

面向大尺度多任务仿真的力觉交互设备^①戴晓伟^② 张玉茹^③ 王党校 张耀军

(北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室机器人研究所 北京 100191)

摘 要 研制了一种新型的基于绳驱动并联机构的力觉交互设备 iFeel6-BH1500, 该设备采用 8 个电机驱动, 实现了设备操作末端三维力和三维力矩输出。定义了绳驱动力觉交互设备的理想工作空间和实际工作空间, 提出了工作空间的计算方法, 以工作空间为指标比较了两种构型的优劣, 给出了 iFeel6-BH1500 用于飞机发动机虚拟装配的实例。绳驱动并联机构具有工作空间大、构型易重构等优点, 比较适合于面向大尺度多任务仿真的力觉交互应用。

关键词 绳驱动, 力觉交互, 大尺度, 多任务, 虚拟装配

0 引言

目前多数力觉交互设备的机械结构为串联或并联式连杆机构, 如 PHANTOM、Omega、Falcon 等, 工作空间较小, 无法模拟大尺度的力觉交互任务。Fischer 将虚拟环境通过比例缩放来适应力觉交互设备, 其结果是降低了力觉交互的逼真性^[1]。为了使交互任务的尺度不受理觉交互设备的限制, 交互设备的工作空间必须覆盖仿真任务空间。同时, 不同的仿真任务对设备工作空间以及设备输出力/力矩能力要求不同。因此, 开发一种面向大尺度多任务仿真的力觉交互设备具有现实意义。

绳驱动并联机构具有工作空间大、惯量小、构型易重构等优点, 比较适合作为大尺度多任务仿真的虚拟现实系统的力觉交互设备。日本东京工业大学的 Sato 等人开发了由 8 根绳驱动的力觉交互设备 Spidar^[2], 法国 Haption 公司在此基础上开发了 6 自由度力觉交互设备 INCA 6D^[3]。关于绳驱动并联机构的理论研究了工作空间^[4-6]、设备刚度^[7,8]以及张力控制^[9-11]等基本问题。国内一些学者面向不同应用, 开发了绳驱动并联机构的物理样机。仇原鹰等利用绳驱动并联机构作为大型射电望远镜的调节装置^[12]。姚蕊等采用四根绳牵引并联机构实现了三自由度的平动, 从而实现了大型射电望远镜的

馈源定位^[13]。郑亚青等将六自由度绳牵引并联机构应用于飞行器风洞实验研究^[14]。张立勋等基于绳驱动柔性 Stewart 机构, 开发了骨盆运动并联康复机器人, 用于航天员的身体机能训练^[15]。隋春平等开发了一个三自由度绳驱动并联机构用于重载搬运^[16]。本文给出了一种面向大尺度多任务仿真的新型绳驱动力觉交互设备 iFeel6-BH1500, 描述了设备的结构、工作原理和运动学模型。同时, 基于力觉交互对设备输出力/力矩的要求以及绳驱动设备的特点, 定义了绳驱动力觉交互设备的工作空间, 分析了设备理想工作空间和实际工作空间, 并以 iFeel6-BH1500 为例, 给出了工作空间的计算方法。最后给出了 iFeel6-BH1500 用于飞机发动机虚拟装配的示例。

1 iFeel6-BH1500 结构与原理

iFeel6-BH1500 是在 863 计划支持下研制的一种新型力觉交互设备^[17], 其物理样机如图 1(a) 所示。该设备由操作末端、八个驱动模块以及机架构成, 设备机构简图如图 1(b) 所示。 $B_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 表示绳在机架上的连接点, P_i 表示绳在操作末端上的连接点。目前 iFeel6-BH1500 机构采用 3-3-1-1 构型, 即 P_1, P_2, P_3 三点重合, P_4, P_5, P_6 三点重合, 以下分别简称为 P_1, P_4 。操作末端为十字架结

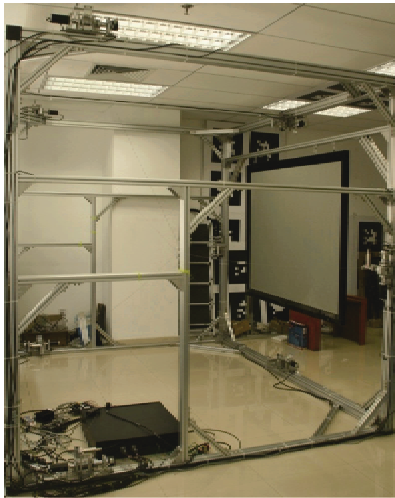
① 863 计划(2008AA04Z206, 2009AA012105)资助项目。

② 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向: 力觉交互; E-mail: daixw@me.buaa.edu.cn

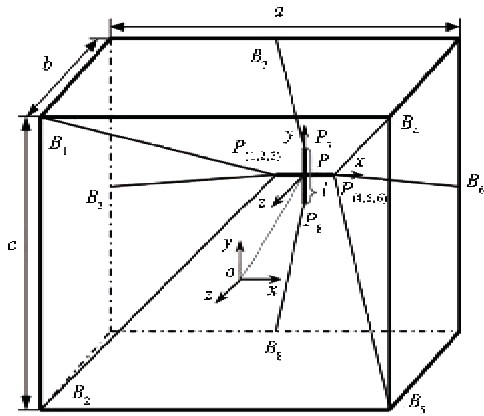
③ 通讯作者, E-mail: yuru@buaa.edu.cn

(收稿日期: 2010-10-09)

构, P_1, P_4 和 P_7, P_8 的交点为十字架中心, $|P_1P_4| = |P_7P_8| = l$, a, b, c 分别表示机架的长、宽、高。图 1(b) 中, $O-xyz$ 表示固定坐标系, 原点与机架的几何中心重合; $P-xyz$ 是与操作末端固连的动坐标系, 其坐标原点为十字架中心。为了适应不同的力觉交互仿真任务, 可通过调整驱动模块在机架上的位置、十字架尺寸以及绳在操作末端的连接方式, 来改变设备的构型, 调整设备的工作空间和输出力/力矩能力。



(a) iFeel6-BH1500 物理样机



(b) iFeel6-BH1500 机构简图

图 1 iFeel6-BH1500 力觉交互设备

驱动模块由驱动电机、导线轮、制动器、绝对码盘和张力传感器构成, 如图 2 所示。绝对码盘用于测量绳长, 通过运动学正解, 可以实时计算设备末端位姿。在设备断电处于非工作状态时, 制动器用于绳张紧。张力传感器用于实时测量绳的实际张力, 构成张力闭环, 补偿摩擦和惯性引起的绳张力误差。

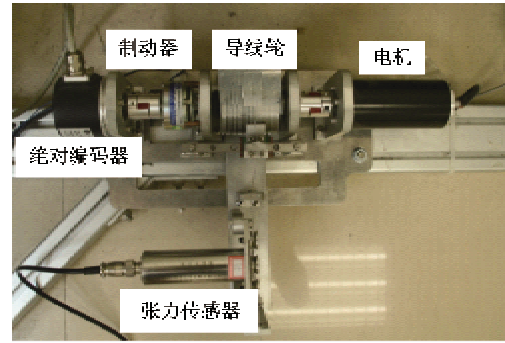


图 2 驱动模块物理样机

定义 $w = [f^T, m^T]^T$ 为设备末端输出的六维广义力, 其中 $f \in \mathcal{R}^3$ 表示设备末端输出合外力, $m \in \mathcal{R}^3$ 表示设备末端输出合外力矩; $t_i = t_i u_i$ ($i = 1, 2, \dots, 8$) 表示作用在第 i 根绳上的张力, 其中 $u_i = \overrightarrow{P_i B_i} / |\overrightarrow{P_i B_i}|$ 表示绳张力的单位方向矢量, t_i 表示绳张力幅值, 记 $t = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_8]^T$ 。因为绳只能承受拉力, 因此每根绳的张力不小于零。绳驱动并联机构的静力学模型可以表示为

$$At = w, t \geq 0 \quad (1)$$

其中 $A = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_8 \\ r_1 \times u_1 & r_2 \times u_2 & \dots & r_8 \times u_8 \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{6 \times 8}$

为绳驱动并联机构的结构矩阵, r_i 表示动坐标系 $P-xyz$ 原点到操作末端绳束结点 P_i 的向量。

2 运动学模型

求解方程(1)需要首先确定结构矩阵 A , 为此本节建立设备末端位姿与绳长之间的关系。设绳在操作末端的束结点 P_i 在定坐标系 $O-xyz$ 下的坐标用 P_i 表示, 操作末端的位姿用 $X = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T$ 表示, 其中 x, y, z 为操作末端中心点在 $O-xyz$ 中的坐标, α, β, γ 为 ZYX 欧拉角。设第 i 根绳长为 l_i , $i = 1, 2, \dots, 8$, 由几何约束关系得

$$\begin{cases} |B_i P_i| = l_i, i = 1, 2, \dots, 8 \\ |P_j P_k| = \sqrt{2}l, j = 1, 4; k = 7, 8 \end{cases} \quad (2)$$

求解上式可以得到点 P_i 在定坐标系 $O-xyz$ 下的坐标, 进而得到操作末端中心点位置坐标为

$$\begin{cases} x = (P_{1,x} + P_{4,x}) / 2 \\ y = (P_{1,y} + P_{4,y}) / 2 \\ z = (P_{1,z} + P_{4,z}) / 2 \end{cases} \quad (3)$$

动坐标系 $P-xyz$ 的三个坐标轴的方向矢量为

$$\begin{cases} l_x = \overrightarrow{P_1 P_4} / |\overrightarrow{P_1 P_4}| \\ l_y = \overrightarrow{P_3 P_7} / |\overrightarrow{P_3 P_7}| \\ l_z = l_x \times l_y \end{cases} \quad (4)$$

动坐标在固定坐标系下的姿态矩阵为 $R = [l_x, l_y, l_z]$, 由此可求出 ZYX 欧拉角 α, β, γ 。

3 工作空间

3.1 理想工作空间

力觉交互仿真任务要求交互设备可以模拟自由空间和约束空间两种状态。自由空间指虚拟物体之间没有发生接触。约束空间指虚拟物体之间发生接触。在自由空间操作者感受不到任何力/力矩反馈, 此时设备对外输出的力/力矩为零。在约束空间, 操作者能感受到期望的力/力矩反馈。不同的仿真任务要求设备的输出力/力矩大小和方向不同。因此, 通用的力觉交互设备应该能够在任意方向上输出从零到某一数值的合外力/力矩。

对 m 根绳驱动的 n 自由度并联机构, Verhoeven^[18]指出

$$\forall w, \exists t > 0, At = w \quad (5)$$

有解的充分必要条件是

$$\begin{cases} \text{rank}(A) = n \end{cases} \quad (6-a)$$

$$\begin{cases} \text{Null}(A) \cap R_m^+ \neq \emptyset \end{cases} \quad (6-b)$$

其中 $\text{Null}(A)$ 指结构矩阵 A 的零空间, R_m^+ 为 m 维空间中所有元素为正的向量集合, $\emptyset$ 表示空集。式(6-a)要求结构矩阵行满秩, 只有结构矩阵行满秩, 设备才能输出 n 维的力/力矩; 式(6-b)的物理含义是在结构矩阵的零空间中, 存在所有元素为正的向量。所以式(6-b)等价于式

$$\exists t > 0, At = 0 \quad (7)$$

从上面的分析可以看出, 对绳驱动设备, 当其结构矩阵行满秩时, 如果设备能输出为零的合外力/力矩, 则在该位姿下, 设备可以输出任意合外力/力矩。因此, 定义绳驱动力觉交互设备的工作空间为结构矩阵行满秩, 且设备末端可输出合外力/力矩为零的末端位姿集合, 即

$$W = \{X \mid \text{rank}(A) = n, \exists t \in \Omega_T, At = 0\} \quad (8)$$

其中 Ω_T 称为绳的张力可行域, 从式(8)可以看出, 工作空间由设备的构型和绳张力可行域决定。

绳驱动力觉交互设备的理想工作空间是指忽略绳的最大张力约束, 即认为绳张力无上界, 同时绳的

最小张力 $t_{\min} > 0$ 的条件下, 设备的工作空间。理想工作空间对应的绳张力可行域为

$$\Omega_T = \{t \mid t_i > 0, i = 1, 2, \dots, m, t \in R^m\} \quad (9)$$

在理想工作空间中的任意点, 设备可以输出从零到无穷大的任意合外力/力矩。

设末端十字架尺寸 $l = 180\text{mm}$, 姿态角为 $\Phi = [0, 0, 0]^T$, 根据(8)式得到设备的理想工作空间为图3所示浅灰色三棱柱, 绳在机架上的六个连结点构成三棱柱的边界。在零姿态角下, 设备的设计任务空间是一个边长为 1500mm 的立方体。为了使理想工作空间三棱柱可以包含这样的立方体, 设备的理想结构尺寸参数如表1所示。图3中深灰色部分是可被其包含的边长为 1500mm 的立方体。

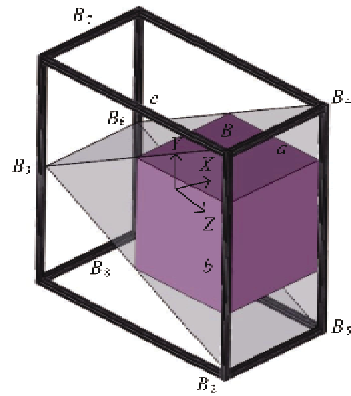


图3 构型3-3-1-1的理想工作空间和任务空间

表1 构型3-3-1-1的结构尺寸

$a(\text{mm})$	$b(\text{mm})$	$c(\text{mm})$
1500	3000	3000

3.2 实际工作空间

绳驱动力觉交互设备的实际工作空间是指考虑绳的最大及最小张力限制时, 设备的工作空间。此时绳的张力可行域相对理想工作空间发生了变化。由于驱动电机的最大力矩限制, 绳存在最大张力 $t_{\max}$ 。另外, 为了保证绳张紧, 其张力必须满足如下条件^[19]:

$$t \geq \mu g l / \eta \quad (10)$$

其中 μ 为绳的线密度, g 为重力加速度, l 为绳长, η 为张紧安全系数, 当 $\eta < 0.1$ 时可以产生比较好的张紧效果, 因此取绳的最小张力 $t_{\min} = \mu g l / \eta$ 。每根绳的张力必须满足 $t_{\min} \leq t_i \leq t_{\max}, i = 1, 2, \dots, m$ 。因此, 实际工作空间对应的绳张力可行域为

$$\Omega_T = \{t \mid t_{\min} \leq t_i \leq t_{\max}, \\ i = 1, 2, \dots, m, t \in \mathcal{R}^m\} \quad (11)$$

对方程

$$At = w, t \in \Omega_T \quad (12)$$

假设输出广义力为 w_1 时,其解为 t_1 ;当输出广义力为 w_2 时,其解为 t_2 。则当输出广义力为 $w_3 = w_1 + k(w_2 - w_1)$, $k \in [0, 1]$ 时,方程(12)一定有解。证明如下:取 $t = t_1 + k(t_2 - t_1)$,可以得到

$$At = w_1 + k(w_2 - w_1) \quad (13)$$

所以 $t = t_1 + k(t_2 - t_1)$ 满足方程(12)的等式约束。向量 t_1, t_2, t 对应 m 维空间中 3 个点 T_1, T_2, T , 则 $T_1, T_2 \in \Omega_T$, 并且 T 是“线段” $\overline{T_1 T_2}$ 上的一个点。由于 Ω_T 是一个封闭的凸区域,因此 $\overline{T_1 T_2} \in \Omega_T$ 。所以 $T \in \Omega_T$, $t \in \Omega_T$ 满足约束方程(12)的不等式约束,因此 $t = t_1 + k(t_2 - t_1)$ 是方程(12)的一组解。

上面的分析表明,如果交互设备可以输出广义力 w ,则可以输出 $[0, w]$ 区间内的任意广义力。广义力最大值由绳张力可行域和设备构型以及操作末端位姿决定;当输出广义力超出了设备的最大输出力/力矩范围时,约束方程(12)无解,即设备不能输出该广义力。

iFeel6-BH1500 的绳最大张力为 32N,最小张力为 2.4N。在零姿态角下,为了使 iFeel6-BH1500 的实际工作空间可以包含一个边长 1500mm 的立方体,设备的结构尺寸参数如表 2 所示,此时设备的实际工作空间如图 4 所示,其中浅灰色部分为设备的实际工作空间,深灰色部分为其可包围的边长为 1500mm 的立方体。

表 2 iFeel6-BH1500 机架尺寸

a (mm)	b (mm)	c (mm)
3000	4000	4000

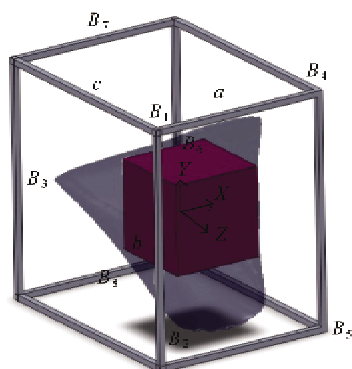


图 4 构型 3-3-1-1 的实际工作空间和任务空间

如果改变 iFeel6-BH1500 的构型,采用图 5 所示的 2-2-2-2 构型,此时绳在机架上的连接点分布在机架的 8 个顶点,设备末端的连接点 P_1 与 P_2, P_3 与 P_4, P_5 与 P_7, P_6 与 P_8 分别重合。在绳的最大最小张力和设备末端尺寸保持不变的条件下,为了使设备的实际工作空间包含边长 1500mm 的立方体,设备的结构参数如表 3 所示,工作空间如图 6 所示。图 6 中浅灰色区域为设备的实际工作空间,深灰色部分是可包围的边长 1500mm 的立方体。对比表 2 和 3,可以看到采用 3-3-1-1 构型比 2-2-2-2 构型可以获得较大的实际工作空间。

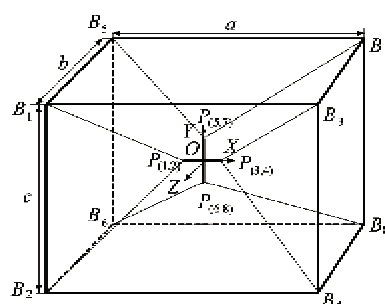


图 5 iFeel6-BH1500 采用 2-2-2-2 构型的机构简图

表 3 构型 2-2-2-2 的机架尺寸

a (mm)	b (mm)	c (mm)
4500	7000	4500

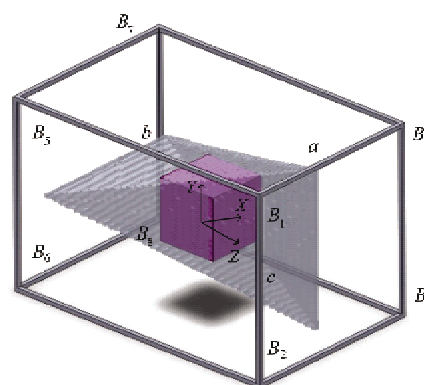


图 6 构型 2-2-2-2 的实际工作空间和任务空间

4 飞机发动机虚拟装配

基于 iFeel6-BH1500 绳驱动力觉交互设备和高性能计算机,构建了飞机发动机虚拟拆装实验环境,实现了花键螺栓和低压联轴器的拆装过程模拟。图形显示部分基于发动机零件的 Catia 模型建立,采用基于零件几何特征的快速碰撞检测和碰撞响应算

法^[20]和弹簧力模型计算装配力和力矩。试验证明当操作者在大范围内移动 iFeel6-BH1500 的操作末端(图 7b)时,可以感受到拆装过程中的力和力矩反馈。

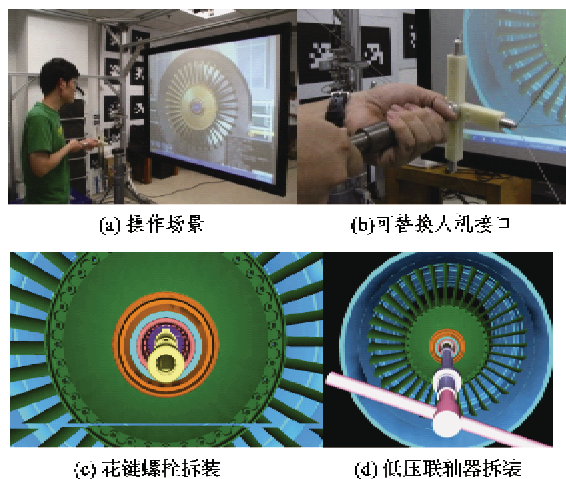


图 7 飞机发动机虚拟拆装

5 结论

iFeel6-BH1500 是一种新型六自由度力觉交互设备,适用于大尺度多任务的仿真系统。改变驱动模块在机架上的位置,以及绳在操作末端的连接方式,可以方便地改变设备的构型,适应不同的交互仿真任务。通过更换操作末端的人机接口,可以模拟不同操作任务。

本文定义了绳驱动力觉交互设备的工作空间,证明了属于工作空间的点一定能输出 $[0, w]$ 的任意广义力,其中 w 依赖电机物理极限、设备构型和末端位姿。分析了绳驱动力觉交互设备的两类工作空间:理想工作空间和实际工作空间。前者只考虑机架和操作末端的尺寸,后者进一步考虑电机的力矩极限和绳的最小张力约束。工作空间的形状和大小还与构型有关,对比 3-3-1-1 和 2-2-2-2 构型发现,在相同机架尺寸下,前者的实际工作空间较大。

理想工作空间可以作为构型选型指标,初步选择较优的构型。进一步,考虑电机力矩极限,检验实际工作空间是否满足仿真任务所需要的工作空间。本文以飞机发动机虚拟拆装为例验证了 iFeel6-BH1500 用于模拟大尺度装配任务的能力。

未来工作将研究绳驱动力觉交互设备的最大输出力/力矩能力,以及根据仿真任务对设备工作空间和输出力/力矩的要求,优化机构的构型和结构尺寸。

参考文献

- [1] Fischer A, Vance J M. PHANTOM haptic device implemented in a projection screen virtual environment. In: Proceedings of the International Immersive Projection Technologies Workshop and Eurographics Workshop on Virtual Environments, Zurich, Switzerland, 2003. 225-229
- [2] Kim S, Hasegawa S, Koike Y, et al. Tension based 7-DOF force feedback device: SPIDAR-G. In: Proceedings of the IEEE Virtual Reality, Orlando, USA, 2002. 283-284
- [3] Ortega M, Coquillart S. Prop-based haptic interaction with co-location and immersion: an automotive application. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications, Ottawa, Canada, 2005. 23-28
- [4] Bosscher P, Riechel A T, Ebert-Uphoff I. Wrench-feasible workspace generation for cable-driven robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(5): 890-902
- [5] Gouttefarde M, Gosselin C M. Analysis of the wrench-closure workspace of planar parallel cable-driven mechanisms. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(3): 434-445
- [6] Barrette G, Gosselin C M. Determination of the dynamic workspace of cable-driven planar parallel mechanisms. *Journal of Mechanical Design*, 2005, 127(2): 242-249
- [7] Dagalakos N G, Albus J S, Wang B L, et al. Stiffness study of a parallel link robot crane for shipbuilding applications. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1989, 111(3): 183-193
- [8] Verhoeven R, Hiller M, Tadokoro S. Workspace, stiffness, singularities and classification of tendon-driven Stewart platforms. In: Lenarcic J, Husty M L, eds. *Advances in Robot Kinematic: Analysis and Control*, 1998. 105-114
- [9] Verhoeven R, Hiller M. Tension distribution in tendon-based Stewart platforms. In: Proceedings of ARK'02 8th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, 2002. 117-124
- [10] Hassan M, Khajepour A. Optimization of actuator forces in cable-based parallel manipulators using convex analysis. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(3): 736-740
- [11] Borgstrom P H, Jordan B L, Sukhatme G S, et al. Rapid computation of optimally safe tension distributions for parallel cable-driven robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(6): 1271-1278
- [12] 仇原鹰, 魏强, 段宝岩等. 冗余度大型射电望远镜广

- 义 Stewart 平台. 机械工程学报, 2001, 37(12): 7-15
- [13] 姚蕊, 唐晓强, 李铁民等. 大型射电望远镜馈源定位 3T 索牵引并联机构分析与设计. 机械工程学报, 2007, 43(11): 105-109
- [14] 郑亚青. 绳牵引并联机构若干关键理论问题及其在风洞支撑系统中的应用研究: [博士学位论文]. 泉州: 华侨大学机电及自动化学院, 2004. 191-217
- [15] 张立勋, 刘攀, 王克义. 基于绳索牵引的航天员机能训练机器人虚拟重力控制. 机器人, 2010, 32(4): 454-458
- [16] 隋春平, 张波, 赵明扬等. 一种 3 自由度并联柔索驱动柔性操作臂的建模与控制. 机械工程学报, 2005, 41(6): 60-66
- [17] Zhang Y J, Zhang Y R, et al. Workspace analysis of a novel 6-dof cable-driven parallel robot. In: Proceeding of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Guilin, China, 2009. 2403-2408
- [18] Verhoeven R. Analysis of the workspace of tendon-based Stewart platforms: [Ph. D. dissertation]. Duisburg, Germany: Duisburg-Essen University, Institute of Mechatronics and System Dynamics, 2004. 17-54
- [19] Otis M J D, Perreault S, Nguyen-Dang T L, et al. Determination and management of cable interferences between two 6-dof foot platforms in a cable driven locomotion interface. *IEEE Transactions on System Man, and Cybernetics, Part A: System and Humans*, 2009, 39(3): 528-544
- [20] Liu M L, Wang D X, Zhang Y R. A novel haptic rendering algorithm for stable and precise 6-DOF virtual assembly. In: Proceedings of the ASME 2010 World Conference on Innovative Virtual Reality, Ames, USA, 2010

A haptic interaction device for large scale and multitask simulations

Dai Xiaowei, Zhang Yuru, Wang Dangxiao, Zhang Yaojun
(State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and System,
Robotic Institute, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract

The iFeel6-BH1500, a novel haptic interaction device based on a cable-driven parallel mechanism, was developed for large scale and multitask simulations. The iFeel6-BH1500 is driven by eight motors to achieve the outputs of 3 degree of freedom(DOF) force feedback and 3 DOF torque feedback to users. The paper gives the definitions of ideal workspace and real workspace of a cable-driven haptic device, presents the method for workspace computation, and compares two haptic interaction configurations according to the workspace. The cable-driven parallel mechanism has the advantages of low inertia, large workspace and reconfigurability, so the iFeel 6-BH 1500 is suitable for the haptic interaction in large scale and multi-task simulations. The application of the iFeel6-BH1500 for virtual assembly of an aircraft engine is presented.

Key words: cable driven, haptic interaction, large scale, multitask, virtual assembly