

基于本体多关节的超声检测机器人误差补偿

郑慧峰 周晓军 李雄兵

【摘要】 超声波检测对方向性有较高要求,特别对曲面型工件进行检测时,需对探头终端的位姿进行误差软件补偿来提高检测的精度。本文首先对超声检测机器人进行运动学分析,然后通过分析其检测位姿误差的来源和特点,阐述基于本体多关节误差补偿的原理和补偿模型。最后,通过实例验证了该误差补偿方法的正确性,为计算机控制超声探头进行曲面检测提供准确的控制参数,实现了曲面形工件的连续超声检测。

关键词: 机器人 超声检测 运动学 误差补偿

中图分类号: TP274⁺.53

文献标识码: A

Research on Error Compensation of Multi-joint Ultrasonic Robot Based on Ontology

Zheng Huifeng Zhou Xiaojun Li Xiongbing
(Zhejiang University)

Abstract

For the high need of direction aiming at ultrasonic testing, especially the test of surface work-pieces, it is necessary to make error compensation to improve the test accuracy. The kinematics analysis of ultrasonic robot was firstly done, then the principle and compensation model of multi-joint error compensation was expatiated though the analysis of sources and traits of the pose error. Finally the example was given to validate the error compensation method, by which the continuous ultrasonic test for curve surface was realized by exact control parameters.

Key words Robot, Ultrasonic test, Kinematics, Error compensation

引言

具有曲面外型的复杂工件在制造业各个部门的应用越来越广泛,针对这类工件的超声检测,本文开发了五自由度超声检测机构,使超声探头能够对准零件外表面法线方向,超声声束能够垂直入射工件表面,进行内部缺陷的评估。该机构可以看作一台由多个连杆和关节组成具有空间运动能力的检测机器人,超声探头就是机器人的终端效应器^[1]。对多关节超声检测机器人进行运动学分析,是实现曲面型工件进行超声检测的基础,利用其正解,可以将工件描述从关节空间转换为操作空间,也即能求得未知曲面模型的工件的CAD数字模型;利用运动学逆解,可以将工件描述从操作空间转换为关节空间,

也即将曲面模型的离散点转换为对应各个关节的扫描点位,实现对各个关节的运动控制。

从控制角度,由于机器人各关节的位置伺服系统采用电机轴(而不是关节轴)上的位置检测构成位置反馈,实际上是一个半闭环伺服系统,故无法消除终端探头架的位置误差^[2],因此在进行运动学分析和运动学综合时,并不是简单地将建立的运动学方程求取正解和逆解,而必须考虑系统位姿误差后进行运动学分析和运动学综合才符合实际情况。本文利用本体多关节补偿模型对系统误差进行有效补偿。

1 超声检测机器人运动学分析

1.1 模型建立

曲面超声检测机器人是由 X、Y、Z 三个平移关

收稿日期: 2007-08-13

郑慧峰 浙江大学机械与能源工程学院 博士生, 310027 杭州市

周晓军 浙江大学机械与能源工程学院 教授 博士生导师

李雄兵 浙江大学机械与能源工程学院 博士生

节和 A、B 两个转动关节的五自由度组成的,按 Denavit-Hartenberg 方法和连杆坐标系建立的原则^[3-4],建立各连杆坐标系如图 1 所示。

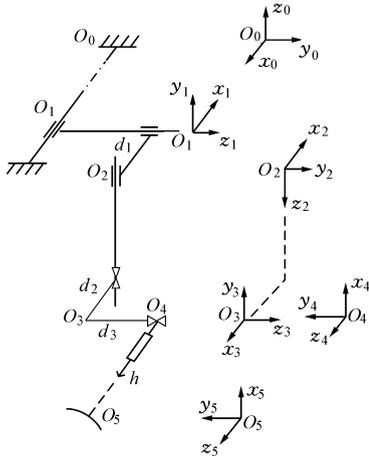


图 1 某超声检测机器人杆件坐标系约定

Fig.1 Convention of ultrasonic robot frame coordinates

相邻两杆坐标系 \sum_{n-1} 和 \sum_n ($n=1, \dots, 5$) 两杆变换矩阵为

$$T_n^{n-1} = T_r(Z_{n-1}, a_n) T_t(0, 0, d_n) T_l(l_n, 0, 0) T_r(x_n, a_n) = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i \cos\alpha_i & \sin\alpha_i \sin\alpha_i & l_i \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \cos\alpha_i & -\cos\alpha_i \sin\alpha_i & l_i \sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_0^5 = T_0^1 T_1^2 \dots T_4^5 = \begin{bmatrix} \cos\alpha \sin b & -\sin\alpha & \cos\alpha \cos b & d_3 \sin\alpha + d_2 \cos\alpha + h \cos\alpha \cos b + d_1 + x \\ -\sin\alpha \sin b & -\cos\alpha & -\sin\alpha \cos b & d_3 \cos\alpha - d_2 \sin\alpha - h \sin\alpha \cos b + y \\ \cos b & 0 & -\sin b & -h \sin b - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)即为该超声检测机器人的运动学方程。由此式就可以求出检测机器人的运动学正解与逆解。这里不做赘述。

1.2 机器人运动学在超声检测中的应用

本系统集成三坐标测量机功能与超声无损检测于一体。对于一未知 CAD 模型的曲面工件,其超声检测流程如图 2 所示。其中①表示运动学正解,水声程为实测。②表示运动学逆解,水声程为用户设定。

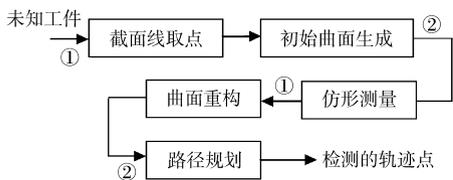


图 2 超声检测中运动学的应用

Fig.2 Kinematical application in ultrasonic test

在图 1 中,检测机器人处于初始位姿(即操作零位), \sum_0 为系统参考坐标系, \sum_5 为工件的检测坐标。由于探头进行反射法超声检测时,检测探头始终指向被测工件的法线方向。因此检测探头所在的坐标系 \sum_5 中的 z_5 轴应该始终指向被测构件表面的法线方向。图中的 d_1, d_2, d_3 都是结构变量, h 为 B 轴轴线沿工件法线方向到探头晶片的距离,包括水声程与 B 轴轴线到探头晶片距离的和。X、Y、Z、A 和 B 分别代表 5 个轴的关节变量,如表 1 所示,其中 l_n 为连杆杆长, α_n 为连杆扭角, a_n 为相邻连杆间的相对角位移, d_n 为相邻连杆沿 z 轴方向的偏移。

表 1 超声检测机器人的连杆 D-H 参数

Tab.1 D-H link parameters of ultrasonic testing robot

连杆号	l_n/mm	$\alpha_n/(\circ)$	d_n/mm	$a_n/(\circ)$	运动变量	范围
1	-X	90	0	180	X	X~(0,2 100)
2	-d ₁	90	Y	0	Y	Y~(0,780)
3	d ₂	90	Z	90+A	Z, A	Z~(-90,600) A~(-365,365)
4	0	-90	d ₃	-90+B	B	B~(-185,185)
5	0	0	h	0	h	实测

将表 1 中的变换参数代入式(1)中计算 T_{n-1}^n ($n=1, \dots, 5$)得

通过运动学正解将关节位置信息转为笛卡尔坐标系下的三维坐标,以实现通过工件的截面线取点得到初始的工件模型和仿形测量中实时得到更加精确的曲面位置信息;通过采用 B 样条节点插入算法和二叉递归分割算法将初始曲面和重构曲面进行离散^[5],然后通过运动学逆解得到仿形测量与超声扫描所需的轨迹点的各个关节位置信息。

2 超声检测中的误差补偿

机器人检测系统的位姿误差有指令误差、伺服系统误差、检测误差、构件变性误差、机械传动误差和温度误差所造成,如果某一误差来单独分析将非常复杂,在工程应用上十分不便。于是,通常将机器人的重复定位误差归纳为各组成连杆的运动变量与结构变量引起的位姿误差^[6]。

2.1 本体多关节运动学分析

式(1)为不考虑误差的理想变换,在考虑误差影响时相邻坐标系的真实变换矩阵为

$$d\mathbf{T} = \frac{\delta\mathbf{T}}{\delta\alpha}\Delta\alpha + \frac{\delta\mathbf{T}}{\delta\theta}\Delta\theta + \frac{\delta\mathbf{T}}{\delta d}\Delta d + \frac{\delta\mathbf{T}}{\delta l}\Delta l \quad (3)$$

机器人末端机构对基础坐标的真实变换矩阵为

$$\mathbf{T}_0^n = \mathbf{T}_0^n + d\mathbf{T}_0^n$$

其中 $d\mathbf{T}_0^n = \mathbf{T}_0^n \partial\mathbf{T}_0^n$

\mathbf{T}_0^n 的误差矩阵^[4]为

$$\partial\mathbf{T}_0^n = \begin{bmatrix} 0 & -\partial_z^n & \partial_y^n & d_x^n \\ \partial_z^n & 0 & -\partial_x^n & d_y^n \\ -\partial_y^n & \partial_x^n & 0 & d_z^n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

可得末端相对于坐标系 $\sum n$ 的位置和位姿误差分别为 $dP^n = [d_x^n \ d_y^n \ d_z^n]^T$ 和 $d\theta^n = [\partial_x^n \ \partial_y^n \ \partial_z^n]^T$ 。式(4)为机器人位姿误差计算模型的基础。

2.2 超声检测机器人的误差补偿

本节在分析系统位姿误差产生原因、特点及其超声检测自身特点的基础上,给出本体多关节误差补偿的基本原理和补偿步骤如下:首先,根据运动到达工件的基准点,然后调整位姿使得超声信号最强,并且满足实际的水声程与在求解运动学逆解时用户设定的水声程基本相等,即可认为探头对准同一点,此时系统误差最小,求得 $d\mathbf{T}_0^5$ 。其次,为了消除齐次变换误差 $d\mathbf{T}_0^5$,设各个关节的补偿摄动运动率分别为 ∂_i ,由式5可求得各个 ∂_i , ($i=1, \dots, 5$)。最后,设 ∂_1 使坐标系 $\sum 5$ 相对坐标系 $\sum 0$ 中产生的补偿摄动齐次变换矩阵为

$$\Delta_0^1 = \partial_1 (\mathbf{T}_0^1 + d\mathbf{T}_0^1) (\mathbf{T}_1^1 + d\mathbf{T}_1^1) \cdots (\mathbf{T}_0^5 + d\mathbf{T}_0^5) \quad (5)$$

依次可以得到其他关节产生的补偿摄动齐次变换归算到基础坐标中,分别为 $\Delta_0^2, \Delta_0^3, \Delta_0^4, \Delta_0^5$ 。若将它们与齐次变化误差相抵消,就可以实现补偿。即

$$d\mathbf{T}_0^5 + \Delta_0^1 + \Delta_0^2 + \Delta_0^3 + \Delta_0^4 + \Delta_0^5 = 0 \quad (6)$$

式(6)为五自由度超声检测机器人探头位姿误差的本体多关节补偿模型,据此可以求得各关节的补偿摄动运动量。

同理得到的各节的摄动矩阵应用于所有轨迹点,对其进行误差补偿。

3 检测机器人实例分析

3.1 实验条件

为了验证补偿的效果,首先,根据1.2节中超声探头的标准运动点位,控制超声探头走位,观察超声信号的表面波和底波的反射情况;然后,生成位姿补偿后的运动点位,控制超声探头走位,观察超声信号

的对准情况。

实验1:用一个直径为88 mm,厚度为7 mm的圆筒形工件。由于本系统缺少转盘,所以扫描的主运动方向为沿圆筒的母线方向(Z轴),辅助运动为沿圆筒外轮廓进给,由X、Y和A三个轴插补完成。记录各个关节到位信息,然后通过运动学正解画出工件上扫描的轨迹,进行对比。

实验2:取曲面工件中的一部分进行超声检测,扫描间距为5 mm。因为是曲面工件,必须五轴进行联动才能够同时满足达到各个运动点位。记录各关节的位置和超声信号底波的幅值强度,范围为0到255,其中255表示满屏值。

3.2 实验结果与分析

在实验1中,补偿前后扫描轨迹与理想轨迹的对比如图3所示。可见,补偿后的轨迹与理想轨迹曲线更加接近,误差整体明显减少。由于本系统具有在超声检测过程中自动记录每个采样点的超声A波,因此,可选择轨迹上两点M和N分别观察在进行误差补偿前后超声A波的区别,如图4所示。

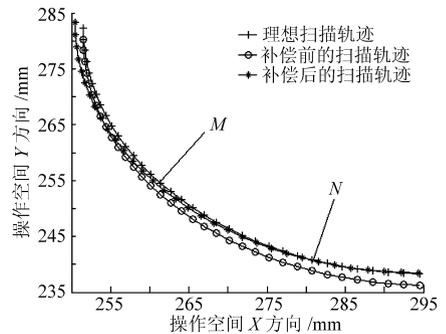


图3 圆柱工件位姿补偿前后轨迹与理想轨迹的对比图
Fig.3 Comparison chart between ideal path and the one before and after error compensation of cylinder work-piece

M和N位置的波形信号在误差补偿之前的增益设置为20 dB,并未能满屏显示,如图4所示。经过误差补偿之后M与N位置的波形信号明显有所增强,基本上都超过满屏,如图5所示。所以,误差补偿使得波形信号加强3~6 dB,补偿效果明显。

表2与表3分别记录了实验2中某运动扫描路径进行补偿前后,扫描点位对应的X、Y、Z、A和B 5个关节的位置信息及超声回波的信号值数据(回波信号为0~255的相对值)。由此可计算得X、Y、Z、A和B各轴的补偿值范围分别为: $[-9.2502, 7.1093]$, $[1.1161, 2.1958]$, $[-5.0318, -0.2999]$, $[-1.5640, 1.3113]$, $[0.3134, 0.8736]$ 。

判断补偿效果的依据是各个点位上的底波幅值是否有所提高。从表中的信号对比可以看出,经过补偿后,在各个点位上底波幅值基本上都有所增高。

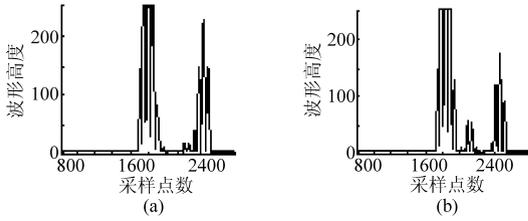


图 4 圆柱工件位姿补偿前 M、N 位置超声波形
Fig.4 Ultrasonic pulse at mark M and N of cylinder work-piece without error compensation
(a) M 位置 (b) N 位置

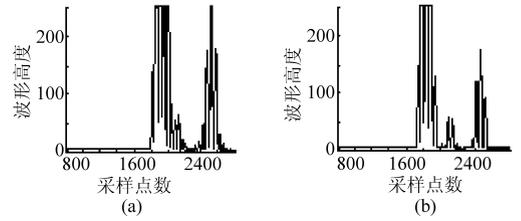


图 5 圆柱工件位姿补偿后 M、N 位置超声波形
Fig.5 Ultrasonic pulse at mark M and N of cylinder work-piece with error compensation
(a) M 位置 (b) N 位置

表 2 某扫描路径的各关节补偿前的位置信息及超声信号值

Tab.2 Joints' position and signal of one scanning path without error compensation

关节变量	曲面某截面线运动轨迹点的序号										
	1	2	3	4	5	...	55	56	57	58	59
X/mm	270.550	270.226	269.937	269.680	269.451	...	281.910	282.307	282.769	283.307	283.861
Y/mm	65.129	64.462	63.807	63.162	62.527	...	41.124	40.743	40.389	40.073	39.782
Z/mm	257.408	258.61	259.801	261.008	262.203	...	317.055	318.272	319.467	320.616	321.719
A/(°)	-85.56	-86.482	-86.42	-86.36	-86.311	...	-89.04	-89.13	-89.23	-89.35	-89.47
B/(°)	25.83	25.71	25.58	25.46	25.34	...	20.36	20.26	20.16	20.06	19.97
信号幅值	203	224	107	215	118	...	198	11	22	249	252

表 3 某扫描路径的各关节补偿后的位置信息及超声信号值

Tab.3 Joints' position and signal of one scanning path with error compensation

关节变量	曲面某截面线运动轨迹点的序号										
	1	2	3	4	5	...	55	56	57	58	59
X/mm	261.799	261.361	260.878	260.430	260.234	...	288.694	289.116	289.594	290.225	290.971
Y/mm	66.730	66.115	65.503	64.898	64.304	...	42.365	42.172	42.086	42.025	41.978
Z/mm	253.268	254.275	255.260	256.244	257.289	...	316.571	317.266	317.724	318.229	318.783
A/(°)	-85.39	-85.28	-85.16	-85.05	-84.999	...	-90.56	-90.64	-90.74	-90.87	-91.03
B/(°)	26.58	26.55	26.54	26.54	26.49	...	20.80	21.00	21.33	21.61	21.84
信号幅值	200	225	110	218	122	...	210	15	28	255	255

但是,扫描路径开始阶段补偿效果不明显,原因是该点是处于各关节加速阶段,本补偿方法并不能减少动态误差。

4 结束语

结合某超声曲面检测机器人的实际检测特点,

通过运动学分析建立运动学方程,应用基于本体多关节的误差补偿模型建模,从而对超声检测机器人进行静态误差补偿。通过实验对比,给出了补偿前后的轨迹信息以及信号值,结果表明此方法提高了检测机器人的位姿精度。

参 考 文 献

- 江健. 航空构件一体化超声成像检测的若干关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- 吴洪涛,蔡鹤,刘又午. 工业机器人关节动态误差分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,1993,25(4):74~78.
- 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1995.
- 张伯鹏,张昆,徐家球. 机器人工程基础[M]. 北京:机械工业出版社,1989.
- 吴思源,周晓军,杨辰龙,等. 曲面工件超声检测路径规划方法研究[J]. 传感技术学报,2006,19(2):388~391.
- 王艳颖,周晓军,程耀东. 自由曲面超声检测机器人运动学分析[J]. 机电工程,2001,18(5):71~73.