

基于中心线匹配的导管三维重建技术

张天^{1,2} 刘检华^{1,2} 唐承统^{1,2} 刘少丽^{1,2}

摘要 针对工业领域中导管的三维重建效率低的问题,提出了一种基于中心线匹配的导管三维重建方法.该方法首先通过导管的平面灰度图像提取出中心线和边缘线,根据立体视觉原理,以非均匀有理 B 样条 (Non-uniform rational B-spline, NURBS) 曲线作为导管中心线的描述工具和匹配基元,利用其透视投影不变性,重建导管的中心线,并通过边缘线计算导管的外径,最后利用三维建模技术重建导管的 CAD 模型.相对于现有导管三维重建方法,该方法具有测量效率高,操作简单的特点.实验结果表明,该方法的导管三维重建时间可控制在 1 分钟内,重投影误差为 0.284 像素,导管两端面中心点的测量误差为 0.242 mm,外径测量误差为 0.158 mm.

关键词 导管, 立体视觉, 三维重建, 中心线匹配, 非均匀有理 B 样条

引用格式 张天, 刘检华, 唐承统, 刘少丽. 基于中心线匹配的导管三维重建技术. 自动化学报, 2015, 41(4): 735–748

DOI 10.16383/j.aas.2015.c130287

3D Reconstruction Technique of Pipe Based on Centerline Matching

ZHANG Tian^{1,2} LIU Jian-Hua^{1,2} TANG Cheng-Tong^{1,2} LIU Shao-Li^{1,2}

Abstract For the problem of low efficiency of 3D reconstruction of pipe in the industrial field, a 3D reconstruction method of pipe based on centerline matching is presented. First, the centerlines and edges of the pipe are extracted from pipe's gray-level images. According to the principle of stereo vision, non-uniform rational B-spline (NURBS) curve is chosen as a description tool and matching primitive. The spatial centerlines of the pipe are reconstructed based on the perspective projection invariance of NURBS curve, and the external diameter of the pipe is calculated through the extracted edges. Finally, the pipe's CAD model is reconstructed by 3D modeling technique. Compared with the existing methods, the proposed method has the advantages of high efficiency and simple operation. It is shown through experimental results that the time of 3D reconstruction is within 1 minute, the re-projection error is 0.284 pixel, the measurement error of end points is 0.242 mm, and the measurement error of external diameter is 0.158 mm.

Key words Pipe, stereo vision, 3D reconstruction, centerline matching, non-uniform rational B-spline (NURBS)

Citation Zhang Tian, Liu Jian-Hua, Tang Cheng-Tong, Liu Shao-Li. 3D reconstruction technique of pipe based on centerline matching. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(4): 735–748

导管弯曲成形是一个集材料非线性、几何非线性和边界条件非线性于一体的复杂过程,该过程影响因素复杂、成形质量难以控制.目前,在航空、航天等复杂军工产品研制生产中,成形后的导管测量是保证管路制造质量和实现精确无应力装配的不可缺少最有效、最直接的手段.工程中通常在导管弯曲成形后对实物进行测量,然后重建导管三维模型并与设计 CAD 模型进行对比分析,并将对比结果作为导管加工修正的依据.

利用传统的数字化测量方法(如结构光测量

仪^[1]、激光扫描仪^[2]、三坐标测量仪^[3]等)进行导管三维重建,由于存在成本昂贵、操作繁琐、效率低下、测量范围有限等问题,越来越难以满足导管快速、精确三维重建的工程需要.

随着数字相机与计算机技术的发展,基于机器视觉的三维重建技术逐渐引起了国内外学者的关注,与其他数字化测量方法不同的是,该技术只需计算机自动处理数字相机采集的物体图像便可实现物体的三维重建,具有操作便捷、效率及精度高、测量范围大等特点.目前,国内外学者在基于机器视觉的三维重建技术方面取得了大量的研究成果^[4–6],然而针对工业导管的研究报导相对较少.军工产品生产中的导管三维重建实际上是一种产品在线检测技术.导管本身是产品,不能对其做任何散斑处理,而且导管表面较多具有光滑的金属纹理,有的甚至反光强烈、形状较为复杂,采用表面散斑或自然纹理的重建方法不适用于导管.因此如何实现导管的快速、精确三维重建一直是工程中的难点.

收稿日期 2013-04-10 录用日期 2014-11-04
Manuscript received April 10, 2013; accepted November 4, 2014
国家自然科学基金(51305031)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (51305031)

本文责任编辑 黄庆明
Recommended by Associate Editor HUANG Qing-Ming
1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081 2. 北京理工大学数字化制造研究所 北京 100081
1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 2. Laboratory of Digital Manufacturing, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

赵玉芹等^[7]提出一种在表面粘贴标记条的导管三维重建方法,然而实际工程中很难对每个导管产品附加标记。Bosemann^[8]利用“共线方程”,提出了基于点摄影测量的导管重建系统,但该系统重建复杂分支导管时存在一定困难。Veldhuis 等^[9]提出了基于直线摄影测量的导管重建方法,但该方法在较短导管和图像干扰较少的条件下才具有较高的精度和鲁棒性。综上所述,导管的快速、精确数字化测量及三维重建仍需突破以下关键技术。

1) 分支导管快速测量与三维重建。多分支管路包含多根导管,并且这些导管弯曲形态复杂。目前已有的导管三维重建方法大部分无法实现分支弯曲导管的三维重建。即使其中有些方法能够实现,重建效率也较低,无法实现多分支导管的同时测量和三维重建。因此,如何解决分支导管的快速测量与三维重建问题是导管三维重建的一个研究难点。

2) 无标记特征匹配。特征匹配是导管三维重建的关键,同时也是计算机视觉领域的一个经典难题。尽管目前已经提出了众多的解决方法,但图像空间中存在不可避免的噪声、无纹理区域和遮挡区域,使得特征匹配问题存在极大的不确定性。大部分导管的表面为光滑的金属材料,这就造成了其表面自然纹理仅含有少量的明显特征。同时由于实际工程中对产品的要求,其表面不允许人工添加标记和散斑。因此,如何解决无标记特征匹配问题也是导管三维重建的一个研究难点。

在空间几何表达上,导管可以看成是一种通径的细长体,其三维形状可以由其空间中心线位置以及外径两个物理量来简化描述^[10]。因此重建时不需重建导管整个表面的三维形貌,只需重建导管的中心线以及获取其外径,提高了重建效率和灵活性。导管空间中心线的重建是影响导管三维重建精度和效率的关键环节。

导管的空間中心线可以看作不规则曲线,即自由曲线。传统的重建方法主要采用点、直线等作为匹配和重建基元,但这些基元并不能准确地表达自由曲线,并且匹配时容易发生错误匹配。近年来,一些学者提出了基于参数曲线的三维重建方法(如 B 样条^[11]、二次样条或三次样条^[12]、非均匀有理 B 样条(Non-uniform rational B-spline, NURBS)^[13]等曲线),直接用参数曲线作为基元进行匹配,可以有效减少错误匹配,提高重建精度。

以 B 样条、二次样条等曲线作为基元的三维重建方法是在将相机的透视变换近似为仿射变换的条件下实现的,理论上仍然影响重建精度。而且上述参数化曲线三维重建的理论方法采用的是比较理想的实验条件,没有对图像处理 and 三维重建中可能出现的各种复杂情况进一步研究,方法的鲁棒性和可靠

性上有待验证。针对以上问题,笔者结合实际工程需求,利用 NURBS 曲线的透视投影不变性,提出了一种将 NURBS 曲线作为中心线匹配和重建基元的导管三维重建方法,开发了原型系统并在北京卫星制造厂得到应用,最后通过实例对提出的方法进行了验证。

1 基本原理与实现流程

导管的三维形状可以由其空间中心线位置以及外径来简化描述。因此,导管三维重建的基本思路是基于立体视觉原理,分别利用视觉图像重建导管空间中心线坐标并测量外径尺寸,快速、精确地重建导管的 CAD 模型。利用在视觉图像上提取的导管边缘线可直接测量导管的外径尺寸,而导管的空間中心线是自由曲线,并不容易直接重建。因此,导管空間中心线重建是导管三维重建的关键。

NURBS 是一种曲线参数化数学表示方法,提供了对自由曲线的统一数学描述方法,在曲线拟合上有很高的精度,并且具有透视不变性,满足曲线重建的必要条件。因此,根据立体视觉原理,利用 NURBS 曲线作为导管中心线的描述工具和匹配基元,可实现空间中心线坐标的精确重建。

下面首先给出 NURBS 曲线透视投影不变性的证明,并对基于中心线匹配的导管三维重建方法的实现流程作简要说明。

1.1 NURBS 曲线的透视投影不变性

NURBS 曲线定义如下: $n+1$ 个特征多边形控制点 P_i ($i=0, 1, 2, \dots, n$) 及权因子 W_i ($i=0, 1, 2, \dots, n$), 则 $k+1$ 阶 k 次 NURBS 曲线表达式为

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u) W_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) W_i} = \sum_{i=0}^n P_i R_{i,k}(u) \quad (1)$$

其中, $R_{i,k}(u) = N_{i,k}(u) W_i / \sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) W_i$, $u \in [0, 1]$, $i=0, 1, 2, \dots, n$ 为 NURBS 的 k 次有理基函数, $N_{i,k}(u)$ 为 k 次 B 样条基函数。按照 deBoor-Cox 公式递推定义

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - u_i) N_{i,k-1}(u)}{u_{i+k} - u_i} + \frac{(u_{i+k+1} - u) N_{i+1,k-1}(u)}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} \quad (3)$$

并规定 $0/0 = 0$. 其中 k 为幂次, $k \geq 1$, u_i ($i = 0, 1, 2, \dots, m$) 为节点, 由其形成参数方向上非减的节点矢量 \mathbf{u} , $\mathbf{u} = [u_0, u_1, u_2, \dots, u_m]$, 当节点数为 $m + 1$, 幂次为 k , 控制顶点数为 $n + 1$ 时, m, k, n 关系为 $m = n + k + 1$, 对于非周期的 B 样条, 其节点矢量两端的重度度取为 $k + 1$, 各有 $k + 1$ 个相同的节点, 即 $u_0 = u_1 = u_2 = \dots = u_k = 0$, $u_{n+1} = u_{n+2} = \dots = u_{n+k+1} = 1$. 因此, 节点矢量 \mathbf{u} 为

$$\mathbf{u} = \left[\underbrace{0, 0, \dots, 0}_{k+1}, u_{k+1}, \dots, u_{m-k-1}, \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{k+1} \right] \quad (4)$$

设在相机坐标系下的某一空间点坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) , 该空间点在相机图像平面的投影点在物理坐标系下的坐标为 (x, y) , 相机的焦距为 f , 由透视投影几何关系可以确定

$$x = \frac{fX_c}{Z_c}, \quad y = \frac{fY_c}{Z_c} \quad (5)$$

由上两式可设空间点 $X(X_c, Y_c, Z_c)$ 的透视投影变换为

$$h(X) = \frac{f}{Z_c} X \quad (6)$$

一条 NURBS 曲线的透视投影变换可写为

$$h[C(u)] = \frac{f}{Z_c} \frac{\sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u) W_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) W_i} \quad (7)$$

由式 (1) 可得曲线 $C(u)$ 的 Z_c 分量的表达式为

$$Z_c = \frac{\sum_{i=0}^n Z_{p,i} N_{i,k}(u) W_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) W_i} \quad (8)$$

由式 (7) 和式 (8) 可得

$$h[C(u)] = \frac{\sum_{i=0}^n \left(\frac{f}{Z_{p,i}} P_i \right) Z_{p,i} N_{i,k}(u) W_i}{Z_c \sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) W_i} = \frac{\sum_{i=0}^n \left(\frac{f}{Z_{p,i}} P_i \right) Z_{p,i} N_{i,k}(u) W_i}{\sum_{i=0}^n Z_{p,i} N_{i,k}(u) W_i} =$$

$$\frac{\sum_{i=0}^n h(P_i) N_{i,k}(u) \overline{W}_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) \overline{W}_i} \quad (9)$$

其中, $\overline{W}_i = Z_{p,i} W_i$.

由式 (9) 可知, 由控制点 P_i ($i = 0, 1, \dots, n$) 及权因子 W_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) 确定的空间 NURBS 曲线经透视投影变换后, 仍为一条 NURBS 曲线, 且其控制点为原空间 NURBS 曲线的控制点的透视投影 $h(P_i)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n$), 对应的权因子可由 $\overline{W}_i = Z_{p,i} W_i$ 计算确定.

1.2 实现流程

第 1.1 节已经证明: 空间 NURBS 曲线的透视投影即为其控制点的透视投影作为控制点生成的平面曲线. 基于这种透视不变性, 从立体视觉系统采集得到的图像中提取导管的中心轴线, 并通过 NURBS 曲线形式表达, 然后利用左右图像 NURBS 曲线的控制点来重建空间 NURBS 曲线的控制点, 从而得到空间中导管中心轴线的 NURBS 曲线表达式. 同时利用提取的边缘线计算导管的外径. 最后通过三维建模技术即可重建出导管完整的三维模型, 导管三维重建流程如图 1 所示.

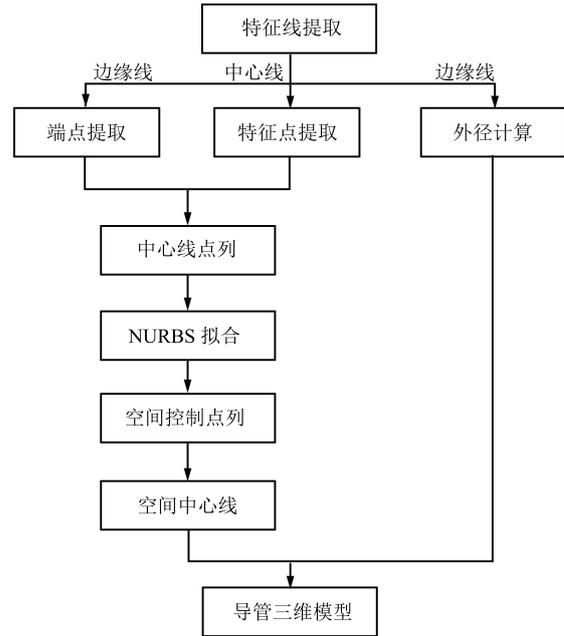


图 1 导管三维重建流程

Fig. 1 Flow of pipe's 3D reconstruction

导管三维重建流程的各步骤简要说明如下:

步骤 1. 特征线提取. 通过灰度值对采集的图像进行阈值分割, 准确而完整地提取出导管的 ROI

(Region of interest) 区域. 在得到的 ROI 区域上分别利用 Canny 边缘检测算法和细分法获取导管亚像素精度的边缘线以及中心线.

步骤 2. 中心线特征点提取与外径计算. 首先利用 Harris 算法在提取的中心线上获取离散特征点, 然后将提取的导管边缘线分割为圆弧段与直线段, 并识别出导管两端的圆弧, 利用最小二乘法将提取的两端圆弧拟合为椭圆, 利用椭圆投影重建空间圆的圆心, 即导管中心线的两个端点空间坐标. 最终得到中心线上的完整特征离散点列. 同时利用导管上分割的直线段边缘计算导管的外径尺寸.

步骤 3. 利用累加弦长参数法对提取的导管中心线进行参数化, 然后用最小二乘法进行 NURBS 曲线的拟合, 得到图像上 NURBS 曲线的控制点.

步骤 4. 根据双目视觉三角测量原理, 利用左右图像的 NURBS 曲线控制点重建空间中的对应控制点.

步骤 5. 按照式 (1), 根据重建得到的空间控制点生成空间曲线, 得到空间中心轴任意一点的三维坐标.

步骤 6. 结合重建得到的导管空间中心线以及计算得到的导管外径, 通过三维建模技术最终得到导管的三维重建模型.

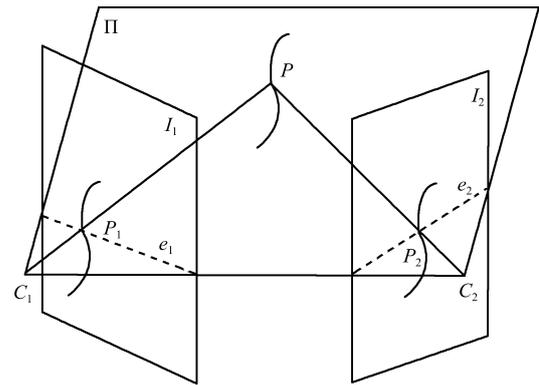
2 导管特征线与特征点的提取

对于基于立体视觉技术的三维重建方法, 图像处理过程中关键的一步就是对包含大量信息的图像进行分解. 最终结果是图像被分解成一些具有某种特征的线与点. 相对于整幅图像, 这些特征线与特征点更容易被快速处理, 因此针对这些图像特征的提取必不可少. 在图像中提取的导管中心线、边缘线等特征线以及特征点, 用来重建导管的空间中心线并计算导管的直径以实现导管的三维重建.

2.1 图像极线校正

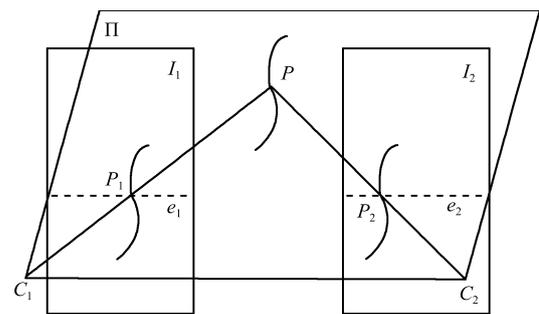
立体视觉系统中, 两相机采集的图像之间存在投影几何关系, 它与场景无关, 由相机内部参数和相机之间的外部参数唯一确定. 如图 2(a) 所示, 空间中的中心线分别投影在两个成像平面 I_1 和 I_2 上, 为两条平面曲线. 设中心线上一点 P 在成像平面 I_1 和 I_2 上的投影为 P_1 和 P_2 (C_1 和 C_2 为不同视点), 空间点 P 及其投影点 P_1 和 P_2 构成一平面 Π , 该平面 Π 称为外极平面. 这个平面 Π 与左右成像平面 I_1 和 I_2 的交线分别为 e_1 、 e_2 , 分别称这两条直线为 P_1 和 P_2 的外极线. 显然从图中可以看出, 如果已知空间中一点 P 在 I_1 的投影点 P_1 , 则其在 I_2 的投影点 P_2 不必在整幅平面 I_2 上搜索, P_2 必在 C_1 、 P_1 、 C_2 确定的外极平面 Π 上, 也就是必在外极平面 Π 与平

面 I_2 的交线上, 即外极线 e_2 上.



(a) 校正前

(a) Before rectification



(b) 校正后

(b) After rectification

图 2 基于外极线的图像的校正

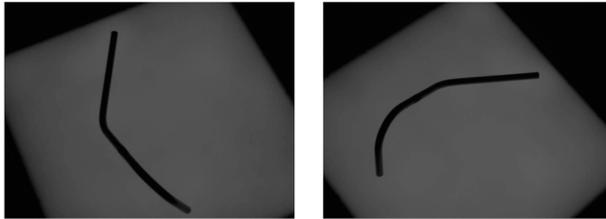
Fig. 2 Image rectification based on epipolar line

已知左成像平面上的一点, 结合双目视觉系统内、外部参数, 即可计算外极线的方程, 再结合一些其他的特征就能在右成像平面上的外极线上搜索对应投影点, 比如常用的灰度分布相关性约束和灰度突变约束等. 根据外极线方程, 对图像进行变换, 包括插值、缩放、旋转等, 获取校正图像. 如图 2(b) 所示, 对在成像平面 I_1 和 I_2 上投影形成的图像进行极线校正, 就是使两个图像上的对应像素在同一行. 极线校正的目的为形成一种平行对应的几何结构, 使得匹配点对的行坐标相等, 匹配点对的极线为水平对齐的直线.

由上述外极线约束关系可知, 中心线上一点在相机平面的投影必过其外极线, 则该极线与成像平面上的中心线的交点即为其对应的平面投影. 通过中心线上某一点在校正后的成像平面上匹配对应点坐标, 结合两相机的校正后内、外参数, 能够重建中心线上该点的三维坐标.

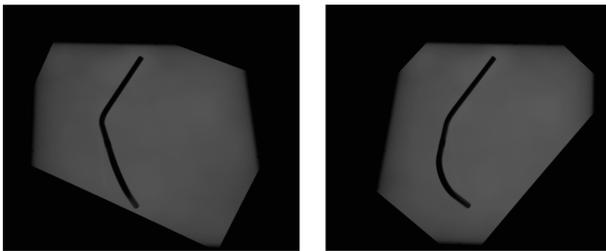
利用校正后得到的图像可以提高分支管路中心线的匹配效率. 对于左图像上的一点, 与其在右图像的匹配点的行坐标必然相等. 采集的导管轮廓投影

图片根据相机参数经过校正后形成了一种外极线水平对齐的结构, 如图 3 所示.



(a) 校正前的立体图像

(a) Stereo images before rectification



(b) 校正后的立体图像

(b) Stereo images after rectification

图 3 导管立体图像极线校正

Fig. 3 Epipolar rectification of pipe's stereo image

2.2 边缘线与中心线的提取

准确而完整地提取出导管的 ROI 区域是准确提取中心线和边缘线的前提. 图像增强处理后, 利用图像的灰度直方图信息获取用于分割的阈值, 用一个或几个阈值将图像的灰度分为几个等级范围, 认为属于同一等级范围的像素是同一个物体. 这种方法特别适用于目标和背景占据不同灰度级范围的图像. 因此, 采用背光光源的照明技术, 导管的投影轮廓可以清晰的显示在白色背景下, 大大减少图像噪声等干扰, 并解决导管表面光滑反光带来的影响, 能够快速而精确的提取出导管的阴影区域, 即 ROI 区域, 如图 4 所示.

导管的中心线提取采用一种细化方法, 即从原来的图中去掉一些点, 但仍要保持原来的形状, 也就是沿着图案的边缘一点点地剥离边缘点, 直到剩下宽度为一个像素的中心轴线为止.

准确提取 ROI 区域后, 可对其进行二值化处理, 即令细化目标内所有点值为 1, 背景区域所有点值为 0. 考虑以边界点为中心的 8-邻域, 如图 5 所示, 记中心点为 p_1 , 其邻域的 8 个点顺时针绕中心点分别为 p_2, p_3, \dots, p_9 , 其中 p_2 在 p_1 上方. 令 $N(p_1)$ 表示 p_1 的非零邻点的个数, $S(p_1)$ 表示以 p_2, p_3, \dots, p_9 为序时这些点的值从 0 \rightarrow 1 变化的次数.

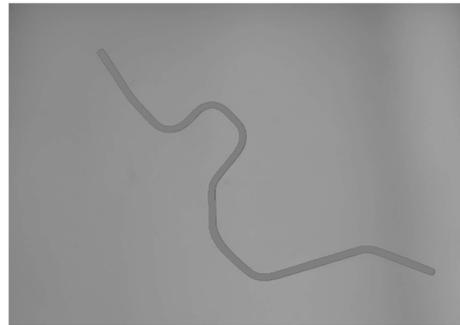
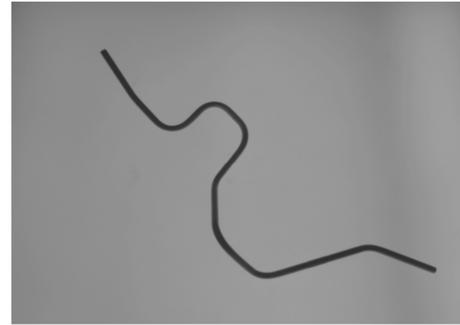


图 4 导管图像 ROI 区域的提取

Fig. 4 Extraction of pipe image's ROI

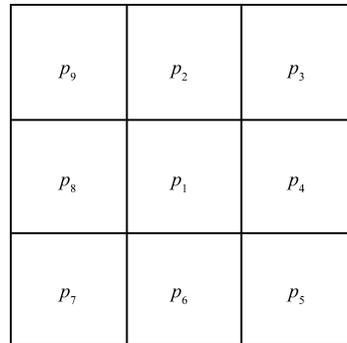


图 5 以边界点为中心的 8-邻域

Fig. 5 8-neighborhood centered on boundary point

导管中心线提取流程如图 6 所示. 中心线提取步骤如下:

步骤 1. 首先标记同时满足下列条件 1 的边界点:

- 1) $2 \leq N(p_1) \leq 6$;
- 2) $S(p_1) = 1$;
- 3) $p_2 \times p_4 \times p_6 = 0$;
- 4) $p_4 \times p_6 \times p_8 = 0$.

当对所有边界点都检验完毕后, 将所有标记了的点除去.

步骤 2. 再次标记满足下列条件 2 的边界点:

- 1) $2 \leq N(p_1) \leq 6$;
- 2) $S(p_1) = 1$;
- 3) $p_2 \times p_4 \times p_8 = 0$;
- 4) $p_2 \times p_6 \times p_8 = 0$.

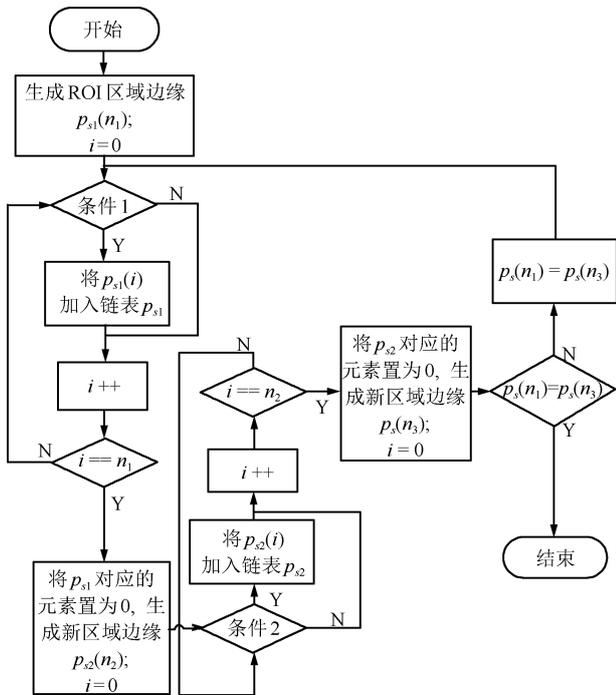


图 6 导管中心线提取流程

Fig. 6 Extraction flow of pipe's centerline

同样对所有边界点检验完毕后, 将所有标记了的点去除.

以上两步操作完成一次迭代. 提取算法反复迭代直至没有点再满足标记条件, 这时剩下的点组成 ROI 区域的中心线, 如图 7(a) 所示. 管路包含分支导管, 通过上述细化算法, 从其图像中的轮廓区域中提取出来的中心线同样也包含分支. 这些中心线的分支不能直接匹配和重建完整的中心线. 因此, 需要将带分支的导管中心线分割为若干条局部曲线, 再进行匹配和重建. 分割算法同样是先遍历提取的导管中心线上所有点, 根据以这些点为中心 p_1 的 8-邻域, 当以 p_2, p_3, \dots, p_9 为序时, 这些点的值从 0 \rightarrow 1 变化的次数大于 2 时, 该点即为中心线的分支连接点. 通过上述分割方法计算得到中心线上各条分支曲线的连接点, 根据这些分支连接点将带分支的导管中心线分割为若干条局部曲线, 如图 7(b) 所示. 常见的中心线分支连接点的 8-邻域组合如图 8 所示.

2.3 中心线特征点的提取与外径的计算

2.3.1 中心线特征点提取

从图像上提取的中心线通常以像素点列的形式表示, 拟合中心线时如果对提取中心线上的全部点列进行计算, 计算量太大, 影响重建效率. 相反, 如果选取的特征点太少, 拟合结果又不能精确表达中心线. 因此, 为了在精确表达和计算量之间找到一个平衡点, 选取中心线上的离散特征点来进行拟合. 采用

Harris 算子^[14] 在提取的中心线上继续提取特征点. 该算子是一种有效的点特征提取算子, 其计算简单、



(a) 中心线的提取

(a) Centerline extraction



(b) 中心线的分割

(b) Centerline segment

图 7 导管中心线的提取和分割

Fig. 7 Extraction and segment of pipe's centerline

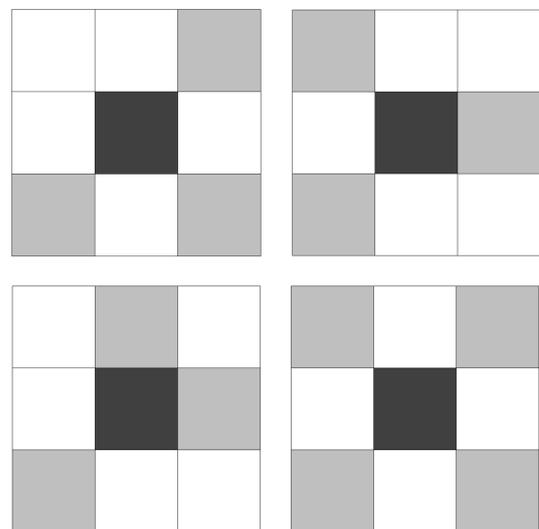


图 8 分支连接点的 8-邻域组合

Fig. 8 8-neighborhood combination of connection points

稳定, 只用到灰度的一阶差分, 且提取的特征点均匀合理. 该方法为了识别兴趣点, 使用一个小的滑动窗口来判断, 当窗口处于一个无论从哪个方向移动都会发生图像灰度值的剧烈变化的位置时, 即可检测出兴趣点. 该变化可以表示为

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2 \quad (10)$$

其中, (u, v) 是滑动距离; $w(x, y)$ 是窗口函数, 一般为矩形窗; $I(x, y)$ 是当前检测点的灰度值. 采用 Harris 算子在管路中心线上提取的特征点如图 9 所示. 利用 Harris 算子在中心线上提取离散特征点既能达到快速的匹配速度, 又能得到精确的重建结果.

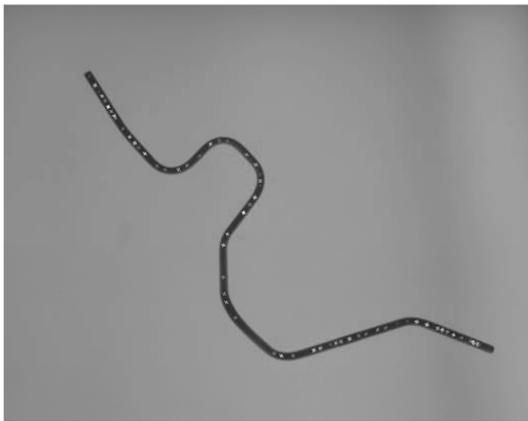


图 9 中心线 Harris 特征点的提取

Fig. 9 Extraction of Harris feature points on centerline

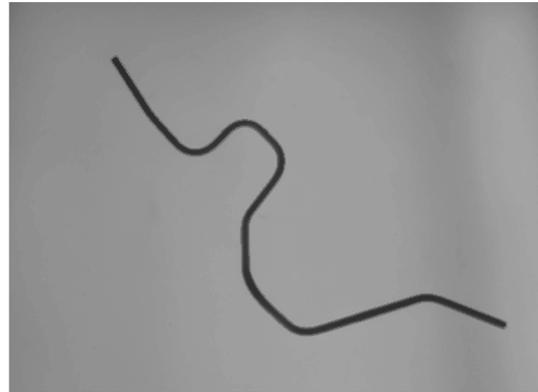
2.3.2 管路端面中心点提取

1) 边缘线提取椭圆

提取的导管中心线的端点并不是实际导管空间中心线端点的投影点, 因此为了获得精确的重建结果, 需要单独精确提取中心线的端点. 中心线端点实际上是导管两端面空间圆的圆心, 端面空间圆的透视投影在图像上将变成椭圆. 在相机内外部参数已知的前提下, 利用管路端面椭圆投影的立体图像实现空间圆圆心的重建, 从而得到精确的导管中心线端点的空间坐标.

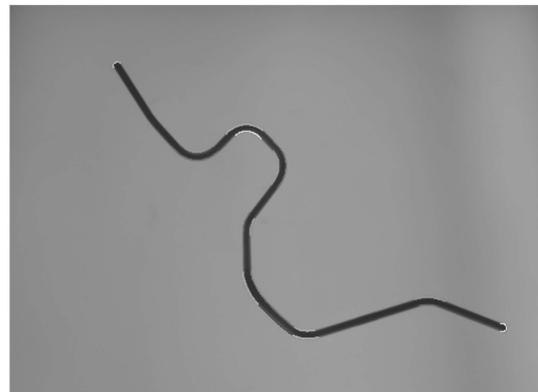
导管端面的椭圆投影是导管边缘线的一部分. 边缘是图像局部亮度变化最显著的部分, 主要存在于目标与背景之间. 边缘提取的实质是提取图像中目标与背景间的交界线. 采用 Canny 边缘检测算子^[15] 在得到的管路 ROI 区域上获取亚像素精度的边缘线. 该算子具有良好的边缘检测性能, 利用高斯函数的一阶微分能在噪声抑制和边缘检测之间取得较好的平衡. 其基本思想是对输入图像通过高斯函

数进行平滑, 以抑制图像噪声. 一般采用 2×2 领域矩阵的平均有限差分方法来计算平滑后的数据阵列的梯度幅值和梯度方向, 然后采用非最大抑制算法寻找图像中的可能边缘点, 最后通过双门限递归寻找图像边缘点, 得到管路的边缘线, 如图 10(a) 所示.



(a) 导管边缘线的提取

(a) Edge lines extraction of pipe



(b) 导管边缘线上的椭圆弧的提取

(b) Elliptic arcs extraction of pipe

图 10 导管边缘线及椭圆弧的提取

Fig. 10 Edge lines and elliptic arcs extraction of pipe

导管两端面椭圆投影的提取流程从将导管边缘线分割成若干个小直线段开始, 即将导管的边缘线近似的通过一个多边形来表示. 如图 11 所示, 一条边缘线的首尾点分别为 Pt_0 和 Pt_n , 首先计算所有边缘点列到线段 Pt_0Pt_n 的距离并找到距离最大点 Pt_1 , 如果该距离比阈值大, 则在该距离最大点 Pt_1 处将当前边缘点列分成新的两段边缘. 同理, 在新的边缘上寻找到边缘首尾点连接线段的距离最大点, 如果比阈值大, 继续这样对边缘线进行递归细分, 如图 11 中的点 Pt_2 和 Pt_3 , 直到得到的所有线段到各自对应边缘的最大距离小于某一阈值为止.

将边缘线分割成直线段后, 如果边缘存在圆弧, 就会在对应的边缘区域内产生过度分割的情况, 即

通过很多个直线段逼近边缘. 将这些彼此相邻的直线进行圆或椭圆拟合, 如果拟合误差比直线拟合误差小, 则这些彼此相邻直线段就会合并, 所有迭代处理直到再无能合并的直线段时结束. 在导管的边缘线上提取椭圆弧流程如图 12 所示, 椭圆弧提取的结果如图 10 (b) 所示.

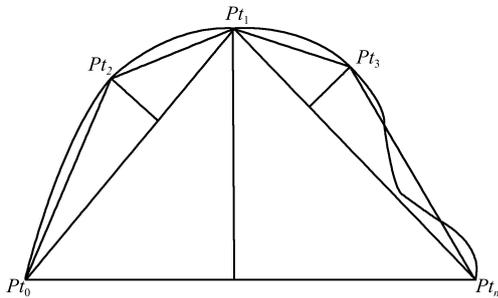


图 11 边缘线的线段化

Fig. 11 Line segment of the edge

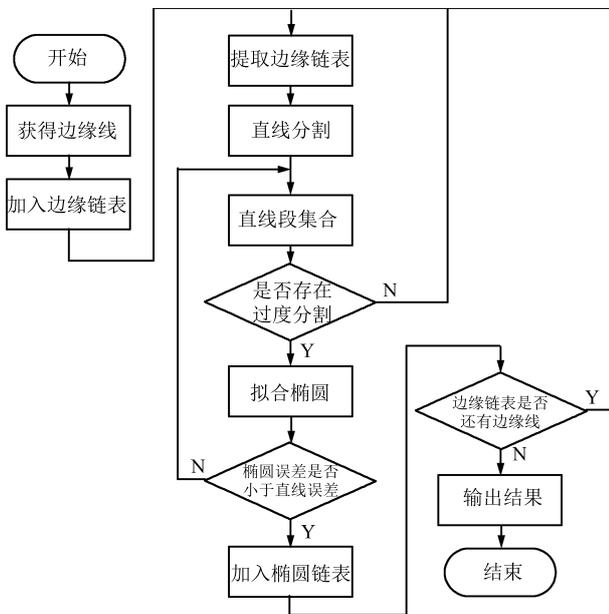


图 12 边缘线提取椭圆流程图

Fig. 12 Flow of ellipse extraction from the edge

将导管边缘分割出多段圆弧后, 需要识别出导管两端的圆弧. 圆弧端点的中点与导管提取的中心线端点的距离最近的两个圆弧即为导管两端的圆弧.

将导管两端的圆弧边缘拟合为椭圆的原理是将边缘上点到椭圆的距离最小化. 利用最小二乘法来最小化距离误差以得到拟合椭圆. 设椭圆的隐式方程为下式

$$x^2 + Axy + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (11)$$

将点的坐标代入此隐式方程得到点到椭圆的距离, 而曲线拟合实际上就是使该距离的平方和达到

最小, 即得到下式

$$\sum_{k=1}^n (x_k^2 + Ax_k y_k + By_k^2 + Cx_k + Dy_k + E)^2 \rightarrow 0 \quad (12)$$

其中, $k = 1, 2, \dots, n$ ($n \geq 5$). 要使上式的距离平方和最小, 必有上式对 A, B, C, D, E 的一阶偏导数为零, 得到关于 A, B, C, D, E 的线性方程组, 求解此方程组即可求得椭圆方程的五个系数, 得到椭圆的隐式方程.

2) 空间圆重建

空间中一个任意圆的圆心在图像上的投影与其投影椭圆的形心并不重合. 因此需要通过导管两端边缘圆弧拟合得到的椭圆投影重建空间圆的圆心, 得到圆心三维坐标, 进而达到获得导管中心线上的两个端点空间位置的目的.

基于立体视觉原理的空间圆重建如图 13 所示, 经过空间圆 Q_c 会聚在左右相机光心 O_1 和 O_2 的光线形成了两个斜圆锥体 V_1 和 V_2 . 设左右相机坐标系分别为 $O_1 X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ 和 $O_2 X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$, 世界坐标系为 $O X_w Y_w Z_w$.

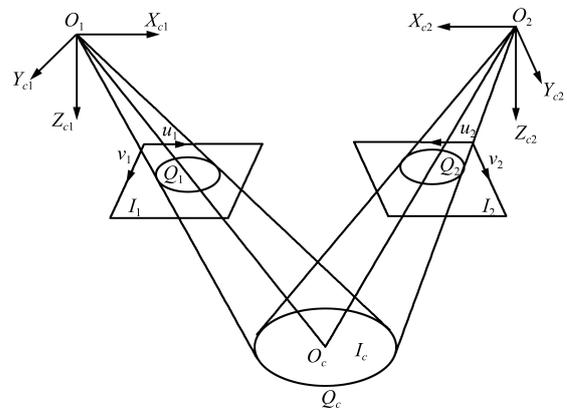


图 13 空间圆圆心的重建

Fig. 13 Reconstruction of the spatial circle's center

首先分析左侧相机. 左相机坐标系与世界坐标系之间的转换关系为

$$[X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1}]^T = R_1 [X_w, Y_w, Z_w]^T + [t_{11}, t_{12}, t_{13}]^T \quad (13)$$

由上式可得:

$$[X_w, Y_w, Z_w]^T = A_1 [X_{c1} - t_{11}, Y_{c1} - t_{12}, Z_{c1} - t_{13}]^T \quad (14)$$

$$\text{其中, } A_1 = R_1^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

斜圆锥体 V_1 在世界坐标系下的方程为

$$(X_w - \alpha_1 Z_w)^2 + (Y_w - \beta_1 Z_w)^2 = \gamma_1^2 Z_w^2 \quad (15)$$

将式 (14) 代入式 (15) 得到斜圆锥体 V_1 在左相机坐标系下的方程为

$$\begin{aligned} & [(a_{11} - \alpha_1 a_{31})(X_{c1} - t_{11}) - \\ & (a_{12} - \alpha_1 a_{32})(Y_{c1} - t_{12}) + \\ & (a_{13} - \alpha_1 a_{33})(Z_{c1} - t_{13})]^2 + \\ & [(a_{21} - \beta_1 a_{31})(X_{c1} - t_{11}) - \\ & (a_{22} - \beta_1 a_{32})(Y_{c1} - t_{12}) + \\ & (a_{23} - \beta_1 a_{33})(Z_{c1} - t_{13})]^2 = \\ & \gamma_1^2 [a_{31}(X_{c1} - t_{11}) + a_{32}(Y_{c1} - t_{12}) + \\ & a_{33}(Z_{c1} - t_{13})]^2 \end{aligned} \quad (16)$$

左相机光心 O_1 到像平面 I_1 的距离等于相机的焦距 f_1 , 那么像平面 I_1 在左相机坐标系下的方程为

$$Z_{c1} = f_1 \quad (17)$$

根据式 (5) 和式 (17) 可得像平面 I_1 上任意点从左相机坐标系到像素坐标系的转换方程

$$x_1 = \frac{X_{c1}}{S_{x1}} + C_{x1}, \quad y_1 = \frac{Y_{c1}}{S_{y1}} + C_{y1} \quad (18)$$

其中, S_{x1}, S_{y1} 为左相机单位像素尺寸, C_{x1}, C_{y1} 为图像中心的列坐标和行坐标. 以上相机参数均可经过相机标定获得.

将式 (18) 和式 (17) 代入式 (16), 可得斜圆锥体 V_1 与像平面 I_1 的交线, 即空间圆 Q_c 在像平面 I_1 的投影椭圆 Q_1 在像素坐标系下满足以下方程

$$\begin{aligned} & [k(S_{x1}x_1 - S_{x1}C_{x1} - t_{11}) - \\ & l(S_{y1}y_1 - S_{y1}C_{y1} - t_{12}) + m]^2 + \\ & [n(S_{x1}x_1 - S_{x1}C_{x1} - t_{11}) - \\ & p(S_{y1}y_1 - S_{y1}C_{y1} - t_{12}) + q]^2 = \\ & [r(S_{x1}x_1 - S_{x1}C_{x1} - t_{11}) + \\ & s(S_{y1}y_1 - S_{y1}C_{y1} - t_{12}) + t]^2 \end{aligned} \quad (19)$$

其中,

$$\begin{aligned} k &= a_{11} - \alpha_1 a_{31} \\ l &= a_{12} - \alpha_1 a_{32} \\ m &= (a_{13} - \alpha_1 a_{33})(f_1 - t_{13}) \\ n &= a_{21} - \beta_1 a_{31} \\ p &= a_{22} - \beta_1 a_{32} \\ q &= (a_{23} - \beta_1 a_{33})(f_1 - t_{13}) \\ r &= \gamma_1 a_{31} \\ s &= \gamma_1 a_{32} \end{aligned}$$

$$t = \gamma_1 a_{33}(f_1 - t_{13})$$

采用最小二乘法拟合得到空间圆 Q_c 在像平面 I_1 的投影椭圆 Q_1 的隐式表达式 (11) 后, 结合式 (11) 和式 (19) 即可联立方程求解斜圆锥体 V_1 在世界坐标系下的方程系数 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$.

根据式 (15) 得到斜圆锥体 V_1 的中心轴线在世界坐标系下的表达式为

$$\frac{X_w}{\alpha_1} = \frac{Y_w}{\beta_1} = Z_w \quad (20)$$

同理, 可得斜圆锥体 V_2 的中心轴线在世界坐标系下的表达式. 因此, 通过确定的左右两个斜圆锥体的中心轴线计算空间圆 Q_c 的圆心 O_c 在世界坐标系下的三维坐标, 即得到导管中心线两个端点的空间坐标.

导管两端提取的椭圆应尽量具有更多的像素, 圆弧像素越多, 精度越高, 这与采集图像的角度有关, 为了获取较高的拟合精度, 利用导管两端内径圆孔投影迭代优化拟合椭圆.

导管的外径是通过计算导管边缘线分割后的平行直线段间的距离实现的. 为了获得更加准确的导管外径尺寸, 选取与相机成像平面接近平行的两条平行直线段边缘进行计算, 这与测量前导管相对于相机的位置摆放有关. 理论上, 通过边缘线对导管外径进行计算需要导管平面与相机成像平面平行. 但是实际应用中, 很难精确控制以达到理想条件. 标定时利用导管所在平面的标定板图像, 将导管实际采集图像转换到相机光轴垂直于导管所在平面, 通过在该平面上的导管部分的边缘线进行外径的测量以达到理想条件的效果. 将导管边缘上平行直线段的像素距离转换到世界坐标系下的实际距离, 求得导管的外径尺寸.

3 NURBS 曲线的拟合和重建

3.1 NURBS 曲线的拟合

拟合 NURBS 曲线时, 先要将曲线上的数据点列和节点矢量 \mathbf{u} 进行参数化. $\{\bar{u}_j\}$ ($j = 0, 1, \dots, m$) 为数据点列 Q_j 的参数值, 由累加弦长参数法确定, 该参数化方法反映了数据点列按弦长分布的情况.

节点矢量 $\mathbf{u} = [u_0, u_1, \dots, u_{n+k}, u_{n+k+1}]$ 的定义域共包含 $n - k + 1$ 个节点区间, 每个节点值应反映参数值 \bar{u}_j 的分布情况, 并能够保证定义域每个节点区间至少包含一个参数值 \bar{u}_j .

采用最小二乘法通过求解 $C(\mathbf{u})$ 与对应节点函数值 $C(\bar{u}_j)$ 之差的平方和最小值来构造逼近函数.

给定 $m + 1$ 个数据点列 Q_0, Q_1, \dots, Q_m ($m > n$), 满足 $Q_0 = C(0), Q_m = C(1)$, 中间数据点 Q_j

($j = 1, 2, \dots, m-1$). 根据最小二乘法建立目标函数为

$$f = \sum_{j=1}^{m-1} \left(\sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(\bar{u}_j) - Q_j \right)^2, \quad \bar{u}_j \in [0, 1] \quad (21)$$

求解式 (21) 关于 $n-1$ ($n \geq k$) 个控制顶点 P_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 的最小值, 可使式 (21) 关于控制顶点 P_i 的导数为 0, 得

$$\frac{\partial f}{\partial P} = \sum_{j=1}^{m-1} R_{l,k}(\bar{u}_j) \left[\sum_{i=1}^{n-1} R_{i,k}(\bar{u}_j) P_i - (Q_j - R_{0,k}(\bar{u}_j) Q_0 - R_{n,k}(\bar{u}_j) Q_m) \right] = 0 \quad (22)$$

式 (22) 整理后得到关于未知量 P_1, \dots, P_{n-1} 的线性方程如下式

$$\sum_{j=1}^{m-1} R_{l,k}(\bar{u}_j) \left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i R_{i,k}(\bar{u}_j) \right) = \sum_{j=1}^{m-1} R_{l,k}(\bar{u}_j) (Q_j - R_{0,k}(\bar{u}_j) Q_0 - R_{n,k}(\bar{u}_j) Q_m) \quad (23)$$

取 $l = 1, 2, \dots, n-1$, 得到关于未知量 P_1, P_2, \dots, P_{n-1} 的 $n-1$ 个方程, 联立方程组求解, 拟合得到 NURBS 曲线的控制点.

通过上述方法利用导管提取的中心线上特征点列与中心线端点, 将导管中心线拟合成为 NURBS 曲线, 并获得其控制点.

3.2 NURBS 曲线的重建

将导管中心线拟合为 NURBS 曲线后, 获得了其控制点序列. 空间上任一点可以利用通过其在两个不同视角下的投影重建出来, 这就是立体视觉三角测量原理. 根据该原理, 利用双目相机采集的左右两幅图像中得到的对应控制点列重建空间控制点.

因为拟合 NURBS 曲线时是先令权因子系数为 1 计算控制点的, 重建空间曲线前需计算其空间控制点所对应的权因子. 这些权因子可由下式计算确定^[16]:

$$\bar{W}_i = W_i (r_7 X_i + r_8 Y_i + r_9 Z_i + t_z) \quad (24)$$

其中, (X_i, Y_i, Z_i) 为空间 NURBS 的控制点坐标, W_i 为在投影图像上 NURBS 曲线控制点对应的权因子.

$$M = \begin{bmatrix} s_x & 0 & u_0 \\ 0 & s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

为透视投影矩阵.

在计算出导管中心线的空间控制点和对应权因子后, 按式 (1) 生成空间曲线. 利用三维建模技术, 根据测量得到的外径与重建的空间中心线, 重建出完整的导管三维模型.

4 实验结果与分析

在采用 CCD 数字相机搭建的双目视觉系统上对提出的重建方法进行实验验证. 三维重建对象选取数字弯管机加工的铝制导管 1, 其外径为 15 mm, 内径为 12 mm, 如图 14 所示. 相机经过标定后的外部参数如表 1 所示.



图 14 待重建导管

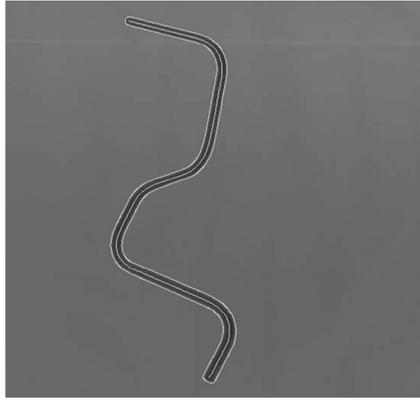
Fig. 14 Pipes to be reconstructed

表 1 立体相机外部参数

Table 1 External parameters of stereo cameras

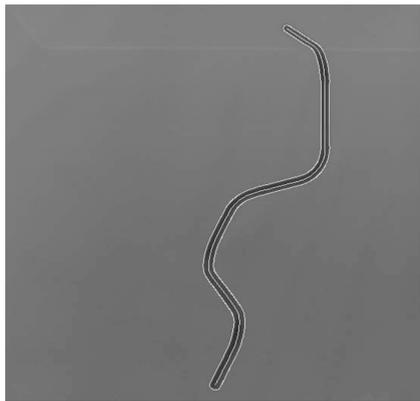
相机	旋转角度 ($^{\circ}$)	平移向量 (mm)
左	[335.057 359.174 282.560]	[35.116 65.549 1300.460]
右	[337.221 351.940 357.877]	[-17.178 50.806 1280.510]

首先, 采集左右两幅导管 1 的平面灰度图像 (像素尺寸 1388 像素 \times 1038 像素), 分别在左右图像上提取导管 1 的边缘线与中心轴线, 如图 15 所示. 通过边缘线计算得到导管的外径尺寸为 15.158 mm, 误差为 1.053%.



(a) 左图像上提取的特征线

(a) Feature lines extracted from left image



(b) 右图像上提取的特征线

(b) Feature lines extracted from right image

图 15 导管 1 特征线的提取

Fig. 15 Extraction of pipe 1's feature lines

左右两幅图像提取的导管 1 中心线的数据点数分别为 659 和 554, 利用 Harris 算法分别获得 124 和 106 个离散特征点.

验证实验采用三次 NURBS 曲线拟合中心轴线, 将节点矢量两端节点的重复度取 4, 两端节点值分别取 0 和 1, 控制点数都选为 41, 分别建立关于左右两根中心轴线的控制点方程组, 见下式

$$\sum_{j=1}^{m-1} v(\bar{u}_j) R_{l,3}(\bar{u}_j) \left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i R_{i,3}(\bar{u}_j) \right) = \sum_{j=1}^{m-1} v(\bar{u}_j) R_{l,3}(\bar{u}_j) (Q_j - R_{0,3}(\bar{u}_j) Q_0 - R_{n,3}(\bar{u}_j) Q_m) \quad (25)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, 40$; $l = 1, 2, \dots, 40$.

求解得到左右两根中心轴线的控制点坐标, 重建得到空间中心轴线的 NURBS 曲线控制点, 即得到导管 1 空间中心轴线的 NURBS 表达式, 并结合

计算得到的导管 1 外径, 利用三维建模技术重建出导管 1 的三维模型, 如图 16 所示.

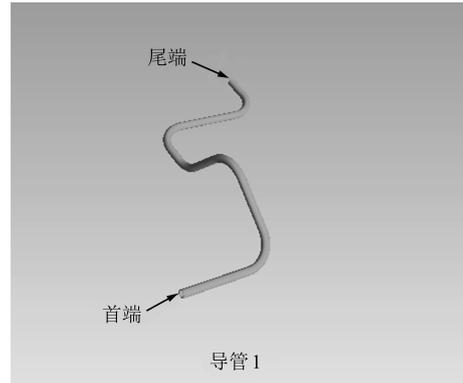


图 16 重建的导管 1 三维模型

Fig. 16 Pipe 1's reconstructed 3D model

利用与导管 1 相同的三维重建方法, 分别重建图 14 中不同形状的导管 2 (外径 20 mm), 导管 3 (外径 10 mm), 得到各自的三维模型, 如图 17 所示.

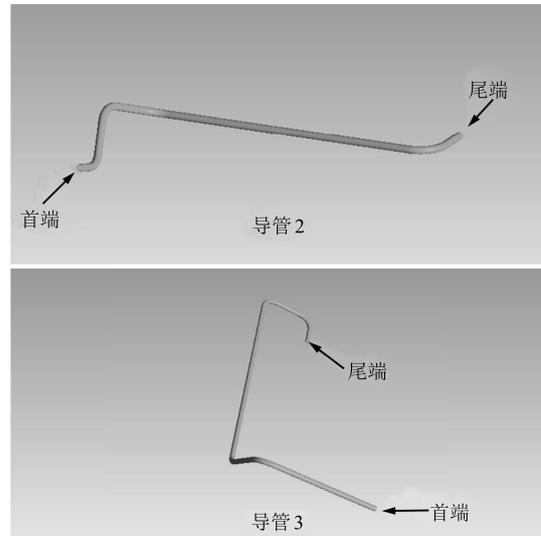


图 17 重建的其他导管三维模型

Fig. 17 Other pipes' reconstructed 3D models

为了定量衡量重建精度, 需要对左右图像的反投影曲线均匀采样 100 个点, 并计算与原始曲线的平均最近距离, 见表 2.

表 2 单支导管最近点平均距离

Table 2 Average distance of closest points on single pipe

单支导管	左图 (pixel)	右图 (pixel)
1	0.261	0.284
2	0.226	0.258
3	0.241	0.272

同时利用激光跟踪仪 (测量球直径 38.1 mm, 精度 20 μ m) 精确测量实验导管 1~3 的两端面中心

点,即中心线端点的坐标值,转换到实验设定的世界坐标下与实验结果进行对比验证,对比结果见表3.每根导管的整个实验重建过程时间均能够保证在1分钟内.由此可见,本文提出的方法能在保证较高精度的前提下实现高效率的导管三维重建.

表3 导管端点重建结果(mm)
Table 3 Reconstructed coordinates of pipe's end points (mm)

重建坐标	三维重建值	激光测量值	绝对误差
导管1首端 X	312.012	312.252	0.242
导管1首端 Y	-347.786	-347.548	0.238
导管1首端 Z	-7.618	-9.368	0.175
导管1尾端 X	-314.072	-313.876	0.196
导管1尾端 Y	-174.204	-174.348	0.144
导管1尾端 Z	-115.910	-115.688	0.222
导管2首端 X	191.268	191.483	0.147
导管2首端 Y	-259.137	-259.263	0.126
导管2首端 Z	-39.796	-39.615	0.181
导管2尾端 X	-373.737	-373.505	0.232
导管2尾端 Y	-522.485	-522.652	0.167
导管2尾端 Z	-14.652	-14.672	0.102
导管3首端 X	232.502	232.324	0.178
导管3首端 Y	96.321	96.548	0.227
导管3首端 Z	-5.837	-5.983	0.146
导管3尾端 X	175.845	175.649	0.196
导管3尾端 Y	-174.133	-174.348	0.215
导管3尾端 Z	-7.270	-7.112	0.158

为了验证提出的基于中心线匹配的导管三维重建方法针对分支导管的可行性和精度,以某型号铝制分支管路作为测量和重建的对象.该分支管路包含由数控弯管机加工的四个导管和焊装的四个接头组成,如图18所示.管路的外径为6 mm,内径为5 mm.

经过图像增强和分割等预处理后,分支导管的中心线从灰度图像中提取出来,并分割为各条导管的局部曲线.其中一对分支导管的立体图像的中心线提取情况如图19所示.左右图像中提取的三条局部中心线的点数分别为1012、1328、274和995、1288、262.通过Harris算子在这些中心线上提取的特征点数分别为173、186、49和179、191、45.与单一导管一样,分别建立关于左右两根中心线的控制点方程组.求解得到左右两条中心线的控制点坐标,然后根据重建得到空间中心线的NURBS

曲线控制点,并将这些局部曲线进行匹配重建和拼接.由于拟合NURBS曲线时的权重系数设为1,计算新分支导管中心线的权重系数,最终得到各分支导管空间中心线的NURBS表达式,并重建分支导管的三维模型,如图20所示.

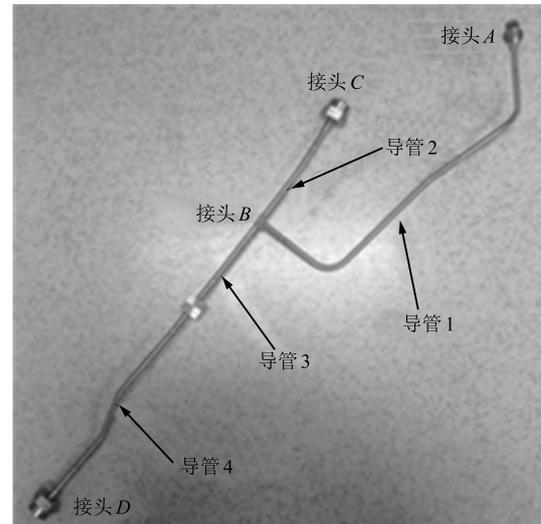


图18 待重建的分支导管

Fig. 18 Branched pipes to be reconstructed



图19 从立体图像中提取和分割的中心线

Fig. 19 Extracted and segmented centerlines in the stereo images

为了量化重建精度,采集了5个不同位姿摆放的分支导管图像,每个位姿都在中心线上均匀选取100个点,然后反投影到立体图像上,计算这些点中最近点的平均距离,结果见表4.平均重建时间保证在1分钟内.由此可见,提出方法能够以较高效率和精度实现分支导管的三维重建.

从导管三维重建的原理以及标定、匹配、重建三个阶段流程可知,影响导管三维重建精度的误差因素分为以下三类(如图21所示):1) 标定误差,主要包括标定点位置坐标误差以及标定点提取误差;

2) 匹配误差, 主要包括图像极线校正误差与中心线提取误差; 3) 重建误差.

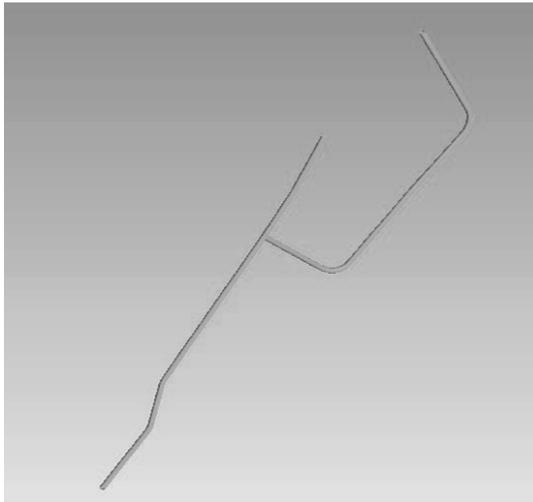


图 20 重建的分支导管三维模型

Fig. 20 3D model of reconstructed branched pipes

表 4 分支导管最近点平均距离

Table 4 Average distance of closest points on branched pipe

分支导管位姿	左图 (pixel)	右图 (pixel)
1	0.256	0.147
2	0.242	0.275
3	0.284	0.201
4	0.179	0.213
5	0.254	0.230

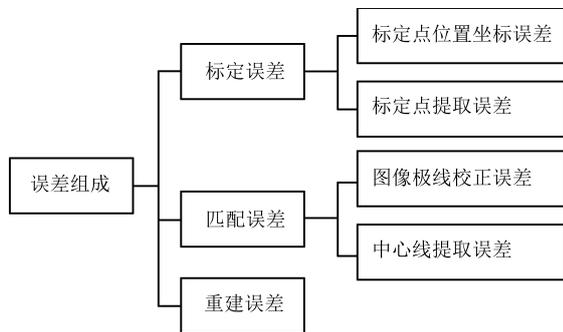


图 21 导管三维重建的误差组成

Fig. 21 Error contributions of pipe 3D reconstruction

管路多目测量系统的误差传递如图 22 所示. 标定过程的输入为标定位置坐标和投影点提取坐标, 它们的误差传递给标定输出的相机内、外部参数, 造成了标定误差; 由于使用借助于标定输出的相机内、外部参数求解的图像极线校正, 造成了图像极线校正误差, 同时存在管路空间中心线的投影和根据其

投影提取的中心线不重合造成的中心线提取误差. 因此, 在利用平行外极线和中心线约束寻找匹配点时, 图像极线校正误差与中心线提取误差传递给匹配过程的输出, 造成匹配误差; 重建过程中, 标定误差和匹配误差作为输入, 产生重建误差. 重建误差实际就是最终的导管三维重建误差.

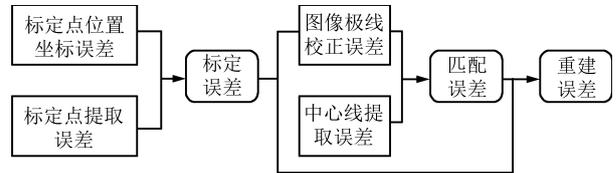


图 22 导管三维重建误差传递

Fig. 22 Error transmission of pipe 3D reconstruction

5 结论

本文提出了一种基于中心线匹配的导管三维重建方法, 该方法采用 NURBS 曲线作为中心线匹配和重建基元, 并使用 NURBS 形式的中心线的控制点列代替了整个表面点集, 加速了匹配过程, 减少了错误匹配发生的概率, 同时保证了测量效率和精度, 解决了分支导管三维重建的难题. 重建中心线曲线可通过调整数据点列和权因子局部修改曲线形状, 以控制曲线的拟合精度, 并直接输出三维模型, 省去了传统方法在重建后还需要进行的插值等后处理工作. 实验结果证明, 采用该方法的三维重建时间可控制在 1 分钟内, 导管两端面中心点的测量误差为 0.242 mm, 外径测量误差为 0.158 mm, 满足了工程需求.

本文提出方法的重建精度受相机的标定、特征的提取和曲线的拟合等多个因素的综合影响, 下一步需要深入研究的工作是重建系统的理论误差分析与建模, 以及提出提高重建精度的方法.

References

- Xin Qin, Ding Ming-Yue, Tu Ji-Lin. Research on active 3D shape retrieval based on one-shot image. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(1): 47-55 (辛勤, 丁明跃, 涂吉林. 单像机有源形状恢复方法研究. *自动化学报*, 2001, **27**(1): 47-55)
- Zhu Ji-Hua, Zheng Nan-Ning, Yuan Ze-Jian, He Yong-Jian. A slam approach by combining ICP algorithm and particle filter. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(8): 1107-1113 (祝继华, 郑南宁, 袁泽剑, 何永健. 基于 ICP 算法和粒子滤波的未知环境地图创建. *自动化学报*, 2009, **35**(8): 1107-1113)
- Qiu Gu-Feng, Yu Jing-Chi, Huang Qi-Tai, Ni Ying, Wang Yi. Mathematical model of contacting freeform surface contour measurement. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(11): 2813-2820 (仇谷烽, 余景池, 黄启泰, 倪颖, 王毅. 接触式三坐标测量自由曲面轮廓的数据处理模型. *光学精密工程*, 2013, **21**(11): 2813-2820)

- 4 Shi Li-Min, Guo Fu-Sheng, Hu Zhan-Yi. An improved PMVS through scene geometric information. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(5): 560–568
(史利民, 郭复胜, 胡占义. 利用空间几何信息的改进 PMVS 算法. 自动化学报, 2011, **37**(5): 560–568)
- 5 Wu Lun, Wang Yong-Tian, Liu Yue. A robust approach based on photometric stereo for surface reconstruction. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(8): 1339–1348
(吴仑, 王涌天, 刘越. 一种鲁棒的基于光度立体视觉的表面重建方法. 自动化学报, 2013, **39**(8): 1339–1348)
- 6 Zhang K, Gao Z. The technology of fast 3D reconstruction based on stereo vision. *Key Engineering Materials*, 2014, **579**: 654–658
- 7 Zhao Yu-Qin, Zhang Li-Yan. Pipe parameter estimation in photogrammetry. *Machine Building and Automation*, 2008, **37**(6): 114–117
(赵玉芹, 张丽艳. 基于摄影测量的管路参数确定. 机械制造与自动化, 2008, **37**(6): 114–117)
- 8 Bosemann W. The optical tube measurement system OLM-photogrammetric methods used for industrial automation and process control. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, **XXXI**(B5): 55–58
- 9 Veldhuis H, Vosselman G. The 3D reconstruction of straight and curved pipes using digital line photogrammetry. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, **53**: 6–16
- 10 Zhang Hu, Zhang Xiang-Lin, Zhang Chang, Huang Shu-Huai. A new approach for the bent tube non-contact measurement. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1999, **20**(4): 438–440
(张虎, 张祥林, 张畅, 黄树槐. 弯管非接触测量的一种新方法. 仪器仪表学报, 1999, **20**(4): 438–440)
- 11 Hu Ming-Xiao, Bai Bao-Gang. Direct Greville ordinate algorithm for implicit B-spline curve reconstruction. *Computer Engineering and Applications*, 2014, **50**(1): 175–179
(胡明晓, 白宝钢. 隐式 B-样条曲线重建的直接 Greville 纵标法. 计算机工程与应用, 2014, **50**(1): 175–179)
- 12 Zhao Yan-Li, Wang Zhan, Guo Cheng-Hao, Liu Feng-Yu. Two approaches for 3D reconstruction of free-form curves based on BSC-spline curves and cubic spline curves. *Application Research of Computers*, 2006, **23**(11): 252–254
(赵颜利, 王湛, 郭成昊, 刘凤玉. 基于 BSC 和三次样条曲线的两种自由曲线重建方法. 计算机应用研究, 2006, **23**(11): 252–254)
- 13 Xiang Chang-Bo, Xu Jian-Hua. 3D reconstruction and measurement of irregular objects based on NURBS curve. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(10): 243–248
(向长波, 许建华. 基于 NURBS 曲线的不规则物体三维重建与测量. 仪器仪表学报, 2009, **30**(10): 243–248)
- 14 Zhan Xiao-Kang, Sha Yue-Jin. Aerial image matching based on image segmentation and Harris algorithm. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013, **43**(S2): 440–445
(占小康, 沙月进. 基于图像分割和 Harris 的低空影像匹配. 东南大学学报(自然科学版), 2013, **43**(S2): 440–445)
- 15 Xu Hong-Ke, Qin Yan-Yan, Chen Hui-Ru. An improved algorithm for edge detection based on Canny. *Infrared Technology*, 2014, (3): 210–214
(许宏科, 秦严严, 陈会茹. 一种基于改进 Canny 的边缘检测算法. 红外技术, 2014, (3): 210–214)
- 16 Xiao Yi-Jun. Research on 3D Reconstruction Approach of Curves Based on Parametric Model [Ph.D. dissertation], Huazhong University of Science and Technology, China, 2000.
(肖轶军. 基于参数模型的曲线三维重建方法研究 [博士学位论文], 华中科技大学, 中国, 2000.)



张天 北京理工大学机械与车辆学院博士研究生. 2010 年获东北大学机械工程学院硕士学位. 主要研究方向为机器视觉, 光学测量.

E-mail: tom8832@163.com

(ZHANG Tian Ph.D. candidate at the School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology. He re-

ceived his master degree from Northeastern University in 2010. His research interest covers machine vision and optical measurement.)



刘检华 北京理工大学机械与车辆学院教授. 2005 年获北京理工大学机械与车辆学院博士学位. 主要研究方向为数字化装配, 螺纹连接, 数字化检测.

E-mail: jeffliu@bit.edu.cn

(LIU Jian-Hua Professor at the School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology. He re-

ceived his Ph.D. degree from Beijing Institute of Technology in 2005. His research interest covers digitalized assembly, threaded connection, and digitalized inspection.)



唐承统 北京理工大学机械与车辆学院教授. 主要研究方向为机械制造与 CAD/CAM 技术.

E-mail: tangcht@bit.edu.cn

(TANG Cheng-Tong Professor at the School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology. His re-

search interest covers mechanical manufacturing and CAD/CAM technique.)



刘少丽 北京理工大学机械与车辆学院讲师. 2012 年获清华大学精密仪器与机械学系博士学位. 主要研究方向为机器视觉, 图像处理. 本文通信作者.

E-mail: liushaoli@bit.edu.cn

(LIU Shao-Li Lecturer at the School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology. She received her

Ph.D. degree from Tsinghua University in 2012. Her research interest covers machine vision and image processing. Corresponding author of this paper.)