第 12A 期
2003 年 12 月

电　子　学　报
ACTA ELECTRONICA SINICA

Vol. 31　No. 12A
Dec.　2003

混合维空间遮蔽关系的表示与推理

王生生, 刘大有
(吉林大学计算机科学与技术学院, 符号计算与知识工程教育部重点实验室, 吉林长春 130012)

摘　要: 从某个视点观察两个三维空间中的对象时, 一个对象遮住另一个对象的现象被称为空间遮蔽关系. 在空间推理和机器视觉领域, 它是一种重要的面向观察者的空间关系. LOS 和 ROC 等现有的遮蔽关系模型都是基于 RCC (区域连接演算) 的, 因而不能支持混合维空间对象. 但在 3 维 GIS 等遮蔽关系的应用领域中, 空间对象的维数是多样的. 为此提出了混合维空间遮蔽关系模型 MSO. 首先将 RCC 扩展到混合维得到了 MRCC, 然后基于 MRCC 定义了混合维遮蔽关系, 最后研究了 MRCC 的复合推理方法.

关键词: 空间遮蔽关系; 定性空间推理; 计算机视觉
中图分类号: TP181　文献标识码: A　文章编号: 0372-2112 (2003) 12A-2175-04

Representation and Reasoning for Multi-Dimensional Spatial Occlusion Relation

WANG Sheng-sheng, LIU Da-you
(*College of Computer Science and Technology ilin University Changchun ilin 130012 China*)

Abstract: Observing two objects from a viewpoint in 3D space, one may occlude another. This phenomena is called occlusion relation. It is an important observer-centred spatial relation in Spatial Reasoning and Computer Vision. The existing occlusion models such as LOS and ROC are all based on the RCC (Region Connection Calculus) theory, which is not suitable for handling multi-dimensional objects. But in 3D GIS or other occlusion relation applied area, the dimensions of objects are multiple. So we propose the multi-dimensional spatial occlusion model (MSO). We first extend the RCC to MRCC for supporting multi-dimension; then define spatial occlusion relation based on MRCC. Finally we investigate the composition reasoning method of MSO.

Key words: spatial occlusion relation; qualitative spatial reasoning; computer vision

1　引言

几乎所有的信息都同空间相关, 空间推理已成为十分活跃的研究领域. 在很多场合中, 定性表示比定量表示更接近人类的思维方式. 在人工智能领域, 把以逻辑和抽象代数等定性方法为主的空间推理方法称为定性空间推理(Qualitative spatial reasoning 简称 QSR) [1,2]. 对实体空间关系进行抽象表达是空间推理的前提, 而拓扑关系又是最基本的定性空间关系, 它也直接影响着其他空间关系[3]. 我们一般采用客观观察的角度, 把拓扑关系定义为二元关系, 但现实世界中的知识往往是主观片面的. 面向观察者(observer-centered) 的空间表示是计算机视觉、机器人导航等研究中的关键问题. 空间遮蔽(occlusion) 关系是面向观察者的定性空间表示和推理所研究的主要内容. 它研究从某个视点观察两个三维空间的空间对象时, 一个对象遮住另一个对象的现象. 空间遮蔽关系一般是三元关系, 除了两个空间对象外还要指定视点.

从一个三维空间的观察点看来, 空间物体的像分布在一个球体的表面上. 更确切的讲是一个半球面, 如果是站在地面上观察. 一个直观的例子是我们站在地面上观察星空. 像是二维的, 不能直接根据它确定空间对象的形状, 判断空间对象在三维空间中的位置关系和距离. 但是可以根据像之间相互遮挡的现象进行分析和推理. 遮蔽关系的作用在于能够判定观察者位置, 帮助确定对象的边界, 找到物体不可见的原因, 确定场景中需要着色的面等等. 它首先应用于机器视觉、可视化等领域. 近年来, 在 QSR 中也逐渐开始了对遮蔽关系的研究.

目前, QSR 中有代表性的空间遮蔽关系模型有两种: Galton 在 94 年提出了视线(Lines of sight) 模型[4], 他定义了 14 种 LOS 关系, 能够表达凸三维对象的遮蔽关系. Randell 等在 2001 年提出了 ROC 关系[5], 它能够表达所有三维对象的遮蔽关系. 共定义了 20 种 ROC 关系, 能表达所有三维对象(包括凹对象) 间的相互遮蔽关系.

LOS 和 ROC 这两种模型都基于 RCC(区域连接演算) 理论. 虽然 RCC 是目前定性空间推理领域研究最多的空间关系理论, 但 Cohn 等 AI 权威学者指出 RCC 作为纯粹的区域拓扑

收稿日期: 2002-06-26; 修回日期: 2003-12-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 60373098) ; 国家高技术研究发展计划项目(No. 2003AA118020) ; 吉林省自然科学基金项目(20030523) ; 吉林大学创新基金项目(No. 2002CX028)

理论,它只能处理区域(二维)对象不能处理空间混合维对象(点、线和区域对象的统称)[1]. 廖士中等也通过试验证明了复合表推理(RCC 的主要推理手段)仅适合处理同维实体[6]. 而在GIS等应用中混合维对象非常普遍[7]. 在空间遮蔽关系的应用领域(如机器视觉、机器人导航、3D-GIS 等)中,由于实体的抽象表示(表示维数低于真实物体维数)和以实体构成成分(如立方体的棱)为研究对象等原因,混合维对象的出现不可避免. 同时一些特殊的领域(如石油管网分析)也直接以线或点等非区域对象建模. LOS 和 ROC 等现有的定性空间遮蔽关系模型,限于 RCC 理论的局限性,只能处理同维实体空间对象间的空间遮蔽关系,不能支持混合维对象. 为此,本文扩展了RCC 理论,提出了支持混合维空间对象的 MRCC 模型,并在此基础上,提出了混合维空间遮蔽关系 MSO,并研究了其复合推理问题.

2 RCC 的混合维扩展

首先 定义三元组: $(x \wedge y\ ?\ \neq \varnothing\ x \wedge y\ ? = x$

$$x \wedge y\ ? = y) \tag{1}$$

其中:

$$x \wedge y ?\ \neq \phi \equiv_{df} \begin{cases} 2 \text{ if } i(x) \wedge i(y) \neq \phi \\ 1 \text{ if } i(x) \wedge i(y) = \phi \text{ and } b(x) \wedge b(y) \neq \phi \\ 0 \text{ if } i(x) \wedge i(y) = \phi \text{ and } b(x) \wedge b(y) = \phi \end{cases} \tag{2}$$

$$x \wedge y ? = x \equiv_{df} \begin{cases} 2 \text{ if } i(x) \wedge i(y) = i(x) \text{and} (b(x) \wedge b(y) \\ \qquad = \phi \text{ or } b(x) \wedge b(y) = b(x)) \\ 1 \text{ if } i(x) \wedge i(y) = i(x) \text{and } b(x) \wedge b(y) \\ \qquad = \phi \text{ and } b(x) \wedge b(y) \neq b(x)) \\ 0 \text{ if } i(x) \wedge i(y) \neq i(x) \end{cases} \tag{3}$$

$b(x)$是 x 的边界 $i(x) = x - b(x)$是 x 的内部.

表 **1** 区域 **RCC-8** 关系

$x \wedge y\ ?\ \neq \varnothing$	$x \wedge y\ ? = x$	$x \wedge y\ ? = y$	RCC-8
0	0	0	*DC*
1	0	0	*EC*
2	0	0	*PO*
2	1	0	*TPP*
2	2	0	*NTPP*
2	0	1	*TPPI*
2	0	2	*NTPPI*
2	2	2	*EQ*

表 1 是三元组的所有可能取值 我们把它们同 RCC-8 的基本关系一一对应起来. RCC-8 是最常用的一组 RCC 基本关系 最初由一阶逻辑定义的.

定理 1 三元组表示的空间关系同 RCC-8 等价.

证明 RCC-8 和 9 交集模型是等价的[1 2]. 9 交集模型是根据$\{i(x)\ \ b(x)\ \ \neg x\}$和$\{i(y)\ \ b(y)\ \ \neg y\}$之间的 3× 3 相交关系矩阵确定的. 对于三元组的每个可能取值 都可以求出它所对应的相交关系矩阵 可以验证表 1 中的 8 项取值恰好同 9 交集模型的 8 种基本关系一一对应 即三元组表示同 9 交集模型等价 因此也同 RCC-8 等价. 篇幅所限具体推导过程省略.

RCC 的混合维扩展(MRCC)描述的是二维空间中不同维空间对象的空间关系. 为了实现混合维扩展 我们尝试用一种新的观点看待点和线. 从点、线和区域都是空间实体的本体表示的角度 把它们都视为广义的"区域". RCC 是纯粹的区域拓扑理论 但三元组定义并不排斥点和线 只需要指定对象边界和内部的划分.

首先 把二维空间中的对象划分为 3 类:点、线和区域. 点没有长度和面积 只考虑位置;线由两个端点和中间的连线构成 没有面积 只有长度;区域由两端点重合的线围成 有面积. 用 $DIM(x)$表示空间对象的维数 点、线和区域的维数分别定义为 0 1 和 2.

MRCC 由三元组定义:

$$(DIM(x)\ \ DIM(y)\ \ \phi) \qquad \phi \in RCC\text{-}8 \tag{4}$$

0 维和 1 维对象的边界 $b(x)$和内部 $i(x)$的定义如下:

①点对象 x 的边界定义为 $b(x) = x$ 内部定义为 $i(x) = x$.; ②线对象的边界定义为 $b(x) = x$ 内部定义为 $i(x) = x - \{A, B\}$ (A, B 为线的端点)

ϕ 的取值不是全体 RCC-8 依赖于 $DIM(x)$ $DIM(y)$而定. 通过讨论各种情况下 ϕ 的可能取值 穷举出 38 种混合维空间对象 RCC 关系(见表 2).

3 混合维遮蔽关系

空间实体是存在于 3 维空间中的真实对象 可能是球体、四面体或其他任意形状的 3 维实体;也可能是抽象成点、线或面的实体. 视点是 3 维空间中的一个点 像是从视点观察到的空间实体的二维形态. 从视点 v 观察到的 x 的像用 $i(x\ \ v)$表示. 在视点 v 观察空间实体 x 和 y 所观察到的 x 和 y 的像的二维空间关系 用三元关系 $R(x\ \ y\ \ v)$表示 称为空间遮蔽关系. 空间实体比其像可能大一维或同维. 例如 一个线空间实体 可能投影成二维空间中的线或点. 由于 x、y 可能是不同维的空间实体以及投影引起的维变化 x、y 的像可能是不同维的. 因此 本文用 MRCC 描述像之间的混合维空间关系.

假设空间实体是不会交叠的刚体:

$$\neg(\exists\ a\ (a \neq \varnothing \text{ and } x \neq y \text{ and } a \in x \text{ and } a \in y)) \tag{5}$$

表 **2** **MRCC** 关系

y / x	点	线	区域
点	(0 0 *DC*) (0 0 *EQ*)	(0 1 *DC*) (0 1 *EC*) (0 1 *TPP*)	(0 2 *DC*) (0 2 *EC*) (0 2 *TPP*)
线	(1 0 *DC*) (1 0 *EC*) (1 0 *TPPI*)	(1 1 *DC*) (1 1 *EC*) (1 1 *PO*) (1 1 *NTPP*) (1 1 *NTPPI*) (1 1 *EQ*)	(1 2 *DC*) (1 2 *EC*) (1 2 *PO*) (1 2 *TPP*) (1 2 *NTPP*)
区域	(2 0 *DC*) (2 0 *EC*) (2 0 *TPPI*)	(2 1 *DC*) (2 1 *EC*) (2 1 *PO*) (2 1 *TPPI*) (2 1 *NTPPI*)	(2 2 *DC*) (2 2 *EC*) (2 2 *PO*) (2 2 *TPP*) (2 2 *TPPI*) (2 2 *NTPP*) (2 2 *NTPPI*) (2 2 *EQ*)

表 3　MSO 关系($OX=\{O\ \ OB\ \ MO\}$)

DC	$(0\ 0\ DC\ \ NO)\ (0\ 1\ DC\ \ NO)\ (0\ 2\ DC\ \ NO)\ (1\ 0\ DC\ \ NO)$ $(1\ 1\ DC\ \ NO)\ (1\ 2\ DC\ \ NO)\ (2\ 0\ DC\ \ NO)\ (2\ 1\ DC\ \ NO)\ (2\ 2\ DC\ \ NO)$
EC	$(0\ 1\ EC\ \ NO)\ (0\ 2\ EC\ \ NO)\ (1\ 0\ EC\ \ NO)\ (1\ 1\ EC\ \ NO)$ $(1\ 2\ EC\ \ NO)\ (2\ 0\ EC\ \ NO)\ (2\ 1\ EC\ \ NO)\ (2\ 2\ EC\ \ NO)$
PO	$(1\ 1\ PO\ \ OX)\ (1\ 2\ PO\ \ OX)\ (2\ 1\ PO\ \ OX)\ (2\ 2\ PO\ \ OX)$
TPP	$(0\ 1\ TPP\ \ OX)\ (0\ 2\ TPP\ \ OX)\ (1\ 2\ TPP\ \ OX)\ (2\ 2\ TPP\ \ OX)$
$NTPP$	$(1\ 1\ NTPP\ \ OX)\ (1\ 2\ NTPP\ \ OX)\ (2\ 2\ NTPP\ \ OX)$
$TPPI$	$(1\ 0\ TPPI\ \ OX)\ (2\ 0\ TPPI\ \ OX)\ (2\ 1\ TPPI\ \ OX)\ (2\ 2\ TPPI\ \ OX)$
$NTPPI$	$(1\ 1\ NTPPI\ \ OX)\ (2\ 1\ NTPPI\ \ OX)\ (2\ 2\ NTPPI\ \ OX)$
EQ	$(0\ 0\ EQ\ \ O)\ (0\ 0\ EQ\ \ OB)\ (1\ 1\ EQ\ \ OX)\ (2\ 2\ EQ\ \ OX)$

遮蔽关系定义为:

$$\text{Occlude}(x\ \ y)\equiv_{df}\exists a\in i(x)\ \ \exists b\in i(y)[\text{Line}(v\ \ a\ \ b)]\tag{6}$$

Line($a\ \ b\ \ c$)表示点 $a\ \ b\ \ c$ 成直线 b 在中间.

JEPD 遮蔽关系 OP 定义为:

$$OP(x\ \ y)=\begin{cases}NO\ \ \text{if not Occlude}(x\ \ y)\ \text{and not Occlude}(y\ \ x)\\ O\ \ \text{if Occlude}(x\ \ y)\ \text{and not Occlude}(y\ \ x)\\ OB\ \ \text{if not Occlude}(x\ \ y)\ \text{and Occlude}(y\ \ x)\\ MO\ \ \text{if Occlude}(x\ \ y)\ \text{and Occlude}(y\ \ x)\end{cases}\tag{7}$$

混合维空间遮蔽关系 MSO 定义为:

$$\text{mso}(x\ \ y\ \ v)\equiv_{def}(\text{DIM}(img(x\ \ v))\ \ \text{DIM}(\text{img}(y\ \ v))\ \ \Psi\ \ \phi)\tag{8}$$

其中(DIM($img(x\ \ v)$) DIM(img($y\ \ v$)) Ψ) $\in$ MRCC $\phi\in$ OP

根据遮蔽关系的定义不难得出"实体遮蔽等价于像交叠" 即:

$$\text{Occlude}(x\ \ y)\leftrightarrow\text{img}(x\ \ v)\ \{\text{PO}\vee\text{TPP}\vee\text{NTPP}\vee\text{TPPI}\vee\text{NTPPI}\vee\text{EQ}\}\ \text{img}(y\ \ v)\tag{9}$$

表 4　三种模型的比较

ROG-20	LOS	MSO
NonOccludes DC	C	$(2\ 2\ DC\ \ NO)$
NonOccludes EC	JC	$(2\ 2\ EC\ \ NO)$
PartiallyOccludes PO	PH	$(2\ 2\ PO\ \ O)$
PartiallyOccludes PO-1	PHI	$(2\ 2\ PO\ \ OB)$
MutuallyOccludes PO		$(2\ 2\ PO\ \ MO)$
PartiallyOccludes TPP	JF	$(2\ 2\ TPP\ \ O)$
TotallyOccludes $TPPI$	JHI	$(2\ 2\ TPPI\ \ OB)$
MutuallyOccludes TPP		$(2\ 2\ TPP\ \ MO)$
PartiallyOccludes $NTPP$	F	$(2\ 2\ NTPP\ \ O)$
TotallyOccludes $NTPP$-1	HI	$(2\ 2\ NTPPI\ \ OB)$
MutuallyOccludes $NTPP$		$(2\ 2\ NTPP\ \ MO)$
TotallyOccludes $TPPI$-1	JH	$(2\ 2\ TPPI\ \ O)$
PartiallyOccludes TPP-1	JFI	$(2\ 2\ TPPI\ \ OB)$
MutuallyOccludes TPP-1		$(2\ 2\ TPPI\ \ MO)$
TotallyOccludes $NTPPI$	H	$(2\ 2\ NTPPI\ \ O)$
PartiallyOccludes $NTPPI$-1	FI	$(2\ 2\ NTPPI\ \ OB)$
MutuallyOccludes $NTPPI$-1		$(2\ 2\ NTPPI\ \ MO)$
TotallyOccludes EQ	EH	$(2\ 2\ EQ\ \ O)$
TotallyOccludes EQ-1	EHI	$(2\ 2\ EQ\ \ OB)$
MutuallyOccludes EQ		$(2\ 2\ EQ\ \ MO)$

根据(9) 可以直接推导出一些不可能存在的 MSO 基本关系. 此外 ($0\ \ 0\ \ EQ\ \ MO$) 同刚体假设(5) 相矛盾. 此外其他由(8) 定义的 MSO 关系全部能找到实例(数目太多不能在文中一一列举) 共有 79 种基本关系(表 3) .

表 4 将 MSO 同 ROG-20 和 LOS 进行了对比, 2 维区域对象的 ROG-20 和 MSO 关系完全等价. 可以用 LOS$\subset$ ROG-20$\subset$MSO 来表示这三个模型的应用范围.

4　MSO 复合推理

复合推理是定性空间推理中最基本的推理形式 在约束满足求解、一致性检查等方面有着广泛应用. 复合推理一般采用手工建立的复合表. 但 MSO 基本关系过多, 复合表的手工推导不现实, 需要提供自动计算 MSO 复合关系的方法.

MSO 关系包括遮蔽和拓扑两部分 两者又有着紧密的联系. 拓扑关系可以直接使用 RCC-8 的复合表. 但 O 和 OB 关系不具有传递性不能直接进行复合 如图 1 中 3 个像循环遮蔽. MO 的情况就更加复杂了. 遮蔽关系难以进行复合的原因在于如果像之间只有一部分发生遮蔽关系 其他部分的遮蔽关系不能确定. 但如果是完全遮蔽关系 就能具有传递性. 因此我们在 MSO 上定义了完全遮蔽关系:

$$\begin{aligned}&FF=\{(a\ \ b\ \ R\ \ O)\mid 0\leqslant a\ \ b\leqslant 2\ \ R=\{TPP\ \ NTPP\ \ EQ\}\}\\&FFI=\{(a\ \ b\ \ R\ \ OB)\mid 0\leqslant a\ \ b\leqslant 2\ \ R=\{TPPI\ \ NTPPI\ \ EQ\}\}\\&NF=-(FF\vee FFI)\end{aligned}\tag{10}$$

这 3 个完全遮蔽关系构成了对 MSO 基本关系的一个划分. 利用完全遮蔽关系复合表(表 5) 计算 MSO 关系复合的过程如下:

给定 MSO 关系: $mso(x\ \ y\ \ v)=(d1\ \ d2\ \ \Psi1\ \ \Phi1)$ $mso(y\ \ z\ \ v)=(d2\ \ d3\ \ \Psi2\ \ \Phi2)$

根据所属的完全遮蔽关系: $mso(x\ \ y\ \ v)\in RF1$ $mso(y\ \ z\ \ v)\in RF2$ $RF1\ \ RF2\in\{FF\ \ FFI\ \ NF\}$

对复合后可能得到的 MSO 关系进行限制:

$$\begin{aligned}&mso(x\ \ y\ \ v)^{\circ}mso(y\ \ z\ \ v)\\&\equiv_{df}[(d1\ \ d2\ \ \Psi1)^{\circ}(d2\ \ d3\ \ \Psi2)\ \{NO\ \ O\ \ OB\ \ MO\}]\\&\cap(RF1^{\circ}RF2)\end{aligned}$$

例子: $(1\ \ 2\ \ TPP\ \ O)^{\circ}(2\ \ 2\ \ TPP\ \ O)$

$$\begin{aligned}&=[(1\ \ 2\ \ TPP\ \ O)^{\circ}(2\ \ 2\ \ TPP\ \ O)\ \{NO\ \ O\ \ OB\ \ MO\}]\\&\cap[FF^{\circ}FF]\end{aligned}$$

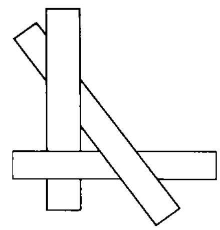

图 1　遮蔽关系非传递性

表 5　完全遮蔽关系复合表

○	FF	FFI	NF
FF	FF	*	*
FFI	*	FFI	*
NF	*	*	*

$= [1\ 2\ \{TPP\ \ NTPP\}\ \{NO\ \ O\ \ OB\ \ MO\}] \cap FF$

$= \{(1\ \ 2\ \ TPP\ \ \ O)\ \ (1\ 2\ \ NTPP\ \ \ O)\}$

5 结论

RCC 拓扑关系是定性空间推理的核心研究内容之一, 本文针对 RCC 理论仅支持同维对象的缺陷, 对其进行了混合维扩展, 构造了 MRCC. 该工作在一定程度上扩展了 RCC 理论的适用范围. 在此基础上, 改进了原来基于 RCC 的定性空间遮蔽关系研究工作, 建立了混合维定性遮蔽关系模型 MSO. 同原有模型相比, MSO 增加了对混合维空间对象的支持, 更加有利于在 3 维 GIS 等实际应用中使用.

参考文献:

[1] A G Cohn, S M Hazarika. Qualitative spatial representation and reasoning: An overview [J]. Fundamental Informatics, 2001, 46(1-2): 1-29.

[2] M Teresa Escrig, Francisco Toledo. Qualitative Spatial Reasoning: Theory and Practice [M]. Amsterdam: Ohmsha, 1999.

[3] 王生生, 刘大有, 谢琦, 等. 集成多方面信息的定性空间推理及在时空 GIS 中的应用 [J]. 软件学报, 2003, 14(11): 1857- 1862.

[4] Antony Galton. Lines of sight [A]. Dorota Kieronska, AISB Workshop on Spatial and Spatio-temporal Reasoning [C]. Berlin: Springer, 1994. 1- 15.

[5] David R, etc. From images to bodies: Modeling and exploiting spatial occlusion and motion parallax [A]. Bernhard Nebel, Proceedings of the 17th IJCAI [C]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 57 - 63.

[6] 廖士中, 石纯一. 拓扑关系的闭球模型及复合表的推导 [J]. 软件学报, 1997, 8(12): 894- 900.

[7] 王生生, 刘大有, 等. 混合维定性空间查询语言 MQS-SQL [J]. 电子学报, 2002, 30(12A): 1995- 1999.

作者简介:

王生生 男, 1974 年 8 月生于吉林长春, 讲师, 2003 年在吉林大学获博士学位, 研究方向为空间推理, 时空推理, 地理信息系统, 空间数据挖掘. 作为主要成员参加过 3 项 863 项目和 4 项自然科学基金项目. E-mail: wang_ sheng_ sheng@163. com.

刘大有 男, 1942 年 7 月出生于吉林省长春市, 教授、博士生导师. 1981 年毕业于吉林大学计算机系, 获硕士学位, 现任吉大计算机科学与技术学院院长和国务院学位委员会学科评议组成员等职务. 主要研究领域为知识工程与 ES, DAI 多 Agent 系统与移动 Agent, 空间推理, 粗集、格机与数据挖掘, 数据结构与算法等. 先后承担过国家级和省部级科研项目近 40 项, 发表论文、著作 180 多篇部, 获国家科技进步三等奖 1 项, 省部级科技进步一等奖 2 项, 省部级二、三等奖 6 项.