

正多角形セル群による無線マルチホップ通信

松村 真吾^{†1} 桧垣 博章^{†1}

高速高頻度に移動する無線ノードからなるアドホックネットワークでは、従来の中継ノード ID の列として無線マルチホップ配送経路を定める手法では、経路切断による経路再探索が頻繁に必要となる。アドホックネットワークを含む適用対象平面を固定正方形セルに分割し、中継セル ID の列として無線マルチホップ配送経路を定める手法では、メッセージごとに中継セルに含まれるノードを中継無線ノードと動的に決定することで、ノード移動に対する耐性の高いアドホックルーティングを実現している。ここでは、より低い無線ノード分布密度であっても接続性が高く、より経路長の短いマルチホップ配送経路の実現が求められる。本論文では、5種類の異なる正多角形セルを用いて適用対象平面を分割した場合の接続性と配送経路長を評価する。また、無線ノード位置をセル ID へ変換する手法を示し、シミュレーション実験によってマルチホップ配送経路接続時間と座標変換時間を評価する。

Wireless Multihop Communication by Using Regular Polygon Cells

SHINGO MATSUMURA^{†1} and HIROAKI HIGAKI^{†1}

In mobile ad-hoc networks consisting of wireless nodes with high-speed and high-frequent mobility, conventional ad-hoc routing protocols do not work efficiently. Since a wireless multihop transmission route consists of a sequence of node IDs, it is often broken due to the mobility and re-routing is required, which reduces performance of data message transmission. In order to solve this problem, a novel highly mobility-resilient method has been proposed in which a multihop transmission route consists of not a sequence of node IDs but a sequence of cell IDs. In order for this method to be widely applied, improvement for high connectivity and shorter multihop routes is required. This paper evaluates cell-based routing using 5 different regular polygon cells. By this evaluation, it becomes clear that a cell-based method with regular hexagon cells works efficiently in view of connectivity, route length, route resiliency and computational overhead.

1. はじめに

無線通信デバイスを備えた無線ノードがデータメッセージの送受信ノードとなるばかりでなく、中継ノードとしても機能することによって、固定無線基地局や有線ネットワークを要することなく構築可能なアドホックネットワークの研究開発が活発に行なわれている。アドホックネットワークでは、各無線ノードが消費電力の削減と無線信号の衝突、競合の発生機会削減を目的として、限られた送信電力を用いてデータメッセージを転送する無線マルチホップ配送が用いられる。無線マルチホップ配送を行なうためには、次ホップ中継無線ノードを無線信号到達範囲に含む無線マルチホップ配送経路が必要である。車載コンピュータを無線ノードとする ITS(Intelligent Transport System) 等の応用では、無線ノードの移動速度、移動頻度が高く、ネットワークポロジが頻繁に変化する。また、無線ノードがセンサ機能を備え、センサデータを無線マルチホップ配送するセンサネットワークでは、無線ノードの移動頻度が低いものの、電池消耗や故障による無線ノードのネットワークからの永続的な離脱や省電力を目的としたスリープモードによる一時的なネットワークからの離脱等によって、ネットワークポロジが変化する。このようなポロジの変化を含むネットワーク環境において、データメッセージの低遅延、高信頼、高スループットな無線マルチホップ配送を実現するために、様々なルーティングプロトコルが提案されている。

しかし、従来提案されているアドホックルーティングプロトコルの多くは、無線ノード ID の列として定めた無線マルチホップ配送経路が送信元無線ノードから送信先無線ノードへデータメッセージ群を配送する時間に切断される可能性が十分低い程度に無線ノードの移動速度と移動頻度が低いことを明示的にあるいは暗黙に前提としている。移動速度と移動頻度が高い環境でのアドホックルーティング手法として、アドホックネットワークを含む適用対象平面を固定正方形セルで分割し、隣接セル ID 列として無線マルチホップ配送経路を定める GVGrid¹²⁾ の手法が提案されている。GVGrid では、マルチホップ配送経路の中継セルに含まれる任意の無線ノードを配送データメッセージごとに動的に中継ノードと定めることにより、無線ノードの高速、高頻度な移動に対して耐性の高いルーティングを実現している。しかし、GVGrid では、隣接セル間の任意の無線ノード間が通信可能であることを必要とするため、比較的小さなセルを用いる必要がある。このため、無線ノードを含まないセルの発生による無線マルチホップ配送経路の切断と多数の中継セルを必要とすることによる配送経路長の増加の問題がある。

アドホックネットワークの適用対象平面を被覆することが可能な正多角形には、正方形セルの他に正三角形セルと正六角形セルがある。また、正三角形セルと正方形セルを用いる場合には、隣接セルの定め方により 2 つの大きさの異なるセルが適用可能である。そこで本論文では、これらの 5 つの異なる正多角形セルを用いてセル ID 列として無線マルチホップ配送経路を構成するルーティング手法における配送経路の接続性と配送経路長を評価し、

^{†1} 東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

正方形セルを用いる従来手法の性能改善について検討する。

2. 関連研究

アドホックネットワークやセンサネットワークで適用される無線マルチホップネットワークを対象としたルーティングプロトコルには、無線ノードの位置情報を用いるものと用いないものがある。位置情報を用いないプロトコルは、各無線ノードの無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードを経路探索制御メッセージ (*Rreq*) の到達性によって確認することを順次繰り返すフラッディングを基礎として無線マルチホップ配送経路を探索、検出、構成する。AODV¹¹⁾, DSR⁴⁾, TORA¹⁰⁾ 等多数のプロトコルが提案されている。一方、位置情報を用いるプロトコルは、各無線ノードが GPS (Global Positioning System) 等の位置情報取得デバイスを備えていることを前提として構成される。すべての無線ノードの位置情報を集約することで最適な無線マルチホップ配送経路を構成することが考えられるが、多数の無線ノードの位置情報を集約する通信オーバーヘッドが大きいこと、特に無線ノードの移動速度、移動頻度が高い場合には高頻度の位置情報集約が必要となることから、各無線ノードが自身および近隣無線ノード (隣接無線ノードや 2 ホップ近隣無線ノード) の位置情報のみを集約し、無線マルチホップ配送経路の次ホップ無線ノードを選択、決定することによるルーティング手法が提案されている。このような無線ノードの位置情報を用いるルーティングプロトコルでは、送信先無線ノードの位置が既知である場合や送信先無線ノードを位置で指定できる場合には、経路探索メッセージのフラッディングを用いることなく、順次次ホップ無線ノードを決定することが可能である。GEDIR¹³⁾, GPSR⁵⁾, FACE²⁾ 等のプロトコルが提案されており、さらにタイマを活用することで隣接無線ノードの位置情報取得を不要とする NB-FACE⁸⁾, NB-GEDIR¹⁴⁾ が提案されている。送信先無線ノードが ID で指定されており、その位置が既知でない場合には、DREAM¹⁾ や HRLI⁷⁾ のような位置管理無線ノードを探索し、送信先無線ノードの位置を取得した後に経路探索を行なう手法や LAR⁶⁾ のように経路探索制御メッセージのフラッディングに制約を与えることで通信オーバーヘッドを削減する手法が提案されている。

これらのアドホックルーティングプロトコルでは、無線ノードの移動速度、移動頻度が比較的低く、無線ノードの分布密度が比較的高いことが明示的にもしくは暗黙に前提とされている。ITS 等への応用では、移動速度、移動頻度の高い車載コンピュータが無線ノードとなるアドホックネットワークが求められる。ここでは、ルーティングプロトコルによって探索、検出、構築された無線ノード ID 列として与えられる無線マルチホップ配送経路は、無線ノードの高速、高頻度の移動によって短時間のうちに切断される可能性が高い。そのため、データメッセージの無線マルチホップ配送を頻繁に中断し、再経路探索を行なわなければならない。これによって、データメッセージの配送遅延の拡大と配送スループットの低下を招く。

この問題を解決する手法として、無線マルチホップ配送経路を経路上の移動ノード ID 列で与えるのではなく、部分平面 ID の列として与え、部分平面に含まれる任意の無線ノードを配送データメッセージごとに動的に中継ノードとして選択する手法が提案されている。適用対象平面を固定の正方形セルに分割し、この正方形セルを部分平面とする手法が GVGrid¹²⁾ で提案されている。ここで、隣接する正方形セルに含まれる任意の無線ノード対が互いに無線信号到達範囲に含まれるように正方形セルの大きさを制限することで、無線マルチホップ配送経路を隣接セル ID 列として与えることができる。データメッセージを転送する無線ノードは、RBM³⁾ によって動的に選択される。一方、AODV や DSR と同様の経路探索制御メッセージ (*Rreq*) のフラッディングによって検出されたマルチホップ配送経路の中継ノードの経路検出時の位置を目標中継点とし、目標中継点に最も近く次ホップ目標中継点を無線信号到達範囲に含む無線ノードを中継ノードとして選択する手法が提案されている¹³⁾。ここでは、前ホップ無線ノードの無線信号到達範囲に含まれ、次ホップ目標中継点を無線信号到達範囲に含む領域を部分平面としている。したがって、部分平面が固定でなく、配送データメッセージごとに動的に定まる点が GVGrid とは異なる。目標中継点に最も近い無線ノードの選択は^{8),14)} で提案されているタイマを用いる手法を適用している。また、各部分平面の面積が GVGrid の場合よりも大きくなることが多いため、無線マルチホップ通信経路上の部分平面に無線ノードが 1 台も含まれなくなることが少なく、より安定な配送経路を提供できることがシミュレーション実験によって示されている。

3. 提案手法

3.1 正多角形セル列によるマルチホップ配送経路

前章で述べたように、無線アドホックネットワークを含む適用対象平面を正方形セルに分割し、無線マルチホップ配送経路をセル ID 列で与える方法は、マルチホップ配送経路を無線ノード ID 列で与える従来の方法に比べて、無線ノードの移動速度、移動頻度の高い環境における経路切断による経路再探索を削減する。これによって、経路切断から経路再構築までの時間のデータメッセージ配送の一時停止および経路再探索に要する制御メッセージ交換のためのトラフィック増加によるデータメッセージ配送遅延の拡大や配送スループットの低下の問題を低減あるいは回避することが可能となる。しかし、本手法が有効に機能するのは、無線マルチホップ配送経路に含まれる各正方形セルに常時 (より正確には各データメッセージ転送要求時に) 1 台以上の無線ノードが含まれる場合である。したがって、ひとつの正方形セルあたりの無線ノードの配置数が大きいほど無線マルチホップ配送経路の可用性が高く、配置数が小さいほど可用性が低下する。そのため、無線ノードからの無線信号到達距離が一定であることを前提とすると、適用対象平面内の無線ノード配置密度がある閾値以上に高いことが本手法を適用する条件となる。

一方、適用対象平面と無線アドホックネットワーク規模 (無線ノード数) が与えられてい

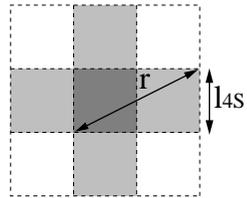


図 1 Cell-4-Side 方式
Fig. 1 Cell-4-Side Method

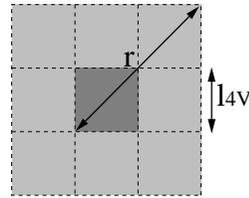


図 2 Cell-4-Vertex 方式
Fig. 2 Cell-4-Vertex Method

る場合、本手法の適用性を高めるためには、より面積の大きなセルに適用対象平面を分割することが考えられる。また、配送経路に含まれるセル数を削減して配送経路を短縮するためには、隣接セル数が多いことが望ましい。平面を隙間なく被覆することができる正多角形には、正三角形、正方形、正六角形がある。そこで本論文では、これら 3 つの異なる正多角形セルに適用対象平面を分割した場合の無線マルチホップ配送について評価する。

各セルの面積を制約するのは、以下の条件である。

[制約条件] 隣接セルに含まれる任意の 1 対の無線ノードは互いに通信可能でなければならない。□

ここで、無線マルチホップ配送が可能隣接セルの定め方には次の 2 種類がある。

- 互いに 1 辺を共有するセルを隣接セルとする
- 互いに 1 頂点を共有するセルを隣接セルとする

正方形セルを用いる場合については、隣接セルが互いに 1 辺を共有する方式 (Cell-4-Side 方式) と互いに 1 頂点を共有する方式 (Cell-4-Vertex 方式) があり、これらをそれぞれ図 1 と図 2 に示す。ここで、隣接セルに含まれる任意の無線ノードが互いに通信可能であるという条件を満足するためには、図 1 と図 2 にそれぞれ示すように、隣接セル間で最大となる 2 点間の距離が無線信号到達距離 r よりも短いことが必要である。したがって、Cell-4-Side 方式におけるセルの 1 辺の長さの最大値 l_{4S} は以下で求められる。

$$l_{4S}^2 + (2l_{4S})^2 = r^2 \text{ より } l_{4S} = \frac{r}{\sqrt{5}}$$

一方、Cell-4-Vertex 方式におけるセルの 1 辺の長さの最大値 l_{4V} は以下で求められる。

$$(2l_{4V})^2 + (2l_{4V})^2 = r^2 \text{ より } l_{4V} = \frac{r}{2\sqrt{2}}$$

以上により、それぞれの方式における正方形セルの面積が $S_{4S} = l_{4S}^2 = r^2/5$ および $S_{4V} = l_{4V}^2 = r^2/8$ となることから、Cell-4-Side 方式の方が Cell-4-Vertex 方式よりも正方形セル面積が大きく、無線ノードを含まないセルが発生しにくいことが分かる。

ただし、適用するセルの選択指標となるのはセルの面積だけではなく、検出、構築される無線マルチホップ配送経路の長さを考慮しなければならない。送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの配送経路を無線ノード ID 列ではなくセル ID 列で与えることによって無線ノードの移動に対する経路の耐性は高められるものの、その経路長は一般に大きくなる。配送経路長が大きくなることによって、データメッセージ配送遅延時間の拡大、配送成功率の低下 (紛失率の上昇)、配送スループットの低下等の問題が発生する。Cell-4-Side 方式と Cell-4-Vertex 方式を比較した場合、Cell-4-Side 方式の方が正方形セルの 1 辺の長さが長いため、水平方向もしくは垂直方向に構築されたマルチホップ配送経路ではその経路長が短縮される可能性がある。一方、Cell-4-Side 方式では各セルが 4 セルとしか隣接しないのに対して、Cell-4-Vertex 方式では 8 セルと隣接する。このように、Cell-4-Vertex 方式の方が隣接セル数が多いため次ホップセルの選択自由度が大きく、特に Cell-4-Vertex 方式で対角線方向に構築される無線マルチホップ配送経路が Cell-4-Side 方式で階段状に構築される経路に対して経路長を短縮する可能性がある。

3.2 正三角形セルと正六角形セル

本節では、正三角形セルと正六角形セルによって適用対象平面を分割したアドホックルーティング方式について検討する。

正三角形セルを用いる場合、セルの定め方には隣接セル間で 1 辺を共有する Cell-3-Side 方式と 1 頂点のみを共有する Cell-3-Vertex 方式があり、それぞれを図 3 と図 4 に示す。正三角形セルを用いる場合には、正方形セルを用いる場合と同様に隣接セルに含まれる任意の無線ノード対が互いに通信可能であることが必要である。したがって、図 3 と図 4 に示すように隣接セル間で最大となる 2 点間の距離が無線信号到達距離 r よりも短いことが必要である。したがって、Cell-3-Side 方式におけるセルの 1 辺の長さの最大値 l_{3S} は以下で求められる。

$$\left(\frac{3l_{3S}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}l_{3S}}{2}\right)^2 = r^2 \text{ より } l_{3S} = \frac{r}{\sqrt{3}}$$

このとき、正三角形セルの面積は $S_{3S} = \sqrt{3}l_{3S}^2/4 = \sqrt{3}r^2/12$ となる。一方、Cell-3-Vertex 方式におけるセルの 1 辺の長さの最大値 l_{3V} は図 4 より

$$l_{3V} = \frac{r}{2}$$

と求められ、正三角形セルの面積は $S_{3V} = \sqrt{3}l_{3V}^2/4 = \sqrt{3}r^2/16$ となる。

正六角形セルを用いる場合には、隣接セル間で 1 辺を共有する方式のみが可能であり、1 頂点のみを共有する方式は存在しない。これは、頂点を共有するセルが 3 つしか存在せず、そのいずれの間においても 1 辺を共有しているためである。正六角形セルを用いる Cell-6 方式を図 5 に示す。正六角形セルを用いる場合にも、正方形セル、正三角形セルを用いる場

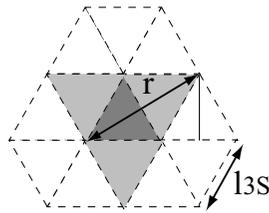


図3 Cell-3-Side 方式
Fig.3 Cell-3-Side Method

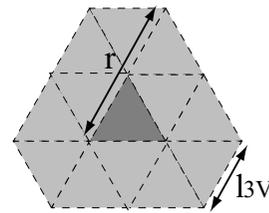


図4 Cell-3-Vertex 方式
Fig.4 Cell-3-Vertex Method

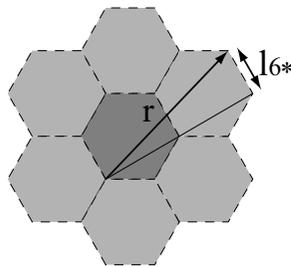


図5 Cell-6 方式
Fig.5 Cell-6 Method

合と同様に隣接セルに含まれる任意の無線ノード対が互いに通信可能でなければならない。したがって、図5に示すように隣接セル間で最大となる2点間の距離が無線信号到達距離 r よりも短いことが必要である。図5から Cell-6 方式におけるセルの1辺の長さの最大値 l_{6*} は以下で求められる。

$$(2\sqrt{3}l_{6*})^2 + (l_{6*})^2 = r^2 \text{より } l_{6*} = \frac{r}{\sqrt{13}}$$

このとき、正六角形セルの面積は $S_{6*} = 3\sqrt{3}l_{6*}^2/2 = 3\sqrt{3}r^2/26$ となる。

各方式におけるセルの面積をまとめると表1となる。表1の結果から、Cell-4-Side方式とCell-6方式におけるセル面積が他の方式に比べて有意に大きいことが分かる。つまり、この2つの方式は他の方式に比べて無線ノードを含まないセルの発生確率が低く、データメッセージ配送時に次ホップ無線ノードの検出に失敗する可能性が低いといえる。

3.3 性能比較

本節では、前節で検討した5つの方式について、無線ノードをひとつも含まないセルの発生頻度と無線マルチホップ配送経路長すなわち送信元無線ノードを含むセルから送信先無線

表1 5つの方式におけるセル面積の比較
Table 1 Properties of Methods with 5 Different Polygon Cells

方式	Cell-3-Side	Cell-3-Vertex	Cell-4-Side	Cell-4-Vertex	Cell-6
セル図形	正三角形	正三角形	正方形	正方形	正六角形
辺の長さ	$0.577r$	$0.500r$	$0.477r$	$0.354r$	$0.277r$
セル面積	$0.144r^2$	$0.108r^2$	$0.200r^2$	$0.125r^2$	$0.200r^2$
隣接セル数	3	12	4	8	6

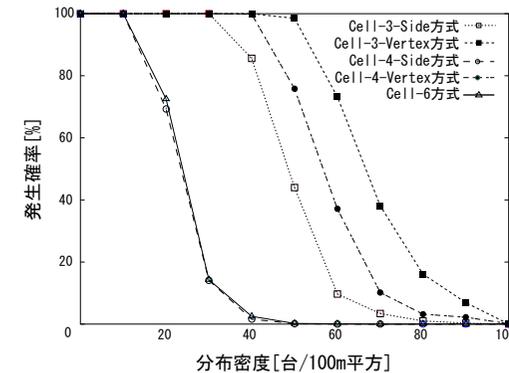


図6 無線ノードを含まないセルの発生確率
Fig.6 Probability of Existence of Empty Cells

ノードを含むセルまでの最短の隣接セル列の長さを評価する。

まず、無線ノードをひとつも含まないセルの発生頻度をシミュレーション実験によって評価する。各無線ノードの信号到達距離を100メートルとし、適用対象平面を1,000メートル平方の正方形領域とする。無線ノードを一様分布乱数によってこの正方形領域にランダムに配置した場合に無線ノードをひとつも含まないセルが発生する確率を無線ノード密度に対して測定する。実験結果を図6に示す。いずれの方式においても、無線ノードを含まないセルの発生確率は分布密度に対して単調減少し、ある分布密度以下ではほぼ100%、ある密度以上ではほぼ0%となる。これらの閾値の大小は、前節で検証したセル面積の大小に対応しており、Cell-4-Side方式とCell-6方式とが他の方式と比較して小さく、同一の分布密度に対する発生確率が低くなっていることが分かる。

次に、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路の平均経路長を各方式で比較する。ここでは、適用対象平面を1辺の長さが500メートルから2,500メートルまでの正方形領域とし、無線ノードがこの領域内に均等分布する場合を想定する。

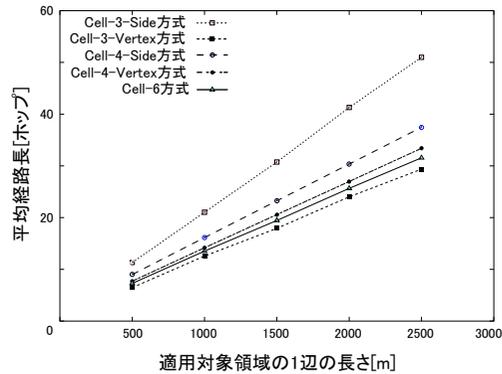


図 7 無線マルチホップ配送経路長
Fig. 7 Route Length of Wireless Multihop Transmission

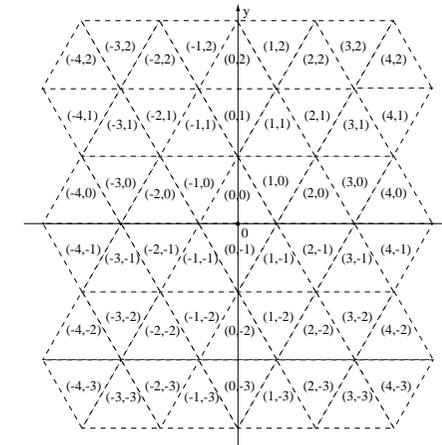


図 8 正三角形セルの配置とセル ID
Fig. 8 Cells in Cell-3 Methods

この場合、適用対象平面に完全に含まれる各セルの無線ノード配置確率 (あるいは配置数の期待値) は等しく、対象平面のエッジを含む各セルの無線ノード配置確率 (あるいは配置数の期待値) はその面積に比例するものとする。これに基づいて各方式における平均ホップ数を計算した結果を図 7 に示す。無線マルチホップ配送経路長は、各セルの隣接セル数とセル面積の影響を受けると考えられるが、計算結果はほぼこの考察に符合するものとなっている。特に、隣接セル数が多く、次ホップの選択自由度が高い方式が平均経路長を短縮することが分かる。すなわち、Cell-3-Vertex 方式 (隣接セル数 12)、Cell-4-Vertex 方式 (隣接セル数 8)、Cell-6 方式 (隣接セル数 6) の経路長が他よりも短く、Cell-3-Side 方式 (隣接セル数 3) の経路長が際立って長い。

以上の結果から、正六角形セルを用いる Cell-6 方式が経路接続率、経路長を選択指標とした場合には、他の正多角形を用いる方式よりも優れた手法であると考えられる。

3.4 セル ID 取得方法

固定正多角形セルを用いるアドホックルーティング手法では、x-y 平面の直交座標で与えられた無線ノード位置をセル ID へと変換する計算が必要となる。正方形セルを用いる場合には、以下の計算によって無線ノード座標 (x_n, y_n) をセル ID (C_x, C_y) へ容易に変換することができる。

$$C_x = \lfloor \frac{x_n}{l_{4*}} \rfloor \quad C_y = \lfloor \frac{y_n}{l_{4*}} \rfloor$$

正三角形セルを用いる場合には、図 8 のようにセルを配置する。座標変換には、まず図 9 に示す 2 つの正三角形セル (C'_x, C'_y) と $(C'_x, C'_y - 1)$ (C'_y は偶数) を包含し、これらが共有する辺以外の 1 辺を共有する隣接セル $(C'_x - 1, C'_y - 1)$, $(C'_x + 1, C'_y - 1)$, $(C'_x - 1, C'_y)$,

$(C'_x + 1, C'_y)$ の x 軸に並行である辺の中点を頂点とする長方形領域を考える。この長方形領域の x 軸方向の辺の長さは l_{3*} であり、y 軸方向の辺の長さは $\sqrt{3}l_{3*}$ である。したがって、無線ノード (x_n, y_n) が含まれる長方形領域に包含されるセル ID (C'_x, C'_y) を以下の式で求めることができる。

$$C'_x = 2 \lfloor \frac{x_n}{l_{3*}} + \frac{1}{2} \rfloor \quad C'_y = 2 \lfloor \frac{y_n}{\sqrt{3}l_{3*}} + \frac{1}{2} \rfloor$$

セル (C'_x, C'_y) と $(C'_x \pm 1, C'_y)$ とで共有される各辺およびセル $(C'_x, C'_y - 1)$ と $(C'_x \pm 1, C'_y - 1)$ とで共有される各辺の x-y 平面上での傾きはすべて $\pm\sqrt{3}$ であることから、 (x_n, y_n) を含むセル (C_x, C_y) を以下により求めることができる。

- $\sqrt{3} \left| x_n - \frac{l_{3*}}{2} C'_x \right| + \left| y_n - \frac{\sqrt{3}}{2} l_{3*} C'_y \right| - \frac{\sqrt{3}}{2} l_{3*} \leq 0$ のとき $C_x = C'_x$
- それ以外のとき $C_x = C'_x + \text{sign}(x_n - \frac{l_{3*}}{2} C'_x)$
ただし、 $X \geq 0$ のとき $\text{sign}(X) = 1$ 、 $X < 0$ のとき $\text{sign}(X) = -1$ とする。
- $y_n \geq \sqrt{3}l_{3*} C'_y$ のとき $C_y = C'_y$
- それ以外のとき $C_y = C'_y - 1$ □

なお、Cell-3-Side 方式における (C_x, C_y) の隣接セルは、 C_y が奇数のとき $(C_x - 1, C_y)$,

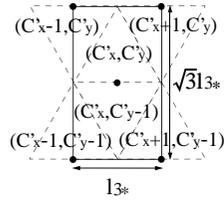


図 9 無線ノードを含むセル ID の取得
Fig. 9 Cell ID Acquisition in Cell-3 Methods

$(C_x, C_y + 1)$, $(C_x + 1, C_y)$ であり, C_y が偶数のとき $(C_x - 1, C_y)$, $(C_x, C_y - 1)$, $(C_x + 1, C_y)$ である. 一方, Cell-3-Vertex 方式における (C_x, C_y) の隣接セルは, C_y が奇数のとき $(C_x - 2, C_y)$, $(C_x - 2, C_y + 1)$, $(C_x - 1, C_y - 1)$, $(C_x - 1, C_y)$, $(C_x - 1, C_y + 1)$ $(C_x, C_y - 1)$, $(C_x, C_y + 1)$, $(C_x + 1, C_y - 1)$, $(C_x + 1, C_y)$, $(C_x + 1, C_y + 1)$, $(C_x + 2, C_y)$, $(C_x + 2, C_y + 1)$ であり, C_y が偶数のとき $(C_x - 2, C_y - 1)$, $(C_x - 2, C_y)$, $(C_x - 1, C_y - 1)$, $(C_x - 1, C_y)$, $(C_x - 1, C_y + 1)$ $(C_x, C_y - 1)$, $(C_x, C_y + 1)$, $(C_x + 1, C_y - 1)$, $(C_x + 1, C_y)$, $(C_x + 1, C_y + 1)$, $(C_x + 2, C_y - 1)$, $(C_x + 2, C_y)$ である. 正六角形セルを用いる場合には, 図 10 のようにセルを配置する. このとき, セル ID (C_x, C_y) には, 以下の制約を満足するもののみが用いられる.

- C_y が偶数のとき C_x は偶数
- C_y が奇数のとき C_x は奇数

この制約のもとでは, (C_x, C_y) の隣接セルは, $(C_x - 1, C_y - 1)$, $(C_x + 1, C_y - 1)$, $(C_x - 2, C_y)$, $(C_x + 2, C_y)$, $(C_x - 1, C_y + 1)$, $(C_x + 1, C_y + 1)$ $(C'_x - 1, C'_y - 1)$, $(C'_x + 1, C'_y - 1)$, $(C'_x - 2, C'_y)$, $(C'_x + 2, C'_y)$, $(C'_x - 1, C'_y + 1)$, $(C'_x + 1, C'_y + 1)$ となる.

座標変換には, 図 11 に示す正六角形セル (C'_x, C'_y) (C'_x と C'_y はともに偶数) を包含し, その x 軸と並行でない 1 辺を共有する隣接セル $(C'_x - 1, C'_y - 1)$, $(C'_x + 1, C'_y - 1)$, $(C'_x - 1, C'_y + 1)$, $(C'_x + 1, C'_y + 1)$ の中心 (重心) を頂点とする長方形領域を考える. この長方形領域の x 軸方向の辺の長さは $\sqrt{3}l_{6*}$ であり, y 軸方向の辺の長さは $3l_{6*}$ である. したがって, 無線ノード (x_n, y_n) が含まれる長方形領域に包含されるセル ID (C'_x, C'_y) を以下の式で求めることができる.

$$C'_x = \lfloor \frac{x_n}{\sqrt{3}l_{6*}} + \frac{1}{2} \rfloor \quad C'_y = \lfloor \frac{y_n}{3l_{6*}} + \frac{1}{2} \rfloor$$

セル (C'_x, C'_y) と $(C'_x \pm 1, C'_y \pm 1)$ とで共有される各辺の x-y 平面上での傾きはすべて $\pm 1/\sqrt{3}$ であることから, (x_n, y_n) を含むセル (C_x, C_y) を以下により求めることができる.

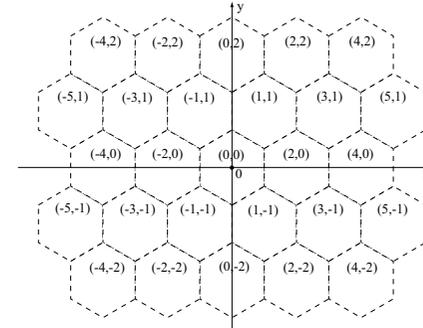


図 10 正六角形セルの配置とセル ID
Fig. 10 Cells in Cell-6 Method

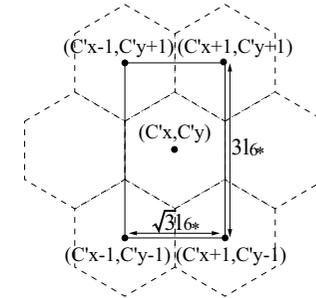


図 11 無線ノードを含むセル ID の取得
Fig. 11 Cell ID Acquisition in Cell-6 Method

- $|x_n - \sqrt{3}l_{6*}C'_x| + \sqrt{3}|y_n - 3l_{6*}C'_y| - \sqrt{3}l_{6*} > 0$ のとき
 $C_x = C'_x + \text{sign}(x_n - \sqrt{3}l_{6*}C'_x)$ $C_y = C'_y + \text{sign}(y_n - 3l_{6*}C'_y)$
ただし, $X \geq 0$ のとき $\text{sign}(X) = 1$, $X < 0$ のとき $\text{sign}(X) = -1$ とする.

- それ以外のとき
 $C_x = C'_x$ $C_y = C'_y$ □

各無線ノードは, 定期的に GPS デバイスによって取得した自身の位置情報から上式によって自身が含まれるセル ID を取得する. 経路探索制御メッセージ Rreq およびデータメッセージの配送は, このセル ID に基づいて GVGrid の手法を用いて実現する.

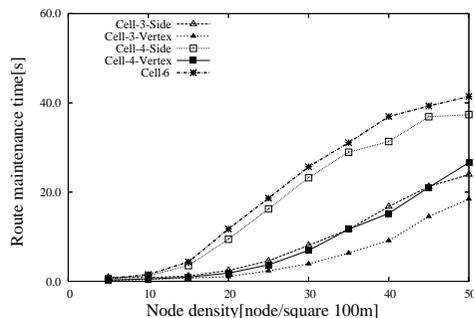


図 12 マルチホップ経路接続時間 (停止時間 0s 移動速度 20-40m/s)
Fig. 12 Lifetime of Multihop Routes (Suspension Time 0s, Speed 20-40m/s)

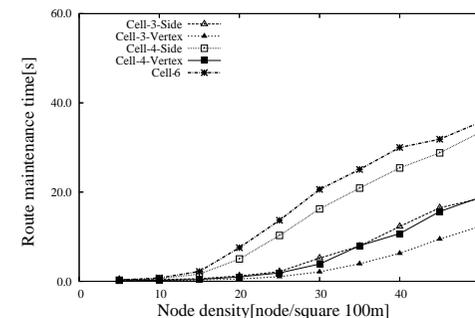


図 13 マルチホップ経路接続時間 (停止時間 0s 移動速度 60-80m/s)
Fig. 13 Lifetime of Multihop Routes (Suspension Time 0s, Speed 60-80m/s)

3.5 シミュレーション実験

本論文で述べた 5 つの異なる正多角形セルを用いる無線マルチホップ配送方式の性能をシミュレーション実験によって評価する。

提案方式では、データメッセージ配送に用いるマルチホップ配送経路を構成するいずれかのセルに無線ノードが含まれなくなることによって経路が切断し、経路の再探索が必要となる。そこで、マルチホップ配送経路の接続時間を実験評価する。ここでは、 $2000m \times 2000m$ の正方形領域に $5-50$ 台/ m^2 の密度でランダムウェイポイントモデルにしたがって移動する無線ノードを配置する。各無線ノードの初期位置は、一様分布乱数を用いてランダムに決定する。また、移動速度は $20-40m/s$ 、 $40-60m/s$ 、 $60-80m/s$ の範囲で一様分布乱数を用いてランダムに決定し、停止時間は $0s-60s$ とする。図 12、図 13、図 14 に移動速度 $20-40m/s$ 、停止時間 0 秒の場合、移動速度 $60-80m/s$ 、停止時間 0 秒の場合、移動速度 $20-40m/s$ 、停止時間 60 秒の場合の測定結果を示す。

いずれの実験結果においても接続時間は Cell-6 方式、Cell-4-Side 方式、Cell-3-Side 方式、Cell-4-Vertex 方式、Cell-3-Vertex 方式の順に長いものとなった。これは表 1 に示したセル面積の広い順および図 X に示した無線ノードを含まないセルの発生確率の小さい順と同じである。また、それぞれの方式の接続時間の差は、Side 方式であるほど大きくなるのが分かる。全体としては、GV-Grid で用いられる Cell-4-Side 方式と比較して Cell-6 方式は平均 44%接続時間を拡大することができる。

3.4 節で正方形、正三角形、正六角形セルを用いる場合に GPS で得られた無線ノード座標をそれが含まれるセル ID に変換する手法を示した。正三角形セル、正六角形セルを用いる場合は、正方形セルを用いる場合に比べてより複雑な計算を要している。そこで、これらの計算に要する時間を比較する。比較には表 2 に仕様を示す Sun SPOT を用いる。10,000

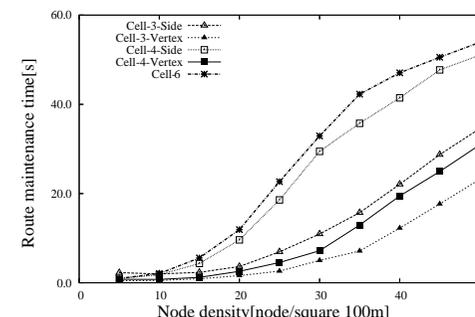


図 14 マルチホップ経路接続時間 (停止時間 60s 移動速度 20-40m/s)
Fig. 14 Lifetime of Multihop Routes (Suspension Time 60s, Speed 20-40m/s)

無線ノード座標の変換を行なった平均計算時間を表 3 に示す。

正三角形セルと正六角形セルの座標変換には、正方形セルの座標変換よりもそれぞれ 197%、176%長時間を要する。ただし、この影響は変換頻度に依存し、無線ノードの移動頻度が高く、移動速度が大きい場合には、頻繁に座標測定、座標変換を要するため、計算時間の差による影響が相対的に大きくなるのが考えられる。しかし、多くの適用環境においては、各座標変換に要する時間の差は無線通信プロトコルのオーバーヘッド等と比較して相対的に十分に小さいものと考えられる。

以上の実験結果から、Cell-6 方式が性能的に優れた方式であると結論付けることができる。

表 2 SunSPOT の仕様
Table 2 Specification of Sun SPOT

項目	内容
CPU	ARM920T 180[MHz]
メモリ	512[KB]
コンパイラ	Java SDK Version 1.6.0_13

表 3 座標変換時間
Table 3 Computational Overhead for Cell ID Acquisition

方式	Cell-3	Cell-4	Cell-6
計算時間 [μ sec]	44.90	15.11	41.82

4. ま と め

本論文では、高速度、高頻度で移動する無線ノードからなるアドホックネットワークにおける無線マルチホップ通信を実現するために、対象平面を固定セルに分割してセル ID 列として経路を与えることで移動への耐性を高める手法において、従来の正方形セルを用いる方法に対して他の正多角形をセルとして用いる方法を提案した。ここで、正多角形の選択指標として、無線マルチホップ配送の接続性と経路長を導入した。これらは、各正多角形セルの面積と隣接セル数に依存するが、各正多角形セルの大きさは隣接セルに含まれる任意の無線ノードが通信可能であるという制約条件に束縛される。この要件のもとで可能な 5 種類のセルを用いた場合について接続性と経路長を評価した結果、正六角形セルが他のセルよりも優れた性能を示すことが明らかになった。

また、各無線ノードが GPS で測定した座標のセル ID への変換手法を各正多角形セルについて示し、これを用いた場合の性能評価シミュレーション実験を行なった。実験の結果、正六角形セルを用いる方式が最も長時間マルチホップ経路の接続を維持すること、座標変換に最も長時間を要することが明らかになった。座標変換時間は通信時間に対して相対的に短いことから、GV-Grid に対して平均 44%の接続時間延長を実現する正六角形セルを用いる Cell-6 方式が最も優れた方式であることが示された。

参 考 文 献

- 1) Basagni, S., Chlamtac, I., Syrotiuk, V.R. and Woodward, B.A.: "A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility," Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.76–84 (1998).
- 2) Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J.: "Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks," Proceedings of the 3rd ACM International

Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications, pp.48–55 (1999).

- 3) Briesemeister, L. and Hommel, G.: "Role-based multicast in highly mobile but sparsely connected ad hoc networks." Proceedings of the 1st Annual ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, pp.45–50 (2000).
- 4) David, B., David, A. and Hu, Y.C.: "The Dynamic Source Routing Protocol," RFC4728(2007).
- 5) Karp, B. and Kung, H.T.: "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless," Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.243–254 (2000).
- 6) Ko, Y.B. and Vaidya, N.H.: "Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks," Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.66–75 (1998).
- 7) Nakagawa, H., Ohta, T., Ishida, K. and Kakuda, Y.: "A Hybrid Routing with Location Information for Mobile Ad Hoc Networks," Proceedings of the 8th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, pp.129–136 (2007).
- 8) Narasawa, M. and Higaki, H.: "NB-FACE: No-Beacon FACE Ad-hoc Routing Protocol for Reduction of Location Acquisition Overhead," Proceedings of the International Workshop on Future Mobile and ubiquitous Information Technologies (2006).
- 9) Navas, J.C. and Imielinski, T.: "Geocast - Geographic Addressing and Routing," Proceedings of the 3rd Annual ACM/IEEE International conference on Mobile Computing and Networking, pp.66–76 (1997).
- 10) Park, V. and Corson, S.: "Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specification," Internet Draft, draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt (2001).
- 11) Perkins, C.E. and Royer, E.M.: "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," RFC3561(2003).
- 12) Sun, W., Yamaguchi, H., Yukimasa, K. and Kusumoto, S.: "GVGrid: A QoS Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks," Proceedings of the 14th International Conference on Quality of Service, pp.130–139 (2006).
- 13) Stojmenovic, I. and Lin, X.: "GEDIR: Loop-Free Location Based Routing in Wireless Networks," Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems, pp.1025–1028 (1999).
- 14) Watanabe, M. and Higaki, H.: "NB-GEDIR: No Beacon GEDIR Ad-hoc Routing Protocol without Periodical Exchange of Location Information," IPSJ Journal, Vol.49, No.6, pp.2180–2191 (2008).