解説

全人間シミュレーション

Whole-Human Simulation

山根 克* *東京大学

Katsu Yamane* *University of Tokyo

1. はじめに

全人間シミュレーションとは、人間の運動機能、代謝系、感覚器、脳神経ネットワークをできる限り忠実に再現したモデルに基づくシミュレーションである。究極的には、個人の“コピー”をメモリ上に構築し、数秒から数年の時間スケールで実時間より高速に高精度のシミュレーションを行うことを目標とする。応用分野として、ロボットの身体・知能の設計、疾患の進行・治療効果の予測、薬剤・治療法の開発、Brain-Machine Interface (BMI) などの革新的なユーザインタフェースの設計などがある。また、人間と同等の運動能力をもつハードウェアが実現されれば、自分のコピーを世界（あるいは宇宙）のどこにでも具現化して、あたかもそこにいるかのように行動することも可能になる。

本稿では、まず現在までの全人間シミュレーションに関連する技術の進化をまとめる。次に、上に述べた未来像を実現するにあたっての技術的課題を示し、今後 50 年間でそれらがどのように解決されるかの見通しを示す。最後に、全人間シミュレーションが 50 年後の社会に与えると予想されるインパクトについて述べる。

なお、全人間シミュレーションに関するロードマップをまとめるにあたって、以下の方々に分担していただいた。この場をお借りして謝意を表したい。

- 持丸正明氏（産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター）：運動系のマルチスケールモデル
- 深井朋樹氏（理化学研究所 脳科学総合研究センター）：脳神経ネットワークのモデリング

2. 現在までの技術

現在でも各機能・スケール別には様々なモデルが構築されており、個別に応用も広がっているが、異なる空間スケール、機能のシミュレーション技術の間には大きな乖離がある。時間スケールとしては、ほとんどの場合数秒程度、代

謝モデルでも数時間程度が限界である。各分野の現状の現状をまとめる。

臓器・代謝系：ミクロレベルでは分子動力学によるタンパクの折り畳みシミュレーション、マクロレベルでは有限要素法による臓器変形等のシミュレーションが個別に行われてきた。近年それらの融合を目指したプロジェクトが活発化している。

運動系：全身筋骨格系のマクロなモデルがスポーツやリハビリテーションに応用され、一定の成果を挙げている。筋のミクロな構造と動作原理はほぼ解明されているが、マクロモデルとの融合はまだ行われていない。

脳神経系：パーセプトロン、ニューラルネットワークなどマクロな数理モデルにより、脳の基本的な機能のシミュレーションが可能になっている。一方ニューロンやシナプスのミクロレベルの構造・機能解明や数理モデルの構築も進んでいる。近年の計算機能力の向上を背景として、脳神経回路を忠実にモデル化するプロジェクトが始まっている。

3. 技術的課題

冒頭で述べたような未来像を実現するためには、図 1 に示すように現状のシミュレーション技術を三つの方向に発展させる必要がある。すなわち、ミクロからマクロまでを統合的に扱うマルチスケール化、各機能モデルを融合するマルチモーダル化、そして数秒から数年後を予測する時間スケールの拡大である。

図 1 全人間シミュレーションに向けた三つの技術課題

原稿受付 2008 年 7 月 18 日

キーワード: Human Modeling and Simulation, Multiscale Simulation, Neural Network Simulation

*〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

もちろん、全人間シミュレーションは多くの関連技術のブレークスルーなしには実現できない。特に、計算機の演算能力の飛躍的な拡大は必須である。実際、理化学研究所の次世代スーパーコンピュータ開発においては、生命体統合シミュレーションがアプリケーションの一つとなっており、今後の発展が期待される。その他、モデル構築・個人適合のための膨大なデータを生体から収集するには、MEMS技術等を駆使した非侵襲計測デバイスが不可欠である。

4. 50 年間の技術展望

4.1 20 年後まで：機能別モデルの進化と統合の始まり

各機能モデルのマルチスケール化と、マクロレベルでのマルチモーダルモデルの開発が並行して進む。一部機能については分子レベルから全身レベルまでのマルチスケールシミュレーションが可能となる。マルチモーダルなモデルはいくつかの組み合わせで部分的に実現する。例えば運動機能と感覚器モデルを脳科学分野の知見と融合することで、人間の運動を実現している身体構造と制御機構、知能を実現している脳神経系の詳細な構造が明らかになる。革新的なアクチュエータの出現にも刺激され、ロボットのハードウェア・ソフトウェアの設計法が大きく変化する。代謝系において統計的手法を利用した長期シミュレーションが実現し、疾患の予測などへの応用が始まる。ベタフロップ計算機の実現により脳のある程度まとまった部位のモデル化およびシミュレーションが可能になり、限定された状況では人間とほぼ同等の判断力をもつ知能が実現される。

4.2 50 年後まで：本格統合と個人適合

マルチモーダルモデルへの本格統合と個人適合技術の開発が進む。内臓・代謝系、脳神経回路の主要部分、運動系が統合された全人間モデルが実現され、数秒間の詳細なシミュレーションから数年スケールの統計的なシミュレーションが可能となる。個人適合のための基礎技術として、人間の運動や神経活動を非侵襲に計測するための手法が確立される。これらの計測技術はインタフェースとしてロボットにも実装され、ロボットが人間の状態を推定したり、BMIの入力情報として利用されたりする。

全人間モデルの要素技術からも様々な応用が展開される。脳神経系の構造に関する知見とモデルにより、ロボットが人間に近い判断力やコミュニケーション能力をもつようになる。五感を代替するデバイスが開発され、物理的・化学的な刺激を直接神経の電気信号に変換して人間に与えることが可能になる。人間の運動系と制御系に関する知見が人間型ロボットのハードウェア・ソフトウェア設計に生かされ、人間と同等の運動能力をもったヒューマノイドが実現する。上記知能と融合することで、多くの分野で人間に代わって作業するロボットが登場する。

5. 社会へのインパクト

詳細な人間モデルは、ロボットが人間の状態を推定・認識したり、超並列計算により得られた多数の候補を評価したりする際のリファレンスとなる。例えば医学においては、現在大規模な臨床試験が必要な薬剤・治療法の開発を計算機実験のみで行えるようになる。さらに、個人適合モデルを構築することができれば、将来の疾患の予測や、効率的なテーラーメイド医療が可能になる。

人間と同等の身体と、ある程度の判断力、コミュニケーション能力をもったロボットにより、多くの単純作業、肉体労働がロボットにより行われるようになる。実現される知能のレベルによっては、話し相手など、より高い適応能力を要求される分野にもロボットが使われる可能性がある。さらに、脳科学の知見を応用した脳の損傷部位の代替、教育の効率化、新たな能力の開発などができる可能性もある。

ハードウェア（身体）・ソフトウェア（知能・制御）・センサ（感覚器）のすべての面において人間の完全なコピーが可能になれば、情報のやりとりだけであらゆる体験が可能になり、物理的な身体がどこにいるかは重要でなくなる究極のテレグジスタンスが実現する。また、他人の体験を自分の感覚情報として受け取ったり、多数の人生を体験したりする（パラレルライフ）ことも可能になる。

機械がますます人間に近づくことで、技術と社会とのかわりも複雑化することが予想される。人間より優れた知能をもつロボットや、感情をもつロボットの是非が深刻な議論を呼ぶことは間違いない。個人適合モデルデータの保護や、脳神経系の完全なモデルにより考えが読まれることなどが社会問題化することも予想される。

6. お わ り に

50 年後の姿を現在の延長として予想するのは想像以上に難しい作業であった。そこで、全人間シミュレーションとして将来のあるべき未来像をまず設定し、そこに至るマイルストーンを考えた。その結果、夢物語のような話が多くなってしまったかもしれないが、過去 50 年にはそれまで予想もされていなかったような技術革新があったように、ここで述べた未来像に少しでも近づくことを期待したい。

山根 克 (Katsu Yamane)

2002 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士（工学）。カーネギーメロン大学研究員を経て、2003 年より東京大学大学院情報理工学系研究科に勤務、現在准教授。ヒューマノイドロボット、CG アニメーション、バイオメカニクスに関する研究に従事。2004 年 IEEE Robotics and Automation Society の Early Academic Career Award, 2005 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞などを受賞。（日本ロボット学会正会員）