

## 確率推論に基づく位置情報推定システムの実現

伊藤孝行<sup>†</sup> 大栗和久<sup>††</sup>

コンピュータ関連技術の進歩による作業の非同期化、作業環境の分散化、勤務形態の変化に伴い、組織のメンバーの状況をリアルタイムに知ることが重要になっている。組織内の位置情報をメンバー間で共有することができれば、相手の状況を配慮したコミュニケーションやコラボレーションの方法を動的に選択することが可能となり、組織活動をより効果的に支援できる。一般的に、位置情報取得技術には、状況によっては位置検出ができないという問題点がある。また、より正確な検出と、そのコストにはトレードオフが存在する。本研究で用いた位置検出システム EIRIS も、同様に利用状況によっては位置検出できないという問題点を抱えていた。本研究では EIRIS により取得した位置情報と共に、状況に応じて位置検出システムの過去の情報から構築した確率ネットワーク、経験的ルール、スケジュール、書き置き情報を基にした推定による情報を表示する位置情報システムを実現した。位置情報システムでは位置検出が困難な際にも連続的に位置情報を提示することを可能としている。また本研究では、メンバーの行動傾向の取得が比較的容易な組織として、大学院の研究室を対象とした。本位置情報システムを7名から構成される研究グループにて試用し、実験を行った。実験では、各メンバーの位置情報を共有することによる利用者の影響と推定情報の精度についての2つを主な評価項目として行い、実験結果を基に評価分析することにより位置情報システムの有用性を示す。

### An Implementation of Position Information Inference Systems based on Probabilistic Reasoning

TAKAYUKI ITO<sup>†</sup> and KAZUHISA OHGURI<sup>††</sup>

In this paper, we present an implementation of a real-time position inference system for a research group. In a research group, knowing the other members' presence, predicting visitors, and holding real-time meetings are time-consuming but important tasks in everyday life. Thus, in this system, we realize a prediction mechanism for group members and visitors. We also develop a support mechanism for holding real-time meetings. In order to implement a real-time position inference system, we need to detect location information of group members. In our school building, EIRIS (ELPAS InfraRed Identification and Search System) has been installed, and we utilize EIRIS to detect members' positions. However, there exists a trade-off between the value and cost of detecting exact positions. Thus, we first try to complement EIRIS's detection ability by employing a stochastic method, probabilistic reasoning, and heuristic rules. Then, we implement a visitor prediction mechanism and a real-time meeting support mechanism. Our experiments demonstrate that our position inference mechanism is more effective than a simple prediction mechanism that employs only stochastic data. According to questionnaires, we could confirm the effect of our system. Furthermore, we discuss on privacy issues that are important in planning positioning system for people.

#### 1. はじめに

本論文では、実時間位置推定に基づく位置情報共有システム<sup>10)</sup>を提案する。組織としては、大学の小規模な研究室や研究グループを対象とする。組織では、日常生活において、重要ではあるが、時間を費やして

しまうようなタスクがある。例えば、レポートを提出したり、タスクを依頼したり、その他の仕事を実行するために、組織のメンバーの所在や現在の状況（タスクの依頼等に対応できるかどうか）を確認することがある。また、自分が誰かの部屋を訪問する際に前もって知らせたりすることがある。さらに自分の部屋に誰かが訪問することを前もって知ることも重要となる。例えば、自分の共同研究者が部屋に近付いてきた時、依頼されていた仕事の状況や、議論のための準備ができれば、組織としての仕事をスムーズに遂行できる。さらに、緊急の会議を開催する場合、その会議を適切

<sup>†</sup> 名古屋工業大学大学院情報工学専攻  
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

<sup>††</sup> 日立情報システムズ  
Hitachi Information Systems

な時間と場所で開催するために、メンバーの所在や現在の状況を知ることが重要である。



図1 バッチ



図2 リーダ

実時間位置推定システムを実現するために、まず、メンバーの位置情報を検出する必要がある。近年、多くの位置情報を検出するための技術が開発されている。例えば、GPS (Global Positioning System)<sup>6)</sup>がある。GPSは、カーナビゲーションシステム等に広く採用されている。なぜなら、GPSは屋外での位置情報の検出の精度が非常に高いためである。しかし、本研究の対象は、屋内のメンバーであるため、GPSをそのまま適用することはできない。そのため、屋内の位置情報を検出するシステムが、広く研究されている。例えば、Active Badge System, Batシステム (Sentient Computingシステム), RADAR, Cricket System, 等がある。以上の関連システムと、本研究で実装するシステムの相違は第5章で述べる。本研

究では、大学のビルディングに実際に導入されている位置検出システム EIRIS (ELPAS InfraRed Identification and Search System) を利用する。EIRISは、ELPAS (Electro-Optical Systems) 社で開発された位置情報検出システムである。各メンバーは、図1に示すバッチを持つ。バッチは赤外線のを図2で示すリーダーに4秒に1度送信する。本ビルディングは8階建てであり、各フロアの天井に、約20個のリーダーが設置されている。図3にあるフロアの地図を示す。二重丸はリーダーが設置されている場所を示している。各リーダーの上には、リーダーの固有のID (「3-1」や「3-2」など) が示されている。例えば、「3-1」は、3階の番号1のリーダーという意味を持つ。

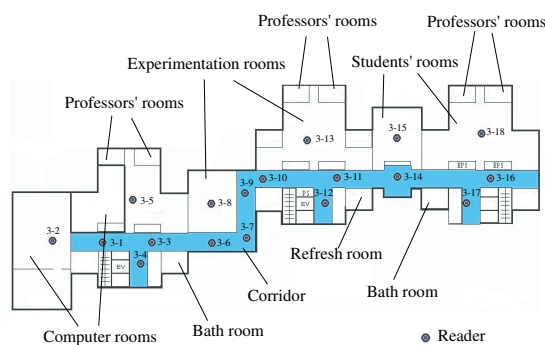


図3 ビルディングのフロアの例

本研究では、EIRISを利用して、実時間位置推定システムを実装している。本システムは、以下の2つの機構を持つ：(1) メンバーの居場所およびその状況を予測する機構。(2) ある部屋に近づくメンバーが存在することとそのメンバーの名前を知らせる機能。

(1) の機構を実現するために、本研究では、EIRISの位置検出機能を用いる。ただし、EIRISを用いたとしても、メンバーがバッチを正しく装着していない場合やリーダーとバッチの間に障害物がある場合、EIRISは位置情報の検出に失敗することがある。リーダーの数を増やすことによって、検出がしやすくなるが、リーダーの数を増やすとコストは大きくなる。もし、EIRIS以外のシステムを位置情報の検知に用いたとしても、そのコストは大きい。すなわち、正確な位置を検知する精度と精度を高めるためのコストはトレードオフの関係にある。一般に位置情報検出システムには同様の問題が起こりえる。従って、本研究では、まず、統計的手法、確率推論、および経験的ルールを用いて、EIRISの位置情報の検知の精度を高めることを目標とする。

(2)の機構では、メンバーの「数ステップ先」の位置を前もって予測する必要がある。上で示した(1)の機構では、本システムでは、各メンバーの現在の位置情報と、「1ステップ先」の予測を得ることができる。「1ステップ先」の予測とは、メンバーの次の位置を前もって予測することである。(2)の機構では、(1)の機構の「1ステップ先」の予測を再帰的に利用することによって、「数ステップ先」の位置の推定を実現する。

本論文では、1ステップ先や数ステップ先という表現を用いるが、1ステップの時間スケールは、実際の時間で4秒から3分である。1ステップの具体的な意味は、一つのリーダーで検知されたユーザが、そのリーダー、もしくは、隣接するリーダーに検知されるまでの間隔を意味する。EIRISでは、4秒に1度信号が送られるので、最短で4秒である。3分という時間は経験的な値である。ビルディングが8階建てのため、1階から8階までエレベータで移動した場合に、待ち時間を合わせて、最長3分程度はかかるため3分とした。特に実験対象としての研究室は、3階と4階に部屋が位置していたため、3分以内であれば、フロア間の移動も可能と経験的に判断した。対象とする建物によっては、最長時間を短く設定することも可能である。また、ユーザが動かない場合は、同じリーダーによって、3分以内に一度検知されると、それを1ステップとする。

本論文の構成を以下に示す。2.では関連研究と本研究の相違を明らかにする。3.では、実時間位置推定システムとその主な機能を示す。4.では、確率推論に基づく実時間位置推定機構を提案する。5.では、本実時間推定機構の実世界における有効性を評価実験の結果から論じる。6.では、まず、本研究のオリジナリティと一般性について論じ、次に、プライバシーに関する問題を議論する。最後に、6.で本論文をまとめ、今後の課題を示す。

## 2. 関連研究

本節では、関連研究を示し、本研究との相違点を明らかにする。まず、GPS<sup>6)</sup>は野外の位置情報の取得に広く用いられているが、本研究では、屋内での位置情報の取得に注目している。屋内での位置情報の取得に関しては以下のようなシステムが提案・実装されている。

Active Badge System<sup>4)14)</sup>は、赤外線を用いた屋内位置情報取得システムである。ユーザはバッジを持つ。バッジは、定期的リーダーにユニークなIDを送信する。ユーザは、PCディスプレイから位置情報を知

ることができる。Bat System (または Sentient Computing system)<sup>1)5)15)</sup>は、Active Badge Systemを改良したシステムであり、3次元の位置情報を取得可能である。RADAR<sup>2)</sup>は、無線によって、位置を検知するシステムである。Cricketシステム<sup>12)</sup>は、超音波によって、位置を検知するシステムである。以上のシステムと我々のアプローチの違いは、ユーザの位置を検出できなかった場合に、過去のデータをもとに、確率的に推論したり、経験的なルールを用いて、検出精度を高めるというアプローチはとっていないという点である。

確率推論の分野では、確率ネットワークを用いた予測に関して様々な研究が行われているBATMobileプロジェクト<sup>3)8)</sup>では、Dynamic Bayesian Network(DBN)を用いた自動自動車運転が提案されている。本システムにもDBNを適用することは可能だが、計算量が非常に多くなる。そこで、本研究では、単純な確率ネットワークを再帰的に扱うことによって、位置情報の推論を行った。単純な確率ネットワークを再帰的に用いた研究は、筆者らの知る限りでは、初めてである。また、DBNを用いた位置情報推論に関する研究も行われておらず、今後の課題の一つである。Coordinate<sup>7)</sup>は、Bayesianネットワークを用いて、ユーザのモデルを構築し、ユーザが在席か不在かを予測する。本システムとCoordinateの相違点を以下の示す。Coordinateは、位置検出システムが検出に失敗することは前提としていない。一方、本システムでは、位置検出システムが検出に失敗することに注目し、確率推論と経験的なルールを用いて、位置情報を推定している。

## 3. 研究グループのための実時間位置情報システム

図4に本システムの概要を示す。各ユーザはバッジを装着する。バッジは、赤外線の信号をリーダーに向かって送信する。リーダーからの情報は、一旦、EIRISサーバに蓄えられ、その後、本システムの位置推定サーバに送信される。位置推定サーバでは、集められた情報を元に、リアルタイムに位置情報が推定される。検出された情報と推定された情報が、ユーザのコンピュータのディスプレイに表示される。将来的には無線LAN機能を持つPDAからもアクセス可能とする予定である。

本システムでは、2種類のユーザインターフェースを提供する。一つは、Webベースのインターフェースである。もう一つは、アプリケーションベースのインターフェースである。図5は、Webベースのインターフェースを示している。Webベースのインター

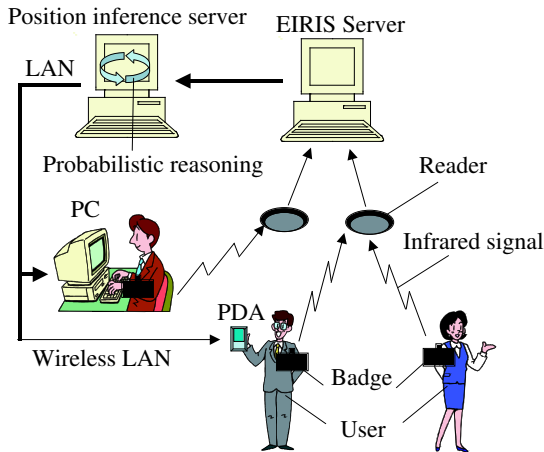


図4 システム概要

フェースは、Perl スクリプトによる CGI プログラムによって実現されている。ユーザは、自分の計算機上の Web ブラウザから、本システムにアクセスすることができ、ユーザの現在の位置情報を Web ページとして取得できる。本 Web ページは、60 秒に 1 度自動的に更新される。図 6 に、Web ベースインターフェースの詳細を示す。各メンバーの現在状況が、四角の中に表示されている。図 6 の左側はメンバーの写真である。図 6 の右側には、メンバーの名前、検出された位置情報、過去の位置情報の履歴を表示するページへのハイパーリンク、および、推定された位置情報が表示されている。図 6 の A には、メンバーの、検出された位置情報が示されている。ここでは、EIRIS が位置情報の検出に成功したら、その位置情報が表示される。EIRIS が位置情報の検出に失敗したら、最も最近の位置情報が表示される。図 6 の B のハイパーリンクをクリックすると、検出された位置情報と推定された位置情報の履歴ページを開くことができる。図 6 の C では、推定されたメンバーの位置情報が表示されている。

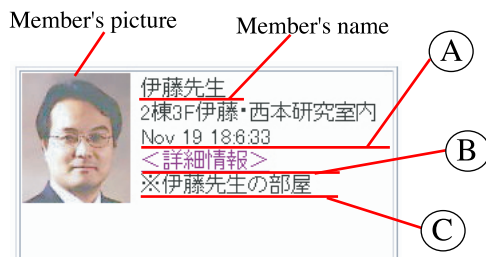


図6 Web ブラウザインターフェースの詳細

図7は、アプリケーションインターフェースを示し

ている。アプリケーションインターフェースは、C++によって実装されている。各ユーザは、本インターフェースを、各自の計算機上で実行する。本インターフェースは、各メンバーの現在状況を表示する。

1章で述べた通り、本システムでは、以下の2つのサービスを提供する：(1) メンバーの現在の位置と状況を予測するサービス、(2) メンバーのうちの誰かがユーザの部屋に訪問することと、それが誰かを前もって知らせるサービス。サービス(1)は、Web ベースのインターフェースとアプリケーションインターフェースで提供される。どちらのインターフェースでもメンバーの現在状況が連続的に表示される。サービス(2)は、アプリケーションインターフェースで提供される。本システムが、ユーザのオフィスへの訪問者を検知した場合、本システムは、信号をアプリケーションインターフェースに送信する。サービス(2)は特別な Web ベースインターフェースで提供される。本インターフェースは、各メンバーの居室の確率を元に、いつどこで会議を開催するのが最も重要かを提案する。

#### 4. 確率推論に基づく実時間位置情報推定

##### 4.1 システムの推定機能

本システムでは、ユーザの現在位置の推定と、ユーザの数分後の位置の推定を行う。以下、ユーザの現在位置の推定方法と、数分後の位置の推定方法を示す。

##### ユーザの現在位置の推定

ユーザの現在位置の推定手法について述べる。第1章で述べたように、EIRIS 等の一般的な位置情報検出システムは位置検出に失敗することが多い。本研究では、EIRIS が現在位置の検出に失敗した場合、以下の3つの場合に分けて、ユーザの現在の位置情報を推定する：

(ケース1) EIRIS が、現在のポジションを検出できず、過去の二つのポジションを検出できている場合、本システムでは、単純な確率ネットワークに基づく方法を適用する。過去二つのポジションとは、最も最近(最後に)検出された(リーダの)位置  $l_1$  と、 $l_1$  の1ステップ前に検出された(リーダの)位置  $l_2$  のことを言う。具体的な時間としては、8秒から2分程度の間隔である。詳細は3.2章で示す。

(ケース2) (ケース1)にあてはまらず、EIRIS がある期間(具体的には3分間)、位置情報の検出に失敗した場合、訓練データに基づいて統計的に現在の位置を推定する。本論文では、過去に蓄えられた位置データを訓練データと呼ぶ。本論文で示す実験では、



図 5 Web ブラウザインターフェース



図 7 アプリケーションインターフェース

およそ2ヶ月間の訓練例を収集した。EIRISが、過去の最新の二つの位置情報の検出に失敗した場合、本システムは、過去に蓄えられた位置データから現在のポジションを推定する。ここでは、本システムは、あるメンバーがある場所に、現在の曜日と時間に、存在す

る確率を計算する。確率はビル内のすべてのリーダに関して求められ、確率の高いリーダを推定された位置とする。

(ケース3) (ケース1) および (ケース2) にあてはまらず、EIRISがある期間位置情報の検出に失敗

し、かつ、EIRIS が最近検出した位置が、リーダが設置されていない部屋に隣接したリーダの場合、本システムでは、経験ルールを用いる。すなわち、メンバーは、リーダが設置されていない部屋にいと推定する。教官のオフィスなど、リーダが設置されていない場所もある。あるメンバーに関して、最近検出された位置情報が、リーダを持たない部屋 A に隣接した場所であり、かつ、そのメンバーの位置情報が検出されていない場合、本システムでは、経験的に、メンバーは、部屋 A にいと推定する。例えば、ある教授の最新の検出された位置情報が、その教授の部屋の隣の部屋であり、かつ、その教授が EIRIS によって検出されていない場合、本システムは経験的に、その教授が自分の部屋にいと推定する。本システムを導入したビルディングには、リーダが設置されていない場所として、教官のオフィス、トイレ、リフレッシュルーム（休憩室）などがある。

#### ユーザの数分後先の位置の推定

ユーザの数分後先の位置の推定手法について述べる。本手法は、訪問者が近付いていることを予測するために、用いられる。ここでは、複数ステップ先の位置を推定するために、確率ネットワークを用いる。確率ネットワークを再帰的に用いることによって、近付いてくる訪問者に関して、再帰的な推定を行う。推定結果が、システムを使用しているユーザの部屋になるまで再帰的に計算が行われる。ただし推定回数には制限を設けて、推定を繰り返しても部屋に達しない場合はこの推定方法における情報は無いものとする。詳細は 3.2 章で述べる。

#### 4.2 位置推定手法の詳細

本論文では、位置推定するために、確率ネットワーク、スケジュール、及び書置き情報を用いた。本節では、各手法の詳細と、どのような場合、どの手法が使われたかを以下に示す。

まず、どのような場合、どの手法が用いられるかについてのフローチャートを図 8 に示す。図 8 における、各推定手法の詳細を以下に示す。

##### 【確率ネットワーク】

確率ネットワークを用いた位置情報の推定には、1 ステップ推定と複数ステップ推定がある。以下で、1 ステップ推定と複数ステップ推定について示す。

(1 ステップ推定) 1 ステップ推定とは、ユーザの過去に検出された位置情報から、ユーザの現在 (次の) 位置情報 (検出されるであろうセンサー) を推定する推定手法である。最近検出された二つの位置情報に基づいて、現在の位置を推定するために、本システ

ムでは、図 9 に示す単純な確率ネットワークを構築する。また、推定の精度を増加するために、時間や曜日のデータも用いる。「二つ」の過去の位置情報を用いる理由は、最近の過去の情報が二つ分かれば、メンバーの動きの「方向」を判断できるからである。過去二つの位置とは、最も最近 (最後に) 検出された (リーダの) 位置  $l_1$  と、 $l_1$  の 1 ステップ前に検出された (リーダの) 位置  $l_2$  のことを言う。具体的な時間としては、8 秒から 2 分程度の間隔である。

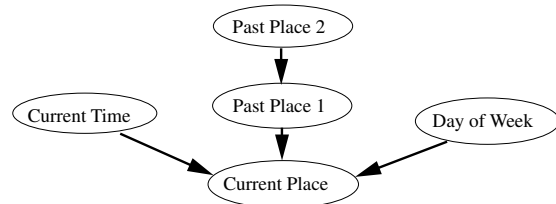


図 9 ベイジアンネットワーク

ここで、確率ネットワークを適用するために、リーダの設置場所に関するグラフを定義する。グラフは、ノードとリンクから構成される。各ノードはリーダで検出されたという事象、曜日、時間などを表す。各リンクは事象間の因果関係を表す。本グラフに基づいて、確率ネットワークを構築する。例えば、以下の状況を想定する。検出された最新の過去の二つの位置を「3-9」（リーダ、3-9 を意味する）と「3-7」とする。現在時刻を 11:35、すなわち、10:00 から 12:00 の間とする。曜日は月曜日とする。以上の状況で、(1) 式に基づいて、最後に検出された位置 (PastPlace1) に隣接する位置すべてを CurrentPlace としてその確率をそれぞれ計算し、最も高い確率を持つ位置を現在位置  $p$  と推定する。

$$p = \arg \max_{s \in S} P(\text{CurrentPlace} = s | \text{PastPlace1} = 3-9, \text{PastPlace2} = 3-7, \text{CurrentTime} = 10-12, \text{DayOfWeek} = \text{mon}), \quad (1)$$

ここで、 $S = \{3-7, 3-8, 3-9, 3-10\}$  である。

(複数ステップ推定) 複数ステップ推定とは、ユーザの過去に検出された位置情報から、ユーザの複数ステップ先の位置情報 (検出されると考えられるリーダ) を推定する手法である。まず、複数ステップ推定では、確率ネットワークを用いるため、リーダの設置場所に関するグラフを定義する。グラフは、ノードとリンクから構成される。各ノードはリーダを表します。各リンクは、リーダ間の移動を表す。本グラフに基づいて、



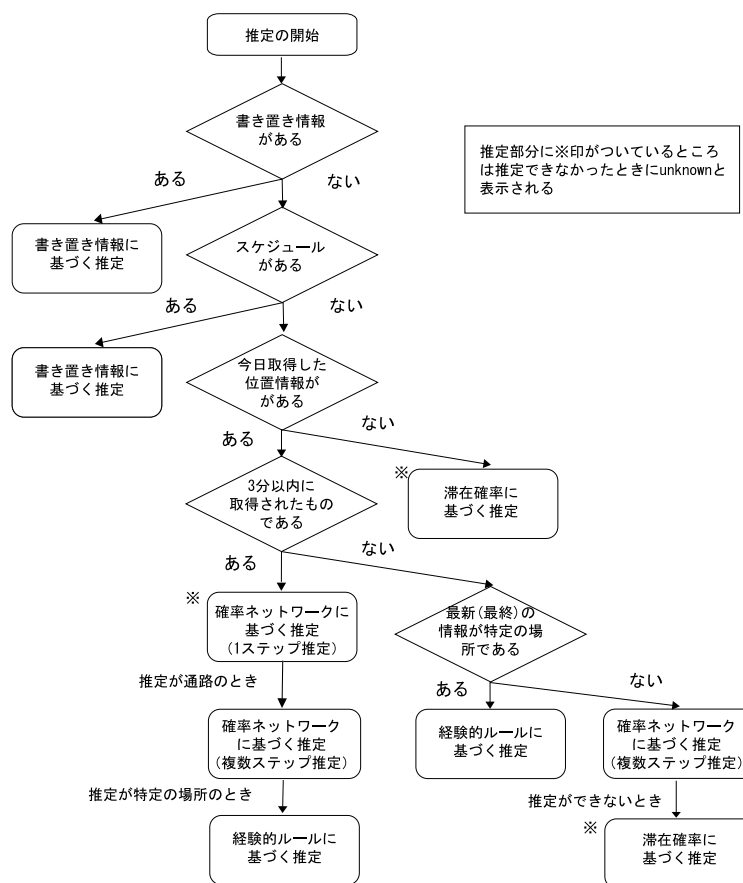


図 8 状況に応じた位置推定手法の選択

確率ネットワークを構築する。この場合、グラフが循環グラフになる可能性がある。確率ネットワークにおいて、各ノードの確率の更新をするための計算は、循環グラフを扱えない、または計算量が非常に大きくなるといわれている<sup>11)13)</sup>。つまり、なるべく実時間で位置情報を表示することを目的としているため、確率ネットワークの既存計算手法をそのまま適用しても計算量の面で好ましくない。そこで、本研究では、前節で提案した1ステップ推定を再帰的に用いる手法を提案する。図10は、本システムで用いている再帰的な推論の例である。

まず、訪問者の現在の位置と最近の過去の位置に基づいて次の位置を推定する。次に、次の位置の候補の中から、最も確率の高い位置を、推定された次の位置とする。例えば、図10では、現在の位置”3-9”と最近の過去の位置”3-7”に基づいて、”3-10”が最も確率が高いと推定できる。さらに、その訪問者の現在の位置と、すでに推定した次の位置に基づ

いて、次の次の位置を推定する。以上のように本システムでは、近付いてくる訪問者に関して、再帰的な推定を行う。推定結果が、システムを使用しているユーザの部屋になるまで再帰的に計算が行われる。ただし推定回数には制限を設けて、推定を繰り返しても部屋に達しない場合はこの推定方法における情報は無いものとする。

#### 【経験ルール】

経験ルールに基づく推定は最新のデータ（最後に取得されたデータ）が特定の場所であり、かつ、一定時間以上データが得られていない場合に行う。

具体的に説明すると、実験を行った建物には、ほとんどの部屋や廊下にリーダが設置されているが、いくつかの場所にはリーダが設置されていない。そこで、まず、リーダが設置されていない場所の最も近くにあるリーダの場所を特定の場所とする。特定の場所で、データが取得されたのを最後に、データの取得が無くなった時は、リーダが設置されていない場所にいると

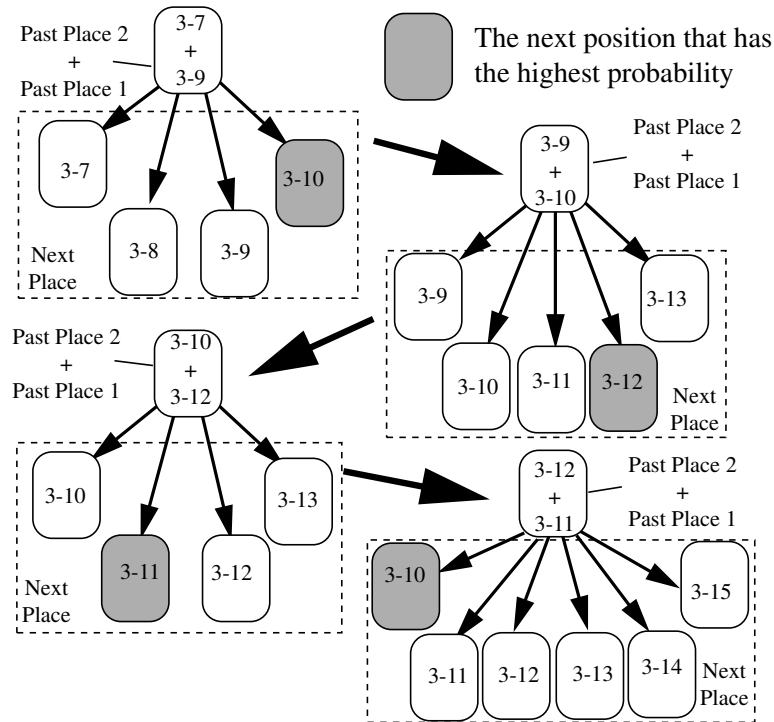


図 10 再帰的な確率推論

経験的に推定できる。例を挙げれば、玄関ホールにリーダはあっても、その先で建物の外には設置されていない。そこで玄関でのデータ取得を最後にデータの取得が無い場合は建物の外という経験ルールを作成する。実際に作成したルールは、本学の建物の構造を考慮した物や、実験の対象とした研究室のメンバーがとりやすい行動を想定したものが約80個ある。以上のように作成されたルールが、図8において、最新の取得データがルールの適用される特定の場所であり、かつ一定時間以上データが得られていない場合、あるいは複数ステップ推定が最新データがルールの適用される場所である場合に、適用される。

#### 【スケジュール情報】

本システムでは、図11に示すような個人的なスケジュールを入力するインターフェースを用意している。スケジュール情報に基づいて、スケジュールに関連する位置情報を取得することによって、センサー等を用いることなく、ある時間の位置情報を推定可能となる。ただし、スケジュール情報は確実な情報としては扱わず、推定情報としてユーザに提示する。理由を以下に示す。

- スケジュール情報は事前に入力されていたとしても、実際にその通りに行われるわけではないことがある。

**情報の更新**

あなたの名前: 大栗和久

・予定を入力してください。12日以上の場合は日付を両方入力してください。その場合時間は入力できません  
 ・場所を入力する際に学内の場所を指定したときは、学内を選んで隣のフォームに入力してください  
 ・時間、予定、場所の入力必須

月 日 時 分 ~ 月 日

予定:  場所:

今までにあなたが入力したものでこれからの予定は以下の通りです(削除する項目があればチェックしてください)

○ 1月24日(10時00分 ~ 12時00分)ゼミ

図 11 スケジュールの入力画面

- スケジュールの開始時間や終了時間は必ずしもその通りに実行されない。
- スケジュールが行われている間にその場所を離れることがある。
- またスケジュールは定期的に入力する必要がある。一度入力したものでも、もしスケジュールが変更されたり、無くなった場合にはその都度更新させる必要があるため、実際に入力されているスケジュール自体も必ずしも信用できる情報とは言えない。

#### 【書き置き情報】

事前に入力されている書き置き情報に基づいて推定を行う。書き置き情報は、自ら所在する場所の情報を与えておくためのシステムを用いて記録された情報であ



る。書置き情報を登録するシステムは、大学の研究室などで一般的に良く用いられるシステムである。本研究室では、Web を用いて構築されており、習慣的に学生や教官が用いている。図 12 にインターフェースを示す。ただし、ユーザの記録忘れ等が原因で、必ずしも正しい情報が記録されているとは限らないため、書置き情報についても推定情報として扱う。

## 5. 実験と評価

### 5.1 実験設定

本章では、本システムに関する実験と評価を示す。本実験では、以下の2つのポイントに注目する。

- 提案した機構による位置情報の予測の正確さ（定量的な評価）。
- グループにおいて位置情報のデータを共有することによる効果（定性的な評価）。

本実験では、大学内の研究室における6名の大学院生と1名の教官を被験者とした。研究室のレイアウトは、主に、一つの教官室、二つの学生の部屋、および一つの実験・セミナールームから構成されている。教官部屋には、EIRIS のリーダーは設置されていない。学生の部屋および実験・セミナールームには、EIRIS のリーダーが設置されている。2003年1月17日から2003年1月31日の2週間を実験期間とした。訓練データとして、3人の被験者(a, b, および, c)に関しては、2002年11月12日からの約2ヶ月を集めた。4人の被験者(d, e, f, および, g)に関しては、2003年1月7日からの約10日間を集めた。

図 13, 図 14, および, 図 15 で、データ 1 とデータ 2 は被験者 a, データ 7 とデータ 8 は被験者 b, および, データ 12 とデータ 13 は被験者 c である。図 13, 図 14, および, 図 15 で、データ 3 とデータ 4 は被験者 d, データ 5 とデータ 6 は被験者 e, データ 9 は被験者 f, および, データ 10 とデータ 11 は被験者 g で表す。

各被験者は、各自のラップトップ計算機またはデスクトップ計算機から本システムにアクセス可能とした。さらに、本実験では、各学生部屋に二つの共有計算機を提供した。本実験を始まる前に、各被験者には、システムの機能と使い方を説明した。本システムの位置情報の予測の正確さを明らかにするために、被験者をランダムに選択して、その被験者に対し、ランダムに選択した一日に関して、その日の翌日に実際の位置を確認した。具体的には実験期間の第2週目のある一日に2時間を選択して、予測データのログを20毎に収集した。そして、インタビューで得られた実際の位置

情報データとログを比較した。

推定した位置情報の精度を比較するためのメンバーの実際の位置を得るために、上の2時間の期間の後にインタビューを実施した。被験者らには、インタビューをいつ行うかは伝えなかった。インタビューでは、被験者に対してログの一つ一つに関して以下の3つの質問をした。以下の質問に対する答えを被験者の実際の位置とした。

質問1：「本システムで検知されなかった、または、予測されなかった位置に移動したか。もしそうならどこにいたか。」

質問2：「対象とする実験期間中（2時間）、バッチを装着していたか。」

質問3：「対象とする実験期間中（2時間）、バッチを装着していないなら、どこにいたか」

質問2によって、被験者がバッチをつけていたかどうかを確認した。もし、被験者がバッチを装着していないにも関わらず、本システムが被験者の位置を予測または検知していた場合、被験者がバッチを実際には机の上に置いていた、などの情報が分かる。質問3で、バッチを装着していなかった場合の位置を確認する。

本実験では、以下の2つの理由から、曜日に関する情報を確率ネットワークには適用しなかった。第1に、実験期間が長くないためである。もし、曜日に関する情報を考慮した場合、データ数が極めて少なくなる。第2に、実験期間中、スケジュールの決まった講義がなかったからである。つまり、被験者7名中6名の学生にとって毎週決まった活動がなかったためである。今後の課題として、曜日情報、一か月のうちの何日目かの情報、何月かという情報等についても確率ネットワークに適用することがある。ここでは、被験者の過去の位置情報や被験者のスケジュールなど基本的な情報のみ注目した。

グループで位置データを共有することの影響の解析を行うために、以下の二つのアンケートを実施した。一つ目のアンケートは、実験中、いつでも答えても良いというアンケートである。もう一つのアンケートは、実験期間終了後に行った。

### 5.2 予測データの精度

本章では、予測されたデータと被験者の実際の行動の履歴を比較する。まず、経験的なルールと確率ネットワークの両方を用いた場合の効果を明らかにするために、以下の二つの比較を実行した。

**【比較1】** 本システムのすべての手法（経験的なルール、確率ネットワーク、および、単純な統計的推定）を用いた場合の予測データと実際の位置

## 書き置き情報の更新

変更場所を決めてください  
別の場所を選ぶ場合は部屋の場所を、その場所を登録するときはチェックを入れて下さい

学内(知識棟内)     学内(知識棟外)     学外     帰宅     食事(学外)  
 その他の場所    
 情報の削除

図 12 書き置き情報の入力画面

データ。

**【比較2】** 本システムの単純な統計的推定を用いた場合の予測データと実際の位置データ。

単純な統計的推定とは、経験的なルールや確率ネットワークを全く利用せず、訓練データのみから統計的に位置情報を推定する方法を意味する。

図 13 に結果を示す。図 13 の縦軸は精度を表し、横軸はデータの種類を表す。ここでは、7人の被験者から集めた13のデータを示す。ほとんどのケースに関して、比較1による精度は、比較2による精度よりも高いことが分かる。本結果は、極めて自然な結果である。なぜなら、比較1は、すべての手法を用いているからである。データ9とデータ6に関しては、比較2の精度の方が比較1の精度よりも高くなっている。理由の一つは、データ9とデータ6の被験者の訓練データが十分でなかったことである。

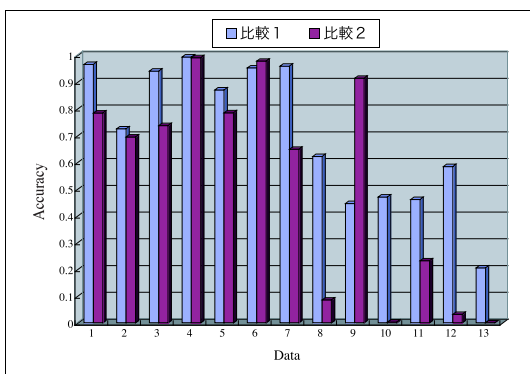


図 13 比較1と比較2

データ8、データ10、データ11、データ12、及びデータ13では、比較2の精度は極めて小さい。理由は、被験者のバッチ装着時間が短かったこと、および被験者の部屋がEIRISリーダを設定されていなかったことがあげられる。すなわち、これらの被験者に関しては、単純な統計的な手法よりは、経験的なルールの

方が効果的であったことが分かる。

比較1の平均精度は0.707であり、比較2の平均精度は0.529である。明らかに、すべての手法（経験的なルール、確率的推論手法、および、統計的な手法）を使った場合のほうが、統計的な手法のみを用いた場合よりも、精度は高い。

以上の比較1と比較2の結果には、被験者が大学のビルディングの外にいる場合のデータも含まれている。もともとEIRISはビルディングの外の位置情報は検知することができない。そこで、2番目として、本論文では、各被験者がビルディングの中にいる場合に関して、さらに二つの比較を行う。

**【比較3】** 被験者がビルディング内に存在する場合の、本システムのすべての手法（経験的なルール、確率ネットワーク、および、単純な統計的推定）を用いた場合の予測データと実際の位置データ。

**【比較4】** 被験者がビルディング内に存在する場合の、本システムの単純な統計的推定を用いた場合の予測データと実際の位置データ。

図 14 に、比較3と比較4の結果を示す。

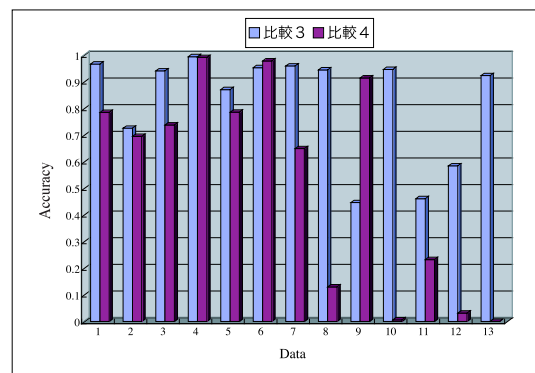


図 14 比較3と比較4

比較3の平均精度は0.825であり、比較4の平均精度は0.533である。比較3と比較4の精度は、比較

1と比較2の精度よりもそれぞれ高い。これは、ビルディング中のデータのみ注目したためである。また、この場合も、すべての手法（経験的ルール、確率的推論手法、および、統計的な手法）を使った場合のほうが、統計的な手法のみを用いた場合よりも、精度は高い。

さらに、本研究では、ビルディングの中でも EIRIS が導入されている場所で集められたデータのみ注目した比較も実行した。例えば、トイレや教官の部屋は、ビルディングの中にあるが、EIRIS は導入されていない。

**【比較5】** 被験者がビルディング内かつ EIRIS が導入されている場所に存在する場合、本システムのすべての手法（経験的ルール、確率ネットワーク、および、単純な統計的推定）を用いた場合の予測データと実際の位置データ。

**【比較6】** 被験者がビルディング内かつ EIRIS が導入されている場所に存在する場合、本システムの単純な統計的推定を用いた場合の予測データと実際の位置データ

図 15 は、比較5と比較6の結果を示している。比較5の精度は、比較1と比較3よりも高く、比較6の精度は、比較2と比較4よりも高い。また、この場合も、すべての手法（経験的ルール、確率的推論手法、および、統計的な手法）を使った場合のほうが、統計的な手法のみを用いた場合よりも、精度は高い。

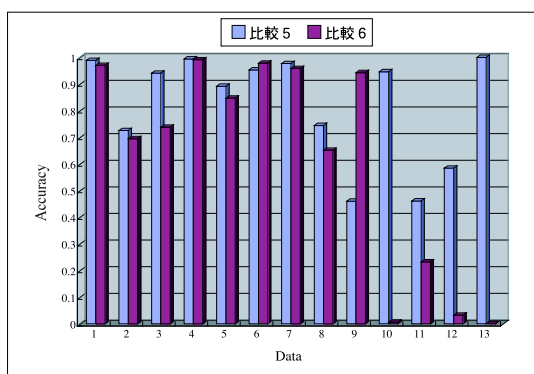


図 15 比較5と比較6

以上の実験より、どの場合もすべての手法を用いた場合、平均 0.7 以上の精度で位置情報を推定できた。特に EIRIS が導入された場所に限定すれば、本手法は 0.8 以上の精度で位置情報を推定できる。以上の結果は、EIRIS で位置情報が取得できなかった場合に、8 割以上の確率で位置情報を推定できることを示して

いる。経験的なルールや確率推論手法が適切に機能した理由の一つは、被験者（大学院生や教官）は、ビルディングの中でほぼ日常的に同じような移動を繰り返している点がある。

### 5.3 実験結果の信頼性について

前節では、本手法によって位置情報の推定性能が向上しているという実験結果を得た。ここで、実験結果に関して、各実験結果に対して、その信頼性を検証するために、t 検定を行った。

比較1と比較2に関して、t 検定の結果を以下に示す。比較1の平均は 0.708、分散は 0.07 である。比較2の平均は 0.530、分散は 0.156 である。ここで、t 値は 1.357、p 値（片側）は 0.09、および p 値（両側）は 0.189 である。すなわち、片側検定で 10% 水準で有為であることが分かる。

比較3と比較4に関して、t 検定の結果を以下に示す。比較3の平均は 0.825、分散は 0.04 である。比較4の平均は 0.533、分散は 0.152 である。ここで、t 値は 2.390、p 値（片側）は 0.01、および p 値（両側）は 0.02 である。すなわち、片側検定および両側検定で 5% 水準で有為である。

比較5と比較6に関して、t 検定の結果を以下に示す。比較5の平均は 0.820、分散は 0.04 である。比較6の平均は 0.618、分散は 0.161 である。ここで、t 値は 1.617、p 値（片側）は 0.06、および p 値（両側）は 0.12 である。すなわち、片側検定で 10% 水準で有為であることが分かる。

以上の検定結果の信頼性に関する検定結果をまとめると、比較1と比較2、および比較5と比較6に関しては、片側検定で 10% 水準で有為である。また、比較3と比較4に関しては、片側検定および両側検定で、5% 水準で有為である。実験結果は、t 検定によって検証した結果、十分に信頼できる値である。また本結果から、実験期間をより長くできれば、より精度の高い結果を得ることが期待できる。

## 6. 議 論

### 6.1 オリジナリティと一般性に関して

本研究のオリジナリティとその一般性を以下の (1)、(2)、および (3) に示す。

(1) 位置情報システムをインフラレベルで構築する研究は、Active Badge System<sup>4)</sup>14)、Bat System (または Sentient Computing system)<sup>1)</sup>5)15)、RADAR<sup>2)</sup>、及び、Cricket システム<sup>12)</sup>があるが、どれも確率ネットワークなどの推論機構を具体的に用いた研究例ではない。本研究では、初めて、確率ネット

ワークを位置検知システムに応用している。すなわち、バッチとリーダーを使った位置検知システムにおいて、リーダーを中心とした確率ネットワークの構築手法そのものと、確率ネットワークを用いた推論手法がオリジナルである。また、バッチとリーダーを用いたスタイルは、上記の Active Badge System<sup>4)</sup><sup>14)</sup> や Bat System (または Sentient Computing system)<sup>1)</sup><sup>5)</sup><sup>15)</sup> で採用されており、EIRIS だけではない。すなわち、本論文で示した確率ネットワークの構築手法は、上記の位置検知システムにも応用可能な手法であり、十分に一般性があると言える。

(2) 位置検知システムにおいて頻繁に起こる、リーダーがバッチのシグナルを受信できなかった場合の位置検知の失敗に対して、確率ネットワークによって補完できる技術を示した点がオリジナルである。関連の位置検知システムはセンサーの数やリーダーとセンサー間の通信性能の改善を行えば、より正確に位置情報の取得が可能になるが、多くのコストがかかる。すなわち、一般に、精度の高い位置情報検出とコストはトレードオフの関係がある。本研究では、確率ネットワーク等のソフトウェア技術を導入することにより、トレードオフを解消するための一手法を提案し、その有用性を実験を通して示した。

(3) 単純な確率ネットワークの再帰的な適用による推論を示した点がオリジナルである。一般に、循環のある確率ネットワークにおける推論計算は、指数関数的な計算コストが必要と言われている。本システムでは、実時間で、位置情報をユーザに提示することを目標としているため、循環のある確率ネットワーク(3章で示したリーダーの間をリンクで結んだネットワーク)の計算を、単純な確率ネットワークを繰り返し適用するというヒューリスティックによって計算を行った。実験結果から、本手法のような経験的な手法でも位置情報の推定には充分有効であることが示された。

## 7. おわりに

本論文では、組織における実時間位置情報推定システムを提案した。組織内の位置情報を共有することにより、相手の状況を配慮したコミュニケーションやコラボレーションの方法を選択することが可能となり、組織活動をより効果的に支援できる。一般に、位置情報取得技術には、状況によっては位置検出ができないという問題点がある。また、より正確な検出と、そのコストにはトレードオフが存在する。本研究で用いた位置検出システム EIRIS も、同様に利用状況によっては位置検出できないという問題点があった。そこで本

研究では EIRIS により取得した位置情報と共に、状況に応じて位置検出システムの過去の情報から構築した確率ネットワーク、経験的ルール、スケジュール、および書き置き情報を基にした推定による情報を表示する位置情報システムを実現した。位置情報システムでは位置検出が困難な際にも連続的に位置情報を提示する。また本研究では、メンバーの行動傾向の取得が比較的容易な組織として、大学院の研究室を対象とした。本システムを 10 名から構成される研究室内にて試用し、実験を行った。実験では、各メンバーの位置情報を共有することによる利用者の影響と推定情報の精度についての 2 つを主な評価項目として行い、本システムの有用性を示した。

一般に、位置検知システムでは、プライバシーの問題を考慮する必要がある。プライバシーの問題に関して、位置検知システムの設計者は、それぞれ、異なったポリシーを持っている。例えば、Active Badge System<sup>14)</sup> では、2 週間の試用の後、多くの被験者が、自ら進んでバッチを装着した、と報告している。さらに、位置を検出されたくない人は、バッチを外しておけばいい、と主張している。しかし、バッチを外したりつけたりするのは、効率が悪い。バッチを外すことなくプライバシーを適切に公開・非公開にする方式が今後の課題である。その第 1 ステップとして、本研究では、プライバシーの階層モデルを提案している<sup>9)</sup>。

**謝辞** 筆者らが在任中、本研究を実現する機会を与えて頂きました北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科藤進教授に感謝の意を表します。また、実験のための機材の提供やご協力を賜った北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センターのスタッフと学生の皆様方に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Mike Addlesee, Rupert Curwen, Steve Hodges, Joe Newman, Pete Steggles, Andy Ward, and Andy Hopper. Implementing a sentient computing system. *IEEE Computer*, 34(8):50-56, Aug 2001.
- 2) Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan. Radar: An in-building rf-based user location and tracking system. In *Proc. of IEEE Inforcom 2000*, pages 775 - 784, 2000.
- 3) Jeff Forbes, Tim Huang, Keiji Kanazawa, and Stuart Russell. The BATmobile: Towards a bayesian automated taxi. In *Proc. of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI95)*, pages 1878-1885, 1995.
- 4) Andy Harter and Andy Hopper. A distributed

- location system for the active office. *IEEE Network*, 8(1), 1994.
- 5) Andy Harter, Andy Hopper, Pete Steggle, Andy Ward, and Paul Webster. The anatomy of a context-aware application. *Wireless Networks*, 8:187–197, 2002.
  - 6) Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and James Collins. *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer Verlag, 2000.
  - 7) Eric Horvitz, Paul Koch, Carl M. Kadie, and Andy Jacobs. Coordinate: Probabilistic forecasting of presence and availability. In *Proc. of the 18th Conference on Uncertainty and Artificial Intelligence (UAI02)*, pages 224–233, 2002.
  - 8) Timothy Huang and Stuart Russell. Object identification in a bayesian context. In *the Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI97)*, 1997.
  - 9) 平田敏之, 大栗和久, 伊藤孝行, "ユーザの判断に基づくプライバシー保護を可能とする位置情報表示インターフェースの実現", 第 65 回情報処理学会全国大会予行集第 4 分冊, pp167-168, 2003.
  - 10) 大栗和久, 伊藤孝行, "確率推論に基づく組織における位置情報推定システムの実現", 第 65 回情報処理学会全国大会予稿集第 3 分冊, pp111-112, 2003 (学生奨励賞).
  - 11) Judea Pearl. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. Morgan kaufmann Publishers, Inc., 1988.
  - 12) Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan. The cricket location-support system. In *Proc. of 6th International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom00)*, pages 32–43. ACM Press, 2000.
  - 13) Stuart J. Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence : A Modern Approach*. Prentice-Hall, Inc., 1995.
  - 14) Roy Want, Andy Hopper, Veronica Falcao, and Jon Gibbons. The active badge location system. *ACM Transactions on Information Systems*, pages 91–102, Jan. 1992.
  - 15) Andy Ward, Alan Jones, and Andy Hopper. A new location techniques for the active office. *IEEE Personal Communications*, 4(5):42–47, oct 1997.

(平成 12 年 2 月 4 日受付)

(平成 12 年 5 月 11 日採録)

#### 伊藤 孝行 (正会員)



1995 年名古屋工業大学知能情報システム学科卒業。1997 年同大学大学院工学研究科博士前期課程電気情報工学専攻修了。2000 年同大学大学院工学研究科博士後期課程電気情報工学専攻修了。博士(工学)。1999 年～2001 年日本学術振興会特別研究員(DC2,PD)。2000 年～2001 年南カリフォルニア大学情報科学研究所(USC/ISI)客員研究員。2001 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター助教授。2003 年より名古屋工業大学大学院工学研究科助教授。現在に至る。マルチエージェントシステム, 電子商取引支援, オークション理論に興味を持つ。AAAI, ACM, 人工知能学会, 電気情報通信学会, 日本ソフトウェア科学会, 計測自動制御学会各会員。

#### 大栗 和久 (正会員)



2001 年名古屋工業大学工学部生産システム学科卒業。2003 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科修了。2003 年株式会社日立情報システムズ入社。事業企画開発本部所属。現在に至る。