移動と観測と地図の不確かさを考慮したロボットの
最適行動プランニング*神原利彦^{*1}, 三浦 純^{*2}, 白井良明^{*3}
林 朗^{*1}, 李 仕 剛^{*4}A Method of Planning Movement and Observation for a Mobile Robot
Considering Uncertainties of Movement, Visual Sensing, and a MapToshihiko KANBARA, Jun MIURA, Yoshiaki SHIRAI,
Akira HAYASHI and Shigang LI

We present a method of route selection for a vision guided mobile robot with an odometry system when the map uncertainty is given. The robot first generates candidate routes, which are expanded to possible loci in consideration of the map uncertainty. It then makes an observation and movement plan along each locus and computes the minimum traveling time. Uncertainties of movement and visual sensing are considered in this step. Finally, for each candidate route, the robot computes its expected traveling time from the traveling times along the possible loci and their probabilities. It selects the route with the least expected traveling time as the optimal route. The advantage of the planning method is that the observation and movement planning is incorporated in path planning to obtain the optimal plan. The three sources of uncertainty are considered in a unified manner in our method. The method has been implemented and tested to validate our claim.

Key Words: Computer Control, Moving Robot, Image Processing, Reasoning, Path Planning, Observation Planning, Stochastic Map, Uncertainty

1 はじめに

近年, 内界センサや外界センサを搭載し, 地図を参照して実環境で自律的に行動するロボットの開発が多くの分野で進められている。これらのほとんどは研究段階のものであり, 実用化に至ってはいない。その原因のひとつに不確かさがあげられる。内界センサでロボットが意図した場所へ移動したことを確認しても, 実際にはずれが発生している。このずれ(移動の不確かさ)は内界センサと駆動系の誤差による。このずれを外界センサで観測して検出し, 補正するよう操縦するのだが, 外界センサ自体にも計測誤差(観測の不確かさ)がある。また, 地図も正確とは限らず, 実際の環境との間にずれ(地図の不確かさ)がある。環境中の物体が多少動いたとしても, 衝突せずに最短時間で到達できるように計画するために

は, 地図と移動と観測の不確かさのいずれも無視できないので, それらを考慮に入れる。

本研究では, オフィス内のような二次元平面環境上を移動するロボットが椅子や机といった物体を視覚(単眼)で認識し, 最短時間で目的地へ到達する問題を考える。物体のおおよその配置を記述した地図を基にして, ロボットはどの物体の間を移動し, どこで視覚を使い, 何を観測すればよいのかを計画する。ただし, 本論文では扱う物体を多角柱で近似する。

最短時間で目的地へ到達する研究の多く^(1,2)は地図を正確として, 経路の長さが最短になるように生成している。山本ら⁽³⁾は, 経路に追従させるための制御入力を考慮に入れて, 最短時間で到達できるように経路を計画した。だが, これらの研究では移動の不確かさを考慮に入れていない。Rosaら⁽⁴⁾は, 移動の不確かさを考慮に入れて経路を生成した。だが, 観測の不確かさが考慮されておらず, 衝突の可能性もある。また, 上記4つの研究では, 生成した経路を使ってどのような観測と移動を行うのかを決定せずに, 移動の時間のみを考慮して経路を生成している。

与えられた経路上のどこで何を観測するかを計画する手法は, ロボットの定位の研究で提案されている。外界

* 1997年3月29日 第74期通常総会講演会において講演, 原稿受付 1998年3月23日。

^{*1} 正員, 広島市立大学情報科学部 (〒731-3194 広島市安佐南区大塚東3-4-1)。

^{*2} 大阪大学工学部 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)。

^{*3} 正員, 大阪大学工学部。

^{*4} 広島市立大学情報科学部。

E-mail: kanbara@im.hiroshima-cu.ac.jp

センサによる観測結果にカルマンフィルタを適用してロボットの不確かさを減らす手法が多い。Curran⁽⁵⁾らの研究では、最も近くの壁面までの距離を超音波センサで観測し、不確かさを減らしている。Betkeら⁽⁶⁾らも、全方位型の外界センサを用いて近くの対象物のみを観測の対象として不確かさを減らしている。これらの研究の目的は不確かさを減少させて、経路に追従させることであるが、観測の対象物を近くのものに限定している。小森谷ら⁽⁷⁾は、遠くのものも観測の候補としているが、地図を正確としている。また、上記3つの研究では、与えられた経路を進むものとしており、その経路を目的に応じて評価していない。

本論文では、経路は地図の中のどの物体とどの物体の間を通るかを順番に記述したものであり、軌道はロボットの代表点を通る道筋のことを指す。まず与えられた地図から目的地に至る複数の経路の候補を生成する。経路は、視覚にかかる時間や移動、観測、地図の不確かさを考慮して物体の配置に応じた複数の軌道の集合とその確率分布へと展開される。次に、それぞれの軌道について、移動と観測の不確かさ、および視覚にかかる時間を考慮して、衝突せずに最短時間で目的地へ到達できるように移動と観測の計画を立て、その時間を求める。最後に、それぞれの軌道について求めた最短到達時間を基に、すべての経路候補について、到達時間の期待値を求め、期待値が最小の経路を最適経路として選択する。

以下、第2章でロボットの不確かさと地図の不確かさの扱い方を述べ、経路と軌道の生成手法を第3章で述べる。生成した軌道上で観測行動と移動行動を計画する手法を第4章で述べ、到達時間の期待値を求めて経路を選択する手法を第5章で述べる。第6章でシミュレーション結果を述べ、結論を第7章で述べる。

2 ロボットの不確かさと地図の不確かさ

2.1 ロボットの不確かさ

ロボット全体を包み込む外接円を考え、その中心をロボットの代表点とし、円半径を r_R とする。世界座標系における二次元平面上での、代表点の座標値を (X_R, Y_R) 、ロボットのY軸に対する向きを θ_R とし、これらをロボットの状態ベクトル $S_R = [X_R, Y_R, \theta_R]^T$ で表す。本研究では、ロボットの不確かさを S_R の正規分布で表し、その共分散行列 $\mathbf{\Lambda}_R$ は不確かさの大きさを表す。

2.2 視覚フィードバック制御

視覚と内界センサを併用して、与えられた軌道に沿って移動する。視覚での処理時間 t_p が長いので、その間は内界センサで極短時間 t_c 毎に計測し、軌道に沿うよう

に操縦する。この観測と移動での不確かさの変化を表したのが図1である。不確かさを図のような誤差楕円⁽⁸⁾に変換して示す。これは状態 S_R の不確かさを表す正規分布の周辺分布(2次元)から求まる等確率曲線であり、その径は主軸方向の標準偏差の3倍である。この誤差楕円の境界線内のみにロボットがあるとみなす。

Fig. 1 Updating the error ellipse after movement and observation

図1の $e1$ の大きさから移動と共に大きくなりB点では $e2$ になる。B点に到達した時にA点での処理結果により $e3$ が求められる。これとB地点に至るまでに記録した内界センサの履歴とで $e4$ を求め、現在地での不確かさとする。以降、同様の処理を繰り返す。このように、視覚と内界センサから現在の状態と不確かさをオンラインで推定し、軌道に沿うようにフィードバック制御する手法はノンストップ走行^(9, 10)として知られている。なお、画像を取り込んでから次の画像を取り込むまでに行う一連の処理を、ここでは画像処理サイクルと呼ぶ。

視覚にかかる処理時間 t_p は、対象となる画像の複雑さに依存せず一定であるとする。従って、1画像処理サイクルでの移動距離(例えば図1のAB間距離)は移動速度 V のみに依存する。ロボットの向きの不確かさが大きくなり過ぎないように、最高速度 V_{max} を決める。すなわち、カメラの画角よりも向きの不確かさを小さくすることによって、対象物を観測可能にし、なおかつ軌道の接線方向との角度も一定以内に保つ。

2.3 地図の不確かさ

地図に物体配置を記述する。 n_o 個の物体のうち j 番目の物体の世界座標における重心の座標値を (X_j, Y_j) 、向きを θ_j とし、それらを順番に並べた状態ベクトル $\mathbf{M} = [X_1, Y_1, \theta_1, \dots, X_{n_o}, Y_{n_o}, \theta_{n_o}]^T$ で配置を表す。不確かな地図として、 $\mathbf{M}$ の確率密度関数 $p(\mathbf{M})$ が与えられる。本研究では、 $3n_o$ 次元の正規分布を部分的に用いたものを $p(\mathbf{M})$ とする。これは標準偏差の3倍以上の偏差において零とした分布を確率密度関数として正規化したものである。零以外となる $\mathbf{M}$ の範囲を物体の不確かさの範囲とする。

3 経路と軌道の生成

3.1 経路の生成手法

経路とは、どの物体と物体の間を通るかを定性的に記述したものである。まず物体の配置を平均 $\overline{M}$ とし、この配置の一般化ボロノイ図⁽¹¹⁾を生成する。このボロノイ図の各要素は近くの物体2つから等距離だけ離れた場所を表す直線あるいは放物線から構成される(図2参照)。同じ2物体から構成され、かつ隣接している要素を連結してセグメント(図2(b)の破線で囲ったもの)を生成する。各セグメントを節点とし、セグメントのつながりを辺とするグラフ(図2(b)参照)を生成する。

出発地(目的地)を示すセグメントは、出発地(目的地)から最も近い要素を含むセグメントとする。図2(a)では、S7が出発地を示す節点、S5が目的地を示す節点となる。S7とS5の間に結ぶことのできる節点の系列をすべて生成することで経路を複数生成する。これらの経路は、出発点から目的地までに通り返ける物体の列を記述したものである。この経路と物体のトポロジーは配置 $\overline{M}$ の小さな変動に依存しない。

(a)Voronoi diagram (b)Graph
Fig. 2 Method of generating routes

上述の直線や放物線を生成する際に得られる、最も近い物体への距離が、ロボットの径 r_R (2.1節参照)よりも小さい場合には、ロボットが通り抜けることはできないので、その直線や放物線を含む経路は候補からはずす。同様に、配置 $\overline{M}$ が平均 $\overline{M}$ から不確かさの範囲(2.3節参照)内で変動した場合についても、上述の直線や放物線を調べ、ロボットが通れるかどうかを判断し、通れないものを含む経路は候補からはずす。このようにして生成した経路を $R^{(i)}(i = 1, 2, \dots, n_r)$ で表す。

3.2 安全幅の定義

1 画像処理サイクルに最高速度 V_{max} で移動した場合に、軌道に対し垂直な方向の不確かさ H がどれだけ増えるかを予測し、その上限を定める。この H の上限を用いて軌道を生成する。

直線軌道に沿って移動する場合を考える。軌道延長上にある距離 L_{max} の点を観測しながら移動する(図3参

照)。 L_{max} は、観測可能な対象物までの距離の最大値であり、地図に記述された物体の配置状況から求める。

Fig. 3 Derivation of the safety width H_{max}

図1に示したように、画像処理サイクルでは移動による不確かさの増大と観測による不確かさの減少があり、 L_{max} だけ離れた観測点を毎回観測することで、軌道に対し垂直な方向の不確かさ H が一定の定常状態になる。その H だけ離れた位置では、ロボットが軌道からはずれる向きになっているので、軌道へ戻す向きへと向けるように回転すると一旦外側へ膨らむ。定常状態での一定の不確かさ H に、この膨らんだ部分を加えて安全幅 H_{max} とする。

軌道の左右両側に安全幅とロボットの半径の和 $H_{max} + r_R$ 以上の自由空間があれば、1 画像処理サイクルに最高速度 V_{max} で移動したとしても、衝突しないとみなす。すべての物体を r_R だけ膨張させて得られる領域(図4の淡色領域)と誤差楕円で衝突の判断をする。ロボットの代表点は誤差楕円内のどこかに存在するので、誤差楕円と膨張させた物体領域が交われば衝突したとみなす。

3.3 軌道の生成手法

同一の経路であっても、物体配置 $\overline{M}$ が異なれば軌道も変わる。それぞれの配置に対し、軌道を以下の手順で生成する

Fig. 4 An example of enlarged regions and generated locus

- (1) 経路を構成する各セグメントは、対応する2つの物体から等距離にある場所で生成される。その距離が安全幅とロボット径の和 $H_{max} + r_R$ より小さくなる部分区間のみを軌道の一部として、最初に決定する。この区間では最高速度で進むと衝突する危険性があるので、危険領域区間と呼ぶ。
- (2) 図4に破線で示したような、物体を安全幅とロボット径の和 $H_{max} + r_R$ だけ膨らませた領域を考え、この内部に入らないという拘束の下で軌道の長さが最小になるように、出発地点から(1)で決めた危

危険領域区間の開始点までの軌道を生成する。同様の拘束の下で、二つの危険領域区間の間の軌道や最後の危険領域区間の終了点から目的地点までの軌道を順次生成する。

危険領域区間以外を自由空間区間と呼ぶ。この区間では最高速度で進んでも衝突を考慮する必要はない。図4の例では手順(1)により経路を構成する各セグメントの中から図のA,B,Cの部分区間が一つのまとまった危険領域区間と決まる。手順(2)により区間Dが決まる。この区間は物体を安全幅とロボット径の和 $H_{max} + r_R$ だけ膨らませた領域の境界線上を一部通って軌道の長さを最小にしている。同様に区間Eが決まる。

4 行動プランニング

4.1 プランニング戦略

到達時間を最小化するために、衝突せずに進むことができ、なおかつそれ以降の移動に問題がないように、各画像処理サイクルで移動する量を最大にする。そのためには、移動前の不確かさを可能な限り小さくする。ただし、ノンストップ走行のため、画像処理の結果が出て不確かさが減るまでに、時間 t_p だけのずれがある。以上のことを考慮してオフラインで計画する戦略を以下のようにとめる。

- (1) 前サイクルでの観測の処理結果が得られるものとして、その結果で前サイクルでの出発点の位置の不確かさを小さくする。その不確かさに前サイクルで計画した移動がなされたとして、移動の不確かさを加え、現サイクルの出発点での不確かさとする。
- (2) (1) で求めた現サイクルの不確かさに、観測結果を合わせれば不確かさを最小にできるように現サイクルでの観測対象物を計画する(観測行動)。
- (3) 同じく(1)で求めた不確かさを基に、移動させたとして衝突しないだけでなく不確かさの範囲内のどこにいたとしても次回以降のサイクルで衝突せずに軌道へ復帰できるように、現サイクルでの移動量を計画する(移動行動)。

行動プランニングとは、このように、観測行動の系列と軌道に沿った移動行動の系列を計画することである。なお、観測行動の結果得られる観測値は、厳密には誤差楕円内のどこから観測を行うかによって異なってくる。これをあらかじめプランニング時点で知ることにはできないので、誤差楕円の中心から観測して得られるであろう観測値を用いる。

4.2 観測の計画

軌道生成時に自由空間区間と危険領域区間を区別した。それぞれでの観測の対象物の決め方を述べる。

4.2.1 自由空間区間での観測対象物の選択

観測対象を垂直エッジセグメント(以下、エッジセグメントのことをエッジと略す)に限定し、観測可能な垂直エッジの中から観測したとして得られる不確かさ(誤差楕円の面積)を最小にできるエッジを選択する。なお、手前の物体に隠されて観測できないものや、首振りの機能(左右90度まで)を使っても画面でとらえることのできない対象物は候補から除外する。

Fig. 5 Edge selection for observation in a free space zone

図5(a)に示したような、4つの物体の環境の例を考える。ロボットから観測できる垂直エッジ9つを観測の候補として、図5(b)に、それらの候補ひとつひとつを観測したとして得られる不確かさを内側の楕円で示す。外側の楕円は観測前の不確かさである。

多くの場合は、近くのエッジを観測した方が観測の不確かさが小さいので、近くのエッジが選ばれるが、図5の例では、ロボットから最も遠い1番のエッジが選ばれた。観測前の位置と向きの不確かさの間に相関があるからである。これを図6を用いて以下に詳しく述べる。

図6の楕円中心(B点)にロボットがあり、分布内のA, B, C点での観測前の向きの不確かさの分布中心を矢印で表す。位置と向きの不確かさには相関があるので、位置によってこの分布中心は異なる。B点では水平右向き、A点では水平よりやや下向き、C点では水平よりやや上向きの分布中心を持つとする。

ここで垂直エッジDを観測すると、ロボットの正面方向とエッジの存在する方向とのなす角度(時計回りを正)が観測値 θ として得られる。図6の淡色の扇形領域が観測の不確かさの範囲を表すものとする。A, B, Cのいずれの位置においても観測値 θ が得られるので、位置

Fig. 6 A case of little uncertainty reduction by observing a near edge

誤差をあまり減らすことはできない。一方、遠くのエッジ E を観測して観測値 θ を得た場合は、A 点や C 点では観測の不確かさの外に出るので、A 点や C 点にいる確率が減少し、位置誤差は小さくなる。

4.2.2 危険領域区間での観測対象物の選択

危険領域区間に入っている場合および画像処理サイクルの間に危険領域区間に突入する場合は、垂直エッジもしくは地面に接した水平エッジを、衝突の可能性のある 2 つの物体のそれぞれから 1 本ずつ選び、それら 2 本のエッジが一画面内におさまるように観測する。観測可能なエッジの組み合わせをすべて考え、その中で観測したとして得られる不確かさを最小にできるものを選ぶ。

ロボットが図 7(a) に示した 2 つの物体のなす危険領域区間にいる例を考える。垂直エッジ (1 番と 3 番) を黒丸で、水平エッジを太い実線 (2 番と 4 番) で表す。1, 3

Fig. 7 Edge pair selection for observation in dangerous zones

番のエッジと、1, 4 番のエッジを観測した場合の画面を図 8 に示す。残り 2 つの観測の画面は省略する。

(a) Edge 1 and 3 (b) Edge 1 and 4
Fig. 8 Edge pairs for observation

この例では、4 通りの可能な組み合わせの中から 1, 4 番

のエッジの組み合わせが選ばれた。垂直エッジを 1 本を観測した場合と異なり、2 本組み合わせると、大きく不確かさを減らすことができ、減少させた不確かさを表す内側の誤差楕円は線のように細長いものになる。

4.3 移動量の計画

ある画像処理サイクルで、衝突を避けることができ、なおかつ誤差楕円内のどこにいても、次以降のサイクルで前進して衝突を避けることのできるような移動量を決める。以下に示したように誤差楕円内全部を調べるのではなく、代表点のみを調べるようにする。

計画の手法としては、軌道に沿って移動する量を少しずつ短くし、その度に代表点から衝突せずに軌道へ復帰できるかどうかを調べる。ある移動量まで短くして初めて軌道へ復帰できるとわかった場合に、その移動量だけ進むように移動の計画を決める。

Fig. 9 Recovery from the worst location

図 9 に示したように、楕円の長軸 (あるいは短軸) の端点で、物体に衝突する可能性の最も高い点を最悪の位置とし、そこで最も確率の高い向きを調べる。その向きを図 9 の実線の矢印で示す。図のように軌道からはずれる方向を向いているのであれば、最悪の位置から不確かさ零で出発し最小旋回半径で旋回し (破線の矢印)、軌道に復帰させて、その復帰途中で増大する誤差楕円が物体の膨張領域 (3.2 節参照) と交わらなければ復帰可能であると判断する。この最悪の位置から軌道への復帰が可能であれば、楕円内のすべての場所からの復帰が可能であるとみなす。図 9 の例では、e1 の位置までは進めないが、e2 の位置へは進むことができる。

4.4 到達時間の算出

固定された配置 M における経路 $R^{(i)}$ に対し、上述の手法により観測の計画の系列と移動の計画の系列を生成することができる。それらの系列に記された画像処理サイクルの回数 q と、最後の移動にかかる時間 $t_f^{(i)}(M)$ を用いて、到達時間 $T^{(i)}(M)$ を次式で計算する。

$$T^{(i)}(M) = t_p(q-1) + t_f^{(i)}(M) \quad (1)$$

5 到達時間の期待値を用いた経路選択

5.1 期待値を用いた経路の評価

物体配置が M である場合に経路 $R^{(i)}$ を通って目的地へと到達する時間 $T^{(i)}(M)$ は式 (1) で求められる。状態ベクトル M を構成する n_o 個の物体のうち、経路 $R^{(i)}$ の軌道の変動に関わる物体の状態のみを記した $3n_i (\leq 3n_o)$ 次元の部分状態ベクトル $M^{(i)}$ を構成する。その生起確率 $p(M^{(i)})$ は $p(M)$ の周辺分布から求める。これらを用いて、到達時間の期待値を次式で表す。

$$E[T^{(i)}] = \int T^{(i)}(M^{(i)}) \cdot p(M^{(i)}) dM^{(i)} \quad (2)$$

すべての経路 $R^{(i)} (i = 1, 2, \dots, n_r)$ に対し到達時間の期待値 $E[T^{(i)}]$ を求め、最も期待値の小さい経路を選ぶ。なお、式 (2) の積分は解析的には求まらないので、有限な s 通りの配置で連続関数 $p(M^{(i)})$ を離散化して、 $M_j^{(i)}$ ($j = 1, 2, \dots, s$) の生起確率を $p_d(M_j^{(i)})$ として式 (3) で近似する。この離散化の度合 s は、計算量と精度を考慮して決める。

$$E[T^{(i)}] \approx \sum_{j=1}^s T^{(i)}(M_j^{(i)}) \cdot p_d(M_j^{(i)}) \quad (3)$$

5.2 期待値を用いる必要性

配置の平均 $\bar{M}$ が同じであっても、配置の不確かさが異なれば到達時間の期待値が異なることを、例を用いて以下に示す。

Fig. 10 A problem to reach a goal through a gap

図 10 に示したように、直線軌道を通り 2 つの物体 (濃色領域) の間を通り抜けて目的地へ到達する問題を考える。簡単化のために、膨張領域 (淡色領域) の間隔 d が変動しても軌道が不変であるようにこれら 2 つの物体配置を変動させる。また、図のように目的地の向こう側に複数の観測対象物があり、間隔 d は安全幅 H_{max} よりも小さい範囲内で変動させて、危険領域区間とし、その前後の区間は自由空間区間である。このような条件の下での間隔 d と到達時間との関係を図 11 に示す。この計算では、最高速度 V_{max} を 500[mm/sec]、軌道長さを 6[m] とし、安全幅 H_{max} を 322[mm] とした。

間隔 d が狭い場合には物体に隠されて見えなかった垂直エッジが、 d が大きくなるにつれて観測可能になり、

不確かさを大きく減らせて移動できる距離も増える。そのため、到達時間が急激に減少する領域がある。

Fig. 11 Traveling time

間隔が d である確率密度関数 $p(d)$ は、平均 $\bar{d}$ を中心として正負の両方向に標準偏差の 3 倍の部分区間で正規分布の値を持ち、それ以外の区間では零になる関数 $p_g(d)$ を、積分値が 1 になるように正規化したものを用いる。この $p(d)$ と図 11 に示す到達時間とで求めた到達時間の期待値を図 12 に示す。この図より、 $p(d)$ の分散が異なれば、到達時間の期待値も異なり、間隔 d によっては大小が逆転する場合があることがわかる。したがって、平均の間隔が同じであっても不確かさが異なる場合に、どの経路を選ばよいかは、実際に期待値を計算しなければわからない。

Fig. 12 Expected traveling time

5.3 サブゴール設定による計算量の減少

経路 $R^{(i)}$ の到達時間の期待値 $E[T^{(i)}]$ は式 (3) で求められる。状態ベクトル $M^{(i)}$ は $3n_i$ 次元のベクトルで、 n_i が増加するにつれて離散化の度合い s は急激に増大する。例えば、1 次元あたり n_u 通りに離散化すると、 $s = n_u^{3n_i}$ 通りである。

この計算量を減少させるために、危険領域を抜けるごとにサブゴールを設置して、一つの経路を複数のサブゴール毎に分断する。この時に、 n_i 個の物体のいずれもが、ひとつのサブゴール間区間のみに関わるようにすることで、各サブゴール間区間を独立に扱う。1-1 番目と 1 番目のサブゴール間での到達時間を $T_1^{(i)}(M^{(i)})$ で表し、合計で $f-1$ 個のサブゴールを設置する。そして、その区間での軌道の変動に関わる m_i 個の物体のみの状態を表した $3m_i$ 次元の部分状態ベクトルを $M^{(i,l)}$ とし、 $M^{(i)}$ の代わりに用いる。このベクトルは s_l 通りに離散化される。例えば、 s と同様に一次元あたり n_u 通りに離散化すれば $s_l = n_u^{3m_i}$ である。生起確率 $p_d(M_k^{(i,l)}) (k = 1, 2, \dots, s_l)$

は、周辺分布 $p(M^{(i,l)})$ を離散化して求める。これらを用いて、式 (3) は以下のように書ける。

$$E[T^{(i)}] = \sum_{l=1}^f \left(\sum_{k=1}^{s_l} T_l^{(i)}(M_k^{(i,l)}) \cdot p_d(M_k^{(i,l)}) \right) \quad (4)$$

この式によって、総和を求めるのに必要な計算回数は $n_u^{3n_i}$ 回から $\sum_{l=1}^f n_u^{3m_l}$ 回になる。前述の独立性より $n_i = \sum_{l=1}^f m_l$ の関係があり、 f は 2 以上なので次式が成り立ち、計算量は必ず減少する。

$$n_u^{3n_i} = n_u^{\left(\sum_{l=1}^f 3m_l\right)} = \prod_{l=1}^f n_u^{3m_l} \gg \sum_{l=1}^f n_u^{3m_l}$$

$T_l^{(i)}(M_k^{(i,l)})$ を求めた後に、次の $T_{l+1}^{(i)}(M_k^{(i,l+1)})$ を求めるために、 l 番目のサブゴールにおける状態 $S_{R(l)}$ と不確かさ $A_{R(l)}$ の平均を求めておく。このようにして、経路上に設定したサブゴール間での期待値の和で、1 本の経路全体の期待値を求める。サブゴールの具体的な位置は、それぞれの自由空間区間において、物体配置が平均である場合の軌道上の中央の位置に決める。

6 シミュレーション

本論文でこれまでに説明した個々の手法が一貫して適用できることを確認するために、図 13 に示した平面環境を移動し、最短時間で目的地へ到達するための行動計画を立て、経路を選択するシミュレーションを行った。

Fig. 13 Routes from start and routes from subgoal

図の水平右向きに X 軸、垂直向きに Y 軸の世界座標系を設定し、出発地点と目的地を座標値で与える。出発地点から真中の自由空間までには、A,B,C の 3 つの経路があり、真中の自由空間から目的地までには、D,E,F の 3 つの経路がある。縮尺を図の右下に示す。経路 A,B,C のサブゴールは 5.3 節で述べた決め方ではなく、手動で同一のもの (図 13 参照) に設定した。最適経路をこれらの $A \rightarrow D$, $A \rightarrow E$, ..., $C \rightarrow F$ の 9 種類の中から選択する。

物体 1 (図 13 の obj1) は向きの不確かさが無く、位置の不確かさを表す分布は、 x,y 方向に独立であり、それぞれの方向の分布は、平均を中心に正負の両方向に標準偏差の 3 倍の区間内では分散の等しい正規分布の値を

持ち、それ以外では零になる分布関数とする。 x,y 方向とも標準偏差は $50/3[\text{mm}]$ である。物体 2 (obj2) も同様の分布関数で標準偏差は $100/3[\text{mm}]$ である。物体 1 の $p_d()$ は、世界座標系の X と Y の両方向に 3 段階ずつの 9 通りの配置に、物体 2 の場合は 5 段階ずつの 25 通りの配置に離散化した。したがって、経路 A を通ってサブゴールへ至る到達時間の計算では 9 通り、経路 C,B の場合は 25, 225 通りの配置の組み合わせから期待値を求めた。その期待値の計算結果を表 1 の左側に示す。

Table 1 Expected time to/from subgoal [sec]

	time		D	E	F
A	23.16	time after A	22.04	20.17	22.60
B	20.22	time after B	21.01	20.13	23.13
C	21.03	time after C	20.23	21.74	23.04

物体 3 は物体 1 と、物体 4 は物体 2 と同じ不確かさで同じ離散化を行い、経路 D,E,F の配置の組み合わせはそれぞれ 9,225,25 通りになる。この組み合わせを用いて、サブゴールへ到達した平均の状態値 (3 通り) から経路 D,E,F を通って目的地へ到達した場合の期待値を計算した結果を表 1 の右側に示す。これらの計算結果より、期待値の和が最小の経路の組み合わせを求めると経路 B (期待値 20.22[sec]) と経路 E (期待値 20.13[sec]) であった。ある配置における、経路 B と経路 E での行動プランニングの結果の例を、観測を行う場所を番号を付けてその時点での不確かさを表す楕円で図 14,15 に示す。それらの場所で観測すべき対象物を括弧付きの番

Fig. 14 Planning observations and movements (along route B)

Fig. 15 Planning observations and movements (along route E)

号で示す。出発地点では初期不確かさを持ち、図 15 ではサブゴールにおける不確かさの平均から計画を始め

る。ただし、図 15 の 3 回目の観測では、危険領域の中にあるものの、左右両方のエッジのいずれの組み合わせも一画面でとらえることができず、最も適切なエッジ 1 本を計画した。サブゴールを設定しなかった場合には、 $81 + 2 \cdot 225 + 625 + 2 \cdot 2025 + 2 \cdot 5625 + 50625 = 67081$ 回の計算回数が必要だが、サブゴールを設定することにより、 $(9 + 25 + 225) \cdot (1 + 3) = 1036$ 回に計算量を減らすことができた。

移動と観測の不確かさのパラメータは以下のように設定した。前輪駆動操舵の三輪の移動機構で、前輪の操舵角と前輪回転角を計測し、 $t_c = 0.075$ [sec] 毎に操舵する。操舵角は計測する度に分散 4.0 [deg²] の誤差を、前輪タイヤと路面が接した軌跡の長さは、計測値に比例した標準偏差 (比例係数 0.01) の誤差を持つ。視覚での画面の大きさは 640 [pixel] $\times$ 480 [pixel]、焦点距離は 400 [pixel] とした。撮像された画素を中心に上下左右半画素ずつの不確かさがあるとし、正規分布をあてはめて量子化誤差による分散を $(0.5/3)^2$ [pixel²] とした。その誤差が伝播して垂直エッジや水平エッジの観測値の誤差を表す分散を求めた。以上の不確かさを用いて、距離 L_{max} を 2900 [mm]、最高速度 V_{max} を 500 [mm/sec]、処理時間 t_p を 3 [sec] とし、安全幅 H_{max} を計算して 322 [mm] を用いた。この t_p の値は、実機を用いた Moon⁽¹²⁾ らの研究を参考にして、画像処理速度とカメラ台の首振り機構操作の時間の和から決めた。

7 おわりに

不確かさを含む地図を基に、移動と観測の不確かさを考慮して、最適な行動を計画する方法を以下のように提案した。(1) 与えられた地図から複数の経路の候補を生成し、それぞれの経路から可能な物体の配置ごとにロボットの通るべき軌道を生成する。(2) それぞれの軌道について、移動と観測の計画を立て、最短到達時間を求める。(3) 軌道ごとの最短到達時間を基に、それぞれの経路候補について、到達時間の期待値を求め、期待値が最小の経路を最適経路として選択する。

本研究の特徴は、移動、観測、地図の不確かさをすべて考慮した上で実際に走行する際の観測と移動をあらかじめ計画しておき、それに基づいて最適な経路を決定する点にある。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費重点領域研究「知能ロボット」の援助のもとに行われた。

文 献

- (1) 小方・新井・太田, 時変環境でユーザ仕様を考慮した移動ロボットの軌道計画法, 日本ロボット学会誌 **12-6**, (1994), 905-910.
- (2) I. Namgung and J. Duffy, Two Dimensional Collision-Free Path Planning Using Linear Parametric Curve, *J. of Robotic Systems*, **14-9**, (1997), 659-674.
- (3) 山本・岩村・毛利, Skid-Steer 型移動ロボットの障害物回避準最短時間軌道計画, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1997), 1033-1034.
- (4) F. De la Rosa, C. Laugier, and J. Najera, Robust Path Planning in the Plane, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, **12-2**, (1996), 347-352.
- (5) A. Curran and K.J. Kyriakopoulos, Sensor-Based Self-Localization for Wheeled Mobile Robots, *J. of Robotic Systems*, **12-3**, (1995), 163-176.
- (6) M. Betke and L. Gurvits, Mobile Robot Localization Using Landmarks, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, **13-2**, (1997), 251-263.
- (7) 小森谷・大山・谷, 移動ロボットののためのランドマーク観測計画, 日本ロボット学会誌 **11-4**, (1993), 533-540.
- (8) 神原・三浦・白井, 移動と視覚の不確かさを考慮した移動ロボットの観測プランニング, ロボティクス・メカトロニクス講演会'96, (1996), 1379-1382.
- (9) S. Maeyama, A. Ohya, and S. Yuta, Non-stop outdoor navigation of a mobile robot, *Proc. Int. Conf. on IROS'95*, (1995), 130-135.
- (10) A. Kosaka, M. Meng, and A.C. Kak, Vision-Guided Mobile Robot Navigation Using Restroactive Updating of Position Uncertainty", *Proc. Robotics and Automation* **2**, (1993), 1-7.
- (11) J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*, (1991), 14, Kluwer Dordrecht.
- (12) I.H. Moon, J. Miura, and Y. Shirai, Dynamic Motion Planning for Efficient Visual Navigation under Uncertainty, *Proc. the 5th Symposium on Intelligent Autonomous Systems*, (1998), 172-179.