DOI: 10.3901/JME.2019.11.046

考虑力补偿的 2(3PUS+S)并联机器人 主动关节同步控制*

山显雷^{1,2} 程刚¹ 陈世彪¹

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116;

2. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室 天津 300350)

摘要: 在并联机器人基于关节空间的控制中,运动控制精度不仅受结构误差及运动副摩擦的影响,由于闭链结构特点,还受主动支链的耦合及运动协调性的影响。以一种 2(3PUS+S)并联机器人为研究对象,在前期误差及摩擦补偿研究的基础上,开展主动关节的同步控制研究。通过建立基于关节空间的动力学模型确定主动关节由于惯量耦合引起的耦合力,以主动支链间的运动协调性为约束定义同步误差,并基于增广 PD 控制理论设计主动关节的同步控制策略,在进行结构误差修正的基础上以前馈补偿方式对耦合力及摩擦力进行补偿,基于控制试验验证了所设计控制策略的有效性。提出的考虑力补偿的主动关节同步控制策略对于改善并联机器人的运动控制精度具有重要作用。

关键词: 并联机器人; 动力学; 关节空间; 同步控制; 力补偿

中图分类号: TP242

Active Joint Synchronization Control of a 2(3PUS+S) Parallel Robot with Consideration of Force Compensation

SHAN Xianlei^{1,2} CHENG Gang¹ CHEN Shibiao¹

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116;

2. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of the State Education Ministry,
Tianjin University, Tianjin 300350)

Abstract: For joint space control of parallel robots, motion control accuracy is not only affected by the structural error and friction, but also by the coupling and motion coordination of the active joints due to the characteristics of the closed chain structure. Studies on active joint synchronization control of a 2(3PUS+S) parallel robot are conducted based on the early study on error and friction compensation. With the help of an established dynamic model based on joint space, the coupling force caused by inertia coupling is calculated. The synchronization error is defined by the motion coordination between active joints, and then, active joint synchronization control strategy is designed based on augmented PD control theory. On the base of the correction of structural error, the coupling force and friction are compensated by feedforward compensation. The last but not the least, the effectiveness of the control strategy is verified based on the control experiments. The proposed active joint synchronization control strategy with consideration of force compensation is of great importance to improve the motion control accuracy of parallel robots.

Key words: parallel robot; dynamics; joint space; synchronization control; force compensation

0 前言

并联机器人以多运动链构成闭链结构,具有高刚度、高精度以及高承载能力等优点^[1-2],被广泛应用于航空航天、医疗器械、加工装备及精密定位等领域^[3-5]。并联机器人机械系统及控制系统的性能决

定了其工作能力,目前,针对其机械系统已形成了较丰富的研究成果^[6-8],随着对并联机器人运动精度、工作效率等要求的提高,需要并联机器人克服摩擦、弹性变形、主动支链不同程度磨损等的不利影响^[9],如何从控制角度保证并联机器人的性能并充分发挥其结构性能优势引起了研究者的关注。然而,并联机器人由于闭链特点引起的运动和力耦合对其运动控制性能的保证提出了挑战。

目前,并联机器人的运动控制通常借鉴关节型

* 国家自然科学基金(91648105)和江苏高校优势学科建设工程资助项目。
20181012 收到初稿,20190402 收到修改稿

机器人或其他领域中较成熟的传统控制方法^[11], 这些方法虽然具有一定通用性, 但由于受结构误差、摩擦、外界扰动等非线性因素的影响, 难以实现高速、高精度控制。为了在控制过程中抑制误差、摩擦等的不利影响, 研究者们针对不同构型的并联机器人开展了静态误差^[11-12]及摩擦补偿^[13-14]研究, 改善了运动控制性能。并联机器人由于闭链结构特点, 动平台的位姿由多个主动关节共同决定, 主动关节间运动、力耦合作用同时存在。由于并联机器人动平台的位姿难以实时获取(尤其对于空间并联机器人), 其控制仍以基于关节空间的控制方法为主, 此时主动支链间因惯量耦合产生的耦合力矩作为干扰力矩影响了支链的控制性能^[15], 进而影响了整机性能; 另外, 控制过程中多主动支链的运动协调性也会影响动平台的控制精度^[16]。因此, 在并联机器人控制策略的设计过程中, 为了实现高速、高精度运动控制, 不仅要误差、摩擦等扰动进行抑制, 还要考虑闭链的耦合作用及多运动支链的运动协调性。目前, 针对空间并联机器人的相关研究成果还较少。

本文以一种 2(3PUS+S)并联机器人为研究对象, 在前期误差及摩擦补偿研究的基础上(文献[16]), 针对基于关节空间控制中主动支链耦合及运动协调性对运动控制精度的影响, 开展主动关节的同步控制研究。首先, 建立 2(3PUS+S)并联机器人关节空间内的动力学模型, 分离耦合力及摩擦力项; 然后, 定义主动支链间的同步误差, 并基于增广 PD 控制理论设计主动关节的同步控制策略, 耦合力及摩擦力以前馈方式进行补偿; 最后, 为验证所提出控制策略的有效性, 开展试验研究。

1 2(3PUS+S)并联机器人

2(3PUS+S)并联机器人由 2 组具有 3 转动自由度的 3PUS+S 并联机构串联而成, 3PUS+S 并联机构中主动支链的组成形式为“丝杆和螺母组成的移动副(P 副)-安装在直线模组滑块上的虎克铰(U 副)-定长连接杆-安装在动平台上的球铰(S 副)”, 中间被动支链通过 S 副与动平台连接, 2 个动平台(m_1 和 m_2)由三组直线模组(LN₁、LN₂ 和 LN₃)同时驱动, 每组直线模组有两个滑块, 滑块间的距离保持不变, 结构简图如图 1 所示。图 1 中, a_{ji} 和 b_{ji} ($j=1, 2; i=1, 2, 3$)分别为球铰球心和虎克铰十字轴中心点, A_i 为直线模组丝杆轴线在基座 B 上的位置。 o_j 和 O 分别为等边三角形 $a_{j1}a_{j2}a_{j3}$ 和 $A_1A_2A_3$ 的中心。在基座 B 的中心 O 点建立参考坐标系 $OXYZ$, X 轴过点 O 和点 A_3 , Z 轴垂直于基座 B 的平面, Y 轴根据右手定

则确定。在动平台 m_j 的中心 o_j 点建立随动坐标系 $o_jx_jy_jz_j$, y_j 轴通过点 a_{j3} , z_j 轴垂直于动平台 m_j 的平面, x_j 轴根据右手定则确定。安装在动平台 m_j 上球铰球心 a_{ji} 到 o_j 点的距离为 e_i , 直线模组上虎克铰十字轴中心 b_{ji} 到 Z 轴的距离为 E_i 。

图 1 2(3PUS+S)并联机器人结构简图

2(3PUS+S)并联机器人可以作为运动模拟装备的核心运动部分, 推力球轴承的旋转中心即为动平台的旋转中心, 推力球轴承的球窝部分安装在中间被动支链上, 两组并联机构的中间支链通过滚珠花键串联在一起。为平衡动平台 m_1 的重力, 在滚珠花键处安装了平衡弹簧, 2(3PUS+S)并联机器人的实物样机如图 2 所示。将 2(3PUS+S)并联机器人用于人工髋关节摩擦磨损试验装备时, 所需运动规律的简化表达式如式(1)所示, α 、 β 和 γ 为描述 2(3PUS+S)并联机器人动平台姿态的欧拉角。

$$\begin{cases} \gamma = 5.5 \cos[2\pi(t - 0.21)] + 1.5 \\ \beta = 6 \cos(2\pi t + \pi) - 4 \\ \alpha = 21.5 \cos(2\pi t) + 3.5 \end{cases} \quad (1)$$

图 2 2(3PUS+S)并联机器人实物样机

2 2(3PUS+S)并联机器人的同步控制

2.1 误差修正及摩擦、耦合力补偿

(1) 误差修正。2(3PUS+S)并联机器人中的误差包括静态误差(零件加工误差、装配误差等)及动态误差(丝杆螺母副的弹性变形、运动副间隙等)。对于静态误差,可以在误差建模、参数辨识的基础上在运动学模型中对结构参数进行修正,具体过程详见文献[17]。对2(3PUS+S)并联机器人进行静态误差修正后的运动学模型如式(2)所示(为了保证2个动平台的误差尽可能一致,采用相同部分误差的平均值对结构参数进行修正)

$$L_{ji} \mathbf{e}_i = -(\mathbf{r}_{Ai} + \Delta \mathbf{r}_{Ai}) - \left(\mathbf{d}_{ji} + \frac{\Delta \mathbf{d}_{1i} + \Delta \mathbf{d}_{2i}}{2} \right) - \left(l_{ji} + \frac{\delta_{1i} + \delta_{2i}}{2} \right) \mathbf{e}_{ji} + \left(\mathbf{h}_j + \frac{\Delta \mathbf{h}_1 + \Delta \mathbf{h}_2}{2} \right) + \mathbf{R}_j \cdot \left(\mathbf{r}_{aji} + \frac{\Delta \mathbf{r}_{a1i} + \Delta \mathbf{r}_{a2i}}{2} \right) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{h}_j(j=1, 2)$ 和 $\Delta \mathbf{h}_j$ 分别为动平台 $\mathbf{m}_j$ 的旋转中心在 $OXYZ$ 中的位置矢量和误差矢量, $\mathbf{R}_j$ 为随动坐标系 $o_jx_jy_jz_j$ 相对于 $OXYZ$ 的旋转矩阵, $\mathbf{r}_{aji}(j=1, 2; i=1, 2, 3)$ 和 $\Delta \mathbf{r}_{aji}$ 分别为球铰链球心 a_{ji} 在 $o_jx_jy_jz_j$ 中的位置矢量和误差矢量, $\mathbf{r}_{Ai}$ 和 $\Delta \mathbf{r}_{Ai}$ 分别为直线模组 LN_i 在 $OXYZ$ 中的位置矢量和误差矢量, $\mathbf{d}_{ji}$ 和 $\Delta \mathbf{d}_{ji}$ 分别为点 b_{ji} 与其到直线模组丝杆轴线的垂线交点组成的矢量及误差矢量, L_{ji} 为滑块 S_{ji} 相对于平面 XOY 的距离, $\mathbf{e}_i$ 为直线模组的单位方向矢量, l_{ji} 和 δ_{ji} 分别为连接杆 $b_{ji}a_{ji}$ 的长度及误差, $\mathbf{e}_{ji}$ 为连接杆 $b_{ji}a_{ji}$ 的单位方向矢量。

2(3PUS+S)并联机器人中的动态误差与动平台的姿态、外部载荷、惯性等有关,很难建立准确的数学模型,可以通过预估动态结构误差导致的动平台姿态误差,在工作空间中对误差进行修正。2(3PUS+S)并联机器人用于固定运动轨迹模拟时,可通过神经网络建立动平台动态误差与主动支链运动间的映射关系,实现在不同姿态下对动态结构误差导致的动平台姿态误差的预估,具体过程详见文献[17]。设动平台的理论姿态轨迹为 $\mathbf{q}$,修正后的轨迹如式(3)所示(为了保证2个动平台的误差尽可能一致,采用动平台误差的平均值进行修正)

$$\mathbf{q}_m = \mathbf{q} + \frac{\Delta \mathbf{q}_{e1} + \Delta \mathbf{q}_{e2}}{2} \quad (3)$$

式中, $\Delta \mathbf{q}_{e1}$ 和 $\Delta \mathbf{q}_{e2}$ 分别为预测得到的动态结构误差

导致的动平台 $\mathbf{m}_1$ 和 $\mathbf{m}_2$ 的姿态误差。

(2) 摩擦及耦合力补偿。2(3PUS+S)并联机器人中的运动副较多,运动副的摩擦在一定程度上影响了整机控制性能,尤其是将2(3PUS+S)并联机器人用于摩擦磨损试验装备中时,需要在关节上直接加载300~3000 N的动态载荷,此时关节、推力球轴承、丝杆与螺母结合处的摩擦将产生更显著影响。另一方面,由于2(3PUS+S)并联机器人动平台的姿态难以实时测量(试验过程中采用MPU6050惯性测量单元测试动平台的姿态,但长时间工作时会产生较大的漂移,可用于短时间内的试验数据采集,但不能作为控制系统中的姿态反馈传感器),因此,采用基于关节空间的控制方法。由于并联机构的闭链结构特点,在关节空间内主动支链间存在耦合力,耦合力作为外界扰动将影响主动支链的控制性能。为了保证2(3PUS+S)并联机器人的控制精度,需要对摩擦力及主动支链间的耦合力进行补偿。

首先,不考虑摩擦、间隙、弹性变形等的影响,在工作空间内基于Lagrange法建立2(3PUS+S)并联机器人的刚体动力学模型,如式(4)所示

$$\frac{p}{2\pi} (\mathbf{J}^{-1})^T \cdot [\mathbf{M}(\mathbf{q}) \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q})] = \mathbf{T}_L \quad (4)$$

式中, $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为惯性矩阵, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为科氏力和离心力矩阵, $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 为重力项, $\mathbf{T}_L$ 为直线模组电动机的驱动力矩矢量, $\mathbf{J}$ 为雅可比矩阵。

然后,根据文献[18]中的方法,将式(4)转化为基于关节空间的动力学模型,如式(5)所示

$$\mathbf{M}_J \cdot \ddot{\mathbf{L}}_2 + \mathbf{C}_J \cdot \dot{\mathbf{L}}_2 + \mathbf{G}_J + (\mathbf{M}_{Jc} \cdot \ddot{\mathbf{L}}_2 + \mathbf{C}_{Jc} \cdot \dot{\mathbf{L}}_2) = \mathbf{T}_L \quad (5)$$

令

$$\mathbf{M}_{J0} = \frac{p}{2\pi} (\mathbf{J}^{-1})^T \cdot \mathbf{M}(\mathbf{q}) \cdot \mathbf{J}^{-1}$$

$$\mathbf{C}_{J0} = \frac{p}{2\pi} (\mathbf{J}^{-1})^T \cdot \mathbf{M}(\mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{J}}^{-1} + \frac{p}{2\pi} (\mathbf{J}^{-1})^T \cdot \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \cdot \mathbf{J}^{-1}$$

则式(5)中

$$\mathbf{M}_J = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{J0}(1,1) & & \\ & \mathbf{M}_{J0}(2,2) & \\ & & \mathbf{M}_{J0}(3,3) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_J = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{J0}(1,1) & & \\ & \mathbf{C}_{J0}(2,2) & \\ & & \mathbf{C}_{J0}(3,3) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{Jc} = \begin{bmatrix} & \mathbf{M}_{J0}(1,2) & \mathbf{M}_{J0}(1,3) \\ \mathbf{M}_{J0}(2,1) & & \mathbf{M}_{J0}(2,3) \\ \mathbf{M}_{J0}(3,1) & \mathbf{M}_{J0}(3,2) & \end{bmatrix}$$

$$C_{jc} = \begin{bmatrix} C_{j0}(1, 2) & C_{j0}(1, 3) \\ C_{j0}(2, 1) & C_{j0}(2, 3) \\ C_{j0}(3, 1) & C_{j0}(3, 2) \end{bmatrix}$$

式中, $M_{jc} \cdot \ddot{L}_2 + C_{jc} \cdot \dot{L}_2$ 为耦合力, p 为丝杆的导程。

采用 Stribeck 摩擦模型分别描述关节、推力球轴承及丝杆与螺母结合处的摩擦 M_{thj} 、 M_{tj} 和 M_{fl} , 并将其向关节空间内转化, 通过试验对摩擦参数进行辨识, 具体过程详见文献[17]。2(3PUS+S)并联机器人包含运动副摩擦的动力学模型如式(6)所示

$$M_J \cdot \ddot{L}_2 + C_J \cdot \dot{L}_2 + G_J + \begin{pmatrix} M_{jc} \cdot \ddot{L}_2 + \\ C_{jc} \cdot \dot{L}_2 \end{pmatrix} + T_f = T_L \quad (6)$$

式中, $T_f = -\frac{p}{2\pi} (J^{-1})^T \cdot \sum_{j=1}^2 (M_{thj} + M_{tj}) - M_{fl}$ 。

在 2(3PUS+S)并联机器人基于关节空间的控制中, 通过前馈补偿抑制耦合力 $M_{jc} \cdot \ddot{L}_2 + C_{jc} \cdot \dot{L}_2$ 和摩擦力 T_f 的影响。

2.2 主动关节的同步控制策略

2(3PUS+S)并联机器人动平台的姿态由 3 条主动支链共同决定, 在基于关节空间的控制中, 主动支链间的运动协调性影响了动平台的姿态控制精度。因此, 为保证各主动支链间的运动协调, 基于同步控制思想设计基于关节空间的同步控制策略。在 2(3PUS+S)并联机器人中, 伺服电机带动滚珠丝杆实现运动的传递, 为了便于分析, 在控制策略的设计过程中以直线模组滑块 S_{2i} 的位移定义误差。若各直线模组滑块的实际位移与期望位移的比值相等, 则认为各主动支链的运动同步, 以此定义同步误差。设直线模组滑块 S_{2i} 的实际位移为 L_{2i}^a 、理论位移为 L_{2i}^d 、误差为 $\Delta L_{2i} = L_{2i}^a - L_{2i}^d$, 则各主动支链的同步性可描述为

$$\frac{L_{21}^a}{L_{21}^d} = \frac{L_{22}^a}{L_{22}^d} = \frac{L_{23}^a}{L_{23}^d} \quad (7)$$

2(3PUS+S)并联机器人主动支链的同步函数可表示为

$$\begin{cases} f_1(L_{21}^a, L_{22}^a, L_{23}^a) = \frac{L_{21}^a}{L_{21}^d} - \frac{L_{22}^a}{L_{22}^d} - \frac{L_{23}^a}{L_{23}^d} = 0 \\ f_2(L_{22}^a, L_{21}^a, L_{23}^a) = \frac{L_{22}^a}{L_{22}^d} - \frac{L_{21}^a}{L_{21}^d} - \frac{L_{23}^a}{L_{23}^d} = 0 \\ f_3(L_{23}^a, L_{21}^a, L_{22}^a) = \frac{L_{23}^a}{L_{23}^d} - \frac{L_{21}^a}{L_{21}^d} - \frac{L_{22}^a}{L_{22}^d} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)在对应的理论轨迹点进行泰勒展开, 且只考虑一阶项, 并结合式(7)和式(8), 主动支链间的同步误差可表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_{21} = \frac{2\Delta L_{21}}{L_{21}^d} - \frac{\Delta L_{22}}{L_{22}^d} - \frac{\Delta L_{23}}{L_{23}^d} \\ \varepsilon_{22} = \frac{2\Delta L_{22}}{L_{22}^d} - \frac{\Delta L_{21}}{L_{21}^d} - \frac{\Delta L_{23}}{L_{23}^d} \\ \varepsilon_{23} = \frac{2\Delta L_{23}}{L_{23}^d} - \frac{\Delta L_{21}}{L_{21}^d} - \frac{\Delta L_{22}}{L_{22}^d} \end{cases} \quad (9)$$

根据 2(3PUS+S)并联机器人主动支链间的位移误差矢量 $\Delta L_2 = [\Delta L_{21}, \Delta L_{22}, \Delta L_{23}]^T$ 和同步误差矢量 $\varepsilon_2 = [\varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{23}]^T$ 定义耦合误差, 如式(10)所示

$$\Delta L_2^* = \Delta L_2 + Q \cdot \int_0^t \varepsilon_2(w) dw \quad (10)$$

式中, Q 为对角正定矩阵。

根据式(10)可得, 主动支链的耦合误差收敛时位置误差及同步误差均收敛, 因此设计 2(3PUS+S)并联机器人的控制策略时, 可将设计目标转变为使各主动支链的耦合误差渐进收敛。根据位置误差及同步误差定义滑模面为

$$s_{L2} = \Delta L_2^* + A_2 \cdot \Delta L_2 \quad (11)$$

式中, A_2 为对角正定矩阵。

定义 2(3PUS+S)并联机器人直线模组滑块的参考速度和参考加速度分别为

$$\begin{cases} \dot{L}_2^r = \dot{L}_2^d + Q \cdot \varepsilon_2 + A_2 \cdot \Delta L_2^* \\ \ddot{L}_2^r = \ddot{L}_2^d + Q \cdot \dot{\varepsilon}_2 + A_2 \cdot \dot{\Delta L}_2^* \end{cases} \quad (12)$$

根据式(6), 并基于增广 PD 控制理论设计 2(3PUS+S)并联机器人的同步控制律, 如式(13)所示

$$\begin{aligned} T_L &= M_J \cdot \ddot{L}_2^r + C_J \cdot \dot{L}_2^r + G_J + T_f + \\ &M_{jc} \cdot \ddot{L}_2^r + C_{jc} \cdot \dot{L}_2^r + K_d \cdot s_{L2} + K_c \cdot \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (13)$$

式中, K_d 和 K_c 均为对称正定矩阵。

2(3PUS+S)并联机器人主动关节的同步控制系统图如图 3 所示, 耦合力 $M_{jc} \cdot \ddot{L}_2 + C_{jc} \cdot \dot{L}_2$ 及摩擦力 T_f 以前馈方式进行补偿, 其中耦合力补偿时需要实时获取直线模组滑块的速度, 可通过伺服电机编码器的检测信号转化得到。基于 Lyapunov 法可以证明同步控制律(式(13))能够保证系统(式(6))稳定, 进而可以在理论上说明所设计的同步控制策略不会因为控制不协调引起振动甚至关节损坏, 在此不再赘述。

图3 2(3PUS+S)并联机器人的主动关节同步控制

3 试验研究

基于 2(3PUS+S)并联机器人主动关节的同步控制策略进行控制试验研究,在试验过程中,动平台的运动轨迹如式(1)所示。2(3PUS+S)并联机器人的主要结构、动力学参数如表 1 所示,关键误差、摩擦等参数见文献[17]。

表 1 2(3PUS+S)并联机器人的主要结构、动力学参数

参数	数值	参数	数值
连接杆长度	328	动平台 m_1 高度	899
/mm		/mm	
距离	144	动平台 m_2 高度	490
/mm		/mm	
距离	280	连接杆质量	1.827
/mm		/kg	
推力球		动平台质量	27.129
轴承半径	64	/kg	
/mm			
关节半径	15	连接杆惯性张量	$\begin{pmatrix} 26354 & 0 & 0 \\ 0 & 26411 & 0 \\ 0 & 0 & 478 \end{pmatrix}$
/mm		/(kg · mm ²)	
丝杆导程/mm	16	动平台惯性张量	$\begin{pmatrix} 246960 & 0 & 0 \\ 0 & 246960 & 0 \\ 0 & 0 & 382531 \end{pmatrix}$
		/(kg · mm ²)	
滑块质量/kg	2.997		

通过整定得到 2(3PUS+S)并联机器人主动关节同步控制的控制参数, $Q=\text{diag}[15, 15, 25]$ 、 $A_2=\text{diag}[200, 200, 250]$ 、 $K_d=\text{diag}[20, 20, 40]$ 、 $K_c=\text{diag}[30, 30, 55]$,在试验过程中得到直线模组滑块 S_{2i} 的位置误差及动平台的姿态误差,并与采用增广 PD 控制时的控制结果进行对比,如图 4 所示。为了比较所设计 2(3PUS+S)并联机器人控制策略的控制效果,以动平台姿态误差的均方根作为衡量指标,定义如下

$$R_{Err} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^N \left[\left(q_{jk}^d - q_{jk}^a \right)^T \cdot \left(q_{jk}^d - q_{jk}^a \right) \right]} \quad (14)$$

式中, N 为 1 s 内的采样点数, q_{jk}^d 和 q_{jk}^a 分别为第 k 个采样点时动平台 m_j 的理论姿态和实际姿态。

(a) 直线模组LN₁ (b) 直线模组LN₂ (c) 直线模组LN₃

图4 并联机器人的滑块位置、动平台姿态误差

通过对比图4a~4c中的结果,采用同步控制时直线模组LN₁、LN₂、LN₃滑块的最大位置误差分别为1.32 mm、1.07 mm和1.16 mm,而采用增广PD控制时相应的最大位置误差分别为1.46 mm、1.99 mm和1.06 mm,主动关节的同步控制改善了主动支链间的运动协调性。根据图4d~4f,采用同步控制时2(3PUS+S)并联机器人动平台m₁和m₂单自由度上最大姿态误差分别为0.760°和0.654°,姿态误差均方根值为0.479°;采用增广PD控制时,动平台m₁和m₂单自由度上最大姿态误差分别为0.980°和0.853°,姿态误差均方根值为0.535°。通过试验

结果可以看出,2(3PUS+S)并联机器人主动关节的同步控制策略由于改善主动支链间运动的协调性,提高了动平台姿态精度。

4 结论

(1) 针对并联机器人基于关节空间控制中主动支链的耦合及运动协调性对运动控制精度的影响,以一种2(3PUS+S)并联机器人为研究对象,开展主动关节的同步控制研究。以主动支链间的运动协调性为约束定义同步误差,并基于关节空间的动力学模型设计主动关节的同步控制策略,在进行结构误差修正的基础上以前馈补偿方式对耦合力及摩擦力进行补偿。

(2) 基于所设计的主动关节同步控制策略,在2(3PUS+S)并联机器人的实物样机上开展试验研究,得到直线模组滑块的位置误差及动平台的姿态误差,通过与采用增广PD控制时的结果进行对比可以看出,主动关节同步控制改善了主动支链间运动的协调性,提高了动平台的姿态精度。本文所提出的考虑力补偿的主动关节同步控制策略对于实现并联机器人的高速、高精度控制具有重要推动作用。

参 考 文 献

- [1] LIU H T, HUANG T, CHETWYND D G, et al. Stiffness modeling of parallel mechanisms at limb and joint/link levels[J]. IEEE. T. ROBOT., 2017, 33(3): 734-741.
- [2] LU Y, DAI Z H, YE N J. Stiffness analysis of parallel manipulators with linear limbs by considering inertial wrench of moving links and constrained wrench[J]. Robot. Cim-Int. Manuf., 2017, 46: 58-67.
- [3] 吴存存, 杨桂林, 陈庆盈, 等. 四自由度2PPPaR并联机构运动学及性能分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 36-45.
- [4] WU Cuncun, YANG Guilin, CHEN Qingying, et al. Kinematic and performance analysis of a 4-DOF 2PPPaR parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 36-45.
- [5] YANG C, LI Q C, CHEN Q H, et al. Elastostatic stiffness modeling of overconstrained parallel manipulators[J]. Mech. Mach. Theory, 2018, 122: 58-74.
- [6] SHAO Z F, MO J, TANG X Q, et al. Transmission index research of parallel manipulators based on matrix orthogonal degree[J]. Chin. J. Mech. Eng-En., 2017, 30(6): 1396-1405.
- [7] CAO W A, YANG D H, DING H F. A method for stiffness analysis of overconstrained parallel robotic mechanisms

- with Scara motion[J]. Robot. Cim-Int. Manuf., 2018, 49: 426-435.
- [7] 沈惠平, 邓嘉鸣, 孟庆梅, 等. 少输入-多输出并联机构的设计方法及其应用[J]. 机械工程学报, 2018, 54(1): 223-232.
- SHEN Huiping, DENG Jiaming, MENG Qingmei, et al. Design methods and applications for the fewer input-more output parallel mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(1): 223-232.
- [8] XU P, CHEUNG C F, LI B, et al. Kinematics analysis of a hybrid manipulator for computer controlled ultra-precision freeform polishing[J]. Robot. Cim-Int. Manuf., 2017, 44: 44-56.
- [9] YANG X, LIU H T, XIAO J L, et al. Continuous friction feedforward sliding mode controller for a TriMule hybrid robot[J]. IEEE-ASME. T. Mech., 2018, 23(4): 1673-1683.
- [10] CHUNG W K, FU L C, KROGER T. Handbook of Robotics 2nd edition, Chapter 8 on "Motion Control"[M]. Springer, 2016.
- [11] FU J X, GAO F, CHEN W X, et al. Kinematic accuracy research of a novel six-degree-of-freedom parallel robot with three legs[J]. Mech. Mach. Theory, 2016, 102: 86-102.
- [12] CHEN G L, KONG L Y, LI Q C, et al. Complete, minimal and continuous error models for the kinematic calibration of parallel manipulators based on POE formula[J]. Mech. Mach. Theory, 2018, 121: 844-856.
- [13] SHANG W W, CONG S, KONG F R. Identification of dynamic and friction parameters of a parallel manipulator with actuation redundancy[J]. Mechatronics, 2010, 20(2): 192-200.
- [14] WEN S H, YU H Y, ZHANG B W, et al. Fuzzy identification and delay compensation based on the force/position control scheme of the 5-DOF redundantly actuated parallel robot[J]. Int. J. Fuzzy. Syst., 2017, 19(1): 124-140.
- [15] 王冬, 吴军, 王立平, 等. 3-PRS 并联机器人惯量耦合特性研究[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 804-812.
- WANG Dong, WU Jun, WANG Liping, et al. Research on the inertia coupling property of a 3-PRS parallel robot[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 804-812.
- [16] SUN D, LU R, MILLS J K, et al. Synchronous tracking control of parallel manipulators using cross-coupling approach[J]. Int. J. Robot. Res., 2006, 25(11): 1137-1147.
- [17] SHAN X L, CHENG G. Structural error and friction compensation control of a 2(3PUS□+□S) parallel manipulator[J]. Mech. Mach. Theory, 2018, 124: 92-103.
- [18] 何景峰, 叶正茂, 姜洪洲, 等. 基于关节空间模型的并联机器人耦合性分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 161-165.
- HE Jingfeng, YE Zhengmao, JIANG Hongzhou, et al. Coupling analysis based on joint-space model of parallel robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 161-165.
-
- 作者简介: 山显雷, 男, 1987 年出生, 博士。主要研究方向为并/混联机器人的机电耦合及性能分析。
E-mail: xl_shan@foxmail.com
- 程刚(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人机构学、大型机电设备可靠性及故障诊断技术。
E-mail: chg@cumt.edu.cn
- 陈世彪, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为并联机器人控制技术。
E-mail: chenshibiao@cumt.edu.cn