

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209617

应用于远距离视觉定位系统的特征图案研究*

石奇 姜小峰 陆顺成

(苏州大学计算机科学与技术学院 苏州 215006)

摘要: 本文的研究目标是重新设计一种用于提取特征点的特征图案以满足远距离视觉定位的需要,与二维码类似,本文中特征图案同样采用黑色块排列组成,但是其排列数量相对更少,黑色块之间具备连续性,从而极大降低对分辨率的要求,而对其进行识别是采用模板匹配算法,并在文中给出以相似率为80%进行识别界定,实验时采用对比实验方式,在同样的环境与拍摄距离的情况下,该特征图案的有效识别距离相比二维码提升225%,在30 cm×30 cm尺寸下,最远识别距离达到90 m,而在鲁棒性实验中对特征图案进行多种干扰处理并均能识别,显示出足够的抗干扰性,适用于应用在室外,所以本文所研究提出的特征图案能够基本满足远距离视觉定位的需要,非常适合应用在车辆视觉定位中。

关键词: 特征图案;特征点;视觉定位;模板匹配;二维码

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Research on feature pattern applied to long-distance
vision positioning system

Shi Qi Jiang Xiaofeng Lu Shuncheng

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: The research goal of this paper is to redesign a feature pattern for extracting feature points to meet the needs of long-distance visual positioning. Similar to the two-dimensional code, the feature pattern in this paper is also composed of black blocks, but the number of arrangements is relatively small. the black blocks have continuity, which greatly reduces the resolution requirements, and the template matching algorithm is used to identify them, and the similarity rate is 80% to identify the definition in the text, and the comparison experiment is used in the experiment. In the same environment and shooting distance, the effective recognition distance of the characteristic pattern is 225% higher than that of the QR code. Under the size of 30 * 30cm, the longest recognition distance reaches 90m, and in the robustness experiment A variety of interference processing is carried out on the characteristic pattern and all of them can be identified, showing sufficient anti-interference ability, and suitable for outdoor applications. Therefore, the characteristic pattern proposed in this paper can basically meet the needs of long-distance visual positioning, and is very suitable for application in vehicles. Visual positioning.

Keywords: feature pattern; feature point; visual positioning; template matching; QR code

0 引言

自动驾驶技术是近年来汽车工业领域的热门研究课题,这也来自于人们对汽车安全以及解放精力的迫切需要,而任何自动驾驶技术都离不开导航定位^[1-2],汽车导航定位技术主要有GPS卫星定位技术^[2],惯性导航定位技术^[3],基于视觉的定位技术^[4]等,而GPS导航存在定位精度有限,以及信号干扰等问题,尤其是车辆进入山区,隧道,高架

桥底,地下室等存在高大障碍物的地区,GPS导航会几乎失效,另外惯性导航存在累进误差的问题,不及时修正会导致误差越来越大,只适用于辅助定位,而视觉定位技术在这几年也得到了广泛的应用,尤其是应用于机器人定位方面,因为机器人通常活动在室内以及狭小区域,对定位精度要求高,而GPS等定位技术满足不了,所以在该领域,视觉定位技术得到长足发展;视觉定位技术主要是根据3D-2D点映射关系求解相机位姿,常用的有多种PnP位姿求解算

收稿日期:2022-04-14

* 基金项目:国家自然科学基金(62176172)项目资助

法,根据相机捕捉图像中的若干特征点构成矩阵方程进行求解^[5],最早由 Fischler 等提出,其中 n 代表需要的特征点数量,一般由 4 个特征点即可准确求得相机位姿(p4p), PnP 类算法在视觉定位以及测距中应用较多^[5-6],另外,若已知相机的朝向角(朝向角可以由其他传感器辅助获得),最少 2 个特征点即可求得^[7],对于 PnP 问题,不同的求解方式会有不同的计算复杂度与鲁棒性,在 OpenCV 的调用库中有关于 P4P 相机位姿求解的直接算法以及迭代解法, P4P 需要 4 个特征点求解相机位姿。

而对于图像中的特征点提取也存在多种方式,最直接的是在自然场景下采集图像中突出事物的特征点^[8],如固定的建筑物,路标等,其中涉及到 SLAM 三维建图技术,多图像视觉融合技术^[9-10],计算复杂度高,对场景要求也高,很明显不适用在如隧道,荒野山区,高速路等场景单调,缺乏特征事物的区域,另一种提取图像中特征点的方式便要简单很多,直接在行进路径区域设置固定的标记物,通过识别该固定标记物便能够快速提取特征点^[11],这种方式运算效率很高,不需要过多的场景学习,且识别精度更高,这类方式通常应用在机器人导航^[12],厂区内物流小车 agv 导航中^[13],而固定标记物应用较多的就是我们非常熟悉的二维码^[12],其能够被精确快速的进行识别,但是要达到有效识别则对清晰度要求较高,最简单的矢量二维码最低的理论像素要求是 21×21 ,而由于光线强度以及相机焦距等因素对成像的影响,并不适合远距离拍摄并进行识别,文献^[12]中辅助机器人导航的二维码排列间距仅仅只有 1.22 m,只能实现在室内使用,而无法在室外道路等需要远距离识别的区域,所以通过二维码来提取特征点的方式无法适用在道路车辆定位中,本文中会通过对比实验验证,因为相比机器人导航,厂区内 agv 导航等有限区域内的导航系统,道路区域的覆盖面更广,用于定位的标记物无法做到非常密集的布置,所以车载摄像头需要捕捉图像的距离更远。

本文则基于目标识别对远距离视觉定位系统进行改进,主要内容是设计一种更简便,对清晰度要求更低,而容错率较高的特征图案,从而满足远距离视觉定位的要求,且围绕该特征图案设计一套用于快速提取特征点的方法。

1 基于目标识别提取特征点

本节内容提出一种新型特征图案,区别于二维码通过编码的方式进行识别,该特征图案通过目标识别的方式进行识别,并给出了能够完成识别的最低相似率,以及通过识别出特征图案后围绕该特征图案确定特征点的流程。

1.1 特征图案的形成思路

首先绘制 7×7 正方形网格,网格只作为辅助线应用,共形成 49 个空格,并将该正方形网格划分为 4 个区域,分别对应网格的左上、左下、右上、右下四个区域,每个区域形成 4×4 的网格,所以四个区域相互之间是存在重叠区域的,图 1 为 7×7 网格与 4×4 网格关系图,之后分别向四个

区域内填充 7 个黑色块,从而在组成的 7×7 网格中必然存在少于 28 个黑色块,且 7×7 网格的 4 个方向的区域内必然都有黑色块填充,使得图案的覆盖区域做到最大化。

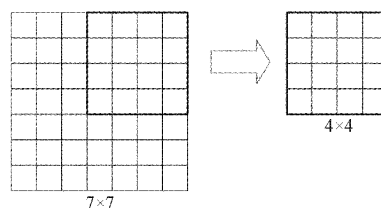


图 1 7×7 网格与 4×4 网格关系图

在向 4×4 网格中填充 7 个黑色块的过程中可以通过枚举的方式列举出如下 14 种不同的典型方案,将这些方案定义为 4×4 基础图案,图 2 为 4×4 基础图案的方案图,每个 4×4 基础图案之间需要保证存在 3 个以上的黑色块处在不同位置,当然还可以列举出更多不同的方案,但是为了避免碎片化与聚团现象,在枚举过程中保持有两个原则:1) 各个 4×4 基础图案之间存在 3 个以上黑色块处在不同位置;2) 每个 4×4 基础图案上的黑色块之间是处于连续状态的,且不存在 4 个以上的聚团现象。如果不保持第 2 个原则,能够得到的方案数量会指数级增大。

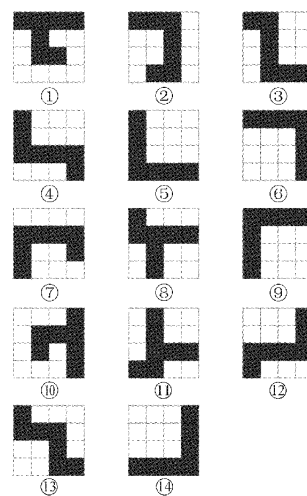


图 2 4×4 基础图案的方案图

通过以上 14 种 4×4 基础图案的拼接组合便能够绘制出填充 7×7 正方形网格的图案,如由①、②、③、④四种排列组合形成的 7×7 的网格图案,如图 3 所示为该 7×7 网格图案的例图,则通过上述方式在 7×7 网格上绘制的特征图案存在 $14^4 = 38\,416$ 个方案,将这些方案得到的图案定义为 7×7 特征图案,这种由 4×4 基础图案组合构成的方式能够快速生成大量 7×7 特征图案,且避免重复,同时又与现有的标识物,如路牌,文字符号等存在显著差异,不会出现与现有标识混淆误识别现象,所以非常适用在道路或者特殊区域的车辆视觉定位中。

在将 4×4 基础图案拼接组成 7×7 特征图案的过程中,相邻的 4×4 基础图案之间会存在重叠,这样设置的目

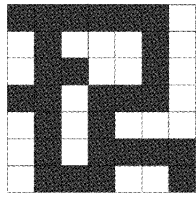


图 3 7×7 网格图案的例图

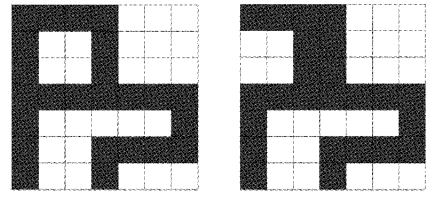


图 6 只存在两个黑色块位置不同的特殊情况

的是使得 7×7 特征图案中黑色条块之间是基本相连的,即避免了黑色条块之间的碎片化,提高在识别过程中的相似率;而这种设置方式能够提高识别过程中相似率主要原因是,在目标距离较远的情况下,相机拍摄的图像会出现模糊现象,这是相机焦距无法进一步拉长的状态下无法避免的,而模糊位置主要在边缘区域,图 4 为拍摄的多种图案模糊区域比对图,图 5 是进行二值化处理后并计算出各个图案的模糊区域侵蚀率,从图 5 明显看出,黑色块的边缘是模糊最严重的区域,而黑色块越分散,被侵蚀的边缘越多,在识别匹配的过程中,边缘模糊的情况越少,相似率会越高,所以减少黑色条块之间的碎片化则能够减少边缘,这是 4×4 基础图案在拼接时进行重叠的主要目的。



图 4 多种图案的模糊区域比对图

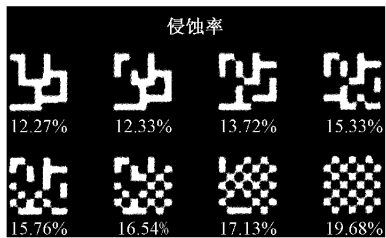


图 5 模糊区域侵蚀率比对图

另外,还需要保证组合形成的每个 7×7 特征图案之间或至少存在 3 个以上的黑色块处于不同位置,大多数情况下是如此,因为用于拼接组合的 4×4 基础图案之间是至少存在 3 个以上黑色块处于不同位置的,但是由于在将四个 4×4 基础图案组成 7×7 特征图案时,相邻的 4×4 基础图案之间会存在部分重叠,如果重叠的区域导致黑色块数量减少,则有可能出现拼接形成的 7×7 特征图案相互之间少于 3 个以上的黑色块处于不同位置,如图 6 中两个用于对比的 7×7 特征图案,两者之间只有两个黑色块处于不同位置,这是因为作为对比的两个 7×7 特征图案之间有三处位置的 4×4 基础图案是相同的,而存在差异的黑色块部位又被重叠了,实际在选用 7×7 特征图案时需要剔除这种情况,以保证各个 7×7 特征图案之间必然有三个以上的黑色块处于不同位置。

另外还需要剔除极个别的特征图案,如都是由⑤、⑥、⑨、⑭这四个 4×4 基础图案组合形成的特征图案,由于这几个 4×4 基础图案组成的特征图案缺乏特殊性,需要被剔除。

前述需要被剔除情况的形成条件比较苛刻,属于少数,所以构成 7×7 特征图案的方案数量依然会在 30 000 个以上,已经足够使用。如果按照每间隔 10~20 m 的这种密集程度布置 7×7 特征图案,那么这 3 000 个具备足够差异性的 7×7 特征图案能够覆盖 400 km 以上的距离,足够使用在如隧道,高架桥底,山区,地下室等 GPS 信号受到干扰的地区,借助 GPS 的初步定位,只需要保证在一定区域内不存在重复的特征图案即可。

很明显,本文中设计的 7×7 特征图案相比二维码的优势是对清晰度要求更低,其理论最低的像素要求是 7×7,而最简易二维码的最低像素要求是 21×21,如图 7 所示,所以理论上讲,在同等相机拍摄以及采光条件下,本文中所提出的 7×7 特征图案的有效识别距离是最简易二维码的有效识别距离的 3 倍。

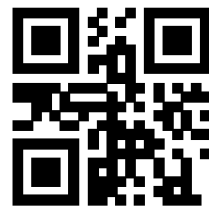


图 7 最简易二维码

1.2 特征图案的特点

从前文中设计特征图案的思路来看,该类特征图案存在以下几个显著特点:

- 1) 低像素要求,能够获得更远的有效识别距离;
- 2) 不同图案之间差异性强,图案之间至少有 3 个黑色块位置存在不同,从而不易识别混淆,具备更强的鲁棒性;
- 3) 图案充分利用覆盖区域,一般标识牌为矩形状,而特征图案的四个方向的区域内均有黑色块填充,从而特征图案可以基本充满整个标识牌,充分展现特征。
- 4) 特征图案的整体连续性好,避免了图案内部的碎片化,减少边缘从而减少远距离拍摄的模糊区域。

1.3 对特征图案的识别

本文中计划采用模板匹配算法对 7×7 特征图案进行识别,模板匹配算法是较为稳定高效的对图像进行目标识别的底层算法,该算法运算过程具备直接性,运算结果直观

高效,减少误识别,本文的后期实验验证是基于 OPEN-CV 完成,在 OPEN-CV 中,图像的模板匹配通常有六种方式,分别是平方差匹配(TM_SQDIFF),标准平方差匹配(TM_SQDIFF_NORMED),相关性匹配(TM_CCORR),标准相关性匹配(TM_CCORR_NORMED),相关性系数匹配(TM_CCOEFF),标准相关性系数匹配(TM_CCOEFF_NORMED)。

本文的实验阶段具体是采用标准相关性系数匹配算法(TM_CCOEFF_NORMED)来对特征图案进行识别,其最终计算的结果是待识别图案与模板图案的相似度,理论公式为:

$$R(x,y) = \frac{\sum_{x',y'} (T'(x',y') \cdot I'(x+x',y+y'))}{\sqrt{\sum_{x',y'} T'(x',y')^2 \cdot \sum_{x',y'} I'(x+x',y+y')^2}} \quad (1)$$

其中,

$$T'(x',y') = T(x',y') - 1/(w \cdot h) \cdot \sum_{x'',y''} T(x'',y'') \quad (2)$$

$$I'(x+x',y+y') = \frac{I(x+x',y+y') - 1}{(w \cdot h) \cdot \sum_{x'',y''} I(x+x'',y+y'')} \quad (3)$$

根据本文中特征图案的特点,黑色块的数量最多为 28 个,两个不同的 7×7 特征图案之间至少存在 3 个黑色块处于不同位置,则相应的也至少存在 3 个白色块处在不同位置,所以在通过以上核心公式能够计算出不同的两个特征图案之间最高相似度为:

$$R = \frac{Eq1}{Eq2} = 0.75 \quad (4)$$

其中,

$$Eq1 = \left(255 - \frac{255 \times 28n}{49n}\right)^2 \times 25n + \left(0 - \frac{255 \times 28n}{49n}\right)^2 \times 18n + \left(255 - \frac{255 \times 28n}{49n}\right) \times \left(0 - \frac{255 \times 28n}{49n}\right) \times 6n \quad (5)$$

$$Eq2 = \left(255 - \frac{255 \times 28n}{49n}\right)^2 \times 28n + \left(0 - \frac{255 \times 28n}{49n}\right)^2 \times 21n \quad (6)$$

如图 8 中的两个用于比对计算的特征图案,两者存在 3 个黑色块处在不同位置,在 python3.7 环境下通过 cv2.TM_CCOEFF_NORMED 函数计算得出两者的相似度为 0.7473,如图 9 所示,理论与试验结果基本一致。

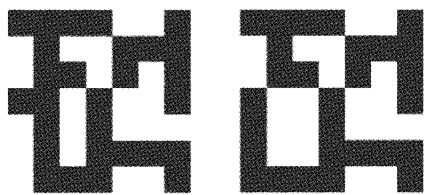


图 8 比对计算的特征图案



图 9 实际计算结果

当然,以上数值是基于特征图案中存在 28 个黑块,两个特征图案之间存在 3 个黑色块处于不同位置的情况下计算的结果,如果两个特征图案之间存在 3 个以上黑色块处在不同位置,会导致式(4)中的分子变小,即式(5)的数值变小,从而两者的相似度会低于这个结果,所以两个不同的特征图案之间只要存在 3 个以上的黑色块处于不同位置,则两者的最高相似度为 75%。

基于这种情况,若相似度在 80% 以上,则可以断定待识别的特征图案与用于比对计算的模板特征图案属于同一图案,从而可以确定该图案的具体编号或者信息。

如图 10 是识别获得特征图案信息的具体流程:

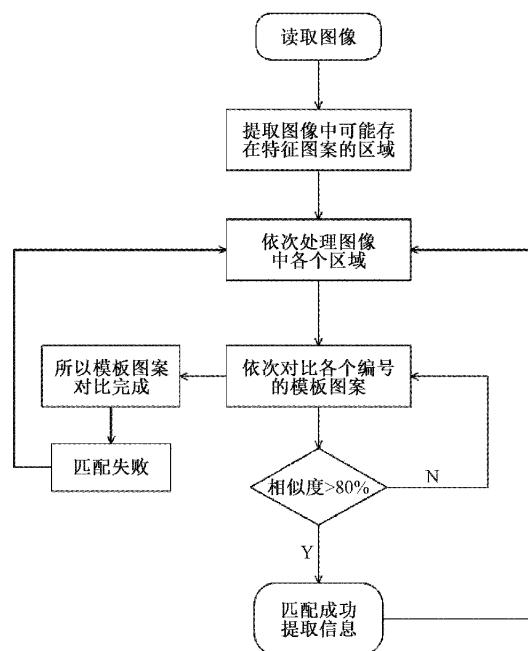


图 10 特征图案识别流程

1.4 计算特征图案中特征点

在成功识别出特征图案后,最终目的是计算图案中特征点的二维坐标,一般以特征图案的中心点为特征点,则目的是计算其中心点的二维坐标,在计算出多个特征图案的中心点二维坐标后,根据相机的成像原理,图像中的二维坐标点与世界坐标系下的三维坐标点存在小孔成像的映射关系,便可以根据 PnP 求解算法获得相机光心的世界坐标,本节将重点阐述如何计算特征图案的中心点二维坐标。

由于仅仅通过模板匹配的方式识别出特征图案后,并不能准确获得图案的边界线,所以本文在 7×7 特征图案的外周设置正方形边框,通过正方形边框能够更准确的获得

特征图案的中心点,同时还能够通过对方形边框的边缘特征快速锁定特征图案所处区域。

详细的计算流程如下:

1) 首先通过 canny 边缘检测算法^[14] 获得图像中的所有轮廓边缘,由于在特征图案的外周设置有正方形黑色边框,因此会形成内外两道正方形边缘。

2) 对所有的轮廓边缘进行筛选,只保留类似正方形边缘,所谓的类似正方形边缘指的是具有 4 个折角点的四边形,且其四条边的长度比例在一定范围内,避免混入窄条形等不可能属于正方形边框的边缘,通过这种方式可以快速锁定需要识别的特征图案所处区域,避免将算力浪费在图像中的其他区域,这属于对注意力机制的应用。

3) 对筛选得到的四边形截取内部图像,并作透视变换,使其转化为尺寸与用于筛选对比的模板图案尺寸一致的正方形待识别图像。

4) 将待识别图像与各个模板图案进行对比,计算两者的相似度,若相似度大于 80%,则表示待识别图像与该模板图案一致,从而获得待识别图像的编号或信息。

5) 在获得待识别图像的编号或信息后,根据特征图案的图像尺寸,向特征图案的四侧边外部各截取一定范围,该范围尺寸是根据黑色边框与特征图案之间的空白宽度以及黑色边框的宽度设置的,囊括黑色边框的四道侧边,图 11 为截取的四道边框的范围,再通过掩码的方式暂只保留黑色边款的四道侧边。

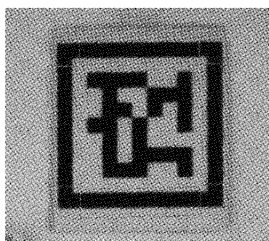


图 11 边款截取范围

进一步对四道侧边框分别按照 dx 的宽度分成若干等分,再分别计算每个等分中的边宽中心点,式为:

$$(x_0, y_0) = \left(\frac{\sum x'}{n}, \frac{\sum y'}{n} \right) \quad (7)$$

则从每道侧边框上析出多个边宽中心点,将这些边宽中心点进行线性拟合形成直线^[15-16],该直线便代表着黑色边框的中心线,图 12 为直线拟合示意图,图 12 中经过二值化处理,从而四道侧边框拟合出四道直线,而四道直线交叉形成 4 个交点,即黑色边款的 4 个角点,4 个交点对角相连后便能获得中心点,即特征图案的中心点,如图 13 所示,相应的,也获得其中心点二维坐标,一般将中心点作为特征图案的特征点,而黑色边框的 4 个角点也可以作为特征点,即 4 个相邻边框的拟合直线交叉点,从而每个特征图案可以析出 5 个特征点。

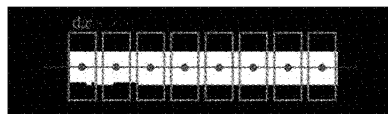


图 12 直线拟合示意

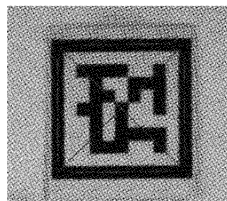


图 13 中心点形成示意图

2 实验及结果分析

由于在前文中已经展示了计算特征图案中心点的具体过程与实验效果,所以接下来的实验主要为对比实验与鲁棒性实验,对比实验是测试识别二维码与识别本文中特征图案能够达到的最远有效距离,鲁棒性实验是测试本文所提供方法的识别抗干扰性,从而判断现实环境下是否适应各种干扰情况。

2.1 对比实验

首先将二维码与本文的特征图案制作成相同的两张 30×30 cm 的正方形标识牌,实验时悬挂于同一位置,分别通过相机在不同距离的位置进行拍摄,并记录各个图像对应的拍摄距离,按照由近及远的方式进行识别,直至无法识别为止,二维码的识别测试以能够扫描出二维码信息为准,而本文中特征图案的识别测试则是以计算与模板图案的相似率,根据前述的理论,相似率大于 80% 则代表识别成功,识别过程中会将特征图案所处区域用绿色线框出。

图 14 为识别处理后的图像,为了尽可能将各个距离的拍摄图像展现在一起,图 14 中只截取了标识牌区域。

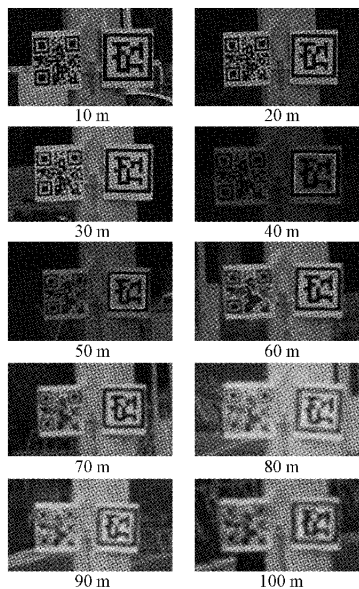


图 14 识别距离对比实验

如表1所示,可以看出,在标识牌的尺寸处于同样大小,且相机拍摄环境相同的情况下,二维码的最远识别距离为40 m,而本文中的7×7特征图案的最远识别距离为90 m,相比之下,本文中特征图案的远距离识别优势非常明显,是二维码的有效识别距离的两倍多(225%),虽然没有理论上的3倍之差(主要由于同等面积情况下在外周设置了矩形边框,使得特征图案的面积相对变小),但也使得识别距离有了极大提高,非常适用在车辆视觉定位这种需要远距离识别的领域。

表1 距离对比实验的结果汇总表

距离/m	7×7 特征图案		二维码
	相似率/%	是否识别	是否识别
10	99.76	✓	✓
20	98.18	✓	✓
30	96.86	✓	✓
40	94.82	✓	✓
50	91.61	✓	×
60	89.99	✓	×
70	84.68	✓	×
80	84.03	✓	×
90	82.43	✓	×
100	77.95	×	×

2.2 鲁棒性实验

该实验主要为了测试本文中7×7特征图案的识别抗干扰性,若用于车辆视觉定位,载有特征图案的标识牌必然需要置于户外,会受到泥沙污渍,水珠,光线,拍摄角度倾斜等多种情况的干扰,所以综合以上考虑,鲁棒性实验主要对分别存在拍摄角度倾斜,弱光,水渍,泥渍四种情况下的特征图案进行识别测试。

根据干扰要求,对标识牌进行一定处理,拍摄得到存在上述4种干扰条件的图像,拍摄距离为20 m,图15中对4种情况下的图像进行了识别处理。

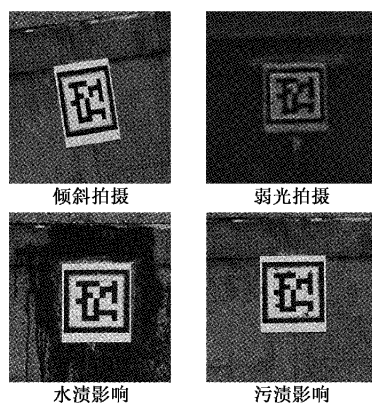


图15 干扰环境下识别测试实验

测试结果如表2所示,4种情况下得到的相似率均大于80%,则均能够通过识别,所以,本文中的特征图案的识别抗干扰性非常强,只要不是存在明显大面积遮挡,均能通过识别。

表2 干扰环境下的实验结果

距离/m	影响因素	相似率/%	是否识别
20	倾斜拍摄	96.01	✓
20	弱光拍摄	85.06	✓
20	水渍污染	98.18	✓
20	泥渍污染	88.27	✓

3 结论

本文利用新设计的7×7特征图案作为视觉定位的特征点采集标识,通过目标识别中的模板匹配算法进行识别,并在文中给定了对特征图案完成识别的要求,通过实验表明显著提高了远距离识别标识物的能力,相比二维码识别距离提高225%,识别距离的提高源于在同等面积下对分辨率要求的降低,从而可以在满足一定距离要求的情况下采用低分辨率的摄像头,则能降低对处理器的性能需要,这对车辆实时定位非常有帮助,另外,本文还提供了采集特征图案上特征点的流程,当然,特征点也不仅仅局限于特征图案的中心点,也可以是其外周边框的四个角点。

参考文献

- [1] 章军辉,陈大鹏,李庆. 自动驾驶技术研究现状及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2020,20(9): 3394-3403.
- [2] 宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013,1(1): 3-8.
- [3] 杨玉明. 基于惯性导航的全向AGV定位系统研究与设计[D]. 天津:天津工业大学, 2019.
- [4] 潘尧. 基于智能车辆立体视觉定位研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2016.
- [5] 王平,周雪峰,安爱民,等. 一种鲁棒且线性的PnP问题求解方法[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(9): 271-280.
- [6] 李占旗,高继东,彭凯,等. 基于PnP算法的前方车辆测距方法[J]. 国外电子测量技术, 2020,39(12): 104-108.
- [7] 张善彬. 基于标准路牌的单目视觉车辆自定位[D]. 济南:山东大学, 2020.
- [8] 周宇辉,朱晓强,曾丹. 基于计算机视觉的室内定位系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2022,45(2): 43-47.
- [9] 杨建松. 基于SLAM技术的移动机器人定位关键技术研究[D]. 南昌:东华理工大学, 2019.
- [10] 孙龙龙,江明,焦传佳. 基于运动矢量的改进视觉

- SLAM 算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 23-31.
- [11] 李传立, 尚俊娜, 李芳. 单目视觉人工路标辅助 INS 的组合导航定位方法[J]. 传感技术学报, 2020, 33(1): 68-73.
- [12] 王家恩, 肖献强. 基于 QR 码视觉定位的移动机器人复合导航方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 230-238.
- [13] 罗哉, 唐颖, 奇李冬, 等. 基于最优偏差路径的自动驾驶车纠偏方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 853-860.
- [14] 马敬奇, 卢亚, 李柳琼, 等. 基于 Canny 算子和改进型 Hough 变换的边缘定位方法[J]. 自动化与信息工程, 2017, 38(3): 32-36.
- [15] 薛改样. 物面边缘特征点提取的平直度检测算法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [16] KONG M, LI D, ZHANG D F. Research on the application of improved least square method in linear fitting [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 252(5): 52-58.

作者简介

石奇, 工学硕士, 主要研究方向为视觉定位, 图像处理与识别等。

E-mail: 1030945110@qq.com

姜小峰(通信作者), 副教授, 主要研究方向为机器学习, 图像处理等。

E-mail: xfjiang@suda.edu.cn

陆顺成, 工学硕士, 主要研究方向为图像处理, 缺陷检测等。

E-mail: 1303892465@qq.com