

## 動的迷路における観測と経路探索手法

北村泰彦 鈴東 智\* 辰巳昭治  
大阪市立大学大学院工学研究科  
kitamura@info.eng.osaka-cu.ac.jp

**あらまし** WWW 情報源はそれぞれが自律分散的に管理され、不定期に更新が行われるので、WWW 情報源を利用した問題解決はその問題空間が変化する動的な問題解決とみなすことができる。動的な問題解決はエージェントの問題空間の観測と探索が繰り返し行われることにより実行される。本論文では、動的な問題解決を動的迷路の経路探索問題として定式化を行い、観測対象決定と解導出手法の提案を行う。提案方式は問題空間の変化の速度に応じて適切な解導出ができることを示す

## Observation and Path Finding Method for Solving Dynamic Maze

Yasuhiko Kitamura, Satoshi Suzuhigashi, and Shoji Tatsumi  
Graduate School of Engineering, Osaka City University

**Abstract** Since WWW information sources are managed in an autonomous and distributed manner, data updates in the sources are performed asynchronously. When we consider a problem solving task that involves WWW information sources, it can be regarded as a dynamic problem solving in which the problem space is dynamically changing in the course of finding solutions. A dynamic problem can be solved by an agent that interleaves finding solution paths with observing the problem space. In this paper, we formalize a dynamic problem solving as a path finding process in a dynamic maze and propose a method for observing the problem space and finding solution paths. Our method shows good performance according to the changing speed of problem space.

### 1 はじめに

今日、インターネットは社会に急速に普及しており、中でも WWW (World Wide Web) は、個人やグループの情報発信、研究教育、電子商取引など様々な目的のために利用されている。WWW 情報源はそれぞれが自律分散的に管理されているため、不定期かつ非同期に更新が行われる。そこで WWW 情報源を利用した問題解決を考えた場合、問題空間が変化する動的な問題解決と見なすことができる。

問題解決の手法として様々な探索アルゴリズムが考案されているが、その多くは静的な問題を扱ったものである。近年では、自律ロボットなどの分野で実時間におけるプランニングや意思決定に興味が集まり、実時間探索 [2, 3, 4] という手法が目立っている。実時間探索では定数時間の先読み探索を行い、その結果得られた判断により行動を決定する。つまり動的な問題を定数

時間に限り、変化しない静的な問題と捉える事で探索を行う。

本研究では、一定時間、問題を固定するのではなく、確率を用いて問題空間を予測しながら探索を行う手法により動的な問題解決を試みる。問題空間の状態を全て調べてから解くのでは、発見した解が問題空間の変化により利用できなくなっている恐れがある。そこで観測対象となる状態の決定が重要となるため、過去の観測結果の新鮮さを表す信頼度、解の重要度を表す期待値を用いて観測対象を決定する。

問題解決とは、問題空間を有向グラフで表現するとき、初期状態を表す節点から目標状態を表す節点に至る経路を発見することである。そこで本研究では、動的な状態空間グラフとして、状態が変化する迷路、即ち動的迷路を定義し、観測対象決定と解導出手法の提案し、その評価を行う。

\* 現在は NTT ドコモ関西

## 2 動的迷路

動的問題とは、時間の経過とともに問題空間が変化する問題のことであり、頻繁に更新されるインターネット上の WWW 情報源を用いて行われる問題解決はその一例である[1]。本論文では、動的問題を動的迷路として以下のように定義する。

- $X \times Y$  サイズの格子状迷路である。
- 障害物は座標単位で存在する。
- 障害物があればその座標には移動できない。
- 隣り合う座標間の移動コストは全て 1 である。
- 迷路内の障害物の割合は決まっている。
- 障害物は不定期に発生、消滅を繰り返す。

動的迷路では、障害物を避けながらスタート座標からゴール座標までの経路を求めることが問題となる。

### 2.1 解

スタート座標を(0,0)、ゴール座標を(2,2)とする図 1 の迷路では、

経路 $A_1$ : (0,0)→(0,1)→(1,1)→(2,1)→(2,2)

経路 $A_2$ : (0,0)→(0,1)→(0,2)→(0,3)→(1,3)→(2,3)→(2,2)

経路 $A_3$ : (0,0)→(0,1)→(0,2)→(1,2)→(2,2)

はいずれもスタート座標とゴール座標を結ぶ経路である。 $A_1$ 、 $A_2$ のように経路上に障害物が無いとき、それは解となる。しかし、 $A_3$ のように一つでも障害物の存在する経路は解とはならない。また  $A_1$ 、 $A_2$  を比較すると、 $A_1$ の方が  $A_2$  よりも距離が短く良い解といえる。解の中で最も距離が短い解を最適解と呼ぶ。

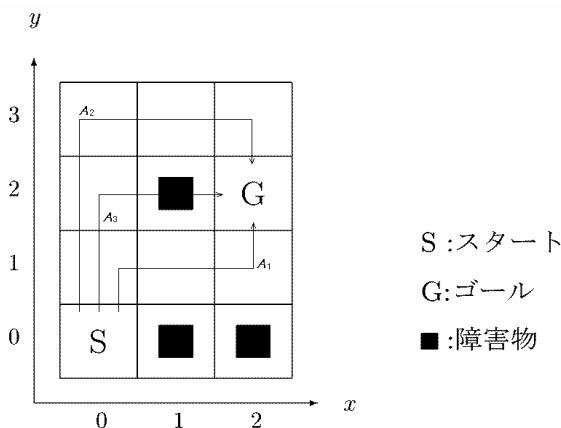


図 1 解の例

### 2.2 エージェントの持つ情報

動的迷路において解探索を行うエージェントを以下のように定義する。

- (1) 目的はスタート座標からゴール座標までの経路を発見することである。
- (2) 座標の観測には一定時間がかかる。
- (3) 一度に一つの座標についてしか観測できない。
- (4) 一度調べた障害物の有無に関する情報は記憶（キャッシュ）できる。
- (5) 迷路について、サイズ、迷路内を占める障害物の割合、障害物の存在時間の確率分布を予め知っている。

## 3 観測対象決定と解導出

動的迷路においてエージェントが観測すべき座標を決定し、解を導出する手法について述べる。

### 3.1 定義

#### 3.1.1 事実の信頼度

事実の信頼度とは、エージェントが観測し、キャッシュした事実（障害物の有無）がどのくらい正しいものであると信頼できるかを確率で表したものである。キャッシュされた情報は、キャッシュした直後は完全に信頼でき、キャッシュされてから時間が経てば経つほど信頼できないものになっていく。事実の信頼度を導出する関数の特徴として、

- キャッシュしてからの時間に依存する。
- 経過時間  $t=0$  のとき 1 となる。
- $t$  が増加すると単調に減少し 0 に収束していく。

が挙げられる。また、信頼度は変化の激しいものを対象としてキャッシュするならば急速に 0 に収束し、殆ど変わらないものが対象であれば収束は非常に緩やかになる。

動的迷路では、障害物の存在時間は正規乱数により決定されることをエージェントは知っており、平均値  $\mu$ 、標準偏差  $\sigma$  はエージェントに与えられるものとしているので、正規乱数の確率密度関数を用いて信頼度導出関数を定義する。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

上式に示す確率密度関数  $f(t)$  は生成されてから  $t$  時間後に消滅する障害物の分布を表している。障害物が生成された後、 $t_1$  時間後にもその障害物が存在している確率を  $F(t_1)$  とすると

$$F(t_1) = 1 - \int_0^{t_1} f(t) dt$$

となる。障害物の存在時間が負の値になる事はない。

つまり  $\int_{-\infty}^0 f(f) dt = 0$  なので

$$\begin{aligned} F(t_1) &= 1 - \int_{-\infty}^{t_1} f(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^0 f(t) dt - \int_{-\infty}^{t_1} f(t) dt \\ &= \int_{t_1}^{\infty} f(t) dt \end{aligned}$$

となる。次に、時刻  $t_2$  における事実をキャッシュしたという確率は上式より

$$\frac{F(t_2)}{\int_{-\infty}^{\infty} F(t) dt}$$

と表される。障害物の生成後、どれだけ時間経過してから観測がなされるかは等確率である。しかし時刻  $t_2$  の時点ではキャッシュする対象が  $F(t_2)$  しか残っていないことになり式が導かれる。

時刻  $t_2$  にキャッシュした事実が、 $T$  時間 ( $T \geq t_2$ ) 後にも正しい確率は

$$\frac{F(t_2 + T)}{F(t_2)}$$

である。信頼度はある事実について、

(時刻  $t$  にキャッシュされた確率) ×  
(かつそれが  $T$  時間後にも正しい確率)

を全ての時刻  $t$  について積分すればよいので、  
となり、事実の信頼度は経過時間  $T$  の関数となる。

$$\begin{aligned} \text{事実 } f \text{ の信頼度: } r(f) &= \int_0^{\infty} \left\{ \frac{F(t)}{\int_{-\infty}^{\infty} F(t) dt} \times \frac{F(t+T)}{F(t)} \right\} dt \\ &= \frac{\int_0^{\infty} F(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} F(t) dt} \end{aligned}$$

### 3.1.2 利用可能確率

ある一つの座標に関してキャッシュされた事実  $f$  に基づき、その座標に障害物がなく移動することが可能な確率を利用可能確率  $e(f)$  とする。迷路内における障害物の割合を  $O_b$  とすると以下のように定義できる。

#### $f$ について何もキャッシュされていない時

エージェントは  $f$  については何の情報も有していない。つまり迷路内での障害物のない割合  $e(f) = 1 - O_b$  が利用可能確率となる。

#### $f$ が利用可能とキャッシュされている時

利用可能確率は何もキャッシュされていない時よりも高くなるはずである。キャッシュからの経過時間が 0 で信頼度  $r(f)$  の値が 1 の場合、障害物がないという事実は間違いなく正しいので利用可能確率は 1 となる。

$$\begin{aligned} e(f) &= (1 - O_b) - (1 - O_b) \times r(f) \\ &= (1 - O_b) \times (1 - r(f)) \end{aligned}$$

逆に、キャッシュから十分に時間が経過していると  $r(f)$  は 0 となり、キャッシュされていない場合と同じなので利用可能確率の値は  $1 - O_b$  となる。よって  $e(f) = (1 - O_b) + O_b \times r(f)$  となる。

#### $f$ が利用不可とキャッシュされている時

利用可能の時と同様で、事実がキャッシュされた直後には  $e(f)$  の値は 0 になり、時間が経過すると  $1 - O_b$  に収束する。よって

### 3.1.3 静的な質

静的な質とは変化する事実に依存しない解の質を表す。0 ~ 1 の間に正規化したものを用い、1 のときが最良解であり、0 の時が最悪解である。

動的迷路では、スタート座標とゴール座標、障害物の割合についての知識をエージェントが有しているので、経路の距離を考えることにより静的な質が得られる。ある解候補となる経路  $A$  に対して

$$\text{静的な質: } Q_s(A) = 1 - \frac{\langle \text{経路上で通る座標の数} \rangle}{\langle \text{座標の総数} \rangle} - \langle \text{障害物の数} \rangle$$

と定義できる。経路の移動距離 (経路上で通る座標の数) が少ないほど、質が良いと考えられ  $Q_s(A)$  の値は高くなる。移動距離が 0 である解は最良解とみなせるので  $Q_s(A)$  の値は 1 になり、全ての障害物のない座標を通過していくような経路は最悪解となるため  $Q_s(A)$  の値は 0 になる。

### 3.1.4 解の期待値

解がどれだけ有用で、かつ利用できるものであるかを期待値として表す。解を  $A$ 、その解で利用する事実を  $f_1, f_2, \dots, f_n$  としたとき、解  $A$  の期待値は以下のように表される。

$$\text{期待値: } E(A) = Q_s(A) \times e(f_1) \times e(f_2) \times \dots \times e(f_n)$$

静的な質が良く、解全体の利用可能確率が高いほど期待値は高くなる。エージェントが提示解を決定する時には期待値を用いることとする。

### 3.1.5 解の信頼度

キャッシュした内容から求めた解がどれだけ信頼できるかを表す解の信頼度を以下のように定義し、観測対象解の決定に利用する。解を  $A$ 、その解で利用する事実を  $f_1, f_2, \dots, f_n$  としたとき、

$$\begin{aligned} \text{解の信頼度: } R(A) &= \min_{f \in A} r(f) \\ &= \min \{r(f_1), r(f_2), \dots, r(f_n)\} \end{aligned}$$

つまり、利用した動的な事実の信頼度のうちで最小のものを信頼度とする。

### 3.1.6 観測スコア

観測は、期待値が高く、かつ信頼度が低い解から行うべきである。そこで解  $A$  を観測の対象とすべきかどうかを表す観測スコアは以下のように定義される。

$$\text{観測スコア: } S(A) = E(A) \times (1 - R(A))$$

## 3.2 観測対象決定手法

観測スコアの高い解が優先して観測されるので、ノード毎に観測スコアを導出し、その値の大きいものから展開していく。探索の方法は  $A(A^*)$  アルゴリズムに準拠する。観測対象となる経路を探索により求め、その経路の中で利用可能確率が最小の事実について観測を行う。例えば、ある解  $A$  に用いる事実  $f_1, f_2, f_3$  の利用可能確率がそれぞれ

$$e(f_1) = 0.50, e(f_2) = 1.00, e(f_3) = 0.90$$

であるときには、 $f_1$  が観測の対象となる。

## 3.3 解導出手法

提示すべき解は質が良く、かつ利用できるものである。そこで提示解の候補の決定は期待値を評価値とした探索により行う。これには観測対象の決定と同様、 $A(A^*)$  アルゴリズムを利用した。

キャッシュを用いた探索では、必ず解が導出されるが、障害物の配置によっては正しい解が存在しない場合がある。また、提示解の候補となる経路について観測が不十分であったとき、その解が正しいのかその時点で判断できない。このような場合は解を提示すべきではない。そこで、提示解の候補となった解の利用可能確率を求め、0.5 以上であればその解を提示し、そうでなければ提示できる解が無いと返す。

解に利用する事実を  $f_1, f_2, \dots, f_n$  としたとき、解の利用可能な確率は以下のようにして得られる。

$$e(f_1) \times e(f_2) \times \dots \times e(f_n)$$

## 3.4 アルゴリズムの実行例

図 2 に示すように、 $(0,0)$  をスタート座標  $S$ 、 $(2,2)$  をゴール座標  $G$ 、当初、障害物が  $(1,0)$ 、 $(1,1)$  にある  $3 \times 4$  の迷路を例として用いる。

まず、何も観測されていない状況でオープンリストにある  $S$  が展開され、 $(0,1)$  と  $(1,0)$  が得られたとしよう。ここで座標  $(1,0)$  を経由する解の観測スコア導出について説明する。

スタート座標から  $(1,0)$  までの移動距離が 1、 $(1,0)$  からゴール座標までのマンハッタン距離が 3、障害物のある座標の(推定)数が 2 であるので、その経路の静的な質は

$$\begin{aligned} Q_s(n_{(1,0)}) &= 1 - \frac{(1+3)}{(12-2)} \\ &= 0.6 \end{aligned}$$

となる。

次にその経路上の各座標の利用可能確率であるが、スタート座標から  $(1,0)$  を経由してゴール座標に至る経路の長さは 5 と推定される。 $(0,0)$  に関しては障害物が存在しないが、他の座標については、障害物が存在するという事実はまだ観測されていないとする。その場合、経路の利用可能確率は  $1 \cdot (1 - O_b)^4 = (5/6)^4$  となる。期待値は

$$\begin{aligned} E(n_{(1,0)}) &= Q_s(n_{(1,0)}) \times (5/6)^4 \\ &= 0.6 \times (5/6)^4 \\ &= 0.289 \end{aligned}$$

となる。

信頼度  $R$  については、観測されていない座標が存在するので 0 である。したがって観測スコアは以上より

$$\begin{aligned} S(n_{(1,0)}) &= E(n_{(1,0)}) \times (1 - R(n_{(1,0)})) \\ &= 0.6 \times (5/6)^4 \times (1 - 0) \\ &= 0.289 \end{aligned}$$

となる。

その後、提示経路を得るまでの観測を行う。まず図 2 に示される  $A_1$  の経路が選択される。何もキャッシュされていない状況では最短経路(移動距離が 4)の期待値は全て同じであるので、ここで  $A_1$  の経路が選択されることに特別な意味はない。 $A_1$  が観測対象経路となり、 $(1,0)$  が調べられる(どの座標についても利用可能確率が等しいときにはスタート座標に近い座標の観測を行うものとする)。そして  $(1,0)$  に障害物がないという事実がキャッシュされる。次の探索でも  $A_1$  が選択さ

れ、(1,0)が調べられて(1,0)に障害物があるという事実がキャッシュされる。

経路  $A_1$  に障害物があると観測されたので、次に経路  $A_2$  が選択され、(0,1)が調べられる。ここで(0,1)に障害物が無いという事実がキャッシュされる。次の探索でも  $A_2$  が選択され、(1,1)が調べられて、障害物があるという事実がキャッシュされる。

次からの探索では  $A_1$ 、 $A_2$  の経路が利用できないので経路  $A_3$  が選択される。そして順に(0,2)、(1,2)、(2,2)に障害物が無いという事実がキャッシュされる。

これまでの観測により  $A_3$  上の座標が全て利用可能であり、かつ質の良い解とわかったため、 $A_3$  という確かな解が提示されるようになる。

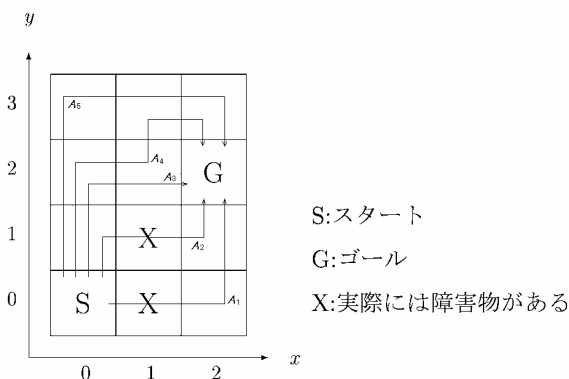


図2 観測対象となる経路

これ以後の観測は障害物の変化の速さによって変わってくる。

#### 変化の速い時

観測間隔時間と比べて障害物の変化するスピードが速いときには経路  $A_3$  の信頼度が小さな値となるため、観測すべき経路として選択され続ける。信頼度  $R=0$  とすると観測スコアは

$$\begin{aligned} S &= E \times (1 - R) \\ &= E \times (1 - 0) \\ &= E \end{aligned}$$

となり、 $A_3$  の再観測が行われる。

#### 変化の速い時

障害物の変化が遅いときには経路  $A_3$  の信頼度は1に近い値となる。信頼度  $R=1$  とすると観測スコアは

$$\begin{aligned} S &= E \times (1 - R) \\ &= E \times (1 - 1) \\ &= 0 \end{aligned}$$

となり、再観測は不必要になる。そこで観測範囲が拡大されることになり、オープンリストに残っている他のノードが取り出されて探索が進められる。この場合

では、 $A_4$  の経路が選択され(1,3)、(2,3)について順に観測される。その後、 $A_5$  の経路が新たな観測の対象となり観測が進んでいく。

経路  $A_3$  発見後の観測は以上のように行われるが、変化率によっては  $A_4$ 、 $A_5$  と観測対象が変わっていく途中で  $A_3$  の信頼度が下がり、そちらの再観測に移る場合もある。

## 4 実験

### 4.1 実験方法

動的迷路を用いたシミュレーションを行い、FIFO方式、S=E方式と提案方式との比較を行った。なお、迷路内の障害物の割合を20%とし、(0,0)をスタート座標、その対角の位置にある座標をゴール座標とした。**FIFO(first in first out)方式** 最も古い事実から観測を行う方式。キャッシュしてからの経過時間のみを考慮するので観測スコアは以下のように計算する。

$$S_{FIFO}(A) = 1 - R(A)$$

**S=E方式** 最も重要なものから観測を行う方式。提示解において重要となる要素は期待値であるので観測スコアは以下ようになる。

$$S_E = E$$

**S=E × (1 - R)提案方式** 解の期待値と信頼度をともに考慮する方式。障害物の変化が速い場合にはすでに得られている解の再観測を行い、遅い場合には他の経路を探索する。

観測結果によるキャッシュを用いて提示解を導出し、その提示解についての評価を行う。評価基準としては

- **成功率**：提示解が正しい解である割合
- **最適率**：提示解がその時点での最適解である割合

を用いた。

ひとつの動的迷路に対して1万回の観測をし、解提示を行う。これを5つの動的迷路に対して行う。

### 4.2 変化の速さによる違い

変化の速さを表すものとして変化率を用いる。変化率は一観測時間の間に障害物が移動する確率とする。障害物の存在時間の平均を  $\mu$ 、観測にかかる時間を  $t$  としたとき、

$$\text{変化率} = \frac{t}{2\mu}$$

と定義する。

仮に問題空間を与える情報源の平均更新時間が全て1日であるとすれば、約6.94秒に一度観測を行う場合に変化率は1.0E-4となる。

### 4.3 実験結果

図3に8×8の動的迷路における成功率、図4に同動的迷路における最適率のグラフを示す。

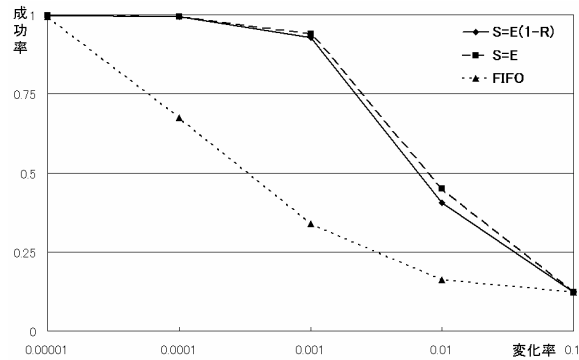


図3 8×8の動的迷路における成功率

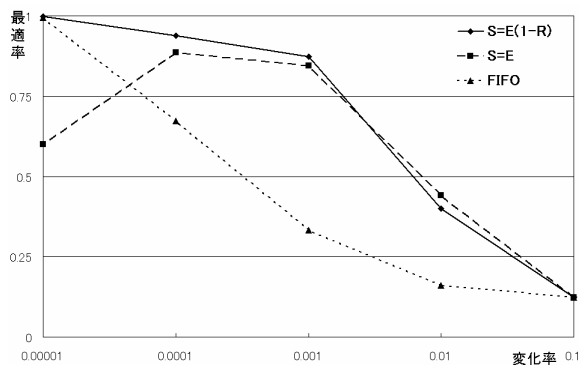


図4 8×8の動的迷路における最適率

#### FIFO方式

- 変化率が高いとすぐに提示解の精度が落ちる  
全ての事実を取得している間に迷路が変わっており、誤った解を提示しやすくなっている
- 最適率と成功率が一致している  
多くの事実を集めた中から解提示を行うので解が正しいときには最適となる

#### S=E方式

- 変化率が高くても精度は比較的悪くならない  
提示解が観測対象となり、その再観測を行うので誤った解を提示する可能性が低くなる
- 最適率と成功率に差が見られる  
発見解の再観測に従事するため、迷路の変化によってもっと良い解が存在するようになっていたとしてもそちらを探すような観測を行わないので正しい解を得られるが質が悪くなりやすい

**S=E×(1-R)提案方式** 成功率ではS=Eとしたときと比べ劣ってはいるが、比較的近い結果を得ている。最適率では、3方式の中で最も良い結果といえる。これは発見解が信頼できるときに、別の解を探すような観測を行うため、FIFO方式のように成功率と最適率に大きな差を生じさせないものと考えられる。

変化率が0.1まで増加すると3方式とも同じ値に収束している。これはどの方式も変化に全く対応できず、解提示を行えないからである。

### 5 おわりに

本研究では動的迷路問題の解決のため、迷路のどの座標の状態を調べるかという観測対象の決定に注目し、信頼度、期待値を用いることで観測対象の決定を行った。提案方式の特性として、FIFO方式に比べて変化の増大に対応した経路探索を行うことができ、またS=E方式に比べて変化の遅い場合でも最適解を得られることが分かった。

WWW情報源を問題空間とする問題解決として、複数のWWW情報源を組み合わせる事で情報の利用価値を高めるというWWW情報統合等が考えられる。WWW情報統合等で大量のユーザを想定した場合、通信路負荷が大きな問題となるように思われる。効率的な観測を行う意義は単に動的変化に対応するのみでなく、不必要な観測を行わないことに繋げる事ができ、通信路負荷対策にも利用できる可能性があるように思われる。

今後の課題として、信頼度、期待値以外の効率良い観測を決定するための要素の導入、またシミュレーションではなくWWW情報統合等、実在するWWW情報源を熱かった問題解決への応用が必要である。

### 文献

- [1] 北村泰彦, 野田知哉, 辰巳昭治, 動的情報メディアのための知的情報収集手法, 電子情報通信学会論文誌 D-I, J84-D-I(8):1256-1265, 2001.
- [2] 北村泰彦, 寺西憲一, 辰巳昭治, “マルチエージェント実時間探索における組織化とその評価,” 人工知能学会誌, 11(3):470-477, 1996.
- [3] R.E. Korf, “Real-time-heuristic search,” Artificial Intelligence, 42(2-3):189-211, 1990.
- [4] Toru Ishida, “Real-Time Bidirectional Search: Coordinated Problem Solving in Uncertain Situations,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 18(6):617-628, 1996.