

情報処理におけるデジタル対アナログ*

高橋 秀俊**

デジタルとアナログというと、電子計算機の発展の歴史の中でもいつも敵同志といった極端ですが、競争を続けて来たものです。第二次大戦の少し前にできたのがデジタル計算機第1号のハーバード・マークIと並んでアナログの微分解析器。その微分解析器を作った Vannebar Bush は、Wiener の“Cybernetics”の序文によると、米国の国防関係の委員長をしていて、Wiener は Bush に、偏微分方程式を解くにはアナログの微分解析器ではできないから、2進法を使ったデジタルの電子計算機の研究を始めなければいけないと進言したけれども、容れられなかったそうです。

しかし1947年頃には砲弾の運動を実物よりも速く計算する電子計算機 Eniac が誕生してデジタル時代の幕は切って落され、それからのことはご存知のとおりで、今日電子計算機といえは10人が10人デジタル計算機のことと思います。もっとも後進国日本では、始めのうちはアナログ計算機を作るメーカーはあってもデジタルの方に手を出すのは少なく、新聞などで電子計算機と書いてあるのを読んで見るとアナコンのことだったりしました。

その頃、電子計算機のことの講義をたのまれて行なった先などでよく“計算機はどれも難かしい。アナログならわかるがデジタルの方はなかなか……”という話をききましたが、こんな理屈に合わぬ話はない。アナログの方は微分積分などの高等数学の知識がいるが、デジタルはただの四則演算だけで小学校の生徒だつてわかるはずだ。などと思ったものですが、考えてみれば逆説的に、正にそうだからデジタルはむずかしいので、微分積分は学校や受験勉強などで散々たたき込まれているから、それがすぐ応用できるアナコンはやさしいが、何の予備知識もいらない、考え方が新しいデジタル計算機はそういう人たちには苦手だというわけでしょう。

とんだ横道の教育談義になってしまいましたが、そ

* Digital versus Analog in Information Processing, by Hidetosi Takahasi (Department of Physics, University of Tokyo)

情報処理学会第3回通常総会における特別講演

** 東京大学理学部

んなわけで、アナログの敗色おおうべくもなく、そこでデジタルと縁組みして、ハイブリッド計算機というものをつくって、頽勢の挽回を計っているというところのようです。

それはさておき、今日はこんな悪口をいうのが目的ではないので、つまり、このように計算機にデジタルという species とアナログという species とがあって、その両者の性質を比較するといういわば博物学的なアプローチはやめて、そもそもどういふ必然性あるいは偶然性からこういう二つの species が世にあらわれたかという、いわば進化論的な見方から、デジタルとアナログの本質を明らかにしようというわけです。

1. アナログの素子をなぜデジタルに使うか

まず、今日の大部分のデジタル計算機に使われている基本素子であるトランジスタは、完全にアナログな素子であるということに注意したいと思います。これは大変おもしろいことで、初めの頃のデジタル計算機に使われていた継電器とか、機械的な機構とかはいずれも本質的にデジタルな、つまり不連続な素子で、継電器の接点はオンかオフかのどちらかで、中途半端な状態は許されません。ところが、トランジスタとか、それから最近少し話題になっている流体力学的素子などはむしろ例外的にアナログ増幅素子、つまり連続的に変わる入力信号を増幅できる素子です。ところがデジタル計算機では、入力を0と1に相当する2種類の電圧に制限して使っている。つまり連続的な出力電圧の出る増幅器をただのスイッチにしているわけで、これはなぜだろうか、というのがまず問題です。このような、いわばもったいない使い方をすることを思いついた人にも感服しますが、それにはそれ相当の理由があるはずで

この間に対する常識的な答をまずいうと、それは、デジタル計算機では数値を2進法にコーディングすることによって、素子の精度があまりよくなくても数値を正確にあらわせて、精度の高い演算が可能になるということです。つまり数値をコード化するというと

ころにその理由を求めるわけです。

しかし、ではなぜコード化するとデジタルつまり不連続な信号にしなければならないか、と反論してみます。実はこんな簡単なことが今まで一度も誰にも疑問を持たれなかったとすると不思議なことですが、実際、コード化というか、上述のように素子の精度を上げないで結果の精度を上げるのに、デジタルにしない方法があるのです。しかも誰でもよく知っているもので、その一つは時計です。時計には普通2本の針がありますが、その理由は時刻をより精密に表示するためです。しかも、時計の動きは全く連続的です。時刻を分を単位としてあらわした数値を x とすると、時計の長針の指す方向の角は $-\frac{x}{60} \times 2\pi$ 、短針の指す方向は $-\frac{x}{720} \times 2\pi$ です。

同じように多数の針で数値を10進的に表わすものに水道のメータがあります。電気メータは近頃は大概数字でデジタルに表示しますが水道の方は4個ぐらいの針があって、それぞれが10進の各桁をあらわすようになっていますが、回転はデジタル式とちがって連続的です。その指示の角は、下の桁の方から、 $-\frac{x}{10} \cdot 2\pi$, $\frac{x}{100} \cdot 2\pi$, $-\frac{x}{1,000} \cdot 2\pi$, $\frac{x}{10,000} \cdot 2\pi$ というようになっていくわけです。

このような連続変数による10進あるいは2進のコーディングを計算機に使ったという例は聞いたことがありませんが、この方式を使って、桁上げのいらぬ加算機を作ることができるはずで、各桁の指度を桁ごとにただアナログ的に加え合わせればよいわけです。こういうものを機械的計算機として作ることをずっと昔に本気で考えたことがありましたが、実際に作るには至りませんでした。

2進法でこのような加算器をつくれれば、桁上げの伝播を待つ必要がないので高速のものができそうです。もっともこれは Robertson などの separate carry adder と呼ばれる、桁上げを別のレジスタに入れておいて徐々に本レジスタに繰り込む方式とかなり似た感じで、あるいは両者は本質的に同じことなのかも知れません。時計式の数値表示法は、数値を redundant に表示しているのが特徴です。いわゆる separate carry 方式も1桁当たり2ビットのレジスタを使う redundant 表示ですから、考え方としても似ているようです。

とにかく、数値の物理的表示が数値と連続的に対応して、かつ素子の精度が低くても結果の精度を落さな

いような表示方法が存在するというので、したがって、これだけでは不連続なデジタル信号を使うことの必然性は出てこないわけです。

2. デジタル化の利点

デジタルとアナログの違いの本質的な点はもちろん信号のレベルがデジタルでは不連続、アナログでは連続ということです。そして、この違いが直接あらわれるのは実は情報の伝送と記憶の際です。

情報を長い距離にわたって伝送しようとする場合、また長時間情報を保持しようという場合、その途中で入ってくる種々の妨害（ノイズ）の累積効果が問題で、これを完全に避けるためには、どうしても信号のレベルを不連続にしなければなりません。信号レベルが連続だと、次々に入るノイズでレベルが少しずつずれて、遂に誤った信号として受けとられる恐れがありますが、不連続だと、許されたレベル値から少し離れたとき、自動的に最寄の正しいレベルに戻すこと、いわゆる再生を行なうことができます。再生は常時継続的に行なうこともでき、フリップフロップはそういうものと考えられます。また間欠的に再生を行なうのは、電信のレピータ（中継器）や昔使われた Williams tube の再生サイクル等です。電話を送るのに AD 変換器でデジタル信号になおして送ろうという PCM 方式などは、この利点をいかすのが目的となっています。

レベルを不連続にするというだけで、レベル数は2レベルでも、もっと多く、たとえば10レベルでもかまわないわけで、10レベルにすれば10進の計算機には便利なわけですが、そういうのが実用になった話はいきいておりません。

不連続なレベルの必要な理由はそのほかに coded information を扱うためです。計算機は数値のほかには非数値的情報も扱おうことができるし、その場合、コード化したものの各桁が0でも1でもない中間の値をとっても、それは意味がつけられません。また、切り換えスイッチの制御信号のようなものは、中間の値をとったとき、たとえば両方の入力信号の平均が出力として出たとしても、そんなものは無意味です。たとえば“明日天気がよければ野球を見に行く、雨ならば家でジッとしている”ときめたとき、もし雨ともつかず、はっきりしない天気だったら、途中まで行って帰ってくるということにはならないでしょう。つまり、条件による選択は、いずれかに決断することが必要な

ので、条件の方が連続なのは不都合のもとといえます。

また、同期方式のデジタル回路では、信号が0か1かに量子化されていることを利用して、回路を簡単化しています。たとえば

$$(x \text{ and } y) \text{ or } (\bar{x} \text{ and } z)$$

という論理式をつくる回路を、この式のとりの構成でつくったとします。この式は $y=z=1$ のときは x に無関係に1、 $y=z=0$ のときは x に無関係に0になるはずのものです。このようにつくった回路で x が0から1または1から0に変わる際、普通は過渡的にそうでない状態があらわれるものです。これはつまり、 x という信号が量子化されない連続的な信号であるとき、このような回路の動作が面倒なことになるということで、同期式の回路では、そのような過渡状態はどうでもよいようにつくられていますから、デジタルの特徴が完全に発揮できるわけです。これに反して非同期式の回路ではそのような過渡状態がいろいろ面倒をおこすので、そういうことのないような回路構成を工夫しなければなりません。

もう一つ、人間の認識の可能性とでもいうことにつながる問題もあります。我々は、連続量の間関係については加減乗除や比較的簡単な関数の入ったアルゴリズムによって簡単に表現されるものは理解できます。また、不連続なデジタル量の間関係は論理式によって処理できます。しかし、電子計算機に使われているような、非線型の素子があれだけたくさん使われている回路で、連続的に変わる入力信号が入ったときどんなことがおこるか、我々にチャンと計算できるでしょうか。そういう回路が我々に設計できるでしょうか。いくら制限をゆるめて可能性を増したところで、それによってできた可能性を利用できるような設計が可能でなければ役に立ちません。我々の手におえる数量関係というのは、連続変数については線型の関係とそのほかは、ほんの少しの簡単な関係に限られているというように考えられないでしょうか。

3. 脳はデジタルでなくてアナログ

電子計算機の様態にたいにいわれている、かの von Neumann も、デジタルとアナログのことについて言及しています。当時、そうして恐らく現在も、人間の脳は素子の数が 10^{10} 個もあるデジタル計算機の親分のように信じられておりますが、von Neumann はこの考えに対して、脳の動作にはむしろアナログ的

な要素が重要な役を演ずることを到る所で強調しています。

digital 計算機で使う表現の特徴は、素子を最も無駄なく使っていることですが、一方において、素子の誤動作に関しては非常に危険な使い方です。1個の素子の1瞬間の誤動作も致命的な結果を生じ、ナンセンスに近い答を生み出します。このことは、元をただせば、機械の中で使われる数値の物理的な表示と、その数値そのものとの対応が topological でないこと、つまり、近接関係が甚だしく異なるということにあります。たとえば2進法の01111と10000とは数値でいえばたった1だけの違いですが、それをあらわすコード、つまり物理的信号は5字が全部違っています。また逆に10000と00000とはたった1ビットの違いですが、あらわす数値は大きく違っています。こういう距離関係の甚だしい不揃いが、わずかの誤動作が、わずかの被害ですまないことの原因になるわけです。

この点は、今日の機械文明と似たところがあります。いわゆる押ボタン戦争で、誰かがボタン一つを押して世界の人類を全滅させるようなことが可能になったり、誰にも特に悪意もないのに、ほんの一瞬の不注意で人の生命を奪う事故をおこしたりするようなことは、昔にはなかったことでしょう。つまり科学文明が社会現象の原因結果のトポロジーを複雑怪奇なものにしたわけです。それも科学が大規模な増幅機構をつくったのが原因です。

ところで、人間の脳にはそんなあぶないものは使うわけがありません。自動車が来たから右へよけようと思ったら左へ行ってしまった、などということになったらそれで一巻の終りです。そこで脳ではもっと安全確実なハードウェア、つまりアナログ的なハードウェアが使われているだろうと考えるのはきわめて自然です。同じような事情にある機械の数値制御などでも、一番重要な、一瞬の誤動作も許されないような部分にはアナログ式のものを使うのが普通のようなのです。

von Neumann の有名な論文“Probabilistic Logic”において、彼はデジタルな回路網もそれを適当に organize すれば、アナログ的な性質をもたせられることを指摘しています。それには数量をシグナルとしてあらわすのに、2進のコーディングなどしないで、単純に1をその数だけ並べたものによってあらわすようなやり方をするわけです。具体的には、一つの数量をあらわすのに N 本の線の束を用いて、その中の n 本

に“1”の信号があれば、 n という値をあらわすというやり方です。そうして、そういう表示でアナログ演算に相当することをやるには、多数決素子あるいは閾素子を使うことが便利です。

線の束を適当に分配して多数の閾素子に結び、それらの素子の閾値も適当に分布させると、加減算や乗算などのことが可能になることが示されます。このような回路は、素子の特性の変動に対してかなり安定な上に、もし誤動作があっても、それは結果に大きい変化を生じないという特徴をもちます。こうして、デジタル素子でアナログ回路の動作をさせることが可能です。

彼はまたさらに進んで、こうしてつくったアナログ的な回路をうまく組み合わせると、逆にデジタル回路に必要な諸機能、たとえば標準化、and, or 等の論理演算、記憶等のことができ、したがって、デジタル回路にできることなら何でもできることを示しました。このことは、トランジスタのようなアナログ素子からデジタル回路ができることから当然のことではあるが、また、人間の脳のはたらきが本来アナログ的であったとしても、デジタル計算機と同様に、どんなことでもできるということの説明だと考えられます。

では人間の脳で、神経線維を伝わる信号が大きさ一定のパルスであるというのはなぜかという、それは信号の伝送のためだと答えられます。人間の体はそう大きくはないから、神経はそんなに長距離の伝送をやるわけではないのですが、何しろ人間の体内などは絶縁が非常に悪いので、再生機能をもった中継器なしにはほんの数 mm の距離しか信号が送れないので、神経は何 mm かごとに中継器のついた電信線なのです。また、ギッシリつまった神経の束の中で混信がおこらないのも、この一定の大きさのパルスを使ったことのおかげだと思われます。

記憶の方については、本当にそれがどう行なわれているのかほとんどわかっていないようです。それでも記憶細胞と、それに信号を送ってくる神経線維末端との接合点であるシナプスと呼ばれる部分に、ある化学物質が生成されることによるのだというような説がかなり有力なようですが、その場合これはデジタルかアナログか、つまりある物質の存在、非存在だけが情報になるのか、その物質の量が情報として記憶されるのか、というようなことはわからないでしょう。しかしこれは単なる憶測ですが、長期間持続する記憶とな

るためには、物質の量ではなくて、存在ということだけの1ビットの情報である方が無理がないように思われます。

それに対して、情報を処理することに関しては、前述のようにマイクロに見れば不連続のデジタル信号でも、マクロに見ればアナログ的な情報処理が行なわれていると見るべきです。なお、神経の上での信号はパルスの大きさは一定だけれども、その頻度は連続的に変わり得る量であって、それがアナログ的信息を送ると考えることも自然です。

4. 人間は本来論理的でない

今度は人間の脳のでやっている情報処理を、中味ではなくその方から眺めて見ることにします。人間の考えるというはたらきには、論理的数学的なものと、直観的ムード的なものとの両方があることは確かです。計算をするとき、ゲームをするときなどは前者であり、日常行なういろいろな判断はむしろ後者の方が主であるように思われます。何となく、いろいろのファクターを頭にうかべて、それらを印象の強さに応じて適当なウェイトをつけて平均して判断を下すようなことです。会議などの議決もそんなことのできる場合が多いようです。このようなのをムード的といえ悪く聞かえますが、総合的といえはもっともらしくなります。ここでいうまでもなく、前の論理的な判断の方はデジタルであり、あとの直観的総合的な判断というのはアナログ的な要素が主となっています。

ところで、我々の日常経験からすると、この論理的という方の判断、特に計算にしろ何にしろ、長い論理の鎖を間違いなく追って行かなければならない仕事には、非常な精神の集中を必要とし、決して楽な仕事ではないものです。同じようなことが電子計算機ではいとも簡単にやられることを考えると、 10^{10} 個も素子がある人間の脳が何ということだといいたくなります。これに対する申し開きは、脳の中の organization がこのような論理的な思考に適するようにはもともとできていないのだというよりほかにありません。

脳の構造は、たしかに von Neumann のいうように、アナログ的に印象の強さに比例して信号を処理するような具合にできていて、したがって、常人の日常の論理は大体そういうようなやり方でやっていて、大した不都合はおこらないのだということになります。

アナログの論理は、イエスとノーで事がきまるのではなく、間違いなくそうだ、大体そうと思ってよい、

どうもそうらしい、どちらかといえばそうだ、全くわからない、どちらかといえばそうでないらしい、……というように、いろいろの段階のある判定が組み合わされてなされるものだと思います。したがって、情報空間に、“もっともらしさ”の *measure* がつくりられ、その *measure* によって最も本当らしいものがきまるわけです。そういう判定は我々は全く無意識に努力せずにできるのだと思います。

それにもかかわらず、我々は、特に数学的に訓練された人々は、数学的論理的な厳密な思考を行なうことができます。それはやはり *von Neumann* の示したように、アナログの回路でも適当に *organize* すればデジタルな判断をするようなものがつくられるということから説明できるのだと考えます。その場合はしかし、非常にまわりくどい能率の悪い方法になるのは当然のことです。

脳を行なう情報処理の代表的なものはいわゆるボタン認識です。ボタン認識とは一口にいえば与えられたボタンが脳の中に用意されているたくさんの標準ボタンのどれと一番似ているのかの判断、つまり脳の中にでき上っている情報空間の *measure* に従って、距離の比較をやることに過ぎません。そこで今いったようなアナログ的な処理が重点となるわけです。デジタルな処理にはイエスとノーの区別はあっても、近い遠いの *topology* 的な区別は直接出てこないの、どうしてもアナログの方が適していわけです。

5. ボタン認識機械はアナログで

そういうわけで今度は、そのボタン認識を機械でやる場合について考えてみます。このような、いわゆる人工智能に属する問題は、今までデジタル計算機の関係から入って行った人がやっている関係か、とかくデジタル的に、イエス、ノーの判断ですべてをやるという傾向が強いように思われます。

しかし、今までのべたことは当然機械でやる場合にも適用できることで、仮にハードウェアを特別に作ってやる場合でも、あるいは計算機のプログラムでやる場合でも、むしろアナログ的、つまり連続的な信号をそのまま使えるような方法をできるだけとるのが本筋ではないかと思えます。プログラムでやる場合には、もちろんアナログ量は2進的にコードされるわけですが、その場合でも、現在のデジタル計算機は数値計算、特に加減算が異常に速く、ただの論理演算と同程度の時間ですむということを考慮に入れるべきです。

そこで具体的なこととしては、文字読取とか音声判別とかいう物理的な対象に対するボタン認識については、その外界の事象を処理装置のための電気信号になおす入力装置はできるだけアナログ的な情報をデジタルつまりイエス・ノーになおさずに、そのまま保持すべきです。たとえば、文字読取に光電池とかテレビ撮像管とかを使う場合、その出力電圧をすぐに 0, 1 の 2 レベルの信号に変えて、文字を白黒のボタンにしてしまうのが今日のすべての方式のやり方なのですが、これはあまり理由のないことで、たとえ文字のように本来は白黒だけで中間のない図形でも、これを光学系を通して、かつ有限な広さをもった光電面によって見た場合、やはり連続的な階調をもった図形になっているので、光電池の出力にはアナログのレベルを設け、たとえば 8 レベルとか 16 レベルとかぐらいのアナログ的信号として A-D 変換をして計算機に入れる方が有利だと思われます。光の強さの情報を使うことの一つの利点は、これに関する線型な演算がボタン認識特にボタンマッチングに有力な手段だということです。図形認識の場合、強度レベルを利用することは、同じビット数を使ってメッシュを細かくするよりも大体において有利であると思われます。

こうして図形に関する情報を電気信号になおしたあとの判定の手続きも、論理的な 20 の扉式のイエス、ノーの連続でやるのは不適當です。前にもいったように、确实、ほぼ确实、そうらしい、……と数段階のグレードのある判定をいろいろな要素に対して行なって、それらの結果から総合するというやり方にすべきです。

通信の方で、ノイズによる誤りを防ぐ方法に *error correcting code* と *error detecting code* というものがありますが、この二つの比較が今の話に関係があります。*error correcting code* というのは、受けた信号に誤りがあった場合、何でもよいからそれに一番近い妥当な信号を正しい信号として判断する方式で、つまりイエスカノーを即決する方式です。一方 *error detecting code* では、誤った信号が来たらこれは誤りだということを知って、もう一度問い返して同じものを送りなおしてもらって方式で、つまり、イエスカノーを急いで決めてしまわずに、もっとデータがそろってまで待つという方式です。そうして、あとの *error detecting code* の方式、またはそれと前者との中間ぐらいの方が、今のべた哲学に合ったやり方だと思います。

病気の診断などに現在行なわれているやり方も、いろいろの兆候をデータとして、ある病気だとしたときのもっともらしさをそれぞれの兆候に対して数値であらわし、その総計をするというやり方で、これは正しく今のべたアナログ的な総合判断の方法です。これは簡単な線型の演算で事を処理するというので、あまりに単純であるという批判を受けるかもしれませんが、よく考えると人間が同じような場合にやる総合判断というの、医者診断でも、犯罪の捜査でも、結局はやはり線型な計算をやっているに過ぎないので、それ以上のことは前にもいったように、人間の手に負えないことなのだと思います。このような機械診断の限界は兆候の中に数量化できないものがあるという方にあるので、線型演算が単純すぎるといふことにはならないと思われまふ。

6. アナログもデジタルも使いよう

以上のことをとりまとめていふと、人間の脳あるいはそれを代行しようとする機械の情報処理について、アナログ的な手段が主体をなしているということで、ここでアナログ的という意味は

- (1) イエス、ノーの2段階でなくて連続的なグレードのついた情報をそのまま扱うこと、そして
- (2) そのアナログ演算というのは決してそう精密なものである必要はない。

ということです。このあとの点は今まで特にのべなかつたことですが実際には非常に重要な点だと思います。そうしてここでもう一度はっきりさせておきたいことは、私はここでアナログ・コンピュータを弁護しているのでは決してないということです。アナコンにおいてはこの(2)の条件に反して、入力信号と出力信号との間の正確な関係が拠り所となっています。そのようなことを目的とした計算機は私の考えでは今やディ

ジタル計算機に席を譲るべき時が来ていると思います。

現在、アナログ計算機の唯一の拠り所となっている高速という点でも、大部分の場合 digital differential analyser (DDA) によって十分に代用できると思われまふ。デジタル計算機の一部の下請けをアナログがやるいわゆるハイブリッド計算機では、 $A \rightarrow D$ 変換、 $D \rightarrow A$ 変換という厄介なものが入るので、それだけの犠牲をはらってもアナログを使う意味がある場合というのはそう滅多にあるとは思いません。これに反し DDA ならそういう面倒はありません。要するに、データを与えて答を出すのを目的とする計算機としてアナログ計算機の果す役割は既に終わったと見るべきではないでしょうか。ただ今日、日本でアナログ計算機が依然として重宝がられている理由が、大型デジタル計算機が不足していることと、さらにシミュレーション用のソフトウェアが完備されていないことに原因があるとしたら、それは別問題です。

一方において、物理的な外界と直接交渉をもつ部分、つまり入出力機器については、むしろアナログの受け持つ役割はもっと多くあるべきで、その点の研究は今後もっと進める必要があると思ひます。文字読み取りや音声識別の感覚装置にしてもそうですが、また普通のテーブリーダやカードリーダの物理的設計のようなことでも今まであまりにも軽く扱われていたきらいがあります。

また、オンラインではたらく特殊目的の装置は、今後もアナログが重用されることは想像されまふ。そのようなところは、アナログの安全性と簡単さが意義をもつからです。

要するに、前述の原則にもとづいて、アナログとデジタルとを先入見にとらわれることなく自由に使い分けることが、これからの情報処理技術の正しい進路を示すのだと思ひわけです。