

一种六杆并联机器人的控制问题和控制器研究

尹旭峰 郇极

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院)

摘 要: 针对一种六杆并联结构工业机器人,研究了其运动学逆解和正解算法,以及它们在开放式数控系统中的具体实现技术,解决了基于逆解算法的实时坐标变换问题和基于正解算法的系统初始化问题,并给出了相应模块与数控系统内核的接口,最后在一种开放式数控系统平台上实际开发成功针对这种并联结构机器人的控制系统,从而得出结论,采用正确的实现技术,并联结构机器人的实时控制问题可以在开放式数控系统中很好地得到解决。

关键词: 机器人; 数值控制; 并联机构; 开放系统

中图分类号: TG 659

文献标识码: A

文章编号: 1001-5965(2003)06-0556-05

相对于传统的串联机构,并联机构具有刚度重量比大、负载与机构质量比大、低惯性、高速度、精度高等显著优点,但是其工作空间与机构整体尺寸比值小、结构设计困难、运动学计算繁琐等缺陷也极大地制约着并联机构在实际生产中的应用^[1]。随着相关研究工作的不断深入,以及机械制造技术、计算机控制技术和伺服技术的发展,20世纪90年代以来,并联机构已经开始逐步应用于机床和工业机器人领域。

本文研究内容来自北京航空航天大学与德国 Braunschweig 理工大学的合作研究项目:“基于开放式数控系统的六杆并联机器人控制器研究”。控制器采用北京航空航天大学开发的 CH2010 开放式数控系统,六杆并联结构工业机器人和伺服系统由德国 Braunschweig 理工大学提供,在开放式数控系统上开发出实时坐标变换功能,完成对六杆并联机器人的运动控制,最后联调运行在德国 Braunschweig 理工大学完成。

1 HEXA 机器人的结构组成

德国 Braunschweig 理工大学开发研制的这种用于普通装配的六自由度并联结构机器人,命名为 HEXA,其结构组成如图 1 所示^[2]。

HEXA 机器人由一个定平台、一个动平台以及六条支链组成,每条支链又由一台伺服电机、一

根主动臂和一根连杆组成。六台伺服电机两两一组,每组间成 120° 夹角安装在定平台上。主动臂与电机轴固联,它与连杆之间以及连杆与动平台之间通过球铰连接。夹持器直接安装在动平台上。给定六个电机轴的转角即可唯一确定夹持器的空间位置和姿态。

HEXA 机器人因其独特的结构设计,其工作空间与整体尺寸的比值相对较高,虽然整体尺寸仅为 1m^3 ,但工作空间却可达到 $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 。另外,虽然每根连杆的直径只有 20mm ,但其负载重量与机构重量之比可达 $1:1$,并且刚度也相对较高。该机构的不足之处是工作空间内存在奇异位置^[2]。

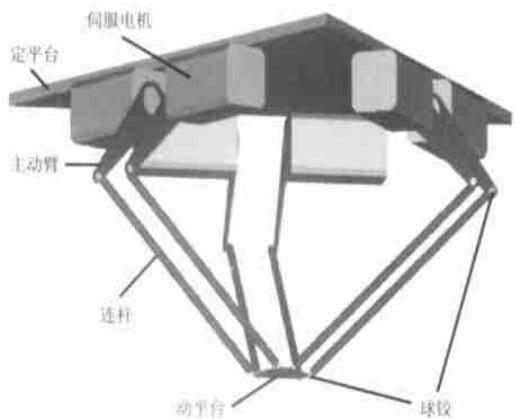


图 1 HEXA 机器人的结构示意图

2 HEXA 机器人的运动控制

HEXA 机器人的运动控制过程如图 2 所示。

假设用户编程指定夹持器在工作空间坐标系中由初始位置 P_a 以速度 v 沿直线运动到最终位置 P_b , 姿态由 H_a 均匀变化为 H_b , 则控制器中的插补器将根据 P_a 、 H_a 、 P_b 、 H_b 和 v 实时计算出其间各个时刻夹持器在工作空间坐标系中的位置 P_i 和姿态 H_i , 然后再通过实时坐标逆变换将 P_i 和 H_i 转换成各个电机轴的转角命令值 $q_1 \sim q_6$ 控制电机运动, 通过六杆联动机构使夹持器到达指定的位置和姿态。

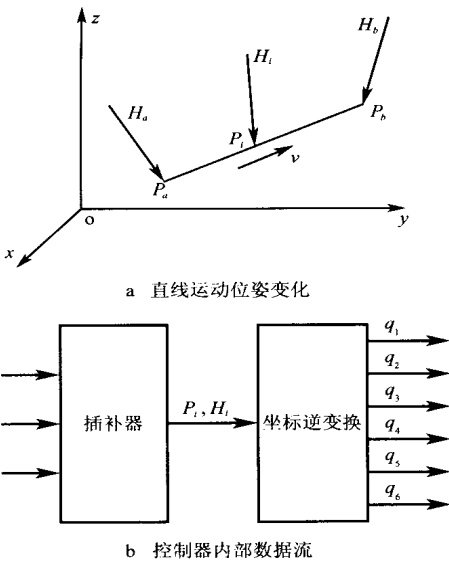


图 2 HEXA 机器人运动控制示意图

3 HEXA 机器人的逆解算法

图 2 中的坐标逆变换也称为并联机构的逆解问题 IKP (Inverse Kinematics Problem)。不同的并联机构其 IKP 算法公式是不同的, 必须独立推导并求解。下面给出 HEXA 机器人的 IKP 算法公式及其简单推导过程。

定义坐标系如图 3 所示: 在定平台中心 O 处定义空间坐标系 (X, Y, Z) 以及 6 个局部坐标系 (X_i', Y_i', Z_i') , 其中 $i = 1, \dots, 6$ (下文中如无特别声明, i 均表示 1 到 6 的整数); 在动平台中心 o 处定义局部坐标系 (x, y, z) 以及 6 个局部坐标系 (x_i', y_i', z_i') ; 并在夹持器中心 P 定义局部坐标系 (x, y, z) 的平移坐标系 (x_P, y_P, z_P) ; A_i 、 B_i 和 C_i 依次为第 i 条支链上的连杆与动平台连接球铰

的球心、电机轴端面圆心、以及连杆与主动臂连接球铰的球心, 则 HEXA 机构的逆解问题 (IKP) 可以具体表述如下:

已知 夹持器中心点 P 的空间位置时间函数 $X_P(t)$ 、 $Y_P(t)$ 、 $Z_P(t)$ 和用欧拉角表示的姿态时间函数 $\psi(t)$ 、 $\vartheta(t)$ 、 $\varphi(t)$; P 点在局部坐标系 (x, y, z) 中的坐标值 x_P, y_P, z_P ; 相关的机构尺寸 b, b', L, M, R_B, r_P 和角度 γ_i, γ_i' 。

求解 电机轴转角时间函数 $q_i(t)$ 。

根据坐标变换公式可知, 在动平台 (x_i', y_i', z_i') 坐标系中有

$$\left. \begin{aligned} b_i' &= (-1)^i b' \\ x_{Ai}' &= r_P \\ y_{Ai}' &= b_i' \\ z_{Ai}' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

在动平台 (x, y, z) 坐标系中有

$$\left. \begin{aligned} x_{Ai} &= x_{Ai}' \cos \gamma_i' - y_{Ai}' \sin \gamma_i' \\ y_{Ai} &= x_{Ai}' \sin \gamma_i' + y_{Ai}' \cos \gamma_i' \\ z_{Ai} &= z_{Ai}' \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在空间坐标系 (X, Y, Z) 中有

$$\begin{bmatrix} X_{Ai} \\ Y_{Ai} \\ Z_{Ai} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{EULER} \cdot \begin{bmatrix} x_{Ai} - x_P \\ y_{Ai} - y_P \\ z_{Ai} - z_P \end{bmatrix} \quad (4)$$

在定平台 (X_i', Y_i', Z_i') 坐标系中有

$$\left. \begin{aligned} X_{Ai}' &= X_{Ai} \cos \gamma_i + Y_{Ai} \sin \gamma_i \\ Y_{Ai}' &= Y_{Ai} \cos \gamma_i - X_{Ai} \sin \gamma_i \\ Z_{Ai}' &= Z_{Ai} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

再根据每一支链的几何关系式

$$\|A_i C_i\|^2 - M^2 = (X_{Ai}' - X_{Ci}')^2 + (Y_{Ai}' - Y_{Ci}')^2 + (Z_{Ai}' - Z_{Ci}')^2 - M^2 = 0$$

可以推得逆解 (IKP) 算法公式如下

$$\left. \begin{aligned} u_i &= -Z_{Ai}' \\ v_i &= R_B - X_{Ai}' \\ w_i &= [(X_{Ai}' - R_B)^2 + (Y_{Ai}' - b_i')^2 + (Z_{Ai}')^2 + L^2 - M^2] / (2L) \\ q_i &= \arctan 2(w_i / \pm \sqrt{u_i^2 + v_i^2 - w_i^2}) + \arctan 2(v_i / u_i) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在前述公式中, 欧拉变换矩阵 \mathbf{R}_{EULER} 由公式 (8) 给出。若要采用滚转、俯仰和侧摆角度来表示姿态变化, 只需将欧拉矩阵 \mathbf{R}_{EULER} 替换成如公式 (9) 所示的 \mathbf{R}_{RPY} 变换矩阵即可, 其中的 ψ, ϑ, φ 即为对应的滚转角、俯仰角和侧摆角。

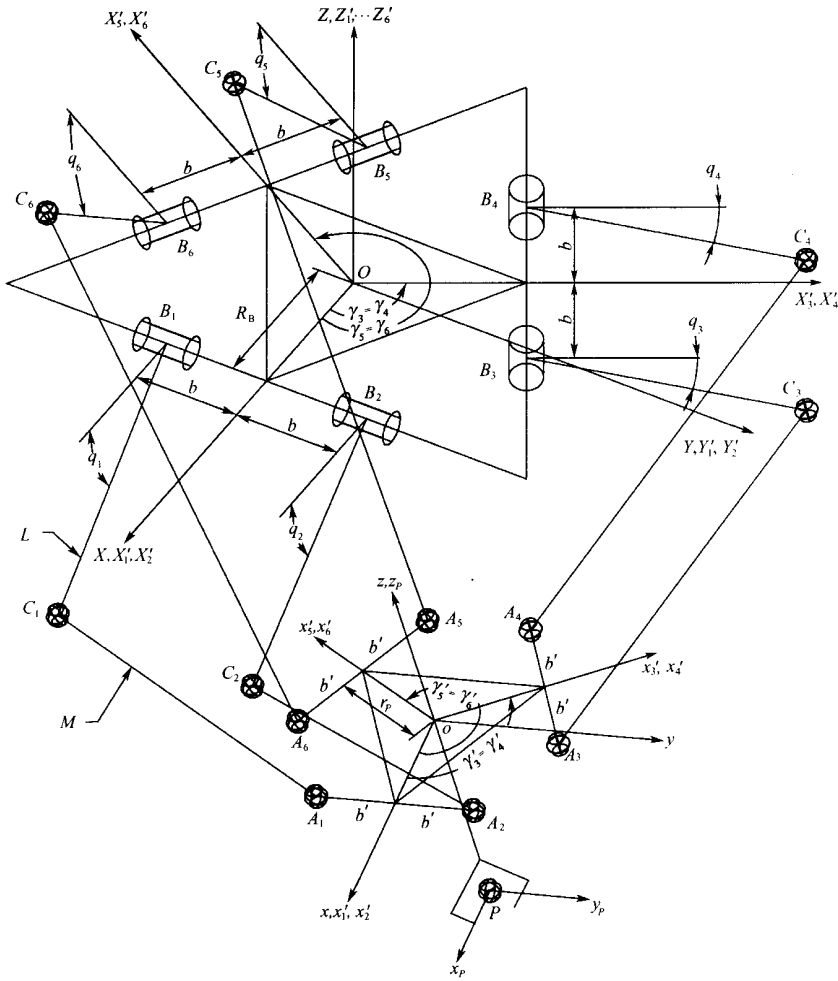


图3 HEXA 机器人逆解算法图

$$R_{EULER} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi & -\cos \psi \cos \vartheta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \vartheta \\ \sin \psi \cos \vartheta \cos \varphi + \cos \psi \sin \varphi & -\sin \psi \cos \vartheta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta \cos \varphi & \sin \vartheta \sin \varphi & \cos \vartheta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_{RPY} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & \cos \psi \sin \vartheta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \vartheta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi \\ \sin \psi \cos \vartheta & \sin \psi \sin \vartheta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \vartheta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \sin \varphi & \cos \vartheta \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (9)$$

因为HEXA机器人的工作空间中存在奇异位置,所以必须在逆解变换的同时对其工作空间进行实时监控,避免机构运行至奇异位置。

在实际控制中,首先利用逆解算法根据指定的空间位置和姿态计算出各电机轴的转角以及各关节点 A_i 、 B_i 和 C_i 的空间位置,再根据它们之间的几何关系完成工作空间检查。若检查无误,则向伺服驱动器发出新的电机轴转角命令值;若出错,则报警并停止运行,而不会损坏机构,因为这时新命令值尚未发往伺服驱动器。

4 HEXA 机器人的正解算法

并联机构的正解问题 DKP (Direct Kinematics

Problem)是指:给定六个伺服电机的转角,求解机构的空间位置和姿态,一个比较典型的用途是在并联机器人启动上电后,根据各个电机所处的初始角度确定夹持器的初始空间位置和姿态。仍然利用图3,HEXA机器人的正解问题可以具体表述如下:

已知 电机轴转角时间函数 $q_i(t)$; 夹持器中心点 P 在局部坐标系 (x, y, z) 中的坐标值 x_p, y_p, z_p ; 相关的机构尺寸 b, b', L, M, R_B, r_p 和角度 γ_i, γ_i' 。

求解 夹持器中心点 P 的空间位置时间函数 $X_P(t), Y_P(t), Z_P(t)$ 和用欧拉角表示的姿态时间函数 $\psi(t), \vartheta(t), \varphi(t)$ 。

通常, 并联机构的正解问题无法给出解析解, 实际应用中大多采用迭代法求得精度许可范围内的数值解. 下面给出 DKP 算法的迭代公式.

如前所述, 每一支链有下列几何关系式:

$$f_i = \|A_i C_i\|^2 - M^2 = (X_{A_i}' - X_G')^2 + (Y_{A_i}' - Y_G')^2 + (Z_{A_i}' - Z_G')^2 - M^2 = 0 \quad (10)$$

则可获得 JACOBI 矩阵如下:

$$J_{DKP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X} & \frac{\partial f_1}{\partial Y} & \frac{\partial f_1}{\partial Z} & \frac{\partial f_1}{\partial \psi} & \frac{\partial f_1}{\partial \vartheta} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_2}{\partial X} & \frac{\partial f_2}{\partial Y} & \frac{\partial f_2}{\partial Z} & \frac{\partial f_2}{\partial \psi} & \frac{\partial f_2}{\partial \vartheta} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_3}{\partial X} & \frac{\partial f_3}{\partial Y} & \frac{\partial f_3}{\partial Z} & \frac{\partial f_3}{\partial \psi} & \frac{\partial f_3}{\partial \vartheta} & \frac{\partial f_3}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_4}{\partial X} & \frac{\partial f_4}{\partial Y} & \frac{\partial f_4}{\partial Z} & \frac{\partial f_4}{\partial \psi} & \frac{\partial f_4}{\partial \vartheta} & \frac{\partial f_4}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_5}{\partial X} & \frac{\partial f_5}{\partial Y} & \frac{\partial f_5}{\partial Z} & \frac{\partial f_5}{\partial \psi} & \frac{\partial f_5}{\partial \vartheta} & \frac{\partial f_5}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_6}{\partial X} & \frac{\partial f_6}{\partial Y} & \frac{\partial f_6}{\partial Z} & \frac{\partial f_6}{\partial \psi} & \frac{\partial f_6}{\partial \vartheta} & \frac{\partial f_6}{\partial \varphi} \end{bmatrix} \quad (11)$$

采用 NEWTON-RAPHSON 迭代法可得如下迭代公式:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \psi \\ \vartheta \\ \varphi \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \psi \\ \vartheta \\ \varphi \end{bmatrix}_k - J_{DKP}^{-1} \Big|_k \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix}_k \quad (12)$$

在实际应用中, 若工作条件允许, 例如夹持器和机构与工件没有碰撞, 可采用一种简化的 DKP 算法: 首先控制并联机构运行到一个指定的启动位置, 此时动平台位于定平台正下方位置, 则六个伺服电机的转角相等并可知, 根据简单的几何算法即可求得动平台及夹持器的空间位置和姿态.

5 基于 CH2010 数控系统的控制器实现

CH2010 数控系统是北京航空航天大学在国家 863 计划支持下开发成功的开放式数控系统平台^[3], 主要应用于各种高性能和特殊要求的机床控制, 例如: 5 坐标加工中心、柔性生产线、车铣复合加工机床、数控凸轮磨床等. 系统设计中预留了用于机器人控制的软件接口, 允许接入各种结构机器人的控制软件模块.

CH2010 开放式数控系统基于 PC 机和光纤数字通讯现场总线 SERCOS 技术, 系统硬件结构简

单, 只由两块板卡组成, 一块为 80486-133 或以上的工控 PC 机主板, 另一块为 SERCOS-Master 卡. SERCOS-Master 卡上同时带有机床操作按钮、倍率开关和手轮接口, 以满足机床和各种数控机械操作的需要. CH2010 可以控制 1 到 50 个伺服电机, 具有很强的灵活性, 扩充和裁减方便, 在同一硬件平台上, 可以开发多种控制系统. 系统 CNC 与伺服驱动器之间采用光缆连接, 大大减少电缆布线, 并能提供丰富的诊断信息, 便于系统安装和维护, 提高系统可靠性. 图 4 为 CH2010 系统控制 HEXA 机器人的硬件结构框图.

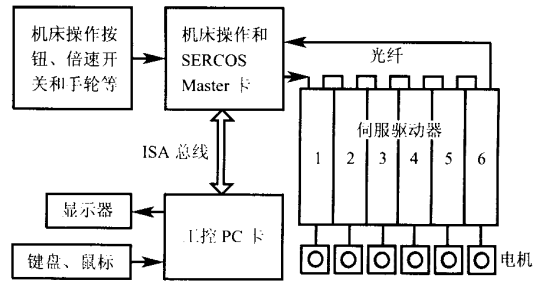


图 4 CH2010 系统控制 HEXA 机器人的硬件结构框图

CH2010 数控系统在 Windows 3.x 或 Windows 9x 操作系统下运行, 其 NC 内核用 C 语言编写, 控制功能十分丰富, 具有各种插补功能、机械误差补偿功能、故障诊断功能、加工循环功能、示教编程功能等; 预留了多种控制函数接口, 为系统用户提供开发环境, 开发各种专有控制功能. CH2010 的应用软件(数据管理、人机界面)用 Visual Basic 语言编写, 用户可以非常方便地使用 Windows 操作系统提供的各种系统资源, 满足特殊控制功能要求, 也可以直接在系统上运行来自其它软件开发商的 DOS、Windows 3.x 和 Windows 9x 应用程序和开发工具, 例如: CAD/CAM、数据库、Internet、多媒体等.

在 HEXA 机器人的控制器中, CH2010 通过 SERCOS-Master 卡控制 6 个具有 SERCOS 接口的伺服驱动器和电机, 执行图 2 所示的 $q_1 \sim q_6$ 运动. 利用 NC 内核提供的二个预留接口, 作者开发了 HEXA 机器人控制模块, 其软件结构见图 5.

1) 启动初始化模块: 由 NC 内核的启动初始化接口调用. 此模块在系统上电后读取电机轴初始转角 $q_1 \sim q_6$, 然后按 DKP 算法公式(10)~(12)计算夹持器在空间坐标系中的初始位置和姿态, 可以使用完全 DKP 变换或简化 DKP 变换.

2) 实时坐标变换模块: 由 NC 内核的实时坐标变换接口调用. 此模块根据 NC 插补器计算出

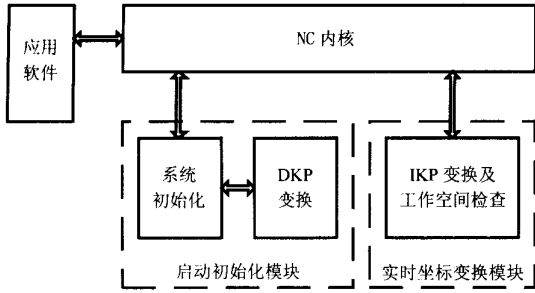


图5 CH2010系统控制HEXA机器人的软件原理框图

的夹持器瞬时位置和姿态(图2),按IKP算法公式(1)~(9)计算获得电机轴转角 $q_1 \sim q_6$,同时还完成对工作空间的实时监视,防止机构运行到奇异位置。

系统运行证明,在CH2010开放式数控系统平台上,通过合适的接口技术可以方便地实现对HEXA类型的六杆并联结构机器人的控制,为建立并联结构机器人控制系统提供基础平台。

6 结束语

文章针对一种六杆并联结构工业机器人,研

究了其运动学逆解和正解算法,以及它们在开放式数控系统中的具体实现技术,解决了基于逆解算法的实时坐标变换问题和基于正解算法的系统初始化问题,并给出了相应模块与数控系统内核的接口,最后在一种开放式数控系统平台上实际开发成功针对这种并联结构机器人的控制系统,从而得出结论,采用正确的实现技术,并联结构机器人的实时控制问题可以在开放式数控系统中很好地得到解决。

参考文献 (References)

- [1] Tsai Lungven. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1999
- [2] Hesselbach J, Kerle H. Structurally adapted kinematic algorithms for parallel robots up to six degrees of freedom (DOF)[A]. World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms[C], 1995. 1935 ~ 1939
- [3] 郇极,尹旭峰.基于数字伺服现场总线技术的开放式数控系统[J].中国机械工程,1999(10):1132~1134
Huan Ji, Yin Xufeng. Open CNC system based on fieldbus [J]. China Mechanical Engineering, 1999(10): 1132 ~ 1134(in Chinese)

Research on Control Problem and Controller of Parallel Robot

Yin Xufeng Huan Ji

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract: The inverse kinematics problem and direct kinematics problem of a six branches parallel robot were studied. Their realizing technologies based on open CNC system, especially the real-time coordinate transformation based on the IKP algorithm and the system initialization based on the DKP algorithm were settled. The interfaces between these modules and NC kernel were given. Finally, a controller based on an open CNC system has been successfully developed to control the parallel robot. It can be concluded that using open CNC system and proper interface technologies, real-time control to a parallel robot can be realized.

Key words: robots; numerical control; parallel manipulator; open system