

博物館向けコンテキスト依存サービスにおける M-Spaces 空間モデルの実証実験

佐藤 一郎^{†1}

コンテキスト依存サービスのための空間モデルである M-Spaces の表現性や汎用性などを調べるために、博物館・美術館向けの位置およびユーザ依存展示支援システムを構築し、実際の博物館（国立科学博物館や兵庫県立人と自然の博物館）において実証実験を行った。この実験はアクティブ RFID タグ技術を利用して、ユーザの位置を推定し、それを空間モデル上で再現するとともに、ユーザが所定の展示の前に立つとその展示に関する音声解説を自動選択・再生するものである。本論文では実装・実験の概要とその過程で得られた知見を述べる。

Experiences with the M-Spaces Location Model in Context-aware Services for Museums

ICHIRO SATOH^{†1}

This paper describes experiences with the M-Spaces location model. To demonstrate the utility and effectiveness of the model, location/user-dependent audio guide systems for museums were constructed based on the model and the systems were used in several museums, e.g., the National Science Museum (Tokyo) and the Museum of Nature and Human Activities (Hyogo). By using active RFID technology, they locate the positions of users and provide audio-based annotations about exhibitions in front of them, where the annotations can depend on their interests and knowledge. This paper discusses experiences and evaluations of these experiments in these museums.

1. はじめに

コンテキスト依存サービスはユビキタスコンピューティングの重要なアプリケーションである。このコンテキスト依存サービスはセンサなどを通じて物理世界の状況（コンテキスト）を把握して、そのコンテキストに応じてサービスを実行することになる。このときセンサの相違を抽象化して、サービスに対して高水準かつ統一的なインタフェースを提供する方法として、空間モデル（または世界モデル）を構築することが求められる。いくつかの空間モデルが提案されており^{2),3),10),12)}、著者も位置・ユーザ依存サービスのための M-Spaces^{16),17),19)} モデルを提案している。

他のモデルと同様に M-Spaces 空間モデルは物理世界における空間や人、モノに対して仮想的オブジェクトを与え、また物理世界の空間的含有関係に応じて仮想的オブジェクトに構造的な関係を与える。たとえば

ビルに部屋があり、その部屋にユーザがいることは、部屋に対応した仮想オブジェクトはビルに対応した仮想オブジェクトに含有されると同時に、ユーザに対応した仮想オブジェクトを含有することとして表現する。従来モデルに対して特徴的な点として、仮想オブジェクトは単なるデータ表現ではなく、プログラム可能な実体となることから、仮想オブジェクトが対象となる空間や人、モノの代理オブジェクトとして機能する。この空間モデルではコンピュータの位置、サービスを定義するソフトウェアの位置も管理できることから、空間モデルそのものが、コンテキストに応じたサービス発見機構として利用できることになる。

さて既存空間モデルには共通の問題がある。それは実証実験や評価が不足していることである。既存研究では空間モデルの提案とプロトタイプ実装だけであることが多い。実証実験まで行ったものが少数あるが、その実験方法には問題がある。たとえばスマートルームなどの名称で研究室内に実験空間を作ることが広く行われている。しかし、恣意的に作られた実験空間では、家具、センサや機材などは評価対象の空間モデル

^{†1} 国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系
Information Systems Architecture Research Division,
National Institute of Informatics

にあわせて設置できることになり、実環境における表現性や可用性を正当に評価しているとはいえない⁴⁾。さらにコンテキスト依存サービスの種別や内容も実験の都合で選ばれることも多く、さらにその実装もプロトタイプシステムの域を超えていないことがほとんどである。こうした実験はデモンストレーションにはなるかもしれないが、空間モデルにおいて重要となる表現性や汎用性などの実験・評価とはいえない。さらにその評価方法にも問題が多い。たとえばほとんどの既存実験は被験者が数十人以下であり、統計的に信頼性がある評価とはならない。さらにその被験者も研究室のスタッフや学生となっている。つまり被験者には実験システムに関してあらかじめ知識があることになり、想定外のユーザ行動をとることは少なく、可用性や信頼性などの基礎的な特性すら正当に評価できていない。

そこで M-Spaces モデルの実証実験として、兵庫県人と自然の博物館、神戸大学附属小学校（住吉）、国立科学博物館（上野）などの実空間において、M-Spaces モデルを用いたユーザ・位置依存展示支援サービスを実装し、実ユーザとなる一般来館者に利用してもらい、M-Spaces モデルの有用性や運用可能性について実験・評価した。なお、本論文の対象は M-Spaces モデルの表現性や汎用性であり、展示支援効果、つまりユーザ行動や展示支援効果については他稿に譲ることとする。

本論文の構成を述べる。続く 2 章では空間モデルの概要を説明し、3 章では博物館・美術館向けの展示支援システムについて概説し、4 章では M-Spaces モデルを用いたユーザ・位置に依存する展示支援システムの設計と実装について説明する。5 章ではその展示支援システムにおける知見をまとめ、6 章では関連研究との比較、7 章では結論を述べる。

2. 博物館向け位置・ユーザ依存展示支援システム

本論文では M-Spaces モデルを博物館・美術館向けのユーザ・位置展示支援システムに適用した事例について報告していく^{*1}。さて博物館・美術館では展示支援方法として展示品近くに設置したポスターやビデオによる解説が広く行われているが、解説を見るために展示品から視線をそらす必要があり、ポスターやビデオを設置できない場合も多い。これを解決する方法と

して、来館者にポータブル型の音声再生装置（PDA や MP3 プレーヤを含む）を貸し出し、来館者は展示品の前で音声解説を聞くものである。ただし、以下のように問題点も多い。博物館・美術館では位置およびユーザ依存した新しい展示支援システムへの需要は大きい。下記では既存手法との対比を通じて、コンテキスト依存サービスによる博物館・美術館向け展示支援システムへの要求を議論していく。

- 展示支援内容の多様化：来館者の興味や知識は相違するにもかかわらず、既存展示支援では画一的な情報を提供するとどまっている。このため来館者の興味や知識に応じた支援内容が求められる、つまりユーザ依存の展示支援が要求される。さらに同一の来館者でも鑑賞回数などに応じて支援内容が変えられると来館者の知識が深まるとともに、リピータの増加も期待できる。
- 操作の煩雑さの最小化：ポータブル型音声再生装置では、来館者が作品番号などを入力しなければならない。しかし、入力作業は煩雑であり、年齢の低い児童などには入力が難しい。このため、来館者による機器操作は最小限にすべきである。また、従来手法では番号入力を間違えることも多く、さらに目前の展示品とは違う展示品の解説を聞いていても気がついていない来館者も多く、目前の展示品の解説を自動的に行う方がよい。
- 運用コストの低減：ポータブル型音声再生装置は高価であり、さらに充電を含む保守管理作業などの運用コストは小さくない。また、液晶やヘッドホンなど壊れやすい部品も多く、故障・紛失が少なからず発生する。このため据え置き型かつユーザ依存の解説コンテンツを再生できる方法が望まれる。
- 信頼性：展示順路があっても来館者はそれを守るとは限らない。想定外の行動に対応できること、そして必要に応じて来館者に展示順路を指示する機能が求められる。また、センサなどは認識ミスや測定誤差は避けられないが、仮にミスや誤差が生じてその影響を最小化することが求められる。
- 設置・調整の迅速化：博物館・美術館への実験機材の設置・撤収は閉館後または週 1 回程度の休館日に行う必要がある、さらに下見や事前設置もできないことが多い。このためセンサの調整・チューニングを含めて数時間、長くても 1 日で行えることが要求される。また、休館日以外は調整すらできないことがある。

*1 モデル自体は汎用的であり、博物館や美術館を想定していない。博物館・美術館は来館者が多く、被験者数が増えることに加えて、来館者の年齢層が幅広く、または性別も偏らないため、多様な被験者により実験するのは都合がよい。

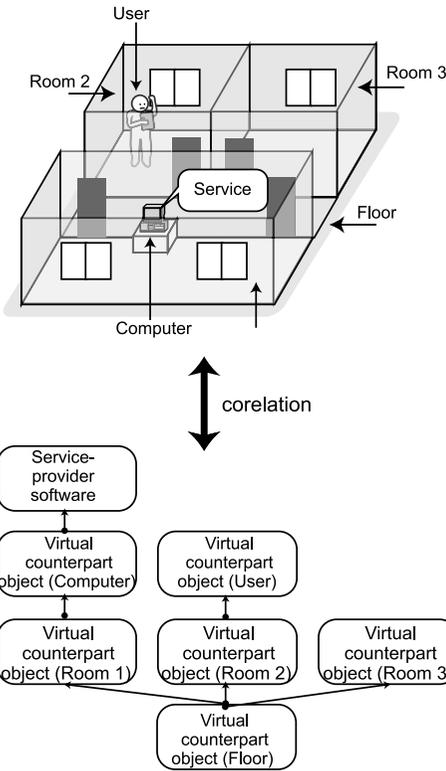


図 1 物理空間・実体の配置と空間モデルの含有関係

Fig. 1 Containment relation based on spaces and objects in physical world.

3. M-Spaces : 空間モデル

ここでは評価実験の対象となる M-Spaces モデルについて概説する*1。ユビキタスコンピューティングを前提とした空間モデルは、緯度経度などの座標情報によるものと、建物や部屋などにつけられた名前や番号などの記号情報によるものの 2 つに大別できる。M-Spaces モデルでは後者に対応する。

M-Spaces モデルでは他の記号的空間モデル^{2),3),12)}と同様に人やモノ、場所に対してモデル上の表現である仮想カウンターパートオブジェクト (Virtual Counterpart Object, 以降では VC と記載する) を導入する。VC は下記のような構造関係を持つことができる。

- VC は 0 個以上の他の VC を含有できる。
- VC が移動する場合はそれに含有されている VC もともに移動する。

図 1 のように VC 間関係は木構造となり、物理世界の人やモノ、空間の含有関係は木構造として表現される。たとえばフロアに複数の部屋があるときはそれぞ

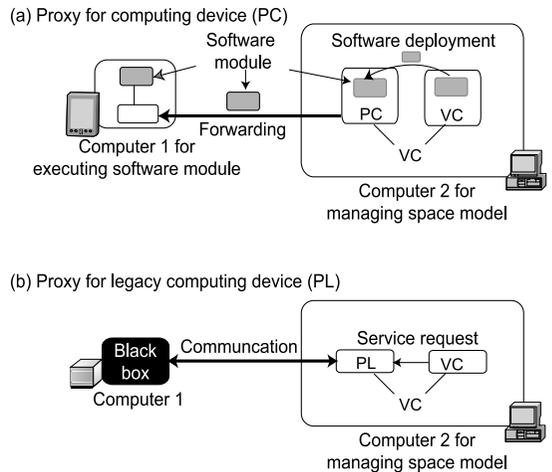


図 2 デバイスのプロキシ (PC と PL)

Fig. 2 Proxy objects (PC and PL) for devices.

れの部屋に対応する VC がフロアに対応する VC に含有されることになる。位置センサなどのセンシングシステムを通じて物理世界の変化を捕捉してその変化を空間モデルに反映する。たとえば人がある部屋に移動することは、人に対応した VC が移動先の部屋に対応した VC に含有されることで表現する。従来の空間モデル^{2),3),12)}では VC に相当する要素は、単なるデータ表現であるが、M-Spaces モデルではプログラマブルな能動的オブジェクトとして定義される。つまり、VC は属性値だけでなくプログラムコードを保持するとともに、さらに VC 間通信機能を持つ。これは当該属性値を持つ VC の検索、メソッド呼び出しに準じたデータ受け渡し機能である。なお、M-Spaces モデルの実装では VC は Java オブジェクトとして定義され、1 つ以上の実行スレッドが割り当てられる。また、VC はそのコードによりサービスを定義可能であり、空間モデルそのものがコンテキスト依存サービスの実行系となる。VC はそれが内包する VC のメソッドをサービスとして呼び出せる。

さらに M-Spaces モデルでは、人やモノ、場所などの物理的実体や空間だけでなく、コンピュータやデバイス、サービスも統一的に扱える。コンピュータやデバイスに対応した VC として、次の 2 つを導入する。

- PC (Proxy for Computing device) は、ソフトウェアのダウンロード・実行できるコンピュータやデバイスへのプロキシとなり、ソフトウェアを受け取るとその対象となるコンピュータやデバイスに転送して、実行させる (図 2 (a))。
- PL (Proxy for Legacy device) は、外部との通信機能を持つデバイスのためのプロキシであり、

*1 詳細は前稿¹⁶⁾を参照されたい。

デバイスと通信してそのデバイスを監視・制御できるようにする(図2(b)). この結果, PLはデバイスのインタフェースとして機能し, デバイスの相違や低レベル制御を隠蔽する.

PCとPLはVCと同様に対象となるデバイスの空間的位置に応じて空間モデル上に配置される. 前者は一般のPCなどの汎用コンピュータを想定するのに対し, 後者は情報家電を含む特定の機能を提供するデバイスが対象になる. なお, 後者のデバイスは通信機能が制限されていることが多い. たとえばテレビなどはコントロール用インタフェースとして, 赤外線リモコンしか持っていないことが多いが, 赤外線リモコンの信号を送信するPLを提供することにより, テレビも空間モデル上で制御できるようになる. とところで, PCとPLはVCのサブクラスとして定義される. また, VC, PC, PLはそのサブクラスを定義することにより拡張することができる.

このほか, サービスだけを定義し, 特定の物理世界に対象を持たないVCを導入することにより, サービスそのものもVCとして空間モデル上で統一的に扱えることになる.

4. 実 験

M-Spaces 空間モデルの実証実験として2つの博物館において, 位置およびユーザ依存性を持つ展示支援サービスの実装・運用を行った. いずれの実験もM-Spaces モデルにより参加者とその立ち位置を把握して, ユーザである参加者が, スポットと呼ぶ所定場所や展示品の前に入ると, そのスポットに設置されたスピーカを通じて, その参加者に対して音声解説コンテンツを自動選択・再生するものである.

4.1 位置センサの選択

M-Spaces モデルは特定の位置センサに依存せず, 実験環境や用途に応じて位置センサを選択することになる. さて, 室内におけるユーザ位置を推定する方法は複数あり^{*1}, たとえば近接方式(Proximity方式)と3点測量方式(Lateration方式またはAngulation方式)に大別される⁹⁾. 前者では所定の位置の近くにユーザがいることを判定する方法であり, たとえば赤外線タグシステムやアクティブRFIDタグシステムでは, ユーザは識別子を含むビーコン信号を定期発信するタグを保持する. 室内に設置された受信機(赤外線リーダまたはRFIDリーダ)により, (所定の強度以

上の)信号を受信すればそのタグは受信機の近くにあると判定する. この方法では高い精度の測位はできないが, タグがたかだか1つの受信機の受信可能範囲にある場合は, 他の受信機に検知されることはないことから, 誤認識は少ない. 後者の方法としてはタグが発信する電波の電波強度を計測する方法(RSSI方式)¹⁾や, 電波または超音波の到着時間差を3点以上計測してタグの数値的位置を推定する測位方式(TDoA方式)¹⁴⁾がある. 室内では電波強度は不安定であり, タグの実際位置とは大きく離れた位置を算出することが多い. TDoA方式は比較的精度が高いが, ノイズは他の電波または音波などの影響により実際位置と大きく離れた位置を算出することがある. このほか, コンピュータビジョンなどの画像処理により位置を推定する方法があるが, カメラを利用する技術はプライバシーの観点から博物館で設置できるとは限らない.

一方, 博物館の展示支援では展示品の大きさは数メートル程度あることも多く, 高い精度が必ずしも要求されない. むしろ, センサの測定ミスやノイズの影響により, ユーザの現在位置と違う位置にいると推定してしまうと, そのユーザが展示支援サービスを受けられないだけでなく, 別の場所にいるユーザに対して他者向けのサービスが提供されることになるなど混乱の原因となる. このため測位精度よりも, 間違った位置を推定する可能性が少ない方法が望まれることになる. そこで実験ではアクティブRFIDタグによる近接方法を利用した. またユーザへのタグ添付であるが, 博物館におけるユーザの年齢や身長は多様であること, またユーザが向いている方向に依存性が少ない方法として, 両実験ともに参加者にはRFIDタグを埋め込んだ帽子をかぶってもらった^{*2}.

4.2 基礎実験

汎用的な空間モデルはその維持・反映のためのコストがオーバーヘッドとなるが, M-Spaces ではたとえばセンサからコンテキスト情報に関するイベントを受け取ってから, その情報に対応するVCを発見し, そのイベントがVCに伝わるまでの時間は5ms以下となる. また, 人やモノがある場所から別の場所に移動したときにおける, 移動対象に対応するVCが移動元に対応するVCから移動先に対応するVCへの移動コストは, 移動先と移動元のVCが同一コンピュータ

*1 著者はRFID技術および測位技術のISO規格委員であり, 測位技術や各社の位置センサを評価する立場にある.

*2 当初はRFIDタグを埋め込んだ小型ペンダントを参加者の首からぶら下げてもらうことを想定していたが, 事前実験の結果, 参加者の向きによって電波強度が変動することや, さらに参加者によってはペンダントを手で握りしめることがあり, ビーコン信号を安定して受信できなかった.

上の場合は 10 ms 以下となる。また、それらが異なるコンピュータ上で管理されている場合は 60 ms となるが(上記の実験では VC は Intel Core Duo 1.66 GHz と Windows XP を搭載したコンピュータで管理され、コンピュータ同士は Fast Ethernet で接続される)、空間モデルそのもののオーバーヘッドは小さいといえる。したがって、コンテキスト依存サービスのレスポンス性能などはむしろセンサのサンプリング間隔や検知速度に依存することになる。下記の 2 つの実験では RF-Code の Spider III アクティブタグシステムを利用した。これはリーダの受信可能範囲は 0.5 m ~ 10 m 程度の範囲で変更でき、さらにタグは 1 秒間隔にビーコン信号を発信するものである。博物館の展示支援の場合、来館者は展示品の前などで立ち止まることが多く、両実験ともに 1 秒間隔のタグでも十分に捕捉できた。

4.3 空間モデルによる表現

M-Spaces モデルでは空間や人の空間的關係は、空間や人に対応した VC の含有関係として表現する。まず以下の 2 つの実験に共通する部分から説明する。展示室に対して VC を導入し、VC 木構造の根とした。図 3 のように展示支援を行うスポットにはアクティブ RFID リーダが導入されているが、ここではリーダの受信可能エリアに対して VC を導入した。これは展示室に対応した VC に含有されることになる。このリーダの VC は、たとえばリーダごとに受信すべき電波強度 (RSSI) の閾値などの RFID リーダの設定に加えて、下記のようなタグ入出を判別するアルゴリズムを定義している。

- 参加者の RFID タグのビーコンを RFID リーダが受信して、タグの識別子を認識することで参加者がそのリーダのスポットにいることを判別する。しかし、参加者はスポットで音声解説を聞くためではなく、単にスポットを通り抜けるだけのことがある。このため RFID リーダがタグを認識しても、所定時間以上続けて RFID タグが存在する場合だけ、参加者がスポットにいると判断した方がよい場合がある。そこで最短滞在を調整できるようにして、所定時間以上続けてスポットにいないと音声コンテンツの再生が始まらないようにした。
- RFID リーダは参加者が移動して認識可能エリア外にいないと、RFID タグのビーコン信号は受信できなくなるが、ノイズなどの電波的状况により、参加者がエリア内にいてもリーダがタグのビーコン信号を受信できない場合もある。このため、

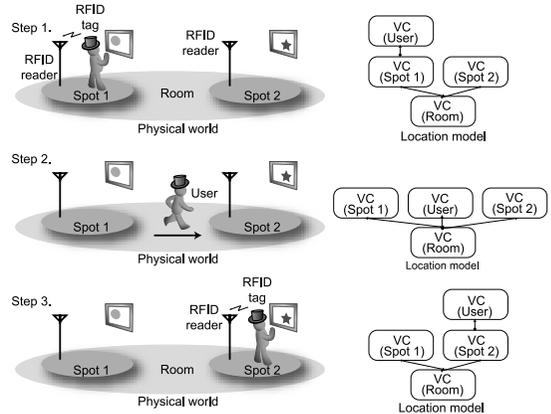


図 3 アクティブ RFID によるユーザ位置推定と空間モデル
Fig. 3 Location model and user tracking with active RFID system.

リーダが所定回数のビーコン信号を未受信の場合だけ参加者がそのスポットにいないと判定できるように未受信回数(または時間)を調整できるようにした。以下の実験では 2 回または 3 回以上連続してビーコン信号を受信できないときにはじめて参加者が別の場所に移動したと判定することにした。

リーダは設置場所や電波状況に応じて調整が必須となるが、M-Spaces モデルでは個々のリーダの設定・アルゴリズムはそのリーダの VC 内に定義できることから、リーダごとにきめ細かい調整が行えた。タグがリーダの受信可能範囲にあっても、前述のようにノイズや遮蔽物の影響によりそのタグのビーコン信号をつねに受信できるとは限らない。帽子には 6 個のタグが埋め込まれている。タグが 1 個の場合、参加者の向きなどによりユーザの頭部がタグとリーダ間を遮蔽して、タグの認識に失敗することがある。そこで複数個のタグを相違な方向になるように埋め込み、タグの方向による影響を軽減するとともに、リーダの VC に埋め込んだプログラムにより、所定数以上のタグを検知した場合のみ帽子が存在すると取り扱うようにした^{*1}。アクティブ RFID タグに関する設定・アルゴリズムはリーダの VC 内で定義されるため、M-Spaces 空間モデルそのものは特定の位置センサに依存しない。

また、各参加者に VC を与える。この VC は参加者が実験にはじめて参加するときに生成され、参加者がかぶる帽子に埋め込まれたタグの識別子を登録する。ここではユーザがあるスポットから別のスポットに移

*1 複数タグはタグの電波信号どうしがコリジョンを起こすことがあり、現状ではタグ数は経験的に決めている。

動する場合を考える．まず図3のステップ1のように当初，ユーザのVCは移動元スポットのVCに含まれるとする．移動元のRFIDリーダがタグが存在しないと判断すると，図3のステップ2のようにユーザのVCはRFIDリーダを含有する空間，つまり展示室のVCに含まれているとして扱われる．移動先スポットに設置したRFIDリーダがタグの存在を認識すると，その識別子から参加者を特定し，そのスポットのVCにその参加者に対応したVCが存在するか調べる．当該のVCが存在しない場合は展示室に対応したVCに対して，VC間通信により問合せメッセージを送って，タグの識別子を含むVCが存在するかを同様に問い合わせる．参加者に対応したVCを見つけると，そのVCに対してタグを認識したリーダのVCに移動するようにメッセージを送り，図3のステップ3のようにVCが移動する．また，参加者のVCには識別子のほかにコース名，推奨順路，参加者の軌跡（スポットへの入出時間と回数）などが記録可能であり，さらにログを記録するために明示的にこれらの情報をファイルなどに出力することもできる．参加者のVCの定義例を下記にあげる．

```

class VisitorVC extends VirtualComponent
implements StructureListener {
    public void setItinerary(String) { ... }
    public int visitItinerary(URL u) { ... }
    // callback method invoked when it arrives
    // at a spot's VC
    public void arrive(URL u) {
        // Requests to VCs in its container VC.
        ServiceInfo[] si = getParentServices("SPEAKER");
        ....
        if (visitItinerary(u) == 0) {
            execService(si[i],
                new Message("play", u.getName(), "course-A"));
        }
    }
    ....
}

```

4.4 実証実験 1 (兵庫県立人と自然の博物館)

兵庫県立人と自然の博物館において，企画展示として3日間実施した．この実験では図4のように展示室に5m×5mの正方形の空間内に4つのスポットを配置した．実験参加者がスポットに移動するとその参加者およびスポットに応じた音声解説をスピーカから再生する．音声コンテンツは動物当てクイズであり，参加者には実験場所（兵庫県）に生息するシカやキジなど6種類の動物いずれかを割り当て，参加者が各スポットに入るとその割り当てられた動物の生態（生息している場所，食べ物）に関する音声解説や鳴き声が再生される．そして4スポットをまわった後に解説

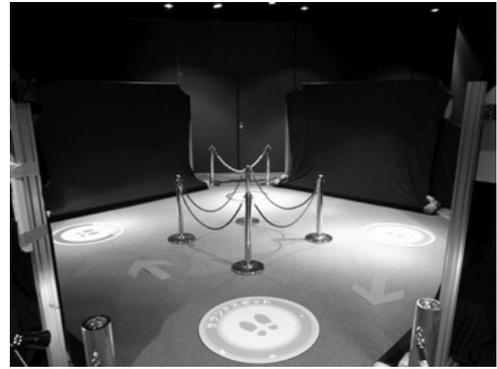


図4 兵庫県立人と自然の博物館における展示室とスポットの配置
Fig.4 Four spots in exhibition room at the Museum of Nature and Human Activities, Hyogo.

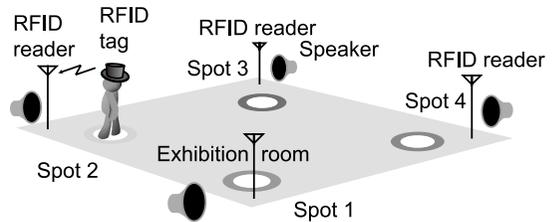


図5 実験システムの構成（兵庫県立人と自然の博物館における実験）
Fig.5 System structure for experiment at the Museum of Nature and Human Activities, Hyogo.

対象となった動物名を当てる（図7）．この実験では図5のように各スポット近くにはRFIDリーダを設置して，リーダの認識可能エリアはスポット範囲にほぼ合致するように調整した．参加者の帽子に埋め込んだタグは1秒間隔で識別子を含むビーコン信号を発信しており，受信機は参加者がスポットにいることを認識できる．参加者がスポット内に入ると，参加者とスポットに応じて音声コンテンツが選択・再生される．スピーカの位置が隣接することから，スピーカアレイシステム²⁰⁾を利用して，再生音はスポットの近傍だけで聞こえるようにした．2人以上のグループでまわった参加者が多く，その数は262組であった．

この実験では，展示室に対応するVC，RFIDリーダに対応するVC，参加者に対応したVCを用意し，図6のように配置したことにより，展示室，スポット，ユーザの空間的な関係性を表現できた．また，RFIDリーダはタグの到着，つまり参加者がスポットに入ることが分かると，参加者のVCをそれ自身のVCに移動させる．一方，参加者のVCを他のVCに移動すると，スピーカを制御するPLを探して，音声コンテンツの再生を依頼する．実験1では空間モデルは1つのコン

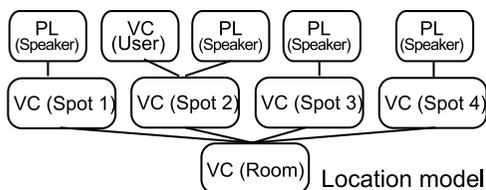


図 6 空間モデルの構成（兵庫県立人と自然の博物館における実験）
Fig. 6 Location model for experiment at the Museum of Nature and Human Activities, Hyogo.



図 7 兵庫県立人と自然の博物館における実験

Fig. 7 Experiment at the Museum of Nature and Human Activities, Hyogo.

コンピュータで管理されており、参加者の VC の移動コスト、VC が PL を発見するコスト、VC と PL 間通信のコストはいずれも 10 ms 以下であり、空間モデルによるオーバーヘッドは無視できることが分かる。また、VC はプログラマブルであることから、たとえば参加者の VC は、コース名（動物名）とスポット名から音声コンテンツ番号を返す関数をその内部に定義することができる。この結果、コンテンツの選択方法も参加者ごとに変更できることになる。これは多様な目的のユーザが混在する環境であっても、個々のユーザに応じたコンテキスト依存サービスを提供できることを意味しており、M-Spaces モデルの重要な特徴となる。



図 8 国立科学博物館における実験

Fig. 8 Participants of user/location-aware assistant system at the National Science Museum.

このほか、実験 1 の補足として、神戸大学附属小学校（住吉）において 2 日間、約 130 人（3 年生全員と 6 年生 1 クラス）に対して同様の実験を行った^{*1}。実験 1 では 4 スポットで音声コンテンツを再生したが、神戸大学附属小学校の実験では設置場所の制約から 3 スポットにして実験した。ただし、これにともなう変更点は空間モデル上において、RFID リーダの VC の数を減らすのと参加者の VC の推奨経路を 3 スポットに対応させただけであり、プログラムの変更などはいっさい不要であった。これは M-Spaces モデルの適応性・汎用性を示している。

4.5 実験 2（国立科学博物館）

国立科学博物館（上野）の古生物展示室において、展示品（恐竜などの古生物の骨格標本）の近くに 6 つのスポットを設置して 6 日間実験を行い（図 8）、120 組の参加があった（参加者の多くは 2~4 人のグループであった）。参加者が解説対象の標本（マンモスや翼竜、スミドロロンなど）の前に設置されているスポット（直径 2~3 m のエリア）に入ると、その標本（マンモスや翼竜など）に関する音声解説コンテンツが自動的に選択・再生されるものであり、各スポットには RFID リーダとスピーカを設置した（図 9）。解説テーマ（歯や足など）ごとに、スポットの巡回コースが相違しており、同じスポットでもコースが違えば解説コンテンツは違うものとなる。なお、空間モデルの実行・管理システムとして 1 台のコンピュータ（Intel Core Duo, MacOS X 10.4 搭載）を用意した。各スポットには図 10 のように参加者（の帽子に埋め込んだタグ）を認識するための RFID リーダと解説コンテ

*1 小学校などで実験するのは、博物館の実験では被験者は一般来館者であり、詳細なアンケートやインタビューなどに協力的とは限らない。一方、学校などは統制実験が容易であり、詳細なユーザ評価ができるからである。

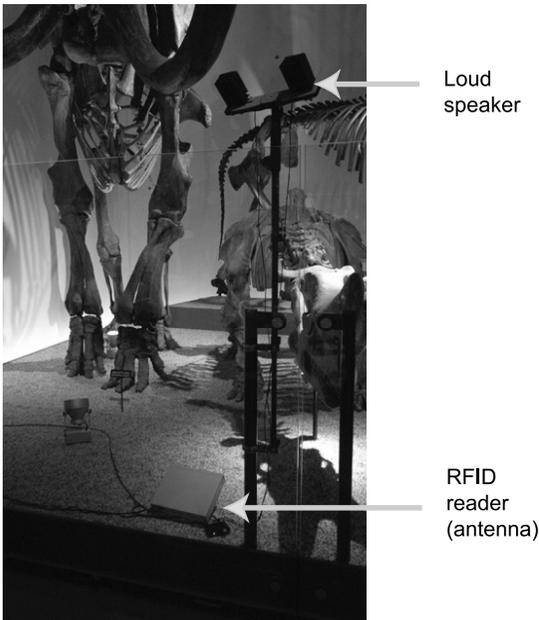


図 9 RFID リーダとスピーカ (国立科学博物館)

Fig. 9 RFID reader and loud speakers at the National Science Museum.

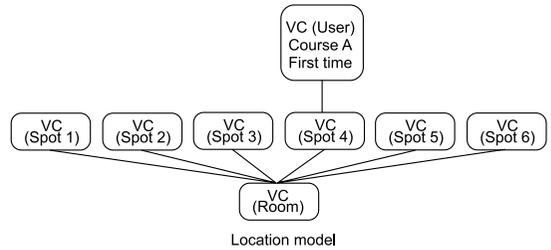


図 11 空間モデルの構成 (国立科学博物館における実験)

Fig. 11 Location model for experiment at the National Science Museum.

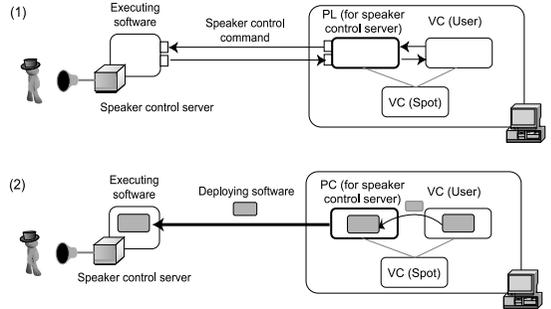


図 12 音声コンテンツの再生方法 (2 種類)

Fig. 12 Location model for experiment at the National Science Museum.

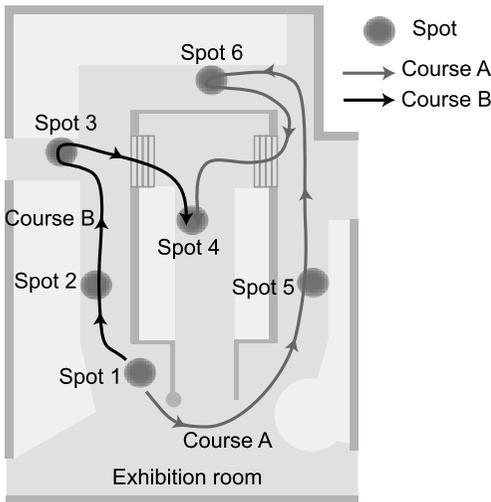


図 10 実験会場とスポット (国立科学博物館における実験)

Fig. 10 Experiment at the National Science Museum.

コンテンツを再生するためのスピーカ, このほか, 各スポットにはスピーカを制御するコンピュータ (Pentium-M 1.2MHz, Windows XP を搭載したノート PC) を工業用コンテナに格納し, 展示品の影などに置いた. スピーカ制御用コンピュータおよび RFID リーダと空間モデルの実行・管理コンピュータとは無線 LAN (IEEE802.11b) により接続した.

実験 1 と同様に展示室に対応する VC, 各 RFID

リーダに対応する VC, 参加者に対応する VC を用意して, 図 11 のように配置した. この実験では M-Spaces モデルの表現性および汎用性を調べるために, 次の 2 つの方法で音声制御用コンピュータと通信する方法を試した*1.

- (1) 図 12 (1) のように実験 1 と同様に各スポットの RFID リーダに対応した VC 内に, スピーカ制御プロキシとなる PL を配置した. この PL はスピーカ制御用サーバと通信をするクライアントとなり, スピーカ制御コンピュータに接続・制御するものとなる.
- (2) 図 12 (2) のように各 RFID リーダの VC に, スピーカ制御用コンピュータに対する PC を配置した. この PC はユーザの VC からスピーカ制御用プログラムを受け取ると, それをスピーカ制御用コンピュータに転送して, そのプログラムによりスピーカを再生する.

上述の 2 つの構成いずれでも, 6 スポット中の 5 スポットに参加者が入った場合でも正常に音声コンテンツが選択・再生されており*2, 本実験の博物館向け展

*1 実験システムの構成では (1) で十分だが, 空間モデルの汎用性を評価するために (2) についても実装・評価した.

*2 5 スポットなのはタグを埋め込んだ帽子の総数が 5 個だったため.

示支援においてはスケラビリティを持つことが確認できた。特に (2) はプログラムコードの移動をとまなうが、そのプログラムコードで直接的にスピーカの制御をすることも可能であり、低水準 I/O を利用する場合には有効な方法となる。参加者のコースは相違する場合があるが、コース設定などは来館者の VC に定義され、その VC が PL を介した遠隔制御または PC によるプログラムコード転送によりスピーカ制御用コンピュータを制御するため、VC により再生コンテンツを選ぶことができた。これは来館者の興味や知識に応じて最適なコンテンツを再生することに道を開く。来館者の VC には参加者がこれまでに通ったスポットや、スポットに入った回数・時間が記録されていることから、参加者の展示経路などに応じてコンテンツを再生できることになる。ところで参加者の VC は推奨順路を保持しているが、参加者がまわるべきスポットとその順番は一意に定まるとは限らず、たとえば2つのスポットはどちらを先にまわってもよい場合がある。このため単純なスポット名列では推奨順路を表現できない。そこで、モバイルエージェント用経路記述言語^{15),18)}を拡張した言語を導入している。この結果、多様な順路を記述でき、後述の実験2では順路から外れた場合は例外処理として順路に戻ることを促す警告アナウンスを流すようにした。

4.6 議 論

2つの実験から得られた M-Spaces 空間モデルに関する知見を述べる。

- 展示支援内容の多様化：各ユーザ（両実験では帽子）は VC を持つことができ、この VC は各種情報、たとえば各スポットに入った時間と出た時間、回数などのログを記録・保持している。これらの情報を利用することで、スポットをまわった順路や、同じスポットでもそのスポットに入った回数によって相違なコンテンツを再生できることを確認した。これは従来手法で難しかった多面的な展示解説を博物館において可能にする点で、M-Spaces モデルの大きな利点となる。タグとコンテンツ種類の割当ては変更でき、実験1では解説対象の動物をユーザごとに違う動物を割り当て、実験2では対象コースによって同じスポットでも解説内容は相違させた。
- ユーザ依存性：個々のユーザが VC を持つことができるが、VC は各種データ構造やプログラムを保持できることから、VC 単位でユーザに特化したサービスを定義・実現できる。たとえばスポットに入ったユーザが音声コンテンツ終了後もその

スポットにいる場合は、再度同じコンテンツを再生する場合と1回に限定する VC をユーザごとに定義して運用した。

- 設置・調整の迅速化：各スポットに設置した RFID リーダの受信感度の設定などはスポットに対応した VC を通じて行える。また、実験1ではスピーカの PL によりコンテンツの選択や音量が制御でき、実験2では制御用スピーカ制御用コンピュータの PC を通じて、コンテンツや音量、再生速度などを調整できる。この結果、空間モデル上で各種設定が行えるようになり、いずれの実験ともに著者1人でセンサおよびコンピュータなどの設置・接続・調整を行ったが、いずれも休館日（1日）で終えることができた*1。
 - 可用性：空間モデルを維持するコンピュータを含む機材は展示ブース内に設置したが、たとえば実験2では展示ブースに週1回の休館日以外には入れない。この結果、M-Spaces モデルの実行システムは最短6日間の連続稼働が必要となった。実験開始直後に帽子の追加などの非技術的要因で再設定した以外は、ほぼ6日間、再起動などをすることなく連続稼働した。これは M-Spaces モデルの実行システムの安定性・可用性を示す点でも重要である。
 - 耐故障性：実運用では長期間の故障・停止は許されないが、M-Spaces により RFID リーダや再生用 PC などは抽象化されており、容易に交換でき、その作業時間も数分であった。これは実運用では重要な特質となる。実験2では砂利の上に機材を設置することから、防塵対策のために RFID リーダの本体やコンテンツ再生用 PC は1つの小型コンテナに入れるとともに、コンテナ単位で瞬時に入れ替えられるようにした。なお、実験中は故障などは起きなかった。
- このほか M-Spaces 空間モデル以外の知見をまとめる。
- 信頼性：実験1では RFID リーダの受信エリアが隣接しているためにユーザがエリアの境界地点に立った場合などにスポットのリーダが受信してコンテンツを再生することがあったが、その回数はきわめて希であり、さらに実験2ではユーザのいないスポットのコンテンツを再生してしまうことはなかった。
 - 操作の煩雑さの最小化：ユーザはタグを埋め込ん

*1 設営前に展示会場において予備実験などは行っていない。

だ帽子をかぶるだけでユーザによる機材操作は
いっさい不要である．コンテンツの切替えはユー
ザ自身のスポット間の移動で実現するため，幼児
でも迷うことなく展示およびその音声解説を聞く
ことができた．

- 運用コストの低減：ユーザに PDA や音声再生装
置などの高価な機材を持たせる必要はない．アク
ティフタグは 1 千円程度であり，1 秒間隔のビー
コン信号を発信する場合は 1 年以上バッテリーの交
換不要である．このほか PDA やポータブル音声
再生装置と比較して故障の可能性も少ない．

5. 関連研究

コンテキスト依存システムの実現では，センサに
よって収集した現実世界の情報をコンピュータ上で表
現・管理する必要があり，その方法として空間モデル
を導入している研究は多い．その空間モデルは数値
的な座標を用いるものと，記号を用いる方法に大別さ
れる³⁾．前者では GPS などによる緯度経路情報が代
表的であるが，地図上に現在地などをマッピングする
場合以外にはアプリケーションが少ない．このため，
NEXUS¹⁰⁾ や Cooltown¹¹⁾ は GPS による数値座標
情報を基本にしているが，建家や道などの空間に与え
られた属性や空間どうしの関係を組み合わせること
により，空間を表現している．一方，後者は本論文の対
象とした M-Spaces^{16),17),19)} に加えて，RAUM モデ
ル²⁾ や Cell モデル¹²⁾ などがある．しかし，コンテキ
スト依存システムおよびその空間モデルに関する多く
の研究は，研究室などにおけるプロトタイプシステ
ムに基づく簡易実験にとどまっていることが多く，実
環境において実ユーザにより運用実験をしている事例
は皆無である．

博物館向けのコンテキスト依存サービスに関するブ
ロジェクトの多くは，PDA などの携帯端末を対象に
したものであり^{6),11),13)}，さらにその目的も来館者間
のコミュニケーション支援であり，環境側に再生装置
を置いて，ユーザの情報を提示する事例は少ない．そ
の中でも Aura プロジェクト⁷⁾ は環境側からの情報提
示を考慮し，博物館などでの運用を考慮しているが，
実環境の事例は報告されていない．Sentient Comput
ing⁸⁾ や EasyLiving⁵⁾ では部屋などの特定空間の名
称とその空間内の相対的な座標情報による空間モデル
を提供している．ただし，Sentient Computing は超
音波位置センサが前提となるが，その設置場所は限ら
れており，EasyLiving プロジェクトは小規模な実験
用プライベート空間を対象にしており，どちらも公共

空間への応用事例はない．

6. おわりに

コンテキスト依存サービスのための空間モデル M-
Spaces の表現性や汎用性などを調べるために，博物館
における位置およびユーザ依存展示支援システムに同
モデルを応用し，2 つの博物館において一般来館者
による実証実験を行った．その結果，M-Spaces モデル
により展示空間の表現できること，位置センサにより
推定したユーザの位置により，そのユーザに対応する
仮想オブジェクトが空間モデル内で移動・配置され，物
理世界の変化を適切に反映できることを確かめた．ま
た，M-Spaces モデルでは各種デバイスやコンピュ
ータにプロキシを扱えることから，位置およびユーザ依
存の解説サービスそのものも同モデルの枠組みで定義
・実現できる．これはコンテキスト依存サービスの定義
やカスタマイズに有用となる．

最後に今後の課題を述べる．ユーザ数の規模・多様
性の点から博物館において実験を行ったが，今後は特
定業務向けアプリケーションなど他の分野においても
実証実験を行う予定である．M-Spaces モデルは仮想
オブジェクトの含有関係として構成されるが，今後は
GUI ベースで仮想オブジェクトどうしの含有関係の
表示・設定するツールなどが必要である．また，高度
なコンテキスト依存サービスを実現するにはコンテキ
ストに関する問合せ言語・機構が必要不可欠となる．

参考文献

- 1) Bahl, P. and Padmanabhan, N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. INFOCOM'00*, pp.775-784, IEEE Communication Society (Mar. 2000).
- 2) Beigl, M., Zimmer, T. and Decker, C.: A Location Model for Communicating and Processing of Context, *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol.6, No.5-6, pp.341-357, Springer (2002).
- 3) Becker, C. and Dürr, F.: On Location Models for Ubiquitous Computing, *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol.9, No.1, pp.20-31 (2005).
- 4) Bell, G. and Dourish, P.: Yesterday's Tomorrows: Notes on Ubiquitous Computing's Dominant Vision, *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol.11 No.2, pp.133-143, Springer (2007).
- 5) Brumitt, B.L., Meyers, B., Krumm, J., Kern, A. and Shafer, S.: EasyLiving: Technologies for Intelligent Environments, *Proc. International Symposium on Handheld and Ubiquitous Com-*

- puting, pp.12–27 (2000).
- 6) Cheverst, K., Davis, N., Mitchell, K. and Friday, A.: Experiences of Developing and Deploying a Context-Aware Tourist Guide: The GUIDE Project, *Proc. Conference on Mobile Computing and Networking (MOBI-COM'00)*, pp.20–31, ACM Press (Aug. 2000).
 - 7) Garlan, D., Siewiorek, D., Smailagic, A. and Steenkiste, P.: Project Aura: Towards Distraction-Free Pervasive Computing, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.1, pp.22–31 (2002).
 - 8) Harter, A., Hopper, A., Steggeles, P., Ward, A. and Webster, P.: The Anatomy of a Context-Aware Application, *Proc. Conference on Mobile Computing and Networking (MOBI-COM'99)*, pp.59–68, ACM Press (Aug. 1999).
 - 9) Hightower, J. and Borriello, G.: Location Systems for Ubiquitous Computing, *IEEE Computer*, Vol.34, No.8, pp.57–66 (Aug. 2001).
 - 10) Hohl, F., Kubach, U., Leonhardt, A., Rothermel, K. and Schwelm, M.: Next Century Challenges: Nexus — An Open Global Infrastructure for Spatial-Aware Applications, *Proc. Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'99)*, pp.249–255, ACM Press (Aug. 1999).
 - 11) Kindberg, T., et al.: People, Places, Things: Web Presence for the Real World, Technical Report HPL-2000-16, Internet and Mobile Systems Laboratory, HP Laboratories (2000).
 - 12) Leonhardt, U. and Magee, J.: Towards a General Location Service for Mobile Environments, *Proc. IEEE Workshop on Services in Distributed and Networked Environments*, pp.43–50, IEEE Computer Society (1996).
 - 13) Oppermann, R. and Specht, M.: A Context-Sensitive Nomadic Exhibition Guide, *Proc. Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing (HUC'00)*, LNCS Vol.1927, pp.127–142, Springer (Sep. 2000).
 - 14) Priyantha, N.B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The Cricket Location-Support System, *Proc. 6th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00)*, ACM Press (Aug. 2000).
 - 15) 佐藤一郎：モバイルエージェントの経路記述と選択機構, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.6, pp.1473–1482 (2003).
 - 16) 佐藤一郎：スマートスペースのプログラミングモデル, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.12, pp.2655–2665 (2004).
 - 17) Satoh, I.: A Location Model for Pervasive Computing Environments, *Proc. IEEE 3rd International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'05)*, pp.215–224, IEEE Computer Society (Mar. 2005).
 - 18) Satoh, I.: Building and Selecting Mobile Agents for Network Management, *Journal of Network and Systems Management*, Vol.14, No.1, pp.147–169, Springer (2006).
 - 19) Satoh, I.: A Location Model for Smart Environment, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol.3, No.2, pp.158–179, Elsevier (2007).
 - 20) Tamai, Y., Kagami, S., Mizoguchi, H. and Nagashima, K.: Simultaneous Forming/Capture of Multiple Focuses Sound Beams, *Proc. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'03)*, pp.4613–4618 (Oct. 2003).

(平成 19 年 5 月 23 日受付)

(平成 19 年 11 月 6 日採録)



佐藤 一郎 (正会員)

1991 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1996 年同大学大学院理工学研究科計算機科学専攻後期博士課程修了, 博士 (工学)。2001 年国立情報学研究所助教授。2006 年より同研究所教授。総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻教授 (併任)。このほか, 1994 ~ 1995 年 Rank Xerox Grenoble 研究所客員研究員。1999 ~ 2001 年科学技術振興事業団さきがけ研究 21 (「情報と知」領域) 研究員。1996 年度情報処理学会論文賞, 1999 年度同学会山下奨励賞, 1998 年日本ソフトウェア科学会高橋奨励賞ほか受賞, 2006 年科学技術分野文部科学大臣表彰若手科学者賞, 2007 年 IEEE/IPSJ SAINT'07 ベスト論文賞。分散システムおよびミドルウェアに関するシステムソフトウェア等の研究に従事。電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員。