

水下距离选通成像多分辨率爬山自动聚焦法

游瑞蓉^{1,2}, 王新伟², 周燕²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083)

摘要: 针对水下距离选通激光成像图像模糊导致自动聚焦难的问题, 提出了多分辨率爬山自动聚焦法, 解决了系统实时聚焦问题, 获得了高清晰度高质量图片。该方法利用图像的多分辨率原理, 通过空间采样处理形成不同分辨率采样层, 减少数据量, 降低图像处理时间, 系统完成聚焦处理时间降低到约为传统方法的一半。进而利用帧间相关性对当前帧和相邻前两帧分别以 0.5, 0.3 和 0.2 的加权系数进行加权计算, 获得当前帧的边缘检测清晰度值, 近乎以 100% 正确率解决爬山法由于局部峰值干扰错误判断可能收敛到局部最大值而导致聚焦失败的问题, 最后利用爬山法实现自动聚焦。针对此方法进行多次选通系统实验验证, 结果证明: 该方法能够保证自动聚焦的速度和精度, 提高系统聚焦判定的实时性、准确性和鲁棒性。

关键词: 多分辨率爬山法; 自动聚焦; 距离选通成像; 实验验证

中图分类号: TP273.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0726003

Multi-resolution MCS auto focus method in range-gated imaging system for underwater

You Ruirong^{1,2}, Wang Xinwei², Zhou Yan²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A real-time, accuracy and robustness multi-resolution mountain climb servo (MCS) auto focus method was proposed in order to solve real-time auto focus problem, and was obtained high clear high quality image because low clear low light images was difficult to realize auto focus in range-gated imaging system for underwater. The merits of this method were outstanding as follows. It reduced the amount of processing data and time by taking advantage of the image multi-resolution theory by spatial sampling of the current image and then formed different resolution sampling layers, which made the system possible to deal with auto focus more quickly as 1/2 time as traditional method. Thereby, the method calculated current frame weighted average edge detection image definition, which was determined by the correlation between current frame and two adjacent frames with 0.5, 0.3 and 0.2 coefficients before solving the error judge of interference maximum local peak. At last, the method realized the last operation auto focus by MCS. The repeated experimental verification of range-gated imaging system for

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(61205019); 国家自然科学基金面上项目(61475150)

作者简介: 游瑞蓉(1991-), 女, 硕士生, 主要从事图像处理及电路与系统方面的研究。Email: youruir@semi.ac.cn

导师简介: 周燕(1972-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像、信号检测方面的研究。Email: zhouyan@semi.ac.cn

underwater shows that the algorithms is capable of guaranteeing the auto focus speed and accuracy and improving the real-time, accuracy and robustness in focus determination.

Key words: multi-resolution MCS; auto focus; range-gated imaging; experimental verification

0 引言

距离选通激光成像广泛应用于导航、远距离侦察、救援、勘探等民用和军事领域^[1-2]。对于水下成像,距离选通成像是目前最有效的光学成像探测手段^[3],可一定程度上抑制海水的后向散射,提高图像信噪比。但是对于大景深水下成像,水的后向散射仍然存在较大影响,导致图像模糊^[4],传统的自动聚焦技术难以有效聚焦,无法获取高清晰聚焦图像。目前,传统的自动聚焦主要有测距自动聚焦和聚焦检测自动聚焦。测距自动聚焦为主动式自动聚焦^[5],但外界物质对测距源有较强的吸收作用时,如红外光作为测距源时,系统将失灵或聚焦不准确;聚焦检测自动聚焦为被动式自动聚焦,自身不需要发射能量,耗能少,有利于小型化,但自身机构复杂,且容易受光照条件的制约,影响调焦。距离选通成像在水下利用激光作为主动照明光源,容易受到后向散射和水质影响,不适合测距自动聚焦,基于光电检测器或相位偏移量的 ICCD 价格昂贵,不适合聚焦检测自动聚焦。

基于图像处理的数字自动聚焦调焦相比传统聚焦智能化灵活化,能有效利用计算机控制来避开复杂电路和机构^[6],适用距离选通成像。数字自动聚焦寻找图像清晰度常用方法有遍历搜索法、黄金搜索法、Fibonacci 搜索法、函数逼近法、爬山法搜索等^[7]。其中爬山法简单,容易实现,是自动聚焦工程使用最广泛的一种方法。而爬山法本身对比度检测方法存在系统“过冲”的问题,需要在验证是否检测到最大对比度时返回最清晰的聚焦点;同时选用的 ICCD 镜头电机,利用串口发送命令时其电机转的圈数难以精确控制,仍然会存在聚焦位置误差;同时要求系统实时对物体进行检测。传统爬山法主要基于清晰度极大值法,但存在的问题是:基于清晰度极大值法可能会收敛到局部最大值;虽然有的爬山法引进阈值克服外界不确定因素引起的聚焦函数局部峰值波

动的干扰,但是没有说明如何在不同场景中调整到最佳阈值。针对以上两处缺点,在此提出改进多分辨率爬山自动聚焦法进行最大清晰度值搜索,兼顾系统工作的实时性、准确性和鲁棒性。

1 多分辨率爬山法

首先,距离选通切片成像过程中,利用其空间初定位特性目标物体进行变焦初始化。再对选通成像系统进行自动聚焦,系统不断采集当前视频流图像。如图 1 所示。

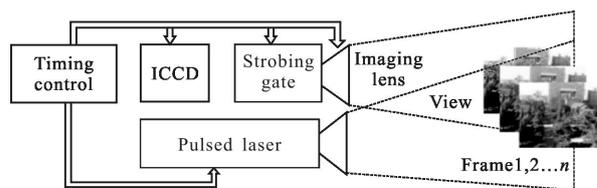


图 1 距离选通成像原理

Fig.1 Range-gated imaging system theory

1.1 图像多分辨率处理

多分辨率爬山自动聚焦法首先将采集到的视频图像利用图像多分辨率原理如图 2 所示,空间采样处理形成不同分辨率采样层,在较低分辨率层进行边缘检测算子清晰度计算。多分辨率处理通过减少处理像素数大大减小图像处理时间,保证算法速度。

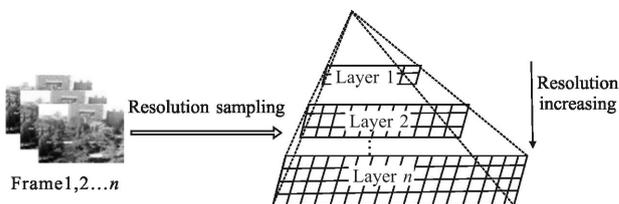


图 2 图像多分辨率原理

Fig.2 Image multi-resolution theory

1.2 爬山自动聚焦法

利用 1/2 变步长爬山法进行最大清晰度值图像帧的搜索,如图 3 所示,同时对镜头进行聚焦控制以及对上位机智能控制系统反馈。搜索具体步骤为:

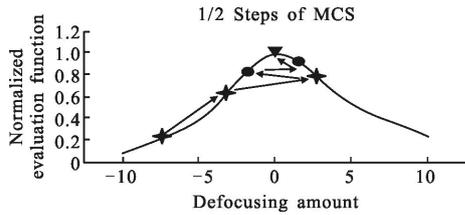


图 3 1/2 变步长爬山法示意图

Fig.3 1/2 variable step MCS schematic diagram

(1) 通过串口与驱动电路以默认离焦正方向变动聚焦马达,电机转动时间为 t ,如果当前清晰度大于前一幅,则串口命令一直保持同方向运动,直到当前清晰度小于前一幅。

(2) 减小电机转动时间(如 $1/2 t$),聚焦反方向操作。

(3) 当前图片清晰度再次小于前一幅,再次减小电机转动时间(如 $1/4 t$),聚焦反方向操作,不断重复。重复次数可由需要决定。

如果按默认方向,第二幅图片清晰度小于第一幅清晰度图片,则向反方向控制命令方向。其余循环步骤与上类似。

1/2 变步长爬山法大步进保证速度,小步进保证精度。

1.3 算法流程

多分辨率爬山自动聚焦法流程如图 4 所示。

- (1) 对当前目标物体进行初步选通。
- (2) 对步骤(1)选通后的视频图像进行多分辨率采样处理。
- (3) 利用边缘检测算子计算加权图像清晰度。
- (4) 利用 1/2 变步长爬山法循环逼近最大清晰度图像。
- (5) 返回最清晰聚焦点,输出聚焦图像。

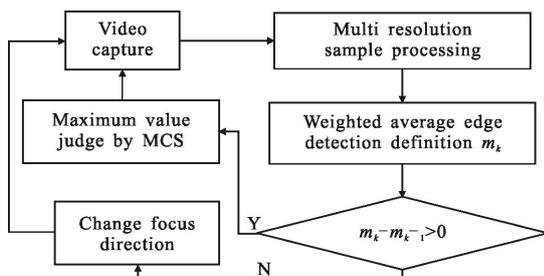


图 4 算法流程

Fig.4 Algorithm process

2 边缘检测图像清晰度

图像清晰度与边缘特征的关系是当系统成像清晰时,边缘点处的灰度阶跃性变化就大,利用边缘点灰度阶跃变化程度可评价清晰度。因此,利用图像边缘检测算法来构建清晰度函数。

针对基于边缘检测算子构建的清晰度函数,也就是聚焦过程中的聚焦评价函数进行实验分析。成像目标为 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 机器视觉标定板,材质为定制乳白色复合材料,分别用 Roberts、Sobel、Prewitt、Lap4、Lap8^[8]等多个边缘检测算子进行镜头在不同离焦量上的清晰度值计算。以 Lap4 边缘检测算子为例,其基于图像 $f(x,y)$ 在 (x,y) 方向上二阶偏微分近似得:

$$\nabla^2 f = [f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1) - 4f(x,y)] \quad (1)$$

模板表示为:

$$L_4(x,y) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

图像清晰度函数为:

$$J_{L_i} = \sum_M \sum_N L_i(x,y) \quad (3)$$

对 $M \times N$ 大小的图像中各点梯度求和,可表征图像清晰度。对聚焦位置前后采集的 9 帧图像计算得到各算子的清晰度值。归一化清晰度值为各图像清晰度值除以其中的最大清晰度值,如图 5 所示。其中横坐标为离焦量,0 表示聚焦清晰的位置,正方向为焦距变长方向,纵坐标为归一化清晰度值;同时,实验验证各边缘检测算子实验聚焦判断的准确度均为 100%;各算子实验聚焦判断的实时性,如表 1 所示。

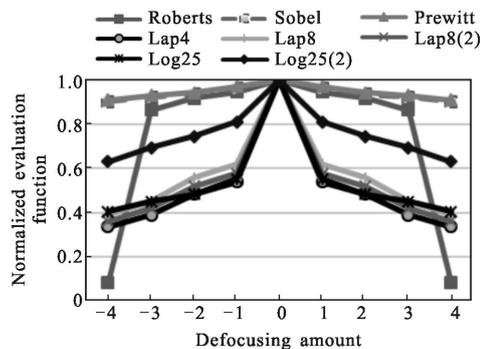


图 5 不同边缘检测算子的聚焦曲线

Fig.5 Focus curves of different edge detection operators

图中算子有(2)标记代表边缘检测算子模板为不同加权系数。

表 1 不同边缘检测算子的完成一帧检测时间比较 (单位:ms)

Tab.1 Comparison of time consumption with different edge detection operators(Unit:ms)

	Average time	Standard Deviation
Roberts	78.0	0
Sobel	242.6	7.7
Prewitt	241.9	7.9
Lap4	102.3	7.4
Lap8	183.7	10.0
Lap8 with different coefficients	187.3	9.7
Log25	261.8	9.83
Log25 with different coefficients	416	12.9

综合考虑以下 3 种因素:(1) 聚焦评价函数的基本要求。即单峰函数对同一组图片求其曲线,其最大值恰好对应最清晰的图像;在峰值两侧分别单调上升和单调下降;在峰值两侧的斜率绝对值应该比较大;由图 5 可以看出:Lap4、Lap8、Lap8 不同邻域算子、Log25 算子均表现出良好曲线特性。(2) 实验的判断准确性。实验中各算子均能正确判断离焦量为 0 的聚焦图片;(3) 系统工作的实时性。由表 1 可知 Roberts、Lap4、Lap8、Lap8 不同邻域算子实时性较好。Lap4 即拉普拉斯四邻域算子能正确判断聚焦图片且聚焦评价函数曲线性能最优,耗时位居第二,综合性能最优。拉普拉斯算子产生边缘较细,且对细线有较强的响应。拉普拉斯 4 邻域算子对于 90°旋转各向同性,对接近水平和垂直方向的边缘有很好的增强,从而避免梯度算子进行两次滤波的麻烦。

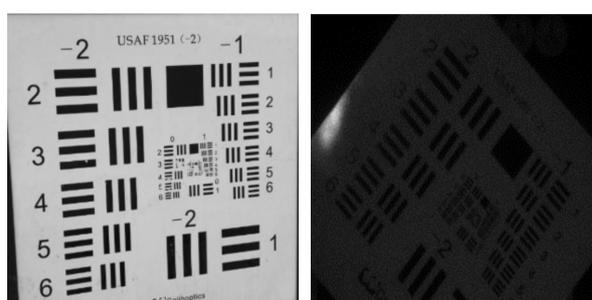
3 实验

距离选通成像系统主要由脉冲激光光源、选通像增强器(ICCD)和选通控制系统组成^[9]。上位机程序采用 Microsoft Visual Studio 2010 平台的 MFC 框

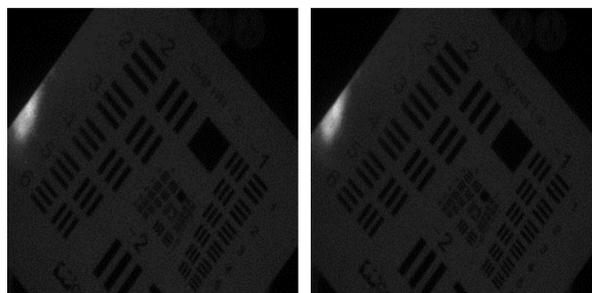
架编写,使用串口通信对镜头电机进行控制;下位机采用 Keil 平台 C 程序编写。

实验过程中,CCD 内触发产生 TTL 信号,时序控制系统在 CCD 高电平时分别为脉冲激光器、选通像增强器高速门控开关提供 TTL 信号;上位机利用多分辨率爬山自动聚焦法进行最大清晰度图像搜索,返回最佳合焦点图像。

实验结果如图 6、图 7 所示。图 6 中(b)~(d)图像清晰度归一化值分别为 1、0.967、0.982。图 7 中(b)~(d)图像清晰度归一化值分别为 1、0.991、0.936。



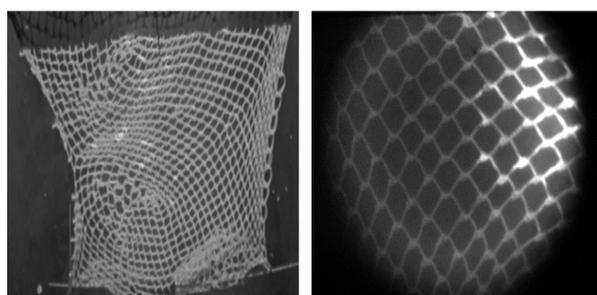
(a) 成像目标 (a) Target object image
(b) 实验聚焦图像 (b) Experimental focus image



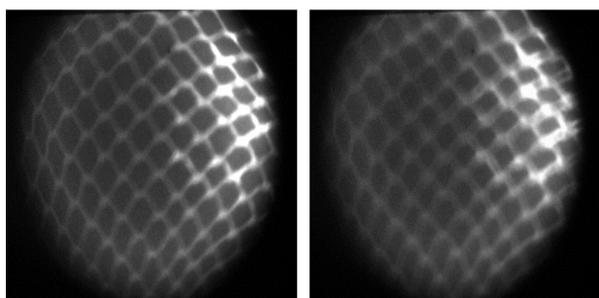
(c) 聚焦前一帧图像 (c) Previous frame of focus image
(d) 聚焦后一帧图像 (d) Next frame of focus image

图 6 距离选通成像机器视觉标定板聚焦结果

Fig.6 Computer vision calibration board focus result of experiment



(a) 成像目标 (a) Target object image
(b) 实验聚焦图像 (b) experimental focus image



(c) 聚焦前一帧图像 (d) 聚焦后一帧图像

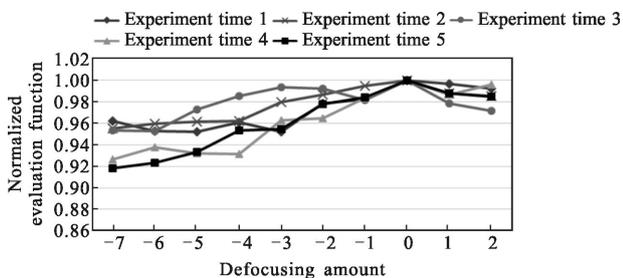
(c) Previous frame of focus image (d) Next frame of focus image

图 7 距离选通成像渔网聚焦结果

Fig.7 Fishing nets focus result of experiment

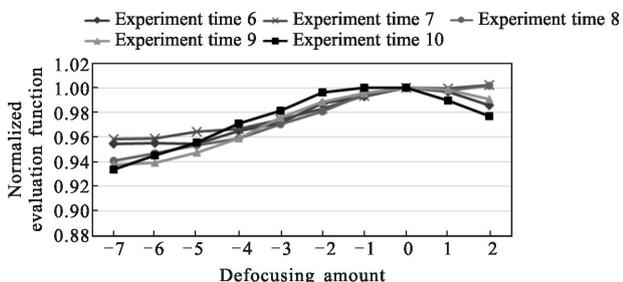
3.1 帧间相关性清晰度处理

由于 MCP 噪声, 激光器光照不均匀等各因素干扰, 实际清晰度值变化不呈现峰值两侧分别单调上升和单调下降, 局部峰值的干扰严重影响上位机对聚焦结果的判断。利用帧间相关性以当前帧和相邻前两帧以 0.5, 0.3 和 0.2 加权系数求解, 对同一场景进行重复聚焦实验, 原始图像清晰度曲线与帧相关加权清晰度曲线对比可知: 帧相关加权可使聚焦函数保证在两侧的单调性, 并且使峰值抖动减小, 保障自动聚焦判断的准确性, 如图 8 所示。



(a) 原始图像清晰度归一化值

(a) Original image definition normalized values



(b) 帧相关加权清晰度归一化值

(b) Frame correlation weighted definition normalized values

图 8 帧相关加权与原始清晰度归一化值比较

Fig.8 Definition normalized values comparison of original image and frame correlation

3.2 多分辨率实时性

比较多分辨率爬山自动聚焦法与传统爬山法, 同一幅场景进行自动聚焦, 重复实验次数 20 次, 多分辨率爬山自动聚焦法耗时少且变化稳定, 如表 2 所示, 说明此种方法能提高系统实时性。

表 2 不同自动聚焦法所耗时间比较(单位: ms)

Tab.2 Comparison of time consumption with different algorithms(Unit:ms)

	Traditional algorithm	Improved algorithm
Average time	4 875.3	2 592.6
Standard deviation	197.7	168.3

3.3 爬山自动聚焦法鲁棒性

同理, 比较两种方法测试结果正确率, 多分辨率爬山自动聚焦法正确率高于传统爬山法, 为 98.75%, 接近 100%。如表 3 所示。

表 3 不同自动聚焦法正确率比较

Tab.3 Comparison of right result with different algorithms

	Traditional algorithm	Improved algorithm
Average time	20	20%
Standard deviation	21%	98.75%

对其他目标成像采集了 20 组, 共 200 张左右不同场景不同离焦程度图片进行模拟聚焦。图像原始大小为 1360×1024 像素, 成像距离为 10 m, 场景包括:

- (1) 40 幅水下大渔网目标组图; 大渔网网目为 4 cm×4 cm, 网线粗 1.5 mm。
- (2) 20 幅水下小渔网目标组图; 小渔网网目为 2 cm×2 cm, 网线粗 1 mm。
- (3) 20 幅水下机器视觉标定板组图。

机器视觉标定板大小为 70 cm×70 cm, 材质为定制乳白色复合材料。

- (4) 120 幅(1)、(2)、(3)重复干扰下的组图, 如气泡、铁棒等。

实验中, 所以检测结果均准确, 耗时少, 重复性好。

4 结论

针对距离选通图像模糊, 文中对传统爬山法进行改进, 提出多分辨率爬山自动聚焦法。结合图像多

分辨率原理、边缘检测算子和帧间相关性实现目标图像聚焦功能。其优点主要有:(1) 利用图像的多分辨率原理,通过空间采样多分辨率处理减少处理像素数,大大减小图像处理时间,系统完成时间至少可以达到传统聚焦方法的一半,保证算法速度。(2) 利用帧间相关性以当前帧和相邻前两帧加权求解作为当前帧的清晰度值,选用 0.5、0.3 和 0.2 加权系数进行加权,有效解决了爬山法由于局部峰值干扰错误判断可能收敛到局部最大值问题,提高系统判断准确性。(3) 进行多次重复实验,实验结果稳定,系统鲁棒性优良。实验验证多分辨率爬山自动聚焦法大大提高了水下距离选通成像系统聚焦实时性、准确性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] Grigorios Tsagakatakis, Arnaud Woiselle, Marc Bousquet, et al. Multireturn compressed gated range imaging [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3): 031106-1.
- [2] Alexander Bulyshev, Farzin Amzajerdian, Vincent E Roback, et al. Three-dimensional super-resolution: theory, modeling, and field test results [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(12): 2583-2594.
- [3] Gianfranco Bianco, Alessandro Gallo, Fabio Bruno, et al. A comparative analysis between active and passive techniques for underwater 3D reconstruction of close-range objects [J]. *Sensors*, 2013, 13(8): 11007-11031.
- [4] Cao Yanan, Wang Xinwei, Zhou Yan. Spatical positioning fuzzy C-means algorithm in segmentation of range-gated image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2862-2866. (in Chinese)
- 曹忆南, 王新伟, 周燕. 距离选通激光成像空间定位模糊均值聚类分法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2862-2866.
- [5] Ahmed Abd Elhalek Azouz, Li Zhenfang. Improved phase gradient autofocus algorithm based on segments of variable lengths and minimum-entropy phase correction [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 9(4): 467-479.
- [6] Mo Chunhong, Liu Bo, Ding Lu, et al. A gradient threshold auto-focus algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 323-327. (in Chinese)
- 莫春红, 刘波, 丁璐, 等. 一种梯度阈值自动调焦算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 323-327.
- [7] HLC Chiu, CS Fuh. An efficient auto focus method for digital still camera based on focus value curve prediction model [J]. *Journal of Information Science and Enginerring*, 2010, 26(4): 1261-1272.
- [8] Zhang Zheng, Wang Yanping, Xue Guixiang, et al. Digital Image Processing and Computer Vision [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2014: 100-102. (in Chinese)
- 张铮, 王艳平, 薛桂香, 等. 数字图像处理与机器视觉[M]. 北京:人民邮电出版社, 2014: 100-112.
- [9] Lu Dezhen, Wang Xinwei, Fan Songtao, et al. ns-scaled time-coding method for real-time 3D Super-resolution range-gated imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(8): 1-5. (in Chinese)