

ユビキタス環境での状態系列モデルを用いたユーザ支援システム

磯田 佳徳[†] 倉掛 正治[†] 石黒 浩^{††}

人やモノの位置をユーザの状況として利用することで、実世界でのユーザの活動を支援するさまざまなアプリケーションの検討や実装がこれまで行われてきた。しかし、より高度な支援を行うためには、人やモノの空間的な関係だけでなく、時間的な関係も考慮する必要がある。本論文では、ユビキタス実験環境内のセンサ、および RFID タグの情報を用いて、人とモノとの時空間的な関係を記述するユーザの状態系列表現を導入する。次に、この表現を用いた典型的な状態系列のモデル化とモデルのあてはめによる状態認識に基づきユーザ支援を行うシステムについて述べる。提案する状態系列表現は、動作のような短時間の時系列活動も日々の家庭内の雑用のような長時間にわたる活動も同様に表現できることに特徴がある。また、人とモノの時空間的な関係を表すユーザの状態の認識は、多数の教示データから C4.5 のアルゴリズムによって生成された判別木によって判別される。構築した実験ハウス内でのプロトタイプシステムにおいて、ユーザ支援のケースを想定した状態判別の性能評価を行い、その有効性を確認した。

A User Activity Assistance System Using State-sequence Models in Ubiquitous Environment

YOSHINORI ISODA,[†] SHOJI KURAKAKE[†] and HIROSHI ISHIGURO^{††}

There has been much research on user activity assistance applications using the location of users and objects as context. However people's activities are described in terms of time sequence aspect in addition to location aspect. Therefore, it is important for an enhanced user activity assistance system to consider space-time constraint as the context of users. In this paper, we have proposed a user activity assistance system that uses a situation state sequence description scheme. In the scheme each state is described as the space-time relationship between users and objects in the real world. Typical state sequences are stored as the models of user activities. We have developed a ubiquitous experimental test-bed house in which various sensors are embedded and RFID tags are attached to objects there. Each state is detected by the analysis of the output of the sensors and the RFID tags. The context of a user is obtained by the fitting of the state sequence model based on a decision tree generated by a C4.5 algorithm. We have evaluated the performance of the proposed system in the test-bed house and concluded that our system can effectively obtain the space-time context of a user in various situations.

1. はじめに

近年、ユーザの身の回りに多数の機器やセンサ（以降、デバイス）が存在するユビキタス環境に注目が集まっている。そこでは、実世界に多数のデバイスを存在させ、情報通信機能を埋め込むことで、いつでも、どこでも、ユーザが適切にサービスを利用できることがその実現目標となっている。

ユーザに対して適切なサービスを提供するためには、

ユーザのおかれた状況の把握が重要である。ユーザの状況を考慮したコンテキストウェアなシステムの多くは、ユーザの状況として主にユーザの位置をセンサによって検出し、状況把握を行っている。しかし、ユーザが実世界で活動する場合、ユーザの位置が変化するだけでなく、ユーザとさまざまなモノ（家電、機器、建物、空間等を含む）との相対的な位置関係も変化する。このユーザとモノとの関係に関する情報を利用すれば、ユーザのより詳細な状況を把握することが可能となる。人とモノとの相対的な位置関係を取得するデバイスとして RFID タグ等の小型無線タグが注目されている。環境中のモノにタグを埋め込むことで、モノにユーザが近づいたときにそのモノに関する情報を通知する等のサービスをユーザは受けることが可能と

[†] NTTドコモマルチメディア研究所
Multimedia Laboratories, NTT DoCoMo, Inc.

^{††} 大阪大学大学院工学研究科知能・機能創生工学専攻
Department of Adaptive Machine Systems, Osaka
University

なる。

しかし、ユーザがモノに近づいたという空間的なユーザとモノとの関係性を考慮しただけでは、ユーザの状況把握を行うためにはまだ十分ではない。ユーザは実世界のモノと空間的にも時間的にも関係を持ちながら活動を行っている。我々は、モノとユーザとの空間的な関係だけでなく、時間的な関係も考慮して、ユーザの行動をモデル化、認識することが重要だと考える。特に短時間での連続した動作のようなマイクロな時系列状態だけでなく、1日の人間の活動のようなマクロな状態系列も扱えることが重要である。本論文では、時空間的な人とモノとの関係を記述するユーザの状態モデルをユビキタス環境のセンサ、および RFID タグを利用して獲得し、ユーザの状況把握とユーザ支援を行うシステムを提案する。

プロトタイプシステムの実験環境として、一般の住宅と同等の建物において、壁と天井にカメラ、床に感圧センサを複数配置し、人、モノに RFID タグを付与したユビキタス環境を構築した。このカメラ、および床の感圧センサによって、建物内を移動するユーザの位置追跡を行う。また、検出されたユーザ位置とモノに付与した RFID タグの時空間的な関係をユーザの状態として表現する。そして、実際にユーザが環境内で行動した際のデータを教示データとし、学習によって状態の判別木を生成することで、ユーザの状態をロバストに判別する。このユーザの状態を時系列的に記録し、あらかじめ用意したユーザの状態系列のモデルにあてはめることで、ユーザの状況を把握し、適切なユーザ支援を行う。以降、2章では、関連研究について述べる。3章では、提案するユーザの状態表現とその状態系列を用いたユーザ支援について述べる。4章では、構築した実験環境について述べ、5章では実験によって提案手法の有効性の確認を行う。そして6章で提案手法に関する考察を行い、7章でまとめとする。

2. 関連研究

ユビキタスコンピューティングを志向した研究では、環境に遍在するモノと人との空間的な関係を主に考慮している。空間情報は、ユーザを支援する際の状況として重要な情報であり、これらを使った機能やアプリケーションが多数実装されている。

ActiveBat システム¹⁾では、ユーザが持ち歩く小型の超音波発信機の位置を、天井の超音波センサが検出することでユーザ位置の同定を行っている。実現されている機能の1つである Bat Teleporting²⁾では、ユーザの身の回りにある利用可能なデバイスとのセッション

管理を検出された位置に応じて行うことで、スムーズにデバイスを切り替える機能が実装されている。EasyLiving³⁾では、人間やモノのそれぞれに座標系を割り当て、複数のカメラによって検出された相対的な座標の関係から、ユーザに対して適切な機器の操作 IF を提供するサービスが実現されている。CoBIT⁴⁾と呼ばれる小型の通信端末を用いたシステムでは、ユーザが特定の場所で CoBIT を特定の方向に向けた場合のみビーム光による通信を行うことで情報提供を行うシステムが提案されている。

しかし、実世界のユーザの活動では、ユーザ自身やユーザが関わるモノとの空間的な関係以外にも、時間的な関係も重要である。たとえば、ユーザの位置やモノとの関係の時間的な継続性や前後関係を把握することで、より高度なユーザ支援を行うことが可能となる。

時系列的なユーザの状態を認識する方法として HMM (Hidden Markov Model) を用いた手法が提案されている。Yamato ら⁵⁾は、動作画像の各フレームをベクトル量子化によってシンボルに変換し、離散 HMM を用いて人間の動作認識を行っている。また Clarkson ら⁶⁾はユーザが携帯するカメラ、マイク、ジャイロセンサで取得した情報に HMM を適用することで時系列の状態を認識する方法を提案している。しかし、実世界でのユーザ活動としては、非常に短時間の時間変化から、数時間単位あるいはそれ以上にわたる長時間の時間範囲を対象として取り扱わなくてはならない。取得したいユーザコンテキストの時間スケールを柔軟に適応させるには、計測されるセンサデータを一定間隔で入力することに適した HMM ではなく、時間軸の解像度を1つの活動の中でもさまざまに変えられるメカニズムが必要である。

3. 状態系列モデルによるユーザ支援

本研究では、ユーザの状態表現としてユーザの位置、およびユーザとモノとの時間的、空間的な関係の継続性に着目する。つまり、ある時点でのユーザの状態表現に、その状態がどれだけ続いているかという時間的な要素を付加することで、時間的な範囲を持った状態の認識を可能とする。また、ユーザとモノとの関係性を取得するためのデバイスとして人やモノに貼り付けられた RFID タグを用いる。これにより、人やモノの存在の有無、およびその属性という抽象度の高い情報を安定して検出し、この情報をユーザの状態を表す属性として利用することで状態認識を行う。得られたユーザの状態に対して、以降で述べる特定のタスクにおけるユーザ支援のための状態系列のモデルをあては

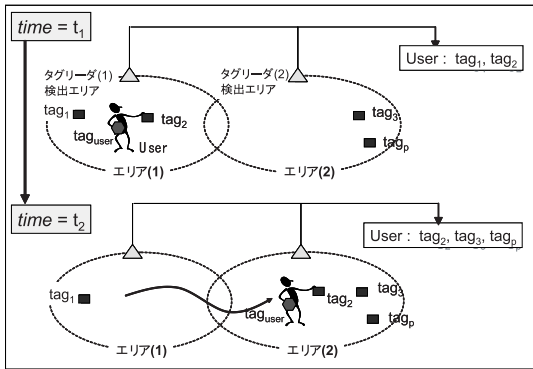


図1 ユーザ移動にともなうRFIDタグの変化
Fig. 1 Tag transition with user's movement.

めることでユーザ支援を行う。

3.1 ユーザ状態を表す属性の表現

実世界でのユーザは、さまざまなタスクの実行を行う。ここでのタスクとは、たとえば、戸締まりの点検や一連の手順を踏む調理等の特定の状態を遷移することで完了するユーザの作業を指している。また、ユーザの状態表現は、タスクに関連した状態のみを遷移するのではなく、タスクとは無関係な状態を経由した後にタスクの実行に復帰し、最終的に完了するような状態遷移も想定する。このユーザの状態は、環境やユーザが身につけているセンサ、およびRFIDタグによって検出される情報を用い、以降に述べるユーザの状態判別処理によって決定される。

本研究では、タスク実行におけるモノと人との関係を考慮し、人とモノに取り付けたRFIDタグの情報をユーザの状態を表す属性の1つとして利用する。図1に示すように、それぞれのタグリーダーで検出されたRFIDタグの情報は、ユーザごとにまとめられ、それぞれのユーザの状態を表す属性となる。さらに、各ユーザに関して身近に存在するモノの有無に加えて、それぞれのモノの存在の時間的な継続性もユーザの状態の属性として利用する。すなわち、ユーザの移動やモノの持ち運びによって時間的に変化するモノの過去の複数時点からの存在の継続性がユーザの状態を表す属性として用いられる。ユーザ u の時刻 t でのモノに関する状態の属性は以下ようになる。

$$Tag(u, t) = ([tag_1(t, a_1), tag_1(t, a_2), \dots, tag_1(t, a_n)] \\ \dots, \\ [tag_p(t, a_1), tag_p(t, a_2), \dots, tag_p(t, a_n)]) \\ (a_1 = 0, a_2 < a_3 < \dots < a_n)$$

ここで $tag_i(t, a_k)$ は時刻 $t - a_k$ から時刻 t の間にユーザ u の周辺にモノ i が継続して存在しているかどうかの属性を表し、継続して存在している場合を1、存在

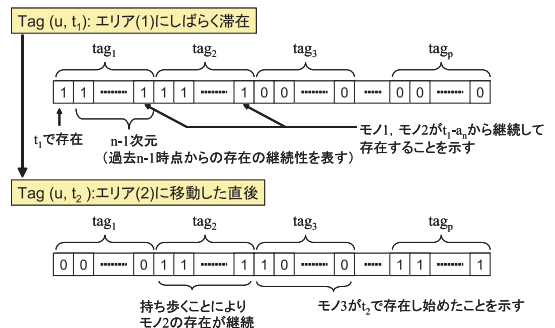


図2 モノに関する属性表現
Fig. 2 Description of attributes related to objects.

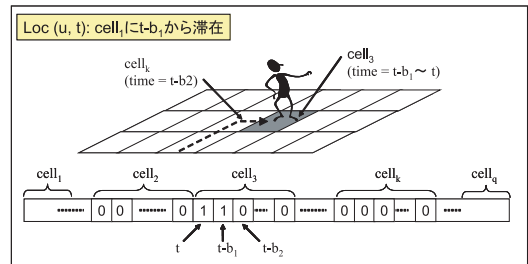


図3 ユーザ位置の属性表現
Fig. 3 Description of attributes related to user's location.

していない場合を0とする属性値を持つ。また、この場合のユーザの周辺とは、ユーザに取り付けたRFIDタグを検出しているタグリーダーの検出範囲である。つまり、ユーザを表すタグと同一のタグリーダーに検出されているモノはすべてユーザの周辺に存在するモノとして取り扱われる。これにより、ある時刻でユーザの周辺に特定のモノが存在するか、存在するならば過去のどの時点から連続して存在するのかがユーザの状態を表す属性として表現される。図1の時刻 t_1 、および t_2 でのモノに関するユーザの属性の例を図2に示す。

ユーザとモノとの相対的な位置関係以外にも、ユーザの絶対位置もユーザの状態を表す属性として重要である。本研究では、RFIDタグから得られるユーザの周辺に存在するモノに関する属性だけでなく、モノと人の相対的な方向や距離が間接的に反映されるユーザの絶対位置もユーザの状態を表す属性として利用する。そこで図3に示すように、床をセル状に分割し、各セルでの現在、および過去からのユーザの存在の継続性を属性として用いる。ユーザ u の時刻 t での位置に関するすべての属性は以下ようになる。

$$Loc(u, t) = ([cell_1(t, b_1), cell_1(t, b_2), \dots, cell_1(t, b_n)] \\ \dots, \\ [cell_q(t, b_1), cell_q(t, b_2), \dots, cell_q(t, b_n)]) \\ (b_1 = 0, b_2 < b_3 < \dots < b_n)$$

ここで $cell_j(t, b_k)$ は時刻 $t - b_k$ から t までセル j にユーザを連続して検出しているという属性を表し、検出していた場合を 1, そうでない場合を 0 とする属性値を持つ。

以上のようにユーザ u の時刻 t での状態の属性をまとめたものを $A(u, t)$ とすると以下の式で表現される。

$$A(u, t) = (Tag(u, t), Loc(u, t))$$

3.2 状態判別とユーザ状態系列の生成

本研究では、ユーザが実行するタスクにおいて、ユーザ支援を行うために区別する必要がある状態を分類するために、C4.5⁷⁾により状態判別木を生成する。C4.5 は、ある情報が属するクラスを決定するために、複数の属性を持つ教示データから各属性の情報利得比を逐次算出することで判別木を生成するアルゴリズムである。個々の教示データは、複数の属性を持ち、その教示データが属するクラスがラベルとして付与されているとする。

今、ユーザの状態クラス $c_j (1 \leq j \leq N)$ のラベルが付与された教示データの集合を D とする。また、 $p(D, c_j)$ を、 D の中で状態クラス c_j に属する教示データの割合とすると、 D に属する各教示データが、どの状態クラスに属するかを決定するために必要な情報量 $Info(D)$ は以下ようになる。

$$Info(D) = - \sum_{j=1}^N p(D, c_j) \times \log_2(p(D, c_j))$$

このとき、ある属性 a について、同じ値をとるデータごとに部分集合 D_1, D_2, \dots, D_k が構成されたとすると、属性 a による情報利得 $Gain(D, a)$ は

$$Gain(D, a) = info(D) - \sum_{i=1}^k \frac{|D_i|}{|D|} \times Info(D_i)$$

となる。また、 D に属する各教示データが、どの部分集合 D_1, D_2, \dots, D_k に属するかを決定するために必要な情報量である分割情報量 $Split(D, a)$ は

$$Split(D, a) = - \sum_{i=1}^k \frac{|D_i|}{|D|} \times \log_2\left(\frac{|D_i|}{|D|}\right)$$

となる。この分割情報量によって情報利得を正規化した以下の $GainRatio(D, a)$ が情報利得比となる。

$$GainRatio(D, a) = \frac{Gain(D, a)}{Split(D, a)}$$

この分割情報量により情報利得を正規化することによって、できるだけ少ない分割数で教示データの判別を行う属性が選択される。ユーザの状態判別木の生成では、ユーザの状態を表す各属性(たとえば、

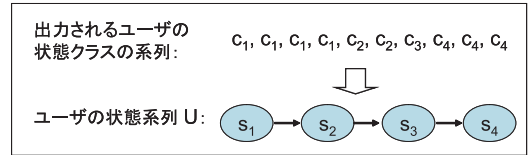


図 4 ユーザの状態系列例
Fig. 4 An example of a state-sequence.

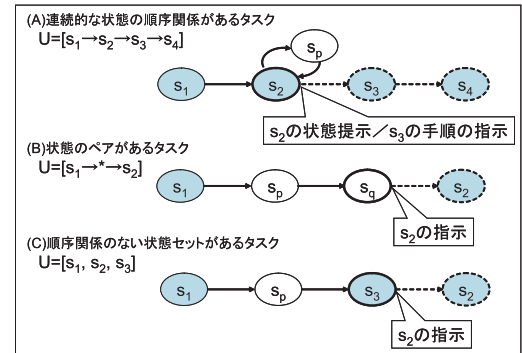


図 5 タスク種別によるユーザ支援
Fig. 5 Typical state sequence of user activity assistance.

$tag_i(t, a_j) = 1$) について情報利得比を算出し、最大となる属性を判別木の最初のノードとして選択する。以降は、各ノードで分割された教示データの集合に対して上記の処理を再帰的に繰り返すことで判別木が生成される。

以上のようにして生成された判別木では、ユーザの状態記述に適した時空間の分解能に該当する属性のみがユーザの状態の判別に有効な属性として選択される。

ユーザの状態判別では、一定時間周期で取得される $A(u, t)$ を判別木に適用することで、各時刻でのユーザの状態クラス c_j が出力される。この出力される状態クラスの系列で、同一の状態クラスが連続する部分 $[c_j, \dots, c_j]$ を s_j として、1 つにまとめた系列をユーザの状態系列 U とする。たとえば、図 4 のユーザの状態クラスの出力系列の場合では、ユーザの状態系列 U は $[s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow s_4]$ となる。

3.3 タスク種別によるユーザ支援

ユーザが特定のタスクを実行している場合、必ずしもタスクに関連する状態のみが連続的に生じるわけではない。たとえば、タスクの実行を中断し、タスクとは無関係な状態を経由した後に再開される場合や、そもそも状態の順序関係がないタスクも存在する。このようなタスクを実行するユーザを支援するためには、連続ではない時系列の状態認識を行う必要がある。タスク実行時のユーザの状態変化をタスクの完了という観点で分類すると図 5 に示すような種類が考えられる。

- (A) 順序関係のある連続的な状態を満たすことで完了するタスク
- (B) 特定の状態が成立した以降に、その状態のペアとなっている別の状態を満たすことで完了するタスク（ペアとなっている状態の間に出現する状態は問わない）
- (C) 順序関係のない複数の状態を満たすことで完了するタスク

これらの場合、提案するシステムが実行するユーザ支援の例としては以下のケースが考えられる。

(A) の場合、現在ユーザが行っているタスクの次の手順をユーザに提示する支援やタスクの実行が中断した後に復帰する場合に、中断した時点の状態をユーザに提示する支援が考えられる。たとえば、料理をしているユーザがその実行を中断し、再開した場合に、中断時の状態 (s_2) の画像を提示する支援や次の手順となる状態 (s_3) を提示する支援である。

(B) の場合、タスクが完了していないことをユーザに通知する支援が考えられる。たとえば、洗濯機をセットするという状態 (s_1) の後には、洗濯物を取り出すという状態 (s_2) を満たす必要がある。これを忘れていた場合に、ユーザに通知する支援である。

(C) の場合は、複数の状態が揃っていないことをユーザに通知する支援が考えられる。たとえば、戸締り確認では、順序は問わないが、点検する場所 (s_2) が残っている限り提示を続けるという支援である。

このような各タスクでのユーザの状態遷移をユーザの状態系列のモデルとしてあらかじめ用意し、判別されたユーザの状態系列に当てはめることでユーザ支援を行う。

3.4 ユーザ支援の実行フロー

各タスクのモデルは、1) タスク起動条件、2) ユーザ支援実行条件、3) タスク実行状態、4) ユーザ支援方法、5) タスク完了条件が記述されたモジュール（以降、タスクモジュールと呼ぶ）として、あらかじめ登録されており、各タスクモジュールが個別に実行・管理される。これにより、ユーザが複数のタスクを並列に実行している場合でも、それぞれタスクモジュールが個別に実行され、各タスクに応じたユーザ支援を行うことが可能となる。また、ユーザの状態判別の性能等に応じて各モジュールを個別に調整することも可能となる。

このタスクモジュールの起動とその実行状態の管理、ユーザ支援の実行フローを図 6 に示す。時刻 t において、RFID タグ、およびセンサから得られた情報をあらかじめ生成されている判別木に適用し、ユーザの

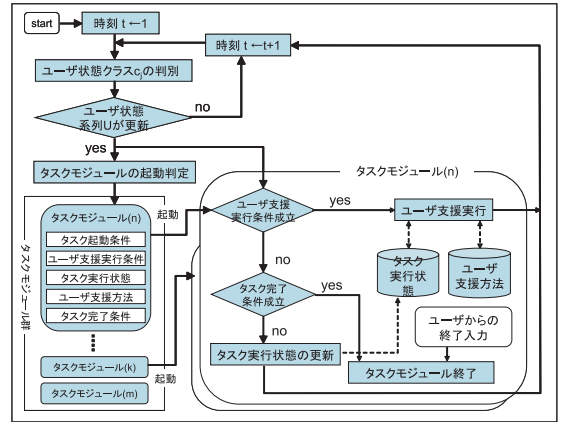


図 6 ユーザ支援の実行フロー

Fig. 6 Flow of user assistance process.

状態クラス c_j が判別されたとする。このとき、時刻 $t-1$ で出力された状態クラスと現在の状態クラス c_j が異なる場合は、ユーザの状態系列 U が更新され、 s_j が系列に追加される。次に、更新されたユーザの状態系列 U と登録されているタスクモジュールの起動条件の比較を行うことでそれぞれのタスクモジュールの起動が判定される。このタスクモジュールの起動条件は、タスクに関するユーザの状態系列の正規表現⁸⁾となっており、ユーザの状態系列 U で新規に追加された状態 s_j から系列を過去にさかのぼる形でマッチングが行われる。たとえば、図 5 のタスク種別 (A) で、タスクの進捗をユーザにリマインドするというユーザ支援の場合は、タスクモジュールの起動条件として、現在の状態が s_2 であり、それ以前にタスクとは無関係な状態があり、さらにそれ以前には状態 s_2, s_1 があるという条件が正規表現されている。このような時間方向とは逆の状態の系列を条件として表現し、マッチング行うことで、ある時刻のユーザの状態がタスクとは無関係な状態となっている場合は、タスクモジュールが起動されないこととなる。図 5 のタスク種別 (B) の場合は、現在の状態が s_2 以外で、それ以前に状態 s_1 があることがタスクモジュールの起動条件として正規表現されている。また、図 5 のタスク種別 (C) の場合は、現在のユーザの状態系列が $[s_1, s_2, s_3]$ のすべてを満たしておらず、かつ過去に $[s_1, s_2, s_3]$ のいずれかの状態となっていることがタスクモジュールの起動条件として正規表現されている。ただし、タスク種別 (B), (C) の場合は、タスクとは無関係な状態を経由するごとにタスクモジュールの起動が行われないように、同一のモジュールが重複して起動されない制御が行われる。また、タスク種別 (C) の場合は、タス

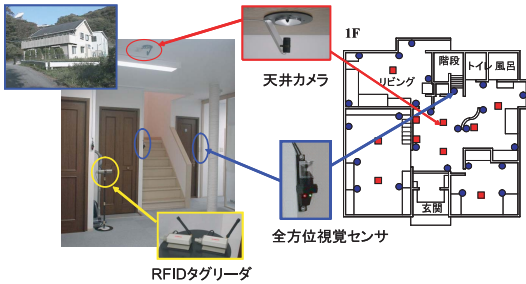


図7 ユビキタス実験ハウス

Fig. 7 Experimental test-bed house.

クの状態セットがどこまで完了しているかがタスクモジュール内のタスク実行状態において管理される。

起動された各タスクモジュールでは、次にユーザ支援実行条件の判定が行われる。タスク種別 (A) の場合は、タスクの起動と同時にユーザ支援が実行されるが、タスク種別 (B), (C) の場合は、タスクモジュール起動後に一定時間が経過した後という条件に基づきユーザ支援が実行される。ユーザ支援の実行時には、タスクモジュール内に記述されたユーザ支援方法参照することでユーザ支援が行われる。そして、タスクモジュールの完了条件が成立するとそのモジュールの起動が終了し、そのタスクに関するユーザ支援が終了する。

ユーザによる実際のタスクの実行では、タスクが中断されるだけでなく、タスクが中止される場合がある。この場合、いったん起動されたタスクモジュールの完了条件が成立せず、モジュールが起動されたままとなってしまう。しかし、長時間の時間範囲でのユーザの状態の認識では、タスクが中断されたのか、中止されたのかをシステムが判断するのは困難である。そこで、本システムでは、ユーザが適時起動中のタスクモジュールを確認し、中止したタスクのモジュールをユーザが手動で終了させることで、タスクの中止に対処する。

4. ユビキタス実験ハウス

図7に示す実験ハウス内にプロトタイプシステムの構築を行った。実験ハウス内のユーザはRFIDタグを持ち移動する。環境側の視覚センサネットワークはユーザ位置の追跡や画像の保存を行う。図8に全体のシステム構成を示す。以下では、各構成要素について述べる。

4.1 視覚センサネットワーク

プロトタイプシステムでは、実験ハウスの天井と壁面にそれぞれ1種類の視覚センサを敷設した。各ユーザの位置追跡は、1階、2階の天井に16台設置したカ

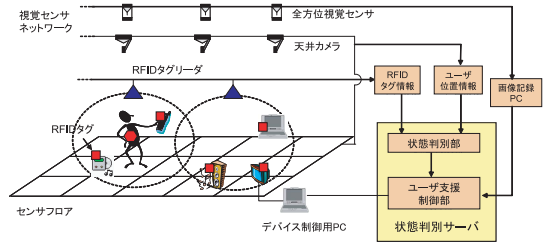


図8 システム構成

Fig. 8 System configuration.

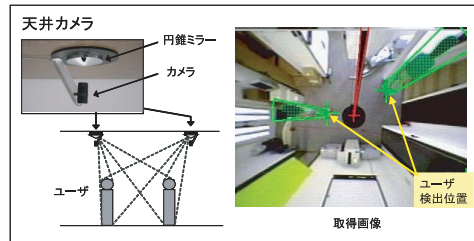


図9 天井カメラと取得画像

Fig. 9 Ceiling camera and captured image.

メラ (以下、天井カメラ) によって行う。この天井カメラは、円錐状のミラーをカメラで撮像することで通常のカメラと比較して広角な画像を取得することが可能である。図9に天井カメラの外形とユーザ検出画像の例を示す。

移動するユーザの検出は画像の差分検出⁹⁾によって行う。画像の各ピクセルの輝度の平均値を μ 、標準偏差を σ 、現在のピクセルの輝度値を x とすると、ユーザの検出は

$$\begin{aligned} |\mu - x| \leq \sigma &\rightarrow \text{背景} \\ |\mu - x| > \sigma &\rightarrow \text{ユーザ} \end{aligned}$$

とする。この μ と σ の値は以下の式でフレームごとに更新される。

$$\begin{aligned} \mu &\leftarrow (1 - \alpha)\mu + \alpha x \\ \sigma^2 &\leftarrow \max\{\sigma_{min}^2, (1 - \alpha)\sigma^2 + \alpha(x - \mu)^2\} \end{aligned}$$

ここで α は学習レート、 σ_{min} はノイズに対する閾値である。得られた差分に対して膨張処理を行い、一定サイズ以上の領域を人間の領域と見なす。天井カメラで撮像された人間は、画像中心から放射状に伸びた形状になる。そこで半径の異なる2つの扇形で囲まれた形状を1人分のユーザ領域とする。この領域ごとに画像中心側の円弧の等分点を床面上に投影したものをそのユーザ位置とする。複数ユーザの位置関係によっては、差分領域が重なり、1つの差分として検出される場合がある。そこで、差分領域のサイズに対して閾値処理を行うことで、1人の人間と見なされないサイズの差分領域はユーザ位置として採用しない処理を行っている。天井カメラの撮像範囲はオーバーラップさせて

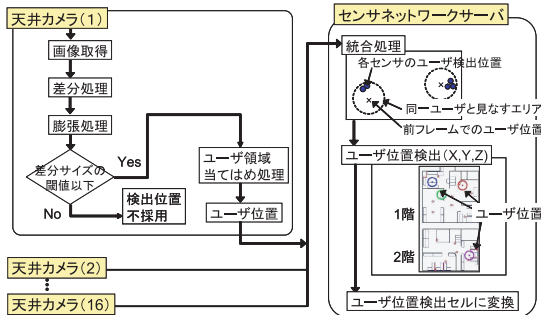


図 10 ユーザ位置検出フロー
Fig. 10 Flow of locating process.

いるため、特定の天井カメラでの検出位置が採用されない場合でも、複数ユーザが分離している他の天井カメラでの検出位置が採用されることで安定した位置追跡が可能となっている。

複数の天井カメラで検出されたユーザ位置は、誤差等によりばらつきが生じる。そのため複数の天井カメラから得られた位置を統合する際には、前フレームで推定されたユーザ位置に対して一定範囲内に存在する検出位置を同一ユーザと見なし、その重心を求めることで最終的なユーザ位置とする。ユーザ位置追跡のフローを図 10 に示す。なお、家屋の玄関にユーザ名を登録するログイン端末を設置し、その位置を初期位置として以降の追跡結果とユーザとを対応付ける。検出されたユーザ位置は床を一辺 90 cm 四方に分割したセルの 1/0 値に変換され、先のユーザの状態を表す属性として利用される。

実験ハウスの 1 階に 25 台設置した全方位視覚センサは、検出されたユーザ位置に基づき、最もユーザに近い全方位視覚センサの画像を取得し、ユーザの活動情報として蓄積する。この蓄積された全方位画像は、ユーザに対して過去の状況を提示する支援に利用される。

4.2 センサフロア

実験ハウス 1 階では、床に感圧センサを多数敷き詰め、人の荷重によるユーザ位置の検出も行っている。図 11 に示すように各感圧センサの検出単位は 18 cm × 18 cm 単位のセルになっており、各セルが出力する 1/0 値はシリアルポートを介して 0.4 sec 周期で PC に取り込まれる。プロトタイプシステムでは、この検出セルの縦横 5 個をまとめた 90 cm × 90 cm の領域をユーザの位置の属性として利用する。

4.3 RFID タグ

人やモノに貼り付ける RFID タグとそのリーダとしてアクティブ型の RFID タグシステムを実験ハウス 1

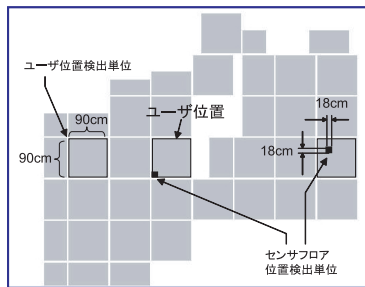


図 11 センサフロアによるユーザ検出
Fig. 11 User location detected by a sensor floor.

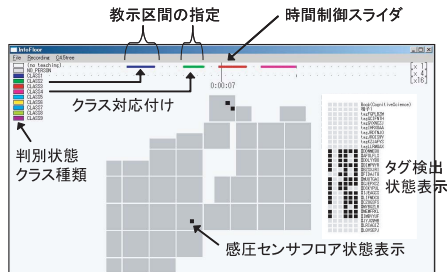


図 12 状態クラス教示画面
Fig. 12 Teaching window.

階に設置した。この RFID タグシステムはタグの検出範囲の指向性が低く、またアンテナを取り付けることで検出範囲を数 10 cm から数メートルの範囲で設定することが可能である。各リーダはプロトコル変換機を介して PC と TCP/IP で通信を行う。RFID タグは発信周期が 0.4 sec であり、人やモノの存在をリアルタイムに検出することが可能である。

4.4 状態判別サーバ

状況判別サーバには、その動作として 2 つのフェーズを持つ。1 つはセンサ、RFID タグの情報を取得し、その情報を教示データとして状態判別木を生成する教示フェーズである。もう 1 つのフェーズは、生成された判別木を用いて、現在のセンサ、および RFID タグの情報から状態判別を行うとともに、ユーザの状態系列の更新、およびタスクモジュールの実行・管理によってユーザ支援を行うフェーズである。教示フェーズでは、図 12 のウィンドウにおいてユーザの行動時の RFID タグとセンサの情報の記録を行う。この記録された情報を時間制御スライドを用いて再生し、特定の時間範囲をマウスで指定することで状態クラスの割当てを行うとともに判別木の生成を行う。状態判別・ユーザ支援フェーズでは、生成された判別木と現在のセンサデータ、および RFID タグの情報によりユーザの状態判別を行い、判別されたユーザの状態クラスの系列に基づきユーザ支援を行う。

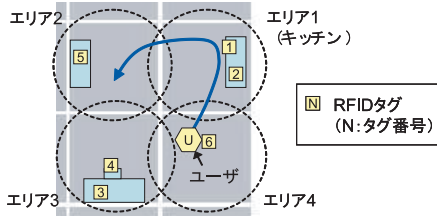


図 13 実験環境
Fig. 13 Experimental configuration.

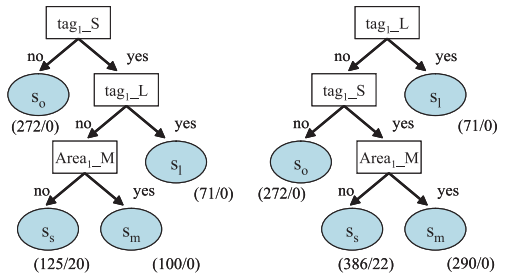
5. 状態判別の性能評価

5.1 実験条件

ユーザ支援を行うための状態判別の性能を評価するために図 13 の環境で実験を行った。判別するユーザの状態は、 s_l キッチンに長く居続けている (32 秒以上)、 s_m キッチンにしばらく居続けている (2.8 秒以上)、 s_s キッチンに一瞬だけ居る (1.2 秒以上)、 s_o キッチン以外の場所に居る、の 4 種類である。

想定するユーザ支援としては、料理を行っている状態から、しばらく別の場所に移動し、戻ってきたときに、どこまで料理をしていたかを思い出させるためにキッチンを超える直前の状況を表す画像を提示するという支援である。この画像は、実験ハウス壁面に設置した全方位視覚センサによって収集蓄積された画像がユーザの近くにあるディスプレイ上に提示される。

このようなユーザ支援において、瞬間的なユーザの位置の情報のみを用いると、単にユーザがキッチンに近づき、すぐにキッチンから離れた場合でも画像の提示が行われてしまう。そこで、キッチンに戻り、ある程度の時間が経過したという状態系列 $[s_l \rightarrow s_o \rightarrow s_s \rightarrow s_m]$ があてはまる場合のみ、ユーザ支援を行う。RFID タグは、キッチン用品のまな板 (tag_1)、包丁 (tag_2) の 2 個、エリア 3 にある机 (tag_3)、椅子 (tag_4) で 2 個、ユーザが持ち運ぶことが可能なノート PC (tag_5)、携帯電話 (tag_6) の 2 個の計 6 個を使用した。また、ユーザ位置検出セルは図 13 に示す 4 エリアである。RFID タグ、およびユーザ位置検出セルの時間の継続性を表す属性は 3 つとした。それぞれ、瞬間 (過去 3 フレーム中、2 フレーム以上)、しばらく前から (過去 7 フレーム中、80% 以上)、長時間前から (過去 80 フレーム中、80% 以上) とし、それらが成立する場合に存在が継続しているとして属性値を 1 とした。よって、ユーザの状態を表す属性は、RFID タグに関して 6×3 の 18 次元、位置に関して 4×3 の 12 次元であり、合計 30 次元である。



(a) Training Data Set: 568 (b) Training Data Set: 1019

図 14 生成された判別木

Fig. 14 Decision Trees generated by two sets of training data.

5.2 実験結果

判別木を生成するために、ユーザの一連の行動を記録し、記録されたデータの中からユーザの状態 s_l 、 s_m 、 s_s 、 s_o が該当する範囲の情報に対して状態クラスの割当てを行い、教示データを作成した。

各状態に対する教示データの総数が 568 個の場合に生成された判別木を図 14 (a) に示す。図中の矩形は属性ノード、楕円形は判別ノードであり、判別木のルートから属性ノード内に示す条件を逐次テストしていくことで判別ノードに到達し、ユーザの状態判別が行われる。各属性ノードでは、モノの存在の継続性、もしくは位置の継続性が判別の条件となる。属性ノードの表現で、 tag_i は RFID タグ $i (1 \leq i \leq 6)$ が取り付けられたモノの存在の継続性を表し、 $Area_j$ は、エリア $j (1 \leq j \leq 4)$ でのユーザ位置の継続性を表している。また、属性ノード内の表現 $\{L, M, S\}$ は、モノ、もしくは位置の継続性として、それぞれ {長い、しばらく、短い} の 3 種類を表している。たとえば、 $tag_k L$ という属性ノードでは、タグ k が長時間存在しているかどうか判別の条件となる。各判別ノードの下に示した括弧内の 2 つの数値 (α/β) は、 α が全教示データの中で、その判別ノードの状態として判別された教示データの個数を表し、 β はその判別ノードで判別された教示データの中で、誤って別のクラスが判定された教示データ数を表している。

図 14 (a) の判別木では、最初の判別の属性として「ユーザの周囲に包丁が短い時間存在している」($tag_1 S$) が用いられ、これによってユーザがキッチンに居ない状態 (s_o) が判別される。次に「ユーザの周辺に包丁が長時間存在している」($tag_1 L$) が判別の属性として用いられ、キッチンに長時間居る状態 (s_l) が判別される。最後に「エリア 1 にしばらく居る」という属性によってキッチンにしばらく居るという状態 (s_m) とキッチンに短時間居る状態 (s_s) が判別される。判

別の誤認識率は全体で 3.5%であり、「短時間キッチンに居る」という状態 s_s の判別ノードに 20 個の教示データの誤った判定のケースが含まれていた。これは、記録されたユーザの一連の行動に対してユーザの状態クラスを割り当てる際に、誤った状態クラスの教示を行ったことが原因と考えられる。つまり、「短時間キッチンに居る」と「しばらくキッチンに居る」という状態の時間範囲の指定が正確ではなかったために判別エラーが生じていると考えられる。そこで状態 s_s と s_m に関する教示データの追加を行い、総計 1,019 個の教示データから判別木の生成を行った。結果は図 14 (b) であり、各状態に対する正しい教示データが増加したことにより全体の誤認識率は 2.2%に低下している。このことは、一部の教示データに誤りが含まれていても、正しい教示データ数が十分多ければ、高精度に状態の判別が行えるという本手法のロバスト性を示している。

6. 考察

本章では、提案するユーザ支援システム、およびユーザの状態表現の汎用性と状態表現のための属性抽出方法、ならびに状態クラスの追加や RFID タグ、センサの追加の際に本システムで必要となる処理について述べる。

6.1 ユーザ状態表現の汎用性

今回の実験システムでは RFID タグ、センサフロア、天井カメラから得られる情報をユーザの状態を表す属性として利用した。しかし、他の情報獲得デバイスを用いた場合であっても、デバイスから得られる情報を属性とし、さらにその属性に関して複数時間範囲での値の継続性を表す属性を追加することで、提案するユーザ状態を表す属性表現を行うことが可能である。たとえば、今回の実験システムでは、複数のカメラから得られる情報を、セル状に分割した床面をユーザ位置の属性として表現したが、カメラ画像を 2 値化処理し、画像の各ピクセルを単位としてそれぞれの値の継続性を状態の属性として利用することも可能である。また、カメラ等によりユーザの動作を認識し、その結果をユーザの状態を表す属性とすることで、より複雑なユーザの状態系列を表現することも可能である。

6.2 ユーザ状態の属性抽出と状態クラス、および属性の追加への対応

本システムでは、実際にユーザがユビキタス環境内で行動した際のセンサ、および RFID タグの情報を記録し、蓄積された情報を教示データとして状態判別木を生成する。この時のユーザの状態を表す属性は、教示データ内に含まれる RFID タグ、およびセンサの情

報として抽出される。他のユビキタス環境でも同様に、その環境での教示データから属性の決定と判別木の生成が行われ、環境を移動するユーザはそれぞれの環境ごとに利用する判別木を切り替えることでユーザ支援を受けることができる。

このように本研究での状態判別は、教示データに含まれる属性と教示を行う状態クラスに基づいており、新たに判別する状態クラスの追加や特定の状態クラスの判別に影響を与える RFID タグ、およびセンサが追加された場合は、その状態クラスに関する教示と判別木の再構成を行う必要が生じる。新たに判別する状態クラスが追加された場合は、その状態クラスに関する教示データの追加作成のみが必要となる。この追加された教示データと以前の判別木の生成時に作成された教示データを合わせて判別木を再度生成することで状態クラスの追加に対応可能となる。また、この場合のユーザ支援を行うためのタスクモジュールに関しては、新規に追加した状態クラスを利用したタスクモジュールを作成する必要があるが、以前のタスクモジュールに変更を加える必要はない。一方、判別する状態クラスは変更されず、判別に影響を与える RFID タグやセンサが追加された場合は、追加により影響が生じる状態クラスに関する教示データの作成を行う必要が生じる。この場合、以前に取得された教示データのうち、判別に影響を受けない状態クラスの教示データは再利用が可能であり、新規に作成される教示データとともに再度判別木の生成を行う。この場合のタスクモジュールに関しては判別する状態クラスに変更がないため、修正を行う必要は生じない。

この教示データの追加で必要となる作業負荷は、新たに追加する状態クラスの複雑さやそれまでに定義されている状態クラスに依存するが、新規に追加、もしくは判別に影響を受ける状態クラスに関する行動をユーザが実環境で複数回行うことが必要となる。

7. おわりに

環境に存在する人やモノとの空間的な関係だけでなく、時間的な関係も表現するユーザの状態表現を用い、ユーザの状態を判別するとともに、ユーザの状態系列をあてはめることで、ユーザ支援を行う方法について提案を行った。また、構築した実験ハウスでのシステム構成について述べた。さらに提案した時空間の状態表現を用いたユーザの状態判別について実験を行い、良好な判別結果を得た。

今後の課題としては、現在想定しているタスクの完了を支援するタスク種別以外の、より複雑なタスクに

対する状態系列のモデル化，ならびにユーザの状態系列のマッチング処理の高度化があげられる．また，本研究での時間の継続性を表す属性表現は，センサの時間方向の解像度を変更した状態表現とも解釈できる．したがって，教示データの与え方における誤りや，センサ，およびRFIDタグの検出エラーに対してもロバストな状態判別を行うことが期待できる．この判別性能を教示データの与え方やユーザの状態表現の属性数に関して検討することも今後の課題である．

参 考 文 献

- 1) Ward, A., Jones, A. and Hopper, A.: A New Location Technique for the Active Office, *IEEE Personal Communication*, Vol.4, No.5 (1997).
- 2) Harter, A., et al.: The Anatomy of a Context-Aware Application, *Proc. MOBI-COM'99*, pp.59-68 (1999).
- 3) Brumitt, B., Meyers, B., Krumm, J., Kern, A. and Hhafer, S.: EasyLiving: Technologies for Intelligent Environments, *Handheld and Ubiquitous Computing* (2000).
- 4) 西村拓一，伊藤日出男，山本吉伸，中島秀之：無電源小型通信端末を用いた位置に基づく情報支援システム，情報処理学会知的都市基盤研究グループ研究報告，2002-ICII-2, pp.1-6 (2002).
- 5) Yamato, J., Ohya, J. and Ishii, K.: Recognizing Human Action in Time-Sequential Images using Hidden Markov Models, *Proc. CVPR'92*, pp.379-387 (1992).
- 6) Clarkson, B. and Pentland, A.: Predicting Daily Behavior via Wearable Sensors, TR540, (July 2001).
- 7) Quinlan, R.: *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann Publishers Inc. (1993).
- 8) Friedl, J.E.F.: *Mastaring Regular Expressions*, O'Reilly & Associates, Inc. (2002).
- 9) Alexandre, F. and Medioni, G.: Adaptive Color Background Modeling for Real-Time Segmentation of Video Streams, *Proc. International on Imaging Science Systems and Technology*, pp.227-232 (1999).

(平成 15 年 3 月 31 日受付)

(平成 15 年 9 月 5 日採録)



磯田 佳徳 (正会員)

平成 3 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業．平成 5 年同大学院基礎工学研究科修士課程修了．同年日本電信電話(株)入社．同社ヒューマンインタフェース研究所にて知能ロボットに関する研究に従事．現在，NTTドコモマルチメディア研究所勤務．センサシングシステム，ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事．



倉掛 正治

昭和 58 年東京大学工学部計数工学科卒業．昭和 60 年同大学院修士課程修了．同年日本電信電話(株)入社．平成 2 年より 1 年間，米国南カリフォルニア大学に客員研究員として滞在．平成 12 年より 2 年間，米国 DoCoMo USA Labs に勤務．文字認識，コンピュータビジョン，ユビキタスコンピューティング，モバイルサービス環境の研究に従事．現在 NTTドコモマルチメディア研究所主幹研究員．IEEE，ACM 各会員．



石黒 浩 (正会員)

平成 3 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻修了．工学博士．同年山梨大学工学部情報工学科助手．平成 4 年大阪大学基礎工学部システム工学科助手．平成 6 年～平成 12 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻助教授，この間，平成 10 年より 1 年間，カリフォルニア大学サンディエゴ校客員研究員．平成 12 年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科助教授．平成 13 年より同大学教授．平成 14 年 10 月より大阪大学大学院工学研究科知能機能創成工学専攻教授．ATR 知能ロボティクス研究所客員室長．知能ロボット，能動視覚，全方位視覚，分散視覚に興味を持つ．