

doi: 10.3788/gzxb20144304.0422002

基于对数极坐标映射的非均匀透镜阵列设计

曹杰, 郝群, 宋勇, 樊凡, 刘韬, 杨云翼, 高鸿勋

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘 要:提出了一种基于非均匀透镜阵列的对数极坐标传感器,通过建立数学模型,证明其具有非均匀采样与对数极坐标映射特性.通过仿真实验以及实例设计验证了模型的有效性,同时分析了非均匀透镜阵列的关键参量(盲孔半径 r_0 , 增长系数 q , 填充因子 η_i)对系统性能的影响,结果表明:1)盲孔半径 r_0 在每环透镜数量 N 相同的情况下,随着环数 M 的增加而减小;在 M 相同的情况下,随着 N 的增加而增大;2)填充因子 η_i 随 N 的增加而增加,当 $N \geq 40$, η_i 趋于极限值 $\pi/4$,选取 $N=40$,得到较为合理的环间增长系数 $q=1.106$. 所获得的实验结果为实现对数极坐标映射的非均匀透镜阵列设计奠定了理论基础,有利于实现一种新型对数极坐标图像传感器.

关键词:应用光学;非均匀透镜阵列;对数极坐标映射;非均匀采样;光学设计;数学模型;光学传感器

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0422002-6

Designing Non-uniform Lens Array Based on Log-polar Mapping

CAO Jie, HAO Qun, SONG Yong, FAN Fan, LIU Tao, YANG Yun-yi, GAO Hong-xun

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A novel log-polar image sensor based on non-uniform lens array was proposed in this paper. Non-uniform sampling and log-polar mapping were testified by building mathematic model. The validity of the model was verified by some design examples. Meanwhile, some key parameters were analyzed and simulated, including blank spot radius (r_0), growth coefficient (q) and fill factor (η_i). Several conclusions can be obtained from the simulation. r_0 decreases with M on the condition that N is unchanged and increases with N on the condition that M is unchanged. Meanwhile, η_i increases with N and tends to $\pi/4$ if $N \geq 40$. So, appropriate growth coefficient ($q=1.106$) was obtained on the condition that $N=40$. The results from the simulation support theoretical foundation for realizing log-polar transformation of based on non-uniform lens array and useful to design a novel log-polar image sensor.

Key words: Applied optics; Non-uniform lens array; Log-polar mapping; Non-uniform sampling; Optical design; Mathematical models; Optical sensors

OCIS Codes: 220.4830; 150.6044; 110.2970; 230.0230

0 引言

对数极坐标图像传感器基于笛卡尔坐标到对数极坐标映射,不仅实现了冗余数据的压缩,而且具有目标的尺度与旋转不变性^[1-2],极大地提高了光电探测系统对运动目标的识别速度与跟踪准确度,因而在机器人、智能监控、医疗等领域具有广泛的应用前景^[3-5].目前,已有的对数极坐标图像传感器可以分为软件与硬件两种方式,基于软件的方式主要是以算法将输入的一副

笛卡尔图像转换成对数极坐标图像^[6],此种方式结构简单,易于实现.但由于其本质仍然是在对笛卡尔坐标系下的图像做处理,因此数据运算量大,不适合高速、实时数据处理等应用场合^[7-9].与软件方式不同,基于硬件的方式可以直接实现对数极坐标转换,从而可有效地提高对数据的处理速度.目前,硬件方式主要基于CMOS工艺实现^[10],即:通过CMOS工艺形成不同尺寸的像素,但此种方法由于采用的非均匀像素,使得电路设计与工艺复杂,增加了研发周期与成本^[11-12];并且

基金项目:国防基础科研项目(No. A2220110005)和上海航天科技创新基金(No. 3040041110009)资助

第一作者:曹杰(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为激光三维成像、光学精密测量. Email:ajieanyyn@163.com

导师(通讯作者):郝群(1968-),女,教授,博导,主要研究方向为光学精密测量、光电传感及信息处理技术. Email:qhao@bit.edu.cn

收稿日期:2013-08-02;录用日期:2013-10-15

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

基于 CMOS 工艺实现的非均匀像素,由于其内部含有读取电路,增加了工艺的复杂性,使其会引入像素间的串扰^[13-14].

针对以上问题,本文提出了一种基于非均匀透镜阵列的对数极坐标图像传感器模型,并基于此模型设计非均匀透镜阵列,通过建立数学模型,证明其具有对数极坐标映射特性,并通过仿真实验,验证了模型的有效性,同时分析了关键参量对系统的影响,随着光学以及微光学加工技术的发展^[15-16],可为形成一种新型对数极坐标图像传感器提供有益设计参考.

1 对数极坐标图像传感器系统模型

1.1 系统建模

系统模型如图 1 所示,沿光轴方向从左至右分别是前置光学系统、非均匀透镜阵列、光电探测器.前置光学系统的主要作用是扩大对目标的成像距离,属于常规光学系统,不作为本文重点讨论内容.

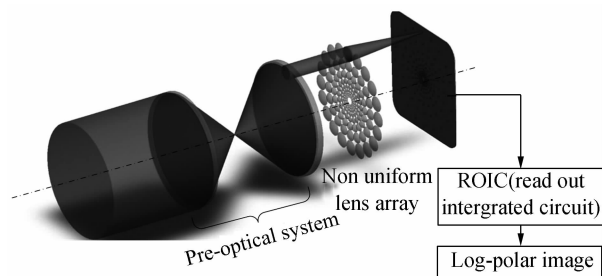


图 1 对数极坐标映射传感器模型

Fig. 1 The model of the log-polar mapping sensor

非均匀透镜阵列位于光电探测器阵列的前方,与光电探测器一一对应,采用相同尺寸探测器,可以有效地简化电路设计的复杂程度.光电探测器将接收到的光信号转换为电信号送入信号处理电路,信号处理电路按照一定的方式读出信号,从而实现了对数极坐标映射.为了进一步地研究系统的对数极坐标映射特性,下文基于该模型,描述其工作流程.

系统的工作流程分为三步:

1) 非均匀采样. 非均匀采样由非均匀透镜阵列实现,如图 2 (a) 所示,目标经前置光学系统的像面被非均匀透镜阵列分割,非均匀透镜阵列由 M 环,每环 N 个透镜构成,不同环内的透镜口径按照指数规律增长,同一环中的透镜口径相同且相邻环间透镜相切;在笛卡尔坐标系下, N 个光学透镜的圆心均匀分布在半径为 r_i 的圆环上,且圆环半径随环数呈指数增长 ($r_i = r_1 q^{i-1}$, q 为环间增长系数, r_i 为采样半径);

2) 光线汇聚与光电转换. 非均匀透镜阵列将对应的区域,聚焦在相应的光电探测器上,光电探测器的尺寸相同,与非均匀透镜阵列一一对应,将光信号转换成电信号;

3) 环形读取信号. 信号处理电路按照由内环到外

环的选通方式逐环读出,读出的结果即是对数极坐标图像,如图 2(b) 所示. 经过上述过程,便完成了从笛卡尔到对数极坐标的映射,图中,纵轴为 $\rho = \log_q(r)$, 横轴为角度 θ , 例如笛卡尔坐标下中的 (r_i, α_j) 元素,映射后为 (ρ_i, θ_j) 元素.

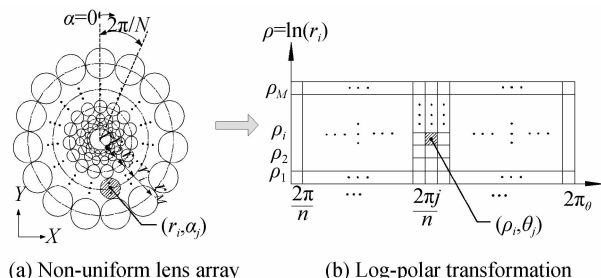


图 2 对数极坐标映射

Fig. 2 Log-polar mapping

根据上述系统的工作流程,建立对数极坐标传感器系统数学模型. 设笛卡尔坐标下,第 i ($i \leq M$) 环上第 j 个透镜对应坐标为 $(x_{(i,j)}, y_{(i,j)})$, 其极坐标可表示为

$$\begin{cases} r_i = \sqrt{x_{(i,j)}^2 + y_{(i,j)}^2} \\ \alpha_j = \arctan(y_{(i,j)} / x_{(i,j)}) \end{cases} \quad (1)$$

用复数 Z 表示, 可以将式(1)改写为

$$z_{(i,j)} = x_{(i,j)} + iy_{(i,j)} = r_i \cos \alpha_j + r_i \sin \alpha_j = r_i q^{i\omega} \quad (2)$$

令 $\rho_i = \log_q(r_i)$, $\theta_j = \alpha_j$, $\omega_{(\rho_i, \theta_j)} = \log_q(z_{(i,j)})$, 则式(2)转变为 $\omega_{(\rho_i, \theta_j)} = \rho_i + i\theta$. 由此可见,笛卡尔坐标下的圆形区域转换为对数极坐标下的矩形区域,采样过程可表示为

$$\begin{cases} r_i = r_1 \cdot q^{i-1} (i=1, 2, 3 \dots M) \\ \rho_i = \log_q(r_i) = \log_q(r_1) + i - 1 \\ \theta_j = \alpha_j = \frac{2\pi}{N} \cdot j (j=1, 2, 3 \dots N) \end{cases} \quad (3)$$

式中, M 、 N 代表非均匀透镜阵列包含 M 环, 每环 N 个透镜, q 为环间增长系数, r_i 为阵列中第 i 环透镜所在圆环的半径, α_j 为某环内第 j 个透镜中心与原点的连线与 x 轴的夹角, ρ_i, θ_j 为相应的对数极坐标下参量. 从上式可以看出,系统的工作流程是一个将笛卡尔坐标转换到对数极坐标的过程.

1.2 非均匀透镜阵列模型

1.2.1 透镜阵列结构

非均匀透镜阵列用于将物面进行非均匀采样,是形成对数极坐标映射的重要环节,因此,其参量设计对系统至关重要. 非均匀透镜阵列的结构如图 3 所示,其中每环内的透镜相切,同时,环与环之间也为相切,这从结构上模拟了人眼视网膜的非均匀采样机理,确定非均匀透镜阵列只需要确定其总体布局结构以及单透镜的参量,根据图 3 中的几何关系可以推导出式,其中, r_0 为盲孔半径, r_{\max} 为结构的最大半径, D_i 为透镜口径,其余参量同上,基于式(4),可求出每环透镜口径,从而进一步求解单透镜参量.

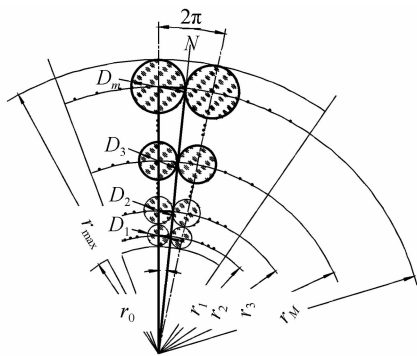


图3 非均匀透镜阵列结构

Fig. 3 The structure of the space-variant lens array

$$\begin{cases} r_1 = \frac{r_0}{1 - \sin(\pi/N)} \\ D_1 = \frac{2r_0 \sin(\pi/N)}{1 - \sin(\pi/N)} \\ q = \frac{1 + \sin(\pi/N)}{1 - \sin(\pi/N)} \\ r_i = q^{i-1} \cdot r_1 \\ r_{\max} = r_0 + \sum_{i=1}^M D_i = r_0 \cdot q^M \\ D_i = q^{i-1} \cdot D_1 \\ i = 2, 3, 4 \dots M \end{cases} \quad (4)$$

1.2.2 单透镜参量

单透镜可以设计成平凸或双凸形状,为了简化问题,同时考虑透镜阵列装配可行性,将其设计为平凸透镜.如图4所示,其中, R 为曲率半径, f 为透镜焦距, d 为光敏面尺寸, D 为透镜口径, l 为焦点至透镜底面的距离, h_i 为第*i*环透镜厚度, n 为折射率.相应的参量可表示为

$$\begin{cases} R = f(n-1) \\ h_i = R - \frac{\sqrt{4R^2 - D_i^2}}{2} + H \\ l = \frac{R}{n-1} - \frac{h_i}{n} \end{cases} \quad (5)$$

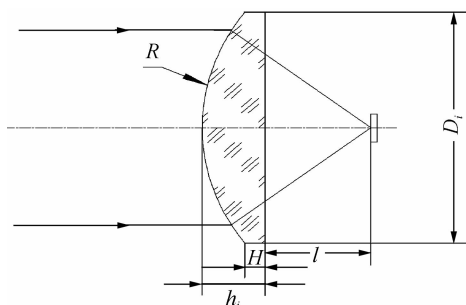


图4 单透镜模型

Fig. 4 The model of the single lens

1.2.3 填充因子

由于本系统采用的是透镜环切阵列结构,且每环中的透镜也相切,因此,在相邻环间的透镜之间会存在光信息丢失的区域,如图5(a)中的 ΔS_i ,这在一定程度

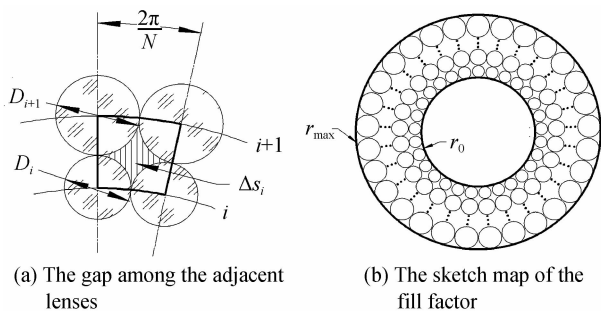


图5 系统填充因子

Fig. 5 The fill factor of system

上影响系统光能利用率,为了定量计算光信息的丢失情况,引入填充因子进行计算,填充因子是指透镜阵列中透镜底面积之和与总圆环面积之比,如式(6).式中, S 为 r_0 与 r_{\max} 圆环包围的面积, S_i 为非均匀透镜阵列底面积之和, η_i 为填充因子.从式(6)中可以看出 η_i 只与每环中透镜个数有关,与环数无关,在后续的仿真实验中详细讨论.

$$\begin{cases} S = \pi[(r_{\max})^2 - (r_0)^2] = \pi r_0^2 \cdot (q^{2M} - 1) \\ S_i = \frac{\pi N}{4} \cdot \sum_{i=1}^M D_i^2 = \frac{\pi N r_0^2 \cdot \sin^2(\pi/N)}{4} \cdot (q^{2M} - 1) \\ \eta_i = \frac{S_i}{S} = \frac{4[(r_{\max})^2 - (r_0)^2]}{N \cdot \sum_{i=1}^M D_i^2} = \frac{N \cdot \sin^2(\pi/N)}{4} \end{cases} \quad (6)$$

2 实例设计与参量分析

为了对建立的非均匀透镜阵列模型进行验证以及为透镜阵列的设计提供参考,本节对该模型进行了实例设计并对其关键参量进行分析.

2.1 实例设计

根据式(4)、(5)可将其参量分为输入与输出两部分,如表1、表2所示,其中参量 D_i 既是透镜阵列结构的输出参量,也是单透镜的输入参量,同时, r_0 、 r_{\max} 均能作为输入或输出参量,如果将其中一个作为输入参量,根据 M 、 N ,可以求出另外一个,反之亦然.这种设置方式有利于实际使用,比如:对于高分辨率的观察范

表1 非均匀透镜结构参量

Table 1 Design structure of non-uniform lens array		
Style of parameters	Symbol	Parametric description
Input parameters	M, N	Rings(M) Sectors(N)
	r_0/r_{\max}	Blank spot radius/Maximum radius of lens array
Output parameters	r_i	Radius of i th ring
	q	Growth coefficient
	η_f	Fill factor
	r_{\max}/r_0	Maximum radius of lens array/Blank spot radius
	D_i	Diameter of i th ring

表 2 单透镜参量

Table 2 Create single plano-convex lens

Style of parameters	Symbol	Parametric description
Input parameters	D_i	Diameter of i th ring
	n	Refractive index
	d	Dimension of photodetector
	f	Focal length of lens array
	l	Distance between back of lens and focal point
Output parameters	R	Curvature radius
	h_i	Thickness of lens

围有一定要求的情况,可以采用 r_0 作为已知设计参量,可以通过在传感器的中央放置常规高分辨率探测器实现,同时仍能够对周边信息进行压缩;对于系统总体结构尺寸具有一定限制的情况,选择 r_{\max} 作为设计参量更为合适.为使模型具有普适性,针对这两种情况,文中均有实例验证,在 2.1 节的实例设计中,采用的是 r_0 作为输入参量,在 2.2 节的关键参量分析中,采用的是 r_{\max} 作为输入参量.

针对表中的参量,进行了实例化验证,选取参量 $\{M, N, r_0, n, d, f\} = \{15, 40, 5, 1.5, 0.1, 8\}$ 求取透镜阵列的结构及单透镜参量,结果如图 6 所示,中央空白区域为盲孔区域,本例中的增长因子 $q = 1.23$,实际上, q 的取值可以根据实际需求设定,下文将对关键参量进一步讨论.通过仿真实验可以看出,根据提出的数学模型,能够建立相应的非均匀透镜阵列.

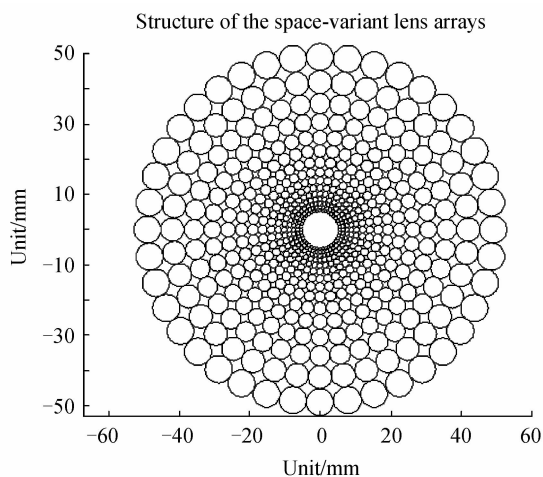


图 6 非均匀透镜阵列结构

Fig. 6 Non-uniform lens array structure

结合系统工作流程与实例中的非均匀透镜阵列结构进行系统模型仿真,仿真结果如图 7 所示,笛卡尔坐标下的目标(图 7(a)),通过非均匀透镜阵列(图 7(b), $M=15, N=40$),然后按照环选方式读取对应的像素,结果为图 7(c),即是对数极坐标图像.

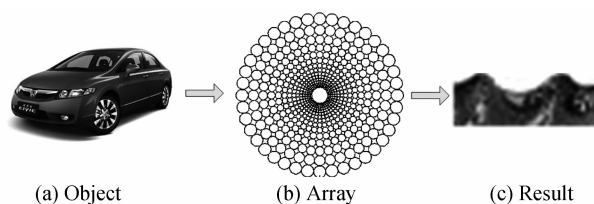


图 7 系统仿真

Fig. 7 System simulation

2.2 参量分析

综合考虑非均匀透镜阵列在实际应用中的需求,发现盲孔半径 r_0 、环间增长系数 q 、填充因子 η_i 对系统设计至关重要,应重点分析.首先,盲孔半径直接决定了能够观察到的最小目标,同时也影响着第一环透镜的口径;其次,对于环间增长系数 q ,由式(4)中的 $r_i = r_1 q^{i-1}$ 与 $r_{\max} = r_0 q$ 可看出环间增长系数 q 不仅影响着采样半径,同时影响透镜阵列的最大结构尺寸,而且,在透镜阵列环数为定值的条件下, q 越大,系统的压缩比率也越大;最后,根据上文分析,填充因子 η_i 一定程度上决定系统的光能利用率,虽然提高填充因子能够提高光能用率,但同时会增加每环透镜的数量,不利于提高系统的压缩比,因此,选择合适的填充因子非常重要,下文对以上三个参量逐一讨论.

2.2.1 盲孔半径

由公式 $r_0 = r_{\max}/q$ 可知,在 r_{\max} 一定的情况下, r_0 既与 M 相关,又与 N 相关,因此,可以通过选取不同 M, N 值求取 r_0 以满足要求.仿真实验条件为 $r_{\max} = 4$ mm, $M=1 \sim 30$, $N=10 \sim 100$, $n=1.5$,结果如图 8.

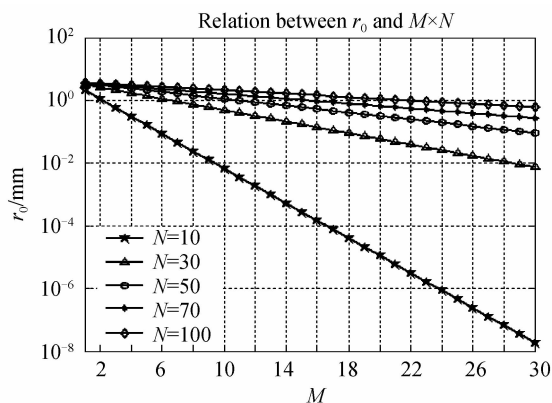
图 8 r_0 与 M, N 的关系Fig. 8 Relation between r_0 and M, N

图 8 分析了 M, N 对 r_0 的影响情况,1) N 相同的情况下,随着 M 的增加, r_0 逐渐减小,例如: $N=70$, $M=10$ 时, $r_0 = 1.63$ mm, $M=20$ 时, $r_0 = 0.66$ mm; 2) M 相同的情况下, r_0 随 N 的增加而增加.当 $M=15$ 时, $N=30$, $r_0 = 0.17$ mm, $N=100$ 时, $r_0 = 1.59$ mm.因此,可以通过选取 M, N 确定 r_0 ,当 M, N 确定下后,各环的采样半径 r_i 就随之确定,这为单透镜参量设计奠

定了基础.

2.2.2 环间增长系数

根据式(4),建立了 q 与 N 的关系,结果如图 9 所示,从图中可看出,随着 N 的增加,增长系数 q 下降,当 N 从 5 增至 40 时, q 从 3.85 下降至 1.17,下降速度较快;当 N 从 40 增至 100 时, q 从 1.17 下降至 1.07,下降速度较慢.通过式(4)可以看出,当 $N \rightarrow \infty$, $\sin(\pi/N) \rightarrow \pi/N$,可以计算出 q 的理论极限为 $\lim_{N \rightarrow \infty} q = (\pi + N)/(\pi - N)$,仅与 N 相关,若在 M 为定值的条件下, q 值越大,则系统的压缩比越大,若想获得较大的压缩比,可通过减少 N 实现,但过大的压缩比会导致图像信息丢失严重,因此,在实际需求中应权衡利弊设计.

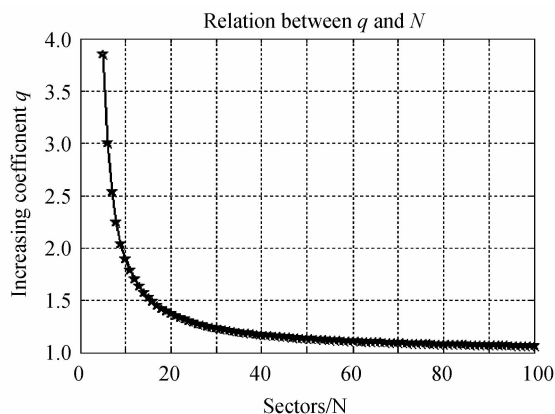


图 9 q 与 N 的关系

Fig. 9 Relation between q and N

2.2.3 填充因子

根据式(6),考察了 η_i 与 N 的关系,实验结果如图 10,当 N 从 5 增至 40 时, η_i 从 0.734 7 增至 0.784 6,当 N 从 40 增至 60, η_i 只从 0.784 6 增加至 0.785,变化甚微.事实上,由式(6)容易得到 $\lim_{N \rightarrow \infty} \eta_i = \pi/4$,从图中可以看出当 $N \geq 40$ 后,随着 N 的增加, η_i 趋于定值,因此,在本例中,选取 $N=40$ 作为每环透镜较为合适,结合 2.2.2 中关于 q 的试验, N 不仅与 q 有关,而且与 η_i 有关.通过图 10 可以选择 $N=40$ 作为每环透镜包含的个数较为合理,因此,可以得出系统的增长系数 $q=1.106$.

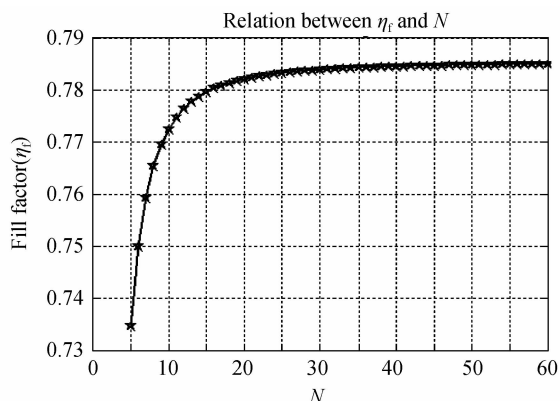


图 10 η_i 与 N 的关系

Fig. 10 Relation between η_i and N

3 结论

本文针对基于 CMOS 工艺实现对数极坐标图像传感器存在的电路复杂、灵敏度低、研发周期长等缺点,提出了基于非均匀透镜阵列的对数极坐标图像传感器模型,并通过理论分析,证明其可以实现对数极坐标映射.重点阐述了非均匀透镜阵列的数学模型,并进行了实例设计,通过仿真实验研究了透镜阵列中关键参量,实验结果表明:1)盲孔半径 r_0 与环数 M 、每环包含的透镜数目 N 相关,在 N 相同的情况下,随着 M 的增加逐渐减小,例如:在 $r_{\max}=5$ mm, $N=70$ 的条件下, $M=10$ 时, $r_0=1.63$ mm, $M=20$ 时, $r_0=0.66$ mm; M 相同的情况下, r_0 随 N 的增加而增加,当 $M=15$ 时, $N=30$, $r_0=0.17$ mm, $N=100$ 时, $r_0=1.59$ mm;2)填充因子 η_i 影响光能利用率,随 N 的增加而增加,当 $N \geq 40$ 后, η_i 趋于极限值 $\pi/4$,因此,选择 $N=40$ 作为系统中每环透镜的个数;3) q 影响着系统的采样半径与系统的压缩率,随 N 的增长而减小,且 $\lim_{N \rightarrow \infty} q = (\pi + N)/(\pi - N)$,根据 $N=40$,可以得到较为合理的增长系数 $q=1.106$.所获得的实验结果有利于形成一种新型对数极坐标传感器,其具有灵活性强、灵敏度高、设计周期短等优点.

参考文献

- [1] SUN Xiao-wei, LI Yan-jun, CHEN Yi, *et al.* Real time mean shift tracking method based on human vision non-uniform sampling[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 719-724. 孙小伟, 李言俊, 陈义. 基于人眼视觉非均匀特性的实时 Mean Shift 跟踪方法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 719-724.
- [2] MASUDA T. Log-polar height maps for multiple range image registration[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, **113**(11): 1158-1169.
- [3] ONKARAPPA N, SAPPA A D. Space variant representations for mobile platform vision applications[C]. *Proceedings of the Computer Analysis of Images and Patterns: 14th International Conference, Caip 2011, Pt 2, F, Springer Berlin Heidelberg*, 2011. 146-154.
- [4] POSCH C. Bio-inspired vision [J]. *Journal of Instrumentation*, 2012, **7**(1): C01054.
- [5] ZHANG Zhi-an, FENG Hong-wei. A new retrieval algorithm based on the texture-spatial feature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 400-404. 张志安, 冯宏伟. 一种新的基于纹理和空间分布特征的图像检索[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 400-404.
- [6] GAMBA P, LOMBARDI L, PORTA M. Log-map analysis [J]. *Parallel Computing*, 2008, **34**(12): 757-764.
- [7] TRAVER V J, BERNARDINO A. A review of log-polar imaging for visual perception in robotics [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, **58**(4): 378-398.
- [8] TRAVER V J, PLA F. Log-polar mapping template design: From task-level requirements to geometry parameters [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, **26**(10): 1354-1370.
- [9] SOLARI F, CHESSA M, SABATINI S P. Design strategies for direct multi-scale and multi-orientation feature extraction in the log-polar domain[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, **33**(1): 41-51.

- [10] EREZ J J P, PARDO F, BOLUDA J A, *et al.* Design of a foveated log-polar image sensor in standard CMOS technology [C]. Proceedings of the Design of Integrated Circuits and Systems (DCIS96), Sitges, Spain, 2011. 1-6.
- [11] NINO-DE-RIVERA L, CALZADA SALAS R, DUCHEN SANCHEZ G, *et al.* Visual simulation of retinal images through microstructures[J]. *Microelectronic Engineering*, 2012, **90**(2): 159-162.
- [12] PARK D S, KIM J H, KIM H S, *et al.* A foveated-structure CMOS retina chip for edge detection with local light adaptation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, **108**(1): 75-80.
- [13] JIN Xiang-liang, LIU Yu, YANG Jun. Design, characterization and evaluation of high performance 2. 8 μ m pitch zero space microlens [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(9): 2357-2362.
- [14] AGRANOV G, BEREZIN V, TSAI R H. Crosstalk and microlens study in a color CMOS image sensor[J]. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 2003, **50**(1): 4-11.
- [15] STEVENS R, MIYASHITA T. Review of standards for microlenses and microlens arrays [J]. *Imaging Science Journal*, 2010, **58**(4): 202-212.
- [16] SUN Yan-jun, LENG Yan-bing, CHEN Zhe, *et al.* Square aperture spherical microlens array for infrared focal plane [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 399-403.
孙艳军, 冷雁冰, 陈哲, 等. 用于红外焦平面的正方形孔径球面微透镜阵列研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(4): 399-403.