ロボットのシミュレーション*

有 本

卓**

1. は じ め に

コンピュータの著しい発展から，“シミュレーション”という言葉が工学の分野で使われるとき、それは暗黙のうちにコンピュータシミュレーションを指すようになった。これをロボティクス（ロボット工学）で使うとき、それはある実世界でロボットが行う諸々の活動のコンピュータ表現法であると規定できる。それらの活動の表現には、当然、ロボットの置かれている環境のコンピュータグラフィックス表現の問題から、環境の認識、行動計画、動作と作業遂行、評価、等のコンピュータシミュレーションに関わる。これらの個々の要素技術は、本来は、ロボット技術とは独立に開発されたものであるが、これらがロボティクスに使われたとき、これらは融合し、その融合の中から新しい視点が生まれた。

この展望では、始めに、ロボットシミュレーションから生れた従来のシミュレーション技術と異なる新しい視点を指摘する。次いで、環境認識や行動計画にとって本質的なインテリジェンス（知能）の問題を取り上げ、そのコンピュータシミュレーションがどこまで可能になるか、また、これによってマシーンインテリジェンスの技術分野がどのように発展していくか議論する。最後に、これらの議論をふまえて、ロボットシミュレーション技術の展望を行う。

2. ロボットシミュレーションで生れた新しい視点

ロボットシミュレーションの技術には大きく分けて二つの流れがある。本特集号でも暗黙のうちに分けられているように、ロボット本体の機構設計や運動解析のシミュレーション技術と、ロボットとその置かれた作業環境との相互作用に重きを置いたシミュレーション技術とである。後者は、ロボットのオフライン教示の技術開発や、移動ロボットの自律化のための技術開発から生れた。オフライン教示では、まず、ロボット本体とともにロボットの作業対象物や作業環境のコンピュータモデルが必要となる。これらは3次元物体の組合せから成るだろうが、それらのコンピュータ表現にはコンピュータグラフィックス（以下、単に“CG”と称す）の分野で種々のモデルが提案されている。詳しくは本特集号の解説を参照していただくとして、CGの世界ではこれらの物体は、本来、静止していることが前提となっていた。あるいは、動いても、それらは形を変えずに平行移動し、あるいはある軸を中心に回転したとき、ある視点からの見え方を問題にするにとどまっていた。もちろん、陰線消去やシェイディング、色付け、等の問題が研究され、その成果は著しいものがある。実際、これらのいくつかのアルゴリズムが専用プロセッサを用いてハードウェア化され、！実用に供されるに到ってきた。そして、このCGの技術環境がロボットのオフラインプログラミングに取り入れられたのである。しかし、ここまでは、CGやCGに基づくCAD技術の単なる応用である。

新しい視点は、ロボットの本质である“mobility”か

原稿受付 1988 年 4 月 4 日

* Robots Simulation

** 大阪大学基礎工学部

図 1 B-表現 (Boundary Representation)

↑ 図 3 キューブの再帰分割によって生成されるオクトツリー
このツリーは図 2 の環境に対応する

← 図 2 オクトツリーモデル

ら生れた。すなわち、ロボットが行うべき作業は、ロボットと対象物体および作業環境との相互作用によって成就されねばならないことから、コンピュータ内部でそれぞれのモデルの間の相互作用が表現されねばならないことになった。その過程で浮かび上った典型的な研究テーマがコンピュータ内部での物体モデル間の干渉チェックの問題である。自律移動ロボットでは、ロボットと周辺環境物（障害物）との衝突チェックの問題である。これらはロボットが行動することから起るが故に、ロボットシミュレーション特有のテーマとなり得たのである。

ここでは干渉チェック法の研究開発の状況については触れない。ただ、研究はむしろ始ったばかりであることを指摘しておきたい。干渉チェックの方法は色々あり得るだろうが、アルゴリズムの効率性はロボットと対象物体や環境のモデリングのデータ構造に大きく依存する。そこで、色々なアイデアを創造し、そのフィージビリティを試すことが重要になる。ある場合には、ロボットと環境を同じデータ構造ではなく、異なるソリッドモデルに基づく異なるデータ構造で表すことがより効率的な干渉チェック法を生み出すこともあり得よう。

たとえば、ロボットをサーフェスモデルの一つである B-rep で表し（図 1 参照）、環境を別のソリッドモデリング法である Octree で表わしてみよう（図 2 参照）。B-rep はいくつかの面（これをパッチと呼ぶ）から成り、面は頂点座標を与えることによって定義される。Octree は立方体（キューブ）の再帰的な分割から構成する。すなわち、キューブを 8 分割し、それぞれが物体によって完全に占有されるか（黒マーク）、一部占有されるか（混合マーク）、完全なフリースペースであるか（白マーク）によってマークをつける。混合マークのキューブのみを 8 分割し、以下、指定した分解能を与えるレベル数まで

再帰的に分割を進め、図 3 のような階層的な木状データ構造を得る。これら二つの異なるデータ構造間の干渉チェックは、B-rep のそれぞれのパッチが Octree の黒マークされたキューブと重なり合うかどうかを効率的にチェックすることにつきる。しかもよく調べると、このことは混合マークのついたキューブにあるパッチの一部が 8 個の子キューブにどのように分配されるかを見ることに帰着することがわかる。つまり、パッチの効率的な遺産相続アルゴリズムを構築することによって干渉チェックが可能になることに気がつく（図 4 参照）。我々はこうして、静止した環境と運動するロボットの間の効率的な干渉チェックのアルゴリズムを見出した。しかし、この方法を単純に二つの運動する物体間の干渉チェックに適合するように拡張するのは困難であろう。したがって、運動する物体表現に適したデータ構造の選択とともに、

図 4 遺産相続アルゴリズム 子キューブ No. 5 と No. 7 がパッチの一部を相続する

図5 最近接対問題 点対 (P, P') はビークル（陰影つき）と環境障害物との間で互いに最も近接している

データ構造間に特有な最適なアルゴリズムを考察し、そのフィジビリティを調べる広くかつ深い研究がもっと必要になるのである。

3. プランニングの問題

オフラインプログラミングや自律移動ロボットの技術開発で重要な問題にロボットの動作計画や経路計画がある。このプランニングの問題もロボットの“mobility”が起因しており、ロボットシミュレーションの新しい視点を与えている。そして、様々な場合に対して色々なアイデアと計画アルゴリズムが提案されているが、一般的でかつ実行可能な方法となると未だ自信のあるものは作られていない。たとえば、移動ロボットの経路計画では、環境データが与えられた場合でも、多くのアルゴリズムは実用的であるとはいえない。その理由は、ロボットが居る瞬間瞬間の位置の安全状態を把握できるアルゴリズムが構築されていないことにある。そこで、ロボットと環境との間の最も近接している二点の対（最近接点対）を一定の短いサンプル時間ごとに見つけるアルゴリズムが必要なことに気がつく（図5参照）。

ところで、2次元平面で最近接点対を見出す問題はポロイ図の生成問題として計算幾何学の分野で詳しく研究されている。しかし、3次元では一般にポロイ面を生成することは困難であり、計算幾何学の分野でも手がつけられていないのが実状である。しかし、この問題にも、環境をあるデータ構造で表現するとアプローチする方法があり得るはずである。筆者の研究室では、環境をOctree、ロボットをB-repで表して、最近接点対を見出すことを試み、有効なアルゴリズムを構成した²⁾。考え方は2次元で説明すると理解しやすいので、図6を参照していただく。3次元モデルのB-repは2次元では多角形になり、2次元環境はquadtreeで表されている。アルゴリズムは次のように構成される。1) ビーク

図6 ロボットと障害物の間の最近接点対を見出すアルゴリズムの説明 ロボットのバンディングボックスは集合 $\{A, B, C, D, E\}$ から成る

ル（この場合長方形）を含む最小の“bounding box”を干渉チェックのアルゴリズムで見出す。（この場合、白マークの正方形の組 $\{A, B, C, D, E\}$ ）。2) bounding boxの各白マークの正方形と環境の黒マークのついた正方形の間の最小距離を見出す（これも干渉チェック法に似た木探索法で実行できる）。3) これらの白マークの正方形を上で見出した距離の小さい順番で並べる。（図6では $\{B, E, D, C, A\}$ となる）。4) 表の一番上の正方形を取り出し、4分割して、それぞれについて黒マークの正方形との最小距離を見出す。ただし、ビークルと交差しない正方形はここで捨てる。5) これらの子ノードを表に加えて、再び距離の順に並べた後、4)に帰る。以上、4)と5)の操作を再帰的に繰り返して、分割が指定したレベルに達したら、そこで打ち切る。こうして、求めた表の一番上にある白マークの正方形が環境に最も近いロボットの部位を与える。もっとも、これは近似的な意味の最近接点を与えるが、分割数を $n=8\sim 10$ とれば、自律移動ロボットにとっては十分な精度が得られるものと思われる。

プランニングの基礎には、干渉チェックや近接点アルゴリズムのような基本的なシミュレーションツールが必要である。これらのツールを有効に使った上で、可視グラフやパスグラフなどの有用なグラフ構成と木探索法に基づいて、最適パスを見出すことができる。

4. 機械インテリジェンスとの関係

ここまで議論を進めて来ると、ロボットシミュレーションの研究開発はやがてマシンインテリジェンス（以

下, MI と略称)の視点に入ってくる事が理解できる. 特に環境認知を含めて, ロボット行動計画は MI の典型的な課題となる. このような認識に立って, アメリカではこの課題にニューロネットを適用してみることが提案されている. これはニューロネットのもつ学習能力に期待するところから来ているが^{3,4)}, この方向の将来性は豊かなものであろうか. ニューロネットはいわゆる“massively parallel”で, かつ, 柔軟に可変できるパラメータ群をもつアナログとデジタルのハイブリッド計算網である. この道具立ては, 容量の大きさから, 1次情報の前置情報処理機能として有効に働くようにできそうである. しかし, 現時点でも脳の高次情報処理機能はほんのわずかしが解明されていない. 従って, ニューロネットを用いて何が出来るかを探ることも重要ではあるが, MI が独自のアプローチを作り出すことも重要であり, かつ可能である. むしろ, MI の本質的な解明には, 数学的に記述できるデータ構造の上で明確な算法構造をもつ有力なアプローチを創造していくことに着実なものを感ずる.

たとえば, 脳の重要な機能として記憶と学習が挙げられる. しかし, 記憶を担う物質は特定されていないし, 記憶作用の素過程についてすら未解明の状況である. 従って, 生理学的な研究とは離れて, MI に有効な記憶過程の設計アルゴリズムを作り出すことも可能であるはずである. 我々には VLSI メモリーが与えられているが, 環境から得た諸々のデータを RAM にどのように組織的に記憶すればよいのだろうか. 我々の研究室ではその一つの試みを提案し, それを“自己組織化データベース”と名づけ, それが MI にとってどのように有効に働くか調べている⁵⁾.

5. ロボットのシミュレーション展望

上で述べたことは, 究極はインテリジェンスをいかにコンピュータ内部で表現し, 生成するかという問題に帰着する. 我々はこの方向を MI と呼ぶ.

他方, ロボット本体のダイナミクスのシミュレーション

技術も確実に進歩している. ロボットの導入によって, 我々は始めて, 自由度が高いリンク機構の自動創生やダイナミクスの自動生成, 運動のシミュレーションの問題に目を向けた. これらの着実な発展がないと, 真の CAD/CAM の実現はおぼつかない.

6. おわりに

本誌の解説記事には, 編集委員会から, “学会誌の性格上, 公平な立場からの解説”が希望されている. 筆者に課せられたのは展望記事なので, 多少の独断と偏見を許していただいたが, 勿論, そうなりすぎることは大いに恐れている. ただ, 科学技術の独創的研究には今迄に無かった考え方という意味で独断が必要であることも忘れてはならない. この独断が十分な批判に耐えて, やがては科学技術の“定石”となり得る.

参考文献

- 1) 登尾啓史, 福田尚三, 有本卓, “オクトツリーを用いた高速干渉チェック法”日本ロボット学会誌, Vol.5, No. 3, pp. 189-198, 1987
- 2) H. Noborio and S. Arimoto, “An Octree-based Algorithm for Selecting the Closest Pair of Points on a Robot and Its Obstacles”, Proc. of the 2nd USA-Japan Symposium on Flexible Automation, Mineapolis, Minesota, July 18-20, 1988
- 3) J. J. Hopfield and D. W. Tank, “Computing with Neural Circuit: A Model”, Science, Vol.233, pp. 625-633, 1986
- 4) D. E. Rumelhart, et al., “Learning Representations by Back-Propagating Errors”, Nature, Vol.323, pp. 533-536, 1986
- 5) 鈴木寿, 大西弘之, 有本卓, “連想データベース自己組織と自律移動ロボットへの応用”, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.6, pp. 431-441, 1987

有本 卓 (Suguru ARIMOTO)

昭和 34 年京都大学理学部卒業. 沖電気工業 K K, 東京大学工学部助手, 講師を経て昭和 43 年大阪大学助教授, 昭和 48 年教授, 基礎工学部に勤務. 工学博士. ロボティクス, デジタルの研究に従事. 日本機械学会, 情報処理学会, 計測自動制御学会等の会員. IEEE の Fellow 会員.