

基于视觉测量的挖掘机工作装置姿态测量系统*

王海波 邹海龙 张如照

(西南交通大学机械工程学院, 成都 610031)

摘要: 提出了一种基于视觉测量的挖掘机工作装置姿态测量方法。使用工业相机获取工作装置侧视图像,采用鞍点检测方法快速捕捉工作臂上的人工靶标;将靶标间的固定几何尺寸关系作为约束条件筛选出靶标中的鞍点并计算相应工作臂的姿态角;通过预判靶标的运动范围以缩小图像检测区域,提高算法处理速度。试验表明,与挖掘机上原有的拉线传感器测量系统相比较,动臂和斗杆姿态角动态测量偏差分别小于 1° 和 2° ,处理每帧工作装置运动图像平均用时在100 ms以内,验证了该方法对挖掘机工作装置姿态测量的可行性。

关键词: 挖掘机 视觉测量 姿态角 鞍点检测

中图分类号: TU621; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0302-07

Attitude Measurement System for Excavator's Manipulator Based on Vision Measurement

Wang Haibo Zou Hailong Zhang Ruzhao

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: An attitude measuring method for excavator's manipulator based on vision measurement was proposed. Using the industrial camera to grab the perspective images of the manipulator, a saddle point detection was adopted to detect the man-made targets which was fixed on every arm of the excavator. Then the fixed geometric dimensioning between two targets was used as a constraint condition to select the saddle point in targets, and the attitude angle of the corresponding arm can be derived from the saddle point coordinates. The image detection area was reduced through anticipation of target movement and the algorithm processing speed was improved. Experiment results showed that compared with the original displacement sensor system installed on the excavator, the measured deviations of dynamic attitude angle for boom and arm were less than 1 degree and 2 degrees, respectively. The average processing time of this method for each manipulator movement frame was within 100 ms. And the feasibility of this method for measuring excavator manipulator's attitude was verified.

Key words: Excavator Vision measurement Attitude angle Saddle point detection

引言

视觉测量是近几十年来迅速发展的一门新型技术,它结合摄影测量学、光学测量等理论,利用工业相机捕捉目标的静态单帧图像或动态序列图像,应用图像处理和分析技术实现对目标结构参数和运动参数的测量^[1],具有非接触、动态响应快、量程大、

效率高等特点^[2]。现阶段国内外对视觉测量的应用一方面主要在整体静态定位及几何尺寸测量^[3]、运动物体的整体跟踪等^[4];另一方面用于测量物体自身在小位移、小运动范围内的运动细节,如对桥梁桥身纵向振动位移的监测^[5-6],汽车四轮定位等^[7]。然而,视觉测量对自身运动幅度和范围较大的物体,如对机械手、挖掘机工作装置等的姿态测量的应用

较为少见。

近年来,挖掘机作业自动化成为挖掘机研究领域的一大趋势^[8-9],国内外部分工程机械主干企业和高校对此做了大量的研究工作^[10-12]。挖掘机自身定位及工作装置姿态获取是挖掘机自动化研究中不可或缺的环节^[13]。一般机体定位由GPS导航系统完成^[14],测量工作装置姿态多采用倾角传感器^[15]、光电编码器^[16-17]或位移传感器。然而挖掘机进行挖掘作业过程中,工作装置不可避免地会与土壤、岩石等发生碰撞,极易造成其上传感器的损坏^[18]。因此,安全、可靠、准确地获取工作装置姿态成为挖掘机自动化研究中的重要问题之一。

本文提出一种基于视觉测量技术的姿态测量方法,并以挖掘机为例,针对其工作装置上传统姿态测量系统的严重不足,使用该方法非接触地动态测量其工作装置姿态角^[19]。

1 挖掘机工作装置姿态测量系统

1.1 系统组成

基于视觉测量的挖掘机工作装置姿态测量系统基本组成如图1所示,主要由测量平面、工业镜头及相机、计算机构成。

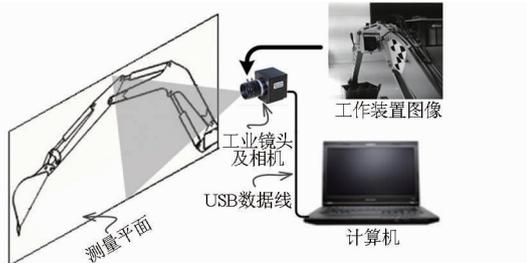


图1 基于视觉测量的姿态系统

Fig. 1 Attitude measurement system based on vision measurement

测量对象始终在测量平面内运动,工业相机与测量平面非接触,并保持固定的视距和夹角,安装方式如图2所示。测量平面为挖掘机工作装置侧边所处平面,工业相机安装在回转平台驾驶室的机架上,挖掘过程中工作装置随回转平台回转时工业相机亦跟随同步回转,因此工业相机与测量平面相对位置无变化,能很好地满足测量要求。

1.2 靶标布置

挖掘机工作装置姿态测量系统的目的是测量动臂、斗杆、铲斗的姿态角,因此需设定一种易于计算机识别且能表征各杆件姿态角的特征。系统以贴片的方式在动臂、斗杆、铲斗连杆侧边粘贴具有特殊几何形状的人工靶标,如图2所示,其中心点黑白对比度最高,称为鞍点。在具有较大侧视倾角的图像中,

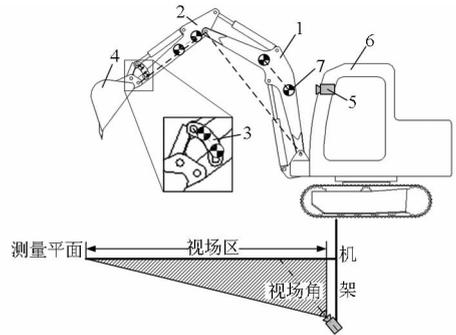


图2 工作装置姿态测量系统硬件布置

Fig. 2 Hardware of manipulator's attitude measurement system
1. 动臂 2. 斗杆 3. 铲斗连杆 4. 铲斗 5. 工业相机 6. 挖掘机机架 7. 人工靶标

轮廓或面域变形程度大,不易检测,而鞍点在一定邻域内图像性质几乎无变化,仍易于被检测到。

靶标的具体布置方式如图2所示,每个部件上各贴两个,两靶标鞍点连线分别与对应部件的铰点连线平行。因此,对于动臂和斗杆,测量出鞍点连线的倾角即测出了对应工作臂的姿态角;对于铲斗,测出铲斗连杆姿态角后,通过几何关系即可计算出铲斗姿态角。为便于区分每组靶标代表不同的工作臂,使每组靶标之间的距离不同,各组距离如表1所示。

表1 靶标布置距离

Tab. 1 Distance between targets

工作臂	动臂	斗杆	铲斗连杆
靶标距离/mm	300	200	100

2 工作装置姿态测量方法

2.1 鞍点检测

角点是与周围的邻点有着明显差异的点,它指示了图像在二维空间内灰度变化剧烈的位置。鞍点是特殊的一类角点,其在 x 方向灰度变化若为极大值,则在 y 方向灰度变化为极小值。设某一理想鞍点坐标为 $(0,0)$,其一定邻域内二维灰度分布如图3所示。

理想情况下鞍点邻域内的数学模型为

$$I(x, y) = \begin{cases} 0 & (xy \leq 0) \\ 255 & (xy > 0) \end{cases} \quad (1)$$

在检测鞍点前通常选用高斯平滑滤波算子对原始图像进行平滑滤波处理,以减小噪声干扰。高斯平滑滤波算子

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

利用高斯平滑滤波算子与源图像函数做卷积进行平滑滤波处理

$$r(x, y) = g(x, y) \otimes I(x, y) \quad (3)$$

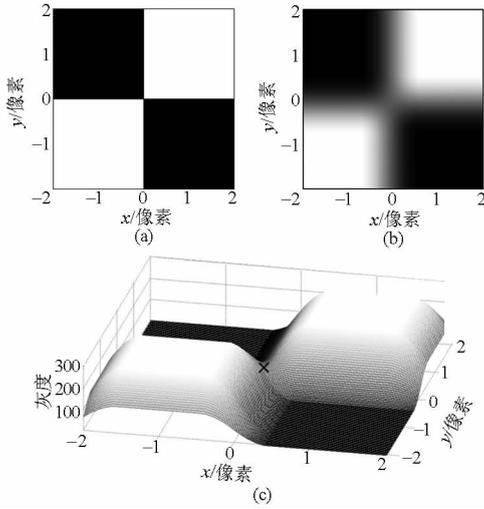


图3 鞍点灰度分布图

Fig. 3 Gray histogram of saddle point

(a) 鞍点二维灰度分布 (b) 高斯平滑滤波后鞍点二维灰度分布
(c) 高斯平滑滤波后鞍点三维灰度分布

$r(x, y)$ 即为平滑滤波后鞍点邻域内的灰度分布函数, 再利用 Hessian 矩阵判断图像 $r(x, y)$ 中的鞍点。Hessian 矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $r_{xx} = \frac{\partial^2 r}{\partial x^2}$ $r_{yy} = \frac{\partial^2 r}{\partial y^2}$ $r_{xy} = \frac{\partial^2 r}{\partial x \partial y}$

Hessian 矩阵的特征值 λ_1 和 λ_2 分别是检测点灰度分布模型的 2 个二阶方向极值, 即最大方向导数和最小方向导数, 当 $\lambda_1 \lambda_2 < 0$ 时, 表示该检测点在某一方向的灰度变化为极大值而在另一方向的灰度变化为极小值, 即为鞍点。求出目标函数的值

$$S = \lambda_1 \lambda_2 = r_{xx} r_{yy} - r_{xy}^2 \quad (5)$$

即可判断检测点是否为鞍点。

2.2 检测点坐标变换

由侧视图像中检测到的鞍点图像坐标系像素坐标无法直接计算出两点连线的实际倾角值, 需通过坐标变换, 将图像坐标系的像素坐标变换到世界坐标系, 进而导出实际倾角。设点 P 为世界坐标系 (WCS) 中的点, 以图 4 的投影方式投影到 COMS 芯片上为点 P' , 将其像素坐标 (r, c) 转换为世界坐标系坐标 (x^w, y^w, z^w) 的转换过程如下:

(1) 图像坐标系与图像平面坐标系

考虑到镜头的畸变效应, 点 P 的图像坐标 (r, c) 变换到图像平面坐标系的畸变坐标 (\tilde{u}, \tilde{v}) 为

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x(c - c_x) \\ S_y(r - c_y) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 S_x, S_y ——比例因子, 面阵相机两个成像单元之间的距离

c_x, c_y ——成像中心位置, 如全图为 640×480 像素时, $c_x = 320, c_y = 240$

畸变坐标可以通过数值方法拟合成原图像坐标, 即

$$\begin{cases} u = \frac{\tilde{u}}{1 + \kappa(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2)} \\ v = \frac{\tilde{v}}{1 + \kappa(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2)} \end{cases} \quad (7)$$

式中 κ ——径向畸变因子, 由镜头决定

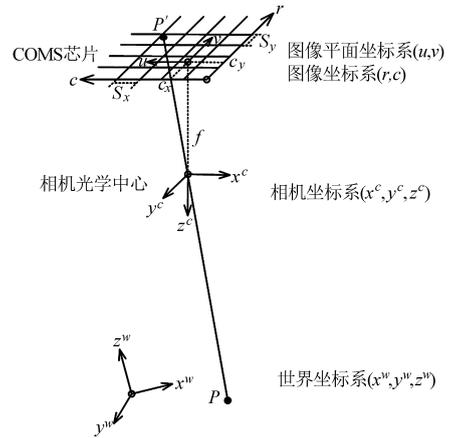


图4 坐标系变换示意图

Fig. 4 Coordinates transformation

(2) 图像平面坐标系与相机坐标系

图像平面坐标系坐标 (u, v) 通过透视投影变换为相机坐标系坐标 (x^c, y^c, z^c)

$$\begin{bmatrix} x^c \\ y^c \end{bmatrix} = \frac{z^c}{f} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 f ——镜头焦距

(3) 相机坐标系与世界坐标系

相机坐标系 (CCS) 坐标可通过旋转变换和平移变换, 即齐次变换到世界坐标系 (WCS) 坐标

$$\begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ z^w \\ 1 \end{bmatrix} = H_c^w \begin{bmatrix} x^c \\ y^c \\ z^c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $H_c^w = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ (10)

式中 H_c^w ——齐次变换矩阵

\mathbf{R} ——旋转矩阵 \mathbf{t} ——平移向量

将 P 点的图像坐标 (r, c) 代入式 (6), 再通过式 (7) ~ (10) 即可得到 P 点的世界坐标系坐标。整个坐标变换过程中, 所需参数中的比例因子、成像中心、畸变因子和镜头焦距 f 由工业相机 CMOS 芯片和工业镜头的物理参数决定, 旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} 通过相机标定获得。

2.3 相机标定

图像处理软件 Halcon 具有强大的视觉算法包，其中包含对相机参数的标定，其标定方法简单，步骤少，标定精度高，具体步骤分为内部参数校核和外部参数标定。

(1) 内部参数校核

为了提高标定精度，需对工业相机和镜头已具有的内部物理参数——比例因子、成像中心、畸变因子 κ 和镜头焦距 f 等进行校核^[20]。

利用 Halcon 软件生成一幅标定板和标定板的描述文件，描述文件以标定板中心为坐标系原点，描述了各圆形标记中心的坐标。将标定板置于相机视场空间内的不同方向和不同倾角并拍摄图像，利用 Halcon 软件相应算法包检测图像中的标定板及标定板中的圆形标记，Halcon 软件利用检测到的图像坐标和描述文件中的实际坐标进行内部参数校核，如图 5 所示。

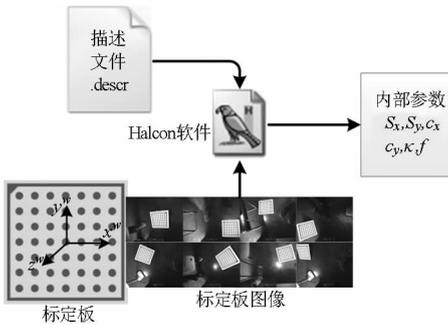


图 5 内部参数校核

Fig. 5 Interior parameters calibration

(2) 外部参数标定

在利用 Halcon 软件的标定法中，世界坐标系的原点为标定板的中心，因此标定板在测量平面中的放置位置即决定了世界坐标系的位置，如图 6 所示。

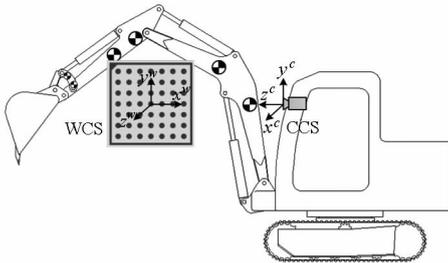


图 6 外部参数标定

Fig. 6 Exterior parameters calibration

测量平面内所有点的 $z^w = 0$ ，挖掘机做回转运动时，测量平面和工业相机跟随同步回转，相应的世界坐标系和相机坐标系亦同步回转，但两坐标系的相对位置不变，即旋转矩阵 R 和平移向量 t 不变。同理(1)，Halcon 软件通过检测图像中的标定板及其圆形标记，并利用描述文件中的实际坐标即可得到

外部参数 R 和 t 。

2.4 姿态角测量

由于挖掘机工作装置图像背景复杂，通常经过一次鞍点检测算法处理后得到的结果会多于所需点数。因此，当检测出图像中所有鞍点并通过坐标变换得到所有鞍点的世界坐标系后，需筛选出相关的鞍点进行姿态角测量。

根据图 2 中靶标的粘贴方式，以两靶标之间固定的几何尺寸为滤波条件，进行相关点筛选。假设在一幅图像中检测到 n 个鞍点，分别计算各点在世界坐标系中的相互距离，得到距离矩阵 L 为

$$L = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ & 0 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ & & 0 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 a_{ij} ——第 i 点与第 j 点之间的距离

L ——对称矩阵, $a_{ii} = 0$

判断每一行 a_{ij} 的大小，若有 $\min \{ |a_{ij} - l_k| \}$ 成立（其中 l_k 为臂 k 对应两靶标之间的距离，参照表 1 和图 2），则第 i 点与第 j 点为臂 k 的相关点。相应的姿态角为

$$\alpha = \arctan \frac{y_i - y_j}{x_i - x_j} \quad (12)$$

2.5 缩小检测区域

挖掘机工作装置运动范围广，因此相机获取的图像视场大、元素多，若每次都对整幅图像执行鞍点检测将耗费大量时间，使测量系统实时性降低。由于鞍点在一个时间间隔内运动范围有限，为了提高图像处理速度，可根据当前检测到的鞍点坐标，预判相机获取下一幅图像时相应鞍点的位置范围，以缩小检测区域。

如图 7 所示，当所有鞍点坐标变换到世界坐标系后，即 $(x_i, y_i, 0)$ （其中 $i = 1, 2, \dots, n$ ），找出最左点 $L(x_l, y_l, 0)$ 、最右点 $R(x_r, y_r, 0)$ 、最上点 $T(x_t, y_t, 0)$ 和最下点 $B(x_b, y_b, 0)$ 。其中

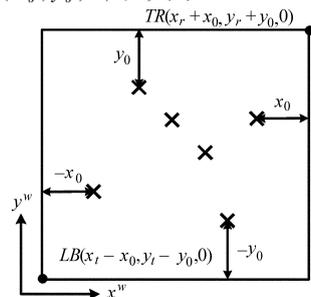


图 7 缩小检测区域

Fig. 7 Reducing detection area

$$\begin{cases} x_l = \min \{x_i\} \\ x_r = \max \{x_i\} \\ y_l = \min \{y_i\} \\ y_b = \max \{y_i\} \end{cases} \quad (13)$$

假设 x_0 为鞍点在时间间隔 t 内横向运动的最大距离, y_0 为鞍点纵向运动的最大距离。通过对 4 个边界点做相应扩展, 即得到下一次矩形检测区域的 2 个对角点坐标: $LB(x_l - x_0, y_b - y_0, 0)$ 、 $TR(x_r + x_0, y_l + y_0, 0)$, 再通过坐标反变换即可得到相应的图像坐标系坐标。当挖掘机有回转运动时, 由于相机坐标系与世界坐标系的相对位置无变化, 因此鞍点的投影关系不变, 仍可采用此方法缩小检测区域。

3 试验验证

3.1 主要试验设备

试验对象为玉柴 YC13-6 型小型液压挖掘机, 试验过程中在该挖掘机上布置有基于传统接触式传感器的工作装置姿态测量系统和基于视觉测量的工作装置姿态测量系统。

基于传感器的测量系统主要采用拉线位移传感器测量各液压缸伸出量, 并通过机构几何关系转换为动臂、斗杆、铲斗的姿态角。视觉测量系统的相机采用维视图像公司的 MV-1300UM 型工业相机: 分辨率 1280×1024 , 帧率 10 fps, USB 接口, 黑白; AFT-0420MP 型工业镜头: 焦距 4 mm, 视场角 77.32° 。计算机主要参数: CPU 为 Intel Pentium B960 (双核), 主频 2.2 GHz, 内存 2 GB。

3.2 试验软件及程序

试验前期采用图像处理软件 Halcon 对相机进行标定, 以获取坐标变换所需的全部参数, 并利用 Halcon 视觉算法包和 Visual Basic 6.0 联合编写图像处理和数据采集软件平台, 算法流程如图 8 所示。

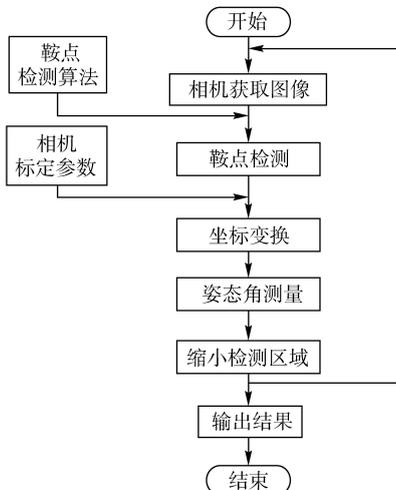


图 8 图像处理软件算法流程

3.3 试验

试验在自然光照条件下进行, 工业相机曝光时间设定为 15 ms, 高斯平滑因子设定为 1.2, 鞍点检测算法中的 Hessian 矩阵特征值阈值设定为 8。工作装置以正常施工速度动作, 其动臂姿态角动态测量结果如图 9 所示。

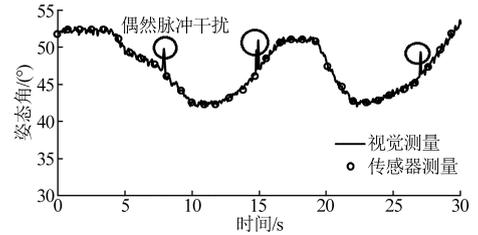


图 9 动臂姿态角测量结果

Fig. 9 Measured value of attitude angle for boom

由图 9 的试验结果看出, 视觉测量系统测量结果与传感器测量系统测量结果基本吻合。鉴于挖掘机工作装置上人工靶标背景图像的复杂性, 鞍点检测算法检测出了非靶标上的多余鞍点, 如图 9 中圆圈处所示的偶然脉冲干扰。为避免此种情况, 通过加入简单的在线实时限幅滤波算法即可。即限定前后两次采集数据之差的幅值为 A , 若实际差值 $a > A$, 舍弃这次数据, 采用前一次数据; 若 $a < A$, 保留这次数据。加入滤波处理后结果如图 10 所示, 滤波结果显示, 偶然的脉冲干扰信号均被抑制, 且不影响测量系统的实时性。

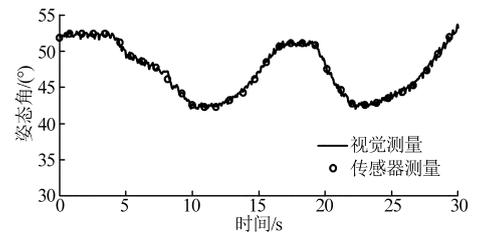


图 10 滤波后动臂姿态角测量结果

Fig. 10 Measured value of attitude angle for boom after filtering

同理, 经过在线实时限幅滤波处理后斗杆姿态角动态测量结果如图 11 所示。铲斗连杆姿态角测量原理与动臂、斗杆相同, 此处不再赘述。

对传感器测量方法与视觉测量方法的结果进行比较, 2 种测量方法的测量偏差如图 12 所示。

其中, 动臂姿态角测量偏差在 $\pm 1^\circ$ 范围内; 由于斗杆距离相机较远 (约 2~3 m), 受试验设备——百万级像素相机及 4 mm 焦距镜头 (低性能相机及镜头) 的限制, 斗杆上的人工靶标投影在图像中的像素数少, 模糊度大, 因此测量误差也大, 姿态角测量偏差在 $\pm 2^\circ$ 范围内。

前 100 帧图像处理时间如图 13 所示, 每帧图像

处理时间均小于 100 ms, 平均耗时为 70.4 ms, 满足挖掘机自动化控制的实时性要求。

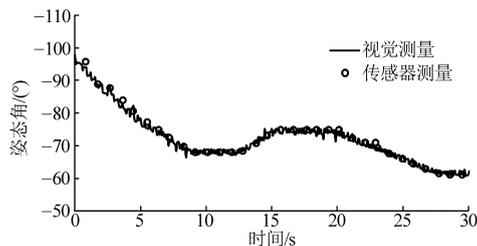


图 11 滤波后斗杆姿态角测量结果

Fig. 11 Measured value of attitude angle for arm after filtering

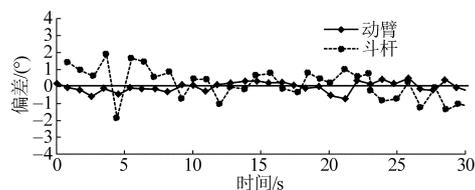


图 12 测量结果偏差

Fig. 12 Deviation of measurement

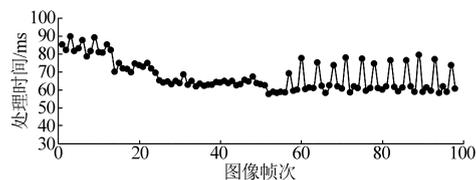


图 13 每帧图像处理时间

Fig. 13 Processing time of each frame

试验结果表明基于视觉测量的挖掘机工作装置姿态测量方法是可行的, 且实时性满足挖掘机自动化控制的要求。

4 结论

(1) 提出了一种基于视觉测量技术的姿态测量方法, 可应用于自身运动幅度和范围较大物体的姿态测量。并以挖掘机为例, 使用该方法非接触地测量其工作装置姿态, 克服了在动作大、易与作业对象碰撞、振动强的工作装置上安装倾角传感器等精密测量件而易损坏的缺陷, 提高了挖掘机测控系统的可靠性, 降低了维护成本。

(2) 针对挖掘机工作装置运动范围大, 相机获取的图像侧视变形程度大且不易捕捉特征的特点, 采用鞍点检测方法快速捕捉粘贴在工作装置上的人工靶标, 并通过鞍点过滤、缩小图像检测范围测出工作装置的姿态, 较之对整个图像大面积分析捕捉轮廓线的方式, 其检测结果准确, 计算步骤少、方法简单, 提高了测量系统的动态响应速度。

(3) 试验表明基于视觉测量的姿态测量方法对挖掘机工作装置姿态的测量具有有效性, 通过与传感器测量方法比较, 视觉测量方法对挖掘机动臂姿态角的动态测量偏差在 $\pm 1^\circ$ 范围内, 对斗杆姿态角的动态测量偏差在 $\pm 2^\circ$ 范围内。

参 考 文 献

- 1 黄桂平, 李广云, 王保丰, 等. 单目视觉测量技术研究[J]. 计量学报, 2004, 25(4): 314-317.
Huang Guiping, Li Guangyun, Wang Baofeng, et al. Evolution for monocular vision measurement[J]. Acta Metrologica Sinica, 2004, 25(4): 314-317. (in Chinese)
- 2 高学海, 徐科军, 张瀚, 等. 基于单目视觉和激光测距仪的位姿测量算法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(8): 1479-1485.
Gao Xuehai, Xu Kejun, Zhang Han, et al. Position-pose measurement algorithm based on single camera and laser range-finder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8): 1479-1485. (in Chinese)
- 3 郝慧敏, 何炳蔚. 机械零件二维几何尺寸和形状检测系统研究与开发[J]. 机械, 2008, 35(10): 70-72.
Yan Huimin, He Bingwei. Mechanical parts and shape of two-dimensional geometry detection system development[J]. Machinery, 2008, 35(10): 70-72. (in Chinese)
- 4 石德乐, 叶培建, 贾阳, 等. 车辆导航立体视觉测量技术特征点匹配方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 134-137.
Shi Dele, Ye Peijian, Jia Yang, et al. Character points matching method on vehicle stereo vision navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 134-137. (in Chinese)
- 5 Fukuda Y, Feng M Q, Shinozuka M. Cost-effective vision-based system for monitoring dynamic response of civil engineering structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2010, 17(8): 918-936.
- 6 Fukuda Y, Feng M Q, Nartita Y, et al. Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(12): 4725-4732.
- 7 陈杉, 周涛, 张效栋, 等. 物体位姿单目视觉传感测量系统[J]. 传感技术学报, 2007, 20(9): 2011-2015.
Chen Shan, Zhou Tao, Zhang Xiaodong, et al. Monocular vision measurement system of the position and attitude of the object[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(9): 2011-2015. (in Chinese)
- 8 朱湘翼. 机械铲式挖掘机机器人化的探讨[J]. 机器人, 1995, 17(5): 316-320.
Zhu Xiangyi. Discussion on the robotization of mechanical mining shovel[J]. Robot, 1995, 17(5): 316-320. (in Chinese)
- 9 何清华, 张大庆, 郝鹏, 等. 液压挖掘机工作装置仿真研究[J]. 系统仿真研究, 2006, 18(3): 735-739.
He Qinghua, Zhang Daqing, Hao Peng, et al. Study on motion simulation of hydraulic excavator's manipulator[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 735-739. (in Chinese)

- 10 Bradley D A, Seward D W. The development, control and operation of an autonomous robotic excavator[J]. Journal of Intelligent and Robotic System, 1998, 21(1):73-97.
- 11 黄宗益, 王康, 杨劲松. 挖掘机工作装置轨迹控制[J]. 建筑机械, 1998(2): 28-41.
- 12 刘心昊, 张大庆, 赵喻明, 等. 一种新型智能挖掘机的设计与实现[J]. 建筑机械, 2010(5): 100-102.
- 13 田光兆, 安秋, 姬长英, 等. 基于立体视觉的智能农业车辆实时运动检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 210-215. Tian Guangzhao, An Qiu, Ji Changying, et al. Real-time motion detection for intelligent agricultural vehicle based on stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 210-215. (in Chinese)
- 14 Seward D W, Pace C, Agate R. Safe and effective navigation of autonomous robots in hazardous environments[J]. Autonomous Robots, 2007, 22(3):223-242.
- 15 Le D H, Kyoung K A, Nguyen B K, et al. Trajectory control of electro-hydraulic excavator using fuzzy self-tuning algorithm with neural network[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(1):149-160.
- 16 Kwon S K, Kim Y S, Lee C D, et al. Development and evaluation of simulator for field robot[C]//Institute of Control, Robotics and Systems. Korea Machine Tool Manufacturers' Association. International Conference on Smart Manufacturing Application, 2008;419-423.
- 17 Plonecki L, Trampczynski W, Cendrowicz J. A concept of digital control system to assist the operator of hydraulic excavators[J]. Automation in Construction, 1998, 7(5): 401-411.
- 18 Ha Q, Santos M, Nguyen Q, et al. Robotic excavation in construction automation[M]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2002, 9(1):20-28.
- 19 罗武胜, 李沛, 李冠章, 等. 基于计算机视觉的飞机尾旋运动姿态测量方法[J]. 电子器件, 2008, 31(3): 992-1002. Luo Wusheng, Li Pei, Li Guanzhang, et al. Method to measure the poses of the aircraft model based on the manmade signs[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2008, 31(3): 992-1002. (in Chinese)
- 20 杨博文, 张丽艳, 叶南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0915001-1-0915001-9. Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan, et al. Camera calibration technique of wide-area vision measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0915001-1-0915001-9. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 281 页)

- 10 Agrawal S, Paknikar K, Bodas D. Development of immunosensor using magnetic nanoparticles and circular microchannels in PDMS[J]. Microelectronic Engineering, 2014, 115: 66-69.
- 11 Foudeh A M, Didar T F, Veres T, et al. Microfluidic designs and techniques using lab-on-a-chip devices for pathogen detection for point-of-care diagnostics[J]. Lab on a Chip, 2012, 12(18): 3249-3266.
- 12 Yang N, Zhang R, Xu P, et al. Latex immunoagglutination assay for rheumatoid factor in a microfluidic device based on light scattering detection[J]. Journal of Investigative Medicine, 2013, 61(4): S25-S25.
- 13 Jiang J, Wang X, Chao R, et al. Smartphone based portable bacteria pre-concentrating microfluidic sensor and impedance sensing system[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 193: 653-659.
- 14 张淑红, 吴清平, 张菊梅, 等. 显色培养基在几种食源性致病菌快速检测中的应用[J]. 微生物学通报, 2006, 33(6): 108-111. Zhang Shuhong, Wu Qingping, Zhang Jumei, et al. Application of chromogenic media in some foodborne pathogenic bacterial rapid detection[J]. Microbiology China, 2006, 33(6): 108-111. (in Chinese)
- 15 Van Reenen A, De Jong A M, Den Toonder J M J, et al. Integrated lab-on-chip biosensing systems based on magnetic particle actuation—a comprehensive review[J]. Lab on a Chip, 2014, 14(12): 1966-1986.
- 16 Yang Y, Kim S, Chae J. Separating and detecting *Escherichia coli* in a microfluidic channel for urinary tract infection applications [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20(4): 819-827.
- 17 Munir A, Zhu Z, Wang J, et al. FEM analysis of magnetic agitation for tagging biomolecules with magnetic nanoparticles in a microfluidic system[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 197: 1-12.
- 18 吴信宇. 磁动力微流控芯片内磁珠动力学行为及其强化混合与分离机理研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- 19 阿伦·J·巴德, 拉里·R·福克纳. 电化学方法原理及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- 20 Varshney M, Li Y. Interdigitated array microelectrodes based impedance biosensors for detection of bacterial cells[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2009, 24(10): 2951-2960.