

非球面鱼眼镜头设计及畸变校正算法研究

张宝龙 李丹* 张少敬 李洪蕊 杨继超 王靖云

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要 提出了一种非球面鱼眼镜头的设计方法,根据全景摄像系统镜头使用要求,设计得到一款仅由三片非球面塑胶镜片和一片球面玻璃镜片组成的超广角鱼眼镜头。镜头最大成像光圈直径为 15.3 mm,后工作距离为 2.158 mm,系统总长为 11.44 mm,焦距为 0.97 mm,视场角为 210°,在 60 lp/mm 处调制传递函数(MTF)曲线达到 0.35。还构建出一种高效简单的鱼眼镜头畸变校正算法,根据镜头设计中得到的畸变曲线,应用畸变模型运用实际像点计算出理想像点位置,将鱼眼镜头拍摄的畸变图像校正为适合于人眼观看的无畸变图像。通过车载全景显示应用中实际拍摄图像及校正图像的对比,验证出该算法精准可行。

关键词 成像系统;鱼眼镜头;像差校正;图像处理;算法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1222001

Design of Aspheric Fisheye Lens and Study of Distortion Correction Algorithms

Zhang Baolong Li Dan Zhang Shaojing Li Hongrui Yang Jichao Wang Jingyun

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract A design method of aspheric fisheye lens is proposed. Based on the requirements of the lens of panoramic imaging system, a kind of ultra-wide-angle fisheye lens is designed, which only consists of a spherical glass lens and three aspherical plastic lenses. The maximum diameter of imaging aperture is 15.3 mm, the working distance behind is 2.158 mm, the total length of system is 11.44 mm, the focal length is 0.97 mm, the viewing angle is 210°, and the modulation transfer function (MTF) curve reaches 0.35 at 60 lp/mm. Furthermore, a kind of distortion correction algorithm for fisheye lens is built, which calculates the position of ideal image point using actual image point according to the obtained distortion curve and distortion model. The algorithm can correct the distorted image taken by fisheye lens to image without distortion suitable for the human eye view, which is simple and effective. The algorithm is applied in car panoramic display system. It is verified to be accurate and reasonable, through the comparison between the real image taken by fisheye lens and the corrected image.

Key words imaging system; fisheye lens; distortion correction; image processing; algorithms

OCIS codes 220.3620; 220.1010; 150.1488; 150.1135

1 引言

随着全景成像技术在安防监控、全景泊车、行车记录、倒车后视、视频会议等领域中得到广泛应用^[1],鱼眼镜头的研究越来越引起人们的关注。鱼眼透镜成像是一种新的凝视型大视场全景成像技术,它是仿生光学的一种,把鱼眼的前表面与水面构成的一个以水为介质的负透镜提取出来,演化成其

前置负透镜来实现水平 360°,垂直 180°的超广角成像^[2]。鱼眼透镜一次性收录前后左右的所有图像信息,不需要图像拼接和信息融合。但是,鱼眼透镜的设计复杂度较高,目前市场上的鱼眼镜头通常采用球面镜片,需要九片以上的镜片才能达到设计效果,因此制造工艺复杂、生产成本高、体积庞大,无法得到广泛应用。如何设计出结构简单、体积小、成像质

收稿日期: 2014-05-23; **收到修改稿日期:** 2014-06-29

基金项目: 天津市科技支撑计划(13ZCZDZX03000)、天津科技大学科学研究基金(20120102)

作者简介: 张宝龙(1976—),男,博士,教授,主要从事现代显示技术方面的研究。E-mail: eezbl@tust.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: lidan@tust.edu.cn

量好的鱼眼镜头一直是光学领域的研究热点之一。鱼眼透镜在获得大视场的同时,会产生严重的畸变,除了图像中心的景物保持不变,其他本应水平或垂直的景物发生扭曲变形。由于鱼眼透镜结构比较复杂,实现畸变精准校正也具有一定的难度。因此在镜头设计时,采用了立体映射方法。选择非球面鱼眼镜头方案正是为了更好地实现立体映射,进而简化畸变校正算法的复杂度。

本文根据车载全景系统中对鱼眼镜头的要求,设计出一款视场角为 210° 的超广角鱼眼镜头,由于采用了非球面技术,仅用四片镜片即达到设计要求,既简化了镜头结构、降低了生产成本,又减少了镜片对光线的衰减、增加了光效。本文还构建出一种高

效简单的鱼眼镜头畸变校正算法,根据设计中得到的畸变曲线,将鱼眼镜头拍摄的畸变图像校正为适合于人眼观看的无畸变图像。经实践证明该算法可靠、有效。

2 非球面鱼眼镜头的设计

2.1 确定镜头设计参数

根据车载全景系统中对鱼眼镜头的要求,选定与镜头匹配的互补型金属氧化物半导体(CMOS)成像芯片,其尺寸为 0.635 cm ,像素大小为 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ 。再根据 CMOS 成像芯片的性能以及镜头使用要求,计算得到镜头设计参数,如表 1 所示。

表 1 镜头设计参数

Table 1 Design parameters of lens

| Item | Specification |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Image size /cm | 0.635 |
| Pixel size / μm | 6×6 |
| Angle of view /($^\circ$) | 210 |
| Focal length /mm | < 1 |
| $F/\#$ | Fixed aperture, $F/2.8$ |
| Total length /mm | < 12 |
| Thickness of protective glass /mm | 0.4 |
| Wavelength /nm | 470 510 555 610 650 |
| Weight of wavelength | 0.091 0.503 1 0.503 0.107 |

2.2 构建镜头初始结构

由镜头设计参数可见,该镜头为超短焦镜头,其镜头焦距小于 1 mm ,而一般镜头的后工作距均小于焦距。为了将超大视场范围内的光线纳入镜头,同时又能得到较长的后工作距,本设计采用后工作距较大的反摄远型结构^[3],其结构如图 1 所示。图中, H' 为主平面, F' 为焦点, f' 为像方焦距, l' 为像距, ω 为物方视场角。

($F/\# = 2.8$, 视场角大于等于 180°) 经过计算后构建得到超广角鱼眼镜头的初始结构。考虑到非球面的计算过于复杂,主要针对球面结构进行计算,光焦度分配好后,再添加非球面度进行优化,得到满足条件的初始镜头结构,如图 2 所示。该镜头前两个镜片采用负透镜以纳入超大视场范围内的光线,后两个镜片采用正透镜,对射入光线进行校正并使之能够成像。图中 1、2 为负透镜镜片,3、4 为正透镜镜

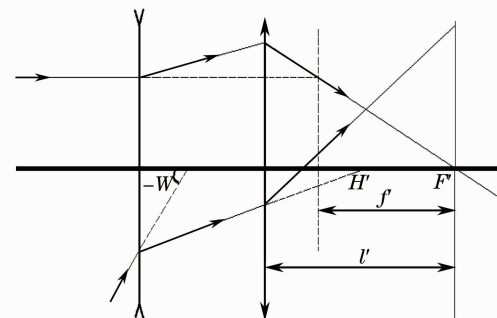


图 1 反摄远型物镜结构图

Fig. 1 Structure of against long-range objective

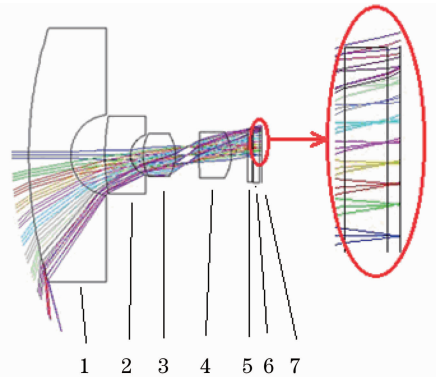


图 2 镜头初始结构

Fig. 2 Initial structure of lens

片,5为红外滤波片,6为CMOS芯片保护玻璃,7表示所选用的CMOS芯片的成像面。

2.3 镜头像差校正及优化

图2所示的初始结构镜头不能完全满足表1中的镜头设计参数,需要进一步进行校正和优化。在镜头设计中,通常使用轴上球差、彗差、场曲、像散、畸变、轴向色差、垂轴色差等像差参数来评价镜头像差的大小。如何使各种像差得到平衡、得到较好的设计结果是需要镜头设计中反复考虑的问题。

首先通过对镜头轴外宽光束球差、彗差和细光束场曲三个参数进行约束和控制来实现镜头的初步优化^[4],然后对像面高度和镜头的调制传递函数(MTF)进行控制,以实现较好的设计效果。由于鱼眼镜头轴外光线相对于折射面形成的入射角较大,光线易发生全反射,在光线追迹中经常遇到光线溢出的问题^[5]。这类问题修正难度较大,因此在初期就对其进行了限定和约束。

本设计在考虑镜头成像质量的同时,还考虑到镜头的加工工艺以及制作成本,保证了镜片的曲率在工艺上能够加工生产。这是由于加工误差会严重影响镜头后期装配精度,进而影响镜头的成品率及成本。

通过反复校正及优化,得到镜头的最终结构如图3所示。该成像系统由一片球面玻璃镜片和三片非球面塑胶镜片组成。其最大成像光圈直径为15.3 mm,后工作距离为2.158 mm,系统总长为11.44 mm。该镜头满足表1中的镜头设计参数,且各镜片定心系数、曲率、中心厚度和边缘厚度均满足加工要求,同时非球面度在 $-2\sim 2$ 之间,易加工。

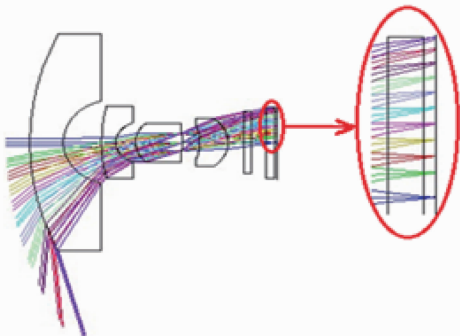


图3 最终镜头结构

Fig. 3 Final structure of lens

通过最终结构镜头的MTF曲线、镜头相对照度曲线及镜头畸变曲线对镜头的像质进行评价,可以看出该系统具有较好的成像品质。

图4为最终结构镜头在奈奎斯特频率^[5]为

60 lp/mm条件下的MTF曲线图。如图4所示,所有视场的MTF曲线高度均在0.35以上,曲线与坐标轴围成的面积较大,表明该系统成像清晰度高;曲线比较集中,表明该系统各视场成像质量均匀;弧矢曲线与子午曲线接近,表明该系统像散小。

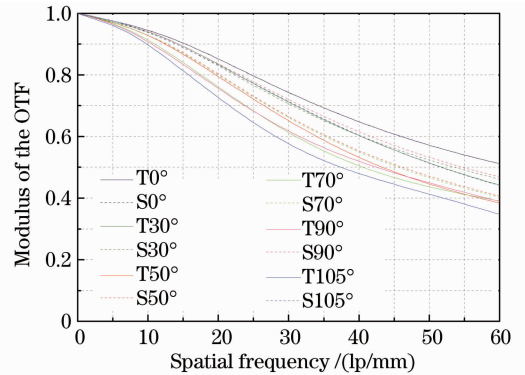


图4 镜头调制传递函数曲线

Fig. 4 MTF curve of lens

相对照度是鱼镜头的重要参数。由普通镜头的四次余弦公式可知,当视场角大于 180° 时镜头相对照度已经趋近于0。本设计通过引入畸变及光阑彗差的方式得到较高的相对照度。图5为最终结构镜头的相对照度曲线。由图可见,0.7视场照度可以达到中心视场照度的0.48倍,表明像面照度能够满足成像要求。

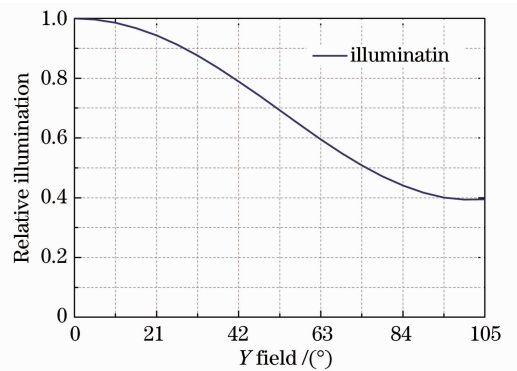


图5 镜头相对照度曲线

Fig. 5 Relative illuminance curve of lens

鱼镜头要引入大量畸变,边缘视场在一定程度上需要压缩,而压缩量的大小直接影响成像视觉效果,因此在设计鱼镜头时非常关注畸变特性。鱼镜头的畸变曲线已不再是传统意义上的畸变曲线,按照传统意义的畸变计算方法,在 180° 视场时其畸变已趋近于无穷。业内公认的鱼镜头模型有四类:体视型、等距型、等立体角型和正交型。本设计采用引入畸变量最小的体视型模型,该成像模型遵循 $2 * f * \tan(\omega/2)$ 的物像对应关系。这种模型

边缘成像相对压缩较少,这为以后的畸变校正提供了便利条件。图 6 为最终结构镜头相对于体视型模型的畸变曲线。横轴表示所设计镜头与使用模型之间畸变的偏差,纵轴表示半视场角。经计算该镜头成像 TV 畸变在 20% 以内,符合镜头成像要求。

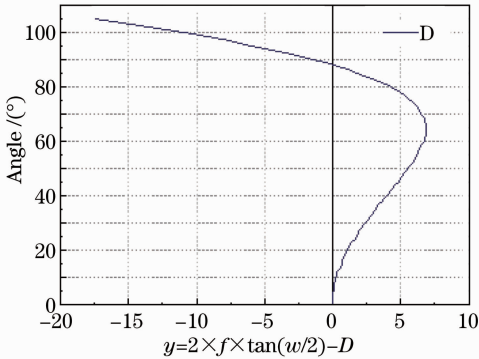


图 6 镜头畸变曲线

Fig. 6 Distortion curve of lens

3 畸变校正算法及其应用

普通镜头成像是平面与平面之间点和点的一一对应,物和像符合相似性原理^[3]。而鱼眼镜头成像是平面和非平面的对应^[6],这种对应关系使镜头呈现出一种特殊的成像效果,即通常所说的畸变。这种效果在某些场合很受欢迎,但在很多必须使用鱼眼镜头的场合则不能接受,因此需要对鱼眼镜头的畸变进行校正。

3.1 鱼眼镜头畸变校正算法

鱼眼镜头成像投影模型如图 7 所示。鱼眼镜头模型是弯曲物面到像面的投影,而理想物面到像面的投影符合普通镜头成像原理。OXY 为像面坐标系, O'X'Y' 为物面坐标系, O'X''Y'' 为理想物面坐标系, Z 轴为鱼眼镜头光轴, P 为像点, P' 和 P'' 分别为 P 点在物面和理想物面中对应的物点。

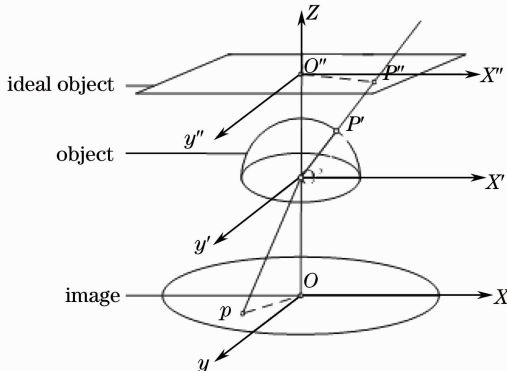


图 7 鱼眼成像投影模型

Fig. 7 Projection model of fish eye imaging

普通镜头成像基于 $f-\tan(\omega)$ 模型,而本设计得到的鱼眼镜头基于体视型模型即 $f-2\tan(\omega/2)$ 模型^[7],其中 f 为焦距、 ω 为视场角。镜头畸变校正就是将设计得到的鱼眼镜头所拍摄到的实际图像校正为符合普通镜头成像原理的理想图像。

根据畸变曲线图 6,其横轴为所设计镜头与使用模型之间畸变的偏差,用软件对曲线多项式进行拟合,得到镜头畸变曲线偏离系数 D 。曲线多项式如(1)式所示:

$$D = a \times \omega^5 + b \times \omega^4 + c \times \omega^3 + d \times \omega^2 + e \times \omega + f, \quad (1)$$

式中 a, b, c, d, e, f 均为已知常数, ω 为镜头视场角。这里需要选取合适的幂次数使计算精度和计算速度达到平衡,实验得到最高次幂为 5 次时曲线拟合精度已达到 99%。进一步推导出实际畸变与视场角和相对畸变之间的关系,如(2)式所示。由此很容易得到实际像点与校正的理想像点之间的关系。

$$D_{is} = \frac{\omega \times (1 + D) - \tan(\omega)}{\tan(\omega)} \times 100. \quad (2)$$

上述过程仅仅得到了实际像点和理想像点之间的代数关系式,在实际校正过程中还需要找到像点之间的几何关系^[8]。像面的几何关系图如图 8 所示,运用光线的直线传播原理把 ABCD 曲面上的点映射到 A'B'C'D' 平面上。ABCD 中心点切面与 A'B'C'D' 均垂直于光轴 ZO, ZA 在面 A'B'C'D' 上的投影和 ZA' 在 A'B'C'D' 上的投影共线。由此可以类推出实际像点和理想像点之间的几何关系。根据像点之间的代数关系和几何关系,就可以由鱼眼镜头的实际像面得到校正的理想像面。

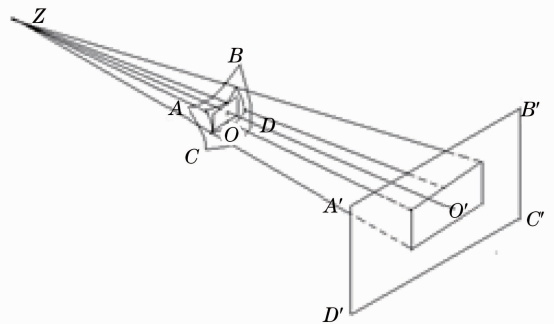


图 8 像面几何关系图

Fig. 8 Geometry diagram of imaging plane

3.2 校正算法实例应用

本设计得到的超广角鱼眼镜头已量产并应用到汽车监控领域。图 9(a)为车载全景显示系统中车身后左右四个方向鱼眼镜头的拍摄图片。该镜头

匹配的 CMOS 为美光公司一款 PAL/NTSC 制式芯片。该图片在其 PAL 制式下拍摄, 可视区域为 0.635 cm, 像素为 768 pixel \times 576 pixel, 像素大小为 6 μ m \times 6 μ m。该镜头焦距为 0.97 mm, 视场角为 210 $^{\circ}$ 。图 9(b) 为应用上述畸变校正算法校正得到

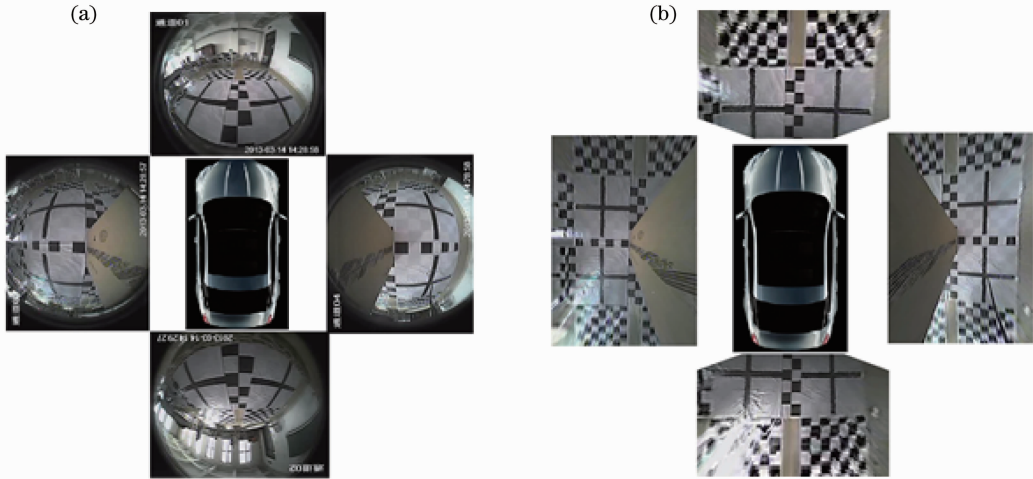


图 9 车载全景显示系统中(a)鱼眼镜头拍摄图片及(b)校正图片

Fig. 9 (a) Photograph shoot by fisheye lens and (b) corrected photograph in vehicle panoramic display system

图 9(b) 所示校正后的四幅图片还需要进行拼接才能应用到车载全景显示系统中。无缝拼接的结果如图 10 所示, 这是本文的扩展研究。驾驶员通过座位前方的屏幕就可以实时监控车辆周边环境, 且无死角, 为驾驶员的行驶及泊车提供了很大方便。



图 10 无缝拼接全景图

Fig. 10 Panoramic image by seamless stitching

4 结 论

对非球面鱼眼镜头的设计进行了深入的研究。根据全景成像系统镜头使用要求确定了设计参数, 构建出初始结构, 再通过像差校正得到优化后的镜头结构。由于采用了非球面技术, 仅用四片镜片即达到设计要求, 既简化了镜头结构、降低了生产成本, 又减少了镜片对光线的衰减、增加了光效。镜头最大成像光

的图片。由方格线及两个十字线校正前后的对比可见该算法精准可行。另外, 在该算法的硬件实现过程中, 采用了查表法的方式进行处理时间优化, 实践表明其实时性满足使用者的需求。

圈直径为 15.3 mm, 后工作距离为 2.158 mm, 系统总长为 11.44 mm, 焦距为 0.97 mm, 视场角为 210 $^{\circ}$, 在 60 lp/mm 处 MTF 曲线达到 0.35。整个系统结构简单、体积小、成像质量好。由于鱼眼透镜在获得大视场的同时, 会产生严重的畸变, 进一步研究了鱼眼镜头的畸变校正算法。根据镜头设计中得到的畸变曲线, 应用畸变模型运用实际像点计算出理想像点位置, 构建出一种高效简单的鱼眼镜头畸变校正算法, 将鱼眼镜头拍摄的畸变图像校正为适合于人眼观看的无畸变图像。将设计得到的鱼眼镜头及畸变校正算法应用到车载全景显示系统中, 通过将实际拍摄图像及校正图像对比验证出研究得到的畸变校正算法精准可行。

参 考 文 献

- 1 Wu Haiqing, Zhao Xinliang, Li Tonghai, *et al.*. Design of refractive/diffractive IR fish-eye optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(8): 1533-1536.
吴海清, 赵新亮, 李同海, 等. 折射/衍射红外鱼眼镜头光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, 39(8): 1533-1536.
- 2 Wang Chengliang, Yang Peng, Cai Yaoze, *et al.*. Image mosaic techniques in catching panorama image of hole wall [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(2): 344-347.
王成良, 杨鹏, 蔡耀泽, 等. 孔壁全景图获取中的图像拼接技术研究[J]. *计算机应用*, 2010, 30(2): 344-347.
- 3 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- 4 Xu Zhengguang. *Zemax Analysis of Vertical Axis Aberration*

- [EB/OL]. Photoelectric Forum.
- 许正光. Zemax 垂轴像差分析[EB/OL]. 光电论坛.
- 5 Dai Jianning. Imaging Theory and Optimization Design of Fish Eye Lens [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1999.
- 戴建宁. 鱼镜头的成像理论与优化设计[D]. 长沙: 国防科技大学, 1999.
- 6 Wen Canhong, Yang Qiang, Luo Fei, *et al.*. A correction method of fish eye lens based on elliptic paraboloid perspective projection constraints [J]. College Mathematics, 2010, 26(3): 192–195.
- 温灿红, 杨 强, 罗 飞, 等. 一种基于椭圆抛物面透视投影约束的鱼镜头校正方法[J]. 大学数学, 2010, 26(3): 192–195.
- 7 R I Hartley, S B Kang. Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation [C]. IEEE Trans Patten Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(8): 1309–1321.
- 8 C Hughes, R Mcfeely, P Denny, *et al.*. Equidistant ($f-\theta$) fish-eye perspective with application in distortion center estimation [J]. Image Vis Compute, 2010, 28(3): 538–551.

栏目编辑: 张浩佳