医療・福祉ロボットへの期待

井 手 隆 俊*

1. は じ め に

コンピュータの医学への導入はまさに医療革命とも呼べる変革をもたらしつつある。そして医療の質的向上を目指した話題のひとつが医用ロボットであるといえる。しかしながら医療本来の対象は「人間」そのものであり、この特殊性を考慮しなければ医用ロボットの研究・開発は成立しない。そして対象が「人間」であるが故に安全性を始めとする様々な制約が存在するため、医用ロボットそのものが必要か否かも合せて議論すべき問題点の一つとなろう。そこでこれらにつき様々な角度から検討するとともに今後の展望につき述べる。

2. 医療を取り巻く様々な問題点

欧米ならびに日本の医療事情¹⁾を見ると、人口 10 万人あたりの医師数は各国ともほぼ同程度であるが、病床数は日本の場合 2094 床と極めて多く、米国の約 4 倍である。また日本の平均在院日数が長い事も特徴である(表 1)²⁾。そして一人あたりの医療費は米国の約 1/3、GNP 比でも約 1/2 である。そして 1990 年の米国における国民医療費は GNP で約 12%、日本は約 5%、20 兆円程度と見込まれている。人的資源につき考えてみると、医療スタッフ数は米国では入院患者ひとりあたり約 4 人、日本では約 1 人である。このように日本の医療事情は米国と

比較する限りにおいては、極めて少ない医療スタッフと安い費用で国民の健康を維持している。経済効率からすると極めて優秀である。しかし医療の質という観点に立った場合、はたして国民の期待する医療が行なわれているかは疑問である。日本の医療は慢性的な人員不足と医療業務の複雑化に伴い、もはや処理能力の限界を越えていると言っても過言ではない。その弊害は患者の不満となって表れており、患者から待ち時間 3 時間、診察 3 分といわれている事もあながち嘘ではない。何故われわれが医用ロボットを必要としているかは、技術的な観点からだけではなく、このような社会的背景を理解することも必要であろう。

3. 高齢化社会の問題点

高齢化社会の到来は世界的傾向であり、特に日本では人類がかつて経験した事のない早さで高齢化社会を迎えようとしている。これは寝たきり老人や痴呆性老人の増加にとどまらず、老人を世話する若年労働者の相対的減少など、さまざまな社会問題を惹起することが予想されている³⁾。最近話題となっている「老人保健施設」は入院治療を必要としない要介護老人に対し、看護・医学的

原稿受付 1990 年 8 月 1 日

Expectation for Medical and Healthcare Robotics

* 山梨医科大学整形外科教室

項目	調査年	米 国	英 国	フランス	西ドイツ	スウェーデン	日 本
老年人口 (%)	'83	11.6	15.2	13.2	15.0	16.5	10.2
医師数 医師数 (人口10万対)	'81	513,040 219	78,649 159	145,466 260	142,934 232	18,300 220	181,101 151
病床数 病床数 (人口10万対)	'83	1,105,201 472	363,395 782	601,051 1,114	707,710 1,150	123,074 1,481	1,750,768 2,094
平均在院日数	'80	7.8	20.5	13.5	19.7	24.2	54.6
医療費 (一人当ドル) 医療費 (GNP 比%)	'83 '83	1,580 10.6	393 6.1	651 9.3	955 8.2	1,390 9.9	487 5.1
医療制度	'83	メディケア メディケイド HMO 民間保険	国民保険 サービス	社会保険 (持保険)	社会保険	国民保険 サービス	社会保険 (持保険)

アメリカ社会の医療戦略(大谷藤郎訳)より抜粋

表 1 各国の医療事情の比較：日本は極めて少ない医療スタッフと安い費用で国民の健康を維持していることがよくわかる

写真 1 従来の歩行訓練法：ベッド上での筋力強化，起座，車椅子での移動，傾斜台，平行棒，歩行器，松葉杖の順に段階的に行う。能力と意欲に合わせて行なえる利点がある半面，患者自身の努力と忍耐に負うところが多い

図 1 荷重歩行指数のパターン分類：訓練による歩行の改善状況を 4 型に分類した
 荷重歩行指数 = (歩行周回数 × 荷重負荷率** × 15) / 1000 *歩行周回数：1 周 12 m
 **荷重負荷率：接地面にかかる体重比

AID-1試作機

AID-1実用機

写真 2 歩行訓練用ロボット AID-1: 安全性の面からも医師による臨床試験が必要ななど一般の産業用ロボットとは異なる開発過程が必要である

管理の下での介護および機能訓練その他必要な医療を行うとともに、日常生活上のサービスを提供することを目的とした施設であるとされている⁴⁾。しかしこのような施設も必要であるが、人手の少ない現実を踏まえ、いかにすれば寝たきり老人の増加を防ぎ、患者の自立と社会復帰が可能となるかを考える事も大切である。

4. 医療業務の現状と問題点

前述のように、人口 10 万人あたりの医師数は各国ともほぼ同程度であるが、医師を含めた医療スタッフ数は米国の約 1/4 である。これは医師、看護婦以外のスタッフが極端に少なく、全ての雑用を両者で行なわなければならない事を意味している。実際医師でなくても可能な雑用に追われ、目が回るような忙しさである。じっくりと腰を落着け、患者の診療にあたりたいと望んでいる医師は著者一人ではないであろう。

また看護婦は外来では診察室の整理・整頓や患者の衣

服着脱の手伝い、重症患者や気分の悪くなった患者を適切に看護するなど気を緩めることはできない。病棟では看護計画をたて、検温を始めとする状態の把握、食事の配膳、用便・入浴の介助、患者の搬送、内服薬の投与、点滴の準備、その他様々な雑用や記録記載、勤務交代時の送りなど休む暇もない。そして患者の不安な精神状態を的確に把握し、勇気づけたり、なだめたりすることも大切な仕事である。このように医師以上に忙しい医療業務を長年続けるうちに、患者の急変や精神的動揺に対して看護婦としてだけではなく人間としての喜怒哀楽が徐々に欠落し、いわゆる「燃えつき症候群」となったり、第一線を離れて行く看護婦は極めて多い。資格をもった看護婦でなくとも可能な配膳や清掃、その他諸々の雑用をこなす人手があれば、看護婦は患者と共に悩み、勇気づけ、回復への意欲を盛り上げ、本来の業務に専念する事が可能となる。しかしその人手が現状では望めない以上、医用ロボットの開発と導入は必要となる。

5. 歩行訓練と医用ロボット

以上、医療と福祉の分野にはさまざまな問題点が存在する事を明らかにしたが、医用ロボットをどのような形で第一線の医療現場に導入するか、あるいは医用ロボットの性能、制約はどのようなものが考えられるのかにつき、具体例を挙げ述べてみたい。

5.1 歩行訓練の現状

従来の歩行訓練はベッド上における筋力強化訓練に始まり、起座、車椅子での移動訓練、傾斜台を用いた起立訓練、そして平行棒・歩行器・松葉杖による訓練を行っていた(写真1)。この段階の訓練は能力と意欲に合わせて行なえる利点がある反面、患者自身の努力と忍耐に負うところが多い。理想的な訓練のひとつにプールを用いた水中における訓練や治療がある。これは水の浮力を利用したものであり、高齢者にとっても温泉療養と似た感覚で馴染みのある方法である。しかし医療スタッフも毎日水に入らねばならず、管理運営にも膨大な費用を要する。

5.2 新しい歩行訓練

理想的な歩行訓練とは熱意ある理学療法士や看護婦、医師などの多数の医療スタッフによる十分に時間と手間をかけたものであろう。しかし現実には人手も少なく満足な訓練は困難であり、特に老人の場合、意欲のない患者は取り残され、寝たきりとなることもある。さまざまな観点から訓練のあり方を考えていくと、もはや人手に頼った従来の方法は限界であり、特に多くの老人が満足な訓練も受けられず、寝たきりとなっている現実を直視する必要がある。このような観点から考案したのが歩行

表 2 対人間用ロボット

機 能	作業内容・用途
診断・検査	内視鏡、X線撮影
治療	手術、放射線治療、人工臓器 マイクロロボット
生体監視	集中治療
看護	食事介助、患者抱き上げ、清拭・排泄介助
患者介助	患者搬送、ヘッド起き上がり介助
リハビリテーション	歩行・筋力増強訓練介助、 日常生活動作訓練介助、職業訓練
身体障害者介助	車椅子型自走装置、義手・義足、 環境制御
教育用	患者病態シミュレータ、手術シミュレータ

表 3 医療業務用ロボット

機 能	作業内容・用途
検体処理・検査	血液・尿検査、生化学分析、細胞診
搬送・移動	薬剤、給食、医療材料・器材 カルテ、輸血、X線フィルム
清掃	病院内床面・手術室天井などの清掃・消毒
案内	受付、患者誘導、道順表示
薬剤	調剤、有効期限・不良品チェック
医用材料・機器製造	綿球、杖、各種医用材料、装具、人工関節
器材管理	医療器材洗浄・消毒・滅菌、在庫管理
洗濯	患者寝間着、手術着、各種の布、シーツ
廃棄物処理	医療廃棄物分別処理

訓練用ロボット AID-1 (エイドワン)^{5),6),7),8)}である。

5.3 歩行訓練用ロボットの開発

開発にあたり最も考慮したことは、人体に対する安全性の問題であった。昭和58年10月、AID-1の基本構想に着手し、2年後に機械部分のみの試作機が完成した。この時点における試作機は圧縮空気による吊り上げ力により患者の体重を軽減し、体幹を保持する機能のみであり、とてもロボットと言える代物ではなかった。訓練中に患者が転倒した場合などの安全性を確認後、厳重な医師の監督のもとに試用し、昭和63年4月にコンピュータ制御による実用機が完成した(写真2)。このように基本構想から実用機の商品化まで約5年を要しており、その間には医師の監督のもとに試用する臨床試験が必要であるなど、一般の産業用ロボットとは異なる開発過程が必要である。

5.4 AID-1の機構

吊り上げアームは水平方向には360度回転が可能であり、垂直方向には上下30度可動する。アーム先端の懸垂装置は患者の腋窩と胸郭部を締め付けて体幹を保持する。なお完全確保のためにベルトを併用している。また本体の周囲には円形手すりを取り付けてある。AID-1

の動力源には圧縮空気を用いており、患者を吊り上げて体重を軽減し、体幹を保持する。そして体重負荷変動をロードセルセンサで感知し、マイクロプロセッサによる体重負荷コントロールを行なっている。制御ラインには作業環境を考慮し、光ファイバケーブルを使用しており、患者情報をホストコンピュータに伝送し、データ解析を行なっている。停電や誤操作対策には万全を期し、非常用自動ロック機構を備え、随時手動操作に変更することが出来る。また患者の転倒などによる急激な負荷の変動を検出して補正する緩衝機構により大きな衝撃が加わることはない。

5.5 AID-1の機能と臨床評価

過去4年間に136症例の訓練を施行した。その結果は極めて満足できるものであった。訓練終了までは詳細なデータ収集が可能であった47症例では、平均訓練日数は33日、総歩行訓練時間は平均3時間、総歩行距離7.5kmであった。またこれらの訓練状況を総合的に把握するために、体重の負荷率、歩行距離をもとに荷重歩行指数と名付けた値を算出した。その結果、訓練による歩行の改善状況を良く把握する事が可能であり、自力歩行が可能となるか、あるいは車椅子かなど、将来の予測が可能

図3 医用ロボットの作業環境と human-machine interface: 利用者として身体障害者を想定したものであるが、他の対人間用ロボットにも共通する基本概念である

能となった(図1, 2)。

このように AID-1 による訓練は従来の段階的、機能的訓練とは異なり、総合的、動的訓練とも呼べるものである。最近、被訓練者の体重負荷などを利用した動的訓練、すなわち closed kinetic chain という考え方が導入され、極めて効果的であることが明らかとなっている。本ロボットによる訓練はまさにこの考えに沿ったものである。しかも疼痛や苦痛を伴うことなく、患者は機械の力を借りていることを忘れ、自分自身の脚力で歩行しているという体験をすることにより、意欲をみせ積極的に訓練する姿勢がみられた。そして医療スタッフの腰痛を未然に防止できることもあり、役割は大きいものと考えている。

本装置は医療スタッフの人手減らしのためのものではなく、歩行訓練を手助けし、医療の質を向上させるための装置であり、現在日本全国で実際には40数台が稼働している。

6. 医用ロボットあれこれ

医用ロボットの定義は極めて曖昧であるが、各種センサ、アクチュエータを有し、これらの情報処理と制御を行なう演算回路を有する装置と考えると極めて広い領域のロボットが挙げられる^{9),10),11),12)}。さまざまな医用ロボットが研究開発されているが、その中で第一線の医療に携わる著者の独断が許されるならば、以下に述べるようなロボットが今後先ず必要になって行くと考えている。医用ロボットは直接患者の身体に触れる対人間用ロボットと、検体の処理など直接には患者と接しない医療業務用ロボットの二つに大別することが出来る(表2, 3)。このうち医療業務用ロボットは従来のロボット技術の延

写真3 人工股関節置換術用ロボットの動物実験装置: より正確で的確な手術操作を行なえるように、三次元CT像とCADシステム上でシミュレーションを行ない、その後実際の操作をロボットが行う

長線上にあり、比較的問題は少ないが、直接患者に接触する対人間用ロボットは安全性を始めとする様々な制約など技術的にも解決すべき問題点が多い(図3)。

診断・検査にあたるものとして先ずX線撮影ロボットが考えられる。患者の個体差を判断し、X線装置の位置制御と撮影条件を設定する事が必要である。顕微鏡視下に行なう手術は今日の医療において大きな分野を占め、耳鼻科、眼科、整形外科、脳外科など多くの専門分野において行なわれている。最も微小な顕微鏡視下手術では直径0.8mm程度の血管、神経の縫合を20μmの糸で縫合することができる。しかし技術修得には多大の努力が必要である。このように極めて高度の熟練と技術を要する手術に対して微小マジックハンドを用いて遠隔操作を行なう医用ロボットの開発もすでに始まっている。手術介助ロボットとしてカナダのブリティッシュコロンビア大学バンクーバー病院の関節鏡視下手術に際し、下肢の保持と肢位の変更を行なうものが有名である¹³⁾。従来の手術では「足持ち3年」と言われるような腕力や体力と共に微妙なコントロールが必要な介助をロボットに行なわせる事が実用的レベルに達した暁には、より一層質の高い手術が可能となるであろう。

さらに人工股関節置換術そのものをロボットに行なわせようとする動物実験¹⁴⁾もカルフォルニア大学ですでに始まっている(写真3)。消化管や血管内等の観察と手術に用いる内視鏡も良い適応であろう。広瀬らは蛇のようにくねくねと曲る多関節多自由度の腸内視鏡ロボット¹⁵⁾を開発し、生検やレーザー照射による治療を可能としている。血管内を鏡視できるファイバースコープはすでに実用化

されているが、心筋梗塞により血管内に生じた血栓の治療や病変の情報収集にあたる自走カプセル型マイクロマシン、癌や骨肉腫などの部位へ血管を介して薬剤を運搬し、放出するもの等が考えられている。すでに実用化されている人工赤血球はマイクロマシンの先駆けである。

このような微小ロボットは蛋白リニア・アクチュエータ、ゾル・ゲル変換駆動装置、鞭毛モータ、化学センサなどを備え、従来の金属でできたロボットの概念からはおよそ想像もできない機構と材料から構成され、人工細胞ともいうべきものである。

マイクロマシン¹⁶⁾の研究はその端緒についたばかりであるが、遺伝子工学やバイオテクノロジーの技術に支えられた次世代を担う先端技術のひとつである。そしてマイクロマシンは人工筋肉、人工神経など人工臓器の部品としても活用されていくであろう。また、患者や身体障害者のちょつとした用事や手助けをするロボットも可能となろう。手足が不自由な人にとって背中が痒い時などは堪らないものである。

看護面では、患者の搬送、清拭、排泄介助にあたる力持ちのロボットが挙げられる。東海大学の患者抱き上げロボット「ナーシー」が有名であり、より小型化が実現すれば質の高い看護が可能となろう。内服薬の投与や点滴等の薬剤の準備、あるいは集中治療を行なう医用ロボットが考えられてもよいと思う。しかし患者の生命に直接関与するため、薬や患者を間違えたりする危険性をいかにしてチェックするかである。これに対処する絶対確実な方策はないに等しいが、ひとつの方法として時々故意に患者に危険のない範囲で間違えるロボットを作ってみてはどうかとも考えている。たとえば、われわれは偽薬というものを使う。これは鎮痛剤の代りに乳糖という全く無害な糖類の一種を与え、習慣的な薬剤依存性から脱却させる目的などに用いる。このようなものを使用して医療関係者のチェック機能判定を行なう事も可能である。

検体の処理など直接には患者と接しない医用ロボットの開発と導入は現存の産業用ロボットの延長線上にあり、急成長が見込まれる。すでに血液検査、生化学分析ロボットは浜松医大などに導入されている。病院内清掃、手術室の消毒、洗濯、医療廃棄物の分別処理は肝炎ウイルスなどの院内感染を未然に防止する意味からも大切であり、ロボットの導入により一層徹底した管理が可能となろう。これらの医用ロボットの導入にあたり、最も考慮すべき点は人手減らしの道具という捉え方はすべきではなく、医療の質的向上、より親密な人間関係のための装置として役立てるべきものと信じている。

7. む す び

医用ロボットは、その必要性、機能、経済性、安全性などを十分に討論して決定することが大切である。いたずらに高機能を重視し、複雑であればあるほど第一線の医療現場では受け入れられない。さまざまな医用ロボットが多く施設や研究所で開発され、報道されているが、医療現場に導入され、本当に稼働しているものは極めて少ない事実を直視し、反省する必要がある。そして何よりも大切な事は工学と医学の密接な協力体制作りであると考えている。稿を終えるにあたり、ご校閲を賜りました赤松功也教授に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 森亘, 本間三郎: 講座 21 世紀へ向けての医学と医療, 第11巻, 第1版, 日本評論社, 東京, 1990.
- 2) Sorkin, A. L.: アメリカ社会の医療戦略 (大谷藤郎・濃沼信夫訳, 第1版, 医学書院, 東京, 1987.
- 3) 吉田寿三郎: 高齢化社会, 第1版, 講談社, 東京, 1981.
- 4) 小野明雄: 老人保健施設について. 総合リハ, 15: 527-533, 1987.
- 5) 井手隆俊ほか: 歩行訓練用ロボット (AID-1) の開発, 整・災外, 29: 825-828, 1986.
- 6) 井手隆俊ほか: 整形外科的立場からみた老人問題とその対策. 山梨医科大学紀要, 4: 34-42, 1987.
- 7) 井手隆俊ほか: 歩行治療用ロボット (AID-1) の開発と臨床効果. 人工臓器, 17: 769-772, 1988.
- 8) 井手隆俊ほか: 医療用ロボット (特に歩行訓練用ロボット) の開発と臨床応用. 病態生理, 8: 172-174, 1989.
- 9) 桜井靖久ほか: 医療とロボット. 日本ロボット学会誌, 1: 44-50, 1983.
- 10) 宮本博幸: 医療分野の検査ロボット. 日本ロボット学会誌, 4: 517-521, 1986.
- 11) 菊池真: 医療におけるロボティクス, BME, Vol. 3, No. 4: 2-10, 1989.
- 12) 齊藤之男: 医療・福祉ロボット, 日本ロボット学会誌, 8: 108-110, 1990.
- 13) McEwen, J. A., et al.: Development and initial evaluation of an advanced robotic assistant for arthroscopic surgery. Proc. of 1st IFMBE Pan-Pacific Symp. 176-177, 1986.
- 14) Paul, H. A., et al.: Application of CT and Robotic Technology to Hip Replacement Surgery. Proc. First International Symposium on Custom Made Prostheses, Dusseldorf, October 1988.
- 15) 広瀬茂男ほか: 形状記憶合金を用いたサーボアクチュエータの研究. 日本ロボット学会第2回学術講演会予稿集, 123-126, 1984.
- 16) 藤正器: マイクロマシン, 第1版, 講談社, 東京, 1990.

井手隆俊 (Takatoshi IDE)

昭和21年8月29日生れ。47年東京慈恵会医科大学卒業。久留米大学医学部整形外科学教室、門司労災病院、宮崎県立日南病院等を経て、58年山梨医科大学整形外科学教室。専門は関節の外科。生体工学の研究に従事。日本整形外科学会、日本リウマチ学会、人工臓器学会、日本関節鏡学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)