

基于自适应模板的图像修复算法

翟东海^{1,2*}, 肖杰¹, 鱼江¹, 李同亮¹

(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031; 2. 西藏大学 工学院, 拉萨 850000)

(* 通信作者电子邮箱 dhzhai@swjtu.edu.cn)

摘要:当前基于纹理的图像修复算法中模板块的大小是固定的,这样,当模板块尺寸很小时,虽然修复的精度会提高,但是算法的时间复杂度会大幅增加;相反,当模板块尺寸很大时,虽然可以降低算法的时间复杂度,但会使算法的误修复率提升。针对以上问题,提出了基于自适应模板的图像修复算法,该算法能够根据当前模板块与尺寸扩大后模板块之间的灰度均值及方差的变化情况来自适应地扩大模板尺寸,同时,根据模板块与样本块之间的匹配情况自适应地缩小模板块。最后,将所提出的算法用于实验验证,其结果表明所提算法不但可以有效地提高图像修复的精度,而且提高了图像修复的效率。

关键词:图像修复;Criminisi 算法;自适应模板;灰度平均值;灰度方差

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Image inpainting algorithm based on adaptive template

ZHAI Donghai^{1,2*}, XIAO Jie¹, YU Jiang¹, LI Tongliang¹

(1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. Engineering School, Tibet University, Lhasa Tibet 850000, China)

Abstract: Currently, template size of texture-based image inpainting algorithm is fixed. Therefore, when the template size is small, the inpainting accuracy improves, but time complexity increases substantially; on the contrary, when the size is large, the time complexity declines, but inpainting error rate increases significantly. Adaptive template size algorithm proposed in this paper can enlarge template size according to the change of expect and variance of grayscale value between current template and its expanded one. Meanwhile, this approach can reduce template size according to the match degree between template and exemplar. After adaptively determining the template size, texture-based image inpainting algorithm was improved and used in experiments. The experimental results show this approach can highly improve the inpainting accuracy with high efficiency.

Key words: image inpainting; Criminisi algorithm; adaptive template; expect of grayscale value; variance of grayscale value

0 引言

图像修复是数字图像处理技术的一个重要分支,是计算机图形和计算机视觉方向的一个极具挑战性的问题,在图像和视频的编辑和传输,以及目标移除等领域均有应用,近年来已逐渐成为一个研究热点^[1-2]。

目前,国内外研究较多的数字图像处理技术,总体来说,可以分为两大类^[3]:第一类是基于结构的方法^[4-5],该方法是通过信息的扩散来对等照度线进行由粗到精的估计,从而实现破损图像修复的过程。第二类是基于纹理合成的方法^[6-13],此类算法的中心思想是从待修复区域边界选取一点,然后以该点为中心,接着根据图像的纹理特征确定合适的模板块大小,最后从未破损区域寻找与之最相似的样本块,来替代模板块,该类算法对破损区域较大的图像具有较好的图像修复效果。具有代表性的是 Criminisi 等^[6-8]提出的一种基于样本块的图像修复算法,该算法是通过自定义一个优先级函数,然后计算破损图像区域中的待修复像素点的优先级,将

优先级最高的待修复点确定为最先修复。但是此算法有一个很明显的不足之处,在整个图像修复过程中,模板块的大小是固定不变的,这样,当模板块尺寸很小时,虽然算法的修复精度会提高,但是算法的时间复杂度会增加;相反,当模板块尺寸很大时,虽然可以降低算法的时间复杂度,但会使误修复率增加。2010年,Zhou 等^[14]提出了一种自适应确定样本块大小的算法,该算法能够根据完好区域图像像素所处邻域的结构信息,自适应确定模板的大小,但该算法是通过计算图像中信息完好区域中各像素点的邻域梯度向量幅值变化来确定最佳样本块大小,对待修复区域缺乏针对性,同时也增加了算法的复杂度。文献[15]通过分析图像的梯度域变化,获得各像素点处的结构信息,进而自适应确定待修复模板的大小,但其仍存在修复精度有待改善和算法复杂度高的问题。

基于以上研究,本文提出了基于自适应模板的图像修复算法,该算法根据当前模板块与尺寸扩大后模板块间灰度均值及方差的变化情况来自适应地扩大模板尺寸,同时,根据模板块与样本块之间的匹配情况自适应地缩小模板。最后,将

收稿日期:2013-03-13;修回日期:2013-05-27。

基金项目:国家社会科学基金资助项目(12EF119);国家级大学生创新创业训练计划项目(201210694019)。

作者简介:翟东海(1974-),男,山西芮城人,副教授,博士,主要研究方向:数字图像处理、海量数据挖掘;肖杰(1988-),女,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理;鱼江(1990-),男,甘肃陇南人,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理;李同亮(1986-),男,河北廊坊人,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理。

本文提出的算法用于实例验证,其结果表明本文算法不但可以有效地提高图像修复的精度,而且提高了图像修复的效率。

1 模板块自适应算法

1.1 原理

传统的基于样本块的图像修复算法中,模板块的大小是固定不变的,然而,在修复过程中模板块的大小应根据相邻模板块间像素值变化的情况适时地扩大和缩小。图1为破损唐卡图像,其中椭圆空白区域为破损区域,其余区域为完好的区域。图2(a),(b)分别是图1中 p 点和 q 点处模板的放大图。其中,小的矩形框代表初始的模板,大的矩形框代表扩大后的模板。由图1可以看出 p 点的初始模板和扩大后的模板之间像素值变化很平坦,因此模板可以由小的模板扩充为大的模板,此时,可以有效地提升算法的效率。然而,由图2可以看出 q 点处两模板间像素值变化剧烈,如果选用大的模板,则在图1的完好区域内找不到与之真实匹配的样本,而如果选用小的模板,则可以找到很合适的样本与之匹配,所以此时应该选择小的模板,以提高图像修复的精度。

为了能够根据待修复点周围像素的变化情况自适应地调整模板的尺寸,需要寻找能够刻画待修复点周围像素变化的方法,而像素的均值和方差分别可以度量模板内像素值的平均水平及其波动情况。本文算法思想为:1)利用初始模板块与扩大后模板块间像素的均值之差与方差之差与各自阈值的比较来决定初始模板的尺寸是否需要扩大。2)在寻找最佳样本块的过程中通过设置模板块和样本块的相似度阈值来决定是否需要缩小模板块。

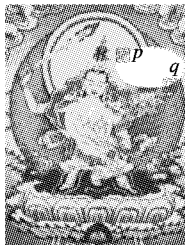
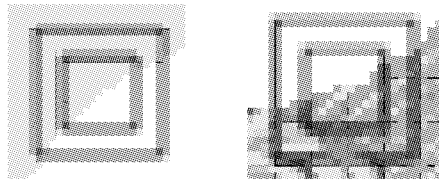


图1 破损唐卡图像



(a) 图1点 p 处模板放大图 (b) 图1点 q 处模板放大图
图2 模板放大图对比

1.2 自适应扩大算法

首先,利用Criminisi算法^[16]中优先权计算方法求出最先修复点 p ,为了确保 p 为该模板块的中心,正方形模板的边长应该取为奇数,因此,初始模板块的尺寸为 3×3 。然后,计算初始模板块和其扩大尺寸后的模板块内有效像素点的平均灰度值,并比较两模板间平均灰度值变化,若变化明显则不进行扩充,将原模板作为扩大最优模板块;若变化不明显,则进一步考察两模板间方差的变化用以判断两模板间像素值波动水平是否近似,若接近,则予以扩充,反之,将此时的模板块作为扩大最优模板块。

本文中,用于刻画待修复点周围像素变化情况的方法分别是像素的均值和方差,其中,模板块的像素平均灰度值的计算方法如式(1)所示:

$$E(T(p, n)) = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^{n^2} g(k) \quad (1)$$

其中, $E(T(p, n))$ 表示以 p 为中心点, n 为边长的正方形模板块 T 的平均灰度值, $g(k)$ 表示第 k 个有效像素点的灰度值, n^2 表示该模板内像素点的个数。像素方差的计算公式为:

$$D(T(p, n)) = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^{n^2} (g(k) - E(T(p, n)))^2 \quad (2)$$

为了确保待修复点 p 总处于模板块的中心,模板块的形状应为边长为奇数的正方形。因此,在进行模板块尺寸扩大时,总是以2个像素点作为扩大步长。这样,初始模板块 $T(p, n)$ 与扩大后模板块 $T(p, n+2)$ 像素均值之差表示为:

$$\Delta E(T(p, n+2), T(p, n)) = |E(T(p, n+2)) - E(T(p, n))| \quad (3)$$

当 ΔE 值大于阈值 ε 时,表明相邻两个模板的有效像素灰度均值相差大,就停止模板的扩大,选择当前模板作为扩大最优模板块。而当 ΔE 值小于阈值 ε 时,就需要利用方差变化 ΔD 来衡量两模板间像素值的波动水平,如式(4)所示:

$$\Delta D(T(p, n+2), T(p, n)) = |D(T(p, n+2)) - D(T(p, n))| \quad (4)$$

式中: $D(\cdot)$ 表示模板方差, ΔD 表示初始模板块与扩大后模板块间方差变化。当 ΔD 值小于阈值 σ 时,初始模板应以2为步长进行扩大;当 ΔD 值大于阈值 σ 时,初始模板应停止扩大,并将其作为扩大最优模板块。模板块自适应扩大算法的详细流程描述如图3所示。

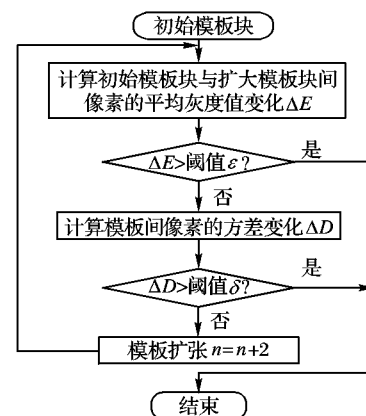


图3 模板块自适应扩大算法流程

1)根据Criminisi算法确定待修复点优先权,从而选择出第一个待修复点 p 。

2)以待修复点 p 为中心选定尺寸为 3×3 的初始模板块。

3)计算当前模板块的平均灰度值及其尺寸扩大后的平均灰度值,并计算二者差值 ΔE 。

4)当 $\Delta E > \varepsilon$ 时,模板停止扩大;否则,转入5)。

5)计算当前模板块的灰度方差值及其尺寸扩大后的灰度方差值,并计算二者差值 ΔD 。

6)当 $\Delta D > \sigma$ 时,模板停止扩大;否则,将当前模板的边长修改为 $n = n + 2$,并转入3)。

1.3 自适应缩小算法

通过1.2节中的“自适应扩大算法”可以确定扩大最优模板块的大小,为了能够提高图像修复算法的精度,应当根据完好区域的图像信息完成第二次的模板块大小的确定,来确定最佳的模板块大小。算法思想如下:1)将扩大最优模板块作为初始最佳模板块,并通过平方差和(Sum of Squared Differences, SSD)准则函数(如式(5))在待修复图像的完好区

域寻找与它最相似的最佳样本块,计算其相似度 $d(\cdot)$ 。
 (2)把得到的相似度 $d(\cdot)$ 与经验阈值 θ 进行比较:如果 $d(\cdot) \leq \theta$,则停止此模板块的缩小,把此初始最佳模板块作为最佳模板块。否则,判断当前的模板块是否为 3×3 的边长,如果是,则停止模板的进一步缩小,将它作为最佳模板块;如果不是,则将模板块的边长缩小成 $(n-2) \times (n-2)$,并返回到步骤 1)。算法实现流程如图 4 所示。

$$d(T(p,n),S(q,n)) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (g_i(p) - g_i(q))^2} \quad (5)$$

其中: $d(T(p,n),S(q,n))$ 分别表示以 p 为中心的边长为 $n \times n$ 的模板块和以 q 为中心的边长为 $n \times n$ 的样本块的相似度; $g_i(p)$ 、 $g_i(q)$ 分别表示模板块和样本块的 i 位置的灰度值。

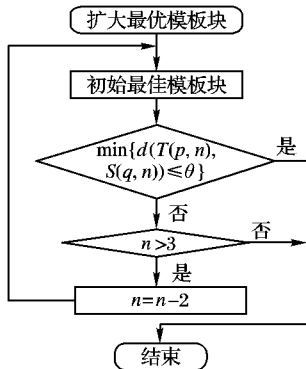


图 4 模板块自适应缩小算法流程

2 基于自适应模板的图像修复算法

在采用 Criminisi 算法进行图像修复时,以待修复点 p 为中心的模板块的最佳尺寸采用本文的模板块自适应算法来确定,这样,改进后的图像修复算法流程如下:

- 1)对破损图像进行预处理,确定待修复的区域的边界。
- 2)利用 Criminisi 算法计算破损区域中待修复点的优先级,并确定最先修复的像素点 p 。
- 3)采用本文提出的模板块自适应算法来确定以待修复点 p 为中心的模板块的最佳尺寸。
- 4)利用 SSD 准则在搜索域中搜索最佳样本块。
- 5)将最佳样本块复制到以待修复点 p 为中心的位置。
- 6)填充新的像素后,更新刚填充的像素点的置信度,并重新计算待修复点周围像素点的优先级(其余边缘点保持不变)。重复步骤 2)~6),直到破损区域中的像素都被修复完。

表 1 各算法比较结果

图像	Criminisi 算法		文献[14]算法		文献[15]算法		本文算法	
	PSNR/dB	耗时/s	PSNR/dB	耗时/s	PSNR/dB	耗时/s	PSNR/dB	耗时/s
图 5(128 × 170)	28.17	102.33	29.07	97.90	30.18	88.14	31.19	80.42
图 6(300 × 400)	27.43	310.44	29.09	256.20	29.36	214.30	30.73	187.87
图 7(300 × 400)	28.48	430.38	29.28	349.12	29.39	316.20	31.32	274.43

由表 1 可知,本文算法的修复效果和文献[14]及文献[15]算法的修复效果相比,在 PSNR 值和算法时间复杂度方面都有所改善。另外,和原始 Criminisi 算法相比,采用本文提出的基于模板自适应的图像修复算法在进行图像修复过程中,算法效率不仅提高了(平均提高 32.38%),而且图像修复结果的 PSNR 值也大幅提高了(平均提高 9.82%)。这是因为在 Criminisi 算法中:当模板的尺寸选择太小,则会增加迭代

3 实例验证

图 5~7 是本文对壁画/唐卡图像进行修复的三组实验结果。

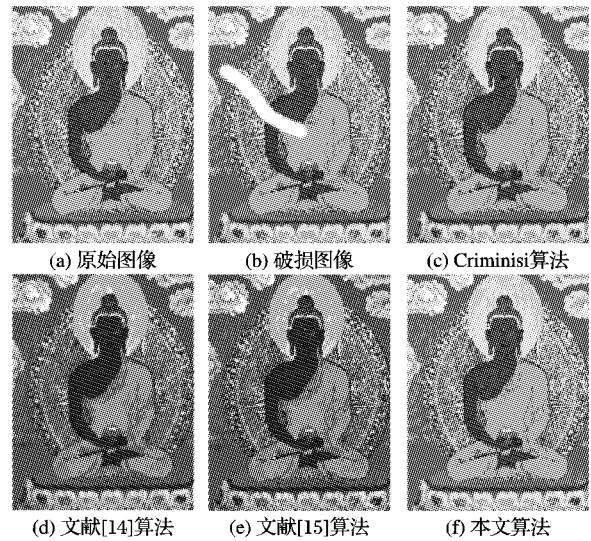


图 5 各算法图像修复效果比较一

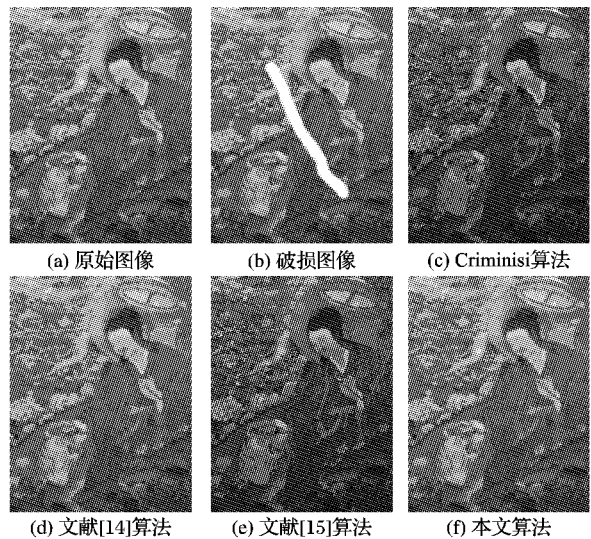


图 6 各算法图像修复效果比较二

在实验过程中,采用本文算法的参数设置:模板块初始大小为 3×3 ,根据经验得出的各阈值为 $\varepsilon = 8.00, \sigma = 2.00, \theta = 3.00$,采用四种算法进行图像修复所得峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)值和总耗时比较结果如表 1 所示。

次数,从而使得图像修复总耗时太大;而当模板块的尺寸选择过大,则会影响图像的修复效果。本文提出的基于自适应模板的图像修复算法考虑了破损区域的待修复点周围信息的变化和完好图像区域的像素值信息变化适度地进行模板块的自适应扩大和缩小,从而,可以确定最佳尺寸的模板块。因此,采用本文提出的方法能够在不增加算法的时间复杂度的同时,有效地提高了图像修复的精度,这一理论分析与实例验证

结果正好相吻合。

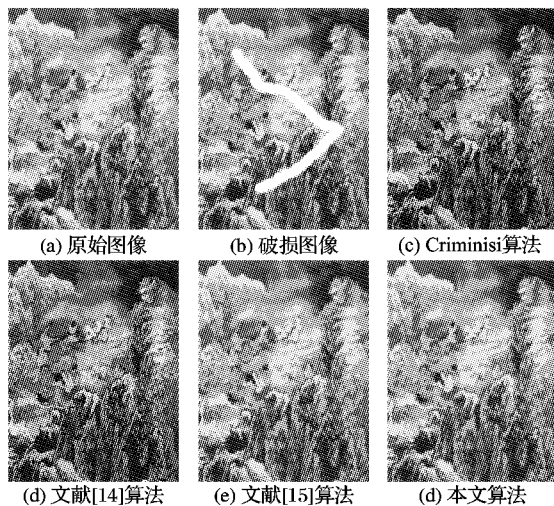


图7 各算法图像修复效果比较三

4 结语

在基于纹理的图像修复算法中,针对模板块尺寸固定的问题,本文提出了基于自适应模板的图像修复算法。该算法根据当前模板块与尺寸扩大后模板块间灰度均值及方差的变化情况来自适应地扩大模板尺寸;同时,根据模板块与样本块之间的匹配情况来自适应地缩小模板块。在自适应确定模板块尺寸的基础上,本文对基于纹理的图像修复算法进行改进并用于实例验证,其结果表明,本文提出的算法在提高图像修复精度的同时,提高了图像修复的效率。

参考文献:

- [1] 张红英, 彭启琮. 数字图像修复技术综述[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(1): 1-10.
- [2] 张晴, 林家骏. 纹理分布分析的快速图像修复算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 0123-0129.
- [3] 刘建明, 鲁东明. 采用加权优化的图像修复[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 528-532.
- [4] BERTAMLIO M, SAPIRO G, CASELLES V, *et al.* Image inpainting [C]// SIGGRAPH 2000: Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New

York: ACM Press, 2000: 417-424.

- [5] CHAN T, SHEN J. Mathematical models for local non-texture inpaintings [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2001, 62(3): 1019-1043.
- [6] CRIMINISI A, PEREZ P, TOYAMA K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1200-1212.
- [7] WU J, RUAN Q. Object removal by cross isophotes exemplar-based inpainting [C]// Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006, 3: 810-813.
- [8] 陈卿, 王慧琴, 吴萌. 基于纹理特征的自适应图像修复算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(6): 1572-1574.
- [9] GROVER S, MITTAL A, GUPTA S, *et al.* A unified approach for digital image inpainting using bounded search space [J]. International Journal on Graphics, Vision and Image Processing, 2005, 5(6): 17-24.
- [10] WONG A, ORCHARD J. A nonlocal-means approach to exemplar-based inpainting [C]// ICIP 2008: Proceedings of 15th IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 2600-2603.
- [11] KOMODAKIS N, TZIRTAS G. Image completion using efficient belief propagation via priority scheduling and dynamic pruning [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(11): 2649-2661.
- [12] 葛仕明, 程义民, 潘浩, 等. 基于离散优化的图像修复[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(12): 1381-1385.
- [13] KWATRA V, ESSA I, BOBICK A, *et al.* Texture optimization for example-based synthesis [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 795-802.
- [14] ZHOU H L, ZHENG J M. Adaptive patch size determination for patch-based image completion [C]// Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 421-424.
- [15] 孟春芝, 何凯, 焦青兰. 自适应样本块大小的图像修复方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(3): 337-341.
- [16] 彭坤杨, 董兰芳. 一种基于图像平均灰度值的快速图像修复算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(1): 50-55.

(上接第2867页)

密算法获得的加密结果为实值密文,分数阶密钥和线性同余参数密钥具有很高的灵敏度。仿真分析说明了加密算法可抵抗统计分析攻击和噪声攻击。

参考文献:

- [1] PEI S C, HSUE W L. Random discrete fractional Fourier transform [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(12): 1015-1018.
- [2] GUO Q, LIU Z J, LIU S T. Color image encryption by using Arnold and discrete fractional random transforms in IHS space [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(12): 1174-1181.
- [3] SINGH N, SINHA A. Chaos based multiple image encryption using multiple canonical transforms [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(5): 724-731.
- [4] LI X X, ZHAO D M. Optical color image encryption with redefined fractional Hartley transform [J]. Optik, 2010, 121(7): 673-677.
- [5] LANG J, TAO R, WANG Y. Image encryption based on the multiple-parameter discrete fractional Fourier transform and chaos function [J]. Optics Communications, 2010, 283(10): 2092-2096.
- [6] BHATNAGAR G, WU Q M, RAMAN B. Discrete fractional wavelet transform and its application to multiple encryption [J]. Information

Sciences, 2013, 223: 297-316.

- [7] JOSHI M, SHAKHER C, SINGH K. Logarithms-based RGB image encryption in the fractional Fourier domain: A non-linear approach [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(6): 721-727.
- [8] WANG X G, ZHAO D M. Multiple-image encryption based on non-linear amplitude-truncation and phase-truncation in Fourier domain [J]. Optics Communications, 2011, 284(1): 148-152.
- [9] DENG X P, ZHAO D M. Single-channel color image encryption based on asymmetric cryptosystem [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 163-140.
- [10] ZHOU N R, WANG Y X, GONG L H. Novel optical image encryption scheme based on fractional Mellin transform [J]. Optics Communications, 2011, 284(12): 3234-3242.
- [11] WIKRAMARATNA R S. Theoretical and empirical convergence results for additive congruential random number generators [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2010, 233(9): 2302-2311.
- [12] 张文全, 周南润. 基于离散分数随机变换的双彩色图像加密算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1727-1734.