

題名	通信・情報処理の進展と私の趣味
Title	Development of Communication and Computing, and My Hobby
著者名	クロード・エルウッド・シャノン
Author(s)	Claude Elwood Shannon
言語 Language	日本語・英語 Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	The Inamori Foundation: Kyoto Prizes & Inamori Grants
受賞回	1
受賞年度	1985
出版者	財団法人 稲盛財団
Publisher	The Inamori Foundation
発行日 Issue Date	10/1/1990
開始ページ Start page	134
終了ページ End page	153
ISBN	

通信・情報処理の進展と私の趣味

クロード・E・シャノン

ありがとうございます。京都賞を受賞できたことを、たいへん光栄に存じております。そして、妻ともども初めて来日できたことを、うれしく思っております。この旅行の予定を立てはじめたとき、妻のベティは日本の文化と習慣に関する本を4冊求めてまいりました。それらの本はすべてアメリカ人が執筆したものでしたから信用できるものかどうか分かりませんが、この4冊の本に共通して書かれていることに「出る釘は打たれる」という日本のことわざがありました。私がこの京都賞をいただき、この席にお集まりのみなさま方の前に立ち、お話しするということなどはまさに「出る釘」なのではないかと思われまふ。まあ、いまのところ私の頭を打つ金づちは見あたりませんが。

私は日本でどのように歴史が教えられているか存じませんが、私の大学時代のアメリカでは、シーザー、ナポレオン、ヒトラーなどの政治の指導者や戦争に関する勉強をいつもしておりました。いまから思えば、このアメリカでの歴史の教え方はまったくの誤りで、歴史上重要な人物や出来事というのは、実際に現在でも偉大な影響を与えつづけるダーウィンやニュートン、ベートーベンなどの思想家や革新者を指すのだと思います。

芸術や文学は1,000年以上の歴史がありますが、科学はせいぜい2、3世紀ほどの歴史でしょう。そのころ、ガリレオ、ニュートン、マクスウェルといった人びとが物体の落下や天体の動き、電気現象を説明する物理学の基本法則を発見しました。これらの科学の基本型は、今世紀のアインシュタイン、ヤクダ、フォン・ノイマンに受け継がれ、その発見がもたらした影響は時とともに指数的に増大していることは、いうまでもありません。

これらの科学者が残した基礎的な発見はそれ自体すばらしい業績ですが、エジソン、ベル、マルコーニといった技術者や発明家の努力によって伝えられなければ、一般の人びとの生活に影響を及ぼすまでにはいたらなかったでしょう。これらの発明や応用は、ほとんどここ2世紀のあいだに成し遂げられたものです。実際には、その大部分が今世紀になってからですが、紡績機、ワットの蒸気機関、電信などは産業革命の先駆けとなるものでしたが、すべてちょうど200年前に開発されたものです。

電話、電灯、ラジオはすべて100年前にできました。アメリカではちょうど2か月前、自動車の100周年記念がかなり盛大に行われました。また飛行機の歴史はもっと浅く、ライト兄弟の初飛行は1903年のことです。

なにかの発明に成功してから、それが日常生活の一部となるには時間を要するものです。ラジオは、1920年代になってはじめて一般的なものとなりましたし、テレビは1940年代です。エジソンの電灯は1880年に発明されましたが、家庭で使われるためには発電所の建設や電線の敷設、部品工場の建設等が必要でした。これらの事実は、電話、自動車、ラジオ、テレビ、電灯、セントラル・ヒーティング、電子レンジといった文明の利器が、1世紀前の家庭にはなにひとつなかったことを物語っています。人びとは何世紀も前と同様、農耕社会で移動も遠距離通信もほとんどない生活をしていたのです。

DEVELOPMENT OF COMMUNICATION AND COMPUTING, AND MY HOBBY

Claude E. Shannon

Thank you very much. It is a very great honor to receive this Kyoto Prize, and Mrs. Shannon and I are finding much pleasure in visiting Japan for the first time. When we began to plan our journey, Betty brought home four books relating to the culture and customs of Japan. I am not sure how reliable these were, since they were all written by Americans. One thing they had in common was telling a Japanese proverb — The nail that sticks up gets hammered down. It occurred to me that in receiving this Inamori Prize I was just such a nail, and standing up here I don't see any hammers over my head at the moment.

I don't know how history is taught here in Japan, but in the United States in my college days, most of the time was spent on the study of political leaders and wars — Caesars, Napoleons and Hitlers. I think this is totally wrong. The important people and events of history are the thinkers and innovators, the Darwins, Newtons and Beethovens whose work continues to grow in influence in a positive fashion.

While the arts and literature may be traced back for millenia, most of science goes back but a few centuries. People like Galileo, Newton and Maxwell discovered fundamental laws of the physical world which describe the motions of falling objects, of the planets, and electrical phenomena. These scientific types, of course, are still continuing with the Einsteins, Yakudas and Von Neumanns of the present century, and the effects of their discoveries tend to grow exponentially with time.

The fundamental discoveries of such scientists are wonderful achievements in themselves, but would not affect the life of the common man without the intermediate efforts of engineers and inventors — people like Edison, Bell and Marconi. Most of these inventions and applications have been developed in the last two centuries, indeed, the majority in the last century. The spinning jenny, Watt's steam engine, and the telegraph were the forerunners of this Industrial Revolution, all developed just two hundred years ago.

The telephone, electric light and radio are all about a century old now. The hundredth anniversary of the automobile was celebrated in the United States with considerable fanfare just two months ago. And of course, the airplane is considerably more recent — the Wright brothers' first flight was in 1903.

Of course it takes time, after the first success of an invention, for it to become part of daily life. Radios were not common until the 1920s, television in the 1940s. Edison's electric light, invented in 1880, required for home use the construction of power plants and a great network of power distribution lines as well as manufacturing facilities for all these components. All told, a century ago, our houses were barren of the modern everyday conveniences — no telephone, automobile, radio, television, electric light, central heating or microwave ovens. People lived much as they had centuries before, a largely agrarian society with little mobility or distant communication.

Science and technology build on themselves in an exponential way, and the technical advances of this century (or, in some cases, harmful developments) certainly exceed those of all the previous centuries combined. The technological advances of

科学や技術は従来のものをふまえて、指数的に積み上げてゆくものです。そして今世紀に入っての技術的な進歩は、なかには有害な展開をした場合もありますが、今世紀以前の技術的な進歩をすべて合わせたものよりいっそう卓越していることは確かです。産業革命による技術的な進歩は、三つの概括的な領域に大きく分けることができます。工場といった「物質」的な品物の製造、加工、生産を究極の目的とするもの、蒸気や太陽熱利用システムといった「エネルギー」の生産、処理に関するもの、そして最後に、「情報」の伝達、変換に関するものの三つです。この第三番目の領域は、ここ50年のあいだに他の2領域に比べ、いっそう飛躍的な成長を遂げています。

私は、通信や情報処理の発展に数多く関与できたことを幸せに思っております。通信とは基本的には、ある点から他の点への情報の「伝送」、そして情報の操作や変換を行うことです。

それではここで、この分野での私の経験をお話することにいたしましょう。私にとっては、職業でありホビー、もっと正確には日本語で「趣味」とよばれるものでもあります。

ミシガン大学での学生時代、R・V・L・ハートレーの論文を読んで感動したことを覚えています。それは種々の通信路を用いた情報の伝送に関するものでした。それ以来10年間、私はこの問題と通信路の雑音や、情報の確率的な側面といった要素を取り入れようと、多くの時間を費やしました。1948年に、なんとかそれまでの私の考えを表した数学的な通信理論を組み立てることができました。それ以来、情報理論が私の生活の大半を支配してきました。いま、この京都賞につきましてもそうです。

ほとんどの人びとにとって「情報」という言葉は意味や事実を示唆します。通信の技術者にとっては「情報」とはある所からある所までの波形、さらに簡単にいうと活字の並び、またいっそう簡単にいうと「0」と「1」の並びの問題を指します。

情報理論での主な関心事は情報を伝達したり、操作するシステムを支配する数学的な法則を発見することです。情報理論では情報および情報を伝送、格納、または処理するさまざまなシステムの能力の定量的な尺度を求めています。

扱われている問題としては、利用可能な通信システムの最良の使用法や、必要な情報つまり信号と、外來の情報つまり雑音とを分ける最良の方法を見つけるなどがあります。与えられた情報を運ぶ通信路とよばれる媒体で、最大限にこなせることはなにか。その上限を決定するという問題があります。この結果は主に通信技術者の関心事となりますが、心理学や言語学の分野にも取り入れられ、その有用性が認められている概念もあります。

もっとも広く研究されている通信システムのタイプの構成は、次のようなものです。

- (A) 伝送されるべき生の情報、すなわち「メッセージ」をつくり出す情報源
 - (B) この情報源でつくられた情報を通信路に合った形に変換、もしくは符号化する送信機。
- この変換されたメッセージは、信号とよばれます。

the industrial revolution can be loosely divided into three general areas — those whose ultimate aim is the processing and production of material goods, such as factories; those concerned with production and processing of energy, such as steam or solar power systems; and, finally, those related to the communication or transformation of information. The growth of this last area has in the last fifty years been even faster than that of the other two.

It has been my good fortune to be involved with many of these developments in the areas of communication and computing. Communication is basically the transmission of information from one point to another, and computing the manipulation and transformation of information.

I would like to share some of my experiences in this field, which has for me been both profession and hobby (or, more precisely, what you call “shumi”).

As a student at the University of Michigan I recall reading a paper by R.V.L. Hartley which impressed me very much. It related to the transmission of information by means of various channels. During the decade after that I spent many hours on this problem, attempting to include factors such as noise in the channel and the probabilistic aspects of information. In 1948 I managed to put together a mathematical theory of communication representing my ideas up to that time. Since then my life has been largely controlled by information theory, as even now with this Kyoto Prize.

To most people the word “information” suggests meaning and reality. To the communication engineer it is the problem of getting a wave form from one point to another or, more simply, a series of letters, or, simpler still, a series of zeros and ones.

The chief concern of information theory is to discover mathematical laws governing systems designed to communicate or manipulate information. It sets up quantitative measures of information and of the capacity of various systems to transmit, store, and otherwise process information.

Some of the problems treated relate to finding the best methods of using various available communications systems, the best methods for separating the wanted information, or signal, from the extraneous information, or noise. Another problem is the setting of upper bounds on what it is possible to achieve with a given information-carrying medium (often called an information channel). While the central results are chiefly of interest to communication engineers, some of the concepts have been adopted and found useful in such fields as psychology and linguistics.

The following is the type of communication system that has been most extensively investigated:

- (A) An information source that produces the raw information, or “message,” to be transmitted.
- (B) A transmitter that transforms or encodes this information into a form suitable for the channel. This transformed message is called the signal.
- (C) The channel on which the encoded information, or signal, is trans-

(C) 符号化された情報、すなわち信号を受信地点まで伝送する通信路。伝送中に信号は変化させられ、ゆがめられることもあります。無線電信の空電やテレビのちらつきというみなさんご存じの現象が、このような変化の例です。これらの妨害となる効果が雑音です。

(D) 受信した信号を元のメッセージ、もしくは近似したものへ復号または翻訳する受信機。

(E) 終点もしくはその情報の予定された受信者。

ついでにいえば、通信システムはちょうどこの場で起こっていることと変わりません。私が情報源で、みなさんが受信機です。通訳者はさしずめ、私の英語のメッセージに込み入った操作をし、日本人のみなさんの耳に合うようにする送信機にあたります。この変換は、たんに事実を述べている言葉でさえむずかしいのですから、冗談や両義をもつ言葉についてはなおさらのことです。通訳者を発奮させるために、冗談をいくつも入れて話をしてみようという誘惑にかられます。

実際、通訳されたテープをほかの通訳者に渡して、再び英語に訳してもらおうかとも思っています。私たちのような情報理論学者は、このようにして大いに楽しむのです。

さまざまな要素をうまく解釈すれば、このシステムはたいへん一般的なため、種々雑多のコミュニケーションの問題を含んでしまうことがおわかりかと存じます。たとえばラジオでは、情報源はマイクに向かって話している人です。そのとき、メッセージは話者の発する声であり、送信機はマイクや声を電波、つまり信号に変える付属電子機器となります。通信路は送信アンテナと受信アンテナのあいだで、そのあいだに図中の雑音源にあたる信号を妨害する空電や雑音があります。ラジオ受信機は、受信された信号を可聴音に変換して、スピーカーから出力します。そして、終点はメッセージを聞く人となります。

情報理論の基本的な考えは、物質やエネルギーのように、情報もおそらく物理量として扱うことができるということです。たとえば、情報源はある地点で材木を作る製材所に似ています。通信路は、材木を別の地点へ運ぶ輸送システムにあたります。このような状況下で重要な量が二つあります。製材所が材木を作る割合 R (m^3/sec) と輸送機器の容量 C (m^3/sec) で、これら二つの量は輸送システムが製材所に対し適切なものであるか否かを決定いたします。もし製材の割合 R が輸送容量 C より大きいならば、製材所が最大限の生産をした場合、輸送不可となるでしょう。なぜなら積み込む場所がないからです。また、もし R が C より小さいか、または等しいならば、材木が効率的に輸送機器に積み込めるかどうかで輸送の可否が決まってきます。さて、ここで情報源に大型製材機があるとしましょう。これは類推すると、符号器もしくは送信機に対応します。このとき、100%の効率で輸送機器の容量を満たすように木材を細かく切るとします。この場合、受けとる地点には断片をうまくまとめて元の形に戻してから消費者に渡すよう大工が必要となってきます。

もしこの類推が正しいならば、与えられた情報源でつくり出される情報の割合を決める適切な単位としての尺度 R 、そして情報を伝送するための通信路の容量を決める2番目の尺度

mitted to the receiving point. During transmission the signal may be changed or distorted. The static in radio reception and the snow in television reception are familiar examples of such changes. These disturbing effects are known generally as noise.

(D) The receiver, which decodes or translates the received signal back into the original message or an approximation of it.

(E) The destination or intended recipient of the information.

Incidentally, a communication system is not unlike what is happening right here. I am the source and you are the receiver. The translator is the transmitter who is applying a complicated operation to my American message to make it suitable for Japanese ears. This transformation is difficult enough with straight factual material, but becomes vastly more difficult with jokes and double entendres. I could not resist the temptation to include a number of these to put the translator on his mettle.

Indeed, I am planning to take a tape of his translation to a second translator, and have it translated back into English. We information theorists get a lot of laughs this way.

It will be seen that this system is sufficiently general to include a wide variety of communication problems if the various elements are suitably interpreted. In radio, for example, the information source may be a person speaking into a microphone. The message is then the sound that he produces, and the transmitter is the microphone and the associated electronic equipment that changes this sound into an electronic wave, the signal. The channel is the space between the transmitting and receiving antennas, and any static or noise disturbing the signal corresponds to the noise source in the schematic diagram. The radio receiver converts the received signal into an audible output from a loudspeaker. The destination is a person listening to the message.

A basic idea in information theory is that information can be treated very much like a physical quantity, such as mass or energy. For example, an information source is like a lumber mill producing lumber at a certain point. The channel might correspond to a conveyor system for transporting the lumber to a second point. In such a situation there are two important quantities: the rate R (in cubic feet per second) at which lumber is produced at the mill and the capacity C (in cubic feet per second) of the conveyor. These two quantities determine whether or not the conveyor system will be adequate for the lumber mill. If the rate of production R is greater than the conveyor capacity C , it will certainly be impossible to transport the full output of the mill; there will not be sufficient space available. If R is less than or equal to C , it may or may not be possible, depending on whether the lumber can be packed efficiently in the conveyor. Suppose, however, that there is a sawmill at the source. This corresponds in the analogy to the encoder or transmitter. Then the lumber can be cut up into small pieces in such a way as to fill out the available capacity of the conveyor with 100 percent efficiency. Naturally, in this case a carpenter would be provided at the receiving point to fasten the pieces back together in their original form before passing them on to the consumer.

Cが求められるでしょう。「生産の割合R (情報伝送速度)」が容量Cより大きくないとき、またそのときのみ適切な符号化または調整システムにより、通信路を介して情報の伝送ができるということを、この類推は示しています。事実この特性をもつ尺度R、Cを求めることを可能にしたのが、情報理論の大きな成果なのです。

もしコインを投げたとしたら、表が出るか、裏が出るかは五分五分の確率です。これは2進数の1桁、すなわち「ビット」の情報を生み出しました。もし3回投げたとしたら、3ビット、すなわち $\log_2 8$ ビットの情報を生み出します。この場合、八つの同等に起こりうる結果があります。この公式は、 P_i をさまざまな事象の確率とすると、 $-\sum_1^{\infty} P_i \log_2 P_i$ です。

事象間の相関があるときは、ますます複雑な式が必要となります。たとえば英文中には子音と母音が交互にあるという傾向がありますから、通信路もいろいろと複雑になります。たとえば、連続的に伝送されるシンボルに作用する通信路の雑音間の相関もあって、このような場合、通信路に対する最適な符号化も通信路容量を求めることも複雑になります。

それではここで、通信から話題を移し、経済的、社会的重要性をまたたくまに増大させた、コンピュータについてお話しいたしましょう。

コンピュータは、その構成要素や構造といった面で数々の段階を経てきました。パスカルやバベジによるもっとも初期の計算機は、たいへん巧妙に作られた複雑な機械的装置でした。1614年に、スコットランドの数学者ジョン・ネーピアが、対数というすばらしい発見をし、数年後にネーピアの骨(Napier's Bones)という掛け算の道具を考案しました。これがのちに、計算尺へと発展してゆきました。計算尺が数世紀にわたって技術者にとって欠くことのできない計算の道具であったことは、いうまでもありません。私は電子工学の最初の講義で教授が、「この講義を取るためには、計算尺を買わなければいけません」といったことを、いまでもよく覚えています。私はlog-log-deplex (注・対数—対数目盛りの計算尺) といういちばん大きなものを買ひ、それをいまだにもっています。大部分のアナログ・コンピュータ同様、計算尺はもう使われなくなり、このような携帯型の電卓に取って代わられました。私のlog-log-deplexでできた計算は、すべてこの電卓でできますし、3桁どころか10桁まで求めることができます。さすがに、日本製。

1936年、ミシガン大学を卒業したばかりの私が仕事を探していると、幸運なことに、マサチューセッツ工科大学(MIT)の電子工学科が微分解析機(微分方程式を解くアナログ機械)を操作する人を探しているという掲示を見つけました。さらに幸運なことに、私はこの職を手に入れ、その後2年間、この機械を操作することができました。解析機とその発明の中心的人物、ヴァニヴァ・ブッシュは自分のことを、ヤンキーのダメ職人とよんでいましたが、実際には彼は優秀な技術者で、MITの工学部長であり、のちにワシントンのカーネギー協会の所長になりました。

微分解析機は6次の微分方程式まで解けました。当時としてはもっとも進んだ計算機でし

If this analogy is sound, it should be possible to set up a measure R, in suitable units, giving the rate at which information is produced by a given information source, and a second measure C that determines the capacity of a channel for transmitting information. Furthermore, the analogy would suggest that by a suitable coding or modulation system, the information can be transmitted over the channel if and only if the rate of production R is not greater than the capacity C. A key result of information theory is that it is indeed possible to set up measures R and C having this property.

If I toss a coin, it has a 50-50 chance of coming down heads or tails. This generates one binary digit or one "bit" of information. If I tossed it three times it would generate three bits or $\log_2 8$. There are eight equally likely outcomes. The general formula is $-\sum P_i \log_2 P_i$, where the P_i are the probabilities of the various events.

More complicated formulas get involved when you have correlations between events. For example, in English text, consonants and vowels tend to alternate. Channels also can become complex in various ways. For example, there can be correlations between the noise of the channel acting on successive transmitted symbols. This can lead to complexity in calculating the capacity of a channel as well as optimal encoding for it.

I would like to turn now from communication to a subject of rapidly growing economic and social importance — computers.

Computers have gone through a number of stages in terms of the components and construction. The earliest ones of Pascal and Babbage were complicated mechanical devices of great ingenuity. On the analog side, John Napier of Scotland made the marvelous invention of logarithms in 1614, and a few years later a multiplying device, Napier's Bones, which evolved into the slide rule. The slide rule, of course, for centuries was the basic computing tool of engineers. I well remember one of my first classes in electrical engineering, when our professor told us "You'll need to buy a slide rule for this class." I bought a log-log-duplex, the biggest they had, and I still have it. Like most analog computers, the slide rule has become obsolete, replaced by hand held transistor computers such as this one. This does everything my log-log-duplex did and much more and out to ten decimal places instead of three...made in Japan.

In 1936 I was just graduating from the University of Michigan and wondering about a job, when it was my good luck to see a notice from the MIT Electrical Engineering Department seeking someone to operate the differential analyzer, an analog machine for solving differential equations. It was my further good fortune to obtain the job and operate the machine for the next two years. Vannevar Bush who was its chief inventor liked to call himself a "Yankee tinkerer," but he was in fact a very sophisticated engineer — dean of engineering at MIT, and later head of the Carnegie Institution in Washington.

The differential analyzer solved differential equations up to the sixth order. It was the smartest computer of its time, but analog computers were basically doomed by the speed and precision possible in electronic and later transistor devices.

The differential analyzer, curiously, had a fairly complicated relay circuit as-

たが、電子素子やのちに現れるトランジスタを使った装置の速さや正確さという面で、このアナログ計算機はやがて消えてゆく運命にありました。

興味深いことに、微分解析機はそうとうに複雑なリレー回路をもっていました。リレーはどちらかといえば単純な装置です。オンまたはオフ、つまり接点が開いているか閉じているかのどちらかです。接点を直列につないだ場合は、接続させるためには両方を閉じる必要があります、並列につないだ場合はどちらか片方を閉じれば接続させることができます。これらは論理学やブール代数の「and」（注・論理和）や「or」（論理積）の概念に近いので、ブール代数をリレー回路やスイッチング回路の解析や設計に適用できるのではという考えが浮かびました。このブール代数とスイッチング回路の組み合わせは、音楽でいえば調和して、みずから美しい調べを奏でているようでした。ブール代数を用いれば、より少ない接点とより少ない仕事量で回路の設計ができます。これが私の修士論文となり、このおかげで博士課程の奨学金をえて、ベル電話研究所での仕事をえることができました。

1940年代には、いくつかのグループがさまざまなタイプのデジタル計算機を研究しはじめました。Mark I および Mark II と名付けられた二つのリレー計算機をもつハーバード大学のハワード・エイケンもその1人です。ベル電話研究所ではジョージ・スティビッツが、やはりリレーを用いて複雑な一連の計算を実行できる計算機を設計しました。

初期の電話のリレーは1ダースまでの接点の開閉が可能です。1940年代には、もっと小型のリレーが開発され、その後さらに小さなものが作られました。

さらに複雑なスイッチング動作が、このロータリー・スイッチ・リレーのような特別な装置で実現されます。これは八つの接点を持ち、各接点が順に25個の位置を動いてゆくことができますというものです。

同じころ、ペンシルバニア大学ではプレスパー・エッカートとジョン・モークレが、リレーではなく真空管を用いた計算機エニャック(ENIAC)を作りあげました。

真空管は、いうまでもなく、リレーの1,000倍以上という、たいへん早い計算を可能にするものです。時間の経過とともに、真空管も小さくなりました。しかしリレーと比較すると、真空管には欠点がありました。多くの異なった回路を同時に制御することは、真空管では難しいのです。つねにフィラメント電力を必要とし、寿命がたいへん短く、長くても数千時間です。真空管6本程度の家庭用ラジオならこのように寿命が短くても我慢できますが、数千本の真空管を使う計算機となると、1時間に1本ぐらいつつ真空管が焼き切れてしまいます。

この世界初の真空管計算機エニャックは、第二次大戦では弾道計算に使われました。エニャックは、回路の接続をいろいろ変えるという点では、微分解析機のようにプログラムされていきました。これは特定の問題をうまく解けるように調節することはできましたが、判断を下すことまではできませんでした。

この研究のコンサルタントとなったのは、プリンストン大学高等研究所の偉大な数学者、ジョン・フォン・ノイマンです。彼はおそらく今世紀でもっとも偉大な数学者であり、純粹

sociated with it. Relays are rather simple-minded devices. They are either off or on — the contacts are either open or closed. Contacts can be connected in series, where both must be closed to complete a connection, or in parallel where if either is closed the connection will be completed. These are close to the “and” and “or” concepts of logic and Boolean algebra, and it occurred to me that one could apply Boolean algebra to the analysis and design of relay and switching circuits. This union of Boolean algebra and switching circuits seemed to “play” as the musicians say. Using Boolean algebra one could design circuits using fewer contacts and less work. It also “played” for me, as a master’s thesis, a fellowship for a doctoral degree, and a job at Bell Telephone Laboratories.

In the 1940s several groups began working anew with digital-type computers of one type or another. Among these were Howard Aiken at Harvard University, with two relay computers which he called Mark I and Mark II; at Bell Telephone Laboratories George Stibitz designed computers also using relays which could carry out complicated sequences of calculations.

Early telephone relays will open or close up to a dozen contacts. In the 1940s more miniature relays were developed, and later still smaller ones.

More complex switching operations could be performed by special devices such as this rotary switch relay, which has eight contacts, each of which steps over 25 positions in sequence.

At about the same time, Presper Eckert and John Mauchly had constructed the ENIAC at the University of Pennsylvania, a computer using vacuum tubes rather than relays.

A vacuum tube, of course, is a much faster device than a relay, by a factor of 1000 to 1 or more, allowing computations to be done at a much higher speed. However, as time went on, the vacuum tube also became smaller as in this model. The vacuum tube had disadvantages, however, vis-a-vis the relay. It was not nearly so adept at controlling many different circuits simultaneously. It required continuous filament power and had a very limited life, measured at best in a few thousand hours. While this limited life was tolerable for a home radio with perhaps six tubes, if you build a computer with several thousand tubes, you will have a tube burn out every hour or so.

This first vacuum tube computer, the ENIAC, was used in ballistic calculations in World War II. It was “programmed” in a sense as the differential analyzer was, by connecting various of its circuits together. It could be set up to solve a particular problem well, but could not do much in the way of making decisions.

A consultant in this work was the great mathematician from the Institute for Advanced Study in Princeton, John von Neumann, perhaps the greatest mathematician of this century, responsible for many great advances in pure mathematics, mathematical physics, and game theory. Studying the computer structure, he realized that the sequences of operations a computer does in a particular problem is itself a kind of computation — a formula akin to the formula a symbolic logician writes — and that this should not be plugged in as the ENIAC required but should be stored in memory. It should be capable of easy modification, even during computation, indeed,

数学や数理論理学、ゲーム理論に数多くの偉大な進歩をもたらしました。彼はコンピュータの構造を研究し、個々の問題において計算機が行なう演算の系列はそれ自体が一種の計算、すなわち記号論理学者が用いる式と同種の式であること、およびこれらはエニアックのように配線により機械に与えるのではなく、メモリの中に内蔵されなければならないことに気がきました。この方式によって、計算中においてさえ、演算の系列を容易に修正することが可能となり、それ自体すら計算の対象となるに違いありませんでした。

この時期、コンピュータの理論面における進歩がたいへん速かったため、コンピュータは完成する前にもう時代遅れとなってしまいました。プログラム内蔵という考え方は、エニアックの後継機エドバック(EDVAC)に導入されました。

初期の計算機につけられたこのような奇妙な名前は、その頭文字に由来しています。エニアック(ENIAC)は、Electronic Numerical Integrator and Computer (電子式数値積分機および計算機)、エドバックはElectronic Digital Vacuum-tube Computer (電子式デジタル真空管計算機)です。数年後に私は遊び半分で、Is、Vs、Xs、Csなどローマ式記数法に基づいて動作する卓上型計算機を設計しました。スロバック (THROBAC)という名前で、Thrifty Roman Numeral Backward-Looking Computer (ケチなローマ数字の時代に逆らうコンピュータ)の頭文字です。

1948年、私はベル電話研究所で働いていました。ある日、ウィリアム・ショックレイと話していると、彼の机の上に3本の針金が出ているプラスチック製の物体が置いてあることに気づきました。彼に「これはなんだ」とたずねると、「真空管と同じような増幅器だが、固体物理を応用している」と彼はいいました。このとき私ははじめて、トランジスタという、まずまちがいがなく今世紀最大の発明となるであろう代物に遭遇したのです。

ショックレイ、ブラッタン、バーディーンがノーベル賞受賞者となったのは、この発明のおかげなのです。

トランジスタは真空管に比べると、たいへん多くの面で優れています。そのため、数年以内にはトランジスタがほとんどの真空管に取って代わりました。たいへん小型でフィラメントを必要とせず、無限の寿命をもっています。このときからトランジスタが、実質的に通信機や計算機のすべてのアプリケーションにおいて、真空管に取って代わったことはいうまでもありません。年々小型化が進み、4分の1インチの小さなトランジスタが、今日では数百のトランジスタをもつマイクロチップに変わりました。1か月ほど前にベル研究所は、より小型化の進んだ新しいマイクロチップを発表しました。それはこの大きさのチップに100万ビットを記憶するというものです。もちろん、みなさんにマイクロチップのお話をするのはニューカッスルに石炭を運ぶようなものですが……。 (注・釈迦に説法の意)

ここでコンピュータにまつわる私の趣味についてのお話に移りたいと思います。

1950年ごろ、迷路を解く機械を作ったらおもしろいだろうということを思いつきました。

even itself being an object of computation.

The intellectual progress in computers in this period was so rapid that they were obsolete even before they were finished. The idea of a stored program that could be manipulated was introduced into the ENIAC's successor, the EDVAC.

These strange names of early computers were acronyms — ENIAC was Electronic Numerical Integrator and Computer; EDVAC meant Electronic Digital Vacuum-tube Computer. A few years later, as a joke, I designed a small desk computer which operated entirely in the Roman numeral system — the Is, Vs, Xs and Cs of antiquity. It was called THROBAC, an acronym for Thrifty Roman Numeral Backward-looking Computer.

In 1948, I was working at Bell Telephone Laboratories. One day I was chatting with William Shockley and noticed on his desk a small plastic object with three wires extending from it. I asked Shockley what it was and he said "It's an amplifying device like a vacuum tube, but using solid state physics." This was my first glimpse of a transistor, quite possibly the greatest invention of the 20th century. Shockley, Brattain and Bardeen won the Nobel Prize for this invention.

The transistor had tremendous advantages over the vacuum tube which it largely replaced within a few years. It was much smaller, required no filament current, and had unlimited life. Since that time, of course, transistors have replaced vacuum tubes in virtually all applications in communications and computing machines. Through the years their small size has become smaller and smaller. The tiny 1/4 inch transistor is transformed into a microchip today with hundreds of transistors inside. Just a month or so ago, Bell Laboratories announced a new even more miniaturized microchip, which can store a million bits in a chip this size. Of course, I am carrying coals to Newcastle to speak to you of microchips.

I'd like to turn now to the "shumi" side of my life with computers.

Around 1950 it occurred to me that it would be interesting to construct a machine which would solve mazes. Psychologists often use mazes as a kind of IQ test for mice. I decided that my mouse would be basically a bar magnet, moved by means of an electromagnet under the floor of the maze. The bar magnet, covered by a mouse-like shell, could be turned, and when it hit a wall of the maze could signal a computing circuit. The computer would then cause the mouse to try a different direction.

The strategy by which the machine operates can be described as follows: There are two modes of operation, which I call the "exploration strategy" and the "goal strategy." They are both quite simple. The exploration strategy is used when the mouse is first trying to find the goal. For each square in the maze, there is associated a memory, consisting of two relays. These are capable of remembering one of four possible directions: north, east, south, or west. The direction that is remembered for a square is the direction by which the mouse left the square the last time it visited that square. Those are the only data the machine remembers about the course of the mouse through the maze.

In exploration strategy, the machine takes a direction D and rotates it 90° as the

心理学者はネズミに対する一種の知能テストとして、よく迷路を用います。私は、棒磁石で私のマウスを作り、迷路の床の下にある電磁石で動かすことに決めました。ネズミの形をしたカバーで覆われた棒磁石は方向を変え、迷路の壁にあたったときには計算回路に信号を送ります。すると計算機はマウスを違う方向に走らせてみるのです。

この機械が動くからくりは次のようなものです。動作には二つのモードがあり、私はこれらを「探索戦略」および「目標戦略」とよんでいます。どちらも単純です。探索戦略はマウスが最初に目標を見つけようとするときにつかわれます。迷路の各区画（注・1つの正方形の領域）に対して二つのリレーからなるメモリがあり、これらは東西南北、四つの方向のいずれか一つを記憶することができます。各区画ごとに、マウスがその区画を最後に訪れたときに、マウスが去って行った方向を記憶します。これらが迷路中のマウスが経路について記憶している唯一のデータです。

探索戦略では、機械は方向Dを選び、ある区画に来ると第一番目の選択として90度回転します。もし障壁にあたって引き返したら、さらに90度回転し、以後これを繰り返します。目標を見つけると、リレーが作動してロックがかけられて動かなくなり、ついで機械は目標戦略に基づいて行動します。

目標戦略では、機械は第一番目の選択として、最後にその区画を訪れたときに、そこから去った方向を選び、目標へ向かって一直線に進みます。駆動機構とリレー回路はすべて迷路の床の下にあるので、マウスが迷路を解くのではなく、迷路がマウスを解いているのだと文句をつける、こうるさい連中もいます。

計算回路に約100個のリレーを用いたこの試行錯誤手続きは、解をもつあらゆる迷路を解きます。

この初期の学習機械は、ごく初歩的なものでしたが、一般の人びとのあいだでもサイバネティックスや学習および脳の機能の科学的な面に興味をもつ科学者たちのあいだでも、かなりの関心を集めました。『ライフ』という雑誌にも特集されました。

迷路を解くマウスは1979年に、IEEE（電気電子学会）がニューヨークで「びっくりマイクロマウス迷路コンテスト」を開催したときに、30年ぶりに復活しました。マウスは自動制御でなければならず、床の下に電磁石その他一切のペテンは許されません。30年間の小型化により、これが可能となりました。そうはいっても、このマウスは猫ほどの大きさもありましたが……。ついでながら、このコンテストは、このたいへん重要な問題に関する私の初期の仕事を、すこしばかり思い出させてくれるものでした。

かつて、チェスは高度な知的遊戯と考えられてきました。1800年代初期に、利口な発明家フォン・ケンペレンは、チェスをする機械を披露しました。実際にはそれはペテンのようなものでしたが……。つまり、考えることは機械の中に巧妙に隠れた人間がやっていたのです。中に人がいないことを観客に信用させるために、いくつかのドアが開けられ、そのときには

first choice when it comes into a square. If it hits a barrier and comes back, it again rotates 90° and so on. When it hits the goal, a relay operates and locks in, and the machine then acts according to the goal strategy.

In the goal strategy, the machine takes as its first choice the direction by which it left the square on its last visit, and follows a direct path to the goal. Since the drive mechanisms and relay computing circuit were all under the maze floor, some of my persnickety friends complained that the mouse was not solving the maze, but the maze was solving the mouse.

The computing circuit used about 100 relays, and its trial and error procedure would solve any maze that had a solution.

This early learning machine, primitive though it was, aroused considerable interest both in the general public and among scientists interested in cybernetics and scientific aspects of learning and brain function. It was featured in the magazine *Life*.

Maze-solving mice had a revival thirty years later, when, in 1979, the Institute of Electrical and Electronic Engineers held “The Amazing Micro Mouse Maze Contest” in New York. The mice had to be self-contained — no under-the-floor electromagnets or other shenanigans. With the miniaturization of thirty years, it was possible to do this. However, the mice were the size of cats.

Incidentally, they gave me a little memento for my early work on this very important problem.

The game of chess has always been considered a high level intellectual pastime. In the early 1800s the ingenious inventor Von Kempelen demonstrated a machine that was supposed to play chess. Actually, it was something of a trick or hoax — the thinking was done by a man who was cleverly hidden inside the machine. He moved about from one place to another as the various doors were opened to convince the audience there was no man inside.

A more honest attempt to design a chess-playing machine was made in 1914 by Torres y Quevedo, who constructed a device which played an end game of king and rook against king. The machine played the side with king and rook, and would force checkmate in a few moves however its human opponent played. Since an explicit set of rules can be given for making satisfactory moves in such an end game, the problem is relatively simple, but the idea was quite advanced for that period.

In the 1940s, the computer field was advancing rapidly, and, being interested both in chess and computers, I spent some time analyzing how one might program a computer to play chess, and wrote a paper dealing with this problem. I also built, using relays, an end-game player. This picture from about 1950 shows the chessmaster Edward Lasker with me sitting at this machine. It is still very primitive by modern standards. Lasker, by the way, in addition to being a chessmaster, was a first-rate go player, and helped popularize that game in the United States with a book he wrote on the subject.

The ideas of my paper on chess-playing machines have been used and improved by many workers in this field since that time, and every year new and better

中に入っている人はあちこち動きまわっていたのです。

チェスをする機械を設計しようというまじめな試みは1914年に、トレーシー・キービドーによって行われました。彼はキングとキングに対抗するルークの終盤戦を演じる装置を組み立てました。その機械はキングとルークの側になり、相手の人間がどのような手を打っても、数手のうちに相手のキングを詰めるというものです。終盤戦で満足のゆく手を打つための系統だった規則を与えることができたのですから、問題は比較的簡単です。しかしそのアイデアは、当時としてはかなり進んだものでした。

1940年代はコンピュータの分野が急速な進歩を遂げたときでもあり、私はチェスにもコンピュータにも興味をもっていたものですから、コンピュータがチェスをするようにプログラムするにはどうしたらよいかを解析したり、この問題を扱った論文を書いたりしました。私はまたリレーを使って、終盤戦の競技者を作りました。現代の水準から見れば、まだかなり原始的ではありました。ところで、エドワード・ラスカーはチェスの名人であるだけでなく、碁の腕も第一級であります。彼が書いた碁の本は、アメリカでの碁の人気上昇に一役買っているのです。私の論文のチェスをする機械についてのアイデアは、このときからこの分野の多くの研究者の手により使われ、また改良されてゆきます。そして毎年新しく、いっそう優れたチェスのプログラムが登場しました。1980年に、私はオーストリアで開かれたチェス・コンピュータの国際トーナメントに出場しました。ここでは20ぐらいのエントリーがありました。使用されるコンピュータは、実際にはカナダやイタリアといった離れた所にあり、電話回線につながっていました。かつて勤務していたベル電話研究所からケン・トンプソンがプログラムしたBelle というエントリーがトーナメントで優勝したのを見て、私はうれしくなりました。

ついでに申しますと、長いあいだチェスの世界チャンピオンだった電気技師のボトヴィニクは、コンピュータ・チェスに興味をもっていました。20年前にロシアを訪れた際、私はボトヴィニクと会うことができ、私たちは機械によるチェスの問題点をいくつか論じました。議論のあと、私は、通訳や同僚をよろこばせました。彼にゲームを挑んだのです。ゲームの途中で、私はルークとナイトを取りました。しかし巧みな駒さばきで巧妙に王手をかけ、ボトヴィニクが勝利をえたのは、当然のことです。

コンピュータ・チップとロボティクスにより、より安くより見事なチェス・プレーヤーを作ることが可能となってきました。それらは市場にあふれるようになりました。毎年、より強いモデルが出現し、私はそのたびに新しい機械を買いそろえました。

これらはたんに閃光により、次の動きを合図するものがほとんどです。しかし、チェスの駒を実際にすべらして動きを示すものもあります。チェス板の下で、二つのモータにより、二次元で電磁力が動くのです。このメカニズムは、30年前に私が迷路を解くマウスで使ったものとほとんど同じです。もう一つ、動きを示すおもしろい方法が使われている例があります。それは三次元で動く機械仕掛けの手をもっています。手による開閉はもちろんできます。

chess-playing programs appear on the scene. In 1980 I attended an international tournament, in Austria, of chess-playing computers with about 20 entries. The computers being used were actually in such distant places as Canada and Italy, and were connected by telephone links. I was happy to see the tournament won by an entry called Belle from my old employer Bell Telephone Laboratories, programmed by Ken Thompson.

Incidentally, the long-time world champion chess player, Botvinnik, who is an electrical engineer by profession, has been interested in computer chess. On a visit to Russia twenty years ago, I arranged a meeting with Botvinnik, and we discussed some of the problems of machine chess. After the discussion, I challenged him to a game, to the amusement of my interpreters and colleagues. Partway through the game, I won the exchange — a rook for a knight — but inevitably Botvinnik produced some slick combinations and won with a clever mate.

Since those days, computer chips and robotics have made it possible to build cheaper and cheaper but smarter and smarter chess-players, and they have been appearing on the market by the drove. Each year the new models play stronger games, and each year I buy all the new machines.

Most of these only signal the move to be made by flashing lights, but this one indicates the move to be made by actually sliding the chesspiece to be moved by means of an electromagnet under the chessboard moved in its two dimensions by two motors — almost identical with the mechanism used for my maze-solving mouse thirty years earlier. Another interesting way of showing the moves is used by this one. It has a mechanically driven hand that moves in three dimensions, as well as opening and closing. For example, if it wishes to capture a piece, it reaches over and down, grips the piece, puts the captured piece over on the side of the board, then moves back and grips its own capturing piece and moves it to the vacated square. In the movie “The Lonely Guy,” this machine appears playing a game with a human, and after winning the game shakes hands with its human opponent.

At the present time, the best chess-playing programs have reached the level of master, with ratings of over 2000. There is even an international association, with an elegant journal, devoted entirely to computer chess. I would not be surprised if, in a few more years, the world championship was held by a computer.

Recently at an Information Theory conference in England I gave a talk. The audience was falling asleep until I pulled three balls from my pocket and started juggling. Juggling skill ranges from manipulating three objects to the ten balls juggled by the great Italian, Enrico Rastelli. While my record is at best five, I began to speculate a few years ago about building machines that would either actually juggle or give that illusion.

After considerable work, I built first a machine which gives the illusion of various world record feats of juggling. Three champion jugglers are on the stage. On the right, the Romanian, Virgoaga, juggles seven clubs. They spin in the air and pass from hand to hand. On the left, Ignatov of Russia, probably today's greatest performer, juggles eleven rings. Center stage, the great Rastelli handles ten balls, five in each

たとえば駒を取りたいと思ったなら、手を伸ばし、下ろし、駒をにぎり、取った駒をチェス板の脇に置きます。そして戻ってきて自分を取りたい駒をつかみ、それを空いたマス目に動かします。映画『孤独の男(The Lonely Guy)』では、この機械が人間とゲームし、ゲームに勝って相手の人間と握手をするというシーンがあります。

現在最強のチェスのプログラムは2,000勝を超える名人のレベルにまで達しています。りっぱな機関誌をもつコンピュータ・チェス専門の国際的な協会まであります。もしもコンピュータが世界チャンピオンを数年内に制したとしても、私は驚かないでしょう。

イギリスで最近開かれた情報理論の会議で、私は講演しました。聴衆は私が三つの球をポケットから引っぱり出してジャグル（お手玉のようなこと）をはじめるまで、いねむりしていたようです。ジャグルの技は、三つの物を扱うところから10個のボールを扱うイタリアの偉大なエンリコ・ラステリのレベルにまで及びます。私の記録はせいぜい五つですが。数年前、実際にこのジャグルをするか、またはそのような錯覚を与える機械をつくるという考えにとりつかれました。

かなり研究したのち、私は世界記録級のジャグルの妙技の幻影をつくり出す機械を最初に作りました。ジャグル・チャンピオンが3人ステージの上にいます。右にはルーマニア人のビルゴアゴが七つのこん棒のジャグルをします。七つのこん棒は宙を舞い、手から手へと移されます。左にはロシアのイグナトフ、おそらく現在最高のパーフォーマですが、11個のリングでジャグルをします。中央には偉大なるラステリが、片手に5個ずつ計10個のボールを扱います。実際には、これらは自由に宙を舞っているのではなく、背景の幕から細く黒い針金で支えられ、たいへん複雑な舞台裏のメカニズムによってその軌道を動くのです。

私はこれをジャグラの大会で披露しましたが、ある程度の関心はひきました。しかし明らかに、ジャグラがほんとうに宙を舞わせる物体を見たいと考えるのは当然のことです。そこで私は時間をかけて、偉大なアメリカのコメディアンでボードヴィル・ジャグラでもある、W・C・フィールズのモデルを作りました。フィールズはいきなり、ドラムのヘッドで三つの鉄球のジャグルをします。それは隠された針金もない本物のジャグルです。彼は何時間も、1回も落とすことなくジャグルをします。これは事実上、目隠しの奇術です。ボールの位置からジャグラの手へのフィードバックはありません。

私は今日、現在アルバート・ルーカスが12のリングでもっている物体の数の世界記録をぬりかえる機械を設計できると信じています。

チェスをする機械やジャグルマシンを“Shumi”（趣味）としてでも作ることは、途方もない時間とお金の無駄使いのようです。しかし、貴重な成果は単純な好奇心から生まれることが多いということを、科学の歴史は語っていると思います。

人間の頭脳をジャグルやチェスや迷路の解決のようなかぎられた領域で模倣する。このような特別な目的の機械をつくる際、遭遇する問題によって人間の頭脳はなんとすばらしい機械なのだろうかと思ひいられます。それは約100億の神経細胞からできているのです。これ

hand. Actually, these objects do not travel freely through the air but are supported by thin black wires from the backdrop, which are moved in their trajectories by a very complex backstage mechanism.

When I exhibited this at a juggler's convention, it aroused moderate interest, but it was clear the jugglers wanted to see real flying objects — so I spent some time building this model of W.C. Fields, the great American comedian who was also a vaudeville juggler. W.C. bounce juggles three steel balls on a drum head, and it is actual juggling, no hidden wires. He has juggled for many hours without a drop. Moreover, this is, in effect, blindfold juggling, with no feedback from the ball positions to the juggler's hands.

I believe that one could design a machine today which would establish the world record in numbers of objects — now twelve rings, held by Albert Lucas.

Building devices like chess-playing machines and juggling machines, even as a “shumi,” might seem a ridiculous waste of time and money, but I think the history of science has shown that valuable consequences often proliferate from simple curiosity.

The problems one encounters in constructing such special purpose machines to emulate the human brain in such limited areas as juggling, chess playing or maze solving make one realize what a fantastic machine the human brain is. It has about 10 billion neurons. These operate in the millisecond range of speed. At birth, there is very little preprogramming apart from the basic bodily functions. The things we know and do as adults are almost all learned, from walking to language to music and mathematics.

While computers are getting smaller and smaller and faster and faster, they are still a long way from the human brain. They can make us look like idiots at long, complicated arithmetic or even logical calculations, but they cannot walk very well, and cannot recognize their own “mother.” While some “learning” programs have been written, they are still very primitive. Sensory organs of robots are very inferior to the human variety, and the output mechanisms are a far cry from the many degrees of freedom of, say, the human hand, with its sensitivity to temperature and touch.

How is it that the brain outperforms these computers, even though the transistors operate in the microsecond range, a thousand times faster than neurons, which work in the millisecond area? Probably the main reason is that the neurons are working in parallel, while our computers are programmed to do but one operation at a time. When our eyes see an object, many millions of neurons are activated, sending simultaneous information to the occipital lobe of the brain. There, millions of simultaneous operations are initiated, leading to the incredibly fast recognition of faces and objects — the information is processed in parallel by the eye, not scanned and processed point by point as by a television camera.

However I have great hopes in this direction for machines that will rival or even surpass the human brain. This area, known as artificial intelligence, has been developing for some thirty or forty years. It is now taking on commercial importance. For example, within a mile of MIT, there are seven different corporations devoted to

はミリ秒の速さで作用します。誕生のときには、基本的な身体機能は別として、ほとんどプログラムされていません。私たちが大人になって知っていることや行うことは、歩くことから、しゃべったり、音楽を聴いたり、数学を勉強するまで、ほとんどすべてが学習によるものなのです。

コンピュータはますます小さく早くなりますが、まだまだ人間の頭脳には及びません。長くて複雑な数学や論理的な計算では、コンピュータは私たちをバカのように思わせますが、彼らはうまく歩くことも、自分の母親を識別することもできません。いくつか「学習する」プログラムが書かれていますが、それはまだ原始的なものです。感覚器官において、ロボットは人間の多様性にはるかに及びませんし、出力機構は、たとえば温度や接触の感覚をもつ人間の手の大きな自由度とは比べものになりません。

トランジスタはマイクロ秒の単位で機能して、ミリ単位で働く神経細胞より1,000倍速く作動します。それにもかかわらず、頭脳がコンピュータより優れているのはいったいなぜでしょうか。たぶん神経細胞は並列に働いていて、他方コンピュータは一度に一つの命令だけを実行するようにプログラムされているということが大きな理由でしょう。私たちの眼が物体を見ると、何百万もの神経細胞が活動し、脳の後頭葉に刺激の情報が送られます。そして数百万の作用が同時にはじめられ、顔や物体を信じられない速さで認識します。情報は目で並行に処理されます。テレビカメラのように、1点ずつ走査して処理するではありません。

しかし、機械が人間の頭脳と張り合う、または勝つという方向に私は大きな望みをもっています。人工知能として知られるこの領域は、いままで30年から40年の期間、開発努力が行われてきました。たとえばMITの周囲1マイル以内には、7社がこの人工知能の研究を、なかには並列処理の研究を行っております。

未来を予言することは難しいのですが、西暦2001年には私たちと同じように歩いたり、見たり、考えたりすることのできる機械が出現すると、私は思っております。

research in this area, some working on parallel processing.

It is difficult to predict the future, but it is my feeling that by 2001 AD we will have machines which can walk as well, see as well, and think as well as we do.

稲盛財団1985——第1回京都賞と助成金

発 行 1990年10月1日

発行所 財団法人稲盛財団

京都市下京区四条通室町東入函谷鉾町87番地 〒600

電話〔075〕255-2688

制 作 京都通信社

装 本 納富進

印 刷 株式会社文功社

製 本 株式会社吉田三誠堂製本所