

文章编号:1006-2467(2008)10-1707-05

## 基于信息融合的海底管道机器人自主定位控制

王忠巍, 曹其新, 栾楠, 张蕾

(上海交通大学 机器人研究所, 上海 200240)

**摘要:** 提出了利用电涡流传感器探测油气管线中的焊缝, 实现管道机器人在管线内的粗略定位, 再结合里程仪进行相邻焊缝间精确定位的定位控制方法. 针对管道机器人爬行速度不稳定所导致的焊缝漏检问题, 提出了利用里程定位信息容错漏检焊缝的产生式规则. 此外, 为了保证里程信息的可靠性, 应用多个里程仪为管道机器人提供里程定位数据, 并采用一致性数据融合算法对冗余里程信息进行融合处理, 同时提高了管道机器人的管内定位精度. 模拟油气管道台架上进行的管内定位实验和现役石油管线上的工程应用验证了该定位方法的可行性.

**关键词:** 管道机器人; 管内定位; 产生式规则; 一致性数据融合; 极大似然估计

**中图分类号:** TP 242

**文献标识码:** A

## Autonomous Localization Technique of Submarine In-pipe Robot Based on Multi-sensor Data Fusion

WANG Zhong-wei, CAO Qi-xin, LUAN Nan, ZHANG Lei

(Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Based on lots of investigation and analysis for internal and overseas in-pipe robot localization technology, a kind of localization method was brought forward, which firstly achieves rough localization using eddy current sensor to detect girth welds in pipelines, then carries out precise localization between adjacent girth welds by odometers. A production rule was presented to achieve fault-tolerance processing for undetected girth welds, which are induced by in-pipe robot's unstable crawl speed, using distance information. Multi-odometer was applied to get more reliable distance information and the consensus data fusion algorithm was adopted to process the redundant data, so in-pipe robot's localization precision is improved as well. The tests on experimental pipeline system and applications on project site show that the new in-pipeline localization method for in-pipe robot is effectual.

**Key words:** in-pipe robot; in-pipeline localization; production rule; consensus data fusion; maximum likelihood estimate

利用管道机器人对海底长输油气管线进行定期检测, 并对检测缺陷进行评估、定位和维修, 是确保海底管线安全、高效运行的有效手段. 在管道缺陷的

维修作业中, 机器人能够“感知”所处管道内的位置, 自主爬行到缺陷处并向外界指示维修位置是一个关键问题. 基于视觉传感器检测管道缺陷以及实现精

收稿日期: 2007-11-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA041703); 国家自然科学基金资助项目(50705054)

作者简介: 王忠巍(1978-), 男, 辽宁辽阳人, 博士生, 主要从事管道机器人自主定位技术和嵌入式控制技术的研究.

曹其新(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-54748985; E-mail: qxcao@sjtu.edu.cn.

确管内定位的方法已广泛应用于开发油气管线检测设备<sup>[1-4]</sup>,但对于现役海底石油管线检测机器人,由于工作环境恶劣而无法适用.而且,该定位方法要依靠拖缆传送视频信息,其作业范围有限,无法满足检测海底长输管线的需要.

针对长距离海底管线的管内定位问题,文献[5,6]介绍了一种用于管线维修的智能卡堵,管道内的智能卡堵与贴近海底同步运动的自主水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)以超低频电磁波实现双向通信功能, AUV再利用声调制解调器与水面维修船上的控制中心进行无线通信.因此,操作人员可以实时掌握智能卡堵的工作状态,对其进行操控,但智能卡堵过于复杂的控制系统使得设备开发困难,造价高昂.文献[7]中采取铺设管线时每间隔一定距离设置定点磁标,管道检测装置携带磁力计和 SINS(Strap-down Inertial Navigation System)系统,磁力计可准确探测到管线沿途的磁标, SINS系统则利用磁标的已知坐标信息进行航迹修正,从而实现了检测设备的精确管内定位,并同时完成对海底管线轨迹的精确测量<sup>[7,8]</sup>.但该方法对管线本身提出了较高的要求,我国早期海上油田特别是滩浅海油田在管道敷设时对后期的维修问题未予以充分考虑,未设置管内外均可检测到的磁标点,因此,该技术不能直接应用于我国长输管线的维护<sup>[8]</sup>.

考虑到海底石油管线通常是由标准钢管焊接而成,焊缝可用于标识管线的粗略位置,本文提出利用电涡流传感器探测油气管线中的焊缝,实现管道机器人在管线内的粗略定位;再结合里程仪进行相邻焊缝间精确定位的定位控制方法.对于粗定位过程中可能发生的焊缝漏检情况,本文应用产生式规则融合里程仪信息和焊缝信息实现对漏检焊缝的容错处理,确保机器人粗定位过程无误.利用多里程仪为机器人提供里程定位数据,并根据多传感器测量数据一致性融合方法<sup>[8,9]</sup>,对获得的冗余里程信息进行融合处理,实现机器人在焊缝间的精确定位.在管道机器人智能控制器上用 C 语言实现本文算法,通过模拟油气管道台架上进行的管内定位实验,以及现役石油管线上的工程应用,验证了该定位方法的可行性.

## 1 海底管道机器人管内定位过程分析

海底管道机器人的管内定位过程包括粗定位和精确定位.粗定位是从管线的起点到缺陷所在钢管,管线中的每条焊缝代表了一根钢管长度的相对距

离,利用电涡流传感器对焊缝与母材电磁特性差异的敏感性,检测识别管线中的焊缝并计数,实现机器人在长距离管线中的粗定位;精确定位是从缺陷所在钢管的起点到缺陷处,管道机器人借助里程仪采集里程定位数据.

管道机器人的粗略定位是靠计数焊缝实现的,因此,焊缝能否被准确探测和识别关系着管道机器人管内定位的成败.大量的电涡流传感器水下识别焊缝实验(见图1,内部安装电涡流传感器的密封舱在经过焊缝时,传感器采集的信号经转换电路后被处理成一个脉冲信号)表明,当电涡流传感器相对焊缝的运动速度 $\geq 50$  mm/s时,其对焊缝的识别率为100%,但管道机器人在爬行时存在因颠簸而产生的速度不稳定,以及因焊缝处焊瘤的阻碍使运动速度陡降等情况,造成其瞬时速度小于临界值,降低了电涡流传感器灵敏度,导致发生焊缝漏检和机器人的粗定位失败,因此,需对漏检焊缝进行容错处理.

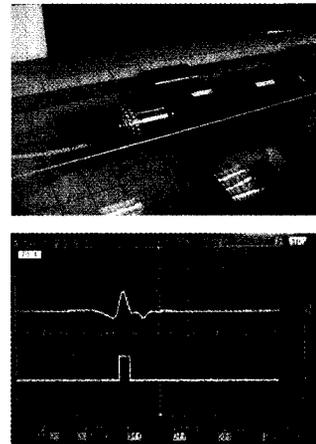


图1 电涡流传感器识别焊缝实验

Fig. 1 Girth weld identification experiments by eddy current sensor

漏检焊缝的容错处理是利用里程仪采集的行程信息“感知”焊缝漏检情况,即管道机器人每行进一定距离就应探测到焊缝,若无焊缝信息则判断发生了漏检,主动修改通过焊缝数的记录,达到容错漏检焊缝的目的.产生式规则的特点在于接近人的思维方式,其知识表示直观自然又便于推理,因此应用产生式规则可以容易表达上述容错漏检焊缝的思想,容错漏检焊缝的规则如下:

IF 〈里程仪计程值经过区间( $\alpha L, L/\alpha$ )〉

AND 〈无焊缝消息〉

THEN 〈发生焊缝漏检,焊缝计数器加1〉

其中: $L$ 为焊接管线所用的标准钢管长度; $\alpha$ 为里程仪的准确系数, $\alpha \in (0, 1)$ .则有:①当机器人实际行

程为  $L$ , 即机器人还未通过一条标准钢管时, 里程仪计程值处于区间  $(\alpha L, L)$ ; ② 当机器人实际行程为  $L/\alpha$ , 即机器人已经通过一条标准钢管时, 里程仪计程处于区间  $(L, L/\alpha)$ . 因此, 当里程仪计程值经过区间  $(\alpha L, L/\alpha)$  时, 可确定机器人实际行程超过  $L$ , 即管道机器人经过一道焊缝, 在该区间内若无焊缝信息, 则推断发生了漏检并给予补偿. 该方法亦可实现对连续漏检焊缝的容错处理.

里程仪常用于为管道机器人提供里程定位信息. 由于具有误差积累效应, 其测量精度随量程的增加而降低, 本文应用焊缝信息作为里程仪的分段校准信号, 可以有效控制其测量精度. 此外, 为消除单个里程仪容易受工作环境及其他随机因素的影响, 管道机器人采用 3 个里程仪同步采集行程数据, 并

对获得的冗余里程信息进行融合处理, 从而实现管道机器人在相邻焊缝间的精确定位. 多传感器得到的数据存在不确定性, 错误的数据或含有较大误差的数据参与信息融合会影响测量结果, 所以在信息融合前必须对其加以剔除. 本文根据文献[8,9]的多传感器测量数据一致性融合方法, 首先定义了一种置信距离测度, 来衡量里程仪测量数据之间的支持程度, 并在此基础上构造多里程仪测量数据之间的置信距离矩阵和关系矩阵; 然后, 利用有向图方法剔除含有较大误差或错误的测量数据, 进而得到反映真实测量结果的融合集; 最后, 采用极大似然估计法求解融合集中测量数据的最优融合值. 融合里程信息与焊缝信息实现管道机器人在管道内精确定位的流程如图 2 所示.

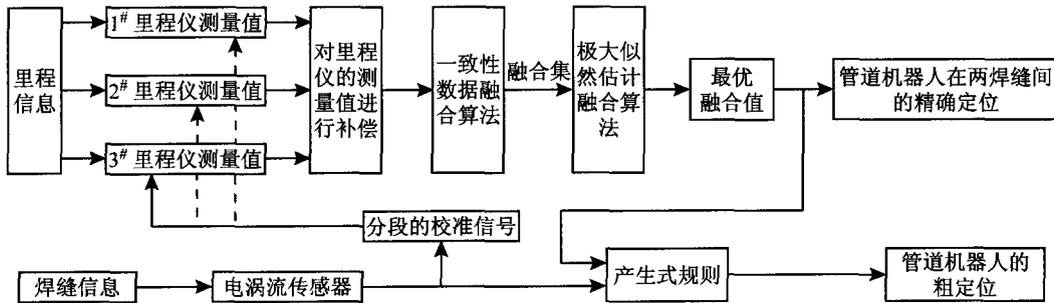


图 2 融合里程信息与焊缝信息实现管道机器人的管线内精确定位

Fig. 2 Flowchart for data fusion of distance and girth welds to achieve pipeline robot's in-pipeline precise localization

## 2 多传感器测量数据最优融合算法

### 2.1 一致性数据融合算法

对多传感器测量数据进行融合前, 可通过信息关联找出测量值彼此支持的一致性传感器组, 以保证所融合信息是来自同一目标, 即保证融合信息的一致性. Gauss 分布作为最普遍的概率分布函数, 常用于表示传感器测量值的不确定性, 置信距离测度<sup>[9,10]</sup>对服从 Gauss 分布的传感器测量值进行信息关联, 能够反映两传感器之间的相互支持程度, 用于确定一致性传感器组. 置信距离测度定义为

$$d_{ij} = 2 \int_{x_i}^{x_j} p_i(x | x_i) dx \quad (1)$$

$$d_{ji} = 2 \int_{x_j}^{x_i} p_j(x | x_j) dx \quad (2)$$

式中:  $p_i(x | x_i)$ 、 $p_j(x | x_j)$  分别为传感器  $i$ 、 $j$  的概率密度;  $d_{ij}$  值为假设传感器  $i$  测量值准确条件下, 传感器  $j$  测量值的可信度;  $d_{ji}$  值为假设传感器  $j$  测量值准确条件下, 传感器  $i$  测量值的可信度, 它们共同反映了 2 个测量值一致性的程度.  $d_{ij}$  (或  $d_{ji}$ ) 值越小, 2

个传感器的观测值越相近, 否则偏差就很大, 因此也称  $d_{ij}$  (或  $d_{ji}$ ) 为 2 个传感器的融合度.

假定用  $m$  个传感器测量同一个物理量, 则总的置信距离测度可用矩阵  $D_m$  来表示, 该矩阵描述了各传感器的一致性支持程度:

$$D_m = (d_{ij})_{m \times m} \quad (3)$$

根据  $D_m$ , 可得到多传感器测量数据的关系矩阵:

$$R_m = (r_{ij})_{m \times m}, \quad r_{ij} = \begin{cases} 1 & d_{ij} \leq \epsilon \\ 0 & d_{ij} > \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\epsilon$  为根据经验或多次试验结果所确定的置信距离测度  $d_{ij}$  的门限值;  $R_m$  可以用有向图法更为直观表示.

有向图法是把传感器作为节点, 对于传感器  $i$ 、 $j$ , 如果  $r_{ij} = 1$ , 则画一个从节点  $i$  到节点  $j$  的箭头, 当  $r_{ij} = r_{ji} = 1$  时, 表明这 2 个传感器相互强支持. 如果一个传感器被多数传感器所支持, 则该传感器的读数是有效的, 所有有效数据的集合称为融合集, 即获得一致性传感器组. 那些不在融合集中的测量值

被视为含有较大误差或错误而被剔除. 然后, 采用适合的最优融合方法合并融合集中的测量数据, 得到被测参数的较精确估计值.

## 2.2 极大似然估计融合算法

设  $m$  个传感器测量同一参数, 所得测量数据中最佳融合数为  $l (l \leq m)$ , 则相应的融合集为  $\{x_1, x_2, \dots, x_l\}$ . 采用文献[9, 11]中的极大似然估计算法, 将融合集中的原始测量数据合并为一个最佳融合数据, 并把它作为被测参数的最后结果. 融合集中的  $l$  个数据来自同一总体, 其概率密度函数如下:

$$p_i(x_i | \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - \theta}{\sigma_i}\right)^2\right] \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, l$$

因此, 可构造含有待估参数  $\theta$  的联合密度, 即极大似然函数:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_l; \theta) = \prod_{i=1}^l p_i(x_i | \theta) \quad (6)$$

$l$  个原始测量数据的最佳融合值  $\hat{\theta} = \hat{\theta}(x_1, x_2, \dots, x_l)$  应满足:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_l; \hat{\theta}) = \sup_{\theta \in \Theta} L(x_1, x_2, \dots, x_l; \theta) \quad (7)$$

等号两边同取自然对数, 可得

$$\ln L(x_1, x_2, \dots, x_l; \hat{\theta}) = \sup_{\theta \in \Theta} \ln L(x_1, x_2, \dots, x_l; \theta) \quad (8)$$

根据极大似然原理:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} L(x_1, x_2, \dots, x_l; \theta) \Big|_{\theta=\hat{\theta}} = 0$$

即

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \sum_{i=1}^l \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - \theta}{\sigma_i}\right)^2\right] \Big|_{\theta=\hat{\theta}} = 0 \quad (9)$$

解得

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^l x_i / \sigma_i}{\sum_{i=1}^l 1 / \sigma_i} \quad (10)$$

$\hat{\theta}$  就是融合集  $\{x_1, x_2, \dots, x_l\}$  的最优融合数据.

## 3 实验研究与工程应用

在管道机器人智能控制器上用 C 语言实现本文算法, 并在百米长模拟油气管道台架上开展了管道机器人自主定位实验(见图 3(a)), 实验管道包含用于考察定位精度的 5.5 m 长定位钢管. 定位实验过程为: 管道机器人通过探测焊缝信息, 首先自主爬行到定位钢管的前一焊缝处, 即实现粗略定位, 再借助里程仪信息爬行 5.5 m 进行精确定位, 机器人实际定位点与定位钢管另一焊缝的距离为定位误差.

管内定位实验进行多次, 管道机器人均能实现

自主定位任务, 智能控制器保存的精确定位阶段的里程仪测量行程数据和应用本文算法得到的融合值如表 1 所示. 表中: 里程仪 1#、2# 和 3# 的方差分别为  $\sigma_1=0.060, \sigma_2=0.055, \sigma_3=0.056$ .



(a) 模拟油气管道台架上进行的定位维修实验



(b) 管道机器人在工程管线定位维修中的应用

图 3 管道机器人自主定位控制的实验与应用  
Fig. 3 Autonomous localization experiment and application for in-pipeline robot

表 1 目标点测量值和融合数据结果

Tab. 1 The measurements of target and data fusion value m

组别	里程仪测量值			$\hat{\theta}$	$\bar{x}$
	1#	2#	3#		
1	5.45	5.34	5.36	5.51	5.55
2	5.32	5.27	5.30	5.46	5.45
3	5.44	5.34	5.37	5.51	5.55
4	5.36	5.47	5.34	5.52	5.56
5	5.19	5.34	5.35	5.51	5.46
6	5.37	5.33	5.35	5.51	5.52
7	5.40	5.34	5.36	5.53	5.54
8	5.35	5.34	5.46	5.51	5.55
9	5.15	5.31	5.32	5.48	5.42
10	5.39	5.36	5.37	5.52	5.42

因为里程仪的测量精度受加工差异、管道内壁情况、测量距离等因素的影响, 所以在对数据处理前, 根据里程仪工作的统计特性, 对 3 个里程仪的原始数据进行了补偿处理(原始测量值分别加 0.18、0.155 和 0.165), 即修正测量值的数学期望为定位钢管长度. 为便于比较, 采用简单平均数融合法对传感器数据进行处理, 其计算方法如下:

$$\bar{x} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 x_i \quad (11)$$

由表 1 可知: 对于含有较大误差或错误测量值

的数据组,采用一致性数据的极大似然估计算法可以排除异常数据的干扰,达到较高的测量精度;对于测量值相近的数据组,该算法的数据融合结果亦优于平均数融合法.此外,文中所述的管内定位方法在现役石油管线的现场缺陷定位实践中得到了成功的应用,如图3(b)所示.

## 4 结 语

针对在海底长输油气管线中进行的管道机器人自主缺陷定位问题,本文提出一种利用电涡流传感器探测油气管线中的焊缝,实现管道机器人的管线内粗略定位,再结合里程仪进行相邻焊缝间精确定位的控制方法.利用多里程仪为管道机器人提供里程定位数据,并采用一致性数据融合算法和极大似然估计融合算法对冗余里程信息进行融合处理,既保证了里程定位信息的可靠性,同时又提高了管道机器人的管内定位精度.该定位方法实现成本较低,对管线本身无特殊要求,为海底长输油气管道缺陷的定位和维修提供了一条新的途径.

### 参考文献:

- [1] 邓宗全, 张晓华, 董连海, 等. 野外大口径管道焊缝 X 射线检测机器人[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(1):48-49.  
DENG Zong-quan, ZHANG Xiao-hua, DONG Lian-hai, *et al.* Robot to detect fracture of the butt weld of big-diameter pipeline by X-ray [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 1997, 29(1):48-49.
- [2] 姜生元, 邓宗全, 李 斌, 等. 内置动力源管内 X 射线探伤机器人的研制[J]. 机器人, 2001, 23(3):211-216.  
JIANG Sheng-yuan, DENG Zong-quan, LI Bin, *et al.* Development on welded seam defect X-ray inspecting in-pipe robot powered by battery [J]. **Robot**, 2001, 23(3):211-216.
- [3] 徐小云, 颜国正, 鄢 波. 一种新型管道检测机器人系统[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8):1324-1327.  
XU Xiao-yun, YAN Guo-zheng, YAN Bo. A new style pipeline inspection robot system [J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2004, 38(8):1324-1327.
- [4] 李军远, 陈宏钧, 张晓华, 等. 基于信息融合的管道机器人定位控制研究[J]. 控制与决策, 2006, 21(6):661-665.  
LI Jun-yuan, CHEN Hong-jun, ZHANG Xiao-hua, *et al.* Localization technique of pipeline robot based on multi-sensor data fusion [J]. **Control and Decision**, 2006, 21(6):661-665.
- [5] Parrott R, Tveit E. Onshore pig trap valve replaced at operating pressure using tetherless intelligent pressure isolation plugs [J]. **Pipeline and Gas Journal**, 2005, 232(8):38-41.
- [6] Aleksandersen J, Tveit E. Remotely controlled pipeline isolation system [C]// **Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference**. Seattle, WA: International Society of Offshore and Polar Engineers Press, 2000: 115-119.
- [7] Jaejong Y, Jang G L, Chan G P, *et al.* An off-line navigation of a geometry PIG using a modified nonlinear fixed-interval smoothing filter [J]. **Control Engineering Practice**, 2005, 13(11):1403-1411.
- [8] 李孟杰. 海底管道轨迹在线精确测量技术研究[J]. 中国海洋平台, 2004, 19(6):46-49.  
LI Meng-jie. The study of accurate in-line inspection technology to offshore pipeline route [J]. **China Offshore Platform**, 2004, 19(6):46-49.
- [9] Luo R C, Lin M H, Scherp R S, *et al.* Dynamic multi-sensor data fusion system for intelligent robots [J]. **IEEE Journal of Robotics and Automation**, 1988, 4(4):386-396.
- [10] 王婷杰, 施惠昌. 一种基于模糊理论的一致性数据融合方法[J]. 传感器技, 1999, 18(6):50-53.  
WANG Ting-jie, SHI Hui-chang. Multisensor data fusion fuzzy theory [J]. **Journal of Transducer Technology**, 1999, 18(6):50-53.
- [11] 时荔蕙. 一种多传感器多目标信息融合方法[J]. 电声基础, 2003(7):8-12.  
SHI Li-hui. A method for multi-sensor multi-target information fusion [J]. **Audio Engineering**, 2003(7):8-12.