

# 基于主分量分析法的小波域三维目标 序列图像隐藏技术\*

帅文娟 冯少彤 聂守平<sup>†</sup> 朱竹青

(南京师范大学江苏省光电技术重点实验室, 南京 210097)

(2010年1月27日收到; 2010年4月29日收到修改稿)

针对在一幅载体图像中隐藏三维目标序列图像的问题, 本文利用主分量分析法获取三维目标的本征图像, 将本征图像的小波域系数嵌入到载体图像的小波域系数中, 利用分解系数和提取得到的本征图像重构出三维目标的系列图像. 本文所提出的方法不是直接存储目标图像, 而是存储能够反映三维目标特征的一组本征图像. 研究表明, 该方法有效地将三维目标的特征隐藏在了载体图像中, 隐藏信息量大.

**关键词:** 信息隐藏, 三维目标, 主分量分析, 小波变换

**PACS:** 42.30.Va, 42.30.Wb

## 1. 引言

信息隐藏是把待隐藏的信息嵌入到载体中, 具有视觉不可见性和保密性, 可以有效避免隐藏信息在传输过程中被第三方窃取破译. 在信息隐藏领域, 常见的隐藏方法分为两类, 一类是空间域隐藏<sup>[1,2]</sup>, 它具有算法简单, 速度快的优点, 但鲁棒性能差, 受攻击影响大; 另一类是变换域隐藏<sup>[3-7]</sup>, 利用傅里叶变换、余弦变换、小波变换等特性, 通过对变换系数的加密实现信息隐藏. 在变换域中, 由于小波变换具有多尺度、多分辨率的特点, 应用更为广泛. 目前, 无论是在空间域还是变换域, 信息隐藏通常是将一幅二维图像隐藏在一幅二维载体图像中<sup>[1-7]</sup>, 这种方法隐藏的信息量有限, 而且解密后直接得到隐藏图像, 安全性较低. 由于三维目标包含的信息要比二维图像的信息更为丰富, 我们考虑将三维目标的信息隐藏到载体图像中.

三维目标可以用其在空间的一系列二维投影图像来表示, 这样就可以直接利用现有的隐藏方法来存储三维目标的一系列二维投影图像, 但这种方法没有考虑到投影图像之间的关联性, 存储量将大大增加. 目前, 处理三维目标信息的一种方法是利

用数字全息技术获取三维目标全息图<sup>[8]</sup>, 将全息图隐藏在二维载体图像中; 另一种方法是在记录三维目标全息图过程中, 将随机相位掩模板作为密钥, 对参考光相位进行调制, 得到加密后的全息图<sup>[9]</sup>. 这两种方法将全息图解密再现得到的图像仅仅反映目标在空间某一范围内的特征, 不能完全反映三维目标的信息. 为此, 我们需要研究一种新的方法, 将能够反映三维目标所有特征的信息隐藏在载体图像中.

本文利用主分量分析法<sup>[10-12]</sup>获取三维目标的一系列本征图像, 并将这些本征图像的小波系数隐藏在载体图像的小波域中; 提取信息时, 将隐藏图像的分解系数作为密钥, 与提取出来的本征向量进行重构, 再现三维目标的系列空间二维图像. 本方法的核心不是直接存储目标图像, 而是存储代表三维目标的本征图像, 解密再现的结果也不是一幅图像, 而是反映三维目标特征的系列图像.

## 2. 主分量分析法

为简单起见, 我们采集三维目标绕中心轴离面旋转的一系列图像, 每幅图像大小为  $P = m \times n$ . 将每幅图像按行优先的顺序转化为  $P$  维列向量, 于是

\* 江苏省高校自然科学基金(批准号:09KJA140002)和江苏省自然科学基金(批准号:BK2009400)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: njnukjc\_nie@163.com

$N$  幅图像可以用大小为  $X = [P, N]$  的图像矩阵表示,通常  $P \gg N$ . 由于这些图像之间有很高的相关性,大量数据存在信息冗余,直接存储会造成了存储空间的浪费. 主分量分析法就是把能够反映图像特征的本征信息集中到数量尽可能少的主成分图像中,并使这些主成分图像之间互不相关,即各个主成分包含的信息内容是不重叠的,从而大大减少存储的数据量.

构造互相关矩阵  $\varphi = X^T X$ , 该矩阵大小为  $N \times N$ , 矩阵的特征值和特征向量为  $\lambda_i$  和  $V_i, i = 1, 2, \dots, N$ , 满足

$$X^T X \lambda_i = X^T X V_i. \quad (1)$$

上式也可以表示为

$$X X^T X \lambda_i = X X^T X V_i. \quad (2)$$

可以看出,  $X V_i$  是矩阵  $X X^T$  的特征向量, 矩阵  $X X^T$  大小为  $P \times P$ , 而  $X V_i$  大小为  $P \times N$ , 通过降维处理我们得到了  $N$  个特征向量来反映目标的特征.

将特征值按照从大到小的顺序排列, 特征值  $\lambda_i$  越大, 说明其对应的特征向量  $X V_i$  在目标重构时所起的作用就越大. 因此, 我们可以仅保留前  $L$  个特征值对应的特征向量, 这样既保留了目标的信息又减少了存储空间, 这  $L$  个特征向量构成了一组正交基

函数  $XV$ . 任意一幅目标图像  $G_i$  都可以在该组正交基上分解, 得到一组分解系数为

$$D_i = \frac{(XV)^T \cdot G_i}{\|(XV)^2\|}. \quad (3)$$

同样, 利用这组分解系数和正交基函数的线性组合, 我们可以重构出原始目标图像

$$G_i = XVD_i. \quad (4)$$

在确定特征向量数目  $C$  的取值时, 我们令

$$\frac{\sum_{i=1}^L \lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \geq \alpha, \quad (5)$$

也就是说, 当  $L$  个特征值所占比重大于某一阈值时, 说明所对应的  $L$  个特征向量可以反映出三维目标的特征.

### 3. 小波域信息隐藏

如图 1 所示为本文所提出的信息嵌入流程图, 我们将载体图像、本征图像以及若干组分解系数在小波域进行融合, 经小波逆变换后得到载密图像. 在此过程中选择恰当的融合因子作为密钥, 既可以

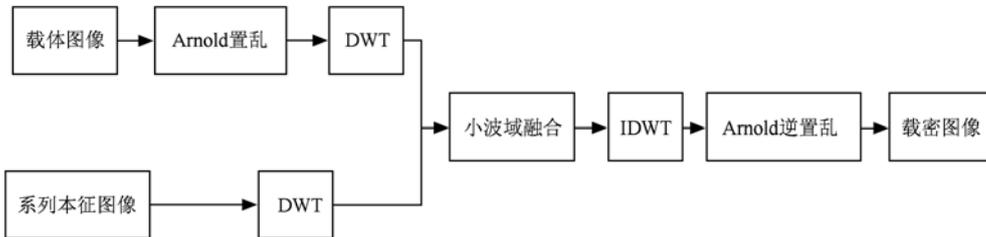


图 1 信息嵌入流程图

保证载体图像的视觉效果, 又保证了隐藏信息的安全.

对经过 Arnold 置乱后的载体图像进行两层小波分解, 如图 2 所示, 由于低频近似子图 LL2 包含了图像绝大多数的能量, 因此该区域具有较好的鲁棒性. 在此区域中嵌入一系列本征图像的低频近似子图, 则小波逆变换后的图像既隐藏了本征图像的信息, 又能抵抗一定的攻击.

假设  $L$  幅本征图像两次小波变换后低频部分的区域大小为  $B$ , 我们在 LL2 中另开辟同样大小的区域  $A$ , 如图 3 所示, 区域  $A$  用来存放本征图像两层小波分解后的近似子图  $b_i, i = 1, \dots, L$ .

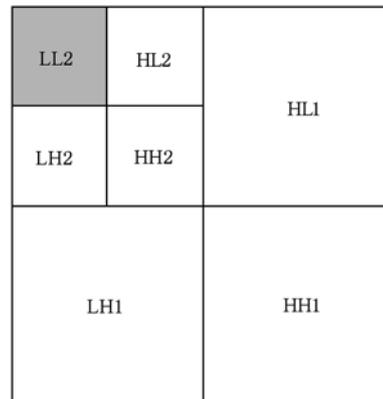


图 2 两层小波分解

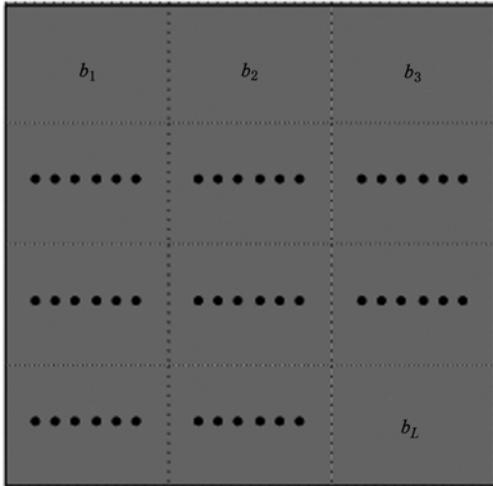


图3 区域A空间分配

为了使融合后的图像在视觉效果上不失真,应恰当地选取区域A与区域B之间的融合因子 $t$ .我们将区域A和B分成 $k$ 个 $10 \times 10$ 的子块,首先按下式计算A中每个子块 $A_k$ 的块内均值 $u_k$ :

$$u_k = \frac{1}{10^2} \sum_{p=1}^{10} \sum_{q=1}^{10} A_k^2(p, q). \quad (6)$$

并按照均值大小进行排列,依据均值大,融合因子就大的原则为每个子块分配合适的融合因子.融合

因子选得较大时,嵌入信息的鲁棒性较好,能够较好地抵御攻击并保证恢复出的隐藏信息不失真,但载体图像的视觉效果会受到影响.应综合鲁棒性和视觉效果的影响折中选择融合因子.

融合因子确定后,采用加性融合

$$C = A \cdot (1 - t) + B \cdot t. \quad (7)$$

这样就将本征图像的低频系数按不同的融合因子嵌入到了载体图像的低频系数中.

图2中除低频LL2以外的其他中高频区域,由于携带能量较少,我们按照统一的融合因子利用(7)式将本征图像的中高频系数对应地嵌入到载体图像的中高频部分,这样就完成了小波域信息的嵌入过程.

提取信息过程如图4所示,由于载密图像与原始载体图像在小波域中的差值包含了所嵌入的信息,由(7)式可知,所嵌入的信息为

$$B = \frac{C - A(1 - t)}{t}, \quad (8)$$

于是,可以提取出嵌入在载体图像中的本征图像的小波域系数,利用(4)式,将分解系数作为密钥与本征向量进行线性组合,就可以重构出目标的系列隐藏图像.

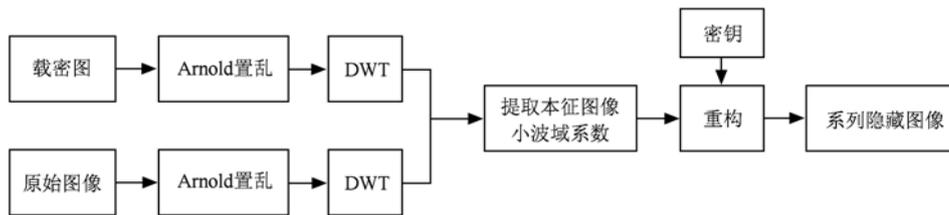


图4 信息提取流程图

## 4. 实验结果

### 4.1. 信息嵌入

实验中,我们选取图5所示的三维目标,每隔 $2^\circ$ 采集目标离面旋转 $180^\circ$ 的图像共90幅,每幅图像大小为 $60 \times 80$ .根据主分量分析法求取目标的90个特征向量,同时,为了降低目标特征空间的维数,选取12个主分量.由(5)式可知,此时 $\alpha = 0.9824$ ,

说明12个主分量占总能量的98.24%,能够满足图像恢复时的要求.图6所示为三维目标的12个本征向量所对应的本征图像,可以看出这些图像反映了三维目标的轮廓和细节特征,我们将把这些本征图像嵌入到载体图像中,并由这些本征图像重构图5所示目标的不同空间姿态的系列图像.



图5 原始三维目标

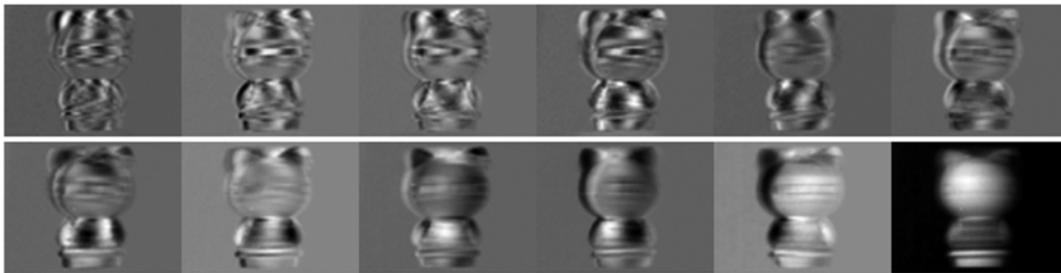


图6 12幅本征图像

在小波域进行信息嵌入时,选取  $256 \times 256$  的 Lena 图像作为载体图像,首先对载体图像进行  $m$  次 Arnold 变换以避免出现分块痕迹,置乱后图像如图 7 所示. 其次,对载体图像和本征图像分别进行两层小波变换,按照(6)式计算载体图像低频部分各个子块的块内均值,将子块按均值大小分为 4 个区间,对各个区间采取不同的融合因子,利用(7)式,将 12 幅本征图像的小波系数嵌入到载体图像的小波系数的对应位置. 对于中高频区域,采用统一的融合因子将本征图像的中高频部分与载体图像的中高频部分进行融合. 最后,对融合后的小波域系数进行两层小波逆变换和  $m$  次 Arnold 逆变换得到载密图像如图 8 所示,从而完成信息嵌入过程. 该图像与原始图像的峰值信噪比值为 33.2,互相关系数为 0.9965.



图8 载密图像

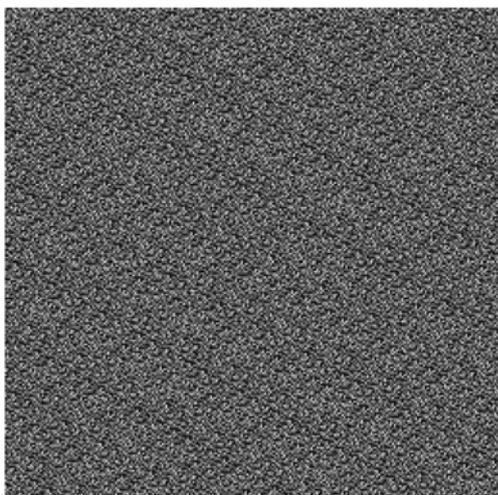


图7 置乱后的载体图像

图 9 所示是载密图像与原始图像差值的灰度直方图,从图上可以看出载密图像相对于原始图像的灰度变化非常小,能够保证较好的画面质量,满足人眼的视觉需要.

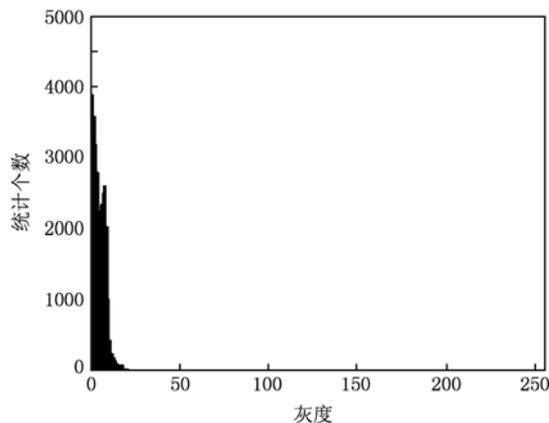


图9 灰度差值直方图

#### 4.2. 信息提取

按图 4 所示的信息提取过程,得到所嵌入的 12 组本征向量,我们将 30 幅待隐藏图像在本征向量上的分解系数作为密钥,由(4)式重构后的图像如图 10 所示,该系列图像反映了图 5 所示三维目标

不同空间位置的特征. 如图 11 所示, 为重构图像与原始图像在特征向量空间上的夹角余弦值分布图, 所有的值均在 0.95 以上, 这说明利用主分

量分析法选取的部分特征向量确实能够反映三维目标的特征, 重构后的图像与原始图像之间有较高的相似度.

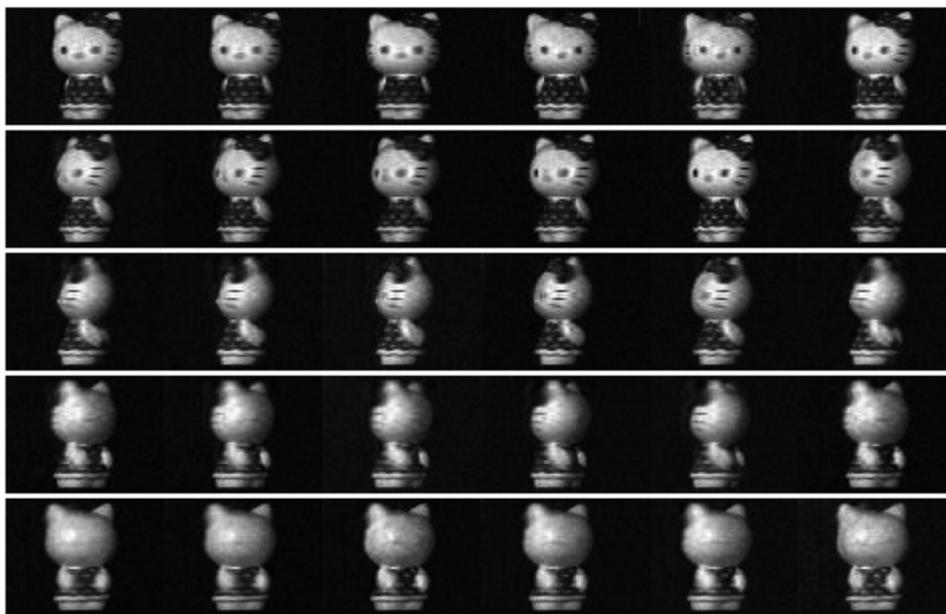


图 10 重构后的图像

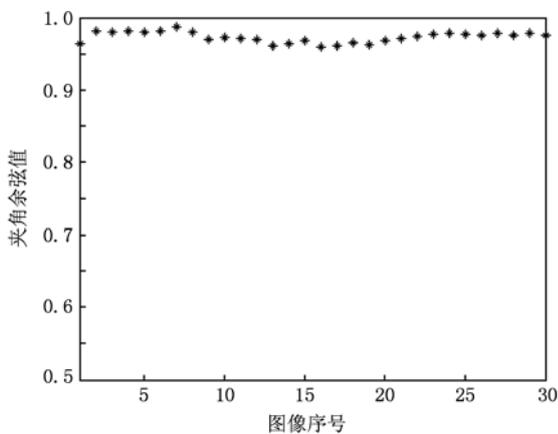


图 11 重构图像与原始图像的夹角余弦值



图 12 载密图像

利用本文所提出的方法, 将另外一个三维目标的序列本征图像嵌入到载体图像中, 得到的载密图像如图 12 所示. 尽管该图像与图 8 极为相似, 视觉效果相同, 但由于在该图像中嵌入的是另外一个三维目标的本征图像, 由其解密重构后的系列图像反映了该目标不同的空间姿态, 结果如图 13 所示. 也就是说, 我们可以在同一幅载体图像中隐藏不同的三维目标, 只有按照正确的解密方法, 才能够获得反映该三维目标特征的系列图像.

实验结果证明, 本文算法与现阶段目标隐藏领域的本质区别在于, 本文不是直接隐藏目标图像, 而是隐藏了能够反映目标信息的本征图像, 重构目标时, 只有利用对应的分解系数才能重现三维目标不同方位的信息.

### 4.3. 攻击处理

为检验算法的鲁棒性能, 我们对图 12 所示的载

密图像进行攻击处理,重构在不同攻击情况下的目标图像,并且计算重构目标图像与原始图像之间归一化互相关系数,该系数越大,表明重构目标图像与原始图像越相似,抗攻击的能力越强.目标在三

个空间位置上的重构图像与原始图像之间的归一化互相关系数如表1所示,可以看出,本文所提出的算法在剪切、椒盐噪声、高斯滤波和图像压缩情况下都能取得较好的效果,而对于高斯噪声效果一般.

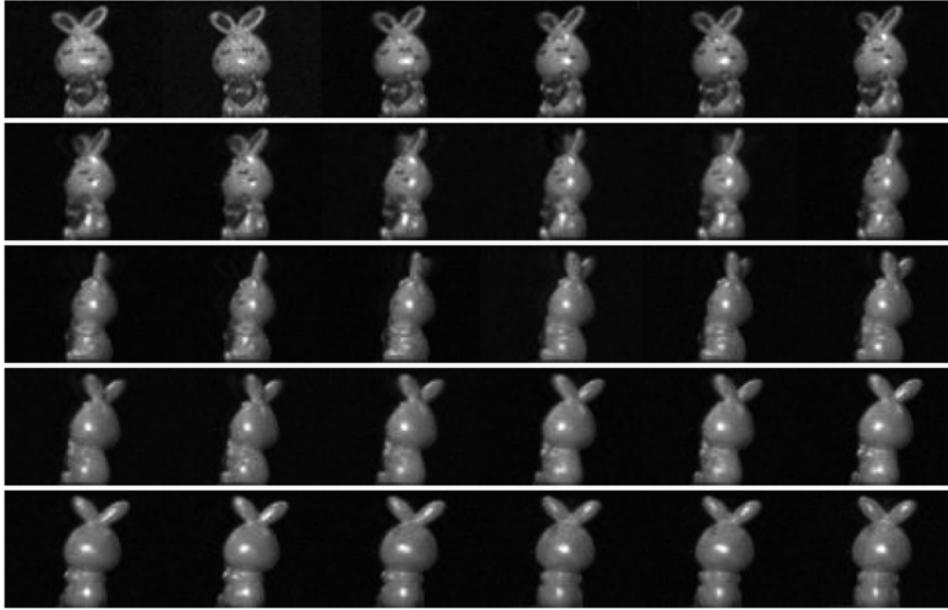


图13 重构后的图像

表1 攻击处理后重构图像与原始图像的归一化互相关系数

空间位置	剪切(剪20行)	添加椒盐噪声(强度为0.01)	添加高斯噪声(0,0.001)	高斯滤波([3 3],0.5)	JPEG压缩(相关度=90)
36°	0.8694	0.9023	0.5722	0.7128	0.7996
114°	0.8828	0.9154	0.5938	0.7290	0.8191
180°	0.9044	0.9060	0.5824	0.7213	0.8062

实验中对剪切攻击的抗攻击性能做了进一步的比较,获得载密图像在不同剪切比例情况下

的重构图像,结果如图14、图15和图16所示.剪切1/64后,重构图像与原始图像的相关度分别



图14 (a)剪切1/64后的图像;(b) 36°重构图像;(c) 114°重构图像;(d) 180°重构图像

为 0.9364, 0.9553, 0.9438; 剪切 1/16 后, 重构图像与原始图像的相关度分别为 0.8772, 0.9089, 0.8930; 剪切 1/4 后, 重构图像与原始图

像的相关度分别为 0.6800, 0.7039, 0.6975, 此时重构图像的噪声较大, 但仍可分辨出三维目标的空间姿态.



图 15 (a) 剪切 1/16 后的图像; (b) 36° 重构图像; (c) 114° 重构图像; (d) 180° 重构图像



图 16 (a) 剪切 1/4 后的图像; (b) 36° 重构图像; (c) 114° 重构图像; (d) 180° 重构图像

## 5. 结 论

本文针对在一幅载体图像中隐藏一组三维目标序列图像的问题, 利用主分量分析法提取三维目标的本征信息, 这些本征信息反映了三维目标的特征, 同时降低了在目标重构时的特征维数. 我们根据载体图像小波域低频区域的特征, 将本征图像的小波域系数嵌入到该区域中, 通过分块选择载体图像和本征图像小波域的融合因子, 使得融合后的图

像既保留了载体图像的特征, 又隐藏了三维目标的本征图像信息. 在信息提取过程中, 可以由所提取的本征图像和分解系数重构三维目标不同方位的姿态. 本文所提出方法的核心不是直接嵌入隐藏图像, 而是嵌入能够反映目标特征的本征图像, 解密后的信息经过重构能获得反映三维目标空间姿态的系列二维图像, 有利于了解三维目标的空间信息. 另外, 置乱次数、融合因子、隐藏图像的分解系数以及嵌入位置均作为了密钥使用, 安全性较好, 并对部分攻击具有一定的鲁棒性.

- [1] Nikolaidis A, Pitas I 2001 *IEEE Trans. on Image Processing* **10** 1726
- [2] Bas P, Chassery J M, Macq B 2002 *IEEE Trans. on Image Processing* **11** 1014
- [3] Yang X P, Gao L J, Wang X L, Zhai H C, Wang M W 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 1662 (in Chinese) [杨晓苹、高丽娟、王晓雷、翟宏琛、王明伟 2009 物理学报 **58** 1662]
- [4] Wang Y W, Doherty J F, Van Dyck R E 2002 *IEEE Trans. on Image Processing* **11** 77
- [5] Hsieh M S, Tseng D C, Huang Y H 2001 *IEEE Trans. on industrial electronics* **48** 875
- [6] Yang X P, Zhai H C, Wang M W 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 847 (in Chinese) [杨晓苹、翟宏琛、王明伟 2008 物理学报 **57** 847]
- [7] Yin D H, Li B F, Tang Y 2006 *Journal of System Simulation* **18** 1289 (in Chinese) [尹德辉、李炳法、唐 燕 2006 系统仿真学报 **18** 1289]
- [8] Okman O E, Akar G B 2007 *J. Opt. Soc. Am.* **24** 243
- [9] Nomura T, Uota K, Morimoto Y 2004 *Opt. Eng.* **43** 2228
- [10] FENG S T, BAO Y, NIE S P, WANG L 2007 *Chinese Journal of Lasers* **43** 952 (in Chinese) [冯少彤、鲍 毅、聂守平、王 亮 2007 中国激光 **43** 952]
- [11] Jogan M, Zagar E, Leonardis A 2003 *IEEE Trans. on Image Processing* **12** 817
- [12] Song W, Hou J J, Li Z H, Huang L 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 4449 (in Chinese) [宋 伟、侯建军、李赵红、黄 亮 2009 物理学报 **58** 4449]

## Sequence images hiding technique of three-dimensional object based on principal component analysis in wavelet domain \*

Shuai Wen-Juan Feng Shao-Tong Nie Shou-Ping<sup>†</sup> Zhu Zhu-Qing

(Jiangsu Province Key Laboratory for Opto-electronic Technology Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

(Received 27 January 2010; revised manuscript received 29 April 2010)

### Abstract

In order to hide sequence images of 3D object in a carrying image, eigenimages are obtained by using principal component analysis method. Wavelet coefficients of eigenimages are embedded into the wavelet domain of the carrying image. Based on the relationship of extracted eigenimages and coefficients, a series of images are reconstructed. The proposed method does not store the object images directly, but store the eigenimages which contain information of the 3D object. The experimental results show that the features of 3D object are effectively embedded into the carrying image, and the proposed algorithm has a high capacity.

**Keywords:** information hiding, three dimension object, principal component analysis, wavelet transform

**PACS:** 42.30.Va, 42.30.Wb

\* Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Education Office (Grant No. 09KJA140002) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant No. BK2009400).

<sup>†</sup> Corresponding Author. E-mail: njnukjc\_nie@163.com