

文章编号: 0258-2724(2010)04-0589-07 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2010.04.018

一种允许误差的异构图形语义匹配技术

石念峰¹, 王国强¹, 唐卫清²

(1. 洛阳理工学院计算机与信息工程系, 河南 洛阳 471023; 2. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100086)

摘要: 为解决二维和三维异构图形数据匹配问题,以流程工厂协同设计为背景,提出了基于允许误差的最大语义匹配算法(MSMGE). 该算法首先用类无向图描述二维和三维图形数据的工程属性和拓扑关系,消除了研究对象的异构性;然后,用语义表达式表示类无向图顶点与边的语义关系,将二维和三维异构图形数据的匹配转化为允许误差最大公共序列的匹配;最后,通过采用基于工程语义的类无向图语义分割、语义规整和语义裁剪等方法降低 MSMGE 的复杂度. 研究表明,用此算法,匹配精度能够达到 90% 以上.

关键词: 计算机图形学;语义匹配;图匹配;异构图形

中图分类号: TP391.72 **文献标识码:** A

Algorithm for Error-Tolerant Semantic Matching of Heterogeneous Graphics

SHI Nianfeng¹, WANG Guoqiang¹, TANG Weiqing²

(1. Department of Computer and Information Technology, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to realize matching of 2D and 3D heterogeneous graphic data, an algorithm, named as MSMGE, for error-tolerant semantic matching of heterogeneous graphic data was presented based on the computer supported cooperative work in plant design. With this algorithm, the undirected-graph-like is used to represent the engineering properties and topological relations of 2D and 3D graphic data to smooth away the heterogeneity of the graphic data. And then, the semantic expression is adopted to describe the semantic relations among vertexes and edges in the undirected-graph-like to transform the semantic matching of heterogeneous graphic data into largest common subsequence error-tolerant matching. Lastly, the graphic partitioning based on engineering semantics, the semantic normalization and the semantic pruning are adopted in order to reduce the complexity of MSMGE. The research result shows that with the presented algorithm, the matching precision can exceed 90%.

Key words: computer graphics; semantic matching; graph matching; heterogeneous graphic

随着计算机图形学技术和计算机硬件的发展, CAD 系统软件已经被广泛地应用于石油化工流程工厂设计全生命周期的各个阶段. 但由于流程工厂模型的复杂性和多专业性,不同专业和不同生命周期阶段都会使用不同的 CAD 系统来完成相应的任务,导致流程工厂产生大量的、异构的数据信息. 以

石油化工流程工厂设计为例,工艺管道及仪表流程图(piping and instrumentation diagram, P&ID)描述的是流程工厂功能的二维逻辑表达图,三维工厂设计模型描述的是流程工厂的物理形状和组件空间布置表达图. 由于这些数据信息之间的强耦合特征,使得在流程工厂设计过程中,一个阶段的数据

收稿日期: 2009-03-25

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2009B520019)

作者简介: 石念峰(1976-),男,讲师,博士,研究方向为制造业信息化、CAD&CAE,电话:13937953674, E-mail:shinf@foxmail.com

信息必须满足其它阶段数据信息的约束和限制.如在石油化工流程工厂设计中,三维工厂设计模型中的工艺管道和仪表模型,简称三维配管模型,必须满足 P&ID 的工艺约束.验证这种约束关系是否得到满足,通常是跨平台异构的数据信息匹配运算.

在模式集成、语义搜索、数据仓库和电子商务等元数据为主要内容的应用领域,匹配运算是主要操作.目前,关于匹配运算方面的研究很多^[1-3].现有的匹配算法可以分为两大类:一种是基于词法的^[4-6],该类算法的输出是两个输入模式的相似系数 $\tau \in (0, 1]$;另一种是基于语义的^[7],该类算法的输出是两个输入模式的语义关系,包括相等(=)、重叠(\cap)、不匹配(\perp)、泛化(\subseteq)和抽象(\supseteq).两类算法的主要区别是词法匹配在进行匹配运算时,只计算两个比较节点的词义相似度,而不考虑节点在整体匹配模式中的语义关系.

本文提出一种异构图形数据语义差异判定算法,解决 P&ID 和三维配管模型异构图形数据匹配过程中存在二义性匹配、无法查出真正设计错误的问题.本文中研究的匹配运算的主要特点:(1) 匹配运算的操作对象是图形格式的,且通常是异构的,即 P&ID 和三维配管模型;(2) 在进行匹配运算时,不但考虑了匹配对象的工程属性,还考虑了匹配对象之间的拓扑关系;(3) 匹配运算的算法输出反映出具体的匹配细节,即哪些节点是匹配的,哪些节点是不匹配的,而不仅仅是匹配或者不匹配的判定.

1 问题的描述

定义 1 具有某些特定的相同属性值的管段、设备、组件和仪表等构成的集合称为管线,记为 P_L ;按照特定的顺序将这些属性值组合形成一个字符串,称为管线号,记为 P_m .在一个流程工厂中, P_m 是管线 P_L 的唯一标识.

定义 2 一条管线 P_L 上,设备、管段、组件和仪表之间的连接关系称为该 P_L 的拓扑关系.流程工厂中各个 P_L 之间的连接关系构成流程工厂的拓扑关系.

P&ID 是 P_L 的集合,是流程工厂拓扑关系的逻辑表达图,如图 1.其中,每条 P_L 主要由管段、设备、组件、信号线和仪表等二维抽象图形符号构成.

三维配管设计模型是流程工厂配管详细设计阶段的主要设计成果,如图 2.它反映的是流程工厂中工艺管道的设备、管段、组件和仪表等三维几

何模型组成的 P_L 空间布置形态.

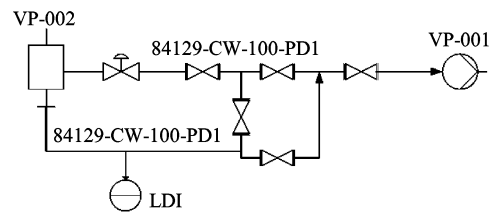


图 1 工艺流程图实例

Fig. 1 Piping and instrumentation diagram

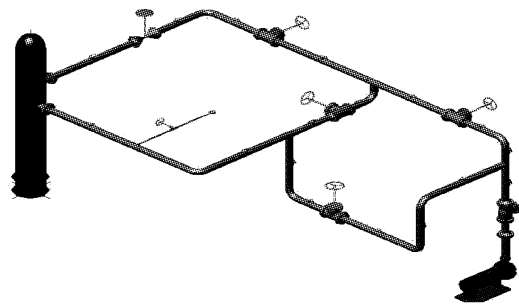


图 2 三维配管模型实例

Fig. 2 3D piping model

P&ID 和三维配管模型的区别不仅仅是二维和三维的区别,更重要的是,三维配管模型是流程工厂中工艺管道和仪表的物理实体的数字仿真,它表示 P_L 上各个对象以及不同 P_L 之间真实的连接、装配关系,而 P&ID 只是个逻辑图.因此,P&ID 和三维配管模型的组成元素之间存在着显著的工程语义差异.比如,在三维配管模型中,同一条 P_L 上邻接的两条垂直和水平管段的交叉处需要添加一个弯头,而 P&ID 中是不需要的;又比如,在三维配管模型中,管段必须通过焊点、法兰、垫片才能和阀门连接,而在 P&ID 中,管段逻辑符号可以直接和任何组件的逻辑符号连接,而不需要绘制法兰、垫片、焊点等组件逻辑符号.所以,不能认为 P&ID 图是三维配管模型从三维到二维的简单退化,而是在特定工程语义下的匹配问题.

2 P&ID 及三维配管模型的描述与表达

从工程角度分析图 1 和图 2,P&ID 和三维配管模型图形文件是由设备实体(equipment, E)对象、管件实体(fitting, F)对象、仪表实体(instrument, I)对象和连接它们的管段实体(pipe segment, P)对象或者信号线实体(signal line, S)对象构成的拓扑网络.因此,必须设计合理的数据结构将这些对象及它们之间的拓扑关系用计算机

语言进行语义描述.文献[8]采用无向图结构来表达,但得到的无向图顶点太多,而且,由于拓扑关系简化的不合理,造成了工程语义缺失.比如,工艺管道中物流介质的流向、主管和支管的区别等.为此,笔者提出了类无向图的表示方法,相对于文献[8],类无向图具有更强的抽象力和语义表达能力.

2.1 抽象模型描述

定义 3 地标类实体(land mark, L_m)表示 P&ID 或三维配管模型中必须被简化成真实节点且不能退化的实体.地标类实体之间只能通过管段或者联结类实体对象连接,通常包括 E 对象、I 对象或者部分 F 对象.

定义 4 联结类实体(connection mark, C_m)表示 P&ID 或三维配管模型中地标类实体之间起连接作用的直通型实体.如果多个联结类实体直接相连,则应只保留一个,其它退化为其特征属性.联结类实体通常包括 P 对象或者部分 F 对象.

定义 5 属性类实体(property mark, P_m)表示 P&ID 或三维配管模型中除联结类实体和地标类实体以外的其它实体.属性类实体可以直接和联结类实体或地标类实体相连.如果有多个属性类实体直接相连,则只保留一个,其它退化为其特征属性.属性类实体通常包括 S 对象和部分 F 对象.

定义 6 虚拟类实体(virtual mark, V_m)由于 3 个或 3 个以上联结类实体直接相连而产生的抽象类实体,它并不真实存在.两个虚拟类实体只能通过联结类实体相连接,且不会和属性类实体连接.虚拟类实体只在 P&ID 中存在.

图 3 为实体类的抽象模型图.

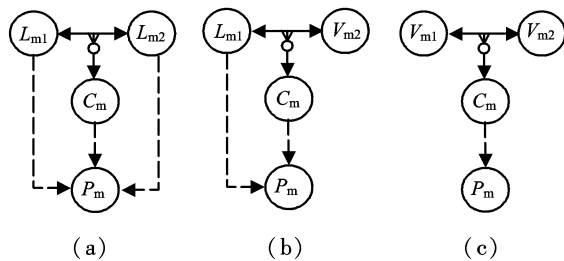


图 3 实体类的抽象模型
Fig. 3 Abstract model of entity

定义 P_{m1}, P_{m2}, P_{m3} 是属性类实体 P_m 的实例.

图 3 中:

(a) 描述的是 L_{m1} 和 L_{m2} 通过 C_m 相连接, L_{m1} 、 L_{m2} 和 C_m 各自的属性为 P_{m1} 、 P_{m2} 和 P_{m3} ;

(b) 描述的是 L_{m1} 和 V_{m2} 通过 C_m 相连, 且 L_{m1}

和 C_m 各自的属性为 P_{m1} 和 P_{m3} ;

(c) 描述的是 V_{m1} 和 V_{m2} 通过 C_m 相连, C_m 的属性为 P_{m3} .

通过以上描述定义, P&ID 和三维配管模型的图形文件可以看成是有地标类实体、联结类实体、属性类实体和虚拟类实体等组成的集合.

2.2 类无向图结构描述及其生成

无向图结构可以定义为 $G = \langle V, E \rangle$, 其中: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是构成无向图顶点的集合; $E = \{e_{12}, e_{23}, \dots, e_{ij}\}$ 是构成无向图顶点间边的集合.

定义 7 类无向图是图形文件中模型实体及其拓扑关系语义化后形成的逻辑图结构,是扩展无向图.与一般无向图不同的是,在类无向图中,边 e_{ij} 表示顶点 v_i 和 v_j 之间存在方向语义约束关系,且具有工程属性信息;类无向图的边是有向的,但这种方向仅表示顶点的语义属性以及邻接顶点之间的拓扑关系,而不是真正的方向性.

如果把地标类实体 L_m 和虚拟类实体 V_m 看作顶点,把联结类实体 C_m 看作边,属性类实体是顶点或边的语义或词义约束,则 P&ID 和三维模型图形文件可以用类无向图 $G = \langle L_m \cup V_m, C_m \rangle$ 表示.

根据上节描述的抽象模型特点,笔者设计了将 P&ID 和三维配管工厂语义化为类无向图结构的主要算法流程:

Step 1 贴标签.根据具体实体对象的类型分别贴上相应的标签(label).图 4 是图 1 和图 2 执行 step 1 的结果,其中,第 1 位下标“1”和“2”分别表示 P&ID 和三维配管模型的实体类型.

Step 2 语义简化操作.根据标签的特性和上下文关系,按照规定的语义规则进行合并和退化操作,将实体对象简化为相应类实体.

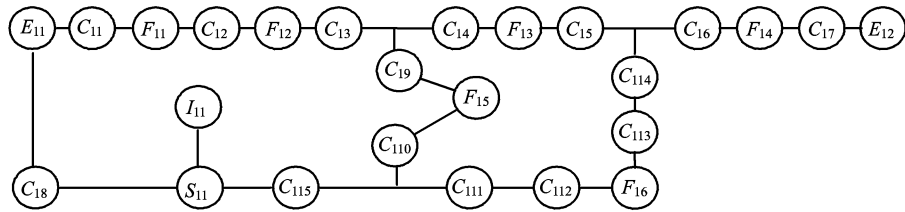
Step 3 生成类无向图.忽略坐标信息,把 L_m 和 V_m 看成是顶点,它们之间的 C_m 看成是边, P_m 归为相应顶点或者边的属性特征,构成类无向图.

图 5 是图 4 对应的类无向图.

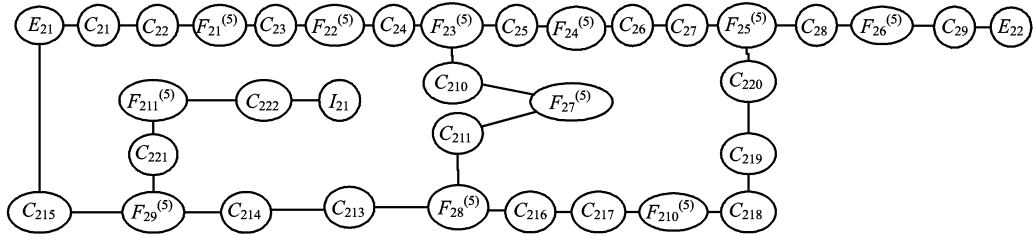
类无向图结构顶点之间语义约束可用语义表达式(semantic expression, S_E)表示.在图 5(a)中,顶点 V_{11} 的语义表达式为:

$$S_E(V_{11}) = (L_{11} \cup L_{12} \cup L_{13}) \cap V_{11} \cap L_{14} \cap L_{17}, \quad (1)$$

式中: \cap 为完全限制条件运算符, $b = a \cap c$ 表示 a 和 c 必须同时存在, b 才能存在; \cup 为半限制条件运算符, $b = a \cup c$ 表示只要 a 和 c 有一个存在, b 就存在.



(a) 对应模型图 1

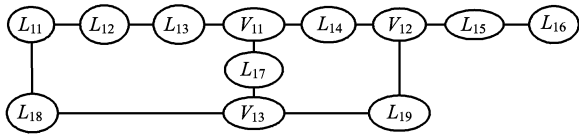


(b) 对应模型图 2

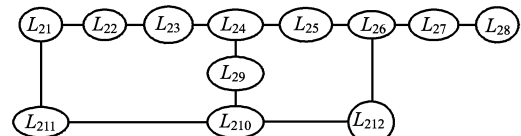
注: $F_i^{(5)}$ 表示 F_i 包含 5 个 F 对象连接

图 4 类实体图

Fig. 4 Entity-class diagram



(a) 对应图 4(a)



(b) 对应图 4(b)

图 5 类无向图

Fig. 5 Undirected-graph-like

3 允许误差的无向图语义匹配及算法设计

3.1 语义匹配

图匹配问题是个 NP-完全问题^[9-10],在计算机视觉、图形处理、模式识别和交通运输规划等领域得到了广泛研究^[11-12]. 目前,关于图匹配问题研究的都是通过比较两个或者多个输入模式之间的精确匹配程度来判断它们是否相等或相似. 但考虑到研究对象的实际工程特点,这种精确匹配基本不存在,必须允许有一定的误差.

本文提出允许误差的最大语义图匹配(maximum semantic matching of graphic with error, MSMGE)算法. 误差主要包括两部分:一是为了保证两个图结构语义匹配而执行的顶点或边的删除(delete)或添加(add)操作造成的误差;二是匹配顶点或者边的标签属性差异造成的误差. 因此,误差可以表示为:

$$\delta(G_1, G_2) = \sum D_{\text{del}}(v_i) + D_{\text{del}}(e_j) + D_{\text{diff}}(e_j) + D_{\text{diff}}(v_{k1}, v_{k2}) + D_{\text{diff}}(e_{m1}, e_{m2}), \quad (2)$$

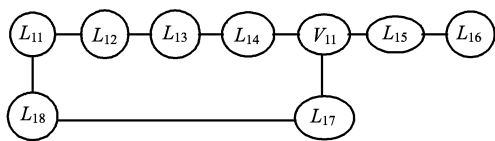
式中: $D_{\text{del}}(x)$ 表示删除 x 造成的误差度量;

$D_{\text{diff}}(x, y)$ 表示 x 和 y 之间属性差异的误差度量.

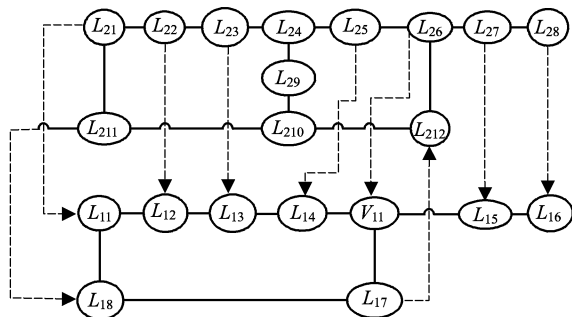
定义 8 给定两个类无向图结构 G_1 和 G_2 , 如果存在最小误差 $\Delta = \delta(G_1, G_2)$, 使得 G_1 和 G_2 的语义匹配程度达到最大, 则称 G_1 和 G_2 是允许误差 Δ 的语义匹配, 简称 MSMGE.

根据定义 8, 图 6(a) 是图 5(b) 删除顶点 L_{24} 、 L_{29} 和 L_{210} 后的语义匹配图, 误差是 $\delta = D_{\text{del}}(L_{24}) + D_{\text{del}}(L_{29}) + D_{\text{del}}(L_{210})$. 图 6(b) 中的虚线表示了顶点间的语义匹配情况.

本文提出的 MSMGE 算法只研究无向图 G_1 相对于标准无向图 G_2 的最优允许误差的语义匹配问题, 即无论添加或者删除任何边或顶点都只能是针对 G_1 的操作, G_2 的边或顶点不能做任何修改性操作.



(a) 图 5(b) 允许误差的语义匹配图



(b) 顶点的语义匹配描述

图 6 允许误差的语义匹配

Fig. 6 Semantic matching of graphic with error

3.2 语义匹配算法框架

通常类无向图 G 和 G' 的边和顶点至少都在 30 000 个以上,因此提高 G 和 G' 匹配判定算法效率的有效方法是将 G 和 G' 分解为合理的子图,减少匹配检查集中边和顶点的数目. 这个过程被称为图分割 (graph partitioning). 图分割问题是图论中的一个基本问题^[13-14]. 基于分治算法思想, MSMGE 算法分两步实现,即图分割和允许误差的图语义匹配性判定.

3.2.1 图分割

MSMGE 算法在对类无向图实施图分割操作时,既要保证得到的子类无向图具有最小的复杂度,又必须保证得到的子类无向图具有合理的工程语义. 该算法可描述为:

Step 1 分析 P&ID 和三维配管模型对应的类无向图 G 和 G' , 获取关键地标类实体, 根据其本体的工程属性进行排序, 形成有序序列 $E = \{L_{E_1}, L_{E_2}, \dots, L_{E_n}\}$ 和 $E' = \{L'_{E_1}, L'_{E_2}, \dots, L'_{E_m}\}$;

Step 2 判定工程属性 E 和 E' 的标签属性匹配性, 形成匹配对 $\langle L_{E_i}, L'_{E_j} \rangle$; 没有匹配的 L_{E_i} 或者 L'_{E_j} 形成孤点;

Step 3 根据管线 P_L 的特征, 按照相同管线号 P_{no} 且具有工程上下文关系的类实体必须且只能存在于同一个子图的原则, 遍历有序序列 E 或 E' 中的每个元素 L_{E_i} 或 L'_{E_j} , 将 G 或 G' 分割成若干子类无向图的集合, 即

$$G = \{G_{si} \mid i=0, \dots, n\}$$

或

$$G' = \{G'_{sj} \mid j=0, \dots, m\};$$

Step 4 根据 Step 2 获得的匹配对 $\langle L_{E_i}, L'_{E_j} \rangle$ 将 Step 3 得到的子类无向图分组, 然后, 判定任意一个子类无向图和本组内其它子类无向图允许误差的图语义匹配性.

3.2.2 语义匹配性判定

MSMGE 算法的最大特点就是允许误差, 所以, 必须在执行最少的删除和插入顶点 (边) 操作的语境下, 判定图的语义匹配程度. 因此, 根据研究对象的工程语义特点, 借鉴最大公共序列算法 (largest common subsequence, LCS) 思想^[15-18], 笔者提出了以下算法框架:

Step 1 生成语义树. 按照工程语义原则, 从图分割得到的分组数据中选取一对 P&ID 和三维配管模型的类无向图, 转化为树结构.

Step 2 生成语义表达式. 计算每个节点的出入度, 并按照降序排序, 求出所有 $\text{degree}(v) \geq 3$ 的节点语义表达 $S_E(v_i)$.

Step 3 生成语义序列. 从判定起始节点 Node_s (首次为根节点) 开始, 按照工程语义将 Step 2 得到的节点语义表达合并, 剔除相邻重复节点, 生成语义序列 (semantic sequence, SSQ), 即:

$$S_{SSQ} = S_E(v_i) \cup S_E(v_j) \cup \dots \cup S_E(v_k), \quad (3)$$

采用 LCS 算法判定得到的两个语义序列的最大公共序列 MSSQ (largest semantic sequence).

Step 4 语义规整. 根据比较结果 MSSQ、P&ID 和三维配管模型的语义树, 对 Step 3 生成的语义序列进行语义调整, 规整节点及边的匹配状态. 例如, 在图 7(a) 语义树中, 根据 MSSQ, 图 7(b) 缺失了图 7(a) 中的节点 3, 需要合并与节点 3 直接连接的两条边, 并修改这些边在 MSSQ 中的一致性判定状态.

Step 5 语义裁剪. 获取没有进行一致性判定的节点, 得到待判定节点集合 S_{node} . 根据 P&ID 和三维配管模型的语义树, 对语义规整结果进行语义判断, 裁剪 S_{node} . 例如, 图 7 中, 由于节点 3 缺失, 根据 $S_E(3)$ 节点 6 必然缺失, 进而可以判定节点 7、8、9 也必然缺失.

Step 6 对 S_{node} 中的节点出入度进行排序, 选定新的 Node_s , 执行 Step 3, 直至 S_{node} 为空.

根据节点语义表达式的定义, Step 3 生成的语义序列中存在冗余节点, 通过冗余节点技术和 Step 5 的处理, 可以得到最小的语义误差.

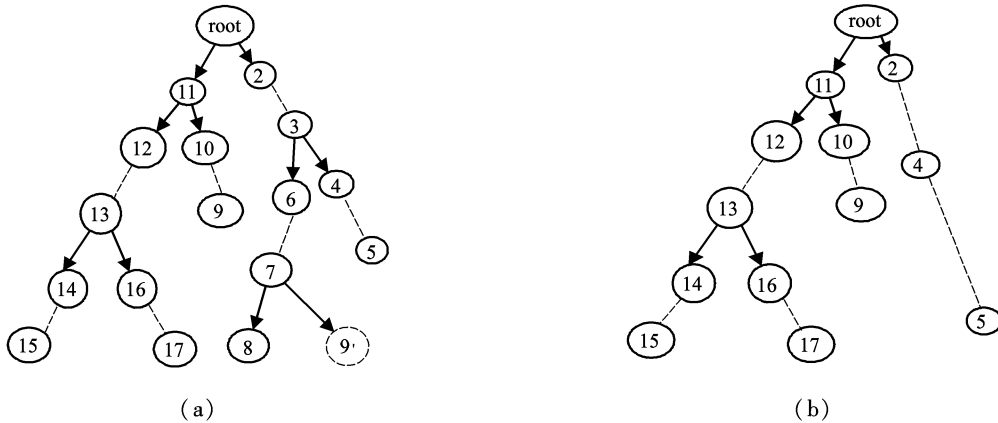


图7 语义规整的原则
Fig.7 Semantic normal

4 实验及结果分析

图8是本文研究的允许误差异构图形文件语义匹配技术的实验结果. 实验测试数据来自实际工厂设计的三维配管模型图形文件和P&ID图形文件. 这些图形文件分别由北京中科辅龙计算机股份有限公司的三维工厂设计软件PDSOFT® 3D Piping和P&ID制作. 在图8中, 横坐标 N 为测试节点的数目, 纵坐标 t 表示算法运行时间. 在实验时分别采用了两大类数据进行测试: 一类数据的控制指标为图分割得到的分组数据中每个组的节点数目, 称为复杂性测试; 另一类数据的控制指标为图分割得到的分组数据的节点数目, 称为数量测试.

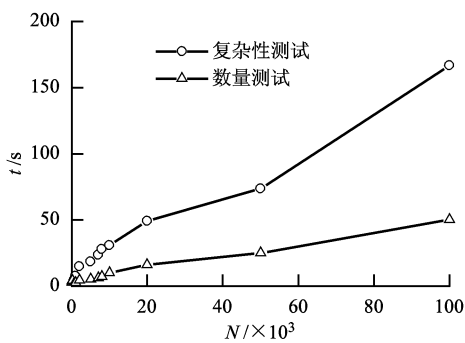


图8 MSMGE算法实验结果
Fig.8 Experimentation of MSMGE

实现MSMGE算法时采用的LCS算法的复杂度为^[14] $O(pn + n \log n)$, 其中, p 为公共序列的长度, 故MSMGE算法复杂度是 $O(m(pn + n \log n))$, 其中, m 为分组数据中组的数目.

分析实验结果, 当 $n > 8\ 000$ 时, 随着分组数据中每组节点数目 n 的增大, MSMGE算法效率降低较快. 但, 如果分组数据中每组节点数目 n 较小($n < 2\ 000$), 而分组数据节点数目 m 较大, 则MSMGE

算法效率变化较为平稳. 实验结果表明, 本文类无向图分割算法得到的分组数据中, 每组节点的数目 n 较小($n < 1\ 500$)时, 匹配精度超过90%. 今后, 需要结合工程应用背景, 研究如何降低标签属性比较时LCS算法的复杂度, 以及减少图分割得到的分组数据中每组节点数目, 等, 从而提高MSMGE的运行效率.

5 结论

本文中提出了MSMGE算法, 首次解决和实现了三维配管模型和P&ID图两类异构图形信息之间的匹配判定问题, 具体是:

- (1) 采用地标类实体、联结类实体、属性类实体和虚拟类实体等4种类体表示三维配管模型和P&ID, 把异构二维和三维数据表示为无向图结构, 将三维配管模型和P&ID图的匹配问题转化为允许误差的最大语义图匹配问题;
- (2) 基于工程语义对类无向图进行了分割, 利用冗余节点技术生成语义表达式; 然后, 通过基于最大公共序列算法的语义表达式比较、语义规整和语义裁剪等步骤实现了三维配管模型和P&ID图两类异构图形信息之间的匹配判定.

致谢: 本文的研究工作得到洛阳理工学院博士启动基金(2008BZ12)的资助.

参考文献:

[1] RAHM E, BERNSTEIN P. A survey of approaches to automatic schema matching [J]. The VLDB Journal, 2001, 10(4): 334-350.
[2] SHVAIKO P, EUZENAT J. A survey of schema-based

- matching approaches [J]. *Journal on Data Semantics*, 2005, IV: 146-171.
- [3] GIUNCHIGLIA F, SHVAIKO P, YATSKEVICH M. Semantic matching: algorithms and implementation [J]. *Journal on Data Semantics IX*, 2007, IV: 1-38.
- [4] DO Honghai, RAHM E. COMA: a system for flexible combination of schema matching approaches [C] // *Proceedings of the 28th International Conference on Very Large Data Bases*. Washington DC: VLDB Endowment, 2002: 610-621.
- [5] BENERECETTI M, BOUQUET P, ZANOBINI S. Soundness of schema matching methods [C] // *Proceedings of European Semantic Web Conference*. Berlin: Springer Link, 2005, LNCS 3532: 211-225.
- [6] SEGERY M, HECTOR G M, ERHARD R, et al. Similarity flooding: a versatile graph matching algorithm [C] // *Proceedings of 18th International Conference on Data Mining*. Washington DC: IEEE Computer Society, 2002: 117-128.
- [7] GIUNCHIGLIA F, SHVAIKO P. Semantic matching [J]. *The Knowledge Engineering Review*, 2003, 18(3): 265-280.
- [8] 贾红妮,唐卫清,石念峰,等. 计算机辅助工厂设计中的协同设计模型的研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2006(S1): 1-3.
JIA Hongwei, TANG Weiqing, SHI Nianfeng, et al. Research on cooperative design model in computer aided design system [J]. *Computer Engineering and Application*, 2006(S1): 1-3.
- [9] GAREY M R, JOHNSON D S. *Computers and Intractability: a guide to the theory of NP-completeness* [M]. New York: W. H. Freeman and Company, 1979: 190-206.
- [10] JOHN W R, PETER W. Maximum common subgraph isomorphism algorithms for the matching of chemical structures [J]. *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, 2002, 16(7): 521-533.
- [11] 向红艳,张邻,杨波. 基于最大流的路网结构优化 [J]. *西南交通大学学报*, 2009, 44(2): 284-288.
XIANG Hongyan, ZHANG Lin, YANG Bo. Optimization of road network structure based on maximum-flow theory [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2009, 44(2): 284-288.
- [12] 寇玮华,李宗平. 运输网络中有流量需求的转运节点最大流量分配算法 [J]. *西南交通大学学报*, 2009, 44(1): 118-121.
KOU Weihua, LI Zongping. Maximum flow assignment algorithm for transshipment nodes with flow demands in transportation network [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2009, 44(1): 118-121.
- [13] JOSEPH W H L. A Graph partitioning algorithm by node separators [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1989, 15(3): 198-219.
- [14] ANGLES R, GUTIERREZ C. Survey of graph database models [J]. *ACM Computing Surveys*, 2008, 40(1): 1-39.
- [15] LUEKER G S. Improved bounds on the average length of longest common subsequences [J]. *Journal of the ACM*, 2009, 56(3): 1-38.
- [16] DANIEL S H. Algorithms for the longest common subsequences problem [J]. *Journal of Association for Computing Machinery*, 1997, 24(4): 664-675.
- [17] YANG I H, HUANG C P, CHAO K M. A fast algorithm for computing a longest common increasing subsequence [J]. *Information Processing Letters*, 2005, 93: 249-253.
- [18] BERGROTH L, HAKONEN H, RAITA T. A survey of longest common subsequence algorithms [C] // *Proceedings of the Seventh international Symposium on String Processing information Retrieval*. Washington DC: IEEE Computer Society, 2000: 39-48.
(中文编辑:唐 晴 英文编辑:付国彬)

(上接第 588 页)

- [14] FREDKIN E, TOFFOLI T. Conservative logic [J]. *Int. J. Theor. Phys.*, 1982, 21(3/4): 219-253.
- [15] GROVER L K. Quantum search on structured problems [J]. *Chaos, Solitons, and Fractals*, 1999, 10: 1695-1705.
- [16] LI Fei, ZHAO Shengmei, ZHENG Baoyu. Performance of a single quantum neuron [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2005, 14(3): 111-114.
- [17] KOREPIN V E, GROVER L K. Simple algorithm for partial quantum search [J]. *Quantum Information Processing*, 2006, 5(1): 5-10.
- [18] LI Shiyong, LI Panchi. A quantum genetic algorithm based on real encoding and gradient information of object function [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(8): 1216-1218.
- [19] BIHAM E, BIHAM O, BIRON D, et al. Grover's quantum search algorithm for an arbitrary initial amplitude distribution [J]. *Physical Review A*, 1999, 60: 2742-2745.
(中文编:唐 晴 英文编辑:付国彬)