

3-SPS/S 踝关节并联康复机构控制系统仿真

王海芳, 李新庆, 乔湘洋, 祁超飞
(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 踝关节是人体下肢关节中较易损伤的部位, 针对其结构特点, 搭建了基于 3-SPS/S 的并联康复机构并对其进行运动学反解. 进而以 3-SPS/S 踝关节并联康复机构为研究对象, 利用 Matlab 里的 SimMechanics 工具箱建立机构仿真平台, 给出动平台规划运动轨迹并生成机构驱动杆输入运动信号, 对机构模型进行仿真分析并给出 3D 效果图. 结果表明, 该方法为并联康复机构控制策略的研究提供了安全高效可视的仿真平台, 便于展开针对并联康复机构特点的各种控制策略的研究.

关 键 词: 并联机构; 控制系统; 仿真; SimMechanics; 康复; 踝关节
中图分类号: TP 242; TP 391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)03-0310-06

Simulation of 3-SPS/S Parallel Manipulator Control System for Ankle Rehabilitation

WANG Hai-fang, LI Xin-qing, QIAO Xiang-yang, QI Chao-fei
(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China.
Corresponding author: WANG Hai-fang, E-mail: hfwang@neuq.edu.cn)

Abstract: The ankle is one of vulnerable parts of the low limb joints of the human body. Based on its structural characteristics, a 3-SPS/S parallel manipulator for ankle rehabilitation is built, and the inverse kinematics is solved by its dimensional characteristics. Then, the simulation platform of 3-SPS/S parallel manipulator for ankle rehabilitation is established by SimMechanics toolbox in Matlab software. A target trajectory is provided to produce input signals of actuating arms. Afterwards, the dynamics of parallel rehabilitation manipulator model are analyzed, and 3D rendering is generated. The experimental results show that it can provide the efficient and visual simulation platform to study the control strategy of parallel rehabilitation manipulator.

Key words: parallel manipulator; control system; simulation; SimMechanics; rehabilitation; ankle

踝关节在人行走、奔跑、跳跃过程中起到稳定平衡的重要作用, 是人体的重要承载关节, 因此它是人体下肢关节中比较容易损伤的部位^[1]. 传统的踝关节康复训练大多数是由康复医师进行接触式的辅助康复训练, 患者被动训练, 方式单一, 医师工作量大导致训练时间较短, 患者的康复周期较长. 其次, 人工辅助康复训练没有反馈机制, 只能依靠医师经验, 训练没有针对性, 导致康复期进一步延长. 随着医疗康复机器人逐渐引起社会各界的普遍关注, 踝关节康复机器人技术也迅速发展起来. 文献[2]对踝关节康复机构进行了机构

学分析, 并采用伺服电机自带的控制策略进行控制. 文献[3]对一种新型踝关节康复训练机器人进行了机构学以及运动学和动力学问题的分析, 在控制方面利用给定运动方程通过位置反解得到各个驱动件运动规律作为输入进行开环控制. 虽然人们对康复机构的研究给予了充分的重视, 但研究内容仅侧重于机构学、运动学和动力学, 而对其控制策略和控制系统的研究工作少之又少.

因此, 针对踝关节的组织结构特点, 搭建基于 3-SPS/S (S: spherical, 球副; P: prismatic, 移动副) 并联机构, 以 Simulink/SimMechanics 为仿真

平台,建立踝关节并联康复机构系统模型,进而设计 PID 控制器,进行 3-SPS/S 踝关节并联康复机构控制系统的仿真分析.该方法为开展康复机构控制策略的研究奠定了理论和实验基础.

1 3-SPS/S 踝关节并联康复机构仿真模型

1.1 3-SPS/S 并联康复机构设计

如图 1a 所示,踝关节由小腿的胫骨和腓骨远端的关节面、距骨以及周围的韧带几部分共同组成.而胫骨远端向内侧凸起的内踝、腓骨远端向外侧凸起的外踝、胫骨下端后缘突出的后踝和胫骨远端几部分共同构成踝穴,距骨则被紧密包围在踝穴内进行活动,形成了整个踝关节.因此从机构学角度上来讲,距骨在踝穴内所进行的反复活动在某种程度上可将其视作一个圆锥体在踝穴内反复滚动的过程.

为便于对踝关节进行运动学分析,基于笛卡尔坐标系将踝关节的生理空间划分为额状面、矢状面和横切面,如图 1a 所示;由其所生成的额状轴、矢状轴和垂直轴,见图 1b^[2].踝关节主要有 3 种基本运动:围绕垂直方向的 z 轴进行反复旋转的内旋/外旋运动、围绕水平方向的 y 轴进行反复旋转的背屈/跖屈运动和围绕水平方向的 x 轴进行反复旋转的内翻/外翻运动,旋转轴 x,y,z 如图 1c 所示.

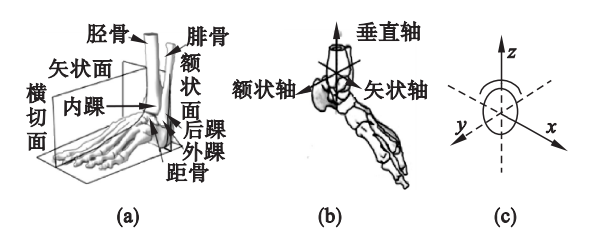


图 1 踝关节结构模型
Fig. 1 Ankle structure model

(a)—踝关节骨骼结构;(b)—解剖轴;
(c)—踝关节简化.

根据机构学原理,为满足踝关节康复训练的要求,可采用 3-SPS/S 并联机构.3-SPS/S 并联机构是一种典型的空三自由度转动的并联机构,主要由动平台、静平台、驱动杆支链和支撑杆四部分组成.如图 2a 所示,动平台为 $\Delta B_1B_2B_3$ 、静平台为 $\Delta A_1A_2A_3$,它们之间通过 3 条 SPS 支链相连,即:支链两端与上下两个平台间分别通过球铰连接,驱动杆本身可由电机控制实现伸缩.中间为支撑杆,支撑杆下端固定在静平台中心位置,上端

通过球铰与动平台中心位置相连.通过电机驱动杆件伸缩,实现动平台绕 x,y,z 三个轴的转动.搭建的实验平台如图 2b 所示,球铰(S)用一个 U 副和一个转动副 R 代替可以避免驱动杆同轴转动,驱动副由移动副 P 通过球铰分别与上平台和下平台相连.由上文可知踝关节的康复训练实际是踝关节绕三个互相垂直相交的坐标轴的旋转运动,因此 3-SPS/S 并联机构能够满足踝关节的康复训练目的.

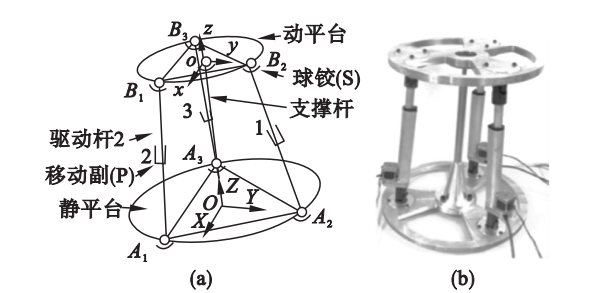


图 2 3-SPS/S 并联康复机构
Fig. 2 3-SPS/S parallel rehabilitation manipulator
(a)—机构简图;(b)—实物图.

1.2 3-SPS/S 并联康复机构位置分析

根据人类特征数据库获得踝关节转动角度的最大允许范围如表 1 所示^[4].为了使康复训练过程中踝关节转动的角度得到合理控制,需要对 3-SPS/S 并联康复机构进行位置分析.此并联康复机构位置分析的目标是确定机构驱动关节位移量与动平台位姿变化量之间的映射关系.与串联机构相反,并联机构大部分的位置正解都比较复杂,但是机构的位置反解一般比较简单,具有显式解析式^[5].因此,通过位置反解对 3-SPS/S 并联康复机构进行位置分析,来获得输入输出构件的关系.

表 1 踝关节最大允许运动范围 Table 1 Maximum allowable ankle range of motion	
运动类型	角度/(°)
背屈	20.3 ~ 29.8
跖屈	32.6 ~ 40.8
内翻	14.5 ~ 22.0
外翻	10.0 ~ 17.0
内旋	22.0 ~ 36.0
外旋	15.4 ~ 25.9

如图 2a 所示,在动平台上建立动坐标系 $o-xyz$ 、静平台上建立静坐标系 $O-XYZ$,且坐标原点均位于平台中心点.动平台外接圆半径为 r ,静平台外接圆半径为 R .假设 B_i^m 为 B_i 点相对于静平

台坐标系 $O-XYZ$ 的相对坐标值, B_i^B 为 B_i 点的绝对坐标值, A_i^B 为 A_i 点的绝对坐标值. 动平台和静平台中心点的距离为 h . 动平台按绕 z 轴、 y 轴、 x 轴的顺序转动, 角度分别为 γ, β, α . 由图 2a 可知, 各点的坐标如下:

$$A_i^B = \begin{bmatrix} X_{A_i} \\ Y_{A_i} \\ Z_{A_i} \end{bmatrix}, B_i^m = \begin{bmatrix} x_{B_i} \\ y_{B_i} \\ z_{B_i} \end{bmatrix}, B_i^B = \begin{bmatrix} X_{B_i} \\ Y_{B_i} \\ Z_{B_i} \end{bmatrix},$$
$$o^B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix}, R_m^B = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix};$$
$$B_i^B = R_m^B B_i^m + o^B.$$

式中, R_m^B 是坐标系 $\{m\}$ 到坐标系 $\{B\}$ 的旋转变换矩阵.

由几何关系 B_i^m 和 A_i^B 可表示为

$$B_1^m = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2^m = \begin{bmatrix} 0 \\ r \\ 0 \end{bmatrix}, B_3^m = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} -\sqrt{3} \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix};$$
$$A_1^B = \frac{R}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, A_2^B = \begin{bmatrix} 0 \\ R \\ 0 \end{bmatrix}, A_3^B = \frac{R}{2} \begin{bmatrix} -\sqrt{3} \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

旋转变换矩阵为

$$R_m^B = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \times$$
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}; R_m^B = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{bmatrix}.$$

其中:

$$u_{11} = \cos\beta\cos\gamma; u_{12} = \cos\gamma\sin\alpha\sin\beta - \sin\gamma\cos\alpha;$$
$$u_{13} = \sin\alpha\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma\sin\beta; u_{21} = \cos\beta\sin\gamma;$$
$$u_{22} = \sin\gamma\sin\beta\sin\alpha + \cos\alpha\cos\gamma;$$
$$u_{23} = \sin\beta\sin\gamma\cos\alpha - \sin\alpha\cos\gamma;$$
$$u_{31} = -\sin\beta; u_{32} = \sin\alpha\cos\beta;$$
$$u_{33} = \cos\alpha\cos\beta.$$

由 $B_i^B = R_m^B B_i^m + o^B$ 可求得

$$B_1^B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{3}ru_{11} - ru_{12} \\ \sqrt{3}ru_{21} - ru_{22} \\ \sqrt{3}ru_{31} - ru_{32} + 2h \end{bmatrix};$$
$$B_2^B = \begin{bmatrix} ru_{12} \\ ru_{22} \\ ru_{32} + h \end{bmatrix};$$

$$B_3^B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\sqrt{3}ru_{11} - ru_{12} \\ -\sqrt{3}ru_{21} - ru_{22} \\ -\sqrt{3}ru_{31} - ru_{32} + 2h \end{bmatrix}.$$

由此, 每个支链 $l_i (i=1, 2, 3)$ 可表示为

$$L_i = |B_i^B - A_i^B| = \left[(X_{B_i} - X_{A_i})^2 + (Y_{B_i} - Y_{A_i})^2 + (Z_{B_i} - Z_{A_i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

若已知动平台的转动角度, 即 α, β, γ 的值, 便可求得每个支链 l_i 的长度. 通过减去初始状态各个支链的长度 l_i , 得到驱动杆长度的变化量.

2 3-SPS/S 并联康复机构控制系统建模

3-SPS/S 踝关节并联康复机构的控制过程即为动平台姿态的控制过程. 但是考虑到动平台的姿态难以测量, 进而将动平台的姿态问题通过位置反解间接地转化为驱动杆的位移控制. 具体控制器设计过程为: 首先给定动平台的期望位姿, 并通过运动学反解求得与期望位姿对应的各个驱动杆的位移; 其次将各个驱动杆的期望位移与实际位移及运动速度作为控制器的输入量, 作用到各个驱动杆上的力为输出量.

2.1 控制系统设计

由于并联机构的发展起步较晚, 目前对其基本上还沿用串联机构的控制策略. 近年来, 国内外相关的控制方法大都采用传统的 PID 控制技术^[6-7]. 常规 PID 控制原理框图如图 3 所示.

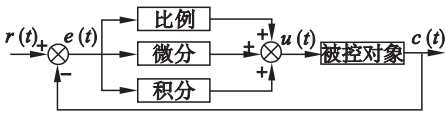


图 3 PID 控制原理图

Fig. 3 PID control schematic diagram

PID 控制器的微分方程数学模型为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right].$$

2.2 3-SPS/S 并联康复机构仿真模型

SimMechanics 是 Matlab 软件中的一个机构系统模块集, 通过对各种运动副连接的刚体进行建模与仿真, 实现对机构系统的动态性能分析与设计, 达到实时分析和模拟显示机构运动状态的目的^[8-10].

利用 SimMechanics 的特点建立 3-SPS/S 并联康复机构仿真平台. 平台由五部分组成: 轨迹生成模块 (leg trajectory), PID 控制器模块 (PID

Controller), 3 - SPS/S 并联康复机构模块 (3 - SPS/S platform), 轨迹跟踪模块 (trajectory tracking) 和传感显示模块 (scope). 其总体框架如图 4 所示. Leg Trajectory 通过反解期望的动平台位姿得到各支链运动轨迹. PID Controller 根据反

馈的偏差产生算法控制量. 3 - SPS/S platform 作为被控对象接受算法控制量并作出相应的运动. 轨迹跟踪模块对空间中动平台运动轨迹进行分析, 验证运动的正确性. 传感显示模块对动平台相应的位置、速度以及误差信息进行检测并显示.

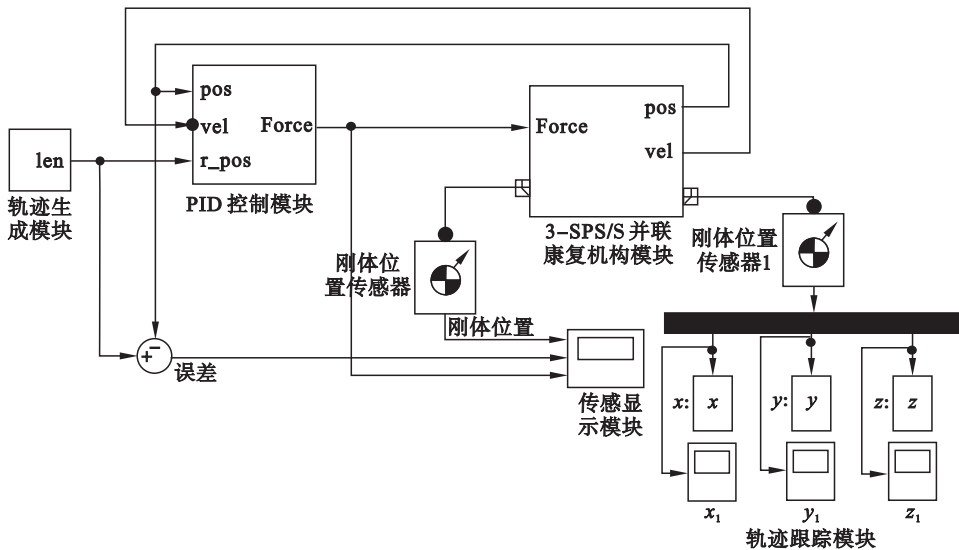


图 4 控制系统仿真模型
Fig. 4 Controller system simulation model

PID 控制器模块如图 5 所示.

3 仿真结果及分析

选用平台的结构参数如下: 动平台外接圆半径 $r = 125\text{ mm}$, 静平台外接圆半径 $R = 160\text{ mm}$, 动平台和静平台之间的距离 $h = 500\text{ mm}$. 初始条件下, 动平台与静平台平行, 且 2 个等边三角形对应的边平行. 经过多次试验, 按照控制效果取 PID 控制器的参数为: $K_p = 260$, $K_i = 10$, $K_d = 1.5$. 设动平台的运动轨迹为一个绕 x 轴持续正反转 30° 的圆弧. 通过运动反解编写轨迹生成程序, 得到各个驱动杆轨迹曲线如图 8 所示 (由于绕 x 轴运动时 2 个驱动杆运动相同, 故驱动杆 2 和驱动杆 3 轨迹曲线重合).

仿真结果如图 9 所示, Body Position 纵坐标表示动平台中心点的坐标值, Errors 纵坐标表示期望轨迹与实际轨迹的偏差, Force 纵坐标表示驱动杆受的驱动力. 从 Body Position 可以看出动平台中心点在运动过程中位置没有发生变化 (同理, x 坐标值与 y 坐标值曲线重合). 从 Errors 中可以看出 (同理, 驱动杆 2 与驱动杆 3 偏差曲线重合), 与期望轨迹相比较, 驱动杆最大位移偏差为 3.05 mm , 在相对误差允许范围内, 可见跟踪效果较为理想.

3 - SPS/S 并联康复机构模块 (3 - SPS/S platform) 的每条支链由 2 个刚体、2 个 S 关节和 1 个 P 关节组成, 借助于 SimMechanics 的各模块库, 按照要求连接各个模块, 形成各支链模型如图 6 所示.

选择适当的参数, 连接各模块, 打开菜单 simulation 选项, 选择 configuration parameters, 在 simmechanics 标签中勾选最后两项, 然后在 simulation 选项下点击 update diagram, 即可生成一个并联康复机构的 3D 仿真可视动画, 便于直观地观察康复机构运动状态, 如图 7 所示, 此处将与静平台相连的点直接与地面相连, 效果与连接静平台相同.

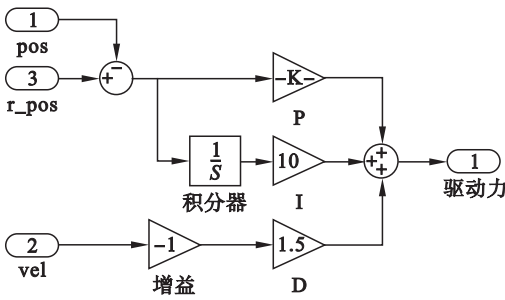


图 5 PID 控制器
Fig. 5 PID Controller

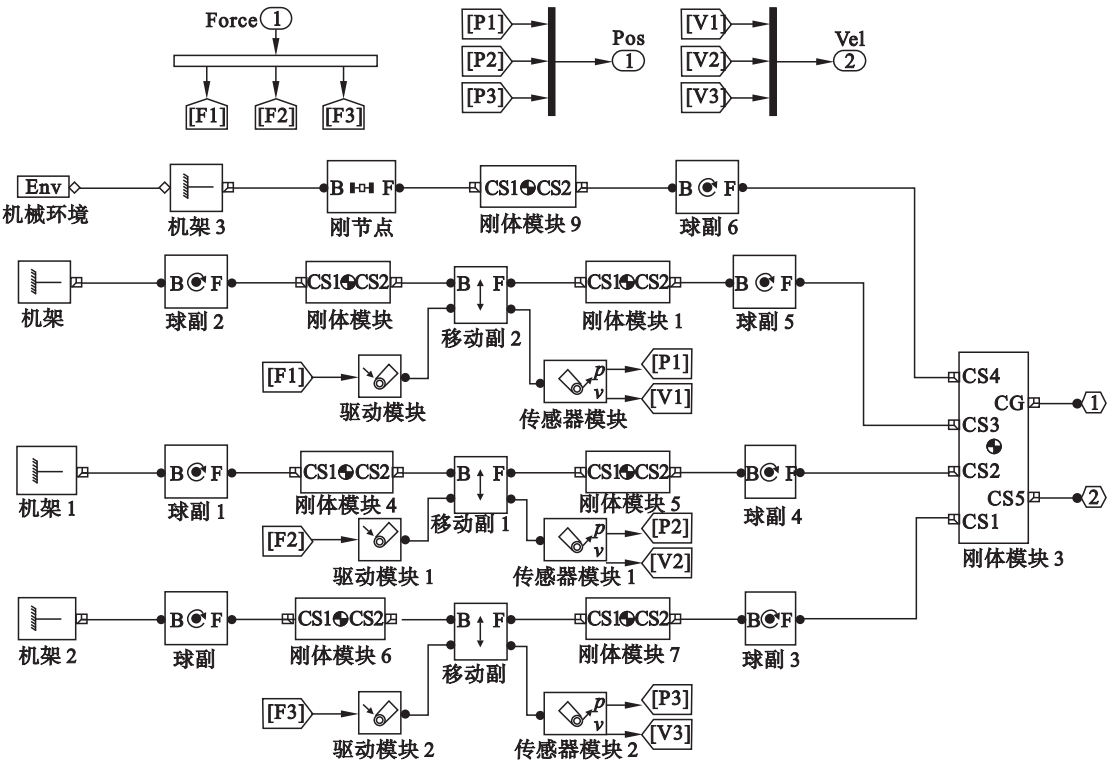


图 6 3-SPS/S 并联康复机构结构模型
Fig. 6 Structural model of 3-SPS/S parallel rehabilitation manipulator

仿真结果如图 10 所示.

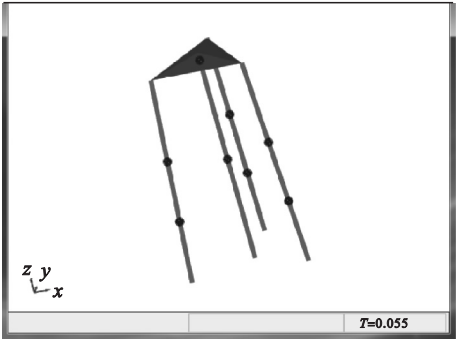


图 7 并联康复机构仿真 3D 效果图
Fig. 7 3D diagram of parallel rehabilitation manipulator simulation

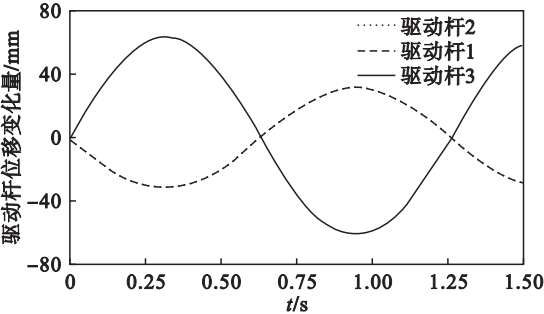


图 8 驱动杆轨迹曲线
Fig. 8 Trace curves of drive rods

为了方便跟踪动平台的运动轨迹,取相对于动平台中心点坐标系 $o-xyz$,坐标值为 $(0,0,20)$,单位为 mm 的点进行轨迹跟踪控制的仿真. 轨迹跟踪模块负责将该点坐标值保存到工作空间中,在 Matlab 命令行输入 `plot3(x,y,z,'*')` 得到

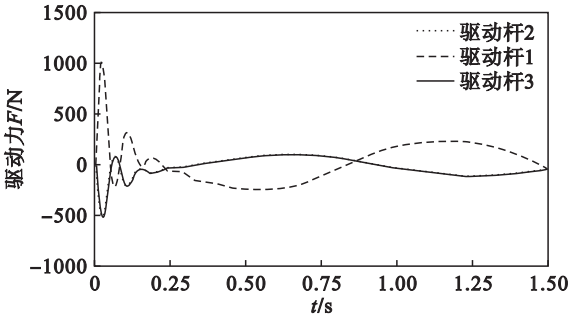
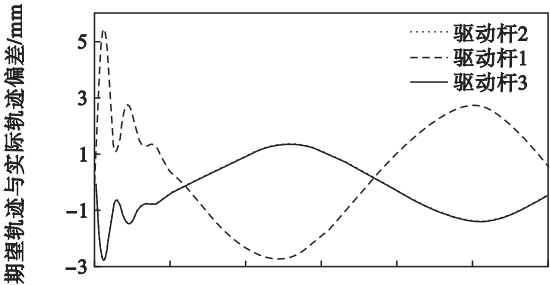
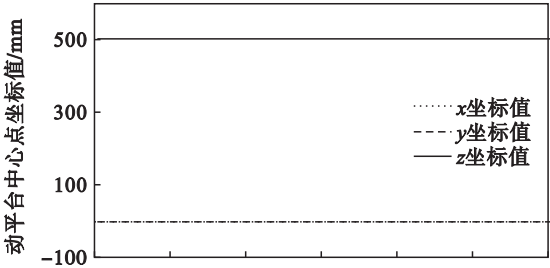


图 9 仿真结果
Fig. 9 Simulation results