

病態生理学的シミュレーションに基づく仮想患者を用いた 臨床医療訓練システム

アルティオン・シモ^{*1}, 木島 竜吾^{*2,*3}, マーク・カワザ^{*4}

Training System for Clinical Medicine with a Virtual Patient through Pathophysiological Simulation

Altion Simo^{*1}, Ryugo Kijima^{*23}, Marc Cavazza^{*4}

Abstract: In this paper, we present a new approach to computer-aided training in Medicine based on the visualisation of simulated clinical conditions using a virtual patient. Our system uses a knowledge-based model of cardiac physiology to generate realistic emergency situations (shock states). The overall results of the simulations are presented through a realistic 3D virtual patient whose behaviour and appearance are consistent with the clinical data generated. After introducing the principles behind the simulation and the system's architecture, we describe the process through which physiological parameters are mapped to the visual appearance of the 3D patient and discuss representative results from the system.

Keywords: qualitative simulation, medical education, game engine

1. はじめに

1.1 医学教育における学習者の能動性

知識ベースシステムを応用した医学教育アプリケーションは、単に細切れの知識を伝えるためのツールとなりがちである。これは、現実感の高い診療の文脈を提示できないことが大きな制約となっており、診療の文脈を提示するためには、多くのシステムで用いられている対話モデル[14]では不十分である。なぜならば、実際の診療現場では、予め提示された限定的な選択枝から選んだり、質問に答えたりといった受動的な行動ではなく、患者、医療器具、および周りの環境中に存在する多様で過剰な視覚情報から、様々な情報や兆候を能動的に選択したり、さらには診断のために必要な行動を取ったりすることが必要だからである。例えば、モニタに表示されている生活反応指標(血圧等)を必要に応じて注視し確認すること、必要な検査を(頭の中にある選択枝から)選択し、行うこと、例えば本論文で

扱う心ショックの場合には、頸動脈や皮膚の状態を観察すること、などがここでいう能動的な行動である。これは単に選択枝が示されたり、質問に答えるような受動的な行動のみを要求するシステムでは不可能である。要するに、医学教育アプリケーションには、学習者により能動的な役割を与えることが必要である、という観点が、本研究の主要な動機である。

本論文の目的は、仮想化された病院や治療室を構成し、その中に一種の定性シミュレーションによって様態の変わる仮想患者をおき、全体を十分に可視化することである。このためには2つのポイントがある。1: シミュレータが、可視化のための十分な種類のパラメータを出力可能なこと、2: 学習者に能動性を持たせることのできる、自由度の高い行動環境(視覚的な情報探索等)を実現し、1と組み合わせること、である。つまり、視覚的にリッチな環境のためには1が必要であり、それが十分に表現された環境で、2を行わせることをねらっている。

本論文では、特に救急医療(ショック状況)を取り上げる。まず、臨床的な訓練において仮想患者に必要な視覚表現について議論する。これを十分に満たすような臨床的な徴候を生成するために、定性プロセス理論[6]に基づく人工知能技術を用いて、心臓血管系の病態生理学シミュレーションを行う。患者の状態を計算するモデルはそれ自体、大きな分野であり、全体を解説することは本稿の目的からははずれるた

*1: 岐阜大学工学研究科

*2: 岐阜大学工学部

*3: 岐阜大学 バーチャルシステムラボラトリー

*4: ティーサイド大学 数理計算科学科

*1: Graduate School of Engineering, Gifu University

*2: Faculty of Engineering, Gifu University

*3: Virtual System Laboratory, Gifu University

*4: School of Computing and Mathematics, University of Teesside

め、定性シミュレーションを用いる理由と、構成した心シミュレーションにしばって述べる。筆者らは患者の状態を計算する基礎として、生理学的なモデルが適していると考えているが、生理学の記述レベルは、非常に局所的な現象の詳細な説明から、マクロな視点からの把握まで多岐にわたっており、これらを適切に組み合わせるための仕組みが必要であり、定性シミュレーションが適していると考ええる。

さらにこのシミュレーションモデルから、患者の挙動と臨床的な徴候を視覚的に表現する。シミュレーション結果を視覚表現にマップして仮想患者の様子を実時間で表現する方法と結果の例を示す。

1.2 関連する研究

現在までのところ、臨床的な訓練に仮想患者を用いようという研究は非常に少ない。手術訓練以外の3次元仮想患者は、Badlerら [2][5]によるものが有名である。彼らは、自律的な仮想患者を記述し、戦場における傷病者として軍事シミュレータに取り込んでいる。彼らの仮想患者は、戦場における怪我の症状を呈することができ、ユーザによりコントロールされる医師が緊急治療を行う。

まず、このアプリケーションは、緊急医療に属するものであるという点では本論文と類似ではあるものの、外科的な処置の訓練であり、臨床的な医療訓練とは異なっている。最も重要な相違点は、[2][5]ではPaT Nets[2]と呼ばれるイベントと状態遷移を表す因果関係のネットワークがシミュレーションの基礎であり、病態学的な表現にすぎないが、本論文で扱う定性シミュレーションでは、生理学的なより深い知識の表現を基礎にして病態学的な表現を扱っていることである。より多くの兆候や症状の表現を生成するためには、因果関係のネットワークをアドホックに拡大してゆく必要があり、価値はあるもののその規模に限界があると考えている。生理学的な知識に基づいた定性シミュレーションであれば、処置(入力)はイベントではなく、シミュレーションの内部変数を書き換えることを意味し、症状は因果関係の分岐の数ではなく、内部変数の取りうる組み合わせの数だけ自動的に生成されうる。

また、手術訓練のシミュレーション[12][15]に関しては、現在までのところ、主に手技を扱っているため、器官や組織の物理シミュレーションが主要なテーマであるように思われる。この点で本論文が扱う病態生理シミュレーションとは大きく異なる物である。将来的には、病態生理学的なシミュレーションをも統合した手術シミュレーションも必要とされよう。

さらに、患者のグラフィカルな表現を突き詰め、きわめて高品位な結果を示した研究[13]もあるが、主題は表現であり、詳細な医学シミュレーションではない。

2. 設計と実装

2.1 仮想患者に必要な視覚表現

本節では最終的な視覚表現と関連するシミュレーション出力について、その全体像を示す。詳細な実装と結果については3.2に述べる。

自律的に動作する仮想患者 (Figure 1)は、関連する発作や症状を示すものであり、これらはシステムにより生成される。臨床においては、疾患にかかわらず共通に調査される様々な種類の徴候がある。それらは、機能性徴候 (functional sign)、内診性徴候 (inspection signs)、及び臨床性徴候 (clinical signs)に分類される。機能性徴候は例えば、呼吸の速度などであり、患者の動作に関連するため、適切なアニメーションにより表現可能である。内診性徴候は、診察時に視覚により把握できる症状であり、例えば発汗、浮腫、チアノーゼ、蒼白、発疹などである。これらは、動的テクスチャリングなどの方法で表現できる。

臨床的な手がかりは、より能動的な聴診、触診などの検査によってのみ得ることができる。現在のところ、検査の指示や、検査結果をモニター上に表示することで実現している。

救急医療や臨床では、心拍数(HR)、平均血圧(MAP)等の生活反応が実時間でモニターに表示されている。これらの生理指標は、以下の3つに分類される。

i) 臨床検査で得られる情報: ユーザは単に仮想世界内部のモニタ上の表示を見るだけである。現在のところ、心拍数、血圧、心電図、血圧曲線などを表示させている。

ii) 特別な検査が必要なもの: 心拍出量 (CO)や総合血管抵抗 (SVR)等は、学習者が特定の検査を指定することで、検査の様子を示すアニメーションが示され、検査結果がモニタ上に現れる。

iii) 内部変数: 例えば心室弛緩など、研究室的環境や動物実験により、生理学の研究現場では得られるが、日常的な臨床現場では得ることができない情報である。本論文では臨床を扱うため特にとりあげない。診療訓練中ではなく、その後の説明プロセスで用いることができるであろう。

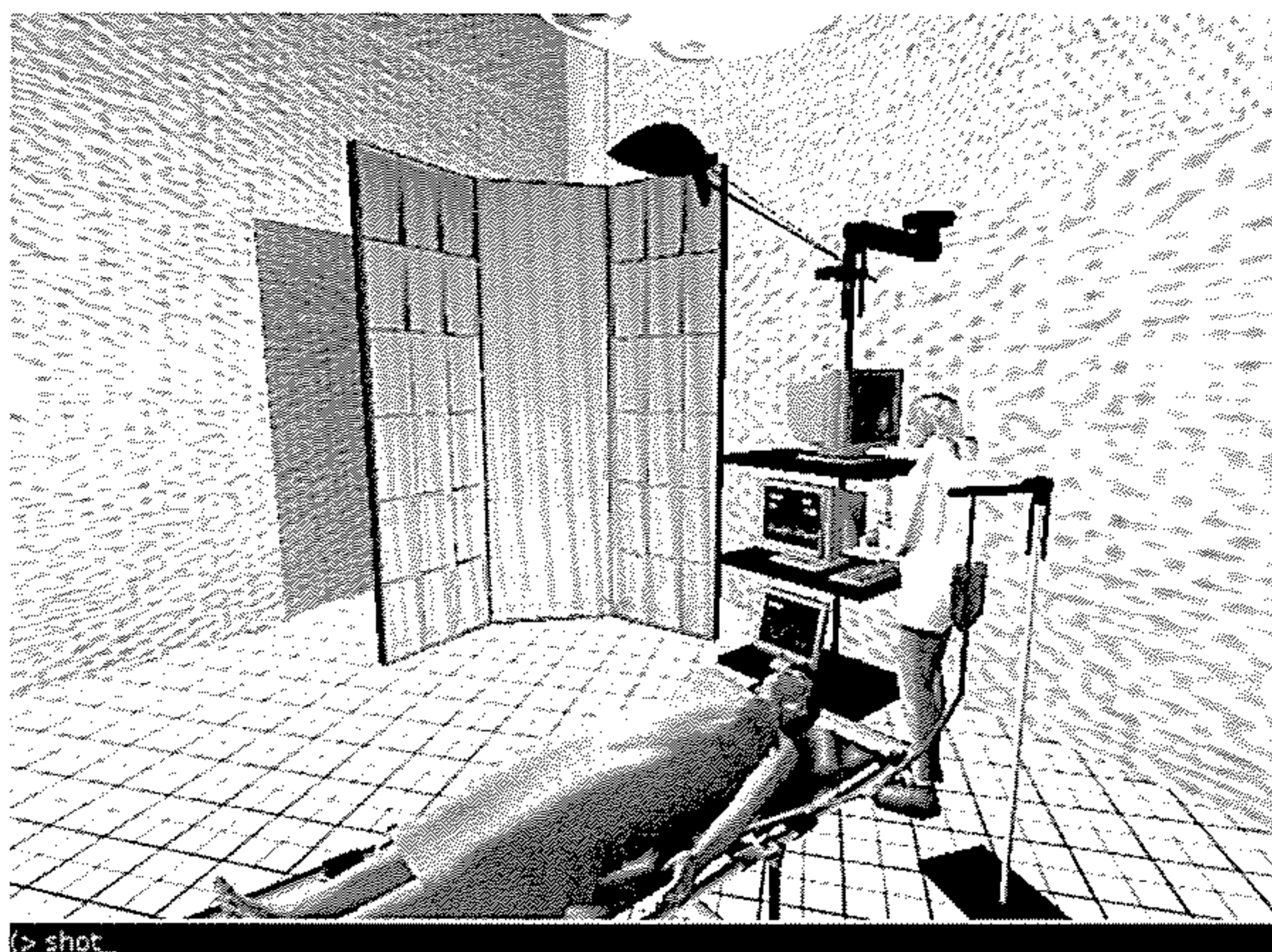


Figure 1. Overview of the Virtual patient.

図1. 仮想患者の様子

2.2. 定性シミュレーションを用いた患者の挙動生成

本論文では、仮想患者の挙動や反応を生成するために、病態生理学モデルに基づいた定性シミュレーションを用いている。本節では、まず、定性シミュレーションを用いる理由を述べ、定性シミュレーションのしくみについて簡単に紹介し、構成したシミュレーションの一部を例示する。

2.2.1 定性シミュレーションを用いる理由

定性プロセス理論は、Forbus[6]によって導入され、医学分野、特に本稿で扱う心臓血管系でも、Kuipers[7]による応用例がある。Long[9]は、Kuipersが構成した定性シミュレーションで用いた因果関係のネットワークに基づいて循環生理学を定式化している。

病態生理学モデルとは、疾患の動態を、健康な状態での生理システム（内分泌系、循環器系など）や、器官（心臓、肝臓など）の振る舞いを基本とし、そこに疾患の影響を加えて記述するものである。これは、健康なシステムの振る舞いに対する機能障害を明示的に記述することができ、医学のテキストや文献において、疾患の原因とその結果を説明するために広く用いられているモデルである [1]。

病態生理学モデルは医用知識ベースシステムでは、「深い知識」として広く用いられている。「深い知識」と呼ばれるのは、臨床的な状況を生成するために、それをルールとして明示的な記述するのではなく、このモデルを用いて原理から生成することが可能だからである [3][10][11]。

さて、定性シミュレーションは、現象を記述するのに、より抽象的なレベルでの記述を用いることを目指すものである。これは、心臓血管系の全体としての挙動を計算する場合、また、心疾患を説明する場合に

有効であると考えられる。その理由を以下にあげる。

1) 数値計算では事実上不可能

まず、心臓の挙動を表現する数値モデルを得ること自体が困難である。また、例えば一つの心室について数値モデルを得ることがもし可能であったとしても、心臓血管系の他の要素、つまり他の心室、心房、主要な静脈、動脈、末梢血管の挙動モデルと組み合わせ、相互の影響を考慮する必要がある。このためには、詳細度、抽象度の異なる知識に基づいてモデルを組み立てるという困難と、組みあがった数値シミュレーションの挙動を説明し、既存の知識との整合性を確認するという困難があり、事実上不可能なように思われる。

2) 定性シミュレーションは医学的知識の表現に近い

教科書などに記述されている医学的な知識（ここでは心臓学）の表現は、定性的な因果関係を主体としている。[7][9]にみられるように、定性シミュレーションは心臓学の「深い知識」を記述するのに役立つ。臨床医学的な知見は常に、観察や計測により得られる情報と、患者の内部状態の間の因果関係から出発するものである。これは、定性シミュレーションモデルに極めて近いいため、モデルの構築が容易である。また、実際に医師が診断を行う際に利用する症状や兆候をそのまま変数として利用することができ、これに基づいて患者の内部状態を説明する物であるため、モデル自体の説明は容易である。可視化や治療を行うためには、シミュレーション結果を解釈したり逆に治療により変数に引き起こされる変化を生成することが必要である。数値計算モデルが構成できたとしても、臨床的に重要な徴候を生成するためには、数値計算結果をもう一度解釈し、表現に変換するためのモデルが必要となる。

2.2.2 定性シミュレーション

定性シミュレーションにおける基本的な記述要素は「プロセス」である。「プロセス」は定性変数に関連づけられており、一つのプロセスに関連する一群の定性変数は、互いに影響を及ぼすために影響関数で結ばれている。つまり、影響関数の有効範囲は、プロセスの内部である。

シミュレーション全体は、イベント（プロセス）のセットとして組み立てられている。これらのプロセスは順序を持って互いに関連づけられている。

ある変数が、あるプロセスにより更新されると、その変数に関連づけられたプロセスが起動される。更新された変数は、別のプロセスへの情報の入力役割を果たし、起動されたプロセス内部の影響関数に

より、別の変数が更新される。このようにして、ある定性変数の変化は、システム全体に波及してゆく。

上記の構造を説明するために例を挙げる。心収縮率ないし心室拡張終期容積を示す変数が変更されたときには、これらに関連するプロセスは心臓の拍出を表現するプロセスはだけであるため、このプロセスのみが実行される。その結果、他の変数が更新されると、それらに関連する次のプロセス群が起動され、そこへの入力となる。

2.2.3 シミュレーションの実装

本論文では、本システム上の最初のアプリケーションとして、救急心処置つまり心ショックの処置を取り上げる。このための、病態生理学的なモデルは既に存在している[1]。この病態生理学シミュレーションの基礎は定性プロセス理論[6]であり、これを生理的プロセスの特質に適用させたものである。1つのプロセスは、たとえば心室充満などの基本的な生理メカニズムに1対1で対応している。4.2で述べたように、各プロセスは、幾つかの定性変数と関連づけられている。同一プロセス内にある変数間の因果関係は影響等式として定義されており、ある変数の値が変化すると、この関係に基づいて他の変数に影響を及ぼす。

本プロトタイプでは、シミュレーションは、心室充満、心室駆出、動脈系挙動、静脈系挙動に各々相当する4つのマクロプロセスとして構成されている。これらのプロセスは循環器系の自然なモデル化であり、このようにして構造/機能の関係が導入されている。シミュレーションの間、この4つのプロセスは交互に起動され、心周期を形成する。

用いられている変数は、「非常に低い、低い、普通、高い、非常に高い」などの強度順序を表す定性変数である。これは、ほとんどの病態生理学の教科書中でも用いられ、通常“+”や“↑”などの記号として表されている。

シミュレーションサイクルは、定性変数が収束するまで行われる。各マクロプロセス内部には、基本生理現象を生理法則によって記述した、低レベルのプロセスがカプセル化されている。なお、本プロトタイプでは、25の低レベルプロセスがある。[4]。各シミュレーションサイクルにおける患者の状態は、1群の定性変数のセットにより表される。

2.3. システムの構成

開発したシステムの構成を図2に示す。本システムは、視覚表現のためのエンジンとして、3Dゲームエンジンである、Unreal Tournament™を用いている[8]。これは、高品質なグラフィックスを生成することができ、キャラクターアニメーションの仕組みを利用して患者を表現することができる。さらに、キャラクターアニメーションの開発環境、通信機能、ダイナミックリンクライブラリの呼び出し、高レベルのスクリプト言語などを備えており、外部のソフトウェアを統合して動作させることができる。本システムでは、外部にAllegro Common Lisp™で記述された心臓血管系シミュレーションモジュールなどの定性シミュレーションを置き、Unrealのスクリプト言語からUDPソケット通信を利用することでシミュレーション結果を取得し、3Dグラフィックスエンジンを制御して、アニメーションなどの表現を変化させている。また、日本語の音声認識ユニットを用い、インタフェースの一部として用いている。

生理変数の内、仮想環境内でのモニタに表示されるもの、仮想患者の外観や動作を変更するものは、UDP通信によりグラフィックスサブシステムに送られる。前者は例えば平均血圧(MAP)や心拍数(HR)である。皮膚のテクスチャを切り替える場合など、送られてきた変数の値を適切な対象にマップするために、スクリプト言語による処理が介在する場合もある。

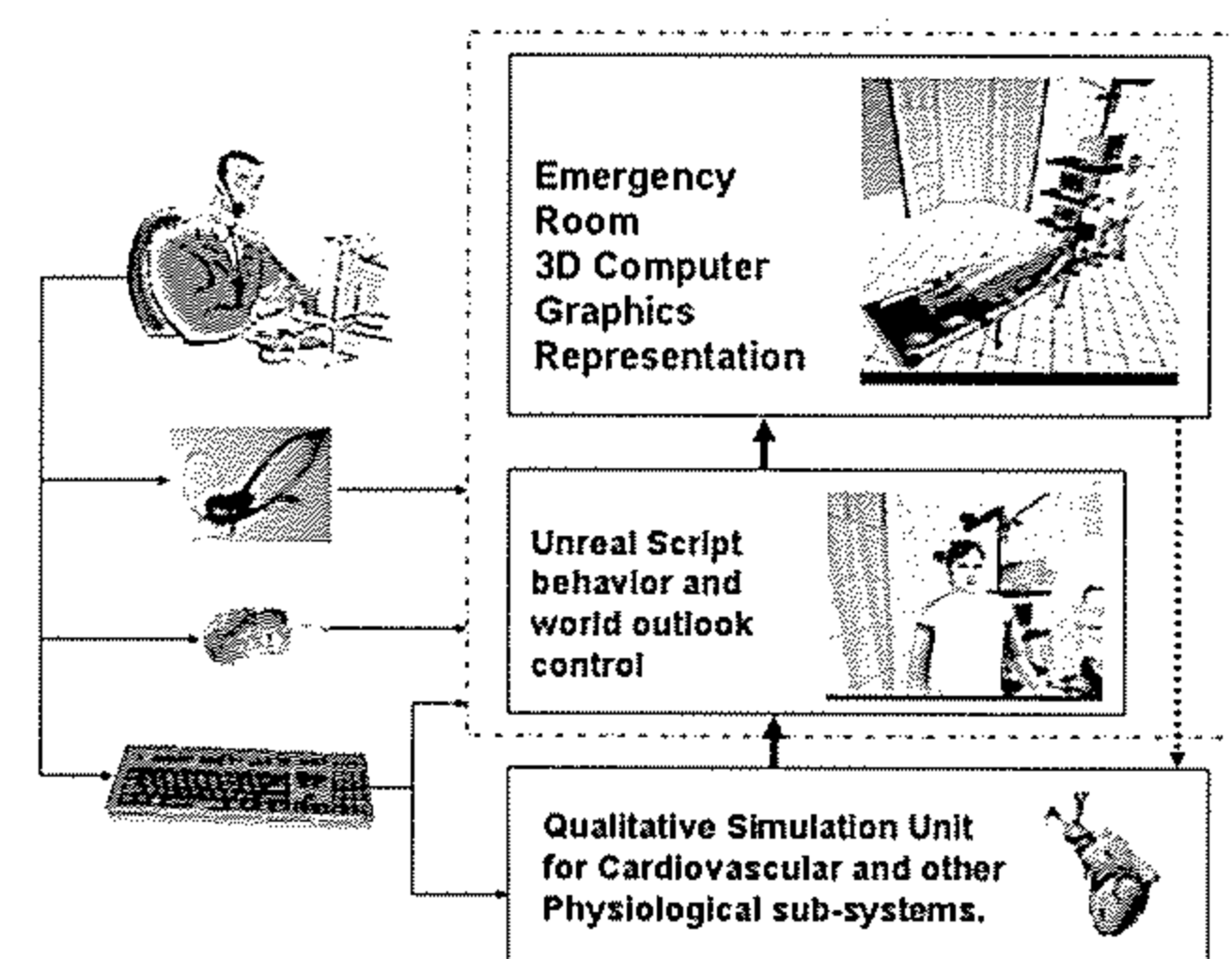


Figure 2. System Architecture.

図2. システム構成

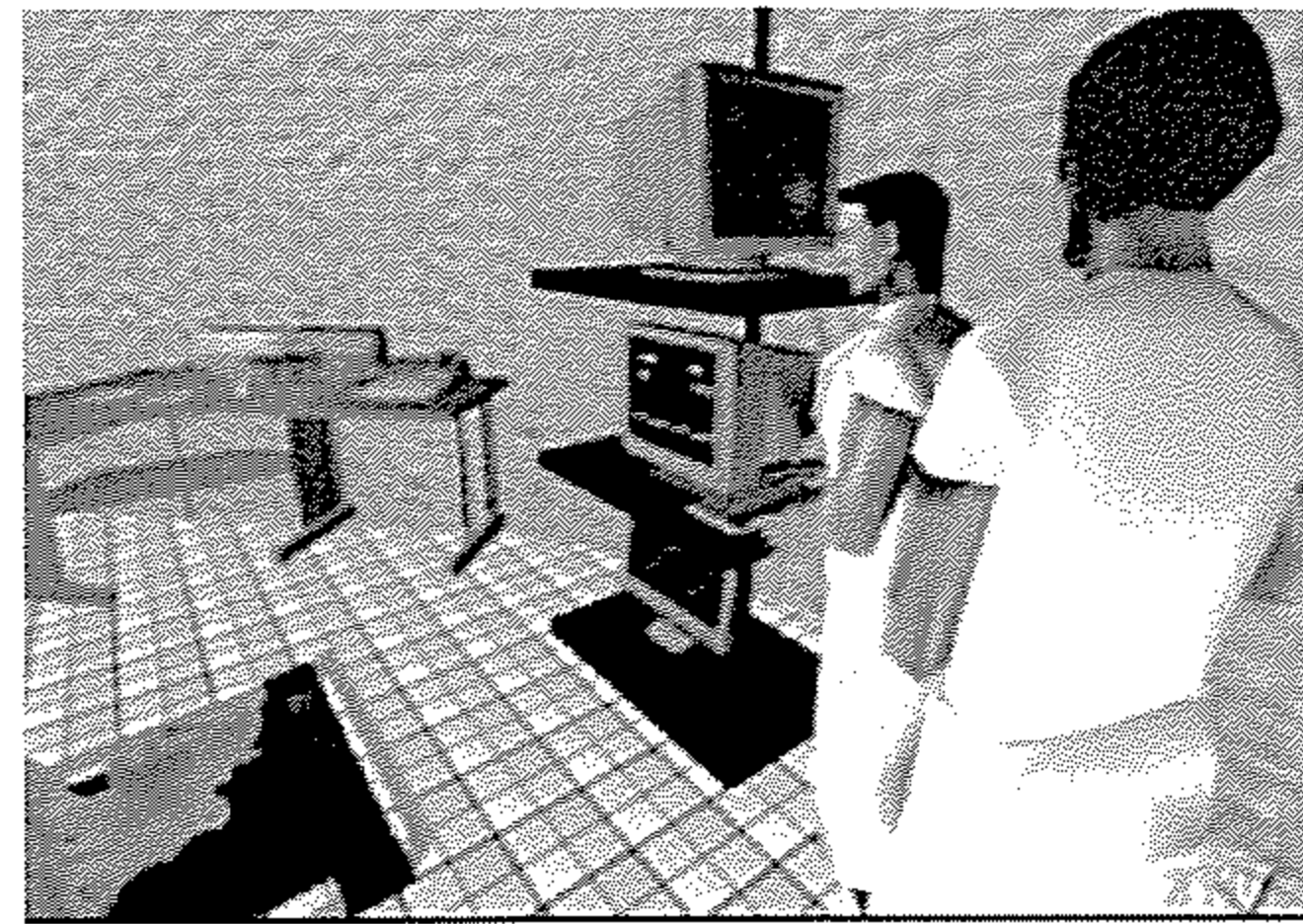
3. 結果

3.1 シナリオ

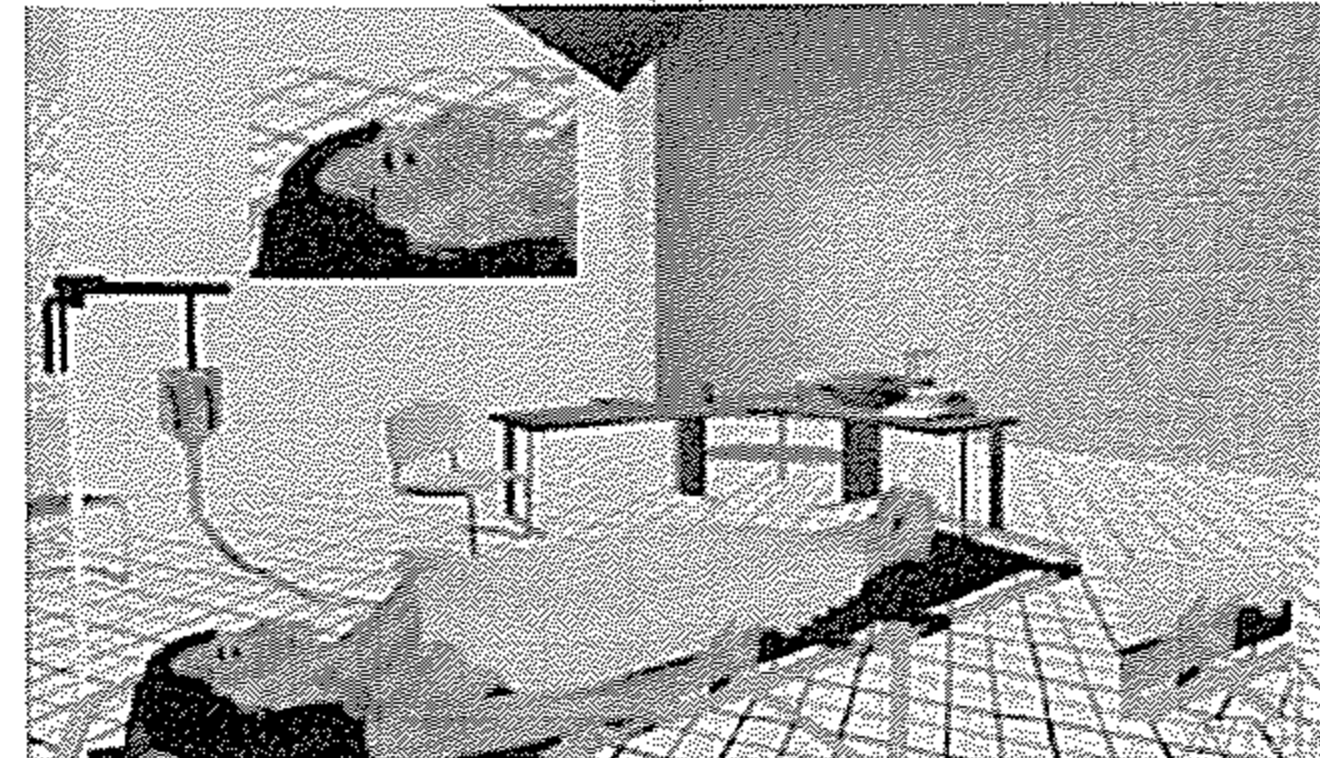
図3に、シナリオに従って進行する本システムの出力例をしめす。ここでは、ショック状態の一つをシナリオとし、シミュレーションの開始、診断、意志決定、治療と回復という進行を示している。

学習者に求められる行動は、多岐にわたる。まず、シミュレーションが開始される(図3(1))。モニタ上

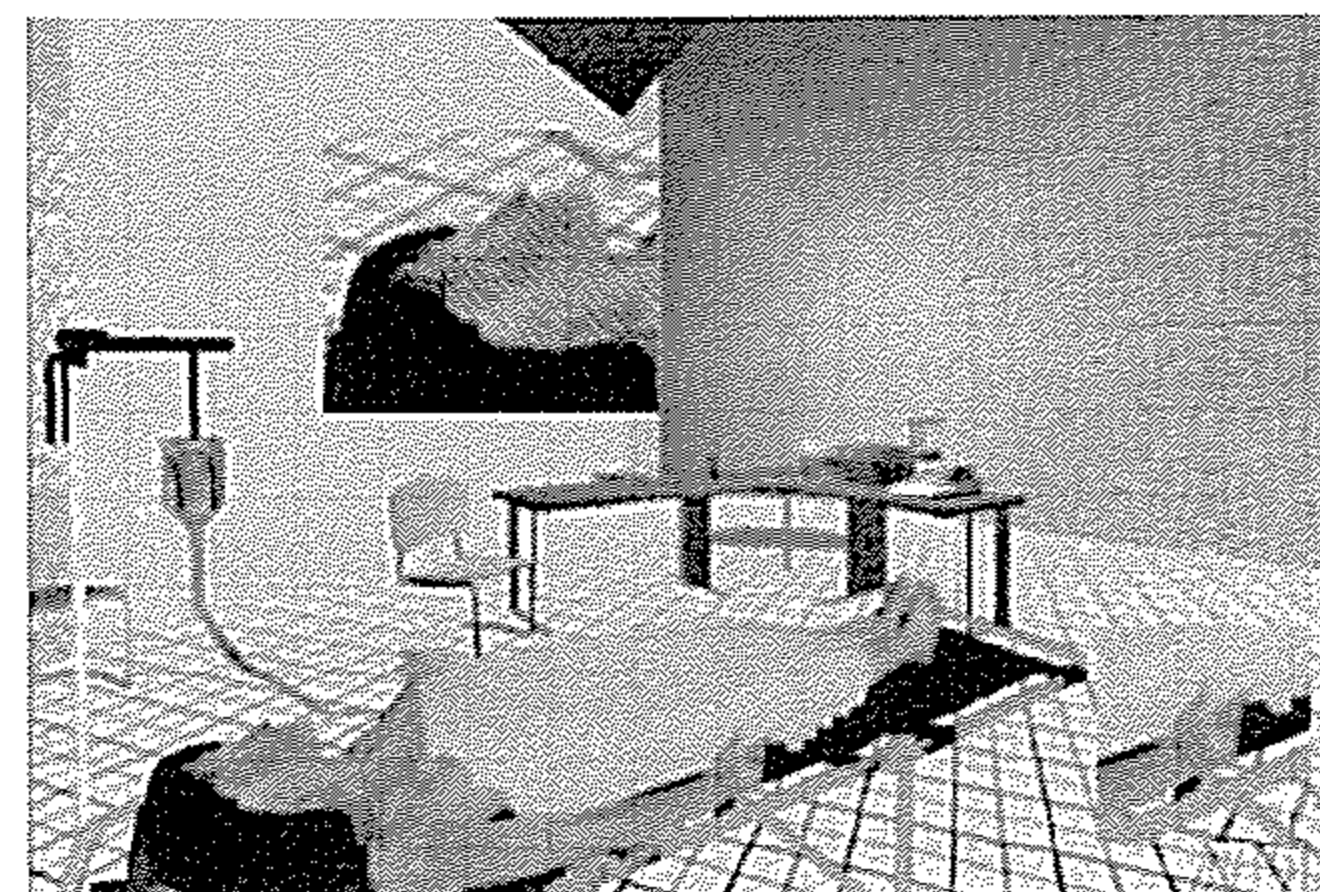
の表示および患者を観察することで、仮想患者の生活反応を確認することができる（同(2)）。看護師に近づいてさらに情報を収集することも重要である（同(3)）。一方、看護師が、小走りになったり、狼狽を見せたり、看護師が寄り集まって状況が緊迫していることを表現する場合もある（同4(4)）。ほかに重要な手がかりは、患者の表情、呼吸のパターン、手振りなどである。図3(5-6)は、身振りや手振りの変化をしめしている。要するに、緊急医療室の環境全体から得られる様々な情報を取捨選択し、判断と処置を行う。処置を決定する前に、様々な情報源から得られた疾患の全体像を、もう一度確認することも重要なステップである（図3(8)）。音声認識を通じて看護師に処置の指示を与えることで、Lispによるシミュレーションに入力を与えることができる（図3(7)）。処置が正しければ、患者の様子と、モニタ上の数値が改善され（同10-11）、シミュレーションは終了する（同12）。



(4)



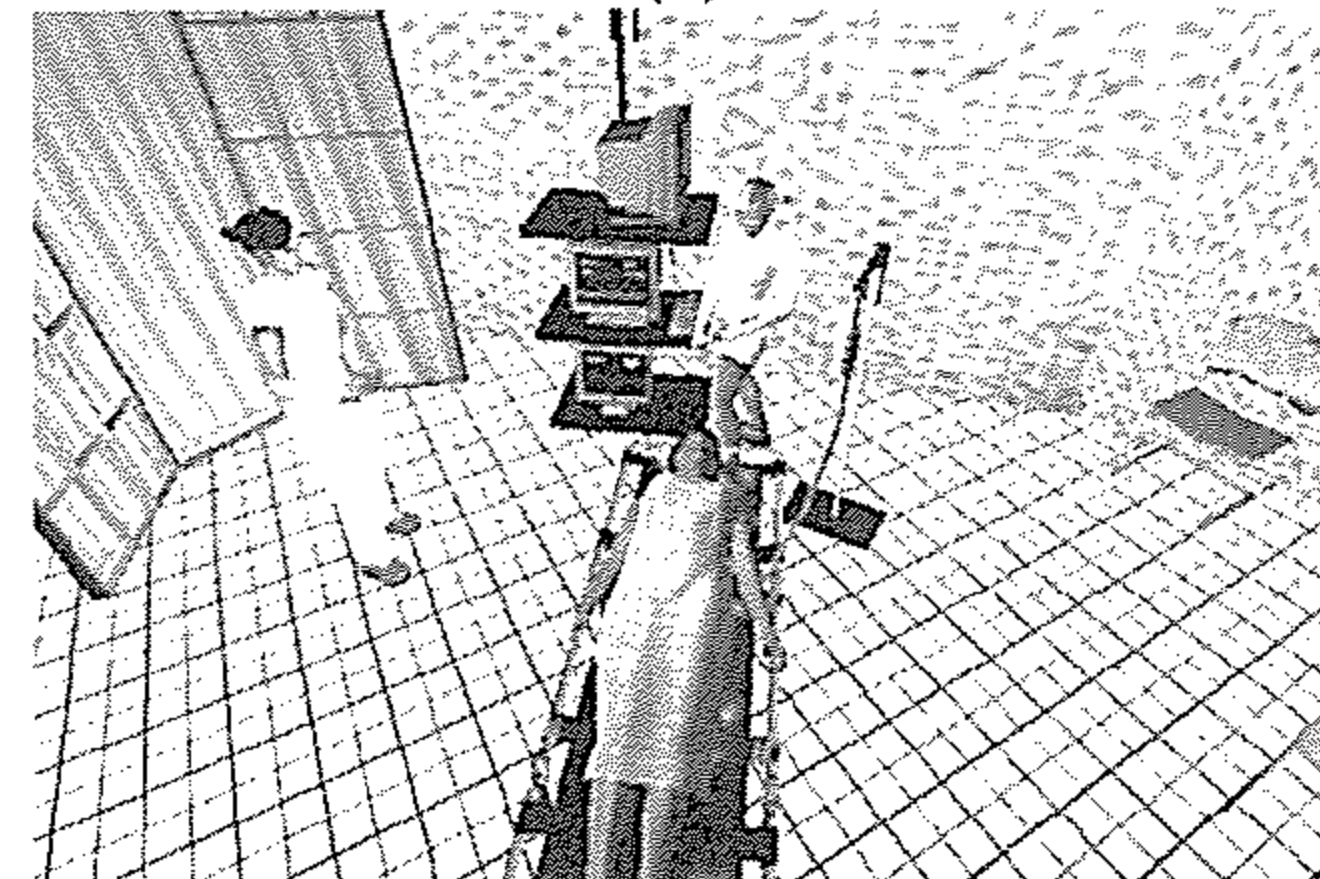
(5)



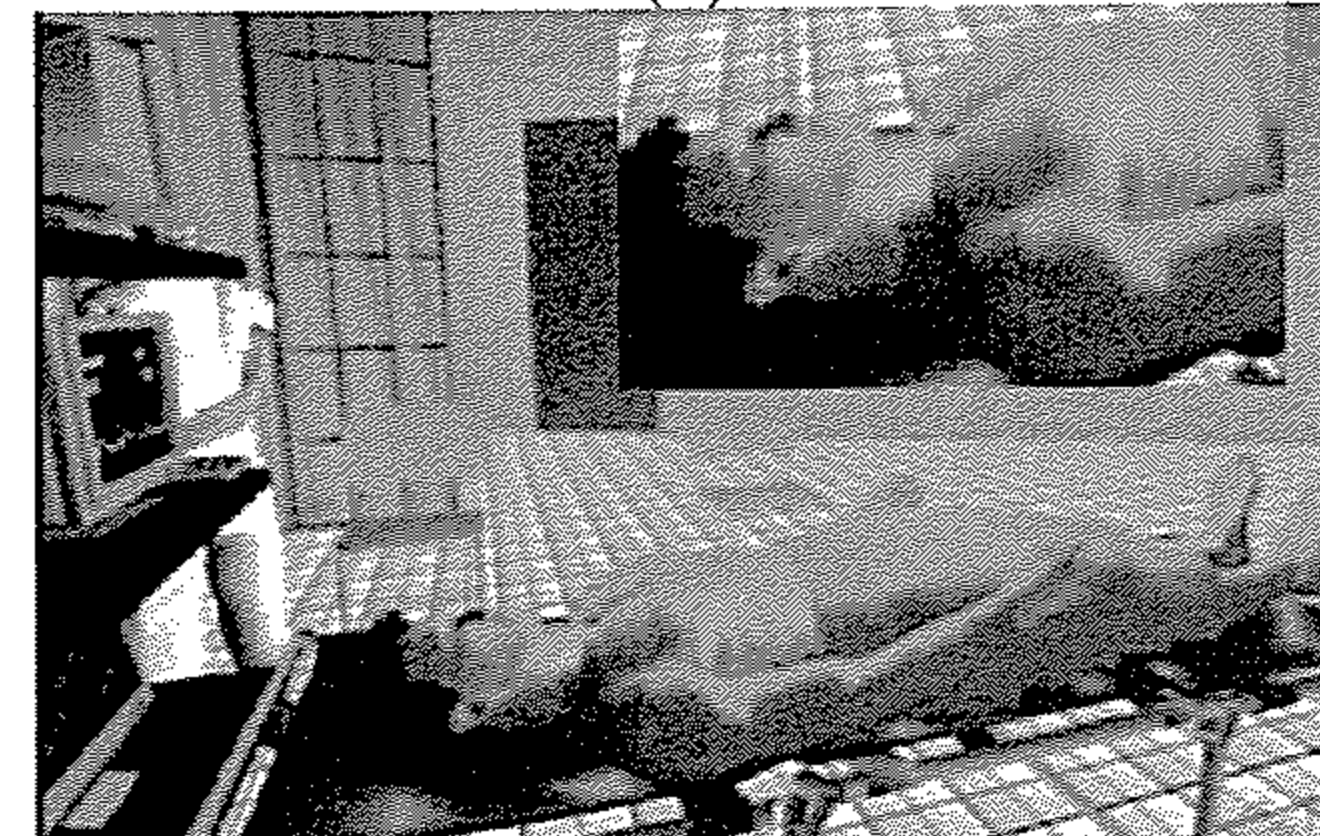
(6)



(7)



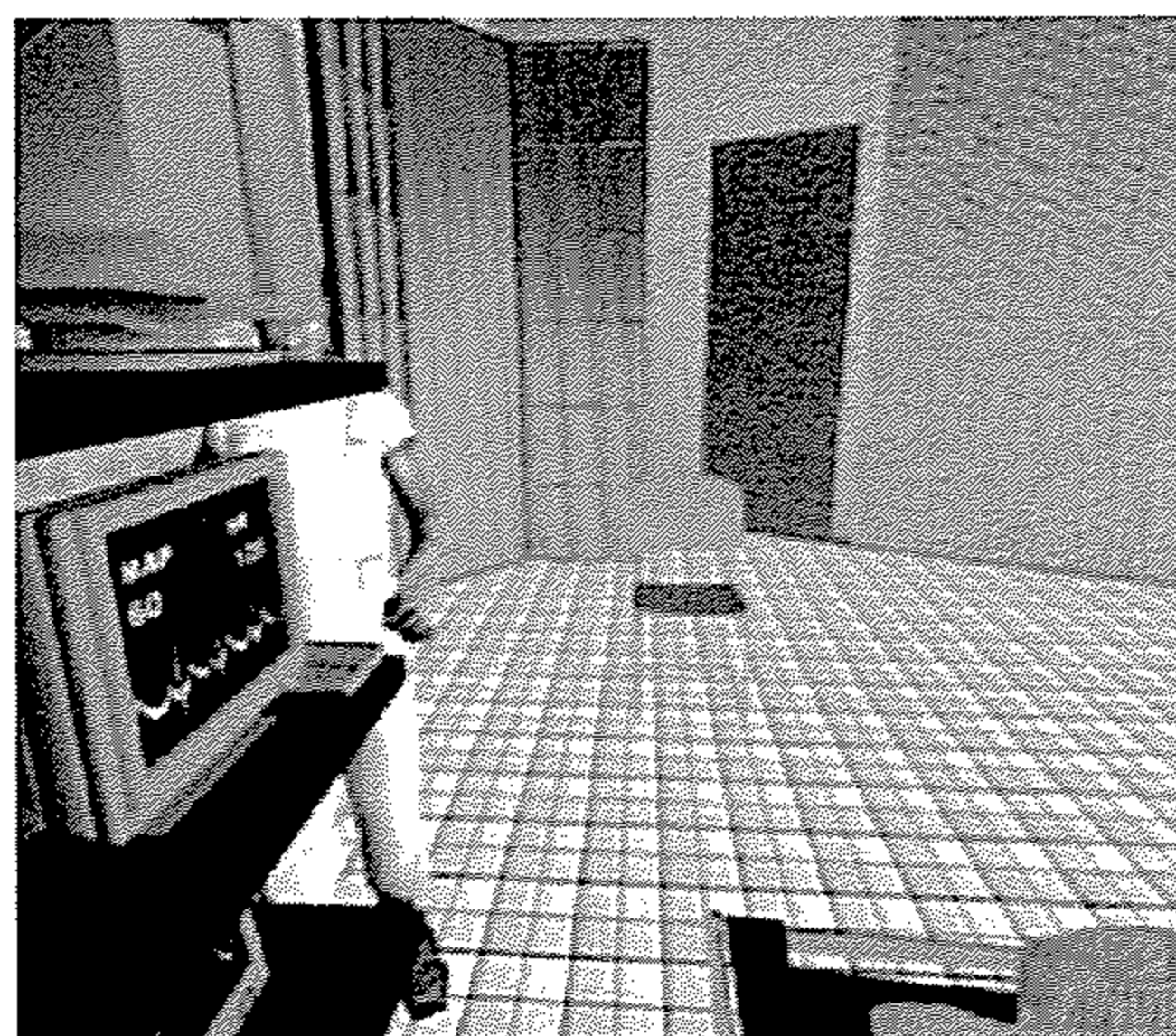
(8)



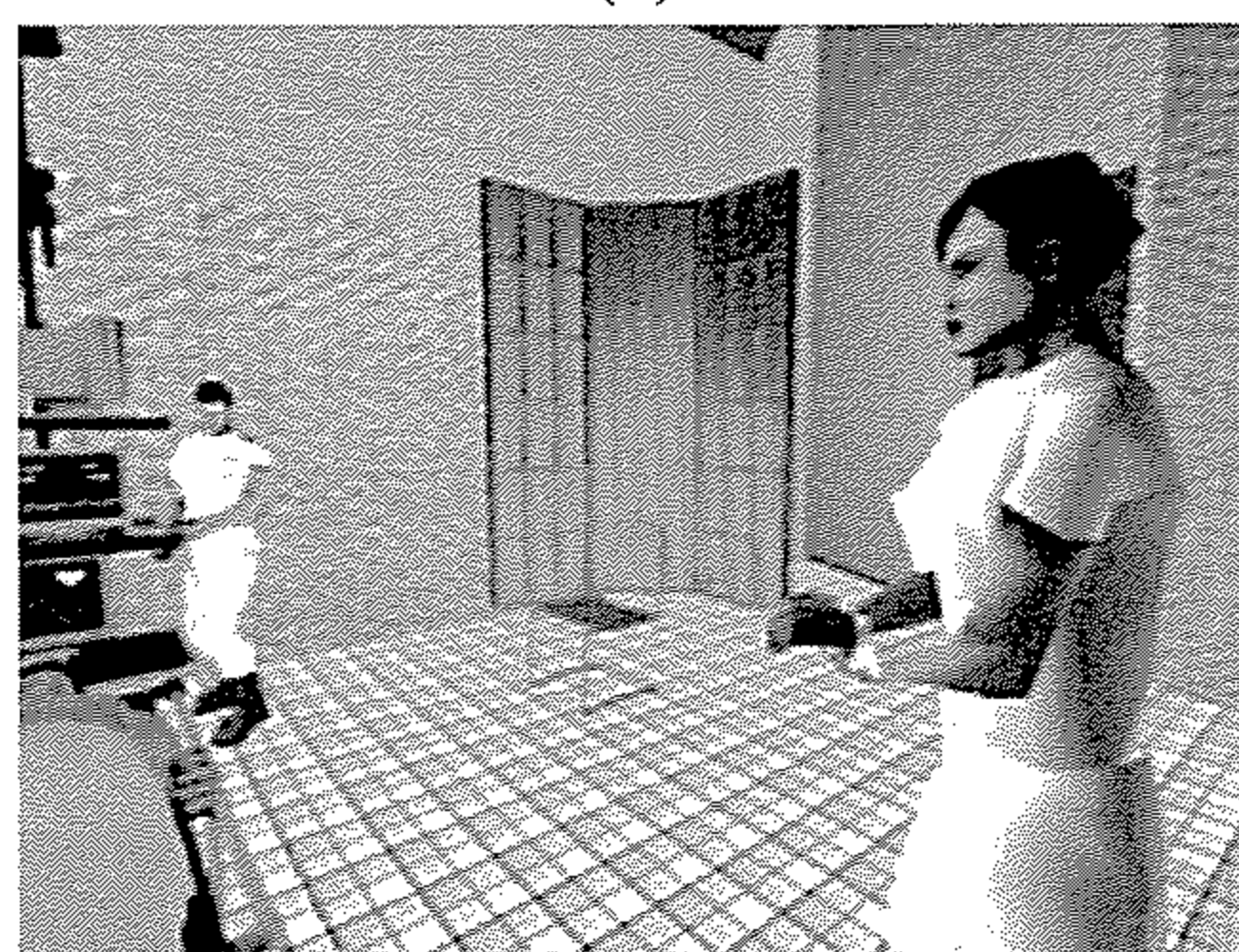
(9)



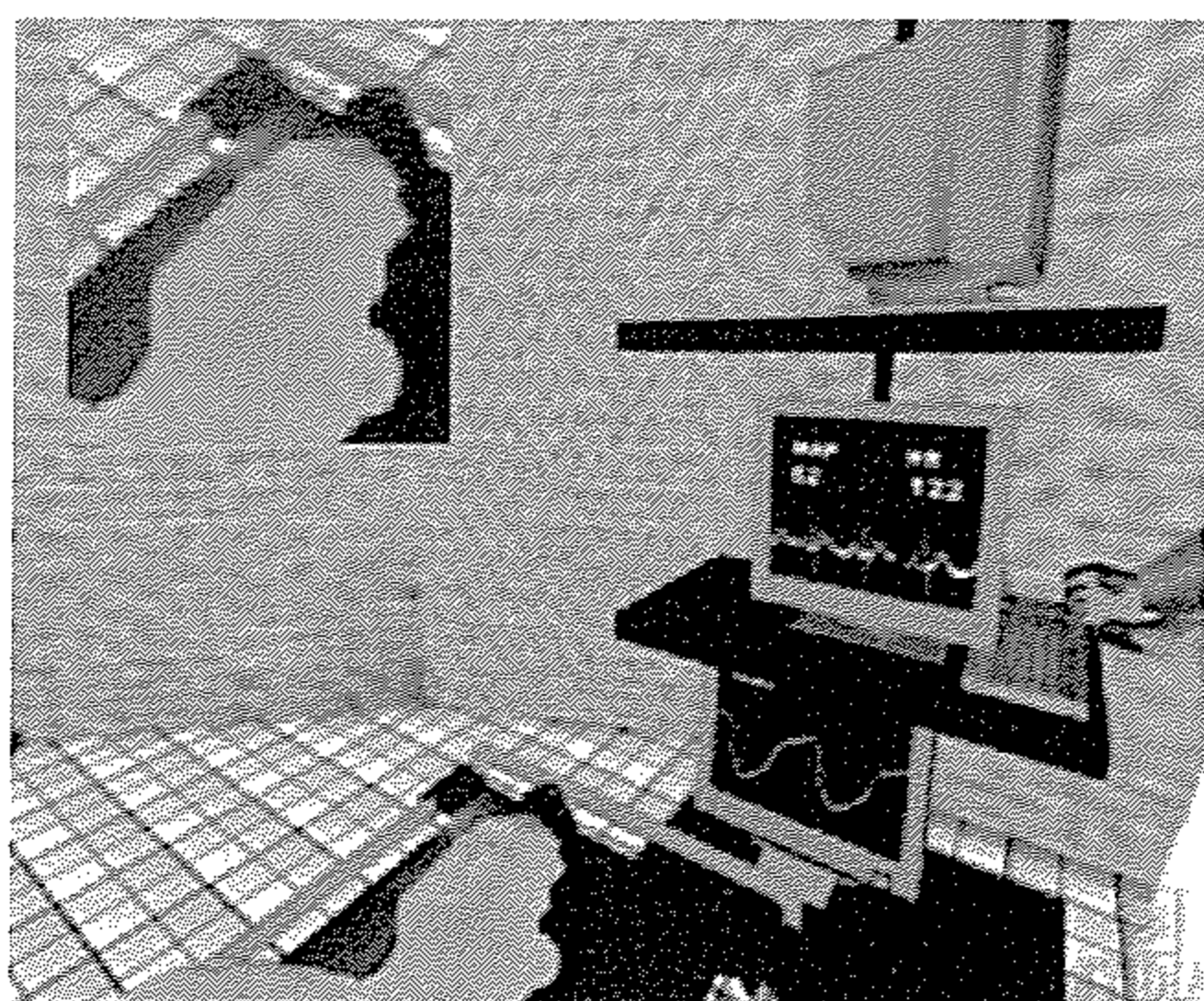
(1)



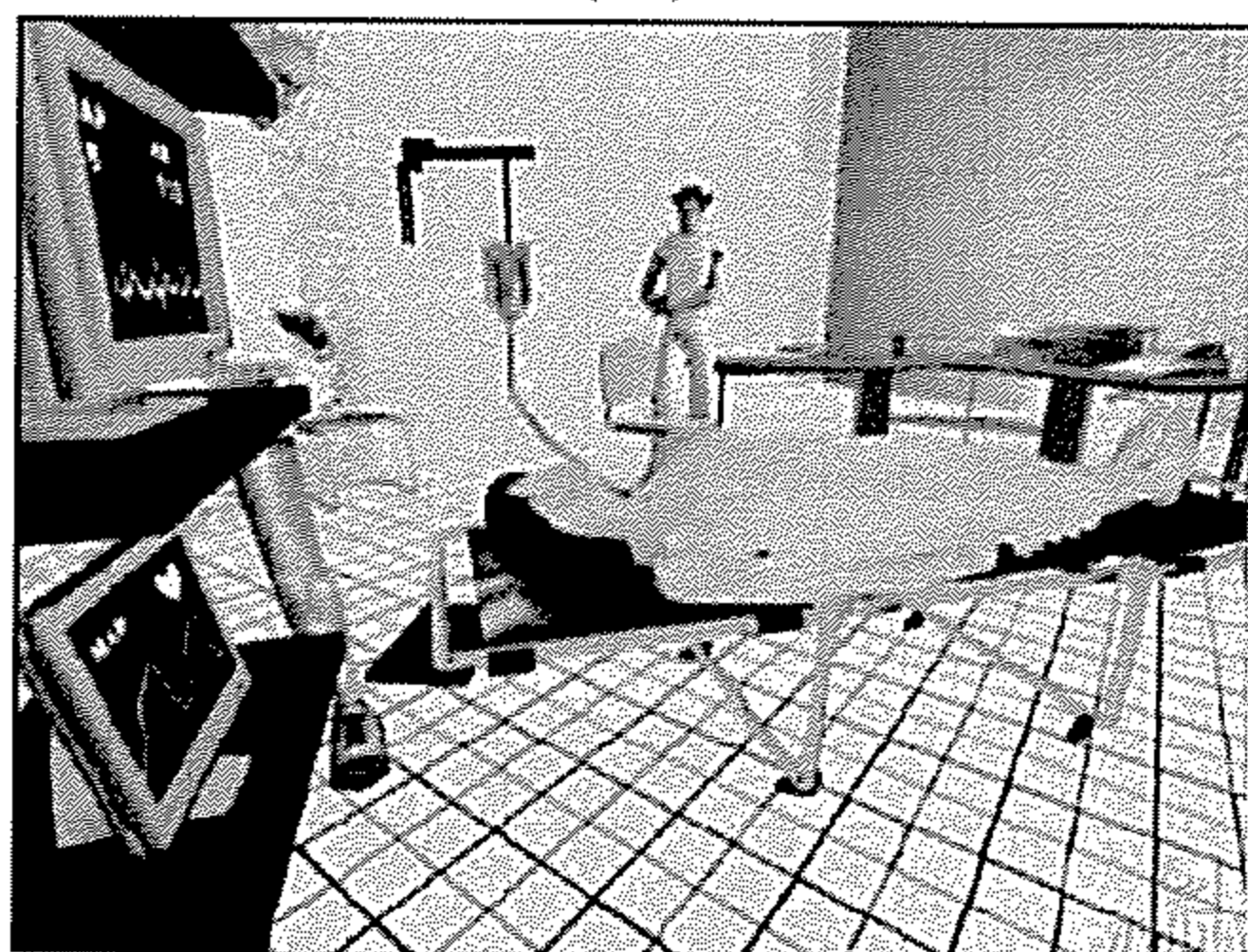
(2)



(3)



(10)



(11)

Figure 3. Example of a scenario with a patient (cardiac shock)

図3 心ショック時のシナリオの例

3.2. 可視化

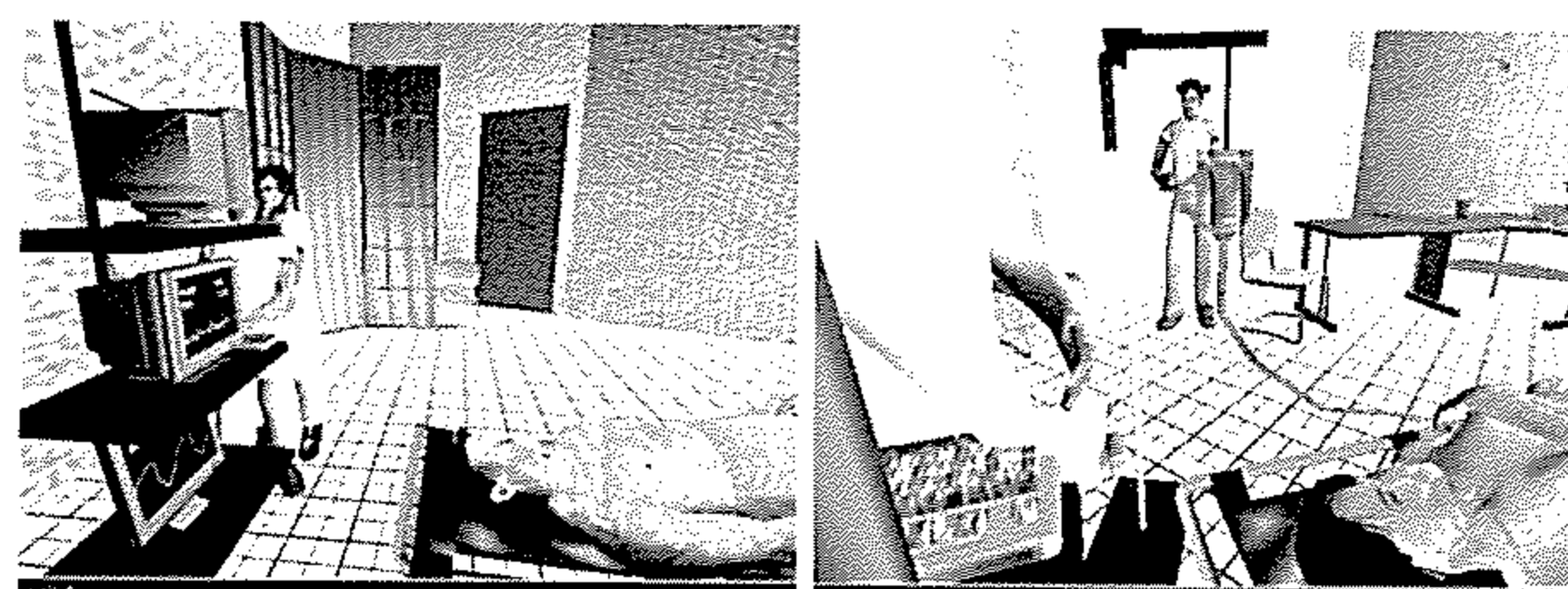
可視化は、病態生理学的なモデルが持つ状態変数を参照することで行っている。本節ではそのマッピングの実装と結果について、具体例を挙げて説明する。

まず、シミュレーション結果やその変数を可視化するのにもっとも単純な方法として、生理指標をモニタリングデバイスに出力することを行った（図3及び図4）。この方法を用いる変数で重要なものはMAPとHRであり、これらは動脈系マクロプロセスの一部として計算されている。

患者の振る舞いは、例えば意識レベルや自発運動、痛みの近くや呼吸パターンなどの機能性徴候からなっている。心シミュレーションの結果をこれらの徴候にマップするために、単純な推論を可視化の段階で行っている。例えば、心拍出量が増えるにつれ、脳灌流も増え、その結果、患者の意識レベルが向上する。結局、患者の動作アニメーションは意識レベルを反映するように変更される。また、心室充填圧が非常に高くなると、肺毛細血管圧が上昇することで心性肺水腫が発生するため、その結果患者の呼吸のパターンが変わる。機能性徴候は、このように患者のアニメーションと本質的に関連している。図3のシナリオでは、例えば、

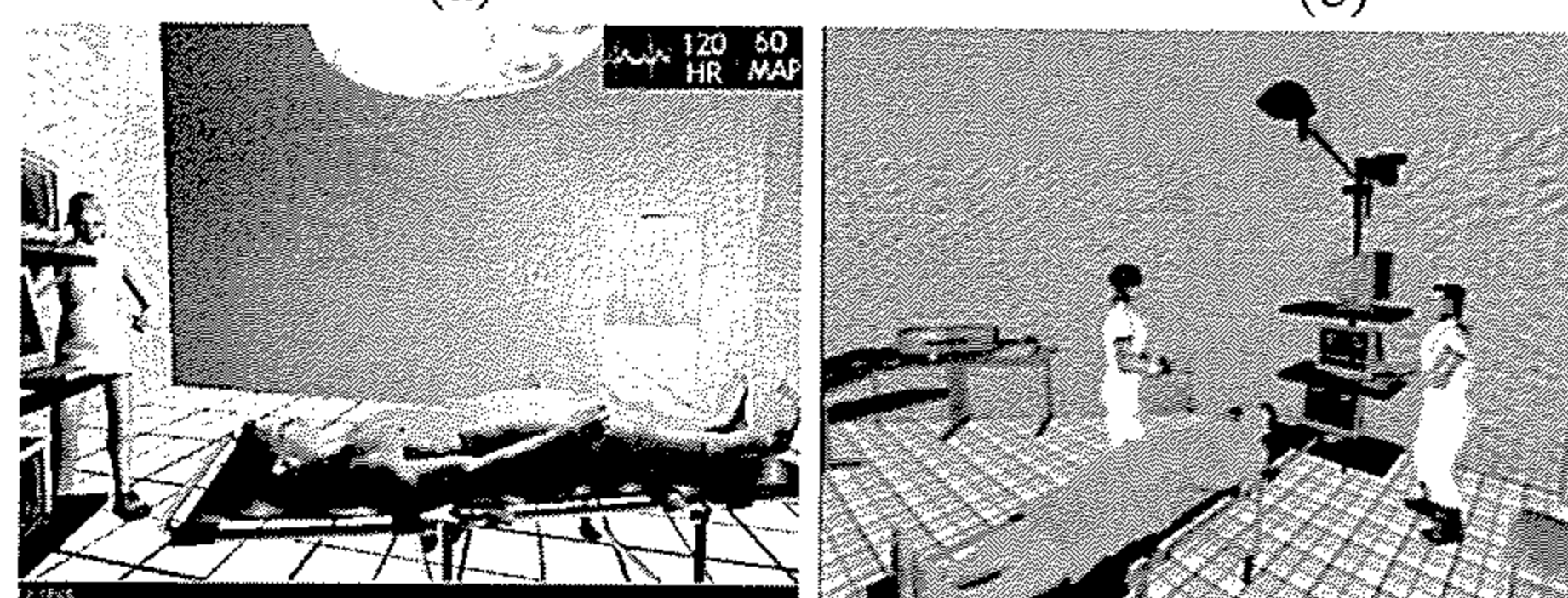
- 頭を振る動作による不快ないし痛みの表現
 - 手の動きによる不快の表現
 - 疼痛回避性の姿勢（e.g. 腹痛）
 - 自発的な動作と姿勢の変更
 - 呼吸の速さと深さ
- などが表現されている

また、診断のために最も有効なのは臨床的徴候の視覚化であろう。実際、ショック時の特徴を説明するために、物理的徴候はよくもちいられている。これらの徴候はショックの原因を探るためには有用ではないが、状況の深刻さを評価するためには重要である。幾つかの臨床的徴候を図4に示す。



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure 4. Clinical signs: (a) pallor, (b) rashes on the skin, (c) warm shock (d) normal.

図4 臨床的徴候：(a)蒼白化、(b)皮膚炎、(c)皮膚が紅潮するwarm shock:感染性ショックの初期など、(d)平常状態

心不全の間、心室充填圧は上昇し、ある状況下では(right ventricle failure, fluid infusion on a failing heart)、中心静脈圧も上昇する。中心静脈圧は、視覚的な表現としては頸動脈の拡張にマップされる。これは、Unreal™エンジンの動的テクスチャ機能を用いて実装している。

皮膚の色調は、末梢血流によって決まる。したがって、血管拡張(SVR低下)の際は、色調は赤みをおびるが、一方、血管収縮は激しい蒼白化をもたらす。SVR変数の値は、このように動的テクスチャにマップされ、皮膚の様子を変える。また、様々な皮膚のテクスチャを用意し、ショック症候群を診断するための手がかりを与えている。

例えば、アナフィラキシーショック場合、患者にはしばしば発疹を生じている。一方、毒素性ショックの場合も様々な発疹や浮腫を生じるが、これは、足にで

きる、拡張した血管で作られる赤い発疹である。

以下では、仮想患者の状態を動的に可視化したシナリオ例を示す。本シミュレーションでは、心臓発作によって拍出量が減少することにより引き起こされる症状を再現している。

心臓の収縮が弱まるにつれ拍出量と平均血圧が減少する。動脈血圧が低下することで、幾つかの適応機能が働き始める。例えば、圧受容器反射が働いて末梢血管を収縮させ、皮膚の蒼白化を引き起こす、などである。学習者は、治療を行うように要求され、この場合は、動脈圧の低下にを根拠として、まず輸液を入れることとした。これは実際には不適切な処置である。システムはシミュレーションの次のサイクルを開始し、心充填圧が増大する。これは可視化モジュールにより、頸動脈の拡張として解釈され表示が変更される(図5)。また、このことにより肺浮腫を引き起こしかけ、呼吸動作のアニメーションは、速く浅いパターンに変更される。これは、肺浮腫に伴う呼吸困難を反映している。

このように、状況に応じた、仮想患者のアニメーションや表現が生成されていることがわかる。

この例では、病態学的な振る舞いは、平常時の機能を記述したモデルから得られている。これは、病態学的プロセスと症状の関係を記述することで、アドホックに疾患を扱えるようにするアプローチとは完全に異なる方法である。

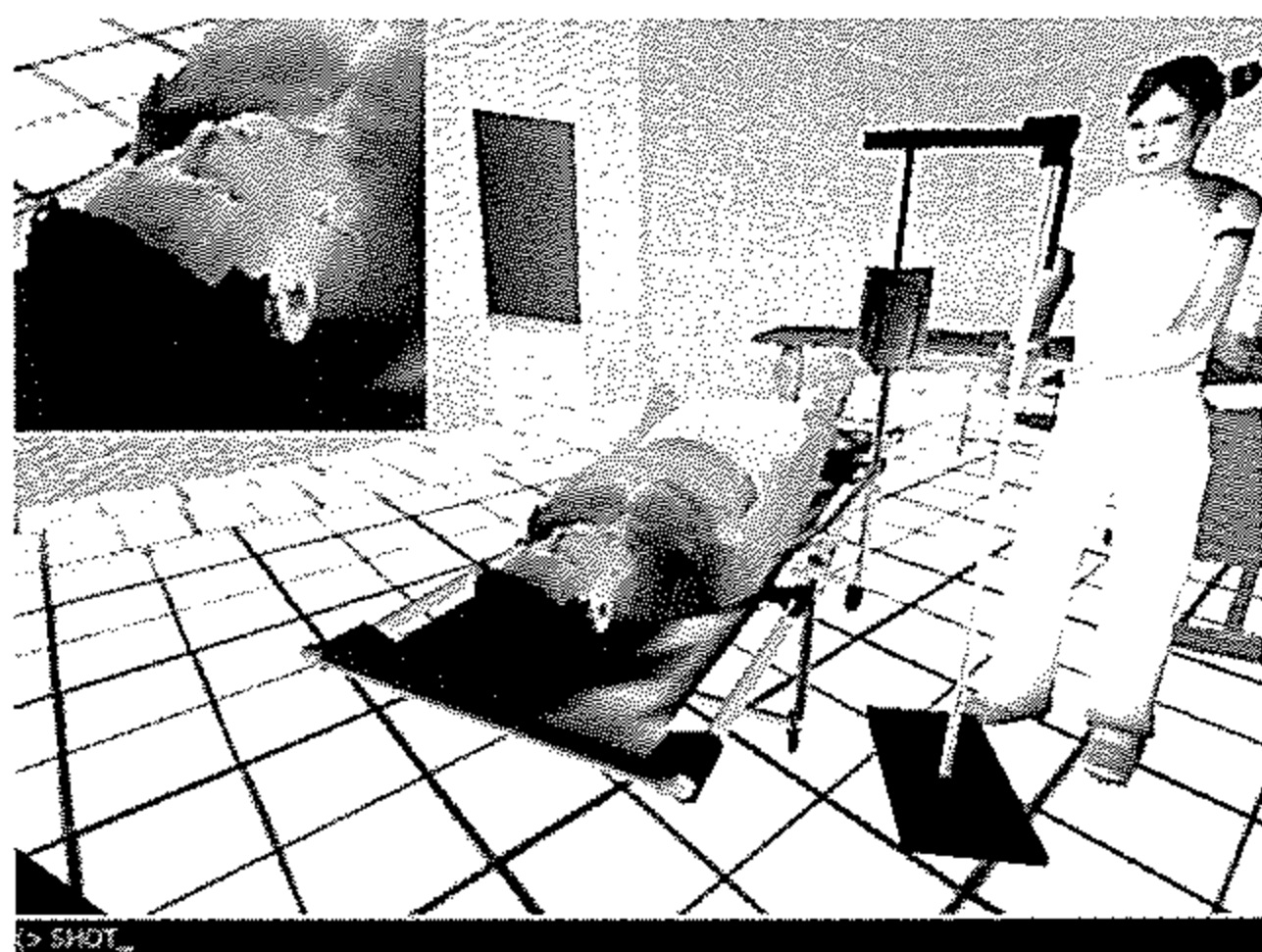


Figure 5. Enlarged jugular veins.

図5 頸動脈拡張の表現

4. 結論と展望

4.1 結論

本論文では、病態生理学的シミュレーションの結果得られる臨床的徴候を高い臨場感を持って表現できる仮想患者の実装について述べた。医学教育における計算機支援学習の方向性として、学習者の情報探索や判断における能動性をとりあげて議論した。

具体的な目標として、患者の状態を定性シミュ

レーションによって求めることで、シナリオ選択よりはるかに多様な状況を生成すること、対話型のシステムに比べてはるかに多様な情報をいちどきに提示することで、診断・治療のプロセスの中で、学習者により能動的な役割を与えることを目指した。

心ショックを具体例として取り上げ、定性シミュレーションとゲームエンジンの技術を組み合わせることで、実際には、28種類の症例が生成され、視覚表現としては、シミュレーションが出力する9種の変数の組み合わせにより、アニメーションやテクスチャなど20箇所以上の表現が制御された。

さらに、緊急医療室の現実感が高いこと、看護師などの存在が、学習者に心理的な緊張を与えるという点でも、実際の緊急医療室をかなりの程度再現した。

これらのことにより、学習者に能動性を持たせるための、過剰で多様な視覚表現と、行動の自由度が得られた。

4.2 展望

生理的なシミュレーションコンポーネントの研究開発は、その個々の開発と検証がある程度の仕事を要求するため、1つのチームでは不可能であり、様々な研究グループによりモジュールとして別個に開発されることとなろう。これらは異なるレベルで記述されることも多いため、その統合は簡単ではない。一見、最も低いレベルで統一的に記述することが望ましいように思われるが、実際には、コンポーネント間の解剖学的な、機能的な関係が複雑なため、これは困難である。本論文では、心臓血管系という具体例を取り上げ、これらを統合することのできる原理として定性シミュレーションを用い、意図した結果を得ることができているが、より広範なシミュレーションを可能とするためには、複数の内臓器官を同時に扱えるような拡張が必要となろう。

また、統合されたシミュレーションの検証とデバッグの方法もより検討されるべきであろう。現段階のプロトタイプシステムでは、図6に示したように、複数の状況下で、症状や患者の動作などのシミュレーション結果を1つずつ検証し、これが妥当なものであることを確認した。しかしながら、コンポーネントの数が増えるにつれ、このようないわば手作りの方法では作業量が膨大になることが考えられ、より系統的な検証手法を検討する必要がある。

また、最終的には医学教育に実際に用い、教育効果の定性的、定量的評価を行うことにより、本システムの効用と有効範囲を明らかにすることが必要であると考えている。



Figure 6. Example of System Validation: Case Where User is Approaching the Nurse in Attempt to Interact.

図6. システム挙動の確認：看護師に近づき会話を行おうとしている場面

参考文献

- [1] Baan, J. Arntzenius, A.C., Yellin E.L. (Eds.) Cardiac Dynamics. Martinus Nijhoff, The Hague, 1980.
- [2] Badler, N., Webber, B., Clarke, J., Chi, D., Hollick, M., Foster, N., Kokkevis, E., Ogunyemi, O., Metaxas, D., Kaye, J. and Bindiganavale, R. MediSim: Simulated medical corpsmen and casualties for medical forces planning and training, National Forum on Military Telemedicine, IEEE, 1996, pp. 21-28
- [3] Bylander T., Smith J.W. and Svirbley J.R., Qualitative Representation of Behaviour in the Medical Domain. Computers and Biomedical Research, 21, pp. 367-380, 1988.
- [4] Cavazza, M., Simo, A. A Virtual Patient Based on Qualitative Simulation. ACM Intelligent User Interfaces 2002, Miami, USA.
- [5] Chi, D., Kokkevis, E., Ogunyemi, O., Bindiganavale, R., Hollick, M., Clarke, J., Webber, B., and Badler, N.. Simulated casualties and medics for emergency training, In K.S. Morgan, H.M. Hoffman, D. Stredney, and S.J. Weghorst (eds.), Medicine Meets Virtual Reality, IOS Press, Amsterdam, 1997, pp. 486-494.
- [6] Forbus, K.D. Qualitative Process Theory. Artificial Intelligence, 24, 1-3, pp. 85-168, 1984.
- [7] Kuipers, B. Qualitative Simulation in Medical Physiology: A Progress Report. Technical Report, MIT/LCS/TM-280, 1985.
- [8] Lewis, M., Jacobson, J., Communications of the ACM, 45, 1, January 2002. Special issue on Games Engines in Scientific Research.
- [9] Long W.J., Naimi, S., Criscitiello, M.G., Pauker, S.G., Kurzrok, S. and Szolovits, P. Reasoning about therapy

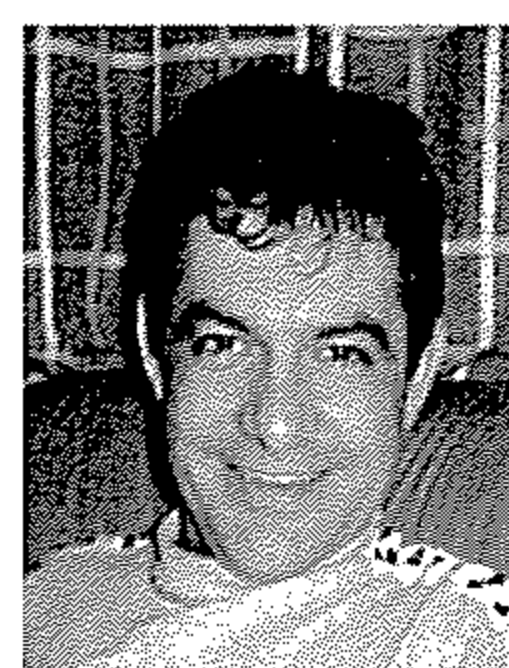
from a physiological model, in Proceedings of MEDINFO'86 (Washington DC).

- [10] Sticklen J. and Chandrasekaran B., Integrating Classification-based Compiled Level Reasoning with Function-based Deep Level Reasoning, Applied artificial Intelligence, 3, 2-3, pp. 275-304, 1989.
- [11] Widman, L.E. Expert System Reasoning About Dynamic Systems by Semi-quantitative Simulation. Computer Methods and programs in Biomedicine, 29, pp. 95-113.
- [12] Mueller-Wittig, W., Virtual Surgery, Tutorial 5, VSMM International Conference, 2002. (<http://www.vsmm.org/2002/program/tutorial5.htm>.)
- [13] Herbelin, B., Riquier, F., Vexo, F., Thalmann, D., Virtual Reality in Cognitive Behaviour Therapy : a Study on Social Anxiety Disorder, Procs of VSMM International Conference 2002, pp.853-862, 2002.
- [14] Fontaine, D., Beux, P., Riou, C., & Jacquelinet, C., An intelligent computer-assisted instruction system for clinical case teaching. Methods of Information in Medicine, 33, p. 433-445, 1994.
- [15] Tait R.J., Schaefer G., Kuhnappel U., Cakmak H. K., Interactive Spline Modelling of Human Organs for Surgical Simulators, paper ESM 2003, 17th European Simulation Multiconference, pp.355-359, ISBN 3-936150-25-7, 2003

(2003年5月7日受付)

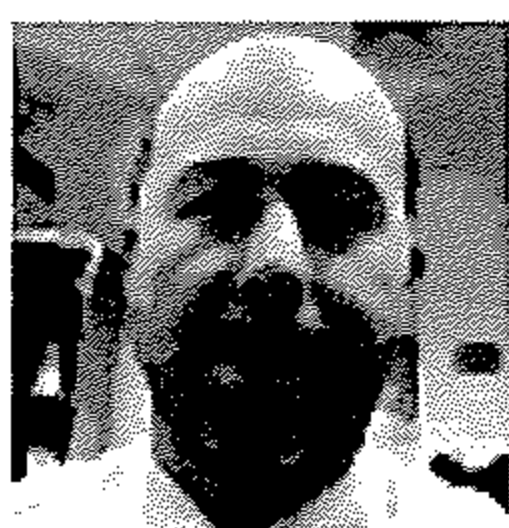
[著者紹介]

アルティオン・シモ（学生会員）



平成12年岐阜大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、同博士課程在学中。AIを有する仮想環境に興味をもつ。情報処理学会会員。

マーク・カワザ



パリ第7大学にてMD及びPhDを取得。現在、英国ティーサイド大学数理計算科学科教授。

木島竜吾（正会員）



平成6年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。現在、岐阜大学工学部応用情報学科助教授。バーチャル・リアリティ、ディスプレイデバイス、インタフェースの研究に従事。IEEE, ACM会員。