

# 基于双目视觉的室内定位标定新方法

邢亚斌<sup>1,2</sup>, 王振岭<sup>1,2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081;

2. 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室, 石家庄 050081)

**摘要:** 随着全球导航卫星系统的发展, 位置服务已经逐渐渗透到人们日常生活以及工作之中, 并成为必不可少的一部分, 越来越多的人开始习惯使用位置服务, 并对其产生依赖, 并且, 室内导航定位应用需求日益增加; 目前, 基于多目视觉原理的室内定位导航技术已经成为众多技术领域的研究热点, 且逐步成熟; 室内导航定位中, 为获取目标的准确位置, 相机的标定过程是重中之重, 标定精度对最终定位精度有着决定性作用; 然而, 当有气液界面存在时, 由于不同介质折射率不同, 视线在传播过程中将发生偏折, 现有的线性标定技术不再适用, 并成为制约室内特殊场景定位(如水下机器人作业)的主要技术障碍; 针对有气液界面的条件提出了一种新的标定方法, 对界面位置进行精确定位, 并修正了线性针孔模型, 能够有效解决有气液界面存在条件下不能准确标定的难题, 克服了封闭体内测量时无法进行现场标定的困难; 为验证标定方法的可行性与可靠性, 进行了数值模拟, 模拟结果显示, 此方法误差较小, 满足室内定位中的标定精度要求。

**关键词:** 室内定位; 双目视觉; 气液界面; 标定

## New Method of Indoor Location Calibration Based on Binocular Vision

Xing Yabin<sup>1,2</sup>, Wang Zhenling<sup>1,2</sup>

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** With the development of global navigation satellite systems, location based services has increasingly become an indispensable part of our personal and professional lives, as more and more people become accustomed to using positioning technology. With the increasing demand for indoor navigation applications, indoor positioning navigation technology based on multi-visual principles has become the center of many technical research efforts, and has matured throughout the past few years. However, when gas-liquid interface is involved, the linear calibration technique that is currently being used is no longer applicable due to the refraction of the line of sight during the propagation process, and therefore becomes the major technical barrier restricting indoor positioning under special circumstances (such as underwater robot operations). This paper proposes a new calibration method that accurately locates the interface position and corrects the linear pinhole model, which can effectively ensure the accuracy of calibration under the circumstances of gas-liquid interfaces, and make field calibration possible during closed measurement. To verify the feasibility and reliability of this calibration method, this paper conducted numerical simulation. Results show small margin of error and indicates that this method satisfies the calibration accuracy requirements in indoor positioning.

**Keywords:** indoor positioning; binocular vision; gas-liquid interface; calibration

## 0 引言

近些年来, 信息技术快速发展, 各类电子智能设备日渐普及, 而卫星定位导航技术性能稳定、成本低廉、定位精度高, 被越来越多的人所熟悉和使用。然而, 当处于室内环境中时, 传统卫星定位导航技术所依赖的卫星信号由于受到钢筋混凝土等障碍物的遮挡以及室内复杂环境等影响, 信号强度会大大减弱, 将无法继续提供准确的位置服务。而室内定位在提高人们日常生活质量, 提升商业服务能力、增加工业生产效率以及维护公共安全等方面, 将发挥越来越重要的作用。因此, 室内精确定位技术的研究具有重要意义。

室内定位技术已经过多年发展, 按照不同的依据可以将现有的室内定位技术进行划分。若以定位机制为依据, 可以划分为: 基于邻近关系的室内定位技术、基于几何关系的室内定位技术以及基于场景分析的室内定位技术<sup>[1]</sup>; 若按照其物理依赖

的不同, 可以划分为: 基于 GPS 的室内定位技术、基于无线传感器网络(红外线、蓝牙、Wi-Fi、超声波等)的室内定位技术以及其他室内定位技术; 若按照定位范围的不同, 可以划分为: 广域室内定位和局域室内定位<sup>[2]</sup>。

双目立体视觉(Binocular Stereo Vision)是二十世纪八十年代初期, 由 Marr 提出的计算机视觉理论<sup>[3]</sup>发展而来。双目立体视觉是机器视觉的一种重要形式, 原理是基于视差, 通过采集两张具有视差的平面图像, 进行图像处理并获取两图像对应点之间的位置偏差, 得到物体的三维几何信息, 恢复出具有景深的立体图像。通过预先的标定过程, 可以解算出两幅图像中同一目标的真实空间坐标。

标定是将目标的物理区域坐标同图像区域坐标建立起一一对应关系的过程。为获取目标的准确位置, 相机的标定过程是重中之重, 标定精度对最终定位精度有着决定性作用。当无法现场标定实际模型时, 通常使用等效标定的方案。然而, 当室内定位场景中存在气液界面时, 光在通过不同介质时会发生折射。现有的等效标定方法中存在因气液界面折射引起的视线畸变、测量空间位置与标定法基准位置不重合、镜头畸变标定精度有限等一系列问题, 使得等效标定不再适用。为严格地模拟

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2017-08-13。

作者简介: 邢亚斌(1992-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事导航定位方向的研究。

这种效应，需要确定相机标定数据、折射率以及不同光学介质交界面的位置。在较为理想的情况下，可以通过现场标定对以上参数予以确定。然而，模型的封闭性设计使得无法将标定靶盘放入封闭模型内部，现场标定无法实现，因此有必要针对存在界面的封闭模型提出一种新的非现场标定方法，将室内特殊场景定位（如水下机器人作业）提供理论指导与实际借鉴意义。

鉴于以上原因，本文提出一种新的三维坐标测定算法，来解决某些特殊场景无法进行现场标定，且气液存在条件下无法进行等效标定的困难。整体思路为：先在空气中进行标定，根据相机在空气中的标定数据以及不同光学介质的折射率，通过迭代自标定的方法，获得气液界面位置。同时，为了减小标定误差，采用不同深度的多个界面进行整体约束，并且不同层之间使用最小二乘法对各层标定结果进行修正。

### 1 方法描述

相机跟踪拍摄目标，只能够获得目标粒子在平行于相机镜头平面中的位移（ $x$  方向和  $y$  方向）。为了获得粒子在垂直相机镜头（ $z$  方向）方向上的位移，需要将相机镜头倾斜一定角度，如图 2 所示。然而，相机镜头倾斜将会对相机成像产生一定的影响，为了减小视角倾斜对不同相机成像的影响，较为有效的手段是采用 Scheimpflug 光路布置方案<sup>[4]</sup>。尽管封闭模型无法进行现场标定，但相机本身的内参数只和相机及镜头的几何相对位置有关，因此可以先通过空气标定的方式在小孔成像模型的假设下确定相机的内部参数。由于水气界面的存在，视线会发生折射，可以通过进一步的界面和物面算法来修正这种折射效应，通过迭代和互相关算法的修正，最终确定界面方程和物面方程，并给出更为精确的视线方程。由于此时的互相关修正是基于薄片光构成的瞬时粒子图，能否准确获得粒子的中心坐标将直接影响物面和界面的重构以及后续的三维空间场重构。在获得粒子中心位置和视线方程之后，通过基于匹配概率的算法可对粒子的物理空间场进行重构，三维重构后的粒子场可以通过传统的三维互相关解算速度场。

新方案的流程如图 1 所示。

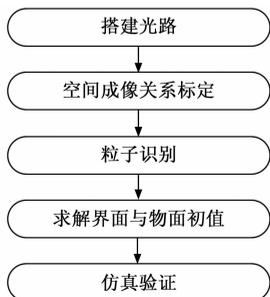


图 1 方案流程图

## 2 搭建光路系统

### 2.1 光学原理

假设在某一时刻，目标粒子  $X$  的位置是  $A$ ， $A$  点的坐标为  $Xa = (x, y, z)$ ，在一段时间  $\Delta t$  后，该粒子到达另一位置  $B$ ， $B$  点的坐标为  $Xb = (x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$ 。在相机的成像中，初始时刻粒子成像的位置是  $Xa$ ，该粒子经过时间  $\Delta t$  后成像的位置是  $Xb$ ，即位移量为  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。

根据标定关系找出  $A$  点在左右相面上的同名配对粒子（同名粒子图像匹配的含义是同一粒子在左右相机成像的对应关系），根据几何共点共线，联立多相机的标定函数关系，从粒子的图像中心确定其在相机的所对应的空间直线方程，采用最小二乘法解算该方程组，方程组的解就是粒子在物理区域的空间坐标，其含义为：这些直线的交点的坐标即为目标粒子的坐标。

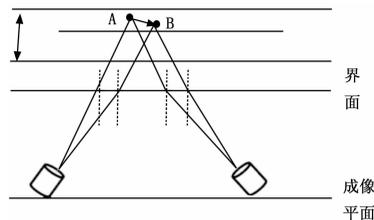


图 2 粒子真实位移与镜头成像关系

在提取到粒子空间坐标后，对某一小立方体区域与下一时刻的同一位置的立方体区域进行三维体相关匹配，将会得到一个空间位移量  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ，代表这个区域的所有粒子的移动量。

### 2.2 光路布置方案

为了确定目标粒子在垂直相机镜头方向上的位移，可以把相机偏移原本垂直方向一定夹角。这会造成测量面上的点到相机感光面的距离不一致，当焦距固定时，则会造成仅有处于特定距离处的粒子才能够在相机内成像清晰，而所有处于其他距离的粒子，都只能在相机上成模糊的像。为了处理这个问题，有气液界面存在条件下的室内定位技术标定过程中使用了 Scheimpflug 设置方案<sup>[4]</sup>。这个方案的示意图如图 3 所示。当测量平面、相机镜头的中心面和相机感光面这三者相交于同一直线上时，处于测量面上的全部粒子都能清晰成像，这就是 Scheimpflug 体视 PIV 布置方案。本实验中都按照这个布置方案来布置光路。该设置方案的重要之处是将机身和相机镜头分开，使得机身与镜头所成的夹角能够通过自制的角位移装置进行调整。如图 4 所示。

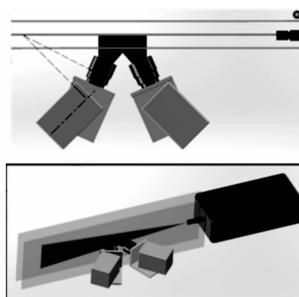


图 3 三维空间目标粒子追踪的光路布置图

## 3 基于针孔模型的空间成像关系标定

相机标定是一个复杂且重要的过程。由于实际环境完全封闭，无法实现现场标定，可先在空气中进行标定，建立一套完整的三维空间坐标系。对空间位置已知的标准网格，采用亚像素定位技术提取网格节点<sup>[5-6]</sup>。首先对标定面进行采样，利用三维坐标架沿界面的垂直方向移动，采集等间距的标定平面，做成像的标定平面提取网格节点，再利用三次像条插值，计算

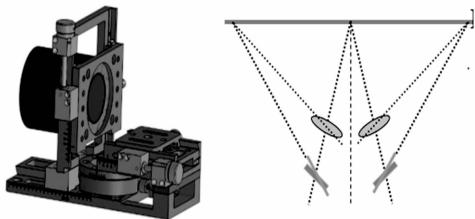


图 4 自有的角位移成像装置 (用于体视成像装置)

每个像素点对应的标定面上的空间坐标, 最后拟合该像素点对应的直线方程, 使镜头函数线性化, 标定方程转化成线性方程组, 最终完成相机的标定过程。

测量中三维坐标测定应遵循共线性的基本数学思想<sup>[7]</sup>, 即物点、相机投影中心以及图像点分布在一条直线上。图像区域和物理区域之间的关系可以用以下模型描述:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dx} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中:  $dx, dy, u_0$  以及  $v_0$  是相机内部参数, 已确定,  $R$  是旋转矩阵,  $T$  为平移矩阵。

为此, 将标定板放置在观测区内, 用两个相机对其拍摄。标定板图像如图 5 所示。

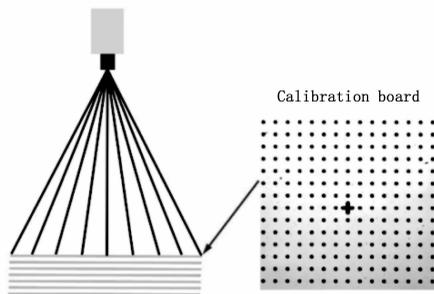


图 5 用于标定的靶盘

标定完毕后, 可得到前面提到的 6 个参数, 将其用于空气条件下粒子定位中的空间相交。为确定标定精度, 可以根据确定的坐标和随机点的坐标之间的 r. m. s 偏差来进行估计。人工生成的随机点图如图 6 (a) 所示, 预测位置与预设值之间的偏差分布如图 6 (b) 所示。从图中容易看出, 标定误差大部分都在 0.1 个像素以内。

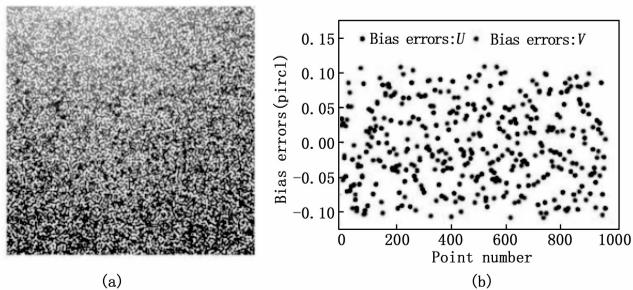


图 6 用于验证的随机点 (a) 和标定误差分布 (b)

### 4 目标识别

为了确保后续定位的准确度以及精度, 需要获取目标物在图像中的位置坐标。而在一副图像中可能除了所要检测出来的目标物, 还会包含其它非目标物体。目标识别就是把目标物与其它非目标物体进行区分, 进而从图像中获取所需的图像数据。目标识别时, 首先需要提取图像的特征信息。图像特征指的是一个物体通过图像中所表现的不同于其它物体在图像中所包含的某方面性质的抽象信息。通过对图像进行特征提取, 利用图像处理技术分析图像特征, 再将分析所得信息与目标物体的图像特征信息进行匹配, 基于匹配结果对物体进行目标识别, 最终可以得到目标物体在图像中的位置。

为了获得目标的精确位置, 应先对图像进行预处理, 比如背景差分, 空间图像的滤波, 粒子图像失真的修正。目标粒子位置识别的精度对测量精度有很大的影响, 是不可缺少的步骤。亚像素定位技术能够把目标定位精度锁定在 0.1~0.5 个像素范围以内, 具体采用何种方法应综合考虑目标形状、图像灰度分布等因素, 否则无法达到预期精度。为了获得更精确的预测, 本方案采用高斯拟合函数估计亚像素级的位置。首先将每个粒子的光强期望分布看作一个半径为 3 个像素的高斯散斑, 如图 7 所示。然后根据光强分布构造二维高斯函数, 每个粒子中心也就处于该高斯函数的极大值点, 故求解该极大值点作为粒子中心点, 并将其当作颗粒中心的初始估计。筛选计算结果并除去背景噪声。然而预测点可能不是微粒中心的真实位置, 因此, 有必要对其进行修正。修正过程由两个主要步骤组成: 剔除噪声以及计算中心坐标。

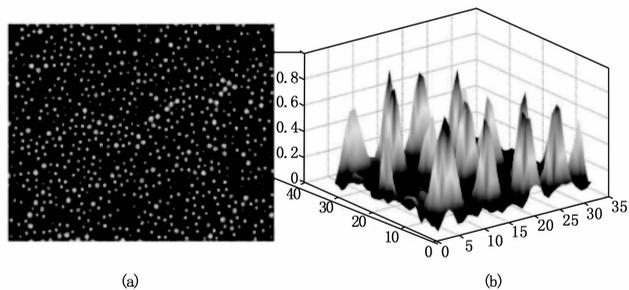


图 7 粒子图像强度分布以及强度平面中最高强度和周围的二维高斯拟合

### 5 求解界面初值与物面初值

光线通过不同介质, 由于折射率的不同会导致光路发生折射, 因此, 必须考虑多介质模型来构造物理空间和相面空间之间的对应关系。这种影响可以根据界面位置建模。假设物面、相面和界面相互平行, 基于共线性条件可以进行简单建模。考虑到玻璃厚度  $t$  远小于物体距离  $Z_0$  和图像距离  $Z_b$ , 可对模型进行化简。简化后的模型如图 8 所示。

对于界面, 可以定义向量:

$$OV = K_1 \cdot ni + \frac{IV - K_2 \cdot ni}{n}$$

其中:

$$K_1 = \sqrt{1 - \frac{1 - (ni \cdot IV)^2}{n^2}}$$

$$K_2 = ni \cdot IV$$

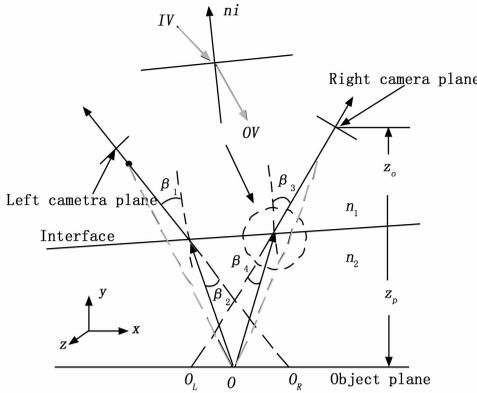


图 8 视线上界面的影响示意图

由于界面的存在，在共线性条件下，光线从不同相机  $C_i$  到物点  $O$  的路径被转移到了物面上两个不同的点，记为  $O_L$  和  $O_R$ ，因此，需要对两条光线进行互相关操作。利用薄片光的不同位置确定界面和物面的参数。下方方程定义了相机平面的点 PCAM 和物面上相应的点 PPHYS 之间的修正关系。

$$P_{phys}(X, Y, Z) = P_{focus}(X, Y, Z) - IV \cdot \frac{ni \cdot (P_{focus}(X, Y, Z) - P_{inter}(X, Y, Z)) - OV}{ni \cdot IV}$$

$$ni \cdot (P_{focus}(X, Y, Z) - IV \cdot \frac{P_{inter}(X, Y, Z)}{ni \cdot IV}) - P_0(X, Y, Z)$$

$$OV \cdot PV$$

其中：

$$IV = \frac{\begin{pmatrix} M \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + P_{cam} - P_{focus} \\ M \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + P_{cam} - P_{focus} \end{pmatrix}}$$

再通过建立物点，PPHY 以及图像点 PCAM 之间的关系可得到逆变换。

$$P_{physcam} = M^{-1} \cdot \begin{pmatrix} P_{cro} - (P_{cro} - P_{focus}) \cdot CV \\ (P_{cro} - P_{cam}) \cdot CV \\ CV \cdot (P_{cam} - P_{focus}) \end{pmatrix} + P_{cam}$$

其中：

$$P_{cro} = P_{phys} - ni \cdot (ni \times (P_{phys} - P_{inter})) - (P_{phys} - P_{focus}) \cdot \frac{a1 - a2 + \sqrt{a3 - a4}}{2}$$

$$\frac{|(P_{phys} - P_{focus}) - ni \cdot (ni \times (P_{phys} - P_{focus}))|}{|LV \times RV|}$$

根据标定数据可得到系数矩阵  $M$  以及系数  $a1 - a5$ 。由于光线从不同的相机发出后将在某点相交，几何约束方程可以写为：

$$DL = \frac{|(LV \times RV) \otimes (Lp - Rp)|}{|LV \times RV|}$$

可用 6 个参数描述界面和物面：

$$Ia \otimes x + Ib \otimes y + \sqrt{1 - Ia^2 - Ib^2} \otimes z + Id = 0$$

$$Pa \otimes x + Pb \otimes y + \sqrt{1 - Pa^2 - Pb^2} \otimes z + Pd = 0$$

其中： $I_c = \sqrt{1 - Ia^2 - Ib^2}$ ， $P_c = \sqrt{1 - Pa^2 - Pb^2}$

多对视线可以建立其距离关系的多元非线性方程组：

$$f_i(x^*) = DL = 0$$

其中： $x^* = (Ia, Ib, Id, Pa, Pb)$  表示界面和物面的参数。由于多元方程式二阶连续可导，可通过牛顿迭代方法确定近似解。

$$x^{k+1} = x^k + \left[ \frac{\partial f(x^k)}{\partial x} \right]^{-1} \otimes f(x^k), (k = 1, 2, 3, \dots, n)$$

## 6 仿真实验

为估计标定程序中套准误差分布，进行了两个仿真，其中一个仿真中界面是平行的，另一个仿真中界面是倾斜的。两个仿真中，两个相机之间的夹角为  $15^\circ$ ，物距 300 mm，焦距 28 mm。界面中心位于  $Z=100$  mm。第二个仿真中倾角为  $4^\circ$ 。因此，两个界面可以定义：

$$Z - 100 = 0$$

$$0.0698 \cdot x + y + 0.9976 \cdot (z - 100) = 0$$

为估算标定误差，先将两个相机的粒子图互相关，得到速度分布，再将两个速度分布的 r. m. s 偏差定义为随机误差。对于第一个仿真，随机误差和参数迭代后的结果如图 9 所示，图中可以看出粒子图的重构有一个明显的 1.5 个像素量级的随机误差，然而在自标定基础上进行几次迭代后，这个误差可以减少到 0.005 个像素以下，如图 10 所示。

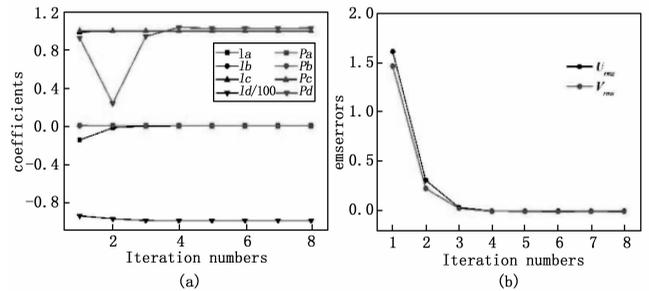


图 9 仿真一的随机误差 (a) 及迭代后的结果 (b)

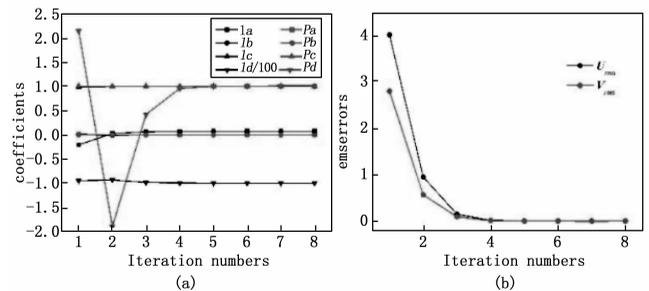


图 10 仿真二的随机误差 (a) 及迭代后的结果 (b)

第二个模拟中可以得到相同的结论，如图 10 所示。对两个仿真，套准误差均在 0.01 个像素以下。

根据对一百对图像的统计学分析，可以发现标定过程中随着粒子位移变化有一个 0.036 像素量级的系统误差。如图 11 所示。

图 12 中显示了套准误差对界面和物面参数的影响。使用了 10 个 0.001 像素到 0.01 像素之间套准误差。可以得出结论：随着套准误差的增长，参数误差水平也会提高。

(下转第 309 页)

见图 10。利用该设备完成整套电缆测试只需要 2.5 个小时, 而之前人工测试往往需要 2 周以上的时间。测试结果表明, 该系统能够自动完成电缆中被测信号的测试通道切换, 可大幅度降低工作强度, 提高工作效率。

通道号: K000-1	起始数据序号: 3225-012	结束数据序号: 3264-172	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
2	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
3	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
4	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
5	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
6	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
7	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
8	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
9	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
10	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
11	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
12	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
13	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
14	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
15	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
16	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
17	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
18	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
19	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
20	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
21	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
22	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
23	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
24	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
25	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
26	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
27	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
28	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
29	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
30	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0

图 10 部分测试数据及结果

### 5 结论

本检测系统通过模块化设计进行系统搭建, 具备集成度高, 响应速度快, 精度高, 安全可靠的优点。通过在卫星总装测试过程中试用证明, 该测试仪能够满足星上电缆的导通绝缘测试需求, 能够对各种型号低频电缆的导通性、绝缘电阻等电气性能参数进行自动测量, 并能全面快速地检测电缆中可能存在的隐患, 提高测试速度, 缩短导通绝缘测试时间, 提高卫星总装生产效率。

(上接第 284 页)

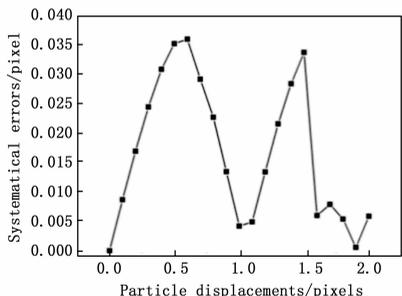


图 11 标定中的系统误差

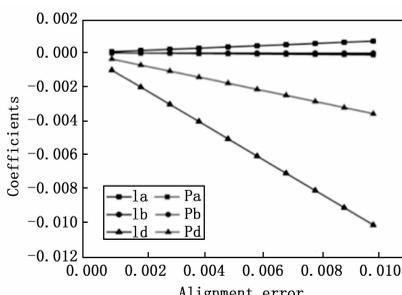


图 12 标定中的套准误差

### 7 结论

本文提出了一种在有气液界面条件下双目视觉定位中相机的标定技术, 有效解决了有折射现象存在时传统标定技术不再适用的难题。克服了封闭模型内的目标定位过程中不能现场标

### 参考文献:

[1] 刘根旺, 赵利军, 马瑞萍. 测试仪器的发展及其对军用测试领域的影响 [J]. 计算机测量与控制, 2001, 9 (2): 1-2.

[2] 李 飞, 赵 伟, 郑华山. 自动多功能电缆测试仪的设计 [J]. 航天制造技术, 2012 (5).

[3] 高玉水, 李正优, 徐振辉. 某型导弹电缆网绝缘电阻测试仪 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (6): 816-817.

[4] 李 辉, 陈红飞. 电缆测试仪绝缘电阻测试单元的研制 [J]. 自动化技术与应用, 2011, 30 (1): 51-53.

[5] 李萃慧, 林 辉. 航空整机电缆自动测试系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (4): 789-791.

[6] 李安国, 曹文智, 马晓波, 等. 整机绝缘耐压测试中绝缘电阻和耐压漏电流问题 [J]. 电工技术, 2011 (6): 63-64.

[7] SYNOR4200 型电缆测试仪使用手册 [OB/EL]. 法国: SEFELEC 公司, 2009.

[8] 孙玉胜, 邹玉炜, 崔光照, 等. 多芯电缆测试仪的研制 [J]. 微计算机信息, 2007, 23, 7-1: 192-194

[9] 宋宏江, 孟晓风, 王 琳. 数字式电缆测试仪的设计与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (2): 288-290

[10] 苏建军, 舟永丰, 于功教, 等. 便携式电缆测试仪的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (11): 1585-1588

[11] 龙华伟, 顾永刚. LabVIEW 8.2.1 与 DAQ 数据采集 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[12] 沙占友. 新编实用数字化测量技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

定的困难。该技术能够应用于基于双目视觉原理的室内定位的标定过程。仿真结果显示, 用此方法进行标定, 误差水平能够达到实验精度要求。充分说明了本方法的可行性与可靠性。

### 参考文献:

[1] 赵 锐, 钟 榜, 朱祖礼, 等. 室内定位技术及应用综述 [J]. 电子科技, 2014, 3: 154-157.

[2] 余 扬, 赵凯飞, 沈 嘉. 室内定位技术应用、研究现状及展望 [J]. 电信网技术, 2014, 5: 46-49.

[3] Marr D, Ullman S, Poggio T A. Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information [M]. MIT Press, 2010.

[4] 马颂德. 计算机视觉: 计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[5] Mass H G, Gruen A, Papantoniou D. Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows Part 1. Photogrammetric determination of particle coordinates [J]. Experiments in Fluids, 1993, 15 (2): 133-146.

[6] Malik N, Dracos T, Papantoniou D. Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows Part 2. Particle tracking [J]. Experiments in Fluids, 1993, 15 (4/5): 279-294.

[7] Hoyer K, Holzner M, Luthi B, et al. 3D scanning particle tracking velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 2005, 39: 923-934.

[8] Holzner M, Liberzon A, Nikitin N, et al. A lagrangian investigation of the small-scale features of turbulent entrainment through particle tracking and direct numerical simulation [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 598: 465-475.