

# 複数センシング戦略を有する視覚移動ロボットの経路・観測計画

## Path and Observation Planning of Vision-Based Mobile Robot with Multiple Sensing Strategies

○ 栢分 光明 (静岡大)

正 山下 淳 (静岡大)

金子 透 (静岡大)

Mitsuaki Kayawake, Shizuoka University

Atsushi Yamashita, Shizuoka University

Toru Kaneko, Shizuoka University

In this paper, we propose a new path and viewpoint planning method for a mobile robot with multiple observation strategies. When a mobile robot works in the constructed environments such as indoor, it is very effective and reasonable to attach landmarks on the environment for the vision-based navigation. In that case, it is important for the robot to decide its motion automatically. Therefore, we propose a motion planning method that optimizes the efficiency of the task, the danger of colliding with obstacles, and the accuracy and the ease of the robots.

*Key Words: Path planning, Viewpoint planning, Mobile robot, Landmark*

### 1. 序論

近年ロボットはその利用範囲を拡大し、日常の環境下で活躍し始めている。しかしロボットが様々な現場で効率的に目的地へ移動し仕事を行うためには、目的地を指示するだけでロボットが独自に経路を計画し、目的地へ到達できる必要がある。また素早く仕事をこなすために、この経路は移動距離が短い方が良い。さらに、移動の際に発生する誤差からロボットが障害物に衝突する危険性を考慮し、選択した経路が安全か検証する必要がある。

こうした経路を計画する手法の従来研究として、[1]や[2]が挙げられる。[1]では計画した経路について、ロボットに発生する誤差や、経路と障害物の相対位置等からその経路の危険性を評価し、安全な経路を選択している。一方[2]では、ロボットが移動する際に発生する誤差をロボットの性能から推定し、推定される誤差が一定値を超えると自己位置同定により誤差を修正する手法を提案している。

本研究では観測手法を複数用意し、観測する地点において効果的な観測手法を用いて自己位置同定を行う。またロボットの性能に合わせた経路を計画できる手法を提案する[3]。具体的には、初期地点から目的地に到達する際のロボットの移動距離が短く、かつデッドレコニング精度やカメラを用いた自己位置同定精度を考慮して障害物に接触しないような安全な経路を決定する手法を構築する。

### 2. 提案手法

本研究で想定するロボットは円形状とし、移動の際にデッドレコニングを行い、ロボットの移動距離からロボットの位置を把握する。しかしデッドレコニングのみでは、発生する誤差が補正されずに蓄積してしまう。これではロボットは計画した経路から外れ、環境中の障害物等に衝突する危険性がある。そこでロボットにカメラを搭載し、環境中に既知の大きさのマークを配置する事でロボットはカメラから見えるマークの大きさや、見えた方向、マーク間の角度等からデッドレコニングの誤差を補正できることとする。

ロボットの行動を計画するために、障害物や自己位置同定に用いるマークの位置、初期地点、目的地の位置の情報が含まれる環境地図を与えることとする。このとき環境中の障害物は多角形で表されるものとする。

この環境情報を基に初期地点から目的地までの経路や、経路上で自己位置同定を行うマーク観測地点、さらにマークの観測手法を計画する。計画された観測地点において自己位置同定を行うことで、障害物に接触する前に自己位置補正を行うことが可能となる。この観測地点を目的地まで確保でき

れば、その経路は目的地へ到達することができる。なお、カメラにもマーク読み取りの際に誤差があり、自己位置同定の精度に影響するため、この誤差も観測地点決定の際に考慮する。

本研究では、ロボットが経路を生成・選択する手法を経路計画、センシングによる自己位置同定を行うタイミングを計画することを観測計画と呼ぶ。またこの2つの計画を合わせて、ロボットの行動計画と呼ぶ。

行動を計画するためには、まず経路計画で選択された最短経路において、観測計画による各許容誤差における評価を行い、目的地へ到達するまで障害物に接触する危険がないか判別する。許容誤差とは、経路を生成する際に用いるコンフィグレーション障害物の拡張幅のことであり、観測地点の決定に関係する値である。この判別により最短経路において、ロボットが障害物に衝突し目的地へ到達できないなら、予備経路計画に移る。

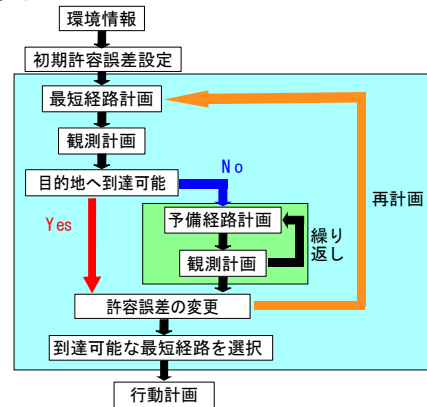


Fig.1 行動計画

予備経路計画では最短経路以外の経路を計画し、毎回異なる予備経路計画と観測計画を一定回数繰り返す。この過程で目的地へ到達可能な経路をリストアップする。

次により移動距離が短く安全な経路を見つけるため、許容誤差を変更して経路の再計画を行い、上記と同様の手順により経路計画と観測計画を繰り返す。こうしてできた到達可能な経路の中から距離が最短となるものを採用し、ロボットの移動経路とする (Fig.1)。

こうした行動計画を実現させるために、本研究では経路の生成に可視グラフ法を、経路の選択には Dijkstra 法を用い、最短経路と予備経路を探索する。

以下、経路計画と観測計画の具体的な手法を説明し、シミュレーション結果より本手法の有効性を検証する。

## 2-1 経路計画

### 2-1-1 障害物の拡張

本研究では環境中に配置した障害物とロボットの接触を避けるために、コンフィグレーション空間を用いる。この空間を利用して、可視グラフ法を用いて経路を生成する。ロボット半径を  $R$  とすると (Fig.2(a))、この形状の場合のコンフィグレーション障害物は Fig.2(b)の形状をとる。しかしコンフィグレーション障害物の拡張幅が  $R$  のロボット半径領域だけでは、移動の際に発生する誤差に対応しきれず、障害物と衝突する危険性がある。

そこで、ロボットの性能により決定する幅  $S$  の許容誤差領域をコンフィグレーション障害物に追加することで、誤差が発生した場合でも障害物と接触する危険性を軽減することが出来る。本研究ではこの許容誤差領域とロボット半径領域を合わせてコンフィグレーション障害物として扱う。許容誤差領域の幅  $S$  が小さいと障害物に近い位置を通るため移動距離は短くなるが、障害物と接触する危険性が高くなる場合がある。一方、許容誤差が大きいと障害物との接触の危険性が減るためより確実に目的地まで到達できるが、障害物を大きく迂回することになるので移動距離が犠牲になる場合がある。このように許容誤差領域の幅  $S$  は出来るだけロボットの性能と環境にあった適正な値を求める必要がある。

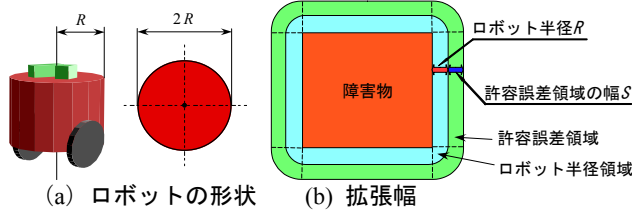


Fig.2 コンフィグレーション障害物

### 2-1-2 頂点の抽出

可視グラフ法に用いる障害物の頂点は、コンフィグレーション障害物の曲線部分を多角形近似し作成する (Fig.3(b))。なお、前項のロボット半径  $R$  と許容誤差領域の幅  $S$  の和を拡張幅  $d$  とする。

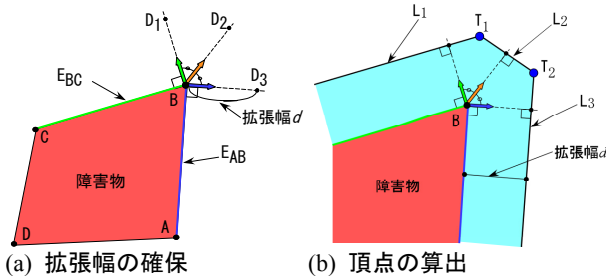


Fig.3 コンフィグレーション障害物の拡張方法

具体的には、Fig.3(a)のように、頂点  $B$  において隣り合った頂点  $A$ 、 $C$  との辺  $E_{AB}$  と  $E_{BC}$  について、これら辺の垂直方向に頂点  $B$  からコンフィグレーション障害物の拡張幅  $d$  を取った地点をそれぞれ  $D_1$ 、 $D_3$  とする。  $D_1$ 、 $D_3$  が成す角を分割した方向にも同様の距離をとり、その地点を  $D_2$  とする。  $D_1$  から  $D_3$  各地点を通り、  $B$  点から距離を取った方向に垂直な直線  $L_1$  から  $L_3$  を算出する。この直線  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  の各交点  $T_1$ 、 $T_2$  を求め、この交点をコンフィグレーション障害物の頂点とする。この手法により本来のコンフィグレーション障害物形状に近似した形状を保持したままで、頂点を求めることが出来る。

### 2-1-3 経路の生成・選択

経路生成には、可視グラフ法を採用する。この手法を前項

で述べたコンフィグレーション障害物に対して用い、経路を生成する。この生成された経路の組み合わせ探索には Dijkstra 法を利用する。まず最短経路は初期地点から目的地に Dijkstra 法を適用して求める。しかしこれだけでは最短経路しか経路を計画できないので、観測計画において最短経路が目的地へ到達できないと判断された場合に備え、予備の経路が必要となる。

そこで本研究では予備経路の作成手法として、コンフィグレーション障害物の頂点を 1 点ランダムに選択し、その頂点を經由する経路を作成する。ランダムに選択した頂点を始点として上記の Dijkstra 法を適用し、Fig.4 のように、初期地点までの最短経路  $A$  と目的地までの最短経路  $B$  をそれぞれ求める。この 2 つの経路  $A$  と  $B$  をつなげて予備経路とする。そして、この探索を繰り返し、予備経路を何通りか作る。この手法の導入により、最短経路と大きく異なった経路を作ることができ、様々な環境に対応した経路が作成できる。

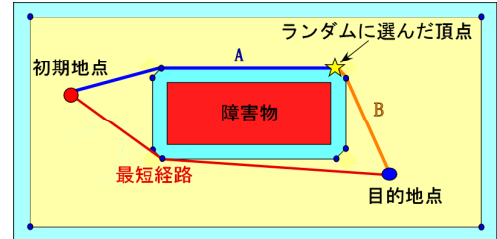


Fig.4 予備経路

この経路計画において、より移動距離が短く、目的地へ到達可能な経路を求めるために許容誤差領域の幅  $S$  を変更し、コンフィグレーション障害物の拡張幅を変更した上で、経路を再計画する。この再計画をいくつかの許容誤差領域の幅  $S$  で行うことで、選択肢が広がり、より最適に近い許容誤差領域で経路を計画することができる。計画時には、幅  $S$  を 0 から一定間隔で増やしてゆき、最終的には最大の距離を持った障害物間をロボットが通行できなくなるような幅まで増加させる。

こうしてできた目的地へ到達可能な経路の中から、最も移動距離の短い経路を採用する。次に計画した経路を安全面から目的地へ到達可能か評価する観測計画手法を説明する。

## 2-2 観測計画

### 2-2-1 観測手法

前項において計画された経路について、観測計画を行う。このとき計画される観測地点では、マークをカメラにより観測し、自己位置同定を行う。そして本研究ではカメラから見えるマークの数に応じて観測方法を変えることが出来る。Fig.5 の(a), (b), (c)をそれぞれステレオ観測、2 点灯台観測、3 点灯台観測と呼び、それぞれ 1 から 3 個のマークが観測できる場合に対応している。この 3 つの観測手法の中から、各観測地点において、最も正確に自己位置同定を行える観測手法を用いて自己位置同定を行う[3]。

また、経路上において最低限の回数で目的地へ到達できるように、3 つの中から最も効果的な観測手法を用いて自己位置同定を行う地点を算出する必要がある。

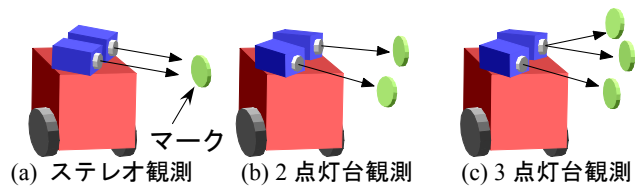


Fig.5 複数の観測戦略

### 2-2-2 観測手法と観測地点の決定

ある観測地点において最も効果的な観測手法を決定するためには、その観測手法における自己位置同定の誤差がどの程度か把握する必要がある。しかし自己位置同定の誤差にはロボットの位置と姿勢の次元の違う2種類の誤差があり、同時に評価できない。

そこで、この2つの誤差を総合的に評価するために、コンフィグレーション障害物に追加する許容誤差領域の幅 $S$ を半径とする円をロボットの位置を中心として描く。この円を許容誤差円と呼ぶ。

まず計画した経路上である任意の距離を移動した場合を想定する。このとき移動後の経路計画上のロボットの位置はFig.6(a)の許容誤差円の中心である。しかし、デッドレコニングの誤差や、カメラのマーク読み取りの際の誤差が要因となり、観測により推定されるロボットの現在位置はすでに計画上の位置からずれている。この現在位置から経路計画通りの距離を誤差なく移動した場合、Fig.6(a)の移動後の位置へ到達するものとする。しかし移動後の位置について、先に述べた誤差を考慮した時、Fig.6(b)のように移動後の位置は位置Aから位置Bまでの範囲でずれる。この移動後の位置の誤差によるずれが、移動後の計画上の位置における許容誤差円から外れた場合、ロボットは障害物に衝突してしまう。このためFig.6(b)のA地点のように許容誤差円から外れる前にマークを観測する。

このように現在位置を出発し、ロボットが初めて許容誤差円から外れるまでの距離を許容距離と呼ぶ。許容距離がその地点において最も長くなる観測手法が最も正確に自己位置同定を行うことができるため、この手法でマークの観測を行い誤差を補正する。以上の事から、デッドレコニングやカメラの読み取り誤差等、ロボットの性能は、許容距離の決定に影響する。

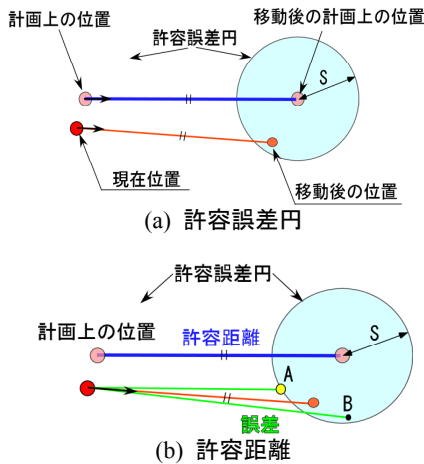


Fig.6 許容距離

次に、経路上において上記で決定した観測手法を用いた自己位置同定を行う観測地点を決定する。

このときの観測地点は最低限の観測回数になるよう計画する。そこで、ある観測地点 $A_S$ における許容距離を $P_S$ とする。この許容距離 $P_S$ を分割し、分割点の距離 $A_i$ を算出する。この各距離 $A_i$ の分割点における許容距離 $P_i$ を考えた場合、式(1)のように、この分割点までの距離 $A_i$ とその分割点の許容距離 $P_i$ の和 $W_i$ が最長となる分割点を、次の観測地点とする。

$$W_i = A_i + P_i \rightarrow \max. \quad (i=1,2,3 \dots N) \quad (1)$$

Fig.7においては分割点 $A_2$ の場合の距離 $W_2$ が最長となり、この地点を $A_S$ の次の観測地点として定める。次の観測地点

$A_2$ の許容距離にも同様の操作を行い、これを繰り返すことで、経路上の観測地点を決定していく。またこの観測地点が目的地まで算出できた場合、その経路を目的地へ到達できると判断し、行動計画の経路として採用する。

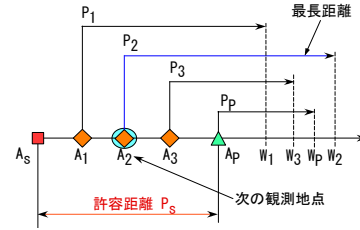


Fig.7 観測地点の決定

### 3. シミュレーション

#### 3-1 許容誤差と観測計画

移動距離が短く、かつ観測地点が少ない経路を求めるため、各許容誤差の最短経路が目的地へ到達できる場合の許容誤差の違いによる観測計画の変化について検証する。想定するロボットの性能は、デッドレコニング誤差が10%とする。この10%とは、移動距離の最大10%の誤差が発生する可能性があることを表す。また実際のマークの位置とカメラにより読み取ったマークの中心との誤差が $\pm 1$ Pixelとする。与える環境はFig.8(a)とする。この環境において、許容誤差が0, 25, 50, 75cmの場合の観測地点を検証し、その結果をそれぞれFig.8(b), (c), (d)に示す。このときの観測地点数と各経路の全観測地点における許容距離の平均値はTable 1のようになる。なお各観測地点の数字は観測するマークの番号である。

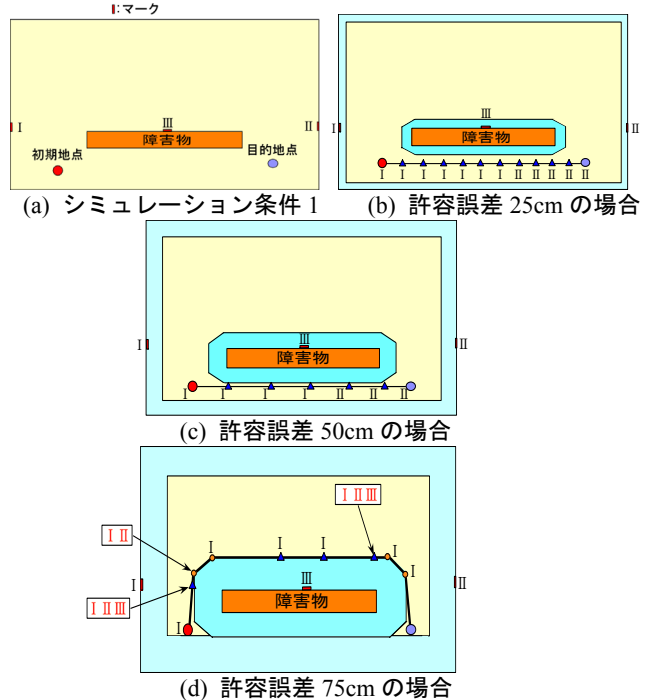


Fig.8 許容誤差による観測地点の決定

Table 1 観測計画

許容誤差の幅(cm)	観測地点数	移動距離(cm)
0	0	2400
25	13	2400
50	7	2400
75	9	3298

まず許容誤差が 0 の場合、コンフィグレーション障害物の許容誤差領域と、観測計画における許容誤差円は 0 である。このため、観測地点を決定することができず、ロボットは初期地点から移動できず、目的地へ到達できない。

次に許容誤差 25cm の場合、初期地点から目的地へ直線の経路が選択される (Fig.8(b))。この結果と許容誤差 50cm 場合を比較すると、許容誤差が 2 倍になったことにより、半分の観測地点で目的地へ到達できる (Fig.8(c))。最後に許容誤差 75cm の場合、これまで選択できた初期地点から目的地の直線経路がコンフィグレーション障害物により選択できず、直線経路より長い最短経路が選択される。さらに観測地点も多くなる (Fig.8(d))。

このように許容誤差を大きくすることで観測地点を少なくできる。一方で許容誤差が過大だと経路の計画を阻害し、移動距離が長く観測地点も多い経路が選択されてしまう。以上の結果より今回の条件では、移動距離が初期地点から目的地まで直線で、かつ観測地点が他の許容誤差の場合に比べ少ない許容誤差 50cm が適正な許容誤差となり、このときの経路及び観測地点 Fig.8(c)が採用される。

### 3-2 ロボット性能の経路選択結果への影響

ロボット性能の相違による経路選択結果への影響について検証する。今回はデッドレコニング性能とカメラの読み取り誤差に差がある 3 種類のロボットを想定し、Fig.9 のような環境を与える。これらのロボットの名前を Robot1 から Robot3 とし、Table 2 に 4 種類のデッドレコニング性能とカメラの読み取り誤差を示す。また各許容誤差における予備経路探索は、環境中のコンフィグレーション障害物の頂点数の半分をランダムに選択するまで繰り返す。今回の許容誤差の上限値は 150cm とし、許容誤差 30cm から始まり、30cm ずつ許容誤差を増やした場合の経路を計画する。

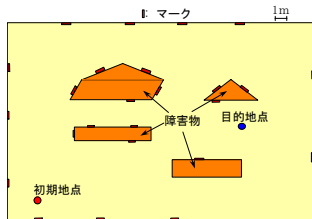


Fig.9 シミュレーション条件 2

Table 2 デッドレコニング性能

ロボットの名称	デッドレコニング誤差	カメラの誤差
Robot 1	10%	±1 Pixel
Robot 2	40%	±1 Pixel
Robot 3	40%	±5 Pixel

各ロボットの採用経路についてそれぞれ Fig.10, Fig.11 に示す。また Table 3 に各採用経路の距離と採用された経路のコンフィグレーション障害物の拡張幅、さらに観測回数について示す。まず Robot1 の場合、デッドレコニング性能、カメラの性能共に良く、経路は最短経路が選択される (Fig.10)。このときの許容誤差は Robot 1 の性能と、与えた環境において許容誤差 60cm が最適であることが分かる。

次に Robot 2 の場合、Robot 1 に比べデッドレコニング性能が悪いので、移動時の誤差が大きく Robot 1 のような経路は選択できない。しかし許容誤差を大きくし、経路を再計画することで、Fig.11 の Robot 2 の経路のように、許容誤差 120cm の場合の最短経路を選択することが出来る。

最後に Robot 3 の場合、デッドレコニング誤差、カメラの

読み取り誤差共に悪く、特に Robot3 は前述の 2 種類のロボットに比べカメラの読み取り誤差が悪いので、それに伴い視覚による自己位置同定の精度も悪くなる。このため Robot 2 と同じデッドレコニング性能でも、ロボットの位置を正確に把握できていないので、Robot 2 の経路を採用することができない。こうした状況でも予備経路を計画することにより、Fig.11 の Robot 3 の経路のように迂回した経路が採用できる。

このように性能の悪いロボットでも、経路の再計画と予備経路の探索により、通行可能な経路を発見できる。また Robot 2 と Robot 3 の結果からカメラの性能が良ければ、デッドレコニング性能が悪くとも、自己位置同定により誤差を修正できていることも分かる。

以上の結果から、本研究で提案する行動計画はロボットの性能に見合った経路を選択できることが確認された。

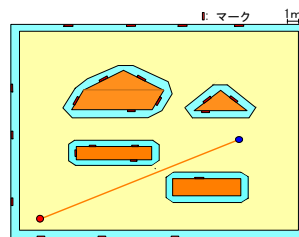


Fig.10 Robot 1 の採用経路

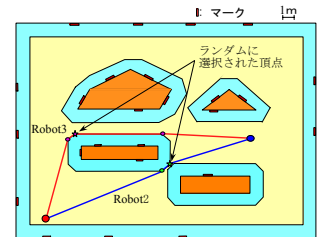


Fig.11 Robot2・3 の採用経路

Table 3 経路の比較

名前	採用時の許容誤差(cm)	移動距離 (cm)	観測回数
Robot 1	60	2372	6
Robot 2	120	2392	18
Robot 3	120	3276	23

### 4. 結論

本研究では、自律移動ロボットが目的地へ移動するための経路を計画する手法を提案した。そして計画された経路が安全で、かつ移動効率の良いものとなるために、経路計画と観測計画を用い、2つの計画が両立するための手法を提案した。

また上記の行動計画を用いた場合のシミュレーション結果からロボットの性能に見合った経路を計画でき、ロボットが目的地へ到達できることを示した。

今後の展望として、ロボット実機による本研究の有効性を検証する必要がある。

### 謝辞

本研究の一部は、財団法人カシオ科学振興財団、及び科研費若手研究 (B) 15700153 の補助を受けた。また、コンフィグレーション障害物の作成方法については茨城大学井上康介氏の助言を得たため、ここに謝辞を表す。

### 参考文献

- [1] 永谷圭司, 油田信一: “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.
- [2] 神原利彦, 三浦純, 白井良明, 林朗, 李仕剛: “移動の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”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No.629, pp.130-137, 1999.
- [3] Atsushi Yamashita, Kazutoshi Fujita, Toru Kaneko, Hajime Asama: “Path and Viewpoint Planning of Mobile Robots with Multiple Observation Strategies”, *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3195-3200, 2004.