

基于同心圆光栅和契形光栅的摄像机自标定方法

薛俊鹏 苏显渝 窦蕴甫

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 提出一种利用同心圆光栅和契形光栅作为标定模板, 基于正交方向消失点摄像机自标定的新方法。新方法利用相移条纹相位提取精度高的特性来求零相位特征点, 避免了传统标记点提取误差给标定结果带来的影响。要求摄像机至少从 6 个方位拍摄标靶, 采用四步相移得到光栅的截断相位并求解零相位交点, 计算消失点从而解算出摄像机的内参数。根据模拟实验得到影响消失点标定精度因素的分析结果, 制作了含有 7 个周期的同心圆光栅和 4 个周期的契形光栅。实际测量实验中分别用光栅靶标和灰度同心圆靶标进行相机标定, 对比重投影误差, 结果证明新方法提高了基于消失点标定算法的精度和稳健性。

关键词 光栅; 机器视觉; 摄像机标定; 消失点; 交比不变性; 同心圆光栅; 契形光栅

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0308002

A Concentric Circles and Wedge Grating-Based Camera Self-Calibration Method

Xue Junpeng Su Xianyu Dou Yunfu

(*Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*)

Abstract A new method for camera calibration by using concentric circles and wedge grating based on the orthogonal vanishing point calibration is proposed. This method uses the characteristics of the high-precision of the phase extraction to obtain the feature points, thus avoiding the calibration errors caused by the traditional marker extraction errors. The camera should capture the pattern images at least six positions. The wrapped phase of the grating can be gained by four-step phase shifting and the zero phase intersection points coordinate of the wrapped phase are calculated from images. The vanishing points and all the intrinsic parameters of the camera can be calculated. According to the simulation experiment analysis results which include factors influencing the vanishing point calibration accuracy, the concentric circles grating with seven periods and the wedge grating with four periods are designed. In the real measuring experiment, the grating target and gray concentric circles target are used to calibrate the camera respectively. Through comparing the reprojective errors of the two methods, it can be proved that the method proposed improves the calibration accuracy and robustness for the vanishing point calibration algorithm.

Key words gratings; machine vision; camera calibration; vanishing point; cross ratio invariability; concentric circles grating; wedge grating

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.6910; 080.1753

1 引 言

摄像机标定是计算机视觉领域所有工作的第一步^[1], 在三维重建、位姿测量以及视频跟踪等领域中

都极其重要^[2~4]。摄像机标定主要分为传统标定方法和自标定方法^[5~9]。传统摄像机标定方法主要是根据已知尺寸和形状的标靶进行标定, 常用的有三

收稿日期: 2011-10-08; **收到修改稿日期**: 2011-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(60838002, 61177010)资助课题。

作者简介: 薛俊鹏(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事机器视觉和近景摄影测量等方面的研究。

E-mail: junpengxue@163.com

导师简介: 苏显渝(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事三维传感和机器视觉等方面的研究。

E-mail: xysu@scu.edu.cn(通信联系人, 中国光学学会会员号: 6100105)

维靶标和二维平面靶标,主要代表是 Zhang^[10]的平面标定法,该方法简单方便、成本低廉、标定精度高。自 1992 年 Hartley 等^[11,12]首次提出自标定以来,这种方法以其简单方便的快速标定优点成为计算机视觉领域的研究热点之一,如基于消失点、圆环点和空间垂直直线的自标定方法等。Meng 等^[13]提出一种新的方法,用一个含有若干条直径的圆作为平面模板,提取拍摄图片中直径与圆的交点作为标记点计算出圆环点确定相机的内部参数。胡钊政等^[14]提出利用一组相互正交方向的消失点来进行摄像机标定。为了提高基于灭点的标定精度,谢文寒等^[15]提出了多像灭点的相机标定方法。

基于消失点自标定算法相机标定实验中,常选用灰度模板作为标靶,然后用 Harris 等算法提取特征点进行摄像机标定,但基于灰度图像的特征点提取精度最高为亚像素^[1],为了提高特征点坐标提取精度,本文利用相移条纹相位定位精度更高的特性^[16],提出利用相移同心圆光栅和契形光栅作为靶标提取特征点的方法,即对拍摄的图像求截断相位,将截断相位叠加计算零相位交点坐标。用圆心和零相位交点根据交比不变性求解消失点,然后由正交消失点调和共轭的特性列出方程求解摄像机内参数。

2 基本原理

2.1 摄像机模型

在透视投影模型下,点 M 的三维坐标为 $[X, Y, Z]^T$, 对应的图像点 m 坐标为 $[u, v]^T$, 相应的齐次坐标分别为 $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ 和 $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$, 它们之间的投影关系表示为^[1]

$$\lambda \tilde{m} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]\tilde{M}, \quad (1)$$

式中 λ 为任意常数, \mathbf{K} 为摄像机内参数矩阵, \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别对应摄像机坐标系到世界坐标系的旋转矩阵和平移向量。摄像机标定就是为了确定内部参数矩阵 \mathbf{K} :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 f_u 和 f_v 分别为图像 u 轴和 v 轴尺度因子, (u_0, v_0) 为主点坐标, s 为 u 轴和 v 轴不垂直因子。

2.2 零相位交点提取

采用灰度调制的同心圆光栅和契形光栅,如图 1(a),(b)所示,它们的强度函数分别为

$$I'_n(r) = a + b \cos\left(\frac{2\pi r}{T'} + \frac{2\pi n}{N}\right), \quad (3)$$

$$I''_n(\theta) = a + b \cos\left(\frac{2\pi \theta}{T''} + \frac{2\pi n}{N}\right), \quad (4)$$

式中 $n = 0, 1, \dots, N-1$; I'_n, I''_n 分别为同心圆光栅和契形光栅的第 $(n+1)$ 幅相移图像; N 为相移总数,文中选用四步相移 $N = 4$; a, b 为正常数,且 $a = b = 0.5$; r 为圆半径; T' 为同心圆光栅的半径周期; θ 为契形光栅的角度; T'' 为契形光栅的角度周期。拍摄 4 幅图像 I_1, I_2, I_3, I_4 , 通过四步相移解算出截断相位^[16],求解公式为

$$\Phi(u, v) = \arctan\left[\frac{I_4(u, v) - I_2(u, v)}{I_1(u, v) - I_3(u, v)}\right], \quad (5)$$

式中 $\Phi(u, v)$ 为在 $[-\pi, \pi]$ 的相位主值。计算同心圆光栅和契形光栅截断相位同时为零的点作为标记点,如图 1(c)所示。

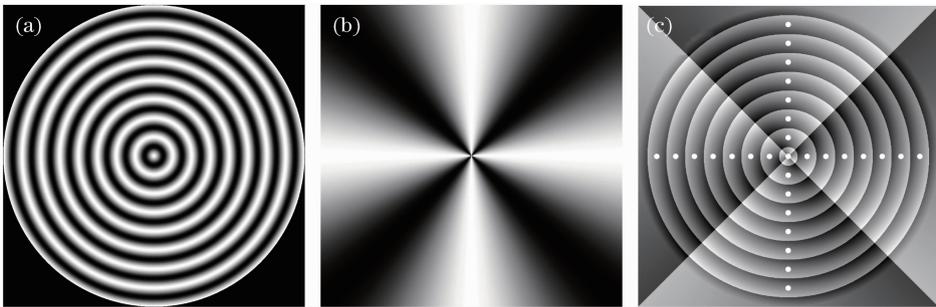


图 1 光栅靶标。(a)同心圆光栅;(b)契形光栅;(c)截断相位图(圆点为零相位点)

Fig. 1 Grating target. (a) Concentric circles grating; (b) wedge grating; (c) wrapped image

(the dots are zero phase points)

2.3 解算消失点

设每个圆环中存在一组具有正交关系的直线,如图 2(a)所示。过圆心的两条直径 $AB \perp CD$, 圆心 O 是线段 AB 和 CD 的中点。直线 AB 和 CD 的无穷

远点分别为 $P_{1\infty}$ 和 $P_{2\infty}$ 。

图 2(a)经过投影后所成的像为图 2(b)。图中点 A_m, B_m, C_m, D_m 和 O_m 分别为点 A, B, C, D 和 O 的像点。点 P_1 和 P_2 分别为无穷远点 $P_{1\infty}$ 和 $P_{2\infty}$ 的像

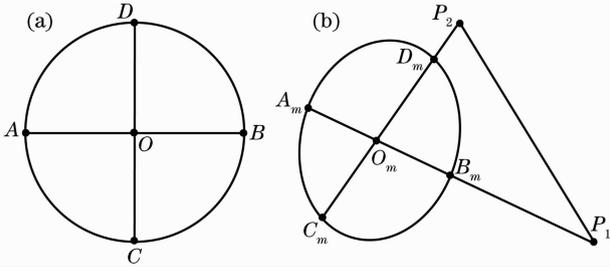


图2 消失点求解示意图。(a)场景模型；
(b)模型透视图像

Fig. 2 Schematic diagram of vanishing point solution.

(a) Scene model; (b) perspective image of model

点,即直线 $A_m B_m$ 和 $C_m D_m$ 的消失点。

根据射影几何调和共轭理论^[1],容易证明直径与圆的两个交点与圆心以及该直径的无穷远点调和分割,得

$$\begin{cases} (A, B; O, P_{1\infty}) = -1 \\ (C, D; O, P_{2\infty}) = -1 \end{cases} \quad (6)$$

根据射影几何中交比不变性,像点 A_m, B_m, C_m, D_m 和 O_m 也满足(6)式的调和共轭关系,于是可以得到

$$\begin{cases} (A_m, B_m; O_m, P_1) = -1 \\ (C_m, D_m; O_m, P_2) = -1 \end{cases} \quad (7)$$

通过2.2节方法计算图像中每一个圆环周期的 A_m, B_m, C_m, D_m 以及圆心 O_m 的坐标,分别表示为 $(u_A, v_A), (u_B, v_B), (u_C, v_C), (u_D, v_D)$ 和 (u_O, v_O) ,代入(7)式得两个消失点图像坐标计算公式为

$$\begin{cases} u_{P_1} = \frac{u_O(u_A + u_B) - 2u_A u_B}{2u_O - u_A - u_B} \\ v_{P_1} = \frac{v_O(v_A + v_B) - 2v_A v_B}{2v_O - v_A - v_B} \\ u_{P_2} = \frac{u_O(u_C + u_D) - 2u_C u_D}{2u_O - u_C - u_D} \\ v_{P_2} = \frac{v_O(v_C + v_D) - 2v_C v_D}{2v_O - v_C - v_D} \end{cases} \quad (8)$$

3 摄像机标定

在欧氏几何中,对于 $AB \perp CD$ 的两条正交直线方向为 d_{AB}, d_{CD} ,根据无穷远单应关系得两条直线间的夹角公式为

$$\cos 90^\circ = \frac{d_{AB}^T d_{CD}}{\sqrt{d_{AB}^T d_{AB}} \sqrt{d_{CD}^T d_{CD}}} = \frac{P_1^T \omega P_2}{\sqrt{P_1^T \omega P_1} \sqrt{P_2^T \omega P_2}} = 0, \quad (9)$$

即得

$$P_1^T \omega P_2 = P_1^T K^{-T} K^{-1} P_2 = 0, \quad (10)$$

式中 $\omega = K^{-T} K^{-1}$ 是绝对二次曲线的像,它是一个对称矩阵,拥有6个未知参量 $[\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6]$,因 $\omega_6 = 1$ 故拥有5个自由度,(10)式写成线性方程为

$$u_{P_1} u_{P_2} \omega_1 + (v_{P_1} u_{P_2} + u_{P_1} v_{P_2}) \omega_2 + v_{P_1} v_{P_2} \omega_3 + (u_{P_1} + u_{P_2}) \omega_4 + (v_{P_1} + v_{P_2}) \omega_5 + \omega_6 = 0. \quad (11)$$

从不同方位对同一场景进行 $m (m \geq 5)$ 次拍摄,可获得 m 个线性方程。采用最小二乘算法求解出 ω 。通过对 ω 进行 Cholesky 分解再求逆得到 $\tilde{K} \cong K$,由 K 矩阵最后一个元素为1的约束条件,求得摄像机内参数。

4 实验结果与分析

为了测试提出的利用同心圆光栅和契形光栅计算消失点自标定方法的性能,分别进行模拟实验和实际测量实验。

4.1 模拟实验

模拟实验研究了同心圆环个数、标定方位数以及标记点提取精度对消失点标定精度的影响。模拟相机内参数如表1所示。模拟图1(c)所示标记点,用模拟相机从10个方位对标记点成像,获得标记点图像坐标。

表1 相机内部参数

Table 1 Intrinsic parameters of the camera

f_u/pixel	f_v/pixel	u_0/pixel	v_0/pixel	s
656	656	302	243	0.28

4.1.1 圆环数对标定精度的影响

理想情况下,由一对正交直径与每个同心圆环的交点计算的一对消失点是相同的,故只需一个圆环就可以精确地标定相机,但实际应用中,提取的交点坐标带有一定的误差,对标定精度有较大的影响。下面研究同心圆环数增多是否对交点噪声起到一定的抑制作用,从而提高标定精度。模拟实验对标记点加方差为0.1的高斯噪声,用不同圆环数进行标定,重复100次求平均值,标定结果如图3所示。

由图3可见,随着圆环个数的增加标定误差成一定下降趋势,说明圆环数量的增加能够在一定程度上抑制噪声的影响;当同心圆环数达到6个后基本趋于平缓,所以实际测量实验中将采用7个同心圆环光栅。

4.1.2 拍摄方位数对标定结果的影响

理论上当 $m (m \geq 5)$ 次拍摄即可进行摄像机标定,为了研究 m 对标定精度的影响,模拟实验中取 $m = 5, 6, \dots, 10$,对标记点加方差为0.1的高斯噪声,采用7个同心圆环进行标定,重复100次求平均

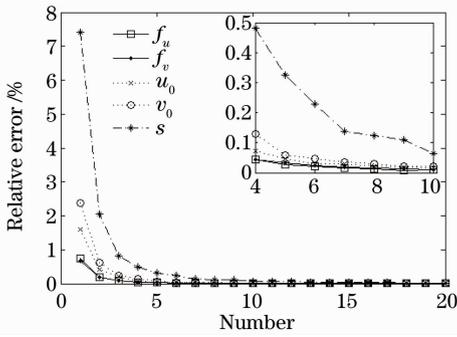


图 3 圆环个数变化时标定参数的误差曲线

Fig. 3 Error curve of calibration parameters obtained when the number of rings changed

值, 标定结果如图 4 所示。

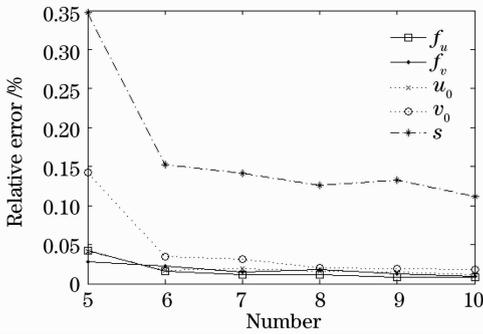


图 4 拍摄方位数变化时标定参数的误差曲线

Fig. 4 Error curve of calibration parameters obtained when the number of camera positions changed

图 4 可见, 当 $m = 5$ 时标定误差较大, 当 $m \geq 6$ 以后标定精度趋于平稳。所以实际实验中将采用 6 个拍摄方位。

4.1.3 噪声对标定结果的影响

采用 6 个拍摄方位对含有 7 个同心圆环的靶标进行拍摄。对标记点图像坐标加方差为 $0 \sim 1$ pixel, 步长为 0.1 的高斯噪声。在不同的噪声条

件下进行标定, 重复 100 次求平均值。标记点噪声对消失点标定误差的影响如图 5 所示。

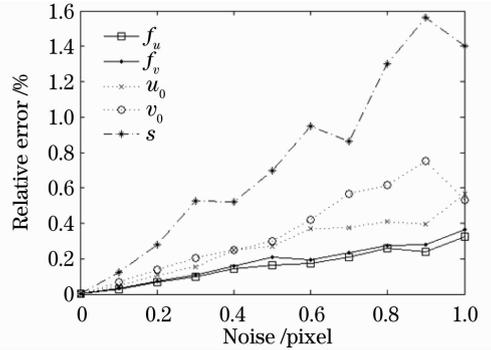


图 5 图像噪声变化时标定参数的误差曲线

Fig. 5 Error curve of calibration parameters obtained when the image noise changed

图 5 说明随着图像噪声的增加标定误差增长; 摄像机的 5 个内参数误差虽然增长的速度不同, 但总体成上升趋势, 所以实际测量中获得高精度的直径与圆环交点的亚像素坐标是得到摄像机高精度标定的一个条件。由于相移条纹算法在确定相位时具有较高的精度和较强的抗噪声干扰能力, 所以利用相位特性求解正交的圆和过圆心直线的零相位交点能够提高相机标定精度。

4.2 实际测量实验

实际实验中, 摄像机为 JAI 公司的 CV-A50, 分辨率为 $572 \text{ pixel} \times 732 \text{ pixel}$, 镜头焦距为 12 mm。用分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$, 像素间距为 0.264 mm 的 Philips170S87 液晶显示器显示图 1 所示标靶, 标靶为含有 7 个同心圆和 4 个契形的光栅。摄像机从 6 个方位拍摄标靶。对拍摄图像求截断相位, 然后解算零相位交点作为特征点。其中一幅截断相位图和零相位交点如图 6(a) 所示。

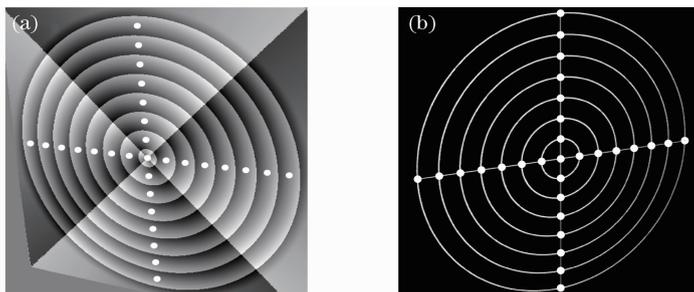


图 6 实际拍摄的标定模板图像(圆点为标记点)。(a) 本文的标定模板; (b) 灰度标定模板

Fig. 6 Real images of the calibration pattern (the dots are marks). (a) Calibration pattern of this paper; (b) gray calibration pattern

为了验证文中提出的利用相移条纹光栅提取特征点基于消失点标定算法的标定精度, 设计一个相同同心圆个数的灰度图像, 利用 Harris 算法提取特

征点对相机进行标定, 所拍摄靶标和提取的特征标记点如图 6(b) 所示。用重投影误差测量标定精度, 两种方法的标定结果对比如表 2 所示。

表 2 不同标定方法的标定结果

Table 2 Calibration results with different calibration methods

Calibration pattern	f_u/pixel	f_v/pixel	u_0/pixel	v_0/pixel	s	Reprojective error /pixel
This paper	1475.686	1527.395	391.992	264.522	0.409	0.262
Gray	1456.454	1508.604	353.590	273.140	4.527	0.410

表 2 标定结果显示,基于相移条纹光栅方法比传统灰度模板方法标定结果重投影误差低,故新方法的标定精度高。这说明利用文中涉及的光栅靶标求零相位点作为特征点,提高了基于消失点标定方法的精度。

5 结 论

提出了一种基于消失点标定技术的同心圆光栅和契形光栅靶标,对该靶标利用相移条纹求解零相位特征点。由于该光栅靶标求零相位特征点比对传统的灰度靶标通过 Harris 算法提取特征点的精度高,所以解算出精度更高的摄像机内参数。模拟实验对实际标定实验中标定模板的设计具有重要的指导意义。实际测量实验中重投影误差降低了大约 1/2,这表明文中方法提高了传统基于消失点标定技术的精度和稳健性。

参 考 文 献

- Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. 134~173
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 134~173
- Bian Xintian, Su Xianyu, Chen Wenjing. A novel three-dimensional coordinates measurement method based on inverse photogrammetry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1832~1836
边心田, 苏显渝, 陈文静. 基于反向摄影的三维坐标测量方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1832~1836
- Xue Junpeng, Su Xianyu, Xiao Yongliang *et al.*. A new algorithm for bundle adjustment based on stereo vision[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(6): 888~892
薛俊鹏, 苏显渝, 肖永亮等. 基于双目视觉的光束法平差新算法[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(6): 888~892
- Zhao Rujin, Zhang Qiheng, Zuo Haorui *et al.*. A method of improving the measuring accuracy of the pose of targets based on outliers-removal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2463~2467
赵汝进, 张启衡, 左颢睿等. 基于去离群点策略提高目标位姿测量精度[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2463~2467
- B. Li, K. Peng, X. Ying *et al.*. Simultaneous vanishing point

- detection and camera calibration from single images[J]. *Advances in Visual Computing*, 2010, **6454**: 151~160
- Sun Junhua, Liu Zhen, Zhang Guangjun *et al.*. Camera calibration based on flexible 3D target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3433~3439
孙军华, 刘震, 张广军等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3433~3439
 - Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 465~472
霍炬, 杨卫, 杨明. 基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 465~472
 - L. Grammatikopoulos, G. Karras, E. Petsa. An automatic approach for camera calibration from vanishing points[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, **62**(1): 64~76
 - Wang Yongqiang, Lü Naiguang, Deng Wenyi. The new online calibration method in large-scale videogrammetry system [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 85~88
王永强, 吕乃光, 邓文怡. 大尺寸视觉测量系统在线标定的新方法[J]. *光学技术*, 2007, **33**(1): 85~88
 - Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on, Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
 - R. Hartley. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras [C]. *Computer Vision-ECCV'92*, 1992, **588**: 579~587
 - S. J. Maybank, O. D. Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1992, **8**(2): 123~151
 - X. Meng, Z. Hu. A new easy camera calibration technique based on circular points [J]. *Pattern Recognition*, 2003, **36**(5): 1155~1164
 - Hu Zhaozheng, Tan Zheng. A new camera self-calibration method using two vanishing points [J]. *Space Electronic Technology*, 2005, **2**(1): 42~46
胡钊政, 谈正. 一种基于二消失点的摄像机自标定新算法[J]. *空间电子技术*, 2005, **2**(1): 42~46
 - Xie Wenhan, Zhang Zuxun. Camera calibration based on vanishing points of multi-image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, **33**(4): 335~340
谢文寒, 张祖勋. 基于多像灭点的相机定标[J]. *测绘学报*, 2004, **33**(4): 335~340
 - Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics [M]. Beijing: Science Press, 1999. 321~331
苏显渝, 李继陶. *信息光学* [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 321~331