第 27 卷 第 6 期
2003 年 12 月

激 光 技 术
LASER TECHNOLOGY

Vol. 27 ,No. 6
December ,2003

文章编号: 1001-3806(2003)06-0580-04

激光束的参数描述 *

彭愿洁[1] 吕百达[1,2]
([1]四川大学激光物理与化学研究所,成都,610064)
([2]华中科技大学激光技术国家重点实验室,武汉,430074)

摘要: 基于对激光束按空间对称性和空间相干性的分类,对激光束的参数描述进行了研究。以有扭曲的各向异性高斯-谢尔模型光束、有扭曲的各向同性高斯-谢尔模型光束、各向异性高斯-谢尔模型光束、旋转简单像散高斯-谢尔模型光束、准直简单像散高斯-谢尔模型光束、各向同性高斯-谢尔模型光束、复杂像散高斯光束、旋转简单像散高斯光束、准直简单像散高斯光束和无像散高斯光束为典型例,对它们的分类和独立特征参数的数目作了详细分析。对一些相关问题也作了讨论。

关键词: 激光束描述;高斯-谢尔模型光束;扭曲;复杂像散;简单像散

中图分类号: O437 **文献标识码**: A

Parametric characterization of laser beams

Peng Yuanjie[1], *Lü Baida*[1,2]
([1] Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)
([2] National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: Based on the laser beam classification in accordance with the spatial symmetry and spatial coherence, the parametric characterization of laser beams is studied. The anisotropic twisted Gaussian-Schell model (ATGSM) beam, isotropic twisted Gaussian-Schell model (ITGSM) beam, anisotropic Gaussian-Schell model (AGSM) beam, rotated astigmatic Gaussian-Schell model (RAGSM) beam, aligned astigmatic Gaussian-Schell model (AAGSM) beam, stigmatic Gaussian-Schell model (SGSM) beam, general astigmatic Gaussian (GAG) beam, rotated astigmatic Gaussian (RAG) beam, aligned astigmatic Gaussian (AAG) beam, and stigmatic Gaussian (SG) beam are taken as typical illustrative examples, their classification and the number of independent beam parameters are analyzed. Some related problems are also discussed.

Key words: laser beam characterization; Gaussian-Schell model (GSM) beam; twist; general astigmatism; simple astigmatism

引 言

笔者对激光束按照空间对称性和空间相干性的分类作了综述[1]。在此基础上对一些典型光束,包括扭曲的各向异性高斯-谢尔模型光束、有扭曲的各向同性高斯-谢尔模型光束、各向异性高斯-谢尔模型光束、旋转简单像散高斯-谢尔模型光束、准直简单像散高斯-谢尔模型光束、各向同性高斯-谢尔模型光束、复杂像散高斯光束、旋转简单像散高斯光束、准直简单像散高斯光束和无像散高斯光束的分类以及独立特征参数的数目作了详细分析和研究。

* 华中科技大学激光技术国家重点实验室资助项目。

作者简介:彭愿洁,女,1980 年 9 月出生。硕士研究生。主要从事激光光束传输变换方面的研究工作。

收稿日期:2003-01-23;收到修改稿日期:2003-02-20

1 一些典型光束的分类

1.1 有扭曲的各向异性高斯-谢尔模型光束(GA, $(\sigma^2)^{-1} \neq 0, \mu \neq 0$)

一般地,既能反映光束的像散特性同时又反映光束的空间部分相干性的光束模型是有扭曲的各向异性高斯-谢尔模型光束(anisotropic twisted Gaussian-Schell model beam, ATGSM 光束),其交叉谱密度函数可写成如下形式[2]:

$$\Gamma(r_1, r_2) = \frac{4A}{\pi^2 \det w^2}\exp\{-[r_1(w^2)^{-1}r_1^T + r_2(w^2)^{-1}r_2^T] - \frac{1}{2}(r_1 - r_2)(\sigma^2)^{-1}(r_1 - r_2)^T - \frac{ik}{2}(r_1 R^{-1} r_1^T + r_2 R^{-1} r_2^T) - ik\mu r_1 J r_2^T\} \quad (1)$$

式中, $J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光波波长, μ

是扭曲因子，

$$\mathrm{w}^2=\begin{bmatrix} w_x^2 & w_{xy}^2 \\ w_{xy}^2 & w_y^2\end{bmatrix},\ \sigma^2=\begin{bmatrix}\sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2\\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2\end{bmatrix},$$

$$\mathrm{R}=\begin{bmatrix}R_x & R_{xy}\\ R_{xy} & R_y\end{bmatrix} \tag{2}$$

分别为与光束束宽、空间相干度和位相有关的实对称矩阵，它们是传输距离 z 的函数[2]。在一般情况下，它们具有各自不同的主轴，不能同时对角化。

(1)式可改写为如下形式：

$$\Gamma(\mathrm{r}_1,\mathrm{r}_2)=\frac{4A}{\pi^2\det \mathrm{w}^2}\cdot\exp\{-[\mathrm{r}_1(\mathrm{a}+\mathrm{i\,b})\mathrm{r}_1^T+\mathrm{r}_2(\mathrm{a}-\mathrm{i\,b})\mathrm{r}_2^T+\mathrm{r}_1\mathrm{c}\mathrm{r}_2^T]\} \tag{3}$$

式中，$\mathrm{a}=(\mathrm{w}^2)^{-1}+\frac{1}{2}(\sigma^2)^{-1}$，$\mathrm{b}=\frac{k}{2}\mathrm{R}^{-1}$，

$$\mathrm{c}=-(\sigma^2)^{-1}+\mathrm{i}\,k\mu\mathrm{J}=\mathrm{c}_1+\mathrm{i\,c}_2 \tag{4}$$

由 w，σ^2，R 的性质可知，a，b，c_1 是实对称矩阵，由于扭曲因子 μ 的存在，c，c_2 不对称。c ≠0，属于部分相干光。w_x^2，w_{xy}^2，w_y^2，σ_x^2，σ_{xy}^2，σ_y^2，R_x，R_{xy}，R_y 和扭曲因子 μ 构成描述 ATGSM 光束的 10 个独立参数。即是空间相干性分类中部分相干光具有“最多 10 个”独立参数的情形。

由维格纳分布函数的定义式(见文献[1]中(2)式)可得 ATGSM 光束的维格纳分布函数为：

$$W(\upsilon)=\frac{A}{\pi^2}\sqrt{\det \mathrm{Q}}\exp(-\upsilon\mathrm{Q}\upsilon^T) \tag{5}$$

式中，

$$\mathrm{Q}=\begin{bmatrix}\mathrm{S} & \mathrm{U}\\ \mathrm{U}^T & \mathrm{T}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}2[(\mathrm{w}^2)^{-1}+\mathrm{B}\gamma\mathrm{B}^T] & k\mathrm{B}\gamma\\ k\gamma\mathrm{B}^T & k^2\gamma/2\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\mathrm{B}=\mathrm{b}-\frac{1}{2}\mathrm{c}_2=\frac{1}{2}k(\mathrm{R}^{-1}-\mu\mathrm{J}),$$

$$\gamma^{-1}=\mathrm{a}-\frac{1}{2}\mathrm{c}_1=(\mathrm{w}^2)^{-1}+(\sigma^2)^{-1} \tag{7}$$

Q 称为光束参数矩阵，显然这是一个实对称矩阵。由此，可进一步得到 ATGSM 光束的二阶矩矩阵为：

$$\mathrm{V}=\frac{1}{2}\mathrm{Q}^{-1}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}(\mathrm{S}-\mathrm{U}\mathrm{T}^{-1}\mathrm{U}^T)^{-1} & -(\mathrm{T}\mathrm{U}^{-1}\mathrm{S}-\mathrm{U}^T)^{-1}\\ (\mathrm{U}-\mathrm{S}\mathrm{U}^{-1T}\mathrm{T})^{-1} & -(\mathrm{U}^{-1T}\mathrm{S}^{-1}\mathrm{U}-\mathrm{T})^{-1}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}\mathrm{W} & \mathrm{M}\\ \mathrm{M}^T & \mathrm{U}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{4}\mathrm{w}^2 & -\frac{1}{2k}\mathrm{w}^2\mathrm{B}\\ -\frac{1}{2k}\mathrm{B}^T\mathrm{w}^2 & \frac{1}{k^2}(\gamma^{-1}+\mathrm{B}^T\mathrm{w}^2\mathrm{B})\end{bmatrix} \tag{8}$$

显然，W，U 是实对称的，而 M 不对称，光束参数为 W_{11}，W_{12}，W_{22}，U_{11}，U_{12}，U_{22}，M_{11}，M_{12}，M_{21}，M_{22}。在空间对称性分类中，这就是 GA 光束具有“最多 10 个”独立参数的情形。

由上面的推导过程可以看出，参数组 w_x^2，w_{xy}^2，w_y^2，σ_x^2，σ_{xy}^2，σ_y^2，R_x，R_{xy}，R_y，μ 与 W_{11}，W_{12}，W_{22}，U_{11}，U_{12}，U_{22}，M_{11}，M_{12}，M_{21}，M_{22} 之间由矩阵关系相联系，由其中一组就可以将另一组推导出来，而且它们都能完整地描述光束，在实际应用中可以根据需要进行选择。

1.2 有扭曲的各向同性高斯-谢尔模型光束(GA，$\sigma^{-2}\neq 0$，$\mu\neq 0$)

对各向同性 TGSM 光束[3](isotropic twisted Gaussian-Schell model beam，ITGSM 光束)，w^2，σ^2，R 简化为 w^2，σ^2，R 与 2×2 单位矩阵 I 的乘积，而扭曲因子 μ 依然存在，(3)式成为：

$$\Gamma(\mathrm{r}_1,\mathrm{r}_2)=\frac{4A}{\pi^2 w^2}\exp\{-[(a+\mathrm{i}\,b)\mathrm{r}_1\mathrm{r}_1^T+(a-\mathrm{i}\,b)\mathrm{r}_2\mathrm{r}_2^T+\mathrm{r}_1\mathrm{c}\mathrm{r}_2^T]\} \tag{9}$$

$$a=w^{-2}+\frac{1}{2}\sigma^{-2},\ b=\frac{k}{2R},\ \mathrm{c}=-\sigma^{-2}\mathrm{I}+\mathrm{i}\,k\mu\mathrm{J} \tag{10}$$

c ≠0，在相干性分类中属于部分相干光。其光束参数为 w^2，σ^2，R，μ，即有 4 个独立参数。

由 ITGSM 光束的性质，(7)式简化为：

$$\mathrm{B}=\frac{1}{2}k(R^{-1}\mathrm{I}-\mu\mathrm{J}),\ \gamma^{-1}=(w^{-2}+\sigma^{-2})\mathrm{I} \tag{11}$$

由(8)式，(11)式可得 ITGSM 光束的二阶矩矩阵为：

$$\mathrm{V}=\begin{bmatrix}W\mathrm{I} & \mathrm{M}\\ \mathrm{M}^T & U\mathrm{I}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}\frac{1}{4}w^2\mathrm{I} & -\frac{w^2}{2k}\mathrm{B}_{\mathrm{TG}}\\ -\frac{w^2}{2k}\mathrm{B}_{\mathrm{TG}}^T & [\frac{1}{k^2}(w^{-2}+\sigma^{-2})+\frac{1}{4}w^2(R^{-2}+\mu^2)]\mathrm{I}\end{bmatrix} \tag{12}$$

易得 $M_{11}=M_{22}$，$M_{12}=-M_{21}\neq M_{21}$，因此根据对称性分类原则，虽然 ITGSM 光束有各向同性特性，但是由于扭曲因子的存在，它仍然属于具有复杂像散的 GA 光束。独立参数为 W，U，M_{11}，M_{12}。这就是 GA 光束具有“最少 4 个”独立参数的情形。

由上述分析可知，只要扭曲因子不为 0，一定是 GA 光束。现在再来说明扭曲因子不为 0 的光束也一定是部分相干的。如果光束具有完全相干性，即 $(\sigma^2)^{-1}=0$，可证明，因交叉谱密度函数必须具有半正定性而直接导致扭曲因子必具有上界，即对完全相干光必须有 $\mu=0$。也可以从完全相干光的交叉谱密度函数的定义式(见文献[1]中(16)式)来简单

理解这个结论,显然,完全相干时,(3)式中的交叉项 $r_1 c r_2^T$ 必须为 0 才能满足要求,即 $(\sigma^2)^{-1}=0$ 且 $\mu=0$。由此可见,只要光束存在扭曲,不管是用相干性还是对称性分类,都是最一般的情况,即具有复杂像散的部分相干光束。但是反之不真,即复杂像散部分相干光束的扭曲因子可以为 0。此外,由上述讨论还可以看出 $c=0$ 同 $(\sigma^2)^{-1}=0$ 是等价的,因此,可以将相干性分类的规则等价地表述为 $(\sigma^2)^{-1}=0$ 时为完全空间相干光,$(\sigma^2)^{-1}\neq 0$ 时为部分相干光。

1.3 各向异性高斯-谢尔模型光束(GA,$(\sigma^2)^{-1}\neq 0$,$\mu=0$)

当 $\mu=0$ 时,ATGSM 光束简化为 AGSM 光束(anisotropic Gaussian-Schell model beam),独立参数为 $w_x^2, w_{xy}^2, w_y^2, \sigma_x^2, \sigma_{xy}^2, \sigma_y^2, R_x, R_{xy}, R_y$,即有 9 个。在相干性分类中属于部分相干光。此时 w^2, σ^2, R 都是实对称矩阵,(7)式简化为:

$$B = \frac{1}{2}kR^{-1}, \gamma^{-1} = (w^2)^{-1} + (\sigma^2)^{-1} \quad (13)$$

由(8)式、(13)式可得 AGSM 光束的二阶矩矩阵为:

$$V = \begin{bmatrix} W & M \\ M^T & U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}w^2 & -\frac{1}{4}w^2R^{-1} \\ -\frac{1}{4}R^{-1}w^2 & \frac{1}{k^2}\gamma^{-1} + \frac{1}{4}R^{-1}w^2R^{-1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

显然 $M\neq M^T$,属于对称性分类中的 GA 光束。由 w^2, σ_2, R 的对称性容易得出 W, U 是实对称矩阵,M 不对称,但满足:

$$W^{-1}M^2 = (W^{-1}M^2)^T \text{或}$$
$$W_{12}(M_{11}-M_{22}) + M_{12}W_{22} - M_{21}W_{11} = 0 \quad (15)$$

因此,V 矩阵的独立参数将减少一个,即共是 9 个独立参数,为 U_{11}, U_{12}, U_{22} 和 $W_{11}, W_{12}, W_{22}, M_{11}, M_{12}, M_{21}, M_{22}$ 中的任意 6 个,另一个元素可以用所选定的元素表示出来。如果以 $W_{11}, W_{12}, W_{22}, M_{11}, M_{12}, M_{22}$ 为独立参数,由(15)式 M_{21} 可表示为:

$$M_{21} = \frac{W_{12}(M_{11}-M_{22}) + M_{12}W_{22}}{W_{11}} \quad (16)$$

1.4 简单像散高斯-谢尔模型光束(SA,$\sigma_x^{-2}\neq 0$,$\sigma_y^{-2}\neq 0$,$\mu=0$)

(1)旋转简单像散高斯-谢尔模型光束(rotated astigmatic Gaussian-Schell model beam,RAGSM 光束)

令 W,M,U 的元素满足条件(见文献[1]中(13)式):

$$W = \Phi' W \Phi^T = \Phi\begin{bmatrix} W_{11}' & 0 \\ 0 & W_{22}' \end{bmatrix}\Phi^T,$$
$$\Phi' = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (17)$$

参数 ϕ 表示光束主轴相对实验室坐标系的旋转,W' 是对角矩阵。对 M,U 有相似的关系,即存在对角矩阵 M',U'。则由 W,M,U 与 w^2, σ^2, R 的关系易知同样有对角矩阵 $w^{2\prime}, \sigma^{2\prime}, R'$ 存在。在此限制下,光束独立参数为 $W_{11}', W_{22}', M_{11}', M_{22}', U_{11}', U_{22}', \phi$ 或 $w_x^{2\prime}, w_y^{2\prime}, \sigma_x^{2\prime}, \sigma_y^{2\prime}, R_x', R_y', \phi$,即 7 个独立参数。在相干性分类中属于部分相干光。在对称性分类中,这就是 RSA 光束具有“最多 7 个”独立参数的情形。

(2)准直简单像散高斯-谢尔模型光束(aligned astigmatic Gaussian-Schell model beam,AAGSM 光束)

如果 $\phi=0$,光束主轴与实验室坐标系重合,W,M,U(或 w^2, σ^2, R)都是对角矩阵。光束参数为 $W_{11}, W_{22}, M_{11}, M_{22}, U_{11}, U_{22}$ 或 $w_x^2, w_y^2, \sigma_x^2, \sigma_y^2, R_x, R_y$,即 6 个独立参数。仍然属于部分相干光,在对称性分类中,即是 ASA 光束具有“最多 6 个”独立参数的情形。

1.5 各向同性高斯-谢尔模型光束(ST,$\sigma^{-2}\neq 0$,$\mu=0$)

对无扭曲各向同性高斯-谢尔模型光束,即无像散无扭曲高斯-谢尔模型光束(stigmatic Gaussian-Schell model beam,SGSM 光束),参数矩阵 w^2, σ^2, R 退化为参数 w^2, σ^2, R,即有 3 个独立参量。在相干性分类中,是部分相干光具有“最少 3 个”独立参数的情形。(13)式、(14)式分别简化为:

$$B_{ST} = k/2R, \gamma_{ST}^{-1} = w^{-2} + \sigma^{-2} \quad (18)$$

$$V = \begin{bmatrix} W & M \\ M & U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{w^2}{4} & -\frac{w^2}{4R} \\ -\frac{w^2}{4R} & \frac{1}{k^2\gamma_{ST}} + \frac{w^2}{4R^2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

W,M,U 退化为 W, M, U,即对称性分类中 ST 光束具有“最多 3 个”独立参数的情形。这就是文献中讨论得最多的高斯-谢尔模型光束(Gaussian-Schell model beam)。

前面所分析的各种对称情况都以部分相干光束为例,同样的分析也可以对完全相干光束进行。

1.6 复杂像散高斯光束(GA,$(\sigma^2)^{-1}=0$,$\mu=0$)

复杂像散高斯光束(general astigmatic Gaussian beam,GAG 光束),作为 AGSM 光束在 $(\sigma^2)^{-1}=0$ 时

的特殊情况,独立参数为 $w_x{}^2$,$w_{xy}{}^2$,$w_y{}^2$,R_x,R_{xy},R_y,即 6 个。在相干性分类中,这是空间相干光具有“最多 6 个”独立参数的情形。(13) 式,(14) 式分别简化为:

$$\mathrm{B} = k\mathrm{R}^{-1}/2,\ \gamma^{-1} = (\mathrm{w}^2)^{-1} \tag{20}$$

$$\mathrm{V} = \begin{bmatrix} \mathrm{W} & \mathrm{M} \\ \mathrm{M}^T & \mathrm{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}\mathrm{w}^2 & -\frac{1}{4}\mathrm{w}^2\mathrm{R}^{-1} \\ -\frac{1}{4}\mathrm{R}^{-1}\mathrm{w}^2 & \frac{1}{k^2}(\mathrm{w}^2)^{-1} + \frac{1}{4}\mathrm{R}^{-1}\mathrm{w}^2\mathrm{R}^{-1} \end{bmatrix} \tag{21}$$

容易证明,只有当 w^2 和 R 都具有(17) 式的形式,即具有相同的主轴,可以同时对角化时,才有 $\mathrm{M} = \mathrm{M}^T$(或 $M_{12} = M_{21}$),而在复杂像散情况下是不满足这一条件的,因此 $M_{12} \neq M_{21}$,属于对称性分类中的 GA 光束。独立参数为 W_{11},W_{12},W_{22},U_{11},U_{12},U_{22},M_{11},M_{12},M_{21},M_{22}中的任意 6 个。如果以 W_{11},W_{12},W_{22},U_{11},U_{12},U_{22}为独立参数,M_{11},M_{12},M_{21},M_{22}可由下式得出:

$$\mathrm{M}^2 = \mathrm{WU} - \frac{1}{4k^2}\mathrm{I} \tag{22}$$

在文献中常用复参数矩阵 1/ q 来描述复杂像散高斯光束[4]:

$$\frac{1}{\mathrm{q}} = \begin{bmatrix} 1/q_{xx} & 1/q_{xy} \\ 1/q_{yx} & 1/q_{yy} \end{bmatrix} \quad q_{xy} = q_{yx},$$

$$\frac{1}{q_{ij}} = \frac{1}{w_{ij}{}^2} - \mathrm{i}\frac{k}{2R_{ij}} \quad i, j \in (x, y) \tag{23}$$

这是一个对称矩阵,有 3 个独立的复参数,由于每个复数都具有实部和虚部两个独立的部分,因此,实际上还是有 6 个独立参数。

1.7　简单像散高斯光束(SA, $\sigma_x{}^{-2} = \sigma_y{}^{-2} = 0$, $\mu = 0$)

(1) **旋转简单像散高斯光束**(rotated astigmatic Gaussian beam,RSAG 光束)

从相干性分类的角度,可以将这种光束看作是在复杂像散高斯-谢尔模型光束基础上增加了空间相干条件 $\sigma_x{}^{-2} = \sigma_y{}^{-2} = 0$ 后的特殊情况。其光束参数为 $w_x{}^{2\prime}$,$w_y{}^{2\prime}$,$R_x{}'$,$R_y{}'$,ϕ,即 5 个。而从对称性分类的角度,则可看作是令复杂像散高斯光束的参数矩阵 W 和 U 具有(17) 式的形式时的特殊情况,即存在对角矩阵 W′和 U′。将此限制条件代入(21) 式,(22) 式,容易证明 $\mathrm{M} = \mathrm{M}^T$(或 $M_{12} = M_{21}$)且 M 也具有(17) 式的形式,即存在对角矩阵 M′,属于空间相干的 RSA 类光束。其独立参数为 5 个,即 ϕ 和 $W_{11}{}'$,$W_{22}{}'$,$U_{11}{}'$,$U_{22}{}'$,$M_{11}{}'$,$M_{22}{}'$中的任意 4 个。如果以 $W_{11}{}'$,$W_{22}{}'$,$U_{11}{}'$,$U_{22}{}'$为独立参数,$M_{11}{}'$,$M_{22}{}'$可表示为:

$$M_{11}{}'^2 = W_{11}{}'U_{11}{}' - \frac{1}{4k^2},\ M_{22}{}'^2 = W_{22}{}'U_{22}{}' - \frac{1}{4k^2} \tag{24}$$

(2) **准直简单像散高斯光束**(aligned astigmatic Gaussian beam,ASAG 光束)

当 $\phi = 0$ 时,w^2,R 是对角矩阵,同样 W,M 和 U 也是对角矩阵。是空间相干的 ASA 光束。光束参数为 $w_x{}^2$,$w_y{}^2$,R_x,R_y 或 W_{11},W_{22},U_{11},U_{22},M_{11},M_{22}中的任意 4 个。如果以 W_{11},W_{22},U_{11},U_{22}为独立参数,M_{11},M_{22}可表示为:

$$M_{11}{}^2 = W_{11}U_{11} - \frac{1}{4k^2},\ M_{22}{}^2 = W_{22}U_{22} - \frac{1}{4k^2} \tag{25}$$

1.8　无像散高斯光束(ST, $\sigma^{-2} = 0$, $\mu = 0$)

从相干性分类的角度,可以将无像散高斯光束(stigmatic Gaussian beam,SG 光束)看作是在各向同性高斯-谢尔模型光束基础上加上空间相干条件 $\sigma^{-2} = 0$ 后的特殊情况。其独立光束参数简化为 w^2,R,即两个。这就是相干性分类中空间相干光具有“最少两个”独立参数的情形。而从对称性分类的角度,则可看作是简单像散高斯光束的参数矩阵 W,M,U 同时退化为参数 W,M,U 的特殊情况,即:

$$\mathrm{V} = \begin{bmatrix} W & M \\ M & U \end{bmatrix} \tag{26}$$

属于 ST 光束,独立参数为 W,M,U 中的任意两个。如果以 W,U 为独立参数,M 可表示为:

$$M^2 = WU - 1/4k^2 \tag{27}$$

2　结　论

综上所述,各种空间对称类型的光束都可以分为完全空间相干和部分空间相干两种,当然完全相干和部分相干光也可以具有不同的对称形式。这两种分类方法都是完整的,相对独立的,是从不同的角度来进行光束种类的划分,两种分类中光束独立参数的数目是相同的。因此,可按应用需要,对光束用不同方法分类。虽然两种分类中没有直接同扭曲因子相关判断规则,但是由于扭曲因子同光束的对称性和空间相干性的内在联系,使得有扭曲光束在两

(下转第 587 页)

存在复杂的“断点”现象,必须进行自动补断处理。鉴于以上两个方面的原因,采用贝塞尔曲线对细化之后的激光条纹进行拟合。如果从一幅图像上检出 $n+1$ 个点 $b_i(i=0,1,2\cdots\cdots n)$,有贝塞尔曲线:

$$P(t) = \sum_{i=0}^{n} b_i B_{i,n}(t) \quad (0 \leq t \leq 1) \qquad (14)$$

式中,$B_{i,n}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i}$,$C_n^i = \frac{n!}{[i!(n-i)!]}$($i=0,1,2,\cdots\cdots n$)。对于左边图像上的任意一个像点,根据(13)式得到该像点在右边图像平面上的极线约束(满足直线方程),根据(14)式可以求出右边图像上的激光条纹的曲线拟合方程,联立(13)式和(14)式,可以求出左边图像上的任意一个像点的匹配点坐标,从而完成了整条激光条纹的匹配。

4　实验结果

实验所用为 795pixel ×596pixel 面阵 MTV-1881Ex CCD 摄像机。对一鼠标进行了扫描,图 4 为

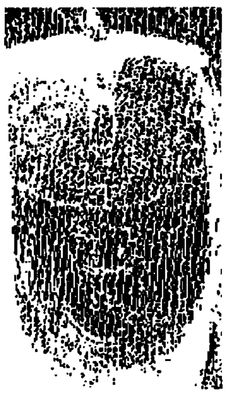

Fig.4　The point cloud of a mouse

经过匹配和三维重建的鼠标点云图像。实验结果表明,本实验室开发的激光扫描系统已达到像素级精度,重构物体图像与被测物体图像没有任何差别。

5　结　论

采用激光和立体视觉测量相结合的反求测量方法,即基于计算机视觉的激光扫描测量,以摄像机针孔基础建立摄像机数学模型,从而建立整个测量传感器的模型,实现了一种基于一阶畸变模型的高精度的摄像机标定方法,接着对图像采集卡采集的图像进行前期的处理,包括图像的分割、滤波、细化,然后作者提出了一种基于极线约束的激光条纹匹配算法,对两个 CCD 摄取的激光条纹图像进行匹配,从而重建出了激光扫描线数据。

参　考　文　献

[1]　Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. Proc IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition,1986:364～374.

[2]　张艳珍. 微机视觉系统相关理论及技术研究. 大连理工大学博士学位论文,2001:50～53.

[3]　马颂德,张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础. 北京:科学出版社,1998: 61～63.

(上接第 583 页)

种分类中有确定的位置,即一定是复杂像散且部分相干的。此外,对于确定的光束无论采用何种分类方法和表示形式(光束参数矩阵 Q、二阶矩矩阵 V 等等),光束独立参数的个数是确定的,可以根据实际需要来进行选择。最后,应当指出的是,本文中对光束的分类对任意空间分布和完全、部分空间相干光束都是成立的,但不涉及光束的时间分布和时间相干性(多色光),对此需另作研究。

衷心地感谢德国柏林技术大学 Weber 教授对文中有关论题进行的有益讨论。

参　考　文　献

[1]　彭愿洁,吕百达. 激光技术,2003,27(5):463～465.

[2]　Simon R,Sudarshan E C G,Mukunda N. Phys Rev,1984,A29(6):3273～3279.

[3]　Simon R,Mukunda N.J O S A,1993,10 (1):95～109.

[4]　吕百达. 激光光学——激光束的传输变换和光束质量控制. 2 版,成都:四川大学出版社,1992:326.