

# 三色激光散斑自相关法测量表面粗糙度的分析

张建伟<sup>1</sup> 袁纵横<sup>1,2</sup> 张艳华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004; <sup>2</sup>贵州民族学院计算机与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要** 为研究表面弯曲对利用多色散斑测量表面粗糙度的影响,引入表面曲率半径,通过模拟粗糙表面以及其形成的多色散斑场,讨论了不同曲率半径的粗糙曲面对模拟散斑场和散斑延长率的影响。结果表明,引入粗糙表面的曲率半径,对三色激光散斑自相关测量法是可行的。粗糙表面曲率半径越大,其模拟的散斑场和计算的散斑延长率与平直的粗糙表面越接近。曲率半径越大,散斑延长率愈大,并且表面粗糙度测量误差越小。因此,在实际测量中,应该考虑表面弯曲对测量粗糙度精度的影响。

**关键词** 光学测量; 表面粗糙度; 自相关; 散斑延长

**中图分类号** TH741

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP48.010301

## Analysis on Large Radius of Curved Surface Roughness Trichromatic Laser Speckle Autocorrelation Measurement

Zhang Jianwei<sup>1</sup> Yuan Zongheng<sup>1,2</sup> Zhang Yanhua<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

<sup>2</sup> School of Computer & Information Engineering, Guizhou University for Nationalities,

Guiyang, Guizhou 550025, China

**Abstract** The influence of curved surface on the method of polychromatic speckle measuring surface roughness is studied by introducing surface curvature radius. The rough surface and the polychromatic speckle patterns near rough surface are simulated, and the influence of different curvature radii of rough surface on the simulated speckle patterns and ratio of speckle elongation is discussed. The results show that the factor of curvature radius of rough surface is valid in trichromatic speckle autocorrelation measurement, and the simulated speckle patterns and speckle elongation of rough surface are more similar to those of the straight surface when the curvature radius of the rough surface is larger. The larger the curvature radius is, the larger the speckle elongation becomes, and the smaller the deviation of measured surface roughness is. Therefore, influence of curvature of rough surface on measurement precision should be considered during the measuring process.

**Key words** optical measurement; surface roughness; autocorrelation; speckle elongation

**OCIS codes** 030.5770; 030.6140; 290.5880; 240.5770

## 1 引言

目前,测量表面粗糙度的激光散斑测量法是实现非接触、实时在线测量的一种有效方法,它克服了接触式测量划伤被测表面和效率低等缺点。当多色相干激光同轴照射粗糙表面时,由于各单色激光形成的散斑场发生相互的错位,形成散斑延长效应<sup>[1]</sup>,它与距散斑场中心距离和表面粗糙度有关<sup>[2]</sup>。在三色激光散斑自相关法测量过程中,存在多种影响因素,文献[3]讨论了入射激光波长组合、成像器件光敏单元尺寸和动态范围对测量结果的影响。本文在三色激光散斑自相关测量法的基础上,模拟了大曲率半径粗糙表面形成的散斑场,并讨论了曲面曲率半径大小对散斑延长率的影响。

## 2 大曲率半径粗糙表面的模拟

实际加工的试件上,其表面宏观上不可能是完全平直的,因此在模拟过程中,加入了粗糙表面的弯曲因素的影响,即考虑粗糙表面在宏观上为一曲面。而且,表面的微观粗糙特性具有随机性,这种随机性主要与

**收稿日期:** 2010-08-21; **收到修改稿日期:** 2010-09-30

**基金项目:** 贵州省科技厅项目黔科合字[2009]2126号资助课题。

**作者简介:** 张建伟(1985—),男,硕士研究生,主要从事光电测量方面的研究。E-mail: zjw002004@163.com

**导师简介:** 袁纵横(1957—),男,教授,主要从事光电信息处理、光电测量等方面的研究。E-mail: yuanzongheng@sina.com

加工过程有关。因此,首先模拟产生随机粗糙表面,然后在随机表面的基础上加入表面的弯曲参数。

一个表面轮廓可用其纵向特征的高度标准偏差( $R_q$ )和横向特征的自相关函数(相关长度 $l_c$ )来表征<sup>[4]</sup>。因此,对于特定随机序列,在给定粗糙表面高度的标准偏差和自相关函数前提下,就可以确定一个随机表面。为建模和仿真,具有高斯统计特性的随机粗糙表面可以由 Garcia 等<sup>[5,6]</sup>提出的方法来实现,即表面轮廓高度分布为高斯分布,轮廓高度自相关函数为高斯型相关函数。取粗糙表面长度 $l_r=10^{-3}$  m,表面高度标准偏差 $R_q=4\times 10^{-7}$  m,表面相关长度 $l_c=4.8\times 10^{-6}$  m,得出模拟的平直粗糙表面如图 1(a)所示, $h(x)$ 近似服从高斯分布。

加入弯曲因素,假设宏观面为一凸面:

$$C_r(x) = \sqrt{R^2 - x^2} - \sqrt{(4R^2 - l_r^2)/4}, \quad (1)$$

式中 $R$ 为凸面的弯曲半径。所讨论的粗糙表面就是随机粗糙表面和宏观曲面两者的结合,即

$$H(x) = h(x) + C_r(x), \quad (2)$$

式中 $h(x)$ 为平直曲面的轮廓高度。由(1)式知, $R$ 直接影响 $C_r(x)$ 的弯曲程度,以致影响到 $H(x)$ 的特性。由设定的 $R_q$ 模拟得到 $h(x)$ ,由某一 $R$ 值模拟得到 $H(x)$ ,并计算出其模拟后两者的表面高度标准偏差 $R_{q1}$ 和 $R_{q2}$ ,结果表明, $R_q \approx R_{q1}$ 。考虑到加入曲面的弯曲因素 $R$ 会影响到模拟后的轮廓高度 $H(x)$ 的标准偏差的值,以 $R_{q1}$ 为参考,计算了模拟后的 $h(x)$ 与 $H(x)$ 的 $R_{q1}$ 与 $R_{q2}$ 值的偏差 $\Delta R_q = |R_{q1} - R_{q2}|$ ,表 1 是 $R$ 与 $\Delta R_q$ 的关系。可以看出,曲率半径越小,两者偏差越大。为保证设定值与模拟后表面特性的完整性,粗糙表面的曲率半径应取适当的值,限定 $R$ 的取值范围 $R > 0.2$  m 时为大曲率半径。

表 1 不同曲率半径粗糙表面所得到的粗糙度偏差

Table 1 Deviation of surface roughness with different radius of curvature

$R$ / m	0.005	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1	3	10
$\Delta R_q$ / nm	1100	500	140	50	20	10	0.8	0	0

取与平直粗糙表面模拟的同样表面参数,并取 $R=1$  m,根据(2)式模拟的结果如图 1(b)所示,其中间拱线为 $C_r(x)$ ,模拟的 $H(x)$ 近似服从高斯分布。

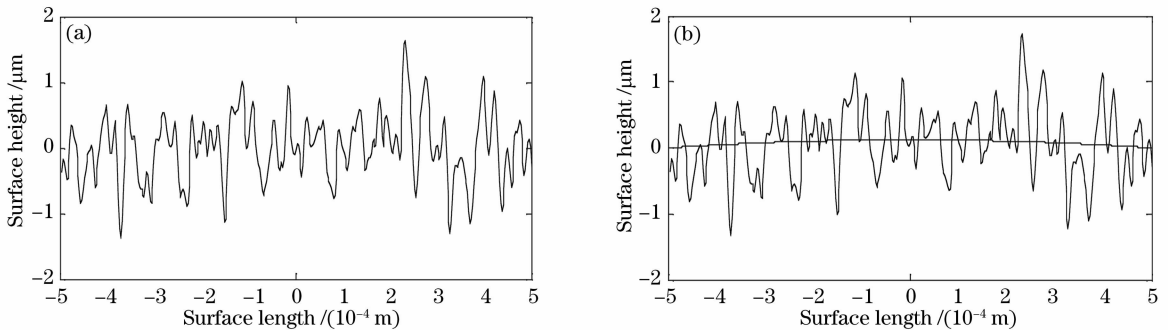


图 1 平直(a)与自由(b)粗糙表面模拟高度曲线

Fig. 1 Simulation of rough flat surface height (a) and curved surface height (b)

对于二维粗糙表面模拟,设定参数 $l_r=8\times 10^{-4}$  m, $R_q=4\times 10^{-7}$  m, $l_c=1.6\times 10^{-5}$  m 和 $R=0.7$  m,生成如图 2 所示的模拟图。

### 3 粗糙表面形成的激光散斑场分析

散斑相干理论是在基于基尔霍夫近似,并且忽略了表面轮廓的阴影效应和多重散射效应的,散射表面粗糙度大于入射光波长的条件下提出的<sup>[8~10]</sup>。如图 3 所示的坐标系,透镜的光轴与观察方向一致,并用 CCD 探测记录散斑场强度,取探测面与透镜光轴的交点为散斑场的坐标原点, $\theta_i$  为光入射角, $\theta_r$  和 $\theta_s$  为观察面的角度。为减

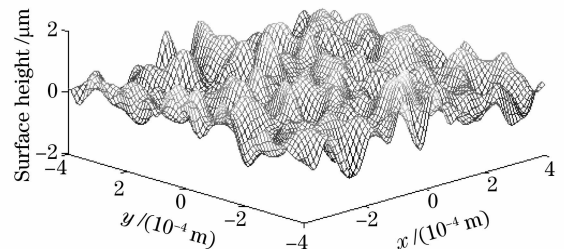


图 2 二维粗糙表面的模拟

Fig. 2 Simulation of two-dimensional rough surface

少计算量,现考虑一维情况下,即取  $\theta_i = \theta_r = 0$ , 可得被照射粗糙表面的夫琅禾费区上的光场分布<sup>[11~13]</sup>

$$u_m(\xi) = \frac{-R_F(\theta_i)}{\sqrt{\pi}L_x} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{L_x^2}\right) \exp\{-i[v_{xm}x + v_{zm}S_h(x)]\} dx, \quad (3)$$

$$v_{xm} = k_m \xi / f, \quad (4)$$

$$v_{zm} = 2k_m, \quad (5)$$

式中  $S_h(x)$  为一维粗糙表面,  $k_m = 2\pi/\lambda_m$  为入射波波长的波数,  $\xi$  为透镜的傅里叶面的一维坐标中观察点距散斑场中心的距离,  $f$  为傅里叶变换透镜的焦距,  $R_F(\theta_i)$  为表面的光场复振幅反射系数,  $L_x$  是 TEM<sub>00</sub> 模式下高斯强度分布的激光束的光斑半径。

现取  $l_r = 10^{-3}$  m,  $R_q = 4 \times 10^{-7}$  m,  $l_c = 4.8 \times 10^{-6}$  m,  $R = 1$  m,  $L_x = 5 \times 10^{-4}$  m,  $\lambda_1 = 488$  nm,  $\lambda_2 = 501$  nm,  $\lambda_3 = 514$  nm,  $f = 0.1$  m, 代入(3)~(5)式可得如图4所示的光强分布。从图4可以看出,各波长形成的单色散斑场的光强分布曲线相似,但是随着远离散斑场中心,观察点与光轴夹角逐渐增大,各曲线逐渐错开,这种由角度扩散引起的现象称为散斑延长效应<sup>[1]</sup>。

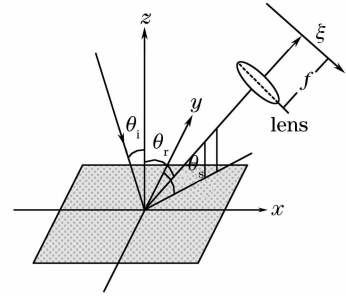


图3 入射方向、散射方向以及观察方向的坐标系  
Fig. 3 Coordinate of incidence, scattering and observation directions

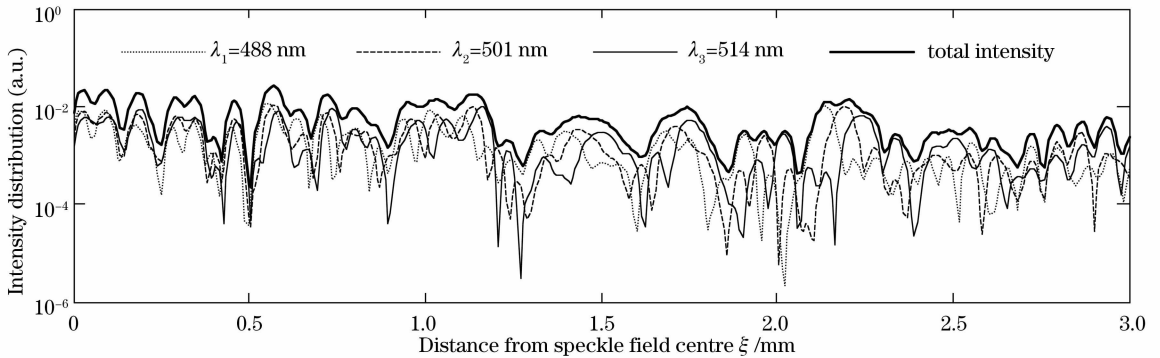


图4 三色散斑场光强分布

Fig. 4 Intensity distribution of trichromatic speckle patterns

图5为平直随机面以及自由曲面曲率半径  $R = 1$  m 与  $R = 0.3$  m 时产生的三色散斑场分布的比较。可以看出,平直与  $R = 1$  m 时散斑场起伏相差明显,延长区变化不大;散斑场近中心区域和远中心区域,两者变化相差明显,这是由于两区域未形成散斑延长效应。 $R = 1$  m 与  $R = 0.3$  m 时变化趋势比较相近,可见曲面对其形成的散斑场有一定的影响。对于三色散斑的模拟分析同样适用于对于多色散斑的模拟与分析。

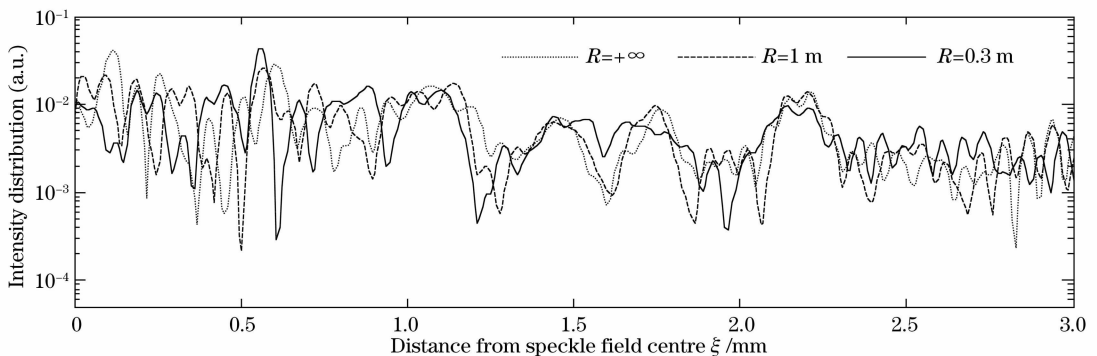


图5 不同曲率半径粗糙表面下的三色散斑场光强分布

Fig. 5 Intensity distribution of trichromatic speckle patterns with different radius of curvature surface

## 4 散斑延长率与表面粗糙度的关系

散斑延长现象的理论是以在夫琅禾费区或者透镜的傅里叶面产生多色散斑场光强的空间自相关函数为基础,且相关函数只与表面高度的标准偏差存在依赖关系<sup>[13,14]</sup>。图6为平直表面在一维情况下 $\lambda_1 = 488 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 501 \text{ nm}$ 和 $\lambda_3 = 514 \text{ nm}$ 散斑延长率的理论曲线。从图中可以看出,在散斑场中心附近,散斑纵横比逐渐增加并达到最大值,当远离散斑场中心时,散斑纵模比逐渐减小。另外,随着粗糙度的增加,曲线逐渐趋于平坦,即散斑延长现象逐渐消失。

对模拟 $R=1 \text{ m}$ 的自由曲面形成的一维散斑场强度曲线进行7等分,通过自相关函数计算每一部分的相关长度,并记相关长度近似为此部分散斑颗粒的大小,以距散斑场中心最近部分的相关长度为基础对各部分相关长度进行归一化,得到散斑延长率<sup>[13,15,16]</sup>。对所得结果进行14点插值,如图7所示,可以看出模拟结果所产生的散斑延长率变化趋于理论值。

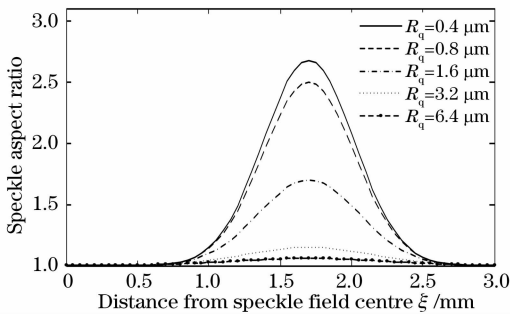


图6 归一化的散斑延长率的理论曲线

Fig. 6 Theoretical curves of the normalized speckle elongation

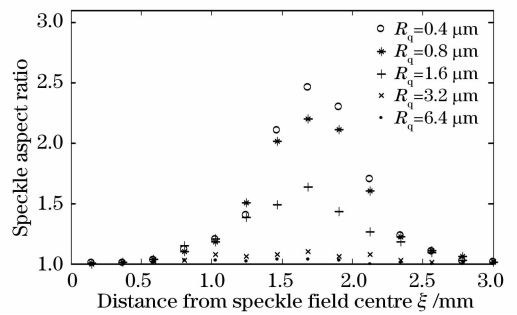


图7 模拟散斑场中散斑延长率的计算结果

Fig. 7 Result of speckle elongation from simulated speckle field

由于多色散斑场光强的空间自相关函数只与表面高度的标准偏差存在依赖关系,根据散斑延长率的计算方法可知,散斑延长率值的分布反映表面粗糙度值。采用散斑延长率值分布的标准偏差来表征表面粗糙度<sup>[13]</sup>,如图8中实线部分,经计算后所得两者关系如图9中实线部分。

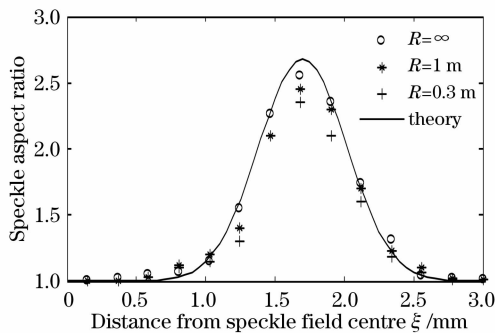


图8 不同曲率半径下的散斑延长率

Fig. 8 Speckle elongation with different radius with curvature surface

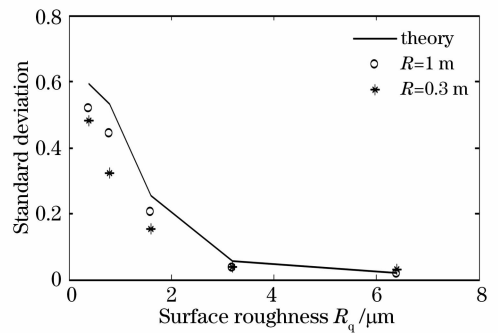


图9 散斑延长率与表面粗糙度之间的关系

Fig. 9 Relation between speckle elongation and surface roughness

由大曲率半径粗糙表面的模拟可见,曲率半径越小,模拟表面粗糙度的结果与设定值的偏差越大,即表面的曲率间接地改变了表面粗糙度,导致模拟结果与实际表面特性相差变大。图8是在 $R_q = 0.4 \mu\text{m}$ 时不同的曲率半径得出的散斑延长率,可见对设定的同一表面粗糙度所得散斑场的散斑延长率的分布,符合理论值的变化趋势,但是曲率半径越小,散斑延长率愈偏小。图9是在 $R = 1 \text{ m}$ ,  $R = 0.3 \text{ m}$ 以及取平直表面理论值时的比较,可见存在曲率半径影响因素时,散斑延长率值的标准偏差偏小,反推出的表面粗糙度值将偏大。

## 5 结 论

从模拟粗糙表面出发,基于三色激光散斑自相关测量法,讨论了大曲率半径粗糙表面( $R > 0.2 \text{ m}$ )对模

拟散斑场以及散斑延长率的影响,比较了粗糙表面的不同曲率半径对模拟散斑场和散斑延长率的影响。研究表明,引入粗糙表面的曲率半径的影响,对三色激光散斑自相关测量法是可行的;而且,粗糙表面曲率半径越大,越接近于平直的粗糙表面,两者模拟形成的散斑场也愈接近,两者的散斑延长率也愈接近;对于不同的曲率半径,曲率半径越大,散斑延长率愈大。由散斑延长率与表面粗糙度之间的关系可知,曲率半径越大,粗糙表面的曲率半径引起了表面粗糙度测量结果的误差越小。此分析可以同理推广到多色散斑的模拟中。因此,在利用多色激光散斑自相关法的实际测量中,应该考虑表面弯曲对测量粗糙度精度的影响。

### 参 考 文 献

- 1 G. Parry. Some effects of surface roughness on the appearance of speckle in polychromatic light[J]. *Opt. Commun.*, 1974, **12**(1): 75~78
- 2 Y. Tomita, K. Nakagawa, T. Asakura. Fibrous radial structure of speckle patterns in polychromatic light[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(18): 3211~3218
- 3 Liu Hengbiao, Chi Jingchun. Analysis of affecting factors on surface roughness measurement based on polychromatic speckle elongation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 279~284  
刘恒彪,池景春. 基于多色散斑延长效应的表面粗糙度测量及影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 279~284
- 4 T. R Thomas. *Rough Surfaces*[M]. second edition. London: Imperial College Press, 1999
- 5 N. Garcia, E. Stoll. Monte-Carlo calculation of electromagnetic-wave scattering from random rough surfaces[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **52**(20): 1798~1801
- 6 A. K. Fung, M. F. Chen. Numerical simulation of scattering from simple and composite random surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**(12): 2274~2284
- 7 Wang Jing, Liu Hengbiao, Li Tongbao. Numerical simulation of surface-roughness measurement based on angular speckle-correlation method using spatial average[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 259~264  
王 婧,刘恒彪,李同保. 空间平均的角度散斑相关粗糙度测量模拟研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 259~264
- 8 G. Goch, J. Peters, P. Lehmann *et al.*. Requirements for the application of speckle correlation techniques to online inspection of surface roughness[J]. *Annals of the CIRP*, 1999, **48**(1): 467~470
- 9 I. Yamaguchi, K. Kobayashi, L. Yaroslavsky. Measurement of surface roughness by speckle correlation[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(11): 2753~2761
- 10 S. L. Toh, C. Quan, K. C. Woo *et al.*. Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**(6): 427~434
- 11 J. A. Ogilvy, H. M. Merklinger. *Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces*[M]. Bristol, England: Acoustical Society of America, 1991
- 12 P. Beckmann, A. Spizzichino. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*[M]. New York: Pergamon Press, 1963
- 13 P. Lehmann, S. Patzelt, A. Schöne. Surface roughness measurement by means of polychromatic speckle elongation[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(10): 2188~2197
- 14 J. W. Goodman. *Statistical Properties of Laser Speckle Patterns*[M]. Berlin: Springer, 1975. 9~75
- 15 S. Patzelt, A. Ciossek, P. Lehmann *et al.*. Parametric optical surface roughness measurement by means of polychromatic speckle autocorrelation[C]. *SPIE*, 1998, **3426**: 124~133
- 16 P. Lehmann. Aspect ratio elongated polychromatic far-field speckles continuous and discrete spectral distribution with respect to surface roughness characterization[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(10): 2008~2014