

## 采用辅助靶标的移动机器人立体视觉定位

李 鹏<sup>1</sup>, 张洋洋<sup>2</sup>

- (1. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026;
2. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘 要:** 在自动化工厂中, 为高效率、低成本地实现对移动机器人的立体视觉定位, 提出了一种基于辅助靶标的移动机器人立体视觉定位方法。首先, 基于高斯混合模型背景减除法和形态学方法实现对视频图像中移动机器人运动区域的检测; 其次, 使用 FAST 算法对移动机器人运动区域进行特征点提取, 进一步通过分析特征点邻域像素的三通道颜色特性, 筛选出固定在移动机器人上的正方形辅助靶标的四个顶点; 最后结合双目摄像机内、外参数的标定结果, 计算出移动机器人上定位点的三维坐标, 通过实验和分析验证了该方法的有效性。该方法具有算法复杂度小, 实时性高等优点。

**关键词:** 双目立体视觉; 移动机器人; 运动区域检测; 特征提取; 摄像机标定

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S117006

## Stereo vision localization for mobile robot based on auxiliary target

Li Peng<sup>1</sup>, Zhang Yangyang<sup>2</sup>

- (1. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. School of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** In order to realize stereo vision localization for mobile robot with high efficiency and low cost in the automated factory, a stereo vision localization method for mobile robot based on auxiliary target was proposed. Firstly, background subtraction based on Gaussian mixture model and morphological methods were used to detect motion areas of mobile robot from video images. Secondly, feature points in motion areas of mobile robot were extracted by the FAST algorithm. On this basis, by analyzing three-channel color characteristics of neighborhood pixels on each feature point, four vertices of the square auxiliary target fixed on the mobile robot were screened from extracted feature points. Finally, the 3D coordinate for localization of mobile robot was calculated with intrinsic and extrinsic parameters of binocular cameras calibrated. Experiment results show the feasibility and validity of the proposed method, which has the advantage of small algorithm complexity and high real-time.

**Key words:** binocular stereo vision; mobile robot; motion area detection; feature extraction; camera calibration

收稿日期: 2018-11-10; 修订日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(51505055); 辽宁省自然科学基金(201602096); 中央高校基本科研业务费专项资金(3132018193)

作者简介: 李鹏(1985-), 男, 讲师, 博士, 主要从事机器视觉、运动检测等方面的研究。Email: lp20131012@dlmu.edu.cn

## 0 引言

当前,随着《中国制造 2025》发展战略<sup>[1]</sup>深入实施以及制造业的转型升级,移动机器人正被广泛地应用于机械制造、金属材料加工等行业的自动化工厂中,以协助数控加工完成工件物料的搬运、装卸等工作。在自动化工厂中,定位是移动机器人导航、路径规划及执行其他任务的前提和基础。常用的定位方法有采用视觉里程计、人工标志、激光雷达及视觉传感器等<sup>[2]</sup>,其中基于双目立体视觉的定位方法因其所采集的信息丰富、适应范围广等优点,被广泛地应用于移动机器人的定位中。

近年来,国内外学者对移动机器人立体视觉定位的大量研究主要集中在车载视觉系统(即双目视觉系统固定在移动机器人上)方面。Howard<sup>[3]</sup>基于立体视觉里程计,采用特征点匹配法寻找前后帧图像中的对应特征点,实现了对无人自主车和非轮式机器人的定位。Nefti-Meziani 等<sup>[4]</sup>以 NAO 机器人为研究背景,实现了基于双目立体视觉的三维深度信息获取和目标跟踪程序的自主开发。Hong 等<sup>[5]</sup>基于立体视觉系统和低成本的 GPS,采用扩展卡尔曼滤波实现了移动机器人的定位和导航。Liu 等<sup>[6]</sup>使用改进的 RANSAC 算法,由立体视觉里程计实现了移动机器人的定位。叶平等<sup>[7]</sup>提出采用 Shi-Tomasi 特征点提取算法,由 SIFT 算子对双目视觉图像进行立体匹配,并采用特征点筛选、RANSAC 算法和卡尔曼滤波等方法,完成了球形机器人的定位。上海交通大学的于清晓<sup>[8]</sup>提出了一种基于双目视觉的服务机器人目标位姿精定位算法,基于 Mean-Shift 颜色分割与 SIFT 特征匹配技术,完成了轮式餐厅服务机器人的移动定位。浙江大学的卢维<sup>[9]</sup>通过构建基于特征点匹配的可实时工作的双目立体视觉里程计,实现了复杂环境中移动机器人的定位。罗杨宇等<sup>[10]</sup>基于光束平差法,通过采用点模式匹配法实现了移动机器人的自定位。

然而,在自动化工厂中,将双目视觉系统固定在移动机器人上,摄像机间的距离较短,工作视场范围有限,很难获取大范围动态环境,全局路径规划困难。当加工现场工况复杂时,图像等信息的传输延迟干扰问题较为明显,难以保证移动机器人在复杂加

工现场定位的准确性和实时性。另外,当加工任务复杂时,往往需要多个移动机器人参与到工件的加工制造中,如果将摄像机安装在移动机器人上,多个移动机器人需要多组摄像机,不仅会增加使用成本,后期的维护和改造也会困难。

而将双目视觉系统安装在自动化工厂内,通过一组摄像机对移动机器人全局定位,对移动机器人进行全局路径规划,使移动机器人运行到距离加工平台的合理范围内,在减少移动机器人定位成本的同时,可实现对加工现场中移动机器人的全局监控,保证各加工环节有序进行。在这一模式中移动机器人定位的效率会影响到工件的整体加工周期。在激烈的市场竞争中,一个产品的研发周期中的每一分钟都可能给企业带来巨大的经济利率,工件制造周期的缩短会带来很大的市场竞争力。而当前的移动机器人双目立体视觉定位方法,尽管可以取得较好的定位结果,但所涉及的算法复杂、计算量大,所需要的时间成本较高。如所涉及的基于特征检测算子(如 SIFT 等算子)的立体图像匹配过程,会增加定位算法的时间复杂度,影响到定位的实时性。

因此,文中针对上述问题,在总结归纳传统移动机器人立体视觉定位方法的基础上,面向自动化工厂的大场景环境,为高效率、低成本地实现对移动机器人的立体视觉定位,提出了采用辅助靶标的移动机器人立体视觉定位方法。文中首先介绍了移动机器人双目立体视觉定位的数学模型和算法流程;其次提出了基于 FAST 算法<sup>[11]</sup>和正方形靶标辅助移动机器人定位的方法;最后对所述的定位方法进行了相应的实验和分析。该方法定位过程灵活、简单,实时性强,可为移动机器人等运动目标的检测、识别与定位提供一种新的方法。

## 1 移动机器人立体视觉定位数学模型及算法流程

### 1.1 移动机器人双目立体视觉定位数学模型

移动机器人双目立体视觉定位几何原理如图 1 所示,双目摄像机固定在自动化工厂的顶部,通过全局路径规划,使移动机器人运行到距离加工平台的合理范围内。以左、右摄像机的光心  $O_{cl}$ 、 $O_{cr}$  为原点,

分别建立坐标系  $O_{cl}-X_l Y_l Z_l$ 、 $O_{cr}-X_r Y_r Z_r$ ，假设移动机器人上一定位点  $P$  在左、右摄像机坐标系下的三

维坐标分别为  $P_{cl}(X_{cl}, Y_{cl}, Z_{cl})$  和  $P_{cr}(X_{cr}, Y_{cr}, Z_{cr})$ ，且相应的图像平面坐标分别为  $P_l(u_l, v_l)$  和  $P_r(u_r, v_r)$ 。

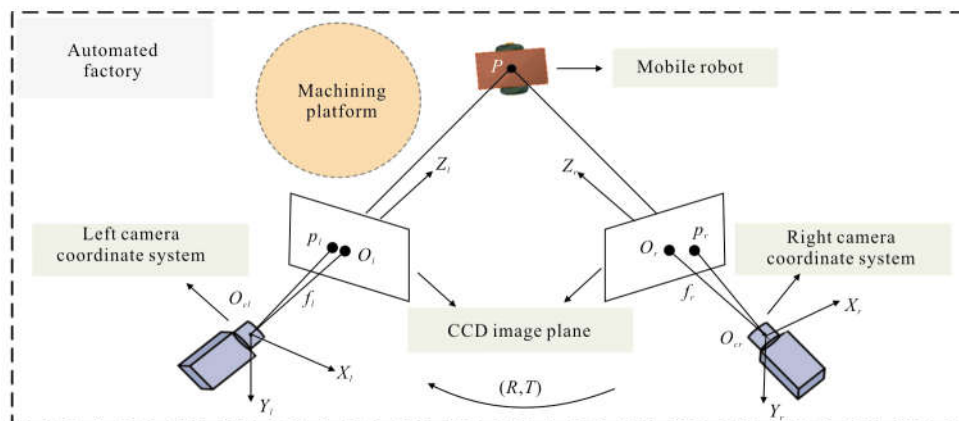


图 1 双目立体视觉定位几何原理

Fig.1 Geometric illustration of location based on binocular stereo vision

由摄像机的理想成像模型<sup>[12-13]</sup>可得如下关系：

$$Z_{cl} \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{lx} & 0 & u_{lo} \\ 0 & f_{ly} & v_{lo} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Z_{cr} \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{rx} & 0 & u_{ro} \\ 0 & f_{ry} & v_{ro} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cr} \\ Y_{cr} \\ Z_{cr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $(f_{lx}, f_{ly})$  和  $(f_{rx}, f_{ry})$  为左、右摄像机的归一化焦距； $(u_{lo}, v_{lo})$  和  $(u_{ro}, v_{ro})$  为左、右摄像机的图像坐标原点。若已知两摄像机坐标系间的旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$ <sup>[14]</sup>，则可得：

$$\begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_{cr} \\ Y_{cr} \\ Z_{cr} \end{bmatrix} + T \quad (3)$$

由公式(1)~(3)，可得左右摄像机像平面坐标关系：

$$Z_{cl} \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = M Z_{cr} \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ 1 \\ 1/Z_{cr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中：

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{lx} & 0 & u_{lo} \\ 0 & f_{ly} & v_{lo} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} f_{rx} & 0 & u_{ro} & 0 \\ 0 & f_{ry} & v_{ro} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}, \text{其中, } r_i (i=1, \dots, 9) \text{ 为旋转矩阵 } R \text{ 的}$$

参数,  $t_i (i=1, 2, 3)$  为平移向量  $T$  的参数。

将由公式(4)求得的  $Z_{cl}$  代入公式(1)，可得定位点  $P$  在左摄像机坐标系下的三维坐标：

$$\begin{cases} X_{cl} = \frac{Z_{cl}(u_l - u_{lo})}{f_{lx}} \\ Y_{cl} = \frac{Z_{cl}(v_l - v_{lo})}{f_{ly}} \\ Z_{cl} = \frac{AD - BC}{A - Cu_l} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $A = m_{11}u_r + m_{12}v_r + m_{13}$ ； $B = m_{14}$ ； $C = m_{31}u_r + m_{32}v_r + m_{33}$ ； $D = m_{34}$ 。

若已知两摄像机的内、外参数和定位点  $P$  在左、右摄像机中的图像坐标对，则由公式(5)可得定位点  $P$  在左摄像机坐标系下的三维空间坐标。

### 1.2 立体视觉定位算法流程

移动机器人双目立体视觉定位算法流程如图 2 所示，首先由双目摄像机获取移动机器人场景视频图像；接着由背景减除法对采集的序列图像进行处理，初步提取出移动机器人的前景图像，进一步由形态学去除前景图像中的噪声等干扰；在此基础上，通过对移动机器人进行特征点提取及特征点的筛选，

得到固定在移动机器人上的正方形靶标的顶点图像坐标;最后基于公式(5),由正方形靶标中心点的图

像坐标对和标定完成的摄像机内、外参数求得移动机器人定位的三维空间坐标。

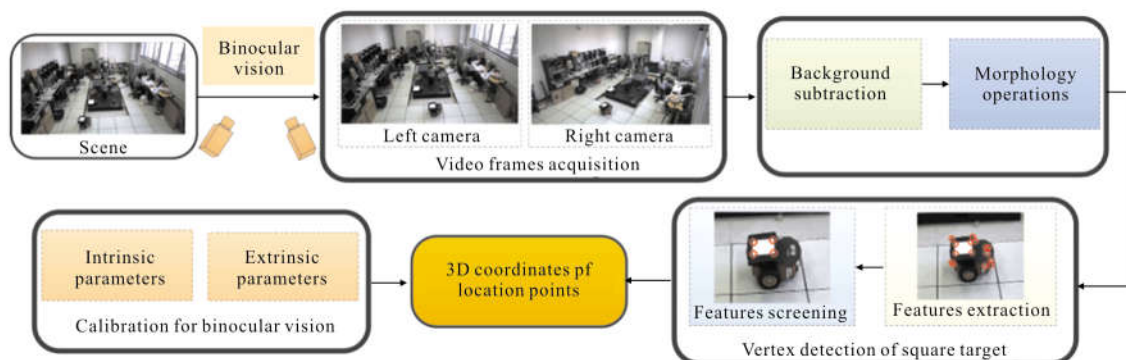


图 2 移动机器人双目立体视觉定位算法流程

Fig.2 Flow chart of the location algorithm based on binocular stereo vision

## 2 基于辅助靶标的移动机器人定位

实现移动机器人定位的前提是在视频流序列图像中检测并识别出移动机器人所在的目标区域,并进一步对所识别目标进行特征提取。

### 2.1 移动机器人区域识别

为将移动机器人的大小、形状等信息从具有复杂背景的视频流图像中提取出来,采用了基于高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)的背景减除算法对运动目标进行检测<sup>[15]</sup>。对于视频流图像中的一像素点  $Q$ ,在某时间段  $t$  内的像素值集合为  $\{X_1, X_2, \dots, X_t\}$ ,用  $K$  个高斯分布描述的像素值概率为:

$$P(X_t) = \sum_{i=1}^K \omega_{i,t} \times \eta(X_t, \mu_{i,t}, \Sigma_{i,t}) \quad (6)$$

式中:  $\omega_{i,t}$  为  $t$  时刻第  $i$  个高斯分布的权重;  $\eta(X_t, \mu_{i,t}, \Sigma_{i,t})$  为  $t$  时刻第  $i$  个高斯概率密度函数;  $\mu_{i,t}$  为  $t$  时刻第  $i$  个高斯分布的均值;  $\Sigma_{i,t}$  为  $t$  时刻第  $i$  个高斯分布的协方差矩阵,可表示为:

$$\Sigma_{i,t} = \sigma_{i,t}^2 I \quad (7)$$

式中:  $\sigma_{i,t}^2$  为  $t$  时刻第  $i$  个高斯分布的方差;  $I$  为三维单位矩阵。

在上述高斯混合背景模型建立的基础上,采用参考文献[16]的方法对高斯混合背景模型完成更新。将当前  $K$  个高斯分布按权重与方差的比值  $\omega_{i,t}/\sigma_{i,t}^2$  的大小进行降序排列,取前  $b$  个高斯分布作为背景模

型的最佳描述:

$$B = \arg \left( \min_b \left( \sum_{i=1}^b \omega_{i,t} > T \right) \right) \quad (8)$$

式中:  $T$  为阈值,表示背景模型  $B$  在  $K$  个高斯分布中所占的比例。将像素点  $Q$  的新像素值  $X_{t+1}$  与前  $b$  个高斯模型进行匹配,只要有一个匹配成功,那么该像素点为背景点,否则为目标点。

以图 3(a)所示的三个位置的移动机器人大场景图像为例,基于 GMM 背景减除法的运动目标检测结果如图 3(b)所示。图 3(a)中的静态背景被去除后,初步提取出了包含移动机器人运动区域的前景图像。由于光照的变化及其他扰动,图 3(b)所示的前景图像存在孤立的光斑噪点、孔洞等缺陷,为实现运动目标的完整提取,进一步由二值形态学<sup>[17-18]</sup>对图像进行处理,设  $X$  是被处理的对象,  $B$  为结构元素,用  $B$  对  $X$  分别做开运算和闭运算:

$$\text{OPEN}(X, B) = (X \odot B) \oplus B \quad (9)$$

$$\text{CLOSE}(X, B) = (X \oplus B) \odot B \quad (10)$$

式中:  $X \odot B$  为对图像的腐蚀运算;  $X \oplus B$  为对图像的膨胀算法。

首先使用开运算对图 3(b)中的图像进行处理,消除背景噪声后,再使用闭运算填补目标区域中的孔洞,处理结果如图 3(c)所示。

对图 3(c)中所检测的移动机器人区域的每个像素进行行和列扫描,可得像素的最小行号  $R_{\min}$ 、最大行号  $R_{\max}$ 、最小列号  $C_{\min}$  和最大列号  $C_{\max}$ ,则移动机器人区域对应的像素对角点坐标分别为  $(C_{\min}, R_{\min})$ 、

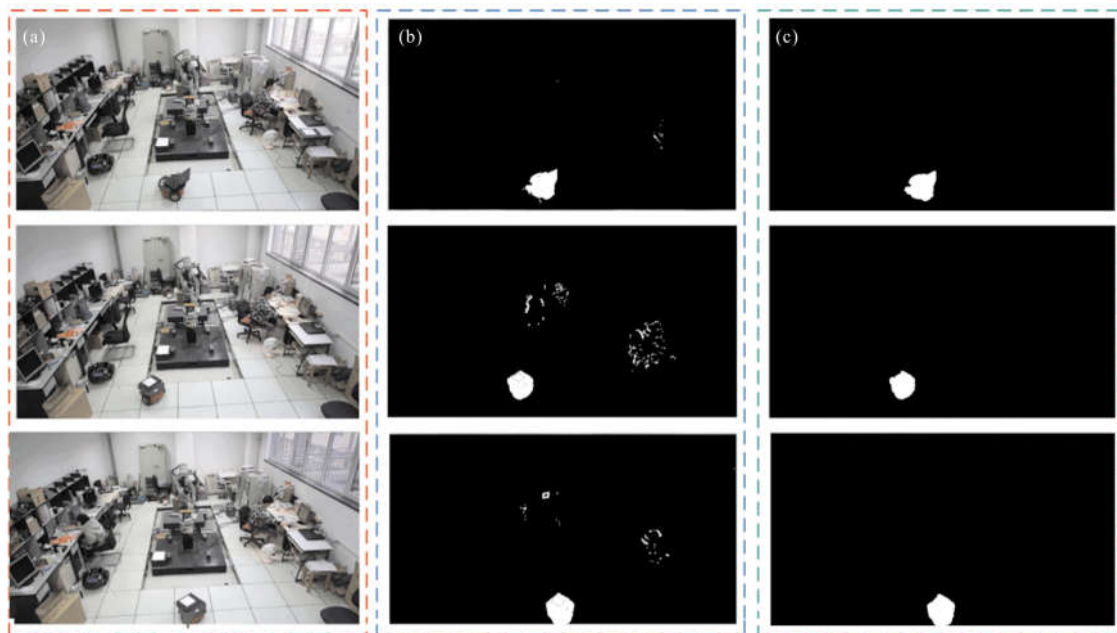


图 3 移动机器人区域检测

Fig.3 Motion area detection of mobile robot

$(C_{max}, R_{max})$ 。进一步可得移动机器人区域最小外接矩形的中心点坐标 $(X_{mid}, Y_{mid})$ 为:

$$X_{mid} = C_{min} + (C_{max} - C_{min}) / 2 \quad (11)$$

$$Y_{mid} = R_{min} + (R_{max} - R_{min}) / 2 \quad (12)$$

根据公式(11)、(12),即可利用矩形框将移动机器人区域从视频流图像中实时标识出来,对三帧图像中的移动机器人由矩形框标识的结果如图 4(a)~(c)所示。



图 4 运动目标标识

Fig.4 Moving target identification

### 2.2 基于辅助靶标的定位方法

在自动化工厂的大场景环境中,当双目摄像机

与移动机器人之间距离较远时,会导致移动机器人在摄像机图像中的细节特征丢失较多。如图 5 所示,



图 5 基于 SURF 算子的移动机器人特征匹配

Fig.5 Feature matching of mobile robot based on SURF

如果基于 SURF 等算法的传统定位方法<sup>[9]</sup>对左右摄像机中的移动机器人目标图像进行特征点匹配,由于在机器人上提取的特征点较少,难以保证图像特征点匹配和移动机器人定位的准确性。

针对以上问题,提出了在移动机器人上固定放置具有明显对比特征的白色正方形靶标的辅助定位方法,以确保移动机器人在运动过程中能够保持稳定的特征提取。进一步可由特征检测算子获取左、右摄像机图像中正方形靶标的四个顶点,然后利用四个顶点的图像坐标信息计算得到正方形靶标中心点的图像坐标,用于定位点的三维坐标求解。

在定位过程中,移动机器人特征提取算法的效率会影响到定位的实时性。因此,对图像处理领域应用较广的 SIFT、SURF、Harris 和 FAST 四种特征提取算法进行了实验对比分析,四种算法对移动机器人特征点检测的结果分别如图 6(a)~(d)所示,各算法

性能比较如表 1 所示,其中 FAST 特征提取算法用时最少,约 5.6 ms 检测了 13 个特征点。

表 1 四种算法性能比较

Tab.1 Performance comparison of four algorithms

Feature detection algorithms	Number of feature points	Run time/ms
SIFT	15	175.340
SURF	13	51.643
Harris	12	14.117
FAST	13	5.558

为保证移动机器人定位的实时性,减小特征检测算法的时间复杂度,采用了 FAST 算子对移动机器人进行特征检测,由 FAST 算子对带有正方形靶标的移动机器人区域提取特征点,在左、右摄像机图像中的特征点提取结果如图 7 所示。

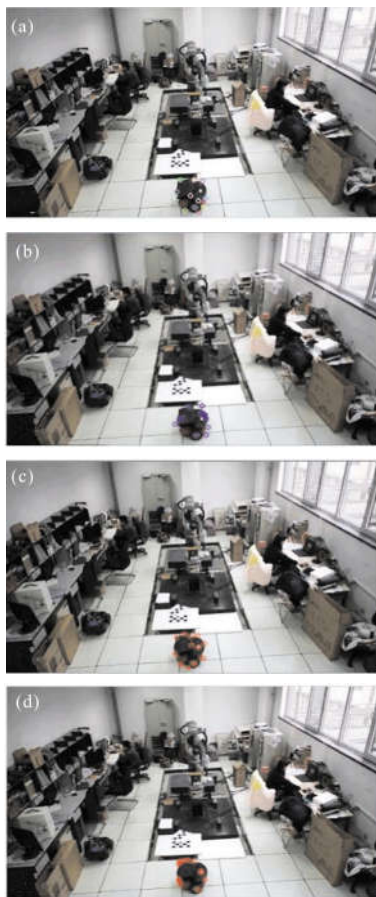


图 6 基于(a)SIFT、(b)SURF、(c)Harris、(d)FAST 四种算法的特征点检测

Fig.6 Feature point detection based on four algorithms (a)SIFT, (b)SURF, (c)Harris, (d)FAST

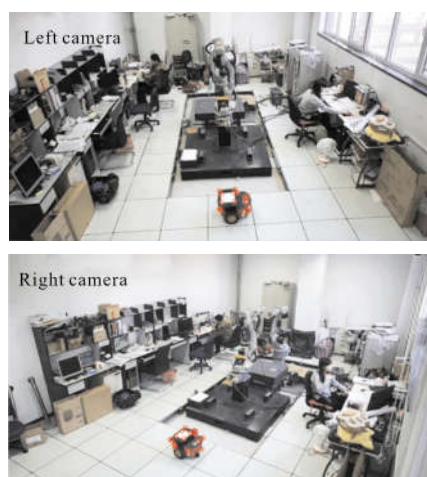


图 7 基于 FAST 算子的特征点检测

Fig.7 Feature point detection based on FAST

在图7提取的移动机器人特征点中,为了只保留移动机器人上白色正方形靶标的四个顶点,进一步基于特征点邻域像素的 RGB 三通道信息,对提取的特征点进行筛选。对于提取到的每个特征点,以该点为中心建立一个 5 pixel×5 pixel 的正方形邻域作为检测区域。以白色正方形靶标的顶点为例,建立 5 pixel×5 pixel 的正方形邻域如图 8 所示。

做如下定义:设  $n$  为正方形邻域内,三通道像素值满足  $(R+G+B)/3 > 230$  的像素点的个数; $m$  为正方形邻域内,三通道像素值满足  $R < 90, G < 90, B < 90$  的

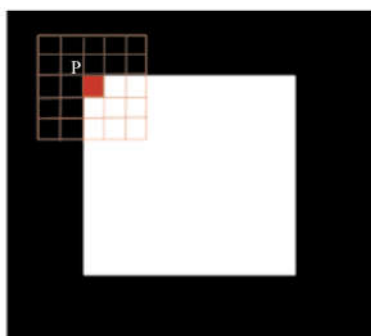


图 8 正方形邻域示意图

Fig.8 Square neighborhood diagram

像素点的个数。建立白色正方形靶标的顶点判据:

$$\begin{cases} n \geq 3 \\ (m+n) \geq 10 \end{cases} \quad (13)$$

对移动机器人提取的每个特征点的正方形邻域内,统计像素点个数  $m, n$ ,若满足公式(13)中的判定条件,则该特征点为白色正方形靶标的顶点。

### 3 实验及分析

双目视觉下移动机器人定位实验平台如图 9 所示,主要由两台摄像机、移动机器人和计算机组成,其中摄像机为 DS-2CD3T21WD-I3 型号的网络摄像机,图像分辨率为 1 920×1 080,4 mm 镜头,帧率为 25 帧/s,两摄像机之间的距离约为 2.5 m,移动机器人先锋 P3-DX 型。计算机 CPU 的主频为 3.70 GHz,8 GB 内存,软件开发平台为安装于 64 位 Windows7 操作系统下的 Visual studio 2008。

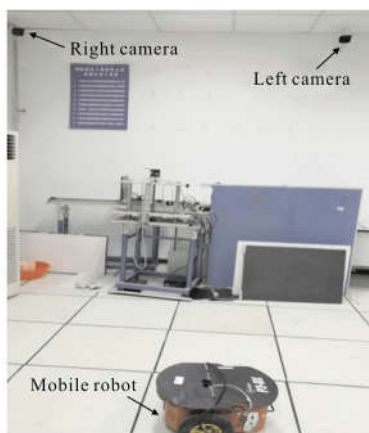


图 9 双目视觉下移动机器人定位实验平台

Fig.9 Experiment platform of mobile robot localization based on binocular vision

### 3.1 摄像机标定实验

参照张正友提出的基于平面点阵靶标的标定技术<sup>[20]</sup>,在 MATLAB 软件下对双目摄像机的内外参数进行标定。用于摄像机参数标定的棋盘格内角点数为 10×7,每个方格边长为 100 mm,由左、右摄像机分别采集 15 幅不同位姿下的棋盘格图像。以左相机采集的一副标定图像为例,提取棋盘格靶标角点后的图像如图 10 所示。



图 10 摄像机内参数的标定

Fig.10 Calibration for camera intrinsic parameters

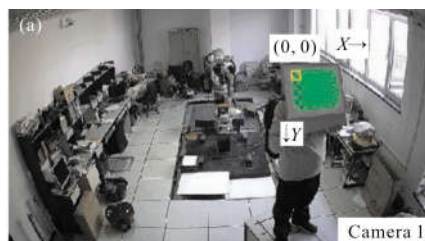
对左、右摄像机内参数标定后的结果如表 2 所示。

表 2 摄像机内参数标定结果

Tab.2 Calibration results of camera intrinsic parameters

Intrinsic parameters	Left camera	Right camera
$f_x (f_x)$	433.308 8	424.156 0
$f_y (f_y)$	435.332 6	426.153 1
$u_0 (u_0)$	350.515 9	307.953 3
$v_0 (v_0)$	185.129 9	171.372 5

在完成摄像机内参数标定的基础上,对摄像机外参数进行标定。由左、右摄像机同时采集 12 幅不同位姿下的棋盘格图像,以图 11 所示的一组提取棋盘格靶标角点后的图像为例,标定求得左、右摄像机间的旋转矩阵和平移向量分别为:



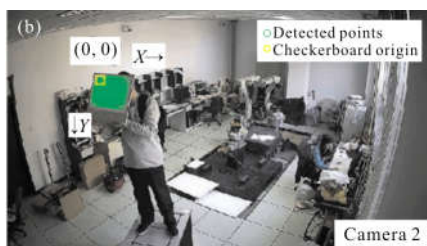


图 11 摄像机外参数的标定

Fig.11 Calibration for extrinsic parameters of cameras

$$R = \begin{bmatrix} 0.799\ 235 & 0.207\ 338 & -0.564\ 121 \\ -0.276\ 681 & 0.960\ 166 & -0.039\ 095 \\ 0.533\ 544 & 0.187\ 328 & 0.824\ 765 \end{bmatrix}$$

$$T = [-2\ 116.258\ 778 \quad -388.683\ 063 \quad 1\ 294.\ 319\ 804]^T$$

### 3.2 移动机器人的定位实验

依据公式(13)中的正方形靶标顶点判据,对由 FAST 算子提取的移动机器人特征点进行筛选,筛选后的六组不同位置图像,如图 12(a)~(f)所示,在每组左右摄像机的图像中,只保留了正方形靶标的四个顶点。进一步,由四个顶点的像素坐标,可计算正方形靶标的中心图像坐标对,由公式(5)和 3.1 节中标定完成的摄像机内、外参数,可求得正方形靶标中心点的三维空间坐标。

与图 12(a)~(f)六组图像对应的计算结果如表 3 所示,其中第一列的序号与图 12 中的(a)~(f)六组图像相对应,第二列为求得的左目摄像机坐标系下移

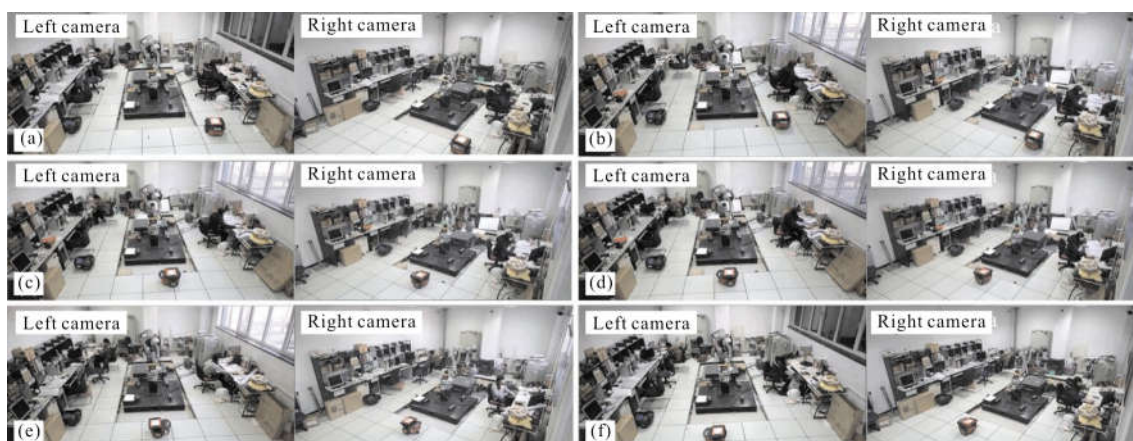


图 12 正方形靶标顶点筛选结果

Fig.12 Screening results of square target vertex

表 3 移动机器人定位结果

Tab.3 Localization results of mobile robot

No.	Location coordinates/mm	$D_1$ /m	$D_0$ /m	Absolute value of error/m	Absolute value of relative error
1	(1 163.720,1 028.140,4 477.110)	4.739	4.631	0.108	0.023
2	(866.688, 803.509, 4235.320)	4.397	4.501	0.104	0.023
3	(227.514, 922.095,4 663.080)	4.759	4.674	0.085	0.018
4	(-35.679,764.767,4 404.830)	4.471	4.540	0.069	0.015
5	(-70.051,844.279,4 495.200)	4.574	4.481	0.093	0.021
6	(-256.561,847.790,4 296.430)	4.387	4.362	0.025	0.006

动机器人的定位坐标 $(X_{cl}, Y_{cl}, Z_{cl})$ ,第三列中的 $D_1$ 为定位坐标点到左目摄像机光心的距离:

$$D_1 = \sqrt{X_{cl}^2 + Y_{cl}^2 + Z_{cl}^2} \quad (14)$$

公式(14)中,左目摄像机坐标系的原点建立在光心上。第四列的 $D_0$ 为由激光测距仪测得的正方形

靶标中心到左目摄像机的距离,作为定位点到左目摄像机光心距离的参考值,第五列的数据为误差绝对值 $|D_1 - D_0|$ ,第六列的数据为相对误差绝对值 $|D_1 - D_0|/D_0$ 。 $D_1$ 与 $D_0$ 在六个序号点的对比如图13所示。



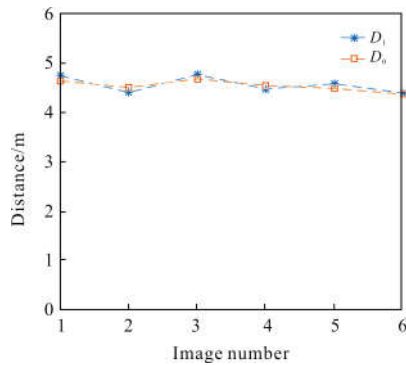


图 13  $D_1$  和  $D_0$  对比

Fig.13 Contrast between  $D_1$  and  $D_0$

由表 3 的实验数据和图 13 可见,最大误差绝对值为 0.108 m, 最大相对误差绝对值为 0.023。经计算,平均误差绝对值为 0.081 m,平均相对误差绝对值为 0.018,可满足自动化工厂的大场景环境下移动机器人定位精度的要求。

影响定位点三维坐标计算精度的主要因素包括:(1) 双目摄像机内、外参数的标定精度,包括棋盘格靶标的制作精度、标定算法的误差等。(2) 特征点提取的精度,由于摄像机固有的噪声、实验环境光照干扰等,会影响固定在移动机器人上的正方形靶标顶点提取精度。通过改进实验条件并减小上述误差,可进一步提高移动机器人的定位精度。

## 4 结 论

文中针对当前移动机器人立体视觉定位存在算法时间复杂度大、实时性差;并且在自动化工厂的大视场下,移动机器人在摄像机图像中的细节特征丢失较多等问题,提出了基于辅助靶标对移动机器人进行立体视觉定位的方法。该方法结合固定在移动机器人上方的正方形靶标顶点信息和双目立体视觉系统的内、外参数的标定结果,完成了对移动机器人上定位点三维坐标的计算。整个定位过程,无需使用传统立体视觉定位方法中所涉及的基于特征检测算子(如 SURF、SIFT 等)的立体图像匹配等复杂算法,提高了算法的运行效率和计算精度,实验结果表明了该方法的可行性和有效性,可为基于立体视觉的移动机器人等运动目标的识别和定位提供一种新的方法。在后续的工作中,将重点研究影响定位精度的各误差源,以进一步提高定位精度。

## 参考文献:

- [1] Zhou Ji. Intelligent manufacturing--main direction of "Made in China 2025"[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(17): 2273-2284. (in Chinese)  
周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [2] Ding Wendong, Xu De, Liu Xilong, et al. Review on visual odometry for mobile robots [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(3): 385-400. (in Chinese)  
丁文东, 徐德, 刘希龙, 等. 移动机器人视觉里程计综述[J]. 自动化学报, 2018, 44(3): 385-400.
- [3] Howard A. Real-time stereo visual odometry for autonomous ground vehicles [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2008: 3946-3952.
- [4] Nefti-Meziani S, Manzoor U, Davis S, et al. 3D perception from binocular vision for a low cost humanoid robot NAO [J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2015, 68(C): 129-139.
- [5] Hong S, Li M, Liao M, et al. Real-time mobile robot navigation based on stereo vision and low-cost GPS [J]. *Electronic Imaging*, 2017, 2017(9): 10-15.
- [6] Liu Y, Gu Y, Li J, et al. Robust stereo visual odometry using improved RANSAC-based methods for mobile robot localization[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2339.
- [7] Ye Ping, Li Ziliang, Sun Hanxu. Stereovision-based localization for ball-shaped robot [J]. *Control and Decision*, 2013, 28(4): 632-636. (in Chinese)  
叶平, 李自亮, 孙汉旭. 基于立体视觉的球形机器人定位方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(4): 632-636.
- [8] Yu Qingxiao. Research on mobile localization techniques for wheeled restaurant service robots [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)  
于清晓. 轮式餐厅服务机器人移动定位技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [9] Lu Wei. Research on key techniques of high-precision and real-time visual localization [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)  
卢维. 高精度实时视觉定位的关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [10] Luo Yangyu, Liu Honglin. Research on binocular vision odometer based on bundle adjustment method [J]. *Control and Decision*, 2016, 31(11): 1936-1944. (in Chinese)  
罗杨宇, 刘宏林. 基于光束平差法的双目视觉里程计研究[J]. 控制与决策, 2016, 31(11): 1936-1944.

- [11] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection [C]//European Conference on Computer Vision. Springer-Verlag, 2006: 430-443.
- [12] Zhang Xu, Wei Peng. Monocular vision calibration method of the stereo target for robot pose measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1117005. (in Chinese)  
张旭, 魏鹏. 针对机器人位姿测量立体标靶的单目视觉标定方法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 1117005.
- [13] Ni Zhangsong, Gu Yi, Liu Qinglin, et al. Flexible calibration method for binocular stereo vision in large field of view[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1882-1889. (in Chinese)  
倪章松, 顾艺, 柳庆林, 等. 大视场双目立体视觉柔性标定[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1882-1889.
- [14] Yang Jinghao, Liu Wei, Liu Yang, et al. Calibration of binocular vision measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 300-308. (in Chinese)  
杨景豪, 刘巍, 刘阳, 等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 300-308.
- [15] Zhang Pin, Chen Yiwang, Fu Qiang. Fast algorithm for camouflaged people detection in infrared imagery using GMM BS[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 975-983. (in Chinese)  
张品, 陈亦望, 傅强. 使用 GMM 背景减除的红外伪装人体目标快速识别算法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 975-983.
- [16] Stauffer C, Grimson W E L. Learning patterns of activity using real-time tracking [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(8): 747-757.
- [17] Li Zhaohui, Zhang Jianqi. Automatic vehicle detection using spaceborne optical remote sensing images in city area [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (11): 3751-3755. (in Chinese)  
李昭慧, 张建奇. 城市街区星载光学遥感图像车辆目标自动检测方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3751-3755.
- [18] Pan Feng, Yan Beibei, Xiao Wen, et al. Digital holographic reconstruction image fusion based on mathematical morphology [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 60-67. (in Chinese)  
潘锋, 闫贝贝, 肖文, 等. 基于数学形态学的数字全息再现像融合方法[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 60-67.
- [19] Qi Bingjie, Liu Jinguo, Zhang Boyan, et al. Research on matching performance of SIFT and SURF algorithms for high resolution remote sensing image[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10 (3): 331-339. (in Chinese)  
齐冰洁, 刘金国, 张博研, 等. 高分辨率遥感图像 SIFT 和 SURF 算法匹配性能研究[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 331-339.
- [20] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.