推薦論文

正多角形セル群による無線マルチホップ配送

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において,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従来の手法は,経路切断に よる経路再探索を頻繁に必要とする.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,隣接する中継セル 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する手法のた続性と配送経路長を評価 する.また,無線ノード位置からセル ID を取得する手法を示す.シミュレーション 実験により,正六角形セルを用いる手法が正方形を用いる従来手法と比較して配送経 路接続時間を延長し,配送経路長を短縮することを示す.

Wireless Multihop Transmission by Using Regular Polygon Cells

Shingo Matsumura $^{\dagger 1}$ and Hiroaki Higaki $^{\dagger 1}$

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 offten 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移動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、ネットワークト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部脱等に よってネットワークトポロジが変化する.このようなト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 ヘ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列として配送経路を定める GVGrid¹³⁾ の手法が提案されている.GVGridでは,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,頂 点を共有するすべての隣接正方形セルに含まれる任意の無線ノード対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.

^{†1} 東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス学専攻 Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University 本論文の内容は 2008 年 11 月のマルチメディア通信と分散処理研究会にて報告され,同研究会主査により情報 処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

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セルには,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隣接セル 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,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等の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と 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. AODV¹⁰⁾,DSR⁴⁾,TORA⁹⁾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,配送経路の次ホップ無線ノードを選択,決定す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 探索制御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.GEDIR¹²⁾,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-GEDIR¹⁵⁾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⁾のような手法を用いて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(図1). そのため,データメッセージの配送を頻繁に中断し,再経路探索を行わなければならない. これによって,データメッセージ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無線ノード 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無線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 GVGrid¹³⁾ で提案されている.ここで,頂点を共有して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,配送経路を隣接セル ID 列として与えることができる.経路探索制御メッセー ジのフラッディングを用いて検出された隣接セル ID 列として与えられる配送経路が切断さ れ,再経路探索が必要となるのは,配送経路に含まれるいずれかのセルにいずれの無線ノー ドをも含まなくなる場合である.つまり,無線マルチホップ配送経路に含まれる各セルにい ずれかの無線ノードが存在する限り,この経路をデータメッセージ配送に用い続けること ができる.たとえば,経路探索時にあるセルに含まれていたすべての無線ノードが時間経 過とともに他のセルに移動した場合でも,他の無線ノードが他のセルからこのセルへと移 動し,このセルが空になることがなければ経路の接続性を保つことができる(図2).なお, 各データメッセージの中継を行う無線ノードは,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¹⁴⁾.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文献 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,無線マルチホップ配送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することができる.

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頂点を共有する隣接セル ID 列で与える方法は,配送経路を無線ノード ID 列で与える従来の方法と比べて,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,1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接続性が高く,配置数が小さいほど接続性が低下する.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.また, 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 有効であると考えられる.

無線マルチホップ配送における,配送遅延の短縮,消費電力の削減,スループットの拡大





には、よりホップ数の少ない配送経路を用いることが有効である.図3のようにより面積の大きなセルを用いることでホップ数の削減された配送経路を検出できる場合がある.しかし、図4に示すように、セルの面積を拡大することによって隣接セル数が減少する場合には、配送経路のホップ数が増加する場合もある.送信元無線ノードから送信先無線ノードへの向きが均等に分布する場合には、隣接セル数が多いほど配送経路のホップ数を削減することができると考えられる.

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.





図 6 Cell-4-Vertex 万式 Fig. 6 Cell-4-Vertex method.

[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な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5 と図6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5と図6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.

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

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.

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

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の面積が大きく、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 列ではなく隣接セル 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つのセルとしか隣接しな いのに対して,Cell-4-Vertex方式では8つのセルと隣接する.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(図4).

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7と図8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.すなわち,図7と図8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.

$$\left(\frac{3l_{3S}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}l_{3S}}{2}\right)^2 = r^2 t 0 \ l_{3S} = \frac{r}{\sqrt{3}}$$

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8より

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





図 8 Cell-3-Vertex 方式 Fig. 8 Cell-3-Vertex method.

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9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9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9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.

 $(2\sqrt{3}l_{6*})^2 + (l_{6*})^2 = r^2$ 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.



Fig. 9 Cell-6 method.

表 1 5 つの異なる正多角形セルを用いる方式の性質 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

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1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 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1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1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10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.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11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,次ホップ無線ノード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からセル ID を取得する計算が必要となる.図 12 のように配置された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) からセル ID (C_x, C_y) を得ることができる.





Fig. 12 Cell IDs in Cell-4 method

$$C_x = \left\lfloor \frac{x_n}{l_{4*}} \right\rfloor \qquad C_y = \left\lfloor \frac{y_n}{l_{4*}} \right\rfloor$$

正三角形セルを用いる場合には,図13のようにセルを配置する.セル IDの取得には,
まず図14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,



Fig. 14 Cell ID acquisition in Cell-3 methods.

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.

$$C'_{x} = 2\left\lfloor \frac{x_{n}}{l_{3*}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \qquad C'_{y} = 2\left\lfloor \frac{y_{n}}{\sqrt{3}l_{3*}} + \frac{1}{2} \right\rfloor$$

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 $(C'_x \pm 1, C'_y)$



図 15 正六角形セルの配置とセル ID Fig. 15 Cell IDs in Cell-6 method.

 $C_y'-1)$ 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 .

・ $\sqrt{3} \left| x_n - \frac{1}{2} l_{3*} C'_x \right| + \left| y_n - \frac{\sqrt{3}}{2} l_{3*} C'_y \right| - \frac{\sqrt{3}}{2} l_{3*} \le 0$ のとき $C_x = C'_x$

それ以外のとき $C_x = C'_x + sign(x_n - \frac{1}{2}l_{3*}C'_x)$ ただし, $X \ge 0$ のとき sign(X) = 1, X < 0のとき sign(X) = -1とする.

• $y_n \ge \sqrt{3}l_{3*}C'_y$ 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 $(C_x - 1, C_y)$ 、 $(C_x, C_y + 1)$ 、 $(C_x + 1, C_y)$ 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。 $-方、Cell-3-Vertex 方式における <math>(C_x, C_y)$ の隣接セルは、 C_y が奇数のとき $(C_x - 2, C_y)$ 、 $(C_x - 2, C_y + 1)$ 、 $(C_x - 1, C_y - 1)$ 、 $(C_x - 1, C_y)$ 、 $(C_x - 1, C_y + 1)(C_x, C_y - 1)$ 、 $(C_x + 1, C_y - 1)$ 、 $(C_x + 1, C_y)$ 、 $(C_x + 1, C_y + 1)$ 、 $(C_x + 2, C_y - 1)$ 、 $(C_x - 1, C_y + 1)$ 、 $(C_x - 1, C_y + 1)$ 、 $(C_x - 1, C_y - 1)$ 、 $(C_x + 1, C_y - 1)$ 、 $(C_x - 1, C_y + 1)$ 、 $(C_x - 1, C_y + 1)$ 、 $(C_x - 1, C_y - 1)$ 、 $(C_x + 1, C_y - 1)$

正六角形セルを用いる場合には,図15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



Fig. 16 Cell ID acquisition in Cell-6 method.

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

セル ID の取得には,図 16 に示す正六角形セル (C'_x, C'_y) ($C'_x & C'_y$ 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.

$$C'_{x} = 2\left\lfloor \frac{x_{n}}{\sqrt{3}l_{6*}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \qquad C'_{y} = 2\left\lfloor \frac{y_{n}}{3l_{6*}} + \frac{1}{2} \right\rfloor$$

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.

・ $|x_n - \sqrt{3}l_{6*}C'_x| + \sqrt{3}|y_n - 3l_{6*}C'_y| - \sqrt{3}l_{6*} > 0$ のとき $C_x = C'_x + sign(x_n - \sqrt{3}l_{6*}C'_x)$ $C_y = C'_y + sign(y_n - 3l_{6*}C'_y)$ ただし, $X \ge 0$ のとき sign(X) = 1, X < 0 のとき 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およびデータメッセー



Fig. 17 Lifetime of multihop routes (Speed 5–10 m/s, Suspension Time 0s).

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.

4. シミュレーション実験

4.1 ランダムウェイポイントモデルによる実験

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、2,000 m×2,000 mの正方形領域に 5–50 台/100 m 平方の密度でランダムウェイポイントモデルに従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 5–10 m/s、10–15 m/s、15–20 m/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 0 s、30 s、60 s とする.図 17、図 18、図 19、図 20、図 21 に移動速度 5–10 m/s、停止時間 0 秒の場合、移動速度 10–15 m/s、停止時間 0 秒の場合、移動速度 5–10 m/s、停止時間 30 秒の場合、移動速度 5–10 m/s、停止時間 30 秒の場合、移動速度 5–10 m/s、停止時間 60 秒の場合の測定結果を示す.

いずれの移動速度,停止時間(移動頻度)の場合においても,ノード分布密度が高いほど 経路接続時間は延長しているが,Cell-4-Side 方式とCell-6 方式が他の3方式よりも有意に 長い経路接続時間となっている.特に,この2方式は15-35台/100m平方の密度において







Fig. 19 Lifetime of multihop routes (Speed 15–20 m/s, Suspension Time 0 s).

他の方式よりも経路接続時間を延長している.図17,図18,図19は,同一の停止時間で 移動速度が異なる条件での実験結果となっている.移動速度の上昇にともなって多少の短縮 が見られるものの,ほぼ同一の接続時間となっている.特に,無線ノードが高密度に分布す る環境においては,移動速度が上昇しても配送経路上のいずれかのセルが空になる確率が大 きく変動しないために,接続時間が大きく低下することはない.一方,図17,図20,図21



Fig. 20 Lifetime of multihop routes (Speed 5–10 m/s, Suspension Time 30 s).



Fig. 21 Lifetime of multihop routes (Speed 5–10 m/s, Suspension Time 60 s).

は,同一の移動速度で停止時間が異なる条件での実験結果である.停止時間の延長すなわち 移動頻度の低下とともに,経路接続時間は延長している.特に,無線ノードが高密度に分布 する環境においては,配送経路上の各セルにとどまる無線ノード数の期待値が大きくなるこ とが,配送経路の安定性に寄与しているものと考えられる.



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10 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.全体としては, GV-Grid で用いられる Cell-4-Vertex 方式と比較して Cell-6 方式は平均44.0%接続時間を拡大している.

一方,無線ノード密度に対する配送経路長の測定結果をまとめたものを図 22 に示す.ノー ド分布密度が8台/100m平方以下では,各無線ノードの無線信号到達範囲に十分な数の無 線ノードが含まれず,マルチホップ到達可能な無線ノードが限られることから,経路が検出, 構築された場合でも,その経路長が短くなる傾向がある.ノード分布密度が15台/100m 平方以上では,おおむね空のセルがなくなり,セルの面積と隣接セル数によって配送経路 のホップ数が決まるようになっている.ノード分布密度が8台/100m平方以上の条件¹¹⁾ では,対象領域全体において配送経路が検出,構築され,Cell-3-Vertex方式,Cell-6方式, Cell-4-Vertex方式,Cell-4-Side方式,Cell-3-Side方式の順に経路長が大きくなる.これ は,3.3節での考察と符合しており,Cell-6方式はCell-4-Vertex方式に対して19.4%の経 路長短縮を実現している.

以上により, Cell-6 方式は, 経路接続時間と経路長の観点で Cell-4-Vertex 方式の性能を 改善する手法であるといえる.

4.2 無線ノード移動を束縛したモデルによる実験

本節では,車載コンピュータを無線ノードとする ITS 応用を想定し,無線ノードが定められた通路(道路)上のみを移動するモデルを対象として,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評価する.前節と同様, 2,000 m×2,000 m の正方形領域に 5-50 台/100 m 平方の密度で無線ノードをランダムに配 置する.ただし,各無線ノードは,鉛直(南北)方向と水平(東西)方向にそれぞれ10 本ず つ,最大5度傾いた通路上に初期配置され,この通路上のみを移動する.無線ノードは,通 路上で移動方向を反転することはせず,正方形領域の境界に到達すると,同一通路の反対側 から同一方向への移動をただちに開始する.通路と通路の交点である交差点では,確率1/3 で一時停止する.また,停止の有無にかかわらず,直進,左折,右折をそれぞれ1/3の確 率で選択する.前節と同様,移動速度を5-10 m/s,10-15 m/s,15-20 m/s,交差点での停 止時間の最大値を0s,30s,60sとして経路接続時間と経路長を測定する.図23,図24, 図25,図26,図27に移動速度5-10 m/s,停止時間0秒の場合,移動速度10-15 m/s,停 止時間0秒の場合,移動速度15-20 m/s,停止時間0秒の場合,移動速度5-10 m/s,停止 時間30秒の場合,移動速度5-10 m/s,停止時間60秒の場合の測定結果を示す.

ノード分布密度が高いほど経路接続時間が延長する点と移動速度に対しては経路接続時間が大きく変化しない点は,前節で述べたランダムウェイポイントモデルによるシミュレーション実験と同様である.また,本節の実験では,交差点での停止時間に対しても経路接続時間が大きく変化していない.これは,無線ノード位置が通路上に限定されるため,逆に経路が存在するセルにおけるノード分布密度が上昇したために,移動頻度の影響が相対的に縮小されたことによるものと考えられる.また,前節の実験では Cell-6 方式とほぼ同等の接続時間であった Cell-4-Side 方式の性能低下が大きく, Cell-6 方式が他の4方式よりも有意に接続時間が長くなっている.Cell-4-Side 方式では,隣接セルが鉛直(南北)または水平(東西)方向に限定されているため,隣接セルに含まれる通路長が極端に短い場合には,経







図 25 マルチホップ経路接続時間(移動速度 15-20 m/s,停止時間 0s) Fig. 25 Lifetime of multihop routes (Speed 15-20 m/s, Suspension Time 0s).

路が切断しやすい性質を持つためと考えられる.

また,配送経路長の測定結果を図28に示す.無線ノードの位置が通路上に限定されるため,経路長は前節の実験結果よりも長くなっているものの,各方式間の関係は前節とほぼ同等であり,Cell-6方式とCell-3-Vertex方式が他の方式よりも短い経路を検出している.以



図 26 マルチホップ経路接続時間 (移動速度 5-10 m/s,停止時間 30 s) Fig. 26 Lifetime of multihop routes (Speed 5-10 m/s, Suspension Time 30 s).



Fig. 27 Lifetime of multihop routes (Speed 15–20 m/s, Suspension Time 60 s).

上により,通路上に移動を束縛したモデルでの実験結果は,Cell-6方式の優位性がランダム ウェイポイントモデルでの実験よりも大きくなることを示した.

4.3 ノード ID 取得計算時間

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の



Fig. 28 Length of multihop routes.

表	₹2	SunSPOT	の仕様	
Table 2	Spe	ecification o	f Sun	SPOT.

項目	内容
CPU メモリ コンパイラ	ARM920T 180 MHz 512 KB 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	$[\mu s]$	44.90	15.11	41.82

x-y 座標からそれが含まれるセル ID を取得する手法を示した.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に仕様を示す無線センサノード Sun SPOT を用いる.ランダムに生成された10,000 無線ノードの x-y 座標からセル ID を 取得する実験を行った.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を用いる場合のセル ID 取得に要する時間は,正方形セルを 用いる場合よりもそれぞれ197%,176%長い.ただし,この影響はセル ID 取得要求発生頻 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,頻繁に座標測定と セル ID 取得計算を要する.このため,計算時間の差による影響が相対的に大きくなることが考えられる.しかし,IEEE 802.11 の SIFS,DIFS,バックオフ時間はそれぞれ 10 μ s,50 μ s,0-20.5 ms であることから,多くの適用環境においては各セル ID 取得計算に要する時間の差は無線通信プロトコルの時間オーバヘッド等と比較して相対的に大きなものではない.

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.

5. 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セルを用いる方法を提案した.ここで,正多角形セルの選択指標と して,無線マルチホップ配送の接続性と配送経路長を導入した.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配送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 で測定した座標からセル ID を取得する方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った.実験の結果,正六角形セルを用いる方式が従来手法と比較して 44.0%経路接続時間を延長し,19.4%経路長を短縮することが示された.

謝辞 本論文の基礎検討段階において, 薤澤達也氏(東京電機大学,現在富士通エフ・ア イ・ピー(株))のシミュレーション実験結果が重要な役割を果たした.

参考文献

- Basagni, S., Chlamtac, I., Syrotiuk, V.R. and Woodward, B.A.: A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility, Proc. 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.76–84 (1998).
- Bose, P., Morin, P., Stojmenović, I. and Urrutia, J.: Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks, Proc. 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, Proc. 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 for Mobile Ad Hoc Networks (DSR), RFC4728 (2007).
- Karp, B. and Kung, H.T.: GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks, Proc. 6th Annual ACM/IEEE 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, Proc. 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, *Proc. 8th International Symposium* on Autonomous Decentralized Systems, pp.129–136 (2007).
- 8) Narasawa, M., Ono, M. and Higaki, H.: NB-FACE: No-Beacon FACE Ad-hoc Routing Protocol for Reduction of Location Acquisition Overhead, *Proc. International Workshop on Future Mobile and Ubiquitous Information Technologies*, pp.102–107 (2006).
- 9) Park, V. and Corson, S.: Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specication, Internet Draft, draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt (2001).
- Perkins, C., Royer, E. and Das, S.: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, RFC 3561 (2003).
- Seyama, T. and Higaki, H.: G-AODV+PCMTAG: Routing in MANET with Low Overhead Flooding and Route-Shortening, Proc. International Conference on Parallel and Distributed Computing and Networks, pp.103–110 (2008).
- 12) Stojmenovic, I. and Lin, X.: GEDIR: Loop-Free Location Based Routing in Wireless Networks, Proc. International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems, pp.1025–1028 (1999).
- 13) Sun, W., Yamaguchi, H., Yukimasa, K. and Kusumoto, S.: GVGrid: A QoS Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks, *Proc. 14th International Conference* on Quality of Service, pp.130–139 (2006).
- 14) 小野真和, 桧垣博章:端末移動への耐性の高い位置ベースアドホックルーティングプ ロトコル, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.7, pp.2392–2407 (2008).
- 15) 渡邊未佳, 桧垣博章: NB-GEDIR: 周期的な位置情報交換を行わない拡張 GEDIR ア ドホックルーティングプロトコル, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.6, pp.2180–2191 (2008).

(平成 21 年 5 月 27 日受付)(平成 21 年 9 月 11 日採録)

推薦文

アドホックネットワークにおける多角形セルを用いて空間を分割することによる効率的な 経路制御について提案している.従来は,無線通信範囲を管理するために正方形や長方形で 空間分割を行うのに対し,提案手法では,効率的に空間分割を行う三角形セルと六角形セル を提案している.任意の2地点間への通信に要するホップ数が従来手法と比べて小さくな ることや,経路の安定性等を評価している.この技術は,センサネットワーク等のユビキタ スネットワークや,位置情報サービスへの応用等が期待できる重要なものであり,シンプル かつ有用性の高い手法を考案している本論文は推薦に値する.

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 串田高幸)

松村 真吾(学生会員)

昭和 61 年生.平成 21 年東京電機大学理工学部情報システム工学科卒業.現在,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 学専攻在学.

桧垣 博章(正会員)

昭和42年生.平成2年東京大学工学部計数工学科卒業.同年日本電信 電話(株)NTTソフトウェア研究所入所.現在,東京電機大学未来科学 部ロボット・メカトロニクス学科,理工学部情報システム工学科および大 学院先端科学技術研究科先端技術創成専攻,大学院未来科学研究科ロボッ ト・メカトロニクス学専攻,大学院理工学研究科情報システム工学専攻

教授.博士(工学).分散システム,分散アルゴリズム,分散オペレーティングシステム, フォールトトレラントネットワーク,モバイルアドホックネットワークの研究に従事.平成 7年情報処理学会全国大会奨励賞.平成9年情報処理学会山下記念研究賞.平成17年情報 処理学会学会活動貢献賞.ACM,IEEE,電子情報通信学会,電気学会各会員.

情報処理学会論文誌 Vol. 50 No. 12 3162-3174 (Dec. 2009)