

環境中の局所誘導情報に対する自律移動ロボットの 繰り返し搬送の作業効率評価†

倉林大輔*・小西克己**・浅間 一*

Evaluation of Efficiency of Distributed Map Management by Intelligent Data Carriers†

Daisuke KURABAYASHI*, Katsumi KONISHI** and Hajime ASAMA*

In this paper, we propose a quantitative evaluation algorithm of task execution by autonomous mobile robots. We have developed a device called "Intelligent Data Carrier (IDC)" which enables local communication and data storage in an environment. Based on simple Markov model, we propose a function to evaluate effect of layout of the IDCs which provide local map information to autonomous mobile robots. The proposed algorithm arranges a map of environment in which robots work to express robot motions driven by local map information. We realize actual experimental system of autonomous mobile robot by the IDC system. We verify effectiveness of the proposed algorithm by simulations and experiments.

Key Words: evaluation of emergent robot system, distributed map management, intelligent data carrier (IDC), autonomous mobile robot

1. 序 論

製造業へのロボット普及が進んだ今日、ロボット化が期待される作業は、工場のように整備された環境から、より一般的な環境でのものに移りつつある。とりわけ、人間の進入が好まれない、原子力施設内、災害現場、山林などにおける作業を自律的に達成するロボットシステムが期待されている。このために、より柔軟なロボットシステムを目指した研究が自律分散システム¹⁾、創発システム²⁾などを中心に行われてきた。

自律分散型移動ロボットに対して、現在最も具体的に期待されているのは、柔軟な物流システムを構築するための搬送作業である。既に、コンピュータ基盤生産工場における自律分散型搬送システムの適用^{3),4)}や、レーザー測距計とマーカーの組み合わせにより地図とのマッチングをとり、自律的に動作可能な自動搬送車の開発⁵⁾などが行われている。

しかし、工場を出て一般的な環境にロボットを適用する場合、その環境のモデルを生成する手間が大きな障壁となる。逆にいえば、詳細なモデルを用意しなくとも、自律的に最適

な動作手順を獲得する、柔軟な適応能力を有するロボットシステムが求められている。

これに対し、吉村らは、未知環境において、経路候補の抽出（環境の構造化）と、その上での分散型探索をフェーズに分け、自律的に行うロボットシステム⁶⁾を提案している。ここでは、複数のエージェントが分散的に行動を行うが、獲得された情報は集中的に管理するものとされている。しかし、自律ロボットの行動範囲が広がり、台数が増加すると、ロボット間の情報を集中管理することは困難となる。このため、アリのフェロモン経路⁷⁾に代表されるような、環境を介した、ローカルな情報管理が有効となると考えられる。この考え方に基づき、Drogoulらは搬送作業の自律的な効率向上アルゴリズム⁸⁾の構築を行った。新井らは、環境内に「都市」を配置し、これら間をランダムウォークにより行き来する自律エージェントからもたらされる、直前経由地の情報から、自律的に地図情報を構成する手法^{9),10)}の提案を行っている。

しかし、これらの研究においては、(i) 環境による局所的な誘導情報の管理が、作業効率に与える影響の定量的な評価、(ii) 環境内での局所的・分散的な情報管理手法の実現、が欠けていたため、具体的なロボットシステムへの適用が進んでいなかった。

本論文では、経路が交差する地点（以下「交差点」とよぶ）とそうでない地点が、自律移動ロボットの局所的なセンサのみで判別可能であるような、迷路状領域内での搬送作業をモデルとし、交差点における局所的な誘導情報管理が、繰り返し搬送作業の効率に与える影響を定量的に評価する手法を提

† 第11回自律分散システム・シンポジウムにて発表（1999・1）

* 理化学研究所 工学基盤研究部 和光市広沢 2-1

** 東京大学 工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

• RIKEN: The Institute of Physical and Chemical Research, Wako

** University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received March 25, 1999)

(Revised June 30, 1999)

ロボットに効率的な動作を行わせるためには、これら交差点における、目的地への最短方向を指示することが十分かつ有効である。具体的な情報管理装置として、著者らが開発した知的データキャリア (IDC) を想定し、ロボットに提供される分散誘導情報を以下のようにモデル化する。

- 誘導情報は、交差点に設置された IDC により管理される。IDC のない交差点では、ロボットが誘導情報を得ることはできない。
- 誘導情報は、ロボットが移動目標地点に最短経路で到達するための、交差点における進行方向のみを指示する。幾何情報、時系列情報などは提示しない。

ロボットが交差点で得られる誘導情報は、各交差点に固有のものとなる。

3. 局所誘導情報の付与に対する作業効率評価

ここでは、領域内の交差点において、提供された誘導情報により、自律移動ロボットによる繰り返し搬送作業の効率はどう向上するかを、定量的に評価する評価関数を与える。この評価はシステム全体を評価するものであり、全ての情報は既知とする。

具体的には、ロボットの動作環境をグラフで表し、ロボットが各ノードをランダムに動くことと仮定した条件の下で、ロボットが目的地に到達するのに必要なステップ数の期待値を評価とする関数を与える。この評価方法は、実際に数値計算することが可能で、IDC の配置による局所誘導情報の付与による作業効率を定量的に評価できる。

3.1 定式化

ロボットの作業領域はグラフで表されるものとする。ロボットは、1ステップ毎に隣接するいずれかのノードに移動する。次数3以上のノード、すなわち交差点において、ロボットはランダムに進行方向を選択する。ただし、そこに IDC が存在した場合、ロボットの目的地への方向を常に正しく指示するものとする。IDC が指示するのは、あくまでその交差点での進行方向のみとし、時系列情報の提示はしないものとする。

k ステップ経過後の各ノードにロボットが存在する確率を、状態ベクトル $x(k)$ で表し、

$$x(k) = [x_1(k) x_2(k) \cdots x_N(k)]^T \quad (1)$$

とする。ここで、 N は総ノード数、 $x_i(k)$ はロボットがノード i に存在する確率を表す。

ロボットが1ステップで他のノードに移る確率を状態遷移確率行列 A で表す。ここで

$$x(k+1) = Ax(k) \quad (2)$$

が成り立つものとし、単純マルコフ過程としてモデル化する。

IDC が存在するノードでは、IDC がロボットを目的地の方向へ正しく誘導するので、ロボットの動きは確率的ではなく一意に決まる。さらに、目的地によって IDC が誘導する

方向が異なるため、状態遷移確率行列は IDC の配置および目的地によって決まる。ここでは、IDC の配置が決められたとき、その配置による作業効率の評価を与えるのが目的であるため、状態遷移確率行列は目的地の数だけ必要となる。ここで、ロボットが i 番目の目的地を目指しているときの状態遷移確率行列を A_i と表す。

ロボットは目的地に到達することで任務が完了し、他のノードへ移動することはない。そこで、ノード i が目的地であるとき、状態遷移確率行列 A_i の i 列成分を全て0とする。連結なグラフ上であれば、ステップ数の正の極限では、ロボットの存在確率が0となる。

3.2 評価関数

IDC の配置に対する評価は、1台のロボットが目的地へ到達するのに必要なステップ数の期待値で行う。 i 番目の目的地に到達するのに必要なステップ数の期待値 E_i は次式のように表される。

$$\begin{aligned} E_i &= \sum_{k=1}^{\infty} c^T x(k) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} c^T A_i^k x(0) \\ &= c^T \sum_{k=1}^{\infty} A_i^k x(0) \end{aligned} \quad (3)$$

$$c = [11 \cdots 1]^T \quad (4)$$

ここで、 $x(0)$ はロボットの初期存在確率を表す。

$$x(0) = [0 \cdots 0 \frac{1}{M} 0 \cdots 0 \frac{1}{M} 0 \cdots 0]^T \quad (5)$$

とすることで、作業領域中の M 箇所の移動目標地点の間での繰り返し搬送作業を想定した評価が可能である。

繰り返し搬送作業などでは、ロボットが複数の目的地を持っている場合が考えられる。ここでは、全ての目的地の E_i の平均値をとることで、IDC の配置の評価とする。 E_i は無限級数であるが、 A_i が安定であることから、ジョルダン分解により計算可能である。

3.3 評価の適用

評価関数の決定においては、ロボットの動作を単純マルコフ過程としてモデル化した。このモデルをロボットの動作に直接適用すると、廊下のような真直ぐな経路であっても、複数のノードでモデル化されていた場合、ロボットはランダムに前進・後退を繰り返すものとして評価が行われる。しかし、このような無意味な動作は、現実のロボットでは考えにくい。そこで、評価を適用する際、2次のノードをはさむ辺を二重化し、お互い逆方向の遷移のみを許す有向グラフに変換する (Fig. 3)。これにより、3次以上のノード (交差点) でのみ方向を変更する挙動について、期待ステップ数を評価する。

4. 提案手法による作業効率評価

4.1 シミュレーションと評価関数の比較

提案した評価関数により、ロボットの挙動が評価可能であることを示すために、同一の条件に対してシミュレーションでの平均目標到達ステップ数と、算出された評価関数の値との比較を行った。ロボットは、2に示す領域で動作するものとした。領域内には、図中□で示される0番から3番まで4箇所の目的地を設定した。領域には、6箇所の交差点があり、それぞれの交差点にIDCを設置した場合設置しない場合の組み合わせについて、IDC総数で区分し評価を行った。ロボットは任意の場所から出発し、目的地の番号のみを与えられる。IDCが存在する交差点では、正確に目的地方向へ誘導されるが、そうでない交差点では、均等な確率で方向を選択する。一度目的地に到達すると、新たな目的地番号を与えられ、同様に動作する。ロボットを10,000ステップの間動作させ、目標地点到達に要したステップ数の平均値を算出した。

シミュレーション値および算出値の比較を Fig. 4 に示す。図において、横軸はIDC配置の組み合わせを便宜的に並べたものである。1個から6個までのIDC数全てにおいて、最適な配置が一致した。また、推定された期待ステップ数は、平均で計算値がシミュレーション値の91.7%、誤差の標準偏差(σ)は0.071であった。シミュレーション値と計算値の差異の原因については、シミュレーション中で用いられている乱数のばらつき、あるいはランダムに指示される移動目標点のばらつきなどが考えられる。

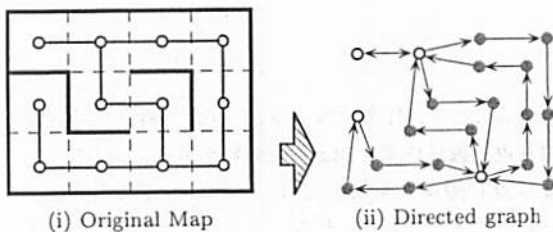


Fig. 3 Arrangement of a map

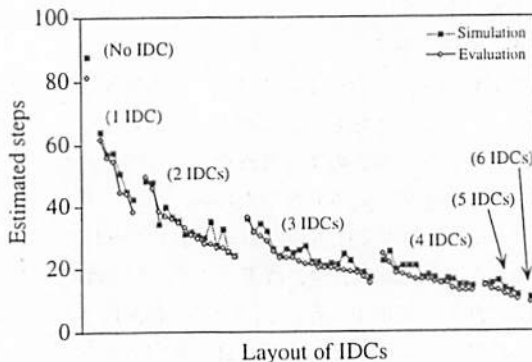


Fig. 4 Comparison of proposed method and simulations

4.2 検証実験

4.2.1 知的データキャリア “IDC”

著者らは、環境を介してローカルに情報を管理・蓄積可能とするデバイス、「知的データキャリア (Intelligent Data Carrier, IDC)」を開発した。IDCシステムは、環境に設置するIDCと、ロボットに搭載されるReader/Writerから構成される。このIDCシステムを利用することで、ロボットは通信資源に負担をかけることなく、環境や搬送物から情報を得たり、逆に書き残したりすることができる。特定の局所領域について、環境を介した情報伝達が可能となるため、集中管理形態のように情報の内容と空間の位置を管理する必要がなく、情報管理の簡便化を図ることが可能となる。

製作したIDCシステムを Fig. 5 に示す。個々のIDCは、CPUおよびメモリからなる情報処理部、通信部、電源を持つ。ロボットの処理系とReader/Writerはシリアル通信(RS-232C)により接続される。Reader/Writerはロボットからの指令に基づいてIDCと通信を行ない、IDCに対する情報の書き込み、IDC内の情報の読み出しを行なう。

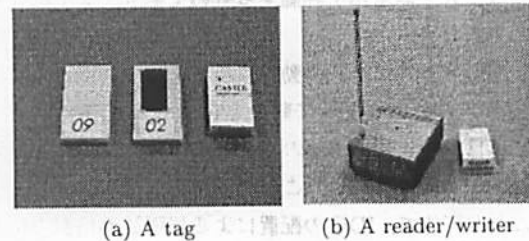


Fig. 5 The prototype of the IDC system

Reader/Writer と IDC 間の通信は、300, 320 [MHz] の無線により行なう。通信部は、通信距離が1.5[m]以下の範囲となるよう構成されている。このように通信距離を限定することによって、局所的な部分以外のロボット、IDCには影響を与えない局所的な情報管理を実現している。IDCシステムの諸元を Table 1 に示す。製作したIDCは、環境内に長時間設置することを想定し、メモリ量を抑えて消費電力を低減させた。消費電力は最大で約8[mA]で、2個のリチウム電池を内蔵し、約1ヶ月間の動作が可能である。

Table 1 Specifications of the IDC

Media	Electromagnetic wave
Frequency	300, 320 [MHz]
Memory	32 Bytes
Modulation	ON/OFF Key
Data rate	1200 [bps]
Power Source	LiON battery (3.6V)
Size (tag)	110 x 65 x 25 [mm]
(reader/writer)	195x130x50 [mm]

4.2.2 検証実験

本論文でのロボットの仮定が、ロボットシステムとして実現可能であり、提案手法が有効に機能することを示すため、

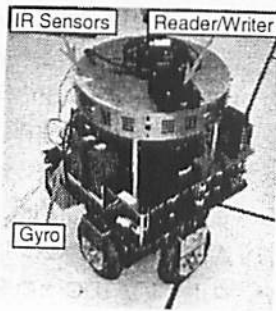


Fig. 6 The autonomous omni-directional robot

Table 2 Spec of the autonomous mobile robot

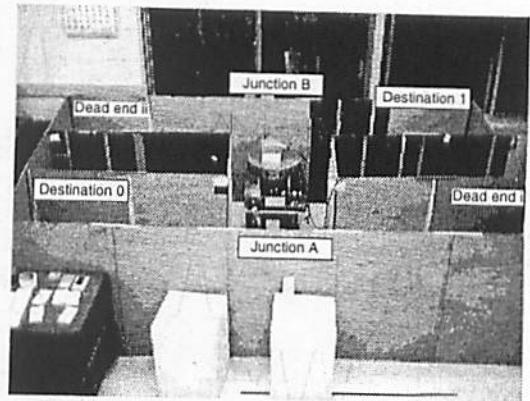
Robot size	0.42W, 0.42D, 0.70H [m]
CPU	Intel MMX Pentium 200MHz
Sensor	8 IR sensors, a gyro
Sensing range (IR)	0.3[m]
Running speed	0.04[m/s]
Batteries	12V 5Ah × 4

自律移動ロボットを用いた検証実験を行った。実験に用いたロボットを Fig. 6 に示す。移動ロボットは、理化学研究所で開発された、全方向移動機構を有する自律移動ロボット¹¹⁾である (Table 2)。CPU に MMX Pentium 200MHz を搭載し、16MBytes のメモリを有する。ISA バスを介して各種 I/O ボードを接続している。ロボット上部には、円周上に 8 つの赤外線センサ¹³⁾が装備されている。電源として、12V5Ah の鉛蓄電池を 4 個搭載している。ロボットは、リアルタイム OS である VxWorks により、スタンドアロンで制御されるが、無線 Ethernet を介して、ホストコンピュータによるモニタリングが可能である。ロボットの大きさは、幅 0.42[m]、長さ 0.42[m]、高さ 0.7[m] である。

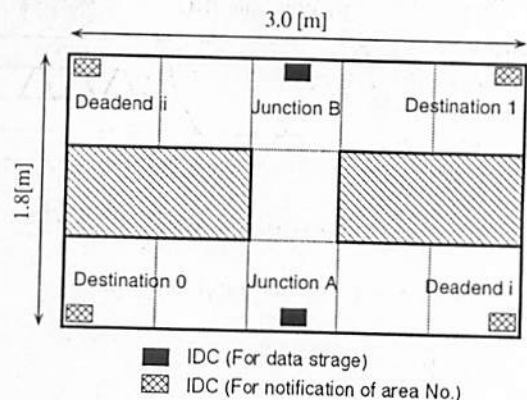
ロボットにはジャイロが搭載されており、自分の向きを知ることが可能となっている。この「向き」を基準として、IDC 内に蓄積された誘導情報が指し示す進行方向が、実環境におけるどの通路を意味しているのかを判別する。

実験環境は、Fig. 7 に示すように、壁で囲まれた 3.0[m] × 1.8[m] の領域であり、2箇所の交差点が存在する。ロボットは、側部の赤外線センサを用い、反射的な動作によって常時壁面に沿うように走行する。壁面と相対的な位置関係を保つことで、走行誤差の蓄積や、壁の歪みによる壁面への衝突を解消している。また、正面のセンサにより行き止まりを、両側面のセンサにより交差点を検出している。本実験では、通路幅が 0.60[m] と、ロボット幅 (0.42[m]) にとって狭いため、衝突防止の点から、ロボットの走行速度を 0.04[m/s] と設定した。

この環境において、2箇所の交差点に IDC を設置した場合、1箇所 (交差点 A) にのみ IDC を設置した場合、IDC を設置しなかった場合について、ロボットを動作させた場合の目標到達数を比較した。なお、設定した目的地付近にも IDC を設置し、ロボットに対してそこが何番の目的地である



(a) Photograph of the experimental environment



(b) Model of the experimental environment

Fig. 7 The map for the experiments

かを提示する。ロボットは、40 ステップ分の動作を 1 回とし、初期位置を交差点 A、交差点 B、目的地 1 の 3 種に設定し、目的地到達に要した平均ステップ数により比較を行った。ロボットは、初期状態ではまず目標点 0 を目指して移動する。ロボットは、合計 120 ステップ、約 1 時間動作を行った。

ロボットの動作の様子を、ダイアグラム状に表したものを Fig. 8 に示す。本実験では、目的地は 2 箇所のみなので、ロボットはこの 2 点間を往復する動作を繰り返す。Fig. 8 において、◎で示されているのは、ロボットが与えられた目的地に到達したことを示している。また、Fig. 9 に、実験と同一の環境に適用した提案評価手法、シミュレーションおよび実験における、目的地到達に要した平均ステップ数の比較を示す。

Fig. 8 のデータは、交差点 A を初期位置として、40 ステップ分の動作を行った結果を表したものである。交差点 A, B 双方に IDC が設置され、誘導情報が与えられた場合 (a) では、ロボットは最短距離で 2 つの目標地点間を移動している。一方、IDC が設置されていない (c) では、ロボットの交差点での動作は乱数に委ねられるため、40 ステップ中に 3 回しか目標地点に到達することができなかった。交差点 A にのみ IDC が配置された (b) では、ロボットが Dead End i に進入することはなくなるため、(c) に比べて作業効率の向上を図ることが可能となっている。

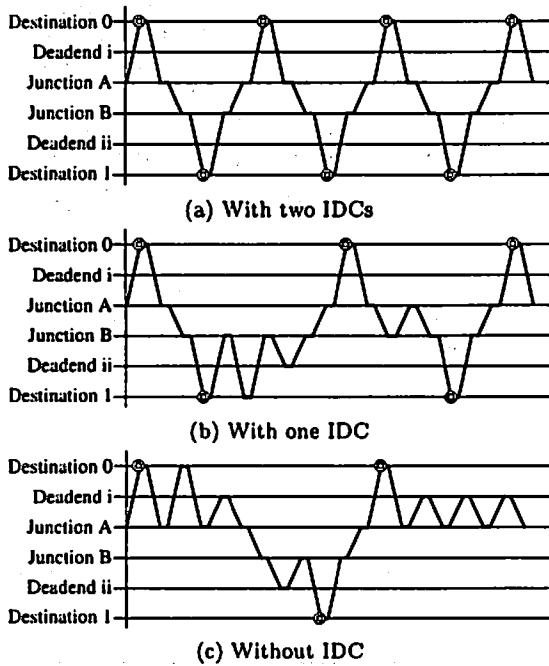


Fig. 8 Comparison of transition of the robot

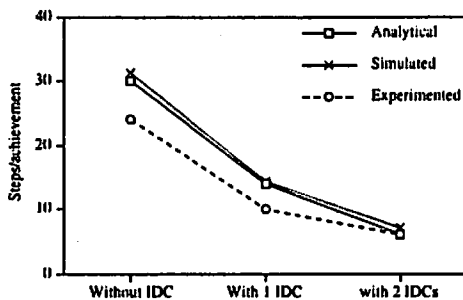


Fig. 9 Averaged steps to achieve a destination

Fig. 9の比較では、評価関数とシミュレーションはほぼ一致しているが、実験での結果は、A,B両方にIDCが設置された場合を基準として、評価関数による評価値を約0.8倍した形となっている。これは、評価関数が無限級数を算出し、シミュレーションが10,000ステップの間の平均を取っているのに対し、実験では時間的な制約から、120ステップでの平均をとっているためであると考えられる。とりわけ、交差点Aを出発点とした例では、他の初期位置に比べて最初に目標点0に到達する可能性が高くなる。これは、乱数の要素が全くない、A,B両方にIDCが設置された場合の結果では、評価関数と実験結果がよく一致していることから考察される。最高効率の評価値が一致していること、Fig. 9のグラフ形状は一致していることから、局所誘導情報の付与における作業効率の定量評価手法として、提案した評価関数は有効であるといえる。

4.3 誘導情報自律獲得システムの提案手法による評価

本節では、これまでに構築した評価手法を用いて、著者らが従来研究において構築した、IDCを用いた誘導情報の自律

獲得を行うロボットシステム¹⁴⁾の評価を行った例を示す。

著者らが提案している誘導情報の自律獲得を行うロボットシステムは、本論文で取りあげたモデル上の繰り返し搬送作業において、IDCを利用して誘導情報を自律的に獲得し、作業効率を向上させる。その動作の概要は次の通りである。

ある交差点に設置されたIDCは、Fig. 10に示す構造でIDC内に誘導情報を蓄積する。初期状態では、IDCには何も記録されていない。ロボットがIDCとの交信範囲内に進入すると、その進入方向と、ロボットが直前に到達した目標点の番号を記録する。その際、直前に到達した目標点から、このIDCと交信するまでに要したステップ時間を併せて記録する。すでに、同一の方向に、その目標点の情報がある場合は、所要ステップ時間を比較し、すでに記録されているデータより短い場合のみ、ステップ時間記録を置き換える。Fig. 4の例では、W(西)方向から、目標点2番からステップ時間19でやってきたロボット、目標点1番からステップ時間8でやってきたロボットがいた、という記録を表している。この記録に応じて進行方向を確率的に選択することで、ロボットは誘導情報を得ることができる。

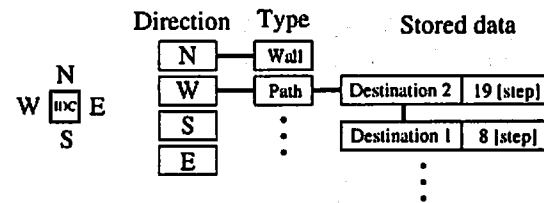


Fig. 10 Data structure in an IDC

この手法により、Fig. 2と同一の環境において、5000ステップの間ロボットを動作させた場合の、IDC配置に対する目的地到達の平均ステップ数と、本論文での評価手法との比較をFig. 11に示す。この結果より、著者らのIDCを用いた誘導情報の自律獲得を行うロボットシステムは、IDC内に全く誘導情報がない初期状態から動作を開始して、理想的に局所誘導情報が整備された場合の平均1.28倍(標準偏差 $\sigma = 0.173$)の所要ステップ数で作業を行うことができた、と定量的に評価を与えることができる。

5. 結 論

本論文では、自律移動ロボットによる繰り返し搬送作業において、分散型の局所誘導情報が作業効率に与える影響を、定量的に評価する手法を実現した。また、環境を介してローカルに情報を管理・蓄積可能とするデバイス、「知的データキャリア(Intelligent Data Carrier, IDC)」を具体的に開発し、自律移動ロボットへの実装を可能とした。自律移動ロボットによる繰り返し搬送作業に対し、IDCを適用し、シミュレーションおよび検証実験を通じて、提案評価手法の有効性を示すとともに、局所誘導情報による自律移動ロボットシステムを実現した。

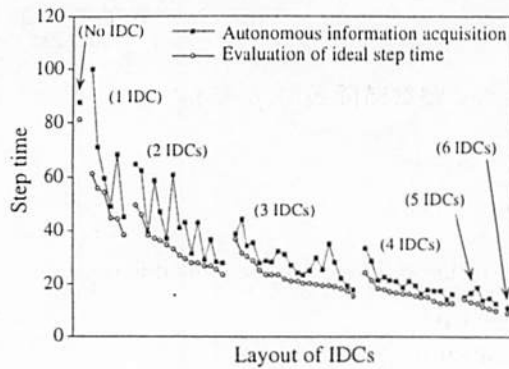


Fig. 11 Evaluation of the algorithm to acquire navigation information by autonomous agents

参考文献

- 1) 自律分散システム, 文部省科学研究費補助金重点領域研究報告書 (1994)
- 2) 創発的機能形成のシステム理論, 文部省科学研究費補助金重点領域研究報告書 (1999)
- 3) 及川, ほか: 自律分散型搬送システムの実用化 (第3報), 工程側エージェントの分散化, 第16回日本ロボット学会学術講演会, 365/366 (1998)
- 4) 鎌田, ほか: 自律分散型搬送システムの実用化 (第4報), ビヘビオベースト AGV のアーキテクチャー, 第16回日本ロボット学会学術講演会, 363/364 (1998)
- 5) 村田機械株式会社: レーザー誘導方式無人搬送車 (カタログ) (1997)
- 6) 吉村, ほか: 群ロボットによる多数物体の繰り返し搬送計画, 日本ロボット学会誌, 16-4, 499/507 (1998)
- 7) J. L. Deneubourg: Collective Intelligence in Natural and Artificial Systems, Distributed Autonomous Robotic Systems 2, 12/13 (1996)
- 8) A. Drogoul and J. Feber: From Tom Thumb to the Dockers: Some Experiments with Foraging Robots, From Animals to Animats 2, 451/459 (1992)
- 9) 新井, ほか: 自律分散型移動ロボット用環境情報システムの構築, 第10回日本ロボット学会学術講演会, 279/280 (1992)
- 10) 新井, ほか: 移動ロボット用分散地図の生成と利用, 1992年精密工学会秋季大会, 967/968 (1992)
- 11) 浅間, ほか: 3自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 14-2, 249/254 (1996)
- 12) Y. Arai, et al.: Robot Collision Avoidance in Multi-Robot Systems - Implementation onto Real Robots -, Distributed Autonomous Robotic Systems 3, 23/33 (1998)
- 13) Y. Arai, et al.: Adaptive Behavior Acquisition of Collision Avoidance among Multiple Autonomous Mobile Robots, Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1762/1767 (1997)
- 14) 倉林, ほか: 群ロボットのための知的データキャリアの開発 (第5報) - IDC を用いた自律移動ロボット間の協調行動 -, 第10回自律分散システム・シンポジウム, 343/347 (1998)

[著者紹介]

倉林 大輔 (正会員)



1970年9月15日生。98年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。同年より、理化学研究所基礎科学特別研究員。マルチエージェント・ロボットシステムの協調作業の研究に従事。博士(工学)。精密工学会、IEEE等の会員。

小西 克己 (正会員)



1974年3月26日生。98年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了(計数工学専攻)。同年博士後期課程進学。大域的最適化、数理計画法による制御系設計などの研究に従事。

浅間 一 (正会員)



1959年1月18日生。84年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。86年理化学研究所化学工学研究室研究員補, 生化学システム研究室研究員, 前任研究員を経て, 現在工学基盤研究部副主任研究員。99年埼玉大学大学院理工学研究科客員助教授。自律分散型ロボットシステム, 複数移動ロボットの協調, 群知能, ロボットによる保全技術, バイオプロセスの知能化技術の開発に従事。95年日本機械学会ロボメック賞, 96年日本機械学会ロボメカ講演会 Best Poster 賞, RoboCup-98 Japan Open 人工知能学会賞 (UTTORI United Team) 等受賞。工学博士。IEEE, ニューヨーク科学アカデミー, 日本機械学会, 精密工学会などの会員。