

研究論文：

自律移動ロボット実践教育カリキュラム

(包摂構造化に基づくプロジェクト型講義の学習プログラム開発)

川副嘉彦

満岡将樹

政田 翔

Practical Education Curriculum for Autonomous Mobile Robot (Project Learning Program for School Based on Subsumption Architecture)

Yoshihiko Kawazoe, Masaki Mitsuoka and Sho Masada

Graduate School of Engineering, Saitama Institute of Technology,
1690, Fusajii, Fukaya, Saitama, 369-0293, Japan
E-mail: kawazoe@sit.ac.jp
[2011年3月10受付 2011年6月29日受理]

There is no robot around us in our society at the current stage if we define a robot as an autonomous machine working in the arena of offices, homes, and disaster sites, etc. outside the factories. Mechatronics, dynamics and robotics involving humans are the world of strong nonlinearity. This paper investigated the approach to the emergence of the objective behavior of an autonomous mobile robot by learning with Subsumption Architecture (SA) for breaking through the problems of the conventional robotics with SMPA (Sense- Model- Plan- Act) framework in the real world. It showed the way of learning in the real world with SA and developed into practical education curriculum as an introduction to Robotics having an intellectual and emotional appeal.

Key words: Robotics, Practical Education Curriculum, Autonomous Mobile Robot, Subsumption Architecture, Perception and Action

1. はじめに

1.1 新しいロボット教育の意義と重要性

少子・高齢化社会に期待されるサービスロボットや介護ロボットなど、我々の周囲に存在して知的に動く（従来の機械とは質的に異なる）機械をロボットと定義するならば、長年の研究にもかかわらず、我々の周りには1体のロボットも実在しない。自動車工場などで活躍している工業用ロボットは、ロボットというより、高級な自動機械と言うべきであって、二十数年前から始まっている国家プロジェクトによるロボットも現在の延長線上では難しい問題が多くすぎることが開発に実際に取り組んできた研究者[1]-[3]だけではなく一般にも認識され始めた[4]-[7]。

生活分野、公共分野、医療福祉分野等においてロボット技術の多様な利用が期待されているが、現状のロボット技術は、将来の市場拡大に対応したロボット技術の具体的用途や技術の実現可能性を明確にできないでいる[8][9]。

日本ロボット学会誌 2009 年 5 月号において、「ロボット制御の理論」特集が組まれ、そもそも、ロボット研究に必要な理論とは何かが改めて問われている。様々なロボット制御法が次々と提案される一方で、長きにわたりロボット制御技術の研究やロボットの開発に携わって来た人々の多くに混乱と疑問が生じているという背景が見える[10]。

例えば、二足歩行ロボットでは、単一質点の倒立振子やテーブル・台車モデルとして近似する ZMP (Zero Moment Point) 制御が一般的という認識があるが、梶田[11]も指摘するように、実際のロボット制御では教科書どおりにいかないことが多く、速い動きの生成やロバスト性の実現への限界が指摘されている[12]-[17]。ホンダの ASIMO の歩行が滑らかであるために ZMP 制御に基づく歩行は安定だと誤解されやすい[18]が、ASIMO は ZMP 制御だけに依存しないで試行錯誤による多くの経験を生かしているから比較的安定なのであって、刻々変化する未知の実環境はロボットにとっては危険に満ちており、現在の一般的なアプローチをとる限り、制御すべきパラメータと計算量が爆発的に増えることになる。ロボットに俊敏・柔軟な動きを期待すればするほど、ロボットは非現実的なものになる。

ロボットダイナミクスは必然的に非線形であり、数学的に展開される一般的制御理論がロボット作業に役に立つことはあまりないと有本[19]が指摘するように、多自由度・非線形はロボットの本質であり、ロボットの本質が多リンク系の非線形の力学と制御への展開だとすれば、2リンク系でもカオスになるロボットの力学と制御は未開拓である[20]-[22]。

理論と実応用のギャップを埋めるために頑健なロバスト制御の研究も 20 年余り盛んに行われてきたが、ロボットの特長でもある非線形性が線形モデル集合で取り扱われているための限界があり、物理的な特性を十分考慮した超ロバストな展開が期待され

ている[23].

一方, 国内外におけるロボット教育の実態調査および, それに基づく教育カリキュラムの確立を目的に日本ロボット学会に設立された「ロボット教育研究専門委員会」により「ロボット感動教育シンポジウム 2009」が開催された.

ロボットの形と動きは人間にとて分かりやすく, ロボットは人によってミッションが設定できるので人を感動させたり達成感を得ることができること, 企画・設計・製作・発表が机の周囲で可能であり, 動かしてみるとロボットは本当に動かないことがわかるが, これが課題発見・解決能力を養うことになり, 広い範囲の基礎教養を構成論的に学べるので非常に可能性を秘めた分野であることなど, ロボット教育の特徴が挙げられている. エンジニアリング・テクノロジーはシンセシス(構成論的)であり, 経験したあとに理論を学ばせると理解しやすいこと, うまく動くものの背景には隠された知恵があるはずであり, それを体系的に評価する方法が必要であることなども強調されている.

ロボットの人間教育的意義については一層の関心がもたれており[24][25], 極論すれば, ロボットが現時点で唯一貢献できそうな分野は教育だけのように見える.

1.2 過剰駆動力の制御によるロボットの自在の動きの生成

平衡点不安定が動きをつくるという力学原理と過剰駆動力を制御した状態遷移に基づくと俊敏自在の動きが生まれる.

自動車にアクセルとブレーキが必要であるように, 二足歩行ロボットの場合, 歩行だけではなく転倒制御も基本である. 例えば, 図1は, 不意に後方から押された二足歩行ロボットが, 転倒を知覚し, 転倒時の衝撃を最小限にするように受け身をし, 転倒した後に素早く立ち上がる動作を示す. ロボットのすべての関節を同時並列に動かして, 動きを阻害する過剰駆動力を制御して状態(姿勢)を形成することにより巧みな動きが発現する. この場合は, 腹部に

取り付けた測距センサーで前方壁との距離の時間微分値を検出し, 転倒の判断をしている. プログラムはサブサンプション的構造を採用している[26]-[29].

ヒューマノイドロボットの研究が盛んであるが, 予測できない外乱により転倒したときに, 衝撃を最小限にとどめるような受け身的動きや転倒後の起きあがりの自律的発現は, 歩行以前の必須事項である. しかし, ロボットに本質的なこのような研究は極めて少ない. 地震の災害現場では「ロボット大国日本」のロボット技術は活躍できるレベルにはない. 「ロボット大国日本」という場合のロボットは高度な機械技術・電子技術, メカトロニクスの進展による産業用ロボットのことであり, 研究者にも誤解されやすい[5]-[7],[9],[31]-[33]. ホンダのお客さま相談センターのホームページの地震に伴う Q&A において, 「ASIMO に原発事故処理をしてもらえませんか?」という質問に対する次の回答は正直でほほえましい.

「Honda の ASIMO は, 将来人の役に立つべく開発をして参りましたが, 残念ながら現状では, ご要望をいただいた様なことができる技術には至っておりません」[34].

図2は, すべての関節を同時並列に動かして過剰駆動力を制御することによる二足歩行ロボットの階段登りであり, サーボモータのトルク不足にもかかわらず, 身体全体を使って1段を約1秒で軽やかに登りきる[26],[35]. 図3のように, 氷雪上も自在の速度で走る[36].

立花[37]が哲学者ヴィーコを引用して指摘する「真理は作ることそのものにおいてある」は, ロボットに最も当てはまる. スポーツや芸術・芸能などと同じく, 能書きや体系化よりもロボットは「いかに動くか」が優先されるべきである. 「動かしてみなくちゃわからない」のが自然・生き物・ヒトと共に存するロボットであり, 能書き(教科書)やマニュアルは後からついてくる. ロボットも「出来なかったら意味がない世界」であり, デカルトの「我思う故に我あり」から「我あり故に我思う」への非デカルト的展開が求められる[26][38][39].

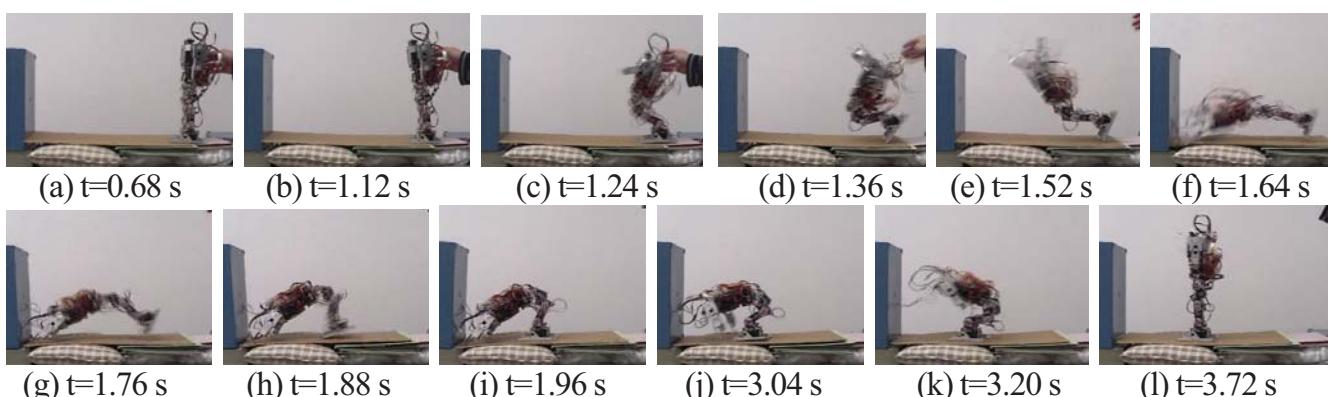


Fig.1 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE-No.5-2005 utilizing instability. It takes only 2.5 seconds.

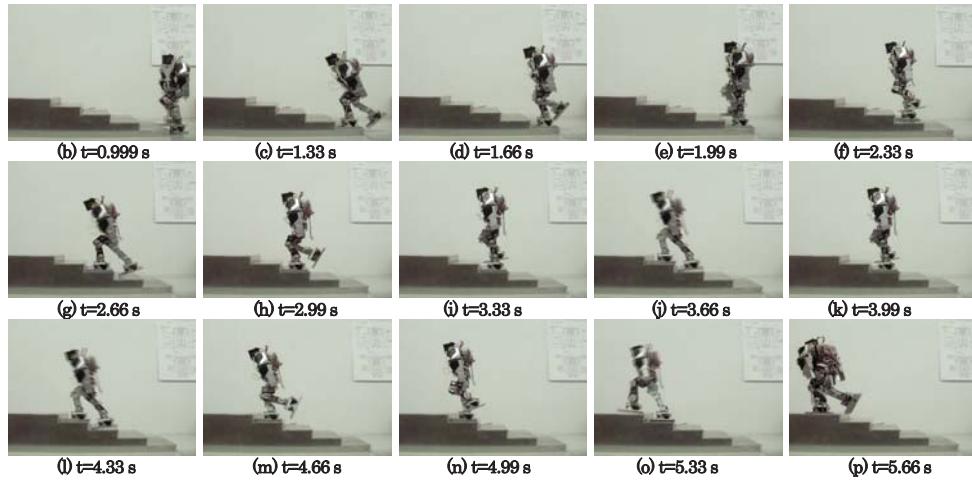


Fig.2 Going up the stairs of GENBE-No.4 with 10 freedom legs with instability.



Fig.3 Humanoid biped robot who walks and runs on the ice and snow in the lake HARUNA.

1.3 二足歩行から始めるロボティクス入門

生体（人間・動物）に似た運動機能を持つもの、あるいは運動機能に加えて知的機能を備えているものというのが最も基本的で本質的なロボットの定義であろう。

大学ロボット系学科の1年次からスタートする2,3名の少人数グループによるプロジェクト型講義を想定し、「二足歩行から始める実践ロボット教育カリキュラム」を開発した[40][41]。ロボティクス入門を「二足歩行ロボット」から始める理由は、システムとしての制御が難しい多自由度システムであり、巧みな動きを実現するには様々な知恵が要求され、しかも、その良し悪しが誰でも容易に分かり、学習の全体像と具体的な成果が目に見えやすいからである。具体的な実践と問題解決の経験を一般的な手法に展開できる能力を養うことが目的である。

1年次に必修の「二足歩行ロボット製作法Ⅰおよび製作演習Ⅰ」、2年次に「二足歩行ロボット製作法Ⅱおよび製作演習Ⅱ」、「二足歩行ロボット製作法Ⅲおよび製作演習Ⅲ」をそれぞれ毎週3時間、15回実施し、3年次の「自律移動ロボット・プロジェクトⅠ, Ⅱ」へと続く。部品を組み立てて、各種センサの実験結果(図4)と生成した各種の動きを使って、知覚と要素行動を包摂構造化の手法によりプログラミし、二足歩行ロボットの自律行動を実現させる。競技会に至るまでに試行錯誤による問題解決の経験を積む。

教員はプロジェクトを遂行する上で必要となる説

明やアドバイスを与えるが、受講者は自由な発想で目標を達成する方法を自ら考え、プロジェクトが完成するまで試行錯誤を繰り返す。関連する論文なども参照して、問題点や改善点を分析し、学生それぞれが独自のマニュアル化・体系化を試みる。ロボット学会誌などの最新の論文を読んだ学生は、論文には非現実的な多くの仮定が設けられていることに気づく。たとえば、足裏の滑りを利用した方向転換に関して[42]、学生のレポートには次のような記述が見られる。

論文の仮定(1)：ロボットの動作は十分に遅く、よって慣性力の影響を受けない。摩擦力の効果が支配的である。

疑問：ロボットの特徴はスタート・ストップ、加速・減速の繰り返しである。論文の仮定では運動とは言えない。ロバストなスタート・ストップの生成こそロボットの重要な課題である。

論文の仮定(2)：動摩擦係数と静摩擦係数は等しいものとして扱う。

疑問：実際にはそうならないので、論文の仮定には無理がある。摩擦の大小に依存しないでロバストな動きをするロボットを実現することが重要な課題である。

論文の仮定(3)：床面は水平で、足裏にかかる摩擦力は一様かつ不变とする。

疑問：現実にはロボットは床面の傾斜や足裏の接触状態の影響を受けやすいので、論文の仮定は非現実的である。多様な傾斜と摩擦のある床面でロバストなロボットの実現こそ重要な課題である。理論的であっても動かないロボットより構成論的でも実際に巧みに動くロボットを優先して解析・設計の対象とすべきである。

これらのこととは日常物理学では基本のことであるが、先入観にとらわれない素朴な学部1, 2年生だから気づくことであり、ロボット実現よりも論文作成を優先せざるをえない大学院生や研究者には気づきにくいことかもしれない。このような課題発見と解決法の模索は、ロボットを動かしてみて初めてわ

かることであり, 問題解決能力の養成には極めて重要である. それぞれがノウハウを蓄積して解答のないマニュアル化をめざすことになる[35] [36] [40] [43].

ロボットの論文には様々な仮定や前提条件が設けられており, シミュレーションの世界とリアル・ワールドの世界とは別物であることを学生は知ることができる. これについては, さらに, 2年次の3Dロボット・シミュレータ Webots (Cyberbotics 社製)[41]を使った授業「移動ロボット設計法」におけるシミュレーションと3年次の授業「自律移動ロボット・プロジェクトI, II」における実験を併用することにより学習効果を上げる工夫をしている.

「二足歩行ロボット製作法Iおよび製作演習I」では, サーボモータの制御による動作の生成, 「二足歩行ロボット製作法IIおよび製作演習II」では, C言語を用いたセンサの動特性の測定とパーセプション&アクションによる簡単な包摂構造的プログラミングの習得, 「二足歩行ロボット製作法IIIおよび製作演習III」では, 競技のための複雑な運動の生成とC言語によるプログラム作成が主要な実践課題であるが, 1年次前期には, 「ヒューマン・ロボット学入門」という科目を配置しており, 人間(自然)とロボット(科学技術)について様々な見方, 考え方を講義とレポートの形式で訓練する.

たとえば, ロボット産業はなぜ期待通りに伸びないのか, ロボットは子供が学習するように学べるか, 情報化社会とロボットの壁, 情報化社会と人間の心, ロボットは人間と共生できるか, ロボットはどれだけ環境を認識できるか, 器用な手作業はロボットにとってなぜ難しいか, ロボット学は、科学?工学?科学的工学?工学風科学?応用?, 二足歩行ロボットの研究はどのようにして始まったか, ホンダが成功したASIMOの二足歩行のメカニズム, ヒューマノイドの応用とは, 知能ロボット研究の歴史と動向, ペットロボットの効用と限界, ヒューマン・ロボット学とは, などが基本的なテーマであり, アニメ「もののけ姫」を科学技術(ロボット)と自然(人間)という視点から考察せよ, スティーブ・ジョブズの伝説の卒業式スピーチをロボット開発の視点から考察せよ, などのトピックス的課題も含める.

これは, 3年次の「新・知能ロボット設計原論I, II」へと展開される. ここでは, なぜ, ロボットが地震の災害現場で活躍できないのか, 活躍できるためにはどのような技術や展開が求められるか, なども重要なテーマとなる.

図5は, 期末試験の発表会(競技会)授業風景であり, 図6は図5の動きの基本となる包摂構造化[26]～[31]の例である. 図7は発表会(競技会)評価シートの例であり, アイディア(発想), 技術(再現性, ロバスト性), 芸術(動きの美しさ), 努力の項目がある. 評価には担当教員のほか, TA (Teaching Assistant), 学生自身も参加し, TAのデモを評価の基準とし, 評価項目ごとにTAに近いパフォーマン

スの場合は5段階の満点の評価になり, TAのパフォーマンスを超えると満点以上になることもある. 異常に低い評価とTAを超える評価に対してはコメントを必須している. したがって, TAが非常に重要な役割をする. TA自身の教育効果も高く, 教員希望者には貴重な教育実習の場にもなる. 授業の課題や内容は, TAが事前に卒業研究やゼミで実際に実施したもの的基本にして講義形式でデモやヒントを与えるが, それぞれのグループができるだけ自力で新しい発想にチャレンジするように指導する. 受講生に能力の個人差があってもグループで協力して目的を達成するように指導する.

図8は, 発表会(競技会)におけるグループ毎の総合評価結果の例であり, アイディア(発想), 技術(再現性, ロバスト性), 芸術(動きの美しさ), 努力の項目毎の評価も見ることができる. 個人別の評価は, 習得したノウハウや工夫した点などを書かせたレポートで行う.

角度	-90(仰向け)	-30	0(直立)	30	60	90(うつぶせ)
1	14	153	216	293	363	414
2	138	156	211	289	369	419
3	140	156	212	287	373	415
計測回数	4	144	163	210	289	367
5	143	160	217	301	364	414
6	133	165	209	295	367	419
7	140	162	217	293	368	415
8	142	166	217	293	365	417
9	142	158	209	298	361	422
10	139	161	209	292	360	414
平均	140.8	161.5	212.7	293	365.7	416.8
標準偏差	3.795	4.116	3.622	4.243	3.917	2.821
標準誤差	1.200	1.302	1.146	1.342	1.239	0.892
						1.489

角度	計測値	標準偏差	標準誤差
90	434	4.709	1.489
60	417	2.821	0.892
30	366	3.917	1.239
0	293	4.243	1.342
-30	213	3.622	1.146
-60	162	4.116	1.302
-90	141	3.795	1.200

振幅A: 147
定数B: 293
(sinθから最大値(90[deg])と最小値(-90[deg])の半分)
 $\theta[\text{deg}] = \text{ASIN}[(\text{センサーの値}-\text{角度が}0\text{時の平均値})/\text{振幅}]$
 $\theta[\text{deg}] = (\theta[\text{rad}]*180)/\pi$

$\theta[\text{deg}]$	-90	-60	-30	0	30	60	90
$\sin\theta$	-1.00	-0.87	-0.50	0.00	0.50	0.87	1.00
$A\sin\theta + B$	147	166	220	293	366	420	440
$\theta[\text{rad}]$							

A/D 傾斜角とA/D値

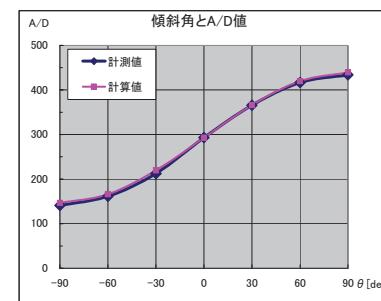


Fig.4 Example of computer aided measurement of characteristics of sensors using C and Excel in the project.

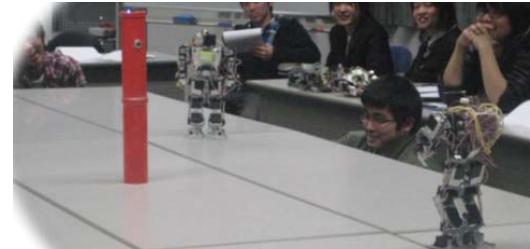


Fig.5 Presentation and contest of autonomous biped robot in the project III.

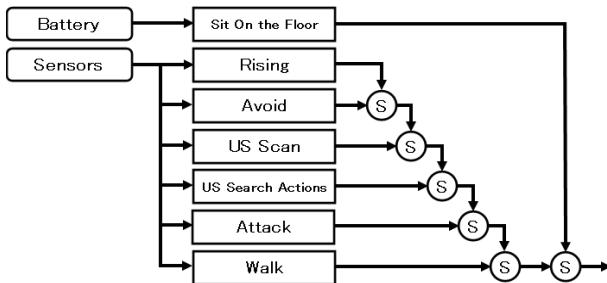


Fig.6 Example of Subsumption architecture in the project.

評価シート 競技の評価							
見直す年月日 参考審査基準(3(普通), 6(TAのモデルレベル), 7(TAより超))							
競技者							
審査者名(審査する者)		相手(相手)		相手(相手)		相手(相手)	
アイデア(発想)	1 2 3 4 5 6 7	技術(安定性)	1 2 3 4 5 6 7	芸術(美しさ)	1 2 3 4 5 6 7	努力(効率的である)	1 2 3 4 5 6 7
注) 安定性:安心して見られる(ロバスト性) 美しさ:人間や動物のような生き生きの動きに近いもの							
コメント:以下にできるだけ記入してください。 (特に高い点数次第で良い記入は印象を与える場合が必須)							

• 3(普通)を基準とした±2段階の5段階

• TAと同等あるいはそれ以上は6, 7

• 極端に低い(1,2)評価や高い(6,7)はコメントを記入。

Fig.7 Example of estimation sheet in the contest.

Group	Idea	Technique	Art	Effort	Total Score
1	19	21	22	23	85
2	19	18	19	22	76
3	17	13	16	20	66
4	17	16	17	21	71
5	19	19	19	22	79
6	18	18	18	22	75
7	21	23	23	24	92
8	21	22	23	22	89
9	14	13	15	19	61
10	19	17	18	21	76
11	23	24	24	24	95

Group	First Place	Second Place	Third Place
Total Score	95(No.1 Group)	92(No.7 Group)	89(No.8 Group)
Idea	23(No.1 Group)	23(No.7 Group)	-
Technique	24(No.1 Group)	23(No.7 Group)	22(No.8 Group)
Art	24(No.1 Group)	23(No.7 Group)	-
Effort	24(No.7,11 Group)	-	23(No.1 Group)

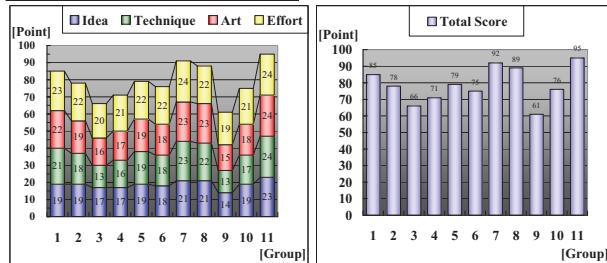


Fig.8 Example of estimated results in the project.

図9は、二足歩行ロボット・プロジェクト関連の(a)講義、(b)(c)学生の授業への取り組み、(d)高校生の体験授業、(e)工業高校の教員研修会、(f)小学生の体験授業の風景を示す。

体験授業は、地域連携の出前授業として毎年5, 6校の他に、スーパーサイエンスハイスクールSSH

(Super Science Highschool), サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト SPP(Science Partnership Project)のテーマとして8回程度実施し(報告書作成), 授業に関連した記事やニュースが産経新聞(2010年3月23日), 日本経済新聞(夕刊)(2009年12月16日), 上毛新聞(2008年3月6日), 桐生新聞(2008年3月6日), テレビ埼玉(2005年10月12日), 朝日新聞埼玉版(2005年10月9日), 埼玉新聞(2005年10月7日), 日刊工業新聞(2005

年9月8日), 日刊工業新聞(2005年9月5日), 日刊工業新聞(2005年9月1日)に掲載された。また、高校や小学校の「学校たより」などで紹介された。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig.9 Scenes of educational curricula and presentation of autonomous biped robot.

年9月8日), 日刊工業新聞(2005年9月5日), 日刊工業新聞(2005年9月1日)に掲載された。また、高校や小学校の「学校たより」などで紹介された。

1.4 自律移動ロボット実践教育カリキュラムへ

作業の精度、速度、効率を追求する従来のモデルベースと呼ばれる知能ロボットは、外界をセンサで認識し、そのモデルを内部に構築し、行動計画を

立て, そして実際に行動を起こす (SMPA: Sense-Model- Plan-Act, 図 10). しかし, このような直列方式では二つの大きな問題点がある. 一つはロバストネスの欠如である. 各機能を実現するモジュールのどこかに誤りがあると, 最終行動は図 10 のように致命的な失敗を招く. 二つ目は開発方法が困難な点である. ある理想的な状況において各モジュール毎にうまく動いたとしても, それらを統合するとうまく動かないことが多い. また, 各機能モジュールのどこかに新たな機能を付加しようとすると, それが他の機能モジュールの設計仕様に影響し, 結局すべてのモジュールを一から作りなおすことになる[38] [39] [44] [45].

一方, ブルックスが提唱した包摶構造 (SA: Subsumption Architecture) を持つ行動型 (ビヘービア・ベースト・) ロボット (図 11) は, 要素行動と呼ばれる単純なモジュールを並列的に積み上げていき, 次第に能力が向上していく. 上位レベルの行動が失敗しても, 下位レベルの行動が実行され, 致命的な失敗を防ぐ. 現実世界で動くロボットが次第に能力を向上させていく形で実現できる[38] [39] [44] [45].

従来から, SAをもつビヘービア・ベースト・ロボットに対して, 「反射的な行動をしている程度の下等なものなら実現できるが高次の知能は実現できない」, あるいは「学習ができない」などという批判がある[46]. しかし, 「学習は死んだ」と Brooks が指摘したように[31], 伝統的な従来の意味での学習を取り込んでも好ましい結果は得られない[38][39]. また, 「刺激・反応系で記述された行動は, 行動間で独立であり障害物を回避しながら目的地の方向へ移動するというような融合的な行動出力ができない[47][48]」というように狭い意味で誤解されやすい. 多目的行動調停のための学習によるアプローチを SA

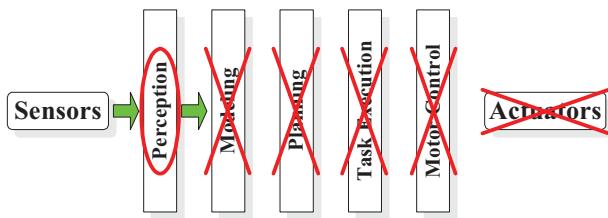


Fig.10 Conventional model-based Robot.

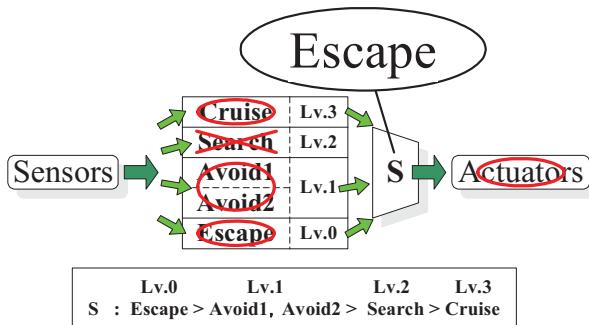


Fig.11 Example of Subsumption architecture

と比較した研究もあるが[47], 基本行動 (要素行動) の積みあげた, あるいは学習の評価項目そのものに疑問が残る. 複雑系としての捉え方がなければ SA による知能ロボットの本質を理解することはできない. 要素行動を単純反射行動だけに限る必要は無いにもかかわらず, SA をベースにした Brooks の複雑系としての知的ロボットはこのような誤解を受けやすい[49]～[51].

包摶構造を持つロボットは日本では誤解されることも多かったが[30], 最近, 掃除ロボットの「ルンバ」や東日本大震災の現場に送られた「パックボット」などの活躍により一般にも知られるようになった[52][53]. しかし, 不思議なことに, 日本では実践している研究者は極めて少数であり, 地震の災害現場で日本のロボットが活躍できない大きな理由の一つだろうと我々は考えている.

本論文では, 包摶構造化による車輪型自律移動ロボットの事例研究を紹介し, 1年次, 2年次の「二足歩行ロボット」プロジェクトに続く「二足歩行から始めるロボティクス入門」としての3年次の講義「自律移動ロボットプロジェクト」の学習プログラム開発に展開する.

2. 包摶構造化による車輪型自律移動ロボットの事例研究

従来の SMPA に基づくロボットの実環境における本質的な欠陥をブレークするために, 実環境で遭遇した課題を設計者とロボットが試行錯誤により学習し, センサー・モータ間にできるだけ計算を介在させない反射的要素行動として積み上げていく開発スタイルをヒューマン・ロボティクスとして提唱した[29].

図12の左のロボットは事例研究用に作製した自律移動ロボット Mobile-2004 を示す. 制御用コントローラは, モトローラ 68332 (25 MHz, 32bit CPU) 搭載, CCD カメラはロボットの前方に向けて配置してロボットの前方の色を取得した. 色の取得に 0.3 [s] 程度の時間を要し, 他の関数の処理時間に比べ時間がかかるので, 見えているすべての色を CCD カメラで判断するのではなく, 見えている画面の中心の一点の RGB を色相 (0~252) に変換して色の識別時間を短縮した. 高速接近障害物回避を想定して, サーボモータ 2 個により駆動タイヤを約 180 度の範囲内で操舵して横や斜め方向へ瞬時に移動できるようにした. サーボモータは, HiTEC 社製 HSR-5995TG, トルク 30 kg-cm, スピード 0.12 sec/60° (7.4 V 動作時) である. ロボットには駆動タイヤが左右に各 1 個と補助輪(ボールキャスター)が前後に各 1 個あり, 左右の駆動タイヤには DC モータがそれぞれ取り付けられている. サーボモータはコントローラに直接接続できるが, DC モータに負荷がかかったとき, サーボモータの電流低減のために誤動作を起こす恐れがあるので, 直接バッテリーから電源を供給できるようにして接続した. バッテリーを単 3 形の充電式電池(Panasonic

社製ニッケル水素電池 1.2V, 2230 mAh)・6 本にして軽量化した。ロボットのサイズは、直径が約 185 [mm], 高さ(最頂部) 152 [mm], 質量 1.23 [kg] (バッテリ含む) である。CCD カメラ下面の位置は 112 [mm] である。左右の駆動タイヤ間の距離は 116 [mm] , 前方への傾きは 4.3 度である。

図 13 は、実験環境例IVであり、ロボットが障害物や衝突を回避しながら環境をくまなく動いて赤色を発見したら歓喜の右回転をすることを想定している。センサは測距センサ、接触センサ、色を識別する CCD カメラである。高速接近障害物の速度は測距センサーの微分値からロボットとの相対速度を算出している。障害物回避 Avoid 1 は平地、障害物回避 Avoid 2 は狭い通路、障害物回避 Avoid 3 は高速接近中における要素行動であり、障害物回避 Avoid 3 は障害物回避 Avoid 1 または障害物回避 Avoid 2 と同時に発現条件を満たすため Avoid 3 を優先させ、障害物回避 Avoid 3 の行動後は直前の障害物回避 Avoid 1 または障害物回避 Avoid 2 に戻るような制御構造にしている。このような SA 的処理系を図 14, 行動アーキテクチャを図 15 に示す。

図 16 は、目的地までの動きのビデオ・コマ写真であり、(1)がスタート地点、(10)が赤色の発見地点である。

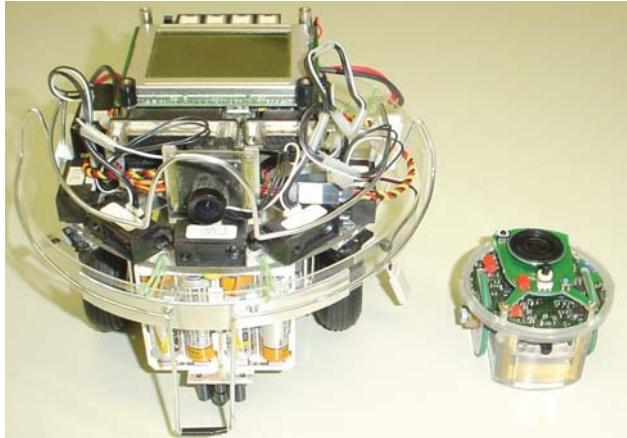


Fig.12 Mobile robot-2004 (left) and robot e-puck (right)

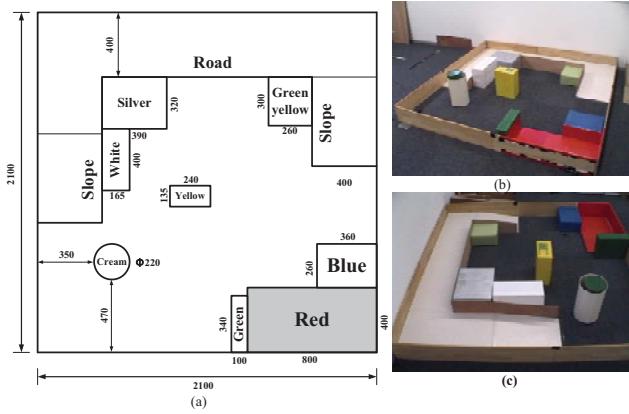


Fig.13 Experimental environment IV

図 17 は、相対速度 70[cm/s] で高速接近するボールに対する赤色探索中のロボットの障害物回避の動きの様子を 1/3 秒間隔のビデオ・コマ写真で示している。(4)でロボットが横に移動し始めて俊敏にボールを避けている。

図 18 ~図 20 は、人間を動的障害物と認識して衝突回避、障害物回避をしながらの目的行動(赤色探索)を示す。図 18 は、実験環境において動く人間の足を動的障害物として回避行動をしながら赤色探索をする走行ロボットの挙動を示す。図 19 は、人間の手の動きを認識して動的障害物として回避する

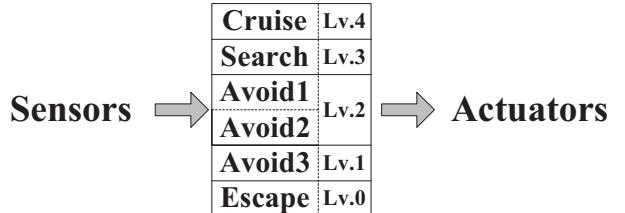


Fig.14 Subsumption architecture of autonomous Mobile-2004

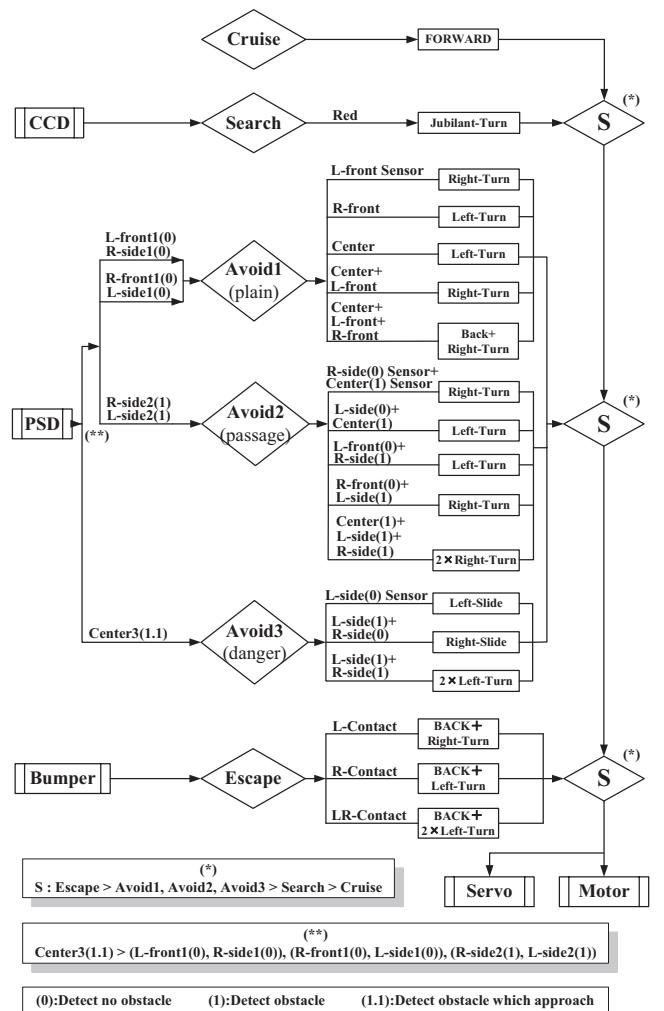


Fig.15 Subsumption architecture of autonomous Mobile-2004

行動である。図20は、実験環境の外界（実環境）において寝転がっている人間の動きを認識して動的障害物として回避行動するロボットの挙動を示す。ロ

ボットは周囲の環境をモデル化しないでも（地図を持たないでも）生き物のような柔軟な動きを示す。

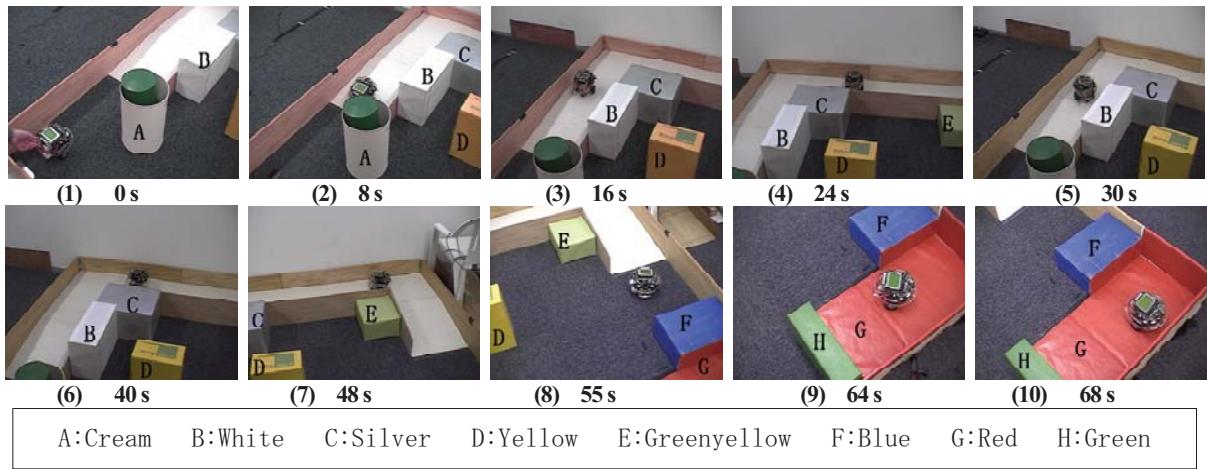


Fig.16 Autonomous and objective behaviors of Mobile Robot 2004 with SA(Escape·Avoid1·Avoid2·Avoid3·Search·Cruise) for searching for RED color using CCD camera with high-speed approaching obstacle avoidance in a new unknown environment.

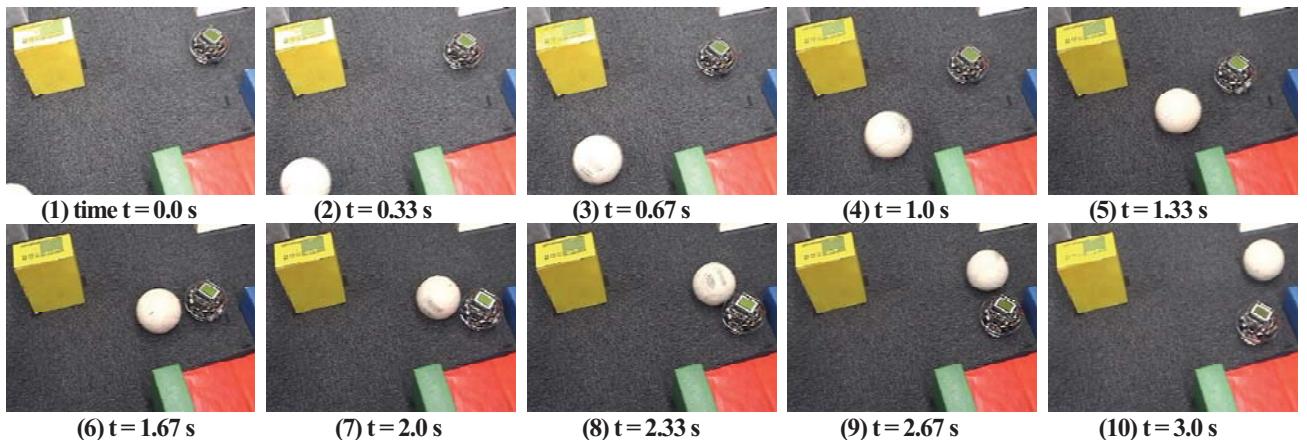


Fig.17 Avoidance (B) of Mobile Robot-2004 against an approaching ball with a relative velocity of 60 cm/s during searching for RED color.

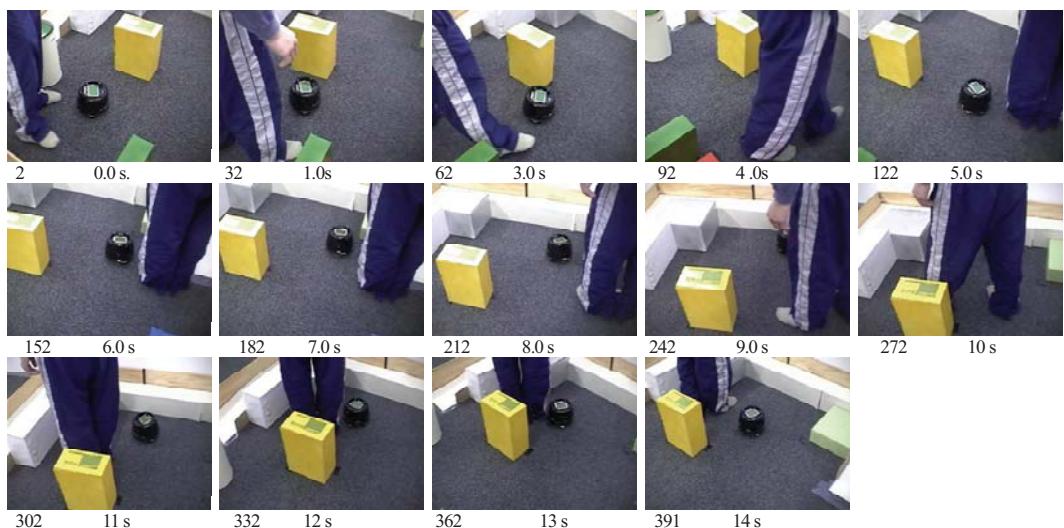


Fig.18 Robot-2003 behaviors of avoiding moving human legs as obstacles.

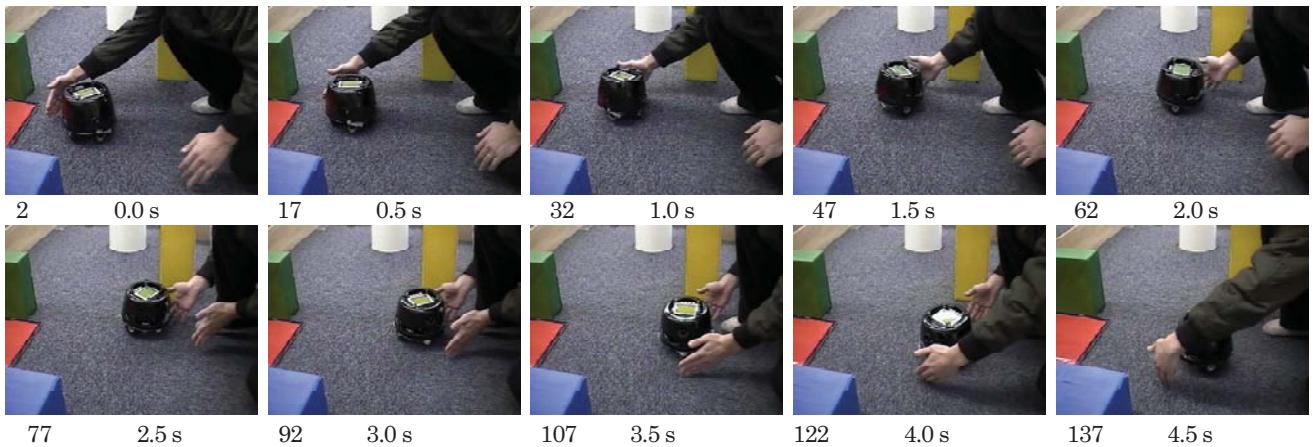


Fig.19 Robot-2003 behaviors of avoiding moving human hands as obstacles.

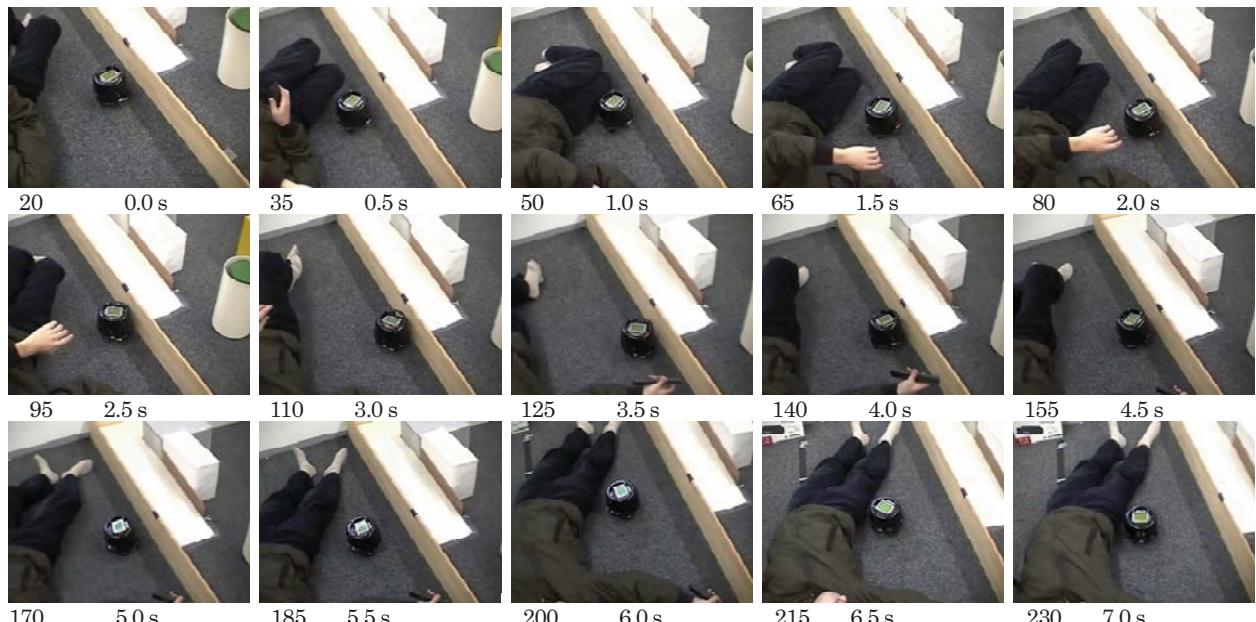


Fig.20 Robot-2003 behaviors of avoiding a moving human body lying down outside experimental environment.

3. 講義「自律移動ロボット・プロジェクト」への展開

大学ロボット系学科の3年次に2名の少人数グループによるプロジェクト型講義を想定し、包摂構造化をベースにした車輪型自律移動ロボットの実践・学習プログラムを開発した。各種センサの実験結果と生成した各種の動きを使って、知覚と要素行動を包摂構造化の手法によりプログラムし、移動ロボットの自律行動を実現させる。期末試験を兼ねた発表会に至るまでに試行錯誤による問題解決の経験を積む。

図12の右の写真がプロジェクト型講義に採用したロボットe-puckであり、2004年に研究・教育用の新型ツールとして、スイス連邦工科大学ローザンヌ校の自律システム研究所、群知能システム研究グループ、知能システム研究所の三者共同プロジェクトとして開発された拡張性の高い知能ロボットである。学習プログラムには、実験用プロトタイプとし

てのロボットe-puckとともに、3Dロボット・シミュレータWebots(Cyberbotics社)を併用した。

講義「自律移動ロボット・プロジェクトI、II」は、それぞれ90分、15回実施し、自律移動ロボットの動作実験を通して、プロジェクトの分析・設計・実装能力などさまざま知的処理技法を身に付け、さらに、ロボットの知的制御という観点から構成論的に学んだことを総括し、問題解決能力を高めることを目指している。

図21はプライテンベルグ・ビーケルの接近・回避行動の概念図、図22はロボットe-puckの平面図と赤外線IRセンサの取り付け配置であり、図23および図24のコマ写真は、ロボットe-puckと赤外線IRセンサIR1, IR6を使用して、それぞれ回避と接近の実験を試みた例である。パソコンを用いて簡単な包摂構造プログラムにより生物のような自然な動きが机上で実験できる。

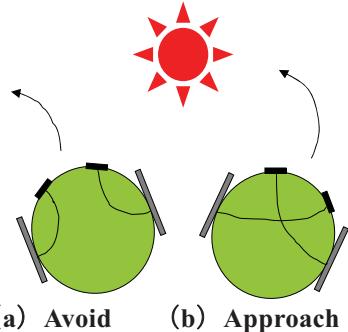


Fig.21 Approach and avoidance of Braatenberg Vehicles

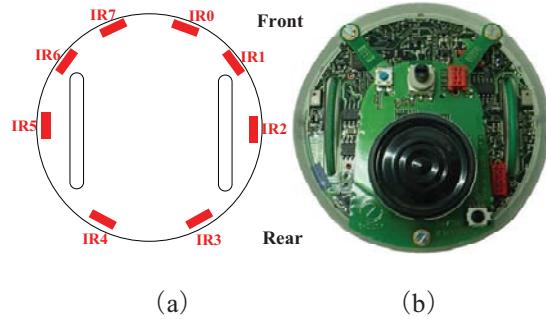


Fig.22 Robot e-puck and locations of IR sensors

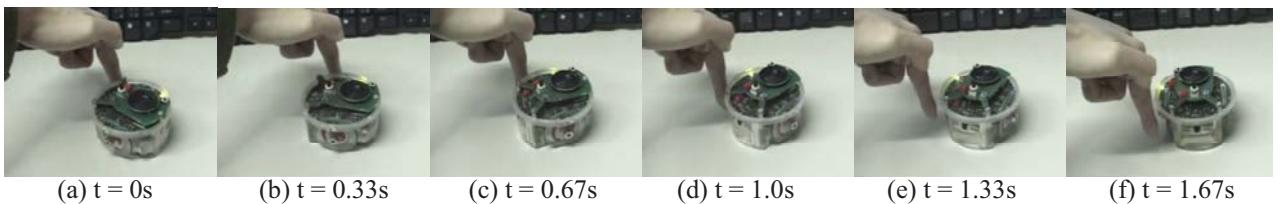


Fig.23 Obstacle avoidance behaviors of robot e-puck

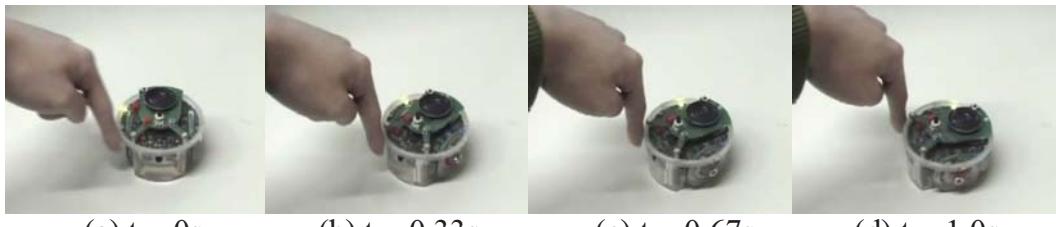


Fig.24 Approach behaviors of robot e-puck

「自律移動ロボット・プロジェクト I」の前半は事例研究の紹介、ロボット e-puck の基本的な使用法や多彩な機能の使い方などのチュートリアルな内容とし、後半は実際にロボットを使ってプログラムを作成して動かす内容とし、演習課題を与えた。具体的には、

第1回：プロジェクト型授業の概要、注意事項、出欠表などについてガイダンスを行い、各班2名（原則）のグループ分けを学生自身で自主的に行う。

第2回：ロボットの部品と構造（IR センサ、CMOS カメラ、LED、リセットスイッチ、ロータリ・スイッチ、パワーLED、インサーキットデバッガ MPLAB ICD2 接続コネクタ、電源スイッチ、スピーカ、拡張ボード、マイク、ステッピングモータなど）を説明し、最後にロボットの簡単で基本的なデモを見せる。デモは、3D 加速度センサ情報を使って傾斜方向の LED 点灯、4種類の加速度の大きさによってスピーカから発する音を変化させる、IR センサを使った障害物回避走行と追従走行。3つのマイクを使って音源方向に向きを変えるなどである。

第3回：プログラムの統合開発環境 MPLAB IDE を使ったプロジェクトの作成法とマイクの仕方、C 言語プログラムの実行などを実際に操作する。また、MPLAB ICD2 を使用してサンプルプログラムを実行

させる。

第4回：MPLAB ICD2 を使ってプログラムをロボット e-puck 本体にダウンロードして実行させる。

第5回：ロボット e-puck に付属するソフト bootloader と無線通信機能 BlueTooth を使った e-puck 本体へのダウンロード方法と無線による PC-e-puck 間の通信について実践する。bootloader の PC 側のソフト Tiny Bootloader を使って無線通信によって、LED 点滅プログラムをダウンロードする。

第6回：付属ソフト e-puck モニタを使用して、ロボット e-puck に搭載したセンサ類（IR センサ、LED、ロータリ・スイッチ、マイク、3D 加速度センサ、ステッピング・モータ、CMOS カメラ、スピーカ）の動作をチェックする。

第7回：第6回と同じ内容を、付属ソフト e-puck モニタではなく、WindowsXP 付属ソフト ハイパーテーミナルを使って行う。ハイパーテーミナルを使ったセンサテストでは、IR センサなどの入力値が e-puck モニタのように視覚的に表示されるのではなく、数値で表示される点が異なる。ハイパーテーミナルを起動し、通信の設定を行う。接続に成功すると、画面にはコマンドリストが表示され、キーボードよりコマンドを入力すると、ロボット e-puck よりデータが送信される。

第8回：シミュレーションソフト Webots を使って、IR センサによる障害物の衝突回避のシミュレーションを例にシミュレーションの方法を学習する。Webots の起動から、フィールドの生成、壁などの障害物の配置を行い、最後にシミュレータ上でロボット e-puck を走らせる。

第9回：ロボット e-puck に搭載したステッピング・モータの制御について解説し、モータを駆動させるプログラムの作成を行い、ロボット e-puck を走らせてみる。前進、後退、旋回などの基本的なプログラム演習と基本的な動きを実現する。

上記の課題を達成したら、ハイパーターミナルと BlueTooth を使った無線通信により e-puck をラジコンにするプログラムを作成させる。キーボードからのキー入力によってモータの回転数を変更することによってさまざまな動きができる。さらに、入力値の値をセンサ入力などに置き換えることによって自律プログラムにチャレンジする。

「自律移動ロボット・プロジェクトⅡ」の前半は事例研究の紹介などチュートリアルな内容とし、後半は実際にロボットを使ってプログラムを作成して動かす内容とし、演習課題を与えた。具体的には、第1回：センサを入力値を PC に送信するための C 言語によるプログラム作成を行い、IR センサの特性を調べ、Microsoft Excel を用いて実験データをレポートの形にする。

第2回：モータの制御と組み合わせて IR センサを使った障害物回避行動を行う。

第3回：作成したプログラムをサブルーチン化して、新たに作ったメインルーチンにロータリ・スイッチを使った走行モードの切り替えプログラムを作成し、実行する。

第4回：ライントレース用の床面センサの特性を実験的に調べ、センサ取り付け位置などを調整する。

次に、簡単な実験環境を各班に用意させ、プログラムを実行して黒のラインを認識できるようにさせる。

次に、床面センサ 1 番が黒を認識したら LED の 1 番を点灯させるような簡単なサンプルプログラムを参考にして、ライントレース競技を行わせる。毎年 TA が異なるコースを作成し、発表会で走行させ、各班の走行タイムを計測し、プログラムの問題点や考察などを期末レポートとして提出させる。

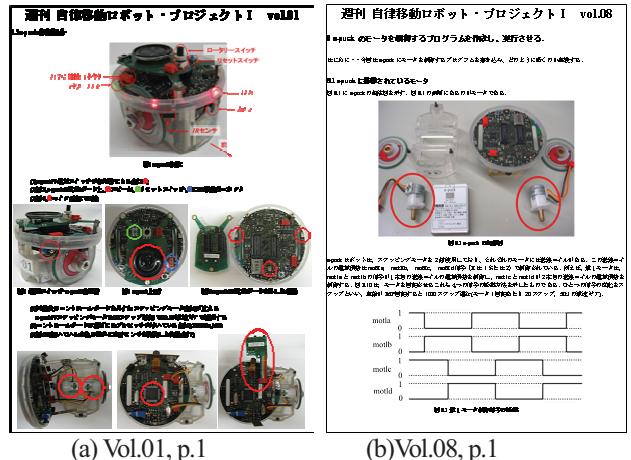
ここまでが単位取得のための必要最小限の課題であり、これらを達成したら、シミュレーションと実験を対照するために、3D ロボット・シミュレータで作成したプログラムを実機ロボット e-puck に送り、ロボットを動かす実験を行う。

図25は、作成したテキストの例である。図25(a) は週刊・自律移動ロボット・プロジェクト I, Vol.01 の 1 頁目、第 2 回目の講義用であり、(b) は Vol.08

(第 9 回目の講義用) の 1 頁目、(c) は Vol.08 の演習、(d) は Vol.08 の課題の例であり、ステッピングモータの駆動原理について学んだ後、モータを駆動させる

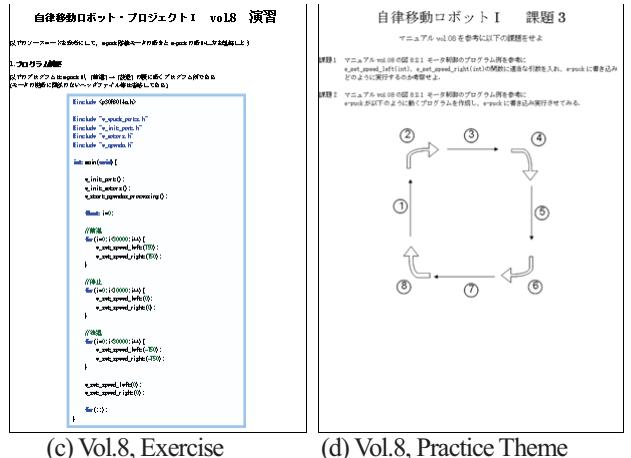
プログラムを作成し、ロボットを走らせる。演習と課題は付録とし、前進、後退、旋回などの基本的な動きを実現する。

図 26 は、「自律移動ロボット・プロジェクトⅡ」の第 1 回目の内容に関するものであり、(a) は IR センサ特性の測定プログラムの作成と実験の様子、(b) は課題レポートの例である。図 27 は、テキストの一部であり、コンピュータ支援による測定プログラムの参考例である。



(a) Vol.01, p.1

(b) Vol.08, p.1



(c) Vol.8, Exercise

(d) Vol.8, Practice Theme

Fig.25 Example of Weekly Textbooks

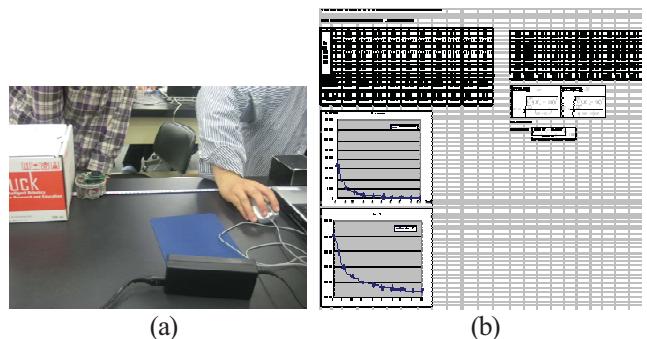


Fig.26 Measurement of IR-sensor characteristics and an example of report.

自律移動ロボット・プロジェクトII vol.01

... 今回はe-puckに搭載されているIRセンサの特性を調べて表にまとめ考察する。

1. IRセンサ測定実験

1.1 実験用プログラム

配布した irsensor フォルダの中の irsensor の main の部分に下記のプログラムを書き込む。

```
int main(void) {
    e_init();
    e_init_uart();
    e_init_ir();
    e_init_ad_scan();

    char c;
    int i,j,n;
    int ir_delta[8]={0,0,0,0,0,0,0,0};

    if(j>0) {
        - uart_send_static_text("W\r\n");
        - "初期化開始 - 他の近くに物を近づけないで下さい\r\n";
        - e_set_led(0, 1);
        - calibrate_ir_sensors(ir_delta);
        - e_set_led(0, 0);
        - uart_send_static_text("初期化終了\r\n");
    }

    while(1) {
        e_getchar_uart(&c);

        switch (c) {
            case '1':
                - uart_send_static_text("W\r\n");
                - "初期化開始 - 他の近くに物を近づけないで下さい\r\n";
                - e_set_led(0, 1);
                - calibrate_ir_sensors(ir_delta);
                - e_set_led(0, 0);
                - uart_send_static_text("初期化終了 2 を押すと測定開始\r\n");
                - e_getchar_uart(&c);
                - break;
            case '2':
                for(j=0;j<10;j++) {
                    nse_get_prox();
                    buffer[j]=nse_get_prox();
                    sortint(buffer);
                    - e_get_prox(0)-ir_delta[0];
                    - uart_send_text(buffer);
                    - wait(100000);
                }
                - uart_send_static_text("W\r\n");
                - c=0;
                - break;
            default:
                - j=0;
        }
    }
}
```

Fig.27 Computer aided measurement program of IR-sensor characteristics with C language.

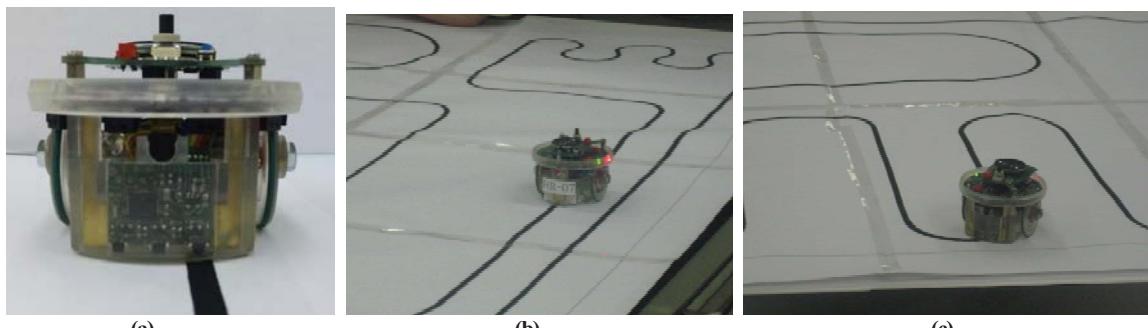


Fig.28 Line trace experiment of autonomous robot with floor sensors and the project contest scenes

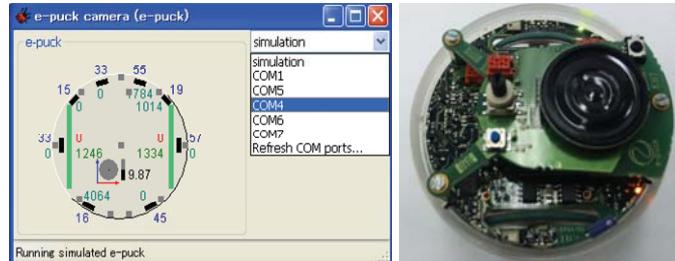


Fig.29 Robot simulator and forwarding program to autonomous robot.

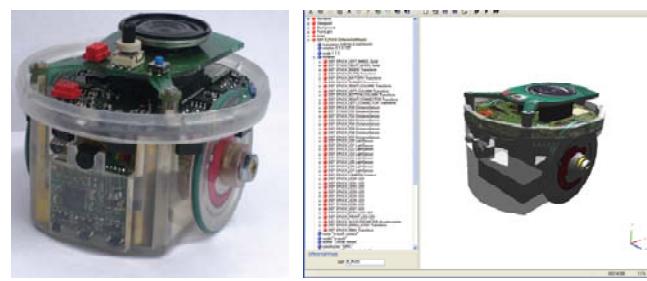


Fig.30 Robot for experiment and 3Dsimulator

図28は、黒のラインを認識出来る床面センサをロボットに取り付けてその特性を測定し、測定結果を使ってラインを認識させてロボットを走らせるプログラムを作成し、競技を行っている様子を示す。

図29は、シミュレーションと実験を対照するために、3Dロボット・シミュレータ Webots(Cyberbotics社)で作成したプログラムを実機ロボット e-puck に送り、ロボットを動かす実験である。図30は、(a) 実機ロボットの写真と(b) 3Dロボット・シミュレータ上のロボット画像画面を示す。

図31は、シミュレーションと実験におけるロボットの自律的な障害物回避行動を比較した画像である。

図32～図34は種々のライントレース課題におけるロボットのシミュレーションと実験の動きを対比した動画の瞬間的な静止画像である。図35は、期末試験課題のコース例、図36はその実施風景である。

図37は、ラインの上の障害物を避けながら自律的にコースを走る自律ロボットのシミュレーションと実験の対比であり、図38は、図37(b)の実験のコマ写真の一部であり、ライン上の障害物を検出・回避した後、再びライン上に戻り、さらにラインをトレースする様子を示す。

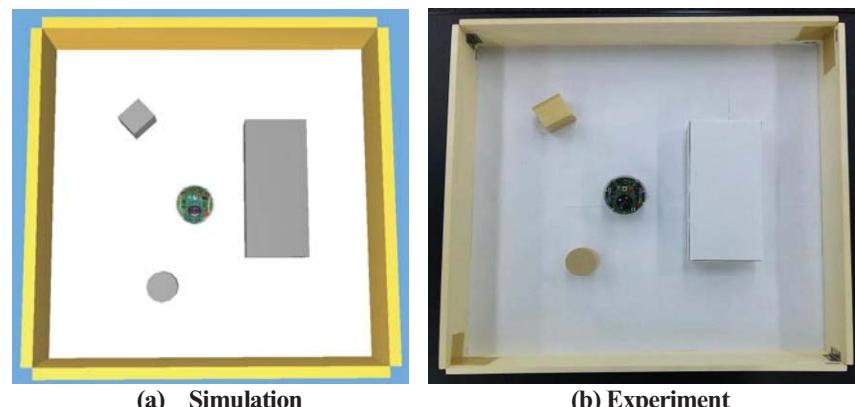


Fig.31 Autonomous obstacle avoidance with comparison between simulation and experiment

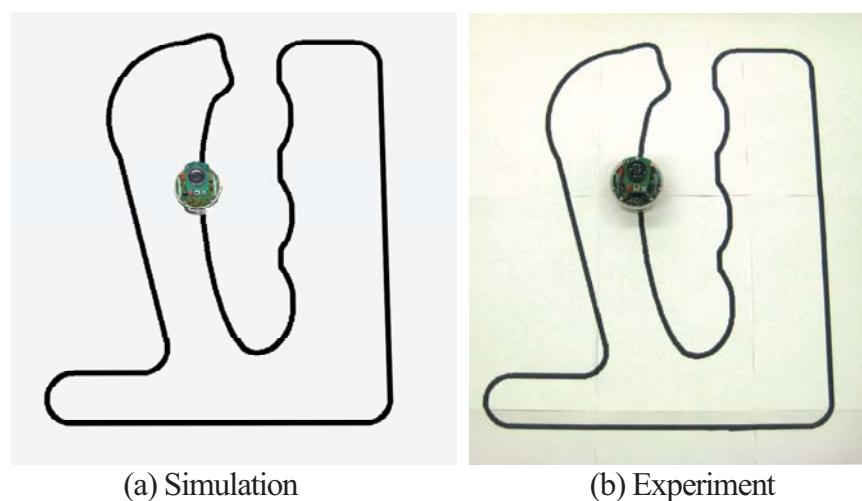


Fig.32 Simulation and experiment(I)

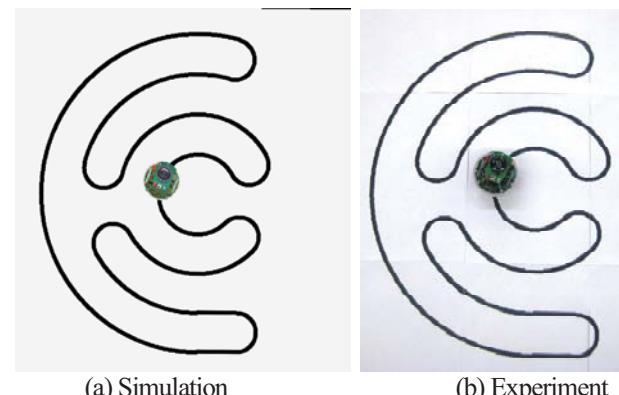


Fig.33 Simulation and experiment (II)

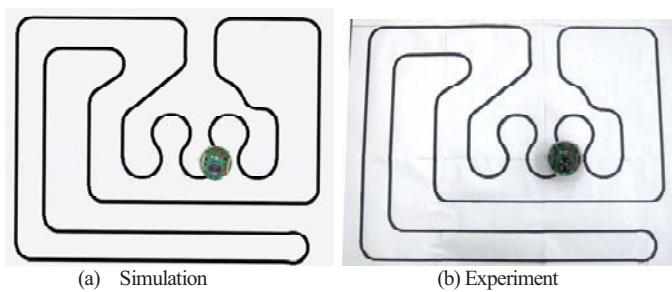


Fig.34 Simulation and experiment (III)

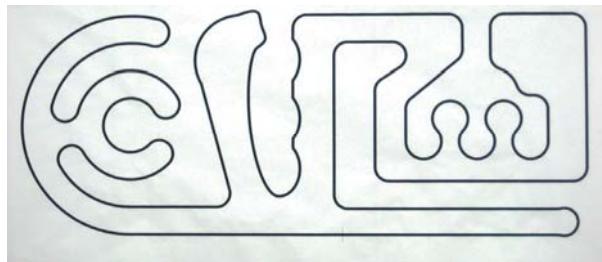


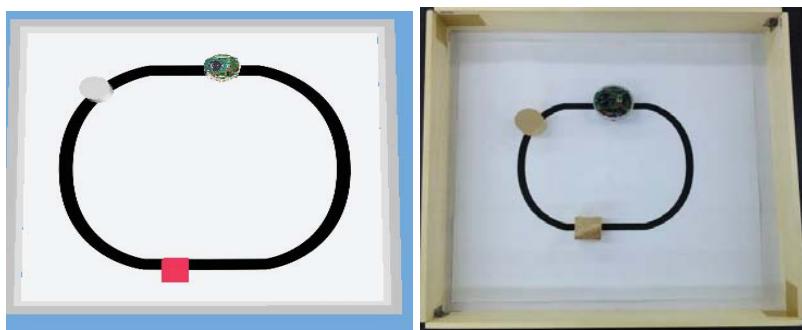
Fig.35 Experimental environment in final competition



(a) Simulation

(b) Experiment

Fig.36 Scenes in a final competition of autonomous mobile robot.



(a) Simulation

(b) Experiment

Fig.37. Line trace with obstacle avoidance



t=24.63s

t=28.97s

t=31.83s

Fig.38. Experimental behavior of autonomous mobile robot with SA during line trace with obstacle avoidance

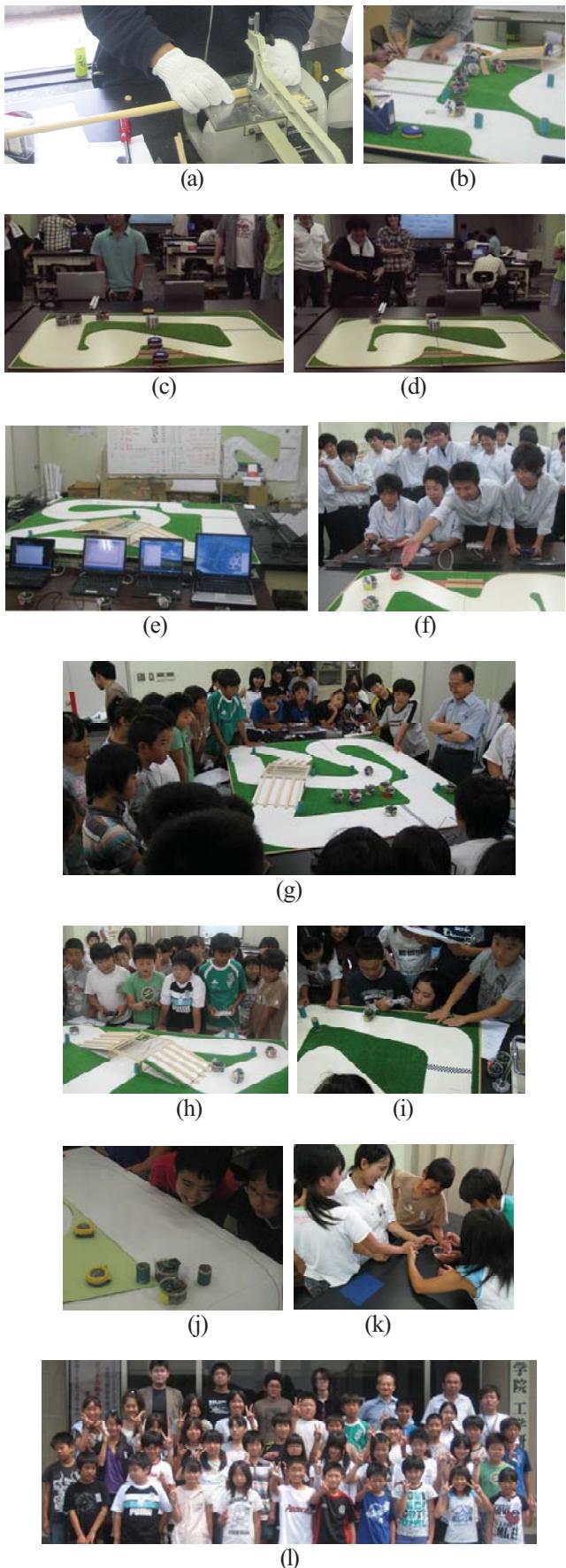


Fig.39 Scenes related to the educational curricula and the presentation of autonomous mobile robot.

図39は、自律移動ロボット・プロジェクト関連の授業風景であり、(a)と(b)は、TAによる実験環境の製作の様子、(c), (d)は授業におけるリモコンによる操縦プログラムの作成と競技会の準備・練習風景、(e)は多人数の体験授業のためにTAが製作した8台で競争できる大型競技コース、(f)は高校生の体験授業、(g)～(l)は小学生の学術振興会SPP(Science Partnership Project)や特別理科教育などの体験授業風景を示している。

本研究で開発した自律移動ロボットに関するプロジェクト型講義の学習プログラムの効果についてまとめることは残された今後の課題の一つであり、アンケートの他に多方面からの整理が必要であるが、本論文で紹介した実施風景写真からでも、大学の授業だけではなく、高校生から小学生までが少なくとも興味や関心を持つ様子が見える。また、体験学習を実施した高校や小学校のみならず、新聞などのマスコミからも関心をもって記事にしていただいた。

4. 結 論

ロボティクスの現状の問題点と新しいロボット教育の意義と重要性を指摘し、具体的な実践と問題解決の経験を一般的な手法に展開できる能力を養うことを目的とした構成論的包摂構造化の手法に基づく大学ロボット系学科のプロジェクト型授業における学習プログラムを開発した。構成論的なロボット開発のいくつかの事例研究を紹介し、それらに基づいて、1年次に必修の「二足歩行ロボット製作法Ⅰおよび製作演習Ⅰ」、2年次に「二足歩行ロボット製作法Ⅱおよび製作演習Ⅱ」、「二足歩行ロボット製作法Ⅲおよび製作演習Ⅲ」をそれぞれ毎週3時間、15回実施し、3年次の「自律移動ロボット・プロジェクトⅠ、Ⅱ」へと続く自律移動ロボット学習プログラムを開発・実践し、その内容を紹介した。

ロボティクス入門を「二足歩行ロボット」から始める理由は、システムとしての制御が難しい多自由度システムであり、巧みな動きを実現するには様々な知恵が要求され、しかも、その良し悪しが誰でも（小学生にも）容易に分かり、学習の全体像と具体的な成果が目に見えやすいからである。

森[54]は、ロボットに欠かせない「総合」の意味について、どの部分を取り上げても、そのほんの一部分の変化が、全体のすべての箇所に影響する、というのが本当の意味での総合であり、このような意味での総合は、分析できないことかもしれない。「分けると消えてしまう」、そういった本性が総合には隠されているようだと指摘している。さらに[55][56]、「作ってみれば分かる」というのは、ロボット工学の一つの大切な姿勢であり、中身が分からぬ場合には、とにかく作ってみると指摘している。「古人の跡を求めず、古人の求めたる所を求めよ」という松尾芭蕉の金言を引用して、「模倣も結構であるが、先人の個性的で創造的な姿勢までをも模倣すべきだ」と述べている。

巧みな技術の習熟をめざす過程で科学する心が生まれ、科学する心から哲学が生まれることを期待したい。

おわりに、本研究にご協力いただいた Dr.Takashi Gomi (Applied AI Systems Inc.)に深謝する。また、大学院および学部の卒業研究および TA として熱心な協力をいただいた研究室の学生諸氏に深く感謝する。

文 献

- [1] 井上博允・加賀美 聰, ロボットの知能とシステム統合, 日本ロボット学会誌, 20-5,(2004), pp.4642- 469.
- [2] 井上博允, 人間型ロボットが拓く未来社会と新産業の創成, 日本ロボット学会誌, 22-1,(2004), pp.2-5.
- [3] 比留川博久, 人間型ロボットの近未来応用, 日本ロボット学会誌, 22-1,(2004), pp.6-9.
- [4] 室山哲也, ロボットシティへの質問, 日本ロボット学会誌, 22-7, (2004), pp.853-855.
- [5] 中村桂子, 日常的なことのできないロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.16,No.1, pp.26-26, 1998.
- [6] 柿倉正義, 極限作業ロボットプロジェクトの教訓と残された課題—中村桂子先生の指摘を踏まえて—, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, pp.27-29, 1998.
- [7] 中村桂子, 極限は日常でもある, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, p.30, 1998.
- [8] 山本哲也, 次世代ロボット実用化プロジェクト—実用システム化推進事業について—, 日本ロボット学会誌, Vol. 24 No. 2, pp.169-170, 2006.
- [9] 荒井裕彦, ロボット産業に関する市場調査・市場予測の比較と分析, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.3, pp.265- 267, 2009.
- [10] 島田明・大明準治, “「ロボット制御の理論」特集について”, 日本ロボット学会誌, 27巻4号, p.369, 2009.,
- [11] 梶田秀司, “倒立振子から2足歩行へ—制御理論とZMP—”, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.4, (2009), pp.392-395.
- [12] 丸山淳一・松原崇充・J. G. Hale・森本淳, “強化学習を用いたヒューマノイドロボットによる転倒回避ステップ動作の学習”, 日本ロボット学会誌, 27巻5号, (2009), pp.527-537.
- [13] Napoleon Nazir・中浦茂樹・三平満司, “人間型ロボットのZMP フィードバック制御における制御性能の限界”, 日本ロボット学会誌, Vo.22, No.5, (2004), pp.656-665.
- [14] 國吉康夫・大村吉幸・寺田耕志・長久保晶彦, “等身大ヒューマノイドロボットによるダイナミック起き上がり行動の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 6, (2005), p. 706-717.
- [15] 有本卓, “巧みさの演出: ダイナミクスペースト制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.7 (2006), pp.791-796.
- [16] 大須賀公一, “ダイナミクスペースト制御の「こころ」”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.7 (2006), pp.797-799.
- [17] 伊藤一之・大須賀公一・石黒章夫・古山宣洋, “実世界の性質を利用した知覚と制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.7 (2006), pp.807-811.
- [18] 小椋優・林憲玉・高西淳夫, 2足ヒューマノイドロボットの膝関節伸展型歩行パターン生成アルゴリズム, 日本機械学会論文集, 70-700(C),(2004), pp.3509-3515.
- [19] 有本 卓, ロボットの非線形制御, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.4, pp.404-407, 2005.
- [20] 劉 大生, 山浦 弘, “遅延フィードバック制御を用いた2リンク鉄棒ロボットの大車輪運動の実現”, 日本機械学会論文集C編, Vol.76, No.767, (2010), pp.1700- 1707.
- [21] 國吉康夫, “ロボティック・サイエンスとは何か”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.4 (2010), pp.370-374.
- [22] 川副嘉彦・石川恵介・伊倉良明, 人間オペレータの個人差と習熟度のカオス・エントロピー解析とファジィ制御による獲得, 日本機械学会論文集(C編),76巻765号, pp.1362-137, 2010.
- [23] 原 辰次, 制御における(超)ロバスト性, 21世紀COE情報科学技術戦略コア・超ロバスト計算原理プロジェクト・超ロバストを探る, pp.1-10, 2005..
- [24] 森 政弘, ロボコンの人間教育的意義, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.9, pp.964 – 966, 2009.
- [25] 森 政弘, この人に聞くロボット工学の開拓者, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.9, pp.1001-1004, 2009.
- [26] 川副嘉彦, ロボットの動きを阻害する過剰駆動力の制御, バイオメカニズム学会誌, Vol.35, No.3, pp.159-167, 2011.
- [27] 川副嘉彦, 人間型二足ロボット「源兵衛」を用いたナンバ歩きからナンバ走りの再現, バイオメカニクス研究, Vol.12, No.1, pp.23-33, 2008.
- [28] 川副嘉彦, 原田一臣, 清水祐一, 自律型二足ロボット源兵衛のAnti-ZMPによる瞬間的転倒衝撃回避と起き上がり, 日本機械学会・Dynamics and Design Conference 2006 CD-ROM 論文集, 550:1-6, 2006.
- [29] 川副嘉彦 他:「ヒューマン・ロボット学」事例研究 (移動ロボットと二足歩行ロボットの包摂構造化), 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集(7), No.06-1, 29-30, (2006).
- [30] 五味隆志, 新AI技術によるサービスロボット, ザ・フナイ, 2007 年 11 月号, pp.148-162, 2007.
- [31] 五味隆志, 新AI科学と介護ロボット, 日本ファジィ学会誌, 13 卷 1 号, pp.28-39, 2001.
- [32] 須藤 拓・辰野恭市・荒井裕彦・琴坂信哉, 「ニーズに基づいたロボット開発」特集について, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.3, p.259, 2009.
- [33] 宮田秀明, 研究の設計学, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.3, pp.260-262, 2009.
- [34] JASIMO に原発事故処理をしてもらえませんか。地震に伴う Q&A, お客様相談センター, ホンダのホームページ : <http://www.honda.co.jp/customer/disaster/asimo/>
- [35] 川副嘉彦・森真太朗・田口 準・發生川純一・伊倉良明, 人間型二足ロボット源兵衛のナンバ歩きから階段昇降・超高速ナンバ走りへの展開, 日本機械学会シンポジウム (スポーツ工学&ヒューマン・ダイナミクス)講演論文集, No.07-24, 391-396, 2007.
- [36] 川副嘉彦・伊倉良明・輿水裕矢・筋野駿介・原 昌彦, 氷雪を走る人間型二足ロボット「源兵衛」のロバスト性のメカニズム, 日本機械学会2008年度年次大会講演論文集, No.08-1, Vol.5, 165-166, 2008.
- [37] 立花 隆, ロボット学会創立20周年記念講演 : 21 世紀のロボティクスと社会, 日本ロボット学会誌, vol.21, No.3, pp.239-246, 2003.
- [38] Gomi,T, Impact of Non-Cartesianism on Software Engineering, AAI Books,Ontario, Canada, pp.487-519, 1998.
- [39] Gomi,T, From Intelligent Robots to Artificial Life, Vol. II, Ontario,Canada,AAI Books,Ontario, Canada, pp.427-454, 1998.
- [40] 川副嘉彦, 二足歩行から始める実践ロボット感動教育プログラム (第1報, 平衡点不安定を利用する非線形最適制御と包摂構造の展開), 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集CD-ROM, RSJ2010AC1L3-4, pp.1-4, 2010.
- [41] 川副嘉彦, 二足歩行から始める実践ロボット感動教育プログラム (第2報, ロボティクス入門としての二足歩行ロボット学習プログラム), 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集CD-ROM, RSJ2010AC1L3-5, pp.1-4, 2010.
- [42] 三浦郁奈子・中岡慎一郎・金広文男・原田研介・金子健二・横井一仁・梶田秀司, 足裏の滑りを利用して2足歩行ロボットの方向転換一滑り現象のモデル化と回転角の予測ー, Vol.28, No.10, pp.1232-1242, 2010.
- [43] 川副嘉彦・須永智文・桃井孝昌, 二足ロボット源兵衛の Anti-ZMPによる瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」の発現, JSME Dynamics and Design Conference 2006 CD-ROM, 560, pp.1-6, 2006. [in Japanese]
- [44] Brooks, R. A., A robust layered control system for a mobile robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.2, No.1, 14 -23, 1986.
- [45] Brooks,R.A.,Intelligence without representation, Artificial Intelligence, Vol.47, pp.139 -159, 1991.
- [46] 藤田雅博, 知能ロボットにおける技術統合：行動制御アーキテクチャとインテリジェンスダイナミクス, 計測と制御, 44-10, pp.729-734, 2005.
- [47] 能島裕介・小島史男・久保田直行, 多目的行動調停に基づく

- 移動ロボットの行動獲得, 日本機械学会論文集, 68-671, pp.2067-2073, 2002.
- [48] 久保田直行・増田寛之・谷口和彦・小島史男・福田敏男, 移動ロボットの多目的行動調停のための学習, 日本機械学会論文集, 67-664, pp.3876-3882, 2001.
- [49] 川副嘉彦, 複雑系としての人間の巧みさと自律ロボットの知性の発現, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集, pp.171-172, 2002.
- [50] 川副嘉彦, 人間の巧みさの発現と包摶構造 (スポーツにおける巧みさへのアプローチ), 日本機械学会・機械力学・計測制御部門講演会 CD-ROM 論文集, pp.1-6, 2003.
- [51] 川副嘉彦, 学習の包摶構造化による知能ロボットの知性の創発と人間の巧みさの発現, 日本機械学会2004年度年次大会講演論文集, pp.169-170, 2004.
- [52] iRobot Roomba: <http://store.irobot.com/home/index.jsp>
<http://www.irobot-jp.com/irobot/index.html>
- [53] 中島みなみ,原子炉建屋にパックボットが入った,レスポンス,2011年4月18日(月),
<http://response.jp/article/2011/04/18/155010.html>
- [54] 森政弘,「ロボットは総合」の意味, ROBOCON Magazine, No.55, pp.81-83,2007.
- [55] 森政弘, 古人の跡を求めるロボット, ROBOCON Magazine, No.64, pp.81-83,2009.
- [56] 森政弘, ロボットと個性, ROBOCON Magazine, No.67, pp.81-83,2010.

**Name:**

Masaki Mitsuoka

Affiliation:

Master Course, Graduate School of Engineering, Saitama Institute of Technology

Address:

1690, Fusajji, Fukaya, Saitama, 369-0293, Japan

Brief Biographical History:

2010- Master Course, Graduate School of Engineering, Saitama Institute of Technology

Main Works:

- Autonomous Mobile Robot
- Practical Robot Education Curriculum

**Name:**

Yoshihiko Kawazoe

Affiliation:

Dr. Eng., Professor, Graduate School of Engineering, Saitama Institute of Technology

**Name:**

Sho Masada

Affiliation:

Master Course, Graduate School of Engineering, Saitama Institute of Technology

Address:

1690, Fusajji, Fukaya, Saitama, 369-0293, Japan

Brief Biographical History:

2011- Master Course, Graduate School of Engineering, Saitama Institute of Technology

Main Works:

- Autonomous Mobile Robot
- Practical Robot Education Curriculum

Address:

1690, Fusajji, Fukaya, Saitama, 369-0293, Japan

Brief Biographical History:

1976-1986 Assistant Professor, Saitama Institute of Technology
1985 Received Dr. Eng. degree from The University of Tokyo
1986-1990 Associate Professor, Saitama Institute of Technology
1990- Professor, Saitama Institute of Technology

Main Works:

- Fuzzy Controllers, Theory and Applications, Edited by: Lucian Grigorie, ISBN 978-953-307-543-3, InTech Publishing, 2010.
- Y. Kawazoe et al., Chaos-Entropy Analysis and Acquisition of Individuality and Proficiency of Human Operator's Skill Using a Neural Controller, Journal of System Design and Dynamics, Vol.2, No.6, pp.1351-1363, 2008.
- Y. Kawazoe et al., Prediction of Impact Shock Vibrations at Tennis Player's Wrist Joint, Journal of System Design and Dynamics, Vol.4, No.2, pp.331-347, 2010.

Membership in Learned Societies:

- The Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) Fellow
- The Robotics Society of Japan (RSJ)
- Society of Biomechanism (SOBIM)
- Society of Automotive Engineers of Japan