視覚と触覚による形状認識の課題

福井 幸男* 赤松 幹之* 下条 誠*

1. はじめに

計算機と人間との対話環境のあり方の一つとして、近年人工現実感の技術が注目されている。これは、人間の感覚器官や運動系に直接働きかける入出力装置を備えていることを特徴とした計算機環境といえる。人間が計算機に働きかける場合、感覚器官からの情報を大脳中枢で判断し、運動系（主として手指）にその意図を伝えて運動発現を起こす。そしてこれは、入力が感覚で出力が運動発現という単純な受動的入出力システムではなく、常に生体の内外でフィードバックループを多重にもつ能動的な制御システムとなっている（図1参照）¹⁾。このとき使われる感覚はいわゆる五感のうちで、視覚、触覚、聴覚が主な役割を果たす。このなかで、触覚を触圧感覚、関節・筋感覚、痛覚、温冷覚などに分けて考えた場合、触圧感覚、関節・筋感覚などが主に使われることになる。ここで主に使われるこれらの触覚関連の体性感覚を、簡単のため触覚と総称することにする。一般に、人間が自然界にある物体形状を視覚や触覚によって認識するとき、目で受ける視覚情報と手などによる触覚情報とは、互いに矛盾がなく、かつ、その手を動かす運動系と完全に整合性がとれている。それは乳児時代からの長期間におよぶ学習によって完成されたものである。物体形状を認識する場合、まず見て大体の概形を把握してから、その形状や位置に沿うように手を伸ばして行き、触れて最終的に確認するという手続きをとっている。このとき、視覚・触覚情報は協調して相補的に働き、運動系である手の筋肉を制御して能動的センシングを行っている。視覚単独、または、触覚（運動覚）単独では空間認識の精度はそれほど良いものではない^{2),3)}。しかし、これらの感覚を統合させて、人間は驚くほどの細かな指先作業から、きわめて大ざっぱな全身作業までを巧みにこなしている。

ロボットハンド等の遠隔操作等、人工的な情報操作環境において、操作する人間にとってより自然な操作感を

呈示するためには、視覚、触覚、聴覚情報などの感覚情報呈示デバイスにおいて、デバイス相互間、および、デバイスと人間特性との情報の整合性をとることが望ましい。しかしながら、現状ではコンピュータやデバイスの情報処理能力が不足しているために、満足な状態ではない。物体をつかむような作業においては、まず、物体を正しく認識する必要がある。操作者がつかむために認識する対象は、遠隔操作などの環境では、実際の物体ではなく画像などで示された仮想的な物体のことが多い。したがって、形状認識という比較的単純な作業を行う場合でも、仮想物体に触れて正しく認識するためには、情報を呈示する環境の性能に大きく依存することになる。特に、触りながら認識する場合は、触る手にも実際と同様な触覚情報を呈示させることが必要となる。本稿ではこのような形状認識のための環境呈示において、どのような点に考慮しなければならないかを考察する。

人工的に与えた感覚情報によって形状を認識する場合情報呈示側の能力不足によって、これらの情報間に不整合が生じやすい。これを解決するための最初のステップとして、どの程度の不整合まで許されるか、あるいは、不自然に感じられないか等を考察することが重要になる。これはすなわち、情報を受け取る人間の特性を把握することにつながる。そこで、形状認識に使われる視覚、触覚、運動系などの基本的な人間特性とそれらの相互関連性を求めるための課題と、その中のいくつかの実験について述べる。

図1 感覚の統合の機能の模式図

原稿受付 1992年9月3日

Issues on Recognition of Shapes with Visual and/or Haptical Sensation

* 製品科学研究所

2. 形状認識における感覚情報の利用形態

形状を認識する場合、通常、視覚情報だけで行うことが多い。またこれとは対照的に、触覚情報だけを用いる場合もある。この後者の場合、特に盲人用ディスプレイ等では、物体形状に触れてさらに手指を形状に沿って自発的になぞる動作により、形状の変化や広い領域の情報を触覚情報として取り込んでいる⁴⁾。もちろん、視覚情報と触覚情報を併用すれば、さらに正確な形状認識ができるはずである。そこで、これらの感覚情報を利用するときの条件を考察してみる。

2.1 呈示情報の組合せ

操作を伴う形状認識環境を考える場合、視覚情報と触覚情報とをどのような条件で利用するかによって様々な場合が生じる。これらの条件をまとめると以下のようなものが考えられる。

1. 利用する感覚情報の種類
 - ・視覚単独
 - ・単眼視／立体視
 - ・狭視野／広視野
 - ・リフレッシュレイト
 - ・分解能
 - ・聴覚情報の有無
 - ・触覚単独
 - ・すべり覚の有無
 - ・点情報呈示／面情報呈示
 - ・サンプリングレイト
 - ・視覚、触覚情報を同時に呈示する
2. 触運動の視覚的フィードバックの影響
 - ・カーソル等でその動きの表示の有無
3. 視覚駆動型運動の触覚フィードバックの影響
 - ・触覚フィードバックの有無
4. 触運動＋視覚的表示における相互関係

図2 微妙なうねりのある図形

4.1 触運動と視覚的情報の遅延関係

- ・触運動とその視覚的表示との間の時間的ずれの有無

4.2 触運動量とその視覚的移動量との関係

- ・両移動量が一致
- ・両移動量の比が一定
- ・両移動量との比が方向によって異なる

4.3 触運動とその視覚的表示の位置関係

- ・触運動と視覚的呈示位置が空間的に一致
- ・触運動と視覚的呈示位置が水平軸まわりの回転変換関係にある
- ・触運動と視覚的呈示位置が水平軸以外の軸まわりの回転変換関係にある

2.2 感覚受容器固有の特性

人間の目の視力は視線方向中心から $2\sim 4^\circ$ の部分が弁別能力の最も優れている部分である。中心から 10° ほどずれると視力は半分に下がる⁵⁾。視線中心近傍左右 15° 、上 8° 下 12° 以内では眼球運動のみで注視できる有効視野となっており、瞬時に情報受容が可能である。そして、臨場感を感じさせるためには、左右 50° 、上 35° 、下 50° の誘導視野までに呈示するのが望ましい⁶⁾。

一方、触覚に関しては、応答特性が異なる4種類の受容器が存在すると考えられ、それらの分布密度も場所によって異なる⁷⁾。形状の細かな凹凸は、応答の速い受容器が多い指先で感度が最も高い。緩やかな凹凸を感知するためには、面積の広い掌部分が有効な場合が多い。しかし、操作環境として、広範囲に触覚情報を呈示することは、現状では技術的に困難な面がある。

図3 錯視図形例

(a) 単独の感覚情報による認識結果

(b) 視覚と触覚を同時に利用した場合の認識結果

図 4 錯視図形認識結果

3. 視覚・触覚情報を利用する認識課題

3.1 視覚、触覚情報の併用の利点

形状認識において、単一の感覚情報を利用する場合と複数の感覚情報を利用する場合との違いを検討すると、まず、単独の情報を使う場合では、視覚情報を利用する場合の方が、触覚情報を利用する場合よりも大局的な形状特徴が得られやすいし、感度も一般的によい。特に力覚をフィードバックさせて間接的に触覚情報として認識させる仮想形状の場合では、視覚情報の方がうねりの周期が比較的長い場合は感度がよい⁸⁾。しかし、微妙な変化があるかないか、あるとしたらどこに在るかというような判断をする図2に見られるような図形の場合では、両方の感覚情報を利用して判断の方が確信度が高くなるという実験結果がある⁹⁾。このことから、やはり複数チャネルの感覚情報を利用した方が、認識に対する確信度が高くなると思われる。

3.2 錯視環境における形状認識

視覚は触覚に比べて大域情報を獲得しやすく、感度も良い場合が多いが、大域情報がかえって判断を誤らせる例に錯視現象がある。微妙な形状の変化を調べるときには、周囲の図形、例えば表示ウィンドウ枠などの影響が少なからず出てくる。そこで、この錯視の影響を調べるために、典型的な錯視の例として図3に示すような多数の同心的に描かれた正方形に囲まれた円図形を用いて、そのひずみ量を認識する実験を行った¹⁰⁾。対角線方向に円図形を次第に歪ませて変化させた(図3に2例を示す)ときにひずみ量が0であると認識するときの実際のひずみ量を実験で求めてみた。触覚情報を用いた認識実験も行った。このときの視覚呈示には19インチディスプレイ、触覚呈示には、XYレコーダに力センサを取り

付けて力フィードバックを行う機構を用いた。これらの結果の一例を図4に示す。図4(a)には単独の情報を利用したときのもので、視覚情報のみによる認識では錯視の影響により、平均値が偏っているが、触覚情報のみによる認識では平均値では視覚ほどの偏りはないが、分解能が低いため、標準偏差は視覚より大きくなっている。これに対し、手指でなぞりながらその位置をカーソルとして原錯視図形とともに表示しつつ、視覚情報も用いて認識した場合の結果を図4(b)に示す。この場合、錯視のため、視覚情報と触覚情報とが互いに矛盾する結果を脳に与えることになる。一般には、視覚情報の方が確信度が高いために、ここでは総合結果として視覚情報を重視した結論を出している。ただし、両方の情報間の矛盾のため、標準偏差は視覚単独よりも大きくなっている。したがって、矛盾する情報呈示は、誤差を拡大する方向に導くようである。

3.3 すべり覚の影響

実際の物体形状を手指でなぞると反力とともに、すべりを皮膚感覚として受ける。ところが、人工的な操作環境で行う場合は、レバーなどを介して操作するので、対象形状をなぞることはできても、そのときにすべり覚を実現させることは困難である。一般に、すべり覚が無ければなぞり動作時の形状認識の感度が低下すると考えられがちであるが、実際はそうでない^{11), 12)}。この実験は、板などの表面をなぞって表面の凹凸やうねりを調べるときに、直接手指をすべらせた時と、薄い紙を手指と表面の間において、指と一緒に紙もすべらせた時との間で感度に差があるかどうかを調べたものである。その結果は、紙などををはさんで直接手指にすべりがなくなるようにした場合の方が、感度が良いことになる。したがって、うねり感は、直接のすべりが無くても、形状に対応した位

置・反力を返すことにより実現できることになり、人工的な操作環境にとって好都合である。

3.4 視覚駆動運動の触覚フィードバックの影響

表示図形の外形に沿ってカーソルで追跡する場合などは、視覚によって駆動される運動である。このような場合、触覚的なフィードバックの有無によって処理効率が変化する¹³⁾。図5に示されるように、表示図形の外形に沿って追跡する実験において、図5(b)に示すように実際の物によって触覚情報を与えた場合とそうでない(a)の場合の比較をした。このときの、図形の縦横比の認識誤差と最大追跡速度を図6で示す。触覚情報を与えると、速度も誤差も小さくなっていることがわかる。なぞり運動の場合のみならず、通常のマウス/カーソルによるメニュー選択のような作業においても、触覚情報の利用は有効となる¹⁴⁾。これらの点からも、視覚と触覚の

図 7 触運動と視覚フィードバック実験

視触覚による形状追跡実験

(a) 縦横比の認識誤差

(b) 最大追跡速度
図 6 追跡実験結果

同時呈示は重要であることが示される。

3.5 触運動の視覚的表示の影響

前項は視覚情報で動きを制御したが、逆に、なぞりなどの触運動を基本として考えた場合、手指の動きを視覚的表示によりフィードバックさせる効果を調べてみた。図7に示すような鏡を利用してディスプレイに形状の外形を示し、実際になぞる形状は鏡の背後に設定しておく。手指の動きは別のカメラで撮影し、その位置情報を画面に表示するかどうかを選択することで実験条件を設定した。長方形の縦横比を認識する実験結果では、視覚フィードバックがある場合の方が、誤差率は小さくなった¹³⁾。したがって、触運動自体の位置情報を視覚的にもフィードバックさせる方がより、認識率が良くなるといえる。これは、中枢から筋運動指令として出された遠心性情報のフィードバックを、生体内と画面、視覚を経由した生体外との二重に行っているため、確信度がより大きくなったためと考えられる。

3.6 時間遅れの影響例

現実的な装置で生じる時間遅れの影響に関して、広視野のゴーグルタイプのディスプレイにおいて実験した例が報告されている¹⁵⁾。この実験によると、頭を回転させて、振動している物体を追跡する実験であるが、約5秒半のゆるい周期の振動を追跡するときでも、画面表示時間の遅れが1秒を越えると急激に追従誤差がでるようになる。

3.7 視覚表示空間と操作空間の対応関係

一般のマウスによるカーソル操作の場合に見られるように、視覚表示空間と操作空間は必ずしも対応していかなくても自然に感じる場合がある。これは、人間の視線方向が正面方向と、下を向いた方向とを常に繰り返すことに慣れているため、この2つの空間対応に馴染んでいるためと思われる。これは、道路標識などでも同じ対応関係で表示されていることから理解できる。ところが、鏡に向かって見ながら、細かな動作をする場面で想像できるように、反転を含む対応関係では視覚と手指による操作関係の学習に時間がかかる。このような対応関係の習熟しやすさも、インターフェース設計において、考慮すべき点と思われる。

4. おわりに

人間は外界情報の8割以上を視覚を通して取り込んでいるといわれるが、視覚が単独で働いているのではなく、触覚や身体動きなどからも同時に関連情報を取り込んで、それらを統合化させて外界を認識している。そして、対象物をつかんで作業する場合など、先ず形状認識が重要となる。一般の場合、人間の形状認識においては視覚だけでなく触覚を用いた能動的知覚活動が重要であり、このときに視覚情報と触覚情報とを統合化させて知覚し

ている。人工的な操作環境において、視覚情報と触覚情報を呈示させる場合、両情報間に不整合があると、結果としてそれらの悪い方に影響されてしまう場合がある。整合性について定量的に調べるには、さらに多くの実験を重ねる必要がある。特に、視覚と触覚とでは、空間位置の差、空間の方向差、スケール差等の要因を今後検討して、人になじむインターフェース設計に役立てる必要があると思われる。

参考文献

- 1) 赤松：視覚と体性感覚の違いと統合、センサ技術、11, 7, 71-76 (1991)。
- 2) Jack M. Loomis & Susan J. Lederman: Tactual Perception, in Handbook of perception and human performance Vol. II, K. R. Boff, J. Kaufman and J. P. Thomas ed., John Wiley & Sons, 1986.
- 3) 和田陽平, 大山正, 今井省吾編：感覚知覚ハンドブック, 誠信書房 (1969)。
- 4) 末田統：盲人用描画システム, 第13回感覚代行シンポジウム, 42-45, 1987。
- 5) 応用物理学会光学懇話会編：生理光学一眼の光学と視覚一, 朝倉書店 (1975)。
- 6) 畑田豊彦：VDT と視覚特性, 人間工学, 22, 2, 45-52 (1986)。
- 7) Robert F. Schmidt 編, 岩村他訳, 感覚生理学, 金芳堂 (1980)。
- 8) 福井, 下条：なぞり動作による仮想形状のうねり検出特性, 第6回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, 31-34 (1990)。
- 9) 福井, 下条：力覚をフィードバックする操作デバイスによる仮想形状のなぞり動作, 信学論, Vol. J 74-D-II, 8, 1052-1059 (1991)。
- 10) 福井, 下条：錯視図形のなぞり動作, 第7回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, 323-326 (1991)。
- 11) I. E. Gordon and C. Cooper: Improving one's touch, Nature, 256, 203-204 (1975)。
- 12) S. J. Lederman: Heightening tactile impressions of surface texture, G. Gordon (ed.) Active touch, 205-214, Pergamon Press, Oxford (1978)。
- 13) 赤松, 石川正俊：形状知覚における視-触覚の感覚統合過程の解析, バイオメカニズム 10, 23-32 (1990)。
- 14) 赤松, 佐藤滋：マルチモーダル統合型マウスの開発, 第7回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, 397-400 (1991)。
- 15) 木島竜吾, 廣瀬通孝：空間生成精度の Virtual Science, ヒューマンインタフェース N & R, Vol. 6, No. 2, pp. 140-145, 1991。

福井幸男 (Yukio FUKUI)

1973 年京都大学工学部精密工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。1980年東京大学大学院機械工学専門課程修士課程終了。同年工業技術院製品科学研究所入所。以来、形状入力, 光学 CAD 開発, 光学計測, 設計システム, ヒューマンインタフェース等の研究開発に従事。情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本人間工学会, 日本眼科学学会各会員。

赤松幹之

(Motoyuki AKAMATSU)

1984 年慶応義塾大学工学部管理工学科博士課程修了。工学博士。慶応義塾大学医学部整形外科共同研究員を経て, 1986 年より工業技術院製品科学研究所勤務。現在主任研究員。専門は人間工学・生体情報工学。触覚情報処理・感覚運動統合機能の電気生理学的研究およびマンマシン・インタフェースの研究に従事。

下条 誠 (Makoto SHIMOJO)

1973 年電気通信大学機械工学科卒業。1976 年東京工業大学大学院精密機械システム専攻修了。同年通産省工業技術院製品科学研究所に入所。現在に至る。主任研究員。その間 1985 年 9 月から 1 年間スタンフォード大学客員研究員を勤める。福祉機器開発の研究, 触覚センサシステムの研究開発に従事。1984 年度計測自動制御学会論文賞受賞。日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本人間工学会各会員。(日本ロボット学会正会員)