

面向信息安全的二维 CAD 工程图复杂度研究

龙 敏¹ 彭 飞²

(长沙理工大学计算机与通信工程学院 长沙 410114)¹ (湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082)²

摘 要 针对二维 CAD 工程图的特点,研究了二维 CAD 工程图复杂度的度量方法。提出了实体复杂度、约束复杂度以及特征复杂度的定义,并分别给出了 3 种复杂度的计算方法。分析与讨论表明,上述 3 种复杂度能有效地对二维 CAD 工程图的复杂度进行度量。最后对二维 CAD 工程图复杂度在工程图内容加密以及数字水印中的应用进行了探讨。

关键词 二维 CAD 工程图,复杂度度量,信息安全

中图法分类号 TP391 **文献标识码** A

Research on the Complexity of Two Dimensional Engineering Graphics for Information Security

LONG Min¹ PENG Fei²

(College of Computer and Communication Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)¹

(School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)²

Abstract Based on the characteristics of two dimensional CAD engineering graphics, the complexity of two dimensional CAD engineering graphic was proposed. The definitions of entity complexity, restriction complexity, and characteristic complexity were given, and their calculation methods were presented, respectively. Analysis and discussion illustrate the proposed method can effectively evaluate the complexity of two dimensional CAD engineering graphics. Finally, the application of the complexity of two dimensional engineering graphics in encryption and watermarking was discussed.

Keywords Two-dimensional engineering graphic, Complexity, Information security

1 前言

与常见的点阵图(也称位图或栅格图像)相比,二维 CAD 工程图是一种矢量图形,其组成要素主要是实体:如线、弧、圆、椭圆等。针对点阵图的复杂度,文献[1]给出了一种通过比较图像位平面的游程统计规律与随机序列游程统计规律的接近程度来定量描述图像复杂度的方法。由于二维 CAD 工程图与点阵图组成要素的不同,该方法无法直接应用于二维 CAD 工程图。文献[2]用复杂度 C 和图形块数 B 来对矢量图形的复杂度进行度量,但分析发现上述两个参数还无法准确描述这类图形的复杂度,尤其是 C 值的度量还存在争议。本文以二维 CAD 工程图为研究对象,从组成图形的实体类型、图形的几何约束以及图形实体的特征与图层特征的一致性等几个方面入手,深入研究二维 CAD 工程图复杂度的表征方法,同时进一步对二维 CAD 工程图复杂度在工程图内容安全中的应用进行了探讨。

2 图形复杂度研究现状

目前针对二维 CAD 工程图复杂度的描述与度量还没有一个公认的方法。从可考的文献来看,尚未发现有关这方面的严格定义。余英林等人提出的有关图形复杂度的论断被大

多人接受:描述给定图案形状所需的、独立的不相关参数越多,每个参数可能采取的状态越多,该图形就越复杂;反之,就越简单^[3]。文献[2]中给出了复杂度 C 值的计算方法,定义为:

$$C = 1 + \frac{(S-A)}{S} \quad (1)$$

式中, A 为给定图形的面积, S 为与给定图形等周长的圆的面积。

以边长均为 l 的正三角形、正四边形和正六边形为例(见表 1),正三角形的 C 值最大,而正六边形的 C 值最小。而根据几何知识,任意正 n 边形的组成要素仅需中心点、半径(或直径)、边数、方位(指内接于圆还是外切于圆两种形式)4 个参数就能够完全确定一个正 n 边形。因此,从这个角度考虑,描述正 n 边形所需的独立不相关的参数是相等的,然而其复杂度 C 值却各不相同,这与文献[3]中的论断是相悖的。与此同时,只能对封闭图形的 C 值进行计算,而对非封闭图形则无法进行有效的度量。

表 1 几种实体的复杂度 C 的计算

	正三角形	正四边形	正六边形
边长	l	l	l
周长	$3l$	$4l$	$6l$
A	$\sqrt{3}l^2/4$	l^2	$3\sqrt{3}l^2/2$
S	$9l^2/4\pi$	$4l^2/\pi$	$9l^2/\pi$
C	1.396	1.215	1.093

到稿日期:2011-02-12 返修日期:2011-05-06 本文受国家自然科学基金项目(61001004,61070195),湖南省自然科学基金项目(09JJ4032,08JJ4020)资助。

龙 敏(1977-),女,博士,副教授,主要研究方向为混沌密码、信息安全,E-mail:caslongm@yahoo.com.cn;彭 飞(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为数字水印、数字取证、混沌密码。

因此,有关二维 CAD 工程图的复杂度的度量有待进一步研究。

3 二维 CAD 工程图复杂度

二维 CAD 工程图主要由各种实体组成,各个实体通过几何约束关系构建成一幅有意义的图形,与此同时,目前各种二

维 CAD 工程图的绘制过程中普遍采用分层的方式,因此有必要从二维 CAD 工程图的实体组成、几何约束以及分层特征等几个角度出发,对二维 CAD 工程图复杂度的度量做进一步的研究。

3.1 实体复杂度

对于不同的实体,考虑构成该实的最少要素,如表 2 所列。

表 2 常见实体组成要素及其复杂指数

实体名称	点	直线	矩形	圆	圆弧
实体图形					
组成要素	一个点	两个点	四个点	一个点+一距离	三个点+一距离
复杂指数	1	2	4	1.5	3.5
实体名称	正 n 边形	椭圆	椭圆弧	多段线	样条曲线
实体图形					
组成要素	一个点(中心)+一距离+方位+边数	一个点(中心)+二距离(两个半轴长度)	三个点(一中心,起点、终点)+二距离(两个半轴长度)	n 点	n 点
复杂指数	2.25	2	4	N	n+1

定义 1(二维 CAD 工程图的实体复杂指数) 在二维 CAD 工程图中,

(1) 单个实体中,点所需的参数最少,其复杂指数为 1;

(2) 对于组成实体要素中的标量信息,如长度、方位等,如果该标量信息的取值空间为无限,其复杂指数为 0.5;若其取值空间为有限,如方位只能取内、外或者上、下等情况时,其复杂指数为 0.25;

(3) 对于一些复杂的实体,如样条曲线,其组成要素除开点以外,还包括构造样条曲线的方程或方法。如果组成的点有 n 个,其复杂指数为 $n+1$,其中的“1”为考虑样条曲线的构造方法。

按照上述定义,可以对几种常见实体的复杂指数进行统计。

在复杂指数定义的基础上,对二维 CAD 工程图的实体复杂度进行定义。

定义 2(二维 CAD 工程图实体复杂度) 实体复杂度描述组成二维 CAD 工程图的实体构成要素的复杂程度。对于一幅二维 CAD 工程图 G ,如果包含 $n(n \geq 1)$ 个实体,第 i 个实体的复杂指数为 α_i ,则二维 CAD 工程图的实体复杂度 $C_E = \sum_{i=1}^n \alpha_i$ 。

定理 1 对于任意两幅二维 CAD 工程图,如果所包含的实体相同,则其实体复杂度相等。

证明:根据定义 1 和定义 2 得证。

根据定理 1 可知,一个相同的实体,无论是放大还是缩小,由于实体复杂指数没有改变,其实体复杂度仍然相同,这一点与文献[2]中复杂度 C 值是一致的。

定理 2 二维 CAD 工程图的实体复杂度与其所包含的实体个数单调递增。

证明:根据定义 2 得证。

定义 3(二维 CAD 工程图平均实体复杂度) 二维 CAD 工程图平均实体复杂度 \bar{C}_E 是指所有图形中所有组成实体的平均复杂程度。二维 CAD 工程图的平均实体复杂度 \bar{C}_E 可

通过式(2)进行计算:

$$\bar{C}_E = \frac{C_E}{n} \quad (2)$$

3.2 约束复杂度

根据工程力学的知识,刚体在二维空间中存在三个自由度,分别是质心沿 x, y 轴移动的二个平动自由度 U_x, U_y 以及一个绕质心 O 转动的转动自由度 ROT ;而对于质点来说,它在平面上的两个自由度分别是沿 x, y 轴移动的两个平动自由度 U_x 和 U_y ,分别如图 1 和图 2 所示。

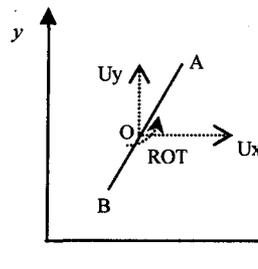


图 1 刚体自由度示意图

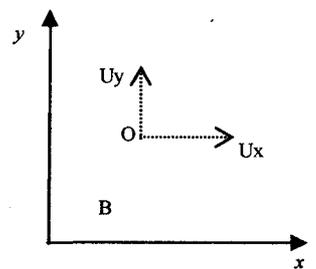


图 2 质点自由度示意图

我们假设组成二维 CAD 工程图的各个实体为刚体(点则假设为质心),则在没有任何约束的条件下,每个实体的自由度为 3(对于点来说只有 2 个)。

而实际上,在二维 CAD 工程图中,各个实体之间是存在约束关系的,一旦存在约束,自由度就会减少。

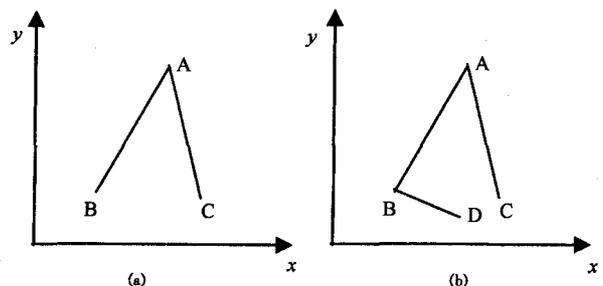


图 3 受约束的刚体自由度示意图

如图 3 所示,以线段 AB 为例,在图 3(a)中,有另一条线

段 AC 与之相连, 它们的相连称之为一个约束, 则线段 AB 的自由度只剩下一个绕顶点 A 转动的自由度, 也就是线段 AB 的自由度由没有约束前的 3 个减少为 1 个。同理在图 3(b) 中, 线段 AB 分别与线段 AC 以及线段 BD 相连, 则存在两个约束, 其自由度为 0。

同时, 相关的分析方法也可以应用其他的实体的自由度计算。

定义 4 (二维 CAD 工程图约束复杂度) 约束复杂度描述二维 CAD 工程图的组成实体之间的约束程度。对于一幅二维 CAD 工程图 G , 如果包含 $n(n \geq 1)$ 个实体, 第 i 个实体的自由度为 F_{E_i} , 则二维 CAD 工程图的约束复杂度为:

$$C_F = \sum_{i=1}^n F_{E_i} / 3n \quad (3)$$

根据定义 2, 二维 CAD 工程图约束复杂度计算的一般方法为:

(1) 读取图形 G 的实体, 并记录所有实体的参数;

(2) 对于其中任一实体 E_i , 如果另外不存在其他实体和该实体相交, 则记该实体的自由度为 $F_{E_i} = 3$; 如果另外存在有实体与该实体相交, 且有一个交点时, 记该实体的自由度为 $F_{E_i} = 1$; 如果另外存在实体与该实体相交, 且交点大于或等于 2 个时, 记该实体的自由度为 $F_{E_i} = 0$;

(3) 按照 (2) 的方法对每一个实体进行自由度的计算;

(4) 将所有实体的自由度累加, 得到图形的总自由度数 $\sum_{i=1}^n F_{E_i}$;

(5) 计算二维 CAD 工程图的约束复杂度为: $C_F = \sum_{i=1}^n F_{E_i} / 3n$ 。

3.3 分层特征复杂度

层是实体的容器, 目前的大部分 CAD 系统都支持分层绘图。层可以简单而形象地理解为: 一层挨一层放置的透明的电子纸。我们可以根据需要增加或删除某一层或多个层。在每一层上, 都可以进行图形绘制, 并能够设置任意的线型与颜色。

从工程角度来看, 设计师在进行工程图纸的设计时, 一般都会按照严格的规范来进行。也就是说, 通常状况下任一实体的通用特性(如颜色、线型、线宽等)与其层的对应特性都是一致的, 因此, 有如下假设:

假设 1 对于一幅规范的二维 CAD 工程图, 实体的通用特性与其所在层的通用特性一致。

对于一幅给定的二维 CAD 工程图 G , 实体集 E 表示为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n\}$, 实体 $e_i (1 \leq i \leq n)$ 的通用特征 C_i 表示为 $C_i = C_i^1 C_i^2 \dots C_i^k$, 实体 e_i 所在层的通用特征 $C_{L_i} = C_{L_i}^1 C_{L_i}^2 \dots C_{L_i}^k$, 其中, 有多个实体可能属于同一层。工程图的特征 S 表示为 $S = s_1 s_2 \dots s_i \dots s_n$, 其中 $s_i \in \{0, 1\}$ 。则可按如下过程对二维 CAD 工程图的特征进行抽取:

(1) 获取第一个实体 e_1 的通用特征 $C_1 = C_1^1 C_1^2 \dots C_1^k$;

(2) 获取第一个实体 e_1 所在层的通用特征 $C_{L_1} = C_{L_1}^1 C_{L_1}^2 \dots C_{L_1}^k$;

(3) 对 C_1 和 C_{L_1} 进行比较: 只要存在 $C_i^j \neq C_{L_i}^j (1 \leq i \leq k)$, 则 $s_i = 1$, 否则 $s_i = 0$;

(4) 从第一个实体到第 m 个实体, 重复 (1) - (3) 的操作, 从而得到工程图的特征 $S = s_1 s_2 \dots s_i \dots s_n$ 。

定义 5 (二维 CAD 工程图分层特征复杂度) 分层特征复杂度描述了二维 CAD 工程图的规范程度。分层特征是指二维 CAD 工程图中所有特征与其所在层的特征不一致的程度。

其计算方法为:

$$C_C = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n} \quad (4)$$

易知, $0 \leq C_C \leq 1$ 。

4 分析与讨论

实体复杂度 C_E 、约束复杂度 C_F 以及分层特征复杂度 C_C 分别表征了二维 CAD 工程图在不同关注要素下的复杂程度, 这 3 个指标一起构成了二维 CAD 工程图的复杂度的度量指标。通过分析, 可以得到:

定理 3 对于两幅包含相同实体的二维 CAD 工程图, 在分层特征复杂度 $C_C = 0$ 情况下, 则混乱程度较高的二维 CAD 工程图的复杂度较高。

证明: 略。

相类似地, 可以得到:

定理 4 对于两幅包含相同实体的二维 CAD 工程图, 在约束复杂度 C_F 相等的情况下, 则规范性较低的二维 CAD 工程图的复杂度较高。

证明: 略。

这里, 在 AutoCAD2006 的 VBA 中, 我们实现了本文的复杂度计算方法。以图 4(a) 为例, 经计算该二维 CAD 工程图中总共包含的实体数为 528 个, 实体复杂度为 825.5, 约束复杂度为 0.2064, 特征复杂度为 2.6515×10^{-2} 。通过以上复杂度值可以计算出平均实体复杂度为 1.5634, 表明该二维 CAD 工程图的组成主要是直线和圆; 约束复杂度较低, 表明该二维 CAD 工程图具有较好的几何约束; 特征复杂度数值较低, 则表明该二维 CAD 工程图具有较好的规范性。

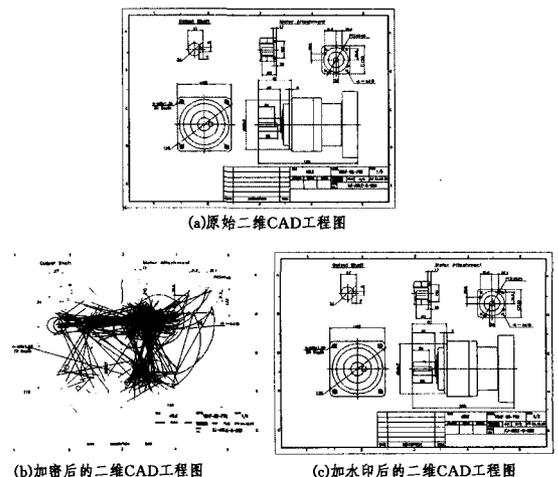


图 4 二维 CAD 工程图示例

此外, 采用文献[4]中的二维 CAD 工程图加密算法对图 4(a) 进行加密, 得到加密后的二维 CAD 工程图, 如图 4(b) 所示; 采用文献[5]中的二维 CAD 工程图水印算法在图 4(a) 中嵌入水印, 得到含水印二维 CAD 工程图, 如图 4(c) 所示。经过计算, 其复杂度结果分别如表 3 所列。由表 3 可知, 无论经过加密还是嵌入水印, 二维 CAD 工程图的实体数以及实体复

杂度均不变,表明加密算法和水印算法没有改变工程图的实体个数以及实体类型;加密和嵌入水印后约束复杂度的增加,则表明经过加密或嵌入水印后实体间的约束减少;加密后的二维 CAD 工程图与原始二维 CAD 工程图的特征复杂度一致表明加密算法没有改变二维 CAD 工程图的分层特征,这与文献[4]中算法的原理是一致的,而嵌入水印后二维 CAD 工程图的特征复杂度大大增加,这是因为文献[5]中的水印嵌入方法是通过修改实体线型来嵌入水印,从而导致特征复杂度的大大增加。因此,可以通过分析加密后或嵌入水印后二维 CAD 工程图复杂度的变化程度来衡量加密算法或水印算法的性能。

表3 复杂度计算结果列表

二维 CAD 工程图类型	实体数	实体复杂度	约束复杂度	特征复杂度
原始二维 CAD 工程图	528	825.5	0.2064	2.6515E-2
加密后的二维 CAD 工程图	528	825.5	0.2468	2.6515E-2
加水印后的二维 CAD 工程图	528	825.5	0.2374	19.6970E-2

由以上分析可知,实体复杂度 C_E 实际上是从图形的组成要素出发对二维 CAD 工程图的复杂度进行度量,图形的组成实体越多,其实体复杂度越高,同时,图形中包含高复杂指数的实体越多,其实体复杂度也越高。另外,约束复杂度 C_F 描述了组成图形的各实体的几何约束关系,这种约束关系对实体参数的取值有直接的影响。因此这与文献[2]中“描述给定图案形状所需的、独立的不相关参数越多,每个参数可能采取的状态越多,该图形就越复杂;反之,就越简单。”的论断是一致的。而特征复杂度 C_C 的引入则进一步描述了二维 CAD

工程图规范程度。

结束语 本文从实体复杂度、约束复杂度以及分层特征复杂度 3 个方面定量分析和描述了二维 CAD 工程图的复杂性度量方法,并给出了上述 3 种复杂度的计算方法。分析与讨论表明上述 3 种复杂度能对二维 CAD 工程图的复杂度进行有效的度量,同时可通过分析加密后的二维 CAD 工程图的复杂度的变化程度,来评测加密算法以及水印算法的性能。但这 3 种复杂度之间的关系、3 种复杂度与二维 CAD 工程图总体复杂度之间的关系及其在二维 CAD 工程图内容安全中的进一步应用还有待深入研究。

参考文献

- [1] 郭云彪,尤新刚,张春田,等. 面向信息隐藏的图像复杂度研究[J]. 电子学报,2006,34(6):1048-1052
 - [2] 段先云,邓学雄,左启阳. 级进模刃孔图形复杂度的研究[J]. 工程图学学报,2006,5:94-97
 - [3] 余英林. 数字图像处理与模式识别[M]. 广州:华南理工大学出版社,1990:186-207
 - [4] Li Shuai-jun, Peng Fei. An Encryption Algorithm for 2D Engineering Graphics' Content Based on Chaos Systems[C]// Proc of 9th International Conference for Young Computer Scientists (ICYCS2008). Zhangjiajie, 2008:1435-1439
 - [5] Fei Peng, Guo Re-si, Li C T, et al. A Semi-fragile Watermarking Algorithm for Authenticating 2D CAD Engineering Graphics Based on Log-Polar Transformation[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(12):1207-1216
-
- (上接第 256 页)
- 标定法精度有待提高,但是如果有一种标定模板能在红外场景下精确提取和匹配角点,立体标定法也不失为一种好方法。
- 结束语** 本文研究了四路摄像头协同多重触控系统标定问题,提出了 3 种构建触点方向直线的方法,即查找表法、消失点法和立体标定法,以解决多触点精确定位问题。查找表法通过在交互区边框上设定标定点,并通过插值查找触点对应的标定点,以光心和标定点构建触点方向直线;消失点法利用触点方向上的消失点和光心构建触点方向直线;立体标定法利用极限几何约束和反投影射线构建触点方向直线。然后对每个触点目标从每路摄像头中选择方向直线,如果 4 条方向直线相交则为真实触点,否则视为伪点予以过滤,从而解决了多触点遮挡问题。并且对 3 种方法进行了误差分析,结果表明在较小尺寸平台用查找表法标定最合适,而在大尺寸平台用消失点法最合适,而立体标定法精度有待提高。
- 下一步我们还将对四路摄像头协同多重触控系统各个环节进行改进,如多触点跟踪^[7],通过对视频序列上的多触点目标建立关联,确定触点的运动轨迹,以及定义与识别基于触点运动轨迹的多重触控手势^[8]等等,以提高系统的鲁棒性。另外还将进一步探索多重触控系统的应用模式,如大尺寸平台多用户基于协同手势的交互^[9]、3D 物体的操作^[10]、与其它交互设备的融合等等。
- ## 参考文献
- [1] Bill B. Multi-touch systems that I have known and loved [OL]. <http://www.billbuxton.com/multitouchOverview.html>, 2008-12-20
 - [2] 王德鑫,张茂军,熊志辉,等. 四路摄像头协同的多重触控系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(10):1507-1512
 - [3] 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京:科学出版社,2008
 - [4] 何援军. 图形变换的几何化表示[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(4):723-728
 - [5] Torr P H S. A structure and motion toolkit in matlab[R]. Cambridge: Microsoft Research, 2002
 - [6] Camera Calibration Toolbox for Matlab [OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html, 2008-12-20
 - [7] Khurram S, Mubarak S. A Non-iterative Greedy Algorithm for Multi-frame Point Correspondence [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(1): 51-65
 - [8] Wu M, Shen C, Ryall K, et al. Gesture registration, relaxation, and reuse for multi-point direct-touch surfaces[C]// Proceedings of The First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-computer Systems. Adelaide, 2006: 183-190
 - [9] Morris M R, Huang A, Paepcke A, et al. Cooperative Gestures: Multi-user Gestural Interactions for Collocated Groupware[C]// Proceedings of CHI 2006. ACM Press, 2002: 1201-1210
 - [10] Frank S, Klaus H, Johannes S, et al. Multi-touching 3 D Data: Towards Direct Interaction in Stereoscopic Display Environments Coupled with Mobile Devices[C]// Proceedings of PPD 2008: Workshop on Designing Multi-touch Interaction Techniques for Coupled Public and Private Displays, as part of AVI 2008. Naples, Italy, May 2008: 46-49