

文章编号: 1001-0920(2004)11-1246-04

基于 X 射线图像的视觉伺服同步控制技术

邓宗全, 许冯平, 张晓华

(哈尔滨工业大学 机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对 X 射线检测实时成像管道机器人工作的特殊性, 提出一种基于基准铅丝 X 射线图像的管内、外旋转机构伺服同步跟踪旋转控制技术。X 射线使用于传递同步跟踪信息的基准铅丝与焊缝同时成像于计算机中。计算机可实时检测到基准铅丝图像偏离屏幕基准中线的位移, 并将该位移作为管外旋转机构伺服控制系统的偏差, 调节管外旋转机构跟踪旋转, 实现同步运动, 从而满足 X 射线实时成像检测技术的工艺要求。

关键词: 同步控制技术; 管道机器人; X 射线检测; 实时成像; 视觉伺服

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Synchro-control technique of vision servo based on X-ray image

DEN G Zong-quan, XU Feng-ping, ZHANG Xiao-hua

(School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: DEN G Zong-quan, E-mail: denzq@hope.hit.edu.cn)

Abstract Aiming at the working particularity of the X-ray inspection real-time imaging pipeline robot (RTIPR), a synchro-follow control technique of vision servo was put forward based on the X-ray image of benchmark lead wire, which can transmit synchro-follow message. It utilizes X-ray to make benchmark lead wire image simultaneously with the weld seam in computer. By measuring the displacement on-line which the image of benchmark lead wire deviates from the reference center line of computer's screen, the out-pipe computer lets the displacement use as an error input of vision servo's control system of out-pipe rotary mechanism to regulate its rotating movement, then the synchro-motion can be realized to meet the technologic requirement of X-ray real-time imaging inspection technique (RTIIT).

Key words: synchro-control technique; pipeline robot; X-ray inspection; real-time imaging; vision servo

1 引言

目前, X 射线实时成像检测技术已成为无损探伤中先进的检测手段, 与传统的 X 射线照相检测技术相比, 它具有检测效率高、经济性好、可实时判定检测缺陷的特点, 已有取代 X 射线照相检测技术的趋势^[1]。基于此, 本文已成功研制了 X 射线检测实时成像管道机器人。

为获得最佳清晰度的焊缝图像, 在机器人系统中采用了小焦点、定向射束的 X 射线系统 (MG165/

2.25)。它需要分步分段透照焊缝, 才能获得整周的环焊缝图像。因此对机器人管内、外两部分的旋转系统提出了同心同步旋转运动的控制要求。关于伺服同步跟踪技术, 已有很多研究成果和应用^[2-9], 但它们均未涉及伺服同步控制信息传递的障碍问题, 因此这些方法都不能应用于该机器人。

针对这一特殊控制要求, 本文提出一种基于 X 射线图像的伺服同步跟踪技术, 该项技术是实现 X 射线实时成像检测技术自动化的保证。

收稿日期: 2003-12-24; 修回日期: 2004-03-19

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2001/AA 422410)。

作者简介: 邓宗全 (1957—), 男, 黑龙江宝清人, 教授, 博士生导师, 从事机器人机构学、特种机器人等研究;
许冯平 (1964—), 男, 黑龙江大庆人, 副教授, 博士生, 从事机器人机构学、机电一体化技术的研究。

2 同步旋转跟踪控制系统方法原理

2.1 问题描述

X 射线实时成像检测技术的工艺要求是在任意径向位置上, 图像增强器接收焊缝图像时, X 射线源照射窗口轴线与图像增强器屏幕的轴线重合, 即相对转角 $\alpha = 0$, 如图 1 所示 因此对管内、外旋转机构的要求是: 在分步分段透照环焊缝获取焊缝图像时, 每当管内旋转机构驱动 X 射线源绕管道几何中心旋转一个步距角时, 管外旋转机构驱动图像增强器同步同心跟踪旋转相同的角度, 且同步旋转运动为管道横截面内的平面运动 所以管外旋转机构的控制系统应具有伺服跟踪同步旋转的功能

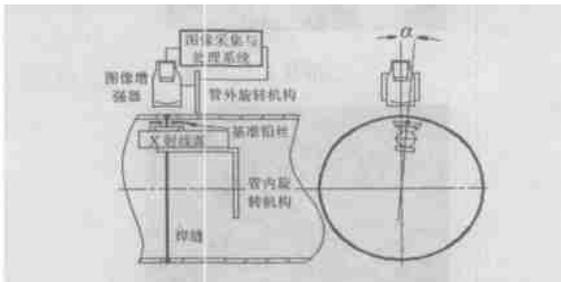


图 1 X 射线检测实时成像管道机器人原理

X 射线检测实时成像管道机器人采用无缆的作业方式, 即机器人系统的管内、外两部分间无任何缆线连接 由于金属管道的屏蔽作用, 常规的通讯方法不易或不能实现管内外控制系统的同步运动控制信息的通讯, 而这种同步运动控制信息包括量和方向的要求 如何实现伺服同步运动控制是研制无缆自主 X 射线检测实时成像管道机器人的关键技术

2.2 基于 X 射线图像的同步控制技术

若采用旋转编码器、低频电磁波系统、双电机同步控制技术等方法, 则无法实时判断管内、外旋转机构的相对转角和相互位置关系 由于受到无缆性和金属管道的限制, 无法采用 CCD 作为视觉源的视觉伺服技术 本文基于 X 射线检测实时成像管道机器人的特殊性, 提出基于基准铅丝 X 射线图像的视觉伺服同步跟踪旋转控制技术

由于铅和钢对 X 射线的吸收率不同, 两种物质的 X 射线图像在计算机屏幕上的灰度有很大的差异 利用这种差异作为视觉特征, 传递管内、外旋转机构的同步运动控制信息, 实现基于图像的视觉伺服控制, 如图 2 所示

具体方案如下: 在 X 射线源照射窗口处与焊缝垂直方位上固置一个铅丝作为标识基准 X 射线透照焊缝时, 基准铅丝也成像在管外图像处理计算机

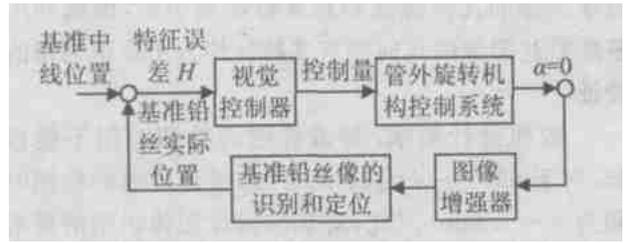


图 2 同步跟踪控制视觉伺服系统

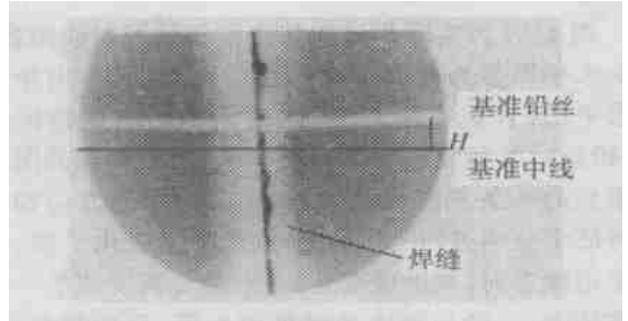


图 3 基准铅丝成像位置

中 当管内、外旋转机构处于同步位置时, 即 X 射线源窗口的轴线与图像增强器屏幕的轴线重合时 ($\alpha = 0$, 参见图 1), 使基准铅丝的图像位于图像处理计算机屏幕中间位置, 即基准中线位置, 如图 3 所示 当管内旋转机构旋转 α 角后, 基准铅丝的图像则偏离中线位置, 位移为 H 。管外旋转机构的控制系统将所检测的位移 H 作为视觉伺服的特征控制管外电机, 调节管外旋转机构同步跟踪旋转, 使基准铅丝图像的位置始终处于屏幕的中央, 即管内、外旋转机构的相对转角为零, 或距离 H 为零, 从而实现管内、外旋转机构的同步旋转

工艺要求不是依据视觉特征实现管外旋转机构的定位, 而是要消除因管内外旋转机构不同步引起的视觉特征的变化, 即产生位移 H 。所以不需要实时计算图像的雅可比矩阵^[10~13], 只需根据位移 H , 消除视觉特征的变化, 使 $H = 0$ 选定 PD 控制律调节管外旋转机构的跟踪运动, 控制律表达为

$$\begin{cases} H_k = e(k), \\ \Delta U_k = K_p(e(k) - e(k-1))/T + K_i e(k) + K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))/T. \end{cases}$$

式中: U_k 为控制输出量; T 为采样时间; K_p , K_i 和 K_d 为比例、积分、微分系数

3 基准铅丝图像的识别

在基准铅丝图像的视觉特征中, 从伺服的观点看, 因为位移 H 对管外旋转机构的运动很敏感, 所以利用位移 H 作为伺服控制特征 但要测得位移 H , 要首先识别基准铅丝的图像 由图 3 可见, 基准

铅丝图像的几何特征和灰度特征很明显, 因此利用基准铅丝图像的几何和灰度特征作为图像识别用的特征

按照设计要求, 每道焊缝的检测时间不能很长, 对于 $\phi 60 \sim \phi 400$ 的管道, 每道焊缝的检测时间为 2 ~ 3 min. 因此, 对基准铅丝图像识别的要求是识别的速度应足够快, 以满足每道焊缝检测的设计要求

图 4(a) 为实际焊缝和基准铅丝的 X 射线图像, 其中水平黑带为标识基准铅丝的图像, 其方向始终是水平的, 且垂直于焊缝, 这是识别的重要特征之一. 铅丝对 X 射线有较高的吸收率, 所以铅丝的图像呈明显的一条灰度均匀的黑带, 其边缘的方向和幅度特征十分明显. 沿边缘走向, 灰度值变化平缓; 垂直于边缘走向, 灰度值变化剧烈. 边缘灰度值的一阶导数较大; 二阶导数在边缘处值为零, 呈现零交叉. 这是基准铅丝图像的灰度特征

图 4(b) 为二值化后的图像, 图中基准铅丝的图像清晰可见. 但由于图像增强器输入屏直径的限制, 二值化后在计算机屏幕上出现一个圆形, 圆外为黑影. 如果没有黑影存在, 则灰度识别方法适于快速识别基准铅丝图像的位置; 但因黑影的存在, 直接采用灰度识别方法将造成误判, 因此需要通过边缘提取的方法去除圆外黑影

根据上述分析, 确定基准铅丝图像的识别方法为: 在图像预处理的基础上, 采用灰度识别、边缘提取和二值化的组合方法

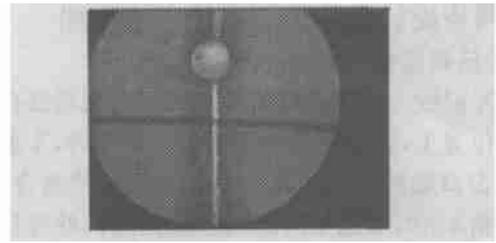
根据基准铅丝图像的灰度特征, 采用 Prewitt 边缘算子提取其边缘, Prewitt 边缘检测算子表示为

$$\begin{cases} M = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}, \\ s_x = (a_2 + a_3 + a_4) - (a_0 + a_7 + a_6), \\ s_y = (a_0 + a_1 + a_2) - (a_6 + a_5 + a_4). \end{cases}$$

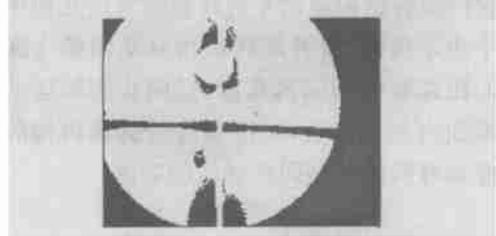
其卷积模板为

$$s_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad s_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

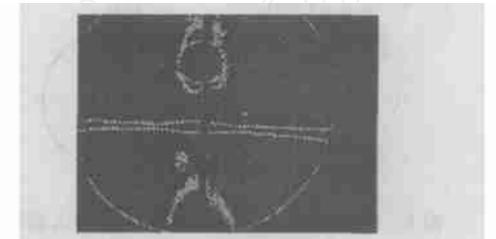
为提高图像的处理速度, 满足实时性要求, 并结合基准铅丝图像的特征, 采用简化 Prewitt 算子方法. Prewitt 算子只计算 1 次水平边缘的特征, 而不是常规 Prewitt 算子中水平、垂直各计算 3 次求最大的方法. 这样可有效减少图像处理的计算量, 提高图像处理的计算速度, 并有效提取垂直边缘信息. 简化



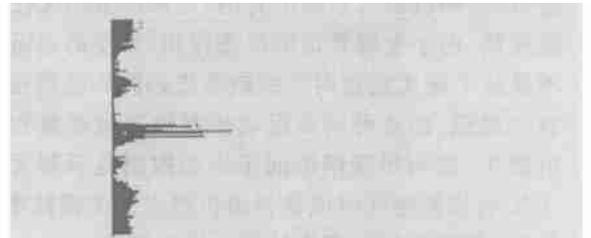
(a) 实际焊缝和基准铅丝的 X 射线图像



(b) 二值化后的图像



(c) 利用 Prewitt 算子对水平边缘的检测



(d) 灰度垂直方向投影

图 4 基准铅丝像的边缘特征图

的 Prewitt 边缘算子为

$$s_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

以 Prewitt 边缘算子为卷积核, 对图像中的每个点进行卷积得到铅丝的边缘图像, 二值化后清晰地呈现出铅丝像的轮廓

图 4(c) 是在图 4(b) 的基础上利用简化 Prewitt 算子对水平边缘的检测, 只保留边缘信息. 将图像中每点像素的灰度值向垂直轴作投影, 得到灰度垂直方向的投影图, 如图 4(d) 所示. 由图 4(d) 可知, 垂直轴上灰度投影值最大点所对应的水平轴的位置就是基准铅丝图像的位置. 根据上面的分析, 基准铅丝

图像的识别算法如下:

- 1) 将处理后图像各点像素的灰度值向铅垂方向投影并相加, 得到一维数据;
- 2) 在一维数据中寻找全局极大值;
- 3) 如果极大值都大于图像均值的 2 倍(根据实际铅和钢的灰度差别设定), 则极大值的位置为基准铅丝图像的位置, 即位移 H , 否则图像中没有标识基准铅丝

4 实验验证

模拟实验主体结构如图 1 所示。由 CCD (QuanA nV F302) 代替 X 射线作为视觉源, CCD 固定在管外旋转机构上; 大恒 CG300 图像卡完成图像采集; 定制的十字线代替基准铅丝, 且固定在管内旋转机构上, 使 CCD 能“看”到十字线

模拟实验过程如下: 管内旋转电机以步距角 2 旋转 4 步, 管外旋转电机根据屏幕上十字线像的位移伺服同步跟踪旋转 4 步。经多次实验, 得到的模拟实线曲线如图 5 所示。其中曲线 ① 为屏幕检测位移的数值与管内旋转机构旋转步数的曲线, 正负旋转步数代表正反转; 曲线 ② 为屏幕检测位移的数值与管外旋转机构伺服跟踪旋转步数曲线。模拟实验曲线

和 ② 不重合度的相对误差小于等于 1%。同时分别检测了模拟实验中管内、外旋转机构的同步旋转角, 相对误差小于等于 1%, 说明将位移 H 作为管外旋转机构视觉伺服误差, 调节其同步跟踪旋转运动, 能够实现管内、外旋转机构的同步旋转。由此证明同步跟踪系统算法是正确的, 实现的同步运动的同步转角误差数量级在分以内

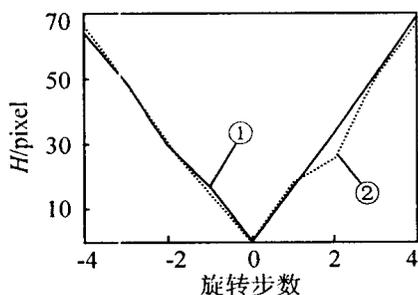


图 5 模拟实验曲线

同步旋转系统的误差只影响焊缝检测图像的搭接长度。若同步系统转角误差为 1, 则按相应的结构尺寸, 焊缝图像搭接长度变化为 ± 0.19 mm。对于 100% 检测的焊缝, 为了不漏检, 焊缝图像搭接长度一般设计为 5 mm, 该数量级的误差对焊缝有效长度几乎没有影响, 所以该同步跟踪系统的同步跟踪

误差满足 X 射线实时成像检测技术工艺要求

5 结 论

本文根据 X 射线检测实时成像管道机器人特殊的同步运动要求, 基于 X 射线检测实时成像管道机器人的特殊性, 利用 X 射线作为视觉源, 提出一种基于基准铅丝 X 射线图像的视觉伺服同步控制技术, 该视觉伺服技术可同时传递同步信息的量和方向。视觉伺服技术的关键点在于视觉特征的图像快速识别, 而不是图像雅可比矩阵的确定。实验证明了本文视觉伺服同步控制技术方法的可行性, 算法正确且效果很好, 满足了 X 射线实时成像检测技术工艺的要求

参考文献 (References):

- [1] 曾祥照, 孙忠诚. X 射线数字化实时成像检测技术在天然气长输管道焊缝探伤中应用的可行性[J]. 无损探伤, 2001, (2): 16-21.
(Zeng X Z, Sun Z C. The applied feasibility of inspection technique of X-ray digital real-time imaging used in weld seam detection of gas pipeline[J]. *Nondestructive Testing*, 2001, (2): 16-21.)
- [2] 王庆超, 吕世勇, 刘荣, 等. 320 湿卷曲张力架位置闭环同步变频电气传动控制系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(4): 78-83.
(Wang Q C, Lu S Y, Liu R, et al. Tension frame position closed loop control system of the synchronous VVVF electric drive system of 320 wet combined coiler [J]. *J of Harbin Institute of Technology*, 1998, 30(4): 78-83.)
- [3] 文方, 姜孝华. 多级电机同步驱动控制系统[J]. 电气传动, 2000, 30(5): 14-17.
(Wen F, Jiang X H. Synchronous control system of multimotor driving[J]. *Electric Drive*, 2000, 30(5): 14-17.)
- [4] 郭庆鼎, 蓝益鹏. 双位置驱动直线伺服电机三重动态同步控制[J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 39-42.
(Guo Q D, Lan Y P. Three variables dynamically synchronized control for double position drive with linear servo motors[J]. *Trans of China Electrotechnical Society*, 2003, 18(1): 39-42.)
- [5] 刘福才, 张学莲. 基于补偿原理多电机同步协调运转的内模控制[J]. 电气传动, 2002, 32(3): 23-25.
(Liu F C, Zhang X L. Internal model control of multimotor synchro-coordinate driving in compensation[J]. *Electric Drive*, 2002, 32(3): 23-25.)
- [6] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000

(下转第 1254 页)

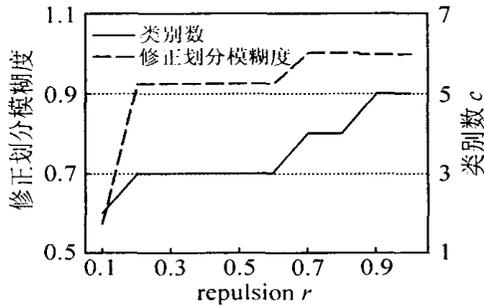


图4 MPF(U; c) 及 c 随 r 变化曲线

5 结论

本文提出一种模糊 CLOPE 算法, 实现了对类属型数据的聚类分析; 同时提出一种修正的划分模糊度, 用它构造了一个聚类有效性函数, 以实现算法中参数的自动选取. 通过对实际数据的分析表明, 该算法能有效地分析类属型数据, 基于修正划分模糊度的参数选取是合理而有效的.

参考文献(References):

- [1] Klogsen W, Zytkow J M. Knowledge discovery in databases terminology [A]. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining* [C]. AAAI Press/The MIT Press, 1996: 573-592.
- [2] Comack R M. A review of classification [J]. *J Roy Statist Soc Serie A*, 1971, 134: 321-367.
- [3] Anderberg M R. *Cluster Analysis for Applications* [M]. New York: Academic Press, 1973.
- [4] Zhexue Huang, Michael K Ng. A fuzzy k-modes algorithm for clustering categorical data [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1999, 7(4): 446-452.
- [5] Zhexue Huang. A fast clustering algorithm to cluster very large categorical data sets in data mining [A]. *Proc of the SIGMOD Workshop on Research Issues on Data Mining and Knowledge Discovery* [C]. ACM Press, 1997: 1-8.
- [6] Yiling Yang, Xudong Guan. CLOPE: A fast and effective clustering algorithm for transactional data [A]. *The Eighth ACM SIGKDD Int Conf on Knowledge Discovery and Data Mining* [C]. Edmonton, 2002.
- [7] Gao Xinbo, Xie Weixin. Advances in theory and applications of fuzzy clustering [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 961-970.
- [8] 高新波. 模糊聚类算法的优化及应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 1999.
- [9] Michalski R S, Stepp R E. Automated construction of classifications: Conceptual clustering versus numerical taxonomy [J]. *IEEE PAMI*, 1983, 5: 396-410.
- [7] Vncezo L, Bruno S, Luigi V. Position and orientation estimation based on kalman filtering of stereo images [A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Control Applications* [C]. Banff: IEEE Press, 2001: 702-707.
- [8] Vince M. Dynamics and system performance of visual servoing [A]. *IEEE Conf on Robotics and Automation* [C]. San Francisco: IEEE Press, 2000: 644-648.
- [9] Liu H, Ramon R C, Paulo L S A. Stable adaptive visual servoing for moving targets [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Arlington: Machinery, 2000: 2008-2012.
- [10] 林靖, 徐强华, 陈辉堂, 等. 基于图像差的平面大范围视觉伺服控制 [J]. *控制与决策*, 2000, 15(5): 581-584. (Lin J, Xu Q H, Chen H T, et al. Image-error-based planar global visual servoing [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(5): 581-584.)
- [11] 夏利民, 谷士文, 樊晓平, 等. 基于活动轮廓的机器人视觉伺服 [J]. *机器人*, 2000, 22(5): 359-364. (Xia L M, Gu S W, Fan X P, et al. Robotic visual servoing based on active control [J]. *Robot*, 2000, 22(5): 359-364.)
- [12] Prokop R J, Reeves A P. A survey of moment-based object representation and recognition [J]. *CVGIP: Graphical Model and Image Processing*, 1992, 54(5): 438-460.
- [13] Martinez J, Thomas F. A reformation of gray-level image geometric moment computation for real-time application [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Minneapolis: IEEE Service Center, 1996: 2315-2320.

(上接第 1249 页)