

## Application of Parallel Manipulator to Bionic Elbow Joints

XIONG Zhuanglin, ZHAO Guowei

School of Astronautics, Beihang University, Beijing, China

xzlxaj02@163.com

XIONG Zhuanglin

**Keywords:** Parallel Manipulator; Input Bionic; Screw Theory; Living Prototype

**Abstract.** Considering the living prototype of elbow joint and the characteristics of serial & parallel manipulators, this paper presents a parallel manipulator PPS-UR to the design of bionic joint, and gains a new bionic design theory. Choice of a new configuration, mobility, singularity and input selection of this mechanism are analyzed via screw theory. Comparing the different positions of actuator and combining with the input bionic, to choose the reasonable actuate position, shows the feasibility of the approach.

## 并联机构在仿生肘关节中的应用

熊壮林, 赵国伟

北京航空航天大学宇航学院, 北京, 中国

xzlxaj02@163.com

熊壮林

**关键词:** 并联机构; 输入仿生; 螺旋理论; 生物原型

**中文摘要.** 考虑肘关节的生物原型, 以及串并联机构各自的特点, 将并联机构PPS-UR引入到仿生关节的设计中, 产生一种新的仿生设计理念。运用螺旋理论, 对该机构的构型选择、自由度、输入的选取进行了分析。对照不同的驱动位置并结合输入仿生, 选择合理的驱动位置, 说明该方法的可行性。

### 1. 引言

自1978年Hunt K. H.提出可以应用6自由度的Stewart平台机构作为机器人机构, 到经过90年代的研究热潮<sup>[1]</sup>, 并联机构已经在机床、医用机器人、装配生产线、空间对接等领域有了很大的应用<sup>[2,3,4,5]</sup>。特别是少自由度并联机构由于其结构简单、控制容易、造价低等特点, 目前已成为机器人领域的研究热点, 有着广阔的应用前景。而现有国内外仿生机体的本体构型几乎都是串联的构成方式, 在功能和形式上仿生水平较低, 与生物原型的实际构型有较大的差距, 不能完全满足实际需要<sup>[6]</sup>。与串联机构相比, 并联机构具有刚度大、误差小、精度高, 位置逆解求解简单等优点。在实用化的进程中, 各种新机构构型或新构型与传统机构构型的相互结合相互补充是一种发展的趋势, 将并联机构揉进仿生机构必将带来全新的发展。

对于机器人上肢中肘关节的设计多以单自由度转动副替代, 这种设计简单、易于控制, 并能在一定程度上完成现有的工作要求。但是单自由度的转动(沿驱动器的转动轴线)只是对肘关节的简单替代, 对于肘关节所能实现的前臂旋转运动则没有不能实现任何的描述。加

之串联肘关节驱动成为其上级驱动（肩关节驱动）的负载，增加了系统的惯性，降低了驱动能力，并且使肘关节传动的灵活性、稳定性受到了限制。而现有仿生关节对肘关节中桡尺关节两端（近、远侧）同时运动实现前臂的旋转运动的考虑则较少，即使有所考虑，在建模时也没有采用考虑此特点所预设的肘关节机构。再者考虑生物关节的运动都有肌肉的参加，可以达到省力、省能以及减少电动机设计容量，进而减少机构的负载及改善动力性能，因而提出了输入仿生的概念，即要求实现输入数目多于自由度数目的超确定输入。基于对仿生医学机械或真正的仿生机械的考虑，我们需要建立基于生物原型的关节模型，实现高水平的仿生。

John M.Hollerbach（1985）提出用2自由度关节机构代替肘关节<sup>[7]</sup>；Gosselin（1994）讨论了球面2自由度并联机器人可以用于2个转动自由度的任务<sup>[8]</sup>，（2005）进行了变尺寸2自由度机构的运动学及动力学分析，2自由度并联机构引起了很多人的关注。

结合生物原型并考虑采用并联机构可以克服串联式驱动所带来的刚度、误差积累等问题，以及在仿生机构中跨关节驱动的“天然合理性”<sup>[9]</sup>，采用一种并联机构用于肘关节的设计。与传统的单自由度转动肘关节只能实现屈伸运动相比，新机构从功能上更加逼近生物原型，使肘关节具有额状轴和垂直轴两个运动轴。使前臂在肘关节的运动下，可完成屈与伸、旋内与旋外运动。本文运用螺旋理论，对设计的仿生肘关节机构进行了自由度的计算和输入选取的分析。

## 2. 概念和原型描述

### 2.1 螺旋理论<sup>[10]</sup>

单位螺旋表示为  $\$ = (\mathbf{s} ; \mathbf{s}_0 + h\mathbf{s})$ ， $\mathbf{s}$  是沿螺旋轴线方向的单位矢量， $\mathbf{s}_0 = \mathbf{r} \times \mathbf{s}$  是矢量  $\mathbf{s}$  对原点的线矩， $\mathbf{r}$  是螺旋轴线上任意一点的位置矢量， $h$  是螺距。对于转动副， $h = 0$ ， $\$ = (\mathbf{s} ; \mathbf{s}_0)$ ；对于移动副， $h = \infty$ ， $\$ = (0 ; \mathbf{s})$ 。

当两个螺旋： $\$ _1 = (a_1 \ b_1 \ c_1 ; d_1 \ e_1 \ f_1)$ 、 $\$ _2 = (a_2 \ b_2 \ c_2 ; d_2 \ e_2 \ f_2)$  互易积为零时，即： $\$ _1 \otimes \$ _2 = a_1 d_2 + b_1 e_2 + c_1 f_2 + d_1 a_2 + e_1 b_2 + f_1 c_2 = 0$  称螺旋  $\$ _1$  和  $\$ _2$  互为反螺旋。反螺旋一般用  $\$ _i^r$  表示。

按性质分，约束反螺旋有3种，即力、力偶和力螺旋。

运动螺旋的反螺旋是结构约束，即力螺旋或力偶螺旋，表示了物体在三维空间受到的约束。对于运动支链，组成运动链的螺旋系的反螺旋可以看作是运动支链对物体运动的约束。

由于机构约束螺旋系是瞬时的，当机构发生运动时，机构约束螺旋系可能发生变化，相应的自由度也可能发生变化。因此需要验证约束螺旋系在机构发生运动前后是否保持一致，进而确定机构是否为瞬时机构。这可以通过由反螺旋系构成的矩阵  $D = [\$ _1 \ \$ _2 \ \dots \ \$ _n]^T$  的秩  $R(D)$  是否保持不变来验证。这样并联机构的自由度也可以表示为  $F = 6 - R(D)$ 。

并联机构输入的选取原理是：将选择的作为输入的所有主动副锁住后，计算所有分支对于运动平台发生的总的约束反螺旋系  $S$ ，如果总的动平台上的约束反螺旋系  $S$  的维数等于6，即自由度为零，则选择合理；否则为不合理。

若在输入运动副数等于自由度的情况下，机构的部分自由度没有得到控制或部分输入之间发生干涉，称为第二类输入干涉。尤其是在自由度大于等于2的机构中。当发生此种情况时，就需重新选择输入运动副，或者考虑超确定输入控制，再引入运动输入，使机构成为冗余输入机构<sup>[11]</sup>。

## 2.2 生物原型——肘关节

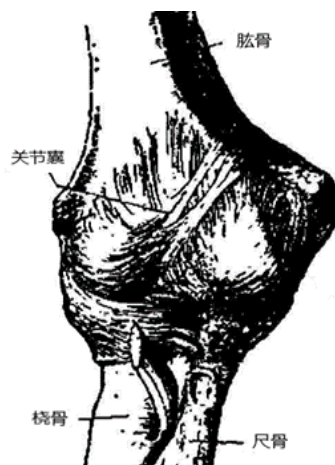


图1 肘关节的生物原型

人体的上肢一般至少有3个关节：肩关节、肘关节、腕关节。其中肘关节是人体惟一能够同时并灵活实现屈曲和旋内旋外两种复合运动的机构，称为肘关节运动复合体，它使人体上肢灵巧性大大优于其他动物<sup>[12]</sup>。肘关节是由肱骨远侧端、尺骨和桡骨近侧端构成，在结构上包括三个关节：肱尺关节、肱桡关节和桡尺近侧关节。这三个关节，共同包在一个关节囊内。正常有145°的屈伸范围，前臂可旋前80°，及旋后85°日常生活中的绝大多数动作可以在屈肘30°~130°和前臂100°(旋前50°至旋后50°)的旋转弧内完成<sup>[13]</sup>。

## 3. 机构模型的选择与自由度分析

针对肘关节的屈伸与旋内旋外复合运动，对其进行欧拉角的描述为 $(\alpha, \beta, 0)$ ，即可全面的描述肘关节的空间运动，如图2所示。

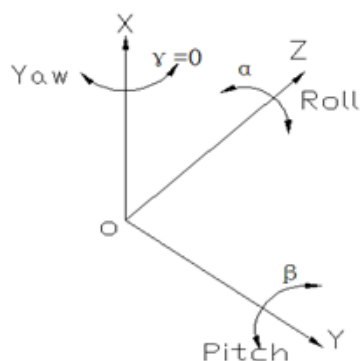


图2 肘关节的欧拉角表示

由于肘关节只存在两个轴线相交的转动，其运动螺旋是：

$$\$_1 = (0 \ 1 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0) \quad \$_2 = (0 \ 0 \ 1 ; 0 \ 0 \ 0)$$

受到4个约束。这4个约束螺旋可以通过观察获得：

$$\$_1^r = (1 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0) \quad \$_2^r = (0 \ 0 \ 0 ; 1 \ 0 \ 0)$$

$$\$_3^r = (0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 1 \ 0) \quad \$_4^r = (0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 1)$$

各个分支的约束螺旋系可以与肘关节的约束螺旋系相同，也可以视为轴关节约束螺旋系的子系。为求得各分支的约束力螺旋系，对上述4个约束螺旋进行线性组合：

$$\$_j = m_{j1}\$_1 + m_{j2}\$_2 + m_{j3}\$_3 + m_{j4}\$_4 \quad (j \text{ 为支链的数目})$$

之后求各个分支约束螺旋系的反螺旋  $\$_j \otimes \$_j^r = 0$ 。

若只是分为两支链，则有七种组合。对各种组合进行计算，考虑实际情况(生物原型中固有的优点——跨关节驱动)选择合适的支链数目,进而选择合适的机构构型，如图3。

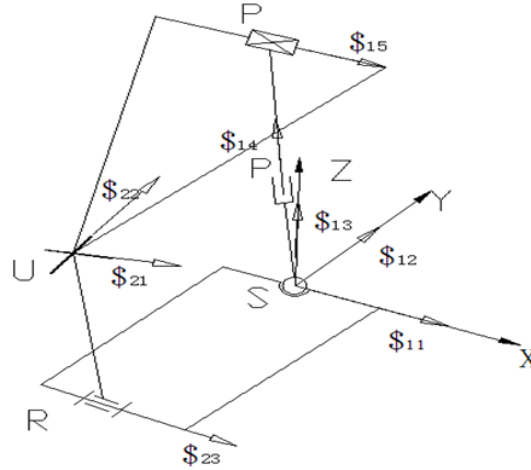


图3 PPS-UR

其螺旋为：

$$\begin{aligned} \$_{11} &= (1 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0) & \$_{12} &= (0 \ 1 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{13} &= (0 \ 0 \ 1 ; 0 \ 0 \ 0) & \$_{14} &= (0 \ 0 \ 0 ; a_{14} \ b_{14} \ c_{14}) \\ \$_{15} &= (0 \ 0 \ 0 ; 1 \ 0 \ 0) & \$_{21} &= (1 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ c_1) \\ \$_{22} &= (1 \ 0 \ 0 ; 0 \ b_{22} \ c_{22}) & \$_{23} &= (0 \ 1 \ 0 ; a_{23} \ 0 \ c_{23}) \end{aligned}$$

没有公共约束。

由互易积为零求得各分支的反螺旋为：

$$\begin{aligned} \$_{11}^r &= (0 \ -c_{14}/b_{14} \ 1 ; 0 \ 0 \ 0) \\ \$_{21}^r &= (0 \ -(c_{22}-c_{21})/b_{22} \ 1 ; -c_{21} \ -c_{23} \ 0) \\ \$_{22}^r &= (1 \ 0 \ 0 ; 0 \ -a_{23} \ 0) \\ \$_{23}^r &= (0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 1) \end{aligned}$$

如概念1.1中所述，需要验证此机构是否为连续机构。令  $D = [\$_{11} \ \$_{21} \ \$_{22} \ \$_{23}]^T$ ，求得  $R(D) = 4$ 。即作用在动平台上的4个反螺旋是线性无关的，机构约束螺旋系在运动前后没有发生变化。因此上述反螺旋系限制了3个移动和1个转动，使上平台有2个转动自由度，且具有连续运动，符合生物原型欧拉角的描述。

#### 4. 输入的选取

由前述计算知自由度为2，根据机构学的基本原理：机构所采取输入的数目要与机构的自由度数相等，这样机构就能实现确定的运动。且考虑动平台负重等因素，并联机构的输入一般选在离基座较近的位置，即选取第一支链的靠近基座的移动副P和第二支链的转动副R作为主动副。按照概念1.1所述，若输入选择合理，锁住2个主动副后动平台的自由度为零。

当所有主动副锁住后，各分支运动螺旋系分别由螺旋 $(\$_{11} \$_{12} \$_{13} \$_{15})$ 和 $(\$_{21} \$_{22})$ 组成。对各分支分别求反螺旋可得分支约束螺旋系组成的总的约束螺旋系S：

$$S = \begin{cases} (0 \ 0 \ 1 ; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 1 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 1 ; -c_{22} \ 0 \ 0) \\ (0 \ 1 \ 0 ; -b_{22} \ 0 \ 0) \\ (1 \ 0 \ 0 ; 0 \ -a_{23} \ 0) \\ (0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 1) \end{cases}$$

求得约束螺旋的维数是5，不满足并联机构输入的选取原理。

于是考虑重新选取输入或再引入运动输入：

(1) 若选取第一支链的靠近动平台的移动副P和第二支链的转动副R作为主动副，得到两支链对于动平台发生的总的约束反螺旋系 $S_1$ ：

$$S_1 = \begin{cases} (-c_{14}/a_{14} \ 0 \ 1 ; 0 \ 0 \ 0) \\ (-b_{14}/a_{14} \ 1 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 1 ; -c_{22} \ 0 \ 0) \\ (0 \ 1 \ 0 ; -b_{22} \ 0 \ 0) \\ (1 \ 0 \ 0 ; 0 \ -a_{23} \ 0) \\ (0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 1) \end{cases}$$

求得反螺旋系 $S_1$ 的维数等于6。

(2) 若再引入运动输入，即选取第一支链的2个移动副P和第二支链的转动副R作为主副，即具有冗余输入。得到两支链对动平台发生的总约束反螺旋系 $S_2$ ，当所有主动副锁住后，各分支运动螺旋系分别由螺旋 $(\$_{11} \$_{12} \$_{13})$ 和 $(\$_{21} \$_{22})$ 组成。对各分支分别求反螺旋可得分支约束螺旋系为：

$$S_2 = \begin{cases} (0 \ 0 \ 1 ; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 1 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0) \\ (1 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 1 ; -c_{22} \ 0 \ 0) \\ (0 \ 1 \ 0 ; -b_{22} \ 0 \ 0) \\ (1 \ 0 \ 0 ; 0 \ -a_{23} \ 0) \\ (0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 1) \end{cases}$$

求得反螺旋系 $S_2$ 的维数亦是6。

针对(1)、(2)两种情况均满足输入的选择原理，考虑在并联机构中采用冗余驱动有优化输入力、减少负载、改善动力性能等优点，且此种输入更加逼近生物原型的驱动。所以选择选取第一支链的2个移动副P和第二支链的转动副R作为主动副。

## 5. 结 论

在详细了解生物原型的基础上选择的PPS-UR并联机构的动平台具有2个转动，采用3个运动输入，并验证其可行性，符合生物原型及输入仿生的要求。对并联机构与仿生机构的结合作了探讨，具有一定的意义。

## References

- [1] Huang Zhen, Kong Lingfu, Fang Yuefa. Mechanism Theory and Control of Parallel Manipulator[M]. Beijing: China Machine Press, 1997: 3-4.
- [2] Duan Guanghong, Li Tiemin. Origin and Development of Parallel Kinematic Machines[J]. The Manufacturing Technology and Equipment Market, 2006, (01).
- [3] Daniel M.Morris, Ravi Hebbar, Wyatt S.Newman. Force Guided Assemblies Using a Novel Parallel Manipulator. Proc. of 2001 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Seoul, Korea, May 21-26, 2001.
- [4] Zhang Lijie. Performance Analysis and Size Optimization of 2-DOF Parallel Manipulator. Yanshan University.
- [5] Wang Jinsong, Li Tiemin, Duan Guanghong. Research Progress and Key Technologies of Parallel Mechanism. Engineering Sciences, 2002, 4(06).
- [6] Zhou Yulin, Gao Feng. Configuration of Humanoid Robot. Chinese Journal of Mechanical Engineering[J]. 2006, 42(11).
- [7] J. M. Hollerbach. Optimum Kinematic Design For A Seven Degree Of Freedom Manipulator. Robotics Research: The Second International Symposium, H. Hanafusa and H. Inoue, editors, 1985, pages 349--356.
- [8] C. M Gosselin, Cloutier Caroline,etal. Analysis of Spherical Two-Degree-of-Freedom Parallel Manipulators. American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division 23rd Biennial Mechanisms Conference, 1994:255-262.
- [9] Yang Lansheng. Composition and Fundamental Type of Bio-mechanism. Harbin University of Science and Technology[J], 1991, 15(2).
- [10]Huang Zhen, Zhao Yongsheng, Zhao Tieshi. Higher Spatial Mechanism. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [11]Yang Gang, Fu Xiaoyun, Li Baoren. Research on 2-DOF Parallel Manipulator with Redundant Actuation. Journal of System Simulation, 2006,18(2).
- [12]Yang Yiyong, Wang Rencheng, Jia Xiaohong and Jin Dwen. Synergetic Dynamic Model of Rapid Human Elbow Joint Movements. Journal of Tsinghua University[J]. 2004,44(5).
- [13]Jiang Xieyuan, Gong Maoqi, et al. Substitution Progress of Elbow Joint. Chinese Journal of Surgery[J]. 2003, 41(9).