

九自由度上肢康复机构及其运动学分析研究

梁辉^a,张广兴^a,王术徽^a,孔祥旭^a,王辉^a,汪传生^{a,b}

(青岛科技大学 a. 机电工程学院; b. 山东省高分子材料先进制造技术重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要:针对上肢的结构和运动性分析,提出一种具有九自由度的上肢康复机构,对该机构的特点进行简单介绍,利用修正后的 Kutzbach-Grübler 公式,对康复机构进行了自由度的求解计算,采用解析法对该机构进行了位置分析,利用串联机构的特性和球面解析理论求解该机构的位置正解,通过探讨机构的过渡层来求解机构的位置反解,得出机构位置反解的求解条件。通过运动仿真,验证了该康复机构运行的稳定性和可行性。针对不同部分的并联机构采用了不同的求解方法,为其他同类型的多层并串结构分析提供了参考。

关键词:康复机构;球面并联机构;自由度计算;位置分析

中图分类号:TH112 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)06-0039-05

9 Degrees of Freedom of Upper Limb Rehabilitation Mechanism and Its Kinematic Analysis

LIANG Hui^a, ZHANG Guangxing^a, WANG Shuhui^a, KONG Xiangxu^a, WANG Hui^a, WANG Chuansheng^{a,b}

(a. College of Mechanical and Electrical Engineering; b. Shandong Key Laboratory of Advanced Polymer

Material Manufacturing Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: In view of the upper structure and dynamic analysis, this paper puts forward a kind of 9 degrees of freedom of upper limb rehabilitation mechanism, briefly introduces the characteristics of this mechanism, uses the revised formula Grübler Kutzbach to calculate its degrees of freedom, analyzes its positioning by the analytic method and uses the characteristics of the serial mechanism and the spherical analytic theory to solve position of the positive solution, then, uses the transition layer of the mechanism to solve the location of the inverse solution, thus obtaining solution condition of the mechanism position inverse solution. And then, the running stability and feasibility of the rehabilitation mechanism are verified by the motion simulation. Different methods are used to solve the parallel mechanism of different parts. The reference is given to the analysis of other parallel structures of the same type.

Keywords: rehabilitation mechanism; spherical parallel mechanism; degree of freedom calculation; location analysis

0 引言

近年来,随着我国人口老龄化进程不断加快,脑卒中患者也不断增加。脑卒中引起偏瘫带来的肢体运动障碍不仅降低了患者的生活质量,而且给患者的生理和心理带来了极大的痛苦^[1-2]。传统的人工治疗方法效率低、劳动强度大,且不适合在家里操作。在现今医学领域,康复训练机器人利用机械手臂带动患肢在空间内进行康复训练运动,模拟日常生活中的手臂运动规律,通过控制实现手臂各个关节的运动训练、肌肉锻炼以及神经功能的恢复训练,使机器人与人的手臂协调运动^[3-4],取得了显著的效果。

本文结合并联结构和串联结构各自的优点,设计出一种适合不同人群的上肢康复机构。该康复机构既有串联机构运动空间大的优势,又有并联机构的刚度大、支撑能力强等特点^[5-6]。该结构可穿戴在患者的上肢上,通过控制调节能够很好地模拟人体上肢运动,然后带动患者的上肢运动,使患者康复训练达到良好效果。该机构结构简单,价格低廉,具有安全性、经济型和实用性。

1 机构介绍及其自由度计算

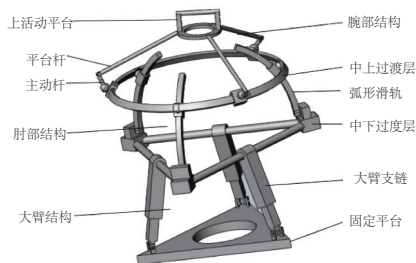
1.1 机构特点

上肢康复机构可帮助偏瘫患者进行肢体的康复训练,为了使患者康复过程更加安全,故设计机构的自由度至少与上肢自由度相同。本康复机构是将 3-RPC、3-RPR 和 3-PSR 并联结构串联成最终的 3 层康复结构,可实现上肢 7 个自由度的康复运动。下层部分 3-RPC 机构仿制的是机械臂的大臂,通过控制下层部分在 x 、 y 、 z 三轴上运动,可以实现肩部的二维转动,进行肩部的康复;中间部分 3-RPR 是球面并联机构,仿制的是机械臂的肘部,通过控制 3 个方向的转动,可以进行大臂的回转和肘部的转动,实现肘部伸展、收缩康复训练,其中的回转是将大臂部分不能完成的肩部回转移到中间部分。上层部分和中间部分结合使最终活动平台和中下过渡层之间的距离为前臂。上层部分 3-PSR 仿制的是腕部,人手抓握上活动平台,通过控制输出 3 个方向的转动,可以实现腕部屈伸、内收、外收以及内旋、外旋等康复训练。大臂结构和前臂结构的尺

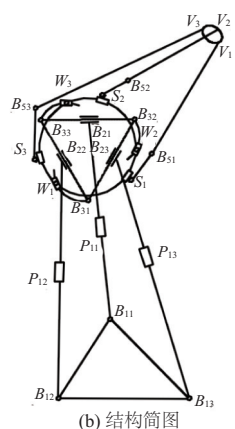
基金项目:山东省重点研发计划项目(2018GNC112007);山东省自然科学基金项目(ZR2016XJ003)

第一作者简介:梁辉(1971—),男,河南新乡人,副教授,博士,研究方向为并联运动机床(机器人)及其机构学理论、先进加工装备及控制技术。

寸设计是否合理,对机构实现其康复性能都有一定的影响,所以通过控制大臂结构移动副的伸缩以及调节腕部平台杆和主动杆之间的角度,可以改变其尺寸大小,以适应不同人群的需要,使康复过程更加安全有效。该康复结构的模型及其结构简图如图1所示。



(a) 结构模型图



(b) 结构简图

图1 九自由度康复结构模型图及结构简图

1.2 机构的自由度计算

如图2所示,大臂机构由1个固定平台、1个中下过渡层以及连接动静平台的3条相同支链组成,每条支链通过转动副R与中下过渡层联接,通过转动副R与固定平台联接,中间是移动副P,作为驱动。图中机构3个基面转动副的轴线是关于中心O点呈切线分布的,上、下平台运动副的连线都是等边三角形^[7-9]。

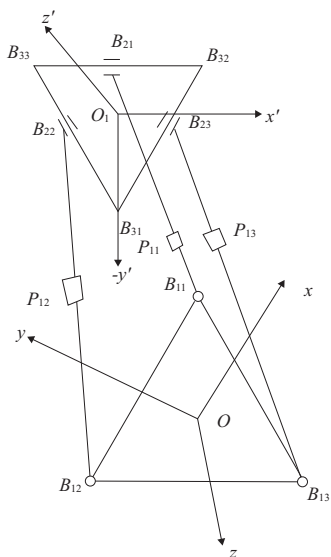


图2 大臂结构图

大臂部分被限制的是3个方向的转动,故该机构阶数为3。因此,计算得到该机构的自由度数为:

$$M_F = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \zeta =$$

$$3(8 - 9 - 1) + 9 = 3 \quad (1)$$

如图3所示,肘部机构由1个中下过渡层、1个中上过渡层以及连接动静平台的3条相同支链组成,每条支链通过转动副R与中上过渡层联接,通过转动副R与中下过渡层联接,中间是移动副P,作为驱动,图中机构3个基面转动副的轴线是关于中心O点呈切线分布的,上下过渡层运动副的连线都是等边三角形。

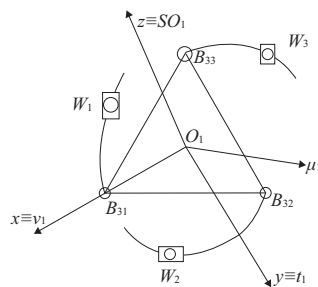


图3 肘部机构模型图与部分简图

中间肘部机构被限制的是3个方向的移动,故该机构阶数为3。该机构的自由度数为:

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \zeta = 3(8 - 9 - 1) + 9 = 3 \quad (2)$$

如图4所示,腕部机构由1个上活动平台、1个中上过渡层以及连接活动平台的3条相同支链组成,每条支链的平台杆和主动杆通过转动副R联接,各支链通过移动副P与中上过渡层联接,中间是球面副S,上过渡层运动副的连线是等边三角形。

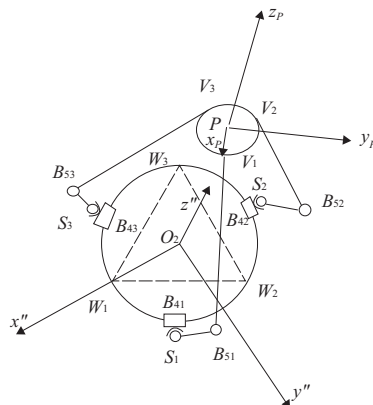


图4 腕部机构图

腕部机构被限制的是3个方向的移动,故该机构阶数为3。该机构的自由度数为:

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \zeta =$$

$$3(8 - 9 - 1) + 9 = 3 \quad (3)$$

由式(1)-式(3)知,九自由度上肢康复结构的自由度为3+3+3=9。

2 运动学分析

把并联机构广泛地运用到上肢康复机构中,首先必须解决3层并、串结构的分析问题,在此通过串联机构的特性对该康复结构进行位置分析。由于大臂部分的输出层是中间肘部的输入层,中间肘部的输出层又是腕部的输入层,故对该机构分成3部分分析,最后再合并,相比较传统对整体结构求解,大大减少了计算量。

2.1 位置正解

a) 对大臂部分进行分析

如图2所示,以等边三角形 $B_{11}B_{12}B_{13}$ 中心处为坐标原点 O ,以垂直面 $B_{11}B_{12}B_{13}$ 为 z 轴,以 $B_{13}O$ 为 y 轴,建立固定坐标系,再在中间平台部分建立新坐标系,中下坐标系中,以运动副 B_{31}, B_{32}, B_{33} 轴线交点为 O_1 ,以过点 O_1 且垂直面 $B_{31}B_{32}B_{33}$ 为 z' 轴,以过点 O_1 且垂直面 $B_{31}Oz'$ 为 x' 轴, y' 轴在面 $B_{31}Oz'$ 中。固定坐标由中下坐标系绕 z 轴旋转 -60° ,再沿 x 轴、 y 轴、 z 轴平移得来。

在已知中下坐标系 O_1 与固定坐标系 O 的位置矢量后,由于 B_{21}, B_{22}, B_{23} 在新坐标系的位置不固定,所以换一种解法,利用等效法进行几何计算。对于 OO_1 向量可以选取沿 x, y, z 轴的3条向量,即机构先沿 z 轴移动 z_1 ,再沿 y 轴移动 y_1 ,最后沿 x 轴移动 x_1 。

机构先沿 z 轴到达指定位置,设上、下三角边长分别为 a, b ,且均为等边三角形,则

$$l_1^2 = l_2^2 = l_3^2 = \left(\frac{\sqrt{3}a}{6} - \frac{\sqrt{3}b}{3} \right)^2 + z_1^2 \quad (4)$$

如图5所示,沿 y 轴到达指定位置,此时

$$l_1^2 = \left(\frac{\sqrt{3}a}{6} - \frac{\sqrt{3}b}{3} - y_1 \right)^2 + z_1^2$$

$$l_2^2 = l_3^2 = \left(\frac{\sqrt{3}a}{6} - \frac{\sqrt{3}b}{3} + \frac{1}{2}y_1 \right)^2 + z_1^2 \quad (5)$$

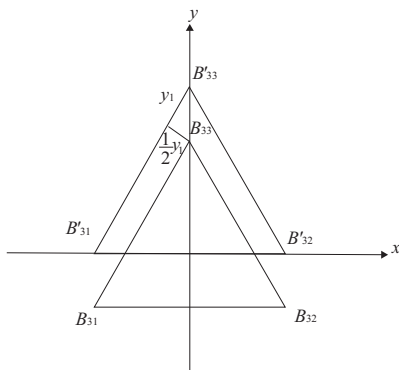


图5 沿 y 轴移动图

如图6所示,在沿 x 轴到达最后位置,此时

$$l_1^2 = \left(\frac{\sqrt{3}a}{6} - \frac{\sqrt{3}b}{3} - y_1 \right)^2 + z_1^2$$

$$l_2^2 = \left(\frac{\sqrt{3}a}{6} - \frac{\sqrt{3}b}{3} + \frac{1}{2}y_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}x_1 \right)^2 + z_2^2$$

$$l_3^2 = \left(\frac{\sqrt{3}a}{6} - \frac{\sqrt{3}b}{3} + \frac{1}{2}y_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}x_1 \right)^2 + z_1^2 \quad (6)$$

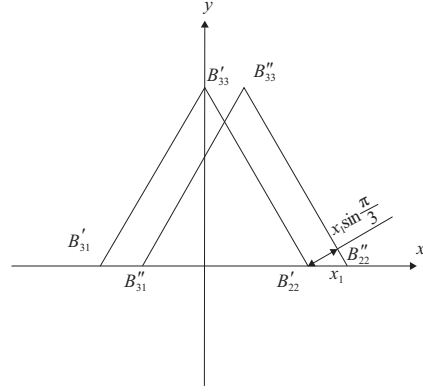


图6 沿 x 轴移动图

当已知各杆长度,由式(6)可以求得 O_1 在固定坐标系的位置,则两坐标系关系为:

$${}^0R = T_1 {}^{0_1}R + P_1$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$P_1 = [x_1 \quad y_1 \quad z_1]^T$$

中间肘部是球面并联机构,圆环的中心点为 O_2 ,如图7所示,中轴 W_i 在中下坐标系中位置为:

1) W_1 的坐标余弦

$$W_{1y} = -\cos\alpha_{11}$$

$$W_{1z} = \sin\alpha_{11}\cos\theta_{11} \quad (8)$$

$$W_{1x} = -\sin\alpha_{11}\sin\theta_{11}$$

2) W_2 的坐标余弦

$$W_{2z} = \sin\alpha_{12}\cos\theta_{12}$$

$$W_{2x} = \sin\frac{2\pi}{3}\cos\alpha_{12} - \cos\frac{2\pi}{3}\sin\alpha_{12}\sin\theta_{12} =$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\alpha_{12} + \frac{1}{2}\sin\alpha_{12}\sin\theta_{12}$$

$$W_{2y} = -\cos\frac{2\pi}{3}\cos\alpha_{12} - \sin\frac{2\pi}{3}\sin\alpha_{12}\sin\theta_{12} =$$

$$\frac{1}{2}\cos\alpha_{12} - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\alpha_{12}\sin\theta_{12} \quad (9)$$

3) W_3 的坐标余弦

$$W_{3z} = \sin\alpha_{13}\cos\theta_{13}$$

$$W_{3x} = \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right)\cos\alpha_{13} - \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right)\sin\alpha_{13}\sin\theta_{13} =$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\alpha_{13} + \frac{1}{2}\sin\alpha_{13}\sin\theta_{13} \quad (10)$$

$$W_{3y} = -\cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right)\cos\alpha_{13} - \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right)\sin\alpha_{13}\sin\theta_{13} =$$

$$\frac{1}{2}\cos\alpha_{13} - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\alpha_{13}\sin\theta_{13}$$

由机构约束条件

$$W_i \cdot W_j = \cos\theta_i \quad i, j = 1, 2, 3 \text{ 且 } i \neq j \quad (11)$$

其中 θ_i 为固定值。

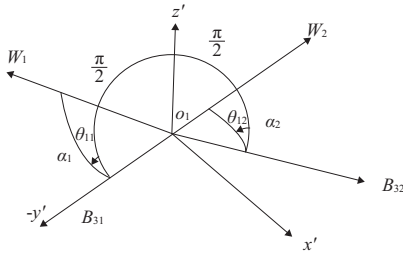


图7 球面多边形图

可以求出 $W_i (i=1,2,3)$ 在中下坐标系的值,以 O_2 为坐标原点,以环的轴线为 z'' 轴,以 $O_2 W_1$ 为 x'' 轴, y'' 轴由右手螺旋法则确定。又知中间肘为球面并联机构,则 $O_1 O_2$ 为定值,设为 h_1 。由式(12)知

$$\begin{aligned} {}^{O_1}W_i &= T_2 {}^{O_2}W_i + P_2 \\ P_2 &= [h_1 \cos \alpha' \quad h_1 \cos \beta' \quad h_1 \cos \gamma']^T \quad (12) \\ i &= 1, 2, 3 \end{aligned}$$

其中 α', β', γ' 是中上过渡层相对于中下过渡层的转角。已知 T_2 , 则中上层相对于中下层各转角可知,即

$${}^{O_1}R_i = T_2 {}^{O_2}R_i + P_2 \quad (13)$$

b) 对前臂部分进行分析

由于滑块在环上运动(图4),可以看成绕环轴线的转动副,主动杆长度为 L_1 ,平台杆长度为 L_2 ,平台杆与动平台之间夹角为 θ_2 ,均为固定值。动平台上以 P 点为原点,垂直动平台的为 z_p ,以 PV_1 方向为 x_p, y_p 由右手螺旋法则确定。其中 $O_2 B_{4i}$ 与 x'' 夹角为 β_i , $V_i B_{5i}$ 与 $B_{5i} B_{4i}$ 夹角为 γ_i ,圆环半径为 R_2 ,上活动平台半径为 R_3 。

球铰之间的距离在坐标系 $O_2-x''y''z''$ 的值与在坐标系 $P-x_p y_p z_p$ 的值是相等的。

$$|S_{i+1} - S_i| = |{}^P S_{i+1} - {}^P S_i|, \quad i=1, 2, 3 \quad (14)$$

S_i 在 $O_2-x''y''z''$ 中的位姿为

$$S_i = [R_2 \cos \beta_i \quad R_2 \sin \beta_i \quad 0 \quad 1]^T$$

S_i 在上活动平台坐标系下位姿为

$${}^P S_i = P V_i + V_i B_{5i} + B_{5i} S_i = [{}^P x_{S,i} \quad {}^P y_{S,i} \quad {}^P z_{S,i} \quad 1]^T,$$

$${}^P x_{S,i} = [L_1 \sin(\gamma_i - \theta_2) - L_2 \sin \theta_2] R_3 \cos \varphi_i,$$

$${}^P y_{S,i} = [L_1 \sin(\gamma_i - \theta_2) - L_2 \sin \theta_2] R_3 \sin \varphi_i,$$

$${}^P z_{S,i} = -L_1 \cos(\gamma_i - \theta_2) - L_2 \cos \theta_2.$$

其中 φ_i 是 P 的分布转角, $\varphi_i = (i-1) \frac{2}{3} \pi$ 。

令 m_i 为 S_i 到 S_{i+1} 的距离,则

$$m_i = R_2^2 (\cos \beta_i - \cos \beta_{i+1})^2 + R_2^2 (\sin \beta_i - \sin \beta_{i+1})^2, \quad (15)$$

$$i=1, 2, 3$$

将式(14)中左右两边平方得:

$$\begin{aligned} & A \sin(\gamma_i - \theta_2) \sin(\gamma_{i+1} - \theta_2) + \\ & B \cos(\gamma_i - \theta_2) \cos(\gamma_{i+1} - \theta_2) + \\ & C \sin(\gamma_i - \theta_2) + D \sin(\gamma_{i+1} - \theta_2) + \\ & E \cos(\gamma_i - \theta_2) + F \cos(\gamma_{i+1} - \theta_2) + G = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $A = -R_3^2 L_1^2$; $B = -2L_1^2$; $C = -L_1^2 L_2^2 R_3^2 \sin \theta_2$; $D = -L_1^2 L_2^2 R_3^2 \sin \theta_2$; $E = 2L_1 L_2 (R_3^2 + 1) \cos \theta_2$; $F = 2L_1 L_2 (R_3^2 + 1) \cos \theta_2$; $G = 2R_3^2 (L_1^2 + L_2^2) - L_2^2 (1 + \cos^2 \theta_2) - m_i^2$ 。

令:

$$t_i = \tan \frac{\gamma_i - \theta_2}{2}, \quad \sin(\gamma_i - \theta_2) = \frac{2t_i}{1+t_i^2}, \quad \cos(\gamma_i - \theta_2) = \frac{1-t_i^2}{1+t_i^2},$$

代入式(16)化简得单一变量的16次多项式

$$\begin{aligned} & K_1 t_1^{16} + K_2 t_1^{14} + K_3 t_1^{12} + K_4 t_1^{10} + K_5 t_1^8 + \\ & K_6 t_1^6 + K_7 t_1^4 + K_8 t_1^2 + K_9 = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

其中 K_1-K_9 是输入量,是关于结构参数 $R_2, R_3, L_1, L_2, \theta_2$ 的函数。 γ_1 取 $\pm 180^\circ$, 则 $t_1 = \frac{\gamma_1 - \theta_2}{2}$ 。

在式(17)中替换关于 $(\gamma_1 - \theta_2)$ 的函数后变成下面方程式:

$$u \cos(\gamma_i - \theta_2) + v \sin(\gamma_i - \theta_2) + w = 0, \quad i=2, 3 \quad (18)$$

求解得

$$\gamma_i = 2 \tan^{-1} \left(\frac{-v \pm \sqrt{u^2 + v^2 - w^2}}{w - v} \right) + \theta_2, \quad i=2, 3 \quad (19)$$

P 点在 $O_2-x''y''z''$ 中的坐标为 (x_p, y_p, z_p) , P 点坐标有如下约束方程:

$$(x_p - x_{S,i})^2 + (y_p - y_{S,i})^2 + (z_p - z_{S,i})^2 = n_i^2, \quad i=1, 2, 3 \quad (20)$$

式中: $n_i^2 = PB_{5i}^2 + L_1^2 + 2|PB_{5i}|L_1 \cos \langle PB_{5i}, B_{5i} S_i \rangle$ 。

其中: $PB_{5i}^2 = R_3^2 + L_2^2 + 2R_3 L_2 \cos \theta_2$, $\cos \langle PB_{5i}, B_{5i} S_i \rangle = \cos(\gamma_i + \langle B_{5i} S_i, B_{5i} V_i \rangle)$; $\langle B_{5i} S_i, B_{5i} P \rangle = \arccos \frac{B_{5i} P^2 + L_2^2 - R_3^2}{2|B_{5i} P|L_2}$ 。

对每一组 $\gamma_i (i=1, 2, 3)$, 可以得到 (x_p, y_p, z_p) 的两组解,但 γ_i 的解是成对出现,且 n_i^2 中 $\cos(\gamma_i - \theta_2) = \cos(\theta_2 - \gamma_i)$, 所以最多有16组 (x_p, y_p, z_p) 的解,对应16个平台位置^[8]。

c) 求平台方位

设旋转矩阵:

$${}^{O_2}R_P = [u \quad v \quad w] = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \quad (21)$$

齐次变换矩阵如下:

$${}^{O_2}T_P = \begin{bmatrix} {}^{O_2}R_P & {}^{O_2}P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中 ${}^{O_2}P = [x_p, y_p, z_p]^T$ 。

根据连杆的连接关系,利用变换矩阵可得:

$${}^{O_2}T_P {}^P S_i = S_i \quad (23)$$

把式(20)、式(21)代入式(22)中得到9个线性方程:

$${}^P x_{S,i} \cdot u_x + {}^P y_{S,i} \cdot v_x + {}^P z_{S,i} \cdot w_x = x_{S,i} - x_p, \quad (24)$$

$$i=1, 2, 3$$

$${}^P x_{S,i} \cdot u_y + {}^P y_{S,i} \cdot v_y + {}^P z_{S,i} \cdot w_y = y_{S,i} - y_p, \quad (25)$$

$$i=1, 2, 3$$

$${}^P x_{S,i} \cdot u_z + {}^P y_{S,i} \cdot v_z + {}^P z_{S,i} \cdot w_z = z_{S,i} - z_p, \quad (26)$$

$$i=1, 2, 3$$

由式(24)-式(26)可求出旋转矩阵 ${}^{O_2}T_P$, 即:

$$\begin{aligned} {}^{O_2}R &= T_3 {}^P R + P_3 \\ T_3 &= {}^{O_2}R_P = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (27)$$

$$P_3 = [x_p \ y_p \ z_p]^T$$

由式(7)、式(13)和式(27)可知:

$$R = T_1 [T_2 (T_3^p \cdot R + P_3) + P_2] + P_1 = T \cdot {}^p R + P \quad (28)$$

其中: $T = T_1 T_2 T_3$; $P = T_1 P_2 + T_2 P_3 + P_1$ 。

则九自由度上肢康复机构的位置正解求解完成。

2.2 位置反解

当已知上活动平台和中上过渡层的位姿后,可以求出上活动平台相对于中上过渡层的6个位姿参量。对上层进行分析,求出上活动平台 V_i 和 B_{Si} 在中上坐标系的位置:

$$\begin{aligned} {}^0_2 V_i &= T_3 \cdot {}^p V_i + P_3 \\ {}^0_2 B_{Si} &= T_3 \cdot {}^p B_{Si} + P_3 \end{aligned} \quad (29)$$

根据3条支链对称分布,转动副 B_{Si} 轴线平行于过平台杆与上活动平台的切线,且和主动杆轴线垂直,同时也和平台杆轴线垂直,有以下公式:

$$\begin{aligned} &(x_p - \cos\beta_i)(x_{V_{i+1}} - x_{V_{i+2}}) + \\ &(y_p - \sin\beta_i)(y_{V_{i+1}} - y_{V_{i+2}}) + z_p(z_{V_{i+1}} - z_{V_{i+2}}) = 0 \\ &(x_{B_{Si}} - \cos\beta_i)(x_{V_{i+1}} - x_{V_{i+2}}) + \\ &(y_{B_{Si}} - \sin\beta_i)(y_{V_{i+1}} - y_{V_{i+2}}) + z_{B_{Si}}(z_{V_{i+1}} - z_{V_{i+2}}) = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

则可以求出前臂部分主动间的输入。又已知中上过渡层的6个位姿参量,由于中间部分是球面并联机构,下部分是纯移动并联机构,故中上过渡层相对于中下过渡层的转角为 α' 、 β' 、 $\gamma' + \frac{2\pi}{3}$,先对中间部分分析。由式(13)知 W_i 在 $O_1-x'y'z'$ 的位置,由式(8)~式(10)可以求出 θ_{ii} ($i=1,2,3$),则中间部分的主动件输入也已知了。由式(31)知

$$\begin{aligned} P_1 &= OO_2 - P_2, OO_2 = [x_{o_2} \ y_{o_2} \ z_{o_2}]^T \\ P_2 &= \left[h_1 \cos\alpha' \ h_1 \cos\beta' \ h_1 \cos\left(\gamma' + \frac{2\pi}{3}\right) \right]^T \end{aligned} \quad (31)$$

其中 P_1 向量为中下过渡层相对于固定坐标系的位置。根据式(6)即可求出各杆 l_i ($l_i > 0$)。至此该机构的9个输入量都已求出。位置反解求解完成。

3 运动仿真

本康复机构利用三维绘图软件 SolidWorks 对九自由度上肢康复结构建模(图1),然后运用其 Motion 模块对该康复机构进行运动仿真。令上、下正三角形边长 $a = 180 \text{ mm}$, $b = 125 \text{ mm}$,固定角度 θ_1 和 θ_2 分别为 120° 和 150° ,主动杆和平台杆的长度分别为 $L_1 = 30 \text{ mm}$, $L_2 = 105 \text{ mm}$,圆环半径和上活动平台半径分别为 $R_2 = 95 \text{ mm}$, $R_3 = 24 \text{ mm}$ 。对康复机构添加电机驱动和约束,通过运行该康复机构,得到上活动平台质心位置的位移、速度、加速度的测试结果如图8~图10所示。

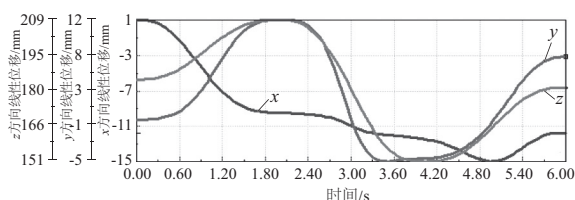


图8 上活动平台位移曲线

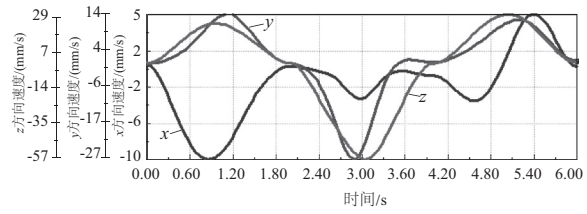


图9 上活动平台速度曲线

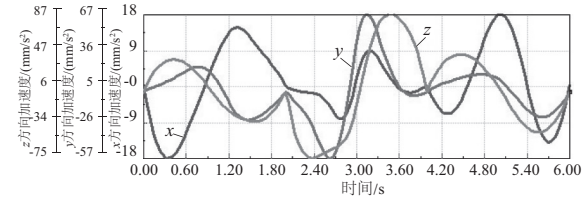


图10 上活动平台加速度曲线

由图8~图10可以看出,上活动平台在运动过程中,速度平稳,加速度并没有出现突变的情况,验证了该康复结构运动的稳定性和可行性。

4 结语

提出一种九自由度上肢康复结构,分析了该结构的特点,对该机构进行了运动学正反解研究,利用分步求解法,将机构整体拆分成3部分,再分别求解整合,并运用了坐标变换和球面解析理论对康复机构进行求解。这种求解方法相比较传统求解整体结构的方法可以简化计算量。通过运动仿真,得到末端上活动平台的位移、速度、加速度曲线图,验证了该结构设计的运动的合理性。本次研究对以后多层串并联机构的位置分析具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 刘春岭,黄如训,解龙昌,等. 脑中中发作的常见诱因分析[J]. 中国神经精神疾病杂志,2005(1): 4-7.
- [2] 王伟,宋为群,曲斯伟. 上肢康复机器人在脑卒中患者并发症康复中的研究与进展[J]. 按摩与康复医学,2018,9(18): 11-13.
- [3] 张无波. 上肢康复机器人结构的谐响应分析[J]. 机械制造,2019,57(4): 15-19,51.
- [4] 檀祝新,余晓流,高文斌. 一种六自由度上肢康复训练机器人运动学及工作空间仿真分析[J]. 机床与液压,2019,47(3): 32-36.
- [5] 黄真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社,1997: 18-29.
- [6] 梁辉,胡同帅,王蕾,等. 3(3-RPS)并-串联机构及其运动学分析研究[J]. 机电工程,2017,34(1): 28-32,78.
- [7] 王晶星,张勇,杨灏泉,等. 3-RPC 并联机构运动学研究[J]. 机械传动,2010,34(11): 31-33.
- [8] 梁辉,李伟,董亚春,等. 两级3-RPS 并串运动平台的运动分析及仿真[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),2014,35(5): 520-523.
- [9] 陈文凯,刘平安. 3-RSR 并联机器人运动学研究[J]. 机械工程师,2005(10): 36-38.

收稿日期:2019-10-22