



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106625573 A

(43)申请公布日 2017. 05. 10

(21)申请号 201610938701.9

(22)申请日 2016.10.25

(71)申请人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

(72)发明人 田文杰 尹福文 刘祺 丁雅斌
刘海涛 黄田 肖聚亮 秦旭达
梅江平

(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代
理事务所 12201

代理人 吴学颖

(51)Int. Cl.

B25J 9/00(2006.01)

B25J 9/16(2006.01)

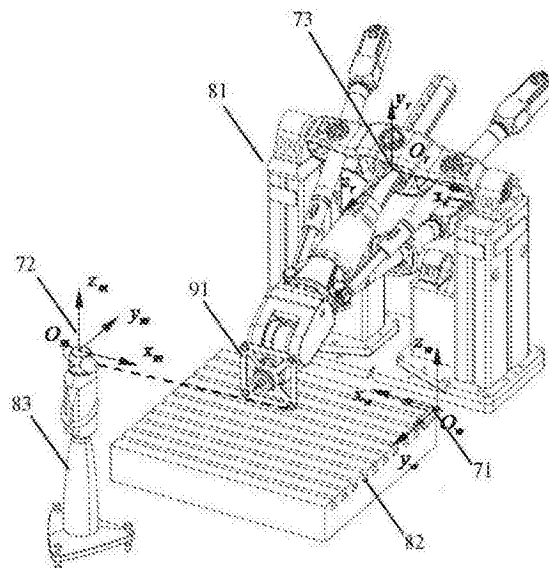
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术

(57)摘要

本发明公开了一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术;建立坐标系;并联机构位姿误差检测及预估;串联转头位姿误差检测及预估;混联机器人位姿误差预估及补偿;检测混联机器人在工作空间内的位姿误差,直至精度满足需求。本发明结合了串联机器人工作空间大和并联机器人加速度大、刚度高的特点,以高速高精加工为目标,在大尺度非结构环境下的加工制造领域具有广泛的应用前景,适用于机器人误差补偿。



1. 一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术,其特征在于,包括以下步骤:

(1) 建立坐标系统;

(2) 并联机构位姿误差检测及预估:保持串联转头不动,测量并联机构在工作空间中一组离散点处的动平台位姿误差,并通过插值手段预估其运动至工作空间内任一点处的动平台位姿误差;

(3) 串联转头位姿误差检测及预估:保持并联机构不动,测量串联转头每一回转轴的六维运动误差以及串联转头的结构误差,预估串联转头运动至其工作空间内任一方位时刀具相对于动平台的位姿误差;

(4) 混联机器人位姿误差预估及补偿:当混联机器人运动至空间任一位姿时,利用上述并联机构位姿误差和串联转头位姿误差的预估结果,计算得到当前位姿下的机器人位姿误差,将该位姿误差取相反数后与理想位姿叠加,并据此利用运动学逆解求得各主动关节运动量,作为运动控制的实际输入变量;

(5) 检测混联机器人在工作空间内的位姿误差,若其不满足混联机器人精度需求,重复上述步骤(1)至步骤(4),直至精度满足需求。

2. 根据权利要求1所述的一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术,其特征在于,所述步骤(1)中坐标系统包括激光跟踪仪测量坐标系和工件坐标系,所述工件坐标系作为统一基准坐标系。

3. 根据权利要求1所述的一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术,其特征在于,所述步骤(2)中并联机构位姿误差检测及预估的过程如下:

在并联机构动平台上选取参考点,将并联机构工作空间划分为空间网格,所有网格依顺序编号为 $1, 2, \dots, i_{\text{并}}, \dots, N_{\text{并}}$,第 $i_{\text{并}}$ 个网格的所有节点分别记为 $P_{i_{\text{并}}}^1, P_{i_{\text{并}}}^2, \dots, P_{i_{\text{并}}}^{m_{\text{并}}}$,其中 $m_{\text{并}}$ 为每个网格的节点数目;

保持串联转头不动,控制并联机构动平台的参考点运动至各个网格节点处,测量并记录各节点处的动平台位姿误差,记第 $i_{\text{并}}$ 个网格的第 $j_{\text{并}}$ 个节点处的动平台位姿误差向量为 $\mathbf{A}_{i_{\text{并}}}^{j_{\text{并}}} = \left(\Delta \mathbf{r}_{i_{\text{并}}}^{j_{\text{并}}} \quad \Delta \boldsymbol{\theta}_{i_{\text{并}}}^{j_{\text{并}}} \right)^T$,其中 $\Delta \mathbf{r}_{i_{\text{并}}}^{j_{\text{并}}}$ 为第 $i_{\text{并}}$ 个网格的第 $j_{\text{并}}$ 个节点处的动平台参考点位置误差向量, $\Delta \boldsymbol{\theta}_{i_{\text{并}}}^{j_{\text{并}}}$ 为第 $i_{\text{并}}$ 个网格的第 $j_{\text{并}}$ 个节点处的动平台姿态误差向量;

当并联机构运动至其工作空间内任一位姿处时,寻找并确定当前并联机构动平台参考点所在的网格单元,提取该网格单元所有节点处的动平台位姿误差测量值,依据参考点在上述网格中的相对空间位置,采用插值运算手段计算并预估当前位姿处动平台的位姿误差为:

$$\Delta_{\text{并}} = \text{Int} (X_{\text{并}}, P_{\text{并}}, \Omega_{\text{并}})$$

其中, $\Delta_{\text{并}}$ 表示当前位姿处动平台的位姿误差向量, $\text{Int}(\cdot)$ 表示插值函数, $X_{\text{并}}$ 表示动平台位姿向量, $P_{\text{并}}$ 表示网格所有节点的空间位置坐标的集合, $\Omega_{\text{并}}$ 表示网格所有节点处动平台位姿误差向量的集合。

4. 根据权利要求1所述的一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术,其特征在于,所述步骤(3)中串联转头位姿误差检测及预估的过程如下:

将串联转头的第一回转轴和第二回转轴的回转范围分别划分为角度区间;

保持并联机构不动,分别控制串联转头的第一回转轴和第二回转轴做回转运动,检测并记录各回转构件运动至上述角度区间端点处时的位姿误差;

当串联转头的第一回转轴、第二回转轴分别运动至角度 $\theta_{串,1}$ 、角度 $\theta_{串,2}$ 时,寻找并确定该转轴包含上述角度值的最小区间单元,提取区间两个端点处回转构件的位姿误差测量值,采用插值运算手段计算并预估当前角度下回转构件的位姿误差:

$$\Delta_{串,i} = \text{Int}(\theta_{串,i}, P_{串,i}, \Delta_{串,i}), i=1,2$$

其中, $\Delta_{串,i}$ 表示第*i*回转轴回转部件位姿误差向量, $\text{Int}(\cdot)$ 表示插值函数, $\theta_{串,i}$ 表示第*i*回转轴转角值, $P_{串,i}$ 表示第*i*回转轴角度区间端点值构成的集合, $\Delta_{串,i}$ 表示第*i*回转轴角度区间端点处回转部件位姿误差向量集合;

检测并拟合串联转头各转动轴回转轴线的空间方位,并计算第一回转轴、第二回转轴及并联机构动平台三者间的结构误差,所有结构误差构成误差向量 $\Delta_{结构}$;

综合考虑两个回转轴线的运动误差及结构误差,预估刀具相对于动平台的位姿误差:

$$\Delta_{串} = A \begin{pmatrix} \Delta_{串,1} & \Delta_{串,2} & \Delta_{结构} \end{pmatrix}^T$$

其中, $\Delta_{串}$ 表示刀具相对于动平台的位姿误差向量, A 表示串联转头误差映射矩阵。

5. 根据权利要求1所述的一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术,其特征在于,所述步骤(4)中运动控制的实际输入变量的计算方法如下:

$$p = p_0 - J(\Delta_{并} + \Delta_{串})$$

$$q = f^{-1}(p, s)$$

其中, p_0 表示理想情况下刀尖点位置信息与刀具姿态信息构成的位姿向量, J 表示用于将位姿误差变换至全局坐标系的误差变换矩阵, p 表示用于求解运动控制实际输入变量的机器人末端位姿向量, $f^{-1}(\cdot)$ 表示混联机器人运动学逆解, s 表示混联机器人结构参数向量, q 表示用于误差补偿的运动控制的实际输入变量构成的向量。

一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术

技术领域

[0001] 本发明涉及制造装备的误差补偿技术,尤其涉及一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术,属于机器人领域。

背景技术

[0002] 由三自由度并联机构与两自由度串联转头搭建而成的五自由度混联机器人是一种新型五轴联动加工装备,其结合了串联机器人工作空间大和并联机器人加速度大、刚度高的特点,以高速高精加工为目标,在大尺度非结构环境下的加工制造领域具有广泛的应用前景。如Tricept、Exechon等五自由度混联机器人已在航空航天、汽车制造等领域开展了初步应用,并取得了良好效果。

[0003] 精度是该类五自由度混联机器人的重要性能指标。在具备良好基础制造精度的前提下,误差补偿是进一步提高该类装备精度的有效手段。通常情况下,误差补偿分为以下四个步骤:误差建模、误差检测、误差辨识和补偿实施。以往在精度要求不高的场合,上述方法尚可满足工程需求,然而随着对该类装备精度要求的逐步提升,上述传统补偿方法已无法使装备达到所需精度。主要原因在于:第一,该类五自由度混联机器人关节数目较多,每一关节存在六项误差源,关节两两之间又存在多项结构误差,故误差源数量众多,若考虑全部几何误差源,则模型过于复杂且会导致模型过度参数化,影响辨识精度,若只考虑部分几何误差源,则无法精确描述装备的误差特性;第二,前述误差模型仅可考虑装备的几何误差,然而误差检测环节得到的末端位姿误差测量值不仅含有几何误差源的影响,而且包含重力场引起的静变形误差、温度场变化引起的热变形误差等,忽略此类误差将导致误差辨识结果偏离真值,从而无法准确预估混联机器人在任一位姿处的误差补偿值;第三,现有误差补偿技术步骤繁琐,且误差累积现象严重,制约补偿精度的提高,如未建模误差导致模型无法精确描述真实机构、测量环节引入测量噪声、误差辨识环节中采用数据拟合技术带来的计算误差等。

发明内容

[0004] 本发明的目的是为了克服现有技术中的不足,提供一种高精度、高效率、便于工业现场应用的、可直接基于误差检测数据完成误差补偿的五自由度混联机器人直接误差补偿技术。

[0005] 本发明的目的是通过以下技术方案实现的。

[0006] 本发明的一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术,包括以下步骤:

[0007] (1) 建立坐标系统;

[0008] (2) 并联机构位姿误差检测及预估:保持串联转头不动,测量并联机构在工作空间中一组离散点处的动平台位姿误差,并通过插值手段预估其运动至工作空间内任一点处的动平台位姿误差;

[0009] (3) 串联转头位姿误差检测及预估:保持并联机构不动,测量串联转头每一回转轴

的六维运动误差以及串联转头的结构误差,预估串联转头运动至其工作空间内任一方位时刀具相对于动平台的位姿误差;

[0010] (4) 混联机器人位姿误差预估及补偿:当混联机器人运动至空间任一位姿时,利用上述并联机构位姿误差和串联转头位姿误差的预估结果,计算得到当前位姿下的机器人位姿误差,将该位姿误差取相反数后与理想位姿叠加,并据此利用运动学逆解求得各主动关节运动量,作为运动控制的实际输入变量;

[0011] (5) 检测混联机器人在工作空间内的位姿误差,若其不满足混联机器人精度需求,重复上述步骤(1)至步骤(4),直至精度满足需求。

[0012] 所述步骤(1)中坐标系包括激光跟踪仪测量坐标系和工件坐标系,所述工件坐标系作为统一基准坐标系。

[0013] 所述步骤(2)中并联机构位姿误差检测及预估的过程如下:

[0014] 在并联机构动平台上选取参考点,将并联机构工作空间划分为空间网格,所有网格依顺序编号为 $1, 2, \dots, i_{\text{并}}, \dots, N_{\text{并}}$,第 $i_{\text{并}}$ 个网格的所有节点分别记为 $P_{\text{并}}^1, P_{\text{并}}^2, \dots, P_{\text{并}}^{m_{\text{并}}}$,其中 $m_{\text{并}}$ 为每个网格的节点数目;

[0015] 保持串联转头不动,控制并联机构动平台的参考点运动至各个网格节点处,测量并记录各节点处的动平台位姿误差,记第 $i_{\text{并}}$ 个网格的第 $j_{\text{并}}$ 个节点处的动平台位姿误差向量为 $\Delta_{\text{并}}^{j_{\text{并}}} = \begin{pmatrix} \Delta r_{\text{并}}^{j_{\text{并}}} & \Delta \theta_{\text{并}}^{j_{\text{并}}} \end{pmatrix}^T$,其中 $\Delta r_{\text{并}}^{j_{\text{并}}}$ 为第 $i_{\text{并}}$ 个网格的第 $j_{\text{并}}$ 个节点处的动平台参考点位置误差向量, $\Delta \theta_{\text{并}}^{j_{\text{并}}}$ 为第 $i_{\text{并}}$ 个网格的第 $j_{\text{并}}$ 个节点处的动平台姿态误差向量;

[0016] 当并联机构运动至其工作空间内任一位姿处时,寻找并确定当前并联机构动平台参考点所在的网格单元,提取该网格单元所有节点处的动平台位姿误差测量值,依据参考点在上述网格中的相对空间位置,采用插值运算手段计算并预估当前位姿处动平台的位姿误差为:

[0017] $\Delta_{\text{并}} = \text{Int}(X_{\text{并}}, P_{\text{并}}, \Omega_{\text{并}})$

[0018] 其中, $\Delta_{\text{并}}$ 表示当前位姿处动平台的位姿误差向量, $\text{Int}(\cdot)$ 表示插值函数, $X_{\text{并}}$ 表示动平台位姿向量, $P_{\text{并}}$ 表示网格所有节点的空间位置坐标的集合, $\Omega_{\text{并}}$ 表示网格所有节点处动平台位姿误差向量的集合。

[0019] 所述步骤(3)中串联转头位姿误差检测及预估的过程如下:

[0020] 将串联转头的第一回转轴和第二回转轴的回转范围分别划分为角度区间;

[0021] 保持并联机构不动,分别控制串联转头的第一回转轴和第二回转轴做回转运动,检测并记录各回转构件运动至上述角度区间端点处时的位姿误差;

[0022] 当串联转头的第一回转轴、第二回转轴分别运动至角度 $\theta_{\text{串},1}$ 、角度 $\theta_{\text{串},2}$ 时,寻找并确定该转轴包含上述角度值的最小区间单元,提取区间两个端点处回转构件的位姿误差测量值,采用插值运算手段计算并预估当前角度下回转构件的位姿误差:

[0023] $\Delta_{\text{串},i} = \text{Int}(\theta_{\text{串},i}, P_{\text{串},i}, \Delta_{\text{串},i}), i=1, 2$

[0024] 其中, $\Delta_{\text{串},i}$ 表示第 i 回转轴回转部件位姿误差向量, $\text{Int}(\cdot)$ 表示插值函数, $\theta_{\text{串},i}$ 表示第 i 回转轴转角值, $P_{\text{串},i}$ 表示第 i 回转轴角度区间端点值构成的集合, $\Delta_{\text{串},i}$ 表示第 i 回转轴角度区间端点处回转部件位姿误差向量集合;

[0025] 检测并拟合串联转头各转动轴回转轴线的空间方位,并计算第一回转轴、第二回

转轴及并联机构动平台三者间的结构误差,所有结构误差构成误差向量 $\Delta_{\text{结构}}$;

[0026] 综合考虑两个回转轴线的运动误差及结构误差,预估刀具相对于动平台的位姿误差:

$$[0027] \quad \Delta_{\text{串}} = A \left(\Delta_{\text{串},1}^T \quad \Delta_{\text{串},2}^T \quad \Delta_{\text{结构}}^T \right)^T$$

[0028] 其中, $\Delta_{\text{串}}$ 表示刀具相对于动平台的位姿误差向量,A表示串联转头误差映射矩阵。

[0029] 所述步骤(4)中运动控制的实际输入变量的计算方法如下:

$$[0030] \quad p = p_0 - J (\Delta_{\text{并}} + \Delta_{\text{串}})$$

$$[0031] \quad q = f^{-1}(p, s)$$

[0032] 其中, p_0 表示理想情况下刀尖点位置信息与刀具姿态信息构成的位姿向量,J表示用于将位姿误差变换至全局坐标系的误差变换矩阵,p表示用于求解运动控制实际输入变量的机器人末端位姿向量, $f^{-1}(\cdot)$ 表示混联机器人运动学逆解,s表示混联机器人结构参数向量,q表示用于误差补偿的运动控制的实际输入变量构成的向量。

[0033] 与现有技术相比,本发明的技术方案所带来的有益效果是:

[0034] (1) 本发明,直接利用机器人工作空间误差测量数据实施误差补偿,可同时补偿机器人的几何误差、运动误差、热误差、重力场引起的变形误差等,由于该方法全面考虑了机器人系统的静态/准静态误差,故误差补偿效果明显优于传统的基于几何误差辨识结果的误差补偿方法;

[0035] (2) 本发明,仅需借助机器人运动学逆解计算补偿量,而无需建立误差模型、辨识模型,计算方法简便,计算效率高,可用于机器人的实时在线补偿;

[0036] (3) 本发明,所需误差测量、误差补偿的时间短、效率高,适用于工业生产现场的机器人设备巡检、精度调校,避免传统方法耗时较长而占用机器人过多的生产时间。

附图说明

[0037] 图1是五自由度混联机器人的一个方向的结构示意图;

[0038] 图2是五自由度混联机器人的另一个方向的结构示意图;

[0039] 图3是由五自由度混联机器人搭建而成的加工中心结构示意图;

[0040] 图4是五自由度混联机器人位姿误差测量原理示意图;

[0041] 图5是五自由度混联机器人位姿测量装置示意图;

[0042] 图6是五自由度混联机器人位姿误差检测方案示意图;

[0043] 图6a是串联转头中第二回转轴误差测量示意图;

[0044] 图6b是串联转头中第一回转轴误差测量示意图;

[0045] 图6c是串联转头和并联结构的连接示意图;

[0046] 图6d是并联结构误差测量示意图;

[0047] 图7是五自由度混联机器人误差补偿流程示意图。

[0048] 附图标记:11第一固定轴座;12第一转动支架;13第一长度调节装置;23第二长度调节装置;24第二铰链;33第三长度调节装置;34第三铰链;41第二固定轴座;42第二转动支架;43第四长度调节装置;44第四铰链;5动平台;6串联转头;61第一回转轴;62第二回转轴;63主轴;64刀具;71工件坐标系;72激光跟踪仪测量坐标系;73机架坐标系;81五自由度混联机器人;82工作台;83激光跟踪仪;91位姿测量装置;92安装板;93连接法兰;94磁座安装槽;

95磁座;96反射镜。

具体实施方式

[0049] 下面结合附图和具体实施例对本发明加以详细说明。

[0050] 本实施例是针对公开号为CN104985596A的中国专利公开的一种含转动支架的五自由度混联机器人的直接误差补偿技术。

[0051] 下面结合附图1和附图2简要说明CN104985596A中公开的五自由度混联机构型装备的结构。该五自由度混联机构型装备由具有一个平动和二转动的三自由度并联机构和与之串接的具有两个转动自由度的串联转头组成,串联转头6固接于并联机构的动平台。所述的串接在动平台5末端的串联转头6为二自由度A/C摆头,包括第一回转轴61和第二回转轴62。所述的三自由度并联机构包括第一长度调节装置13、第二长度调节装置23、第三长度调节装置33和第四长度调节装置43,以及第一转动支架12和第二转动支架42。所述第一转动支架12的两侧端分别各通过一自由度铰链旋转地连接有一个第一固定轴座11,所述第二转动支架42的两侧端分别各通过一自由度铰链旋转地连接有一个第二固定轴座41,所述第一长度调节装置13的一端贯穿所述第一转动支架12的中部与动平台5固定连接,所述第二长度调节装置23和第三长度调节装置33的一端分别贯穿所述第一转动支架12对应地通过第二铰链24和第三铰链34与动平台5连接,所述第二长度调节装置23和第三长度调节装置33对称地设置于第一长度调节装置13的两侧,所述第一长度调节装置13、第二长度调节装置23和第三长度调节装置33的中部分别各通过具有一个转动自由度的铰链连接在第一转动支架12上,所述第四长度调节装置43的一端贯穿第二转动支架42通过第四铰链44与动平台5连接,所述第四长度调节装置43设置在第一长度调节装置13的下方,所述第四铰链44为具有三个转动自由度的球铰链,且三个转动轴线不共线但相交于一点。所述第四长度调节装置43的中部通过具有一个转动自由度铰链旋转地连接在第二转动支架42上。位姿测量装置91由安装板92、连接法兰93、磁座95和反射镜96组成,开展测量时,安装板92可通过连接法兰93固定连接于主轴63的端面上,四个磁座95通过过盈配合固定安放在位于安装板92四角的磁座安装槽94中,反射镜96可精确地固定吸附于任意一个磁座95上,以利用激光跟踪仪83获取反射镜96的中心点的空间位置信息。

[0052] 本发明的一种五自由度混联机器人直接误差补偿技术,通过直接测量并联机构和串联转头6在有限位形下的位姿误差(位置误差与姿态误差的统称),经插值补偿在任意位形下的位姿误差,如图3至图7所示,该技术主要包括以下步骤:

[0053] 一、建立坐标系统

[0054] 选用激光跟踪仪83作为测量仪器,建立激光跟踪仪测量坐标系72及工件坐标系71,确定所述激光跟踪仪测量坐标系72与工件坐标系71之间的相对位姿关系,并以工件坐标系71作为后续误差测量与补偿等环节的统一基准坐标系。

[0055] 二、并联机构位姿误差检测及预估

[0056] 利用激光跟踪仪83测量与动平台5固接的位姿测量装置91上不共线四点的空间位置坐标,并据此解算动平台5在激光跟踪仪测量坐标系72中的位置与姿态坐标,将所述位置与姿态坐标换算至工件坐标系71并与动平台5理想位置与姿态坐标相比较,即可获取动平台5在当前位姿下的位置与姿态误差,具体计算方法为:

[0057] 记激光跟踪仪83所测位姿测量装置上不共线四点的位置坐标为 $r_i = (x_i \ y_i \ z_i)^T$, 则动平台5参考点位置向量 $r = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 r_i$ 。令四个测量点所拟合平面的方程为 $ax+by+c=z$, 则由方程参数构成的向量 $X = (a \ b \ c)^T$ 可由下式求解

$$[0058] \quad X = (H^T H - \lambda_{\min}^2 I)^{-1} H^T L \quad (1)$$

$$[0059] \quad H = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_4 & y_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[0060] \quad L = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0061] 式中, λ_{\min} 表示矩阵 $[A \ L]$ 的最小特征值, I 表示三阶单位矩阵。

[0062] 利用平面方程确定平面法向量 $n_1 = (a \ b \ -1)^T$, 利用不相邻两个测量点(如点1和点3)的位置坐标确定平面内的一个坐标轴 $n_2 = (r_3 - r_1) / \|r_3 - r_1\|_2$, 第三个坐标轴由右手定则确定 $n_3 = n_1 \times n_2$ 。将所得坐标系与理想坐标系对比即可求取动平台姿态误差向量。

[0063] 选取并联机构动平台5上与第一回转轴61和第二回转轴62(A/C轴)轴线交点相重合的点作为参考点, 依所述参考点将并联机构工作空间划分为若干空间六面体网格, 所有网格依顺序编号为 $1, 2, \dots, i_{\text{并}}, \dots, N_{\text{并}}$, 第 $i_{\text{并}}$ 个网格的所有节点分别记为 $P_{\text{并}}^1, P_{\text{并}}^2, \dots, P_{\text{并}}^{m_{\text{并}}}$, 其中 $m_{\text{并}}$ 为每个网格的节点数目, $m_{\text{并}} = 1, 2, \dots, 8$ 。

[0064] 保持串联转头6不动, 测量并联机构在工作空间中一组离散点处的动平台5位姿误差(动平台5参考点位置误差与动平台姿态误差), 也就是, 控制并联机构动平台5的参考点运动至各个网格节点处, 利用激光跟踪仪83测量并计算各节点处动平台5的位姿误差(动平台5参考点位置误差及动平台5姿态误差), 记第 $i_{\text{并}}$ 个网格的第 $j_{\text{并}}$ 个节点处的动平台位姿误差向量为 $\Delta_{\text{并}}^{j_{\text{并}}} = (\Delta r_{\text{并}}^{j_{\text{并}}} \ \Delta \theta_{\text{并}}^{j_{\text{并}}})^T$, 其中 $\Delta r_{\text{并}}^{j_{\text{并}}}$ 为第 $i_{\text{并}}$ 个网格的第 $j_{\text{并}}$ 个节点处的动平台5参考点位置误差向量, $\Delta \theta_{\text{并}}^{j_{\text{并}}}$ 为第 $i_{\text{并}}$ 个网格的第 $j_{\text{并}}$ 个节点处的动平台5姿态误差向量。

[0065] 当并联机构运动至其工作空间内任一位姿处时, 寻找并确定当前并联机构动平台5参考点所在的最小网格单元, 提取该网格单元所有节点处的动平台5位姿误差测量值, 依据参考点在上述网格中的相对空间位置, 采用三维插值运算手段计算并预估当前位姿处的动平台5位姿误差, 具体算法为:

$$[0066] \quad \begin{aligned} \Delta_{\text{并}} &= \text{Int}(X_{\text{并}}, P_{\text{并}}, \Omega_{\text{并}}) \\ &= (1-x)(1-y)(1-z)\Delta_{\text{并}}^{(1)} + (1-x)(1-y)z\Delta_{\text{并}}^{(2)} \\ &\quad + (1-x)y(1-z)\Delta_{\text{并}}^{(3)} + (1-x)yz\Delta_{\text{并}}^{(4)} + x(1-y)(1-z)\Delta_{\text{并}}^{(5)} \\ &\quad + x(1-y)z\Delta_{\text{并}}^{(6)} + xy(1-z)\Delta_{\text{并}}^{(7)} + xyz\Delta_{\text{并}}^{(8)} \end{aligned} \quad (4)$$

[0067] 其中, $\Delta_{\text{并}}$ 表示当前位姿处动平台的位姿误差向量, $\text{Int}(\cdot)$ 表示插值函数, $X_{\text{并}}$ 表示动平台位姿向量, $P_{\text{并}}$ 表示网格所有节点的空间位置坐标的集合, $\Omega_{\text{并}}$ 表示网格所有节点处动

平台位姿误差向量的集合, x, y, z 表示动平台参考点分六面体网格共顶点三边所形成的内分比, $\Delta_{\text{并}}^{(m)}$ 表示六面体网格第 m 节点处动平台的位姿误差向量, $m_{\text{并}}=1, 2, \dots, 8$ 。

[0068] 三、串联转头6位姿误差检测及预估

[0069] 保持并联机构不动, 测量串联转头6每一回转头轴的六维运动误差以及串联转头的结构误差, 预估串联转头6运动至其工作空间内任一方位时刀具64相对于动平台5的位姿误差(刀尖点相对于并联机构动平台5的位置误差与刀具64相对于并联机构动平台5的姿态误差)。

[0070] a) 将第一回转头轴61(转轴C)的回转范围划分为若干角度区间, 混联机器人回零后保持并联机构及第二回转头轴62(转轴A)不动, 控制第一回转头轴61(转轴C)做回转运动, 利用激光跟踪仪83检测并计算第一回转头轴61(转轴C)回转构件运动至上述区间端点处时回转构件的位姿误差, 同时利用前述测量数据拟合第一回转头轴61(转轴C)轴线的空间方位。

[0071] b) 将串联转头6的第二回转头轴62(转轴A)的回转范围划分为若干角度区间, 混联机器人回零后保持并联机构及第一回转头轴61(转轴C)不动, 控制第二回转头轴62(转轴A)做回转运动, 利用激光跟踪仪83检测并计算第二回转头轴62(转轴A)回转构件运动至上述区间端点处时回转构件的位姿误差, 同时利用前述测量数据拟合第二回转头轴62(转轴A)轴线的空间方位。

[0072] c) 当串联转头6运动至空间任一方位时, 计算第一回转头轴61(转轴C)的转角角度 $\theta_{\text{串},1}$ 和第二回转头轴62(转轴A)的转角角度 $\theta_{\text{串},2}$, 寻找并确定第一回转头轴61(转轴C)与第二回转头轴62(转轴A)包含上述角度值的最小区间单元, 提取该区间两个端点处第一回转头轴61(转轴C)与第二回转头轴62(转轴A)各自回转构件的位姿误差测量值, 依据当前角度值在所述角度区间中的相对位置, 采用三维插值方法计算并预估第一回转头轴61(转轴C)与第二回转头轴62(转轴A)各自回转构件的位姿误差:

$$[0073] \quad \Delta_{\text{串},i} = \text{Int}(\theta_{\text{串},i}, P_{\text{串},i}, \Delta_{\text{串},i}), i=1, 2 \quad (5)$$

[0074] 其中, $\Delta_{\text{串},i}$ 表示第 i 回转头轴回转部件位姿误差向量, $\text{Int}(\cdot)$ 表示插值函数, $\theta_{\text{串},i}$ 表示第 i 回转头轴转角值, $P_{\text{串},i}$ 表示第 i 回转头轴角度区间端点值构成的集合, $\Delta_{\text{串},i}$ 表示第 i 回转头轴角度区间端点处回转部件位姿误差向量集合;

[0075] 检测并拟合串联转头6各转动轴回转头轴线的空间方位, 并计算第一回转头轴61、第二回转头轴62及并联机构动平台5三者间的结构误差, 所有结构误差构成误差向量 $\Delta_{\text{结构}}$;

[0076] 综合考虑两个回转头轴线的运动误差及结构误差, 进而预估计算得到串联转头6末端运动部件刀具64相对于动平台5的位姿误差(刀尖点相对于并联机构动平台5的位置误差与刀具64相对于并联机构动平台5的姿态误差):

$$[0077] \quad \Delta_{\text{串}} = A \left(\Delta_{\text{串},1}^T \quad \Delta_{\text{串},2}^T \quad \Delta_{\text{结构}}^T \right)^T \quad (6)$$

[0078] 其中, $\Delta_{\text{串}}$ 表示刀具64相对于动平台5的位姿误差向量(刀尖点相对于并联机构动平台5参考点的位置误差以及刀具64相对于动平台5的姿态误差共同构成的误差向量), A 表示串联转头6误差映射矩阵。

[0079] 四、混联机器人位姿误差预估及补偿

[0080] 当混联机器人运动至空间任一方位时, 利用上述并联机构动平台5在工件坐标系下的位姿误差和串联转头6末端运动部件刀具64相对于动平台5的位姿误差, 将所得两组位

姿误差叠加得到串联转头6末端部件刀具64在工件坐标系下度量的位姿误差,得到当前位姿下的机器人位姿误差(刀尖点位置误差及刀具64姿态误差在基准坐标系中的度量),将该位姿误差取相反数后与机器人理想位姿线性叠加,将所得结果代入机器人运动学逆解模型求解得各主动关节运动量,也就是并联机构第一长度调节装置13、第二长度调节装置23、第三长度调节装置33、第一回转轴61(转轴C)以及第二回转轴62(转轴A)的运动量,以此作为机器人运动控制的实际输入变量以控制装备的运动。

[0081] 所述运动控制的实际输入变量的计算方法如下:

$$[0082] \quad p = p_0 - J(\Delta_{并} + \Delta_{串}) \quad (7)$$

$$[0083] \quad q = f^{-1}(p, s) \quad (8)$$

[0084] 其中, p_0 表示理想情况下刀尖点位置信息与刀具姿态信息构成的位姿向量, J 表示用于将位姿误差变换至全局坐标系的误差变换矩阵, p 表示用于求解运动控制实际输入变量的机器人末端位姿向量, $f^{-1}(\cdot)$ 表示混联机器人运动学逆解, s 表示混联机器人结构参数向量, q 表示用于误差补偿的运动控制的实际输入变量构成的向量。

[0085] 五、检测混联机器人在整个工作空间内的位姿误差(刀尖点位置误差与刀具姿态误差在工件坐标系下的度量),若所测混联机器人位姿误差满足机器人的精度需求,则补偿结束,若其不满足混联机器人精度需求,重复上述步骤一至步骤四,直至机器人位姿误差在全域内均小于允许值,精度满足需求。

[0086] 尽管上面结合附图对本发明的功能及工作过程进行了描述,但本发明并不局限于上述的具体功能和工作过程,上述的具体实施方式仅仅是示意性的,而不是限制性的,本领域的普通技术人员在本发明的启示下,在不脱离本发明宗旨和权利要求所保护的范围情况下,还可以做出很多形式,这些均属于本发明的保护之内。

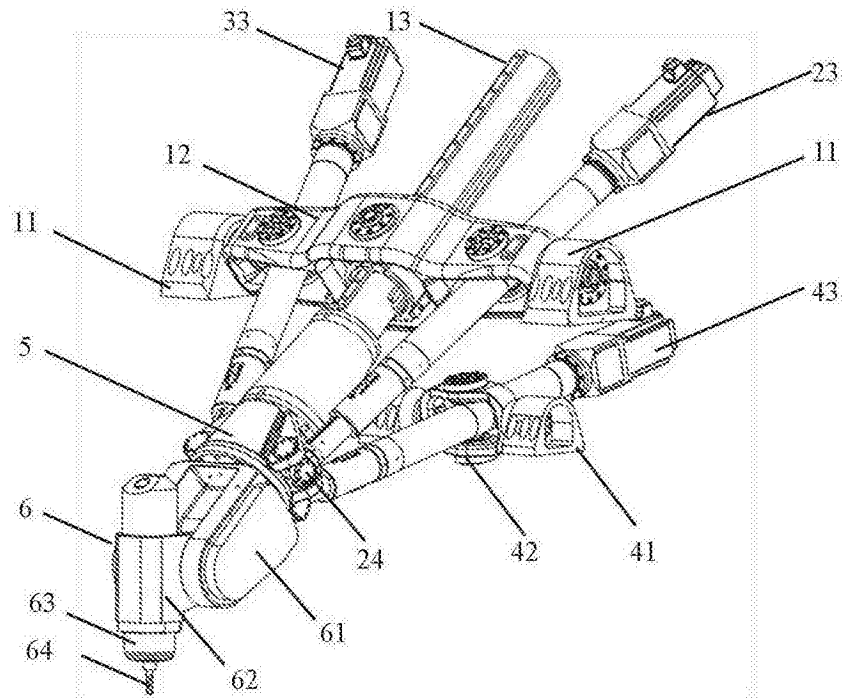


图1

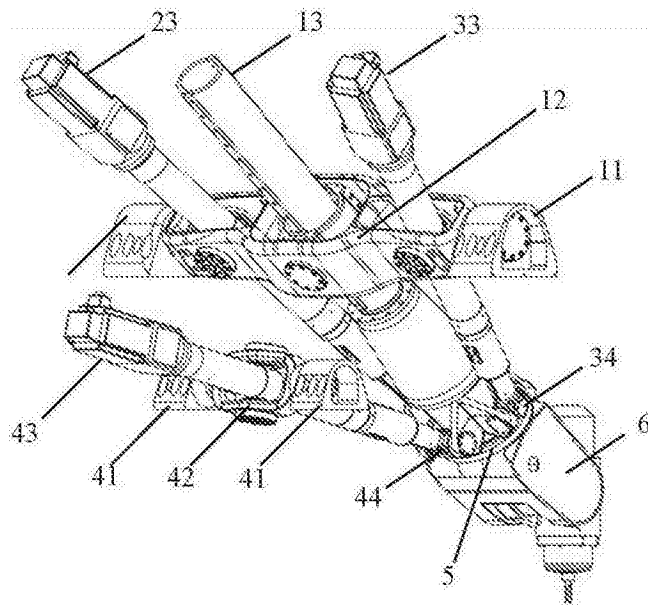


图2

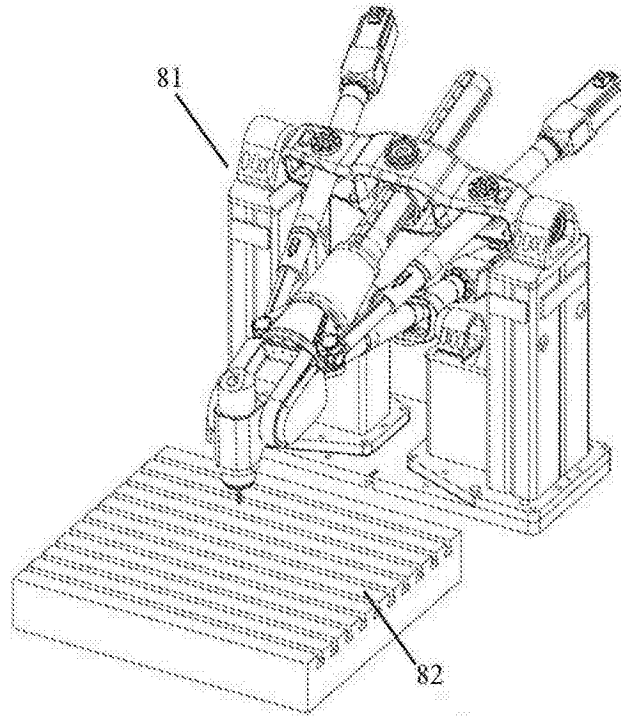


图3

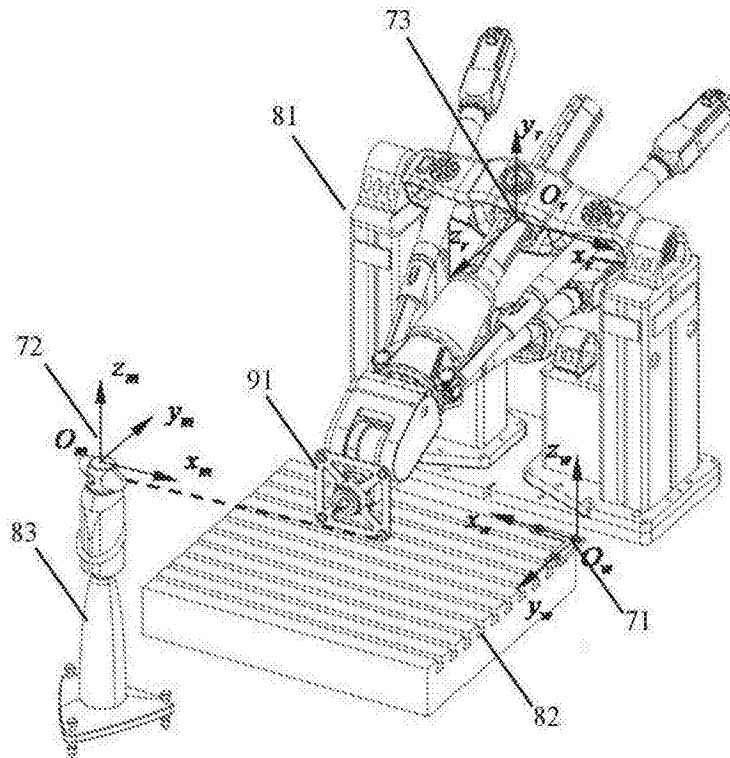


图4

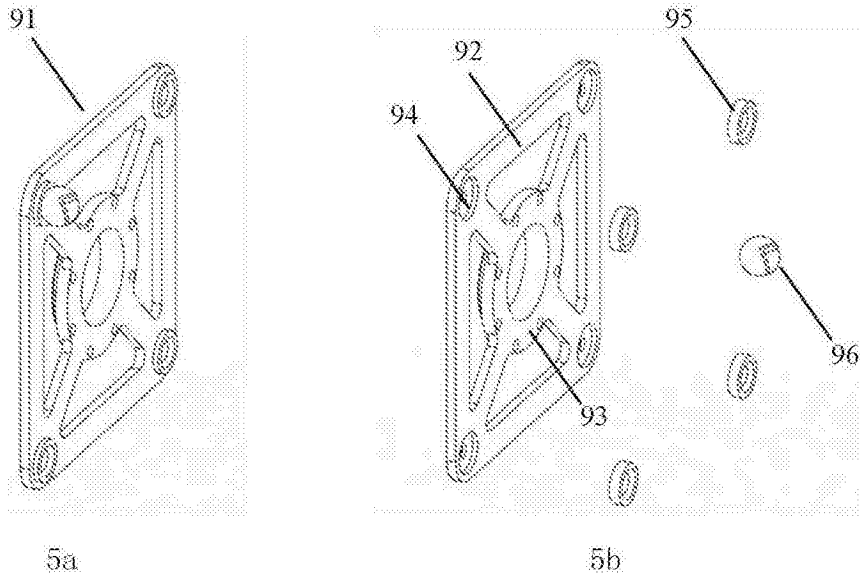


图5

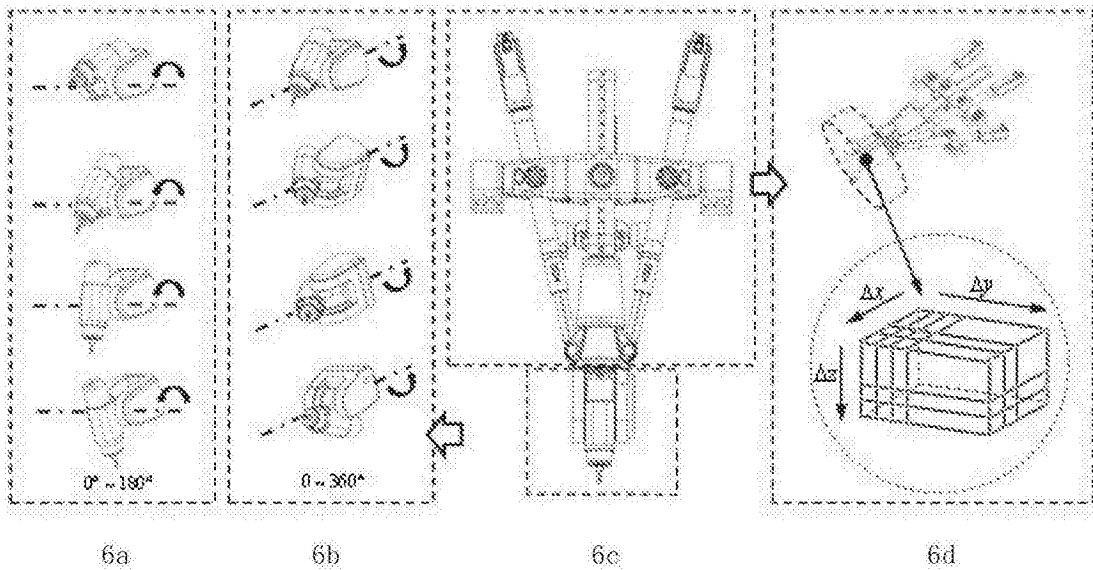


图6

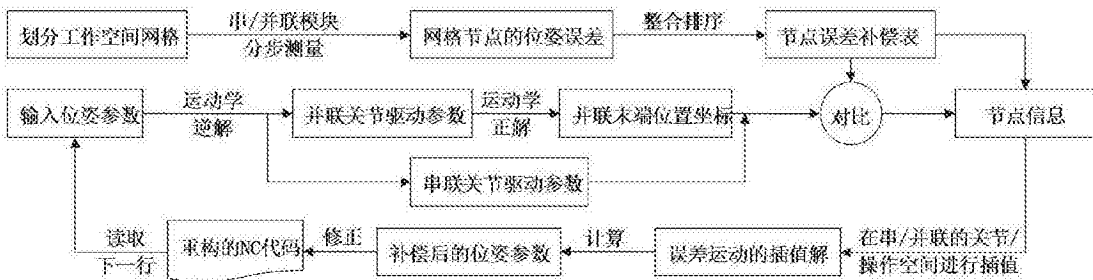


图7