

文章编号 1004-924X(2001)01-0063-04

# 6-SPS 球平台并联机器人 及其局部力和运动传递性能分析

金振林<sup>1</sup>, 高峰<sup>2</sup>

(1. 燕山大学机械工程学院, 河北秦皇岛 066004;

2. 河北工业大学, 天津 300130)

**摘要:** 提出一种 6-SPS 球平台 6 自由度正交并联机器人新机型, 介绍其结构布局特点, 对其局部力与运动传递性能及它们与机构几何参数关系进行分析, 为其设计和实用化提供理论依据。分析结果表明, 该球平台机构在正交位姿力和运动传递性能各向同性, 特别适合于作为 6 自由度微动操作机器人和 6 维力传感器结构。

**关键词:** 6 自由度并联机器人机构; 球平台机构; 正交位姿; 各向同性

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A

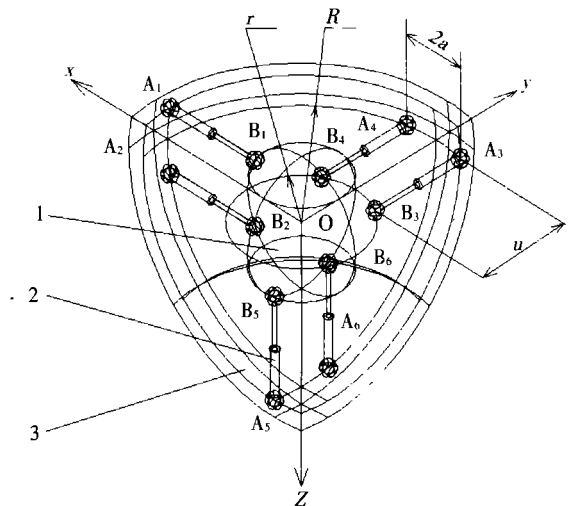
## 1 引言

并联机器人是一类全新结构的机器人, 具有精度高、刚度大、自重负荷比小和动力学性能好等优点。最著名的 6 自由度并联机器人机构是 1965 年由英国工程师 Stewart 提出的 Stewart 平台机构<sup>[1]</sup>, 它已应用于虚轴机床、地下开采、水下作业、飞行模拟、空中救援、飞船对接、卫星天线定位、微动操作和机器人力传感器等领域<sup>[2-3]</sup>。并联机器人机构性能的改善, 可借助于机器人布局型式的合理设计来实现, 所以具有新型布局型式的机构设计作为并联机器人机构研究的重要内容, 受到国内外许多学者的重视<sup>[4-8]</sup>。本文通过对 Stewart 平台机构变异, 提出一种新颖的并联 6-SPS 球平台并联机器人机构, 介绍其布局特点并对其局部力与运动传递性能和机构几何参数关系进行了分析, 为其实用化提供理论依据。该球平台机构在正交位姿是力和运动学各项同性的, 特别适合于作为 6 自由度微动操作机器人和 6 维力传感器结构。

## 2 球平台机构布局特点及坐标系的建立

如图 1 所示一种新型 6-SPS 球平台 6 自由度并联机器人机构, 这种机构是 Stewart 平台机构(如图 2 所示)经过变异得到的一种新机构, 与 Stewart 平台机构具有相同的运动学模型, 它由运动平台 1、6 个 SPS 运动链 2 和基座 3 组成, 其球铰点布局有以下特点: (1) 其与运动平台相连的

6 个球铰点和其与基座相连的 6 个球铰点分别分布在半径为  $r$  和  $R$  的两个三维圆球上; (2) 每 1 个 SPS 运动链构成 1 个分支, 分支中直线移动副为驱动副, 6 个分支分为三对, 各对分支与运动平台相连的两个球铰点的距离均为  $2a$ , 且分别分布在通过运动平台球心的三个互相垂直的平面上; (3) 与基座相连的 6 个球铰点的分布特点和运动平台上的 6 个球铰点相似。当运动平台的球心和基座的球心重合, 且三对分支的轴线互相垂直时, 该机构处于正交位姿。



1. moving platform; 2. SPS kinematic chain; 3. base

Fig. 1 A novel 6-SPS spherical platform parallel robotic mechanism

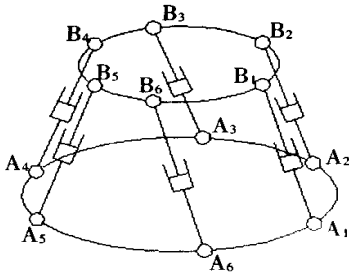


Fig.2 Stewart platform

如图 1 所示, 建立与运动平台固接的坐标系  $\{P\}$ :  $O-x_1y_1z_1$ , 原点  $O$  位于运动平台的球心, 三个坐标轴分别通过与运动平台相连的三对球铰点的连线中点; 建立与基座固接的坐标系  $\{Q\}$ :  $O-x_2y_2z_2$ , 其原点为基座的球心, 三个坐标轴分别和在正交位姿的坐标系  $\{P\}$  的三个坐标轴重合。在坐标系  $\{P\}$  中, 与运动平台相连的球铰点  $A_i$  的空间位置以矢量  ${}^P A_i$  表示 ( $i=1, 2, \dots, 6$ ); 在坐标系  $\{Q\}$  中, 与基座相连的 6 个球铰点  $B_i$  的空间位置矢量以  ${}^Q B_i$  表示 ( $i=1, 2, \dots, 6$ ), 与运动平台相连的球铰点  $A_i$  的空间位置以矢量  ${}^Q A_i$  表示 ( $i=1, 2, \dots, 6$ )。设机构处于正交位姿时各分支均为中位时的长度  $u_0$ , 由机构布局特点可得各球铰点的空间位置

$$\begin{aligned} \begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{matrix} \begin{matrix} {}^Q A_1 \\ {}^Q A_2 \\ {}^Q A_3 \\ {}^Q A_4 \\ {}^Q A_5 \\ {}^Q A_6 \end{matrix} &= \begin{matrix} \begin{pmatrix} \sqrt{r^2 - a^2 + u_0} & 0 & -a \\ r^2 - a^2 + u_0 & 0 & a \\ -a & \sqrt{r^2 - a^2 + u_0} & 0 \\ a & \sqrt{r^2 - a^2 + u_0} & 0 \\ 0 & -a & \sqrt{r^2 - a^2 + u_0} \\ 0 & a & \sqrt{r^2 - a^2 + u_0} \end{pmatrix}^T \\ \begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{matrix} \begin{matrix} {}^P B_1 \\ {}^P B_2 \\ {}^P B_3 \\ {}^P B_4 \\ {}^P B_5 \\ {}^P B_6 \end{matrix} &= \begin{matrix} \begin{pmatrix} \sqrt{r^2 - a^2} & 0 & -a \\ r^2 - a^2 & 0 & a \\ -a & \sqrt{r^2 - a^2} & 0 \\ a & \sqrt{r^2 - a^2} & 0 \\ 0 & -a & \sqrt{r^2 - a^2} \\ 0 & a & \sqrt{r^2 - a^2} \end{pmatrix}^T \end{matrix} \end{matrix} \quad (1)$$

### 3 局部力和运动传递性分析

#### 3.1 正交位姿的力传递性分析

设  $f$  和  $m$  分别为作用在运动平台上的外力对  $O$  点的主矢和主矩,  $o$  为分支的驱动轴力矢量, 则该并联机器人的力方程为<sup>[6]</sup>

$$\begin{pmatrix} f \\ m \end{pmatrix} = G \hat{o} \quad (2)$$

式中,  $G$  为该球平台机构的力 Jacobian, 且

$$f = (f_x \ f_y \ f_z)^T \quad (3)$$

$$m = (m_x \ m_y \ m_z)^T \quad (4)$$

$$G = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 \\ S_{01} & S_{02} & S_{03} & S_{04} & S_{05} & S_{06} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$s_i = ({}^Q B_i - {}^Q A_i) / |{}^Q B_i - {}^Q A_i| \quad (6)$$

$$s_{oi} = {}^Q A_i \times {}^Q B_i / |{}^Q B_i - {}^Q A_i| \quad (7)$$

$$\hat{o} = (\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4 \ \tau_5 \ \tau_6)^T \quad (8)$$

当机构处于正交位姿时, 坐标系  $\{Q\}$  和坐标系  $\{P\}$  重合, 此时有

$${}^P B_i = {}^Q B_i \quad (9)$$

由式(5)~(7)和(9)得该球平台机构在正交位姿的力 Jacobian

$$G = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a & -a \\ a & -a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & -a & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

考虑力与力矩有不同的量纲, 将式(2)力方程改写为如下的形式

$$f = G_f \hat{o} \quad (11)$$

$$m = G_m \hat{o} \quad (12)$$

由式(10)得

$$G_f = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$G_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & a & -a \\ a & -a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & -a & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(11)和(12)可知, 该球平台机构的力与矩传递性能分别取决于矩阵  $G_f$  和  $G_m$ 。当分支的驱动力矢量  $\hat{o}$  的模为单位 1 时, 即有

$$\hat{o}^T \hat{o} = 1 \quad (15)$$

综合式(11)、(12)和(15), 可以得以下二次型方程

$$f^T (G_f G_f^T)^{-1} f = 1 \quad (16)$$

$$m^T (G_m G_m^T)^{-1} m = 1 \quad (17)$$

方程(16)和(17)表明, 当分支的驱动力矢量  $\hat{o}$  的模为单位 1 时, 矢量  $f$  和  $m$  分别位于两个椭球上, 两个椭球的各主轴方向分别为矩阵  $G_f G_f^T$  和  $G_m G_m^T$  的特征矢量方向, 两个椭球的各主轴长度分别等于矩阵  $G_f G_f^T$  和  $G_m G_m^T$  的特征值的平方根<sup>[7]</sup>。因此, 该球平台机构的力与矩传递性能可分别用三维空间的两个椭球直观表征。由式(13)和(14)并借助 *Matlab* 可得

$$E_f = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{o}_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$E_m = \begin{bmatrix} 2a^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2a^2 \end{bmatrix}, \hat{O}_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, 矩阵  $E_f$  和  $E_m$  的对角元素分别为矩阵  $G_f G_f^T$  和  $G_m G_m^T$  的特征值, 矩阵  $\hat{O}_f$  和  $\hat{O}_m$  的列矢量分别为矩阵  $G_f G_f^T$  和  $G_m G_m^T$  的特征值对应的特征矢量。由式(15)~(19)可知: 表征该球平台机构的力与矩传递性能的三维空间的两个椭球对应两个圆球, 两个圆球半径分别为  $\sqrt{2}$  和  $\sqrt{2}a$ 。所以, 该球平台机构机器人机构在各个方向上具有相同的力与矩传递性能, 是力传递各向同性的, 且力传递性能与结构参数无关; 力矩传递性能与结构参数  $a$  成正比。

### 3.2 正交位姿的运动传递性分析

设  $V$  和  $\omega$  分别为运动平台  $O$  对  $O$  点的线速度矢量和角速度矢量,  $\dot{u}$  是该并联机器人分支的输入速度矢量, 则速度输入输出方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{u} \end{bmatrix} = J \dot{u} \quad (20)$$

式中,  $J$  为该球平台机构的 Jacobian, 且

$$V = (V_x \quad V_y \quad V_z)^T \quad (21)$$

$$\dot{u} = (\dot{u}_1 \quad \dot{u}_2 \quad \dot{u}_3)^T \quad (22)$$

$$J = [G^{-1}]^T \quad (23)$$

$$\dot{u} = (\dot{u}_1 \quad \dot{u}_2 \quad \dot{u}_3 \quad \dot{u}_4 \quad \dot{u}_5 \quad \dot{u}_6)^T \quad (24)$$

将式(10)代入式(23)得

$$J = \begin{bmatrix} -1/2 & -1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/2 & -1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2/a & -1/2/a \\ 1/2/a & -1/2/a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2/a & -1/2/a & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

考虑线速度和角速度有不同的量纲, 这里我们将式(20)速度输入输出方程改写为如下的形式

$$V = J_v \dot{u} \quad (26)$$

$$\dot{u} = J_\omega \dot{u} \quad (27)$$

由式(25)得

$$J_v = \begin{bmatrix} -1/2 & -1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/2 & -1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2 & -1/2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$J_\omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2/a & -1/2/a \\ 1/2/a & -1/2/a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2/a & -1/2/a & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

由式(26)和(27)可知, 该球平台机构的速度与角速度传递性能分别取决于矩阵  $J_v$  和  $J_\omega$ 。与上分析同理, 当

$$\dot{u}^T \dot{u} = 1 \quad (30)$$

有

$$V^T (J_v J_v^T)^{-1} V = 1 \quad (31)$$

$$\dot{u}^T (J_\omega J_\omega^T)^{-1} \dot{u} = 1 \quad (32)$$

二次型方程(31)和(32)表明, 当分支的输入速度矢量  $\dot{u}$  的模为单位 1 时, 矢量  $V$  和  $\dot{u}$  分别位于两个椭球上, 两个椭球的各主轴方向分别为矩阵  $J_v J_v^T$  和  $J_\omega J_\omega^T$  的特征矢量方向, 两个椭球的各主轴长度分别等于矩阵  $J_v J_v^T$  和  $J_\omega J_\omega^T$  的特征值的平方根。因此, 该球平台机构的速度与角速度传递性能可分别用三维空间的两个椭球直观表征。由式(28)和(29)得

$$\tilde{A}_v = \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}, C_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\tilde{A}_\omega = \begin{bmatrix} 1/2/a^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2/a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2/a^2 \end{bmatrix}, C_\omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

其中, 矩阵  $\tilde{A}_v$  和  $\tilde{A}_\omega$  的对角元素分别为矩阵  $J_v J_v^T$  和  $J_\omega J_\omega^T$  的特征值, 矩阵  $C_v$  和  $C_\omega$  的列矢量分别为矩阵  $J_v J_v^T$  和  $J_\omega J_\omega^T$  的特征值对应的特征矢量。由式(30)~(34)可知: 表征该球平台机构的速度和角速度传递性能的三维空间的两个椭球分别对应两个圆球, 两个圆球半径分别为  $1/\sqrt{2}$  和  $1/\sqrt{2}a$ 。所以, 该球平台机构在各个方向上具有相同的速度和角速度传递性能, 是运动传递各向同性的, 且速度传递性能与结构参数无关, 角速度传递性能与结构参数  $a$  成反比。

## 4 结 论

通过对 Stewart 平台机构变异, 提出一种新颖的 6-SPS 球平台 6 自由度并联机器人机构, 对其局部力与运动传递性能进行分析的结果表明:

(1) 该球平台机构在正交位姿是力和运动传递各项同性的, 由于机构的速度的输入输出关系即表现了微位移的输入输出关系, 所以, 该球平台机构也是微位移传递各项同性的。

(2) 该球平台机构在正交位姿力传递性能与结构参数无关, 力矩传递性能与结构参数  $a$  成正比; 速度传递性能与结构参数无关, 角速度传递性能与结构参数  $a$  成反比。

(3) 该种机构所具有的特性,使其特别适合于 构。

作为 6 自由度微动操作机器人和 6 维力传感器结

### 参考文献:

- [1] Stewart D. A platform with six degrees of freedom[J]. Proc. of the Institute of Mechanical Engineering. 1965, 180: 371- 386.
- [2] Dasgupta B, Mruthunjaya T S. The Stewart platform manipulator: a review[J]. Mechanism and Machine Theory. 2000, 35: 15- 40.
- [3] Berthod Laurent. parallel-robot[DB/OL]. <http://dmtwww.epfl.ch/imt/misc-robot-1berthod/parallel-robot.html>, 1996- 08- 28.
- [4] Romdhane L. Design and analysis of a hybrid serial-parallel manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory. 1999, 34: 1037- 1053.
- [5] 高峰, 金振林, 刘辛军等. 六自由度并联解耦结构微动机器人[P]. 中国发明专利: 99121020.4, 1999-09-30.
- [6] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [7] 赵永生, 任敬轶, 赵铁石, 黄真, 等. 多机械手协同系统的动载协调数值仿真研究[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(3): 64- 70.
- [8] 赵铁石, 高英杰, 杨铁林, 赵永生, 黄真, 等. 混合型四自由度并联平台机构及其位置分析[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(1): 42- 45.
- [9] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.

## A novel 6-SPS spherical platform parallel robotic mechanism and analysis of its local properties of force and motion transmission

JIN Zhen-lin<sup>1</sup>, GAO Feng<sup>2</sup>

(1. *The College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;*  
2. *Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China*)

**Abstract:** The design of a novel 6-SPS spherical platform 6-DOF orthogonal parallel robotic mechanism is presented. The layout feature of the mechanism is described. Its local properties of the force and motion transmission and the relationships between the properties and the link lengths are studied, which provides theoretical base for the optimal design and application of the mechanism. From the analysis of the results obtained by us, it is shown that its properties of the force and motion transmission are characterized by isotropy at the orthogonal configuration. The mechanism is particularly suitable for certain applications in 6-DOF micromanipulators and 6-axis force/torque transducers.

**Key words:** 6-DOF parallel robotic mechanism; spherical platform mechanism; orthogonal configuration; isotropy.

作者简介: 金振林(1962-), 男, 辽宁抚顺市人, 副教授, 在职博士生, 从事并联机器人理论与应用技术方面的研究, 参加国家 863 高技术研究发展计划资助项目、天津市自然科学基金和高等学校骨干教师资助计划等项目的研究工作, 申请中国发明专利 4 项, 发表科技论文 20 余篇。

高峰,(1956-), 男, 江西人, 河北工业大学副校长, 教授, 博士生导师, 博士, 从事并联机器人理论与应用技术方面的研究, 主持国家 863 高技术研究发展计划资助项目、博士点基金、天津市自然科学基金和高等学校骨干教师资助计划等项目的研究工作, 申请中国发明专利 7 项, 发表科技论文 30 余篇, 出版专著 5 部, 获省部级奖励 2 项。