

文章编号:1673-9469(2011)03-0097-03

3UPS-1S 并联机构的运动学分析

于淑政,冯继刚,崔国华,韦斌
(河北工程大学 机电学院,河北 邯郸 056038)

摘要:以 3UPS-1S 机构为研究对象,使用 Grubler-Kutzbach 自由度公式计算了机构的自由度,通过机器人学及机构学理论确定动、静平台坐标系、旋转矩阵,并根据机构几何关系推导出机构位姿逆解、正解方程,再由位姿方程求导得到雅克比矩阵,从而得到速度逆解、正解方程。分析结果表明:结构调整的 3UPS-1S 机构满足空间三维转动,且在动平台承受重载时,操作平稳;运动学分析得出机构的位姿正、逆解,速度正、逆解,对此类机构的理论研究很有意义。

关键词:并联机器人;三自由度;位姿;速度

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Kinematics analysis of the 3UPS-1S parallel mechanism

YU Shu-zheng, FENG Ji-gang, CUI Guo-hua, WEI Bin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: The Grubler-Kutzbach formula was used to calculate the freedom degree of the 3UPS-1S parallel mechanism, the moable platform, and the fixed platform coordinate system and the rotation matrix were fixed according to the robotics and mechanism theory. The forward equation and the inverse equation of pose were deduced based on the geometric relation, then the Jacobin matrix could be obtained accordingly and the forward equation and the inverse equation of velocity would be calculated. The results show that the new designed 3UPS-1S parallel mechanism can move three-dimensionally, and moves smoothly even when the moable platform supports heavy load. The forward equation and inverse equation of the parallel mechanism pose and velocity are useful to the parallel robot research.

Key words: parallel robot; three degree; pose; speed

空间三自由度并联机器人由于其机构结构简单、灵活性高、造价低等特点,近几年来成为学者研究的热点^[1]。对空间三自由度机器人的研究,比较成熟的如 delta 机器人,该机构应用广泛,特点是实现空间三平移运动。而针对空间转动三自由度机构的研究相对较少,之前的研究主要集中在运动副及支链的空间位置上,忽略了动平台在承受重载时的稳定性。近年来,Chao Wu 等^[2]设计了 3SPS-1S 机构,其特点是在上、下平台之间加了一个固定球铰,从而解决了重载时的问题,此机构应用于隧道管片拼装机的微调机构,不过对其运动学没有做理论分析。张宏涛、陈安军^[3]对 3UPS-1S 机构做了运动学分析,而他所采用的机构是将

三条运动支链置于固定支链的同一侧;由于其用途不同,所以其结构也有所不同。本文在借鉴前人研究成果的基础上,结合机构学及机器人学理论对 3UPS-1S 机构进行改进,将固定支链位于三条运动支链的对称中心,并对其运动学位姿和速度进行分析。

1 3UPS-1S 并联机构

3UPS-1S 并联机构由固定平台、运动平台及连接两个平台的 4 个支链组成(图 1)。固定平台 $A_1A_2A_3$ 及相对运动平台 $B_1B_2B_3$ 由两个边长相等的正三角形组成;3 条运动支链的运动副元素都

相同,都是由1个万向铰U、1个移动副P、1个球面副S组成,而且3条支链的原始长度都为 L ;上、下平台之间由1个固定支链 O_1O_2 即球面副连接,且在固定平台端固定,图中 O_1 、 O_2 分别为上下平台的中心。

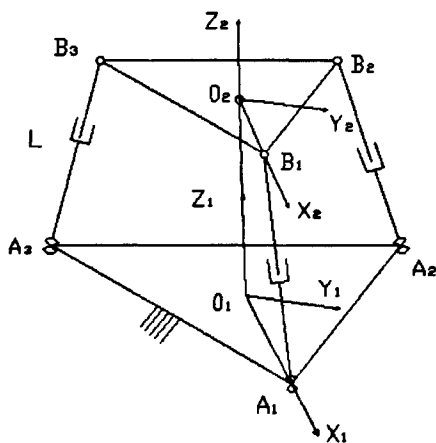


图1 3SPS-1S并联机构简图

Fig.1 Parallel mechanism diagram of 3UPS-1S

2 机构自由度的计算

采用 Grubler-Kutzbach 公式计算机构自由度:

$$M = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i$$

式中 M —机构自由度; n —机构构件数; g —运动副数; f_i —第 i 个运动副的自由度数。

此机构 $n = 8, g = 10$; 运动副为 3 个移动副、3 个万向铰链、4 个球面副, 则 $\sum_{i=1}^g f_i = 3 + 3 \times (1 + 2 + 3) = 21$; 代入上式自由度计算公式, 得出此机构自由度为 $M = 3$ 。

3 运动学分析

3.1 位姿逆解

并联机器人位姿逆解就是已知动平台空间姿态角 $(\alpha \beta \gamma)$, $\alpha \beta \gamma$ 分别为动坐标系 $O_2 - X_2 Y_2 Z_2$ 的各轴绕对应的固定坐标系 $O_1 - X_1 Y_1 Z_1$ 的夹角, 求 3 个油缸的输入位移 L_i 。如图所示, 固定坐标系 $O_2 - X_2 Y_2 Z_2$ 的 X_1 轴通过 $O_1 A_1$ 的连线, Z_1 轴通过 $O_1 O_2$, Y_1 轴通过右手法则确定。初始位置坐标系 $O_2 - X_2 Y_2 Z_2$ 与固定坐标系各轴相互分别平行。上下平台为边长不相等的正三角形, 外接圆半径分别为 R_1, R_2 , 固定杆长为 l_0 , 可变驱动

杆 $A_i B_i$ 的初始长度为 L 。旋转变换后, 动坐标系 $O_2 - X_2 Y_2 Z_2$ 相对于固定坐标系 $O_1 - X_1 Y_1 Z_1$ 的旋转矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta(\gamma-\alpha) - \sin\alpha(\gamma-\alpha) & -\cos\alpha\sin\beta(\gamma-\alpha) - \sin\alpha(\gamma-\alpha) & \cos\alpha\sin\beta \\ \sin\alpha\cos\beta(\gamma-\alpha) + \cos\alpha(\gamma-\alpha) & -\sin\alpha\sin\beta(\gamma-\alpha) + \cos\alpha(\gamma-\alpha) & \sin\alpha\sin\beta \\ -\sin\beta(\gamma-\alpha) & -\sin\beta(\gamma-\alpha) & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

设铰点 A_i 在固定坐标系 $O_1 - X_1 Y_1 Z_1$ 中的坐标为 A_i^0 ; B_i 在动坐标系 $O_2 - X_2 Y_2 Z_2$ 中的坐标为 B_i^2 ; B_i 在固定坐标系 $O_1 - X_1 Y_1 Z_1$ 中的坐标为 B_i^1 。则根据已知条件及构件几何关系得

$$A_i^0 = \begin{bmatrix} X_{A_i} \\ Y_{A_i} \\ Z_{A_i} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2R_1 & -R_1 & -R_1 \\ 0 & \sqrt{3}R_1 & -\sqrt{3}R_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B_i^2 = \begin{bmatrix} x_{B_i} \\ y_{B_i} \\ z_{B_i} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2R_2 & -R_2 & -R_2 \\ 0 & \sqrt{3}R_2 & -\sqrt{3}R_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B_i^1 = [X_{B_i} \ Y_{B_i} \ Z_{B_i}]^T = RB_i^2 \quad (4)$$

则可变驱动杆 $A_i B_i$ 的长度为

$$l_i = A_i B_i = (|B_i^1 - A_i^0|)^{\frac{1}{2}} = \left\{ \begin{aligned} &[(x_{B_1} - x_{A_1})^2 + (y_{B_1} - y_{A_1})^2 + (z_{B_1} - z_{A_1})^2]^{\frac{1}{2}} \\ &[(x_{B_2} - x_{A_2})^2 + (y_{B_2} - y_{A_2})^2 + (z_{B_2} - z_{A_2})^2]^{\frac{1}{2}} \\ &[(x_{B_3} - x_{A_3})^2 + (y_{B_3} - y_{A_3})^2 + (z_{B_3} - z_{A_3})^2]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

机构选定后, R_1, R_2, L 已知, 当已知动平台姿态角 $(\alpha \beta \gamma)$, 可得出其旋转矩阵 R , 将已知条件代入式(5), 可以确定 $A_i B_i$ 的长度变化规律。

3.2 位姿正解

已知驱动杆 $A_i B_i$ 位姿, 求解动平台的位置和姿态 $(\alpha \beta \gamma)$ 为机构的位姿正解。将已知条件代入式, 会得到一个关于 $(\alpha \beta \gamma)$ 的方程组

$$f_i(\alpha \beta \gamma) = 0 \quad (6)$$

当已知条件给定后, 求解式(6)就可得出 $(\alpha \beta \gamma)$ 的对应值。由于式(6)为一高度非线性、强耦合的超越方程, 解析法解方程几乎是不可能的。可采用最小二乘法或牛顿迭代法求其近似解。由于此机构位姿逆解是要考虑的主要问题, 所以正解过程这里不再赘述。

3.3 速度逆解

机构运动学分析包括速度逆解和正解的求解。速度逆解即已知末端动平台角速度 ω , 求驱动杆件的输入线速度 V_{L_i} 。输入线速度的一般表达式为

$$V_{L_i} = J\omega \quad (7)$$

J 表示为输入速度 V_{L_i} 与输出速度 ω 之间的映射矩阵, 俗称机器人速度 Jacobin 矩阵。将式(5)对时间 t 求得

$$V_i^T = f_{ij}^T \omega \quad (8)$$

式中 f_{ij} 为含有 $(\alpha \beta \gamma)$ 的三角形式的函数, 即 $f_{ij}(\alpha \beta \gamma)$; f_{ij}^T 为 f_{ij} 各元素组成的矩阵。所以 $J = f_{ij}^T$ 。当已知动平台角速度 ω , 求得动平台位姿 $(\alpha \beta \gamma)$, 将其代入 f_{ij}^T , 求得雅克比矩阵 J , 再将 ω 和 J 代入式(8), 即可求得速度逆解。

3.4 速度正解

速度正解即已知输入支链线速度 V_{L_i} , 求动平台输出角速度 ω 。

$$\omega = J^{-1} V_{L_i} \quad (9)$$

速度正解的求解方法与逆解是相似的, 由(9)式可以看出, 只要求出其雅克比矩阵 J 的逆矩阵 J^{-1} , 就可以得到速度正解方程, 代入已知条件, 即可求得动平台速度 ω 。

4 结论

结构调整后的 3UPS-1S 机构, 固定支链位于

3 条运动支链的几何对称中心, 满足空间三维转动, 且在动平台承受重载荷时, 操作平稳; 由机构学及机器人学分析得出机构的位姿与速度正、逆解方程, 对此类机构的理论研究很有意义。

参考文献:

- [1] 崔国华, 王国强, 赵春江, 等. 空间转动三自由度并联微调机构设计与运动学分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 144-148.
- [2] WU C, LIU X J, WANG L P, et al. Dimension optimization of an orientation fine-tuning manipulator for segment assembly robots in shield tunneling machines [J]. Automation in Construction, 2010, 20(4): 353-359.
- [3] 张宏涛, 陈安军. 3-3TPS1S 并联机器人机构的运动学研究[J]. 机械工程与自动化, 2008, 4(2): 123-126.
- [4] CRAIG J J. 机器人学导论[M]. 贡超, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006, 6.
- [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.
- [6] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [7] 方跃法, 黄真. 三自由度 3-RPS 并联机器人机构的运动学分析[J]. 机械科学与技术, 1996, 15(6): 929-934.
- [8] 陶建峰, 朱野, 闫述, 等. 重载三自由度旋转并联平台的位置逆解及其分析[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(4): 546-550.

(责任编辑 马立)

(上接第 96 页)

- [5] 邹家祥, 徐乐江. 冷连轧机系统振动控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [6] 张守云, 李春亭. 轧机主传动系统扭振仿真分析[J]. 重工与起重技术, 2008(2): 15-18.
- [7] 王永涛, 臧勇. CSP 轧机振动的振源研究[J]. 振动测试与诊断, 2008, 28(4): 397-399.
- [8] 杨俊, 吴迪平, 秦勤. CSP 热连轧机振动性质的确定

[J]. 冶金设备, 2006(1): 33-35.

- [9] 常瑜. 宝钢 2050 热连轧机组扭振分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
- [10] 马华. 1580PC 轧机 F2 机座主传动系统扭振研究和动态强度校核[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
- [11] 李久惠. 四辊带钢轧机振动研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2007.

(责任编辑 马立)