

端末の移動パターンを考慮した位置登録最適化

久保田 敦[†] 李 頌^{††} 亀田 壽夫^{††}

移動体通信に対するニーズは多様化しており、さらに効率の良い通信方式の開発を目指して世界中でさかんに研究が行われている。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。端末の移動時の振舞いを表す際、現実性の高い4方向移動モデルを考案し、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、我々が新たに提案したモデルとその計算アルゴリズムの有効性を示す。

Optimal Location Management of Mobile Terminals with Consideration of Moving Patterns

ATSUSHI KUBOTA,[†] JIE LI^{††} and HISAO KAMEDA^{††}

This paper studies the location management problem for a mobile-phone network. The location management problem is formulated as an optimization problem. We propose the practical "four-direction model" as the movement model of mobile terminals. The greedy algorithm is used to provide a good solution of the optimization problem. We conduct experiments using the "four-direction model", and show the effectiveness of the proposed approach.

1. はじめに

携帯電話端末を含めた携帯情報機器の普及のペースは目覚ましい。携帯電話は、通信手段として完全に一般的なものになっており、各通信キャリアごとに特色のあるサービスが提供されるようになり、インターネット接続機能を標準装備するなど、単純な「電話」の機能にとどまらないインテリジェンスを持ち合わせるようになってきている。

我々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うえで最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、移動する携帯電話や携帯型パソコンなど(以下、端末)の位置を追跡・制御する機構である。位置登録を行う際のシステム構成は図1のようになっている。

● 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。

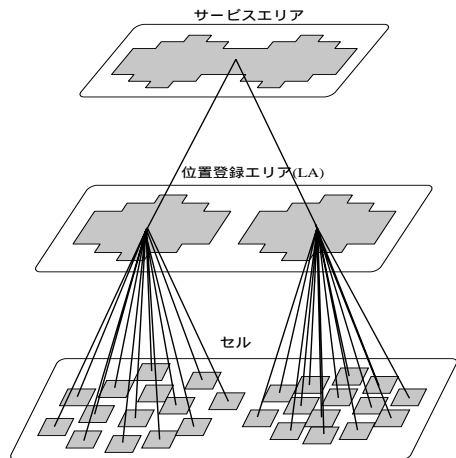


図1 端末の位置登録時のシステム構成

Fig.1 System structure of the location updating of mobile terminals.

[†] 筑波大学大学院工学研究科
Doctor's Program in Science and Engineering, University of Tsukuba

^{††} 筑波大学電子・情報工学系
Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba

- 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．

位置登録時に行われるオペレーションには，次の 2 種類がある．

- (1) 位置更新 (Location Update: LU)

端末が LA を越えて移動した場合に，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．このオペレーションによって，着信時にページング信号を送る LA を特定することができる．端末が通話していない場合でも受信している微弱な電波には LA の識別信号が含まれており，一定周期で端末は自らが記憶している識別信号と送信された識別信号との符合を行っている．別の LA に移動した場合，識別信号が符合しないため端末は自動的にシステム側に発信し，更新作業を要請するようになっていく．

- (2) ページング

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．その端末が現在滞在している LA 内の全セルに対して，各セルに 1 つずつ設置されている基地局を介してポーリング信号という呼び出し信号が送信され，ポーリング信号に回答した端末との間に回線が開かれ，通話ができるようになる．

この 2 種類のオペレーションのコストについて説明する．まず，LU のコストを下げるということは，端末からシステムに LA を越えたことを通知する信号を送信する回数を少なくするということである．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 1 つ 1 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ことになる．しかしこれは同時に，1 つの LA に含まれるセルの数を多くするということでもある．ページング信号は LA に含まれるすべ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最小にすると，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．

位置登録エリア (LA) 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^{1)~3)}．

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ことである．

実際の技術においてはオーバレイ位置登録¹⁴⁾ という動的な方式を使うことにより位置登録コストの低減を図っているところがある．オーバレイ位置登録とは，移動機が LA を越えた移動を行う際に LU を行うセルを中心として新たな LA を作成する方式である．この方式により LA の境界における位置登録コストは大幅に軽減できるが，この方式においても LA の形状は固定されている．

ここでは移動する端末の移動特性に応じて LA の形状も動的に変更することによる移動性管理に必要なコストの軽減を考える．具体的にはその時点で滞在する LA から外に出て位置更新が発生した時点でその端末の移動特性に応じた形状の LA を生成することで滞在する LA での滞在時間の延長を期待する．また新たに LA を生成する際に以前滞在していた LA の一部も含めて形状を決定すれば境界上の移動による無駄なトラフィックの発生も減少できる．

本研究は，ページングコストを一定にして，LU コストを最小にすることが目標である．移動体通信サービスの加入者は，それぞれが様々な移動パターンで自由に移動し，時には移動しながら通信を行っている．この移動パターンに応じて LA を最適化し，位置登録コストを低減する．

我々は端末の移動パターンに応じて LA を最適化し，位置更新コストを低減することに成功した¹¹⁾．しかしその研究は，端末の移動モデルとして，3 方向移動モデルと呼ばれるモデルを用いており，本来自由に移動することができる移動端末の振舞いをこの移動モデルですべて論じることは無理がある．そのため我々は新たに移動体通信ネットワークの 4 方向移動モデルという移動モデルを考案し，これを用いて LA の最適化を行う．

また 4 方向移動モデルに基づく位置更新コストを最小にする最適な LA のサイズと形状を計算するアルゴ

リズムを新たに提案する．さらに数値実験を行い，その4方向モデルと計算アルゴリズムの有効性を示す．

関連研究としては Abutaleb ら¹⁾ が位置登録エリアの最適化方式を応用して研究を行っている．しかし彼らの提案では端末の移動モデルとして「3方向移動モデル」を用いていた．その3方向移動モデルでは端末の移動方向は直進，左折，右折の3方向に限定されており，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．本論文で提案する4方向モデルではあらゆる移動方向，移動パターンに対応している．また位置登録の研究については様々な研究^{2)~7),9),10)}が行われているが，それらの研究は移動方向という重要な移動パターンを考慮していない．

また数値実験を行い，提案したアルゴリズムによって最適化された LA (Location Area) の例を示しアルゴリズムの有効性を示した．

2. 移動体通信ネットワークのモデル化

図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．

2.1 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 を行う方式) ， distance-based 方式 (移動したセル数を一定の閾値を超えた場合だけ LU を行う方式) と distance-based 方式 (移動したセル数を一定の閾値を超えた場合だけ

LU を行う方式) の3つがある³⁾．

movement-based 方式と distance-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 が行われる方法であり，後者は LU が行われたセルから何個かのセルを移動した場合に LU が行われる方法である，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，distance-based 方式を改良した方法で位置登録を行う．端末の移動を本論文で述べる「4方向モデル」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．

2.2 位置登録コスト

移動体通信ネットワークの位置登録コストは LU のコストとページングオペレーションのコストの和で与えられる．1つの端末に対する単位時間あたりの LU およびページングのコストは，以下にあげるパラメータに依存する．

- k : LA に含まれるセルの数．
- μ : その端末への平均着呼率 (calls/unit time) ．
- u_k : k 個のセルを含む LA 内でのその端末の単位時間あたりの LU の平均回数 (upds/unit time) ． u_k を平均 LU 率とも呼び．この値は端末の移動性，移動速度，LA の形状に依存する．
- C_p : セル1つあたりのページングコスト (BW/cell) ． BW は要求される周波数帯域．
- C_u : LU1 回当たりのコスト (BW/upd) ．

以上より，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．

$$C(k, \mu, u_k) = k\mu C_p + u_k C_u. \quad (1)$$

前述したように，LU とページングのコストはどちらかを低く抑えようとすると，他方が増大するという性質があるため，一方を固定して他方を最小にする手法を用いる．本研究ではページングに関するコスト (式 (1) 右辺第1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 に関するコスト (式 (1) 右辺第2項) を最小にするにあたっては，式 (1) 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．各セル内での異なる端末の滞在時間を i.i.d. (independent identically

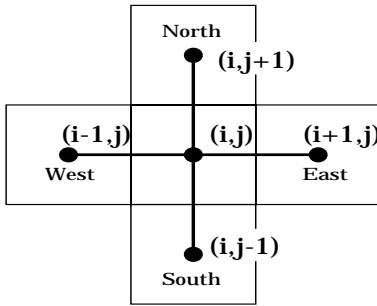


図2 格子モデル
Fig. 2 The grid model.

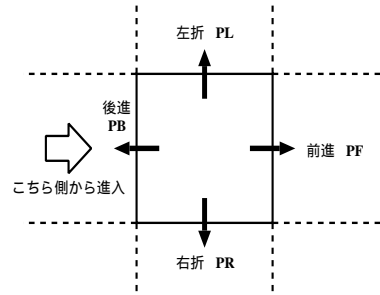


図3 4方向モデル
Fig. 3 The four-direction model.

distributed, 独立同分布) ランダム変数とし, u_k は

$$u_k = \frac{u_1}{N_k} \tag{2}$$

で与えられる¹⁾. 式(2)中の u_1 は単位時間あたりに通過するセルの平均個数(端末の移動速度から決定される), N_k は k 個のセルを含む LA 内で通過するセルの個数の期待値を示す. u_1 は端末の速度を与えることで決定されるため, 本研究での位置登録コストの最小化とは, ある k に対する N_k を最大にすることに帰着する.

本論文では, 各々の端末の移動特性に応じて各端末の N_k を最大にするように最適な LA の形状を求めている. 式(1)は, ネットワーク内の1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いる. 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のには, 式(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.

2.3 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1つの基地局(BS)が配置されており, 端末と無線で通信が行われている. 本研究では, 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する. つまり十字形の交差点の数だけセルが存在する. 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⁾.

このモデルではセルの位置を格子状に配置して表す. 図2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.

3. 4方向移動モデルおよびセル訪問確率の算出

従来提案されていた3方向移動モデルは主に自動車など, 高速で移動し, 方向を転換することがあまり多くない移動手段を用いて端末が移動する場合を想定している. 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経路のみをたどると決めるのには多少無理がある.

我々は移動端末の移動特性を表すため, 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, 4方向モデル(図3)を提案する. また, このモデル上での計算法を提案する.

以降では我々が考案した4方向モデルにおける端末の移動の振舞いを計算するためのアルゴリズムについて述べる.

まずは主な変数について説明する.

- $prv(n, i, j)$: n 回セル追加試行を終了した時点で端末がセル (i, j) を訪れる確率に関する変数. 構造体変数の形をとり, メンバとして $east$ (東), $west$ (西), $south$ (南), $north$ (北), $prob$, eye , jay を持つ. メンバ $east$, $west$, $south$, $north$ はそれぞれ, セル (i, j) に東, 西, 南, 北から進入する確率, $prob$ はそれらの和, eye , jay はそれぞれ i, j を保持する.
- $tmp(n, i, j)$: 試行を行う際の確率の瞬時値. 形式は $prv(n, i, j)$ とまったく同じである. 追加されるセルが決まった時点で $prv(n, i, j)$ にコピーされる.
- $x_{i,j}$: そのセル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, PL, PR, PB : それぞれ移動端末が, 前

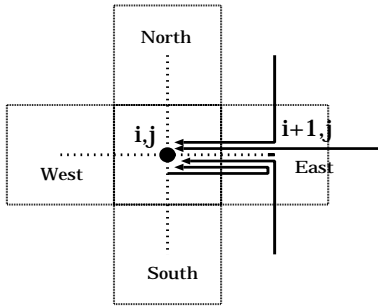


図 4 n 回目に東側のセルから進入する場合

Fig.4 Enter cell (i, j) from east-side in the n th trial.

進, 左折, 右折, 後進する確率.

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) すべての 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),11)} 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 4 方向モデルの場合セルを 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 $prv(n, i, j)$ 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 $prv(n-1, i, j)$ を用いるようにしている.

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 $(i+1, j)$ 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(図 4). 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, そこで LU が発生するということであり, ここではすでに 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 $x_{i+1, j}$ を乗じている.

$$\begin{aligned} & tmp(n, i, j).east \\ &= [prv(n-1, i+1, j).east * PF \\ &+ prv(n-1, i+1, j).west * PB \\ &+ prv(n-1, i+1, j).south * PL \\ &+ prv(n-1, i+1, j).north * PR] x_{i+1, j} \end{aligned}$$

同様にその他の方角から進入する場合の確率を求める.

$$\begin{aligned} & tmp(n, i, j).west \\ &= [prv(n-1, i-1, j).east * PB \\ &+ prv(n-1, i-1, j).west * PF \\ &+ prv(n-1, i-1, j).south * PR \\ &+ prv(n-1, i-1, j).north * PL] x_{i-1, j} \\ & tmp(n, i, j).south \\ &= [prv(n-1, i, j-1).east * PR \\ &+ prv(n-1, i, j-1).west * PL \\ &+ prv(n-1, i, j-1).south * PF \\ &+ prv(n-1, i, j-1).north * PB] x_{i, j-1} \\ & tmp(n, i, j).north \\ &= [prv(n-1, i, j+1).east * PL \\ &+ prv(n-1, i, j+1).west * PR \\ &+ prv(n-1, i, j+1).south * PB \\ &+ prv(n-1, i, j+1).north * PF] x_{i, j+1} \end{aligned}$$

- (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う.

$$tmp(n, i_{LU}, j_{LU}).direction += 1.0$$

- (3) すべての i, j について, $tmp(n, i, j).prob$ を求める.

$$\begin{aligned} & tmp(n, i, j).prob \\ &= [tmp(n, i, j).east \\ &+ tmp(n, i, j).west \\ &+ tmp(n, i, j).south \\ &+ tmp(n, i, j).north] \end{aligned}$$

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.

4. 位置登録エリアの最適化

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_{ij} 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 の値を持つ.

式 (2) 中の N_k は次の式で表される¹⁾.

$$N_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (|i - \alpha| + |j - \beta| + 1) P(e(i, j)). \quad (3)$$

ここで m は行列の行数および列数, (α, β) は LU が

行われるセルの座標を表す． $P(e(i, j))$ は，セル (i, j) が，端末がその位置登録エリア内で最後に訪れるセルであることの確率を示す．

$$P(e(i, j)) = x_{ij}(S(i, j+1)\bar{x}_{i,j+1} + W(i+1, j)\bar{x}_{i+1,j} + N(i, j-1)\bar{x}_{i,j-1} + E(i-1, j)\bar{x}_{i-1,j}) \quad (4)$$

ただし，

$$\bar{x}_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{if } x_{ij} = 1, \\ 1, & \text{if } x_{ij} = 0. \end{cases}$$

また， $S(i, j)$ ， $W(i, j)$ ， $E(i, j)$ ， $N(i, j)$ はそれぞれ，南，西，東，北から，セル (i, j) を訪れる確率である．

端末の移動パターンに応じて最適化された LA を求めるために，最初は LU 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 (2) でも分かるとおり 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，次のような条件を満たすセルを追加する．

$$\text{Maximize } N_k = \sum_i \sum_j c_{ij}, \quad (5)$$

$$\text{in Eq. (5) } c_{ij} = (|i - i_{LU}| + |j - j_{LU}| + 1)pre(i, j), \\ \text{subject to: } \sum_{i=1} \sum_{j=1} x_{ij} = k. \quad (6)$$

式中 $pre(i, j)$ はセル (i, j) がその LA 内で最後に訪れるセルである場合の確率，すなわちセル (i, j) を最後に別の LA のセルへ移動する状況を表す確率である．この問題は，LU 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ほかならない¹⁾．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用いる．パラメータは，

- $B_X(i, j)$: セル (i, j) が LA に隣接するセルであるかどうかを示す変数．0 と 1 の 2 値変数であり，1 の場合セル (i, j) は LA に隣接していることを表す．
- $maxPRV$: セル訪問確率の最大値．
- $count$: LA に含まれるセルの個数．

提案するアルゴリズム

(1) LU が行われるセルについて，その LA に進入

した方向を D_{in} として：

$$prv(1, i_{LU}, j_{LU}).D_{in} = 1.0, \\ tmp(1, i_{LU}, j_{LU}).D_{in} = 1.0.$$

(2) $n = 2$.

(3) すべての (i, j) について，

$$\text{if } x(i, j) = 0 \cap (x(i-1, j) = 1 \\ \cup x(i+1, j) = 1 \cup x(i, j-1) = 1 \\ \cup x(i, j+1) = 1), \\ B_X(i, j) = 1, \\ \text{else } B_X(i, j) = 0.$$

(4) 3章で示した確率計算ルーチンを引数 n で実行する． n における訪問確率 tmp が計算される．

(5) すべての (i, j) について，

$$\text{if } B_X(i, j) = 1 \cap tmp(n, i, j). \\ prob = maxPRV, \\ maxPRV = tmp(n, i, j).prob.$$

(ここで訪問確率の最大値を求める)．

(6) すべての (i, j) について，

$$\text{if } tmp(n, i, j).prob = maxPRV, \\ x_{tmp(n, i, j).eye, tmp(n, i, j).jay} = 1.$$

(訪問確率が最大値と等しいセルを LA に追加する．4 方向モデルの場合 1 回の試行で追加されるセルの個数は，3 方向移動モデルと異なり 2 個以上が同時に追加される場合があるため $tmp.prob$ ， $tmp.eye$ ， $tmp.jay$ の 3 つのメンバを追加した)．

(7) すべての (i, j) について，

$$\text{if } x_{i,j} = 1, \\ prv(n, i, j) = tmp(n, i, j).$$

(tmp を prv にコピーして訪問確率を確定する)．

(8) $maxPRV$ に 0.0 を代入し n をインクリメント．

(9) (3) に戻り，LA に含まれるセルの数が $count$ に達すると終了

(10) $x_{i,j} = 1$ であるセルの個数を $count$ に代入する．

このアルゴリズムによって最適化された LA の形状が導かれる．このアルゴリズム終了時点の訪問確率 prv と変数 $count$ を用いて N_k を計算する． N_k を算出するアルゴリズムとパラメータは，

- $pre(i, j)$: セル (i, j) が LA の最も外側のセルであることを表す確率．この変数の値の確率で端末は LA から出ていくことになる．

- $\bar{x}_{i,j} : x_{i,j}$ の反転．
 N_k 算出アルゴリズム

(1) すべての (i, j) について， $pre(i, j)$ を求める．

$$pre(i, j) \\ = [prv(n, i, j).east * PB$$

$$\begin{aligned}
 &+ prv(n, i, j).west * PF \\
 &+ prv(n, i, j).south * PR \\
 &+ prv(n, i, j).north * PL] x_{i,j} * \bar{x}_{i+1,j}, \\
 &pre(i, j) \\
 &+ [prv(n, i, j).east * PF \\
 &+ prv(n, i, j).west * PB \\
 &+ prv(n, i, j).south * PL \\
 &+ prv(n, i, j).north * PR] x_{i,j} * \bar{x}_{i-1,j}, \\
 &pre(i, j) \\
 &+ [prv(n, i, j).east * PL \\
 &+ prv(n, i, j).west * PR \\
 &+ prv(n, i, j).south * PB \\
 &+ prv(n, i, j).north * PF] x_{i,j} * \bar{x}_{i,j-1}, \\
 &pre(i, j) \\
 &+ [prv(n, i, j).east * PR \\
 &+ prv(n, i, j).west * PL \\
 &+ prv(n, i, j).south * PF \\
 &+ prv(n, i, j).north * PB] x_{i,j} * \bar{x}_{i,j+1}.
 \end{aligned}$$

(2) すべての (i, j) について,

$$N_k = \sum_{i,j} \{(|i - i_{LU}| + |j - j_{LU}| + 1)pre(i, j)\}.$$

(3) $count$ に対応した N_k を返す.

このようにして求められた N_k は、移動パターンが PF, PL, PR, PB であり、LA 内のセルの個数が $count$ であるときの最大値になっている。

本提案手法は、ページングに関するコストを、LA に含まれるセルの個数 k を定数にすることで、その LA 内で通過するセルの個数の期待値 N_k を最大化するによって、LA 内での端末の位置登録率 u_k を最小化し、位置登録コストを最小化する。式 (1) によって、実際にページングに関するパラメータ k (LA に含まれるセルの数)、 μ (その端末への平均着呼率)、 C_p (セル 1 つあたりのページングコスト)、と位置登録に関するパラメータ C_u (LU1 回あたりのコスト) と u_1 (単位時間あたりに通過するセルの平均個数) が分かれば、本提案手法によって、その端末の LA の最適形状と LA 内で通過するセルの個数の期待値 N_k のうち最大となるものを計算でき、最小の位置登録の平均コストを求めることができる。

5. 数値実験、結果および考察

本章では端末の移動特性に応じて、最適化された LA の形状の例を示す。

5.1 最適化された LA の形状

前章に示したアルゴリズムによって導かれた最適化

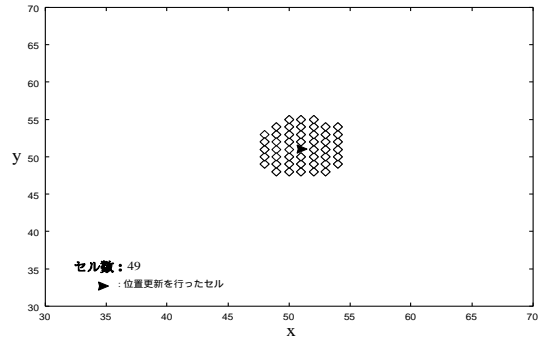


図 5 最適化された LA の形状 1 (前進確率 $PF = 0.3$, 左折確率 $PL = 0.4$, 右折確率 $PR = 0.1$, 後進確率 $PB = 0.2$)
 Fig. 5 Optimized LA shape (1) with $PF = 0.3, PL = 0.4, PR = 0.1, PB = 0.2$.

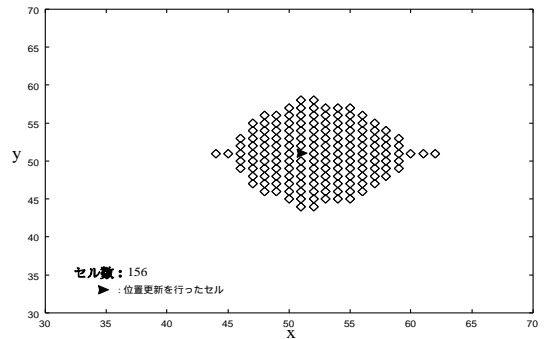


図 6 最適化された LA の形状 2 (前進確率 $PF = 0.7$, 左折確率 $PL = 0.1$, 右折確率 $PR = 0.1$, 後進確率 $PB = 0.1$)
 Fig. 6 Optimized LA shapes (2) with $PF = 0.7, PL = 0.1, PR = 0.1, PB = 0.1$.

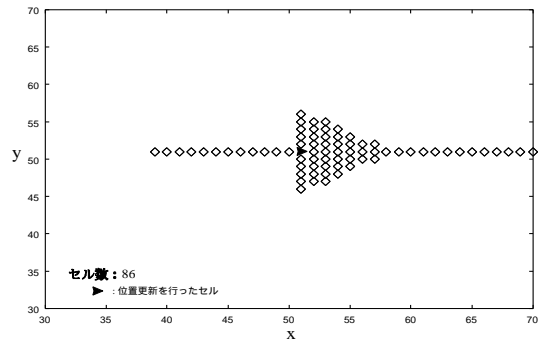


図 7 最適化された LA の形状 3 (前進確率 $PF = 0.9$, 左折確率 $PL = 0.04$, 右折確率 $PR = 0.04$, 後進確率 $PB = 0.02$)
 Fig. 7 Optimized LA shapes (3) with $PF = 0.9, PL = 0.04, PR = 0.04, PB = 0.02$.

された LA の典型的な例を図 5, 図 6, 図 7 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が変化すると LA の形状が大き

く変化することがよく分かる。西から LA に進入した場合、移動方向が 4 方向になったことで 3 方向移動モデルでは決して見られなかった¹¹⁾、LU が行われるセルを通り y 軸と平行な直線よりも左側にも LA が広がっている。

また図 5 のように各方向への移動確率に大きな差がない場合は 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ほど、図 6 や図 7 のように進行方向に向かって細長い LA が形成される。具体的には図 5 は人々が歩いている場合など様々な方向への移動が容易に行われる状況であり、図 6 や図 7 は自動車や電車など比較的方向を変更することが少ない場合にみられる移動特性であると思われる。

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 5 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。本提案手法では、そのようなセルを LA に追加するため、図 6 や図 7 のように対応している LA の形状にも反映されている。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、位置登録の平均コストを最小化する。

6. おわりに

本研究では移動端末の移動方向と移動パターンを考慮し、端末の移動モデルとし 4 方向モデルを新たに提案した。それを用いて LA に含まれるセルの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。また数値実験を行い、提案したアルゴリズムによって最適化された LA (Location Area) の例を示しアルゴリズムの有効性を示した。

今後の課題としては提案した移動端末の位置管理方式およびアルゴリズムの実現手法に関する研究を行うことがあげられる。

参 考 文 献

1) Abutaleb, A. and Li, V.O.K.: Location update optimization in personal communication systems, *Wireless Networks*, Vol.3, No.3, pp.205-

216 (1997).
 2) Akyildiz, I.F., Ho, J.S.M and Lin, Y.-B.: Movement-Based Location Update and Selective Paging for PCS Networks, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.4, No.4, pp.629-638 (1996).
 3) Bar-Noy, A., Kessler, I. and Sidi, M.: To update or not to update?, *Proc. IEEE INFOCOM*, pp.570-576 (1994).
 4) Chih-Lin, I., Pollini, G.P. and Gitlin, R.D.: PCS Mobility Management Using the Reverse Virtual Call Setup Algorithm, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.5, No.1, pp.13-23 (1997).
 5) Jain, R., Lin, Y. and Mohan, S.: Location Strategies for Personal Communications Services, *The Mobile Communications Handbook*, pp.289-318, A CRC Handbook Published in Cooperation with IEEE Press (1996).
 6) Li, J., Kameda, H. and Li, K.: Optimal Dynamic Mobility Management for PCS Networks, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.8, No.3, pp.319-327 (2000).
 7) Lin, Y.: Mobility Management for Cellular Telephony Networks, *IEEE Parallel & Distributed Technology*, Winter, pp.65-73 (1996).
 8) Lin, Y.: Reducing Location Update Cost in a PCS Network, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.5, No.1, pp.25-33 (1997).
 9) Madhow, U., Honing, M.L. and Steiglitz, K.: Optimization of wireless resources for personal communications, *Proc. IEEE INFOCOM*, pp.577-584 (1994).
 10) Xie, H., Tabbane, S. and Goodman, D.J.: Dynamic location area management and performance analysis, *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, pp.536-539 (1993).
 11) 中野裕介, 李 頌, 亀田壽夫: 移動体通信における端末の位置登録最適化, 情報処理学会研究報告, 99-MBL-9-9, pp.63-70 (1999).
 12) 中野裕介, 李 頌, 亀田壽夫: 移動パターンを考慮した移動端末の位置登録最適化, 情報処理学会研究報告, 2000-MBL-12, pp.7-14 (2000). 情報処理学会モバイルコンピューティングとワイヤレス通信研究会 1999 年優秀論文.
 13) 服部 武ほか: モーバイルパーソナルインテリジェンス, 共立出版 (1996).
 14) <http://www.needocomo.co.jp/corporate/rd/tech/cell03.html>

(平成 14 年 3 月 25 日受付)

(平成 14 年 10 月 7 日採録)



久保田 敦

1974年生。1998年筑波大学第三学群情報学類卒業。2000年筑波大学大学院工学研究科において修士取得。現在筑波大学大学院工学研究科に在学中。携帯端末を用いたモバイルコンピューティングとネットワーク分野に興味を持つ。



李 頔 (正会員)

1959年生。1982年中国浙江大学計算機科学科卒業。1985年中国北京郵政省科学研究院大学院修士課程修了。1993年電気通信大学大学院博士課程修了。博士(工学)。1985~1989年中国北京郵政省科学研究院研究工程師。1993年筑波大学電子・情報工学系助手。1994年同講師を経て、1997年同助教授。1997年度IEEE米国航空宇宙・電子工学会最優秀論文賞受賞。分散/並列処理、オペレーティングシステム、移動体通信網、システムの評価の研究教育に従事。情報処理学会、ACM、IEEE各会員。



亀田 壽夫 (正会員)

1942年生。1965年東京大学理学部物理学科卒業。1970年同大学大学院理学系研究科博士課程修了。理学博士。同年東京大学理学部助手。1971年電通大学講師。同助教授・教授を経て、1992年より筑波大学電子・情報工学系教授。この間、1973~1974年IBMワトソン研究所、1974~1975年トロント大学にて研究に従事。OS、分散/並列処理、システム性能評価、分散最適化のパラドックス等の研究教育を行ってきた。Optimal Load Balancing in Distributed Computer Systems, Springer (1997)等。情報処理学会編集委員、同OS研究会主査、システム評価研究グループ主査等を歴任。現在IFIP TC7委員。