

基于支链驱动理论的解耦球面转动并联机构型综合*

张帆¹ 张丹²

(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, 加拿大)

【摘要】 针对解耦并联机构与串联机构的运动学相似性, 提出一种解耦球面转动并联机构的支链驱动理论, 将解耦并联机构分为基本运动支链和驱动支链。在此基础上, 推导得到球面转动并联机构运动解耦的拓扑条件, 并利用该条件综合得到多种结构新颖的球面转动并联机构。经运动学分析表明: 此类机构具有3个独立的转动自由度, 且每个自由度仅由单个驱动器控制, 实现了球面转动并联机构的运动解耦。

关键词: 并联机构 支链驱动 解耦运动 型综合

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)11-0195-05

Structural Synthesis of Decoupled Spherical Parallel Mechanism Based on Driven-chain Principle

Zhang Fan¹ Zhang Dan²

(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 L1H 7K4, Canada)

Abstract

Focused on the similarity between the kinematics of decoupled parallel mechanism and serial mechanism, a unique method of structural synthesis was presented, which was used to synthesize the decoupled parallel mechanism. The kinematic chains of decoupled parallel mechanism were consisted of by the basic kinematic chain and the driven-chains. The structural condition of decoupled spherical parallel mechanism was deduced, and a series of novel spherical parallel mechanism were synthesized. The kinematics analysis verified that the mechanism had three fully decoupled rotational DOFs, and each rotational DOF was driven by a single actuator.

Key words Parallel mechanism, Driven-chain principle, Decoupled motion, Structural synthesis

引言

球面转动并联机构是指多条支链共同驱动动平台实现绕过球心任意轴线转动的并联机构, 它作为机器人的肩、腕关节, 具有电动机靠近基座、运动响应迅速的优点。目前已存在数十种形式各异的三自由度球面转动并联机构^[1-4], 但由于运动学、动力学耦合, 导致机构的工作空间内存在主动、被动奇异位型^[4-5], 使球面转动并联机构的轨迹规划和控制方面较为困难。

为降低球面并联机构的耦合度, 文献[6~10]报道了耦合度较低的球面转动并联机构。文献[11]综合得到多种形式的解耦两自由度机器人手腕。文献[12]基于螺旋理论的转动机构综合方法综合出解耦的两自由度转动并联机构。文献[13]利用线性变换理论法综合出全局各向同性的三自由度转动并联机构, 但在机构中含有球铰链, 影响机构的运动精度。目前解耦的球面转动并联机构机型较匮乏, 解耦球面转动并联机构的综合目前还主要依据研究者的经验。

收稿日期: 2011-07-08 修回日期: 2011-09-12

* 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资助项目(10dz2250800)

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

本文以解耦并联机构与串联机构运动学相似性为切入点,提出一种特殊的解耦并联机构模型:将提供自由度的串联支链作为基本运动支链,利用支链对基本运动支链的运动副提供驱动力。在此基础上,根据解耦并联机构的定义,推导出球面转动并联机构解耦的拓扑条件,并综合得到多种结构新颖、完全解耦的球面转动并联机构。

1 解耦并联机构的支链驱动综合理论

串联机器人通常采用电动机直接驱动关节,对于运动解耦的串联机构而言,机构运动的输入输出方程为

$$t_i = f(q_i) \quad (i=1, 2, \dots, F) \quad (1)$$

式中 q_i ——机构运动输入量

t_i ——机构运动输出量

并联机构动平台通过多个运动支链与基座相连,动平台输出运动的驱动力来自运动支链末端。具有 F 个自由度的并联机构的运动学方程为^[14]

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{S}_{a,1}^T / (\mathcal{S}_{a,1}^T \mathcal{S}_{g1,1}) \\ \mathcal{S}_{a,2}^T / (\mathcal{S}_{a,2}^T \mathcal{S}_{g1,2}) \\ \vdots \\ \mathcal{S}_{a,F}^T / (\mathcal{S}_{a,F}^T \mathcal{S}_{g1,F}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{t}_1 \\ \dot{t}_2 \\ \vdots \\ \dot{t}_F \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\mathcal{S}_{a,i}$ 和 $\mathcal{S}_{g1,i}$ ($i=1, 2, \dots, F$) 分别表示第 i 运动支链的末端驱动力螺旋和主动运动螺旋。互易积 $\mathcal{S}_{a,i}^T \mathcal{S}_{g1,i}$ 表示驱动力对主动运动螺旋作功的数值 ($\mathcal{S}_{a,i}^T$ 表示驱动力螺旋的倒置)。

根据解耦并联机构的定义^[15]:解耦并联机构自由度解耦,并且单个输出自由度仅由单个输入量控制。式(2)可以进一步写作

$$\begin{bmatrix} \mathcal{S}_{t_1} \\ \mathcal{S}_{t_2} \\ \vdots \\ \mathcal{S}_{t_F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 / [\mathcal{S}_{a,1}^T]^{t_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2 / [\mathcal{S}_{a,2}^T]^{t_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_F / [\mathcal{S}_{a,F}^T]^{t_F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{S}_{q_1} \\ \mathcal{S}_{q_1} \\ \vdots \\ \mathcal{S}_{q_1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $k_i = \mathcal{S}_{a,i}^T \mathcal{S}_{g1,i}$, $[\mathcal{S}_{a,i}^T]^{t_i}$ 表示力螺旋 $\mathcal{S}_{a,i}^T$ 在自由度 t_i 方向上分量。式(3)表明,解耦并联机构的驱动力正交解耦,并且单个驱动力仅对单个自由度作功。

将式(3)与式(1)对比可知,解耦并联机构与解耦串联机构运动学相似,都具有解耦的输出自由度,但解耦并联机构自由度的驱动力由运动支链提供,而串联机构自由度的驱动力由关节电动机提供。

因此,构建一种解耦并联机构的支链驱动模型,如图1所示。动平台通过基本运动支链与基座相

连,基本运动支链由运动副串联构成,支链的自由度与解耦并联机构自由度相同。将基本运动支链中具有与机构相同自由度的运动副称为基本关节。第 $i-1$ ($i=2, \dots, F$) 条驱动支链为第 i 基本关节提供驱动力,并且第 $i-1$ 条驱动支链与基本运动支链的第 $1 \sim i$ 个基本关节形成封闭回路。

根据式(3)推导出的并联机构运动解耦的条件,解耦并联机构的支链驱动模型应满足以下条件:

(1)基本运动支链的自由度与解耦并联机构自由度相同,基本运动支链内基本关节相互正交。

(2)第 $i-1$ 条驱动支链仅对第 i 基本关节作功;第 $i-1$ 条驱动支链的自由度不少于基本运动支链第 $1 \sim i$ 个基本关节的自由度之和。

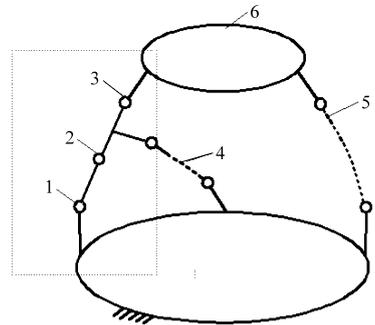


图1 解耦三自由度并联机构的支链驱动模型简图

Fig.1 Chain-driven model of decoupled 3-DOF parallel mechanism

1. 第1基本关节 2. 第2基本关节 3. 第3基本关节 4. 第1驱动支链 5. 第2驱动支链 6. 动平台

2 球面转动并联机构拓扑解耦的条件

球面转动机构具有3个转动自由度。由于机构基本运动支链的自由度与机构自由度相同,因此基本运动支链可以由3个轴线汇交并正交的转动副 R1、R2、R3 构成。运动副 R1、R2、R3 也被称为基本关节 R1、R2、R3,它们的运动螺旋为 \mathcal{S}_1 、 \mathcal{S}_2 、 \mathcal{S}_3 。基本关节 R1 靠近基座,由安装在基座上的电动机直接驱动。R2、R3 分别由驱动支链1、驱动支链2提供主动力,如图2所示。

根据解耦并联机构的支链驱动模型应满足的条件,驱动支链1仅对基本关节 R2 作功,并且支链自由度不少于基本关节 R1、R2 的自由度之和。当驱动支链1具有2个转动自由度时,其中1个应与基本关节 R2 轴线相同,并为基本关节 R2 提供主动力,另1个转动自由度则需等效于基本关节 R1 的自由度。假设驱动支链1的2个转动自由度的运动螺旋分别记为 $\mathcal{S}_{1,1}$ 、 $\mathcal{S}_{2,1}$,根据转动运动的性质可知,在该条件下,驱动支链1的转动自由度的轴线应与基本关节 R1、R2 轴线分别重合,即

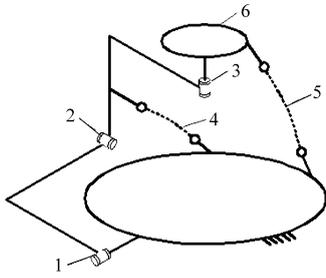


图 2 解耦球面转动并联机构的支链驱动模型简图

Fig. 2 Chain-driven model of chain-driven decoupled spherical parallel mechanism

- 1. 转动副 R1 2. 转动副 R2 3. 转动副 R3 4. 第 1 驱动支链
- 5. 第 2 驱动支链 6. 动平台

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{1,1} = \mathcal{S}_1 \\ \mathcal{S}_{2,1} = \mathcal{S}_2 \end{cases}$$

当驱动支链 1 具有 3 个转动自由度时,余下的 2 个转动自由度无法等效于绕 R2 的转动;而当驱动支链 1 具有 3 个以上的转动自由度时,主动副与被动副的运动螺旋线性相关,机构无法输出运动。因此,当驱动支链 1 具有 2 个以上的转动自由度时,不能作为 R2 的驱动支链。

同理可证,驱动支链 2 应具有 3 个转动自由度,其运动螺旋分别记为 $\mathcal{S}_{1,2}$ 、 $\mathcal{S}_{2,2}$ 、 $\mathcal{S}_{3,2}$,该驱动支链转动自由度的轴线应与基本关节 R1、R2、R3 的轴线分别重合,即

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{1,2} = \mathcal{S}_1 \\ \mathcal{S}_{2,2} = \mathcal{S}_2 \\ \mathcal{S}_{3,2} = \mathcal{S}_3 \end{cases}$$

综上所述,球面转动并联机构拓扑解耦的条件为:驱动支链中转动自由度的轴线应与形成封闭回路的基本关节的轴线分别重合。与移动并联机构的拓扑解耦条件相比,球面转动并联机构的拓扑解耦条件更加苛刻,因此解耦球面转动并联机构机型的数量少于解耦移动并联机构的数量。

3 支链驱动法型综合实例

假设需综合的解耦球面转动机构具有 R_x 、 R_{yoz} 、 R_M 转动自由度,由此可确定基本运动支链为 R_x 、

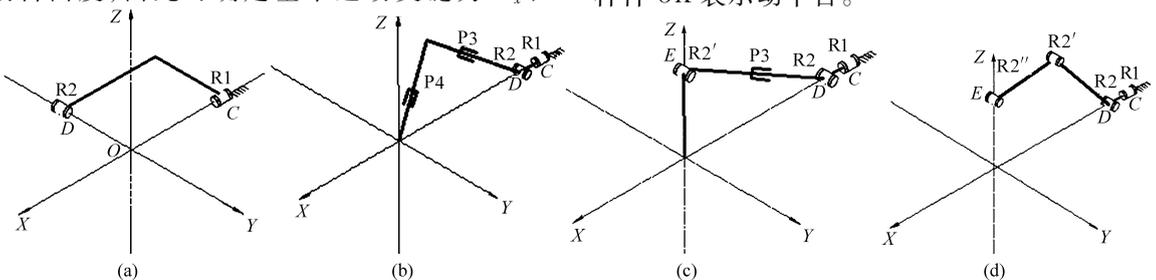


图 3 基本关节 R_{yoz} 的驱动支链

Fig. 3 Driven chain of basic joint R_{yoz}

R_{yoz} 、 R_M 转动副组成的支链。其中, R_x 将采用安装在基座上的电动机驱动, R_{yoz} 、 R_M 由驱动支链来提供主动力。

3.1 基本关节 R_{yoz} 的驱动支链

该驱动支链应具有 R_x 、 R_{yoz} 自由度,并且 R_{yoz} 是主动自由度。在初始位型下,驱动支链运动螺旋系的最简形式为

$$\mathcal{S}_{1,1} = [1, 0, 0; 0, 0, 0]$$

$$\mathcal{S}_{2,1} = [0, 1, 0; 0, 0, 0]$$

即具有 $R \perp R$ 结构,如图 3a 所示。

由于转动自由度可由同向的转动自由度及与 2 个垂直方向的移动自由度代替,将 $\mathcal{S}_{2,1}$ 用两移动一转动运动副代替,驱动支链的运动螺旋系还可以写作

$$\mathcal{S}_{1,1} = [1, 0, 0; 0, 0, 0]$$

$$\mathcal{S}_{2,1} = [0, 1, 0; 0, 0, 1]$$

$$\mathcal{S}_{3,1} = [0, 0, 0; 0, c_1, d_1]$$

$$\mathcal{S}_{4,1} = [0, 0, 0; 0, c_2, d_2]$$

即具有 $R \perp R \perp P \perp P$ 结构,如图 3b 所示。

将 $\mathcal{S}_{2,1}$ 和 $\mathcal{S}_{4,1}$ 线性组合,得到新的运动螺旋 $\mathcal{S}_{22,1}$,代替原有的 $\mathcal{S}_{4,1}$,即

$$\mathcal{S}_{22,1} = \mathcal{S}_{2,1} + \mathcal{S}_{4,1} = [0, 1, 0; 0, m_1, n_1]$$

因此,运动支链具有 $R \perp R \perp P \perp R$ 等结构,如图 3c 所示。

再将 $\mathcal{S}_{2,1}$ 和 $\mathcal{S}_{3,1}$ 线性组合,得到新的运动螺旋 $\mathcal{S}_{23,1}$,代替原有的 $\mathcal{S}_{3,1}$,即

$$\mathcal{S}_{23,1} = \mathcal{S}_{2,1} + \mathcal{S}_{3,1} = [0, 1, 0; 0, m_2, k_2]$$

因此,运动支链具有 $R \perp R // R // R$ 等结构,如图 3d 所示。

3.2 基本关节 R_M 的驱动支链

基本关节 R_M 的驱动支链具有 R_x 、 R_{yoz} 、 R_M 自由度,根据上述方法,综合得到支链 $R \perp R \perp R \perp P \perp P$ 、 $R \perp R \perp R \perp P \perp R$ 、 $R \perp R \perp R // R // R$ 等结构。

将基本运动支链的基本关节的输出端与驱动支链相连,构成多种解耦球面并联机构,如图 4 所示。图中的万向铰链已分解为 2 个轴线垂直的转动副,杆件 OK 表示动平台。

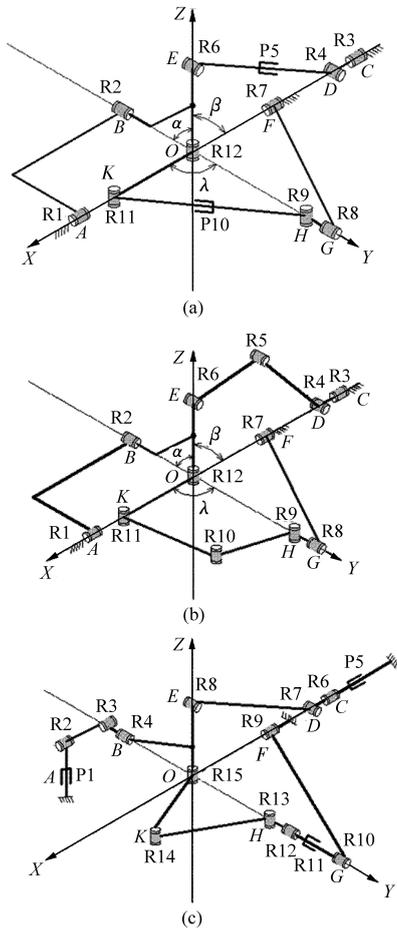


图4 球面转动并联机构的运动学模型
 Fig.4 Prototype of decoupled parallel mechanism
 (a) RRR-UPRR-RUPR 球面转动并联机构
 (b) RRR-URRR-RURR 球面转动并联机构
 (c) PRUR-PURR-RRPUR 球面转动并联机构

4 RRR-UPRR-RUPR 机构运动学分析

在如下推导过程中,为方便标记,运动支链 R1R2R12、R3R4P5R6R12、R7R8R9P10R11 分别用符号 ABO、CDEO 和 FGHK 代替。

以转动副 R1、R2、R12 汇交点为原点 O,以 R1 轴为 X 轴,以 R2 初始位置时轴线为 Y 轴,建立静止坐标系 OXYZ,记作 R0。转动副 Ri 轴线的单位矢量用 ai 表示,其关节变化量用 θi 表示,移动副 P5、P10 长度分别记为 L5、L10,线段 OE、OK 长度为 a, OD、OH 长度为 b,角度 β = ∠DOE = arccos $\frac{a^2 + b^2 - L_5^2}{2ab}$,

$$\lambda = \angle HOK = \arccos \frac{a^2 + b^2 - L_{10}^2}{2ab}。$$

由于 O 点位置始终不变,计算得到 ABO 运动支

链末端杆件的运动螺旋

$$[OK]_{R0}^{ABO} = \text{Rot}(a_{12}, \theta_{12}) \text{Rot}(a_2, \theta_2) \text{Rot}(a_1, \theta_1) [OK]_{R0}^0$$

CDEO 运动支链末端杆件的运动螺旋

$$[OK]_{R0}^{CDEO} =$$

$$\text{Rot}(a_{12}, \theta_{12}) \text{Rot}(a_2, \beta - \frac{\pi}{2}) \text{Rot}(a_3, \theta_3) [OK]_{R0}^0$$

FGHK 运动支链末端的运动螺旋系可以表示为

$$[OK]_{R0}^{FGHK} =$$

$$\text{Rot}(a_{12}, \lambda - \frac{\pi}{2}) \text{Rot}(a_8, \theta_8) \text{Rot}(a_7, \theta_7) [OK]_{R0}^0$$

基于机械约束关系,动平台 OK 运动应该一致,建立约束方程

$$[OK]_{R0}^{ABO} = [OK]_{R0}^{CDEO} = [OK]_{R0}^{FGHK} \quad (4)$$

根据机构的拓扑结构特点,存在

$$a_1 = a_3 = a_7 \quad a_2 = a_8$$

对式(4)进一步求解,得到动平台 OK 的运动学关系

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_3 = \theta_7 \\ \theta_2 = \beta - \frac{\pi}{2} \\ \theta_{12} = \lambda - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5)$$

根据上述推导可知,动平台 OK 具有 R1、R2、R12 转动自由度,3 个转动自由度完全独立,并且每个转动自由度仅由单个主动副驱动,机构是解耦的三转动自由度并联机构。

5 结论

(1) 根据解耦并联机构与串联机构在运动学上的相似性,提出一种解耦并联机构的支链驱动理论。与已有的线性变换等综合方法相比,该综合方法能够综合出具有完全解耦的球面转动并联机构,解决了以往完全解耦球面转动并联机构综合依赖个人经验的问题。

(2) 在支链驱动理论中,基本运动支链是由基本关节依次链接构成,因此基本运动支链属于串联支链,因此综合得到的解耦球面转动并联机构的转动自由度是绕流动坐标系的坐标轴转动,而非绕静止坐标系的 3 个坐标轴转动。

(3) 经过运动学验证,综合得到的球面转动并联机构具有解耦的球面转动运动,证实了支链驱动理论的正确性和有效性。

参 考 文 献

1 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.

- 2 王洋, 黄田, 倪雁冰, 等. 基于正交球面并联机构的新型数控转台姿态求解及实时控制[J]. 自然科学进展, 2002, 12(7): 726 ~ 731.
Wang Yang, Huang Tian, Ni Yanbing, et al. Orthogonal spherical parallel mechanism based on the new NC rotary table and solve the real-time control of posture[J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(7): 726 ~ 731. (in Chinese)
- 3 Raffaele Di Gregorio. A new family of spherical parallel manipulators[J]. Robotica, 2002, 20(4): 353 ~ 358.
- 4 李秦川, 陈欢欢, 李跌, 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)
- 5 Bonev I A, Chablat D, Wenger P. Working and assembly modes of the agile eye[C] // Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Florida, 2006: 2 317 ~ 2 322.
- 6 吴伟国, 邓喜君, 蔡鹤皋, 等. PITCH - YAW - ROLL 全方位关节机构运动学分析与控制[J]. 高技术通讯, 1995, 5(5): 36 ~ 39.
Wu Weiguo, Deng Xijun, Cai Hegao, et al. Study of a new PITCH - YAW - ROLL joint mechanism[J]. High Technology Letters, 1995, 5(5): 36 ~ 39. (in Chinese)
- 7 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)
- 8 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)
- 9 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)
- 10 张帆, 张丹, 杨建国. RRR - UPRR - RPUR 球面转动并联机构运动学分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 202 ~ 206, 224.
Zhang Fan, Zhang Dan, Yang Jianguo. Kinematics analysis of RRR - UPRR - RPUR spherical parallel manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 202 ~ 206, 224. (in Chinese)
- 11 Herve J M. Uncoupled actuation of pan-tilt wrists[J]. IEEE Transactons on Robotics, 2006, 22(1): 56 ~ 64.
- 12 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: 技术科学, 2011, 41(5): 585 ~ 591.
Zeng D X, Huang Z. Type synthesis of the rotational decoupled parallel mechanism based on screw theory[J]. Sci. China Tech. Sci., 2011, 41(5): 585 ~ 591. (in Chinese)
- 13 Grigore Gogu. Fully-isotropic three-degree-of-freedom parallel wrists[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007: 895 ~ 900.
- 14 Joshi S, Tsai L W. Jacobian analysis of limited-DOF parallel manipulators[J]. ASME J. Mech. Des., 2002, 124(2): 254 ~ 258.
- 15 Kong Xianwen, Gosselin C M. Type synthesis of input-output decoupled parallel manipulators[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2004, 28(2A): 185 ~ 196.