

一种 6 自由度冗余驱动并联机器人 运动学分析及仿真*

张彦斐

(北京航空航天大学机器人研究所 北京 100083)

宫金良

(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

李为民

(河北工业大学机械学院 天津 300130)

高 峰

(上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室 上海 200030)

摘要：提出一种采用自均力驱动模块构造冗余驱动并联机器人的新方法，根据这种方法构造了一种具有 10 个输入的 6 自由度冗余驱动并联机器人。对此机器人的运动反解进行了分析，得到了唯一的显式表达。最后用自行研发的六维鼠标对这种机器人进行了运动仿真，验证了反解的正确性。

关键词：冗余驱动 运动学反解 六维鼠标

中图分类号：TP242

0 前言

冗余驱动并联机器人是输入构件(驱动构件)数多于输出构件自由度数的并联机器人。由于冗余并联机器人的输入构件较多,与一般并联机器人相比,该类并联机器人具有更高的刚度、更大的承载能力和更大的加速度等鲜明特性,所以冗余驱动并联机器人适合于重载和大加速度的应用场合,如载荷质量在几吨或几十乃至上百吨的超大型运动模拟器和地震模拟器等。

国内外许多学者对冗余驱动机器人进行了研究。参考文献[1]基于动力学方程分析了冗余驱动机器人在不同的优化目标和不同的约束条件下输入力的最优化问题。结果表明,加入冗余驱动,能够明显降低并联操作手的驱动力。冗余驱动可用于弹性并联机器人减振,通过规划冗余驱动力达到抑制机器人平台弹性振动的目的^[2]。冗余驱动并联机器人还可以消除机器人奇异位形、提高机器人精度及刚度^[3,4]。参考文献[5]运用空间模型理论研究了一种平面 2 自由度冗余驱动并联机器人的设计方法并对此

机器人运动学正反解、可达工作空间、承载能力和灵巧性进行了分析,给出了灵巧性能图谱作为该冗余驱动并联机器人机构设计的重要参考依据。

G.F. Liu 等^[6]将冗余分为运动学冗余(Kinematic redundancy)、约束冗余(Over constraints)和驱动冗余(Over actuation),通过分析得出驱动冗余能够减小并联机器人雅可比矩阵的条件数,增加灵活度和刚度。P.Choudhury 和 A.Ghosal^[7]研究得出通过增加冗余驱动关节和支链,可以减少并联机器人工作空间中的奇异区域。B.J.Yi^[8]分析了冗余驱动并联机器人的刚度问题。J.F.O'Brien 和 J.T. Wen^[9]研究了冗余驱动对于提高并联机器人运动可操作度的作用。对于具有冗余驱动器的机器人来讲,机器人的名义运动仍由主原动机完成,而冗余驱动器则可以用来改善机器人的动力学性能,T.Thomas^[10]证明了驱动冗余可以实现刚性机器人振动力矩的平衡,对于弹性机器人来讲,机器人的刚体运动可由原动机实现,而其弹性运动则可用附加冗余驱动的方法进行控制,即冗余驱动主要用来改善其弹性部分的动力学特性。

参考文献[1~10]大多采用冗余驱动方式,即增加冗余支链,在冗余驱动并联机器人构造类型方面还需要深入的研究。

* 国家杰出青年基金(50125516)、振动、冲击、噪声国家重点实验室(VSN-2005-07)和天津市自然科学基金重点(043801811)资助项目。20041230 收到初稿,20050425 收到修改稿

1 冗余驱动并联机器人类型研究

冗余驱动指机器人输入关节的数目即主动关节数目大于机器人的自由度数目。由于自身结构的特点，串联机器人不存在这种方式。冗余驱动机器人只存在于并联机器人中。

比较常见的冗余驱动方式有两种：一种是直接在原并联机构中增加驱动关节；另一种是在保证原并联机构自由度不变的前提下，再增加与原并联机构相同的支链。如图 1 所示，图 1a 是正常驱动，图 1b 是第一种类型，图 1c 是第二种类型。图 1 中实心圆表示驱动关节。

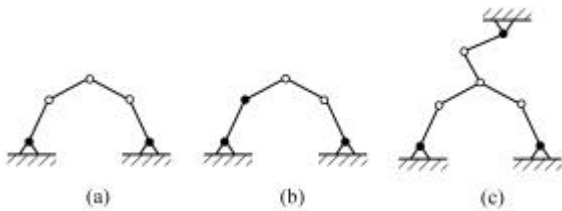


图 1 冗余驱动机器人的构型类型

第一种冗余驱动构造方式简单，但是不便于安装驱动器，并且由于部分驱动器没有布置在基座上，这样就增加了分支的质量以及机构的不对称性，运动时会产生较大惯性，影响机构的动力学性能。第二种驱动方式可以容易的把驱动器安装在基座上，但是由于增加了冗余支链，也就相应地增加了机构的制造成本和运动控制的复杂性。这里提出一种新型冗余输入方式，即采用一种自均力冗余驱动接口模块。如图 2 所示。

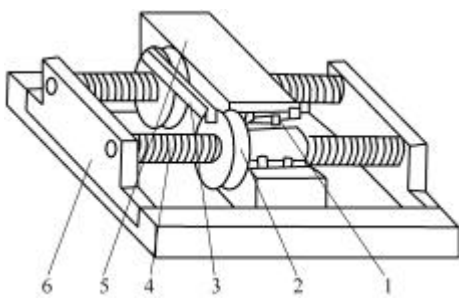


图 2 自均力冗余驱动接口模块

- 1. 轴承 2. 螺母 3. 均力杆 4. 丝杠 5. 动平台 6. 机架

两根丝杠平行的安装在机架上，每根丝杠上分别装配有一个螺母，每个螺母分别通过轴承与套装在两个丝杠上的动平台连接，同时两根丝杠上的螺母由一条传动杆连接。这种冗余驱动方式具有结构简单，成本低廉，工作可靠等优点，特别是所设计的连接着两个螺母的均力杆，可以使任意一个螺母旋转时，同时带动另外的螺母产生牵连转动，构成

驱动器内部的均力机构，从而有效地解决了冗余驱动的受力不均衡问题，达到稳定、均匀地分担总驱动力的作用。这样，两丝杠的冗余输入通过均力机构转化为了动平台的单自由度输出。

2 一种冗余驱动并联机器人描述

采用上面提出的自均力冗余驱动接口模块冗余驱动方式，构造了一种具有 10 个输入的 6 自由度并联机器人。此冗余驱动并联机器人由 6 条支链按 3-2-1 分布在三个正交的平面内，每条支链由移动副、连杆及两个球铰组成。各条支链通过球铰与动平台相连，由移动副作为驱动关节。支链 1~4 采用自均力冗余驱动接口模块，支链 5 和 6 各有一个驱动器，因此此冗余驱动并联机器人共有 10 个驱动器。图 3 是此冗余驱动并联机器人的 CAD 模型。

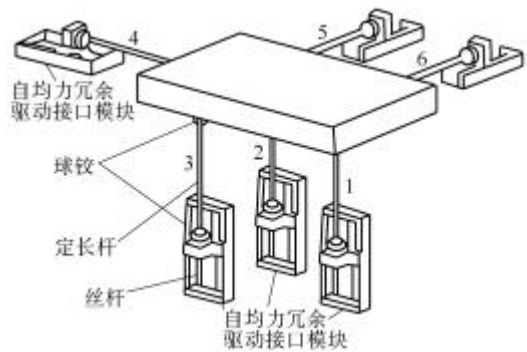


图 3 10 个输入的 6 自由度冗余驱动并联机器人

3 机器人运动学分析

图 4 和图 5 为此机器人的结构参数图。

如图 4，在静平台上建立固定参考系 $Oxyz$ 。 A_{ij} ($i=1,2,3,4; j=1,2$) 为机构中第 i 个支链第 j 个驱动丝杠与基座的连接点， A_5 、 A_6 表示第 5、6 个支链上丝杠与基座的连接点。 B_i ($i=1,2,L,6$) 为机构第 i 个支链上滑块的球铰中心， C_i ($i=1,2,L,6$) 表示与动平台连接的相应球铰的中心点。 Oxy 平面为

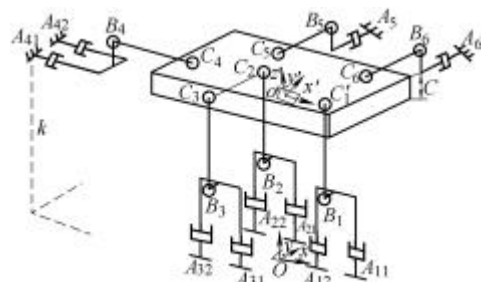


图 4 机器人整体结构参数

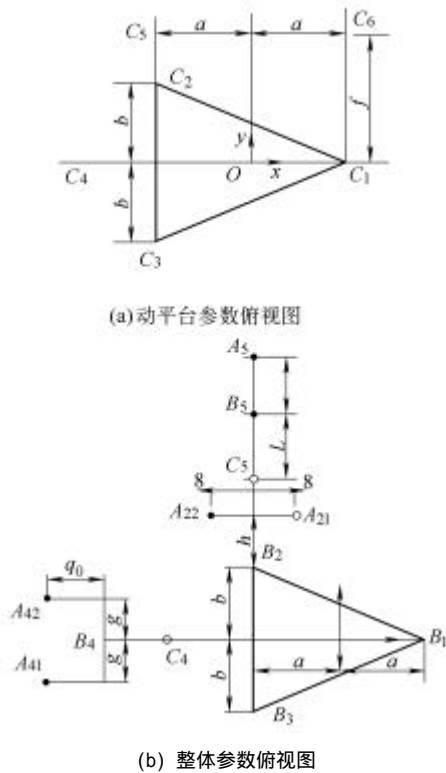


图 5 机器人俯视图的参数描述

点 A_{ij} ($i=1,2,3; j=1,2$) 所在的平面, O 点是 $B_1 B_2 B_3$ 组成三角形几何中心在 A_{ij} ($i=1,2,3,4; j=1,2$) 所在平面的投影点。

在动平台上建立动坐标系 $O'x'y'z'$, $O'x'y'$ 所在的平面为点 C_1, C_2, C_3 构成的平面, O' 位于三角形 $C_1 C_2 C_3$ 的几何中心, 且有

$$|l_{B_i C_i}| = L \quad i=1,2,L,6 \quad (1)$$

根据这种冗余驱动接口模块的特点可知, 自均力冗余驱动接口模块上的两个丝杠的驱动量是相同的。因此实际上只存在 6 个独立的未知输入变量, 定义 l_i 为第 i 个支链驱动量 ($i=1,2,L,6$), 其他参数如图 5 所示。

点 A_5, A_6, A_{ij} ($i=1,2,3,4; j=1,2$) 和 B_i ($i=1,2,L,6$) 在坐标系 $Oxyz$ 中的坐标分别为

$$\begin{aligned} A_{11}(a+g, h, 0) & \quad A_{12}(a-g, h, 0) \\ A_{21}(-a+g, b+h, 0) & \quad A_{22}(-a-g, b+h, 0) \\ A_{31}(-a+g, -b-h, 0) & \quad A_{32}(-a-g, -b-h, 0) \\ A_{41}(-d-L-q_0, g, k) & \quad A_{42}(-d-L-q_0, -g, k) \\ A_5(a, f+L+q_0, k) & \quad A_6(-a, f+L+q_0, k) \\ B_1(a, 0, l_1) & \quad B_2(-a, b, l_2) \quad B_3(-a, -b, l_3) \\ B_4(-d-L-q_0+l_4, 0, k+h) & \\ B_5(a, f+L+q_0-l_5, k+h) & \\ B_6(-a, f+L+q_0-l_6, k+h) & \end{aligned}$$

在坐标系 $O'x'y'z'$ 中, 点 C_i ($i=1,2,L,6$) 的坐标分别表示为

$$\begin{aligned} C_1(a, 0, 0) & \quad C_2(-a, b, 0) & \quad C_3(-a, -b, 0) \\ C_4(-d, 0, c) & \quad C_5(-d, f, c) & \quad C_6(-a, f, c) \end{aligned}$$

$$\text{式中} \quad d=2a \quad f=\frac{3}{2}b$$

为简化后面的计算, 令

$$H_1 = d + L + q_0 \quad (2)$$

$$H_2 = f + L + q_0 \quad (3)$$

运动平台的三维转动采用欧拉角 a, b 和 g 表示, 从坐标系 $O'x'y'z'$ 到坐标系 $Oxyz$ 的坐标变换矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} p_x & m_x & n_x \\ p_y & m_y & n_y \\ p_z & m_z & n_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{式中} \quad p_x = \cos a \cos b$$

$$p_y = \sin a \cos b$$

$$p_z = -\sin b$$

$$m_x = \cos a \sin b \sin g - \sin a \cos g$$

$$m_y = \sin a \sin b \sin g + \cos a \cos g$$

$$m_z = \cos b \sin g$$

$$n_x = \cos a \sin b \cos g + \sin a \sin g$$

$$n_y = \sin a \sin b \cos g - \cos a \sin g$$

$$n_z = \cos b \cos g$$

矩阵 R 为 3×3 的方向余弦矩阵, 其每一列分别为坐标系 $O'x'y'z'$ 的 x', y', z' 轴在坐标系 $Oxyz$ 中的方向余弦。

设点 O' 在坐标系 $Oxyz$ 中的坐标为 (x, y, z) , 则根据

$$l_{OB_i} + l_{B_i C_i} = R l_{O' C_i} + l_{OO'} \quad i=1,2,L,6 \quad (5)$$

有

$$R l_{O' C_i} + l_{OO'} - l_{OB_i} = l_{B_i C_i} \quad i=1,2,L,6 \quad (6)$$

式中 $l_{OB_i}, l_{B_i C_i}, l_{O' C_i}, l_{OO'}$ 均为矢量。对于各条支链, 分别有如下关系式成立。

支链 1

$$(x + ap_x - a)^2 + (y + ap_y)^2 + (z + ap_z - l_1)^2 = L^2 \quad (7)$$

支链 2

$$(x - ap_x + bm_x + a)^2 + (y - ap_y + bm_y - b)^2 + (z - ap_z + bm_z - l_2)^2 = L^2 \quad (8)$$

支链 3

$$(x - ap_x - bm_x + a)^2 + (y - ap_y - bm_y + b)^2 + (z - ap_z - bm_z - l_3)^2 = L^2 \quad (9)$$

支链 4

$$(x - dp_x + cn_x - l_4 + H_1)^2 + (y - dp_y + cn_y)^2 + (z - dp_z + cn_z - k - h)^2 = L^2 \quad (10)$$

支链 5

$$(x + ap_x + fm_x + cn_x - a)^2 + (y + ap_y + fm_y + cn_y - H_2 + l_5)^2 + (z - ap_z + fm_z + cn_z - k - h)^2 = L^2 \quad (11)$$

支链 6

$$(x - ap_x + fm_x + cn_x + a)^2 + (y - ap_y + fm_y + cn_y - H_2 + l_6)^2 + (z - ap_z + fm_z + cn_z - k - h)^2 = L^2 \quad (12)$$

考虑在初始位姿时，动平台的运动输出可表示为

$$R = E \quad x = 0 \quad y = 0 \quad z = h_2 \quad l_i = q_0$$

这样根据式(7)~(12)，可得到机构的最终运动反解表达式为

$$l_1 = z + ap_z - [L^2 - (x + ap_x - a)^2 - (y + ap_y)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$l_2 = z - ap_z + bm_z - [L^2 - (x - ap_x + bm_x + a)^2 - (y - ap_y + bm_y - b)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$l_3 = z - ap_z - bm_z - [L^2 - (x - ap_x - bm_x + a)^2 - (y - ap_y - bm_y + b)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$l_4 = x - dp_x + cn_x + H_1 - [L^2 - (y - dp_y + cn_y)^2 - (z - dp_z + cn_z - k - h)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$l_5 = -(y + ap_y + fm_y + cn_y - H_2) - [L^2 - (x + ap_x + fm_x + cn_x - a)^2 - (z - ap_z + fm_z + cn_z - k - h)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$l_6 = -(y - ap_y + fm_y + cn_y - H_2) - [L^2 - (x - ap_x + fm_x + cn_x + a)^2 - (z - ap_z + fm_z + cn_z - k - h)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

由此可以看出此冗余驱动并联机器人运动学反解的求解过程简单，且反解唯一，具有显式表达，有效地避免了控制的复杂性。

4 冗余驱动机器人仿真

在以上机器人反解的基础上，运用 Visual C++ 和 OpenGL 语言，可以建立这种冗余驱动并联机器人的虚拟控制系统。

首先建立此冗余驱动机器人虚拟样机模型。由于在机构仿真中涉及较多的机构运动学方程求解问题，因而采用 Visual C++6.0 作为开发环境，一方面可以方便地嵌入 OpenGL，另一方面也便于算法的实现。然后通过我们自行研制的六维鼠标(如图 6 所示)输入信号，控制虚拟样机。当操作者控制六维鼠标时，手施加的力和力矩被六维鼠标的传感器实时检测，然后输入计算机经过相应的运算处理后，产生相应的多自由度变量输出，从而改变机构中各构件的位置和姿态。通过前面计算出的冗余驱动并

联机器人的反解表达式，可以算出虚拟样机的各个驱动量，用 OpenGL 对图像进行实时重画，完成机构的运动仿真，从而验证了反解的正确性。由于这一过程采用了可以实时获取输入信号的六维鼠标装置，因此实现了真正的六维空间的人机交互，图 7 是通过六维鼠标对这种冗余驱动并联机器人进行实时控制的运动仿真。



图 6 新型六维鼠标



图 7 六维鼠标实时控制冗余驱动并联机构虚拟样机

5 结论

提出了一种采用自均力冗余驱动接口模块的冗余驱动方式，从而避免了采用传统冗余驱动方式所引入的运动惯性和控制复杂性等问题。基于这种冗余驱动方式构造了一种具有 10 个输入的 6 自由度并联机器人，该冗余驱动并联机器人反解唯一，并具有显式的表达，最后用自行研制的六维鼠标对机器人虚拟样机进行实时控制，验证了反解的正确性。

参 考 文 献

- 1 蔡胜利,白师贤.冗余驱动的并联机器人性能分析.机械科学与技术,1996,15(2):235~238
- 2 蔡胜利,白师贤.冗余驱动消减弹性并联机器人振动的研究.机械科学与技术,1997,16(6):941~944
- 3 吴宇列,吴学忠,李圣怡.冗余并联机构的分类研究.机械科学与技术,2002,21(1):1~2

- 4 吴宇列, 吴学忠, 李圣怡. 并联机构的奇异与冗余. 机械科学与技术, 2002, 21(4): 593 ~ 595
- 5 张立杰, 刘辛军. 平面 2 自由度驱动冗余并联机器人的机构设计. 机械工程学报, 2002, 38(12): 49 ~ 53
- 6 Liu G F, Wu Y L. Analysis and control of redundant parallel manipulators. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2001: 21 ~ 26
- 7 Choudhury P, Ghosal A. Singularity and controllability analysis of parallel manipulators and closed-loop mechanisms. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(10): 1455 ~ 1479
- 8 Yi B J. Geometric analysis of antagonistic stiffness in redundantly actuated parallel mechanisms. J. of Robotic Systems, 1993, 10(5): 581 ~ 603
- 9 Brien J F O, Wen J T. Redundant actuation for improving kinematic manipulability. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1999, 2: 1520 ~ 1525
- 10 Thümmel T. Dynamic balancing of linkage by active control with redundant drives. In: Proceedings of the 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milano, 1995, 2: 970 ~ 975

KINEMATIC ANALYSIS AND SIMULATION OF A 6-DOF REDUNDANT ACTUATION PARALLEL MECHANISM

Zhang Yanfei

*(Institute of Robotics, Beihang University,
Beijing 100083)*

Gong Jinliang

*(College of Mechanical Engineering, Yanshan
University, Qinhuangdao 066004)*

Li Weimin

*(School of Mechanical Engineering, Hebei University
of Technology, Tianjin 300130)*

Gao Feng

*(State Key Laboratory of Vibration, Shock & Noise,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)*

Abstract : Using the interface module of force self-evening, a new method of constituting redundant actuation parallel robots is proposed and based on this method, a 6-DOF parallel robot with 10 actuators is presented. Kinematic of the robot is also analyzed and the only expressions are obtained in an explicit form. Then the kinematics simulation is made by the aid of 6-DOF-mouse which is developed by ourselves and the validity of its kinematics solution is verified.

Key words : Redundant actuation Inverse kinematics

6-DOF-mouse

作者简介: 张彦斐, 女, 1977 年出生, 博士研究生。主要研究方向为冗余输入并联机器人技术及装备。

E-mail: gjlwing@sina.com