

RRR – UPRR – RPUR 球面转动并联机构运动学分析*

张帆¹ 张丹^{2,3} 杨建国³

(1. 上海工程技术大学机械工程学院, 上海 201620; 2. 安大略理工大学工程与应用科学学院, 奥沙瓦 L1H7K4;
3. 东华大学机械工程学院, 上海 201620)

【摘要】构造了 RRR – UPRR – RPUR 球面转动并联机构,该机构具有 3 个连续的转动自由度,其中 2 个转动自由度完全独立并由单个驱动器驱动,实现了三自由度球面转动的运动解耦。首先,根据螺旋理论建立运动支链中运动副在一般位形下的运动螺旋形式,实现对球面转动并联机构自由度的连续性判断。其次,利用线性代数方法,推导出并联机构动平台及相邻杆件的运动学模型,建立了球面转动并联机构的运动学正解的解析算法。最终,利用软件实体造型的运动仿真功能验证了理论计算结果。

关键词: 球面转动并联机构 解耦运动 螺旋理论 自由度分析

中图分类号: TH122 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)09-0202-05

Kinematics Analysis of RRR – UPRR – RPUR Spherical Parallel Manipulator

Zhang Fan¹ Zhang Dan^{2,3} Yang Jianguo³

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China
2. Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa L1H7K4, Canada
3. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract

An RRR – UPRR – RPUR parallel manipulator which can achieve spherical motion around fixed point was presented. The manipulator has three rotational degree-of-freedom (DOF), of which two rotational DOFs are independent and could be actuated by single actuator. The screw formulations of kinematic joints under ordinary configuration were established, which was employed to determine the three continues rotational DOF of the manipulator. Then, the kinematics of moving-platform and adjacent part were deduced, and the analytical algorithm of direct kinematics of the mechanism was established. Finally, the theoretical results are verified by the motion simulation of the prototype mechanism.

Key words Spherical parallel mechanism, Decoupled motion, Screw theory, DOF analysis

引言

并联机构是指动平台和静平台通过多个运动支链共同链接的机构,并联机构属于空间多支链闭环机构,与串联机构相比,具有机构紧凑、运动灵活、较高刚度等优点。球面转动并联机构是指具有 3 个转动自由度,能够绕着固定点实现球面转动的并联机构^[1],由于其较好的刚度和精度,可以用作机器人的肩关节、腕关节,以及卫星定位装置等^[2]。国内

外学者对 3 自由度并联机构进行了较系统的研究^[3~9]。

解耦机构是指自由度由单个或部分驱动器驱动的机构,由于运动学简单,奇异位形少,运动精度高,较耦合机构具有更好的应用前景。在目前得到的解耦球面转动并联机构中,转动自由度之间存在耦合^[10~16],单个转动自由度需要多个驱动器协同驱动,而转动自由度之间无耦合或低耦合的球面转动并联机构非常匮乏。

收稿日期: 2011-01-20 修回日期: 2011-03-24

* 国家自然科学基金资助项目(50975046)、上海市高校培养优秀青年教师科研专项基金资助项目(gjd09036)和上海仓储物流设备工程技术研究中心项目(10dz2250800)

作者简介: 张帆,讲师,博士,主要从事并联机器人、先进制造技术研究,E-mail: pdszhangfan@yahoo.com.cn

本文提出一种具有3个解耦转动自由度的球面转动并联机构,探讨采用螺旋理论分析并联机构自由度中存在的问题,最终建立球面转动并联机构自由度连续性判断的有效方法和解耦球面转动并联机构运动学正解的解析算法。

1 机构构造与自由度分析

1.1 球面转动并联机构的拓扑构造

RRR-UPRR-RPUR 球面转动并联机构如图1所示,机构由3条运动支链组成:RRR运动支链、UPRR运动支链和RPUR运动支链。RRR运动支链中,3条转动副轴线汇交于一点(定义为原点),分别

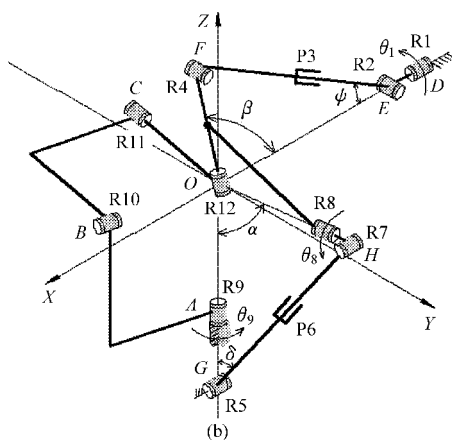
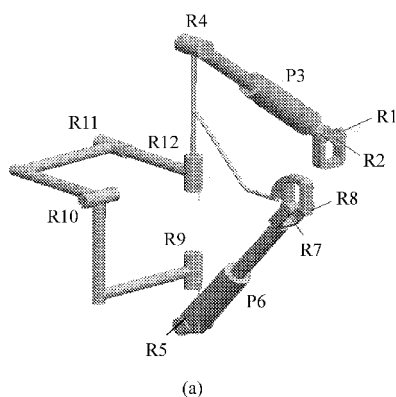


图1 球面转动并联机构及运动简图

Fig.1 Parallel mechanism prototype and kinematic model

(a) 并联机构模型 (b) 并联机构等效机构运动简图

1.2 基于螺旋理论的并联机构自由度分析

螺旋理论用螺旋表述了空间直线的方向与位置,并高度概括了刚体作用力与运动间关系,成为空间复杂机构分析自由度的有力工具。然而,在以往利用螺旋理论分析并联机构自由度时,由于螺旋是瞬时量,仅能判断并联机构在当前运动姿态下的瞬时运动能力。

为了克服该问题,首先建立各运动支链中运动副在一般位形下的运动螺旋形式,然后再根据运动螺旋与约束螺旋互易积为零定理,计算出在一般位形下运动支链末端的约束螺旋,从而得到并联机构运动平台的运动螺旋。

在如下推导过程中,转动副 $R(i)$ 轴线的单位矢量用 $\mathbf{a}_i$ 表示,其关节变化量用 θ_i 表示,移动副 P3 长度记为 L_3 ,移动副 P6 长度记为 L_6 ,线段长度 $l_{OE} = l_{OG} = c$, $l_{OF} = l_{OH} = d$ 。角度 $\psi = \angle OEF = \arccos \frac{c^2 + L_3^2 - d^2}{2cL_3}$, $\beta = \angle EOF = \arccos \frac{c^2 + d^2 - L_3^2}{2cd}$, $\delta = \angle OGH = \arccos \frac{c^2 + L_6^2 - d^2}{2cL_6}$, $\alpha = \angle GOH =$

记为 R_9, R_{10}, R_{11} ,为便于计算,使转动副轴线垂直 $R_9 \perp R_{10}, R_{10} \perp R_{11}$ 。在 UPRR 运动支链中,为便于分析,将万向铰链分解为2个轴向相互垂直的转动副,即 U_1 用 R_1, R_2 代替,运动支链可由 $R_1 R_2 P_3 R_4 R_{12}$ 运动支链代替,且 $R_1 \perp R_2, R_2 \perp P_3, R_2 \parallel R_4$ 。同理,RPUR 运动支链由 $R_5 P_6 R_7 R_8 R_{12}$ 运动支链代替,并且 $R_5 \perp P_6, R_5 \parallel R_7, R_7 \perp R_8$ 。UPRR 和 RPUR 运动支链共用一个转动副 R_{12} ,杆件 OE 与转动副 R_{12} 轴线重合,并且 $R_1 \parallel R_5, R_1 \perp R_9, R_8 \parallel R_2$ 。移动副 P3、移动副 P6 和转动副 R_9 是球面转动并联机构的主动副。

$$\arccos \frac{c^2 + d^2 - L_6^2}{2cd}。$$

在一般位形下, $R_9 R_{10} R_{11}$ 运动支链的运动螺旋系可以表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_9 &= [l_9, m_9, n_9; 0, 0, 0] \\ \mathcal{S}_{10} &= [l_{10}, m_{10}, n_{10}; 0, 0, 0] \\ \mathcal{S}_{11} &= [l_{11}, m_{11}, n_{11}; 0, 0, 0] \end{aligned}$$

根据反螺旋定理,计算得到运动支链 $R_9 R_{10} R_{11}$ 对末端杆件 CO 的约束螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}'_{1,1} = [1, 0, 0; 0, 0, 0] \\ \mathcal{S}'_{2,1} = [0, 1, 0; 0, 0, 0] \\ \mathcal{S}'_{3,1} = [0, 0, 1; 0, 0, 0] \end{cases} \quad (1)$$

即运动支链 $R_9 R_{10} R_{11}$ 对杆件 CO 的约束螺旋系为3个线性无关且轴线汇交于一点的线矢力。

UPRR 运动支链可由 $R_1 R_2 P_3 R_4 R_{12}$ 运动支链代替。由于运动支链末端始终在 O 点,因此, $R_1 R_2 P_3 R_4 R_{12}$ 运动支链的运动螺旋系可以表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_1 &= [1, 0, 0; 0, 0, 0] \\ \mathcal{S}_2 &= [0, \cos \theta_1, \sin \theta_1; 0, -\sin \theta_1, \cos \theta_1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \$_3 &= [0, 0, 0; \cos\psi, -\sin\theta_1 \sin\psi, \cos\theta_1 \sin\psi] \\ \$_4 &= [0, \cos\theta_1, \sin\theta_1; \sin\beta, -\cos\beta \sin\theta_1, \cos\beta \cos\theta_1] \\ \$_{12} &= [-\cos\beta, -\sin\beta \sin\theta_1, \sin\beta \cos\theta_1; 0, 0, 0] \end{aligned}$$

根据反螺旋定理, 计算得到 R1R2P3R4R12 运动支链对末端杆件 CO 的约束螺旋系为

$$\$_{1,2}^r = [0, \cos\theta_1, \sin\theta_1; 0, 0, 0] \tag{2}$$

即运动支链 R1R2P3R4R12 对杆件 CO 的约束螺旋系为过原点与 $R2$ 平行的线矢力。

RPUR 运动支链可由 R5P6R7R8R12 运动支链代替。R5P6R7R8R12 运动支链的运动螺旋系可以表示为

$$\begin{aligned} \$_5 &= [1, 0, 0; 0, 1, 0] \\ \$_6 &= [0, 0, 0; 0, \sin\delta, \cos\delta] \\ \$_7 &= [1, 0, 0; 0, \cos\alpha, \sin\alpha] \\ \$_8 &= [0, \sin\alpha, -\cos\alpha; 0, 0, 0] \end{aligned}$$

$$\$_{12} = [\sin\theta_8, \cos\alpha \cos\theta_8, \sin\alpha \cos\theta_8; 0, 0, 0]$$

根据反螺旋定理, 计算得到 R5P6R7R8R12 运动支链对末端杆件 CO 的约束螺旋系为

$$\$_{1,3}^r = [1, 0, 0; 0, 0, 0] \tag{3}$$

即运动支链 $R_5P_6R_7R_8R_{12}$ 对杆件 CO 的约束螺旋系为过原点与 $\$_{as}$ 平行的线矢力。

综合式(1)、(2)和式(3), 3 条运动支链对杆件 CO 施加的约束螺旋系为

$$\$_{1,1}^r = [1, 0, 0; 0, 0, 0]$$

$$\text{Rot}(\boldsymbol{a}_i, \theta_i) = \begin{bmatrix} f_x f_x (1 - \cos\theta_i) + \cos\theta_i & f_y f_x (1 - \cos\theta_i) - f_z \sin\theta_i & f_z f_x (1 - \cos\theta_i) + f_y \sin\theta_i \\ f_x f_y (1 - \cos\theta_i) + f_z \sin\theta_i & f_y f_y (1 - \cos\theta_i) + \cos\theta_i & f_z f_y (1 - \cos\theta_i) - f_x \sin\theta_i \\ f_x f_z (1 - \cos\theta_i) - f_y \sin\theta_i & f_y f_z (1 - \cos\theta_i) + f_x \sin\theta_i & f_z f_z (1 - \cos\theta_i) + \cos\theta_i \end{bmatrix}$$

在运动支链 $DEFO$ 中, 由于构成三角形 EFO , 在静止坐标系下, 杆件 OF 的姿态可以表示为

$$[OF]_{R0}^{DEFO} = \text{Rot}(\boldsymbol{a}_1, \theta_1) [OF]_{R0}^0$$

假设转动副 R11 通过转动副 R12 与 $DEFO$ 支链末端相连, 转动副 R11 轴线可以表示为

$$[\boldsymbol{a}_{11}]_{R0}^{DEFO} = \text{Rot}(\boldsymbol{a}_{12}, \theta_{12}) \text{Rot}(\boldsymbol{a}_1, \theta_1) [\boldsymbol{a}_{11}]_{R0}^0$$

由此进一步得到

$$[OF]_{R0}^{DEFO} = \begin{bmatrix} -\cos\beta \\ -\sin\beta \sin\theta_1 \\ \sin\beta \cos\theta_1 \end{bmatrix}$$

$$[\boldsymbol{a}_{11}]_{R0}^{DEFO} = \begin{bmatrix} \sin\beta \sin\theta_{12} \\ -\cos\theta_1 \cos\theta_{12} - \cos\beta \sin\theta_1 \sin\theta_{12} \\ -\cos\theta_{12} \sin\theta_1 + \cos\beta \cos\theta_1 \sin\theta_{12} \end{bmatrix}$$

在运动支链 GHO 内, 由于构成三角形 GHO , 在静止坐标系下, 转动副 R8 的轴线可以表示为

$$\begin{aligned} \$_{2,1}^r &= [0, 1, 0; 0, 0, 0] \\ \$_{3,1}^r &= [0, 0, 1; 0, 0, 0] \\ \$_{1,2}^r &= [0, \cos\theta_1, \sin\theta_1; 0, 0, 0] \\ \$_{1,3}^r &= [1, 0, 0; 0, 0, 0] \end{aligned}$$

因此, 杆件 CO 的运动螺旋系为

$$\begin{aligned} \$_1^m &= [1, 0, 0; 0, 0, 0] \\ \$_2^m &= [0, 1, 0; 0, 0, 0] \\ \$_3^m &= [0, 0, 1; 0, 0, 0] \end{aligned}$$

由此可知, 在 RRR - UPRR - RPUR 并联机构中, 以 CO 作为并联机构的动平台, 可以实现绕球心 O 的 3 个转动自由度运动。

2 球面转动并联机构运动学求解

利用杆件在多运动支链相互约束下运动唯一约束条件, 首先推导杆件 OF 的运动关系式, 继而推导动平台 CO 的运动学关系。为方便标记, 运动支链 R1R2P3R4R12, R9R10R11, R5P6R7R8R12 分别用符号 $DEFO$ 、 $ABCO$ 和 GHO 代替。

2.1 运动支链杆件运动求解

以转动副 R9R10R11 汇交点为原点 O , 以 $R1$ 轴为 X 轴, 以 $R9$ 轴为 Z 轴, 建立静止坐标系 $OXYZ$, 记做 $R0$ 。

根据姿态变换矩阵关系可知, 连杆的姿态可以用转动副的转角和方向决定^[17]

$$[\boldsymbol{a}_8]_{R0}^{HFO} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin\alpha \\ -\cos\alpha \end{bmatrix}$$

假设杆件 OF 与运动支链 GHO 相连, 杆件 OF 的姿态可表示为

$$[OF]_{R0}^{GHO} = \text{Rot}(\boldsymbol{a}_8, \theta_8) [OF]_{R0}^0$$

进一步写出

$$[OF]_{R0}^{GHO} = \begin{bmatrix} \sin\theta_8 \\ \cos\alpha \cos\theta_8 \\ \sin\alpha \cos\theta_8 \end{bmatrix}$$

在运动支链 $ABCO$ 内, 转动副 R10 的轴线可以表示为

$$[\boldsymbol{a}_{10}]_{R0}^{ABCO} = \text{Rot}(\boldsymbol{a}_9, \theta_9) [\boldsymbol{a}_{10}]_{R0}^0$$

由此得到

$$[\boldsymbol{a}_{10}]_{R0}^{ABCO} = [\cos\theta_9 \quad \sin\theta_9 \quad 0]^T$$

假设杆件 OF 与运动支链 $ABCO$ 相连, 杆件 OF 的姿态可以表示为

$$[OF]_{R0}^{ABCO} = Rot(a_{12}, \theta_{12}) Rot(a_{11}, \theta_{11}) Rot(a_{10}, \theta_{10}) \cdot Rot(a_9, \theta_9) [OF]_{R0}^0$$

2.2 并联机构约束关系下运动求解

2.2.1 杆件 OF 运动求解

当3条运动支链组成并联机构后,杆件 OF 运动应一致,建立约束方程

$$[OF]_{R0}^{DEFO} = [OF]_{R0}^{GHO} = [OF]_{R0}^{ABCO} \tag{4}$$

根据式(4),得到

$$\begin{bmatrix} -\cos\beta & -\sin\beta\sin\theta_1 & \sin\beta\cos\theta_1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \sin\theta_8 & \cos\alpha\cos\theta_8 & \sin\alpha\cos\theta_8 \end{bmatrix}^T \tag{5}$$

由于运动支链 R9R10R11R12 具有多个被动运动副,对杆件 OF 没有约束力,因此约束关系无效。

2.2.2 动平台 CO 运动求解

由于转动副 R11、R10 之间夹角为 $\frac{\pi}{2}$,建立约束方程

$$[a_{11}]_{R0}^{DEFO} \cdot [a_{10}]_{R0}^{ABCO} = 0 \tag{6}$$

根据式(5),建立方程

$$\cos\theta_{12}\sin\theta_9\cos\theta_1 = \sin\theta_{12}(\cos\theta_9\sin\beta - \cos\beta\sin\theta_1\sin\theta_9) \tag{7}$$

进一步求解等式(5)、(7),得到动平台 CO 的运动学方程

$$\begin{cases} \theta_1 = \alpha - \frac{\pi}{2} \\ \theta_8 = \beta - \frac{\pi}{2} \\ \theta_{12} = \arctan \frac{\cos\theta_1\sin\theta_9}{\cos\theta_9\sin\beta - \cos\beta\sin\theta_1\sin\theta_9} \end{cases} \tag{8}$$

其中 $\cos\theta_9\sin\beta - \cos\beta\sin\theta_1\sin\theta_9 \neq 0$

由于杆件 OF 与转动副 R12 轴线重合,根据上述推导可知,动平台 CO 具有绕 R1、R8、R12 的3个

转动自由度,并且绕 R1 轴和绕 R8 轴的转动自由度分别由移动副 P6 和 P3 驱动,机构具有完全解耦的2个转动自由度。

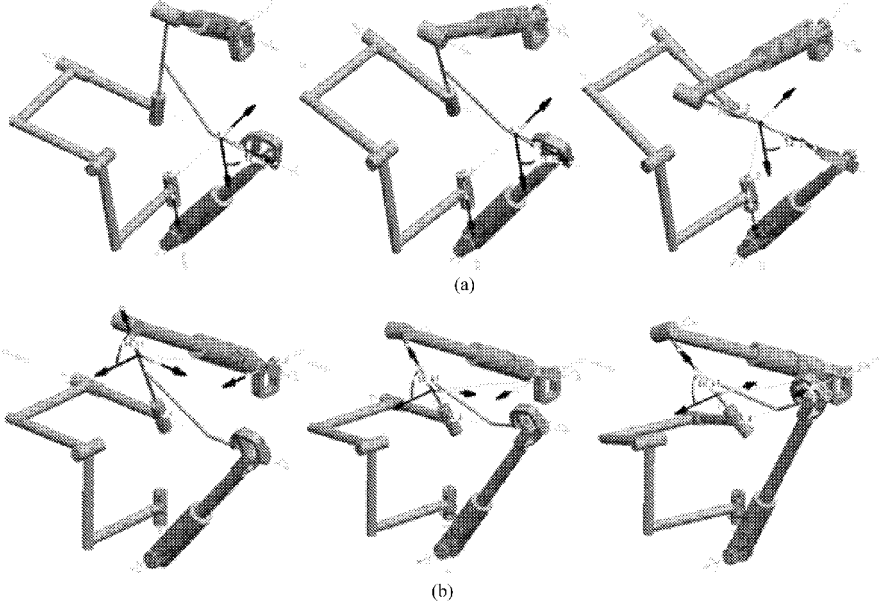
Mathematica 软件计算球面转动并联机构运动学模型结果见表1。揭示球面转动并联机构绕 R12 轴转动自由度与绕 R1、R8 转动自由度弱耦合。

表1 RRR – UPRR – RPUR 并联机构运动算例
Tab.1 Mathematic examples of kinematics of RRR – UPRR – RPUR parallel manipulator

序号	L_3 /cm	L_6 /cm	θ_9 /(°)	α /(°)	β /(°)	θ_1 /(°)	θ_8 /(°)	θ_{12} /(°)
1	56.08	56.08	0	90	90	0	0	0
2	56.08	48.08	0	74.39	90	-15.61	0	0
3	66.08	56.08	0	90	113.33	0	23.33	0
4	48.08	48.08	8	74.39	74.39	-15.61	-15.61	7.92
5	66.08	48.08	30	74.39	113.33	-15.61	23.33	29.56
6	66.08	48.08	-15	74.39	113.33	-15.61	23.33	-15.23

为验证 RRR – UPRR – RPUR 并联机构具有绕球心的3个解耦的转动自由度,定义并联机构的主要参数 ($c = 43\text{ cm}$, $d = 36\text{ cm}$, $l_{OA} = l_{OB} = l_{OC} = 30\text{ cm}$),利用 ProE 软件对 RRR – UPRR – RPUR 并联机构进行实体建模,通过运动仿真功能模拟机构的运动情况,如图2所示。

仿真结果表明,RRR – UPRR – RPUR 并联机构绕 R1 轴转角 θ_1 仅由移动副 P6 决定,绕 R8 轴转角 θ_8 仅由移动副 P3 决定,主动副 R9 对输出角度 θ_1 、 θ_8 无影响;绕 R12 的转角 θ_{12} 由3个主动副、P6、R9 共同决定;由此可见,RRR – UPRR – RPUR 并联机构具有3个解耦转动自由度,运动学关系输入输出简单,有利于实现实时控制和高精度运动轨迹。



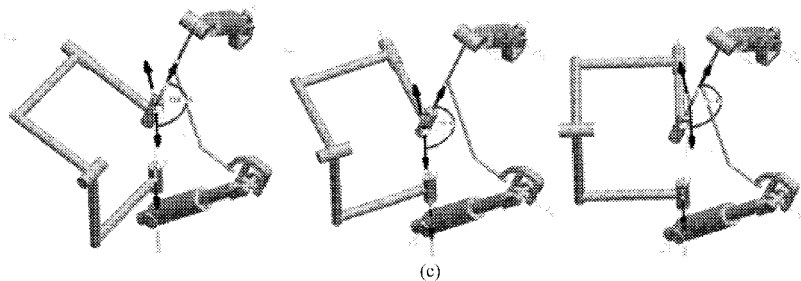


图2 并联机构解耦运动仿真

Fig. 2 Decoupled spherical motion simulation of parallel mechanism

- (a) 主动副 L_6 保持不变, L_3, θ_9 变化条件下, 转角 α 保持不变 (b) 主动副 L_3 保持不变, L_6, θ_9 变化条件下, 转角 β 保持不变
(c) 主动副 L_3, L_6 保持不变, θ_9 变化条件下, 杆件 OE 姿态保持不变

3 结论

(1) 提出了一种运动解耦的球面转动并联机构。机构具有绕球心的 3 个转动自由度, 其中 2 个转动自由度完全独立, 且分别仅由单个主动副驱动控制, 具有 2 个完全解耦的转动自由度。

(2) 通过判断球面转动并联机构一般位姿下运动能力, 确定机构具有连续的 3 个转动自由度; 建立了解耦球面转动并联机构运动学正解的解析算法。

(3) 该机构的转动自由度非绕固定轴转动, 而是绕与动平台固连坐标系的坐标轴分别转动。

参 考 文 献

- Alizade R I, Tagiyev N R, Duffy J. A forward and reverse displacement analysis of an in-parallel spherical manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 1994, 29(1): 125 ~ 137.
- Agrawal S K, Desmier G, Li S. Fabrication and analysis of a novel 3-dof parallel wrist mechanism[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1995, 117(2): 343 ~ 345.
- Gosselin C, Sefrioui J, Richard M J. On the direct kinematics of general spherical 3-DOF parallel manipulator [C]//Proc. of ASME Mech. Conf., 1992: 7 ~ 10.
- Temei Li, Shahram Payandeh. Design of spherical parallel mechanisms for application to laparoscopic surgery [J]. Robotica, 2002, 20(2): 133 ~ 138.
- Raffaele Di Gregorio. A new family of spherical parallel manipulators[J]. Robotica, 2002, 20(4): 353 ~ 358.
- Zoppi M, Molfino R. ArmillEye: flexible platform for underwater stereo vision[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2007, 129(8): 808 ~ 815.
- Deidda R, Mariani A, Ruggiu M. On the kinematics of the 3-RRUR spherical parallel manipulator [J]. Robotica, 2010, 28: 821 ~ 832.
- Javad Enferadi, Alireza Akbarzadeh Tootoonchi. A novel spherical parallel manipulator: forward position problem, singularity analysis, and isotropy design[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(12): 2 204 ~ 2 216.
- 李秦川, 陈欢欢, 李昉, 等. 3- $P_C(RR)_N$ 球面三自由度并联机构的运动学分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(11): 1 280 ~ 1 285.
- Li Qinchuan, Chen Huanhuan, Li Yi, et al. Kinematics analysis of a 3-dof 3- $P_C(RR)_N$ spherical parallel manipulator[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(11): 1 280 ~ 1 285. (in Chinese)
- 吴伟国, 邓喜君, 蔡鹤皋, 等. 新型 PITCH-ROLL-YAW 关节机构研究[J]. 高技术通讯, 1995, 5(5): 36 ~ 39.
- Wu Weiguo, Deng Xijun, Cai Hegao, et al. Study of a new PITCH-ROLL-YAW joint mechanism[J]. High Technology Letters, 1995, 5(5): 36 ~ 39. (in Chinese)
- 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)
- 杭鲁滨, 王彦, 吴俊, 等. 基于拓扑解耦准则的球面并联机构解耦条件研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 28 ~ 32.
- Hang Lubin, Wang Yan, Wu Jun, et al. Study on the decoupling conditions of the spherical parallel mechanism based on the criterion for topologically decoupled parallel mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 28 ~ 32. (in Chinese)

- pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9):209~213. (in Chinese)
- 5 Xu Bing, Yang Jian, Yang Huayong. Comparison of energy-saving on the speed control of the VVVF hydraulic elevator with and without the pressure accumulator[J]. Mechatronics, 2005,15(10):1 159~1 174.
- 6 闻德生,吕世君,刘晓晨,等. 等宽双定子泵和马达的原理研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(11):1 840~1 844. Wen Desheng, Lü Shijun, Liu Xiaochen, et al. Theoretic research on variable displacement of equal-width double-stators pump and motor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008,40(11):1 840~1 844. (in Chinese)
- 7 燕山大学. 等宽曲线双定子滚柱泵:中国, 02144406.4 [P]. 2003-03-19.
- 8 侯清泉,赵存友. 液压缸差动连接时压力的分析研究与仿真[J]. 煤矿机械,2008,29(1):47~48. Hou Qingquan, Zhao Cunyou. Pressure research and simulation of differential cylinder [J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(1):47~48. (in Chinese)
- 9 王积伟,章宏甲,黄谊. 液压传动[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2007:180~185.
- 10 闻德生,张勇,王志力,等. 三作用多泵多马达输出转速和转矩的理论分析[J]. 西安交通大学学报,2011,45(3):81~85. Wen Desheng, Zhang Yong, Wang Zhili, et al. Rotating speed and torque of triple-acting multi-pump and multi-motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011,45(3):81~85. (in Chinese)
- 11 Wen D S, Wang Z L, Gao J, et al. Output speed and flow of double-acting double-stator multi-pumps and multi-motors [J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering, 2011,12(4):301~309.
- 12 闻德生,高俊,王志力,等. 双作用多泵多马达传动中马达输出转矩分析[J]. 中国机械工程,2010,21(23):2 836~2 838. Wen Desheng, Gao Jun, Wang Zhili, et al. Output torque of double-acting multi-pump and multi-motor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010,21(23):2 836~2 838. (in Chinese)
- 13 Wen Desheng. Theoretical analysis of output speed of multi-pump and multi-motor driving system[J]. Science China: Technological Sciences, 2011,54(4):992~997.
-

(上接第206页)

- 13 Herve J M. Uncoupled actuation of pan-tilt wrists [J]. IEEE Transactons on Robotics, 2006, 22(1):56~64.
- 14 金振林,曹舜,高峰. 新型机器人肩关节及其运动学分析[J]. 中国机械工程,2009, 20(14):1 639~1 641. Jin Zhenlin, Cao Shun, Gao Feng. Design and kinematics analysis of a novel robot shoulder joint[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(14):1 639~1 641. (in Chinese)
- 15 崔冰艳,金振林. 农业机器人新型肘关节的静力学性能分析[J]. 农业工程学报,2011,27(3):122~125. Cui Bingyan, Jin Zhenlin. Analysis of statics performance for a novel elbow joint of agricultural robot[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(3):122~125. (in Chinese)
- 16 张帆,杨建国,李蓓智,等. 一种全局各向同性的三自由度转动并联机构[J]. 中国机械工程,2008, 19(13):1 552~1 555. Zhang Fan, Yang Jianguo, Li Beizhi, et al. An full-isotropic spherical three-DOF parallel mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(13):1 552~1 555. (in Chinese)
- 17 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社,2000:37~42.