

小特集

6.

空間データとモバイルコミュニケーション

篠田 庄司 仙石 正和

篠田庄司：正員 中央大学理工学部電気・電子
工学科
E-mail Shinoda@kawa.elect.chuo-u.ac.jp
仙石正和：正員 新潟大学工学部情報工学科
E-mail sengoku@info.eng.niigata-u.ac.jp

Spatial Data and Mobile Communications. By Shoji SHINODA, Member (Faculty of Science and Engineering, Chuo University, Tokyo, 112-8551 Japan), and Masakazu SENGOKU, Member (Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181 Japan).

ABSTRACT

情報通信分野と空間データ・GIS（地理情報システム）とのかかわりは、様々な側面をもっている。最近進展の著しいモバイルコミュニケーション（移動体通信）と空間データ・GISとのかかわりは特に強いようである。そこで、ここでは通信技術者の立場に立って、すなわち通信、特にモバイルコミュニケーションから空間データ・GISについて眺めてみる。すると、空間データ・GISにおける（のための）モバイルコミュニケーションの側面と、空間データ・GISの応用のためのモバイルコミュニケーションの側面がある。以上の2側面を述べると共に、更に、空間データ・GISのモバイルコミュニケーションへの応用についての研究成果も交えて論ずる。

キーワード：空間データ、情報通信、モバイルコミュニケーション、移動通信トラヒック

1. はじめに

空間データ (SD: Spatial Data) は、地球上の自然や人工の地物、境界などの空間的位置と特徴を表すデータであり、その種類は実に多種多様なデータを含む。空間的位置とその特徴を結びつける関連性は直接的なものから間接的なものまである。すなわち、空間的データとは、地球上の位置に直接的あるいは間接的に関連づけることができるデータである。一方、GIS (Geographic Information System: 地理情報システム) は、空間データを利用するための一つの道具である。GISの言葉は狭い意味から広い意味にも使われている。GISとは、地理的位置や空間に関する情報をもった自然、社会、経済などの属性データ (空間データ) を統合的に処理、管理、解析し、その結果を表示するコンピュータ情報処理体系である、との定義が一般的であるが、もっと広く、空間データを扱うす

べての情報システムとの解釈もある。空間データの処理、管理、解析、表示の言葉の中には、空間データの取得、蓄積、伝達等の意味が含まれることは、説明の要はない。すなわち、GISそのものが既に通信技術を前提にしているといえるであろう。また、更に広く解釈するとサイバースペース上に空間データを分散させたシステムをもGISであるとの解釈に到達する。このように通信とGISとのかかわりは極めて強い。事実、その重要性から米国では、クリントン・ゴアの1993年のNII (National Information Infrastructure, または俗称、情報スーパーハイウェイ) 構想の基幹的施策の一つとして、1994年に大統領令により、NSDI (National Spatial Data Infrastructure: 国土空間データ基盤) の構築を提出している⁽²⁾。

以上のように、空間データと通信のかかわりは強い。そのため、ここでは通信分野、特に最近進展が著しいモバイルコミュニケーションと

のかかわりについて述べる。上述したことからわかるように、空間データとその利用のための道具であるGISは利用者からみたときは一体化（以後、空間データ・GISと記述する）している状況にあり、更に通信はその中に既に内在しているとみることができる。通信の立場に立つと、空間データ・GIS内におけるモバイルコミュニケーションと、空間データ・GISの利用のためのモバイルコミュニケーションの二つの側面がある。また、特に空間データ・GISのモバイルコミュニケーションへの応用も非常に興味ある点である。以上から、本文では、以下の三つの観点から空間データ・GISとモバイルコミュニケーションのかかわりについて課題も含めて論ずる。もちろん、これらは相互にかかわりがある。

- (1) 空間データ・GISにおける(のための)モバイルコミュニケーション
- (2) 空間データ・GISの応用のためのモバイルコミュニケーション
- (3) 空間データ・GISのモバイルコミュニケーションへの応用

2. 通信の進展

空間データ、GISの進歩は、コンピュータはじめ通信の技術的進歩と無縁ではない。最近の通信の進歩のキーワードは、

- 高速化（大容量化）
- マルチメディア化
- 高信頼化
- ワイヤレス化
- モバイル化
- パーソナル化

などである。特に、モバイル化、パーソナル化などのキーワードを実現する、モバイルコミュニケーションの進展が著しい。

3. 空間データ・GISのためのモバイルコミュニケーション

空間データを管理するには、最新の空間データを取得し、更新していかななくては何にもなら

ない。最新の空間データの取得には人工衛星リモートセンシング等のほかに、現地実測、調査等が必要である。モバイルマッピングシステムとして道路を走行しながら、三次元データ（時間軸まで含めて四次元データをも）を取得し、伝送する必要がある。この場合は、センサとのインタフェースから、高速、高信頼通信が要望される⁽³⁾。

ITS（Intelligent Transport System：高度道路交通システム）における、周辺監視技術におけるレーダからのデータ収集なども広い意味では含まれる⁽⁴⁾。

4. 空間データ・GISの応用のためのモバイルコミュニケーション

GISでは、空間データが大規模なので、集中管理は難しく、分散システムになるのであろう。その際の、高速にアクセスするためのネットワーク上での最適ファイル配置問題がある。（文献（5）など）空間データの応用分野によって異なるが、移動しながら空間データを有効に利用する場合のネットワーク管理、制御また、携帯端末の機能など様々な課題がある。もちろん、最適なデータの検索エンジン、ネットワーク上を流通させる場合の暗号・圧縮技術の課題も重要である。

今後の高齢化社会に臨んで、より具体的な応用として、GPS（Global Positioning System）を用いたナビゲーションシステム、徘徊老人の定位システム、PHSを用いた位置探索システムなどには、モバイルコミュニケーションが重要な役割を演じている^{(6),(7)}。また、今後ますます、モバイルコミュニケーション技術の関連で、ビルの個別室内や地下空間内における端末利用者のより正確な位置把握を含め、位置特定技術に関する研究もなされよう。ロボット制御との関連でも注目される。

5. 空間データ・GISのモバイルコミュニケーションへの応用

通信技術者にとって、何といたっても空間デー

タを通信に利用したいと思うであろう。

モバイルコミュニケーションを行う空間（モバイルコミュニケーション空間といい、それには高層ビルや木々が混在する都市部分、ビル内や深地下空間内の多層多壁区分領域などが含まれる）を地形形状ならびに建物と障害物等の配置を考慮し、セル（マイクロセル・ピコセルを含め）により最適に領域被覆（アンテナの最適配置、セルサイズ最適制御）する問題の解決には空間データの利用が有効であり、またその利用に適した空間データの作成も重要な課題である。

構造物の高層化が進み、都市内の電波伝搬特性を解析することが難しくなっている。都市内のマイクロ波の伝搬特性から、セル（無線ゾーン）を構成する必要があるが、非常に多くの研究にもかかわらず、現在その最適な構成法が確立していない。詳細な空間データから、より正確な電波伝搬特性を算出して、モバイルコミュニケーションの設計に役立てられないだろうか。この分野での、成果が特に期待される¹⁸⁾。高速道路上などでは、車相互の位置関係がダイナミックに変化するため、電波の伝搬特性も高速にダイナミックに変動する。このような場合のモデル化などの問題は、ITS との関係も含めて重要である。

携帯電話などモバイルコミュニケーションでは、携帯端末のモビリティを考慮したシステム設計が重要である。人、自動車などの流れ（動き）を空間データとして与えられた場合の通信トラフィックの解析およびそれをういた通信システムの最適設計がなされる必要がある。簡単な例¹⁹⁾を示しながら、携帯端末のモビリティと通信トラフィックが非常に強いかかわりをもつことを示す。図1に示すように、自動車が3分間に進む距離は、速度 40 km/h で 2 km、速度 60 km/h で 3 km、…、速度 100 km/h で 5 km である。もし、1.5 分間（90 秒）であると、この半分である。図2に示すような長さが 1 km である帯状のセルを考えると、通話時間 3 分（または 1.5 分）の間に自動車は複数のセルを通過す

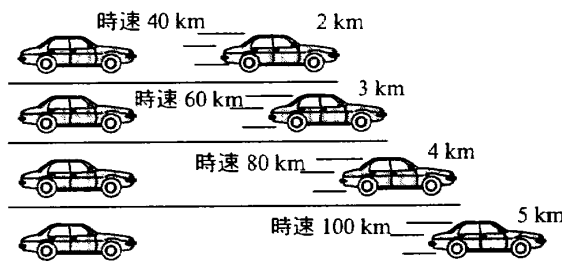


図1 車が3分間に進む距離

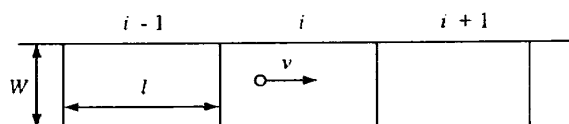


図2 一次元サービスエリア

ることになる。つまり、通話中にチャンネル切換（ハンドオフ）が起る。

図2のようなサービスエリアにおいて、車が通話中に隣のセルに入る確率は以下のようにして求まる。このサービスエリアにおいて、すべての車は一方向に一定の速度 v で移動しているものとする。また、各セルにおいて車は一様に分布していると仮定する。まず、あるセルに存在する車から呼が生起し、チャンネルが割り当てられたとする。この場合の呼の生起とは、自動車で移動中の人に電話がかかってきたこと、あるいは、自動車で移動中の人電話をかけたことと考えればよい。このとき、呼が生起した地点からチャンネルを保留したまま、セルの境界まで達する（ハンドオフを行う）確率を、図3を見ながら考える。呼が生起した地点からセルの境界までの距離が x 以下である確率を $P(X \leq x)$ で表す。呼が生起した地点からセルの境界までの距離が x 以下であるためには、呼が生起し

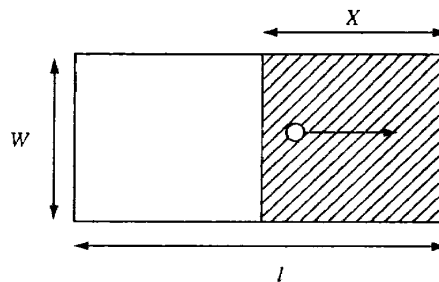


図3 セル境界までの移動距離

た点は図3の斜線部分に存在しなければならない。よって、セル全体の面積と斜線部分を考慮して、 $P(X \leq x)$ は、面積比として次式のように表される。

$$P(X \leq x) = \frac{xw}{lw} = \frac{x}{l} \quad (1)$$

従って、この車が呼が生じたセルにとどまる時間が t 以下である確率 $P(T \leq t)$ は $x = vt$ より、

$$P(T \leq t) = \frac{vt}{l} \quad (2)$$

となる。ここで、 $0 < t \leq \frac{l}{v}$ である。上式の確率密度関数 $p(t)$ は、

$$p(t) = \frac{dP(T \leq t)}{dt} = \frac{v}{l} \quad (3)$$

となる。

また、従来の通信トラヒック理論と同様に、呼の保留時間（通話時間）が平均 h_0 の指数分布に従うと仮定すると、保留時間 H が t よりも長くなる確率 $P(H > t)$ は次式で表される。

$$P(H > t) = \exp\left(-\frac{t}{h_0}\right) \quad (4)$$

呼が生じた地点からセルの境界までの距離が x で、速度 v で移動した場合に、境界までの移動時間が t であるような場合、この呼がチャンネルを保留したまま隣接するセルに入る確率、つまりハンドオフを行う確率は、この呼の保留時間（通話時間）が t より長い確率である。従って、この確率は、式(4)から計算できる。よって、呼が生じたセルから隣のセルに移る確率 P_1 は、式(3)、(4)から以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} P_1 &= \int_0^{\frac{l}{v}} P(H > t) p(t) dt \\ &= \frac{vh_0}{l} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{l}{vh_0}\right) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

隣のセルから移動してきた呼（ハンドオフ呼）が更に隣のセルに移動する確率 P_2 は、 P_1 とは異なり、以下のように考える必要がある。この場合には、すべてのハンドオフ呼はセルの境界上で生じたと考えられる。よって、 P_2 は、

呼の保留時間が一定値 $\frac{l}{v}$ よりも長くなる確率として表すことができる。但し、これは、指数分布が無記憶性をもつことによる。従って、 P_2 は式(4)より、次式で表される。

$$P_2 = \exp\left(-\frac{l}{vh_0}\right) \quad (6)$$

上記の P_1, P_2 と密接に関連するものとして、セル内保留時間、単位時間当たりを生ずるハンドオフの数（ハンドオフ呼の生起係数）がある。セル内保留時間とは、一つのセルの中で一つの呼がチャンネルを占有する時間であり、上記の保留時間よりも短い。もし、ハンドオフ呼がポアソン分布に従うと仮定することができれば、生起呼とハンドオフ呼の生起係数、セル内保留時間を用いて、セルに加わる呼量を求めることができる。この呼量とチャンネル数が与えられれば、広く知られているアランの式を用いて、呼損率を表すことができ、セルラ移動体通信の通信トラヒック特性を求めることができる⁹⁾例を示す。図4のようなリング状のサービスエリア（セル長1 km、チャンネル数8、保留時間1.5分）を考える。このサービスエリアにおける呼損率を数値解析により求めた結果を図5に示す。図5には、コンピュータシミュレーションにより求めた呼損率も示しているが、数値解析結果とコンピュータシミュレーション結果はよく一致していることがわかる。図5から、速度が速くなるに従い、呼損率（呼が生じたときに、つながらない確率）が低くなる。この理由として、

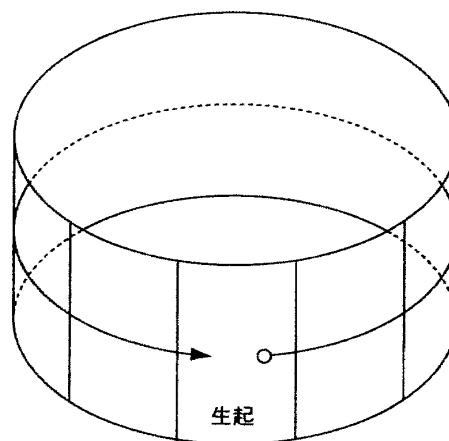


図4 リング状一次元サービスエリア

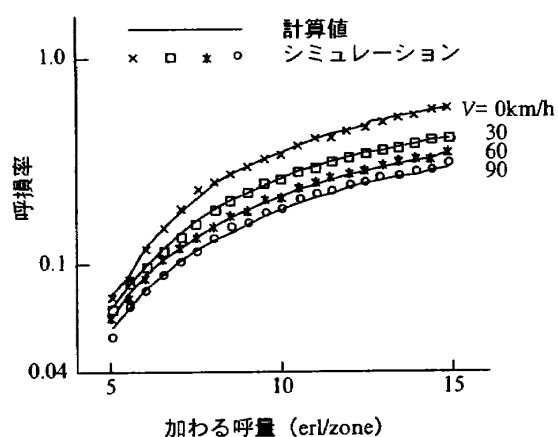


図5 通信トラヒック特性

呼の動きによって一つのセル中における保留時間（通話時間）が減少することと、隣のセルにおいて生じたすべての呼が移動して来るのではなく、隣のセルにおいて呼損が生ずることが考えられる。そのため、呼量が増加して呼損率が大きくなる程、速度が大きくなる程、呼損率の低下の割合が大きい。以上の例は移動体の動きが等速という単純なものであるため、理論的にも導出された⁹⁾。移動体の動きに関しては、実際にはこのように単純ではなく、速度と移動体の密度に相関があったり、時間的にも変動するであろう。このような簡単な例からわかるように、利用者が通話中に動かない固定通信と利用者が動くモバイルコミュニケーションとは、通信トラヒック特性だけでも大きく異なった特性を示す。この移動体の動きに関するものがモバイルコミュニケーション独特な特性である。

モバイルコミュニケーションにおける通信トラヒック特性を求めるためには、上記のようなセル変更確率などを求める必要があり、また、セル変更確率を求めるためには、道路上の移動体の速度などの詳しい空間データが必要になることがわかる。また、このような空間データが得られれば、通信トラヒック特性は求まり、モバイルコミュニケーションの設計に有効となる。

一般に、二次元平面、またはビル内などの三次元空間がモバイルコミュニケーションのサービスエリアとなる。上記の解析例において、呼

は一次元のサービスエリアを移動している。二次元、または三次元のサービスエリアにおいて、同様に通信トラヒック特性を解析することが可能であろうか。例えば、図6のように二次元平面上に存在するセルの形状が正六角形であり、蜂の巣状に配置されているとすると、一つのセルに関して、6方向からの移動体の出入りを考慮する必要がある。6方向それぞれにどの程度の出入りがあるのかを考慮することも必要である。よって、このような二次元平面における通信トラヒック特性を厳密に解析することは非常に困難な問題を含んでいることが容易に予想できる。この問題に対して、最近、二次元のサービスエリアを一次元のネットワーク上にモデル化して近似的に解析する方法が提案された^{10)~12)}。例えば、図6のような六つのセルからなる二次元システムをその道路上のネットワークで近似するものである。ネットワーク上における交通流は、ある点で分岐し、また、ある点で合流する。この近似手法では、交通流をいくつかの一次元の経路に分割し、各経路について、前述の一次元サービスエリアにおける通信トラヒックの解析手法を適用するものである。ここで、いかにして交通流を分割するかという問題が生ずる。例えば、交通工学の分野で用いられている4段階推定法および分割配分法¹³⁾を用いることから考えられる。これらの手法を用いるときには、代表的な点（セントロイド）間の交通量（空間データ）を交通量調査等から求め、この結果から、各一次元の経路を流れる交通量を推定する。図6において、セントロイドはA~Dの四つ存在するが、任意の二つ

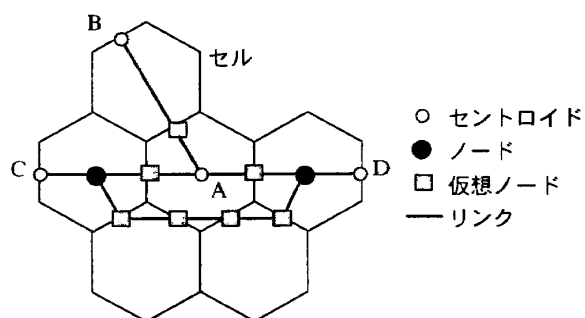


図6 道路ネットワークと移動通信システム

のセントロイド間の交通量は調査結果等からわかる。しかし、この交通量がどのような経路をたどって、セントロイドからセントロイドへ流れるのかはわからないので、各経路の交通量を推定するために、分割配分法が用いられる。分割配分法は交通量を多くの人々が利用するであろう経路（最短経路）に少しずつ配分し、調査結果と配分の最終結果が一致するまで、配分を繰り返す。このとき、交通量が配分された経路は道路が混んでくる。そのため、移動体の速度は遅くなると考えられる、このような移動体の密度と速度の関係を経路の各区間で推定する必要もある。このような場所的な密度と速度の関係も一種の空間データとして考えられる。

移動体の動きは、一次元、二次元、三次元、更にその値が時々刻々変化する場合、つまり、時間変化を加えた四次元の空間データまでかわってくる。このような環境下での、移動体の移動を考慮したモバイルコミュニケーショントラヒック特性の解析、解析結果を利用したシステムの設計は極めて重要な課題である。これらを行うためには、上記のように様々な空間データを取得、作成、利用することが必要となり、モバイルコミュニケーションシステムの設計のために空間データが重要な役割を果たすと考えられる。もちろん、これらの結果はITS等にも深く関連すると思われる⁽⁴⁾。また、端末のモビリティを考慮した場合の、各セルへの最適チャンネル割当問題、サービスエリアのダイナミックな最適セル配置問題なども重要な課題である（文献（14）、（15）など）。

また、上記のような様々な場所における自動車の動きに関連する空間データ以外の空間データもモバイルコミュニケーションとは関連深い。例えば、空間的な人口密度、基地局、端末の密度や分布、セルの大きさや形状等の空間データは、モバイルコミュニケーションシステムの設計のための容量の推定、サービス品質の推定などには欠かせないデータであろう。また、これらの空間データは、確率的にしか与えられないものがある。例えば、セル内に存在する移動

局の数の確率分布は幾何確率（図形に関する確率⁽⁶⁾）として与えられるものであると考えられるし、移動局が中継局の役割を果たすようなマルチホップ型モバイルコミュニケーションシステムにおいては、中継局の数の分布も幾何確率として与えられるであろう。よって、空間データとしての幾何確率を利用したシステムの最適化手法、性能解析手法の開発も非常に重要であると考えられる。

6. あとがき

空間データ・GISと通信、特にモバイルコミュニケーションとのかかわりについて述べた。内容は、空間データ・GIS内でのモバイルコミュニケーション、および空間データ・GISの応用のモバイルコミュニケーション、更にモバイルコミュニケーションへの空間データ・GISの応用という、三つの観点に注目して述べた。特にモバイルコミュニケーションへの空間データ・GISの応用について多くを述べ、最近の研究の若干の紹介も行った。この3番目の観点を特に重視した理由は、移動体の「動き」が、モバイルコミュニケーションと固定通信との比較において最も特徴的な部分であり、空間データとモバイルコミュニケーションとのかかわりで極めて重要なポイントと考えたからである。もちろん、ここで述べた内容は、空間データとモバイルコミュニケーションに関する一端である。今後、上述の三つの観点が相互に影響し合いながら、発展していくことは間違いない。そして、通信技術者から眺めると、物理的に離れていてもその場所の空間データを詳細に駆使することにより、人間を本当に現場にいるような状況にしてくれる、すなわち真にリアリティのある通信がいつでも、どこでも、だれでもがパーソナルに実現できることが目標となるだろう。

本稿の作成に御協力頂いた、新潟大学工学部講師中野敬介博士に感謝の意を表す。また、本稿内容は中央大学理工学研究所の先端技術研究センター（文部省私立大学ハイテクリサーチ・センター）の「統合型地理情報システムの

研究」ならびに平成8年度電気通信普及財団研究助成の「モバイルコミュニケーション空間のセルによる最適領域被覆に関する基礎研究」による。

文 献

- (1) 伊理正夫, “新世紀の空間データ基盤と地理情報システム—歴史と現状を踏まえた展望と研究課題” (「統合型地理情報システム研究プロジェクト」発足シンポジウム), 中央大学理工学研究所, 1998.
- (2) 明野, 熊木, “地理情報システムと空間データインフラの概要,” 情報処理, vol.38, no. 2, pp.143-149, Feb. 1997.
- (3) 東明佐久良, モバイル GIS, オーム社, 1997.
- (4) “特別小特集 新しい時代の交通システムに向けて,” 信学誌, vol.80, no.9, pp.903-934, Sept. 1997.
- (5) H. Tamura, M. Sengoku, S. Shinoda, and T. Abe, “Location Problems on Undirected Flow Networks,” IEICE Trans., vol. E73, no.12, pp.1989-1993, Dec. 1990.
- (6) “創立80周年記念特集 21世紀の電子情報通信技術,” 信学誌, vol. 80, no. 8, pp. 783-858, Aug. 1997.
- (7) 神島博昭, “21世紀の新事業を目指して,” 信学誌, vol.81, no.1, pp.16-21, Jan. 1998.
- (8) 進士昌明 (編著), 無線通信の電波伝搬, 電子情報通信学会, 1992.
- (9) 大塚, 仙石, 山口, 阿部, “移動体の流れと移動通信トラヒックに関する基礎研究,” 信学技報, CAS 86-249, pp.81-88, 1987.
- (10) K. Nakano, M. Sengoku, and S. Shinoda, “Traffic-flow on a Road Network and Teletraffic on a Mobile Communication Network,” Proc. Japan-Korea Workshop on Future Communication and Intelligent Control, pp.11-16, Oct. 1997.
- (11) 中野, 齊田, 仙石, 山田, 篠田, “道路網における移動体の流れと移動通信トラヒック,” 信学技報, AP 97-132, RCS 97-147, pp.131-138, 1997.
- (12) K. Nakano, K. Saita, M. Sengoku, Y. Yamada, and S. Shinoda, “Mobile Communication Traffic Analysis on a Road Systems Mobile,” Performance and Management of Complex Communication Networks, (ed. by T. Hasegawa, H. Takagi, and Y. Takahashi), pp.3-20, IFIP, Chapman & Hall, 1998.
- (13) 例えば, 竹内, 本多, 青島, 交通工学, 鹿島出版会, 1986.
- (14) 仙石, 中野, 篠田, 山口, 阿部, “セルラ移動通信系のチャンネル割当て問題とニューラルネットワークの応用,” 信学論 (B-I), vol.J74-B-I, no.3, pp.190-200, March 1991.
- (15) M. Sengoku, H. Tamura, S. Shinoda, and T. Abe, “Development in Graph-and/or Network-theoretic Research of Cellular Mobile Communication Channel Assignment Problems,” IEICE Trans., Fundamentals, vol.E77-A, no.7, pp.1117-1124, July 1994.
- (16) G. P. Wadsworth, and J. G. Bryan, Application of Probability and Random Variables, McGraw-Hill, 1974.



しのだ しゅうじ
篠田 庄司 (正員)

昭16.12.15生。昭40-03中大・理工・電気卒。昭48.03同大学院理工学研究科電気工学専攻了(工博)。現在、中大・理工・電気・電子・教授。回路、ネットワーク、システムの解析、設計、診断、制御の研究に従事。1991, 1996, 1997年度論文賞, ICNNSP '95最優秀論文賞受賞。著書「回路論入門(1)」など。



せんごく まさかず
仙石 正和 (正員)

1944.10.18生。1967新潟大・工・電気卒。1972北大大学院博士課程了。工博。同年北大・工・電子助手。新潟大・工・情報助教授を経て、現在、同教授。回路網理論, グラフ・ネットワーク理論, 情報伝送特に移動通信の研究に従事。現在、本会編集特別幹事。1991, 1995, 1996, 1997年度論文賞受賞。IEEE ICNNSP '95 Best Paper Award受賞。著書「演習グラフ理論」(共著)など。