

文章编号 1004-924X(2009)11-2871-09

基于静态小波变换的变透明度法 融合 GFP 荧光图像与相衬图像

李添捷, 汪源源

(复旦大学 电子工程系, 上海 200433)

摘要:绿色荧光蛋白荧光图像与相衬图像的融合对蛋白质功能的研究和亚细胞结构的定位有重要价值。针对用于遥感图像融合的 ARSIS 概念下多尺度融合算法融合荧光图像与相衬图像时可能产生伪像的缺点, 提出变透明度的概念。根据直观视觉效果设计了一组函数。为融合图像的每一像素分配了尺度透明度, 并基于静态小波变换的分解结果对源图像进行融合。先通过 30 组图像的融合实验, 估计出所设计函数的相应参数, 用于对另外 117 组图像的融合测试, 然后分别计算融合结果的荧光区和非荧光区与荧光图像、相衬图像的质量指数 Q 和高频相关系数 HPCC 这两个表征融合效果的特征参数。实验结果表明, 相比常用的融合算法—透明度法、棋盘格法和静态小波替换法, 本方法在保持交互可变透明度的同时, 提高了融合结果细节的清晰程度, 降低了荧光图像背景对融合结果的影响。

关键词:图像融合; 透明度; ARSIS 概念; 相衬图像; GFP 荧光图像

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Fusion of GFP fluorescent and phase contrast images using stationary wavelet transform based variable-transparency method

LI Tian-jie, WANG Yuan-yuan

(*Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

Abstract: It is valuable to fuse a Green Fluorescent Protein (GFP) fluorescence image and a corresponding phase contrast image for the research of the protein function and the localization of sub-cellular structures. With the aim to eliminate the false images come from the fusion of fluorescent images and phase contrast images by the multi-scale fusion algorithm based on the ARSIS concept in remote sensing images, a variable-transparency concept is proposed. A set of functions are designed based on visual effects. Then, each pixel is assigned a multi-scaled transparency, and original images are synthesized from the results of a Stationary Wavelet Transform (SWT). Furthermore, 30 groups of images are used to estimate parameters involved in the function set and then 117 groups are assessed by means of qualitative tests. Quantified indexes related to the fused product and original images, such as the quality index Q and the high frequency correlation coefficient HPCC, are calculated for inside and outside of the fluorescent area, respectively. The experimental results demonstrate that compared with common algorithms, including the transparency method, chessboard method and the SWT sub-

收稿日期: 2008-10-14; 修订日期: 2008-11-19.

基金项目: 国家基础研究资助项目 (No. 2006CB705707); 上海市重点学科建设资助项目 (No. B112)

stitution method, the proposed algorithm can keep the interactive user-transparency and improve the definition of fused products while reducing the effect of the dark background of fluorescent images.

Key words: image fusion; transparency; ARSIS concept; phase contrast image; GFP fluorescent image

1 引言

图像融合是通过对采自不同传感器的多源图像信息进行提取与综合,获得某一目标更为全面的图像描述方法,该方法有助于图像的进一步分析、处理与理解,在军事和民用的众多领域有广泛应用。

目前,图像融合的方法大致可以分为三类:一是分量替换法^[1],包括亮度-色调-饱和度(Intensity-Hue-Saturation, HIS)变换法、Brovey变换法和主元分析(Principal Component Analysis, PCA)变换法等,此类方法在获得高分辨率融合图像的同时,会产生较大的频谱失真;二是基于多尺度分析的融合算法,其研究重点包括多尺度分析方法的选择^[2-4]和融合策略的设计^[5-6],尤其是 ARSIS 概念^[5]下的此类算法,很大程度上解决了分量替换法带来的频谱失真问题,在遥感图像的融合中取得了巨大的成功;三是基于统计模型的融合算法^[7],此类方法是近年来发展起来的新算法,主要通过构建融合图像与源图像之间的统计模型,运用估计理论得到融合结果。此外,在不同的应用领域,还有一些特殊融合方法的探索^[8-10]。

相衬成像与荧光成像是分子生物学领域两种重要的成像技术。相衬成像通过将人眼难以观察到的相位差转换成振幅差,提供了具有高分辨率的结构图像,而荧光成像作为典型的分子成像技术,提供了与功能相关的重要定位信息。例如广泛应用的报告分子绿色荧光蛋白(Green Fluorescent Protein, GFP)的荧光图像,使活体细胞功能蛋白的跟踪和定位成为可能,该图像与相衬图像的融合无疑将为蛋白质功能的研究和亚细胞结构的定位提供重要价值^[11]。

透明度法^[8]是医学图像融合中一种简单而特殊的方法,可调的用户透明度实现了荧光图像到相衬图像的渐变,可以满足用户的不同视觉习惯,也是对融合结果无法保留源图像所有信息的一种有益补充。在合适的透明度下,融合图像与源图像有较好的相关性,然而融合结果细节模糊,非荧

光区受荧光图像背景色影响严重。另一方面,基于 ARSIS 概念的多尺度融合算法虽然在遥感图像的融合中取得了巨大的成功,然而运用到相衬图像与荧光图像的融合时,可能产生大量的伪像,效果不甚理想。

基于此,本文结合了透明度法与多尺度分析的特点提出了变透明度的概念,把图像融合的问题视为透明度选择的问题。继而按照直观的视觉习惯设计了一组函数,根据用户透明度和荧光图像亮度分量的强度,为每个像素分配尺度透明度。该设计在保持交互可变用户透明度的同时,增强了融合图像细节的清晰程度,降低了荧光图像背景对非荧光区融合效果的影响。

2 ARSIS 概念与变透明度概念

2.1 ARSIS 概念下的多尺度融合^[5]

ARSIS 概念来自法语“经由注入结构信息的空间分辨率增强”,在遥感低分辨率多光谱图像和高分辨率全色图像融合中得到广泛的应用,并取得了巨大的成功。

ARSIS 概念定义了三个模型,即多尺度模型(Multi-Scale Model, MSM),它用于对源图像进行多尺度分析;波段间结构模型(Inter-Band Structure Model, IBSM),它用于构建源图像低频细节间的关系;高频信息结构模型(High Resolution Inter-Band Structure Model, HRIBSM),它用于构建源图像高频细节之间的关系。在 ARSIS 概念下,待融合的多光谱图像和全色图像先经 MSM 模型进行分解,继而由 IBSM 模型与 HRIBSM 模型推断出多光谱图像所缺乏的细节信息,最后通过 MSM 模型反变换将推断出的高频细节注入到低分辨率多光谱图像中从而得到融合结果。

ARSIS 概念假定:低分辨率多光谱图像所缺乏的高频信息与全色图像和多光谱图像高频子带有关,于是通过寻找两者高频子带间的关系就可推断出多光谱图像所缺乏的高频细节。然而这一假设对生物医学领域的应用并不总是适用。在很

多情况下,彩色功能图像与高分辨率结构图像反映了对象两组独立的定位信息,并同时体现在图像的低频和低频分量中,这就使得 ARSIS 概念下某些成功的融合算法在生物医学领域的应用中常常出现伪像。

2.2 透明度法

透明度^[12]的概念最早出现于动画制作,2007 年被 Rojas 等^[8]应用于医学领域,给出了脑部磁共振(Magnetic Resonance Imaging, MRI)图像与单光子发射计算机断层成像(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)图像的融合实例。

透明度法用 R、G、B 三个通道表示彩色功能图像,定义一个全局透明度 α ,使高分辨率灰度图像以该透明度从中透出来。这个过程可以理解为:一张半透明膜覆盖在一幅图画上,于是图画与半透明膜的影响就交织在一起。记彩色功能图像某一通道为前景 A,高分辨率灰度图像为背景 B,在透明度 α 下,融合图像相应的通道 F 可以表示为:

$$F = (1 - \alpha)A + \alpha B. \quad (1)$$

透明度法保证彩色功能图像的三个通道以相同的透明度允许高分辨率灰度图像透过,从而避免了融合图像中色彩分量不平衡带来的伪像。然而透明度法仅为融合图像设置了一个全局透明度,因此融合结果细节模糊,且受彩色功能图像背景影响较大。

2.3 变透明度概念下的多尺度融合

本文借鉴了 ARSIS 多尺度模型部分思想,在透明度法的基础上提出变透明度多尺度融合的概念。变透明度的概念把图像融合视为一个透明度选择的问题,即令彩色功能图像的每个像素以不同的透明度(该透明度还与尺度相关,以下称为像素尺度透明度),允许高分辨率灰度图像相应尺度下像素点的灰度值透过。变透明度概念的关键在于如何根据源图像间的关系,得到像素尺度透明度。

变透明度概念定义了 3 个模型,即用于对源图像进行多尺度分解的 MSM 模型;用于根据用户参数和源图像(或其多尺度分解结果)计算像素尺度透明度的透明度选择模型(Transparency Selection Model, TSM);用于根据像素尺度透明度融合多尺度分解得到的子图系数并通过 MSM

反变换得到最终融合结果的像素融合模型(Pixel-Fusion Model, PFM)。具体融合过程如图 1 所示。

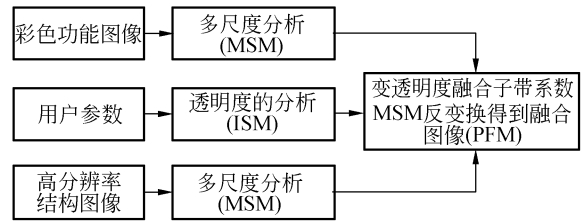


图 1 变透明度概念下图像融合过程

Fig. 1 General scheme for image fusion of variable-transparency concept

需要注意的是,PFM 模型中同一像素点不同彩色通道相同子带的透明度是相同。记像素点 (x, y) 处尺度 l 时的透明度为 $\alpha_l(x, y)$,则有:

$$cF_l(x, y) = (1 - \alpha_l(x, y))cA_l(x, y) + \alpha_l(x, y)cB_l(x, y), \quad (2)$$

其中, $cA_l(x, y)$ 、 $cB_l(x, y)$ 、 $cF_l(x, y)$ 分别表示像素 (x, y) 处尺度 l 下彩色功能图像某一彩色通道、高分辨率灰度图像和融合图像相应彩色通道的子带系数。

3 基于静态小波变换的变透明度法

本文在变透明的概念下,从视觉角度出发,设计一种基于静态小波变换的荧光图像和相衬图像的融合策略。在假定荧光图像为相衬图像覆膜的前提下,一方面,在荧光强烈的区域,透出相衬图像较少的结构信息,而在荧光较弱的区域,则透出较多的结构信息;另一方面,相衬图像的分辨率远高于荧光图像,其高频分量提供的结构信息更为重要,因此融合策略设定相衬图像的高频成分更易透过荧光膜。

这样的设计使得在非荧光区,相衬图像的结构信息得到更多的保留;而在荧光区,相衬图像的细节得到加强,且荧光图像光谱信息也尽可能保持,从而提高融合图像的定位效果。

以下在变透明度的概念下,设计 MSM、VTM 和 PFM。

3.1 多尺度分析模型 MSM 的选择

静态小波变换(Static Wavelet Transform, SWT),亦即多孔 \acute{a} trous 算法,是一种非抽取的

小波变换。在分解过程中,算法通过滤波器组系数逐次插零,实现滤波器的扩展;在重建过程中,则通过平均所有可能抽取情况下的小波逆变换,得到最后的重建结果。静态小波变换可以有效避免因小波系数改变带来的水纹现象,在图像融合中得到广泛的应用^[13]。基于此,本文提出的算法在 MSM 中采用静态小波变换进行多尺度分析。

$$\alpha_{ul}(x,y)=\begin{cases} 0 & \beta_{ul}(x,y)\gamma_{ul}(x,y)<0 \\ \beta_{ul}(x,y)\gamma_{ul}(x,y) & 0\leq\beta_{ul}(x,y)\gamma_{ul}(x,y)\leq 1 \\ 1 & \beta_{ul}(x,y)\gamma_{ul}(x,y)>1 \end{cases}$$

其中基础透明度为 $\beta_{ul}(x,y)=f(u,l,I(x,y))$;增强系数为 $\gamma_{ul}(x,y)=f(u,l,I(x,y))$;尺度索引 l 从小到大依次标记给第一层高频子带、第二层高频子带……近似图像,并将标记的索引平移至关于 0 点对称。

以下具体设计基础透明度 β_{ul} 和增强系数 γ_{ul} 。

基础透明度 $\beta_{ul}(x,y)$ 的设计分三步进行:

第一步在用户透明度 u 的基础上根据尺度索引 l 调整得到 β_{ul} ,如式(4)所示。为了保证荧光膜透明度的渐变,设计的函数对于任意的 l ,当 $u=0$ 时, $\beta_{ul}=0$;当 $u=1$ 时, $\beta_{ul}=1$;当 u 处于 $0\sim 1$ 的范围时, β_{ul} 在用户透明度的基础上,随着参数 λ_1 的增加,减少低频分量的通透性,增加高频分量的通透性。

$$\beta_{ul}=(u^2-u)\tan h(\lambda_1 l)+u. \quad (4)$$

第二步由 β_{ul} 得到基础透明度的浮动范围 $\Delta\beta_{ul}$,如式(5)所示。函数的设计使 β_{ul} 处于 0.5 附近时,浮动较大,处于 0 和 1 时不浮动,因而用户透明度为 0 和 1 时,荧光膜保持不透和全透的特性。参数 λ_2 调整基础透明度的最大浮动范围, λ_2 越大则浮动范围越大。

$$\Delta\beta_{ul}=(0.5-8(\beta_{ul}-0.5)^4)\lambda_2. \quad (5)$$

第三步在 β_{ul} 和 $\Delta\beta_{ul}$ 的基础上,跟据荧光图像的归一化强度 $I(x,y)$,得到某一尺度下像素 (x,y) 处的基础透明度 $\beta_{ul}(x,y)$,如式(6)所示。该式表明当像素点对应的强度小于 $1/4$ 时,在 $\beta_{ul}\sim\beta_{ul}+\Delta\beta_{ul}$ 范围内适当增加膜的通透性,强度越小,增加得越多;当强度大于 $1/4$ 时,在 $\beta_{ul}\sim\beta_{ul}-\Delta\beta_{ul}$ 范围内适当减少膜的通透性,强度越大,减少得越多,从而实现荧光弱的区域透出相衬图像较多结构信息、荧光强的区域透出较少结构信息的视觉

3.2 透明度选择模型 TSM 的设计

TSM 从视觉角度出发,结合交互可变透明度的要求,根据用户透明度、尺度和荧光图像的强度这三个变量,得到像素尺度透明度。

对于某一用户透明度 u ,定义像素 (x,y) 处尺度为 l 时的像素尺度透明度 $\alpha_{ul}(x,y)$ 与基础透明度 $\beta_{ul}(x,y)$ 和增强系数 $\gamma_{ul}(x,y)$ 相关,即:

$$\begin{cases} \beta_{ul}(x,y)\gamma_{ul}(x,y)<0 \\ 0\leq\beta_{ul}(x,y)\gamma_{ul}(x,y)\leq 1 \\ \beta_{ul}(x,y)\gamma_{ul}(x,y)>1 \end{cases}, \quad (3)$$

效果。

$$\beta_{ul}(x,y)=\begin{cases} [1-4I(x,y)]\Delta\beta_{ul}+\beta_{ul} & 0\leq I(x,y)\leq \frac{1}{4} \\ \left[-\frac{4}{3}\left(I(x,y)-\frac{1}{4}\right)\right]\Delta\beta_{ul}+\beta_{ul} & \frac{1}{4}<I(x,y)\leq 1 \end{cases}. \quad (6)$$

与基础透明度的设计相类似,增强系数 $\gamma_{ul}(x,y)$ 亦可分三步设计:

第一步在用户透明度 u 的基础上根据尺度索引 l 调整得到 γ_{ul} ,如式(7)所示。为了保证用户透明度为 0 和 1 时,荧光膜不透和全透的特性,设计的函数对于任意的 l ,当 $u=0$ 时, $\gamma_{ul}=1$;当 $u=1$ 时, $\gamma_{ul}=1$;当 u 处于 $0\sim 1$ 的范围时,随着参数 λ_3 的增大, γ_{ul} 在 1 的基础上,增加各尺度分量的通透性,并且低频分量增强得少,高频分量增强得多。

$$\gamma_{ul}=\lambda_3(u^2-u)\tan h(\lambda_3 l)+\lambda_3(-u^2+u)+1. \quad (7)$$

第二步由 β_{ul} 得到增强系数的浮动范围 $\Delta\gamma_{ul}$,如式(8)所示,其中 l' 为归一化的尺度索引。函数的设计使 β_{ul} 处于 0.5 附近时,浮动得多,处于 0 和 1 时不浮动,因而用户透明度为 0 和 1 时,荧光膜保持不透和全透的特性。增强系数的浮动范围与尺度也相关,高频分量比低频分量浮动得多。参数 λ_4 调整增强系数的最大浮动范围, λ_4 越大则浮动范围越大。

$$\Delta\gamma_{ul}=(1-2|\beta_{ul}-0.5|)\exp(-5l'^2)\lambda_4. \quad (8)$$

第三步根据荧光图像的归一化强度 $I(x,y)$,得到某一尺度下像素 (x,y) 处的增强系数,如式(9)所示。对于任意的像素点,根据所对应的强度大小在 $\gamma_{ul}\sim\gamma_{ul}+\Delta\gamma_{ul}$ 范围内适当增加膜的通

透性,强度越大,增加得越多,从而实现荧光膜透出较多相衬图像细节信息的视觉效果。

$$\gamma_{ul}(x, y) = I(x, y)\Delta\gamma_{ul}(x, y) + \gamma_{ul}. \quad (9)$$

3.3 像素点融合模型 PFM 的设计

变透明度概念下的 PFM 包含像素点子带系数融合与尺度分析反变换两个步骤。首先根据 TSM 计算得到的像素尺度透明度按式(2)融合子带系数,继而运用静态小波反变换得到最终的融合结果。

4 评价标准选择与评估方法设计

4.1 融合效果客观评价标准的选择

融合图像质量的客观评价^[14-15]可分为有参考图和无参考图两种情况。前者可通过比较融合图像与源图像间的差异来评价,如均方误差 RMSE、信噪比 SNR、两者的信息熵差 ΔE 和互信息 MI 等。后者融合效果的优劣可通过融合图像本身的统计特性,如标准差 σ 、信息熵 E 和空间频率 SF 等来衡量,也可通过计算融合图像与源图像的关系,如互信息和 MI、交叉熵 C 、联合熵 UE、相关系数 ρ 、偏差 D 和高频相关系数 HPCC 等来评价。其中,以计算融合结果与源图像的相关性应用最为广泛。

图像质量指数 $Q^{[16]}$,从均值、方差和相关系数的角度评估两幅图像的相似程度,与单纯的相关系数 ρ 相比,更能反映图像间的相似程度。此外,融合图像的定位信息主要存在于高频分量中,因此,评估融合图像与高分辨率源图像间高频相关系数 HPCC^[14]也十分必要。

实验通过计算融合图像与荧光图像、相衬图像之间的质量指数 Q 、高频相关系数 HPCC,全面评价融合效果。

4.2 评估方法的设计

研究发现,全局的评价标准并不适合荧光图像与相衬图像融合效果的评估。事实上,非荧光区融合效果的优劣主要取决于该区域相衬图像与融合图像的相似程度,而荧光区融合效果的优劣则主要取决于该区光谱失真程度,以及与相衬图像的高频相似程度。因此本文在作评价时,先根据式(10)确定的阈值 THR,采用大于阈值归为荧光区否则归为非荧光区的方法粗略地划分荧光区与非荧光区。

$$\text{THR} = 0.15(\max(I) - \min(I)) + \min(I), \quad (10)$$

其中, I 为荧光图像的亮度分量。式(10)实际上是将亮度分量前 15% 的灰阶所处的区域设为非荧光区。

对于荧光区,主要以融合图像与荧光图像间的质量指数 Q 、与相衬图像间的高频相关系数 HPCC 为衡量依据,同时兼顾融合图像与相衬图像间的质量指数 Q ;对于非荧光区,主要以融合图像与相衬图像间的质量指数 Q 、高频相关系数 HPCC 为衡量依据。鉴于本文提出的方法可以显示不同用户透明度下的融合结果,因而评价时绘制了整个透明度变化范围中 Q 值与 HPCC 的变化曲线。

5 实验结果

实验借助 John Innes Center 提供的数据库 <http://data.jic.bbsrc.ac.uk/gfp>,研究模式植物拟南芥蛋白质的 GFP 荧光图像和相应相衬图像的融合,图像大小 256 pixel \times 256 pixel,已配准。其中训练数据 30 例,用于通过静态小波替换算法确定分解层数,并通过计算变透明度法和透明度法融合结果评估曲线所围面积的大小(以下称为累积相似度)调整参数 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 。测试数据 117 例,用于评估融合效果。

测试时,将本文提出的算法与应用较广的静态小波替换法^[13]、脑部结构图像与功能图像融合中较为成功的透明度法和棋盘格法^[8]进行量化比较。

5.1 参数的选择

参数调整通过实验方法,得到一组较优的参考值。调整的结果实际上是通过减少源图像中价值较小的成分在融合图像中所占的比重,来提高融合效果。例如,相比荧光图像的高频成分,相衬图像的高频成分所含的定位信息更为重要,因此可以通过调整参数,用荧光图像高频相似度的下降来换取相衬图像高频相似度的提高。

实验结合参数的物理意义(3.2 中已给出)和经验,通过观察与参数相关的量化指标的上升和下降来调整参数。具体步骤为:

(1)选取分解层数:该参数通过静态小波高频替换法确定,取为该方法融合结果与荧光图像和相衬图像间相似程度相当时分解层数的一半。经实验确定为 3;

(2)调整 λ_1 : λ_1 从 0 变到 1 的过程中,非荧光区融合结果与相衬图像的质量指数 Q 的累积相似程度先减小,后保持不变。选取经验值 $\lambda_1 = 0.20$;

(3)调整 λ_2 : λ_2 从 0 变到 1 的过程中,非荧光区融合结果与相衬图像的质量指数 Q 的累积相似程度持续上升,当 $\lambda_2 = 0.15$ 时,该累积相似程度与透明度法得到的结果相当;另一方面,荧光区融合结果与荧光图像的质量指数 Q 的累积相似程度持续下降,当 $\lambda_2 = 0.68$ 时,该累积相似程度与传统透明度法相当。因此取中间值 0.42;

(4)调整 λ_3 : λ_3 从 0 变到 1 的过程中,非荧光区融合结果与相衬图像的高频相关系数 HPCC 的累积相关程度先增大后减小,取极值点对应的 $\lambda_3 = 0.30$;

(5)调整 λ_4 : λ_4 从 0 变到 5 的过程中荧光区融合结果与相衬图像的高频相关系数的累积相似程度持续上升,非荧光区融合结果与相衬图像的高频相关系数的累积相似程度先增大后减小,取极值点对应的 $\lambda_4 = 3.0$ 。

5.2 测试结果

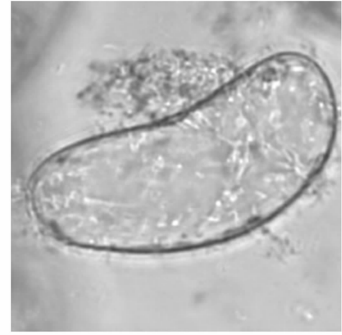
作为例子,图 2 给出了一组参考参数值条件下 GFP 荧光图像与相衬图像的融合结果(透明度法与本文方法的用户透明度均设为 0.5,棋盘格法中棋盘格的大小设为 1 pixel,静态小波替换法的分解层数设为 6)。

从图 2 中可以看出:透明度法的融合结果中,



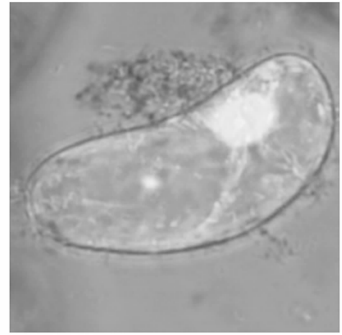
(a) GFP 荧光图像

(a) GFP fluorescent image



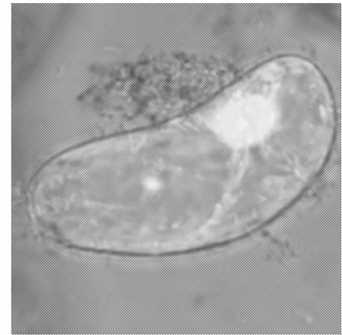
(b) 相衬图像

(b) Phase contrast image



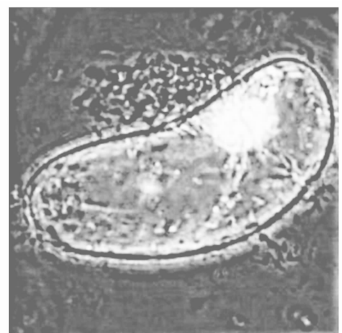
(c) 透明度法的融合结果

(c) Result of transparency technique



(d) 棋盘格法的融合结果

(d) Result of chessboard technique



(e) 静态小波替换算法的融合结果

(e) Result of SWT substitution method



(f) 本文算法的融合结果
(f) Result of proposed method

图2 细胞 GFP 荧光图像与相应相衬图像及其融合结果
Fig. 2 GFP fluorescent and corresponding phase contrast images of a cell and their fusion results

图像的细节比较模糊,且非荧光区受荧光图像背景色影响,显得比较暗;棋盘格法以棋盘格的形式间隔显示相衬图像和荧光图像,融合结果虽然大致保持了源图像的风貌,但连续性差,细节表现不佳,亦受荧光图像背景色的影响;静态小波替换法可视为 ARSIS 概念下多尺度融合方法的一个典型代表,方法在融合中产生大量的伪像;本文方法的融合结果中,相衬图像与荧光图像的定位信息在融合图像中都得到了较好的保留,而且相比透明度法,细节更加清晰,受荧光背景色影响也较少。

图 3 给出了 117 例测试数据不同透明度时量化比较的结果,参数设置和图 2 相同。

从中可以看出:在整个透明度变化过程中,本文方法保持了透明度法交互可变透明度。与透明度法相比,量化评估指标 Q_{Go} 和 $HPCC_{Go}$ 表明,非荧光区融合结果与相衬图像的相似程度有所提高;量化评估指标 Q_{Cl} 和 $HPCC_{Cl}$ 表明荧光区融合结果与荧光图像的相似程度保持基本不变的基础上荧光区融合结果与相衬图像的高频相似度也有所提高。相比其它方法,本文方法在较大的用户透明度变化范围内,关键量化评价指标均有很好的表现。

表 1 进一步给出了用户透明度 0.5 时,本文方法与其它方法在关键的量化评价指标中的表现。

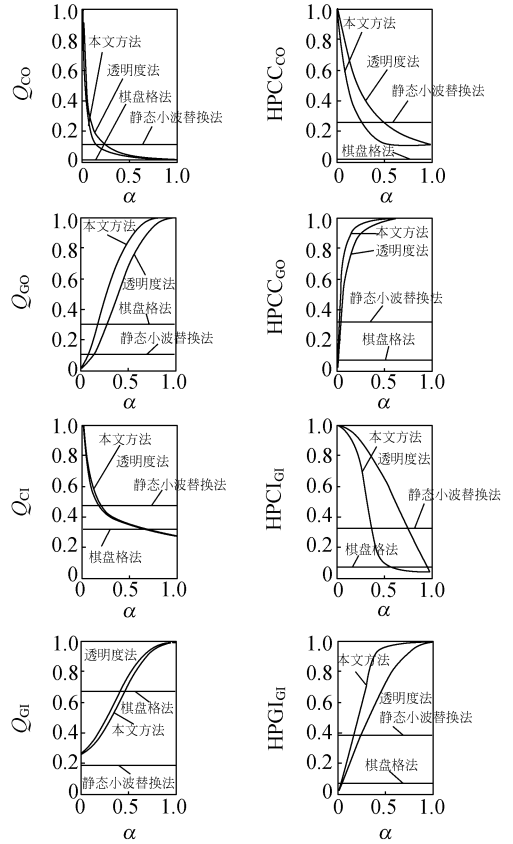


图 3 测试图像在用户透明度变化过程中的量化评估结果
Fig. 3 Evaluation results of the testing images during the variation of the user-transparency

表 1 测试图像量化评估的结果 ($u=0.5$)

	Q_{Go}	$HPCC_{Go}$	Q_{Cl}	Q_{Gl}	$HPCC_{Cl}$
透明度法	0.663	0.980	0.348	0.766	0.727
棋盘格法	0.307	0.064	0.318	0.674	0.070
静态小波替换算法	0.104	0.317	0.471	0.185	0.389
本文方法	0.834	0.990	0.349	0.716	0.971

从表 1 中可以看出:本文方法非荧光区的融合结果与相衬图像的质量指数 Q_{Go} 和 高频相似度 $HPCC_{Go}$ 、以及荧光区融合结果与相衬图像的高频相似度 $HPCC_{Cl}$,均优于其它方法,且提高幅度较大。这与本文方法融合结果对相衬图像细节信息保留较好、非荧光区受荧光图像背景影响较少的视觉效果相吻合。此外,荧光区融合结果与荧光图像的质量指数 Q_{Cl} 、以及与相衬图像的质量指数 Q_{Gl} 也较好。

6 结 论

本文分析了 ARSIS 概念应用到生物学图像融合领域的缺点,在透明度概念的基础上提出了变透明融合的概念。并在此基础上,改进了透明度法,提出了一种基于静态小波变换的变透明度融合方法,该方法具有较强的细节定位能力,融合图像受荧光图像背景影响也较少,且仍保持了交互可变用户透明度的特性。通过 147 组模式植

物拟南芥蛋白质的 GFP 荧光图像和相应的相衬图像的融合实验表明:本文提出的方法对相衬图像与 GFP 荧光图像的融合效果,优于经典的静态小波替换法、脑部结构成像与功能成像融合常用的透明度法和棋盘格法。

研究对变透明度概念下的多尺度融合仅作了一些初步的分析,与 ARSIS 概念下多尺度融合算法更为全面的比较有待深入研究。此外,本文提出的融合算法主要基于直观的视觉理解,如何设计更为客观的融合准则也值得进一步的研究。

参考文献:

- [1] TU T, SU S, SHYU H, *et al.*. A new look at IHS-like image fusion methods[J]. *Information Fusion*, 2001,2(3):177-186.
- [2] BOUSSION N, HATT M, LAMARE F, *et al.*. Contrast enhancement in emission tomography by way of synergistic PET/CT image combination[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2008,90(3):191-201.
- [3] 张强,郭宝龙.应用第二代 Curvelet 变换的遥感图像融合[J].*光学精密工程*,2007,15(7):1130-1136.
- ZHANG Q, GUO B L. Fusion of remote sensing images based on the second generation Curvelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(7):1130-1136. (in Chinese).
- [4] 黄海东,王斌,张立明.一种基于非降采样 Contourlet 变换的遥感图像融合方法[J].*复旦大学学报(自然科学版)*,2008,47(1):124-128,134.
- HUANG H D, WANG B, ZHANG L M. A new method for remote sensing image fusion based on Nonsubsampled contourlet transform[J]. *Journal of Fudan University (Nature Science)*, 2008,47(1):124-128,134. (in Chinese)
- [5] RANCHIN T, AIAZZI B, ALPARONE L, *et al.*. Image fusion—the ARSIS concept and some successful implementation schemes[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003,58(1-2):4-18.
- [6] 陈洪波,王强,张孝飞,等.基于小波系数邻域特征的图像融合[J].*光学精密工程*,2003,11(5):516-522.
- CHEN H B, WANG Q, ZHANG X F, *et al.*. Image fusion based on neighborhood features of wavelet coefficients[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(5):516-522. (in Chinese)
- [7] HARDIE R, EISMANN M, WILSON G. Map estimation for hyperspectral image resolution enhancement using an auxiliary sensor[J]. *Image Processing, IEEE Transactions*, 2004,13(9):1174-1184.
- [8] ROJAS G, RAFF U, QUINTANA J, *et al.*. Image fusion in neuroradiology: Three clinical examples including MRI of Parkinson disease[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2007,31(1):17-27.
- [9] 楚恒,朱维乐.基于 DCT 变换的图像融合方法研究[J].*光学精密工程*,2006,14(2):266-273.
- CHU H, ZHU W L. Image fusion algorithms using discrete cosine transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):266-273. (in Chinese)
- [10] 刘桂雄,林绪虹.基于 CMAC 的图像融合快速算法[J].*光学精密工程*,2008,16(5):950-956.
- LIU G X, LIN X H. Image fusion fast algorithm based on CMAC[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(5):950-956. (in Chinese)
- [11] KOROLEVA O, TOMLINSON M, LEADER D, *et al.*. High-throughput protein localization in Arabidopsis using Agrobacterium-mediated transient expression of GFP-ORF fusions[J]. *The Plant Journal*, 2005,41(1):162-174.
- [12] WALLACE B. Merging and transformation of raster images for cartoon animation[C]. *Proceedings of the 8th annual conference on Computer graph-*

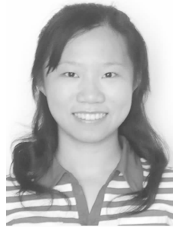
ics and interactive techniques, 1981, 15(3): 253-262.

- [13] NUNEZ J, OTAZU X, FORS O, *et al.*. Multi-resolution-based image fusion with additive waveletdecomposition[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1999, 37(3): 1204-1211.
- [14] ZHOU J, CIVCO D, SILANDER J. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data[J]. *International Jour-*

nal of Remote Sensing, 1998, 19(4): 743-757.

- [15] 李玲玲. 像素级图像融合方法与应用[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 2006: 207-214.
- LI L L. *Methods and Application of Pixel Level Image Fusion*[M]. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 2006: 207-214. (in Chinese)
- [16] WANG Z, BPVOK A. A universal image quality index [J]. *Signal Processing Letters, IEEE*, 2002, 9(3): 81-84.

作者简介:



李添捷(1985-),女,浙江余姚人,博士研究生,主要从事生物医学图像处理方面的研究。E-mail: 071021084@fudan.edu.cn

导师介绍:



汪源源(1968-),男,浙江黄岩人,理学博士,教授,博士生导师,主要从事医学超声工程和生物医学信号、图像处理等方面的研究。E-mail: yywang@fudan.edu.cn

(本栏目编辑:白雨虹)

●下期预告

基于嵌入式视觉的移动式自重构微小型机器人

孙立宁,钟 鸣,李满天

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

为了提高微小型移动机器人作业能力,提出了一种新型移动式自重构机器人。机器人包含若干可独立执行任务的移动子机器人,单元子机器人由若干模块化组件(中央处理模块、通信模块、驱动模块、弯举模块、超声模块、视觉模块等)组成,并可通过展开结构进行简单变形以增强自身机动性能与越障能力。多个子机器人可以在微型 CMOS 相机及其它传感器协作下自主对接为整体机器人,并可自重构为蛇形、环形等构形完成越障;在任务完成后,各子机器人可以彼此脱离,形成分布式机器人系统。为实现机器人微小型化,在模块化设计过程中大量采用了紧凑机械结构,设计了基于微型 CMOS 数字相机的嵌入式图像处理模块用于视觉自重构,以及基于 ARM、FPGA 的嵌入式中央控制器进行低能耗高效率的全局控制。单元机器人通过了完整功能测试;两个单元机器人中心线夹角 30° 情况下,完成对接耗时 15 s,满足机器人自重构要求。