

文章编号 1004-924X(2015)02-0540-10

## 用于弱纹理场景三维重建的机器人视觉系统

林义闽<sup>1,2\*</sup>, 吕乃光<sup>2,1</sup>, 娄小平<sup>2</sup>, 董明利<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学 信息光子学与光通信研究院, 北京 100876;  
2. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192)

**摘要:** 为了实现机器人在弱纹理场景中的避障和自主导航, 构建了由双目相机和激光投点器构成的主动式双目视觉系统。对立体视觉密集匹配问题进行了研究: 采用激光投点器投射出唯一性和抗噪性较好的光斑图案, 以增加场景的纹理信息; 然后, 基于积分灰度方差(IGSV)和积分梯度方差(IGV)提出了自适应窗口立体匹配算法。该算法首先计算左相机的积分图像, 根据积分方差的大小确定匹配窗口内的图像纹理质量, 然后对超过预设方差的阈值与右相机进行相关计算, 最后通过遍历整幅图像得到密集的视差图。实验结果表明: 该视觉系统能够准确地恢复出机器人周围致密的 3D 场景, 3D 重建精度达到 0.16 mm, 满足机器人避障和自主导航所需的精度。与传统的算法相比, 该匹配方法的图像方差计算量不会随着窗口尺寸的增大而增加, 从而将密集匹配的运算时间缩短了至少 93%。

**关键词:** 机器人视觉; 三维重建; 积分图像; 灰度方差; 梯度方差; 自适应窗口; 立体匹配

**中图分类号:** TP242.6; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0540

## Robot vision system for 3D reconstruction in low texture environment

LIN Yi-min<sup>1,2\*</sup>, LÜ Nai-guang<sup>2,1</sup>, LOU Xiao-ping<sup>2</sup>, Dong Ming-li<sup>2</sup>

(1. *Institute of Optical Communication & Optoelectronics, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China;*  
2. *Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: linyimin2012@hotmail.com*

**Abstract:** To realize the obstacle avoidance and automatic navigation of a robot in a low texture environment, an active stereo visual system consisting a binocular camera and a compact laser projector was established. The dense stereo matching algorithm was investigated. Firstly, the compact laser projector generated the spot patterns with excellent uniqueness and anti-noise performance for increasing the texture information. Then, an adaptive-window matching algorithm was proposed based on Integral Grayscale Variance(IGSV) and Integral Gradient Variance(IGV). The algorithm was used calculate the integral variance in a matching window using the integral image obtained by the left image. If it was greater than the variance threshold, the correlation between the left and right image pixels

收稿日期: 2014-07-17; 修订日期: 2014-09-11.

基金项目: 北京市科学技术委员会资助项目(No. Z121100001612011); 教育部“长江学者与创新团队”发展计划资助项目(No. IRT1212); 北京市属高等学校创新团队发展计划项目资助(No. IDHT20130518)

was calculated to get the dense disparity maps. Experimental results show that the vision system accurately gets the 3D dense scene around the robot and the 3D reconstruction accuracy is 0.16 mm, which is suitable for the obstacle avoidance and automatic navigation. As compared with the traditional methods, the computation cost of dense matching has at least decreased by 93% since the computation used for image variance could not increase with the size of the matching window.

**Key words:** robot vision; three-dimensional reconstruction; integral image; grayscale variance; gradient variance; adaptive-window; stereo matching

## 1 引言

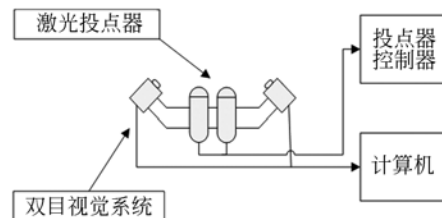
双目立体视觉匹配技术通过对所选特征进行相关计算,建立出特征间的对应关系,从而将同一个空间点在两幅图像中的投影点对应起来。由于匹配结果能够反应场景的三维轮廓,在此基础上可根据距离远近判断场景中障碍物的区域,因此广泛应用于机器人的自主避障与导航<sup>[1-2]</sup>。常用的匹配策略主要有<sup>[3]</sup>:全局最优匹配策略和局部最优匹配策略。为了避免匹配结果受局部极值的影响,全局方法先建立出全局能量函数,其中主要包括相似性数据项和平滑约束项。因此,该能量函数既能够描述待匹配区域之间的相似性,也可以描述相邻像素之间的视差关系。然后采用全局的优化理论方法来最小化该全局能量函数,从而得到整体最优的视差值分布。全局立体匹配算法得到的视差结果比较准确,但是其运行时间比较长,不适用于实时处理的场合。而局部的方法是直接在各自待匹配区域上独立求解局部能量最优结果。因此,其算法复杂度较低,运算速度较快,能满足实时性要求。目前,局部的立体匹配算法可以分为以下三类:自适应窗口立体匹配算法<sup>[4]</sup>、自适应权值的立体匹配算法<sup>[5]</sup>和多窗口结合的立体匹配算法<sup>[6]</sup>。

以上介绍的立体视觉密集匹配算法仅适用于纹理较为丰富的场景,而在实际中,往往会出现弱纹理,甚至是无纹理的场景。这些场景给仅依靠自然特征匹配的方法带来了很大的困难。因此,为了增加空间的纹理信息量,通常借助投影仪向被测空间投射出特殊的编码图案。由于机器人携带的视觉导航系统体积和重量有一定限制,所以本文利用的是两个体积小巧的半导体激光光斑

投点器。它们均可以向被测空间投射出周期性排列的光斑,但是二者的周期不同,所以叠加在一起之后在一定测量范围内能形成唯一性较好的纹理。另外,文中还通过实验证实了该光斑图案具有较好的抗噪性能。根据光斑稀疏分布的特点,本文将提出快速、有效的纹理质量评价指标:积分灰度方差(IGSV)和积分梯度方差(IGV),并依此结果设计了一种自适应窗口匹配算法。

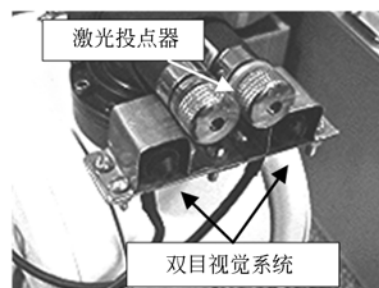
## 2 视觉系统与立体匹配方法

为了增加弱纹理场景的信息量,在双目立体视觉系统上加入激光投点器,视觉系统的结构图和实物图如图1所示。通过双目相机采集物体表面的调制信息,即可解算出三维场景的轮廓。



(a)视觉系统结构示意图

(a)Structure diagram of vision system



(b)视觉系统实物图

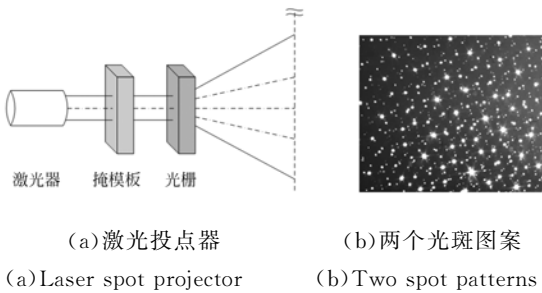
(b)Physical map of vision system

图1 机器人视觉系统示意图

Fig. 1 Illustration of robot vision system

## 2.1 激光投点器

主动视觉测量中通常采用数字投影仪来投影特定的图案<sup>[7]</sup>,然而这样的装置太过庞大,不适用于灵活的机器人平台上应用。因此,未来机器人的导航系统迫切需要一种小型化的光图案投影设备以取代传统的大型投影仪。由于半导体激光器具有体积小、重量轻,同时有效工作距离较大等优点,本文设计了一种小型化的光斑投射器。该激光投点器将一定的光斑图案投射到物体表面上形成丰富的纹理,从而增加了匹配的信息量,能够有效恢复出低纹理,甚至是无纹理区域的三维信息。



(a) 激光投点器 (b) 两个光斑图案  
(a) Laser spot projector (b) Two spot patterns

图 2 激光投点器示意图

Fig. 2 Illustration of laser spot projector

图 2(a)为本文所采用的一种激光投点器原理示意图,其由半导体激光器、掩模板(Transparency)和光栅组成。掩模板是通过随机编码形成的黑白图案,激光经过该掩模板之后形成一系列的光斑<sup>[8]</sup>。由于模板上的图案随机生成,不需要特别设计编码信息,因而对模板的制作精度要求不高。该图案经过一个二维正交的光栅之后,每一级光束将在空间中以固定周期重复出现。一个投点器的整体外形尺寸为  $\Phi 10$ ,高 50 mm,重量约为 50 g。将两个同样类型的投点器投射出的光斑进行叠加时,由于光栅周期不一致,所以在一定范围的测量场内,光斑图案具有较好的唯一性,如图 2(b)所示。

## 2.2 纹理质量评价指标

图 2(b)为一种稀疏的光斑图案,因而只能用一定大小窗口内的图像信息进行相关运算。在匹配计算时,若图像子区过小会造成区域内描述不唯一,而图像子区太大又会导致匹配结果不能准确描述物体形貌变化。因此,图像子区大小的选择需要同时考虑匹配图像纹理质量和物体形貌变化的影响。

据此分析,本节将借鉴数字图像相关技术

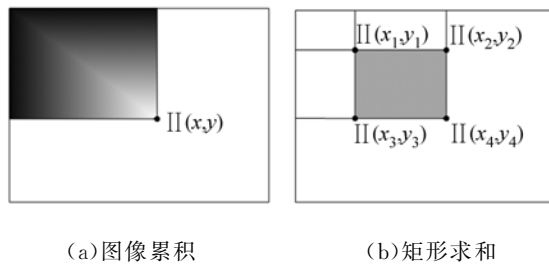
(Digital Image Correlation Method, DICM)<sup>[9-10]</sup>中对于图像纹理质量评价的研究思路。该项技术的前提条件是视觉系统采集的匹配图像纹理质量较高,这里的纹理质量主要是衡量图像子区内纹理信息量的一种指标<sup>[11-12]</sup>,其定义如下:

$$\begin{aligned} \sigma(\Delta u) &= (D(\eta) / \sum \sum (f_x)^2)^{1/2} \\ \sigma(\Delta v) &= (D(\eta) / \sum \sum (f_y)^2)^{1/2} \end{aligned}, \quad (1)$$

其中: DICM 的位移为  $(\Delta u, \Delta v)$ ; 图像噪声为  $D(\eta)$ ;  $f_x, f_y$  分别为  $x, y$  方向上的梯度分量。由式(1)可知,灰度梯度平方和的大小可以作为图像子集内部纹理质量评价的参数。

## 2.3 积分方差定义

式(1)表明图像的灰度和梯度信息可以作为衡量纹理质量的依据,但是这种传统方法的计算量往往比较大。本节将借鉴积分图像的概念,提



(a) 图像累积 (b) 矩形求和  
(a) Accumulation of image pixels (b) Sum within a rectangle

图 3 积分图像原理示意图

Fig. 3 Principle of integral image

出了 IGSV 和 IGV 指标。积分图像(Integral image)最早由 Viola 等人<sup>[13]</sup>提出并应用在人脸图像检测中,其通过图像的累积形成一幅新的图像,故称之为积分图像。如图 3 所示。该图像能够快速统计任意一块区域内像素灰度值的和,而且求和效率不受区域大小的影响。

结合图 3(a)可知,积分图像的具体定义为:

$$I(x, y) = \sum_{i \leq x} \sum_{j \leq y} I(i, j), \quad (2)$$

其表示为坐标  $(x, y)$  左上角区域内的灰度值和。而图 3(b)所示任意一个矩形区域内的灰度求和结果为:

$$Q_{\Pi} |_{U_{i \in [1,4]} x_i, y_i} = I(x_4, y_4) - I(x_2, y_2) - I(x_3, y_3) + I(x_1, y_1), \quad (3)$$

其中:  $x_i, y_i (i \in [1, 4])$  为积分图像中待求矩形的纵横坐标值。不论求和矩形的大小如何变化,求和的结果仅需要完成上述两个减法和加法操

作。因此积分图像能够快速计算出任意窗口内的灰度求和。同理,定义平方积分图像为:

$$\mathbb{I}_2(x, y) = \sum_{i \leq x} \sum_{j \leq y} I^2(i, j). \quad (4)$$

上式即灰度平方的求和。而矩形区域内灰度平方求和的结果为:

$$\begin{aligned} Q_{\mathbb{I}_2} |_{U_{i \in [1,4]}^{x_1, y_1}} = & \mathbb{I}_2(x_4, y_4) - \mathbb{I}_2(x_2, y_2) - \\ & \mathbb{I}_2(x_3, y_3) + \mathbb{I}_2(x_1, y_1). \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.3.1 积分灰度方差 IGSV

由2.2节分析可知:灰度方差是能够反应图像纹理质量的评价依据,一个匹配窗口内的灰度值方差可以表示为:

$$D(I) = \frac{1}{MN} \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} (I(i, j) - \bar{I})^2, \quad (6)$$

其中:  $\bar{I} = \frac{1}{MN} \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} I(i, j)$  为  $M \times N$  像素区域中的灰度均值。

若窗口的位置以及大小发生变化,那么每次都需要重新计算窗口内的灰度均值,方差的求和以及乘积运算,可见公式(6)的计算量非常大。利用积分图像的思路,直接用矩形顶角的4个坐标来索引积分图像  $Q_{\mathbb{I}}$  与平方积分图像  $Q_{\mathbb{I}_2}$ ,从而

$$\begin{cases} Q_{GG} |_{U_{i \in [1,4]}^{x_1, y_1}} = GG(x_4, y_4) - GG(x_2, y_2) - GG(x_3, y_3) + GG(x_1, y_1) \\ Q_{GG_2} |_{U_{i \in [1,4]}^{x_1, y_1}} = GG_2(x_4, y_4) - GG_2(x_2, y_2) - GG_2(x_3, y_3) + GG_2(x_1, y_1) \end{cases}, \quad (10)$$

同理,根据式(10)可得到 IGV 的表达式如下:

$$D(G) = (Q_{GG_2} - Q_{GG}^2). \quad (11)$$

分析式(7)和式(11)可知,由于引入了积分图像的计算方法,算法的复杂度为  $O(1)$ ,即匹配模块的运行时间与匹配窗口大小无关。

## 2.4 自适应窗口立体匹配算法

在保证图像子集唯一性和匹配计算精度的前提下,为了较好地反应出物体的形貌变化,在图像纹理质量较好的地方,要尽量减小匹配窗口,以更好地反应物体的外形轮廓;而在图像纹理质量不好的地方,可以通过增大匹配窗口的尺寸来保证其具有唯一性。因此,自适应窗口立体匹配算法的基本思想是通过统计匹配窗口内灰度或梯度变化量来调整窗口的大小。

图4为基于IGSV和IGV的自适应窗口匹配算法流程图。该算法的详细流程如下:

快速计算图像任意窗口的灰度方差。根据式(3)和式(5),可将式(6)改写为IGSV:

$$D(I) = (Q_{\mathbb{I}_2} - Q_{\mathbb{I}}^2). \quad (7)$$

在积分图像的基础上,式(7)的计算量与图像窗口大小无关,从而能够快速完成子区域内图像纹理质量的计算。

### 2.3.2 积分梯度方差 IGV

除了灰度方差之外,梯度变化的信息也可以作为图像纹理质量的评价依据。因此,先对图像  $I$  在  $x$  和  $y$  方向上进行一阶梯度提取之后表示为:

$$\mathbf{G}_x = \mathbf{I} * \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_y = \mathbf{I} * \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

则最终得到的梯度图像为  $\mathbf{G} = \sqrt{\mathbf{G}_x^2 + \mathbf{G}_y^2}$ 。

依据式(3)与式(5)建立梯度积分图像如下:

$$\begin{cases} GG(x, y) = \sum_{i \leq x} \sum_{j \leq y} G(i, j) \\ GG_2(x, y) = \sum_{i \leq x} \sum_{j \leq y} G^2(i, j) \end{cases}, \quad (9)$$

则矩形区域内梯度求和与平方求和分别如下:

(1)光斑图案采集。开启两个激光投点器,使它们向被测空间投射各自的光斑场,利用视觉系统的两台摄像机采集物体表面调制的光斑图案。

(2)立体视觉校正。根据事先标定的立体视觉系统内外参数,校正左右两幅图像的坐标,从而使左右图像仅在水平方向上含有视差值,而在垂直方向上保持一致。

(3)积分图像计算。选择左图像作为参考图像,遍历其上所有像素计算灰度积分图像(式(2)和式(4)),或梯度积分图像(式(9))。

(4)积分方差计算。在参考图像上选择一个参考子窗口,图像坐标位置为  $(x, y)$ ,大小设置为  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 。然后计算该窗口内的IGSV(式(7)),或IGV(式(11))。

(5)窗口自适应调整。将上述步骤计算得到的IGSV(或IGV)与图像纹理质量的阈值  $TH$  进行比较。若方差小于该阈值  $TH$ ,则增加窗口的

尺寸 $(M+1, N+1)$ , 否则说明该窗口内的图像纹理质量较好, 可以转到下一步进行匹配计算。

(6) 匹配计算。以右图像为目标图像, 利用相似性度量函数在其  $y$  行上搜索得到最为相似的区域, 其横坐标即为匹配之后的视差值。

(7) 完成整幅图像匹配搜索。图像坐标移动到下一个位置, 并且将窗口大小初始化为  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ , 重复(4)~(6)步完成参考图像上所有像素的匹配计算, 即可得到完整的密集视差图。

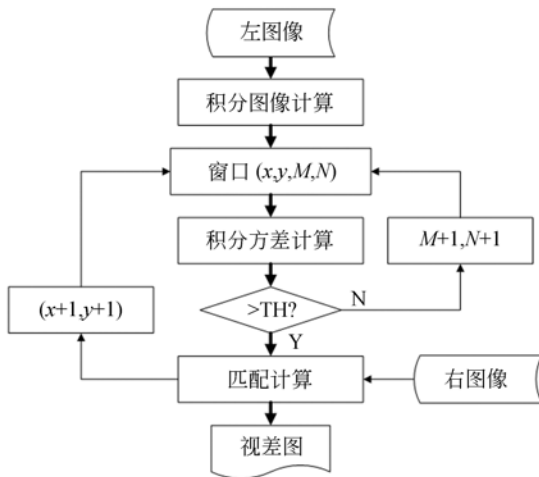


图 4 自适应窗口匹配算法流程图

Fig. 4 Flowchart of adaptive-window matching algorithm

### 3 实验结果与分析

在实验之前, 需要将两台相机进行立体标定, 使得图像对仅在水平方向上存在视差。然后向未知空间中投射光斑图案, 同时采集左右相机的图像, 利用自适应窗口匹配算法即可得到视差图, 最后结合标定信息即可恢复出场景的三维信息。

#### 3.1 图像纹理质量仿真结果与分析

本节仿真实验首先采集 5 幅不同纹理的待匹配图像子区, 同时统计各自的灰度直方图信息, 如图 5 所示。它们的具体特性为: 图(a)SI A 为白色无明显纹理的墙壁, 从直方图上可知其灰度分布集中在 140 左右; (b)SI B 为 2.1 节投点器投射出的光斑分布图案, 其灰度分布在直方图的两端 (50 和 255); (c)SI C 为普通木板的纹理图案, 由直方图可知, 其灰度为 50~150; (d)SI D 为窗帘的纹理图案, 从直方图上可知其灰度分布相对集

中在 125 左右; (e)SI E 为大理石地板的纹理图案, 从直方图上可知其灰度覆盖范围较大 (50~240)。

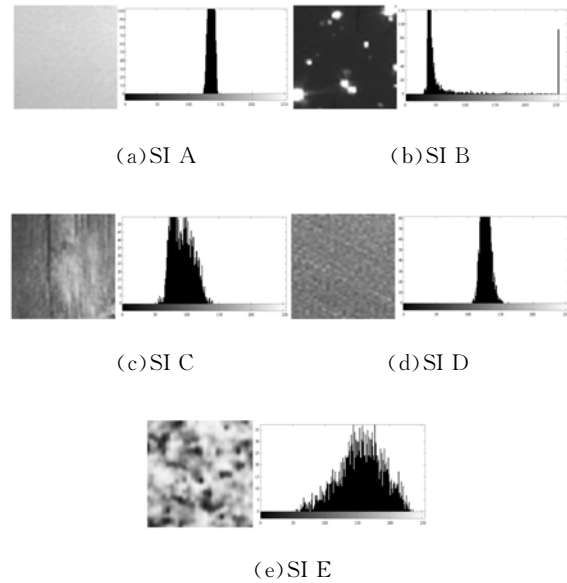


图 5 5 幅匹配图案及其灰度直方图

Fig. 5 Five matching patterns and their gray histograms

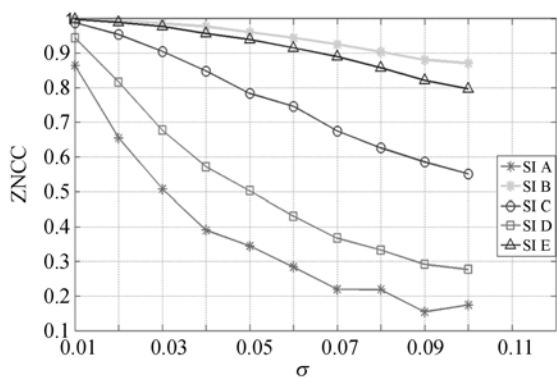
为了更加准确地衡量上述 5 幅图案的纹理特性, 分别比较它们在进行匹配运算时对噪声的抗干扰性能。具体的方法是: 首先在原始灰度图案 (或者可用式(8)中的模板卷积灰度图生成梯度图案) 中添加不同的标准差噪声, 以形成测试图案, 然后将其与原始图案进行匹配。计算每一组的零均值归一化互相关系数 (Zero-mean Normalized Cross Correlation, ZNCC) 作为匹配率指标, 其定义如下:

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum \bar{f}_i \bar{g}_i}{\sum \bar{f}_i^2 \sum \bar{g}_i^2}, \quad (12)$$

其中:  $\bar{f}_i = f_i - \bar{f}$ ,  $\bar{g}_i = g_i - \bar{g}$ ,  $\bar{f} = \frac{1}{n} \sum f_i$ ,  $\bar{g} = \frac{1}{n} \sum g_i$ 。

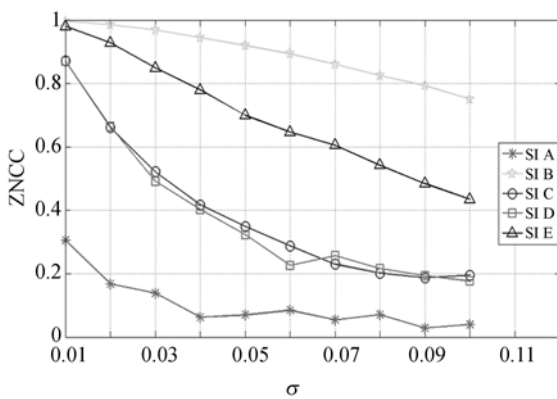
图 6 为 5 幅图案在不同噪声水平下的匹配率, 横坐标为噪声的标准差, 纵坐标为 ZNCC。由图 6(a) 与图 6(b) 可知, 随着噪声水平的增加, 所有图案的匹配率均下降。其中, SI B 的抗噪性能最好, 而 SI A 最差。其余图案的抗噪能力从优到劣依次是 SI E, SI C 和 SI D。

根据式(7)和式(11)分别统计了 5 幅图案的



(a)灰度图匹配率

(a) Matching rates of gray image



(b)梯度图匹配率

(b) Matching rates of gradient image

图 6 5 幅图案的抗噪性能分析

Fig. 6 Anti-noise performance of five matching patterns

IGSV 和 IGV,如表 1 所示。通过分析 IGSV 可知,质量最好的是 SI B 图案,其灰度方差值为 44.03,最差的是 SI A 图案,其灰度方差值为 4.34,其余图案的指标介于二者之间,且与图 6 (a)的结果一致。同时,分析 IGV 也得出了与图 6 (b)相同的纹理质量结果。由此可见,IGSV 和 IGV 均能够较好地反应出匹配图案的纹理特性。此外,该实验还证实了 2.1 节设计的激光投射器投射出的光斑图案具有较好的抗噪性能。

表 1 5 幅匹配图案的纹理质量分析

Tab.1 Analysis of texture quality for five matching patterns

匹配图案	SI A	SI B	SI C	SI D	SI E
IGSV	4.34	44.03	16.32	7.27	34.49
IGV	0.003	0.116	0.018	0.018	0.050

### 3.2 自适应窗口匹配实验

为了验证 2.4 节中介绍的算法性能,根据 IGSV 和 IGV 的结果自动调整匹配窗口大小,从而确保匹配的准确性。根据实际经验,实验中初始化匹配窗口的尺寸选择为 20 pixel×20 pixel,窗口大小的上限设置为 50 pixel×50 pixel,灰度方差阈值为 6 000,而梯度方差阈值为 200。若窗口内的方差均小于其中一个阈值,则增加窗口尺寸,再次统计方差,直至超过该阈值才能进入立体匹配程序。

首先,通过平面测量的比对实验分析本文算法三维重建的精度。在实验中选择一块白色漫反射的标准平面作为被测物体,用于比对的测量方法为多频外差法<sup>[14]</sup>。根据测量平面的特殊性,以三维重建之后的点到拟合平面距离误差的最大值和标准差作为衡量测量精度的评价指标,其结果如表 2 所示。

表 2 不同方法平面测量精度对比

Tab.2 Comparison of measuring accuracies using different methods (mm)

方法	最大误差	标准差
IGSV	0.805	0.159
IGV	0.698	0.151
多频外差法	0.459	0.153

从表 2 可知,IGV 的测量精度指标(最大误差为 0.698 mm,标准差为 0.151 mm)优于 IGSV (最大误差为 0.805 mm,标准差为 0.159 mm),且其标准差(0.151 mm)略优于多频外差法(0.153 mm),已满足机器人自主导航的精度要求。虽然本文算法的精度指标与多频外差法三维扫描仪较为接近,但是从系统的复杂程度来看:半导体激光投射器的体积和重量远小于通用的投影仪;其次,多频外差测量方法属于时间编码,所以实时性无法保证,而本文提出的光斑场和匹配方法易于实现动态目标测量。图 7 为实验采集的平面物体和光斑图案,以及基于 IGSV 和 IGV 的三维重建结果。

从图 7(c)和 7(d)所创建的平面视差图可知,整个视场内的视差值分布均匀,能够较好地反应出物体的轮廓。基于 IGSV 和 IGV 的结果近似,细微的差别是由于方差阈值不同所造成的。

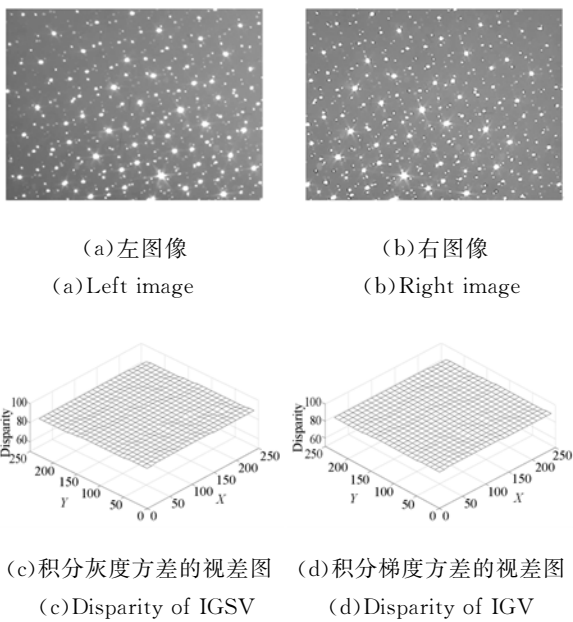


图 7 平面物体的视差图

Fig. 7 Disparity maps of plane object

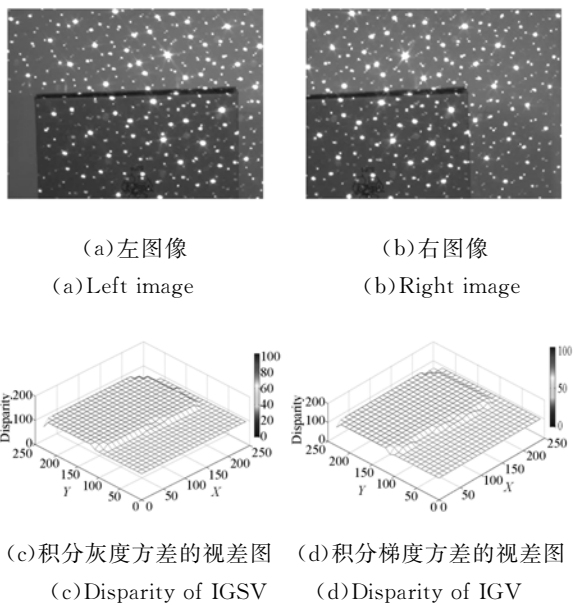


图 8 台阶型物体的视差图

Fig. 8 Disparity maps of stepped object

其次,完成两组简单物体的视差图创建。第一个物体为一个平面台阶。从图 8(c)和(d)所创建的平面台阶视差图可知,基于 IGSV 和 IGV 的视差图均有效地恢复了台阶表面轮廓,且在整个视场中的分布较为均匀。特别是在物体不连续区域,没有出现匹配错误的情况。

第二个物体为图 9 所示的球面物体。由图 9(c)和 9(d)可知,视差图不仅较好地反应出球面

的曲率特性,而且在物体自遮挡区域,由于窗口大小可以自适应调整,所以匹配结果没有出现错误。以上两个实验结果说明:以 IGSV 和 IGV 两种图像纹理质量评价指标为基础,本文提出的自适应窗口匹配算法能够有效恢复出常规平面和自由曲面的三维坐标。

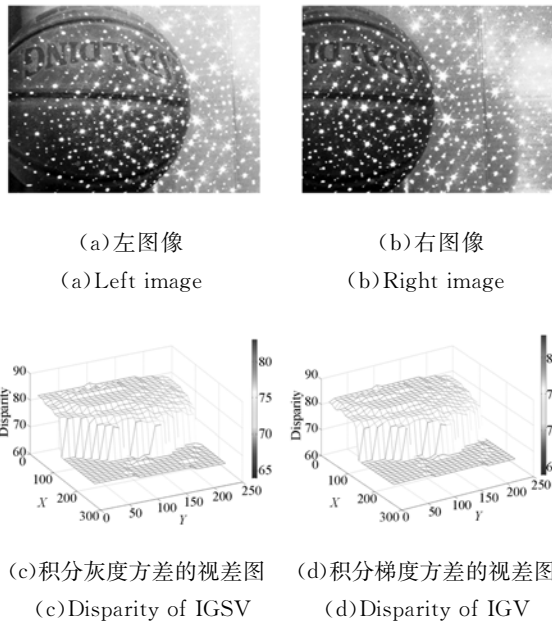
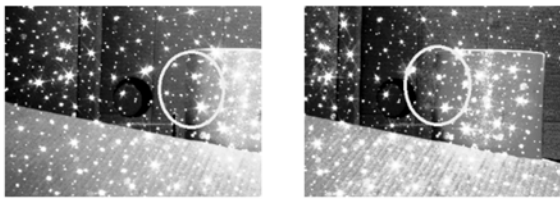


图 9 球形物体的视差图

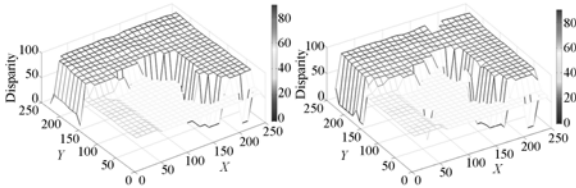
Fig. 9 Disparity maps of spherical object

最后,为了验证该算法在机器人实际导航中的应用效果,在两个实际的弱纹理场景中采集立体图像对,并通过本文算法恢复出场景的深度信息,结果如图 10 与图 11 所示。两者均为未知、狭窄场景中机器人视觉系统采集的图像对,图中的物体表面纹理信息较少,且物体大小和分布位置远近范围较大。

由图 10 与图 11 可知,基于 IGSV 和 IGV 的视差图结果基本一致,仅个别细微处存在差异。视差图的深度信息可以反应出场景中物体的方位和轮廓等信息。众所周知,在物体不连续区域会出现无法匹配的现象,特别是当物体离视觉系统较近时,物体容易在左右相机中形成大面积的自遮挡区域,比如图 10 中的立柱和图 11 的右侧墙壁(图中圆圈所标示区域)。但是从整体结果来看,这些区域并没有影响其他区域的匹配效果。由此可见,本文的自适应窗口匹配算法能够有效地恢复自然复杂场景的深度信息。



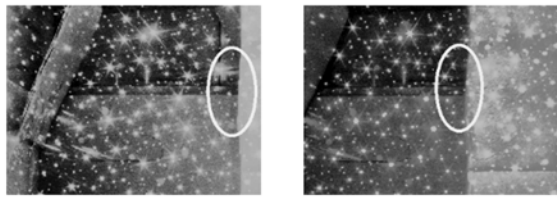
(a)左图像 (a)Left image  
(b)右图像 (b)Right image



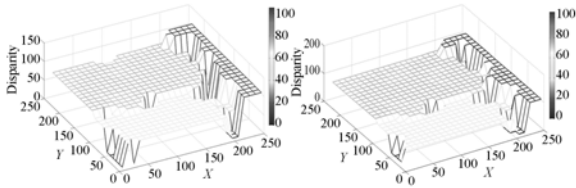
(c)积分灰度方差的视差图 (c)Disparity of IGSV  
(d)积分梯度方差的视差图 (d)Disparity of IGV

图 10 真实场景一的视差图

Fig. 10 Disparity maps of the first real environment



(a)左图像 (a)Left image  
(b)右图像 (b)Right image



(c)积分灰度方差的视差图 (c)Disparity of IGSV  
(d)积分梯度方差的视差图 (d)Disparity of IGV

图 11 真实场景二的视差图

Fig. 11 Disparity maps of the second real environment

由以上分析可知,在实际应用中,物体表面情况复杂,以及立体视觉系统的视角变化容易造成匹配错误,特别是在深度不连续区域会出现物体的自遮挡现象,从而导致匹配信息缺失。为了尽量避免遮挡现象,双目相机的光轴应该尽可能靠近放置,并且保持光轴平行,这样可以有效减少误匹配。除了双目相机的成像质量、同步曝光控制、增益大小差别、镜头的放大倍率和成像角度等

因素外,投射器的光斑图案必须具备唯一性,这样不容易受到噪声或者形变的干扰,匹配准确性才能有所保障。

### 3.3 匹配算法效率实验

根据 2.3 节中所引入积分图像的概念可知:积分图方差的计算效率要高于原始的灰度方差,因此本节实验主要比较二者效率。具体方法是:选择一对立体图像,设置初始的匹配扫描窗口,然后根据 2.4 节的方法进行匹配。匹配中分别用常规灰度方差的计算方法(式(6))和基于 IGV 的计算方法(式(11)),并且将各自的运行时间记录在表 3 中。特别指出的是,为了公平比较,匹配中窗口的大小均固定。程序测试的开发环境为 Intel Core 2 Duo, 2.99GHz 处理器, Matlab R2007a 运行平台。

表 3 不同大小窗口的方差计算效率比较

Tab. 3 Comparison of computational efficiencies using different methods with different window sizes (s)

尺寸	10	20	30	40	50	60
灰度方差	0.430	1.398	2.795	4.689	6.663	9.097
IGV	0.030	0.030	0.030	0.030	0.031	0.033

从表 3 可知,传统灰度方差的计算量是随着窗口大小的增加而增加的,窗口最小为 10 pixel 时匹配消耗时间为 0.43 s,而基于 IGV 的计算复杂度为  $O(1)$ ,消耗时间始终为 30 ms 左右,匹配效率至少提高了 93%。由此可见,利用积分图的概念进行方差计算,能够有效减小自适应窗口匹配算法在不同窗口大小下重复计算方差的运算量。由于本系统用于机器人视觉导航,因此对效率的要求较高。在显卡 Geforce GTX 780 上,设计了并行计算平台,对分辨率为 1 027 pixel  $\times$  768 pixel 的图像对,算法匹配所消耗的时间为 120 ms,适用于实际动态场景。

## 4 结 论

本文根据机器人在弱纹理场景下实现避障和自主导航的要求,建立了由双目相机和激光投点器构成的主动式视觉系统。在此基础上,借鉴积分图像的概念,先后提出了 IGSV 和 IGV 两个图像纹理质量衡量指标,并以此设计了一种自适应

窗口匹配算法。实验结果表明:视觉系统的测量精度为 0.16 mm,匹配算法的效率至少提高了

93%,基本满足机器人获取 3D 环境信息用于避障和导航的精度要求。

#### 参考文献:

- [1] 朱遵尚,苑云,李由,等. 嫦娥一号月面成像的高精度匹配及月貌三维重建[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0211002-9.  
ZHU Z SH, YUAN Y, LI Y, *et al.*. High precision matching and 3D surface reconstruction of Chang'E 1 lunar images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0211002-9. (in Chinese)
- [2] 张来刚,魏仲慧,何昕,等. 面向低纹理图像的快速立体匹配[J]. 液晶与显示, 2013, 28(3): 450-458.  
ZHANG L G, WEI ZH H, HE X, *et al.*. New stereo matching method based edge extraction[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 450-458. (in Chinese)
- [3] 周自维,樊继壮,李戈,等. 支撑点扩展快速立体匹配方法的设计与应用[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 207-216.  
ZHOU Z W, FAN J ZH, LI G, *et al.*. Design and application of fast matching method based on support point expansion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 207-216. (in Chinese)
- [4] 卢阿丽,唐振民. 利用自适应窗口实现不连续保护立体匹配[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2328-2335.  
LU A L, TANG ZH M. Discontinuity preserving stereo matching using variable window [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2328-2335. (in Chinese)
- [5] LIN Y M, LU N G, LOU X P, *et al.*. Matching cost filtering for dense stereo correspondence [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013, 654139-11.
- [6] ZHOU Z, LIU N, WU D, *et al.*. Stereo matching based on adaptive window and reliability constraint [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2013, 9(16): 6669-6675.
- [7] 陈玲,邓文怡,姜小平. 基于多频外差原理的相位解包裹方法[J]. 光学技术, 2012, 38(1): 73-78.  
CHEN L, DENG W Y, LOU X P. Phase unwrapping method base on multi-frequency interferometry [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 73-78. (in Chinese)
- [8] FREEDMAN B, SHPUNT A, MACHLINE M, *et al.*. Depth mapping using projected patterns, US: 8150142B2, 2012[P].
- [9] 潘兵,俞立平,吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412004.  
PAN B, YU L P, WU D F. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412004. (in Chinese)
- [10] 潘兵,吴大方,夏勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. 实验力学, 2010, 25(2): 120-129.  
PAN B, WU D F, XIA Y. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(2): 120-129. (in Chinese)
- [11] SUN Y, PANG J H L. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(9): 967-974.
- [12] PAN B, XIE H M, WANG ZH Y, *et al.*. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7037-7048.
- [13] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features [C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, 1: 511-518.

- [14] 黄亚楠, 娄小平. 基于多频外差原理的相位校正及匹配方法研究[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 237-241.

HUANG Y N, LOU X P. Phase correction and

matching based on multi-frequency heterodyne method [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2):237-241. (in Chinese)

作者简介:



林义闽(1985—),男,海南海口人,博士研究生,2004年于北京理工大学获得学士学位,2008年于北京信息科技大学获得硕士学位,主要从事视觉测量和模式识别的研究。E-mail: linyimin2012@hotmail.com



吕乃光(1944—),男,安徽临泉人,教授,1968年毕业于清华大学,现为北京信息科技大学仪器与光电工程学院教授;北京邮电大学信息光子学与光通信研究院特聘教授,兼职博士生导师,主要从事信息光学、光电子学、光电测试等方面的科研及教学工作。E-mail: nglv2002@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)