

# 连续形变图像的追踪识别算法及其 在手势识别系统中的应用研究

冯志全<sup>1),2)</sup> 孟祥旭<sup>1)</sup> 蒋志方<sup>1)</sup> 王 锐<sup>1)</sup> 蔡 霞<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (山东大学计算机科学与技术学院 济南 250100)

<sup>2)</sup> (济南大学信息科学与工程学院 济南 250022)

**摘 要** 提出了一种连续形变图像的追踪识别算法,通过引入网格等基本概念,建立了一套基本理论,通过揭示网格与连续形变之间的内在联系,避免了传统方法中复杂的拓扑分析.该算法把追踪与识别过程有机地统一起来,既具有一定的理论基础,又可以灵活地满足工程中不同的精度需要.最后讨论了该算法在手势识别系统中的应用.实验表明,算法取得了令人满意的灵活性、适应性和时间复杂度.

**关键词** 连续形变;拓扑结构;跟踪识别;人机交互;人手跟踪

**中图法分类号** TP391

## Research on Tracking Recognition Algorithms of Continuous Deformational Image and Its Application in Hand Gesture Recognition

FENG Zhi-Quan<sup>1),2)</sup> MENG Xiang-Xu<sup>1)</sup> JIANG Zhi-Fang<sup>1)</sup> WANG Rui<sup>1)</sup> CAI Xun<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250100)

<sup>2)</sup> (School of Information Science and Engineering, Jinan University, Jinan 250022)

**Abstract** The tracking recognition of continuous deformational images is one of the fundamental and core problems in robot visual systems. A new algorithm to track continuous images is put forward in the paper. By means of introducing some new basic concepts upon which the fundamental theories are built, exposing the internal relationships between grid and continuous deformation, traditional complicated topological analyses are avoided. As a result, the algorithm developed in this paper is credible and flexible, and satisfied different needs with different precisions. At last, the application in hand gesture recognition is discussed. Experimental results show that this algorithm is good at flexibility, adaptabilities and time complexity.

**Keywords** continuous deformational; topological structure; tracking recognition; human-computer interaction (HCI); human hand tracking

## 1 引 言

跟踪技术是计算机视觉研究的一个主要内容之一,它在机器人导航、智能监视系统、虚拟现实、人机

交互等领域都有广泛的应用基础.目前所跟踪的对象基本上都限于刚性物体,典型的算法包括形心法、质心法、相关的绝对差值法、完全相关法、频域法以及滤波技术等<sup>[1~3]</sup>,而对于随时间而发生形变的物体之跟踪算法研究尚不多见.事实上,有许多与形变

收稿日期:2003-09-09;修改稿收到日期:2005-09-25. 本课题得到国家自然科学基金(60473103,60473127)资助. 冯志全,男,1964年生,博士研究生,副教授,主要研究方向为计算机图形图像处理、VR、HCI运动人手跟踪. 孟祥旭,男,1962年生,教授,博士生导师,主要研究领域为CAD、CG、VR和CMS. 蒋志方,男,1961年生,博士研究生,副教授,主要研究方向为数据库理论与应用. 王 锐,女,1979年生,博士研究生,主要研究方向为虚拟现实、人机交互. 蔡 霞,女,1971年生,博士研究生,主要研究方向为VR、HCI.

有关的手段可被用于这类图像的跟踪研究,目前这些手段主要包括:(1)相位转移和小波技术(Phase-shifting and wavelet techniques)<sup>[4,5]</sup>.其主要特点是通过跟踪每帧对应点的相位变化幅度来达到识别目的,存在的主要问题是只有在图像上的每个点的形变方向和形变幅度基本保持一致的情况下才能取得较为理想的识别结果;(2)不变群和不变量理论<sup>[6~19]</sup>.这些不变群主要包括欧氏群、仿射群及影射群等,不变量主要包括积分不变量、代数不变量、几何不变量和拓扑不变量等,其中拓扑不变量技术起着重要的作用,已经成为目前研究连续形变问题的主流技术<sup>[6~19]</sup>,但这些不变量往往只能用于进行必要性检验,即仅当进行否定性判断时才具有较高的可信度,从理论上进行肯定性判断还有一定的缺陷,例如拓扑性质就是一个典型的例子;(3)网格技术<sup>[20,21]</sup>.但至少从理论上还没有解决网格与连续形变之间的关系;还有一种研究手段就是将包括形心法在内的处理刚性物体的手段与不变量理论相结合<sup>[22]</sup>,但怎样将前景与背景快速地、有效地分离出来,还没有很好的方法.

文献[22]中给出了一种研究连续形变的新的不变量,可以方便地用于形变图像的跟踪识别,但对物体必须是流体的限制制约了对任意复杂的拓扑结构的图像的识别;另一个问题是“圈体”的获得在时间复杂度的改进方面具有一定的困难,特别是,当形变前后所得到的DL表的长度差别较大时,形变量的误差可能较大,尽管很容易克服这种弊端.本研究的首要目标是,定义连续形变图像的基本内涵,找到一种连续形变图像的快速跟踪算法,事实上提出了一种锁定性跟踪识别技术.本文研究的主要思路是:在背景具有同一种灰度或同一种色彩的假设下,首先引入网格理论,在对图像的特性不加以任何限制的情况下,从理论上研究网格与连续形变之间的内在联系,然后再探讨算法的具体实现,并进一步把本文算法用于手势跟踪和识别.形变过程中的同胚问题以及形变的“渐变性”等问题成为本文试图解决的核心问题.

## 2 几个基本概念

### 2.1 网格属性及压线格

用  $M \times N$  ( $M > 0, N > 0$ ) 条互相垂直的两组直线对图像进行逻辑上的分割,图像被分割成  $(M+1) \times (N+1)$  个小矩形,每个矩形被称为一个网格.沿着网格的四条边按一定顺序扫描图像,沿途所经历的

不同的灰度值序列、不同灰度值的数目以及所感兴趣的其它信息等构成该网格的网格属性,每个网格左上角的坐标称为该网格的坐标(简称坐标).把网格属性中的不同灰度值的数目  $\geq 1$  的网格称为压线格.一个第  $I$  帧、坐标矢量为  $p$ 、属性为  $B$  的网格记作  $(I, p, B)$ . 图像  $I$  的所有压线格所组成的图像  $G_i$  叫做图像  $I$  的网格图像.图1中带阴影的网格  $A$  就是一个压线格,而带阴影的网格  $B$  就不是压线格.图3是图2的由  $50 \times 50$  划分原图像时程序运行求得的压线格.图4是另一个压线格实例.每一个压线格总可以按某种规则分为若干子网格,从而得到相应的子压线格序列,这个过程称为一次细分.

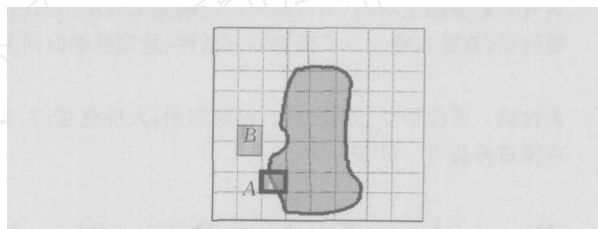


图1 压线格示意图

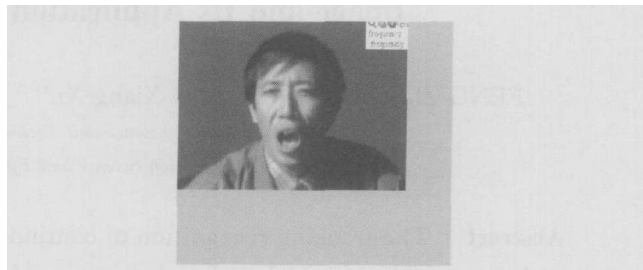


图2 一个实图

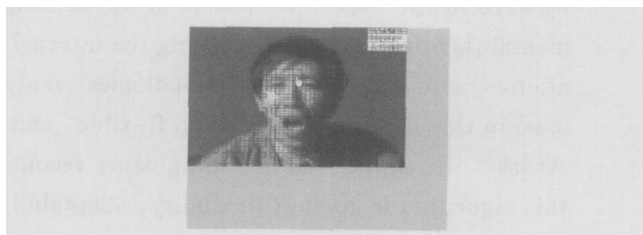


图3 图2的压线格

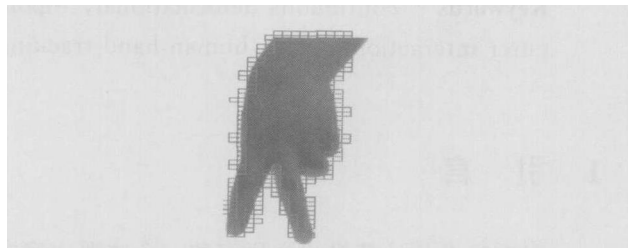


图4 一个压线格实例

### 2.2 $W(I, y, R)$

用  $W(I, y, R)$  表示第  $I$  帧中以网格  $y$  为中心、以  $R$  为尺寸的邻域内的、相邻网格的集合.若网格  $x$  在

$W(I, y, R)$ 内, 则称  $x \subseteq W(I, y, R)$ . 我们约定, 当且仅当某网格的坐标落在某邻域内时, 称该网格在该邻域内.

### 2.3 网格图像的顶点网格和网格图像的边图

若无论怎样细分某网格, 总可以得到一个且仅有一个属性相同的灰度数目为 2 的子网格, 则该网格被称为该网格图像的一个边网格. 若无论怎样细分某网格, 总可以得到一个且仅有一个属性相同的灰度数目大于等于 3 的子网格, 则该网格被称为该网格图像的一个顶点网格. 第  $i$  帧以点  $s$  为邻域中心的顶点网格记作  $h_{i,s}$ . 若很小尺寸的某网格的灰度数目为 2, 则该网格被称为该网格图像的一个边网格, 由相邻且灰度值的数目为 2、灰度值序列相同的压线格所构成的网格图像的子图, 称为该网格图像的一个边图. 显然, 任意一个网格的边图的两端一定是顶点网格, 以  $h_{i,s1}$  和  $h_{i,s2}$  为端点的边图记作  $h_{i,s1}, h_{i,s2}$ ; 另外, 所有顶点网格和边图构成网格图像. 图 5 中, 用矩形框圈起来的网格图就是网格图像的顶点, 剩下圈起来的部分就是网格图像的边图.

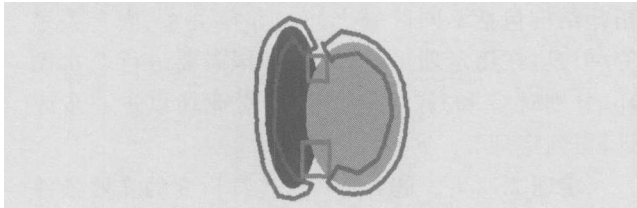


图 5 顶点网格与边图示意图

### 2.4 $G_i$ 与 $G_{i+1}$ 同胚

如果  $G$  和  $G_{i+1}$  之间满足: (1) 同构<sup>[23]</sup>; (2) 有序相邻, 则称  $G_i$  与  $G_{i+1}$  同胚. 所谓有序相邻是指具有相同顶点的两条不同的边在形变前后的相对位置关系保持不变.

从这一定义出发,  $G_i$  与  $G_{i+1}$  同胚的充要条件是: (1) 它们的顶点网格和边图之间分别具有一一对应的关系; (2) 有序相邻. 值得注意的是,  $G_i$  与  $G_{i+1}$  的边图之间具有一一对应的关系, 并不意味着边图的各网格之间必须存在一一对应的关系, 事实上, 对应网格的数量不一定相等. 图 6 和图 7 所示的两个网格图像不同胚, 因为不满足有序相邻性条件.

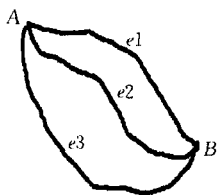


图 6 一个假想的顶点网格和边图

### 2.5 连续形变

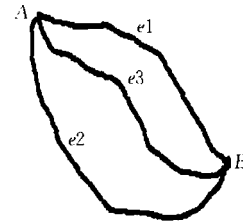


图 7 另一个假想的顶点网格和边图

设第  $i$  帧图像为  $I_i$ , 第  $i+1$  帧图像为  $I_{i+1}$ , 两帧之间的时间间隔为  $t$ . 若满足

$$\lim_{t \rightarrow 0} I_{i+1} = I_i \quad (1)$$

且  $G_i$  与  $G_{i+1}$  同胚, 则称图像由第  $i$  帧到第  $i+1$  帧是一次连续形变. 如果设当前帧的图像边界向量为  $C_{\text{current}}$ , 上一帧的图像边界向量为  $C_{\text{last}}$ , 则式 (1) 等价于: 对任意小的正数  $\epsilon$ , 都有以下包含关系成立

$$C_{\text{in}} < C_{\text{current}} < C_{\text{out}} \quad (2)$$

其中,  $C_{\text{in}}$ 、 $C_{\text{out}}$  分别表示  $C_{\text{in}}$  和  $C_{\text{out}}$  所表示边界的点集,  $C_{\text{in}} = C_{\text{last}} - N$ ,  $C_{\text{out}} = C_{\text{last}} + N$ ,  $N$  为  $C_{\text{last}}$  上点的法线方向. 图 8 中表示了  $C_{\text{in}}$ 、 $C_{\text{out}}$  和  $C_{\text{last}}$  三者之间的关系. 以下我们也称  $C_{\text{current}}$  夹在以  $C_{\text{last}}$  为厚度的条状区域内. 当式 (1) 中的  $t \rightarrow 0$  时, 式 (2) 中的包含关系一定成立; 反之, 对任意小的正数  $\epsilon$ , 有式 (2) 成立, 则  $C_{\text{current}} \subset C_{\text{last}}$ , 即式 (1) 成立.

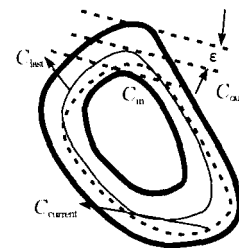


图 8 连续形变的概念

若给定的形变图像在给定的时间范围内任意两相邻帧之间都是连续形变的, 我们谓之跟踪成功; 否则, 跟踪失败.

## 3 识别算法

### 3.1 基本性质和基本定理

我们首先给出以下性质.

**性质 1** 网格图像细分的极限就是原图像的边界图, 如果原图像的边界存在的话.

证明.

设  $G(k+1)$  是  $G(k)$  的一个细分, 则

$$G(1) \supset G(2) \supset G(3) \supset \dots \supset G(s) \supset \dots$$

显然,如果原图像的边界图存在的话,则随着  $s$  的无限增大,上述序列必收敛,其极限就是原图的边界图. 证毕.

**性质 2**  $I_{i+1}$  是  $I_i$  的一次连续形变的必要条件是,  $G_i$  中所有网格的属性的集合等于  $G_{i+1}$  中所有网格的属性的集合.

证明.

设  $I_{i+1}$  是  $I_i$  的一次连续形变. 据连续形变的定义,  $G_i$  与  $G_{i+1}$  必同胚,从而  $G_i$  与  $G_{i+1}$  同构,顶点网格之间可以建立一一对应的关系,边图之间也有一一对应的关系,而这种一一对应都是基于网格属性的,所以结论成立. 证毕.

**性质 1** 从理论上说明了用网格的手段来代替原图像边界的可行性以及在许可精度下的合理性. 为了进一步揭示连续形变图像所对应的网格图像之间的内在联系,首先给出定理 1.

**定理 1**  $I_{i+1}$  是  $I_i$  的一次连续形变的充要条件是,以下两个条件同时得到满足:

- (1) 存在任意小的  $r_1 > 0$ , 使得对  $\forall x \in G_i$ , 存在  $y \in G_{i+1}$ , 使得  $x \in W(I+1, y, r_1)$ ;
  - (2) 存在任意小的  $r_2 > 0$ , 使得对  $\forall y \in G_{i+1}$ , 存在  $x \in G_i$ , 使得  $y \in W(I, x, r_2)$ .
- 其中,  $x$  和  $y$  的网格属性相同.

证明.

(1) 充分性的证明.

首先注意到,若所述两个条件同时满足,则  $G_i$  与  $G_{i+1}$  必同胚. 根据条件 (1),  $\forall x \in G_i$ , 存在  $y \in G_{i+1}$ , 使得  $(I, p_x, B) \subseteq W(I+1, y, r_1)$ ,  $p_x$  是  $x$  的网格坐标,所以,  $G_i$  中属性的集合  $\subseteq G_{i+1}$  中属性的集合; 根据条件 (2),  $\forall y \in G_{i+1}$ , 存在  $x \in G_i$ , 使得  $(I+1, p_y, B) \subseteq W(I, x, r_2)$ ,  $p_y$  是  $y$  的网格坐标,所以,  $G_i$  中属性的集合  $\supseteq G_{i+1}$  中属性的集合,于是,  $G_i$  中所有网格的属性的集合 =  $G_{i+1}$  中所有网格的属性的集合,从而网格图像  $G_i$  与  $G_{i+1}$  的顶点网格和边图之间可以建立一一对应的关系. 另一方面,  $r_1$  和  $r_2$  可以取任意小,当然可以远远小于不同的顶点网格和不同的边图之间的距离,在题设中的两个包含关系同时成立的条件下,必然保持有序相邻,否则,所述的“两个包含关系同时成立”与“ $r_1$  和  $r_2$  任意小”之间将发生矛盾.

另外,若取  $r = \max(r_1, r_2)$ , 则  $G_i$  和  $G_{i+1}$  都将夹在以  $r$  为厚度的条状区域内. 即  $\lim_{i \rightarrow 0} I_{i+1} = I_r$  成立.

(2) 必要性的证明.

设  $G_i$  与  $G_{i+1}$  同胚且  $\lim_{i \rightarrow 0} I_{i+1} = I_r$ . 首先,  $G_i$  和  $G_{i+1}$

的顶点网格之间可以建立一一对应的关系,所以,若  $x$  是  $G_i$  的任意一个顶点网格,则必存在  $G_{i+1}$  中与  $x$  对应的顶点网格是  $y$ , 并且  $x$  与  $y$  具有相同的网格属性,考虑到对任意小的  $\epsilon > 0$ ,  $G_i$  和  $G_{i+1}$  都将夹在以  $\epsilon$  为厚度的条状区域内,所以,  $|x - y| < \epsilon$ ,  $x \in W(I+1, y, \epsilon)$ , 这就证明了定理中的条件 (1); 同理,可证条件 (2) 成立. 若  $x$  是  $G_i$  中的一个边图  $h_{i, s1}$ ,  $h_{i, s2}$  上的任意一个网格,则在  $G_{i+1}$  中存在一个边图  $h_{i+1, s1}$ ,  $h_{i+1, s2}$  与之对应. 若存在  $r > 0$  和任意  $y \in G_{i+1}$ , 都有  $x \notin W(I+1, y, r)$ , 则  $|x - y| > r$ , 这与  $\lim_{i \rightarrow 0} I_{i+1} = I_r$  矛盾. 所以,定理中的条件 (1) 成立; 同理,可证条件 (2) 成立. 证毕.

定理 1 揭示了连续形变过程中构成网格图像的网格之间所存在的内在联系,这种内在联系从微观的角度揭示出连续形变图像的网格图像之间的拓扑结构的关系,并且得到了  $\lim_{i \rightarrow 0} I_{i+1} = I_r$  的一种实现方法; 定理 1 的重要意义还在于,使得计算机从可能非常复杂的拓扑结构的分析和判断中解脱出来,这种拓扑结构包括不同区域之间的邻接关系、嵌套关系等. 但是,在用定理 1 设计算法时,需要进行 2 次循环,分别对  $G_i$  和  $G_{i+1}$  进行判断,对此加以进一步改进,得到定理 2.

**定理 2**  $I_{i+1}$  是  $I_i$  的一次连续形变的充要条件是,对任意小的  $\epsilon > 0$ , 存在着有限个邻域  $W(I, s, \epsilon)$ ,  $s = 0, 1, 2, \dots, S$ , 使得

- (1)  $G_i \subseteq \bigcup_{s=0}^{s=S} W(I, s, \epsilon)$ ,  $G_{i+1} \subseteq \bigcup_{s=0}^{s=S} W(I, s, \epsilon)$ ;
- (2)  $\forall s (s = 0, 1, 2, \dots, S)$ , 存在  $u, v$ , 使得网格  $(I, u, B) \subseteq W(I+1, s, \epsilon)$ , 网格  $(I+1, v, B) \subseteq W(I, s, \epsilon)$ .

其中,  $u = 0, 1, \dots, U-1$ ,  $v = 0, 1, \dots, V-1$ .  $U, V$  分别是  $G_i$  和  $G_{i+1}$  中的网格的个数.

事实上,定理 2 是定理 1 的简单推论. 定理 2 中的条件 (1), (2) 成立时,显然可以推出定理 1 中的条件 (1), (2) 成立; 反过来,当定理 1 中的条件 (1), (2) 成立时,取  $\epsilon = \max(r_1, r_2)$ , 就可以得到定理 2 中的条件 (1), (2). 显然,定理 2 的几何意义是明显的. 条件 (1) 表示了  $G_i$  和  $G_{i+1}$  可以同时被有限个邻域所覆盖,条件 (2) 揭示了任意一个邻域内至少同时包含分别来自  $G_i$  和  $G_{i+1}$  中的属性相同的两个网格.

### 3.2 追踪识别算法

我们以定理 2 中的邻域为圆域作为实例,令圆的半径为  $r$ , 以下把该圆域称为检测圆. 图 9 给出了

检测圆示意图. 本文追踪识别算法的总体结构为

- 1 求出当前帧的网格图像  $G_i$ ;
- 2 调用相邻两帧连续形变的跟踪算法, 若成功, 转下一步; 否则, 退出;
- 3 最后一帧吗? 若是, 退出; 否则, 转步 1.

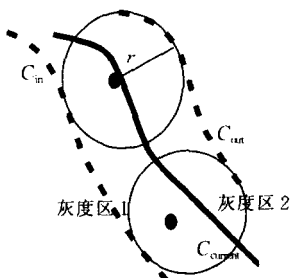


图 9 检测圆概念示意图

### 3.3 网格图像的获取

采用网格化技术可以快速得到图像的边界信息, 具体算法为

- 1 把已知图像等分成  $(M+1) \times (N+1)$  个网格;
- 2 依次求出每个网格的网格属性;
- 3 只保留压线网格.

所得到的网格图像按从上到下、从左至右的顺序即按以行序为主的扫描顺序存放在数组中.

在应用实践中, 对识别的精度要求往往有很大的差异, 在许多情况下容许存在一定的误差而要求有较高的响应速度, 所以让用户来决定这种误差 (即  $M$  和  $N$  的值) 是可行的; 用网格化技术代替逐点处理技术的另一个优点是, 为算法的讨论以及数据结构的设计都带来很大的方便. 顺便注意到, 从性质 1 可以看到, 如果图像边界存在的话, 则随着  $M$  和  $N$  取得越来越小, 识别精度也越来越高.

### 3.4 相邻两帧连续形变的跟踪算法

假设上一帧和当前帧的网格图像已分别放在上一帧表和当前帧表两个表中, 并已进行必要的初始化.

- 1 按顺序扫描上一帧表, 设其当前指针为  $p$ ;
- 2  $p$  超过上一帧表的表长了吗? 若是, 转步 6; 否则, 转步 3;
- 3 以  $p$  所指的网格坐标为中心建立检测圆, 在当前帧的网格图像中统计落在检测圆内的网格的个数  $COUNTER$ ;
- 4 如果  $COUNTER = 0$ , 转步 7; 否则, 转步 5;
- 5  $p = p + 1$ ,  $COUNTER = 0$ ,  $NO = NO + 1$ , 转步 2;
- 6 若  $NO$  等于当前帧表的网格个数时则跟踪成功, 退出; 否则, 转步 7;
- 7 跟踪失败, 退出.

判断某网格  $(I, x, B)$  是否落在以矢量  $P$  为圆心、以  $r$  为半径的检测圆内的方法是: 若

$$(x - P) (x - P) < r^2,$$

则该网格落在检测圆内.

### 3.5 算法的进一步讨论

上述的算法是基于邻域为圆域而提出的. 事实上, 取定理中的邻域为八邻域, 在算法的实现上也是很方便的. 只需对 3.4 节中的步 3 稍加改进, 即转而判断一个点是否在一个矩形内即可. 也可以考虑其它不规整网格作为邻域, 在一定条件下可以改变算法的精确度, 但将影响算法的时间复杂度.

## 4 算法性能分析

不妨假设压线格的个数是  $M \times N$ , 经过  $8 \times [M(N+1) + N(M+1)]$  次比较, 就可得到所有网格的属性, 从而获得压线格. 又设检测圆的个数为  $S$ , 则进行一次拓扑保持性连续形变算法识别需要进行比较的总次数是

$$T_G = 8[M(N+1) + N(M+1)] + S.$$

可见, 算法的时间复杂度只取决于对算法精度的要求, 并且只与压线格的个数和检测圆的个数成一次线性关系.

另外, 我们进一步将本文提出的算法与文献 [22] 所给算法进行比较. 在文献 [22] 中, 每次识别的时间复杂度为  $O(s \times n)$ , 其中,  $s$  为物体中圈的数量,  $n$  为每个圈的顶点的个数, 其中  $s \times n$  表示与源图中顶点的总数, 在一定的条件下, 时间复杂度可以得到有效改善; 另外, 原算法与源图的拓扑结构有关, 而这里与源图的拓扑结构无关, 这正是本算法的又一个重要特点.

## 5 算法在手势识别中的应用

虚拟现实技术是一种高度逼真的模拟人在自然环境中视、听、动等行为的人机交互技术, 是交互——沉浸——想象力的总集成. 在人机交互技术中, 典型的做法是通过摄像机对人体扫描, 得到扫描图片, 从中获取人体姿态, 再根据不同的应用需要提取所感兴趣的信息, 这些信息包括人体运动姿态信息<sup>[24]</sup>、手势信息<sup>[25]</sup>、面部表情信息<sup>[26, 27]</sup>等, 事实上基于以下两个原因, 这些不同的算法可以得到有机的统一: (1) 相邻两帧图片可以认为存在连续形变关系; (2) 都需要对图像照片进行锁定性跟踪识别. 特别地, 在基于手势的交互系统中, 往往根据伸直手指的数目对手势进行分类和识别<sup>[28]</sup>, 但目前大多数系统都采用刚性识别算法, 其严格的手

势形状限制影响操作者的沉浸感和交互效果,且算法的时间复杂度比较差.本文算法不仅可以有效地解决上述问题,而且还把追踪和识别过程有机地统一起来.

## 6 实验结果

### 实例 1

图 10 给出了连续形变的 Lena 图像序列,实验

表明,取  $r=2$  时,可以得到理想的跟踪结果.

### 实例 2

图 11 是以 5ms 为时间间隔获取的手势录像帧序列,实验表明,本文算法可以准确地将它们识别为同一手势进行跟踪,且其最高精度可以达到  $r=1$ .

### 实例 3

图 12 是以 10ms 为时间间隔获取的手势录像帧序列,实验表明,本文算法可以准确地将它们识别为同一手势进行跟踪,且其最高精度可以达到  $r=2$ .

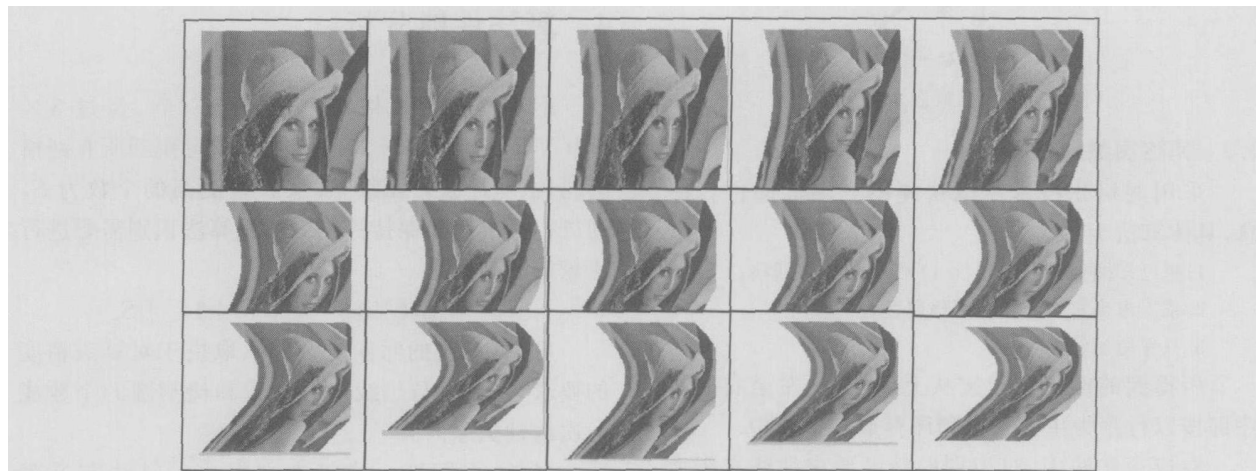


图 10 连续形变的 Lena 图像序列及跟踪

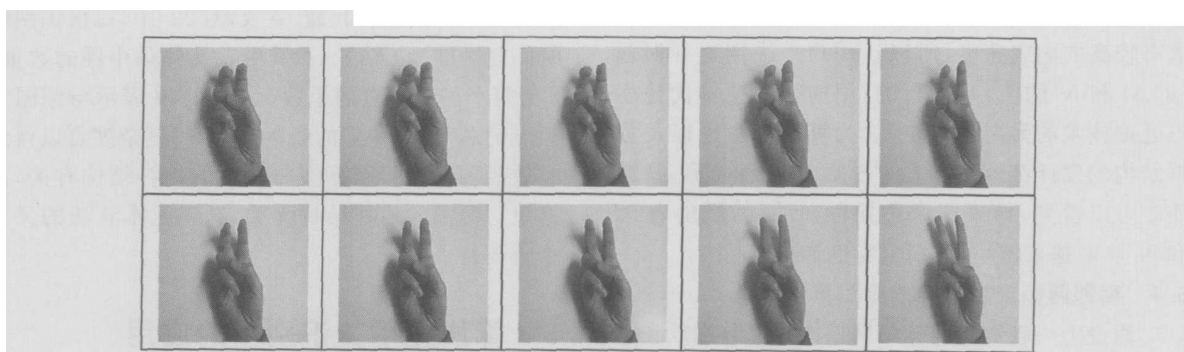


图 11 以 5ms 为间隔获取的手势录像帧序列

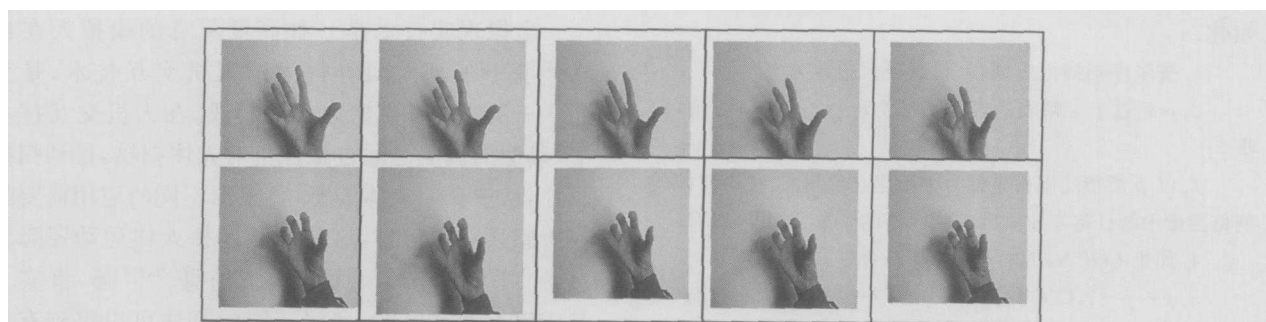


图 12 以 10ms 为间隔获取的手势录像帧序列

## 7 结 论

连续形变物体的追踪算法研究要解决的关键问

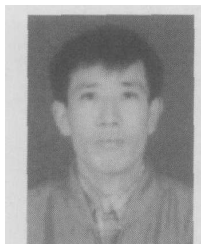
题是:(1)怎样判断被追踪物体的拓扑结构没有改变,或者这种改变在容许的误差范围内;(2)对连续形变“渐变性”的识别.从拓扑结构理论的角度考察,拓扑结构的判断是一个相当复杂的问题.本研究

把这两个问题结合起来分析和研究,通过引入网格、网格属性等基本概念,从理论上揭示出了连续形变与拓扑结构和渐变性之间所存在的深刻联系,建立了一套基于网格等基本概念、以定理 1 为代表的基本理论.以之为基础设计的算法具有以下显著特点:(1)避开了复杂的拓扑结构分析;(2)识别的精度可以根据不同的应用需要加以灵活调节;(3)算法简单,实现方便;(4)算法的时间复杂度与图像的拓扑结构的复杂程度无关;(5)算法的灵活性、普适性和快速性,使之特别适合于人机交互系统的设计;(6)算法对被追踪物体的拓扑结构、灰度以及色彩等可以不加任何限制;(7)把追踪和识别过程有机地统一起来;(8)本文的研究具有广泛而深刻的应用背景,例如,它开拓了手势识别领域中的一个新的研究途径.算法的一个主要弊端是,对被跟踪物体的图像噪声(尤其是高光)很敏感.

### 参 考 文 献

- 1 Fan Yong, You Zhi-Sheng *et al.* A fast algorithm for detection and tracking of moving objects. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, 27 (6): 30 ~ 33 (in Chinese)  
(范 勇,游志胜等.一种快速运动目标检测与跟踪算法.光电工程, 2000, 27(6): 30 ~ 33)
- 2 Guo Xu-Ping, Li Zai-Ming Visual recognition and intelligent tracking of image target. *System Engineering and Electrical Technique*, 1998, (8): 8 ~ 11 (in Chinese)  
(郭旭平,李在铭.图像目标的可视识别与智能跟踪.系统工程与电子技术, 1998, (8): 8 ~ 11)
- 3 Jiang Peng-Yue. Analysis of target tracking algorithms. *Fire & Command Control*, 1998, 23 (2): 47 ~ 52 (in Chinese)  
(江捧岳.图像跟踪算法分析.火力与指挥控制, 1998, 23(2): 47 ~ 52)
- 4 de Lega X. C., Jacquot P. Deformation measurement using object induced dynamic phase-shifting. *Applied Optics*, 1994, 35 (15): 5115 ~ 5121
- 5 de Lega X. C. Continuous deformation measurement using dynamic phase-shifting and wavelet transforms. In: *Proceedings of the Applied Optics Divisional Conference of the Institute of Physics, London*, 1996, 261 ~ 267
- 6 Zhu Zhong-Tao, Zhang Bo, Zhang Zai-Xing The differential invariance of image under boundary extracting operator. *Chinese Journal of Computers*, 1999, 22 (9): 903 ~ 910 (in Chinese)  
(朱仲涛,张 钹,张再兴.图像关于边缘提取算子的微分不变性.计算机学报, 1999, 22(9): 903 ~ 910)
- 7 Zhu Zhong-Tao, Zhang Bo, Zhang Zai-Xing The quasi-invariants of curves under the topological deformation. *Chinese Journal of Computers*, 1999, 22 (9): 897 ~ 902 (in Chinese)  
(朱仲涛,张 钹,张再兴.曲线在拓扑形变下的准不变量.计算机学报, 1999, 22(9): 897 ~ 902)
- 8 Perantonis J., Lisboa P. J. G. Translation, rotation, and scale invariant pattern recognition by high order neural networks and moment classifiers. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1992, 3 (2): 241 ~ 251
- 9 Rivlin E., Weiss I. Local invariance for recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 1995, 17 (3): 226 ~ 238
- 10 Wood J. Invariant pattern recognition: A review. *Pattern recognition*, 1996, 29 (1): 1 ~ 17
- 11 Wood J., Shawe-Taylor J. Representation theory and invariant neural networks. *Discrete Applied Mathematics*, 1996, 69 (1 ~ 2): 33 ~ 60
- 12 Weiss I. Projective invariants of shapes. In: *Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop, Cambridge*, 1998, 1125 ~ 1134
- 13 Zhao Lei, Feng Zhi-Quan, Li Jing-Pin Research advances on the theory of visual invariants in computer vision. In: *Proceedings of the Theories and Applications of Modern Information Technology, Hefei*, 2002, 589 ~ 593 (in Chinese)  
(赵 磊,冯志全,李金屏.视觉不变量理论和拓扑理论在机器视觉中的研究进展.见:现代信息技术理论与应用(CIE-YC '2002)会议论文集,合肥, 2002, 589 ~ 593)
- 14 Zhang Ling, Zhang Bo, Wu Fu-Chao Multilayer neural networks for motion invariant pattern recognition. *Chinese Journal of Computers*, 1998, 21 (2): 127 ~ 136 (in Chinese)  
(张 铃,张 钹,吴福朝.对图形识别具有平移、旋转、伸缩不变性的神经网络.计算机学报, 1998, 21(2): 127 ~ 136)
- 15 Yan Sun-Zhen, Sun Ji-Xiang *et al.* The research and application of moment invariants in object shape recognition. *Journal of National University of Defense Technology*, 1998, 20 (5): 75 ~ 80 (in Chinese)  
(颜孙振,孙即祥等.矩不变量在目标识别中的应用研究.国防科技大学学报, 1998, 20(5): 75 ~ 80)
- 16 Liao Yuan, Yuan Jie *et al.* Recognition of occluded target with fused data of several invariances. *Journal of Wuhan University*, 1998, 44 (1): 81 ~ 84 (in Chinese)  
(廖 原,袁 捷等.基于几种不变量融合信息的缺损目标识别.武汉大学学报, 1998, 44(1): 81 ~ 84)
- 17 Zhao Nan-Yuan The topology properties algorithm of image. *Journal of Tsinghua University*, 1989, 29 (4): 74 ~ 79 (in Chinese)  
(赵南元.图像的拓扑特征算法.清华大学学报, 1989, 29(4): 74 ~ 79)
- 18 Guo Lian-Qi, Li Qing-Fen A study of the graphic recognition method by using the topological relation. *Journal of Harbin Engineering University*, 1998, 9 (4): 38 ~ 43 (in Chinese)  
(郭连骥,李庆芬.利用拓扑关系的图形识别方法.哈尔滨工程大学学报, 1998, 9(4): 38 ~ 43)
- 19 Feng Zhi-Quan, Li Jin-Ping, Chen Xie-Feng *et al.* A new kind of similar invariant and its apply to object recognition algorithm. *Computer Science*, 2002, 29 (9): 360 ~ 361 (in Chinese)  
(冯志全,李金屏,成谢锋等.一种新的相似不变量及其在物体识别算法研究中的应用.计算机科学, 2002, 29(9): 360 ~

- 361)
- 20 Zhu J., Gotoh M. Automatic remeshing of 2D quadrilateral elements and its application to continuous deformation simulation: Part I Remeshing algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 87(1~3): 165~178
  - 21 Gotoh M., Zhu J. Automatic remeshing of 2D quadrilateral elements and its application to continuous deformation simulation: Part II Applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 87(1~3): 179~191
  - 22 Feng Zhi-Quan, Li Jin-Ping, Dong Ji-Wen, Zhao Lei, Cai Jing Computer recognition of 2D objects with continuous deformation. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(12): 1637~1644 (in Chinese)  
(冯志全, 李金屏, 董吉文, 赵磊, 蔡镜. 二维连续形变物体的计算机识别技术研究. *计算机学报*, 2003, 26(12): 1637~1644)
  - 23 Zuo Xiao-Ling, Li Wei-Kan, Liu Yong-Cai. *Discrete Mathematics*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publication House, 1981, 277 (in Chinese)  
(左孝凌, 李为楷, 刘永才. 离散数学. 上海科学技术出版社, 1981, 277)
  - 24 Ruan Qiu-Qi. An integrated model of the computer vision and virtual reality based on LAN. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(3): 247~253 (in Chinese)  
(阮秋琦. 基于 LAN 的计算机视觉与虚拟现实集成模型研究. *计算机学报*, 2001, 24(3): 247~253)
  - 25 Ren Hai-Bing, Zhu Yuan-Xin, Xu Guang-You, Lin Xue-Yin, Zhang Xiao-Ping. Spatio-temporal appearance modeling and recognition of continuous dynamic hand gestures. *Chinese Journal of Computers*, 2000, 23(8): 825~828 (in Chinese)  
(任海兵等. 连续动态手势的时空表观建模及识别. *计算机学报*, 2000, 23(8): 825~828)
  - 26 Gao Wen, Chen Xi-Lin, Yan Jie, Song Yi-Bo, Yin Bao-Cai. Synthesis of facial behavior for virtual human. *Chinese Journal of Computers*, 1998, 21(8): 694~703 (in Chinese)  
(高文, 陈熙霖等. 虚拟人面部行为的合成. *计算机学报*, 1998, 21(8): 694~703)
  - 27 Zhan Yong-Zhao, Song Shun-Lin, She Jiang-Feng, Zhang Jian-Ming. Research and implementation on the method of modeling of facial expression animation. *Journal of Software*, 1998, 9(2): 81~85 (in Chinese)  
(詹永照, 宋顺林等. 面部表情动画建模方法的研究与实现. *软件学报*, 1998, 9(2): 81~85)
  - 28 Athitsos V., Alon J., Sclaroff S., Kollias G. Boostmap: A method for efficient approximate similarity rankings. In: *Proceedings of the CVPR*, Washington, D. C., 2004, 2: 268~275
  - 29 Jiang Zhe-Han. *Introduction to Topology*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publication House, 1978 (in Chinese)  
(江泽涵. 拓扑学引论. 上海: 上海科学技术出版社, 1978)



**FENG Zhi-Quan**, born in 1964, Ph D. candidate, associate professor. His research interests include graphics and image process, VR, HCI and tracking moving 3-D hand

**MENG Xiang-Xu**, born in 1962, Ph D., professor. His

research interests include CAD, CG, VR, CMS and CSCW.

**JIANG Zhi-Fang**, born in 1961, Ph D. candidate, associate professor. His research interests include VR, HCI, database theories and their applications

**WANG Rui**, born in 1979, Ph D. candidate. Her research interests include VR and HCI

**CAI Xun**, born in 1971, Ph D. candidate. Her research interests include VR and HCI

## Background

The project is supported by the National Natural Science Foundation of China (60473103) and (60473127), one of their fundamental task is to provide a human-computer interactive interface, under which the operator can interact with the system by his or her hand, and so, tracking and recognition of human hand is one of the kernel components of the project. Before, authors researched on human gesture modeling and recognition based on digital gloves, and the tracking is accurate, but is poor at flexi-

bility and time complexity. Compared distinctively with the existing methodologies, this paper is dedicated to propose a novel study method to human gesture recognition based on image sequences. Authors introduce the continuous deformation theories into their study and regard changes of hand gesture as continuous deformation. As a result, the performance of tracking and recognition put forward in this paper is greatly improved, especially in flexibility, adaptabilities and time complexity.