

# 基于合作靶球的视觉传感器外参标定方法

宋佳慧, 任永杰\*, 杨守瑞, 尹仕斌, 郭 寅, 叶声华

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 视觉传感器的外参标定旨在建立视觉坐标系与外部标准坐标系之间的关系。设计了视觉测量合作靶球以实现视觉测量与仪器测量之间的合作测量。通过将视觉测量合作靶球与激光跟踪仪靶镜相互替换获取公共点在视觉坐标系和外部标准坐标系下的坐标, 并利用公共点在两坐标系下的坐标对目标函数进行非线性优化, 获得视觉传感器外参数最优解。视觉测量合作靶球的设计将靶标、光源和球形外壳相融合, 以满足与跟踪仪合作靶镜的互换性和球心可测的需求。对外参标定过程中的误差传递进行了分析, 并通过仿真优化标定精度, 以及实验验证该标定方法的精度。结果表明, 该方法的外参标定精度可达到 0.036 mm, 能够实现直接、灵活、高精度的公共点数据获取。

**关键词** 机器视觉; 外参标定; 视觉测量合作靶球; 立体视觉传感器; 精度分析

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0915003

## Extrinsic Parameter Calibration Method Based on Substitutable Target Sphere for Vision Sensors

Song Jiahui, Ren Yongjie, Yang Shourui, Yin Shibin, Guo Yin, Ye Shenghua

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** The aim of extrinsic parameter calibration is to build the relationship between vision coordinate system and extrinsic standard coordinate system. The substitutable target sphere for vision-measurement is designed to cooperate the vision-measurement and instrument measurement. The vision-measurement target sphere and the equipment-measurement target sphere replace each other to get the coordinate of common points in both vision coordinate and standard coordinate. And the extrinsic parameters are solved by optimizing the target function with the coordinate of common points in both systems using non-linear optimization method. The design of substitutable vision-measurement target sphere consists of target, light source and sphere shell to satisfy the substitutability with equipment-measurement target sphere and the availability of center of sphere. The propagation of error during the calibration is presented. The accuracy of calibration is promoted through simulation and verified by experiment. The result shows that the accuracy reaches 0.036 mm, which shows that the proposed method can realize public point data acquisition directly, flexibly and high-accuracyly.

**Key words** machine vision; extrinsic parameter calibration; substitutable target sphere for vision-measurement; stereo vision sensors; precision analysis

**OCIS codes** 150.0155; 150.1448; 150.1135

## 1 引 言

视觉传感器具有测量精度高、非接触、灵活等优点, 日益广泛地应用于机器人、在线检测、产品质量检测、振动检测、工业探伤以及生理分析等领域<sup>[1-3]</sup>。视觉传感器所测得视觉坐标系下的测量数据, 在白车身视觉

**收稿日期:** 2017-04-05; **收到修改稿日期:** 2017-05-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(51475329)、国家科技重大专项(2014ZX04001-081-06)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ350747)

**作者简介:** 宋佳慧(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事视觉测量方面的研究。E-mail: songjiahui\_tju@tju.edu.cn

**导师简介:** 叶声华(1934—), 男, 博士, 院士, 主要从事激光及光电测量技术方面的研究。E-mail: shhuaye@tju.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: yongjieren@tju.edu.cn

检测系统<sup>[4]</sup>、双目视觉-激光测距传感器目标跟踪系统<sup>[5]</sup>、双摄像机相位测量轮廓术系统<sup>[6]</sup>及基于机器人和视觉传感器的柔性坐标测量系统<sup>[7]</sup>中均需要将测量数据转换到外部标准坐标系,以满足全局坐标统一<sup>[8-9]</sup>和数据拼接等需求。因此,标定视觉坐标系与外部标准坐标系之间的转换关系,即视觉传感器的外参标定,是视觉检测中不可缺少的步骤。冯克猷等<sup>[10]</sup>利用直接线性标定算法将传感器外参标定归纳为 12 个参数的确定,并利用平面靶标上共面非线性的点进行相机的外参标定,但该方法对靶标的平面度要求很高,给高精度标定增加了难度。刘常杰等<sup>[11]</sup>提出采用两台经纬仪建立外部标准坐标系,利用三个不共线的公共点确定视觉传感器的外参,但双经纬仪的摆放空间受到限制,且交汇测量易存在测量盲区。刘玥等<sup>[12]</sup>利用激光跟踪仪作为外部精密坐标测量设备,利用配有磁座的圆孔阵列靶标来建立坐标间的转换关系,但该靶标需要使用精度高于激光跟踪仪的三坐标测量机精确标定圆孔圆心和匹配磁座上放置的靶球球心间的位置关系,操作繁琐且精度很难保证。

视觉传感器的外参标定依赖于公共点在视觉坐标系和外部标准坐标系下的坐标,因此公共点数据的获取是外参标定的关键。本文提出利用视觉测量合作靶球来获取公共点数据的方法,利用测量仪器(如激光跟踪仪)作为外部标准测量设备,通过将视觉测量合作靶球与跟踪仪反射靶球相互替换直接得到公共点在两坐标系下的坐标,从而实现视觉测量与仪器测量的合作测量,进而实现视觉传感器外参的标定。该方法具有直接性、灵活性和高精度性。利用视觉测量合作靶球的公共点数据获取方法可在视觉传感器的视场范围内任意摆放球座,通过仿真分析相机提点误差、公共点的选择等因素对外参标定的结果影响,对外参标定精度进行优化。最后搭建实验平台,对该标定方法进行精度验证。

## 2 视觉测量合作靶球的设计

视觉传感器的外参标定利用公共点在视觉坐标系和外部标准坐标系下的坐标对目标函数进行优化求解,得到两坐标系之间的旋转和平移参数,因此获取公共点在两坐标系下的坐标是外参标定过程中的关键步骤。本文设计视觉测量合作靶球用于在外参标定过程中获取数据。外部测量仪器在测量时通常将球心作为基准点,比如跟踪仪测量反射靶镜的球心,室内空间定位测量系统(wMPS)测量接收器球的球心,接触式测量仪器测量一系列球上的点拟合得到球心坐标等。因此,为了直接测得该点在视觉坐标系下的坐标,设计视觉测量合作靶球时将视觉传感器可测的靶标与同测量仪器靶球尺寸大小一致的球形外壳相结合,使得球心可测,球形外壳方便与跟踪仪反射靶镜相互替换并且保证测得的是物空间内同一个点,而靶标则用于通过视觉传感器获取球心坐标。如图 1(a)所示,在外部标准坐标系下,公共点的三维坐标利用激光跟踪仪测量其反射靶镜的球心获得;在视觉坐标系下,利用视觉传感器可以测得视觉测量合作靶球的球心坐标。靶标与球形外壳的融合设计,将外参标定的公共点坐标获取过程简化为通过合作靶球与反射靶镜的相互替换来实现,从而直接、灵活、简单地获取数据。

基于以上原理,视觉测量合作靶球的设计包括靶标设计、光源设计和机械结构设计等部分,如图 1(b)所示。1)靶标的设计,为了满足合作靶球球心坐标可测的需求,在合作靶球球心处放置以同心圆环为特征图案的玻璃基底的光刻靶标,根据球的外形尺寸设计光刻靶标的尺寸,并通过仿真优化设计同心圆环的个数和尺寸<sup>[13]</sup>,利用视觉传感器拍摄靶标并提取其特征点以获得球心坐标。2)光源的设计,视觉传感器需要对光刻靶标进行拍摄来提取球心坐标,因此需要光源对靶标进行照明,以获取清晰的特征图案。将排布在圆形印刷电路板上的 LED 作为光源放置在合作靶球内的底部,并根据球的尺寸设计圆形电路板的直径。由于光照不均匀会影响特征点的提取精度,因此需要优化 LED 的排布使得光均匀照在光刻靶标的透明玻璃部分。将光源设置为圆形范围内的 LED,利用 Light Tools 优化 LED 的排布位置;将光刻靶标的透明玻璃部分设置为接收器,光源到接收器的距离设为放置光源的球底部到球心的距离,对光照强度进行网格优化,优化结果应为将 LED 均匀排布在圆形电路板边缘上使光照均匀。3)机械结构的设计,球形外壳的机械结构设计综合考虑光刻靶标的中心位于球心位置,光源位于球的底部对靶标进行照明,在球的内部设计了调心机构用于影像仪下的靶面对心,通过螺纹配合调整靶标在  $z$  方向的位置,并在圆心高度处通过顶丝配合调整并固定  $xy$  方向的位置。

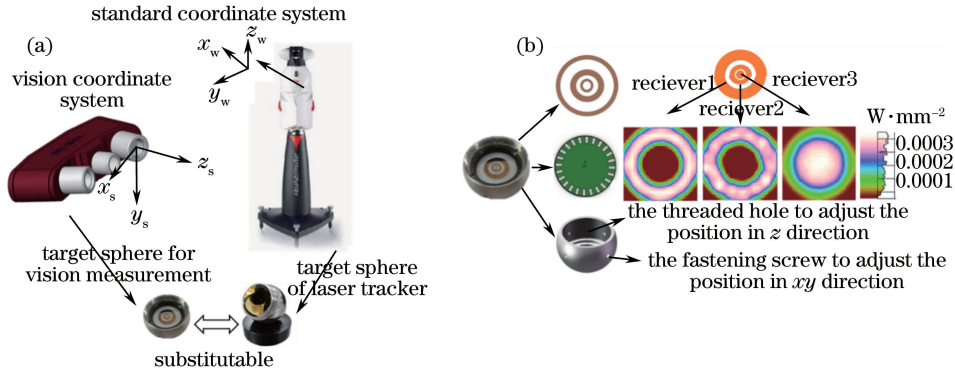


图 1 视觉测量合作靶球设计。(a)外参标定原理 ;(b)视觉测量合作靶球设计

Fig. 1 Design of the substitutable target sphere for vision-measurement. (a) Principle of extrinsic parameters calibration; (b) design of the substitutable target sphere for vision measurement

### 3 原理及精度分析

立体视觉传感器由两个测量相机组成,物空间内的一个三维点成像到相机的图像平面时符合小孔成像原理<sup>[14]</sup>。左相机坐标系为  $O_1-x_1y_1z_1$ ,其图像像素坐标系为  $O_1-u_1v_1$ ;右相机坐标系为  $O_2-x_2y_2z_2$ ,其图像像素坐标为  $O_2-u_2v_2$ :

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{x_1} & 0 & u_{01} & 0 \\ 0 & f_{y_1} & v_{01} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{x_2} & 0 & u_{02} & 0 \\ 0 & f_{y_2} & v_{02} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $f_{x_1}, f_{y_1}$  为左相机的等效焦距,  $(u_{01}, v_{01})$  为左相机的主点,  $f_{x_2}, f_{y_2}$  为右相机的等效焦距,  $(u_{02}, v_{02})$  为示右相机的主点,立体视觉坐标系与其左相机坐标系  $O_1-x_1y_1z_1$  重合。

左右相机同时拍摄视觉测量合作靶球靶标上的特征图案,并通过亚像素边缘提取拟合椭圆<sup>[15]</sup>分别获得左右相机坐标系下的圆心坐标。左右相机坐标系之间的相互位置关系用  $T_L^R$  表示为

$$P_2 = T_L^R P_1, \quad (2)$$

式中  $P_1 = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1]^T$  和  $P_2 = [x_2 \ y_2 \ z_2 \ 1]^T$  分别为三维点在左右相机坐标下的齐次坐标,

$$T_L^R = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{为左相机到右相机的旋转和平移参数。}$$

通过圆心在两相机坐标系下的坐标,重构立体视觉坐标系 S 下球心的三维坐标,即可直接得到公共点在 S 坐标系下的坐标。故公共点的三维坐标可以表示为

$$\begin{cases} x = z \cdot X_1 \\ y = z \cdot Y_1 \\ z = \frac{t_{34} \cdot X_2 - t_{14}}{t_{11} \cdot X_1 + t_{12} \cdot Y_1 + t_{13} \cdot X_2 - X_2 \cdot (t_{31} \cdot X_1 - t_{32} \cdot Y_1 - t_{33})} \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $X_1 = \frac{u_1 - u_{01}}{f_{x_1}}, Y_1 = \frac{v_1 - v_{01}}{f_{y_1}}, X_2 = \frac{u_2 - u_{02}}{f_{x_2}}$  为归一化坐标。

首先,提点像素误差传递到重构三维点坐标,得到三维点的点位误差。公共点在 S 下的三维坐标  $[x \ y \ z]^T$  是关于左右相机图像平面上的像素坐标  $u_1, v_1, u_2, v_2$  的关系式。而提取图像平面上的特征点时存在以 pixel 为单位的提点误差,该误差将传递到重构的三维点坐标上。 $u_1, v_1, u_2, v_2$  的测量值不相关,设  $\sigma_{u_1}^2 = \sigma_{v_1}^2 = \sigma_{u_2}^2 = \sigma_{v_2}^2 = \sigma_0^2$  为两个相机像平面上以 pixel 为单位的提点误差,则 S 坐标系下公共点的点位误

差的协方差矩阵为

$$Q_{xyz} = JQ_{uv}J^T, \quad (4)$$

$$\text{式中 } J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_s}{\partial u_1} & \frac{\partial x_s}{\partial v_1} & \frac{\partial x_s}{\partial u_2} & \frac{\partial x_s}{\partial v_2} \\ \frac{\partial y_s}{\partial u_1} & \frac{\partial y_s}{\partial v_1} & \frac{\partial y_s}{\partial u_2} & \frac{\partial y_s}{\partial v_2} \\ \frac{\partial z_s}{\partial u_1} & \frac{\partial z_s}{\partial v_1} & \frac{\partial z_s}{\partial u_2} & \frac{\partial z_s}{\partial v_2} \end{bmatrix}, Q_{uv} = \begin{bmatrix} \sigma_{u_1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{v_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{u_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{v_2}^2 \end{bmatrix}.$$

误差再由三维点的点位误差传递到外参数,得到外参数的协方差矩阵。外参数是视觉坐标系  $S$  与外部标准坐标系  $W$  之间的旋转和平移关系的 12 个参数,利用公共点在  $S$  坐标系和  $W$  坐标系下的三维坐标进行求解。外部标准坐标系  $W$  下,由激光跟踪仪测量等测量仪器测得公共点的三维坐标;视觉坐标系  $S$  下,由立体视觉传感器得到公共点的三维坐标,因此  $S$  坐标系下公共点的点位误差  $Q_{xyz}$  将传递给外参数。

取两坐标系下的  $n$  个公共点  $P_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 对旋转和平移矩阵进行优化求解,  $P_{s_i} = [x_{s_i} \ y_{s_i} \ z_{s_i} \ 1]^T$  和  $P_{w_i} = [x_{w_i} \ y_{w_i} \ z_{w_i} \ 1]^T$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 分别表示第  $i$  个公共点  $P$  在  $S$  坐标系和  $W$  坐标系下的齐次坐标。 $S$  和  $W$  的转换关系为

$$P_{w_i} = R_S^W P_{s_i} + T_S^W, \quad (5)$$

$$\text{式中 } R_S^W = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \text{ 和 } T_S^W = [T_x \ T_y \ T_z]^T \text{ 表示 } S \text{ 到 } W \text{ 坐标系的旋转和平移矩阵。所以, } W \text{ 坐标系下公共点 } P_i \text{ 的真实坐标值与将公共点 } P_i \text{ 由 } S \text{ 坐标系转换到 } W \text{ 坐标系下的坐标值之间的差值为}$$

$$\Delta_i = P_{w_i} - (R_S^W P_{s_i} + T_S^W), \quad (6)$$

由于误差的存在,使得  $\Delta_i^T \Delta_i \neq 0$ 。为了求得最优的外参数,  $\Delta_i^T \Delta_i$  应取最小值以使误差的影响降到最小,且旋转参数满足正交约束:

$$\begin{cases} f_1 = R_{11}^2 + R_{12}^2 + R_{13}^2 - 1 = 0 \\ f_2 = R_{21}^2 + R_{22}^2 + R_{23}^2 - 1 = 0 \\ f_3 = R_{31}^2 + R_{32}^2 + R_{33}^2 - 1 = 0 \\ f_4 = R_{11}R_{21} + R_{12}R_{22} + R_{13}R_{23} = 0 \\ f_5 = R_{11}R_{31} + R_{12}R_{32} + R_{13}R_{33} = 0 \\ f_6 = R_{21}R_{31} + R_{22}R_{32} + R_{23}R_{33} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

故采用罚函数构建最终的目标函数:

$$E(X, C_s) = \sum_{i=1}^n \Delta_i^T \Delta_i + k \sum_{j=1}^6 f_j^2 = \min, \quad (8)$$

$$\text{式中 } k \text{ 为惩罚因子, } \begin{cases} X = [R_{11} \ R_{12} \ R_{13} \ R_{21} \ R_{22} \ R_{23} \ R_{31} \ R_{32} \ R_{33} \ T_x \ T_y \ T_z]^T \\ C_s = [x_{s_1} \ y_{s_1} \ z_{s_1} \ x_{s_2} \ y_{s_2} \ z_{s_2} \ \dots \ x_{s_n} \ y_{s_n} \ z_{s_n}]^T \end{cases}.$$

为了满足  $E(X, C_s) = \min$  的要求,对  $E(X, C_s)$  求导,其导数值为 0,则有

$$D(X, C_s) = \frac{\partial E(X, C_s)}{\partial X} = \left[ \frac{\partial E(X, C_s)}{\partial R_{11}} \ \frac{\partial E(X, C_s)}{\partial R_{12}} \ \dots \ \frac{\partial E(X, C_s)}{\partial T_z} \right]^T = [D_1 \ D_2 \ \dots \ D_{12}]_{12 \times 1}^T = 0. \quad (9)$$

$X$  与  $C_s$  间存在的函数关系  $X = f(C_s)$  可以用隐函数表示为  $D(X, C_s) = 0$ ,根据隐函数求导法则函数  $f$  的导数  $Df$  为

$$H = - \left[ \frac{\partial D(X, C_s)}{\partial X} \right]^{-1} \frac{\partial D(X, C_s)}{\partial C_s}, \quad (10)$$

式中  $\frac{\partial D(X, C_s)}{\partial X}$  为  $D(X, C_s)$  对  $X$  的导数,  $\frac{\partial D(X, C_s)}{\partial C_s}$  为  $D(X, C_s)$  对  $C_s$  的导数,则,外参数  $X$  的协方差矩

阵  $Q_{RT}$  可表示为

$$Q_{RT} = H Q_{xyz} H^T, \quad (11)$$

式中  $Q_{xyz}$  为  $S$  坐标系下测量  $n$  个点的点位误差的协方差矩阵。

得到外参数  $X$  后,可得视觉坐标系下的任意待测点  $c$  在跟踪仪坐标系下的坐标为

$$P_{w_c} = R_S^W P_{s_c} + T_S^W. \quad (12)$$

待测点坐标的协方差矩阵为

$$Q_c = J_{RT} Q_{RT} J_{RT}^T, \quad (13)$$

$$J_{RT} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{w_c}}{\partial R_{11}} & \frac{\partial x_{w_c}}{\partial R_{12}} & \cdots & \frac{\partial x_{w_c}}{\partial T_z} \\ \frac{\partial y_{w_c}}{\partial R_{11}} & \frac{\partial y_{w_c}}{\partial R_{12}} & \cdots & \frac{\partial y_{w_c}}{\partial T_z} \\ \frac{\partial z_{w_c}}{\partial R_{11}} & \frac{\partial z_{w_c}}{\partial R_{12}} & \cdots & \frac{\partial z_{w_c}}{\partial T_z} \end{bmatrix}_{3 \times 12}.$$

则待测点三维坐标的不确定度表示为

$$M_c = \text{Tr}(Q_c). \quad (14)$$

综合以上,图像像素平面上的提点误差通过(4)式传递到  $S$  坐标系下公共点的点位误差,再通过(11)式将点位误差传递到了外参矩阵,外参数最终通过(13)式将不确定度传递给将立体视觉传感器测量的数据转到外部标准坐标系下的三维点坐标。

#### 4 仿真及精度优化

由于利用视觉测量合作靶球来获取公共点数据具有灵活性,可以在视觉传感器的视场范围内任意改变公共点的个数和位置,因此可以通过仿真分析方法,得到各因素对外参标定结果的影响,进行优化提高外参标定的精度。立体视觉传感器的视场范围是  $570 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$ ,工作距为  $500 \sim 800 \text{ mm}$ 。左右相机的内参数据如表 1 所示。

表 1 相机内参数  
Table 1 Intrinsic parameters of cameras

Parameter	$f_x$	$f_y$	$u_0$	$v_0$	$k_1$	$k_2$	$p_1$	$p_2$
Left camera /mm	4761.3549	4761.5854	1693.7649	1231.7393	-0.079333	0.084597	0.000853	0.000337
Right camera /mm	4761.3940	4762.2236	1689.2218	1258.8938	-0.082652	0.098534	0.000537	0.000278

$$\text{左相机到右相机的转换矩阵为 } R_L^R = \begin{bmatrix} 0.9059 & 0.0056 & 0.4234 & -275.1622 \\ -0.0060 & 0.9999 & -0.0005 & 0.3789 \\ -0.4234 & -0.0021 & 0.9059 & 62.2748 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

在视场中取  $(200, 200, 600)$ ,  $(200, -200, 500)$ ,  $(-100, 100, 600)$ ,  $(-100, -100, 500)$ ,  $(0, 0, 600)$ , 将验证点的坐标代入(13)式和(14)式可以得到每个验证点坐标的不确定度。以下仿真都以 5 个验证点的不确定度  $M_c$  的平均值作为评价标准。

1) 分析提点误差的大小对测量不确定度的影响。在立体视觉传感器的视场范围内以  $(0, 0)$  点为中心,间隔为  $200 \text{ mm}$  的九宫格内取 9 个点,且 9 个点排布在距视觉传感器的高度为  $700 \text{ mm}$ ,将提点误差  $\sigma_0$  由  $0.1 \text{ pixel}$  变化到  $1 \text{ pixel}$ ,  $M_c$  的变化如图 2(a) 所示。由图 2(a) 可知,  $M_c$  随提点误差的增大呈线性增长。

2) 对公共点个数  $n$  进行变换来判断公共点个数的影响。设  $\sigma_{u_1}^2 = \sigma_{v_1}^2 = \sigma_{u_2}^2 = \sigma_{v_2}^2 = \sigma_0^2 = 1$ , 将公共点均匀分布在半径  $r = 200 \text{ mm}$  的圆环上,公共点距视觉传感器的高度均为  $700 \text{ mm}$ ,公共点的个数  $n = 5 \sim 11$  时,则  $M_c$  随个数变换的关系如图 2(b) 所示。由图 2(b) 可知,随着公共点个数  $n$  的增加,  $M_c$  逐渐变小。开始减小



比较明显,当  $n > 8$  后变换趋于平缓,点的个数对误差的影响变小。因此,综合考虑公共点的个数取  $n = 9$ 。

3) 分析公共点排布的疏密对不确定度的影响。设  $\sigma_{u_1}^2 = \sigma_{v_1}^2 = \sigma_{u_2}^2 = \sigma_{v_2}^2 = \sigma_0^2 = 1$ , 当  $n = 9$  时,以九宫格的形式分布 9 个点,9 个点的高度均为 700 mm,变换九宫格的排布间距  $r$  为 50~210 mm,则  $M_c$  随分布间距变换的关系如图 2(c)所示。由图 2(c)可知,点的排布越稀疏,不确定度越小。因此,在选取公共点时应尽量稀疏,考虑到双目立体视觉系统的工作视场为 570 mm×430 mm,取 200 mm 为九宫格的分布间隔。

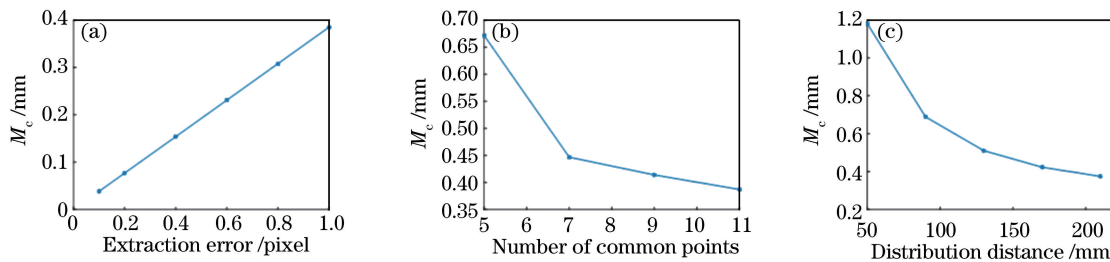


图 2 各因素对测量不确定度的影响。(a)提点误差;(b)公共点个数;(c)分布间隔

Fig. 2 Influence of different factors on uncertainty measurement. (a) Extraction error; (b) number of common points; (c) distribution distance

4) 分析排布形状的影响。在视场内取 9 个公共点,分别将其排布成圆环、九宫格和“L”型对测量不确定度进行比较。9 个点都排布在距视觉传感器 700 mm 的高度上,首先将 9 个点排布成以  $(-200, -200)$  为中心、100 mm 为间隔的“L”型,再将 9 个点排布在以  $(0,0)$  为圆心、200 mm 为半径的圆上,最后将 9 个点排布在以  $(0,0)$  为圆心、200 mm 为间隔的九宫格内。排布形状对不确定度的影响如表 2 所示。由表 2 可知,应将 9 个公共点以九宫格的形状排布在视场范围内。

表 2 排布形状对不确定度的影响

Table 2 Influence of distribution format on uncertainty

Distribution format	“L”	Circle	Sudoku
$M_c$ / mm	0.5838	0.4140	0.3848

在视场范围内取 9 个点,以  $(0,0)$  为中心、200 mm 为间隔排布在九宫格上,比较 9 个点是否分布在同一平面对精度的影响。首先将 9 个点统一排布在距视觉传感器为 700 mm 的同一高度上,再将 9 个点排布在 600,700,750 mm 等 3 个不同的高度上,最后将 9 个点排布在 550,600,650,700,750 mm 等 6 个不同高度。比较  $M_c$  结果如表 3 所示,9 个点的排布不在同一个平面时的不确定度更小,且 9 个点在 6 个不同高度时的精度优于 3 个高度,因此在外参标定时选取的公共点应在不同高度。

表 3 排布在不同高度对不确定度的影响

Table 3 Influence of distribution in different heights on uncertainty

Condition	Distribution in the same height	Distribution in three heights	Distribution in six heights
$M_c$ / mm	0.3848	0.3481	0.3405

通过仿真分析提点误差、公共点的个数、排布疏密、排布形状及是排布高度对测量结果的影响优化定精度,在视觉传感器的视场范围内取 9 个公共点,以  $(0,0)$  为中心排布成间距为 200 mm 的九宫格形状,并且 9 个点的高度在工作距范围内尽量不在同一个高度上。

## 5 实验验证

实验过程中,立体视觉传感器采用两个配有 25 mm 镜头的相机(B3320,Imperx,美国),相机的 CCD 尺寸为  $4/3''$ ,分辨率为 3312 pixel×2488 pixel。立体视觉传感器的工作距为 500~800 mm,工作范围为 570 mm×430 mm,以及激光跟踪仪(LeicaAT901,莱卡,瑞士)。实验系统搭建如图 3 所示。

利用同心圆靶标定立体视觉传感器的左右相机的内参及两相机之间的相对位置关系<sup>[16]</sup>,左右相机内参标定结果如表 1 所示,左相机到右相机的转换矩阵为

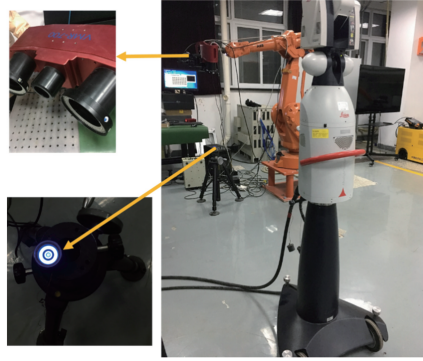


图 3 实验系统图

Fig. 3 Photo of experimental system

$$\mathbf{R}_L^R = \begin{bmatrix} 0.9059 & 0.0056 & 0.4234 & -275.1622 \\ -0.0060 & 0.9999 & -0.0005 & 0.3789 \\ -0.4234 & -0.0021 & 0.9059 & 62.2748 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

以激光跟踪仪的测量坐标系作为外部标准坐标系,根据仿真结果,在立体视觉传感器的视场范围内选取 9 个点,以九宫格的形状排布,且 9 个点尽量不在同一高度上。激光跟踪仪通过测量反射靶镜得到公共点在跟踪仪坐标系下的三维坐标。立体视觉传感器拍摄视觉测量合作靶球,通过提取靶标上的特征点分别得到球心在左、右相机相平面上的图像像素坐标。利用(1)~(3)式重构视觉坐标系下球心的三维坐标,即得到公共点在视觉坐标系下的坐标。利用 9 个公共点在两坐标系下的坐标对目标函数(8)式进行优化求解,得到视

觉坐标系到外部标准坐标系的外参矩阵  $\mathbf{R}_W^S = \begin{bmatrix} 0.0491 & 0.9981 & 0.0373 & -193.0321 \\ 0.9592 & -0.0575 & 0.2769 & 2038.1967 \\ 0.2785 & 0.0222 & -0.9602 & 79.4711 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,并将所选的 9

个点的坐标代入精度分析(4)~(11)式得到外参数的协方差矩阵  $\mathbf{Q}_{RT}$ 。

在视场内取随机取 15 个验证点对基于视觉测量合作靶球的外参标定方法的标定精度和仿真的正确性进行验证。通过激光跟踪仪和立体视觉传感器测得 15 个验证点在两坐标系下的三维坐标,提点误差设为 0.1 pixel,将外参数的协方差矩阵  $\mathbf{Q}_{RT}$ 和验证点在视觉坐标系下的三维坐标代入(13)式,通过 Matlab 仿真得到 15 个验证点的不确定度  $M_c$ 。仿真结果如图 4(a)所示,  $R_{MS} = 0.034$  mm。再利用(12)式将 15 个验证点在视觉坐标系下的坐标转到跟踪仪坐标系下,并与原视觉坐标系下验证点坐标的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  值分别做差得到  $d_x$ 、 $d_y$ 、 $d_z$ ,利用距离  $d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$  作为实验评价偏差的标准,实验结果如图 4(b)所示,  $R_{MS} = 0.036$  mm。

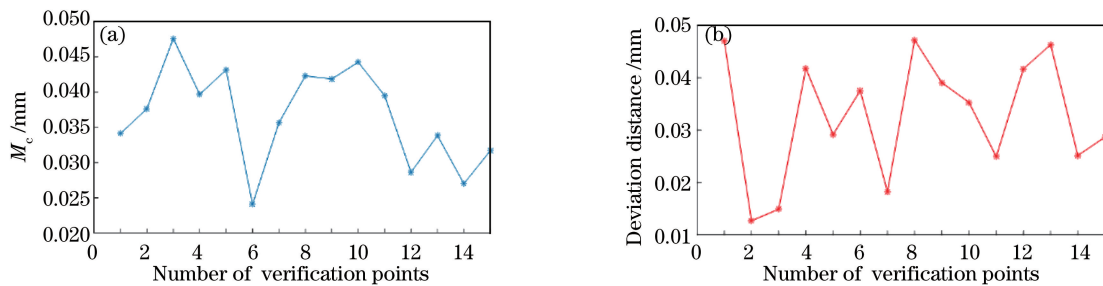


图 4 实验结果验证。(a)仿真结果;(b)实验结果

Fig. 4 Verification of experimental results. (a) Simulation result; (b) experimental result

结果表明,基于视觉测量合作靶球的外参标定方法的精度  $R_{MS} = 0.036$  mm,确定了该方法的精度和有效性。通过精度分析求得的仿真结果与利用距离偏差评价的实验结果相近,表明该精度分析方法的正确性。仿真结果略优于实验结果,可能是由于实验过程中提点像素误差大于 0.1 pixel,并且除了有提点像素误差以

外,其他不确定因素也会引入一定的偏差,使得实际实验结果精度低于仿真结果。

## 6 结 论

针对视觉传感器的外参标定过程中公共点数据的获取问题,提出了一种基于视觉测量合作靶球的数据获取方法;设计了一个融合靶标、光源和球形外壳的视觉测量合作靶球,通过合作靶球与测量仪器靶球之间的相互替换,实现视觉坐标系和外部标准坐标系下公共点的直接获取,进而实现视觉传感器的外参标定,并简化外参标定过程中的数据获取过程。该公共点数据的获取方法具有灵活性,可在视觉传感器的视场范围内任意摆放球座,因此可以通过仿真优化选择公共点的个数和摆放位置等来进一步提高外参标定的精度。立体视觉传感器的外参标定方法表明,该方法的标定精度能达到 0.036 mm。可见,基于视觉测量合作靶球的外参标定方法具有高精度、实现简单、灵活等优点,适用于视觉传感器的外参标定过程。

## 参 考 文 献

- [1] Wilson W S. The role of vision in a dimensional control strategy[C]. Proceedings of the Society of Manufacturing Engineers Conference on Vision, 1985, 7: 43-55.
- [2] Whitney D W. Optical gaging-crankshaft[C]. Proceedings of the Society of Manufacturing Engineers Conference on Vision, 1985, 7: 1-12.
- [3] Feng Xiaofeng, Pan Difu. Study of single camera stereo vision sensor based on plane mirror imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0915002.  
冯晓峰, 潘迪夫. 基于平面镜成像的单摄像机立体视觉传感器研究[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0915002.
- [4] Wang Qilong, Li Jianyong, Shen Haikuo. Target tracking system of binocular vision and laser range sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0912002.  
王琪龙, 李建勇, 沈海阔. 双目视觉-激光测距传感器目标跟踪系统[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0912002.
- [5] Li Yong, Su Xianyu, Wu Qingyang. Calibration and data merging of two-camera phase measuring profilometry system [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(4): 551-556.  
李 勇, 苏显渝, 吴庆阳. 双摄像机相位测量轮廓术系统标定与数据融合[J]. 光学学报, 2006, 26(4): 551-556.
- [6] Zhang Fumin, Qu Xinghua, Ye Shenghua. Multiple sensor fusion in large scale measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(7): 1236-1240.  
张福民, 曲兴华, 叶声华. 大尺寸测量中多传感器的融合[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(7): 1236-1240.
- [7] Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong. Unique world coordinates based global calibration method for multi-vision inspection system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1268-1272.  
张广军, 魏振忠. 多视觉检测系统的世界坐标唯一全局标定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 1268-1272.
- [8] Sha Jilei, Qu Xinghua, Ye Shenghua. Construction of vision detection system of white car body [J]. Measurement Technique, 2001(1): 5-8.  
沙吉乐, 曲兴华, 叶声华. 白车身视觉检测系统空间坐标系的建立[J]. 计量技术, 2001(1): 5-8.
- [9] Liu Changjie, Ma Shuang, Guo Yin, *et al.* Study on calibration technology of high-precision on flexible coordinate measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1012002  
刘常杰, 马 爽, 郭 寅, 等. 高精度柔性坐标测量系统及其校准技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1012002.
- [10] Feng Keyou, Luo Ming. Calibration method for multi-visual inspection system[J]. Acta Metrologica Sinica, 1995, 16(3): 217-220.  
冯克猷, 罗 明. 多视觉检测系统的定标[J]. 计量学报, 1995, 16(3): 217-220.
- [11] Liu Changjie, Zhang Hu. Car body in white inspection system with machine vision[J]. Automotive Engineering, 2000, 22(6): 373-376.  
刘常杰, 张 虎. 汽车白车身机器视觉检测系统[J]. 汽车工程, 2000, 22(6): 373-376.
- [12] Liu Yue, Lin Jiarui, Liu Tao, *et al.* Multi-sensor global calibration on technology of vision sensor in car body-in-white visual measurement system[J]. Acta Metrologica Sinica, 2014, 35(3): 204-209.  
刘 玥, 林嘉睿, 刘 涛, 等. 白车身视觉检测系统中多类型传感器全局校准技术[J]. 计量学报, 2014, 35(3): 204-209.
- [13] Yang S R, Liu M, Yin S B, *et al.* An improved method for location of concentric circles in vision measurement[J].



Measurement, 2017, 100: 243-251.

- [14] Shan Baohua, Yuan Wenting, Liu Yang. A calibration method for stereovision system based on solid circle target[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0915001.  
单宝华, 袁文厅, 刘 洋. 一种基于实心圆靶标的立体视觉系统标定方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0915001.
- [15] Chen X, Hu Y, Ma Z, *et al.* The location and identification of concentric circles in automatic camera calibration[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54(54): 185-190.
- [16] Hou Junjie, Wei Xinguo, Sun Junhua. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315003.  
侯俊捷, 魏新国, 孙军华. 基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315003.