

文章编号: 1002-0446(2000)04-0282-07

手控器的性能和评价方法*

宁 祎

(郑州工业高等专科学校机器人研究所 450007)

摘 要: 手控器是主从遥操作系统的关健设备,它不仅是从机械手进行实时运动控制的输入设备,而且是从机械手与未知环境之间的相互作用力提供给操作者的力觉遥现装置,是人与机器人之间建立紧密动态耦合的重要接口.因此,其性能的好坏,直接影响遥操作系统的操作性能.近年来,在手控器研制方面的文章已发表不少,但很少涉及对手控器进行评价的方法和量化指标.这种目标的模糊性必然造成某些设计上的盲目性.本文作者在总结多年来对手控器研制和试验工作经验的基础上,试图对这个问题进行比较深入的探讨,初步提出了一套评价方法和量化指标.

关键词: 遥控机器人;手控器;评价方法;评价指标

中图分类号: TP24

文献标识码: B

1 引言

在机器人遥操作系统中,手控器作为人与机器人之间的一个重要的人机接口,是人们感知操作环境,并完成对遥控机器人进行控制的重要的中间信息媒介.一方面它可以向操作系统传送位置、姿态、速度和力等多种信息;同时可以接收控制系统发来的力/力矩等环境信息,以便为操作者提供力觉临场感;操作者的手指还可以传达一些附加命令,实现对机器人系统的有效干预和控制.这种实时操作的形象性、直接性、连续性和力觉临场感,使操作者与机器人之间建立了一种紧密的动态耦合.与计算机键盘操作或用操纵杆操作形成鲜明的对比,使系统操作更简捷、更方便.手控器性能的好坏,将直接影响整个遥操作系统的执行性能、系统可靠性及其对各种作业的实用性.因此,开展手控器的研究工作,是发展遥控智能机器人的关键技术之一.

到目前为止,介绍遥操作手控器研制的文章已发表不少,但深入探讨手控器评价方法和量化指标者甚少.这种理论上的不完善难免会导致某些设计上的盲目性.本文作者在总结多年来对手控器研制和试验的基础上,试图对这个问题进行比较深入的探讨.

2 手控器的主要技术性能与设计准则

2.1 手控器设计的基本要求

手控器作为主机械手,与从机械手(可根据操作用途选择各种机器人)组成遥操作系统的装置,主要有以下用途:一是用于恶劣环境下遥控操作,以保护操作者的血肉之躯免受其害,比如核工业领域、航天领域、海洋探索、地下开采、防暴、排雷及某些军工行业;二是用于被操作的工件需要保护的环境下,即要求被操作的工件或其环境与操作者避免接触或不被操作环境所污染,如生物医学领域;三是用于那些环境和操作者都没有特殊要求,但人的能力所不

* 基金项目:国家 863 计划航天领域支持项目(863-2-4-1-17).

收稿日期:1999-10-29

能及的操作,如在医学领域,可以用手控器控制微型机器人进入人的器官完成某些手术.在石油工业领域,也可以控制小型专用机器人进入石油管道进行探伤和维修;四是用于改善人的操作性能,如动眼科手术,需要把手术刀与眼部的作用力放大到医生能明显感知的程度,同时把医生的手部运动适当缩小,以提高手术刀与眼部接触部位的相对运动精度,也可以用一个小型手控器控制一个大型机械手,把人的操作力放大,以灵活地完成对大型工件的遥控锻压操作;五是作为人机接口,实现人与机器之间的一种和谐的动态耦合,给人造成一种沉浸感,如虚拟现实和遥现技术.

就空间遥控智能机器人的应用来说,可用于由地面人员或舱内人员控制航天操作器(从机械手)对不载人的轨道飞行器进行维修;由地面有关领域的科学家对空间环境下的实验进行遥控操作,从而减少对宇航人员进行培训及维持载人宇航的巨额开支,并使太空实验揭开其神秘的面纱;由轨道飞行器上的宇航员对不载人的登月探索或不载人的行星探索进行遥控;甚至还可由地面上的人员利用这种遥操作系统来控制飞行器的月球飞行或星际飞行.空间遥控智能机器人手控器的应用,可以说是上述数种基本用途或全部用途的综合.

对空间机器人的遥操作,是一种真正意义上的遥控.空间机器人手控器作为唯一的一个不可缺少的双工人机接口.因此,要求空间遥控机器人手控器应重点保证两个功能,一方面对异地机器人与环境的相互作用进行实时本地遥现,为操作者提供如临其境的力觉临场感,使之获得进行决策的重要依据;另一方面,可以对操作者手部的位置和姿态准确地进行测算,并实时地传递给异地从机器人操作机,使之再现操作者手部的相应动作,为实现人对机器人的直接干预提供手段.

2.2 手控器的设计准则

对目前国际上已经投入使用的主从式遥控机器人的应用情况进行分析可知,手控器的操作性能是遥操作技术上的瓶颈^[1].作为一个人机接口,手控器必须具有对从机械手与未知环境作用信息的高保真感知和把操作员手部运动准确地测量和传输给从机械手的基本功能.为了满足使用上的需要,手控器的设计应遵循以下几个一般性准则:

① 手控器的结构应能从机械上解耦,简化运动学和动力学的解算工作量.对空间遥控机器人来说,一是控制回路存在着较大的信息时延;二是其运动学、动力学正逆解算工作量比一般工业机器人要大得多;三是尽管目前已有高速运算芯片不断问世,但在空间特殊的环境下,这些芯片不一定都能适应.因此,简化计算工作量对空间遥控机器人的实时控制就显得重要.

② 机械手的结构应减少(最好消除)非线性因素对关节力矩控制的影响,以提高力/力矩控制的精度,为操作者提供高保真的力觉临场感^[2].

③ 为了保证力觉临场感在手控器的工作空间各向同性,手控器在各个位姿下的惯性参数的分布应比较稳定,差别不大^[3,5].

④ 具有足够的机械刚度、低惯性和低摩擦的关节结构.

⑤ 应尽量采用直接驱动,缩短传动链,以提高传动精度改善频率响应和力控制精度^[2].

⑥ 具有供操作员进行多项操作转换的功能.

由于上述各项准则有不少是相互制约的,这就给设计时对某些特性作出正确选择带来了一定困难.因此,必须对各项指标进行深入研究,进一步明确究竟做到何种程度才算合适,也就是说,必须有一个量化的指标.

2.3 主要技术指标

① 光电编码器线数的确定

对于手控器来说, 安装在各关节处的光电编码器是对操作者手部运动的实时检测装置, 其线数的确定应与对位置分辨力的要求相适应. 并不是分辨力越高越好. 分辨力过低, 将影响从手对主手的跟踪精度, 分辨力过高, 将使制造成本增加, 没有必要. 具体应该如何选择分辨力才算合适? 这是一个值得深入探索的问题.

既然手控器的运动主要是反映操作者手部的运动, 也就是说, 各关节的光电编码器实际检测的是操作者手部的运动, 那么, 各关节光电编码器的分辨力的确定, 应以人操作时手部可控制的最小位移为依据. 从人机工学的角度来看, 在正常情况下, 人手可以直接控制的最小位移不会小于 0.1mm , 只要光电编码器反映到操作者手部的位移分辨力能够达到这个值, 就可以满足使用要求. 若分辨力大大超过这个数值, 已经毫无意义. 根据这种思路, 如果手控器腕部三轴汇交, 操作时操作者手握手柄的着力点与三轴汇交点的最大半径 R 为 30mm , 对于直接驱动关节来说, 光电编码器的线数应为: $2\pi R/0.1 \approx 1885$ (线), 选择 2000 线已经足够. 对于操作时手心到关节轴线的操作半径 R 为 300mm 的直接驱动单关节, 光电编码器的线数应为 $2\pi R/0.1 \approx 18850$ (线). 对于多关节手控器各关节光电编码器的线数, 应按照手心位移 0.1mm , 通过手控器运动学逆运算来确定. 对于运动学参数比例因子可调整的手控器来说, 光电编码器的线数选择不受上述数值的限制, 其选取比较灵活.

② 手控器的力觉遥现范围

手控器的力觉范围的确定, 应以改善遥操作系统的操作性能为依据. 这个力如果太大, 操作者将感觉很笨重, 容易产生疲劳, 影响操作的灵活性. 如果这个力太小, 操作者对从机械手与环境的相互作用将难以感觉, 因而影响大脑决策, 不敢大胆操作, 同样影响操作的灵活性. 据统计, 美、英、法、德等工业比较发达国家早期研制的工业用主从式机器人的主机械手的最大反馈力值平均为 75N (17 磅)^[4], 这个数值是从机械连接主从机械手沿袭而来的, 在使用中操作人员易产生疲劳. 近几年国外新研制的灵巧型手控器的最大反馈力一般取为 $10\sim 25\text{N}$. 笔者认为, 手控器的最大反馈力的确定应与手控器的力觉灵敏度有关. 对于摩擦力和惯性较大的手控器, 这个力值应选大一点, 对于摩擦力和惯性较小的手控器, 可适当取小一些. 换句话说, 手控器的摩擦力和惯性的大小, 与当前设计和制造技术水平有关, 因而, 对手控器的最大反馈力的选择, 实际上受技术上的制约. 一般来说, 应使操作者能明显区分所操作任务的力觉信息, 又使操作力处于人常规操作最敏感、操作舒适、不感疲劳的范围.

③ 手控器的位置精度

手控器位置精度的确定与其位置分辨力和手控器的使用要求有关. 这里取为 $\pm 0.1\text{mm}$.

④ 手控器的频率响应

研究表明^[4], 直接用手进行操作时, 操作者通过手部神经系统接收到的信号频率大约为 $0\sim 100$ 周/s 或 $0\sim 1000$ 周/s, 一般间接传动手控器的频率响应仅为 10 周/s 左右. 要想进一步改善手控器的动态品质, 提高其高保真的力觉临场感性能, 就必须在技术上采取措施, 将频率响应提高到 $0\sim 100$ 周/秒左右.

⑤ 手控器的力觉阈值

手控器的力觉阈值即零位附近的力觉分辨力, 它的大小, 与手控器的机械结构、摩擦力及手控器的惯性值有关, 也与手控器的控制方式有关. 由于人手对力的感觉阈值比手控器的力觉

阈值要小得多,所以,减少手控器的力觉阈值在目前来说还是手控器设计上追求的一个目标.从这个意义上来说,力觉阈值越小,手控器的最大反应力可取得越小(或者最大反应力不变,使力反应范围扩大),操作性能越好,造价也越高.

⑥ 手控器的快速特性

对于双向力控制的主从式机器人,其手控器的运动,是由各关节电机驱动的.在这种情况下,手控器末端的移动速度受电机传动速度的制约.而这个速度的确定,必须能够满足操作者最大操作速度的需要.如果这个速度低于人的操作速度,不仅影响手控器的操作性能,而且由于人要拉着手控器走,这种附加的拉力会使操作者误认为是由从机械手反馈来的力,从而影响手控器的力觉临场感.根据人手不疲劳操作的最大速度,确定手控器末端最大速度不小于 24m/m in. 如果采用力、位置控制的主从式机器人,手控器无力传感器,这种手控器的各关节反向驱动一般比较灵活,是由操作者拉着运动,电机的驱动仅产生力感觉,因此,不必规定手控器末端最大速度.

⑦ 手控器的各向同性

各向同性主要指的是手控器在任何位置和姿态下动力学参数的一致性,如摩擦力、重力和惯性张量在不同位姿下的一致性.特别是惯性张量的一致性,它是手控器位置的函数.其较大的变化,会引起同样大小的反馈力在不同位置给人造成不同的感觉.

2.4 工作模式与辅助功能

根据使用要求,手控器必须具有多种工作模式,才能有效改善其遥操作性能^[8].遥操作有两个分离的现场:一个是机器人操作现场,通常称为远地现场;一个是操作员控制现场,通常称为本地现场.操作员在本地现场对远地现场的机器人进行遥控操作,通常有 4 种模式:

2.4.1 MS 模式(Master-slave control mode)

MS 模式一般用于复杂的、精密的控制任务.因为在这种模式下,手控器与从机械手工作在具有力觉临场感的双向力控制状态,操作者与机器人之间完全处于一种动态耦合之中.这是手控器的一个主要工作模式.为了保证 MS 模式的有效操作,必须配套设置两个附加功能:

① 比例因子调整功能

为了扩大手控器遥操作的使用范围,应设置两个可调整的比例因子.一个是由从机械手反馈到手控器的力反应比例因子,无论从手与环境的相互作用力处于什么样的数量级,我们都可以将其调整到操作者感觉最佳的力觉范围;另一个是由手控器传递到从手的运动参数比例因子,以适应从手对运动参数和运动精度的要求.由于这两个比例因子的调整一般在一批任务操作之前进行,为了减少手柄上按钮太多可能带来的误操作,故由键盘操作来实现.

② 坐标原点重置(Lim p)功能

今天的手控器大多采用异构型配置,手控器和从手的结构尺寸无多大关系,其配置比较灵活.在手控器设计时,完全可以根据人机工程学的要求和需要使用上的需要,进行紧凑性、宜人性的结构设计.采用这种配置型式,虽然操作者可以在比较舒适的工作范围内用手控器进行操作,但其工作范围,不能覆盖与之组成遥操作系统的各种从手的全部工作范围.为了解决这个问题,手控器必须配置坐标原点重置(Lim p)功能.即在手控器的操作手柄上设置一个坐标原点重置开关.按下此开关从手在原来位置保持不变,而手控器可以自由退回,当该开关复位时,手控器就可以在新的起点上控制从手在原来位置的基础上继续动作.利用这个功能,一个灵巧型的通用手控器可以覆盖所控制任何从手的全部工作空间.

2.4.2 JS 模式(Joystick control mode)

在操纵杆模式,从机械手端部的运动速度与手控器腕部的受力成正比.而手控器的位置,则由其伺服系统定位.这种模式主要用于控制大型机械手或者用于控制从机械手的粗定位.JS 模式实际上也是基于双向控制.从机械手跟随内部虚拟从手的运动.而手控器被伺服定位,通过保持内部虚拟主手的输出值不变来实现.此外,从手不可能使任务过载.因为从机械手的运动位置,使主从手间的力保持平衡.

2.4.3 自主模式

自主模式是由计算机生成命令使机器人运动.为了减轻操作者的工作量,对于遥操作过程中的部分环境已知的固定操作,可以由机器人自主完成.自主命令的生成可以由手控制系统在远地现场进行,也可以由手控器控制系统在本地现场完成.

2.4.4 监控模式

监控模式既可手动控制,也可计算机控制.监控模式又分为监控自主方式(Supervised Autonomy)和复合控制方式(Shared Control 也叫分享控制).其区别在于操作员发出指令的特点不同.在复合控制方式下,操作员是在机器人运动中发出手动命令,并且与计算机发出的自动命令混合起来进行控制.在监控自主方式下,操作员通过交互方式生成自主命令,这些命令通常要经过存储、仿真和修改后才付诸执行.命令先经过仿真和修改,证明没有问题时再执行,大大提高了遥操作的安全可靠性.

3 对手控器基本性能的评价方法

3.1 对手控器位置精度的评价

为了提高手控器在 MS 模式下对从机械手的控制精度,手控器必须准确获得操作者手部的运动参数,并实时传递给从机械手.因此,了解手控器通过各关节光电编码器对其腕部位置参数测量的精度,是对手控器的位置精度进行评价的一项重要内容.可以通过下述实验来评价:

- ① 在手控器的腕部(机械手末端)固定一根钢针,用以指示手控器的空间位置;
- ② 在工作空间内选择一个平面(如 XY 平面),在该平面内设置一张由绘图机按实际比例精确绘制的方格纸,以保证手控器末端位移准确;
- ③ 将手控器的指针对准方格纸的交点,读取手控器各关节光电编码器的读数值,计算出手控器末端的位置坐标;
- ④ 将钢针所指位置与计算值进行比较,确定手控器的位置误差.

3.2 对手控器力觉性能的评价

在手控器的末端安装一个 6 轴力/力矩传感器,并将手柄固定.首先确定实验的理论值,然后根据手控器的数学模型,计算出分配给各关节的指令值.驱动手控器各关节电机,采集力传感器的测量结果.将指令值与实测值进行比较,从而确定手控器的力觉精度.

3.3 对手控器动态性能的评价

评价手控器动态性能的最好方法是用手控器的广义惯性张量椭球.惯性张量是参考坐标系位置和姿态的函数,是描述手控器质量分布的重要矩阵,可用于分析手控器的动力学特性^[5,7].手控器的广义惯性张量可由下式给出:

$$G = R^T H R \quad (1)$$

$$U^T G U = 1 \quad (2)$$

式中, H 为手控器在关节空间的惯性张量; R 为雅可比矩阵的逆阵; G 为手控器的广义惯性张量。(2)式实际上是一个椭球面方程. 一般来说, 在手控器的工作空间内, 如果其广义惯性张量椭球面越接近球面, 就表明该手控器在操作时的动力学特性越好, 在各个方向的操作就越容易. 否则, 手控器的动力学特性就不能达到各向同性, 将直接影响操作者对从手传来的现场力的准确感受.

对手控器进行评价时, 往往把手控器的广义惯性张量椭球面分别向有关坐标平面进行投影. 由于广义惯性张量椭球是位置的函数, 因此可以在手控器的工作范围内的不同剖面, 作出不同位置的惯性张量椭圆曲线分布图, 非常直观地对手控器的动态性能进行评价. 图 1 所示为对一台手控器进行评价时, 在 x - z 平面作出的惯性张量椭圆曲线分布.

3.4 对手控器综合操作性能的评价

① 对手控器综合操作性能的评价一般用时效因子来表示^[9]. 所谓时效因子, 指的是用遥控机器人去完成一项既定工作时所需的时间与人手操作时所需的时间的比值. 也可用相对时效因子(用不同的手控器控制同一个从手完成同一项既定工作所需时间的比值)来进行评价.

用这种方法进行评价的一般实验有两类: 一类是抓取、转移物件和简单的装配操作; 另一类是用不同操作方式完成开关阀门和插上电缆插头等操作.

② 模型跟踪实验. 首先, 在计算机上建立一个虚拟从机械手, 且在屏幕上绘出图 2 所示的几何模型理论曲线. 然后, 由操作者通过手控器控制虚拟从机械手, 跟踪屏幕上的几何模型理论曲线, 并在屏幕上画出其轨迹. 比较理论曲线与跟踪轨迹, 依此评价手控器的操作性能. 用虚拟从机械手代替实际从机械手, 可以剔除实际从机械手的制造、装配及其它动态误差对手控器性能评价的影响, 使评价更加准确.

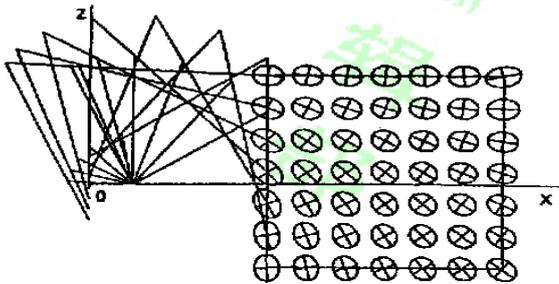


图 1 惯性张量椭圆曲线分布图

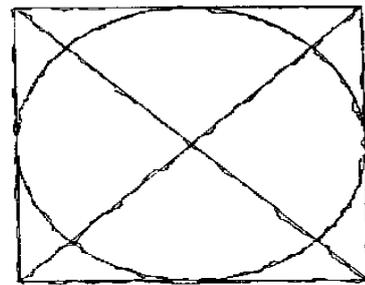


图 2 模式跟踪实验曲线

在几何模型理论曲线中, 水平线和垂直线主要测试手控器在单一坐标方向的跟踪精度; 斜线和圆用来测试手控器多坐标联动的跟踪精度, 间接反映手控器各坐标对摩擦力的补偿精度以及各方向惯性参数的差异.

4 结束语

手控器是遥操作系统中的一个十分重要的人机接口, 是空间遥控机器人的关键设备. 现有的遥操作系统的操作性能之所以受到限制, 手控器是其技术瓶颈. 要深刻认识手控器技术的本质, 确定合理可行的技术指标和评价方法, 进一步改善手控器的操作性能, 涉及到机器人技术、

传感器技术、计算机技术、机械设计与制造技术、电机技术、人机工程学、生物力学和遥现技术等多种技术和学科,还有大量的工作要做.它不仅依赖于相关技术的发展和基础元件制造水平的提高,还有待建立和完善自身的理论体系.当务之急是建立和完善必要的实验系统,在此基础上,进行比较深入的实验研究和理论研究.

参 考 文 献

- 1 Nobuto Matsuhira, Hiroyuki Bamba, Makoto Asakura. The Development of a General Master Arm for Teleoperation Considering Its Role as a Man-machine Interface. *Advanced Robotics*, 1994, 8(4): 443- 457
- 2 Tetsuo Kotoku, Erhard J Husler, Kazuo Taniguchi, Akio Fujikawa. The Development of a Direct Drive Master Arm. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2(6): 463- 470
- 3 Vertut J. Remarks on Manipulator Classification, And Reversibility-Deflection-Backlash-Inertia-Balance And Friction Trade off. RO-MAN-SY-76 Warsaw, 1976
- 4 顾俊仁. 遥控主从机械手. 北京: 原子能出版社, 1982: 19- 20
- 5 Asada H. A Geometrical Representation of Manipulator Dynamics and Its Application to Arm Design. *ASME J Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1983, 105: 131- 135
- 6 Vertut J. Contribution to Define A Dexterity Factor for Manipulator. *Proceedings of 21st Conference on Remote Systems Technology*, 1973: 38- 46
- 7 Arocena J I, Daniel R W. Design and Control of Novel 3-DOF Flexible Robot, Part 1: Design and Evaluation. *The International Journal of Robotics Research*, 1998, 17(11): 1167- 1181
- 8 Yong K Hwang, Sung C Kang. Human Interface Automatic Planning. *Research*, 1998, 17(11): 1131- 1149
- 9 Bejczy A, Salisbury J K. Kinesthetic Coupling Between Operator and Remote Manipulator. *Proceedings of the International Computer Technology Conference, ASME*, 1980. 197- 211

THE PERFORMANCE AND EVALUATION METHOD OF MASTER MANIPULATOR

NING Yi

(Polytechnic Institute of Zheng Zhou 450007)

Abstract: Master arm is a key device for master slave manipulation system (MSMs), It is not only to measure the human operator's arm motion, but also to telepresence the forces the slave arm will receive from the environment during tasks, and is an important man-machine interface for establishing a kinesthetic coupling between operator and telerobot. thus, its performance will directly affect the maneuverability of MSMs. So far, a variety of master arm designs have been developed for teleoperation, but the evaluation method and evaluation index of master arm have seldom been studied. The unclearness of aim will bring about the blindness of design. In this paper, we attempt to explore it based on our experience of development in master arm and offer the evaluation method and evaluation index of master arm.

Keywords: Master slave manipulator, master arm, evaluation method, evaluation index

作者简介:

宁 祎 (1957-), 男, 副教授. 研究领域: 遥控智能机器人, 机电一体化等.