

doi:10.3788/gzxb20174611.1112004

光场相机视觉测量误差分析

汪义志,张旭东,熊伟,邓武

(合肥工业大学 计算机与信息学院,合肥 230009)

摘 要:光场相机通过一次曝光可以获取空间目标的位置和方向信息,具有重聚焦和多视角的特性,利用光场的这些特性可以进行视觉测量.本文对光场极平面图像视觉测量、重聚焦视觉测量、双目视觉以及多目视觉测量方法的测量原理和误差影响因素进行了理论分析,并通过实验验证了光场视觉测量误差跟不同视角基线长度,主透镜焦距大小,目标离相机的实际距离等结构参量的关系;理论分析和实验结果表明,由于相机基线较短,远距离测量误差较大,近距离测量具有较高的精度;在光场微透镜阵列大小有限条件下,采用多个视角组合的测量方法具有更高的测量精度.

关键词:光场相机;多视角图像;焦堆栈图像;视觉测量;结构参量;误差分析

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)11-1112004-12

Error Analysis of Vision Measurement Based on the Light Field Camera

WANG Yi-zhi, ZHANG Xu-dong, XIONG Wei, DENG Wu

(College of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Light field camera can obtain position information and direction information of space target through one exposure. It has the characteristics of refocus and multi-view, which can be used for vision measurement. In this paper, the measurement principle and error influence factors of epipolar plane image (EPI), refocus-based, binocular and trinocular measurement methods were analyzed. The relationship between the measurement errors and the structural parameters, including the baseline length of different views, the focal length of the main lens and the actual distance of the target from the camera, were verified by experiments. Theoretical analysis and experiment results show that, due to the short baseline of the camera, the distance measurement errors are large, and short distance is of high precision; under the condition of fixed size of microlens array, the multi-view combination measurement method has higher accuracy.

Key words: Light field camera; Multi-view image; Focal stack images; Vision measurement; structural parameters; Error analysis

OCIS Codes: 120.4820; 150.0155; 150.1488; 150.5670

0 引言

光场相机^[1-2]作为一种新型相机,将计算和成像相结合,在它的主透镜和传感器之间放置微透镜阵列,相对于传统相机可以通过单次曝光就能同时获取光辐射的空间信息和角度信息.光场相机具有重聚焦、多视角等特点,利用光场相机的这些特点,可以获取场景的深度信息.

对光场深度获取方向研究分为两类:第一类为光场深度估计^[3-7],主要在深度获取效率、遮挡场景下的深

基金项目:国家自然科学基金(No.61403116)和中国博士后基金项目(No.2014M560507)资助

第一作者(通讯作者):汪义志(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为光场技术、计算机视觉. Email: wangyizhihfut@foxmail.com

导师:张旭东(1966—),男,博士,教授,主要研究方向为智能信息处理、机器视觉. Email: xudong@hfut.edu.cn.

收稿日期:2017-05-25;录用日期:2017-07-28

<http://www.photon.ac.cn>

度获取以及深度获取精度等方面进行探讨,但利用此方法只能获取场景的相对深度图,无法获取场景点的真实距离,特别是在无纹理区域得到的深度图很粗糙,获取的深度信息非常的有限;第二类为光场视觉测量^[8-10],文献[8]利用光场重聚焦算法渲染出一系列的焦堆栈图像,并利用不同的清晰度评价函数确定最清晰像的位置,运用高斯公式确定相机离目标物体的距离,但是聚焦性检测函数的选择对这种方法的测量结果影响较大,文献[9]运用重聚焦特性,将一组光线作为图像系统的线性函数进行深度测量,但是通过一次重聚焦并不能获取整个目标平面上所有点的距离,文献[10]通过构建图像空间模型和目标空间模型,并结合两种子空间模型和返回到目标空间的光线,推导出目标平面对应点的距离跟目标像直径的关系,然后进行深度测量,但是实际测量系统中由于安装误差和制作误差,造成测量结果不理想,文献[11-15]对视觉测量方法误差进行了大量研究,文献[11]分析了相机运动方式、相机基线长度以及目标远近对光场极平面图像(Epipolar Plane Image, EPI)图像的结构的影响,并研究了 EPI 图像结构变化对场景点深度信息的影响;文献[12]理论推导了匹配模糊、遮挡以及噪声因素分别对立体视觉、聚焦、散焦测量方法结果误差的影响;文献[13]分析了相机结构参数、相机标定误差对立体视觉测量结果的影响;文献[14]理论推导分析了标志器与相机的相对距离、标志器尺寸、相机量化误差、相机内参数标定误差、特征点中心提取精度等因素对单目视觉位姿测量精度的影响;文献[15]理论分析了标靶尺寸大小、标靶基线长度以及特征圆点大小与单目视觉位姿测量解算准确度的关系,本文在传统视觉测量方法误差分析的基础上结合光场相机结构特点,对光场视觉测量方法测量误差进行理论推导;分析相机结构变量误差和随机变量对光场视觉测量误差的影响,分析光场视觉测量方法的测量范围和精度,并指出在微透镜阵列尺寸固定条件下精度提高的方法,并通过实验验证了测量误差跟不同视角基线长度、主透镜焦距大小、目标离相机实际距离等结构参量的关系。

1 光场基本理论

光场相机可以收集进入相机所有光线的波长、强度和方向,获取的光场信息实质上就是空间中所有光辐射函数的总体,由 Levoy 的光场渲染理论^[16]可知,空间中携带位置和方向信息的任意光线,都可以用两个平面参数化表示,光线与透镜平面和传感器平面相交于 (u, v) 和 (x, y) 两点,形成了一个四维光场函数 $L_F(x, y, u, v)$,如图 1 所示,光线携带二维位置信息和二维方向信息,利用计算机可以将光场信息转换成不同视角、不同焦点的图像。

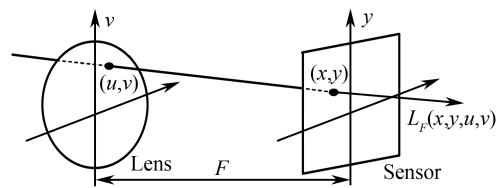


图 1 光场四维参数化表示

Fig.1 Four dimension parametric representation of light field

微透镜阵列式光场相机成像原理见图 2,微透镜阵列中每一个微透镜在传感器上形成对应的子孔径图像,每一个子孔径图像都记录了来自目标某一点不同方向的光线,从不同子孔径图像中,选取同一方向的像素,即可获得某些视角的完整图像,多视角图像形成的过程见图 3,获取的多视角图像空间分辨率为 3×3 ,角度分辨率为 3×4 ,图中只画出了其中三个相邻视角的图像。

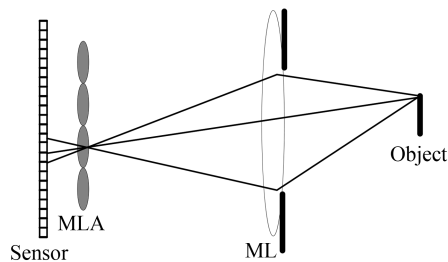


图 2 光场相机成像光学示意图

Fig.2 Imaging optics of light field camera

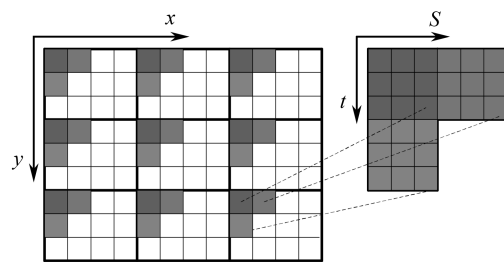


图 3 光场多视角图像

Fig.3 Multiview images of light field

由于光场能够记录来自不同方向的光线,因此可以进行重聚焦,如图 4 所示, Π 平面表示透镜平面, Δ 平面表示传感器平面, Ψ 平面为重聚焦平面,光线在重聚焦平面投影坐标为 (x', y') ,另外坐标 (u, v) 记录了光线经过主透镜到达微透镜的位置信息,根据经典辐射理论^[16]可知

$$E_{\alpha F}(x', y') = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \iint L_F \left[u \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{x'}{\alpha}, \right. \\ \left. v \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{y'}{\alpha} \right] du dv \quad (1)$$

式中, F 为主透镜到图像传感器之间的距离, αF 为重聚焦平面到主透镜的距离, α 为调焦系数, 通过不断改变 α 的值可获得一系列聚焦在不同深度的焦堆栈图像。

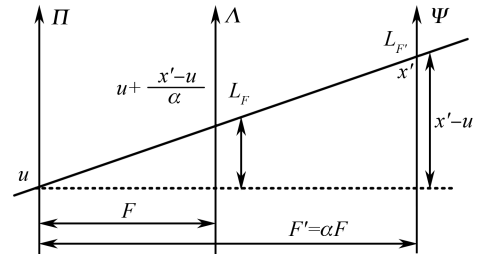


图4 光场数字重聚焦

Fig.4 Light field digital refocusing

2 光场视觉测量与误差分析

分析可知, 光场相机具有多视角、重聚焦的特性, 利用这些特性提取出的多视角图像和焦点堆栈图像可以进行视觉测量和三维重建. 目前常用的光场视觉测量方法有: 光场 EPI 视觉、重聚焦视觉、双目视觉和多目视觉测量方法, 本文对这几种常用的光场视觉测量方法进行误差分析。

2.1 光场 EPI 视觉测量与误差分析

光场相机获取不同深度的场景可以转换为极平面不同斜率的直线, 斜率越大, 代表场景目标点的距离更远^[11], 由于 EPI 图像具有此特性, 因此, 可以利用生成的 EPI 图像进行视觉测量. 光场 EPI 视觉测量是通过提取的多视角图像来生成极平面图像, 然后检测生成的 EPI 图像直线的斜率来进行视觉测量。

光场 EPI 图像是指光场极平面图像, 如图 5 所示, 它可以通过固定传感器平面 Λ 内一个空间坐标 y 和透镜平面 Π 内一个角度坐标 t , 移动另外一个空间坐标 x 和角度坐标 s 获取^[17], 提取的 EPI 图像如图 6 所示. 由于透镜平面 Π 上的透镜中心坐标位置决定点 P 在传感器平面 Λ 上的投影位置, 假设空间不同深度的场景点在透镜平面 Π 内透镜中心坐标位置变化为 Δs , 在传感器平面 Λ 内空间分辨率变化为 Δx , 透镜的焦距为 F , 根据几何关系可知

$$Z = -F(\Delta s / \Delta x) \quad (2)$$

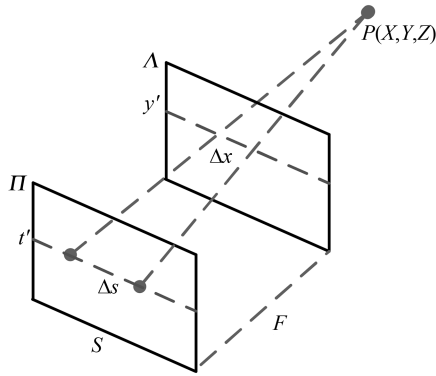


图5 光场的几何表示

Fig.5 Geometrical representation of light field

实际上, 由于系统误差和随机误差的影响, 生成的 EPI 图像会出现偏差, 为了更好地分析 EPI 图像的直线结构, 将图 6 中所提取的 EPI 图像简化为如图 7 所示. 如图 7 所示, 假设空间目标点在对应的极平面直线的真实投影坐标变化为 Δx , 在平面 Π 上的透镜中心坐标位置变化为 Δs , 真实倾斜角为 φ . 由于噪声原因, 假设目标点投影坐标变化为 $\Delta x + \eta$, 实际上从光场信息中提取的 EPI 图像的倾斜角为 $\varphi + \Delta\varphi$, 因此场景点深度的误差为

$$\Delta z = |F \cdot \tan \varphi - F \cdot \tan(\varphi + \Delta\varphi)| \quad (3)$$

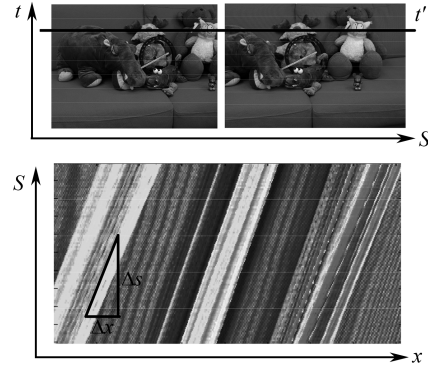


图6 EPI 图像

Fig.6 Epipolar plane image

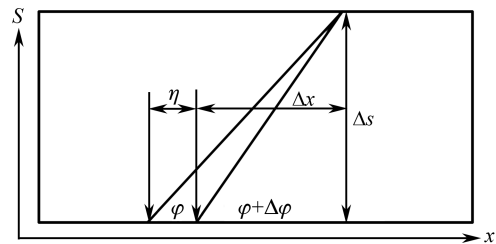


图7 极平面图像简图

Fig.7 Diagram of the epipolar imaging plane

将式(2)带入式(3)中可得

$$\Delta Z = \left| F \cdot \frac{\Delta s}{\Delta x} - F \cdot \frac{\Delta s}{\Delta x + \eta} \right| = \frac{F \cdot \Delta s \cdot \eta}{\Delta x (\Delta x + \eta)} \quad (4)$$

假设 $\Delta\varphi \ll \varphi$, 即有 $\eta \ll \Delta x$, 因此测量误差为

$$\Delta Z = \frac{F \cdot \Delta s \cdot \eta}{(\Delta x)^2} = \frac{Z^2}{F \cdot \Delta s} \eta \quad (5)$$

由式(5)可知, 光场 EPI 视觉测量方法的误差跟透镜焦距 F 成反比, 跟透镜平面内透镜中间坐标位置的变化 Δs 成反比, 即跟微透镜之间的基线长度成反比; 还跟目标点离相机的实际距离的平方成正比; 同时测量误差还跟目标点在传感器平面投影坐标的误差 η 成正比, 因此, 为了提高 EPI 视觉测量方法的精度, 需要增大透镜焦距, 同时增大微透镜之间基线长度; 此外, 利用精确的斜率检测函数能够减小目标点在传感器平面投影坐标的误差, 从而提高测量精度.

2.2 光场重聚焦视觉测量与误差分析

利用光场重聚焦原理, 可以从光场原始中渲染出一系列的焦堆栈图像, 利用清晰度评价函数对堆栈图像进行评价, 最清晰的图像的位置即为重聚焦时像距的位置, 光场重聚焦视觉测量方法就是利用这个原理进行目标深度测量.

如式(1)所示, 改变 α 的值可以渲染出一系列焦堆栈图像, 清晰度最高的焦堆栈图像的位置即为图像重聚焦平面的位置. 根据光场相机光学系统的共轭几何关系可知, 目标距离 S , 主透镜的焦距为 L , 重聚焦时的像距为 F' , 三者满足关系

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{F'} = \frac{1}{L} \quad (6)$$

光场重聚焦示意图如图 8 所示, 重聚焦时像距 $F' = \alpha F$, 因此, 由式(6)可知场景点的深度可以表示为

$$S = \frac{L \cdot F'}{F' - L} = \frac{\alpha F \cdot L}{\alpha F - L} \quad (7)$$

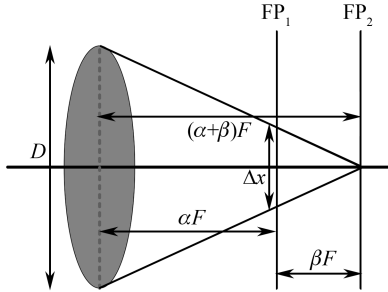


图 8 光场重聚焦示意图

Fig.8 Light field refocusing diagram

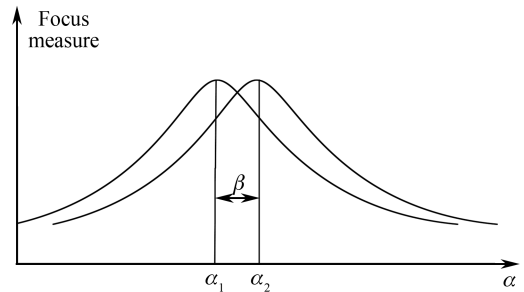


图 9 焦堆栈图像清晰度评价曲线

Fig.9 The image quality evaluation curve of focal stack images

假设对于某一场景光场相机真实重聚焦参数为 α_1 , 实际上运用的清晰度评价函数检测的参数为 α_2 , 如图 9 所示, 且有 $\alpha_2 - \alpha_1 = \beta$, 因此光场对焦测量误差可以表示为

$$\Delta S = |S(\alpha + \beta) - S(\alpha)| = \left| \frac{(\alpha + \beta)F \cdot L}{(\alpha + \beta)F - L} - \frac{\alpha F \cdot L}{\alpha F - L} \right| = \frac{\beta \cdot F \cdot L^2}{(\alpha F - L)[(\alpha + \beta)F - L]} \quad (8)$$

实际测量过程中, 通过光场重聚焦算法对对焦系数进行分层, 假设将对焦参数 α 分成等间距若干层, 每层间隔为 β , 则有 $\beta \ll \alpha$, 且有 $\Delta F' \ll F'$, 因此测量误差可以表示为

$$\Delta S = \frac{F \cdot L^2}{(\alpha F - L)^2} \cdot \beta = \frac{S^2}{F'^2} \cdot \Delta F' \quad (9)$$

式中, $\Delta F'$ 为像距测量误差, 且有 $\Delta F' = \beta F$.

由式(9)可知, 光场重聚焦视觉测量的误差跟实际距离成正比, 测量的误差还跟实际测量像距平方成反比; 同时还跟像距的测量误差成正比. 因此, 提高光场重聚焦视觉测量的精度, 需要减小目标离相机的距离; 此外, 选取精确的清晰度评价函数, 能够减小像距误差 $\Delta F'$, 从而提高视觉测量的精度.

2.3 光场双目视觉测量与误差分析

原始光场信息通过重新编码可以获取子孔径图像序列, 从获取的多视角图像中任意选取两个不同的视

角的图像都可以看做是双目视觉系统,两幅有差异的子孔径图像为光场深度获取提供了可能^[18].通过对子孔径图像进行标定、校正和立体匹配进而对目标点距离进行测量.光场双目视觉测量示意图如图10所示.

目标点真实深度为 $d(x)$,光场相机微透镜的直径为 D ,透镜焦距为 f ,在传感器上的真实视差为 x ,因此空间点 P 的真实深度为

$$d(x) = \mu D \cdot f / 2x \quad (10)$$

然而,由于光场相机微透镜阵列安装偏差以及匹配误差,光线在传感器平面的成像视差与真实视差有 ϵ 的偏差,因此目标点深度测量误差为

$$\Delta d(x) = |d(x + \epsilon) - d(x)| = \left| \frac{\mu D \cdot f}{2(x + \epsilon)} - \frac{\mu D \cdot f}{2x} \right| = \frac{\mu D \cdot f \cdot \epsilon}{2(x + \epsilon) \cdot x} \quad (11)$$

假设匹配误差很小,即匹配误差 $\epsilon \ll x$ 时,由式(11)可知,则测量误差可以表示为

$$\Delta d(x) = \frac{\mu D \cdot f}{2x^2} \cdot \epsilon = \frac{2d(x)^2}{\mu D \cdot f} \cdot \epsilon \quad (12)$$

因此,光场双目视觉测量误差为

$$\Delta d_\epsilon(x) = \frac{\partial \Delta d(x)}{\partial \epsilon} = \frac{\mu D \cdot f}{2x^2} = \frac{2d(x)^2}{\mu D \cdot f} \quad (13)$$

式中, μD 为微透镜基线的倍数.由上式可知,光场立体视觉测量的误差精度跟实际距离的平方成正比,跟双目视觉系统中基线的距离成反比;因此,在实际距离固定情况下,选择较大的透镜焦距,或者选取较长基线的视角组合进行视觉测量能够有效提高精度.

2.4 光场多目视觉测量与误差分析

光场多视角图像是从同一场景提取不同视角的子孔径图像,不同视角的组合可以看作是多目视觉测量系统,任意两个子孔径图像视角的变化都会引起视差变化,根据传统立体视觉测量原理可以获取场景的深度信息.

图11为光场解码后的多视角图像.挑选出任意多个不同视角就可以构成多目视觉测量系统.如图12,图中可以看出多目视觉可以分为两两组合的立体视觉测量系统,由2.3节立体视觉测量分析可知,假设目标点真实距离为 $d(x)$,实际上由于匹配误差和微透镜阵列安装工艺问题,假设三组双目视觉匹配误差分别为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$,因此测量的实际距离分别为 $d(x + \epsilon_1), d(x + \epsilon_2), d(x + \epsilon_3)$,因此每组测量系统的误差可以表示为

$$\Delta d_j(x) = |d(x + \epsilon_j) - d(x)| = \frac{\mu D \cdot f \cdot \epsilon_j}{2(x + \epsilon_j) \cdot x} \quad (j = 1, 2, 3) \quad (14)$$

式中, ϵ_j 为不同组双目视觉的匹配误差.

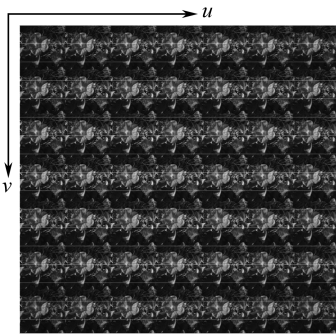


图11 光场解码后的多视角图像

Fig.11 Multi-view image light field after decoding

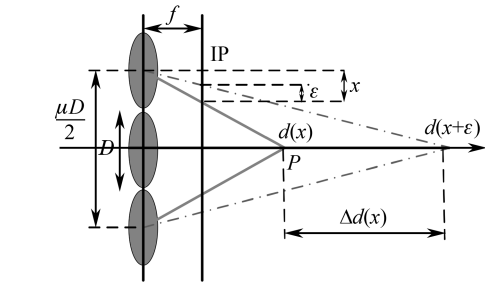


图10 光场双目视觉示意图

Fig.10 Light field stereo vision diagram

然而,由于光场相机微透镜阵列安装偏差以及匹配误差,光线在传感器平面的成像视差与真实视差有 ϵ 的偏差,因此目标点深度测量误差为

$$\Delta d(x) = |d(x + \epsilon) - d(x)| = \left| \frac{\mu D \cdot f}{2(x + \epsilon)} - \frac{\mu D \cdot f}{2x} \right| = \frac{\mu D \cdot f \cdot \epsilon}{2(x + \epsilon) \cdot x} \quad (11)$$

假设匹配误差很小,即匹配误差 $\epsilon \ll x$ 时,由式(11)可知,则测量误差可以表示为

$$\Delta d(x) = \frac{\mu D \cdot f}{2x^2} \cdot \epsilon = \frac{2d(x)^2}{\mu D \cdot f} \cdot \epsilon \quad (12)$$

因此,光场双目视觉测量误差为

$$\Delta d_\epsilon(x) = \frac{\partial \Delta d(x)}{\partial \epsilon} = \frac{\mu D \cdot f}{2x^2} = \frac{2d(x)^2}{\mu D \cdot f} \quad (13)$$

式中, μD 为微透镜基线的倍数.由上式可知,光场立体视觉测量的误差精度跟实际距离的平方成正比,跟双目视觉系统中基线的距离成反比;因此,在实际距离固定情况下,选择较大的透镜焦距,或者选取较长基线的视角组合进行视觉测量能够有效提高精度.

2.4 光场多目视觉测量与误差分析

光场多视角图像是从同一场景提取不同视角的子孔径图像,不同视角的组合可以看作是多目视觉测量系统,任意两个子孔径图像视角的变化都会引起视差变化,根据传统立体视觉测量原理可以获取场景的深度信息.

图11为光场解码后的多视角图像.挑选出任意多个不同视角就可以构成多目视觉测量系统.如图12,图中可以看出多目视觉可以分为两两组合的立体视觉测量系统,由2.3节立体视觉测量分析可知,假设目标点真实距离为 $d(x)$,实际上由于匹配误差和微透镜阵列安装工艺问题,假设三组双目视觉匹配误差分别为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$,因此测量的实际距离分别为 $d(x + \epsilon_1), d(x + \epsilon_2), d(x + \epsilon_3)$,因此每组测量系统的误差可以表示为

$$\Delta d_j(x) = |d(x + \epsilon_j) - d(x)| = \frac{\mu D \cdot f \cdot \epsilon_j}{2(x + \epsilon_j) \cdot x} \quad (j = 1, 2, 3) \quad (14)$$

式中, ϵ_j 为不同组双目视觉的匹配误差.

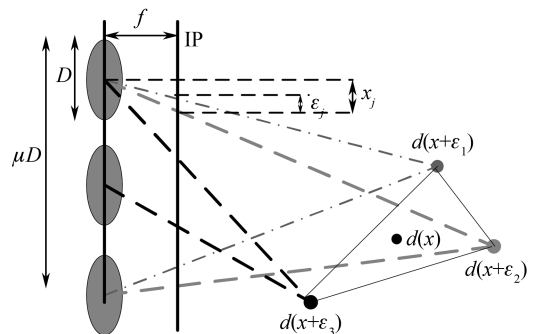


图12 光场多目视觉测量

Fig.12 Multi-view vision measurement of light field

假设三组测量系统基线相等,即 $\mu_i D = \mu D$, 当匹配误差 $\epsilon_j \ll x$ 时, 则测量误差可以表示为

$$\Delta d_j(x) = \frac{\mu D \cdot f}{2x^2} \epsilon_j = \frac{2d(x + \epsilon_j)^2}{\mu D \cdot f} \epsilon_j \quad (j = 1, 2, 3) \quad (15)$$

假设多个视角组成的三目视觉系统的视差匹配误差为 δ , 且光场多目视觉测量结果为各组双目视觉系统测量结果的最优估计, 则目标点真实距离 $d(x)$ 的估计值满足下面约束函数

$$F = \min \sum_{j=1}^n |d(x) - d(x + \epsilon_j)|^2 \quad (j = 1, 2, 3) \quad (16)$$

令目标真实距离 $d(x)$ 估计值为 $G(x)$, 因此, 光场相机多目视觉深度测量估计值为

$$G(x) = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 d(x + \epsilon_j) \quad (j = 1, 2, 3) \quad (17)$$

假设多目视觉系统匹配误差 $\delta \ll x$, 则多目视觉测量系统测量的整体误差为

$$\Delta E_T(x) = |G(x) - d(x)| = \frac{2G(x)^2}{\mu D \cdot f} \cdot \delta \quad (18)$$

因此, 整体测量精度可以表示为:

$$E_T(x) = \frac{\partial \Delta E_T(x)}{\partial \delta} = \frac{2G(x)^2}{\mu D \cdot f} \quad (19)$$

式(19)即为光场多目视觉整体测量精度. 进一步分析光场多目视觉测量误差和双目视觉测量误差的大小关系, 由式(18)可知

$$\Delta E_T(x) = |G(x) - d(x)| \leq \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 |d(x + \epsilon_j) - d(x)| \quad (j = 1, 2, 3) \quad (20)$$

进一步简化式(20), 假设三组双目视觉匹配误差相等, 即有 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon$, 将其带入到式(14)中可得

$$\Delta E_T(x) \leq \sum_{j=1}^3 \frac{2d(x + \epsilon_j)^2}{3\mu D \cdot f} \epsilon = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \Delta d_j(x) \quad (j = 1, 2, 3) \quad (21)$$

由式(18)可以得出, 光场多目视觉测量误差同样与透镜的焦距、不同视角组合基线长度和目标实际距离结构参量相关. 因此, 跟光场双目视觉测量方法类似, 光场相机有效条件下, 增大基线长度在能有效提高测量精度. 由式(21)可以得知, 光场多目视觉测量方法的测量精度比各组双目视觉测量误差平均值更小, 因此在选用光场立体视觉方法进行测量时, 可以选择利用多个视角组合的多目视觉测量方法, 从而提高测量精度.

3 光场视觉测量误差影响因素与测量范围

分析可知, 测量误差由结构变量误差和随机误差因素两部分组成, 本文从这两个方面对测量误差影响因素进行归纳与分析.

3.1 结构变量误差影响

1) 分析光场 EPI 视觉测量、光场双目视觉和多目视觉测量等测量精度公式, 可知这三种测量方法测量误差同时满足

$$\Delta D \propto D^2 / FB \quad (22)$$

式中 ΔD 为测量误差, D 为场目标点真实距离, F 为主透镜的焦距, B 为不同透镜之间基线长度. 在透镜焦距、基线长度固定情况下, 这三种视觉测量方法误差都跟实际距离成正比. 随着实际距离增大, 测量误差成二次函数增大; 因此基于光场立体视觉测量方法在远距离测量误差很大. 同时在实际距离和焦距固定情况下, 为了尽可能提高精度, 需要选取较大基线的视角组合进行测量. 然而, 目前光场相机受工艺影响, 微透镜阵列大小有限, 通过增大微透镜阵列大小可以增大基线, 同时增大角度分辨率, 但是会造成空间分辨率降低, 又会降低测量精度.

2) 分析光场重聚焦视觉测量方法测量精度公式可知, 它的测量精度满足

$$\Delta D \propto D^2 / F'^2 \quad (23)$$

式中 ΔD 为测量误差, D 为场观点真实距离, F' 为像距大小. 由式(23)可知, 光场重聚焦视觉测量方法误差跟像距平方成反比和实际距离平方成正比. 因此, 为了尽可能提高精度, 需要减小目标实际距离; 此外, 可以通过增加重聚焦分层数来减小测量误差; 然而, 增大分层数需要增大主透镜孔径大小和减小像元大小, 虽然通

过增大孔径,可以减小重聚焦间隔,从而提高了像距的精度,但是主透镜孔径大小是受限于制造工艺,改变孔径大小,相机硬件的成本会相应提高。

3.2 环境因素以及随机误差影响

除了上述相机制造工艺等结构变量的影响以外,光场视觉测量方法还受到图像噪声等随机误差的影响,同时还受到场景的纹理、遮挡以及高光等环境因素的影响。

1) 对于光场重聚焦的视觉测量方法,利用重聚焦原理从光场信息中渲染出一系列焦堆栈图像以后,深度测量问题转换成了清晰度评价函数对焦堆栈图像进行质量评价问题。同样光场信息受到噪声因素以及光照条件的影响,然而不同清晰度评价函数对于噪声以及光照的敏感性和鲁棒性不一,因此需要研究鲁棒性清晰度评价算法进行测量。例如:Roberts gradients, Laplace operator, Tenengrad function 三种清晰度评价函数对散焦图像的敏感性不同,因此可以通过选取抗噪性强、对散焦敏感性强的清晰度评价函数对焦堆栈图像进行评价,从而通过减小随机误差来提高最终测量精度。此外,重聚焦测量方法像距获取也是一个难点问题,清晰度评价函数可以准确评价最清晰图像的位置,但是初始像距也很难确定。由于清晰度评价函数受噪声和环境因素影响较大,因此重聚焦视觉测量方法误差较大。

2) 对于光场 EPI 视觉测量方法而言,场景点的深度变成了斜率检测问题,EPI 视觉测量方法除了跟结构变量相关还跟随机误差^[19]相关,在随机误差无法控制情况,只能通过提高 EPI 直线斜率检测算法的精度来提高测量精度;因此学者们提出了运用建立匹配代价函数以及“赢者通吃”算法^[20]提取最优倾斜角度,从而获取精确的深度信息。实际测量过程中,解码后的光场信息包含大量的噪声,生成的 EPI 图像的直线跟理想直线误差较大,因此基于光场 EPI 视觉测量方法测量精度较低。

3) 对于光场双目视觉和多目视觉测量方法测量精度的问题都转化为视差匹配精度的问题,同样受到噪声以及光照条件的影响。在光场相机结构参量固定情况下,只能通过减小随机误差的影响来提高精度。目前有 MultiRBF、TSGO、IGSM、KADI 等高精度的立体匹配算法,它们对噪声以及环境变换鲁棒性较高,因此可以运用这些立体匹配算法进行光场子孔径图像的匹配来提高视差匹配精度,从而可以提高光场双目和多目视觉的测量精度。

综上,光场视觉测量方法的精度主要受光场相机工艺结构变量和检测算法的影响,一方面从光场相机制造工艺出发,解决像元大小,微透镜阵列大小问题;另一方面,需要从算法上着手,提出效率更高、鲁棒性更好的视差匹配算法、直线检测算法、清晰度评价算法来弥补光场相机硬件上的不足。

3.3 视觉测量方法测量范围分析

1) 光场重聚焦测量方法范围

根据 Ng.^[21-22]可知,如果高分辨率光场图像能够进行重聚焦,则 α 满足式

$$|\alpha \Delta x| \geq |(1-\alpha)\Delta u| \Leftrightarrow \frac{\Delta u}{\Delta u + \Delta x} \leq \alpha \leq \frac{\Delta u}{\Delta u - \Delta x} \quad (24)$$

式中, Δx , Δu 分别为相机空间抽样频率和方向抽样频率。

将式(24)带入式(7)可得,光场重聚焦测量方法的测量范围为

$$\frac{L \cdot F \Delta u}{F \Delta u - L \Delta u + L \Delta x} \leq S \leq \frac{L \cdot F \Delta u}{F \Delta u - L \Delta u - L \Delta x} \quad (25)$$

式(25)即为光场聚焦测量可测目标范围,因此场景目标点的实际距离满足式(25)条件时,才能使用重聚焦视觉测量方法。当目标点满足可测目标范围时,进一步对测量的精度进行分析。

如果重聚焦分层的间隔为 β ,由式(24)可知,重聚焦图像序列的数量为

$$N = \frac{1}{\beta} \left(\frac{\Delta u}{\Delta u - \Delta x} - \frac{\Delta u}{\Delta u + \Delta x} \right) \quad (26)$$

由式(26)可知,将重聚焦测量范围平分为 N 等分,因此光场重聚焦测量方法的精度为

$$\frac{F \cdot L (\Delta u^2 - \Delta x^2) \cdot \beta}{2 \Delta x (F \Delta u - L \Delta u + L \Delta x)} \leq \Delta S = \frac{S}{N} \leq \frac{F \cdot L (\Delta u^2 - \Delta x^2) \cdot \beta}{2 \Delta x (F \Delta u - L \Delta u - L \Delta x)} \quad (27)$$

式(27)即为光场重聚焦视觉测量方法的测量精度。由式(27)可以看出,在光场相机相机空间抽样频率和方向抽样频率固定情况下,重聚焦分层的间隔 β 决定了光场重聚焦测量的精度,重聚焦分层数越大,测量的误差

越小.

2) 光场双目视觉、EPI 视觉方法以及多目视觉测量范围

受光场相机工艺影响,光场相机的微透阵列大小以及焦距都有一个固定范围,假设微透镜阵列中任意两个微透镜最长和最短的基线分别为 $u_{\max}D/2, u_{\min}D/2$, 因此,光场立体视觉测量方法的测量范围为

$$\frac{\mu_{\min}D \cdot f}{2x} \leq d(x) \leq \frac{\mu_{\max}D \cdot f}{2x} \quad (28)$$

式(28)为光场立体视觉测量方法的目标范围.因此在测量过程中,当目标定满足可测目标范围时,光场双目视觉、EPI 视觉测量方法的误差范围为

$$\frac{2d(x)^2}{\mu_{\max}D \cdot f} \epsilon \leq \Delta d(x) \leq \frac{2d(x)^2}{\mu_{\min}D \cdot f} \epsilon \quad (29)$$

然而,对于多目视觉测量方法而言,虽然是由多个视角组成的测量系统,但是跟光场双目视觉有着很多相似之处.多目视觉测量方法测量范围与精度同样受微透镜阵列大小和主透镜焦距的限制.假设微透镜阵列中任意两个透镜最长和最短基线分别为 $u_{\max}D/2, u_{\min}D/2$, 因此,由式(19)可知,光场多目视觉测量方法的误差范围为

$$\frac{2G(x)^2}{\mu_{\max}D \cdot f} \delta \leq \Delta E_T(x) \leq \frac{2G(x)^2}{\mu_{\min}D \cdot f} \delta \quad (30)$$

式(29)为光场双目视觉以及 EPI 视觉测量方法的误差范围,式(30)为光场多目视觉测量方法的误差范围.另外,光场视觉测量精度还受相机焦距的影响,在实际距离以及微透镜基线长度固定情况下,光场相机焦距影响视觉测量方法的测量范围和精度.

实际上由于光场相机结构的限制,相机的主透镜焦距和微透镜阵列大小等结构参数都有特定范围或大小, Lytro ILLUM 光场相机的等效焦距为 30~250 mm, 且其实际焦距为

$$9.5 \text{ mm} \leq f \leq 77.8 \text{ mm} \quad (31)$$

对于光场相机多目视觉测量方法而言,立体匹配误差小于等于 1 个像元大小,经测量光场相机像元大小为 7.4 μm , 假设选取基线最长的视角组合形成多目视觉测量系统,目标实际距离为 1 400 mm, 则由式(30)可得测量误差为

$$8.47 \text{ mm} \leq \Delta E_{T1}(x) \leq 69.40 \text{ mm} \quad (32)$$

式(32)即为在目标距离为 1 400 mm 情况下,在光场相机可调焦距范围内,多目视觉测量方法理论测量误差范围.此外,光场相机微透镜阵列大小决定了视角组合基线的长度,在固定焦距情况下,不同视角基线长度对最终测量误差影响也很大,经过测量微透镜阵列基线范围为

$$1.60 \text{ mm} \leq B = \mu D/2 \leq 30.00 \text{ mm} \quad (33)$$

假设多目视觉测量系统等效焦距固定为 80 mm, 且目标实际距离为 1 400 mm, 由式(30)可得测量误差范围为

$$19.28 \text{ mm} \leq \Delta E_{T2}(x) \leq 361.47 \text{ mm} \quad (34)$$

式(34)即为目标距离为 1 400 mm 情况下,在光场相机不同基线长度情况下,多目视觉理论测量误差范围.

综上所述,通过对光场视觉测量方法结构变量误差和随机变量误差以及测量范围的分析可知:1)光场 EPI 视觉测量、光场立体视觉测量、光场多目视觉测量方法都基于立体视觉测量方法原理.它们的测量精度都跟实际距离的平方成正比,跟透镜焦距和基线长度成反比,在光场相机微透镜焦距固定情况下,如果要提高测量精度,尽可能选择较长基线的视角组合.实际测量过程中,EPI 视觉测量问题最后变成了 EPI 图像直线斜率的检测问题,在相机结构参量固定情况下,只能通过减小随机误差以及环境因素对测量的影响,因此,通过选取精确的斜率检测函数来提高测量精度;对于光场双目和多目视觉测量方法,测量精度问题变成了立体匹配精度的问题,同样在结构变量固定情况下,可以利用高精度的视差匹配算法能够减小匹配误差,从而提高最终测量精度.2)光场重聚焦视觉测量方法跟传统的对焦测量方法类似,它是利用光场相机重聚焦的特性生成一系列的焦堆栈图像来进行测量.它的测量误差跟实际距离的平方成正比,跟像距的平方成反比.在实际测量过程中,重聚焦测量方法精度问题变成了清晰度评价函数检测精度问题,在实际距离和透镜焦距固定情况下,只能通过选择高效的清晰度评价函数找到重聚焦时最优像距的位置,从而来提高测量精度;然而

实际过程中噪声因素以及环境变化对清晰度评价函数检测的精度影响很大,因此基于光场重聚焦的视觉测量方法误差很大.3)对于测量范围而言,四种光场视觉测量方法的误差都跟实际距离成正比,距离越大,误差越大,当实际距离达到可测范围之外时,光场相机的空间分辨率不能满足要求.因此,光场相机远距离测量误差很大,目前只适合近距离测量.

4 实验验证与分析

为了验证误差理论推导和分析的正确性,分析了光场视觉测量方法跟基线长度、焦距大小以及实际距离等结构参量的关系.

4.1 实验设置

实验使用的 PC 机配置为 Core i7-4770k CPU 3.5 GHz×8 cores, RAM 16 GB, Windows7 64 位操作系统,编译软件为 MATLAB 2014a、Halcon12 和 Visual Studio 2012;采用的设备有 LytroILLUM 光场相机、五维坐标平移台、40 cm×40 cm 标定板,实验场景图见图 13.

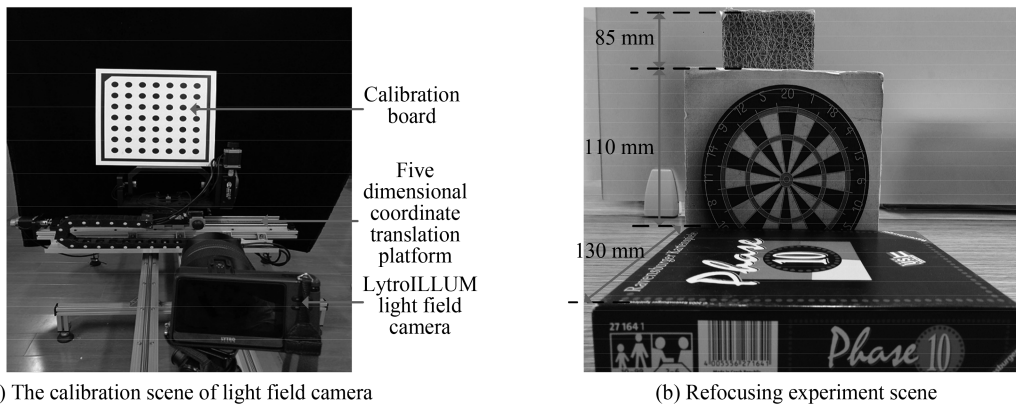


图 13 实验设备与场景

Fig.13 Experimental equipment and scenes

为使结果精确性更高,实验中进行了多次测量,记录测量结果,并用平均绝对误差来衡量四种视觉测量方法的距离误差,计算公式为

$$\text{Error} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |D_{\text{estimation}} - D_{\text{truth}}| \quad (35)$$

式中, n 为同一距离下测量的次数,实验中 $n=4$, $D_{\text{estimation}}$, D_{truth} 坐标为目标距离的估计距离和真实距离.

4.2 实验结果与分析

4.2.1 四种光场视觉测量方法误差跟实际距离关系的验证

为了验证不同测量方法误差跟实际距离的关系,对于光场立体视觉测量方法和光场 EPI 视觉测量方法需要固定相机基线和焦距.实验中,在光场双目和多目视觉测量方法和 EPI 测量方法中相机主透镜等效焦距 F 固定为 80 mm,微透镜基线 B 固定为 22 mm;光场重聚焦测量方法中,对渲染出的重聚焦图像序列,采用的是 Tenengrad 清晰度评价函数;光场 EPI 测量方法中,对生成的 EPI 图像直线斜率,利用 Hough 变换进行检测;首先用激光测距仪测量并记录出不同目标点的实际距离 Actual distance,然后用上述四种测量方法分别对目标点进行测量,最后计算出平均误差距离 Distance Error,不同距离下四种测量结果如图 14.

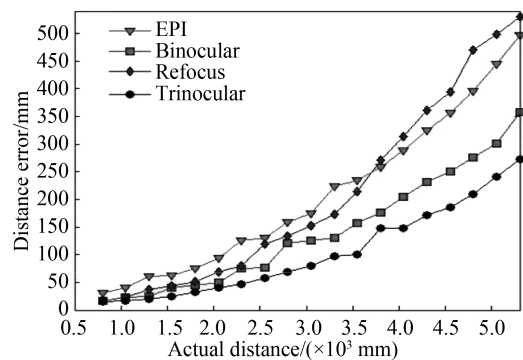


图 14 测量误差与实际距离关系

Fig.14 The relationship of measurement error and the actual distance

从图 14 可知,随着距离的增大,四种视觉测量方法的误差基本都满足二次函数增长规律;同时可以看出,光场多目视觉测量方法相对于其他三种测量方法精度较高.四种方法在不同距离下的测量误差数据如表 1.

表 1 不同距离下测量精度对比

Table 1 Measurement accuracy comparison of different distance

Actual distance D /mm	Measurement error/%			
	EPI	Binocular	Refocus	Trinocular
800	3.78	2.10	2.08	1.75
1 550	4.02	2.60	2.85	1.57
2 300	5.47	3.28	3.48	2.05
2 800	5.65	4.31	4.74	2.47
3 300	6.76	3.94	5.26	2.94
4 300	7.53	5.36	8.37	3.98

由表 1 可知,随着实际距离的增大,测量误差越来越大;此外,EPI 测量方法和重聚焦测量方法在超过 3 300 mm 以后,测量误差急剧上升,因此目标的实际距离是影响光场视觉测量的首要因素;光场多目视觉测量方法有较高精度,这是因为相对于两个视角测量系统而言,多视角组合测量方法是一种冗余的测量方法,增加多余视角能够有效减小测量误差,因此,光场多目视觉测量误差小于双目视觉测量误差,实验结果跟式(23)理论误差分析相符合.

4.2.2 光场视觉测量方法误差跟基线关系的验证

为了进一步分析不同测量方法误差跟微透镜基线的关系,需要固定目标点实际距离和焦距.实验中,光场相机离标定板目标点实际距离 D 固定为 1 400 mm,主透镜等效焦距 F 固定为 80 mm.如图 15 所示,将光场信息解码以后,通过选择不同视角子孔径图像组合来改变基线长度,在每组视角组合下,分别用 EPI 视觉测量、双目和多目视觉测量方法分别对固定目标点距离进行测量,然后得出平均误差距离 Distance Error.假设视差匹配误差为 1 像素大小,并得出理论误差曲线,实验结果和理论误差曲线如图 16.不同基线下测量的误差数据如表 2.

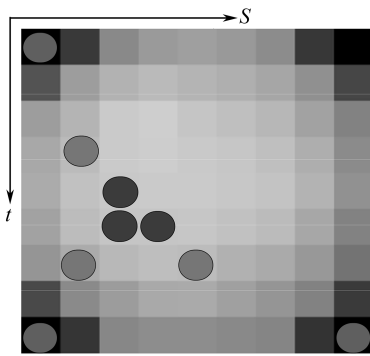


图 15 不同基线长度的视角组合

Fig.15 Views combination of different baseline

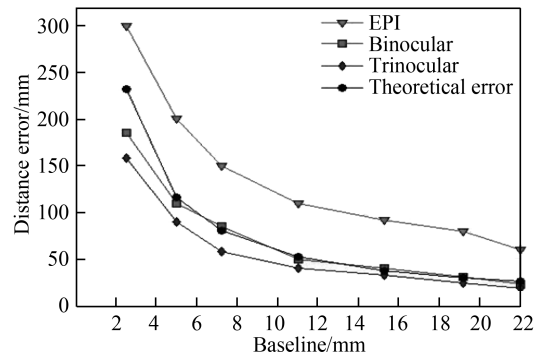


图 16 测量误差与透镜基线关系

Fig.16 Measurement error of different baseline

由图 16 可知,微透镜基线越短,测量误差越大.随着不同视角组合的基线越来越小,光场 EPI 视觉测量方法、双目视觉和多目视觉测量方法误差呈增大趋势.

表 2 不同基线下测量精度对比

Table 2 Measurement accuracy comparison of different baseline

Baseline length B /mm	Measurement error/%		
	EPI	Binocular	Trinocular
22.0	4.30	1.72	1.45
19.2	5.72	2.22	1.79
15.3	6.58	2.88	2.39
11.2	7.87	3.56	2.89
4.9	14.31	7.80	6.44
2.5	21.45	13.27	11.33

分析图 16 和表 2 可知,随着基线的减小,测量误差会随之变大.当视角组合的基线小于微透镜基线一半长度时,三种测量方法的误差都会急剧变大,实验结果验证误差理论分析的正确性;因此,在利用这三种光场视觉测量方法时,为了尽可能提高测量精度,需要选择基线较长的视角组合进行测量.

4.2.3 光场视觉测量误差跟主透镜焦距关系的验证

为了分析不同测量方法误差跟主透镜焦距的关系,需要固定目标点实际距离和基线长度.实验中,光场相机离标定板特定目标点实际距离 D 固定为 1 400 mm,选择水平基线最长的视角进行测量,即基线 B 固定为 22 mm.调节主透镜焦距,从小到大变化,在不同焦距下分别用 EPI 测量、双目和多目视觉测量方法分别对目标点进行测量,最后得出平均误差距离 Distance Error.假设视差匹配误差为 1 像素大小,并得出理论误差曲线,实验结果与理论误差曲线如图 17.

因为在实际测量过程中,标定板实际距离固定在 1 400 mm 左右时,当焦距大于 120 mm 以后,无法获取整个标定板图像,从而无法标定和距离测量.

因此本组实验只研究了主透镜焦距为 30~120 mm 的情况.由图 17 可以看出,在标定板目标点实际距离和相机基线长度固定情况下,随着主透镜焦距的减小,测量误差越来越大.

综上三组实验与可知,实验结果验证了光场视觉测量方法精度跟主透镜焦距、基线长度以及实际距离等结构参量的关系.

5 结论

本文对光场视觉测量方法误差的影响因素进行了分析,通过实验验证了光场视觉测量方法的精度跟实际距离、基线长度、焦距等结构参量的关系.实验测量误差与理论分析具有相同的变化趋势,在光场相机有限结构条件,多目视觉比双目视觉误差更小,利用光场多视角的特点,采用多个视角组合的测量方法具有更高的测量精度;光场相机测量误差还跟透微透镜基线长度和焦距有关,增大主透镜的焦距,同时选择较长基线的视角组合进行测量能够有效提高测量精度;另外,由于相机基线较短,远距离测量误差较大,目前只适合近距离测量.

本文系统分析了结构参量误差、随机误差对光场视觉测量方法测量误差的影响,但是只定性分析了随机误差对光场视觉测量方法精度的影响,实际上纹理结构、遮挡、光照环境对生成的 EPI 图像结构、焦堆栈图像的质量影响也很大,从而影响了直线检测精度、立体匹配精度以及清晰度评价函数精度,进而影响光场视觉测量方法的测量精度;下一步将通过理论研究和实验两部分分析纹理结构、遮挡、光照环境对光场视觉测量误差的影响.

参考文献

- [1] NG R, LEVOY M, BRÉDIF M, *et al.* Light field photography with a hand-held plenoptic camera[J]. *Computer Science Technical Report*, 2005, **2**(11): 1-11.
- [2] GEORGIEV T, LUMSDAINE A. Focused plenoptic camera and rendering[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, **19**(2): 021106.
- [3] KIM M J, OH T H, KWEON I S. Cost-aware depth map estimation for Lytro camera[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, IEEE, 2014: 36-40.
- [4] LI J, LU M, LI Z N. Continuous depth map reconstruction from light fields[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, **24**(11): 3257-3265.
- [5] TAO M W, SRINIVASAN P P, MALIK J, *et al.* Depth from shading, defocus, and correspondence using light-field angular coherence[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, 2015: 1940-1948.
- [6] XU Y, JIN X, DAI Q. Depth fused from intensity range and blur estimation for light-field cameras[C]. *IEEE*

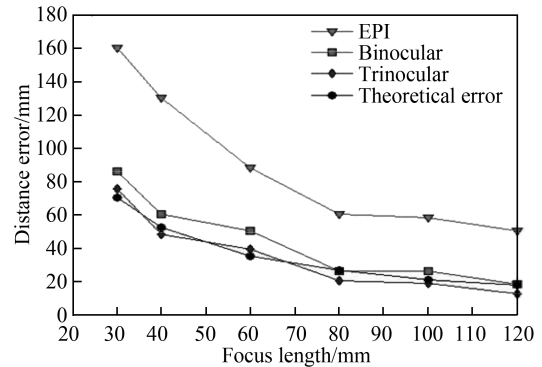


图 17 测量误差与主透镜焦距关系
Fig.17 Measurement error of different focus length

- International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE, 2016: 2857-2861.
- [7] JEON H G, PARK J, CHOE G, *et al.* Accurate depth map estimation from a lenslet light field camera[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2015: 1547-1555.
- [8] FU W, YAN F, CHEN K, *et al.* Scene distance measurement method based on light field imaging[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(20): 6237-6243.
- [9] HAHNE C, AGGOUN A, HAXHA S, *et al.* Light field geometry of a standard plenoptic camera[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(22): 26659-26673.
- [10] CHEN Y, JIN X, DAI Q. Distance measurement based on light field geometry and ray tracing[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(1): 59-76.
- [11] BAKER H H, BOLLES R C. Generalizing epipolar-plane image analysis on the spatiotemporal surface[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1989, **3**(1): 33-49.
- [12] SCHECHNER Y Y, KIRYATI N. Depth from defocus vs. stereo: How different really are they? [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, **39**(2): 141-162.
- [13] XU Y, ZHAO Y, WU F, *et al.* Error analysis of calibration parameters estimation for binocular stereo vision system [C]. IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, 2014: 317-320.
- [14] ZHAO Lian-jun, LIU En-hai, ZHANG Wen-ming, *et al.* Analysis of position estimation precision by cooperative target with three feature points[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(5): 1190-1197.
赵连军,刘恩海,张文明,等. 单目三点位置测量精度分析[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(5): 1190-1197.
- [15] HUO Ju, CUI Jia-shan, WANG Wei-xing. Error analysis of monocular visual position measurement based on coplanar feature points[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0512003.
霍炬,崔家山,王伟兴. 基于共面特征点的单目视觉位姿测量误差分析[J]. *光子学报*, 2014, **43**(5): 0512003.
- [16] LEVOY M, HANRAHAN P. Light field rendering[C]. Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM, 1996:31-42.
- [17] WANNER S, GOLDLUECKE B. Globally consistent depth labeling of 4D light fields[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society, 2012: 41-48.
- [18] PAPPAS T N. Single lens 3D-camera with extended depth-of-field[C]. SPIE, 2012, **8291**(1): 829108.
- [19] LÜKE J P, ROSA F, SANLUIS J C, *et al.* Error analysis of depth estimations based on orientation detection in EPI-representations of 4D light fields[C]. Information Optics, IEEE, 2013: 1-3.
- [20] LV H, GU K, ZHANG Y, *et al.* Light field depth estimation exploiting linear structure in EPI[C]. IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops, IEEE, 2015: 1-6.
- [21] WANG Xiang-jun, BIAN Yue-xin, LIU Feng, *et al.* Optimization of structural parameters of binocular vision system in remote 3-D coordinate measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(10): 2902-2908.
王向军,卞越新,刘峰,等. 远距离三维坐标测量中双目视觉系统结构参数的优化[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(10): 2902-2908.
- [22] NG R. Fourier slice photography[C]. ACM SIGGRAPH, ACM, 2005, **24**(3): 735-744.