

01 総論：医療のための デジタルヒューマン技術



金出武雄

産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター
t.kanade@aist.go.jp

持丸正明

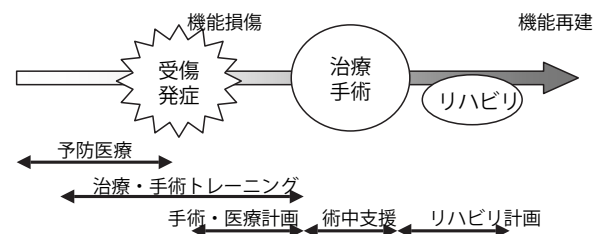
産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター
m-mochimaru@aist.go.jp

デジタルヒューマンとは

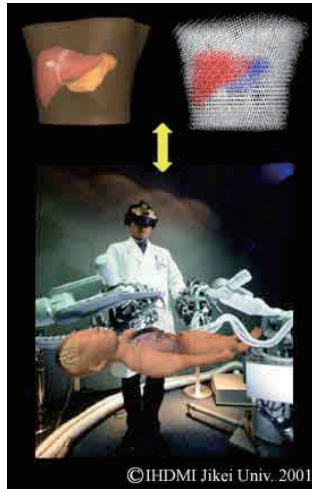
Human, the weakest link. — 現在、製品やシステムの多くがコンピュータ支援で設計され運用されている。製品やシステムの働きが解明され、計算モデルとして再現されているのである。一方で、その製品やシステムの対象である、あるいは、重要な要素である人間の働きは十分に解明されておらず、計算機上のモデルもできていない。それゆえに、製品・システムが人間に対してうまく働かないという問題が生じる。たとえば、人工関節という製品の材質、形状、強度は最新技術と計算モデルに基づいて設計されているが、その人工関節が人体の一部としてどのように働き、それが人間生活の質（QoL: Quality of Life）をどのように変えるのかは、十分に理解されていない。人工関節と人間という系全体で、人間機能を再建し QoL を向上させるという目的を達成することを考えた場合、人間の部分が最も理解されていない最も脆弱なリンクになっている。デジタルヒューマン研究は、これを解決するために人間機能をモデル化し、計算機上に再現するための研究である。上記人工関節の例を挙げるまでもなく、医療にかかわる製品・システムは、明らかに人間（患者）を対象にしたものであり、人間機能に関する計算モデルをもって設計し、運用すべきものである。近年、最先端技術が高度医療装置（内視鏡など）や代替器官（インプラントや義肢）に適用されるようになり、製品やシステムの自由度が増すなかで、これらのシステムをどのように設計し、どのように用いることで人間機能が正しく再建されるかを予見したいという要請が強い。さらには、人間機能モデルの援用により危険性を予測し、事故を防止する予防医療への展開も期待されている。

医療のためのデジタルヒューマン技術

医療のためのデジタルヒューマン研究は、受傷・発症から治療、そして機能再建に至るまでの時間軸に沿って4つの研究に分けて考えることができる（図-1）。第1は治療・手術そのものを低減するための予防医療の研究、第2は治療・手術の手技をトレーニングするための人体シミュレータの研究、第3は術前の治療・手術計画支援に役立てるための研究、そして、第4は術中の治療・手術支援に役立てるための研究である。手術のあとにリハビリテーションを必要とする場合もあり、このリハビリテーション計画支援のためのデジタルヒューマン研究もあるが、ここではリハビリ計画支援も第3の治療・手術計画に含めて考える。そもそも医療とは、患者の人体構造を再建することではなく、患者の人間機能を再建し、生活を取り戻すためのサービス全般を指すものである。このような医療サービスにおいて、サービスクオリティの向上と管理、科学的根拠に基づく医療（EBM: Evidence Based Medicine）、そして予防医療は重要度の高い課題といえる。医療におけるデジタルヒューマン技術は、これらの3つの課題にかかわる基盤



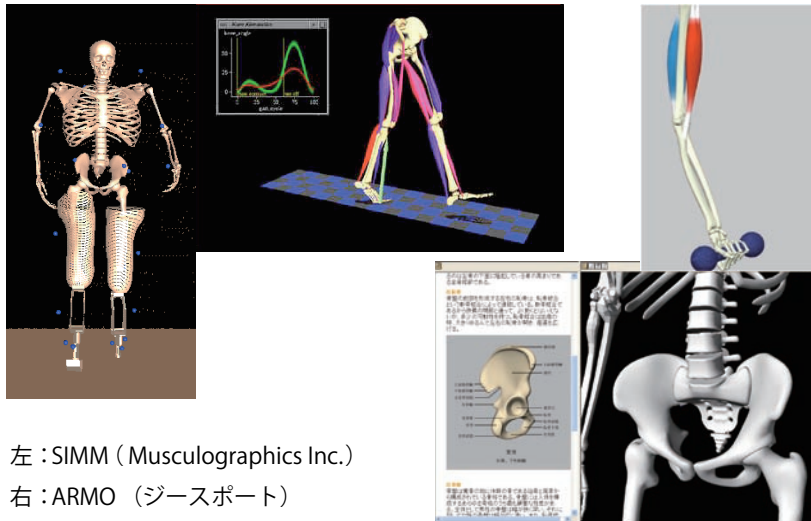
■ 図-1 医療におけるデジタルヒューマン技術



左：VRと臓器変形モデルによる手術トレーニング（慈恵医科大学高次元医用画像工学研究所）

右：破壊可能な精密鼻腔模型による内視鏡手術トレーニング（産総研）

■図-2 仮想患者モデル



左：SIMM（Musculographics Inc.）
右：ARMO（ジースポート）

■図-3 人体機能可視化ソフトウェア

技術となっている。

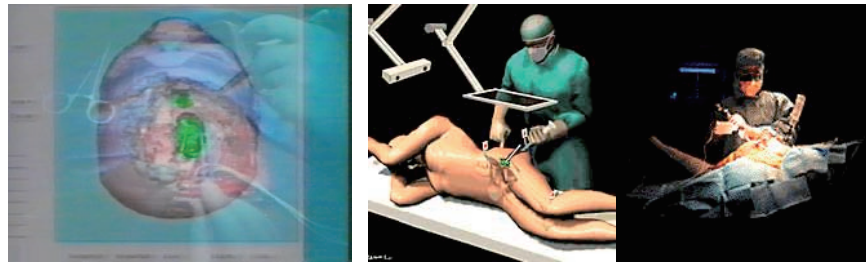
医療サービスクオリティの向上・管理

患者が期待する医療サービスとは安全・安心で、必要十分な説明があり、コストが安く、品質にばらつきのないものである。第1の安全・安心には、医療従事者の技量をトレーニングする仮想患者モデルや医療事故予防技術が役に立つ。仮想患者モデルには、患者の人体・臓器形状や材料特性を実体模型やVR技術で再現する研究がある（図-2）。構造だけでなく、患者の薬理反応や、さらには患者が受ける心理的圧迫とそれに基づく生理反応までもモデル化して再現することで、医師の総合的な医療トレーニングに役立てようという研究も進められている。

第2に挙げた十分な説明と同意形成（informed consent）には、デジタルヒューマンの可視化技術が役立つ。医師はサービスを受ける患者に対して、治療

手段の選択肢と選択結果の利点とリスクを患者に説明し同意を得る義務がある。説明を受ける患者はあくまでも医学の素人であり、専門用語を並べられても分からない。医師は治療手段の本質と得失を簡潔かつ明瞭に患者に伝えなければならない。患者の機能がどのように損なわれているか、治療がこれをいかにして再建するのかを、視覚的に提示することが有効である。それも、医用画像のような専門データを患者に見せるだけではなく、より分かりやすく、かつ、生々しくないCG画像を併用するべきである。このようなCG画像を用いた説明・同意は、まだ医療現場に普及しているわけではない。ただし、これに有効と思われる人体機能可視化ソフトウェアは製品として出始めている（図-3）。今後、これらのソフトウェアで、患者個人の状態や治療計画に沿ったモデルの構成と可視化をより簡便に実現できるようになれば、普及が進むと期待している。

第3のコスト低減と第4の品質管理には、治療・手



左：Augmented Realityによる手術情報支援（Harvard Medical School）
 右：人工股関節手術ナビゲーション（Carnegie Mellon University）

■図-4 コンピュータ支援医療

術計画技術と術中支援技術が寄与する。医療のためのデジタルヒューマン研究において、最も層の厚いのが、前者の治療計画を目的とした研究である。特に、治療に利用されるさまざまな人工機械（義肢、カテーテル、人工関節など）を、患者個人の特性や構造に応じてどのように選択し、どのように処方するかを仮想的に検討するための研究が多い。このような研究では、患者の構造と機能をモデル化しており、人工機械による代替などで構造を変えた場合に、最終的な機能がどのように再建するかを模擬できるようになっている。後者の術中支援はこの治療計画通りに治療・手術を実行するための技術である。術中支援技術では、ロボットやMixed Reality（複合現実感）などの先端技術導入が進んでおり、実際の医療現場での利用も始まっている（図-4）。術中支援における最大の課題は、これらの高度なロボットやコンピュータに術中の患者の状態を理解させることにある。コンピュータが患者の状態を医者のように理解できないまでも、患者自身の体位や治療操作によって動いた体位や臓器の構造変化を人体モデルとして常時獲得するためのデジタルヒューマン技術が不可欠である。

Evidence Based Medicine

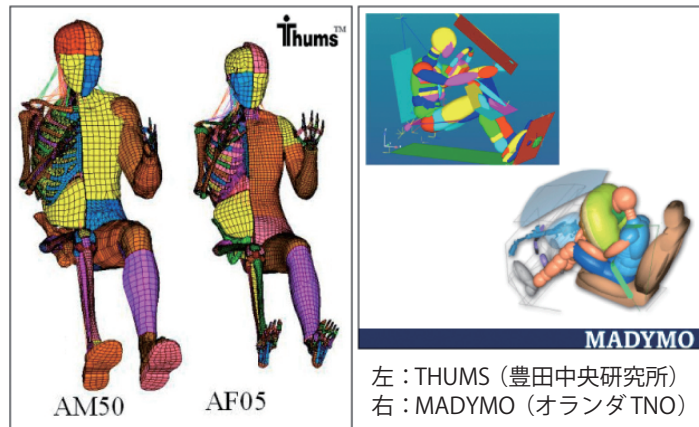
科学的根拠に基づく医療（EBM）とは、投薬や治療によって人体の構造や状態が変化する仕組みを実測データに基づいて理解した上で、個々の患者に対する治療手段を決定することを指向する医療サービスである。実測データに基づいて人体の働きを解明する科学がEBMの根幹となる。デジタルヒューマン技術の根底をなすコンピュータシミュレーションは、実測データに基づく科学的解明の対極にあるように思われがちである。コンピュータシミュレーションでは「計算モデルで現象を再現できる」ことしか証明できず、「現象の本質が計算モデルの通りである」ことを証明できるわけではないからである。とはいえ、人体活動のすべてを、生体内（in vivo）で、かつ、実活動条件下（in situ）で詳細に観測できる

わけではない。得られる観測データには限りがあり、それだけから人体の働きを解明することは難しい。デジタルヒューマン技術は、現時点で観測可能なデータとモデルを連係することで、観測不能な現象の予測と可視化を担う技術であり、実測データに基づく科学的解明を補完する技術なのである。そういう意味で、EMBの科学的根拠を得る手段として、デジタルヒューマン技術は大いに活用されるべきである。

観測可能なデータと連係し、科学的な働きの解明を指向するという点で、医療のためのデジタルヒューマン技術はアニメーションやゲームに活用される人体のシミュレーション技術と根本的に異なる。後者がリアルタイム性やインタラクティブ性を重視して、人間の働きをうまく再現する簡易なモデルを目指すのに対し、前者はあくまでも科学的な仕組みのモデル化を指向し、モデルに使用するデータの信頼性が要求される。コンピュータ性能の高度化により、複雑な物理モデルでもシミュレーションが可能となったが、それは同時に観測・実測の難しい未定パラメータを大量に抱えることでもある。屍体実験や生体での観測可能なデータから、これらの未定パラメータを実測・同定して、モデルシミュレーションと連係していくことが、EBMに資するデジタルヒューマン技術の基盤である。

予防医療

予防医療とは健康を維持し、事故を低減することによって、身体機能を損なうことそのものを低減しようというものである。健康で安全な暮らしを守り、機能再建のための医療サービスを受けずに済めば、労働力も損なわれず医療費も抑制される。そのためのデジタルヒューマン研究も進められている。健康維持という側面では疫学的な研究が古くから行われており、最近ではサプリメントの効能やスポーツによる体力維持などの観点でミクロからマクロに至るまで幅広い研究が行われている。デジタルヒューマン技術を活用した例として、高齢者向



■ 図-5 人体モデルによる衝撃予測

け体操の筋力トレーニング効果を筋骨格系モデルを用いて解明したものなどがある。高齢者向け体操の多くは体表にあるアウターマッスル（主動作筋）ではなく、インナーマッスルの筋力維持を目的とするものが多い。インナーマッスルの活動は表面筋電では観測しにくいいため、筋骨格系モデルを有するデジタルヒューマン技術が利用されることになる。

機能損傷の原因となる事故そのものを予防するための研究も行われるようになってきている。たとえば、自動車事故を低減するための人体モデルの研究がある（図-5）。コンピュータの高度化により、以前では考えられなかったほど複雑な有限要素モデルを解くことができるようになり、衝突時の人体に働く衝撃応力を細かく模擬できるようになっている。単にダミー人形で衝撃試験を行うだけでなく、詳細な有限要素モデルを用いた衝撃シミュレーションで、多様な人種・体格、さらには多様な衝突パターンに応じた衝撃応力を知り、それを低減するための設計が進められている。一方、小児科分野では子供の事故を予防するためのデジタルヒューマン研究が始まっている。子供の発達に伴ってどのような行動パターンが発現し得るかを模擬し、家庭内のハザードを発見する、さらには、そのハザードの原因となっている環境や製品そのものを見直していくというアプローチである。



医療のためのデジタルヒューマン研究の共通課題

予防医療から、手術トレーニング、治療・手術計画として術中治療支援に渡るデジタルヒューマン技術における共通課題を考えてみたい。個々の研究課題にはそれぞれ課題特有の問題点や困難性があるが、特に共通する課題が2つある。第1はモデルに必要なパラメータの取得、第2はモデルシミュレーションの精度と信

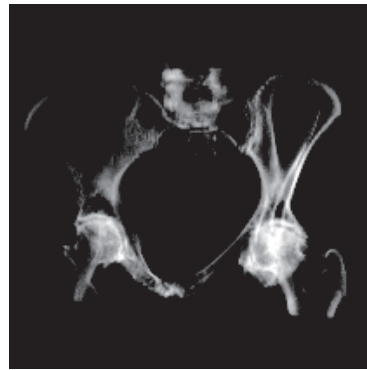
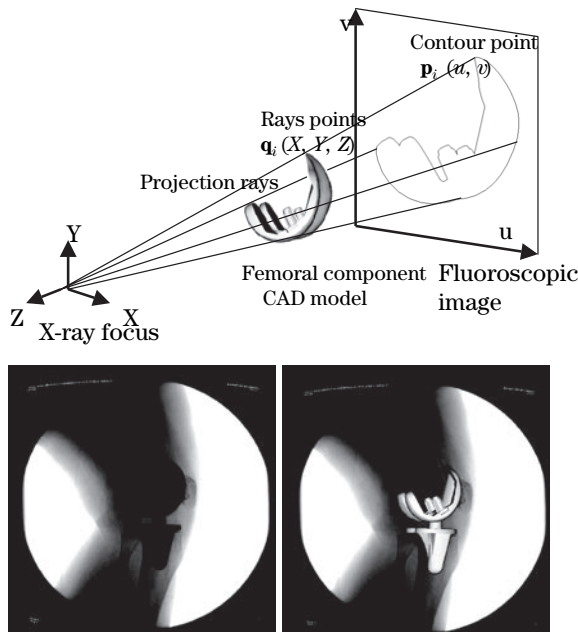
頼性の検証である。

モデルパラメータの取得

そもそも人間の構造・機能は複雑であり、それをモデル化するとすると、モデルのパラメータ、たとえば、寸法や形状、材料特性などをいかにして取得するかという問題が生じる。精密なモデルを作れば作るほど、これらの未定パラメータが増え、シミュレーション結果そのものがパラメータの決定如何に左右されることになる。先に述べたとおり医療におけるデジタルヒューマン技術では、高い信頼性と科学性の裏付けとして、でき得る限り実測データによってパラメータを決定することが要求される。そのため、医療向けのデジタルヒューマン研究は、単に複雑な計算モデルを構築してシミュレーションを実現するだけでなく、屍体実験や生体計測によって計算モデルのパラメータを同定するための研究が含まれている。研究全体に費やす時間からいえば、パラメータを同定することが研究の主体であるというべきかもしれない。パラメータの中でも形状や材料特性は物理的に計測可能な量であり、医用画像や屍体計測でなんらかのデータを得ることができる。ところが、より複雑なモデルでは感覚受容器の発火量や神経結合度、脳内の時間遅れなど実測が不可能に近いパラメータを含む場合もある。これらのパラメータは、シミュレータから出力される可観測な結果の妥当性と、その出力結果に対するパラメータ感度をもって評価するしかない。

シミュレーションの精度と信頼性

では、そのシミュレーション結果の妥当性をいかにして評価するのか。実はこれも容易ではない。そもそも人体モデルを用いたシミュレーションを必要とする背景には、実際の間人を使った実験ができないという事情がある。人工関節の妥当性を検討するために、同一の患者に



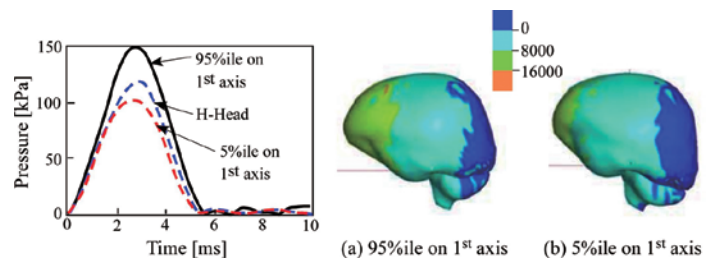
左：単眼X線画像からの人工膝関節位置・姿勢の同定（大阪大学医学系器官制御外科）
 右：人工股関節位置・姿勢の同定（Carnegie Mellon University）

■ 図-6 個別構造パラメータ同定技術

何度も手術をして異なる人工関節を埋め込み、妥当性を実測するというわけにはいかない。まして、自動車事故での傷害程度を知るために人間を乗せたまま衝突をさせることはできない。実験ができない条件下で実測困難な深部生体量を知るためにシミュレーションを行うのであり、その結果の妥当性と信頼性を問われても明快に回答しようがない、というのがデジタルヒューマン研究に携わる多くの研究者の本音であろう。無論、それでよいと言っているのではないし、実際に研究者たちも上で述べたようなパラメータをできるだけ精度良く実測したり、あるいは、比較的危険でない条件下で実測可能な量で実測とシミュレーション結果を比較したりしている。現時点では、これ以上どうすることもできない。ただ、このデジタルヒューマン技術が実際の医療現場で利用されてくると、状況は一変する。患者個別パラメータと治療工程を記録し、その結果として患者の機能がいかに再建されたのかを評価すれば、シミュレーションによる予測の妥当性を評価できる。実際の機能再建結果と予測にずれがあれば、その原因を探り、さらに高度で信頼性の高いデジタルヒューマン技術に発展することになる。

医療ログデータベースの蓄積

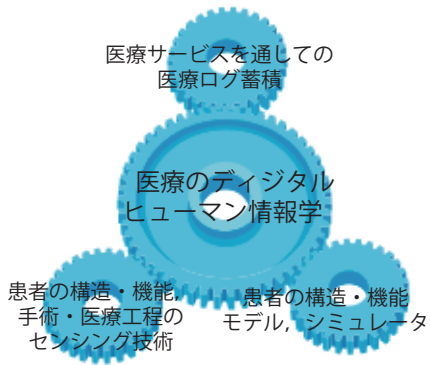
医療のためのデジタルヒューマン技術は、研究室でモデルを構成し、実験によってモデルパラメータを決定し、できあがったシミュレータを医療現場に提供するという流れだけでは完遂しない。実際に医療現場で使用したときのデータを蓄積し、それをさらに精緻なモデル開



■ 図-7 個別の有限要素メッシュ変形

発やパラメータ同定の研究に還元するという循環が必要である。このためには、患者個人のモデルパラメータを現場で簡便に同定できる技術や治療・手術工程の記録技術、治療結果の評価技術なども必要になる。

屍体実験や煩雑な生体実験で同定したモデルパラメータは、治療対象である患者個人のものと異なる。現場レベルで患者個別のモデルパラメータをセンシングする技術として、たとえば、医用画像を用いた形状モデリングなどがある。最近では2次元のX線画像とコンピュータ上の3次元モデルを位置あわせることで、人工関節のアライメントを同定する技術などもあり、できるだけ非侵襲で現場の手間をかけずに個別パラメータをセンシングする研究が進められている(図-6)。また、有限要素のメッシュモデルを個別に変形する技術(図-7)や、さらには個人の材料特性を医用画像と荷重計測から同定する研究なども行われている。これと並行して、人体モデルシミュレーション研究において、パラメータ感



■図-8 医療ログデータベースへ向けて

度の検討も必要となろう。これは、あるパラメータのみを±1標準偏差変化させたとき、結果がどの程度変わるのかを、すべてのパラメータについて調べることを意味している。先に述べたようにパラメータそのものを同定することが煩雑で、当然、誤差も含んでいるであろうから、これを多人数で計測して統計データを得ることは現実的ではない。ただ、それでも、あえてパラメータを変化させ感度を解明しておく必要があると考えている。それは、個別パラメータの取得時の要求精度と深くかわるからである。

治療・手術工程の医療ログをデジタルヒューマンモデルのパラメータとして記録する技術も必要となる。この一部は現在のコンピュータ支援治療技術で実現できる。ただし、現在、記録されている情報の多くは治療側の機器の動きと内視鏡画像であり、内視鏡画像情報そのものをデジタルヒューマンモデルとして記述しているわけではない。パラメータ同定技術を駆使して、内視鏡画像情報から患者個別パラメータを獲得することが必要となる。患者個別パラメータは一定不変なものではない。治療行為中に、患者の体位や臓器は変形し、心理生理的な患者の状態も変化する。デジタルヒューマン技術によって患者個別パラメータの時間変化情報を獲得し、医療従事者の治療行動、その結果としての患者人体構造パラメータ（臓器・骨格）の変化と患者機能パラメータ（循環・生理）を一貫して記録する必要がある。さらに、手術・治療が終了し、患者が日常生活に復帰してからの機能パラメータ（生活行動・心理）をも記録しモデル化していくべきである。

これらの技術によって、患者個人の特性データと実際に行った治療・手術工程、その治療結果という一貫したデータを蓄積する「医療ログデータベース」を構築することで、医療のためのデジタルヒューマン研究が熟成される。この研究は図-8のように体系化できる。患者の構造と機能を記述し再現するモデル・シミュレータと、そのモデルパラメータを現場で簡便に取得するセンシ

ング技術と、医療サービスを支援しながら記録する技術から構成される。医療のためのデジタルヒューマン研究は、この歯車を医療現場で廻しながら医療ログを蓄積し、それに基づいて実験室レベルでのモデル・シミュレーション技術が進展するという循環を繰り返すことで発展していく。さらに、この考え方を予防医療にまで拡張すれば、医療現場でのログを蓄積するだけでなく、医療現場をトリガにして事故や疾患の原因になった日常生活行動まで関連づけて蓄積することが必要だといえる。医療のためのデジタルヒューマン研究とは、言うなれば人体の構造や機能のモデル（数理的な仮説）をベースにして医療データを蓄積することで、散在する医療情報を統合し知識化することを指向した情報学研究なのである。

患者モデルから医療従事者モデリングへ

医療のためのデジタルヒューマン研究の多くは、患者という人間をモデル化の対象にしている。ただ、医療というサービスにかかわる人間は患者だけではない。サービスを提供する医療従事者もモデル化の対象になるべきである。たとえば、医療サービスの安全・安心の中で最も関心の高い医療事故や院内感染は、精密な患者の人体モデルだけでは低減し得ない。医療従事者側の行動ログの蓄積と、認知・疲労・行動に関する医療従事者モデルの研究が必要となる。現在、この分野の研究は必ずしも多くはないが、一部の大学病院などではユビキタスセンシング技術を用いた行動ログの蓄積などを試験的に始めている。今後、この行動ログから、医療従事者の計算モデルをいかにして構成していくかが大きな研究の焦点となっていくであろう。

医療のためのデジタルヒューマン研究は、Visible Human Project など医用画像処理を中心とした患者の形状・構造を情報処理対象とする研究に始まり、それが、循環器系、筋骨格系、制御系など患者の機能を情報処理対象とする研究に発展してきた。さらに、患者の心理・生理反応や行動にまで情報処理対象の範囲を拡げつつある。そして、今後、情報処理の対象は、患者だけでなく、患者を取り巻く環境や、患者に医療サービスを提供する医療従事者へと展開することになるだろう。人間が人間に対してサービスを提供し、そこに多数の先端的な機械が関与し、そして結果が生死にかかわるといふきわめてクリティカルな「医療」という場が、人間を対象とする情報処理技術—デジタルヒューマン研究の最も重要で、最も難しい挑戦課題であることは間違いない。

(平成 17 年 11 月 12 日受付)