人工ランドマークの最適配置設計法

田代 健治* 太田 順* 林 遠球* 新井 民夫*

Design of the Optimal Arrangement of Artificial Landmarks

Kenji Tashiro*, Jun Ota*, Yeuann C. Lin* and Tamio Arai*

It is important to set landmarks when a robot needs to navigate in a certain environment and to measure its own location; however it has not been discussed well how to arrange landmarks in the optimal way until now. We, therefore, demonstrate the possibility of design of the optimal arrangement of artificial landmarks.

First, we make it clear the optimization problem with regard to the arrangement of landmarks. Second, as one example of the artificial landmarks, we introduce a signboard system. Third, we propose a methodology to evaluate arrangement of landmarks assuming an obstructed rectangular environment. Fourth, we apply the algorithm of spatial competition to the optimal arrangement of landmarks. Finally, simulation results indicate that even though our method is not global optimization approach we can obtain closely optimal and practical arrangement with the minimum number of landmarks which satisfies the necessary condition.

Key Words: Mobile Robot, Landmark, Localization, Voronoi Diagram

1. はじめに

移動ロボットによる環境探索において、自己位置同定は基本的な機能である。デッドレコニングは自己位置同定の主要な手法であるが、累積誤差のため、その信頼性は走行距離が増えるに従って低下する。

この問題を解決するため、デッドレコニングを補う機能としてランドマークを観測する画像センサを搭載した移動ロボットが開発されている[1]~[5]。ロボットの自律性が要求されるならば、ロボット自身が環境内の特徴物（電灯やスプリンクラー等）を選択して情報を抽出しなければならない。しかし、予め環境内に情報を得やすいように単純な設計の人工ランドマークを設置するならば、自己位置の測定は高速で信頼性の高いものとなる。これは、移動ロボット側の負担を環境が負担したと考えるもよい。このような、環境側のアプローチとなる研究は、主に人工ランドマークの開発に限定されてきた。即ち、単純な設計で効率の良いランドマークが、これまで幾つか開発されてきた（例えば文献[6]）。しかしそのように開発されたランドマークを配置する手法はこれまで殆ど議論されていない。小森谷[7]は、周囲にある多数のランドマークから最も有用なものを選択する方法論を提案したが、そこではランドマークの数

とその配置は与えられたものとしている。

筆者らは、人工ランドマークの1例として新井らの提案したサインボードシステム[8]を用いることにより、ランドマークの最適配置法について議論を進める。1つのサインボードは4つのLED（Fig. 1）を持ち、その2次元の画像データは移動ロボット上に搭載されたCCDカメラによって得られる。故に、移動ロボットはランドマークとの姿勢を得る。

2章では、ランドマーク配置問題を最適化問題の1つとして明確に定義する。3章では配置されたランドマークの評価手法について、4章ではランドマークの最適配置を設計するアルゴリズムを示す。

2. ランドマーク配置最適化問題の定義

種々の人工ランドマークが存在するが、本論では相対位置・姿勢を計測可能な人工物に限定する。また移動ロボットは、通

Fig. 1 Overview of a signboard unit

原稿受付 1995年7月17日

*東京大学工学系研究科

*The Graduate school of engineering, University of Tokyo

常デッドレコニングで自己位置同定を行っており、適当な距離を走行すると人工ランドマークを観測することにより自己位置の誤差を補正するものとする。このとき、誤差を補正するために移動ロボットがランドマークを観測しようとする場所が、ランドマークの観測に適していない事態が考えられる。

ランドマーク配置の最適化問題の設定を明らかにする。移動ロボットの自己位置は、環境内の任意の点で同定可能であり、かつある精度以上で同定可能であることが必要である。別の言い方をすれば、自己位置の誤差の上限値が設計仕様として重要である。さらに、ランドマークの設置コストを考慮すれば、ランドマークの数は出来るだけ少ない方がよい。従って、ランドマーク配置の最適化問題は以下のように定義できる。

ランドマーク配置の最適化問題とは、「環境内のどの点でランドマークを観測したとしても、自己位置同定がある精度以上で可能であるような、最少個数のランドマーク配置を探索すること」である。

ただし、我々は移動ロボットが常時ランドマークを観測していると仮定しているわけではないことに注意しなければならない。デッドレコニングの累積誤差をキャンセルすべく移動ロボットが環境内のどの点でランドマークを観測したとしても、自己位置がある精度以上で補正されることを保証するのが、最適配置である。

具体的な最適化法を、次の2段階より構成する。

第1段階では、ランドマークの数を固定して、ランドマークの配置のみを変化させて、環境内の自己位置誤差の最大値を最小化する。ランドマークの数を変えて、各ランドマーク数に対応する配置を求める。

第2段階では、設計仕様で環境内の最大位置誤差に関して上限値が与えられるとすると、それを満たすような最少のランドマーク数とその配置を先の各ランドマーク数に対応した配置より決定する。

このように我々の目的は、ある環境と最大位置誤差の上限値が与えられたときに、最低でも幾つランドマークが必要なのか、そして如何なる配置にすべきなのかを決定することである。

3. ランドマークモデル

3.1 サインボード

相対位置・姿勢を同定可能な人工ランドマークの1つとして、本論ではサインボード[6]を採用し、配置手法の議論を進める。ただし、サインボード以外のランドマークを採用したとしても、配置されたランドマークの評価手法や4章で述べる設計手法の一般性は失わない。

サインボードを観測することにより、移動ロボットはCCDカメラの画像を通して、迅速にかつ正確に自己位置を同定する。

サインボードユニットはFig.1に示されるように、2つの平板をある角度 α で合わせた構造をしており、一定長 L で隔てられた4つのLEDを持つ。角度 α は、測定した相対回転角 θ の標準偏差 σ_θ を最小化するように最適化し、 $\alpha=140[\text{degree}]$ としている[6]。

Fig. 2 Relationship between a signboard and a measuring robot

以降では、サインボードユニットを単にサインボードと呼ぶこととし、最適配置設計に於いては1つのランドマークとして使用する。

3.2 相対位置・姿勢の計算手法

ロボットは、観測対象となるサインボードとの相対位置・姿勢を計算する。相対姿勢は、距離 d 、方向 ϕ 、回転角 θ の3変数で定義される (Fig. 2)。

対象ランドマークが θ 回転しても、垂線 P_1P_2 の像長は一定に保たれる。像長 P_1P_2 は距離 d に反比例することから、 d が計算可能である。

P_2P_3 、 P_2P_4 の像長 l_2 、 l_3 の比は相対回転角 θ に依存する。カメラ像面と対象ランドマークの方向とがなす角 ϕ は、像上におけるサインボードユニットと、像の中心点との距離を計算することで得られる。

3.3 サインボードの誤差解析

自己位置同定で生ずる測定誤差の要因としては、CCDカメラによる量子化誤差と、ランドマークの設置誤差が考えられるが、ここではCCDカメラの量子化誤差のみを考慮する。移動ロボットによって測定されたサインボードとの相対距離 d と相対回転角 θ の誤差をそれぞれ e_d 、 e_θ と記述する。すなわち、

$$d = \underline{d} + e_d, \theta = \underline{\theta} + e_\theta \quad (1)$$

ここで、 $\underline{d}$ 、 $\underline{\theta}$ は d および θ の真値である。サインボードの誤差解析を以下で行う。 e_d と定義される相対距離 d の測定誤差は次式で表される。

$$e_d = \frac{d^2}{Lf} e_1 \quad (2)$$

ここで、 e_1 は P_1P_2 の像長 l_1 の量子化誤差、 L はLED間の距離、 f はCCDカメラの焦点距離である。

式(2)から、距離の量子化誤差は、相対距離 d が一定となる条件下ではLED間距離 L に反比例することが分かる。 e_θ と定義される相対回転角 θ の測定誤差は次のように表される。

$$e_\theta = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial l_2}\right)^2 e_2^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial l_3}\right)^2 e_3^2} \quad (3)$$

ここで、 e_2 、 e_3 はそれぞれ P_2P_3 、 P_2P_4 の像長 l_2 、 l_3 (Fig.2)の量子化誤差である。

上式で示される e_θ の計算アルゴリズムは、観測に成功したLEDの数に依存する。式(3)の値は以下の場合においてそれぞれ決定される。

(a) 全てのLED (P_1 , P_2 , P_3 , P_4) が観測される場合

$$\frac{\partial \theta}{\partial l_2} = \frac{(l_3 + f \cot \phi - l_3 \cos \alpha)G_1 + (f + l_3 \sin \alpha)G_2}{G_1^2 + G_2^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial l_3} = \frac{G_{2d}G_1 - G_{1d}G_2}{G_1^2 + G_2^2} \quad (5)$$

ここで, G_1, G_2, G_{1d}, G_{2d} は次のように定義される.

$$G_1 = l_2 f + l_3 f \cos \alpha + (l_2 - f \cot \phi) l_3 \sin \alpha$$

$$G_2 = l_2 l_3 + l_2 f \cot \phi + l_3 f \sin \alpha - (l_2 - f \cot \phi) l_3 \cos \alpha$$

$$G_{1d} = f \cos \alpha + (l_2 - f \cot \phi) \sin \alpha$$

$$G_{2d} = l_2 + f \sin \alpha - (l_2 - f \cot \phi) \cos \alpha$$

(b) P_1, P_2, P_3 の3点が観測可能で, P_4 が観測不能の場合

$$\sigma_\theta = \frac{\lambda \sqrt{3}}{6} \left| \frac{\partial \theta}{\partial l_2} \right| \quad (6)$$

ここで,

$$\frac{\partial \theta}{\partial l_2} = \begin{cases} \frac{1}{l_u^2 + f^2} \left\{ \frac{d(l_u^2 + f^2 + l_2 l_u)}{\sqrt{L^2(l_u^2 + f^2) - d^2 l_2^2}} + f \right\} \\ \text{when } \theta + \sin^{-1} \frac{l_2}{\sqrt{f^2 + l_2^2}} \geq 0 \\ \frac{1}{l_u^2 + f^2} \left\{ -\frac{d(l_u^2 + f^2 + l_2 l_u)}{\sqrt{L^2(l_u^2 + f^2) - d^2 l_2^2}} + f \right\} \\ \text{when } \theta + \sin^{-1} \frac{l_2}{\sqrt{f^2 + l_2^2}} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

ただし, $l_u = f \cot \phi - l_2 \lambda$ は, CCD カメラの画素長を意味する.

(c) P_1, P_2, P_4 の3点が観測可能で, P_3 が観測不能の場合も(b)と同様に $\frac{\partial \theta}{\partial l_1}$ を計算する.

これまで e_d と e_θ の定式化を行ってきた. 2章では, 移動ロボットがランドマークを観測して自己位置を補正する場合, 環境内のどの位置に存在しても常に一定値以内の測定誤差を保証することが重要であると述べた. したがって実際には, 相対距離 d と相対回転角 θ の最大測定誤差 $e_{d, \max}, e_{\theta, \max}$ を考慮しなければならない. e_1, e_2, e_3 の最大値を $e_{1, \max}, e_{2, \max}, e_{3, \max}$ と表記すると, $e_{d, \max}, e_{\theta, \max}$ は式(1)(2)に $e_1 = e_{1, \max}, e_2 = e_{2, \max}, e_3 = e_{3, \max}$ を代入して得られる. e_1, e_2, e_3 を何れも $U(-\lambda, \lambda)$ なる一様分布と仮定できる. $e_{1, \max} = e_{2, \max} = e_{3, \max} = \lambda$ と仮定すると, 式(1)(2)は次のように書き換えられる.

$$e_{d, \max} = \frac{d^2}{L f} \lambda \quad (8)$$

$$e_{\theta, \max} = \lambda \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial l_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial l_3} \right)^2} \quad (9)$$

次に, 平面内における d と θ の誤差の広がりを調べる. $e_{d, \max}$ の誤差分布図を Fig. 3(a) に, $e_{\theta, \max}$ の誤差分布図を(b)に示す. Fig. 3の各曲線は, 等誤差点を結ぶことにより得られる等位曲線を表す. $e_{d, \max}$ は点 P_1 (P_2) を中心に同心円状に広がり, 無指向性と言える. $e_{\theta, \max}$ は指向性を持ち, 不連続点が存在する. これは, e_θ の計算アルゴリズムが観測されたLEDの数に依存することに起因している (Eq. 4~7). これらの不連続点は, 全てのLED (P_1, P_2, P_3, P_4) が観測可能な場合と3つのLEDのみが観測可能な場合の境界線を形成する. 不連続点における誤差の大きさの比較により, 3点観測可能な場合より4点観測可能な場合の方が計測精度が良好であることがわかる. ここで, ランドマーク以外の障害物による遮蔽はないものとし, CCD カメラの画素長 $\lambda = 15 [\mu\text{m}]$, 焦点距離 $f =$

(a) $e_{d, \max}$: relative position error

(b) e_θ : relative orientation error

Fig. 3 Geographical distribution of error

12[mm], 方向 $\phi = 90[\text{degree}]$, LED 間の距離 $L = 7[\text{cm}]$ とした.

4. 配置されたランドマークの評価手法

4.1 位置誤差 Le の定義

移動ロボットはランドマークを観測することにより相対位置を計算するが, 必然的に誤差を含む. その誤差は, CCD カメラによる量子化誤差と, ランドマークの設置誤差が考えられるが, ここでは CCD カメラの量子化誤差のみを考慮し, 自己位置同定で生じる誤差を位置誤差として以下のように定義する.

Fig. 4 に示すように, 移動ロボットがランドマーク $\text{Lan}(i)$ を測定して自己位置を計算する場合を想定する. 今, $\text{Lan}(i)$ の点光源 P_i を原点とする極座標系で表現された, 図中の点 $R(d, \theta)$ に移動ロボットが位置するものとする. 移動ロボットはランドマーク $\text{Lan}(i)$ を観測することにより, 相対距離 d , 相対回転角 θ , 相対方向 ϕ を計算する (Fig. 2). 単純化のため, 方向 ϕ は常に 90 度とする.

ロボットが実際に位置している点を $R(d, \theta)$ とし, ロボットがランドマークを観測することで計算した自己位置を $R_m(d, \theta)$ とする. R と R_m の関係は式(1)で記述される.

e_d, e_θ の最大値 $e_{d, \max}, e_{\theta, \max}$ を用いると, 移動ロボットが同定する自己位置は Fig. 4 に示される扇型 $KLMN$ 内部の点で

Fig. 4 Definition of location error at $R(d, \theta)$

あると言える。ロボットが実際に位置する点 R からの最大偏差は点 N または点 M に位置する場合であるから、この最大偏差長を点 R における位置誤差と定義する (Fig. 4)。すなわち位置誤差を L_e と表記すると、 L_e は式 (10) で表される。

$$L_e \equiv |RN| = \sqrt{\{(d + e_{d,\max})\cos(\theta + e_{\theta,\max}) - d \cos \theta\}^2 + \{(d + e_{d,\max})\sin(\theta + e_{\theta,\max}) - d \sin \theta\}^2} \quad (10)$$

環境に複数のランドマークが置かれている場合、移動ロボットは、測定点 R から観測可能な、最小の位置誤差を与えるランドマークを選択できるものとし、このランドマークが与える位置誤差を点 R における L_e として採用する。この仮定は、移動ロボットがランドマークを観測して自己位置を補正したい時、最適なランドマークを1つだけ選択できることを意味している。この手法はアルゴリズムが単純であり、リアルタイム性に優れたものと考えられる。移動ロボットが如何にして最適なランドマークを知りうるかという問題があるが、どの位置ではどのランドマークを選択すべきかを記述したマップを作成し、移動ロボットに保持させることで可能となる。このマップはボロノイ図の応用として4.2節で議論する。

さらに、ある位置で障害物の遮蔽などによりどのランドマークも観測出来ない場合は、その位置の L_e の値は無限大とする。

4.2 領域の分割

前節において、移動ロボットがランドマークを観測する時、唯一の最適なランドマークを選択するものと仮定した。その結果、環境は、ある特定のランドマークが観測に最適となる点の集合からなる有限個の小領域に分割できる。この領域分割は、距離を誤差で正規化した拡張されたボロノイ図 [9][10] であると解釈できる。本節では、その分割手法を示す。

環境内の任意の点において、観測可能な全てのランドマークについて式 (10) から位置誤差 L_e を計算する。その中で最小の L_e をこの観測点における位置誤差とし、この位置誤差を与えるランドマークがこの点における最適ランドマークとなる。この手順を全ての点について行なうと、環境はランドマーク i が最適な領域、ランドマーク j が最適な領域……というように、有限個の小領域に分割される。小領域の数は、ランドマークの数と一致しないことに注意されたい。

The environment is 25[m]x25[m] square
Maximum position error $M_e = 1.22[m]$

Fig. 5 One example of the spatial tessellations

Fig. 5 に、ランドマークが配置された場合の領域分割の一例を示す。環境は 25×25[m] の正方形領域であり、4 つのランドマークが配置されている。小領域に記入されている番号は、移動ロボットがその領域内部にいる時に観測すべきランドマーク番号を示している。領域境界線が直線とならないのは、相対回転角 d の測定誤差 e_d の分布が指向性を持つためである (Fig. 3 (b))。

4.3 配置されたランドマークの評価手法

本節では、ランドマーク配置が与えられた場合の評価手法を提案する。4.2 節で述べたように、環境は多数の小領域に分割され、任意の点で観測すべきランドマークと位置誤差の値が決定されている。

我々に与えられた設計要求は、環境内の任意の点で、位置誤差の値が予め設定された上限以下になることであった。したがって本論では、環境内の位置誤差 L_e の最大値をランドマーク配置の評価指標とし、これを M_e と表記する。例えば Fig. 5 においては、位置誤差の最大点は黒塗の点であり、したがって配置の評価値は $M_e = 1.22[m]$ と表現する。

5. 最適ランドマーク配置の設計手法

5.1 適用環境の設定

以下の環境を想定する。

- (1) ロボットの探索空間となる環境は 2 次元平面で、その内部に障害物が存在する。
- (2) 全てのランドマークは環境境界上、または障害物面に接した状態でのみ設置可能である。

仮定 (2) は、計算量の軽減、ランドマーク設置の容易性、ランドマークを移動ロボットの走行の障害にならないようにする、という観点から設定した。

5.2 配置の設計の定式化

最適配置を得るアルゴリズムを、次の 2 段階より構成する。第 1 段階では、ランドマークの数を固定し、配置のみを変化させて環境内の位置誤差の最大値 M_e を最小化する。この段階

は、式(11)で表される。ランドマーク数を n 個として、評価値 M_e を最小化し、その収束値を $C_v(n)$ とする。 n を変化させて同様の操作を行うと、各ランドマーク数に対応する $C_v(n) \{n=1, 2, 3, \dots\}$ を求めることが出来る。

$$\begin{aligned} M_e(n) &\equiv \max\{L_e(x), \forall x \in W\} \rightarrow \min \\ C_v(n) &\equiv \min\{M_e(n) | n \text{ is fixed}\} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで

W : 移動ロボットの作業環境

x : W 内の点

n : ランドマークの個数

第2段階では、位置誤差の上限値 K が要求されたとき、 K を満足する最小個数のランドマーク配置を $C_v(n) \{n=1, 2, 3, \dots\}$ の中から探索する。この過程は次式で表現できる。

$$\min\{n | C_v(n) \leq K\} \quad (12)$$

以上より、最適配置問題は式(11)(12)の2式で表現できる。

5.3 M_e を最小化するアルゴリズム

本論では、複数企業による領域競合アルゴリズム[11]を本最適化問題に適用した。このアルゴリズムによって、ランドマーク数を固定しつつ、評価関数 M_e を最小化する。

競合アルゴリズムの概要は次の通りである。ランドマーク数を n 個と固定して、ランダムにランドマークの初期配置を生成する。次に、各ランドマークを1個ずつ、次に示す3つの方法のうち評価値 M_e を最も減少させる1つを採用して移動させ、この移動を収束配置が得られるまで繰り返す。

戦略

- 現在存在している境界上を勾配方向に移動する
- 環境内において位置誤差が最大値 (M_e) をとる点に最も近い環境境界または障害物面上に移動する
- 上記いずれの場合も M_e の現在値を減少させないならば、現在地に留まる

Fig. 6 Strategy to minimize the evaluation function: M_e

Fig. 7 Coordinate system when a landmark is shifted by strategy (a)

戦略(a)を採用する場合、ランドマークの移動量は、次の様に決定する。まず Fig. 7 で示されるように、環境あるいは障害物の境界線を時計周りの向きに移動方向として ξ 軸を定める。環境内の位置誤差の最大値 M_e を評価値として、移動すべきランドマークの位置 ξ は $-\frac{\partial M_e}{\partial \xi}$ だけ移動する。したがって、次のランドマークの位置は、 $\xi - \frac{\partial M_e}{\partial \xi}$ となる。

戦略(b)を採用した場合、移動すべきランドマークの位置を、現時点の位置誤差の最大値 M_e をとる点に最近接の境界面上に移動させる (Fig. 6)。ただし、位置誤差が無限大の領域が存在するとき、その適当な点を M_e の点として採用する。

戦略(a)(b)ともに現在の評価値 M_e を減少させない場合は、ランドマークを現在位置に留める。これを戦略(c)とする。

1つ1つのランドマークについて以上の移動を行い、全てのランドマークの移動が終了した時、これを1[step]と定義する。評価値 M_e が収束するまで、ステップを繰り返す。

この手法は、大域的最適化手法ではないが、総当たり探索と比較して計算時間が短く、実用的な解を得ることができる。次章では、シミュレーションで本手法でランドマーク配置が決定可能であることを示す。

6. シミュレーション

6.1 シミュレーションの目的

ロボットの探索空間において、位置誤差の上限値が要求された場合、それを満足する最少個数のランドマーク配置を求める。

6.2 シミュレーション環境の設定

本シミュレーションでは、まずランダムにランドマークの初期配置を発生させる。これをもとに、5.3節で提案したアルゴリズムを用いて、その評価値 M_e すなわち環境内の位置誤差の最大値を最小化する。

以下では、5.3節の戦略(a)を計算機上で近似計算する場合のアルゴリズムを簡単に述べる。戦略(a)が選択された場合、次の近似式を用いて勾配を決定する。

$$\Delta \xi_i = -K \frac{M_e(\xi_i + d\xi) - M_e(\xi_i)}{d\xi}, \quad \xi_{i+1} = \xi_i + \Delta \xi_i \quad (13)$$

ここで、

ξ_i : i ステップ後のランドマークの座標

$d\xi$: 疑似微分のための微小定数

K : 係数

$\Delta \xi_i$: 最急降下方向

システムは次のように設定した。

- (1) 環境は $10[m] \times 10[m]$ の正方形領域で、2つの障害物が存在する (Fig. 8)。
- (2) サインボード LED 間の距離 L は、 $7[cm]$ とする。
- (3) CCD カメラに関しては、焦点距離 f を $12[mm]$ 、1画素長を $7.5[\mu m]$ とする。
- (4) 勾配については、以下のように変数を設定

Fig. 8 Initial arrangement of 10 landmarks

Fig. 9 Arrangement at step 15

Fig. 10 Transition of the maximum location error (M_e) in case of 10 landmarks

$$d\zeta = 0.3[\text{m}], \quad K = 10.0$$

各ランドマーク数に対応する初期配置を5個ランダムに発生させた。各初期配置について5.3節のアルゴリズムを用いて環境内の最大位置誤差 M_e を最小化する。収束値 $C_e(n)$ のうち最小であるものを採用し、この初期配置より生成した収束配置をランドマーク数 n に対応する配置とする。

Fig. 11 Convergent value (C_e) of M_e for various number of landmarks

ランドマーク数10の場合の初期配置を Fig. 8 に示す。

6.3 シミュレーション結果

Fig. 8 を初期配置とした時、評価関数 M_e はステップ数が増加するにつれて減少する。Fig. 9 は、15 ステップ後の配置であり、この時 M_e は $1.42 \times 10^{-1}[\text{m}]$ で収束した。Fig. 10 にステップ毎の M_e の遷移図を示す。

ランドマークの数を変化させて、各個数に対して M_e を最小化し、収束配置を得る。これらの操作の集計結果を Fig. 11 に示す。ランドマークの個数が増大するほど、誤差が減少する傾向が見られる。なお、この単調減少の性質は、初期配置をランダムに決定する場合には常に保証されるものではない。しかしながら、ランドマーク数 n の場合の初期配置として、「ランドマーク数 $n-1$ の際の準最適配置にもう一つのランドマークをランダムに設置した初期配置」をも採用することにより、この問題は解決されると考えられる。また、初期配置に対する M_e の値は、得られた準最適配置の2~3倍程度とかなりばらつきが大きかった。このことより、初期配置の個数を増加させることでより適切な配置が得られる可能性があることがわかるが、ここでは、計算時間の観点から配置個数を5と限定した。

Fig. 11 から、環境内の位置誤差の上限値が例えば $3.00 \times 10^{-1}[\text{m}]$ と設定された場合、少なくとも6個のランドマークが必要であり、 $1.50 \times 10^{-1}[\text{m}]$ と設定された場合は10個のランドマークが必要であることがわかる。また、位置誤差の上限値を $1.50 \times 10^{-1}[\text{m}]$ とした場合の準最適配置は、Fig. 9 の配置と言える。補足であるが、4個以下のランドマークではどのような配置をしても $M_e = \infty$ なる領域が存在する。すなわち、どのランドマークも観測できない領域がある。

7. 結 論

最適なランドマーク配置を設計するための方法論を確立するため、本論では以下の手順で議論を進めた。

まず、環境にランドマークを配置する問題を最適化問題として明確に定義した。次にサインボードシステムとその誤差解析を紹介した。その後、環境内に配置されたランドマークの評価方法を示した。さらに、この最適化問題を定式化し、ランドマークの準最適配置を得るためのアルゴリズムを示した。最後

に、コンピュータシミュレーションを行なうことで、環境内の位置誤差の上限値が与えられた時に、それを満足する最少個数のランドマーク配置を求めることが可能であることを示し、準最適配置の設計法を示唆した。

本論では、人工ランドマークの1例としてサインボードシステムを用いたが、他のランドマークでも本手法により準最適配置の設計が可能である。また、移動ロボットが複数のランドマークを利用して自己位置同定すると仮定しても、4章で定義した L_e を再考する必要があるものの、本論で提案した手法を用いてランドマークの配置設計が可能である。

参 考 文 献

- [1] 齊, 大川: “移動ロボットの誘導のための立体標識”, 日本ロボット学会誌, vol. 9, no. 4, pp. 129-136, 1991.
- [2] 藤原, 米澤, 津村: “画像情報を利用した移動体の位置姿勢計測法”, システム制御情報学会論文誌, vol. 3, no. 4, pp. 110-117, 1990.
- [3] T. D' Orazio, M. Ianigro and E. Stella and A. Dstane: “Self Location of a Mobile Robot Using Visual Landmarks,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Systems, pp. 1869-1874, 1992.
- [4] Christian Hock: “Landmark Navigation with ATHENE,” Fifth Int. Conf. on Advanced Robotics (91 ICAR.), vol. 2, pp. 1099-1104, 1991.
- [5] M. Hannu and K. Kari: “Navigation of Outdoor Mobile Robots Using Dead Reckoning and Visually Detected Landmarks,” Fifth Int. Conf. on Advanced Robotics (91 ICAR.), vol. 2, pp. 1051-1056, 1991.
- [6] Jaw H. Kim and Hyung S. Cho: “Experimental investigation for the estimation of a mobile robot's position by linear scanning of a landmark,” Robotics and Autonomous Systems, vol. 13, pp. 39-51, 1994.
- [7] K. Komoriya, E. Oyama and K. Tani: “Planning of Landmark Measurement for the Navigation of a Mobile Robot,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Systems, pp. 1476-1481, 1992.
- [8] 新井, 木村, 前田, 太田, 梅田: “移動ロボット相互の位置・姿勢実時間計測システムの開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 3, pp. 472-478, 1994.
- [9] A. Okabe, B. Boots and K. Sugihara: “Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams,” John Wiley (Chichester), 1992.
- [10] A. Okabe and F. Miki: “A conditional nearest-neighbor spatial association measure for the analysis of conditional locational independence,” Environment and Planning A, vol. 16, pp. 107-114, 1984.
- [11] A. Okabe and A. Suzuki: “Stability of spatial competition for a large number of firms on a bounded two-dimensional space,” Environment and Planning A, vol. 19, pp. 1067-1082, 1987.

田代健治 (Kenji Tashiro)

1970年6月28日生。1994年東京大学工学部精密機械工学科卒業。現在、同修士課程在学中。移動ロボットのための環境設計の研究に従事。1995年カリフォルニア大学バークレー校電気工学科に文部省国際交流制度交換生として留学。精密工学会, IEEE 学生会員。

(日本ロボット学会学生会員)

林 遠球 (Yeuan Chyou Lin)

1957年3月20日生。1986年台湾中原大学工学部機械工学専攻修士課程修了。1992年台湾交通大学工学部制御研究科博士課程中退。1982~1993年(株)三菱電機台湾支社に勤務。現在、東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程在学中。ロボティクス, 特にロボットビジョンの研究に従事。精密工学会, IEEE 会員。

(日本ロボット学会学生会員)

太田 順 (Jun Ota)

1965年2月19日生。1989年東京大学工学系大学院精密機械工学専攻修士課程修了。同年新日本製鉄(株)入社。1991年東京大学工学部助手, 1994年同講師。1996年東京大学工学系研究科助教授。複数台の移動ロボットの動作計画, 作業計画, 協調制御の研究に従事。博士(工学)。精密工学会, IEEE 会員。

(日本ロボット学会正会員)

新井民夫 (Tamio Arai)

1947年8月4日生。1970年東京大学工学部精密機械工学科卒業, 1977年同博士課程修了。工学博士。1987年東京大学工学部精密機械工学科教授。1979年英国エディンバラ大学人工知能学科研究員。産業用ロボット言語の標準化活動を推進。自動組立, 移動ロボットなどの研究に従事。自動化推進協会会長。

(日本ロボット学会正会員)