

基于轴线投影精确模型的 弯管立体视觉测量方法*

孙军华,张悦,程晓琦

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

[摘要] 利用立体视觉技术测量弯管轴线需精确计算弯管轴线在图像上的投影位置,现有方法将弯管图像轮廓中心线近似为空间轴线在像平面上的投影,这种近似计算存在误差。为获得弯管轴线的精确投影位置,提高三维测量精度,对弯管成像特征进行了深入研究。首先对弯管任意横截面建立透视投影模型,探索截面图像边缘点与空间轴线投影点间的几何关系,进而提出轴线上任意一点在像平面上投影位置的精确计算方法。采用双目视觉系统对某一航空管件进行重构测量。试验结果表明,相较于现有方法,采用本文方法计算轴线投影位置后,管件测量的重复性精度与前者相当,而测量精度平均提高 14.5%。说明本文方法对轴线投影位置计算正确,可有效提高弯管轴线视觉测量精度。

关键词: 弯管轴线;视觉测量;透视投影;双目立体视觉;三维重构

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.05.040



孙军华

博士,教授,博士生导师,主要从事机器视觉、图像处理和模式识别等方面的研究。

管路系统是航空航天领域机电产品的重要组成部分,通常由复杂弯管组成。为了确保无应力装配,需要对加工后的弯管重新测量并与该弯管的 CAD 模型进行比对并确定是否满足装配需要。当前较为主流的弯管测量方法为基于立体视觉技术的弯管测量方法,立体视觉技术具有非接触、高精度、通用性强的优势,近年来针对该技术的研究非常广泛^[1-3]。根据测量内容的不同,基于立体视觉技术的测量方法又可分为弯管表面形貌测量和三维轴线测量两种。

Gom 公司 ATOS Core 三维扫描仪以及 Bosemann^[4]提到 AICON 公司的 3Dscanner 就是测量弯管表面形貌的典型代表,利用相机多角度获得弯管表面三维形貌,间接拟合弯管轴线。这种方法测量精度很高,但是需要进行三维拼接,效率很低。

弯管三维轴线测量方法具有设备自动化程度高,测量过程简单,效率高的特点。AICON 公司的 TubeInspect 系统测量精度可达 0.1mm,测量时间在 0.2s 以内。Zhang 等^[5-8]提出将图像轮廓中心线视为弯管轴线投影并结合多目立体视觉技术实现轴线重构。然而这种方法没有把弯管透视投影考虑在内,直接将图像轮廓的中心线作为弯管轴线的投影其实是近似计算,与实际弯管轴线投影位置有一定偏差,因而需要进一步研究弯管透视投影模型,准确计算弯管轴线投影位置。

早在 20 世纪 90 年代,就有许多学者对弯管的透视投影模型进行过研究,然而大部分研究均集中于均匀直圆柱形弯管^[9-10]。对于弯管的透视投影模型仅有少量研究,Bosemann^[11]提出将弯管中心线划

* 基金项目:航空科学基金项目(2017ZE51062)。

分为若干直线段,以线段交点测量管件参数,重构误差很大;Lee等^[12]通过计算弯管表面点的局部几何属性将曲面点映射到中心线上并拟合,但需要已知弯管表面点云信息。Caglioti^[13]提出可以利用弯管任意横截面的几何特征单目重构直径均匀的任意弯管轴线,但需要已知弯管半径。上述研究都没有给出弯管轴线投影位置的精确计算方法。因而针对目前弯管测量极其透视投影模型的研究现状,本文对弯管透视投影过程进行精准建模,探寻弯管成像点与投影点间的透视投影模型,提出利用像平面轮廓计算空间轴线上点所对应投影位置的计算方法,可以进一步提高多目立体视觉技术测量弯管轴线的精度。

弯管任意截面透视投影模型

空间弯管表面可分解为一系列具有相同半径且紧密排列的横截面圆,每一个圆的圆心都位于弯管轴线上。因而对任意横截面构建透视投影模型并计算截面圆圆心投影位置,可以得到整条弯管轴线的投影位置。

图1展示了弯管任意横截面 π 的透视投影模型,截面圆 π 所处的支撑平面定义为平面 P , n 为平面 P 的单位法向量,并与截面圆 π 交于圆心点 P_c 。平面 T_1 和 T_2 为弯管在点 P_1 和 P_2 处的切平面,通过摄像机光心。点 P_3 为弦 P_1P_2 中点,直线 OQ 为平面 T_1 和 T_2 的交线。平面 T_{mid} 平分两

平面 T_1T_2 并过直线 OQ 及点 P_c 。点 P'_1 和 P'_2 为切点 P_1 和 P_2 的投影点,同样的,点 P'_3 和点 P'_c 为点 P_3 和 P_c 的对应投影点。平面 T_1 和 T_2 分别交像平面于线 t'_1 和 t'_2 。 V_h 为线 t'_1 和 t'_2 的交点,同时也是直线 OQ 与像平面的交点。

平面 P 可以写作 $(n^T, -d)^T$,其中 $n=(n_1, n_2, n_3)^T$, d 为平面 P 到摄像机光心的距离,所有位于截面上的点 x_i 均满足方程 $n^T x_i = d$ 。由于 T_1, T_2 为弯管表面的切面,它们均垂直于支撑平面 P ,那么它们的交线 OQ 也垂直于该平面。所以直线 OQ 与向量 n 在空间中具有相同方向。根据消影点的定义,点 V_h 应为向量 n 在像平面上的消影点。可以写作 $V_h = t'_1 \times t'_2$,其中 $n = OV_h = A^{-1} \tilde{V}_h$, $\tilde{V}_h = (V_h, 1)^T$ 。

对于切点 P_1 ,根据摄像机小孔成像模型,切点 P_1 与其投影点 P'_1 满足式(1):

$$\tilde{P}'_1 = k_1 \begin{bmatrix} A^{-1} & 0^T \end{bmatrix}^T \tilde{P}_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T d \quad (1)$$

其中, k_1 为尺度系数; A 为摄像机内参; \tilde{P}_1 和 \tilde{P}'_1 是 P_1 和 P'_1 的齐次坐标,摄像机内参矩阵的逆可记作式(2):

$$B = A^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将 $\tilde{P}_1 = (X_1, Y_1, Z_1, 1)^T$, $\tilde{P}'_1 = (x_1, y_1, 1)^T$ 带入式(1),得到式(3):

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1(b_{11}x_1 + b_{12}y_1 + b_{13}) \\ k_1(b_{21}x_1 + b_{22}y_1 + b_{23}) \\ k_1(b_{31}x_1 + b_{32}y_1 + b_{33}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1\gamma_{11} \\ k_1\gamma_{12} \\ k_1\gamma_{13} \end{bmatrix} \quad (3)$$

同时,切点 P_1 位于截面圆 π 上,满足方程 $\pi^T \tilde{P}_1 = 0$,即 $n^T P_1 = d$,进一步得到点 P_1 的表达式:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11}/(n_1\gamma_{11} + n_2\gamma_{12} + n_3\gamma_{13})d \\ \gamma_{12}/(n_1\gamma_{11} + n_2\gamma_{12} + n_3\gamma_{13})d \\ \gamma_{13}/(n_1\gamma_{11} + n_2\gamma_{12} + n_3\gamma_{13})d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{11}d \\ \eta_{12}d \\ \eta_{13}d \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据对称性得到 P_2 的表达式为 $(\eta_{21}d, \eta_{22}d, \eta_{23}d)$ 。上述推导过程展示了两切点的透视投影关系,由图2可以看出,除两个端面外,任意截面 π 的实际投影只有两个点,即切点 P_1, P_2 的投影点 P'_1, P'_2 。由于 P_1, P_2 及圆心点 P_c 在空间中具有一定几何约束,可以直接利用 P'_1, P'_2 得到 P_c 在像平面上的投影位置。计算轴线投影位置时,上述两个切点的投影模型可以代表弯管任意截面透视投影过程,包括两个端面。

根据文献[13]提供的点对匹配方法,可以区分闭合轮廓上每一个截面对应的投影点对。图像中轮廓上的点属于同一截面的一个必要条件是式(5):

$$\frac{\tilde{P}'_1{}^T \omega \tilde{v}_h}{\sqrt{\tilde{P}'_1{}^T \omega \tilde{P}'_1} \sqrt{\tilde{v}_h{}^T \omega \tilde{v}_h}} = \frac{\tilde{P}'_2{}^T \omega \tilde{v}_h}{\sqrt{\tilde{P}'_2{}^T \omega \tilde{P}'_2} \sqrt{\tilde{v}_h{}^T \omega \tilde{v}_h}} \quad (5)$$

即 $P'_1 o V_h = P'_2 o V_h$,其中 ω 为图像对应的绝对二次曲线,可以用摄像机内参矩阵表示为 $\omega = A^{-T} A^{-1}$ 。应用文献[14]中提到的子像素级轮廓提取方法可以同时获得弯管图像子像素级轮廓及轮廓上各点对应的切向量,将得到的子像素级轮廓整

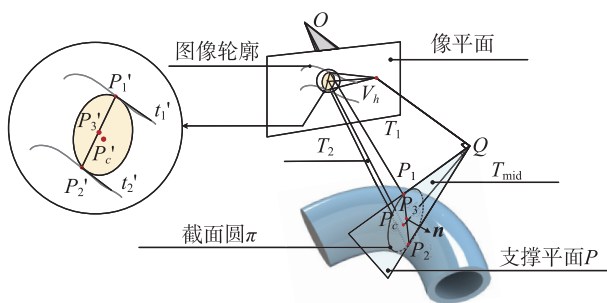


图1 影像测量系统原理图

Fig.1 Perspective projection model of arbitrary cross section

理成沿轮廓轴线对称的两条点链,构造损失函数用以评价 P'_1OV_h 和 P'_2OV_h 之间的差异:

$$\begin{cases} \alpha = \arccos\left(\frac{\tilde{P}'_1{}^T \omega \tilde{v}_h}{\sqrt{\tilde{P}'_1{}^T \omega \tilde{P}'_1} \sqrt{\tilde{v}_h{}^T \omega \tilde{v}_h}}\right) \\ \beta = \arccos\left(\frac{\tilde{P}'_2{}^T \omega \tilde{v}_h}{\sqrt{\tilde{P}'_2{}^T \omega \tilde{P}'_2} \sqrt{\tilde{v}_h{}^T \omega \tilde{v}_h}}\right) \\ J_c(P'_1, P'_2) = [\alpha - \beta]^2 \end{cases} \quad (6)$$

对两条链上的点沿链搜索,按照寻找损失函数 $J_c(P'_1, P'_2)$ 最小的原则寻找能够配对的点对,每一对寻得的点对均有空间上一个截面与之对应。

截面圆圆心投影位置计算方法

平面 T_1 及 T_2 可以视为直线 P'_1V_h 和直线 P'_2V_h 的反向投影平面,因而它们的法向量可以表示为: $\mathbf{n}_1 = A^T(\tilde{P}'_1 \times \tilde{V}_h) = (T_{11}, T_{12}, T_{13})^T$, $\mathbf{n}_2 = (T_{21}, T_{22}, T_{23})$, 过摄像机光心,截面圆圆心 P_c 和消隐点 V_h 所成的平面 T_{mid} 平分平面 T_1 和 T_2 的夹角,构造平面束方程: $T_{mid} = T_1 + \kappa T_2$, 其中 $T_1 = [\mathbf{n}_1, 0]^T$, $T_2 = [\mathbf{n}_2, 0]^T$, 设平面 T_{mid} 法向量为 $\mathbf{n}_{mid} = (T_{31}, T_{32}, T_{33})^T$, 求解满足式(7)的 κ 值并带入平面束方程,求解平面 T_{mid} 的表达式。

$$(\mathbf{n}_1 / \|\mathbf{n}_1\| - \mathbf{n}_2 / \|\mathbf{n}_2\|) \cdot \mathbf{n}_{mid} = 0 \quad (7)$$

类似于式(1)截面圆圆心 P_c 点的摄像机模型可表示为式(8):

$$\tilde{P}_c = k_c [B \ 0]^T \tilde{P}_c + [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (8)$$

由于 P_c 点在截面圆 π 和角分面

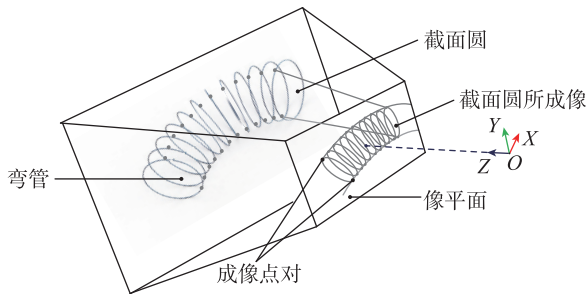


图2 截面圆成像点对示意图

Fig.2 Projected process of coupled contour points

T_{mid} 上满足方程 $\mathbf{n}^T P_c = d$ 及 $T_{mid} \tilde{P}_c = 0$, 其中 $T_{mid} = [\mathbf{n}_{mid}, 0]^T$, \tilde{P}_c 是 P_c 点的齐次坐标;另一方面, P_c 点作为截面圆 π 的圆心,满足方程 $\|P_c - P_1\| = \|P_c - P_2\|$ 。联立上述方程,得到:

$$\begin{cases} k_c n_1 & k_c n_2 & k_c n_3 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \\ k_c(\eta_{11} - \eta_{21}) & k_c(\eta_{12} - \eta_{22}) & k_c(\eta_{13} - \eta_{23}) \end{cases} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (9)$$

为简化表达,令式(9)中的部分参量表示为式(10)的形式:

$$\begin{cases} B \tilde{P}_c = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \\ 1/2(\eta_{11}^2 - \eta_{21}^2 + \eta_{12}^2 - \eta_{22}^2 + \eta_{13}^2 - \eta_{23}^2) = \Omega \end{cases} \quad (10)$$

为进一步简化关系,令式(10)最后一行的变量表述为:

$$\begin{bmatrix} \psi_1 & \psi_2 & \psi_3 \end{bmatrix}^T = \mathbf{n} - \frac{1}{\Omega} [\eta_{11} - \eta_{21} \ \eta_{12} - \eta_{22} \ \eta_{13} - \eta_{23}]^T \quad (11)$$

最终可以得到式(11)所示的截面圆圆心 P_c 在像平面成像的具体位置 $P_c(x_c, y_c)^T$ 的计算方程,其中 $\tilde{P}_c = (x_c, y_c, 1)^T$ 。

$$\begin{bmatrix} \psi_1 & \psi_2 & \psi_3 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} B \tilde{P}_c = 0 \quad (12)$$

试验过程及结果比对

搭建图3所示的双目立体视觉测量系统,该系统由双目立体视觉传感器、背景光源组成,其中双目立体视觉传感器由2个GC1380H

相机和2个焦距12mm的Cin-geol.4镜头构成,其视场范围约为450mm × 600mm。相机图像分辨率为1360pixel × 1024pixel。为评价本文提出的方法,用微米级测量精度的三坐标扫描仪测量待测工件并与本文方法进行比对,该传感器型号为RENISHAW公司的PH10M旋转测量头,工作距离为300mm,测量精度可达0.4μm。扫描过程如图4所示,利用其获得管路表面点云数据,然后拟合得到管路中心线。对于待测工件的弯角半径测量结果为25.176mm, 24.829mm;两弯角测量结果为112.263°, 99.793°。以三坐标扫描仪测量而得的管路中心线作为参照基准,然后利用本文方法和图像轮廓轴线重构的方法分别测量同一管件,将两种方法所得的测量结果与三坐标扫描仪得到的结果进行比对,评价算法性能。

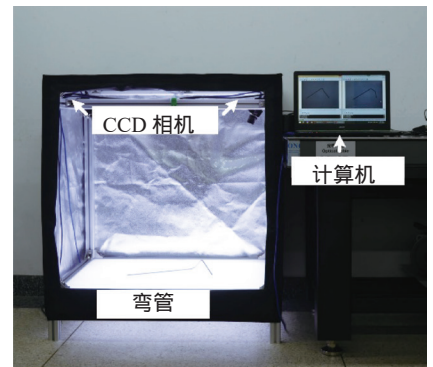


图3 试验装置

Fig.3 Experimental devices



图4 三坐标机扫描过程

Fig.4 Three coordinate machine scanning process

1 弯管轴线投影计算结果

试验采用图5所示某一具有两弯角结构的航空弯管作为待测工件。根据弯管轴线精确投影位置计算方法,可以得到该管件在像平面上的投影位置。具体试验结果如图6所示。

对三坐标扫描仪扫描结果拟合轴线,然后向平面投影,其投影结果可以作为弯管轴线在像平面上的投影基准,分别与本文方法所得投影位置和弯管在像平面上的轮廓中心线进行对比,可以定性分析轴线投影位置的计算结果。将三坐标扫描仪坐标系下的扫描重构结果转换到双目坐标系下,可以得到统一在同一张图像上的3种轴线投影结果。图7展示了在一张图像上两种方法所得轴线投影点相



图5 待测弯管

Fig.5 Bent tube to be measured

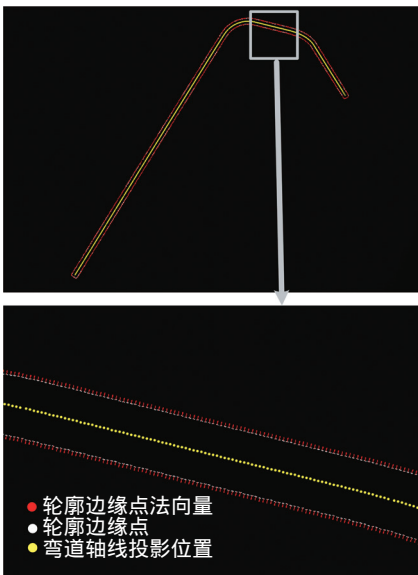


图6 弯管轴线投影位置计算结果

Fig.6 Calculation result of the projection position of tube axis

对于三坐标扫描仪投影结果拟合曲线的偏差,可以看到本文方法与三坐标扫描仪投影结果的偏差不会随待测件的形状和拍摄角度变化;而直接计算轮廓中心线的结果会受待测件形状影响,平均偏差增加15.1%。

2 本文方法三维测量结果

结合双目立体视觉模型利用弯管轴线投影计算结果重构弯管轴线,然后对轴线点按直线部分和曲线部

分分别拟合,任意两相邻直线段的夹角可以被视为弯角的弯曲角度;曲线段拟合所形成圆半径可以被视为弯角半径。对每一个待测工件分别测量两个弯角的角度和半径,可以得到不同直径弯管的测量结果。

使用图3所示的双目视觉测量系统将弯管在同一环境下以不同角度置于背景光源上重复测量10次,三维重构效果如图8(a)所示,测

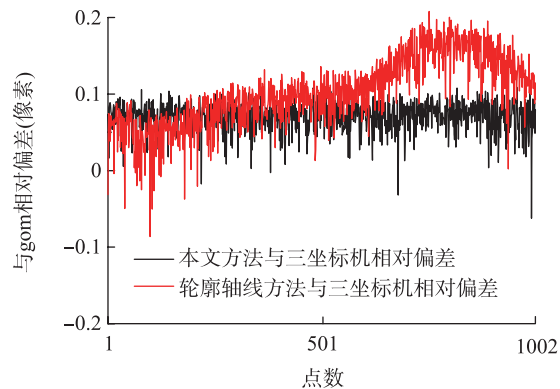
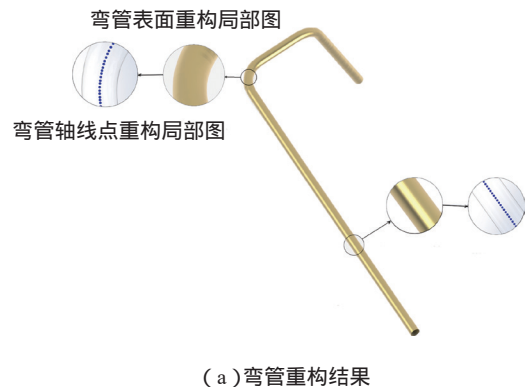
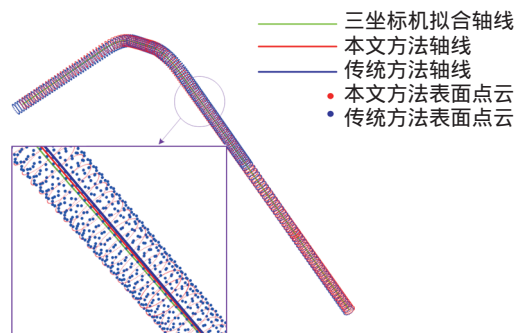


图7 轴线投影位置计算结果对比图

Fig.7 Comparison diagram of calculation results of tube axis projection position



(a) 弯管重构结果



(b) 3种方法轴线重构结果对比

图8 弯管重构结果及对比

Fig.8 Reconstruction result of tube and comparing

量结果见表1。测量结果显示,对于管件两个夹角测量重复性精度为 0.020° 和 0.020° ,对两端弯角半径测量重复性精度为 0.021mm 和 0.022mm 。与三坐标扫描仪测量结果相比,两个夹角的均方根误差为: 0.025° 和 0.028° ,两段圆弧半径的误差为 0.027mm 和 0.025mm 。图8(b)同时展示了3种方法的三维重构点云,可以看到,本文方法重构结果优于直接利用弯管图像轮廓轴线进行三维重构的结果,整体更贴近三坐标机三维扫描结果。

3 轮廓中心线重构方法测量结果

为证实中心线投影模型可以提升弯管轴线测量精度,本节将利用

表1 本文方法测量结果
Table 1 Measurement result of our methods

Count	Angle1 / ($^\circ$)	Angle2 / ($^\circ$)	R_1 /mm	R_2 /mm
1	112.28	99.80	25.17	24.82
2	112.26	99.78	25.21	24.85
3	112.30	99.83	25.18	24.83
4	112.30	99.80	25.22	24.86
5	112.27	99.79	25.19	24.82
6	112.28	99.82	25.17	24.87
7	112.31	99.83	25.22	24.82
8	112.26	99.83	25.17	24.87
9	112.28	99.82	25.21	24.86
10	112.25	99.82	25.19	24.86
RMSE	0.020	0.020	0.022	0.021
RMSD	0.025	0.028	0.027	0.025

轮廓中心线作为轴线投影的重构方法与本文方法三维测量结果进行对比。这种利用图像轮廓中心线作为轴线投影的重构方法在当前管路测量任务中占据主流地位,因而与本文方法的对比结果具有高度参考意义。参照文献[5]计算左右图像轮廓中心线并结合双目立体视觉模型,得到未加入轴线投影模型的重构结果。

表2展示了无透视投影模型的测量结果,与三坐标扫描仪测量结果相比,两个夹角的均方根偏差为: 0.028° 和 0.031° ,两段圆弧半径的偏差为 0.033mm 和 0.028mm 。

表3列出了两方法对同一弯管

表2 轮廓中心线重构方法测量结果
Table 2 Result of contour centerline reconstruction method

Count	Angle1 / ($^\circ$)	Angle2 / ($^\circ$)	R_1 /mm	R_2 /mm
1	112.26	99.80	25.18	24.84
2	112.31	99.83	25.23	24.86
3	112.28	99.78	25.20	24.82
4	112.30	99.80	25.23	24.83
5	112.27	99.83	25.17	24.85
6	112.28	99.82	25.19	24.82
7	112.28	99.83	25.21	24.84
8	112.27	99.83	25.17	24.87
9	112.28	99.82	25.21	24.87
10	112.31	99.84	25.22	24.88
RMSE	0.019	0.019	0.023	0.021
RMSD	0.028	0.031	0.033	0.028

表3 两种方法量结果比较
Table 3 Comparison between two methods

Method	Item	Angle1 / ($^\circ$)	Angle2 / ($^\circ$)	R_1 /mm	R_2 /mm
1	RMSD	0.025	0.028	0.027	0.025
2	RMSD	0.028	0.031	0.033	0.028
Increasing ratio		15.6%	11.2%	20.9%	10.1%

各待测量测量值的均方根偏差。其中 method1 代表本文方法,method2 代表未加入透视投影模型的双目重构方法,表格最后一行展示了本文方法与未加入透视投影模型方法相比,对测量精度提高的百分比。对比结果显示,加入透视投影模型后确实可以纠正部分系统误差,与直接利用弯管图像轮廓中心线重构轴线的方法相比,本文方法对该管件关键待测量的测量精度平均提升14.5%。

结论

本文提出了一种弯管轴线精确投影位置计算方法,可以减小在立体视觉重构弯管轴线的过程中因为轴线投影位置提取有误而造成的重构偏差。试验结果表明:

(1)将三坐标扫描仪轴线投影结果作为基准,本文方法计算弯管轴线点投影位置的偏差,不随弯管形状和拍摄角度变化,测量结果与三坐标扫描仪结果相当;如果将像平面轮廓中心线作为弯管轴线在像平面上投影位置,计算结果受待测管件形状影响,平均偏差比本文方法高15.1%。因而本文方法可以精确计算弯管轴线在像平面上投影位置。

(2)与未考虑弯管透视投影过程的双目测量方法相比,本文方法对同一弯管各关键参数测量结果的均方根偏差均大幅度降低,测量精度平均提升14.5%,可以有效提高弯管轴线测量精度。

参考文献

[1] 孔筱芳,陈钱,顾国华,等. GPS 双目摄像机标定及空间坐标重建[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 485-492.
KONG Xiaofang, CHEN Qian, GU Guohua, et al. GPS-based binocular camera calibration and space coordinate reconstruction [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(2): 485-492.

- [2] 倪章松, 顾芝, 柳庆林, 等. 大视场双目立体视觉柔性标定[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1882–1889.
- NI Zhangsong, GU Yi, LIU Qinglin, et al. Flexible calibration method for binocular stereo vision in large field of view[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1882–1889.
- [3] 杨景豪, 刘巍, 刘阳, 等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 300–308.
- YANG Jinghao, LIU Wei, LIU Yang, et al. Calibration of binocular vision measurement system [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 300–308.
- [4] BÖSEMANN W. Industrial photogrammetry - accepted metrology tool or exotic niche[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, 5: 15–24.
- [5] JIN P, LIU J H, LIU S, et al. Automatic multi-stereo-vision reconstruction method of complicated tubes for industrial assembly[J]. Assembly Automation, 2016, 36(4): 362–375.
- [6] LIU S, JIN P, LIU J, et al. Accurate measurement method for tube 's endpoints based on machine vision[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(1): 1–12.
- [7] LIU S, LIU J, JIN P, et al. Tube measurement based on stereo-vision: a review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(4): 1–16.
- [8] ZHANG T, LIU J, LIU S, et al. A 3D reconstruction method for pipeline inspection based on multi-vision[J]. Measurement, 2017, 98: 35–48.
- [9] DOIGNON C, DE MATHELIN M. A degenerate conic-based method for a direct fitting and 3-D pose of cylinders with a single perspective view[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2007.
- [10] LIU C, HU W. Relative pose estimation for cylinder-shaped spacecrafts using single image[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2014, 50(4): 3036–3056.
- [11] BÖSEMANN W. The optical tube measurement system OLM photogrammetric methods used for industrial automation and process control[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 31: 55–58.
- [12] LEE I K, KIM K J. Shrinking: Another method for surface reconstruction[C]//Geometric Modeling and Processing. Washington: IEEE Computer Society, 2004.
- [13] CAGLIOTI V, GIUSTI A. Reconstruction of canal surfaces from single images under exact perspective[C]//Proceedings of Computer Vision-ECCV 2006, European Conference on Computer Vision. Graz: DBLP, 2006.
- [14] TRUJILLO-PINO A, KRISIAN K, ALEMÁN-FLORES M, et al. Accurate subpixel edge location based on partial area effect[J]. Image & Vision Computing, 2013, 31(1): 72–90.

通讯作者: 孙军华, E-mail: sjh@buaa.edu.cn.

A Stereo Vision Measurement Method for Bent Tube Based on Accurate Projection Model for Axis

SUN Junhua, ZHANG Yue, CHENG Xiaoqi

(School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] The projection position of tube axis should be calculated accurately when the tube axis is measured using stereo vision. Previous methods for measuring tube axis approximate the centerlines of image contours as the axis projection. This assumption exists errors. In order to obtain the exact projection position of tube axis and to improve the measurement precision of tube axis, the proposed method studied the imaging characteristics of tubes. Firstly, a perspective projection model for any cross section of tube was established to explore the geometric relationship between the contour points of the cross section and their corresponding projection points on space axis. Furthermore, a way to locate the precise projected position on image planes of points laying on axis was presented. A binocular vision system was constructed to measure an aerospace tube. Compared with classical approaches, the repeatability accuracy of the proposed method is same as the former, while the measurement accuracy of the presented method increased by 14.5% on average due to precisely calculating the projection position of axis. It is shown that the proposed method is correct in calculating the projection position of tube axis and can effectively improve the measurement precision of tube axis.

Keywords: Tube axis; Visual measurement; Perspective projection; Binocular stereo vision; 3D reconstruction

(责编 铃兰)