

六足农业机器人并联腿构型分析与结构参数设计

荣 誉^{1,2}, 金振林¹, 崔冰艳³

(1. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 河北科技师范学院机电工程学院, 秦皇岛 066004;
3. 河北联合大学机械工程学院, 唐山 063009)

摘 要: 为拓展六足机器人在农业领域的应用, 将并联机构用于六足机器人的腿部结构, 从而使其可以用于山地、林地、丘陵等环境的农业运输、种植、采摘等。首先, 对六足机器人并联腿部机构进行了构型分析, 选择 2-UPS+UP 机构作为腿部的初步机构原型; 其次, 依据螺旋理论, 对 2-UPS+UP 机构进行了转动解耦性优化和变异, 提出了一种转动解耦的 UPR+UPS+UP 机构; 之后, 通过对该机构进行运动学分析, 建立了该机构位置逆解模型与速度映射方程; 最后, 对 UPR+UPS+UP 机构的工作空间进行了分析, 绘制了工作空间三维图, 通过分析设计参数对工作空间的影响, 确定了一组性能较好的结构参数, 该研究为并联腿部机构农业六足机器人的进一步研究提供了参考。

关键词: 农业, 机器人, 运动学, 并联腿部机构, 工作空间, 构型分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.15.002

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-15-0009-06

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)

0 引 言

20 世纪 90 年代, 农业机器人研究才得到国内外学者的重视^[1-4]。用于农业运输、种植、采摘等作业的六足机器人的研究至今仍很少见。根据美国陆军的调查, 地球上近一半的地面不能为传统的轮式或履带式车辆到达和通过^[5], 而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, 六足式步行机器人在这方面有得天独厚的优势^[6]。六足机器人适合用于野外农业运输、野外农业作物种植等工况。目前, 六足机器人机械腿的结构主要采用串联结构或平面多连杆结构, 典型的代表是美国宇航局的 ATHLETE 机器人。这类六足机器人要么为实现大载重量而导致机体和腿都十分庞大, 要么为实现结构紧凑而导致机体和腿都脆弱单薄, 这些大大限制了其用途。并联机构具有承载能力大、运动精度高、机构构型灵活等特点, 使并联机构适合作为六足机器人的腿部结构。目前, 采用并联腿部机构的多足步行机器人较少, 在国内金振林教授曾对四足步行器做过研究^[7-9], 王洪波教授曾对四足/两足可重组并联机器人做过研究^[10-11]。

六足步行机器人设计的关键是机械腿的构型与设计。本文根据六足机器人结构特点, 确定了其腿部机构的初步构型; 采用约束螺旋法对其进行解耦性优化, 提出了适用于六足机器人腿部的 UPR+UPS+UP 机构, 其含

义是支链分别为 UPR、UPS 和 UP 运动链的三支链并联机构; 对 UPR+UPS+UP 机构进行了运动学分析和工作空间分析; 结合运动学及工作空间的分析, 选出了一组较好的机械腿的结构参数。

1 并联腿部机构构型

1.1 并联腿部机构自由度分析

根据六足机器人特点可知, 其躯干通过 6 条腿与地面相连接, 通过自身重力和腿末端与地面间的摩擦力实现力封闭^[12]。从机器人整体上看, 躯干、6 条腿、地面所构成的系统可以等效成典型的 6 分支并联机构, 其中: 躯干可以看成运动平台; 6 条腿可以看成 6 个支链; 地面可以看成固定平台。如图 1 所示。

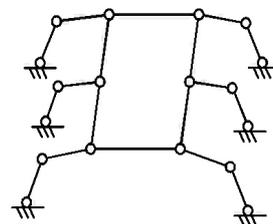


图 1 六足机器人简图

Fig.1 Sketch map of six-legged robot

为了应用于农业领域, 机器人躯干在非行走状态需要具有 6 个自由度。因此, 其机械腿的自由度分析就是 6 自由度并联机构的支链自由度分析问题。在非行走状态时, 机械腿末端与地面间的运动关系可以等效成球副 S, 即具有 3 个转动自由度。根据螺旋理论^[13], 要使运动平台具有 6 个线性无关的自由度, 每个支链都需要具有 6

收稿日期: 2012-01-15 修订日期: 2012-06-25

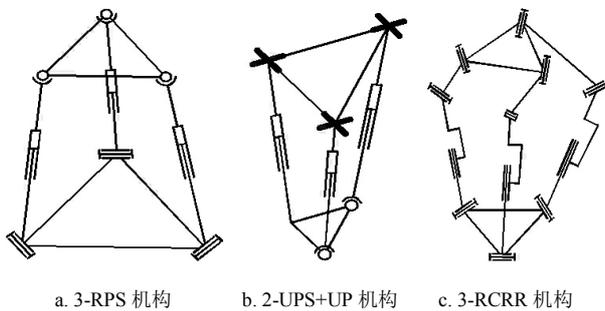
基金项目: 机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金项目 (No. MSV-2012-10); 秦皇岛市科技支撑计划项目 (201101A028)

作者简介: 荣 誉 (1981-), 男, 汉, 吉林通化人, 燕山大学机械工程学院博士研究生, 河北科技师范学院讲师, 主要从事并联机器人理论及应用研究。秦皇岛 燕山大学机械工程学院, 066004。Email:lixiangcg@126.com

个线性无关的运动螺旋，即支链没有约束螺旋。因此，每个支链除末端的 3 个自由度外还需要 3 个线性无关的自由度。这样的机构可以是：3 平移、2 转 1 移、1 转 2 移、3 转动三自由度机构。根据对六足步行动物腿部结构的分析，其腿部一般具有 2 个转动自由度和 1 个移动自由度。所以，机械腿应该采用 2 转 1 移并联机构。

1.2 并联腿部机构选型

根据运动平台的运动螺旋系标准基的情况，可以看出在不出现冗余的时候其分支数目为 3。在众多 3 分支 2 转 1 移并联机构中，较为适合作为腿部机构的主要有 3-RPS 机构（即含有 3 个 RPS 支链的并联机构）、2UPS+UP 机构（即含有 2 个 UPS 支链和 1 个 UP 支链的并联机构）和 3-RCRR 机构（即含有 3 个 RCRR 支链的并联机构），如图 2 所示。



注：U 表示虎克铰，P 表示移动副，R 表示转动副，S 表示球铰，“-”表示相同支链的数量，“+”表示支链间为并联连接方式，图 a 中与 R 副连接的平台为固定平台，图 b 中与十字虎克铰连接的平台为固定平台，图 c 中与最下端转动副连接的平台为固定平台。

图 2 3 种并联机构简图
Fig.2 Sketch map of three parallel mechanisms

图 2a 为常见的 3-RPS 对称机构，其优点是可以通过把 3 个移动副 P 作为输入，运动副和构件的实体化设计容易。缺点是各支链之间耦合性很强，工作空间较小，工作空间中的奇异位姿尚不明确。

图 2b 为 2-UPS+UP 非对称机构，其特点是 2 个 UPS 支链对运动平台不起约束作用而只作为驱动输入。运动平台的约束主要通过 UP 支链实现，这样运动平台的自由度数目及类型与 UP 支链末端的情况完全一样，从而使机构的运动学分析十分简单。在把 3 个移动副 P 作为驱动输入时，通过合理的机构布局，可以实现支链间运动的弱耦合性。其工作空间与六足动物腿的运动空间一致。

图 2c 为 3-RCRR 对称机构，其优点是机构的运动灵活性好且工作空间较大。但每个支链含有的运动副数量较多，实体化设计很麻烦且支链间耦合性很强。

通过综合分析这 3 种并联机构的性能，图 2b 所示的 2-UPS+UP 机构最适合作为六足机器人的腿部机构。

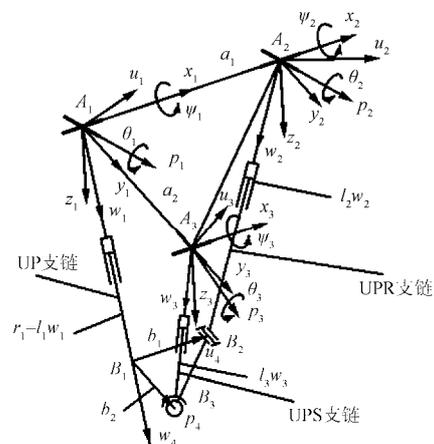
1.3 并联腿部机构构型转动解耦性优化

六足机器人主运动方向为前进方向，次运动方向为左、右横向运动。因此，机械腿的主运动方向亦为前后运动，次运动为左右运动，任何实际运动步伐均可由这 2 种运动组合而成。要实现机械腿的灵活、迅速控制，就

需要腿部机构在主、次运动方向的运动解耦或只存在弱耦合。并联机构普遍存在运动耦合性，所以，需要在 2-UPS+UP 机构基础上进行解耦性优化设计。本文采用约束螺旋法对其进行解耦性优化，针对这类问题，文献[14]进行了详细分析，并提出了机构转动自由度实现条件，这里依照文献[14]方法进行解耦性优化。

在分支布局方面，采取以 UP 约束支链为核心，2 条 UPS 驱动支链分别布置在主运动方向和次运动方向，3 个支链与运动平台及固定平台的连接点均呈等腰直角三角形布置，如图 2b 所示。其中：主运动方向的驱动支链主要为前后运动提供驱动，简称为主驱动支链；次运动方向的驱动支链主要为左右运动提供驱动，简称为次驱动支链。在运动副布置方面，根据文献[14]提出的机构转动自由度实现条件，主驱动支链虎克铰靠近固定平台的回转轴线与 UP 支链虎克铰靠近固定平台的回转轴线共线，次驱动支链虎克铰靠近固定平台的回转轴线与 UP 支链虎克铰靠近固定平台的回转轴线共面且垂直。机械腿的前后摆动运动完全由主驱动支链实现；左右摆动运动完全由次驱动支链实现。

根据文献[15]提出的实现 2 转动 1 平移三自由度运动约束螺旋所需满足几何关系，若将 2-UPS+UP 机构的主驱动支链与运动平台之间改为通过一个回转轴线垂直于主驱动支链和 UP 支链所确定平面的转动副连接，也可实现相同运动。因此，机构演变为分支呈等腰直角三角形布局的 UPR+UPS+UP 机构，如图 3 所示。



注： A_i 为每条支链与固定平台虎克铰回转中心， B_i 为每条支链轴线与运动平台交点， ψ_i 和 θ_i 为每条支链虎克铰绕其 2 个轴线的转角， $A_i-u_i-p_i-w_i$ 为固定在每条支链上的运动坐标系，U 表示虎克铰，P 表示移动副，R 表示转动副，S 表示球铰。

图 3 UPR+UPS+UP 并联机构结构简图
Fig.3 Sketch map of UPR+UPS+UP parallel mechanisms

2 UPR+UPS+UP 机构运动学分析

2.1 坐标系建立与动平台姿态描述

图 3 为 UPR+UPS+UP 并联机构简图， $A_i(i=1,2,3)$ 表示各支链与机架相连虎克铰的回转中心点， B_1 表示 UP 支链中心线与运动平台交点， B_2 表示 UPR 支链中心线与运动平台交点， B_3 表示 UPS 支链球铰中心。

建立固定参考坐标系 $A_1-x_1y_1z_1$, 其中 x_1 轴与 UP 支链连接机架虎克铰靠近机架的回转轴重合; z_1 轴与 A_1 、 A_2 、 A_3 所张成的平面 A 垂直, 方向如图 3 所示; y_1 轴满足右手定则。又以 $A_i(i=2,3)$ 为原点建立辅助参考坐标系 $A_i-x_iy_i z_i(i=2,3)$, 其中 x_i 轴与对应支链连接机架虎克铰靠近机架的回转轴重合; z_i 轴与 x_1 轴平行; y_i 轴满足右手定则。建立运动坐标系 $B_1-u_4p_4w_4$, 其中 w_4 轴与 UP 支链轴线重合并由点 A_1 指向点 B_1 , p_4 轴沿 B_1B_2 方向, u_4 轴满足右手定则。为了描述各支链的姿态, 在各支链上分别建立连体坐标系 $A_i-u_i p_i w_i(i=1,2,3)$, 如图 3 所示。其中, w_i 轴与支链 i 的轴线重合并由点 A_i 指向点 B_i ; p_i 轴与对应支链连接机架虎克铰远离机架的回转轴重合; u_i 轴满足右手定则。

根据前面对坐标系的定义, 坐标系 $A_i-u_i p_i w_i(i=1,2,3)$ 相对于坐标系 $A_i-x_i y_i z_i$ 的姿态可以通过 2 次旋转实现: 首先绕 x_i 轴旋转角度 ψ_i , 然后绕 p_i 轴旋转角度 θ_i 。由此可以构造得到姿态矩阵表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_i &= \text{Rot}(x_i, \psi_i) \text{Rot}(p_i, \theta_i) \\ &= [\mathbf{u}_i \quad \mathbf{p}_i \quad \mathbf{w}_i] \end{aligned} \quad (1)$$

式中, \mathbf{u}_i 、 \mathbf{p}_i 和 \mathbf{w}_i 分别为 u_i 、 p_i 和 w_i 的单位矢量, 且

$$\mathbf{w}_i = (w_{ix} \quad w_{iy} \quad w_{iz}), \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

据此, 各支链的姿态角 (虎克铰的两个转角) 可以表示为

$$\theta_i = \arcsin(w_{ix}), \psi_i = \arctan(-w_{iy}/w_{iz}) \quad (3)$$

在选取运动平台参考点时, 由于 UP 支链末端与运动平台固接在一起, 所以选取 B_1 为其参考点。

2.2 位置反解分析

位置反解分析涉及已知动平台参考点 B_1 的位置矢量 $\mathbf{r}_1=(x \quad y \quad z)^T$, 求解各支链的杆长和姿态^[16-19]。

在固定参考坐标系 $A_1-x_1y_1z_1$ 下, 构造位置闭环约束方程

$$\mathbf{r}_1 = l_i \mathbf{w}_i \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{a}_i + l_i \mathbf{w}_i - \mathbf{b}_i = \mathbf{a}_i + l_i \mathbf{w}_i - \mathbf{R}_i \mathbf{b}_{0i}, \quad i=2,3 \quad (5)$$

式中, l_i 和 $\mathbf{w}_i(i=1,2,3)$ 分别表示支链 i 的杆长和单位矢量, \mathbf{b}_{0i} 表示点 B_i 在系 $B_1-u_4p_4w_4$ 下的位置矢量。对上式等号两边同时取范数, 得

$$l_i = \|\mathbf{r}_1\| \quad (6)$$

$$\mathbf{w}_i = \mathbf{r}_1 / l_i \quad (7)$$

由式 (3) 可以求出 UP 支链的姿态角 ψ_i 和 θ_i 。然后, 通过式 (1) 求出姿态矩阵 \mathbf{R}_i 。最后, 将其带入式 (5) 求取范数, 得到 UPR 和 UPS 支链的杆长

$$l_i = \|\mathbf{r}_1 + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i\|, \quad i=2,3 \quad (8)$$

而且, 还可以求出

$$\mathbf{w}_i = (\mathbf{r}_1 + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i) / l_i, \quad i=2,3 \quad (9)$$

通过式 (3) 求出 UPR 支链和 UPS 支链的姿态角 ψ_i 和 θ_i , 从而求得对应的姿态矩阵 \mathbf{R}_i 。

2.3 速度映射分析

速度映射指的是动平台参考点 B_1 的速度与各支链轴

向驱动移动副伸缩速度间的映射关系, 速度映射分析的目的在于得出速度雅克比矩阵, 从而进行运动学传递性能分析^[20-23]。

对式 (4) 和 (5) 关于时间 t 求导数, 得

$$\mathbf{v}_1 = \dot{l}_i \mathbf{w}_i + l_i \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{w}_i \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_1 = \dot{l}_i \mathbf{w}_i + l_i \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{w}_i - \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{b}_i \quad (11)$$

式中, \mathbf{v}_1 表示点 B_1 的速度, $\boldsymbol{\omega}_i$ 和 \dot{l}_i 分别表示支链 $i(i=1,2,3)$ 整体的角速度及其驱动移动副伸缩速度。

根据几何关系, 有 $\mathbf{w}_i^T (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{w}_i) = 0$ 和 $\mathbf{w}_1^T (\boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{w}_1) = 0$, 因此, 对式 (10) 两端同时点乘 \mathbf{w}_1 , 对式 (11) 两端同时点乘 $\mathbf{w}_i(i=2,3)$, 从而得到

$$\dot{l}_i = \mathbf{w}_1^T \mathbf{v}_1 \quad (12)$$

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{v}_1 = \dot{l}_i - (\mathbf{b}_i \times \mathbf{w}_i)^T \boldsymbol{\omega}_i \quad (13)$$

为分析速度映射, 需要构造 $\boldsymbol{\omega}_1$ 与 \mathbf{v}_1 的映射关系, 对式 (10) 两端同时叉乘 \mathbf{w}_1 , 通过三重向量积公式, 有

$$\mathbf{w}_1 \times \mathbf{v}_1 = l_i (\boldsymbol{\omega}_1 - (\mathbf{w}_1^T \boldsymbol{\omega}_1) \mathbf{w}_1) \quad (14)$$

因为 UP 支链绕自身轴线的旋转运动受到约束, 故上式中有 $\mathbf{w}_1^T \boldsymbol{\omega}_1 = 0$, 于是有

$$\boldsymbol{\omega}_1 = (\mathbf{w}_1 \times \mathbf{v}_1) / l_i \quad (15)$$

将式 (15) 带入式 (13), 有

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{v}_1 = \dot{l}_i - \frac{1}{l_i} (\mathbf{b}_i \times \mathbf{w}_i)^T (\mathbf{w}_1 \times \mathbf{v}_1) \quad (16)$$

根据几何关系, 有 $\mathbf{b}_i^T \mathbf{w}_1 = 0$, 则式 (16) 变为

$$\dot{l}_i = \mathbf{w}_i^T \mathbf{v}_1 - \frac{1}{l_i} \mathbf{w}_i^T \mathbf{w}_1 \mathbf{b}_i^T \mathbf{v}_1, \quad i=2,3 \quad (17)$$

将式 (12) 和式 (17) 写成矩阵形式, 即可得到 UPR+UPS+UP 并联机构关节速度与运动平台参考点速度的映射关系

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J} \mathbf{v}_1 \quad (18)$$

式中, $\dot{\mathbf{l}} = (\dot{l}_1 \quad \dot{l}_2 \quad \dot{l}_3)^T$ 为关节速度矢量, \mathbf{J} 为雅克比矩阵, 且

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \\ \mathbf{w}_3 \end{bmatrix} - \frac{1}{l_i} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{w}_2^T \mathbf{w}_1 \mathbf{b}_2 \\ \mathbf{w}_3^T \mathbf{w}_1 \mathbf{b}_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

3 UPR+UPS+UP 机构工作空间分析

UPR+UPS+UP 机构的工作空间为动平台参考点 B_1 所能达到的所有空间点位的集合^[17], 记作 V 。

3.1 结构约束分析

腿部机构的工作空间大小和形状主要由各支链杆长的变化范围、3 条支链的干涉情况、虎克铰与球铰及转动副的转角限制共同确定。

各杆杆长的变化范围为

$$l_{i\min} \leq l_i \leq l_{i\max}, \quad i=1,2,3 \quad (20)$$

式中, $l_{i\min}$ 为各杆的最小杆长; $l_{i\max}$ 为各杆的最大杆长。

球铰链由于其自身的结构特点, 能够实现的转角范围都存在一定的限制, \mathbf{q}_3 为球铰链座与动平台平面固联

的单位法向量, l_3 为 UPS 支链连杆的向量, 球铰链的结构转角 η_3 为

$$\eta_3 = \arccos(q_3 \cdot l_3) \quad (21)$$

初始姿态时球铰链的转角为 0 度, 球铰链转角的转动条件为

$$0 \leq \eta_3 \leq \eta_{3\max} \quad (22)$$

式中, $\eta_{3\max}$ 为球铰链的最大转角。

虎克铰转动时受到一定的限制, 虎克铰允许支撑杆在一个小于夹角 ψ_{\max} 的倒三角锥内任意摆动, ψ_{\max} 由虎克铰结构限制。当处于特定位姿时, 杆向量与倒三角锥轴线之间的夹角为 ψ_i 应满足条件

$$\psi_i \leq \psi_{\max} \quad (23)$$

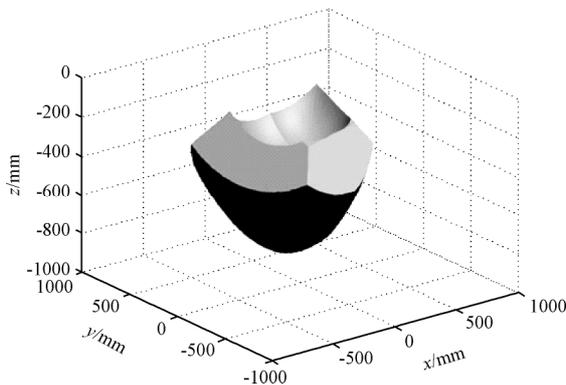
腿部机构在运动时, 杆件采用直径为 d 的均匀杆, 相邻分支杆件之间都可能发生干涉, 假设各杆件之间的最短距离为 $d_{ij}(i,j=1,2,3)$ 且 $i \neq j$, 则避免发生干涉的条件为

$$d_{ij} \geq d \quad (24)$$

3.2 工作空间形状分析

定义动平台平行于固定平台且两平台距离为 h 时的位姿, 为初始位姿。初步设定机械腿的结构参数为: $l_{\max}=900$ mm, $l_{\min}=500$ mm, $b=B_1B_2=B_1B_3=35$ mm, $\eta_{3\max}=38^\circ$, $\psi_{\max}=60^\circ$, $a=A_1A_2=A_1A_3=120$ mm, $h=700$ mm, $d=30$ mm。

工作空间是关于结构参数 a, b 和 l_i 的三个球壳方程, 综合式 (4) ~ (9) 和式 (20) ~ (24), 在满足机构的几何约束关系的条件下, 采用极坐标搜索法绘制了腿部机构的位置工作空间三维图, 如图 4 所示。



注: 图中 z 轴负向为机械腿的末端即大地方向, x 轴正向为机械腿向前迈步方向、负向为向后迈步方向, y 轴正向为机械腿向左迈步方向、负向为向右迈步方向, 封闭区域内即为机械腿参考点可以到达的空间点位集合。

图 4 腿部机构工作空间三维图

Fig.4 Sketch map of workspace leg with parallel mechanisms

从图 4 可以看出, 腿部机构的工作空间为三个球冠相交所形成的区域, 整体呈轴对称布局。工作空间的形状饱满, 分布均匀合理, 满足机械腿的步态要求。

3.3 设计参数对工作空间的影响

为了使工作空间更合理, 需要分析各设计参数对工

作空间的影响, 从而选择出性能较好的结构参数^[24-26]。

为此, 首先设定静、动平台的结构参数 $a=120$ mm、 $b=35$ mm, 球铰 S 的最大转角 $\eta_{3\max}=38^\circ$, $l_{\max}=500$ mm, 同时令 l_{\min}/l_{\max} 在 0.25~1 之间变化, 得出工作空间体积 V 随 l_{\min}/l_{\max} 变化的曲线, 如图 5 中曲线 l_{\min}/l_{\max} 所示。

另外, 取 $l_{\max}=900$ mm, $l_{\min}=500$ mm, 球铰的最大转角 $\eta_{3\max}=38^\circ$, 静平台的结构参数 $a=120$ mm, 令动、静平台结构参数之比 b/a 在 0.25~1.6 之间变化, 得出工作空间体积 V 随 b/a 变化的曲线, 如图 5 中曲线 b/a 所示。

最后, 取 $l_{\max}=900$ mm, 球铰的最大转角 $\eta_{3\max}=38^\circ$, 动平台结构参数 $b=35$ mm, 静平台结构参数 a 和最大杆长 l_{\max} 的比值 a/l_{\max} 在 0.1~0.6 之间变化, 得出工作空间体积 V 随 a/l_{\max} 变化的曲线, 如图 5 中曲线 a/l_{\max} 所示。

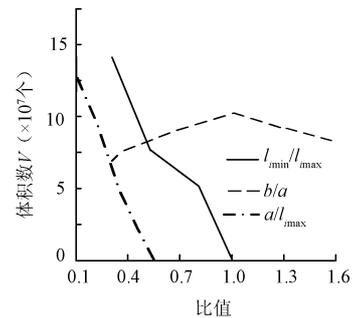


图 5 结构参数与工作空间的关系

Fig.5 Relationship of structural parameters and workspace

通过分析图 5 可知, 当 l_{\min}/l_{\max} 在 0.25~1 之间变化时, 工作空间 V 随 l_{\min}/l_{\max} 的比值增大而减小, 当比值越小时, 工作空间越大, 而当比值趋近 1 时, 工作空间趋近 0; 当 b/a 在 0.25~1.6 之间变化时, 工作空间的体积随动平台结构参数 b 的增大而增大, 当上下平台结构参数相等时, 工作空间体积最大, 当动平台结构参数大于静平台结构参数时, 工作空间体积开始减小; 当 a/l_{\max} 在 0.1~0.6 之间变化时, 工作空间呈现单调递减趋势。

4 腿部机构结构参数确定

为了达到最大工作空间, 选取结构参数作为设计变量, 即

$$X = \{\chi_1 \ \chi_2 \ \chi_3\} = \{a \ b \ h\} \quad (25)$$

式中, h 与前文含义相同。

定义腿部机构设计优化的目标函数为

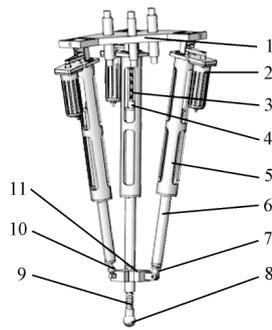
$$N(X) = n\{\chi\} = \max(V) \quad (26)$$

腿部机构结构参数的变化范围是

$$X_{\max} = \{200 \ 150 \ 800\} \quad (27)$$

$$X_{\min} = \{70 \ 35 \ 600\} \quad (28)$$

通过式 (6) - (9), 得到腿部机构性能较好的一组结构参数为: $a=130$ mm, $b=50$ mm, $h=750$ mm。结合选取的结构参数, 设计出基于 UPR+UPS+UP 机构的腿部结构, 如图 6 所示。主要技术参数如表 1 所示。



1.机架 2.伺服电机 3.丝杠 4.丝杠螺母 5.套筒 6.运动杆 7.转动副
8.足 9.减震弹簧 10.球铰 11.动平台

图 6 基于 UPR+UPS+UP 机构的腿部结构
Fig.6 Structure of UPR+UPS+UP mechanical leg

表 1 并联机械腿技术参数

Table 1 Technical parameters of leg with parallel mechanisms

| 名称 | 尺寸/型号 |
|--------------|---------------------------|
| 固定平台结构参数 a | 130 mm |
| 运动平台结构参数 b | 50 mm |
| 套筒长×直径×壁厚 | 500 mm× ϕ 65 mm×5 mm |
| 从动杆长×直径×壁厚 | 50 mm× ϕ 30 mm×5 mm |
| 丝杠有效行程×公称直径 | 30 mm× d 12 mm |
| 电机型号 | F2260 817 |
| 联轴器型号 | GP62A 110505 |
| 编码器型号 | Encoder HEDS 5540 |

5 结 论

1) 为满足农业需求,把并联机构应用于农业六足机器人的机械腿,分析表明,2-UPS+UP 机构十分适合作为腿部的初步机构原型。

2) 通过用螺旋理论对 2-UPS+UP 机构进行了转动解耦性构型优化和变异表明,一种分支呈等腰直角三角形布局的 UPR+UPS+UP 机构具有转动解耦的优点,十分适合作为六足步行机器人的腿部机构原型。

3) 通过对 UPR+UPS+UP 机构的运动学模型和工作空间进行分析表明:工作空间体积随支链最大、最小杆长比值的增大而减小;随运动、固定平台尺寸比值的增大而先增大后减小;随着固定平台尺寸与支链最大杆长比值呈现单调递减趋势。通过分析设计参数对工作空间的影响,确定了一组性能较好的结构参数。

4) 本文的研究成果为并联腿部机构六足步行机器人的进一步研究奠定了理论基础,对开拓并联机器人研究领域和扩大六足步行机器人应用范围具有参考意义。

[参 考 文 献]

[1] Edan Y, Miles G E. Design of an agricultural robot for harvesting melons[J]. Trans of the ASAE, 1993, 36(2): 593—603.
[2] 赵匀,武传宇,胡旭东,等. 农业机器人的研究进展及存在问题[J]. 农业工程学报, 2003, 14(1): 20—24.
Zhao Yun, Wu Chuangyu, Hu Xudong, et al. Research progress and problems of agricultural robot[J]. Transactions

of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 14(1): 20—24. (in Chinese with English abstract)
[3] Peng C, Yoshizo H, Mitushi Y. Grasping control of robot hand using fuzzy neural network[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 3972: 1178—1187.
[4] 郭伟斌,陈勇,侯学贵,等. 除草机器人机械臂的逆向求解与控制[J]. 农业工程学报, 2009, 54(4): 108—112.
Guo Weibin, Chen Yong, Hou Xuegui, et al. Inverse kinematics solving and motion control for a weeding robotic arm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 54(4): 108—112. (in Chinese with English abstract).
[5] Waldron K J. Configuration Design of the ASV. Int [J]. J. of Robotics Research, 1984, 3(2): 37—48.
[6] Elena Garcia, Maria Antonia Jimenez. The evolution of robotics research[J]. Robotics And Automation, 2007, 3(10): 90—102.
[7] 崔冰艳. 仿生机器人并联关节/运动单元的性能分析与设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011: 83—125.
Cui Bingyan. Performance Analysis and Design for Parallel Joint/Kinematical Unit of Bionic Robot[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 83—125. (in Chinese with English abstract).
[8] 王炳一. 一种新型四足仿生机器人性能分析与仿真[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011: 55—70.
Wang Bingyi. Simulation and Performance Analysis on new Type of Bionic Quadruped Robot[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 55—70. (in Chinese with English abstract).
[9] 倪森. 基于 2-UPS&UP 并联结构腿的四足步行器设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011: 35—70.
Ni Sen. The Design of Quadruped Robot Based on 2-UPS&UP Parallel Mechanism Leg[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 35—70. (in Chinese with English abstract)
[10] 王洪波,齐政彦,胡正伟,等. 并联腿机构在四足/两足可重组步行机器人中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 24—30.
Wang Hongbo, Qi Zhengxiao, Hu Zhengwei, et al. Application of parallel leg mechanisms in quadruped/biped Reconfigurable walking robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 24—30. (in Chinese with English abstract).
[11] 王洪波,徐桂玲,张典范,等. 助老助残四足/两足可重构并联腿步行机器人运动学建模与仿真[J]. 燕山大学学报, 2010, 34(6): 508—515.
Wang Hongbo, Xu Guiling, Zhang Dianfan, et al. Kinematics modeling and simulation of quadruped/biped walking robot with parallel leg mechanism for the elderly and the disabled[J]. Journal of Yanshan University, 2010, 34(6): 508—515. (in Chinese with English abstract).
[12] 陈学东,孙翊,贾文川. 多足步行机器人运动规划与控制[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006: 21—22.
[13] 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: 61—87.
[14] 曾达幸,黄真. 基于螺旋理论的转动解耦并联机构型综合[J]. 中国科学(E辑), 2011, 41(5): 585—591.
Zeng Daxing, Huang Zhen. Type synthesis of the rotational decoupled parallel mechanism based on screwtheory[J]. Sci

- China Tech Sci, 2011, 41(5): 585—591. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李秦川. 对称少自由度并联机器人型综合理论及新机型综合[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003: 51—55.
Li Qinchuan. Type Synthesis Theory of Lower-Mobility Parallel Mechanisms and Synthesis of new Architectures[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 51—55. (in Chinese with English abstract)
- [16] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996: 32—55.
- [17] 于靖军, 刘辛军, 丁希伦, 等. 机器人机构学的数学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 11—12.
- [18] Rong Yu, Jin Zhenlin, Qu Mengke. Study on mechanics structural synthesis of six-legged walking robot with parallel leg mechanisms[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 496: 247—250.
- [19] 荣誉, 金振林. 五自由度并联机械腿静力学性能评价与优化设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1233—1242.
Rong Yu, Jin Zhenlin. Statics performance evaluating and optimal design of 5-DOF parallel mechanical leg [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1233—1242. (in Chinese with English abstract).
- [20] 齐明, 刘海涛, 梅江平, 等. 3-PUS/PU 3 自由度并联机构运动学优化设计[J]. *天津大学学报*, 2007, 40(6): 649—654.
Qi Ming, Liu Haitao, Mei Jiangping, et al. Kinematics optimum design of a 3-DOF parallel mechanism with 3-PUS/PU architecture[J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(6): 649—654. (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘海涛, 黄田, Chetwynd D G, 等. 5 自由度大工作空间/支链行程比混联机械手概念设计与尺度综合[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(6): 14—20.
Liu Haitao, Huang Tian, Chetwynd D G, et al. Kinematic design of 5-DOF hybrid robot with large workspace/limb-stroke ratio[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(6): 14—20. (in Chinese with English abstract).
- [22] 王友渔, 赵兴玉, 黄田, 等. 可重构混联机械手 TriVariant 与 Tricept 的静动态特性预估与比较[J]. *天津大学学报*, 2007, 40(6): 41—45.
Wang Youyu, Zhao Xingyu, Huang Tian, et al. Estimation and comparison of static and dynamic performance of two reconfigurable hybrid robots—the trivariant and the tricept[J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(6): 41—45. (in Chinese with English abstract).
- [23] 刘海涛, 梅江平, 赵学满, 等. 一种 2 自由度球面并联机构动力学建模与伺服电机参数预估[J]. *中国科学 (E 辑)*, 2008, 38(1): 111—124.
- [24] 崔冰艳, 金振林. 基于正交机构的机器人肩关节静力学分析与结构参数设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 77—82.
Cui Bingyan, Jin Zhenlin. Statics analysis and structure parameter design of robot shoulder joint based on orthogonal mechanism[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(1): 77—82. (in Chinese with English abstract)
- [25] 荣誉, 金振林, 曲梦可. 六足步行机器人的并联机械腿设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1532—1541.
Rong Yu, Jin Zhenlin, Qu Mengke. Design of parallel mechanical leg of six-legged robot [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1532—1541. (in Chinese with English abstract).
- [26] 金振林, 崔冰艳. 机器人肩关节的动力学建模及伺服电机峰值预估[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 122—125.
Jin Zhenlin, Cui Bingyan. Dynamic modeling and peak prediction of servo motor for shoulder joint of robot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(8): 1452—149. (in Chinese with English abstract)

Configuration analysis and structure parameter design of six-leg agricultural robot with parallel-leg mechanisms

Rong Yu^{1,2}, Jin Zhenlin¹, Cui Bingyan³

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Hebei Normal University Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China;

3. College of Mechanical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

Abstract: To apply the six-legged robot in the field of agriculture, the parallel mechanism was used in the mechanical leg of the six-legged robot. The six-legged walking robot could be used for transportation, cultivation, harvesting of agricultural fields in the mountains, woodlands, hills. The configuration of the six-legged robot was analyzed, and the 2-UPS+UP parallel manipulator was selected as the initial configuration of the mechanical leg. The rotational decoupled optimization of 2-UPS+UP parallel manipulator was done with screw theory, a rotational decoupled UPR+UPS+UP parallel manipulator was proposed. Based on configuration analysis, kinematics position equations were formulated. Kinematics model of the parallel manipulator was discussed as a key. The inverse position analysis and velocity mapping equations were presented. The workspace of UPR+UPS+UP parallel manipulator was analyzed. Three-dimensional graphic of workspace was drawn. By analyzing the impact of the design parameters on the work space, a set of structural parameters with good performance were selected. These studies laid the theoretical foundation for further study of the six-legged agricultural robot.

Key words: agriculture, robots, kinematics, parallel leg mechanism, workspace, configuration analysis