

1 はじめに

ここ最近のユービキタス・コンピューティングへの注目からも明らかなように、今後ますます大量のプロセッサが我々の身の回りに存在するようになるだろう。この状況は、ハードウェアの小型化・高機能化・省電力化だけではなく、IPv6 がもたらす広大なアドレス空間、IEEE 802.11 や Bluetooth, ZigBee 等で実現される近接通信、RFID 等の無線タグを用いた人や物の個体識別等の、様々な要素技術により支えられている。このような環境下での重要な技術的課題として、我々は、自動設定 (*autoconfiguration*) と *Human-Environment Interface* の 2 点に着目した。

IPv6 には IP アドレスの自動設定機構 [13] が規定され、これが、身の回りの膨大な数の機器を IP-reachable にするというストーリーに現実味を与えている。しかし IPv6 の自動設定機構は、単にその機器の IP アドレスを決定するだけで、プロセッサの物理的位置や隣接した場所に存在する他のプロセッサについての情報を得るには、何ら役に立たない。また現在開発が進められている *zeroconf* [5] 等の自動設定機構も、名前の解決やプリンタ等のサービス発見を可能にするに過ぎない。

仮に家庭やオフィスにおいて何らかの入力 (センサーや操作系等) または出力 (光源 / 音源 / アクチュエータ等) を持つ機器全てをネットワークに接続することを考えた場合、その機器の数は、一般の家庭で 10^2 オーダー、オフィス 1フロアで 10^3 オーダーに達することが容易に予想される。このような多数の機器全てについて設定作業を行うことは現実的ではなく、また無線技術が前提となっている以上、一部の機器 (や人間) は時として移動し、動的に追加・削除されるだろう。我々が必要と考えているのは、このような現実空間に実体を伴って遍在する多数の機器に関して、その位置や入出力機能の情報レベルでの自動設定を行うシステム・プラットフォームの構築である。

一方、そもそもなぜ多数のセンサやアクチュエータを伴うプロセッサを遍在させる必要があるのだろうか？ その理由のひとつは、操作すべき対象や測定すべきデータが実空間中の至るところに存在するからだ。例えば家庭には多数の家電製品・光熱水設備機器があり、それを操作するという必要がある。家電や設備機器を操作するためには、それらを取り巻く環境のデータ、例えば温度や湿度や音や匂いを知

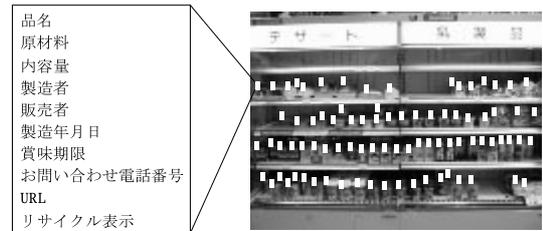
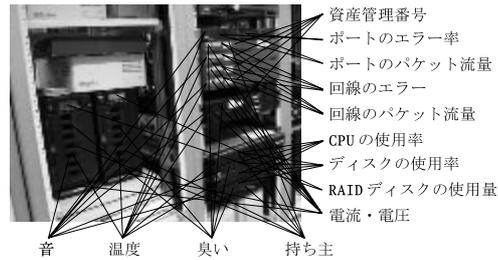


図 1: 実空間に満ち溢れるデータや属性値

る必要がある。オフィスや工場でもそれは同様である。例えば計算機やネットワーク機器を収めたラックを考えたとき、ファイルの内容やパケットの中身といった機器本来の機能としてのデータ、そして、CPU やディスクの使用率、ネットワーク・インタフェースのエラーレート等の機器の状態を表すデータが、そこに存在する。加えて、資産管理番号や所有者情報といった機器の属性、ファンやディスクの音、温度、臭い (焦げ臭くないか?) 等の様々な情報が同時にそこに存在している (図 1)。

このように、実空間はデータや属性値に満ち溢れている。しかしこれらのデータ全てを単純に人間に提示しては、破綻することが明らかだろう。センサ / プロセッサ / アクチュエータの遍在環境を現実化する場合、必要なときに必要な環境データのみを得て、操作することを可能にするインタフェースが不可欠である。我々はそれを *Human-Environment Interface* (以下、HEI と略) と呼び、その実現の支えとなるシステム・プラットフォームの構築が必要だと考えている。

以上のように、我々は、多数のセンサ / プロセッサ / アクチュエータが実空間に遍在する環境において不可欠な技術要素として、自動設定と HEI の 2 点に着目し、その解決を主眼とした新たなシステム、*Organic Entia* の構築を開始した。以下本稿では、第 2 節で *Organic Entia* の概略について説明し、第 3 節でその自律設定機能について、第 4 節で HEI と

その一例である Resonant Environment について述べる．続いて第 5 節で本システムの基盤となるロケーションモデル，cell-proximity model を新たに提案し，第 6 節で結びとする．

2 Organic Entia

ens [ɛnz] 【哲】— *n.* (*pl.* en·tia [ɛnʃiə])
存在, 実在(物); 実体. [L = being]
— リーダーズ英和辞典

2.1 背景と設計指針

Organic Entia は，遍在するセンサ/アクチュエータ/プロセッサを基本要素としたプログラミングを行うためのシステム・プラットフォームである．その目的は，実空間に散在する様々なデータの処理や実体の操作を行うアプリケーションを容易に構築することにある．

本システムの設計方針を述べる前に，その基となる我々の認識について 2 点ほど触れたい．ひとつは，今後は現実世界の物体に起因する情報の氾濫が大きな問題となるだろう，という認識である．現在は仮想世界の(いわゆる“ネット上”)情報の洪水が問題として取り上げられることが多い．しかし近い将来，実空間中に存在する様々な物体に ID が埋め込まれ，更にそれらがネットワーク化されたとき，それに起因する極めて深刻な情報氾濫が我々の身の回りに生じる可能性があると考えている．

もう 1 点は，オープン・アーキテクチャの重要性である．ユービキタス・システムの実現に必要な，あらゆる物への ID の埋め込みや，至る所に設置されるべきロケーション・サービスのインフラ整備が，単一事業者や統一規格により行われると考えることは現実的ではない．将来的に求められるものは，多種多様なユービキタス・システムが相互に接続して動作する，*Inter-UbiComp* の実現である．

本システムの設計指針は，第一には上述の，

1. 物理的実体を主たる対象とすること
2. オープン・アーキテクチャの構築

である．更に，

3. 位置や空間を対象としたアプリケーションの作成を可能にすること
4. 位置を意識させないプログラミングを可能にすること

5. スケーラブルで，かつ，局所性を持つこと
6. (可能な限り) zero configuration であること

等が求められる．

上の 3 と 4 は一見矛盾しているように見えるが，これは，3 は，いわゆる location-aware なプログラムの作成を可能にすることを意味し，4 は，個々の位置の概念や位置同定技術を encapsulate してそれらに依存しないプログラミングを可能にすることを表している．また 4 には，位置が unbound (後述) な物も取り扱う，という意味が含まれている．

2.2 Entia

本システムにおける最小構成単位を *entia* と名付ける．*entia* は物理的な存在であり，かつ，以下の 4 つの要件を満たしたものである (但し 4 は現時点では必須要件としない)．

1. 通信可能である
2. 何らかの入力または出力機能を持つ
3. 位置という属性を持つ
4. 自らの位置を取得可能である (optional)

1 の通信可能性については，システムを構成する以上必要不可欠な性質である．2 の入出力機能については，本システムが，入力系 (センサ) として実空間 (の一部) を受容する実体，あるいは，出力系 (アクチュエータ) として実空間に対して働き掛けを行う実体を，プログラミングの対象とすることを意味する．なお本システムでは，スイッチや可変抵抗等の操作系も，人間とのインタラクションをセンスする装置という意味で，センサとして取り扱う．同様に音源や光源も，環境を駆動するという意味で，アクチュエータとして取り扱う．

物理的存在である以上，全ての *entia* は 3 が表すように位置という属性を持つ．ただしその属性値がある時点では unbound であることは認める．これは *entia* の位置がその時点では同定されていない状況を表す．4 の位置取得性については，近年，GPS や RFID，超音波等を用いた様々なロケーション・システムが開発されており [6]，全ての *entia* がそのような仕組みを用いて自らの位置を取得可能だとすることも可能である．しかしその装置のサイズやコスト面を考え，現時点ではこれを optional な要件とした．

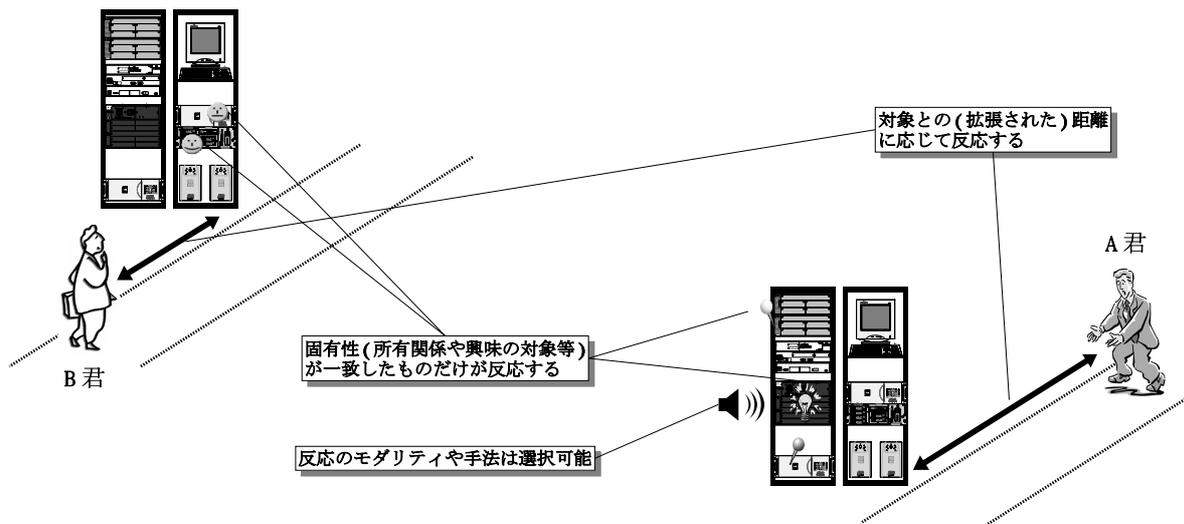


図 3: Resonant Environment の一例

付け, Organic Entia がその実現を支えるプラットフォームであるべきだと考えている。

4.2 Resonant Environment

ここでは HEI の一例として, 我々が *Resonant Environment* と名付けた HEI を紹介する。Resonant Environment は, 環境データのフィルタリングと提示を, entia 間の距離と固有性という概念を用いて具現化するものである。動作例として以下のような事例が考えられる (図 3)。

- A 君はグループのネットワーク管理をしている。A 君がマシンルームの前を通り掛かったときは, ルータのトラフィックの状況が光や音で示される。また, スイッチのポートのエラーレートが閾値より高くなっている場合には, そのポートのインタフェース部分が鳴り, 光る。
- 一方ユーザに徹している B 君が通り掛かったときは, 自分のマシンの CPU usage や DISK usage しか “見えない”。

このように Resonant Environment は, 人がある環境下に入ると, その人に関連する, あるいは, その人が興味を持つ物 (データ) が浮かび上がるという HEI である。

これは, 全ての物体は特定の固有性を持っており, その固有性を持つ力が外部から与えられると反応する, というように共振のメタファを用いたものであ

る。この場合, 人間は自らの興味や関連を表す固有性を持つ力を発していると考えられる。つまり, 関連する環境データ源に人間が近づくことに応じ, その環境データを何らかのモダリティで “表示する” ことで, データのフィルタリングを行うものである。

ただし, ここで用いられる距離は, 以下のような点で拡張された概念となる。

拡張された距離 単なる物理的なものではなく, 例えば近接性²に基づく距離 (図 4) が表現できなければならない。また, 場所 (局所性) やコンテキストに応じて距離の尺度が異なる可能性もある。

また固有性についても, 以下のような概念となる。

拡張された固有性 所有者や, それが表している・興味の対象となる事項等, 属性とその値のペアを固有性として扱う。また当然, ひとつの実体が複数の固有性を持ち得るだろう。

我々は Resonant Environment を, HEI の中でも中庸な性質のものと捉えている。HEI には, 人間が問い掛けない限りは実体は一切反応しない, より calm なインタフェースもあるだろう。また, 実体がより積極的に, より proactive に働き掛けるような HEI も考えられる。Organic Entia はそれら

2. “proximity” の邦訳 — 壁やパーティションの反対 (裏) 側は, 物理的な距離は短い, 人がそこに行くには遠回りしなければならないという意味で, 近接性に基づく距離では遠い所として評価する必要がある。

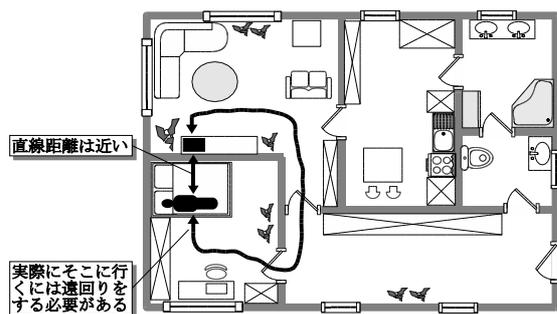


図 4: 近接性に基づく距離

れの HEI も構築できるようなシステム・プラットフォームとなるべきである。

5 ロケーションモデル

以上のように、Organic Entia の設計にあたり最も重要なのが、位置と距離の概念 (より正確にはそのモデルと表現) である。本節ではまず、ユービキタス・コンピューティングにおけるロケーションモデル研究について簡単に触れ、それに続いて Organic Entia の基盤となる新たなロケーションモデル、*cell-proximity model* の提案を行う。

5.1 既存研究

Location-aware なアプリケーションを作成する場合、実空間をどのようにモデル化し、それを表現するかが大きな問題となる。ユービキタス・コンピューティング研究の文脈でも、多くのロケーションモデルが提案されている [2]。これらのロケーションモデルは、*geometric model* と *symbolic model* に大別される [10]。前者は GPS の出力に代表されるような座標系に基づくモデルであり、後者は基本的には各々の位置にラベル付けをする (そしてラベル間の関係をつリーやグラフ構造で記述する) 形態のモデル [11][3] である。いずれのモデルにも長短があり、それらを複合して利用する *combined model (hybrid model)* もいくつか提案されている [10][9][7]。また同様に空間の取り扱いが重要な、移動ロボット [14] や MANET (Mobile Ad-hoc Networks) [1] の分野でも、ロケーションや地図のモデルに関して同様の研究が行われている。

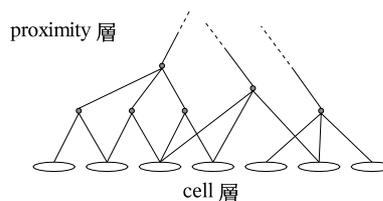


図 5: Cell 層と proximity 層

5.2 Organic Entia での要求条件

Organic Entia の基盤となるロケーションモデルへの要求条件をまとめると、以下ようになる。

1. 特定の位置同定機構に依存せず、多種多様な位置の概念を扱えること
2. 4.2 で示したような拡張された距離の概念を扱えること
3. 自動設定に適したモデルであること
4. (例えば複数事業者が各々の) 位置の管理を分散して行うことが可能であり、かつ、それらが相互接続可能であること

これらの条件を基に新たに設計したロケーションモデルを、以下、紹介する。

5.3 Cell-proximity model

Cell-proximity model は、我々が Organic Entia の基盤として新たに提案するロケーションモデルである。Cell-proximity model は、

- *cell*
- *proximity*

の 2 つのレイヤと、

- *Proximity Engine (PE)*
- *Location Resolver (LR)*

の 2 つのサービスで構成される。

Cell 層はロケーションモデルの基本となるレイヤで、その cell が表す位置に entia が存在するか否かを表現するものである。Cell には、そこに entia が含まれるか否かの 2 つの状態しか存在せず、「cell の半径」や「中心から何 m」といった大きさの概念は存在しない。また、cell 同士の包含関係や、重なり、隣接といった概念もない。これらの概念は全て proximity 層で表現される。Proximity 層は cell 間

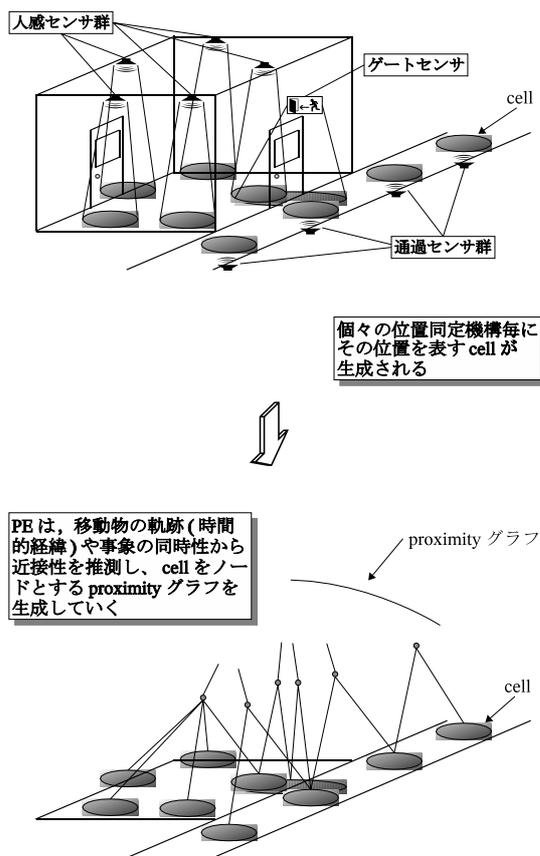


図 6: PE による proximity 層の生成

の関係を表すためのレイヤであり、cell をノードとするグラフ構造により表現される (図 5)。

PE は proximity グラフを生成するサービスである。PE は、移動する entia が通過した cell の順序等から cell 間の近接性を推定し、それを表現する proximity グラフを生成していく。また単なる位置的な近接性だけではなく、異なる cell に属する entia のセンサから読み取られる環境データ値の静的 / 動的関連性から、それらの cell 間の関係³を推定し、それを proximity グラフとして表現 / 生成していく (図 6)。LR は、PE が生成した proximity グラフに関する query に返答するためのサービスである。

5.4 議論

Organic Entia の基盤としてこのようなロケーションモデルを選択した理由のひとつは、屋内利用における geometric model の有効性への疑問にある。GPS を利用した geometric なロケーションモデル

が屋外において極めて有効であることは明らかである。しかし、geometric ベースの屋内用位置同定システムがいくつか提案されている [6] にもかかわらず、いずれも、スケーラビリティやコスト、あるいは事前設定の煩雑さ等の点から、普及には至っていない。一方、アプリケーション側から見ると、実際に必要なのは距離や包含といった query に対する返答であり、座標値はそれを計算するための手段に過ぎない。これらの query に対する返答が可能であるならば、geometric なモデルに拘る必要はないと考える。

5.2 で挙げたロケーションモデルの要求条件の 4 については、多様な PE・LR の展開とそれらを相互接続するプロトコルの制定により解決されることを期待している。すなわち、個々の事業者や異なるモデルを持つサービスはそれぞれのサービスに適した PE・LR 群を持ち、かつ、それらが相互にロケーション情報を交換することで、事業者 / サービス間の相互接続が可能システムが実現可能ではないかと考えている。

6 むすび

本稿で我々は、現実空間に存在する物理的実体を基本構成要素としたシステム・プラットフォーム、Organic Entia を紹介した。本システムは、実空間中の物体に起因する情報を主な対象とし、かつ、その自律構成を第一の目標に置いたシステムである。更に本システムを基盤として、実空間中の環境データと人とを結ぶ Human-Environment Interface の確立を目指す。

今後は、実際に複数の位置同定システムを用いたロケーションモデルの詳細設計を行うとともに、自律設定を実現するための、Proximity Engine と Location Resolver の実装を進めていく予定である。また本稿では HEI の一例として Resonant Environment を紹介したが、これ以外の HEI についても積極的な提案と実現を行っていく予定である。

参考文献

[1] Bauer, M., Becker, C. and Rothermel, K.: Location Models from the Perspective of Context-

3. PE が推定する cell 間の関係は、[12] で *semantic proximity measure* と呼ばれている概念に近い。

- Aware Applications and Mobile Ad Hoc Networks, in [2], pp. 35–40.
- [2] Beigle, M., Gray, P. and Salber, D. (eds.): *Location Modeling for Ubiquitous Computing, Workshop Proceedings, UbiComp 2001* (2001).
- [3] Brumitt, B. and Shafer, S.: Topological World Modeling Using Semantic Spaces, in [2], pp. 55–62.
- [4] Bulusu, N., Estrin, D. and Heidemann, J.: Trade-offs in Location Support Systems: The Case for Quality-Expressive Location Models for Applications, in [2], pp. 7–12.
- [5] Guttman, E.: Autoconfiguration for IP Networking: Enabling Local Communication, *IEEE Internet Computing*, Vol. 5, No. 3, pp. 81–86 (2001).
- [6] Hightower, J. and Borriello, G.: A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing, Technical Report UW-CSE 01-08-03, University of Washington (2001).
- [7] Hightower, J., Brumitt, B. and Borriello, G.: The Location Stack: A Layered Model for Location in Ubiquitous Computing, in *Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA 2002)*, pp. 22–28 (2002).
- [8] Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms, in *CHI '97, Conference Proceedings*, pp. 234–241 (1997).
- [9] Jiang, C. and Steenkiste, P.: A Hybrid Location Model with a Computable Location Identifier for Ubiquitous Computing, in *UbiComp 2002, Proceedings*, LNCS 2498, pp. 246–263 (2002).
- [10] Leonhardt, U.: *Supporting Location-Awareness in Open Distributed Systems*, PhD thesis, Imperial College, University of London (1998).
- [11] O’Connell, T., Jensen, P., Dey, A. and Abowd, G.: Location in the Aware Home, in [2], pp. 41–44.
- [12] Schiele, B. and Antifakos, S.: Beyond Position Awareness, in [2], pp. 107–112.
- [13] Thomson, S. and Narten, T.: IPv6 Stateless Address Autoconfiguration, RFC 2462 (1998).
- [14] Thrun, S.: Robotic Mapping: A Survey, Technical Report CMU-CS-02-111, Carnegie Mellon University (2002).
- [15] Weiser, M.: The Computer for the 21st Century, *Scientific American*, Vol. 265, No. 3, pp. 94–104 (1991).
- [16] Wisneski, C., Ishii, H., Dahley, A., Gorbet, M., Brave, S., Ullmer, B. and Yarin, P.: Ambient Displays: Turning Architectural Space into an Interface between People and Digital Information, in *CoBuild '98, Proceedings*, LNCS 1370, pp. 22–32 (1998).
- [17] 中島秀之, 橋田浩一, 森彰, 伊藤日出男, 本村陽一, 車谷浩一, 山本吉伸, 和泉潔, 野田五十樹: 情報インフラに基づくグラウンディングとその応用 — サイバーアシストプロジェクトの概要 —, コンピュータソフトウェア, Vol. 18, No. 4, pp. 48–56 (2001).
- [18] 暦本純一: 実世界指向インタフェースの研究動向, コンピュータソフトウェア, Vol. 13, No. 3, pp. 4–18 (1996).