

偏置输出的 3 - RRR + (S - P) 仿生关节机构设计与分析*

杨 龙 邱雪松 侯雨雷 周玉林

(燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 针对 3 - RRR + (S - P) 球面并联机构安全工作空间较小, 不能满足人形机器人肩关节、髋关节 workspace 设计需求的问题, 依据仿生设计理论, 参照人体肱骨结构, 提出了偏置输出的设计思想, 并以 3 - RRR + (S - P) 球面并联机构为原型, 设计完成了偏置输出的 3 - RRR + (S - P) 仿生关节机构。通过坐标变换的方法, 得到新型仿生关节机构与原型机构 workspace 的映射关系, 进而得到新型仿生关节机构的安全 workspace。在保留原型机构运动学、力学特性的基础上, 新型仿生关节机构的安全 workspace 大幅增大, 完全可以满足人形机器人肩关节、髋关节 workspace 的设计需求。

关键词: 球面并联机构 仿生关节 偏置输出 空间映射

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0366-06

Structure Design and Workspace Analysis of 3 - RRR + (S - P) Bionic Joint Mechanism with Offset Output

Yang Long Qiu Xuesong Hou Yulei Zhou Yulin

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

Abstract: The 3 - RRR + (S - P) spherical parallel mechanism is very similar to human shoulder and hip joint. This mechanism can be taken as the prototype of the shoulder and hip joint for humanoid robot. However, the secure workspace of 3 - RRR + (S - P) spherical parallel mechanism is so small, that could not meet the requirements of the shoulder and hip joint for humanoid robot. According to bionics and structure of human thighbone, the design idea of biasing output was proposed. And then, the 3 - RRR + (S - P) bionic joint mechanism with biasing output was proposed based on the 3 - RRR + (S - P) spherical parallel mechanism. For the bionic joint mechanism and prototype mechanism, there was a certain mapping relation between their secure workspaces. The mapping relation was obtained based on conversion of coordinates, and then, the secure workspace of the proposed bionic joint mechanism was obtained. The 3 - RRR + (S - P) bionic joint mechanism with biasing output retained the kinematic and mechanical performance of prototype mechanism, and had a substantially increased secure workspace. The secure workspace of the proposed bionic joint mechanism could meet the requirements of the shoulder and hip joint for humanoid robot absolutely.

Key words: Spherical parallel mechanism Bionic joint Offset output Space mapping

引言

人形机器人是机器人领域最活跃的分支之一,

其中,人形机器人关节的结构和性能直接决定其整体性能,受到国内外学者的广泛关注。

三自由度球面并联机构属于典型的少自由度球

收稿日期: 2014 - 11 - 15 修回日期: 2014 - 12 - 14

* 国家自然科学基金资助项目(51275443)、教育部科学技术研究重点资助项目(212012)和河北省自然科学基金资助项目(E2012203034)

作者简介: 杨龙, 博士生, 主要从事人形机器人及仿生学研究, E-mail: yanglong233@163.com

通讯作者: 周玉林, 教授, 博士生导师, 主要从事机器人机构学、重型装备构型理论及机电集成技术研究, E-mail: zyl@ysu.edu.cn

面并联机构,其结构、运动状态和特性与人体关节很相似,非常适合作为人形机器人肩关节、髋关节的原型机构^[1]。侯雨雷等^[2]以 3-RRR 三自由度球面并联机构为原型,在其静力学^[3]及刚度特性^[4]分析基础上,从仿生学角度出发,通过植入中心球面副的方式,提出可应用于人形机器人肩关节、髋关节的 3-RRR + (S-P) 球面并联机构,实现了静力卸载及刚度均衡。

将 3-RRR + (S-P) 球面并联机构应用到人形机器人关节,还需要对其工作空间进行详细研究。目前,关于三自由度球面并联机构工作空间的研究已经取得一定进展^[5-14]。但是,现有的研究都是针对具体的三自由度球面并联机构,3-RRR + (S-P) 球面并联机构的工作空间还亟待研究和改进。

本文根据 3-RRR 三自由度球面并联机构静力学性能随机构运动位姿变化关系,确定 3-RRR + (S-P) 球面并联机构的安全工作空间。依据仿生设计思想,提出偏置输出的设计思想,设计完成偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构,以满足人形机器人肩关节、髋关节的工作空间需求。

1 3-RRR + (S-P) 球面并联机构

图 1 所示为 3-RRR 三自由度球面并联机构,上平台可实现 3 个方向的转动,下平台固定,两者之间由 3 条相同的支链连接,每条支链分别由 3 个转动副依次串联而成,9 个转动副的轴线汇交于一点(图 1 中的 O 点)。

机构的结构参数包括: $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \eta_{1i}, \eta_{2i} (i = 1, 2, 3)$, 球半径 R , 其中 $\eta_{1i} (i = 1, 2, 3)$ 分别为 $z_{1i} (i = 1, 2, 3)$ 与 z_{11} 在下平台投影所呈角度; $\eta_{2i} (i = 1, 2, 3)$ 分别为 $z_{2i} (i = 1, 2, 3)$ 与 z_{13} 在上平台投影所呈角度。

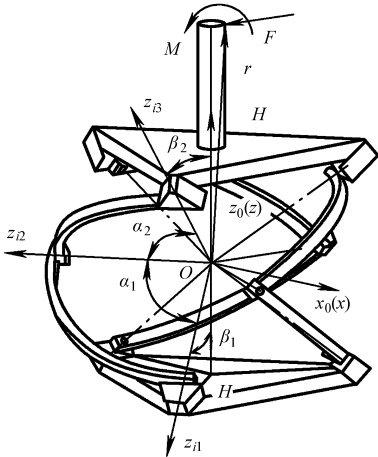


图 1 3-RRR 三自由度球面并联机构

Fig. 1 Spherical parallel mechanism 3-RRR with 3-DOF

图 2 所示为 3-RRR + (S-P) 球面并联机构,球头端杆与动平台以棱柱形式移动副连接,球窝端杆与定平台固连^[2]。当机构受到一般作用力(外力、外力矩)作用时,3-RRR 三自由度球面并联机构的 3R 支链同时承受并传递外力和外力矩;引入中心球面副后,外力主要由 S-P 支链承受并传递,外力矩由 S-P 支链和 3R 支链共同承受并传递。所以,相对原型机构 3-RRR 而言,新的四支链三自由度球面并联机构具有静力卸载和刚度均衡的特性。

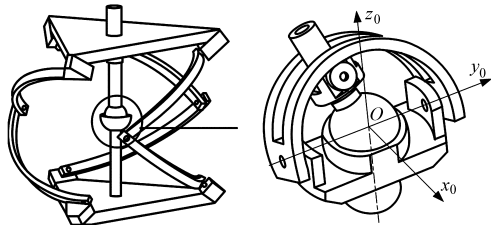


图 2 3-RRR + (S-P) 球面并联机构及具有大工作空间的中心球面副

Fig. 2 Spherical parallel mechanism 3-RRR + (S-P) and central spherical pair with large workspace

2 3-RRR + (S-P) 球面并联机构安全工作空间与人体关节运动空间

2.1 3-RRR + (S-P) 球面并联机构安全工作空间

3-RRR 三自由度球面并联机构($\alpha_1 = 90^\circ, \alpha_2 = 90^\circ, \beta_1 = 60^\circ, \beta_2 = 45^\circ$) 3 个分支工作空间的交集是整个球面^[15],但是由于机构的奇异性,机构的实际工作空间在整个球面的一些位置存在空洞。将从零点位姿开始,连续的、完全不存在空洞的工作空间称为机构的安全工作空间。

在 3-RRR 三自由度球面并联机构工作状态下,分析构件上的作用力随运动位姿的变化关系^[3]。机构的位姿角 $\varphi_{x_0}, \varphi_{y_0}$ 在 $(-63^\circ, 63^\circ)$ 内, φ_{z_0} 在 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 内时,机构的力学性能绝对良好,不出现奇异,是 3-RRR 三自由度球面并联机构的安全工作空间。

在 3-RRR + (S-P) 球面并联机构中,具有大运动空间的中心球面副的工作空间完全包括了 3-RRR 三自由度球面并联机构的安全工作空间,因此,3-RRR + (S-P) 球面并联机构的安全工作空间为: $\varphi_{x_0}, \varphi_{y_0}$ 在 $(-63^\circ, 63^\circ)$ 内, φ_{z_0} 在 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 内,其形状及相对固定坐标系的位置如图 3 所示。

2.2 人体肩关节、髋关节运动空间

人体肩关节(大臂)、髋关节(大腿)的运动轨迹和运动范围,如图 4 和表 1 所示。

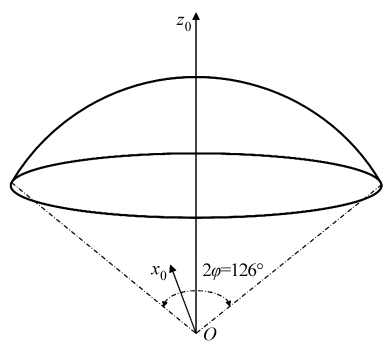


图3 3-RRR+(S-P)球面并联机构的安全工作空间

Fig.3 Secure workspace of spherical parallel mechanism 3-RRR+(S-P)

与人体肩关节、髋关节运动空间相比,3-RRR+(S-P)球面并联机构的安全工作空间明显较小。所以,为了满足人形机器人肩关节、髋关节工作空间的设

计需求,需要在保留静力卸载和刚度均衡特性的前提下,对其做进一步的结构改进,以增大安全工作空间。

3 偏置输出的3-RRR+(S-P)仿生关节机构

分析发现,3-RRR+(S-P)球面并联机构的安全工作空间完全由输出杆两方向(绕 x_0 、 y_0 轴)的摆角决定,虽然输出杆绕 z_0 轴的转角范围较大,但是没有反映到机构的输出运动中,即绕 z_0 轴的转动对机构输出的作用被掩盖。

人体髋关节的结构属于传统被动球面铰链结构^[16],但是其运动空间明显大于传统被动球面铰链的工作空间。观察发现,人体股骨与传统被动球面铰链的输出杆有明显不同:股骨整体呈弯拐状,股骨颈与股骨体夹角为 $55^{\circ}\sim 62^{\circ}$,如图5所示。

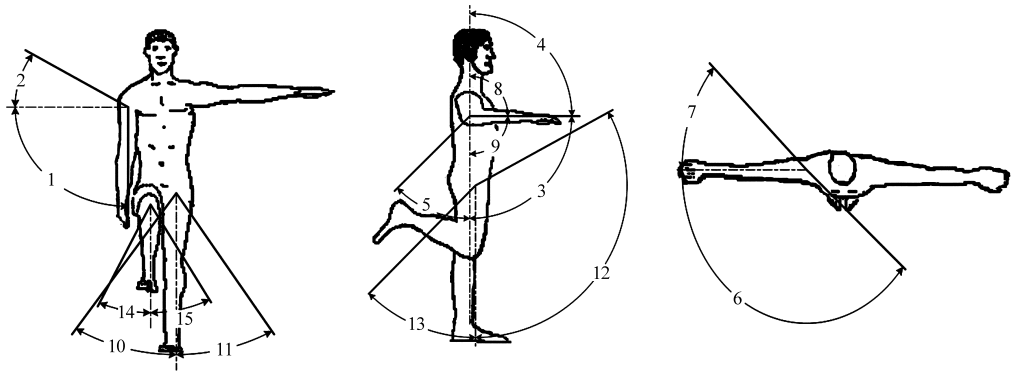


图4 人体肩关节(大臂)、髋关节(大腿)的运动轨迹

Fig.4 Motion trail of shoulder (upper arm) and hip joint (thigh)

表1 人体肩关节(大臂)、髋关节(大腿)运动范围

Tab.1 Motion range of shoulder (upper arm) and hip joint (thigh)

运动关节	动作方位	运动角度		运动范围	
		动作编号	角/($^{\circ}$)	度量位置	角/($^{\circ}$)
肩关节	外展(抬高)	1(2)	90(40)	冠状面内摆动	130
	屈曲	3	90	矢状面内摆动	225
	向前抬高	4	90		
	极限伸展	5	45		
	内收(极后展)	6(7)	130(30)	水平面内摆动	160
	外观(内观)	8(9)	90(90)	绕大臂轴旋转	180
髋关节	内收(外展)	10(11)	40(45)	冠状面内摆动	95
	屈曲(极限伸展)	12(13)	120(45)	矢状面内摆动	165
	屈曲转外(内)	14(15)	30(35)	绕大腿轴旋转	65

对比人体股骨结构可知,3-RRR+(S-P)球面并联机构输出杆绕 z_0 轴的旋转对输出的作用被掩盖的根本原因是:输出杆的轴线始终与 z_0 轴在同一平面内。

依据仿生设计原则,提出机构输出杆偏置的设计思想,即输出杆轴线向任意方向偏折,释放输出杆绕 z_0 轴的转动对机构输出的影响,从而扩大机构的工作空间。

以3-RRR+(S-P)球面并联机构为原型,将输出杆在动平台附近的一部分保留,称为直输出杆;余下的部分偏折某一角度使其轴线偏离直输出杆轴线,称为偏置输出杆,形成偏置输出的3-RRR+(S-P)仿生关节机构,如图6所示。

偏置输出杆轴线与直输出杆轴线的夹角称为偏摆角 α_h 。偏置输出杆的末端点P与球心的连线OP是实际输出杆轴线,它与直输出杆轴线的夹角

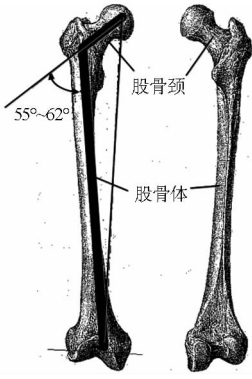


图 5 人体股骨结构
Fig. 5 Structure of human thighbone

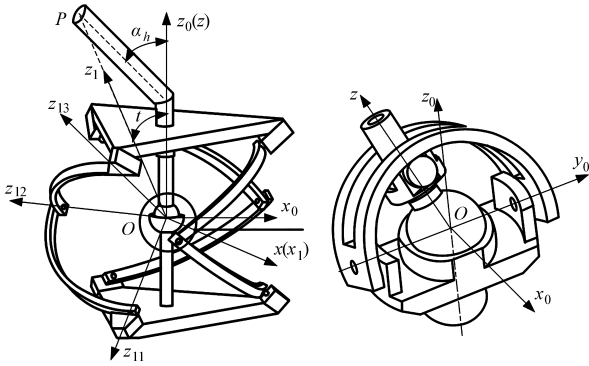


图 6 偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构
Fig. 6 Bionic joint mechanism 3-RRR + (S-P) with biasing output

称为偏置角 t 。 z_{11} 、 z_{12} 、 z_{13} 为过球心的 3 条转动副轴线。

取机构的中心点 O 为坐标原点, 建立固定坐标系 $Ox_0y_0z_0$ 、动坐标系 $Oxyz$ 和偏置坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 。其中, 固定坐标系与支撑杆固连, z_0 轴与支撑杆轴线重合, 正向向上, x_0 轴由 z_0 轴转到 z_{11} 轴及右手螺旋法则确定, y_0 轴由右手螺旋法则确定; 动坐标系与输出杆固联, z 轴与直输出杆轴线重合, 正向指向外, x 轴由 z 轴转到 z_{13} 轴及右手螺旋法则确定, y 轴

$${}^C_pR = \begin{bmatrix} c\varphi_y c\varphi_z & (s\varphi_x s\varphi_y c\varphi_z - c\varphi_x s\varphi_z)ct + (c\varphi_x s\varphi_y c\varphi_z + s\varphi_x s\varphi_z)st & -(s\varphi_x s\varphi_y c\varphi_z - c\varphi_x s\varphi_z)st + (c\varphi_x s\varphi_y c\varphi_z + s\varphi_x s\varphi_z)ct \\ c\varphi_y s\varphi_z & (s\varphi_x s\varphi_y s\varphi_z + c\varphi_x c\varphi_z)ct + (c\varphi_x s\varphi_y s\varphi_z - s\varphi_x c\varphi_z)st & -(s\varphi_x s\varphi_y s\varphi_z + c\varphi_x c\varphi_z)st + (c\varphi_x s\varphi_y s\varphi_z - s\varphi_x c\varphi_z)ct \\ -s\varphi_y & s\varphi_x c\varphi_y ct + c\varphi_x c\varphi_y st & -s\varphi_x c\varphi_y st + c\varphi_x c\varphi_y ct \end{bmatrix}$$

此时, 假定偏置坐标系绕固定坐标系 x_0 、 y_0 、 z_0 轴依次旋转的角度为 φ'_x 、 φ'_y 、 φ'_z , 则偏置坐标系在固定坐标系下的直接描述矩阵为

$${}^C_pR' = \begin{bmatrix} c\varphi'_y c\varphi'_z & s\varphi'_x s\varphi'_y c\varphi'_z - c\varphi'_x s\varphi'_z & c\varphi'_x s\varphi'_y c\varphi'_z + s\varphi'_x s\varphi'_z \\ c\varphi'_y s\varphi'_z & s\varphi'_x s\varphi'_y s\varphi'_z + c\varphi'_x c\varphi'_z & c\varphi'_x s\varphi'_y s\varphi'_z - s\varphi'_x c\varphi'_z \\ -s\varphi'_y & s\varphi'_x c\varphi'_y & c\varphi'_x c\varphi'_y \end{bmatrix}$$

显然, C_pR 和 ${}^C_pR'$ 两个矩阵的每一元素都对应相等, 选独立方程

由右手螺旋法确定; 偏置坐标系与输出杆固连, 假定直输出杆和偏置输出杆所构成的平面与 Ozy 面重合, 取 OP 为 z_1 轴, 正向向外, x_1 轴与 x 轴正向重合, y_1 轴由右手螺旋法则确定。

4 偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构与原型机构工作空间的映射

根据空间映射原理, 当直输出杆在 3-RRR + (S-P) 球面并联机构的安全工作空间内运动时, 实际输出杆轴线将在更大的安全工作空间内运动, 并且这两个工作空间存在一定的映射关系。

根据机构坐标系的建立规则, 动坐标系表示 3-RRR + (S-P) 球面并联机构的工作空间, 而偏置坐标系表示偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的工作空间。

假定机构输出杆运动到某一位姿时, 动坐标系绕固定坐标系 x_0 、 y_0 、 z_0 轴依次旋转的角度为 φ_x 、 φ_y 、 φ_z , 则动坐标系在固定坐标系下的描述矩阵为

$${}^C_DR = \begin{bmatrix} c\varphi_y c\varphi_z & s\varphi_x s\varphi_y c\varphi_z - c\varphi_x s\varphi_z & c\varphi_x s\varphi_y c\varphi_z + s\varphi_x s\varphi_z \\ c\varphi_y s\varphi_z & s\varphi_x s\varphi_y s\varphi_z + c\varphi_x c\varphi_z & c\varphi_x s\varphi_y s\varphi_z - s\varphi_x c\varphi_z \\ -s\varphi_y & s\varphi_x c\varphi_y & c\varphi_x c\varphi_y \end{bmatrix}$$

其中, $c\varphi_x$ 表示 $\cos\varphi_x$ 、 $s\varphi_x$ 表示 $\sin\varphi_x$, 其余类似。

偏置坐标系在动坐标系下的描述矩阵为

$${}^D_pR = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{cost} & -\text{sint} \\ 0 & \text{sint} & \text{cost} \end{bmatrix}$$

所以, 偏置坐标系经动坐标系, 在固定坐标系下的描述矩阵为

$${}^C_pR = {}^C_DR {}^D_pR$$

整理得

$$\begin{aligned} \cos\varphi'_y \sin\varphi'_z &= \cos\varphi_y \sin\varphi_z \\ -\sin\varphi'_y &= -\sin\varphi_y \end{aligned}$$

$$\sin\varphi'_x \cos\varphi'_y = \sin\varphi_x \cos\varphi_y \text{cost} + \cos\varphi_x \cos\varphi_y \text{sint}$$

得到偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构工作空间与 3-RRR + (S-P) 球面并联机构工作空间的映射关系^[17]

$$\begin{cases} \varphi'_x = \varphi_x + t \\ \varphi'_y = \varphi_y \\ \varphi'_z = \varphi_z \end{cases}$$

5 偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间

根据 3-RRR + (S-P) 球面并联机构的安全工作空间和上述工作空间的映射关系,得到偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间(为避免机构输出杆和动平台之间的干涉,偏置角 t 的最大值取为 90°),如图 3 和图 7~10 所示。

(1) 当 $t=0^\circ$ 时,偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间的形状及相对固定坐标系的位置如图 3 所示。

(2) 当 $0^\circ < t < 63^\circ$ 时,偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间变大,其形状及相对固定坐标系的位置如图 7 所示。

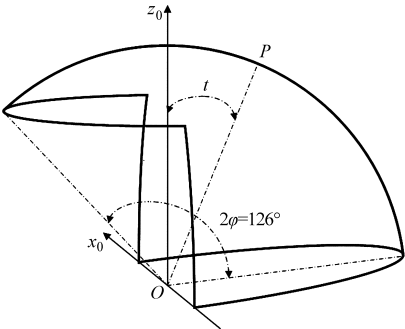


图 7 当 $0^\circ < t < 63^\circ$ 时,偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间

Fig. 7 Secure workspace of bionic joint mechanism 3-RRR + (S-P) with biasing output ($0^\circ < t < 63^\circ$)

(3) 当 $t=63^\circ$ 时,偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间进一步增大,其形状及相对固定坐标系的位置如图 8 所示。

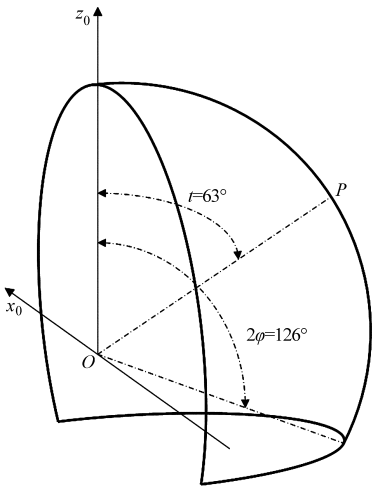


图 8 当 $t=63^\circ$ 时,偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间

Fig. 8 Secure workspace of bionic joint mechanism 3-RRR + (S-P) with biasing output ($t=63^\circ$)

(4) 当 $63^\circ < t < 90^\circ$ 时,偏置输出的 3-RRR +

(S-P) 仿生关节机构的安全工作空间为不对称半球面带,其相对固定坐标系的位置如图 9 所示。

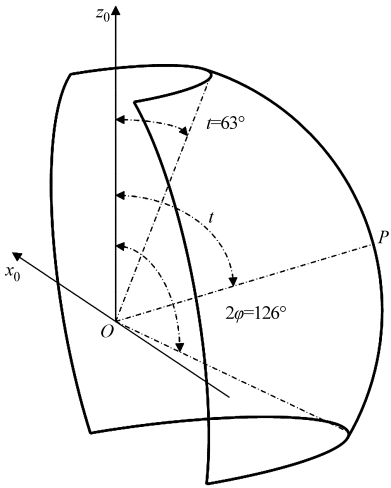


图 9 当 $63^\circ < t < 90^\circ$ 时,偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间

Fig. 9 Secure workspace of bionic joint mechanism 3-RRR + (S-P) with biasing output ($63^\circ < t < 90^\circ$)

(5) 当 $t=90^\circ$ 时,偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间为对称半球面环带,其相对固定坐标系的位置如图 10 所示。

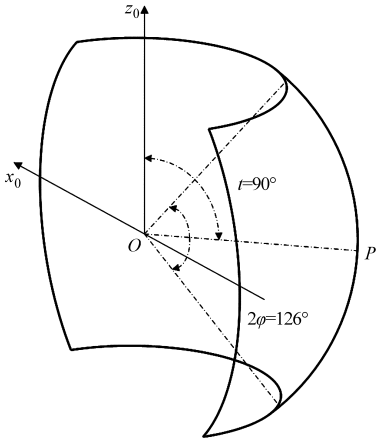


图 10 当 $t=90^\circ$ 时,偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间

Fig. 10 Secure workspace of bionic joint mechanism 3-RRR + (S-P) with biasing output ($t=90^\circ$)

结果表明,偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构的安全工作空间具有以下特性:

(1) 安全工作空间的大小较原型机构显著增大,且随着偏置角的增大而增大,当 $t=90^\circ$ 时达到最大,完全满足人形机器人肩关节、髋关节对工作空间的需求。

(2) 安全工作空间的形状随着偏置角的增大而发生变化,由较小的球缺演变成退化的小半球缺与增大的大半球缺的组合、半球冠、不对称半球面环带,最后为对称半球面环带。

(3) 当偏置角一定时,安全工作空间的大小、形

状及相对固定坐标系的位置完全确定。

6 结束语

以 3-RRR + (S-P) 球面并联机构为原型, 设计完成了一种偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关

节机构, 用以人形机器人的肩关节、髋关节。

偏置输出的 3-RRR + (S-P) 仿生关节机构不仅具有静力卸载和刚度均衡的特性, 而且其安全工作空间随着偏置角的增大而增大, 可以完全满足人形机器人肩关节、髋关节对工作空间的设计需求。

参 考 文 献

1 Yi Byung-Ju, Freeman Robert A, Tesar Delbert. Force and stiffness transmission in a redundantly actuated mechanism; the case for a spherical shoulder mechanism [J]. ASME, Design Engineering Division (Publication) DE, 1992, 45: 163-172.

2 侯雨雷, 胡鑫喆, 周玉林. 新型过约束球面并联式关节机构仿生设计[J]. 中国机械工程, 2014, 25(6): 723-726. Hou Yulei, Hu Xinzhe, Zhou Yulin. Bionic joint design based on a novel over-constrained spherical parallel mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(6): 723-726. (in Chinese)

3 周玉林, 刘磊, 高峰. 3 自由度球面并联机构 3-RRR 静力全解[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 169-176. Zhou Yulin, Liu Lei, Gao Feng. Static full-solutions of spherical parallel mechanism 3-RRR with 3-DOF [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 169-176. (in Chinese)

4 周玉林, 高峰. 3-RRR 3 自由度球面并联机构静刚度分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 25-32. Zhou Yulin, Gao Feng. Stiffness analysis of spherical parallel mechanism 3-RRR with 3-DOF [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 25-32. (in Chinese)

5 孙立宁, 刘宇, 祝宇虹. 一种用于腕关节的球面三自由度并联解耦机构位置分析[J]. 中国机械工程, 2003, 14(10): 831-833. Sun Lining, Liu Yu, Zhu Yuhong. A kinetic analysis of 3-DOF decoupled spherical parallel mechanism used for the wrist joint [J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(10): 831-833. (in Chinese)

6 Kong X W, Gosselin C. Forward displacement analysis of a quadratic spherical parallel manipulator; the agile eye [J]. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2010, 7(B): 237-245.

7 Tao Z J, An Q. Interference analysis and workspace optimization of 3-RRR spherical parallel mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 69: 62-72.

8 李剑锋, 费仁元, 范金红, 等. 具有大位置空间的 3 自由度并联机构运动性能分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 53-59. Li Jianfeng, Fei Renyuan, Fan Jinhong, et al. Kinematic performance analysis of 3-DOF parallel mechanism with large positional workspace [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 53-59. (in Chinese)

9 Carretero J A, Nahon M, Podhorodeski R P. Workspace analysis of a 3-DOF parallel mechanism [C] // Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1998: 1021-1026.

10 Huda S, Takeda Y, Hanagasaki S. Kinematic design of 3-URU pure rotational parallel mechanism to perform precise motion within a large workspace [J]. Meccanica, 2011, 46(1): 89-100.

11 鲁开讲, 牛禄峰, 刘亚茹, 等. 3-RPS 并联机构奇异位形及工作空间研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 143-146. Lu Kaijiang, Niu Lufeng, Liu Yaru, et al. Research on singular configuration and workspace of 3-RPS parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 143-146. (in Chinese)

12 张彦斌, 吴鑫, 刘宏昭, 等. 无耦合 3 自由度并联机构的设计与分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 208-211. Zhang Yanbin, Wu Xin, Liu Hongzhao, et al. Design and analysis of decoupled parallel mechanism with 3-DOF [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 208-211. (in Chinese)

13 崔国华, 张海强, 徐丰, 等. 空间 3-PUS-UP 并联机构运动灵巧性与刚度性能研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 348-354. Cui Guohua, Zhang Haiqiang, Xu Feng, et al. Kinematic dexterity and stiffness performance analysis of spatial 3-PUS-UP parallel manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 348-354. (in Chinese)

14 李树平, 谢少荣, 程军, 等. 基于差分进化的球面并联机构仿生眼参数优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 189-194. Li Shuping, Xie Shaorong, Cheng Jun, et al. Parameter optimization for spherical parallel mechanism bionic eye based on differential evolution [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 189-194. (in Chinese)

15 Liu X J, Jin Z L, Gao F. Optimum design of 3-DOF spherical parallel manipulators with respect to the conditioning and stiffness indices [J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(9): 1257-1267.

16 周玉林, 高峰. 仿人机器人构型[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 66-74. Zhou Yulin, Gao Feng. Mechanism architecture of humanoid robot [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 66-74. (in Chinese)

17 曹永刚, 张玉茹, 马运忠. 6-RSS 型并联机构的工作空间分析与参数优化[J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 19-24. Cao Yonggang, Zhang Yuru, Ma Yunzhong. Workspace analysis and parameter optimization of 6-RSS parallel mechanism [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 19-24. (in Chinese)