



# autonomic computing:

オートノミック自律的コンピューティング

情報技術に関するIBMの展望



情報技術( IT )業界は、不可能だと思われていることを可能だと証明したいのです。

私たちはさまざまな障害を克服し、驚くほど着実に、数々の記録を打ち立ててきました。しかし現在、この輝かしい成功が新たな問題をもたらしています。しかも、その解決に力を注いでいる者はあまりにも少ないのです。

この問題は、放置しておく他のどんなIT関連の問題にもまして次世代のコンピューティングへの移行を妨げる障害となるでしょう。さらに興味深いことに、この問題は私たちを悩ませてきたこれまでの障害とはほとんど関係がありません。

それはムーアの法則の歩みを続けるのではなく、むしろムーアの法則がこの何十年間君臨してきたことによる弊害に対処しなくてはならないということです。1平方インチにどれほど多くのビットを詰め込むことができるか、あるいはシリコンにどれだけ細かいラインを刻むことができるかといったことは直接的には関係がありません。しかし現実的には、私たちは「小型化、高速化、低価格化」といった3つの脅迫観念にすっかり取りつかれてしまっているのです。

また、私たちの進歩を脅かすのは、「マシンの知性」の問題でもありません。世間でもてはやされている、人工知能( AI )の概念を具体化する「思考するマシン」を作り上げるという課題よりは、コンピューティング・システムの日常的な機能を自動化するという課題に近いでしょう。ディープ・ブルー( DEEP BLUE<sup>®</sup> )の生みの親がこのような発言をすると奇異に聞こえるかもしれませんが、私たちの前に立ちふさがる最大の障壁を克服するために必要なのは、さらにチェスに優れたスーパーコンピューターや、愛情を持ったり笑ったりする感情を持つマシンやアンドロイドを創ることではないのです。

その障害とは「複雑さ」なのです。この「複雑さ」に対処することこそが、現在IT業界が直面している最重要課題なのです。

**それが私たちが取り組むべき「最大の挑戦」なのです。**

私たちIT業界に携わる者は、絶えずより強力なコンピューティング・システムの開発を目指しています。なぜでしょうか？それは、主要なタスクとプロセスを自動化することで、個人と企業の生産性を高めるためです。そこには、

### 人間と人間社会の発展において、自動化は常に進歩の基盤となってきた

というもっともな論拠があります。日常的作業を「自動的に処理」することができるようになれば、精神的にも物理的にも、今まで達成することができなかったタスクに集中することができます。パンを手に入れるときに、小麦を収穫し、小麦粉を製粉し、パンを焼くと考える人はあまりいません。近くの店で買えばすむことです。また、どうやって地球の裏側に住む友人に連絡しようかと悩むこともほとんどありません。ただ電話をかければよいのです。(図1,2を参照)

しかし、この自動化による発展が、「複雑さ」という副産物を生み出すのは避けられないことでした。**特にコンピューティング・システムの進化においてはこれがまさに現実のものとなりました。**

コンピューターの進化の歴史を、単体のコンピューターからモジュラー・システム、大型コンピューターとネットワーク接続したパーソナル・コンピューターという具合にたどってみると、そこには確かなパターンが浮かび上がってきます。すなわち、コンピューティングのほぼすべての面で著しい進歩があったということです。その進歩の程度は、マイクロプロセッサの性能で1万倍、ストレージの容量で4万5,000倍、通信速度で100万倍にも達しています。しかし、これには代償を伴いました。これらの進歩に伴い、常に数千万行ものコードで書かれた複雑なソフトウェアが制御するような高度なアーキテクチャーが構築されています。オペレーティング環境によっては、4,000人を超えるプログラマーが3,000万行以上のコードを作成する場合もあるのです。

図1

## 農業における進歩

ほぼ2世紀にわたって、人手による農作業の自動化を図る技術革新が進められた結果、農作物の生産と収穫の両方で効率化が達成されました。この間、労働力のうち農作業に要する割合は90パーセントから2.6パーセントに、また100ブッシェルの小麦を生産するのに要する労働時間は300時間からわずか3時間へと減少しました。(資料: 米国農務省)

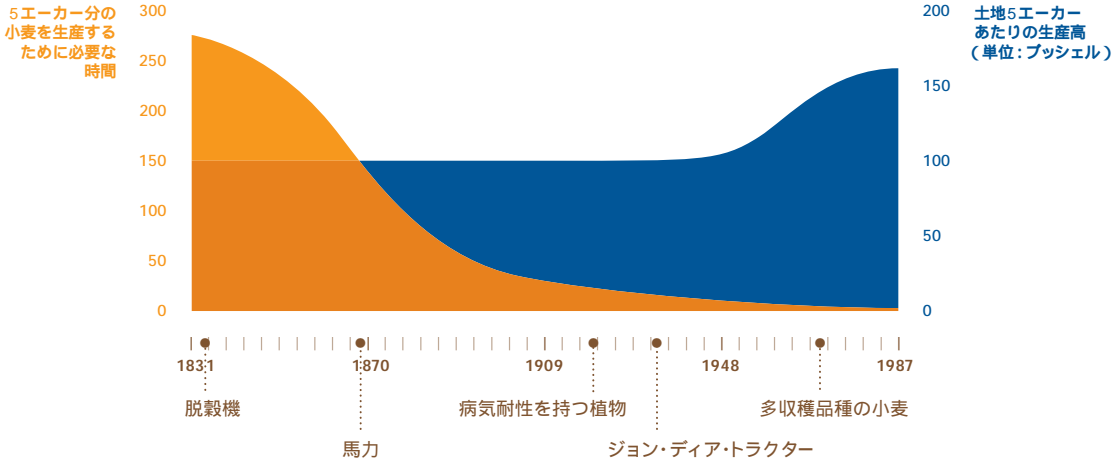
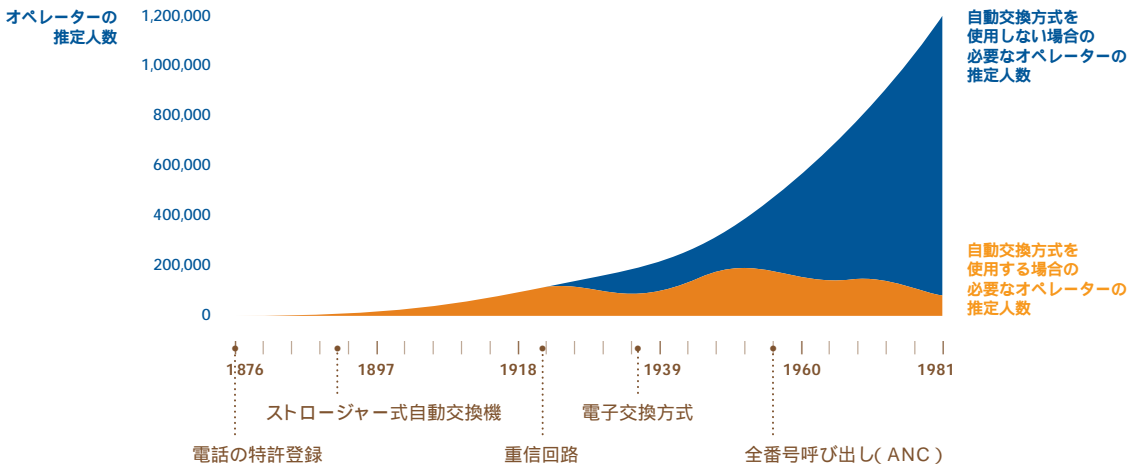


図2

## 電話通信の進歩 (米国のみ)

AT&T/Bellシステムが1920年代に自動交換プロトコルを実用化したことで、電話交換手を増やさずに電話機の需要増に対応できました。(資料: AT&T/Bellシステム)



インターネットにより、コンピューターおよびコンピューティング・システムの世界が通信ネットワークと接続するようになったため、新たな複雑さが加わっています。この過程でコンピューティング・システムはますます管理するのが困難になり、結果的に使いづらいものになってしまいました。2つの異なるプラットフォーム上で構築されたITシステムを統合しようと試みたことのある人にたずねてみてください。あるいは、お客様のなかでご家庭で高速のネットワーク接続を試みた方に聞いてみてください。

**事実、ITのインフラストラクチャーが複雑化した結果、ITが本来もたらすべき恩恵を損なう事態がおきています。** これまではおもに人手を介して管理することで複雑さに対処してきました。しかし、残念ながら、こうした手作業にはすでに限界が見え始めているのです。

IT分野での人材不足について考えてみましょう。現在のペースでIT産業が拡大していくと、世界のコンピューティング・システムを稼働し続けるために必要な熟練したIT技術者の数は不足してしまいます。米国だけでもIT分野での仕事には数十万人もの求人があります。経済情勢が不安定な現在ですら、熟練したIT技術者の需要は今後6年間で2倍以上になると見込まれています。今後10年間で、世界でインターネットに接続するユーザーが10億人、企業は数百万社に達するとも言われます。こうした人々をサポートするには、米国の人口に匹敵する2億人以上のIT技術者が必要になるという予測もあります。

人手不足をなんとか解消できたとしても、コンピューティング・システムは人間の管理能力を超えて複雑化していきます。コンピューティング・システムが進化するにつれて、ネットワーク接続は重複し、システム要素は相互に依存し、アプリケーション同士は相互作用するため、これらを管理するには、人間の能力を超えた迅速な意思決定と対応が要求されます。システムの効率化を図ることにより、人間の手に負えないようなさらに複雑な問題が生じ、そんな中でシステム障害の根本的原因を特定するのはいっそう困難になります。

新しいアプローチをとらなければ、事態は悪化するばかりです。しかし皮肉なことに、この問題を解決しようとすればするほど、つまり、システムをIT管理者とユーザーにとって使いやすくしようとすればするほど、**いっそう複雑なシステムを創る必要がでてくるのです。**

## 新しいアプローチとは？

それは、システム・インフラストラクチャー自体(ハードウェア、ソフトウェアの両方)に複雑さを埋め込んでしまい、その管理を自動化するというものです。この考えは、人体の非常に複雑なシステムからヒントを得ることができます。

私たちの体で機能している自律神経系に目を向けてみてください。自律神経系は体内のいたる所に張り巡らされていますが、それに気づくことはほとんどありません。

自律神経はさまざまな働きをします。心拍数を決めたり、血糖値や酸素レベルをチェックしたりします。あなたがこの文章を読んでいる今も、適量の光が入るように瞳孔を調節しています。体温を監視して、36.5 を維持するように血流と皮膚の機能を調整するのも自律神経の役割です。さらに、食物の消化を調整し、ストレスへの反応も制御します。ひどい恐怖感を覚えたときには髪の毛を逆立てることもできます。自律神経は、「ホメオスタシス」と呼ばれる一定の体内環境を常に維持しながら、外部の多種多様な条件に対して自律神経の機能を発揮し、同時に、当面の事態に体が対応できる態勢を整えます。(図3参照)

しかし、自律神経の働きで最も意味があるのは、これらの働きが私たちが無意識のうちに、さりげなく行われているということなのです。そのおかげで、私たちは自律神経の仕組みを考えずにやりたいことだけを考えていれば済みます。たとえば、どのくらい呼吸数や心拍数をあげたらよいかなどと考えずに全力で電車で駆け込むこともできますし、電車のドアが閉まる直前にはアドレナリンが多少必要なことなどを考えずに済むのです。

自律神経系はあたかもこう言っているかのようです。「私の役割について心配するな。考える必要などない。私がすべて対処するから」と。

これこそが、コンピューティング・システムの構築に必要とされること、つまり、私たちが提案する、自律的に動作する「オートノミック・コンピューティング」なのです。



今こそ、

自律的に動作し、環境の変化にも適応する、そしてシステムへの作業負荷を最も効率よく処理するためリソースを配分するコンピューティング・システムを設計・構築すべきです。このような自律的なシステムなら、必要なことを予測・実行してくれるので、ユーザーはシステムの設定方法を考えることなく、目的達成だけに集中することができるのです。

**オートノミック・コンピューティングの実現を急ぐのはなぜでしょうか？**  
それは、次に述べるように、新しいe-businessテクノロジーを採用する組織が大きな課題に直面しているからです。

アクセス装置の数が激増し、企業のコンピューティング・インフラストラクチャーの構成要素になりつつあります。これに伴い、企業は社員、そしてお客様やサプライヤーと接続するために、自社の情報システムやビジネス・プロセスを変更する必要に迫られています。デスクトップ、ワークステーション、PCはもちろん、PDA、携帯電話、ポケベルなどにも対処しなければなりません。今後3年間でこれらの装置は、世界で年平均38%以上の伸び率で増加すると予想されています。企業はまた、自社製品(ネットワーク対応の自動車、洗濯機、エンタテインメント・システムなど)自体も、こうした統合システムの一部として管理しなければなりません。旧来のシステムに対する概念を、各企業の枠の外へと大きく広げるのです。そのためには、急激な成長に対応でき、しかもシステムの複雑さをお客様、社員、サプライヤーに意識させない信頼性の高いインフラストラクチャーが必要なのです。

「Webサービス」に関するさまざまな標準規格が作成され、インターネット上で有益なサービスを提供できるようになるでしょう。InfoWorldの最近の調査では、70%近くが2001年までにWebサービス戦略を展開すると回答しています。インターネット関連で成長が見込まれる次世代ビジネス・モデルはWebサービスだ、と考えている人も同じく70%程度に上りました。特にITサービスは、電気・ガスなどのユーティリティのように提供できるサービスとなるでしょう(これをIBMでは「e-sourcing」と呼んでいます)しかし、こうしたサービスが実際に普及するには、ITシステムの自動化が進み、e-sourcingの供給者にとって市場の拡大につれ、より経済的なサービスの供給が可能になるという経済性が実現されなければなりません。お客様も、重要な事業データやプロセスを任せられるほど、このビジネス・モデルを十分に信頼する必要があります。不足しているIT技術者にシステムの信頼性の維持を依存しては、新しいビジネス・モデルに対する信頼感は育ちにくいでしょう。

複雑なシステム管理を著しく自動化させるための基礎技術はすでに成熟し、革新に向けた準備ができています。たとえば、XMLや多くの新しい標準規格が出現しました。これらの規格は、自己管理システム同士を結びつける接着剤の働きをしていくでしょう。また、ワークロード・マネジメントやソフトウェア・エージェントの進化により、オートノミック・コンピューティングへの道が着実に開けてきています。

しかし、コンピューティング・システムの個々の  
パーツを自動化するだけでは  
**不十分です。**

もう一度、私たちの自律神経系の働きを考えてみましょう。

自律神経は、体の一部分だけでなく体の仕組み全体を自己制御して初めて恩恵をもたらすのです。

呼吸と血圧が調節されずに心拍数が上がると、非常に悲惨な結果になります。同様に、たとえ脳幹が機能していても、指令の行き先である器官や筋肉と「常につながって」いなければ、脳幹の機能も無意味となってしまいます。

オートノミック・コンピューティング・システムにも同じことが言えます。ストレージ・システムに自律機能を加えることは確かに改善にはなりますが、保存場所からデータを取り出すコンピューティング・システム自体の自己管理がほとんど不可能なら、自動化は部分的にしか実現せず、全体としてはあまり多くのメリットを得られません。

こうしたことから、コンピューティング・システムのネットワーク全体での調整と管理の自動化を実現できるような、一貫したアプローチが必要なのです。ここで言うコンピューティング・システムとは、多種多様なプラットフォーム上に構築され、さまざまな企業や団体に所有される(ときには共有される)システムです。したがって、**オートノミック・コンピューティングとは、コンピューティング全体の自動化を可能にする全体的なビジョン**であり、個々のパーツを自己管理できるようにしてそれを統合するというアプローチより、はるかに高度な自動化を実現することができます。

システム全般の信頼性やITユーザーにとっての「使いやすさ」以上のことが問われています。ITの複雑さをインフラストラクチャーの中に埋め込み、ユーザーの意識から効果的に消し去って初めて、IT主導の経済的な生産性を向上させることができます。たとえ現在のIT技術をお客様にとってより使いやすいものにしたとしても、常に予測できないような新しいアプリケーションが生み出され、それに絶えず対応していかななくてはなりません。

インターネットとPCが起した変革によって、必然的に一般の人々が急速にコンピューターを利用するようになりました。それでも、世界の大多数の人たちはいまだにコンピューターに触ったこともなければ、コンピューターの潜在的な能力から直接恩恵を受けたこともありません。こうした人々がコンピューターを使用できるようにするには、コンピューティング・システムとのやり取りをもっと自然な形にする必要があります。では、どのくらい自然にすればよいのでしょうか。

1960年代の遠い昔、カーク船長と船員たちはコンピューティング・システムから情報を得ていました。簡単な質問をして、簡潔な答えが返ってきます。しかし、船内にはIT管理者など一人もいません。このようなことを今日多くの人々が期待するようになりました。人と話すようにコンピューターとやり取りしたい。しかも、人間には不可能な情報処理能力をシステムに持たせたい。このようなことが本当に実現するのはまだ先のことのように感じられますが、

この考えを日々のビジネスに適用したらよい  
のではないのでしょうか。

現状に目を向けると、たとえば、なぜ企業のオーナーたちは莫大な時間とお金をかけてITシステムを導入し管理する方法を思案しなくてはならないのでしょうか？エンタープライズ・リソース・プランニング(ERP)システムによっては、インストールとカスタマイズの料金が導入時のライセンス費用の何倍もかかることがあります。本来、企業のオーナーが一番考えなくてはならないのは、**自分の会社がなにを達成すべきか**であるはず

ITのユーザーであるお客様に、何を求めているかを尋ねてみてください。きっとこんな答えが返ってくるでしょう。「**私たちは、たとえばセキュリティなどのポリシーの設定に専念したい。そして、その実現にあたっての詳細はシステムがやってくれば良い**」と。プログラミング言語が自然言語に近づいてきたのと同様に、企業は将来、コンピューティング・システムへの指示を簡単な話言葉で行えるようになるはず。たとえば「**競合他社を監視しなさい。特定のマーケットでわが社が負けていたら、価格を調整し、その新しい価格に対応できるようにサプライ・チェーンを調整しなさい**」というように。

ITユーザーであるお客様が真に恩恵を受けるためには、オートノミック・コンピューティングがITシステムとのやり取りを改善し、ITが提供する情報の質を向上させ、e-sourcingというITサービスを提供するための新たな手法を取り入れることで、明確な利益と機会を提供する必要があります。

そうすれば、お客様は必要とする情報サービスを十分に享受することができ、情報サービスを提供するシステムのことは「**忘れる**」ことができるのです。

オートノミック・コンピューティングの可能性を図で示します。

図4

## 数百店もの小売店を持つ大規模小売りチェーンの例

倉庫網、配送組織、各種の社員向けサービス、カスタマー・サービス・コール・センター、Webインターフェースをはじめ、多種多様なものが別々に（外見上は独立して）存在していますが、オートノミック・コンピューティング・システムがこれを1つのものとして管理します。また、Webをインターフェースにして「常時」アクセスが可能だけでなく、時間に応じてさまざまな統合サービスを提供します。

お客様、社員、サプライヤーが使用するあらゆる種類のアクセス機器をサポートします。

世界各地にサプライヤーが点在し、サプライ・チェーンの管理業務が複雑多岐にわたる場合でも、オートノミック・システムで対応します。

ひとつに統一されたITインフラストラクチャーが、実際の小売店とオンラインショップの双方でお客様、サプライヤーをサポートします。

ビジネス上で起こる問題によっては、管理ルールやガイドラインに従って自動的に処理します。たとえば、在庫の少ない区域に商品をまわしたり、最新の気候と経済傾向のモデルに基づいて、在庫の発注と商品の価格を調整します。（例：猛暑が続く＝扇風機の需要が高くなる。）

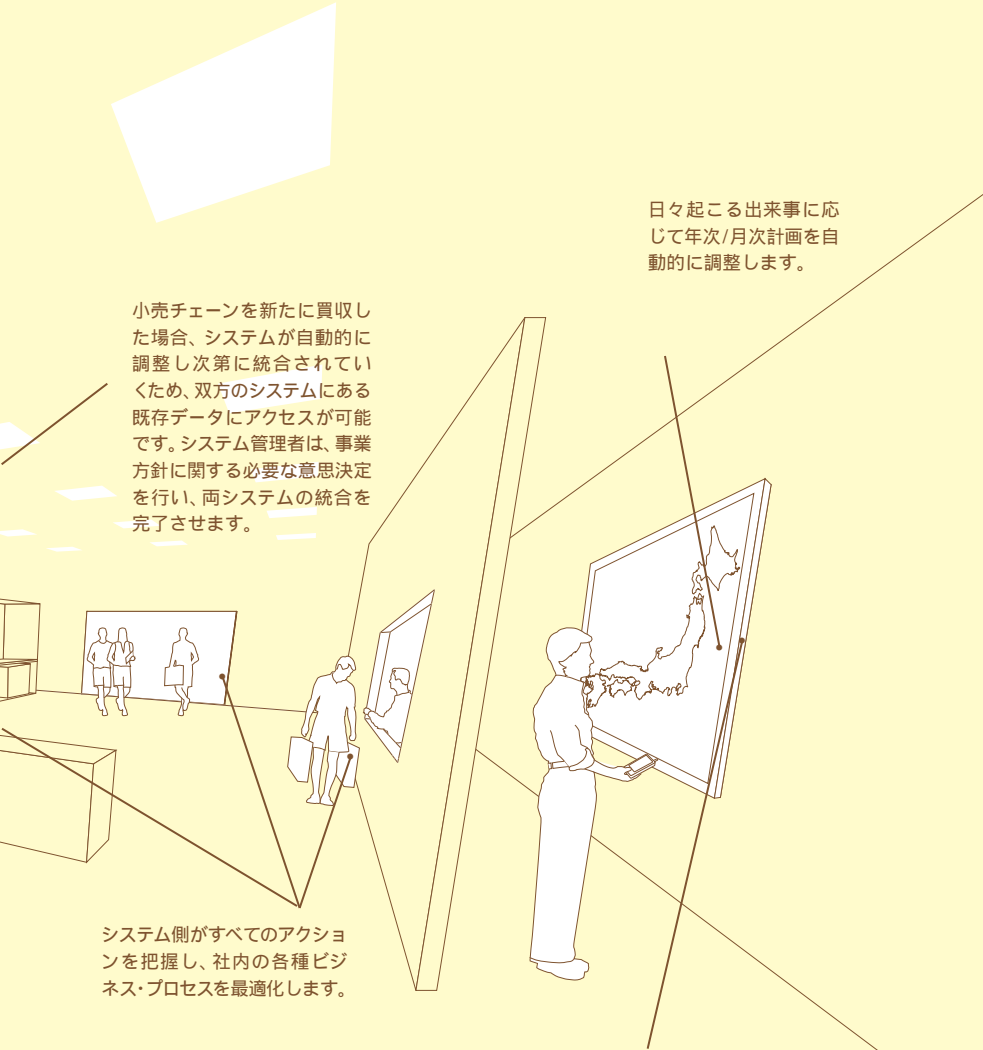


日々起こる出来事に  
応じて年次/月次計画を自  
動的に調整します。

小売チェーンを新たに買収し  
た場合、システムが自動的に  
調整し次第に統合されてい  
くため、双方のシステムにある  
既存データにアクセスが可能  
です。システム管理者は、事業  
方針に関する必要な意思決定  
を行い、両システムの統合を  
完了させます。

システム側がすべてのアクショ  
ンを把握し、社内の各種ビジ  
ネス・プロセスを最適化します。

ビジネスを有機的統一体として  
リアルタイムでビジュアル化し  
ます。つまり、売り上げ、コスト、  
在庫、最も効率のよいマーケッ  
ト等、数千店の小売店の状況を  
現在図として常時把握し、これ  
により経営陣はスピーディーな  
意思決定が可能です。



最初の診断時に患者の意識がなくても、海外に存在する記録(家族の病歴、X線写真、MRI画像など)に瞬時にアクセスできます。これにより一般的な診断を省き、手術を必要とする深刻な病気の診断を行います。

医師は現在使っている薬の処方やアレルギー、可能性のある相互作用を調べることにより、使用する麻酔の種類を決定します。

治療方法を検討するとき、患者のDNA記録と既知のゲノム・データを比較します。スーパーコンピューター上で新薬に対する患者それぞれの全身反応をシミュレーションし、可能な限り最善の薬剤療法を確定します。



ある地域で停電や暴風、ネットワーク・トラフィックの混雑などが発生しても、世界各地の医師や病院が持つ多種多様なシステムで構成されているネットワークの信頼性が損なわれることはありません。

図5

## 海外の医療現場で緊急事態が発生した場合

この種の緊急事態に対処するには、複数の異なるシステムに瞬時にアクセスして、それらのシステムを統合する必要があります。グローバルな医療基準にもとづくオートノミック・システム・マネジメントを使えば、別個のシステムがひとつのシステムのように動作し、データを相互に交換したり統合することができます。その結果、迅速・正確に診断でき、最善の救急救命処置をとることができます。

システムは保険記録とリンクしており、必要な承認の入手とフォームの提出を行います。



記録へのアクセスと入力信頼性の高い情報源を通じてのみ行い、ソフトウェア・エージェントに埋め込まれた標準の医療プロセスにもとづいて完全に機密保持されます。

図6

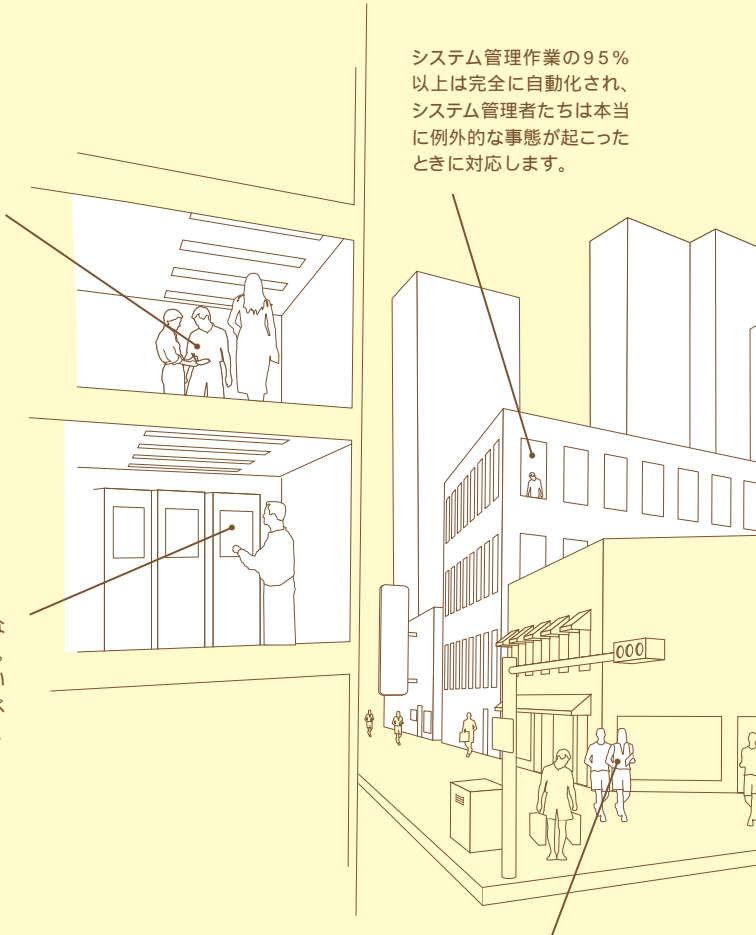
e-sourcingのプロバイダー1社だけで、フォーチュン誌500社に入る大企業から個人ユーザーまで、数千人ものお客様にサービスを提供します。オートノミック・コンピューティング・システムなら、さまざまなサービスの提供が可能です。またグローバルなIT インフラストラクチャーを通じて、収益性を高めると同時に多様なお客様のニーズを集約できます。

お客様は複数のe-sourcingプロバイダーと契約してコストを最小化し、かつ冗長度を高めることができます。たとえば、ある場所のe-sourcingプロバイダーと締結するサービス・レベル保証契約(SLA)では、午前8時~午後5時のピーク時間は高めの料金が設定されることがあるので、お客様のオートノミック・システムにより、この時間帯は地球の裏側にあるプロバイダーへと自動的に切り替えることも可能です。

冗長性を分散させて重要な顧客データを保護します。有償でデータを保護したいお客様に対して、最高レベルの保全性を保証できます。

システム管理作業の95%以上は完全に自動化され、システム管理者たちは本当に例外的な事態が起こったときに対応します。

アクセス機器もシステムの一部として自動的に管理されるため、お客様がどんな機器を使用してアクセスしても対応できます。

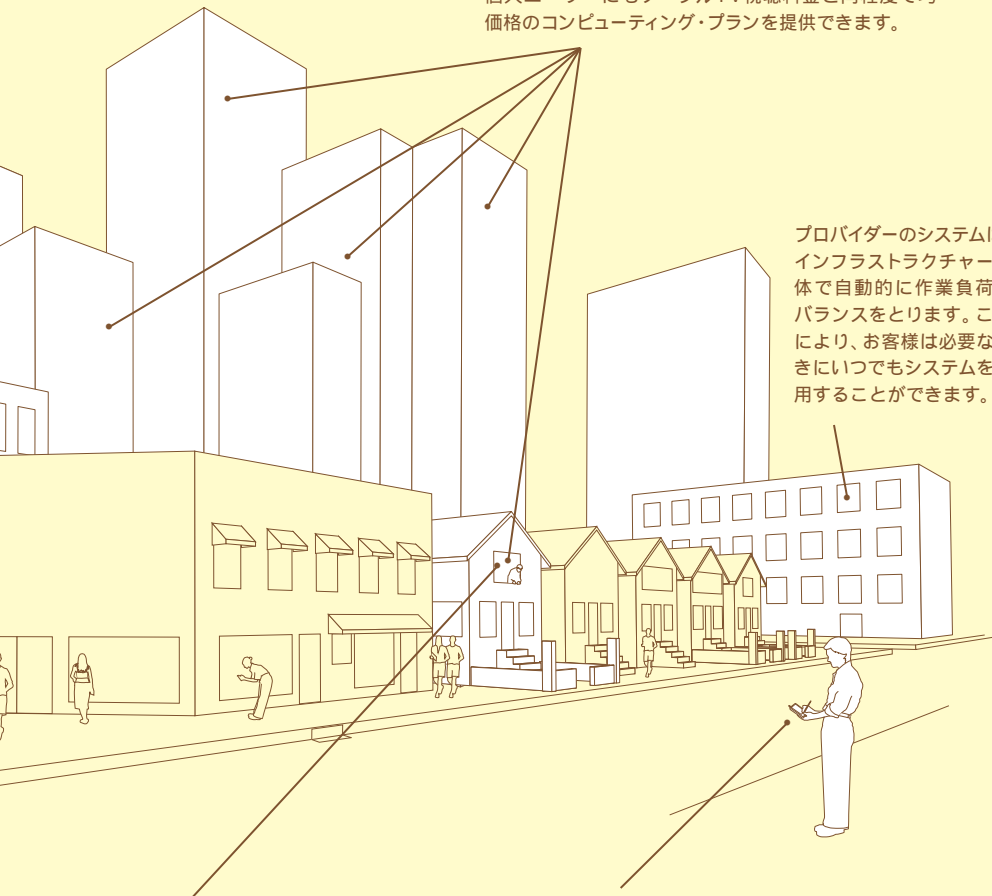


さまざまな「サービス品質(QoS)」契約があり、大企業から個人まであらゆるお客様に対応できます。このサービス品質契約はITシステムに関する方針という形で具体化されます。その結果、フォーチュン誌500企業のすべてのITニーズを処理するのと同じユーティリティを使って、個人ユーザーにもケーブルTV視聴料金と同程度で均一価格のコンピューティング・プランを提供できます。

プロバイダーのシステムは、インフラストラクチャー全体で自動的に作業負荷のバランスをとります。これにより、お客様は必要なときにいつでもシステムを使用することができます。

お客様は、スーパーコンピューティングを利用するなど、特別な課金サービスを購入することも可能です。

プロバイダーは最新のアクセス機器を無償提供するプランをお客様に提案します。多くのお客様はもはやコンピューター機器を所有しませんが、コンピューティング・サービスへの依存度は従来に増して高くなります。



これほどの機能は簡単には実現しないでしょう。前の図で紹介した内容は、次世代コンピューティングへのアプローチというよりは、完璧な解決策を示しているかのようです。実際は、次世代にもたらされるものについて、私たちが描いた想像の一端にすぎません。しかし残念ながら、現行と同じ方法でシステムやITの複雑さを管理し続けていたら、次の時代はいつになっても訪れません。

## オートノミック・コンピューティング・「システム」が必然的な答えであるとしたら、これらの特徴は何でしょうか。

まず、「システム」を定義してみます。システムとは、複数のコンピューティング・リソースが集まり、互いに接続して特定の機能を実行するものと考えられます。このロジックに沿って考えると、サーバー1台だけでも1つのシステムになります。1つのチップに各種の集積回路を搭載したマイクロプロセッサ(いわゆる「システム・オン・チップ」)もシステムになり得ます。このような下位層のシステムの組み合わせにより大型のシステムを構成していきます。たとえば、複数のマルチプロセッサがサーバーを構成し、ストレージ、クライアントあるいはアクセス機器などが接続されてネットワーク・システムになります。オートノミック・コンピューティングを定義する要素の大部分は上位層の大規模システムを指しますが、オートノミック・コンピューティングの原則はどのシステムにも適用されます。つまり、どのレベルでもシステムは自分自身のプロセスを管理できなければなりません。

人間の体も似たような自己統制の階層構造を成し、単独の細胞から臓器や器官系を構成しています(自律神経系もそのひとつです)。どの階層も多少の独立性を維持しながらより上位の組織に貢献し、最終的に「人間」という生命体に到達します。ありがたいことに、私たちは、自分の体のしくみが日々どのように管理されているかほとんど知らないまま過ごしています。これは、通常体内の各システムが個別に自主管理し、手助けが必要なときだけ上位機能へと「エスカレーション」しているからなのです。

オートノミック・コンピューティング・システムにも同様なことがあてはまります。結局、人間が行う作業を単純化するために人間が定期的に介入せず、システムを構成する個々の階層レベルと構成要素となる各機器がシステムに貢献し、システムはそれだけで十分に機能できなければなりません。このような高度なレベルのシステムは、少なくとも以下の8つの要素を備えたものとなるでしょう。

# 1

自律的であるためには、コンピューター・システムは「己を知る」必要があります。そして、各構成要素もまた、個別の識別子(アイデンティティー)を持つ必要があります。

場合によっては多くの階層で「システム」が存在するため、オートノミック・システムは自身を構成する要素や現在の状態、能力の限界、他のシステムとの接続状況などを詳しく知っていないと、自己を制御することはできません。加えて、自分が持っているリソース、貸し借りできるリソース、共有できるリソース、隔離すべきリソースがそれぞれどの程度あるかも把握する必要があります。

上で述べた定義は簡単に思われるかもしれませんが。確かに、「コンピューター・システム」が一部屋で収まるようなマシンや、数百台の小型マシンが同じ敷地内にある社内ネットワークで接続されていることを意味するのであれば簡単かもしれません。しかし、その数百台のコンピューターがインターネット経由でさらに数百万台と接続し相互に依存している場合、または現在普及しているアクセス機器(携帯電話、テレビ、情報家電など)を介して世界中のユーザーがこの数百台のコンピューターに接続したら、どうでしょうか。当初は明確だった「システム」のコンセプトも不明瞭になっています。まず、これらの装置すべてが処理サイクル、ストレージ、その他のリソースを共有できるようになり、これにコンピューティング・サービスをユーティリティーのように貸し出す可能性も加わります。すると、ひとつの「システム」を表すどんな定義もあてはまらないような状況に到達してしまいます。

しかし、システム全体レベルでの自己認識こそ、オートノミック・コンピューティングに必要なことなのです。どんなシステムでも、存在を確認できないものや、明確でない制御領域を監視することは不可能です。

自分自身を知る能力をコンピューティング・システムの中に構築するには、適応性のあるソフトウェア・エージェントによる明確なポリシーが、システム自体とその周辺のITシステムとの相互作用を認識し管理運営する必要があります。加えて、一時的にせよ他のシステムと自動的に統合して新しいシステムを構築したり、逆に必要に応じてシステムを分離させる適応能力も必要でしょう。

# 2

**オートノミック・コンピューティング・システムは、変化する予測不可能な状況のもとでも、自己を自らの力で構成し直す必要があります。**

システムの構成(セットアップ)は自動的に行われなければなりません。同様に、変化する環境に的確に対処するため、システムの再構成を動的に行う必要もあります。

複雑なシステムでは、さまざまな設定の組み合わせが可能なため、システム全体の構成は困難をきわめ、時間もかかります。1台のサーバーでも数百通りの設定方法が存在します。システム管理者が、サーバーやその他のシステム装置が数千台集ったシステムを数秒・数分毎に再構成しようとしても、監視・調整すべき項目があまりにも多すぎて、人間には不可能な作業なのです。

自動的に構成を行うようにするためには、システム側でOSなどの重要ソフトウェアのイメージを複数作成し(一種のソフトウェア・クローニング)必要に応じてリソース(メモリー、ストレージ、通信バンド幅、プロセッシングなど)の割り当てをやり直す必要があります。世界各地に分散しているシステムの場合、ネットワーク内のある部分が障害に陥ったときは、その復旧のために複数のイメージとバックアップ・コピーを利用することも必要となります。この種のシステムで適応アルゴリズムが動作していれば、最善の構成を習得でき、必要なパフォーマンス・レベルを達成することができます。

# 3

## オートノミック・システムは、現状に満足することは決してありません。常に自己最適化の道を探ります。

システムは自己のサーバーや機器といった構成要素を監視しワークフローを微調整しながら、所定の目標を達成します。これは、指揮者がオーケストラに耳を傾け、ダイナミックかつ表現力豊かな演奏者の特性を調整しながら、目標とする演奏を達成するのに似ています。

企業、お客様、社員、サプライヤーがそれぞれITに対して要求することは複雑で、お互いに対立することも多々あります。そうした多様なニーズに対応するには、コンピューティング・システムが一貫して自分自身を最適化していく以外に方法はありません。その上、これらのニーズを生み出す元となる優先順位も絶えず変化しているので、常にシステムを最適化しなければ、その変化にも対応できません。

e-sourcingを実現・浸透させる、つまり、コンピューティング・サービスを電気やガスと同じように提供する上でも、システムの最適化が重要なカギです。e-sourcingが実現すれば、ITユーザーにとっては確実なコスト予測が可能になり、コンピューティング・システムが使いやすいものになります。その反面、コンピューティング・サービスのプロバイダーにとっては、お客様に保証したサービス内容を確実に提供するため、作業とシステム・リソースの優先順位をつけ、補助的な外部リソース(ストレージの外部委託、余分な処理サイクルの準備など)も検討することが必要になります。これはちょうど、現在の電力市場で電力会社が余剰電力を売買するのと似ています。

しかし、システムの自己最適化を可能にするには、自己のメトリクス(管理尺度)を監視し、適切な措置をとる先進的なフィードバック制御メカニズムを必要とします。フィードバック制御自体は古い手法ですが、コンピューティングに応用するための新しいアプローチが必要になるでしょう。システムが制御措置をとる頻度、措置を実行してから効果が現れるまでの許容できる遅延時間、システム全体の安定性に与える影響などの問題についても、明確な答えを出す必要があるでしょう。

制御理論をコンピューティングに応用する際の技術革新は、制御目的を念頭に置き、システム全体のアーキテクチャーと連携して進める必要があります。制御アルゴリズムは、内部のメトリクスにアクセスし、ラジオのチューニングのつまみのように簡単に調整できなければなりません。

最も重要なことは、オートノミック・システムの多種多様な構成機器・装置を一体化してコントロールしなければならない、ということです。

# 4

オートノミック・コンピューティング・システムは、自己治癒が可能でなければなりません。部分的な機能不全を引き起こす、日常的な事態や異常事態から回復する力が必要です。

現在起こっている問題や潜在的な問題を発見し、リソースの使い方、あるいはシステムの再構成について代替策を探し、システムが円滑に動作できるようにしなければなりません。コンピューティング・システムの自己治癒機能とは、人間の細胞のように補充個所を「成長させる」のではなく、あまり使われていない余分な要素を代替品として機能させることを意味します(ある意味では、脳の一部が損傷したときの脳の働きに似ています)

もちろん、すでにコンピューティング・システムの一部となっている修復機能も存在します。たとえば50年以上も使われているエラーの検出・訂正技術のおかげで、インターネットを介して転送されるデータは非常に高い信頼性を維持しています。また、RAIDのような二重化されたストレージ・システムを使えば、ストレージ・システムの一部が故障してもデータを復元できます。

ところが、今日のIT環境はますます複雑化し、比較的単純な環境でも障害の原因を見極めるのは一段と困難になってきています。パーソナル・コンピューターでも状況は同じです。解決策としてシャットダウンと再起動を行い、問題が解決したかどうかを確認する作業をしたことが幾度となくあるはずです。

複雑なシステムの場合、障害の原因を把握するには根本的な原因の解析(何が何に対してどう起こったかを系統だてて調査し、問題の核心に近づく試み)が必要です。しかし、一番大事なことは、中断時間を最小にしてお客様へのサービスを再開することです。オートノミック・システムでの解決方法とは、アクションを優先するアプローチ(今ある情報をもとに、直ちにとるべき対策を決定すること)をとることになります。

最初はそれを専門とする人間が作成したルールに従って修復対応を行います。コンピューティング・システムに埋め込まれるインテリジェンスが強化されるにつれて、システムの二重化した部分や追加リソースの使用に役立つ新しいルールをシステムがおのずと発見し、障害から復旧することができるでしょう。そして、第一の目的である「個々のユーザーが指定した目標を達成する」ようになるでしょう。

# 5

仮想世界も現実の世界と同じように危険なものとなっています。このためオートノミック・コンピューティング・システムは、自己防衛のエキスパートである必要があります。

さまざまな攻撃を検出・識別し、攻撃から自分を守り、システム全体の安全性と信頼性を維持しなければなりません。

インターネットが登場する前、コンピューターは孤島のように動作していました。「ウイルス」と呼ばれる攻撃からコンピューター・システムを保護するのもきわめて簡単でした。プログラムやファイルを共有するにはフロッピー・ディスクを使用し、そのディスクを郵送したり相手先まで持ち込んだりしていたため、ウイルスが広がるまでに数週間から数ヵ月もかかりました。

ところが、ネットワークで世界がひとつにつながることによって事態が一変しました。今ではどこからでもウイルスが侵入してきます。しかも、他のユーザーに自動的に送信されるように作られているため、数秒という短い時間で広い範囲に広がってしまいます。会社のデータ、イメージ、業績に与える潜在的な損失の大きさは測り知れません。

単に構成機器の障害に対応したり、症状を定期的にチェックするだけでは不十分です。オートノミック・システムは常に油断することなく警戒し、脅威を予測し、必要な措置をとる必要があります。次の2種類の攻撃に対してはこれらの対応がなされなければなりません。ウイルスとハッカーの侵入です。

人の免疫系をまねた「デジタル免疫システム」という方法がすでに存在します。このシステムは、疑わしいコードを検出して自動的に中央の解析センターに送り、コンピューター・システムに治療法を配信してくれます。このプロセスはユーザーがまったく気づかぬうちに行われるのです。

ハッカーからの悪意ある攻撃に対処するには、侵入検知システムが自動的に攻撃を察知し、システム管理者に警戒を呼びかけなければなりません。現状では、コンピューター・セキュリティの専門家が問題を調査・解析して、システムを修復しています。今後コンピューター・システムとネットワークがますます拡大し、ハッカー攻撃の危険性が高まるにしたがい、修復プロセスの自動化をさらに進めなくてはなりません。個々の攻撃に対処する専門家の数が不足するからです。

# 6

**オートノミック・コンピューティング・システムは、その動作環境と状況を認識するとともに、それに対応して動作する必要があります。**

これは、オートノミック・システムの自己最適化能力を外部環境に応用することです。つまり、周辺のシステムを見つけ、やり取りするために最善のルールを自分で作成します。使用可能なリソースを引き出し、ときには、あまり活用されていないリソースの使い方について他のシステムと交渉し、その間、自分自身と周囲の環境を変化させます。ひとこと言えば「適応する」ということです。トランザクションの状況に関する知識にもとづいてサービスを改善することも、こうした状況適応能力のひとつです。

オートノミック・システムに適応能力があれば、予想される状況下だけでなく、さまざまな状況が複合した環境(予測し得ない事態に対処する日がやって来たとき)でも信頼性を維持できます。しかし、これ以上に重要なことは、混乱を招くようなデータではなく有益な情報を提供できるようになることです。たとえば、凝ったWebページを表示させようとしても、ユーザーが携帯電話の小さい画面でネットワークに接続していて、単に最寄りの銀行の場所を知りたいだけとしたら、全部のデータを配信するのは明らかに行き過ぎです。同様に、原価変動をタイムリーに教えてくれる業務システムがあったとしても、お客様向けに提案書を作成している営業担当者にすぐ送る必要はないのです。1週間に一度程度の更新で十分です。

オートノミック・システムは、自分自身の説明や使用可能なリソースについての情報も他のシステムに伝えることができなくてはなりません。また、周辺に存在する他の機器を自動的に発見できるようでなくてはなりません。現時点では、「グリッド( Grid )」を介してスーパーコンピューターのリソースを共有し、相互に接続する試みがなされています。こうした活動が、環境対応能力を実現するための技術の誕生に貢献するのは確実です。さらに、システムにユーザーの動作を認識させるには、与えられた状況下でシステムに最適な対応を判断させるアルゴリズムなど、さらなる進歩が必要です。

# 7

## オートノミック・コンピューティング・システムは、外部とのコミュニケーションを必要とします。

オートノミック・コンピューティング・システムは、自身を管理するという能力の面では独立していますが、多種多様なコンピューティングの世界で機能し、オープン・スタンダードを実現できなければなりません。言い換えれば、オートノミック・コンピューティング・システムは、その定義により、オープンなソリューションでなければならないのです。

自然界では、あらゆる種類の生物が自らが生存していくために共存し、相互に依存しながら生きています。( 実際、こうした生物の多種多様性が生態系の安定に寄与しています ) 現在のようにコンピューティング環境が急速に進化し続ける状況では、これに似た共存・相互依存を避けて通ることはできません。企業はサプライヤー、お客様、パートナーと接続していますし、個人もハードウェアやアプリケーションの種類にかかわらず、取引銀行、旅行代理店、ひいきのお店などと接続しています。技術が進歩すればするほど、私たちはもっぱら新しい発明や新しい装置を期待するようになり、それに付随して選択肢や相互依存度もいっそう増加することになります。

情報科学の世界では、新しくオープンな標準規格を作る共同作業により、従来にないタイプの共有が可能になりました。たとえば、Linux( オープンなOS ) Apache( オープンなWebサーバー ) UDDI( 自分の会社について記述し、他社を検索し、他社と統合する方法の標準規格 )などの革新技术が生まれました。グローバス( Globus )プロジェクトでは、コンピューターのリソースを分散環境で(あるいはグリッドのように)共有させるプロトコル群が作成されました。こうした各種コミュニティの活動によりオープンな標準規格化が加速し、オープン・プラットフォーム用のツール、ライブラリー、デバイス・ドライバー、ミドルウェア、アプリケーションなどが開発されています。

オートノミック・コンピューティング・システムが進歩するには、このようなオープンな標準規格という基盤が必要です。具体的には、システムの識別、通信、交渉をするための標準の方法を作成し合意する必要があります。どのシステムにも中立的な新種の仲介役、あるいは相容れないリソースの要求を調整するサイバー外交官的な役割を担う「エージェント」も必要になるでしょう。

# 8

おそらくユーザーにとって最も重要なことは、オートノミック・コンピューティング・システムが内部の複雑さを隠し、必要とされる最適なリソースを予測することです。

これこそがオートノミック・コンピューティングの最終目標です。つまり、遂行に人間の手を煩わせることなく、お客様の事業目標あるいは個人目標と、その目標達成のためのIT遂行のギャップを埋めるためのITリソースの運用実施計画です。

お客様は現在、あらかじめシステムの操作、システムとのやり取り、システムが提供するさまざまな情報の収集・比較・解釈の仕方を学んでから、何をすべきかを決定しています。そうしないとコンピューティング・システムに適応できません。特定のお客様用に作った特注システムですら、社内のデータやドキュメントはもちろんのこと、社内の他のITシステムととぎれなくスムーズにやり取りできることはまれです。確かに、一般ユーザーにとって改善された点もいくつかあります。たとえばグラフィカル・ユーザー・インターフェースは、コマンド・プロンプトとそのコマンド・ディクショナリーを使用していた時代と比べてはるかに使いやすくなりました。しかし、ITシステム全体の潜在能力を完全に引き出すのは、まだ非常に困難な状況です。

ところで、これは、オートノミック・コンピューティング・システムがユーザーのITニーズを予測し、指示すらできるような人間の知性を持ち始めることを意味するのでしょうか。答えはNoです。人間の体との類似性をもう一度考えてみましょう。特に、自律神経系の中で「攻撃・逃避反応」と呼ばれる働きについて考察してみます。

緊急事態や危険な状態に直面したとき、私たちが認識する前から自律神経系は危険性を予知しています。次に、適切な対応を選択するために身体を「最適化」します。具体的には、自律神経系が副腎を促して体内にアドレナリン(筋肉の収縮力を高めるホルモン)を流し込み、心拍数と呼吸数を上げ、血管全体を圧縮して血圧を上昇させます(一方、骨格筋などの重要部位に流れる血管は拡張させます)。その結果、私たちの体は次に起こす行動の準備が完璧にできていますが、意識の上では、その場にとどまって行動するか(攻撃反応)、逃げだすか(逃避反応)を決めるのに必要ないくつかの重要な情報を除いて、何も認識していません。

オートノミック・システムなら、このような予測と支援が可能になります。システムの最適化と、ユーザーの決定を実行する準備に不可欠な情報を提供します。しかも、システムから結果を得る際にお客様を不要に巻き込むこともありません。

**現実的には**、こういったシステムを構築するのは非常に難しく、新しい技術革新をさらに探求する必要があります。だからこそ、私たちは、オートノミック・コンピューティング・システムをIT産業全体にとっても「最大の挑戦」ととらえています。これを**実現するには、2本の柱に沿って進行する必要があります。**

ひとつはシステムの個々の構成要素を自律化すること、もうひとつは、**グローバルな企業ITシステムのレベルで自律的な動作を実現することです。**

2つ目は非常に高いハードルとなるでしょう。システムの各構成要素が他のパーツとそれぞれ情報を共有し合ってシステム全体の認識と調整に貢献しない限り、オートノミック・コンピューティングが目指すものには到達できません。ですから、いかにこのグローバルなシステムの認識と制御を実現するかということが、必然的にひとつの大きな技術的課題になります。別の言い方をすると、コンピューティングの階層のスタック全体をどのように最適化するかということですが、その方法は今のところまだ分かっていません。

**当面** 取り組むべき課題もたくさんあります。適切な「適応アルゴリズム」(システムの経験を取り入れながら改善されていくルール群)の作成の仕方、適応アルゴリズムが記憶すべきことと無視すべきことのバランスの取り方などです。人間は、後者の「無視する」(人間の場合、「忘れる」と言います)に長ずる傾向がありますが、忘れた方が好都合なときもあります。重要な情報だけ覚えていられれば、不要な情報に気をくばる必要はないのです。

**解決** すべき課題は他にもあります。オートノミック・システムのアーキテクチャーをどのように設計するか、という問題です。このアーキテクチャーは、一貫したインターフェースと制御点を提供すると同時に、さまざまな機種が存在する環境で使用できなければなりません。取り組むべき問題は非常に多く、今後も研究を続けていくことになりますが、オートノミック・コンピューティングをSFの夢のような途方もないこととは考えていません。

**実際、主要な分野ですでに進展を見せています。**

## 第一に、

今までに確立された科学研究分野がオートノミック・コンピューティングに貢献します。人工知能、制御理論、複雑適応系、カタストロフィー理論、そして、サイバネティックスにおける初期の取り組みからオートノミック・コンピューティングに関するさまざまな探求方法を学ぶことができます。研究所や大学では現在、自己を監視してある程度の変化に適応できる自己進化システムや、障害から自己回復してアプリケーションの長期稼働を可能にする「セルラー」チップ、各種サーバー上で多数のアプリケーションの作業負荷を分散させてそれを調整する異機種間ワークロード管理、そして情報科学の領域に応用される従来の制御理論など、数多くの研究プロジェクトが進められています。

また、

IT産業にとってオートノミック・コンピューティングは100%新しい技術というわけではありません。インターネットで情報をパケット転送するためのプロトコルや規格(TCP/IPが代表的)はすでに定着し、ルーティングのような比較的簡単な機能であれば、人間の指示をほとんど受けずに実行されています。一方、メインフレームの自律機能も向上しています。メインフレーム・コンピューターは従来より、企業や政府の重要な基幹業務を任されてきました。このため、内蔵する自己調整・自己診断機能のレベルも向上し、今では99.999%もの高い稼働率(正常に機能している時間の割合)を誇っています。

しかし、この革新をまったく新しいレベルにおし進める必要があるのです。

このためIBMは、オートノミック・コンピューティングという大変大きな目標を軸にリサーチ部門を再編成しました。加えて、現在の技術革新を今日のハードウェアやソフトウェアにより早く具体化するため、「プロジェクト eLiza™(イライザ)」に取り組んでいます。IBMはこのプロジェクトで、オートノミック・コンピューティングの新技術を開発するために、サーバー部門の研究開発予算を確保しました。

これは、  
**IT企業一社の枠を超えた**  
取り組みです。

オートノミック・コンピューティングは、技術界のリーダーや有識者たちの参加を必要とするビジョンです。そこでIBMでは、自律性関連の研究項目を定義するため、学术界と産業界の主要な専門家で構成される諮問委員会を設立します。一方、プロジェクトeLizaの活動の一環として、お客様とITパートナーで構成する大規模なグループとも協議を行っています。ここでは、自律性に関する革新的な技術を製品化するための戦略を定義しています。

学术界の方々には、オートノミック・コンピューティングの探求を推進していただくようお願いします。IBMは、研究・学界がオートノミック・コンピューティングを重要な研究分野と認識いただくよう提案いたします。また、政府系研究機関のパートナーの方々には、オートノミック・コンピューティングの中の重要なプロジェクトでIBMと共同作業していただくようお願いいたします。IBMは、この分野の研究活動を支援するため、継続して学術助成金を出資していく意向です。IT産業に従事する他のの方々にも同様の支援をお願いいたします。

**最後に**、IT産業全体が、この非常に重要な目標を最優先課題として位置付けていただくよう希望します。このビジョンを現実のものにするには、必要な規格やオープン・インターフェースを共同で作成する必要があります。このためIBMは、Globusおよびグリッド・コンピューティングのコミュニティーと協力して、オートノミック・コンピューティング環境を支援する規格の策定を進めています。**独占的で閉鎖的な計画や戦略を追求する時代は終わりました。お客様はより適切な対応を受けるべきです。**

IT産業は、過度に専門化した時代があまりにも長すぎました。そこでは、インテグレーションという要素ですらひとつの専門技術でした。コンピューティングのいろいろな分野で著しい進歩がありましたが、今や最も重要になった問題「小型化、高速化、低価格化」を追求した結果生じた複雑さにどう対処するかを解決できるほど十分に進化していません。

私たちは、ひたすら前に進むことだけを急いでいたため、ITを購入し、ITによって日々の生活のさまざまな面を改善し生産性を高めるためにIT業界に依存してくださるようになったお客様の姿を見失うという危険を冒していました。私たちがお客様に約束した将来実現可能な技術を、不必要に難しくしてしまったのです。**今こそ変わるときです。**

オートノミック・コンピューティングとは、このように変化することであり、ITの自動化が必然的に進化することなのです。次世代のコンピューティングが到来すれば、現在想像もできないことが可能になります。もっとも、成功が明らかになるのは、私たちが日ごろ自分の心臓の鼓動をあまり意識しないのと同様に、お客様が、コンピューティング・システムの稼働を考えずにすむことができたときでしょう。



シニア・バイス・プレジデント

IBMリサーチ

## 用語集

## アルゴリズム

与えられたインプットから特定のアウトプットを出すための手続き。一連の手順として記述できる。

## Webサービス

標準のインターネット・プロトコルとアーキテクチャー要素を使ってコンピューター機能を提供する方法のひとつ。たとえばデータベースWebサービスでは、Webブラウザを介してリモート・データの検索・更新を行う。UDDIを使ってWebサービスの存在を知らせることができる。

## SLA( Service Level Agreement : サービス・レベル保証 )

サービス・プロバイダーが最低限保証するサービス・レベルを確約した契約書。

## カーク船長

有名なSFのTV、映画シリーズ「スタートレック」に出てくる宇宙船の船長。

## カタストロフィー理論

ダイナミック・システムの一理論。微小な状況変化により生じる急激な挙動変化で特徴づけられる現象を研究・分類する。

### グリッド・コンピューティング

分散コンピューティングの一種。複数のコンピューターが広範なネットワークで接続され、エンド・ユーザー全員がそのリソースを使用できる。「ピア・ツー・ピア」と呼ばれるコンピューティングもグリッド・コンピューティングのひとつ。

### グローバス(Globus)プロジェクト

Argonne National Laboratoryを中心とする学術研究の共同プロジェクト。グリッド(Grid)の概念をコンピューティングに応用することを研究している。

### サイバネティクス

ギリシャ語の「舵取り」が語源。1947年、動物と機械における制御と通信の科学研究を表す語として使われるようになった。

### サービス品質(QoS)

SLA(サービス・レベル保証)で使われる語。「応答時間は1秒未満」のように、保証するパフォーマンス・レベルを表す。

### 自律神経系

神経系のうち体の不随意機能(呼吸、心拍など)を司る部分。

### 自律的(オートノミック)

- 1.自律神経系に関連する事柄。自律神経系の制御対象。
- 2.無意識(自動的)に動作または発生すること。自律反射。

### 人工知能(AI)

人間に特有の高度な知的プロセスと一般に関連するタスクを実行するコンピューターまたはシステムの機能。人間の思考という側面をコンピューター上でモデル化する試みととらえることができる。AIのいくつかの側面がオートノミック・コンピューティングに貢献するのは間違いないが、オートノミック・コンピューティングの主要目的は、人間の思考をエミュレートすることではない。

#### 制御理論

システムとメカニズムの数学的解析。変動する内外の条件下で所要の状態を得ることを目的とする。

#### 適応アルゴリズム

自身の動作の結果と本来の設計目標とを比較することにより「学習」し、自己の挙動を変化させることのできるアルゴリズム。

#### フィードバック制御

機械またはシステムのアウトプットや挙動をもとに、その動作を変更するプロセス。アウトプットと目標値の差を常時低減することを目的とする。炉や空調をオン/オフして一定温度を保つサーモスタットが典型例。

#### プロジェクトeLiza(イライザ)

自律機能をIBMの製品・サービス(サーバー、ストレージ、ミドルウェア、各種サービス提供など)に統合する目的でIBMが2001年4月に開始したイニシアチブ。IBMが追求するオートノミック・コンピューティング活動の中核部分を成す。

#### ホメオスタシス

自己調節メカニズムにより維持される生理的な恒常性または平衡性。

#### RAID( Redundant Arrays of Independent Disks )

同じデータを複数のハードディスクで複数の場所に保存する方法のひとつ。複数のディスクにデータを保存すると、入出力操作のバランスが取れるのでパフォーマンスが向上する。複数のディスクを使用すると平均故障間隔が長くなるため、データを冗長的に保存することにより耐故障性も向上する。

2001年

© International Business Machines Corporation  
New Orchard Road, Armonk, NY 10504

日本語版編集・発行

日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所  
〒242-8502 神奈川県大和市下鶴間1623-14

デザイン: VSA Partners, Inc.  
01-02 Printed in Japan



この冊子は再生紙を使用しており、リサイクル可能です。

IBM, DEEP BLUE, eLizaは、International Business Machines Corporationまたはその全額出資子会社の商標です。

Fortune 500は、Time Incorporatedの登録商標です。

Linuxは、Linus Torvaldsの商標です。

Apacheは、Apache Software Foundationの商標です。

AT&Tは登録商標です。

Globusは、シカゴ大学の商標です。

InfoWorldは、International Data Groupの商標です。

その他の社名、製品名、サービス名は、それぞれ各社の商標またはサービスマークです。

オートノミック・コンピューティングに関する詳細は、IBMのWebサイト  
<http://www.ibm.com/research/autonomic>( 英文 )でご覧になれます。



