http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0455

基于计算力矩法的眼内手术机器人的重力补偿

陈翔, 黄龙, 杨洋*

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 为了提高一种具有远程运动中心(RCM)机构的眼内手术机器人的定位精度和稳定性,在建立机器人坐标系的基础上,通过动力学等效,对机器人各构件质心瞬态位置进行分析。根据拉格朗日方程建立机器人动力学模型。提出基于计算力矩法的重力补偿方法。在此基础上,通过 MATLAB/Simulink 软件对重力补偿模型进行仿真。比较独立比例微分(PD)控制方法及重力补偿方法的各关节运动响应曲线,表明重力补偿模型可有效补偿重力项;同时,分析重力补偿模型响应曲线与期望曲线的误差,证明重力补偿模型具有较高的补偿精度和可行性。

关 键 词: 远程运动中心(RCM)机构; 眼内手术机器人; 动力学; 计算力矩法; 重力补偿; Simulink 仿真

中图分类号: TH113; TP242

文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2017)06-1231-08

眼科手术对医生的操作精度及稳定性有着非常高的要求,借助先进的机器人技术进行精密的眼科手术已成为国内外眼科研究的热点。视网膜静脉阻塞等眼内手术[1-3]的典型过程是将末端器插入眼内,并绕插入点进行转动或移动,应用于该类手术的机器人均具有远程运动中心(Remote Center of Motion, RCM)机构,该机构为一种可实现固定虚拟转动中心的少自由度机构[4-7]。拥有 RCM 机构的眼内手术机器人具有运动范围小、定位精度要求高的特点[8],由于各构件重力的影响,导致末端器定位精度难以达到眼内手术操作的要求,使末端器极易对眼内组织及血管造成损伤。因此有必要针对眼内手术机器人进行动力学建模及重力补偿研究。

此外,由于大多数眼内手术机器人构型复杂,导致常用的动力学分析算法并不适用,需针对具体机器人模型进行动力学建模。机器人动力学模型的建立[9-11]主要采用 2 种动态数学模型,分别为牛顿-欧拉方程以及拉格朗日方程,其中拉格朗日方程不必求解关节内作用力,适用于具有 RCM 机构的眼内手术机器人。

国内外学者对各种机器人进行了重力补偿的研究。文献[12]对具有弹性关节的机器人进行在线重力补偿的比例微分(PD)控制研究;文献[13]针对除冰机器人右臂提出了一种精确的在线重力补偿 PD 控制策略,并对其阶跃响应和动态跟踪特性进行分析;文献[14]建立了工程机器人动臂、前臂的动力学模型,并对其进行在线重力补偿,通过实验对机器人轨迹跟踪特性进行分析。

以上学者的重力补偿研究多集中在工业机器人等非医疗领域,针对医疗机器人尤其是眼科手术机器人的相关研究较少。鉴于此,本文针对一种应用于视网膜静脉阻塞等眼内手术的机器人,根据 D-H 法建立了机器人坐标系,在构建机器人

收稿日期: 2016-05-26; **录用日期**: 2016-12-16; **网络出版时间**: 2017-01-11 16:24
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20170111.1624.003.html
基金项目: 国家自然科学基金 (51175013)
* **通讯作者**: E-mail: 07288@buaa.edu.cn

引用格式: 陈翔, 黄龙, 杨洋. 基于计算力矩法的眼内手术机器人的重力补偿[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(6): 1231-1238. CHEN X, HUANG L, YANG Y. Gravity compensation of an intraocular surgery robot based on computed torque method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(6): 1231-1238 (in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

RCM 机构等效模型的基础上,对其各构件质心瞬态位置进行分析;通过拉格朗日方程建立了该机器人系统的动力学模型;在此基础上,提出基于计算力矩法的重力补偿方法,并采用 MATLAB/Simulink 对重力补偿模型进行仿真,对比未重力补偿的独立 PD 控制模型,分析重力补偿策略的补偿效果,验证重力补偿模型的可行性。

1 坐标系建立

图 1 所示为一种 RCM 机构的眼内手术机器人,该机器人共 6 个自由度,前三关节为 3 自由度 SCARA 机械臂,后三关节为 3 自由度 RCM 机构。采用 D-H 法[15] 建立机器人各连杆坐标系 $O_ix_iy_iz_i$,如图 2 所示,系统前三关节决定基坐标系 $O_0x_0y_0z_0$ 下远程运动中心 O 点的位置,分别由绕 z_1 轴的转动副、绕 z_2 轴的转动副以及沿 z_3 轴的移动副组成,2 个转动副轴线 z_1 与 z_2 平行,移动副实现竖直运动。系统后三关节决定坐标系 $O_3x_3y_3z_3$ 下末端器尖端 O_{top} 相对于 O 点的位置,且末端器轴线始终穿过远程运动中心 O,后三关节分别由绕 y_3 轴的转动副、绕 y_4 轴的转动副以及沿 z_6 轴的移动副组成。

设机器人系统中关节 1 高度为 d_1,长度为 a_1,关节 2 距离关节 1 高度 d_2,长度 a_2,关节 3 相对关节 2 高度为 d_3,远程运动中心 O 与关节 3 的距离不变,用 L 表示,关节 6 尖端 O_{top} 距远程运动中心 O 的距离为 d_6;根据 D-H 参数的定义,由图 2得到系统 D-H 参数如表 1 所示。

图 2 所示机器人坐标系不能够完全反映 RCM 机构的构成。图 3 所示为机器人 3 自由度 RCM 机构简图,如图建立 $O'x'y'z'$ 坐标系,其中 l_i 为各构件长度,分别将构件 CD 绕 y' 轴、构件 HI 绕 y' 轴与图 3 各构件组成的平面机构绕 x' 轴的转动角度用 θ_1、θ_2 和 θ_3 表示,构件 AD 移动距离用 x_1 表示。分别将关节变量 θ_1、θ_2、θ_3 以及 x_1 作为机构的广义坐标。该 RCM 机构的自由度为 3,有一广义坐标为被动,因此建立广义坐标间关系式,如式(1)所示,已知 θ_1、θ_2 以及 θ_3 3 个广义坐标可求出广义坐标 x_1,广义坐标 x_1 速度与加速度由式(2)得到。值得注意的是,广义坐标 θ_1、θ_2、θ_3 为控制过程中的主动关节。

$$x_1 = \frac{l_2\sin(\theta_2 - \theta_1)}{\sin\theta_2} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dfrac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}t} \\ \ddot{x}_1 = \dfrac{\mathrm{d}^2x_1}{\mathrm{d}t^2} \end{cases} \tag{2}$$

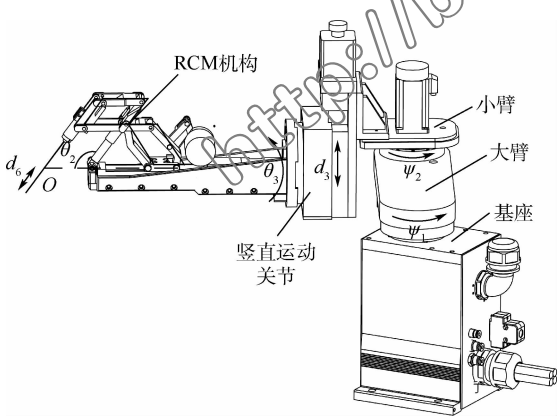


图 1 基于 RCM 机构的眼内手术机器人示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intraocular surgery robot based on RCM mechanism

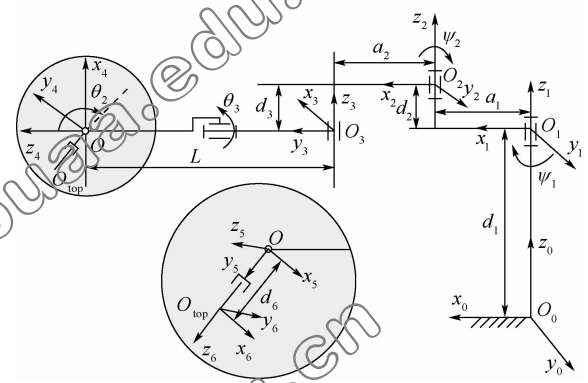


图 2 眼内手术机器人坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate system of intraocular surgery robot

表 1 机器人系统 D-H 参数

Table 1 D-H parameters of robot system

i	从 z_{i-1} 到 z_i 沿 x_{i-1} 距离 a_{i-1}	从 z_{i-1} 到 z_i 绕 x_{i-1} 角度 α_{i-1}	从 x_{i-1} 到 x_i 沿 z_i 距离 d_i	从 x_{i-1} 到 x_i 绕 z_i 角度 θ_i
1	0	0	d_1	ψ_1
2	a_1	0	d_2	ψ_2
3	a_2	0	d_3	$-90°$
4	0	$-90°$	L	$-90°+\theta_3$
5	0	$-90°$	0	θ_2
6	0	0	d_6	0

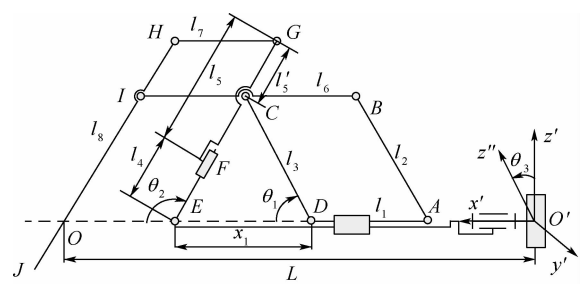


图 3 3 自由度 RCM 机构简图

Fig. 3 Diagram of 3 degrees of freedom RCM mechanism

http://bhxb.buaa.edu.cn

2　眼内手术机器人的动力学建模

眼内手术机器人在手术操作过程中需保证远程运动中心 O 固定,即在该过程中机器人前三关节保持固定,因此该机器人的动力学建模即为机器人后三关节 RCM 机构的动力学建模。由于 RCM 机构通常具有冗余约束[16],直接对其进行动力学分析有一定难度,因此有必要建立其等效模型。此外,需对等效模型的各构件质心位置进行分析,以便构建系统的动力学模型。

2.1　等效模型及各构件质心位置分析

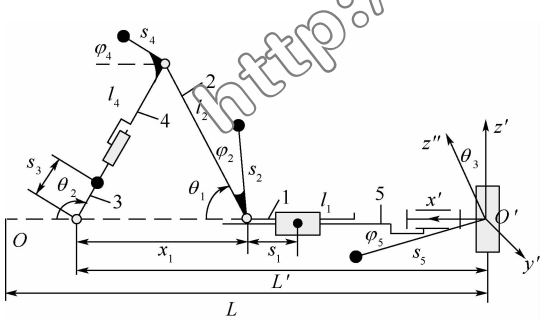
由图 3 可知,构件 AB 与构件 CD 运动规律一致,构件 FG 与构件 HJ 运动规律一致,因此建立等效模型,如图 4 所示。图 3 构件 AB、BI、CD 等效为图 4 构件 2,其长度为 l_2,其质量为 3 个构件总和;图 3 中构件 FG、GH、HJ 等效为图 4 中的构件 4,其长度为 l_5-l_5',其质量为 3 个构件总和;构件 2 与构件 4 的质心矢径通过式(3)得到。

$$\begin{cases} \boldsymbol{r}_{s2}=\dfrac{m_{AB}\boldsymbol{r}_{AB}+m_{BI}\boldsymbol{r}_{BI}+m_{CD}\boldsymbol{r}_{CD}}{m_{AB}+m_{BI}+m_{CD}} \\ \boldsymbol{r}_{s4}=\dfrac{m_{FG}\boldsymbol{r}_{FG}+m_{GH}\boldsymbol{r}_{GH}+m_{HJ}\boldsymbol{r}_{HJ}}{m_{FG}+m_{GH}+m_{HJ}} \end{cases} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{r}_{s2}$、$\boldsymbol{r}_{s4}$分别为图 4 中构件 2、构件 4 的质心矢径;$\boldsymbol{r}_{AB}$等为图 3 中对应构件的质心矢径;m_{AB}等为对应构件的质量。

易知等效后的各构件矢径为广义坐标的函数,质心矢径 $\boldsymbol{r}_{s2}$、$\boldsymbol{r}_{s4}$均可由矢径的模与矢径相对 x'轴角度完全表示;推导所得质心矢径表达式较复杂,因此使用多项式拟合矢径函数,得到矢径的模与矢径相对 x'轴角度关于广义坐标的等效函数。

对机器人系统 RCM 机构各构件质心位置分析,在图 4 所示 $O'x'y'z'$坐标系下各构件的质心位置函数表示为



s_i—各构件质心相对于转动关节的矢径的模;θ_i—关节变量;

φ_i—与构件 i 质心矢径相对 x'轴角度有关的参数。

图 4　等效后的 RCM 机构简图

Fig. 4　Equivalent diagram of RCM mechanism

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi}_1=[\theta_3,0,0]^{\mathrm{T}} \\ x_{s1}=L'-x_1-s_1 \\ y_{s1}=z_{s1}=0 \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi}_2=[\theta_3,\theta_1+\varphi_2,0]^{\mathrm{T}} \\ x_{s2}=L'-x_1+s_2\cos(\theta_1+\varphi_2) \\ y_{s2}=s_2\sin(\theta_1+\varphi_2)\sin\theta_3 \\ z_{s2}=s_2\sin(\theta_1+\varphi_2)\cos\theta_3 \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi}_3=[\theta_3,\theta_2,0]^{\mathrm{T}} \\ x_{s3}=L'+s_3\cos\theta_2 \\ y_{s3}=s_3\sin\theta_2\sin\theta_3 \\ z_{s3}=s_3\sin\theta_2\cos\theta_3 \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi}_4=[\theta_3,\theta_2,0]^{\mathrm{T}} \\ x_{s4}=L'-x_1+l_2\cos\theta_1+s_4\cos\varphi_4 \\ y_{s4}=(l_2\sin\theta_1+s_4\sin\varphi_4)\sin\theta_3 \\ z_{s4}=(l_2\sin\theta_1+s_4\sin\varphi_4)\cos\theta_3 \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi}_5=[\theta_3,0,0]^{\mathrm{T}} \\ x_{s5}=s_5\cos\varphi_5 \\ y_{s5}=s_5\sin\varphi_5\sin\theta_3 \\ z_{s5}=s_5\sin\varphi_5\cos\theta_3 \end{cases} \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{\Phi}_i$ 为构件 i 在 $O'x'y'z'$坐标系下的角位移;x_{si}、y_{si}和 z_{si}分别为构件 i 的质心在 x'、y'和 z'方向上的坐标表示。

2.2　动力学模型的建立

设机器人等效模型中各构件质心速度为 $v_{si}(i=1\sim5)$。取图 4 所示姿态为机器人各构件初始位置,$O'x'y'$面为系统零势能面,且不计机器人系统各构件间的摩擦。

根据 2.1 节所述眼内手术机器人各构件质心位置函数,建立机器人系统动力学模型。将式(4)~式(8)对时间求导,得到构件 i 在广义坐标系下的角速度及质心速度,如式(9)所示。

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\Phi}}_i=\dfrac{\partial\boldsymbol{\Phi}_i}{\partial x_1}\dot{x}_1+\dfrac{\partial\boldsymbol{\Phi}_i}{\partial\theta_1}\dot{\theta}_1+\dfrac{\partial\boldsymbol{\Phi}_i}{\partial\theta_2}\dot{\theta}_2+\dfrac{\partial\boldsymbol{\Phi}_i}{\partial\theta_3}\dot{\theta}_3 \\ \dot{x}_{si}=\dfrac{\partial x_{si}}{\partial x_1}\dot{x}_1+\dfrac{\partial x_{si}}{\partial\theta_1}\dot{\theta}_1+\dfrac{\partial x_{si}}{\partial\theta_2}\dot{\theta}_2+\dfrac{\partial x_{si}}{\partial\theta_3}\dot{\theta}_3 \\ \dot{y}_{si}=\dfrac{\partial y_{si}}{\partial x_1}\dot{x}_1+\dfrac{\partial y_{si}}{\partial\theta_1}\dot{\theta}_1+\dfrac{\partial y_{si}}{\partial\theta_2}\dot{\theta}_2+\dfrac{\partial y_{si}}{\partial\theta_3}\dot{\theta}_3 \\ \dot{z}_{si}=\dfrac{\partial z_{si}}{\partial x_1}\dot{x}_1+\dfrac{\partial z_{si}}{\partial\theta_1}\dot{\theta}_1+\dfrac{\partial z_{si}}{\partial\theta_2}\dot{\theta}_2+\dfrac{\partial z_{si}}{\partial\theta_3}\dot{\theta}_3 \end{cases} \tag{9}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

采用拉格朗日方程建立系统动力学模型:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial E_{\mathrm{k}}}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial E_{\mathrm{k}}}{\partial q_i}+\frac{\partial E_{\mathrm{p}}}{\partial q_i}=F_i \quad i=1,2,\cdots,n \tag{10}$$

式中:E_{k} 为系统动能;E_{p} 为系统势能;q_i 为广义坐标;F_i 为广义力,对应于驱动角 θ_1、θ_2、θ_3 以及驱动位移 x_1 的系统广义力,广义坐标为角位移时,F_i 为力矩,广义坐标为线位移时,F_i 为力;n 为广义坐标数,该 RCM 机构中 n 为 4。机器人系统的动能及势能分别为

$$E_{\mathrm{k}}=\sum_{i=1}^{5}\frac{1}{2}\left(m_i v_{si}^2+\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_i\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i\right) \tag{11}$$

$$E_{\mathrm{p}}=\sum_{i=1}^{5}m_i g h_i \tag{12}$$

式中:$\boldsymbol{I}_i$ 为构件 i 在 $O'x'y'z'$ 坐标系下的惯性张量;m_i 为各构件质心质量;h_i 为各构件质心相对于零势能面的高度。质心速度 v_{si}($i=1\sim5$)由式(13)得到:

$$v_{si}=\sqrt{\dot{x}_{si}^2+\dot{y}_{si}^2+\dot{z}_{si}^2} \tag{13}$$

将各参数代入式(10),整理得到化简后的系统动力学方程为

$$\boldsymbol{F}_i=\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) \tag{14}$$

式中:$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}$ 为与广义加速度有关的惯性力;$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}$ 为广义速度的二次型;$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})$ 为重力项。各参数具体表达式分别为

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})=[h_{ij}] \quad i=1\sim4;\ j=1\sim4 \tag{15}$$

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})=[c_{ij}] \quad i=1\sim4;\ j=1\sim4 \tag{16}$$

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})=[g_1,g_2,g_3,g_4]^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

经推导,得

$$\begin{cases}
h_{13}=h_{31}=h_{23}=h_{32}=h_{34}=h_{43}=0\\
h_{11}=J_2'+J_3'+m_2s_2^2\left(\frac{15}{13}\right)^2+m_4l_2^2\\
h_{12}=h_{21}=0.0351m_4l_2(\sin\theta_1\cos\varphi_4+\cos\theta_1\sin\varphi_4)\\
h_{14}=h_{41}=\frac{15}{13}m_2s_2\sin\left(\frac{15}{13}\theta_1\right)+m_4l_2\sin\theta_1\\
h_{22}=m_3s_3^2+0.0351^2m_4+J_4'+J_5'+J_8'\\
h_{24}=h_{42}=0.0351m_4\cos\varphi_4\\
h_{33}=m_2s_2^2\sin^2\left(\frac{15}{13}\theta_1\right)+m_3s_3^2\sin^2\theta_2+m_4(l_2\sin\theta_1+s_4\sin\varphi_4)^2+m_5s_5^2\sin^2\varphi_5+J_{\mathrm{Total}}\\
h_{44}=m_1+m_2+m_4
\end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases}
c_{11}=c_{12}=c_{14}=c_{22}=c_{24}=c_{34}=c_{42}=c_{43}=c_{44}=0\\
c_{13}=-\frac{15}{13}m_2s_2^2\sin\left(\frac{15}{13}\theta_1\right)\cos\left(\frac{15}{13}\theta_1\right)\dot{\theta}_3-m_4(l_2\sin\theta_1+s_4\sin\varphi_4)l_2\dot{\theta}_3\cos\theta_1\\
c_{21}=0.0351m_4l_2(\cos\theta_1\cos\varphi_4-\sin\theta_1\sin\varphi_4)\dot{\theta}_1\\
c_{23}=0.0351m_4\dot{\theta}_3(l_2\sin\theta_1+s_4\sin\varphi_4)\sin\varphi_4-m_3s_3^2\dot{\theta}_3\sin\theta_2\cos\theta_2\\
c_{31}=2m_4\dot{\theta}_3(l_2\sin\theta_1+s_4\sin\varphi_4)l_2\cos\theta_1\\
c_{32}=-2m_4\dot{\theta}_3(l_2\sin\theta_1+s_4\sin\varphi_4)0.0351\sin\varphi_4\\
c_{33}=2\times\frac{15}{13}\dot{\theta}_1m_2s_2^2\sin\left(\frac{15}{13}\theta_1\right)\cos\left(\frac{15}{13}\theta_1\right)+2m_3s_3^2\dot{\theta}_2\sin\theta_2\cos\theta_2\\
c_{41}=\left(\frac{15}{13}\right)^2\dot{\theta}_1m_2s_2\cos\left(\frac{15}{13}\theta_1\right)+\dot{\theta}_1m_4l_2\cos\theta_1
\end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases}
g_1=\frac{15}{13}m_2gs_2\cos\left(\frac{15}{13}\theta_1\right)\cos\theta_3+m_4gl_2\cos\theta_1\cos\theta_3\\
g_2=m_3gs_3\cos\theta_2\cos\theta_3-0.0351m_4g\sin\varphi_4\cos\theta_3\\
g_3=-m_3gs_2\sin\left(\frac{15}{13}\theta_1\right)\sin\theta_3-m_3gs_3\sin\theta_2\sin\theta_3-m_4g(l_2\sin\theta_1+s_4\sin\varphi_4)\sin\theta_3+m_5gs_5\sin\varphi_5\sin\theta_3\\
g_4=0
\end{cases} \tag{20}$$

式中:J_j'($j=1\sim8$)分别为图 3 中各构件质心相对于 y' 轴的转动惯量;J_{Total} 为图 4 机器人初始状态各构件相对于 x' 轴的转动惯量总和。

由式(14)可知,已知各连杆位置、速度、加速度曲线即可求得对应的各驱动关节力矩曲线,即机器人逆动力学表示。值得注意的是,式(14)所述动力学方程具有 4 个广义坐标,分别为 θ_1、θ_2、θ_3 和 x_1,其中 θ_1、θ_2 和 θ_3 为驱动关节变量,将式(1)和式(2)代入式(14)所述动力学方程,得到关于 θ_1、θ_2 与 θ_3 的动力学方程,其中 F_1、F_2 和 F_3 分别对应 θ_1、θ_2 和 θ_3 的 3 个广义坐标产生的广义力。

3 眼内手术机器人的重力补偿方法

根据第 2 节推导的动力学模型,可知动力学方程中重力项对于系统驱动力或力矩的影响较为明显。通常采用的具有固定重力补偿的 PD 控制,该控制方法虽然可有效补偿重力项,但必须事

http://bhxb.buaa.edu.cn

先得知各驱动关节的期望位置,不能实时跟踪关节轨迹,同时该方法忽略了各关节变量之间的耦合。针对以上重力补偿方法的缺陷,设计一种可在线重力补偿的计算力矩法[17]。该重力补偿方法不仅可实时地获取重力项并补偿,并且可以对期望的关节变量轨迹曲线进行跟踪。

该控制方案的基本思路为,在内控制回路中引入非线性补偿,且机器人的重力项包括在该非线性补偿中,使得机器人系统变为易于控制的线性定常系统,该控制方案的结构框图如图 5 所示,引入控制为

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{u} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) \tag{21}$$

机器人系统的受控方程为

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{u} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) \tag{22}$$

$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})$可逆,且假定获得的机器人各参数名义值足够精确,可忽略模型中各矩阵与机器人实际矩阵的误差,经过化简,受控方程等价于如下定常系统:

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{u} \tag{23}$$

将该定常系统引入 PD 控制:

$$\boldsymbol{u} = \ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{d}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{d}}\dot{\boldsymbol{e}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{e} \tag{24}$$

式中:$\boldsymbol{K}_{\mathrm{d}}$ 与 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{p}}$ 为正定矩阵,由 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{d}}$ 与 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{p}}$ 的正定性可知$(\dot{\boldsymbol{e}},\boldsymbol{e}) = (\boldsymbol{0},\boldsymbol{0})$是全局稳定的平衡点,因此从任何初始条件出发,总有$(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) \rightarrow (\boldsymbol{q}_{\mathrm{d}},\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{d}})$,即实现了全局稳定的重力补偿和轨迹跟踪。值得注意的是,该眼内手术机器人的重力补偿以 2.1 节所述 θ_1、θ_2、θ_3 的 3 个关节变量作为补偿的目标变量。

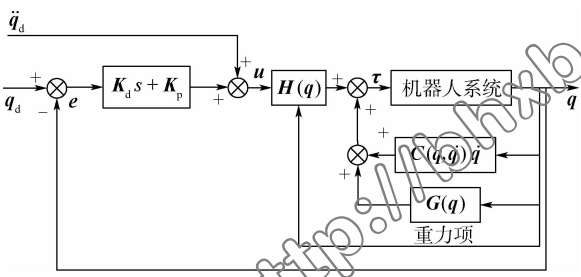


图 5　重力补偿模型结构框图

Fig. 5　Structure diagram of gravity compensation model

4　MATLAB 重力补偿仿真及结果分析

眼内手术机器人参数如下:机器人各构件采用均质铝合金材料,密度为 2.7 kg/m^3,各构件长度 l_2 = 60 mm,L' = 294 mm,各构件矢径的模为 s_1 = 25 mm,s_2 = 35.058 3 mm,s_3 = 21.747 mm,s_5 = 137.885 mm,m_1 = 0.142 kg,m_2 = 0.078 kg,m_3 = 0.036 kg,m_4 = 0.28 kg,m_5 = 1.32 kg,φ_4 = 39.96°,φ_5 = 5.173°。设机器人系统各关节变量初始位置为 q = [44.05°,135°,0°],3 s 后到达期望位置[40°,120°,45°],则该眼内手术机器人 RCM 机构的关节变量期望轨迹可用如下函数表示:

$$\theta_1 = \begin{cases} -1.5t^3 + 0.75t^4 - 0.1t^5 + 44.05 \\ \qquad 0 < t < 3 \\ 40 \quad t \geqslant 3 \end{cases} \tag{25}$$

$$\theta_2 = \begin{cases} -5.56t^3 + 2.78t^4 - 0.37t^5 + 135 \\ \qquad 0 < t < 3 \\ 120 \quad t \geqslant 3 \end{cases} \tag{26}$$

$$\theta_3 = \begin{cases} 16.67t^3 - 8.33t^4 + 1.11t^5 \quad 0 < t < 3 \\ 45 \quad t \geqslant 3 \end{cases} \tag{27}$$

重力补偿模型参数矩阵 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{d}}$ = diag(4.5,3.8,8.5),$\boldsymbol{K}_{\mathrm{p}}$ = diag(0.028 8,0.038 8,0.26),仿真时间为 5 s,对于给定的关节变量变化曲线,采用拉格朗日逆动力学,得到采样周期内各关节变量驱动力矩变化曲线,如图 6 所示,可知驱动力矩曲线变化平缓,且没有突变;稳定时刻各关节的驱动力矩即为各关节变量对应的重力项,大小分别为 0.104 3、−0.046 5 和 −0.036 1 N·m。

为分析重力补偿策略的效果,设定一对照模型与重力补偿模型进行对比,对照模型为不采用重力补偿的独立 PD 控制模型,该模型结构框图如图 7 所示。采用 MATLAB/Simulink 对上述 2 种模型进行仿真,得到采样周期内各关节变量的响应曲线。

独立 PD 控制模型的响应曲线如图 8 所示,其参数矩阵的选取与重力补偿模型参数矩阵一致。分析可知,未采用重力补偿时,响应曲线达到稳定值后存在稳态误差,其大小受重力项的影响,稳态误差分别为 −3.621 7°,1.195 9°,0.138 9°。值得注意的是,图 8 所示独立 PD 控制模型各关

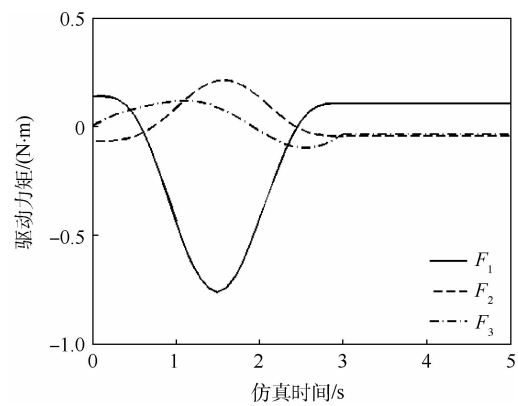


图 6　机器人系统驱动力矩变化曲线

Fig. 6　Driving torque variation curves of robot system

http://bhxb.buaa.edu.cn

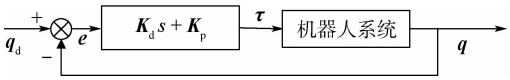


图 7 独立 PD 控制模型结构框图

Fig. 7 Structure diagram of independent PD control model

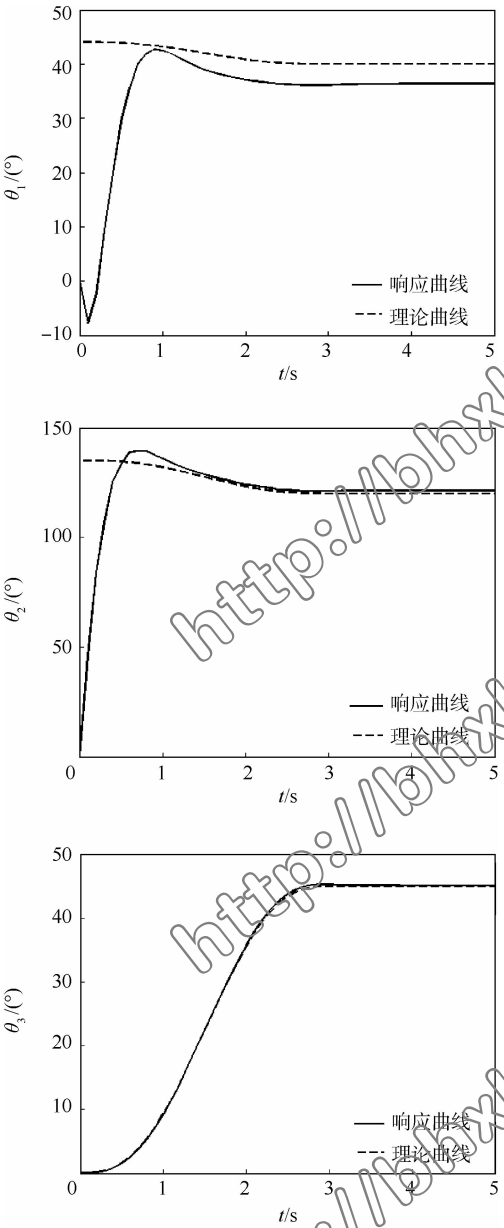


图 8 独立 PD 控制模型响应曲线

Fig. 8 Response curves of independent PD control model

节的驱动角均从 0°开始变化,且前 2 个关节在仿真初期与期望曲线差距较大,这是由于该模型不能完成对连续时变轨迹的跟踪任务,对前两关节设定的从非零初始条件出发的轨迹无法实现全程跟踪。

图 9 为采用第 3 节所述在线重力补偿的计算力矩法模型的响应曲线,由图可知响应曲线变化平稳,且有较好的跟踪特性,模型的稳态误差为零。对比图 8 与图 9,分别取 ±2% 与 ±5% 作为

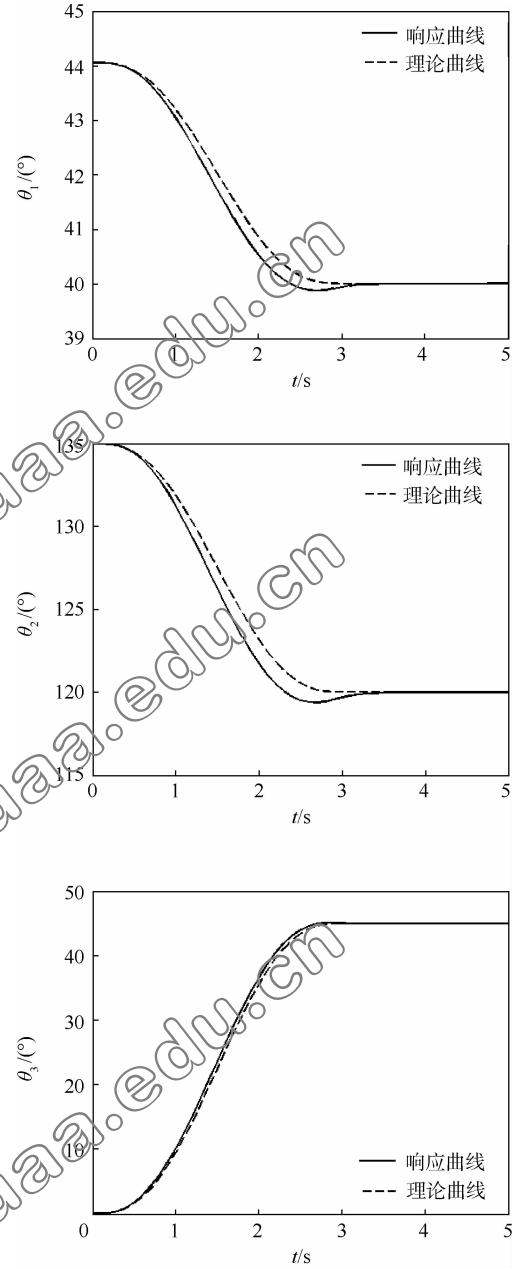


图 9 基于计算力矩法的重力补偿模型响应曲线

Fig. 9 Response curves of gravity compensation model based on computed torque method

响应曲线的误差带,则各关节变量响应曲线调节时间如表 2 所示。

由图 8、图 9 及表 2 可知,相对于未重力补偿的独立 PD 控制模型,重力补偿模型响应曲线的调节时间较小,响应速度相比较有一定优势,且模型可有效补偿系统的重力项,因此重力补偿模型相对于独立 PD 控制模型具有明显优势。

图 10 所示为采用重力补偿模型各关节变量期望曲线与响应曲线的差值变化,由图可知,关节变量 θ_1 在 $t = 1.9$ s 达到最大误差 0.337 8°,关节变量 θ_2 在 $t = 1.9$ s 达到最大误差 1.453 3°,关节变量 θ_3 在 $t = 1.8$ s 达到最大误差 −1.1342°。

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 2　各关节响应曲线的调节时间

Table 2　Adjusting time of response curve of each joint

误差带	关节变量	调节时间/s	
		计算力矩法	PD 控制模型
±2%	θ_1	1.9	2.0
	θ_2	1.9	2.1
	θ_3	2.4	2.6
±5%	θ_1	1.4	1.7
	θ_2	1.5	1.6
	θ_3	2.3	2.4

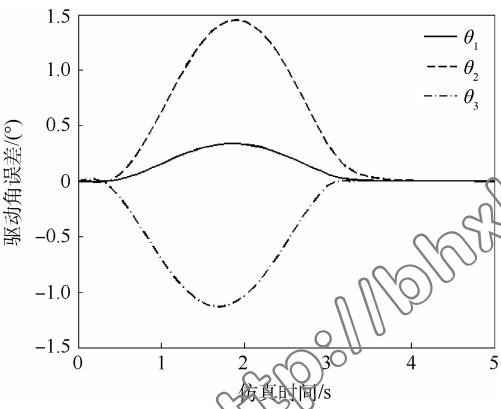


图 10　重力补偿模型期望曲线与响应曲线的差值

Fig. 10　Difference between expected curves and response curves of gravity compensation model

分析可知,从 $t=0$ s 开始,各关节响应位置与期望位置重合,随仿真时间变化,响应位置与期望位置误差变大,分别于 $t=1.9$ s,$t=1.9$ s 与 $t=1.8$ s 达到峰值并逐渐减小,且误差均不超过 1.5°;因此该重力补偿模型的补偿精度高,具有良好跟踪特性,该模型有较高的可行性。

5　结　论

1)本文给出一种基于 RCM 机构的眼内手术机器人的动力学模型,以便对机器人系统进行力矩控制。

2)通过与未重力补偿的独立 PD 控制模型进行比较,证明重力补偿模型可有效补偿系统的重力项,且响应速度有一定优势。

3)通过分析重力补偿模型期望曲线与响应曲线的差值变化,验证重力补偿模型的重力补偿精度高,具有良好的跟踪特性,该模型有较高的可行性。

参考文献(References)

[1] WEI W, GOLDMAN R, SIMAAN N, et al. Design and theoretical evaluation of micro-surgical manipulators for orbital manipulation and intraocular dexterity[C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 3389-3395.

[2] 肖晶晶,杨洋,沈丽君,等. 视网膜血管搭桥手术机器人系统的研究[J]. 机器人,2014,36(3):293-299.
XIAO J J, YANG Y, SHEN L J, et al. A robotic system for retinal vascular bypass surgery[J]. Journal of Robotics, 2014, 36(3): 293-299(in Chinese).

[3] BECKER B C. Vision-based control of a handheld micromanipulator for robot-assisted retinal surgery[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2012.

[4] 裴旭,于靖军,毕树生,等. 一维远程运动中心机构的型综合[J]. 机械工程学报,2009,45(2):144-148.
PEI X, YU J J, BI S S, et al. Type synthesis for one-dimensional remote-center-of motion mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 144-148(in Chinese).

[5] 黄龙,杨洋,苏鹏,等. 1R1T 远程运动中心机构的型综合[J]. 机械工程学报,2015,51(13):131-136.
HUANG L, YANG Y, SU P, et al. Type synthesis of 1R1T remote center of motion mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 131-136(in Chinese).

[6] GIJBELS A, WOUTERS N, STALMANS P, et al. Design and realisation of a novel robotic manipulator for retinal surgery[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013: 3598-3603.

[7] GIJBELS A, VANDER POORTEN E B, STALMANS P, et al. Design of a teleoperated robotic system for retinal surgery[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 2357-2363.

[8] 肖晶晶,杨洋,李大寨,等. 眼科显微手术机器人研究进展及关键技术分析[J]. 机械工程学报,2013,49(1):15-22.
XIAO J J, YANG Y, LI D Z, et al. Advances and key techniques of ophthalmic microsurgical robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 15-22(in Chinese).

[9] 蔡自兴. 机器人学基础[M]. 北京:机械工业出版社,2009:6.
CAI Z X. Fundamentals of robotics[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 6(in Chinese).

[10] LIU X, LI H, WANG J, et al. Dynamics analysis of flexible space robot with joint friction[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 47: 164-176.

[11] 刘善增,余跃庆,刘庆波,等. 3-$\underline{R}$RC 并联机器人动力学分析[J]. 机械工程学报,2009,45(5):220-224.
LIU S Z, YU Y Q, LIU Q B, et al. Dynamic analysis of 3-$\underline{R}$RC parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 220-224(in Chinese).

[12] DE LUCA A, SICILIANO B, ZOLLO L. PD control with on-line gravity compensation for robots with elastic joints: Theory and experiments[J]. Automatica, 2005, 41(10): 1809-1819.

[13] 龚捷,鲍金锋,衣冠超,等. 基于计算力矩法的装载机工作装置轨迹控制[J]. 机械工程学报,2010,46(13):141-146.
GONG J, BAO J F, YI G C, et al. Trajectory-following control for manipulator of wheel loaders based on computed torque[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 141-146(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

[14] 唐新星,侯敬巍,倪涛,等. 在线重力补偿下工程机器人自主作业轨迹跟踪性能分析[J]. 农业工程学报,2013,29(3):30-37.
TANG X X,HOU J W,NI T,et al. Analysis on autonomous task trajectory tracking performance of construction robot with online gravity compensation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(3):30-37(in Chinese).

[15] CRAIG J J. Introduction to robotics: Mechanics and control [M]. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005: 62-100.

[16] 宗光华,裴旭,于靖军,等. 双平行四杆型远程运动中心机构的设计[J]. 机械工程学报,2007,43(12):103-108.
ZONG G H,PEI X,YU J J,et al. Design of double parallelogram remote-center-of-motion mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2007,43(12):103-108(in Chinese).

[17] 霍伟. 机器人动力学与控制[M]. 北京:高等教育出版社,2005:124-140.
HUO W. Robot dynamics and control[M]. Beijing:Higher Education Press,2005:124-140(in Chinese).

作者简介:

陈翔 男,硕士研究生。主要研究方向:医疗机器人技术、机器人控制理论。

黄龙 男,博士研究生。主要研究方向:机器人机构学、医疗机器人技术。

杨洋 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:机器人机构学、医疗机器人技术、精密机械设计。

Gravity compensation of an intraocular surgery robot based on computed torque method

CHEN Xiang, HUANG Long, YANG Yang*

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To improve the positioning accuracy and stability of an intraocular surgery robot which has a remote center of motion (RCM) mechanism, the coordinate system of the robot is established. Based on the equivalent system model, the instantaneous centroid position of model components is analyzed. The dynamic model of the robot system is built by using the Lagrange equation. On the basis of the dynamic model, the gravity compensation model is built by using computed torque method and it is simulated by using MATLAB/Simulink. Each joint motion response curve is compared between the independent proportional plus derivative (PD) control model and the gravity compensation model. The results of simulation show that the gravity compensation model can compensate the gravity effectively. The difference between response curve and expected curve of gravity compensation model is analyzed, which prove that the gravity compensation model has high precision and feasibility.

Keywords: remote center of motion (RCM) mechanism; intraocular surgery robot; dynamics; computed torque method; gravity compensation; Simulink simulation

Received: 2016-05-26; **Accepted**: 2016-12-16; **Published online**: 2017-01-11 16:24
URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20170111.1624.003.html
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51175013)
* **Corresponding author**. E-mail: 07288@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn