自律移動ロボット実践教育カリキュラム
（第 1 報，包摂構造に基づく目的行動と高速接近障害物回避への展開）

川副　嘉彦

埼玉工業大学工学部ヒューマン・ロボット学科

kawazoe@sit.ac.jp

Practical Education Curriculum for Autonomous Mobile Robot
－1st report: Development Toward Objective Behavior with High-Speed Approaching Obstacle Avoidance Based on Subsumption Architecture－

Yoshihiko KAWAZOE

Department of Human-Robotics, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

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 has investigated the approach to the emergence of the objective behavior with high-speed approaching obstacle avoidance 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 in order to develop into practical education curriculum as an introduction to Robotics having an intellectual and emotional appeal.

Key words: Robotics, Autonomous Mobile Robot, Subsumption Architecture, High-Speed Approaching Obstacle Avoidance, Objective Behavior, Emergence, Practical Education Curriculum

１．はじめに

人間や動物の複雑精妙な運動は，非線形で自由度の多い身体や四肢を巧みに制御して実現される．一方，ロボティクスは，人間や動物の運動機能を機械的に実現しようとするものにほかならない．

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 [1]．ロボット研究開発に必要な「ロボット制御の理論」とは何かが改めて問われている．

一方，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 [2),3)]，極論すれば，ロボットが現時点で唯一貢献できる分野は教育だけのように見える．

現実世界で知的に動くロボットには生き物のような適応性・柔軟性が求められる．

現代はすべてをシステム化すなわち自動化しようとするが，自然の全てを自動化することはできない．したがって，自然は技術者の最も苦手な対象になる．ロボットにとって人間社会は未知の環境(自然)だから，技術者が設計したロボットは自然によって妨害される [4]．

従来の自律ロボットは SMPA (Sense -Model -Plan -Act)フレームワークに基づくモデル・ベースト・ロボット（図 1）と呼ばれ，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．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 1 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 [4)-8)].

一方，ブルックスが提唱した包摂構造 (SA: Subsumption Architecture) を持つ行動型ロボット（図 2）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 [4)-8)].

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 [9)]. しかし,「学習は死んだ」と Brooks が指摘したように [10)]，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．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 [11), 12)]というように狭い意味に誤解されやすい．多目的行動調停のための学習によるアプローチを SA と比較した研究もあるが [11)]，基本行動（要素行動）の積みあげかた，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 [9)]．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 [13)-18)].

前報 [19)] では, 大学ロボット系学科の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」を開発し, 実践した. 一方, 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二人三脚による試行錯誤により学習し，その結果を反射的要素行動として積み上げてメインプログラムとして構築し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，実践した．事例研究の一つとして，人間のような動的障害物も含めて自律的に障害物を回避しながら CCD カメラで床と壁の赤い部分を発見するという目的行動, さらに, 坂になった二つの出入口と狭い通路のような複雑な未経験の環境に遭遇したときに，構成論的学習の包摂構造化により新しい要素行動を積み上げて問題を解決する方法を実験で試みた [20)-(22)].

本論文では，構成論的包摂構造化により，速いスピードで接近してくる障害物 [23)] を回避しながらの目的行動（色探索）の発現に展開し，ロボットの定義を生体（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し,「プロジェクト型講義の学習プログラム開発」を続報 [24)]に展開する．具体的実践と問題解決の経験を一般的手法に展開できる能力を養うことが目的である．

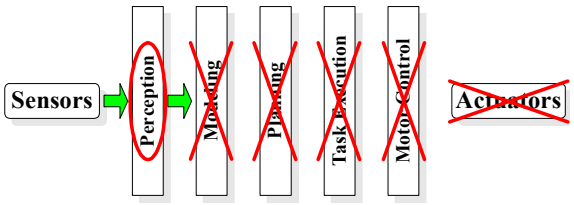


Fig.1 Conventional model-based Robot.

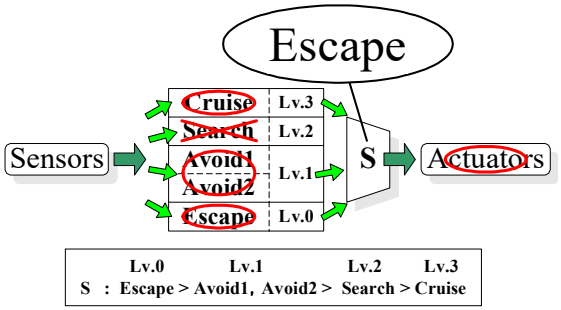


Fig.2 Example of Subsumption architecture

２. 学習の包摂構造化による自律移動ロボットの目的行動の発現

図 3 は，前報 [4] で作製した自律移動ロボット Mobile-2003 を示す．制御用コントローラは，モトローラ 68332 (25 MHz, 32bit CPU)搭載の JOKER 社製 Eyebot を用い，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（Hue : 0～252）に変換して色の識別時間を短縮した．図 4 は，実験環境における障害物や床などの色を調べた結果であり，赤色の床と青色の障害物の色相（Hue）値が他の色の値と大きく離れている．

図 5～図 7 は，自律移動ロボット Mobile-2003 の要素行動の動きを示す．

図 5 は，ロボットが赤色を Search（探索）したときの歓喜の右回り旋回の要素行動を示す．

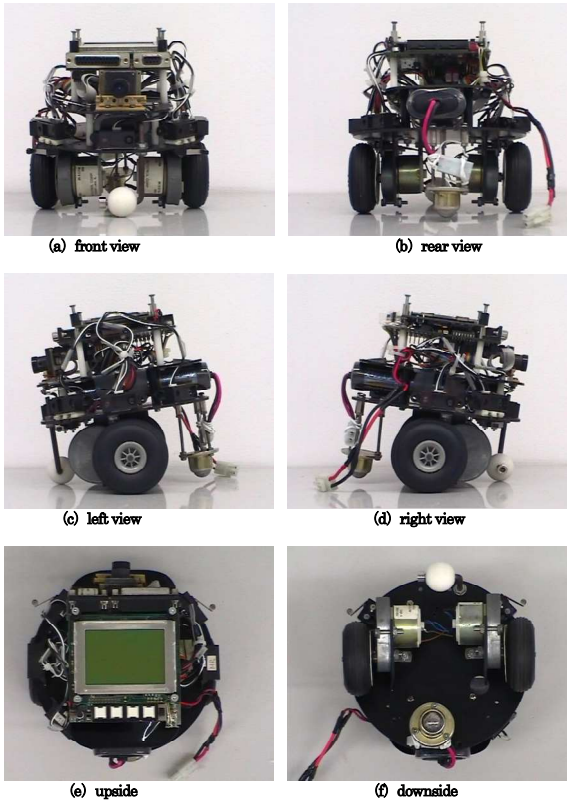


Fig.3 Autonomous Mobile Robot 2003

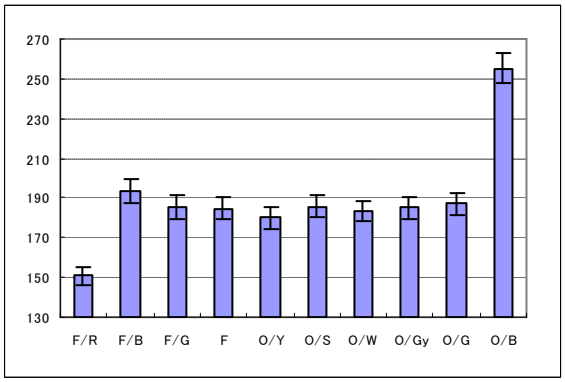


Fig4. Measured Hue values in the experimental environment. (F:Floor, O: Object, R: Red, B: Blue, G: Green, Y: Yellow, S: Silver, W: White, Gy: Green Yellow)

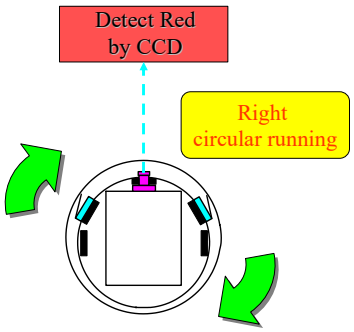


Fig.5 Detect red color by CCD with right circular running.

図 6 は，ロボットのバンパによる衝突検知と衝突回避行動（要素行動 Escape）を示す．

図 7 は，狭い通路におけるロボットの測距センサ（PSD）による障害物検出と障害物回避行動（要素行動 Avoid 2）を示す．

図 8，図 9 は，本論文で使用した自律移動ロボット Mobile-2004 であり，高速接近障害物回避を想定して，自律移動ロボット Mobile-2003 にサーボモータ 2 個を新たに取り付けて駆動タイヤを約 180 度の範囲内で操舵することにより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．

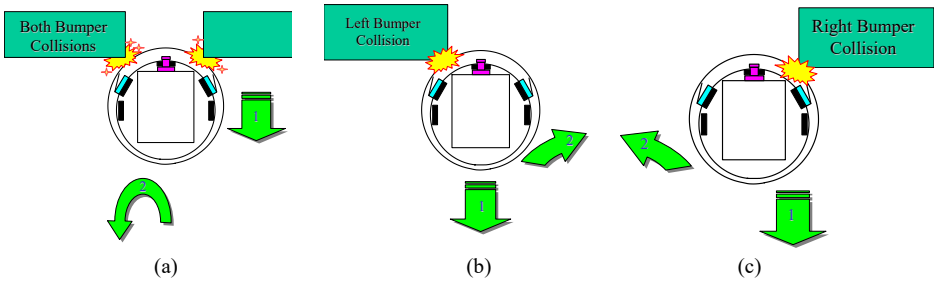


Fig.6 Escape behavior: collisions by bumpers with obstacles and escape actions.

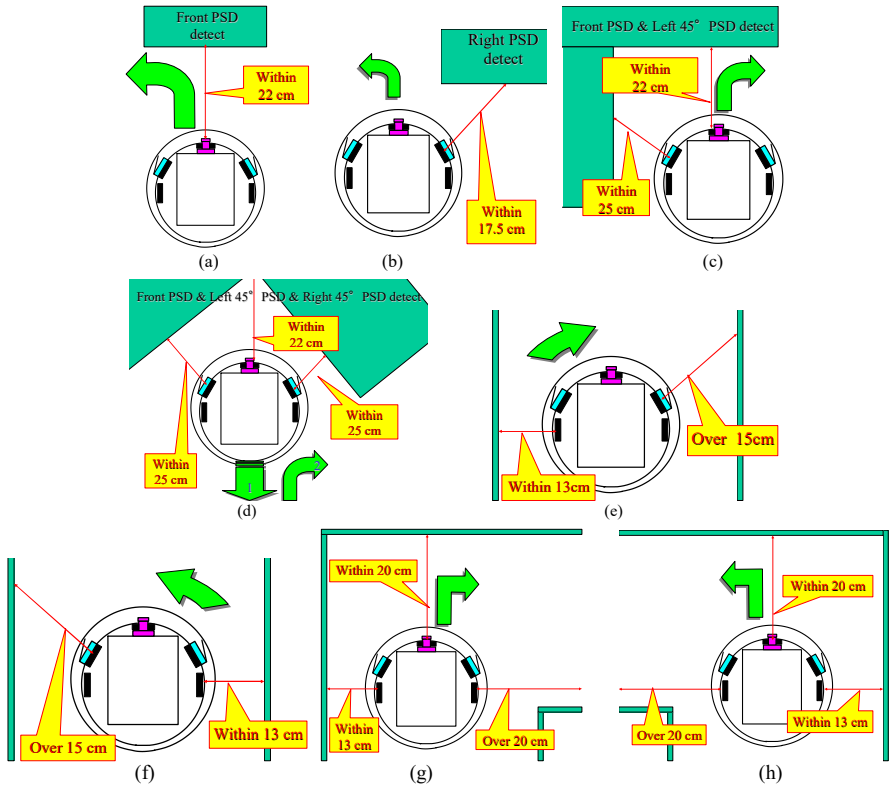


Fig.7 Avoid 2 behavior of Robot-2003: Obstacle avoidance by PSD sensors in the narrow passage (30 cm width).

これまでの自律移動ロボット Mobile-2003 は，駆動タイヤの向きが前(後)方向に固定されており，左右の駆動タイヤの回転差によって旋回運動を行っていたが，本論文の自律移動ロボット Mobile-2004 は，サーボモータを用いて駆動タイヤを約 180 度の範囲内で操舵することにより，横や斜め方向へ移動することを可能にした(図 9).

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，図 10 のように，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．図 10 の GND は電源のマイナス，Vcc は電源のプラス，PWM(Pulse Width Modulation)は制御信号である．またバッテリーをラジコン用のものから単 3 形の充電式電池(Panasonic 社製ニッケル水素電池 1.2V, 2230 mAh)・6 本に変更して軽量化した．

シャーシ，バンパー部分などはアクリル板 1 mm，2 mm，3 mm，アルミ板 1.5mm 厚を用い，模型工作用の電池ボックス，ボールキャスタ (田

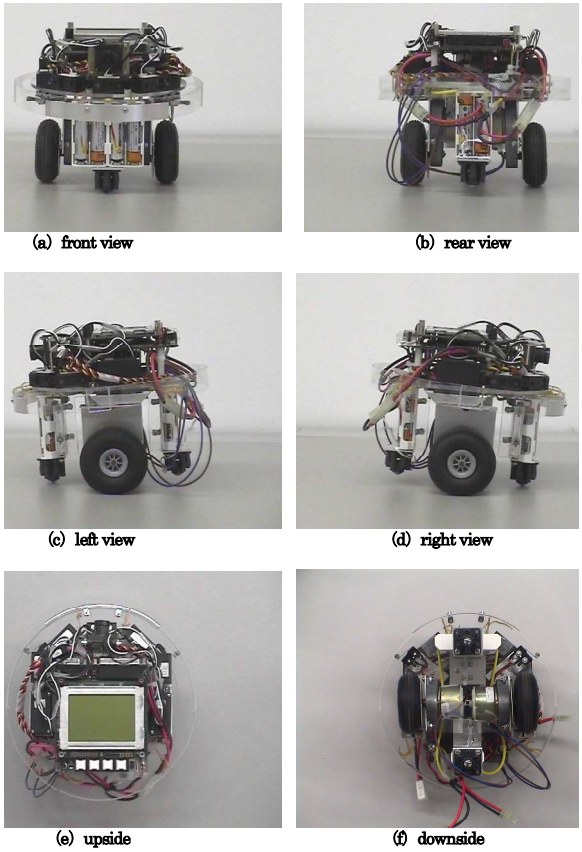


Fig.8 Autonomous Mobile Robot 2004

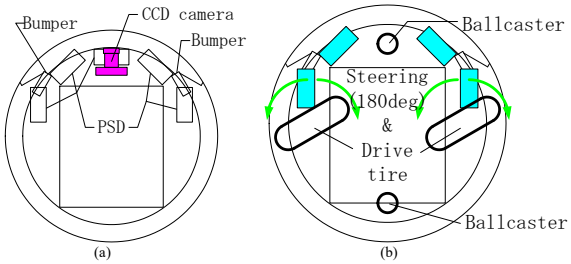


Fig.9 Autonomous Mobile Robot 2004 with steering for high-speed approaching obstacle avoidance. Robot width (Diameter):185 mm, height: 152 m.

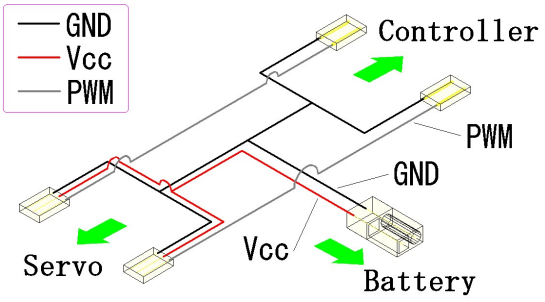


Fig.10 Servo-motors connected to battery

宮模型社製ITEM70144に変更)を取り付けている．

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．自律移動ロボット mobile-2003 に比べて，バンパ（マイクロスイッチ）の位置が 26 [mm] 高くなってスイッチ上端が地上から 91 [mm]，PSD 下面の位置は 31.5 [mm] 高くなって 99 [mm]，CCD カメラ下面の位置は 11.5 [mm] 高くなって 112 [mm] である．左右の駆動タイヤ間の距離は 20 [mm] 短くなって 116 [mm] ，前方への傾きは 8.0 度から 4.3 度に小さくなった．

図 11 は，本論文での実験環境Ⅳである．

図 12 は，実測した PSD 距離センサの特性である．横軸に測定距離，縦軸に PSD 取得値をとっている．Center（FW）は前方，R-front（FR）は右 45 度，L-front（FL）は左 45 度，R-side（MR）は右 90 度，L-side（ML）は左 90 度にそれぞれ向けられた各 PSD を表す．距離が 10 cm 未満では正しい検出ができず，測距範囲は 10 ~ 80 cm であり，検出精度も良いとはいえない．したがって，前報における狭い通路の幅 30cm では，ロボットに取り付けられている左右 90 度の PSD と壁との距離は 7.5cm になるので，図 11 の実験環境Ⅳでは狭い通路の幅を 40 cm に変更してある．この場合は，ロボットが坂の狭い通路の中央に侵入したときに左右 90 度 PSD と壁との距離を 12cm 程度に確保できる．

3．学習の包摂構造化による自律移動ロボットの目的行動の発現と高速接近障害物回避

ロボットの通常の前進速度 20 cm/s (0.72 km/h) を考慮して，直径 194 mm のバレーボールが約 50 cm/s (1.8 km/h) 程度の速度でロボットの正面に接近する（相対速度は 70 cm/s）ことにした．接近速度は PSD（測距センサ）値を 0.1 秒の待ち時間を設けて 2 回連続して取得することにより認識し，障害物回避として既存の平地(Plain)における Avoid1，狭い通路(Passage)における Avoid2 に急速接近中の障害物回避 Avoid3 を新たな要素行動として積み上げた．

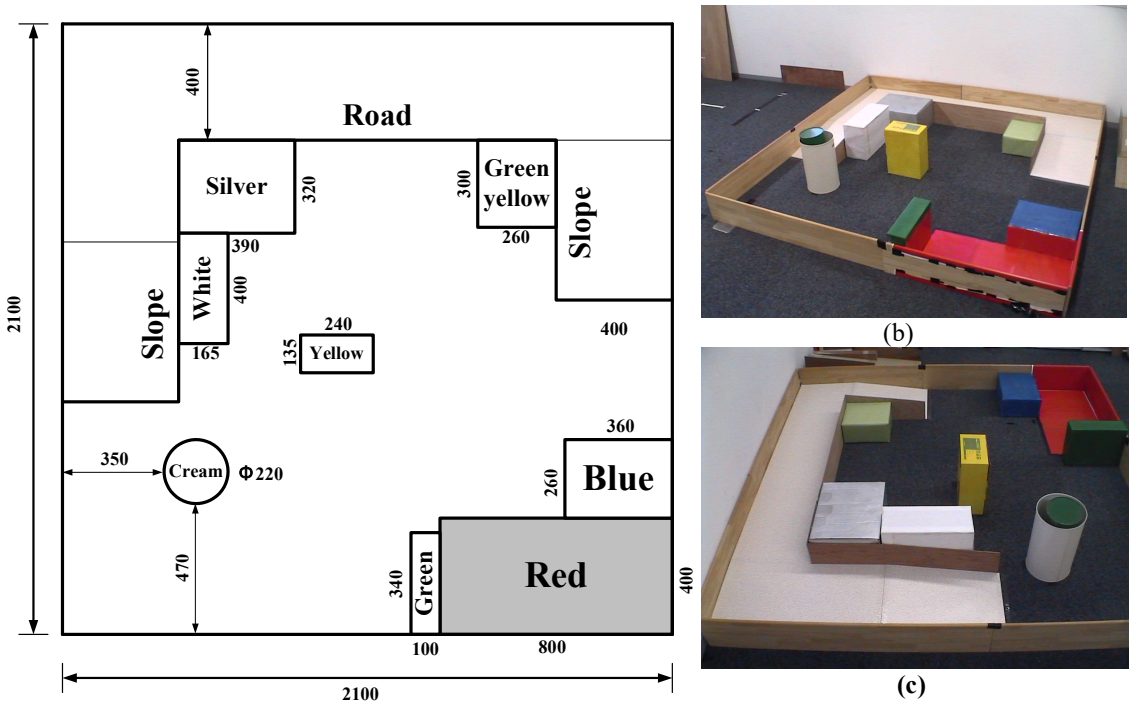
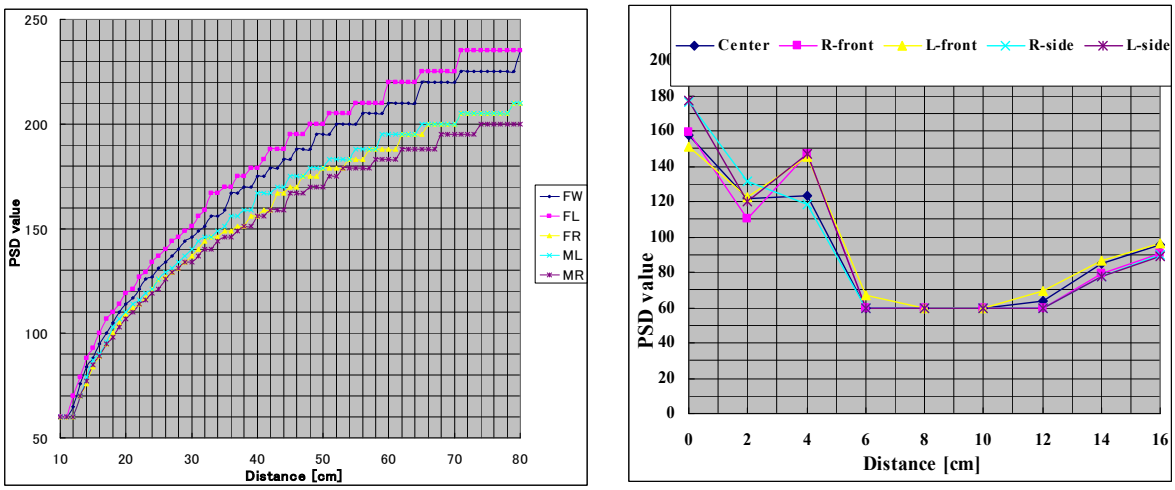


Fig.11 New unknown environment Ⅳwith ascend and descend at narrow passage.



(a) Overall　　(b) very near

Fig.12 Measured AD values of PSD (Position Sensitive Detector) characteristics

図 13 は，新実験環境（図 11）に対応する狭い通路での mobile-2004 の要素行動を示す．図 13(h)は障害物回避 Avoid2 に追加された新しい要素行動である．

図 14 は，直径 189 [mm]のバレーボールが約 50 [cm/s]の速度でロボットに向かって転がってくるときの両者間距離とロボットの速度および両者の相対速度の測定値を示す．ロボットの前進速度が 20 [cm/s] の場合であり，前方 PSD 値

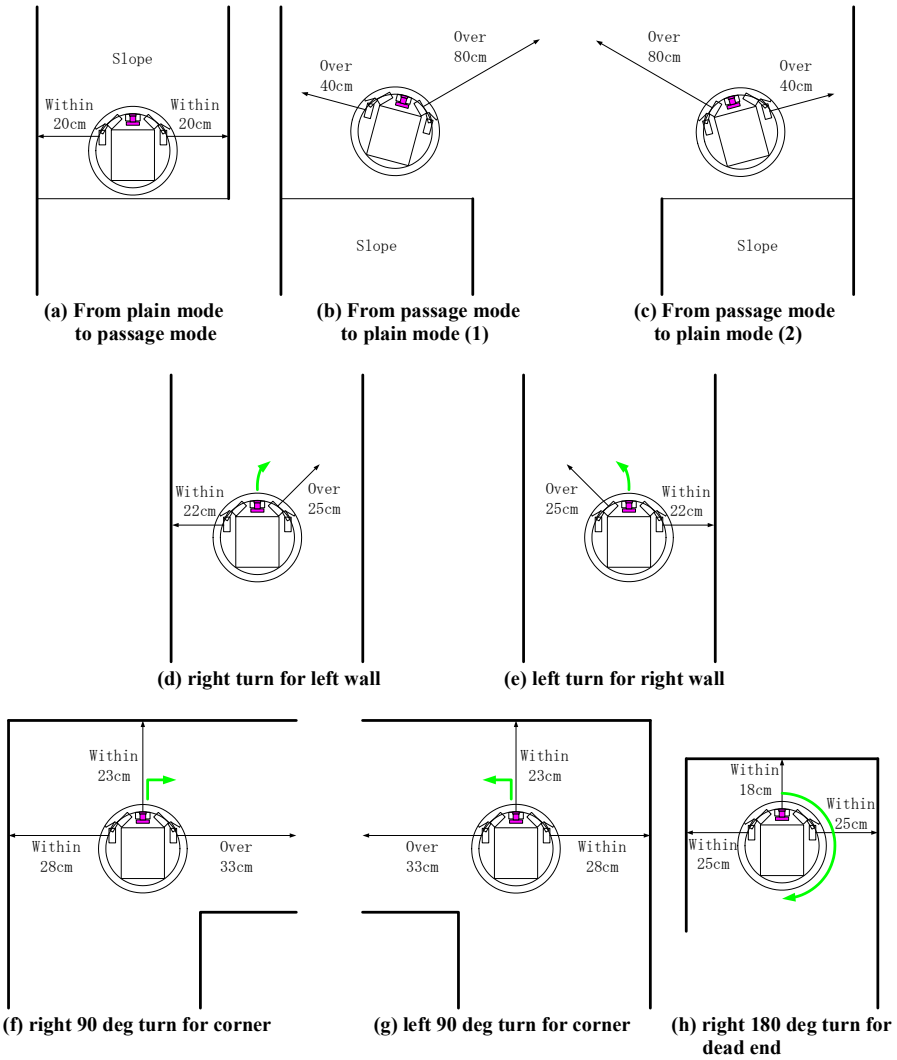
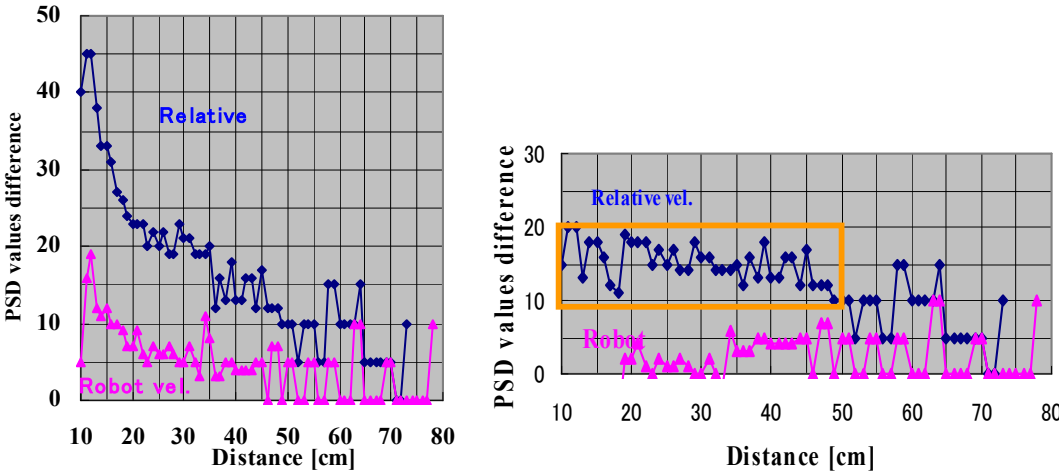


Fig.13 Robot-2004 Avoid behavior: Obstacle avoidance by PSD sensors in the narrow passage (40 cm width).



(a) (b)

Fig.14 Introduction of relative velocity for recognition of high speed approaching obstacle at the relative distance.

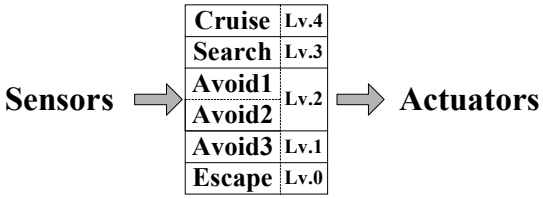


Fig.15 Subsumption architecture of autonomous Mobile-2004.

Table 1 PSD settings learned for obstacle avoidance

PSD sensor	Distance	Obstacles
L-front**1(0)**	over 80cm	Avoid1: Detect no obstacle
R-front**1(0)**	over 80cm	Avoid1: Detect no obstacle
L-side**1(0)**	over 40cm	Avoid1: Detect no obstacle
R-side**1(0)**	over 40cm	Avoid1: Detect no obstacle
L-side**2(1)**	within 20cm	Avoid2: Detect obstacle
R-side**2(1)**	within 20cm	Avoid2: Detect obstacle
Center**3(1.1)**	within 50cm	Avoid3: Detect obstacle which approach

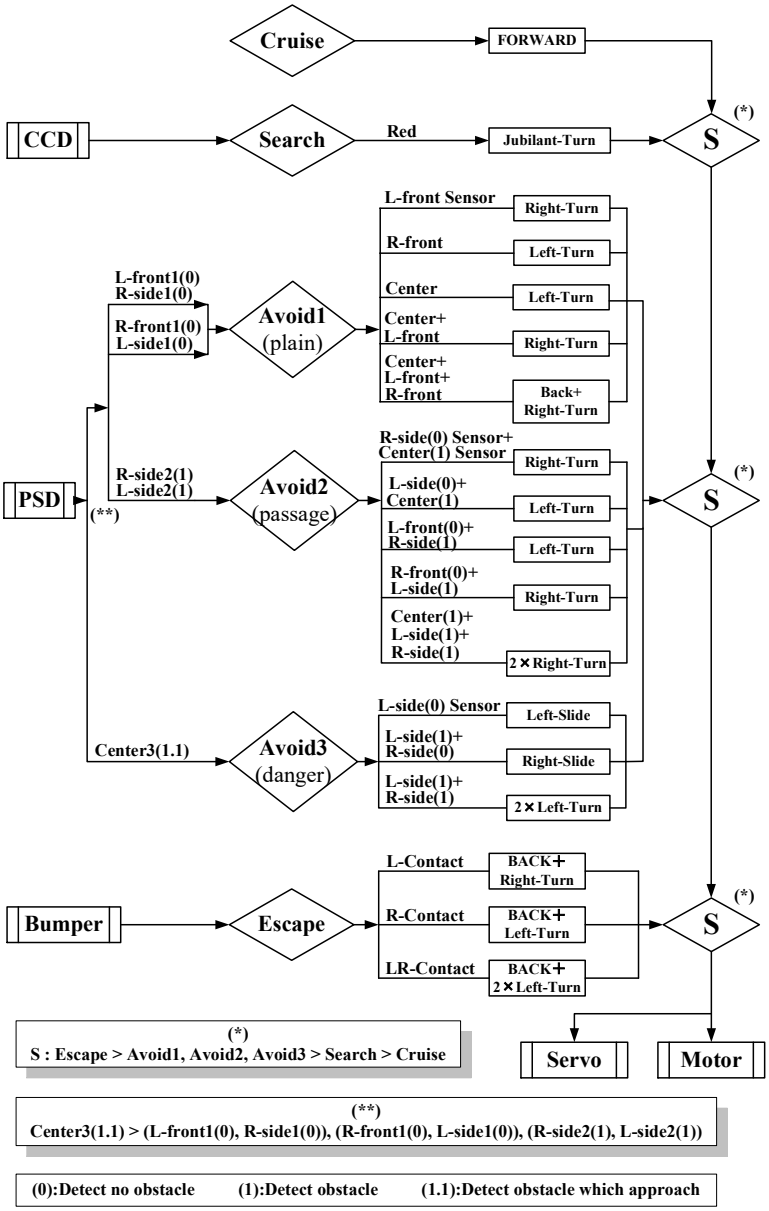


Fig.16 Subsumption architecture of autonomous Mobile-2004

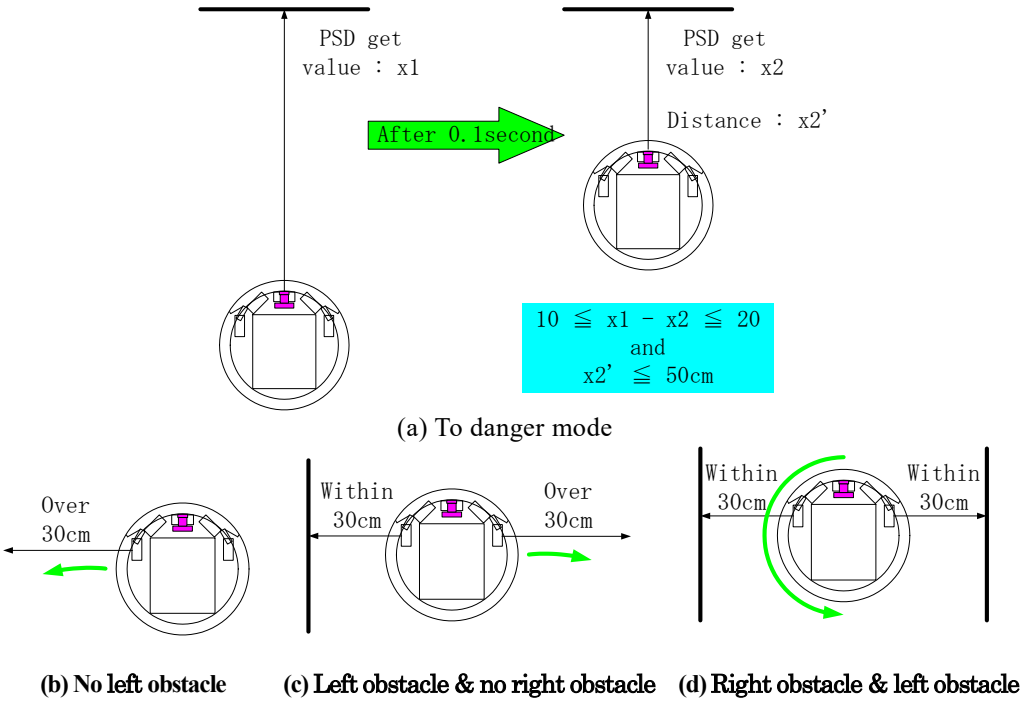


Fig.17 Behaviors of high speed approaching obstacle avoidance Avoid 3

を取得した 0.1 [s] 後に再び前方 PSD 値を取得し，この二つの取得値の差から相対速度を算出し，相対速度の大きさにより高速接近する障害物かどうかを判断する．この場合は，転がってくるボールとロボットの相対速度は 70 [cm/s] であり，0.1 [s] 間に 7 [cm] 接近する．この結果が図 14(a) であり，ボールとロボットの位置により相対速度が変化している．高速接近する障害物を回避できる最小距離は 50 [cm] であり，50 [cm] 以内では，相対値がほぼ一定（10 ～ 20）になるように図 14(a) の PSD 取得値から相対距離 13 [cm]以下では 25， 14～18 [cm] の範囲では 25, 19～ 35 [cm]の範囲では 5 をそれぞれ差し引くことにより，2 回目の取得時に相対距離 50 [cm] 以内で取得値の差が 10 ～20 のとき高速接近障害物と判断し，これを高速接近中の障害物回避 Avoid 3 として要素行動に積み上げた．また障害物回避 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 を優先させるようにして，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 15，行動アーキテクチャを図 16，平地，狭い通路，高速接近中の障害物識別のための PSD の働きを表 1，障害物回避 Avoid 3 の判断条件を図 17 に示す．

図 18(a)は坂になった出入口と狭い通路を通って目的地(End Point)に到達したときの軌跡であり，図 18(b)は図 18(a)の左側にある坂を登った後の軌跡を分割したものである．図 18(b)の(1)と(2)の軌跡の最後の部分で錯覚により Avoid 3 が発現し，(3)の曲がり角付近では Avoid 1 が発現している.また図 18(a)の右側にある坂を下った後の軌跡がロボットの進行方向から右に折れている部分でも錯覚により Avoid 3 が発現している．これらの Avoid 3 の発現は，ロボット自身の走行速度が増したために静止している障害物や壁を速いスピードで接近してくる障害物と誤って判断したものであるが，このような錯覚は人にもありうることであり，むしろロボットが生き物であるかのような感じを与える．ロボットは旋回後に慣性によってわずかに運動が残り，旋回直後の PSD 取得値は状況によって差が大きく，また駆動タイヤと補助輪の 4 輪が同一平面になく，走行中に約 8.5 度の範囲内で上向

き・下向きの振動を起こすことがあるためにPSD 取得値がばらつく．図 18 に示す錯覚による Avoid 3 の発現は，これらの理由によるものであり，小型の安定した速度センサーがほしくなる，

図 19 は，図 18(a)での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，(4)，(5)，(8)が Avoid 3 の発現地点，(10)が赤色の発見地点である．図 18 では右側にある坂を下った後に Avoid 3 が発現してロボットの方向が目的地（赤色）に向かったために短時間で赤色を発見したが，坂を下った後は直進して青色の障害物を検知し右旋回してスタート地点へ向かうことの方が多かった．

図 20 は，相対速度 70[cm/s] で高速接近するボールに対するロボットの動きの様子を 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(6)でボールをかすめている．

図 21 はボールのスピードが 40 [cm/s]（相対速度は 60 [cm/s]）の場合であるが，ボールがロボットの回避方向にカーブしており，(4)でロボットが横移動し始めて(7)でロボットが横移動し終わる状態で回避しかけているが，(8)でボールがロボットの側面をかすめている．

図 22 は，ロボットが CCD カメラを使用していない場合であり，処理の軽減によって PSD 値を取得し判断する周期が，CCD カメラ使用時の

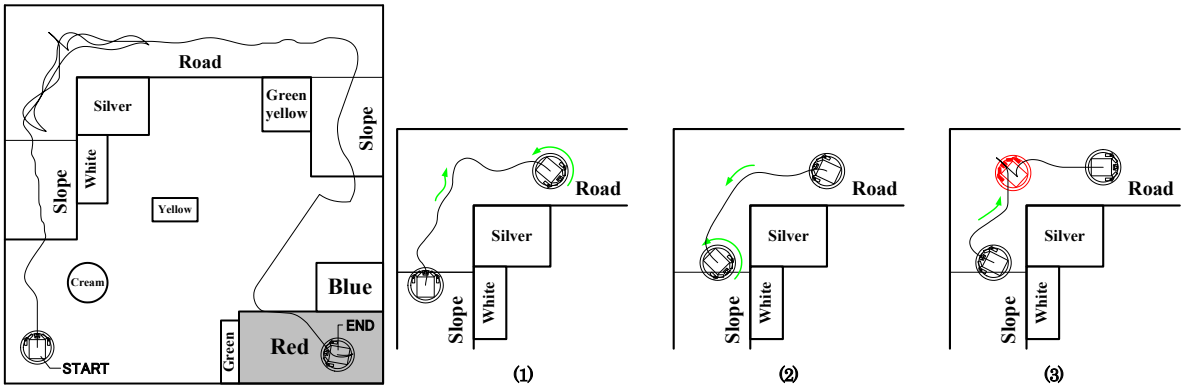


Fig.18 Autonomous behaviors of a mobile robot-2004 with complex trajectories

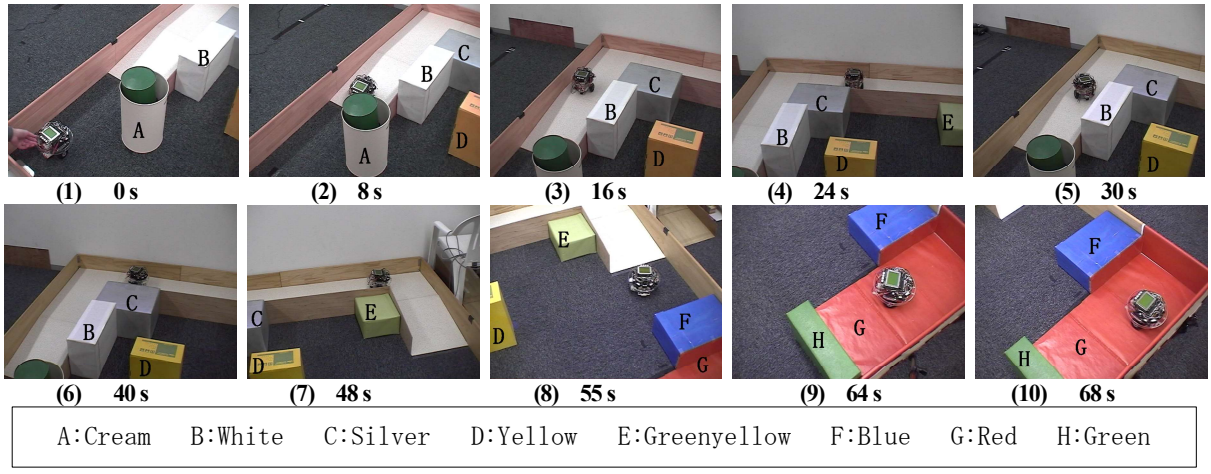


Fig.19 Autonomous and objective behaviors of Mobile Robot 2004 with SA(Escape･Avoid1･Avoid2･Avoid3･Search･Cruise) for searching for RED color using CCD camera with high-speed approaching obstacle avoidance in a new unknown environment.

周期 0.45 [s] に対して, 0.16 [s] と反応が速くなり, (3)でロボットがわずかに横に移動し始めて (7)で回避している.

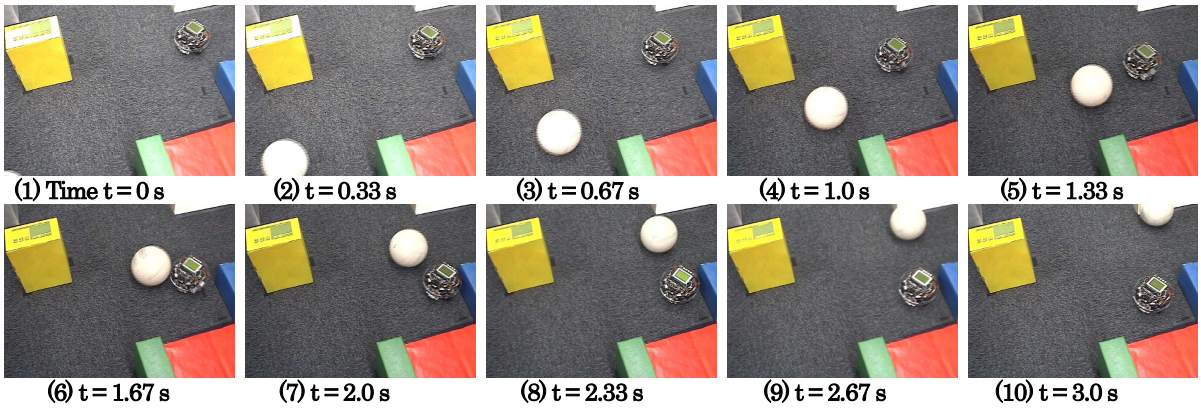


Fig.20 Avoidance (A) of Mobile Robot-2004 against an approaching ball with a relative velocity of 70 cm/s during searching for RED color.

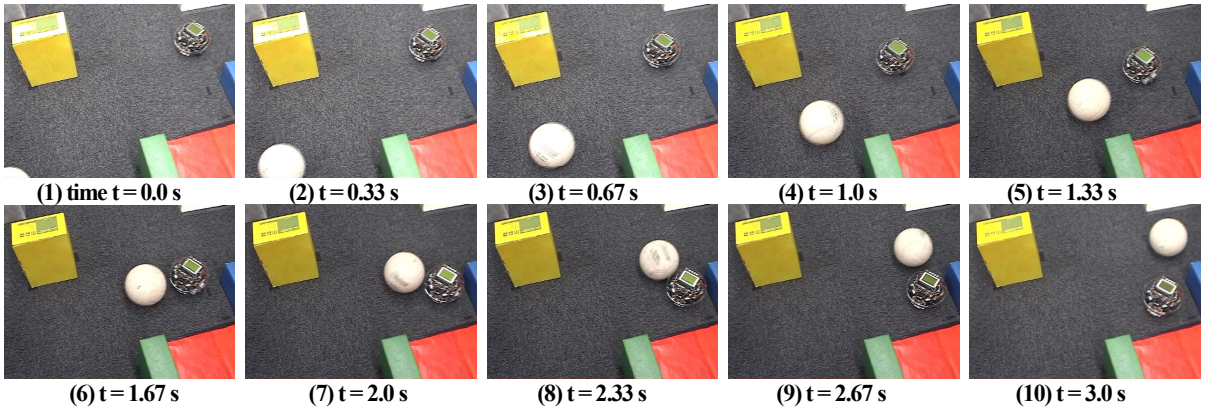


Fig.21 Avoidance (B) of Mobile Robot-2004 against an approaching ball with a relative velocity of 60 cm/s during searching for RED color.

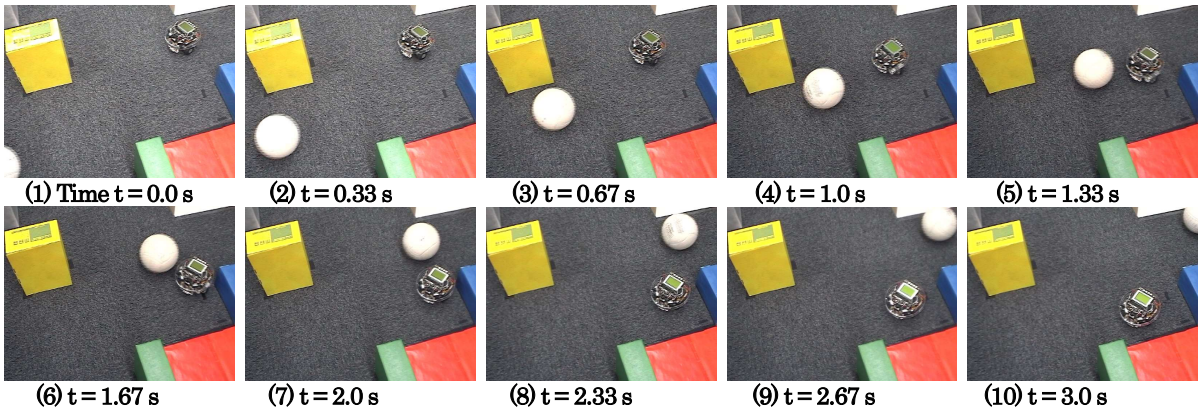


Fig.22 Avoidance (C) of Mobile Robot-2004 against an approaching ball with a relative velocity of 70 cm/s without searching for Red color.

ボールとロボットの位置関係の近似計算例を図 23，図 24 に示す．

図 23 は CCD カメラを使用して赤色探索をしている場合で，ボールとの距離が 52cm のときの状況判断によりロボットは Cruise が発現して前進する．次に 0.45 秒後の判断では，ボールが 22.5 [cm] 転がり，ロボットが 9 [cm] 前進してボールとの距離は 20.5 [cm] になる．ここで高速接近障害物回避 Avoid 3 が発現してロボットの駆動タイヤが横方向に向くまでの 0.186 [s] 間にボールが 9.3 [cm] 転がり，ロボットは 3.2 [cm] 前進して 3.2 [cm] 横方向へ移動し，ロボットが完全に横方向移動する場合の PSD センサとボール間の y 軸方向の距離は 8 [cm] になる．ボールが転がって，この y 軸方向の PSD センサとボール間の距離が 0 [cm] になるまでの 0.16 [s] 間にロボットは 4.5 [cm] 横方向へ移動する．この 0.1 [s] 後にはボールが 5 [cm] 転がり，ロボットは 2.8 [cm] 横方向へ移動する．ボールとロボットがわずかに重なっていることからボールとロボットは接触することが分かる．

図 24 は CCD カメラを使用していない場合である．判断の周期が短くなるので高速接近障害物回避 Avoid 3 の発現が速くなり，y 軸方向の PSD とボール間の距離が 0 [cm] になるときロボットの左側面とボールの左側面(図ではボールの右側)はボールが直進したときに接触しない位置 0.14 [cm]まで移動していることから，ロボットはボールを回避できる．この例ではボールとの距離が 52cm のときを判断のタイミングとしているが，51cm のときは Avoid 3 発現条件を満たすため CCD カメラを使用しても高速接近のボールを回避できる．これらの計算において Avoid 3 が発現してからロボットの駆動タイ

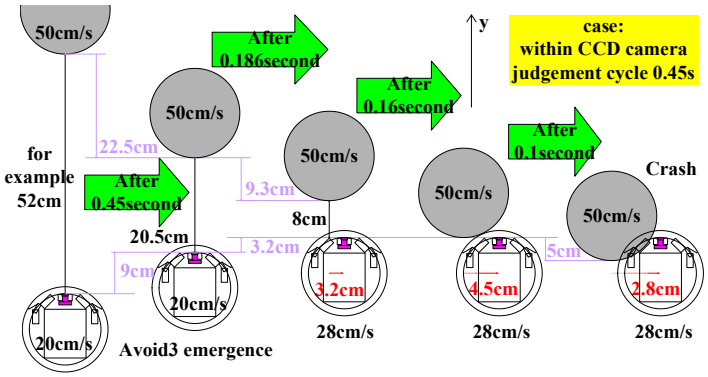


Fig.23 Predicted alert avoidance behaviors of Mobile Robot-2004 against an approaching ball with a velocity of 70 [cm/s] during searching for Red color.

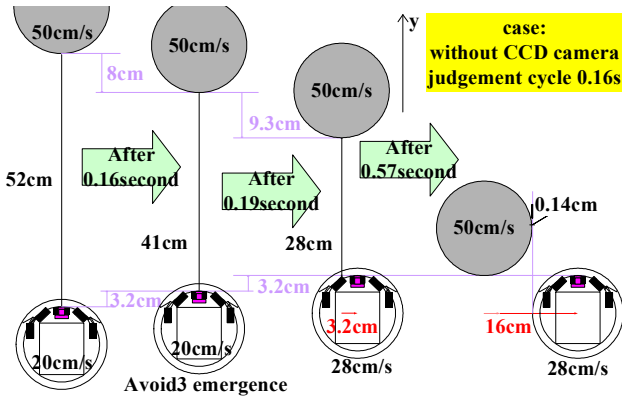


Fig.24 Predicted alert avoidance behaviors of Mobile Robot-2004 against an approaching ball with a velocity of 70 [cm/s] without searching for Red color.

ヤが横方向に向くまでの状態は，サーボの回転スピードが約 0.186 [sec/90°]であることから近似軌跡を作成して用いている（図は省略）．また左右の駆動タイヤは，サーボを取り付ける都合により実際には両方が同時に 90 度の向きにならない．したがって，Avoid 3 発現後の軌跡は真横方向へ直進移動するわけではなく，図 18(a)の右側にある坂を下った後の軌跡が右に折れている部分のように円を描く．

４．結　論

包摂構造を持つロボットは，次第に能力が向上していき，上位レベルの行動（目的行動など）が失敗しても，下位レベルの行動（障害物回避，衝突回避など）が実行され，致命的な失敗を防ぐことができる．人間のような動的障害物も含めて自律的に障害物を回避しながら CCD カメラで床と壁の赤い部分を発見するという目的行動，さらに，坂になった二つの出入口と狭い通路のような複雑な未経験の環境に遭遇したときに，学習の包摂構造化により新しい要素行動を積み上げていく．

本論文では，速いスピードで接近してくる障害物（実験では転がってくるバレーボール）を回避しながらの目的行動（CCD カメラによる色探索）も新しい要素行動を追加して積み上げること（包摂構造化）により発現した．未知の現場で遭遇した課題をオフラインで設計者の介助により試行錯誤的に学習（練習）し，その結果を要素行動として積み上げることにより（包摂構造化），高速接近する障害物を 0.5 秒で俊敏に回避した．

ロボットの定義を生体（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し，具体的実践と問題解決の経験を一般的手法に展開できる能力を養うことを目的として，「プロジェクト型講義の学習プログラム開発」を続報[24]に展開する．

おわりに，ご協力いただいたビジネスネット（株）原田洋氏，卒業研究として実験・作図にご助力いただいた 2001 年度・橋本和馬・大澤渉，2002 年度・板倉敏明・田口潤，2003 年度・石井達也・石坂大悟，2004 年度・池田光雄の諸氏に厚くお礼申し上げる．

文　献

1) 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，(2009), pp.369.
2) 森政弘，ロボコンの人間教育的意義，日本ロボット学会誌，Vo.27, No.9, (2009), pp.964 - 966.
3) 森政弘，談話：ロボット工学の開拓者，日本ロボット学会誌，Vo.27，No.9，(2009), pp.1001 - 1004.
4) 川副嘉彦，“知能ロボットの知性の創発（習の包摂構造化と巧みさの発達），埼玉工業大学工学部紀要，第14号，pp.3-16,(2004)
5) 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).
6) Brooks,R.A.,Intelligence without representation, Artificial Intelligence, Vol.47, (1991), pp.139 -159.
7) Gomi, T, Impact of Non-Cartesianism on Software Engineering, Evolutionary Robotics ER'98, AAI Books, Ontario, Canada, 1998, pp.487–519.
8) 五味隆志，知的移動ロボット：知能の新しい見方，ロボットの新たな役割，Evolutionary Robotics ER'98, AAI Books, Ontario, Canada, 1998, pp.427–454.
9) 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, (2005), pp.729-734.
10) 五味隆志，新 AI 科学と介護ロボット，日本ファジィ学会誌，2001 年２月号，pp.1-11, (2001)
11) 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，(2002)，pp.2067-2073.
12) 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, (2001)，pp.3876-3882.

13) 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).

14) 川副嘉彦，知能ロボットの知性の創発（第1報，複雑系としての人間の行為・運動の巧みさとサブサンプション・アーキテクチャ），埼玉工業大学紀要，第11&12号，pp.9-19, (2002)

15) 川副嘉彦，知能ロボットの知性の創発（第2報，SA を用いた行動型移動ロボットの自律走行の発現），埼玉工業大学紀要，第11&12 号，pp.21-31, (2002)

16) 川副嘉彦，人間の巧みさの発現と包摂構造（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).

17) 川副嘉彦，知能ロボットの知性の創発（生き物・人間の巧みさと包摂構造からのアプローチ），埼玉工業大学工学部紀要，第 13 号，pp.13-23, (2003)

18) 川副嘉彦，学習の包摂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).

19) 川副嘉彦，二足歩行から始める実践ロボット教育カリキュラム（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）”, 埼玉工業大学工学部紀要, 第19号，pp.47-56 (2009)

20) 川副嘉彦，自然・生き物・人の巧みさに学ぶ「ヒューマン・ロボット学」の提唱，2006 年度日本機械学会年次大会講演論文集，No.06-1, (7), (2006), pp.29-30.

21) 川副 嘉彦・原田一臣・須永智文・桃井孝昌・清水祐一，「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），2006 年度日本機械学会年次大会講演論文集,No.06-1,(7)，(2006), pp.31-32.

22) 川副嘉彦, ロボットと人間が 21 世紀を生きるための「ヒューマン・ロボット学」の提唱, 第 5 回 21 世紀連合シンポジウム － 科学技術と人間 －論文集，(2006), pp.23-26.

23) 黄　健・藤堂勇雄・松浦　稔，視覚情報を用いた冗長ロボットの制御（接近してくる障害物の回避制御），日本機械学会論文集，68-674, (2002)，pp.2999-3006.

24) 川副嘉彦・満岡将樹，自律移動ロボット実践教育カリキュラム（第 2 報，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），埼玉工業大学工学部紀要，第 20 号，(2010), pp.53-59.