

2PRC-PRS 并联平台运动学分析与控制系统开发

韩 博¹, 许允斗^{1,2}, 姚建涛^{1,2}, 苏弘良¹, 平立发¹, 赵永生^{1,2*}

(1. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室, 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘 要: 为拓展少自由度并联机器人在农业工程中的应用, 提出一种具有两转一移(2R1T) 3 自由度的 2PRC-PRS 并联机构, 基于反螺旋理论对机构的自由度及运动特性进行了分析, 并推导出了机构的位置反解; 设计制造了 2PRC-PRS 并联平台样机, 结合贝加莱公司生产的伺服运动控制器, 添加相应外围设备, 对并联平台设计了一套基于 Powerlink 总线的网络化运动控制系统, 组装了电控柜, 并以 Automation Studio 3.0 为软件开发平台, 基于 ST 编程语言开发了控制软件; 在并联平台和电控柜以及控制软件的基础上, 完成了伺服电机三环参数整定、电子齿轮试验、平台综合运动控制试验以及无线网络远程控制试验。为深入研究此类少自由度并联机器人奠定了理论和试验基础, 丰富了工业网络实时控制系统的实践经验, 也为此类机电一体化设备的研发提供了参考。

关键词: 并联; 机构; 软件开发; 螺旋理论; 位置反解; 控制系统; 网络远程控制

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.005

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-14-0030-09

韩 博, 许允斗, 姚建涛, 苏弘良, 平立发, 赵永生. 2PRC-PRS 并联平台运动学分析与控制系统开发[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 30-38. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.005 http://www.tcsae.org

Han Bo, Xu Yundou, Yao Jiantao, Su Hongliang, Ping Lifa, Zhao Yongsheng. Kinematic analysis of 2PRC-PRS parallel platform and development of control system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(14): 30-38. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.005 http://www.tcsae.org

0 引 言

随着农业生产模式的变革和农业技术的不断更新, 农业机器人作为新一代智能化农业机械得到了快速的发展和广泛的应用^[1-3]。传统农业机器人大多都是基于串联机器人设计, 而并联机器人由于具有刚度大、承载能力强、精度高等优点而逐渐被应用到农业生产中, 已成功应用于颗粒状种子筛选、植物幼苗移植、果蔬嫁接和果蔬采摘等方面^[4-6]。

农业工程方面的作业往往在山地、林地、丘陵等复杂地况进行^[7], 机械结构简单、灵活性好、成本较低的少自由度并联机器人在这方面具有得天独厚的优势, 在一些作业中, 农作物的采摘、种植、辅助运输等作业操作过程相对简单, 并且精度要求不高, 具有两转一移(2R1T) 3 自由度的并联机器人就可以满足作业要求。2R1T 并联机构是少自由度并联机构中的一类, 自 1983 年 Hunt 提出了 3-RPS 并联机构^[8]以来, 少自由度并联机构尤其是 2R1T 并联机构便受到广泛关注, 与 6 自由度并联机器人

相比, 少自由度并联机器人具有驱动件少、构件少、控制简单方便、制造容易等优点, 是极具发展前途的一类机器人^[9], 相关研究人员在这类机构的构型综合^[10]、运动学^[11]、解耦性^[12]、受力分析^[13]、奇异性分析^[14]、动力学^[15]、尺寸综合以及伴随运动^[16]等方面做了大量研究, 取得了许多原创性成果, 同时该类机构也得到了广泛的应用, 如基于 3-PRS 机构的 Z3 主轴头, 采用 2-UPR/SPR 机构的 Exechon 五轴加工中心^[17]等。但是此类 2R1T 并联机器人机型至今仍很少见, 而且目前关于此类并联机器人的研究大多是机构学相关理论研究, 控制系统的研究较为欠缺, 尤其是缺少按照应用标准设计, 可以应用到生产实际中的控制系统的开发以及软硬件配置等工作的研究。因此, 有必要开展此类并联机器人的构型设计、结构设计、实际应用标准下的控制系统开发以及相关试验研究等工作。

本文提出一种具有两转一移(2R1T) 3 自由度的 2PRC-PRS 并联机构, 基于反螺旋理论对其进行了自由度分析和运动特性分析, 推导出了机构的位置反解, 自主设计制造了一台 2PRC-PRS 并联平台样机, 搭载贝加莱伺服运动控制系统, 研发了一套机电一体化设备, 并开发了控制软件, 在此基础上进行了相关试验研究, 旨在为后续深入研究奠定基础, 为该类以少自由度并联机构为基础的机电一体化设备的研发提供参考。

1 2PRC-PRS 并联机构结构介绍及并联平台坐标系的建立

2PRC-PRS 并联机构的机构简图及运动坐标系的建

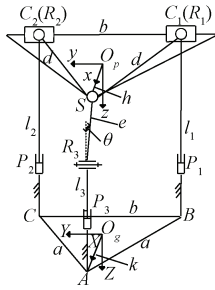
收稿日期: 2015-11-06 修订日期: 2016-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275439 和 51405425); 河北省重点基础研究项目(15961805D); 燕山大学青年教师自主研究计划课题(13LGA001)。

作者简介: 韩 博, 男, 河北衡水人, 博士, 研究方向为并联机构理论及应用、机器人技术。秦皇岛 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室, 066004。Email: 1440731168@qq.com

*通信作者: 赵永生, 男, 吉林龙井人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为机器人技术、传感器技术、先进制造技术。秦皇岛 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室, 066004。Email: yszhao@ysu.edu.cn

立如图 1 所示, 由定平台、动平台及连接动平台和定平台的 3 条支链组成。其中, 第一支链和第二支链的结构完全相同, 支链的运动副结构为 PRC 结构 (P、R 和 C 分别表示移动副、转动副和圆柱副), 该两支链的一端通过移动副与定平台连接, 其另一端通过转动副与圆柱副相连, 圆柱副的导轨固定在动平台上; 第三支链的结构为 PRS 结构 (S 表示球副), 该支链的一端通过移动副与定平台连接, 此移动副另一端连接着下连杆, 该下连杆另一端通过转动副与上连杆相连, 该上连杆上端通过球铰连接动平台。第一支链和第二支链的圆柱副 C_1 和 C_2 共轴线; 第一支链和第二支链的转动副 R_1 和 R_2 轴线相互平行, 并与圆柱副 C_1 和 C_2 的轴线垂直相交; 第三支链的转动副 R_3 轴线与移动副 P_3 轴线垂直, 且与第一支链和第二支链的圆柱副轴线平行; 各个支链中的移动副 P_1 、 P_2 和 P_3 作为该机构的输入运动副, 3 条支链在空间中呈以第三支链为顶点的等腰三角形分布, 整个结构呈空间面对称^[18]。



注: P_1 、 P_2 、 P_3 、 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为 3 个支链中的移动副和转动副, C_1 、 C_2 分别为第一支链和第二支链中的圆柱副, S 为第三支链中的球副; O_p-xyz 、 O_g-XYZ 分别为动平台和定平台上的坐标系; A 、 B 、 C 、 S 、 $C_1(R_1)$ 、 $C_2(R_2)$ 分别为动平台和定平台上各运动副的坐标点位置; a 为定平台上 3 个移动副构成的等腰三角形的腰长, mm; d 为动平台上 3 个运动副构成的等腰三角形的腰长, mm; b 为动、定平台上运动副构成的等腰三角形的底边长, mm; k 为定平台上 A 点与定坐标系原点之间的距离, mm; h 为动平台上 S 点与动坐标系原点之间的距离, mm; l_1 、 l_2 、 l_3 分别为 3 个支链中转动副和定平台之间的距离, mm; e 为第三支链中转动副和球副之间的连杆长度, mm; θ 为第三支链中转动副和球副之间的连杆与竖直方向的夹角, ($^\circ$)。Note: P_1 、 P_2 、 P_3 、 R_1 、 R_2 and R_3 are the prismatic pairs and the revolute pairs in the 3 branches, respectively. C_1 and C_2 represent the cylindrical pairs in the first branch and the second branch. S represents the spherical pair in the third branch. O_p-xyz and O_g-XYZ represent the coordinate systems on the moving platform and the fixed platform. A , B , C , S , $C_1(R_1)$ and $C_2(R_2)$ represent the position of the joint on the moving platform and the fixed platform. a represents the waist length of the isosceles triangle which is composed of the three prismatic pairs on the fixed platform, mm. d represents the waist length of the isosceles triangle which is composed of the 3 joints on the moving platform, mm. b represents the length of the base of the triangle which is composed of the 3 joints on the moving platform and the fixed platform, mm. k represents the distance between the point A and the origin of the coordinate system on the fixed platform, mm. h represents the distance between the point S and the origin of the coordinate system on the moving platform, mm. l_1 , l_2 and l_3 represent the distances between the revolute pair and the fixed platform in 3 branches, mm. e represents the length of the linkage between the revolute pair and the spherical pair in the third branch, mm. θ represents the angle of the linkage between the revolute pair and the spherical pair in the vertical direction, ($^\circ$).

图 1 2PRC-PRS 并联机构简图及坐标系

Fig.1 Schematic diagram of 2PRC-PRS parallel mechanism and coordinate system

现有的并联平台中, 无论是 6 自由度并联平台还是少自由度并联平台, 运动副多为分体式结构, 依次排布在各个支链上, 运动副之间用连杆连接, 这就使得平台分支运动链较长, 力传递效果较差, 运动惯性大, 成本

较高。如图 1 所示, 在 2PRC-PRS 并联机构的设计中, 创造性的将转动副和圆柱副复合在一起, 这就使得分支运动链的尺寸大大缩短, 整体结构更加紧凑, 也减小了运动惯性, 同时在结构设计中共轴线的两个圆柱副共用一条高刚度不锈钢光轴, 直接避免了因轴线不共线而产生的偏差, 由于转动副和圆柱副复合在一起, 在运动过程中连杆施加给转动副的驱动力并不会对圆柱副产生附加力矩, 改善了圆柱副光轴的受力情况, 减少了非期望磨损, 同时提高了驱动力利用率, 这为今后并联平台的分支结构设计提供了新思路。

如图 1 所示, 在动平台和定平台上分别建立动坐标系 O_p-xyz 、和定坐标系 O_g-XYZ , O_p 为动平台的中心, x 轴指向 S , y 轴与 C_1C_2 平行, z 轴垂直于平面向下, O_g 为定平台的中心, X 轴指向 A , Y 轴与 BC 平行, Z 轴垂直于平面向下。机构在初始位置时, 两坐标系各个对应的坐标轴相互平行。

2 2PRC-PRS 并联机构自由度分析

下面采用反螺旋理论^[19]来分析 2PRC-PRS 并联机构的自由度。

第一支链的运动螺旋系为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{11} &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathbf{S}_{12} &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ z_1 \ -y_1) \\ \mathbf{S}_{13} &= (0 \ 1 \ 0; -z_1 \ 0 \ x_1) \\ \mathbf{S}_{14} &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 x_1 、 y_1 、 z_1 为圆柱副中心 C_1 点在定坐标系 O_g-XYZ 中 3 个方向的坐标值, mm。

对第一支链的运动螺旋系求反螺旋得

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{11}^r &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathbf{S}_{12}^r &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ z_1 \ 0) \end{aligned} \quad (2)$$

分析上述两个约束力螺旋可知, 第一个螺旋为沿 Z 轴方向的一个力偶, 第二个螺旋为经过动平台 C_1 点, 平行于 X 轴方向的一个约束力。

第二支链与第一支链结构相同, 对第二支链的运动螺旋系求反螺旋得

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{21}^r &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathbf{S}_{22}^r &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ z_2 \ 0) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 z_2 为圆柱副中心 C_2 点在定坐标系 O_g-XYZ 中的 Z 轴方向坐标值, mm。

分析上述两个约束力螺旋可知, 第一个螺旋为沿 Z 轴方向的一个力偶, 第二个螺旋为经过动平台 C_2 点, 平行于 X 轴方向的一个约束力。

对第三支链的运动螺旋系求反螺旋得

$$\mathbf{S}_{32}^r = (0 \ 1 \ 0; -z_3 \ 0 \ x_3) \quad (4)$$

式中 x_3 、 z_3 为球副中心 S 点在定坐标系 O_g-XYZ 中的 X 轴方向和 Z 轴方向坐标值, mm。

3 条支链对动平台施加的 6 个约束螺旋构成约束螺旋系, 对这 3 条支链施加给动平台的约束螺旋系求反螺旋得动平台的运动螺旋系为

$$\begin{aligned}\mathbf{S}_1 &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathbf{S}_2 &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ z_3 \ 0) \\ \mathbf{S}_3 &= (0 \ 1 \ 0; -z_1 \ 0 \ 0)\end{aligned}\quad (5)$$

这 3 个运动螺旋表示的运动分别为沿 Z 轴方向的移动、绕 X 轴方向的转动和绕 Y 轴方向的转动, 因此, 2PRC-PRS 有两转一移 3 个自由度。

因为在机构任何可能的运动过程中, 包括上述的 2 个转动和 1 个移动, 各个支链的运动副因为结构的限制总保持原有的几何关系, 应用反螺旋理论分析得到的支链约束力螺旋系不变, 所以动平台的自由度不会发生改变, 因此, 机构自由度是全周性的。

3 2PRC-PRS 并联机构反解计算

在输出参数已知的情况下求解输入参数称为运动学反解^[20], 运动学反解是并联平台控制系统软件开发的必要准备。2PRC-PRS 并联机构有 2 个转动自由度和 1 个移动自由度, 因此, 该并联机构的反解问题实质就是已知动平台的 2 个转角 θ_1 、 θ_2 和动平台坐标原点 O_p 与定坐标系原点 O_g 在 Z 轴方向的距离 z_p , 求解 3 个支链的驱动移动副的输入位移值 Δl_1 、 Δl_2 、 Δl_3 。

首先对本 2PRC-PRS 并联机构进行姿态和位置描述, 采用 Z - X - Y 型欧拉角^[21]: 首先绕 z 轴旋转 α 角度, 然后绕 x 轴旋转 β 角度, 最后绕 y 轴旋转 γ 角度。本 2PRC-PRS 机构, 只有 2 个转动自由度, 故设 $\alpha=0$, $\beta=\theta_1$, $\gamma=\theta_2$, 从而得到动坐标系最终的姿态矩阵为

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(z, 0)\mathbf{R}(x, \theta_1)\mathbf{R}(y, \theta_2)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ 0 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{R}$ 为动平台坐标系相对于定平台坐标系的旋转变换矩阵; θ_1 为动平台绕动坐标系 x 轴旋转的角度, ($^\circ$); θ_2 为动平台绕动坐标系 y 轴旋转的角度, ($^\circ$)。

最终简化可得

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \\ -\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2PRC-PRS 并联机构只有 Z 轴方向的一个移动自由度, 动坐标系的位置描述如下

$${}^{O_g}\mathbf{P}_{O_p} = [0 \ 0 \ -z_p]^T \quad (8)$$

式中 ${}^{O_g}\mathbf{P}_{O_p}$ 为动坐标系原点 O_p 相对于定坐标系的位置矢量; z_p 为动坐标系原点 O_p 与定坐标系原点 O_g 在 Z 轴方向的距离, mm。

如图 1 所示, 在定坐标系 O_g - XYZ 中, 角点坐标

$$\begin{aligned}A &(k, 0, 0) \\ B &(k - \sqrt{a^2 - b^2/4}, -b/2, 0) \\ C &(k - \sqrt{a^2 - b^2/4}, b/2, 0)\end{aligned}\quad (9)$$

式中 a 为定平台上 3 个移动副构成的等腰三角形的腰长,

mm; b 为动、定平台上运动副构成的等腰三角形的底边长, mm; k 为定平台上 A 点与定坐标系原点之间的距离, mm。

在动坐标系 O_p - xyz 中, 运动副中心坐标

$$\begin{aligned}S &(h, 0, 0) \\ C_1 &(h - \sqrt{d^2 - b^2/4}, -b/2, 0) \\ C_2 &(h - \sqrt{d^2 - b^2/4}, b/2, 0)\end{aligned}\quad (10)$$

式中 d 为动平台上 3 个运动副构成的等腰三角形的腰长, mm; h 为动平台上 S 点与动坐标系原点之间的距离, mm。

两个 PRC 分支的移动副位移值可以由几何关系直接得出

$$\begin{aligned}\Delta l_1 &= \frac{z_p - l_1 + b \tan \theta_1}{2 + (\sqrt{d^2 - b^2/4} - h) \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2} \\ \Delta l_2 &= \frac{z_p - l_2 + b \tan \theta_1}{2 - (\sqrt{d^2 - b^2/4} - h) \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2}\end{aligned}\quad (11)$$

式中 Δl_1 为第一支链的移动副的输入位移值, mm; Δl_2 为第二支链的移动副的输入位移值, mm; l_1 、 l_2 分别为初始位置时第一支链和第二支链中转动副和定平台之间的距离, mm; 初始位置时, $l_1=l_2$ 。

求解最后一个支链移动副的位移值, 利用公式

$${}^{O_g}\mathbf{P}_S = \mathbf{R} \cdot {}^{O_p}\mathbf{P}_S + {}^{O_g}\mathbf{P}_{O_p} \quad (12)$$

式中 ${}^{O_g}\mathbf{P}_S$ 为第三支链 S 点在定坐标系 O_g - XYZ 下的位置坐标; ${}^{O_p}\mathbf{P}_S$ 为第三支链 S 点在动坐标系 O_p - xyz 下的位置坐标。

进而求出 S 点在定系下表示的坐标值

$${}^{O_g}\mathbf{P}_S = (k \cdot \cos \theta_2, k \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2, -k \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 - z_p) \quad (13)$$

通过 S 点始终在 PRS 分支所在平面内的约束关系可直接得第三分支的输入值

$$\Delta l_3 = k \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 + z_p - e \cos(\theta + \theta_2 \cdot \cos \theta_1) - l_3 \quad (14)$$

式中 Δl_3 为第三支链的移动副的输入位移值, mm; e 为第三支链中转动副和球副之间的连杆长度, mm; θ 为第三支链中转动副和球副之间的连杆与竖直方向的夹角, ($^\circ$); l_3 初始位置时第三支链中转动副和定平台之间的距离, mm。

这样, 就建立了 2PRC-PRS 并联机构的位置反解数学模型, 在已知动平台的两个转角 θ_1 、 θ_2 和动平台参考点 O_p 的 Z 轴坐标 z_p , 就可以求解出 3 个分支的驱动移动副的输入位移值 Δl_1 、 Δl_2 、 Δl_3 。

4 2PRC-PRS 并联平台控制系统开发与试验研究

2PRC-PRS 并联平台具有两转一移 3 个自由度, 并且拥有少自由度并联机器人高刚度、运动灵活、控制简单、成本低的优点, 可以广泛应用于农业工程领域中野外复杂地况下的农作物的种植、采摘、辅助运输等作业。为了将 2PRC-PRS 并联机构真正应用于生产实际, 在相关理论分析及优化完成后, 对其进行详细的结构设计, 加工制造了并联平台样机 (如图 2 所示), 组建了控制系统, 并进行相关试验研究。

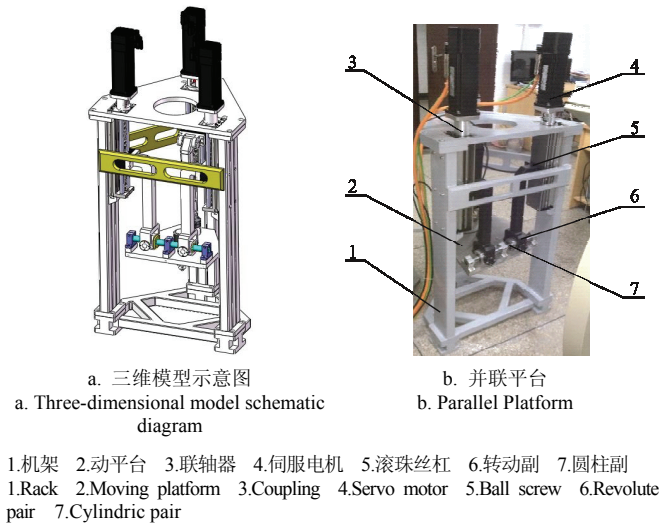


图 2 2PRC-PRS 并联平台三维模型和实体图

Fig.2 Three-dimensional model and the entity of 2PRC-PRS parallel platform

4. 1 2PRC-PRS 并联平台控制系统组建与软件开发

并联机械控制系统一般结构都是“控制器+驱动器+伺服/步进电机”的模式。控制系统软硬件功能的优劣在很大程度上影响了机械设备的运动状态^[22]。传统运动控制系统的控制模式、快速性、稳定性和开放性等已经不能满足现代相关领域的发展需求，因此对 2PRC-PRS 并联平台开发基于实时工业以太网的网络化多轴运动控制系统^[23]。

4. 1. 1 2PRC-PRS 并联平台控制系统功能规划与电控柜组建

这里我们选用贝加莱伺服运动控制系统，贝加莱工业自动化公司在自动化方案研发理念、系统架构及服务理念等方面赢得了业界的广泛认同^[24]，其提出的 Powerlink 通信协议^[25]，得到了实践的反复检验和业界的广泛认可，其开发的运动控制系统功能强大，可靠性高。结合贝加莱控制系统的特点，设计 2PRC-PRS 并联平台的控制系统，其主要功能和相互关系如图 3 所示。

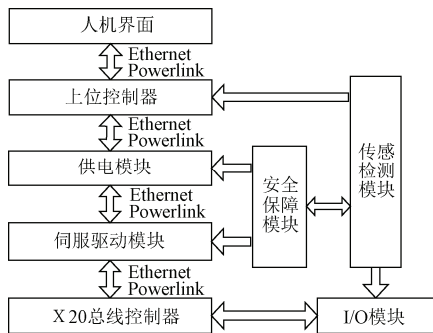


图 3 控制系统功能框图

Fig.3 Functional block diagram of control system

组建电控柜时根据控制系统功能设计外围电路，电气单元设计采用模块化的方法，设计有供电单元、硬件控制单元、主控和显示单元、I/O 接口单元、伺服驱动单元五部分。绘制相应电气原理图并对低压电气元件进行

选型和采购，初步接线和上电调试，综合考虑系统安全因素、信号干扰因素、系统散热因素、人机协调因素以及电气配置原则，设计电控柜内部器件的空间排布以及布线，组装后的电控柜和操作台如图 4 所示。

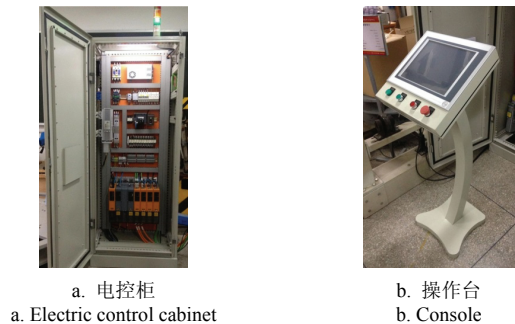


图 4 组装后的电控柜和操作台

Fig.4 Assembled electric control cabinet and console

4. 1. 2 2PRC-PRS 并联平台控制系统调试与软件开发

2PRC-PRS 并联平台控制系统要完成的核心任务，就是控制多个伺服电机协调运转，从而使动平台完成期望的运动，主要工作包括系统软硬件配置、伺服电机三环整定、人机界面规划、控制程序编写等。

控制系统调试的首要工作是使伺服电机正常运转，在电机使用前首先要对伺服电机进行参数整定，使电机工作在最佳状态，以减小实际误差并延长电机寿命。伺服电机的电流、速度和位置三环系统框图如图 5 所示，3 环均采用 PID（比例、积分、微分）调节器。

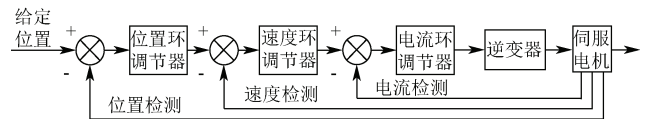


图 5 永磁同步伺服电机三环系统框图

Fig.5 Block diagram of permanent magnet synchronous motor three-loop system

电流环输出就是电机每相的相电流，其 PID 参数已经在驱动器内部设置好，不需要更改；对速度环进行 PI 调节，找到速度增益和速度积分时间常数的合理配置；对位置环进行 P 调节，调整比例增益到最恰当，表 1 为伺服电机整定关键参数。

表 1 永磁同步伺服电机整定关键参数

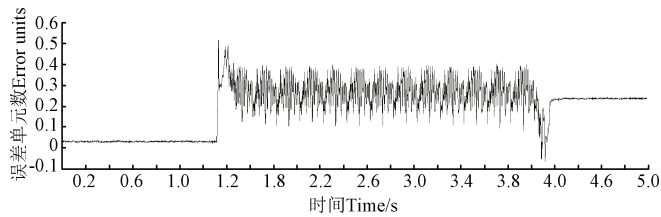
Table 1 Key parameters in tuning permanent magnet synchronous motor

名称 Name	速度环 Speed loop			位置环 Position loop	
	比例增益 Proportional gain	速度滤波 Speed filter/ms	积分增量 Integral gain/s	比例增益 Proportional gain	前馈时间 Feedforward time/s
初值 Initial value	0.1	0.2	3	1	T
峰值 Peak value	-	5	-	-	-

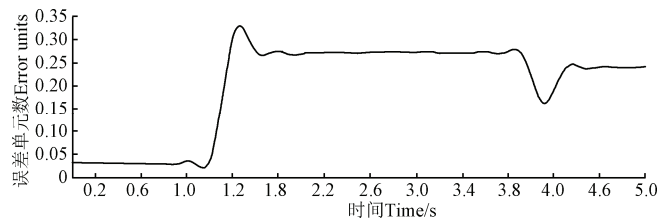
注：T 为伺服电机的伺服周期，s。
Note: T represents the servo cycle of the permanent magnet synchronous motor, s.

整定过程需要对表 1 中所列参数进行反复设定，数值与伺服电机本身以及外部负载的影响等许多条件有关，以伺服电机运转时振动越小、噪声越低为最好。整

定测试时将电机旋转一圈分为 1 000 个单元, 实时测定电机旋转一圈所产生的误差单元数, 图 6 所示图线分别为整定前后的误差值, 其横轴为时间轴, 纵轴表示电机旋转一圈实际值与理论值的误差单元数, 可见整定后误差数值有所减小且误差波动明显减弱。



a. 整定前误差
a. The error before tuning



b. 整定后误差
b. The error after tuning

注: 整定测试时将电机旋转一圈分为 1 000 个单元, 实时测定电机旋转一圈所产生的误差单元数, 图 a 和图 b 所示图线分别为整定前后的误差值, 其横轴为时间轴, 纵轴表示电机旋转一圈实际值与理论值的误差单元数。

Note: The motor rotation is divided into 1 000 units when tuning test, measures the error units number when the motor rotate one revolution, the figure a and b represent the error value before tuning and after tuning, the abscissa axes in the figure a and b represent time, the ordinate axes in the figure a and b represent the error units number of actual value with the theoretical value.

图 6 伺服电机整定前后实际位置与控制位置的误差值

Fig.6 Error value of actual position with control position of permanent magnet synchronous motor before tuning and after tuning

伺服电机整定完成后进行并联平台控制软件的开发, 控制软件借助贝加莱 Automation Studio 3.0 软件开发平台来完成, 基于 ST 语言参照硬件结构的功能来设计控制软件的功能 (见图 7)。

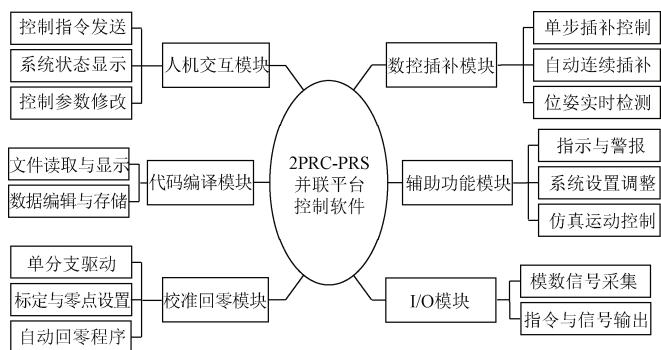


图 7 2PRC-PRS 并联平台控制软件功能框图

Fig.7 Functional block diagram of 2PRC-PRS parallel platform control software

2PRC-PRS 并联平台控制软件的人机交互界面如图 8 所示, 主要包括信息显示区、功能选择区、控制操作区

和用户信息区四个部分。



图 8 2PRC-PRS 并联平台控制软件主界面

Fig.8 Main interface of 2PRC-PRS parallel platform control software

并联平台在工作之前, 首先要返回设定的零点位置, 然后从零点出发开始运动。回零操作需要借助编码器来寻找零点位置, 本并联平台所选用的伺服电机配有高精度 EnDat 绝对值编码器, 每转分辨率 4096, 可保证中等信号频率下很高的定位精度, 而且无需以光电开关为基点的复位定位过程。

运动轨迹规划完成后, 数控代码的生成有两种方式, 一种方法是通过 Matlab 或 SolidWorks 等第三方软件事先进行反解运算, 将得到的数据点存储在“*.txt”格式的文件中, 然后由系统读取调用到内存; 另一种方法是直接输入所规划的轨迹路径, 再由程序完成反解运算, 得到每个伺服电机的“转角—时间”离散函数, 保存在内存中等待利用, 如果发现数控代码有错误可以直接修正, 也可以对准确无误的数控代码直接保存, 以便重复使用, 不必重复代码生成过程。

除了上述功能外, 为完善系统整体功能, 设计了 I/O 状态监视和系统软件设置功能, 方便使用者了解系统状态、检查故障原因和调试。

4.2 2PRC-PRS 并联平台试验研究

在并联平台样机设计制造、控制系统设计、伺服电机三环参数整定以及控制软件开发完成后, 开展对伺服电机精确控制的电子齿轮试验以及对并联平台运动控制的综合性试验和网络远程控制试验。

4.2.1 2PRC-PRS 并联平台控制系统电子齿轮试验

电子齿轮是相对于机械齿轮传动而提出的一种无轴传动方式, 通过多个伺服电机分别驱动不同的旋转装置来实现精确传动^[26]。电子齿轮技术跟机械齿轮啮合传动相比增加了传动的柔性, 同时不受空间位置的局限, 大大减少了传动元件的数量和传动链的长度, 广泛应用于工业自动化设备领域中。

电子齿轮控制结构图如图 9 所示, 进行电子齿轮试验时, 电机的控制使用位置控制模式, 编写电子齿轮控制程序, 控制两个伺服电机实现一级传动, 这样需要使用上位控制器来进行插补运算及运动控制, 虽然运算量较大, 但是有上位机参与, 可以达到检验整个控制系统的

软硬件的控制效果的目的。选择两个电机一个为主动轮, 一个为从动轮, 图 10 为主从轴的速度和位移跟踪曲线。

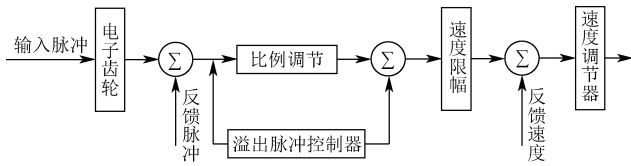
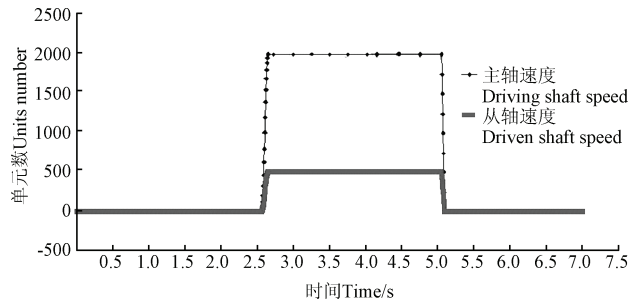


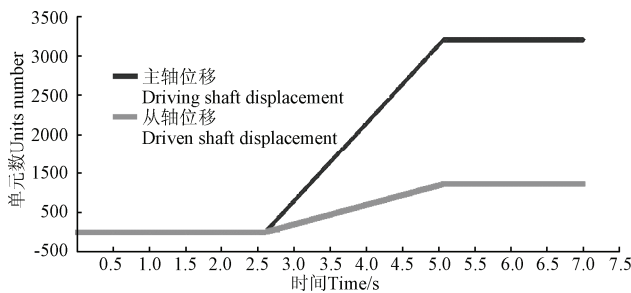
图 9 电子齿轮控制环结构框图

Fig.9 Control structure diagram of electronic gear



a. 电子齿轮比 4:1 时的主从轴速度跟踪曲线

a. Speed tracking curve of driving shaft and driven shaft when the electronic gear ratio is 4:1



b. 电子齿轮比 4:1 时的主从轴位移跟踪曲线

b. Displacement tracking curve of driving shaft and driven shaft when the electronic gear ratio is 4:1

注：图中横轴均为时间轴，图 a 中纵轴为电机每秒所转过的编码器码盘单元数，图 b 中纵轴为电机累计转过的编码器码盘单元数。

Note: The abscissa axes in figure a and figure b represent time, the ordinate axis in figure a represents the number of the code wheels that the motor turns per second, the ordinate axis in figure b represents the total number of the code wheels that the motor turns.

图 10 电子齿轮比 4:1 时的主从轴速度和位移跟踪曲线

Fig.10 Speed and displacement tracking curve of driving shaft and driven shaft when the electronic gear ratio is 4:1

图中横轴均为时间轴，图 a 中纵轴为电机每秒所转过的编码器码盘单元数，图 b 中纵轴为电机累计转过编码器码盘单元数，这样可以利用编码器码盘单元个数直观的反映出主从轴速度与位移曲线变化，由图 10 可见，电子齿数比为 4:1 时，主轴转速设置为 2 000，从轴转速实际值则为 500，主轴和从轴的位移变化也完全符合预期，电子齿轮试验成功，控制系统精度较高，满足设计要求。

4.2.2 2PRC-PRS 并联平台综合运动控制试验

拟定动平台的运动过程，使动平台做 3 个自由度的运动展示，分别是动平台上下运动、左右摆动和前后俯仰运动。将反解数据文件导入控制软件，执行插补编译计算，得到各驱动分支的插补运动数据点，接下来使各

伺服电机全上电、全伺服，执行回零操作，使动平台回到事先标定好的零位参考点（为保证安全，在进行并联平台自动控制之前，首先要进行单分支驱动、杆长校准以及脱机测试）。执行运动开始命令，动平台首先运动到程序起点，然后按照轨迹规划依次完成上下运动、左右摆动和前后俯仰过程，最终返回程序起点完成一次运动循环过程。

经过轨迹修正和调试，动平台实现了 3 个自由度的运动过程（如图 11 所示），控制软件各环节运行情况完全正常，控制系统响应较快，试验结果达到了预期效果。



图 11 运动的平台

Fig.11 Moving platform

4.2.3 2PRC-PRS 并联平台无线网络远程控制试验

这里探索性地对 2PRC-PRS 并联平台进行无线网络远程控制试验。网络远程控制^[27-28]过程如图 12 所示，以控制系统为核心，完成对执行机械的控制指令发送和机械动态影像以及传感器信号的接收和处理，影像和显示器信息通过互联网传输到远程设备，操作者可以在远端通过手持设备（如智能手机、平板电脑）或 PC 机来控制整个系统。

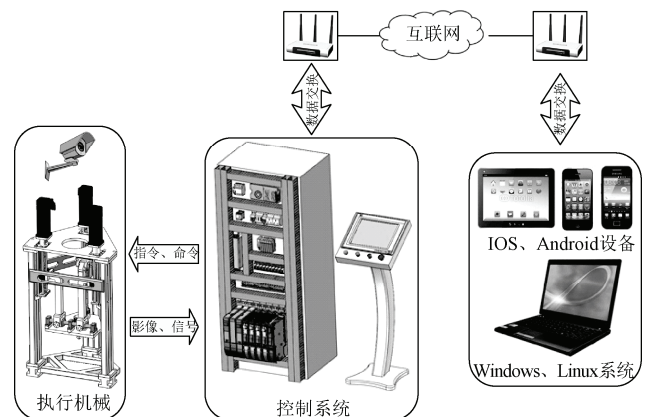


图 12 网络远程控制示意图

Fig.12 Schematic diagram of network remote control

首先进行内网环境下的网络远程控制，控制系统的主位控制器提供了 2 个 Ethernet 网口，将网口对应的 IP 地址设置成路由器分配的 IP 网段内，同一局域网内的 PC 机与控制系统实现互联，进行程序下载、试验调试，同

时连接到同一路由器的无线设备通过远程控制软件（如 VNC、iTeleport 等），将显示器的画面截取过来，直接控制整个系统。

在实验室内完成了 IOS 手机端在内网环境下的远程控制，如图 13 所示。对控制系统和机械平台进行监控，同时准确控制并联平台的运动，基本实现了预期目标。



图 13 手机端无线网络远程控制

Fig.13 Wireless network remote control in mobile phone

除了在内网环境下进行远程控制外，通过互联网也可以实现对控制系统的远程控制，而不受地域限制。现有的方法中，多数是采用远程控制软件进行控制，这种方法简便快捷，但是数据通信依赖远程控制软件，还需要一台专用 PC 机作为被控端。

在这里我们采用另一种开放性较强的方法对其进行网络远程控制，将远程桌面的端口和控制系统的 IP 地址直接映射到路由器上，这样可以直接穿透内网，位于外网的 PC 机或手持设备可以通过路由器所在的外网 IP 直接找到控制系统的控制器，从而实现互联进而进行控制。经过试验，完成了通过广域互联网的远程控制，可以对控制系统和并联平台的运动进行控制，基本实现了预期目标。

试验过程中也发现了一些问题，首先是通过互联网控制时，如果不采用远程控制软件，而是采用上述 IP 地址映射的方法时，需要建立防火墙和认证设置；其次是信号传输延迟现象，尤其广域网条件下的图像延迟较为明显，若要实际推广应用，网络信息传输速度慢的问题需要解决。这些问题为后续深入研究奠定了基础，也为无线网络远程控制的实际应用积累了实践经验。

5 结 论

1) 提出一种具有两转一移（2R1T）3 自由度的 2PRC-PRS 并联机构，基于反螺旋理论对机构的自由度及运动特性进行了分析，并推导出了机构的位置反解。

2) 设计制造了 2PRC-PRS 并联平台样机，基于贝加莱公司生产的伺服运动控制器，添加相应外围设备，针对并联平台设计了一套基于 Powerlink 总线的网络化运动控制系统，组装了电控柜组，以 Automation Studio 3.0 为软件开发平台，基于 ST 编程语言开发了控制软件。

3) 对 2PRC-PRS 并联平台进行相关试验研究，完成了伺服电机 3 环参数整定、电子齿轮试验、并联平台综合运动控制试验并探索了内外网环境下的远程无线网络

控制试验，结果表明，控制系统精度较高，响应较快，平台运动连续性较好，在无线网络控制试验研究中，发现信号传输延迟现象，尤其广域网条件下的图像延迟较为明显，后续需要对此进行深入研究。

4) 本文的研究成果丰富了少自由度并联机构的构型，为该类以少自由度并联机构为基础的机电一体化设备的研发提供了参考，同时也为工业网络控制系统的实际应用积累了实践经验，为后续深入研究奠定了基础。

[参 考 文 献]

- [1] Van Henten E J, Schenk E J, van Willigenburg L G, et al. Collision-free inverse kinematics of the redundant seven-link manipulator used in a cucumber picking robot[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2): 112—124.
- [2] Tanner H G, Kyriakopoulos K J, Krikelis N I. Advanced agricultural robots: kinematics and dynamics of multiple mobile manipulators handling non-rigid material[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31(1): 91—105.
- [3] Van Henten E J, Van't Slot D A, Hol C W J, et al. Optimal manipulator design for a cucumber harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 247—257.
- [4] 高国琴, 王威, 丁琴琴. 农业并联机器人同步滑模控制[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 173—178, 196. Gao Guoqin, Wang Wei, Ding Qinqin. Synchronization Sliding mode control for agricultural parallel robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 173—178, 196. (in Chinese with English abstract)
- [5] Geng Changxing, Zhang Kai, Zhang Erpeng, et al. Assessment on spraying effect of intelligent spraying robot by experiment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(2): 114—117.
- [6] 姜凯, 郑文刚, 张骞, 等. 蔬菜嫁接机器人研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 8—14. Jiang Kai, Zheng Wengang, Zhang Qian, et al. Development and experiment of vegetable grafting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(4): 8—14. (in Chinese with English abstract)
- [7] 荣誉, 金振林, 曲梦可. 三自由度并联机械腿静力学分析与优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 41—49. Rong Yu, Jin Zhenlin, Qu Mengke. Statics analysis and optimal design of 3-DOF parallel mechanical leg[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(20): 41—49. (in Chinese with English abstract)
- [8] Hunt K H. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms[J]. Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation In Design, Transactions of the ASME, 1983, 105: 705—712.
- [9] 路懿, 胡波. 少自由度并联机构研究进展[J]. 燕山大学学报, 2011, 35(5): 377—384. Lu Yi, Hu Bo. Development evaluation of limited-DOF

- parallel manipulators[J]. Journal of Yanshan University, 2011, 35(5): 377—384. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王飞博, 吴伟峰, 陈祥, 等. 基于运动/力传递特性的 1T2R 并联机构构型优选[J]. 机械工程学报, 2014, 50(23): 20—28. Wang Feibo, Wu Weifeng, Chen Xiang, et al. Optimal type selection of 1T2R parallel mechanisms based on motion/force transmissibility[J]. Journal of Mechanical engineering, 2014, 50(23): 20—28. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李秦川, 孙晓东, 陈巧红, 等. 2-PRS-PRRU 并联机构运动学与奇异分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(3): 21—27. Li Qinchuan, Sun Xiaodong, Chen Qiaohong, et al. Kinematics and singularity analysis of 2-PRS-PRRU parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(3): 21—27. (in Chinese with English abstract)
- [12] 曾达幸, 胡志涛, 侯雨雷, 等. 基于螺旋理论的两转一移解耦并联机构型综合[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(1): 22—28. Zeng Daxing, Hu Zhitao, Hou Yulei, et al. Type synthesis of 2R1T decoupled parallel mechanism based on screw theory[J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38(1): 22—28. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王庚祥, 刘宏昭, 原大宁. 空间 4-SPS/CU 并联机构的受力分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 30—38. Wang Gengxiang, Liu Hongzhao, Yuan Daning. Force analysis of spatial 4-SPS/CU parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 30—38. (in Chinese with English abstract)
- [14] 柴馨雪, 项济南, 李秦川. 2-UPR-RPU 并联机构奇异分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 144—151. Chai Xinxue, Xiang Jinan, Li Qinchuan. Singularity analysis of a 2-UPR-RPU parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical engineering, 2015, 51(13): 144—151. (in Chinese with English abstract)
- [15] 牛雪梅, 高国琴, 刘辛军, 等. 三自由度驱动冗余并联机构动力学建模与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 31—41. Niu Xuemei, Gao Guoqin, Liu Xinjun, et al. Dynamics modeling and experimental of 3-DOF parallel mechanism with actuation redundancy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 31—41. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李秦川, 陈志, 陈巧红, 等. [PP]S 类并联机构无伴随运动的结构条件[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 31—35. Li Qinchuan, Chen Zhi, Chen Qiaohong, et al. Structural condition for [PP]S parallel mechanism without parasitic motion[J]. Journal of Mechanical engineering, 2010, 46(15): 31—35. (in Chinese with English abstract)
- [17] Bi Z M, Jin Y. Kinematic modeling of Exechon parallel kinematic machine[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(1): 186—193.
- [18] 赵永生, 平立发, 许允斗, 等. 一种三自由度并联式主轴头结构[P]. 中国专利: 201410465305, 2015-01-07. Zhao Yongsheng, Ping Lifa, Xu Yundou, et al. A three-DOF parallel spindle head structure[P]. Chinese patent: 201410465305, 2015-01-07. (in Chinese with English abstract)
- [19] 黄真, 刘婧芳, 李艳文. 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: 1—56.
- [20] 荣誉, 金振林, 崔冰艳. 六足农业机器人并联腿构型分析与结构参数设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 9—14. Rong Yu, Jin Zhenlin, Cui Bingyan. Configuration analysis and structure parameter design of six-leg agricultural robot with parallel-leg mechanisms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 9—14. (in Chinese with English abstract)
- [21] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 86—229.
- [22] 王学林, 肖永飞, 毕淑慧, 等. 机器人柔性抓取试验平台的设计与抓持力跟踪阻抗控制[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 58—63. Wang Xuelin, Xiao Yongfei, Bi Shuhui, et al. Design of test platform for robot flexible grasping and grasping force tracking impedance control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 58—63. (in Chinese with English abstract)
- [23] 郎需林, 靳东, 张承瑞, 等. 基于实时以太网的 DELTA 并联机械手控制系统设计[J]. 机器人, 2013, 35(5): 576—581. Lang Xulin, Jin Dong, Zhang Chengrui, et al. Control system design of DELTA parallel manipulator based on real-time Ethernet[J]. Robot, 2013, 35(5): 576—581. (in Chinese with English abstract)
- [24] 宋慧欣. 贝加莱: 平台级软件将赢得未来[J]. 自动化博览, 2014(10): 44—45. Song Huixin. B & R: platform-level software will win the future[J]. Automation Expo, 2014(10): 44—45. (in Chinese with English abstract)
- [25] 胡书立, 王清理. POWERLINK 总线技术的研究与实现[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(10): 3821—3828. Hu Shuli, Wang Qingli. POWERLINK field bus controller research and realization based on FPGA[J]. Computer Engineering And Design, 2012, 33(10): 3821—3828. (in Chinese with English abstract)
- [26] 滕福林, 李宏胜, 温秀兰, 等. 电子齿轮比对轮廓误差及加工效率影响的研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(13): 1607—1610. Teng Fulin, Li Hongsheng, Wen Xiulan, et al. Research on influences on contour error and cutting efficiency from electrical gear-ratio[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(13): 1607—1610. (in Chinese with English abstract)
- [27] 陈波, 高秀娥, 隋广洲. 无线远程控制系统研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 573—574. Chen Bo, Gao Xiue, Sui Guangzhou. Research and realization on wireless remote control system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 573—574. (in Chinese with English abstract)
- [28] 许宏, 张怡, 陈锡爱, 等. 远程半自主机器人监控系统的设计及实验[J]. 机器人, 2010, 32(1): 125—131. Xu Hong, Zhang Yi, Chen Xiai, et al. Design and experiment of remote semi-autonomous robot monitoring system[J]. Robot, 2010, 32(1): 125—131. (in Chinese with English abstract)

Kinematic analysis of 2PRC-PRS parallel platform and development of control system

Han Bo¹, Xu Yundou^{1,2}, Yao Jiantao^{1,2}, Su Hongliang¹, Ping Lifa¹, Zhao Yongsheng^{1,2*}

(1. *Parallel Robot Mechatronic System Laboratory of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;*

2. *Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)*

Abstract: Agricultural engineering operations are often conducted in complex ground conditions such as fields on a hill, forest land, and hilly land. Compared with 6 degrees of freedom (DOFs) parallel robot, lower-mobility parallel robot is especially suitable for picking, planting and transporting crops in complex ground conditions with the advantages of fewer actuators, fewer components, easy control, easy fabrication, low cost, and so on. One translational and two rotational DOFs parallel mechanism is a representative of lower-mobility parallel robot. In order to expand the application of lower-mobility parallel robot in agriculture, this paper presented a novel 2PRC-PRS parallel mechanism, which has one translational DOF and two rotational DOFs. The motion characteristics of the mechanism and its number of DOFs were analyzed based on the theory of reciprocal screw, and through establishing the moving coordinate system and the fixed coordinate system of the parallel platform, the kinematic screw system of each branch and the corresponding constraint wrenches were calculated, the reciprocal kinematic screws of the constraint wrenches of each branch were solved, and then the DOF nature of the moving platform was analyzed based on the kinematic screws of the moving platform. It concluded that the moving platform had 3 DOFs, which were respectively the movement along the vertical direction and the rotations along the two directions which are perpendicular in the horizontal plane. After analyzing the number of DOFs and the motion characteristics of the 2PRC-PRS parallel mechanism, whether the DOF of the moving platform was instantaneous or not was checked. The results showed that the DOF of the 2PRC-PRS parallel mechanism was not instantaneous, and it was continuous. By adopting *Z-X-Y* Euler angle to describe posture and position of the parallel platform, the inverse position of the parallel platform was calculated. The model machine of the 2PRC-PRS parallel platform was designed and manufactured; combined with the servo motion controller produced by the Bernecker&Rainer industrial automation company, add the appropriate peripherals, design and set up a network motion control system based on Powerlinks bus for the 2PRC-PRS parallel platform, and assemble the electric control cabinet, the control system included human-computer interaction module, master display module, servo-driven module, sensing module and security module. Adopt modularization approach, and based on the ST programming language, develop the 2PRC-PRS parallel platform control software on Automation Studio 3.0 software development platform. It included interactive interface, security alarm, calibration by returning to zero, uniaxial control, multi-axis control, I/O control, spindle control, and so on, which satisfied the basic demands of the experiment. Then the relevant experiments were carried out based on parallel platform, cabinet and control software. Through the regulation of the speed loop and the position loop of the servo motor, the servo motor parameters tuning was completed, and the electronic gear test was completed by writing electronic gear control program under the position control mode. When the electronic gear ratio was 4:1, and the driving shaft speed was set to 2000, the actual value of the driven shaft speed was 500, and the displacement change of the driving shaft and the driven shaft were also in line with expectations, so the electronic gear experiment was successful, and the control system of high precision met the design requirements. The trajectory planning of the moving platform was carried out and the inverse data were calculated, then the interpolation calculation was conducted. And the interpolation moving data point was carried out by inputting the parallel platform inverse data into the control software. The moving platform moved in accordance with the moving data point after it came back to the initial position and it achieved the expected effect. Finally, combined with the network communication technology, the wireless network remote control experiment was performed separately on IOS mobile terminal under the intranet and PC (personal computer) under extranet, which basically achieved the expected target, and also found the signal transmission delay phenomenon, especially under the condition of wide-area the internet image delay was more obvious. This issue will be further researched. This paper is aimed to provide the theoretical and experimental foundation for the agricultural lower-mobility parallel robot and provide the reference for the researching of this mechatronics equipment.

Keywords: parallel; mechanisms; software development; screw theory; inverse position; control systems; network remote control