

研究解説

空間知能化—インテリジェント・スペースの提案—

Introduction of Intelligent Space

橋本 秀紀*・秋山 尊志**

Hideki HASHIMOTO and Takashi AKIYAMA

1. 空間知能化とは？

今世紀はコンピュータ技術がこれまで以上に発展し、我々の生活はより便利な快適なものになり得る。また、高齢化社会の進行、労働形態の会社中心から家中心への移行の結果、いかに自分の時間を快適にするかということが1つの関心事になるであろう。快適な生活とはどのようなものであろうか。心と体が望む通りの条件が満たされて、非常に気持ちの良い生活、自分の好きな本を読む、食べる、寝る、旅行をする、買い物をする、遊ぶなど個人により様々である。これらに共通することは、全て我々の五感を通した脳内の作用であるということである。

最近のゲーム業界の興隆、エンターテインメント性や癒しを提供するロボットの登場、VR技術の急速な発展、これらは現在の工学が、脳とのインターフェースである人間の五感に直接働きかけて満足感を提供する方向に進んでいることを示している。恐らくこの動きは、今世紀の1つのテーマである脳のメカニズムの解明との相乗作用により、さらに拍車がかかると思われる。

しかし、現段階のVR技術やロボット技術では、人間に真の満足感を与えるのは難しい。一方、ゲームのような我々人間側の意図することをある程度理解した上で相互作用を行うコンピュータシステムにおいては大きな満足感を得ることができる。これは、我々の知的能力を用いる知的消費により満足感を得ているのである。VR及びロボット技術によって真の満足感を得るためには、コンピュータシステムに知能を持たせ、人間がどのような状況にいるのか、何をしているのかといった状況を把握しなければならない。

空間の知能化とは、様々なセンサを用いて空間内の事象を捉え、ネットワーク化されたコンピュータやロボットが

これらの情報を知的に利用することにより、人間に適切なサービスを提供する機能を空間が持つことである [1]。

これにより、部分的な知能を持ったロボットが空間との相互作用で、より知性的になる。また、人間のジェスチャ等による何らかの要求を理解して空間及びロボットから効果的な支援を受けることが可能となる [2]。そのような空間をインテリジェント・スペースと呼ぶ。その概念図を図1に示す。DIND (Distributed Intelligent Networked Device: 分散知能化ネットワークデバイス) はカメラやマイクロフォンによるセンシング機能を持ち、それらがネットワークを介してつながり、インテリジェント・スペース内の情報を処理する。

知能化された空間は、ロボット技術やVR技術などにより、人間に対して物理的・心理的なサポートを与えることが可能であり、これにより人間に満足感を提供することになる。そのため、これから到来するであろう知的消費社会には欠かせない技術である。本解説では、知能化空間を実現するために必要な技術の紹介とその問題点、及び現在研究されている知能化空間の現状やその将来について論じ

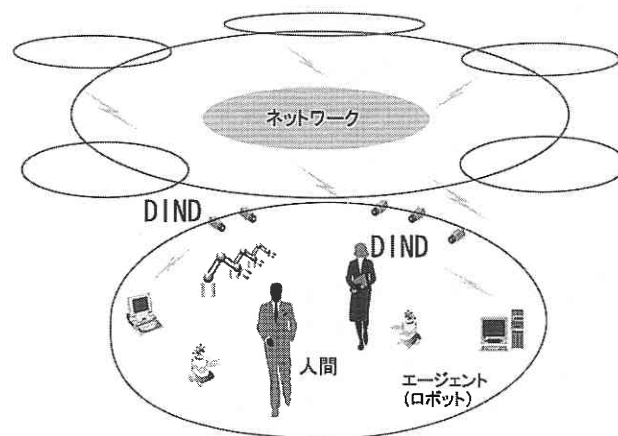


図1 インテリジェント・スペース

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門
科学技術振興事業団さきがけ研究21

**東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

る。

2. 分散知能化ネットワークデバイス (DIND)

この章では前章で紹介したインテリジェント・スペースの機能, 特にDINDの機能について述べる。

2.1 DIND の概念

インテリジェント・スペースでは, DINDが空間内の事象を把握し, ロボットやディスプレイ, スピーカなどを用いて人間に適切なサービスを提供する。DINDは, 主に情報を得るセンサ部と, その情報を処理する演算部から構成され, コストを押さえた小型なものが理想である。また, ネットワーク化が前提であるため高いセキュリティ性, 自己の状態の把握機能, お互いの機能を共有する機能などが必要となる [3]。図2にDINDの概念図を示す。センサ部, 演算部, ネットワーク部及び電源部から構成され, 小型化の技術にはMEMS(Micro Electro Mechanical System)やナノテクノロジーが必要である。

2.2 DIND の基本的機能

1つのDINDはその大きさのため知能にある程度の限界があるが, DINDをネットワーク化し空間に多数配置しそれぞれが自律的に協調することにより, 高い知能の実現が可能となる。

ネットワーク化されたDINDの基本的な機能をまとめる。

・空間内での事象の観測

各種センサを用いてインテリジェント・スペース内での事象を観測する機能であり, 視覚センサ, 赤外線センサ, 電波センサ, 超音波センサ, 高感度マイクロフォン, レーザレーダなどが考えられる。

・観測されたデータの高度な処理

観測されたデータをローカルに処理し, ネットワーク化のために, センサの種類に依存しないデータで出力する機能。

・知的な判断

DINDからの情報を用いて, インテリジェント・スペース内で起きている事象を過去のデータ等を駆使しながら推定し, 適切な判断を行う機能。

・適切なサービスの提供

ロボットやマニピュレータに物理的支援を行う命令を発する機能。

2.3 DIND ネットワーク

この空間的に配置された知能は, 物理空間とデジタル空間とを結ぶものであり, 人間の行動の意図の理解や, 人間への適切なサービスを可能にする。インテリジェント・スペースはDINDをベースとして様々な技術が融合される場であり, それによりさらに進化していくプラットフォームである。

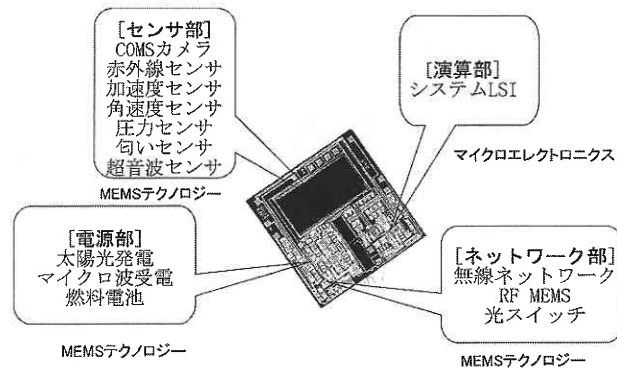


図2 DINDの機能

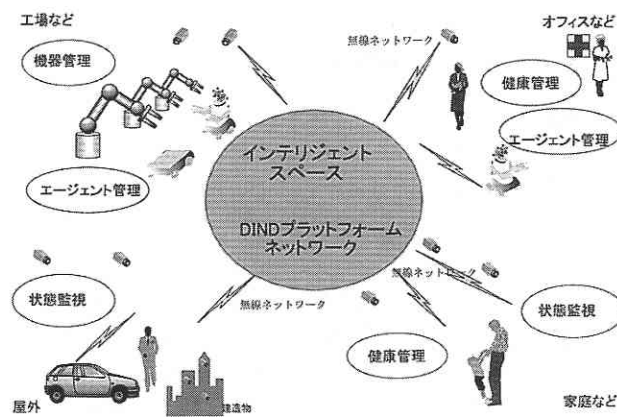


図3 DINDによるネットワークシステム

図3にDINDによるネットワークシステムの概念図を示す。DINDによるネットワークは, 屋外, 屋内をシームレスに接続し1つの大きなインテリジェント・スペースとなる。家庭では, 家族の健康管理や, 子供の監視, また屋外でも交通の監視など様々なデータがインテリジェント・スペースをプラットフォームとして共有または加工, 処理され, 様々なサービスを受けることが可能となる。

現時点でも, 携帯電話やPHS, モバイル機器によるネットワークとのリンクがインテリジェント・スペースの1つの形態として成立していると考えられる。

3. インテリジェント・スペースにおける位置情報の重要性

インテリジェント・スペースは空間内の人間に様々なサービスを提供する空間である。例えば, ユーザの声やジェスチャによる要求に対しての応答, ユーザの行動や振る舞いを理解した上での適切なサービスの提供などである。これらのサービスを提供する際, インテリジェント・スペースでは人間の位置情報が重要な役割を果たす。

ユーザ側の要求を受け付けるにはそのユーザが誰であるか, また何を要求しているのかを把握しなければならない。

それらの情報を得るのはマイクロフォンやカメラなどのセンサである。

また、位置の精度も問題となる。例えば、ロボットがユーザに物を渡すという物理的なサービスを提供する場合は、ユーザの動きである程度の融通が利くためユーザの位置情報はそれほど正確でなくてもよいだろう。しかし、ジェスチャの認識では手や頭の位置など、より高い精度の位置情報が必要となる。従って、必要な精度を満たす人間の位置情報がなければ、ユーザに適切な場所で適切なサービスを提供することが出来ない。

4. インテリジェント・スペースにおける位置同定方法

この章では、現在研究されている位置同定方法の主なものを紹介する。

4.1 視覚を用いた位置同定方法

カメラなどによる視覚を用いた様々な位置同定方法が現在研究されている。さらに位置の同定のみではなく特定のユーザやオブジェクトのトラッキングもカメラにより達成できる。インテリジェント・スペースにおけるカメラを用いた位置同定やトラッキングにおいては、主に以下の条件を満足しなければならない。

- ・ユーザの位置と誰であるかが常に明らかであること。
- ・適度な速度で動作すること（リアルタイム性）。
- ・複数人・複数カメラに対応できること。
- ・部分的に対象物が隠れる、動きが止まるなど、状況の変化に耐えられること。

カメラに基づくトラッキングではユーザが何らかのデバイスを持つ必要がなく、またカメラの画像を利用して部屋の配置や構成などもモデル化して管理することが出来る。さらに、対象物の全体像が認識出来るためインターフェースとしてジェスチャなどが使えるなどのメリットもある。

4.1.1 ステレオ視

カメラを用いて位置を同定するには距離情報を得る必要がある。そのため、一般的にはステレオ視により2台のカメラからの視差を用いて、その視差と2台のカメラの位置及び姿勢を用いて距離が計算される [4]。また、視差を求めるには2台のカメラの画像から対象とする同一のオブジェクトを認識しなければならない。

図4のように対象物体の位置 P とカメラ位置 $C1$, $C2$ の3点から成る平面、これをエピポーラ平面と呼び、この平面とカメラ画像の交線をエピポーラ線と呼ぶ。エピポーラ線には「一方のエピポーラ線上に存在する点の、他方の画像上での対応点は、もし存在すれば必ずそれと対をなすエピポーラ線上に存在する」という性質があるため、これを利用して対象物体を認識する。例えば点 $p1$ と同一のものをカメラ2で探するとき、 $p1$, $C1$, $C2$ からなるエピポー

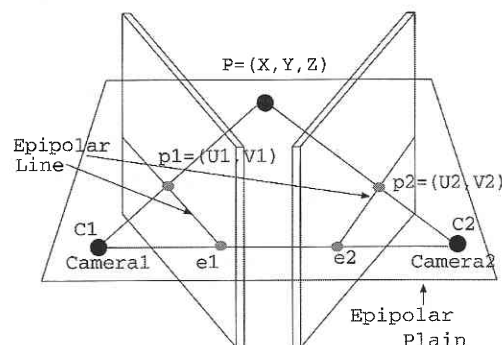


図4 エピポーラ幾何によるステレオ視の原理図

ラ平面のカメラ2上でのエピポーラ線上に $p2$ が存在すればこれが同一の物体である可能性があると考えられる。全てのピクセルに対してリアルタイムに、この処理を行うことは現在のコンピュータパワーでは不可能なので、対象とする物体（人間、ロボット）を背景画像から抽出し、これらのデータに対して処理を行う必要がある。

また、抽出された背景画像の管理にも困難が生じる。理想的な、背景管理は以下の問題を解決しなければならない。

- ・外部の照明変化により背景が変化する。
- ・なびく木など背景がぐらつく場合、ばらばらなピクセル値のモデルになる。
- ・均一的な色のオブジェクトがそのピクセル群内部で動いた時に、その変化が検出されない。
- ・最初に背景にあったオブジェクトが動き始めた時、そのオブジェクトと新たに現れた背景の両方が変化したように見えてしまうこと。
- ・動きの止まったオブジェクトが、背景画面から区別されないこと。

これらの問題を解決するため様々な画像処理アルゴリズムが研究開発されている [5] [6]。

4.2 電波を用いた位置同定方法

電波を用いて位置を計測するシステムとして、GPSや携帯電話・PHSの位置同定技術があるが、インテリジェント・スペースにおいてもこれらの技術が適用可能である。ここでは、GPSなどの電波が届かない屋内を想定して議論する。

4.2.1 システム構成

屋外位置同定システム同様、屋内位置同定システムの構成は2つのカテゴリーに分類される。モバイルベース構成とネットワークベース構成である。現在までに提案された多くの屋内位置同定システムは図5に示されるようなネットワークベース構成のものである [7]。ジオロケーション基地局 (GBS) はモバイル機器から発信された無線信号が

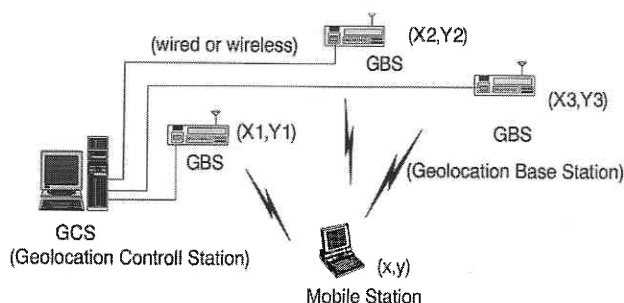


図5 電波を用いた屋内位置検出システム

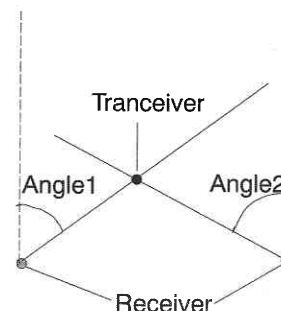


図6 AOA法の原理図

ら位置情報を抽出し、その情報をジオロケーション制御局 (GCS) にリレーする。その後、GCS でモバイル局の位置が推定され、表示される。モバイルベース構成では、モバイル局は、いくつかの固定された GBS からの無線信号を用いてモバイルステーション自身が自分の位置を推定する。モバイルベース構成と比較して、外部の基地局が位置計算を行うネットワークベース構成では、モバイル局が小さなサイズで低電力であり簡単な構造の送信器として実装され、さらに持ち運びが便利である。そのため、大切な設備などにタグとして取り付けることが出来るなどのメリットがある。

屋内における電波による位置同定システムでは、電波が壁や障害物などに遮られたり、反射したりといった現象が生じる。そのため、直接波と反射波が混ざりあった状態で受信されるといった、マルチパスの問題が発生する。この問題の解決法として、位置の異なる複数のアンテナを用いる空間ダイバシティや、垂直偏波用と水平偏波用のアンテナを組み合わせた偏波ダイバシティ、また受信と送信で周波数を変換することなどが考えられている [8] [9]。

また、位置同定方法には電波の到着角度を利用する AOA (Angle of Arrival) 法、電波の到着時間を用いる TOA (Time of Arrival) 法、電波の到着時間差を利用する TDOA (Time Difference of Arrival) 法、及び電波の受信強度を利用する RSS (Received Signal Strength) 法などがある [7]。

以下、これらの同定方法を簡単に説明し、屋内環境では十分な精度を持つとされる、PinPoint ローカル位置同定システムを紹介する。

4.2.2 AOA 法

AOA 法は図6に示されるように送信機の位置を求めるために簡単な三角測量を用いる。受信器は指向性アンテナまたはアンテナ列を用いてターゲットである送信機から信号の方向 (AOA) を計測する。この方法では、信号通路が遮断されたり、反射または散乱した信号が計測に用いられると非常に大きな誤差が生じてしまう。

4.2.3 TOA 法及び TDOA 法

TOA 法は送信機から複数の受信器への信号の伝搬時間

を利用して、位置を同定している。

TOA (到着時間) が計測されると、光速 C を一定と仮定して、送信機と受信機の距離が計算される。図7の左図は2次元での原理図であるが3つの円の交点が電波を発した送信機の位置である。

TOA を用いるかわりに、TDOA (到着時間差) を用いて位置を同定することも出来る。2つの受信器からの一定の到着時間差により1つの双曲線を得ることが出来る。3つあるいはそれ以上の TDOA を用いて双曲線の交点を求めればよい。この様子を図7の右図に示す。TOA 法と比較して TDOA 法は送信された正確な時間を知る必要がないというメリットがあるが、全ての受信器は互いに同期していなければならない。

4.2.4 RSS 法

送信機から送信される信号の出力が既知ならば、受信器で RSS (受信信号強度) を計測することにより、電波の衰弱に関する数学的なモデルを用いて送信機と受信機の距離が分かる。TOA 法と同様に、受信機を中心とする複数の球の交点として送信機の位置が求まる。予め、受信信号の距離を受信器側で計測しておくことにより精度を改善出来る。

4.2.5 PinPoint ローカル位置同定システム [10]

PinPoint ローカル位置検出システムの構成を図8に示す。PinPoint システムはパソコンやプリンターなどに取り付け可能な簡単な構造を持つタグを用いる。屋内領域はセルに分割され、それぞれのセルはセルコントローラに制御される。セルコントローラは最高 16 個の位置が既知であるアンテナに接続されている。タグの位置を同定するために、セルコントローラは 2.4 GHz のスペクトラム拡散信号を送信する。スペクトラム通信とはワイヤレス伝送方式の1つである。セルコントローラからの信号をタグが受けとるとすぐに、その受信信号の周波数を 5.8 GHz に変換し、さらにその信号に位相変調された自身のタグ ID 情報を載せてセルコントローラに送り返す。信号の伝搬の往復時間を計測することにより、タグとアンテナの距離が決定され、その距離情報を用いて TOA 法によりタグの位置が同定される。また、ホストコンピュータが TCP/IP でセルコント

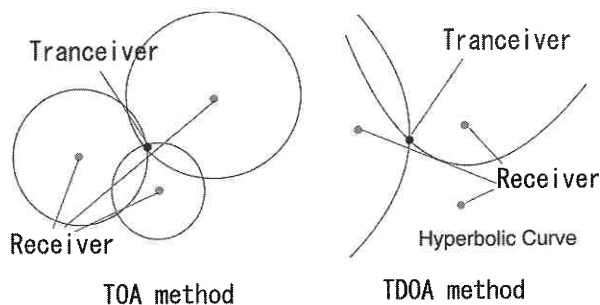


図7 TOA法及びTDOA法

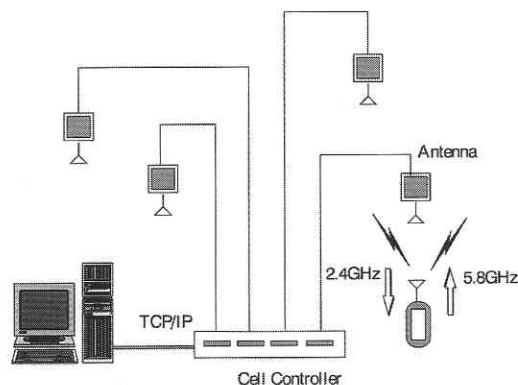


図8 PinPointシステムの構成図

ローラに接続されており、タグの位置情報を管理している。

マルチパスの影響を最小にするために、チャンネル間での干渉を避けるためのアップリンクとダウンリンクで異なる周波数が用いられている。

このシステムでは精度はおよそ3m以内であり、0.5秒毎に位置が同定される。

4.3 赤外線を用いた位置同定方法

この節では、赤外線を用いた位置同定方法を紹介する。赤外線を利用して位置を同定するシステムは、後述するアクティブバッジシステムという赤外線を発生するバッジを用いるものや、カメラを用いて赤外線源の位置を同定するなどのシステムがある。赤外線を用いる際の問題点は、周波数帯の近いハロゲン電灯などの光により誤差が生じ易いことである。

4.3.1 アクティブバッジ位置同定システム [11]

1989年にORL (Olivetti Research Laboratories) で開発されたアクティブバッジ位置同定システムは現在までにさまざまな改良がなされてきた。このシステムでは、多数の部屋とその内部のオブジェクトを対象としている。部屋を定めるために、赤外線を用い、さらに内部の位置を求めるために電波を用いている。人間などのオブジェクトは、アクティブバッジと呼ばれる、マイクロプロセッサと10秒毎にそのバッジ固有の赤外線を発する赤外線光源を持つ小さなデバイスをつける。

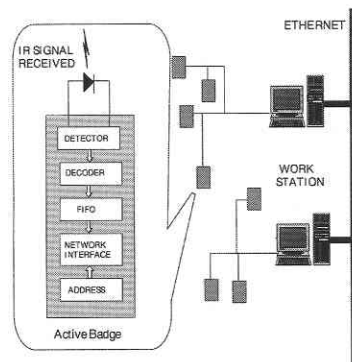


図9 アクティブバッジシステムの構成図

アクティブバッジシステムの構成を図9に示す。各部屋にあるネットワークに接続されたセンサ群はバッジからの信号を受信しその信号及び自身のアドレスの情報をネットワーク上のPCに送る。さらに固有のパルス幅を持つ低出力電波送信機がこのシステムに存在し、バッジがこの送信機の電波領域内に入るとすぐに、自身のアドレス情報とこの電波送信機のアドレス情報を赤外線送信システムに送る。そして、センサ群がこの情報をPCに送り位置が同定される。

赤外線で部屋の位置が分かり、電波でさらに細かい場所が分かるが、ジェスチャ認識などの応用は出来ない、また、サンプリングレートが低いため動きの速いオブジェクトのトラッキングは出来ない。

4.4 超音波を用いた位置同定方法

この節では超音波を用いた位置同定方法を紹介する。超音波は観測範囲が狭いなどの欠点があるが、高精度な位置同定が可能である。

4.4.1 アクティブバット [12]

ケンブリッジのAT & T研究所では超音波を用いた位置同定システムが開発されている。このシステムは距離を用いる三角測量に基づいている。位置同定の対象であるオブジェクトに取り付けられた送信器であるバット（超音波を発する蝙蝠 (bat) に由来）から短いパルスの超音波が発信され、位置が既知である受信器がその信号を受信する。この時の超音波信号の伝搬時間を計測し、また超音波の速度が空気中で一定速度であることを利用し位置が検出される。一つのオブジェクトに取り付けられた、2つ以上のバットの相対的な位置を用いてそのオブジェクトの姿勢も分かる。さらに、1つのバットを持つ人間の動く方向も、受信器の位置関係や信号の強度を用いて計測される。

性能は、1000平方メートルの場所において毎秒75もの対象物体の位置を同定可能で、精度は3次元位置で3cmである。現在、ソフトウェアの改良によるさらなる計測速度と精度の向上を図っている。

4.5 その他の位置同定方法

・無線 LAN による位置同定

無線 LAN を用いて位置同定を行うシステムとしてマイクロソフト社の RADAR [13] というシステムがある。RADAR は無線 LAN のアクセスポイントにおける信号強度を利用して無線 LAN で動作しているモバイル機器の位置を同定する。

モバイル機器の位置を知ることで、そのモバイル上で動作しているプログラム要素に位置を利用したインターフェースが可能である。また、モバイル機器を使用しているユーザの位置もおおよそ分かる。

・電磁トラッキング [14]

電磁トラッキングは、対象オブジェクトの位置を非常に高い精度で同定出来る。位置は 1 mm、角度は 0.2 度まで測定可能である。しかし、費用がかかり、また、ユニットを制御するためのケーブルが必要である。さらに、測定範囲が狭い。また金属の物体が電磁トラッカーの送信器や受信器の近くにあると、送信信号が影響を受けてしまい正確な位置の検出が出来ない。このような誤差には大きく 2 種類ある。静的なものと動的なものである。静的な誤差は近くに金属物体が存在するが動かない場合に生じ、動的な誤差はその物体が動く場合に生じる。動的誤差を抑えることは困難であるが、静的誤差に関しては磁界が変化しない限りは誤差を抑えることが出来るため、いくつかの改善策が研究されている。

・マイクロフォンによる位置同定

マイクロフォンを用いて人間の声などの音源を観測することにより位置を同定するシステムがある [15] [16]。しかし、マイクロフォンによる位置同定は測定範囲が狭く、

本人を特定するのが困難である。現在、会議などでの発言者をアクティブカメラで自動的に撮る研究などが進められている。

表 1 にこれまで述べてきた方法の長所短所をまとめる。

5. 空間知能化を支える要素技術

空間知能化に必要な技術として、前章では DIND のセンサ部の中で重要な位置同定技術について紹介してきた。

ここでは、その他の空間知能化に必要な要素技術について述べる。DIND のセンサ自体の技術、得られた情報を伝達するネットワーク技術及び情報処理技術、及びロボットなどで重要なアクチュエータ技術が挙げられる。

5.1 センサ技術

センサ技術は空間知能化において重要な技術であり、その高感度化や小型化が必要である。ここでは、マイクロフォン、赤外線センサ、嗅覚センサ及び味覚センサを挙げる。

5.1.1 マイクロフォン

高感度なマイクロフォンを用いることにより、人間の声を識別して要求を満たすことが出来る。マイクロフォンに必要な技術として、音声の獲得及び本人の位置情報も必要である。4.5 節で述べたようなマイクロフォンを用いた発話者の位置の測定も研究されている。

5.1.2 赤外線センサ

赤外線センサは広範囲に応用可能であり、物体検知、温度測定、通信、画像表示などに適用出来る。例えば、物体検知では、赤外線レーザを用いて、移動する物体の距離や、速度、運動方向の検知を行い、自動車の安全走行、航空機の離着陸コントロールなどに利用される [17]。この赤外線センサはインテリジェント・スペースにおいて位置同定技術をはじめ、空間の温度や湿度の測定などに利用される。

5.1.4 嗅覚センサ

嗅覚センサは、大気中のガス成分を測定するものであり、家やオフィス・工場など空気の状態、または食品などの品質チェックなどにも応用できるものである。現在、セラミックガスセンサを多数集積したインテリジェントセンサという 60 種類以上もの匂いを判別するセンサも開発されている [18]。

5.1.5 味覚センサ

味覚センサは一般に存在するセンサとは異なり、特定の物理量を測定すれば味を表現出来るわけではない。この技術は人間の実際の味覚認識プロセスを模倣することによって実現されると考えられている [19] [20]。そのため、将来インテリジェント・スペースにおいて、味覚のデータ通信などが発展した際、必要な技術である。

5.2 ネットワーク技術

この章では、インテリジェント・スペースにおいて必要であるネットワーク技術について紹介する。

表 1 各位置同定技術の評価

システム	長所	短所
視覚	全体の認識が可能 非接触	背景処理が困難 処理時間の問題
電波	高精度	マルチパスの問題 信号発信タグが必要
赤外線	簡単な構成	信号発信タグが必要 ノイズに弱い 狭い測定範囲
超音波	簡単な構成 高精度	狭い測定範囲 信号発信タグが必要
電磁トラッキング	高精度	ハイコスト 狭い測定範囲 磁性体などの影響
音波	非接触	狭い測定範囲 本人特定が困難

5.2.1 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム)

MEMS とは IC 製造プロセスを基盤としたマイクロマシンング技術によるマイクロサイズのセンサ、アクチュエータ、そして制御回路を集積化した微細システムの総称である [21]。この技術により機械システムを極小レベルまでスケールダウンし、全てのシステムが砂粒程度の大きさに収まる設計を可能となる。DIND の小型化にもこの技術は欠かせないものである。また、MEMS 技術に基づく光スイッチにより光ファイバによる、ブロードバンドの性能がさらに上がるため、この技術は将来のネットワークに重要な役割を果たすであろう [22]。

5.2.2 ウェアラブルコンピューティング

モバイルコンピューティングをより小型化・省電力化し、コンピュータを身に付けて使うウェアラブルコンピュータが注目され始めている。将来的には衣服レベルまで一体化することにより、人間の記憶や感性を拡張し、社会や文化を激変させる可能性もあるが、現状では小型化したパソコンとディスプレイを装着する程度である [23]。産業的には航空機や船舶関連の整備時に用いられている。

ウェアラブルコンピュータは知能化空間のなかでネットワークのアクセスポイントであると同時に、人間の能力を増大し、人間の側にコンピューテーションを移動させる役割を持つ。例えば、人間が認識したものあるいは記憶したものは全てコンピュータに蓄えられ、いつでも引き出すことが出来、自分の見ているものあるいは将来的には考えていることも遠隔地の他人に送信可能となる。

また、GPS やカメラやマイクロフォンなどのセンサを取り付けることも可能である。

5.2.3 ユビキタスコンピューティング

ユビキタスコンピュータ、これも空間知能化に欠かせない技術である。この技術は、椅子に圧力センサを付けたり、小さな赤外線放射バッジを人間に付けて位置情報を得たりなど、コンピューテーションを日常空間の様々な場所に人間に邪魔にならないように、さらには見えないように数多く配置するものである [24]。

また、コンピューテーションの配置の際、その建物を建設する段階で考慮すべき問題がある。現在多くの部屋は2次元的にしか利用されておらず、天井や床にスペースが残されている。将来これらの場所にセンサや機器類を埋め込む可能性があり、知能化空間を構築する際、建築・デザインの分野も考慮する必要があるだろう。

5.2.4 ネットワークロボティクス

遠隔操作でロボットを制御する技術であるテレロボティクスは、原子力施設での危険物のハンドリングや海中作業、爆発物などの危険物処理のために研究開発されてきた。今日では外科手術への応用も研究されている。このテレロボ

ティクスを現在成長し続けているインターネットと結び付けた概念として、ネットワークロボティクスというものがある。この技術は、インテリジェント・スペースでのエージェントであるロボットを遠隔操作して使用する際に重要である。

テレロボティクスは何らかの通信経路を介して特定のロボットなどを特定のオペレータサイトから操作する1対1型のシステムであるが、ネットワークロボティクスはインターネットと同じように1つの制御サーバに不特定多数がアクセスして「いつでも何処でも誰でも」利用可能なシステムである。また、インターネットを用いることにより、ロボットシステムに必要な多くのソフトウェアを分散配置して利用出来る。これに関してはOMG (Object Management Group) が仕様を策定しているCORBA (Common Object Request Broker Architecture) などが提案されている [25]。

現在、幾つかのロボットがインターネットに接続されネット上で制御が出来るようになっている。例えば、CMU のXavier やUSC プロジェクトのマニピュレータの先端に双眼カメラを付け、視点を変えながら彫像を鑑賞するシステム [26] などである。

その他にも、遠隔健康モニタリングや遠隔マニピュレーションなど様々な研究開発が行われているが、ネットワークとロボティクスの融合はまだ始まったばかりで今後の発展が期待される。

5.3 アクチュエータ技術

ロボットのアクチュエータは現在、その制御性の良さから電磁モータが普及している。しかし、ロボットの関節は電磁モータのように高速で回転する必要もない。一方、回転が止まっているときにも高トルクが必要となる。電磁モータは高速回転は得意だが、高トルクにすると大電流が必要となり発熱が問題になる。特に静止してトルクが必要ときはゼロの出力に対して大電流の入力が必要となる。このミスマッチを補うため減速機を用いるが、これは関節の重量増加につながり重量の軽減が課題のロボット設計には好ましくない。

また、ロボットの知能化が進むに伴い、そのハードウェアの機能向上が益々要求され、それに対応できるアクチュエータ技術の裏付けが不可欠となってきた。

このような背景のもと、電磁動、流体方式のアクチュエータに代わる新しい駆動方式であるニューアクチュエータ [27] [28] [29] の実用化が切望されている。

また、アクチュエータフュージョンという概念が提案されている [30]。アクチュエータフュージョンの概念図を図10に示す。この概念は「アクチュエータに要求された運動、動作を、多数のアクチュエータの協調動作によって実現すること」である。アクチュエータフュージョンの概念を応用した典型的な例は微細構造型アクチュエータであ

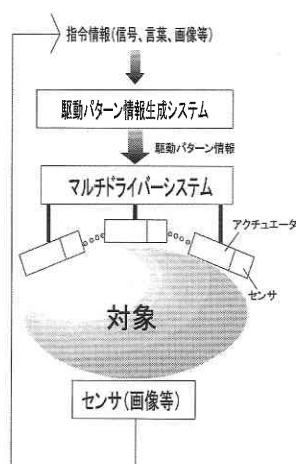


図10 アクチュエータフュージョンの概念図

る。微細構造型アクチュエータは、マイクロマシニングによって生成されたマイクロメーターオーダーの多数のアクチュエータモジュールの組み合わせにより多様な形態に構成される。この場合、モジュールの数だけの最大自由度を持つ。自由度の多さは制御の困難さを伴うものと考えられるが、この場合、それぞれのモジュールに関するオン／オフ制御のみで力、位置に関する十分な精度を出すことが出来る。これは微細なモジュールを使う利点である。微細構造型アクチュエータ開発の最終的な目標はロボット本体の骨組みの外殻を全て微細なモジュールで埋め尽くした構造を作り出すことによってロボットを製作することである。

5.4 その他の技術

インテリジェント・スペースに関連するその他の技術について説明する。

5.4.1 インターフェース技術

人間とインテリジェント・スペースのインターフェースとして、人間にとって自然な音声やジェスチャまた、VR技術などによる五感に作用するものが挙げられる。究極のインターフェースとして脳波を用いるインターフェースも今後開発される可能性がある。筆者らの研究室では、ハプティックインターフェースという人間に力などの感覚を返すインターフェースを研究している [31]。

5.4.2 遠隔学習

カメラやマイクロフォンを用いた遠隔学習が開発され始めているが、現段階では簡単なタッチパネルを用いたものや遠隔の画像やその解説などが得られる程度である。知能化空間では、DIND, VR 技術、及びネットワーク技術などを用いることによりさらに高度な学習の支援が可能である。例えば、スポーツなどの動きの必要な学習では DIND がユーザの動きを細かく監視し適切なアドバイスをリアルタイムで提供することが出来る。また、力覚を伝えることの出来るハプティックインターフェースを用いることによ

り、遠隔作業・遠隔手術・遠隔操作など感覚が必要な動作の訓練を VR 空間内で体験することが考えられる [32]。

さらに、バーチャル講義や会議などに必要である空間の共有感を、インテリジェント・スペース内の DIND や VR 技術でより多く持たせることが可能となる。

5.4.3 認識技術

人間とコンピュータのインタラクションは現在、キーボードやマウスが主なものだが、知能化空間では、より簡単で自然な方法が求められる。そのためには、言語的な会話はもちろん、顔の表情やジェスチャなどの非言語的な情報が重要になってくる。会話の理解には、音声認識や自然言語処理、豊富な知識データベースなど様々な要素技術が必要であり、現状では特定の分野での応用がなされている程度である。知能化空間では、内部の人間の要求への応答、話者認識によりカメラの人間認識機能の、さらには会話のみで位置情報まで検出される可能性も考えられる。

表情認識では、「驚き」「恐怖」「嫌悪」「怒り」「幸福」「悲しみ」の基本6表情が認識の当面の目標となっている [33]。ジェスチャの認識では、コンピュータビジョンの能力不足のために、あるジェスチャを別のジェスチャと誤認識したり、人間の無意識のジェスチャをある要求と誤認識したりなど問題点が多い [34]。今後の研究によりヒューマンインタフェースの問題はかなり解決されると期待されるが、どんなに能力が向上しても完全無欠はあり得ない。そこで、人間同士のようにその場に応じて、密なインタラクションをとることにより、情報の訂正や追加をすることも同時に必要である。

5.4.4 人工知能技術 (AI)

人工知能は、知能を理解し知能を持つ機械を実現するための研究分野であるが、「鉄腕アトム」や「HAL 9000」の様な人工知能は現段階では困難であり、多くの AI 研究者はもはやそのような機械を想定しなくなっている。それよりも、局所的な専門知識をもつ機械を開発することに専念している [35]。人工知能の応用として、知能化空間では対話インターフェースとしての自然言語理解、対象物認識のための画像理解、知的協調作業を行うエージェントの開発が期待できる。ここでのエージェントとは他のエージェントと協調して問題を解決することが出来る自律的な存在である。広い意味では人間やロボットもエージェントに含めることが出来る。知能化空間において必要な自然言語理解を用いる対話インターフェース及び画像理解を用いる画像認識は多くのエージェントと協調することである程度可能となる。

6. 空間知能化の現状

この章では、我々が提案するインテリジェント・スペースと同様な空間知能化に関する研究事例を紹介する。

6.1 EasyLiving

マイクロソフト社の EasyLiving というプロジェクトではインテリジェント環境のためのアーキテクチャや技術の開発を行っている [36]。ここでのインテリジェント環境とは内部のユーザに情報へのアクセスやサービスを提供する空間と定義されている。このプロジェクトの目標は、多様なデバイスを用いてユーザに分かり易く使い易い技術を提供するアーキテクチャを開発することである。そのため、ミドルウェアと呼ばれる多くの分散されたデバイスをサポートするためのソフトウェア、ユーザが使いたいデバイスを特定するための地理的なモデリング、知覚やサービスの記述方法などの研究が進められている。

6.2 Intelligent Room

MIT で研究されているインテリジェントルームは、普段の生活活動にコンピューテーションを取り入れ、人間とコンピュータの自然なインタラクションを可能にする実験環境である [37]。ここには、内部の人間がどこにいるのか、また何をしているのか、何を話しているのかを知るための多くのコンピュータビジョンや音声・ジェスチャ認識システムが設置されている。このシステムにおけるユーザインターフェースはマウスやキーボードではなく、ジェスチャや声や行動である。この研究の目的の1つは、コンピュータをユーザに対し優しいものとし、さらに本質的にユーザに見えないものにすることである。

6.3 Oxygen Project

MIT で研究されているこの Oxygen Project はコンピューテーションを我々が吸う酸素のように何処にいても自由に使えるようなシステムの開発を目指している [38]。将来的には、個人のデバイスを持つ必要がなくなり、誰でも環境に埋め込まれたデバイスを用いて、どこにいてもコンピューテーションを利用出来るようにする。

この Oxygen Project の概念図を図 11 に示す。音声やジェスチャなど人間にとって自然で簡単なインタラクション

が可能のため、キーボードやマウスを用いたり、コンピュータの使用法などを覚える必要がなくなり多くの人が簡単にコンピュータを使用できる。

6.4 Interactive Workspace Project

スタンフォード大学のインタラクティブワークスペースプロジェクトは多くのテクノロジーが埋め込まれている空間において人間がコンピュータや相互作用デバイスと協調して仕事などをする新たな可能性の研究を行っている [39]。この空間には、無線 LAN でつながれた PDA やノートパソコンの他、高解像度の壁に埋め込まれたディスプレイやテーブル上のディスプレイが存在する。また、LCD タブレットのような特殊化された入出力デバイスやマイク、アクティブカメラなども設置されている。

Oxygen プロジェクトが目指すように、将来コンピュータが広く多くの人々に使われるようになったとき、コンピュータやその他のデバイスのプラットフォームとして、このインフラが導入されることが期待されているが、現状では分散ディスプレイの問題や、インタラクションの問題など解決すべき課題が多い。

6.5 ロボティックルーム

「人間と機械またはロボットとの協調は、機械やロボットは人間が不得手な部分を補い、人間に合わせて働くべきである」。このような視点に立ち、部屋自体がロボットとなり、その中で生活する人間の状況をセンシングし、人に対してアクチュエーションを行って支援活動を自然な形で行うことが出来るロボティックルームが研究されている [40]。この部屋は人間の行動をメディアとして扱いそれをベースに支援を行うことを想定している。このシステムは医療・福祉分野を念頭において人間を幅広く支援することを意図したロボティック病室として研究されており、最近では日常生活支援を目的としたものも研究されている。

7. エピローグ～2050年の世界～

最後にこれまでに紹介してきたインテリジェント・スペースの50年後の姿について論じる。

インテリジェント・スペースはネットワーク技術をベースに様々な技術を融合出来るプラットフォームである [41]。そのため、50年後のテクノロジーを様々な形で取り入れたインテリジェント・スペースというものが形成されていると考えられる。インテリジェント・スペースの核である、ネットワーク技術や MEMS、ナノテクノロジーが高度に発展した結果、DIND が世界中のいたる場所に分散配置され地球規模のインテリジェント・スペースが形成されている。屋内・屋外のシステムがネットワークによりシームレスに融合され、物理的な距離は存在するものの、世界中の至る場所に VR 技術などを用いて瞬時にアクセス可能となる。

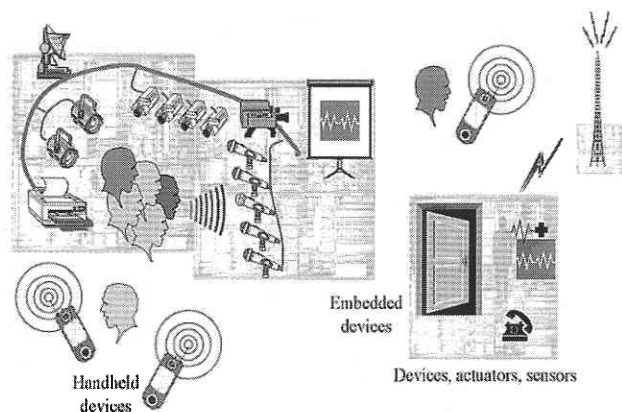


図 11 Oxygen Project[37]

また、知能化された家そのものが生活や仕事の中心となり、会社や学校に行かずとも知能化空間である家に居ながら、臨場感あふれるバーチャル会議やバーチャル講義に参加することが出来る。これは、物理空間とデジタル空間を結ぶインテリジェント・スペースの本来の役割である。各家庭には、役割に応じて人間型のロボットやペット型ロボットなどが存在し、人間の生活はより快適なものになっている (図12)。

また、各要素技術の発展により音声一つで DIND が人間にサービスを提供し、人間のジェスチャや軽い仕草を理解し、それなりの対処をしてくれる。例えば、寝る前に「ニューヨークの夜景を見ながらベーターベンを聞きたい」と言えば、DIND がその要求を理解し、どのようなものでも映し出せる壁にその美しい夜景をあたかもそこにいるかのように見せてくれるだろう。また、人間の身体的な健康状態などはウェアラブルコンピュータにより全て管理されている。そのため、疲労やストレスがたまったり、ウイルスなどが体に侵入した場合など、その状態をウェアラブルコンピュータのセンサが検知し、その情報を DIND に送り適切な処置が施される。

50年後のウェアラブルコンピュータはウェアラブルというより人間内部に埋め込まれた IC チップコンピュータのようなものになっているのではないだろうか。そうなれば、インテリジェント・スペースの大きな目的の1つである人間に満足感を与えるということを、脳レベルで制御可能となる。これは、今後の脳の解析と VR 技術との融合で可能となるであろう。その時には、既に人間自身がネットワークのアクセスポイント、つまり人間がネットワーク世界と融合され、もはや携帯電話や PDA など必要としないかもしれない。

そして、この DIND によるインテリジェント・スペース

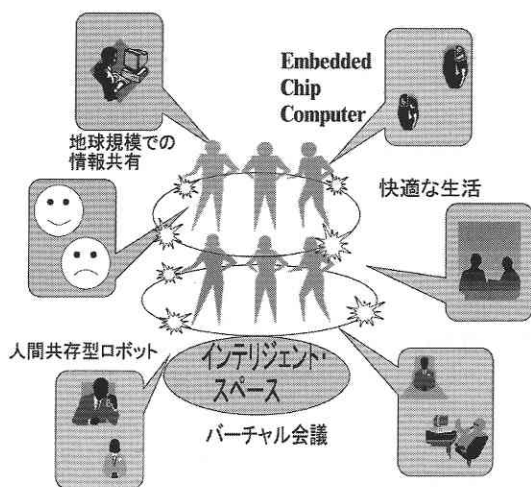


図12 50年後の世界

によって物質中心から脳内の作用に注目した知的消費を核とした省エネで循環型社会が期待できる。

(2001年3月15日受理)

本原稿に関しては、科学技術振興事業団さがけ 21「相互作用と賢さ」の支援している領域プロジェクトです。

参 考 文 献

- 1) 橋本秀紀, “インテリジェント・スペース”, SICE'97 第36回学術講演会予稿集. 103 C-8, 99. 45-46, 1997. 7.
- 2) Hideki Hashimoto, “Intelligent Interactive Spacebased for Robots”, Proceedings of the 2000 International Symposium on Mechatronics and Intelligent Mechanical System for 21 Century pp. 26, 2000. 10.
- 3) 橋本秀紀, 小林尚登, 山口亨, “インテリジェント・インタラクティブ・スペース”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1998年講演論文集, 2 B14.
- 4) 徐剛, 三郎, “3次元ビジョン”, 共立出版, 1998.
- 5) K. Toyama, J. Krumm, B. Brumitt, B. Meyers, “Wallflower: Principles and Practice of Background Maintenance”, International Conference on Computer Vision, September 1999, Corfu, Greece.
- 6) N. Oliver, B. Rosario, A. Pentland, “A Bayesian Computer Vision System for Modeling Human Interactions”, in Int' Conf. on Vision Systems. 1999. Gran Canaria, Spain: Springer.
- 7) K. Pahlavan, X. Li, M. Ylianttila, R. Chana, M. Latva-aho, “An Overview of Wireless Indoor Geolocation Techniques and systems”, MWCN 2000, LNCS 1818, pp. 1-13, 2000.
- 8) http://www.ne.jp/asahi/kansaiphs/tukanana/http_in.htm
- 9) <http://www.watch.impress.co.jp/pc/docs/article/990428/key75.htm>
- 10) PinPoint Local Positioning System, <http://www.pinpointco.com/>
- 11) R. Want, A. Hopper, V. Falco, J. Gibbons, “Active Badge Location System”, <http://citeseer.nj.nec.com/want92.active.html>
- 12) Ultrasonic Location System, <http://www.uk.research.att.com/bat/>
- 13) P. Bahl, V. Padmanabhan, “Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System”, <http://citeseer.nj.nec.com/291324.html>
- 14) V. Kindratenko, “Electromagnetic Tracker Calibration”, <http://www.ncsa.uiuc.edu/VEG/VPS/emtc/>
- 15) CAIP Multimedia Lab: Microphone Arrays for Source Location, <http://www.caip.rutgers.edu/multimedia/marrays/source.location/>
- 16) 近藤啓介, 長井隆行, 金子正秀, 樽松明, “車載音声認識のための2次元 MUSIC 法を用いた話者位置推定”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, pp. 128, 2000. 3.
- 17) <http://www.jpo-miti.go.jp/ryutu/map/sekigai/frame.htm>, “赤外線センサとその応用”
- 18) http://chemsens.mase.nagasaki-u.ac.jp/journal/1988-1_abt.htm, “化学センサの選択性と自己再生について”
- 19) http://ultrabio.ed.kyushu-u.ac.jp/A9912/summer_school/intro.htm, “味覚センサとは”
- 20) http://www.dojindo.co.jp/wwwroot/letterj/084/84_reviews1.html, “味覚センサ”

- 21) <http://www.mems-exchange.org/>, “MEMS Exchange”
- 22) <http://www.dri.co.jp/instat/pr/pr2000/as0004mf-pr.htm>, “ブロードバンドの性能を挙げる MEMS 光スイッチ”
- 23) 稲坂令, ウェアラブルコンピュータ, 日本バーチャルリアリティ学会誌 Vol.5, No.1 pp. 13–16, 2000. 1.
- 24) <http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/UbiHome.html>, “Ubiquitous Computing”
- 25) <http://www.omg.org/>
- 26) S.Goldberg, G.Bekey, Y.Akatsuka, “DIGIMUSE :aninteractive telerobotic system for remote viewing ofthree-dimensional art objects”, Preprints of IROS'98 workshop ‘Robots on the Web’, pp. 55–59, 1998.
- 27) 黒澤実, “薄膜アクチュエータ”, 日本ロボット学会, Vol. 15, No. 3, pp. 326–329, 1997.
- 28) 中田毅, 森川泰, 松熊昭憲, “光アクチュエータ”, 日本ロボット学会, Vol. 15, No.3, pp. 338–341, 1997.
- 29) 田所論, “柔らかいアクチュエータ”, 日本ロボット学会, Vol. 15, No. 3, pp. 318–322, 1997.
- 30) 高森年, “今, ロボット用アクチュエータに何が求められているか?—ニューアクチュエータへの期待—”, 日本ロボット学会誌, Vol. 15 No. 3, pp. 314–317, 1997.
- 31) Noriaki Ando, Kouhei Gonda, Masahiro Ohta, Hideki Hashimoto, Taiichi Kusano, Isao Kamiyama, “Micro Work Cooperative System with Haptic Interface” IFAC-Conference on MECHATRONIC SYSTEMS (Mechatronics 2000), Vol. 3, pp. 1085–1090, 2000. 9, Darmstadt, Germany.
- 32) Gary. R. Morison, Steveb. M. Ross, Jerrold.E.Kemp, “DESIGNING EFFECTIVE INSTRUCTION”, WILEY EDUCATION 3rd Edition, 2001.
- 33) 橋本周司, システム／制御／情報, Vol. 44, No. 3. pp. 102–109, 2000.
- 34) 久野義徳, “実時間の密なインタラクションに基づくヒューマンインターフェースシステムの研究”, 平成9–11年研究成果報告書, pp. 1–10, 工学会知能メカトロニクス.
- 35) 菅原研次, “人工知能”, 森北出版株式会社, 1998.
- 36) B. Brumitt, B. Meyers, J. Krumm, A. Kern, S. Shafer, “Easy Living: Technologies for Intelligent Environments”, Handheld and Ubiquitous Computing, September 2000.
- 37) Michael H.Coen MIT Artificial Intelligence Laboratory, “A Prototype Intelligent Environment”, <http://www.ai.mit.edu/projects/hci/>
- 38) <http://oxygen.lcs.mit.edu/>
- 39) <http://graphics.stanford.edu/projects/iwork>
- 40) T. Sato, Y. Nishida and H. Mizoguchi: Robotic room: symbiosis with human through behavior media; Robotics and Autonomous Systems, Vol. 18, pp. 185–194 1996.
- 41) 橋本秀紀, “インテリジェント・メカトロニクスの展開”, 日本塑性加工学会誌 Vol. 40, No. 456, pp. 18–24, 1999. 1.