

一种基于合成孔径聚焦图像的目标测距方法

陈广东 孙红梅 陈 智

(南京航空航天大学无人机研究院,南京,210016)

摘要:基于合成孔径聚焦图像提出一种新的目标测距方法。该方法利用小孔成像模型摄像机获取与目标视线垂直的等间隔线阵机位图像序列,并将线阵与目标视线交点处机位的图像作为基准图像。根据图像序列获取各距离段所对应的像差校正叠加图像,计算基准图像中每个像素的邻域与每一幅像差校正叠加图像中相应区域的相似度,并选取相似度随像差校正叠加图像变化的范围大于一预设阈值的像素作为可测距像素,相似度最大的像差校正叠加图像所对应的距离段即为该可测距像素对应目标点所处的距离段。对合成孔径原理进行了仿真分析,并根据摄像机线阵实测数据和航拍序列实测数进行了测距实验。实验表明该测距方法鲁棒性好,算法简单,并且无干扰。

关键词:聚焦测距;摄像机线阵;合成孔径

中图分类号:V241.62

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2014)04-0573-07

Target Distance Measurement Based on Synthetic Aperture Focusing Image

Chen Guangdong, Sun Hongmei, Chen Zhi

(Research Institute of Unmanned Aircraft, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A novel method is proposed to obtain the target depth. A sequence of images is taken by linear camera arrays spreading perpendicularly to the line of sight. The image from the camera at the intersection of the linear camera array and the line of sight is selected as the reference image. The measurable range is divided into several distance segments. For each segment, a parallax correction stack image is calculated, then the regional similarity of the reference image and the stack image is got. The target distance is in the segment which has maximum similarity of the reference image and the stack image. Without image matching, depth from synthetic aperture focus has good robustness and can not be influenced by single image error or deviation. Simulation results verify the efficacy of this scheme. Moreover, the range precision is also analyzed. Without electromagnetic pollution, the method has the advantages of concealment.

Key words: depth from focus; camera linear arrays; synthetic aperture

视觉测距作为机器视觉领域内基础技术之一,广泛应用于机器视觉定位、目标跟踪、视觉避障等领域,尤其是作为视觉导航和伺服控制中不可或缺的基础技术受到广泛的关注。机器视觉测量主要分为:单目视觉测量、双目视觉测量、结构光视觉测量等。单目视觉不存在特征点匹配等问题^[1-7],且由于结构简单、运算速度快而具有广阔的应用前

景。单目视觉距离的分辨率与光学镜头孔径正相关,要获得高的距离测量精度,就需用大孔径镜头成像。大孔径光学镜头除制造难度大外,成像面移动、镜头孔径(光圈)张缩等动作需做机械运动,使用不便。在光学镜头的生产制造技术实践中,人们很早就意识到光学镜头大孔径可看成由诸多子孔径合成而来。合成孔径原理早已被国内外业界知

晓,但与信号处理相结合的应用却时间不长。在成像载体为胶片和模拟信号感光器的年代,人们主要在光学和机械系统中利用合成孔径方法改善光学镜头的性能,例如菲涅耳透镜^[8]。数字化成像设备的普及给合成孔径处理带来了巨大便利,近年欧美日韩在这一领域进行了前沿性研究。

本文根据合成孔径原理,将多机位小孔成像合成为大孔径图像,与单镜头成像效果一致,并且用数字图像处理方法实现成像面的灵活移动及镜头孔径(光圈)的灵活张缩。同时应用单目聚焦原理得到距离信息。实验表明航拍图像序列处理及移动摄像机图像序列处理都可采用合成孔径原理获得深度信息。

1 合成孔径聚焦测距原理

大孔径镜头成像时,通过镜头各部位的入射光线经镜头折射后,目标光线重新会聚,在成像面成二维像。若将入射光线按所通过的子孔径分离成像,再用信号处理方法叠加,就得到合成孔径像,成像结果与大孔径镜头成像一致。图1(a)显示目标点 p_1 经大孔径光学镜头聚焦在成像面上;图1(b)显示距光心线 r 处有一子孔径,经过此子孔径成像, p_1 仍聚焦在画面中心,而另一距离处的目标点 p_2 成像距画面中心存在像差 ϵ ,它与 r 线性正相关。图1(c,d)显示全孔径成像时, p_1 为一点,而 p_2 成像为一圆,它由各子孔径成像组成。因此本文将各子孔径像按一定规则叠加,得到合成孔径像。它具有大孔径镜头成像的特征,可以应用单目测距的方法测量合成孔径目标的距离。形成合成孔径像时,并没有要求图1(d)大孔径圈中所有子孔径像都参与计算,只需部分子孔径像参与叠加计算,就能形成合成孔径效应。

图2为摄像机线阵,各摄像机成像符合小孔成像模型,线阵摄像机则可看成大孔径镜头的线阵子孔径。

合成孔径聚焦立体视觉的 $2N+1$ 个相同摄像机 C_n 平行放置, $n=-N, \dots, 0, \dots, N$, C_0 为基准摄像机,所有摄像机均匀固定在长度为 $2NB$ 的横杆上,摄像机间距为 B ,基准摄像机 C_0 在横杆中心。摄像机的镜头方向与横杆垂直,所有摄像机中轴线共面平行,因此,摄像机 C_n 与基准摄像机 C_0 的基线为 nB 。

各摄像机坐标系的原点是各自镜头的光心; Z

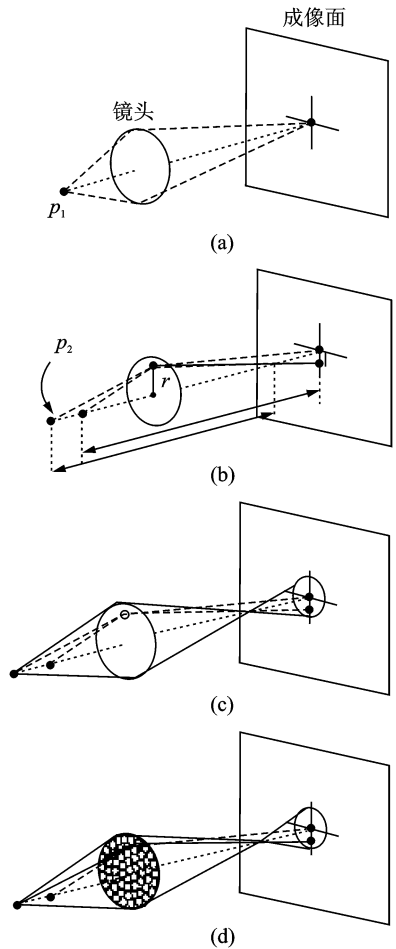


图1 合成孔径聚焦成像

Fig. 1 Synthetic aperture imaging focus



图2 合成孔径聚焦立体视觉摄像机线阵

Fig. 2 Camera linear array for synthetic aperture focusing stereo vision

轴通过光心指向场景点方向,且垂直于图像平面; X 轴通过光心沿着基线方向; Y 轴通过光心垂直于另外两轴,这三者满足右手定则。设: x_n 为目标点 P 在各图像坐标系中横坐标; z 为 P 到摄像机主平面的距离; nB 为基线长度; f 为焦距,则由几何关系可以得出摄像机 C_n 与基准摄像机 C_0 的像差为

$$x_0 - x_n = \frac{nBf}{zL_c} \quad (1)$$

式中 L_c 为靶面像素距离。

若基准摄像机 C_0 的图像为 $s_0(x, y)$,则合成孔径叠加图像为

$$s_\Sigma(x, y) = \sum_{n=-N}^N s_0\left(x - \frac{nBf}{L_c z}, y\right) =$$

$$\sum_{n=-N}^N s_0 \left(\frac{Bf}{L_c z} \left(\frac{L_c z}{Bf} x - n \right), y \right) h(n) = s_0(x, y) \times h \left(\frac{L_c z}{Bf} x \right) \quad (2)$$

式中

$$h(n) = \begin{cases} 1 & -N \leq n \leq N \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

为合成孔径像素扩散核。与光学孔径不同,合成孔径核扩散范围可以很大,扩散方式可以是离散的,扩散维和方向也可以人为设计。式(1)移位是亚像素级,可以使合成孔径像聚焦在任意距离处,即成像面可以任意移动。直接将所有图像叠加所得合成像对无穷远处目标聚焦。摄像机线阵长度 $2NB$ 为合成孔径长度,舍弃线阵两端摄像机图像可类比于缩小了合成镜头的光圈。由于线阵相邻摄像机基线很短,减轻了视点不同造成的遮挡图像变化。

2 合成孔径聚焦成像仿真

仿真使用 17 台黑白摄像机线阵,摄像机间距 3 mm,各摄像机模型为针孔摄像机,640 像素 \times 480 像素,靶面 4 mm \times 3 mm,靶面像素间距 $L_c = \frac{4}{640} = \frac{1}{160}$ (mm),焦距 4 mm。采用小孔成像模型仿真 3 个垂直杆目标,由垂直排列的单个点目标组成,亮度相同,位于摄像机线阵前 50,30 和 19 m 处,在画面中分别处于上,中,下位置,如图 3 所示。

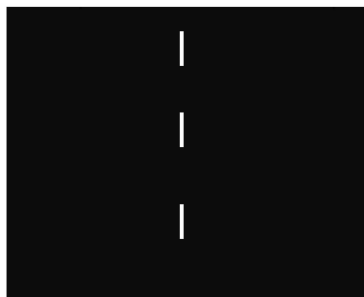


图 3 仿真合成孔径目标基准像

Fig. 3 Synthetic aperture objective reference image simulation

图 4 分别为聚焦 50,30 和 19 m 处杆目标时,叠加图像中各目标成像情况。由图 4 可见,对某距离处目标聚焦时,其余目标沿线阵基线向散焦,距离差距越大,散焦越严重,但图像能量保持守恒。由图 4 (c)可见,散焦严重时可能出现散焦像不连续的情况。将 $2N + 1$ 个摄像机图像按式(1)确定的偏移量移位后叠加,得到的图像中:景深 z 处场

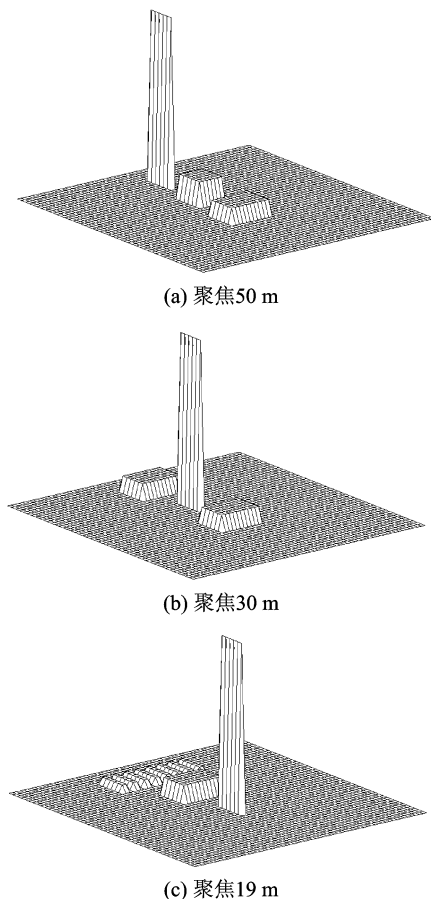


图 4 合成孔径图像空域聚焦测距法

Fig. 4 Distance indication by focusing synthetic aperture image

景图像没有发生错位,图像清晰,得到良好聚焦,信息熵保持良好,与基准图相似度高,图像锐度较大,基线向梯度起伏大;而景深不是 z 的场景图像错位叠加时图像水平向散焦,图像锐度减低,与基准图相似度小,基线向梯度相对平缓。考察杆目标像与基准图相似度、锐度或沿基线向梯度,能区分点目标像能量的聚散程度,分割出聚焦点目标,获得目标距离值。但由于图像锐度和边缘分布强弱差异较大,弱信号易受强信号干扰。相似度在抗信号强弱差异上表现较好。

3 合成孔径图像序列的采集

合成孔径聚焦立体视觉要求获得同一目标不同机位的多个图像,对光照、摄像机差异、噪声等有较强的适应能力。图像序列可以来自摄像机阵列,也可以是同一摄像机移位分时拍摄。实际上航拍图像序列处理、移动摄像机图像序列处理,也可采用合成孔径原理获得深度信息。

图5为不同机位拍摄合成孔径图像序列,拍摄用摄像机为超景深的小孔镜头,图像序列并非同时采集,各图像光照差异很大。



图5 合成孔径图像序列

Fig. 5 Synthetic aperture image sequence

图6为图像序列合成像,由于合成孔径直径比光学镜头大得多,所以微小的目标距离差异,也能造成明显的聚/散焦效应。图像序列合成像对单个图像光照、摄像机抖动、噪声等差异有明显抑制能力。聚焦测距允许合成像因误差造成聚焦像清晰度有所下降。



(a) 聚焦在近景处



(b) 聚焦在相对远景处

图6 图像序列合成像

Fig. 6 Composite image from image sequency

4 合成孔径目标深度图像计算

合成孔径散焦频域测距法^[9-10]和合成孔径聚焦空域测距法都能有效测量目标距离^[2],但二者处理数据方式不同。目标散焦像分布范围大于目标聚焦像,复杂场景、不同距离的目标散焦像互相重叠,这时用合成孔径散焦测距法就会出现信号污染,无法正确测距,合成孔径通常大于光学孔径,使这一现象更显著。合成孔径聚焦测距法只对特定距离目标聚焦,聚焦目标信号能量集中,受其他距离目标信号影响小,聚焦像能量集中在小区域,易于与其他距离目标区分,算法稳定,适于工程应用。

相比于用图像的锐度和梯度分割聚焦区和散焦区,用与基准图的相似度分割图像更为稳健。区域图像的相似度定义为

$$R_z(x, y) = \frac{\sum_{x, y} s_\Sigma(x, y) s_0(x, y)}{\sum_{x, y} s_\Sigma(x, y) \sum_{x, y} s_0(x, y)} \quad (3)$$

式中 (x, y) 为分区内像素坐标。

取边长为5个像素的方滑块,作为滑块中心像素邻域,在画面中由左至右,由上向下依次滑遍整幅画面,计算滑块内图像与基准图相似度 $R_z(x, y)$ 时,只需修正滑块滑动引起的边界变化像素对应的 $\sum_{x, y} s_\Sigma(x, y) s_0(x, y)$, $\sum_{x, y} s_\Sigma(x, y)$ 和 $\sum_{x, y} s_0(x, y)$ 变化即可,使得相似度计算效率极高。以有序间隔改变 z 值计算 $R_z(x, y)$, 重复上述过程,得到所有 z 值对应的 $R_z(x, y)$ 。

应用聚焦效应测距时目标区图像熵不能太小,即目标区图像要有一定信息量,否则不会产生聚散焦差别。图7为基准图信息熵分布二值图像,其中白色区域表示该区图像有足够的目标信息量,可以测距,而零值区表示该区图像没有足够的目标信息量,不可以测距。

以信息熵分割图像比较复杂,且受各个图像采样条件差异的影响。而本文通过考察 $R_z(x, y)$ 就可区分聚散焦差别,分割图像。熵小的图像其 $R_z(x, y)$ 随 z 变化小,反之则动态范围大。给相似度 $R_z(x, y)$ 动态范围设一门限,基准图中各像素领域区中, $R_z(x, y)$ 动态范围大于门限的目标测距才是有效测距,最大相似度对应的 z 值为该像素的距离。

本文测距方法流程如图8所示。



图 7 基准图信息熵分割

Fig. 7 Reference image segmentation according to its entropy of information

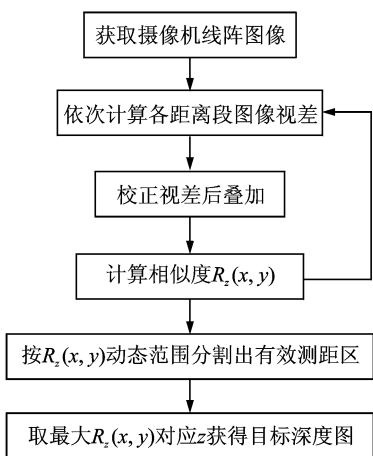


图 8 合成孔径聚焦立体视觉算法

Fig. 8 Stereo vision algorithm about synthetic aperture focus

图 9 为合成孔径目标深度图像,图中亮度表示目标深度,左侧亮度与距离对照表的尺度单位为 m。图 9 需与图 7 二值图比照,可得目标有效部位的深度。



图 9 合成孔径视觉测得目标深度图像

Fig. 9 Depth of the target image measured from synthetic aperture stereo vision

作为对比,只选择图 4 中的 1 号机位图和基准图,仍用本文算法测量距离。这时基于合成孔径聚

焦图像的目标测距方法成为一种双目视觉测距方法,由该方法测得目标深度图像如图 10 所示。由图 10 可见,深度图受到噪声干扰;如白色箭头指示,双目视觉不能同时看到的遮挡区不能测距。



图 10 双目视觉测得目标深度图像

Fig. 10 Depth of the target image measured from binocular stereo vision

5 航拍图像序列三维成像

图 11 为不同机位航拍图像序列。采样飞行高度 1 400 m,每秒拍 25 幅图像,飞行速度 80 m/s,共采集 125 幅图像,合成孔径长度为 400 m。

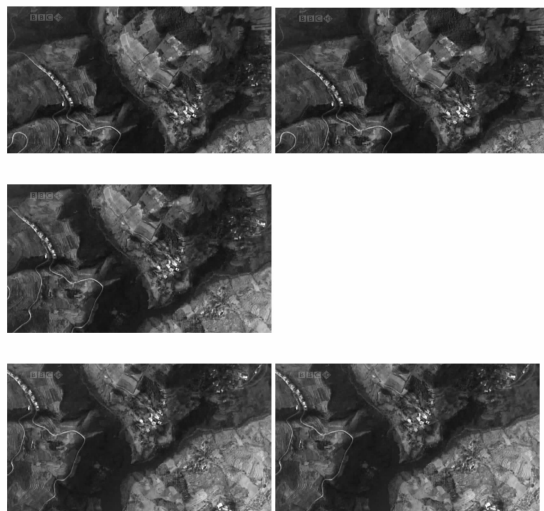


图 11 合成孔径图像序列

Fig. 11 Synthetic aperture image sequence

图 12 为图像序列合成像:图 12(a)为图像序列直接叠加像,采用单目视觉方法计算此图像的点目标扩散核^[11];图 12(b)为图 12(a)图像扩散核,根据扩散核线段的指向旋转图像,使图像序列合成孔径向转到水平向,然后可按前文方法测量地形表面高度;图 12(c)为聚焦在高(近景)处叠加像;图 12(d)为聚焦在相对低(远景)处叠加像。

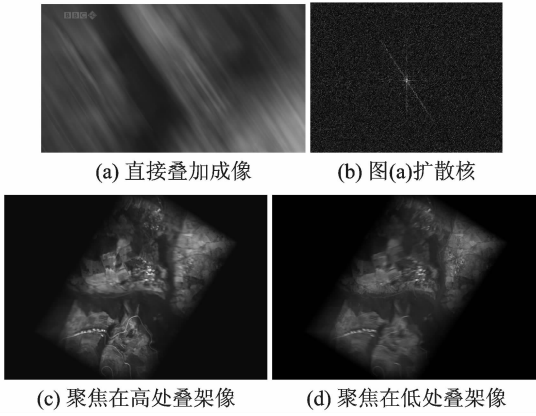


图12 图像序列合成像

Fig. 12 Composite image from image sequence

图13(a)为按本文方法得到的地形深度图像；对不能测距点插值补齐，经平滑滤波可得三维地形，如图13(b)所示，图中尺度单位为m；图13(c)为另一视点看到的与图13(b)相同区域的地形表面。

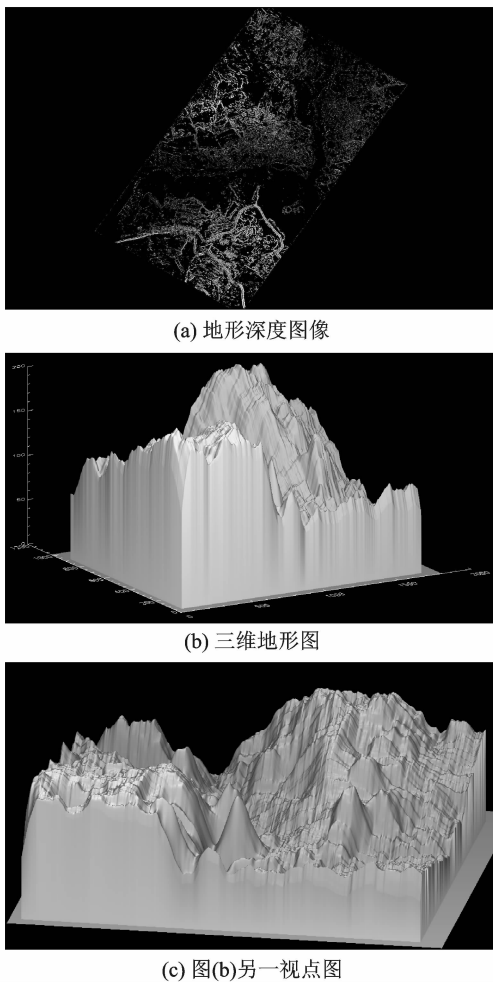


图13 航拍图像序列三维成像

Fig. 13 Three-dimensional imaging from Aerial photo sequence

6 测距精度和测距范围

由式(1)得

$$dz = \frac{z^2 L_c}{nBf} d(x_0 - x_n) \quad n = -N, \dots, 0, \dots, N$$

其中最小值为距离分辨率

$$dz = \frac{z^2 \sigma}{NBf} \quad (4)$$

它符合单目视觉距离测量分辨率特征^[1]。式中常数 $\sigma = L_c \cdot d(x_0 - x_n)$ 是可区分靶面视差(在实孔径单目视觉中为与靶面最小分辨单元有关的常数), L_c 由硬件决定; $d(x_0 - x_n)$ 是图像可区分像素视差,由算法决定,可达亚像素,即 $d(x_0 - x_n) \leq 1$,通常用1作为 $d(x_0 - x_n)$ 的评估值。式(4)表明距离分辨率与距离平方成正比,距离越远测距精度越差。由式(4)可见增加合成孔径长度 NB 或选用长焦距 f 可提高分辨率,但会带来测距范围变化。

测距最远距离理论值为无穷远,但测距分辨量为无穷大,没有实践意义,通常认为测距最远距离受目标可识别图像大小限制。

测距最近距离受测距死区限制,进入测距死区后,有部分线阵摄像机看不见目标,影响图像聚焦测距。摄像机分布密度,分布是否均匀影响非距离 z 处场景图像是否被均匀平滑。摄像机数量增加意味着计算量增加和系统误差增加。

7 结束语

合成孔径聚焦立体视觉摄像机数目多,在恢复3D场景时有更多的信息资源。本文提出的目标测距方法抛弃了图像匹配的过程,根据所有机位图像信息计算目标距离,结果受单个摄像机影响极小,目标测距鲁棒性好,且能实时处理。合成孔径聚焦测距需利用目标图像的纹理和边缘信息,若主动向目标区投影纹理图案,可使目标区图像信息熵合理分布,测距点符合需要^[12]。由于线阵相邻摄像机基线很短,平缓了视点不同造成的遮挡图像变化。航拍三维成像为飞行器掠地飞行创造了条件。

参考文献:

- [1] 黄桂平,李广云.单目视觉测量技术研究[J].计量学报,2004,25(4):314-317.
Huang Guiping, Li Guangyun. Evolution for monocular vision measurement[J]. Acta Metrologica Sinica, 2004, 25(4): 314-317.

- [2] Xiong Y, Shafer S. Depth from focusing and defocusing[C]//Proceedings CVPR'93, 1993 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York:IEEE, 1993:967-976.
- [3] Nayar S K. Shape from focus system[C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer vision and Pattern Recognition. Champaign, Illinois:IEEE, 1992:302-308.
- [4] Subbarao M, Tyan J K. The optimal focus measure for passive auto focusing and depth-from-focus[C]//Proceedings of SPIE Conference on Video Metrics. IY, PhiladelPhia:IEEE, 1995, 2598:89-99.
- [5] Rajagopalan A N, Chaudhuri S. Space-variant approaches to recovery of depth from defocused images[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 68(3):309-329.
- [6] Pentland. A new sense for depth of field[J]. IEEE Trans on PAM, 1987, PAMI-9(4):523-531.
- [7] Subbarao M, Gurulnoorthy N. Depth recovery from blurred edges[J]. CVPR, 1988, 88:498-503.
- [8] 陆汉民. 光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1987:782.
Lu Hanmin. Handbook of optical technique[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1987:782.
- [9] Watanabe M, Nayar S K. Rational filters for passive depth from defocus[J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 26(4):635-654.
- [10] Favaro P, Soatto S. A geometric approach to shape from defocus[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(3):406-417.
- [11] 董杰. 基于单目视觉的散焦测距算法的研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.
Dong Jie. Study on the algorithm of depth from defocusing based on monocular vision[D]. Qingdao:China Ocean University, 2010.
- [12] 王华. 高密度全场主动离焦三维测量方法的研究[D]. 成都:四川大学, 2004.
Wang Hua. A study for dense full-field measurement of active depth from defocus[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.