

文章编号: 1001-3806(2009)01-0008-04

微透镜阵列实现3维物体旋转不变实时识别

郝劲波¹, 王良甚¹, 忽满利²

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055; 2. 西北大学 物理系, 西安 710069)

摘要: 为了实现3维物体旋转不变实时识别,应用微透镜阵列的多视角成像特点,利用透射像阵列的高关联性,实现3维物体信息与2维透射像阵列信息之间的转换,从而可以利用光学2维图像识别技术实现3维物体的识别。对转换和识别过程进行了理论分析,用匹配滤波的方法进行了实验验证,实现了3维物体旋转不变实时识别。得到了良好的识别效果,并实现了旋转方向的准确定位和旋转角度大小的比较判别。结果表明,应用微透镜阵列可以实现旋转3维物体旋转不变实时识别。

关键词: 信息光学; 3维物体识别; 匹配滤波; 微透镜阵列; 旋转不变; 旋转方向定位

中图分类号: O438.2 **文献标识码:** A

Real-time 3-D object rotation-invariant recognition with microlens array

HAO Jin-bo¹, WANG Liang-shen¹, HU Man-li²

(1. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710069, China; 2. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to realize 3-D object rotation-invariant recognition, with help of high relevancy of perspective array of 3-D objects, the depth information of 3-D objects was converted to 2-D elemental images by means of microlens array. Theoretical analysis showed that both 3-D object rotation-invariant recognition and exact orientation of rotation direction could be obtained. Taking a dice, a 3-D object as an example, it was recognized in real-time by means of match filtering and the proposed method. The latter performed better, and the exact orientation of rotation direction and rotational angle size discrimination were recognized. The results showed that the real-time 3-D object rotation-invariant recognition can be accomplished with microlens array.

Key words: information optics; 3-D object recognition; match filtering; microlens array; rotation-invariant; orientation of rotation direction

引言

光学系统对2维图像进行识别具有非接触、准确性高、速度快、并行处理等优点,从而得到了广泛应用^[1-2],例如基于指纹的安全系统,自动售货机的货币识别系统等。但光学系统只能对2维信息进行处理,不能直接实现3维物体的识别,必须首先将3维物体的信息转换成2维信息。由于更具有实际应用价值,近年来3维物体识别被广泛研究。目前国内主要采用位相编码^[3]、结构光场^[4]、莫尔条纹^[5]、以及表面网格^[6]等方法;国外有采用相移数字全息^[7-8]和整体图像^[9-11]的报道,但由于对入射光有严格要求,且过程复杂,主要是进行计算机模拟,难以在实际光路中实现,并未实现实时识别。而且这些方法对于发生诸如旋转

等畸变的3维物体都没有很好的处理方法,而对发生畸变的3维物体的识别将具有更大的实用价值。作者提出的应用微透镜阵列实现3维物体旋转不变实时识别的方法光路简单、易于实现,利用光折变晶体作为介质制作匹配滤波器,在克服匹配滤波器难以进行实时处理的缺点的同时,充分利用了其大容量、并行性的优点,使其更具有实用性。对该方法进行了理论分析和实验验证,在实际光路中实现了3维物体的旋转不变实时识别,得到了良好的识别效果,并实现了物体旋转方向的准确定位以及对不同旋转角度大小的比较判别。理论分析进一步表明,该方法可以实现旋转3维物体微小角度的非接触测量。

1 旋转不变识别理论分析

利用微透镜阵列的 $r-\theta$ 转换特性,可以实现3维物体的深度信息和2维透射像阵列的角度信息之间的转换,使3维物体的光学相关识别得以实现,其原理如图1所示。图中 a 为物距, b 为微透镜的焦距, D 为空间位移。

作者简介:郝劲波(1979-),男,讲师,主要从事光信息处理和光学模式识别研究。

E-mail: haojinbo@sina.com

收稿日期:2007-10-18;收到修改稿日期:2008-01-07

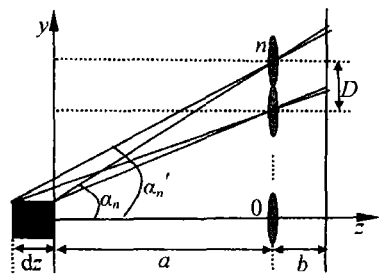


Fig. 1 Forming images of 3-D object with microlens array

微透镜阵列由一系列周期性排列的自聚焦透镜组成,其中的每一个微透镜,相对于3维物体都有不同的角度 θ ,所以每一个微透镜都能提供1个不同的3维物体透射像,而每一个透射像都包含着诸如深度 r 等不同的3维物体的信息,这也就意味着3维物体的深度信息被微透镜阵列转化成了2维的角度信息,即完成了3维物体信号和2维阵列信号之间的 $r-\theta$ 转换,而光学系统是可以对2维信息进行实时处理的,这就使得3维物体的实时识别成为可能。把这些透射像综合起来进行分析,就可以完全重建3维物体^[9],而不会丢失3维物体的信息。

为方便起见,仅考虑微透镜阵列沿 y 轴方向对物体所成的像。沿 y 轴方向从0到 n 的每个透镜都对3维物体成角度不同的透射像,用 α_n 表示这些角度。3维物体沿 z 轴方向在第 n 个透镜上所成的角度分别表示为 α_n, α_n' ,可以得到: $\tan\alpha_n = nD/a, \tan\alpha_n' = nD/(a + dz)$,由于 $dz \ll a$,故有: $\tan\alpha_n \approx \alpha_n, \tan\alpha_n' \approx \alpha_n'$ 。

于是可以得到:

$$d\alpha_n = \alpha_n - \alpha_n' = \frac{nD}{a} - \frac{nD}{a + dz} \approx n \frac{D}{a^2} dz \quad (1)$$

由(1)式可以看到, $d\alpha_n$ 只与3维物体的深度 dz 和透镜的位置,也就是 n 有关。这也就意味着3维物体的深度信息被微透镜阵列转化成了2维的角度信息,即完成了3维物体信号和2维阵列信号之间 $r-\theta$ 的转换。

对微透镜阵列的 $r-\theta$ 转换特性加以推广应用,则这种方法可以实现3维物体的旋转不变识别,其原理如图2和图3所示。

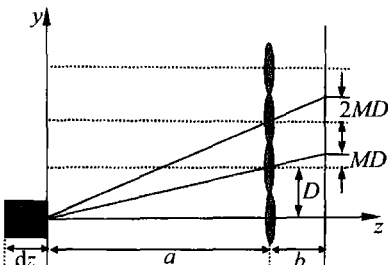


Fig. 2 Forming images of 3-D object with microlens array

图中, MD 和 $2MD$ 为空间位移,表示物体经微透镜后所成的像与该微透镜光轴之间的距离。由于 $b \gg$

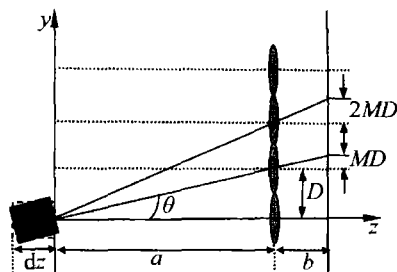


Fig. 3 Forming images of rotational 3-D object

D ,则有:

$$\theta \approx \tan\theta = D/a \quad (2)$$

当物体未旋转时,图2中位于 z 轴上的微透镜正对着3维物体位于 z 轴上的一点,该微透镜对3维物体所成的透射像位于 z 轴上;当物体旋转过角度 θ 后,与原微透镜毗连的另一微透镜将正对3维物体原来位于 z 轴上的同一点,如图3所示,此时,该微透镜对3维物体所成的透射像将与物体未旋转前,位于 z 轴上的微透镜对3维物体所成的透射像完全相同,只是其在焦面上的位置已不在 z 轴上,而是沿 y 轴方向有了一个 $(D + MD)$ 的平移。

微透镜阵列的其它微透镜对旋转3维物体所成的透射像的位置与上面两个微透镜相类似,均与其毗连微透镜对未旋转物体所成的透射像相同,只是有一个 D 的平移,所以,旋转3维物体,仅仅是使相同的透射像发生了空间位移,而微透镜阵列所记录的3维物体的信息仍与未旋转时一样。在微透镜的焦面上,该空间位移的大小相同,均为:

$$s = D + MD \quad (3)$$

经由上面的分析可以得到,若3维物体旋转一定角度,所得的透射像阵列仍包含未旋转时3维物体透射像阵列的全部信息,即二者有很高的关联度。如果将此时的透射像阵列图像作为目标图像输入相关识别器,仍可得到相关输出。

由于旋转后各透射像的位置较未旋转前均发生了位移,因此,将旋转后的透射像阵列图像作为目标图像输入时,得到的相关峰的位置亦会随之发生位移,且位移量与所旋转的角度有关,旋转角度越大,偏移量越大,这在实验中也得到了验证。由理论分析也可以看到,3维物体的旋转角度与相关峰的偏移量之间存在比例关系,如果应用到微小角度的测量上,就可以得到一种对3维物体微小角度进行非接触测量的新方法。

2 实验验证

实验中使用的光路由图4和图5两部分共同组成,为更加清晰明了,将其分为两部分分别示出。图4为获得旋转3维物体透射像的实验装置部分。

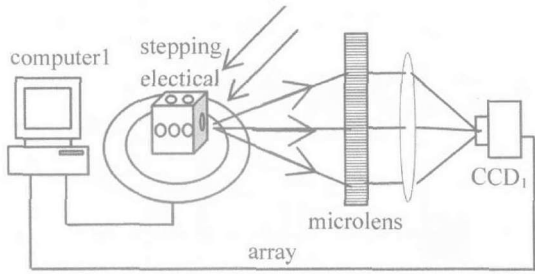


Fig. 4 Equipment to obtain perspective images of rotational 3-D object

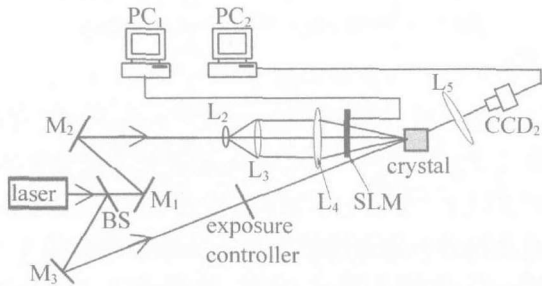


Fig. 5 The diagram of experiment

实验中使用计算机控制的步进电机控制3维物体的旋转角度,步进电机的精度为 0.01° ,3维物体骰子置于步进电机旋转台的中心,其中心轴与旋转台的中心重合,使3维物体仅绕其中心轴沿水平方向作纯旋转运动。由钠光灯发出的非相干光照射3维物体骰子,其反射光经微透镜阵列和成像透镜后,得到2维的透射像阵列,由CCD记录并输入到计算机中。

实验中使用的微透镜阵列大小为 $6\text{cm} \times 5\text{cm}$,由3000个周期性排列的焦距为 1mm 的自聚焦透镜组成,其周期 $D=1\text{mm}$,实验中物距取 $a=90\text{mm}$ (控制步进电机使旋转角度为 0.64°)。

图5为采用匹配滤波方法进行旋转3维物体实时识别的光路部分。

激光器发出的激光束经分光镜(beam splitter, BS)分成两束,反射光束经反射镜 M_2 反射后做为参考光束,透射光束经反射镜 M_1 和反射镜 M_2 后,经由透镜 L_2 和 L_3 组成的倒装望远镜系统扩束并准直后,均匀投射到空间光调制器(spatial light modulator, SLM)上。

物体识别过程分为两步:第1步是制作光折变匹配滤波相关器。作为参考物体的旋转3维物体的透射像阵列由计算机控制并输入到SLM上。SLM和光折变晶体分别放置于傅里叶透镜 L_4 的前焦面和后焦面上,携带参考物体信息的透射光经 L_4 进行傅里叶变换,在其后焦面上得到参考物体图像的频谱,并与参考光在光折变晶体内发生干涉,从而在晶体内写入体全息图作为匹配滤波相关器。第2步是对目标物体进行识别。通过计算机将目标物体的透射像阵列输入到SLM上,使携带目标物体信息的透射光作为匹配滤波相关器的读出光,读出的光波经由傅里叶透镜 L_5 进行逆傅里叶变换,在其后焦面上得到参考物体和目标物体的

相关输出,由CCD记录并输入到计算机中进行分析。

输入到SLM,即输入平面上的信号可表示为:

$$g(x, y) = \sum_{k=-N_x}^{N_x} \sum_{l=-N_y}^{N_y} a_{kl}(x, y) * \delta(x - kD_x - kMD_x, y - lD_y - lMD_y) \quad (4)$$

式中, x 轴, y 轴的方向如图1所示, $a_{kl}(x, y)$ 表示微透镜阵列沿 x 轴, y 轴方向的第 (k, l) 个透镜对参考物体的透射像,*表示卷积, M 是微透镜阵列成像系统的放大率, D_x, D_y 分别是微透镜阵列沿 x 轴, y 轴的周期, N_x, N_y 表示微透镜阵列沿 x 轴, y 轴分别有 $2N_x + 1$ 和 $2N_y + 1$ 个微透镜。

同样,目标物体输入波可表示为:

$$f(x, y) = \sum_{m=-N_x}^{N_x} \sum_{n=-N_y}^{N_y} b_{mn}(x, y) * \delta(x - mD_x - mMD_x, y - nD_y - nMD_y) \quad (5)$$

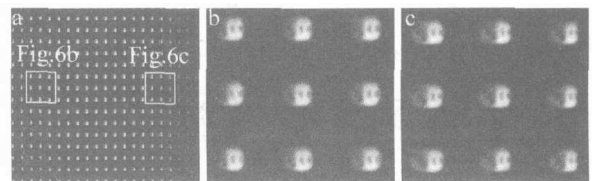
经过匹配滤波识别过程^[1],可得到最后的输出结果为:

$$c(x, y) = \sum_{k=-N_x}^{N_x} \sum_{l=-N_y}^{N_y} \sum_{m=-N_x}^{N_x} \sum_{n=-N_y}^{N_y} a_{kl}(x, y) \otimes b_{mn}[x - (k - m)(1 + M)D_x, y - (n - l)(1 + M)D_y] \quad (6)$$

式中, \otimes 表示相关。

3 实验结果与分析

实验中使用波长为 $\lambda = 532\text{nm}$ 的绿光激光器作为光源,e光入射。参考光功率为 51mW ,物光功率为 116mW ,由于物光需扩束,为保证入射光强基本相等,故功率较参考光大。使用大小为 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$,掺铁(质量分数为 0.0003)、掺铈(质量分数为 0.006)的 Fe:Zn:LiNbO_3 晶体作为光折变晶体,为了获得较高的衍射效率,实验中,将晶体光轴沿水平方向放置,使物光和参考光耦合时形成的光栅矢量沿晶体光轴方向。SLM的分辨率为 1024×768 ,像素大小为 $18\mu\text{m} \times 11\mu\text{m}$ 。使用模拟黑白CCD记录图像,像素大小为 $8.6\mu\text{m} \times 8.3\mu\text{m}$ 。以 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的骰子作为3维物体。物体经微透镜阵列的透射像如图6所示,目标图像和参考图像均为 21×15 的透射像阵列。

Fig. 6 Perspective images of 0° 3-D object

以未旋转时,即 0° 时的物体作为参考物体,制作匹配滤波器,以骰子旋转 $+0.64^\circ, -192^\circ$ 时所得的透射像阵列作为目标图像进行识别,得到了相关输出结

果,正号和负号分别表示相对于 0° 的两个相反的旋转方向。参考图像的自相关输出如图7所示,图8,图9为骰子相对于参考物体旋转 $+0.64^\circ$, -1.92° 时与参考物体的互相关输出结果。

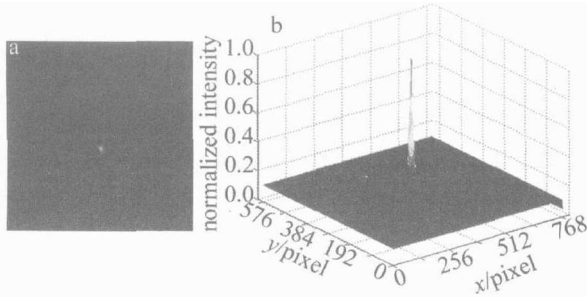


Fig.7 Autocorrelation image of the reference(0°) and the normalized intensity curve

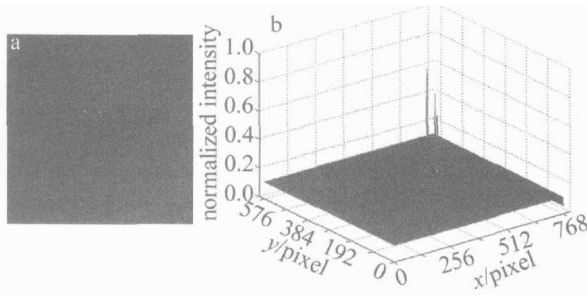


Fig.8 Cross correlation image of the rotational 3-D object ($+0.64^\circ$) and the normalized intensity curve

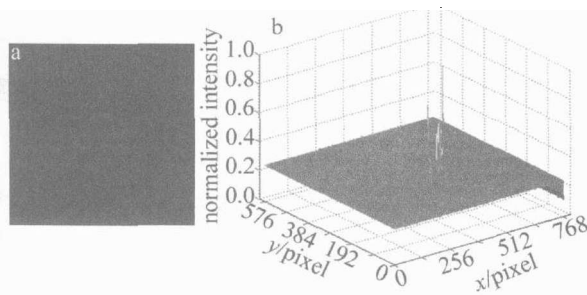


Fig.9 Cross correlation image of the rotational 3-D object (-1.92°) and the normalized intensity curve

从上述输出结果可以看到,该方法对于具有旋转的3维物体实现了实时识别,且相关输出结果良好。输出结果中出现了两个强度明显高于其它点的相关峰,从归一化强度分布曲线图中也可以清楚地看到。图中最高的相关峰为图形本身的形状所引起,与自相关峰的位置相同;第2高相关峰即为参考物体与目标物体的互相关峰,可以看到,它与自相关峰的位置有一偏移量,该偏移量的大小即度量着旋转角度的大小,且对不同的旋转方向,偏移方向也不相同,可以清楚地由偏移方向对3维物体的旋转方向进行准确定位,且可以对旋转角度的大小进行比较判别。

从图8、图9也可以明显地看到,偏移量的变化趋势与旋转角度绝对值的变化趋势相同;但随着旋转角度的增大,相关峰的强度也迅速减小, -1.92° 的相关

峰强度仅为 $+0.64^\circ$ 相关峰强度的0.47倍,这是因为随着旋转角度的增大,透射像的偏移量也越大,透射像阵列关联度减小,参考物体和目标物体的相同度也随之减小,这和理论分析的结论一致。所以,该方法对于3维物体允许旋转的角度存在一个最大值,若超过这个最大值,则会引起旋转后和旋转前相同透射像之间的位移量过大,从而不能完全记录原透射像阵列所记录的3维物体的信息,物体将不能被识别。

图中其它较低的相关峰为旋转角度与微透镜阵列的周期未严格匹配,以及反射镜未镀膜界面的微弱反射光和背景光经聚焦后进入CCD所造成的,但强度较弱,并不会影响到最后的识别结果。

在实验中使旋转角度满足(2)式,只是为了使旋转角度 θ 和微透镜阵列的周期 D 有一个简单的比例关系,减少干扰峰对识别效果的影响,对于除 θ 外的其它角度,上面的分析方法仍然适用,由于 D 为定值,只要改变 a 的大小即可通过(2)式得到任意 θ 值。

4 结论

应用微透镜阵列的 $r-\theta$ 转换特性,可以利用光学系统实现3维物体的实时识别。由于3维物体经微透镜阵列的透射像阵列之间具有高关联性,所以该方法可以实现3维物体的旋转不变实时识别,并且由理论分析和实验结果得到,该方法可以实现3维物体旋转方向的准确定位以及对旋转角度大小的比较判别。该方法光路简单、容易在实际光路中实现,相关识别能力良好,由于使用光折变晶体作为制作匹配滤波器的介质,且输入、输出都应用CCD采集并通过计算机进行处理,所以具有很好的实时性,而3维物体的旋转不变实时识别将更具有现实意义。

参 考 文 献

- [1] SONG F J, JUTAMULIA S. Advanced optical information processing [M]. Beijing: Peking University Press, 1998: 64-77 (in Chinese).
- [2] SHENG Z X, SUN X L. Application of computer generated hologram technology in optical correlation recognition system [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 61-63 (in Chinese).
- [3] CAO F, SU X Y. Method for 3-D objects recognition based on phase-encoded range image [J]. Laser Journal, 2007, 28(1): 50-52 (in Chinese).
- [4] LU J, SU X Y, WANG H X. Three dimensional object recognition with rotation-invariant by structure light [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15(12): 1492-1497 (in Chinese).
- [5] WANG H X, SU X Y, LU J. Method for 3-D object recognition by Moire fringe [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(3): 349-353 (in Chinese).
- [6] LI Q, ZHOU M L, LIU J. Multi-resolution mesh based 3-D object recognition [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(7): 891-894 (in Chinese).

2002年法国固体激光应用实验室的AKA, VIVIEN和罗马尼亚原子能物理研究所量子电子国家实验室的LUPEI用可调谐钛宝石激光器输出885nm激光作为Nd:YAG(质量分数为0.011时)的抽运源,输出连续准3能级946nm激光^[6]。2003年,以色列原子能研究中心光电部门的非线性光学研究小组GOLDRING, LAVI等人第1次通过实验比较了885nm热助推抽运与808nm传统抽运的热负载情况,表明885nm抽运方案的晶体热负载要比808nm方案少27%^[7]。2005年,瑞士BJURSHAGEN和LAURELL,美国HOFFMAN用869nm直接抽运Nd:YAG晶体产生连续准3能级946nm的激光输出^[8]。

短短的几年内,已经实现了用869nm和885nm作为抽运源,分别产生1064nm,1340nm,准3能级946nm的激光输出。869nm直接抽运方案对线宽的苛刻要求使得抽运用的869nm激光大多都是可调谐钛宝石可调谐激光器,885nm抽运最初也是用可调谐钛宝石激光器,随着半导体激光器的发展,2001年开始已经能提供符合要求的885nm半导体抽运源。后来关于885nm热助推抽运的研究就基本都采用半导体抽运结构,该抽运方案优异的热性能和高的效率一直受到全世界科研人员的关注。2000年后关于半导体热助推抽运的报道还有很多,本文中并没有一一列举,但笔者调研国内的情况时,发现目前国内方面还未见有任何公开的报道此技术,开展该项目的研究非常有意义。

3 结束语

从理论方面分析了Nd:YAG晶体低热抽运中的热助推抽运技术的优势所在,对传统的808nm LD抽运而言,斜效率提高到原来的1.15倍,相对阈值是原来的0.87,885nm热助推抽运方案发热功率与吸收光功

率的曲线的斜率是传统808nm抽运的60%,可见热助推抽运技术在固体激光器热管理方面是很有价值的。另外,也有很多其它的4能级激光晶体同样存在其低热抽运带,如Tm:YAG^[9],Nd:YVO₄^[10]等,低热抽运技术对LD抽运源要求比较苛刻,设计合理的抽运结构对该系统而言非常重要。但在热性能方面的优势是十分明显的,合理利用该技术可为实现紧凑化的全固态激光器的一条技术途径,紧凑化的全固态激光器可用于军用激光测距、激光制导、光雷达和定向能武器等。

参 考 文 献

- [1] SHI P, LI L, GAN A Sh, *et al.* Thermal effect research of Nd³⁺ doped laser crystals in end-pumped all-solid-state lasers [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(2): 177-180 (in Chinese).
- [2] LAVI R, JACKEL S, TAL A, *et al.* 885nm high-power diodes end-pumped Nd:YAG laser [J]. *Opt Commun*, 2001, 195(5): 427-430.
- [3] BROWN D. Heat, fluorescence, and stimulated-emission power densities and fractions in Nd:YAG [J]. *IEEE J Q E*, 1998, 34(33): 560-572.
- [4] ROSS M. YAG laser operation by semiconductor laser pumping [J]. *Proc-IEEE*, 1968, 65: 196-197.
- [5] LAVI R, JACKEL S, TZUK Y, *et al.* Efficient pumping scheme for neodymium-doped materials by direct excitation of the upper lasing level [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(36): 7382-7385.
- [6] LUPEI V, AKA G, VIVIEN D. Quasi-three-level 946nm CW laser emission of Nd:YAG under direct pumping at 885nm into the emitting level [J]. *Opt Commun*, 2002, 204: 399-405.
- [7] GOLDRING S, LAVI R, TAL A, *et al.* Direct pumping of four levels lasing materials [J]. *SPIE*, 2003, 4968: 74-78.
- [8] BJURSHAGEN S, LAURELL F, KOCH R, *et al.* 946nm Nd:YAG laser under ground-state direct diode-pumping at 869 nm [C]//Conference on Lasers & Electro-Optics. San Francisco: OSA, 2005: 328-330.
- [9] PTERSON P, GAVRIELIDES A, SHARMA M P. Diode-pumped Tm:YAG solid-state lasers with indirect and direct manifold pumping [J]. *Appl Phys*, 1995, B61(22): 195-200.
- [10] HUANG Zh Y, HUANG Y D, CEHN Y J, *et al.* Theoretical study on the laser performances of Nd³⁺:YAG and Nd³⁺:YVO₄ under indirect and direct pumping [J]. *J O S A*, 2005, B22(12): 2564-2569.

(上接第11页)

- [7] JAVIDI B, TAJAHUERCE E, MARTINEZ-CORRAL M, *et al.* New developments in active and passive 3-D image sensing, visualization, and processing [J]. *SPIE*, 2005, 5986: 598601. 1-598601. 11
- [8] NELLERIA A, GOPINATHAN U, JOSEPH J, *et al.* Three-dimensional object recognition from digital Fresnel hologram by wavelet matched filtering [J]. *Opt Commun*, 2006, 259(2): 499-506.
- [9] MATOBA O, TAJAHUERCE E, JAVIDI B. Real-time three-dimension object recognition with multiple perspectives imaging [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(20): 3318-3325.
- [10] HONG S H, JANG J S, JAVIDI B. Three-dimensional volumetric object reconstruction using computational integral imaging [J]. *Optics Express*, 2004, 12(3): 483-491.
- [11] FRAUEL Y, TAJAHUERCE E, MATOBA O, *et al.* Comparison of passive ranging integral imaging an active imaging digital holography for three-dimensional object recognition [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(2): 452-462.