

文章编号 1004-924X(2000)02-0106-04

# 大视场主动光学成像系统的成像研究

吴亚平, 张天序, 桑 农, 汪国有, 曹治国

(华中理工大学图像识别与人工智能研究所)

图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 从主动光学成像系统的照明模型出发, 研究了大视场情况下目标和景物的成像性质, 分析了传输介质对照明和成像光束的衰减作用, 得出了光学成像系统像面照度的计算公式, 并对其对比传递特性和视场大小对成像的影响进行了详细的分析, 得出了小视场近似的条件, 其结果可用于主动光学成像系统的设计、图像分析和目标识别。

关键词: 点光源; 主动光学成像系统; 衰减; 散射; 对比

中图分类号: TH703 文献标识码: A

## 1 引 言

对主动光学成像系统的成像分析是主动光学成像系统总体设计的一个重要内容。一方面可通过它来分析系统对比传递特性及有效作用距离, 从而为确定系统参数提供理论依据; 另一方面它为分析主动光学成像系统的图像, 识别目标提供有用的信息。因此, 对它研究有着重要的应用价值。在主动光学成像系统中, 像面光照度不仅受到光传输介质吸收和散射的影响, 而且受到目标偏离视场中心角度的影响。因此, 对其分析要进行复杂的计算。为简化计算, 人们总是略去角度的影响<sup>[1]</sup>, 得出只适应小视场的结果。曹兴房<sup>[2]</sup>假定了主动系统照明光束在景物上的照度是均匀的, 且在散射光的计算中略去了大气对光的衰减作用。这样就略去了角度的影响, 这种假定只有当照明覆盖角和接收器视场角都很小的情况下才能成立。实际上, 在许多情况下, 照明覆盖角和接收器视场角并不小, 如低空拍摄等。所以, 研究一般及大视场情况下主动光学成像系统的成像性质和小视场近似条件很有必要。为此, 本文研究了在大视场情况下目标和景物的成像性质, 得到了光学成像系统像面照度的计算公式, 并对其对比传递特性及视场大小对图像的影响进行了详细的分析, 得出了小视场的近似条件。其结果对主动光学成像系统的设计、图像分析和目标识别都有一定的意义。

## 2 主动光学成像系统

在主动光学成像系统中, 景物和目标是通过

反射人工光源发出的光而在成像系统中成像的。系统示意图如图 1。

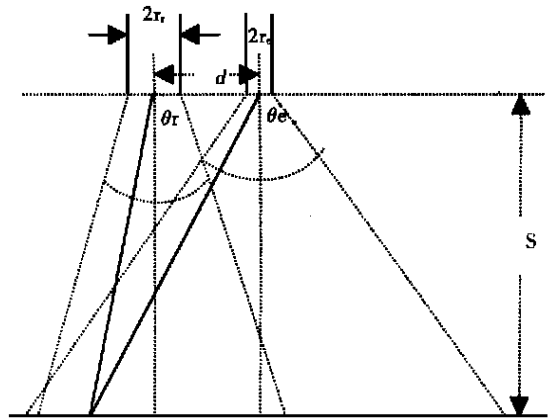


Fig. 1 Active optical imaging system

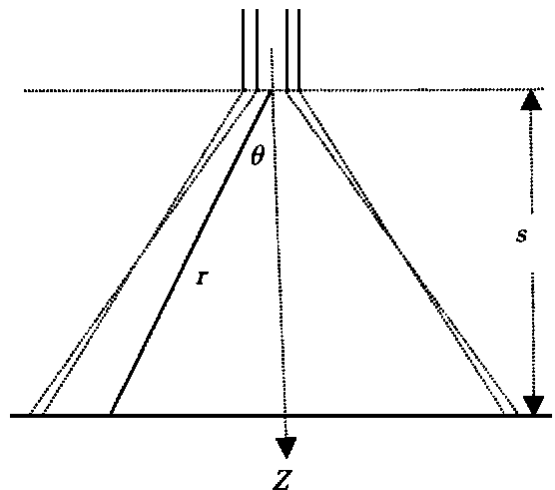


Fig. 2 Active optical imaging system with the same axes

图中,  $\theta_e$  为点光源照明覆盖半角,  $r_e$  为光源的半口径,  $\theta_r$  为接收器视场半角,  $r_r$  为接收器的半口径,  $d$  为光源到接收器的横向距离。由于光源到接收器的横向距离  $d$  远小于光源到目标和接收器到目标的距离, 所以可以把系统作为同轴系统来处理, 简化为图 2。其中  $\theta$  是光源至目标的光线与光轴的夹角,  $r$  为光源到目标的距离。

### 3 目标成像的计算

假定目标是反射率为  $\rho$  的理想漫反射体, 光源的发光强度为  $I$ , 大气衰减系数为  $\mu$ , 则目标受点光源照射的照度为  $E_t = Ie^{-\mu r} \cos\theta / r^2$ , 目标亮度为  $L = \rho E_t / \pi$ , 其在成像面的照度为

$$E_0 = \frac{\tau L \cos\theta dA d\Omega}{dA} e^{-\mu s / \cos\theta} = \frac{\tau \rho \cos^7\theta}{4F^2 s^2} e^{-2\mu s / \cos\theta} \quad (1)$$

其中  $dA$ ,  $d\Omega$  分别为目标成像面面积和目标像素面积,  $d$  为接收器对目标所张的立体角,  $\tau$  为光学成像系统的光透过率,  $1/F$  为接收器成像物镜相对孔径。

### 4 成像背景光的计算

由于大气对光源发出的光的散射, 使得一部分散射光进入接收器形成背景。在大气散射中, 多次散射主要集中在照明光束的传播方向上, 而本文中的接收器处于后向附近, 只能接收散射角在  $\pi$  左右一个很小范围内的散射光, 所以我们只需考虑一次散射, 且有角散射系数近似等于后向散射系数, 即  $\beta(\theta) = \beta(\pi)$ 。对位于  $z$  处与  $Z$  轴垂直的厚度为  $dz$  的环介质元  $dA dz$ , 它受到的光照度为

$$E_s = \frac{I e^{-\mu z / \cos\gamma} \cos^3\gamma}{z^2}$$

$$C_2(s, \theta) = \frac{\rho \tan^2\theta \cos^7\theta e^{-2\mu s \cos\theta}}{2\pi \beta(\pi) s^2 \left[ \left( \frac{s-f}{4sf} \right) (1-a^4) + \frac{1}{2f} (1-a^2) - 2\mu(1-a^3) \ln \frac{s}{f} - \mu(1-a) \right]} \quad (4)$$

成像面上目标与相邻景物间的表现衬比为

$$C_2(s, \theta) = C_2(0) \left\{ 1 + e^{2\mu s \cos\theta} \frac{2\pi s^2 \beta(\pi)}{\rho \tan^2\theta \cos^7\theta} \left[ \left( \frac{s-f}{4sf} \right) (1-a^4) + \frac{1}{2f} (1-a^2) - 2\mu(1-a^3) \ln \frac{s}{f} - \mu(1-a) \right] \right\}^{-1} \quad (5)$$

其中  $C_2(0) = (\rho - \rho) / \rho$  为目标与相邻景物之间的固有衬比。

其中  $\gamma$  为到达介质元的光线与光源光轴的夹角。由于介质元  $dA dz$  对光的散射而进入接收器的光通量为

$$d\Phi = e^{-\mu z / \cos\gamma} \Omega(x) E_s \beta(\pi) dA dz$$

其中,  $\Omega(x) = \frac{\pi r_r^2}{z^2} \cos^3\gamma$  (当  $z > f$  时),  $\Omega(x) = \frac{\pi r_r^2}{f^2} \cos\gamma$  (当  $z < f$  时),  $dA = \frac{2\pi z^2 \sin\gamma}{\cos^3\gamma} d\gamma$ ,  $f$  为光学成像系统的焦距。由此得散射光在像面上的照度

$$E_s = \frac{\tau \rho}{\pi (f \tan\theta)^2} = \frac{\pi \tau \beta(\pi)}{2F^2 \tan^2\theta}$$

$$\left[ \frac{1}{\cos(\min(\theta_e, \theta_r))} \left( \int_f^s \frac{t^3 e^{-2\mu t}}{z^2} dz + \int_0^f \frac{1}{f^2} t e^{-2\mu t} dz \right) dt \right]$$

在一般情况下,  $us \ll 1$ , 我们有近似解

$$E_s = \frac{\pi \tau \beta(\pi)}{2F^2 \tan^2\theta} \left[ \left( \frac{s-f}{4sf} \right) (1-a^4) + \frac{1}{2f} (1-a^2) - 2\mu(1-a^3) \ln \frac{s}{f} - \mu(1-a) \right] \quad (2)$$

其中  $a = \cos(\min(\theta_e, \theta_r))$ 。

### 5 成像系统的像面照度及衬比

成像系统的像面照度  $E$  是目标反射光在像面的照度  $E_0$  和大气散射光在像面的照度  $E_s$  之和

$$E = \frac{\tau \rho L \cos^7\theta}{4F^2 s^2} e^{-2\mu s / \cos\theta} + \frac{\pi \tau \beta(\pi)}{2F^2 \tan^2\theta} \left[ \left( \frac{s-f}{4sf} \right) (1-a^4) + \frac{1}{2f} (1-a^2) - 2\mu(1-a^3) \ln \frac{s}{f} - \mu(1-a) \right] \quad (3)$$

因此, 反射率为  $\rho$  的目标对大气背景的衬比为

### 6 讨 论

由(1)式我们看到, 目标反射光在像面的照度与  $\theta$  有关。在小视场近似中人们总是忽略其影响, 所产生的相对误差如图 3 所示。从图中可以看出, 随着  $\theta$  的增大, 误差也增大, 当  $\theta$  为 10 度时, 误差为百分之十左右, 当  $\theta$  为 20 度时, 误差为百分之四十左右, 当  $\theta$  为 30 度时, 误差为百分之七十左右, 且误差与光路上的透射比有关, 透射比减小,

误差增大。在一般情况下,当视场半角小于5度时,由小视场近似而引起的误差小于百分之五。此时可略去 $\theta$ 的影响。然而对于较大的视场角,必须考虑其影响。

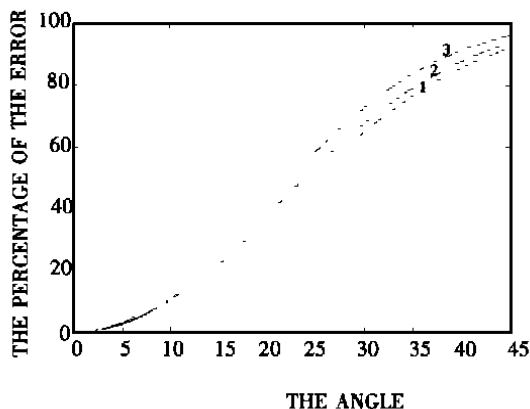


Fig. 3 The percentage of the relative error resulted from narrow view field approximation. The values of  $\exp(-\mu s)$  for lines 1, 2, 3 are 0.9, 0.7, 0.4, respectively

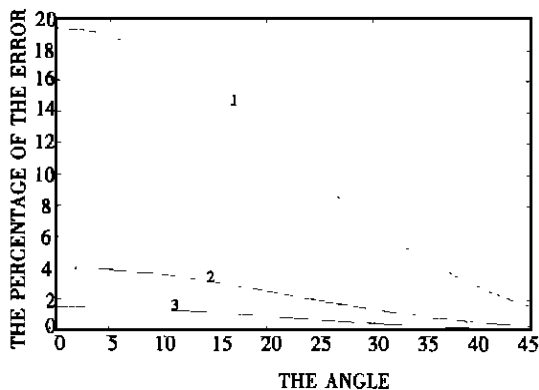


Fig. 4 The contrast between object and background resulted from the diffusion. The values of  $s$  for lines 1, 2, 3 are 50m, 100m, 150m, respectively.  $\theta = \pi/4$ ,  $\rho = 0.8$ ,  $f = 600\text{mm}$ ,  $\mu = 0.00196\text{m}^{-1}$ ,  $\beta(\pi) = 0.0003\text{m}^{-1}$

由(2)式可知,大气散射光在像面上的照度只与系统参数,大气后向散射系数及距离 $s$ 有关。由(4)式可看出,目标对大气背景的衬比随 $\theta$ 变化而变化,但这种变化在小视场探测器中不太明显。在一般情况下,当视场半角小于5度时,可略去其影响,认为目标对大气背景的衬比不随 $\theta$ 变化。然而,在较大视场的情况下, $\theta$ 的影响是不可略去的。图4画出了目标对大气背景的衬比随 $\theta$ 的变化(其衬比是用百分数表示的)。从图中可看出,随

着 $\theta$ 的增大,衬比不断减小,且与 $s$ 有关。当 $\theta$ 增大到一定程度时,由大气散射形成的背景有可能会淹没目标信息。

对图像来说,目标与相邻景物间的衬比是反映图像质量的一个重要因素,它对目标识别有重要的影响。由(5)式可知,大气散射使目标与相邻景物间的衬比低于它们之间的固有衬比,这可能造成图像模糊,目标细节部分信息丢失,且这种影响随 $s$ 的增大和目标对光的反射率 $\rho$ 的减小而变的更加显著,并且与 $\theta$ 和视场角的大小有关。图5画出了目标和相邻景物间的衬比与其固有衬比的百分数比值(即 $C_2(s, \theta)/C_2(0)$ 的百分数)随 $\theta$ 的变化。从中我们看到,其衬比随 $\theta$ 的增大而减小,且与 $s$ 有关。在一般情况下,当视场角小于5度时, $\theta$ 的影响可以略去,但对大视场,必须考虑其影响。

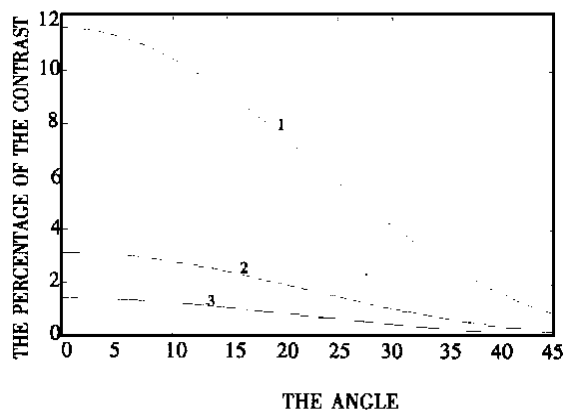


Fig. 5 The contrast between object and neighborhood object. The values of  $s$  for lines 1, 2, 3 are 50m, 100m, 150m, respectively.  $\theta = \pi/4$ ,  $\rho = 0.8$ ,  $f = 600\text{mm}$ ,  $\mu = 0.00196\text{m}^{-1}$ ,  $\beta(\pi) = 0.0003\text{m}^{-1}$

在以上的作图中,分别采用了积分形式的公式和近似公式进行计算,从图上看不出有任何差别。为分析近似公式的精度,在图6中作出了采用近似方法计算积分时的相对误差随 $\theta$ 和 $s$ 的变化(图中的相对误差是用百分数表示的情况)。从图中我们可以看出当 $\theta$ 大于1度后,其误差基本上不随 $\theta$ 变化。但随着 $s$ 的增加,误差有所增大,然而也在 $10^{-5}$ 数量级。因此,本文的近似公式有很高的精度,完全可以用在实际中。若对公式(1)、(2)、(3)、(4)、(5)加上小视场的条件,就可以得到文献<sup>[2]</sup>中的相应公式。

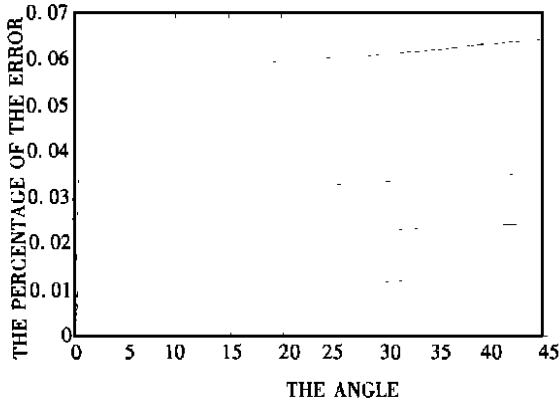


Fig. 6 The error of approximation calculation. The values of  $s$  for lines 1, 2, 3, 4 are 50m, 100m, 150m, 300m, respectively,  $\mu = 0.00196\text{m}^{-1}$

## 7 结 论

在主动光学成像系统照明模型下,目标反射光在光学成像系统像面的照度、目标与大气背景间的衬比及目标与相邻景物间的衬比都与目标的位置有关。当视场半角小于5度,一般可略去光源至目标的光线与其光轴间夹角的影响,用小视场近似。但对于大视场,必须考虑这个角度因素。对一般情况本文的近似公式都有很高的精度。

## 参考文献:

- [1] 张敬贤,李玉丹,金伟其.微光与红外成像技术[M].北京:北京理工大学出版社,1994.109-115.
- [2] 曹兴房.主动光学成像系统衬比传递特性及有效作用距离的分析[J].光子学报,1997,26(9):858-862.

## Imaging of active optical imaging system with a wide field of view

WU Ya-ping, ZHANG Tian-xu, SANG Nong, WANG Guo-you CAO Zhi-guo

(State Key Laboratory for Image Processing and Intelligent Control,  
Institute of Pattern Recognition and Artificial Intelligence,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on the irradiation model and imaging principles of an active optical imaging system, the imaging properties of active optical imaging systems with wide field of view are studied by taking account of the effects of both atmospheric attenuation and scattering. By theoretically studying, the formulas for calculating the irradiance on the imaging plane and the contrast of the image are obtained. The effects of atmospheric attenuation and scattering are analyzed. The transfer properties of the contrast and the effects of the size of the field of view on imaging are studied in detail. The validity of narrow field of view approximation is also analyzed. These results are useful to the design of active optical image systems, image analysis and object recognition.

**Key words:** point source; active optical imaging system; attenuation; scattering; contrast

作者简介: 吴亚平(1961-),男,江西乐平市人。华中理工大学物理系讲师,华中理工大学物理系硕士毕业,从事光电技术方面的研究。现为华中理工大学图像识别与人工智能研究所模式识别与智能系统专业博士生,从事目标成像特性、识别和仿真方面的研究。