

基于改进禁忌搜索算法的液体透镜系统优化设计

李正达 杨 波

(上海理工大学光电科学与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要 建立了一套最新的优化概念, 以便于液体透镜在一般光学系统中的优化设计。由于液体透镜拥有多个离散的变焦位置, 设计时不得不在其中选择多个位置作为阻尼最小二乘法(DLS)的初始优化点。而这些位置通常是由设计者凭经验来选择的, 不同的选择不仅会对设计过程带来不同的影响, 而且会给设计结果带来本质的不同。基于此提出了一套改进禁忌搜索(ITS)算法, 从而实现在 DLS 算法优化的过程中液体透镜变焦位置的自动选取, 从而得到更佳的成像效果。

关键词 光学设计; 像差优化; 改进禁忌搜索算法; 液体透镜

中图分类号 O43; TP39 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0822001

Study of Optical Design with Liquid Lens Based on Improved Tabu Search

Li Zhengda Yang Bo

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract For optimizing the optical system with liquid lenses, a new concept is proposed. Because liquid lenses have multiple discrete zoom locations, it is inevitable to select an initial solution for the damped least square algorithm (DLS) optimization process. The selection of the initial solution mostly depends on the experience of the designer. Thus different choices not only can bring the influence for different design processes, but also can bring difference in nature for the design results. To obtain a dynamic solution during the optimization process, an improved tabu search (ITS) algorithm with the DLS is proposed. The results show that automatic selection of zoom positions makes imaging effect better.

Key words optical design; aberration optimization; improved tabu search (ITS) algorithm; liquid lens

OCIS codes 220.3620; 220.1010; 220.2740

1 引 言

随着光学系统的不断轻量化、小型化, 许多研究者都在试图将液体透镜应用于小型的成像系统, 如此不但简化了原本的结构, 而且减少或者避免了机械调、变焦带来的速度慢、易磨损和调节不便等缺点。然而由于液体透镜的特殊属性, 在设计实际系统时将面临仅用阻尼最小二乘法(DLS)难以解决的困难^[1~3]: 1) 由于液体透镜固有的大色差与畸变, 使设计时用后续球面系统做补偿产生一定的困难。2)

液体透镜拥有多个离散的变焦点, 在使用多个液体透镜时选取不同变焦点进行优化对于设计者是相当不易的。3) 传统的调、变焦系统是依据机械凸轮的线性运动, 通过 DLS 优化的^[4], 由于液体透镜组的面型系数变化与光功率(焦距的倒数)呈非线性关系, 因此用 DLS 算法来优化是相当复杂的。提出了一套改进禁忌搜索(ITS)算法, 使系统在 DLS 优化中不断进行液体透镜变焦位置的选择, 从而得到更佳的成像效果。

收稿日期: 2012-01-09; **收到修改稿日期:** 2012-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(6110851)和上海市教委科研创新项目(10YZ98)资助课题。

作者简介: 李正达(1988—), 男, 本科, 主要从事光学工程方面的研究。E-mail: li_demonlee@hotmail.com

导师简介: 杨 波(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学工程方面的研究。E-mail: libobinfinland@hotmail.com

液体透镜不仅能用在变焦系统中,也可用在调焦系统中,取代原本的机械调焦延拓景深^[5]。文中设计了两个小型的照相光学系统来说明 ITS 算法^[6,7]在单液体透镜与多液体透镜时的不同实现。系统中使用的液体透镜是 Varioptics 公司的 ARCTIC 416^[8]。

2 改进禁忌搜索算法

禁忌搜索算法^[6,7]是一种局部搜索能力很强的全局迭代优化算法,已经被成功应用于各种组合优化问题中。禁忌搜索算法是一种局部搜索算法的演进,其模拟了人类思维模式,用禁忌的手段屏蔽了一些重复出现或不可能出现的条件,从而提高运算速度,避免使用枚举等方法带来设计的复杂和冗长,以及遗传算法^[8]的复杂实现过程。

2.1 单液体透镜的 ITS 算法

在实现算法前,首先要建立一个以调制传递函数(MTF, f_{MTF})值、横向色差(LC, f_{LC})与畸变(DIS, f_{DIS})为标准的评价函数(EVA)

$$f_{EVA}(z) = \sum_{A=1}^M \omega_z^A \left(\sum_{B=1}^N f_{MTF_z^B} / N \right) + \omega_{DIS} |f_{DIS}(z) - \theta_{DIS}| + \omega_{LC} |f_{LC}(z) - \theta_{LC}|, \quad (1)$$

式中 z 为多个变焦位置, M 为视场角的个数, N 为选取单个视场 MTF 曲线不同线对的个数, ω 为对于不同视场的权重。 ω 的选取可使用余消差补的办法,对于 EVA 贡献过大的视场自动消减它的权重,反之增加。其后的两项分别为系统在不同变焦位置的畸变量与横向色差, θ_{DIS} 、 θ_{LC} 分别为初始设定的阈值, ω_{DIS} 、 ω_{LC} 为此二项的权重,在评价函数中设此二项是为了限制液体透镜系统固有的色差与畸变,使得整个系统的优化能更快地收敛为最佳值。

在建立完评价函数之后,下一步便是以一种新的方式建立整个搜索域,即以液体透镜的变焦位置的个数建立一个多维的坐标,如有 2 个变焦位置,则建立一个二维坐标,3 个变焦位置则建立一个三维坐标,以此类推。而每个坐标轴的各个整数点为液体透镜半径的各个值的整数编码,即每个整数坐标对应一个液体透镜的半径值,如此做的原因是液体透镜的液面半径可唯一决定其参数的构成(液面的厚度等)。接着,可以把 R 作为半径的多维球体作为当前搜索域,即

$$(x_1 - a_1)^2 + (x_2 - a_2)^2 + \dots + (x_n - a_n)^2 \leq R^2, \quad (2)$$

其中 $a_1 a_2, \dots, a_n$ 为该坐标下的原点位置, R 的选取

决定搜索的范围,其大小直接影响运算的速度以及结果的正确性,当 R 取得大时,速度变慢,但准确性提高,反之则速度快,但准确性降低。一个拥有 3 个变焦位置的系统可建立如图 1 的搜索域。

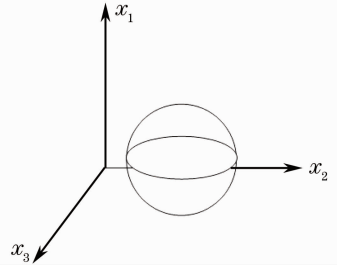


图 1 3 个变焦位置系统的搜索域

Fig. 1 Search field of a system with three zooms

当建立完评价函数和搜索域后,搜索算法的步骤为: 1) 选取一个随机值($a_1 a_2, \dots, a_n$),即为空间坐标中的一个点,作为初始解。2) 满足停止条件时则停止计算,否则在($a_1 a_2, \dots, a_n$)的当前搜索域里选取非禁忌集合 $Can_N(a_1 a_2, \dots, a_n)$ ^[6]中满足或者更优的解替代原解,更新非禁忌集合 $Can_N(a_1 a_2, \dots, a_n)$ 并以新的解为原点建立新的搜索域,重复步骤 2。其中禁忌表的建立则可以用多进制的方法把多维空间每个点存放在一个二维表中,以此表明已搜索过的坐标,非禁忌集合 $Can_N(a_1 a_2, \dots, a_n)$ 为禁忌表^[6]的补集。

2.2 多液体透镜的 ITS 算法

与单液体透镜系统相同,多液体透镜系统也使用相同的评价函数。但是在搜索域、禁忌表的建立方面则使用平面多点限制的方法^[10,11]。

此方法主要是分别把多个液体透镜的半径作为坐标系的整数点坐标,如此建立之后,再随机选取多个位置,它们分别代表不同的变焦位置。对于不同的变焦位置建立一个圆形搜索域,半径的大小可以随当前原点的评价函数值选取,评价函数值越小则搜索域的半径越大。其搜索算法步骤则与单个液体

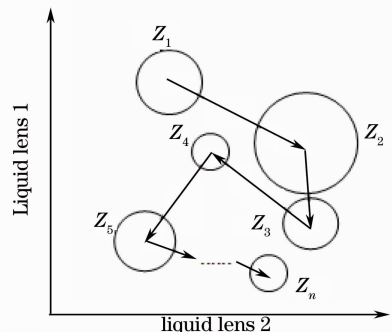


图 2 拥有两个液体透镜的系统

Fig. 2 System with two liquid lenses

透镜的 ITS 算法相同。图 2 是一个拥有两个液体透镜的系统,其变焦位置有 n 个。

2.3 优化流程

对于整个系统使用 DLS 与 ITS 结合的方法,流程如图 3 所示,首先对于初始系统使用 DLS 算法进行优化,再利用 ITS 算法选取最佳的液体透镜变化,之后判断系统是否已达到要求,从而决定是否进行下一轮的优化循环。反复进行此循环多次后,便能得到理想的设计结果。

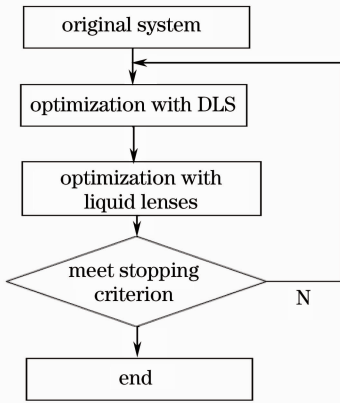


图 3 优化流程
Fig. 3 Process of optimization

3 设计结果

3.1 单个液体透镜系统的设计结果

为了控制像面的大小以满足成像面大小的需要,调焦系统应尽量使系统的有效焦距不变。单个

表 2 液体透镜的参数。(a) ITS 优化前的液体透镜参数;(b) ITS 优化后的液体透镜参数

Table 2 Parameters of the liquid lens. (a) Before the optimization of ITS; (b) after the optimization of ITS

(a)				(b)			
Object /mm	Radius /mm	Thickness of liquid lens /mm	Thickness of liquid lens /mm	Object /mm	Radius /mm	Thickness of liquid lens /mm	Thickness of liquid lens /mm
200 (zoom 1)	37.453	0.310	0.340	200 (zoom 1)	234.980	0.322	0.328
500 (zoom 2)	-149.100	0.328	0.322	500 (zoom 2)	-25.960	0.346	0.304
1200 (zoom 3)	-25.960	0.346	0.304	1200 (zoom 3)	-25.509	0.352	0.298
2000 (zoom 4)	-20.509	0.352	0.298	2000 (zoom 4)	-14.565	0.363	0.287

系统的 MTF 如图 5 所示。

由图 5 与表 2(a)可以看出,通过 DLS 算法优化的系统由于液体透镜初始位置的选取不当,影响了整个系统的像质。图 5(b)为使用 ITS 算法后的系统表现,由图 5(b)与表 2(b)可以看出,通过使用 ITS 算法可以自动的选择合理的液体透镜变焦位置,从而减少设计的工作量并取得理想的效果。

液体透镜照相系统的设计结果如图 4 所示,其设计参数如表 1 所示,其中包括:系统长度(OAL)、全视场角(FOV)、所使用 CMOS 的尺寸大小。横向色差、相对照度、畸变量,以及有效焦距(ELF)等。液体透镜相对于不同物距清晰成像时的参数如表 2 所示。

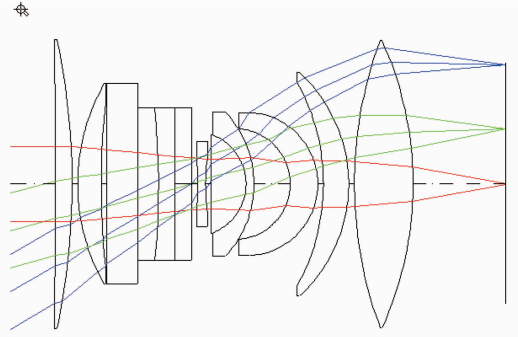


图 4 单个液体透镜照相系统的设计结果
Fig. 4 Result of digital camera with one liquid lens

表 1 结构数据

Table 1 Parameters of optical structure

Parameter	Value
OAL /mm	6.3
FOV /($^{\circ}$)	60
F	2.8
CMOS /mm 1/4 [#] MT9D11	3.56×2.6
Lateral chromatism / μ m	<2.6
Relative illumination	>57%
Distortion	<1.5%
ELF /mm	3.7
Property	all sphere surface

3.2 多个液体透镜系统的设计结果

同样,为了控制像面的大小,调焦系统应尽量使系统的有效焦距不变。由于液体透镜的底部孔径较小,所以将两个液体透镜相对放置,把孔径光阑置于两液体透镜底部的相接处,这样的设计更有效地利用了光能,以及限制了液体透镜的固有色差与畸变^[3]。两个液体透镜的照相系统的设计结果如图 6

所示,其设计参数如表 3 所示。

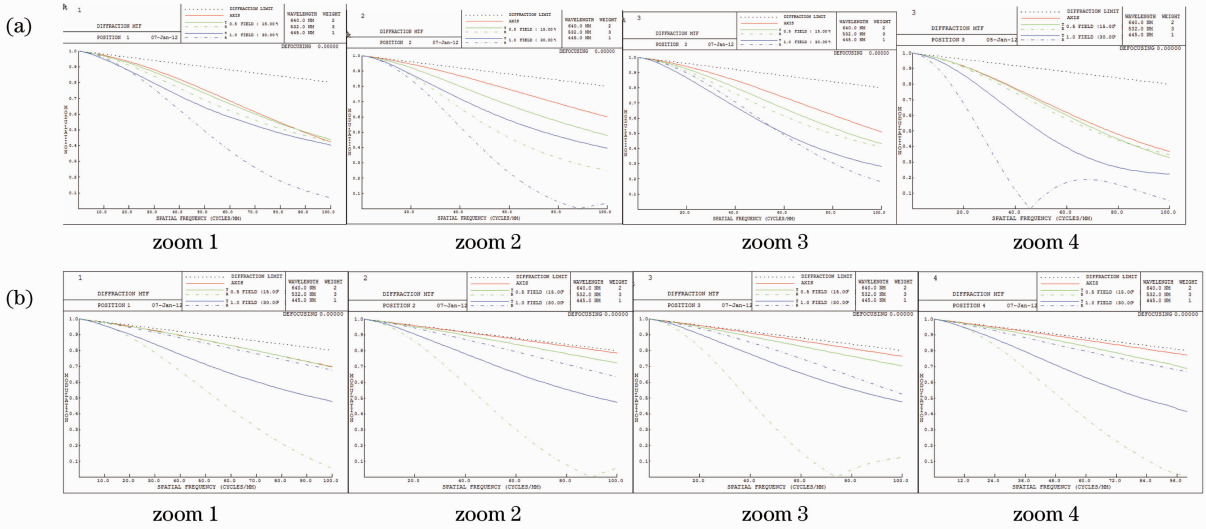


图 5 各个变焦位置的 MTF 值。(a) ITS 优化前系统的 MTF；(b) ITS 优化后系统的 MTF
Fig. 5 MTF of each zoom. (a) MTF before ITS optimization ; (b) MTF after ITS optimization

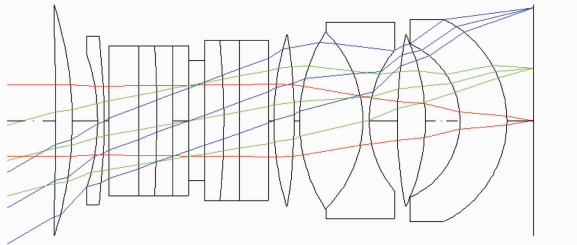


图 6 两个液体透镜照相系统的设计结果
Fig. 6 Results of digital camera with two liquid lenses

表 4 为 ITS 优化前后,两液体透镜的不同变化组合。其对应最终的像质变化如图 7 所示。

表 4 液体透镜组的参数。(a) ITS 优化前的液体透镜组参数；(b) ITS 优化后的液体透镜组参数
Table 4 Parameters of liquid lenses. (a) Before ITS optimization; (b) after ITS optimization

(a)				(b)			
Object /mm	Radius /mm	Thickness of liquid lens /mm	Thickness of liquid lens /mm	Object /mm	Radius /mm	Thickness of liquid lens /mm	Thickness of liquid lens /mm
100 (zoom 1)	11.670	0.279	0.371	100 (zoom 1)	37.453	0.310	0.340
500 (zoom 2)	16.230	0.282	0.358	500 (zoom 2)	-20.509	0.352	0.298
900 (zoom 3)	-25.960	0.346	0.304	900 (zoom 3)	-234.980	0.322	0.328
2000 (zoom 4)	-8.705	0.390	0.260	2000 (zoom 4)	-25.960	0.346	0.304

Object /mm	Radius /mm	Thickness of liquid lens /mm	Thickness of liquid lens /mm	Object /mm	Radius /mm	Thickness of liquid lens /mm	Thickness of liquid lens /mm
100 (zoom 1)	37.453	0.310	0.340	100 (zoom 1)	-11.670	0.279	0.371
500 (zoom 2)	25.960	0.346	0.304	500 (zoom 2)	-11.670	0.279	0.371
900 (zoom 3)	-16.230	0.292	0.358	900 (zoom 3)	-37.453	0.310	0.340
2000 (zoom 4)	-8.134	0.260	0.390	2000 (zoom 4)	-16.230	0.292	0.358

表 3 结构数据

Table 3 Parameters of optical structure

Parameter	Value
OAL /mm	8.5
FOV /($^{\circ}$)	50
F	2.8
CMOS /mm 1/4 $^{\#}$ MT9D11	3.56 \times 2.6
Lateral chromatism / μ m	<6
Relative illumination	>50%
Distortion	<3%
ELF /mm	3.75
Property	all sphere surface

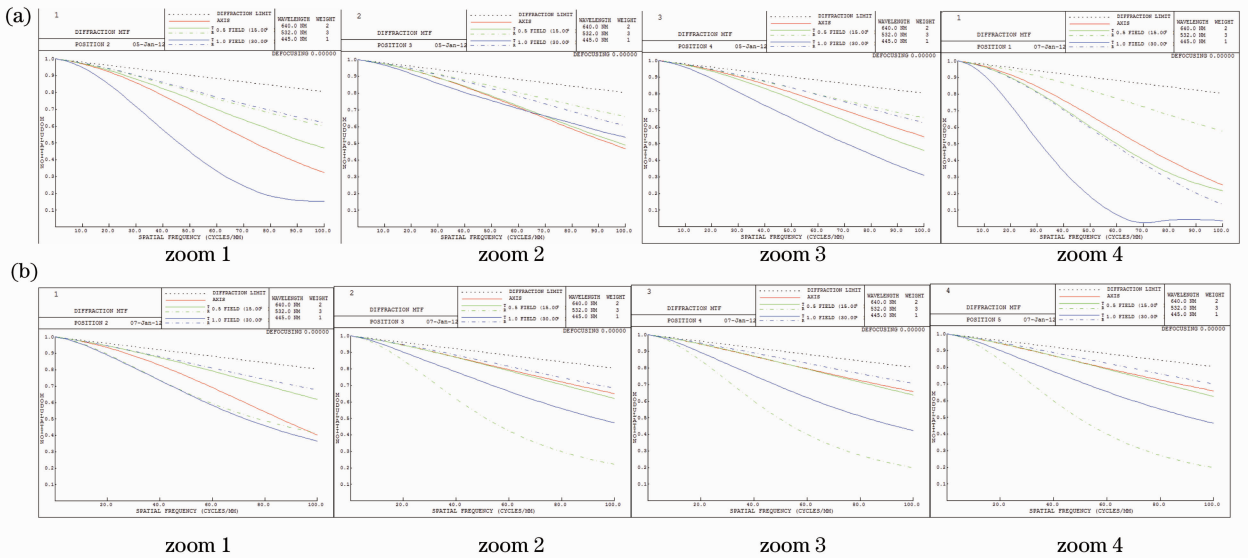


图7 各个变焦位置的MTF值。(a) ITS优化前系统的MTF; (b) ITS优化后系统的MTF

Fig.7 MTF of each zoom. (a) MTF before ITS optimization; (b) MTF after ITS optimization

由于多液体透镜的使用,从而使整个系统的复杂性大增。由于在多液体透镜的情况下,系统的调、变焦过程与液体透镜组的液面变化是非线性的^[1,3],所以由两个液体透镜所组成液体透镜组大约有几百种不同组合,若系统使用更多的液体透镜,则会面临以排列方式增长的数据量。如此,若使用传统的DLS加枚举的算法将带来庞大的计算量,但是,利用ITS算法在液体透镜的变焦位置动态选取液体透镜组的变化组合,并结合DLS算法的优化不但能取得理想结果,而且可以克服使用液体透镜组所带来的庞大数据运算。整个ITS算法只要使用CODE V的宏语言或者Visual C++就能完成,相对于遗传算法^[8],ITS对于编程更为简单。把它和DLS算法有效地结合在一起,可大大简化使用液体透镜系统的优化过程^[11],取得理想的结果,如图7(b)所示。

4 结 论

通过使用ITS算法简化了液体透镜的设计过程,而且此方法也可以使用在小型的嵌入式系统中,如手机相机等,只要结合自动变焦原理^[13]便可以快速的进行系统调焦、对焦,为液体透镜应用于普通设备提供了方便。

参 考 文 献

1 H. W. Ren, S. T. Wu. Variable-focus liquid lens[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 5931~5936

2 Wang Dazhen, Peng Runling, Chen Jiabi *et al.*. Variable focus hysteresis of double liquid variable focus lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612001
王大振, 彭润玲, 陈家璧等. 双液体变焦透镜变焦迟滞现象的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0612001

3 J. H. Sun, B. R. Hsueh. Optical design and multiobjective optimization of miniature zoom optics with liquid lens element [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(9): 1741~1757

4 Huang Cheng, Wen Tongqiang, Lu Jianhua *et al.*. Design of 2.5× zoom camera lens within cell phone [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(5): 47~52
黄 城, 温同强, 路建华等. 2.5倍光学变焦内置式手机摄像镜头的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(5): 47~52

5 S. Kuiper, B. H. W. Hendriks, J. F. Suijver *et al.*. Zoom camera based on liquid lenses, MOEMS and miniaturized systems VI[C]. *SPIE*, 2007, **6466**: 64660F

6 Xin Wenxun, Xie Jinxing. Modern Optimization Calculation (second edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. 51~76
邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法(第二版)[M]. 清华大学出版社, 2006. 51~76

7 F. Semet, E. Taillard. Solving real-life vehicle routing problems efficiently using tabu search[J]. *Annals of Operations Research*, 1993, **41**(4): 469~488

8 Y. C. Fang, C. M. Tsai. Miniature lens design and optimization with liquid lens element via genetic algorithm[J]. *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**: 075304

9 F. Glover. Tabu search, part II [J]. *ORSA Journal on Computing*, 1990, **2**(1): 4~32

10 F. Glover. Tabu search, part I [J]. *ORSA Journal on Computing*, 1989, **1**(3): 190~206

11 R. L. Peng, J. B. Chen, C. Zhu *et al.*. Design of a zoom lens without motorized optical elements [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(11): 6664~6669

12 S. Venkataraman, K. Peters, R. Hecht. Next generation digital camera integration and software development issues[C]. *SPIE*, 1998, **3302**: 76~82