

# 複数観測戦略を有する自律移動ロボットの行動計画

山下 淳<sup>†</sup> 藤田 和俊<sup>†</sup> 金子 透<sup>†</sup> 浅間 一<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 静岡大学工学部機械工学科 <sup>‡</sup> 東京大学人工物工学研究センター

## Motion Planning of Autonomous Mobile Robots with Multiple Observation Strategies

Atsushi Yamashita<sup>†</sup>, Kazutoshi Fujita<sup>†</sup>, Toru Kaneko<sup>†</sup>, Hajime Asama<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

<sup>‡</sup>RACE (Research into Artifacts, Center for Engineering), The University of Tokyo

**Abstract**— In this paper, we propose a new navigation planning method for autonomous mobile robots with multiple observation strategies. The robot estimates its position by observing landmarks attached on the environment with two active cameras. It chooses the optimal landmark-observation strategy depending on the number and the configuration of visible landmarks in each place. The effectiveness of our proposed method is shown through simulations.

**Key Words:** Mobile robot, Navigation, Landmark, Motion planning

### 1. 序論

本論文では、複数観測戦略を有する移動ロボットが目的地に移動するためのナビゲーション計画手法を提案する。

移動ロボットが作業を行う際、自己位置を同定しながら移動することは重要である。移動ロボットの自己位置同定については、最も基本的な手法として車輪の回転速度等から移動距離を算出するデッドレコニングが挙げられる<sup>1)</sup>。この手法は内界センサのみを用いた簡単で方法であるため、移動機構の組み付け誤差や床面の微妙な凹凸等の影響により、走行距離が長くなるに従って推定誤差が累積する。従って、外界センサを用いて累積誤差の補正を行う必要がある。

そこで、ロボットに視覚センサ(カメラ)を搭載し、環境中の特徴点を観測することで自己位置同定を行う方法が一般的に採用されている。特に屋内環境の場合、予めロボットにとって認識しやすい人工ランドマークを環境中に設置し、ランドマークを観測することで自己位置同定を行うことが有効である。

そこで本論文では、ランドマークが設置された環境において、安全かつ効率的に目的地まで到達するための移動ロボットの行動計画手法を提案する。

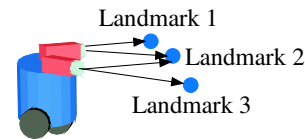
これまで、ランドマークを用いた移動ロボットのナビゲーションに関して数多くの研究が行われており、主にランドマーク自体に焦点を当てた研究と、ランドマークを観測するロボットの行動に焦点を当てた研究に分類することができる。

ランドマーク自体に焦点を当てた研究では、ランドマーク自体の設計<sup>2)</sup>や、環境へのランドマーク配置問題<sup>3)</sup>について研究が行われている。

一方、ロボットの行動に焦点を当てた研究では、観測可能なランドマークの個数に応じて高精度に自己位置同定を行う手法<sup>4)</sup>や、ランドマーク観測とデッドレコニング推定等複数の情報を融合させて高精度に自己位



(a) Stereo observation. (b) Two-landmark observation.



(c) Three-landmark observation.

Fig.1 Three observation strategies.

置同定を行う手法<sup>5)</sup>が提案されている。しかし、これらの研究では、ロボットがどの位置でランドマークを観測すれば良いかに関する議論がなされていない。そこで、ランドマークの観測計画に関する研究もなされており、観測すべきランドマークを選択する方法<sup>6)</sup>や、衝突の危険性を考慮して経路とセンシング点を選択する方法<sup>7)</sup>等が提案されている。また、不確定要素が存在する環境下における観測計画に関する研究も行われている<sup>8, 9, 10)</sup>。

また、ロボットの行動とランドマークの設計・配置を同時に考慮した研究も存在する<sup>11, 12)</sup>。

しかし、例えば、文献<sup>8)</sup>ではステレオ計測、文献<sup>12)</sup>では2台のカメラが別々のランドマークを観測して自己位置同定等、上記のほとんどの研究において、ランドマークの観測方法は1種類に固定されている。

そこで本研究では、複数観測方法(Fig. 1)を採用した移動ロボットの自己位置同定方法を構築し、複数観測戦略を有するロボットが安全に目的地まで移動するためのナビゲーション計画を提案する。具体的には、

デッドレコニング誤差やランドマークを観測する際に画像に生じる読み取り誤差等によって発生する自己同定誤差を小さくすることにより、障害物に衝突する危険が少ないロボットの行動を計画する。

## 2. 問題設定

### 2.1 研究目的

本論文では、移動ロボットの性能に応じて、ランドマークを観測する場所及びその場所におけるカメラの方向を計画することを目的とする。

### 2.2 前提条件

移動ロボットは半径  $R$  の円形で表現され、全方向に移動可能であるとする。デッドレコニング誤差は、ロボットの移動距離に応じて蓄積すると仮定する。ロボットには独立に方向を変化させることが可能なカメラが2台搭載されており、各カメラの光軸は床面と平行で高さは  $h$  であるとする。各カメラの位置は、ロボット中心から  $b_r$  だけ離れた場所にそれぞれ一直線上に設置する。また、世界座標系におけるロボットの中心位置を  $(x_r, y_r)$  とおく。

ランドマークは一定の大きさの円(半径  $r$ ) であるとし、環境中に一定の高さで設置する。ランドマーク同士はそれぞれ区別できるものとし、壁に貼り付けてあるため裏側からは観測できないものとする。

また、環境地図は既知であるとする。つまり、世界座標系における障害物の位置、及びランドマーク  $i$  の位置  $(x_i, y_i)$  はロボットに与えられているとする。

なお、ランドマーク観測は移動しながら行うこととし、同じ場所に立ち止まってカメラの方向を変化させることはしないこととする。

### 2.3 自己位置同定のための画像情報

ロボットの自己位置同定は、ランドマークを観測した際の画像中のランドマークの位置・形状・大きさにより求めることができる。

ここで、ロボットからランドマーク  $i$  までの距離を  $l_i$ 、ランドマーク  $i, j$  間の距離を  $d_{ij}$ 、ロボット  $(x_r, y_r)$  から観測したランドマーク  $i$  と  $j$  のなす角を  $\theta_{ij}$  とおく (Fig. 2)。

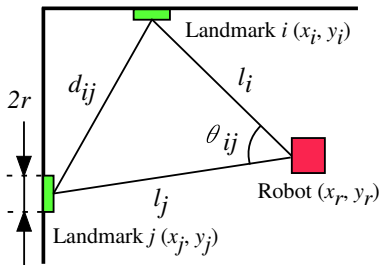


Fig.2 2-D model of the environment.

距離  $l_i$  はランドマークの半径  $r$  と画像中でのランドマークの大きさの比より、角度  $\theta_{ij}$  は画像中でのランドマーク  $i, j$  の中心位置の関係によりそれぞれ求めることができる。

## 3. 複数観測戦略

観測できるランドマークの個数や位置関係に応じた観測戦略を提案する (Fig. 1)。

一般に、1個のランドマークしか観測できない場合は、そのランドマークの画像中の大きさ・形状・位置からロボットの自己位置同定を行う必要があることに対して、複数個のランドマークが観測できる場合にはそれらの情報を融合し、最も信頼性の高い情報を用いて自己位置同定をすることが可能である。

そこで本研究では、同時に観測できるランドマークの数に応じた観測戦略を提案する。

視野内に入る観測可能なランドマーク個数が1以上の場合、ステレオ観測を用いる (Fig. 1(a))。この観測戦略は、ランドマークが1個でも視野に入れば採用することができるので汎用性が高い。

同時に観測可能なランドマーク個数が2以上の場合、2点灯台観測を用いる (Fig. 1(b))。この観測戦略は、2台のカメラの角度が大きい時に高精度で自己位置同定を行うことができる。

また、同時に観測可能なランドマーク個数が3以上の場合、3点灯台観測を用いる (Fig. 1(c))。この観測戦略では、画像中のランドマークの大きさを用いず、ランドマークの位置関係のみから自己位置同定が可能であることから、精度が高く、かつ自己位置同定結果が一意に定まる。

以下でそれぞれの観測戦略の原理について説明する。

### 3.1 ステレオ観測

ステレオ観測では、1個のランドマークの複数の場所を2台のカメラで同時に観測することで、ロボットの自己位置同定を行う方法である (Fig. 3)。

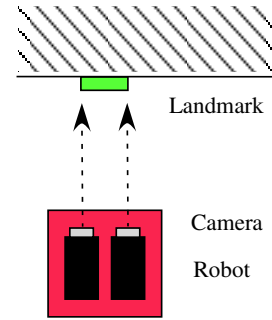


Fig.3 Overview of stereo observation.

本論文では、2台のカメラの光軸を平行にして観測することとした (平行ステレオ)。左右の画像での対応点の位置を  $(u_l, v_l)$ 、 $(u_r, v_r)$ 、基線長を  $b (= 2b_r)$ 、カメラの焦点距離を  $f$ 、視差を  $d = u_r - u_l$  とすると、三角測量の原理により、対応点の3次元座標を求めることができる。

$$s = \frac{b(u_l + u_r)}{2d}, \quad (1)$$

$$w = \frac{b(v_l + v_r)}{2d}, \quad (2)$$

$$t = \frac{bf}{d}. \quad (3)$$

ランドマークの端部を複数対応点として用いることにより、ランドマークとロボットの位置関係を算出することが可能である。

### 3.2 2点灯台観測

2点灯台観測は、ランドマークを2個観測することにより、距離  $l_j$  と角度  $\theta_{ij}$  を求め、自己位置同定を行う観測法である (Fig. 4)。ここでランドマーク  $j$  はランドマーク  $i$  と比較しロボットから近い位置にあるとする。

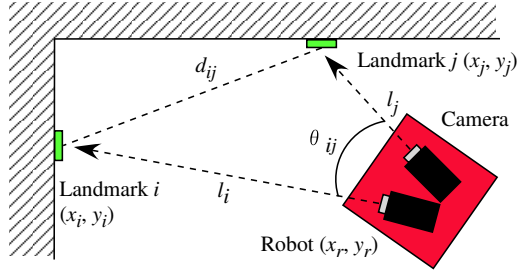


Fig.4 Overview of two-landmark observation.

この観測法では各カメラが異なるランドマークを観測することになり、半径  $r$  とカメラの画像でのランドマークの大きさの比により距離  $l_i, l_j$  が算出される。

このときカメラの読み取り誤差を考えると、ロボットまでの距離が近いランドマーク  $j$  はランドマーク  $i$  に比べ画像の分解能が高く誤差が小さい。また角度  $\theta_{ij}$  は、カメラの奥行き情報である距離  $l_i$  に比べ誤差の影響が少ない。従って、より正確である距離  $l_j$ 、角度  $\theta_{ij}$ 、距離  $d_{ij}$  から距離  $l_i$  を求める。

これにより、ランドマーク  $i$  の位置から距離  $l_i$  離れた場所にロボットが位置していることが分かる。従ってランドマーク  $i$  の位置  $(x_i, y_i)$  を中心として半径  $l_i$  の円上にロボットの位置  $(x_r, y_r)$  が存在することになり、ランドマーク  $i$  とロボットの位置の関係は以下の式により表される。

$$(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2 = l_i^2. \quad (4)$$

同様にランドマーク  $j$  とロボットの位置の関係式を求めることができる。

$$(x_r - x_j)^2 + (y_r - y_j)^2 = l_j^2. \quad (5)$$

この2組の関係式により、ロボットの位置はランドマーク  $i, j$  の円の交点に限定される。円の交点は2点となるが、デッドレコニングによるロボットの移動履歴から1点に定めることができる。

### 3.3 3点灯台観測

3点灯台観測は、3個のランドマークの観測から、角度  $\theta_{ij}, \theta_{jk}$  を求め、自己位置同定を行う方法である (Fig. 5)。

ランドマーク  $i, j$  の位置  $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 、角度  $\theta_{ij}$  とロボットの位置  $(x_r, y_r)$  の関係は以下の式より表すことができる。

$$\tan^{-1} \frac{y_j - y_r}{x_j - x_r} - \tan^{-1} \frac{y_i - y_r}{x_i - x_r} = \theta_{ij}. \quad (6)$$

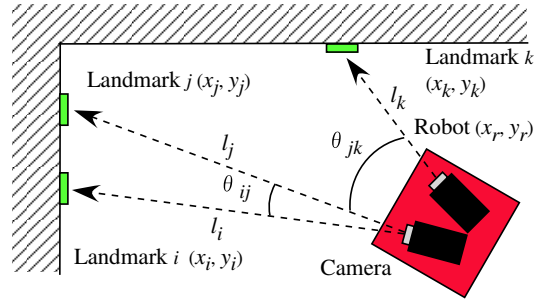


Fig.5 Overview of three-landmark observation.

同様に、それぞれのランドマーク  $j, k$  とロボットの位置の関係式を求めることができる。

$$\tan^{-1} \frac{y_k - y_r}{x_k - x_r} - \tan^{-1} \frac{y_j - y_r}{x_j - x_r} = \theta_{jk}. \quad (7)$$

これらの関係式よりロボットの位置を同定することができる。

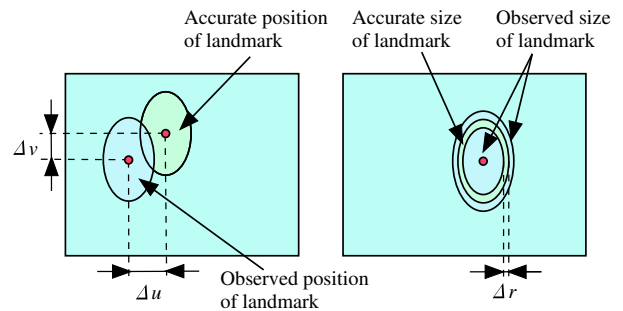
## 4. 最適観測戦略の決定

本研究では、提案した3つの観測戦略を併用する。そして、自己位置同定を行う場所で、3つの観測戦略のうち観測精度が最も良い最適観測を選択する。

最適観測の選定には、まずどのランドマークが観測可能かを調べる。ロボットがランドマークを裏側から観測する時や、ロボットとランドマークの間に障害物が存在するときはランドマークを観測することができない。

また、画像には通常誤差が生じる。しかし、異なるランドマークや異なる観測戦略では、画像誤差の自己位置同定への影響に違いがある。この誤差の影響が少ないものが、観測精度が良いと言える。

そこで、ランドマークの画像に位置  $(\pm \Delta u, \pm \Delta v)$ 、大きさ  $\pm \Delta s$  だけ誤差が発生したと仮定する (Fig. 6)。この誤差を含む画像からそれぞれの観測戦略と観測可能なランドマークを組み合わせ、自己位置同定を行う際の誤差を算出する。

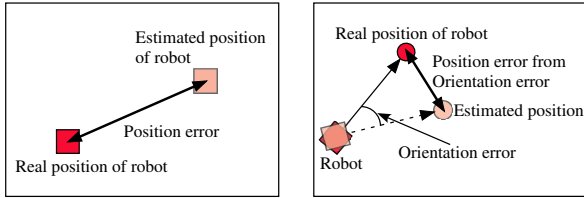


(a) Position error. (b) Size error.

Fig.6 Image error.

ここで、画像に含まれる誤差の影響により、ロボットの自己位置同定結果に位置誤差と姿勢誤差が発生する。位置誤差の単位は距離であり、姿勢誤差の単位は角度であるため、両者を直接比較することはできない。

そこで、ある一定距離進んだ後の目的地と現在位置の間のずれの大きさを求め、これを各観測戦略の評価指標とする (Fig. 7). 具体的には、位置誤差の影響の最悪値 (Fig. 7(a)) と姿勢誤差の影響の最悪値に移動距離をかけたもの (Fig. 7(b)) をそれぞれ計算し、それらの合計距離の最悪値が最も小さい (目的地への移動誤差が最も小さい) 場合の観測戦略をその観測地点での最適観測戦略とする.



(a) Position error. (b) Orientation error.

Fig.7 Position and orientation error of robot.

つまり、ロボットの現在位置  $p$  から距離  $m$  だけ移動した際の、位置誤差  $E_{pos,max}(p, m)$  と姿勢誤差に起因した位置ずれ  $E_{ang,max}(p, m)$  の合計の最大値を  $E_{max}(p, m)$  ( $= E_{pos,max}(p, m) + E_{ang,max}(p, m)$ ) とすると、

$$E_{max}(p, m) \rightarrow \min. \quad (8)$$

を求めることにより、観測方法 (ステレオ計測, 2点灯台観測, 3点灯台観測) 及びその際に観測するランドマークを決定する.

## 5. ナビゲーション計画手法

ランドマークの観測誤差とデッドレコニング誤差を考慮し、安全に目的地に到達するためのナビゲーション計画手法について説明を行う.

ロボットは、ランドマークを観測して自己位置同定を行った後、デッドレコニングにより自己位置を推定しつつ走行する. ただし、長距離移動すると、デッドレコニング誤差が蓄積し、障害物に衝突する危険性がある. よって、デッドレコニング誤差が蓄積する前に再びランドマークを観測して自己位置同定を行う必要がある.

一方、ランドマークを観測して自己位置同定を行うにはカメラの方向変化や画像処理演算を行う必要がある. 従って、ランドマークの観測回数は少ないほうが良い.

そこで、少ない観測回数で誤差が蓄積する前に自己位置同定を行う手法を構築する.

ここで、経路上においてスタートからの距離が  $m_s$  となる場所  $p_s$  でランドマークの観測を行った後、次に経路上のどの場所で観測を行えば良いかを考える.  $p_s$  から距離  $m$  だけ移動した際のデッドレコニング誤差 (目的地と実際の位置のずれ) の最大値を  $D_{max}(p_s, m)$  とし、経路と障害物の距離関係より求められる、障害物に衝突しないためのロボットの位置の許容誤差を  $A$  とすると、ランドマークを観測せずに移動可能な距離  $m$  は、

$$D_{max}(p_s, m) + E_{max}(p_s, m) \leq A. \quad (9)$$

を満たす. 従って、上式において等号が成立する場合を計算することで、ランドマークを観測せずに移動可能な許容最大距離  $m_{p_s,max}$  を求めることができる.

ここで、スタートからの距離が  $m_s + m_{p_s,max}$  となる場所を  $p_g$  とする. また、 $p_s$  から  $p_g$  までを  $n + 1$  分割し、それぞれの場所を  $p_i$ , 経路上のスタートからの距離を  $m_i$  とする ( $p_0 = p_s, p_n = p_g$ ).

さて、 $p_0 (= p_s)$  の次に  $p_n (= p_g)$  で観測を行うとすると、更に次 ( $p_s$  での観測の2回後) に観測を行う場所 (スタート地点からの距離は  $m_n + m_{p_n,max}$ ) が最も大きくなるとは限らない. 従って、 $p_0$  から  $p_n$  の区間において、更に次 ( $p_s$  での観測の2回後) に観測を行う場所が最も遠くなる地点を求めるためには、

$$m_i + m_{p_i,max} \rightarrow \max. \quad (10)$$

を満たす  $p_i$  を求めればよい (Fig. 8).

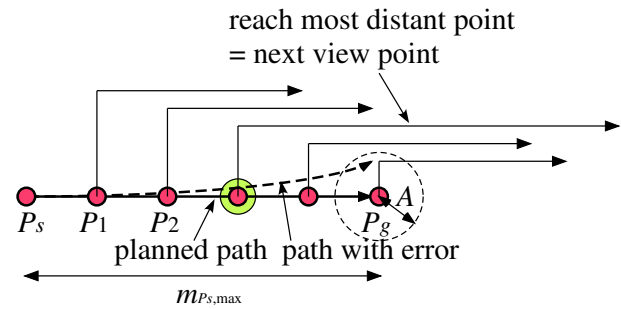


Fig.8 Selection of view points.

よって、以下の手順により経路上での観測地点を順次求めることができる.

1. ランドマーク観測を行った場所  $p_s$  で式 (9) を満たす  $m_{p_s,max}$  を計算し、 $p_g$  を求める.
2.  $p_s$  から  $p_g$  までを  $n + 1$  分割し、それぞれの場所を  $p_i$  とする.
3. 式 (10) を満たす  $p_i$  を求め、次の観測地点とする.
4.  $m_i + m_{p_i,max}$  がスタートからゴールまでの距離より大きければ終了し、そうでなければ求めた  $p_i$  を  $p_s$  とおき、最初のステップに戻る.

以上により、経路上での観測地点、観測地点での最適観測戦略、その際に観測するランドマークを計画することができる.

## 6. ナビゲーション計画結果

我々が構築した実際のロボットシステム (Fig. 9) に基づき、ナビゲーション計画のための各種パラメータ設定を行った. その結果、ロボットの半径  $R = 300\text{mm}$ , カメラ高さ  $h = 700\text{mm}$ , ロボット中心からカメラまでの距離  $b_r = 100\text{mm}$ , カメラの解像度  $640 \times 480\text{pixel}$ , 焦点距離  $f = 3000\text{pixel}$ , ランドマークの半径  $r = 50\text{mm}$  と設定した.

まず、複数観測戦略が有効に選択されているかを調べるため、Fig. 10 のような環境下においてロボットの経路と観測地点を与え、最適観測戦略計画を行った. ここでは、画像中での誤差を左右のカメラとも  $\Delta u = \Delta v = \Delta s = 1\text{pixel}$  とした場合の結果を示す. Fig. 10

Table 1 Simulation results of optimal observation strategy.

Position	Strategy	Observing Marks	Total error	Position error	Orientation error
I	A	1	143mm	53mm	1.6deg
	<b>B</b>	<b>1, 3</b>	<b>48mm</b>	<b>39mm</b>	<b>0.3deg</b>
	C	-	-	-	-
II	A	2	259mm	133mm	1.9deg
	B	1, 2	305mm	237mm	2.6deg
	C	-	-	-	-
III	A	3	237mm	101mm	2.4deg
	B	1, 3	93mm	81mm	0.7deg
	<b>C</b>	<b>1, 2, 3</b>	<b>5mm</b>	<b>2mm</b>	<b>0.1deg</b>
IV	A	4	178mm	80mm	2.0deg
	B	-	-	-	-
	C	-	-	-	-
V	A	5	22mm	22mm	0.7deg
	B	4, 5	35mm	35mm	0.6deg
	C	-	-	-	-

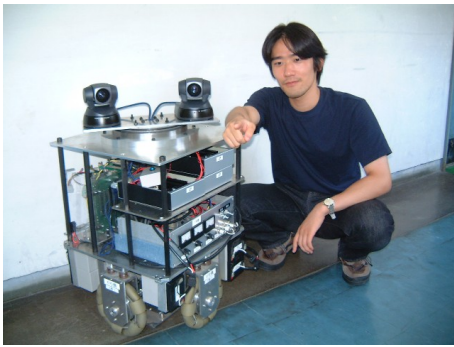


Fig.9 Constructed mobile robot based on omnidirectional mechanism<sup>13)</sup>.

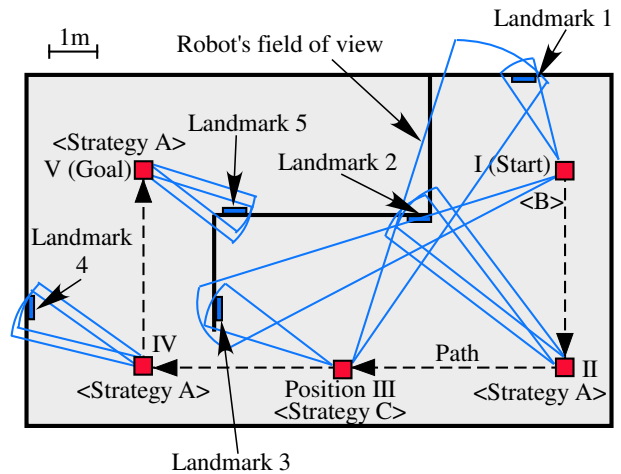


Fig.10 Simulation results of optimal observation strategy.

及び Table 1 において, I~V はランドマーク観測地点, 1~5 はランドマーク番号を表している. また, 各観測地点での最適観測戦略を A~C で, その際の視野方向を扇形で示す. ただし, A はステレオ観測, B は 2 点灯台観測, C は 3 点灯台観測を表している. 更に, Table 1 において, 各場所で観測精度 (誤差) を示す. ここでは, 選択された最適観測戦略を太字で示してある.

観測地点 III ではすべての観測法を行うことができたが, 最も精度が良い観測法は 3 点灯台観測であった. また, 2 点灯台観測の誤差は近いランドマークまでの距離とカメラの角度に依存するため, カメラ角度が大きいときは 2 点灯台観測, 角度が大きいときはステレオ観測が最適観測となった.

以上により, 適切な観測戦略が状況に応じて選択されていることが示された.

次に, ロボットの性能と観測地点や経路の関係を調べるため, 観測精度及びデッドレコニング精度の高いロボット  $R_1$  と低いロボット  $R_2$  のナビゲーション計画結果の比較を行った (Fig. 11).

ロボット  $R_1$  は, 画像中での誤差を左右のカメラともに  $\Delta u = \Delta v = \Delta s = 0.5\text{pixel}$  とし, デッドレコニング誤差が走行距離の  $\pm 5\%$  蓄積するとした. ロボット  $R_2$  は,  $\Delta u = 1\text{pixel}$ ,  $\Delta v = \Delta s = 0.5\text{pixel}$  とし, デッドレコニング誤差は走行距離の  $\pm 10\%$  であるとした. また,  $A = 400\text{mm}$  と設定した.

ここで, Path A (Fig. 11 中上側の経路) は, ゴールに到達するまでの走行距離は短い, 観測できるランドマークが少ない. 逆に, Path B (下側の経路) は, ゴールに到達するまでの走行距離は長い, 観測可能なランドマークが多いため, 自己位置同定が行い易い.

ナビゲーション計画の結果, ロボット  $R_1$  に関しては, 合計 5 回ランドマークを観測することで Path A を通りゴールに到達する行動が計画された. それに対

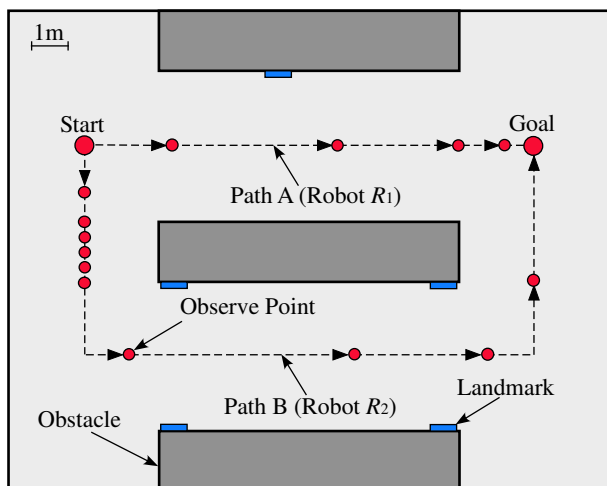


Fig.11 Simulation results of navigation planning.

して、ロボット  $R_2$  はデッドレコニング誤差が大きくなり障害物に衝突する危険があるため、Path A を通ってゴールに到達することができなかった。そこで、ロボット  $R_2$  に関しては、合計 11 回ランドマークを観測することで Path B を通りゴールに到達する行動が計画された。

参考のため、Path B を通ってゴールに至る経路をロボット  $R_1$  に関して計画したところ、ランドマーク観測回数は合計 7 回であった。また、それぞれの場所において適切な観測戦略が選択されていることも確認された。

以上により、ロボットの性能に応じて適切な観測地点及び経路を決定することが可能であることが示された。具体的には、性能の良い（観測精度・デッドレコニング精度）ロボットは多少危険が多くてもゴールまでの到達時間が短い経路を選択し、逆に性能の悪いロボットは一見経路長が短く到達しやすい経路があってもより安全な経路長の長い経路を選択することができた。

## 7. 結論

本論文では、移動ロボットが安全に目的地に到達するために、複数観測戦略から最適な方法を選択し、ランドマークを観測する場所及びその場所におけるカメラの方向を計画する手法を提案した。動作計画シミュレーションの結果、ロボットは高精度に自己位置同定を行う観測戦略を適切に選び、少ない観測回数で障害物に衝突する危険性を小さくする観測地点を求めることができた。

また、従来の経路計画手法と異なり、ロボットの観測精度やデッドレコニング精度に応じて、例えば経路長が長くなっても安全に目的地に到達できる経路や、危険でもスタートからゴールまで距離が短い経路を選択することができた。

今後の展望としては、例えば同時に 2 個以上のランドマークについてステレオ観測を行う等、観測戦略の種類を増やすことや、環境の不確定性を定量的に考慮してナビゲーション計画を行う<sup>14)</sup>ことが挙げられる。また、動作計画時に入力として与えるカメラの精度やロボットのデッドレコニング精度に実機実験から得ら

れた実際の結果を用いることや、最適観測の結果を用いて実機移動ロボットのナビゲーションを行うことも重要である。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 (B)15700153 の補助を受けた。

## 参考文献

- 1) Yutaka Watanabe and Shin'ichi Yuta: "Estimation of Position and its Uncertainty in the Dead Reckoning System of the Wheeled Mobile Robot," *Proceedings of the 20th International Symposium on Industrial Robots*, pp.205-212, 1990.
- 2) 太田順: "知能ロボットのための環境整備," 精密工学会誌, Vol.65, No.10, pp.1407-1410, 1999.
- 3) 田代健治, 太田順, 林遠球, 新井民夫: "人工ランドマークの最適配置設計法," 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.896-902, 1996.
- 4) Margrit Betke and Leonid Gurvits: "Mobile Robot Localization Using Landmarks," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.13, No.2, pp.251-263, 1997.
- 5) 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一: "移動ロボットのための遡及的現在位置推定法 - 処理時間を要する外界センサーデータの利用 -," 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.7, pp.1075-1081, 1997.
- 6) 小森谷清, 大山英明, 谷和男: "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.
- 7) 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.
- 8) 文仁赫, 三浦純, 白井良明: "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," 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.8, pp.1107-1113, 1999.
- 9) Kanji Tanaka, Hongbin Zha and Tsutomu Hasegawa: "Viewpoint Planning in Map Updating Task for Improving Utility of a Map," *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.729-734, 2003.
- 10) Masahiro Tomono: "Planning a Path for Finding Targets under Spatial Uncertainties using a Weighted Voronoi Graph and Visibility Measure," *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.124-129, 2003.
- 11) 竹内一雅, 太田順, 池田和生, 相山康道, 新井民夫: "人工ランドマークを用いた移動ロボットのナビゲーション," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.66, No.647, pp.2239-2246, 2000.
- 12) 太田順, 藤本智也, 鬼頭朋見, 新井民夫, 植山剛, 西山強志: "2 台のカメラを用いた AGV ナビゲーションのための人工ランドマークの配置計画法と観測計画法," 精密工学会誌, Vol.68, No.12, pp.1600-1604, 2002.
- 13) Hajime Asama, Masatoshi Sato, Luca Bogoni, Hayato Kaetsu, Akihiro Matsumoto and Isao Endo: "Development of an Omni-Directional Mobile Robot with 3 DOF Decoupling Drive Mechanism," *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1925-1930, 1995.
- 14) Luis Moreno and Eladio Dapena: "Path Quality Measures for Sensor-based Motion Planning," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.44, pp.131-150, 2003.