

照度測定の自動化に向けた自律移動ロボットの 知能化技術

Intelligent Technology of Autonomous Mobile Robot for Illuminance Measurement

岡山大学	戸田 雄一郎	Yuichiro TODA	Nonmember
首都大学東京	WeiHong Chin	WeiHong CIHN	Nonmember
首都大学東京	新井 智之	Tomoyuki ARAI	Nonmember
株式会社きんでん	辻元 誠	Makoto TSUZIMOTO	Nonmember
株式会社きんでん	谷口 和彦	Kazuhiko TANIGUCHI	Nonmember
首都大学東京	久保田 直行	Naoyuki KUBOTA	Nonmember

Abstract

Recently, the expectation to autonomous mobile robots has been increasing much in order to try to save labor in various scenes. However, there are many critical problems in autonomous mobile robot system. In this paper, we develop the autonomous mobile robot system for an illuminance measurement. In the mobile robot, the environmental map building and self-localization is the fundamental capability for performing the task given by operator. Therefore, we propose the real-time self-localization method based on an evolution strategy. Next, we propose a method of a control system based on fuzzy estimation and multi-objective behavior coordination. Finally, we show an experimental result of the proposed method.

Keywords: Illuminance Measurement, Intelligent mobile robot, Self-localization

1. はじめに

近年、少子高齢化社会にともない、労働人口の減少に関する問題が注目されている。そのような中、ロボットは、生産現場や極限作業環境だけでなく、家庭内や福祉にも適用されており、省力化や作業時間の短縮のため様々な産業へのロボットの導入が検討されている [1]。建築現場でもまた、省力化などのためにロボットが導入されつつあり、建築現場での作業の一つに照度計測がある。照度測定は、夜間等、外光の影響の無い時間帯に実施され、多くの計測点を必要とするため、建築現場の中でも特に照度測定の自動化が望まれている。そこで本稿では、電気設備業における照明の照度測定を、ロボット技術を用いて自動化することを研究目的とする。このような照度測定用自律移動ロボットを実現するためには、ロボットが、現在の自己位置を認識し、構築された環境地図の中から、ロボットが作業者の指定した多数の測定地点へ移動し、照度の計測を行う必要がある。このような作業を効率よく行うためには、環境認識・行動計画・行動制御といった知的な要素技術が必要となる。

また、これらの要素技術は、単一の技術として用いるのではなく、要素技術を高度に統合しなければならない。そこで、本稿においては、これらの知的な要素技術をフuzzy理論・進化計算といった計算知能の観点から実現することによって、照度計測用ロボットの知能化に関する提案を行う。さらに、開発した照度測定用ロボットを用いて、実環境での実験を行いその有効性を検証する。

2. 照度測定用ロボットのシステム構成

本研究にて開発を行なった照明測定用ロボットの外観を図1に示す。基本的な照度計測において、一般照明の照度は、床面から800mmの高さで測定することがJIS規格で決められているため、本研究では、用いるロボットの移動ベースに三脚を設置し、その上に照度計を取り付け、照度測定を行なうこととした。また、ロボットに搭載されているセンサとしては、コニカミノルタ株式会社から発売されている照度計であるT10 [2]とロボットには、周囲の環境地図の構築を行い、自身の自己位置を推定する能力が求められるため、北陽電機株式会社から発売されている測域センサであるUTM-30LX [3]が搭載されている。

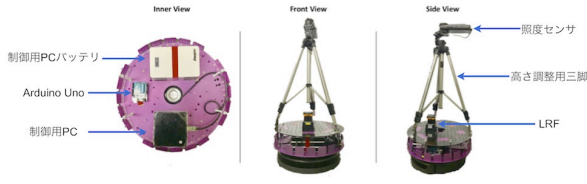


図1 照度測定用ロボット

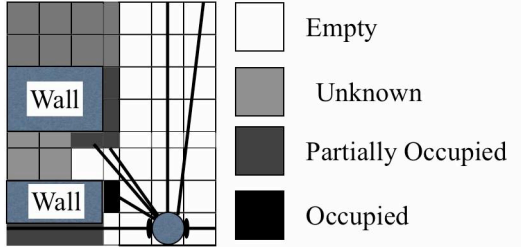


図2 占有格子空間地図の概念図

3. 照度測定用ロボットの知能化技術

3.1 環境地図構築と自己位置推定

照度測定用ロボットが測定を行う環境内を自律的に移動し、照度測定点へと移動していくためには、上述のとおり環境地図構築と自己位置推定に関する技術が必要である。本研究では、地図表現方法として、占有格子空間地図を用いる。占有格子空間地図は、2次元空間を格子として表現し、計測情報に応じて各格子の占有度合いを更新していく地図の表現手法である。図2に占有格子空間の概念図を示すが、基本的にはセンサからの計測情報が存在したセルに対しては占有度を上げ、センサが透過したセルに対しては占有度を下げていくことによって、地図の更新を行っていく。本提案手法においては、以下の式に基づき、占有格子空間地図を用いることによって地図の更新を行っていく [4]。

$$map_t(x,y) = \frac{hit_t(x,y)}{hit_t(x,y) + err_t(x,y)} \quad (1)$$

ここで、 $hit(x,y)$ と $err(x,y)$ は、それぞれ、時刻 t までに格子 (x,y) において、測域センサによって計測された回数と測域センサの信号が透過した回数を表す。このようにして本研究では、環境地図を構築していくが、ロボットの自己位置推定の最適化には、進化戦略に基づく手法を用いる。具体的な進化戦略の手法としては、 μ 個の親となる個体群から1個の子個体を生成し、山登り的に探索を行っていく $(\mu+1)$ -ESを用いる。 $(\mu+1)$ -ESは、常に親個体を μ 個体保持するため解集合の多様性が保たれた状態において、近傍探索が可能な手法であり、より精度の高い

自己位置推定が可能となるため本研究において採用した。

自己位置推定の最適化における、進化戦略では、各個体を現時点におけるロボットの自己位置 (g_{k1}, g_{k2}) と姿勢 (g_{k3}) として表現し、各遺伝子に対して、遺伝的操作を行っていくことによって、探索を行っていく。遺伝的操作の1つである、交叉には、最良個体とランダムに選択された個体から交叉を行なうエリート交叉を用いる。また、突然変異には以下の式によって計算される適応的突然変異を用いる。

$$g_{k,h} \rightarrow g_{k,h} + \left(\alpha_h \cdot \frac{fit_{max} - fit_k}{fit_{max} - fit_{min}} + \beta_h \right) \cdot N(0,1) \quad (2)$$

ここで、 f_k は、 k 番目の個体の適応度を表し、 f_{max} と f_{min} は、それぞれ、個体群中の最大、最小の適応度を表す。また、 $N(0,1)$ は、平均0、分散1の正規乱数を α_h と β_h は、それぞれ、係数とオフセットを表す。このように突然変異では、 α_h の値によって、探索範囲を設計することが可能であり、遠隔モニタリングに使用する移動ロボットの最大移動速度に応じて、適切な係数を設計することによって、ロボットにおける自己位置推定のための探索を行なうことが可能である。また、 k 番目の適応度 fit_k は以下の式によって計算される。

$$fit_k = p_t^{occ}(x_{i,L}, y_{i,L}) \cdot \sum_{i=1}^M map_t(x_{i,L}, y_{i,L})$$

$$p_t^{occ}(x_{i,L}, y_{i,L}) = \frac{\sum_{i=1}^M hit'_t(x_{i,L}, y_{i,L})}{\sum_{i=1}^M hit'_t(x_{i,L}, y_{i,L}) + \sum_{i=1}^M err'_t(x_{i,L}, y_{i,L})} \quad (3)$$

$$hit'_t(x_{i,L}, y_{i,L}) = \begin{cases} 1 & \text{if } hit_t(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \\ 0 & \text{else if } err_t(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \end{cases}$$

$$err'_t(x_{i,L}, y_{i,L}) = \begin{cases} 1 & \text{if } err_t(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \\ 0 & \text{else if } hit_t(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \end{cases}$$

式(3)より、自己位置推定解の探索において、適応度は、基本的に地図の占有度の総和によって決定される。適応度が高くなるほど、測域センサのよって計測された格子の座標と現時刻までに構築された地図情報の一致度合いが高くなるため、より精確に自己位置を推定できることが期待される。そのため、本問題は最大化問題として帰着される。

3.2 多目的行動調停による知的制御

各行動における各モータへの出力の計算には簡易型ファジィ推論を用いる。ファジィ if-then ルールは以下のよ

うになる。

IF x_{k1} is A_{ki1} and ... and x_{kM} is A_{kiM}
THEN y_{k1} is w_{ki1} and ... and y_{kN} is w_{kiN}

ここで、 k は行動番号を表し、 $k=1$ は障害物回避、 $k=2$ は目標追従を表す。 M は各行動における入力数であり、障害物回避ではLRFからの計測データを一定角度ごとに5分割して用いるため $M=5$ 、目標追従、最適目標位置追従では距離が前方、ゼロ、後方の3種と角度のずれが左右2方向にあるため積をとって $M=6$ となる。 N はロボットの出力数であり、両輪の出力であるので $N=2$ となる。適合度の計算には以下の式で表されるガウス型メンバシップ関数を用いる。

$$\mu_{A_{k,j}}(x_{k,j}) = \exp\left(-\frac{(x_{k,j} - a_{i,j})^2}{b_{i,j}^2}\right) \quad (4)$$

a_{ij}, b_{ij} はメンバシップ関数の中央値と幅を表す。メンバシップ関数により各入力に対する適応度を求め掛け合わせることで各ルールの発火度を計算する。

$$\mu_{k,i} = \prod_{j=1}^M \mu_{A_{k,j}}(x_{k,j}) \quad (5)$$

各ルールの設定出力値に対し、発火度を重みとした重み付け平均を取ることで、行動 k における両輪の出力 y_{kl} ($l=1,2$)を得る。 R はルール数である。

$$y_{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^R \mu_{k,i} w_{k,i,l}}{\sum_{i=1}^R \mu_{k,i}} \quad (6)$$

ロボットが複数のタスク行動を並行して実行する場合、環境の変化に応じて行動の優先順位を変化させる必要がある。多目的行動調停 (Multi-objective Behavior Coordination) では、各行動 (行動1: 障害物回避, 行動2: 目標追従) の出力 y_{kl} を行動 k の重み wgt_k をセンサ値によって更新し、各出力の重み付け和を取ることで環境に適した最終出力 y_l を算出する。 K はタスク行動の総数であり、本研究においては $K=2$ である。

$$y_l = \frac{\sum_{k=1}^K wgt_k \cdot y_{k,l}}{\sum_{k=1}^K wgt_k} \quad (7)$$

y_{kl} は k 番目の行動出力における両輪 ($l=1,2$) の出力を表す。また、重みの更新則は次のように行われる。ここで α は忘却係数であり、センサ情報が初期値と同値になった場合に、累積の重み更新幅が0に戻ってしまうこと

を防ぐ目的がある。

$$wgt'_k = \alpha \cdot wgt_k + \Delta wgt_k \quad (8)$$

障害物回避、目標追従をそれぞれ、行動1、行動2とし、式(8)における各タスク行動の重み更新則 Δwgt_k ($k=1,2$)を設定する。

$$\begin{bmatrix} \Delta wgt_1 \\ \Delta wgt_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dw_{1,1} & dw_{1,2} \\ dw_{2,1} & dw_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} si_1 \\ si_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

si_m ($m=1,2$)は環境知覚情報を表し、それぞれLRFから求めた障害物の接近度や、目標までの相対角度。最適目標位置までの距離である。 dw_{km} は行動 k が si_m によって受ける影響を定める定数パラメータである。 $\Delta wgt_k, dw_{km}, si_m$ の値は正規化され、0~1の範囲の値を取る。 si_m が高い値となったときに Δwgt_k が大きき値を取るよう dw_{km} の値を決めることで知覚された状況に適した統合出力を得ることができる。

このように、基本的な行動制御は、目標物追従と環境情報からの入力によるファジィ制御によって各行動に対する出力の計算が行われ、最終的に多目的行動調停によって出力が行われる。このような手法は、環境を探索する際においてタスク (行動) ごとに出力を計算することができ、現在のロボットの状況に応じた出力を計算可能となっている。

4. 実験結果

本研究では、屋内フロアにおける照度計測を想定して、体育館における実験を行なう。実験環境を、図3に示す。本体育館は約30m×30mの大きさとなっており、環境地図構築を行なった結果を図4に示す。図4においては、ロボットを環境地図構築結果より、体育館のように、あまり環境の形状に特徴がない部分においても、環境地図構築ができていることが確認できる。

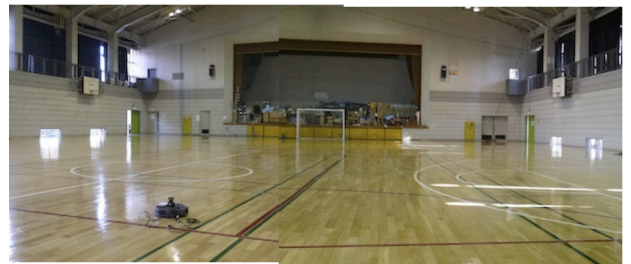


図3 実験環境

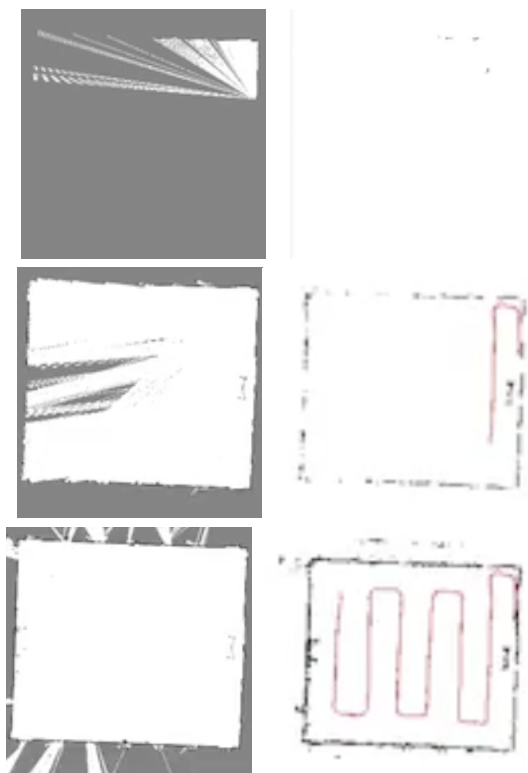


図4 環境地図構築結果 (左図：地図, 右図：位置推定)

次に、構築された地図を用いて、照明の計測に関する実験を行なった。本実験において設定した計測点を図5に示す。本計測地点は、ロボット上面に設置したカメラで計測した際における照明の中心点の座標をそれぞれ手で設定し実験を行なった。図6に制御結果の例を示す。図における赤丸は設定した計測地点、青線はロボットが移動した軌跡を示す。図6より、各計測地点をほぼ正確に追加している。よって、ファジィ制御と多目的行動調停によってロボットを制御することで、測定点の計測を行なうことが可能である。

5. おわりに

本研究では、電気設備業における照明の照度測定を、ロボット技術を用いて自動化するための知能化されたロボットシステムとして、照度測定用ロボットの開発及び、照度測定用ロボットに必要な環境地図構築と自己位置推定、知的制御などの要素技術を計算知能の観点から実装し統合した知能化技術に関する提案を行なった。実験では、体育館における照度測定を目的とした実験を行

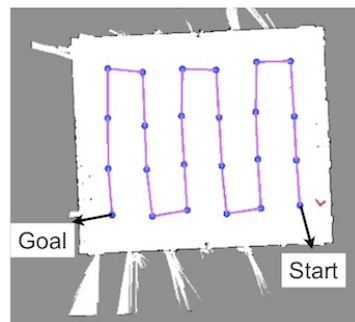


図5 照度測定における計測点と経路

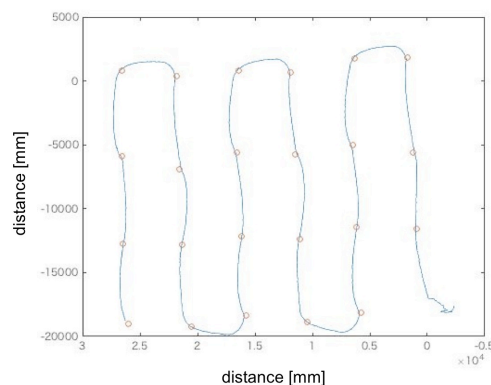


図6 ロボットの制御結果

い、提案手法によってロボットが自己位置推定をしながら自動で照明点まで移動可能なことを示した。今後は、実現場で適用していくことによって、有効性の検証を行なっていく予定である。

参考文献

- [1] NEDO ロボット白書 2014,
<http://www.nedo.go.jp/content/100567345.pdf>
- [2] コニカミノルタ株式会社 T10,
https://www.konicaminolta.jp/instruments/support/discontinued_products/t10/index.html
- [3] HOKUYO, <http://www.hokuyo-aut.co.jp/>
- [4] Benet, Gines, et al. "Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots.", *Robotics and autonomous systems* 40.4, 2002, pp.255-266.