

五感情報通信の実現にむけて ～ 触覚および嗅覚情報の伝達 ～

広 田 光 一[†] 廣 瀬 通 孝[†]

五感情報通信という言葉が広く使われるようになってきた。このような興味のひとつの側面は従来扱われてこなかった感覚情報をメディア技術に導入することである。本稿では触覚および嗅覚情報の伝達について筆者らの試みを紹介する。触覚情報の伝達のひとつの方法は接触などのインタラクションの対象となるものを触覚的なモデルとして構築し仮想空間の中で再現することである。嗅覚情報はこれを構成する匂いの要素(原臭)が明らかになっておらずしたがって任意の匂いを扱うことは難しいが、匂いの種類を限定することでこれを電子的なメディアで扱うことはある程度可能になってきている。

Toward multi-sensory communication - transmitting the sense of touch and smell

KOICHI HIROTA[†] and MICHITAKA HIROSE[†]

Multi-sensory communication has been emerging as a new field in the media technology. In this paper, we describe our approaches to transmitting the senses of touch and smell through the electronic media. We propose methods to acquire the information of stiffness of deformable objects and to represent them in virtual environment for the real-time interaction. Also, we develop a system that measures concentration of smell in the air using gas sensors and present the coordinate smell to the remote user.

1. はじめに

五感情報通信という言葉が広く使われるようになってきた。これは技術の進展により視覚や聴覚以外の感覚を利用したより表現力のあるメディアが生まれるのではないかという期待のあらわれであると考えられる。人は五感を通して情報を受け取るという言い方がしばしばされるが、厳密には人間が受容する感覚情報は視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚のほかに前提感覚、深部感覚などもあることが知られている。このような言い回しの本来の意図やメディア技術の目的を考えると、五感という言葉がこれらの感覚情報をひっくるめた総体という意味で使われていると捉えるのが自然であろう。人はこれらの感覚情報をたよりに周囲の環境を知り、それに応じて行動するが、これらの感覚情報の物理的な伝達範囲には限界がある。目の届く範囲は手前のものでさざぎられない領域に限定され、聴覚も音波の減衰によりそれほど遠くまでは効かない。このよう

な感覚情報の物理的制約をはずすひとつの方法が電気的あるいは電子的に感覚情報を伝達することであった。

電話の発明により音声情報が電気的に伝達されるようになり、テレビの発明によって映像情報が伝達されるようになった。電話はマイクとスピーカにより1点の音圧変化を遠隔の1点で再生する仕組みをふまえて、感覚情報の発信源である口と受容器である耳とを相互につなぐことで、音声による1対1のコミュニケーションを可能とした。テレビもカメラとディスプレイにより1点からの映像を伝えるメディアで、当初はマスメディアとして利用されてきたが、通信技術の進歩にともないテレビ会議として1対1あるいは多対多のコミュニケーションにも利用されるようになってきた。触覚情報の伝達の必要性が指摘されたのは遠隔操作(テレロボティクス)の領域であった。触覚情報が対象物の状態の把握や操作力の制御に必要とされ、ひいては作業効率に影響を与えることが指摘された。触覚情報は視覚や聴覚とはことなり一般には空間を伝わる性質のものではなく、したがって人間の動きによって空間を探ることで初めて環境の情報が得られる。このため体性感覚をあわせて能動的に感覚情報の収集が

[†] 東京大学先端科学技術研究センター
RCAST, University of Tokyo

行われることが特徴である。時間遅れのある系ではこのような能動的な探索を行うことが難しくなることから、後にスーパーバイザリコントロールのように制御に知性を持たせることやプレディクティブディスプレイなどのように遠隔の環境を仮想空間内でモデルとして保持することでシミュレーションによる予測を可能とする概念が提案されている。

このような感覚情報の伝達においてあたかもその場にいる感覚、すなわち臨場感の必要性を指摘したのがトレイグジスタンスあるいはテレプレゼンスの概念である。これらは主にテレロボティクスを背景とした技術であったため、オペレータが環境を主観的に認識することができるような情報の記録再生に焦点が当てられていたと考えられる。ほぼ同じ時期にVRの概念が提案されたが、トレイグジスタンスに比べるとVRにおいては空間性の概念が重要視され、客観的な世界としての仮想空間の構築に関心が集まった¹⁾。また、このような空間を臨場感をもって提示するために多感覚情報の提示の必要性が指摘されていた。VRから派生したAR (Augmented Reality) とMR (Mixed Reality) の概念は、仮想空間を現実の世界と関係付けるものである。ARはVR空間性を現実環境における情報世界とのインタフェースに適用する考え方であり、MRはARによる情報世界から現実世界への情報の流れに加えて、さらに現実世界の情報を仮想世界に積極的に取り入れて利用するAV (Augmented Virtuality) の概念の導入によって現実と仮想環境との間をシームレスに関係付けるといったものであった。このような技術の展開の影響もあって、現実環境をモデル化して情報世界に取り込む技術が広く検討されるようになり、たとえば映像に関してはCV (Computer Vision) による環境の認識やこれから派生したイメージベーストモデリングの考え方が提案されている。

一方、仮想空間をネットワーク上に展開共有することでコミュニケーションに利用するネットワークVRや共有仮想空間の概念が提案されていた。これらを実現するための技術的検討はこれまでどちらかというとは仮想世界に非常に多くの人がいることを想定した場合の効率的な処理や通信プロトコル、あるいは高次のコミュニケーションをサポートする概念や実装など、ネットワーク技術よりのアプローチが多く試みられてきた。しかしながら、上で述べたような現実世界の情報を仮想世界に取り込む技術が現実世界と仮想世界の関係を密接なものにしていくにしたいが、現実世界でのコミュニケーションに近い活動を仮想空間で行うことが現実味を帯びてきており、これを目指した研究も

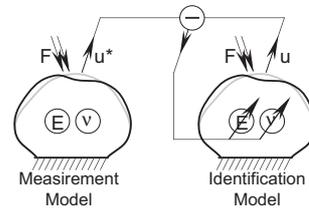


図 1 モデル獲得の概念

活発化してきている。人物像を3次元的に実時間で仮想世界に取り込むアバタ技術などはその一例である。この技術は究極的には空間をまるごと伝送する考え方につながっていくと考えられる。

以上のように背景を振り返ると、五感情報通信といってもその実現方法には電話やテレビあるいはテレロボティクスのようにユーザあるいはオペレータの様々な感覚受容器をいわば延長する考え方と、現実世界の様々な感覚情報をモデル化して仮想空間に取り込む考え方とのすくなくとも2つのアプローチが考えられそうである。ところで、五感情報という言葉聞いた場合に、従来の情報提示と比較してとくに興味を引くのは視覚や聴覚以外の部分であろう。視覚や聴覚については、上述のように技術的にかかなり確立され実用に供されているのに対して、それ以外の感覚については必ずしも十分な検討がなされていないのが実情である。以下では、筆者らの研究室で行っている触覚および嗅覚情報をあつかう試みについて紹介する。

2. 触覚情報の記録と再生

ひと口に触覚の情報といっても形状に触ることができるというレベルから対象物の触覚的質感表現のレベルまで多様である²⁾。対象物に関わる触覚情報を記録伝送再生するためには、これらの情報を計測しモデル化して計算機に取り込む技術と、このモデルにもとづく接触のシミュレーションによってインタラクションにともなう力を計算し提示する技術とが必要となる。とくに物体のやわらかさの表現については、手術シミュレーションのための臓器モデルのようにできるだけ現実に近い特性が必要とされる応用もあり、現実の対象の計測などにもとづいてこれを再現する試みが行われるようになってきた。

2.1 やわらかさのモデル化

やわらかさとは力と変形の関係である。したがって、現実の物体とこれをモデル化した仮想物体が同じやわらかさをもつということは、同じ力に対して同じような変形をする、あるいは同じ変形をさせるのに同じような力を必要とするということである。このようなモ

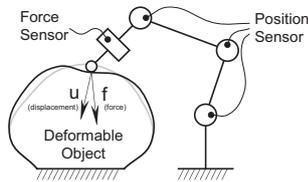


図 2 やわらかさの計測

デルの構築にむけて、筆者らは弾性変形する物体について検討を行っている³⁾。現実の物体は一度変形すると戻らないいわゆる塑性的性質をとまなうものも多いが、第1近似として弾性のみを扱おうというわけである。これを具体的に行う過程は、次のようなパラメータ同定の問題と考えることができる。すなわち、仮想物体の変形モデル(同定モデル)が与えられて、その柔らかさが何らかのパラメータで表現され、さらに、実物体(計測モデル)と仮想物体の変形モデルとの変形特性の違いを誤差関数として表現できるとすると、誤差関数を最小にするパラメータを求める問題に帰着する(図1)。

実験ではやわらかい物体のモデルとして有限要素法などで利用されている線形弾性モデルを用いた。このようなモデルでは、対象を要素に分割しその内部のひずみと応力の関係が定義され、その総和として物体全体での変形と力の関係が与えられる。やわらかさのパラメータはひずみと応力の関係の中で物理的な係数として表現される。具体的にはヤング率 E とポアソン比 ν である。不均質な物体では場所によってやわらかさが異なり、すなわちこれらの係数も場所によって異なることになる。

まず、対象となる実物体について、力と変形の間を計測する必要がある。力センサを備えたロボットアームなどを利用することが考えられるが、まだ理論的検討の段階であることから、実験ではシミュレーションにより理想的なモデルに対して誤差のない計測を行った結果を用いるものとした。また計測の自由度についてはもっとも単純な条件として1点に対して作用しその点における力および変位を計測できる装置を仮定した(図2)。

以上により計測された力と変形の間を基に変位誤差の自乗和を誤差関数としてこれを最小とするパラメータ(やわらかさの係数)を共役勾配法(降下法の一つ)を用いて決定する。内部のやわらかさの分布が未知の場合には、微小領域のメッシュに分けて各々のパラメータを推定し、これをもとに内部の構造を把握することになる。実験では、やわらかい材料の中に硬い芯が埋め込まれている立方体形状のモデル(図3(a))

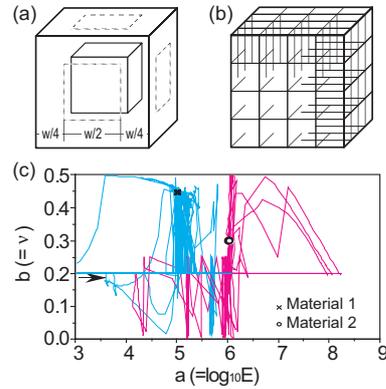


図 3 シミュレーション実験

について計測した結果から、同じ形状を $4 \times 4 \times 4$ の領域に分けたモデル(図3(b))で同定を試みた。パラメータが収束していく様子を図3(c)にプロットした。この実験では全てのパラメータがほぼ正しい値に収束した。このように提案した方法により理論的にはやわらかさをモデル化することができるということが示されたが、モデルや計測に誤差を含む実物体の計測にこれを適用していくにあたっての問題点の解決がこれからの課題である。

2.2 実時間の変形操作

前節のようにしてやわらかさを線形弾性体としてモデル化することができたとして、触覚情報の伝達の観点からは、これを仮想空間で表現する手法が必要である。一般に変形のシミュレーションは計算負荷が大きく触覚提示に要求される実時間での計算が必ずしも容易ではない。筆者らはこれを解決するために次のような手法を提案している⁴⁾。

線形弾性モデルでは対象物全体の変形と力の関係を全体剛性行列により表現することができる。これはモデルのもつすべての自由度について変位と力の関係を与えるものである。これを解いて操作反力を求めるためには、全体剛性行列のうちで強制変位が与えられていない自由度について変形(変位)を求め、これらの変位を用いて各自由度の力を計算する必要があり、変形を求める計算で全体剛性行列の大きな部分行列について逆変換の計算を行うことが計算時間を多く必要とする理由であった。しかしながら、仮想空間での接触がデバイスの制約などから現状では少ない数の点でしか発生することに注目すると計算量の削減が可能である。

よく知られていることであるが、あらかじめ全体剛性行列の逆行列を求めておくことで、力境界条件が与えられた際の変形の計算は容易に行うことができるよ

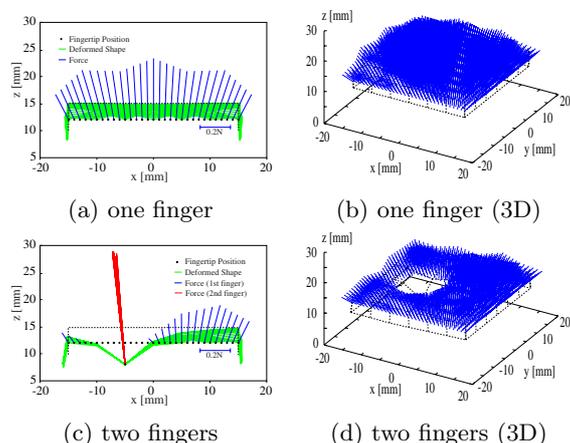


図 4 Force in deformation operations

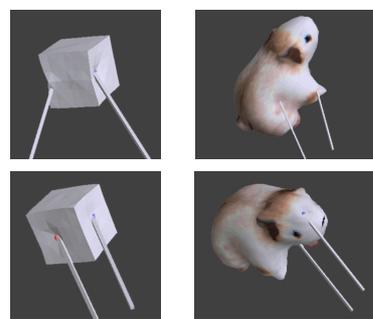
うになる。ただしこの方法では触覚表現では指先が物体に接触した場合に指先が物体に対して生じる新たな強制変位の境界条件を考慮することができない。そこで、指先が与える強制変位の境界条件と等価な力境界条件を求めることができれば上述の逆行列を利用することができる。この等価な力境界条件は全体剛性行列の逆行列のうち強制変位境界条件が与えられる自由度に関する部分行列の逆変換を用いて計算される。したがって、強制変位の条件が与えられる自由度が少ない場合には、この部分行列は比較的小さいものとなり、計算量も少なくなる。

以上の議論は指先が変形モデルのノードに変位を与えるような場合に関するものであったが、仮想物体とのインタラクションでは表面上の任意の点に接触することから、ノード以外の点で反力の表現についても計算手法を確立しておく必要がある。ひとつの方法はノード間で力の補間をおこなうフォースシェーディングに近い考え方を適用するもので、具体的には指先が物体に進入した深さに等しい変位が近傍の3ノードに独立に作用したときの反力を求め、これらに面積座標による重み付けをおこなった総和を接触点での反力とするものである。このような補間による力の提示の様子を図4に示す。(a)および(b)は1点で立方体上面を押した場合、(c)および(d)は1点が既に面を押し下げている場合に2点目の接触点が同様に面を押し下げた場合の変形と反力の様子を重ねてプロットしたものである。

このようなモデルを触覚提示装置と組み合わせて用いることで、やわらかい物体をもって操作することも可能である。実験ではPHANToMを2台用いてつまむなどの操作を実現した(図5図6)。シミュレーション



図 5 Device for two-finger interaction



(a) Cube (b) Mouse

図 6 Manipulation of elastic objects

ンの計算時間も一般に触覚表現において最低限必要な更新レートとされる 1kHz で計算を行うことができる。

3. 嗅覚情報の伝達

これまでのメディア技術では嗅覚表現にはほとんど関心もたれてこなかった。その理由のひとつは嗅覚が言語的に意味のある情報の伝達に適さないことによると考えられる。しかしながら、最近ではアロマセラピーのように非言語的あるいは無意識的に嗅覚がわれわれに与える影響に関心が高まっている⁵⁾。また、セキュリティや環境モニタリングを目的として電子鼻(Electronic Nose)のような匂い計測技術が注目を集め、仮想空間などにおいて匂いを提示する技術の必要性も指摘されるようになってきた⁶⁾。視覚や聴覚と匂いが大きく異なっているのは、これが化学的な感覚であるということである。すなわち、刺激のもとになるのが化学物質であり、これを受容する感覚器は化学的センサである。また、嗅覚情報の扱いを困難にしている理由の一つは嗅覚のもととなる物質の要素が特定されていないことである。視覚であればRGBの3原色などによって全ての色を表現することができるのに対して、嗅覚ではこのような原臭が明らかになっていないのである。

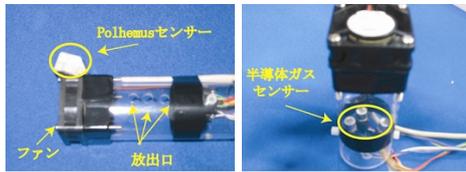


図 7 匂いセンシング装置

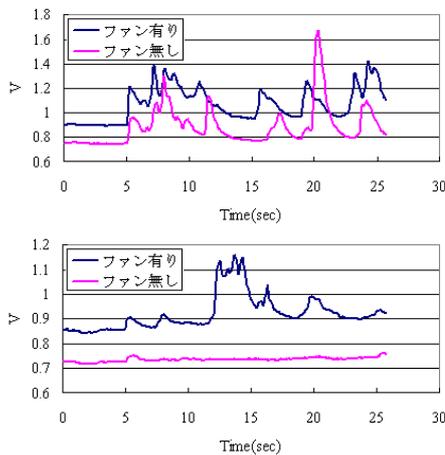


図 8 吸気の効果

このように問題は多いものの、上述のようなセンサ技術の進歩などにより嗅覚情報を電子的なメディアで扱うことがある程度は可能になってきた。以上のような背景から、筆者らは匂いの伝達を五感情報通信の要素技術のひとつと捉えてその実現方法に関する検討を行っている。

3.1 嗅覚情報の計測

匂い計測には半導体ガスセンサ (フィガロ技研 SnO_2 センサ) を用いた。このセンサは化学物質が半導体の厚膜に吸着により化学分子と厚膜の間に電子の授受が生じ、その結果として半導体の電気伝導率が変化するという原理に基づくもので、電気伝導率がガス濃度の対数に比例する。このガスセンサは計測の対象とする物質によって数種類が用意されており、これを組み合わせることで、ある程度匂いの識別が可能になる⁷⁾。

このセンサを用いて人工の鼻を試作した (図 7)。人間が匂いをかぐ際には、受容器が鼻腔内部にあることから空気を吸引することで臭気を導入する。試作した人工の鼻においてもファンによる吸引を行うものとした。これによってセンサの応答を早める効果や吸引の制御により感度を制御できることなどの利点が明らかになっている。たとえば、図 8 は匂い源から 10cm および 20cm の距離に吸引の機構を取り付けたセンサと取り付けしていないセンサをおいた場合の計測値の比較

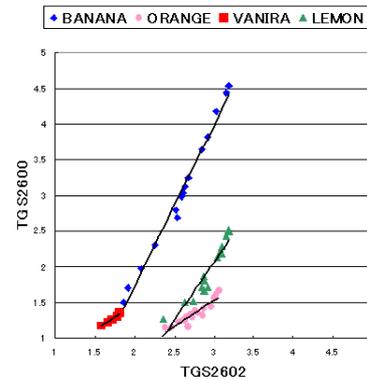


図 9 匂いの判別

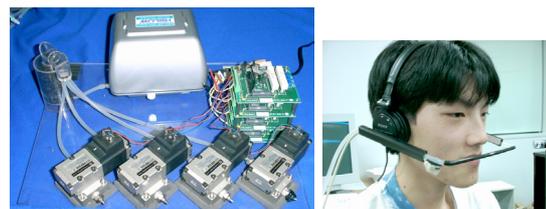


図 10 匂い提示装置

である。この結果が示すように、吸引がある場合にはない場合に比較して、臭気を早く導入し検出することができ、また、匂い源が離れている場合でも臭気を導いて効果的に検出することができる。

このような人工の鼻を用いて匂いの識別を行うことを試みた。実験では 2 種類のセンサをもちいて食品添加物として用いられる香料のバナナ、オレンジ、バニラ、レモンの 4 種類をさまざまな濃度で放出した場合の計測値を記録した。この結果をプロットしたものが図 9 であるが、各々の匂いごとに領域がほぼ分かれており、単独の匂いであれば計測結果をもとにいずれの香料であるかをほぼ特定できることが明らかになる。

3.2 嗅覚情報の提示

以上のようにして人工の鼻により計測され特定された匂いの情報を再生するためには嗅覚ディスプレイが必要である⁸⁾。嗅覚ディスプレイについてもセンサと同様に任意の匂いを提示することは匂いの要素が特定されていない現状では困難であるが、匂いの種類を限定すれば実現は必ずしも難しくはない。

筆者らは 4 種類の香料による匂いを混合して提示することができる嗅覚ディスプレイを試作している。この装置では、香料を独立のチャンバに入れて揮発させておき、これらのチャンバに空気を送ることで匂いのついた空気を取り出し、無臭の空気とあわせて混合してユーザに提示する。チャンバのなかで空気中の香料

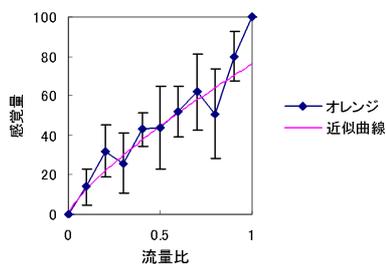


図 11 匂いの提示

の濃度はほぼ飽和状態にあると考えることができることから、チャンパに送る空気量(すなわちチャンパから取り出す臭気量)と無臭の空気量をアナログバルブによって変化させることで、匂いの濃度や混合比を定量的に制御することができる。

この嗅覚ディスプレイによって匂いの強度の変化を提示できていることを確認するための評価実験を行った。被験者にさまざまな濃度の匂いを提示し、それぞれについて濃度が 0% および 100% のときの感覚量を 0 および 100 として感覚量がいくぐらいであるかを答えてもらう。例としてオレンジの香料について得られた結果を図 11 に示す。この図から明らかなように全体的な傾向としては混合比の増加にしたがって感覚量も増加している。なお、嗅覚については物理的な刺激の強さをこれに伴って生じる感覚量との間に Weber-Fehener の法則とよばれる対数的関係があることが知られており、この実験で得られた結果にもこれに近い傾向が観察される。

3.3 嗅覚情報の伝達

人工の鼻と嗅覚ディスプレイをもちいて実時間で匂いを計測し提示することができるようになる。もっとも単純な実験としてこれらを組み合わせて鼻を延長する実験をおこなった。人工の鼻を手を持って環境を走査し、その結果を嗅覚ディスプレイにより鼻にフィードバックする。このようなシステムをもちいて匂い源の位置を特定する実験を行ったところ、およそ 3cm 以内の誤差で匂い源の探り当てることができることが明らかになった。誤差の要因はさまざまなものが考えられるが、この実験結果の全般的な傾向として走査方向と逆方向に誤差を生じるケースが多いことから、人工の鼻が匂い源に接近し匂い強度に大きな勾配が生じた点を匂い源の位置と誤認する傾向があると予想される。

4. おわりに

本稿では、五感情報通信の実現に向けた筆者らの取り組みについて、触覚および嗅覚の情報の伝達に關す

る試みを紹介した。これらの技術はいずれも実用にはまだほど遠いものであるが、さまざまな応用の可能性を秘めたものであると考えている。このような研究を通して今後も五感情報通信の技術の発展に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 廣瀬 通孝: パーチャル・リアリティ; 産業図書, (1993).
- 2) G.Burdea: Force and Touch Feedback for Virtual Reality; A Wiley-Inter-Science Publication, New York, 1996
- 3) 広田光一, 金子豊久: 柔らかい仮想物体モデルの入力に関する検討; 日本 VR 学会第 1 回大会論文集, pp.47-50, 1996
- 4) 広田光一, 金子豊久: 柔らかい仮想物体の力覚表現; 情処論, Vol.39, No.12, pp.3261-3268, 1998
- 5) 高木貞敬, 渋谷達明: 匂いの科学; 朝倉書店, 1989.
- 6) M.W.Krueger : Reality Stinks and so should virtual reality; Proc. VSMM'96 in Gifu, pp.1-66, 1996
- 7) 崎川修一郎ほか: 嗅覚情報伝送に関する研究; 日本 VR 学会第 6 回大会論文集, pp.217-220, 2001
- 8) 廣瀬通孝, 谷川智洋, 石田健亮: 嗅覚ディスプレイに関する研究; 日本 VR 学会第 2 回大会論文集, pp.155-158, 1997