

文章编号: 1003-501X(2010)04-0077-06

折反射式连续变倍扩束系统的设计

赵 阳^{1, 2}, 巩 岩¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了用同一台仪器获得不同口径的激光准直光束, 设计了一个连续变倍激光扩束系统, 系统扩束比可在 55~155 之间连续变化, 可以得到比传统扩束系统更大的激光光斑, 满足对大口径激光束应用的要求。该系统由两级扩束子系统构成, 一级折射式无焦变倍扩束系统实现激光光束口径连续变化, 变焦系统选用仅有 4 片透镜的三组元结构, 并采用“正-负-正”的形式, 有利于减小系统整体结构尺寸。考虑到可能产生的热形变, 对入射光斑较小的变倍移动组的材料进行了分析选择。二级折反射系统实现激光束的高倍率扩束, 由球面反射镜取代离轴抛物面镜, 用一片弯月透镜补偿像差。由于单透镜折射元件对系统性能影响很大, 对其结构形式和材料进行了分析, 确定了透镜的厚度与材料。应用光学设计软件 CODEV 给出了系统的优化设计, 设计结果显示该系统像差得到了很好地校正, 成像质量达到衍射极限。最后用 Light tools 软件进行三维建模分析, 系统准直度与理论设计值相符。

关键词: 激光扩束; 变焦系统; 高扩束比; 光学设计

中图分类号: O435.2

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.04.015

Design of Catadioptric Variable Focus Beam Expanding Optical System

ZHAO Yang^{1,2}, GONG Yan¹

(1. State Key Laboratory of Applied optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to obtain different diameters of laser beam by using one optical system, a catadioptric beam expander zoom optical system was designed. The beam expanding ratio was changed from 55 to 155 continuously, which was greater than before, and could expand the application areas. The system was composed of two main parts: one afocal zoom system was located in the front could achieve continuous laser beam expanding. Only four sphere lenses were used to design the zoom system. In order to reduce the size of total system, a “Positive-Negative-Positive” form was introduced. The material of variable part of zoom system was analyzed because the beam diameter was so small that the distortion was appeared for the temperature changing by the laser irradiation. The other secondary catadioptric system was used to achieve high ratio beam expanding. A sphere mirror was used to replace an off-axial parabolic mirror, and a meniscus lens was introduced to compensate aberrations. The lens in the secondary system was so important to the performance that it was analyzed, and then the thickness and material of the lens were chosen. The model was built up in CODEV. By optimizing aberrations, the performance of the system reaches diffraction limitation after adding perfect lens. Finally, the software light tools were used to analyze the collimation and the result matches the theoretical design.

Key words: laser beam expanding; zoom system; high expanding ratio; optical design

收稿日期: 2009-08-20; 收到修改稿日期: 2009-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40674098)

作者简介: 赵阳(1982-), 男(汉族), 吉林长春人。博士研究生, 主要研究光学系统设计。E-mail: juventus-xx@126.com。

通信作者: 巩岩(1968-), 男(汉族), 吉林梅河口人。博士后, 研究员, 主要研究光学系统设计。E-mail: ygong2000@sina.com。

0 引言

由于激光器发出的典型激光束直径很小,而在很多应用中,如在一些激光干涉仪的光源扩束、激光准直系统和全息应用中,必须照明比激光光斑大得多的物体和全息记录介质,同时还要求远距离传输时激光束有高准直度,因此必须对激光光束进行扩束。目前广泛使用的激光扩束器一般有两类:一类是采用两个或多个透镜组成的透射式激光扩束器^[1-5]。该类系统的特点是结构简单,可以设计成扩束比连续变化的变倍系统。如果要求系统输出激光口径很大,则透镜的口径也随之增大,使得球差、彗差等与口径相关的像差显著增加,不仅影响了照明分布的均匀性,也增加了透镜的加工难度与成本,所以该类系统只适用于小倍率扩束。另一类是采用反射式扩束系统,比如巴塞格林系统、格里高利系统以及离轴三反射式系统^[6-9]。这类系统的特点是使用大口径反射镜面,增大了扩束比,并且非球面的设计使得像差校正得很好。由于大扩束比系统有利于压缩激光器的发散角,提高准直性,所以在激光扩束中得到广泛的应用。但巴塞格林无焦系统存在中心挡光现象;而离轴三反系统会引入比较大的轴外像差,所以为了保证光束质量而引入了多个非球面,增加了制造和装调的难度和成本。此外,反射式系统的扩束比不可调节,只能针对某一种光束口径进行设计,使得应用范围受到了限制。目前文献报道的最大光束放大倍率为50倍。

本文针对以上两类激光扩束器的优缺点,设计出一个折反射式连续变倍扩束系统。该系统采用两级扩束方法:由透射式变焦系统完成一级低倍放大,系统仅用4片透镜材料,结构简单,实现激光光束连续可调,扩束比范围为2.0~5.6。由球面反射镜和大口径离轴抛物面反射镜实现二级扩束,并在一次像处设置针孔进行空间滤波,阻挡高频噪声。抛物面镜的小离轴量消除了挡光现象,但引入了离轴像差,加入一片弯月透镜补差像差,二级系统扩束比约为27.7。两级系统总扩束范围约为55~155,组成高扩束比连续可调系统,压缩了激光的发散角度,可以实现大口径光束远距离传输,扩大了应用范围。

1 扩束系统设计原理与方法

1.1 一级扩束系统设计

激光光束为高斯光束,其方向性不但与透镜焦距的大小有关,而且也与入射光束束腰 ω_0 大小有关。入射光束束腰愈小,则高斯光束的方向性愈好。根据单透镜对高斯光束的变换规律可得出望远系统对高斯光束的准直倍率为

$$M' = \frac{\theta_0}{\theta_0'} = \frac{f_2}{f_1} \frac{\omega(l)}{\omega_0} = M \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda l}{\pi \omega_0^2}\right)^2} \quad (1)$$

式中: $M = f_2 / f_1$ 为望远系统中后组镜与前组镜的焦距比,也即望远系统的准直倍率; θ_0 为入射高斯光束的发散角; θ_0' 为出射的高斯光束的发散角; l 为光束束腰与前组透镜的距离,如图1所示; λ 取632.8 nm。可见,如果预先用一个短焦距透镜将高斯光束聚焦,以获得极小束腰直径,然后再用一个长焦距透镜来改善其方向性,就可以得到很好的准直效果。准直倍率 M' 越大,准直性越高^[10]。这实际上是一个倒置的望远系统,变倍扩束系统是基于这种结构演变得来的。

根据理想光学系统的物像关系,可以采用三组或三组以上的透镜系统来实现无焦连续变倍与准直扩束

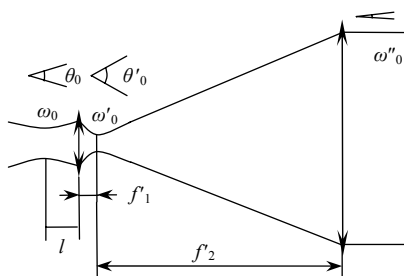


图1 扩束系统原理图

Fig.1 Theory of beam expanding system

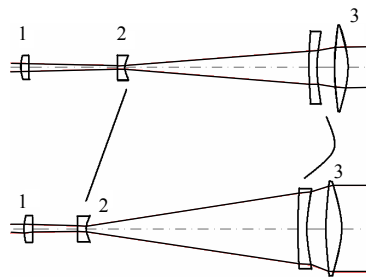


图2 无焦扩束变倍系统原理图

Fig.2 Theory of a focal zoom beam expander

的功能。如图 2 所示。在三组透镜组成的变倍扩束系统中，当第二组透镜相对其物点也即第一组透镜的像点移动时，其放大率随之而变化，由此产生的系统焦距变化由第三组透镜移动进行补偿。此时，如果第二组透镜的像点恰好与第三组的前焦点重合，则整个系统就是一个无焦光学系统，而且出射光束口径会随着这两组透镜的移动而不断变化。

通常，三组透镜可以采用“正—负—正”或“负—正—负”等多种形式，前者具有更紧凑的结构^[11]。设计中采用“正—负—正”的结构形式。第一组为固定组，第二组为移动变倍组，第三组为补偿组。图 2 所示，变倍组上的光斑直径最小，能量最集中，玻璃材料热变形也最明显，所以在优化系统时玻璃材料的选用要考虑到成像质量、热膨胀系数和材料价格的关系。

其中，相对价格是指：

$$\text{相对价格} = \frac{\text{所选玻璃价格}}{\text{K9_CHINA 的单价}} \times 10$$

(2)

表 1 表明由于透镜通光口径较小，成像质量较好，所以热膨胀系数和相对价格成为选取材料的主要依据。对于最常用的 K9 玻璃，热膨胀系数却比较高；而热膨胀系数最小的 TF3 材料的相对价格却很高，系统性能也稍差。折中考虑这里选取 BAK3_CHINA 作为移动变倍组的材料，使得成像质量、热膨胀系数、和相对价格达到最佳结合。

经过优化设计后，结构参数如表 2 所示。变倍扩束比范围为 2.0~5.6。

表 1 不同玻璃材料参数的比较

Table 1 Comparison of different lens materials

Materials	N/v	$\alpha/(10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C})$	Spot diagram / μm	Relative price
QK3_CHINA	1.487 46/70.1	94	6.63	22
K9_CHINA	1.516 40/64.1	75	4.03	10
BAK3_CHINA	1.546 78/62.7	60	3.74	23
TF3_CHINA	1.612 40/44.0	56	4.40	60
ZF2_CHINA	1.672 70/32.2	77	3.25	29
ZF6_CHINA	1.755 20/27.5	81	3.46	36

表 2 变焦系统结构

Table 2 Parameters of zoom system

	f'/mm	Thickness /mm	Materials
Front group	30.2	33.7~24~18	K9_CHINA
Variable group	-13.75	36.06~37.57~37.91	BAK3_CHINA
Compensated group	-27	3.14	ZF6_CHINA
	24.5	2.5~8.83~14.48	K9_CHINA

1.2 二级扩束系统设计

为实现系统大扩束比，大多采用反射式结构，如图 3 所示。图 3 中由两个共焦的抛物面反射镜组成。为防止挡光，这里仅用抛物面的离轴部分。这种扩束结构非常简单，而且像差校正得很好。但对于小口径入射光束，离轴抛物面反射镜矢高较大，制造比较困难，增加了系统的成本。针对反射扩束系统的特点，本文提出用球面反射镜代替小口径离轴抛物面反射镜，因球面反射镜工艺简单，且公差灵敏度较非球面低很多。但仅由小口径球面反射镜和大口径离轴抛物面镜不足以完全校正大光束口径产生的球差、彗差和偏心引入的像散和场曲，所以加入一片弯月透镜进行像差校正，组成折反射系统，如图 4 所示。

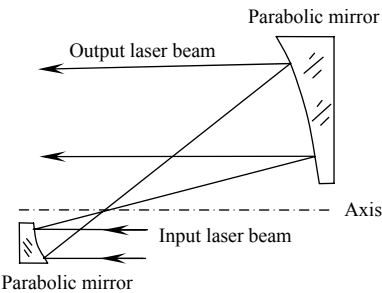


图 3 反射式扩束系统

Fig.3 Chart of the reflective beam expander

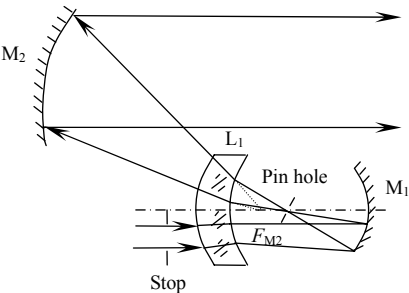


图 4 折反射扩束系统原理

Fig.4 Theory of the catadioptric beam expander

图 4 中，M₁ 为球面反射镜，M₂ 为抛物面反射镜，L₁ 为弯月透镜。M₁ 和 M₂ 共轴，使用 M₂ 的离轴部

分,其特点是不存在挡光现象。光阑(STOP)偏离光轴,使入射光束进入 L_1 的下部,经过 M_1 的反射,在光轴附近成一次像,再次通过弯月镜,经过抛物面镜准直。在一次像位置处放一个直径为 $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$ 针孔进行空间滤波。针孔滤波是令其反映光强高斯分布缓慢变化特征的低频通过,而阻挡噪声所特有的高频,因而从针孔射出的激光束基本上是叠加在球面波前的光滑的高斯分布。

弯月透镜 L_1 的使用是必要的,由于使用了球面反射镜 M_1 ,从而中心光线不再沿光轴方向,所以引入了较大的像散和场曲。使用弯向一次像的弯月透镜,可以减小入射角度,增大系统效率,降低公差灵敏度,有效校正了轴外像差。同时 M_2 使用抛物面镜,将系统的球差校正至最小,彗差也得到了抵消补偿, M_1 无需使用非球面即可得到较好的成像质量。同时要保证 L_1 与 M_1 之间有合理的间距,使得激光聚焦点远离光学部件,激光束在光学件上的光斑要足够的分散,以免局部热变形过大。

该系统中由于单透镜 L_1 起到了两级扩束系统连接和像差补偿的作用,并且光线在透镜中发生多次折射,所以使其成为整个系统中非常重要的部件,对系统性能影响很大。

如图 5 所示,透镜 L_1 厚度越小则成像质量越好,但同时要考虑到材料的实际加工情况,保证透镜的直径比要小于 10。已知透镜的口径为 37 mm ,则弯月透镜的中心厚度值大于 3.7 mm 。同时由图 5、6 可知在厚度大于 6 mm 时像差和公差灵敏度均显著增加。所以厚度值只能在一定的范围内变动,最佳厚度范围为 $4 \sim 6 \text{ mm}$ 。通过比较几种材料可知,玻璃材料也影响到系统的性能,图 6 显示当折射率增大时,像差逐渐减小,但高折射率材料热膨胀系数也比较大,价格也相对昂贵。而在合理厚度范围内公差灵敏度相差不大,所以热膨胀系数并不是重点考察对象。当材料为 BAK3_CHINA 和 ZF2_CHINA 时,都可以得到像质和材料成本的较好组合。进一步分析,BAK3 的化学稳定性优于 ZF2;而且 BAK3 的密度(2.86 g/cm^3)小于 ZF2(4.09 g/cm^3),前者有利于轻量化,所以选择 BAK3。根据图 5、图 6,此时厚度选择范围适当放宽仍可以得到较好质量。

二级扩束系统结构参数如表 3 所示。扩束比为 27.7。

表 3 折反射扩束系统结构参数

Table 3 Parameters of the catadioptric beam expander

	f'/mm	Thickness/mm	Materials
Catadioptric group	-123	6.36	BAK3_CHINA
Mirror	-11.22	-30	SiC
Parabolic mirror	235.3	—	SiC

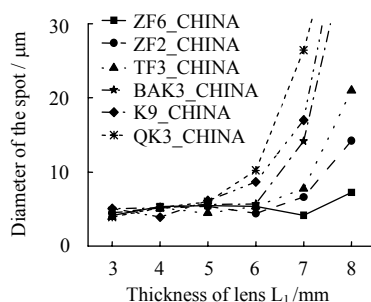


图 5 透镜材料与系统性能关系曲线

Fig.5 Curves of the material of the lens relative to the size of the system

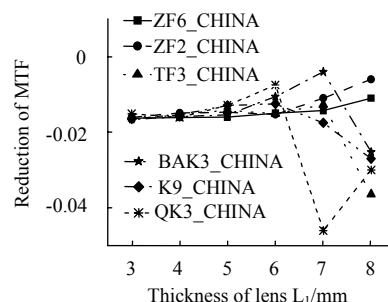


图 6 透镜材料与公差灵敏度关系曲线

Fig.6 Curves of the materials of the lens relative to the tolerance sensitivity

2 设计结果与分析

2.1 像质评价

将前面设计的两级扩束系统联合使用,光源采用 He-Ne 激光器,波长 632.8 nm ,光束口径 1 mm ,全视场 $1^\circ (17 \text{ mrad})$ 。系统结构如图 7 所示,用光学设计软件 CODEV 进行总体优化设计。优化后 MTF 和波前误差达到衍射极限,如图 8 所示。

图 8 所示为加入理想透镜后的系统成像质量,由于理想透镜是虚拟薄透镜,不引入任何像差,所以图 8 能真实地反映出无焦扩束系统的总体性能。

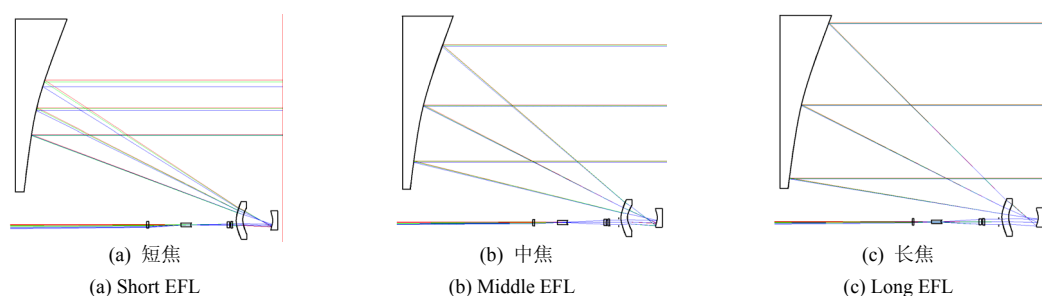


图 7 变倍扩束系统结构图

Fig.7 Chart of zoom beam expanding system

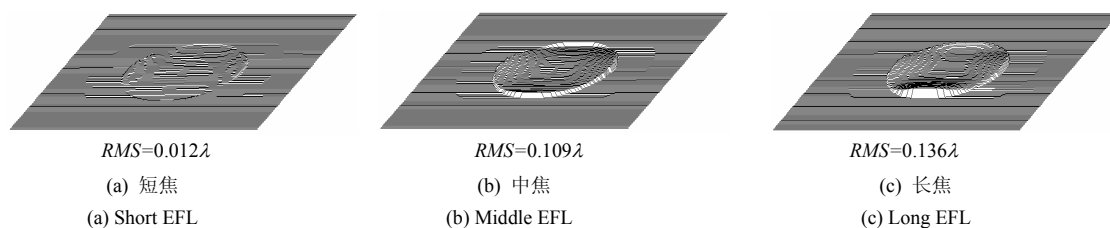


图 8 系统像差曲线

Fig.8 Aberration curves of the system

2.2 光束准直性验证

激光扩束系统的主要作用之一就是压缩发散角, 实现激光束准直, 完成远距离传输。由式(1)可知, 光束发散角压缩比为系统扩束比。光束发散角可由式(3)计算:

$$\theta_0'' = \frac{D_2 - D_1}{L} \quad (3)$$

式中: L 为所选取的一段传输距离的长度, D_1 , D_2 分别为传输距离前后两端光束直径。取 $L=10^5$ mm, 由 Lighttools 模拟仿真可知 $D_1=159.958$ 79, $D_2=170.147$ 58, 经计算得 $\theta_0''=0.111$ 9 mrad, 理论设计值为 17 mrad/ $155=0.109$ 7 mrad, 两者符合得很好, 光线准直性较高。

3 结 论

本文设计了一个连续变倍激光扩束系统。系统采用两级扩束方法。一级扩束使用无焦变焦光学系统, 实现光束口径大小连续变化; 二级扩束采用折反射大扩束比系统, 由球面反射镜代替小口径离轴抛物面反射镜, 弯月透镜补偿像差, 降低了系统设计加工难度。整个系统可以在扩束比为 $55\sim 155$ 范围内连续变化, 扩大了系统的使用范围。设计结果 MTF 达到衍射极限, 光束准直效果与理想设计值相符。该系统可以在一些激光干涉仪的光源扩束、激光准直系统、远距传输和全息应用等方面得到应用。

参考文献:

- [1] Barry Johnson R. Design, fabrication, &test of a $5.5\times$ telescope to retrofit an existing FLIR system [J]. *Pro. of SPIE* (S0277-786X), 1990, **1320**: 399-405.
- [2] 郝沛明, 王鹏, 王占山, 等. 高倍率及大口径扩束器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2003, **30**(6): 494-496.
HAO Pei-ming, WANG Peng, WANG Zhan-shan, *et al.* Lens design for high power and wide-aperture beam expander [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(6): 494-496.
- [3] 袁莉, 潘宝珠, 郝沛明, 等. 大口径平像场激光扩束器光学系统的研制[J]. 激光与红外, 2007, **37**(7): 672-675.
YUAN Li, PAN Bao-zhu, HAO Pei-ming. Study of the laser beam-expander optical system with large aperture and non-curvature of field [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(7): 672-675.
- [4] CHANG Jun, WENG Zhi-cheng, WANG Yong-tian, *et al.* Design of infrared afocal zoom system [J]. *Proc. of SPIE*

- (S0277-786X), 2006, **6034**: 603420 1-5.
- [5] Fischer Robert E, Kampe Thomas U. Actively controlled 5:1 afocal zoom attachment for common module FLIR [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 1992, **1690**: 137-152.
- [6] 郑盼, 杨应平, 郜洪云, 等. 基于伽利略结构的二级激光扩束系统的设计[J]. 应用光学, 2008, **29**(3): 347-350.
ZHENG Pan, YANG Ying-ping, GAO Hong-yun, *et al.* Design of two-level laser beam expander based on Galilean structure [J]. **Journal of Applied Optics**, 2008, **29**(3): 347-350.
- [7] Howard Joseph M. Unobstructed afocal systems of spherical mirrors [J]. **Pro. of SPIE(S0277-786X)**, 2006, **4768**: 41-47.
- [8] Ilia V, Ermakov, Daniil T, *et al.* The calculation of oblique beams in the mirror-lens telescope based on the afocal two-mirror system [J]. **Pro. of SPIE(S0277-786X)**, 2006, **6267**: 626736 1-8.
- [9] R Barry Johnson. Very-broad spectrum afocal telescope [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 1998, **9482**: 711-717.
- [10] 樊丽娜, 朱爱敏, 刘琳, 等. 激光扩束望远镜的光学设计[J]. 红外, 2007, **28**(8): 20-22.
FAN Li-na, ZHU Ai-min, LIU Lin, *et al.* Optical design of laser beam expanding telescope [J]. **Infrared**, 2007, **28**(8): 20-22.
- [11] 郜洪云, 熊涛, 杨长城. 中波红外连续变焦光学系统[J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(7): 1038-1043.
GAO Hong-yun, XIONG Tao, YANG Chang-cheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(7): 1038-1043.

~~~~~  
( 上接第 76 页 )

- [4] Venzo de Sabbata, Bidyut Kumar Datta. **Geometric Algebra and Applications to Physics** [M]. Taylor & Francis Group: CRC Press, 2007: 62-80.
- [5] David Hestenes. **New Foundations for Classical Mechanics** [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002: 77-86.
- [6] Lounesto P. **Clifford Algebras and Spinors** [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 44-52.
- [7] Lasenby J, Doran L. A Unified Mathematical Language for Physics and Engineering in the 21st Century [J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A(S1364-503X)**, 2000, **358**(1765): 21-39.
- [8] Eduardo Bayro-Corrochano, Joan Lasenby. A unified language for computer vision and robotics [M]// **Lecture Notes in Computer Science**. Heidelberg: Springer, 1997, **1315**: 219-234.
- [9] Felsberg. Michael Low-Level Image Processing with the Structure Multivector [D]. Kiel: University of Kiel, 2002: 27-38.
- [10] Vince John. **Geometric Algebra for Computer Graphics** [M]. Lodon: Springer Press, 2008: 33-45.
- [11] Wareham R, Cameron J, Lasenby J. Applications of conformal geometric algebra in computer vision and graphics [C]// **Proceedings of Computer Algebra and Geometric Algebra with Applications**, Shanghai, China, May 19-28, 2004: 329-349.
- [12] Buchholz S, Sommer G. A hyperbolic multilayer perception [C] // **IJCNN 2000**, Como, Italy, 2000. IEEE Computer Society Press, 2000: 129-133.
- [13] Leo Dorst. The Inner Products of Geometric Algebra [C]// **Applications of Geometric Algebra in Computer Science and Engineering**, Cambridge, UK: Birkhäuser Boston, 2002: 37-45.
- [14] 王立, 常青, 张科, 等. Radon 变换在低信噪比图像中的线段检测[J]. 红外与激光工程, 2003, **32**(2): 163-166.  
WANG Li, CHANG Qing, ZHANG Ke, *et al.* Radon transform for line segment detection in low SNR image [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2003, **32**(2): 163-166.
- [15] 安志勇, 赵珊, 王晓华, 等. 基于多尺度 Radon 变换的图像检索[J]. 光子学报, 2007, **36**(6): 1176-1180.  
AN Zhi-yong, ZHAO Shan, WANG Xiao-hua, *et al.* Content-Based Image Retrieval Based on the Multi-Scale Radon Transform [J]. **Acta Photonica Sinica**, 2007, **36**(6): 1176-1180.