

三维 AD-HOC 网络地理信息路由算法*

汪芸¹⁺, 苏瀚^{1,2}, 房鼎益³

¹(东南大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 211198)

²(中国科学院 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

³(西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127)

A Geographic Surface Routing Algorithm in 3D Ad Hoc Networks

WANG Yun¹⁺, SU Han^{1,2}, FANG Ding-Yi³

¹(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211198, China)

²(Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

³(College of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

+ Corresponding author: E-mail: yunwang@seu.edu.cn

Wang Y, Su H, Fang DY. A geographic surface routing algorithm in 3D ad hoc networks. *Journal of Software*, 2010,21(Suppl.):318-329. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/10033.htm>

Abstract: For geographic routing in 2D ad hoc networks, greedy algorithm is efficient. The next hop node is selected according to the distance to the destination. However, greedy forwarding fails when a message reaches a local-minimum. Face routing is used to solve these problems. Unfortunately, these results cannot be applied to 3D networks directly. We propose an algorithm GSG (Greedy Surface routing Greedy) for geographic routing in 3D environments. We partition whole network with 3D Restricted Delaunay Triangulation. Triangles and isolated edges are defined as 3D components on Surface. By means of identifying intersecting triangles and edges, efficient routes are constructed on surfaces by bypassing local-minimums. Simulation results show that GSG achieves good routing performance and scalability.

Key words: ad hoc network; routing holes; geographic routing; network partition; routing efficiency

摘要: 在二维 AD-HOC 网络中,可以充分利用节点的地理信息进行路由,即 AD-HOC 中节点根据邻居节点的距离目标节点的距离,选择下一跳节点进行路由转发。由于 AD-HOC 中节点部署通常不满足均匀分布,造成网络中出现路由空洞,贪婪转发算法在遭遇空洞的情况下将无法正确执行。在二维 AD-HOC 网络环境中,往往采用贪婪(Greedy)算法结合表面路由(Face Routing)的方法跳出路由空洞。但是在三维条件下,目前没有很好跳出路由空洞的算法能够实现有效的路由。提出了一种在三维 AD-HOC 网络中的地理信息路由算法 GSG,该算法使用 3D RDT 图和 3D RRNG 图的方法实现三维网络空间的划分。采用 3D 表面路由的方法进行信息传递,在遭遇局部最小点时,可有效跳出路由空洞。仿真实验结果表明,GSG 算法可提升三维 AD-HOC 网络条件下地理信息路由的效率,具有良好的可扩展性。

关键词: AD-HOC;路由空洞;地理信息路由;三维空间划分;路由效率

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60973122 (国家自然科学基金); the Aeronautics Foundation of China under Grant No.20091969022 (航空基金)

Received 2010-07-01; Accepted 2010-12-10

与传统网络不同,AD-HOC 网络中的每个节点都具有路由功能.在 AD-HOC 中,由于节点的移动可能造成网络拓扑结构的频繁变化,当网络规模较大的情况下,节点很难搜集得到全网的路由信息,因此需要节点仅仅依靠局部信息进行路由选择.使用局部信息进行路由判断不仅不会给节点带来额外的计算和存储负担,也使网络能够应对拓扑结构的频繁变化.

地理信息路由是 AD-HOC 网络中一种十分有效的路由方式.在地理信息路由协议中,每个节点都拥有自身的地理位置信息,同时可以通过信息交换,得到自己邻居节点以及目标节点的地理位置信息.地理位置信息的获取可以通过部署 GPS 装置或者采用现有的定位算法获得[1,2].地理信息路由协议规定,节点根据目标节点和邻居节点的地理位置信息采用贪婪算法进行路由转发.节点在邻居节点集合中选择距离目标节点最近的邻居节点进行路由转发.

地理信息路由算法中,每个节点都根据邻居节点的地理位置信息,决定信息传输的方向,选择距离目标节点距离最近的邻居节点作为下跳节点.然而,在使用地理信息路由的算法中常常会遭遇到局部最小点的问题,即节点找不到距离目标更近的邻居节点.因此在二维网络中往往采用平面图的方法,对网络进行平面划分,将网络分成若干个表面.当网络中出现路由空洞时,可以用表面的边缘确定路由空洞的边界.采用表面路由(face routing)的方法,使报文沿着路由空洞的边缘进行传输,从而最终跳出局部最小点.但是在现实条件下,网络部署往往难以严格满足二维环境,因此需要在三维网络环境下对地理信息路由进行研究.

本文的主要贡献包括:(1) 提出了使用 3D RDT 和 3D RRNG 方法进行三维空间的划分,通过空间的三角划分将空洞表面划分成 3D 表面;(2) 使用空间中的三角形和独立边集合组成 3D 组件,3D 组件是 3D 表面的基本组成元素.(3) 提出了 3D 表面的路由算法 GSG(Greedy Surface routing Greedy),信息通过在 3D 组件之间的跳转实现了有效传递,快速的离开局部最小点附近的空洞区域.(4) 仿真实验结果说明 GSG 算法相对其他算法更加高效,实现了很好的可扩展性.

本文第 1 节是地理信息路由的相关工作;第 2 节提出了本文的系统模型和问题描述;第 3 节提出了三维空间划分方法.第 4 节讨论了 GSG 算法.第 5 节是仿真实验性能分析,最后是总结.

1 相关工作

当 AD-HOC 分布在二维平面中,常常采用面路由(Face Routing)的方法实现跳出局部最小点.在进行面路由之前首先需要对二维网络进行有效的平面划分.二维网络中,将没有交叉边的网络称为平面图(Planar Graph).现有研究中一般采用分布式的方法进行平面图的构建,常用的方法有二维 Gabriel Graph (GG 图)、二维 Relative Neighborhood Graph (RNG 图)、二维 Restricted Delaunay Triangulation Graph (RDT 图)^[3-6].当网络实现了平面划分之后,整个网络可以划分称为若干个相邻的表面.当遭遇局部最小点时,路由沿着表面的边缘进行,则能够有效的跳出局部最小点.文献[12,13,16]介绍了如何跳出局部最小点的一系列方法.这些方法都采用平面划分的方法将网络分块,当遭遇到局部最小点时,采用若干方法沿着局部最小点周围的表面,向目标节点进行报文转发.现有的这些算法都将贪婪算法与表面路由的方法相结合,即在一般情况下采用贪婪转发的方法进行路由传输,一旦报文到达路由空洞的边缘,即遭遇局部最小点,则进行表面路由.当发现跳出局部最小点时,则继续进行贪婪转发.一般将二维网络中的与贪婪算法相结合的表面路由方法称为 GFG(greedy-face routing- greedy)方法.

与二维网络的路由空洞一样,三维网络中由相邻局部最小点围成的空间体称为三维路由空洞.局部最小点位于路由空洞的边缘.在二维网络中,路由空洞可以通过平面图划分的方法加以确认.但是在三维网络中,相应的空间划分方法并不存在.因此三维网络中的路由空洞边缘难以确认,使三维条件下的地理信息路由更加难以解决.

在三维条件下,没有类似于二维网络中表面路由的有效算法.文献[14]提出了基于 ALSP 的混合路由方式,ALSP 将三维网络中的节点投影到某个二维平面上,在二维平面上通过采用贪婪算法(Greedy Routing) 结合表面路由的方法进行路由.文献[15]提出了基于 SCR 的路由方法.当遇到局部最小点时,基于 SCR 同时部署多个路由恢复树,以提升跳出局部最小点的效率.由于没有对网络中存在的空洞进行划分,因此 ALSP 和 SCR 都无法

保证遇到局部最小点时,搜索严格沿空洞表面执行,搜索效率有待提高.

文献[10,14]证明了对于一个任意的三维网络,不存在 k -local 的决定性的路由算法.文献[7]提出了采用贪婪转发与随机游走相结合的方法(Greedy-Random Walk-Greedy)进行路由.通过使用对偶图的方法,确定空洞边缘,在对偶图划分的基础上,采用随机游走(Random walk)的方法,跳出局部最小点.算法证明在稀疏网络和稠密网络的不同网络条件下,路由算法都能满足较好的性能指标.文献[8]提出了采用贪婪算法与空间外壳路由相结合(Greedy-Hull-Greedy)的方法进行路由.通过采用 PUDT 的方法对三维网络进行划分,基于 PUDT,将相邻的三角形和线段组成 Hull.最后通过在 Hull 上进行深度优先搜索以跳出局部最小点.GRG 和 GHG 算法都对网络进行了一定程度的划分,并能保证在遭遇局部最小点时,搜索能沿空洞表面执行.但是在对空洞表面进行搜索时,GRG 采用随机路由的方法,GHG 采用深度优先搜索,当空洞表面节点数量较多时,无法保证路由算法跳出局部最小点的效率.

2 模型和问题描述

2.1 前提假设

本文假设 AD-HOC 节点部署在三维空间中,所有节点均拥有自身地理位置信息(节点地理位置采用空间三维坐标表示).同时节点可以通过信息交互得到邻居节点的地理位置信息.在信息路由的过程中,信息发送节点同时拥有接收节点的地理位置信息.由于节点在三维空间中部署不均,因此网络中存在一定数量的路由空洞.本文假设网络规模较大,节点的存储空间有限,任意一个节点无法存贮全局网络拓扑信息.所有节点具有相同通信半径,以 1 为单位.本文采用单位球模型,即任意两个空间距离小于 1 的节点能实现相互通信.

2.2 相关定义

在三维网络中,节点 A 和节点 B 之间的连接用 $E(AB)$ 表示.一个由四个节点 A、B、C、D 组成的空间四面体用 $T(ABCD)$ 表示.由三个节点 A、B、C 组成的三角形用 ΔABC 表示.由若干个节点如 A、B、C、D 组成的平面用 $P(ABCD)$ 表示. $S(U,d(UV))$ 表示圆心位于节点 U,半径为 $d(UV)$ 的一个球形区域.不能形成三角形的边称为独立线段.

本文采用 3D RDT(3D Restricted Delaunay Triangulation)的方法进行三维空间的划分.相对 3D DT 方式,3D RDT 不仅大于 1 的边将被消除,同时消除三维划分中的二异性.与二维网络不同,在三维网络中被三角形包围的闭合区域称为 3D 表面(3D Surface).

定义 1. 3D RNG (3D Relative Neighborhood Graph): 三维网络中的两个节点 U 和 V, $E(UV)$ 属于 3D RNG 当且仅当网络中不存在第 3 个节点 W, 位于 $S(U,d(UV))$ 和 $S(V,d(UV))$ 的公共区域之内.

定义 2. 3D RRNG(3D Restricted RNG): 三维网络中的 3D 表面 S 中存在两个节点 U 和 V, $E(UV)$ 属于 3D RRNG 当且仅当 S 中不存在第三个节点 W, 位于 $S(U,d(UV))$ 和 $S(V,d(UV))$ 的公共区域之内.

3D 表面由大量的相互邻接的三角形及无法形成三角形的独立边集合组成.本文将同一个 3D 表面上的三角形和独立边集合称为 3D 组件(3D Component).3D 组件由节点和边组成,是 3D 表面的基本组成元素.根据 3D RRNG 的方法可以对 3D 表面的 3D 组件进行进一步合并,以减少 3D 组件数量.本文提出的 3D 表面路由算法在 3D 表面的 3D 组件之间进行.

2.3 问题描述

在三维网络中,路由空洞边界上的节点为局部最小点.当在具有路由空洞的网络中,任意两个节点之间进行信息传输时,遭遇局部最小点的概率很大.本文考虑 3D 网络条件下的基于地理信息的路由问题.本文研究如何有效实现三维网络的划分,当路由遭遇局部最小点时,搜索能严格在空洞表面执行,从而有效的跳出路由空洞,最终到达目的节点.

3 三维空间划分方法

3.1 概述

为了确定三维网络中的路由空洞,首先需要对三维网络进行空间划分,本文采用 3D RDT(restricted delaunay triangulation)图的方法,3D RDT 图是 3D DT 图的子集,可消除了大于 1 的边,并保证不出现 5 个或者 5 个以上的点共球.当出现 5 个或者 5 个以上的点共球时,对网络的三维划分不唯一,需要根据应用选择一种 3D RDT 图划分.在 3D 网络中采用 RDT 图的方法,无法确保避免边和面的交叉,因此需要额外的机制消除边和三角形交叉的现象.

3.2 三维划分的二异性

情况 1:假设图中存在 5 个节点,如图 1 所示.如果边 E(DI)与三角形 ΔABC 相交时,存在两种 RDT 图的划分.(1) $T(ABCD)$ 和 $T(ABCI)$,如图 1(a)所示;(2) $T(ABDI)$, $T(BCDI)$, $T(ACDI)$,如图 1(b)所示.因此,当空间中出现两个四面体共用一个三角形时,在空间划分中将出现划分的二异性.

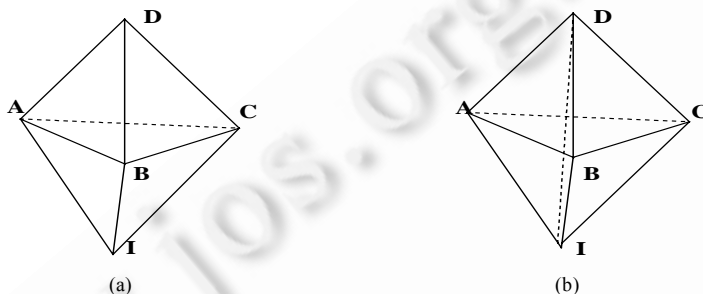


图 1 三维划分二异性:情况 1

情况 2:当出现 4 个点共面时,BCDI 四个点共面,且该面是三角划分子集的边界,按照 DT 图的划分方法,存在两种划分方法:(1) $T(ABCD)$ 和 $T(ABCI)$,如图 2(a)所示;(2) $T(BCDI)$ 和 $T(ACDI)$,如图 2(b)所示.无论采用何种划分方式,都将导致同一平面内两条线段的交叉.因此不仅存在二异性,同时无法消除边和三角形的交叉.

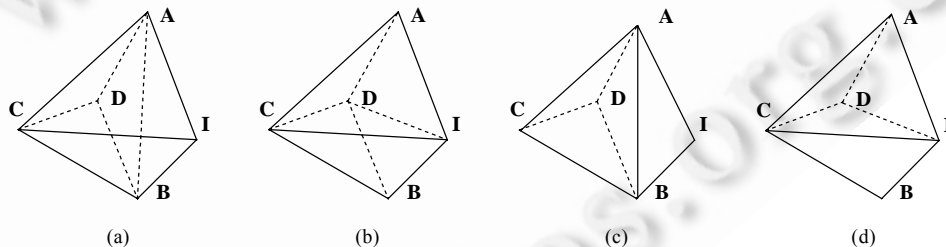


图 2 三维划分二异性:情况 2

情况 3:当出现 4 个点共面且这个面不是三角划分子集的边界时,按照 RDT 图的划分,存在两种划分,(1) $T(ABCE)$, $T(ABEI)$, $T(ABCD)$, $T(ABDI)$,见0(a);(2) $T(ACDE)$, $T(ADEI)$, $T(BCDE)$, $T(BDEI)$,如图 3(b)所示.划分存在二异性.

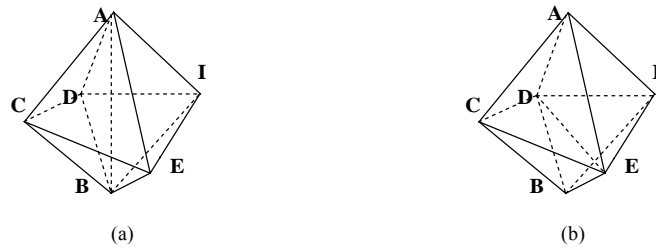


图3 三维划分二异性:情况3

3.3 二异性的消除

针对以上出现的三维空间划分中的二异性,本文给出确定性规则.规则不仅消除二异性,同时也保证三维网络中边与任意三角形之间都不存在互相交叉的情况.

规则1:针对情况1.假设两个空间四面体共用一个 ΔABC ,且四面体的两个端点 D, I 组成的边 $E(DI)$ 穿越了该 ΔABC .如果端点 I 位于 $T(ABCD)$ 的外接球内部则,删除边 $E(DI)$,网络被划分成为 $T(ABCD)$ 和 $T(ABCI)$,见图 1(a)所示;否则,删除 ΔABC ,网络被划分为 $T(ABDI), T(BCDI), T(ACDI)$,如图 1(b)所示.

规则2:针对情况2.对于共面的四个点 $BCDI$,如果 D 位于 ΔBCI 外接圆内,则在第1种划分的基础上进一步消除边 $E(CI)$,如图 2(c)所示,节点集合分为四边形 $T(ABCD)$ 和 ΔABI .如果点 I 在 ΔBCD 外接圆内,则在第2种划分的基础上进一步消除边 $E(BD)$.如图 2(d)所示,节点集合分为四边形 $T(ADCI)$ 和 ΔCBI .

规则3:针对情况3.对于共面的四边形 $ABDE$,如果点 A 在 ΔBDE 的外接圆内,或者点 B 在 ΔADE 的外接圆内则消除 DE 边,保留 AB 边即采用第1种划分方法,网络被划分成为 $T(ABCE), T(ABEI), T(ABCD), T(ABDI)$,如图 3(a)所示.如果点 E 在 ΔABD 的外接圆内,或者点 D 在 ΔABE 的外接圆内则消除 $E(AB)$,保留 $E(DE)$ 即采用第2种划分方法.网络被划分成为 $T(ACDE), T(ADEI), T(BCDE), T(BDEI)$,如图 3(b)所示.

3.4 相邻三角形的确认

采用 3D RDT 方法对网络进行划分后,网络中的节点将被划分成许多相邻的三角形.空洞表面将由若干个相互邻接的三角形构成,需要确认相邻三角形是否同属于一个 3D 表面.本文采用右手法则确定三角形的方向. ΔABC 按照右手法则,沿 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 的方向是向下的,沿 $A \rightarrow C \rightarrow B$ 方向向上. ΔABC 在 $E(BC)$ 上有两个相邻的三角形 ΔBCE 和 ΔBCD .根据空间中相邻三角形夹角计算.可得 ΔABC 和 ΔBCD 的下表面同属于 3D 表面 I. ΔABC 的上表面和 ΔBCE 的左表面同属于 3D 表面 II. ΔBCE 的右表面和 ΔBCD 上表面同属于 3D 表面 III.在对网络进行 3D RDT 划分之后,网络中任意一个三角形都能够给通过这种方法确定其三边属于同一 3D 表面的相邻三角形.

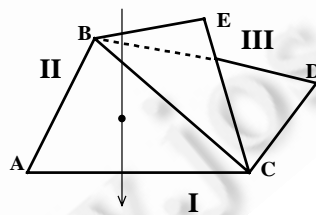


图4 相邻三角形

对于空间划分后的一个三角形,如果某条边不与其他任何三角形相交,则该三角形的两个方向上的面同属于一个空洞的 3D 表面.如果 ΔBCE 的边 $E(BE)$ 不与任意其他的三角形相邻接,则 ΔBCE 的左右两个面同属于一个 3D 表面,即 3D 表面 II 与 3D 表面 III 可以合并.算法见表 1.

表 1 相邻三角形 3D 表面的确定算法

算法: 相邻三角形 3D 表面的确定	
1	BEGIN
2	FOR(i=0;i<2;i++)
3	选择三角形的一个方向;
4	FOR (i = 0; i<3;i++)
5	选择三角形一条边;
6	找到与该边相邻的邻居三角形;
7	IF (三角形不存在)
8	合并三角形两个表面成为一个 3D 表面;
9	ELSE
10	选择该方向上与其夹角最小的三角形,成为同一个 3D 表面;
11	ENDIF
12	ENDFOR
13	ENDFOR
14	END

3.5 网络中的独立边

网络中某些区域可能由于节点分布比较稀疏,无法形成三角形,只存在独立边.网络中连续的独立边形成一个独立边集合,如图 5 所示.E(DE),E(EF)与 E(BD)相互邻接形成了一个独立边集合.独立边集合与相邻的三角形同方向上属于同一个 3D 表面.边 E(BD)、E(DE)、E(EF)无法与其他节点构成三角形, ΔABC 下表面属于 3D 表面 I,上表面属于 3D 表面 II,独立边集合 E(DE),E(EF)与 E(BD)与 ΔABC 上表面同属于 3D 表面 II.

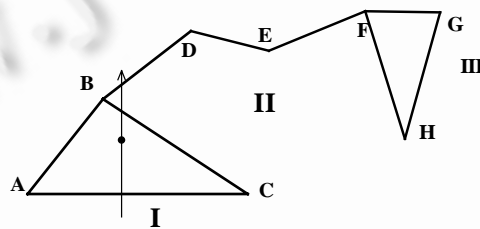


图 5 独立线段

同一个 3D 表面上,独立边集合与三角形一样,都是 3D 表面的 3D 组件(3D Component).3D 组件由节点和边构成,是 3D 表面的基本组成元素.独立边集合形成的 3D 组件一经确定不再变化,而由三角形构成的 3D 组件将进一步合并,以进一步减少 3D 表面 3D 组件的数量.

3.6 3D 表面上三角形的合并

采用 3D RDT 划分的方法,将整个网络划分成若干个邻接的三角形.三角形和独立边集合形成了 3D 表面的 3D 组件.在网络较稠密的情况下,3D 表面的 3D 组件数量很多,为了进一步减少 3D 组件的数量,本节采用 3D RRNG 图的方法对 3D 表面由三角形构成的 3D 组件进行进一步合并.

定理 1. 同一个 3D 表面上 3D RRNG 图是 3D RDT 图的子集.

证明:由 3D RDT 图的构建方法,同一个 3D 表面内所有节点构成若干个三角形.假设按照 3D RRNG 划分方法,3D 表面上存在某条边,且该边不属于 3D 表面上的 3D RDT 图,则存在如下可能,(1)该边与某个三角形相交而被删除;(2)由于 3D RDT 图的二义性,该边被删除.对于第一种可能,参考图 2,如果边 DI 在 RDT 图中被删除,且属于 3D RRNG 图,则 A、B、C 中必有一点在 $S(D,d(D,I))$, $S(I,d(D,I))$ 的相交球内,因此边 DI 不应属于 3D RRNG 图,存在矛盾.对于第 2 种可能,参考图 3,共面的 4 个点,必然不存在交叉边,如果存在交叉边,则消除的边不仅不存在于 3D RDT 图中,同样也不会出现在 3D RRNG 图中,存在矛盾.同样参考图 3,在 3D RDT 图中消除的边必然也不

会出现在 3D RRNG 图中.因此,如果某条边属于 3D 表面上的 3D RRNG 图,该边必然也在 3D RDT 图内. □

由于在同一个 3D 表面上,3D RRNG 图是 3D RDT 图的子集,采用 3D RRNG 图可以进一步减少 3D 表面上边的个数.根据被消除的边,可以进行三角形的合并.0中,在 3D 表面 I 上,如果按照 3D RRNG 方法 E(BC)应被消除,则合并 $\triangle ABC$ 和 $\triangle BCD$,但是在 3D 表面 II 和 III 上 E(BC)并没有被消除.由于进行了三角形的合并,在原有的 3D 表面上 3D 组件的个数将进一步减少.3D 表面相邻三角形合并算法见表 2.

表 2 3D 表面三角形的合并算法

算法. 3D 表面三角形的合并(当前节点 U,V,当前 3D 表面 I)	
1	BEGIN
2	FOR (所有边 E(U,V) {E(U,V) ∈ I})
3	IF $\exists W \{W \in I, W \neq U, W \neq V, W \in S(U, d(U, V)) \cap S(V, d(U, V))\}$
4	在 I 上删除边 E(U,V);
5	IF (\exists 组件 $F_1, F_2 \{E(U, V) \in F_1, E(U, V) \in F_2, F_1, F_2 \in I\}$)
6	合并 F_1 和 F_2 为 F_{12} ;
7	ENDIF
8	ENDIF
9	END FOR
10	END

4 地理信息路由算法 GSG

算法 GSG 在一般情况下采用贪婪转发的方式进行路由,遭遇局部最小点时,采用 3D 表面路由,跳出局部最小点后继续采用贪婪算法路由.

4.1 3D 表面路由算法

4.1.1 相关定理和说明

现有的三维网络路由算法都需要遍历空洞表面大多数的边和节点,且搜索过程完全随机,没有方向性,平均搜索效率都不高.本文采用基于 3D 表面路由方法,当遇到局部最小点时,实现了在空洞表面的搜索.但并不采用传统路由协议中节点到节点之间的数据传输方式,而是根据空洞表面 3D 组件的划分,在 3D 表面上的 3D 组件之间进行信息跳转.对于任意一个 3D 表面来说,只需要遍历 3D 表面上少量节点,即能够实现跳出局部最小点,从而提升了搜索的效率,加快了跳出局部最小点的速度.

如上节所示,采用 3D RRNG 的方法,3D 表面任意一个 3D 组件上的节点需要知道自身所在 3D 组件内其他节点的信息(包含节点标号和节点坐标).根据文献[14],三维条件下,仅仅知道 K 跳邻居,不存在确定性的路由算法.在本文提出的方法中,每个节点知道自身所处 3D 组件中的其他节点信息,本方法对单个节点的存储能力要求有所增强,但不会对节点造成很大的负担.

对于空洞边界的 3D 表面可以分为空洞内表面和空洞外表面部分.当遇到局部最小点时,信息将沿着空洞内表面进行搜索,在局部最小点 S 与目标节点 T 之间建立一条连线.在 3D 表面上的搜索就是在 3D 表面上寻找某个 3D 组件包含的三角形,与 ST 连线相交.如果不存在这样的 3D 组件,则目标节点 T 一定位于该 3D 表面上.

定理 2. 信息在某个 3D 表面上路由,如果目标节点 T 不在当前 3D 表面上,则 3D 表面上一定存在一个 3D 组件中的三角形被 ST 连线穿越.

证明:假设目标节点不在当前 3D 表面上,同时 3D 表面上不存在一个 3D 组件被 ST 连线穿越.由 3D 表面定义,如果空洞被 3D 表面完全覆盖,则当 T 不在当前 3D 表面上时,ST 连线必然穿越空洞表面围成的空间体,即 3D 表面上必有一个 3D 组件与 ST 连线相交.如果空洞表面没有被 3D 表面完全覆盖,则根据 3D 表面的定义,空洞从局部最小点开始一直到 T 都不完全闭合,T 必然属于当前 3D 表面,因此产生矛盾.故如果目标点不在当前 3D 表面上,则 3D 表面上必然存在一个 3D 组件中的三角形被 ST 连线穿越.证毕.

在 3D 表面上路由时,每个 3D 组件都有一个中心点,中心点的三维坐标 3D 组件上所有节点三维坐标的平均值.假设对于 3D 表面中一个 3D 组件 F,3D 组件 F 中心点与 ST 连线垂直的平面在 ST 连线上的交点为 i,交点 i 称为 3D 组件 F 在 ST 连线上的投影点.设局部最小点 S 的坐标为 (x_s, y_s, z_s) ,目标 T 的坐标为 (x_t, y_t, z_t) ,3D 组件 F 的中心点坐标为 (x_f, y_f, z_f) .则过 3D 组件 F 在 ST 连线上的投影点坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,满足方程(1).

$$\begin{cases} (x_t - x_s)(x_f - x_i) + (y_t - y_s)(y_f - y_i) + (z_t - z_s)(z_f - z_i) = 0 \\ (x_i - x_s)/(x_t - x_s) = (y_i - y_s)/(y_t - y_s) = (z_i - z_s)/(z_t - z_s) \end{cases} \quad (1)$$

由方程 5-1 可得 3D 组件 F 在 ST 连线上的投影点坐标 (x_i, y_i, z_i) .3D 组件 F 的中心点与 ST 连线的距离可表示为 $L_{Fi} = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2}$.同时投影点 i 距离目标点 T 的距离可表示为

$$L_{ti} = \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2 + (z_t - z_i)^2}.$$

3.1.2 算法描述

3D 表面路由算法见表 3.

表 3 3D 表面路由算法 GSG

算法. 3D 表面路由算法(设当前 3D 表面为 I;当前 3D 组件为 F_i ;路由选择中上一个访问的 3D 组件为 F_{i-1} ;下一个访问的 3D 组件为 F_{i+1} ;当前 3D 组件 F_i 的未访问过的邻居 3D 组件为集合 FN;当前节点为 C_i ;上一个访问的节点为 C_{i-1} ;下一个访问的 3D 组件为 C_{i+1} ;当前节点的邻居节点集合为 CN;当前路由准则为 R;信息发送点为 S;信息接收点为 T;局部最小点为 M.	
<pre> 3D_FACE_ROUTING(3D 表面路由算法) 1 BEGIN 2 IF ((M!∈Fi & Fi 被 ST 连线穿越) T∈Fi) 3 END; 4 ENDIF; 5 IF (C=M) 6 R←R1; 7 Fi+1←F{max LFi {F∈I, C∈F}}; 8 COMPONENT_ROUTING(Fi+1); 9 ELSE 10 IF (R = R1 & !∃F{max LFi {F∈FN}}) 11 R←R2; 12 ENDIF 13 IF (R = R2 & !∃F{minLti {F∈FN}}) 14 R←R3; 15 ENDIF 16 IF (R = R3 & !∃F{minLti {F∈FN}}) 17 R←R4; 18 ENDIF; 19 Fi+1←COMPONENT_SELECT (Fi+1 R); 20 COMPONENT_ROUTING(Fi+1); 21 ENDIF 22 END </pre>	<pre> COMPONENT_SELECT(Fi, R)(根据准则选择下一 3D 组件进行路由) 23 BEGIN 24 IF (R=R1) 25 Fi+1←F{max LFi {F∈FN}}; 26 ENDIF 27 IF (R=R2) 28 Fi+1←F{minLti {F∈FN}} 29 ENDIF 30 IF (R=R3) 31 Fi+1←F{minLti {F∈FN}}; 32 ENDIF 33 IF (R=R4) 34 Fi+1←F{F∈FN}; 35 ENDIF 36 IF (Fi+1=NULL) 37 RETURN Fi+1; 38 ELSE 39 RETURN Fi+1; 40 ENDIF 41 END </pre>
<pre> COMPONENT_ROUTING(Fi+1)(3D 组件上节点间路由算法) 42 BEGIN 43 IF(C∈Fi+1) 44 Ci+1←K{K∈CN,K∈Fi+1, K≠Ci-1} //节点在新的 3D 组件中路由 45 ELSE 46 Ci+1←K{K∈CN,K∈Fi, K≠Ci-1} //仍然在当前 3D 组件中路由 47 ENDIF 48 END </pre>	

3D 表面路由算法由 3 个子算法构成。3D_FACE_ROUTIN 是主算法,实现了路由准则的改变以及路由转发中下一个节点的选择。算法 COMPONENT_SELECT 根据路由准则,实现了 3D 表面路由中下一个 3D 组件的选择。算法 COMPONENT_ROUTING 实现了信息在 3D 组件内节点之间的传输。

算法 COMPONENT_SELECT 根据如下规则,实现 3D 表面中下一个 3D 组件的选择。

规则 R1:对于当前 3D 组件的未遍历的邻居 3D 组件 F_i , L_{Fi} 最大的被选中(算法第 24~26 行)。

规则 R2:对于当前 3D 组件的未遍历的邻居 3D 组件 F_i , L_{Fi} 最小的被选中(算法第 27~29 行)。

规则 R3:对于当前 3D 组件的未遍历的邻居 3D 组件 F_i , L_{Fi} 最小的被选中(算法第 30~32 行)。

规则 R4:随机选择未遍历过的邻居 3D 组件(算法第 33~35 行)。

如果在路由过程中发现当前 3D 组件被 ST 连线穿越或者目标节点在当前 3D 组件中,则 GSG 算法结束(第 2~4 行)。当遭遇局部最小点时,开始以准则 R1 进行路由选择(第 5~8 行)。随后路由算法按照准则 R1,R2,R3 按照远离 ST 连线,沿 ST 连线方向前进,逐步靠近 ST 连线的过程向前搜索(第 10~15 行)。如果发现仍然无法跳出当前 3D 表面,则按照深度优先搜索的方式随机选择 3D 组件搜索(第 16~18 行)。

算法 COMPONENT_ROUTING 根据当前节点和下一跳 3D 组件的关系进行下一跳节点的选择。如果当前节点同时属于下一跳 3D 组件,则进行 3D 组件间的转换(第 43~44 行)。否则在当前 3D 组件内寻找下一跳节点转发(第 45~46 行)。

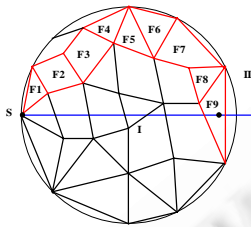


图 6 3D 表面路由

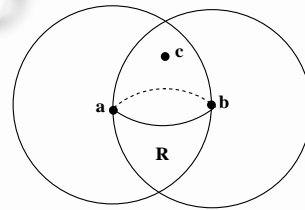


图 7 三维条件下 MST 和 3DRNG

当信息遭遇局部最小点 s 时,报文开始在 3D 表面 I 上进行路由。首先报文按照准则 1 将不断远离 ST 连线,报文沿 F_1, F_2, F_3, F_4 进行传输,当报文到达 F_4 时,进行规则的转换,沿 F_5, F_6, F_7 的路径进行传输。当报文到达 F_7 时,转换成规则 3,报文沿 F_8, F_9 进行转发。当报文到达 F_9 时,由于 F_9 与 ST 连线相交,在当前 3D 表面上的路由终止。如果跳出了局部最小点则继续按照贪婪转发的方式进行路由。否则重新选择新的 3D 表面,在新的 3D 表面上继续执行路由。

如果 3D 表面边的个数为 m ,3D 表面路由算法的复杂度上限是 $O(m)$ 。因为在最坏情况下,3D 表面路由算法需要遍历所有的 3D 组件。而任意一条边最多同时属于 2 个 3D 组件。因此最坏情况下算法需要遍历每条边两次。算法复杂度上限为 $O(m)$ 。

4.2 稀疏网络中的路由

当网络中节点密度较大时,可形成包围空洞的若干三角形,并基于空洞表面的 3D 表面进行路由。如果节点部署密度较小时,大多数相邻节点无法形成有效的三角形,无法对空洞表面进行有效的三角划分,也无法确定有效的 3D 表面。在网络较稀疏的条件下,网络中空洞区域较大,空洞的 3D 表面难以确定。本文直接使用 3D RNG 图对网络进行划分。3D RNG 在消除网络多余边的条件下,仍然保证了网络的连通性能。因此,在稀疏网络中,采用贪婪转发的方法进行路由转发,当遇到局部最小点时,在 3D RNG 图上进行深度优先搜索以跳出局部最小点。之后继续进行贪婪转发方式的路由。

定理 4. 三维条件下 MST(最小生成树)是 3D RNG 图的子集。

证明:对于空间中任意两个节点 a 和 b , R 为分别以 a 和 b 为球心的两个球的公共区域。如果 $c \in R$ 则有 $d(ac) < d(ab)$, $d(bc) < d(ab)$ 。因此 ab 必不属于 MST。因此 $ab \in MST$ 的必要不充分条件是 R 内没有第 3 个节点。同时 R 内没有第 3 个节点是 $ab \in RNG$ 的充分必要条件,因此 $MST \in 3DRNG$ 。□

5 实验仿真

5.1 路径长度比较

实验在 $100 \times 100 \times 100$ 的三维区域随机部署 $n(200 < n < 1000)$ 个节点,在三维区域中随机部署大小为 $k \times k \times k$ ($k=15,35,50$) 的空洞区域.实验仿真了 GRG^[7]、GHG^[8]、GSG 和 3D RNG 在不同网络部署条件下的性能指标.并与采用 Dijkstra 的全局算法进行了比较.由于 GRG、GHG 和 GSG 在跳出局部最小点后都采用贪婪转发方法,因此实验仅比较了三个算法在遭遇局部最小点到跳出局部最小点之间的路由效率.

首先实验比较了 GSG、GRG 和 GHG、3D RNG 以及 Dijkstra 算法在不同条件下的路径长度.实验以 Dijkstra 的全局最优算法为基准,分别仿真实验了 GSG、GRG、GHG 和 3D RNG 相对 Dijkstra 算法的路径长度的比值.当空洞较小且节点密度较低的情况下,3D RNG 图的路径长度最短,GHG 的路径长度高于 3D RNG,略低于 GSG,GRG 路径长度最大.当空洞大小逐渐变大,且节点密度不断增加时,3D RNG 和 GHG 的路径长度都明显增加,GSG 的性能超越 3D RNG 和 GHG.当密度增加到一定程度时,3D RNG 和 GHG 算法的路径长度与 GRG 算法接近.同时由图可以看出,3D RNG、GRG 和 GHG 的路径长度都随着节点密度的增加而增加.而 GSG 的性能并不随着节点密度的增加而剧烈变化.由此可见,在节点密度较低的情况下,3D RNG 性能最优,而算法 GSG 相对其他算法而言,适用于各种部署环境,具有更高的路由效率和可扩展性.

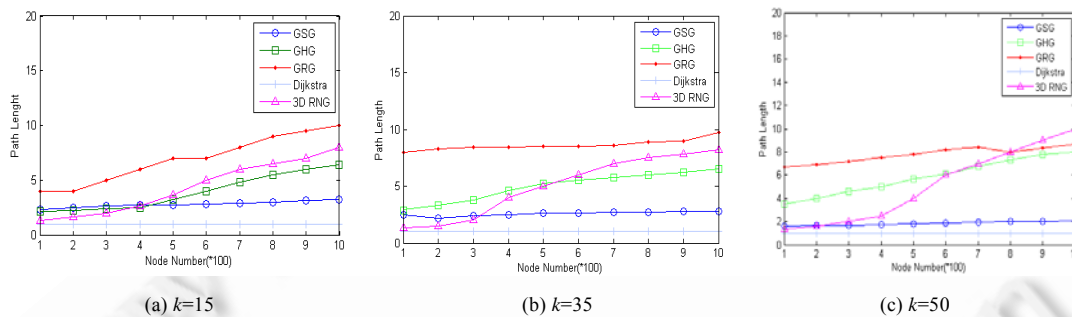


图 8 路径长度比较

实验模拟了不同的三维路由空洞边界条件下,GSG 算法与 GRG 及 GHG 算法的性能比较.如图 9 所示,实验分别在球表面、瓶表面以及复杂地形表面上分别实验了算法的性能,由实验可知,在各种不同不规则的三维路由空洞表面中,GSG 路由性能较好,其平均路径长度远低于 GHG 与 GRG,实现了更加有效的路由.同时 GSG 算法的路由效率不随空洞表面的不同而变化.因此 GSG 算法具有较好的可扩展性.

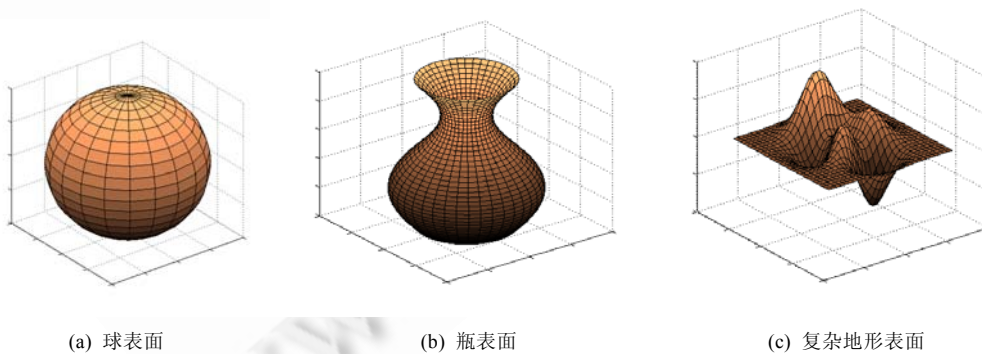


图 9 不同的空洞表面

表 4 复杂空洞表面路由长度

空洞表面	球表面	瓶表面	复杂地形表面
Dijkstra	1	1	1
GSG	2.5	2.4	2.3
GHG	6.2	5	6.5
GRG	12	9.4	10.1

5.2 性能代价比实验

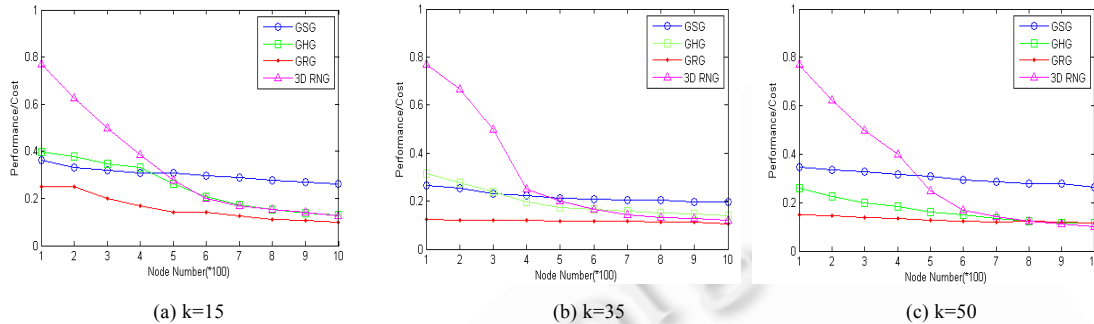


图 10 路由性价比比较

实验比较了 GSG、GRG、GHG 算法和 3D RNG 的路由性能和路由代价的比值。路由代价为节点之间交换的信息数量,路由性能为路由的长度的倒数,节点交换的位置信息越少,路由代价越低。路由长度越小,路由性能也就越好。如图 10 所示,在网络部署密度较低的情况下,3D RNG 的性能代价比很高,大于 GSG、GHG 和 GRG。GSG 的性能代价比与 GHG 性能代价比接近,GRG 的性能代价比最低。当空洞较大且节点部署密度较大时,3D RNG 和 GHG 性能代价比下降很快。此时 GSG 的性能代价比下降很慢,其性能代价比高于其他路由协议。由图 10 可见,在低密度的条件下可以考虑直接采用 3D RNG,而在大多数情况下,GSG 都实现了较高的性能代价比,GSG 的可扩展性明显优于其他方法。

6 结论

本文提出了三维 AD-HOC 条件下基于地理信息的路由算法 GSG。该方法考虑了 AD-HOC 部署的多样性,在允许网络中空洞出现的条件下,实现了空洞容忍的三维路由。本文使用 3D RDT 和 3D RRNG 图的方法进行三维空间划分,通过寻找 ST 连线与表面的相交边,确认 3D 表面上 3D 组件的转换。通过使用 3D 表面路由的方法有效跳出局部最小点。相比现有的协议,GSG 算法在多种网络部署条件下实现了高效的地理信息路由,并具有良好的性能代价比和可扩展性,在稀疏网络中采用 3D RNG+DFS 的方法能够实现较高的路由效率。

References:

- [1] Bruck J, Gao J, Jiang AA. Localization and routing in sensor networks by local angle information. ACM MobiHoc, 2005. 181–192.
- [2] He T, Huang C, Blum BM *et al.* Range-Free localization schemes for large scale sensor networks. ACM MobiCom, 2003. 81–95.
- [3] Bose P, Morin P, Stojmenovic I, *et al.* Routing with guaranteed delivery in Ad Hoc wireless networks. Wireless Networks, 2001, 7(6):609–616.
- [4] Karpand B, Kung HT. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. ACM MobiCom, 2000. 243–254.
- [5] Frey H, Stojmenovic I. On delivery guarantees of face and combined greedy-face routing in Ad Hoc and sensor networks. ACM MobiCom, 2006. 390–401.
- [6] Kuhn F, Wattenhofer R, Zhang Y, *et al.* Geometric Ad-Hoc routing of theory and practice. ACM PODC, 2003. 63–72.
- [7] Roland F, Roger W. Randomized 3D geographic routing. IEEE Infocom, 2008. 834–842.
- [8] Liu C, Wu J. Efficient geometric routing in three dimensional AD hoc networks. IEEE Infocom, 2009. 2751–2755.

- [9] Joe B. Construction of three dimensional delaunay triangulation using local transformations. Computer aided Geometric Design, 1991,8(2):129-142.
- [10] Stephane D, David K, Lata N. On routing with guaranteed delivery in three-dimensional ad hoc wireless networks. In: ICDCN. 2008. 546-557.
- [11] Godfried T. The relative neighbourhood graph of a finite planar set pattern recognition, 1980,12:261-268.
- [12] Kranakis E, Singh H, Urrutia J. Compass routing on geometric networks. In: Proc. of the 11th Canadian Conf. on Computational Geometry (CCCG 1999). 1999. 51-54.
- [13] Fang Q, Gao J, Guibas L. Locating and bypassing routing holes in sensor networks. IEEE Infocom, 2004. 2458-2468.
- [14] Liu S, Fevens T, Abdallah A. Hybrid position based routing algorithm for 3D mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Mobile Adhoc and Sensor Networks. 2008. 177-186.
- [15] Tao S, Ananda A, Chan M. Spherical coordinate routing for 3D wireless ad-hoc and sensor network. In: IEEE Conf. on Local Computer Networks. 2008. 144-151.
- [16] Frey H, Stojmenovic I. On delivery guarantees of face and combined greedy-face routing in ad hoc and sensor networks. ACM Mobicom. 2006. 390-401.



汪芸(1967—),女,江苏苏州人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为传感器网络,分布式系统,容错算法.



房鼎益(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,软件安全与保护.



苏瀚(1979—),男,博士,主要研究领域为无线传感器网络.