

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.06.006

# 超声检测并联机器人位姿分析研究<sup>\*</sup>

沈 伟<sup>1,2</sup>, 吴瑞明<sup>2\*</sup>, 刘云峰<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江科技学院 机械学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:**针对多自由度超声检测机器人检测曲面工件时位姿调整困难问题,通过分析超声检测并联机器人的运动学模型,提出了超声背散射检测与并联机器人一体化技术。以实现超声检测探头姿态的特殊控制要求为目标,对检测并联机器人建立了数学模型,提出了一种位姿控制计算方法,并利用 Matlab 对位姿控制进行了仿真分析,为计算机控制检测探头进行曲面检测提供准确的控制参数。通过超声 C 扫查实验,对比了超声图像中噪声所占的面积比例和图像轮廓清晰度。实验结果表明,超声检测并联机器人在提高超声探头的位姿控制精度后,能够降低噪声,提高信噪比。

**关键词:**超声散射;晶粒度;并联机器人;位姿分析

中图分类号:TH73;TP249

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)06-0768-06

## Pose analysis of diffuse ultrasonic backscatter parallel robot

SHEN Wei<sup>1,2</sup>, WU Rui-ming<sup>2</sup>, LIU Yun-feng<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. College of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;)

**Abstract:** Aiming at the difficulties of ultrasound scattering detection for multi-degree of freedom pose adjustment, analyzing ultrasonic testing parallel robot in kinematic model was introduced. Ultrasonic backscatter detection and parallel robot integration technology was used to improve the problem. Because of the specific control requirements for ultrasonic transducer's position, testing robot mathematical was modeled. A method to calculate the pose control was proposed. Pose analysis was simulated through Matlab. Through this pose analysis, the result was anticipated to provide accurate control parameters for computer-controlled transducer of surface testing. At C-scan experiments, comparing the percentage of the noise area, the experimental results indicate that ultrasonic testing parallel robot improved the accuracy of ultrasonic transducer's pose. Noise is reduced, and signal to noise ratio is improved.

**Key words:** diffuse ultrasonic; grain; parallel robot; pose analysis

## 0 引 言

超声检测机器人是集数控、超声信号处理及超声成像等多学科技术于一体的超声检测系统。在复杂形状工件的超声检测中,如何做到实时调节和控制探头姿态和位置,使探头在检测过程中保证准确发射/接受声波信号,是检测工作中要解决的一个很重要的问题<sup>[1]</sup>。

在超声检测运动控制研究中,浙江大学王艳颖,周

晓军等<sup>[2,4]</sup>将超声检测技术与串联机器人技术结合应用。但串联机器人的末端执行器的误差是各个关节误差的累积和放大,因而误差大而精度低,文献[5-6]通过误差补偿提高超声检测的精度。而并联机器人却没有那样的累积和放大关系,误差小而精度高;在位姿求解上,并联机器人的反解非常容易,而串联机器人反解复杂且多值,从这一点来看,在工作空间内进行并联机器人位姿控制是比较容易的。

收稿日期:2015-01-04

基金项目:浙江省科技计划资助项目(2009C21G2130013)

作者简介:沈 伟(1988-),男,浙江上虞人,主要从事超声波检测技术方面的研究. E-mail:watsonshen5@126.com

通信联系人:吴瑞明,男,副教授,硕士生导师. E-mail:wuruiming@163.com

基于并联机器人以上的优势,以超声检测探头位姿精确控制为目标,本研究提出将超声波探头(换能器)安装在6-UPS钢带并联机器人上,通过对该超声检测并联机器人进行运动学分析,可为实现自由曲面的连续超声波扫描检测提供位姿精确控制的算法。

## 1 超声检测原理

### 1.1 超声背散射评价晶粒度原理

超声散射波虽然会影响超声检测过程中的超声成像,如以杂波的形式出现,但散射波中也携带着有关材料微观结构非常重要的信息,如果进行适当地建模可以用来评价材料的晶粒度<sup>[7]</sup>。目前国内还不太有对这方面的研究,国外已经提出了几种模型和方法来研究超声漫散射与材料晶粒度之间的联系。美国内布拉斯加大学林肯分校 Tuner 教授<sup>[8]</sup>提出了以深度为函数的 SSR 模型,其检测基本原理如图 1 所示。

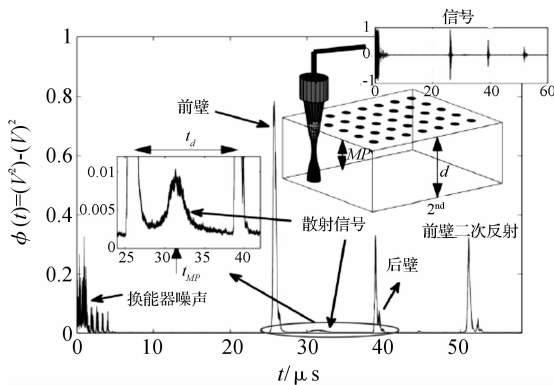


图 1 超声背散射原理

通过  $\Phi(t)$  与微观结构量建立关系,SSR 的最后一个表达式由下式给出:

$$\Phi(t) = V_{\max}^2 \frac{\pi}{8\sqrt{2}} \left( \frac{w(z_F)}{w_0} \right)^2 \left( \frac{\rho_L c_L^2}{\rho_f c_f^2} \frac{T_{fL} T_{Lf}}{R_{ff} D(\omega_0)} \right)^2 \times \exp(4\alpha_f z_F - 4\alpha_f z_f) \times \left[ \frac{\pi}{2} \frac{\omega_0^4}{c_L^8} \tilde{\eta}(\theta_{ps}, k_L) \Xi \dots \hat{p}\hat{p}\hat{s}\hat{s} \dots \hat{p}\hat{p}\hat{s}\hat{s}(\theta_{ps}) \right] \times \exp\left(-\frac{t^2}{\sigma^2} \int_0^\infty \frac{w_0^2}{w^2(z)} dz\right) \times \exp\left[-4\alpha_L z - \frac{4z(z - tc_L)}{\sigma^2 c_L^2}\right] dz \quad (1)$$

式中:  $\rho_L, c_L$ —样品的密度和纵波在样品中的速度;  $\rho_f, c_f$ —液体的密度和波在液体中的速度;  $D(\omega_0)$ — $\omega_0$  的衍射校正,并作为输入波的中心频率,  $w_0$ —换能器孔径的半径;  $w(z_F)$ —高斯光束的宽度,  $z_F$ —校准反射振幅  $V_{\max}$  期间测得的从换能器表面到该反射平面之间的水通道距离;  $\alpha_f$ —流体的衰减系数;  $z_f$ —后向散射实验中

换能器的表面到样品之间的水通道距离。

式(1)表示的是流-固界面超声散射理论的实验结果。这个 SSR(单次散射)模型可分为 3 个主要部分。式(1)的前两行表示的是与换能器参数,样品流体参数和整体性质相关的参数。固、液之间的透射系数分别由以下两式给出:

$$T_{Lf} = T_{fL}(2\rho_f c_f) / (\rho_L c_L), T_{fL} = 2\rho_f c_f / (\rho_L c_L + \rho_f c_f) \\ R_{ff} = (\rho_L c_L - \rho_f c_f) / (\rho_L c_L + \rho_f c_f)$$

表达式  $\tilde{\eta}(\theta_{ps}, k_L) \Xi \dots \hat{p}\hat{p}\hat{s}\hat{s} \dots \hat{p}\hat{p}\hat{s}\hat{s}(\theta_{ps}) = K$  在式(1)的第

3 行中所示,定义了用于量化微结构性质的漫散射系数。 $\tilde{\eta}(\theta_{ps}, k_L)$  是相关函数  $\eta(x - y)$  的空间傅立叶变换。这个相关函数描述了两个随机选择的点  $x$  和  $y$  在该均匀材料中某一区域的概率。在式(1)中,  $\theta_{ps}$  定义了入射纵波矢量  $p$  和散射纵波矢量  $s$  之间的夹角。在后向散射实验中,  $\theta_{ps} = \pi$  ( $k_L$ —在固体中波的个数,  $k_L = \omega_0 / c_L$ )。在测试单相材料中,对纵-纵后向散射模式 ( $\theta_{ps} = \pi$ ) 的相关函数的傅立叶变换可表示为:

$$\tilde{\eta}(\theta_{ps}, k_L) = \frac{L^3}{\pi^2 (1 + 4k_L^2 L^2)^2} \quad (2)$$

式中:  $L$ —空间相关长度,它是颗粒的长度标度的量级;

量  $\Xi \dots \hat{p}\hat{p}\hat{s}\hat{s} \dots \hat{p}\hat{p}\hat{s}\hat{s}(\theta_{ps})$ —广义胡克定律,  $\Xi \dots \hat{p}\hat{p}\hat{s}\hat{s} \dots \hat{p}\hat{p}\hat{s}\hat{s}(\theta_{ps}) =$

$\Xi \dots \alpha\beta\gamma\delta \dots \hat{p}_\alpha \hat{p}_i \hat{s}_j \hat{s}_k \hat{p}_l \hat{s}_m \hat{s}_n \hat{s}_l, \Xi \dots \alpha\beta\gamma\delta \dots \hat{p}_\alpha \hat{p}_i \hat{s}_j \hat{s}_k \hat{p}_l \hat{s}_m \hat{s}_n \hat{s}_l$ —协方差张量的内积,其中:

$$\Xi \dots \alpha\beta\gamma\delta \dots \langle C_{ijkl} C_{\alpha\beta\gamma\delta} \rangle - \langle C_{ijkl} \rangle \langle C_{\alpha\beta\gamma\delta} \rangle$$

式中:  $\langle C_{ijkl} \rangle$ —二阶弹性系数张量,有 81 个分量(尖括号  $\langle \rangle$  表示集合平均值); 矢量  $p, s$ —入射和散射波的传播方向。例如在一个立方晶体中:

$$\Xi \dots \hat{p}\hat{p}\hat{s}\hat{s} \dots \hat{p}\hat{p}\hat{s}\hat{s}(\theta_{ps}) = \frac{v^2}{\rho^2} \left( \frac{9}{525} + \frac{6}{525} \cos^2 \theta_{ps} + \frac{1}{525} \cos^4 \theta_{ps} \right) \quad (3)$$

式中:  $v$ —单晶各向异性因子,  $v = c_{11} - c_{12} - 2c_{44}$ 。

式(1)剩余项定义的是当超声波穿透试件时平均波束的行为。其中:  $\alpha_L$ —固体的衰减系数,  $\sigma$ —输入波的时间宽度。高斯波束宽度可以写成:

$$w^2(z) = -2k_f^{-1} \left( \text{Im} \left( q(0) + z_f + \frac{c_L}{c_f} z \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (4)$$

式中:  $k_f$ —在液体中的波数,  $k_f = \omega_0 / c_f, q(0) = (-F^{-1} + 2ik_f^{-1} w_0^{-2})^{-1}, F$ —换能器的焦距。

而式(1)中等号的左边:

$$\Phi(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (V_i(t) - b(t))^2 = \langle V^2 \rangle - \langle V \rangle^2$$

通过求解各扫查点信号的平方值与各扫查点信号平均值的平方的差值(即  $\Phi(t)$ ),建立  $\Phi(t)$  与晶粒度之间的函数关系是实现超声检测评价试件晶粒度的一种方法。 $\Phi(t)$  的实验值与理论值偏差对比如图 2 所示。 $\Phi(t)$  值是一个数值较小的值,在实验研究过程中,很容易因探头位姿不到位产生的误差而引起  $\Phi(t)$  的实验值与理论值产生较大偏差如图 2(b) 所示。所以要控制超声检测过程中误差在合理范围内,提高检测过程中控制的精确度尤其是对探头位姿控制的精度对检测结果具有积极影响。

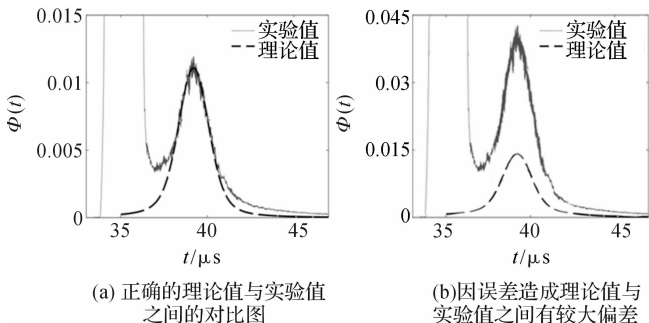


图 2  $\Phi(t)$  的实验值与理论值偏差对比

因并联机器人相比串联机器人具有更小的末端误差,以及位姿控制计算更容易等优点,本研究尝试将超声检测技术与并联机器人技术结合应用,为自动化超声评估材料晶粒度提供一种平台思路。而位姿分析是超声检测并联机器人其他运动分析的前提和准备,故本研究从位姿分析出发,为计算机控制超声检测并联机器人的提供一种算法。

## 1.2 超声检测并联机器人

钢带并联机器人模型如图 3(a) 所示。其工作原理是由 6 套伺服电机通过皮带轮装置带动卷筒转动,卷筒再带动 6 根钢带运动并使得钢带长度发生变化,从而实现动平台的多自由度运动<sup>[9]</sup>。电机座铰接在横杆上并可绕铰轴转动,钢带的一端可绕卷筒转动,钢带的另一端通过复合球铰与动平台连接。钢带并联机器人机构的简化结构形式如图 3(b) 所示。与上、下平台连接的每条单开链,自上而下包括一个球面副(S),一个移动副(P),一个虎克铰(U)。

## 2 超声机器人位姿分析

已知超声探头的位置和姿态,求解输入件的位置称为机构的反解。在并联机器人的运动过程中,不论是钢带,还是动平台,都将产生复杂的运动。但如果把这些物体看成是刚体,那么就可以用描述一个刚体在空间的位置和姿态的方法来描述它们在空间的位

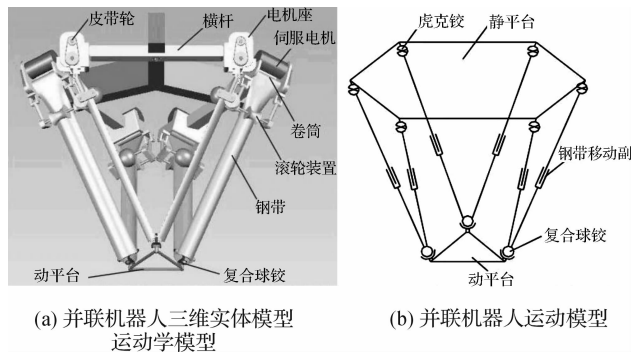


图 3 并联机器人三维模型和运动模型

姿<sup>[10-11]</sup>。本研究在笛卡尔坐标系内进行描述,在动平台和静平台上分别建立动静坐标,用  $x_b, y_b, z_b$  和  $\alpha_b, \beta_b, \gamma_b$  来描述动平台的位姿,再通过动静坐标系之间的坐标转换,得到动平台上三点在静坐标系下的坐标。由两点坐标求得两点间的距离,即钢带长度。

## 2.1 超声检测机器人数学模型

本研究在机构的上平台建立一个固定坐标系  $O-XYZ$ ,原点  $O$  位于上平台  $A_1A_2A_3A_4A_5A_6$  六边形的几何中心, $O-XYZ$  的  $Z$  轴垂直于上平台平面向上, $X$  和  $Y$  轴如图 4(a) 所示。在机构的下平台建立一个动坐标系  $O'-X'Y'Z'$ ,其原点  $O'$  位于下平台三角形  $B_1B_2B_3$  的几何中心,其  $Z$  轴在初始状态时垂直于下平台平面向上,动坐标系的  $X$  轴和  $Y$  轴分别平行于静坐标系的  $X$  轴和  $Y$  轴。机构坐标俯视图如图 4(b) 所示,设  $A_1A_2A_3A_4A_5A_6$  六边形外接圆半径为  $R$ ,等边三角形  $B_1B_2B_3$  外接圆半径为  $r$ 。设  $(x_b, y_b, z_b)$  是下平台  $O'$  点相对定坐标系  $O-XYZ$  的坐标。

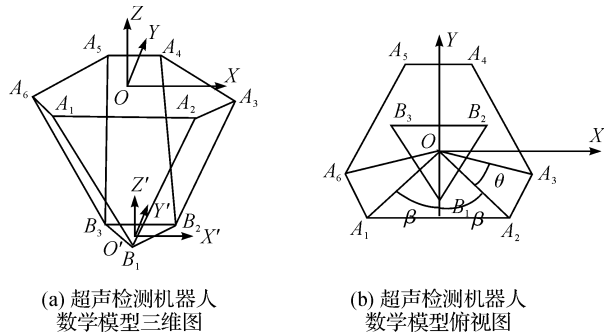


图 4 超声检测机器人数学模型

在图 4(b) 中,定平台基座六点  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  和  $A_6$  均在以半径为  $R$  的圆上, $A_1$  和  $A_2, A_3$  和  $A_6, A_4$  和  $A_5$  分别关于  $Y$  轴对称。其中  $A_1$  和  $A_2$  的夹角, $A_3$  和  $A_4$  的夹角, $A_5$  和  $A_6$  夹角均为  $\beta(0^\circ < \beta < 120^\circ)$ 。则在静坐标系下  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  和  $A_6$  的坐标为:

$$A_1(-R\sin\beta, -R\cos\beta, 0)$$

$$A_2(R\sin\beta, -R\cos\beta, 0)$$

$$\begin{aligned}
 &A_3(R\cos(30^\circ - \beta), R\sin(30^\circ + \beta), 0) \\
 &A_4(R\cos(30^\circ + \beta), R\sin(30^\circ + \beta), 0) \\
 &A_5(-R\cos(30^\circ + \beta), R\sin(30^\circ + \beta), 0) \\
 &A_6(-R\cos(30^\circ - \beta), R\cos(30^\circ - \beta), 0) \quad (5)
 \end{aligned}$$

$B_1, B_2, B_3$  在动坐标系  $O'-X'Y'Z'$  下坐标分别为:

$$B_1(0, -r, 0), B_2\left(\frac{\sqrt{3}}{2}r, \frac{r}{2}, 0\right), B_3\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}r, \frac{r}{2}, 0\right) \quad (6)$$

### 2.2 坐标转换

在动坐标系中的任一矢量  $\mathbf{b}'$  可以通过变换矩阵转换为固定坐标系中的  $\mathbf{b}$ , 即:

$$\mathbf{b} = \mathbf{T}\mathbf{b}' + \mathbf{b}_o \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{b}_o = [x_b \ y_b \ z_b]^T$ ,  $\mathbf{b}_o$ —上平台选定的参考点, 即动坐标原点  $O'$  在固定坐标系中的坐标。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{T}$ —动平台姿态的方向余弦矩阵, 第 1, 2, 3 列—动坐标系中  $X', Y', Z'$  轴在固定坐标系中的方向余弦。  
 $\mathbf{b}_o, \mathbf{T}$ —动坐标系相对于固定坐标系的位置和姿态。

在式(8)中, 矩阵  $\mathbf{T}$  虽然有 9 个元素, 但它们皆依赖于上平台的动坐标系相对于固定平台的定坐标系的 3 个独立的转角  $\alpha_b, \beta_b, \gamma_b$ 。坐标转换示意图如图 5 所示, 设绕  $X$  轴旋转的角度用  $\alpha_b$  表示, 绕  $Y$  轴旋转的角度用  $\beta_b$  表示, 绕  $Z$  轴旋转的角度用  $\gamma_b$  表示, 动、静平

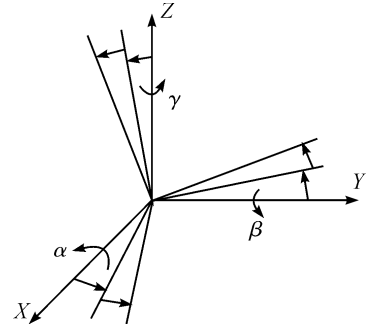


图 5 坐标转换示意图

台的相对坐标系是先绕  $X$  轴旋转了  $\alpha_b$ , 再绕  $y$  轴旋转了  $\beta_b$ , 最后又绕  $Z$  轴旋转了  $\gamma_b$ , 则动平台相对于静平台的旋转变换矩阵  $\mathbf{T}$  可以表示为:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_z \cdot \mathbf{T}_y \cdot \mathbf{T}_x \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{T}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_b & -S\alpha_b \\ 0 & S\alpha_b & C\alpha_b \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_y = \begin{bmatrix} C\beta_b & 0 & S\beta_b \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\beta_b & 0 & C\beta_b \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_z = \begin{bmatrix} C\gamma_b & -S\gamma_b & 0 \\ S\gamma_b & C\gamma_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

计算得:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C\gamma_b \cdot C\beta_b & C\gamma_b \cdot S\beta_b \cdot S\alpha_b - S\gamma_b \cdot C\alpha_b & C\gamma_b \cdot S\beta_b \cdot C\alpha_b + S\gamma_b \cdot S\alpha_b \\ S\gamma_b \cdot C\beta_b & S\gamma_b \cdot S\beta_b \cdot S\alpha_b + C\gamma_b \cdot C\alpha_b & S\gamma_b \cdot S\beta_b \cdot C\alpha_b - C\gamma_b \cdot S\alpha_b \\ -S\beta_b & C\beta_b \cdot S\alpha_b & C\beta_b \cdot C\alpha_b \end{bmatrix} \quad (10)$$

(注:  $C = \cos, S = \sin$ )

再由两点之间的距离公式得到钢带长度:

$$l_i = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} \quad (i = 1, 2 \dots, 6) \quad (11)$$

### 3 实例分析

根据以上理论, 现用该超声检测机器人检测一个半径为 300 mm 圆环工件中的焊缝, 设置超声检测机器人动平台初始位置在  $z = -800$  mm 的平面, 动平台外接圆半径  $r = 40$  mm, 定平台外接圆半径  $R = 400$  mm。在检测过程中, 超声探头需始终与工件表面垂直, 即动平台的  $\beta$  需实时变化。机器人动平台与被检测焊缝相对位置如图 6 所示。

针对已知曲面进行超声检测前, 需对超声检测路径进行规划。本研究引用文献[12]中提出的  $z$ -map 路

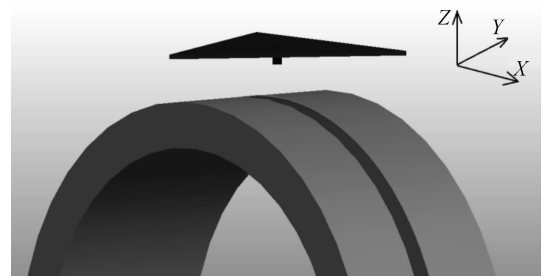


图 6 超声检测探头与被检测工件相对位置

径规划原理, 利用 Matlab 对曲面进行超声检测路径进行规划, 得到的路径如图 7 所示。图 7 中各点为实际超声扫查点。

得到路径规划图之后, 本研究通过控制并联机器人各钢带的长度来最终控制超声探头的位姿。笔者利用 Matlab 计算仿真, 进一步得到在检测过程中各钢带长度变化曲线如图 8 所示。

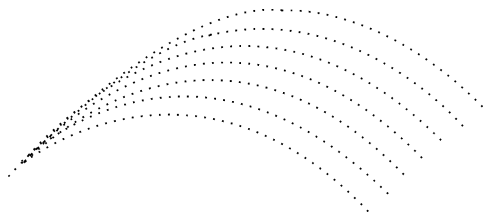


图 7 超声检测路径规划图

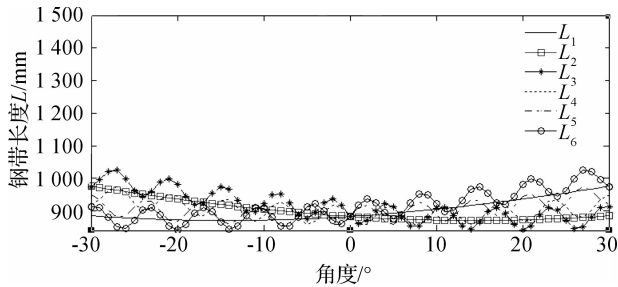


图 8 各钢带长度在检测过程中的变化曲线

图 8 中,  $L_1$  和  $L_2$  与其他 4 根钢带变化不同, 为正弦变化, 这是因为动平台上  $B_1$  点只做圆周运动, 而  $B_2, B_3$  点在大趋势是正弦变化的同时又要实时调整以满足探头位姿始终垂直于焊缝表面。所以在正弦变化的基础上有波动。在角度为 0 的位置, 各钢带长度相等, 此处正好是动平台初始位置, 说明建模正确, 姿态分析算法可行。

本研究分别采用手工超声检测、串联机器人超声检测和并联机器人超声检测 3 种不同的超声扫查方式检测同一工件, 检测得到的 C 扫查图像如图 9 ~ 11 所示。不同超声扫查方式黑色噪声所占面积比如表 1 所示。其中工件中内置了直径 1 mm 的小孔缺陷。对比上述 3 张图像, 图 9 的噪声最大, 图中黑色点表示噪声, 通过 Matlab 计算, 图 9 中黑色噪声占总面积的 36.72%。对检测造成了非常大的影响, 中间白色区域为人为设置的小孔, 虽然能检测到小孔, 但小孔边缘模糊。图 10 的噪声相对减少很多, 计算得到黑色噪声占总面积的 14.96%, 小孔的形状也清晰了不少, 而图 10 的小孔形状基本还原了圆形。而且比图 11 的噪声也更小, 图 11 的黑色噪声所占面积比为 9.11%。所以综合以上实验数据, 将超声检测与并联机器人技术结合, 能有效提高曲面超声检测精确度, 对结果有积极作用。

表 1 不同超声扫查方式黑色噪声所占面积比

	图 9	图 10	图 11
黑色噪声所占面积比 (%)	36.72	14.96	9.11

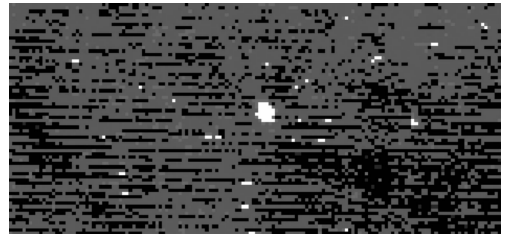


图 9 手工超声检测工件 C 扫查图像

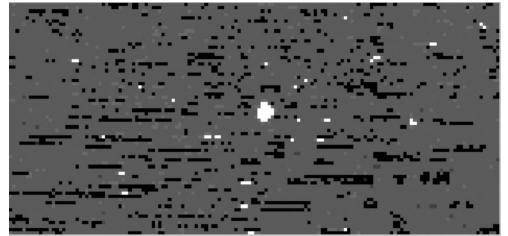


图 10 串联机器人超声检测工件 C 扫查图像

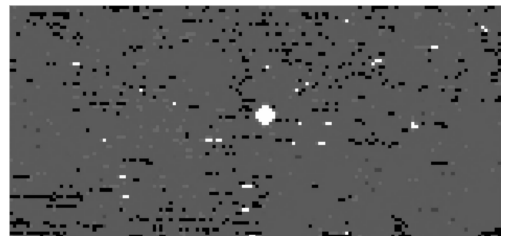


图 11 并联机器人超声检测工件 C 扫查图像

### 4 结束语

本研究通过分析超声检测并联机器人的运动学模型, 提出了超声背散射检测与并联机器人一体化技术。

通过实验发现, 相比超声检测串联机器人更小的末端误差, 超声检测并联机器人从硬件上进一步降低超声检测过程中噪声的影响, 为从超声信号中提取有用信息提供硬件保障。笔者通过超声检测并联机器人位姿分析, 建立超声检测并联机器人的数学模型, 利用动坐标系与固定坐标系之间的坐标转换关系, 为超声检测并联机器人检测工件的位姿控制提供一种算法。

Matlab 仿真验证了该模型的正确性, 且该方法具有算法简单、柔性好等优点, 为超声检测过程自动化水平的进一步提升打好基础。

### 参考文献 (References) :

[1] 马 俊. 数控机床超声检测系统产品族 CAE 技术分析 [D]. 太原: 中北大学机械与动力工程学院, 2014.

(下转第 807 页)

本文引用格式:

沈 伟, 吴瑞明, 刘云峰. 超声检测并联机器人位姿分析研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6): 768 - 772, 807.

SHEN Wei, WU Rui-ming, LIU Yun-feng. Pose analysis of diffuse ultrasonic backscatter parallel robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(6): 768 - 772, 807.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>