

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.10.008

颞骨手术虚拟触感装置设计及其运动学分析*

赵苗苗¹, 桑宏强^{1,2*}, 李戊星¹, 王婧宇¹

(1. 天津工业大学 机械工程学院 天津 300387; 2. 天津市现代机电装备技术重点实验室 天津 300387)

摘要:针对现有颞骨手术术前培训手段存在的问题,设计了一种具有结构简单、位姿解耦、自重平衡特点的 5 自由度力反馈触感装置。其采用水平放置的平行四边形结构,使得前后和左右两个位置自由度均满足重力平衡;对于后 3 个姿态自由度,采用驱动电机补偿的方式实现了完全重力补偿,进而实现了整个触感装置完全重力平衡;在触感装置结构设计的基础上对触感装置开展了工作空间分析,针对触感装置的运动学模型问题,基于旋量法建立了触感装置的正逆运动学模型;利用该模型,通过推导其末端雅可比矩阵,建立了速度模型;最后,通过 Matlab 对机构的条件数进行了分析计算,对机构灵活性进行了评价。研究表明:所设计的机构满足工作空间需求,其灵活性较好、精度较高,验证了触感装置机构设计的合理性。

关键词:颞骨;触感装置;自重平衡;工作空间;运动学;灵活性

中图分类号:TH122;TH113.22;TH77;TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)10-1050-05

Design and kinematic analysis of virtual haptic device for temporal bone surgery

ZHAO Miao-miao¹, SANG Hong-qiang^{1,2}, LI Wu-xing¹, WANG Jing-yu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Electromechanical Equipment Technology, Tianjin 300387, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient pre-operative training methods for temporal bone surgery, a 5-DOF force feedback haptic device was designed, which has the advantages of simple structure, position-posture decoupling and self-weight balance. The gravity balance of the degrees of freedom of front and rear, right and left position could be accomplished by using a horizontally parallelogram structure. For three posture degrees of freedom, the full gravity compensation could be achieved by means of motor compensation. Thus, the complete gravity balance of the haptic device could be achieved. Based on the structural design, workspace analysis of the haptic device was performed. For the kinematic model problem of the haptic device, the forward and inverse kinematic models of the haptic device were established based on screw theory. The velocity model was established by Jacobian matrix of the haptic device, which could be obtained based on the forward kinematic model. Finally, the flexibility of the haptic device was evaluated by using Matlab to analyze and calculate the condition number. The results indicate that the haptic device can meet the needs of the workspace, which has better flexibility and higher precision. The mechanism rationality of the haptic device is verified.

Key words: temporal bone; haptic device; self-weight balance; workspace; kinematic; flexibility

收稿日期:2019-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205287);天津市自然科学基金资助项目(16JCYBJC18400);天津市高等学校创新团队培养计划资助项目(TD13-5037)

作者简介:赵苗苗(1998-),女,河南濮阳人,主要从事触感装置的设计与控制方面的研究。E-mail:miao_cassiel@163.com

通信联系人:桑宏强,男,教授,博士生导师。E-mail:sanghongqiang@tjpu.edu.cn

0 引言

颞骨是人体最复杂的解剖部位之一,其非常接近大脑的外表面,并保护和包围几个重要的软组织,如动脉、静脉和面神经^[14]。当移除肿瘤或囊肿^[5-9]、修复骨折、恢复听力、校正平衡失调和防止感染^[10]等时,需要对颞骨进行手术操作。医生在进入临床之前,需要进行很好的培训,否则存在导致患者永久畸形、听力丧失^[11]和潜在死亡等危险。

尸体是传统颞骨外科手术培训的主要教学工具,然而这种方法受尸体数量、成本和疾病传播风险等限制^[12]。较新颖的教学方法是使用模拟器,目前用于颞骨手术培训的模拟器主要有物理模型、虚拟现实模拟器和具有力反馈的虚拟现实模拟器:(1)物理模型^[13-14]。此类模型接近尸体条件,主要是快速原型模型和塑料模型。然而此类模型培训问题之一就是物理模型不能重复使用,仅能使用一次且价格较昂贵,不具有成本效益;(2)虚拟现实模拟器^[15]。此类模拟器由传统的人机交互接口键盘和鼠标等组成。哥本哈根大学 Rigs 医院的 SORENSEN 教授和奥尔胡斯 Alexandra 研究所的 MIKKELSEN 工程师等^[16]设计开发出了一种颞骨解剖手术模拟器,其提供模拟物理条件图形解释,然而该模拟器的主要问题是无法提供真实的震动和接触力;(3)具有力反馈的虚拟现实模拟器。例如上海交通大学的谢叻教授等^[17]研发出了一种具有力反馈的心血管介入虚拟手术模拟器,该模拟器具有虚拟现实模拟器的功能,同时具有触觉力反馈的能力,但其不能提供手术钻在实际工作过程中的震动感。据此,研究一种能够提供真实震动感和触觉感知的颞骨手术混合现实模拟器,为实习医生临床培训提供一种教学工具,具有重要的意义和实际应用价值。

本文将设计一种多自由度触感装置即为颞骨手术混合现实模拟器的现实机构部分,并对其进行运动学分析和性能评价。

1 结构设计

针对颞骨手术培训的特定需求,本文设计了一种具有重力补偿功能的五维力反馈触感装置。通过分析触感装置的运动学及可操作性,并考虑到工作空间的限制,最终确定主操作手的具体结构和尺寸参数。

1.1 触感装置构型设计

在设计上,力反馈型触感装置需要考虑的问题主要包括:(1)结构简单;(2)运动灵活、摩擦小;(3)惯量

小;(4)可实现重力平衡;(5)位姿解耦;(6)运动性能好,在工作空间内无奇异。

结合颞骨手术特点,确定的工作空间为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的正方体空间。本文具有重力补偿功能的五维力反馈触感装置包括6部分:底座、平行四边形机构、大臂机构、小臂机构、手腕机构和手术钻。由于手术钻本身提供绕 Z 轴旋转的姿态自由度,装置还需提供3个位置自由度和2个姿态自由度。

力反馈触感装置三维模型如图1所示。

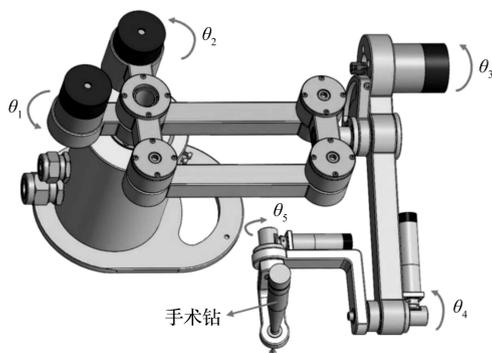


图1 力反馈触感装置三维模型

考虑到触感装置自身重力和运动过程中关节产生的摩擦力对系统精度影响,为减少医生在手术过程中为补偿上述力而提供的额外驱动力,提高手术精度,设计的触感装置应该实现机构自重平衡,并尽可能选择摩擦力相对较小的转动副进行关节的设计。

位置自由度前2个自由度采用平行四边形结构。平行四边形结构通过转轴与底座连接,其轴线与地面垂直,满足自身重力平衡,且与直杆小臂机构通过转动副的形式连接,减小了机构摩擦力。为降低运动学方程建立和控制系统构建的难度,本文采用位姿解耦的结构设计,令姿态部分腕部两关节转动轴线与手术钻转动轴线汇交于一点。由于小臂机构、手腕机构和手术钻本身的重量较轻,本研究采用驱动电机对其进行重力补偿^[18],由此实现了整个触感装置完全重力平衡,减轻了重力对于人手触觉感知的影响。

由于手腕机构末端为一实际外科钻,这样在虚拟仿真的环境下,可完全模拟真实环境下外科钻的操作效果。其设计原则符合人机工程学要求,操作灵活、结构紧凑、惯量小。

1.2 驱动方式的设计

考虑到触感装置对反向驱动能力的要求,各关节减速比不宜过大。综合考虑运动灵活性与传动精度方面的要求,可以认为传统的齿轮减速箱或谐波减速箱难以满足触感装置系统的要求,目前只有丝传动能够满足零回差,同时又能够满足触感装置对传动环节的要求。通

过丝传动的预紧,可以消除丝传动系统的回差,其具有运动质量、惯量小、形式灵活、传动精度高等优点^[19]。

触感装置采用丝传动进行关节驱动。传动钢丝缠绕在直接固定于电机输出轴上的丝筒上,两端经扇面固定于大扇轮上,通过调整扇轮和丝筒的直径比即可以调整传动比。弹簧用于调整传动钢丝的预紧力。

丝传动驱动方式示意图如图 2 所示。

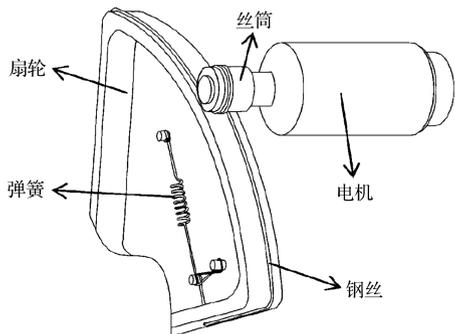


图 2 丝传动驱动方式示意图

2 运动学分析

采用旋量、运动旋量和力螺旋来描述刚体运动学问题,不仅可以避免用局部坐标系描述时所造成的奇异性,而且可以对刚体运动进行几何描述,大大简化对机构的分析,故本文采用旋量法^[20]来建立坐标系,并推导该触感装置的运动方程。

2.1 正运动学分析

由于手腕机构末端为一实际手术钻,本文在此只分析触感装置的 5 自由度,触感装置坐标系与零位构型如图 3 所示。

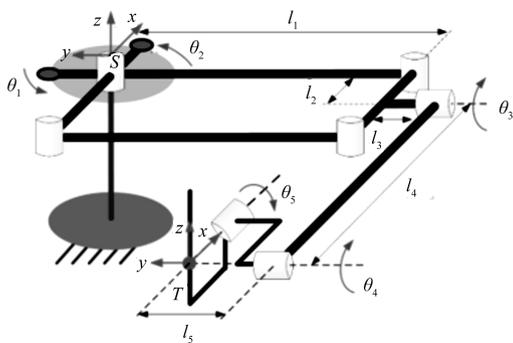


图 3 触感装置坐标系与零位构型

取轴的单位矢量和轴上的点为:

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \omega_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \omega_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \omega_5 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} q_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, q_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, q_3 = \begin{bmatrix} -l_2 \\ -l_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ q_4 &= q_5 = \begin{bmatrix} -l_2 - l_4 \\ l_5 - l_1 - l_3 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

运动旋量 ξ 可表示为:

$$\xi_i = \begin{bmatrix} -\omega_i \times q_i \\ \omega_i \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (3)$$

姿态矩阵和位置矩阵分别为:

$$R(\theta) = e^{\hat{\omega}_2\theta_2} e^{\hat{\omega}_3\theta_3} e^{\hat{\omega}_4\theta_4} e^{\hat{\omega}_5\theta_5} I_{3 \times 3} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P(\theta) &= H \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}_1\theta_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}_2\theta_2} \begin{bmatrix} -l_2 \\ -l_3 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}_2\theta_2} e^{\hat{\omega}_3\theta_3} I_{3 \times 3} \begin{bmatrix} -l_4 \\ l_5 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

因此,5 自由度触感装置运动学正解为:

$$\begin{aligned} g_{st}(\theta) &= \begin{bmatrix} R(\theta) & P(\theta) \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} c_2c_3 & -s_2 & c_2s_3 & l_1s_1 - (l_2 + l_4c_3)c_2 + (l_3 - l_5)s_2 \\ c_3s_2 & c_2 & s_2s_3 & -l_1c_1 - (l_2 + l_4c_3)s_2 - (l_3 - l_5)c_2 \\ -s_3 & 0 & c_3 & l_4s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $s_i = \sin\theta_i$; $c_i = \cos\theta_i$ 。

2.2 逆运动学分析

由于腕部两个自由度转动轴线与手术钻转动轴线汇交于一点,实现了位姿解耦。由于其定向部分的计算相对比较简单,在此只分析前 3 个关节决定的定位问题。

通过几何分析可以得到:

$$\begin{cases} \theta_3 = \arcsin\left(\frac{P_z}{l_4}\right) \\ \theta_2 = \arcsin\left(\frac{l_1^2 - A^2 - B^2 - p_x^2 - p_y^2}{\sqrt{M^2 + N^2}}\right) - \arcsin\left(\frac{M}{\sqrt{M^2 + N^2}}\right) \\ \theta_1 = \arcsin\left(\frac{A\cos\theta_2 - B\sin\theta_2 + p_x}{l_1}\right) \end{cases} \quad (7)$$

其中: $A = l_2 + l_4\cos\theta_3$, $B = l_3 - l_5$, $M = 2Ap_x + 2Bp_y$, $N = 2Ap_y - 2Bp_x$ 。

3 速度模型建立

触感装置操作空间速度与关节空间速度映射关系为:

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}$ —触感装置关节角矢量; \mathbf{v} —笛卡尔速度矢量; $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ —触感装置雅可比矩阵。

为方便分析,此处只取主手前 3 关节位置机构作为研究对象,基于旋量法求解触感装置雅可比矩阵。求解公式为:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \left[\dots \left(\mathbf{g}_{st}^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}_{st}}{\partial \theta_i} \right)^v \dots \right] \quad (9)$$

由此可求得雅可比矩阵 \mathbf{J} 为:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} l_1 c_1 & l_3 c_2 - l_5 c_2 + l_2 s_2 + l_4 c_3 s_2 & l_4 c_2 s_3 \\ l_1 s_1 & l_3 s_2 - l_2 c_2 - l_5 s_2 - l_4 c_2 c_3 & l_4 s_2 s_3 \\ 0 & 0 & l_4 c_3 \end{bmatrix}$$

将机构各时刻的位置参数 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别代入公式,即可得到触感装置在各个位置下的雅可比矩阵。

4 工作空间分析

本研究基于“蒙特卡罗法”对颞骨触感装置进行工作空间分析^[21-22],触感装置工作空间如图 4 所示。

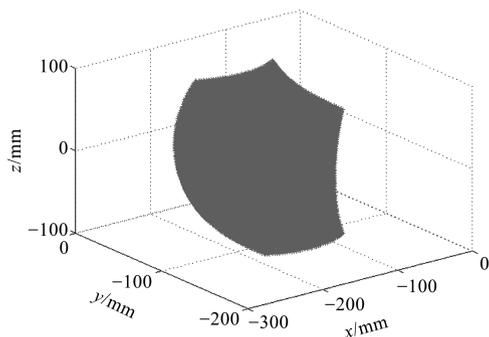


图 4 触感装置工作空间

从图 4 可以看出:装置可以达到手术过程中所需要到达的位置。

5 触感装置性能评价

机构的操作性指标和条件数指标是比较常用的基于雅可比矩阵的性能评价指标^[23],其均是基于奇异值来进行评价机器人的灵巧度。操作性指标可以确定机构的最佳姿态,但不能准确地描述出机构的运动性能。而条件数指标描述的是机器人在运动过程中的精度,条件数越小,机构的灵活性越好、精度越高。

本文选用雅可比矩阵的条件数指标作为求解触感

装置操作性的度量指标,条件数指标表达为:

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad 1 \leq K \leq \infty \quad (10)$$

式中: $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ —雅可比矩阵的最大与最小奇异值。

根据条件数指标的定义,影响雅可比矩阵条件数的变量有 3 个: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$,分别固定其中一个变量,分析另外两个变量对雅可比矩阵条件数的影响。已知各个连杆的长度为: $l_1 = 150 \text{ mm}, l_2 = 30 \text{ mm}, l_3 = 46 \text{ mm}, l_4 = 150 \text{ mm}, l_5 = 96 \text{ mm}$ 。

触感装置条件数分布如图 5 所示。

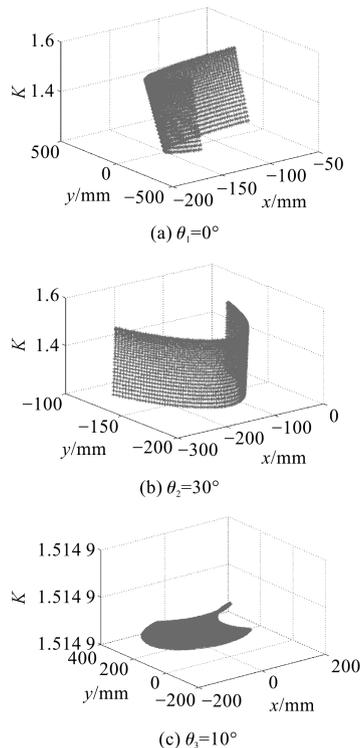


图 5 触感装置条件数分布

从图 5 可以看出:触感装置的条件数处于 1 到 2 之间,最大不超过 1.6,所以触感装置的灵活度较好。且当 $\theta_1 = 0^\circ$ 固定时,在触感装置工作空间里, x 坐标越靠近 -150 mm ,触感装置条件数越小,其灵活性越好,精度越高。

6 结束语

本文研究开发了能够提供真实震动感和触觉感知的颞骨手术混合现实模拟器,所设计的触感装置为其现实机构部分,该装置具有摩擦小、可实现自重平衡以及传动精度较高等优点。

在触感装置结构设计的基础上,本文基于旋量理论,建立了触感装置正运动学模型与逆运动学模型,并利用 Matlab 进行了工作空间分析。分析结果表明:所

设计的机构满足工作空间需求。

在已建运动学模型基础上,本文推导了触感装置的雅可比矩阵,建立了速度模型;并以机构的条件数为评价指标,对机构灵活性进行了仿真分析。仿真结果表明:所设计的触感装置较为合理,其灵活性好、精度高。

参考文献 (References):

- [1] 庄 园,李德志. 面神经减压术治疗颞骨骨折致面瘫的研究进展[J]. 中国康复理论与实践,2018,24(10):1169-1171.
- [2] XU P, JIN A, DAI B, et al. Surgical timing for facial paralysis after temporal bone trauma[J]. **American Journal of Otolaryngology**, 2017,38(3):269-271.
- [3] NISHIJIMA H, KONDO K, KAGOYA R, et al. Facial nerve paralysis associated with temporal bone masses[J]. **Auris Nasus Larynx**, 2017,44(5):548-553.
- [4] KONG K, SEVY A. Temporal bone fracture requiring facial nerve decompression or repair[J]. **Operative Techniques in Otolaryngology-Head and Neck Surgery**, 2017, 28(4):277-283.
- [5] BARRY J Y, LE C H, KHAN R. Multifocal inverting papilloma of the sinonasal cavity and temporal bone[J]. **Otolaryngology Case Reports**, 2017(2):33-36.
- [6] SIMMONDS J C, VECCHIOTTI M. Cholesteatoma as a complication of Langerhans cell histiocytosis of the temporal bone: a nationwide cross-sectional analysis[J]. **International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology**, 2017(100):66-70.
- [7] MARTIN J R, FILIP P, THORPE E J, et al. Treatment of locally advanced parotid malignancies with parotidectomy and temporal bone resection[J]. **American Journal of Otolaryngology**, 2017,38(4):380-382.
- [8] TSAY C, TEWARI R A, MALHOTRA A, et al. Osteoma of the superior petrous portion of the temporal bone[J]. **Otolaryngology Case Reports**,2017(5):18-20.
- [9] 郝 瑾,许丽萍,鲜军舫,等. 内淋巴囊瘤的临床和 VHL 基因突变分析研究[J]. 中华耳科学杂志,2018,16(5):651-658.
- [10] MARIO C, MARCOS G, VERÓNICA S. External ear canal exostosis and otitis media in temporal bones of prehistoric

and historic chilean populations: a paleopathological and paleoepidemiological study[J]. **Acta Oto-Laryngologica**, 2017,137(4):365-369.

- [11] LANIGAN A, FORDHAM M T. Temporal bone extramedullary hematopoiesis as a cause of pediatric bilateral conductive hearing loss: case report and review of the literature[J]. **International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology**, 2017(97):135-138.
- [12] 张 娟. 人工颞骨模型在青年耳显微外科医师培训中的应用[J]. 医学教育管理,2018,4(4):330-332,337.
- [13] 查 洋,高志强,吕 威,等. 3D 打印解剖模型在耳鼻喉科教学的应用[J]. 基础医学与临床,2018,38(6):878-881.
- [14] WANIBUCHI M, NOSHIRO S, SUGINO T, et al. Training for skull base surgery with a colored temporal bone model created by three-dimensional printing technology[J]. **World Neuro-surgery**,2016(91):66-72.
- [15] MORONE P J, SHAH K J, HENDRICKS B K, et al. A virtual, three-dimensional temporal bone model and its educational value for neurosurgical trainees[J]. **World Neurosurgery**, 2018,11(74):1-4.
- [16] 黄孝文,余 洋,周良强,等. 可视耳模拟器在颞骨解剖虚拟训练中的应用[J]. 听力学及言语疾病杂志,2013,21(4):400-402.
- [17] 谢 叻,神祥龙,吴朝丽,等. 具有力反馈的心血管介入虚拟手术模拟器的研发[J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2017,41(4):331-337.
- [18] 王宏民,杜志江,闫志远,等. 混联式主操作手重力补偿算法[J]. 机器人,2014,36(1):111-116,128.
- [19] 张林安. 力反馈型主操作手设计及其控制策略研究[D]. 天津:天津大学机械工程学院,2010.
- [20] NIKU S B. 机器人学导论:分析、控制及应用[M]. 孙富春,朱纪洪,刘国栋,等,译. 北京:电子工业出版社,2013.
- [21] 桑宏强,常丽敏,刘 芬,等. 一种六自由度丝传动微创手术器械的设计[J]. 机械科学与技术,2017,36(2):239-244.
- [22] 司艳伟,陈洪立. 六自由度果蔬采摘机器人关节空间轨迹规划[J]. 轻工机械,2017,35(4):8-12.
- [23] 虞启凯,游有鹏,韩江义. 一种 6DOF 串并联机构性能指标分析[J]. 机械传动,2015,39(6):159-165.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

赵苗苗,桑宏强,李戌星,等. 颞骨手术虚拟触感装置设计及其运动学分析[J]. 机电工程,2019,36(10):1050-1054.

ZHAO Miao-miao, SANG Hong-qiang, LI Wu-xing, et al. Design and kinematic analysis of virtual haptic device for temporal bone surgery[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(10):1050-1054.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>