〔解 説〕

医学教育におけるロボット*

菊 地 眞**

1. は じ め に

産業界におけるロボットの導入・活躍は着々と進みつつある。これからロボットが活躍するであろう分野を眺めてみると、教育、生活・福祉、レクリエーション、農・工・漁業、極限作業、医療、サービスなど多方面への導入が予測されている。特に医療に関するロボットの役割としては看護婦代行、手術の介助・支援、ホームヘルパーなど医療に直接役立つロボットが考えられているが、医学・医療においても教育とのかかわりは少なくなく、もう一つの大きな側面として医学・医療教育用ロボットが挙げられる。

医学・医療においては医師、看護婦、医療技術者などのいわゆるメディカル・スタッフの教育と、患者あるいはその周辺の一般人の教育の両面が存在する。前者は、医学及び医療の質の確保と向上 (Quality assurance) のために必須であり、近年ますます増加しつつある医学情報や医療技術を効率よく、かつ up to date に体得してゆくために新しい医学教育工学手法の開発が望まれている。一方、後者に関しては、より良い医療を実践してゆくためにも患者教育は重要である。今後の高齢化の進行に伴う医療の量の拡大により、在宅医療化が急速に推進される可能性があり、それに伴って患者あるいはその周辺の人々の教育をどうするかが大きな問題になろう。

医学・医療におけるメディカルスタッフと患者の関係を図示すると図 1 (a) のようになり、ここでは主として医師がプロセッサの役割を果たす診療用マン・マシンシステムが構成されている。一方、医学教育を考えるとその関係は全く逆になり、図 1 (b) に示すように患者が教育のためのプロセッサになる。メディカルスタッフの教育は医学書から学ぶだけではなく、患者自身から発せられる種々の兆候や情報を数多く体験することによりはじめて完成されるのである。すなわち、医学教育

においては患者自身が最もすぐれた教材であり、したがって医学部教育においてはポリクリとかベッドサイド・ティーチングと称される患者を直接見ながら教育する時間が設けられている。しかしながら、患者が教材となり得ないようなケース (例えば、救急蘇生術のように患者の生命に直結する医療技術の教育) では、適切な教材がないわけであり教科書による知識を得た後に直ちに先輩の指導のもとに実践に移らざるを得ない。さらには数多くの症例や学生の教育の時期に合った適切な症例を教材として得たいという場合にも困難が伴う。その為自ずと医学部・医科大学には多数の病床をもった付属病院が必要となるわけである。

図 1 医学・医療におけるマン・マシンシステム

原稿受付 1985 年 10 月 2 日

* Robot in Medical Education

** 防衛医科大学校医用电気工学講座

すなわち、医学教育においては患者は教材として必要条件ではあるが、必ずしも十分条件ではない。この点を少しでも解決しようとする試みが医学教育用ロボットの考え方であり、すなわち患者の代行をする医学教育用患者ロボットなのである。医学知識そのものの教育用としては、既に CAI (Computer aided instruction) などの方法が存在するが、ここではそれらについては省略し、医学教育用ロボットについてのみ言及したい。

2. ロボットによる医学教育の有用性

患者の代行をするロボットと一口に言ってもそれを実現することは現状の技術レベルではなかなか難しい。しかしながら、前述した救急蘇生術訓練用のような場合には、対象とする患者の状態や教育すべき内容が比較的限

定されており、かつたんなる知識ではなく実技の体得に主眼が置かれている定型的医療技術であるので、ロボットによる教育の有用性が高い。すなわち、教材が得にくい、医学教育上きわめて重要度が高くかつ緊急性を要する定型的医療技術を対象とした医学教育へのロボットの導入であり、これを端緒として将来は徐々にその範囲を拡げてゆくものと考えられる。

医学教育においては、これまでにも各種の医学教育用機械が開発されており(表1)、各々表2～表5に示すようなものが用いられてきた。しかしこれらのいずれを見ても、幅広い適応力をもち、かつ高度な内容が教育

表1 医学教育用機械

ファントム	形態的
	機能的
シミュレーター	単能機能的
	総合的知能的
論理シミュレーター: C. A. I.	

表2 形態的ファントム

解剖学教育用模型	単なる形態的な模型、立体像の表示、理解医療人および一般人の医学知識習得、立体像表示
骨格・筋肉・臓器模型	色分けなどにより構造を明示
耳鼻科用透明模型	透明プラスチック内に耳道、内耳、鼻道などを立体的に呈示
血管・神経走行模型	
血管・神経支配領域表示模型	
屍体樹脂含浸模型	医療関係者の解剖学知識習得のため
人体屍体	死体組織に樹脂を含浸させて切片としたもの
動物屍体	
発生学教育用模型	成長、変化過程の立体的表示
胎児发育模型	胎児の月別の发育を示す
病理・細菌模型	
皮膚疾患模型	
細菌・寄生虫・病理組織模型	

表3 機能的ファントム

——受動的、形態的、物性的な生体シミュレーター——

(1) 物理的性状ファントム	
諸種の物性的シミュレーター	
放射線照射線量測定用	放射線治療に際して体内線量分布を知る
超音波的性状測定用	超音波診断、治療に際しての超音波に対する特性を知る
(2) 物性・立体形態シミュレーター	
主として医療実技実習に用いる	
胃洗浄用、導尿・浣腸・注射用、清拭実習用、包帯練習用、人工呼吸・心臓マッサージ用、乳房マッサージ用、経絡表示、保育訓練用、関節機能ファントム	

表4 単能機能的生体シミュレーター

生体電気現象シミュレーター	生体活動を能動的に出力表出する
心電図シミュレーター	各種心電図の呈示、表示
不整脈・除細動訓練器	不整脈・心室細動に対して除細動をかけて治療する訓練に利用
その他の電気現象シミュレーター	脳波、筋電、神経興奮、心筋興奮伝播
体表心電図	心電現象の体表への電位分布投影
流体力学的シミュレーター	血流、呼吸流などの可視モデル
生体音シミュレーター	
心音シミュレーター	正常心音、心雑音の聴診訓練
呼吸音シミュレーター	ラッセルなどの聴診訓練
その他の生体音シミュレーター	腸音、打診音、コロトコフ音
機械的シミュレーター	
触診訓練用シミュレーター	腹部触診

表5 総合的知能的生体シミュレーター

人体シミュレーター (computerized patient robot)	コンピュータを含む論理、判断機能を有するもの、入力、判断、出力の構成人体をリアルに模擬したロボットのシミュレーター
救急蘇生訓練用	人工呼吸、心臓マッサージ、注射等の入力に反応して生体反応を示す
麻酔訓練用	麻酔導入、維持、覚醒訓練用ロボット
心臓病診断訓練用	心音、心電図、脈拍その他を表出するロボット
異常反射訓練用	体表に圧、叩打等の刺激を与えて皮膚、腱反射を表出
論理シミュレーター (logic simulator)	知識、理論習得のため、CAIと類似
各種疾患シミュレーター	基準化したテキスト、多様性、時間経過の伸縮自在
代謝トレーナー	生化学的代謝のシミュレーター
循環アナログシミュレーター	血圧、血流、末梢血管抵抗、キャパシタンス等の循環パラメータ相互間の関係を示すダイナミック・シミュレーター
検査結果を診断に直結するシミュレーター	
心電図心臓病変直結シミュレーター	医師の診断用に用いる。ある心電図を入力すると心臓模型上に心筋梗塞部位などが点灯などにより表示され、直観的な病変把握に役立つ
X線画像と体内臓器病変とを直結するシミュレーター	診断用に有用

表 6 医学教育工学の利点 (文献 2) より利用)

I	教育における教育者側のバラツキをなくし、均一な内容の教育が施行できる
II	被教育者側の修得能力のバラツキに対応できる (意図的教育でなく成功的教育を可能にする). 学習者に対してオンラインでフィードバックをかけられる, 教育効果を実時間で評価しうる
III	教育内容の可塑性・弾力性・応答性・対応性が向上する
IV	教育内容の基準化・多様化が可能
V	地域による不公平の是正
VI	時間軸の短縮も延長も可能
VII	患者を教材 (material) として用いることなく人権意識の向上にマッチする
VIII	緊急, 稀少, 高価, 遠隔, 危険など, 通常は実地に訓練することが難しいケースでも教育可能
IX	同一内容の反復可能
X	人によって訓練される場合の学生側の心理的バリエーションがなくなる. 個人教授に近い教育を多数に実施しうる
XI	いつでも, どこでも, その時の最高レベルの訓練を受け得る (accessibility)
XII	教育要員のマンパワー不足にも対処しうる

できる総合的・知的シミュレータと呼ばれるレベルのものはいくつか、むしろこれから研究・開発すべき重要な課題となっていた。

技術的観点から見れば、最近のマイクロコンピュータの進歩によりこれらのロボットの開発は一段と容易になりつつある。さらに各種のセンサ技術の進歩やアクチュエータの開発により医学教育用ロボットも一昔前困難でなくなりつつある。しかしながら、医学教育用ロボットを構築する際に最も難しい点は、そこで用いるソフトウェアをいかに決定するかである。一般的には、教育用ということである程度定型化したり、あるいは典型的なケースに限定するが、医学の場合にはきわめて多くの例外があり、さらには個体差や複合的变化の種類が多くそのソフトウェアを決定することが難しい。今後、マイクロコンピュータのさらなる機能拡大に伴ない患者ロボットにも学習能力などを付加させて、より患者らしい幅広い対応が出来るロボットが誕生することが期待される。

図 2 救急蘇生術訓練教育用患者ロボットの構成と機能

写真 1 筆者らが開発した救急蘇生術訓練教育用患者ロボット「Resim」

る。

表6はこれら医学教育用ロボットが医学・医療教育において果たす有用性をまとめたもので²⁾、多くの利点があることに気がつく。

3. 救急蘇生術訓練教育用患者ロボット「Resim」³⁾

前述した総合的・知的生体シミュレータの一例として、筆者らが開発した救急蘇生術訓練教育用患者ロボットについて説明しよう。全景は写真1に示すようなものであり、その構成と機能を図2に示す。本装置の特徴の一つはマイクロコンピュータと連動している「知能ロボット」である点であり、第二には、外見、物性、機能を出来るだけ人体に似せて作られていることである。ロボット外皮にはシリコン樹脂などが用いられており、外見は勿論手ざわり、色つやなどが人体に酷似しており、実体感と臨場感に富んでいる。人体では胸廓を1mm押し下げるのに約1kgの力を要するが、このロボットでも胸廓内に仕込まれたコイル状バネのバネ定数がほぼそれに一致している。胸骨下端部にセットしたバネにはストレンゲージを用いた変位計が取り付けられており、体外式心臓マッサージ (写真2) を行なうとマッサージによる胸壁の変位が自動的に計測される。これらは電気

写真 2 体外式心臓マッサージとマウス・トウ・マウス人工呼吸の訓練

写真3 麻酔訓練用患者ロボット

信号に変換されてマイクロコンピュータに送られるが、その直前で施行したマッサージが適切であったか否かの評価（例えば、圧迫部位、変位置、圧迫時のリリースの有無、マッサージ・レート、リズムの各点をアナログ・スコアリング回路により判定）を受ける。これをパスした入力だけが A/D 変換されて取り込まれる。マイクロコンピュータ内部には呼吸・循環系に関する生理学的モデルを基盤にして作成したアルゴリズムが組み込まれており、時々刻々術者が行なう心臓マッサージと人工呼吸の入力を取り込んで各時刻毎の最高血圧、最低血圧、血中 O_2 、 CO_2 濃度などを計算する。算出された血圧値はロボット上腕部に巻かれたカフと水銀血圧計によって測定できるようになっている。血圧測定に当っては実際の患者で行うのと同じように聴診器を肘動脈部にあてコトコフ音を聞きながら測定する。救急蘇生にとっては循環系以上に呼吸系の処置が重要である。意識の喪失に伴ない出現する舌根沈下による気道閉塞を防ぐ技術を訓練するため、ロボットの舌は本物そっくりにつくられており、外に引っ張り出せるようになっている。さらには頭部を後方にそらすと気道確保が行なえるよう設計がなされている（写真2）。人工呼吸による換気量は胸腔内の流量センサで検出され、心臓マッサージと同様にスコアリング回路で評価を受けた後にマイクロコンピュータに入力される。

一方、ロボットの反応としては頸部および腕部の動脈拍動、心音、瞳孔の対光反射が具現され、いずれもプロセッサ部分で逐次判定される全身状態の程度に応じて反応を示す。さらに本ロボットは医学教育用であることから、心臓マッサージや人工呼吸などの処置のよしあしが直ちにモニタ上に表示されるとともに、教育表示用として訓練生により施行されている実技についての批判（モットシッカリヤリナサイ…）、注意（ハクシュツリョウガタリマセン…）、励まし（ガンバレ…）などの文字が表示されるようになっている。

さらに最近では学童の救急蘇生を対象とした患者ロボットも開発されており、主として8～9歳ぐらいの学童

の救急蘇生を対象としている。

同じような試みとしては、従来から心肺蘇生 CPR (Cardiac pulmonary resuscitation) 訓練用の人形（例えばレサシ・アンなどは世界的に有名）が普及していたが機械じかけであるために多様性や緊迫感、臨場感に乏しく今一步の感があった。一方、米国においてはマイアミ大学医学部が中心となって循環器疾患教育用患者ロボット“ハーベイ”が開発されている。このロボットの特色は、教師が予じめ外部からのボタン操作であらゆる循環器疾患をつくり出すことができる点で、生徒は実際の患者に対するのとまったく同じように血圧測定や聴打診、心電図、心音図などの診察手段により診断をつけてゆく。ただしこのロボットは診断面だけにその機能が限られている。

4. 麻酔訓練用患者ロボット⁴⁾

前述した救急蘇生術訓練教育用ロボットの機能をさらに向上させたものとして写真3に示す麻酔訓練用患者ロボットがある。本患者ロボットがもつ機能は、まず入力として筋弛緩剤の投与、静脈麻酔、吸入麻酔ができることであり、患者ロボットからの出力としては麻酔施行中の患者の眼瞼の開閉、瞳孔の対光反射、パッキング（麻酔から覚めた時に気管チューブをはき出そうとする運動）、呼吸運動と呼吸音、心音、心拍、血圧測定、筋弛緩に伴う手掌部の開閉が具現される。注射は前腕部に設置された注射の種類及び液量センサにより判別・定量される。また吸入麻酔では笑気、酸素ガス（いずれも模擬ガス）流量が流量センサにより、ハローセン濃度は気化器に取り付けられたダイヤルのセットにより検出されてマイクロコンピュータに送られる。ロボットの内部（患者）状態は体重、体格の各々3つのパラメータ値の組合せにより計9種類が選択出来るようになっており、個体差による反応の違いを訓練出来る。なお、同様のものとして米国においては南カリフォルニア大学において麻酔訓練用患者ロボット“Sim-One”が開発されている⁵⁾。

5. おわりに

以上、医学教育におけるロボットについて解説したが、本格的な医学教育用知能ロボットはその研究が緒にいったばかりと言えよう。しかしながら、これら教育用ロボットの教育効果については既にいくつかの報告（救急蘇生用^{3,6)}、麻酔用⁷⁾）があり、たしかに有用性がある。冒頭でも述べたように医学教育用ロボットは必ずしもメディカルスタッフ教育用だけではなく、今後は患者自身やその周辺あるいは一般人も含めた健康医学の教育のた

めにもきわめて有用になろう。医師からの説明だけではなく患者自らが自身の反応とロボットのそれとを対比して疾患部位やその状態の理解を深めてゆくことなどは、医師と患者間のコミュニケーションをより促進させるためにも役立つと思われ、それらを目指したものの一つとして異常反射教育用ロボット⁸⁾の研究などが進められている。

いずれにしても、今後益々医療の質の向上と、医療の量の拡大が進行するものと思われ、それらに柔軟に対処してゆくに医学・医療教育用ロボットの果たす役割が拡大するものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 菊地眞, 桜井靖久: 臨床技能訓練と患者シミュレータ, 臨床ME, 第4巻, 第1号 (1980) pp. 39~46
- 2) 桜井靖久: 医学教育工学, 東女医大誌, 第53巻, 第2号 (1983), pp. 89~98
- 3) 桜井靖久, 菊地眞, 谷下一夫, 秋山太郎: 蘇生訓練教育用患者シミュレータ, ライフサイエンスの現状と将来, 創造社 (1981), pp. 883~895
- 4) 菊地眞, 桜井靖久: 麻酔訓練用知能機械, ライフサイエンスの現状と将来(II), 創造社 (1985) pp. 158~173
- 5) 藤正敏: 患者ロボット, 計測と制御, 第16巻, 第7号

(1977) pp. 59~61

- 6) H. Patrick & L. Eisenberg: An electronic resuscitation evaluation system, IEEE trans. BME, Vol.19 (1972) pp. 317~320
- 7) S. Abramson, J. S. Denson & R. M. Wolf: Effectiveness of a simulator in training anesthesiology residents, J. Med. Education, Vol.44 (1969) pp. 515~519
- 8) 中島尚正, 河野襄次, 桜井靖久, 菊地眞, 谷下一夫, 谷下一夫, 秋山太郎: 異常反射診断教育用シミュレータ, ライフサイエンスの現状と将来, 創造社 (1981) pp. 903~909

菊地 眞 (Makoto KIKUCHI)

昭和21年12月6日生れ。44年慶応義塾大学工学部卒, 49年同大学院博士課程修了。工学博士。47年東京女子医科大学医用工学研究施設助手, 51年同講師を経て55年より防衛医科大学校医用電子工学講座教授。医用マイコン, 生体制御, 医用レーザー, ハイパーサーミアなど医用工学に従事。日本ME学会, 日本人工臓器学会, 日本医科器械学会, 日本レーザー医学会, 日本ハイパーサーミア学会等の評議員。電子通信学会, 日本ロボット学会等の会員。