

文章编号 1000-5013(2003) 04-0385-05

六自由度绳牵引并联机构的轨迹规划

郑亚青 刘雄伟

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362011)

摘要 建立所设计的六自由度绳牵引并联机构的运动学逆解模型后, 提出 1 种计算拉力的算法. 以动平台末端执行器能实现 型的轨迹为目标, 进行运动规划, 研究绳的运动特性. 仿真结果表明, 绳的速度值和加速度值, 始终不大于动平台末端执行器的速度值和加速度值. 绳的加速度值和末端执行器的加速度值, 同属 1 个数量级. 同时, 一些绳的拉力的变化不大 (处于“关”的状态); 而另外一些绳的拉力的变化很大 (处于“开”的状态). 这些运动轨迹规划的仿真结果, 能为以后该机构的运动控制方案的研究以及控制系统的设计, 提供依据. 文中提出的运动轨迹规划方法, 它对一般的六自由度绳牵引并联机构都适用.

关键词 绳牵引, 并联机构, 六自由度, 轨迹规划

中图分类号 TH 112 TH 113. 2

文献标识码 A

在分析以前研究成果的基础上, 提出了 1 个由 7 根绳牵引的结构紧凑适用于高速机器人的六自由度并联机构^[1~3]. 该机构的动平台在主姿态处的平动工作空间大, 沿 z 方向的工作空间的大小几乎就等于系统本身的高度^[1]. 为了设计该机构的运动控制方案, 有必要对该机构进行运动轨迹规划. 本文第 1 部分分析了该六自由度绳牵引并联机构的运动学逆解模型. 第 2 部分提出一种简单可行的计算绳拉力的标准. 第 3 部分以动平台的末端执行器实现螺旋型的轨迹为目标, 实例仿真研究机构各根绳的长度、速度、加速度和拉力. 仿真结果可作为设计运动控制方案的依据. 同时, 本文提出的运动轨迹规划的方法可适用于一般的六自由度绳牵引并联机构.

1 运动学逆解模型

如图 1 所示, 我们提出 1 个新型的六自由度绳牵引并联机构. 动平台设计为多面体, 由 7 根绳通过球铰链牵引, 各根绳的另一端分别与固定在机架上的由伺服电机驱动的滑

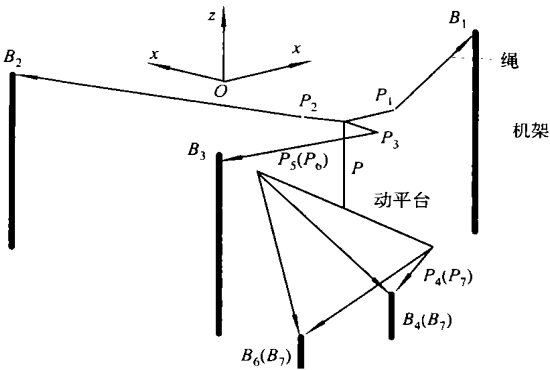


图 1 六自由度绳牵引并联机构

收稿日期 2003-01-30

作者简介: 郑亚青 (1974), 女, 讲师, 在职博士研究生. E-mail: yq_zheng@hqu.edu.cn

Copyright © 2003, Journal Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

轮相连. 记绳与滑轮的连接点为 B_i , $P_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 为绳与动平台的球铰链的中心. 记 $L_i = \overrightarrow{PB_i}$, $l_i = |L_i|$, $w = L_i / l_i$, T_i 为第 i 根绳的拉力, 该拉力产生一个作用在动平台的拉力 $T_i = T_i w$. P 为动平台的重心, 设为动平台的参考点, 且 $r_i = \overrightarrow{PP_i}$.

机构的固定坐标系为 $Oxyz$, 动平台的局部坐标系 P_{xpypzp} 设在动平台的重心位置 P 上. 选取动平台上的重心 P 的位姿为机构的主位姿: $(x_{HP} = 0, y_{HP} = 0, z_{HP} = -0.3(\text{m}), \varphi = 0^\circ, \theta = 0^\circ, \psi = 0^\circ)$. 滑轮上铰链点相对于固定坐标系的坐标(m)为 $B_1(0.5, 0, 0)$, $B_2(-0.25, 0.433, 0)$, $B_3(-0.25, -0.433, 0)$, $B_4(B_5)(1.0, 0, -1.0)$ 和 $B_6(B_7)(-1.0, 0, -1.0)$. 而动平台的铰链点相对于动平台的局部坐标系的坐标(m)为 $P_1(0.1, 0, 0.07667)$, $P_2(-0.05, 0.0866, 0.07667)$, $P_3(-0.05, -0.0866, 0.07667)$, $P_4(P_5)(0, 0.05, -0.22333)$, $P_6(P_7)(0, -0.05, -0.22333)$. $T_{\text{des}} = 200(\text{N})$, $T_{\text{min}} = 10(\text{N})$, 动平台的质量为 5 kg . 动平台所受的力和力矩平衡可表示为

$$F = J^T T. \quad (1)$$

这里 T 是 T_i 分量组成的向量 $(T_1, \dots, T_m)^T$, F 是由 6 个分量组成的向量 $\begin{bmatrix} f \\ m_p \end{bmatrix}$, 且 J^T 满足

$$J^T = \begin{bmatrix} u_1 & \dots & u_7 \\ r_1 \times u_2 & \dots & r_7 \times u_7 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

记 $X = [X_P \ X_{\text{ang}}]^T$ 为动平台相对于坐标系 $Oxyz$ 的位姿. X_P 为 P 的位置坐标 (x_P, y_P, z_P) , X_{ang} 为坐标系 P_{xpypzp} 相对于坐标系 $Oxyz$ 的姿态坐标 (φ, θ, ψ) , φ, θ, ψ 分别为坐标系 $Oxyz$ 相对于坐标系 P_{xpypzp} 的欧拉角 Yaw (偏侧角)、Pitch (俯仰角) 和 Roll (旋转角).

六自由度绳牵引并联机构的运动学速度逆解方程可表示为

$$\dot{l} = JW \quad (3)$$

这里 \dot{l} 是由 \dot{l}_i 分量组成的向量, W 是 6 个分量的向量 $\begin{bmatrix} V_P \\ \Omega \end{bmatrix}$, 其中这里 V_P 和 Ω 分别为动平台的平动和转动速度, $\dot{l}_i = w^T V_P + (r_i \times w)^T \Omega = w^T \dot{P}_{B,i}$. 因为 w 是单位向量, 所以 $\dot{l}_i = \dot{P}_{B,i}$.

这说明绳的速度等于相应的动平台的铰链点的速度沿绳方向的投影. 故绳速度的大小总小于或等于相应的动平台的铰链点的速度大小. 当铰链点沿着 (或背向) 绞盘运动时, 取等号.

对式(3)进行求导得加速度逆解方程为

$$\ddot{l} = J\ddot{W} + \dot{J}W, \quad (4)$$

其中 $\ddot{l} = \ddot{w}^T \dot{P}_{B,i} + w^T \ddot{P}_{B,i}$. 加速度逆解问题比较复杂, 因为它涉及到 J^T 随时间变化问题. 绳的加速度有 2 项组成, 第 1 项几乎就等于相应铰链点的加速度, 第 2 项铰链点的速度与 J^T 的导数的乘积. 因为绳的方向始终跟随着铰链点, 所以 w 和 $\dot{P}_{B,i}$ 之间的角度不会大于 90° ; 而第 2 项的大小始终不小于 0. 因此, 绳加速度值小于或等于相应铰链点的加速度值.

2 绳拉力计算的标准

当 J^T 满秩时, 定义 $T_{\text{eff}} = (J^T)^+ F$ 是式(1)的最小范数解, 这里 $(J^T)^+$ 是矩阵 J^T 的 Moore-Penrose 伪逆, 且 T_{null} 是属于零空间 $N(J^T)$ 的一个矢量, 这里 T_{null} 可表示为 $(I_{m \times m} - (J^T)^+ J^T) \times T_{\text{des}}$, $T_{\text{des}} = (T_{1\text{des}}, \dots, T_{m\text{des}})^T$, 所以 T 可表示为

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{\text{eff}} + \mathbf{T}_{\text{nul}}, \quad (5)$$

若给定绳拉力的问题为

$$\mathbf{T} = (\mathbf{J}^T)^+ \mathbf{F} + (\mathbf{I}_{m \times m} - (\mathbf{J}^T)^+ \mathbf{J}^T) \times \mathbf{T}_{\text{des}} \quad (6)$$

和 $T_{ides} = T_{des}$ 及 $T_i > T_{\min}$ ($i = 1, 2, \dots, m$), 则可提出如下算法. 估算机构的位姿, 并计算 \mathbf{J}^T . 因此, 有

$$\mathbf{T}_{\text{eff}} = (\mathbf{J}^T)^+ \mathbf{F}, \quad \mathbf{T}_{\text{nul}} = (\mathbf{I}_{m \times m} - (\mathbf{J}^T)^+ \mathbf{J}^T) \times \mathbf{T}_{\text{des}},$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{\text{eff}} + \mathbf{T}_{\text{nul}}, \quad \mathbf{h} = \mathbf{N}(\mathbf{J}^T).$$

如果 $(\min(\mathbf{h}) > 0$ 和 $(\min(\mathbf{T}) < T_{\min}))$, 则

$$\mathbf{T} = \mathbf{T} + \lambda \mathbf{T}_{\text{nul}}$$

直到 $\lambda \min(\mathbf{T}) = T_{\min}$ 终止.

3 轨迹规划

3.1 动平台末端执行器的期望运动轨迹

有各种各样的运动轨迹 r 可以规划, 为了研究的目的, 我们这里选择如图2(a)所示的

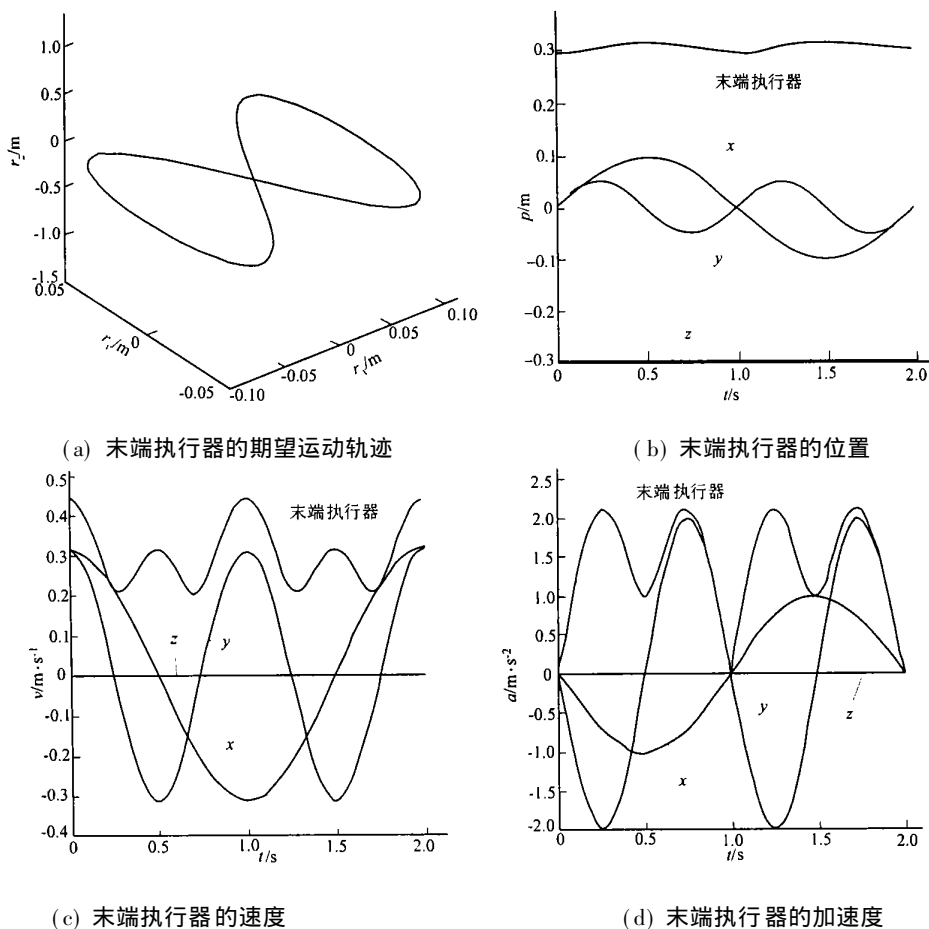


图2 末端执行器的期望运动特性

型轨迹. 这种轨迹可描述为

$$\mathbf{r}(\alpha) = (0.1 \sin \alpha, 0.05 \sin 2\alpha, 0), \quad \alpha \in [0, 2\pi].$$

这种轨迹具有实际任务的一些特性. 它在工作空间的中心具有高的速度; 沿 x, y 方向, 末端执行器的位移/速度/加速度以正弦或余弦函数变化; 在边界区域, 末端执行器运动速度比在中央区域慢; 有些区域, 末端执行器的速度几乎不变, 而有些区域的末端执行器的速度变化较大. 对这样的运动轨迹进行规划, 便于对机构的操作性能有个比较好的了解. 这里我们把 α 看成时间的函数, 选择 $\dot{\alpha} = \pi (1/s)$, $\ddot{\alpha} = 0$, 可发现

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \pi (0.1 \cos \alpha, 0.1 \cos 2\alpha, 0), \\ \dot{\mathbf{r}} &= -\pi^2 (0.1 \sin \alpha, 0.2 \sin 2\alpha, 0). \end{aligned}$$

对 $\alpha(t)$ ($\alpha \in [0, 2\pi]$), 我们利用点对点的运动对该轨迹进行规划. 图 2(b), (c) 和 (d), 表示末端执行器在期望运动轨迹下的位置、速度和加速度.

3.2 绳运动特性的仿真结果

图 3 表明在动平台末端执行器实现期望运动轨迹下, 机构的 7 根绳相应的长度(L)、速度(v)、加速度(a)和拉力(T). 正如第 1 部分所解释的, 7 根绳的速度始终都小于或等于末端执行

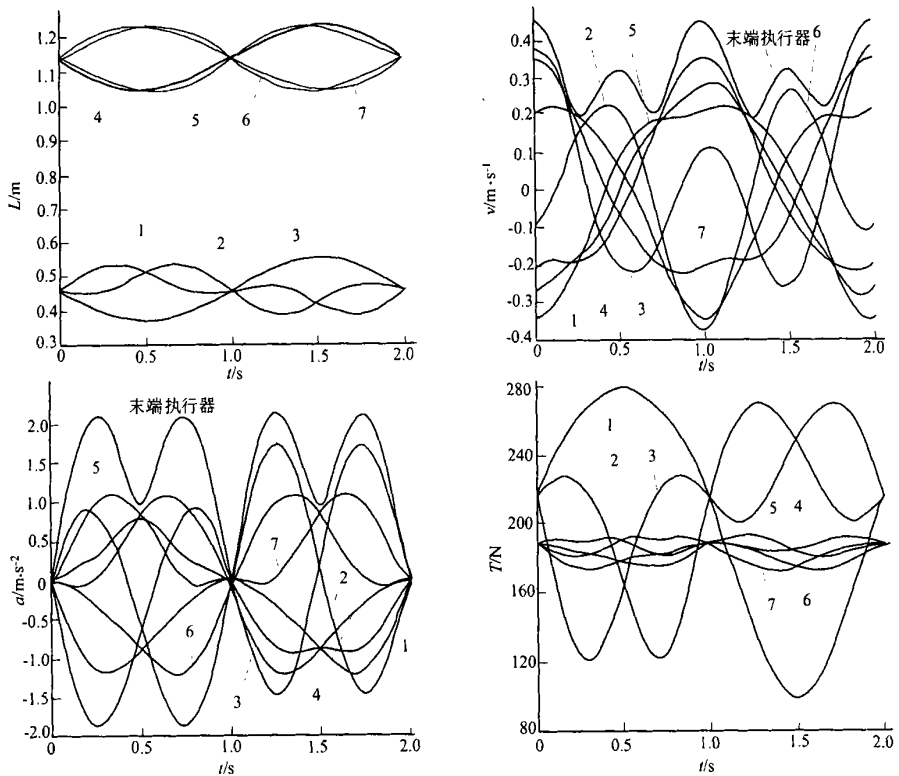


图 3 期望轨迹下绳的运动特性

器的速度. 同时可发现所有的绳在大部分时间内的加速度值和末端执行器的加速度值是同数量级, 且绳加速度值不大于同一时刻的末端执行器的加速度值. 在运动轨迹规划的时间内, 绳 4, 5, 6 和 7 的拉力都保持在 T_{min} 值附近, 几乎处于“关”的状态; 而绳 1, 2 和 3 的拉力呈几乎呈

正弦函数变化的趋势, 有时处于“开”的状态.

4 结束语

六自由度绳牵引并联机构的运动学逆解模型为机构的运动轨迹规划提供了一些绳的速度值和加速度的值一般性的结论. 基于绳拉力控制的运动控制方案, 引入一种计算绳拉力的算法, 采用 型轨迹进行实例仿真研究绳运动的特性. 结果验证表明了绳的速度值和加速度值始终不大于动平台末端执行器的速度值和加速度值; 且绳的加速度值和末端执行器的加速度值是同数量级. 同时, 一些绳拉力的变化不大(处于“关”的状态); 而另一些绳拉力的变化很大(处于“开”的状态). 这些运动轨迹规划的仿真结果为以后该机构的运动控制方案的研究以及控制系统的设计提供依据. 提出的方法具有一般性, 可用于一般的六自由度绳牵引并联机构的运动轨迹规划中.

参 考 文 献

- 1 郑亚青, 刘雄伟. 绳牵引并联机构的研究概况与发展趋势[J]. 中国机械工程, 2003, 14(9): 808~810
- 2 郑亚青, 刘雄伟. 六自由度绳牵引并联机构的可达工作空间分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2002, 23(4): 393~398
- 3 Kawamura S, Choe W, Tanaka S, et al. Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system[J]. Journal of the Robotics Society of Japan, 1995, 15(1): 82~89
- 4 刘雄伟, 郑亚青. 六自由度绳牵引并联机构的运动学分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(增刊): 16~20

Trajectory Planning of a 6-DOF Wire-Driven Parallel Kinematic Manipulator

Zheng Yaqing Liu Xiongwei

(College of Electromech. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

Abstract With regard to the authors' design of a 6-DOF wire-driven parallel kinematic manipulator, the inverse kinematic model is set up and an algorithm is put forward to calculate the tension of wires; and then, motion trajectory planning is carried out and the kinematic characteristics of wires are studied, with the objective that helical shaped trajectory can be realized by end-effector on the moving platform. As shown by the simulation results, the value of velocity and acceleration of wires are always less or equal to those of the end-effector; the values of acceleration of wires is in the order of magnitude of that of end-effector; and moreover, the tension of some wires changes slightly and even in the state of "switch off"; however, the tension of the other wires changes greatly and even in the state of "switch on". These results may serve as a basis for further motion scheme control and control system design of this manipulator. The methods of trajectory planning presented here is applicable to general 6-DOF wire-driven parallel kinematic manipulators.

Keywords wire-driven, parallel kinematic manipulator, 6-DOF, trajectory planning