

基于 OpenHaptics 的六自由度串联机器人实时控制^①

李大为

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 随着串联机器人技术的发展, 通过计算机编程实现的多种人机交互的机器人控制方法成为一个新的研究热点. 对触觉输入输出设备、六自由度串联机器人的物理结构、通讯方式及编程接口进行研究, 使用 Geomagic 公司的触觉输入输出设备 Geomagic Touch 为人机交互信息采集设备, 利用设备配套的 OpenHaptics 编程套件, 通过 UR10 机器人及其控制脚本 URScript, 构建了一个六自由度串联机器人的实时控制系统.

关键词: 优教机器人; 串联机器人; 人机交互; 力反馈设备; 实时控制

Real-Time Control of 6-Degrees of Freedom Serial Robots Based on OpenHaptics

LI Da-Wei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: With the development of the technology of serial robots, multiple human-computer interaction control methods through computer programming is becoming a new research hotspots. This article conducts research on physical mechanism, communication and programming interface of haptic input/output device and 6-degrees of freedom serial robots, using Geomagic Touch haptic input/output device producing by Geomagic cooperation. By using OpenHaptics programming interface and UR10 robots to control script language, we construct a real-time control system of 6-degrees of freedom serial robots.

Key words: universal robots; serial robot; human-computer interaction; openhaptics; real-time control

1 引言

1.1 研究背景

1959 年, 第一台真正意义的“机器人”诞生于美国 Unimation 公司. 历经 50 多年的发展, 串联机器人技术和应用在日本、美国、欧洲等一些国家已经基本发展成熟, 串联机器人技术不仅已经在传统工业领域已经得到了广泛的应用, 在航空航天、海洋开发、军工装备制造等领域也有着较好的发展势头. 随着工业 3.0 向工业 4.0 时代的过渡, 工业自动化向着网络化、智能化方向发展. 而人工智能、人机交互等技术也必将会与机器人技术越来越紧密地结合^[1-5].

工业机器人大多数采用封闭式的控制系统, 机器人控制系统本身并不对外开放, 对机器人的控制使用机器人本身提供的示教系统进行脚本编程, 机器人按

照脚本语言提供的指令完成预期规划的动作. 机器人使用示教系统完成的运动是固定的, 人们为了达到实时控制的目的, 通常采用摄像头、力传感器、二维控制杆、按键等作为信息采集设备^[6-11].

本文所构建的系统使用 Geomagic 公司生产的 Geomagic Touch 六维关节式触觉输入输出设备作为信息采集设备, 这种设备的结构与六自由度串联机器人相对接近, 可以采集到六维空间位姿坐标及空间运动中的速度、加速度等运动学数据, 使用这种信息采集设备对机器人进行实时控制, 操作方便、直观, 并且由于结构的接近, 采集到的运动学数据是简单使用视觉、力学传感器所无法相比的.

1.2 OpenHaptics 编程套件

OpenHaptics 是 Geomagic 公司对其触觉输入输出

① 基金项目: 国家自然科学基金(11302222)

收稿时间: 2016-02-24; 收到修改稿时间: 2016-03-22 [doi: 10.15888/j.cnki.csa.005397]

设备提供的上位机编程接口。该编程接口分为 HD-API 和 HL-API 两部分,其中 HD-API 为设备的底层接口,能够通过回调函数直接访问设备状态查询表中的各种设备的实时参数,而 HL-API 的设计与基于状态机形式的 OpenGL 更加类似,能够对旧有的 OpenGL 代码更大程度的重用。本系统采用的 OpenHaptics3.3.0 版本,在原有 HD-API 和 HL-API 基础上还提供了 QuickHaptics Micro API,该接口对设备输入输出参数的调用,模型及指针的创建较 HL-API 进行了更大幅度的封装,能够更加快速高效的建立应用程序的基本框架^[12]。由于本系统是对串联机器人实物进行操作,不需要依赖仿真模型,而且基于对实时性的要求,选择了更加底层的 HD-API 编程接口进行编码。

1.3 UR10 串联机器人

UR10 六自由度串联机器人,由丹麦创新公司 Universal Robots 生产,负载 10kg,工作半径 130cm,近年来被广泛应用于工业生产制造及机器人研究领域。UR10 机器人由 6 轴串联机械臂及下位机控制箱两部分组成,其中下位机可以通过 RJ45 网线与上位机相连,上位机通过 TCP/IP 协议将控制指令以 URScript 脚本语言规定的控制格式传输给下位机控制箱^[13],以达成对机器人实时控制的目的。在控制过程中,下位机控制箱会将机器人状态的实时数据按照一定的格式不断发送给上位机,上位机可以通过解析该数据包,得到机器人位置、速度、加速度等实时数据,并通过这些反馈数据对控制指令闭环补充。

2 系统分析

2.1 系统搭建

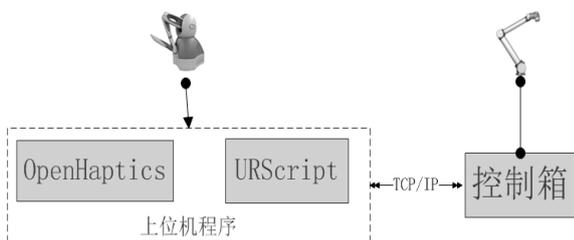


图 1 硬件构成

如图 1 所示,上位机通过 OpenHaptics HD-API,以 1000hz 的频率获取 Geomagic Touch 的位置、姿态、关节角、末端速度、关节角速度等实时信息,对获取的信息进行处理以位置或速度控制的方式组织 URScript

脚本,以 Socket 链接的方式发送给下位机控制箱,控制箱控制 UR10 机器人运动,并将 UR10 的位置、速度、加速度等信息反馈给上位机,上位机对 Touch 及 UR 的反馈信息进行闭环控制,持续不断发送控制信息给控制箱,控制机器人实时运动。

在系统搭建过程中,需要在上位机安装 Geomagic Touch 设备的驱动程序,并在驱动程序中对设备进行初始化设置。UR10 机器人控制箱与上位机通过网线连接,使用 TCP/IP 协议通过 30001-30003 端口通信,并且需要将上位机 IP 设置与控制箱在同一网段。

2.2 人机交互分析

人机交互(Human-Computer Interaction, 简称 HCI)是研究人与计算机或电子、机械等系统通过相互理解的手段进行交流或通信,为人们完成信息的收集、处理进而完成一定工作,使系统更好的成为人类生产活动的助手的一门学科。

为了实现对 UR10 机械臂实时操控的目的,我可以采用的人机交互手段有以下几类:

- 1) 基于键盘的字符输入
- 2) 基于鼠标、控制杆等的 2D 图形输入
- 3) 基于多媒体设备的声音、视频采集输入
- 4) 基于六维力反馈设备的 3D 图形输入

其中采用键盘输入的方式能够很好地量化机械臂运动的位移、速度、加速度等数据,但由于交互方式的缓慢,缺乏很好地对数据进行实时处理的手段,因此不能达到实时操控的目的。

而采用鼠标、控制杆等 2D 输入设备,虽然能够较好的实现数据的实时采集,不过由于原理及结构的限制,不能较为形象的进行 3D 空间的平动及转动的数据输入。

采用多媒体设备进行输入,尤其是 Kinect 等视觉采集设备,能够很好的收集手势、体态等实时信息,也能够较友好的实现人类的输入,不过对于运动信息的采集往往是趋势上的,采集的数据精确程度存在的问题。还有视觉信息采集设备对于平动的信息采集较为直观,但是如果采集转动数据,则需要比较复杂的图像处理技术。因此采用此类设备实时控制机器人也是不合适的。

本文中采用的 Geomagic Touch 六维触觉输入输出设备作为人机交互设备,该设备与 UR10 机器人同为六维机械结构,结构上较为相近,信息的对应非常直

观. 该设备可以以 1khz 的频率采集三维空间内的末端平动及转动数据, 较好地满足实时控制 UR10 机器人的信息输入要求. 而且该设备能够精确的采集运动输入的位移、速度、加速度等信息, 可以精确的控制机器人的运动.

3 实现细节

程序的编写采用 VS2010 的 VC 环境. 程序的运行流程图如图 2 所示, 首先调用 OpenHaptics 编程套件相关函数初始化 Geomagic Touch 设备, 然后初始化 Socket 套接字客户端与 UR10 服务器建立连接, 接下来进入读取 Touch 设备数据, 数据处理和发送 URScript 控制指令循环, 不断完成 Touch 数据, UR 反馈数据与 UR10 控制指令的实时对应, 并发送给 UR10 控制箱, 以完成对 UR10 机器人的实时控制.

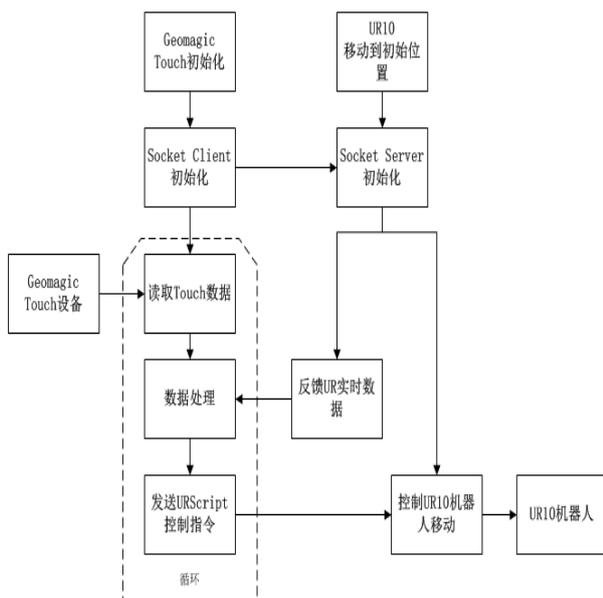


图 2 硬件构成

3.1 系统搭建

URScript 的控制脚本可分为笛卡尔坐标空间及关节坐标空间的位置控制模式和速度控制模式, 如表 1 所示^[14].

表 1 URScript 控制指令

指令	格式	描述
move1	<i>move1(pose,a,v,t)</i>	笛卡尔空间的位姿控制
movej	<i>movej(q,a,v,t)</i>	关节空间的位姿控制
speed1	<i>speed1(xd,a,t)</i>	笛卡尔空间的速度控制
speedj	<i>speedj(qd,a,t)</i>	关节空间的速度控制

其中 pose 为(x,y,z,rx,ry,rz)组成的六维位姿六元组, q 为六维关节空间的六个关节角的角度, xd 为六维位姿的速度六元组, qd 为关节空间的关节速度六元组, a 为加速度, v 为速度, t 为时间.

move1 和 movej 位姿控制指令能够精确定位到指定的位姿, 但位姿和关节的运动速度变化较大, 原因是指令是控制机器人按照指定加速度加速到指定速度, 然后降速到 0 的一个过程. 如果采用位姿控制指令, 当传送指令的频率很高时, 速度变化将会非常陡峭, 导致机器人运动产生严重的抖动.

而 speed1 和 speedj 速度控制指令, 是控制机器人按照指定加速度加速到指定速度, 然后运动时间 t 或者到接收到新指令为止, 速度变化会较为平滑, 可以很大程度上避免位姿控制指令出现的抖动问题. 但我们获得并发送的速度信息是离散的数据, 实际控制中会产生漂移现象, 导致控制定位不准确.

笔者分别使用 URScript 的几种控制指令进行测试, 如图 3. 实验中, 笔者分别使用 movej 和 speedj 指令控制 UR10 机器人的最末端关节按照时间的正弦函数运动, 并按照 1hz 的频率获得 UR10 的末端关节的角速度反馈数据. 实验中可以看出位姿控制指令 movej 的角速度波动要远远大于速度控制指令 speedj.

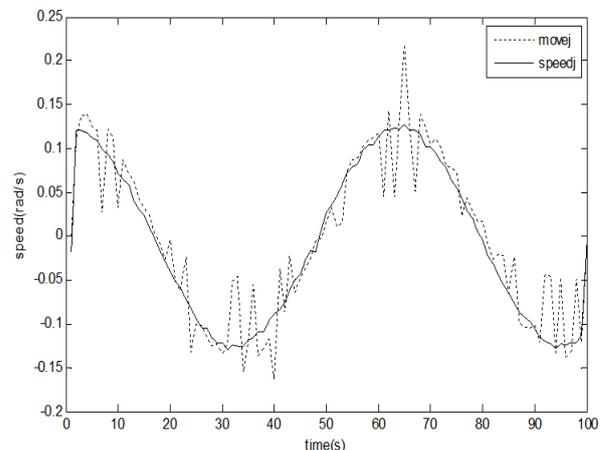


图 3 URScript 控制模式对比

表 2 速度控制模式位移误差(单位: m)

	预期位移	实际位移	位移误差
平缓	0.27032	0.26921	0.00111
曲线(慢)	0.28743	0.28331	0.00412
曲线(快)	0.30497	0.29672	0.00825
折线(慢)	0.25651	0.24995	0.00656
折线(快)	0.15765	0.14832	0.00933

如表 2 所示, 笔者分别以较平缓的运动, 慢速及快速的曲线及折线运动测试速度控制模式的位移偏差(此处没有考虑位移的方向), 其中实际位移来源于 UR 机器人的反馈数据, 预期位移由 Touch 设备的输入数据坐标转换后计算而得. 可以看出即使是较平缓的运动, 速度控制模式带来的位移偏差也达到了 mm 量级, 远大于位移控制模式的定位精度(0.1mm).

使用 speedl 和 speedj 速度控制指令造成的误差主要来源于以下两个方面:

1) 以离散化的瞬时速度数据近似描述 Δt 时间内的速度, 忽略了 Δt 时间内的速度变化, 从而产生了位移的误差积累.

2) 如图 4 所示, 假设 $t1$ 时刻 UR 机器人的瞬时速度为 $v1$, 此时使用速度控制指令 speedl 传入速度 $v2$, 并使其运动时间 Δt . 在 Δt 时间内, 机器人会按照给定加速度加速到速度 $v2$, 然后按照速度 $v2$ 匀速运动. 其中 $v2 * \Delta t$ 是我们对 Δt 时间段的预期位移, 忽略了加速期间的位移偏差, 图中的阴影部门即我们使用速度控制指令产生的位移误差积累

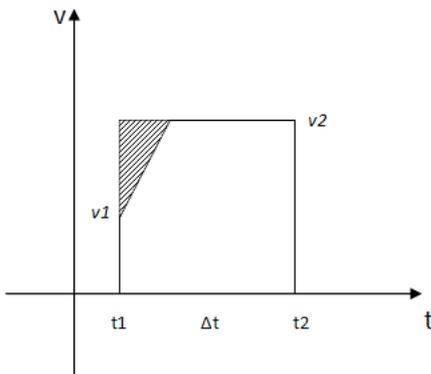


图 4 速度控制模式位移误差

基于以上两点, 为了校正速度控制模式产生的位移积累误差, 本文采用以下算法周期性地对误差进行弥补.

算法 1 位姿闭环算法

```

counter=0;//循环计数器
while{
    tbegin;
    getTouchInfomation();//读取 Touch 设备信息
    im=InformationHandler();//信息处理坐标对应等
    SendToUR(speedl(im));//向 UR 发送 speedl 指令
    tend;

```

```

counter+=1;
t= t_end; t_begin;//计算系统耗时
sleep(0.01-t);
if(counter==1000){
    getURFeedback();//读取 UR 反馈信息
    im=FeedbackCompare();//反馈信息与预期信息
    比较
    SendToUR(movel(im));//向 UR 发送 movel 指令
    counter=0;
}
}

```

算法 1 是对系统所采用的位姿闭环算法的伪代码描述, 结合位姿控制指令和速度控制指令的优缺点, 本系统采用了一种速度控制指令结合反馈信息, 并利用位姿控制指令达到位置闭环的算法. 算法中, 为了防止实时控制的抖动, 以 100hz 的频率使用 speedl 指令向 UR10 控制箱发送速度控制指令, 并以较低频率获取 UR10 的位置反馈数据, 并与 Geomagic Touch 经过坐标变换后的实时位姿进行对比, 并通过 movel 指令补足运动的漂移误差.

3.2 Touch 设备数据获取

通过 OpenHaptics HDAPI, 我们可以获得位置速度、加速度、关节角等几十种设备参数, 表 3 中列出了本系统所使用的四种参数^[15].

表 3 Touch 设备参数

参数名	返回值类型	参数描述
HD_CURRENT_POSITON	DOUBLE*3	当前平动位置信息
HD_CURRENT_VELOCITY	DOUBLE*3	当前平动速度信息
HD_CURRENT_TRANSFORM	DOUBLE*16	当前姿态信息
HD_CURRENT_JOINT_ANGL ES	DOUBLE*3	当前关节角

OpenHaptics HDAPI 由两个主要部分构成: 设备(device)和调度者(scheduler), 其中设备参数可以是 Geomagic 公司生产的任意一种结构的触觉输入输出设备, 而调度者负责与设备使用中的伺服线程相交交互, 进而对设备读取或写入信息.

在设备初始化完毕, 读取 Touch 设备参数时, 为了保证数据访问的一致性, OpenHaptics 提供了一种 Frame 框架结构, 在回调函数中通过 hdGetIntegerv 及 hdGetDoublev 函数读取设备参数时, 要使用 hdBeginFrame 和 hdEndFrame 作为访问的起点和终点.

参数读取时, HDcallback 类型的回调函数将表 2 中的参数读入传入的地址, 然后通过使用 hdScheduleSynchronous 同步调用方法将回调函数读回的数据赋值给相应变量^[16].

为了实现 3.1 节中的算法, 我们需要从 Touch 设备中获取的数据有:

- 1) x,y,z 平移方向的速度
- 2) rx,ry,rz 姿态角变化速度
- 3) x,y,z 平移方向的位移
- 4) rx,ry,rz 姿态角

我们可以直接通过 OpenHaptics HDAPI 的回调函数得到, x,y,z 平移方向的位移和 x,y,z 平移方向的速度, 但是对于 Geomagic Touch 设备, 虽然 HDAPI 提供了姿态角变化速度的访问接口, 但在实际测试中, 我们并不能够通过该接口直接得到 rx,ry,rz 姿态角和姿态角变化的速度.

通过 OpenHaptics HDAPI, 我们可以得到列主序的以等效轴角坐标系表示法描述的 16 元末端姿态数组(参见式 1).

$$R_k(\theta) = \begin{bmatrix} t[0] & t[4] & t[8] & t[12] \\ t[1] & t[5] & t[9] & t[13] \\ t[2] & t[6] & t[10] & t[14] \\ t[3] & t[7] & t[11] & t[15] \end{bmatrix} \quad (1)$$

由式 1 可得:

$$\theta = \arccos\left(\frac{t[0] + t[5] + t[10]}{2}\right) \quad (2)$$

并且:

$$\hat{k} = \frac{1}{2\sin\theta} \begin{bmatrix} t[6] - t[10] \\ t[8] - t[2] \\ t[1] - t[4] \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于 $R_k(\theta)$ 为单位矩阵, 故 \hat{k} 即当前姿态相对于基坐标系的姿态角^[17], 利用差分可近似得到姿态角在 rx,ry,rz 三个方向的速度.

基于上述的方法, 我们通过 HDAPI 可以获得我们需要整理并使用 movel 及 speedl 发送给 UR10 控制箱的所有数据, 而且 Touch 设备数据发送频率为 1000hz, 完全满足我们闭环实时控制算法对于数据频率的需求.

4 结论

本文对触觉输入输出设备、六自由度串联机器人的物理结构、通讯方式及编程接口进行研究, 使用 Geomagic 公司的触觉输入输出设备 Geomagic Touch 为人机交互信息采集设备, 利用设备配套的

OpenHaptics 编程套件, 通过 UR10 机器人及其控制脚本 URScript, 构建了一个六自由度串联机器人的实时控制系统.

笔者使用本文所描述的位姿闭环算法, 使用 Touch 设备控制 UR10 机器人进行随机运动测试. 如图 5 所示, 图中分别对随机运动过程中的三自由度平动速度和三自由度转动速度进行采样, 可以看出虽然使用 movel 位姿控制指令对机器人运动的误差进行闭环补足, 但由于误差积累相对机器人整体运动的幅度相对较小, 在随机运动的速度采样中, 并没有表现出明显的速度波动, 各自由度的速度变化波动也比较平缓. 由于采用了 movel 控制指令, 保证了 UR10 机器人的控制精度(0.1mm). 因此本方法既克服了位姿控制指令抖动的问题, 又在运动过程中补足了设备运动的精度.

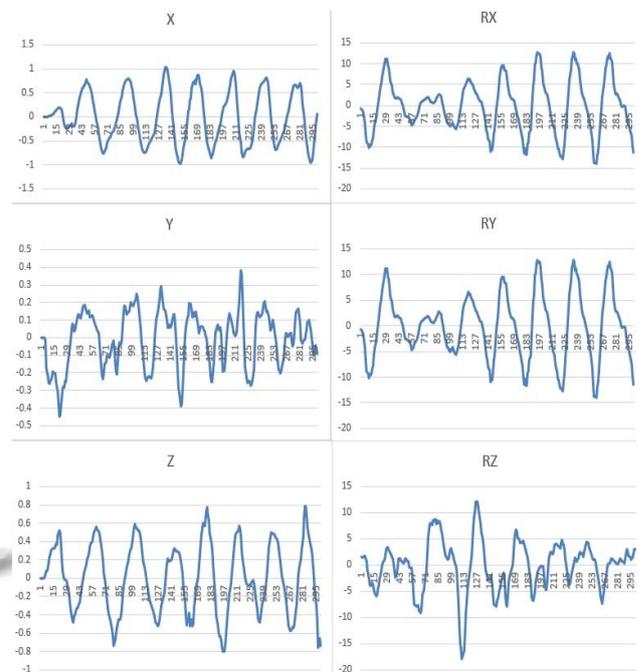


图 5 系统随机运动实验

图 6 为系统构建实际图片, 在硬件结构搭建完成后, 本系统综合了 UR10 机器人开放的两类控制指令的优点和缺点, 使用一种高频速度指令结合低频位姿指令进行位置闭环的方式, 达到了机器人实时控制中运动流畅并定位相对精确的目的, 具有较强的工程指导意义.

本文所使用的控制指令 movel 和 speedl 都是在笛卡尔坐标系下的控制指令. 如果在实现过程中需要替代 UR10 控制系统内置的位姿解算算法, 也可以使用

关节坐标空间的控制指令 `movej` 和 `speedj` 对 UR 机器人的关节角直接进行控制。



图6 系统实际构建图

参考文献

- 1 计时鸣,黄希欢.工业机器人技术的发展与应用综述.机电工程,2015,32(1):1-13.
- 2 孙英飞,罗爱华.我国工业机器人发展研究.科学技术与工程,2012,12(12):2912-2918.
- 3 刘松国.6 自由度串联机器人运动优化与轨迹跟踪控制研究.杭州,浙江大学,2009.
- 4 赵泊禄,谈英姿.机器人控制软件的发展与研究现状.工业控制计算机,2014,27(4),108-110.
- 5 邓黎明,赵现朝,等.开放式步行机器人实时控制系统研究.机械设计与研究,2014,30(3):29-33.
- 6 Dong PI, Chanhun P, Jinho K. Design and analysis of direct teaching robot for human-robot cooperation. IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. 2009. 220-224
- 7 董士海.人机交互的进展及面临的挑战.计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(1):1-13.
- 8 杨东方,王仕成,刘华平.基于系统的场景建模与机器人自主导航.机器人,2012,34(5):581-589.
- 9 刘昆,李世中,王宝祥.基于 UR 机器人的直接示教系统研究.科学技术与工程,2015,15(28):22-26.
- 10 王松林.基于的手势识别与机器人控制技术研究[硕士学位论文].北京:北京交通大学,2014.
- 11 Li Y, Zhang Y, Ye X, Zhang SY. Haptic rendering method based on generalized penetration depth computation. Signal Processing, 2014, 120(2016): 714-720.
- 12 3D Systems. OpenHaptics Toolkit API Reference Guide. <http://support1.geomagic.com>. 2015.
- 13 Universal Robots. Universal Robots Manual. <http://www.universal-robots.com>. 2013
- 14 Universal Robots.The URScript Programming Language. <http://www.universal-robots.com>.
- 15 3D Systems. OpenHaptics Toolkit Programmers Guide. 2015, <http://support1.geomagic.com>.
- 16 Itkowitz B, Handley J, Zhu WH. The OpenHaptics toolkit: A library for adding 3D touch navigation and haptics to graphics applications. Proc. of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. 2005.
- 17 Craig JJ. Introduction to Robotics Mechanics and Control. 3rd Ed.北京:机械工业出版社,2006.