

文章编号:0253-9993(2012)01-0172-05

# 基于深度预标定的煤仓煤位激光监测方法

孙继平<sup>1</sup>,江 静<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;2. 华北科技学院机电工程系,北京 101601)

**摘 要:**针对煤矿井下高粉尘、高湿度、低照度的恶劣成像环境,提出一种非接触式激光三角测距煤仓煤位的测量方法。该方法预置一激光光源照射煤面,在煤仓主轴顶部架设相机拍摄光源光斑,依据针孔成像模型,通过计算光斑成像点的横向偏移量,查询预先实测标定的对应不同偏移量的煤仓煤位深度表,最终实现煤仓煤位深度测量的目的,测量的精度取决于标定步长的选择。依据该原理设计了测量装置,现场使用表明,该方法易于实施,可以在煤矿井下低照度的成像环境中实现煤仓煤位检测。

**关键词:**煤仓煤位;激光三角测距;图像分割

中图分类号:TD679 文献标志码:A

## Laser monitoring of the coal level of coal silo by depth pre-calibration

SUN Ji-ping<sup>1</sup>,JIANG Jing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Department of Mechanics and Electricity Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China)

**Abstract:** A novel contact-free laser triangulation method for measuring the coal level of coal silo was presented under harsh environmental conditions such as dense dust, high humidity and low illumination in coal mines. A laser source and a camera were mounted on the top of the coal silo where the laser spot projected into the coal silo was imaged by the camera. Using the pinhole imaging model, the lateral shift of the spot image was calculated to determine the coal level, which is by use of a pre-calibrated look-up table of the coal depth and shifts. The precise of measurement relies on the step size of pre-calibration. A measurement device was devised according to this principle and the field application shows that the proposed method is easy to implement to detect the coal level of coal silo at the condition of low illumination in coal mines.

**Key words:** coal level of coal silo; laser triangulation measurement; image segmentation

在煤矿井下主要运输环节之间(如井底、采区或工作面)普遍设置了各种类型的煤仓,用以调节和缓冲各环节的生产能力。煤仓煤位的准确有效测量是煤矿安全生产的重要保障,而防止煤仓溢出(冒仓)和排空(空仓)两种现象的发生则是关键环节<sup>[1-4]</sup>。

常用的煤仓深度测量方法有:重锤式、电极式、电容式、核子式和激光式,然而这些方法在实际使用中均存在不可克服的缺陷。①重锤式料位计利用重锤跟踪物料升降测量煤位高度。但是原煤的粒度变化

很大,容易将重锤埋死,导致煤位计无法工作<sup>[5]</sup>。②电极式料位计,在原煤仓不同高度安装的电极测量相应高度的煤位。但是原煤所含水分的差别导致原煤导电性变化非常大,极易产生虚假信号。③电容式料位仪,将传感器探头与被测对象接触构成电容<sup>[6]</sup>,作用于输出继电器,但是不能实现连续测量。④核子式物位计利用核辐射来测量物位。但是核辐射仪表具有危险性,并且射线会被物料原子散射和吸收,测量精度随着物料层的厚度呈指数规律衰减<sup>[7]</sup>。⑤激光

收稿日期:2011-01-17 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51074169);国家科技支撑计划资助项目(2006BAK03B00)

作者简介:孙继平(1958—),男,山西翼城人,教授,博士生导师,博士。通讯作者:江 静(1979—),江苏连云港人,博士研究生。Tel:010-62233332, E-mail:jiangjing@cumt.edu.cn

式料位计,由传感器发射激光束照射到被测物料表面,并接受发射光,通过测量发射至接收的时间,换算成料位的深度<sup>[8]</sup>。但是在不同煤位检测时,容易造成反射波的不规则散射,影响检测精度。

考虑到煤仓是有限密闭空间,无外界光线干扰,仓内高粉尘、高湿度、低照度的成像环境,原始图像质量较差,使得图像处理技术应用于煤仓煤位深度测量受限。文献[9-10]利用计算机视觉技术,将辅助光源直接照射在煤面上形成圆形光斑,通过检测光斑的成像直径,获取煤仓的深度值。这一方法使得图像识别技术在矿井料位深度检测中的应用成为可能。但是,由于辅助光源的准直性和单一性差,导致边界模糊,测量误差较大。本文提出了一种非接触式,基于激光三角测距的煤仓煤位深度测量方法。通过图像分割确定光斑质心坐标与图像中心点间的距离,依据预先标定的对应不同像素数均值的深度表,确定煤仓煤位的深度值。文献检索显示,目前还鲜有尝试运用激光光斑成像点的像素坐标实现煤仓煤位的深度测量。

## 1 测量原理

由于煤仓垂深大,煤流动时对仓壁的冲击性强,一般矿井煤仓有筒状体、锥状体或半桶半锥状混合体。按煤仓的仓体安置倾角不同可分为垂直式、倾斜式及水平式 3 种;按横断面形状的不同可分为圆形、拱形和矩形 3 种;按煤炭在煤仓中的运动方式又可分为自由下落煤仓、螺旋煤仓和机械煤仓 3 种<sup>[11]</sup>。褐煤的容重一般为 1.05~1.20,烟煤为 1.2~1.4,无烟煤变化范围较大,为 1.35~1.80。煤矿大部分采用直径为 6~10 m 的圆形立式仓,容量 1 000~2 000 t,最大达 3 000 t。根据容积公式计算结果,考虑到裕量,煤仓高度取值 40 m,宽度取值 8 m。

本文以常用的垂直式,圆形,自由下落煤仓为例,研究煤仓煤位深度估计的光电测量方法与装置,采用预设出射角度的激光束照明方式解决煤仓中成像条件恶劣的问题。借鉴激光三角测距原理,在基线距离已知,激光光源和 CCD 的相对位置确定的前提下,通过测量 CCD 图像平面上光斑成像点的位置,确定被测煤面与相机之间的距离,以常用的垂直式、圆形、自由下落煤仓为例,设计了基于激光三角测距的非接触式煤仓煤位测量装置,如图 1 所示。

由相似三角形可知

$$\frac{x}{f} = \frac{d}{Z} \quad (1)$$

式中, $x$  为光斑成像点偏离主轴的距离; $f$  为相机的焦

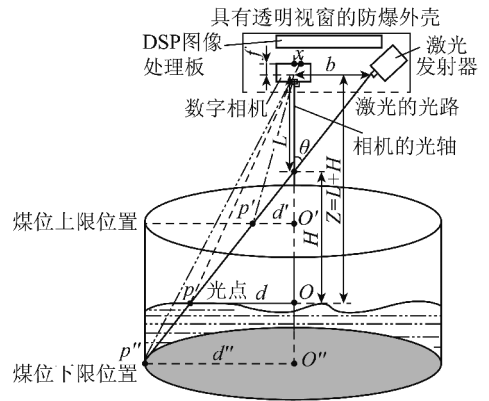


图 1 非接触式煤仓煤位测量装置结构

Fig. 1 Non-contact measurement equipment structure chart of coal silo

距; $d$  为煤面上的光点偏离主轴的距离; $Z$  为煤仓深度值。

$$Z = L + H = \frac{b + d}{\tan \theta} \quad (2)$$

式中, $b$  为相机与激光器在水平方向的距离,又称基线距离; $\theta$  为相机光轴与激光光路间的夹角。

将式(2)代入式(1),可得

$$\frac{x}{f} = \frac{d \tan \theta}{b + d} \quad (3)$$

化简,得

$$d = \frac{b}{\frac{f}{x} \tan \theta - 1} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),确定  $Z$

$$Z = \frac{1 + \frac{1}{\frac{f}{x} \tan \theta - 1}}{\tan \theta} b \quad (5)$$

## 2 方案实施

### 2.1 测量方案

测量装置是将长距离半导体激光发射器 Trimble LL400 和矿用本安型 CCD 数字相机安装于立式圆形筒状煤仓主轴顶部,在立式筒状煤仓主轴的内顶部,按照先验信息(基线  $b$ , 夹角  $\theta$ ) 固定矿用本安型光纤摄像机和长距离半导体激光发射器 Trimble LL400 的位置。相机光轴垂直于煤仓煤位表面,确保相机的视场范围能够覆盖整个筒状煤仓内的煤位表面。预置激光发射器的光路偏离相机光轴一个固定角度  $\theta$ , 确保激光成像光斑能够投射在相机视场范围内的煤仓煤位表面上。激光发射器采用红色点光源,圆型光斑模式。测量装置摄取的有效数字图像送入 DSP 图像处理板中,图像处理器采用 DSP 芯片 TMS320C6416,使用通用 USB 2.0 接口控制器 CY7C68001 对 DSP 进

行接口设计,通过 DSP 的传输系统将煤仓的图像信号实时传到 PC 机中。

## 2.2 光斑提取

图像的能量主要集中在其低频部分,而需要提取的激光光斑边缘信息则集中于其高频部分。但是在低照度下图像噪声较大,故文中提取激光光斑首先要解决的问题是去掉低频和噪声干扰的同时保持边缘信息。任意选取 3 幅准直激光束照射在煤仓煤位表面的成像点,煤面激光光斑原始图像如图 2 所示。



图 2 煤面激光光斑原始图像

Fig. 2 Original image of laser spot in the coal face

激光光斑识别的步骤如下:

**Step 1** 选用微分算子进行锐化<sup>[12]</sup>,增强图像中灰度的突变及降低灰度缓慢变化的区域。

**Step 2** 直方图均衡图像增强,运用分段非线性直方图拉伸,扩大图像前景和背景灰度的差别,根据图像区域亮度分布的不同,采用不同的变换曲线,实现激光光斑图像的增强处理<sup>[13]</sup>。

**Step 3** 图像去噪,采用邻域平均法的均值滤波器,去除通过扫描得到的图像中的颗粒噪声<sup>[14]</sup>。由于直方图拉伸后会突出噪声的影响,选用 Wiener 滤波器<sup>[15]</sup>,更好地保存图像的边缘和细节信息。

**Step 4** 采用自适应阈值的方法进行图像分割<sup>[16]</sup>,将图像细分成多个图像子区域,对每一子图像分别选取一个阈值进行分割,用于定位图像中的物体和边界,减少亮度不均匀。

**Step 5** 图像形态学光斑提取,在图像分割基础上,利用数学形态学的方法进行特征量提取,将目标区域分为前景和背景两个部分。

**Step 6** 光斑形心计算;获取光斑的形心坐标、质心坐标,光斑有效像素等数据。

最后确定图像中激光光斑的成像点坐标,通过查询深度表,确定煤仓煤位的深度值。其中,深度表是通过测量装置预先标定的,对应光斑像素坐标横向偏移量距离与煤仓深度值的列表。首先将数字相机的聚焦位置设定在第 1 档处,使用下方水平悬吊一标定板和带有长度标志的  $M$  m 的细绳( $M$  为煤仓的深度),煤仓的第 1 个测试点为 0.6 m 处,相机摄取不同深度下标定板表面的激光光斑图像,得到不同深度对应图像激光成像点质心坐标。顺次下放细绳,重复上述过程,下放间隔 1.2 m,获得对应不同焦距下,激光成像点与图像光路中心点之间像素数对应煤仓煤位值的列表。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验结果

本文采用 SONY SSC-ET185P 摄像机和准直激光发射器,获取 72 帧激光光斑成像的图像序列。具体包括在无辅助光源照明条件下 36 帧图像,有辅助光源照明条件下 36 帧图像,其中在位置 1、位置 2 和位置 3 处分别获取图像各 12 帧。实验提供的数字图像有效的成像分辨率为  $720 \times 576$ ,则图像中成像中心点的像素坐标为  $360 \times 288$ ,当 CCD 像机工作于高速采集模式时,成像设备采用高感光度的  $\frac{1}{4}$  英寸 Ex-wave HAD CCD,CCD 传感器的靶面尺寸为  $3.2 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$ ,则像元间距  $k = \frac{3.2 \text{ mm}}{720} = 4.44 \mu\text{m}$ ,焦距  $f = 4.1 \sim 73.8 \text{ mm}$ 。相机标定区间为 0.6 ~ 13.8 m,步长为 1.2 m。选定 3 个夹角  $\theta_i, i=1,2,3$ ,分别对应位置 1、位置 2 和位置 3,其中  $\theta_1 = 17^\circ, \theta_2 = 18^\circ, \theta_3 = 13^\circ$ ,相应的基线距离分别为  $b_1 = 18 \text{ cm}, b_2 = 16.5 \text{ cm}, b_3 = 2.8 \text{ cm}$ 。实验测试数据见表 1。

表 1 实验测试数据

Table 1 Experimental test data

图像序列	激光光斑质心坐标		光斑像素坐标差值		标定深度值/m	计算深度值/m	误差/m
	无辅助光源	有辅助光源	无辅助光源	有辅助光源			
位置 1	(297,345)	(298,345)	85	84	0.6	0.84	0.24
位置 2	(439,334)	(436,334)	91	88	0.6	0.73	0.13
位置 3	(541,364)	(547,358)	196	199	0.6	1.36	0.76

注:标定数据共 12 组,表中只列出了第 1 组标定数据。

在 3 个不同成像位置,将获取的 12 组标定数据绘制成数据点连线,如图 3 所示。

从图 3 看,位置 1 和位置 2 成像点的光斑像素坐标差值,从低到高能够完全跟随深度由浅到深的变化

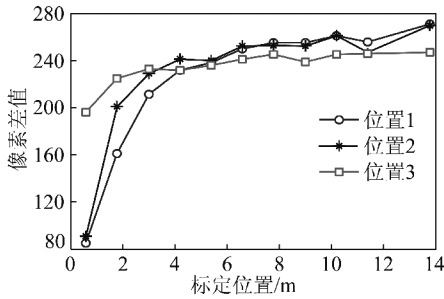


图 3 不同成像位置数据对比

Fig. 3 Comparison data in different imaging location

趋势,并且曲线的变化比较剧烈,能够有效地区分出煤仓的深度变化信息。而位置 3 由于设置的激光光路与水平方向夹角偏小,曲线的变化趋势比较平缓,在深度变化幅度比较小的时候,不能够很明显地从光斑像素坐标上对应找出具体的深度值。

在第 1 组图像标定位置 0.6 m 处,选取摄像机初始加电的最宽视场,焦距为 4.1 mm。根据式(5)计算深度值,与标定深度值进行比较,误差值见表 1。数据显示,深度标定值略高于数值计算结果,原因

来自摄像机畸变误差、测量误差以及计算误差等因素,但是该误差结果在煤仓煤位深度值的工业误差许可范围内,完全满足煤仓煤位深度测定的精度要求。但除了在 0.6 m 处拍摄的图像帧,焦距已知,其他 11 帧图像在拍摄过程中,为了获得清晰的光斑图像,相机自动调焦,式(6)中  $u, v, x$  均为未知量,无法直接得到计算值,需要进行实测标定。

为了进行标定,选择 3 个不同成像位置,有、无辅助光源照明两种条件下的 12 组图像数据如图 4 所示,从中可以看出光斑像素坐标差值是随着深度值增加而增加,说明煤仓中煤位越高,光斑成像点到图像中心之间的像素数就越小。此外两条数据线条中数值很接近,说明有、无辅助光源的照明条件,对本文提出的测量方法影响不大,完全适应煤矿井下低照度的成像环境现状。

在无辅助光源照明条件下 36 帧图像中,选取位置 1 处进行实测标定的 12 帧数据为例,光斑坐标的像素差值与煤仓煤位深度值的对应关系见表 2,最终通过查表法,获取煤仓煤位的深度值。

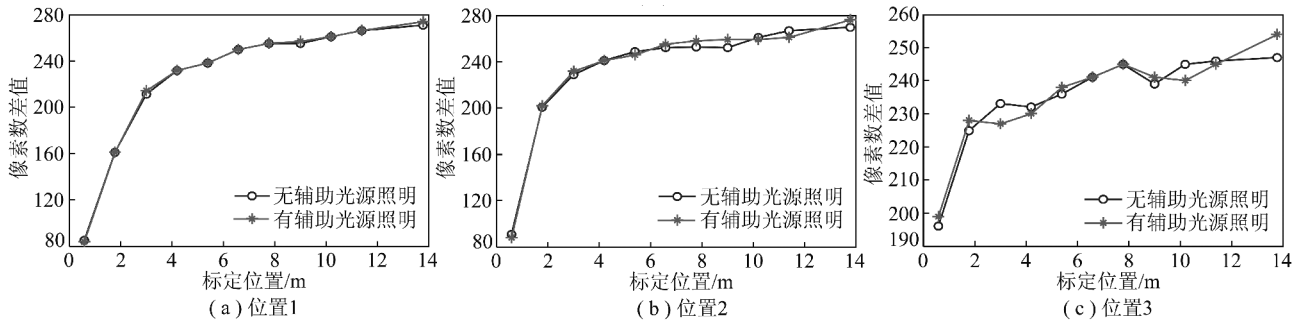


图 4 有无辅助光源照明的数据对比

Fig. 4 Comparison data under the poor and good auxiliary illumination

表 2 标定深度

Table 2 Calibration depth list

图像帧	像素差值	标定深度值/m	图像帧	像素差值	标定深度值/m	图像帧	像素差值	标定深度值/m	图像帧	像素差值	标定深度值/m
1	91	0.6	4	232	4.2	7	255	7.8	10	266	11.4
2	167	1.8	5	238	5.4	8	259	9.0	11	268	12.6
3	211	3.0	6	250	6.6	9	261	10.2	12	271	13.8

3.2 影响因素

根据透镜成像法则  $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ , 代入式(5), 得

$$Z = \frac{buv\cos\theta}{u\sin\theta + u\cos\theta + v\cos\theta} \quad (6)$$

实际测量中,参数  $u, v, \theta$  的误差都会对测量精度造成影响,分别是

$$\frac{\partial Z}{\partial u} = \frac{bv^2x\cos^2\theta}{(u\sin\theta + u\cos\theta + v\cos\theta)^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial v} = \frac{bu^2x\cos^2\theta}{(u\sin\theta + u\cos\theta + v\cos\theta)^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta} = \frac{-(bu^2v^2\sin^2\theta + bu^2v^2\cos^2\theta)}{(u\sin\theta + u\cos\theta + v\cos\theta)^2} \quad (9)$$

由此可得,测量系统的精度方程为

$$dZ = \frac{bv^2x \cos^2\theta}{(uvsin\theta + uxcos\theta + vxcos\theta)^2} du + \frac{bu^2x \cos^2\theta}{(uvsin\theta + uxcos\theta + vxcos\theta)^2} dv - \frac{bu^2v^2 \sin^2\theta + bu^2v^2 \cos^2\theta}{(uvsin\theta + uxcos\theta + vxcos\theta)^2} d\theta \quad (10)$$

式(7)~(9)反映了参数 $u, v, \theta$ 的误差对测量精度造成的影响,并且都与成像点偏离主轴的像素数 $x$ 有关。通过式(10)可以计算出在煤仓煤位不同深度的煤面上,多参数误差共同作用时,对应于 $x$ 值的系统误差的大小。实际测量中,透镜的物距 $u$ 和像距 $v$ 由摄像机的内部参数确定<sup>[12]</sup>。夹角 $\theta$ 和基线 $b$ 由测量装置先验值确定,需要满足激光光路与相机光轴间夹角的约束条件,即最小值大于0;最大值必须确保激光束成像光斑能够投影在煤仓煤位表面,而不是投影到煤仓的仓壁上,具体值由煤仓的尺寸确定。

## 4 结 论

(1)提出的测量方法可以工作在光照度很低的环境下,有无辅助光源的光照对测量结果影响很小,能够适应煤矿井下低照度的成像环境。

(2)煤仓中煤位越高,图像中激光光斑成像点到图像中心之间的像素数就越小;相反,煤仓中煤位越低,图像中激光光斑成像点到图像中心之间的像素数就越大。

(3)该方法易于实施,非接触式结构简单,无易损件,测量的精度取决于标定步长的选择。

## 参考文献:

- [1] 孙继平. 煤矿安全生产理念研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 313-316.  
Sun Jiping. Research on coal-mine safe production conception[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 313-316.
- [2] 孙继平. 煤矿安全监控技术与系统[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(10): 1-4.  
Sun Jiping. Mine safety monitoring and control technology and system [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(10): 1-4.
- [3] 孙继平. 煤矿安全监控系统联网技术研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1546-1549.  
Sun Jiping. Networking technology for safety supervision system in a coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11): 1546-1549.
- [4] 孙继平. 煤矿安全生产监控与通信技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1925-1929.  
Sun Jiping. Safety production monitoring and communication technol-

ogy in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1925-1929.

- [5] 廖志强, 凌 玲, 吴百海, 等. 重锤式料位计图象识别系统的应用与研究[J]. 流体传动与控制, 2009, 35(4): 36-39.  
Liao Zhiqiang, Ling ling, Wu Baihai, et al. Application and research of image recognition technique in weighting hammer level indicator [J]. Fluid Power Transmission & Control, 2009, 35(4): 36-39.
- [6] 宗伟林, 邓先明, 赵英麟. 煤粉仓粉位仪用电容传感器的研制[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(3): 292-295.  
Zong Weilin, Deng Xianming, Zhao Yinglin. Research on powder coal position measurement with capacitive sensor[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(3): 292-295.
- [7] 陈群英, 宋东风. 应用核辐射场理论测量粉煤灰料位的方法[P]. 中国专利, 200810017274.6, 2008-08-20.  
Chen Qunying, Song Dongfeng. Measurement method for level of coal fly ash based on nuclear radiation field theory[P]. China Patent, 200810017274.6, 2008-08-20.
- [8] 常凤筠, 崔旭东. 非接触式激光料位检测系统的设计[J]. 计量技术, 2008(3): 13-15.  
Chang Fengyun, Cui Xudong. Design of detection system for non-contact laser level[J]. Measurement Technique, 2008(3): 13-15.
- [9] 孙继平, 吴 冰. 概率哈夫变换在井下煤仓煤位检测中的应用[J]. 煤炭学报, 2004, 29(6): 748-751.  
Sun Jiping, Wu Bing. Application of probabilistic Hough transform in detecting coal level of coal bin[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(6): 748-751.
- [10] 孙继平, 樊 京. 井下主动超声定位系统[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 993-996.  
Sun Jiping, Fan Jing. Active ultrasonic location system in mine tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 993-996.
- [11] 可自清. 井下煤仓的类型及其分析[J]. 陕西煤炭, 1988(1): 44-48.  
Ke Ziqing. Category and analysis of coal bins[J]. Shaanxi Coal, 1988(1): 44-48.
- [12] Ji Z, Leu M C. Design of optical triangulation devices[J]. Optics & Laser Technology, 1989, 21(5): 339-341.
- [13] Schavemaker J G M. Image sharpening by morphological filtering [J]. Pattern Recognition, 2000, 33(2): 997-1012.
- [14] Farbiz F, Menhaj M B, Motamedi S A, et al. A new fuzzy logic filter for image enhancement [J]. IEEE Transaction on Sys. Man. Cybern., 2000, 30(2): 110-119.
- [15] Malfait M, Roose D. Wavelet-based image denoising using a Markov random field a priori model[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 1997, 4(4): 549-565.
- [16] 孙继平, 陈 伟, 王福增, 等. 概率神经网络在矿井红外监控图像识别中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1206-1209.  
Sun Jiping, Chen Wei, Wang Fuzeng, et al. Application of probabilistic neural network in recognizing coalmine infrared monitoring images[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1206-1209.