

本田財団レポート No.112

第26回本田賞授与式 記念講演(2005年11月25日)

「社会的要請にこたえるロボット工学と知能システム」

カーネギーメロン大学

コンピュータサイエンスアンドロボティクス教授

(モザービントナッサーユニバーシティプロフェッサー)

ラジ・レディ博士

Robotics and Intelligent Systems in Support of Societal Needs

Commemorative Lecture

at the Twenty-Sixth Honda Prize Awarding Ceremony
on the 25th November 2005 in Tokyo

Dr. Raj Reddy

The Mozah Bint Nasser University Professor

of Computer Science and Robotics at Carnegie Mellon University

財団法人 本田財団

ラジ・レディ博士

カーネギーメロン大学
コンピュータサイエンスアンドロボティクス教授
(モザートナッサーユニバーシティプロフェッサー)

The Mozah Bint Nasser University Professor of Computer
Science and Robotics at Carnegie Mellon University

Dr. Raj Reddy



略歴

1937年	インドに生まれる
1958年	マドラス大学(インド)卒業
1960年	オーストラリア・ニューサウスウェールズ大学 修士課程終了
1966年	米国・スタンフォード大学 コンピュータサイエンス専攻 Ph.D
1969年	カーネギーメロン大学助教授
1973年	同大学 コンピュータサイエンス部教授
1979年	同大学 ロボット工学研究所初代所長
1984年	同大学 教授
1991年	同大学 コンピュータサイエンス部部长
2005年	モザートナッサーユニバーシティプロフェッサー

受賞歴(1984年以降)

1984年	仏ミットラン大統領よりレジオンドヌール勲位授与
1991年	IBMよりサーチ・ラルフ・ゴモリーフェロー賞
1994年	アメリカ計算機学会(ACM)チューリング賞
2001年	インド大統領よりパドマブシャン(最高栄誉賞)
2004年	大川財団より大川賞

印スリ・ヴェンカテスワラ大学、
仏アンリ・ポワンカレ大学、
豪ニューサウスウェールズ大学、
印ジャワハーラル・ネルー工科大学、
米マサチューセッツ大学、英ワーウィック大学、印アンナ大学、
インド情報技術大学(アラハバッド)の各大学より名誉理学博士号

会員歴

- 電気エレクトロニクス・エンジニア協会
- アメリカ音響学会フェロー
- アメリカ人工知能学会(会長就任:1987-1989)
- アメリカ国立工学アカデミー会員
- アメリカ芸術・科学アカデミー会員
- 米国大統領情報技術諮問委員会共同委員長(1999-2001)
- イスラエル・ペレス平和センター執行委員会役員

Personal History

1937	Born in India
1958	BE degree from the Guindy Engineering College of the University of Madras, India
1960	MTech degree from the University of New South Wales Australia
1966	Assistant Professor of Stanford University
1969	Carnegie Mellon faculty as an Associate Professor of Computer Science
1973	Carnegie Mellon faculty as a Full Professor of Computer Science
1979	Carnegie Mellon University Director of the Robotics Institute
1984	Carnegie Mellon University Professor
1991	Carnegie Mellon University Dean of School of Computer Science
2005	The Mozah Bint Nasser University Professor

Awards (1984~)

1984	The Legion of Honor by President Mitterand of France
1991	The IBM Research Ralph Gomory Fellow Award
1994	The ACM Turing Award
2001	Padma Bhushan by President of India
2004	Okawa Prize

He has been awarded honorary doctorates from SV University in India, University Henri-Poincare in France, University of New South Wales in Australia, Jawaharlal Nehru Technological University in India, University of Massachusetts in USA, University of Warwick in England, Anna University in India and the Indian Institute for information Technology (Allahabad). He serves on the Board of Governors of Peres Institute for peace in Israel.

Professional honors

- Fellow of the Institute of Electrical and Electronics Engineers
- Fellow of the Acoustical Society of America
- President of the American Association for Artificial Intelligence from 1987 to 89.
- Member of the National Academy of Engineering
- Member of the American Academy of Arts and Sciences
- Co-chair of the President's Information Technology Advisory Committee (PITAC) from 1999 to 2001
- Board of Governors of Peres Institute for Peace in Israel

社会的要請にこたえるロボット工学と知能システム

2005年11月25日 ホテルオークラ, 東京

カーネギー・メロン大学
ラジ・レディ博士

要約

ロボット工学と知能システムはこの半世紀、幅広く研究されてきました。かつては特定の技術問題の解決を目指す研究が主流でしたが、研究の飛躍的進展とともに、人間生活に多大な影響を与えうるシステムやソリューションが生まれるようになりました。本講演では、そのような先端技術の中でも、特に人類に奉仕するエコ・テクノロジーという観点から注目すべき応用技術をご紹介します。ロボット工学、コンピュータによる視覚情報処理支援、HCI（人間とコンピュータの相互作用研究）、自然言語処理、人工知能の各分野から代表例を選びました。

技術動向

ロボット工学と知能システムが進歩した背景には、情報技術の急激な普及発展があります。2000年には大方の予測通り、毎秒10億単位の演算命令をこなし、数10億ビットのメモリと毎秒10億ビットのデータ伝送機能を搭載した「ギガPC」が2000ドルを切る価格で発売されました。企業カルテルや想定外の技術障壁が行く手を阻まぬ限り、2015年には「テラPC」が、2030年には「ペタPC」が登場することでしょう。（図-1）

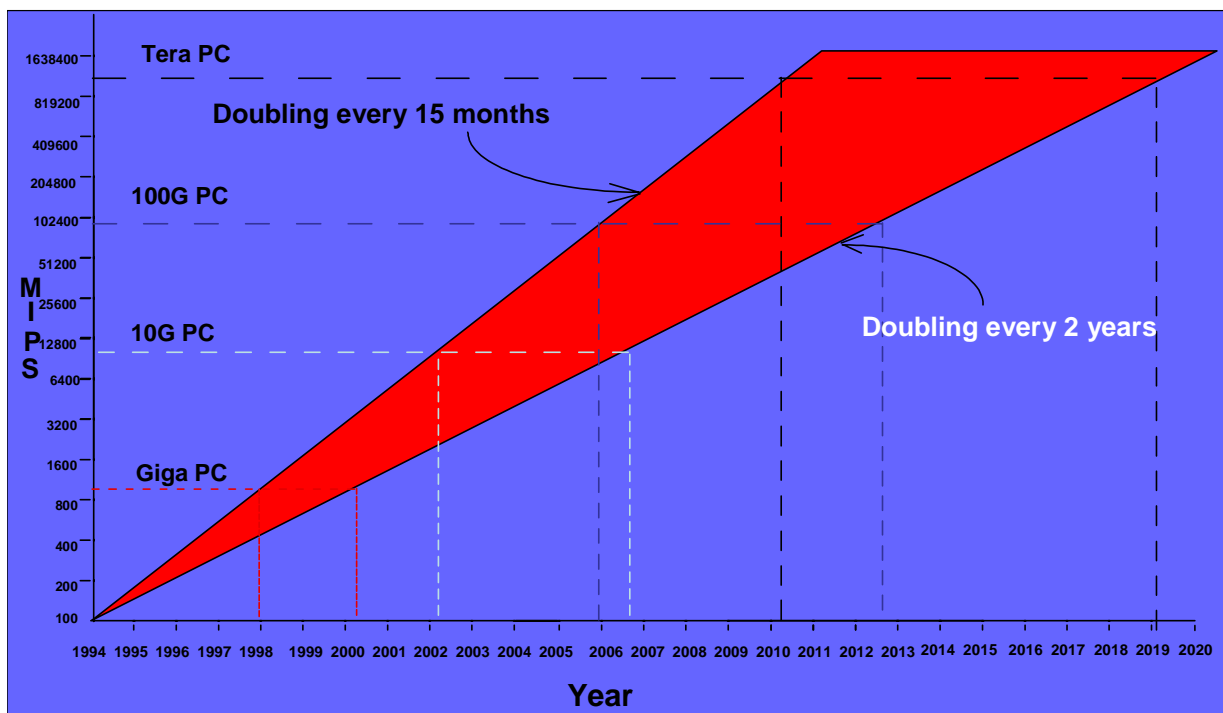


図-1. 情報処理能力の普及予測

問題は、このように累乗的なペースで進化する情報マシンを、私たち人間が何に使うのか—、そのような劇的進展は私たちの暮らしや仕事にどんな影響を及ぼすのか—、という点にあります。私は社会制度、食べる物、着る物、男女の関係や友情といった私たちの基本が変わるとは思いません。しかし、私たちの学び方、働き方、他人とのつきあい方、ヘルスケアの質やその提供方法といった面は、大きな変化を受けるのではないかと考えています。おそらく高速化したコンピュータの処理能力の一部は、自己回復型コンピュータの開発や、絶対にダウンしたり再起動したりのないネットワークが構築にも利用されていくでしょう。

磁気ディスク・メモリの世界の進歩も劇的です。ディスクの記録密度は毎年倍増を続け、記憶容量は 10 年で 1000 倍になるペースで進展しています。100 ギガバイトのハードディスクドライブは現在 100 ドルそこそこですが、このまま行けば、2010 年には同じ値段で 100 テラバイトの HDD が買えるようになります。100 ドルのお金で、自宅のパソコン 1 台に数百万冊の本を収めた個人ライブラリや、一生ものの音楽や映画のコレクションを所有することができるようになるのです。また、近年最も凄まじいばかりの発展を遂げているのが通信の分野です。光ファイバー技術の進展で、通信回線の容量は 9 ヶ月に 2 倍のペースで増大を続けています。既に市場では、DWDM（高密度波長分割多重通信）技術を使った、伝送能力毎秒 1.6 テラビットの通信システムが売られています。DWDM は、それぞれ波長の異なる 160 種類の光信号を、毎秒 10 ギガビットの高速で同時に伝送する方式です。実験段階ですが、何と毎秒 25 テラバイトを伝送できる超高速システムも開発されています。

では、毎秒 1.6 テラビットの回線容量とはどのように凄いのでしょうか？例えば、米議会図書館の全蔵書を電子化したファイルを 50 秒で完全に伝送できます。あるいは世界中の電話通話をひとつのファイバー回線で送っても、まだおつりが来ます。実は、このような超高速通信の実用化を妨げているのは送る側の伝送能力ではなく、テラビット単位で送り込まれてくるデータパケットを処理（もしくは交換）しきれないコンピュータの処理能力の問題なのです。このレベルまで行くと、ファイバー上を走る光の速度でさえ問題なのです！TCP/IP プロトコルで持続可能な最高の伝送スピードはデータの往復に要する時間、いわゆる遅延によって決まります。例えば、テラビット回線で伝送されるデータはアメリカ全土を往復するのに約 30 ミリ秒かかります。従って、受信側から受領データが帰ってくるまでの間、最大で 300 億ビットしか伝送できません。このようなメモリや通信回線の大容量化は、向こう 10 年か 20 年の間、倍々ゲームで進むといわれています。その頃には、一日数ペニーでテラバイトの記憶装置や毎秒テラバイトの通信回線を利用できるようになっているはずで、このような量的変化は、コンピュータが人間に提供するサービスの質をも変えていくと思われます。本講演ではロボット工学や知能システムの代表的なアプリケーションをご紹介しながら、それらが人間の生活、あるいは学習や仕事のやり方にどのような変化を与えるのかについて考えていきたいと思えます。

高齢化社会で活躍を期待される介護支援ロボット

世界的な寿命の延びで、70 歳以上の高齢人口が全体の 1 割を超える日も近いといわれています。これらの高齢者は日常生活に支障をきたす軽度の障害を患うケースが増えます。軽度の障害は知覚障害、認知障害、運動障害に大別できますが、いずれもロボット工学や知能システムの活用により軽減または克服することが可能です。

ここでは、カーネギー・メロン大学の「ナースボット(Nursebot)」プロジェクトで開発された高齢者介護ロボット「パール(Pearl)」についてお話ししましょう。「パール」には主な機能として、薬や食事の時間を忘れないように教えるお知らせ機能、いながらにして遠方の現実世界を体験できるテレプレゼンス機能、血圧や心拍数などのデータの収集・監視機能、離れたところからロボットを自分の手のように動かせる遠隔操作機能、ロボット自身が社会的交流の一部を代行するソーシャル・インタラクション機能などが搭載されています。将来こうした介護ロボットが市販されれば、高齢者はいつまでも活動的で生き生きとした時間を過ごせるようになるでしょう。高齢者の医療保障費負担は過去 10 年間に大きく増大しました。現在、アメリカの老人養護施設に入るのに年間で 30,000~60,000 ドルが必要です。高齢人口の急激な上昇は、このような負担コストの増大とともに大きな社会問題となっています。高齢者ケアの提供体制は今でも不十分ですが、今後は高齢者の介護や支援に当たる若い人口もどんどん減っていくのです。

高齢者ケア用のロボットには満たすべき要件がいくつかあります。

- ロボットの動きは遅すぎても早すぎてもよくありません。ロボットの方で介護対象のペースに合わせる必要があります。現行のロボットでは動く速度が固定されていて利用者のフラストレーションになります。
- 高齢者の周囲を動く場合の安全性を確保しなければなりません。現在ロボットに搭載されている視覚システムの視野は限られた範囲にしか届きません。その範囲の外にある物体を検知できず、間違って介護対象の人にぶつかってしまう危険があります。
- 音声指示に的確に対応する必要があります。命令の意味がとれない、対話の流れについていけない、周囲の雑音で命令が聞き取れないなど、多少の問題が発生する場合があるものの、現行の音声認識・合成システムでも十分実用の域に達しています。

カーネギー・メロン大で開発され、現在ミシガン大のマーサ・ボラック教授¹に引き継がれている「パール」は、数ヶ所の介護ケア現場で実用実験を受けています。(図-2)



図-2. 社会活動を支援

「パール」ロボットは高齢者介護に関する様々なアイデアを試す研究プラットフォームです。2 個の Intel® Pentium® 4 プロセッサを積んだパソコンが、茶目っ気のある応答・ナビゲーション能力を持ったソフトウェアを実行します。駆動系には差動車輪方式が採用され、「パール」に自在な動きを与えています。Wi-Fi ワイヤレス・ネットワーク接続により、離れたところでもユーザーと交信できます。レーザー距離計を備えたステレオカメラと音波センサーで障害物を検知し、マイクロフォンでユーザーの音声を聞き取り、スピーカーから合成音声で応えます。アクチュエータ付きの頭部ユニットは人間の頭そっくりに回転したり揺れたりします。研究者は、「パール」のような自律移動ロボットが、慢性疾患を抱える高齢者の自宅に常駐し、次のような仕事²をこなしながら、彼らと一緒に生活する日の来ることを夢見ています。(図-3)

- 入浴や薬の時間、水飲みや医者への訪問のタイミングを教える仕事。
- インターネットを通じて高齢者と外部の介護者の連絡を可能にする仕事。医者の訪問機会を減らすため、プロの介護者が遠隔の患者と直接交信できるようにする技術をテレプレゼンス技術と呼びますが、介護ロボットはこのテレプレゼンス技術のプラットフォームと言えます。
- 被介護者の健康状態を監視し、データとして収集する仕事。システムティックなデータ収集が、心臓麻痺や血糖値の上昇などの緊急状態の発生を未然に防ぎます。
- 冷蔵庫、洗濯機、電子レンジなど家の中の機械を被介護者に代わって操作する仕事。専門家によれば、高齢者が一人暮らしをあきらめる最大の原因は関節炎だそうです。
- 被介護者と社会との交わりの一部をロボットが代行する仕事。高齢者は社会との接触を奪われて、孤立した生活を強いられる傾向があります。介護ロボットは家に引きこもりがちな高齢者の孤立感を和らげることができます。



図-3. パールロボット

現在ロボットは非常に高価です。「パール」は類似の競合製品がないせいもあって 1 体 10 万ドル近くします。市販用に量産するには、バッテリーの長寿命化、歩行支援機能の搭載などクリアすべき問題も少なくありません。テレプレゼンス機能にしても、正しい薬を服用しているか、食事をきちんと摂っているかなど、被介護者の日常生活に関するもっときめ細かなデータを介護

者に提供しないと十分な機能は発揮できません。また、被介護者の日常行動を監視する中で正常な行動パターンをデータ化し、例えば、長時間椅子から動かないなどの異状が発生した際はすぐ介護者に通知を行うといった臨機応変な対応が求められます。現行のロボットは単純な文字列でお知らせを行うだけですが、被介護者の認知能力が日増しに低下していくことを考慮すれば、もっと彼らにわかりやすい通知方法が必要になるでしょう。被介護者のニーズは、比較的短期間のうちに、例えば新たな疾病の発生によって大きく変化する可能性があります。インテリジェントなお知らせ機能を志向するなら、時刻、過去の交信のタイミング、ユーザーの気分、想定される行動など、様々なパラメータを判断のベースに置かなければなりません。また、未来の介護ロボットはユーザーの代わりに物を持ち上げたり移動したりといった運動の代行機能も備えるべきだと思います。

このように、現代の高齢化社会は高齢者や慢性疾患の患者に対して新たなケアの方法を確立していく必要に迫られています。介護コストの削減はもちろん、生活の快適さの向上や被介護者の尊厳を傷つけない方法を確立して行かねばなりません。技術の進歩が、そのような高齢者介護ロボットの商品化を成功させると私は確信しています。

人間の視覚と行動範囲を拡大する救助ロボット

天災や人災が発生した際、人間が行える救助活動には限界があります。そこでロボット・システムを効果的に導入すれば、より災害状況に応じた、臨機応変な救助体制を敷くことができます。被災地では危険で人間が立ち入れないケースが珍しくありません。救助人員の不足や、現場の異常な低気温や高気温、あるいは突風などで被災者の捜索は遅れがちです。被災者の生存率を高めるには 48 時間以内の救出が必須といわれています。過去 10 年の災害を見ても、地震予知精度の向上だけでは不十分であることが証明されています。例えば、1995 年の阪神淡路大震災では、倒壊するはずのないビルや高速道路などの耐震建造物が倒壊しました。オクラホマの爆弾テロ事件の場合も同様です。このような災害が発生した場合、人間による生命救助活動には限界があります。実は、当時も大型の救助ロボットが利用されたのですが、瓦礫の中での機械の操縦は至難を極め、十分な成果を挙げることはできませんでした。

このような実地での教訓を活かし、世界の研究者は小型軽量かつ安価な救助ロボットの設計に取り組み始めました。現在、人体ほどの積荷を搭載可能な小型救助ロボットの開発が複数の機関で盛んに行われています。多くのシステムは 360°回転式のカメラを通じて精細な画像を操縦者に提供します。中には、陸上でも空中でも操縦可能で音を検知できるシステムや、人体の体温や服の色を検知する特殊センサーを備えたシステムもあります。近年の、9・11 の悲劇やハリケーン・カトリーナ災害で最新鋭のデータ収集ツールや救助システムが活躍し、ロボット工学技術や関連産業のめざましい進化をアピールしました。(図-4)



図-4. 9月11日テロ救助活動

現在市販されている救助ロボットの代表が、アメリカン・スタンダード・ロボティクス社が製造した「VGTV エクストリーム (VGTV Xtreme)」³です。(図-5)

これは重さわずか 14 ポンド (約 6.4kg) で、危険で立ち入れない箇所も救助員が探索できるようにビデオカメラが装着されています。

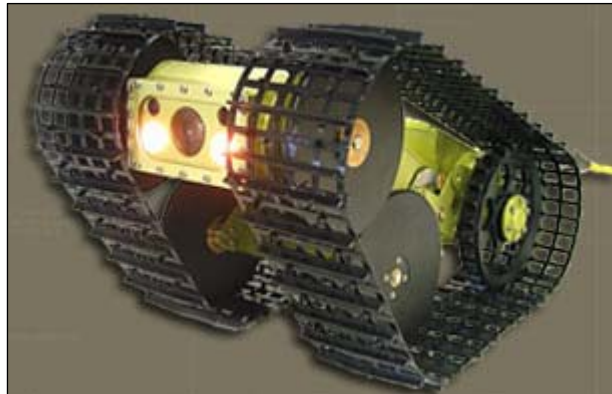


図-5. VGTV エクストリーム救助ロボット

「VGTV エクストリーム」は旧世代の実験用システムに比べ、丈夫で自在性が高く、実地における物理的衝撃にもよく耐えます。最新モデルには更に改良が施されました。まず、本体の地上高が高くなり、操縦性が向上しました。ロボットが楽々瓦礫の山を乗り越えられるようになったのです。次に、構造物内部の探索時にロボットの進入距離をなるべく短くするため、人間の目となって働くカメラに従来よりも長径の望遠レンズが採用されました。また、機動性の向上のために、救助員の使う手袋や器具はそのままロボットに装着して共用できます。更に、ロボットが防水仕様になったため、汚染除去活動が容易になっています。

図-6 は、日本の国際レスキューシステム研究機構 (IRSI) が開発中の捜索・救助活動支援システム⁴です。



図-6. 国際レスキューシステム研究機構 (IRSI) が開発中の搜索、救助支援システム

これらのロボットは数百マイルを自走可能です。この他にも、廃棄物貯蔵地の汚染物の内部や地雷の搜索に使われる救助ロボットとして、カーネギー・メロン大が開発した「スネーク・ロボット」があります。米軍では同様の小型・高耐久性の戦術用移動ロボット「PackBot」をアフガニスタンの洞窟内搜索に利用しています。米人工知能学会は、現行製品の能力や限界を更に高めるために2000年から救助ロボットのコンテストを開いています。

救助ロボット・システムの限界を克服し、その性能を高めるには更なる研究開発が必要です。被災地が呈する状況の複雑さはあらゆる事前の想定を超えるものです。例えば、浸水した地雷やガス・水道管、あるいは倒壊したビルの瓦礫にも対応できる汎用的な救助ロボットを製造するのは至難の業です。汎用というからには光量の変化や極温状況（火山や氷山）への対応も求められます。

グラウンド・ゼロでのロボット使用救助活動からわかったことですが、係留綱の長さが短いため、ロボットが瓦礫内へ進入できる距離はあまり大きくありません。現在、ロボットを遠隔操作可能な範囲は、せいぜい被災箇所から100フィート四方です。センサー性能の向上、セットアップ時間の短縮、被害者への食料や医薬品の配給機能、人間味の付加などは次世代のロボットに託された課題になっています。(図-7)



図-7. 救助ロボットの応用例

とはいえ、救助ロボットが災害被害の低減に決定的な意義を持つことは確かです。そのため、救援活動、人命救助、救助員の安全確保などの能力を兼ね備えた汎用ロボットを実現する技術や実装方法が熱心に研究されています。安価で能率的な救助ロボットの大規模開発には、地方・国の関係省庁の協力と支援が必要です。技術や研究インフラ整備に留まらず、ロボットの操作・運用に熟達した要員の養成も急務といえるでしょう。

音声認識技術と読書支援システム「リーディング・チューター」

世界には読み書きのできない人々が 10 億人以上います。字は読めても文章の意味を理解できない（読解力を持たない）事実上の読み書き不能者を含めれば、その数は 20 億を超えます。この状況を打破すべく、最新の音声認識・音声合成技術を駆使して、識字率を改善するコンピュータ・ソリューションが開発されてきました。その代表格が自動読書支援システム「リーディング・チューター（Reading Tutor）」です。「リーディング・チューター」では、コンピュータ画面上に教材となるストーリーが表示され、子どもは声を出してそれを読み上げます。読み上げた声は音声認識技術で解析されます。

10 年ほど前までの音声認識システムには、一続きで発音される語のつらなりを捕捉しながら解析するスピードがありませんでした。読書支援システムで生徒の発音の誤りを見つけて矯正するには、単に音声から語の連なりを識別するだけでなく、基準となるネイティブ・スピーカーと生徒の間にあるアクセントの強弱、音の持続時間、スペクトル特性の違いを正確に識別しなければなりません。

こうした難しい処理をクリアしたソリューションが、カーネギー・メロン大のジャック・モストウ博士⁵が開発した「リーディング・チューター」です。読書の時間を楽しく本物の経験とするため、教材メニューには「Weekly Reader」（全米でポピュラーな子ども向け出版物）の提供するお話や、生徒自作のストーリーが表示されます。生徒はメニューから興味のある教材を選びます。

子どもの発語解析には、カーネギー・メロン大の音声認識頭脳「スフィンクス（Sphinx）」が使われています。発声者が読み間違えたり、途中でつかえたりした場合、あるいはヘルプをクリックしたり、問題に遭遇しそうな状況に至った場合、「スフィンクス」は学習の進行を中断して支援モードに切り替わります。このとき提供される正しい読みは、専門家の発音をモデルとして、音声認識技術の能力と限界を踏まえて諸種の改良を加えたものです。現行バージョンは最低 128MB のメモリを搭載していれば、通常の Windows XP パソコン上で稼働します。まだ市販はされていませんが、実用性検証のため、下の写真のように毎日数百人の子どもに利用されています⁶。（図-8）



図-8. リーディング・チューターを使う子供たち

「リーディング・チューター」の可能性を最大限に活用するには、次のような改良が必要と思われます。

1. 聞き手としての「リーディング・チューター」の能力を高めるには、音声認識エンジンがよく起こす認識エラーを減らす必要があります。ネイティブ以外のスピーカーや地方なまり、あるいは子どものいい加減な発音にも対応したシステムも必要でしょう。
2. 学習機能を更に充実させるには、ユーザーがつかえたその時点でヘルプを提供したり、読み間違いを矯正する発音を現地の音に近づけたりする必要があります。また、もっと直観的にヘルプを呼び出せるようにインターフェイスの改良も必要でしょう。
3. 生徒が単に黙っているのか、それとも質問に答えようとして考えているのかを応答時間で判断する集中力のトレース機能が必要です。生徒の挙動をモデル化して、個々の生徒に合った支援アプローチを提供すれば、学習効果は更に高まるでしょう。
4. 個々の生徒にふさわしいヘルプを提供するには、その生徒の学習能力や習熟レベルに合わせてヘルプの内容を差別化する必要があります。（図-9）



図-9. ガーナでの試行導入

コンピュータの目を持つセンサー式インテリジェント走行制御技術

世界では毎年百万人以上が交通死傷事故で亡くなっています。アメリカだけでも年間の交通事故死者は4万人以上、事故に起因する修理費用は550億ドル(約6.05兆円)にのぼります。ロボット工学と知能システムの進歩で可能となった最新鋭のセンシング計画・制御技術を利用すれば、現在の死者数や修理費用を80%以上も減らせる可能性があるといわれています。

自動車衝突事故の4割は光量や気象状況の変化による視野の低減に起因することがわかっています。逆光、霧、人工照明などを検知するセンサーを付ければ、そのような悪条件で走行する場合、事前にドライバーに警告し、注意を促すことができます。

路上交通事故の7割は運転中の人為的ミスが原因です⁷。なかでも多いのがスピードの出し過ぎ、運転疲れ、飲酒運転による事故です。アメリカでは居眠り運転が原因の事故だけで24万件以上にのぼります。万一の場合、一時的に自動運転モードに入ってクルマを安全な場所に誘導する自動誘導機能を備えるだけで、事故死傷者数は劇的に減らせると思います。

事故以外の心配の種といえば、高速道路や市街地での渋滞です。テキサス州運輸局の試算では、2000年だけで全米の主要都市は36億走行台時間(vehicle-hour)を渋滞で無駄にした計算になります。これは216億リットルの燃料浪費、675億ドルの生産力浪費に相当する数字です。渋滞の多くはドライバーの瞬間的なパニックによる過剰なブレーキングや、運転中の軽い判断ミスに起因しています。このような不規則運転はクルマの流れを乱すだけでなく、同乗者の不快にもつながります。また、車輛の損耗につながって燃費を悪化させます。不規則運転の副作用は、ドライバーが車間を取りすぎることによる道路の非効率的な利用です。

様々な問題を挙げましたが、これらの多くは衝突余裕時間(TTC)に基づいて走行スピードを制御するインテリジェント走行制御技術を利用すれば防止することができます。

専門の研究調査によれば、少数のクルマに何らかの運転補助システムを装備するだけで、交通渋滞の大半を事前に回避できることが判っています。

このような諸々の問題に対する効果的なソリューションを開発するためには、センサー技術、制御システム、アクチュエータ、ルート計画アルゴリズム、視覚ベースのナビゲーション機構など多岐の分野でイノベーションが必要です。

次世代の走行制御システムの鍵を握る要素は、ロボットが持つ知覚能力の信頼性の向上です。安定した知覚能力を与えるには、光、音、電波のいずれかの媒体で物理環境の検知を行うセンサーを開発し、定常的に、走行スピード、車間、走行車輛を取り巻く物体の形状や色に関するデータを採取する必要があります。センサーのデータから物体の形状を割り出し、色によって分類精度を増すような高能率の物体分類技法の確立も必要です。その上で、時間経過とともに変化する周囲の車輛や人間の軌跡を監視し、軌跡の変化をリアルタイムで予測できるような物体追跡システムが求められます。正確な軌跡情報が得られれば、実用性の高い情景認識アルゴリズムを開発できます。情景認識アルゴリズムとは周囲の物体間の相互作用から近い将来に発生する衝突の危険を予測し、複数の衝突シナリオにまとめあげるプログラムです。

高信頼の知覚モジュール以外にも、実際に車輛を操縦する制御システムとそれを始動するアクチュエータの開発も必要になります。現在のスピードをもとにスロットルを自動調節して一定の走行速度を保つには、フィードバック制御システムが必要です。車輛を自動的に既定の経路へ

誘導するには、高能率の経路計画・ローカライズ技法も必要でしょう。

以上の技術が実現すれば、衝突の危険が差し迫ったとき、直観的なインターフェイスを通じて事前にドライバーに危険を知らせ、事故を未然に防ぐ衝突警告システムの構築が可能となります。そうして、ドライバーの介在なしに事故シナリオを描き、事前に障害物や危険状況を回避する経路に車輛を導く、衝突防止・自動誘導システムが完成するのです。

差し迫った衝突の危険を事前告知する衝突警告システムは、近年のセンサー技術や情景認識システムの進歩によって開発可能になったものです。事前警告そのものが間に合わない緊急時には、衝突防止システムが自動的に発動し、車輛を安全な経路へ誘導します。現在一部のシステムでは、レーザー・ストライピング（分割光検知）技術を使って、車輛と周囲の物体の距離を測りながら、走路遵守と障害回避を実現しています。この技術は情景に照射したレーザー光と情景内の物体が交差する点をカメラで捕捉し、三角測量法を使って車輛と物体の距離を割り出す方法です。路肩、路側の縁石などの障害物の検知に威力を発揮します。その上で、全方位カメラとオプティカル・フロー追跡システムを使って、前後左右 360°の情景の中で、車体の移動に伴う情景の縁の動きを追跡します。車輛が縁石に近づき過ぎたり、路肩からはみ出したりすれば、システムはこれを危険な状況と判断してドライバーに警告を発します。カーネギー・メロン大の視覚・自律システム研究センターでは、公共バス向けの衝突警告システムを開発中です（このバスには、車輛前後方向の衝突に関する検知・警告を行う短距離センサーが既に取り付けられています）。

過去 10 年の間に、実際の交通状況の中で走行計画と車輛誘導を行う完全自律型ナビゲーション・システムの開発が急務であることが認識されました。このシステムの最大のメリットは衝突防止機能、運転疲れの軽減、燃費の改善、プラトウニング（車間距離をつめて直前の車両に追従して走行する車群走行）による道路利用の改善などにより、交通事故を減らす点にあります。また、『Physics』誌に発表された研究によれば、道路上の 2 割のクルマが車間距離制御（ACC）システムを利用すれば大半の交通渋滞は解消できるといいます。

写真のクルマは、高速での長時間にわたる自動走行能力が実証されたカーネギー・メロン大フィールド・ロボティクス・センター開発の「Navlab」車です⁸。「Navlab」は上述のような知覚モジュールを利用して周囲の物体や障害物を検知・識別しています。（図-10）



図-10. 「Navlab」自走式インテリジェント走行（車間距離・速度）制御システム

「Navlab」では、レーザー、レーダー、カメラを併用して道路上の縁石を検出し、縁石の動きを追跡しながら走行を制御します。道路画像上には縁石の位置が投影され、その外観のひな形が生成されます。車輦の走行につれて移動する画像上の縁石を追跡することにより、この先の道路状況が容易に予測できます。予測精度が向上したおかげで、自律走行車は路上の物体と路側の物体を峻別し、カーブや曲がり角での速度を自在に調節できるようになりました。車輦周囲の地図の作製と移動物の追跡には独 SICK 社の単軸梯子センサーを使用しています。この SICK 社のセンサーは、定期的に情景を横切る一本の線を電波とレーザー光線によってスキャンしています。正常に走行している場合、移動物は画像のすべてのコマの内部で追跡できます。もし移動物がコマからはみ出し追跡できない場合、車輦が許容限度を超えて不規則に走行していることを意味します。異状の場合、移動する固定物の位置情報と車輦の進行方向から、個々の物体と車輦との衝突時間を割り出すことができます。また、路上や周囲の人間の検知・追跡は特に重要なため、ステレオ視覚システムを利用して情景の 3D 情報を取得し、走行制御に万全を期しています。次世代の自律走行車の開発を促進するもう一つの最新技術がドライブ・バイ・ワイヤです。ドライブ・バイ・ワイヤとは、クルマの機械的制御を構成装置の実際の動作から切り離すという考え方です。アクセル、ハンドル、ブレーキ、クラッチ、ギア変速などの機械的運動は、それぞれ異なる圧力を発生させます。ドライブ・バイ・ワイヤでは、この圧力の違いを異なる電気信号に変換して中央制御コンピュータに送ります。コンピュータには既定の制御命令群がセットされており、受け取った信号に合った（例えば、吸気バルブを開いてスロットルへの給気を増やす）命令を実行して車輦走行を制御します。こうしてアクセルを踏みすぎる、クラッチを切れないなど的人為的エラーを取り除くと同時に、最適な燃料供給を行うのです。この技術は安全運転に貢献するとともにユーザーの燃料負担も低減します。また自動速度制御とギア変速の最適化により、運転そのものも楽になります。

以上のような走行制御技術は、過去 20 年以上にわたってカーネギー・メロン大や他の研究室で実証実験を受け、実用化可能な段階に達しています。（図-11）

しかし、法的規制と信頼性に対する懸念から、実車導入は思うように進んでいません。私としては、例えばホンダの革新的な事故防止・走行制御技術がさきがけとなって、最新の走行制御技術が誰でも安く利用できる技術になることを願っています。



図-11. 自走式人間救助システム

人とコンピュータの相互作用研究が実現した非識字者向けコンピュータ

世界の人口ピラミッドの底辺には年収 2000 ドル以下の生活に甘んじる 40 億人の人間がいます⁹。彼らの大半は英語を知らないし、10 億の人は教育を受けていません。しかし、殆どのコンピュータは、ユーザーが英語か他の先進国の国語を知っているという前提で設計されています。これでは、ピラミッドの底辺¹⁰には情報技術の進歩の恩恵に浴する資格がないといっているも同然です！でも悲観の必要はありません。誰でもテレビや電話は使えますし、クルマの運転だって習えます。これらは人間社会が生み出した最も高度な技術ですが、そうなのです。その秘密は、複雑さを極限まで簡素化されたインターフェイスの下に隠すことにあるのです。

障害はコンピュータ技術の側ではなく、豊かな国のお客しか想定していないコンピュータ会社の側にあるといえるでしょう。ピラミッドの底辺で役に立つコンピュータには、絶対落とせない機能しかありません。そしてすぐに使い慣れるユーザー・インターフェイスが必要です。

そこで私たちカーネギー・メロン大の研究チームは、誰でも使える多機能情報家電を開発しました。この装置の基本はエンターテインメントと通信です。テレビ、デジタル・ビデオテープ・レコーダー（DVR）、テレビ電話、IP 電話の他、パソコンとしても使えるので「PCtvt」という名前にしました。

地球上の誰でも簡単に使えるように、「PCtvt」にはアイコン表示と音声応答をベースにしたインターフェイスを採用しています。初めての人でも、テレビの電源を入れてチャンネルを合わせるのと同じように、1 分もあればすぐ使えるようになります。すべての操作は 2 段階、多くても 3 段階で完結し（2 クリック設計）、キーボードの代わりにテレビのリモコンや携帯電話を使って入力することも可能です。図-12 はアイコン表示のユーザー・インターフェイスで「PCtvt」をテレビとして使う場合のイメージです。

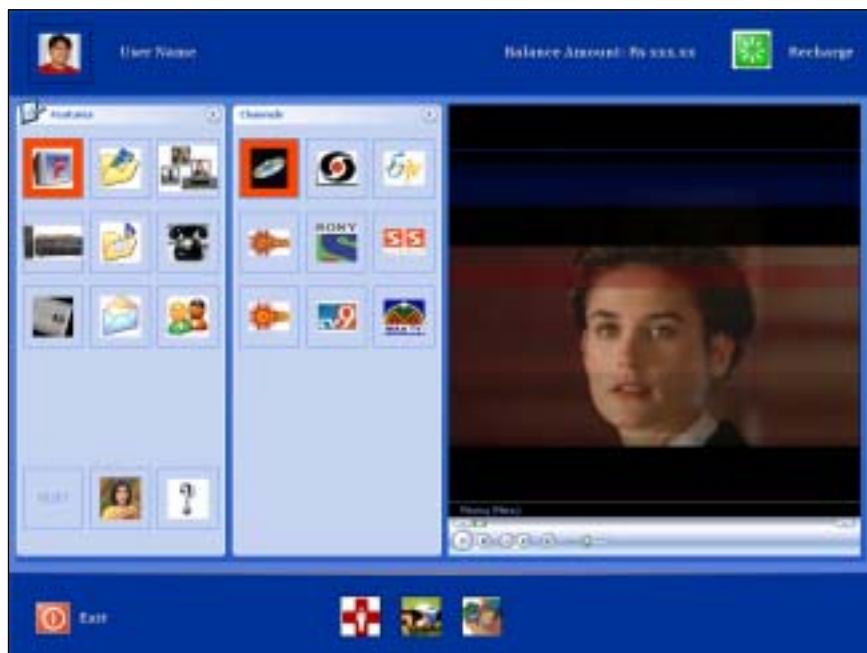


図-12. 多機能情報家電「PCtvt」 - 1 TV 放送

パソコンにマルチメディア機能を付加するための基本技術は既に 15 年以上前から存在します。

パソコンにテレビ・チューナーのチップを増設すれば、DVR 機能付きテレビの完成です。パソコンにカメラとマイクロフォンを付ければ、画像入力と音声入力を受け付けるようになります。これで、VOIP プロトコルを介して電話として使えるばかりか、テレビ電話、テレビ会議、ビデオメールやボイスメールなど、先進国でも少数のユーザーしか利用できないような機能をも提供できるのです。

「PCtvt」の鍵は易しくかみ砕くこと、すなわち、ユーザー・インターフェイスを最大限シンプルにして、私たちが定義した「情報家電モデル」の中心を占める読み書きできない人でも使える機械にすることです。2 クリック設計で、1 分もあれば使えるテレビのような情報家電、この基本設計が他の機能の設計にも「電源オン チャンネル切り替え」のシンプルさを強いたわけです。「PCtvt」の2 クリック・アイコン表示インターフェイス画面は図-13 のようになっています。



図-13. 多機能情報家電「PCtvt」 - 2 TV 電話

読み書きのできない人に必要なのは博士号ではなく、実用的なパソコンなのです！電子メールの読み書きはできなくても、ボイスメールやビデオメールなら簡単に使い方を習得できます。文字で書かれたヘルプは読めなくても、ビデオヘルプなら理解できます。こうした高度なメールやヘルプ機能を搭載するため、「PCtvt」のような多機能情報家電には通常のパソコンより速い通信速度、高い計算能力、大きなメモリが必要なのですが、何とおかしなジレンマでしょう。ピラミッドの底辺で手に入る便利な機械には、100 倍の演算パワーを持ったパソコンを 10 分の 1 の価格で提供しなければならないのです！

このように贅沢な通信回線やメモリを積んだ「PCtvt」ですが、これを雀の涙の価格で提供できない技術的理由は（法的・政治的理由はともかく）存在しません。情報通信技術の凄まじく急激な進歩がそれを可能にするからです。これはエコ・テクノロジーとしてだけでなく、ニュービジネスとして取り組むべき研究課題かもしれません。膨大な顧客ベースを有する手つかずの新興市場を切り拓くことにつながるからです。

自然言語処理とデジタル図書館

既に技術的には、過去に出版されたありとあらゆる書籍を電子化し、誰でも無料で閲覧可能な汎用デジタル図書館を作ることができます。グーグルでもヤフーでもマイクロソフトでも、お客が指定した本をスキャナーにかけ電子的に提供する公共サービスの構想を明らかにしています。残念ながら、提供されるオンライン書籍の大半は英語で、世界人口の 8 割には読めません。たとえ英語以外のことばで書かれた書物がオンライン化されたとしても、原語を読めない人には読解不能です。

本の要約や翻訳に関する自然言語処理（NLP）技術はまだ完璧なものではありませんが、このような技術が言語の壁を乗り越える可能性は視野に入りつつあります。言語の壁を乗り越えるソリューションが実現すれば、世界中の学者や研究者に巨大なデジタル図書館が公開され、世界的な「知識の民主化」が進んでいくことでしょう。

自然言語処理技術は本の索引や要約の作成、検索、翻訳、文書クラスタリング（類似文書のグループ分け）、文書内項目の追跡管理などの機能を提供します¹¹。将来、デジタル図書館が完成したとしても、これらの機能を総動員しなければ膨大な量の情報を使いこなすことはできません。私たちが毎日 1 冊ずつ本を読んだとしても一生に読めるのはせいぜい 4 万冊です。したがって数百万単位の本をオンライン化して公開しても、そのみでは情報過多が生まれるだけです。私たちの同僚だったノーベル賞受賞者の故ハーバート・サイモンがよく言っていたように「情報はふんだんにある。人間がそれに気づかない」のです。このような状態を脱するために、多言語対応のオンライン検索技術が開発されました。多言語対応の検索を使えば、ユーザーの母国語や所在地に関係なく、求めている情報がどこにあるかを瞬間的に、しかも正確に突き止めることができます。

過去 20 年間で自然言語処理技術は格段の進歩を遂げました。統計学と言語学の手法を取り入れた優れたシステムが現れましたし、機械学習理論を採用した高性能システムは既に広く利用されています。かつて言語学者と理論家の領域だった自然言語処理は、コンピュータ科学者と数学者の関与によって実用化に向け大きく前進したのです。現在も、更に研究を推進すべく、様々な大学で多種多様な言語資源が構築されています。

カーネギー・メロン大の「ミリオン・ブック・デジタル・ライブラリ」¹² は、米印中の共同事業です。これまでに中国で 40 万冊、インドで 20 万冊が電子フィルムに変換されています。ライブラリの図書には世界の様々なサイトから無料でアクセスできます。カーネギー・メロン大のウェブサイト（www.ul.cs.cmu.edu、または <http://www.ulib.org>）にアクセスすれば、フルテキスト検索またはフィールド検索でコレクション・サンプルを検索し、目的の本を閲覧することができます。下の写真はライブラリに採用されたインドの古典とウルドゥー語の小説の原本の表紙です。まさに多言語コレクションであることがおわかりいただけだと思います。（図-14）
（図-15）

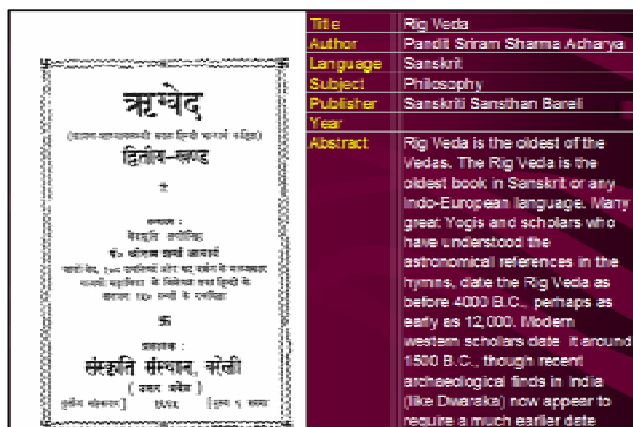


図-14. インドの古典文字サンスクリット

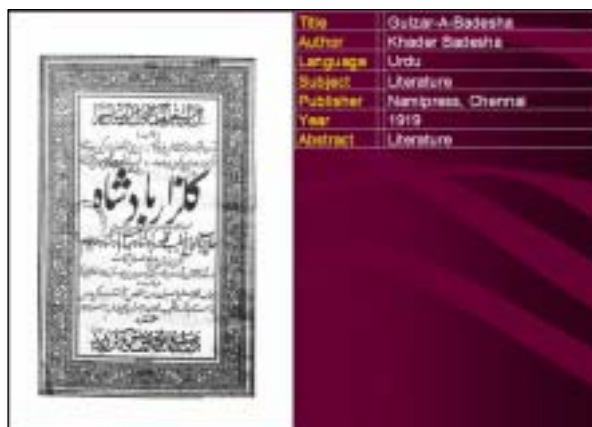


図-15. ウルドゥー語の表紙

今後は、「ミリオン・ブック・デジタル・ライブラリ」など世界のあちこちで実行されているデジタル化プロジェクトが、自然言語検索コンセプトの豊かな実証性実験の場になっていくと思います。ほんの数十年前には、いくら大量のデータが存在しても、自然言語処理ツールの方でそれを使いこなすレベルに達していませんでした。いまは違います。例えば、カーネギー・メロン大で「AVENUE」と呼ばれる機械翻訳（MT）システム開発プロジェクトを通じて、少数民族の言語や絶滅の危機に瀕している言語を安価かつ迅速に機械翻訳するシステムを開発し、それらの言語の生存を守ることを目指しています。

IBM では、情報システムと結ばれた自然言語インターフェイス「REQUEST」を介して、ユーザーの質問に回答する応答システムを提供しています。また、身体障害者や高齢者、更には読み書きのできない人々が、音声インターフェイスを通じて音声認識・合成システムにアクセスし、オンライン・データを利用するシステムも利用されています。

ただし、英語向けツールを使った基本技術の実証は済んでいますが、他の言語の多くに対しては十分な言語ツールが提供されていない現状があります。そのため、多言語間の自動翻訳や要約作成に関してはまだ満足いく結果が得られていません。今後は、商業的価値の低い言語に対しても、安価で高速、かつ信頼できる言語処理システムの開発が必要でしょう。自然言語処理システムの課題は、いかに自然言語の曖昧さを克服し、正確な解析結果を出力するかにあります。自然言語には語彙、構文、意味、文脈と様々なレベルに曖昧さがあり、これらを総合的に解決しなければ満足いく出力は得られませんが、そのような言語処理システムを組むには大がかりなコンピュータ資源が必要とされます。そればかりか、必要に応じて配分する資源をリアルタイムで調整できるような、柔軟なシステム設計が求められるのです。

Google、Yahoo、MSN などのかたちで 1000 億ドル規模のサーチ市場を生みだした現代社会。そこでは必要な情報と知識にいち早くアクセスできることが非常に重要です。Google Print などのプロジェクトは、オンラインで処理かつ検索できる情報を刻一刻増やし続けています。そのような社会にあって、デジタル図書館こそ最もよく利用されるエコ・テクノロジーになるのかもしれませんが。

都市・地方間のデジタル・デバイドを解消する人工知能

開発途上国では子どもの5人に1人が生後5年以内に亡くなっています。病院がないか、あっても費用がかかるので、生まれたての赤ん坊に十分な新生児ケアを提供できていないからです。根本原因はわかっており予防可能なものです。新生児の死の直接的な原因は感染症、出生児仮死、出産時外傷、早産、低体温症のいずれかにあります。間接的には妊婦の妊娠前の病弱、妊娠・出産中・出産後の不適切な医療処置、低出生体重、授乳障害なども新生児の死につながります。現行の医療体制では、新生児ケアの専門教育を受けた各地域の医療従事者が妊婦の家を訪問し、問題の対処に臨んでいます。（図-16）



図-16. 医療従事者による家庭訪問

彼らは下痢や急性呼吸器感染症の予防、予防接種の普及、微量栄養素を含む適切な栄養摂取、健康意識の向上などを通じて、地域一丸となった小児病の予防や治療に取り組んでいます。ただ、こうした努力には規模の点でも持続性の点でも限界があります。医療従事者への連絡手段がなかったり、治療や薬をタイミングよく提供できなかったり、医療従事者になる人材の選抜や養成が難しかったりと、様々な障害があるからです。

情報通信技術（ICT）から得られるメリットは、「都市・地方間のデジタル・デバイド」の片側で既にそれを享受している10億の人々よりも、その反対側にいる膨大な貧困者、病人、無学な人々にとって大きなものであると考えられています¹³。例えば、1970年代以来、医療診断や治療の場で利用されているエキスパート・システムや知識ベース・システムが開発途上国で役立つはずがなく、それらを利用して時宜に適った診療を提供すれば、多くの命が助かり、医療費が節約できます。

こうしたシステムの典型例が「VIE-PNN」（新生児の非経口栄養摂取のためのウィーン・エキスパート・システム）¹⁴です。適切な栄養補給計画には、煩雑な栄養計算や熟練者の専門知識が必要で、最悪の場合、新生児を死なせかねないので大きな責任が伴います。VIE-PNNシステムの目的は人為ミスの発生を極力抑え、計算時間を節約し、後の分析のためにデータを保守することにあります。毎日患者に与える水分、電解質、ビタミン、必要栄養素などは、システムの算出した必要栄養量、患者の体重、年齢、病状（疾患の有無、過去と現在の日次血液分析の結果など）に基づいて決定されます。

農村部の新生児ケアのために同様のエキスパート・システムを構築するのは、おそらく百倍も困難な作業です。利用料はドル単位でなくペニー単位に抑えなければ駄目です。以下に示すような技術的課題もあります。

- エキスパート・システムの端末となる情報機器、現地の家庭の主婦が現地の言葉で使えるコンピュータはほぼ皆無です。存在したとしても住民がアクセスできるとは限りません。しかし数年後には、進化した携帯電話がこうした役割を担えるかもしれません。
- 現地の言葉にローカライズしたインターフェイスを持つ音声認識・合成システムを開発しなければなりません。
- エキスパート・システムに FAQ データベースを搭載するだけでは不十分です。テキスト以外に動画形式や音声形式の回答が必要です。現地のデータベースに回答が存在しない場合は、世界中のもっと大きな FAQ データベースにアクセスし、その検索によって回答を引き出せなければなりません。その場合、多言語対応のサーチエンジンと翻訳機能が必要になります。どこのデータベースにも答えがない場合には専門家が回答し、即座に回答するだけでなく、将来に備えて情報をストックしておく必要があります。
- 問題解決には処方が必要でなければなりません。例えば、AIDS 患者に「あなたには抗 HIV 薬の 3 種混合カクテルが必要です」という答えでは不十分です。「どこそこに行けば手に入ります」「支払いはどのようにすればいいのか」「買うお金がない場合はどうすればいいのか」なども教えなければなりません。

こうしたソリューションを社会経済的な貧困にあえぐ人々に提供するために、ICT は強力なツールとなります。遠隔治療機能を使えば、医者への連絡や治療方法へのアクセスが実現します。ローカライズされたエキスパート・システムがあれば、必要なときすぐ健康情報を入手できます。そうすれば新生児の死亡率を低減でき、適切な情報を通じて衛生意識も高まるのです。

むすび

ロボット工学と知能システムが今後 50 年に劇的進化を遂げることは疑うべくもありません。テレビ電話、事故防止システムを搭載した自動車、全地球規模の情報・知識へのアクセス、オンデマンド・エンターテイメント、オンデマンド学習、遠隔医療などのサービスは確実に現実のものとなるでしょう。

先進技術の進歩は私たちの暮らしぶり、働き方、自己統治の在り方を大きく変えます。その恩恵を持つ者と持たざる者の格差を押し広げる方向に使うのか、それとも貧しい人、病に苦しむ人、無学な人を助ける方向に使うのかは私たち人間次第です。私としましては本田財団の尽力でエコ・テクノロジーを普及発展し、「人間味あふれる 2050 年」になることを切に希望します！

参考文献

1. M.E. Pollack, "Intelligent Technology for an Aging Population: The Use of AI to Assist Elders with Cognitive Impairment", *AI Magazine*, 26(2), September 2005.
2. Intel, "Robot nurse escorts and schmoozes the elderly", <http://www.intel.com/employee/retiree/circuit/robot.htm> , July 2004.
3. American Standard Robotics, "VGTV Xtreme" , http://www.asrobotics.com/products/vgtv_xtreme.html
4. International Rescue System Institute, Japan, "", <http://www.rescuesystem.org/tmp/NEW/en/framepage01.htm> , November 2005.
5. J. Mostow, S. Roth, A. G. Hauptmann, and M. Kane, "A Prototype Reading Coach that Listens". *Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-94)*, American Association for Artificial Intelligence, August 1994, pp. 785-792.
6. J. Mostow and G. Aist, "Evaluating Tutors that Listen: An Overview of Project LISTEN. In K. Forbus and P. Feltovich (Eds.) *Smart Machines in Education*", MIT/AAAI Press, 2001
7. Chuck Thorpe, et. al. "Safe Robot Driving", Proceedings of the International Conference on Machine Automation (ICMA 2002), September 2002
8. Chuck Thorpe, M Hebert, T.Kanade, and S.Shafer "Vision and Navigation for the Carnegie Mellon NavLab", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, No. 3, May 1988, pp. 362 - 373.
9. Computer Science and Telecommunications board, "National Research Council, "More than Screen Deep, Toward Every Citizen Interfaces to the Nation's Information Infrastructure." July 1997.
10. Raj Reddy, "The Role of Information Technology at the Bottom of the Pyramid" <http://www.rr.cs.cmu.edu/it4pbp.ppt> , October 2005.
11. Jaime G. Carbonell, Alon Lavie, Lori Levin and Alan W.Black "Language Technologies for Humanitarian Aid." *Technology for Humanitarian Action* pages 111-137.
12. Carnegie Mellon University, "Universal Library", <http://www.ulib.org>
13. Rahul Tongia, Eswaran Subrahmanian, V.S. Arunachalam, "Information and Communication Technology for Sustainable Development, Defining a Global Research Agenda", http://www.cs.cmu.edu/~rtongia/ICT4SD_Front_Pages.pdf , 2003.
14. Vienna Expert System for Parenteral Nutrition of neonates (VIE-PNN), " An Expert System for Parenteral Nutrition Composition of Newborn Infants" , <http://www.ai.univie.ac.at/imkai/kbs/vie-pnn.html>