

DOI: 10.3969/j.issn.1673-064X.2020.06.016

中图分类号: TE927; TP314.7

文章编号: 1673-064X(2020)06-0107-08

文献标识码: A

井筒可视化检测图像失真校正方法

严正国¹, 汤英¹, 王旭², 陈磊²

(1. 西安石油大学 陕西省油气井测控技术重点实验室 陕西 西安 710065;

2. 中国石油川庆钻探长庆井下技术作业公司 陕西 咸阳 712000)

摘要: 通过井筒三维建模和井筒成像仿真, 研究了井筒图像的失真机理, 提出了一种基于井筒截面轮廓检测和不动点定位的井筒可视化检测图像失真校正方法, 推导了不动点坐标计算公式, 通过图像重采样和映射变换, 得到了井筒偏心校正图像和展开变换图像。实际应用效果表明, 利用该方法对实际测井资料进行处理, 可消除图像的变形失真, 得到井筒管壁的 360°全景平面展开图像, 进一步合成井筒表面的三维立体图像, 为井筒可视化检测的主观评价提供全新的视角, 为定量分析奠定了基础。

关键词: 图像失真校正; 图像处理; 可视化检测; 三维建模

Research on Correction Method of Image Distortion in Visual Detection of Wellbore

YAN Zhengguo¹, TANG Ying¹, WANG Xu², CHEN Lei²

(1. Key Laboratory of Shaanxi Province for Gas-Oil Logging Technology, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Changqing Downhole Technology Company, Petrochina Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: Through 3D modeling and imaging simulation of wellbore, the mechanism of wellbore image distortion is studied. A visual image distortion correction method of wellbore based on wellbore cross-section contour detection and fixed point positioning is proposed. The calculation formulas of fixed point coordinates are derived. The wellbore eccentricity correction image and unfolding transformation image are obtained through image resampling and mapping transformation. The practical application shows that the method can eliminate the distortion of the image by processing of actual logging data, and obtain the 360° panoramic plane unfolded image of the wellbore wall, and further synthesize the three-dimensional surface image of the wellbore, which provides a new perspective for the subjective evaluation of wellbore visual detection and lays a foundation for quantitative analysis.

Key words: image distortion correction; image processing; visual detection; three-dimensional modeling

严正国, 汤英, 王旭, 等. 井筒可视化检测图像失真校正方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(6): 107-114.

YAN Zhengguo, TANG Ying, WANG Xu, et al. Research on correction method of image distortion in visual detection of wellbore[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2020, 35(6): 107-114.

收稿日期: 2020-03-30

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05060); 陕西省光电传感测井重点实验室开放基金(09JS042); 陕西省教育厅重点实验室项目(15JS097; 11JS051)

第一作者: 严正国(1976-), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 测井信号与信息处理, 可视化测井技术等。

E-mail: zhgyan@xsyu.edu.cn

通讯作者: 汤英(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 图像处理。E-mail: 1535199463@qq.com

引言

可视化检测技术利用井下摄像机获取并眼视频图像,让油气井工程技术人员以“最直观”的方式掌握井下“最真实”的状况。早期的研究重点在于井下工具的研制以及作业工艺的配套,以获取高质量的井下视频图像。随着井下工具和配套工艺的成熟,可视化检测在油气井管柱腐蚀、穿孔、变形、错断检测、鱼顶检测、套破出水等领域都得到了很好的应用^[1-3]。目前,VideoLog 可视化测井服务在国内取得了较好的工程应用效果。在应用过程中,新的需求不断被提出,主要集中在组合测井资料的综合解释和可视化检测的定量评价^[4-5]。受摄像机的固有特性及成像原理所限,可视化检测获取到的井筒图像是变形失真的。对于图像失真校正,2003年,Wang、Lucchese等^[6-7]提出了校正径向畸变和倾斜变形的的方法,利用该方法得到的校正图像在视觉上有所改善,但其方法复杂;2007年,刘堂友等^[8]针对图像畸变,提出了一种可同时精确校正相机图像的径向畸变和倾斜失真的方法,但该方法应用于实际存在畸变的图纸图像;2015年,黄斌等^[9]通过建立中心偏移摄像机成像数学模型,较好地实现了管道柱面图像展开,但中心偏移量在80%以上时,偏移后的误差相对较大;2017年,吕耀文等^[10]提出了一种基于鱼眼透镜球面投影的实时校正方法,但该方法校正精度不高。本文提出了基于井筒截面轮廓检测和不动点定位的井筒可视化检测图像失真校正方法,通过实际应用案例的解释成果图,展示该方法的应用效果,以期对实现井筒可视化检测检测目标的定量分析提供依据。

1 井筒三维建模与成像仿真

1.1 三维管柱模型

由于摄像机的固有特性,可视化测井系统获取的全帧率视频图像是变形失真的。因此,在分析研究视频图像前需要对井筒原始图像进行三维建模。三维模型通常要根据场景对象的空间几何拓扑结构及不同特征的对象采用不同的构建方法。对于规则形体对象,采用点、线、面等基本图元进行建模;对于规则曲面形体对象,采用球体、圆柱体等三次曲面进行建模;对于非规则的曲面,采用切片、角点网格等更灵活方法进行建模^[11]。理论上,井筒井径是均匀

的,但实际情况下,由于井内各种复杂的环境,井径会产生变化。从宏观上只考虑井筒的整体走势,不考虑井径的变化,井筒是一个规则的曲面形体对象。因此,本文采用圆柱体拼接进行建模,三维管柱建模如图1所示,模型参数半径 $r_0 = 50$,高度 $h = 100$,中轴线 $x_0 = 0$, $y_0 = 0$,底平面 $z = 0$ 。

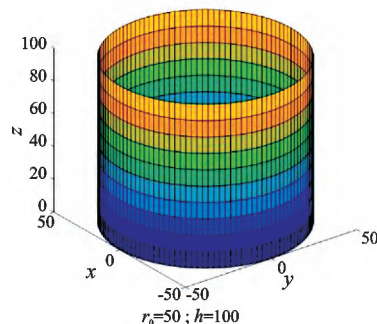


图1 三维管柱模型

Fig. 1 Three-dimensional pipe string model

1.2 管柱表面视觉建模

1.2.1 理论基础

(1) 成像原理

成像原理如图2所示,其中: s 为物体的像的大小,像素; S 为物体的尺寸,mm; D 为物体所在平面与镜头所在平面的距离,mm; d 为物体的像所在平面与镜头所在平面的距离,mm。假设摄像机的像元为正方形,边长为 p (单位为mm/像素),根据成像原理,可得到关系式

$$\frac{ps}{S} = \frac{d}{D}, \text{即 } s = \frac{d}{pD}S = \frac{\alpha}{D}S, \quad (1)$$

其中 $\alpha = d/p$,为相机常数。由于 o 的位置未知, d 很难直接测量, p 通常也很难确定,因此 α 与镜头结构及成像元件的分辨率有关,可通过相机标定来确定^[12-13]。仿真中选取 $\alpha = 1$ 。式(1)中物体的像的大小 s 与物体的尺寸 S 成正比,与物体所在平面与镜头所在平面的距离 D 成反比。

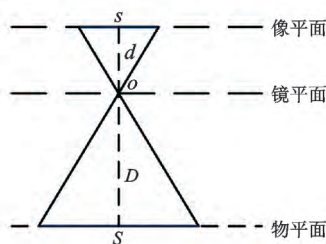


图2 成像原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of imaging principle

(2) 不动点原理

摄像机中轴线上的所有点与图像中的像点全部

重合, 与该点距摄像头的位置远近无关, 该像点称为不动点。本文求解不动点坐标, 目的是为了计算偏心圆环上的圆心坐标和半径, 通过坐标平移, 将偏心圆环上所有的圆心平移, 使其与管柱中心重合, 可得到偏心校正的图像。

1.2.2 视觉建模

(1) 摄像机在管柱中居中

摄像机在管柱中居中的几何模型如图 3 所示, 摄像机在管柱中居中时(摄像机中轴线与管柱中轴线重合), 目标管柱(管柱上一段高度为 h 的圆柱体)在摄像机中的像是同心圆环。圆心对应摄像机中轴线投影像点。

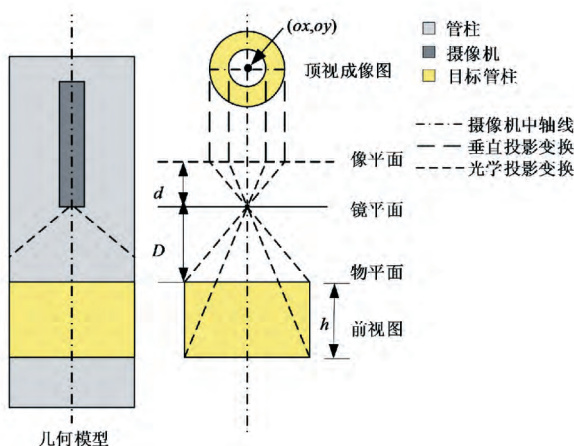


图 3 摄像机在管柱中居中的几何模型
Fig.3 Geometric model of camera centering in pipe string

不动点坐标 $(oox, \rho oy)$ 与管柱中心 $(ox, \rho y)$ 重合, 依据成像原理, 平行于摄像机镜头平面, 距离 $D = d + h - z$ ($0 \leq z \leq h$) 的管柱截面的像是圆心为 $(ox, \rho y)$ 、半径为 r_0/D (取 $\alpha = 1$) 的圆。三维管柱模型在摄像机居中时的视觉模型如图 4 所示。

(2) 摄像机在管柱中偏心

摄像机在管柱中偏心的几何模型如图 5 所示, 摄像机在管柱中偏心时(摄像机中轴线与管柱中轴

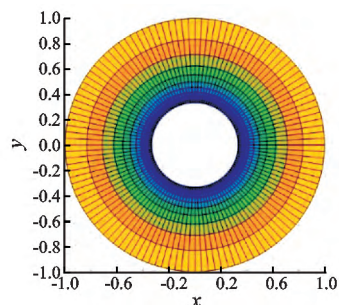


图 4 三维管柱模型在摄像机居中时的视觉模型
Fig.4 Visual model of 3D pipe string model when camera is centered

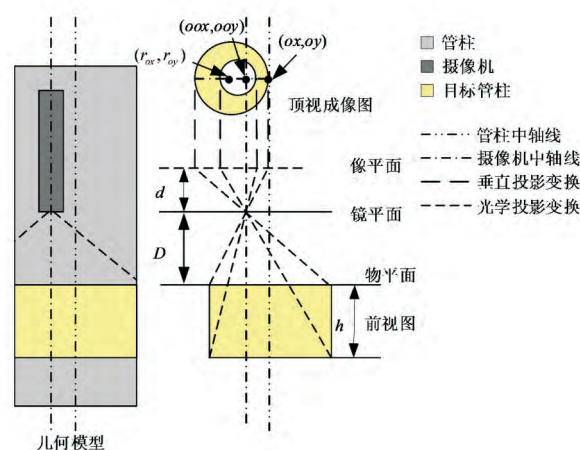


图 5 摄像机在管柱中偏心的几何模型
Fig.5 Geometric model of acentric camera in pipe string

线平行但不重合), 目标管柱(管柱上一段高度为 h 的圆柱体)在摄像机中的像是偏心圆环。

相机中心在 xy 平面的投影坐标 $(oox, \rho oy)$, 依据成像原理及三角形相似原理, 平行于摄像机镜头平面距离为 $D = d + h - z$ ($0 \leq z \leq h$) 的管柱截面的像是圆心为 (r_{ox}, r_{oy}) 、半径为 r 的圆。其中 $r = r_0/D$, $r_{ox} = oox + (ox - oox)/D$, $r_{oy} = oy + (oy - \rho oy)/D$ 。

三维管柱模型在摄像机偏心视觉模型($oox = 0$, $oy = 0$; $oox = 10$, $\rho oy = 10$) 如图 6 所示。

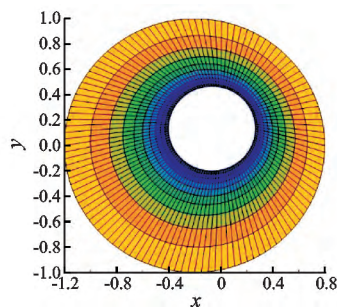


图 6 三维管柱模型在摄像机偏心时的视觉模型
Fig.6 Visual model of 3D pipe string model when camera is acentric

1.2.3 偏心校正和失真校正

相机偏心时, 与管柱平行截面的像圆心不重合, 只要通过圆周重采样和坐标平移, 将所有的圆心平移到管柱中心, 即可消除相机偏心的影响, 也就是将图 6 所示图像转换为图 4 所示图像。

由于距离相机较近的管柱截面的像半径较大, 距离相机较远的管柱截面的像半径较小, 因此, 管柱的图像是失真的。通过圆周变换, 使相同管径截面的像的大小相等, 并通过空间坐标变换, 将图像进行

三维重构或展开变换,可以消除视觉失真。三维重构将图6所示图像转换为图1所示图像,展开变换将图4或图6所示图像转换为图7所示图像。

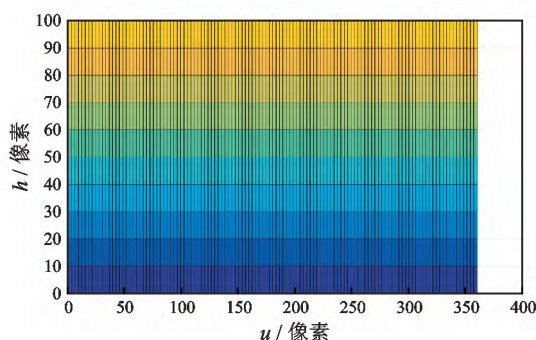


图7 管柱展开图像

Fig. 7 Expanded image of pipe string

2 管柱图像变形失真校正的方法

为了对管柱图像变形进行失真校正,本文提出了基于井筒截面轮廓检测和不动点定位的井筒可视化检测图像失真校正方法。首先,通过对不动点坐标的求解,可得到偏心圆环上的圆心坐标;再通过坐标平移,将偏心圆环上所有的圆心平移,使其与管柱中心重合,即可对图像进行偏心校正;最后,通过映射关系进行空间坐标变换,将图像展开变换,即可对管壁图像进行失真校正。

2.1 不动点坐标求解

如图8所示,经过偏心圆环的内外圆心做直线,与内外圆有4个交点,与外圆交点记为 $A(x_{11}, y_{11})$, $C(x_{12}, y_{12})$,与内圆交点记为 $B(x_{21}, y_{21})$, $D(x_{22}, y_{22})$ 。外圆圆心记为 $O_1(ox_1, oy_1)$,半径为 r_1 ;内圆圆心记为 $O_2(ox_2, oy_2)$,半径为 r_2 。其中,外圆表示距离相机较近的管柱截面的像,内圆表示距离相机较远的管柱截面的像。

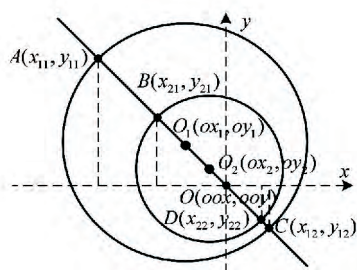


图8 偏心校正中心点估计

Fig. 8 Estimation of eccentricity correction center point

设待求的不动点为 $O(oox, ooy)$,根据相机成像原理及三角形相似原理,由图8可知

$$\frac{OA}{OB} = \frac{OC}{OD}, \quad (2)$$

由式(2)可得

$$\frac{x_{11} - oox}{x_{21} - oox} = \frac{x_{12} - oox}{x_{22} - oox}, \quad (3)$$

$$\frac{y_{11} - ooy}{y_{21} - ooy} = \frac{y_{12} - ooy}{y_{22} - ooy}. \quad (4)$$

由式(3)和(4)分别可得

$$oox = \frac{x_{11} \cdot x_{22} - x_{12} \cdot x_{21}}{(x_{11} + x_{22}) - (x_{12} + x_{21})}, \quad (5)$$

$$ooy = \frac{y_{11} \cdot y_{22} - y_{12} \cdot y_{21}}{(y_{11} + y_{22}) - (y_{12} + y_{21})}. \quad (6)$$

当 A, B, C, D 在一条竖直线上时,式(5)分子为0,此时 $oox = x_{11} = x_{12} = x_{21} = x_{22}$;当 A, B, C, D 在一条水平线上时,式(6)分子为0,此时 $ooy = y_{11} = y_{12} = y_{21} = y_{22}$ 。

实际中,通过图像视觉识别和参数提取,容易得到内外圆圆心坐标及圆心半径。即已知外圆圆心 $O_1(ox_1, oy_1)$,半径 r_1 ,内圆圆心 $O_2(ox_2, oy_2)$,半径 r_2 ,求不动点 $O(oox, ooy)$ 。这时,只需要按照已知条件求出 A, B, C, D 点坐标即可。根据成像原理及三角形相似,由图8可知

$$\frac{OA}{OB} = \frac{OC}{OD} = \frac{OO_2}{OO_1}, \quad (7)$$

可求得 A 点坐标:

$$\begin{cases} x_{11} = ox_1 - \frac{r_1 |ox_1 - ox_2|}{l}; \\ y_{11} = oy_1 - \frac{r_1 |oy_1 - oy_2|}{l}. \end{cases} \quad (8)$$

C 点坐标:

$$\begin{cases} x_{12} = ox_1 + \frac{r_1 |ox_1 - ox_2|}{l}; \\ y_{12} = oy_1 + \frac{r_1 |oy_1 - oy_2|}{l}. \end{cases} \quad (9)$$

B 点坐标:

$$\begin{cases} x_{21} = ox_2 - \frac{r_2 |ox_1 - ox_2|}{l}; \\ y_{21} = oy_2 - \frac{r_2 |oy_1 - oy_2|}{l}. \end{cases} \quad (10)$$

D 点坐标:

$$\begin{cases} x_{22} = ox_2 + \frac{r_2 |ox_1 - ox_2|}{l}; \\ y_{22} = oy_2 + \frac{r_2 |oy_1 - oy_2|}{l}. \end{cases} \quad (11)$$

其中 l 为内外圆圆心之间的距离 $l = \sqrt{(ox_1 - ox_2)^2 + (oy_1 - oy_2)^2}$ 。

2.2 圆心坐标求解

如图9所示, 管柱的直径为 $2R$, 管柱截面1(距离相机较近的管柱截面)的像为 AC , 以 AC 为直径构成的圆的圆心为 $O_1(ox_1, oy_1)$, 半径为 r_1 ; 管柱截面2(距离相机较远的管柱截面)的像为 BD , 以 BD

为直径构成的圆的圆心为 $O_2(ox_2, oy_2)$, 半径为 r_2 ; 管柱截面3(任意管柱截面)的像为 EF , 以 EF 为直径构成的圆的圆心为 $O_3(ox, oy)$, 半径为 r ($r_2 < r < r_1$)。 $O(oox, ooy)$ 为不动点坐标, 管柱截面1和管柱截面2之间的距离记为 h , 管柱截面1和管柱截面3之间的距离记为 y 。

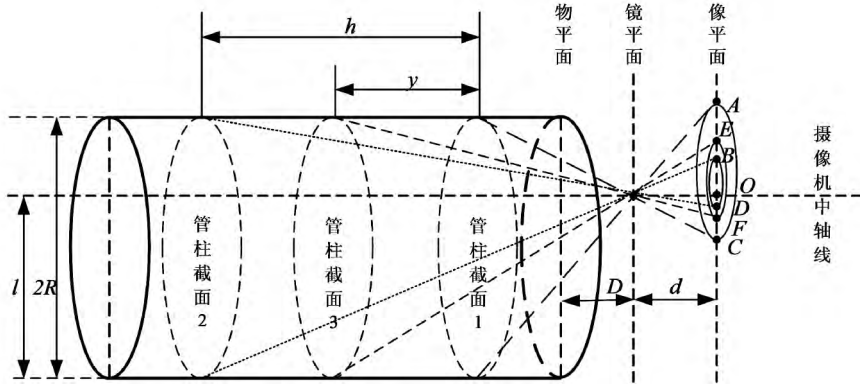


图9 偏心圆环上圆心半径求解示意图

Fig.9 Schematic diagram of solving circle center and radius on eccentric ring

根据相机成像原理及三角形相似, 由图9可知

$$\begin{cases} \frac{AC}{2R} = \frac{d}{D} \\ \frac{BD}{2R} = \frac{d}{D+h} \\ \frac{EF}{2R} = \frac{d}{D+y} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{OO_1}{l} = \frac{d}{D} \\ \frac{OO_2}{l} = \frac{d}{D+h} \\ \frac{OO_3}{l} = \frac{d}{D+y} \end{cases} \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可求得半径 r 和圆心 $O_3(ox, oy)$:

$$r = \frac{hr_1r_2}{hr_2 - y(r_2 - r_1)}; \quad (14)$$

$$\begin{cases} ox = \frac{h(ox_1 - oox)(ox_2 - oox)}{h(ox_2 - oox) - y(ox_2 - ox_1)} + oox \\ oy = \frac{h(oy_1 - ooy)(oy_2 - ooy)}{h(oy_2 - ooy) - y(oy_2 - oy_1)} + ooy \end{cases} \quad (15)$$

2.3 图像失真校正

通过坐标映射关系, 对实际检测采集到的视频图像重新进行采样和映射, 将原始图像中的数据填充得到展开变换图像和偏心校正图像, 即可得到失

真校正后的管壁图像。

2.3.1 偏心校正映射

如图10所示, 2个圆的圆心坐标和半径分别为 $O_1(ox_1, oy_1)$ r_1 和 $O_2(ox_2, oy_2)$ r_2 的圆, 建立2个圆之间的区域Area1中的点 $P_1(x_i, y_i)$ 到区域Area2中的点 $P_2(x_c, y_c)$ 的映射关系。设展开后图像尺寸为 $L \times L$, 则区域中心坐标为 $(L/2, L/2)$ 。

2.3.2 平面展开映射

如图10所示, 2个圆的圆心坐标和半径分别为 $O_1(ox_1, oy_1)$ r_1 和 $O_2(ox_2, oy_2)$ r_2 , 建立2个圆之间的区域Area1中的点 $P_1(x_i, y_i)$ 到边长为 $w \times h$ 的矩形区域Area3中的点 $P(x, y)$ 的映射关系。其中 w 为展开图像的宽度(采样角度), h 为展开图像的高度。

2.3.3 偏心校正和展开变换

如图10所示, 当高度 y 在 $1 \sim h$ 和 x 在 $1 \sim 360$ 之间变化时, Area1中的圆心 $O(ox, oy)$ 、半径为 r ($r_2 < r < r_1$) 的圆, 映射为Area2中圆心为图像中心 $(180, 180)$ 、半径 $r_2 + h$ ($0 < h < r_1 - r_2$) 的圆, 映射为Area3中纵坐标为 y 的一条线。其中, Area3中的点 $P(x, y)$ 与Area1中的点 $P_1(x_i, y_i)$ 互为映射, Area3中的点 $P(x, y)$ 与Area2中的点 $P_2(x_c, y_c)$ 互为映射, 可求得 $P_1(x_i, y_i)$ 和 $P_2(x_c, y_c)$ 的坐标:

$$\begin{cases} x_i = r \cos\left(\frac{2\pi x}{360}\right) + ox \\ y_i = r \sin\left(\frac{2\pi x}{360}\right) + oy \end{cases} \quad (16)$$

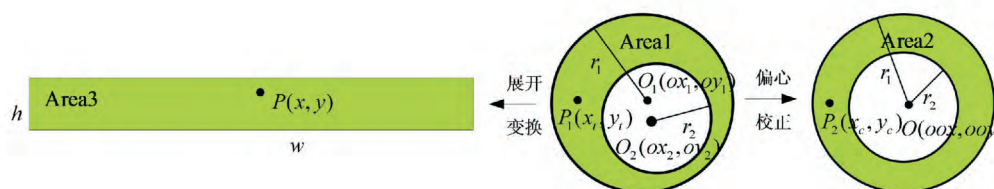


图 10 图像变换映射关系

Fig. 10 Image transformation mapping relation

$$\begin{cases} x_c = (r_2 + y) \cos\left(\frac{2\pi x}{w}\right) + \frac{L}{2}, \\ y_c = (r_2 + y) \sin\left(\frac{2\pi x}{w}\right) + \frac{L}{2}. \end{cases} \quad (17)$$

2.4 小结

本文通过求解不动点坐标,得到偏心圆环上的圆心坐标,并通过圆周重采样和坐标平移,将所有的圆心平移到管柱中心,使其与管柱平行截面的像圆心重合,实现图像的偏心校正。再通过圆周变换,使相同管径截面的像的大小相等,并通过空间坐标变换,将图像进行三维重构或展开变换,实现图像的失真校正。

3 实际应用的实施步骤

3.1 视频获取

通过可视化测井,获取可视化测井视频资料。如图 11 所示可视化检测视频图像是由 VideoLog 油气井可视化测井系统在某地区采集。

3.2 轮廓提取

打开视频文件,抽取图像,根据管柱自身的视频图像特征(如套管接箍),提取轮廓特征(图 12),通过参数拟合(图 13),获取轮廓的圆心和半径。

3.3 偏心校正、展开变换

依据文中前述方法进行不动点求解,计算偏心圆环的半径和圆心坐标,通过图像重采样和映射,得到如图 14 所示的偏心校正图像和如图 15 所示的偏心圆环展开图像。

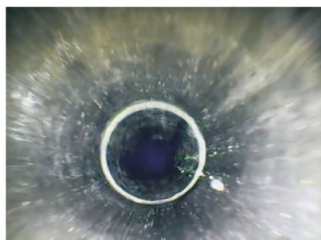


图 11 可视化检测视频图像
Fig. 11 Visual detection video image

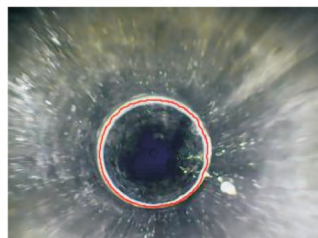


图 12 接箍轮廓识别

Fig. 12 Recognition of coupling outline

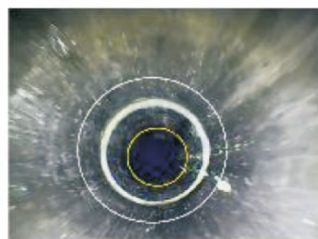


图 13 参数拟合

Fig. 13 Parameter fitting

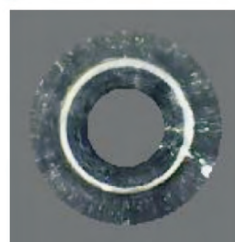


图 14 偏心校正图像

Fig. 14 Corrected eccentricity image

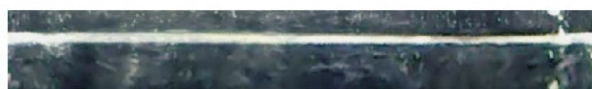


图 15 局部展开图像

Fig. 15 Partially expanded image

3.4 图像配准和拼接

对视频图像进行连续处理,将如图 15 所示的局部展开图像依次进行配准和拼接,得到如图 16 所示的管壁的 360°全景展开图像。



图 16 局部展开图拼接图像
Fig. 16 Splicing image of partially expanded images

3.5 三维立体表面图像绘制

将 360°全景展开图像绘制在三维立体管柱表面,即可得到如图 17 所示的管柱的三维立体表面图像。



图 17 三维立体表面图像
Fig. 17 Three-dimensional surface image

4 应用效果实例

利用本文的方法对延长某套损井的可视化视频原始图像进行解释处理,得到如图 19 所示的展开图像。对展开图像做进一步处理,得到了如图 20 所示



图 18 原始图像
Fig. 18 Original image

的三维立体表面图像,为井筒可视化检测的主观评价提供了全新的视角,同时消除了非线性失真,易于评价和度量。

5 结 论

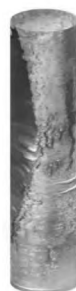
本文通过三维管柱建模、管柱成像原理分析和视觉仿真,研究了管柱图像失真机理,利用管柱轮廓特征推导出了不动点求解公式和偏心圆环圆心求解公式,提出了一种井筒可视化检测图像失真校正的方法,并给出了具体的实施步骤。通过实际应用案例的解释成果图,展示了该方法的应用效果,为管柱可视化检测主观评价提供了全新的视角,为管柱可视化定量检测提供了重要的理论依据。该方法的关键在于待检管柱轮廓特征和参数的准确提取,示例采用了接箍轮廓识别和参数提取的方法,在实际应用中存在一定局限性。后续的研究将改进轮廓参数获取的方法,以增强本文提供的井筒图像失真校正方法的实用性。

参 考 文 献:

- [1] 张斌山,严正国,张郁山,等. 视频测井图像处理技术与应用[J]. 测井技术, 2019, 43(4): 376-379.
ZHANG Binshan, YAN Zhengguo, ZHANG Yvshan, et al. Video log interpretation processing technology and its application [J]. Well Logging Technology, 2019, 43(4): 376-379.
- [2] 张家田,严正国,胡长岭,等. 井下视频成像测井技术



图 19 展开图像
Fig. 19 Expanded image



(a) 方位角0° (b) 方位角90° (c) 方位角180° (d) 方位角270°

图 20 三维立体表面图像
Fig. 20 Three-dimensional surface image

- [J]. 仪器仪表学报 2007 28(4): 714-717.
ZHANG Jiatian, YAN Zhengguo, HU Changling, et al. Down-hole video imaging technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2007 28(4): 714-717.
- [3] LY T Q, BALDELLI S. Distortion correction for an imaging ellipsometer [J]. The Journal of Physical Chemistry A 2020 124(13): 2708-2713.
- [4] 暴莹, 薛继军. 井下电视图像定量解释 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版) 2004 19(2): 33-36.
CUAN Ying, XUE Jijun. Quantitative interpretation of downhole television image [J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition) 2004 19(2): 33-36.
- [5] 严正国, 张家田. 井下电视图像压缩技术 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版) 2007 22(5): 94-97.
YAN Zhengguo, ZHANG Jiatian. Data compression technique of downhole video image [J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition) 2007 22(5): 94-97.
- [6] WANG X, KLETTE R, ROSENHAHN B. Geometric and photometric correction of projected rectangular pictures [C]//Proceedings of International Conference on Image and Vision Computing (IVCNZ), Dunedin, New Zealand, 2005: 223-228.
- [7] LUCCHESI L, MITRA S K. Correction of geometric lens distortion through image warping [C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, Rome, Italy 2003: 516-521.
- [8] 刘堂友, 董爱华. 精确校正图像的径向畸变和倾斜失真 [J]. 中国图象图形学报 2007(10): 1935-1938.
LIU Tangyou, DONG Aihua. Precisely correct radial and oblique distortion of camera image [J]. Journal of Image and Graphics 2007(10): 1935-1938.
- [9] 黄斌, 李天剑, 王会香, 等. 基于中心偏移矫正算法的管道图像展开研究 [J]. 计算机应用与软件 2015 32(10): 196-200.
HUANG Bin, LI Tianjian, WANG Huixiang, et al. On unwrapping pipeline image based on centre offset correction algorithm [J]. Computer Applications and Software 2015, 32(10): 196-200.
- [10] 吕耀文, 安喆, 徐熙平. 鱼眼视频图像畸变的实时校正方法 [J]. 吉林大学学报(理学版) 2017 55(1): 103-108.
LV Yaowen, AN Zhe, XU Xuping. Real-time correction method for fisheye video images distortion [J]. Journal of Jilin University(Science Edition) 2017 55(1): 103-108.
- [11] 魏佳, 段友祥, 李卿, 等. 面向地质导向的三维井筒可视化 [J]. 计算机系统应用 2017 26(4): 9-15.
WEI Jia, DUAN Youxiang, LI Qing, et al. 3D visualization of wellbore for geosteering [J]. Computer Systems & Applications 2017 26(4): 9-15.
- [12] 王庆峰, 张全法, 李宏成. 管道内壁图像无畸变重建及摄像机标定研究 [J]. 测控技术 2012 31(1): 13-15.
WANG Qingfeng, ZHANG Quanfa, LI Hongcheng. Study on distortion-less reconstruction of pipeline inner wall image and camera calibration [J]. Measurement & Control Technology 2012 31(1): 13-15.
- [13] 吴文欢, 朱虹, 吴向荣. 基于平面运动约束的摄像机自标定方法 [J]. 仪器仪表学报 2019 40(1): 248-256.
WU Wenhuan, ZHU Hong, WU Xiangrong. Camera self-calibration method based on planar motion constraint [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2019 40(1): 248-256.
- [14] ORTIZ A, MUNILLA J, MARTÍNEZ-MURCIA F J, et al. Empirical functional PCA for 3D image feature extraction through fractal sampling [J]. International Journal of Neural Systems 2019 29(2): 1850040.
- [15] 谭祺瑞, 路海明, 卢增祥, 等. 基于空间三维物体重构的光场显示技术综述 [J]. 清华大学学报(自然科学版) 2018 58(9): 773-780.
TAN Qirui, LU Haiming, LU Zengxiang, et al. Survey on light-field displays based on 3D object reconstructions [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology) 2018 58(9): 773-780.
- [16] 段友祥, 仝兆岐, 李卿, 等. 面向随钻的井筒可视化方法研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版) 2016 40(6): 63-70.
DUAN Youxiang, TONG Zhaoqi, LI Qing, et al. Wellbore visualization method for logging while drilling [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science) 2016 40(6): 63-70.
- [17] 马福义, 赵喜江, 张在岩, 等. 基于三维激光扫描技术的竖井井筒变形分析方法 [J]. 中国矿业 2019 28(s1): 72-75.
MA Fuyi, ZHANG Xijiang, ZHANG Zaiyan, et al. Shaft deformation analysis method based on 3D laser scanning technology [J]. China Mining Magazine 2019 28(s1): 72-75.

责任编辑: 张新宝