

視覚障害者のための力覚による科学学習支援システム I

——展望——

鈴木 貴*・荒木 智行**

(平成23年10月31日受付)

Haptical Learning Science System for Visually Impaired Students 1

—— A Perspective ——

Takashi SUZUKI and Tomoyuki ARAKI

(Received Oct. 31, 2011)

Abstract

This paper proposes a Haptic Learning-Science System (HALS) which supports visually impaired students in learning science and mathematics of higher education. When we understand these subjects, we usually try to visualize a phenomenon with the help of our own mental image brought by visual experiences. Owing to the lack of such experiences, it is quite hard for them to have a mental image, and so they have serious difficulties in learning science. Taking advantage of the haptic device, HALS aims at supplying them with some haptical (virtual) experiences of three-dimensional objects and dynamical phenomena.

Key Words: support system for learning science, visually impaired students, haptic device

1. はじめに一視覚障害者の科学学習の現状

視覚障害者の学習には数々の困難がともなう。とくに理数系科目を習得する過程でのハンディキャップとして、おもに次の2つの問題 (i), (ii) が挙げられる。

- (i) まず、理数系科目の知識を習得する段階で大きなハンディキャップとなっているのが、視覚障害者が利用できる書籍や文献が極端に不足しているという問題である。

視覚障害者は点訳もしくは音声化された書籍しか利用することができないが、とくに理数系科目の書籍には多くの数式や図が含まれているため、障害者の学習環境はより一層制限されてしまう。しかし、近年の情報技術の格段の進

展に基づく多くの研究によって、この問題は急速に改善されつつある。今後、この方面の研究・開発はますます進展していくと期待できる。

- (ii) 視覚障害者は、科学の内容を理解しようとする段階で、もうひとつの大きなハンディキャップを抱えている。それは、科学の理解において本質的となる「自然界の現象や概念をイメージ化すること」がきわめて困難であるという問題である。

理数系科目の学習においては、理解しようとしている現象や概念をイメージ化することが、理解を促進する上で最も本質的な役割を果たすと言ってもよい。通常、このようなイメージ化を可能にしているのは、視覚による膨大な経験から頭の中に作り上げてきた「空間的」および「動的」

* 広島工業大学工学部電気システム工学科

** 広島工業大学工学部電子情報工学科

な事象のモデルである。そして、直面している問題に対して、それらのモデルの中から適当なものを選びだし、自由に組み合わせることによってイメージを働かせるのである。さらに重要なことは、それまで経験したことがないような現象や抽象的な概念に対してもイメージを組み立てることができ、それらを理解することが可能になるのである。

ところが、触覚と聴覚を通してしか自然と接することができない視覚障害者にとっては、知覚することができる空間的、動的な自然界の事象はかなり限定されてしまう。実際、視覚障害は「空間認知の障害」とも言われ、また、触れることができる動的な現象などはほとんど無いと言っても過言ではない。このような、科学の理解において致命的とも言えるハンディキャップを持っている視覚障害者は、さまざまな自然界の現象や概念をイメージ化するのに十分な事象のモデルを作ることができない。そのことが視覚障害者の理数系科目の学習を極端に阻んでいるだけでなく、科学への興味を起こす機会をも奪っているのが現状である。

しかし、障害学生に対しても、科学や数学に対する興味をもつことができる機会を与え、彼らの可能性を広げる環境を整えることはきわめて大切なことである。そこで筆者は障害学生に対して、**力覚デバイス**と呼ばれる新しい情報技術を用いて、科学を理解する上で不可欠となるイメージ創成を支援するシステムを提案した [1]。力覚デバイスとは、ユーザーと PC の間で 3 次元的な力の相互作用を可能にするインターフェースである。本稿では、このシステムの可能性についてさらに詳しく検討したい。とくに高等学校や大学初年度の高等教育に焦点をあて、そこで取り扱われる理数系科目の内容を視覚障害者が理解できるようにするための方法を議論する。具体的には、視覚障害者に数学と物理学で取り扱われる対象物や動的現象を疑似体験させること、つまり、晴眼者が視覚によって経験していることを、力覚デバイスを用いて触覚を通して体験させる手段を考える。

まず次節において、文献 [1] で提案した支援システムの構成を紹介する。次に 3 節と 4 節では、視覚障害者に力覚デバイスを通して体験させる事象のモデルについて議論する。これらのモデルは教材として PC 上に構築される。とくに、科学技術の言語としての数学 (3 節) と基礎である物理 (4 節) の教材を作成する。5 節はまとめと今後の課題を述べる。

2. システムの構成

文献 [1] で導入した力覚による科学学習支援システムを「HALS」(Haptic Learning-Science System) と呼ぶ。HALS は次の三つの要素から構成されている。

1. 力覚デバイス

力覚デバイス (図 1) は、3 次元的な情報の入出力装置であり、PC 上で作り出された 3 次元仮想的対象物とユーザーの間の動的な相互作用において、対象物に触れたときに手に伝わる力の感覚をありのままに実現する装置である。力覚デバイスは近年さまざまな技術の分野で応用され始めているが、視覚障害者の生活や学習に対する支援にも利用されている [2]–[4]。



図 1：力覚デバイス (phantom OMNI)

ユーザーは、アームの先端にある stylus と呼ばれるペン状のハンドルを操作して、力の入出力を行う。このとき、入力については 6 自由度 (平行移動 3 成分と回転 3 成分)、一方出力については 3 自由度 (平行移動 3 成分) が許されている。

このようにして、ユーザーは PC 上に実現された仮想 3 次元空間内の対象物に触れ、そのときに手に伝わる触覚をありのままに体験することができる。

2. 制御ソフトウェア

力覚デバイスを制御するためのソフトウェアである。距離場空間モデル (Distance Field Model) に基礎を置いた「人工現実」の技術を利用し、空間をコンピュータ内部にモデル化する。その空間上に実現された対象物とユーザーの間の相互作用を可能にする。このように、このソフトウェアは、本システムにおいてきわめて重要な役割を果たしている。

3. 教材のコンテンツ

視覚障害者に、力覚デバイスを通して「空間的」および「動的」な現象や概念を体験させる、具体的な事象のコンテンツである。

このコンテンツの作製にあたっては次の点に留意しなければならない。教材として、高等教育において取り扱われる事象のすべてを網羅することは不可能である。そこで、いくつかの典型的な事象をコンテンツとして選ばなければならないが、その際、選ばれた事象の体験によって作られたイメージが核となり、あらゆる事象をイメージ化できるようにしたい。

次節では、数学に現れる 3 次元の対象、4 節では物理で扱われる力学的対象の例を挙げ、それをどのように視覚障害者に知覚させるのかについて説明する。

3. 数学モデルの構築

本節では、前節で述べた教材コンテンツのうちの、数学に関する 3 次元の対象を知覚させる「数学モデル」について議論する。

数学は科学技術を客観的に表現するための言語であり、理数系科目を学ぶ上で欠かすことができない重要な科目である。しかしながら、数学に現れるさまざまな概念は抽象的なものが多く、それらの理解にはイメージをうまく活用することが重要なかぎとなる。そのため、数学の教科書や文献には多くの図が用いられている。幾何学的な対象はもちろんのこと、関数はグラフによって表現され、線形空間のような抽象的な空間概念でさえ図示される。晴眼者はこれらの図を見ることで対象をイメージ化することができ、そのことによって理解を格段に促進させる。

一方、視覚障害者にそれらの図を知覚させるためには、何らかの方法で触覚化する必要がある。その一つの方法として「触図技術」がある。これは点字と同様に、紙の上の凹凸によって図の線を描写する方法である。障害者はその凹凸を触ることによって図を理解する。たとえば、図 2 は、 $y=f(x)$ のグラフである。左図は元のグラフであり、右図はそれを触図化したものである。このように、触図で描写されたグラフは元のグラフと同一の形をしており、また座標軸も直交を保ったまま描写されているため、障害者は触覚によってグラフを正しく理解できる。これは、関数 $y=f(x)$ が 1 変数であるため、そのグラフは平面的に描くことができるからである。

ところが、2 変数関数になると事情は異なる。図 3 は、関数 $z=x^2+y^2$ が表す曲面（放物面）である。この図では、3 次元空間に埋め込まれた曲面を紙の上に描写するために「投影図」を用いている。つまり、曲面が変形されて描写されているばかりでなく、直交座標系も直交関係を崩して平面上に 3 本の軸が描かれているのである。晴眼者にとっ

てはこのような投影的な見方は常に見ている景観そのものであり、頭の中では 3 次元空間を回復させて容易に曲面の形をイメージできる。

しかし、3 次元的な空間の広がりやを十分に経験していない視覚障害者にとって、この投影図の触図を触っただけで元の曲面の正確な形を理解することはほぼ不可能であると言ってよいだろう。すなわち、視覚障害者に対しては、3 次元的な対象物は 3 次元のまま触らせることが必要になる。HALS で用いる力覚デバイスは、そのことを可能にする。

次に、HALS の「数学モデル」によって、3 次元的な対象を知覚させる上で何が可能か、そしてその方法について考察しておこう。

- 対象を埋め込むための 3 次元直交座標系を、直交性を保ったまま設定できる。したがって、触図とは異なり、対象は形を変形することなく実現できる。この形を知覚するためには、stylus を対象の表面に束縛する。つまり、stylus は表面に沿った方向には自由に動くが、表面から離れる方向には強い力で引き戻される。そして、ユーザーは表面をなぞることでその形状を理解することができる。
- 表面の曲率や勾配などの詳細な局所的情報を、HALS は力覚以外にも音声による情報を加えて与えることが可能である。
- 任意の平面で対象を切断したときの断面の形状を与えることができる。さまざまな平面で切断したときの断面を知ることは、対象をイメージするうえできわめて有効である。
- スケール変換やアフィン変換を自由に施すことができる。これらの変換によって、一部分の詳細を知ることや、対象をいろいろな角度から知覚することが可能になる。
- 対象として、たとえば、関数 $z=ax^2+by^2$ で与えられる曲面を考える。この曲面の形状は係数 a, b の値によって変化する。そこで、 a と b をパラメータとしてユー

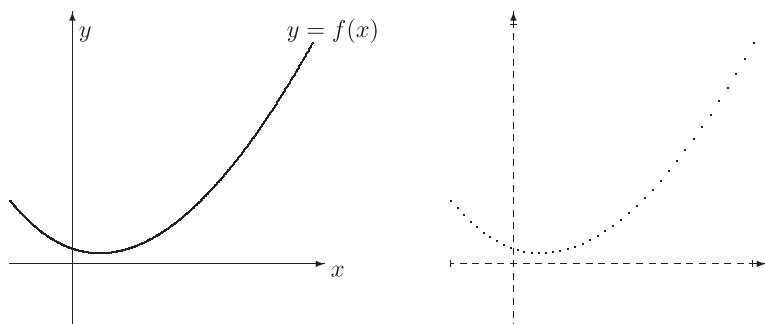


図 2 : 1 変数関数 $y=f(x)$ のグラフ (左) とその触図 (右)

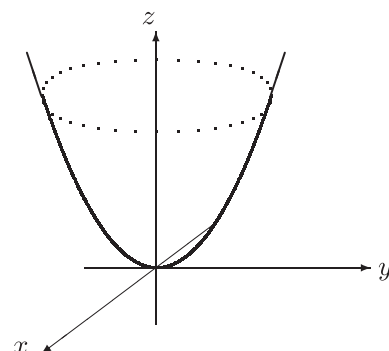


図 3 : 2 変数関数 $z=x^2+y^2$ の放物面

ザーが自由に変えることができるようにしておけば、係数の値に応じた曲面の変化のようすを理解させることができる。

以上に述べたように、HALS を用いれば、3次元の対象をそのまま実感させることができるばかりでなく、対象を自由に変形、変換させることが可能になるという利点がある。そのことによってユーザーは、その対象をより詳細に理解できるようになる。さらに、HALS の利点は、音声による情報提供が可能だということである。たとえば、stylus で曲面をなぞるとき、stylus の現在の位置は触っているだけでは曖昧である。また、座標系と曲面の位置関係、たとえば曲面がどこで xy 平面を切るのかなどを理解することが重要になることもある。そのようなときは音声を利用して、必要な情報を与えることが大切になる。

4. 物理モデル

次に、教材として導入する物理モデルについて考えよう。このモデルは、PC 上に実現された動的な現象を、力覚デバイスを通してユーザーがそのままに体験することを可能にする教材である。高等教育で学ぶべき物理としては、ニュートン力学、電磁気学、波および熱などの内容があるが、本節ではその中で最も基礎であるニュートン力学に焦点をあて、惑星の公転運動のモデルを例にとり、現象を知覚させる方法について考察する。

4.1 物理モデルの有効性

具体的な物理モデルを説明するまえに、視覚障害者にとって HALS が有効であることを確認しておこう。

1節で述べたように、自然界のある現象を理解するときには、その現象をイメージ化することが大変重要なステップである。そして、そのようなイメージ化を可能にしているものは、頭の中に作られたさまざまな動的現象のモデルである。晴眼者はこのようなモデルを、膨大な数の視覚による経験を通して自然と身につけている。たとえば、放物線を描いて空中を飛んでいるボールや月の運行などは誰もが日常目にする光景であり、このような現象はいつでも容易にイメージすることができる。さらに重要なことは、さまざまなモデルによって、直接観察することができない現象や今まで観察したことがない現象にまでイメージが可能になるということである。地球の公転運動を直接観察した人は一人もいない。それでも、地球が太陽の周りを回っているようすを思い浮かべることができる。それが可能なのはおそらく、誰でも一度は太陽系を描いたイラストなどを見たことはあるだろうし、おもりに糸をつけてぐるぐる回した経験はあるだろう。この2つの経験から作られたモデル

を組み合わせれば、地球の公転運動をイメージすることは容易にできる。このように、科学の学習においては、視覚的经验によって構築されたさまざまな現象のモデルを駆使して、いかなる現象も理解しようとするのである。

この観点から考えると、視覚に障害をもつ学生たちは科学を習得する上できわめて大きなハンディキャップを抱えていると言わざるを得ない。障害学生たちにとって自然を知覚する手段はおもに触覚と聴覚だけだからである。その情報だけでは、空間の中で起こるさまざまな動的現象をイメージするのに十分なモデルを作り上げてくることはほぼ不可能であったらう。実際、空中を飛んでいるボールの動きを触れて確認することはできない。大抵の場合、物体の運動は手の届かない範囲におよぶ。また、なによりも、物体の運動を妨げることなく運動物体に触れることは不可能である。

ボールの放物運動や惑星の楕円運動のように、基本的に2次元平面内で起こる運動ならば、その軌道を触図によって表すことはできるが、速度や位置の時間的な変化まで知覚させることは不可能である。ここに HALS の有効性が現れる。HALS の物理モデルによって、PC 上に3次元の動的現象を再現できる。そしてユーザーは、力覚デバイスを通して現象をありのままに知覚することが可能になる。このように HALS は、視覚障害者に自然界で起こるさまざまな現象を疑似体験させ、科学を理解するために必要なイメージ創成を可能にするものとして十分期待できる。

4.2 ニュートン力学のモデル

そこで、ニュートン力学で扱われる物体の運動として惑星の公転運動を例にとり、具体的に HALS の有効性を検証する。

ニュートン力学で中心的役割を担うのは力と運動であり、物体に作用している力とそのとき実現される運動の関係を知覚させることが本質である。そこで、図4で示される惑星の公転運動を HALS によって知覚させる具体的な方法を列挙する。

- 3次元座標系を適宜設定し、この座標系に物体の軌道

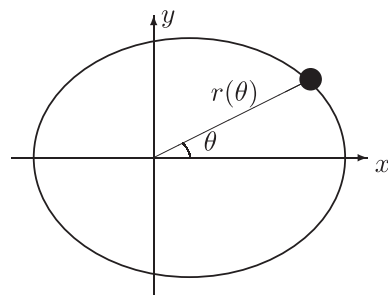


図4：惑星の公転運動

を埋めこむ。惑星の公転運動の場合、原点に太陽を置けばその軌道は

$$r(\theta) = \frac{h}{1+e \cos \theta} \quad (1)$$

で与えられる楕円になる。このとき重要なことは、太陽が楕円の1つの焦点に位置していることである。また、 e, h は初期条件で決まるパラメータである。

stylus をこの軌道に束縛すれば、ユーザーは stylus を軌道に沿って動かすことで軌道の形を理解できる。

- 次に、stylus を惑星に固定し、惑星の運動を実現する。ユーザーは手に持っている stylus の動きによって惑星の運動、すなわち位置の変化や速度の変化を知覚することができる。
- 物体に作用している力をユーザーに知覚させることは大変重要である。図4の公転運動を引き起こす力、すなわち太陽による重力を HALS によって実現するためには、原点に向かい距離 r の2乗に反比例する力を空間全体に発生させる。ユーザーは stylus を動かすことで、原点に向かい原点に近づくほど強くなる力を空間のいたるところで実感できる。
- 軌道に含まれるパラメータと軌道の形の関係を理解することは重要である。式(1)では、 e と h がパラメータであり、とくに e は離心率とよばれ、軌道の形を楕円もしくは放物線、双曲線のいずれかに決める。一般にこれらのパラメータは物体の運動における初期条件によって決定される。

触図では一つの初期条件に対する軌道を描くことしかできず、初期条件を変化させたときの軌道が変化するように理解させるためには、いくつもの触図が必要になる。これに対して HALS では、ユーザーは自由に初期条件を変化させ、その変化に対する軌道の応答を調べることが容易にできる。

このように、HALS の物理モデルによって、ユーザーは軌道の形だけでなく、物体の運動状態も力覚デバイスによってありのままに知覚できるようになる。さらに、数学モデルの場合と同様に、HALS では音声を利用することができるため、必要な情報を音声によって提供することも可能である。たとえば、図4の軌道に沿って stylus を動かす時、ユーザーはその軌道が楕円であることは理解できても、太陽（焦点と惑星の位置関係については知ることが難しい。そこで、stylus の位置を音声化することができれば、ユーザーは惑星が太陽からどれだけの距離のところに位置しているのかを知ることが可能になる。

5. おわりに

本稿で提案した視覚障害学生のための科学学習支援システム (HALS) は、力覚デバイスの利点を活用して3次元的な対象物や現象をありのままに疑似体験させるシステムである。このシステムでは、視覚障害者に許された感覚、触覚と聴覚双方をフルに活用する。HALS によって、これまで視覚障害者の科学学習得において大きなハンディキャップとなっていた、自然界で起こる空間的、動的な現象のイメージ化が困難であるという問題に対して1つの解決策を与えることができると期待できる。そのためには、本稿で紹介した数学および物理モデルを拡充し、多くの現象のイメージ化に適用できるような「核となるモデル」を教材のコンテンツに加えていく必要がある。

視覚障害学生の科学教育に対しては、一つの方法だけでは十分だということはない。平面的な図の知覚に限れば、触図も有効な手段である。HALS では stylus を通して図を知覚するために、つねに図の1点にしか触れることができず、大域的な情報を得にくいという欠点がある。これに対して触図では、手のひら全体で図に触れることができるため、図全体の様子を捉えやすいという利点がある。このように、視覚障害者の科学学習を支援するためには、可能な限りの手段を駆使し、できるだけ多くの体験ができるように工夫しなければならない。

文 献

- [1] T. Suzuki, T. Araki, "A Proposal on a Haptic Learning-Science Simulator for Visually Impaired Students", Proc. 2011 IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp. 1094-1099, 2011.
- [2] Y. Murai, H. Tatsumi, M. Kawahara, M. Miyakawa, "Kanji Writing Practice for the Visually Impaired Using Haptic Interface", Proc. 7th Int. Conf. on Perspectives of System Informatics (in Educational Informatics), pp. 7-14, 2011.
- [3] Y. Murai, H. Tatsumi, M. Miyakawa, "Kanji Writing Assisting through Haptic Interface for the Visually Impaired", Proc. WAC 2010 Int. Forum on Multimedia and Image Processing, 534, 2010.
- [4] Y. Murai, H. Tatsumi, M. Miyakawa, "A Haptic Walk-Guide simulator for the visually impaired — A prototype —", Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp. 3731-3736, 2007.