

99.999%の漢字認識と言語情報処理 (1)

—複雑系進化に基づく考察と基礎実験—

Kanji Recognition of 99.999% Correctness for Language Processing (1)

—Evolutionary Complex Systems Approach and the First Experiment—

稲垣 耕作*, 嶋 正利**, 上田 院亮***

要旨

漢字認識技術は、4半世紀にわたって、正解率99.9%の壁を破れずに停滞してきた。本論文はその困難な壁を破り始めたことを告げる最初の論文である。本論文では、パターン認識技術を複雑系進化という観点から見直すという立場からの考え方を述べる。半導体集積回路の集積度はMooreの法則のいう18ヵ月に2倍の向上を続けてきたが、現在はさらなる機能上のイノベーションを必要とする段階にさしかかっていると思われる。高度なパターン認識と人工知能技術によって、言語情報処理など実世界における情報文化に一層近い機能をコンピュータに付与することが1つの道であろう。我々の実験システムは印刷漢字を対象として、現在、基礎実験段階では単一フォントで99.999%以上の認識率を達成している。

Kosaku INAGAKI *, Masatoshi SHIMA **, Yoshisuke UEDA ***

Abstract

Kanji character recognition technologies could not break the barrier of 99.9% correctness in the last quarter century. This paper first presents an experimental system that has broken this barrier, by utilizing the evolutionary complex systems approach. Semiconductor integrated circuits in accordance with Moore's law will require another new innovation in the near future. AI technologies should develop new facilities for language processing and real world computing to reinforce information-culture-based societies. Our basic experiment has achieved the correctness over 99.999% for printed single-font Kanji documents.

1. まえがき

文字認識は重要な技術であり、1920年代から特許が出願されてきたが、たとえば印刷漢字認識において99.9%の壁を破れない状態が4半世紀にわたって続くなど、近年は長く停滞している。1970年

代の旧通商産業省による大型プロジェクト「パターン情報処理システム」の成果をいまだに明確には越えていない。

一方、いわゆるMooreの法則に従う半導体集積回路は、18ヵ月で2倍の集積度向上を今でも続けている。とはいえ、従来のマイクロプロセッサのアーキテクチャで高集積化を続け、従来の延長上の応用に用いるとしても、すでに市場が飽和しつつあるという深刻な問題に直面している。

文字認識や音声認識分野では、カタログに記載された実験室データは、実用に供した場合、1桁以上低下するのが通例である。印刷漢字認識で、

* 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University
** 会津大学コンピュータ理工学部
School of Computer Sci. & Eng., University of Aizu
*** 公立はこだて未来大学複雑系科学科
Dept. of Complex Systems, Future University-Hakodate

98%程度の認識性能（1～2行に1文字程度の認識誤り）が大勢であるため、広く普及していない。

手書き漢字認識の場合は、筆順情報をも利用できるオンライン認識が実用されている。第1位候補が98%程度の認識精度だったとしても、他の入力手段とのトレードオフで選ばれるためである。

一方、印刷漢字認識の性能は、その程度では満足されない。10枚のレポートで1万字以上、厚手の書籍は数十万字あるため、99.99%～99.999%という認識精度が潜在的に要求される。

99.999%の認識精度を「ファイブナインの壁」と呼ぼう。人間が注意深く数度の校正を行った程度の正確度である。この精度が達成されれば、漢字認識技術ひいてはパターン認識技術に大きなブレークスルーがもたらされると予想される。

本論文は、この壁に挑み、複雑系進化の手法でそれを超えようとする試みを述べる。現在、印刷漢字認識の基礎実験で、99.999%以上の正解率をすでに達成している。

本論文は第1論文として、この研究に至った契機となる「複雑系進化」の考え方を述べる。特許等の知的財産にかかわる記述は以後の論文に譲る。知能的な言語情報処理や、実世界における人工知能的処理などが、コンピュータにとってごく普通の応用となる時代には、情報文化のさらなる進展の恩恵がもたらされよう。ポスト情報ネットワーク時代のSUI（smart user interface）の重要技術として、情報文化学の視点から高精度パターン認識技術と言語情報処理について検討したい。

2. パターン認識と進化

生物のもつパターン認識機能は、進化の過程で獲得された。外在する“意志をもった知的存在”が手を加えた人工的機能ではなく、純粹に自然発生したものである。その点で、我々は「自己組織化」（または「創発」）と「進化」をキーワードにして、これまで研究を続けてきた^{[1]～[5]}。

自己組織化と進化のシミュレーション実験対象に、人工生命を選ぶ研究者もいる。しかしながら単にコンピュータ上でシミュレートしただけの生命体では、実世界との対応度に疑義が多く、科学

的研究として多くの難点を抱えがちである。

一方、コンピュータ上でシミュレートされた知能の場合には、たとえその知能が生物界の知能とかけ離れていようと、実用性が高ければ、工学的応用が生まれるというメリットを伴う。

我々が目指すのは後者である。しかも1000億個の脳細胞を単純にシミュレートするのではない。その中に潜む進化の原理のみを取り出して、知能の本質的部分を実現しようとする実験である。飛行機を飛ばすのに、鳥のように羽ばたかせる必要はなく、プロペラあるいはジェットエンジンを採用してもよいのと同様の発想である。

知能の自己組織化を実験する場合、多くの研究者はニューラルネットワークを用いてきた。ただその手法にはさまざまな欠点がある：

- (1) 学習速度が遅く、収束させるのに時間がかかるとともに、高い精度が達成されない。
- (2) 学習して分類できる対象数が限られ、アルファベット程度の分類は可能でも、数千に上る漢字を学習させるのは困難である。
- (3) 集積回路で実現する場合、ニューラルネットワークは回路効率が極端に悪く、大きなネットワークを現実的コストで実現できない。
- (4) 文字認識においても、位置ずれにきわめて弱いなど、工学的応用には数々の問題を伴う。

我々は、ノイマン型でもなく、ニューロ型でもない第3の方式を、次世代コンピュータの有力候補であると考え、その基礎実験として漢字パターン認識への応用を試みている。

そのような実験によって、知能の1つの本質が解明されてくるものと期待するが、現段階では進化的方法の全貌を確立する途中段階であるため、基礎実験データの記述にとどめ、技術的詳細は以後の論文に譲るものとする。

3. 人為的工学としての人工知能

パターン認識を含む人工知能分野の研究は、意外に自然界の知能に学んでこなかったのかもしれない。

その大きな理由は明らかである。脳のマクロな外形と、個々の細胞のミクロな特性はわかるが、

脳が全体としてどのような原理で機能しているかは、科学技術の長い歴史において、ほとんど明らかにされてこなかったからである。それは複雑系というシステム的な「メゾの謎」である^[6]。

脳は謎の器官である。ニューロンは数十ミリ秒の単位で機能しているが、そのように遅い部品を用いながら、ヒトのパターン認識能力は、かなりの高速性を達成している。それは脳のパラドックスの1つだと考えられている。

脳の仕組みがほとんど解明されていないため、人工知能分野ではアドホック (ad hoc) といわれるような、その場しのぎ的な技術が用いられてきた。パターン認識分野では、「研究者の数だけ認識方式がある」といわれがちだった。その後、認知科学などの研究者も増えたが、その成果が有効に人工知能に応用されているかという点、実例はなかなか見つけにくいのではないと思われる。

またニューロ分野では、小さなブレークスルーを起こすのさえ、10年か20年に1度かと思えるほど進歩が緩やかである。ニューロンのランダムネットワークはほとんど解析不能であって、理論的な証明をめぐって与えることができない。その中でHopfield型ネットワークは、証明を与えることができた貴重な例である。しかしそれは原理的に脳と明らかに異なるモデルである。

脳の科学的解析が困難であるため、人工知能研究者はよりどころの少ない方法論で、コンピュータ実験を繰り返してきた。人工知能は、大部分が人為的な体系であって、自然界の動物の知能に基づく原理だと主張できる部分はごく少ないであろう。しかも最新のコンピュータを用いても、その性能は人間よりはるかに低いのである。

パーソナルコンピュータで32ビット演算を行えば、1秒間に10億回を超える基本性能をもつ。全人類を相手にしても、たった1台のパソコンが勝つはずである。しかし日常的な低レベルの認識的機能の場合、そんな高度なコンピュータをもってしても、現在はまだ太刀打ちできない。

4. 複雑系の自己組織化パラドックス

脳のように複雑な機能を人間が工学的に実現し

ようとする際、やみくもにやっても成功しそうにない。また、もしも従来のコンピュータ理論が知能のキーを握っていて、単純にそれで可能ならば、現在までにだれかがやり遂げていたであろう。

我々はまったく別のアプローチからの研究を行ってきた。それは複雑系における自己組織化と進化の考え方である。なんら秩序のなかったカオスの世界から、生命も知能も生まれ出た。その根本原理を解明するのが、理論構築の最も有効な道筋であろうと考えたわけである。

複雑系の自己組織化においては、困難なパラドックスが存在する。ただ、それに注目する研究者は意外に少数にすぎない。それが常識的思考でとらえにくいからであろうか。

「自己組織化のパラドックス」とは、組み合わせ数学あるいは情報理論上の問題である。宇宙の全素粒子を用いても、生命体を構成する複雑さを生み出すのは不可能に見える。しかし現実には複雑な生命体が誕生したとのパラドックスである。

宇宙の素粒子数は、一般に 10^{80} 個未満の値で記載されている。宇宙誕生後の秒数は 5×10^{17} 秒程度である。この時間内に、全素粒子がランダムに結合し合ったとして、最大何種類程度の物質が生まれるだろうか。そのような物質中に、自己増殖する生命体の起源が含まれていたはずである。

生まれ出る物質をできるだけ多めに計算しよう(上界を求める意)。各素粒子は毎秒 10^{12} 回の反応を行うとする。各素粒子は毎回すべて異なる物質になり、同じ物質になることは二度とないとする。また物質ができる際、複数の素粒子が結合し合うが、それによって物質の総数が減る効果も無視する。これは極端に多めの計算である。

このようにして計算すると、宇宙誕生以来、各素粒子は 10^{12} 回 $\times 5 \times 10^{17}$ 秒 $= 5 \times 10^{29}$ 種類の物質に変化したことになる。その数に素粒子の総数 10^{80} 個をかけると、生まれた物質数の上界となり、それは 5×10^{109} 種類である。宇宙の全物質を使っても、これが物質を反応させた数の上界である。2進表現では約 2^{368} 種類となる。

この数を別の表現で述べると、宇宙の全物質を使い、宇宙誕生以来150億年程度の時間をかけたとして、それらの物質を区別するためには、各物

質にたかだか368ビットのラベルを付ければ十分だというのが、Shannon流の情報理論である。

生命体がいかに複雑に見えようとも、ランダムな過程で自己組織化すれば、たかだか368ビットで記述できる。そのような生命体（上記で述べた物質）の中にヒトの各個体も含まれるが、ヒトはDNA中に30億文字の情報量を持つというよりは、Shannon流ではヒトの各個体は368ビット未満に圧縮できる情報量しか持たない。

これに類似した議論は、ノーベル賞受賞者を含む何人かの研究者によってこれまでもなされてきた^{[7]～[10]}。本論文の著者の1人、稲垣も30年にわたってこの疑問を抱き続けてきたし、複雑適応系で最も有名な研究者の1人であるKauffmanも同じ疑問を最大の課題として研究を続けてきた。

それほど重要な疑問点でありながら、生命の起源の研究で見落とされることが多い。ほとんどの著書と論文は、「物質が反応しているうちに、やがて生命の基になる物質ができた」程度に記述するのみである。しかし、実際は「組み合わせ爆発現象」に阻まれており、妥当な説明を構成しない。

生物学用語で述べるならば、生物学には2大理論が存在する。Darwinの「進化論」と、WatsonとCrickによる「DNAの2重螺旋モデル」である。そして後者には上記の組み合わせ数学が適用される。そこで導かれる結論は、「DarwinとWatson & Crickという生物学の2大理論はまだつながっていない」である。生命のミクロな仕組みは解明されたが、それではまだ生命体は生まれえず、マクロな進化理論は成立しない。

この試算に疑問を持つかもしれない方のために、生物における小さな実例の数字を付け加えておきたい。細胞内に存在するリボソームという小器官は、メッセンジャーRNAを解読しながら、20種類のアミノ酸を結合させてタンパク質を作る。デコード機能と合成機能という、純粋に機械的な作用を行う小器官であって、その分子量は約270万である。この機能をもつ巨大分子の立体構造を自己組織化させるか設計するために、368ビット程度の情報ではたして十分であろうか。

5. 自己組織化の新原理

リボソームは地球上の生命機能を維持する部分的器官の1つにすぎないが、偶然そのような器官が生まれる確率を計算しようとする、ほとんど絶望的なほど小さなものとなる。生物学者のDawkinsは、18世紀の神学者W. Paleyの『Natural Theology』を引用して、荒野に石が落ちていたら、自然にできたと思うが、時計が落ちていたら、自然にできたとは思わないという比喩を述べた。

時計よりもヒトの方がはるかに複雑である。あるいはバクテリアでさえ、時計より複雑だろう。しかしそれらはだれの手も加えられずに、自然にできたとみなされている。そのような自己組織化の背後には、何かまだ人類が発見していない未知の原理が働いているのだろうか。

我々の漢字認識研究は、そのような基本的疑問に裏打ちされて行われてきた。自己組織化と進化の新原理をコンピュータに組み込み、やがて人間並みの知能を発揮する「進化コンピュータ」の開発を目指した実験である。

考えうる進化の道筋は、稲垣が構築してきた理論に基づいている。発表済みの理論は、実験に入る2年前までの体系であるので、さらにそれを押し進めた理論の構築が必要だった。たとえばニューラルネットワークがカオス状態に陥らない条件など、進化する知能の実験には深い理論的考察が重要であることなどを指摘できる。

1つのエピソードを述べるならば、稲垣が最初の基礎実験^[11]に成功したとき、上田はそれを実地に見て、採用した原理を聞く前に、一目でそれを言い当てた。パターン認識研究者がほぼ半世紀にわたって発見できなかった原理であるため、容易に見破れるはずがないが、複雑系でほとんど顧みられることもない洞察によれば可能であった。稲垣は複雑系理論として上田理論を最も参考にしてきたが、それに近いところに、進化原理に基づくパターン認識の本質があるといえよう。

それは自己組織化と進化の原理を根本的に考え直した結果たどり着いた「進化コンピュータ」による認識方式といえるものである。現在も研究の途上であるが、きわめて有望な方式であろうと

我々は研究を続けている。

6. 進化コンピュータの実験

進化コンピュータの実験は、現在、通常のパーソナルコンピュータ上で行っている。そしてこの実験を「デジタル・アインシュタイン・プロジェクト」と呼んでいる。実用性が高ければ、やがて専用チップ化することを考慮に入れているため、ハードウェア化しやすい方式を目指している。

自己組織化のパラドックスを克服できた場合、その最大の利点は人手によるプログラム作成量の激減であろう。「ほとんどプログラムを書かないコンピュータ」という究極の目標を目指して、我々のプロジェクトは基礎研究を続けている。

印刷漢字認識を実験対象に選んだのは、定量的に信頼できるデータを最も得やすいと考えたためである。音声認識などを実験対象に選んでも、認識精度がいくらかというデータをきちんと示にくい面がある。ロボットによる物体認識の場合にはなおさらである。それに比べて漢字認識の場合には、どんな漢字を何文字認識させたかを、異論のないデータとして提示できる。

図1に実験システムの画面例を示す。図は夏目漱石の『吾輩は猫である』を文字認識させている画面の途中時点を表示している。

本実験では、切り出された個々の文字の認識方式のみを進化の原理で考えることを目標にしているため、この画面は進化によって生まれたものではない。また、紙面をスキャンした画像からの文字の切り出しも通常のプログラムの手法によっている。あくまで単一文字の認識に関して、進化という観点を重視して実験的に研究している。専用チップ化した後には、もっと広範な進化方式の研究も可能になると思われる。

なお、飛行機が羽ばたかなくてもよいように、工学的に有効でありさえすれば十分であるという方針で行っている実験である。したがって、そこで生まれる漢字認識方式は、かならずしもヒトの脳内で行われている機構と類似しているとはかぎらない。むしろ似ていない方が、人間より高性能の認識コンピュータとなる可能性が皆無でないことにも注意しておくべきである。

最初にJIS第1水準のMS明朝体を進化コンピュータに学習させてから、同じJIS第1水準MS明朝体の漢字を白紙に印字して、それをスキャナで入

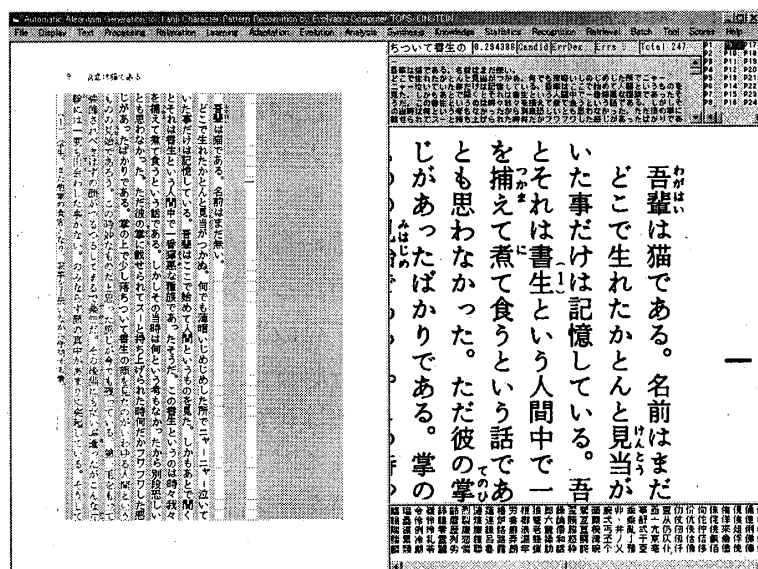


図1 漢字認識実験システムの画面例

力する。基礎実験でその認識性能を求めた。

入力した画像は、17ポイントの活字を300ドット/インチでスキャンして、2値化した。A4判に33字×45行で印字したため、ほとんど隙間のない紙面となったが、文字切り出しには失敗しなかった。

そのような紙面を用いて、100,810文字分の認識実験を行った。その結果、現在得られている認識精度データは、認識誤り文字数0、すなわち正解率100%である。なお文字切り出しは通常のプログラムの手法を用いており、進化複雑系の原理を導入したものではない。また我々の実験は、正解率99.5%、99.94%などを経過して、この段階に至ったものである。

学習したフォントと同一フォントであるため、最も条件のよい実験であるが、ファイブナインの壁を初めて突破した漢字認識システムであると考えている。認識能力にはかなり余裕をもっているため、さらに優れた実験データを出すことが可能と思われる。

他の商用システムでは、カタログ性能として、単一フォントで文字切り出しの失敗がない場合のデータを示していると推測され、それらと競って2桁以上の認識精度の向上を達成しつつあると言ってよいのかもしれない。ただ、実験を重ねていくことによって、実用性能をファイブナインに近づけていくことが我々の目標であるので、このデータでまだ満足しているわけではない。

稲垣はかつて新聞紙面のレイアウトを認識させる実験^[12]を行ったが、従来のプログラミング技術で人間並みの認識能力を発揮できるものではなかった。レイアウト認識など、さらに上位階層の認識実験にも、やがて進化複雑系的な発想を導入すべきであると思われる。

しかしながら、安価な実験用コンピュータの能力では、計算速度がまだそのような実験には大幅に不足している。切り出された個々の文字に対する認識実験でも、ごく基本的なデータを得るために、数日間コンピュータを走らせておくことが稀でないためである。

コンピュータの性能はまだしばらくはMooreの法則に従って、5年で10倍程度の向上を続けるものと思われる。その点で、計算量の多い手法はか

ならずしも不利ではなく、むしろ将来的には主流の地位を獲得する可能性が十分に存在する。そのような事例は、過去のコンピュータ技術の発達史が物語っていると思われる。たとえば漢字の画面表示を、フォントROMを用いずに、グラフィック処理によって置き換えていったなど、前例は枚挙にいとまがない。

また、ある種の情報処理技術の重要性が高まることによって、処理系のハードウェアアーキテクチャが変わり、専用の処理機構がハードウェアに装備されていくという変化はコンピュータ分野においてしばしば起こる。それによって数桁程度の性能向上をもたらすことも可能になり、コンピュータアーキテクチャ自体が一気に変革されるといふ未来も予想しうるであろう。

7. 言語情報処理とコンピュータの技術革新

数値計算処理が主体だったコンピュータの用途が変わり、分散的個人用コンピュータの時代が訪れたのは、1つには本論文の著者の1人である嶋が1971年に開発した世界初のマイクロプロセッサの影響があったことは、いまや広く認められているものと思われる。

それとともに、言語情報処理という潜在需要が他方にあり、それがコンピュータアーキテクチャの変革に寄与してきたという隠れた影響を見落とすことはできない。1973年、Xerox社のPalo Alto研究所で開発された世界最初のワークステーションAltoは、ビットマップ型のディスプレイを備え、GUI (graphical user interface) 技術によって、明確に文書処理応用を想定した装置だった。しかもAltoはイーサネット接続を採用していた。

Altoの技術はXerox社ではStar（日本国内ではJ-Star）にも採用されたが、Apple社のコンピュータがAltoの技術を引き継いだのが、パーソナルコンピュータ史における重要な流れである。ウィンドウ型方式は、やがて世界中のパーソナルコンピュータの採用するところとなっていった。

現時点の分散型小型コンピュータを主流とする技術体系は、約30年前を出発点として、それをほぼ完成する域にまで到達させてきたというのが、

情報技術と情報文化という両視点から見た1つの見解となるのではなからうか。技術のシーズは約30年前にまかれた。その果実が刈り尽くされることによって、その分野がやがて飽和する。そしてその飽和がIT不況の一因にもつながっていく。

しかし、言語情報処理あるいはそれを発展させたメディア処理技術が、息の長いコンピュータ技術の発展をもたらしてきたという事実を見逃すわけにはいかない。今後も同様の技術的シーズを掘り当てたならば、さらに長期間のこの分野の発展につながる可能性がないではない。

我々はその1つを、人類の文化の中核である言語にかかわる技術的シーズが、もう1度果たすのではないかとみなしている。そしてそれをさらに発展させた形が、コンピュータが実世界とつながりをもつという実世界型の情報処理技術であろうと考えている。

言語関連技術で明確なブレークスルーが起こっていないのは、文字認識、音声認識、機械翻訳などの人工知能・パターン認識型技術である。またより実世界型の技術は、ロボット工学で試されたり、仮想現実感技術で実験されているものの、実世界での3次元認識技術、実世界型での推論技術などはまだまだ格段に弱い。

世界に数台から数十万台以内というスーパーコンピュータは、数値計算型技術を追求する。一方、世界で数億台からさらに無数といえるユビキタス環境を目指す個人用情報処理分野は、従来から明確に文化志向を目指してきており、我々はそれへの1つの未来型の接近として、新しい言語情報処理技術という側面からの研究を進めている。「文化志向」とは小型分散型のパーソナルコンピュータがたどってきた道筋どおり、「人間を補助し、個人の能力を増幅するメディア」への道である。

Altoが文書処理を出発点として、それが後の時代に映像・音響を含むマルチメディア処理へと発展したように、次代のコンピュータ技術においても、言語情報処理技術が出発点となるか否かはまだ十分に明らかではない。ただロボットで目先の新しさを競っても、ロボットの知能はまだ低く、一朝一夕に人間並みに達するわけではない。

そういう点で、情報処理上の明確なブレークス

ルーをもたらす可能性がおそらく高いであろう分野として、我々は情報文化史的観点を加味して、オーソドックスに文字認識技術を選んだ。GUIからさらに進んだSUI (smart user interface) の実現という次世代型のコンピュータを目指した研究である。そして今やブレークスルーへの一番乗りに成功する可能性を競っている。

パターン認識的な言語情報処理技術は、表意文字など文字種の多い言語を用いる東アジア圏で特に重要なものというまでもない。インターネット技術が世界の単一言語化を押し進める圧力となったのに対して、言語情報処理技術は世界の多言語文化を尊重する方向の原動力となりうる。

世界の情報文化のバランスを取るという視点をも重視して、我々はこの新しい研究方向を東アジア圏から強力に進めてみたいと考えている。そのように情報文化に根ざした問題意識を掲げることが、世界から注目される独創的な情報技術を育てる1つの方策になるのではないかと考えている。

なお、漢字認識技術に関しては、文書の電子データ化に関する著作権問題など、情報文化としての関連問題は数多い。本学会ではこのような問題に対しても真剣な議論を深めるべきであると思われる。また著作権法制も技術に遅れることなく、先進的な内容に変革されていくべきであろう。

8. あとがき

本論文では、我々が研究している進化複雑系型の新しい漢字認識技術について、その基本の考え方、現在の性能などについて、情報文化学的観点を加味して記述した。JIS第1水準の漢字の場合、基本的な認識実験では、すでに10万文字で誤読0を達成しており、パターン認識技術において、人間と同等あるいはそれを超えるレベルを可能とするブレークスルーに接近していると考えている。本論文は最初の論文であるため、技術的詳細とさらに進んだ実験には触れなかったが、すでに商用化に向けた開発活動も並行して行われていることを付言しておきたい。

マイクロプロセッサ技術と並んで、言語情報処理技術が、現在のパーソナルコンピューティング

時代への大きな影響を与えた。次代のコンピュータ技術と情報文化を考えると、そのような情報文化史的視点が、今後もさらに重要性を高めていくのではないかと想定して、SUI (smart user interface) 技術をさらに研究している。

謝辞

稲垣が薫陶をいただく梅棹忠夫氏に深謝する。複雑系の新技術については赤松則男氏から貴重なご意見をいただいた。漢字認識の新方式に貢献してくれた稲垣宏行・仁美にも感謝する。

参考文献

- [1] 稲垣耕作, 創発仮説とコンピュータの30年周期説, 情報文化学会誌, Vol.4, No.1, pp.53-61 (1997)
- [2] K. Inagaki, Elemental Universality of Sets of Logic Devices, IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol.E81-D, No.8, pp.767-772 (1998)
- [3] K. Inagaki, Information Physics Based on the Emergence Hypothesis and a Proof of Computational Universality of Single-NOT Networks, Trans. IPS Japan: Mathematical Modeling and Its Applications, Vol.40, No.SIG2 (TOM1), pp. 68-75 (1999)
- [4] K. Inagaki, Matter-Conserved Replication Causes Computational Universality, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E83-A, No.3, pp.579-580 (2000)
- [5] 稲垣耕作, 嶋正利, 技術革新はMooreの法則を超える, 情報文化学会誌, Vol.8, No.1, pp.37-44 (2001)
- [6] ラルフ・エイブラハム, ヨシスケ・ウエダ編著, 稲垣耕作, 赤松則男訳, カオスはこうして発見された, 共立出版 (2002)
- [7] F. Hoyle and N. C. Wickramasinghe, Evolution from Space, Dent (1981)
- [8] R. Shapiro, Origins: A Skeptic's Guide to the Creation of Life on Earth, Summit Books (1986)
- [9] R. Dawkins, The Blind Watchmaker, Norton (1986)
- [10] S. A. Kauffman, The Origins of Order, Oxford University Press (1993).
- [11] 自ら知能高めるコンピューター, 京都新聞

2001年12月21日朝刊

- [12] K. Inagaki, et al., MACSYM: A Hierarchical Parallel Image Processing System for Event-Driven Pattern Understanding of Documents, Pattern Recognition, Vol.17, No.1, pp.85-108 (1984)

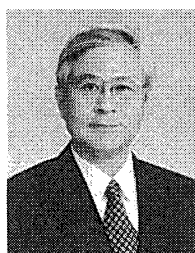
2002年6月13日受理

2002年10月8日採録



稲垣 耕作 (いながき こうさく)

1977年京大・工・博士了。工博。京都大学助手を経て、現在京都大学助教授(大学院情報学研究科)。専門は基礎情報学、情報文明学、情報物理学。ペンネーム逢沢明でも活動。著訳書に『コンピュータ科学の基礎』、『複雑系を超えて』(共著),『カオスはこうして発見された』(共訳)など。



嶋 正利 (しま まさとし)

1967年東北大・理・化工卒, ビジコン入社。世界初のマイクロプロセッサ4004開発。1972年インテル入社。8080マイクロプロセッサ開発。1975年ザイログ入社。Z80とZ8000開発。1997年(株)トプス設立。2000年より会津大教授。工博。1997年京都賞。1998年米国半導体生誕50周年記念“Inventor of MPU”賞。



上田 院亮 (うえだ よしすけ)

1964年京大・工・博士了。1961年自然界のカオス現象を世界最初に確定。2000年京大退官。現在京大名誉教授, 公立はこだて未来大教授。1993年電気学会副会長。1998年情報文化学会大賞。主著『The Road to Chaos』のほか『The Chaos Avant-Garde』等カオス科学の著編書, 幾つかの国際学術誌の編集等に携わる。