

一种基于正等轴测草图的三维重构算法

伍晓亮 田怀文

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

摘要 为便于实现平面立体的三维重构,提出一种基于正等轴测草图的重构算法。首先按面片组织轴测草图轮廓信息,通过交互指定父面,并建立各个面片之间的关系。其次对轴测草图的父面进行投影逆变换求解。然后将子面绕与父面连接的公共棱边旋转,并进行分类计算,当立体的表面积最大时,生成相应的目标形体。给出了用 Matlab 实现算法的关键技术和测试算例,从而快速实现平面立体的三维重构。实验结果表明了该算法的有效性和实用性。

关键词 轴测草图,三维重构,草图识别,投影变换,平面立体

中图分类号 TS941.26 **文献标识码** A

Method of 3D Reconstruction Based on Given Axonometric Sketching

WU Xiao-liang TIAN Huai-wen

(Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract This paper presented a method of 3D reconstruction based on given axonometric sketching to realize 3D reconstruction of planar object conveniently. Firstly, according to the outline information of the patch organization of axonometric sketching, it establishes the relationship between all patches by interactive designated father-face. Secondly, it resolves the father-face of axonometric sketching by projection inverse transformation. Last, it rotates the child-faces around the edge linked to the father-face, and calculates them categorically when the area of the tridimensional reaches the maximum, generates the accurate target shape. The key technology and test drawings of the method realized by Matlab were given in this paper. The experiment results prove that the proposed method realizes 3D reconstruction of axonometric sketching of general planar object with a certain availability and practicality.

Keywords Axonometric sketching, 3D reconstruction, Sketch recognition, Projection transformation, Planar object

三维重构是计算机图形学领域近 30 年的经典难题。近年来,模型界面的研究趋向于从草绘到三维重构的自动化进程^[1]。草图作为工程设计的有效辅助手段,能快速表现用户的设计创意,在工程应用各流程中发挥巨大的作用^[2]。用户由先验知识,根据手绘草图可直接推断对应的三维几何形体。而从轴测草图求解三维空间信息是从低维信息反求高维信息的过程,从数学推理角度看是不可能的,如何让计算机对草图进行学习和理解,并实现其三维重构,试图解决这种几何计算的方法一直没有停止过。

基于笔触、基本图元、几何特征和组合图形表示的识别技术相继开展^[3],QIN 描述了一个基于草图的三维 CAD 初步模型,提出利用自适应和模糊知识将笔画识别为直线、圆、圆弧等基本形状^[4];西北工业大学的宋保华提出分步逐层的草图识别方法和基于笔输入方式的三维建模^[5];袁浩等实现了隐藏元素的推理和三维重建^[6]。Pedro Company 等做了基于草绘建模的重构的相关研究调查^[7,8],Matthew T. Cook 等更进一步丰富了三维重构的技术^[9]。Chen 等采用最大似然估计识别用户绘制的形状构成^[10],在一定程度上突破了手势交

互建模方式的局限性,但其只针对 2.5 维模型的生成;Contero M 等提出在用户草绘过程中重建三维模型^[11],但这涉及到 WIMP 的复杂操作过程和频繁的模式切换,影响草绘交互的自然性和设计的流畅性。以上研究从不同角度基本实现了平面立体的三维重构,但部分算法计算复杂,目前仍有应用领域的限制,不能完全适应产品概念设计领域的草图识别。

据此以手绘二维轴测草图为研究对象,以重建草图三维线框模型为目标,提出重构算法实现策略,研究如何进行草图信息组织和草图美化以及求解平面立体表面积的相关技术,探索平面立体表面积与可行解之间的关系,较好地解决了轴测草图的识别重构问题,为基于草图的三维重构研究进行了有益的探索。

1 算法基本思想

手绘输入轴测图,如图 1(a)所示。假定研究对象是单一的、连续不间断的实体,结合人工读图的基本原理和认知过程,对其进行规整。由于绘制的线条图多为消隐的轴测图,目标形体往往不唯一,只取最有可能的常规形状,如图 1 所示。

到稿日期:2012-11-26 返修日期:2013-02-23 本文受中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU11CX022)资助。

伍晓亮(1987—),女,硕士生,主要研究方向为计算机图形学,E-mail: wuxiaoliang1987@yeah.net;田怀文(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为计算机图形学、计算机视觉。

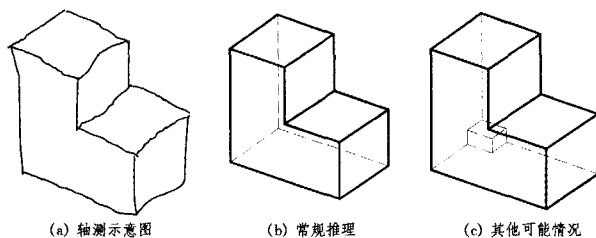


图1 目标形体的多解性

在概念设计阶段,绘制的设计草图绝大部分是正等轴测图或较为接近正等轴测图,故选择正等轴测图作为研究对象。

根据轴测投影理论可知,正等轴测投影的形成过程分为以下3步^[12]:

- (1)绕Y轴顺时针旋转 α 角,令变换矩阵为 T_1 ;
- (2)绕X轴逆时针旋转 β 角,令变换矩阵为 T_2 ;
- (3)向XOY平面作正投影变换,令变换矩阵为 T_3 。

由此可以得到正等轴测投影的变换矩阵 T 为:

$$T = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \quad (1)$$

故三维立体各顶点 $V(X,Y,Z,1)$ 经过正等轴测投影变换后,由 $V \cdot T = v$ 可得到其二维坐标 $v(x,y,0,1)$ 。本文是在已知轴测图中各顶点的二维坐标的前提下,通过轴测投影逆变换即 $V = v \cdot T'$ (理论上可通过此式反求出其三维信息)实现目标形体的三维重构。

在重构过程中,可任意指定一个面片开始反算,称其为父面,将其余各二维面片定义为子面。首先利用上述理论求出父面各顶点的三维信息,完成父面的创建;其次,由于父面已求出,各子面的部分顶点已是三维点,根据子面和父面的连接关系,对各子面进行分类依次求解,直至所有的子面反算结束;最后对重构结果进行美化和修正。

2 三维重构关键技术

根据上述思想,实现轴测草图三维重构的关键技术主要有:建立算法数据结构、创建父面、创建子面,以及建立算法运行终止条件。

2.1 算法数据结构

建立数据结构,一方面用于表达轴测草图信息,另一方面用于支撑重构算法过程。为此,根据绘制的轴测草图的构图特点以及算法需要,建立面表、顶点表,以及表征父面和子面关系的连接表。其中,顶点表用于记录草图的二维数据信息,即已知各顶点的二维坐标。

以图1所示轴测图^[13]为例,目标实体可能是一个截去一角的长方体,规整后的轴测草图如图2所示。首先确定绘制的二维轴测草图的面数,将每个面的顶点按照一定的顺序进行标号,如图3所示。

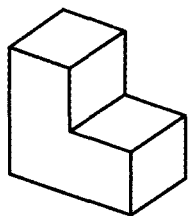


图2 轴测示意图

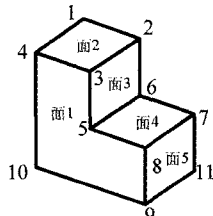


图3 规整的轴测图

图3中,共有5个可见面片,11个可见顶点,各面的顶点数最多为6,据此建立面表 $F(\text{Face})$ 。

$$F = \text{Face} = \begin{bmatrix} 6 & 10 & 9 & 8 & 5 & 3 & 4 & 10 \\ 4 & 4 & 3 & 2 & 1 & 4 & 0 & 0 \\ 4 & 2 & 3 & 5 & 6 & 2 & 0 & 0 \\ 4 & 6 & 5 & 8 & 7 & 6 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 8 & 9 & 11 & 7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

面表 F 中,第 $i(i=1,2,\dots,5)$ 行表示第 i 个面,第一列为各面片包含的顶点数 n ,其余各列 $j(j=2,3,\dots,n)$ 为各面片的顶点。将各面的顶点按一定的顺序排列,例如沿逆时针方向排序,其中 $F(i,n+2)=F(i,2)$ 。不足的位置用0补齐。本文中,从面1开始反算,故面1为父面,其余各面定义为子面。

例如面表中第二行 $[4 \ 4 \ 3 \ 2 \ 1 \ 4 \ 0 \ 0]$ 表示面2由4个顶点围成,从顶点4出发,沿逆时针方向用各顶点表示该面,使其形成封闭图形,首尾相接表示为4-3-2-1-4,其余位置用0补齐。

为表示其他各面和父面的连接关系,建立连接表 $L(\text{Link})$ 。面表 F 中相邻两个顶点表示两个面的公共棱,若该棱连接了子面,则将子面序号输入连接表 L 中,反之,记为0。重复出现的面仅标记1次。例如如图3中,顶点10和顶点9没有连接子面,记为0;顶点9和顶点8所在的棱连接了子面5,则记为5。同理,依次完成连接表 L 的建立,如下所示:

$$L = \text{Link} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 5 & 4 & 3 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2 创建父面

根据算法的基本思想,需要交互指定父面,并利用轴测投影逆变换计算重构父面。但在式(1)中,由于投影矩阵 T_3 不可逆,因此需修正变换矩阵 T ,使其可逆。

在反求过程中,用父面的单位法向量 $(a,b,c,0)$ 修正变换矩阵 T 的第三列,得到修正矩阵 R ,此时 R 可逆,即

$$R = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \cdot \sin\beta & a & 0 \\ 0 & \cos\beta & b & 0 \\ -\sin\alpha & -\cos\alpha \cdot \sin\beta & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

用修正矩阵 R 代替变换矩阵 T ,则 $V = v \cdot R'$,据此求出父面各顶点的三维坐标,即 $[X \ Y \ Z \ 1] = [x \ y \ 0 \ 1] \cdot R'$ 。

在指定父面时,为便于求出其单位法向量,可选取投影面的平行面作为父面。

2.3 创建子面

为便于分类,若各面片还是二维面,则将其标记为0,已求出其三维信息的面标记为1。本算例中,此时父面1已求出,记作 $\text{Sign}(1)=1$;其他子面尚未建立,记作 $\text{Sign}(i)=0, i=2,3,\dots,5$ 。

可将各子面分为以下几种类型:

(1)TwinFace:连接表中,满足 $L(i,j)>0, L(i,j+1)>0$,且 $\text{Sign}(L(i,j))=0$ 的两个面。同时满足以上条件的面称为父面的两个TwinFace面。

如图3所示,由于父面1已创建,连接表中 $L(1,3)=5, L(1,4)=4$,且此时各子面仍为二维面片,故子面5和子面4满足TwinFace条件。顶点8、9所在的棱为面5和面1的公共棱,亦即该公共棱的三维信息已知,若能求出面5的另外一

个顶点,即可求出面5的法向量;同理,可求出面4。

在处理上述 TwinFace 中,问题的关键在于求出面4、5的公共点。旋转面片,使面5绕顶点8、9所在公共棱旋转,面4绕顶点8、5所在的公共棱旋转,求出任意时刻所围成的平面立体的表面积。经验证,当平面立体的表面积取最大值时,求得可行解。

据此求出面5和面4两个子面的三维信息。故此时 $Sign(5)=1, Sign(4)=1$ 。

(2) BrotherFace: 满足 $L(i, j) > 0, L(i, j+1) > 0$, 且 $Sign(L(i, j)) = 1$ 的面。同时满足上述条件的面称为 BrotherFace。

图3中,现已求出面1、4、5的三维面。在连接表中, $L(1, 5)=3, L(1, 6)=2$, 且 $Sign(4)=1$, 此时子面3满足 BrotherFace 的所有条件。

在面3中,顶点3、5所在的棱同时在面1上,顶点5、6所在棱亦在面4上,均已求出,故可确定面3的法向量。根据旋转理论以及面3的二维顶点,求出面3的所有三维信息。

同理,可求出面2的三维面。至此,对于图3中所示轴测草图,所有面片已反求出其三维信息。

(3) SingleFace: 满足 $L(i, j) > 0$, 且 $L(i, j+1) = 0$, 且 $Sign(L(i, j)) = 0$ 的面。本例中尚未出现此类型的面片。对于此类型的面片,首先找出与父面相邻的公共棱,将该面片上的二维点绕公共棱旋转任意角度,求出旋转后的三维面,当该面片面积最大时,求得可行解。

以上3种类型涵盖了连接表中所有子面与父面的连接关系。根据子面满足的条件,执行相应的程序,即可求出其三维信息,实现目标形体的三维重建。

2.4 平面立体表面积计算

在创建子面的过程中,算法的终止条件是各面片围成的平面立体表面积取得最大值。下面介绍平面立体表面积的计算。

如图4(a)所示,已知三维平面 α 的单位法向量为 n , 在平面 α 内, γ 为由 n 个顶点围成的多边形。在平面 α 外任意找一点 P , 连接点 P 和多边形 γ 的各顶点, 形成平面立体 n 棱锥。图4(b)所示子棱锥中, P_0 为点 P 在平面 α 的垂足, θ 为棱锥各侧面与平面 α 的二面角的平面角, β_i 为侧面的面积矢量^[14]。

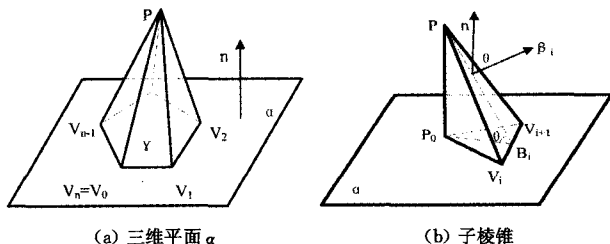


图4 三维平面表面积示意图

即 $\beta_i = \frac{1}{2} (PV_i \times PV_{i+1})$, 其中 $V_n = V_0, i=0, 1, \dots, n$ 。

则三角形 $P_0V_iV_{i+1}$ 的面积为:

$$A(\triangle P_0V_iV_{i+1}) = \frac{1}{2} |P_0V_i \times P_0V_{i+1}| \quad (2)$$

三角形 PV_iV_{i+1} 的面积为:

$$A(\triangle PV_iV_{i+1}) = \frac{1}{2} \vec{n} \cdot |PV_i \times PV_{i+1}| \quad (3)$$

以上式子,规定平面 α 各顶点沿逆时针方向为正,顺时针

为负。平面 α 的总面积为各部分带有符号的三角形面积之和,不论平面为凸面还是凹面,都不影响总面积,即平面 α 的面积为:

$$A(\alpha) = \sum_{i=0}^{n-1} A(\triangle P_0V_iV_{i+1}) = \frac{1}{2} \vec{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} P_0(V_i \times V_{i+1}) \quad (4)$$

P 为平面 α 外的任意一点,为计算方便,取点 P 为原点,故 $PV_i = V_i$, 则上述公式可简化为:

$$A(\alpha) = \frac{1}{2} \vec{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (V_i \times V_{i+1}) \quad (5)$$

由式(5)可知,若已知平面多边形各顶点,即可求出任意三维平面的面积,其中该平面的单位法向量可由多边形顶点求出。但由式(5)计算的三维平面面积是带有符号的,故在平面立体中,对各平面面积取绝对值,进行叠加,即可求出平面立体的表面积。

3 算法实现

3.1 实验及结果分析

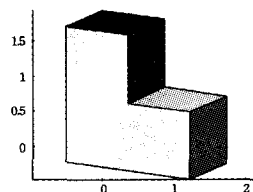
为便于获得轴测图各顶点的二维坐标,可通过建立对应的三维形体并对其进行投影变换而求出,然后比较重构的三维形体与之前建立的三维形体,以验证算法的可行性。

将三维体绕 y 轴顺时针旋转 α 角,绕 x 轴逆时针旋转 β 角,向 XOY 平面作正投影变换,易求得三维体各顶点的二维坐标。

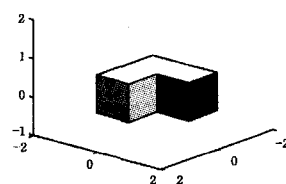
在空间直角坐标系中,建立图2所示轴测示意图对应的三维形体,各顶点三维坐标如矩阵 A_1 所示。

各顶点的二维坐标已求出,根据本文提出的算法,用 Matlab 为软件实现工具,编译相关程序,依次求出各面。由重建结果可知,程序运行时间为 0.4006s,重构的三维体各顶点的坐标如矩阵 B_1 所示,比较重构结果与原始坐标,误差率不超过 0.415%。图5为测试草图2计算出的一个实例,其中图5(a)为根据二维顶点绘制的轴测草图,图5(b)为重构的目标三维形体。

$$A_1 = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \\ 0 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \\ 0 & 1.9998 & 1.9999 & 1 \\ 0.9999 & 1.9917 & 1.9999 & 1 \\ 0.9999 & 1.9999 & 1.0000 & 1 \\ 0 & 2.0000 & 1.0000 & 1 \\ 0.9999 & 1.0000 & 1.0000 & 1 \\ 0.9999 & 0.9999 & -0.0001 & 1 \\ 2.0000 & 0.9999 & -0.0001 & 1 \\ 2.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1 \\ 2.0000 & -0.0001 & 1.0000 & 1 \\ -0.0000 & 0.0000 & 1.0000 & 1 \\ 2.0000 & -0.0000 & -0.0001 & 1 \end{bmatrix}$$



(a) 二维轴测草图



(b) 目标形体

图5 重建结果

图2所示轴测图中,从选定的父面开始计算,其余各面片均与父面相邻,故根据文中提出的算法可快速准确实现其三维重构。

在复杂的机械零件中,并不是所有的面均与选定的父面相邻。将与父面直接相邻的子面称为第一类子面,对于此类子面,可根据文中提出的算法实现重构;其余子面中,根据轴测草图的连接关系,与第一类子面相邻的子面称为第二类子面,按照上述方法在求出第一类子面后,可视其为第二类子面的父面;以此类推,完成各个子面的重建。

3.2 复杂算例

通过其他一些测试图形来验证本算法的可行性和普适性,如图6(a)所示测试算例^[13],这与之前的测试案例有所不同,该类算例没有镜面对称性和轴对称性,并且不是所有的面都与父面相邻。对各面片进行排序标号,如图6(b)所示。

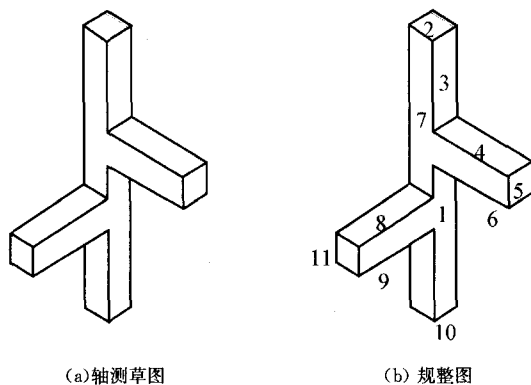


图6 测试算例

图6(b)中,选面1为父面,则与之相邻的面6、10、9、11、8、7可视为其第一类子面;面2、3、4、5与面1不相邻,为第二类子面。

根据算法思想,建立数据结构,编译相关程序,图7(a)为其相应二维轴测图,由于Matlab绘制的各二维面片有先后顺序,可能会存在一定范围的相互遮挡。目标形体如图7(b)所示。

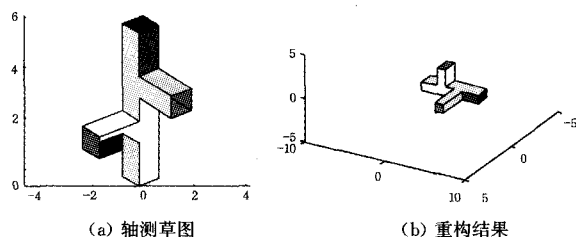


图7 运行结果

经验证,图6所示算例可得到预想结果。此类型的各面片均为投影面平行面的轴测草图,利用本算法容易实现其三维重构。

对于复杂的机械零件,如通过截切、叠加的综合型的平面立体,其轴测图中存在一般位置平面,下面对该类问题进行相关探讨。

图8(a)所示为平面立体轴测图,与图7所示算例不同的是,该类算例包含一般位置平面。对于此类型轴测草图,将各面片进行分类、规整及标号,面2、3、9为一般位置平面。重构过程中,可从面片1开始计算,即选面1为父面,则与其垂直并相邻的面为第一类子面,如面6、7、8、10、11、12、15等面片;面2、4、9等可视作面片6的子面,面3、5可视作面片8的子面,同理,面13、14等可视作面片10的子面。根据算法思想即可实现其三维重建,如图9所示。

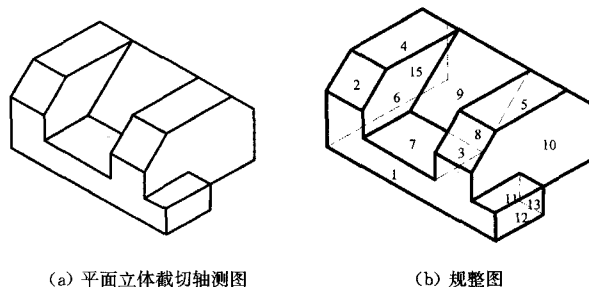


图8 平面立体的截切

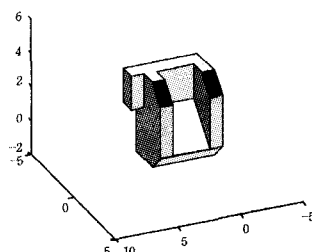


图9 重建结果

上述算例,程序运行时间为0.1477s,误差率不超过0.005%,验证了文中算法同样适用于含有一般位置平面的复杂平面立体。

由此得出,对于该类由叠加截切而成的复杂轴测图,依次对各子面进行分类求解,即可实现其三维重构。

4 实验结果与分析

根据以上算例,可以得出以下结论:

1. 各面片旋转的终止条件是面片所围的平面立体面积最大;
2. 平均重构精度高于99%,具有较好的效果;
3. 与已有算法相比,大大缩短了时间开销,提高了重构效率,为设计人员捕捉瞬间灵感争取了宝贵时间;
4. 避免了现有算法的复杂操作和应用领域的限制,可快速、有效求解复杂程度不同的正等轴测图的三维重构。

为验证本文方法的有效性,文中通过3个不同的典型案例进行试验验证。和已有三维重构的算法不同,本方法对轴测草图加以旋转而求得可行解,强调模型的连接关系,其重构过程快速简洁,大大缩短了设计者的绘制时间。根据本文方法重构得到的模型符合轴测草图的结构特点,各组成单元的尺寸也与用户所表达的意思高度相符,支持用户自由而快速地绘制所需的三维模型。

结束语 本文提出通过轴测草图面片的旋转实现目标形体的三维重建策略可行,设计数据结构有效,通过理论分析和算例测试验证了算法的有效性。所采用的算法实现了预期效果,具有很好的实时性,可实现以截切、叠加为主的平面立体的三维重构,在草图识别领域中有一定的应用参考价值。下一阶段将在此基础上开展进一步的研究和实验,提高算法的智能性和时间效率,深入分析复杂案例以及曲面立体的三维重构,拓展算法的适用范围。

参考文献

- [1] Olsen L, Samavati F F, Sousa M C, et al. Sketch-based modeling: A survey [J]. Computers & Graphics, 2009, 33: 85-103

(下转第316页)

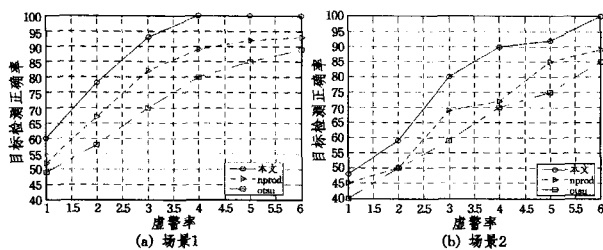


图 11 两组场景 3 种方法 ROC 曲线比较

4 实验结论

通过实验,可得如下结论:

1) 针对目标处于复杂背景时,直接提取特征进行匹配容易受到相似目标的影响、识别率不高的问题,本文提出的目标识别算法在多级形态学目标检测后运用 sigmoid 函数进行筛选,缩小了下一步目标提取的搜索范围,并引入 Haar 小波方法从区域纹理入手,综合考虑了候选区域及其周边 8 方向邻域的相似性关系,明确了图像目标识别中对红外实时图目标的提取,并运用目标模板的先验知识进行目标识别。

2) 为检验本文所提算法的性能,针对几种不同红外图像进行仿真试验、分析。相对于经典的模板匹配算法和 otsu 阈值检测算法,本文提出的算法目标检测率较高,提升了识别精度。

3) 本文算法有效解决了前视红外复杂地面固定目标无可用基准图、背景干扰严重、匹配识别难的技术问题,对于复杂地面目标前视红外图像的匹配识别具有一定应用价值。

参考文献

- [1] 同武勤,凌永顺,黄超超,等. 数学形态学和小波变换的红外图像处理[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 139-143
- [2] 汪洋. 面向自动目标识别的图像压缩关键技术研究[D]. 长沙:

国防科学技术大学, 2006

- [3] Rivest J. Morphological operators on complex signals [J]. Signal Processing, 2004, 84(1): 133-139
- [4] Angulo J. Geometric algebra colour image representations and derived total orderings for morphological operators—Part I: colour quaternions [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2010, 21(1): 33-48
- [5] Heijmans H J A M, Beatrice P P, Piella G. Building nonredundant adaptive wavelets by update lifting [R]. Research Report PNA-R02xx. CWI, Amsterdam, 2002
- [6] 王广君, 王伟, 等. 基于 Haar 小波的地形匹配技术 [J]. 电波科学学报, 2002, 17(3): 240-244
- [7] 宋燕星, 袁峰, 丁振良. 目标感兴趣区域检测算法 [J]. 吉林大学学报, 2010, 40(5): 53-54
- [8] 崔屹. 图像处理与分析——数学形态学方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [9] Maragos P. Tutorial on advances in morphological image processing and analysis [J]. Optical Engineering, 1987, 26(7): 623-63
- [10] 张丽红, 张慧, 王晓凯. 边缘检测和区域生长相结合的图像 ROI 提取方法 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(4): 234-237
- [11] 夏晶, 孙继银. 基于区域生长的前视红外图像分割方法 [J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 107-110
- [12] Hertz J, Plamer R. Introduction to the neural computation [M]. Addison Wesley, California, 1991
- [13] 曹跃文, 柳健. 基于 Haar 小波的海底地形匹配方法研究 [J]. 海军工程大学, 2005, 17(6): 62-71
- [14] 高晶, 孙继银, 等. 基于区域模糊阈值的前视红外目标识别 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 3056-3063
- [15] D D S, Mh E, V R. Max-mean and max-median filters for detection of small targets [A] // SPIE [C]. 1999: 74-83
- [16] 程蕾. 基于局部特征几何结构的目标识别方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010

(上接第 278 页)

- [2] 宋沫飞, 孙正兴, 张尧辉, 等. 采用单幅草图的正交多面体模型生成方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(1): 50-59
- [3] 孙建勇, 金翔宇, 彭彬彬, 等. 一种快速在线图形识别与规整化方法 [J]. 计算机科学, 2003, 30(02): 172-176
- [4] Qin S F. Intelligent classification of sketch strokes [C] // Proc of the International Conference on Computer as a Tool. 2005: 1374-1377
- [5] 宋保华. 面向产品概念设计的智能草图研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003
- [6] 袁浩, 卢章平. 基于邻边推理求隐藏元素的正等轴测图 3D 重建 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(2)
- [7] Company P, Contero M, Varley P, et al. Computer-aided sketching as a tool to promote innovation in the new product development process [J]. Computers in Industry, 2009, 60(8): 592-603
- [8] Company P, Piquer A, Contero M, et al. A survey on geometrical reconstruction as a core technology to sketch-based modeling [J]. Computers & Graphics, 2005(29): 892-904
- [9] Cook M T, Agah A. A survey of sketch-based 3-D modeling

techniques [J]. Interacting with Computers, 2009, 21(3): 201-211

- [10] Chen X J, Kang S B, Xu Y Q, et al. Sketching reality: realistic interpretation of architectural designs [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(2): 1-15
- [11] Contero M, Naya F, Jorge J, et al. CIGRO: A minimal instruction set calligraphic interface for sketch-based modeling [C] // Proceedings of International Conference on Computational Science and its Applications, Part III. Heidelberg: Springer, 2003: 549-558
- [12] 银红霞, 杜四春, 蔡立军. 计算机图形学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 113-119
- [13] Varley P A C. Automatic Creation of Boundary-Representation Models from Single Line Drawings [D]. Department of Computer Science University of Wales College of Cardiff. <http://ralph.cs.cf.ac.uk/Data/Sketch.html>, 2002-12
- [14] Sunday D. Area of Triangles and Polygons (2D&3D) [OL]. http://softsurfer.com/Archive/algorithm_0101/algorithm_0101.html