

文章编号: 1002-0446(2006)05-0540-04

人机合作机器人重力平衡设计*

罗杨宇, 李金泉, 王健美, 杨向东, 陈 恳

(清华大学精密仪器与机械学系制造工程研究所, 北京 100084)

摘 要: 为提高人 机器人合作的质量, 研究了机器人机构的重力平衡方法, 以减小其带给操作者的重力感受. 对于关节式机器人结构, 采用拉弹簧的方式对机器人重力进行较大范围的平衡; 通过对弹簧刚度和预变形的设计, 使得随着机构的运动, 弹簧系统可以适当调节弹簧力以实现机构在各种位形下重力的自主平衡. 在机器人运动范围内的若干点对设计方案进行了验证, 各关节的残余重力矩是原始重力矩的 1~10%. 结果说明, 该设计可以基本实现重力平衡.

关键词: 机器人; 重力平衡; 人机合作

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Gravity Balance Design for Cobot

LUO Yang-yu, LI Jin-quan, WANG Jian-mei, YANG Xiang-dong, CHEN Ken

(Institute of Manufacturing Engineering, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract To improve the collaboration quality between human and robot, a gravity balance method for cobot (collaborative robot) is investigated to alleviate gravity burden on human operator. A spring system is introduced to realize gravity balance of an articulated robot in a motion range as large as possible. The stiffness and original distortion are specifically designed so that the spring system can modulate appropriately the spring force along with motion of the robot to realize self-balance within a large range. The design is tested in some points within the motion range of the robot, and the residual gravity moment is one to ten percent of the original moment. The result shows that this method can realize gravity balance to some degree.

Keywords robot; gravity balance; collaboration

1 引言 (Introduction)

所有的人机交互或人机合作机器人, 都要求机器人尽量少地给人带来额外的负担, 使交互或合作更加轻松和友好. 机械结构式的合作机器人都不可避免地存在着重力问题, 实现机构的自重平衡是提高交互质量的最基本也是最重要的要求.

在现有的机器人机构中, 实现重力平衡或部分平衡的方法主要有两种, 其一是通过结构设计来实现机构的重力平衡^[1-4]; 其二是通过控制进行补偿以实现重力平衡. 第一类方法是相对积极的, 其实现方式主要有 3 种: 结构质量分布设计, 加配重设计和拉弹簧设计. 由于机器人机构重力特性的位形依赖性, 一般都只能实现机构的部分重力平衡. 以三关节式机器人的平衡为例, 通过拉弹簧的方式分别对大臂

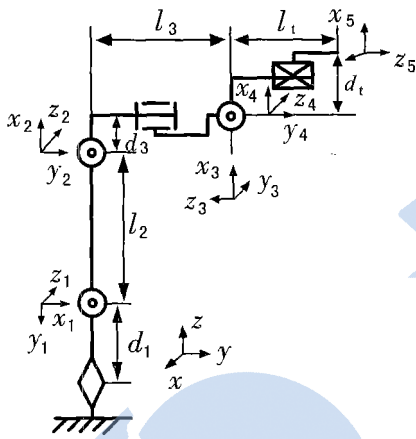
和小臂进行重力平衡, 这种方式所起的作用只是缓解重力的影响; 另外, 还可采用凸轮结构调节弹簧的变形, 使单关节实现比较大范围的自平衡, 而凸轮机构的设计和制作都比较困难^[1]; infinite 关节臂式测量机采用了安装于关节的重力平衡系统 zeroG, 同样只能实现单关节的重力矩基本为零. 因此, 仍有必要研究人机合作机器人机构的重力平衡设计, 保证以简单的方式实现更大范围的重力平衡.

本文仍沿用拉弹簧式的重力平衡思想, 以用于手术消融的辅助机器人为例, 设计机器人平衡系统, 使弹簧力可以随着机构的位形变化而自动进行调节, 以实现在任意位置都能达到最大程度平衡的目的.

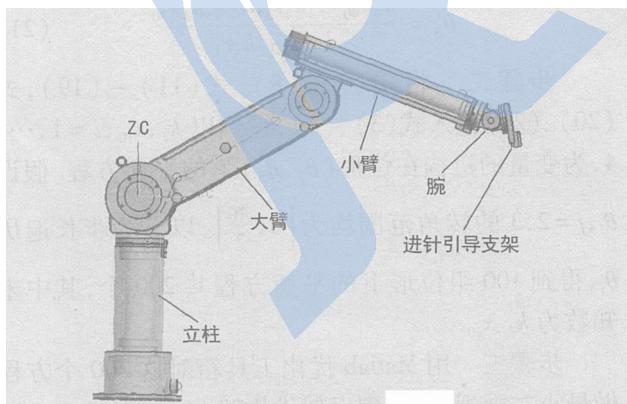
2 机器人构型 (Robot configuration)

本机器人采用五自由度关节式, 如图 1 所示. 从机器人基座往上记作关节 1 至 5 机器人各关节均采用无动力形式, 各个关节安装断电制动抱闸. 机器人在通电状态下被牵引, 当到达预定位姿时, 断电将机器人位姿锁定, 从而成为手术医生操作的平台. 如图 1 所示, 机器人臂部为三自由度关节式, 腕部为二自由度灵活手腕形式. 机器人立柱长度为 d_1 , 大臂长 l_2 , 小臂偏距和小臂长分别为 d_3 和 l_3 . 最后一个关节轴线的偏距为 d_4 , 工具导引长度为 l_4 .

由于机器人的运动是通过医生的牵引实现的, 为使其操作更舒适和安全, 要求基本实现重力自平衡, 保证医生不会感受到过多的额外重力.



(a) 运动学简图



(b) 虚拟样机

图 1 机器人构型

Fig 1 Robot configuration

3 重力平衡方法 (Gravity balancing method)

对图 1 所示的机器人, 本文所采用的拉弹簧式重力平衡方法如图 2 所示. 该种构型影响操作者重

力感受的主要因素是大臂和小臂, 由于机器人的关节耦合特性和重力特征的位形依赖性, 对大臂和小臂进行综合重力平衡设计. 在关节 2 和关节 3 上各挂一个可以自由转动的如图 3 所示的弹簧支架 2 3 其上安装弹簧钩 2 3 从弹簧钩 2 上各拉一根弹簧到关节 2 的基座和大臂中部, 从弹簧钩 3 上各拉一根弹簧到大臂中部和小臂. 图 2 所示的机构位置和弹簧钩位置即为各自零位, 从基座往上, 各个弹簧序号为 1 至 4

该方案实现重力平衡的原理为: 给零位上的弹簧以初始变形, 随着机器人机构的运动, 弹簧支架将会发生相应的转动, 如果弹簧的刚度和初始变形设计合理, 弹簧支架转动的结果是自动调节弹簧力, 保证机器人在大多数位置都能基本实现自平衡.

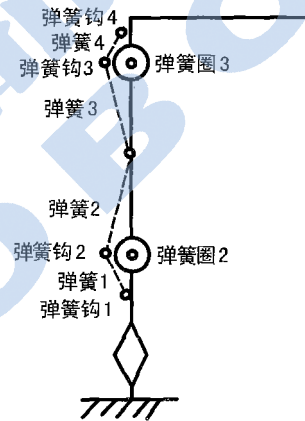


图 2 重力平衡方法

Fig 2 Gravity balancing method

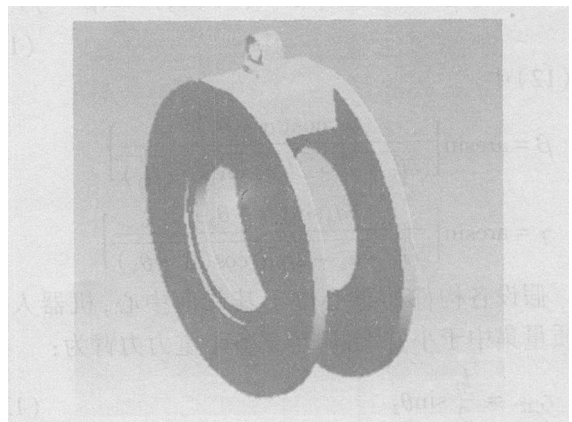


图 3 弹簧支架与弹簧钩

Fig 3 Spring bracket and spring hook

4 重力平衡方程 (Gravity balance equation)

对机器人 大臂和小臂进行综合重力平衡分析.

令: f_i , $i = 1, 2, 3, 4$ 为弹簧 i 上的力; r_{ij} 为力 f_i 对关节 j 的力臂; G_i 为杆件 i 的重力, 当 i 为二位数 ik 时, 表示杆件 i 的第 k 部分的重力; G_w 为腕部的重力; r_{Cij} 为 G_i 对关节 j 的力臂; r_j 为关节 j 上的弹簧钩至关节 j 中心的距离. 对弹簧支架 2, 3, 其力矩平衡方程分别为:

$$f_1 r_{12} = f_2 r_{22} \quad (1)$$

$$f_3 r_{33} = f_4 r_{43} \quad (2)$$

对第 2, 3 关节, 其力矩平衡方程分别为:

$$f_2 r_{22} + f_3 r_{32} + f_4 r_{42} = G_2 r_{C22} + G_{31} r_{C312} + G_{32} r_{C322} + G_w r_{Cw2} \quad (3)$$

$$f_4 r_{43} = G_{31} r_{C313} + G_{32} r_{C323} + G_w r_{Cw3} \quad (4)$$

令: θ_j 为关节 j 的转角; α_j 为弹簧支架 j 的转角; 各个弹簧的刚度为 k_i , $i = 1, 2, 3, 4$; 各个弹簧的初始变形为 x_{i0} , $i = 1, 2, 3, 4$. 假设弹簧总是紧贴于弹簧支架的外圆周围, 则各个弹簧的变形可以表示为:

$$x_1 = x_{10} + r_2 \alpha_2 \quad (5)$$

$$x_2 = x_{20} + r_2 (\alpha_2 - \alpha_2) \quad (6)$$

$$x_3 = x_{30} + r_3 \alpha_3 \quad (7)$$

$$x_4 = x_{40} + r_3 (\alpha_3 - \alpha_3) \quad (8)$$

令: a_4 为弹簧钩 4 中心至关节 3 中心的距离, 为零位时弹簧钩 3 中心与关节 3 中心连线与弹簧钩 4 中心与关节 3 中心连线之间的夹角. 假设弹簧支架的自由转动对各方臂的影响很小可以忽略, 于是各个弹簧力臂为:

$$r_{12} = r_{22} = r_2 \quad (9)$$

$$r_{33} = r_{43} = r_3 \quad (10)$$

$$r_{32} = \frac{b_2 r_3}{\sqrt{4r_3^2 + l_2^2}} \quad (11)$$

$$r_{42} = \sqrt{l_2^2 + a_4^2 + 2l_2 a_4 \sin(\alpha_2 + \alpha_3)} \cos(\alpha_2 - \alpha_3) \quad (12)$$

式 (12) 中

$$= \arcsin \left[\frac{a_4 \cos(\alpha_2 + \alpha_3)}{\sqrt{l_2^2 + a_4^2 + 2l_2 a_4 \sin(\alpha_2 + \alpha_3)}} \right]$$

$$= \arcsin \left[\frac{a_4 \sin(\alpha_2 + \alpha_3)}{\sqrt{r_3^2 + a_4^2 - 2r_3 a_4 \cos(\alpha_2 + \alpha_3)}} \right]$$

假设各构件的重心位于其几何中心, 机器人手腕质量集中于小臂端部, 于是各个重力力臂为:

$$r_{C22} = \frac{l_2}{2} \sin \alpha_2 \quad (13)$$

$$r_{C312} = l_2 \sin \alpha_2 + \frac{d_3}{2} \sin(\alpha_2 + \alpha_3) \quad (14)$$

$$r_{C322} = l_2 \sin \alpha_2 + d_3 \sin(\alpha_2 + \alpha_3) + \frac{l_3}{2} \cos(\alpha_2 + \alpha_3) \quad (15)$$

$$r_{Cw2} = l_2 \sin \alpha_2 + d_3 \sin(\alpha_2 + \alpha_3) + l_3 \cos(\alpha_2 + \alpha_3) \quad (16)$$

$$r_{C323} = \frac{d_3}{2} \sin(\alpha_2 + \alpha_3) \quad (17)$$

$$r_{C323} = d_3 \sin(\alpha_2 + \alpha_3) + \frac{l_3}{2} \cos(\alpha_2 + \alpha_3) \quad (18)$$

$$r_{Cw3} = d_3 \sin(\alpha_2 + \alpha_3) + l_3 \cos(\alpha_2 + \alpha_3) \quad (19)$$

5 平衡系统参数设计 (Parameter design of the balancing system)

5.1 问题的描述

平衡系统尚有若干待定参数: 各个弹簧的刚度以及零位时弹簧的初始变形. 平衡系统的参数设计问题可以描述为: 设计各个弹簧的刚度和在零位的初始变形, 使得在机器人大部分工作空间都能基本实现自平衡. 因此, 该问题转化成一个非线性优化问题, 优化目标是若干个机器人位形的重力平衡, 优化对象是各个弹簧参数, 包括刚度和初始变形.

5.2 参数设计算法

采用非线性优化方法进行弹簧参数设计, 其算法步骤如下:

步骤一 根据弹簧支架的力矩平衡方程式 (1)、(2) 和式 (5)、(6), 计算弹簧支架转角与关节转角之间的关系:

$$\alpha_2 = \frac{k_2 x_{20} + k_2 r_2 \alpha_2 - k_1 x_{10}}{k_1 r_2 + k_2 r_2} \quad (20)$$

$$\alpha_3 = \frac{k_4 x_{40} + k_4 r_3 \alpha_3 - k_3 x_{30}}{k_3 r_3 + k_4 r_3} \quad (21)$$

步骤二 将式 (7)、(8), 式 (11) ~ (19), 式 (20)、(21) 代入式 (3)、(4), 得到以 k_i, x_{i0} , $i = 1, 2, 3, 4$ 为变量的机构在位形 (α_2, α_3) 下的平衡方程. 假设

α_j , $j = 2, 3$ 的转角范围均为 $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$, 以 $\frac{\pi}{20}$ 为步长遍历 α_j 得到 100 组位形下的平衡方程共 200 个, 其中未知数为 k_i, x_{i0} .

步骤三 用 Matlab 优化工具箱对这 200 个方程做最小二乘拟合, 得到近似优化解 k_i, x_{i0} , $i = 1, 2, 3, 4$.

5.3 参数设计结果

图 1 所示机器人, 其设计结构参数如下: $l_2 = 400\text{mm}$; $r_2 = 75\text{mm}$; $r_3 = 45\text{mm}$; $a_4 = 75\text{mm}$; $\alpha = \frac{\pi}{5}$; $G_2 = 50\text{N}$; $G_{31} = 10\text{N}$; $G_{32} = 40\text{N}$; $G_w = 10\text{N}$. 采用 4.2 节的算法进行优化设计, 得到: $k_1 = 38.93\text{N/mm}$, $x_{10} = 5.17\text{mm}$; $k_2 = 6.84\text{N/mm}$, $x_{20} = 6.97\text{mm}$; $k_3 =$

2.08N/mm , $x_{30} = 7.22\text{mm}$; $k_4 = 33.65\text{N/mm}$, $x_{40} = 4.91\text{mm}$

5.4 参数设计验算

在 $j \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ 的范围内任取非优化拟合计算用到的取值 (α_2, α_3) , 代入式 (3)、(4) 验算是否满足平衡方程, 并计算其未平衡重力矩. 如表 1 所示, 在任意的 4 个位置, 其未平衡重力矩均很小, 大约是原始重力矩的 1~10%.

表 1 重力平衡验算

Table 1 Evaluation of gravity balance

(α_2, α_3)	关节 2 未平衡重力矩	关节 3 未平衡重力矩
(49.5°, 61.5°)	-0.65N·m	0.84N·m
(37.5°, 55.5°)	-0.1N·m	-2.6N·m
(22.5°, 76.5°)	-0.04N·m	-2.25N·m
(7.05°, 28.5°)	-1.82N·m	0.29N·m

6 结论 (Conclusion)

本文以一种肝癌消融治疗的辅助定位机器人为例, 对关节式人机合作机器人的重力平衡方法进行研究. 在机器人的大臂和小臂关节安装可以自由转动的弹簧支架, 在机器人腰部、弹簧支架、大臂和小臂之间安装弹簧平衡系统, 通过该组弹簧的组合参

数设计, 使弹簧支架可以随着关节运动自主转动适当的角度以调节弹簧力, 实现机构在任何位置的基本自平衡, 从而减小或消除该机器人带给其合作对象的重力感受. 本文的后续工作为机器人样机质量和质心参数的测量, 以及实际弹簧的参数确定和调试.

参考文献 (References)

- [1] 孙杏初. 国外典型工业机器人图册 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.
- [2] 刘达. 微创外科机器人若干关键技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
- [3] Agrawal S.K., Fattah A. Design of an orthotic device for full or partial gravity-balancing of a human upper arm during motion [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/ie15/8823/27960/01249301.pdf?arnumber=1249301>, 2003.
- [4] Fattah A., Agrawal S.K. Gravity balancing rehabilitative robot for the human legs [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/ie15/9639/30462/01403773.pdf?arnumber=1403773>, 2004.

作者简介:

罗杨宇 (1975-), 女, 博士, 助理研究员. 研究领域: 机器人人机交互技术, 机器人运动学与动力学, 医疗机器人.

陈 愚 (1954-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人与仿生学, 特种机器人及应用, 机电自动化及系统集成.