

基于对比度补偿的古籍图像二值化算法研究

冯 炎

(西藏大学 现代教育技术中心, 西藏 拉萨 850000)

摘 要: 环境因素及不当保存会使古籍退化严重, 对此设计一种二值化算法来解决具有均匀字符大小的退化古籍图像的对比度问题, 从而更好地揭示古籍所记载内容. 算法首先利用 Canny 算子提取图像文本的边缘信息并估计平均笔划宽度, 根据笔划宽度来估计古籍图像背景, 然后用背景信息来对古籍进行对比度补偿, 从而提高古籍图像对比度, 最后利用 Howe 的算法对补偿后的古籍进行二值化处理, 后处理算法进一步提高了图像质量, 得到最终的二值图像. 实验结果证实了该算法的有效性. 该算法优于在 ICFHR'2014 国际会议上获得第一名的 Mesquita 的算法.

关键词: 对比度补偿; 古籍图像; 二值化

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)04-0050-05

Study of Ancient Books Image Binarization Based on Contrast Compensation

FENG Yan

(Modern Education and Technology Center, Tibet University, Lhasa 850000, China)

Abstract: Many environmental factors and improper handling cause ancient document to suffer a high degree of degradation. In order to solve the problems that arise in the binarization of old books images having a uniform character-size characterized by variations in image contrast, we try to design a binarization algorithm in order to better reveal the contents recorded in ancient books. First we will detect text stroke edges by Canny's method and calculate stroke widths, the ancient books image background is estimated through the calculated stroke width. Next step, we compensate the ancient document contrast by using the estimated background. Then, the document text is segmented by Howe's binarization algorithm. Further improvements are achieved by a postprocessing step. Finally the performance of the algorithm is analyzed and evaluated, the proposed method is better than Mesquita's method which achieved the best performance in the ICFHR'2014.

Key words: contrast compensation; ancient books image; binarization

1 引言

古籍是人类文明传承的重要载体, 由于古籍存放时间较长, 不可避免地遭受了自然和人为因素的损坏, 所以出现了不同程度的退化. 为了进一步保护古籍原件, 更好地将古籍所记载内容呈现在人们面前, 古籍研究者常采用古籍图像二值化的做法予以实现. 二值化^[1]是将图像像素分为两类, 黑色的像素作为前景, 而白色像素的作为背景, 能有效分隔文本

和背景, 提高古籍图像的质量.

近年来, Howe^[2]提出了一个基于拉普拉斯图像的全局能量函数最优化方法, 该方法采用一系列的训练图像用于最优化算法, 接着, Howe 又通过调整每个图像的两个关键参数改进了前面的方法^[3], 改进的算法在 ICDAR'2013 国际会议^[4]上所提交的 23 个算法中, 名列第二, 并且在 ICFHR'2014 国际会议^[5]上所提交的 8 个算法中也名列第二. IC-DAR 和 ICFHR 都是国际权威的文档图像二值化

算法评比会议. Mesquita 等人在文献[6]中将人眼根据距离感知目标的过程建模,并应用到二值化算法中,接着 Mesquita 等人在文献[7]中将文献[6]及文献[3]的算法融合,并采用 I/F-Race 方法^[8]来自动调节参数,取得了较好的效果,在 ICFHR'2014 国际会议^[5]所提交的 8 个算法中,名列第一.

综上所述,虽然这一课题的研究已经有了相当多的成果,但从文献[9]的试验结果中发现,以上这些算法中没有一个能够处理所有的古籍图像退化类型及所有的数据库中的文本图像.由于图像质量差,对比度低,有阴影、污点等复杂因素的存在,使得图像二值化仍是一个挑战.本文主要围绕具有均匀字符大小的退化古籍图像展开研究.

2 本文的算法

本文针对具有均匀字符大小的退化古籍图像,提出了基于对比度补偿的二值化算法,它主要包含五个步骤:将原始的古籍图像转换为灰度图像 $I(x, y)$,利用 Canny 算子提取图像的文本边缘信息 $I_e(x, y)$;根据文本边缘信息估计平均笔划宽度 d ;根据笔划宽度估计古籍图像背景 $I_b(x, y)$;根据背景信息来对古籍进行对比度补偿,得到 $I'_b(x, y)$,从而自适应提高古籍图像对比度;利用 Howe 的算法对补偿后的古籍进行二值化处理,后处理算法进一步处理,得到最终的二值图像 $B(x, y)$.

2.1 边缘检测

首先将原始的古籍图像转换为灰度图像 $I(x, y)$,然后用 Canny 算子检测文本边缘 $I_e(x, y)$. Canny 算子边缘检测步骤如下:第一步,用高斯函数构造滤波器,用标准卷积实现高斯平滑,以去除图像中的噪声;第二步,计算滤波后的古籍图像中的每一个像素的梯度和方向;第三步,对梯度进行非极大值抑制,确定边缘;第四步,为减少假边缘段数量,采用双阈值方法检测边缘,然后连接图像文本边缘.

2.2 古籍字符的平均笔划宽度估计

按行从左往右扫描古籍文本边缘图像,标记边缘像素点坐标,然后在古籍图像中依次按行计算其它边缘像素点距离该像素点最近的水平间距 d_i ,当求出所有边缘像素点的间距时,将他们的中间值当作古籍字符的平均笔划宽度 d ,之所以采用中间值的方法,是因为 Canny 边缘检测算法检测出的边缘像素点也有部分是污渍边缘.

2.3 估计的古籍背景

为了快速、准确地估计背景,充分去除文本内

容,本文采用数学形态学闭运算对古籍做三次迭代平滑运算,算法采用逐渐增大的圆盘型结构元素,且结构元素的圆盘半径 $radius$ 计算如下:

$$radius(i) = f_{md}(d \times n_i) \quad (1)$$

式中, $f_{md}()$ 是取整函数, d 是古籍字符的平均笔划宽度, $i = 1, 2, 3$. 且 $n_1 = 1/2$, $n_2 = 1$, $n_3 = 2$. 结构元素的构造如下^[10]:

$$se(i) = f_{strel}('disk', radius(i)) \quad (2)$$

式中, $f_{strel}()$ 是构造结构元素的函数. 用闭运算对古籍图像做迭代平滑运算:

$$bg_i(x, y) = \begin{cases} \text{imclose}(I(x, y), se(i)), & i = 1 \\ \text{imclose}(bg_{i-1}(x, y), se(i)), & i = 2, 3 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\text{imclose}()$ 是闭运算函数^[10], $I(x, y)$ 是古籍的灰度图像, $bg_i(x, y)$ 是每次迭代平滑所估计的古籍背景. 得到最终的古籍背景 $I_b(x, y)$:

$$I_b(x, y) = bg_3(x, y) \quad (4)$$

2.4 古籍对比度补偿

采用上面估计的背景来对古籍对比度进行补偿,可以自适应提高古籍对比度. 补偿后的古籍 $I'_b(x, y)$ 求法如下所示.

$$I'_b(x, y) = \frac{\text{normalize}(I(x, y))}{\text{normalize}(I_b(x, y)) \times \alpha} \quad (5)$$

式中, $\text{normalize}()$ 是归一化函数, α 是一个控制古籍对比度补偿强度的常数.

2.5 二值化及后处理

采用 Howe 的算法^[3]对图像进行二值化处理,方法如下:

$$B(x, y) = \text{HoweBinarize}(I'_b(x, y)) \quad (6)$$

式中, $I'_b(x, y)$ 为对比度补偿后的古籍图像. 已知 d 为前面估计的平均笔划宽度,则字符中的最小点的面积近似等于 $d \times d$,那么面积小于 $d \times d$ 的点就应该是噪声,为最大限度地避免笔划信息的丢失,后处理算法中仅去除面积小于 $0.5 \times d \times d$ 的椒盐噪声,从而进一步提高输出图像质量.

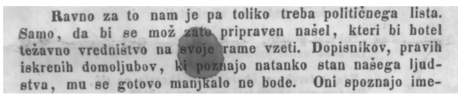
2.6 算法应用示例

图 1 中给出了本文提出的算法的应用示例,其中,图(a)是原始古籍图像,选取自 DIBCO2013 (PR5). 可以看出,本文算法估计的背景更接近于古籍真实背景,并且,对比度补偿后的古籍图像已经清楚地消除了背景污渍的影响.

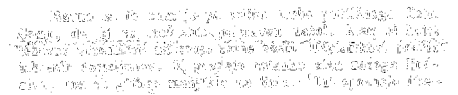
3 仿真实验与结果分析

3.1 实验评价方法

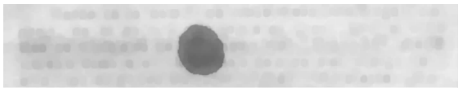
为了更客观地评价本文算法的性能,实验中采



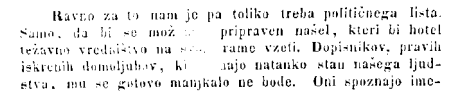
(a)原始古籍图像



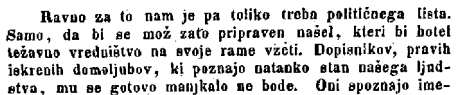
(b) 古籍文本边缘



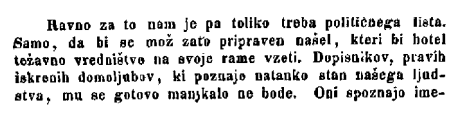
(c)古籍背景



(d)古籍对比度补偿



(e)古籍二值化



(f)经过后处理的最终输出

图 1 本文提出的算法的应用示例

用了学者在文档图像处理领域广泛使用的图像评价方法,这些方法包括召回率(RC)、准确率(PR)、F 值(F-measure)、峰值信噪比(PSNR)及距离倒数的失真度量(DRD).

召回率(RC)、准确率(PR)的定义:

$$RC = \frac{TP}{TP + FN} \tag{7}$$

$$PR = \frac{TP}{TP + FP} \tag{8}$$

式中,TP 表示真正类,即应该是文本像素被正确识别出来的个数,FP 表示假正类,即原本是背景像素被误认为是文本像素的个数,FN 表示假负类,即原本是文本像素被误认为是背景像素的个数^[11].

F 值(F-measure) 的定义如下:

$$F = \frac{2 \times RC \times PR}{RC + PR} \tag{9}$$

式中,RC 是召回率,PR 是准确率.

峰值信噪比(PSNR) 定义如下:

$$PSNR = 10 \times \log(\frac{D^2}{MSE}) \tag{10}$$

式中, D 表示背景和文本直接的差异,而 MSE 表示均方误差. PSNR 值越高,表示输出图像与对应基准图像越相似.

距离倒数的失真度量(DRD) 是比较有效的二值古籍图像失真评价标准,定义如下^[12]:

$$DRD = \frac{\sum_{k=1}^S DRD_k}{NUBN} \tag{11}$$

式中,NUBN 是基准图像中非均匀(不全是黑的或白的像素) 8×8 大小的块的数量,且 DRD_k 定义如下^[12]:

$$DRD_k = \sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 |GT_k(i, j) - B_k(x, y)| \times W_{Nm}(i, j) \tag{12}$$

3.2 仿真实验及结果分析

通过实验来展示本文所提出算法的有效性. 实验采用的文档图像数据来自 2013 年举办的国际文档图像二值化竞赛会议(DIBCO2013)^[4],实验选取了该数据库中 15 个具有近似一致的字符大小且具有复杂背景的文档图像,这些图像对比度低,有些出现了光线渐变、片墨迹等情况,并包含对应的基准二值化图像.

为确定算法中参数 α 的取值,表 1 给出了不同 α 取值时的 F 值,PSNR 及 DRD 对比. 由表 1 可知 α 等于 0.9 时,效果最佳.

表 1 不同 α 取值时 F 值,PSNR 及 DRD 对比

α	平均 F 值	平均 PSNR	平均 DRD
0.8	93.520 2	21.702 2	2.676 0
0.85	93.537 0	21.710 6	2.670 8
0.9	93.716 7	21.802 9	2.595 5
0.95	93.522 6	21.702 1	2.677 7

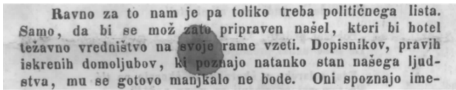
我们选取了一些有代表性的方法与本文提出的方法做比较,包括基于全局阈值的 Otsu 方法、经典的 Sauvola 算法、Howe 的算法^[3]以及 Mesquita 的算法^[7].

如表 2 所示,本文的算法具有较高的平均 F 值及平均 PSNR 值,说明本文算法的输出结果与对应基准图像越相似度最高. 本文的算法具有较小的平均 DRD 值,表示该算法的输出结果与对应基准图像相比失真度最小.

表 2 不同二值化方法平均 F -measure,PSNR 及 DRD 对比

Method	平均 F 值	平均 PSNR	平均 DRD
Proposed method	93.716 7	21.802 9	2.595 5
Mesquita	92.912 1	20.947 9	3.205 3
Howe	90.965 2	21.133 6	3.315 0
Sauvola	31.519 5	12.815 6	16.597 0
Otsu	79.341 3	16.452 9	11.645 5

为直观显示本文算法的性能,图 2、图 3 和图 4 分别给出了本文提出的算法与其他算法的对比,采用的原始古籍图像均选自 DIBCO2013,并且图 2 中采用了图像 PR5,图 3 中采用了图像 PR4,图 4 中采用了图像 PR8.



(a)原始古籍图像

Ravno za to nam je pa toliko treba političnega lista. Samo, da bi se mož zato pripraven našel, kateri bi hotel težavno vredništvo na svoje rame vzeti. Dopisnikov, pravih iskrenih domoljubov, ki poznajo natanko stan našega ljudstva, mu se gotovo manjkalo ne bode. Oni spoznajo ime-

(b)本文的算法

Ravno za to nam je pa toliko treba političnega lista. Samo, da bi se mož zato pripraven našel, kateri bi hotel težavno vredništvo na svoje rame vzeti. Dopisnikov, pravih iskrenih domoljubov, ki poznajo natanko stan našega ljudstva, mu se gotovo manjkalo ne bode. Oni spoznajo ime-

(c)Howe 的算法

Ravno za to nam je pa toliko treba političnega lista. Samo, da bi se mož zato pripraven našel, kateri bi hotel težavno vredništvo na svoje rame vzeti. Dopisnikov, pravih iskrenih domoljubov, ki poznajo natanko stan našega ljudstva, mu se gotovo manjkalo ne bode. Oni spoznajo ime-

(d) Mesquita 的算法

Ravno za to nam je pa toliko treba političnega lista. Samo, da bi se mož zato pripraven našel, kateri bi hotel težavno vredništvo na svoje rame vzeti. Dopisnikov, pravih iskrenih domoljubov, ki poznajo natanko stan našega ljudstva, mu se gotovo manjkalo ne bode. Oni spoznajo ime-

(e) Otsu 的算法

Ravno za to nam je pa toliko treba političnega lista. Samo, da bi se mož zato pripraven našel, kateri bi hotel težavno vredništvo na svoje rame vzeti. Dopisnikov, pravih iskrenih domoljubov, ki poznajo natanko stan našega ljudstva, mu se gotovo manjkalo ne bode. Oni spoznajo ime-

(f) Sauvola 的算法

图 2 本文提出的算法与其他算法对图像 PR5 二值化的对比

图 2 中的古籍图像有一个较重的圆形污渍,对比度极低. Howe 的算法、Mesquita 的算法、Otsu 的算法及 Sauvola 的算法均无法去除污渍,而本文的算法,很好地解决了第对比度区域内容背景的分离,显示出污渍所掩盖内容.

图 3 中的古籍图像右边有一个较重的大块污渍,Otsu 的算法及 Sauvola 的算法均无法去除污渍.虽然 Howe 的算法和 Mesquita 的算法去除了大块污渍,但产生椒盐噪声,而本文的算法完全地去除了大块污渍并没有留下椒盐噪声.

图 4 的古籍图像右边有一个较重的印章污渍,Otsu 的算法及 Sauvola 的算法均无法去除印章.虽然 Howe 的算法和 Mesquita 的算法去除了印章污渍,却丢失了印章处的部分文本内容细节,如图 4 中印章处的字符 t 和 y 的笔划信息几乎全部丢失而影

响内容阅读,本文的算法在不丢失文本内容的前提下去除了印章污渍,稍微不足的是没有去除文本字符周边的少量印章痕迹.

从图 2、图 3 和图 4 可以看出,本文算法的总体表现优于相比较的算法,尤其在低对比度的区域表现更好.



(a)原始古籍图像

Ogled po Gorenskem.
Poljanska dolina in pot skozi njo proti Idriji.
(Konec.)

Polagoma se okrenemo okoli grške sv. Antona, in razgremo se našim očem v desni dolinici prijazno mesto Idrija. Na koncu gori ponosno stoji graščina, iz ktere srede mali stolpiček v zrak moli; pod gradom pa se po celi dolinici razprostira mesto, v kterega sredi stoji farna

(b)本文的算法

Ogled po Gorenskem.
Poljanska dolina in pot skozi njo proti Idriji.
(Konec.)

Polagoma se okrenemo okoli grške sv. Antona, in razgremo se našim očem v desni dolinici prijazno mesto Idrija. Na koncu gori ponosno stoji graščina, iz ktere srede mali stolpiček v zrak moli; pod gradom pa se po celi dolinici razprostira mesto, v kterega sredi stoji farna

(c)Howe 的算法

Ogled po Gorenskem.
Poljanska dolina in pot skozi njo proti Idriji.
(Konec.)

Polagoma se okrenemo okoli grške sv. Antona, in razgremo se našim očem v desni dolinici prijazno mesto Idrija. Na koncu gori ponosno stoji graščina, iz ktere srede mali stolpiček v zrak moli; pod gradom pa se po celi dolinici razprostira mesto, v kterega sredi stoji farna

(d) Mesquita 的算法

Ogled po Gorenskem.
Poljanska dolina in pot skozi njo
(Konec.)

Polagoma se okrenemo okoli grške sv. Antona, in razgremo se našim očem v desni dolinici prijazno mesto Idrija. Na koncu gori ponosno stoji graščina, iz ktere srede mali stolpiček v zrak moli; pod gradom pa se po celi dolinici razprostira mesto, v kterega sredi stoji farna

(e) Otsu 的算法

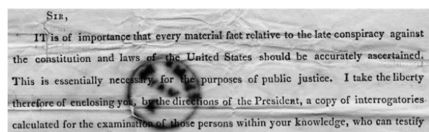
Ogled po Gorenskem.
Poljanska dolina in pot skozi njo proti Idriji.
(Konec.)

Polagoma se okrenemo okoli grške sv. Antona, in razgremo se našim očem v desni dolinici prijazno mesto Idrija. Na koncu gori ponosno stoji graščina, iz ktere srede mali stolpiček v zrak moli; pod gradom pa se po celi dolinici razprostira mesto, v kterega sredi stoji farna

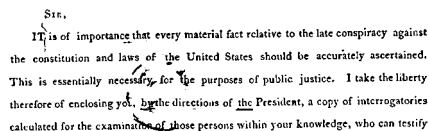
(f) Sauvola 的算法

图 3 本文提出的算法与其他算法对图像 PR4 二值化的对比

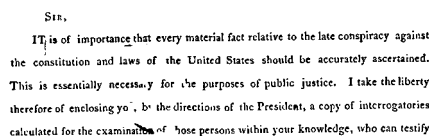
本文算法之所以有出众的效果,主要得益于三个方面.第一,由于有文本笔划宽度的准确估计和古籍图像的背景估计算法采用的迭代闭运算操作能够充分消除文本信息,并最大限度地保留背景信息.第



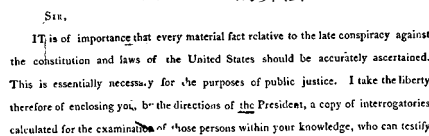
(a) 原始古籍图像



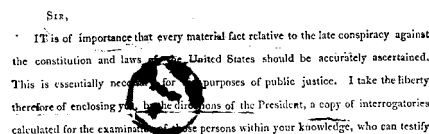
(b) 本文的算法



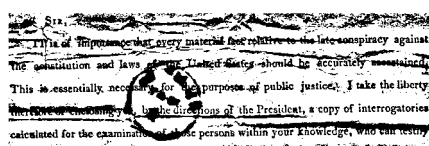
(c) Howe 的算法



(d) Mesquita 的算法



(e) Otsu 的算法



(f) Sauvola 的算法

图 4 本文提出的算法与其他算法对
图像 PR8 二值化的对比

二,古籍图像的对比度补偿,能够自适应地提高古籍的对比度,淡化古籍图像中的较重污渍,凸现该处的文本信息.第三,本文采用了 How 在 ICFHR'2014 国际会议中获得了第二名的算法^[3]作为主二值化方法,使得本文的算法表现更出众.

4 结束语

本文针对具有均匀字符大小的退化古籍图像,提出了基于对比度补偿的二值化算法.算法首先利用 Canny 算子提取图像文本的边缘信息并估计平均笔划宽度,然后估计古籍图像背景并对古籍进行对比度补偿,最后利用 Howe 的算法对补偿后的古籍进行二值化处理,后处理算法进一步提高图像质量.该算法优于在 ICFHR2014 会议中获得第一名的 Mesquita 的算法.

另一方面,本文的算法的前提是对每一个古籍图像都要估计平均文本笔划宽度,并且对于大多数

古籍而言,它们的平均文本笔划宽度都能近似代替每一个字符的笔划宽度.但是,古籍封面的题目一般用较大的字符,而作者及出版社等信息采用较小的字符,此时的平均文本笔划宽度与每一个字符的笔划宽度差异较大,估计出的古籍背景不准确并影响算法的整体性能.这就是本文提出的算法的局限,所幸古籍中封面数量非常少.

参考文献:

- [1] Ntirogiannis K, Gatos B, Pratikakis I. A performance evaluation methodology for historical document image binarization[J]. IEEE Trans. Image Process, 2013, 22(2,):595-609.
- [2] Howe N. Document image binarization using Markov field model[C] //Proc. 11th ICDAR, Beijing; IAPR, 2011: 6-10.
- [3] Howe N. Document binarization with automatic parameter tuning[J]. Int. J. Document Anal. Recognit. , 2013, 16(3):247-258.
- [4] Pratikakis I, Gatos B, Ntirogiannis K. ICDAR 2013 document image binarization contest (DIBCO 2013)[C] //Proc. 12th ICDAR, Washington DC; LAPR, 2013: 1471-1476.
- [5] Ntirogiannis K, Gatos B, Pratikakis I. ICFHR2014 competition on handwritten document image binarization (H-DIBCO 2014) [C] //Proc. 14th ICFHR, The Island of Crete; IAPR, 2014:809-813.
- [6] Mesquita R G, Mello C A B, Almeida L H E V. A new thresholding algorithm for document images based on the perception of objects by distance[J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2014, 21 (2):133-146.
- [7] Mesquita R G, Silva R A M A, Mello C A B, et al. Parameter tuning for document image binarization using a racing algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(5):2593-2603.
- [8] Birattari M, Yuan Z, Balaprakash P, et al. F-Race and iterated F-Race: An overview[M] // Experimental Methods for the Analysis of Optimization Algorithms. Berlin; Springer, 2010:311-336.
- [9] Ziaie Nafchi H, Farrahi Moghaddam R, Cheriet M. Phase-based binarization of ancient document images: Model and applications[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2014, 23(7):2916-2930.
- [10] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
- [11] Pratikakis I, Gatos B, Ntirogiannis K. ICDAR 2011 document image binarization contest (DIBCO 2011)[C] //Proc. 11th ICDAR, Beijing; IAPR, 2011:1506-1510.

(下转第 59 页)

6 结束语

本文提出了基于深度图像的动态手势识别方法,该方法基于深度图像,对光照强度和复杂背景有较强的鲁棒性,且在不影响识别率的情况下,相对于文献[4]中的 DTW 算法和文献[7]中的 LB 算法在处理时间上有了明显的提升.本文的手势特征有很好的识别效率,但特征提取过程相对复杂,如何找到一种简化的手势特征使得算法效率进一步提高,是下一步的研究方向.

参考文献:

[1] Trelea I C. The particle swarm optimization algorithm; Convergence analysis and parameter selection[J]. Information processing letters, 2003, 85(6): 317-325.

[2] 翁汉良, 战荫伟. 基于视觉的多特征手势识别[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(2): 123-127.

[3] Guyon I, Athitsos V, Jangyodsuk P, et al. Results and analysis of the chlearn gesture challenge 2012 [M]//Depth Image Analysis and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer , 2013: 186-204.

[4] Ney H, Ortmanns S. Dynamic programming search for continuous speech recognition[J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 1999, 16(5): 64-83.

[5] 何超, 胡章芳, 王艳, 等. 一种基于改进 DTW 算法的

动态手势识别方法[J]. 数字通信, 2013, 40(3): 21-25.

[6] Krishnan R, Sarkar S. Similarity measure between two gestures using triplets[C]//Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2013 IEEE Conference on. Oregon:IEEE, 2013: 506-513.

[7] Myers C, Rabiner L. A level building dynamic time warping algorithm for connected word recognition[J]. Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, 1981, 29(2): 284-297.

[8] 曹雏清, 李瑞峰, 赵立军. 基于深度图像技术的手势识别方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(8): 16-18.

[9] Sakoe H, Chiba S. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition[J]. Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, 1978, 26(1): 43-49.

[10] 徐华, 俞一彪. 基于 MIM_LB 算法的连续数字语音识别[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(5): 33-36.

作者简介:

贺霄琛 男,(1991-),硕士研究生. 研究方向为计算机仿真、虚拟现实. E-mail:76156860@qq. com.

韩 雯 女,(1964-),教授,博士生导师. 研究方向为仿真与可视化、虚拟现实.

李顺增 男,(1966-),副教授. 研究方向为计算机硬件、嵌入式技术.

(上接第 54 页)

[12] Lu H , Kot A C , Shi Y Q. Distance-reciprocal distortion measure for binary document Images[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11,(2):228-231.

作者简介:

冯 炎 男,(1979-),硕士,讲师. 研究方向为信号与信息处理、图像处理. E-mail:fy4528@163. com.