

文章编号 1004-924X(2009)08-1896-06

染色体切割设备的并联宏动平台运动学传递性能

张典范¹, 高峰^{1, 2}

- (1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 上海交通大学 振动、冲击、噪声国家重点实验室, 上海 200030)

摘要:介绍了用于染色体切割设备可实现微米级高精度定位的新型6-(P-2P-S)并联宏动平台,该平台具有在初始正交姿态部分运动解耦和装配工艺性好等特点。为提高该平台的实际应用理论基础,对其运动的传递性及其在姿态空间的分布规律进行了研究。基于其结构布局特点分析了该并联宏动平台的位置问题,求得机构位置正反解。推导了运动学传递方程,根据雅可比矩阵定义了速度传递性能的评价指标。最后,考虑其结构约束条件,分析了线速度和角速度传递性能评价指标(K_v, K_ω)在姿态空间内的分布规律。仿真结果表明,越是靠近姿态空间的边界, K_v 和 K_ω 的值越大,其最大值随着初始姿态角增大而增大, $K_{v\max}$ 的变化为0.970 9~1.179 1, $K_{\omega\max}$ 的变化为8.586 5~10.978 3。根据设计需要选择合适的运动学传递性能指标,可满足该并联宏动平台在不同精密操作领域的应用需求。

关键词:并联宏动平台;染色体切割设备;速度传递;评价指标;姿态空间

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A

Kinematics transmission property of parallel macro manipulator of cutting equipment for chromosome

ZHANG Dian-fan¹, GAO Feng^{1,2}

- (1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. State Key Laboratory of Vibration, Shock and Noise, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A novel 6-(P-2P-S) parallel macro manipulator used as the macro system of the cutting equipment for chromosome is put forward, which is characterized by some movement decouplings on the orthogonal posture and its good manufacturability. In order to explore the theoretical foundation of the manipulator, the kinematics performance and the attitude distribution properties in the orientation workspace are investigated. Based on the design feature, the position problem is analyzed to obtain the inversion of forward displacement. Then, the kinematics equation is derived, and the speed transmission evaluation indicators (K_v, K_ω) are defined based on the Jacobian matrix. Finally, in consideration of the structure constraints, the distribution of the K_v and K_ω in the orientation workspace is analyzed. Simulation results indicate that the $K_{v\max}$ and $K_{\omega\max}$ are close to the edges of orientation workspace, and they can be changed in the ranges of 0.970 9~1.179 1, and 8.586 5~10.978 3, respectively.

收稿日期:2008-08-06;修订日期:2008-10-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 30770538);天津市自然科学基金重点资助项目(No. 043801811)

ly. By choosing appropriate K_v and K_w in the orientation work space, it can satisfy the different requirements of the parallel macro manipulator applied in other precision operating fields.

Key words: parallel macro manipulator; cutting equipment for chromosome; speed transmission; evaluation index; orientation workspace

1 引言

某染色体切割设备^[1]是一种宏/微双重驱动机器人系统,具有响应速度快、定位精度高、自由度冗余等特点。宏/微双重驱动机器人系统包括宏动平台和微操作平台两部分,宏动平台以地面为参照物,用于实现大行程定位;微操作平台安装在宏动平台执行端,进行高精度微操作^[2-4]。根据不同的设计要求,串联机构和并联机构均可以作为宏动平台或微操作平台来组成宏/微双重驱动机器人。采用并联机构作为宏动平台,具有刚度大、承载能力强等优点,在对工作空间要求不高的领域取得了较多的应用,文献[5]提出了一种采用大行程柔性铰链的6-PSS并联宏动平台,可以实现微米级定位;文献[6]设计了具有振动控制能力的高稳定精密跟瞄机构,该宏动平台采用6-SPS并联机构构型;文献[7]应用螺旋理论对三移一转四自由度双重驱动并联机构进行综合,可作为新型宏/微机器人系统的机构原型。

本文提出了一种新型6-(P-2P-S)并联宏动平台,其具备初始正交位姿部分运动解耦、运动惯性小、工艺性好等优点,应用该平台作为染色体切割设备的宏动系统,可实现微米级精度定位,完成除染色体切割以外的大部分操作。本文研究该并联宏动平台的运动学性能,定义速度传递性能评价指标,分析该性能评价指标在姿态空间内的分布情况,为该并联宏动平台的应用奠定理论基础。

2 6-(P-2P-S)并联宏动平台位置分析

2.1 结构布局描述

图1和图2为6-(P-2P-S)并联宏动平台及其结构简图,由基座、运动平台和6条相同的运动支链等部分组成,每条运动支链均由球铰、十字滑轨和直线移动副等部分组成。6条运动支链分成3组,每组中的两条运动支链的轴线相互平行,3组运动支链与运动平台相连的3对球铰分别分布在

运动平台基础立方体的3个互相垂直的平面上,每条支链的直线移动副为驱动副。当3组运动支链的轴线分别与正方体的3个互相垂直的表面垂直,且各输入均为0时,该并联机构处于正交初始位姿。

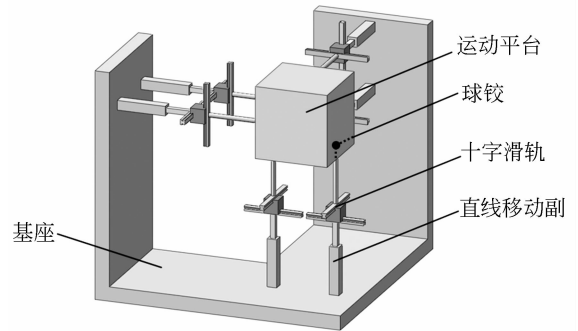


图1 6-(P-2P-S)并联宏动平台

Fig. 1 6-(P-2P-S) parallel macro manipulator

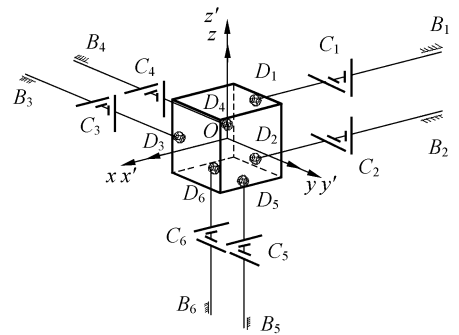


图2 6-(P-2P-S)并联宏动平台结构简图

Fig. 2 Structure sketch of 6-(P-2P-S) parallel macro manipulator

根据染色体切割设备宏动平台的实际结构参数,在正交位姿时驱动杆长 $L_{i0} = 300$ mm,动平台正方体边长 $d = 300$ mm,各组支链中两球铰间距 $b = 260$ mm,定长连杆长度 $l = 150$ mm,十字滑轨导轨长度 $h = 150$ mm。

2.2 位置正解

定义当并联宏动平台处于正交位姿时为其初始位姿。建立与运动平台固结的动坐标系 $\{M\}$: $\{O'-x'y'z'\}$,原点位于运动平台的中心,3个坐标

轴分别与运动平台的 3 个互相垂直的边平行;建立与基座固结的固定坐标系 $\{G\}:\{O-xyz\}$, 坐标系的原点和 3 个坐标轴分别与在初始位姿的坐标系 $\{M\}$ 的原点和坐标轴重合。

当给定动平台的位姿坐标, 求解驱动杆伸长量时, 称为位置反解。点 C_i 在固定坐标系中的位置矢量为

$$\begin{cases} {}^G\mathbf{C}_1 = (-d/2 - l + \Delta L_1, 0, b/2)^T \\ {}^G\mathbf{C}_2 = (-d/2 - l + \Delta L_2, 0, -b/2)^T \\ {}^G\mathbf{C}_3 = (b/2, -d/2 - l + \Delta L_3, 0)^T \\ {}^G\mathbf{C}_4 = (-b/2, -d/2 - l + \Delta L_4, 0)^T \\ {}^G\mathbf{C}_5 = (0, b/2, -d/2 - l + \Delta L_5)^T \\ {}^G\mathbf{C}_6 = (0, -b/2, -d/2 - l + \Delta L_6)^T \end{cases}, \quad (1)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: α, β, γ 分别为运动平台绕固定坐标系 z, y, x 轴的旋转角。

由结构布局特点可得

$$l_i^2 = (\mathbf{D}_i - \mathbf{C}_i)^T (\mathbf{D}_i - \mathbf{C}_i), \quad (5)$$

由式(5)可解得其位置反解, 且位置反解为唯一解。

当已知驱动杆的伸长量, 求解动平台的位姿坐标时, 称为位置正解。并联机构的位置反解较为简单, 但位置正解却不易求解, 根据式(5)列出关于动平台位姿的非线性方程组

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = \mathbf{A}, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{q} = (\alpha, \beta, \gamma, x_D, y_D, z_D)^T$ 为动平台位姿参数;

$$\mathbf{A} = (A_1, A_2, \dots, A_6)^T$$

$$A_i = l_i^2 - x_{Q_i}^2 - y_{Q_i}^2 - z_{Q_i}^2 \quad (i=1, 2, \dots, 6).$$

利用 Matlab 软件, 采用迭代法编程, 给定 \mathbf{q} 的初值, 迭代方程为 $\mathbf{q}(k+1) = \mathbf{q}(k) - \mathbf{J}^{-1} \mathbf{H}[\mathbf{q}(k)]$, 可计算出位置正解的数值解。

3 运动传递性能分析

根据图 3 给出的位置矢量, 动平台参考点 O' 在固定坐标系中的位置矢量可表示为

$$\mathbf{OO}' = \mathbf{OB}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{C}_i + \mathbf{C}_i \mathbf{D}_i - \mathbf{TO}'\mathbf{D}_i, \quad (7)$$

\mathbf{OB}_i 在固定坐标系中为常矢量, 用 \mathbf{I}_{1i} 表示;

式中: $\Delta L_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 为六个驱动杆的伸长量。

点 D_i 在动坐标系中的位置矢量为:

$$\begin{cases} {}^M\mathbf{D}_1 = (-d/2, 0, b/2)^T \\ {}^M\mathbf{D}_2 = (-d/2, 0, -b/2)^T \\ {}^M\mathbf{D}_3 = (b/2, -d/2, 0)^T \\ {}^M\mathbf{D}_4 = (-b/2, -d/2, 0)^T \\ {}^M\mathbf{D}_5 = (0, b/2, -d/2)^T \\ {}^M\mathbf{D}_6 = (0, -b/2, -d/2)^T \end{cases}. \quad (2)$$

点 D_i 在固定坐标系中的位置矢量为

$${}^G\mathbf{D}_i = \mathbf{T}^M \mathbf{D}_i + \mathbf{D}_0, \quad (3)$$

式中: \mathbf{D}_0 为动平台选定的参考点的位置矢量, 即点 O' 在固定坐标系中的坐标 $(x_D, y_D, z_D)^T$; \mathbf{T} 是固定坐标系到动坐标系的坐标转换矩阵。

$O'\mathbf{D}_i$ 在动坐标系中为常矢量, 用 \mathbf{I}_{2i} 表示, 变换到

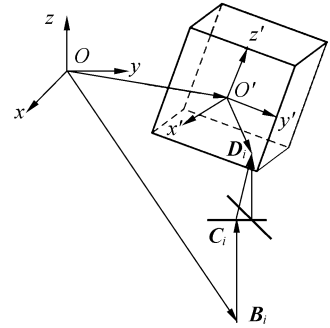


图 3 支链的位置矢量图

Fig. 3 Position vectors of flexible links

固定坐标系中表示为 $\mathbf{T}\mathbf{I}_{2i}$; $\mathbf{C}_i \mathbf{D}_i = l \mathbf{s}_i$, l 为连杆固定杆长, \mathbf{s}_i 为连杆 i 的单位方向矢量; $\mathbf{B}_i \mathbf{C}_i = L_i \mathbf{e}_i$, $L_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 为 6 个驱动杆杆长, \mathbf{e}_i 为驱动杆的单位方向矢量。

将以上表达式代入式(7)整理得到

$$l \mathbf{s}_i = \mathbf{OO}' + \mathbf{T}\mathbf{I}_{2i} - \mathbf{I}_{1i} - L_i \mathbf{e}_i. \quad (8)$$

动平台参考点 O' 的线速度用 $\mathbf{v} = \frac{d(\mathbf{OO}')}{dt}$ 表示, 对式(8)两边关于时间求导得到

$$(\mathbf{v} + \dot{\mathbf{T}}\mathbf{I}_{2i} - \dot{L}_i \mathbf{e}_i)^T \cdot \mathbf{s}_i = 0. \quad (9)$$

旋转矩阵 \mathbf{T} 具有如下性质^[8]

$$\mathbf{T}\mathbf{T}^T = \mathbf{T}^T \mathbf{T} = \mathbf{E}, \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{n} = \dot{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{T}^{-1} \boldsymbol{n}, \quad (11)$$

式中: \boldsymbol{E} 为单位矩阵, $\boldsymbol{\omega}$ 为动平台参考点 O' 的角速度, \boldsymbol{n} 为动平台上任意向量。

将式(10)、(11)代入式(9),整理得到

$$\boldsymbol{s}_i^T \cdot \boldsymbol{v} + (\boldsymbol{T}\boldsymbol{I}_{2i} \times \boldsymbol{s}_i)^T \cdot \boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{e}_i \cdot \boldsymbol{s}_i \dot{L}_i, \quad (12)$$

写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{V} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \boldsymbol{J} \dot{\boldsymbol{L}}_i = \boldsymbol{J}_1 \boldsymbol{J}_2 \dot{L}_i, \quad (13)$$

$$\text{式中: } \boldsymbol{J}_1 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{s}_1^T & (\boldsymbol{T}\boldsymbol{I}_{21} \times \boldsymbol{s}_1)^T \\ \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{s}_6^T & (\boldsymbol{T}\boldsymbol{I}_{26} \times \boldsymbol{s}_6)^T \end{bmatrix}.$$

$$\boldsymbol{J}_2 = \text{diag}(e_1 \cdot s_1 \quad e_2 \cdot s_2 \quad \cdots \quad e_6 \cdot s_6).$$

\boldsymbol{J} 即为速度雅可比矩阵,考虑线速度和角速度具有不同的量纲,式(13)可以写成如下形式

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{J}_v \dot{\boldsymbol{L}}_i, \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{J}_\omega \dot{\boldsymbol{L}}_i, \quad (15)$$

式中: \boldsymbol{J}_v 和 \boldsymbol{J}_ω 分别为线速度和角速度的速度传递矩阵。

4 速度传递性能评价指标

4.1 速度传递性能评价指标定义

矩阵 \boldsymbol{J}_v 和 \boldsymbol{J}_ω 分别为矩阵 \boldsymbol{J} 的前三行和后三行所组成的矩阵。当机构不在奇异位姿时,矩阵 \boldsymbol{J}_v 和 \boldsymbol{J}_ω 的秩均为 3,由矩阵分析理论,矩阵 \boldsymbol{J}_v 和 \boldsymbol{J}_ω 均有奇异性分解,即存在正交阵 $\boldsymbol{\Theta}_v \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 、 $\boldsymbol{\Theta}_\omega \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 、 $\boldsymbol{\Pi}_v \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 和 $\boldsymbol{\Pi}_\omega \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 使

$$\boldsymbol{J}_v = \boldsymbol{\Theta}_v \boldsymbol{\Lambda}_v \boldsymbol{\Pi}_v^T, \quad (16)$$

$$\boldsymbol{J}_\omega = \boldsymbol{\Theta}_\omega \boldsymbol{\Lambda}_\omega \boldsymbol{\Pi}_\omega^T. \quad (17)$$

η_{1v} 、 η_{2v} 和 η_{3v} 分别为 \boldsymbol{J}_v 的 3 个奇异值,且 $\eta_{1v} \geq \eta_{2v} \geq \eta_{3v}$, $\eta_{1\omega}$ 、 $\eta_{2\omega}$ 和 $\eta_{3\omega}$ 分别为 \boldsymbol{J}_ω 的 3 个奇异值,且 $\eta_{1\omega} \geq \eta_{2\omega} \geq \eta_{3\omega}$ 。设分支的输入速度矢量的模为单位 1,即有

$$\boldsymbol{v}^T \boldsymbol{v} = 1, \quad (18)$$

综合式(16)~(18)可得以下二次型方程^[9-10]

$$\boldsymbol{v}^T \boldsymbol{\Theta}_v (\boldsymbol{\Lambda}_v \boldsymbol{\Lambda}_v^T)^{-1} \boldsymbol{\Theta}_v^T \boldsymbol{v} = 1, \quad (19)$$

$$\boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\Theta}_\omega (\boldsymbol{\Lambda}_\omega \boldsymbol{\Lambda}_\omega^T)^{-1} \boldsymbol{\Theta}_\omega^T \boldsymbol{\omega} = 1. \quad (20)$$

式(19)和式(20)分别表示空间两个椭球, \boldsymbol{v} 和 $\boldsymbol{\omega}$ 分别位于空间的两个椭球上, \boldsymbol{J}_v 和 \boldsymbol{J}_ω 的奇

异值为两个椭圆的主轴长度,这两个椭圆直观表征了该并联宏动平台的运动传递性能。当 $\eta_{1v} = \eta_{2v} = \eta_{3v}$ 、 $\eta_{1\omega} = \eta_{2\omega} = \eta_{3\omega}$ 时,椭圆变成圆球,此时该并联机构沿各个方向具有相同的运动传递性能,即运动传递各向同性。选用下面的指标来评价并联宏动平台的运动传递性能。

定义 \boldsymbol{J}_v 的最大奇异值为线速度传递性能评价指标 K_v ,即

$$K_v = \eta_{1v}. \quad (21)$$

定义 \boldsymbol{J}_ω 的最大奇异值为角速度传递性能评价指标 K_ω ,即

$$K_\omega = \eta_{1\omega}. \quad (22)$$

4.2 结构约束条件

宏动平台的结构约束主要有驱动杆杆长、球面副转角和十字滑轨导轨长度。设驱动杆 i 的最大杆长为 $L_{i\max}$,最小杆长 $L_{i\min}$,则杆长 L_i 的约束条件为

$$L_{i\min} \leq L_i \leq L_{i\max}, \quad (23)$$

式中: $L_{i\max} = L_0 + \Delta L_{i\max}$, $L_{i\min} = L_0 + \Delta L_{i\min}$, L_0 为驱动杆在初始位姿时的杆长, $\Delta L_{i\max}$ 和 $\Delta L_{i\min}$ 分别为驱动杆杆长的最大最小变化。

球铰转角约束条件为

$$0 \leq \varphi_i \leq \varphi_{\max}, \quad (24)$$

式中: φ_i 为球铰的实际转角,在初始位姿时球铰的转角为 0,球铰的最大转角 φ_{\max} 取决于球铰制造的可能性(球铰的最大摆角一般不会 $> 45^\circ$)。

十字滑轨两个导轨的长度均为 h ,考虑机构的解耦特性,滑块在垂直(水平)导轨上允许的移动距离 H_i 的范围为

$$-h/2 \leq H_i \leq h/2, \quad (25)$$

式中: $H_i = L_i - b(1 - \cos \varphi)/2$ 。

考虑该并联宏动平台的结构特点和球铰转角范围,各组运动支链之间一般不会产生干涉。设驱动杆径向最大尺寸为 r_B ,同组两个驱动杆轴线间距为 b_i ,则同组分支间干涉约束为

$$b_i \geq r_B. \quad (26)$$

4.3 速度传递性能评价指标在姿态空间的分布

根据式(13)~(22),借助 Matlab 软件,绘制了速度传递性能评价指标在姿态工作空间内的分

布情况,图中虚线为姿态工作空间,实线为速度传递性能评价指标分布曲线。图 4 和图 5 分别为 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=20^\circ$ 时 K_v 在姿态空间分布的截面图,图 6 和图 7 分别为 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=20^\circ$ 时 K_ω 在姿态空间分布的截面图。

从图中可以直观地看出速度传递性能分布情况,越是靠近姿态空间的边界, K_v 和 K_ω 的值越大,速度传递性能就越好,根据设计需要可选择合适的传递性能指标。因此,姿态空间越大速度传递性能指标的可选择范围越大,在初始位姿时,该宏动平台姿态空间最大,同时运动传递性能指标可选择范围最大。

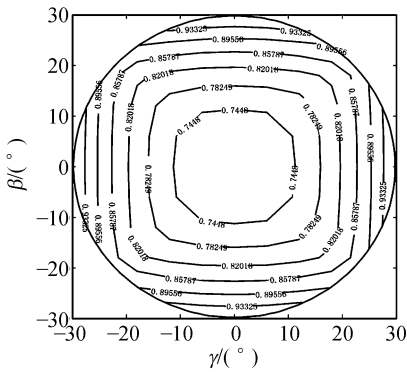


图 4 K_v 在姿态空间 $\alpha=0^\circ$ 截面的分布情况
Fig. 4 Distributions of K_v in section of orientation space $\alpha=0^\circ$

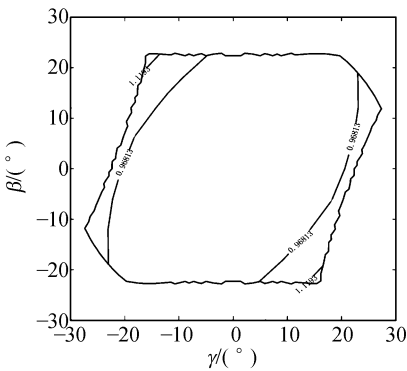


图 5 K_v 在姿态空间 $\alpha=20^\circ$ 截面的分布情况
Fig. 5 Distributions of K_v in section of orientation space $\alpha=20^\circ$

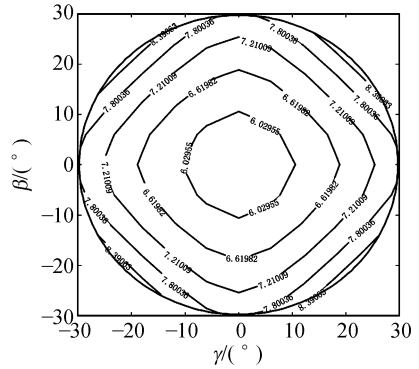


图 6 K_ω 在姿态空间 $\alpha=0^\circ$ 截面的分布情况
Fig. 6 Distributions of K_ω in section of orientation space $\alpha=0^\circ$

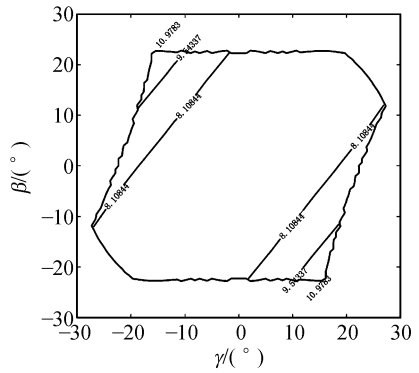


图 7 K_ω 在姿态空间 $\alpha=20^\circ$ 截面的分布情况
Fig. 7 Distributions of K_ω in section of orientation space $\alpha=20^\circ$

5 结 论

介绍了一种作为某染色体切割设备宏动平台的新型 6-(P-2P-S) 并联机构,该机构具有在初始正交位姿部分运动解耦和装配工艺性好等特点,推导了该机构的位置正反解及运动学方程。基于速度雅可比矩阵,定义了速度传递性能评价指标,分析了该性能评价指标在姿态空间内的分布规律。仿真结果表明,越是靠近姿态空间的边界, K_v 和 K_ω 的值越大,速度传递性能就越好,根据设计需要可选择合适的传递性能指标,以满足该并联宏动平台在不同精密操作领域的应用。

参考文献:

- [1] 高峰,李为民,张建军. 染色体切割设备:中国, CN03129764. 1[P]. 2003.
GAO F, LI W M, ZHANG J J. *The cutting equipment for chromosome: China*, CN03129764. 1[P]. 2003.
- [2] 程维明,孙麟治,章海涛. 利用补偿提高精密定位平台的定位精度[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 884-888.
CHENG W M, SUN L Z, ZHANG H T. Improvement of positioning precision for precise stage with compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 884-888. (in Chinese)
- [3] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 171-178.
JIE D G, LIU Y J, SUN L N, et al.. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 171-178. (in Chinese)
- [4] CHEN Q J, WOLFGANG H. Development of 4 DOF planar macro-micro manipulators system[C]. *The IEEE 28th Annual Conference on Industrial Electronics Society, Sevilla*, 2002: 2231-2236.
- [5] 孙立宁,董为,杜志江. 基于几何非线性方法的大行程柔性并联机器人位置解[J]. 机械工程学报, 2005, 41(10): 71-74.
SUN L N, DONG W, DU ZH J. Kinematics analysis of a parallel manipulator with long travel range flexure hinges based on geometric nonlinear method [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(10): 71-74. (in Chinese)
- [6] 崔龙,黄海. 高稳定精密跟瞄机构设计与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(12): 1463-1465.
CUI L, HUANG H. Design and simulation of highly stable and precise tracking-pointing platform [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(12): 1463-1465. (in Chinese)
- [7] 李宁宁,赵铁石,边辉. 双重驱动四自由度并联机构型综合[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(1): 51-57.
LI N N, ZHAO T SH, BIAN H. Type synthesis of dual-driven 4-DOF parallel mechanism[J]. *Machine Design & Research*, 2008, 24(1): 51-57. (in Chinese)
- [8] MURRAY R, LI Z X, SASTRY S. *A mathematical introduction to robot manipulation* [M]. CRC Press. 1994.
- [9] 金振林,李研彪. 3-P-2SS球平台机器人的运动传递性分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 658-661.
JIN ZH L, LI Y B. Kinematics transmission property of a novel 3-P-2SS spherical platform manipulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 658-661. (in Chinese)
- [10] 熊友伦. 机器人学[M]. 北京:机械工业出版社, 1993.
XIONG Y L. *Robot Basic Technique* [M]. Beijing: Press of Huazhong University of Science and Technology, 1996. (in Chinese)

作者简介:



张典范(1978—),男,吉林人,燕山大学博士研究生,助理研究员,2001、2006年于燕山大学分别获得学士和硕士学位,主要从事生物工程中微操作机器人及控制的研究。E-mail: zdf@ysu.edu.cn

导师简介:



高峰(1956—),男,上海交通大学教授,博士生导师,主要从事并联机器人及其应用技术和生物工程中微操作机器人与微机械的研究。E-mail: fengg@sjtu.edu.cn