

文章编号: 1000-5889(2004) 03-0041-04

专用焊接打磨机器人视觉系统的研究

杨萍^{1,2}, 赵丹¹, 李鹤岐², 张淑珍¹

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050 2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对水轮机修复专用机器人视觉系统进行了系统地描述, 并对其硬件与图像处理方法作了较详细地阐述. 采用主动视觉检测法, 利用 CCD 摄像机等相关硬件获取图像和小波变换对获取后图像进行处理, 实现了对叶片表面缺陷的识别并且引导机器人焊枪跟踪焊缝, 实时调整焊枪姿态, 以完成补焊及焊后打磨工作.

关键词: 水轮机; 机器人视觉; 主动视觉法; CCD 摄像机; 小波变换; 图像处理

中图分类号: TH164; TP242.62 **文献标识码:** A

Investigation of visual system on special-purpose welding-polishing robot

YANG Ping^{1,2}, ZHAO Dan¹, LI He-qi², ZHANG Shu-zhen¹

(1. College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: The visual system of the special-purpose robot for hydraulic turbine repair is described systematically and its hardware components and methods of the image processing are also discussed in detail. By taking positive vision testing method and CCD camera to gain image and wavelet transform for image processing, the identification of the defect on vane surface is realized to implement the weld seam tracking, regulate timely the attitude of weld gun, and, finally, finish the rewelding and polishing.

Key words: hydraulic turbine; robot vision; method of positive vision; CCD camera; wavelet transform; image processing

随着机器人技术的发展, 机器人已在很多领域可代替人来进行工作, 这其中有半数焊接机器人. 它们大多为可编程的示教再现式机器人, 对外界条件要求较严格, 不能实时动态调整焊接参数, 不适用于某些特殊应用场合. 因此, 机器人要想真正智能地代替人进行工作, 就必须具有人的“器官”和判断执行功能. 根据研究, 人类感知客观世界的信息中有 70% 来自于视觉^[1], 因此随着第三代机器人——智能机器人研究的深入, 视觉已被认为是机器人中最重要的感觉能力.

在水轮机修复专用焊接打磨机器人系统中, 视觉系统主要是进行叶片表面的缺陷识别并且引导机器人焊枪跟踪焊缝, 实时调整焊枪姿态以完成补焊及焊后打磨工作. 本研究主要针对导轨式水轮机修复机器人(见图 1)视觉系统的硬件组成与图像处理

进行了分析, 以实现图像的消噪、边缘检测、特征提取和压缩等处理, 尽量真实清晰地反映叶片表面特征.

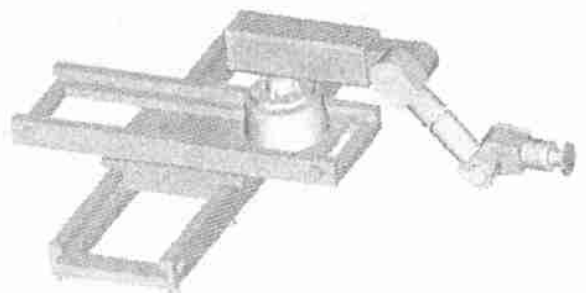


图 1 基于 Pro/E 平台的水轮机修复专用机器人虚拟样机
Fig. 1 Virtual prototype of robot for hydraulic turbine repair based on platform Pro/E

1 叶片缺陷检测的方法

1.1 基本原理

目前常用的焊接机器人视觉检测方法主要有主动视觉法和被动视觉法. 被动视觉法指利用弧光或

收稿日期: 2003-06-30

基金项目: 甘肃省中青年自然科学基金(19907)

作者简介: 杨萍(1964), 女, 黑龙江方正人, 副教授, 博士生.

普通光源和摄像机组成的系统, 由于该方法易受电弧的严重干扰, 而且较难获取相关的三维信息, 因此信息的真实性与准确性有待提高; 而主动视觉法是基于三角测量原理(见图 2), 利用特定结构的光源与摄像机组成的视觉传感器. 主动视觉法一般分为结构光法和激光扫描法. 结构光法采用面型传感器, 当结构光照在金属板表面时, 会产生强烈的二次反射, 使后续处理失败, 另一方面投射光纹光强不均匀, 使图像经过较为复杂的后续处理, 精度也会降低^[2]; 而激光扫描法与其它类型传感器相比具有获取信息量大, 精度高, 检测空间范围大, 通用性好, 具有智能化特点, 实时性能好等优点. 正因如此, 本文提出采用基于三角测量原理的主动视觉法中的激光扫描法对水轮机转轮叶片缺陷进行检测, 其基本原理如图 3 所示.

为透过光轴上的点. 被测量点 P 的像 F 与 P_1 点的像 F_1 的距离 $F_1F = I$. 可由图 1 推导出:

$$h = \frac{L(R \tan \beta - I \tan \beta \cos \alpha + I \sin \alpha)}{R - I \cos \alpha - I \tan \beta \sin \alpha}$$

传感器结构确定后, 上式中只有 I 是变量.

1.2 坐标系的确定及空间一点的坐标变换

设在水轮机转轮轴心的世界坐标系为 x_w, y_w, z_w , 摄像机坐标系为 x_c, y_c, z_c , 机器人本体坐标系为 x_r, y_r, z_r , 如图 4 所示.

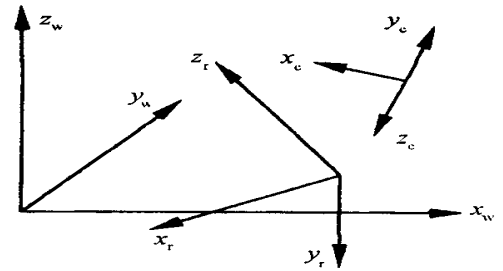


图 4 坐标变换图

Fig. 4 Diagram of coordinate transformation

空间一点在世界坐标系、机器人本体坐标系与摄像机坐标系下的齐次坐标为 $(x_w, y_w, z_w, 1)^T$, $(x_r, y_r, z_r, 1)^T$ 和 $(x_c, y_c, z_c, 1)^T$, 世界坐标系与机器人本体坐标系间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{r-w} & T_{r-w} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_{r-w} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中 R_{r-w} 为 3×3 阶正交单位阵(旋转矩阵), T_{r-w} 为 3×1 阶平移列向量, $0 = (0, 0, 0)^T$, M_{r-w} 为 4×4 阶机器人本体坐标系与世界坐标系间的变换矩阵.

同理机器人本体坐标系与摄像机坐标系间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{c-r} & T_{c-r} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} = M_{c-r} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中, R_{c-r} 为 3×3 阶正交单位阵(旋转矩阵), T_{c-r} 为 3×1 阶平移列向量, $0 = (0, 0, 0)^T$, M_{c-r} 为 4×4 阶机器人本体坐标系与摄像机坐标系间的变换矩阵. 因为机器人本体与摄像机间位置相对固定, 所以 M_{c-r} 为常数, 因此由坐标变换知, 摄像机坐标系与世界坐标系间的关系为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = M_{c-r} M_{r-w} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_{c-w} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

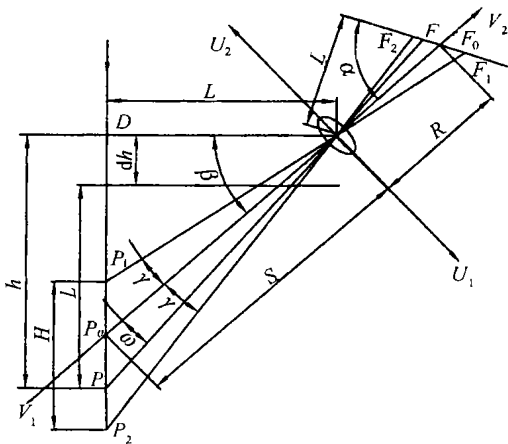


图 2 基于激光的三角测量原理图

Fig. 2 Principle diagram of trigonometric measurement based on laser

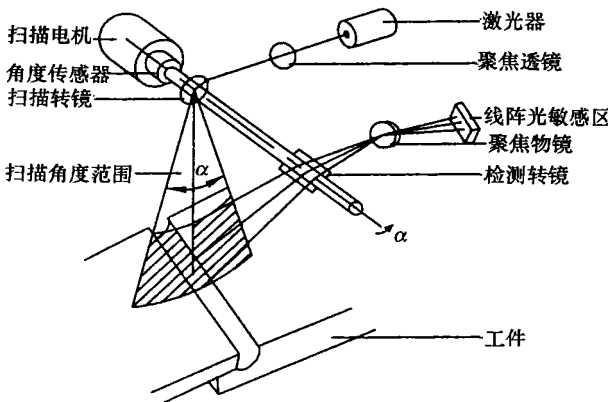


图 3 基于线阵 CCD 的激光扫描视觉传感器的结构原理
Fig. 3 Structural schematic of visual sensor with laser scanning based on linear array CCD

在图 2 中, 产生漫反射的物点在 P_1P_2 上, 其对应的像点用 F_1F_2 等标记. H 为深度测量范围, P_0

其中, M_{c-w} 为 4×4 阶摄像机坐标系与世界坐标系间的变换矩阵, 只要摄像机与机器人本体间相对位置固定, M_{c-w} 只与 M_{r-w} 有关。

2 视觉系统的硬件组成

1) 激光视觉传感器. 由一台激光发生器与一台 CCD 摄像机组成, 摄像机上可加不同镜头, 以调节焦距和光圈;

2) 视频信号数字化设备. 将 CCD 摄像机输出的模拟信号转化为数字信号;

3) 视频信号快速处理器. 视频信号实时、快速、并行算法的硬件实现;

4) 计算机外设。

3 视觉系统的软件组成

水轮机修复专用机器人视觉系统的软件组成主要有计算机系统软件、机器人视觉信息处理算法和机器人控制软件等, 其中与视觉系统最密切相关的是机器人视觉信息处理算法, 包括图像的预处理、分割、描述、识别和解释等算法. 现在主要对机器人视觉信息处理的算法进行研究。

傅里叶分析是信号处理的主要工具, 但傅里叶变换在处理本课题时, 却遇到了以下问题: 傅里叶变换反映的是整个信号全部时间下的整体频域特性, 不能提供任何局部时间段上的频率特性; 因为熔池边缘是突变信号, 而傅里叶变换对非平稳信号和突变信号却无能为力; 且对图像中大量冗余信息的处理时间长, 不能满足实时性的要求. 为了克服上述问题, 小波变换应运而生. 原则上凡传统使用 Fourier 变换的地方, 都可以用小波变换代替. 由于小波在时域和频域同时具有良好的局部化特性, 而且由于对高频采取逐渐精细的时域或空域步长, 从而可以聚焦到分析对象的任意细节^[3], 因此本系统采用小波变换来对图像进行消噪、边缘检测、特征提取和压缩等处理。

3.1 小波变换

小波(Wavelet)是指一衰减波形, 它在有限的区域内存在(不为零), 且其均值为零^[4]. 它在低频部分具有较高频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率, 因而又被称为“数学显微镜”. 小波基是一个由单一的函数经伸缩平移而产生的一簇函数:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R, a \neq 0)$$

其中, a 为伸缩因子, b 为平移因子, $\psi(t)$ 为母小

波^[5].

由于实际中的图像多为离散点, 因此将伸缩因子 a 和平移因子 b 进行离散化, 通常取 $a = 2^m$ (m 取整数), $b = 2^m n$. 小波基函数变为

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n)$$

Mallat 在图像分解与重构的塔式算法启发下, 提出了多分辨率(Multi-resolution Analysis, MRA)的概念. 从空间概念上形象地说明了小波的多分辨率特性, 给出了正交小波构造以及正交小波变换的快速算法, 即 Mallat 塔形算法, 使离散小波变换以数字滤波器组的形式出现. 多分辨率分析小波分解公式为

$$\begin{cases} d_n^j = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \overline{h_{n-2k}} d_k^{j-1} \\ d_n^j = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \overline{g_{n-2k}} d_k^{j-1} \end{cases}$$

其重构公式为

$$d_n^{j-1} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_{n-2k} d_n^j + \sum_{k=-\infty}^{\infty} g_{n-2k} d_n^j$$

一个多分辨率分析对应一个尺度函数 $\varphi(t)$ 和一个小波函数 $\psi(t)$. 设尺度空间为 $\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} U_j = L^2(R)$, W_m 为 V_m 在 V_{m-1} 中的正交补空间, 即 $V_{m-1} = V_m \oplus W_m$. 依次类推, 则 $L^2(R) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j$. 直方图曲线可分为 V_j 与 W_j 两部分, V_j 为低频分析空间, 包含大部分的图像信息; W_j 为高频分析空间, 主要是含噪声的边缘信息^[6].

3.2 小波变换在水轮机修复专用机器人视觉系统中的应用

采用激光扫描法本身信噪比较大, 又由于存在强烈弧光干扰和电磁干扰, 图像中有大量噪声与突变信号, 因此消除噪声便成了图像处理中必不可少的工作. 噪声主要包含在图像的高频信息中, 所以消噪处理实际上就是对图像的高频信息进行处理. 利用小波变换中的多分辨率分析可以有效地区分噪声与突变信号, 实现消噪. 一般分为 3 步进行: 首先选择小波对图像信号进行 N 次分解; 然后对从第 1 层到第 N 层, 每层选择一个阈值(本文采用 heursure 启发式阈值法), 并对高频系数用软阈值法进行处理; 最后根据第 N 层低频系数与从第 1 层到第 N 层经过修改的高频系数, 计算出信号的小波重构, 即得到去噪后的图像^[7].

消噪后图像需要进行特征提取. 由于图像大多信息包含在低频部分, 因此利用小波变换即可实现特征提取。

机器人工作时需要对图像中的边缘进行检测,

分辨出物体轮廓, 以便于后期识别与解释. 由于边缘信息主要包含在高频中, 因此还需对高频信息进行处理, 以区分噪声与边缘信息. 与小波分析中多分辨率类似, 也可对高频信息进行多次分解, 直到达到想要的结果, 此即小波包变换. 其分解式为

$$\begin{cases} \omega_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \omega_n(2t - k) \\ \omega_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \omega_n(2t - k) \end{cases}$$

给定尺度函数 $\varphi(t)$ 与小波函数 $\psi(t)$, 满足双尺度方程:

$$\begin{cases} \varphi(t) = \sum_{k \in Z} \varphi(2t - k) \\ \psi(t) = \sum_{k \in Z} g_k \varphi(2t - k) \end{cases}$$

在水轮机修复专用机器人视觉系统中, 要达到实时控制, 就要求图像信息实时进行处理. 由于硬件设备的原因, 图像处理速度被限制, 因此只有通过压缩图像数据来实现对图像进行多分辨率分解. 将图像分解为不同空间、频率的子图像, 再对子图像进行系数编码, 去掉冗余信息. 小波变换与其它类型算法相比, 压缩比高, 压缩速度快, 压缩后能保持信号与图像特征基本不变, 且在传递过程中可以抗干扰, 这是采用小波变换的又一个好处. 与图像消噪类似, 图像压缩也分为几个步骤: 首先对信号进行小波分解; 其次将高频系数进行阈值化处理, 对第 1 层到第 N 层的每 1 层高频系数选择不同的阈值进行系数量化; 最后对量化后的系数进行小波重构, 即可得到压缩图像. 此外利用小波变换还可以进行图像增强、图像平滑与数据融合等处理, 使图像更接近于真实图像.

经过小波变换处理后的图像还需与人工智能、分形技术等先进技术结合进行识别与解释后, 才可送给控制器并利用机器人软件对机器人实施控制.

4 系统组成

视觉系统的硬件和软件组成确定后, 视觉系统

的基本组成也就基本确定, 如图 5 所示.

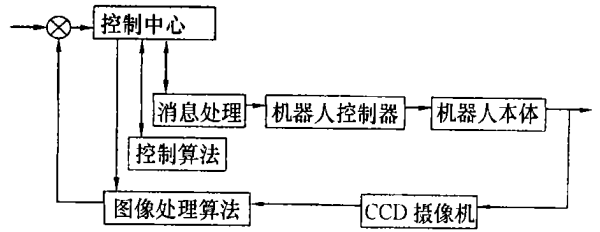


图 5 水轮机修复专用机器人视觉系统的基本组成

Fig. 5 Primary components in visual system of robot for hydraulic turbine repair

5 结论

由于小波变换在图像处理方面的优越性, 因此系统基本上可以满足水轮机修复专用机器人视觉系统的要求. 可以代替人在恶劣的环境下工作; 可以获取叶片表面缺陷, 有助于人们观察; 可以实时控制焊枪调整姿态; 提高工作效率, 降低维修成本. 但还有许多有待于解决的问题: 采用激光扫描法时图像信噪比较大; 激光束、透镜轴线、线阵敏感器单元不共面引起的误差; 图像消噪、压缩过程中小波基及阈值选择引起的误差等需要在今后的研究中解决.

参考文献:

- [1] 钟玉琢, 乔秉新, 李树青. 机器人视觉技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [2] 林尚扬, 陈善本, 李成桐. 焊接机器人及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 徐佩霞, 孙功宪. 小波分析与应用实例 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996.
- [4] 郑治直, 沈萍, 杨选辉, 等. 小波变换及其 Matlab 工具的应用 [M]. 北京: 地震出版社, 2001.
- [5] 杨萍, 李鹤岐, 李有堂. 动态载荷识别的小波正交算子变换法 [J]. 甘肃工业大学学报, 2001, 27(2): 102-105.
- [6] 周延武, 李保国, 宗光华. 小波及模糊理论在擦窗机器人实时图像检测中的应用 [J]. 机器人, 2002, 24(5): 404-408.
- [7] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 Matlab 的系统分析与设计——小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.