

移動体通信ネットワークにおける
端末の移動パターンを考慮した
位置登録方式について

システム情報工学研究科
コンピュータサイエンス専攻
筑波大学

2005年3月

久保田 敦

©Copyright
by
Atsushi Kubota
2005

目次

目次	i
図目次	ii
要旨	iii
謝辞	iv
第1章 はじめに	1
第2章 Personal Communications Service(PCS) ネットワーク	4
2.1 ロケーションマネージメント	6
2.1.1 位置登録	7
2.1.2 端末ページング	8
第3章 移動体通信ネットワークのモデル化	11
3.1 位置登録の方式	11
3.2 Signaling Cost	12
3.3 Mobility Model	15
第4章 関連研究	17
4.1 動的な位置管理	17
4.2 Movement-Based 法	17
4.3 Movement-Based 法の問題点	18
4.4 ネットワークモデル	19
第5章 正方形セルモデル及びセル訪問確率の算出	21
5.1 正方形セルモデル	21
5.2 セル訪問確率の算出	22
5.3 位置登録エリアの最適化	27

第 6 章	数値実験, 結果およびモデル	31
6.1	最適化された LA の形状	31
6.2	正方形セルモデルにおける従来方式との比較	31
第 7 章	正六角形セルモデル及びセル訪問確率の算出	38
7.1	正六角形セルモデル	38
7.2	セル訪問確率の算出	39
7.3	位置登録エリアの最適化	45
第 8 章	数値実験, 結果およびモデル	49
8.1	最適化された LA の形状	49
8.2	正六角形セルモデルにおける従来方式との比較	51
8.2.1	正方形型 LA との比較	51
8.2.2	正六角形型 LA との比較	52
第 9 章	本研究における問題点	58
第 10 章	まとめと今後の課題	60
	参考文献	60
	公表論文リスト	64

目 次

2.1	PCS ネットワークのサービスエリアの構成	4
2.2	PCS のシステム網	5
2.3	位置登録	7
2.4	端末ページング	9
3.1	二呼間での端末の移動が与える影響について	15
4.1	Movement-Based 法	18
4.2	無駄なトラフィックの発生例	19
5.1	格子モデル	21
5.2	正方形セルモデル	22
5.3	n 回目に東側のセルから侵入する場合	25
6.1	PF=0.25, PL=0.25, PR=0.25, PB=0.25, セル数=49	32
6.2	PF=0.30, PL=0.40, PR=0.10, PB=0.20, セル数=49	32
6.3	PF=0.50, PL=0.10, PR=0.10, PB=0.30, セル数=49	33
6.4	PF=0.50, PL=0.20, PR=0.20, PB=0.10, セル数=49	33
6.5	PF=0.70, PL=0.10, PR=0.10, PB=0.10, セル数=49	34
6.6	正方形型の LA	35
6.7	PF=0.25, PL=0.25, PR=0.25, PB=0.25	35
6.8	PF=0.30, PL=0.40, PR=0.10, PB=0.20	36
6.9	PF=0.50, PL=0.10, PR=0.10, PB=0.30	36
6.10	PF=0.50, PL=0.20, PR=0.20, PB=0.10	37
6.11	PF=0.70, PL=0.10, PR=0.10, PB=0.10	37
7.1	正六角形セルモデル	38
7.2	六角形セルモデル	40
8.1	Pf=Pb=Prf=Prb=Plf=Plb=1/6, セル数=61	49
8.2	Pf=0.45, Pb=0.05, Prf=0.15, Prb=0.10, Plf=0.15, Plb=0.10, セル数=61	50

8.3	$P_f=0.60, P_b=0.05, P_{rf}=0.15, P_{rb}=0.05, P_{lf}=0.10, P_{lb}=0.05$, セル数=61	50
8.4	$P_f=0.70, P_b=0.01, P_{rf}=0.15, P_{rb}=0.05, P_{lf}=0.07, P_{lb}=0.02$, セル数=61	51
8.5	正方形型の LA	52
8.6	$P_f=P_b=P_{rf}=P_{rb}=P_{lf}=P_{lb}=1/6$	53
8.7	$P_f=0.45, P_b=0.05, P_{rf}=0.15, P_{rb}=0.10, P_{lf}=0.15, P_{lb}=0.10$	53
8.8	$P_f=0.60, P_b=0.05, P_{rf}=0.15, P_{rb}=0.05, P_{lf}=0.10, P_{lb}=0.05$	54
8.9	$P_f=0.70, P_b=0.01, P_{rf}=0.15, P_{rb}=0.05, P_{lf}=0.07, P_{lb}=0.02$	54
8.10	正六角形型の LA	55
8.11	$P_f=P_b=P_{rf}=P_{rb}=P_{lf}=P_{lb}=1/6$	56
8.12	$P_f=0.45, P_b=0.05, P_{rf}=0.15, P_{rb}=0.10, P_{lf}=0.15, P_{lb}=0.10$	56
8.13	$P_f=0.60, P_b=0.05, P_{rf}=0.15, P_{rb}=0.05, P_{lf}=0.10, P_{lb}=0.05$	57
8.14	$P_f=0.70, P_b=0.01, P_{rf}=0.15, P_{rb}=0.05, P_{lf}=0.07, P_{lb}=0.02$	57
9.1	$P_F=0.25, P_B=0.25, P_L=0.25, P_R=0.25$, セル数=1037	58
9.2	$P_F=P_B=P_{rf}=P_{rb}=P_{lf}=P_{lb}=1/6$, セル数=1029	59

要旨

通信業界に移動体通信が新たな分野として生まれ、今やその分野の中核である携帯電話、PHS等の利用者は爆発的に増加し、移動電話は既に生活の基盤として日常生活の上で必要不可欠なものになりつつある。

この移動体通信はサービスエリアを多くのセルと呼ばれるエリアに分割し、チャンネルを割り当てる同周波数帯域を複数のセルで利用するセルラーシステムを用いている。現在このシステムにおいてここ数年の利用者の急増がチャンネル数の不足を招き、チャンネル数を確保するために一つのセルをさらに複数のセルに分割するセル細分化が進んだ。これによって一つの移動体通信交換局が管理する基地局数も増加することとなった。このようなシステム変動の中、呼接続や通話継続に要するオペレーションのメッセージトラフィックによる通信コストが問題視されている。中でも移動する端末の位置を監視する位置追跡 (Location Tracking) と通話中の端末がセルを移動した際に通話を継続させるハンドオフ (Hand Off) の二つの処理に要する通信コストについては研究が盛んに行なわれている。

本研究では、移動端末の発着信に関する移動体通信ネットワークにおける位置登録コストを端末の移動パターンを考慮して最適化する。端末の移動時のふるまいとしては正方形セルモデルおよび六角形セルモデルを使用し、その計算アルゴリズムを新たに提案する。また、数値実験を行い、新たに提案するモデルとその計算アルゴリズムの有効性を示す。

謝辞

本研究にあたり、李頡助教授には大変お世話になりました。李先生には公私にわたりお世話になり、基本的な事柄から研究に関することまで広範囲な知識など様々なことを教えていただきました。本当にありがとうございました。厚くお礼申し上げます。

また亀田 壽夫教授にも大変お世話になりました。亀田先生には様々なものの考え方を教わり、数多くの有益なコメントをいただきました。ありがとうございました。

さらに海老原義彦教授、北川博之教授、ならびに和田耕一教授からも数多くの有益なコメントをいただきました。深く感謝いたします。

OSDP 研究室の皆さんにもお世話になりました。特に Adrian Vasilache 氏には公私にわたり様々な相談に乗っていただいただけでなく、研究室の計算機環境の整備と管理などでも大変お世話になりました。ありがとうございました。他のメンバーの皆さんにも研究を手伝ってもらったり、相談にのってもらいました。また、皆さんと出会っていろいろなことを教えていただきました。本当にありがとうございました。

第1章 はじめに

通信業界に移動体通信が新たな分野として生まれ、今やその分野の中核である携帯電話、PHS等の利用者は爆発的に増加し、2004年12月現在において契約数は8500万台近くにまでなっている。普段の生活においても携帯端末を利用している人を見かけない日はないといっても良いほどに携帯電話は既に生活の基盤として日常生活の上で必要不可欠なものになりつつある。

このように増加を続ける契約者数に対して、現在の通信網では許容能力に限界があり、世界各国において通信方式の研究・開発が行われており、標準化を勝ち取ること为目标に盛んに研究が行われている [21, 22]。これらは主に通話時に割り当てる周波数帯域の有効利用という点に主眼がおかれているが、その一方で通話コストの削減についても盛んに研究が行われている。実際に数年前では無理としか言われていなかった携帯電話、PHSによる定額通信の提供が行われているという現実がこのことを如実に物語っているといえる。

この移動体通信はサービスエリアを多くのセルと呼ばれるエリアに分割し、チャンネルを割り当てる同周波数帯域を複数のセルで利用するセルラーシステムを用いている。現在このシステムにおいてここ数年の利用者の急増がチャンネル数の不足を招き、チャンネル数を確保するために一つのセルをさらに複数のセルに分割するセル細分化が進んだ。これによって一つの移動体通信交換局が管理する基地局数も増加することとなった。このようなシステム変動の中、呼接続や通話継続に要するオペレーションのメッセージトラフィックによる通信コストが問題視されている。中でも移動する端末の位置を監視する位置追跡 (Location Tracking) と通話中の端末がセルを移動した際に通話を継続させるハンドオフ (Hand Off)

の二つの処理に要する通信コストについては研究が盛んに行なわれている。

本研究では携帯電話やパーソナル・ハンディフォン・システム (PHS) に代表される移動体通信システムのサービスを提供する上でもっとも重要な位置登録機能に着目し、そのコストを低減することを目標とする。位置登録とは、自由に位置を変えることの出来る携帯端末の位置をシステムが認識することにより、端末がどこにしようとも発着信が出来るようにすることである。

移動する携帯電話や携帯型パソコンなどの携帯端末 (以下、端末と記す) の位置を追跡・制御する位置登録を行う際のシステム構成は図 2.1 のようになっている。また、それぞれは以下のような機能を持っている。

- サービスエリア

移動体通信サービスを提供する範囲。自動車電話・携帯電話では企業グループや業務提携によってほぼ日本全国をカバーしている、加入者が通話できる範囲。

- 位置登録エリア (Location registration Area: LA)

移動体通信ネットワークシステムが端末の所在位置を認識する際の範囲。各 LA は MSC (Mobile Switching Center) と呼ばれる交換局によって制御されており、複数の LA からサービスエリアが構成される。

- セル

システムの最小構成単位。いくつかのセルが集まって LA が構成されている。セルごとに基地局が存在し、基地局と端末は無線で通信を行い、これによって通話情報をやりとりする。

本研究では、移動端末の発着信に関する移動体通信ネットワークにおける位置登録コストを端末の移動パターンを考慮して最適化する。端末の移動時のふるまいとしては正方形セルモデルおよび六角形セルモデルを使用し、その計算アルゴリズムを新たに提案する。ま

た, 数値実験を行い, 新たに提案するモデルとその計算アルゴリズムの有効性を示す. さらに, 提案した端末の行動モデルのセルへの依存度を調べ, セルに依存しない端末行動モデルについても言及する.

第2章 Personal Communications Service(PCS) ネットワーク

PCS ネットワークにおいてサービスエリアは多くのロケーションエリア (Location Area: 以下 LA と略す場合がある) に分割され, その LA はさらに小さなセルと呼ばれる受信エリアに分割されている.

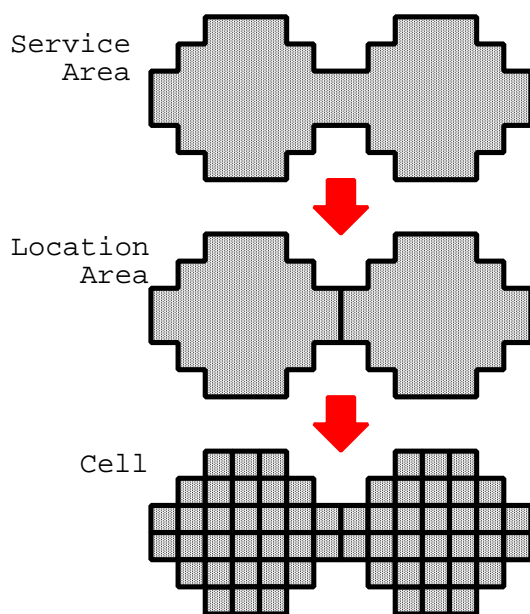


図 2.1: PCS ネットワークのサービスエリアの構成

各 LA はその LA に対応した Mobile Switching Center(移动通信交換局:以下 MSC と略す場合がある) に監視されている. 受信エリアである各セルには端末からの通信電波を受信する Base Station(基地局:以下 BS と略す場合がある) が設置されている. また MSC と BS

は有線で結ばれており MSC は BS を介して LA 内の端末の状態を監視することができる。

また, PCS ネットワークでは端末の現在の位置等の情報を格納するため Visitor Location Register, Home Location Register という二つのデータベースを使用する。

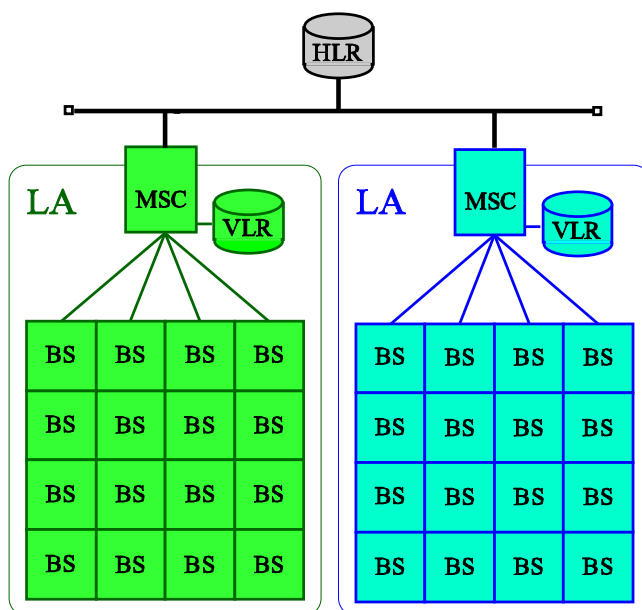


図 2.2: PCS のシステム網

Visitor Location Register(以下 VLR と略す) は端末が現在どの LA に滞在しているかを記憶するデータベースである。後で述べる通り端末が他の VLR によって管理されている LA に移動した時には元の VLR の記録は消去して、現在滞在している LA を管理している VLR に新たに登録を行う。つまり VLR 内の位置情報は一時的なものである。一つの VLR はあらかじめ決められた一つまたは複数の LA のデータ管理を受け持つ。もう一つの Home Location Register(以下 HLR と略す) は位置情報 (HLR に格納されている位置情報は端末が現在滞在している VLR の位置) を含めた加入者の詳細な情報を格納している。

2.1 ロケーションマネージメント

サービスエリア内で発生した呼が受信端末に接続されるためにはPCSは連続的に各端末の位置情報を記憶しておかねばならない。このために次の二つの処理が行なわれる。

- 位置登録 (Location Update : LU)
- 端末ページング

位置登録とは端末がLA間の境界を越えての移動をおこなった場合に、端末側からシステム側に信号を送り、システムが端末の現在位置情報を更新するオペレーションである。このオペレーションによって、着信時に目的とする端末にページング信号を送るLAを特定することができる。各端末は通話していない場合でも滞在しているLAの各ベースステーションから発信されている微弱な電波を受信している。この電波には各LAに固有の識別信号が含まれている。各端末は一定周期で自らが記憶している識別信号とベースステーションから送信された識別信号との符合を行なっている。これにより各端末は今まで滞在していたLAから別のLAに移動した場合、識別信号が符合しないため新たなLAへと境界を越えて移動したことを検知できる。LA間の移動を行った端末はこの仕組みを用いてLA間の移動を知り、端末使用者を煩わせることなく自動的にシステム側に位置情報の更新が必要であることを発信し、更新作業を要請するようになっている。

ページングとは端末に呼が生じたときにシステム側から端末側に着信を知らせる動作である。端末への着信が発生した際には、その端末が現在滞在しているLA内の全セルに対してポーリング信号という呼び出し信号が送信される。このポーリング信号は各セルにひとつずつ設置されている基地局を介してLA内に滞在している各端末へと送信される。着信側の端末がポーリング信号に応答すると、端末との間に回線が開かれ、通信・通話ができるようになる。

以下で各オペレーションについて説明する。

2.1.1 位置登録

位置登録とは端末が現在滞在している LA から違う LA へと移動した時に実行されるオペレーションである。このオペレーションは HLR に格納されている端末の位置情報を更新するために実行される。

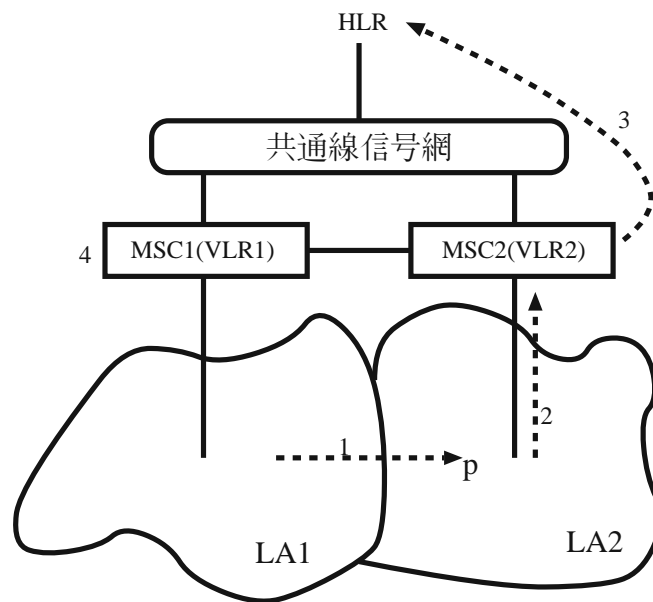


図 2.3: 位置登録

位置登録が行なわれる際の実行手順は以下の通り。

1. 端末 p が LA1 から LA2 へ移動
2. 端末が VLR2 へ登録要求を出す。VLR2 では登録要求を受け付けた後端末 p の ID 番号を登録する。
3. VLR2 は HLR へ端末 p の位置レコードの更新要求を出す。HLR は VLR2 からの更新要求を受け付けた後その位置レコードを VLR1 から VLR2 へ変更する。
4. VLR1 の端末 p の登録を削除する。

以上のようなオペレーションを行なうことによって端末への呼が発生した時に呼を発した側はHLRへ問い合わせることによって端末がどのLAに滞在しているのかを知ることができるようになる。

ステップ4における処理はderegistrationオペレーションと呼ばれ、次の4通りの方法があげられる。

- VLR2がVLR1に直接deregistrationオペレーションを実行する。
- HLRがVLR1にderegistrationオペレーションを実行する。
- 各々のVLRが利用されない古い登録を削除する。
- deregistrationオペレーションは実行されず、各VLRが持つ端末のルートアドレス(TLDN: Temporary Local Directory Number)を使い尽くした時には、新しい端末の登録は最も古いVLRレコードと置き換えられる。

最後の方法は古いレコードを消去する際にderegistration messageを必要としない。

2.1.2 端末ページング

端末ページングとはある端末に対して呼が発生した時に位置登録によって更新された端末の位置情報を元に端末を捜し出すオペレーションである。

端末ページングが行なわれる際の実行手順は以下の通り。

1. 端末pへの呼が発生
2. 呼を受けたMSC1は端末pの位置をHLRに問い合わせる。
3. HLRは端末pが最後に登録したVLR2に現在位置を問い合わせる。

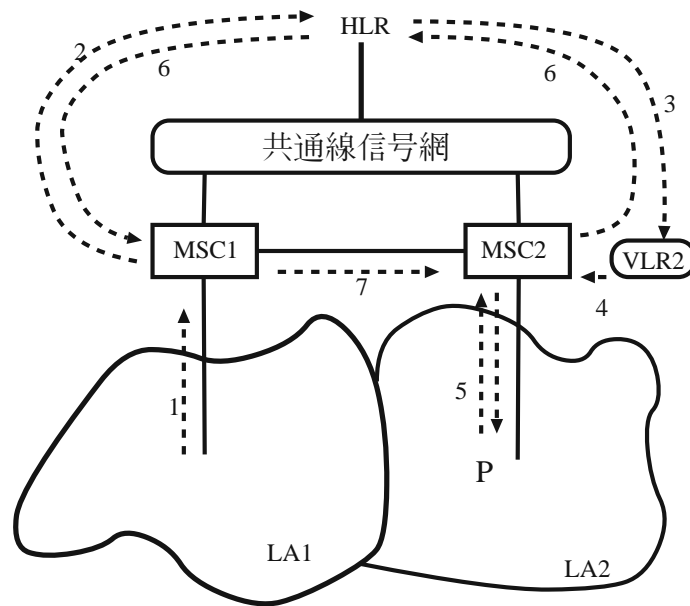


図 2.4: 端末ページング

4. VLR2 は端末 p を管理下においている MSC2 に端末 p が呼を受信可能かどうかを問い合わせる.
5. MSC2 は管理している LA2 内のすべてのセルに対して polling 信号を送信する. 端末 p が LA2 に滞在しており, かつ受信可能であれば polling 信号を受信し MSC2 に応答を返信する. (端末ページング)
6. MSC2 は端末 p からの送信を受けた後, 端末 p へのルートアドレスである TDLN を VLR2, HLR を介して MSC1 に送信する.
7. MSC1 は通話専用回線を通して MSC2, そして端末 p へと呼を接続する.

ステップ5における処理が端末ページングであるが, ここで MSC から送信される polling 信号は LA 内の全ての BS から送信される.

現在一つのセルをさらに複数のセルに分割するセルの細分化によって一つの LA 内の

BS数が増えており，LA内の全てのセルに polling 信号を送信するのは無駄が多く非効率的である．

第3章 移動体通信ネットワークのモデル化

図 2.1 にも示したように移動体通信ネットワークにおいてサービスエリアは複数個の位置登録エリア (LA) に分割され, その LA はさらに小さなセルと呼ばれる受信エリアに分割されている.

受信エリアである各セルには端末からの通信電波を受信する基地局 (以下 BS と略す場合がある) が設置されている. BS とそのセルをカバーする LA をサービスしている MSC が有線で結ばれている.

3.1 位置登録の方式

位置登録の方法には, 静的な方式と動的な方式が存在する [3].

静的位置登録は, 端末がどのような移動を行なうかとは無関係に LA が固定的に決められており, 端末がエリアの境界を越えると自動的にデータベースの更新が行なわれる. 境界を越えれば強制的にアップデートが生じるため, 境界付近で移動した場合何度もアップデートが生じてコストが増大する可能性がある.

この問題を解決するために動的な位置登録方式が考案されている. 動的な位置登録方式としては, 大別して Time-Based 方式 (一定の時間間隔で LU を行なう方式), Movement-Based 方式 (移動したセル数が一定の閾値を超えた場合だけ LU を行う方式) と Distance-Based 方式 (最後に LU が行われたセルからの距離が一定の閾値を超えた場合だけ LU を行う方式) の三つがある [3].

Distance-Based 方式と Movement-Based 方式の違いは、前者は単純に訪れたセルの個数を条件としているため、隣り合う2つのセルを何度も行き来して閾値に達した場合にも LU が行なわれる方法であり、後者は LU が行なわれたセルから何個かのセルを移動した場合に LU が行なわれる方法である、動的な方法は無駄なアップデートが発生することを防ぐことができるが、仕組みが多少複雑になってしまう。

本研究では、Movement-Based 方式を改良した方法で位置登録を行なう。端末の移動を本論文で述べる「正方形セルモデル」を用いてモデル化する。このモデル上で端末がどの方向へ移動するかという確率を与え、ネットワーク内の全セルに対して、端末がそのセルを訪れる確率を求める。これをもとにして端末の移動パターンに最適な位置登録エリアを導出する。この際、貪欲アルゴリズムを用いたヒューリスティックな方法で解を求める。

3.2 Signaling Cost

PCS でのロケーションマネージメントに要する通信コスト TC は位置登録のコストとページングのコストの和として求めることができる。1つの端末に対する単位時間あたりの位置登録およびページングのコストは以下のようなパラメータに依存する。

- k : LA に含まれるセルの数
- μ : 端末が呼を受ける割合 (calls / unit time)
- u_k : k 個のセルを内包する LA 内を移動する端末が発生させる位置登録の割合 (updates / unit time)
- C_p : セル一つにページングするために必要とされるコスト
- C_u : 位置登録に必要とされるコスト

- $TC(k, \mu, u_k)$: 与えられた条件の LA においてロケーションマネージメントに必要なとされるコスト

以上により, 各端末の位置登録の平均コストは次のように与えられる.

$$TC(k, \mu, u_k) = k\mu C_p + u_k C_u \quad (3.1)$$

位置登録のコストを下げるということは, 端末からシステムに LA を越えた事を通知する信号を送信する回数を少なくするという事である. サービスエリアの広さは決まっているため, この信号を送信する回数を減らすということは, LA 一つ一つの広さを大きくし, サービスエリアを構成する LA の数を少なくするという事になる. しかしこれは同時に, 一つの LA に含まれるセルの数を多くするという事でもある. ページング信号は LA に含まれる全てのセルに送信されるため, ページングのコストが増大することになる. 逆の理由でページングのコストを少なくなるようにすると, 今度は LU のコストが大きくなってしまふ. このように, 同時に 2 種類のコストを最小化することは不可能である.

そこでページングに関係するコスト ((3.1) 式右辺第一項) を, LA に含まれるセルの個数 k を定数にすることで固定する. LU に関係するコスト ((3.1) 式右辺第二項) を最小にするということは, (3.1) 式中の C_u はパラメータとして固定値を与えるので, 平均 LU 率 u_k を最小にすることと同意である. 各セル内での異なる端末の滞在時間が i.i.d. (independent identically distributed, 独立同分布) ランダム変数とし, N_k を端末が k 個のセルを含む LA 内で通過するセルの期待値, u_c を単位時間あたりに通過するセルの平均個数とすれば, u_k は

$$u_k = \frac{u_c}{N_k} \quad (3.2)$$

として与えられる [1].

位置登録コストを最小にするには, 端末がある LA に登録されてからその LA を出るまでの時間を長くすればよい. つまりこの問題は N_k を最大にすることに帰着する.

上述したとおり位置登録エリア (LA) とはいくつかのセルが集まったものである. 移動体通信ネットワークシステムは端末が LA への出入りを行うたびに LU を行う. これにより移動体通信ネットワークシステムは端末が所在する LA を知ることができる.

現在提供されているサービスでは位置登録エリアの範囲があらかじめ固定されており, 動的に変更・更新されることはないとされている [1, 3, 4].

本論文では, 各端末の移動特性に応じて, 各端末の N_k を最大にするような最適な LA の形状を求めている. 式 (3.1) は, ネットワーク内の一つの端末の位置登録の平均コストを表している. 実際のネットワークには多数の移動端末が存在しており, 各端末が独立した移動特性を持っていることが考えられる. システム全体の位置登録の平均コストを最小化するには, 式 (3.1) で表される各端末の位置登録の平均コストを最小化すればよい. よって, 後で提案する手法は各端末の位置登録を最適化するだけでなく, 多数の端末が存在しているネットワーク全体の位置登録を最適化することができる.

この現行の方式は静的な方式であり, 端末の移動特性を考慮して最適な位置管理を行うことができない.

このように固定されたエリアを使う方式では, あるエリアとそれに隣接するエリアの境界にある端末に対して頻繁に位置登録の切り替えが生じてしまう. このようにして位置登録が頻繁に生じるということは, それだけ位置登録コストが増大するという事である.

図 3.1 は端末の移動が発生させるトラフィックの例を示したものである. 図中のパターン A によるエリア決定法では前回の呼からその次の呼の間に 3 回の位置登録が必要であるが, パターン B によるエリア決定法では一回の位置登録のみで済んでいる. これより単位時間あたりの位置登録の回数が少ないほど位置登録コストを下げる事が出来る事がわかる. 位置登録の回数が少ないということは一つの RA での滞在時間が長いということでもある.

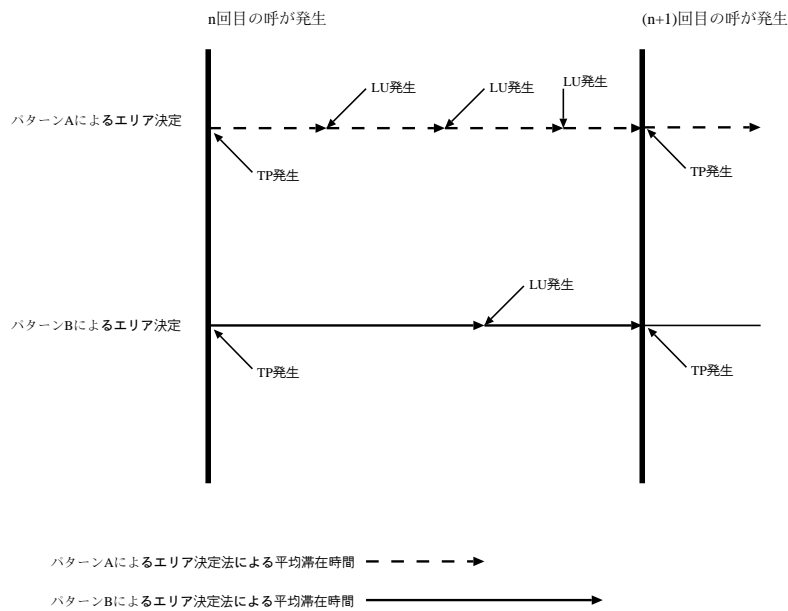


図 3.1: 二呼間での端末の移動が与える影響について

ここで δ_{LU} と δ_{TP} が一定であるので通信コスト C を低くするには $N_{LU}, \#Cell$ を低くすることが必要であると判る. Movement-Based 法は random walk と呼ばれる前後左右へくまなく移動するような場合を主に考慮し N_{LU} と $\#Cell$ を低くしようとしたものであるが, 下で述べる通り RA を静的に決定する場合に比較してコストが高くなる場合があるという欠点がある.

そこで Movement-Based 法を発展させ, RA の形状を工夫し一つの RA での滞在時間を伸ばすことにより通信コスト C の削減が可能か調べてみた.

3.3 Mobility Model

最適な LA の形状はサービスエリア内を移動する各端末の物理的位置, その端末による位置登録やその端末への呼の発生割合により決めることが出来る. 交換局など PCS ネットワークシステムの処理能力向上とともに端末毎の移動特性に適合する LA を設定するこ

ともできるようになると思われる。しかしながら今現在使用されている移動体通信網においては似たような呼の発生頻度や移動特性を持つような移動端末をグループ化し、それらに合わせた LA が設定されている。移動特性は端末の所在位置、時間と密接に関係している。朝の通勤時間帯での住宅地からオフィス街への移動、夕刻からのオフィス街から住宅街への移動などが例としてあげられる。このような端末の移動特性は移動する端末自身が保持し位置登録を行う際にシステム側に通知する、システム側が各端末の移動履歴を保持する、等の方法で得ることが出来る。そこでまずはこのようなグループ化された端末の移動特性をあらわすような代表端末を考える。本研究において使用しているセルアーキテクチャにおいては各端末の移動は二次元平面上に配置されてセル間の移動によりあらわされている。これは正方形セルアーキテクチャにおいては各セル (i, j) は隣接セル $(i + 1, j)$, $(i - 1, j)$, $(i, j + 1)$, $(i, j - 1)$ をもつということである。

第4章 関連研究

4.1 動的な位置管理

動的な一管理方式としては下記の3種類が提案・研究されている。

- Movement-Based 法
- Distance-Based 法
- Timer-Based 法
- オーバレイ位置登録法 [21]

それぞれ端末の移動にしたがい動的な位置管理をおこない位置登録に必要なとされるコストの低減を目指したものであるが、その使用するモデルが現状に即していないなどの問題点がある。

一つの例として Movement-Based 法について説明する。

4.2 Movement-Based 法

Movement-Based 法 [4] とはロケーションエリア内にある範囲 d となるようなさらに小さなエリアを作り, polling 信号をその小さなエリア内のみを送信するという方法である。図 4.1 に $d = 4$ とした時の例を示す。最初にセル A でアップデートを行ったとする。閾値 $d = 4$ なのでセル A からセル C まで移動する間に呼の到着が無かったとすると位置登録

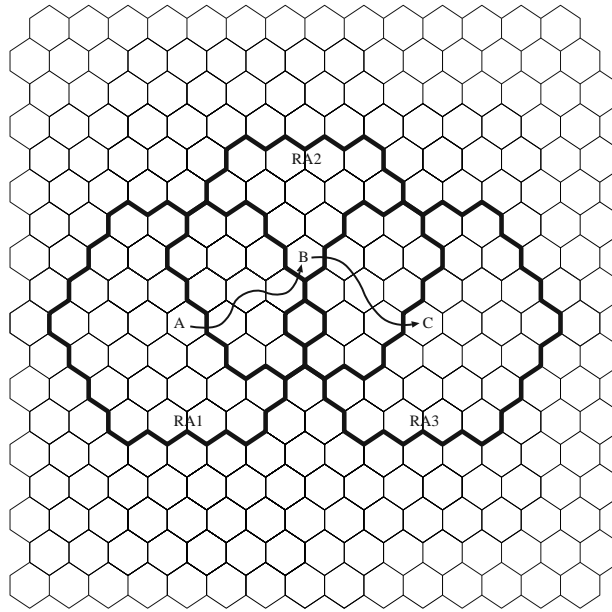


図 4.1: Movement-Based 法

はセル B とセル C で行われる. Movement-Based 法とは最後にアップデートが行われたセルをセンターセルとしたときに次回のアップデートまでは端末はセンターセルから閾値 d に従って最大でも $d-1$ 以内 (このエリアを RA とよぶ) にいることを保証することによって無駄なトラフィックを減らそうというものである.

4.3 Movement-Based 法の問題点

LA 内の全てのセルに polling 信号を送信するのは無駄が多いので, 端末毎にレジストレーションエリアと呼ばれる小エリアを割り当て無駄を削減することを目指す.

Movement-Based 法では定型のレジストレーションエリアを作り, それを端末の移動にしたがって移動させていくという方法をとっているが, この方法では例えば端末の移動速度が高い時には次々とレジストレーションエリアが作成されていくことになりかえって無駄なトラフィックを発生させる場合がある.

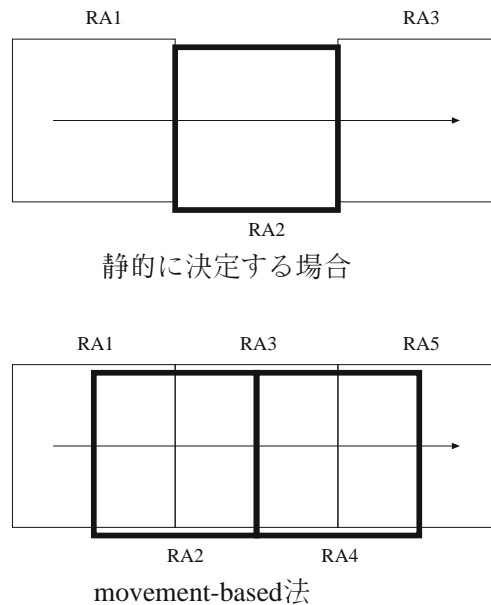


図 4.2: 無駄なトラフィックの発生例

図 4.2 は同じ距離を移動した際の振舞いの違いを表したものである。静的にエリアを決定する方式では二回の位置登録ですんでいるのに比べ Movement-Based 法では二倍の四回位置登録を行なっている。これは Movement-Based 法では端末の移動特性が考慮されていないことと、位置登録を行なったセルを中心にして新たなレジストレーションエリアを構成するのが原因である。

そこで本研究では Movement-Based 法を更に発展させ作成されるレジストレーションエリアを端末の移動速度に従い動的に変化させることを考える。

4.4 ネットワークモデル

一般に移動体通信ネットワークでは、各セルに一つの基地局 (BS) が配置されており、端末と無線で通信が行なわれている。本研究では二つのモデルについて実験をおこなった。

一つは端末は市街地を移動するものとし、BS が交差点に設置されているものと仮定した

もの. つまり十字形の交差点の数だけセルが存在する場合. このようなモデルをマンハッタン・シティモデルともいう [1].

もう一つはより一般的な場合を想定したものでサービスエリアを隙間無く敷き詰められた正六角形の集合であると仮定したものである. このモデルを我々は正六角形セルモデルと呼ぶ.

第5章 正方形セルモデル及びセル訪問確率の算出

5.1 正方形セルモデル

まず正方形セルモデルについて述べる.

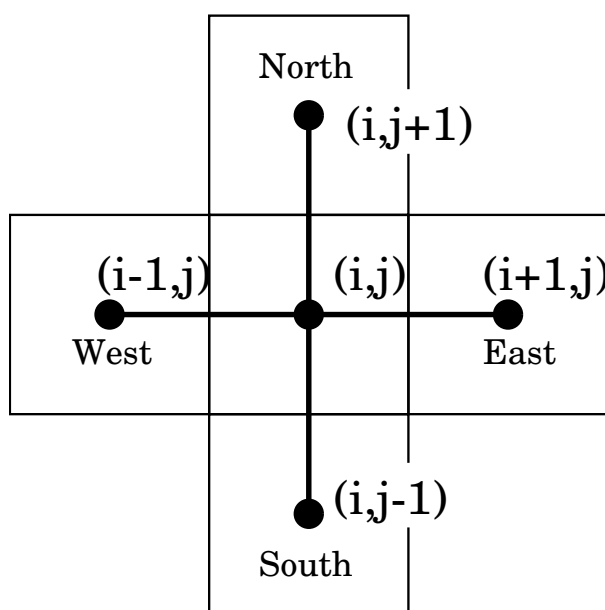


図 5.1: 格子モデル

このモデルは [1, 2] 等で使用されているモデルを元に, それを発展させたものである. 本モデルではセルの位置を格子状に配置してあらわす. 図 5.1 に示すようにセル (i, j) は東西南北をそれぞれ $(i+1, j)$, $(i-1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$ の 4 つのセルに囲まれている. 従来提案されていた 3 方向移動モデル [1, 2] では端末の移動方向は直進, 左折, 右折の 3 方向

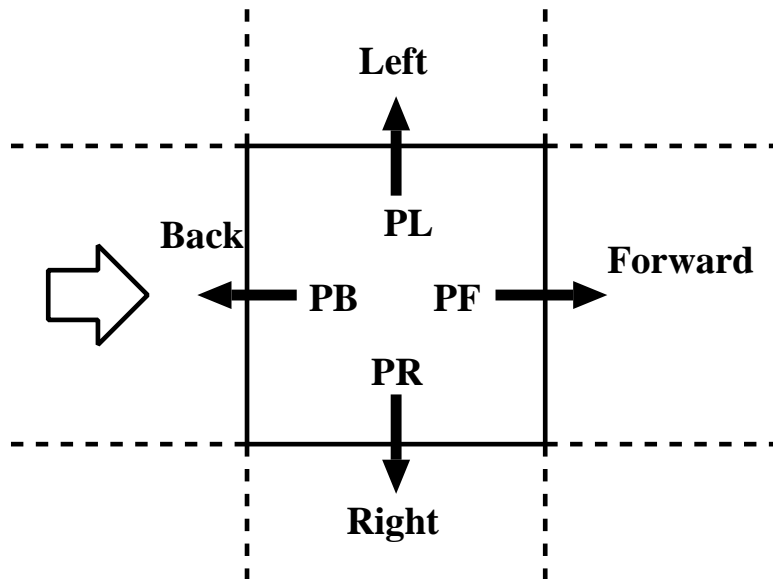


図 5.2: 正方形セルモデル

に限定されており、任意の2点間の移動に際し端末の取る経路は2点間の最短路をとる。後方に進路をとること、任意の2点間の移動時に冗長な経路をとることは許されないため、端末の移動パターンが限られてしまう。結果として端末の移動手段としては自動車や鉄道など、高速で移動し、突然進路が変わることが少ないようなものしか想定されていない。しかし歩く程度の移動速度ならば頻繁に、かつ簡単に方向を転換することができるため、ある目的地に到達するために最短路のみを辿ると決めるのには多少無理がある。

5.2 セル訪問確率の算出

ここでは移動端末の移動特性をあらわすため、前進、左折、右折以外に後進することも考慮に入れ、任意の2点間の移動経路に制限を設けない、正方形セルモデルについて説明する。

ここでは我々が考案した [9] 正方形セルモデルにおける端末の移動性を考慮したセル訪

問確率の算出方法について述べる.

まずは主な変数について説明する

- $prv(i, j, n)$ - n 回目の試行において移動端末が LA 内のセル (i, j) へ移動をおこなう確率.
- $prv(i, j, n).e$ - n 回目の試行において移動端末が LA 内のセル (i, j) に東から進入し移動してくる確率. 同様に $prv(i, j, n).w$, $prv(i, j, n).n$, $prv(i, j, n).s$ はそれぞれ同様に西, 北, 南よりセル (i, j) に進入してくる確率.
- $Pre(i, j, n)$ - 移動する端末が n 回目の試行においてセル (i, j) から LA 外のセルへと移動する確率
- $x_{i,j}$ - 対象としている端末が滞在している LA にセル (i, j) が割り当てられているかどうかを表す. 1 なら割り当てられており, 0 なら割り当てられていない.
- $\bar{x}_{i,j} - x_{i,j}$ の反転. つまり $x_{i,j} = 0$ ならば 1 となり, $x_{i,j} = 1$ ならば 0
- PF, PL, PR, PB - それぞれ移動端末が, 前方, 左方, 右方, 後方のセルに進入する確率.

セル (i_0, j_0) を出発地点 (位置登録が発生したセル) とし, LA の境界上に位置するセル (i, j) に n 回目のセル移動で訪れる確率を $Prv(i, j, n)$ とする. そのとき $n \geq |i - i_0| + |j - j_0|$ となる. このとき $Pre(i, j, n)$ により N_k は下記のような式であらわすことが出来る

$$N_k = \sum_{(i,j) \in Rb} \sum_{n=|i-i_0|+|j-j_0|}^{\infty} (n+1)Pre(i, j, n)$$

なお式中の Rb は LA の境界上に位置するセルの集合, $Pre(i, j, n)$ は上記の通り移動する端末が n 回目の試行においてセル (i, j) から LA 外のセルへと移動する確率であり下記のように現すことが出来る.

$$\begin{aligned}
pre(i, j, n) & \qquad \qquad \qquad (5.1) \\
& = [\quad prv(i, j - 1, n).n \times \bar{x}_{i,j-1} \\
& \quad + \quad prv(i, j + 1, n).s \times \bar{x}_{i,j+1} \\
& \quad + \quad prv(i - 1, j, n).e \times \bar{x}_{i-1,j} \\
& \quad + \quad prv(i + 1, j, n).w \times \bar{x}_{i+1,j}] x_{i,j}
\end{aligned}$$

以下に示すのはセルを LA に追加する試行 n 回目における LA 内全セルの訪問確率を求める際の流れである。

1. 全ての LA 内のセル i, j について, n 回目の訪問確率を求める。

移動モデルが 3 方向移動モデル [1, 2] の場合訪問確率は端末が 1 回訪れたセルを 2 度と訪れることがないため, 前回 LU が行われたセルからの距離と端末の移動パターンが与えられれば一意に決定される。しかし正方形セルモデルの場合同一セルを 2 回以上訪れることがあるためそれらの値だけでは決定することができない。そのため, あるセルの n 回目の訪問確率 $prv(i, j, n)$ を求めるには, 隣接する 4 つのセルの $(n - 1)$ 回目の訪問確率を用いるようにしている。

つまり, n 回目にセル (i, j) に東から進入する確率は, セル (i, j) の東側に隣接するセル $(i + 1, j)$ の $n - 1$ 回目の訪問確率を用いて, セル $(i + 1, j)$ に東 (E) から進入し前進する確率, 西 (W) から進入し後進する確率, 南 (S) から進入し左折する確率, 北 (N) から進入し右折する確率の和に, セル (i, j) が LA に含まれているか否かのフラグである $x_{i+1,j}$ を乗じることにより計算する。なお LA に割り当てられていないセルから進入するということは, そのセルで LU が発生するという事であり, ここでは既に LA に割り当てられているセルからの進入確率を求めているので $x_{(i+1,j)}$ を乗じている。

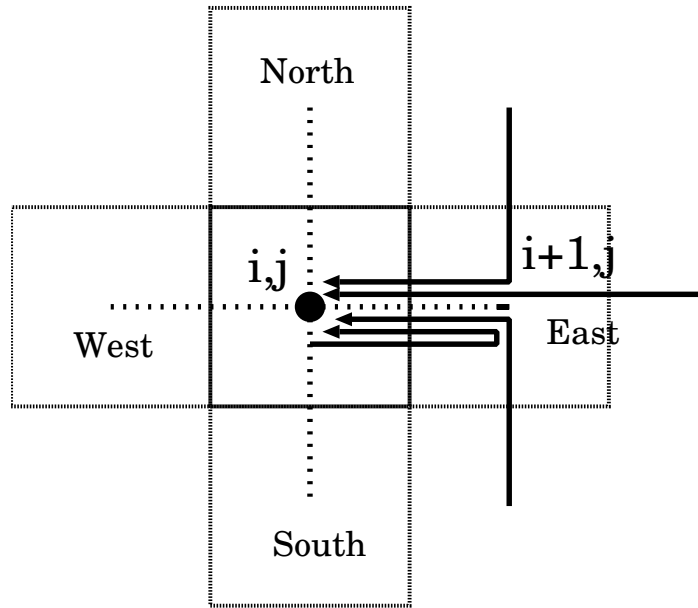


図 5.3: n 回目に東側のセルから侵入する場合

$$\begin{aligned}
 & prv(i, j, n).e \\
 &= [prv(i+1, j, n-1).e \times PF \\
 &+ prv(i+1, j, n-1).w \times PB \\
 &+ prv(i+1, j, n-1).s \times PL \\
 &+ prv(i+1, j, n-1).n \times PR] x_{i+1, j}
 \end{aligned}$$

同様にその他の方角から進入する場合の確率 $prv(i, j, n).w$, $prv(i, j, n).s$, $prv(i, j, n).n$ はそれぞれ下記の通り求めることができる。

$$\begin{aligned}
 & prv(i, j, n).w \\
 &= [prv(i-1, j, n-1).w \times PF
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \text{prv}(i-1, j, n-1).e \times PB \\
& + \text{prv}(i-1, j, n-1).n \times PL \\
& + \text{prv}(i-1, j, n-1).s \times PR] x_{i-1, j}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{prv}(i, j, n).s \\
& = [\text{prv}(i, j-1, n-1).s \times PF \\
& + \text{prv}(i, j-1, n-1).n \times PB \\
& + \text{prv}(i, j-1, n-1).w \times PL \\
& + \text{prv}(i, j-1, n-1).e \times PR] x_{i, j-1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{prv}(i, j, n).n \\
& = [\text{prv}(i+1, j, n-1).n \times PF \\
& + \text{prv}(i+1, j, n-1).s \times PB \\
& + \text{prv}(i+1, j, n-1).e \times PL \\
& + \text{prv}(i+1, j, n-1).w \times PR] x_{i, j+1}
\end{aligned}$$

2. LU が行われるセルについて, LA に進入した方向については訪問確率は 1 になるが, 上記の計算法ではそれが反映されないため補正を行なう.

$$\text{prv}(i_{LU}, j_{LU}, n).direction+ = 1.0$$

3. 上記計算を LA 内の全てのセルについて行い, 全ての i, j について, $\text{prv}(i, j, n)$ を求める.

$$\begin{aligned}
prv(i, j, n) &= prv(i, j, n).e \\
&+ prv(i, j, n).w \\
&+ prv(i, j, n).s \\
&+ prv(i, j, n).n
\end{aligned}$$

このようにして求められたセル訪問確率を用いて、次に説明するアルゴリズムで最適化された LA を導出する.

5.3 位置登録エリアの最適化

本研究においては端末の移動特性に応じて最適化された LA を求めるために、最初は位置登録が行われるセル 1 個だけの LA から段階を踏んでセルを追加していき、最終的に LA に含めるセルの個数 (k) になるようにする. 式 (3.2) でもわかる通り LA を最適化するためには k 個のセルにより構成された LA 内の通過するセルの個数 N_k を最大にするような条件を満たしてやれば良い. その場合、下記のような条件を満たすセルを追加する.

Maximize N_k ,

$$\text{subject to: } \sum_{i=1} \sum_{j=1} x_{i,j} = k.$$

この問題は、LA に含めるセルの個数を決定し、その個数の範囲の中で通過するセルの個数の期待値 N_k を最大にするという問題であるが、これは NP 完全問題に属するナップザックの問題に他ならない [20, 9]. ナップザックの問題は必ず最適な解を求めることができる

ような決定的なアルゴリズムが存在しないため、我々はこの問題に対する解を導くために貪欲アルゴリズムによる発見的な解法を提案する。

本研究では、各端末の移動特性を表すため、セルを表現するのに2次元行列を用いた。あるセルを特定するために、 (i, j) の形の x - y 座標を用い、これと行列を対応させて実験を行った。この行列を X と呼ぶことにし、各要素 $x_{i,j}$ は対応するセルが位置登録エリアに含まれているか否かによってそれぞれ1, 0の値をもつ。また位置登録が発生したセルの座標を (i_0, j_0) とする。

1. 初期化

位置登録の発生したセル (i_0, j_0) のみを LA とする。

$$x_{i_0, j_0} = 1,$$

$$x_{i,j} \text{ for } i = 1, \dots, m, i \neq i_0; j = 1, \dots, m, j \neq j_0$$

LA に含まれているセルの数 : $N_c = 1$

下記の各方向から進入してくる確率およびその瞬時値を0とする。

$$Prv(i_0, j_0, 0).n, Prv(i_0, j_0, 0).s,$$

$$Prv(i_0, j_0, 0).w, Prv(i_0, j_0, 0).e,$$

$$tmp(i_0, j_0, 0).n, tmp(i_0, j_0, 0).s,$$

$$tmp(i_0, j_0, 0).w, tmp(i_0, j_0, 0).e,$$

$$Prv(i_0, j_0, 0), tmp(i_0, j_0, 0),$$

初期進入方向の進入確率を1とする。 $Prv(i_0, j_0, 0).din = tmp(i_0, j_0, 0).din = 1,$

試行回数 $N = 0$ 。

なお n, s, e, w はそれぞれ北, 南, 東, 西の各方向からの進入をあらわす。

2. 試行回数をインクリメント $N = N + 1$

3. 現時点までに LA に含まれているセルに隣接しているが LA に含まれていないセル

の集合を $B(X)$ とする. ($x_{i,j} = 0$ であり, $x_{i+1,j} = 1, x_{i-1,j} = 1, x_{i,j+1} = 1, x_{i,j-1} = 1$ のいずれかを満たすようなセルの集合)

4. n 回目の試行における各セルの訪問確率の瞬時値 $tmp(i, j, N).n, tmp(i, j, N).s, tmp(i, j, N).w, tmp(i, j, N).e, tmp(i, j, N)$ を算出する. $tmp(i, j, N).n$ は下記の通り.

$$\begin{aligned}
 & tmp(i, j, N).n \\
 &= [Prv(i, j + 1, n - 1).n \times PF \\
 &+ Prv(i, j + 1, n - 1).s \times PB \\
 &+ Prv(i, j + 1, n - 1).w \times PR \\
 &+ Prv(i, j + 1, n - 1).e \times PL] x_{i,j+1}
 \end{aligned}$$

他の値 $tmp(i, j, N).s, tmp(i, j, N).w, tmp(i, j, N).e$ も同様に計算できる.

$$\begin{aligned}
 & tmp(i, j, N).s \\
 &= [prv(i, j - 1, n - 1).s \times PF \\
 &+ prv(i, j - 1, n - 1).n \times PB \\
 &+ prv(i, j - 1, n - 1).w \times PL \\
 &+ prv(i, j - 1, n - 1).e \times PR] x_{i,j-1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & tmp(i, j, N).w \\
 &= [prv(i - 1, j, n - 1).w \times PF
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \text{prv}(i-1, j, n-1).e \times PB \\
& + \text{prv}(i-1, j, n-1).n \times PL \\
& + \text{prv}(i-1, j, n-1).s \times PR] x_{i-1, j}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{tmp}(i, j, N).e \\
& = [\text{prv}(i+1, j, n-1).e \times PF \\
& + \text{prv}(i+1, j, n-1).w \times PB \\
& + \text{prv}(i+1, j, n-1).s \times PL \\
& + \text{prv}(i+1, j, n-1).n \times PR] x_{i+1, j}
\end{aligned}$$

5. $B(X)$ に含まれる (i, j) のうち $\text{tmp}(i, j, N)$ が最大となるような (i, j) を LA に加える.
LA に含まれているセルの個数 N_c を更新.
6. $x_{i, j} = 1$ であるようなセル全てについて求めた瞬時値をコピーする.

$$\begin{aligned}
\text{Prv}(i, j, N) & = \text{tmp}(i, j, N) \\
\text{Prv}(i, j, N).n & = \text{tmp}(i, j, N).n \\
\text{Prv}(i, j, N).s & = \text{tmp}(i, j, N).s \\
\text{Prv}(i, j, N).e & = \text{tmp}(i, j, N).e \\
\text{Prv}(i, j, N).w & = \text{tmp}(i, j, N).w
\end{aligned}$$

7. $N_c \geq k$ であれば終了. さもないければ step2 へ進む.

第6章 数値実験, 結果およびモデル

6.1 最適化された LA の形状

上記のアルゴリズムによって導かれた最適化された LA の典型的な例を図 6.1~6.5 に示す. いずれも端末は LU が行われるセル (51, 51) に西 (左) から進入している. 端末の移動パターンの変化にともなって LA の形状が大きく変化することがよくわかる.

図 6.1 のように各方向への移動確率が等しいような場合は LU セル (LU が行われたセル) を中心とした範囲に LA が形成されるようになるが, 端末の移動パターンに偏りが出ると図 6.2~6.5 のようにその偏りに従って LA が形成される.

本提案手法では, 移動端末が各方向への移動確率に大きな差がない場合は, その端末が LU セルを中心として, その隣りのセルを通過する確率が高く, それらのセルを LA に追加するため, LA が (図 6.1 で示すように) ある程度対称的な形状になる. また, 端末の移動パターンに偏りが出るほど, その移動パターンを反映するように, その端末が LU セルを原点に, その偏りの方向上のセルを通過する確率が高くなる. そのように求められた端末の LA の形状には, その端末が LA 内で通過するセルの個数の期待値 N_k を最大化し, その結果位置登録の平均コストを最小にする.

6.2 正方形セルモデルにおける従来方式との比較

図 6.7~6.10 は貪欲アルゴリズムを用いた最適化されて LA における N_k と静的に配置された正方形型の LA における N_k との比較である. ここでいう正方形セルとは LU を行っ

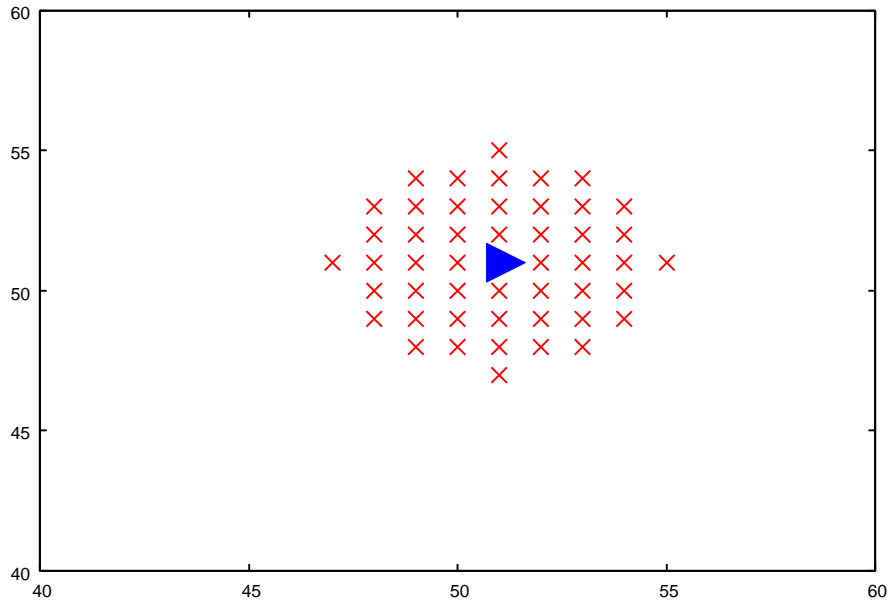


図 6.1: $PF=0.25$, $PL=0.25$, $PR=0.25$, $PB=0.25$, セル数=49

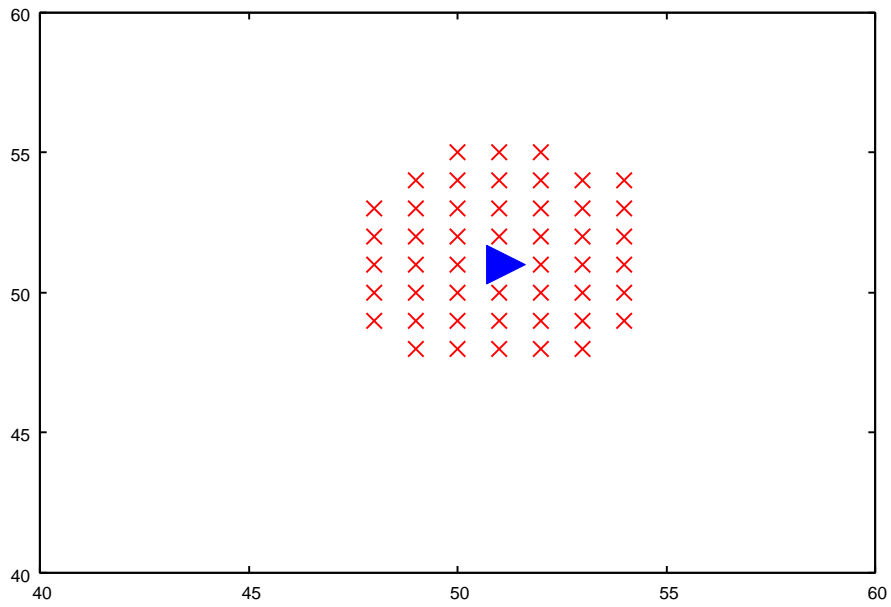


図 6.2: $PF=0.30$, $PL=0.40$, $PR=0.10$, $PB=0.20$, セル数=49

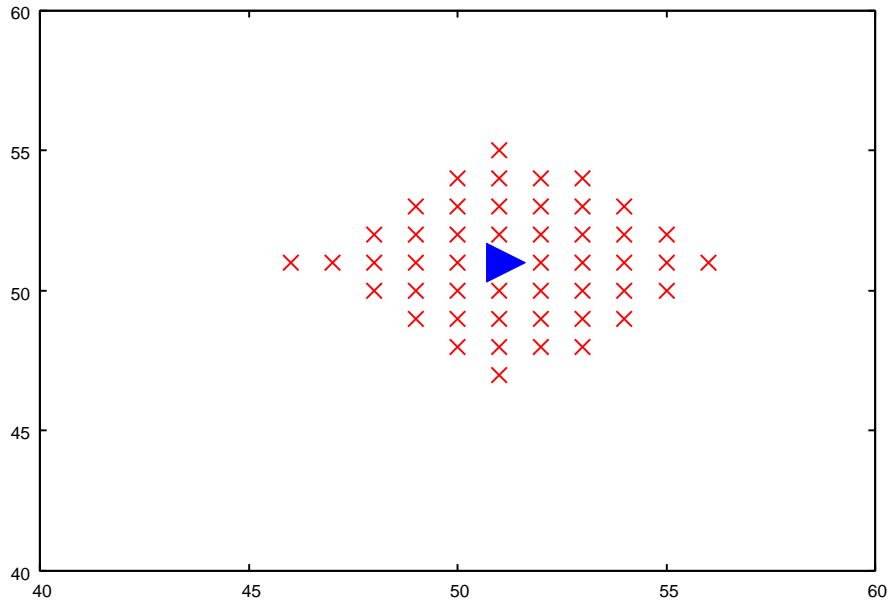


図 6.3: $PF=0.50$, $PL=0.10$, $PR=0.10$, $PB=0.30$, セル数=49

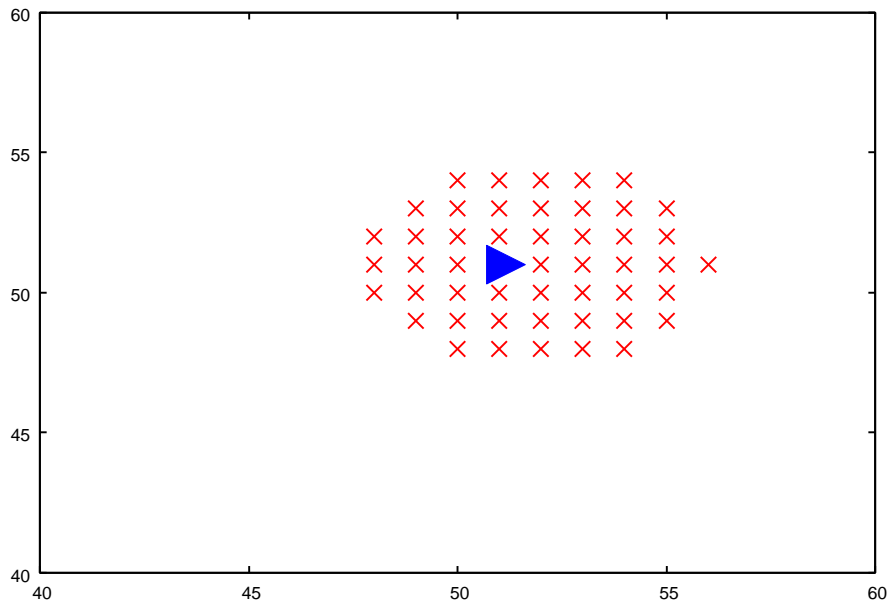


図 6.4: $PF=0.50$, $PL=0.20$, $PR=0.20$, $PB=0.10$, セル数=49

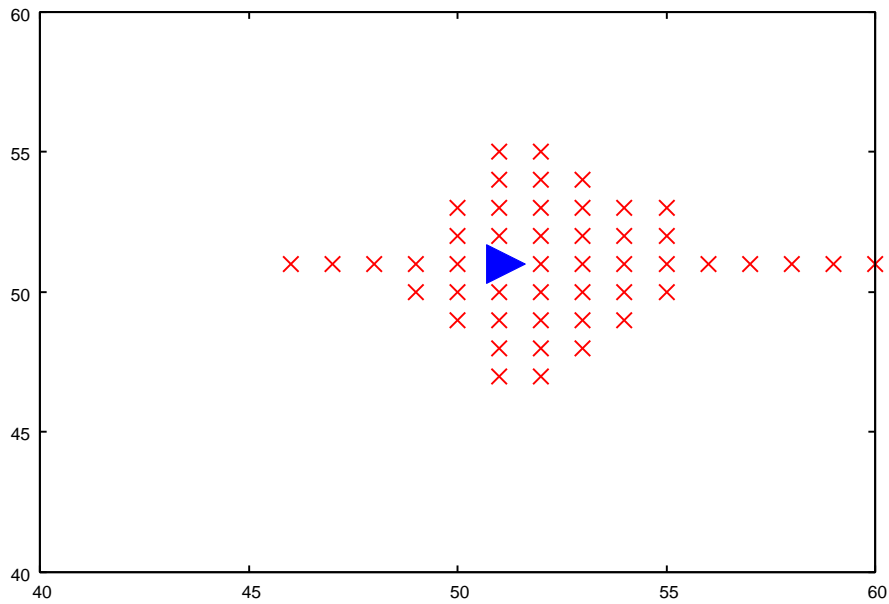


図 6.5: PF=0.70, PL=0.10, PR=0.10, PB=0.10, セル数=49

たセルを中心とし、セル数が k となるような正方形の LA である。この正方形の辺の長さを l とすれば $l \times l = k$ となる。つまり本提案手法と比較している従来使用されている静的に配置された LA に含まれるセルの個数は図 6.6 のように 1, 9, 25, 49, 81, 121, ... というように増加する。

図 6.7 ~ 6.11 から端末の移動特性が同じであれば LA に含まれるセルの個数が増加するほど本研究によって求められた最適化された LA が効果的であることがわかる。また、端末の移動特性の偏りが大きいほど効果的であることがわかる。

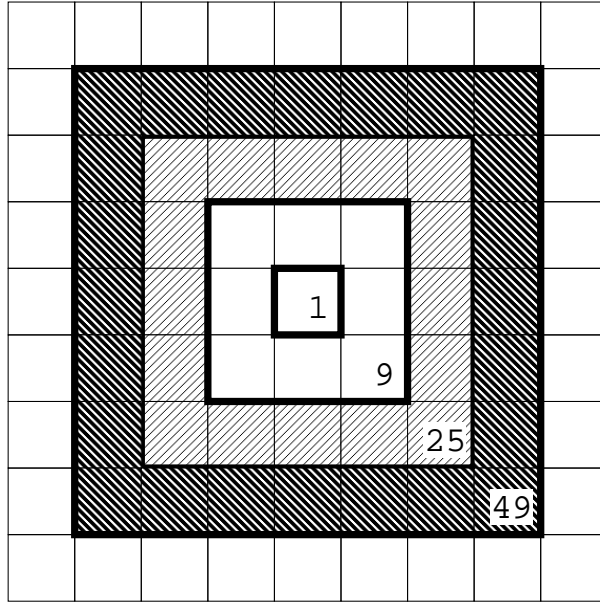


図 6.6: 正方形型の LA

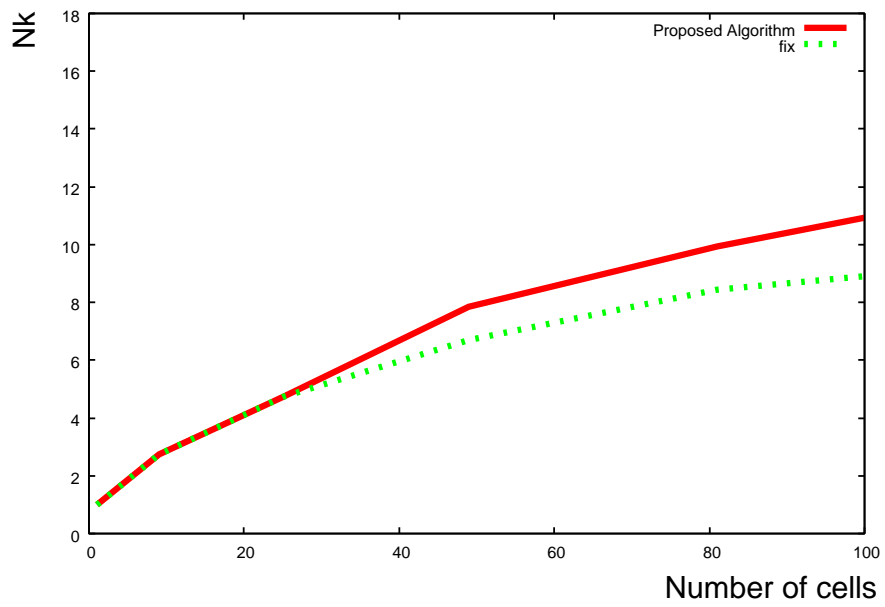
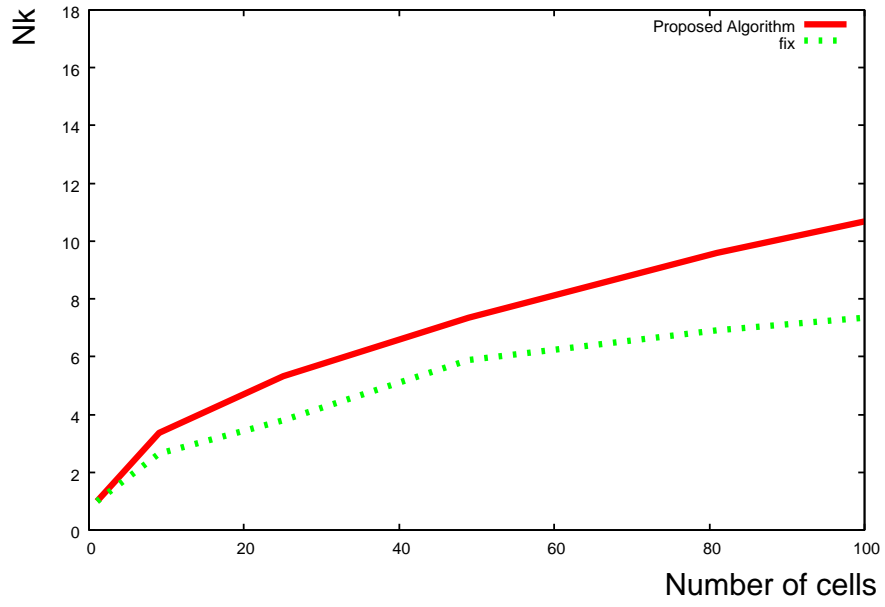
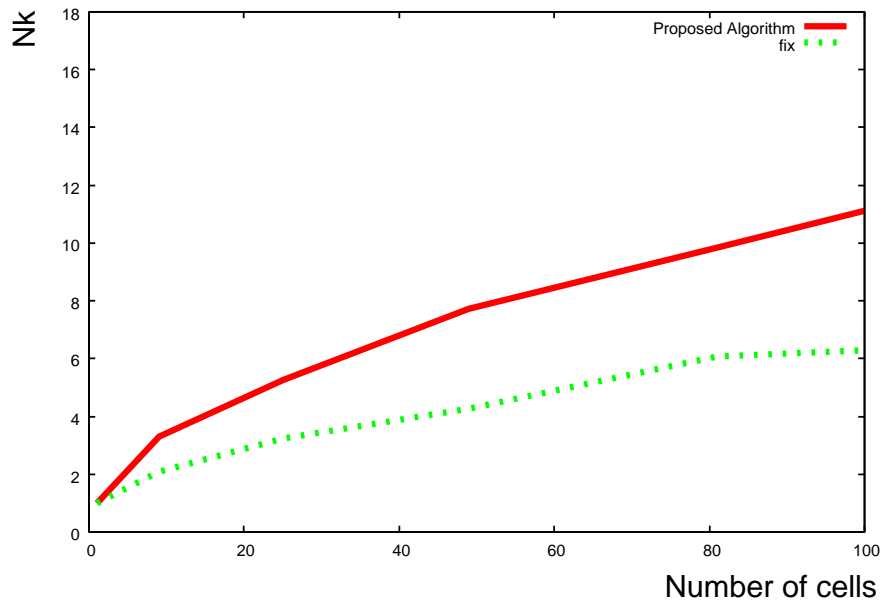


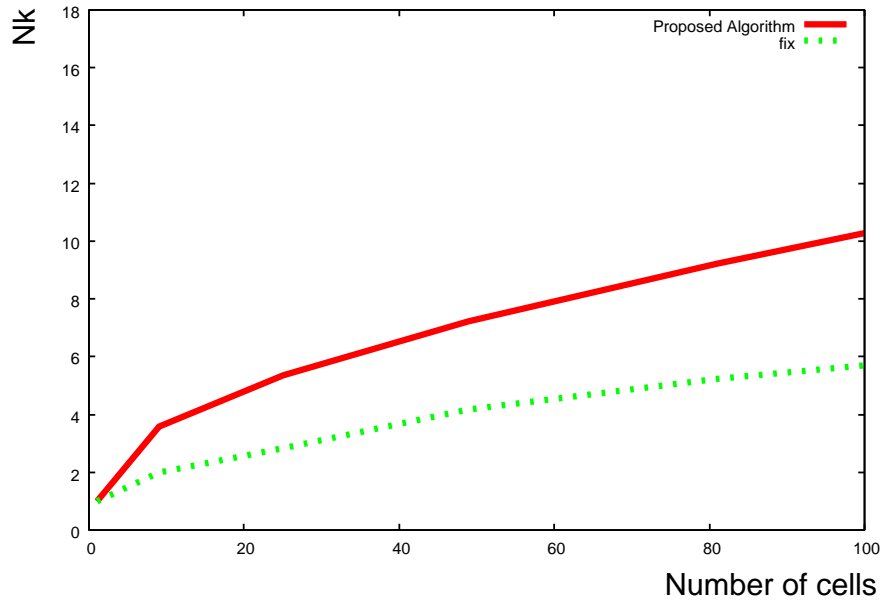
図 6.7: PF=0.25, PL=0.25, PR=0.25, PB=0.25



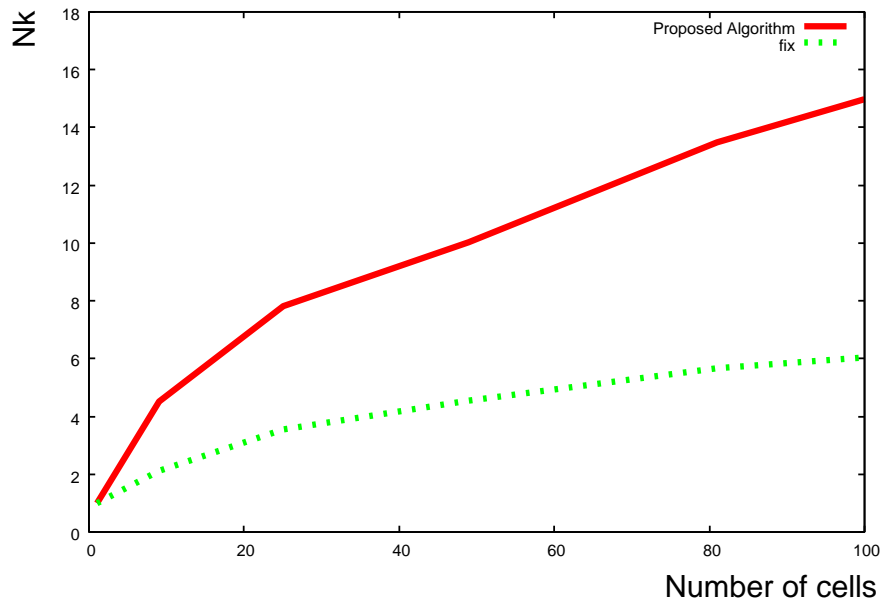
⊗ 6.8: PF=0.30, PL=0.40, PR=0.10, PB=0.20



⊗ 6.9: PF=0.50, PL=0.10, PR=0.10, PB=0.30



☒ 6.10: PF=0.50, PL=0.20, PR=0.20, PB=0.10



☒ 6.11: PF=0.70, PL=0.10, PR=0.10, PB=0.10

第7章 正六角形セルモデル及びセル訪問確率の算出

7.1 正六角形セルモデル

次に正方形セルモデルの考え方を発展させた六角形セルモデルについて述べる.

六角形セルモデルとは端末の移動方向として前進, 後進の他に右前方, 左前方, 右後方, 左 後方の計 6 方向への移動を考慮した六角形セルモデルである [10]. この六角形セルモデルにおいても上記の正方形セルモデルと同様に任意の 2 点間の移動経路に制限を設けないようにしてある.

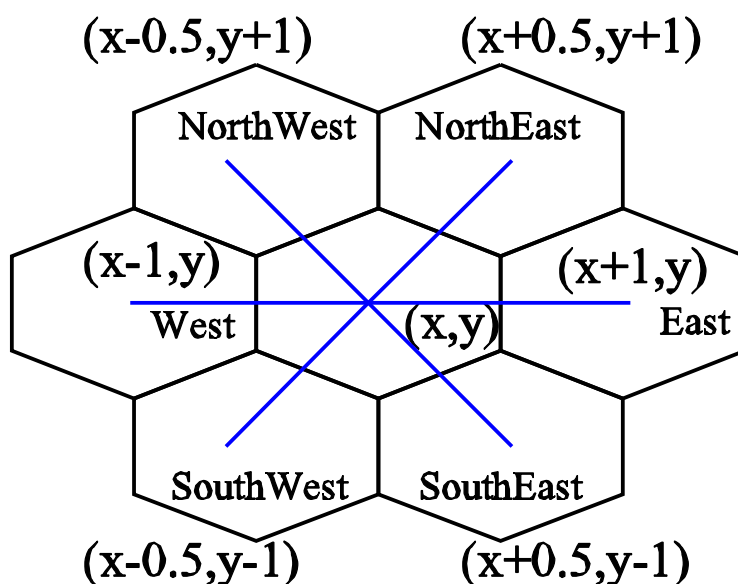


図 7.1: 正六角形セルモデル

六角形セルモデルでは図 7.2 のように各セルが 6 つの隣接セルを持つ。つまり、あるセルの座標が (x,y) であるとしたときに、その隣接セルは図 7.1 のように $(x+1,y)$, $(x-1,y)$, $(x+0.5,y+1)$, $(x-0.5,y+1)$, $(x+0.5,y-1)$, $(x-0.5,y-1)$ となる。つまりこのモデルにおいては各セルへは西 (W), 南西 (SW), 南東 (SE), 東 (E), 北東 (NE), 北西 (NW) の 6 方向からの進入が考えられる。

また、 $\lceil x \rceil \geq 0$ を $\max\{x, 0\}$ となるような正の整数のうち最小の値を返す関数であるとするれば、このモデル上で (x_1, y_1) と (x_2, y_2) であるような 2 点間の距離はこのようにあらわすことができる。

$$d(x_1, y_1, x_2, y_2) \tag{7.1}$$

$$= |y_1 - y_2| + \lceil |x_1 - x_2| - \frac{1}{2}|y_1 - y_2| \rceil_{\geq 0}$$

この計算によれば、例えば $d(-3, 4, 1, 0) = 6$ であり、 $d(1, 0, 1, -4) = 4$ となる。

以降では我々が考案した六角形セルモデルにおける端末の移動のふるまいを計算するためのアルゴリズムについて述べる。

7.2 セル訪問確率の算出

まずは主な変数について説明する

- $prv(x, y, n)$ - n 回目の試行において移動端末がセル (x, y) へと移動をおこなう確率。
- $prv(x, y, n).e$ - n 回目の試行において移動端末が LA 内のセル (x, y) に東から進入し移動してくる確率。 $prv(x, y, n).w$, $prv(x, y, n).ne$, $prv(x, y, n).se$, $prv(x, y, n).nw$, $prv(x, y, n).sw$ はそれぞれ同様に西, 北西, 南西, 北東, 南東よりセル (x, y) に進入し移動してくる確率。

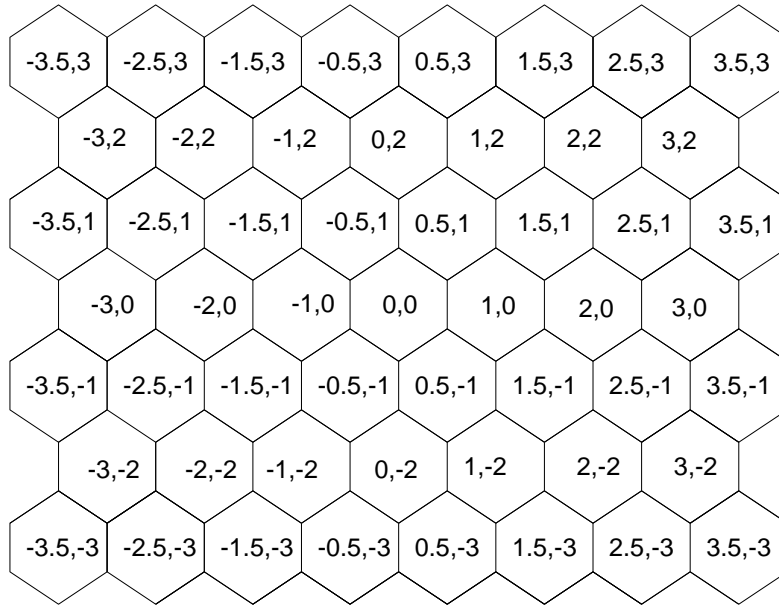


図 7.2: 六角形セルモデル

- $Pre(x, y, n)$ - 移動する端末が n 回目の試行においてセル (x, y) から LA 外のセルへと移動する確率
- $a_{x,y}$ - セル (x, y) が対象としている端末が滞在している LA に割り当てられているかどうかを表す. 1 なら割り当てられており, 0 なら割り当てられていない.
- $Pf, Plf, Plb, Prf, Prb, Pb$ - それぞれ移動端末が, 前方, 左前方, 左後方, 右後方, 右前方, 後方へと移動する確率.

Rb を LA の境界上に存在するセルの集合としたとき N_k は下記のように表すことが出来る.

$$N_k = \sum_{(i,j) \in Rb} \sum_{n=d(x,y,x_0,y_0)}^{\infty} (n+1) Pre(x, y, n)$$

$Pre(x, y, n)$ は LA 内のセルから LA に含まれない隣接セル (x, y) へと移動する確率の合計として算出される。つまりこのように表すことができる。

$$\begin{aligned}
pre(x, y, n) &= [prv(x-1, y, n+1).e \times \bar{a}_{x-1,y} \\
&+ prv(x+1, y, n+1).w \times \bar{a}_{x+1,y} \\
&+ prv(x-0.5, y+1, n+1).se \times \bar{a}_{x-0.5,y+1} \\
&+ prv(x+0.5, y+1, n+1).sw \times \bar{a}_{x+0.5,y+1} \\
&+ prv(x-0.5, y-1, n+1).ne \times \bar{a}_{x-0.5,y-1} \\
&+ prv(x+0.5, y-1, n+1).nw \times \bar{a}_{x+0.5,y-1}] a_{x,y}
\end{aligned}$$

なお \bar{a}_{xy} は $a_{xy} = 1$ のときに 0 であり, $a_{xy} = 0$ のとき 1 となるような変数である。

また式中の prv はそれぞれ下記のように算出する。なお以下では東側のセルからの進入についてのみ説明しているが、実際には他の西, 北東, 南東, 北西, 南西の各方向についても同様に求める必要がある。

1. 全ての LA 内のセル x, y について, n 回目の訪問確率を求める。

上記正方形セルモデルの場合と同様に六角形セルモデルにおいても任意のセルを 2 回以上訪れることがある。そのためあるセルの n 回目の訪問確率 $prv(x,y,n)$ を求める際には, 隣接する 4 つのセルの $n-1$ 回目の訪問確率 $prv(x,y,n-1)$ を用いるようにしている。

n 回目にセル (x, y) に東から進入する確率は, セル (x, y) の東側に隣接するセル $(x+1, y)$ の $n-1$ 回目の訪問確率を用いて, セル $(x+1, y)$ に東 (E) から進入し前進する確率, 西 (W) から進入し後進する確率, 南東 (SE) から進入し左前進する確率, 南西

(SW) から進入し左後進する確率, 北東 (NE) から進入し右前進する確率, 北西 (NW) から進入し右後進する確率の和に, セル (x, y) が LA に含まれているか否かのフラグである $a_{x+1,y}$ を乗じることにより計算する. なお上記したとおり LA に割り当てられていないセルから進入するということは, そこで LU が発生するという事であり, ここでは既に LA に割り当てられているセルからの進入確率を求めたかったので $a_{x+1,y}$ を乗じている.

$$\begin{aligned}
 & prv(x, y, n).e \\
 &= [\quad prv(x + 1, y, n - 1).e \times Pf \\
 &\quad + \quad prv(x + 1, y, n - 1).w \times Pb \\
 &\quad + \quad prv(x + 1, y, n - 1).se \times Plf \\
 &\quad + \quad prv(x + 1, y, n - 1).sw \times Plb \\
 &\quad + \quad prv(x + 1, y, n - 1).ne \times Prf \\
 &\quad + \quad prv(x + 1, y, n - 1).nw \times Prb] a_{x+1,y}
 \end{aligned}$$

同様に $prv(x, y, n).w$, $prv(x, y, n).ne$, $prv(x, y, n).nw$, $prv(x, y, n).se$, $prv(x, y, n).sw$ として西, 北東, 北西, 南東, 南西のそれぞれの方角から進入する場合の確率は下記の通りとなる.

$$\begin{aligned}
 & prv(x, y, n).w \\
 &= [\quad prv(x - 1, y, n - 1).e \times Pb \\
 &\quad + \quad prv(x - 1, y, n - 1).w \times Pf \\
 &\quad + \quad prv(x - 1, y, n - 1).se \times Prb
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \text{prv}(x-1, y, n-1).sw \times Prf \\
& + \text{prv}(x-1, y, n-1).ne \times Plb \\
& + \text{prv}(x-1, y, n-1).nw \times Plf] a_{x-1,y}
\end{aligned}$$

$$\text{prv}(x, y, n).ne$$

$$\begin{aligned}
& = [\text{prv}(x+0.5, y+1, n-1).e \times Plf \\
& + \text{prv}(x+0.5, y+1, n-1).w \times Prb \\
& + \text{prv}(x+0.5, y+1, n-1).se \times Plb \\
& + \text{prv}(x+0.5, y+1, n-1).sw \times Pb \\
& + \text{prv}(x+0.5, y+1, n-1).ne \times Pf \\
& + \text{prv}(x+0.5, y+1, n-1).nw \times Prf] a_{x+0.5,y+1}
\end{aligned}$$

$$\text{prv}(x, y, n).nw$$

$$\begin{aligned}
& = [\text{prv}(x-0.5, y+1, n-1).e \times Plb \\
& + \text{prv}(x-0.5, y+1, n-1).w \times Prf \\
& + \text{prv}(x-0.5, y+1, n-1).se \times Pb \\
& + \text{prv}(x-0.5, y+1, n-1).sw \times Prb \\
& + \text{prv}(x-0.5, y+1, n-1).ne \times Plf \\
& + \text{prv}(x-0.5, y+1, n-1).nw \times Pf] a_{x-0.5,y+1}
\end{aligned}$$

$$\text{prv}(x, y, n).se$$

$$\begin{aligned}
&= [\text{prv}(x + 0.5, y - 1, n - 1).e \times Prf \\
&+ \text{prv}(x + 0.5, y - 1, n - 1).w \times Plb \\
&+ \text{prv}(x + 0.5, y - 1, n - 1).se \times Pf \\
&+ \text{prv}(x + 0.5, y - 1, n - 1).sw \times Plf \\
&+ \text{prv}(x + 0.5, y - 1, n - 1).ne \times Prb \\
&+ \text{prv}(x + 0.5, y - 1, n - 1).nw \times Pb] a_{x+0.5,y-1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\text{prv}(x, y, n).sw \\
&= [\text{prv}(x - 0.5, y - 1, n - 1).e \times Prb \\
&+ \text{prv}(x - 0.5, y - 1, n - 1).w \times Plf \\
&+ \text{prv}(x - 0.5, y - 1, n - 1).se \times Prf \\
&+ \text{prv}(x - 0.5, y - 1, n - 1).sw \times Pf \\
&+ \text{prv}(x - 0.5, y - 1, n - 1).ne \times Pb \\
&+ \text{prv}(x - 0.5, y - 1, n - 1).nw \times Plb] a_{x-0.5,y-1}
\end{aligned}$$

2. LU が行われるセルについて、LA に進入した方向については訪問確率は 1 になるが、上記の計算法ではそれが反映されないため補正を行なう。

$$\text{prv}(x_{LU}, y_{LU}, n).direction+ = 1.0$$

3. 全ての x, y について、 $\text{prv}(x, y, n)$ を求める。

$$\text{prv}(x, y, n)$$

$$\begin{aligned}
&= [\text{prv}(x, y, n).e \\
&\quad + \text{prv}(x, y, n).sw \\
&\quad + \text{prv}(x, y, n).se \\
&\quad + \text{prv}(x, y, n).nw \\
&\quad + \text{prv}(x, y, n).ne \\
&\quad + \text{prv}(x, y, n).w]
\end{aligned}$$

7.3 位置登録エリアの最適化

本研究においては端末の移動特性に応じて最適化された LA を求めるために、最初は位置登録が行われるセル 1 個だけの LA から段階を踏んでセルを追加していき、最終的に LA に含めるセルの個数 (k) になるようにする。式 (3.2) でもわかる通り LA を最適化するためには k 個のセルにより構成された LA 内の通過するセルの個数 N_k を最大にするような条件を満たしてやれば良い。

つまり下記のような条件を満たすセルを追加する。

$$\text{Maximize } N_k, \tag{7.2}$$

$$\text{subject to: } \sum_{i=1} \sum_{j=1} a_{i,j} = k. \tag{7.3}$$

この問題は、LA に含めるセルの個数を決定し、その個数の範囲の中で通過するセルの個数の期待値 N_k を最大にするという問題であるが、これは NP 完全問題に属するナップザックの問題に他ならない [10]。ナップザックの問題は必ず最適な解を求めることができるような決定的なアルゴリズムが存在しないため、我々はこの問題に対する解を導くために貪欲アルゴリズムによる発見的な解法を提案する。

本研究では、各端末の移動特性を表すため、セルを表現するのに2次元行列を用いた。あるセルを特定するために、 (i, j) の形の x-y 座標を用い、これと行列を対応させて実験を行った。この行列を X と呼ぶことにし、各要素 $x_{i,j}$ は対応するセルが位置登録エリアに含まれているか否かによってそれぞれ 1,0 の値をもつ。また位置登録が発生したセルの座標を (i_0, j_0) とする。

1. 初期化

位置登録の発生したセル (i_0, j_0) のみを LA とする。

$$x_{i_0, j_0} = 1,$$

$$x_{i,j} \text{ for } i = 1, \dots, m, i \neq i_0; j = 1, \dots, m, j \neq j_0$$

LA に含まれているセルの数 : $N_c = 1$

下記の各方向から進入してくる確率およびその瞬時値を 0 とする。

$$Prv(i_0, j_0, 0).nw, Prv(i_0, j_0, 0).ne,$$

$$Prv(i_0, j_0, 0).sw, Prv(i_0, j_0, 0).se,$$

$$Prv(i_0, j_0, 0).w, Prv(i_0, j_0, 0).e,$$

$$tmp(i_0, j_0, 0).nw, tmp(i_0, j_0, 0).ne,$$

$$tmp(i_0, j_0, 0).sw, tmp(i_0, j_0, 0).se,$$

$$tmp(i_0, j_0, 0).w, tmp(i_0, j_0, 0).e,$$

$$Prv(i_0, j_0, 0), tmp(i_0, j_0, 0),$$

初期進入方向の進入確率を 1 とする。 $Prv(i_0, j_0, 0).din = tmp(i_0, j_0, 0).din = 1,$

試行回数 $N = 0$ 。

なお nw, ne, sw, se, e, w はそれぞれ北西, 北東, 南西, 南東, 西, 東の各方向からの進入をあらわす。

2. 試行回数をインクリメント $N = N + 1$

3. 現時点までに LA に含まれているセルに隣接しているが LA に含まれていないセルの集合を $B(X)$ とする. ($x_{i,j} = 0$ であり, $x_{i+1,j} = 1, x_{i-1,j} = 1, x_{i+0.5,j+1} = 1, x_{i+0.5,j-1} = 1, x_{i-0.5,j+1} = 1, x_{i-0.5,j-1} = 1$ のいずれかを満たすようなセルの集合)
4. n 回目の試行における各セルの訪問確率の瞬時値 $tmp(i, j, N).n, tmp(i, j, N).s, tmp(i, j, N).nw, tmp(i, j, N).ne, tmp(i, j, N).sw, tmp(i, j, N).se, tmp(i, j, N)$ を算出する. 一例として $tmp(i, j, N).w$ の求め方を示す. 他の値も同様に計算できる.

$$\begin{aligned}
& tmp(i, j, N).w \\
& = [Prv(i-1, j, n-1).w \times Pf \\
& + Prv(i-1, j, n-1).e \times Pb \\
& + Prv(i-1, j, n-1).nw \times Plf \\
& + Prv(i-1, j, n-1).ne \times Plb \\
& + Prv(i-1, j, n-1).sw \times Prf \\
& + Prv(i-1, j, n-1).se \times Prb] a_{i,j+1}
\end{aligned}$$

5. $B(X)$ に含まれる (i, j) のうち $tmp(i, j, N)$ が最大となるような (i, j) を LA に加える. LA に含まれているセルの個数 N_c を更新.
6. $x_{i,j} = 1$ であるようなセル全てについて求めた瞬時値をコピーする.

$$\begin{aligned}
Prv(i, j, N) & = tmp(i, j, N) \\
Prv(i, j, N).w & = tmp(i, j, N).w \\
Prv(i, j, N).e & = tmp(i, j, N).e
\end{aligned}$$

$$Prv(i, j, N).sw = tmp(i, j, N).sw$$

$$Prv(i, j, N).se = tmp(i, j, N).se$$

$$Prv(i, j, N).nw = tmp(i, j, N).nw$$

$$Prv(i, j, N).ne = tmp(i, j, N).ne$$

7. $Nc \geq k$ であれば終了. さもないければ step2 へ進む.

第8章 数値実験, 結果およびモデル

8.1 最適化されたLAの形状

上記の方法に従って導かれた最適化されたLAの例を図8.1~8.4に示す. いずれも端末はLUがおこなわれるセル(0,0)に西(左)方向から進入している.

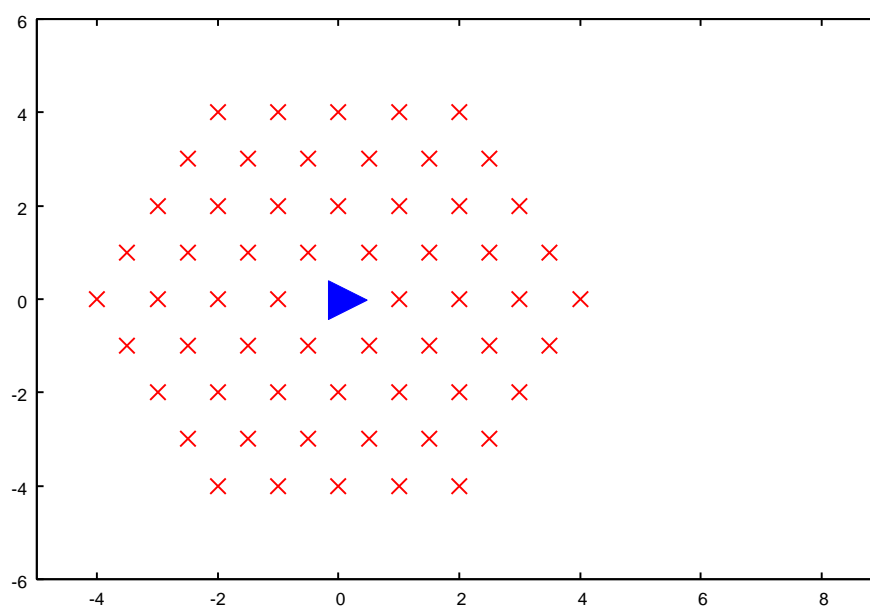


図 8.1: $P_f=P_b=P_{rf}=P_{rb}=P_{lf}=P_{lb}=1/6$, セル数=61

端末の移動パターンが変化するとそれに従いLAの形状にも変化が現れるのが分かる. 正方形セルモデルの場合と同じく図8.1のように各方向への移動確率に大きな差がない場合にはLUセルを中心とした範囲にLAが形成されるようになるが, 図8.2~8.4に見られるように端末の移動パターンに偏りが出るとその偏りに従いLAに含まれるセルの分布に

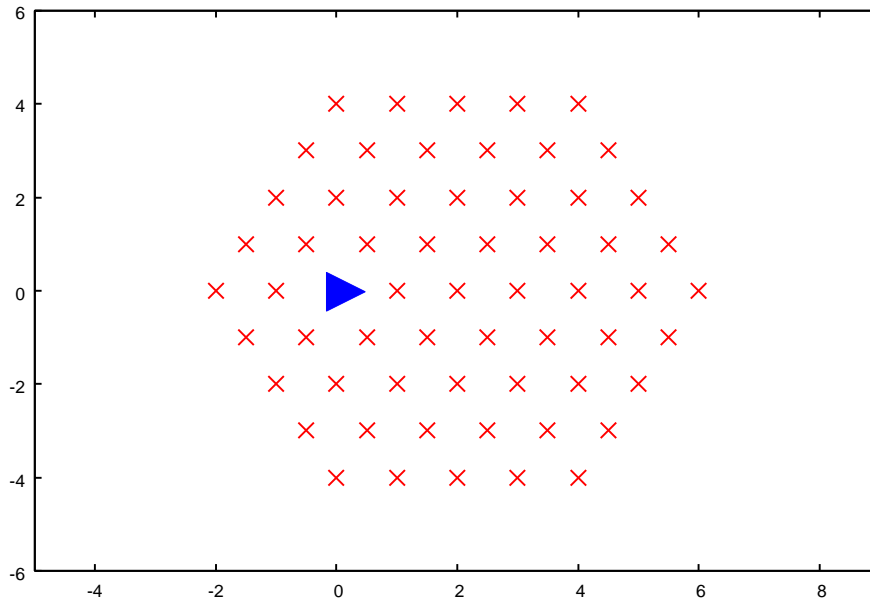


図 8.2: $P_f=0.45$, $P_b=0.05$, $P_{rf}=0.15$, $P_{rb}=0.10$, $P_{lf}=0.15$, $P_{lb}=0.10$, セル数=61

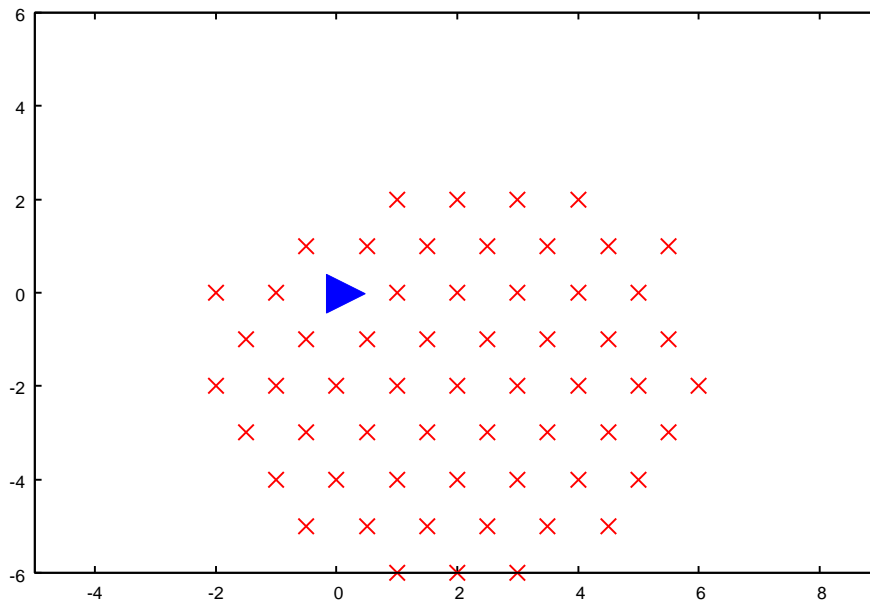


図 8.3: $P_f=0.60$, $P_b=0.05$, $P_{rf}=0.15$, $P_{rb}=0.05$, $P_{lf}=0.10$, $P_{lb}=0.05$, セル数=61

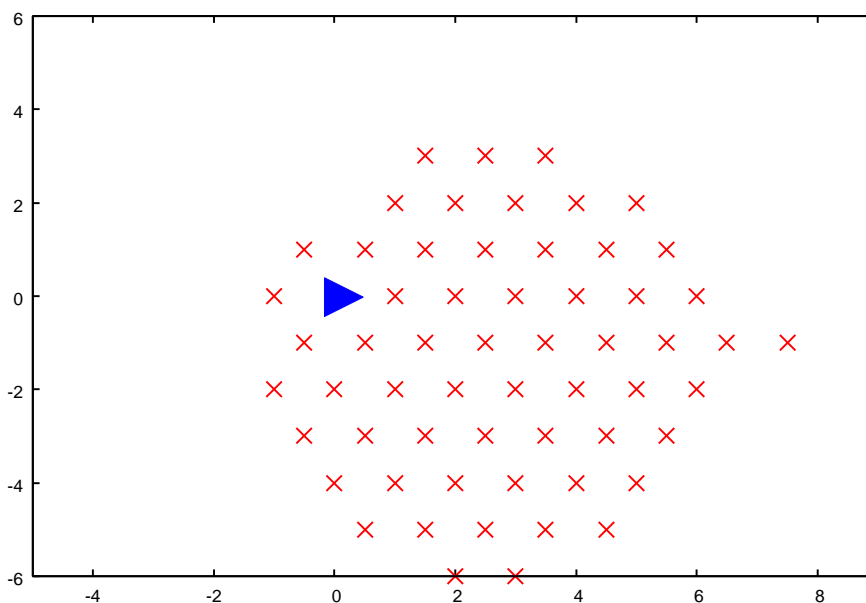


図 8.4: $P_f=0.70$, $P_b=0.01$, $P_{rf}=0.15$, $P_{rb}=0.05$, $P_{lf}=0.07$, $P_{lb}=0.02$, セル数=61

も偏りが出ているのが分かる.

8.2 正六角形セルモデルにおける従来方式との比較

8.2.1 正方形型 LA との比較

図 8.6 ~ 8.9 は貪欲アルゴリズムを用いた最適化されて LA における N_k と静的に配置された正六角形セルで近似された正方形型の LA における N_k との比較である. ここでいう正方形型の LA とは LU を行ったセルを中心とし, 座標面上において 4 方向モデルで使用した正方形型 LA に内包されるようなセルによって構成された LA である. つまり本提案手法と比較している従来使用されている静的に配置された LA に含まれるセルの個数は図 8.5 のように 1, 7, 23, 45, 73, 107, 246, ... というように増加する.

図 8.6 ~ 8.9 から端末の移動特性が同じであれば LA に含まれるセルの個数が増加するほど本研究によって求められた最適化された LA が効果的であることがわかる. また, 正方形

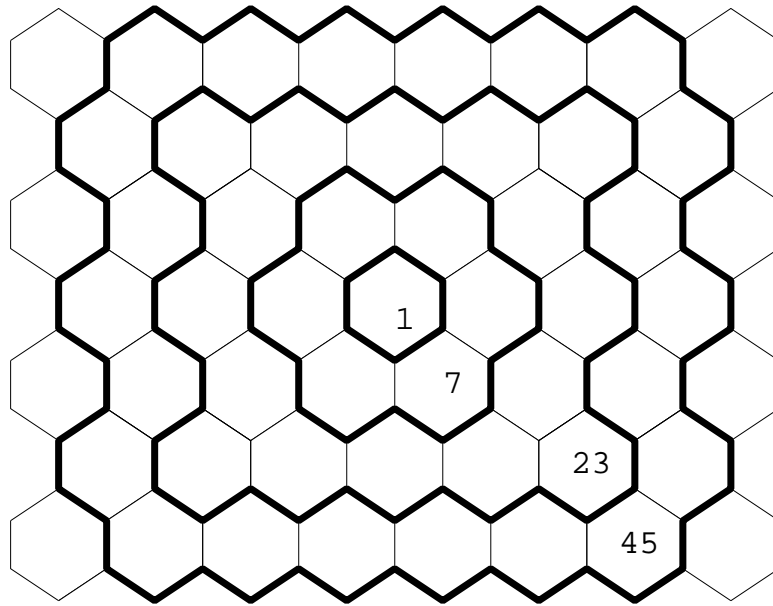


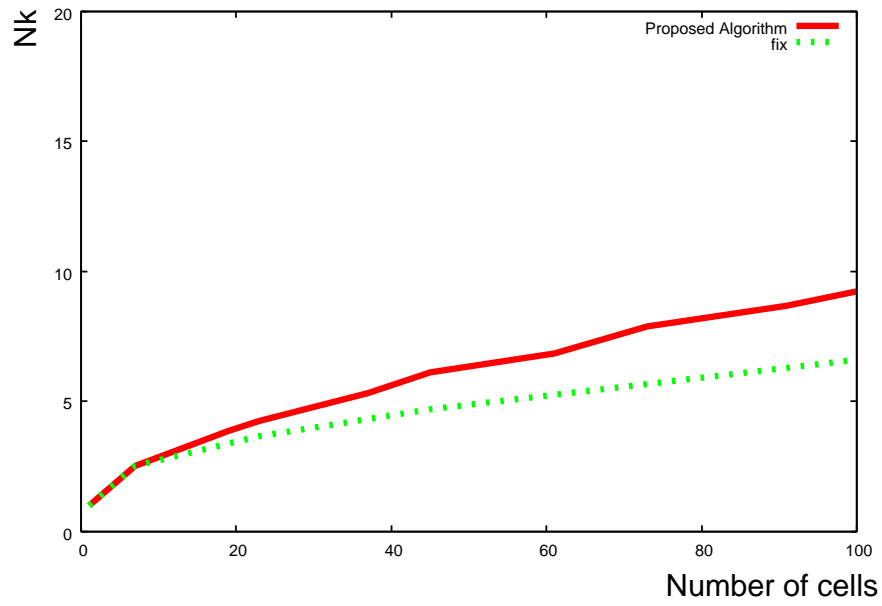
図 8.5: 正方形型の LA

セルモデルの場合と同じく、端末の移動特性に偏りがあるほど効果的であることがわかる。

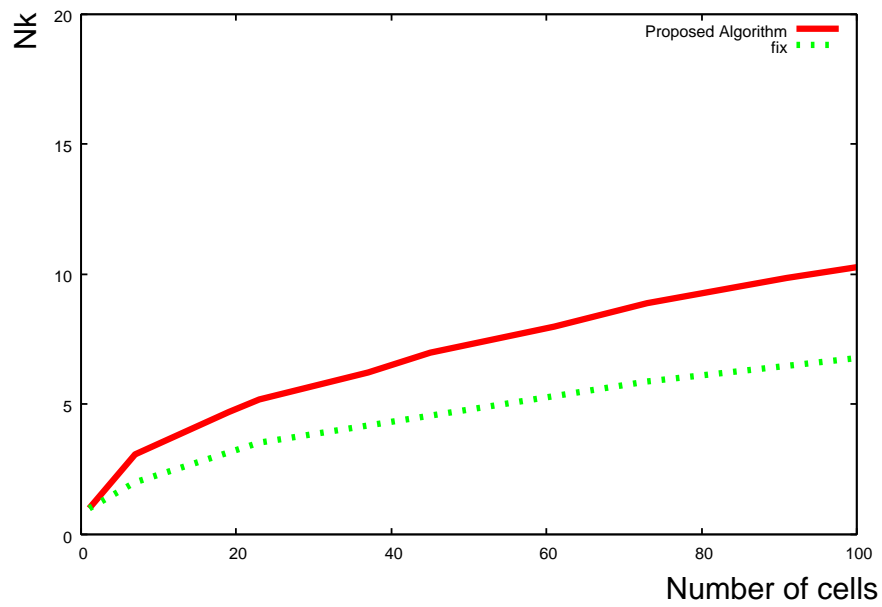
以上は正方形セルモデルの場合と同様に静的に配置された従来の LA として正方形型の LA を使用したものである。次に静的に配置された従来の LA として正六角形型の LA との比較した結果を示す。

8.2.2 正六角形型 LA との比較

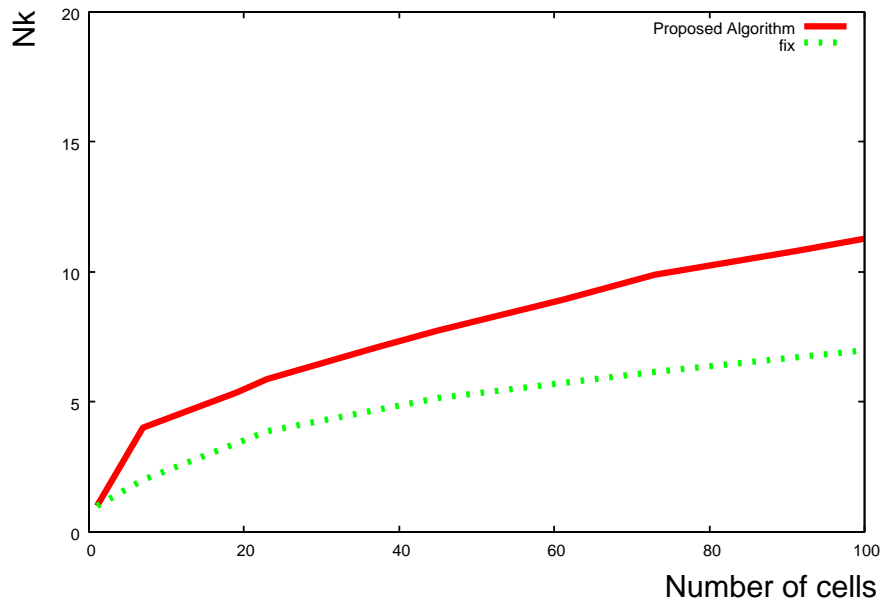
図 8.11 ~ 8.14 は貪欲アルゴリズムを用いて最適化された LA における N_k と静的に配置された正六角形型の LA における N_k との比較である。ここでいう正六角形型の LA とは LU を行ったセルを中心とし、そのセルから等距離に存在するセルによって構成された LA である。つまり本提案手法と比較している従来使用されている静的に配置された LA に含まれるセルの個数は図 8.10 のように 1, 7, 19, 37, 61, 91, 127, 169, 217, ... というように増加する。



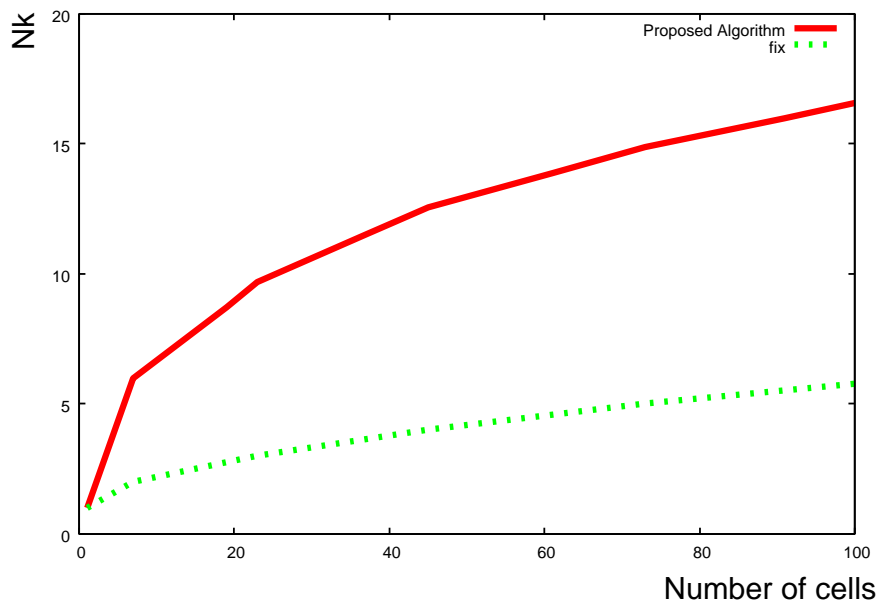
☒ 8.6: $P_f=P_b=P_{rf}=P_{rb}=P_{lf}=P_{lb}=1/6$



☒ 8.7: $P_f=0.45, P_b=0.05, P_{rf}=0.15, P_{rb}=0.10, P_{lf}=0.15, P_{lb}=0.10$



8.8: $P_f=0.60$, $P_b=0.05$, $P_{rf}=0.15$, $P_{rb}=0.05$, $P_{lf}=0.10$, $P_{lb}=0.05$



8.9: $P_f=0.70$, $P_b=0.01$, $P_{rf}=0.15$, $P_{rb}=0.05$, $P_{lf}=0.07$, $P_{lb}=0.02$

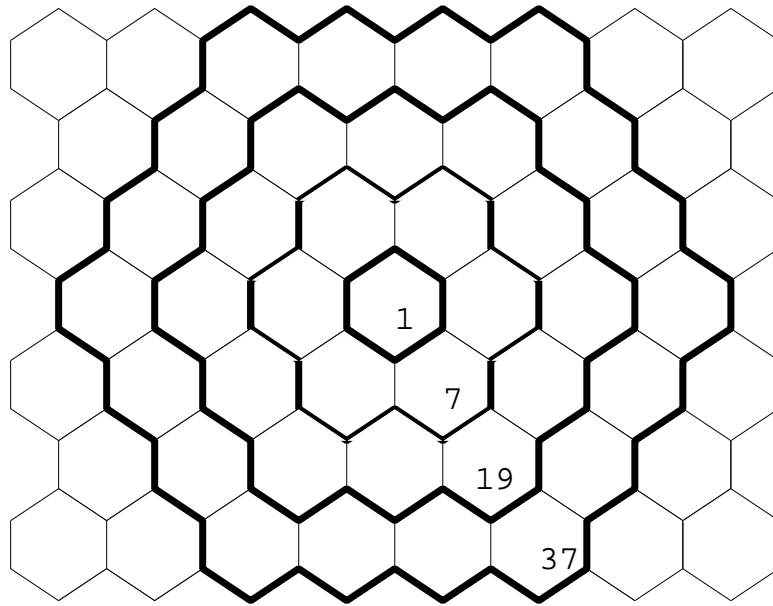
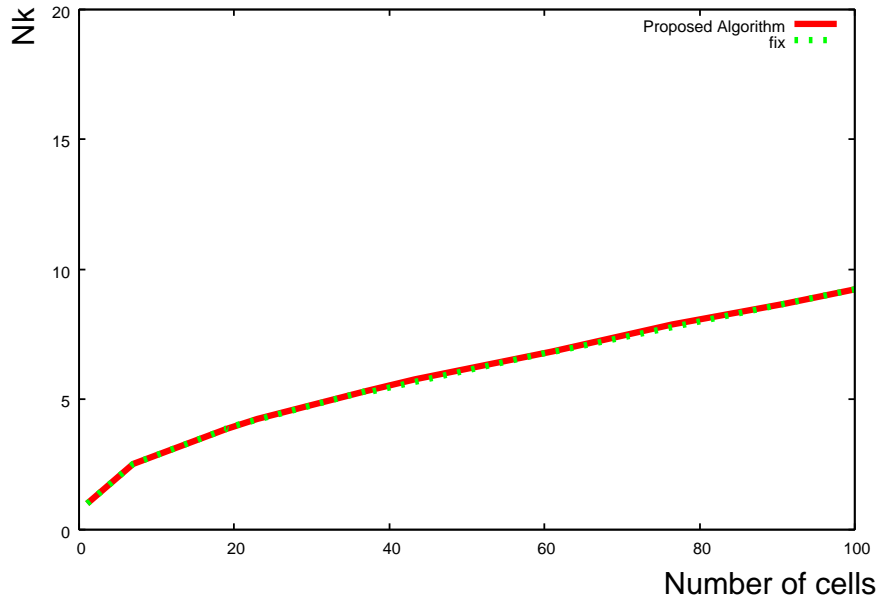


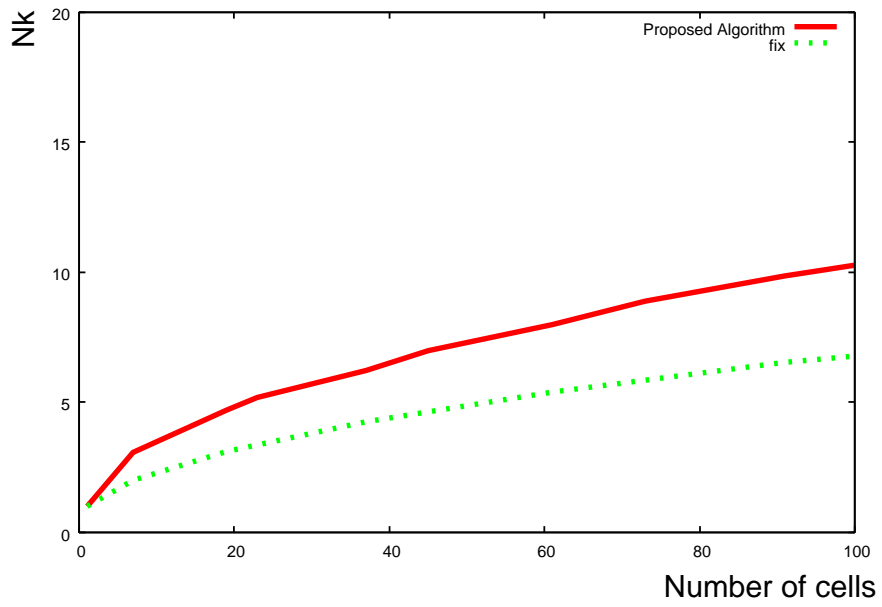
図 8.10: 正六角形型の LA

図 8.11 では両方式に差がほとんどでないが、これは提案方式によって最適化された形も静的に配置された場合と同じく正六角形になっているからである。

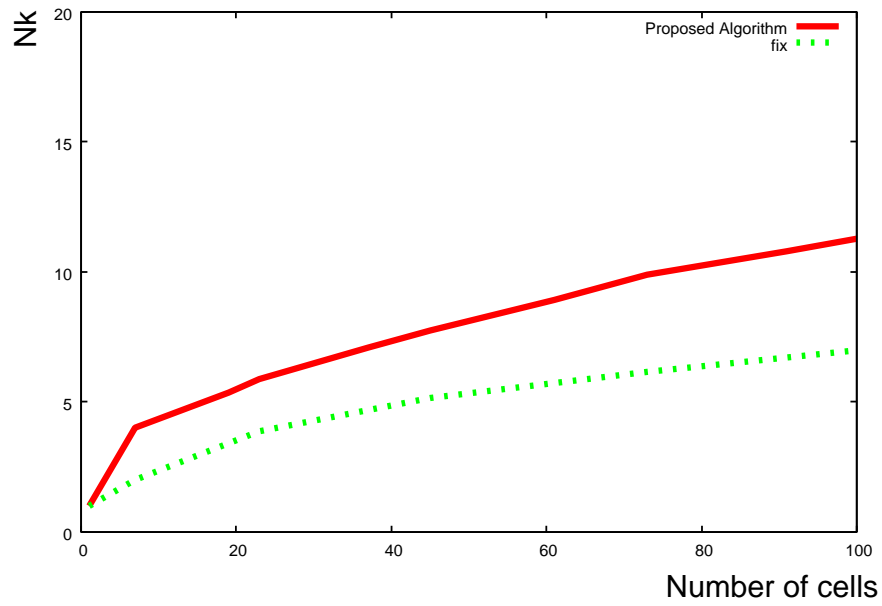
図 8.12 ~ 8.14 からは今までに示した結果と同様に LA に含まれるセルの個数が増加するほど、また、移動特性に偏りがあるほど本研究によって求められた最適化された LA が効果的であることがわかる。



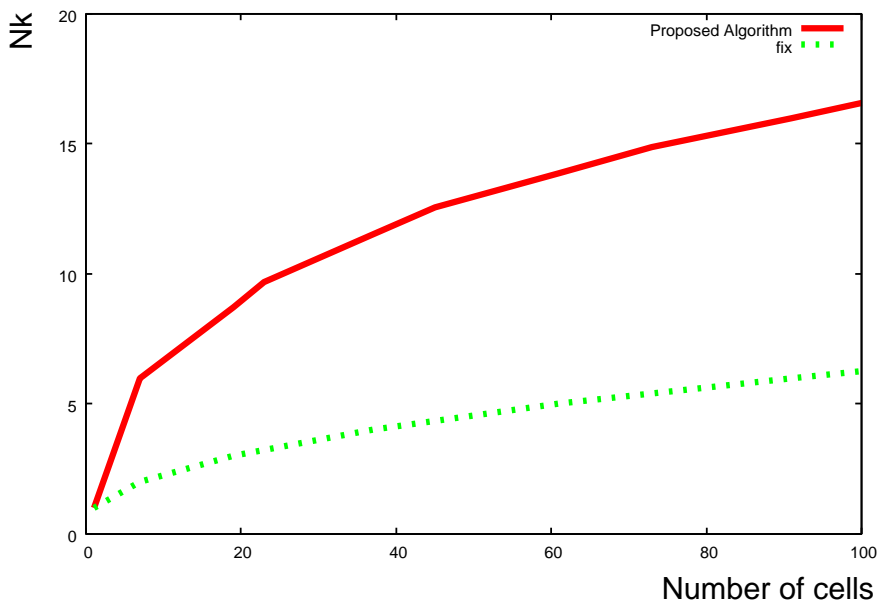
☒ 8.11: $P_f=P_b=P_{rf}=P_{rb}=P_{lf}=P_{lb}=1/6$



☒ 8.12: $P_f=0.45, P_b=0.05, P_{rf}=0.15, P_{rb}=0.10, P_{lf}=0.15, P_{lb}=0.10$



☒ 8.13: $P_f=0.60$, $P_b=0.05$, $P_{rf}=0.15$, $P_{rb}=0.05$, $P_{lf}=0.10$, $P_{lb}=0.05$



☒ 8.14: $P_f=0.70$, $P_b=0.01$, $P_{rf}=0.15$, $P_{rb}=0.05$, $P_{lf}=0.07$, $P_{lb}=0.02$

第9章 本研究における問題点

今回の研究においては360度全ての方向への移動を同程度の割合で行うような端末の行動を、正方形セルモデルと六角形セルモデルのそれぞれにおいて4方向および6方向への同確率での移動として扱った。

そのような移動特性のもとにセル数が約1000個であるようなLAの形状を求めたものが図9.1および図9.2である。

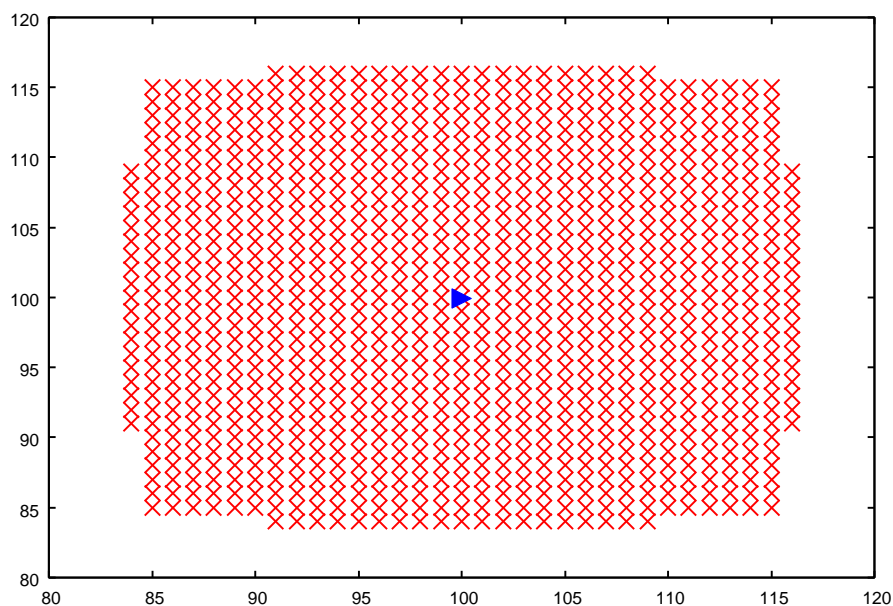


図 9.1: PF=0.25, PB=0.25, PL=0.25, PR=0.25, セル数=1037

正方形セルモデルではLAの形状はほぼ正方形なるのに対し、六角形セルモデルでの結果は正六角形となっている。このように本研究において使用しているモデルでは端末の移

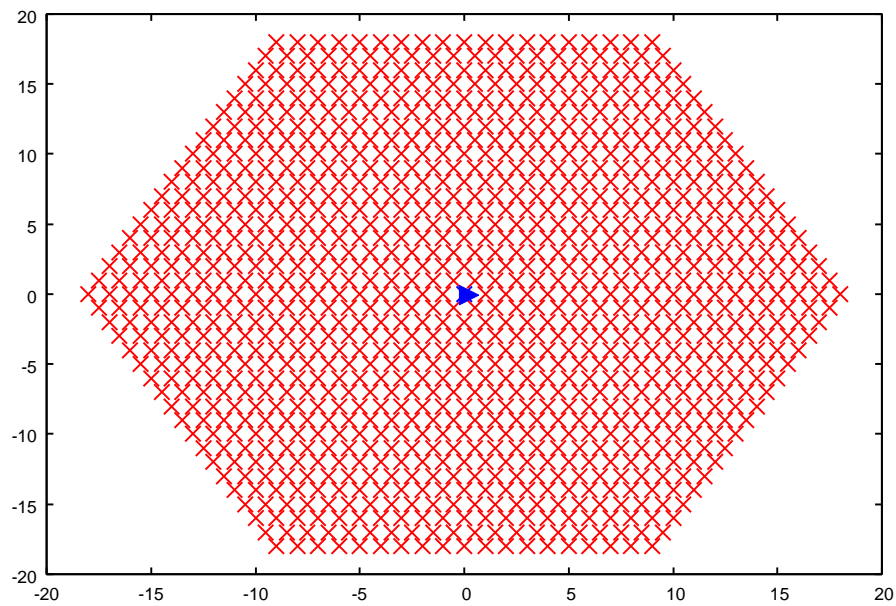


図 9.2: $PF=PB=Prf=Prb=Plf=Plb=1/6$, セル数=1029

動特性として同じものを考えている場合にも使用するセルの形状により別の LA の形状ができてしまう。

今回の研究において上記のように求められる LA 形状に差が出てしまったのは、端末の移動特性がセル形状に依存するようなモデルを用いてしまったことが原因としてあげられると思われる。

第10章 まとめと今後の課題

本研究では移動端末の移動方向と移動特性を考慮し、端末の移動体通信網のモデルとして正方形セルモデルを考案した。それをを用いてLAに含まれるセルの個数を一定にし、移動端末の位置登録のコストを最小にするようなLAの形状を導いた。また数値実験をおこない、提案したアルゴリズムにより最適化されたLAの例を示した。

また、市街地などを想定している正方形セルモデルの発展として、より一般的なネットワークモデルを表現できる六角形セルモデルを考案した。六角形セルモデルでは座標の表現を工夫することにより正方形セルモデルと同様の手法での計算を可能にしている。

さらにその六角形セルモデルを用いて正方形セルモデルの場合と同じくLAに含まれるセルの個数を一定にしたうえで移動端末の位置登録のコストを最小にするようなLAの形状を導いた。また数値実験をおこない、提案したアルゴリズムにより最適化されたLAの例を示した。

今後の課題としてはセルに依存しない端末の移動特性の表現方法の提案、さらにそれをを用いてセルモデルの上での計算方法およびアルゴリズムを考案すること。また提案する方式の実現について研究に取り組むことがあげられる。

参考文献

- [1] Ahmed Abutaleb and Victor O.K. Li: Location update optimization in personal communication systems, *ACM Wireless Networks*, vol.3, no.3, pp. 205–216, 1997.
- [2] Ahmed Abutaleb and Victor O.K. Li: Paging Strategy optimization in personal communication systems, *ACM Wireless Networks* vol 3, no.3, pp. 195–204, 1997.
- [3] Amotz Bar-Noy, Ilan Kessler and Moshe Sidi: To update or not to update?, *Proceedings of IEEE INFOCOM'94*, pp. 570–576, 1994.
- [4] Ian F. Akyildiz, Joseph S. M. Ho and Yi-Bing Lin: Movement-Based Location Update and Selective Paging for PCS Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.4 , no.4 , pp. 629-638, August 1996.
- [5] George E. Fry, Albert Jordan, David Y. Lee, Anil S. Sawkar, Nitin J. Shah and William C. Wiberg: Next Generation Wireless Networks, *Bell Labs Technical Journal*, Autumn, pp. 88–96, 1996.
- [6] Joseph S.M. Ho and Ian F. Akyldiz: Dynamic Hierarchical Database Architecture for Location Management in PCS Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no.5, pp. 646–660, 1997.
- [7] Chih-Lin I, Gregory P. Pollini and Richard D. Gitlin: PCS Mobility Management Using the Reverse Virtual Call Setup Algorithm, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no.1, pp. 13–23, 1997.
- [8] Rabi Jain, Yi-Bing Lin and Seshadri Mohan: Location Strategies for Personal Communications Services, *The Mobile Communications Handbook*, Section II, Wireless, Chapter 18, A CRC Handbook Published in Cooperation with IEEE Press, pp. 289–318, 1996.

- [9] Jie Li, Atsushi Kubota and Hisao Kameda: Dynamic Location Update for PCS Networks with Consideration of MT Mobility Patterns, *Proceedings of The IEEE International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks* pp. 527-532, May 10-12, 2004, Hong Kong.
- [10] Jie Li and Atsushi Kubota: Optimal Location Management for PCS Networks with Hexagonal Cellular Architectures, *Proceedings of The joint conference (APCC/MDMC'04) of 10th Asia-Pacific Conference on Communications and 5th International Symposium on Multi-Dimensional Mobile Communications*, pp. 744-748, August 29-September 1, 2004, Tsinghua University, Beijing, China.
- [11] Jie Li, Atsushi Kubota and Hisao Kameda: Location Management for PCS Networks with Consideration of Mobility Patterns, *IEEE INFOCOM 2005*, March 13-17, 2005, Hyatt Regency hotel, Miami (Accepted).
- [12] Yi-Bing Lin: Comparing the PCS Location Tracking Strategies, *IEEE Transactions on vehicular Technology*, vol. 45, no.1, pp. 114-121, 1996.
- [13] Yi-Bing Lin: Mobility Management for Cellular Telephony Networks, *IEEE Parallel & Distributed Technology*, Winter, pp. 65-73, 1996 .
- [14] Yi-Bing Lin: Reducing Location Update Cost in a PCS Network, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no.1, pp. 25-33, 1997.
- [15] Yi-Bing Lin: Deregistration Strategies for PCS Networks, *IEEE Transactions on vehicular Technology*, vol. 47, no.1, pp. 49-57, 1998.
- [16] Yi-Bing Lin and Wen-Nung Tsai: Location Tracking with Distributed HLR's and Pointer Forwarding, *IEEE Transactions on vehicular Technology*, vol. 47, no.1, pp. 58-64, 1998.
- [17] Upamanyu Madhow, Michael L. Honig and Kenneth Steiglitz: Optimization of wireless resources for personal communications, *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 577-584, 1994.
- [18] H. Xie, S. Tabbane and D.J. Goodman: Dynamic location area management and performance analysis, *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 536-539, 1993.

- [19] Nishith D. Tripathi , Jeffery H. Reed, VanLandinoham and Hug F.: F. Vanlandingham MPRG , Virginia Tech. Handoff in Cellular Systems, *IEEE Personal Communications* vol.5, no.6, pp. 26–37, December 1998.
- [20] 久保田敦, 李頡, 亀田壽夫: 端末の移動パターンを考慮した位置登録最適化, 情報処理学会論文誌 第 43 巻, no. 12, pp. 3922-3930, December, 2002.
- [21] NTT DoCoMo Research&Development: TECHNOLOGY
<http://www.nttdocomo.co.jp/corporate/rd/index.html>
- [22] KDDI 研究開発 (R&D):
http://www.kddi.com/corporate/r_and_d/index.htm

公表論文リスト

1. 久保田敦, 李頡, 亀田壽夫:
端末の移動パターンを考慮した位置登録最適化,
情報処理学会論文誌, 第 43 巻, no. 12, pp. 3922-3930, December, 2002.
2. Jie Li, Atsushi Kubota and Hisao Kameda:
Dynamic Location Update for PCS Networks with Consideration of MT Mobility Patterns,
Proceedings of The IEEE International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks (I-SPAN 2004), pp. 527-532, May 10-12, 2004, Hong Kong.
3. Jie Li and Atsushi Kubota:
Optimal Location Management for PCS Networks with Hexagonal Cellular Architectures,
Proceedings of The joint conference (APCC/MDMC'04) of 10th Asia-Pacific Conference on Communications and 5th International Symposium on Multi-Dimensional Mobile Communications, pp. 744-748, August 29-September 1, 2004, Tsinghua University, Beijing, China.
4. Jie Li, Atsushi Kubota and Hisao Kameda:
Location Management for PCS Networks with Consideration of Mobility Patterns,
IEEE INFOCOM 2005, March 13-17, 2005, Hyatt Regency hotel, Miami (Accepted).