

影响玻璃微珠回向反射性能的主要因素分析*

陈炎明 何玉明

(华中科技大学力学系, 武汉 430074)

摘要 从理论和实验两方面分析了玻璃微珠的回向反射特性, 主要讨论了玻璃微珠的折射率和其反射层面积这两个因素对回向反射性能的影响. 研究表明, 折射率增大, 折射率小于 2 时, 回向反射性能逐渐增强, 相反, 在折射率大于 2 时, 回向反射性能减弱; 反射层面积的大小会影响入射光线的完整回向反射过程; 最后定义了有效回向反射角度, 并给出了玻璃微珠在激光照射下的二维回向反射光照度分布.

关键词 玻璃微珠; 回向反射特性; 回向反射强度

中图分类号 TQ171.1

文献标识码 A

0 引言

由于玻璃微珠涂料在近乎 180° 光线入射角度下都具有良好的回向反射性能, 因而在交通标志、广告装饰、野外救援、全息摄影等领域得到了广泛的应用. 国内外科研人员对玻璃微珠的回向反射进行了比较全面的研究^[1-4]. 但是对于玻璃微珠的折射率和其反射层对回向反射性能的影响讨论甚少. 作者基于几何光学理论, 建立了玻璃微珠完整的入射和

回射的数学模型. 分析了玻璃微珠折射率对回向反射光线的方向、光照度、光通量分布规律的影响, 并与实验结果相对照, 论证了理论分析的正确性; 对玻璃微珠反射层面积大小对有效入射光线角度的影响进行了深入的讨论.

1 回向反射基本理论

图 1(a) 中, 入射光线 a 以 θ 角进入微珠内, 光线在反射层表面经过反射后再从微珠表面折射到微

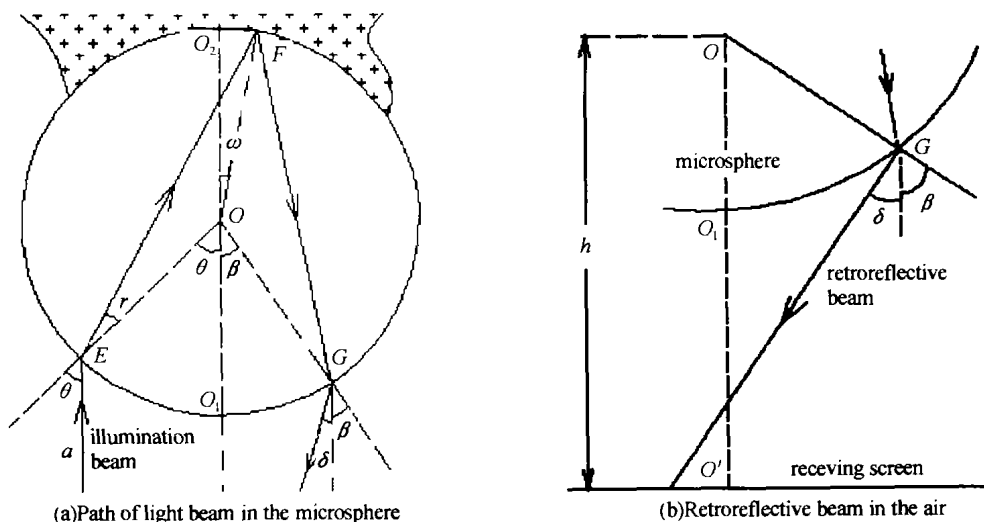


图 1 玻璃微珠回向反射模型
Fig. 1 Retroreflection model for microsphere

珠外. 设玻璃微珠相对于空气的折射率为 n , 根据几何光学和 Snell 定律, 得到出射光线与入射光线之间夹角 $\delta(\theta)$ 为

$$\delta(\theta) = 2\theta - 4\arcsin(\sin \theta/n) \quad (1)$$

式中, 出射光线与入射光线之间夹角越小, $\delta(\theta)$ 越小说明回向反射性能越好. 因而 $\delta(\theta)$ 是描述回向

反射性能的重要参量之一.

在垂直于入射光线方向、距离玻璃微珠球心 h 的位置放置接收屏, 如图 1(b) 所示. 设玻璃微珠的直径为 D , 入射光线在垂直于光线传播方向的面上的光照度为 I_0 , 出射光线在接受屏上的光照度为 $I(\delta)$, 玻璃微珠入射表面元面积 ds_1 , 接收屏表面元面积 ds_2 , $R'(a)$ 和 $T(a)$ 分别为光线 a 在 F 点反射率和在 G 点的透射率. 因为有

$$ds_1 = (\pi D^2 \sin \theta d\theta) / 2 \quad (2)$$

和

* 华中科技大学行动计划资助项目

Tel: 027-87543138 Email: lh - - cym@zlcn. com

收稿日期: 2003-06-30

$$ds_2 = 2\pi(h - \frac{D}{2}\cos\beta)\tan\delta d((h - \frac{D}{2}\cos\beta)\tan\delta) \quad (3)$$

且入射光线和出射光线光通量满足

$$I_0 R'(a) T(a) \cos\theta ds_1 = I(\delta) \cos\delta ds_2 \quad (4)$$

所以接收屏上回射光线的光照度分布为

$$I(\delta) = \frac{[\frac{I_0 D^2}{4}] R'(a) T^2(a) \sin 2\theta \cos\delta}{M + N} \quad (5)$$

式中

$$M = 4\pi(h - \frac{D}{2}\cos\beta)^2 \tan(1 - \frac{2\cos\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}})$$

$$N = \frac{D}{4}(h - \frac{D}{2}\cos\beta) \sin\beta \tan\varphi \sin(2\varphi) \cdot$$

$$(\frac{4\cos\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} - 1)$$

$$\beta = 4\arcsin(\frac{\sin\theta}{n}) - \theta$$

由于 $D \ll h$, 在式(5)的分母中与 D 有关项皆可忽略不计. 经简化, 回射光线在接收屏上的光照度分布为

$$I(\delta) = \frac{[\frac{I_0 D^2}{16h^2}] R'(a) T^2(a) \sin 2\theta \cos\delta \cot\delta}{1 - \frac{2\cos\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}} \quad (6)$$

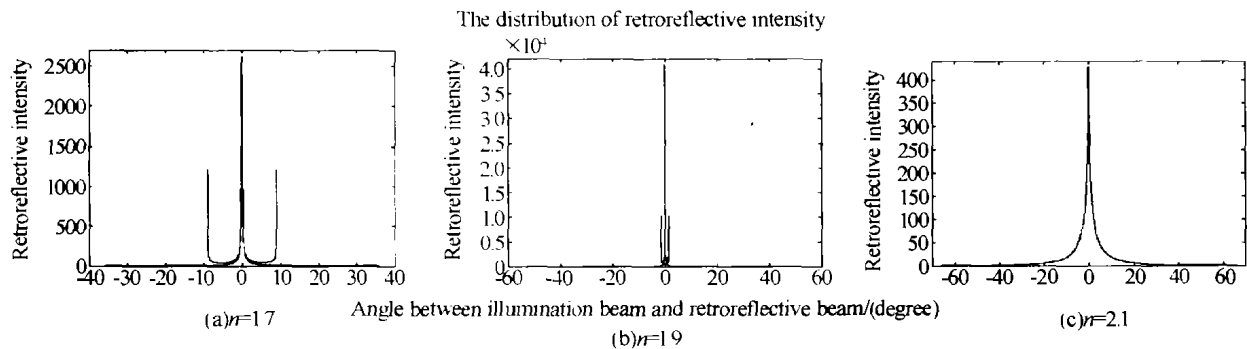


图3 不同值时回向反射光照度分布规律

Fig. 3 The distribution of retroreflective intensity with different refractive index

可看出, 在 $n < 2$, n 值确定时, 回射光线与入射光线之间的夹角 $\delta(\theta)$ 随着 θ 的增大出现先增大而后减小再增大的分布, 光照度 $I(\delta)$ 随着 $|\delta(\theta)|$ 的增大出现先减小而后增大再急剧减小的规律; n 值变化时, 随着 n 值增大, $\delta(\theta)$ 向零点集中程度增加, $I(\delta)$ 值亦迅速增大.

在 $n > 2$, n 值确定时, 回射光线与入射光线之间的夹角 $\delta(\theta)$ 随着 θ 的增大而逐渐增大, 光照度 $I(\delta)$ 随着 $|\delta(\theta)|$ 的增大而逐渐减小; n 值变化时, 随着 n 值增大, $\delta(\theta)$ 远离零点程度增加, $I(\delta)$ 值亦逐渐减小.

实际应用中, 玻璃微珠回向反射效果应该满足在距离光源附近的某个范围内能够观测或检测到明

显的回射光线. 例如, 对于交通标志牌, 要求汽车车灯发射出的光线应该能够清楚的被驾驶员观察到; 在全息摄影中, 通常摄影头在光源附近. 因此, 对回向反射性能的评价和度量, 偏重于回射光线的光通量向光源聚集程度的直观表达. 根据这种要求, 可定义有效回向反射角 $\delta^*(n)$, 使得

当 $n < 2$, 结合图 2, 有

$$\delta^*(n) = \arccos \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}} - 2\arcsin \sqrt{\frac{4n^2 - 1}{3n^2}} \quad (7)$$

从图 3 可看出, $\delta^*(n)$ 为 $I(\delta)$ 的第二条亮条纹中心所对应的 δ . 在 $|\delta| > |\delta^*(n)|$ 范围内, $I(\delta)$ 值很小, 对应的光通量也很小.

当 $n \geq 2$ 时, 满足条件

2 影响回向反射性能的主要因素

2.1 折射率 n 对回向反射性能的影响

在回向反射现象中, 回射光线与入射光线之间的夹角 $\delta(\theta)$ 和回射光线在接受屏的光照度 $I(\delta)$ 是用来表述回向反射性能的重要参量. $\delta(\theta)$ 与 θ 的关系如图 2 所示. 图 3 给出了折射率 $n = 1.7, 1.9, 2.1$ 时, 光照度 $I(\delta)$ 的分布图. 从图中可看出, 在 $n < 2$ 时, 接收屏上的光照度会有两条明显条纹.

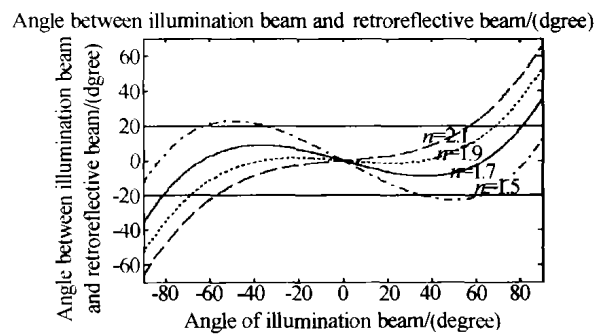


图2 不同 n 值时回射与入射光线间的夹角

Fig. 2 Angle between illumination beam and retroreflective beam in different refractive index

$$A = \frac{\int_0^{\delta^*(n)} I(\delta) d\delta}{\int_0^{\delta_{\max}} I(\delta) d\delta} \quad (\text{其中 } \delta_{\max} = \frac{\pi}{2} - 2\arcsin\left(\frac{1}{n}\right)) \quad (8)$$

A 为常数. 在 $(0, \delta^*(n))$ 范围内的回射光线光通量与全部回射光线光通量的比值等于 A .

从式(7)、(8)可看出, A 值设置得足够大时, 在 $(0, \delta^*(n))$ 范围内通过回射光线的绝大多数光通量. $\delta^*(n)$ 值大小就可以反映回射光线的光通量向光源聚集程度, $\delta^*(n)$ 越小, 聚集程度越高, 回向反射性能也就越好. $\delta^*(n)$ 就成为了衡量玻璃微珠回向反射性能的参量.

表 1 给出不同值对应的 $\delta^*(n)$

	$n=1.7$	$n=1.8$	$n=1.9$	$n=2.0$	$n=2.1$	$n=2.2$
$\delta^*(n) / (^\circ)$	8.93	4.51	1.48	1.16	5.19	9.14
A	0.986	0.961	0.941	0.75	0.75	0.75

从表 1 中看出, 当 $n < 2$ 时, $\delta^*(n)$ 随 n 值增大而减小, 回向反射性能增强; 当 $n \geq 2$ 时, 对于同一 $\delta^*(n)$ 值, A 随 n 值增大而减小, 回向反射性能减弱. 由于玻璃微珠很少有 $n \geq 2$ 的, 故未能找得样品用试验验证; $n < 2$ 时, 进行实验验证理论分析结果可信, 试验如下.

2.2 实验

实验采用 $n = 1.74$ 和 1.90 的玻璃微珠, 光源是波长 633 nm 的氦氖激光器. 接收屏与玻璃微珠之间距离为 h . 回向反射光线的光照度采用数码相机记录.

表 2 给出理论计算值与实验结果值之间的比较.

表 2 理论计算值与实验结果值的结果比较

		$\delta^*(n) / (^\circ)$	h / mm	r / mm	相对误差
$n = 1.74$	理论计算值	6.9889	670	82.13	2.0%
	实验结果值	6.9269	670	80.50	
$n = 1.90$	理论计算值	1.4866	2740	71.11	2.2%
	实验结果值	1.4527	2740	69.50	

(r 为第二条亮条纹到光环中心的距离. 理论值 $r = h\delta^*(n)$)

从表 2 可以看出, 实验值和理论计算值比较吻合, 证明了理论假设和推导的正确性.

图 4 为回向反射光线光照度照片. 从图中可观

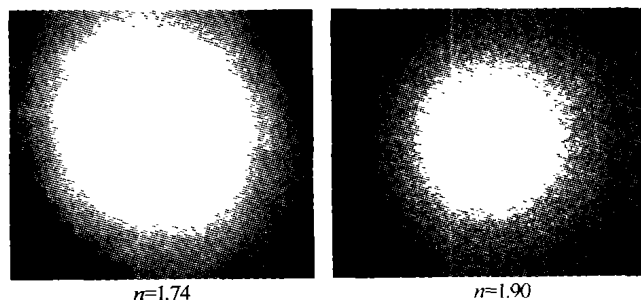


图 4 回向反射光线光照度图片
Fig. 4 Photograph of retroreflective intensity

察到两条明显的环状亮条纹, 与理论分析一致, 光照度从第二条亮纹中心开始光照度明显减弱. 根据计算比较, 第二条亮条纹中心对应 $\partial\delta/\partial\theta = 0$ 时的 δ , 即前面给出的 $\delta^*(n)$. 由此证明了有效回向反射角 $\delta^*(n)$ 的定义具有明显的实际意义.

2.3 反射层对回向反射性能的影响

如图 5 所示, 全反射层面积大小是由微珠在基板表面嵌陷深度决定, 即玻璃微珠与基板表面(包括粘结剂和全反射层) AB 之间的距离 d 来决定. d 越大, 面积越小.

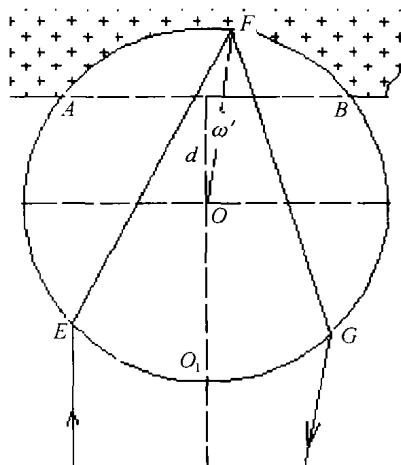


图 5 反射层面积的影响示意图
Fig. 5 influence sketch map of reflective area

若光线反射点 F 在反射层之外, 回向反射效果会大大减弱; 若光线的出射点 G 在反射层之内, 折射效果会大大削弱. 此两种情况均认为回向反射过程未能完成.

当入射光线垂直于基板且 $0 < d < D/2$ 情况时, 设 $\omega(\theta)$ 为 OF 与入射光线之间夹角, 由式(1)和图 5, 有 $\omega(\theta) = \delta(\theta)/2$, 即

$$\omega(\theta) = \theta - 2\arcsin\left(\frac{\sin\theta}{n}\right) \quad (9)$$

$|\theta| = \arccos\sqrt{(n^2-1)/3}$ 时, $|\delta(\theta)|$ 极值为 $|\omega_{\max}^1| = \arccos\sqrt{(n^2-1)/3} - 2\arcsin\sqrt{(4n^2-1)/3n^2}$, 当 $|\theta| = \pi/2$ 时, 端点值 $|\omega_{\max}^2| = \pi/2 - 2\arcsin(1/n)$, 记 $\omega_{\max} = \max(|\omega_{\max}^1|, |\omega_{\max}^2|)$.

一束光线能够完成回向反射应同时满足 F 点在反射层内和 G 点在反射层外. 由于 $0 < d < D/2$ 时, 一定有 G 点在反射层外, 因而只需满足条件

$$\frac{D}{2} \cos \omega_{\max} > d \quad (10)$$

据式(9)、(10)可以得到在不同反射层面积情况下的入射和回射光线夹角 $\delta(\theta)$

$$\delta = 2\theta - 4\arcsin\left(\frac{1}{n}\sin\theta\right) \cdot$$

$$\begin{cases} 0 \leq d \leq \frac{D}{2} \cos\left(\frac{\delta_{\max}}{2}\right) \text{ 时, 取 } |\delta| \leq \delta_{\max} \\ \frac{D}{2} \cos\left(\frac{\delta_{\max}}{2}\right) \leq d \leq \frac{D}{2} \text{ 时, 取 } |\delta| \leq 2\arccos\frac{2d}{D} \end{cases} \quad (11)$$

在图2中,位于平行线之间的部分为 $d = 0.4924D$ 时的 $\delta(\theta)$ 曲线图.表3给出不同 d 、 n 值时,能够完成回向反射过程光线占总入射光线的比例.

表3 反射层对回向反射性能得影响(正入射)

	η	$n=1.5$	$n=1.7$	$n=1.9$	$n=2.1$
$d=0.4980D$	0.4%	64.8%	76.1%	64.1%	47.5%
$d=0.4924D$	1.5%	85.0%	90.0%	70.1%	66.4%
$d=0.4829D$	3.4%	100%	96.0%	84.7%	74.1%

(η 为反射层面积占半球面面积的比例值.)

从表3中可看出,当反射层面积确定,回向反射性能随着折射率 n 的增大先增大而后减小;折射率不变时,回向反射性能随着 d 的减小(反射层面积增加)逐渐增强.且小面积($<5\%$)的反射层面积即可满足大多数入射光线的回向反射过程.

结合图2和表3,在 $\delta > |\delta^*(n)|$ 范围内的光线只占全部入射光线的很小部分,再考虑到光照度的大小相差悬殊,对于工艺生产方面,可以用 $\delta^*(n)$ 代替 δ_{\max} 作为边界条件,这对光通量影响不大.式(6)可为

$$I(\delta) = \frac{\left[\frac{I_0 D^2}{16h^2}\right] R' T^2 \sin 2\theta \cos \delta \cot \delta}{1 - \frac{2\cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}}$$

$$\begin{cases} 0 \leq d \leq \frac{D}{2} \cos\left(\frac{\delta_{\max}}{2}\right) \text{ 时, 取 } |\delta| \leq \delta_{\max} \\ \frac{D}{2} \cos\left(\frac{\delta_{\max}}{2}\right) \leq d \leq \frac{D}{2} \text{ 时, 取 } |\delta| \leq 2\arccos\frac{2d}{D} \end{cases} \quad (12)$$

2.4 反射层的合理计算

d 值范围的确定,也即玻璃微珠反射层面积大小的确定,直接影响到回向反射效果.对指导回向反射材料的生产有实际的意义.

以玻璃微珠折射率为1.7为例.设入射光线与基板的夹角在 $(-\phi, \phi)$ 范围内.由于对称图形和对称角度,若边界光线能够完成回向反射过程,则 $(-\phi, \phi)$ 范围内光线均能够回向反射.只需要讨论与基板成 ϕ 的光线完成回向反射过程的条件.

由图6,简单坐标变换得

$$d_\phi = \frac{D}{2} \cos \delta^*(n) \cos \phi - \frac{D}{2} \sin \delta^*(n) \cdot \cos \delta^*(n) \quad (13)$$

当 d 值在 $(0, d_\phi)$ 范围内时,与基板的夹角在范围内入射光线均能回向反射.

例如取 $\phi = \pi/4$,则 d 值范围应为 $(0, 0.273D)$.

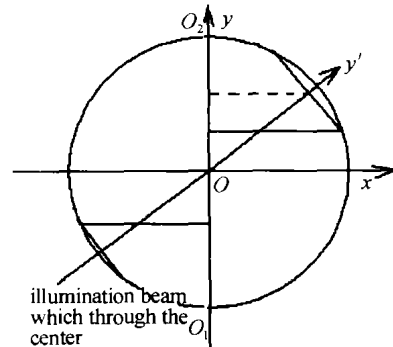


图6 坐标转换示意图

Fig. 6 Sketch map of coordinate conversion

3 结论

通过对玻璃微珠回向反射性能的理论分析和实验验证,可得到结论如下:

1)当折射率 $n < 2$ 时,玻璃微珠的回向反射性能随着折射率 n 值的增大而增强;当 $n \geq 2$ 时,回向反射性能则随着折射率 n 值的增大而减弱(现尚无 $n \geq 2$ 的玻璃微珠应用).

2)有效回向反射角的定义是反映玻璃微珠回向反射性能的重要参量.在实际应用中,对有效回向反射角的不同要求,可通过选择折射率 n 来达到.

3)随着入射光线与基板法线间夹角的增大,玻璃微珠反射层面积要随之增加.一般情况下,半球的反射层可获得最大回射视场角.

参考文献

- Wesley S E. System of visual retroreflective aircraft approach runway panels. USP G02B, 6, 293, 678. 2001-9-25
- 王柏庐. 微玻璃球回归反光条件的理论分析. 光学学报, 1998, 18(6): 693 ~ 699
Wang B L. Acta Optica Sinica, 1998, 18(6): 693 ~ 699
- 强士义, 楚自强, 李建成. 玻璃微珠回向反射理论研究. 纺织高校基础科学学报, 2001, 14(1): 13 ~ 17
Qiang S Y, Chu Z Q, Li J C. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2001, 14(1): 13 ~ 17
- 张海泉, 李桂付, 周群. 回归反光织物反光机理及影响因素. 纺织学报, 1993, 14(3): 111 ~ 115
Zhang H Q, Li G F, Zhou Q. Journal of Textile Research, 1993, 14(3): 111 ~ 115
- 曹志峰, 张希艳. 激光合作目标用玻璃微珠的研制. 光学技术, 1997, 23(1): 25 ~ 27
Cao Z F, Zhang X Y. Optical Technique, 1997, 23(1): 25 ~ 27
- 李云台. 回归反光织物的反射光分布. 无锡轻工大学学报, 1997, 16(1): 71 ~ 74
Li Y T. Journal of Wuxi University of Light Industry, 1997, 16(1): 71 ~ 74

- 7 王柏庐. 回归反光膜的结构、原理及应用. 物理, 1997, 26(1): 48 ~ 50
Wang B L. *Physics*, 1997, 26(1): 48 ~ 50
- 8 张海泉, 李云台. 织物光反射特性的探讨. 纺织学报, 1995, 16(3): 16 ~ 18
Zhang H Q, Li Y T. *Journal of Textile Research*, 1995, 16(3): 16 ~ 18
- 9 黄富泉, 赵道木, 王绍民. 微珠阵列逆返膜性能的改善. 光子学报, 2001, 30(3): 359 ~ 363
Huang F Q, Zhao D M, Wang S M. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(3): 359 ~ 363

Study on the Key Factors Deteriorating the Retroreflective Capability of Glass Microspheres

Chen Yanming, He Yuming

Mechanics Department, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Received date: 2003-06-30

Abstract The retroreflective capability of a kind of paint made of glass microspheres, is theoretically investigated and experimentally demonstrated in this paper. Two factors, refractive index and reflective area related with the retroreflective capability are discussed. The theoretic results show that retroreflective intensity increases gradually with accretion of refractive index when refractive index is less than two, but decreases when refractive index is great than two. The reflective area of a glass microsphere plays an important role in finishing the retroreflective procedure. An efficient retroreflective angle is defined as a key parameter referred for practice application. Finally, an experimental photograph of retroreflective intensity distribution is obtained.

Keywords Glass microsphere; Retroreflective capability; Retroreflective intensity



Chen Yanming was born in 1979. He received the B. S. degree in engineering mechanics from Huazhong University of Science and Technology (HUST) in 2002. Now, he is a M. S. candidater of department of engineering mechancis in HUST. His research interests include nondestructive testing and measurement techniques with computer vision.