可動型赤外線センサを用いた
自律移動ロボットの地図生成システムの設計と実装

A Map Generation System by using Movable Infrared Sensors for an Autonomous Mobile Robot.

○　山浦 康史 (慶大)　鎌田 展秀 (慶大)　平 哲也 (慶大)　山崎 信行 (慶大)

Koji Yamaura, Keio University. Nobuhide Kamata, Keio University. Tetsuya Taira, Keio University. Nobuyki Yamasaki, Keio University. Hiyoshi 3-14-1, Kouhoku-ku, Yokohama, Kanagawa

Generating a map of the working environment is very important for autonomous mobile robots. This paper describes a map generation system of an unknown environment by using movable infrared sensors. An infrared sensor is horizontally rotated to get wide-area information, and the environmental map is generated from the information. The map is modeled as grid cells with the occupation probability. Reliability of each distance information is evaluated by characteristics of the sensor. The robot position is localized by matching of a local map and a global map. Global map is updated based on the reliability and the probability model of the sensor. Experiments in real environment show the proposed system is effective in the map generation.

Key Words: Map Generation, Movable Infrared Sensor, Autonomous Movile Robot,

1　序章

日常生活の中で人間と関わりながら活動するロボットは、人間に危険を与える動作や、障害物を回避する必要がある。そのためには、外部環境の認識、ロボット自身の位置や姿勢の把握、動作計画などといった作業をする必要がある。こうした一連の作業を行なう際に、環境地図が大きな助けとなる。

ロボットの地図生成を行なうためのセンサの要素技術に注目すると、近年では、LRF(Laser Range Finger) [1] や、ビジョンセンサ [2] が用いられている。

LRF を用いると精度よく、計算コストもある程度少なく地図生成をすることができるため、正確な地図を生成するという視点のみで考えるならば最適なセンサであると言える。しかし LRF は危険性が高く、高価であるといった欠点もある。

ビジョンセンサは LRF と同様に精度の良い地図を描くことができる上に、付加的な様々な情報を得ることが可能である。しかし画像処理には大きな計算量が必要である。最近の CPU パワーの向上により、改善されつつあるがまだ課題がある。

地図生成に用いられる他のセンサとして超音波センサがある。超音波センサは安価で、有効距離が長いが、指向性に乏しく、干渉による誤差が生まれやすい。さらに単点を測るセンサであるため、LRF やビジョンセンサのような広い視野を得ることが困難である。超音波センサアレイ [3] では広範囲の距離情報を同時に得ることができる。センサは固定されているため、余計な制御を必要としない。しかし非連続的な値しか得られず、非連続的な情報では精度のよい地図を生成することは困難である。さらに多くのセンサを搭載する事によるコスト、スペースの問題も存在する。また連続的な値を得る方法として超音波センサを回転させる方法 [4] がある、これは回転制御によりあらゆる角度の距離情報を取得することができるものである。しかし、センサの指向性が乏しいため、角度に対する分解能が低い。

そこで本研究では安価で安全に、ピンスポットで距離を測定できる赤外線センサに注目した。広域の距離情報を獲得するために赤外線センサを水平方向に回転させる。このセンサを可動型赤外線センサと呼び、このセンサを利用した地図生成システムを設計し、ロボットへ実装する。

2　設計と実装

2.1　実装対象

本研究で使用したロボットを図 1 に示す。このロボットは左右に車輪を持ち、ジャイロセンサを有する。コントローラには *Responsive Processor*[5] を使用している。このロボットを使用し、地図生成システムを設計・実装する。

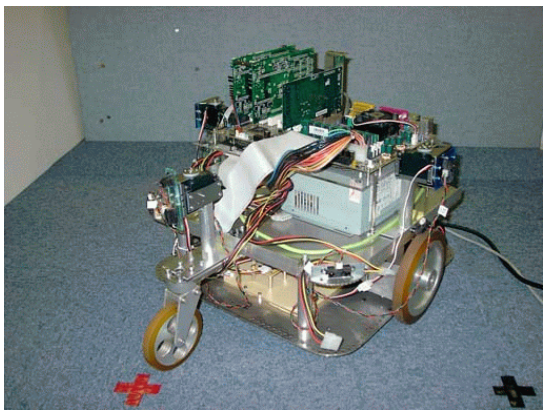

Figure 1: 筐体

2.2　可動型赤外線センサ

図 2 に赤外線センサの原理を示す。赤外線センサは、赤外線を発生させる LED を持つ発信器と、PSD センサを有する受信器を持ち、三角測量によって距離を得る。発信器から発射された赤外線は障害物に当たって拡散反射し、受信器によって受信される。PSD センサは光の入射位置によって出力が変化するフォトダイオードの一種であるため、物体で反射して受信された赤外線の入

射角を知ることが出来る。赤外線センサは光の入射角を基準に距離を求める方法であるため、対象の色や材質が影響されにくい。

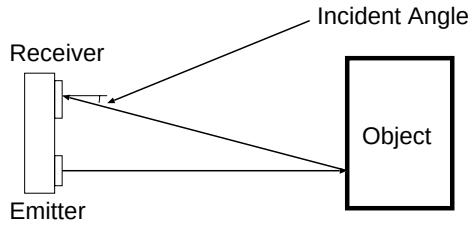

Figure 2: 赤外線センサの動作原理

広域の距離情報を得るために赤外線センサをサーボモータに取りつけ回転させる。赤外線センサは地面に対して水平に装着すると干渉が起こりやすいため、垂直に装着する。完成したセンサは可動型赤外線センサと呼ぶこととし、図 3 に示す。

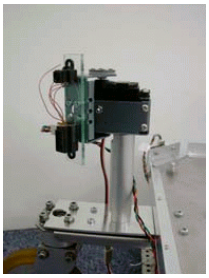

Figure 3: 可動型赤外線センサ

2.3 地図の表現法

地図表現としてグリッドマップを使用する [4]。グリッドマップは、確率的な表現が可能である。各セルには、セルがどれだけ占有されているかを示す占有度 (pos) という情報を持たせ、その占有度が正の場合は occupy、負の場合は empty、0 の場合は unknown とする。未知の環境を想定しているため占有度の初期値は全て 0 とする。地図の使用用途に合わせて地図を生成できるように、セルの大きさは可変とした。以下セルの大きさのことをセルサイズ (cm×cm) と呼ぶこととする。

2.4 スキャン方法

可動型赤外線センサをロボットの前方と左右の 3 個設置する。ナビゲーションする際にロボットの正面は遠くまで見えている必要があるため、前方の赤外線センサは有効距離の長いもの ($20cm \sim 150cm$) を使用する。左右のセンサは計算量を減らすために有効距離の短いもの ($10cm \sim 80cm$) を使用する。スキャン範囲が重なって非効率的になることを避けるために、サーボモータの可動範囲をそれぞれ 120° と設定した。スキャン可能な範囲を図 4 に示す。スキャンの命令を受けると、ロボットを停止させ、モータの中心を 0° とし、−60° から 60° まで 1° 毎にサーボモータを停止させて距離を計測する。このように広域距離情報を取得する事をスキャンと呼ぶこととする。また 1 回のスキャンが終了するまでの時間をスキャンスピード (sec/scan) とする。

2.5 信頼度の評価

地図生成において、取得した値が大きく間違ってしまった場合、値をそのまま使用して地図を更新すると、誤差の多い地図になってしまう。そのため地図を更新する前に明らかに間違っているデータを排除し、信頼性の薄いデータは重みを小さくして更新するべきである。そこで観測値がどれだけ信頼できるかを示す信頼度 (bel) というパラメータを観測値毎に与える。$k°$ の方向に観測されたデータ l_k の信頼度 bel_k は式 (1)(2)(3) より求める。

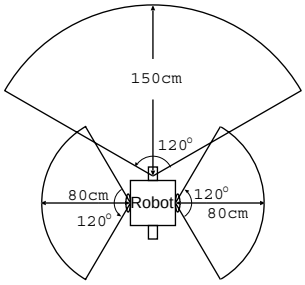

Figure 4: スキャン可能範囲

$$bel_k = L(l_k) \times D(l_{k-1}, l_k, l_{k+1}) \tag{1}$$

$$L(r) = \begin{cases} 1 & (lower < r < upper) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \tag{2}$$

$$D(r_{i-1}, r_i, r_{i+1}) = \begin{cases} 1 & (dif(r_{i-1}, r_i) < T \cap dif(r_i, r_{i+1}) < T) \\ 0 & (dif(r_{i-1}, r_i) > T \cap dif(r_i, r_{i+1}) > T) \\ 0.5 & (otherwize) \end{cases} \tag{3}$$

- $L(r) \cdots$ センサの有効距離による評価
  センサには有効距離があるため、有効距離以外の値が返ってくる事があれば、値を無効にする。
- $D(r_{i-1}, r_i, r_{i+1}) \cdots$ 前後のデータ間の距離による評価
  スキャンは 1° 毎に距離を測定するため、±1° のデータ間の距離は近いはずである。あるスレッショルド T を定め、2 点間の距離 dif と T を比較し、T 以内であれば信頼度を高くする。式 (3) を使用すると角の部分は値が 0.5 となってしまうといった欠点も存在する。

2.6 位置推定

位置推定は内界センサによる位置同定と、外界センサによる位置補正により行う。今回使用したロボットは、内界センサとしてエンコーダとジャイロセンサを有しているため、この 2 つのセンサを融合させて位置同定を行う。外界センサによる位置補正は、センサの距離情報から生成されたローカルマップと、グローバルマップをマッチングさせることにより行う。

マッチングのイメージを図 5 に示す。図中の黒い部分は α, β, γ 方向に観測された点である。内界センサによって同定されたロボットの自己位置を基準に、ローカルマップを x 軸方向に i、y 方向に j だけずらしたときに、どれだけグローバルマップとマッチするかを示す適合度 ($match_{ij}$) を定義する。位置同定と観測値から得られた $k°$ 方向の観測点の座標を (px_k, py_k) として、適合度は式 (4) より求める。

$$match_{ij} = \sum pos_{px_k+i, py_k+j} \tag{4}$$

$pos_{a,b}$ は座標 (a, b) のセルの占有度を示す。適合度が一番大きな値を取ったものがマッチする位置であるため、この位置を利用して補正を行う。今回の実装では、マッチングの範囲を ±10 個のセルとした。

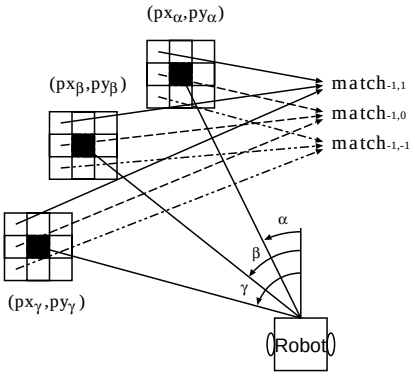

Figure 5: マッチングイメージ

2.7 赤外線センサの確率モデル

超音波センサでは、地図の更新のためにセンサ位置から物体観測点までの占有確率のモデル化 [6] がされることが多い。そこで今回は赤外線センサ位置から観測点までの占有確率のモデル化を行う。確率モデルを式 (5) で表す、またグラフにしたものが図 6 である。r はセンサからの距離で、R は観測された距離である。センサ位置から観測点 R にかけて値が大きくなり、観測点で最大となる。赤外線センサはピンスポットで計測可能なため、超音波センサで用いられる様な 3 次元的な広がりを考慮に入れないこととする。

$$IR(r) = \begin{cases} -1+(r/R)^2 & (0<r<R) \\ 1 & (r=R) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5)$$

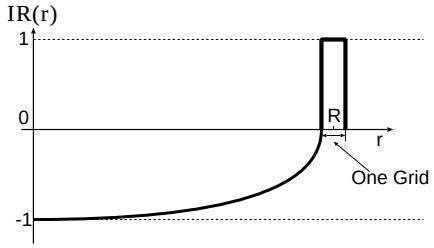

Figure 6: 赤外線センサの確率モデル

2.8 グローバルマップの更新

グローバルマップは自己位置と信頼度付きのスキャンデータに基づきインクリメンタルに更新する。更新するべきセルはセンサ位置から観測点の間にあるセルである。センサから $k°$ 方向のセルの占有度 (pos) は式 (6) によって更新する。

$$pos = pos + bel_k \times IR(r) \quad (6)$$

bel_k は $k°$ 方向の観測値の信頼度であり、IR(r) は赤外線センサの確率モデルである。r が観測距離 R になるまでセルを抽出する。更新は信頼度と確率モデルの積をセルの占有度に加算することによって行う。$k°$ 方向の更新が終了すると $k+1°$ 方向の更新を行い、全ての角度の更新が終了するとグローバルマップの更新が終了となる。なおセルの抽出にはラスターのアプローチ [7] を使用する。ラスターのアプローチは任意の 2 点間のセルを高速に抽出することができるアルゴリズムで、コンピュータグラフィック等で使用される方法である。

3 評価

実験室内に図 7 の様な環境を作成した。見取図を図 8 に示す。環境を複雑にするために、障害物として中央に箱を 4 個、障害物を図右の壁側に 2 個、図左下に 1 個配置した。この環境を使用して評価実験を行う。

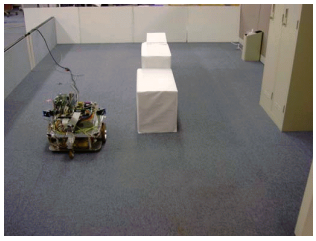

Figure 7: 環境写真

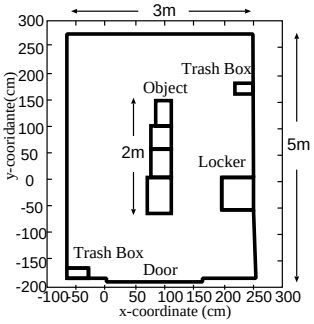

Figure 8: 環境見取り図

3.1 地図生成システムの評価

実装した地図生成システムの評価のために、ロボットを実際に走行させて地図生成を行う。ロボットは原点 (0,0) から反時計回りに移動し、再び原点に戻ってくる間に、一定間隔でスキャンを行い、地図生成をする実験を行う。動くべき座標は、事前にプログラムしておき、ロボットは現在地から指定された場所へ移動し、目的地に到着するとスキャンを行う。なおスキャンスピードは 5sec/scan、スキャン間隔は 40cm/scan、セルサイズは 1cm×1cm とした。

図 9 は生成された地図と理論値を重ねたものである。地図が全体的に左斜めになっているのは、ロボットの初期状態が斜めになっていた事によるものである。これは原点付近の壁や障害物が直線的に繋がっている事からわかる。生成された地図はゴミ箱やロッカーの形が地図上にはっきり描かれている。また理論値とほぼ重なっていることがわかる。

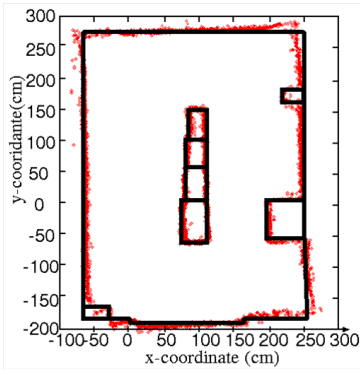

Figure 9: 理論値との比較

表 1 は全ての点について理論値との誤差を計算し、その誤差平均、誤差分散、最大誤差を調べ、5 回実験を行いその平均を取ったものである。平均誤差が約 3.4cm というのは小さいと言える。今回のアルゴリズムでは、壁の外側に点がプロットされた場合に更新することはできないため、最大誤差が大きくなってしまった。しかし、環境内部のエラーではないため、地図を利用する際に影響は少ないと考えられる。

地図生成アルゴリズムの有効性を調べるために、実験中にスキャンデータを保持し、スキャンデータに処理を加えずにそのまま点をプロットしたものと、信頼度評価と確率的更新を行った、2

Table 1: 地図精度

誤差平均	誤差分散	最大誤差
3.376cm	19.636	19.4cm

つの場合においてシミュレーションを行い、グラフにプロットした。得られたグラフを図 10、図 11 に示す。図 10 を見ると物体がないはずの場所に沢山の点がプロットされている。全体の形は人間の目からは分かるが、ロボットが使用できる地図ではない。しかし一連の作業により、図 10 から図 11 のような状態までエラーを排除することができた。

以上の実験より、今回実装したシステムは精度良く、ロボットが使用できる形で地図生成が可能であることがわかった。

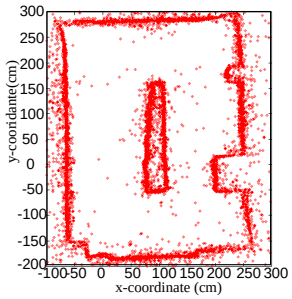

Figure 10: 処理前

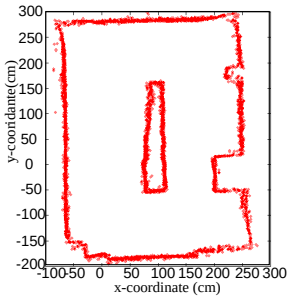

Figure 11: 処理後

3.2 ナビゲーションへの適用

本研究で実装したシステムを使用し、システムがナビゲーションに使用可能であるか検証する。検証のために内界センサのみで位置推定を行う場合 (実験 1) と、マッチングによる位置補正を行う場合 (実験 2) で環境を 6 周して初期位置に戻ってくる実験を行う。ロボットに与える情報は、図 12 中の丸で示す座標のみであり、その場所に到着したと判断したら左回りに次の座標へと進む。後者の実験ではこの 4 点に到着する度にスキャンを行い、位置補正を行う。実験が終了したら、ロボットの位置と、初期位置との誤差を計測する。今回の実験は精度の良い地図生成が目的ではなく、ナビゲーションを行うことが目的であるため、スピード速く、計算量を小さくするために、スキャンスピードを 2sec/scan セルサイズを 3cm×3cm と設定した。なお実験は各二回ずつ行う。

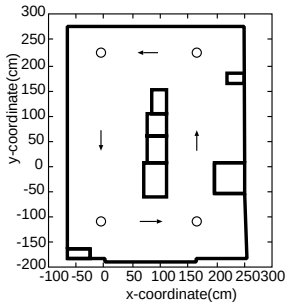

Figure 12: 移動とスキャン位置

実験 1 では実験中にロボットが壁に衝突してしまって、2 回実験を中止することになったが、実験 2 の場合は、壁に衝突することなく 6 周することができた。壁に衝突せずに 6 周できた場合の誤差を表 2 に示す。実験 1 の場合は誤差が蓄積している事が分かる上に、実験を中止したことから誤差はさらに大きいと考えられる。実験 2 では誤差を小さく抑えることができた。LRF を使用した自己位置推定 [1] での精度が約 2cm であるため、LRF 程度の精度を出すことができた。このため今回実装したシステムはロボットのナビゲーションにも有効であることを実証することができた。

Table 2: 位置推定の誤差の平均

	位置推定の方法	誤差平均
実験 1	内界センサのみ	50.5cm
実験 2	内界センサ + マッチング	2.5cm

4 まとめ

本研究では赤外線センサを水平方向に回転させる可動型赤外線センサを提案し、自律移動ロボットを対象とした地図生成システムを設計し、ロボットへ実装した。

実環境での実験により、精度のよい地図生成や、地図を使用したナビゲーションを行なうことができた。以上より、本研究で提案した地図生成システムは、家庭用自律移動ロボットのナビゲーションに対して有効であることを示すことができた。

謝辞

本研究は文部科学省の科学技術振興調整費の支援による。

References

[1] Erik Schulenburg, Thilo Weigel, and Alexander Kleiner. Self-localization in dynamic environments based on laser and vision data. In *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 998–1004, October 2003.

[2] C.Drocourt, L.Delahoche, B.Marhic, and A.Clerentin. Simultaneous localization and map construction method using omnidirectional stereoscopic information. In *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 894–899, May 2002.

[3] F.J.Toledo, J.D.Luis, L.M.Tomas, M.A.Zamora, and H.Martines. Map building with ultrasonic sensors of indoor environments using neural networks. In *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 920–950, October 2000.

[4] Nouara Achour and Redouane toumi. Building an environment map using a sweeping system based on a single ultrasonic sensor. In *Proceedings of the 2002 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1329–1333, July 2002.

[5] 山崎信行, 松井俊浩. 並列分散リアルタイム制御用レスポンシブプロセッサ. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 3, pp. 68–77, 2001.

[6] A.Couroxelle and O.Horn. Ultrasonic data representation: application to mobile robots localization. In *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1559–1564, October 1998.

[7] K.S.Reid-Green. Three early algorithms. *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 24, No. 4, pp. 10–13, October-December 2002.