

六自由度微动机构的运动分析†

徐卫平

(中国直升机设计研究所 16室 江西省景德镇市 333001)

张玉茹

(北京航空航天大学机器人研究所 100083)

摘要 本文对作者设计的一种六自由度微动机构进行了位移分析,该机构由3条PP-R-S支链并联而成,为消除间隙,每条链的运动副都设计成柔性铰链.本文用坐标变换方法求出了机构的输入输出微位移关系.由于柔性铰链的运动范围受材料强度的限制,文中还建立了柔性铰链微小角位移与机构输出位移的关系.以上关系式为六自由度微动机构的结构设计提供了计算依据.

关键词 机器人,微动平台,并联机构

1 引言

工业机器人问世以来,采用串联机构的操作器一直占主导地位,它结构简单,工作空间大,因而获得广泛应用.近年来,针对串联机构刚性差,关节累积误差大的弱点提出用并联机构作操作器的设想,并开展了基础与应用研究.在运动学和动力学方面,国内外学者对含六条支链的六自由度Stewart平台有比较深入的研究^[1].也有文献涉及含3条支链的六自由度并联机构^[2,3].将并联机构应用于微动操作手是近年来的新发展.微动操作手是实现微小运动的操作器,它与大范围运动平台配合使用,可以实现高精度、高分辨率的运动,用于电子、生物、医学工程等领域.文献[4,5]研究了一种六自由度微动机构的运动学、结构优化设计及工作空间等问题.

对于运动范围在微米级甚至纳米级的微动机构,一般不采用常规运动副,而是采用图1所示柔性铰链,靠弹性变形实现微小运动^[6],以达到无间隙和无摩擦的目的.图1(a)为转动铰链,Z轴为转动轴线;图1(b)为球铰,它能绕Y、Z两轴弯曲变形,也能绕X轴扭转变形,具有普通球副的运动性质.微动机构所用驱动器也不同于传统机构中的电机,而是压电式微位移驱动器^[7,8].

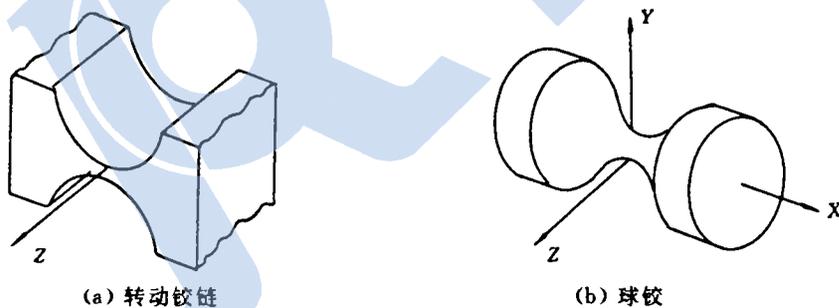


图1 柔性铰链

† 本项目受国家自然科学基金资助.1994-05-29收稿

基于对驱动方式、结构设计及运动学等多方面因素的考虑,经过型综合作者提出了一种含 3 条 PP-R-S 支链的六自由度微动机构. 本文讨论该机构的运动学建模,用坐标变换方法建立了输入与输出微位移关系式,还给出了柔性铰链的微角位移与输出微位移的关系式. 这些方程在微动机构设计中有重要用途.

2 机构输入输出方程

该机构的简图如图 2 所示. 其中 PP 为两坐标微位移驱动器,R 和 S 分别为柔性转动铰链和球铰. 为表达方便,图中的 R 和 S 仍用常规运动副表示,并称机架为下平台,含 3 个球铰的杆件为上平台. 在上平台上建立动坐标系 $P-X'Y'Z'$,坐标系原点 P 为 P_1, P_2, P_3 所在圆的圆心, $P_i (i=1, 2, 3)$ 表示球铰的球心, X' 轴指向 $\overline{PP_1}$ 方向, Z' 轴垂直于上平台,方向朝上. 球铰中心至转动铰链轴线的垂距称为杆长,用 C 表示, $C=Q_iP_i, Q_i$ 为垂足. 规定机构的初始位置为各驱动器输出位移为零的位置,称为机构的零位. 设 Q_i 在下平台上的投影为 B'_i, B_i 为 B'_i 的零位点,如图 3 所示. 设定坐标系 $B-XYZ$ 固连于下平台上(原点 B 为 B_1, B_2, B_3 所在圆的圆心),

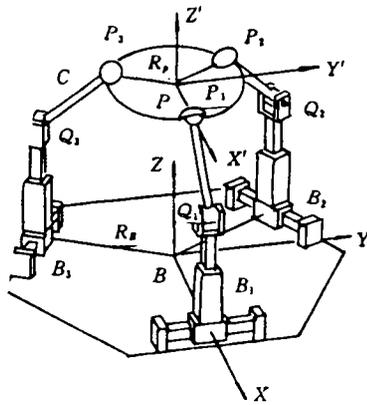


图 2 PP-R-S 型微动并联机构

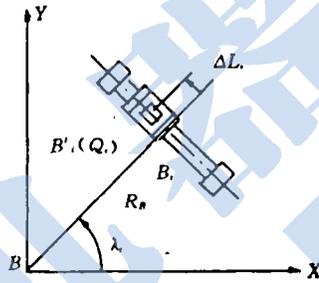


图 3 点 Q_i 在平面 XY 上的投影

X 轴指向 $\overline{BB_1}$ 方向, Z 轴垂直于下平台,方向朝上. 机构处于零位时, Z' 与 Z 共轴, X' 与 X 轴平行. 令 $BB_i=R_B, PP_i=R_P, R_i=R_B-R_P, \overline{PP_i}$ 与 X' 轴之间的夹角为 $\lambda_{i0}=(i-1)\times 120^\circ$, 显然 $\overline{BB_i}$ 与 X 轴之间的夹角也为 λ . 设第 i 个驱动器沿水平方向的微位移为 ΔL_i , 其正方向与 Z 轴服从右手螺旋, 沿垂直方向的微位移为 ΔH_i , 其正方向与 Z 轴的正方向一致. 又设机构处于零位时 $B_iQ_i=H$, 则 P 点在零位时的坐标为 $P_0=(0, 0, H+\sqrt{C^2-R_i^2})^T$. 当第 i 个驱动器输出位移 $\Delta L_i, \Delta H_i$ 时, 由图 2、图 3 可知在 $B-XYZ$ 系中 Q_i 点的坐标为

$$Q_i=(R_B\cos\lambda-\Delta L_i\sin\lambda, R_B\sin\lambda+\Delta L_i\cos\lambda, H+\Delta H_i)^T \quad (1)$$

$\overline{\Delta L_i}$ 的方向数为 $(-\sin\lambda, \cos\lambda, 0)^T$, 点 P 在 $B-XYZ$ 中的坐标为

$$P=(\Delta x_P, \Delta y_P, H+\sqrt{C^2-R_i^2}+\Delta z_P)^T \quad (2)$$

设坐标系 $P-X'Y'Z'$ 绕 X, Y, Z 轴的转角分别为 $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$, 对于微小角位移, 方向余弦矩阵 $[T]$ 与旋转顺序无关^[9].

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma & \Delta\beta \\ \Delta\gamma & 1 & -\Delta\alpha \\ -\Delta\beta & \Delta\alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

点 P_i 在定系 B -XYZ 中的坐标为

$$P_i = [T]P'_i + P = \begin{bmatrix} R_p \cos\lambda_i - \Delta\gamma R_p \sin\lambda_i + \Delta x_p \\ \Delta\gamma R_p \cos\lambda_i + R_p \sin\lambda_i + \Delta y_p \\ -\Delta\beta R_p \cos\lambda_i + \Delta\alpha R_p \sin\lambda_i + H + \sqrt{C^2 - R_i^2} + \Delta z_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $P'_i = [R_p \cos\lambda_i, R_p \sin\lambda_i, 0]^T$ 为 P_i 在动系中的坐标。由图 2 可知, $\overline{P_i Q_i}$ 与 $\overline{\Delta L_i}$ 垂直, 由两矢量垂直条件可得如下关系式

$$-\sin\lambda_i (R_i \cos\lambda_i - \Delta L_i \sin\lambda_i + \Delta\gamma R_p \sin\lambda_i - \Delta x_p) + \cos\lambda_i (R_i \sin\lambda_i + \Delta L_i \cos\lambda_i - \Delta\gamma R_p \cos\lambda_i - \Delta y_p) = 0$$

将上式化简可得

$$\Delta L_i = -\sin\lambda_i \Delta x_p + \cos\lambda_i \Delta y_p + R_p \Delta\gamma \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

忽略高阶微量, 由 $P_i Q_i = C$ 与式(5)可推出如下关系式

$$\Delta H_i = -\frac{R_i}{\sqrt{C^2 - R_i^2}} (\cos\lambda_i \Delta x_p + \sin\lambda_i \Delta y_p) + \Delta z_p + R_p \sin\lambda_i \Delta\alpha - R_p \cos\lambda_i \Delta\beta \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

将式(5), (6)合并写成矩阵形式得

$$\Delta L = J \Delta P \quad (7)$$

式中 $\Delta P = [\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta z_p, \Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma]^T$ 为上平台微位移, 即输出量 $\Delta L = [\Delta L_1, \Delta H_1, \Delta L_2, \Delta H_2, \Delta L_3, \Delta H_3]^T$ 为驱动器的微位移即输入量, J 为雅可比矩阵。

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & R_p \\ -\frac{R_1}{\sqrt{C^2 - R_1^2}} & 0 & 1 & 0 & -R_p & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & R_p \\ \frac{R_1}{2\sqrt{C^2 - R_1^2}} & -\frac{\sqrt{3}R_1}{2\sqrt{C^2 - R_1^2}} & 1 & \frac{\sqrt{3}}{2}R_p & \frac{1}{2}R_p & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & R_p \\ \frac{R_1}{2\sqrt{C^2 - R_1^2}} & \frac{\sqrt{3}R_1}{2\sqrt{C^2 - R_1^2}} & 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2}R_p & \frac{1}{2}R_p & 0 \end{bmatrix}$$

因此式(7)为机构的输入输出方程。

3 柔性铰链的微小角位移

在对机构进行力学分析、功能计算及强度校核时, 要涉及机构中柔性铰链的角位移。因此, 本节计算 PP-R-S 链中 R 和 S 铰的角位移。

3.1 转动铰链的微小角位移

设机构处于零位时 $\angle P_i Q_i B_i = \theta_0$, 由图 2 可知:

$$\sin \theta_0 = \frac{R_i}{C} \quad (8)$$

$$\cos \theta_0 = -\frac{\sqrt{C^2 - R_i^2}}{C} \quad (9)$$

点 P_i 关于 B - XYZ 的位置为

$$P_i = Q_i + \overline{Q_i P_i} = \begin{bmatrix} R_B \cos \lambda_i - \Delta L_i \sin \lambda_i - C \sin(\theta_0 + \Delta \theta_i) \cos \lambda_i \\ R_B \sin \lambda_i + \Delta L_i \cos \lambda_i - C \sin(\theta_0 + \Delta \theta_i) \sin \lambda_i \\ H + \Delta H_i - C \cos(\theta_0 + \Delta \theta_i) \end{bmatrix} \quad (10)$$

令式(4)与式(10)右边第三个元素相等并将式(6)代入可解得:

$$\Delta \theta_i = \frac{1}{\sqrt{C^2 - R_i^2}} (\cos \lambda_i \Delta x_P + \sin \lambda_i \Delta y_P) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

3.2 球铰的微小角位移

PP-R-S 链中球铰的扭转变形轴线沿 $\overline{P_i Q_i}$ 方向, 由于球铰的扭转变形与弯曲变形的刚度系数不同, 因此, 有必要求出球铰的扭转角位移和弯曲角位移. 为此, 在上平台上选取坐标系 P_i - $X'_i Y'_i Z'_i$, 其中 Y'_i 轴在平面 $P_i P_1 P_2$ 上且垂直于 $\overline{P_i P_1}$, Y'_i 轴的正方向与 Z' 轴服从右手螺旋, X'_i 轴为 $\overline{P_i P_1}$ 的延长线绕 Y'_i 轴旋转 $(\theta_0 - \frac{\pi}{2})$ 后所在的方向; 在杆 $P_i Q_i$ 上选取坐标系 P_i - $X_i Y_i Z_i$, 其中 X_i 轴沿 $\overline{P_i Q_i}$ 方向, Y_i 轴平行转动副轴线, 如图 4 所示. 两坐标系 P_i - $X_i Y_i Z_i$ 与 P_i - $X'_i Y'_i Z'_i$ 在零位时重合. 以下求坐标系 P_i - $X'_i Y'_i Z'_i$ 绕坐标轴 X_i, Y_i, Z_i 的 3 个微小角位移 $\Delta \theta_{ix}, \Delta \theta_{iy}, \Delta \theta_{iz}$. 设 P_i - $X'_i Y'_i Z'_i$ 相对于 P_i - $X_i Y_i Z_i$ 旋转的方向余弦矩阵为 $[C_1]$, 其中

$$[C_1] = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta \theta_{iz} & \Delta \theta_{iy} \\ \Delta \theta_{ix} & 1 & -\Delta \theta_{ix} \\ -\Delta \theta_{iy} & \Delta \theta_{ix} & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

坐标系 P_i - $X'_i Y'_i Z'_i$ 相对于坐标系 P - $X' Y' Z'$ 的旋转变换阵

$$\begin{aligned} [C_2] &= \text{Rot}(z', \lambda_i) \text{Rot}[y'_i, (\theta_0 - \frac{\pi}{2})] \\ &= \begin{bmatrix} \cos \lambda_i \sin \theta_0 & -\sin \lambda_i & -\cos \lambda_i \cos \theta_0 \\ \sin \lambda_i \sin \theta_0 & -\cos \lambda_i & -\sin \lambda_i \cos \theta_0 \\ \cos \theta_0 & 0 & \sin \theta_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

坐标系 P_i - $X_i Y_i Z_i$ 相对于 B - XYZ 的旋转变换阵

$$[C_3] = \text{Rot}(z', \lambda_i) \text{Rot}[y'_i, (\theta_0 + \Delta \theta_i - \frac{\pi}{2})]$$

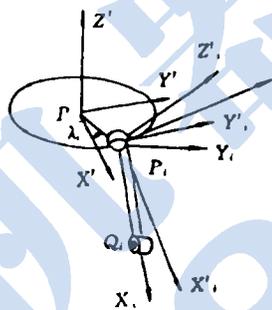


图 4 P_i 点的固连坐标系

$$= \begin{pmatrix} \cos\lambda_i \sin(\theta_0 + \Delta\theta_i) & -\sin\lambda_i & -\cos\lambda_i \cos(\theta_0 + \Delta\theta_i) \\ \sin\lambda_i \sin(\theta_0 + \Delta\theta_i) & \cos\lambda_i & -\sin\lambda_i \cos(\theta_0 + \Delta\theta_i) \\ \cos(\theta_0 + \Delta\theta_i) & 0 & \sin(\theta_0 + \Delta\theta_i) \end{pmatrix} \quad (14)$$

由图2及图4可得闭环方程:

$$\begin{aligned} [T][C_2] &= [C_3][C_1] \\ [C_1] &= [C_3]^T [T][C_2] \end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)中两边对应元素相等并注意到 $\sin\Delta\theta_i \approx \Delta\theta_i$, $\cos\Delta\theta_i \approx 1$ 可解得

$$\begin{cases} \Delta\theta_{ix} = \cos\theta_0 \Delta\gamma + \sin\theta_0 (\cos\lambda_i \Delta\alpha + \sin\lambda_i \Delta\beta) \\ \Delta\theta_{iy} = -\Delta\theta_i - \sin\lambda_i \Delta\alpha + \cos\lambda_i \Delta\beta \\ \Delta\theta_{iz} = \sin\theta_0 \Delta\gamma - \cos\theta_0 (\cos\lambda_i \Delta\alpha + \sin\lambda_i \Delta\beta) \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (16)$$

式(16)给出的 $(\Delta\theta_{ix}, \Delta\theta_{iy}, \Delta\theta_{iz})$ 代表球铰分别绕坐标轴 X_i, Y_i, Z_i 转动的微小角位移。其中 $\Delta\theta_{ix}$ 为扭转角位移, $\Delta\theta_{iy}, \Delta\theta_{iz}$ 为弯曲角位移。球铰绕其他任意轴的微小角位移可以用 $(\Delta\theta_{ix}, \Delta\theta_{iy}, \Delta\theta_{iz})$ 表示。

4 结论

本文通过对 PP-R-S 型并联六自由度微动机构的运动学建模,得到了输入输出微位移方程。此方程揭示出微动机构的一大特点,即雅可比矩阵为常数阵。这无论对雅可比逆阵计算还是对以工作空间最大为目标的结构优化都提供了便利条件。本文提出的柔性铰链角位移公式适用于机构的任何位形,因此可以从中求出最大角位移的准确值,这比文献[5]用近似方法求最大角位移进了一步。本文所建立的公式在微动机构结构设计中为强度校核及功能计算提供了依据。

参 考 文 献

- 1 Nguyen C C, Antriazzi S S, Park J Y, Zhou Z L. Trajectory Planning and Control of a Stewart Platform-based End-effector with Passive Compliance for Part Assembly. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1992, 6(2,3): 263-281.
- 2 Kohli D, Soo-hun Lee, Kao-Yueh Tsai. Manipulator Configurations Based on Rotary-Linear(R-L) Actuators and Their Direct and Inverse Kinematics. *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 1988, 110(2): 397-404.
- 3 Fariborz Behi. Kinematic Analysis for a Six-degree-of-freedom 3-PRPS Parallel Mechanism. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1988, 4(5): 561-565.
- 4 Arai T, Stoughton R *et al.* Micro Hand Module Using Parallel Link Mechanism. *Proceedings JAPAN/USA Symposium on Flexible Automation*, 1992, 1: 163-168.
- 5 Stoughton R, Arai T. Kinematic Optimization of a Chopstick-type Micromanipulator. *Proceedings JAPAN/USA Symposium on Flexible Automation*, 1992, 1: 151-157.
- 6 Paros J M, Weisbord L. How to Design Flexure Hinges. *Machine Design*, 1965, 37(27): 151-156.
- 7 杨宜民等.仿生型步进式直线驱动器的研究. *机器人*, 1994, 16(1): 37-39.
- 8 杨宜民等.新型二坐标微位移驱动器. *高技术通讯*, 1993, 3(5): 20-21.
- 9 张启先.空间机构的分析与综合(上册). 1984, 机械工业出版社.

(下转第308页)

APPLICATION OF BIONICS TO THE STUDY OF ARTIFICIAL MUSCLES

XU Wei

(*Second Engineering Research Institute of PLA* 100850)

SUN Xuliang HE Lijuan

(*Harbin Institute of Technology* 150006)

Abstract From the point of view of bionics, an artificial muscle with magnetic rubber, which has some similar functions to living things' muscle, is presented in the paper and the construction and specialities are also analysed.

Key words Bionics, robots, artificial muscle

(上接第 302 页)

KINEMATIC ANALYSIS OF A SIX-DEGREE-OF-FREEDOM MICROMOTION PARALLEL MECHANISM

XU Weiping

(*Chinese Helicopter Research and Developments Institute, Jingdezhen* 333001)

ZHANG Yuru

(*Robot Research Institute, Beijing University of Aeronautics & Astronautics* 100083)

Abstract This paper develops a method for the kinematic analysis of a six-degree-of-freedom mechanism for micromotion. The mechanism has three PP-R-S parallel chains in which all the kinematic pairs are designed as flexure hinges to avoid mechanical clearance. By means of coordinate transformation, the relationship between the input and the output micro-displacements of the mechanism is obtained. Because the range of motion of the flexure hinges is limited by material intensity, the micro-displacements of the flexure hinges are also established in relation to the output micro-displacements for the purpose of design.

Key words Robot, micromotion-platform, parallel mechanism

作者简介:

徐卫平:男,31岁,硕士.研究领域:运动学,动力学,汽车及飞行驾驶员的防护与救生.

张玉茹:女,36岁,博士.研究领域:运动学,动力学,机构分析与综合,机器人机构设计.