

# 屋内環境における自律照度測定ロボットの開発

The development for an autonomous illuminance measurement robot in indoor environment

首都大学東京	新井 智之	Tomoyuki ARAI	Member
首都大学東京	井上 椋太	Ryota INOUE	Nonmember
岡山大学	戸田 雄一郎	Yuichiro TODA	Nonmember
株式会社きんでん	辻元 誠	Makoto TSUJIMOTO	Nonmember
株式会社きんでん	谷口 和彦	Kazuhiko TANIGUCHI	Nonmember
首都大学東京	相野谷 威雄	Takeo AINOYA	Nonmember
首都大学東京	笠松 慶子	Keiko KASAMATSU	Nonmember
首都大学東京	久保田 直行	Naoyuki KUBOTA	Member

## Abstract

In recent years, the research has been conducted on the robots which automatically measure the illuminance at indoor construction sites due to the declining birthrate and aging population which cause the labor shortage. Therefore, we developed a system for one robot operator to work at night, which is currently being performed by two people. It is in the final stage of commercialization, adding practical functions required for illuminance measurement, such as simultaneous localization and mapping, and an obstacle avoidance system. From the experimental results of actually measuring the illuminance indoors, it is expected to be able to be fully active in the actual site.

**Keywords:** illuminance measurement, SLAM, indoor construction site, LRF, fuzzy control, multi-objective coordination

## 1. 諸言

近年、少子高齢化の問題に伴い、労働力不足が深刻な問題となっている。建設現場においても、労働者不足問題は一刻も早く対応すべき課題であり、その影響を受ける作業として照度計測がある。この作業は通常、外界からの光の影響を受けづらい夜間に行う必要があり、計測と記録に計2名を要している。さらに測定箇所は多く、測定後もデータを整理したりする必要があり、負担の大きい業務である。そこで本研究では、建設現場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。これまで、本研究では自動化に向けて実験を行っており、有効性を示してきた[1]。そこで現在は照度計測に必要な自己位置推定、照度計測点への移動、障害物回避等の実用的な機能を追加し、商品化の最終段階である。開発したロボットを用いて照度計測の実験を行った。本稿ではその実験結果を示すとともに、商品化する上での有効性について議論する。

## 2. 照度測定ロボットのシステム構成

本研究において、商品化を前提として照度測定ロボットの開発を行った。Fig.1に外観図を示す。ロボットに搭載されているものとしては、LRF、バンパセンサ、落下防止センサ、照度計があり、それぞれSLAMと目標追従、障害物回避、階段などの段差認識、照度計測に使用される。LRFは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[2]を、照度計にはコニカミノルタ株式会社から発売されているT10[3]を使用した。JIS規格では事務室などの一般照明の照度測定は床面から80 cm±5 cmの高さで、非常照明の測定などで行う床面照度測定では床面から15 cm以下の高さで照度測定を行うことが定められているため、これらに対応できるよう照度計取り付け位置を設計した。床面照度測定時にはロボット後部に照度計を取り付ける仕様となっている。

連絡先：新井 智之、〒191-0065 東京都日野市  
旭が丘6丁目6、首都大学東京、  
E-mail: arai-tomoyuki@ed.tmu.ac.jp

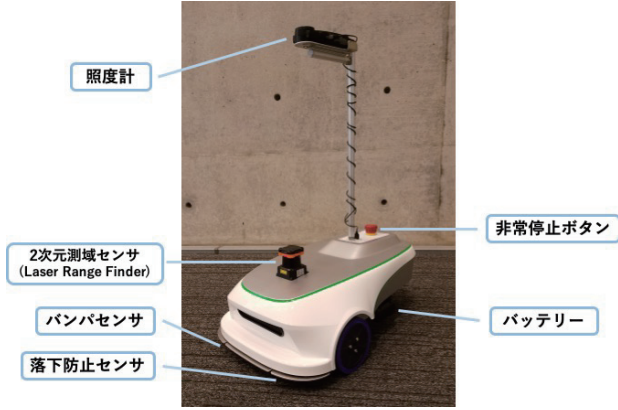


Fig.1 External view

### 3. 照度計測ロボットの智能化制御

#### 3.1 環境地図構築と自己位置推定

照度計測ロボットが与えられた測定点に移動するためには、環境地図の構築と自己位置推定をする必要がある。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。得られたセンサデータから、地図内で対応するセルに対して占有度の更新を行うのだが、対象となるセルには占有度を上げ、センサが透過したセルは占有度を下げる。以下にセルの占有度の更新式を示す。

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

ここで  $hit_t(x, y)$  と  $err_t(x, y)$  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である。

また、ロボットの自己位置推定には進化戦略に基づく手法を用いた。具体的な進化戦略の手法としては、 $\mu$ 個の親となる個体群から1個の子個体を生成し、山登りのように探索を行なっていく( $\mu+1$ )-ESを用いる。 $(\mu+1)$ -ESは、常に親個体を $\mu$ 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( $g_{k,1}$ ,  $g_{k,2}$ )と姿勢( $g_{k,3}$ )として表現し、各遺伝子に対して、遺伝的操作を行なっていくことによって、探索を行なっていく。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、 $fit$  は、 $k$  番目の個体の適応度を表し、 $fit_{max}$  と  $fit_{min}$  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  $\alpha_h$  と  $\beta_h$  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、 $\alpha_h$  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。

$$fit_k = p_t^{occ}(x_{i,L}, y_{i,L}) \cdot \sum_{i=1}^M map_t(x_{i,L}, y_{i,L}) \quad (3)$$

$$p_t^{occ}(x_{i,L}, y_{i,L}) = \frac{\sum_{i=1}^M hit'_t(x_{i,L}, y_{i,L})}{\sum_{i=1}^M hit'_t(x_{i,L}, y_{i,L}) + \sum_{i=1}^M err'_t(x_{i,L}, y_{i,L})} \quad (4)$$

$$hit'_t(x_{i,L}, y_{i,L}) = \begin{cases} 1 & \text{if } hit_t(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \\ 0 & \text{else if } err_t(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$err'_t(x_{i,L}, y_{i,L}) = \begin{cases} 1 & \text{if } err_t(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \\ 0 & \text{else if } hit_t(x_{i,L}, y_{i,L}) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(4)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 照度測定点への移動と障害物回避

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  $x_{k,1}$  is  $A_{k,i,1}$  and ... and  $x_{k,M}$  is  $A_{k,i,M}$

THEN  $y_{k,1}$  is  $w_{k,i,1}$  and ... and  $y_{k,N}$  is  $w_{k,i,N}$

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。

$$\mu_{A_{k,i,j}}(x_{i,j}) = \exp\left(-\frac{(x_{k,j} - a_{i,j})^2}{b_{i,j}^2}\right) \quad (7)$$

$a_{ij}, b_{ij}$  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。

$$\mu_{k,i} = \prod_{j=1}^M \mu_{A_{k,i,j}}(x_{k,j}) \quad (8)$$

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  $y_{k,l}$  ( $l=1,2$ ) を得る。  $R$  はルール数である。

$$y_{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^R \mu_{k,i} w_{k,i,l}}{\sum_{i=1}^R \mu_{k,i}} \quad (9)$$

### 3.3 バンパセンサと段差検出センサ

ロボットが移動をしている環境には、木材が置かれている場合がある。搭載されている LRF の設置高さによっては、レーザーが木材に当たらず、ロボットが直進してしまったり、押し進んだりしてしまい、危険な状態になってしまう。そこで、本ロボットには Fig.2 に示すように前方部にバンパセンサを取り付けた。これにより、LRF で検出できないような高さの障害物であっても、バンパセンサの衝突により検知することで、回避行動をとることが可能である。

また、ロボットが階段等に近づいても落下しないよう、赤外線センサを用いた落下防止センサを搭載した。一定以上の距離を計測した場合に、段差と判定し、移動の停止を行う。

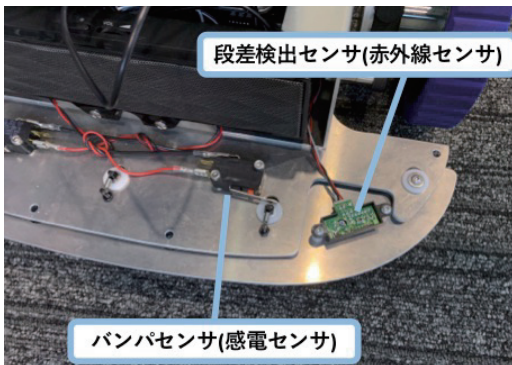


Fig.2 Bumper sensor and step detection sensor

### 3.4 多目的行動調停

上記で述べた通り、照度計測ロボットは目標追従や障害物回避を行う必要があり、その時々でどの行動を優先するかを決定する。多目的行動調停では、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。

$$y_l = \frac{\sum_{k=1}^K wgt_k \cdot y_{k,l}}{\sum_{k=1}^K wgt_k} \quad (10)$$

$y_{kl}$  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  $\alpha$  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。

$$wgt'_k = \alpha \cdot wgt_k + \Delta wgt_k \quad (11)$$

$$wgt_k \leftarrow \frac{wgt'_k}{\sum_{k=1}^K wgt'_k} \quad (12)$$

障害物回避、目標追従、最適目標位置追従をそれぞれ、行動1、行動2とし、式(4.6)における各タスク行動の重み更新則  $\Delta wgt_k$  ( $k=1,2$ ) を設定する。

$$\begin{bmatrix} \Delta wgt_1 \\ \Delta wgt_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dw_{1,1} & dw_{1,2} \\ dw_{2,1} & dw_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} si_1 \\ si_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$si_m$  ( $m=1,2$ ) 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  $\Delta wgt_k$  が大きな値を取るよう  $dw_{km}$  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。ここでバンパセンサ、段差検出をした際は、それらを回避するような行動を優先する。

## 4. 実験結果

実際の照度計測を想定して、屋内フロアにて実験を行なう。本実験環境において、設定した計測地点及び環境地図構築を行なった結果を Fig.3 に示す。また、実際にロボットが移動した軌跡を Fig.4 に示す。図中の赤い円は照度の測定点を示す。環境地図構築開始時点 (Fig.3 左図) では、LRF の計測データと CAD 図から生成された環境地図がほぼ一致していることがわかる。その後、ロボットは

環境地図の更新を行いながら、照度計測のための移動を開始し、各計測地点を通過しながら計測終了地点まで移動をしている (Fig.3 右図). Fig.4 より、ロボットは、本研究において用いているファジィ制御による目標位置追従によりオーバーシュートは生じているものの各計測地点を適切に通過できていることが確認できる. この際における、各計測地点と照度計測時の測定点の座標値及び照度値を Table 1 に示す. Table 1 より、設定した計測地点と実際に測定した地点の誤差の平均値は、約 194 [mm]、最大値は 204 [mm]となっていることから本研究において開発を行なった照度測定用ロボットは、照度測定作業への利用としては十分な精度の位置決め制御を行えると評価できる.

次に、今回ロボットに搭載したバンパセンサを用いて、LRF では検知できない低い障害物の回避について実験を行なった. 結果を Fig.5 に示す. 目標経路上にある障害物に対してロボットは直進し (Fig.5 左上)、衝突した後 (Fig.5 右上)、右後方に後退することで (Fig.5 左下)、回避が行われており (Fig.5 右下)、LRF で検知できない障害物に対しても十分な回避機能を有していると言える.

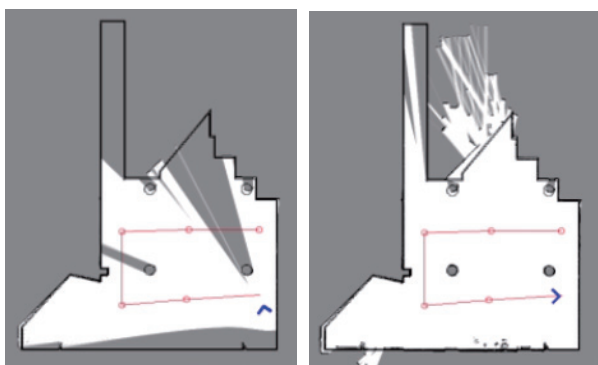


Fig.3 Results of map building

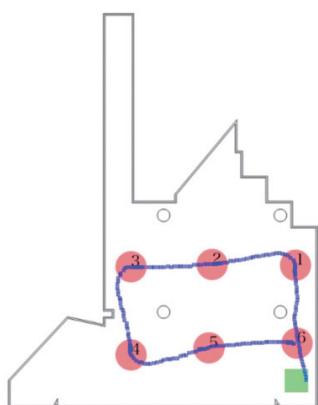


Fig.4 Movement trajectory

Table 1 Results of illuminance measurement

測定点	設定座標(m)		測定座標(m)		測定点誤差(m)	照度値(lx)
	x	y	x	y		
1	39.641	38.900	39.592	39.048	0.156	541
2	34.105	38.900	34.303	38.850	0.204	688
3	28.866	39.048	29.063	39.048	0.198	231.1
4	28.866	44.782	28.866	44.584	0.198	137.4
5	33.907	44.337	33.710	44.386	0.204	474
6	39.690	43.991	39.493	44.040	0.204	447

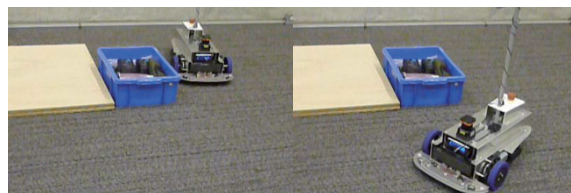


Fig.5 Obstacle avoidance by bumper sensors

## 5. 結言

本研究では、照明の照度測定を自動化する照度測定ロボットの開発を行なった. 実際に屋内環境において照度測定の実験を行い、開発したロボットは十分な精度で各計測地点を辿り、障害物を回避する性能を有していることを示した. 今後、実際の施工現場での検証を行うことによって、さらに改善を行なっていく予定である.

## 参考文献

- [1] 戸田 雄一郎, WeiHong Chin, 新井 智之, 辻元 誠, 谷口 和彦, 久保田 直行, "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", 日本保全学会 第 15 回学術講演会, pp.157-160,福岡国際会議場, 2018.
- [2] HOKUYO, <http://www.hokuyo-aut.co.jp/>
- [3] コニカミノルタ株式会社 T10, [https://www.konicaminolta.jp/instruments/support/discontinued\\_products/t10/index.html](https://www.konicaminolta.jp/instruments/support/discontinued_products/t10/index.html)