

利用激光散斑获取深度图

张绍阳*, 侯旭阳, 崔 华, 高小梅

(长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 相对于普通灰度和彩色二维图像, 深度图像可以得到物体的三维信息, 使视觉识别和人机交互更加智能。国内外目前还没有低成本、公开的实时获取高质量深度图的方法。本文在对散斑图获取深度图原理研究的基础上, 采取激光散斑的方式, 运用块匹配的方法给出了一种大范围深度图的获取方法。首先, 从原理上验证了块匹配方法的可行性; 然后, 分别从理论和实验两个方面对深度图的计算公式进行了推导和验证; 再次, 对深度图恢复过程进行了详细叙述, 包括散斑图像的预处理和块匹配的过程; 最后, 给出了运用该块匹配方法得到的实验数据。实验结果表明, 本文方法在物体距离相机 50 cm 左右时精度可以达到 5 mm, 200 cm 时精度可以达到 5 cm, 可以满足室内大部分对象的识别要求。

关键词: 激光散斑; 深度图; 块匹配; 块匹配快速算法

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20160906.0633

Depth image acquisition using laser speckle

ZHANG Shao-yang*, HOU Xu-yang, CUI Hua, GAO Xiao-mei

(Information Engineering College, Changan University, Xi'an 710018, China)

* Corresponding author, E-mail: zhsy@chd.edu.cn

Abstract: Compared with the ordinary 2D gray and color images, 3D information of target can be obtained by depth image, making the visual identification and human-computer interaction more intelligent. There is no open and real-time method to obtain high quality depth image at low cost at home and abroad. In this paper, based on the principle research on obtaining the depth image by laser speckle, a way to obtain wide range of depth image is presented by laser speckle and the method of template matching. Firstly, the feasibility of the method of template matching is proved in this paper. Then, the formula of depth image is calculated and verified from both theory and experiments. After that, the process of recovering depth image is described in detail, including pretreatment of speckle image and the process of block matching. Finally, the experimental data obtained by this template matching method are given. The experimental results show that the precision can reach 5 mm when the objects is 50 cm far from the camera and 5 cm when the object is 200 cm far from the camera by using the method proposed in this paper, which can satisfy the requirements of most indoor objects' recognition.

Key words: laser speckle; depth image; template matching; fast algorithm of template matching

收稿日期: 2016-06-22; 修订日期: 2016-07-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(自然科学类)(No. 310824152009)

Supported by Basic Scientific Research Projects (Natural Sciences) of Central Universities of China (No. 310824152009)

1 引言

如何快速、准确地获取图像深度信息一直是计算机视觉领域的研究热点。一般来说,根据测量方法的不同,光学三维测量主要分为:被动式和主动式^[1]。被动式是指利用周围环境条件成像,不需要主动投射,如双目测距,即通过两个摄像头对同一场景拍摄,再进行匹配,从而进行测距。主动式是指用专门的能量束(激光、超声波等)照射到物体上,并检测接收回波,主流技术包括 TOF (Time-of-Flight) 测距和结构光测距等。TOF 通过测量光照射到物体并返回的时间进行测距,原理类似于雷达测距。结构光法是光源投影特定的编码图案到物体上,把深度变化信息转换成编码图案的变化,通过检测编码图案的变化从而获取深度信息。结构光法包括点结构光、线结构光、面结构光。单点结构光测量法每次只投影一点,测量精度高,效率很低;线结构光法包括单线结构光和多线结构光法,指的是光源向物体投影一条线或者多条线,精度较高,效率较低;面结构光是光源向物体投射平面几何图案,精度低,但是效率最高,成本较低。激光散斑属于面结构光的一种,是将激光透过毛玻璃形成随机干涉斑点,在毛玻璃与激光条件不变的情况下,利用激光散斑的分布随距离呈现出规律性的变化,从而进行深度信息获取^[2-5]。

与 TOF 技术相比,基于散斑图像的深度摄像头,同样能实现实时性,但其成本大幅下降。微软的体感相机 Kinect 正是基于此技术实现的, Kinect 深度图像处理的核心芯片 PS1080 由以色列 Prime Sense 公司生产,其核心技术正是使用散斑图像来获取深度图^[6]。但是微软的 Kinect 价格较高并且技术封闭。Jan SMISEK 在文献[7]中对 Kinect 做了比较系统的研究,介绍了 Kinect 的硬件结构和成像原理,并与单反相机成像性能、TOF 成像性能做了比较,但其文章侧重于 Kinect 的应用与校准,对于 Kinect 原理的介绍不是很详细。王一娇在对结构光深度图像获取算法研究中,对 Kinect 成像原理与算法做了详细的介绍^[1],但其算法运算量非常大,需要使用高性能计算机才能

快速恢复出高质量的深度图,使用条件受到限制。

本文在对获取的散斑图自相关性和互相关性进行详细研究的基础上,给出一种使用散斑图进行块匹配的深度获取算法,计算量小,便于更广泛的应用,有助于降低深度图成像设备的成本。

2 深度图获取算法

2.1 散斑图的获取

红外激光发射器发射红外激光,然后红外激光通过毛玻璃,照射到物体表面^[8-11],再通过红外摄像头拍摄红外激光在物面所形成的散斑图^[12-17]。散斑图获取的示意图如图 1 所示。

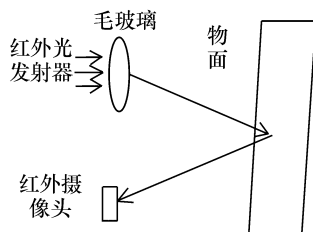


图 1 散斑图获取示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser speckle's acquisition

2.2 散斑图获取深度的理论依据

基于散斑图采用块匹配方法获取深度图,即在测试图中取任意一个小块,在参考图中搜索与其最相似的块。要利用散斑图进行块匹配,散斑图必须具有很好的自相关性和互相关性,即散斑图中的某一小块与自己的相关系数要高,与其它块的相关性要低,这样才能匹配得到。其次要验证与相机不同距离的平面上边的块要有很好的互相关性,这样才能实现准确匹配。

本文选用距相机 1 m 的一个平面进行测试,红外摄像头的分辨率是 1 280 pixel × 720 pixel。选取平面上的一个点,并以该点为中心,取一个 31 pixel × 31 pixel 的块。用该块与平面内所有点为中心的相同大小的块进行互相关计算(距边界 15 pixel 的点除外)。这里以点(768, 450)为例,计算出的互相关系数画成三维图如图 2 所示。

图 2 中最大的互相关系数是 1,且互相关系数的峰值出现在点(768, 450)处。从图 2 可以看

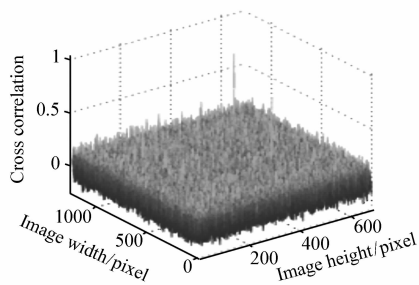


图2 同一平面点(768,450)与整幅图互相关系数三维图

Fig. 2 Cross-correlation coefficient's 3D graph of the same plane's point (768, 450) and the whole image

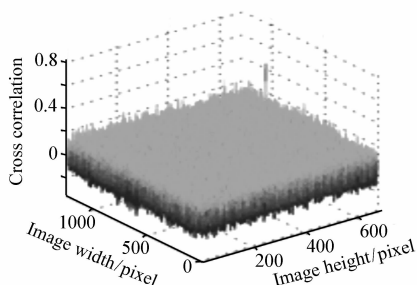


图3 不同平面点(768,450)与整幅图互相关系数三维图

Fig. 3 Cross-correlation coefficient's 3D graph of the different plane's point (768, 450) and the whole image

出,相关系数只有一个峰值,在其它地方的互相关系数数值都非常小。也就是说一幅散斑图中的某一块,只与自身有很大的相关性,与其它块相关性非常低,这是这种散斑图的一个非常重要性质,具备这种性质块匹配的方法才可行。

在一幅散斑图中,某一块只与自身有较高的相关性,与其它块相关性很低。接下来需要测试不同深度的散斑图散斑规律是否会发生变化。

这里以1 m和0.9 m的两个平面进行测试。随机抽取0.9 m平面上一个点为中心的31 pixel×31 pixel的块在1 m的平面上进行匹配。以点(768,450)为例,计算出的互相关系数画成三维图如图3所示。图3中,最大的互相关系数是0.799 034,且互相关系数的峰值出现在1 m平面的点(762,450)处,也就是说横向偏移了6 pixel。

为了验证横向偏移是由深度变化引起,而不是由物体本身的移动所导致,分别在距相机0.9 m和0.8 m处,移动物体,重复测试其与1 m参考平面的横向偏移,发现0.9 m处的物体横向偏移恒为6 pixel,0.8 m的物体横向偏移恒为15 pixel,这说明深度变化会引起散斑图像的横向偏移。

从图3的互相关系数三维图可以看出,不同平面匹配也有很好的相关性,匹配到的互相关系数数值要比没有匹配到的互相关系数数值大得多,且只有一个峰值。这说明不同平面,散斑模式没有变化,只是散斑的亮度发生变化,散斑位置发生横

向偏移。这个结论说明可以采用块匹配的方法,通过检测块的横向偏移来获取深度值。

以上两个实验验证了散斑图的两个重要性质:(1)一幅散斑图中的任意一块,只与自身有较大的相关性,与其它块相关性都很小;(2)随着物体与相机距离的变化,散斑图只是发生横向偏移,散斑模式不发生变化。

2.3 深度图计算公式推导和验证

2.3.1 公式推导

从2.2节实验得出的结论可知,物体距离相机距离发生变化,其散斑图模式不改变,只发生横向偏移。故可以选取一个平面作为参考图,检测测试图上每一块相对于参考图发生的横向偏移量,从而获取深度信息。散斑图的光路分析如图4所示。其中, D 点为红外激光发射器, C 点为红外相机镜头, D 点发射的红外激光照射到参考平面 E 点,在红外相机中成像点为 B 点,若光路中间有 F 点遮挡,并反射红外光,其成像点就会是 A 点,通过测量 A 点与 B 点的距离,就可以利用三角测距得出 F 点距离相机的距离^[1]。设参考平面距离相机的距离是 L ,深度计算公式推导过程如下:

做辅助线 FG , G 点为 CF 延长线与参考平面的交点,设相机的焦距为 f ,一个像素点的实际距离为 p ,偏移的像素量为 n 。

$$\text{则 } AB = np$$

$$\because \triangle ABC \text{ 与 } \triangle CGE \text{ 相似}$$

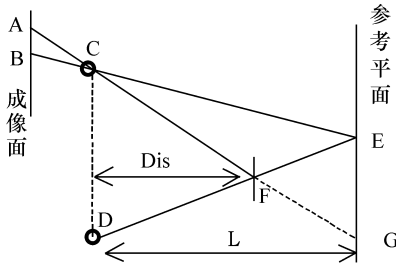


图4 光路几何图

Fig. 4 Geometric graph of light path

$$\therefore \frac{np}{EG} = \frac{f}{L}$$

$$\therefore GE = \frac{np \times L}{f}, \text{又} \because \triangle CDF \text{ 与 } \triangle EFG \text{ 相似}$$

$$\therefore \frac{GE}{CD} = \frac{L - \text{Dis}}{\text{Dis}}$$

$$\therefore \text{Dis} = \frac{CD \times L}{GE + CD}$$

带入 GE , 得:

$$\therefore \text{Dis} = \frac{CD \times L \times f}{L \times np + CD \times f}, \quad (1)$$

式中, CD 表示红外摄像头和红外激光发射器的距离, L 表示参考平面离相机的距离, f 表示相机的

焦距, n 表示偏移的像素量, p 表示一个像素格的实际距离, 文中其它公式中的变量与式(1)的意义相同。

同理可以推导出当物体距离比参考平面远时,

$$\text{Dis} = \frac{CD \times L \times f}{-L \times np + CD \times f}, \quad (2)$$

即偏移的像素要记为负值。

当物体在参考平面上时, 偏移像素为 0, 即 $\text{Dis} = L$, 故上面推导出的距离计算公式同时满足物体近于参考平面、远于参考平面和在参考平面上的情况。

2.3.2 深度图公式验证实验

为了验证以上公式的正确性, 在 0.5 m 到 2.0 m 范围内, 每隔 10 cm 拍摄一幅平面图。以 1 m 处的平面作为参考平面, 计算每一个平面上每一个点(边界小于匹配块的一半的点除外)相对于参考平面的偏移量, 并求其平均值, 作为该平面相对于参考平面的偏移量。

经过测试, 得到不同深度图像与参考图的横向与纵向偏移量关系, 如表 1 所示。

表 1 深度与横向偏移量关系

Tab. 1 Relation of depth and crosswise offset

深度/m	横向偏移/pixel	纵向偏移/pixel	深度/m	横向偏移/pixel	纵向偏移/pixel	深度/m	横向偏移/pixel	纵向偏移/pixel	深度/m	横向偏移/pixel	纵向偏移/pixel
0.5	58.87	-0.82	0.9	5.99	0.26	1.3	-13.18	1.10	1.7	-25.17	1.16
0.6	39.22	-0.42	1.0	0	0	1.4	-16.52	1.36	1.8	-24.97	0.86
0.7	24.62	0	1.1	-3.69	0.43	1.5	-19.88	1.49	1.9	-28.23	0
0.8	14.84	0.17	1.2	-8.80	0.75	1.6	-23.89	1.68	2.0	-28.71	0.75

从表 1 可以看出, 纵向偏移量在 0 左右, 横向偏移量随着深度的变化而变化。把表 1 中的横向偏移量和距离拟合曲线, 如图 5 所示, 其中横坐标是距离, 纵坐标是像素横向偏移量。

本次测试, 式(1)和(2)中的 L (相机距参考平面的距离) 为 100 cm, CD (红外激光发射器与红外相机的距离) 为 5 cm, p (一个像素点代表的实际距离), f (相机焦距), 都是红外相机的参数, $f/p = 1187.464$ 。把以上值带入式(1)中, 得到深

度值与横向偏移的关系为:

$$n = \frac{5937.32}{\text{Dis}} - 59.3732. \quad (3)$$

同样, Dis 在 50 cm 到 200 cm 范围内式(3)画出的曲线图如图 6 所示。

对比图 5 和图 6, 两个曲线基本重合, 说明了式(1)的正确性, 因此可以用该公式来计算深度值。

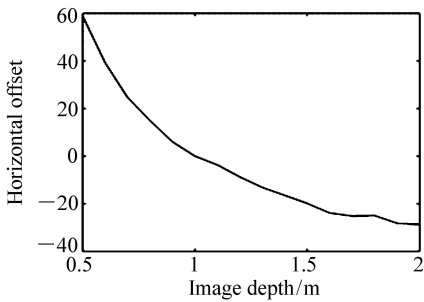


图5 实际测量到的深度与像素横向偏移量关系曲线

Fig.5 Curve of measured depth vs. pixel's crosswise offset

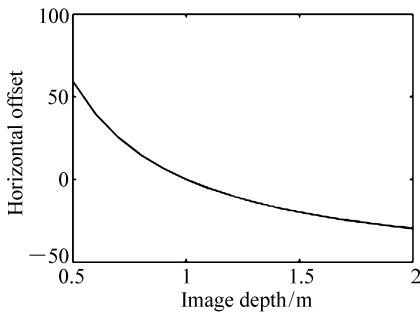


图6 公式计算到的深度与像素横向偏移量关系曲线

Fig.6 Curve of depth computed with formula vs. pixel's crosswise offset

3 基于块匹配的深度图获取过程

基于块匹配的深度图获取算法,其具体的恢复过程如下:

首先,选择一幅平面散斑图作为参考图,以1 m作为示例。然后,在测试图上逐点进行匹配(边缘小于匹配块宽度一半的点除外),测试图上每一个点 (x, y) 的匹配方法为以 (x, y) 为中心,选择一个31 pixel \times 31 pixel的块,在参考图上搜索与其相匹配的块,并计算在参考图上匹配到点的坐标与 (x, y) 坐标的横向偏移量,向右偏移记为正,向左偏移记为负,把计算出的偏移量带入式(1)就可以得到点 (x, y) 的深度值。依次计算每一个点的深度值,就恢复出了深度图像。

这里的关键问题就在于如何在参考图上搜索与测试图中块相匹配的块。在2.2节散斑特性分析中,求两个块间的互相关系数可以用于匹配两个块。但是互相关系数的计算量非常大,测试图中每一个点对应的块,都要与参考图中不同偏移处对应的块进行互相关计算。以1 280 pixel \times 720 pixel大小的散斑图,要计算的目标深度范围为50 ~ 200 cm为例,要在参考图中搜索的偏移范围为 90×3 (如表1所示,深度为50 cm时,测试图相对于参考图横向偏移量为58 pixel,深度为200 cm时,横向偏移量为-28 pixel,故在参考图中的搜索范围取横向偏移量为-30 ~ 60 pixel比较合适;由于纵向也会有少量偏移,故除了搜索测试图所在行外,最好搜索与其相邻的上下两行),所以计算互相关系数的次数大概为 $1\ 280 \times 720 \times 90 \times 3$,这个计算量相当巨大,计算速度也会很慢。

所以要用更加简单的计算方法进行匹配。这里对散斑图像进行二值化,二值化后的参考图像与测试图像直接计算异或,测试图的亮斑处异或值为1表示未匹配到,为0则表示匹配到。

3.1 散斑图像预处理

首先对拍摄到的散斑图进行二值化,在二值化的过程中主要有两个问题:(1)同一深度散斑图像不同位置亮度相差较大;(2)不同深度散斑图像亮度相差较大。所以选用的二值化方法是局部自适应二值化。局部自适应二值化图的一部分如图7所示。

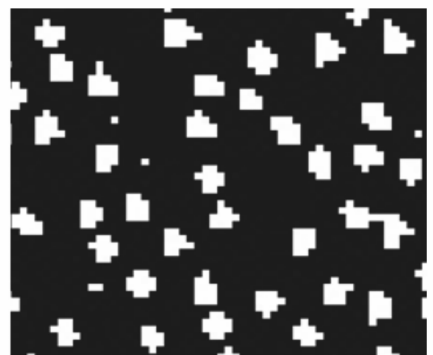


图7 局部自适应二值化图

Fig.7 Local adaptive binary image

从二值化图中可以看到,每一个亮斑都是一

块并不是单点,有些地方两个块也连接到一起,而且图中出现单点的噪声点。所以接下来要剔除二值化图中的每一个孤立点,这些孤立点指一个亮点上下为黑或者左右均为黑的点。剔除点后的散斑图如图 8 所示。

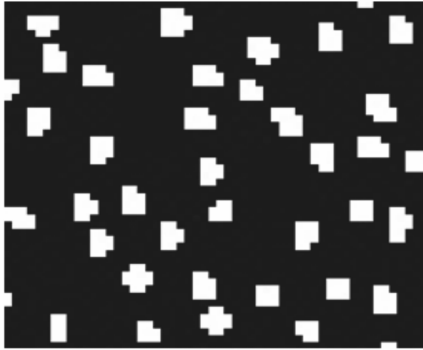


图 8 剔除后的散斑二值化图

Fig. 8 Speckle binary image after excluding isolated points



图 9 单点散斑图

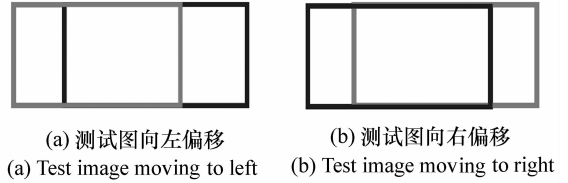
Fig. 9 Single points speckle image

剔除后的散斑图把孤立点都剔除了,被连接在一起的块也被分开。接下来把每一个连通域处理成单点即可。最后二值化的结果如图 9 所示。

3.2 块匹配过程

把参考图像和测试图像都处理成图 9 所示的单点散斑图。然后,测试图从向左偏移 60 pixel (对应最近距离 50 cm 相对 100 cm 的横向偏移量)到向右偏移 30 pixel(对应最远距离 200 cm 相对 100 cm 的横向偏移量),一个像素一个像素的移动,分别与参考图计算异或图,测试图与参考图

不重叠部分不进行计算。如图 10 所示,黑色表示参考图,灰色表示测试图。图 10(a)表示测试图向左偏移时,与参考图异或的示意图,图 10(b)表示测试图向右偏移时,与参考图异或的示意图。



(a) 测试图向左偏移

(b) 测试图向右偏移

(a) Test image moving to left

(b) Test image moving to right

图 10 参考图与测试图异或区域示意图

Fig. 10 Schematic diagram of reference image and test image's xor area

图 9 所示的块与参考图在某个偏移上匹配到时间和未匹配到时的异或图如图 11 和图 12 所示。



图 11 匹配到的异或图

Fig. 11 Matched Xor image



图 12 未匹配到的异或图

Fig. 12 Unmatched Xor image

对比图 11 和图 12 可以看出,未匹配到时,测试图与参考图中的亮点在异或图中都为亮点,且对应的亮点间有一定的距离;匹配到的时候,在异

或图中,要么对应的点成了黑点,要么对应的两个点相邻,极个别的点不相邻。

并不是所有匹配到的点都是黑点的原因是距离不同时斑点除了横向偏移外,其整体亮度分布也有微量变化,这就导致3.1节中二值化后把斑点缩小成一个单点的时候位置会有微量变化。

同一个斑点,在距离相机90 cm和100 cm时其散斑图如图13(a)、13(b)所示。二值化后的斑点如图13(c)、13(d)所示,图中画圈的地方为把连通域缩小成单点时单点的位置。

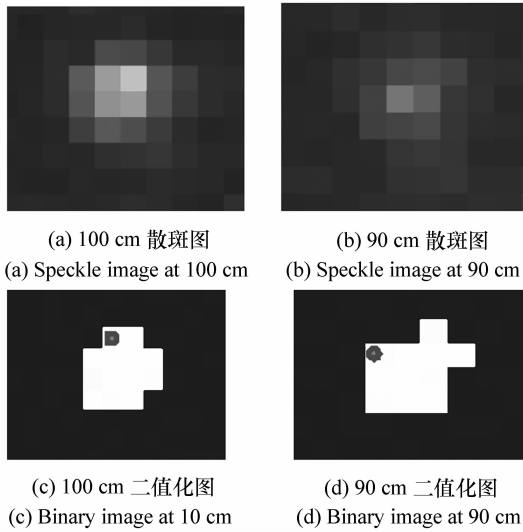


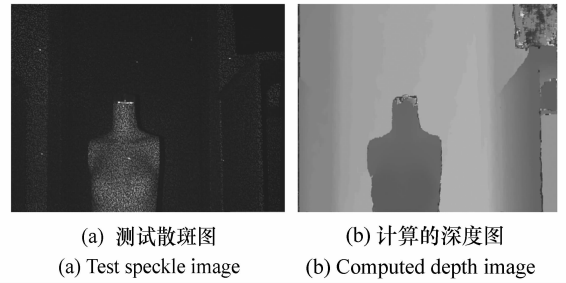
图13 不同距离亮斑图

Fig. 13 Bright speckle image at different distances

从图13(c)、13(d)可以看出,不同距离同一个斑点缩小的单点位置将会不同,所以导致了同一位置的单点不能完全对应到一起,异或结果不为0。

接下来,需要统计测试图上每一个点在所有偏移中对应的块(以该点为中心大小为31 pixel × 31 pixel的块,边界点除外)上匹配到的点的数量,匹配到点最多的偏移量记为该点相对于参考图像的偏移量,带入式(1)中即可求出该点的深度。以此类推,计算每一个点的深度。

使用以上匹配方法计算拍摄到的散斑图像和参考散斑图像的异或值,计算次数为图像的像素数,而且计算方法非常简单、快速,算法复杂度只有 $O(n)$ 。使用以上方法匹配到的深度图如图14所示。



(a) 测试散斑图 (b) 计算的深度图
(a) Test speckle image (b) Computed depth image

图14 测试散斑图和计算出的深度图

Fig. 14 Test speckle image and the computed depth image

3.3 深度图分辨率分析

深度图分辨率是指在一定距离处,深度值变化最小时,深度图像可以将其区分出来。这里以如图15所示的斜面进行分析。



图15 斜面深度图

Fig. 15 Depth image with inclined plane

取其中一行画成曲线图如图16所示。从斜面曲线图中可以很明显地看出,深度为0.9 m时,深度分辨率为1.6 cm,随着深度的增加,分辨率降低(可分辨的最小距离增大),深度到1.4 m时,深度分辨率降到了3.5 cm。

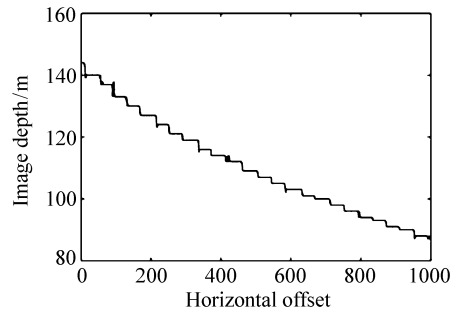


图16 斜面中一行的曲线图

Fig. 16 Curve of graphone row in inclined plane

在相同的深度下,相对于参考平面的横向偏移量 n 越大,深度分辨率越高。

变换式(1)可以得到:

$$n = \frac{CD \times f}{Dis \times p} - \frac{CD \times f}{L \times p}. \quad (4)$$

故增大 CD 、 f 或者减小 p 都可以提高深度分

辨率,也就是说要提高深度分辨率,需要增加红外相机和红外摄像头的距离,或者选用焦距较大和 CCD 感光点距离更小的相机。

使用以上方法计算出的深度与实际深度对照表如表 2 所示。

表 2 实际深度与计算出的深度对比

Tab.2 Comparison of real depth and computed depth

实际深度/cm	测量深度/cm	实际深度/cm	测量深度/cm	实际深度/cm	测量深度/cm	实际深度/cm	测量深度/cm
50	49.5	90	88.07	130	128.48	170	172.09
60	58.27	100	100	140	140.72	180	183.23
70	69.00	110	109.09	15	149.97	190	192.00
80	79.12	120	119.97	160	161.04	200	205.94

从表 2 可以看出,深度为 50 cm 时,精度可以达到 5 mm,深度为 200 cm 时,精度可以达到 5 cm。

4 结 论

本文着重介绍了通过散斑图像获取深度图的理论基础、原理推导和计算过程,本文采用的基于散斑的深度恢复方法,可以快速恢复大范围的深

度信息,在模式识别,人机交互方面有广泛应用。目前国内还没有掌握这方面的核心技术,研究基于散斑的深度获取方法,可以以低成本获取一些工程上需要的深度图。采用本文的方法计算的深度图,距离在 50 cm 左右时精度可以达到 5 mm,到 200 cm 时精度可以达到 5 cm,能满足室内大多数物体的识别要求,并且通过改变硬件,提升空间很大,实用性高。

参考文献:

- [1] 王一娇. 结构光深度图像获取算法研究[D]. 北京:清华大学,2011.
WANG Y J. Algorithm of obtaining the structure optical depth image[D]. Beijing:Tsinghua University,2011. (in Chinese)
- [2] 朱猛,李翔宇,龙宁波,等. 大视场双缝载频散斑干涉成像检测系统[J]. 光学 精密工程,2014,22(1):13-17.
ZHU M, LI X Y, LONG Y B, et al. Double-slit based carrier frequency speckle interferometric system with large viewing filed[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):13-17. (in Chinese)
- [3] 王永红,梁恒,王硕,等. 数字散斑相关方法及应用进展[J]. 中国光学,2013,6(4):470-480.
WANG Y H, LIANG H, WANG SH, et al. Advance in digital speckle correlation method and its application[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4):470-480. (in Chinese)
- [4] 王希军. 纳米磁流体动态散斑干涉场的奇异场分布[J]. 中国光学,2015(6):919-925.
WANG X J. Singularity distribution of the dynamic speckle in the nano-magnetic fluid interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2015(6):919-925. (in Chinese)
- [5] 王永红,李骏睿,孙建飞,等. 散斑干涉相位条纹图的频域滤波处理[J]. 中国光学,2014,7(3):389-395.
WANG Y H, LI J R, SUN J F, et al. Frequency domain filtering for phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3):389-395. (in Chinese)
- [6] 范哲. 基于 Kinect 的三维重建[D]. 西安:西安电子科技大学,2013.
FAN ZH. Three dimensional reconstruction of Kinect based on [D]. Xi'an:Xi'an Electronic and Science University, 2013. (in Chinese)

- [7] SMISEK J, JANCOSSEK M, PAJDLA T. 3D with Kinect [C]. 2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), IEEE, 2011: 1154-1160.
- [8] FREEDMAN B, SHPUNT A, MACHLINE M, *et al.*. Depth mapping using projected patterns; US, 8493496 B2 [P]. 2013-07-23.
- [9] GARCIA J, ZALEVSKV Z. Range mapping using speckle decorrelation; US, 7433024 B2 [P]. 2008-10-07.
- [10] SPEKTOR E, MOR Z, RAIS D. Integrated processor for 3D mapping; US, 8456517 [P]. 2013-06-04.
- [11] SHPUNT A. Optical designs for zero order reduction; EP, US, 8630039 [P]. 2014-01-14.
- [12] 樊雪松. 数字散斑相关方法的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.
FAN X S. Research on digital speckle correlation method [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)
- [13] 曾毅. 激光散斑测量应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
ZENG Y. Study on the application of laser speckle measurement [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)
- [14] 李喜德. 散斑检测技术及其应用 [J]. 理化检验: 物理分册, 2004(5): 245-251.
LI X D. speckle detection technology and its application [J]. *Physical and Chemical Inspection: Physical Sciences*, 2004(5): 245-251. (in Chinese)
- [15] 王梦伟, 黄向生, 陈则西, 等. 基于投影散斑的实时场景深度恢复 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014(8): 1304-1313.
WANG M W, HUANG X SH, CHEN Z X, *et al.*. Depth recovery of real time scene based on projection speckle [J]. *Computer Aided Design and Graphics Journal*, 2014(8): 1304-1313. (in Chinese)
- [16] 金观昌, 孟利波, 陈俊达, 等. 数字散斑相关技术进展及应用 [J]. 实验力学, 2007, 21(6): 689-702.
JIN G CH, MENG L B, CHEN J D, *et al.*. Digital speckle correlation technology progress and application [J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 21(6): 689-702. (in Chinese)
- [17] 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(2): 120-129.
PAN B, WU D F, XIA Y. Study on the quality evaluation of speckle patterns in digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2010(2): 120-129. (in Chinese)

作者简介:



张绍阳(1971—),男,山西襄汾人,博士后,教授,硕士生导师,主要从事交通信息工程、软件技术及理论、模式识别等方面的研究。E-mail: zhsy@chd.edu.cn