

基于光场数据的无纹理景物视差估计方法

郑森 赵红颖[†] 杨鹏 晏磊 郑鸿云 崔家梁

北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; [†] 通信作者, E-mail: zhaohy@pku.edu.cn

摘要 为了提高无纹理区域视差计算结果, 在利用光场子孔径图像立体匹配估计无纹理区域的视差时, 采用量化的光场子孔径图像之间的几何关系代替像素值进行立体匹配。根据光场子孔径图像之间的几何关系, 计算像素点的极线分割比, 用极线分割比代替子孔径图像像素值, 提高了像素可区分性。实验结果表明, 利用分割比图像得到的视差图结果明显优于利用子孔径图像得到的结果。

关键词 光场; 无纹理; 视差估计; 极线分割比

中图分类号 TH74

Disparity Estimation Method for Free-Texture Scenes Based on Light Field

ZHENG Miao, ZHAO Hongying[†], YANG Peng, YAN Lei, ZHENG Hongyun, CUI Jialiang

School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: zhaohy@pku.edu.cn

Abstract In order to improve the pixel distinguishability, this paper introduces an algorithm that the quantized geometric relationship among sub images of light field replaced the pixel value. Based on this relationship, the epipolar line division ratio is calculated to take place of pixel value. Experimental results showed that the disparity map with the division ratio images are obviously superior to those obtained by using the subaperture images.

Key words light field; free-texture; disparity estimation; epipolar line division ratio

利用四维光场数据估计图像视差信息是光场相机三维重建的主要步骤之一。与传统相机提取视差需要多张不同位置拍摄的相片进行匹配处理不同, 光场四维数据记录的光线角度信息^[1-4]可以获得不同视角下的子孔径图像, 利用子孔径图像间的立体匹配估计图像中各部分的视差, 因此对一幅光场图像进行处理便可得到景物的视差图^[5-11]。

当拍摄对象纹理较弱, 甚至无纹理时, 获得图像的像素值均匀, 像素的可区分性不高, 易导致误匹配, 使视差计算准确度降低。现有的估计光场数据视差算法大多直接利用子孔径图像^[5,7,9]。即使利用亚像素的匹配技术^[7], 对弱纹理区域进行处理时, 得到的视差结果仍不能满足三维重建的要求。利用人工增加纹理技术添加被拍摄物体的纹理信息^[12],

存在代价高、纹理分辨率差及纹理均匀等问题^[13]。所以, 增加图像像素的可区分性才能从根本上解决弱纹理区域误匹配问题。依据同名点在极线上线段分割比不变的性质^[14-15], 利用极线分割比代替光场数据的像素灰度值, 可以提高像素的可区分性。

为了以较低的成本获得无纹理区域的视差信息, 本研究对拍摄对象投影出简单纹理, 并对拍摄得到的光场数据进行处理, 提取子孔径图像, 根据子孔径之间的几何关系, 用不同方向的极线分割比代替子孔径图像像素值, 可以提高像素可区分性, 降低视差计算时误匹配, 进而提高视差结果。

1 光场数据

在计算机视觉中使用二维图像重构拍摄对象的

国家自然科学基金(61672043)资助

收稿日期: 2016-12-30; 修回日期: 2017-03-28; 网络出版日期: 2017-06-20

三维模型时, 需要利用视差计算深度 z , 如下式^[16]所示:

$$z = Bf/d, \quad (1)$$

其中, d 是视差值, B 是相机间的基线长度, f 是焦距。对于光场数据, 利用不同视角下的子孔径图像, 可通过立体匹配的方法确定同名像点之间的视差。但是, 当拍摄对象为无纹理景物时, 像素灰度值均一, 可区分性差, 在匹配过程中易造成误匹配。本文在解决无纹理区域视差计算问题时, 先对无纹理区域投影出简单纹理, 利用立体匹配的方法计算视差。由于达到可以精确匹配纹理效果的成本较高, 普通的实验条件很难达到, 所以采用极线分割比代替弱纹理区域像素值, 从根本上提高像素的可区分性, 改善视差计算结果。

1.1 光场数据

本文使用的光场相机模型如图 1 所示, 光场相机在主透镜与传感器之间添加微透镜阵列, 用于收集光线角度信息。微透镜阵列安置在主透镜(直径为 D)与传感器之间, 到传感器的距离为微透镜的焦距 f_m 。

光场相机拍摄的图像经过解译得到光场数据 $r(x, y, u, v)$ 。其中, (x, y) 表示光线分布位置, 是微透镜下对应宏像素的坐标, (u, v) 反应光线的传输方向, 是宏像素所包含像元坐标^[19]。

1.2 子孔径图像

光场图像解译后, 提取四维光场数据中每个宏像素下相同的坐标像元, 组成一幅子孔径图像, 宏像素下每个像元代表光线的角度信息, 因此子孔径图像为特定视角下的景物拍摄图像。由于微透镜对应的宏像素正交排列, 因此子孔径图像共面且正交排列。将所有子孔径图像按照其视角位置排列, 组

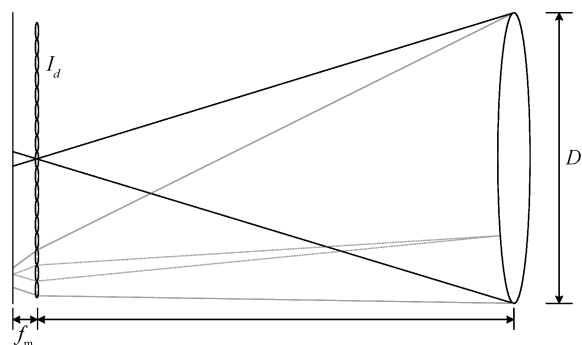


图 1 光场相机模型^[17-19]

Fig. 1 Light field camera model^[17-19]

成子孔径图像阵列。计算视差时, 以中心视角子孔径图像为参考图像, 其余子孔径图像与其匹配, 计算不同视差值下的匹配代价, 将最小匹配代价的视差值, 作为参考像素的视差取值。

2 研究方法

估计光场相机拍摄无纹理景物视差过程, 主要分为以下几个步骤: 1) 为获取无纹理区域光场图像, 对无纹理对象投影出简单纹理, 制造弱纹理区域, 使用光场相机拍摄; 2) 利用光场相机配置文件——白图像, 解译光场数据, 提取子孔径图像; 3) 计算图像分割比, 以此代替子孔径图像像素值; 4) 利用计算机视觉中立体匹配方法, 计算图像各部分视差。估计无纹理区域视差流程如图 2 所示。

2.1 解译光场数据

光场相机中微透镜阵列被设计为非正交的六边形排列方式, 制造工艺的误差会导致微透镜阵列的变形, 并且传感器无法记录微透镜与宏像素之间的对应关系^[20-21]。为获得正交排列的四维光场数据, 需要对原始光场数据进行解译。光场相机提供了不同对焦和变焦参数下的白图像, 用以记录微透镜阵列的排列模型^[22]。对白图像进行处理, 提取微透镜中心点, 计算微透镜排列模型参数, 用对应的模型参数对拍摄得到的光场图像进行处理, 通过平移和旋转, 得到正交排列的四维光场数据^[20], 如图 3 所示。

2.2 提取子孔径图像

解译出的四维光场数据用 $r(x, y, u, v)$ 记录, 提

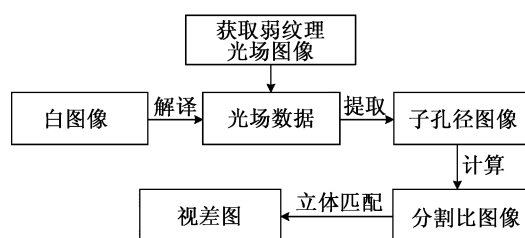


图 2 估计无纹理区域视差流程

Fig. 2 Process of estimating disparity for free-texture regions

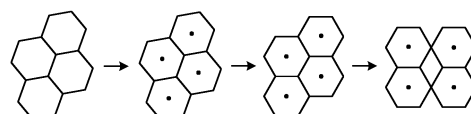


图 3 光场数据解译

Fig. 3 Decoding light field data

取所有宏像素同一位置的像元,组成一幅子孔径图像,如图 4 所示。将不同视角下的子孔径图像排列成子孔径图像阵列,如图 5 所示。

光场数据提取出的子孔径图像共面且正交排列,基线与像平面平行。子孔径图像阵列同一行中,同名点纵坐标 y 相同,水平方向横坐标 x 存在差异;同一列中,同名点横坐标 x 相同,竖直方向纵坐标 y 存在差异。

2.3 极线分割比

为了提高像素的可区分性,本文根据图像间的变换关系,为像素重新分配特定的标记。在光场子孔径图像阵列中,图像之间只存在平移,同名点之间的几何关系为仿射变换。仿射变换有保持平行线段长度比值不变的性质^[15]。计算某点所在极线的分割比表示该几何关系,并用其代替像素值。对于正交排列的子孔径图像阵列,任意两个子孔径图像均可以组成一个像对,以子孔径阵列中左右相邻的两张图像为例,如图 6 所示。

两张水平方向相邻的子孔径图像,基线 C_1C_r 与像平面平行,连接物点 O 。 O 在左右两张相片上的投影点分别为 o_l 和 o_r 。极平面 OC_1C_r 与图像平面相交于极线,极线与基线平行(沿水平方向)。极线上的同名线段 p_lq_l 和 p_rq_r 满足下式:

$$p_lo_l / p_lq_l = p_ro_r / p_rq_r. \quad (2)$$

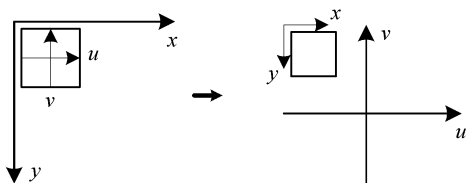


图 4 子孔径图像提取

Fig. 4 Extraction of sub-aperture images

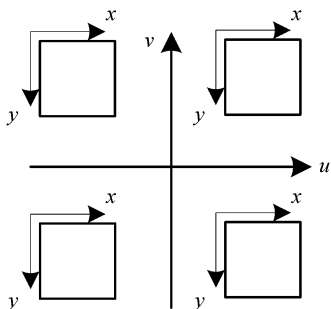


图 5 子孔径图像阵列

Fig. 5 Sub-aperture images array

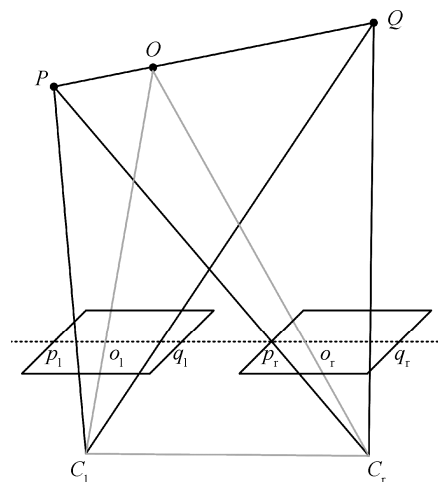


图 6 极线分割比

Fig. 6 Epipolar line division ratio (ELDR)

O 在不同的像对中构成不同的极平面,有不同方向的极线,而子孔径图像阵列中水平、竖直方向的极线与图像坐标轴方向平行,可以用像素坐标代表像素在极线上的坐标,用这两个方向分割比的代数和代替像素的灰度值:

$$f(o) = \lambda f_x(o) + (1-\lambda)f_y(o), \quad (3)$$

$f(o)$ 为像素的分割比, $f_x(o)$ 为水平方向极线的分割比, $f_y(o)$ 为竖直方向的分割比, λ 为比例系数。在水平方向上,共面的子孔径图像只存在水平方向的差异,可进一步简化坐标来表示,用像素的坐标代表极线上的坐标。从式(2)可以看出,分割比应从线段的端点来计算,但由于弱纹理区域像素信息较少,所以使用概率统计的方法^[14]计算极线分割比,如式(4)和(5)所示。

$$f_x(o) = \frac{\|p_x - o_x\|}{\|p_x - q_x\|} = \frac{\sum_{x=\max(0, x^o - \sigma_x w)}^{x^o} \exp\left(-\frac{(I(x) - I(x^o))^2}{2\sigma_1^2}\right)}{\sum_{x=\max(0, x^o - \sigma_x w)}^{\min(w-1, x^o + \sigma_x w)} \exp\left(-\frac{(I(x) - I(x^o))^2}{2\sigma_1^2}\right)}, \quad (4)$$

$$f_y(o) = \frac{\|p_y - o_y\|}{\|p_y - q_y\|} = \frac{\sum_{y=\max(0, y^o - \sigma_y h)}^{y^o} \exp\left(-\frac{(I(y) - I(y^o))^2}{2\sigma_1^2}\right)}{\sum_{y=\max(0, y^o - \sigma_y h)}^{\min(h-1, y^o + \sigma_y h)} \exp\left(-\frac{(I(y) - I(y^o))^2}{2\sigma_1^2}\right)}, \quad (5)$$

$I(x)$ 和 $I(y)$ 表示图像灰度值; x_o 为 o 点在水平极线上的坐标; y_o 为 o 点在竖直极线上的坐标; σ_1 为常数;

σ_s 控制窗口大小, 根据弱纹理区域在图像中所占范围确定, 当拍摄区域均为弱纹理, σ_s 取无穷大。

2.4 立体匹配

利用分割比图像代替原子孔径图像进行立体匹配, 计算图像视差。在计算匹配代价时, 使用灰度绝对值差异和梯度绝对值差异, 并以最小匹配代价对应的视差为所要求的视差, 即 WTA (winner-takes-all strategy) 算法^[23]。

3 结果分析

利用投影仪在白色墙面无纹理区域制造弱纹理, 使用 Lytro 一代手持光场相机进行拍摄, 在 Matlab R2016b 平台上采用 LFTtoolbox0.4 工具^[21]对拍摄到的数据进行解译, 得到四维光场数据。提取子孔径图像, 利用子孔径图像进行匹配, 得到的视差结果, 如图 7(c)所示。可以看出, 右下角红色方框中存在明显错误, 视差计算误匹配率为 21.15%。

按照 2.3 节的算法设计进行实验, 结果如图 8 所示。图 8(a)为一个利用像素极线分割比替换后的图像, 与原子孔径图像(图 7(a))相比, 不同圆形图

案的像素值明显不同, 像素可区分性得到提高。利用本文算法得到的结果(图 8(c))与利用原子孔径图像匹配计算得到的视差结果(图 7(c))相比, 除图像边缘部分外, 视差结果基本上连续, 误匹配率为 13.37%, 很大幅度地改善了传统算法对无纹理区域视差计算结果。

4 讨论

本文采用极线分割比的方法, 提高了弱纹理区域像素的可区分性, 得到表面光滑无纹理的白墙区域的视差结果, 为解决光场无纹理区域三维重建问题提供了新的方法。与前人计算稀疏、人工增加少量特征点的空间位置相比, 本文方法用极线分割比替换了弱纹理区域的像素值, 并用立体匹配的方法求解空间位置, 计算出图像每点的视差值, 得到弱纹理区域稠密点云三维信息。

在实验研究过程中, 发现一些需要进一步研究的问题。1) 对于图像边缘区域视差计算结果明显错误, 可能与光场微透镜阵列制造工艺有关, 需进一步实验研究。2) 在获取光场图像时, 相机与被拍

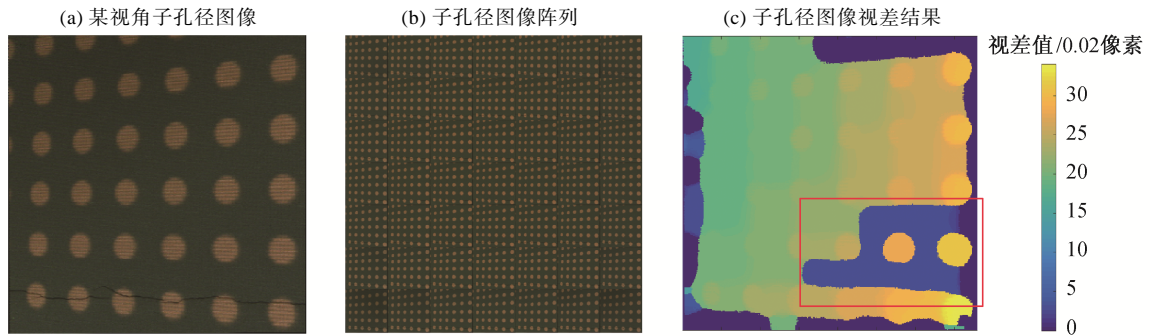


图 7 初始实验结果

Fig. 7 Original experimental results

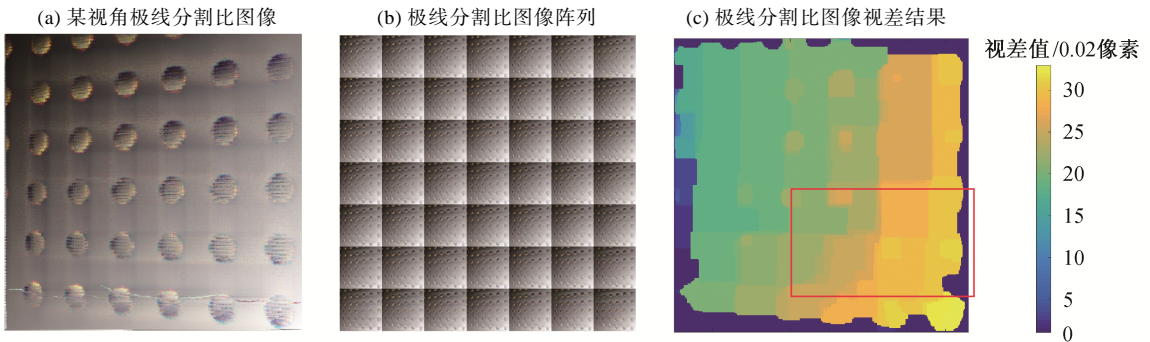


图 8 实验结果

Fig. 8 Experimental results

摄物体之间的距离在 0.5 m 以内的数据, 计算的视差结果较好。因为子孔径图像基线过短, 无法获取远距离物体的视差信息, 一直以来都是光场相机的不足。本研究突破短距离拍摄限制的技术, 可以拓宽光场相机的应用范围。3) 本文使用圆形简单纹理, 为无纹理的白墙增加弱纹理信息。有关不同的纹理信息对视差计算的影响, 尚需进一步研究。

参考文献

- [1] Levoy M. Light fields and computational imaging. *IEEE Computer*, 2006, 39(8): 46–55
- [2] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering // *Computer Graphics*. New Orleans, 1996: 31–42
- [3] Georgiev T, Lumsdaine A. Focused plenoptic camera and rendering. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(2): 021106
- [4] Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera // *IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. Cluj-Napoca, 2009: 1–8
- [5] Chen C, Lin H, Yu Z, et al. Light field stereo matching using bilateral statistics of surface cameras // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Columbus, 2014: 1518–1525
- [6] Dansereau D, Bruton L. Gradient-based depth estimation from 4D light fields // *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Vancouver, 2004: III-549-52
- [7] Jeon H G, Park J, Choe G, et al. Accurate depth map estimation from a lenslet light field camera // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Boston, 2015: 1547–1555
- [8] Tao M W, Hadap S, Malik J, et al. Depth from combining defocus and correspondence using light-field cameras // *IEEE International Conference on Computer Vision*. Sydney, 2013: 673–680
- [9] Yang P, Wang Z, Yan Y, et al. Close-range photogrammetry with light field camera: from disparity map to absolute distance. *Applied Optics*, 2016, 55(27): 7477–7486
- [10] Yu Z, Guo X, Lin H, et al. Line assisted light field triangulation and stereo matching // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. Sydney, 2013: 2792–2799
- [11] Zhang S, Sheng H, Li C, et al. Robust depth estimation for light field via spinning parallelogram operator. *Computer Vision & Image Understanding*, 2016, 145:148–159
- [12] Clarke T A, Clarke T A. An analysis of the properties of targets used in digital close range photogrammetric measurement // *Proc Spie*. Boston, 1994: 251–262
- [13] 范生宏. 工业数字摄影测量中人工标志的研究与应用[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2006
- [14] Yang Q, Ahuja N. Stereo matching using epipolar distance transform. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(10): 4410–4419
- [15] Schneider P J, Eberly D. *Geometric Tools for Computer Graphics*. New York: Elsevier Science Inc, 2002
- [16] Okutomi M, Kanade T. A multiple-baseline stereo. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1993, 15(4): 353–363
- [17] Ren N, Levoy M, Bredif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera. *Computer Science Technical Report CSTR*, 2005, 2(11): 1–11
- [18] Ng R. Fourier slice photography. *Acm Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 735–744
- [19] Ng R. Digital light field photography [D]. Stanford: Stanford University, 2006
- [20] Bok Y, Jeon H G, Kweon I S. Geometric calibration of micro-lens-based light field cameras using line features. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2017, 39(2): 287–300
- [21] Dansereau D G, Pizarro O, Williams S B. Decoding, calibration and rectification for lenselet-based plenoptic cameras // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Portland, 2013: 1027–1034
- [22] Lytro. The lytro camera [EB/OL]. [2016–12–02]. <https://www.lytro.com>
- [23] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 47(1): 7–42