

# 机械科学与技术

## JIXIE KEXUE YU JISHU

2015年2月  
第34卷第2期(总第240期)

ISSN 1003-8728  
CODEN JKJIE6

### 目次

#### 机械动力学

1. 手术机器人力感主手不完全重力平衡性能研究 ..... 赵昱, 赵汉望 (165)
2. 新型四相平板式TFPM自定位力矩研究 ..... 韩康, 史仪凯, 苏士斌, 崔田田, 马艳 (166)
3. 6 KW柴油发电机组振动性能的有限元分析 ..... 王金林, 徐利梅, 张鸿, 谢晓梅, 姜盼秋 (173)
4. 可调节转子临界转速的新型支承设计与研究 ..... 张立华, 张雷, 陈巍巍, 刘秋岭 (179)
5. 柔性气动连续体机器人关节结构设计与运动学分析 ..... 赵志刚, 陈志刚 (184)
6. 一种新型3-UPS/UPR并联机构运动学分析及应用 ..... 李坤, 原大宁, 王庚祥, 赵鹏 (188)
7. 超磁致伸缩喷油器阀口开度建模 ..... 薛光明, 何忠波, 李冬伟, 李玉龙, 杨朝舒 (194)
8. 含弹性环的机器人关节变刚度驱动器设计分析 ..... 张亚平, 周建军, 陈耀, 刘成龙 (199)

覆盖作者姓名

#### 精密制造与加工

9. 大型液压机驱动系统摩擦补偿控制 ..... 潘晴, 黄明辉, 李毅波 (204)
10. 圆弧修形滚子-滚道接触变形计算的拟合方法 ..... 何贞志, 陈於学, 柳剑 (209)
11. 频率修正在超声变幅杆设计中的研究与应用 ..... 梁延德, 梅景放, 何福本, 周其波, 魏剑宇 (212)
12. 基于自由度约束互补集的柔顺机构可视化构型库研究 ..... 林盛, 周士钧, 王春, 王晓煜 (216)
13. 高速工业平缝机挑线机构轨迹精度分析 ..... 李鹏飞, 原园, 林哲, 王伟涛 (220)
14. 面曝光快速成形系统制作工艺参数的优化研究 ..... 胥光申, 杨根 (224)
15. 油液磨粒超声回波信号的双树复小波去噪研究 ..... 李一宁, 张培林, 徐超, 张云强 (229)
16. 一种双面凸轮的反求设计方法 ..... 王细洋 (234)
17. 基于自适应共振解调技术的滚动轴承故障诊断 ..... 潘阳, 陈安华, 蒋玲莉, 李学军 (238)

DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.2015.0201

# 手术机器人力感主手不完全重力平衡性能研究

陈臣, 赵汉望  
(天津理工大学机械工程学院, 天津 300222)  
覆盖作者姓名

**摘要:** 结合力感主动力学方程, 分析了主手在不完全重力平衡时, 不平衡力对主手力感性能的影响。给出了重力不平衡项的变化范围, 以及在不影响主手的质心位置变化范围, 并应用 Adams 和 Matlab 软件联合仿真, 对主手的透明性和不完全重力平衡两种状态下进行分析对比。结果表明: 当质心在该范围内时, 可以减小机构惯性力, 提高力感性能, 同时又不会影响主手的刚度和可操作性。

**关键词:** 力感主手; 重力不平衡; 不平衡半径; 透明性

**中图分类号:** TP242.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-8728(2015)02-0165-04

## Study on the Gravity Imbalance of Haptic Master of Surgical Robot

Chen Chen, Zhao Hanwan  
(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)  
覆盖作者姓名  
覆盖作者单位

**Abstract:** Combining with the dynamic equation of the self-designed haptic device, the effect of the unbalanced force on the the performance of the haptic device is analyzed. Under not influencing the force accuracy, the range of variation of gravity imbalance items and center-of-mass coordinates are presented. Combining with Adams and Matlab, the transparency of the device under both gravity balance and imbalance state is analyzed. As the centroid of haptic device is within this range, the inertial force of device will be reduced and the performance will be also enhanced, but not affecting the stiffness and operability.

**Key words:** computer software; cutoff frequency; dynamics; gravity imbalance; haptic interfaces; imbalance radius; Jacobian matrices; mathematical models; MATLAB; mechanisms; robots; stiffness; transparency; vectors

在任意位置和姿态下的重力不平衡性能是衡量力感主手的重要指标。过于明显的重力不平衡将影响操作性能, 使操作者因不平衡力而感到疲劳, 还会使手术机器人反馈到主手的力失真, 导致主手的力感性能大大降低。

宁祎采用配重块与弹簧联合使用的方法对 STANFORD 主机械手进行平衡<sup>[1]</sup>, 此种方法有利于减小配重的质量, 减小惯性力对机器人末端的影响, 但是对弹簧的设计要求较高。Omega 系列力感主手

采用弹簧和凸轮结合的方式使机构达到平衡<sup>[2]</sup>。Phantom 主手<sup>[3]</sup>、达芬奇主手<sup>[4]</sup>以及哈尔滨工业大学研发的主手<sup>[5]</sup>均采用质量平衡的方式, 这种方式理论上可以使主手重力平衡性能达到最好, 但是平衡配重的增加会使整体的质量及惯性力增加。在进行手术的过程中, 过大的惯性力会给医生带来错误的引导, 给手术带来很大的风险。因此, 对于用于手术的力感主手, 其惯性力应越小越好。减小配重的质量将会是我们首先考虑的方法, 但是减小配重会使得整个机构不能达到完全重力平衡, 会引入重力不平衡力。

收稿日期: 2013-03-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2007AA04Z205)资助

作者简介: 王... 陈臣(联系人), 副教授, zhaochen@tju.edu.cn  
覆盖作者姓名及研究方向  
覆盖作者邮箱

### 1 运动学和动力学分析

#### 1.1 主手运动学分析

机器人运动学中求解雅克比矩阵的方法有很多,

在此我们采用旋量理论方法<sup>[6]</sup>。主手的机构简图如图 1 所示,此时,末端坐标系与基坐标系  $O-XYZ$  重合。

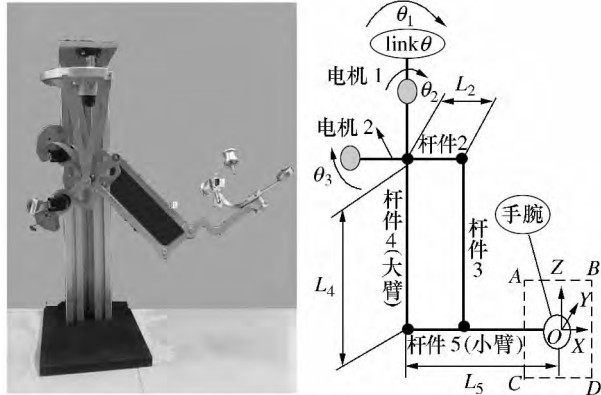


图 1 力感主手实物图与机构简图

由螺旋理论可求出末端坐标系与基坐标系的变换矩阵为

$$g_{st}(\theta) = \begin{bmatrix} R(\theta) & P(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:姿态变换矩阵  $R(\theta) = e^{\hat{\omega}_1\theta_1} e^{\hat{\omega}_2\theta_2} I_{3 \times 3}$ ; 末端位置矢量

$$P(\theta) = e^{\hat{\xi}_1\theta_1} e^{\hat{\xi}_3\theta_3} \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & -L_5 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R(\theta) & L_5 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中  $\omega_i$  为各个关节转动方向单位矢量;  $\xi_i$  为各个关节旋量表达式,  $i = 1, 2, 3$ 。空间雅可比矩阵  $J$  计算公式为

$$J = \begin{bmatrix} \dots & \left( g_{st}^{-1} \frac{\partial g_{st}}{\partial \theta_i} \right)^V & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_5 c_2 + L_4 s_1 s_3 & -L_5 s_2 c_1 & -L_4 c_1 c_3 \\ L_5 c_1 c_2 - L_4 c_1 s_3 & -L_5 s_2 s_1 & -L_4 s_1 c_3 \\ 0 & -L_5 c_2 & L_4 s_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $c_i = \cos \theta_i$ ,  $s_i = \sin \theta_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  为各个关节角。

### 1.2 主手动力学分析

采用拉格朗日方法求解主手机器人的动力学表达式为

$$M(\theta) \ddot{\theta} + D(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为机器人关节力矩矢量;  $M(\theta)$  为惯性矩阵;  $D(\theta, \dot{\theta})$  为哥氏力和向心力矢量;  $G(\theta)$  为重力矢量。

重力项的表达式为

$$G = [0 \quad G_1 \cos \theta_2 \quad G_2 \sin \theta_3]^T \quad (4)$$

式中:  $G_1 = m_2 g r_{2x} - m_3 g L_2 - m_5 g r_{5x}$ ,

$$G_2 = m_5 g L_4 + \frac{1}{2} m_3 g L_4 - m_4 g r_{4z}$$

其中  $m_2, m_3, m_4, m_5$  分别为杆 2, 3, 4, 5 的质量;  $r_{2x}, r_{5x}$  分别为杆件 2 和杆件 5 的质心在基座坐标系中沿  $x$  方向的坐标;  $r_{4z}$  为杆件 4 质心在基座坐标系中沿  $z$  方向坐标。

## 2 不完全重力平衡分析

### 2.1 重力项元素之间关系分析

由公式 (2) 和 (4) 可得到因重力不平衡而导致的主手末端的力矢量  $F_{gravity}$

$$F_{gravity} = \begin{bmatrix} \frac{-G_1 s_3 c_2}{L_5 (c_2 c_3 + s_2 s_3)} - \frac{G_2 c_2 s_3}{L_4 (c_2 c_3 + s_2 s_3)} \\ 0 \\ \frac{G_2 s_3 s_2}{L_4 (c_2 c_3 + s_2 s_3)} - \frac{G_1 c_2 c_3}{L_5 (c_2 c_3 + s_2 s_3)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

构建手腕末端点产生的力在杆件坐标系下的数学模型, 并经处理后得到

$$\|F_{gravity}\| = \sqrt{(K_{1max}^2 + 2K_{3max}^2) \left( \frac{G_1}{L_5} + \frac{G_2}{L_4} \right)^2 + 2 \left( \frac{G_2}{L_4} \right)^2} \quad (6)$$

式中:  $K_{1max}, K_{2max}, K_{3max}$  分别为  $K_1, K_2, K_3$  绝对值的最大值。

$$K_1 = \frac{\sin \theta_3 \cos \theta_2}{\cos(\theta_2 - \theta_3)}, K_2 = \frac{\sin \theta_3 \sin \theta_2}{\cos(\theta_2 - \theta_3)}, K_3 = -\frac{\cos \theta_3 \cos \theta_2}{\cos(\theta_2 - \theta_3)}$$

以末端工作空间为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  为例分析, 可得  $-90^\circ < \theta_3 < 40^\circ$  且  $35^\circ < 90^\circ - \theta_2 + \theta_3 < 150^\circ$ 。此时, 可得到

$$K_{1max} = 1.7321, K_{3max} = 2.2648$$

由式 (6) 得重力不平衡力分布图, 如图 2 所示。

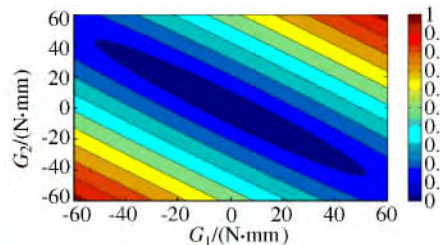


图 2 重力不平衡引起的末端力

在手术过程中, 主手对操作者施加力的平均值为  $1 \text{ N}$ <sup>[7]</sup>, 而人手的力变差 (just noticeable difference, JND) 为  $7\% \sim 15\%$ <sup>[8]</sup>, 在此取 JND 为  $10\%$ 。因此, 要使操作者不受重力不平衡力的影响, 就应使重力不平衡力小于  $0.1 \text{ N}$ 。对图 2 中的不平衡力小于  $0.1 \text{ N}$  的区域进行拟合, 可以得到一条近似于斜椭圆的曲线, 倾斜角为  $40^\circ \sim 45^\circ$ 。为方便计算取倾斜角为  $45^\circ$ , 得到近似的曲线方程



$$\frac{(G_1 + G_2)^2}{2a^2} + \frac{(G_1 - G_2)^2}{2b^2} = 1 \quad (7)$$

式中:  $a=66.7$   $b=10.3$ 。

将得到的曲线与图 2 中区域进行对比(实心区为实际区域),发现其重合部分达到 87%,曲线拟合相近度很高,可以近似代替等高线中的区域,比较图如图 3 所示。

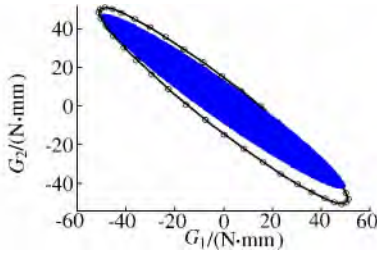


图 3 拟合图与实际图比较

### 2.2 质心位置关系

只有当力感主手的质心在基座标系原点时,整个机构才处于完全重力平衡的状态。式(7)中  $G_1$ ,  $G_2$  的关系并不能直观地表示力感主手的质心位置与平衡性能之间的关系。为了能够更直观的反映力感主手的不平衡即质心的变化对力感的影响,建立质心坐标同重力项  $G_1$ ,  $G_2$  之间的关系式。基于转矩平衡的思想得出质心坐标与杆件参数之间的关系式为:

$$P_x = \frac{m_2 r_{2x} - m_3 L_2 - m_5 r_{5x}}{M} \quad (8)$$

$$P_z = \frac{m_5 L_4 + m_3 L_4 / 2 - m_4 r_{4z}}{M} \quad (9)$$

式中:  $P_x$ ,  $P_z$  分别为基座标系下质心沿  $x$  和  $z$  方向坐标;  $M=m_2+m_3+m_4+m_5$ 。

重力项与质心坐标之间的关系为:

$$G_1 = MgP_x \quad (10)$$

$$G_2 = MgP_z \quad (11)$$

将式(10) (11)代入式(7)可得

$$\frac{(P_z + P_x)^2}{a^2} + \frac{(P_z - P_x)^2}{b^2} = \frac{2}{M^2 g^2} \quad (12)$$

式(12)说明当主手机构的质心处于该斜椭圆内时,主手因重力不平衡而产生的力小于 0.1 N。斜椭圆的短轴为 0.81 mm,长轴为 5.24 mm。当力感主手处于不完全平衡状态时,主手质心随着主手的运动是在不断变化的,并且变化轨迹是以平衡位置(基座标系原点)为圆心的圆。所以取质心可以变化的范围以为基座标系原点为圆心,以式(12)所示椭圆的短轴为半径的圆的范围,则在此范围内因重力不平衡产生的不平衡力小于 0.1 N。定义此圆的

半径为不平衡半径 如图 4 所示。

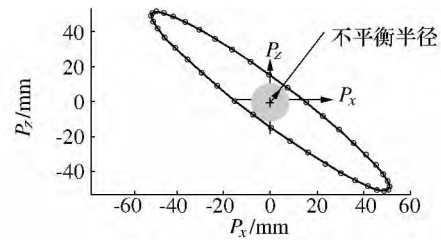


图 4 不平衡半径

重力不平衡力在主手整个工作空间内的分布如图 5 所示。

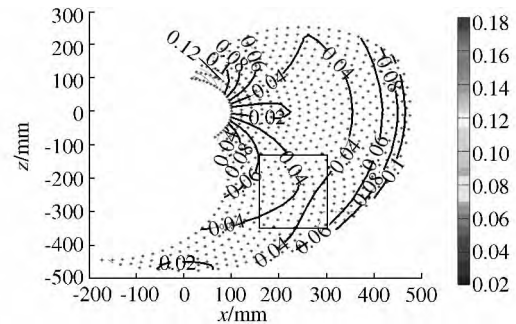


图 5 工作空间内的重力不平衡力

### 3 不完全重力不平衡对性能的影响

当主手处于不完全重力平衡时,会产生不平衡力,使力感性能降低。但是在不完全平衡时,由于减小了配重的质量,会使得主手运动过程中的惯性力减小,又会使力感性能增强。为了能够比较客观的评价力感性能的好坏,引入透明性评价指标。透明性  $G_T$  被定义为测量阻抗  $Z_H$  与环境阻抗  $Z_D$  的比值。透明性函数<sup>[10]</sup>为

$$G_T = Z_H / Z_D \quad (13)$$

一个透明的系统应使操作者只对交互的环境有触感,而感知不到主手动力学的影响。利用速度—力关系来表示阻抗,将式(13)变换为

$$G_T = F_H V_H / (F_D V_D) \quad (14)$$

式中:  $F_H$  为手端实际测量力;  $V_H$  为测量速度;  $F_D$  为理想的力;  $V_D$  为环境速度。假设条件  $V_H = V_D$ , 则透明性函数化简为

$$G_T = F_H / F_D \quad (15)$$

透明性指标是透明性函数从 0 dB ~ ±3 dB 的截止频率<sup>[9]</sup>。为了定量评价主手的透明性,采用 Adams 和 Matlab 软件分别对完全重力平衡和不完全重力平衡两种状态下的主手进行联合仿真(在此只对  $x$  和  $z$  方向进行透明性分析)。采用基于动力学模型的反馈补偿控制结构,不同于文献[11]的是,在动力学补偿时不加

入重力项的补偿 控制结构如图6所示。

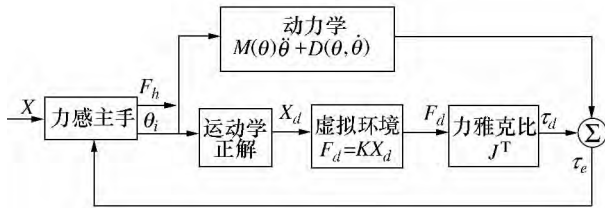


图6 主手控制结构

在每次联合仿真时,为了能够模拟主手末端  $0.3 \text{ m/s}^2$  的加速度 给定主手末端同样的位置曲线  $7.5\sin(2\pi t) \text{ mm}$ 。每次仿真的时间为  $3 \text{ s}$  ,设定理想的力反馈信号为  $1$  个刚度  $0.05 \text{ N/mm}$  的线性力。则在  $x$  和  $z$  方向 ,完全平衡和质心处于不平衡半径处的透明性如图7~10所示。

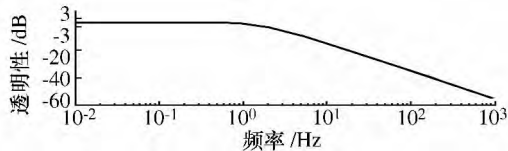


图7 完全平衡时沿  $x$  轴的透明性

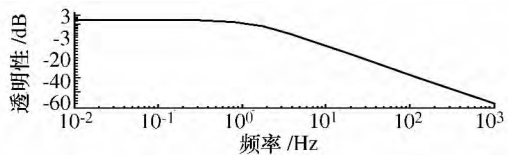


图8 质心位于不平衡半径处沿  $x$  轴的透明性

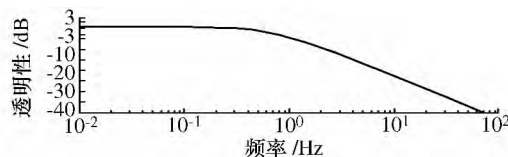


图9 完全平衡时沿  $z$  轴的透明性

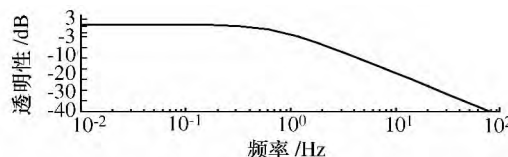


图10 质心位于不平衡半径处沿  $z$  轴的透明性

由图7 图8 可得沿  $x$  轴的透明性 ,完全重力平衡和不完全重力平衡时的透明性带宽分别为  $1.18 \text{ Hz}$  ,  $1.29 \text{ Hz}$ 。由图9 ,图10 可得沿  $z$  轴的透明性 ,平衡和不完全平衡时分别为  $0.86 \text{ Hz}$  ,  $0.94 \text{ Hz}$ 。由此可见 ,力感主手的质心在规定的范围内运动时其力感性能并没有减弱 ,反而有所提升。

## 4 结论

分析了主手机构因质心位置偏移给操作者带来的重力不平衡力的影响 ,给出了当重力不平衡对力感影响不大时的质心位置范围 ,综合分析了重力不平衡对主手透明性的影响。经分析可得 ,重力不平衡在一定的范围内是可以接受的 ,且适当的重力不平衡会提高主手的力感性能。不平衡半径的概念可以作为以后主手的设计指标使用。

## 【参考文献】

- [1] 宁祎.主-从式空间遥控机器人 STANFORD 型主机械手的平衡系统[J].中国机械工程 ,1995 ,6(5) : 28-30  
Ning Y. A balance system of STANFORD model master manipulator [J]. China Mechanical Engineering ,1995 ,6(5) : 28-30 ( in Chinese)
- [2] Helmer P ,Conti F ,Grange S ,et al. Haptic device gravity compensation [P]. United States 0019890 ,2010
- [3] Massie. Force reflecting haptic interface [P]. United States 6405158B1 ,2002
- [4] Kenneth S Jr. Master having redundant degrees of freedom [P]. US Patent 6714839 ,2004
- [5] 李长军.面向外科手术的力反馈型遥操作主手研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学 ,2007: 20-28  
Li C J. Research on master hand with force feedback in remote operation facing surgery [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology ,2007: 20-28 ( in Chinese)
- [6] Murray R ,Li Z ,Sastry S S. A mathematical introduction to robotic manipulation [M]. Florida: The Chemical Rubber Company Press ,1994: 78-79
- [7] Massie T H ,Salisbury J K. The PHANTOM haptic interface: a device for probing virtual objects [C]// Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting , Chicago: H J David ,1994: 246-253
- [8] Pang X D ,Tan H Z ,Durlach N I. Manual discrimination of force using active finger motion [J]. Perception & Psychophysics ,1994 ,49(6) : 531-540
- [9] Fite K ,Speich J ,Goldfarb M. Transparency and stability in two-channel bilateral manipulation [J]. Journal of Dynamic Systems , Measurement and Control ,2001 ,123: 400-407
- [10] McJunkin S T. Transparency improvement for haptic interfaces [D]. Houston: Rice University ,2007: 42-44
- [11] Zhao C ,Luo X M ,Ma F T. Transparency design of a new haptic interface [C]// International Conference on Electrical and Control Engineering ,2011: 6193-6197