知的車椅子のための進化型シミュレータと 行動統括機構の開発

学生員 今井 誠* 学生員 川戸 康司*
正 員 濱上 知樹** 正 員 平田 廣則*

Development of an evolutionary simulator
and an overall control system for intelligent wheelchair

Makoto Imai*, Student Member, Koji Kawato*, Student Member,
Tomoki Hamagami**, Member, Hironori Hirata*, Member

The goal of this research is to develop an intelligent wheelchair (IWC) system which aids an indoor safe mobility for elderly and disabled people with a new conceptual architecture which realizes autonomy, cooperativeness, and a collaboration behavior. In order to develop the IWC system in real environment, we need design-tools and flexible architecture. In particular, as more significant ones, this paper describes two key techniques which are an evolutionary simulation and an overall control mechanism. The evolutionary simulation technique corrects the error between the virtual environment in a simulator and real one in during the learning of an IWC agent, and coevolves with the agent. The overall control mechanism is implemented with subsumption architecture which is employed in an autonomous robot controller. By using these techniques in both simulations and experiments, we confirm that our IWC system acquires autonomy, cooperativeness, and a collaboration behavior efficiently.

キーワード：知的車椅子，自律移動ロボット，サブサンプション・アーキテクチャ，進化型シミュレータ

Keywords: intelligent wheelchair, autonomous behavior, subsumption architecture, evolutionary simulator

1. まえがき

現在，日本は65歳以上の高齢者人口が総人口の19%を占める高齢社会を迎え，高齢者の社会参加促進や介護者の負担軽減措置が急務となっている⁽¹⁾。その中であって，電力による駆動力をもつ電動車椅子（Electric Wheelchair：EWC）の需要は大きく伸びつつある。しかし，ジョイスティック等を介した電動車椅子の操作に支障のある高齢者や障がい者も多く，施設内での使用が制限されたり，屋内外での事故も後を絶たない。このような問題を背景に，筆者らは，電動車椅子の駆動力を有効に利用しながら，様々な環境において高い操作性・安全性を実現する「知的車椅子（Intelligent Wheelchair：IWC）」の研究を進めている^{(2)~(6)}。

従来，同様の目的において研究されたいくつかのIWCが

存在する。足立らは，操作者と車椅子とのインタフェースとして顔の向きを検出する機構を導入し，自然な操作性を目指した知的車椅子を開発した⁽⁷⁾。Kotaniらは，画像情報を用いたティーチングによる自律行動機構を提案し，視覚障がい者のための歩行ガイドロボットに応用した⁽⁸⁾。また，環境を自律走行することができる車椅子に関する研究⁽⁹⁾も行われている。これらの従来研究に対し，本研究は，従来の知的インタフェースや，自律移動ロボットの側面に加え，自律行動・協調行動・協同行動という知的振る舞いを獲得する知能ロボットとしての車椅子開発をめざしている。

特に本論文では，量産可能な安価なデバイスと市販の電動車椅子を組み合わせた試作機による実験を行い，実環境において知的な振る舞いを獲得する上で生じる2つの技術的問題及びその解決方法について検討した結果を述べる。

以下2章では，IWCのハードウェア及びソフトウェアについて述べ，システム仕様を示す。3章では，試作機実験で生じる2つの問題点と対応方法について述べる。4章では，実環境に近い振る舞いを効率よく獲得するための進化型シミュレータについて述べる。5章では，自律・協調・協同行動を統括し，即応的に行動を出力する行動統括機構について述べ，実環境とシミュレータ環境における走行実験

* 千葉大学

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

Chiba University

1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

** 横浜国立大学

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

Yokohama National University

79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

結果について考察する。

2. 知的車椅子

2.1 定義 本研究では、「車椅子」、「他の車椅子」、「操作者」及び「動作環境」の4者関係において、学習または進化的手段により次の3つの機能を獲得する機構を具備した自律移動ロボットを、知的車椅子 (Intelligent Wheelchair: IWC) と定義する。

- 危険を回避し、制約を満たす自律的な行動をとる。
- 他車椅子と協調し集団として適切な振る舞いをとる。
- 操作者の明示的、非明示的な操作に基づき、協同して目的を達成する。

それぞれの機能により実現される諸振る舞いを、それぞれ「自律行動」「協調行動」「協同行動」と呼ぶ。図1にIWCと他要素との関係を示す。

2.2 ハードウェア 本研究で試作に利用した電動車椅子、及び周辺装置の構成を以下に示す。

- 電動車椅子：ワコー技研製 Emu⁽¹⁰⁾
- インタフェースボード (自作)
- PSD センサ：SHARP 製 GP2D12 (12個)
- AD/DA コンバータ
- ラップトップ PC (PentiumIII (1 GHz))
- Joystick
- Touch panel
- RFID tag (SONY FeliCa)

本研究で試作したIWCハードウェアの外観を図2に、システム構成図を図3に示す。図4に示すように、IWCには、周辺環境情報を取得するためのPSDセンサ12個を配置してある。各PSDセンサは、10~80[cm]の範囲にある障害物までの距離を電圧値として出力する。この出力電圧はADコンバータを介してラップトップPCに取り込まれ、後述のIWCエージェントの行動決定に用いられる。

2.3 ソフトウェア IWCは、ラップトップPCで動作するIWCエージェントプログラム(以下、エージェント)によって動作する。エージェントは、環境に合わせた「自律行動」、他IWCとの「協調行動」、操作者との「協同行動」などの知的な振る舞いを実現する。本研究では、既の実数値GAを用いた障害物回避行動⁽¹¹⁾や遺伝的プログラミングを用いた隘路通過行動⁽¹²⁾など、「自律行動」や「協調行動」の基本機能を持ったエージェントを開発している。また、これらの基本機能を実現するサブシステム同士を統合するための機構として、「行動統括機構」と呼ぶサブシステムを想定したアーキテクチャを提案している⁽²⁾。

エージェントは電動車椅子を直接操作するドライバプログラムを介して電動車椅子を制御する。ここで、エージェントと電動車椅子ドライバ間は、TCP/IPソケットによりネットワーク越しに通信を行うクライアント・サーバの関係にある。

さらに、エージェントを仮想環境中で行動させ、効率良く行動戦略の学習・進化を進めるためのシミュレータ (Intel-

図1 IWCシステム概念図

Fig. 1. The concept of IWC system.

図2 知的車椅子外観

Fig. 2. Schematic diagram of the IWC.

図3 IWCシステム構成

Fig. 3. Schematic diagram of the IWC system.

図4 センサの向きおよび配置

Fig. 4. A sensor layout plan (12 sensors.) and the range of beam.

ligent Wheelchair Simulator: IWS)を開発している。図5にIWSのGUI画面を示す。本シミュレータは前述のドライバと同じソケットインタフェースにより、エージェントと通信することで実環境を模擬した応答をシミュレーションする機能を有する。

図5 知的車椅子シミュレータ画面
Fig. 5. An example of IWC simulator window.

図6 システムアーキテクチャ
Fig. 6. IWC prototype subsystems and the architecture.

図6に、以上で述べたIWCシステムアーキテクチャを示す。

3. 実環境走行で生じる問題と対応方法

3・1 実環境走行で生じる問題 試作した知的車椅子実機は、量産可能な安価なデバイスを利用して構成されている。そのため、センサや処理系に関しては、いくつかの性能上の制約が存在する。実機走行による予備実験の結果、以下の2つの問題が生じることが明らかとなった。

シミュレータ精度の問題 実環境においては、発進・停止時の過渡現象や、タイヤと床との摩擦などの外乱、壁の素材やセンサ感度のばらつきなどによるセンサ応答の変化などが生じる。その結果、理想的な実環境を模擬したシ

ミュレータ上で学習・進化したエージェントの行動は、実環境では有効でない場合がある。エージェントの行動学習・進化を進める傍ら、実環境とシミュレータ間の差異を効率的に縮めるための工夫が必要である。

行動統括機構の応答性の問題 IWCは、急停止・急発進による操作者への影響を軽減させるために、速度が過渡的に変化するようにサーボモータの制御が行われている。その結果、行動統括機構が停止処理を開始してから実際にIWCが停止するまでの間に制動距離が生じる。

屋内カーペット上で実測した結果、 0.6 km/h (16.7 cm/s)の低速走行の場合でも、制動距離は7cm程度に達することがわかった。すなわち、対向して走行している2台のIWC(相対速度 33.3 cm/s)の衝突回避を確実にするためには、それぞれのセンサが前方30cmにお互いを障害物として感知後、500ms以内に停止処理が開始される必要がある。

さらに、試作機が用いているPSDセンサは、ビーム干渉による測定誤差を除くために、1度の環境情報取得につき、3回の測距を時間をずらしながら行っている。すべてのセンサが3回の測距を完了し、行動統括機構が環境情報としてその値を利用できるようになるまでのサイクルは約300msである。

以上の理由から、環境情報に基づき行動を決定する処理に利用できる時間は200ms以下という制約が生じる。その結果、従来の自律移動ロボットに多く用いられてきた行動決定モデルであるSMPA (Sense-Model-Plan-Act)モデルでは、十分な応答性能が得られない可能性がある。また、今後新たな知的な機構を追加する場合に、応答速度を維持することが困難になると思われる。

3・2 対応方法 実環境で生じる2つの問題点につき、本研究では以下の方法で解決をはかる。

進化型シミュレータによる精度向上 シミュレータの精度向上のために、エージェントの行動政策獲得の過程に合わせて、シミュレータと実環境との誤差を漸次的に修正する「進化型シミュレータ」を提案する。

この考え方は、工業用ロボットシミュレータにおけるキャリブレーションの技術と同様の目的を持つ。しかし、一般的なキャリブレーション手法が、教師である実機の動作に合わせて、シミュレータ上の誤差を減少させる一方向の修正であるのに対し、本手法は、実機を制御するエージェント行動政策獲得とシミュレータの精度向上を同時平行して行う点が異なる。

エージェントの進化とシミュレータの進化が並列して生じることにより、共進化プロセスのような進化の促進が期待できる。

サブサンブションアーキテクチャによる即応性の実現 複数のサブシステムを統括する行動統括機構に即応性を持たせるために、Brooksらの提案したサブサンブションアーキテクチャ (Subsumption Architecture: SSA)⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を採用する。SSAを用いることにより、2・3節で述べた各サブシステムからの出力を効率的に取捨選択可能となり、即

応性の向上が期待できる。

次章以降では、以上 2 つの方法の詳細とそれぞれの実験結果について述べる。

4. 進化型シミュレータ

ここでは、実環境とシミュレーション環境を交互に走行するエージェントの進化とともに、シミュレータと実環境の差異を漸近的に修正することが可能なシステムを、進化型シミュレータと呼ぶ。進化型シミュレータの目的は、エージェントの学習・進化の過程で、実環境に適応した行動政策を効率的に獲得することである。

4.1 GA による進化型シミュレータの設計

4.1.1 センサベクトルと Critic による補正 実環境において、エージェントがある行動を選択した結果、時刻 t で得られるセンサ応答ベクトルを $S^{\text{EWC}}(t)$ と表す。

$$S^{\text{EWC}}(t) = (s_0^{\text{EWC}}(t), s_1^{\text{EWC}}(t), \dots, s_{N-1}^{\text{EWC}}(t)) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 N はセンサ数である。実環境で選択した一連の行動系列に対し、シミュレータ上で同時刻 t で観測されるセンサ応答ベクトルを $S^{\text{Srv}}(t)$ と表す。

$$S^{\text{Srv}}(t) = (s_0^{\text{Srv}}(t), s_1^{\text{Srv}}(t), \dots, s_{N-1}^{\text{Srv}}(t)) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $S^{\text{Srv}}(t)$ と $S^{\text{EWC}}(t)$ の誤差を修正するための評価器 (Critic) をシミュレータに導入する。評価器は、 $S^{\text{Srv}}(t)$ を、補正センサ応答ベクトル $Q^{\text{Srv}}(t)$ に変換する。

$$Q^{\text{Srv}}(t) = \mathcal{F}(S^{\text{Srv}}(t)) \dots\dots\dots (3)$$

$$= (q_0^{\text{Srv}}(t), q_1^{\text{Srv}}(t), \dots, q_{N-1}^{\text{Srv}}(t)) \dots\dots\dots (4)$$

補正関数 $\mathcal{F}$ として、予備実験による試行錯誤から、個別のセンサ毎の線形変換で補正を行う方法を用いる。

$$\mathcal{F} : q_n^{\text{Srv}}(t) \leftarrow a_n s_n^{\text{Srv}}(t) + b_n \dots\dots\dots (5)$$

4.1.2 染色体

エージェントの染色体 エージェントの行動は、文献 (11) で用いた 2 層実数値ニューラルネットワーク (NN) によって決定される。入力層はセンサ次元と同じ 12 次であり、実機センサ応答ベクトル ($S^{\text{EWC}}(t)$) または補正センサベクトル ($Q^{\text{Srv}}(t)$) の値がそのまま入力される。出力層は、前進、後退、左旋回、右旋回の 4 つの行動に対応する 4 次元とする。最も大きな値を出力するニューロンの行動が選択される。入力層から出力層へのリンク数は 48 本であり、この 48 個の NN の重みを一次元に並べたベクトルをエージェントの染色体とする。

Critic の染色体 一方、Critic 個体は、(5) 式中の $\{a_1, a_2, \dots, a_{N-1}, b_1, b_2, \dots, b_{N-1}\}$ で表される $2N$ 個の実数値パラメータを持ち、理想的な応答から実測値に近い応答へと補正する。ここで、このパラメータを Critic の遺伝子とみなし、一次元に並べたベクトルを当該 Critic の染色体と定義する。

4.1.3 エージェント及び Critic の適応度 IWC は start 地点から goal 地点までの走行タスクを行う。タスク終了条件は、ゴールに到達するか、 T_{max} [s] 経過するか、壁に衝突するかのいずれかである。ただし、goal 到達とは、ゴール地点から半径 d [m] 以内の円エリアに到達した場合である。タスク終了までの経過時間や終了状態に応じて、エージェント及び Critic の適応度を求める。

エージェントの適応度 エージェントの適応度 F_{Agent} は、走行タスクに基づき、以下の方法により算出する。

- ゴールに到達した場合：一律 r の適応度を与える。
- T_{max} 経過した場合：走行終了地点から goal 地点までの距離の逆数を適応度として与える。
- 壁に衝突した場合：goal 地点までの距離に d [m] を加算した距離の逆数を適応度として与える。

Critic の適応度 ある Critic 染色体により実現される Critic の性能を評価する尺度として、時刻 $t = 0$ から $t = T-1$ までの行動に基づいた Critic の適応度関数 F_{Critic} を以下のように定義する。

$$F_{\text{Critic}} = \left(\frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} f(t) \right)^{-1} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $f(t)$ は、時刻 t における、 $S^{\text{EWC}}(t)$ と $Q^{\text{EWC}}(t)$ の二乗誤差平均値である。

$$f(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (s_n^{\text{EWC}}(t) - q_n^{\text{Srv}}(t))^2 \dots\dots\dots (7)$$

4.1.4 並列進化プロセス 以下に、エージェントの行動政策の獲得と進化型シミュレータ構築の手順を示す。

- step1** Critic の初期集団と、エージェントの初期集団を生成し、初期化する。
- step2** この時点でのエリートエージェント (初回の場合はエージェント集団からランダムに選ぶ) を用いて実機を走行させ、 $S^{\text{EWC}}(t)$ と移動命令の履歴を取得する (図 7 上段)。
- step3** Critic 集団から未評価の Critic を 1 つ選び、シミュレータに反映させる。このシミュレータを用いて、前述の移動命令の履歴をもとに step2 で用いたエリートエージェントを走行させ、(6) 式により、Critic の適応度を得る (図 7 下段)。使用した Critic を評価済みとする。すべての Critic に対して適応度を得るまでこのステップを繰り返す。
- step4** この時点でのエリート Critic をシミュレータに反映させ、このシミュレータを用いて全てのエージェント集団の走行を行い、それぞれの適応度 F_{Agent} を得る (図 8)。
- step5** エージェント集団に対して、 F_{Agent} に応じた選択、交叉、突然変異、世代交代を行う。
- step6** Critic 集団に対して、 F_{Critic} に応じた選択、交叉、突然変異、世代交代を行う。
- step7** エージェント、Critic 双方の集団が予め決められた世代数に達するまで step2 ~ step6 を繰り返す。

図7 IWC 実機動作に基づくセンサ誤差修正によるシミュレータの進化

Fig. 7. The simulator evolution by sensor error correction simultaneous with behavior of real IWC agent.

図8 シミュレータ上での動作によるエージェントの進化

Fig. 8. The agent evolution through behavior on the simulator.

図9 シミュレーション及び実機実験環境

Fig. 9. Experimental environment for the evaluation of evolutionary simulation.

4.2 進化型シミュレータによる実環境への適応実験

Criticを持つ進化型シミュレータによる手法(提案手法)と、シミュレータの応答をそのままエージェントの行動決定に用いる方法(比較手法)のそれぞれについて、シミュレーション及び実機での比較実験を行った。

シミュレーション環境及び実機実験環境を図9に示す。予備実験に基づき、この実験環境における実験パラメータを、 $T_{\max} = 30\text{ s}$, $r = 0.3$ に設定した。また、3.1節で述べた応答性の問題から、IWCの周囲30 cm以内を当該IWCが占める領域とみなし、 $d = 0.3$ とした。

最終世代までの進化を1試行とし、提案手法と比較手法各10試行分の進化から、それぞれ10体のエリートエージェントを得た。すべてのエリートエージェントに対し、シミュレーション及び実機にて各々50回の走行を行い、そのゴール到達率を評価した。表1に本実験で用いるGAの

表1 GAパラメータ

Table 1. The parameters of GA in the simulator and agents.

Item	Critic	Agent
Number of individuals	50	50
Elite size	0	0
Length of gene	192	168
Crossover point	1	1
Crossover probability	0.75	0.75
Mutation probability	0.01	0.01
Final generation	30	30

表2 提案手法におけるゴール到達率

Table 2. Task performance ratio by using the proposed method.

Trial	Simulation [%]	Real Env. [%]
1	100	100
2	100	100
3	100	100
4	100	96
5	100	94
6	100	80
7~10	0	0

表3 比較手法によるゴール到達率

Table 3. Task performance ratio by using the conventional method.

Trial	Simulation [%]	Real Env. [%]
1	100	92
2	100	80
3	100	52
4~10	100	0

パラメータを示す。

提案手法の結果 表2に、提案手法の実験結果を示す。シミュレーション上でゴールに到達できるエリートエージェントは6割に留まっているが、これらのエージェントは、実環境においてもシミュレーションと同程度の高いゴール到達率を達成できている。また、提案手法では、通路中央を通過し、壁に接近しすぎない安全な行動を獲得することができた。これより、提案手法を用いた進化プロセスは、シミュレータの応答と実環境からの応答のずれを効果的に吸収可能であることがわかった。

比較手法の結果 表3に、比較手法の実験結果を示す。シミュレーション上では、すべてのエリートエージェントが確実にゴールに到達できている。しかし、実環境では7割のエージェントが1度もゴールには到達できず、また、ゴール可能なエージェントでも、その到達率にばらつきがみられる。さらに、比較手法により獲得した行動では、時折壁に接近しすぎる、または衝突してしまうケースがみられた。これは、シミュレーション上での学習が、実機における外乱を吸収できていないことが原因である。

また、図10を見ると、提案手法では第4世代、および、第12世代で一旦ゴールに到達する個体が現れるが、その

後、その個体が消滅していることがわかる。これは、Criticの進化に伴い、世代毎にシミュレータとエージェントとが、互いに影響し合いながら進化をしているためである。

4.3 センサ応答の重み付加の影響について 前節の実験結果から、提案手法のCriticは、実環境とのセンサ応答の差異を吸収する進化を遂げていることが明らかになった。次に、その有効性をさらに評価するために、実センサが出す応答に擬似的に $\pm 10\%$ の重みをランダムに付加した場合について、同様の実験を行った。

提案手法の結果 表4に、提案手法を用いたエージェントの実機走行結果を示す。シミュレーション上でのゴール

図10 エリートエージェントの適応度の遷移

Fig. 10. Changes of the fitness of elite agent.

図11 Criticの適応度の遷移

Fig. 11. Changes of the fitness of the critic.

表4 提案手法におけるゴール到達率

Table 4. Task performance ratio using by the proposed method.

Trial	Simulation [%]	Real Env. [%]
1	100	94
2	100	90
3	100	90
4	100	82
5~10	0	0

表5 比較手法によるゴール到達率

Table 5. Task performance ratio using by the conventional method.

Trial	Simulation [%]	Real Env. [%]
1	100	80
2	100	0
3	100	32
4~10	100	0

ル到達可能エージェントは4割であるが、その4割のエージェントは実環境においても高いゴール到達率を実現できている。この結果から、シミュレータと実環境とで応答に違いがある場合にも、提案手法を用いることで高いタスク達成度を得られることが確認できる。

比較手法の結果 表5に、比較手法である表3の各エージェントを用いた実機走行結果を示す。これより、センサに動的な誤差が加わることにより、これまでゴール到達可能であったエージェントも、ゴール到達率が下がることがわかる。

以上の結果から、進化型シミュレータを用いた並列進化により、実環境に適応可能なエージェントの行動政策獲得が可能になることが明らかになった。

5. 行動統括機構

5.1 行動制御モデルの問題点 2.3節で述べたように、IWCは障害物回避や譲り合いなどの個別的知的な行動を起こす独立したサブシステム⁽¹¹⁾⁽¹²⁾による処理を統括するための行動統括機構を有している。

行動統括機構の一例として、従来の自律移動ロボットに多く用いられてきたSMPA (Sense-Model-Plan-Act) モデルがある。SMPAは、図12に示すように、「外界の情報をセンサで読み取る」→「それをもとに環境のモデルを作る」→「作成した環境モデルから行動計画を立案する」→「モータなどに制御信号を送る」→「振る舞いを起こす」という直列的な構造をしている。そのため、外界からの入力に対し行動を起こすまでに時間差が生じ、行動統括機構に求められる即応性の実現が困難である。さらに、新たな機能を追加する際に、今までの構成を考慮に入れた設計をする必要があり、容易に機能を追加することができないことも問題である。

5.2 SSAによる行動統括機構 これに対し、Brooksの提案したサブサンプリング・アーキテクチャ⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾は、並列的な構造を有しており、センサからの入力に対し行動を起こすまでに時間差が生じにくい。SSAは図13に示すように、行動のレベルによって分けられた複数のレイヤーからなる。高位のレイヤーに含まれる行動は低位のレイヤーに依存し、低位のレイヤーに含まれる行動を包摂できる。各動作モジュールは、外界からの情報を独立に受け取ることができ、条件を満たした動作モジュールのみが実行され

図12 SMPAによる一般的な行動決定モデル

Fig. 12. A conventional model using SMPA (Sense, Model, Plan, and Act) framework.

図 13 SSA による自律移動ロボットの行動モデル

Fig. 13. SSA (Subsumption Architecture) for autonomous robot.

図 14 SSA を用いて設計した IWC 行動統括機構

Fig. 14. The overall control implementation based on SSA.

る。SSA は外界からの入力に対し行動を起こすまでに時間差がほとんど生じないため、動的環境での使用に有効であると考えられる。さらに、以前の実装を変更することなく新たな機能を容易に追加することができる。

そこで、本研究では SSA による行動統括機構を構築する。SSA を表現する方法として拡張有限オートマトンを利用する。

実際に実装した SSA 構造を図 14 に示す。

- Level 0 control system はプリミティブな行動を含み、障害物回避などの最低限必要な行動を実装する。まずはじめに、このレイヤーを作ることによって車椅子に求められる安全性を実現する。
- Level 1 control system は定型行動等を含み、壁沿い行動などを実装する。Level 0 control system で障害物回避を実装していれば障害物回避を意識することなく壁沿い行動を実装できる。
- Level 2 control system はさらに高度な機能を含み、人の入力による行動や RFID タグによる室内への誘導行動を実装する。

5・3 シミュレーション実験 SSA を実装し、計算機上で前述のシミュレータによる実験を行った。まず、SSA により行動群を統括し知的車椅子の制御が可能であることを確認するための予備実験を行った。本実験では、自律、協調、協同行動の例として、下記のタスクが混合した行動シ

図 15 シミュレーション結果

Fig. 15. The result of simulation of the continuous switching behavior by SSA.

ナリオを想定した。

- 自律行動：障害物回避行動
- 協調行動：隘路での譲り合い
- 協同行動：RFID タグによる入室誘導

まず、お互いの IWC が壁沿い行動をし、障害物を回避しつつ隘路に入る。隘路で 2 台の IWC が対峙すると、協調行動である譲り合い行動が発動し譲り合いを開始する。その結果 1 台が後退し、もう 1 台が進み終わると後退していた IWC が前進を始め、壁沿い行動をしながら隘路を進む。隘路を通過し終わると、そのまま壁沿い行動を続けドアの前で RFID タグを認識することで入室行動を開始し、入室を完了する。

シミュレーションの結果、図 15 のように (1) 双方の IWC が壁沿い行動を開始、(2) 通路に置かれた障害物を回避、(3) 隘路にて協調行動開始、(4) 再び壁沿い行動、(5) RFID タグを認識しドア通過のための定型行動開始、という一連の所作がリアルタイムで実現できることが確かめられた。これらの結果より、SSA による行動統括機構の実装が有効に機能していることが確認できた。

5・4 実機実験 シミュレーション実験と同様の環境を用いて、実機での実験を試みた。本実験では、実際に RFID タグを配置せず、外部からトリガを与えることで RFID タ

図 16 実機実験結果

Fig. 16. The result of experiment of the continuous switching behavior by SSA in real environment.

グの読み取りを実行している。

実験の結果を図 16 に示す。これより、実機においてもシミュレーション実験の場合とほぼ同様の結果を得ることができ、SSA による行動統括機構は実機においても有効に

働くことが確認できた。

尚、この実験では、IWC の速度を約 0.4 km/h という低速に設定している。これは、搭乗者の乗り心地と安全性に配慮した設定であるが、実用上は、安全性と利便性を兼ね備えた、より早い走行性能が求められる。この点については、今回ハンドコーディングで実装した障害物回避行動などのサブシステムを、学習・進化的手法にて最適化することで、ある程度解決することが可能と考える。

6. む す び

知的車椅子試作機開発にあたり、現実の環境での利用を考えた場合に生じる課題を解決するための進化的シミュレータ及び知的行動の統括方法について述べた。提案した進化的シミュレータを用いることで、実環境とシミュレータ上の振る舞いの差異を解消し、実環境に適応した行動政策の効率的な獲得が可能になる。また、SSA による行動統括機構を導入することで、様々な環境で動的に振る舞いを切り替えることのできる柔軟性と、機能追加可能な柔軟性を併せ持つことができる。

進化的シミュレーション上の学習・進化の実験と、実機走行実験の結果、壁沿い行動から隘路での譲り合い、RFID タグによる入室行動と様々な機能を実現しながらの走行が可能になった。

今後は、実機実験におけるスピードアップ、ハンドコーディングによるモジュールを学習や進化によって得られた知的なモジュールへの変更、新たなモジュールの追加による性能向上などを考えている。

(平成 16 年 1 月 28 日受付, 平成 16 年 7 月 9 日再受付)

文 献

- (1) 平成 15 年版 高齢社会白書 : <http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2003/zenbun/indexz.html>
- (2) K. Kawato, T. Hamagami, S. Koakutsu, and H. Hirata: "Design for Obstacle Avoidance Module in Autonomous Behavior for Intelligent Wheelchair", Proc. Electrics, Information and Syst. Conf. IEE of Japan, pp.922-923 (2002-9) (in Japanese)
川戸康司・濱上知樹・小坪成一・平田廣則:「知的車椅子における自律走行のための障害物回避モジュールの設計」, 平 14 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.922-923 (2002-9)
- (3) K. Kawato, T. Hamagami, S. Koakutsu, and H. Hirata: "Action Control Mechanism of Intelligent Wheelchair with Subsumption Architecture", Proc. Electrics, Information and Syst. Conf. IEE of Japan, pp.965-968 (2003-8) (in Japanese)
川戸康司・濱上知樹・小坪成一・平田廣則:「サブサンプション・アーキテクチャによる知的車椅子の行動制御機構」, 平 15 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.974-977 (2003-8)
- (4) M. Imai, T. Hamagami, S. Koakutsu, and H. Hirata: "Evolutionary Approach of a Simulator for Intelligent Wheelchair with Parallel Operations in Actual Environment", Proc. Electrics, Information and Syst. Conf. IEE of Japan, pp.974-977 (2003-8) (in Japanese)
今井 誠・濱上知樹・小坪成一・平田廣則:「知的車椅子における実環境との並列動作によるシミュレータの進化的構築」, 平 15 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.974-977 (2003-8)
- (5) H. Abe, T. Hamagami, S. Koakutsu, and H. Hirata: "Autonomous Rolling Method of Intelligent Wheel Chair Using the Teaching and Q-learning",

IEEJ Trans. EIS, Vol.123-D, No.11, pp.1384-1385 (2003-11) (in Japanese)
阿部秀樹・濱上知樹・小坪成一・平田廣則：「ティーチングとQ学習を併用した知的車椅子の自律走行」, 電学論 D, 123, 11, pp.1384-1385 (2003-11)

- (6) T. Hamagami and H. Hirata: "State Space Composition Technique for Intelligent Wheel Chair Adapting to Environment", *IEEJ Trans. EIS*, Vol.123-D, No.10, pp.1118-1124 (2003-10) (in Japanese)
濱上知樹・平田廣則：「知的車椅子における環境適応のための状態空間の構成法」, 電学論 D, 123, 10, pp.1118-1124 (2003-10)
- (7) Y. Adachi, S. Nakanishi, Y. Kuno, N. Shimada, and Y. Shirai: "Intelligent Wheelchair Using Visual Information from the Human Face", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.17, No.3, pp.423-431 (1994) (in Japanese)
足立佳久・中西 知・久野義徳・島田伸敬・白井良明：「顔の視覚情報処理を用いた知的車椅子」, 日本ロボット学誌, 17, 4, pp.423-431 (1999-4)
- (8) S. Kotani, K. Nishikawa, and H. Mori: "Empirical learning in mobile robot navigation", *Journal of the Advanced Robotics*, Vol.12, No.4 pp.317-333 (1998-4)
- (9) Applied AI Systems, Inc.: <http://www.aai.ca/>
- (10) WACOGIKEN CO.,LTD.: <http://emu.wacogiken.co.jp/>
- (11) M. Yamada, T. Hamagami, S. Koakutsu, and H. Hirata: "Acquisition of Obstacle Avoidance Behavior of Intelligent Wheelchair by using Real-Coded Genetic Algorithm", *Proc. Electrics, Information and Syst. Conf. IEE of Japan*, pp.1020-1023 (2003-8) (in Japanese)
山田 学・濱上知樹・小坪成一・平田廣則：「実数値遺伝的アルゴリズムを用いた知的車椅子の障害物回避行動の獲得」, 平 15 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.1020-1023 (2003-8)
- (12) T. Osano, T. Hamagami, S. Koakutsu, and H. Hirata: "Acquisition of Cooperative Behavior of Intelligent Wheelchairs by using Genetic Programming and Frustration Cost", *Proc. Electrics, Information and Syst. Conf. IEE of Japan*, pp.1136-1139 (2003-8) (in Japanese)
小佐野智之・濱上知樹・小坪成一・平田廣則：「知的車椅子群の遺伝的プログラミングによるフラストレーションコストを用いた協調行動の獲得」, 平 15 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.1136-1139 (2003-8)
- (13) R.A. Brooks: "Intelligence Without Representation", *Artificial Intelligence Journal* (47), 1991, pp.139-159 (1991)
- (14) R.A. Brooks: "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.2, No.1, March (1986), pp.14-23; also MIT AI Memo 864, September (1985)
- (15) T. Yamaguchi, M. Masubuchi, Y. Tanaka, and M. Yachida: "Propagating Learned Behaviors from a Virtual Agent to a Physical Robot in Exploitation-Oriented Reinforcement Learning", *Journal of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, Vol.12, No.4, pp.570-581 (1997) (in Japanese)
山口智浩・増淵元臣・田中康祐・谷内田正彦：「経験型強化学習における仮想個体から実ロボットへの学習行動の伝播」, 人工知能学誌, 12, 4, pp.570-581 (1997)
- (16) 北野宏明 編：遺伝的アルゴリズム, 産業図書 (1993)
- (17) 佐藤宏明・山本智子・安田弘法 編著：群集生態学の現在, 京都大学学術出版会 (2001)
- (18) 伊庭斉志：進化論的計算の方法, 東京大学出版会 (1999)

今 井 誠 (学生員) 1979 年 9 月 19 日生。2002 年, 千葉大学工学部電子機械工学科卒業。2004 年, 千葉大学大学院自然科学研究科電子情報システム専攻博士前期 (修士) 修了。現在, JFE スチール株式会社勤務。

川 戸 康 司 (学生員) 1979 年 9 月 12 日生。2002 年, 千葉大学工学部電子機械工学科卒業。2004 年, 千葉大学大学院自然科学研究科電子情報システム専攻博士前期 (修士) 修了。現在, 松下電器産業 (株) 勤務。

濱 上 知 樹 (正員) 1966 年 3 月 7 日生。1988 年千葉大学工学部電気工学科卒業。セコム (株) 勤務を経て, 1999 年在職のまま千葉大学大学院自然科学研究科生産科学専攻後期課程修了。2001 年同助手。2004 年横浜国立大学大学院工学研究院助教授。分散知能システム, マルチエージェント, 強化学習, 福祉・医療支援等社会システムへの応用研究に従事。博士 (工学)。IEEE, 電子情報通信学会, 情報処理学会会員。

平 田 廣 則 (正員) 1948 年 6 月 2 日生。1976 年東京工業大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年千葉大学工学部助手, 1981 年同助教授, 1994 年同教授, 1997 年千葉大学大学院自然科学研究科教授となり現在に至る。大規模システムのモデリング, 解析と設計, 特に生態システム, 最適化, ならびに分散システムの基礎的理論に興味を持つ。2001 年電気学会業績賞受賞。工学博士。IEEE (Fellow), INNS, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 情報処理学会, システム制御情報学会, 人工知能学会会員。