DOI：10.3901/JME.2022.14.093

面向中大型铸造件的主从机器人系统及其遥操作加工方法*

王 猛[1,2] 宋轶民[1,2] 王攀峰[1,2] 赵学满[1,2] 连宾宾[1,2]
陈跃程[3] 孙 涛[1,2]
(1. 天津大学机械工程学院 天津 300350；
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；
3. 天津中屹铭科股份有限公司 天津 300400)

摘要：中大型铸造件合模线、浇冒口等残留特征具有尺寸随机、形貌随机、分布随机的特点，其安全高效高质量去除存在巨大挑战。对于此，提出以兼备高刚度和高灵活性的五自由度混联机器人为从动加工机器人、以具有力反馈信息的三平动并联机器人为主动操控机器人、以及基于主动和从动机器人的遥操作加工方法。首先，通过构造参数化、在线可调的禁止型虚拟夹具(Forbidden region virtual fixture，FRVF)，解决了遥操作过程中由于抖动、通讯延迟等因素导致的过度加工问题。其次，建立了基于增量式位置跟随与人工势场法的遥操作控制模型，以便对主动和从动机器人进行约束与引导。最后，进行仿真分析与试验验证。结果表明，FRVF 对空间复杂曲面的贴合度高，遥操作控制模型可确保加工区域不越过虚拟夹具表面，2.32 m×1.65 m×1.24 m 灰铸铁铸造件残留特征的去除率达 95%以上，一次加工后的表面粗糙度 2.1 μm，加工效率较人工方式提升了 4 倍。所提出的主从机器人系统及其遥操作加工方法，可有效实现中大型铸造件残留特征的高质量高效率去除加工，为其他中大型零部件高效加工提供新的解决思路。

关键词：中大型铸造件；机器人加工；遥操作；虚拟夹具；人工势场法
中图分类号：TP242

Master-slave Robot System and Its Teleoperation Machining Approach for Medium and Large Casting Parts

WANG Meng[1,2] SONG Yimin[1,2] WANG Panfeng[1,2] ZHAO Xueman[1,2] LIAN Binbin[1,2]
CHEN Yuecheng[3] SUN Tao[1,2]
(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350;
2. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350;
3. Tianjin Zhongyiming Technology Co., Ltd., Tianjin 300400)

Abstract：The residual features such as mould closing lines and pouring risers of medium and large castings are random in size, morphology and distribution, so there are great challenges in safe, efficient and high-quality removal. For this difficulty, a teleoperation machining method based on master and slave robots is proposed. A five degrees of freedom hybrid robot with both high stiffness and high dexterity is used as the slave machining robot and a three-translational parallel robot with force feedback is utilized as the master control robot. Firstly, the parametric, online adjustable forbidden region virtual fixture(FRVF) is constructed to solve the problem of excessive machining caused by shake, communication delay and other factors during the teleoperation process. Secondly,

* 国家自然科学基金(51875391，51875392)和天津市新一代人工智能科技重大专项(18ZXZNGX00350)资助项目。20210705 收到初稿，20211008 收到修改稿

a teleoperation control model based on incremental position following and artificial potential field is established, which is convenient for constraining and guiding the master robot and slave robot. Finally, the simulation analysis and experimental verification are carried out. The results show that FRVF has a high degree of fit to the complex surface, and the teleoperation control model can ensure that the machining area does not exceed the boundary of FRVF. The removal rate of residual features of gray cast iron casting part with a size of 2.32 m×1.65 m×1.24 m is more than 95%, the surface roughness after one-time machining is 2.1 μm, and the machining efficiency is increased by 4 times. The proposed master-slave robot system and its teleoperation machining approach can effectively realize the high-quality and high-efficiency removal of the residual features of medium and large casting parts, and provide a new solution for the efficient machining of other medium and large parts.

Key words：medium and large casting parts; robotic machining; teleoperation; virtual fixture; artificial potential field

0 前言

随着航空航天、风电船舶、工程机械等产业的飞速发展，大型高端装备的需求逐步加大，中大型基础零部件的高效高质量制造成为高端装备制造的核心问题之一。当前，50%以上的中大型基础零部件均采用铸造成型的方式获得毛坯件，必须对毛坯件的铸造残留特征进行去除加工才可进入后续精加工或装配工序[1-2]。受铸造工艺等因素的影响，中大型铸造件的合模线、浇冒口等残留特征具有尺寸随机、形貌随机、分布随机的特点，这对加工装备与加工方法提出了巨大挑战。中大型铸造件残留特征的高效率高质量去除加工已成为中大型基础零部件制造的首要关键问题[3]。

目前，95%以上企业采用人工作业的方式对中大型铸造件进行残留特征去除加工。作业时，工人首先利用切割机切割浇冒口等大尺寸残留特征，随后采用打磨机逐层磨削毛刺、飞边等小尺寸残留特征，直至满足加工要求。这种加工方式劳动强度大、危险度高，易导致加工效率低、一致性差的问题，且恶劣的工作环境易给工人带来尘肺、癌症等多种健康隐患[4]。采用自动化装备完成中大型铸造件的磨切加工迫在眉睫。

当前用于铸造件残留特征去除加工的自动化装备主要分为串联机器人和数控机床两类(图 1)。以日本小山为代表的串联磨削机器人[5]虽然灵活性高，但刚度低，仅能完成小余量低效率的磨削加工[6-7]；以意大利 Maus 机床为代表的数控机床[8]刚度虽高，但灵活性差，仅能完成有限空间的磨削与切割[9-10]。由于中大型铸造件的尺寸较大(1 m 以上)，铸造浇冒口可达百毫米数量级，且飞边、毛刺、合模线等残留特征分布范围较广，要求相应加工装备兼备高刚度与高灵活性，现有的串联型自动化装备均难以满足此性能需求。此外，现有自动化装备的磨切控制方法根据铸造件的残留特征规划加工轨迹，采用示教或离线编程的方式控制自动化加工装备执行磨切指令[11-13]。然而，中大型铸造件残留特征具有随机分布特性，难以预先规划加工轨迹，即便规划出磨切加工轨迹，残留特征随机可变的尺寸与形貌易导致按既定轨迹加工时出现磨切量不足或过度磨切的问题。



(a) 串联机器人 (b) 数控机床

图 1 铸造件残留特征去除的现有装备

针对上述问题，提出以五自由度混联机器人为从动加工机器人、三平动并联机器人 Omega[14]为主动操控机器人的加工系统，以及基于主动和从动机器人的遥操作加工方法。所述五自由度混联机器人采用二自由度并联机构[15-17]为磨切去除加工的执行机构，提高了装备的刚度，在此基础上利用长行程导轨与二自由度转头提高了装备的灵活性，解决了现有串联机器人与机床装备的不足。遥操作加工方式保留工人对残留特征的识别与判断，解决了随机残留特征无法预先规划磨切轨迹的问题，同时将工人从恶劣环境中解放出来，可提高加工安全和效率。注意到遥操作过程中抖动、通信延迟等因素[18-19]易导致过度加工，提出构造参数化、在线可调的禁止型虚拟夹具(Forbidden region virtual fixture, FRVF)限定机器人的加工区域，由人工势场法[20]对 FRVF 进行力渲染，实现主动操控机器人末端运动的约束与引导。

主要章节安排如下：第 1 节介绍主从机器人系统，建立从动加工机器人、主动操控机器人的

运动学模型；第 2 节介绍 FRVF 的构造方法；第 3 节介绍基于增量式位置跟随和人工势场法的遥操作控制方法；第 4 节进行仿真分析与试验验证。

1　主从机器人系统

1.1　系统组成

面向中大型铸造件残留特征去除的主从机器人系统如图 2 所示。该系统由视觉系统，主动操控机器人、从动加工机器人及控制系统等组成。其中，从动加工机器人采用五自由度混联机器人。主从机器人系统的应用方式见图 3。工人借助视觉系统获取铸造件残留特征与从动加工机器人末端执行器之间的相对位姿，构造并调整与残留特征相匹配的 FRVF。在 FRVF 的约束下，工人对主动操控机器人实施操作，通过控制系统遥控从动加工机器人进留特征去除。

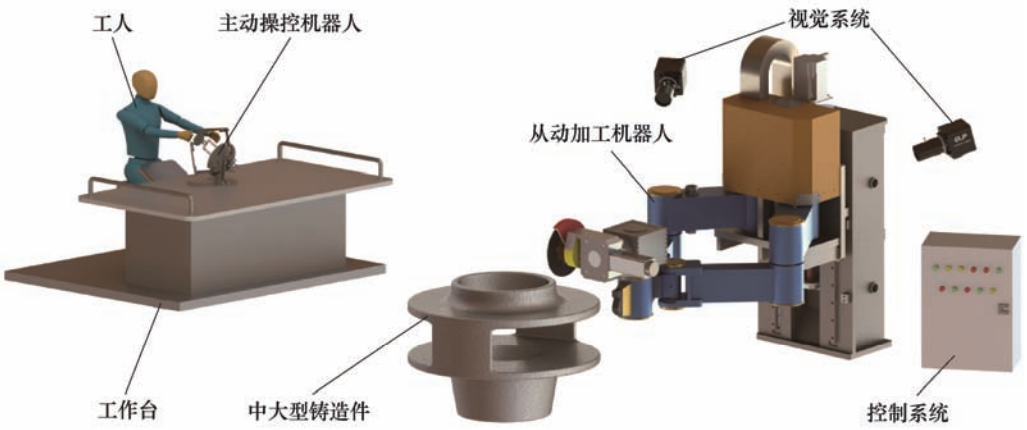


图 2　主从机器人系统

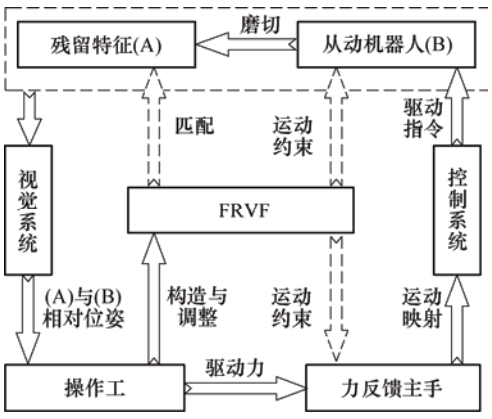


图 3　主从机器人遥操作加工流程

1.2　主从机器人运动学模型

主从机器人系统采用图 4 所示 Omega 作为主动操控机器人，其结构为三平动并联机构。该机构由三条关于中心轴对称分布的相同支链组成，每条支链由一个(四球副)平行四边形结构和三个转动副构成。主动操控机器人的单支链结构见图 5，其中 A_j 处为驱动关节，B_j、C_j 处为被动关节，动平台中心为点 P。

建立主动操控机器人的闭环矢量方程

$$\boldsymbol{r}-\boldsymbol{e}_j-l_1\boldsymbol{u}_j=l_2\boldsymbol{w}_j \qquad j=1,2,3 \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{r}$ 表示动平台位置矢量，$\boldsymbol{r}=\begin{bmatrix}u & v & w\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，其中，$u$、$v$、$w$ 分别表示点 P 的位置坐标分量，$\boldsymbol{e}_j=e\begin{pmatrix}\cos\alpha_j & \sin\alpha_j & 0\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$ 表示静、动平台半径 OA_j 与 PC_j 的差值，其中 e 为常量，α_j 是支链空间布局夹角，$\alpha_j=0,\frac{2\pi}{3},\frac{4\pi}{3}$。$\boldsymbol{u}_j$、$\boldsymbol{w}_j$ 与 l_1、l_2 分别是 A_jB_j 和 B_jC_j 的单位向量与长度，且 $\boldsymbol{u}_j=\begin{pmatrix}\cos\alpha_j\cos\theta_j & \sin\alpha_j\cos\theta_j & -\sin\theta_j\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$，$\theta_j$ 表示驱动关节的输入转角。

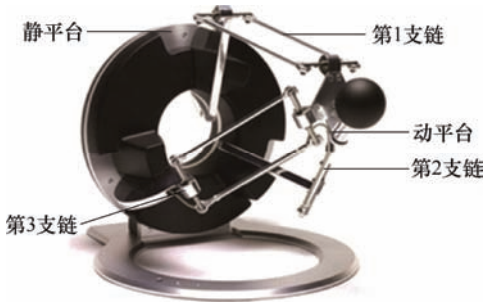


图 4　主动操控机器人

整理式(1)得

$$E_j\sin\theta_j+F_j\cos\theta_j+G_j=0 \tag{2}$$

式中，$G_j=u^2+v^2+w^2+e^2+l_1^2-2eN-l_2^2$，

$E_j=2l_1w$，$F_j=2l_1(e-N)$，$N=u\cos\alpha_j+v\sin\alpha_j$。

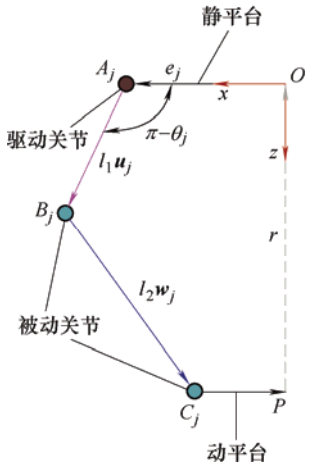


图 5 从动加工机器人单支链简图

对式(2)进行求解得

$$\theta_j=2\arctan 2\left(-E_j-\sqrt{E_j^2-G_j^2+F_j^2},G_j-F_j\right) \tag{3}$$

至此，主动操控机器人的逆解完成。

进一步联立式(2)、(3)，求得

$$\boldsymbol{w}_j=\frac{\boldsymbol{r}-\boldsymbol{e}_j-l_1\boldsymbol{u}_j}{l_2} \tag{4}$$

主动操控机器人的正解过程如下。将式(1)两端分别点乘各自转置，得

$$\left(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{e}_j-l_1\boldsymbol{u}_j\right)^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{e}_j-l_1\boldsymbol{u}_j\right)=\left(l_2\boldsymbol{w}_j\right)^{\mathrm{T}}\left(l_2\boldsymbol{w}_j\right) \tag{5}$$

将式(5)展开，得

$$u^2+v^2+w^2+2b_{j1}u+2b_{j2}v+2b_{j3}w=l_2^2-b_{j1}^2-b_{j2}^2-b_{j3}^2 \tag{6}$$

式中，$b_{j1}=-e\cos\alpha_j-l_1\cos\alpha_j\cos\theta_j$，$b_{j3}=l_1\sin\theta_j$，$b_{j2}=-e\sin\alpha_j-l_1\sin\alpha_j\cos\theta_j$。

化简式(6)得

$$\begin{cases}u=W_1-W_2w\\v=W_3-W_4w\end{cases} \tag{7}$$

$$W_1=\frac{(b_{32}-b_{12})M_1-(b_{22}-b_{12})M_2}{2(b_{21}-b_{11})(b_{32}-b_{12})-2(b_{31}-b_{11})(b_{22}-b_{12})},$$

$$W_2=\frac{(b_{23}-b_{13})(b_{32}-b_{12})-(b_{33}-b_{13})(b_{22}-b_{12})}{(b_{21}-b_{11})(b_{32}-b_{12})-(b_{31}-b_{11})(b_{22}-b_{12})},$$

$$W_3=\frac{(b_{31}-b_{11})M_1-(b_{21}-b_{11})M_2}{2(b_{22}-b_{12})(b_{31}-b_{11})-2(b_{32}-b_{12})(b_{21}-b_{11})},$$

$$W_4=\frac{(b_{23}-b_{13})(b_{31}-b_{11})-(b_{33}-b_{13})(b_{21}-b_{11})}{(b_{21}-b_{11})(b_{31}-b_{11})-(b_{32}-b_{12})(b_{21}-b_{11})},$$

$$M_1=\sum_{j=1}^{3}\left(b_{1j}^2-b_{2j}^2\right),\quad M_2=\sum_{j=1}^{3}\left(b_{1j}^2-b_{3j}^2\right)。$$

将式(7)代入式(6)，化简得

$$T_1w^2-2T_2w+T_3=0 \tag{8}$$

式中，$T_3=W_1^2+W_3^2+2b_{11}W_1+2b_{12}W_1W_3-l_1^2+b_{13}^2+b_{12}^2+b_{11}^2$，$T_2=W_1W_2+W_3W_4+b_{11}W_2+b_{12}W_4-b_{13}$，$T_1=W_2^2+W_4^2+1$。

求解式(8)得

$$w=\frac{T_2-\sqrt{T_2^2-T_1T_3}}{T_1} \tag{9}$$

由此可得到主动操控机器人动平台中心点 P 的坐标。

从动加工机器人的机构简图如图 6 所示。该机器人由竖直滑轨 P_q、平面 5R(R1～R5, R 代表转动副)并联机构和两转头 R6、R7 组成，其中平面 5R 并联机构与竖直滑轨始终保持垂直，转头 R6 与 R5 同轴，转头 R7 与 R6 垂直。平面 5R 并联机构的运动学逆解与主动操控机器人的逆解分析相似，不同之处在于：① 平面 5R 并联机构转动副 R5 中心为末端参考点，式(1)中 $\boldsymbol{e}_j$ ($j=1,2$)表示转动副 R1 与 R2 距离的一半；② 表征主动操控机器人各支链空间分布的参数 α_j ($j=1,2$)的值为 0 和 π；③ 平面 5R 并联机构只存在 x, z 方向的移动。因此，平面 5R 并联机构的逆解也可由式(1)～(5)进行分析。

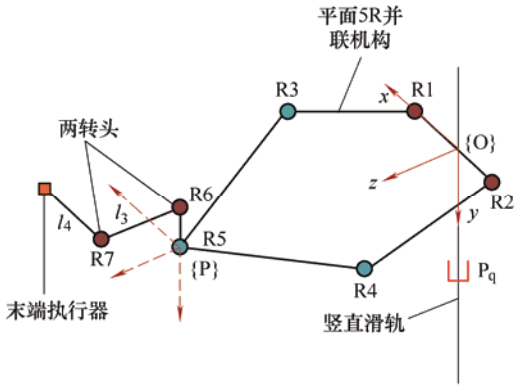


图 6 从动加工机器人机构简图

为区别两个机构的运动学参数，做如下变动

$$u\to u'\quad w\to w'\quad \theta_j\to\theta_j'$$
$$\boldsymbol{e}_j\to\boldsymbol{e}_j'\quad \boldsymbol{u}_j\to\boldsymbol{u}_j'\quad \boldsymbol{w}_j\to\boldsymbol{w}_j' \tag{10}$$

从动加工机器人的姿态完全由两转头决定，假设两转头转动角度分别为 β_1 和 β_2，转头轴向长度分别为 l_3 和 l_4。若在转动副 R5 处建立与全局坐标轴平行的局部坐标系{P}，则两转头 R6 和 R7 的合成运动在该坐标系中可表示为

$$\boldsymbol{P}_{s,R}=\boldsymbol{R}_{\mathrm{R7}}^{\mathrm{R6}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{R7}}+\boldsymbol{R}_{\mathrm{R6}}^{\mathrm{R5}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{R6}} \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{R7}}^{\mathrm{R6}}$，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{R6}}^{\mathrm{R5}}$ 分别为两转头旋转矩阵；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{R6}}$，$\boldsymbol{P}_{\mathrm{R7}}$ 为两转头末端的位置向量。

若 $\boldsymbol{P}_{s,R}=\begin{pmatrix}p_x & p_y & p_z\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$，则

$$\begin{cases} l_4\cos\beta_2 - l_3\sin\beta_1 = p_x \\ l_4\cos\beta_2 = p_y \\ l_3\cos\beta_1 = p_z \end{cases} \tag{12}$$

经求解，得

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{p_z}{l_3}\right) \tag{13}$$

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{p_y}{l_4}\right) \tag{14}$$

若以 $\boldsymbol{P}_{s,e}(P_X, P_Y, P_Z)$ 表示从动加工机器人末端的位置坐标，则

$$\begin{cases} u' = P_X - p_x \\ q = P_Y - p_y \\ w' = P_Z - p_z \end{cases} \tag{15}$$

式中，q 为垂直导轨的驱动量。

从动加工机器人的运动学正解可表示为

$$\boldsymbol{P}_{s,e} = \boldsymbol{P}_{s,R} + \boldsymbol{P}_{\mathrm{R5}} + \boldsymbol{P}_q \tag{16}$$

式中，$\boldsymbol{P}_{\mathrm{R5}}$ 和 $\boldsymbol{P}_q$ 分别为平面 5R 并联机构末端和直线滑轨运动末端参考点位置向量，且 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{R5}}=\begin{pmatrix}u' & 0 & w'\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{P}_q=\begin{pmatrix}0 & q & 0\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$。$\boldsymbol{P}_{\mathrm{R5}}$ 可通过式(5)～(7)求得。

2　FRVF 构造方法

针对中大型铸造件残留特征尺寸、形貌与分布随机的特点，提出了参数化、在线可调的 FRVF 辅助遥操作加工。工人可通过视觉系统观察残留特征，判断且构造适宜残留特征的 FRVF，然后依据加工需求，调整 FRVF 与残留特征的相对位姿。FRVF 的构造与使用方法如图 7 所示。

中大型铸造件残留特征可根据待加工面几何形状大致分为三类：① 平面合模线、浇冒口；② 曲面合模线、飞边毛刺；③ 圆柱内孔毛刺。

对于平面合模线、浇冒口的加工，可采用平面型 FRVF 对从动加工机器人末端运动进行约束。该类 FRVF 的标准参数构造方程为

$$A(x-x_0)+B(y-y_0)+C(z-z_0)= Ax+By+Cz+D=0 \tag{17}$$

式中，(x_0, y_0, z_0) 分别为 FRVF 中心点 $P_{p,0}$ 的坐标。A, B, C, D 皆为表征该平面位姿的参数。其边界由 FRVF 四个角的点坐标 $P_{p,n}(x_{b,n}, y_{b,n}, z_{b,n})$，$n$=1～4 确定。

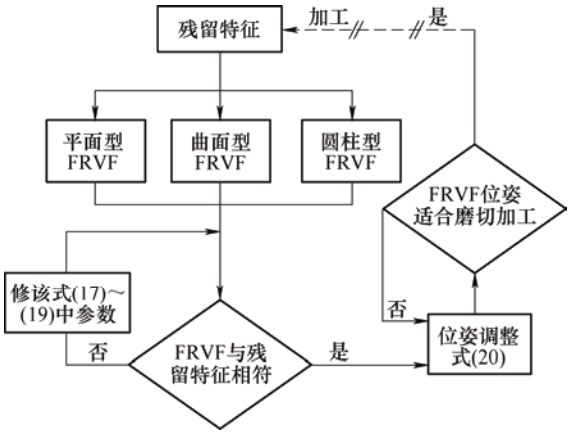


图 7　FRVF 构造与使用方法

对于曲面合模线、飞边毛刺的加工，可构建曲面型 FRVF 对从动加工机器人的运动进行约束。曲面(抛物面)型 FRVF 的标准参数构造方程可表示为

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}-2z=0 \tag{18}$$

式中，a, b 为表征抛物面形状的参数，z 的正负决定抛物面的凹凸。若 $z>0$，表示凸面型 FRVF；若 $z<0$，表示凹面型 FRVF。坐标 $P_{e,0}(0, 0, 0)$ 表示其中心点和下边界。$z=z_{e,b}$ 平面表示 FRVF 的上边界。

对于圆柱内孔毛刺的加工，可构造圆柱型 FRVF 对从动加工机器人运动进行约束。其标准参数方程可表示为

$$x^2+y^2-R^2=0 \tag{19}$$

式中，R 表示 FRVF 的半径，中心点为 $P_{c,0}(0, 0, 0)$，FRVF 高度由上、下边界 $z=z^U$ 和 $z=z^L$ 共同决定。

通过构建图 8 所示平面型、曲面型、圆柱型 FRVF 可实现中大型铸造件不同残留特征的加工约束。FRVF 的大小、形状、凹凸度等属性均可通过几何参数进行调整。

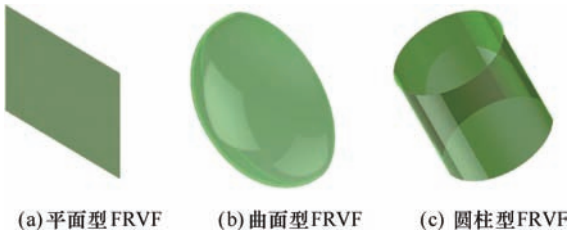


图 8　FRVF 示意图

由于残留特征的随机特点，需要对 FRVF 的位姿进行调整，便于为从动加工机器人末端执行器提供运动约束。对三类标准 FRVF 进行调整时，

分别以中心点 $P_{p,0}$, $P_{e,0}$, $P_{c,0}$ 为参考点，通过位姿控制参数来实现其在空间中的移动或旋转，位姿调整矩阵为

$$\boldsymbol{T}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{R} & \boldsymbol{P}\\ \boldsymbol{0} & 1\end{pmatrix} \tag{20}$$

式中，$\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{P}$ 分别表示旋转和平移变换矩阵。

综上，调整 FRVF 的几何参数与位姿参数，即可实现虚拟夹具的调整与控制。采用图形化界面搭建平台 LabView 开发如图 9 所示的 FRVF 控制软件。使用时，工人可通过手动输入或拖动刻度盘的方式对 FEVF 进行构造和调整。



图 9 FRVF 控制软件

3 遥操作控制方法

3.1 主从机器人位置控制

主动操控机器人和从动加工机器人间采用基于增量式位置跟随的控制方式，其核心思想是由主动操控机器人的驱动关节转角计算位置增量，由运动缩放比例系数获取从动加工机器人的末端位置，进而计算出所需的从动加工机器人主动关节驱动量。

首先，通过运动学正解模型，由主动操控机器人各主动关节的转角 θ_m^i 计算出末端位置 $\boldsymbol{P}_m^i$，以同样的方式得到下一周期的末端位置 $\boldsymbol{P}_m^{i+1}$，计算出相邻周期的位置增量为

$$\Delta\boldsymbol{P}_m=\boldsymbol{P}_m^{i+1}-\boldsymbol{P}_m^i \tag{21}$$

然后，由运动学正解模型，根据从动加工机器人的关节驱动量 q_s^i，计算出从动加工机器人末端执行器位置 $\boldsymbol{P}_s^i$，加上主动操控机器人末端位置增量，即可得到从动加工机器人末端目标位置

$$\boldsymbol{P}_s^{i+1}=\boldsymbol{P}_s^i+K\Delta\boldsymbol{P}_m \tag{22}$$

式中，K 为主动操控机器人与从动加工机器人之间的运动缩放比例系数。通过从动操控机器人运动学逆解，求得其主动关节的驱动量。

基于上述主动操控机器人与从动加工机器人间的控制方式。主动和从动机器人工作空间之间的映射可表示为

$$\boldsymbol{W}_Z=K\boldsymbol{W}_C \tag{23}$$

式中，$\boldsymbol{W}_Z$ 为主动操控机器人的工作空间，$\boldsymbol{W}_C$ 为从动加工机器人的工作空间。

实际加工过程中，规定从动加工机器人末端执行器不能越过 FRVF 边界，以免破坏铸件本体。因此，须对从动加工机器人施以强约束

$$d_e=\min\left\|\boldsymbol{S}_{s,i}-\boldsymbol{P}_{s,e}\right\|\leqslant 0 \tag{24}$$

式中，$\boldsymbol{S}_{s,i}$ 为从动加工机器人端映射 FRVF 边界上第 i 个离散点的位置坐标，$\boldsymbol{P}_e$ 是从动加工机器人末端的当前位置，d_e^a 是两者的距离，且

$$\boldsymbol{S}_{s,i}\in\boldsymbol{S}_s$$

式中，$\boldsymbol{S}_s$ 为从动加工机器人端映射 FRVF 边界。

3.2 主动操控机器人力反馈控制

在加工过程中，工人无法直接感知 FRVF 几何边界，需要进行力渲染。力感知方式通常采用基于碰撞检测的反馈力算法，需考虑 FRVF 刚度等物理属性，且主动操控机器人末端与 FRVF 碰撞时才产生反馈力，不利于安全加工。因此，采用基于人工势场法的力反馈控制方法，其核心在于：在主动操控机器人工作空间中构造一个由引力场和斥力场共同作用的人工虚拟势场，对处于势场中的主动操控机器人施加引力和斥力，引导和限制主动操控机器人的空间运动。

针对残留特征的磨切去除加工，仅强制要求主动操控机器人末端不穿越 FRVF 边界，当主动操控机器人末端远离 FRVF 边界时可自由运动，因此只需对 FRVF 施加斥力场。构造斥力场势函数

$$U_{rep}=\begin{cases}\dfrac{1}{2}\eta\left(\dfrac{1}{d_e^a(\Gamma)}-\dfrac{1}{d_{th}^{\ *}}\right)^2 & d_e^a(\Gamma)\leqslant d_{th}^{\ *}\\ 0 & d_e^a(\Gamma)>d_{th}^{\ *}\end{cases} \tag{25}$$

式中，η 表示 FRVF 斥力场强度因子；$d_{th}^{\ *}$ 表示 FRVF 斥力场的作用范围，$d_e^a(\Gamma)=d_e^a(\boldsymbol{S}_m,\boldsymbol{r})$ 表示主动操控机器人末端与 FRVF 边界 $\boldsymbol{S}_m$ 的最短距离

$$\boldsymbol{d}_e^a(\Gamma)=\boldsymbol{S}_m-\boldsymbol{r} \tag{26}$$

$$d_e^a(\Gamma)=\min\left\|\boldsymbol{d}_e^a(\Gamma)\right\| \tag{27}$$

由斥力场势函数可知，当主动操控机器人末端位于斥力场中时才会受到斥力，否则不受力。令 FRVF 边界上与主动操控机器人末端距离最近点位置坐标为 $\boldsymbol{S}_{m,m}(x_m, y_m, z_m)$，则

$$d_e^a(\Gamma)=\sqrt{(x_m-u)^2+(y_m-v)^2+(z_m-w)^2} \tag{28}$$

通过对式(25)中斥力场势函数进行计算，可得到作用于主动操控机器人的斥力大小为

$$F_{rep}=-\nabla U_{rep}=$$
$$\begin{cases}-\eta\left(\dfrac{1}{d_e^a(\Gamma)}-\dfrac{1}{d_{th}^*}\right)\dfrac{1}{\left[d_e^a(\Gamma)\right]^2}\nabla d_e^a(\Gamma) & d_e^a(\Gamma)\leqslant d_{th}^* \\ 0 & d_e^a(\Gamma)>d_{th}^*\end{cases} \tag{29}$$

式中，斥力 F_{rep} 的方向与 $\boldsymbol{d}_e^a(\Gamma)$ 的方向一致；斥力可表示为 $\boldsymbol{F}_{rep}$。

通过式(29)可以看出，强度因子 η 和主动操控机器人末端与 FRVF 边界的最短距离 $d_e^a(\Gamma)$ 主导斥力的大小，且斥力的大小与 $d_e^a(\Gamma)$ 成反比，满足加工对力反馈变化趋势的要求。

在加工过程中，主动操控机器人依据力偏差进行控制，即

$$\boldsymbol{F}_c=\boldsymbol{F}_m-\boldsymbol{F}_{rep} \tag{30}$$

式中，$\boldsymbol{F}_m$ 为工人施加于主动操控机器人的驱动力。因此，根据不同工人输入驱动力的最大值确定主动操控机器人末端与 FRVF 边界的最短距离 $d_e^a(\Gamma)$ 和强度因子 η 至关重要。

若设定从动加工机器人端映射 FRVF 势场的作用范围是 100 mm，加工余量为 5 mm，运动缩放比例 $K=10$，则设主动操控机器人端 $d_{th}^*=10$ mm，强度因子 η 和最短距离 $d_e^a(\Gamma)$ 对斥力 F_{rep} 的影响如图 9 所示。当 η 一定时，$d_e^a(\Gamma)$ 与 F_{rep} 之间的变化关系如图 10 所示。从图中可看出：斥力与强度因子正相关、与主动操控机器人末端和 FRVF 最短距离负相关，且最短距离越小，斥力增速越快。

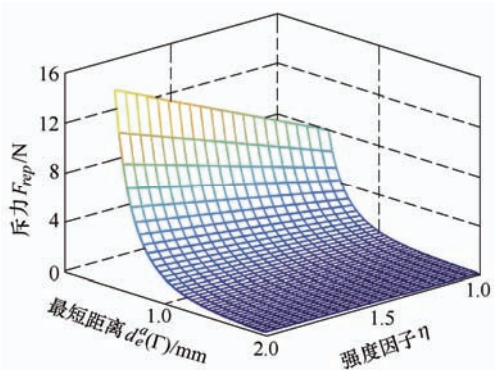


图 10　强度因子和最短距离对斥力的影响

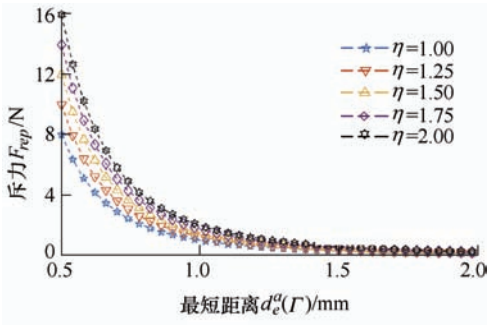


图 11　不同强度因子下最短距离对斥力的影响

4　仿真分析与试验验证

4.1　仿真分析

采用 CHAI3D 软件构建虚拟仿真环境，对主动操控机器人末端运动进行仿真分析。仿真流程与仿真环境如图 12 和 13 所示。

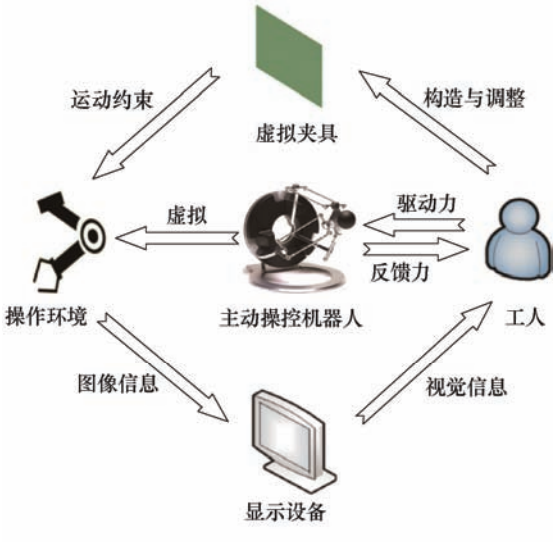


图 12　仿真流程



图 13　仿真环境

设置两组仿真分析：① 平面残留特征加工；② 曲面残留特征加工。上述每组试验中，首先在 CHAI3D 中构建相应的 FRVF，然后操纵主动操控机器人，使主动操控机器人末端向 FRVF 边界靠近。图 12 小球为主动操控机器人末端，灰色几何体为平面型或曲面型虚拟夹具。仿真过程中给 FRVF 施加

人工势场，设定最大斥力为 30 N，势场范围为 $d_{th}^{*}=10$ mm。仿真结束后对主动操控机器人末端的位置、受力和速度进行分析，结果如图 14～21 所示。

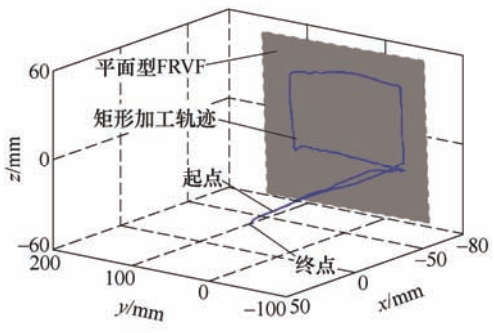


图 14 平面残留特征加工(仿真 1)

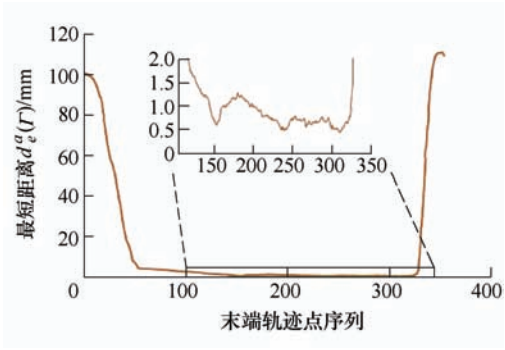


图 15 主动操控机器人末端与 FRVF 间最短距离(仿真 1)

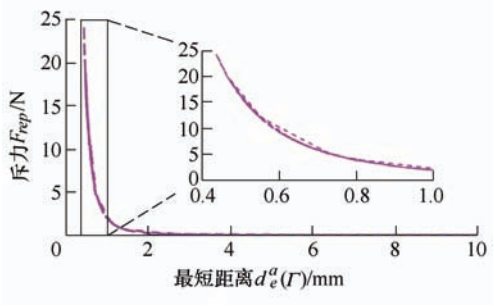


图 16 主动操控机器人末端受到的斥力(仿真 1)

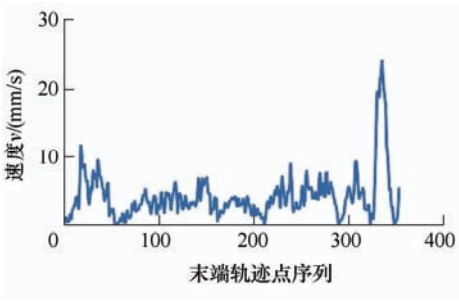


图 17 主动操控机器人末端速度(仿真 1)

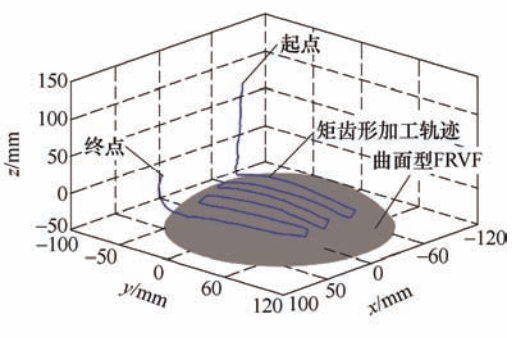


图 18 曲面残留特征加工(仿真 2)

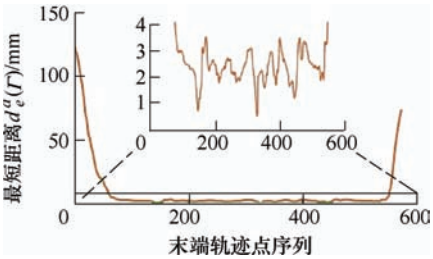


图 19 主动操控机器人末端与 FRVF 间最短距离(仿真 2)

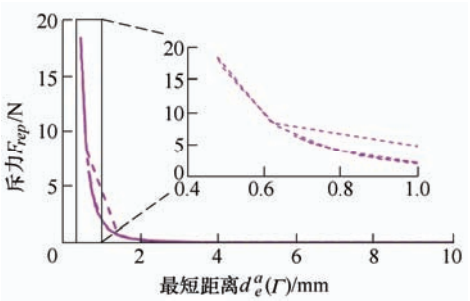


图 20 主动操控机器人末端受到的斥力(仿真 2)

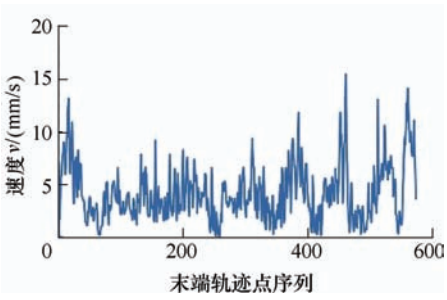


图 21 主动操控机器人末端速度(仿真 2)

由仿真结果可以看出以下几点。

(1) 针对不同残留特征，采用平面型 FRVF 和曲面型 FRVF 遥操作加工控制，主动操控机器人末端运动轨迹始终没有穿越 FRVF 边界，可有效避免非理想操作对被保护部位的伤害。

(2) 仿真 1 所示矩形加工轨迹距平面型 FRVF 的最短距离平均值为 0.7 mm，仿真 2 所示锯齿形加工轨迹距曲面型 FRVF 的最短距离平均值为

2.3 mm，表明不同加工轨迹与 FRVF 影响加工余量的大小。

(3) 两组仿真中，主动操控机器人末端与 FRVF 间距离减小，机器人受力随之增大，同时增速加大，与理论计算及实际加工相符；当 $d_e^a(\Gamma)<1$ mm 时，斥力增加趋势明显，但 $d_e^a(\Gamma)$ 始终大于 0.4 mm，可有效保证加工余量。

(4) 两组仿真中主动操控机器人末端速度均保持在 10 mm/s 以内，但速度波动较大，在实际加工中应考虑对从动加工机器人进行速度规划。此外，还可考虑通过分段调节机器人间的运动缩放比例，适应不同残留特征的加工。

4.2　试验验证

采用所提出的主从机器人系统及其遥操作加工方法，对中大型工程机械铸造部件(材料 HT250，2.32 m×1.65 m×1.24 m)侧平面残留特征进行去除加工，加工场景如图 22 所示，加工试验前后的对比如图 23 所示。

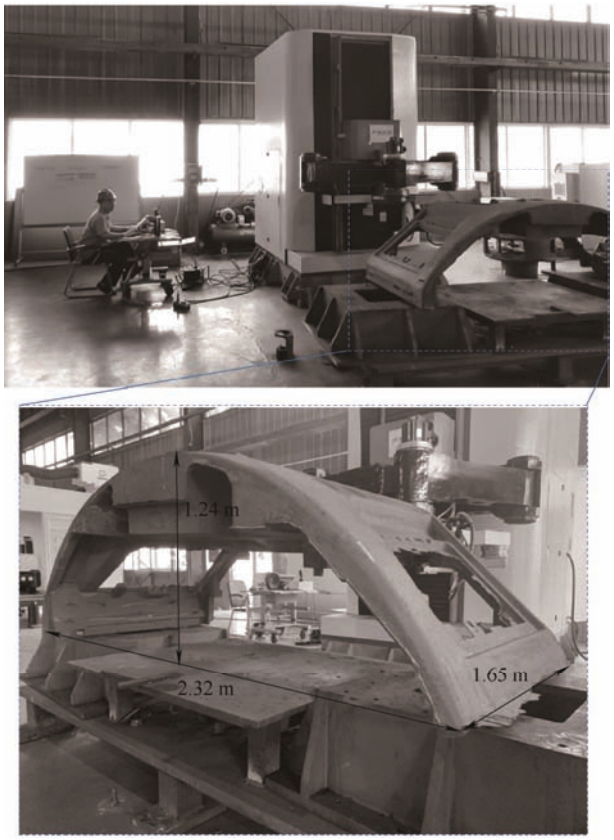


图 22　加工场景

从图 23 可看出，铸造件的合模线等残留特征宽达 21.0 mm。采用人工方式需 40 s 才能完成去除加工，而主从机器人系统可一次性完成残留特征的去除，加工过程约为 10 s，加工效率提高约 4 倍，残留特征去除率达 95%以上，加工质量(表面粗糙度为 2.1 μm)在可接受范围以内(小于 3.2 μm)，表明该方法可实现中大型铸造件残留特征的高效高质量磨切去除。

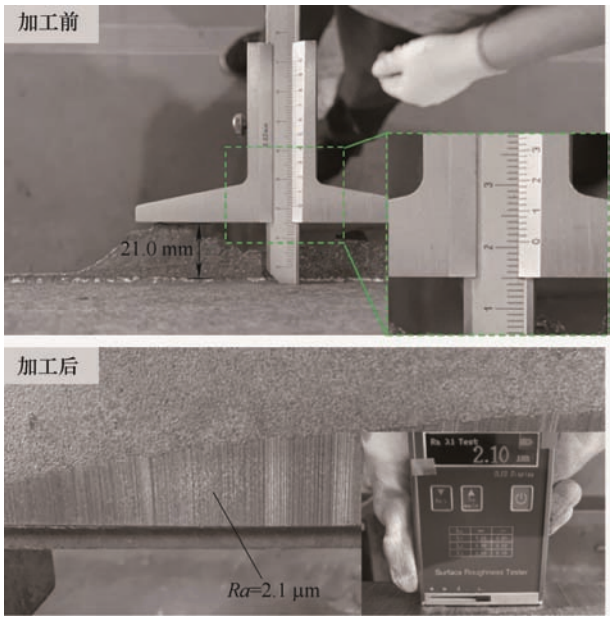


图 23　加工前后对比

5　结论

针对中大型铸造件残留特征的高效率高质量去除加工难题，提出了一种主从机器人系统与遥操作加工方法。全文取得如下结论。

(1) 主从机器人系统以一种五自由度混联机器人为从动加工机器人、三平动并联机器人为主动操控机器人。五自由度混联机器人以二自由度并联机构为主执行机构，具备高刚度特性，通过串接长行程导轨与二自由度转头，具备高灵活性。

(2) 提出了平面、曲面和圆柱三类禁止型虚拟夹具限制从动加工机器人的加工范围，通过在线调整虚拟夹具的几何与位姿参数，可贴合残留特征的随机尺寸与形貌。建立了基于增量式位置跟随与人工势场法的遥操作控制模型，实现了主动和从动机器人的运动约束与引导。

(3) 仿真结果表明，基于虚拟夹具、增量式位置跟随与人工势场的遥操作控制方法可安全实现残留特征的去除加工。试验结果表明，主从机器人系统及遥操作加工方法提高了中大型铸造件残留特征去除的加工效率与加工质量。

参 考 文 献

[1] 朱世银，陶李洋，骆祎岚，等. 云溪环保型砂铸造性能的研究[J]. 机械工程学报，2016，52(6)：93-98.
ZHU Shiyin，TAO Liyang，LUO Weilan，et al. Study on the performance of yunxi environment friendly molding sand[J]. Journal of Mechanical Engineering，2016，52(6)：93-98.

[2] 向青春，张伟，邱克强，等. 基于 DOE 的大型下架体铸钢件铸造工艺优化研究[J]. 机械工程学报，2017，53(6)：88-93.
XIANG Qingchun，ZHANG Wei，QIU Keqiang，et al. Casting process optimization for large lower frame body of heavy gyratory crusher based on DOE[J]. Journal of Mechanical Engineering，2017，53(6)：88-93.

[3] SABOURIN L，ROBIN V，GOGU G. Robotized cell dedicated to finishing operations, by machining and polishing, on large cast parts[J]. Mecanique & Industries，2011，12(6)：495-502.

[4] MIAO C，YE H，HU X Q. Occupational health risk assessment of a foundry enterprise based on ICMM method[J]. Industrial Hygiene & Occupational Diseases，2020，46(2)：129-133，136.

[5] 王振泽. 铸造件磨削加工机器人力反馈主从控制方法研究[D]. 天津：天津大学，2019.
WANG Zhenze. Research on master-slave control method of force feedback for casting grinding robot[D]. Tianjin：Tianjin University，2019.

[6] CLAIRE D，STÉPHANE C，SÉBASTIEN G，et al. Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2011，27(4)：881-888.

[7] XU P，YAO X L，LIU S B，et al. Stiffness modeling of an industrial robot with a gravity compensator considering link weights[J]. Mechanism and Machine Theory，2021，161：104331.

[8] WANG M，WANG P F，SUN T，et al. Teleoperation robot machining for large casting components[C]// International Conference on Intelligent Robotics and Applications，October 22-24，2021，Yan Tai，China. Cham：Springer，2021：620-627.

[9] KÁROLY S，THEODOROS L，ANDREAS A. Measurement and analysis of machine tool errors under quasi-static and loaded conditions[J]. Precision Engineering，2018，51：59-67.

[10] ANDREAS A，MIHAI N. A top-down equivalent stiffness approach for prediction of deviation sources in machine tool joints[J]. CIRP Annals，2017，66(1)：487-490.

[11] LEE H M，KIM J B. A survey on robot teaching：Categorization and brief review[J]. Applied Mechanics and Materials，2013，330：648-656.

[12] ZHOU B，ZHANG X，MENG Z，et al. Off-line programming system of industrial robot for spraying manufacturing optimization[C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference，IEEE，Nanjing，China，2014：8495-8500.

[13] ARGALL B D，CHERNOVA S，VELOSO M，et al. A survey of robot learning from demonstration[J]. Robotics and Autonomous Systems，2009，57(5)：469-483.

[14] HYOUNG S. The contribution of force feedback to human performance in the teleoperation of multiple unmanned aerial vehicles[J]. Journal on Multimodal User Interfaces，2019，13：335-342.

[15] LIANG Dong，SONG Yimin，SUN Tao，et al. Dynamic modeling and hierarchical compound control of a novel 2-DOF flexible parallel manipulator with multiple actuation modes[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2018，103(15)：413-439.

[16] LIANG Dong，SONG Yimin，SUN Tao. Nonlinear dynamic modeling and performance analysis of a redundantly actuated parallel manipulator with multiple actuation modes based on FMD theory[J]. Nonlinear Dynamics，2017，89：391-428.

[17] LIANG Dong，SONG Yimin，SUN Tao，et al. Optimum design of a novel redundantly actuated parallel manipulator with multiple actuation modes for high kinematic and dynamic performance[J]. Nonlinear Dynamics，2016，83：631-658.

[18] SICILIANO B，KHATIB O. Springer handbook of robotics[M]. Switzerland：Springer，2016.

[19] GARCÍA C E，POSTIGO J F，CASTRO A，et al. On-line estimation of communication time delay in a robotic teleoperation system[J]. Latin American Applied Research，2003，33(4)：371-377.

[20] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. Autonomous Robot

Vehicles，1986，5(1)：396-404.

作者简介：王猛，男，1996 年出生，博士研究生。主要研究方向为机构学与机器人学。

E-mail：mengwang_tju@tju.edu.cn

宋轶民，男，1971 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为机械系统动力学、机器人机构学、机械传动。

E-mail：ymsong@tju.edu.cn

王攀峰，男，1978 年出生，博士，副教授。主要研究方向为机器人技术与应用、机器人学。

E-mail：panfengwang@tju.edu.cn

赵学满，男，1965 年出生，高级工程师。主要研究方向为机器人学。

E-mail：newman65@163.com

连宾宾，女，1988 年出生，博士，副教授。主要研究方向为机构学与机器人学。

E-mail：lianbinbin@tju.edu.cn

陈跃程，男，1972 年出生，中级工程师。主要研究方向为铸造控制工艺学。

E-mail：cyc213@163.com

孙涛(通信作者)，男，1983 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为机构学与机器人学。

E-mail：stao@tju.edu.cn

(上接第 92 页)

global and local feature fusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2016，37(1)：170-176.

[17] MA Jiayi，ZHAO Ji，JIANG Junjun，et al. Locality preserving matching[J]. International Journal of Computer Vision，2019，127(5)：512-531.

[18] ZHENG Yefeng，DOERMANN D. Robust point matching for nonrigid shapes by preserving local neighborhood structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2006，28(4)：643-649.

作者简介：钟雨君，女，1997 年出生。主要研究方向为测试技术及仪器、机器视觉与图像处理。

E-mail：zyj053@mail.ustc.edu.cn

金一(通信作者)，男，1985 年出生，博士，副教授，硕士研究生导师。主要研究方向为测试技术及仪器、机器视觉与图像处理。

E-mail：jinyi08@ustc.edu.cn