

文章编号 1004-924X(2012)01-0124-07

## 基于虚拟立体视觉的气液两相流三维测量系统的标定

薛 婷\*, 曹兆峰, 金俞鑫

- (1. 天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072;
2. 天津市过程检测与控制重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**研究了基于虚拟立体视觉的气液两相流三维测量系统的标定技术。首先,基于单台高速摄像机和两组反射镜组构建虚拟立体视觉测量系统,建立高速摄像机透视投影变换模型以及虚拟立体视觉三维测量模型,对虚拟立体视觉系统中摄像机及虚拟立体视觉传感器进行标定。用靶标基准球模拟气泡在水中的分布,以其空间距离作为测量评价指标,比较了不同标定方法对三维重建精度的影响。实验结果表明,将标定参照物置于水箱内,并且分别对左、右虚拟摄像机及传感器进行标定,三维重建精度最高,测量空间距离绝对误差优于0.13 mm,相对误差优于0.49%。实验认为,对基于虚拟立体视觉的气液两相流三维测量系统进行标定时,必须充分考虑折光分光光路以及管壁折射对三维重建所带来的影响。

**关键词:**气液两相流;三维测量系统;虚拟立体视觉;标定;误差分析

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122001.0124

## Calibration of three-dimensional measurement system for gas-liquid two phase flow based on virtual stereo vision

XUE Ting\*, CAO Zhao-feng, JIN Yu-xin

- (1. College of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control, Tianjin 300072, China)

\* Corresponding author, E-mail: xueting@tju.edu.cn

**Abstract:** A calibration technique for the three-dimensional measurement system of gas-liquid two phase flow based on a virtual stereo vision was researched. Firstly, a single high-speed camera and two groups of mirrors were used to construct the virtual stereo vision system and to establish a perspective transformation model for the high-speed camera and a virtual stereo vision three-dimensional measurement model. Then, the camera and the virtual stereo vision sensor in the virtual stereo vision system were calibrated. Finally, the distribution of the bubble in the water was simulated by a target standard ball and its space distance was regard as the measurement standards. Furthermore, the impacts of different calibration methods on the accuracy of three-dimensional reconstruction were compared. Experimental results indicate that the accuracy of the three-dimensional reconstruction is the best when the calibration reference is placed in a water tank and the left and right virtual cameras and

收稿日期:2011-08-08;修订日期:2011-09-28.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 60902084, 61172120);教育部博士点新教师基金资助项目(No. 200800561059);精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金资助项目(No. PIL0902);天津大学自主创新基金资助项目

sensors are calibrated, respectively. The absolute error and the relative error of the measurement distance are better than 0.13 mm and 0.49%, respectively. It suggests that the impact of the light splitting path and tube wall refraction on the calibration accuracy should be taken full account of in the calibration of the gas-liquid two-phase flow three-dimensional measurement system based on the virtual stereo vision system.

**Key words:** gas-liquid two phase flow; three-dimensional measurement system; virtual stereo vision; calibration; error analysis

## 1 引 言

气液两相流是一种典型的流动现象,随着科学技术的迅速发展,气液两相流在诸如机械制冷、石油工程、化工、水利、核反应等工程中的应用日益广泛,而分散相和连续相之间的相互作用以及气泡运动形态在很大程度上决定了气液两相流的工程应用效果<sup>[1-2]</sup>。为了进一步研究气液两相流的运动机理,更精确地描述气液两相流的运动特性,并由此指导生产实践,对于气液两相流特征参数的三维测量具有重要的意义。

目前,基于高速摄影的气液两相流三维测量方法,由于其非接触、瞬时、全场等优点成为研究的前沿和热点<sup>[3-5]</sup>。其中,双目立体视觉是应用最多的一种方法,它采用两台高速摄像机,模拟人体双眼的处理方式,对气液两相流场进行三维测量。但是,双目传感器中两台摄像机之间的非严格同步极易造成测量误差。本文基于单台高速摄像机和两组反射镜组建立虚拟立体视觉测量系统,对气液两相流中气泡形态以及运动特性等进行研究。对于气液两相流这种特殊的测量对象,虚拟立体视觉测量系统不要求两路图像采集信号严格同步,因此,降低了对摄像机及同步控制器等实验设备的性能要求,同时也降低了实验系统成本及实现的复杂程度。

标定是三维重建的关键技术之一,标定精度直接影响气液两相流参数三维重建的精度。针对基于虚拟立体视觉的气液两相流三维测量系统,是否需要考虑折光分光光路对摄像机标定及三维重建带来的影响;另外,针对气液两相流这种特殊的动态测量对象,和一般视觉测量对象不同,气泡被管壁及液相所包围,传感器与测量对象之间的介质不单一且非均匀,是否综合管壁等光折射所带来的影响,需要针对基于虚拟立体视觉的气液

两相流三维测量系统标定技术进行深入研究。

本文基于单台高速摄像机和两组反射镜组,提出构建虚拟立体视觉气液两相流参数三维测量平台。建立高速摄像机透视投影变换数学模型以及虚拟立体视觉三维测量模型,对虚拟立体视觉系统中摄像机及虚拟立体视觉传感器进行标定。以靶标基准球模拟气泡在水中的分布,以其空间距离作为测量评价指标,通过实验对不同标定方法进行组合验证,比较不同标定方法对三维重建精度的影响。

## 2 基于虚拟立体视觉的气液两相流三维测量原理

采用单台高速摄像机和两组对称的反射镜构建虚拟双目立体视觉测量系统,高速摄像机在平面镜组中的虚像在系统中充当了“双目”的角色,左、右像平面可以分别获得气液两相流在两个不同方向上的二维信息实现对气液两相流特征参数的三维重建。

虚拟立体视觉测量原理如图 1 所示。在气液两相流特征参数三维测量中,有效视场内气泡的

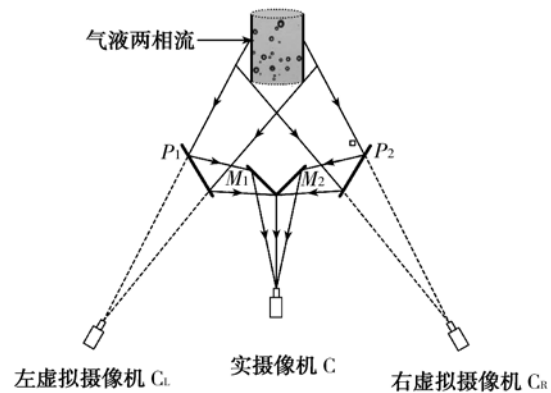


图 1 虚拟立体视觉测量原理

Fig. 1 Measuring principle of the virtual stereo vision

被测特征通过两组反射镜组后,映射到实体摄像机 C 像平面虚拟的左、右像面,形成一定的虚拟立体视差,利用空间点在左、右像面上透视成像点的坐标求取空间点的三维测量坐标,实现类双目立体视觉传感器的功能。

针对气液两相流这种特殊的动态测量对象,基于虚拟立体视觉的三维测量系统与传统的双目立体视觉不同,其不要求两台高速摄像机之间严格同步,而且成本低、结构灵活、测量速度快,可实现视场内所有特征点的三维测量。

### 3 虚拟立体视觉数学模型

#### 3.1 摄像机透视投影变换模型

摄像机透视变换模型如图 2 所示。 $P_w$  为任一空间点,以  $O_n$  为摄像机像平面  $\pi_i$  的中点,  $X_n$  轴为图像列增加的方向,  $Y_n$  轴为图像行增加的方向建立笛卡儿图像直角坐标系  $O_n-X_n Y_n$ , 像平面上与  $P_w$  对应的像点  $P_n$  的坐标为  $(X_n, Y_n)$ ,  $O_c-x_c y_c z_c$  为摄像机坐标系,原点  $O_c$  为投影中心,  $z_c$  轴与摄像机的光轴重合,  $x_c$  轴、 $y_c$  轴分别平行于  $X_n$  轴和  $Y_n$  轴。设空间点  $P_w$  在摄像机坐标系  $O_c-x_c y_c z_c$  下的坐标为  $(x_c, y_c, z_c)$ , 则空间任一点在图像上的成像位置可以用针孔模型近似表示,即任何空间点  $P_w$  在图像上的投影位置  $P_n$  为投影中心  $O_c$  与  $P_w$  点的连线  $O_c P_w$  与图像平面的交点,这种关系称为中心射影或透视投影。

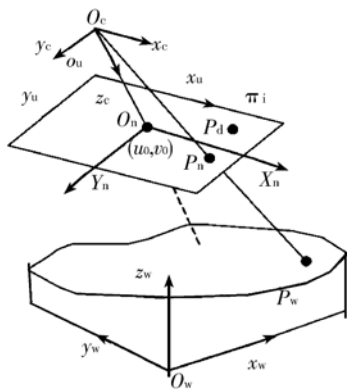


图 2 摄像机透视投影变换模型

Fig. 2 Camera perspective transformation model

由比例关系可建立透视变换关系为

$$\begin{cases} X_u = f \frac{x_c}{z_c} \\ Y_u = f \frac{y_c}{z_c} \\ z_c = f \end{cases} \quad (1)$$

由于实际的镜头并不是理想的透镜成像,而是带有不同程度的畸变,理论上存在径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变。设  $(x, y)$  是实际像点  $P_d$  的图像坐标,  $\delta_x$  与  $\delta_y$  是非线性畸变值,它与图像点在图像中的位置有关,可以用公式表达

$$\delta_x(x, y) = k_1 x(x^2 + y^2) + [p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy] + s_1(x^2 + y^2), \quad (2)$$

$$\delta_y(x, y) = k_1 y(x^2 + y^2) + [p_2(3x^2 + y^2) + 2p_1 xy] + s_2(x^2 + y^2), \quad (3)$$

其中,  $\delta_x$  与  $\delta_y$  的第一项称为径向畸变,第二项为离心畸变,第三项为薄棱镜畸变,式中  $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$  为需要标定的参数。

#### 3.2 虚拟双目立体视觉测量模型

虚拟双目立体视觉三维测量模型如图 3 所示。设左虚拟摄像机坐标系为  $O-x_1 y_1 z_1$ , 位于世界坐标系的原点,且无旋转,其像平面坐标系为  $O_l-X_l Y_l$ , 有效焦距为  $f_l$ ; 右虚拟摄像机的坐标系为  $O_r-x_r y_r z_r$ , 其像平面坐标系为  $O_r-X_r Y_r$ , 有效焦距为  $f_r$ 。

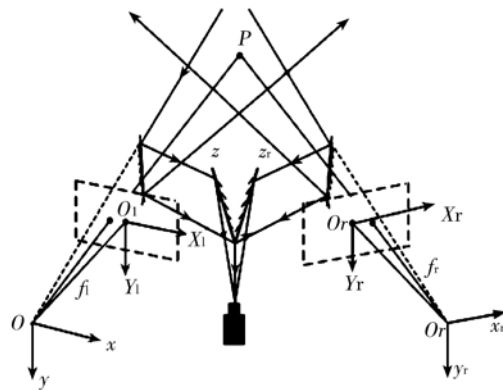


图 3 虚拟双目立体视觉数学模型

Fig. 3 Virtual binocular stereo vision model

由摄像机的透视投影变换模型,可知

$$s_l \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_l & 0 & 0 \\ 0 & f_l & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$s_r \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r & 0 & 0 \\ 0 & f_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中,  $[X_l, Y_l, 1]^T$  和  $[X_r, Y_r, 1]^T$  分别为空间点在相应坐标系下的三维坐标,  $s_l, s_r$  为比例因子。

通过空间转换矩阵  $M_{lr}$  表示为:

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = M_{lr} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ .  $\mathbf{R}, \mathbf{T}$  分别为左、

右虚拟摄像机坐标系之间的旋转矩阵和原点间的平移向量,也是立体视觉三维测量中需要标定的参数。

由式(4)~(6)可知对于  $O-xyz$  坐标中的空间点,两虚拟摄像机之间坐标系的对应关系为

$$s_r \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r r_1 & f_r r_2 & f_r r_3 & f_r t_x \\ f_r r_4 & f_r r_5 & f_r r_6 & f_r t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{zX_l}{f} \\ \frac{zY_l}{f} \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

因此,虚拟立体视觉三维测量模型可以表示为

$$\begin{cases} x = \frac{zX_l}{f} \\ y = \frac{zY_l}{f} \\ z = \frac{f_l(f_l r - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + r_9 f_l) - f_r(r_1 X_l + r_2 Y_l + r_3 f_l)} \end{cases} \quad (8)$$

因此,已知焦距  $f_l, f_r$  和空间点在左右虚拟摄像机坐标系中的图像坐标,只要求出旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矢量  $\mathbf{T}$ ,就可以对被测特征进行三维重建。

### 4 测量实验与结果

在气液两相流特征参数三维测量实验中,实验装置主要由虚拟立体视觉测量平台和气泡发生器组成,其中气泡发生器由二维透明玻璃水箱和空气压缩机组成。气液两相流中的液相为自来水,气相为压缩空气,由气泡发生器产生气体后射入充满自来水的有机玻璃长方体水箱中。反射镜组  $M_1, M_2$  垂直,反射镜组  $M_1, M_2$  和  $P_1, P_2$  间的

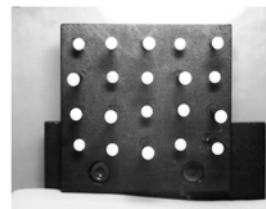
夹角为  $17.5^\circ$ 。实验所用高速摄像机为瑞士 Weinberger 公司的 MiniVisE2 型号高速摄像机,其最大分辨率为  $1280 * 1024 @ 500 \text{ fps}$ ,镜头为 Nikkor 35 mm 定焦镜头。

#### 4.1 摄像机标定及实验

摄像机标定精度直接影响着气泡形态及运动参数三维重建的精度。摄像机标定是指建立摄像机图像像素位置与场景位置点之间的关系,其途径是根据已知特征点的图像坐标和世界坐标求解摄像机的模型参数。有关摄像机标定技术,学者们进行了大量研究<sup>[6-8]</sup>。本文在 Tsai 两步法<sup>[9]</sup>基础上进行优化,求取摄像机标定参数。标定参照物采用三维球形靶标,其优点主要是靶标在各个方向上对称,不会导致透视投影变换中心不一致。为确定虚拟立体视觉三维测量平台中折光分光光路、管壁等光折射的影响以及程度,设计摄像机标定过程为:

(a) 将靶标分别置于水箱外部和内部,对实体摄像机进行标定,由于水箱内、外采集的靶标图像人眼区别不大,限于篇幅,仅列出水箱外采集靶标图像,如图 4(a)所示。

(b) 将靶标分别置于水箱外部和内部,对左、右虚拟摄像机进行标定,以水箱外采集靶标图像为例,如图 4(b)、(c)所示。



(a) 实体摄像机标定图像  
(a) Real camera calibration image



(b) 左虚拟摄像机 (b) Left virtual camera  
(c) 右虚拟摄像机 (c) Right virtual camera

图 4 摄像机标定图像(以水箱外为例)

Fig. 4 Camera calibration image (outside water tank)

由摄像机透视投影模型及标定原理,摄像机需要标定的参数为:有效焦距  $f$ ,像平面中心坐标  $C_x$ 、 $C_y$ ,图像尺度因子  $S_x$ 、一阶径向畸变系数  $k_1$ 、

$k_2$ ,离心畸变系数  $p_1$ 、 $p_2$ 。各组分类情况下的标定结果如表 1 所示。

表 1 摄像机内部参数标定结果

Tab. 1 Calibration results of camera's inner parameters

		$f/\text{mm}$	$C_x/\text{pixel}$	$C_y/\text{pixel}$	$S_x$	$k_1$	$k_2$	$p_1$	$p_2$
水	实摄像机	38.987 3	479.827 9	359.941 7	0.998 5	-0.000 6	0.000 025	-0.000 228	-0.000 125
箱	右虚拟摄像机	36.382 3	458.132 8	360.071 3	0.986 1	0.001 1	-0.000 009	-0.000 026	-0.001 837
内	左虚拟摄像机	37.141 5	478.353 7	361.256 7	1.012 1	-0.000 4	0.000 007	0.000 116	-0.000 496
水	实摄像机	37.217 4	479.977 8	360.007 8	1.000 0	-0.000 8	0.000 033	-0.000 042	0.000 015
箱	右虚拟摄像机	35.739 0	473.643 5	362.946 4	0.986 6	0.000 8	-0.000 009	-0.000 111	-0.001 276
外	左虚拟摄像机	36.833 5	479.988 8	360.008 8	1.008 1	-0.000 1	0.000 003	0.000 040	-0.000 161

#### 4.2 虚拟立体视觉传感器标定及实验

立体视觉传感器标定是计算机视觉实现三维重建的基础与前提<sup>[10]</sup>。虚拟立体视觉传感器的标定模型由两个虚拟摄像机相互间的空间姿态(旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{T}$ )决定,而旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{T}$  的求解则采用光线交汇定向原理,借助标定靶标上的特征点实现。标定方法是由 9 个标定特征点建立包含两个虚拟摄像机空间位姿关系的非线性方程组,旋转矩阵满足正交约束关系,解出旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和不含刻度的平移向量  $\mathbf{T}$ ,由靶标上多个标定特征点之间的基准距离给出刻度因子,得到包含刻度的平移向量  $\mathbf{T}$ ,从而得到完整的虚拟立体视觉传感器标定参数。

将虚拟立体视觉传感器标定靶标分别置于水箱外、水箱内进行标定。图 5 所示为置于水箱外的传感器标定图像,其中左半像面、右半像面的图像分别对应于左虚拟、右虚拟摄像机采集的图像。

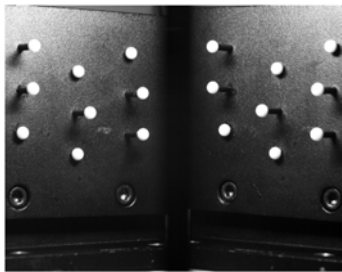


图 5 传感器标定图像(以水箱外为例)

Fig. 5 Sensor calibration image (outside water tank)

利用水箱内实体摄像机的标定结果,以及水箱内传感器图像标定虚拟立体视觉传感器,旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{T}$  如下所示

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.180 1 & 0.013 6 & -0.983 6 \\ -0.025 4 & 0.999 6 & 0.009 1 \\ 0.983 3 & 0.023 4 & 0.180 4 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = [478.806 8 \quad -3.158 6 \quad 410.248]^T.$$

利用水箱内左、右虚拟摄像机标定结果,以及水箱内传感器图像标定虚拟立体视觉传感器,旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{T}$  如下所示

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.359 5 & 0.021 8 & -0.932 9 \\ -0.023 3 & 0.999 6 & 0.014 4 \\ 0.932 8 & 0.016 6 & 0.359 9 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = [421.163 2 \quad -5.825 8 \quad 310.877 3]^T.$$

利用水箱外左、右虚拟摄像机标定结果,以及水箱外传感器图像标定虚拟立体视觉传感器,旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{T}$  如下所示

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.415 2 & 0.022 9 & -0.909 4 \\ -0.022 0 & 0.999 6 & 0.015 1 \\ 0.909 4 & 0.013 8 & 0.415 6 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = [399.949 2 \quad -5.490 0 \quad 284.427 6]^T.$$

利用水箱外实体摄像机的标定结果,以及水箱外传感器图像标定虚拟立体视觉传感器,旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{T}$  如下所示

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.146 1 & 0.018 6 & -0.989 1 \\ -0.025 2 & 0.999 6 & 0.015 1 \\ 0.988 9 & 0.022 7 & 0.146 5 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = [457.154 5 \quad -6.023 1 \quad 405.285 7]^T.$$

以另一位置靶标基准球模拟气泡在水中的分布,验证测量精度。由于传感器的测量坐标系和靶标坐标系无关,以基准球空间距离作为测量评价指标,由虚拟立体视觉测量模型计算得到相应

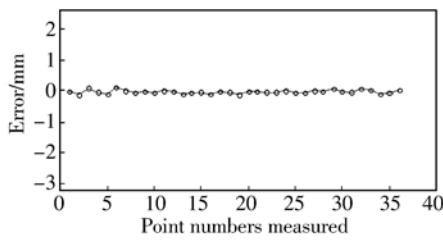
基准球空间距离,与对应距离真值比较,得到测量偏差。基准球空间距离真值由三坐标测量机测量得到。不同标定方法下的空间距离误差如图 6 所示,其中横轴为任意两个基准球空间距离的测量点数(即测量个数),纵轴为空间距离测量绝对误差,单位为 mm,具体如下:

标定方法 a:由水箱内左、右虚拟摄像机及虚拟立体视觉传感器标定结果,计算虚拟立体视觉三维测量误差,如图 6(a)所示;

标定方法 b:由水箱内实体摄像机及虚拟立体视觉传感器标定结果,计算虚拟立体视觉三维测量误差,如图 6(b)所示;

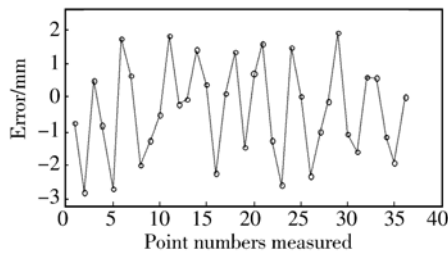
标定方法 c:由水箱外左、右虚拟摄像机及虚拟立体视觉传感器标定结果,计算虚拟立体视觉三维测量误差,如图 6(c)所示;

标定方法 d:由水箱外实体摄像机及虚拟立体视觉传感器标定结果,计算虚拟立体视觉三维测量误差,如图 6(d)所示。



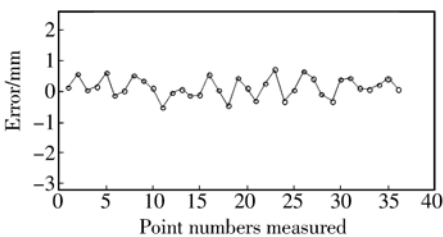
(a) 标定方法 a 下的测量误差

(a) Measurement error of calibration method a



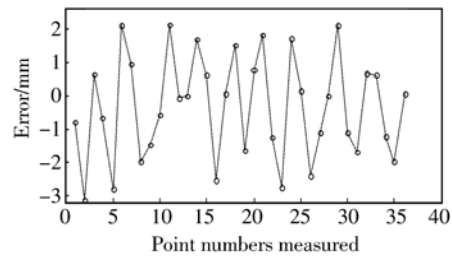
(b) 标定方法 b 下的测量误差

(b) Measurement error of calibration method b



(c) 标定方法 c 下的测量误差

(c) Measurement error of calibration method c



(d) 标定方法 d 下的测量误差

(d) Measurement error of calibration method d

图 6 空间距离测量误差

Fig. 6 Measurement errors of spatial distance

不同标定方法下测量空间距离的绝对误差平均值、最大值以及最大相对误差如表 2 所示。

表 2 不同标定方法下测量误差比较

Tab. 2 Measurement error of different calibration method

标定方法	a	b	c	d
绝对误差 最大值/mm	0.131 7	2.785 3	0.701 7	3.101 9
绝对误差 平均值/mm	-0.031 1	-0.364 0	0.128 0	-0.318 9
相对误差 最大值/%	0.49	7.94	2.18	8.89

从图 6 和表 2 中可知:(1)考虑虚拟立体视觉测量平台中折光分光光路影响,分别对左、右虚拟摄像机标定,相较仅标定实体摄像机,可以大幅提高三维测量精度;(2)考虑气液两相流管壁光折射等的影响,在水箱内标定左、右虚拟摄像机以及虚拟立体视觉传感器,可以大幅提高三维测量精度;(3)综合虚拟立体视觉测量平台中折反光路系统,以及管壁光折射等影响,将标定参照物置于水箱内,分别对左、右虚拟摄像机及传感器进行标定,三维重建精度最高,测量空间距离绝对误差优于 0.13 mm,相对误差优于 0.49%。

## 5 结 论

针对基于虚拟立体视觉的气液两相流三维测量系统中标定技术进行了深入研究。基于单台高速摄像机和两组反射镜组,提出了构建虚拟立体视觉测量系统,该系统不要求两台高速摄像机

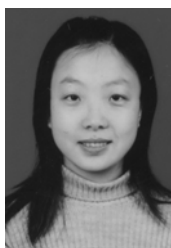
严格同步,具有良好的对称性、标定简单、成本低、结构灵活、测量速度快的优点。建立了高速摄像机透视投影变换模型以及虚拟立体视觉三维测量模型,对虚拟立体视觉系统中摄像机及虚拟立体视觉传感器进行了详尽的标定实验。实验结果表

明,在基于虚拟立体视觉的气液两相流三维测量系统标定中,必须充分考虑折光分光光路以及管壁折射对三维重建带来的影响,此时测量空间距离绝对误差优于 0.13 mm,相对误差优于 0.49%,三维重建精度最高。

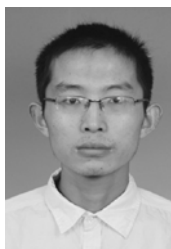
#### 参考文献:

- [1] CROWE C T. *Multiphase Flow Handbook* [M]. Boca Ra-ton: CRC Press, 2006.
- [2] ZHANG L J, LI T, YING W Y, *et al.*. Rising and descending bubble size distributions in gas-liquid and gas-liquid-solid slurry bubble column reactor [J]. *Chem Eng Sci*, 2008, 86(10): 1143-1154.
- [3] VENKATESAN M, SARIT K D, BALAKRISHNAN A R. Effect of diameter on two-phase pressure drop in narrow tubes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, 35: 531-541.
- [4] VISSCHER J, HELGE I A, MUSTAFA B, *et al.*. A new set-up for PIV measurements in rotating turbulent duct flows [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2011, 22: 71-80.
- [5] ELCOCK D, HONKANEN M, KUO C, *et al.*. Bubble dynamics and interactions with a pair of micro pillars in tandem[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(5): 440-452.
- [6] 周富强, 郝继贵, 杨学友. CCD 摄像机快速标定技术 [J]. *光学 精密工程*, 2002, 8(1): 96-100.
- ZHOU F Q, ZHU J G, YANG X Y. A high speed CCD camera calibration technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 8(1): 96-100. (in Chinese)
- [7] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] 黄凤山, 钱惠芬. 三坐标测量机驱动的摄像机标定 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(4): 952-957.
- HUANG F S, QIAN H F. Camera calibration driven by three-coordinate measuring machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 952-957. (in Chinese)
- [9] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [10] XUE T, WU B, ZHU J G, *et al.*. Complete calibration of a structure-uniform stereovision sensor with free-position planar pattern [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 135: 185-191.

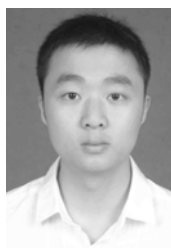
#### 作者简介:



薛 婷(1977—),女,山西太谷人,博士,副教授,硕士生导师,分别于 1998 年、2004 年、2007 年在天津大学获得学士、硕士、博士学位,主要从事多相流测试、视觉检测及其应用等方面的研究。E-mail: xueting@tju.edu.cn



曹兆峰(1987—),男,山东邹城人,硕士研究生,2010 年在中国石油大学获得学士学位,主要从事多相流测量、图像处理等方面的研究。E-mail: czf336@tju.edu.cn



金俞鑫(1985—),男,湖南怀化人,硕士研究生,2009 年在厦门大学获得学士学位,主要从事多相流测量、视觉检测等方面的研究。E-mail: lucifernn@sina.com