

l_3 为支链 3 第 2 驱动副的位移,取值范围 $[60, 120]$ cm。

4.2 工作空间求解

边界搜索算法一般采用机构的运动学逆解,并考虑机构的尺寸参数和运动参数的约束条件,进而搜索得到动平台上 o 点的活动轨迹的集合,即为该并联机构的工作空间,课题组在 MATLAB 软件中采用边界搜索算法得出 2-PUR-PSPR 并联机构的工作空间^[14],工作空间搜索流程如图 5 所示。

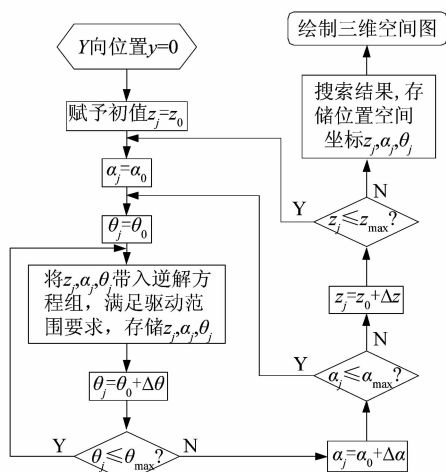


图5 工作空间求解流程

Figure 5 Workspace solution flow

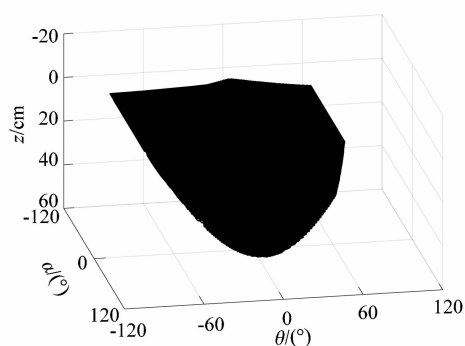
图 5 中 j 表示将 α, θ 与 z 的取值范围均等距分成 j 份,每份用 $\Delta\alpha, \Delta\theta$ 与 Δz 表示,在 MATLAB 中输入程序后,由赋予的初值开始逐步搜索,最终搜索得到该并联机构的工作空间如图 6 所示,其中 j 取值越大,所得图形精度越高。由图 6 可以看出该并联机构动平台在 Y 向位置为零时 ($y=0$),该并联机构动平台具有较大的转角范围, α, θ 的转动范围均超过 150° 。

5 运动逆解仿真

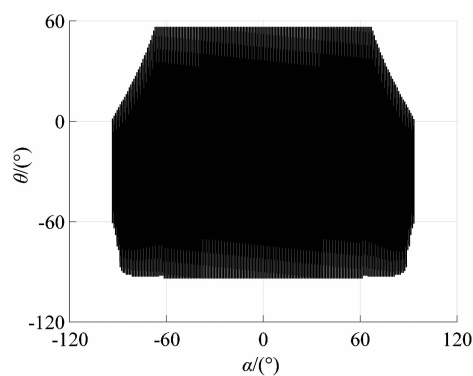
课题组已经对 2-PUR-PSPR 并联机构的动平台自由度,该并联机构的位置逆解,以及动平台 o 点的工作空间等做了理论分析,现基于 SolidWorks 软件仿真验证所建模型的合理性与稳定性。

在 SolidWorks 中将平行 $X-Y$ 面的圆投影到圆柱形工件内表面上,形成空间闭合曲线,该空间闭合曲线的加工示意图如图 7 所示。

在 SolidWorks 软件中,将空间闭合曲线通过路径配合与动平台末端执行器进行配合并仿真。仿真过程中可以输出动平台绕定平台 X 轴和 Y 轴的角度 α 和 θ 随时间的变化曲线,动平台 o 点沿 X 轴和 Y 轴的位移随时间的变化曲线,以及动平台末端执行器运动轨迹,



(a) α - θ - z 三维工作空间 ($y=0$)



(b) α - θ 平面上的投影

图6 并联机构工作空间

Figure 6 Workspace of parallel mechanism

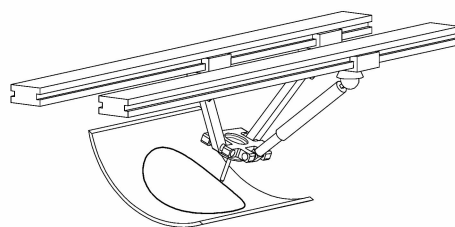


图7 并联机构加工空间曲线示意图

Figure 7 Schematic diagram of machining space curve of parallel mechanism

如图 8 所示。图 8(a) 中 X 轴上的数值是由动平台绕 Y 轴转动时伴随产生,图 8(b) 中动平台转角的 α 值变化较小,是因为末端执行器加工的轨迹位于圆柱形工件内表面上,故只需较小的 α 值即可满足加工需求。

在 SolidWorks 虚拟仿真环境中,在已知动平台变化规律的情况下,仿真得到各驱动副位移随时间的变化曲线如图 9 所示。

从图 8 动平台输出参数曲线与图 9 各驱动副的输入参数曲线可以看出,该并联机构在仿真过程中,输出与输入参数曲线均无明显波动,说明该并联机构具有设计合理,转动范围大,运行稳定性好等优点。

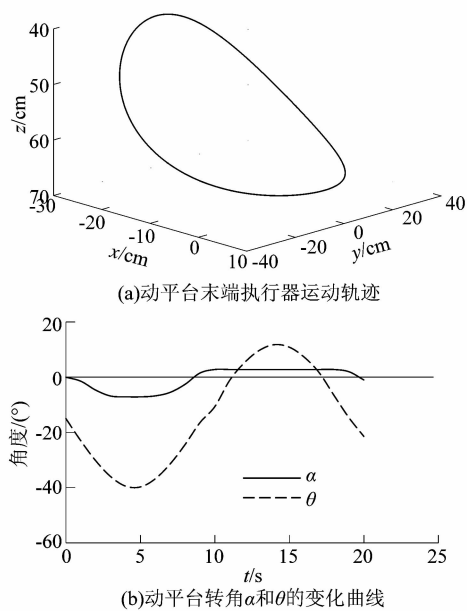


图8 并联机构动平台变化曲线
Figure 8 Dynamic platform change curve of parallel mechanism

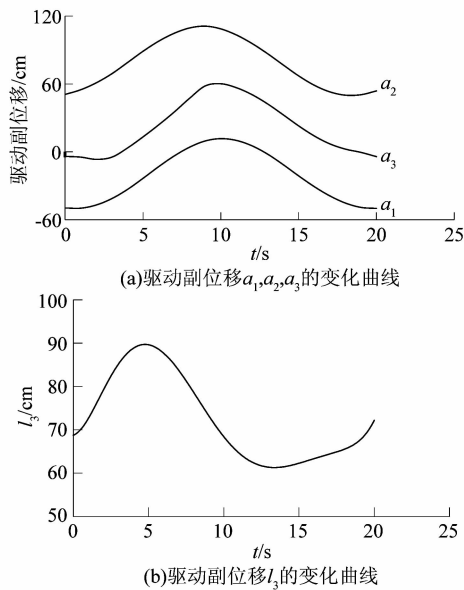


图9 驱动副位移变化曲线
Figure 9 Displacement curve of driving pair

6 结论

1) 课题组提出了新型的2移2转4自由度2-PUR-PSPR并联机构。该机构同时采用移动内、外副驱动,具有较大的位置工作空间;通过切换控制移动内副和多个移动外副的驱动方向,可使机构具有较大的姿态转角。基于MATLAB边界搜索算法,求解得到了该机构的工作空间,证实了动平台具有沿 X, Y 方向的

超过 150° 的大姿态转动能力。

2) 计算并验证了2-PUR-PSPR并联机构的自由度,获得了解析形式的位置逆解。针对动平台末端执行器执行圆柱形工件的内表面加工任务,设定了末端执行器的空间轨迹曲线,通过SolidWorks虚拟运动仿真获得了动平台的相应转角变化曲线。然后,在已知动平台运动规律的前提下,仿真获得了2-PUR-PSPR并联机构各驱动副的输入位移变化曲线。由图8和图9可看出,该机构的动平台末端执行器轨迹和转角 α, θ 变化曲线均平滑连续,表明末端执行器加工运动平稳、加工精度较高;各驱动副位移 a_1, a_2, a_3, l_3 变化曲线均波动较小且在合理取值范围,说明驱动器运转平稳、能耗较低。

研究结果验证了本构型设计、位置逆解建模、工作空间求解的正确性,为复杂自由曲面工件多轴加工装备研发设计奠定了必要的基础。

参考文献:

- [1] HUANG Zhen, LI Qinchun. General methodology for type synthesis of symmetrical lower-mobility parallel manipulators and several novel manipulators [J]. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(2): 131-145.
- [2] YANG Tingli, LIU Anxin, SHEN Huiping, et al. Topology design of robot mechanisms [M]. Singapore: Springer Singapore, 2018: 55-64.
- [3] 陈子豪, 张彦斌, 荆献领, 等. 一种新型2CRP/RRR平面移动并联机构的设计与分析[J]. 机电工程, 2019, 36(4): 357-362.
- [4] NEUMANN K E. Robot: US4732525 [P]. 1988-03-22.
- [5] NEUMANN K E. Parallel-kinematic machine: PCT, WO/2006/054935 [P]. 2006-05-26.
- [6] NEUMANN K E. The key to aerospace automation [EB/OL] (2013-12-12) [2019-06-30]. <http://www.doc88.com/p-1117283410961.html>.
- [7] 李秦川, 柴馨雪, 陈巧红, 等. 2-UPR-SPR并联机构转轴分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(21): 62-69.
- [8] 张伟中, 徐灵敏, 童俊华, 等. 2-PUR-PSR并联机构的运动学分析及尺度综合[J]. 机械工程学报, 2018, 34(7): 45-53.
- [9] LI Qinchuan, XU Lingmin, CHEN Qiaohong, et al. New family of RPR-equivalent parallel mechanisms: Design and application [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(2): 217-221.
- [10] 叶伟, 李秦川, 张克涛, 等. 一种运动部分解耦的2R2T并联机构运动学与性能分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 372-382.
- [11] 黄真, 刘婧芳, 李艳文, 等. 论机构自由度: 寻找了150年的自由度通用公式[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 20-37.
- [12] 黄真, 赵永生, 赵铁石, 等. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 112-117.
- [13] 克雷格. 机器人学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 30-37.
- [14] 吕叶萍, 许勇, 刘勇, 等. 一种含闭环机构单元的新型2R1T并联机构运动性能优化[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(2): 50-54.