

一种基于 3 维全景图像技术的深度测量方法

伍春洪¹⁾ 游福成²⁾ 杨扬¹⁾

¹⁾(北京科技大学信息工程学院, 北京 100083) ²⁾(北京印刷学院信息与机电学院, 北京 102600)

摘要 3 维全景图像技术是一种能够记录和显示全真 3 维场景的图像技术。该技术采用微透镜阵列记录空间场景, 空间任意一点的深度信息只需通过一次成像即可直接获得。本文研究采用全景图像技术直接获取物体空间信息的方法。此方法首先从全景图像中抽提视图。视图是通过抽提全景图像中对应于每个微透镜下一局部位置的点人工合成的。每幅视图包含了全景图像中对原来的物空间场景按照某一特定方向的平行投影记录信息。接下来通过分析全景图像的光学成像过程, 推导了用来描述物体深度信息和其在对应的视图间的视差关系的深度方程。从而得出空间任一点的深度可以通过其在对应视图间的视差来求得。最后, 通过运用全景图像测量火柴盒的厚度的实例, 验证了这一方法的可行性。其结果一方面可用于全景图像的数据处理本身, 另一方面可望为开发新型的深度测量工具提供理论依据。

关键词 深度测量 3 维全景图像 机器视觉 视图 视差分析

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)04-0563-07

A Depth Measurement Approach Based on Integral Imaging

WU Chun-hong¹⁾, YOU Fu-cheng²⁾, YANG Yang¹⁾

¹⁾(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

²⁾(College of Information & Mechanical Engineering, Beijing Institute of Graphic and Communication, Beijing 102600)

Abstract Integral imaging is a technique capable of displaying 3D images with continuous parallax in full natural color. Since micro-lens sheet is used in recording, only one recording is necessary in containing 3D information. The paper presents a method for extracting depth information directly from lenticular integral images. The method involves first extracting viewpoint images from the lenticular integral image. The approach starts with the constructions of special viewpoint-images from the integral image. A viewpoint-image is constructed by extracting one pixel from each micro-lens rather than a macro-block of pixels corresponding to a micro-lens unit. Each viewpoint-image contains a 2D parallel recording of the 3D scene from one particular view direction. A new mathematical expression giving the relationship between object depth and the corresponding viewpoint image pair displacement is derived by geometrically analyzing the 3D image recording process. The depth information for any object point can be calculated with its disparity between corresponding viewpoint images. The method is validated and applied to measure the thickness of a matchbox in the experiment. The results can not only be applied on the area of integral image data processing but also be expected to provide theory foundation for a novel depth extraction technique.

Keywords depth measurement, 3D integral image, machine vision, viewpoint image, disparity analysis

1 引言

深度信息在遥感、医疗图像处理、3 维场景可视

化、质量控制以及电视图像处理如基于内容的图像编码和操作等方面均有广泛的应用。从场景中获取深度信息是机器视觉研究领域中最重要的问题之一。在经典的机器视觉领域中, 深度信息是通过两

收稿日期: 2004-08-04; 改回日期: 2005-07-18

第一作者简介: 伍春洪 (1972 ~), 女, 副教授。2003 年于英国 De Montfort 大学获博士学位。主要研究方向为 3 维图像技术。E-mail: cwu@ics.ustb.edu.cn

联系作者: 游福成, E-mail: youfucheng@yahoo.com.cn

个或多个相机对同一场景从不同角度拍摄的 2 维图像的视差信息来获取的。其中,确定摄像机的几何位置和有关参数一直是传统的机器视觉研究领域中的困难所在^[1,2]。

全景图像技术(integral imaging)是一种通过微透镜阵列来记录和显示全真的 3 维场景的 3 维图像技术^[3-5]。这一技术具有不需要观察者佩戴特殊的眼镜、记录过程不要求采用相干光源、全真彩色等特点,正吸引着 3 维显示领域内越来越多的科学工作者和公司企业的注意^[3-10]。可以期盼,随着理论研究、微透镜制造工艺和高分辨显示技术的进展,全新的 3 维电视将在不远的将来出现在我们的生活中。

迄今为止,国际上在全景图像这一领域的研究工作多集中于如何建立合适的呈现参数、改善图像的生成上,在数据处理和理论分析方面的研究工作开展得比较少^[3-10]。在未来基于全景图像的 3 维电视带来的众多的数据处理问题中,场景的空间位置(深度信息)在实现有关基于内容的 3 维图像编码以及基于全景图像的 3 维虚拟现实环境等方面显得十分重要。本文研究采用全景图像技术直接获取物体空间信息的方法,其结果可为 3 维全景图像的数据处理提供应用基础。由于深度信息本身在测量、遥感、导航等方面也有着十分可观的应用,这一研究结果也可望应用于开发新型的深度测量工具。

国际上对如何从全真的全景图像中直接获取深度信息的研究尚停留在理论阶段。沿用经典的机器视觉获取深度的方法,把在全景图像记录过程中的每个微透镜看作是一个个小相机。这些小相机各自从一个特定的位置记录一部分 3 维空间场景,在相应的记录平面上形成一个个小子图。整个 3 维场景中任一点的视差信息被这些许许多多的小透镜所对应形成的小子图扩散记录于整个记录平面。然而,由于尺寸的限制,每个微透镜实际只相当于一个非常低分辨率的相机,企图用传统的多目视觉的方法通过从每个透镜下的元素图像间的视差信息来直接获取深度信息变得十分困难。因此,从前的研究者试图从图像形成的反转理论来挑战这一问题^[9,10]。这一方法首先将物空间离散化,然后用点扩散函数(point spread function)来描述全景图像成像系统的光学记录过程;接下来把全景图像的形成看作是点扩散函数作用于物空间的结果,从而将从全景图像中求解原来物空间的问题转化为解方程的问题。该方法应用于由假想的 3 维空间点阵仿真形成的全景

图像时,能够取得精确的结果。然而,该方法不仅需要卷入大量的计算,而且无法克服由于物空间离散化过程中的信息丢失所带来的影响,因而尚未实现从理论到实际应用的突破。

本文提出了一种通过视图提取,借助传统的机器视觉理论来直接从全景图像中提取深度信息的实用方法。该方法首先从全景图像中抽提视图,每幅视图包含了全景图像中对原来的物空间场景按照某一特定方向的 2 维平行投影记录信息。然后通过分析全景图像的光学成像过程,推导了用来描述物体深度信息和其在对应的视图间的视差关系的深度方程。空间任一点的深度可以通过其在对应视图间的视差来求得,从而将全景图像中提取深度的问题转化为求解视图间视差的问题。最后,通过运用全景图像测量一个火柴盒的厚度的实例,验证了这一方法的可行性。

2 全景图像中视图的抽提

全景图像技术的关键在于采用微透镜阵列来记录空间场景信息。通过这种特殊的记录方式,3 维信息以特殊的格式嵌入于二维数据格式中。研究从全景图像中提取深度信息的方法,首先需要了解和掌握全景图像的数据结构特点及其光学记录过程。

图 1 是一幅由棱柱状微透镜阵列(lenticular lens array)记录的全景图像。场景包含一骑士和马的模型。该图直接看起来有些模糊不清是由于特殊的记录方式而引起的。当把该图置于具有合适参数的微透镜阵列之后时,原来的 3 维场景就能够清楚地再现出来。为分析和讨论方便,以下的分析以由棱柱状微透镜记录的全景图像为例,其结论很容易推广到由其他形状的微透镜阵列记录形成的全景图像。

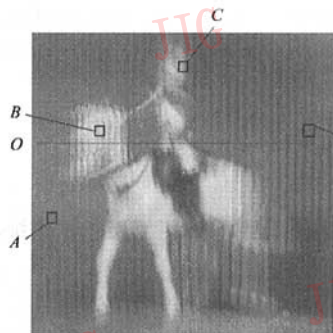


图 1 一幅全景图像实例

Fig. 1 An example of integral image

图 2 是从图 1 中任选的 4 个区域的放大部分。可以看出在全景图像中存在规则的带状结构,且带状结构的宽度正好对应于微透镜的孔径宽度。对全景图像中的数据进行自相关分析给出十分有趣的结果(图 3):在普通的 2 维图像中,受空间相邻性的影响,图像中不同像素灰度值的相关性随着距离的增加而减小。不同于普通的 2 维图像,全景图像中的数据以一定间隔呈现出高相关性(点 P_1 和点 P_9 的相关性高于和点 P_2 的相关性),这一间隔正好也为微透镜的孔径宽度。

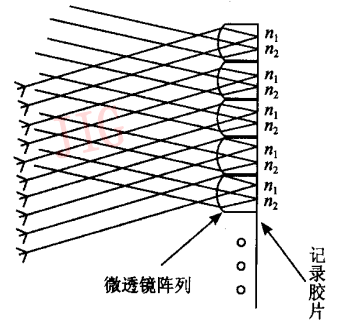


图 4 全景图像记录过程中的方向选择性

Fig. 4 Direction selectivity in the integral image recording

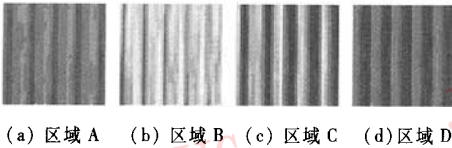


图 2 图 1 中 4 个区域的放大显示

Fig. 2 Four magnified areas taken from fig. 1

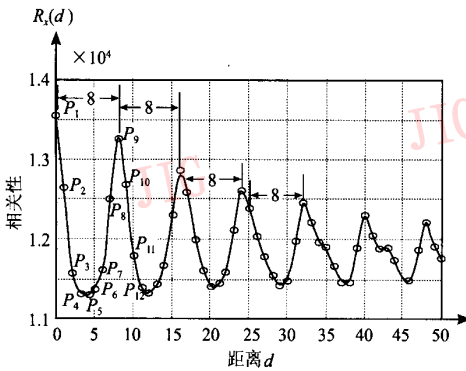


图 3 对图 1 中数据进行自相关分析的结果

Fig. 3 The unbiased auto-correlation analysis results

透镜下同一局部位置的点,包含对空间场景沿同一方向的记录。这是全景图像中的数据按照一定间隔呈现出高相关性的原因。

如果将这些位于微透镜阵列下相同局部位置的点抽提出来合成一幅新的图像,并称之为“视图”。同一“视图”中的数据将对应于全景图像中对 3 维空间场景按照某一特定方向的平行投影的记录。举例来说,如果将所有标记为 n_1 的点抽提出来合成一幅视图,则该视图将包含且仅包含对空间场景沿 θ_1 方向的记录。图 5 示意性地描述了这一视图的形成过程。为简单起见,假设每个微透镜下只有 4 个点,位于不同微透镜下同一局部位置的点用同一种图案来表达;具有相同图案的点,被抽提出来形成相应的视图。这样,每幅视图都包含对原来 3 维场景从一个特定方向的记录。图 6 是从全景图像图 1 中提取的一幅视图。

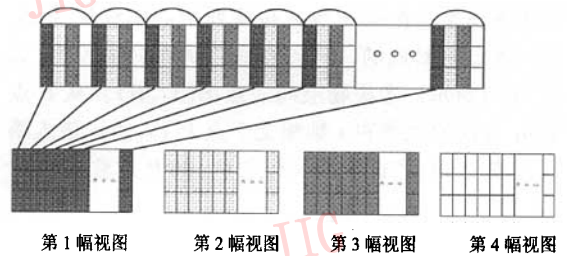


图 5 视图提取形成示意图

Fig. 5 Illustration of viewpoint image extraction

按照基本几何光学的原理,所有沿某一特定方向入射的平行光线经理想透镜折射后都将通过焦平面上同一点。观察全景图像的光学记录过程:由于参与记录的微透镜阵列具有同样的光学参数,记录胶片放置于这一微透镜阵列共同的焦平面上;所有沿同一方向的平行入射光将被记录在微透镜阵列后相同的局部位置上,如图 4 所示。

所有沿 θ_1 方向的光线(标有箭头)都被记录在相应的微透镜下标记为 n_1 的位置;与此相类似,所有沿 θ_2 方向的光线(未标有箭头)被记录于相应微透镜下标记为 n_2 的位置。具体在图像中的位置则取决于该入射光线被哪一个微透镜记录。换个角度从生成的全景图像上看,在图像中对应于不同的微

值得一提的是,这种人工合成的视图不同于普通 2 维图像。视图记录的是 3 维空间的平行投影,而普通 2 维图像是对 3 维空间的透射投影的记录。视图的抽提和人工合成,使得以全景图像数据格式存在的 3 维场景信息可以用一些 2 维图像的形式来表达,从而提供了分析全景图像的新途径。



图 6 从全景图像图 1 中提取的一幅视图

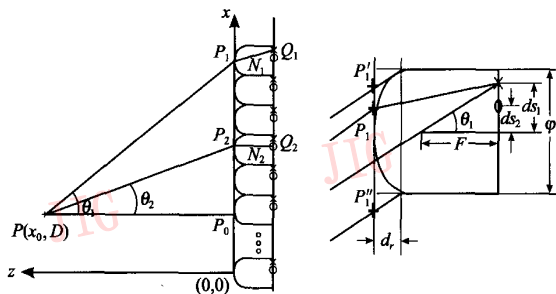
Fig. 6 One of the viewpoint images extracted from fig. 1

3 物体深度和对应视图间视差关系

3.1 几何光学分析深度和对应视图间视差关系

在经典的机器视觉领域中,深度信息可以通过两个以上的相机对同一场景从不同位置拍摄的 2 维图像的视差信息来获取。从前面的分析可以知道,不同视图也包含对同一场景从不同方向的记录,所不同的是视图记录的是对场景从特定方向的平行投影而不是透射投影。以下研究从两幅不同角度视图间获得深度信息的方法。

图 7(a)描述了用于分析的笛卡尔坐标系: z 轴指向深度方向, x 轴代表侧面位置, z 轴的零点开始于和微透镜阵列表面重合的平面, x 轴的零点开始于在微透镜阵列第 1 个微透镜的中心。假设第 1 个视图是通过提取和微透镜阵列中心偏移量为 ds_1 的位置点而形成的,记录的是沿 θ_1 方向的投影;第 2 个视图是通过提取和微透镜阵列中心偏移量为 ds_2 的位置点而形成的,记录的是沿 θ_2 方向的投影,如图 7(b)所示。考虑物空间一点 $P(x_0, D)$ 。从 P 点沿 θ_1 方向的光线和 x 轴相交于点 $P_1(x_1, 0)$, 进入第 N_1 个微透镜,经折射记录在点 Q_1 ; 从 P 点沿 θ_2 方向



(a) 笛卡尔坐标系

(b) 一个放大的微透镜部分

图 7 用于分析深度和视差关系的几何模型

Fig. 7 Geometric analysis model

的光线和 x 轴相交于点 $P_2(x_2, 0)$, 进入第 N_2 个微透镜经折射记录在点 Q_2 。

对于 P 点在第 1 幅视图的记录, 由三角形 PP_1P_0 , 有

$$x_1 = x_0 + D \tan(\theta_1) \quad (1)$$

P_1 被第 N_1 个微透镜记录的条件是 P_1 位于 $P'P''$ 之间, 即需满足条件:

$$(N_1 - 0.5)\varphi - d_r \tan(\theta_1) < x_1 < (N_1 + 0.5)\varphi - d_r \tan(\theta_1) \quad (2)$$

其中, φ 为微透镜孔径。

另外, θ_1 和 ds_1 满足关系:

$$\tan(\theta_1) = \frac{ds_1}{F} \quad (3)$$

将方程式(2)和式(3)带入方程式(1), 可以推导出描述深度和对应的记录位置关系的方程:

$$(N_1 - 0.5)\varphi < x_0 + \frac{(D + d_r)ds_1}{F} < (N_1 + 0.5)\varphi \quad (4)$$

对于 P 点在第 2 幅视图的记录, 可以推导类似的方程

$$(N_2 - 0.5)\varphi < x_0 + \frac{(D + d_r)ds_2}{F} < (N_2 + 0.5)\varphi \quad (5)$$

综合方程式(4)和式(5)的结果, 有

$$(N_1 - N_2 - 1)\varphi < \frac{(D + d_r)(ds_1 - ds_2)}{F} < (N_1 - N_2 + 1)\varphi \quad (6)$$

在经典的机器视觉深度测量领域中, “基线 Δ ” 被用来表述两个摄像机投影中心的距离。这里借用“基线”这一名词来表述两幅视图之间的抽样距离 ($\Delta = ds_1 - ds_2$)。由于每个微透镜下只有一个点被抽提出来形成视图, 视图中的一个点和全景图像中一个微透镜单元相对应。物空间任一点在两幅视图间的视差将对应于它在原全景图像中对应的微透镜个数差 ($d = N_1 - N_2$)。分别用 d 和 Δ 表示视差和抽样距离, 可以得到描述物体深度 D 和视图间视差 d 关系的方程:

$$(d - 1)\varphi < \frac{(D + d_r)\Delta}{F} < (d + 1)\varphi \quad (7)$$

该方程也可写成

$$D = \frac{(d \pm 1)\varphi F}{\Delta} - d_r \quad (8)$$

这里, $d \pm 1$ 表示期待值为 d , 但是可能在 $d - 1$ 到 $d + 1$ 的范围内变化, φ, F 和 d_r 分别是微透镜阵列的参数, 如图 7 所示。在大部分情况下, $d_r \ll D$, 不考虑误差范围, 方程可以简化为

$$D = \frac{d\varphi F}{\Delta} \quad (9)$$

根据式(9),如果微透镜阵列的参数和对应两幅视图的抽样距离已知,则空间任意一点的深度可以通过求解该点对应视图间的视差来获得。

3.2 误差分析

从上述推导过程可知由式(9)得到的深度测量误差范围为

$$E = \frac{\varphi F}{\Delta} \quad (10)$$

即由该方法测量给出的误差范围正比于微透镜阵列参数 φ, F ,反比于抽样距离(Δ)。在给定微透镜阵列参数的情况下(φ, F 确定),选用具有较长抽样距离的视图对,可以提高测量结果的准确性。由于 Δ 的取值受到微透镜孔径 φ 的限制(即 Δ 的取值不能超过微透镜孔径 φ),选取极端情况($\Delta \approx \varphi$),该测量方法给出的误差范围是一与被测物体的深度无关的固定值 F 。也就是说,在采用基于全景图像的技术测量深度时,其测量的量化错是一个仅由微透镜参数决定的固定值,而不随深度的增加而增大。在传统的机器视觉中测量精度随着物体距离的增大而大大下降。上述结果提示采用基于全景图像技术的测量系统,可望在一定程度上克服传统机器视觉中当被测物体比较远时测量精度的下降。

图 8 图示性地描述了从视图恢复场景空间位置过程中存在的空间不确定区域的分析。由于所有进入同一透镜的平行光都将被记录于该透镜下的同一位置,在图中钻石状灰色区域内的任意一点在两幅视图中的记录位置都将和 P 点相同。也就是说,仅从两幅视图无法分辨出绿色钻石状区域内两点的空间位置。即在由两幅视图恢复场景空间位置时存在不确定区域。这一不确定区域可以通过考虑更多的

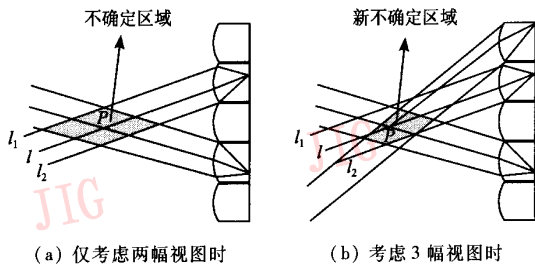


图 8 从视图恢复场景空间位置过程中存在的空间不确定区域的分析

Fig. 8 The ambiguity region on the reconstruction from viewpoint images

视图引入的限制而缩小,如图 8(b)所示。

4 采用全景图像技术测量深度的实例

构造一个只包含两个深度层次的简单空间场景(一垂直平面及紧贴该平面放置的火柴盒)来测试上述方法测量深度的可行性。该火柴盒的厚度用游标卡尺测量为 15.6mm。本实验具体所采用的光学设备为英国 De Montfort 大学 3 维图像技术组研制的全景光学成像系统^[4],采用的微透镜阵列参数 φ, F 和 r 分别为 0.6mm, 1.237mm, 0.88mm。图 9 是被记录的全景图像,该图看起来有些模糊不清,这是由于特殊的记录方式而引起的。若将该全景图像放在合适的微透镜阵列后,原来的 3 维场景即可清楚地再现出来。

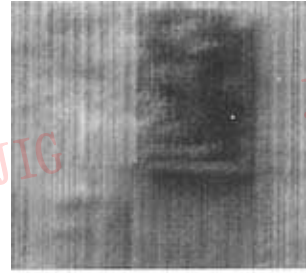


图 9 一幅包含两个深度层次的简单空间场景的全景图像
Fig. 9 An integral image containing two object depth planes

从前面的分析可以知道,深度测量的误差和两幅视图之间的抽样距离长度成正比;同时考虑到图像记录的质量在透镜边缘会有所下降,所选用的视图不应该由那些太靠近透镜边缘的点形成。如图 10 所示,选用的两幅视图分别是由距离透镜左右边缘 5/24 处的点抽样而形成的。两幅视图之间的抽样距离为 0.35mm。已知某点在不同视图间的视差,该点的深度可以通过推导的深度方程来求解。

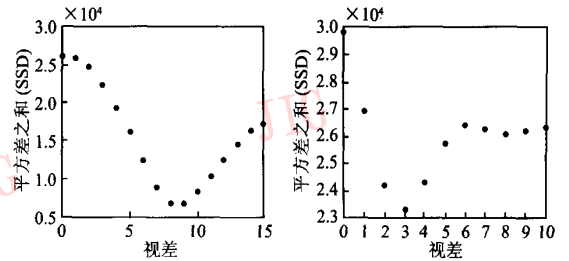
考虑到计算的简单和有效性,本实验采用以 SSD(sum of square difference)为计分准则的基于相关的块匹配算法来求解视图间的视差。SSD 计分准则的数学公式可以描述如下:

$$\text{score}(d) = \text{SSD}(d) = \sum_{x,y \in w} [\hat{I}_1(x,y) - \hat{I}_2(x+d,y)]^2 \quad d \in [-R,R] \quad (11)$$

其中, $\hat{I}(x,y) = I(x,y) - \bar{I}, \bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{x,y \in w} I(x,y)$



图 10 从图 9 中提取的两幅视图
Fig. 10 Viewpoint images from fig. 9



(a) 火柴盒表面 (b) 背景区域

图 12 对两个选定区域进行视差分析的结果

Fig. 12 The disparity results on the two chosen regions

中火柴盒表面和背景,该算法给出的视差值分别为 9 和 3。

由此,火柴盒表面和背景区域的深度可以分别估计为 19.1mm 和 6.4mm,误差范围均为 2.1mm。火柴盒的厚度可以计算为 12.7mm,误差范围为 4.2mm 和实际游标卡尺测量结果 15.6mm 相比,结果落在给定的误差范围内。

I_1 和 I_2 分别代表两幅视图, (x, y) 是被分析点的坐标, $I_1(x, y)$ 为对应点 (x, y) 的强度, w 是用来匹配的窗口, R 是搜索范围; N 是匹配窗口内点的个数。引入局部窗口强度调整是用来克服由于不同视图间照度不同而引起的视差分析错误。

由于这里的视图间只有水平视差存在,搜索范围被限制在水平方向。给定一个匹配窗口,该算法寻找第 2 幅图中在搜索范围内使记分函数最小的位置。

如图 11 所示为测量火柴盒的厚度,两个分别置于火柴盒表面和火柴盒后的平面背景的窗口 w_1 和 w_2 ,被选取来进行视差分析。火柴盒的厚度可以通过求出火柴盒表面和背景的深度差来获得。图 12 是由采用完全搜索算法搜索得到的计分结果。对图

5 结论

在发展下一代基于全景图像的 3 维电视所面临的众多数据处理的问题中,深度信息的获取起着至关重要的作用。此外,深度信息本身在医学、工业测量以及军事上也有着十分可观的应用前景和传统的机器视觉方法比较,基于全景图像技术的深度测量工具可以使得整个测量系统简洁(只需要一个相机),不存在传统机器视觉采用两个以上相机来测量深度过程中存在的摄像机的标定和校准问题。另一方面,由于其量化错是一个仅由微透镜参数决定的固定值,而不随深度的增加而增大,作为一种测量工具,可以在一定程度上克服传统机器视觉中当被测量物体比较远时测量精度下降的问题。

本文通过对全景图像这一特殊图像的形成过程以及其数据结构特点的分析,提出了一种利用全景图像技术来直接测量物体 3 维立体深度的新颖的测量方法。在采用全景图像测量火柴盒厚度的实例中,得到的测量结果虽然在误差允许的范围之内,但和实际游标卡尺测量的结果相比较,误差还是很大。这表明在采用该方法作为测量工具时的测量精度尚待提高。从图 8 中对误差分析的结果表明测量的准确性可望通过更多视图的引入来提高,在另一方面,

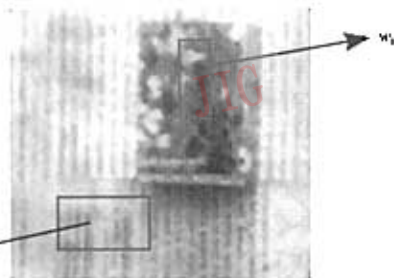


图 11 用来进行深度测量的两个窗口

Fig. 11 The two regions chosen for depth measurement

一些针对于视图数据结构特点的视差分析算法有待于研究以代替简单的块匹配方法来提高视差分析的可靠性和稳定性。

参考文献 (References)

- 1 Davies E R. Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities [M], London: Academic Press, 1990.
- 2 Trucco E. Introductory Techniques for 3-D Computer Vision [M]. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1998.
- 3 Okoshi T. Three Dimensional Imaging Techniques [M]. London: Academic Press, 1976.
- 4 Davies N, McCormick M, Brewin M. Design and analysis of an image transfer system using micro-lens arrays [J]. Optical. Engineer, 1994, 33(11): 3624 ~ 3633.
- 5 Wu Shen-nan, Wu Chun-hong. Integral imaging and three-dimensional T[J]. Jiangxi Science, 2004, 22(2): 110 ~ 114. [伍胜男, 伍春洪. 三维集成图像技术及其在发展三维电视上的应用 [J]. 江西科学, 2004, 22(2): 110 ~ 114.]
- 6 MotoKi T, Isono H, Yuyama I. Present status of three-dimensional television research [J]. Proceedings of IEEE, 1995, 83(7): 1009 ~ 1021.
- 7 Okano F, Hoshino H, Arai J, et al. Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography [J]. Applied Optics, 1998, 36(7): 1598 ~ 1603.
- 8 Kim S. Recent development of 3D display technology for new market [A]. In: Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, Three-Dimensional TV, Video, and Display II [C], Orlando, USA, 2003, 5243: 1 ~ 6.
- 9 Manolache S, Aggoun A, McCormick M, et al. A mathematical model of a 3D-lenticular integral recording system [A]. In: Proceedings of IEEE Vision, Modeling and Visualization Conference [C], Erlangen, Germany, 1999: 51 ~ 58.
- 10 Manolache S, McCormick M, Kung S Y. Hierarchy adaptive regularization method for depth extraction from planar recording of 3D-integral images [A]. In: IEEE Proceedings of International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing [C], Salt Lake City, USA, 2001: 1433 ~ 1436.