

文章编号 1004-924X(2013)03-0717-07

一种并联宏/微驱动操作手的工作空间

冯海兵*

(燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:以应用于扫描电镜的 4-HSPS/PRPUR 并联宏/微驱动操作手为研究对象,对该并联机构的工作空间进行了分析。4-HSPS/PRPUR 并联宏/微驱动操作手的动平台与基座之间通过 4 个 HSPS 分支和 1 个 PRPUR 分支相连,机构动平台具有 3 个方向的移动自由度和绕 X 轴和 Y 轴的 2 个转动自由度。该并联机构同时包含了宏动输入部分和微动输入部分,本文分别对该机构在宏动输入和微动输入下的定姿态工作空间和灵活姿态角工作空间进行了分析。分析表明该机构具有较大的运动能力,同时还发现中间分支的连杆尺寸对运动空间形状有较大影响。综合该机构的定姿态工作空间和灵活姿态角工作空间可知,该并联宏/微驱动机器人能够应用于平台安装空间较小,工作空间需要较大并且定位精度高的场合。得到的结果对 4-HSPS/PRPUR 机构的应用有重要的理论指导意义。

关键词:宏/微驱动;并联机构;工作空间;扫描电子显微镜

中图分类号:TP241.3;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0717

Workspace of macro/micro actuated parallel mechanism

FENG Hai-bing*

(School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

* Corresponding author, E-mail: fhb@ysu.edu.cn

Abstract: The workspace of the 4-HSPS/PRPUR macro/micro actuated parallel mechanism applied to a scanning electron microscope is analyzed. The 4-HSPS/PRPUR macro/micro actuated parallel mechanism is composed of a base and a moving platform connected by four HSPS branches and a middle PRPUR branch. It has three translational degrees of freedom and two rotational degrees of freedom about the X axis and Y axis. Because the macro actuation and micro actuation are integrated together in this mechanism, this paper analyzes the constant orientation workspace and the dexterous workspace of this mechanism. The analysis shows that this mechanism can move flexibly in large workspace and the link length of the middle branch has considerable influence on the shapes of the workspaces. On the analysis of the constant orientation and dexterous workspaces of this mechanism, it demonstrates that the mechanism is suitable for the work condition of smaller platform mount space, large workspace and higher positioning accuracy. This study provides a theoretical basis for the application of the 4-HSPS/PRPUR parallel mechanism.

Key words: macro/micro actuation; parallel mechanism; workspace; scanning electron microscope

收稿日期:2012-10-08;修订日期:2012-11-27.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 51105322);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20101333120001);秦皇岛科学技术研究与发展计划资助项目(No. 201101A137)

1 引言

扫描电子显微镜可以实现微小三维形貌的观察和分析,有着广泛的应用前景^[1-2]。为了满足实际应用过程中对微操作的需求,一般将宏/微动平台结合使用。但是在平台安装空间较小,工作空间需求较大并且定位精度要求较高的场合,以往传统的宏/微定位平台系统具有一定的局限性^[3-6],而结构简单且紧凑的宏/微机器人系统则更符合实际应用需要。文献[7-8]充分利用并联机构的结构优势,通过在并联机构的空间结构中同时添加 2 组驱动,开发出了双重驱动少自由度并联机构。双重驱动少自由度并联机构实质上是 2 个具有相同自由度数的并联机构相结合,可以视为 2 个并联机构的串联。通过为 2 组驱动提供不同的驱动方案便可以开发出新型宏/微高精度定位平台。

文献[9]中介绍了一种并联宏/微驱动的操作手,它是一种面向扫描电子显微镜的机构。该机构采用了并联宏/微双重驱动的结构形式,能够在增大活动范围的同时获得较高的定位精度。该机构的宏动部分设计采用的是常规铰链,而微动部分则采用压电陶瓷作为驱动,同时辅以柔性铰链设计来实现扫描电子显微镜对微纳米级新型材料物性的操作和性能测试。

工作空间作为衡量并联机构性能的重要指标,能直接反映机构的工作能力。并联机构的工作空间相对较小是并联机构应用受限的一个主要因素,因此展开对并联机构工作空间的分析非常重要。本文以 4-HSPS/PRPUR 并联宏/微驱动操作手为研究对象,对该操作手在宏动输入和微动输入下的定姿态工作空间和灵活姿态角工作空间进行分析,从工作空间角度研究机构的运动性能。

2 4-HSPS/PRPUR 操作手并联机构

4-HSPS/PRPUR 机构简图如图 1 所示,该机构由 4 个 6 自由度的 HSPS 分支和 1 个 5 自由度的 PRPUR 分支并联构成。这里,R,P,U,S 和 H 分别表示转动副,移动副,万向铰链,球面副和螺旋副。

通过这 5 个分支把操作手和定平台相连接,该机构具有 10 个机构自由度,即需要 10 个输入才能确定操作手的位姿^[9]。将 10 个输入分成 2

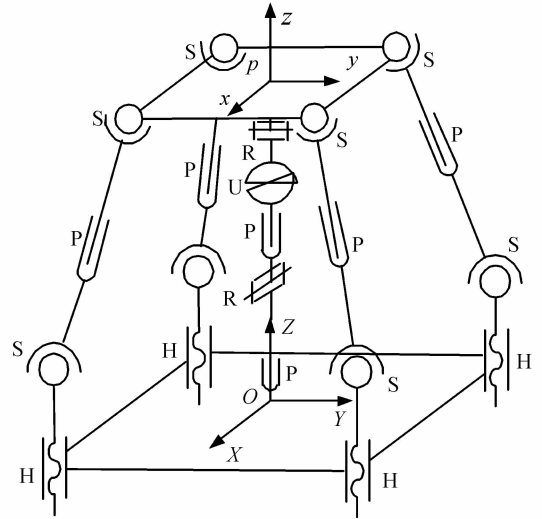


图 1 4-HSPS/PRPUR 机构简图

Fig. 1 Constructional sketch of 4-HSPS/PRPUR mechanism

组,4 个螺旋副 H 和 PRPUR 分支中靠近定平台的移动副 P 一组作为宏驱动,剩下 5 个分支中的 5 个移动副 P 一组作为微驱动,宏动时 4-HSPS/PRPUR 机构相当于 4-HSS/PRUR 机构,微动时相当于 4-SPS/RPUR 机构,都是 5 自由度输出,机构动平台可实现空间三维移动和绕 X 轴和 Y 轴的二维转动。

3 4-HSPS/PRPUR 操作手工作空间分析

工作空间分析是并联机构运动学分析过程中的重要内容,是在已知机构的尺度参数、导轨行程以及铰链约束等条件下,保证机构不出现奇异形,构件之间不发生干涉时,确定机构动平台的可达位置姿态^[10-15]。

在机构动平台位姿已知的情况下,利用位置反解能够计算出各连杆的长度 L_i 、球铰的摆角 θ_b 以及相邻杆之间的最短距离 D_i 。然后将得出的计算结果与机构的允许值,即杆长的极限值 $L_{i\max}$ 、球铰的极限摆角 $\theta_{b\max}$ 、杆的直径 D 进行比较,如果其中的任一值等于其允许值,即满足下列条件之一时:

$$\begin{cases} L_i = L_{\max} \\ D_i = D \\ \theta_b = \theta_{b\max} \end{cases},$$

说明参考点位于工作空间的边界点上。如果其中

的任一值超出允许值,那么此时参考点的位姿是不可能实现的,即参考点在工作空间之外。如果所有的参数值都在允许值范围之内,那么此时机构的参考点位于工作空间内。

3.1 定姿态工作空间

设 4-HSPS/PRPUR 操作手并联机构的宏动输入为 $L_i (i=1,2,\dots,5)$, 微动输入为 $l_i (i=1,2,\dots,5)$ 。

当只考虑宏动输入 L_i 变化,而令微动输入为零 $l_i=0 (i=1,2,\dots,5)$ 时,则机构变为 4-HSS/PRUR 并联机构。此时机构具有 3 个方向的移动自由度和绕 X 轴和 Y 轴的 2 个转动自由度。当令其绕 X 轴和 Y 轴的 2 个姿态转角都不发生改变时 ($\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$), 可以得到其定姿态工作空间如图 2 所示。

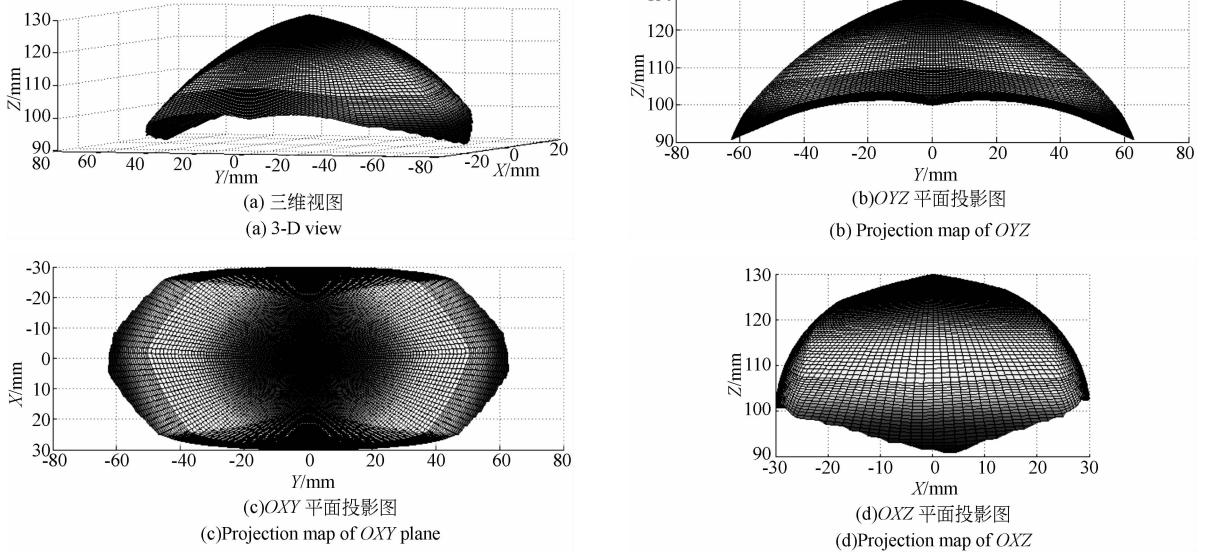


图 2 宏动输入下 4-HSPS/PRPUR 机构定姿态工作空间

Fig. 2 Workspace of 4-HSPS/PRPUR with given orientation under macro input

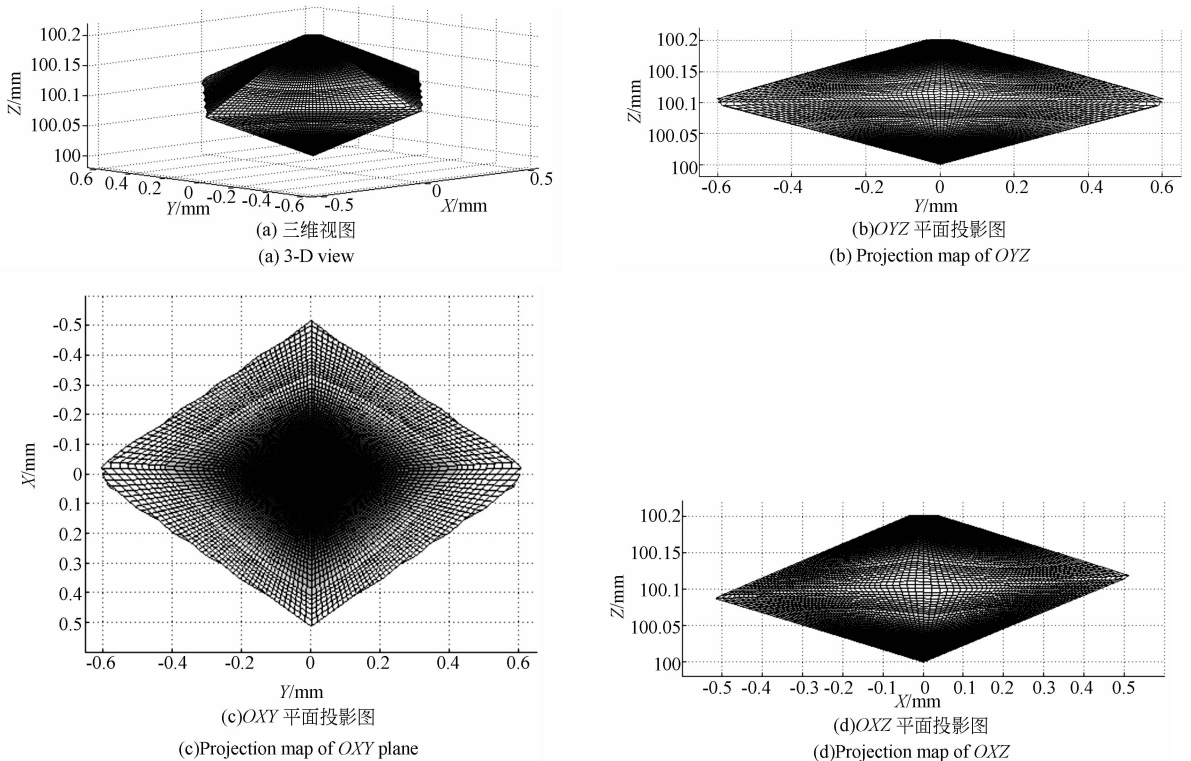


图 3 微动输入下 4-HSPS/PRPUR 机构定姿态工作空间

Fig. 3 Workspace of 4-HSPS/PRPUR with given orientation under micro input

由图 2 可以看出,当只考虑宏动输入变化且机构发生平动($\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$)时,

(1)机构工作空间形状大致为蘑菇形,在 OXY 平面的投影近似为不规则几何体。

(2)驱动范围为 $0\sim 30$ mm 时,工作空间在 Y 轴方向达到 100 mm,范围较大。

当只考虑微动输入 l_i 的变化,而令宏动输入为零 $L_i=0(i=1,2,\dots,5)$ 时,则机构变为 5 自由度 4-SPS/RPUR 并联机构。此时机构同样具有 3 个方向的移动自由度和绕 X 轴和 Y 轴的 2 个转动自由度。当令其 2 个姿态转角都不发生改变时($\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$),可以得到其定姿态工作空间如图 3 所示。

由图 3 可以看出操作手的定姿态微动工作空间具有如下特点:

(1)其工作空间形状近似为八面体,其在各平面的投影都为菱形;

(2)当微驱动行程为 $0\sim 0.2$ mm 时,操作手在 Z 方向上的运动范围也近似为 0.2 mm,而在 X 、 Y 方向上的运动能力较大,可以达到 1 mm。

3.2 中间分支尺寸对定姿态工作空间的影响

对于 4-HSPS/PRPUR 机构来说,它的各个尺寸对于运动空间也是有影响的,这里只简单分析中间分支尺寸变化对工作空间的影响。

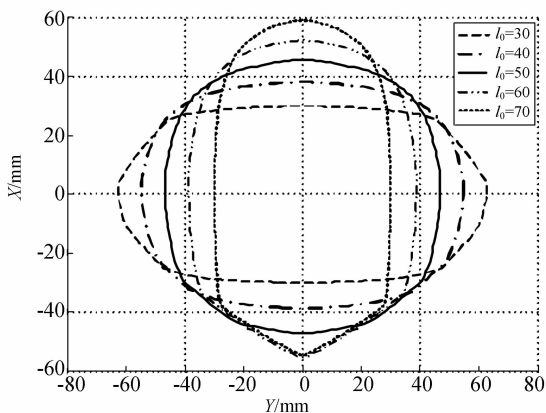


图 4 中间分支尺寸对定姿态工作空间的影响

Fig. 4 Influence of middle branch size on workspace

假设中间分支最上侧 U 副和 R 副之间的连杆长度为 l_0 。若中间分支 PRPUR 的总长度为 100 mm,则 l_0 的取值为 $0\sim 100$ mm,当 l_0 分别取值 30、40、50、60、70 mm 时,上平台的定姿态工作空间在 OXY 平面的投影如图 4 所示。

由图 4 可以看出:

(1)随着 l_0 的增大,其工作空间在 X 轴方向的投影长度逐渐增大,在 Y 轴方向的投影长度逐渐减小。

(2)由于上平台为关于 X 轴对称的梯形^[9],可以看出工作空间在 OXY 平面上的投影关于 X 轴是对称的,但并不关于 Y 轴对称。

(3)可以看出,当 $l_0=50$ mm 时,工作空间在 OXY 平面内的投影形状几乎为一个圆,此时机构的运动具有较好的各向同性。

3.3 灵活姿态角工作空间

前面研究了 4-HSPS/PRPUR 机构的定姿态工作空间。这种工作空间的大小可以体现机构动平台在姿态角为零时的移动能力。但由于机构的动平台是能够发生转动的,这里研究当动平台的转角不为零时,其运动空间的变化情况。

机构位置工作空间边界的不规则性以及姿态和位置的强耦合性导致的机构灵活工作空间的大小评价变得非常困难。这里利用机构工作空间边界曲线的最大内切圆的大小来评价其工作空间的大小。如果边界曲线内切圆的半径大,说明其工作空间大,反之则小。

由于很难直观地用固定坐标系下的 2 个转角 α, β 来描述操作手的姿态,这里采用平台灵活倾斜角 δ 来描述机构动平台的转角^[16]。

平台灵活倾斜角 δ 是指动平台向任意方向都能够偏转的角度值,可以综合反映出机构动平台绕 X 轴和 Y 轴的转动能力。当 δ 取不同的数值时可依次生成不同的工作空间,称为灵活姿态角工作空间。

当动平台的 z 坐标取某个确定值时,随着灵活倾斜角 δ 的变化,工作空间剖面最大内切圆的变化如图 5 所示。

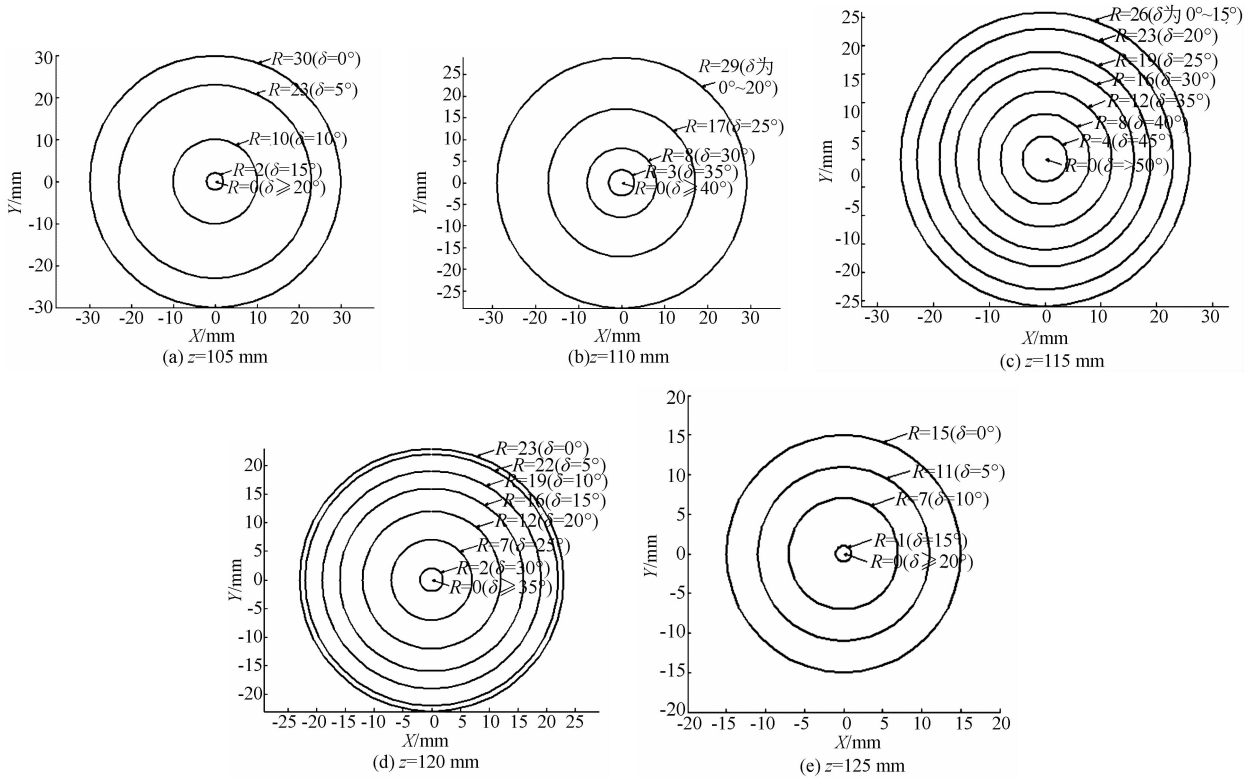


图 5 不同高度上,最大内切圆半径与 δ 的取值关系

Fig. 5 Relationship between radius of largest inscribed circle and δ at different heights

由图 5 可以看出:

(1)同一 z 截面高度,当转角 δ 增大时,机构位置工作空间的最大内切圆半径 R 减小。 δ 值大的工作空间是 δ 值小的工作空间的子空间。

(2)在每个高度层面上, δ 是有一定转动范围的,当给定的 δ 值超出这个范围时,其工作空间为零。

(3)在某些高度上,当 δ 从零增大到某个值时,其最大内切圆半径并没有变化。如图 5(b)所示 ($z = 110 \text{ mm}$),当 δ 为 $0 \sim 20^\circ$ 时,其最大内切圆半径都是 29 mm ,又如如图 5(c)所示 ($z = 115 \text{ mm}$),当 δ 为 $0 \sim 15^\circ$ 时,其最大内切圆半径都是 26 mm 。

当灵活刀具倾斜角 δ 取某个确定值时,随着 z 的变化,工作空间剖面最大内切圆半径的变化如图 6 所示,对应三维工作空间如图 7 所示。

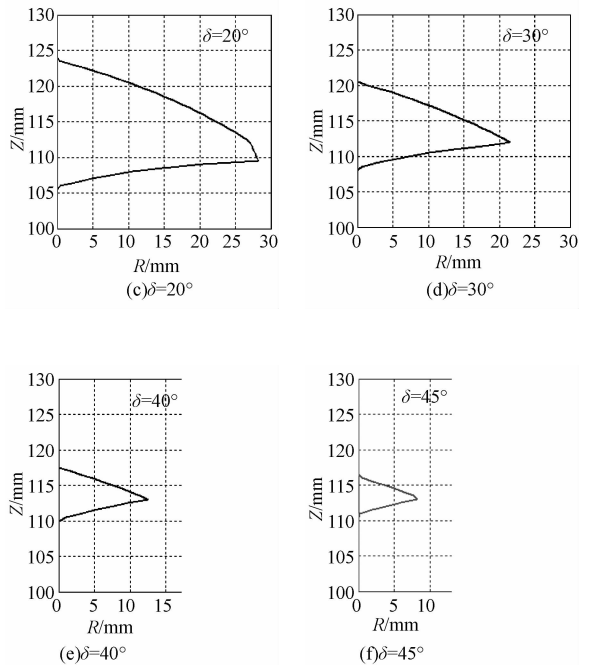
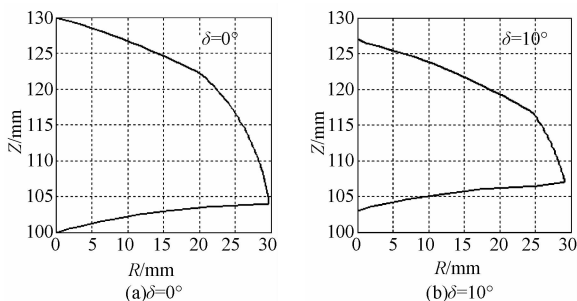
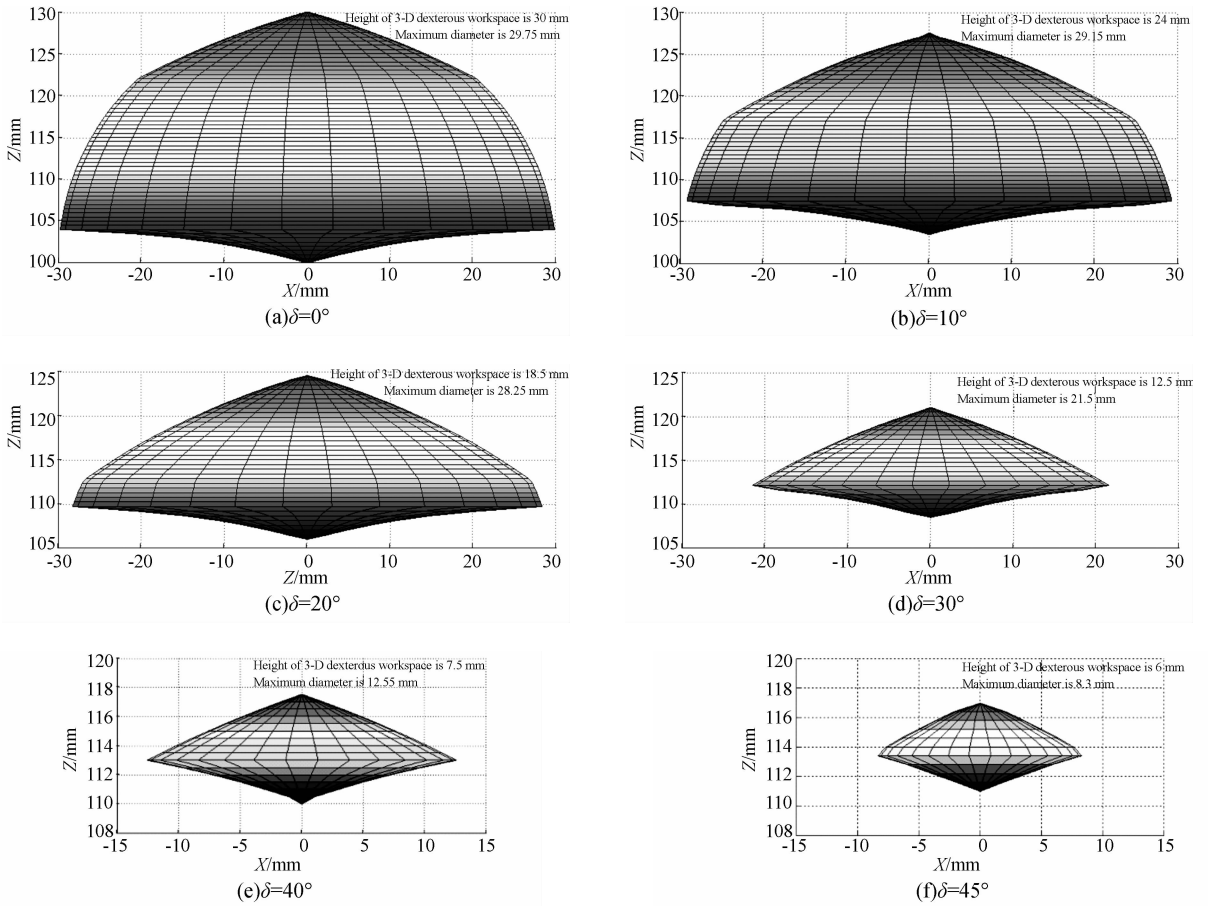


图 6 当 δ 取不同值时,最大内切圆半径与 z 坐标的关系
Fig. 6 Relationship between radius of largest inscribed circle and z with different δ

图 7 δ 取不同值时,操作手的灵活三维工作空间Fig. 7 3-D dexterous workspace of operator with different δ

由图 7 可以看出:

(1) 在灵活姿态角 δ 给定的情况下, z 值在 100 ~ 130 mm 的变化过程中, 机构位置工作空间的最大内切圆半径 R 先增大后减小。

(2) 随着 δ 角的增大, 工作空间的体积逐渐缩小。

4 结 论

本文分析了 4-HSPS/PRPUR 并联宏/微驱动操作手的工作空间。主要结论如下:

(1) 通过对定姿态工作空间的分析可以看出, 机构工作空间的尺寸范围较大, 在 Y 轴方向可以达到 100 mm。由于机构中含有微动机构, 当通过

宏机构移动到距离目标点 0.2 mm 的范围内时, 能通过微动机构的调节实现精密定位。

(2) 通过研究中间分支尺寸对定姿态工作空间的影响, 发现当中间分支的连杆尺寸 $l_0 = 50$ mm 时, 机构的运动定姿态工作空间具有较好的各向同性。

(3) 通过对机构灵活姿态角工作空间的分析可以看出, 随着机构偏转角的增大, 其灵活姿态角工作空间会相应减小; 且灵活姿态角工作空间的内切圆直径在高度方向呈现先增大后减小的变化规律。

综合机构的定姿态工作空间和灵活姿态角工作空间可知, 该并联宏/微驱动机器人能够应用于平台安装空间较小, 工作空间需要较大并且定位精度高的场合。

参考文献:

[1] PFALZGRAFF W C, HULSCHER R M, NESHYBA S P. Scanning electron microscopy and molecu-

lar dynamics of surfaces of growing and ablating hexagonal ice crystals [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(6): 2927-2935.

[2] PICCIOTTI P M, AGOSTINO S E, NARDO W D, et al.. Scanning Electron Microscopy of cochlea in

- new-born rats exposed to hyperbaric oxygen: preliminary report [J]. *Acta Otorhinolaryngol Ital*, 2005,25 (5):267-270.
- [3] 孙立宁,董为,杜志江. 宏/微双重驱动机器人系统的研究现状与关键技术[J]. *中国机械工程*,2005,16(1):89-93.
- SUN L N, DONG W, DU ZH J. State-of-the-art and key technologies of Macro/Micro dual manipulator system [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005,16(1):89-93. (in Chinese)
- [4] 陈立国,孙立宁,边信黔,等. 面向微操作的宏/微精密定位技术研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*,2005(5):49-51.
- CHEN L G, SUN L N, BIAN X Q, *et al.*. Macro/Micro positioning technique for micromanipulation [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2005,(5):49-51. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] KANG D S, SEO T W, YOON Y H, *et al.*. A Micro-positioning parallel mechanism platform with 100 degree Tilting Capability [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2006,55(1):377-380.
- [7] ZHAO T SH, DAI J S, HUANG Z. Geometric synthesis of spatial parallel manipulators with fewer than six degree of freedom [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2002, 216 (12): 1175-1185.
- [8] 祁晓园,李宁宁,陈江,等. 一种新型4-PUU并联机构运动学分析[J]. *燕山大学学报*,2007,31(5):387-391.
- QI X Y, LI N N, CHEN J, *et al.*. Kinematic analysis of a new-style 4-PUU parallel mechanism [J]. *Journal of Yanshan University*, 2007,31(5):387-391. (in Chinese)
- [9] 赵铁石,冯海兵,刘艳辉,等. 五自由度宏/微双重驱动并联机构及其运动学分析[J]. *燕山大学学报*,2010,34(6):501-507.
- ZHAO T SH, FENG H B, LIU Y H, *et al.*. 5-DOF dual-drive parallel mechanism and its kinematics [J]. *Journal of Yanshan University*, 2010,34 (6):501-507. (in Chinese)
- [10] BONEV I A, GOSSELIN C M. Analytical determination of the workspace of symmetrical spherical parallel mechanisms [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(5):1011-1017.
- [11] XU B Q, LI T M, LIU X J, *et al.*. Workspace analysis of the 4RRR planar parallel manipulator with actuation redundancy [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2010,15(5):509-516.
- [12] LI R Q, DAI J S. Workspace atlas and stroke analysis of seven-bar mechanisms with the translation-output [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012,47:117-134.
- [13] 高峰,黄玉美,史文浩,等. 3-RPS并联机构工作空间分析的球坐标搜索法[J]. *西安理工大学学报*,2001,(3):239-242.
- GAO F, HUANG Y M, SHI W H, *et al.*. The sphere-coordinate searching method of the workspace analysis of the 3-RPS parallel mechanism [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2001,(3):239-242. (in Chinese)
- [14] 张立杰,刘辛军. 球面三自由度并联机器人可达工作空间的研究[J]. *中国机械工程*,2001,12(10):1122-1124.
- ZHANG L J, LIU X J. The atlases of reachable workspace for spherical 3-DOF parallel manipulators [J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(10):1122-1124. (in Chinese)
- [15] 李兵,王知行,袁剑雄. 新型并联机床的操作空间分析[J]. *机械设计与研究*,1999(1):46-48.
- LI B, WANG ZH X, YUAN J X. Workspace analysis of new type parallel machine tool [J]. *Machine Design and Research*, 1999(1):46-48. (in Chinese)
- [16] 田小静. 新型五自由度并联机床的运动学设计及工作空间分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2003:35-48.
- TIAN X J. *The Kinematics Design and Workspace Analysis of a Novel 5-DOF PMT* [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2003:35-48. (in Chinese)

作者简介:



冯海兵(1981—),男,河北清河人,硕士,研究实习员,2004年、2009年于燕山大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为双重驱动并联机器人。E-mail: fhb@ysu.edu.cn

(本栏目编辑:马健)

(版权所有 未经许可 不得转载)