

ユビキタスコンピューティング環境における センサデータを用いたモノの状態推定について

前川 卓也[†] 柳 沢 豊[†]
服 部 正 嗣[†] 岡 留 剛[†]

本稿では、モノにセンサノードを添付するだけで、添付されたモノが何であるか、そしてそのモノが現在どのような状態にあるかを推定するための、モノの表現方法について述べる。想定している環境では室内のさまざまなモノにセンサノードが添付され、センサノードには、それが添付されるモノに関する情報を一切与えない。その環境内でユーザが活動し、センサノードは、センシングして得られたデータがある程度の期間収集する。そして、あらかじめ用意した様々なモノのメタデータとセンシングデータを比較し、そのデータが観測され得る尤もらしいメタデータを決定することでモノの推定を実現できる。ここで本稿では、モノのメタデータを状態遷移図を用いて表現する。モノの状態遷移図とは、モノの状態とモノに起こり得る状態間の遷移の関係をグラフとして記述したものである。さらに、モノを決定することで、そのセンサノードが添付されているモノがどのような状態にあるかも同時に推定することができる。

キーワード ユビキタスコンピューティング、センサネットワーク、状態遷移図

Estimation of Object State using Sensor Data in Ubiquitous Computing Environment

TAKUYA MAEKAWA,[†] YUTAKA YANAGISAWA,[†] TAKASHI HATTORI[†]
and TAKESHI OKADOME[†]

By attaching sensor nodes to physical objects in a sensor networked environment, the object expression method introduced here infers what the physical objects are and their states. The method does not assume that initially the sensor nodes have information about the objects to which the sensor nodes are attached. The sensor nodes collect data by sensing humans' daily living in the environment for a certain period of time. The method compares the collected data with metadata of physical objects prepared in advance and determines a presumable metadata where the collected data can be observed. Object metadata are described by using state transition diagrams where object states and its transitions between states are represented by an graph structure. The method also permits us to infer objects' states.

Keywords Ubiquitous computing, sensor network, state transition diagram

1. ま え が き

ユビキタス環境においてコンテキストウェアなサービスを実現するための重要な要素とされているのは、モノやユーザの位置とユーザの行動の把握と言われている⁷⁾¹²⁾。さらに、われわれはユビキタス環境に存在するモノの状態も重要な要素になると考える。モノの状態は、コンテキストウェアなサービスを提供

するための直接的なトリガとなることは言うまでもない。単純な例だと、ドアが開きっぱなしになっていたりドアがロックされたりしたときに、ユーザに通知するなどである。また、複数のモノの状態の組み合わせから提供するサービスを変更することも可能である。さらに、モノの状態は、モノの位置やユーザ行動の把握の精度を向上させるパラメータにもなり得る。例えば、ユーザにセンサを添付することでADL(Activity of Daily Living)を推定する研究⁸⁾が多く行われているが、モノの状態の情報を利用することでその精度を向上できると考える。例えば、ユーザが食事中である

[†] NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratories

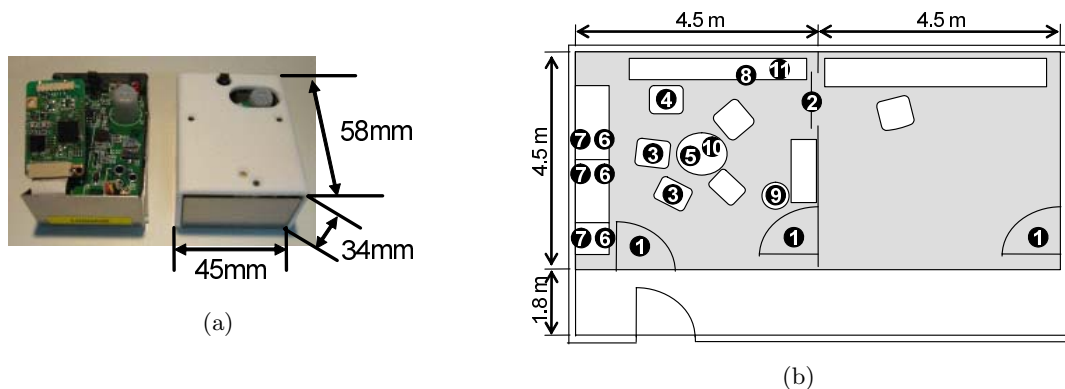


図 1 (a) センサノード, (b) 実験室のレイアウト

ことを推定するために、食卓の机、イス、コップなどの状態を利用できる。ADL 推定の精度が向上すれば、その際に用いているウェアラブルセンサの数を減らすこともできる。特に、老人の ADL の推定の際、多くのウェアラブルセンサは大きな負担となると考える。

モノの状態を推定するためには、そのモノやモノの周辺的环境を何らかの方法でセンシングする必要がある。われわれは、モノに加速度や温度などを測るセンサノードを添付することで、室内に設置されているドアや机といったさまざまなモノの状態を推定する。このとき、センサノードには、添付されるモノに関する情報を一切与えない。つまり、センサノードが添付された直後は、センサノードはどのようなモノに添付されているかを知らないものとする。そして、ある程度の期間の生活から収集したデータを用いて、そのモノとモノの現在の状態の推定を行う。ここでセンサノードはさまざまなモノに添付される可能性があり、さらに各々のモノは本来の機能以外の使われ方を含めて多様な利用をされるので、全て同一の機能を持つ汎用的なセンサノードであるとする。イスに添付するために作られた圧センサをもつセンサノードのような、特定のモノのためのセンサノードではない。汎用的なセンサノードは特定のモノ専用のノードに比べ、生産の際にコスト的に優位なだけでなく、実際にコンテキストアウェアなサービスを家庭に導入する際、エンドユーザが何も考えずにモノにセンサを添付するだけでコンテキストアウェアなサービスの基盤を構築できるため、導入の労力が少なく抑えられる点でも非常に有利である。

以上を実現するために、本研究では、室内にありコンテキストアウェアなサービスに利用できそうなモノをピックアップし、それらの状態の遷移をモデル化した状態遷移図を作成する。例えばドアというモノには

“開”状態と“閉”状態があり、それらの状態はユーザに“開かれ”たり、“閉じられ”たりすることで他方の状態に遷移する状態遷移図が作成される。そして、ある程度の期間にセンサノードにより観測されたデータから、そのデータが観測され得る尤もらしい状態遷移図を決定することでモノの推定を行う。状態遷移図を決定することで、そのセンサノードが添付されているモノがどのような状態にあるかも同時に知ることができる。本稿では、以上のプロセスの内、特にモノの状態遷移図の作成について説明し、センサデータとの対応付けに関して予備的な検討結果について述べる。

以下、2では本研究の関連研究について述べ、3では本研究の実験環境について述べる。4では本研究で定義するモノと状態と遷移について説明する。5では、その定義に則った状態遷移図の記述について説明し、6でモノの推定方法について考察する。最後に7で結論を述べる。

2. 関連研究

センシングデバイスを用いた状態推定に関する研究で現在最も盛んな分野は ADL の推定である。文献²⁾では、ユーザに加速度センサを添付し計測した波形から、“歩く”、“テレビを見る”、“歯を磨く”などの 20 種類のユーザの行動を認識している。文献⁵⁾では、加速度だけでなく照度などのユーザの身の回りの環境パラメータをセンシングする機構を提案している。文献¹⁰⁾では、ユーザとモノのインタラクションに注目して ADL を推定している。具体的には、ユーザが使用したモノからその行動を推定する。また画像処理のアプローチから、カメラで得られえた人物の映像を用いて人物の動作を認識する研究¹⁴⁾も行われている。しかし、これらの研究はトレーニングデータを用いた学習による推定を行うため、さまざまな環境下での適用

を実現するためには膨大なトレーニングデータが必要となる。さらに本研究が想定する環境では、例えばさまざまな大きさのドアにセンサノードが添付されていても、それら全てをドアと認識する必要がある。つまり、モノ自体やモノ環境に多数のバリエーションが考えられるため、トレーニングデータを用いた推定は困難である。

状態遷移図に注目したユビキタスコンピューティング環境における研究も多く存在する。文献³⁾では、状態遷移図を用いて家庭内の状態をモデル化している。例えば、浴室の利用状況を表す状態遷移図は、“入浴中”と“入浴中でない”の二つの状態間を、浴室のドアの開閉やユーザの浴室への進入・退出といったイベントにより遷移するようモデル化されている。状態遷移図を用いることで、“ドアの開閉”などといった実際のセンサから得られるような信号に比べて抽象化した記述ができるため、本研究が想定するような様々な環境に適用可能なモデルを作成することが可能であると考える。文献⁶⁾では、ユーザに添付した加速度センサにより観測した波形データから、ユーザの生活における状態をクラスタリングし、さらにその状態遷移図を一次マルコフモデルを用いて自動的に作成している。しかし本研究で想定する環境ではモノが異なる状態であっても、センサは同じ値を示すことがある。また、同じ状態であっても異なる値を示すこともあるため、このようなモデルでの表現は困難である。

3. 実験環境

まず、本研究で利用するセンサノードについて説明する。センサノードはわれわれの研究グループが開発したもので、一般的に普及している温度センサ、照度センサ、焦電センサ、三軸加速度センサを搭載する。これらのセンサから取得したデータをデータの保存用に設置したサーバシステムに送信するために、XPort(Lantronix)もしくは無線モジュール(Millennial Net, iB-5324EK end point)を搭載している。また、データ処理のためにCPU(Renesas Technology, H8/36049GH)を搭載しており、60msecごとにその間にセンシングしたデータの平均値を送信する。図1(a)に、開発したプロトタイプของセンサノードとその形状を示す。

以上のセンサノードを設置して観測を行うために、図1(b)に示すような実験室内にセンサネットワークシステムを構築している。実験室は作業部屋としてレイアウトしており、イスや机、棚などの家具とPC類を配置して、日常的な作業が行える環境を整えている。

この部屋では、午前9時から午後5時頃まで1人から4人程度の作業員(研究者ではない)が各々の作業や本センサネットワークシステムの整備などを行っている。また、図1(b)の網掛け部分の床にはセンサフロアシステム(Vstone, VS-SF99)を設置しており、床面の圧力の有無を180mm四方の分解能で観測することができる。

センサノードを添付したモノの位置を図1(b)内に示している。具体的には、ドア(図1-b-1)、スライドドア(図1-b-2)、背もたれのあるイス(図1-b-3)、車輪付き回転イス(図1-b-4)、机(図1-b-5)、ロッカーの扉(図1-b-6)、ロッカーの内部(図1-b-7)、引き出し(図1-b-8)、ごみ箱(図1-b-9)、コップ(図1-b-10)、目覚まし時計(図1-b-11)にセンサノードを添付した。図2は、車輪付き回転イスに添付されたセンサノードである。われわれはセンサノードを添付するモノとして、一般的に通電していないもの、または、通電していても将来的にその内部状態を取得して外部出力するほど高度なプロセッサを持たないであろうものを選んだ。つまり本研究では、あらかじめモノの状態を把握する機構やそのモノに関する情報を持たないモノにセンサノードを添付し、モノや状態の推定を行うことを想定している。将来的には、現時点で状態を把握する機構などを持たないモノが、そのモノの状態をセンシングし外部出力するセンサノードをあらかじめ付加されて生産されることも考えられる。そのときには、あらかじめセンサノードにそのモノの名前が与えられていると考えられるが、周囲の環境やユーザの特性によって得られるセンサデータの値は異なるため、特定の遷移に対応する波形のモデルデータをあらかじめ与えることは困難である。つまり、得られたセンサデータのみからの遷移の特定は難しい。また、あらかじめセンサノードが添付されたモノを用いることを考えた場合、身の回りのモノがそのようなモノに置き換わる必要があるが、本研究で用いるような汎用的なセンサノードを用いると、現在あるモノにセンサを添付するだけでよい。

4. 定義

本節では、状態遷移図の詳細な表現方法について説明する前に、本研究で定義するモノの状態と遷移について説明する。

本研究では、モノに添付したセンサが何の変化も検知しない間を状態とし、変化を検知している間を遷移と定義する。つまりセンサが検知できない現象については関知せず、センサノードがもつX軸方向、Y軸方

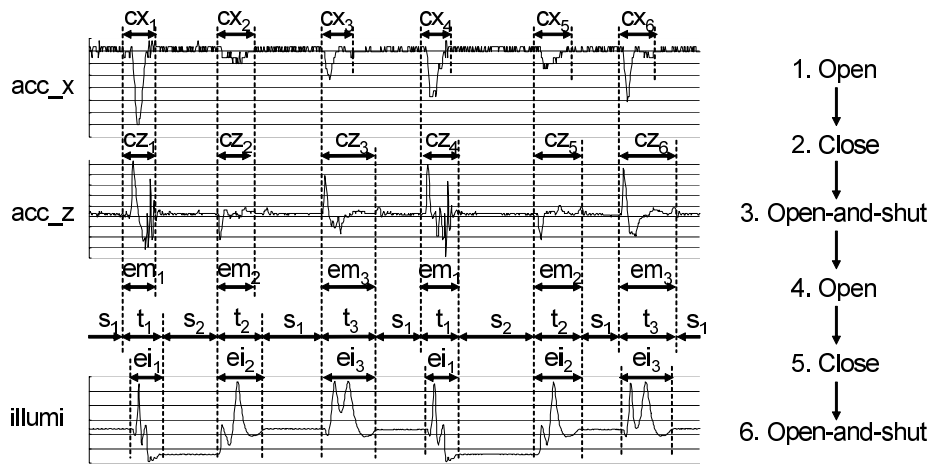


図3 ドアに添付されたセンサノードから取得した信号の例



図2 イスに添付されたセンサノード

向、Z 軸方向の加速度センサ、照度センサ、温度センサのいずれかに変化があったときを遷移とする。焦電センサは、その変化の有無がセンサノードを添付する位置に大きく依存するため今回は用いない。床圧センサは、モノや状態の推定の際に補完的に利用する。

ここで重要な事項として、われわれの提案する状態遷移図における遷移は値を持ち、それらの値は遷移の際に加速度センサ、照度センサ、温度センサ、床圧センサにより検知されるイベントを用いて記述される。例えばドアが開く遷移が起こるときは、床圧センサが人が歩いているイベントを検知した後、ドアに添付された加速度センサと照度センサがほぼ同時に変化するイベントを検知し、その後、人が歩いているイベントを検知することが考えられ、それらを遷移の値として

記述する。

ここで、図3を用いてセンサが検知する変化、イベント、遷移、状態の関係を説明する。図はドアが「開き」、「閉じ」、「開閉する」遷移を2回繰り返したものである。ただし、Y 軸方向の加速度センサと温度センサの波形は省略している。 cx_i および cz_i ($i = 1, \dots, 6$) は、X および Z 方向の加速度センサから得られた波形における変化である。これらの範囲を併合したものが、加速度センサのイベントである em_i ($i = 1, 2, 3$) である。このとき、同じイベントである「開く」、「閉じる」、「開閉する」をまとめている。 ei_i ($i = 1, 2, 3$) は照度センサのイベントである。加速度センサと照度センサのイベントの範囲を併合したものが、遷移である t_i ($i = 1, 2, 3$) である。さらに、遷移の範囲以外が状態 s_i ($i = 1, 2$) である。 s_1 と s_2 はそれぞれ閉状態と開状態をあらわす。つまり、本研究で定義する遷移は、加速度センサ、照度センサ、または、温度センサのいずれかが変化している範囲であり、変化が起きていない範囲を状態としている。

ここで、われわれは「開閉する」を一つの遷移としている。一般的には、開閉は開くと閉じるの二つの現象が連続して起こるものとしたほうが自然である。しかし、図3の cx_3 などの波形を見ても分かるように、センサデータからは開くと閉じるの二つの遷移が連続して起こったと認識するのは不可能である。これはトレーニングデータをあらかじめ用意しないことに起因するが、開閉するという遷移が認識できれば、ドアが開いたということも認識できるため問題はないと考える。以上のように、間を置かず連続して起こる現象は本研究では一つの遷移とする。

5. モノの状態遷移図

本節では以上の定義に従って状態遷移図を記述する方法を説明する。

5.1 状態遷移図の形状

まず、状態遷移図の形状を決定する。簡単に言えば、モノに一般的に起こると考えられる遷移と、モノの状態をピックアップし、それらをつなげることで状態遷移図の形を決める。このとき、前節で定義したような条件に則って遷移と状態をピックアップする必要がある。

ここで、われわれの提案するモノの状態遷移図における状態は遷移のように値を持たない。これは、モノのそれぞれの状態におけるセンサノードから得られる値は環境に大きく依存し一般性をもたないためである。以降では、遷移の記述方法について、まず遷移の要素であるイベントの記述から説明していく。

5.2 イベントの記述

2で述べたように、様々な環境や状況でモノの推定を行うため、抽象化した表現で状態遷移図（特にイベント）を表現する必要がある。しかし推定の精度を高くするためには、ある程度詳細な表現も必要になる。そこで、センサの種類ごとに環境に依存せず取得できるイベントをピックアップし、それらのみを詳細に表現する。例えば、ロッカーを開けるとロッカーの内部に設置しているセンサノード付近の照度は上昇する。これは信号の解析から容易に解析できるため、ロッカーが閉まっている状態から開いている状態への遷移には、照度の上昇というイベントが含まれると具体的に記述できる。しかし、ドアを開けるときのドアに添付しているセンサノード付近の照度は変化したが、上昇するか下降するかはそのドアの周辺的环境による。したがって、ドアが閉まっている状態から開いている状態への遷移には、照度の変化というイベントが含まれると抽象的に記述する。また、例えばイスに人が座ったなどの、センサデータの解析から一意に特定が不可能な遷移も、人が座っている状態から座っていない状態への遷移には加速度センサの変化というイベントが含まれると抽象的に記述する。

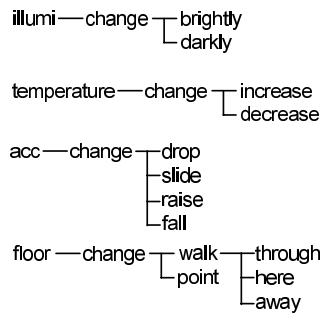
本研究では、図4(a)のようにそれぞれのセンサが検知するイベントを、ノードの深さが抽象度に対応する木構造で表現している。“illumi”を根とする木は照度センサが検知できるイベントを表しており、まず最も抽象的なイベントとして“change”がある。そして、その子に対応する具体的なイベントとして、“brightly”と“darkly”がある。温度センサの木でも、最も抽象

的なイベントとして“change”がある。そして、その子に対応する具体的なイベントとして、“increase”と“decrease”がある。加速度センサの木でも最も抽象的なイベントとして“change”がある。そして、その子に対応する具体的なイベントとして、“drop”と“slide”と“raise”と“fall”がある。これらはそれぞれ、落下と水平方向への移動と垂直上方向への移動と倒れることをそれぞれあらわす。床圧センサの木でも最も抽象的なイベントとして“change”がある。そして、その子に対応する具体的なイベントとして、“walk”と“point”がある。これらはそれぞれ、床圧センサが検知する人の歩行と、なんらかのものが落下するなどして床の一点に接地した現象を表す。さらに、“walk”の子に対応する最も具体的なイベントとして、“through”と“here”と“away”がある。これらはそれぞれ、モノを通り抜ける、モノまで歩いてくる、モノから遠ざかって歩いていくをあらわす。つまり、これらのイベントはモノの位置が分かっていたら検出できないものであるが、モノの推定後にこのイベントを用いてモノの位置をさらに推定する応用も考慮してこれらを採用した。また、将来的に無線電波強度等からセンサノードの位置を高い精度で特定できる方法が確立されることも考えられる。

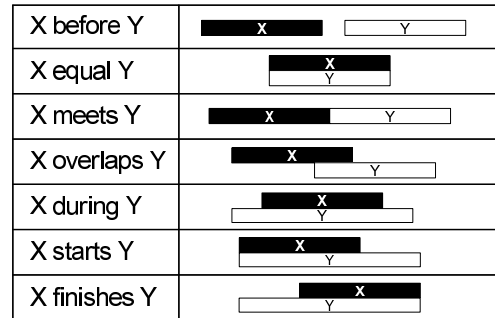
ここで、ドアが開いた際の照度の変化は環境によるため、照度が増える(“illumi.change”)というイベントを用いて記述すると前述した。実際に、ある環境でドアを開いた際のセンサの照度が上昇していたとしても、階層的な表現を用いることにより、照度の上昇は温度の変化に含まれることが分かるため、モノの推定の際の遷移のマッチングに利用できる。

5.3 遷移の記述

次にイベントの集合である遷移の記述について説明する。状態遷移図における遷移は、それぞれのセンサによって得られたイベントの集合であり、それらのイベントの間に時間的な関係が存在する。例えばドアを閉めるという遷移では、床圧センサが人が歩くイベントを検知した後、加速度センサと照度センサが変化するというイベントをほぼ同時に検知する。その後、さらに床圧センサが人が歩くイベントを検知する。このようなイベント間の時間的な関係はAllenの時区間関係表現を用いて表現する。Allenは13通りの時区間関係を定義しており、図4(b)にそれらを示す(“equal”以外にはそれぞれインバースの関係が存在する。)。例えば、“X before Y”では、黒の矩形がイベントXの、白の矩形がイベントYの時間的な範囲をあらわし、イベントXのあとにイベントYが起こっている。この



(a)



(b)

図 4 (a) センサが検知するイベント, (b) Allen の時区間関係表現

時区間関係表現を用いて、遷移の際に起こりうるイベントの時間的な関係を遷移の値として記述する。

5.4 モノの可搬性と可動性

モノには可搬性 (portability) と可動性 (mobility) があるものがあり、それらに共通して起こる遷移が存在する。例えばコップは可搬性のあるもので、人が持ち歩いたり座りながらその位置を移動させる遷移が存在する。さらに、高いところから落ちたり倒れたりする遷移も存在する。イスは可動性のあるモノで、人が押して移動させたり倒れたりする遷移が存在する。また、全てのモノに共通して起こる遷移も存在する。例えば、あるモノに人が近づくと、人の影によりそのモノの周辺の照度が下がることがある。以上の遷移を全て考慮すると、状態遷移図は複雑となり記述の際に大きな負担となる。そこで、記述したいモノに可搬性や可動性があると明示すれば、そのモノの全ての状態に対応する遷移が存在すると解釈するとする。

以下に、可搬性があるモノ、可動性があるモノ、全てのモノに共通して起こる遷移を示す。

可搬性 { 倒れる, 持ち歩く (人の移動あり), 移動する (人の移動なし), 落ちる }

可動性 { 倒れる, 移動する (人の移動あり) }

全て { 人がぶつかる, 人が近づいて暗くなる }

そして、今回はページの都合上示さないが、それぞれの遷移をイベントの集合として定義した。ただし、これらの遷移は、上記した遷移の内容からも分かるように全てループバックの遷移とする。つまり、状態が変化しない遷移とする。

5.5 状態遷移図の記述

以上を考慮して図 1(b) に示した 11 のモノの状態遷移図を作成した。このとき、できるだけモノの遷移の取りこぼしを防ぐために日本語語彙大系⁴⁾を用いてモノごとの遷移をピックアップした。具体的にはモノに関係する用言から、センサによる検知が可能で、コ

ンテキストウェアなサービスを提供する際に、有用であると考えられるものを選択し、それに対応する遷移を吟味した。状態遷移図はあらかじめ記述方式を定義した XML で記述する。図 5 に、ドアの状態遷移図を図式化したものを示す。“Open” の遷移から出ているバルーンは、その遷移が起こる際のイベントの集合を時系列であらわしている。この例では“Open” の遷移は 2 通りのケースが存在しており、一つ目は人が歩きながらドアを開けて通り抜けていくケースを、二つ目は人がドアの前まで歩いてきて立ち止まってからドアを開けドアから離れて歩いていくケースを表している。このように一つの遷移に対して複数のケースを記述できるため、さまざまな状況を考慮できる。

6. モノの推定について

本節では、前節で述べた状態遷移図とセンサノードから得られた信号のマッチングを行う方法について考察する。つまり、その信号が観測され得る尤もらしい状態遷移図を決定することでモノの推定を行う。ここで、4 において図 3 を用いて説明したように、センシングした信号からは遷移と状態のシーケンスが得られると考えられる。このシーケンスから、状態遷移図の形を推定するような従来研究は存在する。例えばコンピュータへの侵入検知の研究では、呼び出されたシステムコールのシーケンスから異常な侵入を検知している。このとき、通常のユーザのシステムコールのシーケンスから学習された最終状態オートマトンなどを作成し、それから逸脱したシーケンスを異常な行動としている¹¹⁾¹³⁾。最終状態オートマトンなどの作成方法は、本研究でも利用できると考えられる。つまり、最終状態オートマトンを本研究における状態遷移図に置き換え、学習した遷移図とあらかじめ用意した遷移図とのマッチングを行うことで、シーケンスが観測される尤もらしいモノを決定できると考える。

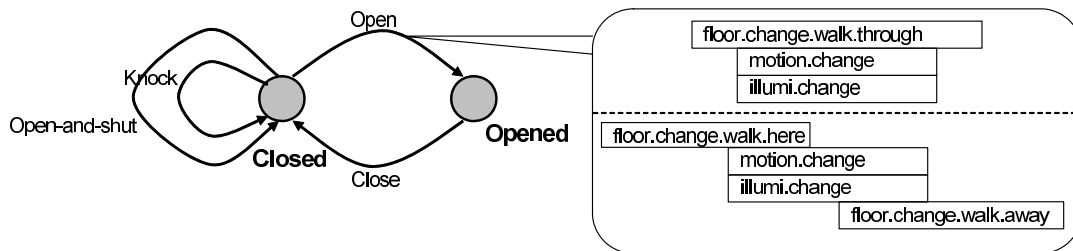


図 5 ドアの状態遷移図

7. むすび

本稿では、ユビキタスコンピューティング環境において、汎用的なセンサノードをモノに添付するだけで、そのモノやモノの状態の推定を可能とするための方法について考察した。さまざまな環境においてモノの状態推定を実現するためには、モノの状態や遷移などを抽象的に記述できる状態遷移図が必要であると考え、その記述方法について述べた。今後は、具体的な状態の推定方法についての検討と実現を行う予定である。

参考文献

- 1) J. F. Allen, "Maintaining knowledge about temporal interval," *Commun. of the ACM*, 26(11):832–843, 1983.
- 2) L. Bao and S. S. Intille, "Activity recognition from user-annotated acceleration data," *Proc. PERVASIVE 2004*, pp. 1–17, 2004.
- 3) 藤波香織, 山邊哲生, 小林勲美, 長谷部晴美, 中島達夫, "現実世界のモデル化と家庭におけるコンテキストウェアネスへの応用," マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (*DICOMO2004*) シンポジウム, pp. 527–530.
- 4) 池原 悟, 宮崎 正弘, 白井 諭, 横尾 昭男, 中岩 浩巳, 小倉 健太郎, 大山 芳史, 林 良彦, "日本語語彙大系 CD-ROM 版," 岩波書店, 1999.
- 5) N. Kern, B. Schiele, and A. Schmidt, "Multi-sensor activity context detection for wearable computing," *Proc. European Symposium on Ambient Intelligence*, pp. 220–232, 2003.
- 6) A. Krause, D.P. Siewiorek, A. Smailagic, and J. Farringdon, "Unsupervised, dynamic identification of physiological and activity context in wearable computing," *Proc. International Symposium on Wearable Computers*, pp. 88–97, 2003.
- 7) S.-W. Lee and K. Mase, "Activity and location recognition using wearable sensors," *IEEE Pervasive computing*, 1(3):24–32, 2002.
- 8) P. Lukowicz, H. Junker, M. Stager, T.V. Burden, and G. Troster, "WearNET: a distributed multi-sensor system for context aware wearables," *Proc. UbiComp 2002*, pp. 361–370, 2002.
- 9) W. Pentney, A. Popescu, S. Wang, H. Kautz, M. Philipose, "Sensor-based understanding of daily life via large-scale use of common sense," *Proc. AAAI 2006*, 2006.
- 10) M. Philipose, K. P. Fishkin, and M. Perkowitz, "Inferring activities from interactions with objects," *IEEE Pervasive computing*, 3:50–57, 2004.
- 11) R. Sekar, M. Bendre, D. Dhurjati, and P. Bolline, "A fast automaton based method for detecting anomalous behaviours," *Proc. IEEE Symposium on Security and Privacy*, pp. 144–155, 2001.
- 12) B. Schilit, N. I. Adams, and R. Want, "Context-aware computing applications," *Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp. 85–90, 1994.
- 13) C. Warrender, S. Forrest, and B. Pearlmutter, "Detecting intrusions using system calls: alternative data models," *Proc. IEEE Symposium on Security and Privacy*, 1999.
- 14) J. Yamamoto, J. Ohya, and K. Ishii, "Recognition human action in time-sequential images using hidden markov model," *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 379–385, 1992.