

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2020.03.021

本文引用格式:张勇.基于图像结构张量的改进样本图像修复算法[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(3):145-151.

Citation format:ZHANG Yong. Improved Sample Image Inpainting Algorithm Based on Image Structure Tensor[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(3): 145 - 151.

基于图像结构张量的改进样本图像修复算法

张 勇

(四川旅游学院, 成都 610100)

摘 要:由于 Criminisi 算法针对复杂结构待修复图像的修复效果不好,提出一种基于图像结构张量和改进 Criminisi 样本的图像修复算法,采用图像结构张量和图像梯度的组合对图像结构进行检测,以实现显著和非显著图像结构的区分。对 Criminisi 算法中的优先级函数进行改进,提出一种最佳距离启发式方法进行优先权重计算,充分考虑了待修复像素点周围的图像特征,从而增强了图像结构的影响。实验结果表明:所提算法的修复性能优于其他算法,能够有效实现图像修复。

关 键 词:Criminisi 算法;图像结构张量;启发式;优先权重;图像修复

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1674-8425(2020)03-0145-07

Improved Sample Image Inpainting Algorithm Based on Image Structure Tensor

ZHANG Yong

(Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

Abstract: The image restoration strategy based on sample Criminisi algorithm is not very effective when repairing images with complex structures. To solve this problem, this paper proposes an image restoration algorithm based on image structure tensor and improved Criminisi sample. The algorithm uses the combination of image structure tensor and image gradient to detect the image structure to achieve the distinction between significant and non-significant image structures. In addition, the priority function in the Crinisi algorithm is improved, and an optimal distance heuristic method is proposed to calculate the priority weight, which takes full account of the image features around the pixels to be repaired, thus enhancing the image structure. Experimental results show that the proposed algorithm can effectively achieve image restoration, and the restoration performance is better than other algorithms.

Key words: Criminisi algorithm; image structure tensor; heuristic; priority weight; image inpainting

收稿日期:2018-10-17

基金项目:四川省教育厅青年基金课题项目(08SB042)

作者简介:张勇,男,副教授,主要从事计算机多媒体技术及旅游信息化研究,E-mail:zhangyq_sc@163.com。

数字图像修复是图像处理中最重要的研究领域之一,其包括通过利用该图像的剩余数据来猜测被破坏图像的丢失部分的复杂算法^[1-2]。图像修复用于图像对象移除和旧图像恢复^[3-4]。在图像修复文献中,丢失的部分称为洞,图像中的孔通常是自动指定的,或者以用户定义的掩模形式指定。数字图像修补广泛用于划痕绘画修复、不需要的物体移除、图像消除、图像传输错误补偿和隐私保护^[5-6]。

目前,常见的几种数字图像修复技术包括基于纹理的修复^[7]、基于偏微分方程的修复(partial differential equations, PDE)^[8]、基于范例和搜索的修复^[9]、混合修复和半自动快速修复^[10]。本文重点研究基于样本的修复算法,因为该类方法在二维图像上具有良好的性能、合理的计算成本以及可以在替换过程中同时考虑图像结构和纹理的优势。Ralekar C 等^[11]提出了利用边缘图技术计算数据项,给出了不同距离度量的比较,如平方距离和汉明距离以及用于找到最佳匹配样本的归一化互相关,根据不同的度量重新设置样本优先级。ZHANG L^[12]提出了一种改进的基于样本联合三边引导滤波的图像修复算法,基于样本的修补方法用于填充深度图像中的孔,其中在优先级评估函数中引入了水平集距离分量。采用联合三边引导滤波器对修复后的结果进行去噪和平滑处理,该方法的增强效果更好。WANG H^[13]对于 Criminisi 样本算法,提出了一种空间变化的置信度更新策略和匹配的置信项,以改善填充优先级估计,提出结构一致的样本匹配,以考虑源和目标样本差异的分布,快速傅里叶变换适用于全图搜索,以实现更好更快的匹配结果。PATEL J^[14]提出了一种改进的基于样本的图像修复算法,通过搜索附近的像素来减少搜索区域,减少了完成修复的时间。ALILOU V K^[15]提出了一种基于样本匹配技术重建图像缺失部分的新算法,通过利用一些启发式方法加快搜索过程并减少了 Criminisi 算法的运行时间。TRAMPERT P^[16]定义一个新的分离优先级定义,然后合成图像纹理,旨在恢复图像几何和纹

理。此外,设计自动算法来估计新的分离优先级定义的步骤,解决了不能正确选择样本的问题。KRISHNAMOORTHY V^[17]提出了一种基于样本图像修复的对象去除方法,在该方法中,图像按列标准化,然后计算来自图像块的每个像素的优先级。用具有最大估计优先级的像素替换像素,直到移除所需对象的所有像素。

本文提出了一种新的基于样本的方法来解决基于贪婪样本算法中的完成顺序和线性结构传播问题。为了解决第 1 个问题,改进由 Criminisi 定义的优先级算法,精细优先级函数考虑线性结构的更高优先级,更早地合成线性结构。另外,为了检测最有效的结构,使用图像结构张量和图像梯度的组合加快搜索过程。与其他算法相比,实验结果表明所提算法的图像修复质量显著提升。

1 Criminisi 算法

在本文中,提出了一种基于样本的图像修复方法,旨在改进 Criminisi 算法,以便保留图像线性结构并以理想的顺序填充目标区域。Criminisi 算法用于物体去除和图像修复,结合了“纹理合成”方法和“修复”技术的优点,Criminisi 算法如图 1 所示。图像中已损坏或丢失并需要填充的部分称为“目标区域”,用 Ω 表示,图像的剩余部分被称为“源区域”,表示为 Φ ($\Phi = I - \Omega$),由 $\delta\Omega$ 表示的源和目标区域之间的边界线称为“填充前沿”。

图 1 描述了 Criminisi 的算法符号以及该算法中的图像线性结构传播。在图 1(a)的原始图像中,目标区域、源区域和填充前沿分别由 Ω 、 Φ 和 $\delta\Omega$ 表示;图 1(b)目标样本以 $p(\psi_p)$ 为中心,具有最高优先级;图 1(c)是与目标样本最相似的一些候选样本块,图 1(d)目标样本已由最相似的样本块完成。

Criminisi 算法是迭代的最佳优先算法,在每次迭代时,选择具有较高优先级的填充前沿上的像素 $p \in \Omega$ 的样本(图 1 中的 ψ_p)进行填充。然后,为了找到与目标样本最相似的样本,逐个样本搜索源区域。从图 1(b)和(c)可以得到,如果目

标样本沿着图像的一个边缘,候选源样本如 ψ_q 和 $\psi_{q'}$ 将恰好位于该边缘或与该边缘颜色相同的边缘。Criminisi 算法中的样本大小默认为 9×9 , 通过样本完成样本,减少了算法的运行时间,也提高了图像结构传播的准确性。

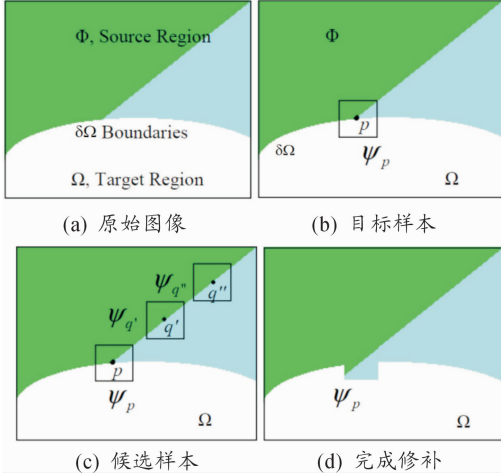


图1 Criminisi 算法的图像线性结构传播

Criminisi 算法删除了不利的对象,并分 3 步重建图像:

步骤 1 优先级功能为每个目标模板分配优先级值,在最佳优先策略期间,选择具有最高优先级的样本完成。

$$P(p) = C(p) \cdot D(p) \quad (1)$$

式中 $P(p)$ 、 $C(p)$ 和 $D(p)$ 分别代表样本优先级、置信度和数据。补丁置信度和数据项计算如下:

$$C(p) = \sum_{q \in \psi_p \cap (I - \Omega)} C(p) / |\psi_p| \quad (2)$$

$$D(p) = \nabla I_p^\perp \cdot n_p / \alpha \quad (3)$$

式中: $|\psi_p|$ 是补丁区域; α 是归一化因子(例如:灰度图像中的 $\alpha = 255$); n_p 是点 p 处的正交矢量;符号 \perp 代表正交性;对于位于目标区域中的像素, $C(p)$ 被认为是零,对于位于源区域中的像素, $C(p)$ 被认为是 1,即:

$$C(p) = \begin{cases} 0, & \forall p \in \Omega \\ 1, & \forall p \in (I - \Omega) \end{cases} \quad (4)$$

步骤 2 专用于图像纹理和结构传播。在为填充前端的每个像素分配优先级后,选择具有最高优先级的样本($\psi_{\hat{p}}$)。然后,搜索源区域以找到

与($\psi_{\hat{p}}$)最相似的样本。

$$\psi_{\hat{q}} = \arg \min_{\psi_q \in \Phi} d(\psi_{\hat{p}}, \psi_q) \quad (5)$$

式中 $d(\psi_{\hat{p}}, \psi_q)$ 是平方差的总和。然后,将样本 $\psi_{\hat{q}}$ 像素的信息复制到目标样本 $\psi_{\hat{p}}$ 的相应像素中,因此,图像结构和纹理通过样本将样本传播到目标区域中。

步骤 3 区分新的填充前沿并更新置信度值。使用最佳距离的启发式优先级函数加速了搜索过程。另外,通过从 CIELAB 移动到 YCbCr 色彩空间来提高 Criminisi 修复算法的质量。

2 本文图像修复算法

Criminisi 的修复算法在结构传播和填充顺序方面存在局限性,当涉及具有强烈或复杂结构的图像时,会发生一些重大错误。对于像素 p ,如果每个置信度或数据接近于零而另一个为高,优先级值接近于零。因此,在修复过程开始时可能值得填充的样本由于其低优先级值而失去了被提名的机会。这个问题也会使结构传播问题恶化。本文研究的目的是改进 Criminisi 修复算法,利用图像结构张量的概念来检测基本图像结构。此外,提出了一种启发式优先级函数,以便解决 Criminisi 修复算法的局限性。

本文方法的目的是在结构传播过程和完成顺序中对 Curimisi 算法进行改进。虽然 Criminisi 能完成图像纹理传播,但其数据项无法充分保存所有图像结构。由于 Criminisi 的数据项不会根据边缘的权重而将图像中的所有现有边缘收集,因此,在修复具有复杂或强结构的图像时无法产生合适的图像。本文提出一种新的基于样本的图像修复方法,该方法引入图像结构张量和图像梯度的组合对 Criminisi 算法进行改进,可以更精确地传播图像结构。此外,提出了一种启发式优先级函数,其为沿着图像边缘的样本分配更高的优先级。本文方法不是从位置 $[0,0]$ 开始搜索过程,而是从当前补丁所在的行开始,然后在上下方向逐渐移动,直到到达图像的边界。因此,在初始步骤中找到合适补丁的机会增加,使得图像修复时间减少。

本文图像修复方法流程如图 2 所示。

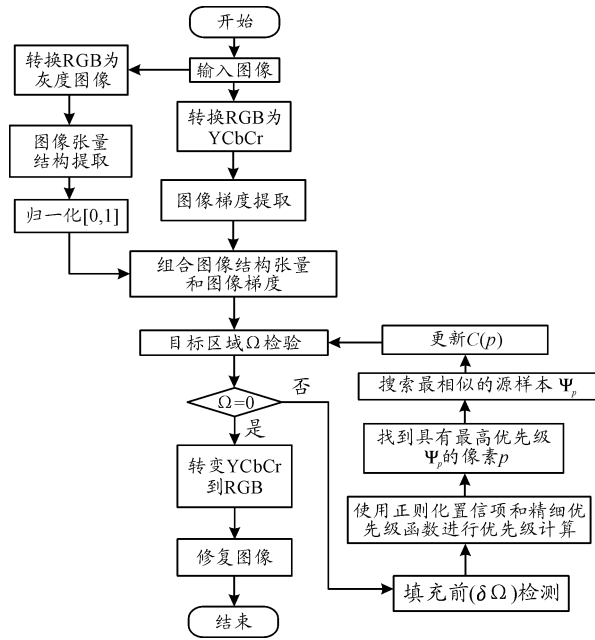


图 2 图像修复方法流程

如图 2 所示,本文方法中,具有一些丢失或损坏数据的输入图像移动到 YCbCr 颜色空间并且平行地缩放到灰色,从灰度图像中提取图像结构张量。然后,将 2 阶矩阵的每个元素归一化为 $[0,1]$,从 YCbCr 图像中提取图像梯度,需要削弱图像渐变以防止其误导效应。最后,归一化图像结构张量与弱化的图像梯度组合,在修复受损图像的同时具有更精确的结构传播。

2.1 图像结构张量

图像渐变将更锐利的边缘视为更明显的结构,这并不总是正确的,而且可能导致修复中的重大错误。已经证明图像结构张量可以有效地帮助边缘检测,因此,在本文中,应用图像结构张量和图像梯度的组合来修复受损结构。图像结构张量负责检测最显著的图像结构,图像梯度负责检测不明显的图像结构。在结构传播过程中,明显结构和不明显结构都没有被忽略。因此,结果比 Criminisi 算法的结果更合理。为了实现这一目标,图像结构张量和图像梯度在优先级函数中构建数据项。

结构张量也称为第二矩阵,允许定向和图像结构分析,提供了一些描述图像局部信息的特征,例如梯度方向及其在一个像素附近的相干性。

结构张量或第二矩阵如下获得:设 Ω 是二维图像, I 是 Ω 的灰度图像,像素 p 的梯度向量定义为

$$\nabla I = \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix} \quad (6)$$

由 J_p 表示的结构张量或第二矩阵定义为

$$J_0 = \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$J_p = K_p \otimes J_0 \quad (8)$$

其中 K_p 可以是任何平滑矩阵,而 \otimes 表示卷积算子, K_p 通常被认为是高斯核,标准差为 ρ 即 g_ρ 。因此,结构张量矩阵可以写为

$$J_p = \begin{bmatrix} g_\rho \otimes I_x^2 & g_\rho \otimes I_x I_y \\ g_\rho \otimes I_x I_y & g_\rho \otimes I_y^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

J_p 的特征向量及其相应的特征值为图像结构分析提供了有价值的信息。结构张量具有大幅度以及图像边缘周围的大相干性,相反,它在光滑区域的幅度很小,结构张量的所述特征可以在 Criminisi 算法中的结构传播中起重要作用。

2.2 启发式优先级函数

为了提高算法性能和减少运行时间,本文提出了启发式优先级函数。本文研究在 YCbCr 色彩空间进行,通过最佳距离启发式优先级函数来定义图像填充顺序。Criminisi 建议在式(1)中为每个样本分配优先级,当其中一个数据项或置信度接近于零而另一个具有很大价值时,建议的优先级函数可能会遇到一些问题。对于可以传播的显著结构但其置信度具有一点价值的样本,优先级将接近于零,因此,该样本几乎没有机会传播这种强大的结构。为解决这个问题,本文提出了一种新的启发式样本优先级计算函数。由于人眼对图像结构比对图像纹理更敏感,因此在所提出的优先级函数中,数据项通过结果张量和图像梯度得到加强。在本文启发式样本优先级计算函数中,将置信项修改为正则化置信项,并用加权加法形式替换乘法优先级计算。

$$R_c(p) = (1 - w) \times C(p) + w, 0 \leq w \leq 1 \quad (10)$$

式中: $R_c(p)$ 是正则化的置信项; w 是将置信度扩

展到 $[w, 1]$ 的正则化因子。加权优先级计算如下:

$$P(p) = \alpha \times R_c(p) + \beta \times D(p),$$

$$0 \leq \alpha, \beta \leq 1 \quad (11)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (12)$$

式中: α 和 β 分别是正则化置信度和数据项权重。

$$P(p) = \alpha * C(p) + (1 - \alpha) * D^\beta(p) \quad (13)$$

式中: $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ 。 β 使数据项得到增强,因此,图像结构将在完成顺序中具有更多优先权。

3 本文图像修复算法

为了验证本文提出的图像修复方法的有效性,进行了一系列实验,并将结果与Criminisi方法和文献[16]中的方法进行比较,所有实验均使用带有Intel Core™ i7 CPU的WIN 10平台中的Visual Studio 2013进行。

图3主要显示了本文方法优先级函数对填充顺序的修复结果,对比不同算法对图像修复的效果。可以看出:当天空的填充优先级高于金字塔时,在图3(b)和(c)中可以观察到明显的错误,在图3(d)中,本文所提方法重视金字塔的结构并获得更好的性能。图4主要对包含纹理和边缘的图像的修复性能进行对比。

由图4可以看出:Criminisi方法和文献[16]方法将边缘连续性扭曲,而本文方法给出了更接近原始图像和自然的修复图像,说明本文的修复性能更好。

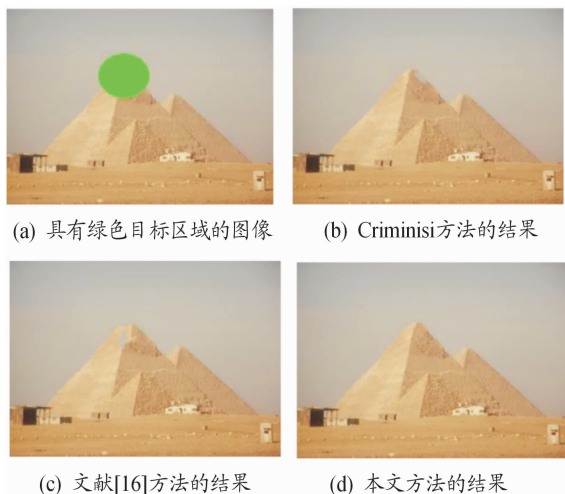


图3 不同方法图像修复结果



图4 边缘图像修复结果

图5给出了本文提出的图像结构张量和最佳距离启发式优先级算法与其他方法的样本匹配修复质量的性能对比。

由图5可以看出:不必要的物体被填充到图5(b)和(c)中的目标区域中,使修复结果不自然,本文提出的方法的修复结果更接近原始图像。

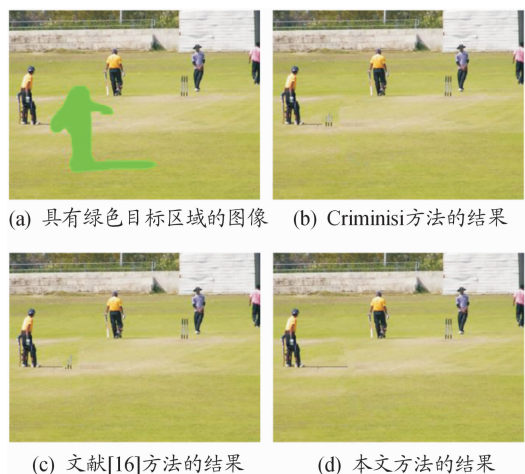


图5 不同方法样本匹配的图像修复结果

综上,本文方法在填充顺序、纹理边缘图像及样本匹配的图像修复中,修复性能都优于其他算法,验证了本文方法的可行性和有效性。

为了验证本文方法在时间性能方面的优越性,将其与Criminisi方法及文献[16]中方法进行

比较,分别对图6中4幅图片进行实验,结果如图7所示。从图中可以看出:本文方法对于4幅图像的修复时间都小于 Criminisi 方法及文献[16]中的方法,说明本文方法更省时。

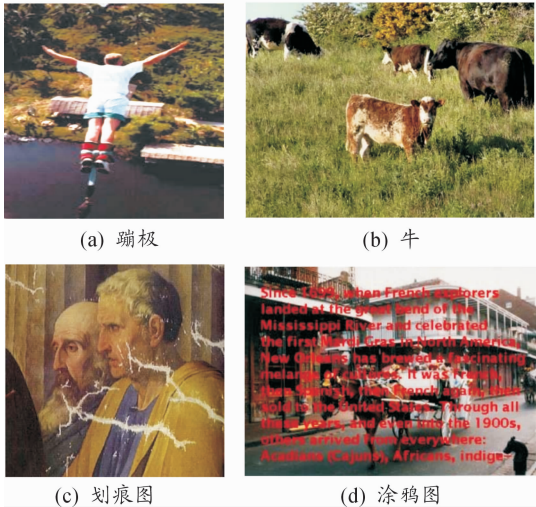


图6 实验图像

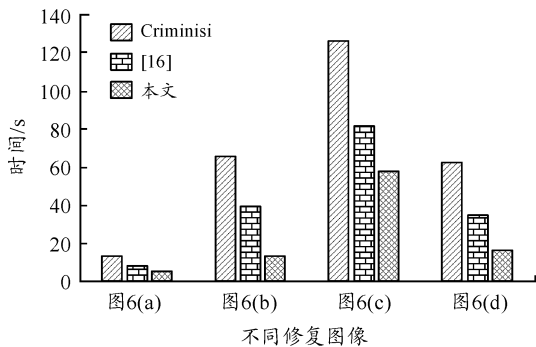


图7 不同方法的修复时间

4 结束语

本文提出一种基于图像结构张量和改进样本的图像修复算法,解决了 Criminisi 算法在图像结构传播和图像修复过程中的填充顺序方面的局限性。首先,为了克服结构传播问题,使用图像结构张量和图像梯度的组合能更精确地区分显著的结构和不显著的结构。然后,为了改进填充顺序,提出最佳距离启发式优先级函数,加强了数据项。实验结果表明:本文方法能实现图像修复,在填充顺序、边缘结构图像、匹配对图像修复和修复时间等性能方面,本文算法都优于 Criminisi 算法和文

献[16]中算法。未来研究工作是对本文方法进行改进,以便能处理曲率结构并降低计算成本。

参考文献:

- [1] ALI L, KASETKASEM T, KHAN F G, et al. Identification of inpainted satellite images using evolutionary artificial neural network (EANN) and k-nearest neighbor (KNN) algorithm[C]//Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES), 2017 8th International Conference of Chonburi, Thailand; IEEE, 2017: 1-6.
- [2] WANG J, LU K, PAN D, et al. Robust object removal with an exemplar-based image inpainting approach[J]. Neurocomputing, 2014, 123(S1): 150-155.
- [3] ZHANG X, DING F, TANG Z, et al. Salt and pepper noise removal with image inpainting[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2015, 69(1): 307-313.
- [4] SHARMA R, AGARWAL A. An innovative approach to show the hidden surface by using image inpainting technique[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Frontiers of Intelligent Computing: Theory and Applications (FICTA) 2014. Bhubaneswar, 2015: 395-403.
- [5] DEOKATE B H, JADHAV P M, PATIL P M. Image mapping and object removal using Daubechies wavelet transform in image inpainting[J]. Development, 2015, 2(3): 517-520.
- [6] GUILLEMOT C, LE MEUR O. Image inpainting: Overview and recent advances[J]. IEEE signal processing magazine, 2014, 31(1): 127-144.
- [7] ZHANG T, GELMAN A, LARONGA R. Structure-and texture-based fullbore image reconstruction[J]. Mathematical Geosciences, 2017, 49(2): 195-215.
- [8] ZHANG F, CHEN Y, XIAO Z, et al. Partial Differential Equation Inpainting Method Based on Image Characteristics[C]//International Conference on Image and Graphics. China: Springer, 2015: 11-19.
- [9] BUYSENS P, DAISY M, TSCHUMPERLÉ D, et al. Exemplar-based inpainting: Technical review and new heuristics for better geometric reconstructions[J]. IEEE

- transactions on image processing, 2015, 24 (6): 1809 – 1824.
- [10] FARID M S, MAHMOOD A, GRANGETTO M. Image defencing framework with hybrid inpainting algorithm[J]. Signal, Image and Video Processing, 2016, 10(7): 1193 – 1201.
- [11] RALEKAR C, DHONDSE S, MUSHRIF M M. Image reconstruction by modified exemplar based inpainting [C]//Communications and Signal Processing (ICCSP). India: IEEE, 2015: 1005 – 1010.
- [12] ZHANG L, SHEN P, ZHANG S, et al. Depth enhancement with improved exemplar-based inpainting and joint trilateral guided filtering [C]//Image Processing (ICIP). USA: IEEE, 2016: 4102 – 4106.
- [13] WANG Haixia, JIANG Li, LIANG Ronghua, et al. Exemplar-based image inpainting using structure consistent patch matching[J]. Neurocomputing, 2017, 269: 90 – 96.
- [14] PATEL J, K. SARODE T. Exemplar based Image Inpainting with Reduced Search Region [J]. International Journal of Computer Applications, 2014, 92(12): 27 – 33.
- [15] ALILOU V K, YAGHMAEE F. Introducing a new fast exemplar-based inpainting algorithm [C]//Electrical Engineering (ICEE). Iran: IEEE, 2014: 874 – 878.
- [16] DENG L J, HUANG T Z, ZHAO X L. Exemplar-based image inpainting using a modified priority definition [J]. Plos One, 2015, 10(10): 1 – 18.
- [17] KRISHNAMOORTHY V, MATHI S. An enhanced method for object removal using exemplar-based image inpainting [C]//Computer Communication and Informatics (ICCI). India: IEEE, 2017: 1 – 5.

(责任编辑 符有梅)

(上接第 136 页)

- [8] WANG H, LING W. Robotic grasp detection using deep learning and geometry model of soft hand [C]//2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics-China (ICCE-China), 2016.
- [9] 韦婷, 肖南峰. 基于数据手套的仿人机械手控制系统 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(7): 1707 – 1711.
- [10] 陈超, 平尧, 郝斌, 等. 基于脑机接口技术的写字系统建模仿真与实现 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30(12): 4499 – 4505.
- [11] MASON S G, BIRCH G E. A general framework for brain-computer interface design [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2003, 11(1): 70 – 85.
- [12] CONNOLLY C. Prosthetic hands from Touch Bionics [J]. Industrial Robot-The International Journal of Robotics Research and Application, 2008, 35(4): 290 – 293.
- [13] ZHANG T, FAN S W, JIANG L, et al. Development and experiment analysis of anthropomorphic prosthetic hand with flexible three-axis tactile sensor [J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2013, 10(3): 1350028.
- [14] 孙志超. 基于绳索传动的灵巧手的研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2012.
- [15] 肖南峰, 巢娅, 陈星辰. 仿人机械手的触觉传感器和关节驱动及控制系统设计与实现 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018(1): 148 – 157.
- [16] Personal Robotics: Deep learning for grasping novel objects [EB/OL]. [2019-03-04]. <http://pr.cs.cornell.edu/deeppgrasping/>.
- [17] PASZKE A, CHAURASIA A, SANGPIL K, et al. ENet: A deep neural network architecture for real-time semantic segmentation [arXiv] [J]. arXiv, 2016: 10.
- [18] 李航. 统计学习方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [19] BREIMAN L. Bagging predictors [J]. Machine Learning, 1996, 24(2): 123 – 140.
- [20] HO T K. The random subspace method for constructing decision forests [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 832 – 844.

(责任编辑 符有梅)