

第3章

人のインタフェース特性

この章では、人とコンピュータとのインタフェースに関連する、人の側の基礎的な特性について述べます。人がコンピュータなどの人工機械と接する部分を設計する際に、どのような人の特性について考慮すべきか、考えていきましょう。

3.1 視 覚

コンピュータが情報を提示する手段として、もっとも一般的に利用されている人の感覚器官が視覚です。人は、おおよそ $360nm$ ないし $400nm$ から、 $760nm$ ないし $830nm$ の波長の電磁波を視ることができます。これを可視光と呼びます。人の網膜には、錐体細胞と桿体細胞という二種類の視神経細胞が配置されていて、これらが光を感じて網膜に写った映像を感知しています。

このうち、錐体細胞には、 $420nm$ 、 $534nm$ 、 $564nm$ 付近に感度のピークを持つ三種類が存在しています。ある波長の光に対して、3種類の錐体細胞は特定の組み合わせの反応を示し、この違いから人は色を識別しています。そこで3種類の波長の光を、異なる強度で混ぜ合わせることで、3種類の錐体細胞に適切な組み合わせの刺激を与えて、様々な色を人に見せることができます。すなわち、人にとっての光の原色は、錐体細胞の種類と同数の3色となります。

人に、効率よく色を提示する3波長の組み合わせとして、赤、緑、青に相当する色 ($700nm$ 、 $546.1nm$ 、 $435.8nm$ など) が使われます。そこで、テレビやコンピュータのカラーディスプレイには、*RGB* (red, green, blue) の三色の発光体が画面上に配置され、それぞれが異なる強度で発光することで人にその画素の色を伝えています。

人はすべての種類の視神経細胞からの反応を総合して明るさを感じますが、その感度も光の波長（色）に依存します。人の目の感度が最も高い光の波長は、 $555nm$ で、黄緑色に相当します。そこで、モノクロディスプレイでは緑色や黄緑色の発光体が使われることもあります。

一般的なテレビ放送では、RGBを次のように変換して、 Y, Cb, Cr の3つのパラメータで明るさと色を表現することがあります。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

$$Cb = -0.169R - 0.331G + 0.500B$$

$$Cr = 0.500R - 0.419G - 0.081B$$

Y は目の感度の高い黄緑色で、輝度（明るさ）情報を人に伝える光の波長に対応し、 Cb と Cr は色差と呼ばれ、色の情報を伝える波長に対応します。人の目は Y の光から多くの視覚情報を得ており、解像度も高く色差の光に対しては、人の解像度は低いと言われています。そこで、画像を伝送したり保存したりするときに、色情報よりも輝度情報を重視して、輝度情報により多くの伝送帯域幅やメモリーを割り当てることで、同じ条件でもより美しい画像を人に提供することができます。たとえば、一般的なアナログカラーテレビ放送では、輝度の信号を伝送するために $4.2MHz$ の帯域を割り当てていますが、色の信号を伝送するために割り当てられている帯域は約半分の $2MHz$ です。また、JPEGなどのデジタル画像フォーマットにおいても、多くの場合、 Cr, Cb 軸情報のそれぞれは、輝度情報の4分の1の画素数で記録されます。すなわち Y, Cr, Cb に割り当てられている情報量の比率は、 $4:1:1$ になります。情報量を $4:4:4$ として等分に割り当てる場合と比較して、画質をほとんど劣化させずに情報量を半分に減らすことができます。

人の目の解像度を測定する検査が視力検査です。その一つが、ランドルト環(Landolt ring)を用いた方法で、図3.1に示すリングを見て、リングが欠けている方向を被験者が見分けられるかどうかを調べます。視力は、被験者から見たギャップ部分の視角（分単位）の逆数で表します。例えば、視力0.5の人は、ギャップの大きさが2分の視角になるランドルト環を識別できることになります。人の一般的な視力が1.0前後であることは、作業空間、生活空間に置かれるディスプレイの解像度や表示するフォントサイズなどを決める目安になるでしょう。

人の視力に上限があること、すなわち、目に映る物の細かい部分を識別できないことも、人に提示するための画像データの圧縮に利用されています。テレ

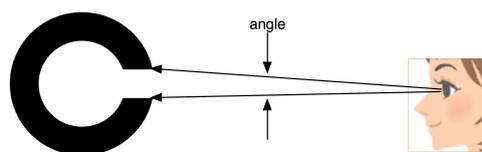


図 3.1 ランドルト環による視力検査

ビカメラのアナログ信号は、撮像面の明るさを水平方向に一定速度で読み出した（走査した）信号です。撮像面での明るさの空間的な変化（空間周波数）が、時間的な変化（時間周波数）に変換されていると言えます。一般的なアナログテレビ規格では、モノクロ映像信号の帯域幅は $4.2MHz$ です。これより周波数の高い空間変化を記録しても、それによって生じる伝送や保存のためのコスト増加の割には、人が感じる画質は向上しないとの判断です。デジタル動画やデジタル写真では、縦横2次元の画素データを、2次元の空間周波数に変換し、高い周波数のデータを省略することで画像情報を圧縮しています。たとえば、 4000×3000 画素のデジカメの場合、画素ごとの RGB 値をそれぞれ1バイトで記録（合計3バイト）すると写真のデータ量は $36MB$ になりますが、上述の人が識別しにくい情報を省略することで、通常は $5MB$ 程度のデータとして保存されます。

3.2 聴 覚

聴覚もまた、コンピュータ情報提示のためにしばしば利用されます。人は、通常 $20Hz$ から $15kHz$ ないし $20kHz$ の振動を音として感じるすることができます。この周波数帯を可聴域と呼びます。可聴域は年齢とともに変化し、加齢により可聴域は狭くなります。また、可聴域の中でも、 $2kHz$ から $4kHz$ の感度が良く、これより高域または低域になるほど感度が低下します。また、感度低下の度合いは、音圧（音の大きさ）が低いほど、より低下する傾向があります。図 3.2 に人の聴覚のラウドネス曲線を示します。横軸が周波数で、縦軸が音圧です。曲線は $xxkHz$ の音と同じ大きさに聞こえる音圧を結んでいます。曲線が

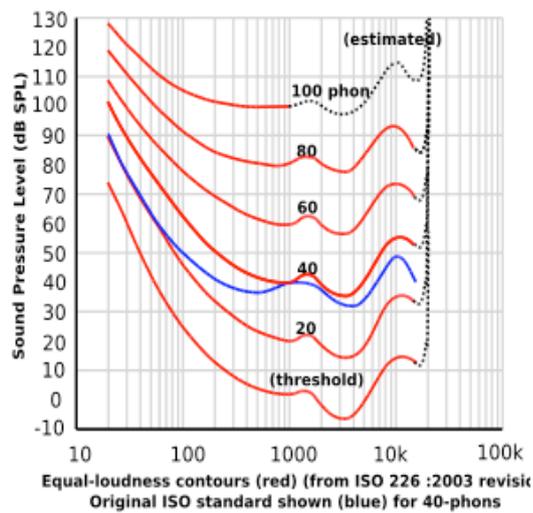


図 3.2 ラウドネス曲線

上方にある程、その周波数の音の感度が低いことを示しています。ピープ音などで人に情報を提示する場合、 $2kHz$ から $4kHz$ が多く含まれる音を利用することで、小さな音でも効果的に人の注意を引くことができます。振動板などのサイズや、使用電力に制限がある場合などに有効です。

十分に音圧の高い可聴域の範囲であっても、大きな音が小さな音を打ち消すマスキング効果によっても音が聞こえない状況が発生します。騒音のひどい場所で、小さな音が聞こえないことや、大きな音の直前、直後の小さな音が聞こえないなどの現象が知られています。

このような、人に聞こえない音情報を省略することで、映像の圧縮と同様に、音声データの保存や伝達に必要な資源を節約する、もしくは、同じ条件でより高品質な音を提示することができます。たとえば、音楽CDは、ステレオ2チャンネルの信号を16ビット、 $44.1kHz$ でサンプリングしています。これにより毎秒44,100回、音信号を16x2ビットのデジタルデータに変換しているのです。毎秒1,4Mビット、すなわち約1.4Mbpsの情報量が発生します。この情報は、 $0kHz$ から $20kHz$ までの音を、人に聞こえにくい音も含めて、まんべんなく同

じ解像度で記録したことになります。これに対して、携帯音楽プレイヤー、デジタル動画・テレビの音声、音楽配信、携帯電話などでは、前述のような人の聴覚感が低い音や人には聞こえない音の情報を記録する解像度を落としたり、さらには省略してしまうことでデータ量を削減し、メモリーや通信量を節約しています。たとえば音楽プレイヤーや音楽配信では、音楽CDの10分の1程度の情報量で、ほぼ同等の音質を達成しています。

3.3 その他の感覚

視覚、聴覚の他に、人には様々な感覚があり、その一部がコンピュータとのインタフェース手段として利用されています。

視覚や聴覚のように特殊な感覚器官による感覚としては、このほかに、味覚、嗅覚、前庭感覚があります。味覚は、食べ物に含まれる化学物質を舌などの味覚細胞により感じるものです。嗅覚も、空気中の化学物質を鼻の嗅覚細胞により感じる感覚です。いずれも化学物質により引き起こされる感覚であり、音や光のように電氣的に制御することが難しく、コンピュータインタフェースとしての利用は進んでいません。特定の香りを提示する装置は、それぞれの香料の入った容器に加圧空気を通す配管を接続し、電磁バルブで空気の流量を制御してユーザの面前に香りを流すことで実現できます。光の三原色を使用したカラーディスプレイと同様に、基本となる香りの混合から様々な種類の香りを発生させる嗅覚提示装置が考えられます。しかし、100以上の基本香料カートリッジを内蔵した嗅覚提示装置の製品化などが試みられているものの、実用には至っていません。

前庭感覚は、内耳の半規管などで傾きや加速度を感じる感覚です。航空機や自動車のシミュレータや、アミューズメント施設では、人の体全体に慣性力や重力により加速度を提示することで、乗り物の加速度や身体の傾き／回転／落下などを人に提示するインタフェースが実現されています。このような装置では、圧縮空気により伸縮する6本のアクチュエータで支えられたプラットフォームが使われます。6本のアクチュエータにより、6自由度の動きをプラットフォームに与えることが出来ます。プラットフォーム上には、椅子や、人が搭乗できる乗り物の模型などを搭載し、搭乗者にスクリーンなどを用いて映像を提示します。映像に示したカメラ視点の移動に同期して、プラットフォームを加速し

たり傾けたりすれば、搭乗した人に、映像のカメラと一体になって移動している感覚を提示できます。

以上のような特別な感覚器官による感覚に加えて、人はさらに体全体で感じる感覚を持っています。これらは体性感覚と呼ばれていて、触覚、温覚、冷覚、痛覚、圧覚、振動覚などが知られています。

触覚を提示する装置としては、点字ディスプレイが実用化されています。これは、8ピンで構成される点字セルにより、ピンの凹凸で点字を表示する装置です。また、人体に接する物体、たとえば腕輪やマウスなどを電熱で加熱したり、半導体冷却素子で加熱、冷却したりすることで、熱を人に伝えるインタフェースデバイスも試作されています。一方、振動を提示する安価な装置に振動モータまたは偏心モータと呼ばれる部品があります。これは、重心がモータ軸から外れた（偏心した）重りをモータに取り付けることで、回転するモータを振動させる部品です。小型で安価な振動モータは携帯電話などで広く使われ、振動を提示するインタフェースに利用されています。このほか、ソレノイドやモータ、加熱により形状が変化する形状記憶合金などを利用して指先などに圧力を与えることで、様々な触覚を提示するなどの試みが実験的に行われています。コンピュータ周辺機器として実用化されている具体的な装置については、ヒューマンインタフェースデバイスの章を参照ください。

3.4 動作と記憶の特性

3.4.1 ヒューマンパフォーマンスモデル

感覚器官からの刺激に対して、適切な行動を起こすためには、刺激を知覚し、次にそれが何であり何をすべきかを認知して、最後に筋肉を動かす手順があると考えられます。たとえば、あるランプが点灯したらボタンを押すタスクを人が行う場合、まず何かが点灯したことを知覚し、それが指定されたランプの点灯であることを認知し、手の筋肉を動かしてボタンを押すという3段階の手順に相当します。人にはこの3段階の手順を処理（プロセス）する機構があり、それぞれにほぼ決まった処理時間が必要になるという処理モデル（ヒューマンパフォーマンスモデル）が考えられています。それぞれの手順に必要な時間が、さまざまな実験から計測されていて、知覚プロセッサには100ms、認知プロセッサには70ms、運動プロセッサには70ms程度の処理時間が必要とされています。

す。これから、機械やコンピュータの表示を見て人が操作を行う際には、最低でも 250ms 程度の応答時間が必要になることがわかります。逆に、コンピュータの応答速度がこれ以上遅くなると、コンピュータの応答が人より遅いと感じることになります。コンピュータシステムは可能ならば数 100ms 程度で応答を返すことが望まれます。処理が複雑でそれが困難な場合には、進捗状況をアニメーション表示するなどして、なんらかの応答を返すと良いでしょう。

3.4.2 短期記憶と長期記憶

一般的に人の記憶力という、単語の意味、歴史の年号、人の名前などを覚える能力を指す場合が多いと思います。こららは長期記憶と呼ばれ、記憶する試みを何度も繰り返すことで記憶が形成されます。これに対して、たとえば電話帳にある電話番号を見て、それを覚えて電話をかけるというような作業で使われる記憶を短期記憶と呼びます。短期記憶は、長期記憶に比べて簡単に達成することができますが、数 10s 程度しか持続しません。また、その記憶容量も少なく、 7 ± 2 チャンクであると言われています。チャンクとは意味としてまとまった一つのまとまりのことで、たとえばランダムな数字による電話番号

5 9 6 3 4 6 4 9

ならば 8 チャンクですが、これを「ゴク로우サンーヨロシク」と覚えたしたら 2 チャンクになります。

また文字の場合でも、

さ ま り も ら く ひ わ み じ

のように無意味な文字でしたら 10 チャンクとなりますが、同じ個数の文字でも、

さ く ら も み じ ひ ま わ り

となじみのある単語として並んでいれば 3 チャンクとなります。

人がコンピュータを操作する時に、頻繁に使われるのも短期記憶です。たとえば、操作一覧メニューにどのような項目があるかを一時的に記憶することがあります。そこで、コンピュータシステムが提示するメニューの項目などは、最大でも 7 ± 2 項目程度にしておくが良いと言われています。良く設計されたソフトウェアでは、メニューバーに並ぶ項目、プルダウンメニューの項目などが、このマジックナンバーの範囲に入っていることが多いです。これ以上の項目が

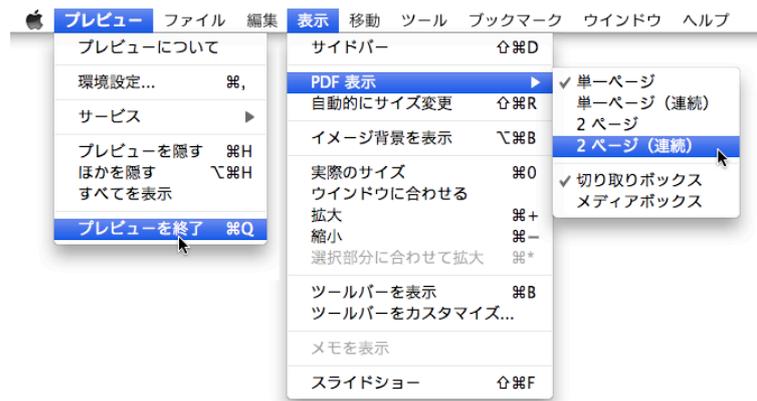


図 3.3 一般的なメニューの例。

必要な場合には、階層的なメニューにするか、さらにはダイアログボックスなどを開いて、詳細な設定を行えるよう設計すべきです。たとえば図 3.3 ではメニューバーの項目数が 9 項目で、「プレビュー」のメニューバー項目からのプルダウンメニューの項目数は 7 項目になっています。「表示」項目からのプルダウンメニューの項目数は多いですが、線で区切って 7 個のグループに分けています。またプルダウンメニュー項目の一部、たとえば「PDF 表示」などには項目数 6 のサブメニューが作られて一度に表示される項目数を減らす工夫がされています。いずれの項目数もマジックナンバーの範囲に収まっています。

コンテキストがあると記憶が強化される。世界的な大事件のあった日に何をしていたかは記憶しているが、その前日の出来事は覚えていない。写真を使ったパスワード。などなど認証。Timestamp Drawer の紹介。