

学術論文

不確かさを考慮した観測位置と移動のオンライン計画手法

文 仁 赫* 三 浦 純* 白 井 良 明*

Online Viewpoint and Motion Planning Method under Uncertainty

Inhyuk Moon*, Jun Miura* and Yoshiaki Shirai*

This paper proposes an online viewpoint planning method for a mobile robot to reach a goal position safely and quickly. When a robot passes through a narrow space, it moves slowly while carefully observing surrounding objects and estimating the distances to the objects precisely. On the other hand, the robot moves quickly to a next destination in a widely open space. By considering both the predicted positional uncertainty and the configuration of obstacles, the viewpoint is adaptively determined according to the clutteredness of the nearby environment. The planner works online to cope with the actual error caused by the real motion. The robot motion is continuously performed with speed control between the planned viewpoints during visual processing. An experimental result using a mobile robot with stereo vision shows the validity of the proposed method.

Key Words: Viewpoint Planning, Online Planning, Uncertainty, Mobile Robot, Stereo Vision

1. はじめに

現在得られている情報を基に、どこに移動して何を観測するかを決める感覚と行動の計画は、自律移動ロボットの重要な機能である[1]。しかし実世界で得られた情報は不確かさが含まれているため、その計画にも情報の不確かさを考慮しなければならない[2]。本論文では、視覚を持つロボットが安全に、かつ早く目的地に到着するため、移動と観測の不確かさを考慮した観測位置と行動のオンライン計画手法を提案する。

ロボットの位置と方向の不確かさは、制御の誤差やすべりなどの移動の誤差によって大きくなる。視覚のような外界センサを用いて既知の位置のランドマークを観測することによって現在の状態が推定できるが、その視覚情報にも画像の量子化による誤差やキャリブレーションの不確かさが含まれている。また、一般の視覚システムは処理時間がかかるという問題がある。

観測位置の選び方と観測回数は、安全性と走行時間に影響を与え、それらの間には密接な関係がある。速く移動するために、あまりに観測回数を減らすと移動の誤差によって障害物とぶつかる可能性がある。頻繁に観測すれば安全な走行が可能になるが、総走行時間がかかる[3]。

Ayache ら[4]は移動と視覚観測の不確かさを考慮して複数の観測情報をカルマンフィルタを用いて統合する方法を定式化した。Kriegman ら[5]は未知の廊下環境で視覚と行動の不確かさを考

慮して外界環境モデルを作り、自由空間を探索してゴールまで走行することに成功した。これらの研究では、得られた視覚観測情報の使い方が中心であり、どこで環境を観測すればよいかという問題は扱っていない。一方、視覚システムの処理時間がかかる問題に対して、Kosaka ら[6]と前山ら[7]は、認識処理時間を要するセンサデータを適宜的に統合することによって、ノンストップ走行手法を提案した。しかし、これらの研究でもどこで観測すればよいかという問題は扱っていない。

小森谷ら[8]は、複数のランドマーク候補から観測情報を統合した結果がより精度よくできるものを選択する観測計画を提案した。しかし、ランドマーク選択とその観測は、不確かさがあらかじめ設定した値を越えた地点で行ったため、設定値によってはロボットの全走行の効率が悪くなる可能性がある。永谷ら[9]は複数の観測位置の候補をあらかじめ決めておいて、観測コストと衝突の危険性による評価関数が最小になる経路とセンシング位置をグラフ探索によって計画する手法を提案した。しかし、観測位置の候補および、危険性と観測コストの関係を経験的に決めているので、得られた計画が効率的である保証はない。さらにオフラインで計画を行ったため、現実の誤差の影響が考慮されていない。

そこで本論文では、ロボットの移動と観測の不確かさのモデルを基に安全を保証し、同時に広いところでは速く走り、狭いところではゆっくり動くような適応的戦略を用いて、安全かつ効率的な走行と観測位置を決める手法を提案する。また、実際の走行や観測の誤差を反映するためオンラインで観測位置を計画する。Fig.1は、自己位置の不確かさを考慮し、障害物の配置に適応し

原稿受付 1998年9月4日

*大阪大学工学部

*Faculty of Engineering, Osaka University

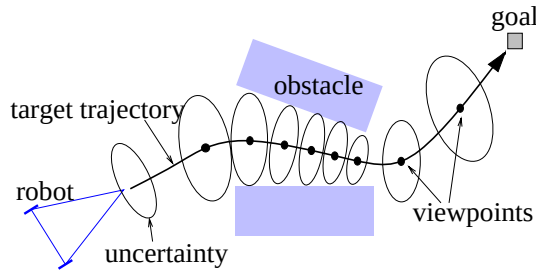


Fig. 1 Adaptive selection of viewpoints

た観測位置計画の考え方を示した図である。楕円はロボットの位置の不確かさを、線は目標軌道を表す。

本論文では、既知の室内環境の地図とランドマーク候補が与えられた場合について、観測位置の計画手法を提案する。観測位置として、位置の不確かさと障害物の地図に基づいて安全が保証できるという条件を満たす限り、現在の位置から目標軌道上の最も遠い位置を繰り返し選択する。ただし、ロボットは画像処理しながら移動するので、観測位置間の最大距離はランドマーク認識のためにかかる時間内に最大速度で走れる距離とする。観測位置間はスピード制御によって走行し、停止することなく連続的に移動する。移動ロボットを用いた実験により、提案した手法の有効性を示す。

2. 不確かさのモデリング

本研究では、Fig.2で示す前輪ステアリングの三輪移動ロボットを対象とする。平行ステレオカメラをカメラ台上に設置し、パン軸まわりに回転させて視線方向を制御する。パン軸は、前輪の中心位置と一致させている。

2.1 移動の不確かさ

ロボットの状態は、 $\mathbf{X} = [x \ y \ \theta \ \phi]^T$ で表す。ここで x 、 y と θ はロボットの位置と方向であり、 ϕ はパン角度である。Fig.3は

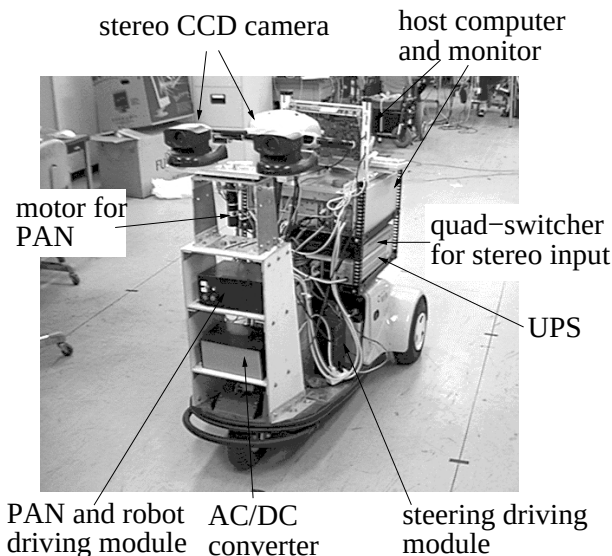


Fig. 2 The mobile robot

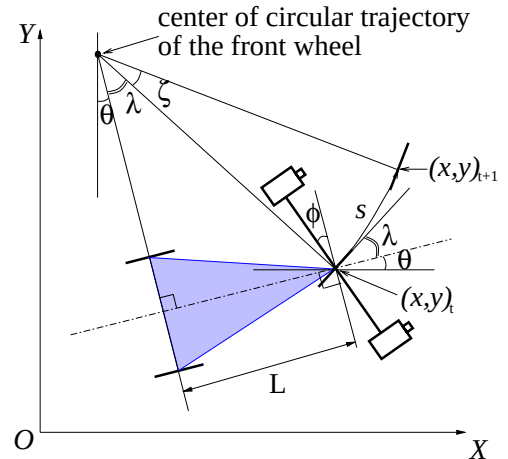


Fig. 3 Motion model of the front steering mobile robot

ロボットの移動モデルを表す。各観測位置間での移動速度とステアリング角度は一定とし、観測位置ごとにそれらの値を変更してロボットを制御する。ステアリング角度 λ によって、ロボットの軌道の中心と円弧が決まり、その回転角度 ζ は距離 s を与えれば求まる。平行ステレオカメラの視線方向は、入力 ψ によって制御する。制御入力 $\mathbf{U} = [s \ \lambda \ \psi]^T$ による観測位置間の状態移行は、次のような非線形の関係で表現できる。

$$\mathbf{X}_{t+1} = \begin{bmatrix} x_t + \frac{L}{\sin \lambda_t} \{ \sin(\theta_t + \lambda_t + \zeta_t) - \sin(\theta_t + \lambda_t) \} \\ y_t + \frac{-L}{\sin \lambda_t} \{ \cos(\theta_t + \lambda_t + \zeta_t) - \cos(\theta_t + \lambda_t) \} \\ \theta_t + \zeta_t \\ \phi_t + \psi_t \end{bmatrix} = \mathbf{F}(\mathbf{X}_t, \mathbf{U}_t) \quad (1)$$

ここで、 $\zeta_t = \frac{s_t \sin \lambda_t}{L}$ である。 $\lambda_t \simeq 0$ の場合は、 $\sin \lambda_t \simeq \lambda_t$ として式 (1) を近似した式を用いる。

ロボット状態の予測共分散 $\Sigma_{\mathbf{X}_{t+1}}$ は、

$$\Sigma_{\mathbf{X}_{t+1}} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}_t} \Sigma_{\mathbf{X}_t} \frac{\partial \mathbf{F}^T}{\partial \mathbf{X}_t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}_t} \Sigma_{\mathbf{U}_t} \frac{\partial \mathbf{F}^T}{\partial \mathbf{U}_t} \quad (2)$$

になる。制御誤差の共分散行列は、

$$\Sigma_{\mathbf{U}_t} = \begin{bmatrix} \sigma_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\lambda^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\psi^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

である。 σ_s^2 はすべりによる距離計測誤差の分散であり、距離入力に比例する。 σ_λ^2 と σ_ψ^2 は機構の誤差による分散であり、定数とする。おのおのの制御の誤差は独立なガウス分布に従うとする。

本論文では、標準偏差 σ の3倍の領域を不確かさの範囲とする。推定したロボットの共分散 $\Sigma_{\mathbf{X}_t}$ から、 X - Y 平面上に投影した誤差楕円を求める。誤差楕円は $\mathbf{X}_p^T \Sigma_{\mathbf{X}_p}^{-1} \mathbf{X}_p = 1$ で得られる楕円を3倍して求まる。 $\mathbf{X}_p$ は状態 $\mathbf{X}$ の x - y 位置を、 $\Sigma_{\mathbf{X}_p}$ は $\Sigma_{\mathbf{X}}$ での x - y の共分散を意味する。誤差楕円の境界は等確率であり、その中心は推定値である。

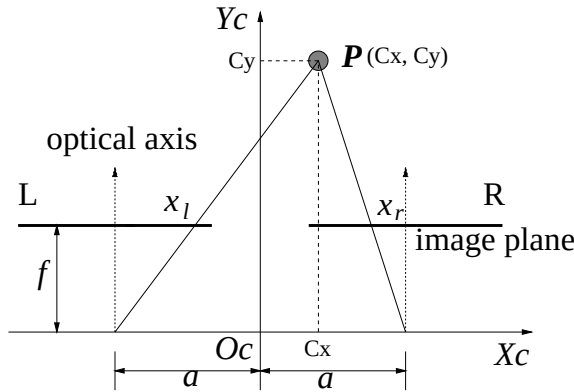


Fig. 4 Stereo geometry

2.2 観測の不確かさ

本研究では、垂直セグメントを観測対象物として検出し、そのセグメントの画面上の x 方向の平均位置から X_c - Y_c 平面上の 2 次元位置を求める。Fig.4は、二次元平面上のあるセグメント P が平行ステレオ視覚によって観測された時の観測幾何を表す。セグメント P が左右の画像上にそれぞれ $I = [x_l \ x_r]^T$ の位置で検出できたとすると、カメラ座標系 X_c - Y_c 平面上の位置、 $P = [c_x \ c_y]^T$ は次式になる。

$$P = Z(I) = \begin{bmatrix} \frac{a(x_l + x_r)}{x_l - x_r} \\ \frac{2af}{x_l - x_r} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 f 、 a はそれぞれ焦点距離とカメラ座標原点からカメラの中心までの距離を表す。観測された画面上での位置は量子化による誤差があり、その誤差はステレオ画像の左右間で独立であるとする[10]。その共分散 Σ_I を

$$\Sigma_I = \begin{bmatrix} \sigma_{x_l}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{x_r}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

とし、ステレオ観測の共分散は式 (4) を線形化して求まる[5]。

$$\Sigma_P = \frac{\partial Z}{\partial I} \Sigma_I \frac{\partial Z^T}{\partial I} \quad (6)$$

2.3 観測情報の統合

ロボットが既知の世界座標系のランドマーク $L = [L_x \ L_y]^T$ を観測すると、次のような関係式が成り立つ (Fig.5参照)。

$$L = R_{[(\theta+\phi)-\frac{\pi}{2}]} P + X_P \quad (7)$$

ここで、 $R_{[\rho]}$ は角度 ρ の回転行列を表す。式 (7) は以下のような非線形の観測拘束式で表せる。

$$G(X_t, P_t, L) = 0 \quad (8)$$

式 (8) を平均値 $(\hat{X}_t, \hat{P}_t, L)$ でテイラー展開し、2 次以上の高次項を無視して線形化することによって線形観測式が再構成でき、カルマンフィルタを用いてロボットの状態とその不確かさを推定する[4]。

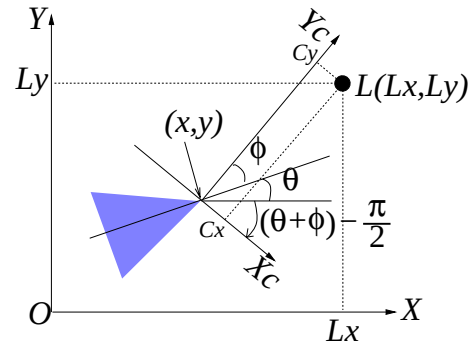


Fig. 5 Observation geometry

3. 不確かさを考慮した計画

本研究では、目標軌道計画、ランドマーク計画、観測位置および移動計画を行う。目標軌道は与えられた障害物地図から、オフラインで生成する。観測位置と移動量は、現在の不確かさに基づいてオンラインで同時に決まる。またランドマークは、ロボットからの相対位置の不確かさを考慮して観測が保証できて近いものをオンラインで選ぶ。

3.1 目標軌道計画

与えられた地図情報に基づいてロボットの目標軌道をオフラインで生成する。まず、与えられた障害物の位置を用いて障害物領域と拡張障害物領域を作る。障害物領域は、障害物の境界からロボットの幅の半分を足した領域であり、さらに安全幅を加えた領域を拡張障害物領域とする。安全幅は、一定の時間に走れる最大距離 s_{max} を動いた場合の不確かさの大きさによって決まる。拡張障害物領域が重なったところは狭い空間になり、軌道は障害物の真中を通る直線を選ぶ。それ以外の空間では拡張障害物領域に入らず、かつ最短距離になるように軌道を決める。この結果、生成された目標軌道は直線と円弧によって構成される[3]。

3.2 オンライン観測位置と移動計画

3.2.1 最悪位置

本研究では、安全を調べるため不確かさを考慮した最悪位置を導入する。ある入力 U を加えたとき、位置の不確かさが式 (2) から計算でき、その不確かさの楕円が求まる。軌道に平行な直線と不確かさの楕円との接点を最悪位置 W_p とし、その位置が安全であれば、現在の位置の不確かさのどこでも安全であるとする。本研究では、両側の接点の両最悪位置を用いて安全を調べる。

3.2.2 観測位置

観測位置は、観測回数をできるだけ減らすために、位置の不確かさと障害物の地図に基づいて安全が保証できるという条件を満たす限り、現在位置から最も遠い位置を選択する。ここで安全というのは、予測不確かさの最悪位置が障害物に衝突せず、かつその最悪位置から衝突なしに目標軌道へ復帰できることを意味する。Fig.6は観測位置計画手法を表し、その手順は次の通りである。

- (1) 初期移動距離 $s_t = s_{max}$ にする。
- (2) 現在推定位置 $\hat{X}_t$ と移動距離 s_t から、目標軌道上の次の観測位置とステアリング入力 λ_t を求める。この制御量から式

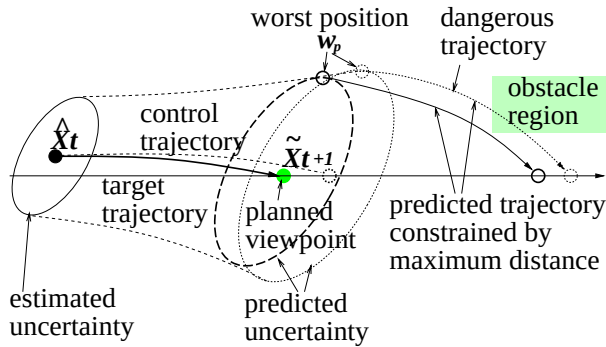


Fig. 6 Online viewpoint planning strategy

- (1), (2) を用いて予測位置 $\hat{\mathbf{X}}_{t+1}$ と不確かさおよび最悪位置 $\mathbf{W}_p$ を求める。もし $\mathbf{W}_p$ が障害物領域内にあれば、 s_t を減らして (2) から再び計算する。
- (3) 最悪位置から目標軌道に戻る軌道を計算する。このとき、安全を保証するため、最も厳しい条件を与える。本研究では、ロボットの方向は最悪方向、走行距離は最大距離 s_{max} とする。この復帰軌道 (Fig.6の最悪位置からの曲線) が障害物に衝突しなければ、予測位置 $\hat{\mathbf{X}}_{t+1}$ を次の観測位置として決める。そのときに求めた制御量を次の制御入力とする。復帰軌道が障害物と衝突するならば、走行距離 s_t を減らして (2) から再計算する。

提案した手法は、次の観測位置および制御量が現在の不確かさを考慮してオンラインで決まるので、移動と視覚観測情報の不確かさの大小にかかわらず安全性が保証されることが特長である。

3.2.3 オンライン観測位置計画の必要性

オフラインとオンライン観測位置計画をシミュレーションして比較し、オンライン手法の必要性を示す。総走行距離が8[m]の直線軌道の環境での走行を仮定する。最大距離 s_{max} は、ロボットの走行性能と誤差モデルにより決まり、1[m]とする。制御の分散は、 $\sigma_s^2 = 0.1^2 * s_t / s_{max}$ [m], $\sigma_\lambda = 3$ [deg] とし、パンの制御誤差は十分小さいため $\sigma_\phi = 0$ [deg] とする。視覚観測のピクセル誤差は $\sigma_{x_l} = \sigma_{x_r} = 1$ [pixel] とする。各誤差モデルに基づいて 3σ のノイズを加え、シミュレーションの結果を比較する。

オフライン計画はオンライン計画と同様に、予測位置の不確かさに基づいて安全性を調べて観測位置を決める。オンライン計画との違いは、実際の観測値が得られないため推定位置が分からないことである。そこで、オフライン計画ではロボットが平均の位置に存在し、平均の観測値が得られると仮定して、ロボットの位置と不確かさを計算し、ゴールまでの観測位置を繰り返して求める。しかし、ロボットが実際に走行すると、一般には制御誤差によってオフラインで計画した観測位置からずれてしまう。そこから次の観測位置に戻るためにロボットを制御すると、実際の誤差分布が計画時での誤差分布と違ってしまふので、結局安全性が保証できなくなる。

Fig.7は、オフラインで計画した観測位置に基づいてゴールまで走行した結果である。矢印はロボットの位置と方向を表し、その終端が観測位置である。この結果により、オフライン計画は実際の制御誤差の影響を計画に反映できなかったため、それに基

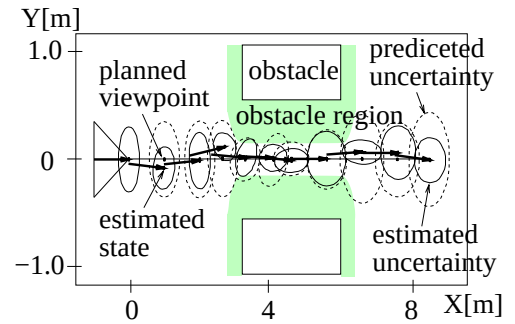


Fig. 7 Motion result using the offline planned viewpoints

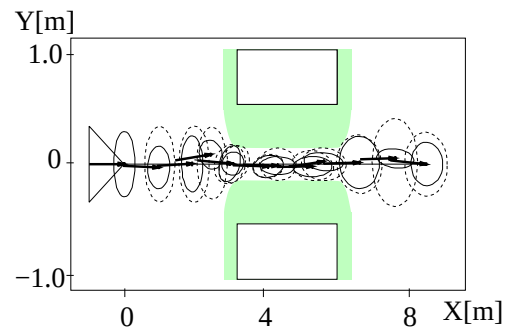


Fig. 8 Motion result using the online planning strategy

づいた走行は衝突する可能性があることが分かる。Fig.8は、本研究で提案したオンライン計画手法を用いて、同様なシミュレーションを行った結果である。予測位置のどこでも障害物と衝突しないことが分かる。

3.2.4 ノンストップ走行

視覚観測処理には時間がかかり、処理結果は画像の入力から時間が遅れて得られる。この問題に対して画像を入力してからすべての制御量を記憶し、視覚観測の結果が得られたら遡及して統合することによってノンストップ走行する方法が提案された[6][7]。本研究では同様の手法を用いるが、各観測位置間でのロボットのステアリング角度と速度は一定とするので、直前の制御量だけを記憶しておいて現在の位置を推定することが違う。

Fig.9は、ノンストップ走行と遡及的に推定した不確かさを表す。まず、ロボットが不確かさ e_1 で、位置 $\hat{\mathbf{X}}_{t-1}$ にあるとする。ロボットが画像を入力してから次の観測位置 $\hat{\mathbf{X}}_t$ に向かって移動する。 t 時刻での不確かさはデッドレコニング走行によって e_2 のように大きくなる。その時刻 t で、 $t-1$ での観測の結果が得られ、その情報を統合することによって位置 $\hat{\mathbf{X}}_{t-1}$ と不確かさ e_3 が推定できる。この推定した $\hat{\mathbf{X}}_{t-1}$ と t までの制御入力を用いて現在の位置 $\hat{\mathbf{X}}_t$ とその不確かさ e_4 が推定できる。計画を含めてすべての処理時間が一定と仮定すると、ロボットの走行速度を観測位置間の距離に比例して制御することによって、連続的な走行が可能になる。このノンストップ走行戦略では、 e_2 が予測不確かさであり、この楕円に基づいて安全を調べる。

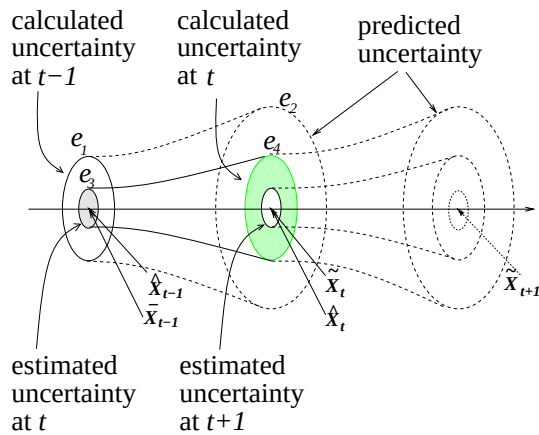


Fig. 9 Non-stop motion and estimated uncertainties

3.3 ランドマーク計画

事前に与えておいた複数のランドマーク候補中、ロボットの位置から距離が一番近く、観測可能なランドマークペアを選ぶ。ペアとして選択できない場合でも必ず1個は選ぶ。観測可能かどうかは、ステレオ観測モデルによって判断する。

ステレオ両画面上のランドマークの投影位置は、式(4)から次式のように求まる。

$$I = \begin{bmatrix} x_l \\ x_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \frac{c_x + a}{c_y} \\ f \frac{c_x - a}{c_y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$P = [c_x \ c_y]^T$ は、式(7)から

$$P = R^{-1}[(\theta + \phi) - \frac{\pi}{2}][L - X_p] \quad (10)$$

が求まるので、式(9)に代入して非線形投影関係式が得られる。

$$I = J(X, L) \quad (11)$$

ここで、 L が不確かさが無い場合は、共分散 Σ_I は

$$\Sigma_I = \frac{\partial J}{\partial X} \Sigma_X \frac{\partial J^T}{\partial X} \quad (12)$$

である。観測可能かどうかは、式(9)と式(12)から求まった、画面上での投影の平均位置を中心とした不確かさの範囲が画面内に完全に含まれるかどうかで判断する。視線方向は、ランドマークがペアである場合は中央位置を、1個の場合はそのランドマークを向くように決める。

4. ステレオ視覚によるランドマーク検出

本研究では、室内シーンに多く存在している垂直セグメントをランドマークとして扱う。室内環境でのランドマークの位置、長さ、方向は既知であり、目標軌道の周りに多く存在しているとす

る。入力した濃淡画像を水平方向に微分して得られたエッジから垂直セグメントを抽出する。垂直セグメントの左右の明度の変化を方向とし、その方向、長さ、両端点の位置および画面上の x 方向の平均位置をそのセグメントの情報として使う[10]。画面上の投



Fig. 10 Result of landmark detection

影位置の式(11)とその共分散 Σ_I から求まる不確かさによってランドマークの探索範囲を絞る。探索範囲内のセグメントに対して、ランドマークを投影したときの平均セグメントとの長さ、方向、垂直方向のオーバーラップ量の類似度を計算してしきい値以上のセグメントをランドマーク候補として選ぶ。左右の候補セグメントは、左右セグメントの類似度を計算して動的計画法を用いてステレオ対応づけを行なう[11]。

対応づけの結果、各セグメントの X - Y 平面上の位置が求まり、地図上のランドマーク位置との距離を計算する。与えたランドマークが1個である場合は一番近いものを選ぶ。ペアである場合は、候補セグメントを組合せてペアのリストを作り、おのおののペアが正しいランドマークであると仮定してロボットの位置を推定する。推定結果が予測位置の範囲に存在するとそのペアを候補として選び、そのペア間の距離と与えられたランドマークのペア間の距離との差を調べて最も小さいものを観測されたランドマークペアとして検出する。

Fig.10は、ホワイトボードの右側とパーティションの左側のエッジをランドマークペアとして与えた場合の検出結果である。黒い垂直線は検出したランドマークの位置を、その上下端で与えたおのおののランドマークの平均位置と不確かさを表す。

5. 実験

実験には、前輪操舵・後輪駆動型の電動三輪車をベースとして、コンピュータと無停電電源装置(UPS)を搭載した自立移動可能

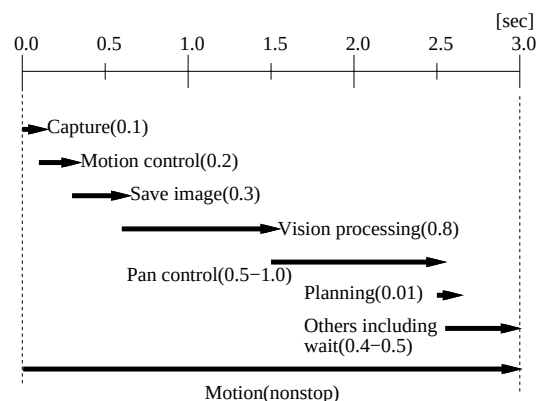


Fig. 12 Processing time chart

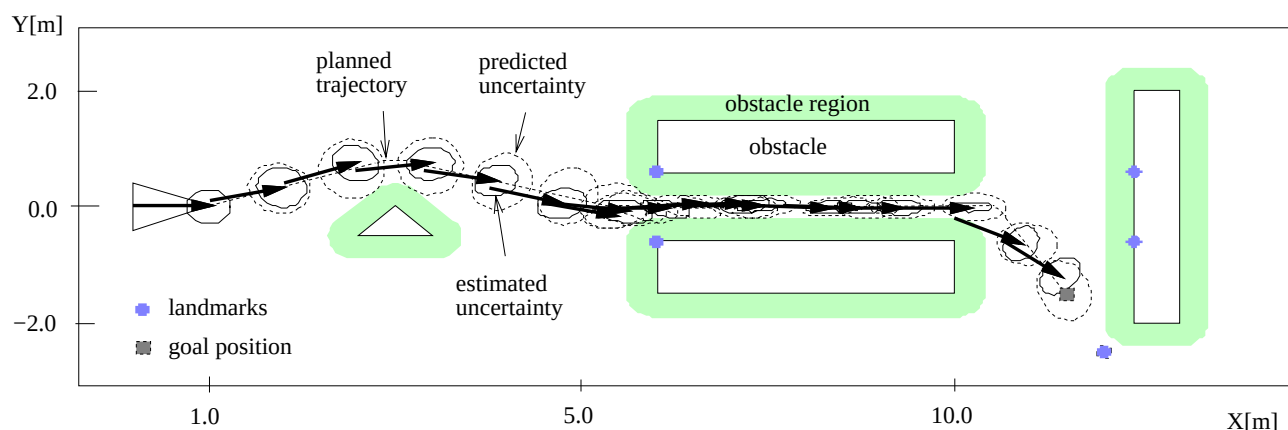


Fig. 11 Motion result by on-line planned viewpoints

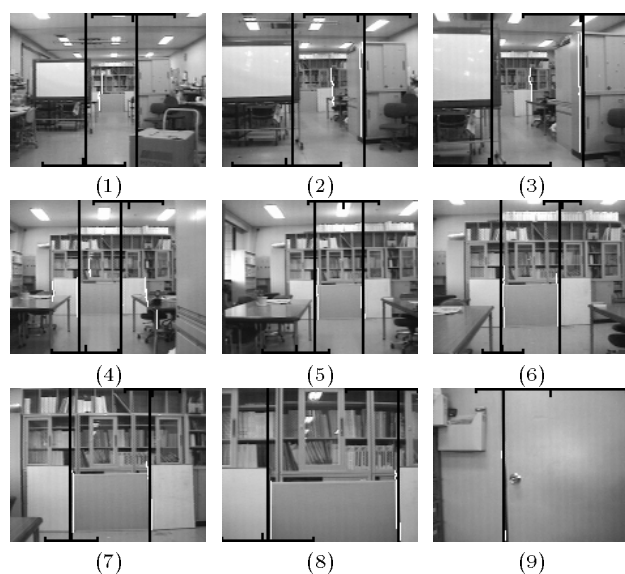


Fig. 13 Observed landmarks

なロボット (Fig.2参照) を用いる。実験の各定数は 3.2.3 節に述べた値に設定する。

研究室の環境での実験結果を Fig.11 に示す。狭い空間と広い空間の目標軌道が直線と円弧によって構成され、ゴールまでの総走行距離は約 13[m] である。図中の各観測位置において二つの誤差楕円が示され、外側は予測不確かさを、内側は推定不確かさを示す。この結果から全走行は、広い所では速く、狭い所ではゆっくり移動し、障害物と衝突しないことが分かる。また、本研究で提案した手法が、ロボットを安全、かつなるべく早くゴールへ誘導する目的に有効であることが分かる。

本実験の全処理は、あるプロセスが終了した時点で次のプロセスを行う逐次的処理によって行ったため 1 ステップの処理時間は、3[sec] であり、最大走行速度は、0.33[m/sec] である。全処理のタイミングチャートを Fig.12 に示す。Fig.13 は、各観測位置から観測したランドマークの平均位置とその分散、そして検出結果を示す。画面上の長い垂直線の位置が検出されたランドマークの

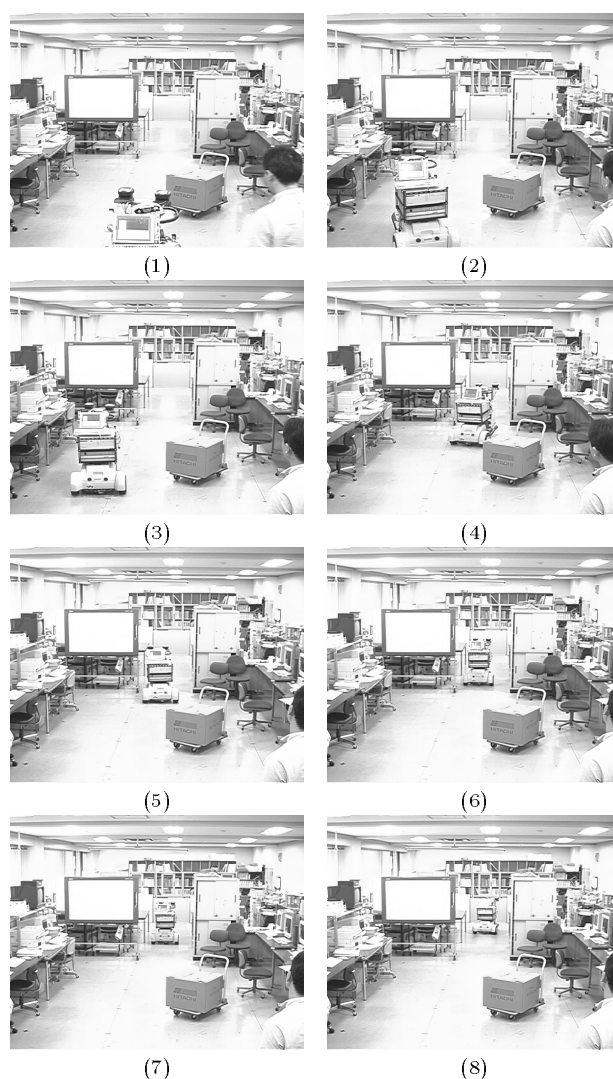


Fig. 14 Mobile robot motion

画面上の位置を表す。Fig.14 は、実験でのロボットの走行シーンである。

6. ま と め

本研究では、移動ロボットの移動と観測の不確かさを考慮して、安全かつなるべく早くゴールへ到着できるような観測位置と移動計画手法を提案した。安全は、予測不確かさをを用いて調べ、現在の位置から安全が保証できる限り目標軌道上の最も遠い位置を次の観測位置として決めた。この戦略によって、安全な限りでできるだけ観測回数減らすことができた。この手法は、オンラインで実行可能であり、実際の誤差に対応できるという特長がある。提案した手法による実験では、ロボットは与えられたゴール位置まで衝突しなく、効率な観測を行ないながら走行できた。

本実験では比較的簡単なシーンでの既知のランドマークを使ったが、もっとも自然な室内環境で、自律的にランドマークを抽出しながら走行する手法を研究中である。また、未知の障害物でも対応できるような視覚と行動計画は今後の課題である。

参 考 文 献

- [1] 白井：“感覚と行動の統合による実環境の理解”，計測と制御，vol.35, no.4, pp.256-261, 1996.
- [2] 三浦，白井：“不確かさを考慮した視覚と行動のプランニング”，人工知能学会誌，vol.7, no.5, pp.850-861, 1992.
- [3] I.H. Moon, J. Miura, Y. Yanagi, and Y. Shirai: “Planning of Vision-Based Navigation for a Mobile Robot under Uncertainty,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1202-1207, 1997.
- [4] N. Ayache and O.D. Faugeras: “Maintaining Representations of the Environment of a Mobile Robot,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.5, no.6, pp.804-819, 1989.
- [5] D.J. Kriegman, E. Triendl, and T.O. Binford: “Stereo Vision and Navigation in Buildings for Mobile Robots,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.5, no.6, pp.792-803, 1989.
- [6] A. Kosaka, M. Meng, and A. Kak: “Vision Guided Mobile Robot Using Retroactive Updating of Position Uncertainty,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, pp.1-7, 1993.
- [7] 前山，大矢，油田：“移動ロボットのための適応的現在位置推定法 - 処理時間を要する外界センサデータの利用 -”，日本ロボット学会誌，vol.15, no.7, pp.1075-1081, 1997.
- [8] 小森谷，大山，谷和：“移動ロボットのためのランドマーク観測計画”，日本ロボット学会誌，vol.11, no.4, pp.533-540, 1993.
- [9] 永谷，油田：“衝突の危険性を評価関数とする移動ロボットの経路とセンシング点の計画”，日本ロボット学会誌，vol.15, no.2, pp.197-206, 1997.
- [10] 三浦，白井：“ステレオ視におけるあいまいな対応づけのモデリングとあいまいさ解消のための視点選択”，日本ロボット学会誌，vol.12, no.8, pp.1222-1230, 1994.
- [11] S.H. Lee and J.J. Leou: “A Dynamic Programming Approach to Line Segment Matching in Stereo Vision,” Pattern Recognition, vol.28, no.8, pp.961-986, 1994.

文 仁 赫 (Inhyuk Moon)

1992年韓国慶尚大学校電子工学科卒業。1994年同大大学院修士課程修了。1999年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械専攻博士課程修了，工学博士。同年，浜松テクノポリス推進機構研究員。コンピュータビジョンおよび知能ロボットの研究に従事。IEEE 会員。（日本ロボット学会正会員）

三 浦 純 (Jun Miura)

1984年東京大学工学部機械工学科卒業。1989年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了，工学博士。同年，大阪大学助手。現在同大大学院工学研究科電子制御機械工学専攻助教授。知能ロボット，人工知能，コンピュータビジョンの研究に従事。1994年～1995年，CMU 客員研究員。1997年ロボット学会論文賞受賞。人工知能学会，電子情報通信学会，情報処理学会，IEEE，AAAI 各会員。（日本ロボット学会正会員）

白 井 良 明 (Yoshiaki Shira)

1964年名古屋大学工学部機械工学科卒業。1969年東京大学大学院工学系博士課程修了。工学博士。同年，電子技術総合研究所入所，コンピュータビジョン，ロボティクスの研究に従事。1971年～1972年，MIT AI ラボ客員研究員。1988年大阪大学工学部電子制御機械工学科教授。人工知能学会，電子情報通信学会，情報処理学会，日本機械学会各会員。（日本ロボット学会正会員）