doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.046

农业机器人并联视觉云台研究

于珊珊[1,2]　张建军[1]　李为民[1]　杨先海[2]

(1. 河北工业大学机械工程学院, 天津 300130; 2. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255000)

摘要: 针对智能农用机器人对机器视觉工作范围的需求,提出了一种用于农业机器人的并联视觉云台设计方案。基于双摇杆的输入输出特性,提出了一种运动支链设计方法,用于构建二自由度全球面工作空间解耦并联机构。在此基础上,衍生出两种可行的运动支链 P5R 和 PRR,基于这两种运动支链,设计了 2 种二自由度全球面工作空间并联视觉云台 RR&P5R 和 RR&PRR。通过运动学分析,分别建立了 2 种机构的位置关系表达式;通过尺寸优化,得到了 2 种机构的最优杆长比;通过对比得出,RR&P5R 型并联视觉云台具有更好的输入输出性能;通过有限元分析,研究了载荷对 RR&P5R 型并联视觉云台运动精度的影响。结果表明,RR&P5R 机构强度满足要求,但杆件的累积弹性变形导致运动副的位移偏差较大。

关键词: 并联机构; 农业机器人; 机器视觉; 大工作空间; 解耦

中图分类号: TP24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0406-08　　**OSID**:

Decoupled Parallel Vision Table with Large Workspace of Agricultural Robot

YU Shanshan[1,2]　ZHANG Jianjun[1]　LI Weimin[1]　YANG Xianhai[2]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Hebei University of Technology*, *Tianjin* 300130, *China*
2. *School of Mechanical Engineering*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255000, *China*)

Abstract: Aiming at the demand of intelligent agricultural robots for a wider range of machine vision, a solution of parallel vision table for agricultural robot was introduced. Based on the input and output characteristics of the double rocker mechanism, a new design method of kinematic chain was presented, which can be used to design a decoupled 2-DOF parallel mechanism with a fully spherical workspace. Two feasible kinematic chains were derived, i.e. P5R and PRR. Two decoupled 2-DOF parallel vision table with a fully spherical workspace were designed based on the above kinematic chains, i.e. RR&P5R and RR&PRR. The displacement relationship of the two mechanisms were established respectively through kinematics analysis. The optimal length ratio of the members of the two mechanisms were obtained respectively through the size optimization. After comparison, the RR&P5R parallel vision table had the better input and output performance. Through statics analysis, the restraining force at each hinge was obtained. Through finite element simulation, the influence of load on the motion accuracy of RR&P5R parallel vision table was analyzed. The result showed that the strength of RR&P5R mechanism met the requirements. However, the displacement deviation of revolute joints of RR&P5R mechanism was large, which was caused by the cumulative elastic deformation of members.

Key words: parallel mechanism; agricultural robot; machine vision; large workspace; decoupled

0　引言

机器视觉是涉及图像处理、机械、控制、光学、传感器、数字、计算机等领域的综合性技术[1],已在工业、农业、航空航天、军事、医疗、天文气象、公共安全等领域得到了广泛应用[2-3]。目前,研究人员已在图像处理算法、动态性能、3D 成像等方面展开了深入研究[4]。相比于工业生产的标准化,农业生产往

收稿日期: 2020-04-14　修回日期: 2020-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51905316)

作者简介: 于珊珊(1980—),女,博士生,山东理工大学讲师,主要从事农业装备和解耦并联机器人研究,E-mail: yushanshan1206@126.com

通信作者: 李为民(1964—),男,教授,主要从事并联机器人运动解耦构型和数控机床误差补偿研究,E-mail: ymin@hebut.edu.cn

往是复杂多变的室外环境，环境的未知性给机器视觉技术带来了诸多挑战。

视觉跟踪、视觉定位是机器视觉在农业中的应用场景之一，如农机导航、病虫草害控制、自动采摘等[5-6]。在采摘作业中，机器需要实时调整姿态，以实现跟踪定位的功能，球面并联机构是用于空间定位的经典机构，该机构动平台能够围绕空间中固定的一点，实现球面的工作空间，现已广泛应用于运动模拟器[7-8]、外科手术机器人[9]、精准定位[10-12]、仿生关节[13-16]、仿生眼[17-18]等球面工作空间领域。

随着科技的发展，对大角域工作空间的应用需求已变得越来越多，如目标多方位定位跟踪、未知环境探测等，国内外学者对球面并联机构的工作空间进行了大量的研究。BAI[19]针对球面并联机械手的工作空间进行了设计，将目标最优问题转换为非线性最小二乘问题，确定了空间设计最佳参数。杨健等[20]提出了一种智能遗传算法，对 3 - RRR 球面并联机构进行参数优化，扩大了机构的有效工作空间。王超群等[21]以工作空间最大化为目标，对 3 - RRR 球面并联机构进行了结构优化设计，使机构动平台实现了完整的球面工作空间。球面并联机构工作空间最大化一直是机构学领域的研究热点之一[22-24]。与传统球面并联机构相比，球面解耦并联机构因其解耦特性，具有各支链运动互不影响的特点，实现其工作空间最大化比较容易。

针对农业生产领域机器视觉对大工作空间的需求，本文提出一种运动支链设计方法，并设计 2 种二自由度全球面工作空间并联视觉云台，以期解决现有二自由度球面解耦并联机构工作空间不足的问题，为机器视觉大工作范围在智能农业机器人领域的应用提供理论依据。

1　大工作空间并联视觉云台结构设计

二自由度球面解耦并联机构是一种具有实际应用价值的球面并联机构。图 1 为 2R&PRR 型二自由度球面解耦并联机构[25]，由 2 条运动支链组成：①转动支链，由转动副 R_1 和 R_2 组成。②直线输入支链，由移动副 P 和转动副 R_3、R_4 组成。

实际情况中，该机构转动支链可实现[0°, 360°]输出，而直线输入支链受转动副 R_2 处摩擦圆的限制，其输出角范围小于[0°, 180°]，使得机构无法实现完整的球面工作空间。

1.1　运动支链设计

现有 2R&PRR 型球面解耦并联机构的输出角 θ_1 的范围为[0°, 360°]，而输出角 θ_2 的范围都小于[0°, 180°]，通过运动耦合后，现有 2R&PRR 型球面解耦并联机构的工作空间并不是完整的球面。因此，如何使输出角 θ_2 的范围大于[0°, 180°]，成为全球面工作空间解耦并联机构研究需要解决的关键技术问题。

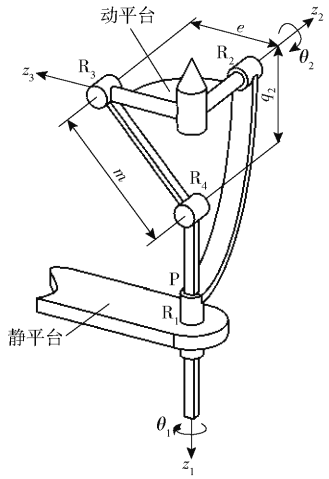

图 1　2R&PRR 型球面解耦并联机构

Fig. 1　2R&PRR spherical decoupled parallel mechanism

双摇杆机构的运动特性如下：当双摇杆机构主动摇杆与从动摇杆的杆长不同时，主动摇杆的摆角与从动摇杆的摆角也不相同。如图 2 所示，当以双摇杆机构较长的杆件 *CD* 作为主动摇杆，较短的杆件 *AB* 作为从动摇杆时，双摇杆机构可在较小摆角 α 下，实现较大的摆角 $\beta(\beta>\alpha)$，理论上摆角 β 的极限值可大于 180°。

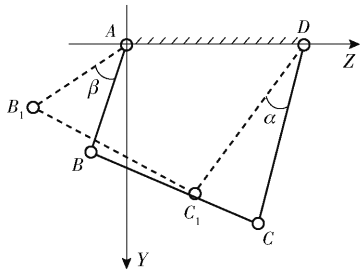

图 2　双摇杆机构

Fig. 2　Double rocker mechanism

基于双摇杆的输入输出差异化设计二自由度全球面解耦并联机构，能够实现在较小输入角情况下，实现较大的输出角，理论上该输出角可大于 180°。

根据二自由度解耦并联机构的结构形式（直线输入-转动输出），对双摇杆机构进行变型设计，将双摇杆机构的输入杆件串联曲柄滑块机构，使转动输入转换为直线输入，以此得到 P5R 直线输入支链，如图 3 所示。

如图 4 所示，假设双摇杆机构的输入角为 θ_3，输出角为 θ_2，转动副 R_2 的摩擦圆半径为 ρ。如果 P5R 支链运动过程中杆件 R_4R_5 所在的直线与转动副 R_2 的距离小于或等于摩擦圆半径 ρ，则机构处于局部奇异位形，无法继续运动。因此，为使双摇杆机构输

出角 θ_1 大于 180°,运动过程中杆件 R_4R_5 所在的直线不能与转动副 R_2 处的摩擦圆相交,根据点线距离公式可得

$$\left|\frac{l_3\sin\theta_2(l_1\cos\theta_1-l_3\cos\theta_2-l_4)-(l_1\sin\theta_1-l_3\sin\theta_2)(l_3\cos\theta_3+l_4)}{\sqrt{(l_3\cos\theta_3+l_4-l_1\cos\theta)^2+(l_1\sin\theta_1-l_3\sin\theta_2)^2}}\right|-\rho>0 \tag{1}$$

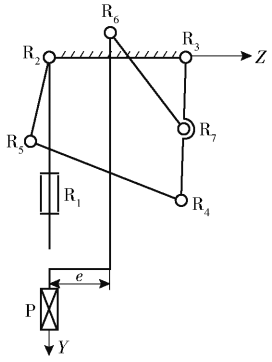

图 3 P5R 直线输入支链

Fig. 3 P5R linear input chain

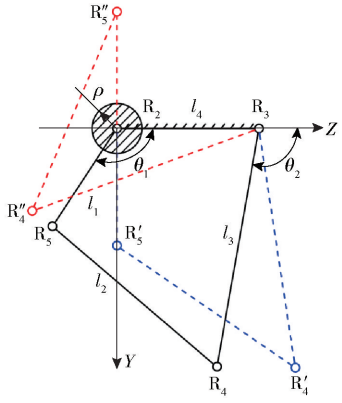

图 4 双摇杆机构极限位置

Fig. 4 Limited position of double rocker mechanism

如图 2 所示,如果双摇杆机构的输入杆件趋于无限长,即点 D 处于无穷远处,则点 C 的运动轨迹由圆弧转换为直线,以此得到 PRR 直线输入支链,如图 5 所示。现有 2R&PRR 型球面解耦并联机构的直线输入支链同样也是曲柄滑块机构,其输出角极限值不能大于 180°的原因是滑块的移动方向与转动副 R_2 之间没有偏置距离,即偏置曲柄滑块机构在一定约束条件下,也可实现输出角大于 180°。

如图 6 所示,假设偏置曲柄滑块输出角为 θ,移动副 P 的输入量为 q,移动副 P 与转动副 R_2 在竖直方向的距离为 e,转动副 R_2 处的摩擦圆半径为 ρ,动平台与杆件 R_2R_3 的夹角为 α。同样,为满足 PRR 支链的输出角 θ 大于 180°,运动过程中杆件 R_3R_4 所在的直线不能与转动副 R_2 处的摩擦圆相交,根据点线距离公式可得

$$\left|\frac{l_1(q\sin\theta-e\cos\theta)}{\sqrt{(e-l_1\sin\theta)^2+(q-l_1\cos\theta)^2}}\right|-\rho>0 \tag{2}$$

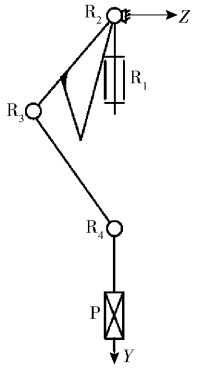

图 5 PRR 直线输入支链

Fig. 5 PRR linear input chain

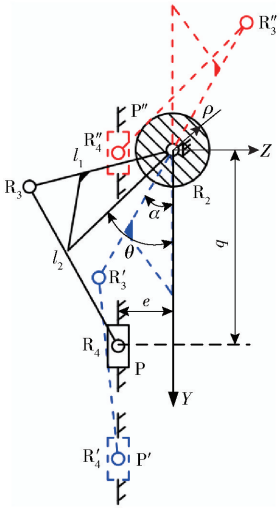

图 6 偏置曲柄滑块极限位置

Fig. 6 Limited position of offset crank slider

1.2 并联视觉云台结构设计

基于 P5R 直线输入支链,所设计的并联视觉云台如图 7 所示。机构动平台通过 2 条运动支链与静平台相连:转动支链由转动副 R_1 和 R_2 组成,由于该运动支链由 2 个转动副组成,也称为 RR 运动支链;

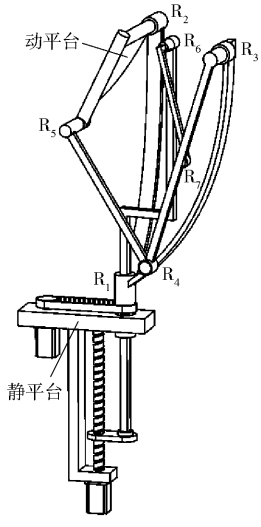

图 7 RR&P5R 型全球面并联视觉云台

Fig. 7 RR&P5R decoupled parallel vision table with fully spherical workspace

直线输入支链由移动副 P 和转动副 R_3、R_4、R_5、R_6、R_7组成，由于该运动支链由 1 个移动副和 5 个转动副组成，也称为 P5R 运动支链，该机构称为 RR&P5R 型全球面工作空间并联视觉云台。

基于 PRR 直线输入支链，所设计的并联视觉云台如图 8 所示。动平台通过 2 条运动支链与静平台相连：转动支链由转动副 R_1 和 R_2 组成，称为 RR 运动支链；直线输入支链由移动副 P 和转动副 R_3、R_4 组成，称为 PRR 运动支链。该机构称为 RR&PRR 型全球面工作空间并联视觉云台。

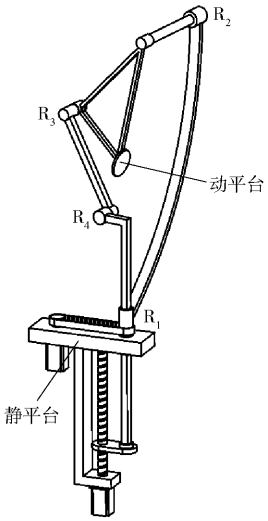

图 8　RR&PRR 型全球面并联视觉云台

Fig. 8　RR&PRR decoupled parallel vision table with fully spherical workspace

两种并联视觉云台均可实现完整的球面工作空间，如图 9 所示。

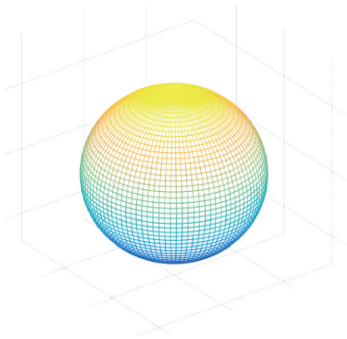

图 9　完整球面工作空间

Fig. 9　Fully spherical workspace

2　机构位置分析

2.1　RR&P5R 型机构

如图 10 所示，k 表示 RR&P5R 型机构转动副 R_7在杆件 L_3上的位置，取值范围为(0,1)。则机构的构件几何关系可以表示为

$$l_2^2=(l_3\cos\theta_3+l_4-l_1\cos\theta_2)^2+(l_3\sin\theta_3-l_1\sin\theta_2)^2 \tag{3}$$

$$q_2=kl_3\sin\theta_3-\sqrt{l_5^2-(kl_3\cos\theta_3+l_4-e)^2} \tag{4}$$

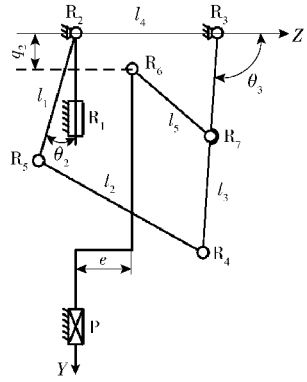

图 10　RR&P5R 型全球面解耦并联机构简图

Fig. 10　Schematic diagram of RR&P5R decoupled parallel mechanism with fully spherical workspace

根据式(3)、(4)，可得 RR&P5R 型机构位置解为

$$\begin{cases}\theta_1=q_1\\ \theta_2=\arcsin\dfrac{C^2+D^2+l_1^2-l_2^2}{2l_1\sqrt{C^2+D^2}}-\arcsin\dfrac{C}{\sqrt{C^2+D^2}}\\ \theta_3=\arcsin\dfrac{k^2l_3^2+q_2^2+(l_4-e)^2-l_5^2}{2kl_3\sqrt{q_2^2+(l_4-e)^2}}-\arcsin\dfrac{l_4-e}{\sqrt{q_2^2+(l_4-e)^2}}\end{cases} \tag{5}$$

其中　$C=l_4-l_3\sin\theta_3$　$D=l_3\cos\theta_3$

2.2　RR&PRR 型机构

如图 11 所示，β 为动平台所在平面与杆件 L_1之间的夹角，机构构件之间的几何关系可表示为

$$l_2^2=(q_2-l_1\cos(\theta_2+\beta))^2+(l_1\sin(\theta_2+\beta)-e)^2 \tag{6}$$

根据式(6)可得 RR&PRR 型机构位置解为

$$\begin{cases}\theta_1=q_1\\ \theta_2=\arcsin\dfrac{q_2^2+e^2+l_1^2-l_2^2}{2l_1\sqrt{q_2^2+e^2}}-\arcsin\dfrac{q_2}{\sqrt{q_2^2+e^2}}-\beta\end{cases} \tag{7}$$

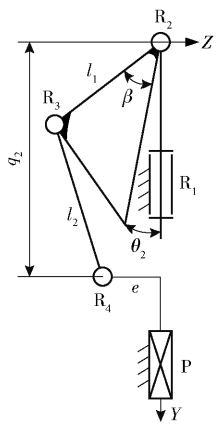

图 11　RR&PRR 型全球面解耦并联机构简图

Fig. 11　Schematic of RR&PRR decoupled parallel mechanism with fully spherical workspace

3 尺寸优化与输入输出特性

3.1 尺寸优化

如图 10 所示,当转动副 R_7 越靠近转动副 R_3,其力臂越短,机构适合轻载模式,反之,如果转动副 R_7 越靠近 R_4,其力臂越长,机构更适合重载模式。本文仅研究转动副 R_7 处于杆件 L_3 中点处的情况,即 $k=0.5$,优化目标为移动副 P 的位移最小。RR&P5R 机构优化结果如图 12 所示,l_1、l_2、l_3、l_4、l_5、e 最优比约为 1.68∶2.78∶4.03∶2∶1.98∶1.5。

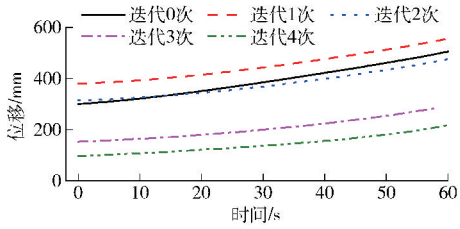

图 12 RR&P5R 机构优化曲线

Fig. 12 Optimization curves of RR&P5R mechanism

如图 11 所示,夹角 $\beta=30°$,根据式(2)计算得出 $e_{min}=51.89$ mm。e 选取 51.89、100、150、200 mm 对机构进行优化分析,优化目标为移动副 P 的位移最小,当 $e=51.89$ mm 时存在最优结果,如图 13 所示。RR&PRR 机构杆长 l_1、l_2 最优比约 2∶1.83。

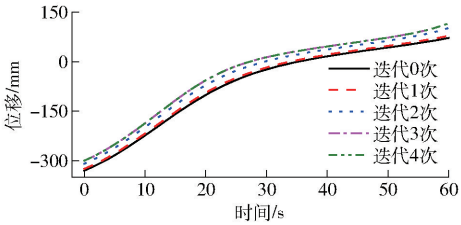

图 13 $e=51.89$ mm 时 RR&PRR 机构优化曲线

Fig. 13 Optimization curves of RR&P5R mechanism when $e=51.89$ mm

3.2 输入输出特性

模拟并联视觉云台的实际使用环境,机构动平台应为等速等距输出,则 RR&P5R 机构和 RR&PRR 机构输入情况如图 14 所示。如图 14a 所示,RR&P5R 型机构的输入速度呈现递增规律,而 RR&PRR 型机构幅值波动较大。如图 14b 所示,RR&P5R 型机构输入力比较小且平稳,而 RR&PRR 型机构输入力较大且变化较大。通过比较可以明显看出,RR&P5R 型机构的输入输出特性更优。

4 静力学分析

如图 15 所示,建立 P5R 支链的静力学分析简图。假设机构杆件的质量以及杆件之间的摩擦忽略不计,机构处于低速运动,经过静力学分析,杆件 BC 为二力杆。假设转动副 A 点处存在恒定的扭矩载荷 M,对应移动副 P 的输入驱动力为 F_P。各杆件受力如图 16 所示。

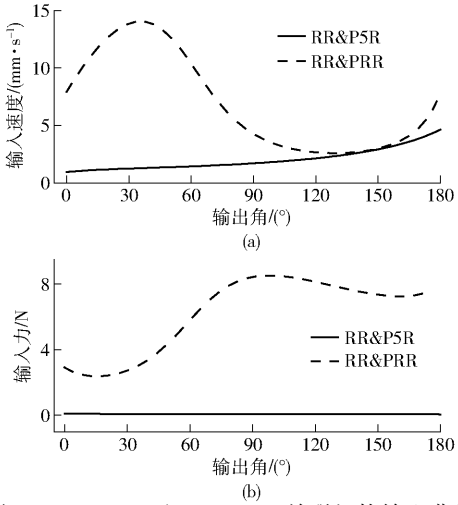

图 14 RR&P5R 和 RR&PRR 并联机构输入曲线

Fig. 14 Input curves of RR&P5R and RR&PRR parallel mechanism

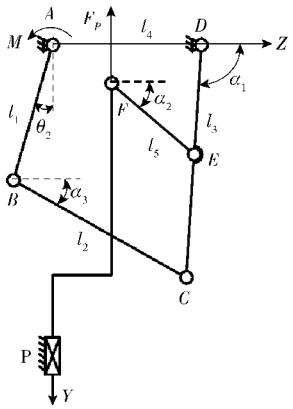

图 15 P5R 支链静力学分析图

Fig. 15 Static analysis of P5R kinematic chain

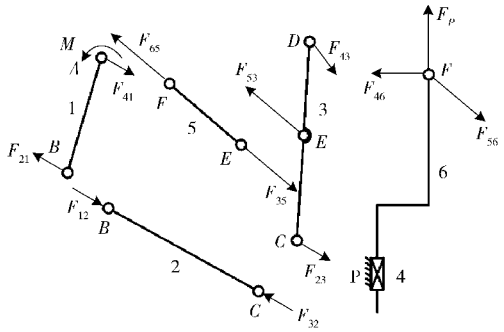

图 16 各杆件受力图

Fig. 16 Force diagram of each member bar

杆件 AB 静力学平衡方程为

$$\boldsymbol{M}+\boldsymbol{F}_{21}l_1\cos(\theta_2-\alpha_3)=0 \tag{8}$$

$$\boldsymbol{F}_{21}+\boldsymbol{F}_{41}=0 \tag{9}$$

杆件 BC 静力学平衡方程为

$$\boldsymbol{F}_{12}+\boldsymbol{F}_{32}=0 \tag{10}$$

杆件 CD 静力学平衡方程为

$$\boldsymbol{F}_{23}+\boldsymbol{F}_{43}+\boldsymbol{F}_{53}=0 \tag{11}$$

杆件 EF 静力学平衡方程为

$$\boldsymbol{F}_{35}+\boldsymbol{F}_{65}=0 \tag{12}$$

杆件 FP 静力学平衡方程为

$$\boldsymbol{F}_{P}+\boldsymbol{F}_{46}+\boldsymbol{F}_{56}=0 \tag{13}$$

将以上静力学平衡方程整理可得各铰链处约束力如下：

点 A、点 B、点 C 约束力为

$$|\boldsymbol{F}_{A}|=|\boldsymbol{F}_{B}|=|\boldsymbol{F}_{C}|=\frac{M}{l_1\cos(\theta_2-\alpha_3)} \tag{14}$$

点 E、点 F 约束力为

$$|\boldsymbol{F}_{E}|=|\boldsymbol{F}_{F}|=\frac{\sin(\alpha_1-\alpha_3)M}{kl_1\sin(\alpha_1-\alpha_2)\cos(\theta_2-\alpha_3)} \tag{15}$$

点 D 约束力为

$$|\boldsymbol{F}_{D}|=\sqrt{|\boldsymbol{F}_{C}|^2+|\boldsymbol{F}_{E}|^2-2|\boldsymbol{F}_{C}||\boldsymbol{F}_{E}|\cos(\alpha_2-\alpha_3)} \tag{16}$$

驱动力为

$$|\boldsymbol{F}_{P}|=\frac{\sin(\alpha_1-\alpha_3)M}{kl_1\sin(\alpha_1-\alpha_2)\sin\alpha_2\cos(\theta_2-\alpha_3)} \tag{17}$$

假设点 A 处扭矩载荷 M 为 2 000 N·mm，RR&P5R 机构杆长按照最优比例 $l_1:l_2:l_3:l_4:l_5:e\approx1.68:2.78:4.03:2:1.98:1.5$ 取值，即 $l_1=168$ mm，$l_2=278$ mm，$l_3=403$ mm，$l_4=200$ mm，$l_5=198$ mm，$e=150$ mm。则机构各铰链处的约束力如图 17 所示。从图 17 可以看出，点 A、点 B、点 C 处的铰链约束力较小，而点 D、点 E、点 F 处的铰链约束力较大。

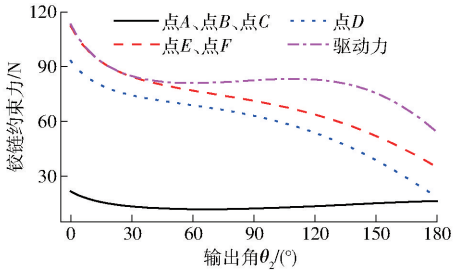

图 17　各铰链处约束力

Fig. 17　Restraining force at each hinge

5　有限元分析

设计了 RR&P5R 型并联视觉云台。以杆件 R_2R_3 在 Z 轴方向的距离为基准尺寸，距离为 200 mm，其他杆长按照比例 $l_1:l_2:l_3:l_4:l_5:e\approx1.68:2.78:4.03:2:1.98:1.5$ 进行设计。杆件 R_2R_5 采用空心圆管设计，截面直径为 20 mm，壁厚为 2 mm；其余各杆件均采用空心方管设计，截面边长为 20 mm，壁厚为 2 mm。

为了分析载荷对 RR&P5R 机构运动精度的影响，利用 ABAQUS 软件对 RR&P5R 机构进行有限元分析。选用的计算单元为 C3D20R，模型材料为钢材料，材料参数：弹性模量 $E=210$ GPa，泊松比 $\upsilon=0.3$，密度为 7 850 kg/m^3。

第 1 次模拟分为 2 步：①对转动副 R_2 处施加 2 000 N·mm 的扭矩载荷，移动副 P 施加零位移约束。②设置移动副 P 的 Y 向位移 34 mm，其他设置不变。如图 18 所示，机构最大应力点在移动副杆件的拐角处，达到 118.10 MPa，但未超过材料屈服极限。

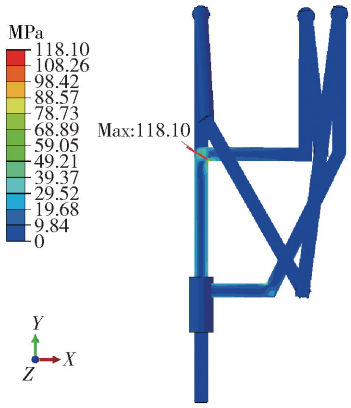

图 18　RR&P5R 机构应力云图

Fig. 18　Stress cloud diagram of RR&P5R mechanism

为检验载荷对弹性机构位移偏差的影响，进行第 2 次模拟：①对转动副 R_2 处施加扭矩 2 N·mm。②与第1 次模拟中的设置相同。各转动副在 X、Y、Z 方向的位移偏差如图 19 所示，各转动副在空间的位移偏差如图 20 所示。由图 19、20 可知，在机构初始位置处各运动副位移偏差最大，运动副 R_5 的偏差超过 10 mm。

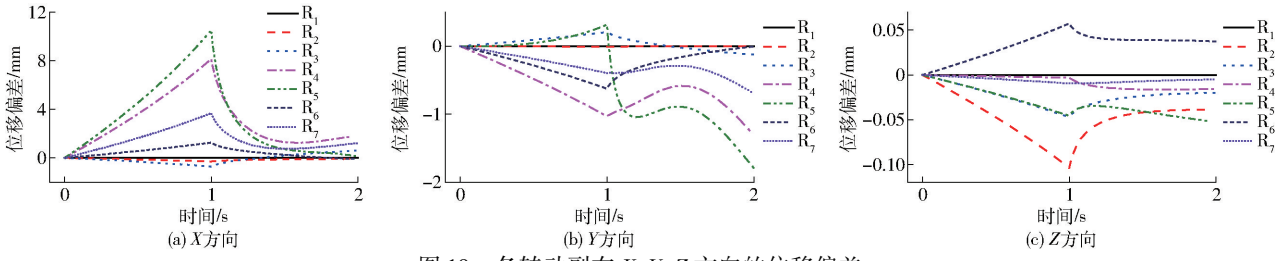

图 19　各转动副在 X、Y、Z 方向的位移偏差

Fig. 19　Displacement deviation of each revolute joint in X, Y and Z directions

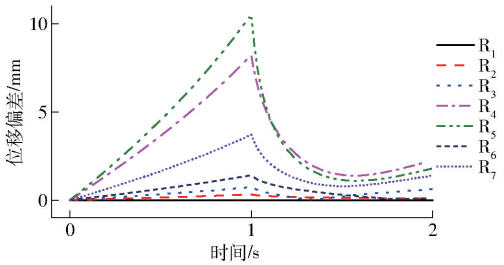

图 20 各转动副的空间位移偏差

Fig. 20 Spatial displacement deviation of each revolute joint

6 结论

(1)针对农业机器人对大角域视觉工作空间的需求,提出一种可用于构建二自由度全球面工作空间解耦并联机构的运动支链设计方法,该支链具有直线输入和旋转输出特性,并衍生出 2 种可行的支链构型 P5R 和 PRR。基于这 2 种支链,设计了 2 种二自由度全球面工作空间并联视觉云台 RR&P5R 和 RR&PRR,并给出了这 2 种机构的位置分析式。

(2)通过尺寸优化,得到 RR&P5R 型机构的最优杆长比为 $l_1:l_2:l_3:l_4:l_5:e\approx1.68:2.78:4.03:2:1.98:1.5$;RR&PRR 型机构最优杆长比为 $l_1:l_2:e\approx2:1.83:0.5$。RR&P5R 型并联机构具有更优的输入输出特性。

(3)通过有限元分析,研究了 RR&P5R 型机构的强度和运动精度,结果表明,该机构强度满足要求,但各杆件累积弹性变形导致运动副的位移偏差较大。在实际应用中,可通过适当增加各杆件的横截面来提高运动副的运动精度。

参 考 文 献

[1] 陈兵旗, 吴召恒, 李红业, 等. 机器视觉技术的农业应用研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(11): 54 - 65.
CHEN Bingqi, WU Zhaoheng, LI Hongye, et al. Research of machine vision technology in agricultural application: today and the future[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(11): 54 - 65. (in Chinese)

[2] 朱丹, 吴兹古力. 基于机器视觉的农业机械图像识别系统分析[J]. 农机化研究, 2020,42(10): 28 - 31, 36.
ZHU Dan, WU Ziguli. Analysis of agricultural machinery image recognition system based on machine vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(10):28 - 31, 36. (in Chinese)

[3] 魏中雨, 黄海松, 姚立国. 基于机器视觉和深度神经网络的零件装配检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(3): 74 - 77, 82.
WEI Zhongyu, HUANG Haisong, YAO Liguo. Component assembly inspection based on deep neural network[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(3):74 - 77, 82. (in Chinese)

[4] KITA Y, ISHIKAWA H, MASUDA T. Guest editorial: machine vision applications[J]. International Journal of Computer Vision, 2017, 122(2): 191 - 192.

[5] 宋宇, 刘永博, 刘路, 等. 基于机器视觉的玉米根茎导航基准线提取方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 38 - 44.
SONG Yu, LIU Yongbo, LIU Lu, et al. Extraction method of navigation baseline of corn roots based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 38 - 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170205&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.005. (in Chinese)

[6] 关卓怀, 陈科尹, 丁幼春, 等. 水稻收获作业视觉导航路径提取方法[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 19 - 28.
GUAN Zhuohuai, CHEN Keyin, DING Youchun, et al. Visual navigation path extraction method in rice harvesting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 19 - 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20200102. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.002. (in Chinese)

[7] MENG Linxin, ZHAO Shanshan, ZHANG Lizhong. Motion simulation platform for the outdoor test of the airborne spatial laser communication[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 501 - 504:2558 - 2561.

[8] RAGHUCHARAN M C, SOMALA S N. Simulation of strong ground motion for the 25 April 2015 Nepal (Gorkha) Mw 7.8 earthquake using the SCEC broadband platform[J]. Journal of Seismology, 2017, 21(4):1 - 32.

[9] ZHANG X L, OLEYNIKOV D, NELSON C A. Portable tool positioning robot for telesurgery[J]. Studies in Health Technology & Informatics, 2015, 142:438 - 443.

[10] 陈斌, 宗光华, 于靖军, 等. 一种 2-DOF 类球面并联转台的动力学建模及分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 24 - 31.
CHEN Bin, ZONG Guanghua, YU Jingjun, et al. Dynamic modeling and analysis of 2-DOF quasi-sphere parallel platform [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 24 - 31. (in Chinese)

[11] 李仕华, 孙静, 单彦霞, 等. 空间光学镜并联指向机构优化[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 132 - 139.
LI Shihua, SUN Jing, SHAN Yanxia, et al. Optimization of novel parallel pointing mechanism for space optical mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(3): 132 - 139. (in Chinese)

[12] ENFERADI J, SHAHI A. On the position analysis of a new spherical parallel robot with orientation applications[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 151 - 161.

[13] SANCISI N, PARENTI-CASTELLI V. A 1-DOF parallel spherical wrist for the modelling of the knee passive motion[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(4): 658 - 665.

[14] 杨龙, 邱雪松, 侯雨雷, 等. 偏置输出的 3 - RRR + (S - P)仿生关节机构设计与分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 366 - 371.

YANG Long, QIU Xuesong, HOU Yulei, et al. Structure design and workspace analysis of 3 - RRR + (S - P) bionic joint mechanism with offset output[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 366 - 371. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150353&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.053. (in Chinese)

[15] 侯雨雷, 汪毅, 范建凯, 等. 3 - PCSS/S 球面并联肩关节机构优化与仿生设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(11): 16 - 23.
HOU Yulei, WANG Yi, FAN Jiankai, et al. Optimization and bionic design of 3 - PCSS/S spherical parallel mechanism for the shoulder joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11): 16 - 23. (in Chinese)

[16] BI Z M. Design of a spherical parallel kinematic machine for ankle rehabilitation[J]. Advanced Robotics, 2013, 27(2): 121 - 132.

[17] LI Hengyu, LUO Jun, HUANG Chaojiong, et al. Design and control of 3-DOF spherical parallel mechanism robot eyes inspired by the binocular vestibule-ocular reflex[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 78(3 - 4): 425 - 441.

[18] 谢少荣, 刘思淼, 罗均, 等. 一种混合驱动柔索并联仿生眼的轨迹规划[J]. 机器人, 2015, 37(4): 395 - 402.
XIE Shaorong, LIU Simiao, LUO Jun, et al. Trajectory planning of a bionic eye using hyhrid-driven cable parallel mechanism [J]. Robot, 2015, 37(4): 395 - 402. (in Chinese)

[19] BAI Shaoping. Optimum design of spherical parallel manipulators for a prescribed workspace[J]. Mech. Mach. Theory, 2010, 45(2): 200 - 211.

[20] 杨健,周鑫,柳伟兵,等. 3 - RRR 球面并联机构优化设计研究[J]. 机械设计与制造, 2018(7): 119 - 122.
YANG Jian, ZHOU Xin, LIU Weibing, et al. Research on optimization design of 3 - RRR parallel mechanism[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(7): 119 - 122. (in Chinese)

[21] 王超群,高踔,陈柏,等. 3 - RRR 球面并联机构的工作空间分析及结构优化[J]. 机械设计与制造, 2015(4): 55 - 58.
WANG Chaoqun, GAO Chuo, CHEN Bai, et al. Workspace analysis and structure optimization of 3 - RRR spherical parallel mechanism[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(4): 55 - 58. (in Chinese)

[22] ENFERADI J, NIKROOZ R. The performance indices optimization of a symmetrical fully spherical parallel mechanism for dimensional synthesis[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2018, 90(3 - 4): 305 - 321.

[23] KHOSHNOODI H, HANZAKI A R, TALEBI H A. Kinematics, singularity study and optimization of an innovative spherical parallel manipulator with large workspace[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2018, 92(2): 309 - 321.

[24] CAMMARATA A. Optimized design of a large-workspace 2-DOF parallel robot for solar tracking systems[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 83: 175 - 186.

[25] LI Weimin. Type design of decoupled parallel manipulators with lower mobility [M] // Parallel manipulators, new developments. InTech, 2008: 483 - 498.

(上接第 405 页)

[19] 郭辉, 胡文军, 陶俊林. 泡沫橡胶材料的超弹性本构模型[J]. 计算力学学报, 2013,30(4):575 - 579.
GUO Hui, HU Wenjun, TAO Junlin. The superelasticty constitutive model for foam rubber materials [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013,30(4):575 - 579. (in Chinese)

[20] WONG R D P, POSNER J D, SANTOS V J. Flexible microfluidic normal force sensor skin for tactile feedback[J]. Sensors & Actuators A: Physical,2012,179(3): 62 - 69.

[21] MAIOLINO P, MAGGIALI M, CANNATA G, et al. A flexible and robust large-scale capacitive tactile system for robots [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(10):3910 - 3917.

[22] 王永立,路懿. 分流式柔性铰六维力传感器刚度分析与结构优化[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(6):419 - 426.
WANG Yongli, LU Yi. Stiffness analysis and structure optimization of shunted sensor with flexure hinge[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):419 - 426. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190650&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.050. (in Chinese)

[23] YAN X, BOWEN C R, YUAN C G, et al. Carbon fiber based flexible piezoresistive composites to empower inherent sensing capabilities for soft actuators[J]. Soft Matter, 2019,15: 8001 - 8011.

[24] 张文东, 樊俊铃, 陈莉, 等. 二维数字图像相关法在准静态拉伸试验中的应用[J]. 应用力学学报, 2018, 35(5):1058 - 1064,1187.
ZHANG Wendong, FAN Junling, CHEN Li, et al. Study on the application of two-dimensional digital image correlation method in quasi-static tension test [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(5):1058 - 1064,1187. (in Chinese)

[25] 庞志勇, 谭洪舟, 陈弟虎. 一种改进的低成本自适应双三次插值算法及 VLSI 实现[J]. 自动化学报, 2013, 39(4):407 - 417.
PANG Zhiyong, TAN Hongzhou, CHEN Dihu. An improved low-cost adaptive bicubic interpolation arithmetic and VLSI implementation [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4):407 - 417. (in Chinese)

[26] 罗华安, 王化明, 朱银龙. 介电型电活性聚合物圆柱形驱动器结构参数分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4):355 - 363.
LUO Huaan, WANG Huaming, ZHU Yinlong. Analysis of structure parameters of dielectric electroactive polymer cylindrical actuators [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(4):355 - 363. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160447&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.047. (in Chinese)