

基于层间联系的三维扫描盲区填充方法^{*}

王孟阳¹, 耿国华¹, 周明全^{1,2}, 高原¹

(1. 西北大学 信息科学与技术学院, 西安 710127; 2. 北京师范大学 信息科学与技术学院, 北京 100875)

摘要: 针对三维文物扫描中出现的绝对盲区问题, 提出了一种快速高效的、基于层间联系的三维填充方法。该方法对传统的边界点提取方法、离散点插入方法和三角剖分方法进行了适应性改进, 并将以上三种方法和三角片品质优化同步进行, 提高了填充的效率和准确率。该方法充分利用盲区当前最内层边界点之间距离和方向关系, 向内逐层插入离散点, 逐层进行三角剖分, 利用相邻层顶点间的拓扑关系, 逐层优化三角片, 并动态更新当前层, 层层推进。实验表明, 新方法能够实现三维文物表面快速、光顺地填充。

关键词: 扫描盲区; 填充; 点云数据; 三角剖分

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2010)07-2776-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.07.107

Filling method for three-dimensional scanning blind-area based on layer associations

WANG Meng-yang¹, GENG Guo-hua¹, ZHOU Ming-quan^{1,2}, GAO Yuan¹

(1. College of Information Science & Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. College of Information Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To solve the problem of scanning blind-area appearing in scanning 3D relic, this paper gave a fast and efficient method of filling based on layer associations. The method improved the traditional method of picking up boundary points, of inserting the discrete points and triangulation, to make them suitable. The method also made the above three kinds of methods and the quality triangle parallel, in order to improve efficiency and accuracy of filling. The method took full advantage of the distance-direction relationship between the boundary points in which the innermost layer that in blind-area, to insert the discrete points and triangulation layer by layer, and using of topological relations between vertices adjacent layers, to optimize triangle. While dynamically update the current layer, layer by layer. The experiment shows, the new method can fill up the 3D relic surface speedily and smoothly.

Key words: scanning blind-area; filling; point-cloud; triangulation

0 引言

三维扫描仪扫描过程中, 由于三维物体的几何形状、物体与扫描仪的相对位置、扫描仪的参数设置、反光等原因, 使得扫描仪不能捕捉到的物体表面区域被称为扫描盲区。如果通过调整物体和扫描仪相对位置, 或者调整扫描设备参数能够消除的盲区, 称其为相对盲区。由于物体几何形状的复杂性, 导致不论如何去改变扫描仪和物体的位置, 都不能捕捉到的区域, 称其为绝对盲区。此外, 在一些应用中, 由于物体位置无法改变, 且几何形状复杂, 单凭扫描仪位置的变化仍无法完整扫描, 该类型盲区由相对盲区转换为绝对盲区。

在考古领域, 特殊的文物在出土时需对文物迅速实施照相或扫描工作, 便于日后的研究和复原。由于文物易风化、易损坏, 具有非接触性, 部分文物, 如开凿在岩壁上的石佛, 具有非移动性, 使得文物在进行三维扫描过程中极易产生绝对盲区。

针对不可避免的绝对盲区问题, 在扫描后需要对其实施填充。基于网格模型的三维扫描盲区填充, 理论上可以归类于空间三角网格的孔洞修补, 国内外学者对此进行了一些研究和探索^[1-4]。文献[1]对孔洞多边形进行一般三角化, 而后通过多次迭代, 对孔洞三角化后的网格进行细化和几何形态的调整, 但在生成新三角片时, 不断检测和更新点、边、面的位置和关系, 比较耗时。文献[2]提出了通过径向基函数建立描述孔洞及其周围区域拟合曲面的方法, 使填充后的效果具有一定的光滑性。文献[3]提出将 3D 模型投影到合适的二维平面, 用二维图像修复方法进行处理, 完成后再映射到三维空间。但如何去选择合适的投影平面, 以及在投影过程中对模型进行旋转变换, 都将增加操作的难度, 同时如何很好地记录模型深度信息, 也将成为亟待解决的问题。

综上所述, 传统方法^[5]多采用等距离法, 在填充区域内构造新离散点, 再使用 Delaunay 三角剖分法生成三角片, 没有考虑三维填充区域曲率变化的情况, 不适用于绝对盲区这种填充

收稿日期: 2009-10-25; **修回日期:** 2009-11-27 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60736008); 西北大学研究生自主创新基金资助项目(08YZZ33); 陕西省自然科学基金资助项目(SJ08F29)

作者简介: 王孟阳(1985-), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要研究方向为图形学与可视化技术(williamwmy992@163.com); 耿国华(1955-), 女, 山东莱西人, 教授, 博导, 主要研究方向为图像检索技术、数据库系统; 周明全(1954-), 男, 陕西临潼人, 教授, 博导, 主要研究方向为计算机可视化技术; 高原, 女, 陕西西安人, 副教授, 博士, 主要研究方向为数据库与人工智能。

面曲率变化大的问题,牵强应用,容易使得新离散点越界,生成三角片品质较差。其他一些特殊填充方法^[6,7]针对不同的孔洞类型进行处理,不具有一般性,且时间复杂度较高,这些方法不适于填充三维扫描盲区,实现时没有考虑三维文物绝对盲区填充的特殊要求。

本文针对文物三维模型扫描中出现的绝对盲区问题,提出了一种基于层间关系的快速三维扫描盲区填充方法。该方法将普通网格孔洞填充方法和扫描盲区自身特性相结合,寻找孔洞边界点,依靠区域邻域内点之间方向变化趋势,沿着孔洞边界向内逐层插入离散点,逐层进行三角剖分,层层推进,最大条件地满足边界层、生成层之间的形态约束,最后对新增离散点位置进行拟合调整,实现文物表面快速、光滑的曲面填充。

1 基于层间联系的 3D 填充方法

本实验首先标定出待填充区域,根据区域邻域内采样点构造出区域内的离散点,对这些离散点进行空间三角剖分,建立离散点之间的面关系,配合曲面拟合技术、曲面磨光技术,使模型具有更好的光滑性和真实感,完成盲区的填充工作。具体步骤如下:

- a) 标定待填充区域。
- b) 提取区域边界点。
- c) 构造区域内离散点。
- d) 离散点三角剖分。
- e) 三角片优化处理。

本文主要针对区域边界点提取、区域内离散点构造、离散点三角剖分、三角片优化进行研究,并设计适应性算法。

1.1 提取区域边界点

待填充区域邻域内点云数据部分出现在完整区域内部,部分出现在区域边界。设其中一点 P ,与 P 有线关系的点称为 P 的邻接点。如果 P 的所有邻接点 V_p 组成一个闭合的区域将 P 点包围在内,则称 P 为内部点,否则称为边界点。如图 1 所示,点 G 的邻接点集合 $V_g = \{A, B, C, D, H\}$,这些点之间通过线关系 AB, BC, CD, DH, HA 相连,将点 G 包围在内,故称点 G 为内部点。点 B 的邻接点集合 $V_b = \{A, C, G\}$,这些点之间的线关系为 CG, GA ,而 A 和 C 之间没有线关系,所以称 B 为边界点。总结得出,当 V_p 中点个数与点之间线关系数相等时, P 点为内部点,否则为边界点。

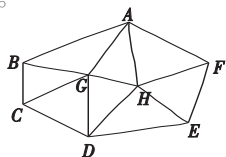


图1 边界点示意图

以图的广度遍历算法为基础,设计算法提取区域边界点。算法 1 流程如图 2 所示。

定义队列 P 存放离散点,定义二维数组 $a[N][N]$ 存放点之间的线关系, N 表示离散点个数。定义 int 变量 P_num, L_num 分别记录点个数和线关系个数。随机选取一点 P 作为遍历的起始点。

$$a[i][j] = \begin{cases} 1 & i, j \text{ 之间有线关系} \\ 0 & i, j \text{ 之间无线关系} \end{cases}$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j$$

算法 1

- a) 令 $P_num = 0, L_num = 0$ 。按照图的广度遍历算法,点 P 的邻接点依次进入点队列 P ,每进入一个邻接点,变量 P_num++ 。
- b) 查找二维数组,统计邻接点之间的线关系,记为 L_num 。
- c) 当 $P_num = L_num$ 时,点 P 为内部点,否则点 P 为边界点。
- d) 如果队列为空,转步骤 f); 否则转步骤 e)。
- e) 队列首元素出队,记为 P ,如果点 P 已经考察过,则继续执行步骤 e), 否则转步骤 a)。
- f) 结束。

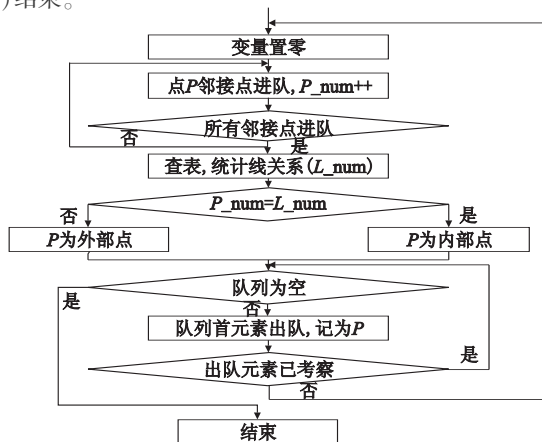


图2 算法1流程图

1.2 区域内离散点构造及三角剖分

在求得待填充区域的边界轮廓线后,需要在区域内生成新的离散点并完成三角剖分。本文分两步进行实现:a) 建立待填充区域局部坐标系和旋转变换法则,方便填充操作和填充效果观察;b) 在区域内构造新离散点,进行三角剖分,并对新生成的三角片进行优化调整,完成填充工作。

1.2.1 区域内局部坐标系建立

本文以孔洞区域的中心点作为局部坐标系的原点。设提取到的边界点为 m_1, m_2, \dots, m_n , 原点 o 的计算如式(1)所示:

$$o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (1)$$

Z 轴沿待填充区域的法向量 n 方向建立^[8]。首先,按照式(2)计算出区域边界点集中每个顶点的邻接三角片的法向量,然后,按照式(3)求取三角片法向量平均值:

$$v_i = (m_A - m_B) \otimes (m_C - m_B) \quad (2)$$

$$v = \sum_{i=1}^n v_i / n \quad (3)$$

其中: m_A, m_B, m_C 为边界点 m_i 所在的三角面片的三个顶点向量, v 即可作为 n , 方向指向模型网格面的外侧。 X 轴方向可由矢量 oq 决定, 其中 q 为待填充区域边界集中某顶点在 Z 轴与原点 o 确定的一个特征平面上的投影点。 Y 轴方向由 X 轴和 Z 轴上的单位向量作叉积确定。

为了进一步观察填充效果,需要寻找旋转变换法则,使得特征面能够围绕其法向量作自由旋转。本文采用四元数法^[9]来实现任意旋转。如图 3 所示, $p(x_p, y_p, z_p)$ 为原边界中任意一点, $p^*(x_p^*, y_p^*, z_p^*)$ 为 $p(x_p, y_p, z_p)$ 绕局部坐标原点沿 Z 轴单

位向量 $q(x_q, y_q, z_q)$ 逆时针旋转 θ 后所得。 $p^*(x_p^*, y_p^*, z_p^*)$ 和 $p(x_p, y_p, z_p)$ 的关系由式(4)给出, R_{rot} 为旋转变换矩阵。

$$[x_p^*, y_p^*, z_p^*, 1] = [x_p, y_p, z_p, 1] * R_{rot} \quad (4)$$

新离散点的插入和三角剖分在新坐标系下进行, 完成后将新插入点的坐标值重新转换回世界坐标系下。

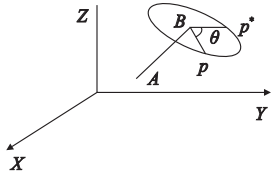


图3 空间向量旋转示意图

1.2.2 三维离散点构造与剖分

为提高效率, 算法 2 将离散点插入, 三角剖分和三角片优化同步进行。步骤 a) ~ c) 完成新边界点的插入, 步骤 d) 完成三角剖分, 步骤 e) ~ g) 对新生成的三角片进行优化。算法 2 流程如图 4 所示, 具体实现步骤如下:

定义两个双向循环链表 FList、NList, 分别存放待填充区域当前最内层(记为 i 层)边界点和新构造的下一层(记为 $i+1$ 层)边界点。

算法 2

a) 按逆时针方向顺序查找待填充区域最内层边界顶点, 依次加入链表 FList 中, 并将此层边界点个数及边界点的平均距离 L 等信息写入表头节点。

b) 从 FList 中第一个节点开始直至最后一个节点, 依次查找当前节点 $p_{i,j}$ 和其邻接 $p_{i,j+1}$ (j 表示当前层的第 j 个顶点), 在两者中点位置插入一个新的顶点 $P_{i+1,j}$, 并将此点放入链表 NList 中。 $p_{i+1,j}$ 的方向由 $p_{i,j}$ 和 $p_{i,j+1}$ 两点组成的矢量与待填充区域局部坐标系的 Z 轴作叉积确定; 距离设为上层边界点的平均距离 L , 保证了下一层边界点距离的平均分布。

c) 在三角剖分前, 对下一层边界点距离进行检查, 如果新构造两点距离太近, 则对此两点进行合并处理, 避免狭长三角片的产生。循环检查 NList 中各相邻边界点间隔距离。若 $d = \|p_{(i+1,j)}p_{(i+1,j+1)}\| < \frac{1}{2} \times L$, 则在 $p_{i+1,j}$ 和 $p_{i+1,j+1}$ 的中点新构建插入点取代 $p_{i+1,j}$, 并从链表中删除 $p_{i+1,j+1}$ 。最终确定的 NList 链表中的节点为当前层(i 层)的下一层($i+1$ 层)边界点。

d) 进行第 i 层和第 $i+1$ 层顶点之间的三角剖分。首先顺序将顶点 $p_{i+1,j}$ 和生成它的 $p_{i,j}, p_{i,j+1}$ ($j = 1, \dots, n$) 三点相连, 然后将第 $i+1$ 层的所有顶点依次连接便完成了新增三角片的构造, 同时将新增点以及新增面片的拓扑关系保存到相关数据结构中。

e) 利用第 i 层和第 $i+1$ 层边界点的拓扑关系, 对新增三角面片进行优化调整。首先判断第 $i+1$ 层中相邻的两个三角片的组成顶点是否共圆, 如果共圆, 转步骤 f); 否则, 转步骤 g)。

f) 共圆情况下, 计算两邻接三角面片的两对角线距离, 即边界点 $p_{i,j}$ 与 $p_{i+1,j+1}$ 之间的距离 d_1 和 $p_{i,j+1}$ 与 $p_{i+1,j}$ 之间的距离 d_2 。当 $d_2 > d_1$ 时, 删除 $p_{i,j+1}$ 和 $p_{i+1,j}$ 之间的边关系, 并建立 $p_{i,j}$ 和 $p_{i+1,j+1}$ 之间的边关系, 生成新的三角片并更新拓扑关系; 当 $d_2 < d_1$ 时, 满足对角线最短的条件, 什么都不做。

g) 不共圆情况下, 则首先找出初始剖分后两邻接三角面片的最小内角, 设为 α ; 然后找出连接顶点 $p_{i,j}$ 和 $p_{i+1,j+1}$ 而生成的两个三角片的最小内角 β 。当 $\alpha < \beta$ 时, 初始剖分所形成的最小内角并不满足最大化的准则, 因此删除由 $p_{i,j+1}$ 和 $p_{i+1,j}$ 连接而成的边, 同时连接顶点 $p_{i,j}$ 和 $p_{i+1,j+1}$, 生成新的三角片并更新拓扑关系; 当 $\alpha > \beta$ 时, 什么都不做。

h) 如此循环执行步骤 e) ~ g), 完成第 $i+1$ 层所有三角片的优化调整。通过更新 FList 以及点和面的拓扑关系, 保存调整后的三角片信息。

i) 以第 $i+1$ 层取代第 i 层, 第 $i+2$ 层取代第 $i+1$ 层, 反复执行步骤 b) ~ h), 层层推进, 循环生成下一层的三角网格。当下一层边界点数为 3 时, 连接生成一个三角面片, 结束循环, 完成填充工作。

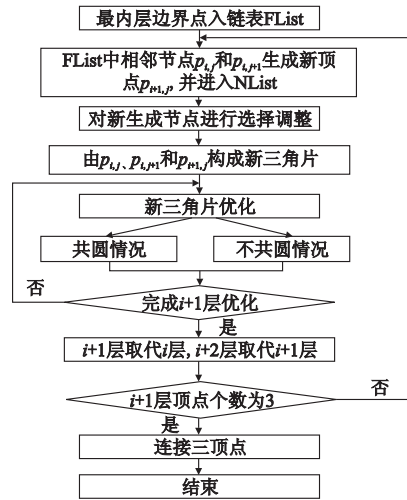


图4 算法2流程图

2 实验介绍及效果

本文进行两组实验。实验 1 对一宗唐代公主头像进行了扫描, 并以此例中扫描盲区的修复为例给予说明。在实验扫描工作中, 公主头像模型头发层比较厚, 发型尾部与肩膀的高度距离较短, 而与脖颈之间的深度距离较长, 导致发型层与脖颈之间三维信息无法获取, 产生缺失区域。本实验针对此问题进行了填充。如图 5 所示: (a) 为公主像模型正面; (b) 为填充前模型背面; (c) 为填充前网格模型, 红色小圈标出为缺失区域; (d) 为提取出的缺失区域邻域点云数据; (e) 为构造离散点后的缺失区域; (f) 为三角剖分后的网格模型; (g) 为填充后的头像网格模型(绿色部分为填充部分); 图 5 (h) 为填充后的模型背面。

实验 2 对由 CT 影像重构出的颅骨三维模型孔洞进行修复。从实验结果得出: 与传统填充方法相比, 本文提出的方法解决了传统方法中新构离散点越界、分布不均匀、生成三角片品质差、区域曲率变化大时难填充等缺点。图 6 (a) 为传统方法进行新离散点添加和三角剖分效果图, (b) 为本文提出方法进行新离散点构造和三角剖分及三角片品质优化后的效果图。表 1 给出传统方法和本文方法在构造离散点个数、三角片个数及锐角三角片个数的数据对比, 其中优品质率指锐角三角片个数占总三角片个数的百分比。从表中可以得出, 本文方法较传统方法降低了离散点和三角片的数量, 提高了三角片的品质。

本方法在孔洞填充领域具有通用性,可填充各种形态孔洞。图 7 给出本方法对其他形态孔洞填充的效果图。

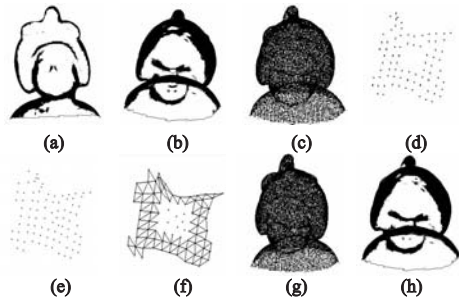


图5 实验效果图

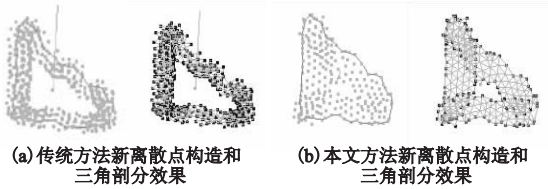


图6 实验2填充效果对比图

表 1 层间联系法与传统方法数据对比

方法	区域内顶点个数	三角片个数	锐角三角片个数	优品质量率/%
传统填充	372	476	387	81.3
层间联系填充	216	281	249	88.6



图7 本文方法解决其他形态孔洞效果图

本文实验设计的算法及效果显示由 VC6.0 调用 OpenGL 图形库实现。

3 结束语

本文针对三维文物扫描中遇到的绝对盲区问题,提出一种基于层间联系的填充方法。该方法对传统的边界点提取方法、离散点插入方法和三角剖分方法进行了适应性改进。从表 1 中数据可以得出,与传统方法相比,该方法在高效性、准确性、健壮性方面有所提高。

(上接第 2775 页)使和声搜索算法的性能有很大的改进,效果良好。通过实验分析可以看出,和声搜索算法是一种高效的启发式全局搜索算法,该算法能够搜索到最优解,但小概率的会陷入局部最优解。增大和声库的大小能有效地增大搜索到全局最优解的概率,但会降低求解速度;改进微调扰动方法既能增大搜索到全局最优解的概率,又能提高求解速度。

参考文献:

[1] 高小山,蒋鲲.几何约束求解研究综述[J].计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(4):385-396.
 [2] 曹春红,张斌,李文辉.基于牛顿—遗传混合算法的几何约束问题的求解[J].系统仿真学报,2007,19(16):3650-3652.
 [3] 欧阳应秀,唐敏,刘生礼,等.几何约束求解的BFGS-混沌混合算法[J].浙江大学学报:工学版,2005,39(9):1334-1338.
 [4] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. Simulation, 2001, 76(2):

高效性方面,本文采用双向循环链表组织区域内边界点,提高了边界点的查询、添加、删除效率;保存层与层之间的拓扑关系,并利用此关系,减少了区域内顶点个数和三角片个数,并将构造新顶点、三角剖分和三角片优化调整同步进行,一次完成,与分步执行相比,减少了插入点的查询次数。

准确性方面,本文在进行三角剖分的同时对新增三角面片的品质进行改善。根据三角网格的综合改善法^[10],取长补短,结合最小内角最大化和最小权法,在孔洞填充同时进行三角网格的优化调整。以实验 2 为例,本方法优品质量率与传统方法相比提高了 7%。

健壮性方面,本文给出的方法是以待填充区域当前最内层为边界构造离散点,在满足层与层的约束条件下进行三角剖分,对于任何形态的孔洞都能修复。从图 7 得出,本方法对于工程应用中出现的同类问题具有适应性。

参考文献:

[1] 张浩,岳玮宁,王楠,等.三角网格模型各向异性孔洞修补算法[J].计算机辅助设计与图形学报,2007,19(7):893-897.
 [2] 杜信,张丽艳,王宏涛,等.基于径向基函数的三角网格曲面空洞修补算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(9):1976-1980.
 [3] PEREZ E, SALAMAUCA S, MERCHAN P. A robust method for filling holes in 3D meshes based on image restoration[C]//Proc of the 10th International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS). [S. l.]:Springer-Verlag, 2008:742-751.
 [4] LI Gen, ZI Xiu, YUAN San. An algorithm for filling holes complex holes in reverse engineering[J]. Engineering with Computers, 2008,24(2):119-125.
 [5] 成欣.三维曲面破洞技术研究[D].西安:西北大学,2006.
 [6] 刘燕武,耿国华,周明全.轮廓对称轴法在缺损颅骨修复中的应用[J].计算机工程与应用,2010,46(8):156-159.
 [7] 李磊.基于CT断层的颅骨破洞修复技术研究[D].西安:西北大学,2008.
 [8] 陈宏明,周久兵,刘胜兰.基于曲率的三角网格孔洞修补算法的研究[J].淮阴工学院学报,2004,13(5):32-34.
 [9] 王勇,马立元,王忠强.四元数法在计算机图形中的应用[J].军械工程学院学报,2001,13(2):48-50.
 [10] 王群,李爱平,马淑梅.局部网格狭长三角形的品质改善及其实现[J].同济大学学报:自然科学版,2004,32(11):1508-1511.

60-68.

[5] 刘生礼,唐敏,董金祥.两种空间约束求解算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(8):1011-1029.
 [6] SAKA M P. Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm[J]. Journal of Constructional Steel Research,2009,65(1):36-43.
 [7] KIM J H, GEEM Z W E S. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using harmony search[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001,37(5):1131-1138.
 [8] CELYAN H, HALDENBILEN H S, BASKAN O. Transport energy modeling with meta-heuristic harmony search algorithm, an application to Turkey[J]. Energy Policy,2008, 36(7):2527-2535.
 [9] AYZAZ M T. Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management models[J]. Advances in Water Resources,2009,32(6):916-924.