-17], X 、 Y 、 Z 方向测力量程均为 $-120 \sim 120$ N,存活载荷为 ± 300 N,测量误差小于 3% F. S,满足控制要求。

1.2 运动学分析

机械臂的采样任务需要指定探入深度,采样时的避障控制需要根据机构末端在基座坐标系下的位姿信息,进行末端位置调整,需得到笛卡尔空间位置指令到机械臂关节空间角度(位移)指令的逆运动学映射。本文利用 D-H 参数法对机械臂结构进行正运动学建模分析,得到关节参数到末端位置的转换关系。同时由于机械臂关节

自由度较少,采用几何法在机械臂工作范围内进行逆运动学分析。

1) 正运动学分析(D-H 参数法)

如图 3 所示,为便于分析,选择前两个旋转关节的转轴交点处为基座坐标系原点,此时机械臂基座坐标系和连杆 1、连杆 2 坐标系重合,选定采样器末端为连杆 3 的坐标系原点并令连杆 3 坐标系为工具坐标系,规定转轴方向及平移方向为各连杆坐标系 Z 轴,规定逆时针方向为转动正向,按照 D-H 参数法的要求建立基座坐标系以及各连杆坐标系。机械臂的 D-H 参数以及变量范围如表 1 和 2 所示。

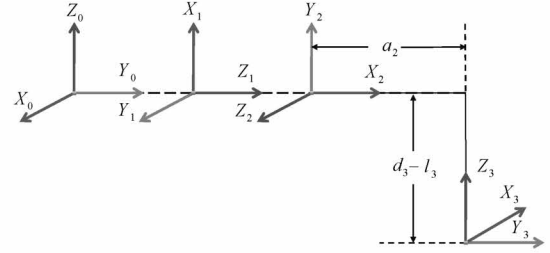


图 3 坐标系建模

Fig. 3 Coordinate system modeling

表 1 机械臂 D-H 参数表

Table 1 Manipulator D-H parameters

Link i	α_{i-1}/rad	a_{i-1}/mm	d_i/mm	θ_i/rad
1	$-\pi/2$	0	0	$\theta_1 - \pi/2$
2	$-\pi/2$	0	0	$\theta_2 - \pi/2$
3	$-\pi/2$	$a_2(200)$	$d_3 - l_3(150)$	0

表 2 机械臂自由参数变化范围

Table 2 Manipulator free parameter variation range

参数变量	取值范围
θ_1/rad	$-\pi/3 \sim \pi/3$
θ_2/rad	$-\pi/4 \sim \pi/4$
d_3/mm	$0 \sim -200$

将位置向量从坐标系 $j-1$ 到坐标系 j 的变换关系以四阶矩阵 ${}^{j-1}_j \mathbf{T}$ 表示,则根据机械臂 D-H 参数表可以写出从末端坐标系到基座坐标系的转换矩阵^[18]:

$${}^0_3 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 \sin\theta_2 & -\cos\theta_1 & \sin\theta_1 \cos\theta_2 & a_2 \sin\theta_1 \sin\theta_2 + (d_3 - l_3) \sin\theta_1 \cos\theta_2 \\ \cos\theta_2 & 0 & -\sin\theta_2 & a_2 \cos\theta_2 + (l_3 - d_3) \sin\theta_2 \\ \cos\theta_1 \sin\theta_2 & \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \cos\theta_2 & a_2 \cos\theta_1 \sin\theta_2 + (d_3 - l_3) \cos\theta_1 \cos\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 逆运动学分析(几何法)

旋转当关节参数 $\theta_1 = \theta_2 = d_3 = 0$ 时,机械臂处于初始状态,令此时机构末端点及其三维坐标为 $X_0(0, a_2, -l_3)$,如

图 4(a) 所示。当末端位置改变到点 $X_1(x_1, x_2, x_3)$ 时,将点 X_0 和点 X_1 向基座坐标系 $X-Z$ 平面投影后,如图 4(b) 机械臂的关节旋转角 θ_1 即为投影点的位置向量与坐标系 Z

轴所成夹角的变化量,且在 $X-Z$ 投影平面上顺时针转动为旋转角正向,可得:

$$\theta_1 = \tan^{-1}(x_1/z_1) \quad (2)$$

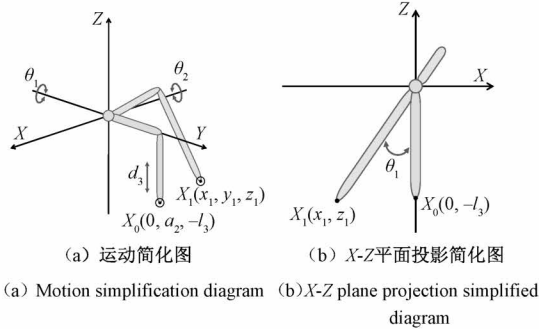


图4 逆运动学分析图

Fig. 4 Inverse kinematic analysis diagram

令从基座坐标系原点到点 X_1 的向量为 $\mathbf{P}_1$, 由于杆件扭转角 $\alpha_2 = -\pi/2$, 构成直角三角形。由勾股定理, 向量 $\mathbf{P}_1$ 的模长平方与连杆长度 a_2 、连杆偏移量 $d_3 - l_3$ 的平方和相等, 有:

$$a_2^2 + (d_3 - l_3)^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \quad (3)$$

同时, 由于参数范围约束, $d_3 < 0$, 式(3)有唯一解:

$$d_3 = l_3 - \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - a_2^2} \quad (4)$$

最后, 进行 θ_2 的求解, 结合上文中正运动学求解的结论式(式(1)), 可以得出:

$$y_1 = a_2 \cos \theta_2 + (l_3 - d_3) \sin \theta_2 \quad (5)$$

联立式(4)、(5), 结合关节活动范围, 得到 θ_2 的逆解表达式:

$$\theta_2 = 2 \tan^{-1} \left[\frac{(l_3 - d_3) - \sqrt{(l_3 - d_3)^2 - y_2^2}}{a_2 + y_2} \right] \quad (6)$$

2 采样策略和避让控制算法

为探究合理可行的作业方案并实现机构自主避障, 首先对采样策略进行了规划与分析, 制定了以探进至指定深度为主要目标的采样工作流程。其次, 对现有的机械臂柔顺控制方法中广泛使用的导纳控制算法进行了调整, 通过在前端串联远离障碍物方向的关节旋转运动, 构建了一套完整的机械臂自主避障运动控制过程。

2.1 采样策略

为实现在机械臂采样工作的过程中进行实时的障碍避让, 本文通过实时读取采样器上三维力传感器的输出信号并进行数据处理, 实现对采样器三维受力情况的监测, 并在受力异常时及时做出调整。如图5所示, 对于碰到障碍物造成的小范围受力增加, 及时通过向侧向运动进行避让调整, 当环境不适宜采样, 如遇到层状坚硬介质

时, 可能使得受力情况较为危险并对采样器、传感器等机构构成损伤, 则需及时中止钻进。

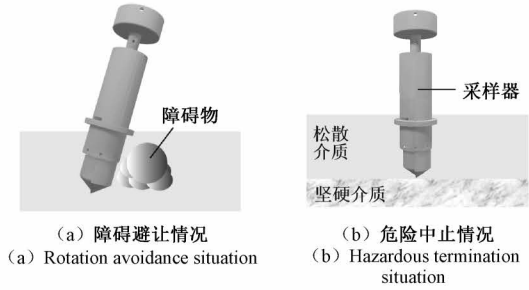


图5 避让与危险情况作业示意图

Fig. 5 Illustration of obstacle avoidance and dangerous situation operation

根据运动学分析时的坐标系设定, 机械臂工具坐标系 Z 轴方向即为采样方向的反向, 而工具坐标系的 $X-Y$ 平面则与采样方向垂直, 在此称采样方向为主方向, 称工具坐标系的 X 与 Y 轴方向为侧方向。采样器在直接与土壤介质挤压接触的过程中, 末端在主方向上的受力会产生较大范围的变化, 而在侧方向上的受力相对变化较小, 因此将主方向合力与侧方向合力进行分开判断, 分别设定不同的参数阈值。

在任务开始前设定受力的安全阈值与危险阈值以及目标采样深度。采样器未到达目标深度时, 当采样器所受主方向合力和侧方向合力均处于安全范围时, 通过直线关节的运动进行主方向上采样器的钻进; 当任一方向所受合力超出安全阈值但并未达到危险阈值时, 通过旋转辅助进行侧方向上的避让调整; 当任一方向所受合力超出危险阈值时中止任务。采样器到达目标深度后结束任务。

2.2 控制方法

已有的机械臂柔顺控制方法如阻抗控制、力/位混合控制、导纳控制等方法能够根据机械臂末端执行器受力情况来调整机械臂姿态, 达到期望力跟踪的效果, 在设定安全阈值的情况下, 配合机械臂内部的运动控制器使得末端接触力快速跟踪到安全受力界限^[19], 实现采样器贴合障碍物表面的控制效果, 如已经在地面挖取任务中得到应用的模型参考阻抗控制方法^[14], 符合采样过程中的受力改善的基本需求。然而, 地外风化层的作业环境具有不确定性^[7], 如果在机构贴合障碍物时受到干扰, 即受力在安全阈值附近波动, 则可能造成机构产生抖动, 造成采样器在障碍物表面不断进行微小撞击, 不利于机构安全以及采样作业的顺利进行, 同时贴合障碍进行探进的过程也将造成更大的机构磨损, 受力改善有限。

因此, 本文面向地外风化层浅层钻取采样任务, 在常规柔顺的基础上进行改进, 通过在导纳控制的前项串联

远离障碍的旋转运动,增强避障效果,避免贴合硬物,进一步改善了作业受力。本部分将首先介绍受力柔顺的实现,而后介绍串联了旋转避让运动的完整避障控制过程。

1) 柔顺控制实现

由于所设计的采样机械臂采用位置控制的模式运作,通过搭载三维力传感器感知末端受力,所以在障碍规避任务中,对末端机构的 X 、 Y 、 Z 三方向的运动均应用了更加适配的导纳控制来实现笛卡尔空间下的受力柔顺。导纳控制器作用效果如图6所示,可用弹簧-阻尼-质量模型表示。

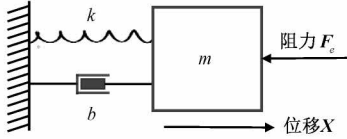


图6 导纳控制作用效果图

Fig. 6 Impedance control illustration diagram

其中参数 k 、 b 、 m 分别为刚度、阻尼和质量系数,控制回路的输入为 X 、 Y 、 Z 三方向阻力向量 F_e 以及参考位置向量 X_r 。输出为位移运动量 X ,导纳控制器的具体运算过程如下^[20]:

$$F_e = M(\ddot{X}_r - \ddot{X}_d) + B(\dot{X}_r - \dot{X}_d) + K(X_r - X_d) \quad (7)$$

其中, F_e 在力传感器所测原始三维力 F_x 、 F_y 、 F_z 经处理后得到的三维阻力向量,记传原始三维力向量为 F ,经过处理后的外力向量为 F_e ,记侧向受力安全阈值为 F_{side} ,采样方向受力安全阈值为 F_{main} ,则信号处理式如下:

$$F_e = \begin{cases} \mathbf{0}, & \text{if } \sqrt{F_x^2 + F_y^2} < F_{side} \text{ and } |F_z| < F_{main} \\ \mathbf{F} = [F_x \ F_y \ F_z]^T, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

即对安全限度内的外力清零,视作处于合理钻进阻力区间,不进行避让调整。而当外力超过安全阈值时则保留力信息,根据受力方向进行避让调整。

参考位置向量 X_r 来自外界定义, M 、 B 、 K 分别为三维刚度、阻尼和质量系数矩阵, X_r 与 X_d 分别为笛卡尔坐标下的采样器参考目标位置和期望位置向量。运算式经拉氏变换后进一步处理^[19]:

$$F_e = (Ms^2 + Bs + K)(X_r - X_d) \quad (9)$$

$$E_x = X_r - X_d \quad (10)$$

$$E_x = F_e / (Ms^2 + Bs + K) \quad (11)$$

导纳控制器将以 X_r 作为零力位置,对外力呈现弹簧-阻尼-质量模型的运动响应。 E_x 即作为位置控制指令的力反馈修正量,用以修正参考目标位置 X_r 得到实际运动的期望位置 X_d ,导纳控制器随后将 X_d 作为命令送入机械臂内部运动控制器中,进一步控制关节电机实现位姿调整,完成对外力的柔顺。

2) 避障控制实现

完整的避障控制算法以基于位置控制的导纳控制方法为基础,在导纳柔顺的同时串联远离障碍物方向的关节旋转运动,并以旋转避让的目标位置作为导纳控制器的参考目标位置 X_r ,使得柔顺交互的过程中机构与环境的接触力进一步下降。机械臂的旋转关节能够进行绕采样器工具坐标系 X 和 Y 轴的转动,从而辅助实现远离障碍物的侧向转动,使得采样器在快速调整到安全受力状态的同时顺应阻力方向进行旋转避让,改善机构受力情况。

旋转避让的过程如图7所示,通过旋转关节1的转动响应工具坐标系 Y 轴受力、旋转关节2的转动响应 X 轴受力来进行障碍规避。

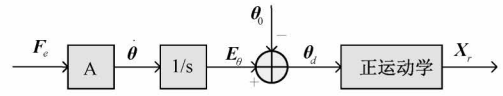


图7 旋转避让过程图

Fig. 7 Rotational avoidance process diagram

其中,转速与外力成正比,当受力安全时转速为0,转速经过积分得到旋转修正量 E_θ ,叠加初始角度 θ_0 后即得到期望关节角度 θ_d ,计算式如下:

$$\dot{\theta} = A F_e, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & a_y & 0 \\ a_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$E_\theta = \int_0^t \dot{\theta} dt, \quad \theta_d = \theta_0 + E_\theta \quad (13)$$

其中,矩阵 A 为增益系数矩阵,调节 X 、 Y 两向旋转对所受阻力的敏感程度。期望关节角度 θ_d 经正运动学解算后作为阻抗控制器的参考位置输入 X_r ,完成串联。

通过在采样器上端搭载的三维力传感器监测末端采样方向 Z 轴和采样侧方向 X 、 Y 轴的受力情况,并读取各个关节电机位置编码器获得末端位置,实现实时的状态监测。

具体控制过程如图8所示。当采样作业进行时,末端采样器与环境(土壤、障碍物)发生接触并受到各向外力,通过读取三维力传感器反馈的力信号来判断受力情况。首先,读取到采样器3方向的原始受力信息 F_x 、 F_y 、 F_z ,而后对原始信息进行阈值比较,如式(8),若高于危险阈值则停止作业,反之则进一步处理,舍弃低于安全限度的外力,保留超过安全限度外的外力,得到有效外力 F_e 。后再送入避障控制的位姿调整回路,根据受力方向进行避让调整。

处理得到的有效外力 F_e 进一步作为机构旋转避让和导纳控制的共同输入,如式(12)和(13)所示,其中旋转避让部分将输出关节修正角度向量 E_θ , E_θ 与关节当前

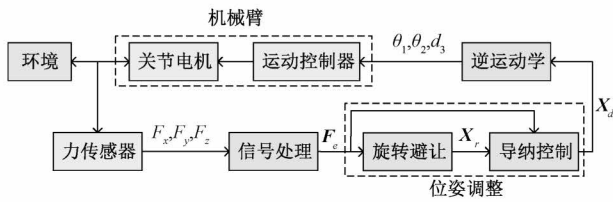


图8 运动控制过程图

Fig. 8 Motion control process diagram

位置 θ_0 叠加,得到关节空间下的期望关节角向量 $\theta_d, \dot{\theta}_d$ 经过正运动学解算可得到笛卡尔坐标系下的参考位置向量 X_r 并送入导纳控制器中,使得机械臂旋转关节在所受阻较大时快速旋转,受阻力较小时慢速旋转。

导纳控制部分则以 F_e 和旋转避让的参考位置向量 X_r 为输入,如式(9)~(11),按照弹簧-阻尼-质量模型计算得到位置修正向量 E_x ,用以进一步修正旋转避让部分的参考位置 X_r ,得到最终的目标位置控制量 $X_d, \dot{X}_d$ 再经过逆运动学解算后得到关节空间下各关节的运动控制量 θ_1, θ_2, d_3 并送入运动控制器中执行,由此达到导纳柔顺与旋转避让串联叠加的运动效果,实现位姿调整并减小机构受力。

上述为单次控制循环的完整流程,作业过程中将实时进行末端采样器三维受力监测与位置监测,当受力超过安全阈值时通过旋转避让和导纳柔顺进行姿态调整,避开阻力较大的区域,直到有效外力 $F_e = 0$,即机构受力处于安全区间。当末端采样器达到期望深度后,结束作业。

3 实验验证

为对工作方案进行验证,首先在机器人物理仿真平台 Gazebo 中进行了避障方法的模拟测试,而后根据结构设计搭建实物仿真平台,并按照论述方法部署控制策略后进行了实物测试,并进一步将本文方法和常规柔顺方法进行了定量比较。

3.1 仿真测试

Gazebo 仿真平台具有高性能的物理仿真引擎,可对仿真的引力、刚度等环境参数以及物体的质量、转动惯量、摩擦系数等细节参数进行详细定义,并实时反馈机构的位置、速度、加速度等运动参数,同时也以插件形式扩展不同传感器来感知其他信息,如接触力,是很多机器人研究采用的仿真平台^[21-22]。Bumper 传感器是 Gazebo 中的传感器插件之一,用于反馈接触物体接触时产生的多维力信息,可用于测试采样器采样时与障碍物的接触力,同时反馈的运动参数也能作为导纳控制的输入,直接运用于式(9)~(11)中求解期望位置。

本次仿真实验在 Gazebo 中进行采样场景建模,如图9所示,场景包含装载采样器的机械臂、盒状采样区域以及障碍物。其中机械臂基座固定,其他关节受软件控制;黄色球体为非固定物体,提供干扰;岩石纹理部分为固定地形,用于模拟坚硬介质;球状 bumper 传感器搭载于采样器末端,在接触实体时产生接触力信号。

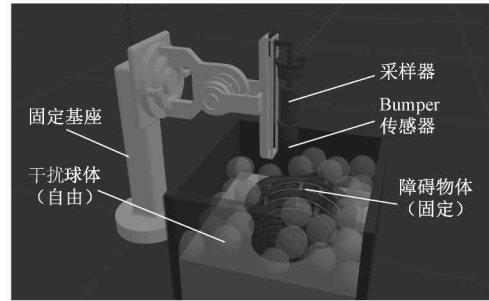


图9 仿真实验环境

Fig. 9 Simulated experimental environment

在系统设计实现与实验中,本文考虑了引力环境的不同对本研究的系统开展验证。首先,通过调整 Gazebo 仿真平台的重力加速度参数,实现对地球、月球和火星不同重力环境的模拟。在这些环境中,非固定物体会在采样器的挤压下表现出不同的运动特性。此外,由于重力参数的改变同时会影响机械臂所搭载的传感器的力信号零位,因此每次实验的初始化步骤均包括有对传感器力信号的零位标定,以消除不同的引力环境对采样臂自重带来的影响。同时,搭建了不同的障碍地形以丰富场景,如图10所示。采用 ODE 物理引擎,仿真频率设置为 1 kHz,各关节最大运动速度分别设定为 0.5 rad/s、0.5 rad/s、5 cm/s。

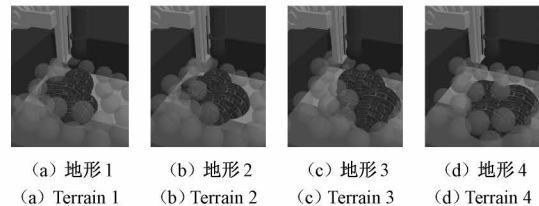


图10 不同障碍地形

Fig. 10 Different obstacle terrain

实验过程中,通过程序对机械臂的各个关节的运动进行控制,并记录力信号。当采样器与实体接触时 Bumper 传感器将会产生信号,未接触时反馈受力为 0。以避让障碍物为目标进行了多次实验,在同样的场景以及初始姿态下,通过比较施加避让控制以及不施加避让控制时机械臂探进过程中的力信号差异以及运动表现,分析控制效果。

实验时,施加了避让控制的机械臂在采样过程中能够有效避开障碍,在接触到障碍物体时根据接触力的大小与方向进行旋转避让,避障过程如图 11 所示。

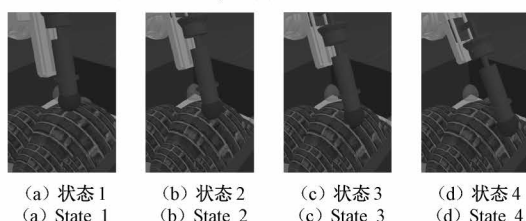


图 11 末端避让障碍物

Fig. 11 End-effector obstacle avoidance

而未施加避让控制的机械臂在接触障碍物体时产生了很大的接触力,无法避开固定的障碍物体,在各个地形与引力条件下均不能实现有效的钻进。图 12 是未施加避让控制时的接触力曲线图,各方向接触力很容易达到 1 000 N 以上。

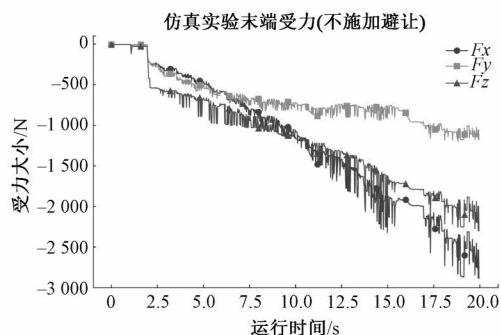


图 12 仿真实验接触力(未施加避让控制)

Fig. 12 Simulation experiment contact force (without avoidance control)

而施加了避让控制后,采样末端接触障碍物时立即进行了旋转调整,有效地减小了阻力。在各环境下,施加避让控制后机构能将侧方向接触力控制在 150 N 内,采样方向接触力控制在 250 N 内,如图 13 所示。

3.2 实物验证

根据结构设计,定制三自由度机械臂并搭载采样器、多维力传感器,组成完整的机械臂采样平台,如图 14 所示。

适合进行浅层钻取的地外风化层环境通常由不同粒径的松散物质如尘土和细砾组成^[23-24],同时考虑到地外风化层环境的复杂性和多样性^[6-7],在本实验中,采用了土壤、水泥灰和沙粒等多种介质来模拟各种不同的地外风化层环境,覆盖了不同形式的典型颗粒状土质。用石块模拟风化层中的障碍物,并将这些石块随机埋在土壤中。构建了多种不同的实验场景^[25-26],如图 15 所示。采样过程中实时读取并记录力传感器的输出数据,通过比

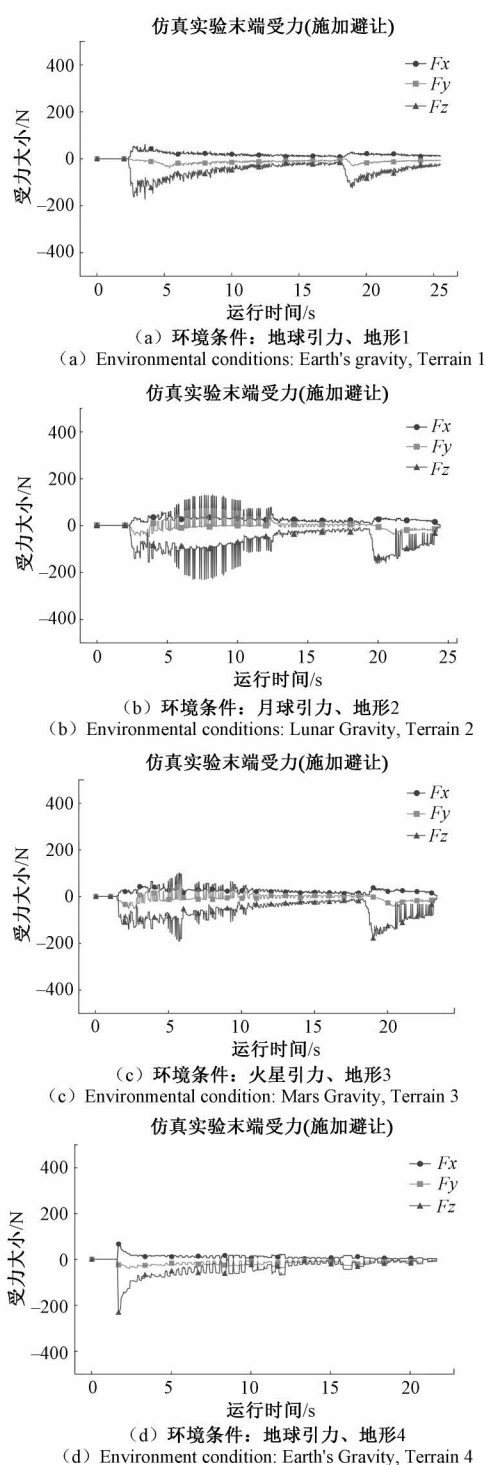


图 13 仿真实验接触力(施加避让控制)

Fig. 13 Simulation experiment contact force (with avoidance control applied)

较施加避让控制以及未施加避让控制下的钻进过程的最大受力情况,分析控制效果。

实验前,对采样臂自重进行了标定补偿以消除地面实验重力环境对采样机构的影响,同时通过对机械臂各

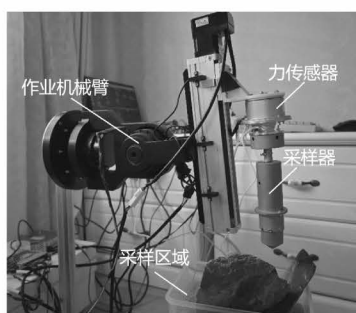


图 14 实物实验平台

Fig. 14 Physical experiment platform

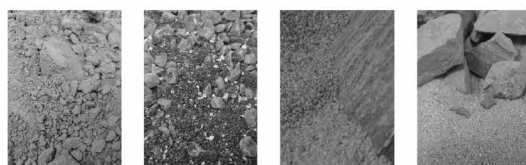


图 15 采样场景

Fig. 15 Sampling scenes

关节的旋转与平移基本运动进行人工采样预实验,结合作业性能以及采样器强度,明确了安全阈值和危险阈值并调节了控制参数。控制部分相关参数设置如表 3 所示,其中安全阈值为侧向力 5 N(X 、 Y 单向力 3.5 N),采样方向力 15 N;危险阈值为侧向力 20 N(X 、 Y 单向力 15 N),采样方向力 80 N。同时,鉴于采样过程中速度及其变化相对较小,导纳控制的质量部分以及 Z 轴的运动柔顺对系统的影响可忽略不计。因此,在实验验证中,采用刚度-阻尼模型下 X 与 Y 轴的导纳柔顺,并使用离散化后的速度观测值,即当前帧位置与上一帧位置之差除以控制周期,作为导纳控制的位置微分项。

表 3 实物实验控制参数表

Table 3 Physical experiment control parameters

方向	刚度系数 k	阻尼系数 b	旋转增益 a
X	120	15	0.03
Y	120	15	0.03

实验时,任意方向受力超出阈值后即开始避让。施加避让控制时,机械臂能够通过姿态调整来避开障碍物,改善受力。如图 16 所示,采样器在进入土壤前后都对石块进行了避让。

按照不施加避让控制、常规柔顺控制以及施加避让控制(本文方法)进行类型区分,开展了多次对比实验。设定控制频率为 200 Hz、侧向力安全阈值为 5 N、 X 和 Y 轴受力安全阈值 3.5 N、采样方向即 Z 轴安全受力阈值 50 N、目标深度 5 cm 即浸没挖勺。



图 16 采样避让过程

Fig. 16 Sampling avoidance process

图 17 显示了采样过程中机构末端在不同控制方法下的受力曲线,从中可以看出,常规柔顺方法虽然有一定的受力改善能力,但因其所实现的贴合障碍物的运动效果易受干扰,产生了显著的受力抖动,而本文所提出的避让控制方法则改善了这一问题,各向阻力进一步减小。

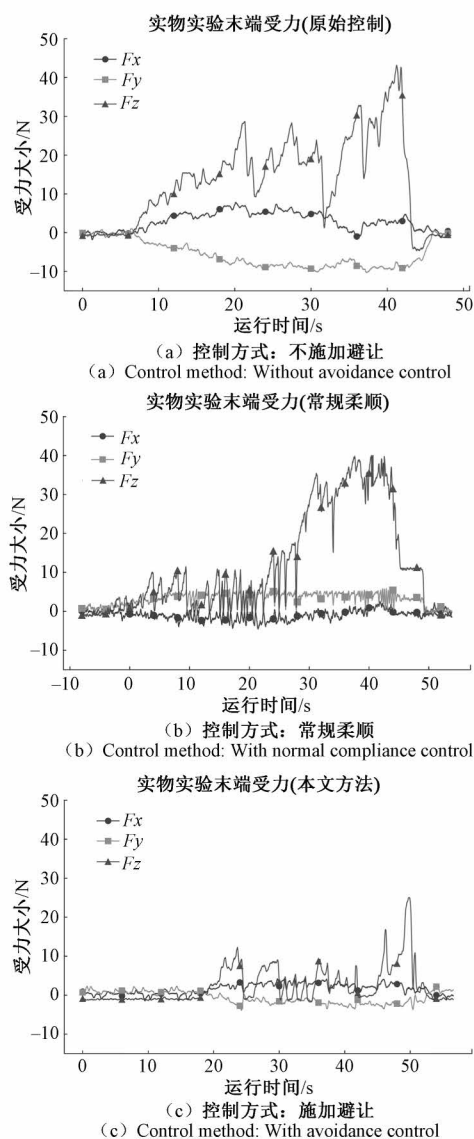


图 17 实物实验末端受力曲线

Fig. 17 Physical experiment end-effector force curve

对多次实验的数据进行了统计对比。表4给出了不同控制方法下末端各向最大受力的统计结果,以及本文方法和常规柔顺方法相较于原始控制下的受力改善程度。相较于不施加避让控制的原始组,应用本文避让控制方法的采样器的 X 、 Y 、 Z 方向最大受力的改善分别达到46.7%、57.0%、64.9%,而未串联旋转避让运动的常规柔顺方法仅可达到31.1%、38.5%、37.7%。实验结果表明,所提出的控制方法更适用于浅层钻取任务,进一步改善了采样器的末端受力情况,保护了机械结构。

表4 不同控制方法下末端各向最大受力
Table 4 Maximum terminal forces under different control methods

方向	原始控制	本文方法(改善)	常规柔顺(改善)
X	6.79 N	3.62 N (46.7%)	4.68 N (31.1%)
Y	9.37 N	3.99 N (57.0%)	5.76 N (38.5%)
Z	70.64 N	24.94 N (64.9%)	44.02 N (37.7%)

4 结 论

本文以地外风化层的浅层钻取为研究背景,针对在未知作业环境下,采样任务可能被障碍硬物影响导致机构损伤、任务失败的问题,提出了一种采样机械臂自主避障控制方法,通过在前项串联旋转避让运动改进了导纳柔顺过程,实现了采样钻进过程中对障碍物的有效避让,弥补了常规柔顺方案执行采样任务时易受干扰的不足,进一步改善了采样器末端的受力情况,丰富了地外采样任务中考虑末端机构与环境介质交互情况的研究。同时,本文所提出的采样装置具有小型便携的优势,经过精简设计的采样机械臂可搭载在巡游器上,部署自主避障控制方法后配合巡游器的移动自由度完成轻巧的浅层钻取采样。通过在采样器上搭载的力传感器感知末端三维受力。开展了多次的仿真测试以及实物实验,证明了方法的可行性。

由于方法是面向地外浅层钻取任务而改进产生,在应用方面也具有一定局限性。今后的研究将着力于对采样过程中力信号的进一步分析,通过精准识别碰撞环境与预测接触状态,实现更加准确的状态判断,丰富方法的应用范围。

参考文献

[1] 郑燕红, 邓湘金, 赵志晖, 等. 地外天体采样任务特点及关键技术发展建议[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9):71-74.
ZHENG Y H, DENG X J, ZHAO ZH H, et al. The character and key technology suggestion of extraterrestrial

sampling mission [J]. Drilling Engineering, 2014, 41(9):71-74.
[2] ZHANG T, WANG B, WEI H, et al. Review on planetary regolith-sampling technology [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 127: 100760.
[3] VERMA V, CARSTEN J, KUHN S. The evolution of the curiosity rover sampling chain [J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(5): 729-753.
[4] ZHENG Y, YANG M, DENG X, et al. Analysis of Chang'e-5 lunar core drilling process-ScienceDirect [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(2): 292-303.
[5] 胡军, 周敬. 基于自适应预测校正的月球软着陆制导控制方法[J]. 飞控与探测, 2022, 5(2):1-13.
HU J, ZHOU J. A guidance and control method for moon soft landing based on the adaptive predictor-corrector[J]. Flight Control and Detection, 2022, 5(2):1-13.
[6] ZHANG TAO, XU KUN, YAO ZHIXIAO, et al. The progress of extraterrestrial regolith-sampling robots [J]. Nature Astronomy, 2019, 3(6):487-497.
[7] 阳雨妍, 宋爱国, 沈书馨, 等. 基于CNN-GRU的遥操作机器人操作者识别与自适应速度控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3):123-131.
YANG Y Y, SONG AI G, SHEN SH X, et al. Operator recognition and adaptive speed control method of teleoperation robot based on CNN-GRU [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3):123-131.
[8] FENG J, SIEGLER M, WHITE M. Shallow regolith structure and obstructions detected by lunar regolith penetrating radar at Chang'E-5 drilling site [J/OL]. Remote Sensing, 2022, 14: 3378.
[9] NK A, GK A, OJK B. A review towards the design of extraterrestrial structures: From regolith to human outposts[J]. Acta Astronautica, 2020, 175: 540-569.
[10] FRIDRICH C J. Reverse zoning in the resurgent intrusions of the grizzly peak cauldron, sawatch range, colorado [J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95(7):779-787.
[11] YUN L, WEI L, SONG A, et al. Sampling head-rock contact identification for regolith sampling in space[J]. Aerospace Science & Technology, 2013, 31(1): 108-114.
[12] LU W, SONG A, HAO F. Design and analysis of spring roll-style retractable sampling arm [C]. The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, IEEE, 2010: 2374-2378.
[13] LI P, JIANG S, QUAN Q, et al. A drilling tactic to tackle indeterminable environment in lunar regolith sampling [C]. 2015 IEEE International Conference on

- Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE, 2015; 2347-2352.
- [14] BAE J, LEE C S, HONG D. Avoidance of earth obstacles for intelligent excavator[C]. 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2011, 2011.
- [15] YAJIMA R, KATSUMA S, SUZUKI M, et al. Development of an excavator-avoidance system for buried pipes [J]. Advanced Robotics, 2021, 35 (23): 1468-1483.
- [16] 赵莹, 石为人. 一种空间机械臂末端接触力建模与算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1780-1788.
ZHAO Y, SHI W R. A kind of modeling and algorithm based on the contact force of space manipulator end[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1780-1788.
- [17] 陈望隆, 杨述焱, 胡权, 等. 面向运动力学测量的无线六维力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 129-136.
CHEN W L, YANG SH Y, HU Q, et al. Wireless six-dimensional force sensor for motion mechanics measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 129-136.
- [18] 叶泉, 王建华. 基于 D-H 参数的 ABB IRB2600 机器人运动学分析与仿真[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(5): 114-117.
YE Q, WANG J H. Kinematics analysis and simulation of ABB IRB2600 robot based on D-H parameters [J]. Machine Building and Automation, 2022, 51 (5): 114-117.
- [19] SCHERZINGER S, ROENNAU A, DILLMANN R. Forward dynamics compliance control (FDCC): A new approach to cartesian compliance for robotic manipulators[C]. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2017: 4568-4575.
- [20] WU Z, CHEN Y, XU W. A light space manipulator with high load-to-weight ratio: System development and compliance control[J]. Space: Science & Technology, 2021.
- [21] 张浩杰, 苏治宝, 苏波. 基于深度 Q 网络学习的机器人端到端控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 36-43.
ZHANG H J, SU ZH B, SU B. End to end control method for mobile robots based on deep Q network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 36-43.
- [22] 蒋化南, 张帅, 林宇斐, 等. 基于 MPI 的分布式并行 Gazebo 仿真优化与测试[J]. 计算机科学, 2021, 48(S2): 672-677, 692.
JIANG H N, ZHANG SH, LIN Y F, et al. Simulation optimization and testing based on gazebo of MPI distributed parallelism [J]. Computer Science, 2021, 48(S2): 672-677, 692.
- [23] KALAPODIS N, KAMPAS G, KTENIDOU O J. A review towards the design of extraterrestrial structures: From regolith to human outposts[J]. Acta Astronautica, 2020, 175: 540-569.
- [24] ZHANG T, ZHANG Y, XU K, et al. Robotic drilling tests in simulated lunar regolith environment[J]. Journal of Field Robotics, 2021, 38(8): 1011-1035.
- [25] ZHANG J, DING Y, CHEN L, et al. A sweeping and grinding combined hybrid sampler for asteroid sample return mission [J]. Acta Astronautica, 2022, 198: 329-346.
- [26] 徐成, 行芳仪, 赵宝生. 冲击挤密式月球表面钻探潜孔器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(11): 9-16.
XU CH, XING F Y, ZHAO B SH. Design of a penetrator for lunar surface drilling [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(11): 9-16.

作者简介



赵子弈, 2023 年于东南大学获得学士学位, 主要研究方向为机器人传感与控制技术。

E-mail: millsrain@163.com

Zhao Ziyi received his B. Sc. degree from Southeast University in 2023. His main research interests include robotic sensing and control technology.



宋爱国(通信作者), 分别在 1990 年于南京航空航天大学获得学士学位, 1993 年和 1996 年于东南大学获得硕士学位和博士学位, 现为东南大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器人感知与遥操作机器人技术、信号处理及仿生智能计算等。

E-mail: a. g. song@seu.edu.cn

Song Aiguo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1990, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Southeast University in 1993 and 1996, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Southeast University. His main research interests include robot sensing and teleoperation robot technology, signal processing and bionic intelligent computing, etc.