

# 基于半镜面靶标的无重叠视域相机全局标定

段心怡, 杨 剑, 程泽会

(中北大学 软件学院, 太原 030051)

**摘要:** 针对智能无人车、监控等多相机全局标定问题, 往往存在无重叠视域或无法单向观测的情况, 因此提出了一种基于半镜面平面靶标的多相机全局标定方法; 该方法首先完成了单相机的内参数标定, 然后固定点激光器并投射光线到第一个相机  $c_1$  视场内并进行散斑点的观测, 接着利用半镜面平面靶标将光路反射到第二个相机  $c_2$  视场内并观测散斑点像, 由于单相机自身的内外参数已经标定, 因此可计算得到反射光路的直线方程, 最后根据直线的方向向量可计算全局坐标系的转换矩阵  $R_{c_1}^{c_2}$  和平移向量  $T_{c_1}^{c_2}$ ; 仿真和实验的结果表明, 所提方法在 500~1 200 mm 距离, 相机视域 500 mm×400 mm 范围内, 其标定误差为 0.36 mm; 相对于现有方法, 文章所提方法具有更广泛的适应性, 可针对多相机复杂视场结构完成标定, 同时具有设备简单、操作方便、计算简便等优点。

**关键词:** 计算机视觉; 视觉测量; 相机标定; 点激光器; 半镜面平面靶标

## External Parameter Calibration for Non-overlapping Cameras Based on Part Mirror Reflect Target

DUAN Xinyi, YANG Jian, CHENG Zehui

(Software School, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of external parameter calibration for multiple cameras with unmanned vehicle and intelligent monitoring, there is often no overlapping fields of view (FOVs) or one-way observation, an external parameter calibration method for multiple cameras based on part mirror planar target is proposed. Firstly, internal parameter calibration of single camera is completed. Spot laser projects laser beam emits beam into the FOVs of the first camera, which finishes the observation of speckle, and then across the FOVs of the second camera by part mirror calibration panel reflection, which observes the image of speckle, since the internal and external parameters of the single camera are calibrated, the linear equation of reflected light path can be obtained. The rotation matrix  $R_{c_1}^{c_2}$  and the translation vector  $T_{c_1}^{c_2}$  between the two cameras are computed by the reflecting co-linearity property of the laser beam. Experiment results show that, when the working distance of the cameras is about 500~1 200 mm, and FOVs are around 500 mm \* 400 mm, the camera calibration max error is about 0.36 mm. Compared with the present methods, the proposed method has the advantages of simple equipment, easy operation and calculation.

**Keywords:** computer vision; visual measurement; camera calibration; spot laser; part mirror planar target

## 0 引言

在过去几十年, 随着计算机视觉在无人驾驶、智能监控、视觉分析等方面的快速发展以及视觉系统成本的降低, 多相机视觉系统得到了日益广泛的应用。由于单相机视觉系统存在视场范围狭窄以及无法产生视差等限制, 使得其应用受限, 因此多相机系统应运而生。同时环境条件限制、设计需求、成本限制等因素的影响, 多相机视觉系统往往存在相机之间无重叠视场的情况, 然而相机之间的坐标系变换对于很多应用至关重要, 例如: 视觉测量<sup>[1-5]</sup>、轨迹追踪<sup>[6-9]</sup>、自主机器人<sup>[10-12]</sup>、监控<sup>[13-15]</sup>等等, 因此针对无重叠视场的多相机视觉系统全局标定问题, 研究一种高精度、易操作、低成本的有效方法成为很多研究者关注的问题。

相机的全局标定方法是解决局部的相机坐标系转换到全局坐标系的问题, 目前针对该问题, 研究人员已经提出了多种方法, 可分为基于周围环境信息的手眼标定方法<sup>[16-20]</sup>和基于关联靶标的外参标定方法<sup>[21-26]</sup>。然而无重叠视场的多相机系统全局标定问题依然是一个具有挑战性的问题, 尤其在相机之间的视场无法通视或单向观测的情况下。针对该问题, 本文提出了基于半镜面平面靶标的全局标定方法, 通过平面靶标的镜面部分将点激光器的光线反射到其他相机的视场内, 利用平面靶标的标志点计算靶标的空间参数并得到反射光线的空间方程, 最后利用激光光线的方向向量构建相机间坐标系转换方程组, 从而确定转换矩阵和平移向量。实验表明所提方法可有效的解算全局标定矩阵, 并具有高精度、计算简便、操作简便、设备简

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-06-05。

作者简介: 段心怡(2001-), 女, 山西临汾人, 大学本科, 主要从事计算机视觉方向的研究。

通讯作者: 杨 剑(1979-), 男, 山西临汾人, 博士, 讲师, 主要从事计算机视觉、人工智能及电磁视觉方向的研究。

引用格式: 段心怡, 杨 剑, 程泽会. 基于半镜面靶标的无重叠视域相机全局标定[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 224-231.

单等优点。

### 1 相关工作

为了解决无重叠视场的多相机系统全局标定问题, 科研工作者已经给出很多方法, 其可总体分为: 基于人工或周围环境信息的手眼或自标定方法<sup>[16-20]</sup>和基于关联标定物的外参标定方法<sup>[21-34]</sup>。

自标定方法通常需要设定相机组一定规律的运动。受手眼标定方法的启发, Esquivel 等<sup>[16]</sup>基于每个相机时间同步性估计彼此之间的相对姿态。F. Pagel<sup>[17]</sup>则给出了运动调整的方法, 利用测距法计算相机之间彼此的运动幅度, 从而估计相机之间的外参数。文献<sup>[18-19]</sup>则是在现有的手眼标定等方法基础上, 借助加速度传感器和角度传感器等设备进一步优化相机外参的标定, 文献<sup>[20]</sup>则是首先利用 SLAM 设备(如深度相机)将周围环境进行三维建模, 在相机组运动过程中, 根据周围环境的三维坐标确定外参。该类方法具有较好的自主性, 但也存在计算复杂, 精度难以保证等问题。

基于关联标定物的外参标定方法通常不需要相机做特定的运行。针对无重叠视场的多相机系统全局标定问题, 文献<sup>[21]</sup>利用近景摄影测量的原理, 首先在室内环境中布置编码点, 然后, 利用测量设备测量编码点的全局三维坐标, 最后利用这些测定的三维坐标点标定相机之间的转换矩阵。文献<sup>[22-23]</sup>采用经纬仪或激光雷达关联两个相机平面靶标, 实现全局标定。文献<sup>[24-25]</sup>则设计了长距离的链接杆, 在长杆的两头分别固定标定靶标, 从而实现标定靶的关联。同时有很多科研工作者利用镜面的反射效果, 反视另一个相机的视场, 从而实现相机的关联<sup>[26-30]</sup>, 该类方法简单直接, 但需要视场没有遮挡, 同时反射后靶标变小, 有损精度, 利用球面镜反射虽可获得较好的视野, 但也存在畸变的问题。Liu 等<sup>[31]</sup>则将激光器产生的光平面投射到平面靶标上, 利用光平面的法向量构建相机之间的转换方程。该方法不需要昂贵的设备, 具有实施简单的优点, 但也存在计算复杂, 标定板朝向限制的不足。文献<sup>[32-34]</sup>中, 则进一步提出更实用的方法, 利用点激光器产生激光射线, 分别在各自视场内截断射线, 观测散斑点像, 从而计算射线的方向向量, 然后利用射线的方向向量构建外参解算方程。以激光射线为靶标的相机标定方法, 具有设备简单、实施方便、计算简单等优点, 但其相机之间的视场可以通视, 没有遮挡, 并要求单向性观测。

本文所提出的基于半镜面平面靶标的无重叠视域多相机全局标定方法, 基于点激光器的射线方向向量约束相机之间的转换方程, 并利用半镜面平面靶标改变其光路。该方法具有很好的灵活性, 设备简单、易操作、计算简单, 由于激光的准直性, 精度不受相机布局远近的影响, 适用于各种相机布局, 在相机之间的视场无法通视或单向观测的情况下依然适用。

### 2 全局标定方法的原理

基于半镜面平面靶标的无重叠视域多相机全局标定方法的原理如图 1 所示, 不失一般性, 图以双相机组为例进行说明, 多相机系统可转化为两两分组的问题。

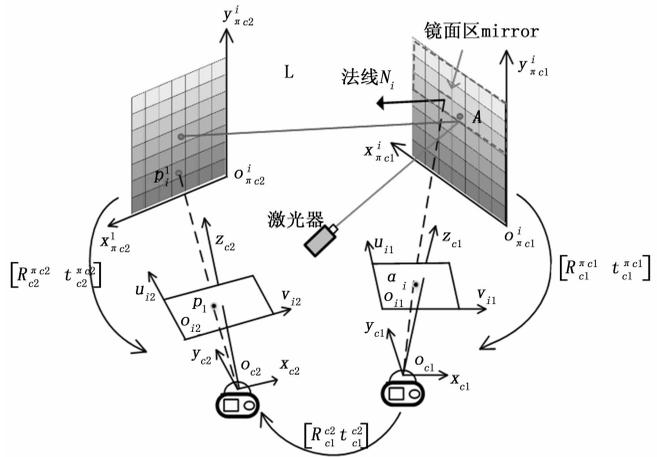


图 1 无重叠视域多相机全局标定方法的示意图

图中设定每个相机以镜头中心为相机坐标系, 标定到全局坐标系, 这里选定相机坐标系  $(\alpha xy)_{c1}$  为全局坐标系。  $R_{c2}^{\alpha c1}$  和  $t_{c2}^{\alpha c1}$  表示从相机 2 坐标系  $(\alpha xy)_{c2}$  到相机 1 坐标系  $(\alpha xy)_{c1}$  的转换矩阵和平移向量。在相机 1 视场内放置点激光器, 由于相机 2 和相机 1 背视或无法通视, 因此在光路上放置半镜面标定板将光路反射到相机 2 的视场内。图中数学符号表示的内容如表 1 所示。

表 1 符号与定义

符号	定义
$O_k, x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}, k \in (1, 2, \dots, n)$	第 $k$ 个相机坐标系
$O_k, u_k, v_k, k \in (1, 2, \dots, n)$	第 $k$ 个相机图像坐标系
$O_{nki}, x_{nki}, y_{nki}, z_{nki}, i, k \in (1, 2, \dots, n)$	第 $k$ 个相机视场的位置 $i$ 的靶标平面 $\pi$ 坐标系, 其 $Z$ 轴垂直于平面
$[R_{c1}^{\alpha c2}, t_{c1}^{\alpha c2}]$	第 $k$ 个相机靶标平面 $\pi$ , 在位置 $i$ 转换至相机坐标系 $(\alpha xy)_{c1}$ 的旋转矩阵和平移向量
$[R_{c2}^{\alpha c1}, t_{c2}^{\alpha c1}]$	表示相机 2 坐标系 $(\alpha xy)_{c2}$ 到相机 1 坐标系 $(\alpha xy)_{c1}$ 的旋转矩阵和平移向量
$N_{nki}$	第 $k$ 个相机视场内位置 $i$ 的靶标平面的法向量
$p_{mirror_i}^k$	相机系统 $K$ 的靶标镜面区
$p_{laser_i}^k$	激光测距仪所在的坐标点
$p_{spk_i}^k, k, i \in (1, 2, 3)$	激光测距仪照射的散斑点
$p_{img\_spk_i}, i \in (1, 2, 3)$	散斑点在像平面上的像点

选定激光器的位置, 在相机 1 的视场内, 在光路上三次移动标定板, 则可拦截激光的散斑点  $A, B, C$ , 并采集图

像点  $a, b, c$ 。由于相机 2 和相机 1 背视或无法通视,因此在光路上放置半镜面标定板将光路反射到相机 2 的视场内,同样拦截散斑点  $D, E, F$ ,并采集图像点  $d, e, f$ 。将相机 2 坐标系  $(\alpha x y)_{c_2}$  到相机 1 坐标系  $(\alpha x y)_{c_1}$  之间的转换矩阵表示为  $T_{21}$

$$= \begin{bmatrix} R_{c_1}^{c_2} & t_{c_1}^{c_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

其中  $R_{c_1}^{c_2}$  and  $t_{c_1}^{c_2}$  分别表示旋转矩阵和平移向量。

本文所提方法的主要步骤如下:

- 1) 基于张正友<sup>[35]</sup>的经典标定方法,实现单个相机的内参数的标定  $A_k, (k = 1, 2)$  及相机 1, 2 的自身坐标系外参。
- 2) 将相机群分为两两一组,如图 1 所示,选定单点激光器的位置;
- 3) 在相机 1 的视场内,三次移动标定板,则可拦截激光的散斑点  $A, B, C$ ,并采集图像点  $a, b, c$ ,则根据 3.1 小节中的方法可计算得到激光射线的消隐点;
- 4) 在相机  $c_1$  的视场内,放置半镜面标定板,将激光光路反射到相机  $c_2$  的视场内,并在  $c_2$  不同位置截获激光射线的散斑点  $D, E, F$ ,并采集图像点  $d, e, f$ 。利用 3.1 小节中的方法可计算得到激光射线的消隐点;
- 5) 重复步骤 (2) ~ (4) 可到激光器在至少两个不同位置的散斑图像点集,根据 3.2 小节的方法可得到全局旋转矩阵  $R_{c_1}^{c_2}$  和平移向量  $t_{c_1}^{c_2}$ 。

### 2.1 计算图像消隐点坐标

如图 1 所示,选定激光器的位置,在相机  $c_1$  的视场内移动平面靶标,分别在位置  $i = 1, 2, 3$  拦截激光射线形成散斑点  $A, B, C$ ,并采集像点  $(a_i, b_i, c_i)$ ,其结果如图 2 所示,  $V_{i\infty}$  表示激光射线在相机  $c_1$  坐标系下的无限远点,相应的  $v_{i1\infty}$  则表示该无限远点在图像坐标系下的消隐点坐标。

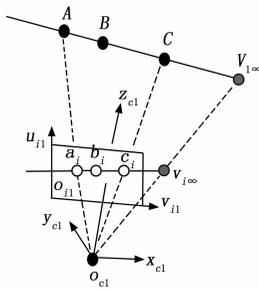


图 2 点  $A, B, C, V_{i\infty}$  的交比示意图

由于  $V_{i\infty}$  是无限远点,因此可以近似得到  $\| \frac{AV_{i\infty}}{BV_{i\infty}} \| \approx 1$ ,由交比定义得到下式:

$$CR(A, B, C, V_{i\infty}) = \frac{\| \frac{AC}{AC} \|}{\| \frac{AV_{i\infty}}{BV_{i\infty}} \|} \approx \frac{\| \frac{AC}{BC} \|} {1} \quad (1)$$

则根据射影几何的交比不变性<sup>[34]</sup>可估算图像消隐点  $v_{i\infty 1}$ :

$$CR(A, B, C, V_{i\infty}) = CR(a_i, b_i, c_i, v_{i\infty 1}) \approx \frac{\| \frac{AC}{BC} \|} {1} \quad (2)$$

公式 (2) 中,  $(a_i, b_i, c_i, v_{i\infty 1})$  表示激光射线散斑点 ( $A,$

$B, C, V_{i\infty}$ ) 的单应图像点,其坐标系如图 2 所示。同理,经过半镜面平面靶的反射,光线进入相机  $c_2$  的视场内,移动平面靶可截取激光的散斑点图像  $(d_i, e_i, f_i, v_{i\infty 2})$ ,基于交比不变性可估算反射后光线的消隐点  $v_{i\infty 2}$ 。

### 2.2 基于半镜面的法向量及消隐点计算 $R_{21}$

线的消隐点表示了直线的方向向量。设  $d_i, (i = 1, 2)$  表示激光射线的方向向量,如图 3 所示。根据 2.1 节计算的消隐点可得射线的方向向量 (3):

$$s_k d_k = A_{c_k}^{-1} v_{i\infty}, (k = 1, 2) \quad (3)$$

其中:  $A_{c_k} (k = 1, 2)$  表示相机的内参数;在相机  $c_1$  坐标系下,射线的方向  $d_{c_1}$  经过半镜面靶平面反射后,其光路方向变为  $d'_{c_1}$ 。根据几何光学的反射原理可知,其入射光线和反射光线在同一个平面内,并且角度被镜面的法线  $N_i = (n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}, 1)$  平分,即  $\alpha_{c_1} = \alpha_{c_2}$ ,其关系可表示为矩阵形式:

$$d'_{c_1} = W * d_{c_1} \quad (4)$$

其中:  $W = \begin{bmatrix} 1 - 2n_x n_x & n_x n_x & n_x n_x & 0 \\ n_x n_x & n_x n_x & n_x n_x & 0 \\ n_x n_x & n_x n_x & n_x n_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

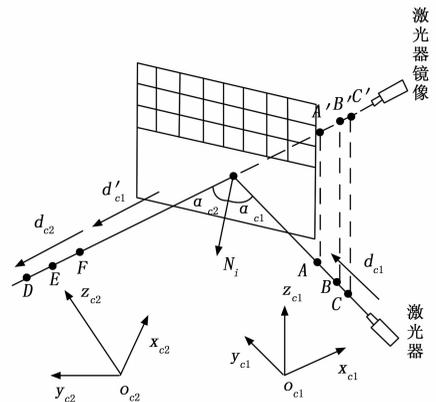


图 3 半镜面平面靶反射激光光路

因此根据式 (3) 和 (4) 可知,经过镜面反射后,入射光线与反射光线的消隐点之间的关系式:

$$v'_{i\infty} = W * v_{i\infty} \quad (5)$$

根据射影几何可知,设空间中一点在两个相机像平面上的坐标为  $m_{c_1}$  和  $m_{c_2}$ ,其关系可用单应矩阵  $H$  表示为:

$$m_{c_1} = H m_{c_2} \quad (6)$$

当单应平面为无穷远平面  $\pi_{\infty}$ ,其关系依然存在,此时像点为无穷远点的像,也就是图像的消隐点。

$$v'_{i\infty 1} = H_{\infty} v_{i\infty 2} \quad (7)$$

结合式 (5) 可得到:

$$v_{i\infty 1} = W^{-1} H_{\infty} v_{i\infty 2} \quad (8)$$

因此当有至少两个消隐点  $(v_{i\infty 1}^1, v_{i\infty 1}^2, v_{i\infty 1}^3 \times v_{i\infty 1}^4)$ ,即在两个位置产生非平行的光线并计算消隐点可解得  $H_{\infty}$ 。

根据文中的设定,第一个摄像机  $c_1$  的坐标系为全局坐

坐标系, 经过标定后, 其两个相机内参已知, 相机矩阵分别为:

$$p_{c1} = A_{c1}(I, 0), p_{c2} = A_{c2}(\mathbf{R}_{c1}^2, \mathbf{t}_{c1}^2) \quad (9)$$

对于单应平面  $\pi$  上的任一个点  $M$ , 考虑它在两个摄像机下的投影。显然, 在第一个摄像机下的投影为:

$$m_{c1} = p_{c1} \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} = A_{c1}x \quad (10)$$

因此, 单应平面  $\pi$  到第一个像平面的单应矩阵为  $\mathbf{H}_1 = A_{c1}$ 。在第二个摄像机下的投影为:

$$m_{c2} = p_{c2} \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} = A_{c2}(\mathbf{R}_{c1}^2, \mathbf{t}_{c1}^2) \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} = A_{c2}(\mathbf{R}_{c1}^2 x + \mathbf{t}_{c1}^2) \quad (11)$$

由于平面  $\pi$  的方程为  $n^T X = L$ , 这里  $L$  表示坐标原点到平面  $\pi$  的距离, 则  $n_L^T X = 1$ , ( $n_L^T = \frac{1}{L} n^T$ ), 因此  $t$  可以写成  $t = m_L^T x$ 。于是, 在第二个摄像机下的投影为:

$$m_{c2} = A_{c2}(\mathbf{R}_{c1}^2 x, \mathbf{t}_{c1}^2) = A_{c2}(\mathbf{R}_{c1}^2 x + \mathbf{t}_{c1}^2 n_L^T) X \quad (12)$$

即平面  $\pi$  到第二个像平面的单应矩阵  $\mathbf{H}_2 = A_{c2}(\mathbf{R}_{c1}^2 + \mathbf{t}_{c1}^2 n_L^T)$ , 因此两幅图像间的单应矩阵可表示为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_2 \mathbf{H}_1^{-1} = A_{c2}(\mathbf{R}_{c1}^2 + \mathbf{t}_{c1}^2 n_L^T) K_{c1}^{-1} \quad (13)$$

当单应平面  $\pi$  变成无穷远平面, 所以在式 (13) 中取  $L \rightarrow \infty$  的极限值, 可得到无穷远单应矩阵, 显然:

$$\mathbf{H} = A_{c2}(\mathbf{R}_{c1}^2 + \mathbf{t}_{c1}^2 n_L^T) A_{c1}^{-1} \rightarrow A_{c2} \mathbf{R}_{c1}^2 A_{c1}^{-1} (L \rightarrow \infty) \quad (14)$$

因此:

$$\mathbf{R}_{c1}^2 = A_{c1}^{-1} \mathbf{H} A_{c2} \quad (15)$$

无穷远单应矩阵仅与两个相机内参数和旋转矩阵有关。结合式 (8), 可知在两个非平行的位置放置点激光器计算消隐点后, 即可获得旋转矩阵  $\mathbf{R}_{c1}^2$ , 计算简便。

### 2.3 计算平移向量 $\mathbf{t}_{c1}^2$

如图 3 所示, 基于镜面反射的原理可知, 以镜面为对称平面, 入射光线与反射光线共线。设  $\mathbf{N}_i = (n_{xi}, n_{yi}, n_{zi})$  是镜面的平面的单位法向量,  $\|\mathbf{N}_i\| = 1$ , 则镜面矩阵可表示为:

$$\mathbf{Q} = I - 2\mathbf{N}_i \mathbf{N}_i^T \quad (16)$$

设点  $A, B, C$  的镜像点表示为  $A', B', C'$ , 根据式 (16) 可得:

$$A', B', C' = \mathbf{Q}A, \mathbf{Q}B, \mathbf{Q}C \quad (17)$$

设  $D$  点在相机 2 下的坐标为  $D_{c2} = (x_{Dc2}, y_{Dc2}, z_{Dc2})$ , 坐标转化为相机 1 坐标系后  $D_{c1} = (x_{Dc1}, y_{Dc1}, z_{Dc1})$ , 其转换关系如下:

$$\begin{cases} D_{c1} = \mathbf{R}_{c1}^2 D_{c2} + \mathbf{t}_{c1}^2 \\ E_{c1} = \mathbf{R}_{c1}^2 E_{c2} + \mathbf{t}_{c1}^2 \\ F_{c1} = \mathbf{R}_{c1}^2 F_{c2} + \mathbf{t}_{c1}^2 \end{cases} \quad (18)$$

同样的坐标表达方式及转换关系可用于  $A, B, C, D, E, F$ 。

$A, B, C$  做镜面对称得到  $A', B', C', D, E, F$  共线, 因此可得:

$$\frac{x_{Dc1} - x_{B'c1}}{x_{A'c1} - x_{B'c1}} = \frac{y_{Dc1} - y_{B'c1}}{y_{A'c1} - y_{B'c1}} = \frac{z_{Dc1} - z_{B'c1}}{z_{A'c1} - z_{B'c1}} \quad (19)$$

可写为:

$$\begin{cases} x_{Dc1}(y_{A'c1} - y_{B'c1}) - y_{Dc1}(x_{A'c1} - x_{B'c1}) = \\ x_{B'c1}(y_{A'c1} - y_{B'c1}) - y_{B'c1}(x_{A'c1} - x_{B'c1}) \\ x_{Dc1}(z_{A'c1} - z_{B'c1}) - z_{Dc1}(x_{A'c1} - x_{B'c1}) = \\ x_{B'c1}(z_{A'c1} - z_{B'c1}) - z_{B'c1}(x_{A'c1} - x_{B'c1}) \end{cases} \quad (20)$$

把式 (18) 代入到式 (20) 可得:

$$\begin{cases} t_1(y_{A'c1} - y_{B'c1}) - t_2(x_{A'c1} - x_{B'c1}) = r_2 D_{c2}(x_{A'c1} - x_{B'c1}) - \\ r_1 D_{c2}(y_{A'c1} - y_{B'c1}) + x_{B'c1}(y_{A'c1} - y_{B'c1}) - y_{B'c1}(x_{A'c1} - x_{B'c1}) \\ t_1(z_{A'c1} - z_{B'c1}) - t_3(x_{A'c1} - x_{B'c1}) = r_3 D_{c2}(x_{A'c1} - x_{B'c1}) - \\ r_1 D_{c2}(z_{A'c1} - z_{B'c1}) + x_{B'c1}(z_{A'c1} - z_{B'c1}) - z_{B'c1}(x_{A'c1} - x_{B'c1}) \end{cases} \quad (21)$$

其中:  $\mathbf{t}_{c1}^2 = [t_1, t_2, t_3]^T$ ,  $r_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) 是矩阵  $\mathbf{R}_{c1}^2$  的行向量。

选择不同的点, 构建至少两个式 (21) 则可以计算得到  $\mathbf{t}_{c1}^2$ 。选择不同位置的激光线和不同的点构建多个 (21) 式则可以得到误差更小的  $\mathbf{t}_{c1}^2$ 。

### 2.4 非线性优化

为了进一步提高标定的精度, 本小节构建坐标系旋转矩阵  $\mathbf{R}_{c1}^2$  和平移向量  $\mathbf{t}_{c1}^2$  的非线性优化方法。首先  $A_{c1}, B_{c1}, C_{c1}$  是在相机 1 坐标系下的激光散斑点,  $A'_{c1}, B'_{c1}, C'_{c1}$  是经过镜面对称后的虚拟点, 其与相机 1 坐标系下的点  $D_{c1}, E_{c1}, F_{c1}$  共线, 其中点  $D_{c1}, E_{c1}, F_{c1}$  可经过两个相机之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{c1}^2$  和平移向量  $\mathbf{t}_{c1}^2$  得到, 见式 (18)。

如图 3 所示, 设激光线在位置  $i$  的方程为  $L_i$ , 其可表示为如下方程:

$$L_i: \frac{x - x_{i0}}{n_{dx}} = \frac{y - y_{i0}}{n_{dy}} = \frac{z - z_{i0}}{n_{dz}} \quad (22)$$

其中:  $\mathbf{d}_{c1}^i = (n_{dx}, n_{dy}, n_{dz})^i$  是基于相机 1 坐标系在位置  $i$  的激光线的方向向量。( $x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}$ ) 是散斑点  $A_{c1}, B_{c1}, C_{c1}, D_{c1}, E_{c1}, F_{c1}$  中的任意一个。

通常认为, 相机 CCD 图像噪声符合高斯分布, 采用最大似然法针对下式求解最优解可获得最小误差的相机外参。

$$f(\alpha = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{A,B} d(q_{ij}, L_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{C,D} d(q_{ij}, L_i)) \quad (23)$$

其中:  $\alpha = (T_2, n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}, x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})$ ,  $m$  表示点激光器的位置,  $d(q_{ij}, L_i)$  则表示点  $q_{ij}$  偏离直线  $L_i$  的距离。同时这里采用了 Levenberg-Marquardt 算法作为优化方法, 实现对最小二乘结果的最优解。

## 3 实验部分与分析

### 3.1 综合仿真实验

为了验证所提算法的有效性和精度, 设计了如下的实验部分, 分析了影响标定精确性的 3 个主要的因素: 1) 图像噪声对激光散斑中心点检测精度及镜面法向量计算精度的影响; 2) 相机之间的距离对全局标定的影响; 3) 布置激光器的数量对相机全局标定参数的影响;

不失一般性, 用双目相机系统 (相机 1、2) 作为实验的对象, 分析多相机系统。设相机 1, 2 的内参已知, 并且

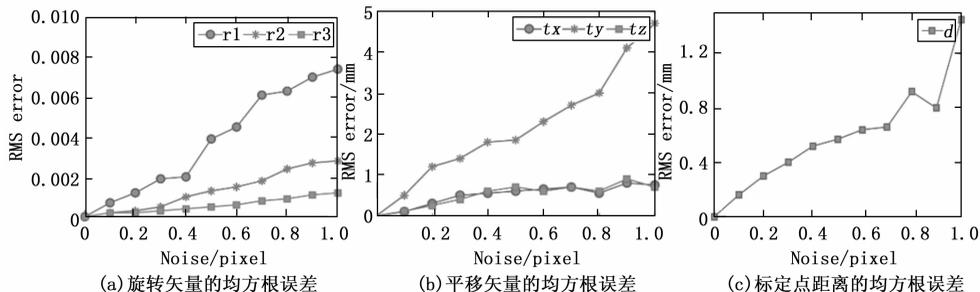


图 4 图像噪声对标定点的误差影响

两个相机的内参相同，其中  $\alpha_x = 658, \alpha_y = 658, \mu_0 = 304, \nu_0 = 245, \gamma = 0$ 。相机的图像分辨率设为  $1\ 280 \times 1\ 536$ 。设定相机 1 的坐标系  $(\alpha x y)_c1$  为全局坐标系，则坐标系  $(\alpha x y)_c2$  到全局坐标系的转换矩阵还是表示为  $T_{c1}^c2$ ，其中包含旋转矩阵  $R_{c1}^c2$  和平移矩阵  $t_{c1}^c2$  (见 3.1 章节)。

3.1.1 相机图像噪声

此实验中，设两相机之间的旋转矩阵和平移向量分别为： $R_{c1}^c2$  和  $t_{c1}^c2$ ，其中： $R_{c1}^c2 = (r_1, r_2, r_3) = (1, 0, 0; 0, 0.5, -0.866; 0, 0.866, 0.5)$ ，平移向量  $t_{c1}^c2 = (-500, 0, 0)$ 。点激光器分别置于 8 次不同的位置。文中所提的半镜面标定靶的镜面反射精度较高，但计算其平面的法向量存在一定的计算误差，其计算误差源主要来自半镜面标定板的非镜面区的图像噪声，且其噪声符合加性高斯白噪声。因此图像中携带的噪声可假设为加性高斯白噪声，设噪声水平的区间为 0.0 到 1.0 个像素之间。针对每个噪声水平，标定两个相机的外参数  $r_1, r_2, r_3, t_x, t_y, t_z$  以及标定点之间距离，分别进行 100 次独立的实验从而计算均方根误差 (RMS) 值，其结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出，所有相机外参数的均方根误差随着噪声水平线性增长。通常在真实实验中，会采用工业相机，其图像的噪声要小于 0.2 个像素。

同时采用的点激光器射线强度符合高斯分布，因此基于 Matlab 仿真了光强高斯分布的光斑图像，并分别进行 100 次的添加高斯白噪声后，拟合高斯分布的中心点，其中中心点偏离的 RMS 结果如图 5 所示。可以看出，在标定板方向向量与激光射线方向向量夹角  $< 10$  度，图像噪声  $< 1$  个像素的条件下，其 RMS 小于 0.006 mm。

3.1.2 两相机之间距离因素

在此仿真实验中，给图像中的特征点坐标添加方差为  $\sigma = 0.2$  像素的高斯白噪声，激光器及半镜面标定板被放置 8 次，并设两个相机间的旋转矩阵固定为  $R_{c1}^c2$ ，相机之间沿着全局坐标 Y 轴平移，即  $t_{c1}^c2 = [t_1, t_2, t_3]^T$  中分量  $t_3$  从 50 cm 到 5 m 平移。每个  $t_3$  值，均进行 100 次独立实验，分别标定外参数  $R_{c1}^c2 = [r_1, r_2, r_3]^T, t_{c1}^c2 = [t_1, t_2, t_3]^T$  及点距的 RMS 误差。

实验结果如图 6 所示，标定的外参的 RMS 误差随着相机之间距离的增加而增长，当其相对精度均小于 0.3%，所提方法可应用于相机组的外参标定。

3.1.3 点激光器位置数量对精度的影响

点激光器的放置的数量直接决定着约束方程的数量，因此直接影响着相机外参标定的精度。此实验中，设定图像的噪声类型为加性高斯白噪声，其噪声水平为  $\sigma = 0.2$  像素，两相机之间的旋转均为  $R_{c1}^c2 = (r_1, r_2, r_3) = (1, 0, 0; 0, 0.5, -0.866; 0, 0.866, 0.5)$ ，平移向量为  $t_{c1}^c2 = (0, 1000, 0)^T$ 。激光器的放置位置的数量由 3 增加到 50。在每个激光器放置位置数量条件下，分别进行 100 次独立的实验，从而分别计算相机的外参数以及距离的均方根误差 (RMS<sub>error</sub>)。

实验结果表明，随着点激光器布置数量的增加，相机外参数的标定误差较快地减少。在不少于 5 个位置放置激光器的条件下，标志点之间距离的均方根误差小于 0.07 mm，基于半镜面平面靶标的全局标定方法在较少点激光器的条件下，可得到较好的精度。

3.2 实验过程

如图 8 所示，真实实验的环境采用了三相机组 (相机 1, 2, 3)，其中相机 1, 2 为维视公司的 CMOS 灰度工业相机，其图像分辨率分别为  $2\ 048 \times 1\ 536$ ，像素尺寸为  $3.2 \times 3.2 \mu\text{m}$ ，相机采用的光学镜头为日本 computar 28 mm 镜头；相机 3 作为辅助相机，采用大恒公司 CMOS 工业相机，其图像分辨率为  $2\ 048 \times 1\ 536$ ，光学镜头为日本 com-

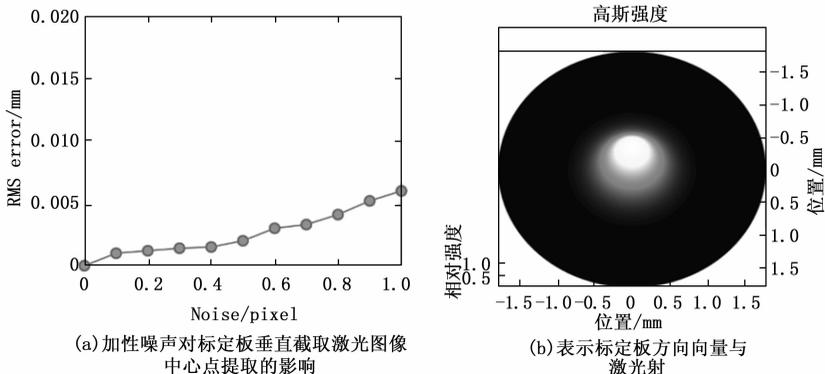


图 5 激光散斑图像仿真及图像噪声影响对中心提取的影响

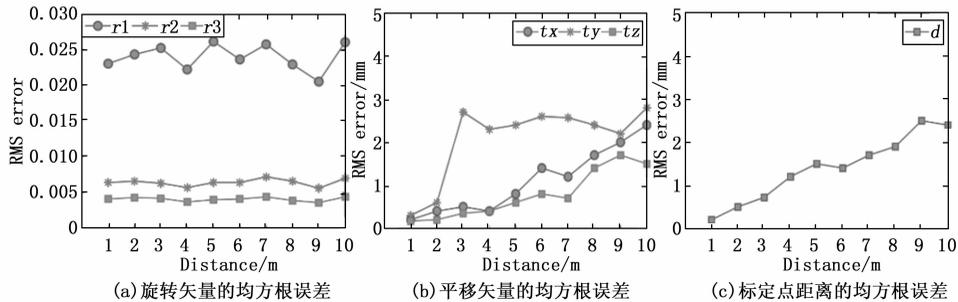


图 6 相机之间距离对标定外参的 RMS 误差的影响

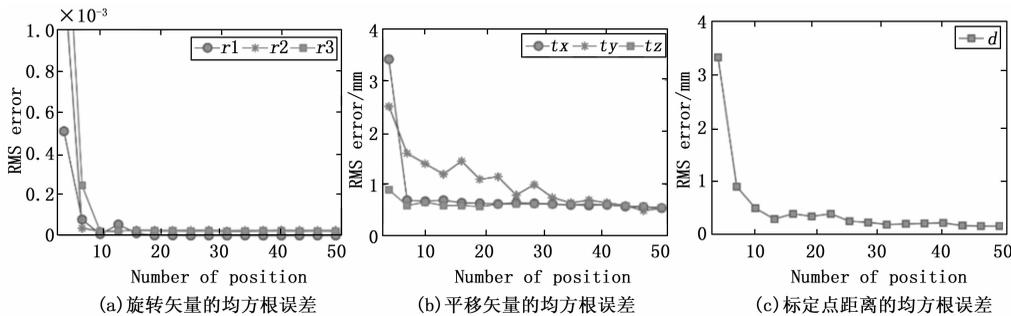


图 7 点激光器的取值数量对标定误差的影响

putar 18 mm 镜头。相机组固定在三角支架上, 激光器及标定板则固定在光学平台上。



图 8 三相机组对内参的标定

首先完成相机内参的标定工作, 标定中采用的二维标定板以及半镜面标定板中的图案均为  $9 \times 7$  个黑白相间的棋盘格, 其间距为 30 mm。在相机内参标定过程中, 3 个相机分别采集了 20 副二维标定板的图像, 并采用张正友的方法完成内参的标定, 标定结果如表 2 所示。

表 2 内参的标定结果

相机内参数	相机 1	相机 2	相机 3
$f_x$	1 599.9	1 595.5	2 346.9
$f_y$	1 606.8	1 601.1	2 360.5
$\gamma$	-1.058 1	-2.670 1	-3.213 1
$u_0$	1 063.19	986.31	686.34
$v_0$	852.65	786.21	542.39
$k_1$	-0.111 4	-0.139 7	-0.103 7
$k_2$	0.142 6	0.197 3	0.985 3

完成相机组的内参标定后, 为了验证外参的标定效果, 设计了利用第三个相机作为关联视场, 基于经典的张的标定方法完成没有公共视域的两相机 (相机 1, 2) 的外参标定, 并与本文方法进行比较。其实验如下:

- 1) 基于张正友的方法<sup>[33]</sup>, 分别完成相机 1, 3, 相机 2, 3 的外参的标定, 从而在相机 3 的帮助下得到相机 1, 2 之间的转换矩阵并做为真值与本文所提出的方法进行比较;
- 2) 基于本文所提方法, 分别在 8 个不同的位置布置点激光器, 在相机 1 视场内放置半镜面标定板将激光射线反射到相机 2 的视场内;

3) 分别在每个相机视场内用标定板截断激光射线, 并采集 6 个散斑点图像, 如图 9 展示了相应的散斑图像点。根据所提式 (8)、(15) 则可计算得到旋转矩阵, 式 (21) 可计算得到平移向量。

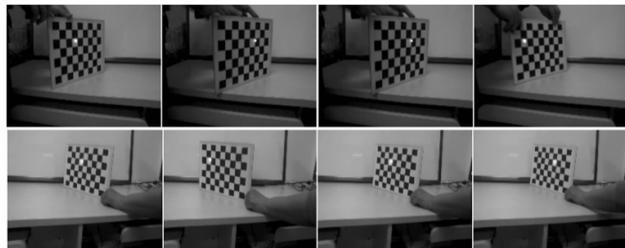


图 9 三相机组对外参的标定

表 3 给出了比较结果, 假设张正友的方法为真值, 则本文所提的方法最大误差为平移向量中的  $tx$ , 在相机间距 1.1 m 的条件下, 其误差为 0.36 mm。

表 3 全局标定方法和张正友方法的结果

		$a$	$b$	$c$	$T_x/\text{mm}$	$T_y/\text{mm}$	$T_z/\text{mm}$
Camera <sub>1,3</sub>	Zhang's method	-0.037 7	-0.200 4	0.008 5	121.384 5	8.790 0	-47.766 7
Camera <sub>2,3</sub>	Zhang's method	0.020 1	-0.228 4	-0.015 7	99.097 2	5.962 1	33.617 4
Camera <sub>1,2</sub>	Our method	-0.021 6	-0.429 9	-0.014 3	224.876 2	13.000 6	-34.044 5
	Zhang's method	-0.020 2	-0.428 5	-0.013 6	225.253 1	13.135 6	-34.368 0

#### 4 结束语

针对无重叠视域的多相机全局标定问题,提出了基于半镜面平面靶标的标定方法。相比于现有的方法,所提出的方法具有更好的弹性、适应性,基本不受相机布局的影响,尤其适用于一维标定物无法贯穿两个相机的视场的情形,同时在相同标定精度及设备条件下,该算法计算更为简便,只需要计算一维标定物的散斑图像点的消隐点即可计算旋转矩阵,该算法具有广泛的应用前景。实验结果确认了所提出的基于半镜面平面靶标的外参标定方法具有较好的精度以及鲁棒性。

#### 参考文献:

- [1] CHEN F, CHEN X, XIE X, et al. Full-field 3D measurement using multi-camera digital image correlation system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51 (9): 1044-1052.
- [2] ZHAN D, JING D, WU M, et al. An accurate and efficient vision measurement approach for railway catenary geometry parameters [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67 (12): 2841-2853.
- [3] CHAO Z, YU Q, JIANG G, et al. 4. Study of a pose-relay videometric method using a parallel camera series [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49: 5192-5198.
- [4] SHANG Y, YU Q, XU Y, et al. a displacement-relay videometrics method in unstable areas [D]. *Fringe*, 2013, 2014: 871-874.
- [5] MA D, KE S. The study of the monocular vision measurement system based on OpenCV [J]. *Computer Measurement & Control*, 2015, 23 (12): 9.
- [6] RISTANI E, TOMASI C. Features for multi-target multi-camera tracking and re-identification [C] // *Proc. CVPR*, 2018 (5): 6036-6046.
- [7] 陈渠. 基于深度学习的多摄像头协同目标跟踪方法研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [8] SCHMIDT R, SIDDIQUIE B, PETERSON J, et al. Large-scale vehicle detection, indexing, and search in urban surveillance videos [J]. *IEEE TMM*, 2012, 14 (1): 28-42.
- [9] RISTANIE, SOLERA F, ZOU R, et al. Performance measures and a data set for multi-target, multi-camera tracking [C] // *European Conference on Computer Vision*, 2016: 17-35.
- [10] KIM J, HWANGBO M, KANADE T, et al. Motion estimation using multiple non-overlapping cameras for small unmanned aerial vehicles [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2018: 3076-3081.
- [11] PAGEL F. Calibration of non-overlapping cameras in vehicles [C] // *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2010: 1178-1183.
- [12] JIANG W, XIAO C, JIM H, et al. Vehicle tracking with non-overlapping views for multi-camera surveillance system [C] // *IEEE 10th International Conference on High Performance Computing and Communications & IEEE International on Embedded and Ubiquitous Computing (HPCC EUC)*, 2013: 1213-1220.
- [13] JAVED O, SHAFIQUE K, SHAH M. Appearance modeling for tracking in multiple non-overlapping cameras [C] // *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005: 26-33.
- [14] BIN H, et al. Panoramic video stitching in multi-camera surveillance system [C] // *International Conference of Image and Vision Computing, New Zealand*, 2010: 1-6.
- [15] ESQUIVEL S, WOELK F, KOCHR. Calibration of a multi-camera rig from non-overlapping views [J]. *Pattern Recognition*, 2007: 82-91.
- [16] PAGEL F. Extrinsic self-calibration of multiple cameras with non-overlapping views in vehicles [C] // *Video Surveillance and Transportation Imaging Applications*, 2014: 1-14.
- [17] GUAN B, SHANG Y, YU Q, et al. A simple and flexible calibration method of non-overlapping camera rig [J]. *Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII*, 2015, 95280.
- [18] WANG Q, LIU Y, SHEN Y, et al. An accurate extrinsic camera self-calibration method in non-overlapping camera sensor networks [C] // *2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2011: 1-6.
- [19] ATAER C E, TAGUCHI Y, RAMALINGAM S, et al. Calibration of non-overlapping cameras using an external SLAM system [C] // *International Conference on 3D Vision*, 2014: 509-516.
- [20] DONG S, SHAO X, JANG X, et al. Extrinsic calibration of a non-overlapping camera network based on close-range photogrammetry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55 (23): 6363-6370.
- [21] LU R, PHYSICALA, A global calibration method for large-scale multi-sensor visual measurement systems [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 116 (3): 384-393.
- [22] ORTEGAA, GALEGO R, FERREIRA R, et al. Estimation of camera calibration uncertainty using lidar data [C] // *2013 European Conference on Mobile Robots*, 2013: 361-366.

- [23] XIE M, WEI Z, ZHANG G, et al. A flexible technique for calibrating relative position and orientation of two cameras with no-overlapping FOV [J]. *Measurement*, 2013, 46 (1): 34 - 44.
- [24] LIU Z, ZHANG G, WEI Z, et al. A global calibration method for multiple vision sensors based on multiple targets [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22 (12): 125102.
- [25] HESCHJ, MOURIKIS A, ROUMELIOTIS S, Extrinsic camera calibration using multiple reflections [C] // *European Conference on Computer Vision*, 2010: 311 - 325.
- [26] TAKAHASHIK, NOBUHARA S, MATSUYAMA T, A new mirror-based extrinsic camera calibration using an orthogonality constraint [C] // *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012: 1051 - 1058.
- [27] AGRAWALA, Extrinsic camera calibration without a direct view using spherical mirror [J]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2013: 2368 - 2375.
- [28] KUMARR, ILIE A, POLLEFEYSM, et al. Simple calibration of non-overlapping cameras with a mirror [C] // *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008: 1 - 7.
- [29] LONG G, LI X, ZHANG X, et al. Simplified mirror-based camera pose computation via rotation averaging [J]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015: 1247 - 1255.
- [30] LIU Q, SUN J, ZHAO Y, et al. Calibration method for geometry relationships of nonoverlapping cameras using light planes [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52 (7): 074108.
- [31] LIU Z, WEI X, ZHANG G, et al. External parameter calibration of widely distributed vision sensors with non-overlapping fields of view [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51 (6): 643 - 650.
- [32] LIU Z, LI F, ZHANG G, An external parameter calibration method for multiple cameras based on laser rangefinder [J]. *Measurement*, 2014, 47: 954 - 962.
- [33] LIU Z, ZHANG G, WEI Z, et al. Novel calibration method for non-overlapping multiple vision sensors based on 1D target [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49 (4): 570 - 577.
- [34] ZHANG Z, A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22 (11): 1330 - 1334.
- [35] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple view geometric in computer vision* [M]. Cambridge University Press, 2003.
- [5] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37 (9): 1904 - 1916.
- [6] 李鹏飞, 刘 瑶, 李 珣, 等. YOLO9000 模型的车辆多目标视频检测系统研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27 (8): 21 - 24.
- [7] WANG Z, WU L, LI T, et al. A smoke detection model based on improved YOLOv5 [J]. *Mathematics*, 2022, 10 (7): 1190.
- [8] MALTA A, MENDES M, FARINHA T, et al. Augmented reality maintenance assistant using yolov5 [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11 (11): 4758.
- [9] ZHAO Y, GAO F, YU J, et al. Underwater image mosaic algorithm based on improved image registration [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11 (13): 5986.
- [10] 陈科圻, 朱志亮, 邓小明, 等. 多尺度目标检测的深度学习研究综述 [J]. *软件学报*, 2021, 32 (4): 1201 - 1227.
- [11] GAO M, DU Y, YANG Y, et al. Adaptive anchor box mechanism to improve the accuracy in the object detection system [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78 (19): 27383 - 27402.
- [12] YAN B, FAN P, LEI X, et al. A real-time apple targets detection method for picking robot based on improved YOLOv5 [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13 (9): 1619.
- [13] 于 硕, 李 慧, 桂方俊, 等. 复杂场景下基于 YOLOv5 的口罩佩戴实时检测算法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2021,
- [14] ZHANG T, ZHANG X, KE X. Quad-FPN: A novel quad feature pyramid network for SAR ship detection [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13 (14): 2771.
- [15] GAO J, CHEN Y, WEI Y, et al. Detection of specific building in remote sensing images using a novel YOLO-S-CIOU model. Case: gas station identification [J]. *Sensors*, 2021, 21 (4): 1375.
- [16] AL-FURAIJI O J, TUAN N A, YUREVICH T V, et al. A new fast efficient non-maximum suppression algorithm based on image segmentation [J]. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2020, 19 (2): 1062 - 1070.
- [17] 张 鸿, 严云洋, 刘以安, 等. 基于定位置信度和区域全卷积网络的火焰检测方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57 (20): 201021.
- [18] WEISS K, KHOSHGOFTAAR T M, WANG D D. A survey of transfer learning [J]. *Journal of Big data*, 2016, 3 (1): 1 - 40.
- [19] ZOPH B, YURET D, MAY J, et al. Transfer learning for low-resource neural machine translation [C] // *Proc. of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 2016: 1568 - 1575.
- [20] PENG P, XIANG T, WANG Y, et al. Unsupervised cross-dataset transfer learning for person re-identification [C] // *Proc. of the Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016: 1306 - 1315.

（上接第 223 页）