

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108219

# 精确三维数据测量的双目视觉系统优化设计

王龙华 曾国华 胡华锋 钱进 汪先炜 张宏宇  
(国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司 武汉 430074)

**摘要:** 针对绝缘斗臂车空间机械臂中的双目视觉系统,研究了视觉系统中两个全景相机参数的最优设计和标定问题,构造了对系统中摄像机位置、方向和镜面形状等因素进行优化配置后的模型,以获得更高的三维数据测量精度。为了构造最佳视觉系统配置,根据数据计算过程中的误差传播分析、图像像素量化精度和角度分辨率变化,推导了三维测量误差模型的解析公式。然后,将该公式用于框架优化中,能够针对不同形状的系统设置环境找到最佳系统配置。对于具有长方体三维测量区域和相机放置区域的常规情况,利用所提出的解析公式推导其系统配置的次优解,并证明了该次优解的精度趋近于其最优解。最后,在实际应用案例中将所提出方法与现有的4种经典算法进行对比分析,结果表明本文所提出方法较经典算法至少减小了17.1%的测量误差,同时算法的运行速度提高了16.7倍,能够有效提高双目测距的准确性与鲁棒性。

**关键词:** 双目视觉测距;三维数据测量精度;最佳系统配置;摄像机标定

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Optimal design of binocular vision system for accurate 3D data measurement

Wang Longhua Zeng Guohua Hu Huafeng Qian Jin Wang Xianwei Zhang Hongyu  
(Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the binocular vision system of the space manipulator of the insulated bucket arm vehicle, the optimal design and calibration of the parameters of two panoramic cameras in the vision system are studied in this paper, and a model is constructed after the optimal configuration of the camera position, direction and mirror shape in the system, so as to obtain higher accuracy of 3d data measurement. In order to construct the optimal configuration of the visual system, the analytical formula of the 3D measurement error model is derived according to the error propagation analysis, the quantization accuracy of image pixels and the variation of angular resolution in the process of data calculation. Then, this formula can be used in framework optimization to find the best system configuration for different shapes of system settings. For the general case with cuboid 3D measurement area and camera placement area, the suboptimal solution of system configuration is derived by using the proposed analytical formula, and the accuracy of the suboptimal solution is proved to be close to its optimal solution. Finally, the proposed method is compared with four existing classical algorithms in a practical application case. The results show that the proposed method reduces the measurement error by at least 17.1% compared to the classical algorithm, while the algorithm runs 16.7 times faster, effectively improving the accuracy and robustness of binocular distance measurement.

**Keywords:** binocular ranging; 3D data measurement; optimal system configuration; camera calibration

## 0 引言

绝缘斗臂车作为一种在交通方便且布线复杂的场合进行等电位作业的特殊车辆,在配电网的检修和维护中得到了广泛的应用。在斗臂车的空间机械臂中,双目视觉系统是其重要的组成部分,双目视觉系统能够引导机械臂自主

完成对目标的定位和捕获。双目视觉系统通常使用两个广角相机(如鱼镜头或折反射全向相机)组成立体视觉系统,用于捕捉应用环境中的视觉信息。

机械臂双目视觉系统在测量目标的三维信息时,需要对两台摄像机的内参数和外参数进行标定,双目视觉系统测量精度与摄像机的标定精度密切相关,是双目相机高精

度获取合作目标位置、方向等运动信息进而进行三维重建的首要前提和重要保障<sup>[1,2]</sup>。因此,在机械臂双目视觉系统中,相机内参和外参的精确性往往决定了机械臂获取合作目标的精度,摄像机参数的标定作为机械臂双目视觉伺服控制系统的重要研究领域,近年来受到越来越多的关注<sup>[3-7]</sup>。

王竞磊<sup>[8]</sup>根据透视原理提出了直接线性变换法,但由于没有考虑参数之间的约束和镜头畸变,故而标定精度不高。Forsyth等<sup>[9]</sup>在直接线性变换法的基础上增加了对切向畸变的考虑,但对设备装置的要求很高,缺少实用价值。陈天飞等<sup>[10]</sup>提出了一种相机自标定方法,不使用参照物即可进行标定,但精度较低且鲁棒性差。王鑫等<sup>[11]</sup>提出的一种以平面棋盘格为标定物,介于两步法和自标定法之间的标定算法。杨子寒等<sup>[12]</sup>提出利用标定板上各角点间的约束关系提高张氏标定法的标定精度。文涛等<sup>[13]</sup>为了提高复杂光照条件下的标定精度,利用交叉网格作为参照物进行标定。棋盘网格标定法通常采用黑白棋盘格作为标定目标,由于加工误差无法消除,导致对测量精度影响较大,且由于棋盘格为二维,因此测试过程繁琐。徐中宇<sup>[14]</sup>和工道累等<sup>[15]</sup>为了克服标定中的局部最优解问题,分别将遗传算法和天牛须搜索算法应用到相机的参数标定优化中,智能算法虽然在一定程度上提高了标定精度,但计算量过大,耗时较长。Meng等<sup>[16]</sup>根据物体距离、相机基线和焦距提出了评估三维数据重建误差的优化模型。Hanel等<sup>[17]</sup>从被检测对象的外表面出发,对最佳视觉系统配置进行了优化。Jacek<sup>[18]</sup>从物体表面点都出现在相机的 FOV 内且图像重建分辨率最优出发,对相机位置进行优化计算。但这些方法中都没有考虑图像像素量化精度和角度分辨率变化的问题,导致标定存在一定的误差,限制了 3D 测量数据重建精度的进一步提高。

针对传统相机内外参标定技术存在的精度低、优化算法耗时过长等问题,本文提出了一种优化的机械臂双目视觉系统相机内外参数标定算法,在充分考虑三维重建时图像像素量化精度和角度分辨率变化的基础上,根据数据计算过程中的误差传播分析,推导了三维测量误差模型的解析公式,进而实现双目视觉系统参数标定的优化。本文方法的主要思路如下:首先,为提高三维测量的评估精度,推导了双目全相机视觉系统三维数据计算中误差传播的解析公式;然后,推导了确定最佳相机系统标定(包括双摄像机位置、方向和镜面形状等因素)的优化模型,建立更加精确的立体视觉系统;最后,利用迭代算法求解所提出的参数标定模型的最优解,完成系统的参数标定,并通过实验分析标定结果的有效性。

本文其余部分的内容如下:在第 1 节中提出了一个在双目视觉系统中寻找摄像机最优参数标定的优化框架。第 2 节推导了折射率全相机参数的建模公式。第 3 节构造了用于优化相机参数标定的度量模型。第 4 节给出了求解最

优参数标定值的迭代计算方法。第 5 节中给出了实验结果,第 6 节中进行了结论分析。

## 1 最优系统配置优化框架

本文提出的最优系统参数标定的优化框架如图 1 所示,通过该框架计算双目全向视觉系统的最佳系统配置因素。系统的配置因素包括两个全向摄像机的位置、方向和镜面形状等,拟通过视觉系统因素的优化配置以获取更精确的 3D 重建数据。

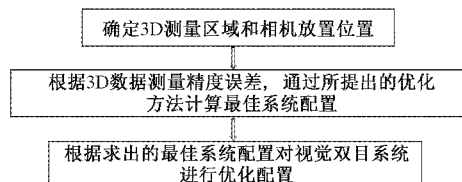


图 1 本文提出的优化算法框架

该优化框架的部分假设属性如下:

1) 如果两台全域摄像机靠得很近,则连接两台摄像机的线段  $L$  (即基线) 的长度就会变小,求出的 3D 数据的精度会相应降低。

2) 如果基线非常大,则相机前的空间点位置相对于  $L$  来讲,会变得非常接近,将导致得到的 3D 数据的精度会很低。

由于全景相机拍摄的图像失真较大,因此所拍摄的图像的分辨率也存在较大差异,因此,如果特征点位于分辨率较高的区域,则计算的 3D 数据的精度会更高,反之亦然。由此可知,系统的最优配置是存在的。

本文提出的优化框架主要包括 3 个步骤:首先,指定一个 3D 数据测量区域,称为三维测量区域;同时,指定一个可以放置摄像机的区域,称为摄像机放置区域。然后,根据第 5.2 节中提出的系统优化算法推导出两个全向相机的最佳位置、光轴和固有参数。最后,根据所求出的最佳配置对双目视觉系统进行设计,提高 3D 数据的重建精度。

## 2 全相机结构和公式

### 2.1 全相机结构

折反射全景相机由双曲面镜和朝向镜面的透视相机组成,如图 2 所示。

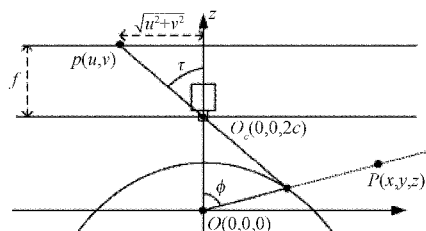


图 2 折射率全相机结构及相机坐标系

摄像机坐标系  $(x-y-z)$  和图像坐标系  $(u-v)$  的定

义方式是:  $x$  轴和  $y$  轴分别平行于  $u$  轴和  $v$  轴, 镜面的两个焦点分别在  $O(0,0,0)$  和  $O_c(0,0,2c)$  处。这样, 镜面形状可以表示为<sup>[19]</sup>:

$$(z-c)^2/a^2 - (x^2+y^2)/b^2 = 1 \quad (1)$$

$$c = \sqrt{a^2+b^2}, z < c$$

镜面偏心率定义为  $\epsilon = \frac{c}{a} > 1$ 。

描述空间点  $P$  的俯仰角  $\varphi$  与投影像素  $p$  的图像坐标  $(u, v)$  对应关系的投影方程可表示为<sup>[19-20]</sup>:

$$\tan\varphi = \frac{(\epsilon^2 - 1)\sin\tau}{(\epsilon^2 + 1)\cos\tau - 2\epsilon} \quad (2)$$

如图 2 所示,  $\cos\tau$  和  $\sin\tau$  可以表示:

$$\cos\tau = \frac{f}{\sqrt{u^2+v^2+f^2}}, \sin\tau = \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{\sqrt{u^2+v^2+f^2}} \quad (3)$$

### 2.2 全景相机固有参数的确定

假设全景相机中的透视相机是经过良好校准和无失真的, 则透视相机的唯一参数是其视角  $2\tau_{\max}$ 。此外, 式(2)所示, 偏心率  $\epsilon$  描述了反射镜产生的所有畸变效应。因此, 全景摄像机需要确定的固有参数是其视角  $2\tau_{\max}$  和偏心率  $\epsilon$ 。下面, 在假设透视相机视角角度  $2\tau_{\max}$  固定的情况下, 首先推导了偏心率  $\epsilon$  的计算公式。然后, 又给出了确定角度  $2\tau_{\max}$  的计算准则。

定理 1: 若透视相机的视角为  $2\tau_{\max}$ , 全景相机的视角为  $2\varphi_{\max}$ , 则双曲面镜的偏心率  $\epsilon$  为:

$$\epsilon = \frac{\sin(\varphi_{\max}) + \sin(\tau_{\max})}{\sin(\varphi_{\max} - \tau_{\max})} \quad (4)$$

证: 根据式(2)可得:

$$(\tan\varphi_{\max} - \tan\tau_{\max})\epsilon^2 - 2\tan\varphi_{\max}\sec\tau_{\max}\epsilon + (\tan\varphi_{\max} + \tan\tau_{\max}) = 0 \quad (5)$$

由此可得  $\epsilon$  的两个解为:

$$\epsilon = \frac{\tan\varphi_{\max}\sec\tau_{\max} \pm \sec\varphi_{\max}\tan\tau_{\max}}{\tan\varphi_{\max} - \tan\tau_{\max}} = \frac{\sin\varphi_{\max} \pm \sin\tau_{\max}}{\sin(\varphi_{\max} - \tau_{\max})} \quad (6)$$

下面证明带负号的解  $\epsilon_1$  是无效的。首先,  $\epsilon_1$  作为偏心率大于 1, 也即:

$$\epsilon_1 = [\sin(\varphi_{\max}) - \sin(\tau_{\max})]/\sin(\varphi_{\max} - \tau_{\max}) > 1 \quad (7)$$

又由于全景相机的视角  $2\varphi_{\max}$  大于透视相机的视角  $2\tau_{\max}$ , 得到  $0 < \tau_{\max} < \varphi_{\max} < \pi$ , 因此,  $\cot(\frac{\varphi_{\max}}{2}) < \cot(\frac{\tau_{\max}}{2})$ , 再根据余切半角公式<sup>[21]</sup>, 可得到:

$$\cot(\frac{\varphi_{\max}}{2}) = \frac{\sin\varphi_{\max}}{1 - \cos\varphi_{\max}} < \frac{\sin\tau_{\max}}{1 - \cos\tau_{\max}} = \cot(\frac{\tau_{\max}}{2}) \quad (8)$$

式(8)等价于:

$$\frac{\sin(\varphi_{\max}) - \sin(\tau_{\max})}{\sin(\varphi_{\max} - \tau_{\max})} > 1 \quad (9)$$

这与式(7)相矛盾, 因此带负号的解  $\epsilon_1$  是无效的。

选择不同视角  $2\tau_{\max}$  的透视相机的效果如图 3 所示, 这些图像是通过在全向相机前面放置棋盘而获得的, 根据定理 1 中的解设计的双曲面镜可以查看整个棋盘。从图 3 中可以看出, 所拍摄的全向图像受视角大小的影响较小, 这意味着只要相机不失真, 可以自由选择视角。

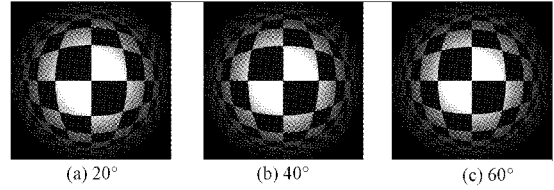


图 3 使用不同视角的透视相机拍摄的全景图像

### 2.3 全景相机分辨率公式

文献[21]提出了一个计算全向图中不同像分辨率的公式。设  $dA$  是像素  $p$  附近图像平面上的一个无穷小区域, 如图 4 所示, 它是以待点  $P$  为中心的无穷小立体以角度  $d\omega$  在该区域的投影。则像素  $p$  的分辨率可表示为:

$$R(\epsilon, f, \varphi) = \frac{dA}{d\omega} = \frac{(\epsilon^2 - 1)(\epsilon^2 + 2\epsilon\cos\varphi + 1)}{[2\epsilon + (\epsilon^2 + 1)\cos\varphi]^3} \quad (10)$$

其中,  $\epsilon$  是反射镜的偏心率,  $f$  是相机的焦距,  $\varphi$  是  $P$  的互补仰角。

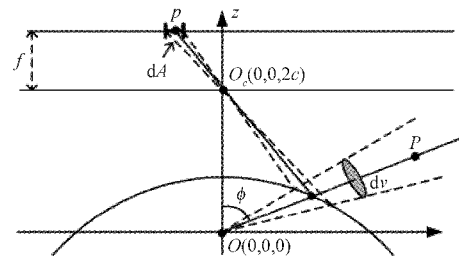


图 4 像素分辨率示意图

## 3 数据测量精度的计算

### 3.1 三维数据测量计算函数

定义一个坐标系  $X-Y-Z$ , 如图 5 所示, 摄像机中心  $O_1$  和  $O_2$  分别位于  $(-D, 0, 0)$  和  $(D, 0, 0)$ ,  $XY$  平面包含空间点  $P$ , 假设两个光轴  $a_1$  和  $a_2$  位于  $XY$  平面上。

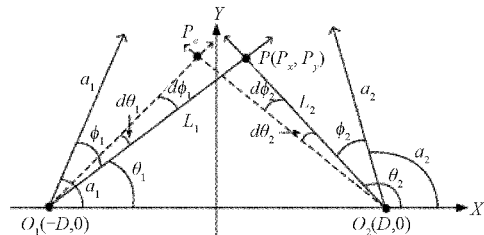


图 5 三角测量过程和误差传播过程图

如图 5 所示, 两个轴  $a_1$  和  $a_2$  分别由角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  定义。为了计算  $P$  的三维坐标数据, 首先由两台全域摄像机获取两幅图像, 然后通过特征检测过程提取两幅全域图像中与

$P$  对应的两个像素  $p_1$  和  $p_2$ 。然后分别利用  $p_1$  和  $p_2$  的坐标,由式(2)推导出  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  的互补仰角。最后,角  $\theta_1$  和  $\theta_2$  通过式(11)进行计算:

$$\theta_1 = \alpha_1 - \varphi_1, \theta_2 = \alpha_2 - \varphi_2 \quad (11)$$

如图 5 所示,特征点  $P$  的位置可以通过两个参数方程来计算:

$$\begin{aligned} P &= O_1 + s_1 \cdot (\cos\theta_1, \sin\theta_1) \\ P &= O_2 + s_2 \cdot (\cos\theta_2, \sin\theta_2) \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $P, O_1, O_2$  为二维坐标向量,  $s_1, s_2$  为未知参数。式(12)等价于:

$$\begin{aligned} P_x &= -D + s_1 \cos\theta_1 = D + s_2 \cos\theta_2 \\ P_y &= s_1 \sin\theta_1 = s_2 \sin\theta_2 \end{aligned} \quad (13)$$

通过式(13)可以求出  $s_1$  和  $s_2$ , 从而得到:

$$\begin{aligned} P_x &= D \frac{\sin\theta_2 \cos\theta_1 + \cos\theta_2 \sin\theta_1}{\sin\theta_2 \cos\theta_1 - \cos\theta_2 \sin\theta_1} = D \frac{\sin(\theta_2 + \theta_1)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \\ P_y &= 2D \frac{\sin\theta_1 \sin\theta_2}{\sin\theta_2 \cos\theta_1 - \cos\theta_2 \sin\theta_1} = 2D \frac{\sin\theta_2 \sin\theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \end{aligned} \quad (14)$$

因此,可通过  $\theta_1$  和  $\theta_2$  计算出空间点  $P$  的位置  $(P_x, P_y)$  为:

$$T(\theta_1, \theta_2) = (P_x, P_y) = \left( D \frac{\sin(\theta_2 + \theta_1)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}, 2D \frac{\sin\theta_2 \sin\theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \right) \quad (15)$$

且可求出  $P_x$  和  $P_y$  的导数为:

$$\begin{bmatrix} dP_x \\ dP_y \end{bmatrix} = \frac{2D}{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)} \begin{bmatrix} \sin\theta_2 \cos\theta_2 d\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1 d\theta_2 \\ \sin^2\theta_2 d\theta_1 - \sin^2\theta_1 d\theta_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

### 3.2 像素量化精度和角度分辨率变化的分析

利用微元  $d\theta_1$  和  $d\theta_2$  来衡量像素量化精度和角度分辨率。从图 5 可以看出,如果提取两幅图像中  $p_1$  和  $p_2$  的特征检测过程不准确,使得角度  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别具有误差  $d\varphi_1$  和  $d\varphi_2$ , 则将导致三角测量结果  $P_e$  不准确。假设像素量化和特征检测过程在小区域  $dA$  内引入了误差,那么,如图 4 所示,测得的角度  $\varphi$  将具有与角分辨率函数  $R$  相关的误差  $d\varphi$ 。在这个意义上,角  $d\varphi$  是一个二维立体角,角  $d\theta$  是对应的一维角,假设由  $d\varphi$  形成的背投影锥是圆形的,  $d\theta$  的值可以通过式(17)来估计:

$$d\theta = \pm \sqrt{d\varphi} = \pm \sqrt{dA/R} \quad (17)$$

其中,  $d\varphi$  项由分辨率公式(10)表示。另外,通过对式(11)中的方程进行微分,可以得到  $d\varphi$  和  $d\theta$  之间的关系为  $d\theta = -d\varphi$ , 与式(17)结合后,得到:

$$d\theta = \pm \sqrt{dA/R} \quad (18)$$

因此,可求出误差  $d\theta_1$  和  $d\theta_2$  为:

$$\begin{aligned} d\theta_1 &= \pm \sqrt{\frac{dA}{R(\epsilon_1, f_1, \varphi_1)}} \\ d\theta_2 &= \pm \sqrt{\frac{dA}{R(\epsilon_2, f_2, \varphi_2)}} \end{aligned} \quad (19)$$

### 3.3 测量误差模型构造及分析

为了评估特征点  $P$  的 3 维测量误差,定义测量误差函数为  $E(P)$ 。

定理 2:由图 5 可知,当三角测量过程由于  $d\theta_1$  和  $d\theta_2$  的误差而产生不精确的测量点  $P_e$  时,3D 测量误差  $E(P)$  (即实际点  $P$  与测量点  $P_e$  之间的距离)是:

$$E(P) = \max(E_1(P), E_2(P)) \quad (20)$$

其中,

$$E_1(P) = \frac{\sqrt{G_1^2(P) - 2G_1(P)\cos(\theta_2 - \theta_1) + G_2^2(P)} \sqrt{dA}}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}$$

$$E_2(P) = \frac{\sqrt{G_1^2(P) - 2G_1(P)\cos(\theta_2 - \theta_1) + G_2^2(P)} \sqrt{dA}}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}$$

$$G_1(P) = \frac{|O_1P|}{\sqrt{R(\epsilon_1, f_1, \varphi_1)}}, G_2(P) = \frac{|O_2P|}{\sqrt{R(\epsilon_2, f_2, \varphi_2)}} \quad (21)$$

证明:根据定义是  $P$  和  $P_e$  之间的距离,可以从式(13)求出测量误差  $E$  为:

$$\begin{aligned} E(P) &= \|dT\| = \sqrt{(dP_x)^2 - (dP_y)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{\left(\frac{2D\sin\theta_2 d\theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}\right)^2 - 2\cos(\theta_2 - \theta_1) \frac{4D^2 \sin\theta_1 \sin\theta_2 d\theta_1 d\theta_2}{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)} + \left(\frac{2D\sin\theta_1 d\theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}\right)^2}}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \end{aligned} \quad (22)$$

由图 5 和正弦定律可推得到:

$$\frac{2D}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} = \frac{|O_1P|}{\sin\theta_2} = \frac{|O_2P|}{\sin\theta_1} \quad (23)$$

联合式(22)和(23),可得到:

$$E(P) = \frac{\sqrt{(|O_1P| d\theta_1)^2 - 2\cos(\theta_2 - \theta_1)(|O_1P| d\theta_1)(|O_2P| d\theta_2) + (|O_2P| d\theta_2)^2}}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (24)$$

## 4 基于测量误差的系统优化配置求解

本文中,假设双目视觉测量系统中,两个透视相机属于同一类型,3D 测量区域和相机放置区域由两个矩形长方体指定,如图 6 所示。在第 5.1 节中推导了常规情况下的优化配置问题的数学模型。在第 5.2 节推导了最优系统配置优化问题的求解方法。

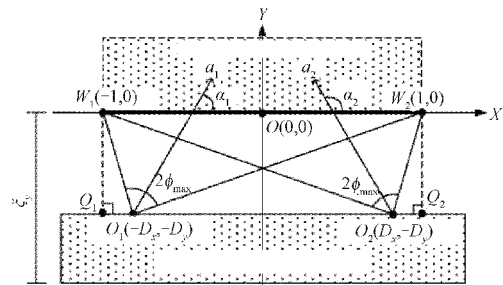


图 6 双目视觉系统示意图

### 4.1 优化配置问题数学模型

将三维测量区域  $W$  内的最大测量误差作为模型优化

时的准则函数  $E_w$ , 即:

$$E_w(W) = \max_{P \in W} (E(P)) \quad (25)$$

式中:  $E(P)$  为式(20)定义的特征点  $P$  的测量误差。通过该设置,可确保所有 3D 测量误差都低于值  $E_w$ 。假设全景相机中使用的两个透视相机是相同的,即它们的焦距  $f_1$  和  $f_2$  都等于  $f$ , 视角  $2\tau_{\max 1}$  和  $2\tau_{\max 2}$  都等于  $2\tau_{\max}$ 。两个全景摄像机结构相同,对称放置,因此两个光轴  $a_1$  和  $a_2$  共面,因此两个光轴可以由两个角度  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  定义,如图 6 所示。因此,系统配置可以定义为参数集  $(D_x, D_y, \alpha_1, \alpha_2, \epsilon_1, \epsilon_2)$ , 系统满足的条件如下。

从顶部看,全向相机放置在  $O_1(-D_x, -D_y)$  和  $O_2(D_x, -D_y)$ ; 它们的光轴方向分别由  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  定义;反射镜的偏心率分别为  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ 。所以,双目视觉系统优化配置问题就是找到最优参数集  $(D_x^*, D_y^*, \alpha_1^*, \alpha_2^*, \epsilon_1^*, \epsilon_2^*)$ , 使其满足:

$$(D_x^*, D_y^*, \alpha_1^*, \alpha_2^*, \epsilon_1^*, \epsilon_2^*) = \underset{D_x, D_y, \alpha_1, \alpha_2, \epsilon_1, \epsilon_2}{\operatorname{argmin}} (E_w(W)) \quad (26)$$

由于希望捕获的图像被 3D 测量区域完全填满,因此相机的方向应面向 3D 测量区域。在图 6 中,可以算出光学轴  $a_1$  和  $a_2$  是张成的角的平分线,也即光轴  $a_1$  是  $O_1W_1$  和  $O_1W_2$  形成的视角的平分线,光轴  $a_2$  是  $O_2W_1$  和  $O_2W_2$  形成的视角的平分线<sup>[22-23]</sup>。由以上分析可知,可以通过  $D_x$  和  $D_y$  计算出角  $\phi_{\max}$  和光轴角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ 。首先,由图 6 可知,  $\alpha_2 = \pi - \alpha_1$ ; 然后,由  $O_1, W_2, Q_2$  组成的三角形,可得到  $D_y = (D_x + 1) \cdot \tan(\alpha_1 - \phi_{\max})$ 。同理,由  $O_1, W_1$  和  $Q_1$  组成的三角形,可得到  $D_y = (D_x - 1) \cdot \tan(\alpha_1 + \phi_{\max})$ 。据此,可分别求解出两个未知数  $\alpha_1$  和  $\phi_{\max}$  为:

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0.5[\tan^{-1}(D_y/D_x - 1) + \tan^{-1}(D_y/D_x + 1)] \\ \phi_{\max} = 0.5[\tan^{-1}(D_y/D_x - 1) - \tan^{-1}(D_y/D_x + 1)] \end{cases} \quad (27)$$

再根据定理 1,可知  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  为:

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon = \frac{\sin\phi_{\max} + \sin\tau_{\max}}{\sin(\phi_{\max} - \tau_{\max})} \quad (28)$$

其中,  $2\tau_{\max}$  为透视相机的视角。综上所述,优化问题式(26)可简化为如下形式:

$$(D_x^*, D_y^*) = \underset{(D_x, D_y)}{\operatorname{argmin}} (E_w(W)) = \underset{(D_x, D_y)}{\operatorname{argmin}} (\max_{P \in W} (E(P))) \quad (29)$$

从图 7(a)可知,可以使用式(20)和(21)推导出坐标  $(P_x, 0)$  处的点  $P$  的测量误差,其中:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \cos^{-1} \left( \frac{P_x + D_x}{\sqrt{(P_x + D_x)^2 + D_y^2}} \right) \\ \theta_2 &= \cos^{-1} \left( \frac{P_x - D_x}{\sqrt{(P_x - D_x)^2 + D_y^2}} \right) \\ G_1(P) &= \frac{\sqrt{(P_x + D_x)^2 + D_y^2}}{\sqrt{R(\epsilon, f, \phi_1)}} \\ G_2(P) &= \frac{\sqrt{(P_x - D_x)^2 + D_y^2}}{\sqrt{R(\epsilon, f, \phi_2)}} \end{aligned} \quad (30)$$

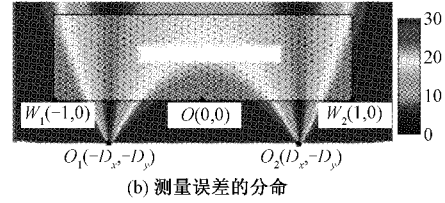
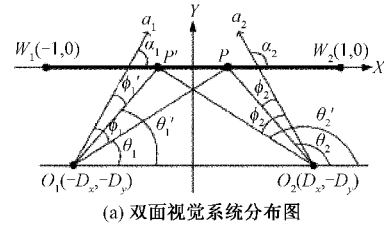


图 7 准则函数的分析

然后,证明函数  $E(P)$  是一个偶函数,由图 7(a)可以看出  $\phi_1$  和  $\phi_2$  可表示为:

$$\phi_1 = |\alpha_1 - \theta_1|, \phi_2 = |\alpha_2 - \theta_2| \quad (31)$$

由式(10)知,对于任意角度  $\phi, R(\epsilon, f, \phi) = R(\epsilon, f, -\phi)$ , 所以:

$$\begin{aligned} R(\epsilon, f, \phi_1) &= R(\epsilon, f, \alpha_1 - \theta_1) \\ R(\epsilon, f, \phi_2) &= R(\epsilon, f, \alpha_2 - \theta_2) \end{aligned} \quad (32)$$

设  $P$  为位于  $(-P_x, 0)$  处的点,角  $\theta'_1, \theta'_2, \phi'_1, \phi'_2$  如图 7(a)所示。由于三角形  $\Delta O_1 O_2 P'$  和  $\Delta O_1 O_2 P$  相似,因此  $\theta'_1 = \pi - \theta_2$  和  $\theta'_2 = \pi - \theta_1$ , 将该结果与式(31)相结合,可得到:

$$\begin{aligned} \phi'_1 &= |\alpha_1 - \theta'_1| = |(\pi - \alpha_2) - (\pi - \theta_2)| = \\ &= |\alpha_2 - \theta_2| = \phi_2 \\ \phi'_2 &= |\alpha_2 - \theta'_2| = |(\pi - \alpha_1) - (\pi - \theta_1)| = \\ &= |\alpha_1 - \theta_1| = \phi_1 \end{aligned} \quad (33)$$

因此,可推导出:

$$\begin{aligned} G_1(P') &= \frac{\sqrt{(-P_x + D_x)^2 + D_y^2}}{\sqrt{R(\epsilon, f, \phi'_1)}} = \\ &= \frac{\sqrt{(D_x - P_x)^2 + D_y^2}}{\sqrt{R(\epsilon, f, \phi_2)}} = G_2(P) \end{aligned} \quad (34)$$

由此可证明函数  $E_1(P)$  是一个偶函数,即:

$$\begin{aligned} E_1(P) &= \frac{\sqrt{G_1^2(P) + 2G_1(P)G_2(P)\cos(\theta_2 - \theta_1) + G_2^2(P)} \sqrt{dA}}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} = \\ &= \frac{\sqrt{G_2^2(P') + 2G_2(P')G_1(P')\cos(\theta'_2 - \theta'_1) + G_1^2(P')} \sqrt{dA}}{\sin(\theta'_2 - \theta'_1)} = E_1(P') \end{aligned} \quad (35)$$

同理,可证明  $E_2(P)$  是一个偶函数,即  $E_2(P) = E_2(P')$ 。

最后,证明如下性质,如果  $R(\epsilon, f, \phi_1)$  和  $R(\epsilon, f, \phi_2)$  相等,则  $E(p)$  的最大值将出现在  $O(0,0)$  或  $W_2(1,0)$ 。首先,假设  $P_x^*$  是  $P_x$  某一个取值,此时  $\theta_2 - \theta_1 = \frac{\pi}{2}$ 。

当  $0 \leq P_x \leq P_x^*$  时,  $\frac{\pi}{2} \leq \theta_2 - \theta_1 \leq \pi$ , 此时,

$\cos(\theta_2 - \theta_1) \leq 0$ , 根据式(21), 有  $E_2(P) \leq E_1(P)$ , 再根据式(20), 有:

$$E(P) = E_2(P) \quad (36)$$

应用余弦定理, 并假设  $R(\epsilon, f, \phi_1) = R(\epsilon, f, \phi_2)$ , 可将  $E_2(P)$  简化为:

$$E_2(P) = \frac{\sqrt{|O_1P|^2 - 2|O_1P||O_2P|\cos(\theta_2 - \theta_1) + |O_2P|^2}}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} = \frac{|O_1O_2|}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (37)$$

相应的, 当  $P_x$  从 0 增加到  $P_x^*$  时, 角度  $\theta_2 - \theta_1$  从  $180^\circ$  减小到  $90^\circ$ , 因此  $E(P)$  的最大值出现在  $P_x = 0$  处。对于  $P_x^* \leq P_x \leq 1$  的情况, 根据  $0 \leq \theta_2 - \theta_1 \leq 90^\circ$ , 可知  $\cos(\theta_2 - \theta_1) \geq 0$ , 着根据式(21)可知  $E_1(p) \leq E_2(P)$ , 再根据式(20)可得到:

$$E(p) = E_1(P) \quad (38)$$

再根据式(30),  $E_1(P)$  可被写为:

$$E_1(P) = \frac{\sqrt{|O_1O_2|^2 + 4(P_x + D_x, D_y) \cdot (P_x - D_x, D_y)}}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (39)$$

同理, 由于当  $P_x$  增加时, 角度  $\theta_2 - \theta_1$  从  $90^\circ$  减小到  $0^\circ$ , 因此  $E(P)$  的最大值出现在  $P_x = 1$  处。结合两种情况的分析, 可知  $E(P)$  的最大值出现在  $O(0,0)$  或  $W_2(1,0)$  处。最后, 由于  $E_1(P)$  和  $E_2(P)$  都是偶函数, 因此该结论也可以证明适用于左侧范围  $-1 \leq P_x \leq 0$ 。因此, 可以得到如下结论: 如果  $R(\epsilon, f, \phi_1)$  和  $R(\epsilon, f, \phi_2)$  相等, 且点  $O$  和  $W_2$  分别位于  $(0,0)$  和  $(1,0)$ , 则式(25)描述的函数  $E_w$  可以改写为:

$$E_w(W) = \max_{P \in W} (E(P)) = \max(E(O), E(W_2)) \quad (40)$$

定理 3: 如果  $D_y$  的值越大, 则准则函数  $E_w$  的值越小。

证明: 如果圆周角和圆心角对应着圆上的同一条弧, 则内切角  $\theta$  是圆心角  $2\theta$  的  $1/2$ 。即当视场角度为  $2\phi_{\max}$  时, 可以计算出摄像机可能的位置约束在图 8(a) 所示的虚线圆上,  $D_y$  的上界位于圆的底部。

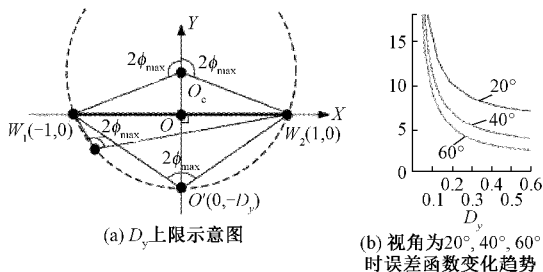


图 8 寻找  $D_y$  的最佳值

同时, 考虑到相机是全景的, 因此可假设它们的视角  $2\phi_{\max} > 120^\circ$ , 则有:

$$\max(D_y) = \cot(\phi_{\max}) \cot(\frac{\pi}{3}) \approx 0.6 \quad (41)$$

根据这个上界, 将函数  $E_w$  绘制在图 8(b) 中, 可以看出

$D_y$  的值越大,  $E_w$  的值越小。证明完毕。利用式(40), 式(29)可被重写为:

$$(D_x^*, D_y^*) = \underset{(D_x, D_y)}{\operatorname{argmin}} (\max(E(O), E(W_2))) \quad (42)$$

此外,  $D_y$  的上界受到摄像机部署约束的限制, 即图 6 中的  $\xi_y$ 。

根据定理 3, 式(42)中的最优值  $D_y^*$  可知为  $\min(\xi_y, 0.6)$  ( $\xi_y$  是  $D_y$  的上界), 因此  $D_x^*$  是唯一需要进行优化的参数, 即:

$$D_x^* = \underset{D_x}{\operatorname{argmin}} (\max(E_{mid}(D_x, D_y^*), E_{bound}(D_x, D_y^*))) \quad (43)$$

其中,  $E_{bound}$  和  $E_{mid}$  定义为:

$$E_{bound}(D_x, D_y^*) = E(W_2), E_{mid}(D_x, D_y^*) = E(O) \quad (44)$$

### 4.2 优化模型的数值求解

本文通过二分法求解式(43)中定义的关于  $D_x^*$  的优化模型。参考图 9(a) 中的  $E_{mid}$  和  $E_{bound}$  曲线, 可知  $E_{mid}$  和  $E_{bound}$  两个曲线的交点即为待求的最优解  $D_x^*$ 。为此, 定义函数  $E_{opt}$  为:

$$E_{opt}(D_x, D_y^*) = E_{mid}(D_x, D_y^*) - E_{bound}(D_x, D_y^*) \quad (45)$$

则方程  $E_{opt}$  的根就是最优解  $D_x^*$ , 可利用二分法求解方程  $E_{opt}$  的根。首先, 确定根的初始范围。  $D_x$  的下界  $lower_{D_x}$  显然为 0, 根据图 9(b), 对上界  $upper_{D_x}$  进行推导。从图 9(b) 可以看出:

$$|O_c O_2| = |O_c W_2| = \csc(\pi - 2\phi_{\max}) = \csc(2\phi_{\max}) \quad (46)$$

圆心  $O_c$  的坐标为:

$$O_c = (0, \cot(\pi - 2\phi_{\max})) = (0, -\cot(2\phi_{\max})) \quad (47)$$

根据勾股定理, 我们有:

$$D_x^2 = |O_c O_2|^2 - |O_c O_1|^2 = |O_c W_2|^2 - 1 = \csc^2(2\phi_{\max}) - |D_y^* - \cot(2\phi_{\max})|^2 = 1 - D_y^* [D_y^* - 2\cot(2\phi_{\max})] \quad (48)$$

$D_x^2$  对  $2\phi_{\max}$  的一阶导数为:

$$\frac{\partial(D_x^2)}{\partial(2\phi_{\max})} = 2D_y^* (-\csc^2(2\phi_{\max})) \quad (49)$$

由于  $D_y^* > 0$ ,  $D_x^2$  的一阶导数小于 0, 即  $D_x$  随着  $2\phi_{\max}$  的增加而减小, 因此, 当  $\phi_{\max}$  达到最小时,  $D_x$  的最大值出现。因此, 根据式(48), 可求出  $D_x$  的上界为:

$$upper_{D_x} = \sqrt{1 - D_y^* [D_y^* - 2\cot(2\phi_{\max})]} \quad (50)$$

求解双目系统最优配置问题的具体步骤如下:

目的: 寻找双面视觉系统最优配置。

输入: 相机的视角  $2\tau_{\max}$  和焦距  $f$ 。

输出: 最佳系统配置  $(D_x^*, D_y^*)$ , 也即全域摄像机放置在  $O_1(-D_x^*, D_y^*)$  和  $O_2(D_x^*, D_y^*)$ , 并按图 6 所示方向放置。

步骤 1) 根据系统部署初始参数计算  $\xi$ , 并设置  $D_y^* = \min(\xi_y, 0.6)$ 。

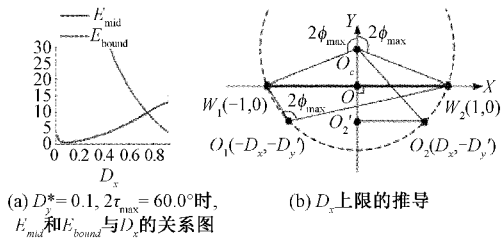


图9 最优解  $D_x^*$  的求解

步骤2) 设置变量  $lower_{D_x} = 0$  并计算  $E_{opt}(lower_{D_x}, D_y^*)$ , 并将结果赋值给变量  $lower$ 。设  $D_x = lower_{D_x}$ , 并根据式(27)计算  $\varphi_{\max}$ , 根据式(28)计算偏心率  $\epsilon$ , 根据式(44)计算  $E_{mid}$  和  $E_{bound}$ , 其中  $O_1 = (-D_x^*, D_y^*), O_2 = (D_x^*, D_y^*)$ , 再根据式(45)计算  $E_{opt}$ 。

步骤3) 通过式(50)计算  $D_x^*$  的上限  $upper_{D_x}$ 。

步骤4) 按照步骤1)~3)的计算  $E_{opt}(upper_{D_x}, D_y^*)$ , 并将结果赋给变量  $upper$ 。

步骤5) 如果  $lower$  和  $upper$  符号相反, 则利用二分法的搜索方程的根, 步骤如下:

$$(1) \text{ 设 } new_{D_x} = \frac{lower_{D_x} + upper_{D_x}}{2}。$$

(2) 按照步骤1)~3)计算  $E_{opt}(new_{D_x}, D_y^*)$ , 并将结果分配给变量  $new$ 。

(3) 如果  $(new < lower)$ , 则令  $lower = new, lower_{D_x} = new_{D_x}$ ; 否则, 令  $upper = new, upper_{D_x} = new_{D_x}$ 。

(4) 如果  $(upper_{D_x} - lower_{D_x}) < \delta$ , 其中  $\delta$  为预定义的精度阈值, 则以  $(D_x^*, D_y^*) = (new_{D_x}, \xi_y)$  作为输出并结束迭代; 否则, 转到步骤5)。

步骤6) 如果  $lower > 0$  且  $upper > 0$  或  $lower < 0$  且  $upper < 0$ , 则选择  $D_x^*$  作为上界  $upper_{D_x}$ , 并取  $(D_x^*, D_y^*) = (upper_{D_x}, \xi_y)$  作为输出。

### 5 实验分析

实验中, 首先在室内模拟环境中对本文提出的最佳系统配置优化模型的有效性进行了实验分析; 然后将本文方法与现有的4种算法分别在模拟测量环境和真实测量环境下进行了实验对比分析。

#### 5.1 本文优化配置模型有效性分析

考虑一个尺寸为  $10\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 3\text{ m}$  的房间, 如图10(a)所示, 实验目的是精确计算用户身体在三维测量区域内移动的三维数据, 全景摄像头放置在图中的相机放置区域。实验中, 首先使用本文所提出的方法推导出该模拟案例的最佳系统配置。然后, 对最佳系统配置和一些非最佳系统配置产生的三维测量精度进行了对比分析。

为了找到最佳系统配置, 首先定义坐标系如图10(a)所示, 地板被设为平面  $Z = 0$ , 透视相机的视角  $2\tau_{\max}$  选择为  $60^\circ$ 。接下来, 在三维测量区域中产生大约100个均匀分

布的点, 并且在照相机放置区域中产生大约1000个类似分布的点。然后, 根据第5.2节中提出的优化配置求解模型计算系统的最佳配置  $S_1^*, S_1^*$  使该系统具有最小三维测量误差。最佳系统配置求解结果如图10(a)所示,  $S_1^*$  包括: 1) 两个摄像机的位置, 分别为  $(\pm 3.92\text{ m}, -0.5\text{ m}, 2.5\text{ m})$ ; 2) 定向光轴  $a_1$  和  $a_2$  分别由向量  $(\pm 0.093, 0.996, 0)$  确定; 3) 反射镜的偏心率  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  均为1.8967。两个摄像机拍摄的图像由光线跟踪程序POV-Ray模拟, 如图10(b)和(c)所示。

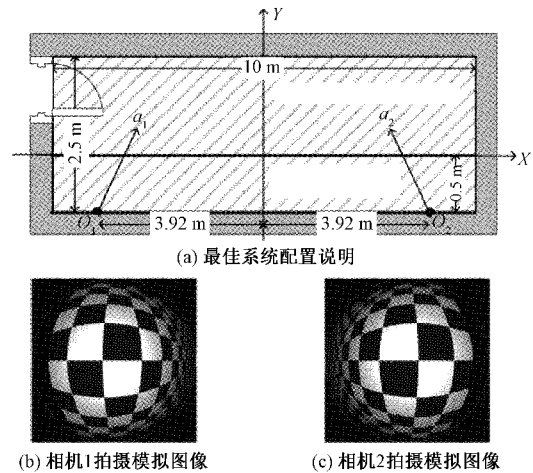


图10 优化过程得出的一般情况下的最佳系统配置

为了比较本方法求出的最佳系统配置  $S_1^*$  的三维测量精度, 随机选择了4种系统配置  $S_1, S_2, S_3$  和  $S_4$  进行对比分析。对于所选择的4种方案, 方案  $S_1$  中两个摄像机的位置配置为  $(\pm 2.5\text{ m}, -0.5\text{ m}, 2.5\text{ m})$ , 方案  $S_2$  中两个摄像机的位置配置为  $(\pm 1.67\text{ m}, -0.5\text{ m}, 2.5\text{ m})$ , 方案  $S_3$  中两个摄像机的位置配置为  $(\pm 3.33\text{ m}, -0.5\text{ m}, 2.5\text{ m})$ , 方案  $S_4$  中两个摄像机的位置配置为  $(\pm 2.87\text{ m}, -0.5\text{ m}, 2.5\text{ m})$ 。方案  $S_1, S_2, S_3$  和  $S_4$  中, 光轴方向和两个反射镜的偏心率按照第3.2节中的方法进行计算。

在每种配置的实验中, 三维测量区域中均匀地生成大约1000个点。首先将生成的每个点投影到坐标为  $(u_1, v_1)$  和  $(u_2, v_2)$  的两幅全景图像上。然后, 对4个坐标值添加均值0且标准差为1.0 pixel的高斯噪声, 并通过中点三角剖分相应地求出三维坐标点的估计位<sup>[24]</sup>。以真实三维坐标点和估计三维坐标点之间的距离作为每种方案的三维测量误差。

每种方案对1000个点进行测量时的最小误差、最大误差和标准差如表1所示。同时, 利用第4节提出的准则函数  $E_w$  对4种随机选择方案三维测量误差的最小值、最大致和标准差进行估计, 计算结果也列于表1中。

最大三维测量误差越小表面系统配置的效果越好(见表1中第3列的粗体字部分), 可以看出, 与4种随机配置相比, 通过本文提出的优化模型求出的配置具有更好的测

表 1 三维测量误差比较 cm

系统配置	三维测量误差			提出方法的三维测量估计误差		
	Min	Max	Std	Min <sup>E</sup>	Max <sup>E</sup>	Std <sup>E</sup>
S <sub>1</sub> <sup>*</sup>	0.337	<b>11.173</b>	1.965	0.875	<b>12.395</b>	1.856
S <sub>1</sub>	0.392	<b>23.673</b>	3.544	1.188	<b>18.857</b>	2.895
S <sub>2</sub>	0.384	<b>18.285</b>	2.883	1.645	<b>16.590</b>	2.137
S <sub>3</sub>	0.397	<b>35.577</b>	3.758	2.241	<b>26.633</b>	4.326
S <sub>4</sub>	0.359	<b>25.673</b>	5.461	1.886	<b>22.799</b>	3.937

量精度。在所提出的双目视觉系统优化配置模型中,系统测量误差  $E_w$  被作为优化准则函数,优化模型通过估计  $E_w$  的最大值从而寻找最佳系统配置,因此模型估计误差  $E_w$  的取值也可以反映优化模型的有效性。从表 1 第 3 列中的最大值 max 与第 6 列中的最大值 max<sup>E</sup> 的相似性可以看出本文所提方法有效性。

5.2 与现有优化配置算法的比较

本文所提出的优化模型中,通过误差传播分析来评估三维测量误差,目前经典的优化算法通常是通过协方差矩阵来评估三维测量误差<sup>[23-26]</sup>。本文选择了 4 种基于协方差矩阵估计测量误差的算法<sup>[27]</sup>,通过实验与本文提出的模型进行对比分析。

当使用协方差矩阵来评估由双目视觉系统产生的三维测量误差时,假设  $P$  是空间中的特征点,  $P^L$  是点  $P$  在左摄像机图像中对应的像素点,记  $P^L$  的坐标为  $(u_1, v_1)$ ;  $P^R$  是点  $P$  在右摄像机图像中对应的像素点,记  $P^R$  的坐标为  $(u_2, v_2)$ 。设点  $P$  的三维位置坐标计算函数为  $f(u_1, v_1, u_2, v_2)$ , 则点  $P$  的三维位置数据的协方差矩阵  $\sum_P$  计算公式为:

$$\sum_P = (\partial f / \partial P) \sum_R (\partial f / \partial P)^T \quad (51)$$

式中:  $R$  表示向量,  $R = (u_1, v_1, u_2, v_2)$ ,  $\sum_R$  是  $R$  的协方差矩阵,  $T$  表示矩阵的转置。协方差矩阵  $\sum_R$  通过数值法进行估计<sup>[23]</sup>, 函数  $f$  的一阶导数通过有限差分法进行计算, 差分步长取为  $10^{-10}$ 。计算出协方差矩阵  $\sum_R$  后, 分别采用以下 4 种经典算法估计双目视觉系统的三维测量误差: 1) 通过协方差矩阵行列式估计测量误差<sup>[28]</sup>; 2) 通过协方差矩阵的迹估计测量误差<sup>[27]</sup>; 3) 通过协方差矩阵的最大特征值估计测量误差; 4) 通过协方差矩阵(covariance matrix, CM)的对角线元素最大值估计测量误差。将这 4 种方法分别被命名为协方差行列式、协方差迹、CM 最大特征值和 CM 对角线最大值。

1) 模拟实验环境下 5 种配置优化模型测量误差的比较

在仿真实验中, 三维测量区域被设置为矩形区域, 矩形区域的两个对角顶点分别为  $(-1, 0, 1)$  和  $(1, 0, 1)$ , 在区域内选择了大约 4 000 个等距的实验点作为三维测量位置。两个全景相机的放置位置为  $(\pm 0.7, -0.1, 0)$ , 透视相机的

视角为  $60^\circ$ , 采集图像的分辨率为  $600 \times 600$ 。在每次实验中, 首先拍摄两幅全景图像, 在左右全景图像中分别提取测量位置  $P_i$  的投影像素  $l_i$  和  $r_i$ 。为了模拟特征检测过程中的不确定性, 将  $[-1.0, 1.0]$  内均匀分布的噪声干扰添加到像素  $l_i$  和  $r_i$  的坐标值中, 然后利用  $l_i$  和  $r_i$  添加噪声后的坐标值对  $P_i$  的三维位置测量值进行估计, 设估计值为  $P'_i$ 。由于坐标值受到噪声的干扰, 计算出的三维位置  $P'_i$  与地面真实值  $P_i$  有一定的不同。经多次实验后, 分别计算本文方法和另外 4 种经典算法的平均峰值信噪比 (PSNR) 和运行时间, 结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 本文方法具有更高的测量精度, PSNR 最大, 明显优于另外 4 种算法, 而且算法运行时间也有较大的优势。协方差迹模型是另外四种算法种精度最高的, 与协方差迹模型相比, 本文方法的 PSNR 约提高了  $\frac{24.37-18.35}{18.35} \approx 32.8\%$ , 而运行时间大约减小了  $\frac{279.06}{9.46} \approx 29.50$  倍。

表 2 仿真中的 PSNR 值和运行时间

方法	峰值信噪比/PSNR	运行时间/s
本文方法	24.37	9.46
协方差行列式	11.98	285.77
协方差迹	18.35	279.06
CM 最大特征值	16.27	338.19
CM 对角线最大值	14.99	289.44

2) 真实实验环境下 5 种配置优化模型测量误差的比较

本节在真实实验环境下分析本文所提视觉系统优化配置模型的性能。在实验中, 两个全景相机被放置在指定的放置区域, 实验人员允许在指定的三维测量区域中自由移动, 利用本文方法和协方差行列式、协方差迹、CM 最大特征值、CM 对角线最大值方法, 分别计算两个相机的最佳位置和方向。具体实验环境如图 11(a) 所示, 地板平面设为  $X-Y$  平面, 三维测量区域为长方体区域, 长方体的两个对角顶点为  $(5.0, 2.0, 2.0)$  和  $(5.0, 0, 0)$ ; 摄像机放置区域为  $Z=0$  平面上的矩形区域, 两对角顶点为  $(5.0, 2.0, 1.0)$  和  $(-5.0, -0.5, 1.0)$ 。优化算法的目标是找到两个全景摄像机的最佳位置  $O_1$  和  $O_2$  以及它们的光轴方向  $a_1$  和  $a_2$ , 确保位于测量区域内的物体的三维测量尽可能精确。两台相机均为双曲面折反射相机, 偏心率  $e$  为 1.657 1, 透视相机视角为  $2\tau_{\max} = 38^\circ$ , 全像尺寸为  $600 \times 600$ 。

首先, 在三维测量区域内以 10 cm 的固定间隔对三维测量位置进行点采样, 同时, 在摄像机放置区域内以 1 cm 的固定间隔摄像机放置位置进行点采样。然后, 对于摄像机  $O_1$  和  $O_2$  的每个可能位置, 按照光轴方向计算方法求出光轴的方向, 并通过第 4 节中提出的误差模型评估三维测量误差。最后, 三维测量误差最小时的两个全景相机的姿



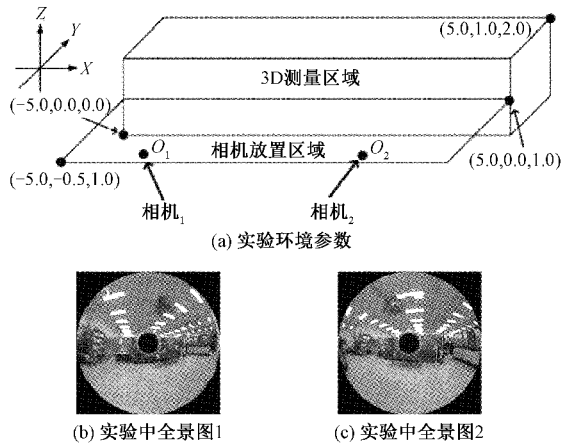


图 11 实验的环境

态被认为是最佳系统配置参数。利用本文方法进行优化计算后表明,两个摄像机的最佳放置位置分别为  $(3.78, -0.5, 1.0)$  和  $(-3.78, -0.5, 1.0)$ ,最佳光轴方向分别为  $(-0.14, 0.99, 0)$  和  $(0.14, 0.99, 0)$ 。在双目视觉系统配置完成后,利用该系统进行三维位置测量精度实验,在三维测量区域的  $Y=0, 1.0$  和  $2.0$  处分别放置棋盘(图 12(a)是  $Y=0$  时的两次放置)。从拍摄的全景图中提取出所有交叉点对应的图像像素点,并对提取的像素点坐标添加幅度在  $[-5, 5]$  范围内的加性噪声干扰,以模拟特征检测过程引入的误差。然后,根据本文所提出的方法,计算交叉点的三维测量数据,并根据地面真实数据计算三维测量误差。图 12(b)是  $Y=0$  时本文方法在测量交叉点位置时的测量误差图,可以看出,测量误差和真实误差(如图 7(b)所示)的形状基本保持一致,从而证明了本文方法具有较高的测量精度。利用另外 4 种方法分别对交叉点的位置值进行计算,并与本文方法的实验结果进行比较,测量误差和运行时间的实验结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,本文方法具有更好的测量精度,与精度最高的 TR 方法相比,最大测量误差减小了约  $(28.119 - 23.311) / 28.119 \approx 17.1\%$ ,运行速度提高了约  $208.124 / 12.437 \approx 16.7$  倍。

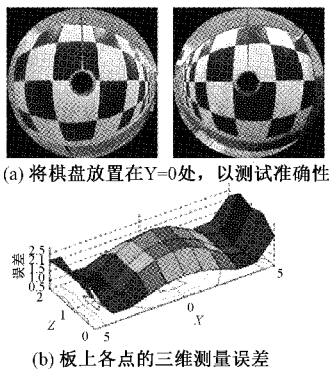


图 12 测试导出的最佳系统配置的三维测量精度

表 3 真实实验环境下 5 种优化配置算法的实验结果

配置优化算法	左右相机位置/m	最大测量误差/cm	运行时间/s
协方差行列式	$(\pm 4.15, -0.5, 1.0)$	30.273	207.559
协方差迹	$(\pm 4.21, -0.5, 1.0)$	28.119	208.124
CM 最大特征值	$(\pm 3.97, -0.5, 1.0)$	29.788	229.322
CM 对角线最大值	$(\pm 4.06, -0.5, 1.0)$	30.343	215.792
本文方法	$(\pm 3.84, -0.5, 1.0)$	23.311	12.437

3) 模拟机械臂系统测量误差分析

斗臂车装置中双目视觉测量的流程包括:相机系统配置、图像校正、图像匹配、亚像素坐标获取等,相机参数配置对实验测量精度至关重要,它的目的是建立摄像机的图像像素坐标与空间点三维坐标之间的关系,确定两个全景摄像机的最佳位置  $(O_1$  和  $O_2)$ 、光轴方向  $(\alpha_1$  和  $\alpha_2)$  以及镜头的偏心率  $(\epsilon_1$  和  $\epsilon_2)$ 。本文所用斗臂车模拟双目视觉测量实验系统如图 13 所示,实验系统由 2 个带镜头的摄像机、1 个调节机构、1 台计算机和 1 个靶标组成。实验运行环境如下:64 位 Windows10 操作系统,Inter (R) Core (TM) i5200 CPU M430@2.27 GHz 处理器,16 GB 内存;软件实施平台为 MATLAB 2020b。

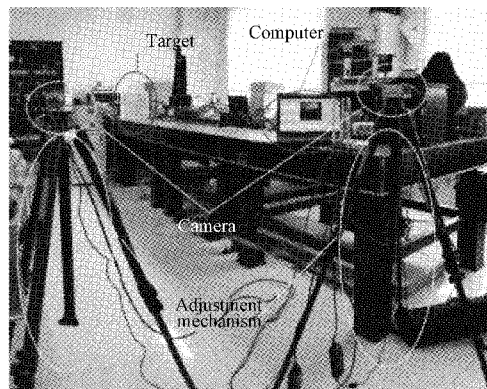


图 13 模拟机械臂双目视觉精度分析系统

在实验中,两部相机参数相同,均为前置摄像头,相机型号为 piA2400-17gm,分辨率为  $2400 \times 2050$  像素。镜头型号为 M2514-MP2,焦距 25 mm,视场角约  $60^\circ$ 。实验中使用的是具有 81 个角  $(9 \times 9)$  的平面棋盘靶,在棋盘靶的水平和垂直方向上特征点分布均匀,最小点间距为 48 mm。平面棋盘靶材料为陶瓷,间隔误差小于 0.003 mm。

将本文方法与目前广泛使用且效果较好的协方差行列式、协方差迹、CM 最大特征值和 CM 对角线最大值等 4 种配置算法进行实验对比分析,分别 5 种方法配置后的测量精度和配置时间。在本文实验中,利用上述平面棋盘靶和 5 种相机配置算法对分别摄像机参数进行优化配置。我们

将目标放置在 10 个不同的位置进行测试,应用双目视觉系统计算特征点的距离,利用两个特征点的距离误差定义双目视觉系统的测量误差。本文中,双目视觉系统测量误差评价指标定义为:

$$E_d^i = |G_i - G_{true}|, \bar{E}_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_d^i \quad (52)$$

其中,  $G_i$  为第  $i$  次测量时求出的两特征点间的距离,

$G_{true}$  为两特征点间对应距离的真实值,  $E_d^i$  表示第  $i$  次测量时的误差,  $\bar{E}_d$  表示  $N$  次测量实验时的平均误差。

本文分别计算了 10 次实验中两特征点之间的平均距离误差,5 种相机参数配置方法配置后双目视觉系统的测量误差如表 4 所示。同时,为了比较了 5 种参数配置算法的计算效率,分别测量了 5 种配置算法的平均计算时间,其结果也如表 4 所示。

表 4 测量误差和计算时间

实验 次数	协方差行列式		协方差迹		CM 最大特征值		CM 对角线极值		本文方法	
	$E_{d,ave}$	$E_{l,ave}$	$E_{d,ave}$	$E_{l,ave}$	$E_{d,ave}$	$E_{l,ave}$	$E_{d,ave}$	$E_{l,ave}$	$E_{d,ave}$	$E_{l,ave}$
1	1.16	341.67	0.82	288.60	1.05	291.23	1.17	294.12	0.66	14.48
2	1.32	339.98	0.84	278.42	1.50	295.93	0.98	284.73	0.71	15.77
3	1.38	343.78	0.87	277.81	1.27	289.47	1.18	294.35	0.64	11.68
4	1.57	343.15	1.01	280.11	1.19	285.52	1.25	298.92	0.68	14.81
5	1.19	337.85	0.97	269.43	1.27	303.21	1.15	293.21	0.72	14.26
6	1.41	342.03	0.93	291.35	1.17	290.70	1.21	295.94	0.61	12.63
7	1.49	342.36	1.07	285.78	1.18	297.40	1.18	294.40	0.68	13.51
8	1.24	345.32	1.03	280.38	1.34	294.42	1.07	289.25	0.70	14.28
9	1.17	337.65	1.05	291.01	1.34	301.13	1.13	282.23	0.73	17.52
10	1.37	347.73	0.96	275.60	1.21	288.27	1.33	286.83	0.60	16.71
平均	1.33	342.15	0.95	281.84	1.25	293.73	1.16	291.39	0.67	14.56

从表 4 可以看出,在测量精度方面,本文提出配置方法与协方差行列式法、协方差迹法、CM 最大特征值法和 CM 对角线最大值法相比,其配置后的双目视觉系统的测量精度有明显提高。本文方法,协方差行列式、协方差迹、CM 最大特征值和 CM 对角线最大值方法的平均误差分别为 0.67、1.33、0.95、1.25 和 1.16 mm。与协方差行列式法相比,本文方法的测量精度近似提高了 49.62%;与协方差迹算法相比,本文方法的测量精度近似提高了 36.84%,与 CM 最大特征值算法相比,本文方法的测量精度近似提高了 46.40%;与 CM 对角线最大值算法相比,本文方法的测量精度近似提高了 42.24%。而且,与另外三种配置算法相比,本文方法的误差分布也更加平稳。

从表 4 也可以看出,本文方法的平均计算时间为 14.56 ms,与协方差行列式算法相比,平均计算时间减小大约 23.49 倍;与协方差迹算法相比,平均计算时间大约减小了 19.31 倍;与 CM 最大特征值算法相比,平均计算时间大约减小了 20.17 倍;与 CM 对角线最大值算法相比,平均计算时间大约减小了 20.01 倍。5 种方法的平均计算时间表明本文提出的 GAM 标定方法具有较高的计算效率,可以用于实时在线测量双目视觉系统。

## 6 结 论

本文研究了绝缘斗臂车的双目视觉系统中具有两个折射反射全景相机的立体双面视觉系统的优化配置问题,以

三维坐标数据测量误差最小为目标函数,计算全景相机位置、方向和镜面形态等参数的最优取值。本文根据误差传播分析、图像像素量化精度和角度分辨率变化,推导了三维测量误差模型的解析公式,并利用该误差公式建立了视觉系统的优化配置模型。针对具有长方体三维测量区域以及矩形摄像机放置区域的常规环境,设计了优化配置模型的数值求解方法。通过模拟实验环境和真实实验环境对所提方法进行了实验分析,实验结果表明了本文方法的可行性。在实际应用中,为了建立精确的三维测量立体视觉系统,所用的摄像机有可能会多于两个,如何将所提出的优化方法推广到多于两个全景摄像机的斗臂车立体视觉系统是我们未来的研究方向。

## 参考文献

- [1] 郭鑫. 基于空间机械臂双目视觉测量的关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2019.
- [2] 朱照飞,刘伟. 基于改进的 SURF 特征点的双目测距[J]. 电子测量技术,2018,41(12):133-138.
- [3] ZHOU W, YU L, WU M. Simulating binocular vision forno-reference 3D visual quality measurement[J]. Opt. Express, 2015,23:23710-23725.
- [4] 郑冬,冯鹏,龙邹荣,等. 面向多因素工况下的相机标定精度综述[J]. 国外电子测量技术,2020,39(8):109-116.
- [5] 王琨,骆敏舟,曹毅,等. 基于多变量预测补偿的机械臂

- 精度提升方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11):1213-1221.
- [6] 陈立, 李柯达, 张泽宇, 等. 基于计算机视觉的目标测距算法[J]. 导弹与制导学报, 2020, 40(2): 93-96.
- [7] RAFAEL B, NICOLA S, NICOLAI P, et al. Efficient binocular stereo correspondence matching with 1-D Max-trees [J]. Pattern Recognition Letters, 2020, 135(2020): 402-408.
- [8] 王竟磊. 基于两条垂直直线的相机标定方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [9] FORSYTH D, JEAN P. Computer vision[M]. Inc: Prentice Hall, 2008.
- [10] 陈天飞, 马孜, 吴翔. 基于主动视觉标定线结构光传感器中的光平面[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 256-263.
- [11] 王鑫, 李伟, 梁炜, 等. 单目相机-IMU-机械臂的空间联合标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 221-231.
- [12] 杨子寒, 赖际舟, 吕品, 等. 一种可参数自标定的鲁棒视觉/惯性定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 259-267.
- [13] 文涛, 左东广, 李忠科. 一种鲁棒的高精度摄像机标定方法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(11): 3489-3491.
- [14] 徐中宇. 基于遗传算法的摄像机内部参数标定优化方法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2014, 6: 1267-1271.
- [15] 王道累, 孙昊, 胡松. 基于天牛须搜索算法的单目相机标定方法[J]. 济南大学学报, 2020, 34(6): 568-574.
- [16] MENG J, WEI Y, HOSEINNEZHAD R, et al. Distributed multi-sensor fusion using generalized multi-bernoulli densities[C]. International Conference on Information Fusion, IEEE, 2016.
- [17] HANEL M, KUHN S, HENRICH D, et al. Optimal camera placement to measure distances conservatively regarding static and dynamic obstacles [J]. Int. J. Sensor Netw., 2012, 12(1): 25-36.
- [18] JACEK T. Binocular system with asymmetric eyes [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2018, 35(7): 1180-1191.
- [19] WU C J, TSAI W H. An omni-vision based localization method for automatic helicopter landing assistance on standard helipads [C]. Proc. Int. Conf. Comput. Autom. Eng., 2010, 3: 327-332.
- [20] JIANG J W, LIU L, FU R G, et al. Non-horizontal binocular vision ranging method based on pixels [J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52: 223.
- [21] 张志强, 施文华. 改进的尺度不变特征变换算法并加速双目测距系统及其实现[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 201-210.
- [22] 宋超群, 许四祥, 杨宇, 等. 一种基于改进 ORB 算法的双面视觉测距方法[J]. 光电子. 激光, 2021, 32(2): 122-129.
- [23] 李龙, 王翱翔, 韩越兴, 等. 基于几何约束的双目测距技术研究[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(7): 8-11.
- [24] 张仲楠, 霍炜, 廉明, 等. 基于 YOLOv5 的快速双目立体视觉测距研究[J]. 青岛大学学报, 2021, 36(2): 20-27.
- [25] WANG Q Y, WANG Z Y, YAO Z J, et al. An improved measurement model of binocular vision using geometrical approximation [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(12): 125013.
- [26] MASATOMO K, YUTAKA A. Binocular range-sensor LSI with improved distance detection precision by coordinated pixel placement [J]. IEICE Electronics Express, 2014, 11(19): 1-11.
- [27] ALSADIK B, GERKE M, VOSSelman G. Automated camera network design for 3-D modeling of cultural heritage objects [J]. Proc. ISPRS Ann. Photogrammetry, Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2012, 1: 7-12.

### 作者简介

王龙华, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高压计量测试技术。

曾国华, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力自动化装备设计。

E-mail: 39625732@qq.com