

• 机械工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201900643



本刊网刊

## 一种基于数字图像的空间测距算法及仪器研发

樊庆文<sup>1</sup>, 李海博<sup>1\*</sup>, 裴宏亮<sup>1</sup>, 王 可<sup>1</sup>, 蒋汶君<sup>2</sup>, 赵志键<sup>1</sup>

(1. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 空天科学与工程学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:**基于数字图像的空间测距技术是非接触测量, 其中汇聚式双目视觉系统具有测量视野大、对相机空间布局没有具体要求的特点, 是目前基于数字图像的空间测距技术的研究热点之一。根据相机小孔成像原理, 利用双目相机采集被测物在空间坐标系的平面图像信息(像素坐标), 标定相机内外部参数以及相机外部参数旋转矩阵, 平移向量, 确定像素坐标系、图像坐标系、相机坐标系和世界坐标系之间的关系, 构建测量对象平面图像像素坐标与世界坐标系中的坐标值之间的关系, 建立基于数字图像的空间测距数学模型, 通过平面图像上的像素坐标计算被测物两点之间的空间距离。按照便携式、低功耗、兼容性的原则, 以RK3288为核心处理器, 选用IMX-179作为图像传感器, 基于Linux系统, 研制基于数字图像的空间测距仪器, 设计仪器的图像采集、数据传输、数据交换、数据处理模块, 具有实时性好、测量效率高、系统结构简单、成本低等优点。实验证明, 基于数字图像的空间测距仪器对10 cm的空间距离, 在被测物位于相机前50~100 cm处的测量误差小于1%。基于该算法的测量仪器在机器人视觉、非接触工程测量、智能制造等领域具有广泛的使用价值。

**关键词:**数字图像处理; 机器视觉; 空间测距; 仪器设计

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2020)03-0201-05

### Instrument Development and Distance Measurement Algorithm Based on Digital Image

FAN Qingwen<sup>1</sup>, LI Haibo<sup>1\*</sup>, PEI Hongliang<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, JIANG Wenjun<sup>2</sup>, ZHAO Zhijian<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 2. School of Aeronautics Sci. and Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Distance measurement based on digital image is non-contact measurement. Among them, the convergent binocular vision system has a large measurement field and has no specific requirements for the camera's spatial layout. It is one of the current research hotspots of distance measurement based on digital image technology. The mathematical model of distance measurement based on digital image is established according to the principles of camera pinhole imaging. A binocular camera is used to acquire planar image information (pixel coordinates) of a measured object in the space coordinate system, and these information are then used to calibrate the internal parameters and external parameters rotation matrix, translation vector. A methodology is presented to determine the relationship among the pixel coordinate system, the image coordinate system, the camera coordinate system and the world coordinate system as well as calculate the spatial distance between two points of a measured object by using their pixel coordinates on the planar image. A distance measurement instrument was developed based on digital images with the goal of optimized portability, power consumption and compatibility. the RK3288 is used as the core processor, and IMX-179 is selected as the image sensor, the Linux system is selected as developed system. This paper discusses the approaches to image acquisition, data transmission, data exchange, and data processing modules of the instrument. The instrument of distance measurement algorithm based on digital image has the ad-

收稿日期:2019-06-27

基金项目:四川省科技厅项目(19ZDYF1402); 四川大学火花库项目(2018SCUH0041)

作者简介:樊庆文(1965—), 男, 研究员, 博士。研究方向:人机工程; 机电工程。E-mail: fanqingwen@scu.edu.cn

\* 通信联系人 E-mail: 496761193@qq.com

网络出版时间:2020-04-17 08:56:16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200416.1138.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

vantages of good real-time performance, high measurement efficiency, simple system structure, and low cost. Experiments showed that the distance measurement instrument show digital images has a measurement error of less than 1% at a distance of 10 cm when the object is located at 50 cm to 100 cm in front of the camera. The measurement instrument based on this algorithm has a wide range of applications in robot vision, non-contact engineering measurement, intelligent manufacturing and other fields.

**Key words:** digital image processing; machine vision; distance measurement; instrument design

机器视觉技术是通过计算模拟人眼的视觉功能,通过对图像传感器获取3维场景得到的2维图像来的研究来计算、感知3维空间内物体的信息。基于数字图像的空间测距技术是机器视觉技术的重要研究领域之一,具有非接触、实时性好、测量效率高、系统结构简单、成本低等优点<sup>[1]</sup>。目前在机器视觉测量领域主要分为主动式测量方法和被动式方法两类<sup>[2]</sup>。利用结构光投影技术是主动式测量方法的主流技术之一。天津大学的叶声华等<sup>[3-4]</sup>首先研制的线结构光扫描设备,并将其应用于汽车车身检测;苏显渝等<sup>[5]</sup>利用结构光技术在静态和动态3维面形测量领域进行了研究。基于该方法的测量设备主要应用于精密测量、3维重建<sup>[6-7]</sup>等领域,具有测量精度较高,但测量设备成本高,多适用于室内近距离精密测量。

基于数字图像的空间测距技术属于被动式测量技术,通过双目视觉系统对空间物体定位和测量。双目视觉系统按照相机安装位置的不同可分为平行式光轴双目视觉系统<sup>[8]</sup>和汇聚式光轴双目视觉系统<sup>[9]</sup>两类。平行式光轴双目视觉系统要求两个相机光心处于同一平面且光轴平行。该方法数学建模简单,但对相机空间布局要求高,否则对测量有较大影响。汇聚式双目视觉系统要求相机形成汇聚视觉系统,对相机空间布局没有具体要求。该系统视野更大,制造成本低,特别适用于空间大尺寸测量。张惠杰<sup>[10]</sup>研发了一款基于双目视觉的嵌入式测距系统,在1 m距离内的测量误差为1%。

作者根据相机小孔成像原理,确定像素坐标系、图像坐标系、相机坐标系和世界坐标系之间的关系,建立汇聚式基于数字图像的空间测距数学模型,标定相机内外部参数,利用双目相机采集被测物在空间坐标系的平面图像信息(像素坐标)计算被测物两点之间的空间距离。按照便携式、低功耗、兼容性的原则,设计仪器的图像采集、数据传输、数据交换、数据处理模块,研制基于数字图像的空间测距仪器,实现通过双目相机测量被测物的空间距离,具有广泛的使用价值。

## 1 基于数字图像的空间测距数学原理

图1为基于数字图像的空间测距模型。

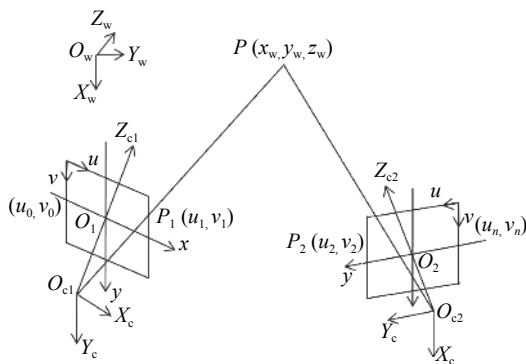


图 1 基于数字图像的空间测距模型

Fig. 1 Distance measurement model based on digital image

$O_{c1}$ 、 $O_{c2}$ 为相机1、2的光心,  $O_{c1}Z_{c1}$ 、 $O_{c2}Z_{c2}$ 为光轴,光轴可以“相离”布置。相机坐标系为 $(O_{ci}-x_{ci}y_{ci}z_{ci})$ ,  $i=1,2$ ;  $O_1$ 、 $O_2$ 为光轴与成像平面的交点;图像坐标系为 $(O_i-x_iy_i)$ ,  $i=1,2$ ;像素坐标系为 $(O_i-u_iv_i)$ ,以图像左上角为原点;世界坐标系为 $(O_w-x_wy_wz_w)$ ,  $i=1,2$ ;世界坐标系的原点可以任意设置。另外,还需要定义一定测量坐标系 $(O_m-x_m, y_m, z_m)$ ,用于数学公式推导和计算。 $P$ 为世界坐标系中的任意一点,  $P_1$ 、 $P_2$ 分别为 $P$ 点在两个成像平面中的像点。相机内部参数可用矩阵 $K$ 表示,包含了相机焦距、像元物理尺寸等信息。相机外部参数可用坐标系间的旋转矩阵 $R$ 和位移向量 $T$ 表示。相机小孔成像的方程如式(1)所示<sup>[11-13]</sup>。

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

相机坐标系分别与测量坐标系的关系分别用旋转矩阵 $R_{m1}$ 、 $R_{m2}$ 和平移向量 $T_{m1}$ 、 $T_{m2}$ 表示。相机坐标系分别与世界坐标系的关系分别用旋转矩阵 $(R_i)$ ,  $i=1,2$ 和一个平移向量 $(T_i)$ ,  $i=1,2$ 来表示。定义相机1的相机坐标系与测量坐标系 $(O_m-x_m, y_m, z_m)$ 重合,因此,相机1在测量坐标系中旋转矩阵和平移向量如式(2)所示。相机2在测量坐标系中的 $R_{m2}$ 、 $T_{m2}$ 与世界坐标系中的 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 的关系可用式(3)表示。

$$R_{m1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{m1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{m2} = R_2 R_1^T, T_{m2} = T_2 - R_2 R_1^T T_1 \quad (3)$$

设某点 $P$ 在测量坐标系中的坐标值为 $P(x_m, y_m, z_m)$ ,  $P$ 点在相机1的像素坐标系中的像素坐标为 $(u_1, v_1)$ , 则在测量坐标系中,  $P$ 点像素坐标与测量坐标的关系如式(4)所示。同理,  $P$ 点在相机2的像素坐标与测量坐标的关系如式(5)所示。

$$z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{m1} & \mathbf{T}_{m1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_2 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{m2} & \mathbf{T}_{m2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_2 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^T & \mathbf{T}_2 - \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^T \mathbf{T}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, 内外部参数 $\mathbf{K}_1$ ,  $\mathbf{K}_2$ ,  $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{R}_2$ ,  $\mathbf{T}_1$ ,  $\mathbf{T}_2$ 均可以通过相机标定确定。

整理式(4)可以得到式(6):

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix} = z_{c1} \cdot \mathbf{R}_{m1}^{-1} \mathbf{K}_1^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} - \mathbf{R}_{m1}^{-1} \mathbf{T}_{m1} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中, 得到式(7):

$$z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_2 \mathbf{R}_{m2} \cdot \left( z_{c1} \cdot \mathbf{K}_1^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} - \mathbf{T}_{m1} \right) + \mathbf{K}_2 \mathbf{T}_{m2} \quad (7)$$

令:

$$\mathbf{S}_1 = \mathbf{K}_2 \mathbf{R}_{m2} \mathbf{K}_1^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_2 = -\mathbf{K}_2 \mathbf{R}_{m2} \mathbf{T}_{m1} + \mathbf{K}_2 \mathbf{T}_{m2},$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix}。$$

并代入式(7)中可得:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{S}_1 & \mathbf{U} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_{c1} \\ z_{c2} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_2 \quad (8)$$

整理式(8)得到式(9):

$$\begin{bmatrix} z_{c1} \\ z_{c2} \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} -\mathbf{S}_1 & \mathbf{U} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} -\mathbf{S}_1 & \mathbf{U} \end{bmatrix}^{-1} \right) \cdot \begin{bmatrix} -\mathbf{S}_1 & \mathbf{U} \end{bmatrix}^T \cdot \mathbf{S}_2 \quad (9)$$

利用式(9), 可以通过 $P$ 在两个像素中的 $u_1$ ,  $v_1$ 、

$u_2$ ,  $v_2$ 值计算 $z_{c1}$ ,  $z_{c2}$ 。将 $z_{c1}$ ,  $z_{c2}$ 的值代入式(4)或(5)中就可解出 $P$ 点在测量坐标系中的坐标值 $(x_m, y_m, z_m)$ 。

同理, 可以计算空间中另一点 $P'$ 点在测量坐标系中的坐标值 $(x'_m, y'_m, z'_m)$ 。

$P, P'$ 两点的空间距离可用式(10)计算。

$$|PP'| = \begin{bmatrix} x_m - x'_m \\ y_m - y'_m \\ z_m - z'_m \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} x_m - x'_m \\ y_m - y'_m \\ z_m - z'_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

## 2 基于数字图像的空间测距仪器研发

### 2.1 基于数字图像的空间测距仪器系统设计

仪器的设计准则如下:

- 1) 仪器能够与其他设备, 包括PC机, 通过串并口、无线局域网、蓝牙等进行数据的通信与交换。
- 2) 方便操作, 便携式、体积小、质量轻, 符合手持操作的要求。
- 3) 仪器的测量精度要能够满足设计的要求。
- 4) 生产成本较低。

仪器的系统设计框图如图2所示, 由图像采集、数据传输、数据处理、系统控制等模型组成。图像采集模块用于采集、读取和存储图像数据, 算法模块用于处理和分析图像数据, 系统控制模块用于控制数据交互、显示以及外部系统的交互。

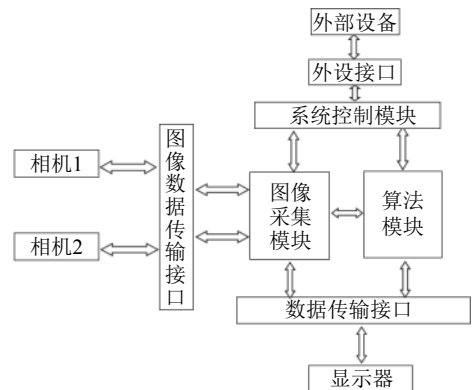


图2 系统设计框图

Fig. 2 Block diagram of system design

### 2.2 仪器硬件设计

图像传感器分为CCD和CMOS两大类, 选用CMOS作为图像传感器, 具有集成性好、成本低。选用Sony公司生产的IMX-179型号的图像传感器, 其像素大小为3 248×2 448。

采用Cortex-A系列的处理器开放性好, 能够支持Linux操作系统, 运算速度快, 能够完成图像的采集、数据处理、显示、外部设备通讯的要求。Tinker Board以Cortex-A17为架构的RK3288处理器为核心。主要的类型和型号如表1所示。

表 1 仪器硬件选择列表

Tab. 1 Table of Instrument hardware selection

名称	类型	型号
图像传感器	CMOS	IMX-179
图像数据传输接口	串口	USB2.0
视频数据传输接口	数字信号	HDMI
显示器	电容式	LCD
处理器	Cortex-A	RK3288

### 2.3 仪器软件设计

按照空间测距仪器体积小、能够独立工作的要求,仪器的软件具有以下功能:

- 1) 人机交互功能。
- 2) 实时拍照,实时显示当前图像。
- 3) 可对图像进行缩放,能够提取被测物坐标信息。
- 4) 通过无线局域网与外部PC机进行通讯。

软件流程图如图3所示。人机交互界面如图4所示,界面由软件菜单操作区、图像显示区、图像操作区3个区域组成。软件菜单操作区具有系统初始化、相机标定、保存等功能,图像显示区用于图像的显示,图像操作区用于获取和显示目标图像的像素坐标。基于数字图像的空间测距仪器如图5所示。

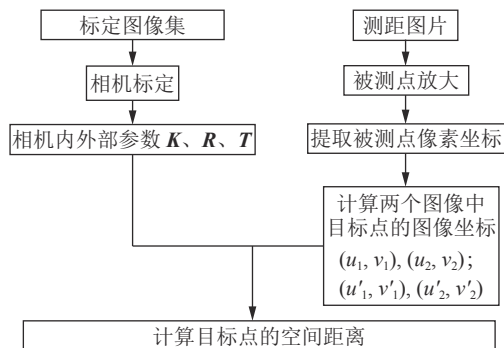


图 3 软件算法流程图

Fig. 3 Software algorithm flow chart



图 4 仪器软件交互界面

Fig. 4 Instrument software interface



图 5 基于数字的空间测距仪器

Fig. 5 Distance measurement instrument based on digital image

### 3 仪器测距实验及结果

测距实验模型如图6所示,仪器的相机的有效焦距为3.8 mm,为了得到清晰的图像,将被测物(选择钢尺)随意放置于仪器前50~100 cm处,拍照时应保证钢尺上10和20 cm的刻度线清晰。

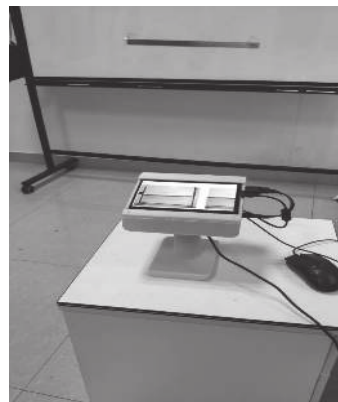


图 6 测距实验

Fig. 6 Distance measurement experimental model

首先采用张正友定标法<sup>[14-15]</sup>标定内外部参数。用相机1、2采集标棋盘格(标定板)图像,形成相机标定图像集(共40张图像),导入MATLAB的Camera Calibration标定工具箱计算相机的内外部参数,结果如下:

$$K_1 = \begin{bmatrix} 2371.3533 & 0 & 1755.9090 \\ 0 & 2372.0339 & 1215.0180 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix},$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 2351.2752 & 0 & 1600.0450 \\ 0 & 2349.8788 & 1190.0884 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix},$$

$$R_{m1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_{m2} = \begin{bmatrix} 0.9998 & -0.0195 & 0.0063 \\ 0.0196 & 0.9999 & 0.0188 \\ -0.0060 & -0.0034 & 0.9998 \end{bmatrix},$$

$$T_{m1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, T_{m2} = \begin{bmatrix} -112.39 & 0.41 & 3.79 \end{bmatrix}^T.$$

对被测物进行拍照,利用仪器的放大功能选择钢尺上10和20 cm刻度线的像素坐标值并计算刻度线之间的空间距离。9组实验的钢尺像素坐标和测量结果如表2所示。实验结果表明,测量的平均误差为0.84%,小于1%满足设计要求。



表2 仪器测量结果

Tab. 2 Measurement results of the instrument

$(u_1, v_1)$	$(u_2, v_2)$	$(u'_1, v'_1)$	$(u'_2, v'_2)$	测距结果/mm
(2 158.0, 1 780.4)	(1 609.1, 1 727.1)	(2 528.5, 1 772.4)	(1 974.0, 1 712.4)	99.1
(1 755.1, 1 991.5)	(1 241.0, 1 939.6)	(2 088.5, 1 988.7)	(1 574.5, 1 929.7)	100.7
(2 027.3, 1 129.4)	(1 451.3, 1 074.2)	(2 337.4, 1 119.4)	(1 794.8, 1 061.6)	99.9
(1 039.1, 1 888.3)	(476.5, 1 857.5)	(1 355.9, 1 870.8)	(832.088 2, 1 832.7)	98.3
(1 995.0, 1 947.0)	(1 495.5, 1 892.4)	(2 321.8, 1 944.0)	(1 815.8, 1 882.5)	100.4
(1 971.5, 1 945.7)	(1 478.0, 1 892.9)	(2 277.0, 1 948.2)	(1 762.0, 1 886.5)	100.6
(1 829.0, 1 963.8)	(1 302.6, 1 912.4)	(2 175.9, 1 968.8)	(1 631.1, 1 910.4)	101.7
(1 849.0, 1 231.8)	(1 284.0, 1 179.1)	(2 067.8, 1 226.8)	(1 550.4, 1 174.8)	99.3
(1 740.6, 1 226.8)	(1 184.0, 1 177.3)	(2 100.0, 1 219.1)	(1 557.0, 1 164.7)	99.1

## 4 结论

在建立基于汇聚式数字图像空间测距数学模型的基础上,研制基于数字图像的空间测距仪器。采用张正友标定法标定相机的内外部参数,确定像素坐标系、图像坐标系、相机坐标系和世界坐标系之间的关系,利用双目相机采集被测物在空间坐标系的平面图像信息(像素坐标),通过平面图像上的像素坐标计算被测物两点之间的空间距离。

实验证明,基于数字图像的空间测距仪器的测量误差小于1%。若采用像素更高的相机,进一步提高相机的标定精度以及特征点的提取精度,可以大幅度测量精度。基于数字图像的空间测距方法以及在其基础上设计的测量仪在机器人视觉、非接触工程测量、智能制造等领域具有广泛的使用价值。

### 参考文献:

- [1] 郝继贵.视觉测量原理与方法[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [2] Zheng Taixiong,Huang Shuai,Li Yongfu,et al.Key techniques for vision based 3D reconstruction:A review[J].*Acta Automatica Sinica*,2019(7):1-22.[郑太雄,黄帅,李永福,等.基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J].*自动化学报*,2019(7):1-22.]
- [3] Liu Changjie,Zhu Jigui,Yang Xueyou,et al.Autocar-body on-line laser inspection system with machine vision[J].*Chinese Journal of Scientific Instrument*,2004,2(Supp1):670-672.[刘常杰,邹继贵,杨学友,等.汽车白车身在线激光视觉检测站[J].*仪器仪表学报*,2004,2(增刊1):670-672.]
- [4] Zhu Jigui,Yang Xueyou,Ye Shenghua.Body three-dimensional visual detection and latest progress[J].*Automobile Technology & Material*,2002(3):22-26.[郝继贵,杨学友,叶声华.车身三维尺寸视觉检测及其最新进展[J].*汽车工艺与材料*,2002(3):22-26.]
- [5] Su Xianyu,Zhang Qican,Chen Wenjing.Three-dimensional imaging based on structured illumination[J].*Chinese Journal of Lasers*,2014,41(2):9-18.[苏显渝,张启灿,陈文静.结构

光三维成像技术[J].*中国激光*,2014,41(2):9-18.]

- [6] Li wei.The study on 3D measurement of the outer diameter of train's wheel set[D].Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2007.[李伟.基于线结构光的火车轮对外径三维检测技术研究[D].武汉:华中科技大学,2007.]
- [7] Chen Tianfei.Research on calibration techniques of line structured light[D].Dalian:Dalian Maritime University,2013.[陈天飞.线结构光表面三维测量系统的标定技术研究[D].大连:大连海事大学,2013.]
- [8] Zou X,Zou H,Lu J.Virtual manipulator-based binocular stereo vision positioning system and errors modelling[J].*Machine Vision and Applications*,2012,23(1):43-63.
- [9] Zhang Qiang,Dong Yu,LI Haibin,et al.Under watercurve constraint model based on non-parallel binocular vision[J].*Acta Optica Sinica*,2016,36(3):141-147.[张强,董玉,李海滨,等.非平行双目视觉系统水下成像的极线约束模型[J].*光学学报*,2016,36(3):141-147.]
- [10] Zhang Huijie.The research of embedded measurement system based on binocular vision[D].Fuzhou:Fuzhou University,2013.[张惠杰.基于双目视觉的嵌入式测距系统的研究[D].福州:福州大学,2013.]
- [11] Faugeras O.Three-dimensional computer vision:A geometric viewpoint[M].Cambridge:The MIT Press.1993.
- [12] Fan Qingwen,Wang Xiaopeng,Wang Dehui,et al.A method for linear distance measurement based on reference plane[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2013,45(6):157-161.[樊庆文,王骁鹏,王德麾,等.一种基于参考平面的直线距离测量方法[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2013,45(6):157-161.]
- [13] David A F.计算机视觉:一种现代方法[M].王宏,译.北京:电子工业出版社,2012.
- [14] Zhang Z Y.A Flexible new technique for camera calibration[J].*IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,2000,22(11):1330-1334.
- [15] Zhang Z Y.Camera calibration with one-dimensional objects[J].*IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,2004,26(7):890-899.

(编辑 黄小川)

引用格式: Fan Qingwen,Li Haibo,Pei Hongliang,et al.Instrument development and distance measurement algorithm based on digital imag[J].*Advanced Engineering Sciences*,2020,52(3):201-205.[樊庆文,李海博,裴宏亮,等.一种基于数字图像的空间测距算法及仪器研发[J].*工程科学与技术*,2020,52(3):201-205.]