DOI: 10.3901/JME.2020.18.015

检测机械手轨迹突变点识别方法^{*}

赵新玉¹ 温欣¹ 段晓敏²

(1. 大连交通大学材料科学与工程学院 大连 116028;

2. 大连交通大学理学院 大连 116028)

摘要: 结合六轴机械手和超声无损检测技术实现自动检测,是检测自动化领域重要发展方向。超声检测要遵循运动平稳原则,检测轨迹中姿态变化较大会导致机械手速度突变,造成超声耦合不佳影响检测结果。针对上述问题,提出一种基于特殊欧几里得群信息几何结构的轨迹突变点识别方法,以轨迹当前点和前后若干点的黎曼均值差异为突变点检测依据,来预先识别出轨迹突变点,进而在这些突变点附近进行速度平滑处理。利用六轴机械手运动学反解方法验证了基于黎曼均值方法识别轨迹突变点的有效性。进一步,开展了机械手平台运动实验,识别突变点并降低邻近三点速度,使机械手各轴检测运动更加平稳。

关键词: 六轴机械手; 突变点识别; 信息几何; 黎曼均值;

中图分类号: TB553

Recognition Method for Testing Manipulator Trajectory Change-point

ZHAO Xinyu¹ WEN Xin¹ DUAN Xiaomin²

(1. School of Material Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028;

2. School of Science, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028)

Abstract: A six-axis manipulator is used in ultrasonic nondestructive testing technology to realize automatic testing, which is an important development direction in the field of testing automation. In ultrasonic testing, the principle of smooth motion is followed. Sudden change in the speed of the manipulator is occurred due to large change in posture in the detection trajectory, and testing results is affected by poor coupling. To solve the above problems, a change-point detection method based on the matrix information geometry of special Euclidean group is proposed. Once a change-point occurs, the distance between the current point and the Riemannian mean of its neighbor points should be a local maximum. According to this principle, the change-points of the trajectory are identified in advance, and then the velocity is smoothed near these change-points. The effectiveness of the Riemannian mean method is verified by the inverse kinematics solution method of six-axis manipulator. Furthermore, the manipulator platform movement experiment is carried out to identify the change-points and reduce its speed near the change-points, so that the detection movement of each axis of the manipulator is more stable.

Key words: six-axis manipulator; change-point recognition; information geometry; Riemannian mean

0 前言

近年来超声自动化无损检测逐步运用于工业领域中,将超声探头与六轴机械手相结合利用离线仿真技术获取机械手运动轨迹,有效提高了曲面检测效率和检测精度^[1-2],离线仿真平台生成机械手运动轨迹包括轨迹各点位置和姿态,将机械手末端探头

移动速度与加速度配置给轨迹各点即生成一个超声机械手检测任务。超声机械手检测时要保证末端探头稳定沿工件表面运动^[3],轨迹中姿态变化较大的点称之为轨迹突变点^[4],当机械手末端探头经过突变点时,由于末端探头姿态变化较大,在特定时间内末端探头需要到达下一位置,机械手各轴的偏转速度突变,导致末端探头运动速度突变,易造成检测时耦合不佳而出现漏检问题。

机械手运动时间内突变点的检测,是超声机械手检测领域的一个重要问题。机械手轨迹是一段时间序列内的位移^[5],轨迹规划时预先识别运动轨

^{*} 国家重点研发计划(2016YFF0203000)和辽宁省教育厅(JDL2019013)资助项目。20190504收到初稿,20200324收到修改稿

迹内所有突变点,进而在突变点前后进行运动降速或插值平滑,可以确保机械手以稳定速度完成检测。

机械手运动过程中每时刻姿态和位置一般描述为 4×4 的刚体运动矩阵^[6],如何识别出系列刚体运动矩阵间的差异,进而判别出哪些矩阵是轨迹突变点,这涉及复杂的数学问题,采用信息几何方法进行机械手运动轨迹突变点检测。机械手运动过程中的姿态和位置都对应一个特殊欧几里得群里的元素^[7]。基于特殊欧几里得群的信息几何结构计算若干个点的黎曼均值^[8]。如果机械手运动轨迹中出现突变点,那么当前点与附近点的黎曼均值之间的几何距离为局部最大值。识别出突变点之后,通过调节机械手在突变点及附近点速度,从而保证机械手末端探头能够稳定运动。

采用黎曼意义下的均值方法检测突变点,能够避免欧氏框架中检测方法的一些弊端。如果在特殊欧几里得群上定义欧氏度量,特殊欧几里得群上的线性运算不满足封闭性,导致若干个刚体运动矩阵的算数均值矩阵不再是特殊欧几里得群里的元素。其次欧氏度量诱导的测地线是直线,它保持在群上需要严格的条件,所以不能对任意两个刚体运动矩阵定义它们的距离。本文提出的识别方法基于特殊欧几里得群上的黎曼度量,这保证黎曼均值矩阵仍属于这个群,并且黎曼度量所诱导的测地线保持在群上,从而测量两个刚体运动矩阵之间的距离。

下文首先介绍特殊欧几里得群的信息几何结构,然后利用李群上的 Cambell-Baker-Hausdorff 公式,计算若干个点的黎曼均值,提出当前点与其附近点黎曼均值之间的差值计算判别方法。最后,通过机械手运动试验评估了我们方法的可靠性。

1 李群与李代数

机械手在空间中平移和旋转可以由 4×4 的齐次变换矩阵表示,该齐次变换矩阵是三维实向量空间中特殊欧几里得群里的元素。特殊欧几里得群是一个重要的矩阵李群^[8-9],下面简要介绍李群及其李代数的一些相关概念,这是设计突变点检测方法的理论基础。

1.1 矩阵李群

李群是具有群结构的流形,并且群中的加法运算和逆元运算是流形中的解析映射。李群 G 满足下面四种条件

$$\begin{cases} G \times G \rightarrow G \\ u: (X, Y) \rightarrow X \times Y \\ G \rightarrow G \\ \iota: X \rightarrow X^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, G 在单位元处的切空间是它的李代数 $\mathfrak{g}$ 。用 $\exp$ 表示从李代数 $\mathfrak{g}$ 到李群 G 上的指数映射。一般情况下,指数映射既不是单射也不是满射,然而,它是 G 的单位元 I 的邻域到 $\mathfrak{g}$ 的单位元 O 的邻域上的一个微分同胚,指数映射的局部逆映射是对数映射,记为 $\ln$ ^[10]。

矩阵李群是一个所有元素为矩阵的李群,矩阵李群的指数映射和对数映射在李群理论中扮演了重要角色,经常利用它获得矩阵李群的李代数,并且传递了从李代数到李群的信息。矩阵李群 G 的指数映射为^[11]

$$\exp(V) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{V^m}{m!} \quad (2)$$

式中, V 为李代数 $\mathfrak{g}$ 中的元素。指数映射的逆映射,即,对数映射定义为

$$\ln(X) = \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m+1} \frac{(X-I)^m}{m} \quad (3)$$

式中, X 属于 G 的单位元 I 的邻域。

对于矩阵的指数映射和对数映射,有很多有用的公式,它们在许多理论和实际应用中发挥着重要的作用。这里介绍所要用到的著名的 Cambell-Baker-Hausdorff 公式(CBH 公式)^[12]

$$\ln(\exp(W)\exp(V)) = W + V + [W, V] + O([W, V]^3) \quad (4)$$

式中, W 、 V 为两个 $n \times n$ 矩阵。

1.2 特殊欧几里得群

机械手姿态的旋转变化是通过一个 3×3 的旋转矩阵 R 来描述的, R 是特殊正交群 $SO(3)$ 的一个元素,特殊正交群 $SO(3)$ 是由三阶旋转矩阵全体构成的,也是一个李群, $SO(3)$ 表示如下

$$SO(3) = \{R \in \mathfrak{R}^{3 \times 3} \mid RR^T = I, \det(R) = 1\} \quad (5)$$

式中, $\mathfrak{R}^{3 \times 3}$ 为 3×3 实矩阵全体。

机械手在空间中平移和旋转可以由 4×4 的齐次变换矩阵表示,该齐次变换矩阵是特殊欧几里得群中的元素。

用 $\mathfrak{R}^n$ 表示 n 维实向量空间,那么 $\mathfrak{R}^n$ 上的特殊欧几里得群 $SE(n)$ 是 $SO(n)$ 和 $\mathfrak{R}^n$ 的半直积。作为拓扑结构, $SE(n)$ 与 $SO(n) \times \mathfrak{R}^n$ 是同胚的,因为 $SE(n)$ 中的 $SO(n)$ 和 $\mathfrak{R}^n$ 是能够独立选择的。 $SE(n)$ 上元素

的矩阵形式表示为

$$SE(n) = \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \middle| \mathbf{R} \in SO(n), \mathbf{t} \in \mathfrak{R}^n \right\} \quad (6)$$

当 $n=3$ 时, 旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 表示机械手末端执行器的姿态, 平移矩阵 $\mathbf{t}$ 表示机械手末端执行器的位置。特殊欧几里得群 $SE(n)$ 也是一个矩阵李群, 机械手的运动轨迹对应于 $SE(n)$ 上若干个元素。

$SE(n)$ 的李代数 $se(n)$ 表示为

$$se(n) = \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{U} & \mathbf{v} \\ \mathbf{0} & 0 \end{pmatrix} \middle| \mathbf{U} \in \mathfrak{R}^{n \times n}, \mathbf{U}^T = -\mathbf{U}, \mathbf{v} \in \mathfrak{R}^n \right\} \quad (7)$$

当 $n=3$ 时, 反对称矩阵 $\mathbf{U}$ 可被唯一确定表达为

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z) \in \mathfrak{R}^3$, $\boldsymbol{\omega}$ 表示机械手末端的角速度, $\mathbf{v}$ 表示机械手末端的线速度^[13]。

SELIG^[14]提出了 $se(3) \rightarrow SE(3)$ 上一个封闭形式的指数映射

$$\exp(\mathbf{V}) = \mathbf{I}_4 + \mathbf{V} + \frac{1 - \cos \theta}{\theta^2} \mathbf{V}^2 + \frac{\theta - \sin \theta}{\theta^3} \mathbf{V}^3 \quad (9)$$

式中, $\mathbf{V} \in se(3)$, $\theta^2 = \omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2$ 。对数映射 $SE(3) \rightarrow se(3)$ 满足

$$\ln(\mathbf{Q}) = q_1 (\mathbf{q}_2 \mathbf{I}_4 - \mathbf{q}_3 \mathbf{Q} + \mathbf{q}_4 \mathbf{Q}^2 - \mathbf{q}_5 \mathbf{Q}^3) \quad (10)$$

$$\begin{cases} q_1 = \frac{1}{8} \csc^3(\theta/2) \sec(\theta/2) \\ q_2 = \theta \cos(2\theta) - \sin(\theta) \\ q_3 = \theta \cos \theta + 2\theta \cos(2\theta) - \sin \theta - \sin(2\theta) \\ q_4 = 2\theta \cos \theta + \theta \cos(2\theta) - \sin(\theta) - \sin(2\theta) \\ q_5 = \theta \cos \theta - \sin \theta \\ \text{tr}(\mathbf{Q}) = 2 + 2 \cos \theta \quad -\pi < \theta < \pi \end{cases} \quad (11)$$

2 机械手轨迹突变点识别方法

注意到机械手运动轨迹所对应的矩阵为特殊欧几里得群 $SE(n)$ 中的元素, 下面根据 $SE(n)$ 的几何结构计算若干个点的黎曼均值, 当出现突变点时, 该点与附近点的黎曼均值之间的几何距离为局部最大值。并且提出一个有效算法从而实现机械手运动轨迹的突变点检测。

2.1 黎曼均值

设机械手轨迹是一段时间序列内点的位移

$\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n$ 。本文提出的突变点识别方法是计算轨迹每一点 $\mathbf{X}_i$ 的前 N 个点 $\mathbf{X}_{i-N}$ 与该点后 N 个点 $\mathbf{X}_{i+N}$ (共 $2N+1$ 个点) 的黎曼均值, 其中参数 N 为窗口大小。再计算 $\mathbf{X}_i$ 的前后 $2N+1$ 个点与 $\mathbf{X}_i$ 的黎曼距离 d_i , 当 d_i 为局部最大值时, 则 $\mathbf{X}_i$ 为潜在的轨迹突变点。

$SE(n)$ 中的矩阵 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 之间的黎曼距离

$$d(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \|\ln(\mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y})\|_F \quad (12)$$

式中, F 为 Frobenius 范数。所以从 $\mathbf{X}_{i-N}$ 至 $\mathbf{X}_{i+N}$ 共 $2N+1$ 个点的黎曼均值 $\mathbf{M}_f(\mathbf{X}_i)$ 可以定义为

$$\mathbf{M}_f(\mathbf{X}_i) = \arg \min_{\mathbf{X} \in SE(3)} \sum_{j=i-N}^{i+N} d(\mathbf{X}, \mathbf{X}_j)^2 \quad (13)$$

结合式(12)、(13)得到 $\mathbf{X}_i$ 和黎曼均值 $\mathbf{M}_f(\mathbf{X}_i)$ 之间的黎曼距离 d_i 为^[15]

$$d(\mathbf{X}_i, \mathbf{M}_f(\mathbf{X}_i)) = \|\ln(\mathbf{X}_i^{-1}\mathbf{M}_f(\mathbf{X}_i))\|_F \quad (14)$$

2.2 轨迹突变点识别

当序列 $\{d(\mathbf{X}_i, \mathbf{M}_f(\mathbf{X}_i))\}_{i=N+1}^{n-N}$ 产生局部最大值时, 此点为潜在的突变点。将此方法应用到机械手轨迹的突变点识别, 通过对轨迹中每一点计算其前后 $2N+1$ 个矩阵的黎曼均值, 便可实现轨迹突变点检测。

首先介绍如何将机械手的一段运动轨迹转换成 $SE(3)$ 中的矩阵。

机械手运动由末端位置与姿态组成, 将轨迹各点位姿表示为 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$, 其中 x, y, z 表示机械手末端在世界坐标系下的位置, α, β, γ 为轨迹点坐标系相对于世界坐标系所转动的角度, 将轨迹点 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 转换为 4×4 机械手李群齐次变换矩阵, 转换如下

$$SE(3) = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{R}$ 为轨迹点姿态表示轨迹点坐标系的三轴方向矢量, $\mathbf{t}$ 表示轨迹点位置。

旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 通过 $\mathbf{X}-\mathbf{Y}-\mathbf{Z}$ 欧拉角坐标系法表示为

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma & -s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & -s\alpha c\beta \\ -c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma + s\alpha c\gamma & c\alpha c\beta \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中, α, β, γ 表示为轨迹点坐标系相对于世界坐

标系所转动的角度, $s\alpha$ 、 $s\beta$ 、 $s\gamma$ 表示 α 、 β 、 γ 正弦值的缩写, $c\alpha$ 、 $c\beta$ 、 $c\gamma$ 表示 α 、 β 、 γ 余弦值的缩写。平移向量 $\mathbf{t}$ 表示轨迹点在机械手世界坐标系中的位置

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (17)$$

下面提出机械手运动轨迹突变点识别的算法。

在算法设计中为了提高计算时效, 根据 CBH 公式, $\mathbf{SE}(3)$ 中的矩阵 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 之间的黎曼距离近似为

$$d(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \approx \|\ln \mathbf{Y} - \ln \mathbf{X}\| \quad (18)$$

根据式(13)和(18), $2N+1$ 个点的黎曼均值 $\mathbf{M}_f(\mathbf{X}_i)$ 的一阶近似值

$$\hat{\mathbf{X}}_i = \exp\left(\frac{1}{2N+1} \sum_{j=i-N}^{i+N} \ln \mathbf{X}_j\right) \quad (19)$$

算法 1:

输入: 轨迹位姿 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)_i$ 和窗口宽度 N

输出: 轨迹对应序列 $\{d(\mathbf{X}_i, \mathbf{M}_f(\mathbf{X}_i))\}_{i=N+1}^{n-N}$ 的近似值。

For $i = N+1, \dots, n-N$

(1) 计算 $\mathbf{X}_{i-N}, \dots, \mathbf{X}_i, \dots, \mathbf{X}_{i+N}$ 的黎曼均值

$$\hat{\mathbf{X}}_i = \exp\left(\frac{1}{2N+1} \sum_{j=i-N}^{i+N} \ln \mathbf{X}_j\right);$$

(2) 计算 $\mathbf{X}_i$ 和黎曼均值 $\hat{\mathbf{X}}_i$ 的黎曼距离 d_i 的近似值

$$d'(\mathbf{X}_i, \hat{\mathbf{X}}_i) = \|\ln \hat{\mathbf{X}}_i - \ln \mathbf{X}_i\|.$$

End

3 轨迹突变点数值仿真试验

为验证上述方法的有效性, 通过一组模拟试验分析不同窗口宽度 N 对突变点检测结果的影响。图 1 给出一组仿真轨迹 $(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{35})$, 该轨迹各点位姿由一组 xyz 坐标表示。利用上述算法计算检测突变点, 计算时采用了不同宽度窗口 ($N=1, 2, 3, 5$)。从图 2 突变点检测结果可以看出, 四种不同宽度窗口都可有效检测出轨迹突变点, 即在轨迹 10、19 和 27 三点处出现局部最大值。为了更清楚显示突变点位置, 图 1 中用虚线坐标来标识 C_1 、 C_2 、 C_3 突变点, 可明显看出其恰好为姿态轨迹突变位置。随窗口宽度 N 增加, 局部最大值幅度会增大, 但计

算均值时间增加, 计算效率下降。

图 1 仿真轨迹

图 2 不同窗口对突变点检测结果影响

4 六轴机械手突变点检测试验

史陶比尔 TX90XL 机械手具有较高运动精度和防护等级, 非常适合超声检测使用。试验采用史陶比尔 TX90XL 机械手读取运动轨迹, 并比较突变点检测前后的运动数据的差异。

利用机械手轨迹规划离线仿真平台生成一组机械手运动轨迹, 轨迹由 6 条折线段组成, 每段折线包含 400 点, 轨迹总共包含 2 400 点, 轨迹点步进为 1 mm, 机械手从下往上依次运动。生成轨迹时尚不清楚哪些是轨迹突变点, 因而机械地设置各点运动速度均为 60 mm/s, 机械手末端空间轨迹如图 3 所示。

将轨迹各点转换为相应的齐次变换矩阵, 通过黎曼均值计算每个轨迹点前后 5 点(窗口宽度 $N=2$)的李群黎曼均值, 通过观察图 4 中 d_i , 可以清楚的看到该轨迹产生了 6 处黎曼均值局部最大值 d_i , 突变点 P_1 至 P_6 分别对应第 200、600、1 000、1 400、1 800、2 200 轨迹点, 且依次对应图 3 中从下至上 6 个突变点。图 5 将轨迹放大显示, 可以看出轨迹 6 个转角位置即为突变点, 上述算法可以有效识别。

图 3 机械手末端轨迹

图 4 轨迹各点的黎曼距离

图 5 轨迹中的突变点

5 突变点速仿真比分析

为了保证机械手在突变点处平稳运动，可以降低机械手在突变点前后位置的运动速度，防止机械手在突变点处产生动荡。

对于上述运动轨迹，选定机械手后采用运动学逆解也可求得机械手通过各路径点时对应的六轴关节位置，如图 6 所示，从中可以看出，机械手经过突变点时其各轴转角发生突变，其中轴 4、5、6 关节角度变化较大。基于黎曼均值方法和机械手逆运动方法获得的各轴转角突变结果相一致，也验证了黎曼均值方法的有效性。

识别出轨迹突变点后，再通过调节机械手在轨迹突变点和邻近点的速度，从而使机械手末端探头以平稳的速度通过突变点。表 1 给出了突变点处速度调整方法，以 P_{200} 突变点为例，将其前后共 3 点速度按固定比例降低，其他突变点速度调节方式相同。

利用史陶比尔机械手软件平台可以读取机械手沿轨迹运动的实时速度，每隔 4 ms 反馈一次各轴关节速度。图 7 给出了突变点检测前后各关节轴原始速度和校正速度的比较，从中可以看出，突变点速度校正后各关节轴的峰值速度均有明显降低。为了更清楚量化上述差异，对图 7 中机械手通过突变点前后的速度进行整理如表 2 所示，比较数据可以看出，以原始速度通过突变点时，各关节轴速度均存在较高峰值点，峰值点附近速度变化剧烈；突变点检测校准后，将突变点附近速度降低后，峰值高度得到了有效的降低，其中关节 2-3、关节 5-6 的最大速度均减小 40% 以上，由于各轴速度降低使得机械手通过突变点的时间延长了 0.46 s。通过降低突变点速度有效地解决机械手经过突变点时速度剧烈变化的问题。

表 1 路径点参数

路径点	位姿/(x/mm, y/mm, z/mm, $\alpha/(^\circ)$, $\beta/(^\circ)$, $\gamma/(^\circ)$)	原始速度/(mm/s)	校正速度/(mm/s)	描述
P_1	(1091.16, 27, -610, 90, 16.55, -180)	60	60	起始点
$\vdots$	$\vdots$	60	60	$\vdots$
P_{199}	(901.36, -29.39, -610, 90, 16.55, -180)	60	30	中间点
P_{200}	(900.40, -29.67, -610, 90, 61.55, -180)	60	10	突变点
P_{201}	(900.69, -30.63, -610, -90, 73.45, 0)	60	30	$\vdots$
$\vdots$	$\vdots$	60	60	中间点
P_{400}	(957.09, -220.43, -610, -90, 73.45, 0)	60	60	终止点

图6 各关节轴角度曲线

图7 机械手各轴关节速度曲线

表2 突变点速度对比

突变点速度	经过突变点时间/s	突变点处最大速度/(rad/s)					
		轴1	轴2	轴3	轴4	轴5	轴6
修改前	1.02	-57.16	-7.08	59.52	-209.3	27.07	54.52
修改后	1.48	-41.24	-3.78	26.39	-151	15.69	24.4

6 结论

(1) 基于特殊欧几里得群的几何结构, 提出机械手运动轨迹突变点检测算法。轨迹当前点和前后

若干点的黎曼均值差异为判断突变点依据, 这样局部最大值点对应空间突变点。

(2) 基于黎曼均值方法识别轨迹突变点与六轴机械手运动学反解获得的各轴转角突变结果相一致。黎曼均值轨迹突变点计算方法仅依据空间轨迹

姿态, 不依赖于具体几轴机械手和相应逆解算法, 适应性更广。

(3) 利用史陶比尔机械手进行了突变点检测实验, 通过识别突变点并降低邻近三点速度即可有效改善机械手经过突变点时的速度剧烈变化问题。

参 考 文 献

- [1] 徐春广, 王洪博, 赵新玉. 大型曲面复合材料超声检测技术[J]. 纤维复合材料, 2013, 30(3): 33-38.
XU Chunguang, WANG Hongbo, ZHAO Xinyu. Ultrasonic transmission detection techniques for large complex curved surface of composite material[J]. Fiber Composites, 2013, 30(3): 33-38.
- [2] 徐春广, 张翰明, 郭灿志. 机械手无损检测技术[J]. 电子机械工程, 2017, 33(2): 1-12.
XU Chunguang, ZHANG Hangming, GUO Canzhi. Nondestructive test technology using robot manipulator[J]. Electro Mechanical Engineering, 2017, 33(2): 1-12.
- [3] 李雄兵, 徐志农, 胡宏伟, 等. 曲面工件超声测量中探头自动对正的研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(11): 1289-1292.
LI Xiongbing, XU Zhining, HU Hongwei, et al. Probe's auto-alignment in curved components ultrasonic survey[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(11): 1289-1292.
- [4] RIGAILL G. Pruned dynamic programming for optimal multiple change-point detection[J]. arXiv preprint arXiv, 2010: 1004.0887.
- [5] 朱世强, 刘松国, 王宣银, 等. 机械手时间最优脉动连续轨迹规划算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 47-52.
ZHU Shiqiang, LIU Songguo, WANG Xuanyin, et al. Time-optimal and jerk-continuous trajectory planning algorithm for manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 47-52.
- [6] 梅江平, 臧家伟, 乔正宇, 等. 三自由度 Delta 并联机械手轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 9-17.
MEI Jiangping, ZANG Jiawei, QIAO Zhengyu, et al. Trajectory planning of 3-dof delta parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(19): 9-17.
- [7] ZEFRAN M, KUMAR V, CROKE C B. On the generation of smooth three-dimensional rigid body motions[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(4): 576-589.
- [8] LU Z, XU C, PAN Q, et al. Inverse kinematic analysis and evaluation of a robot for nondestructive testing application[J]. Journal of Robotics, 2015, 2015: 1-7.
- [9] PULLEN K, BREGLER C. Motion capture assisted animation: Texturing and synthesis[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 501-508.
- [10] AMINIKHANGHAHI S, COOK D J. A survey of methods for time series change point detection[J]. Knowledge and Information Systems, 2017, 51(2): 339-367.
- [11] KIRILLOV A. An introduction to lie groups and lie algebras[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [12] MOAKHER M. Means and averaging in the group of rotations[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 2002, 24(1): 1-16.
- [13] KAWAHARA Y, YAIRI T, MACHIDA K. Change-point detection in time-series data based on subspace identification[C]// Seventh IEEE International Conference on Data Mining, October 28-31, 2007, Omaha, NE, USA. IEEE, 2007: 559-564.
- [14] SELIG J M. Geometric fundamentals of robotics[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2005.
- [15] MERCKEL L, NISHIDA T. Change-point detection on the lie group SE(3)[C]// International Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics, May 17-21, 2010, Angers, France. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 230-245.

作者简介: 赵新玉, 男, 1979 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为焊接、检测技术与装备。以主要完成人身份发表学术论文 30 余篇, 其中 SCI 源刊 10 篇, EI 源刊 15 篇。

E-mail: xyz@djtu.edu.cn

温欣, 男, 1993 年出生。主要研究方向为先进无损检测技术。

E-mail: 296503677@qq.com

段晓敏(通信作者), 女, 1979 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为信息几何及其应用, 以主要完成人身份发表学术论文 10 余篇(其中 SCI 源刊 9 篇, EI 源刊 2 篇)。

E-mail: dxmhope@djtu.edu.cn