群ロボットを用いた竣工前建築物の照度測定システムの開発 -第二報 制御インタフェース開発とスケーラビリティテスト-

Development of a multi-robot system for illuminance measurement Scalability test and development of Graphic User Interface

学 西浦 悠生 (九州大)

○正 松本 耕平 (九州大)

酒見 和幸 (株式会社九電工)

古野 純二 (株式会社九電工)

福田 貴子(株式会社九電工)

池田 義明 (株式会社九電工)

正 倉爪 亮 (九州大)

Yuki NISHIURA, Kyushu University, nishiura@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

Kohei MATSUMOTO, Kyushu University

Kazuyuki SAKEMI, KYUDENKO Corporation

Junji, FURUNO, KYUDENKO Corporation

Takako, FUKUDA, KYUDENKO Corporation

Yoshiaki, IKEDA, KYUDENKO Corporation

Ryo KURAZUME, Kyushu University

In facility construction of a building, illuminance measurement is required to verify that the illuminance condition satisfies JIS regulations before its completion. In order to perform illuminance measurement accurately, measurements are conducted at night, causing long working hours at night. In this paper, we propose a GUI system for controlling autonomous illuminance measurement multiple robots system and report the result of scalability test by increasing the number of robots of the system. The experiments show that the system is able to complete the measurement by dividing areas for each of three robots.

Key Words: Infrastructure measurement, Multiple robots, Illuminance measurement

1 緒言

建築物の電気設備工事では、照明機器により空間内の照度が JIS 規格の照明基準に記載の推奨照度および設計者の求める所要 照度を満たしているかを竣工前に測定する必要がある。この空間 の照度を測定する業務を照度測定業務と呼ぶ。照度測定業務は, JIS で規定された測定方法および照度基準に従って実施されなければならない。さらに、正確な照度の測定を行うため、外光の影響の少ない夜間に実施されることが多く、照度測定業務は夜間の長時間労働の一因となっている。さらに、この業務は施工終了から竣工および物件引き渡しまでの限られた時間の中で実施しなければならない。

これに対し、照度測定業務の省力化を目指すロボットシステム [1][2][3] が提案されている。このシステムでは、照度測定業務中の巡回作業のロボットによる自動化を成功している。しかし、照度測定業務の作業負担の大きい大規模物流倉庫を単一のロボットで巡回することは、作業可能時間の少なさやバッテリー上限による巡回可能領域不足の問題から困難である。

これに対し我々はこれまでに、照度測定業務を自動化する群ロボットシステム [4] を提案してきた.これは、複数の照度測定ロボットへ測定を行う平面を分担・巡回させるシステムである.このシステムでは、3台の照度測定ロボットとそれらと同一ネットワークへ接続されたサーバ PC より構成されている.ロボットの複数台化によって、従来の作業員による測定よりも迅速に照度測定を行うことが可能であることが示された.

しかし、ロボット3台の構成では、依然として現場を巡回する性能に限りがあり、大規模建造物の巡回完了が難しい. また、照度測定を行う際のロボットの指示をコマンドラインで入力するため、現場作業員による運用に向かない.

本稿では、ロボットの実運用に向けた GUI システムの導入と 照度測定ロボット台数の追加によるスケーラビリティテストの実 施結果について報告する.

2 照度測定の手順

本章ではまず一般的な照度測定業務の概要を説明する. 照度測定業務は, JIS により測定手順及び照度基準が定められている. 代表的な照度測定方法である四点法の測定手順を以下に示す(図1).

- i. 照度測定を行う平面を一定間隔で縦横に分割(図 1(a))
- ii. 分割線の交点に測定点を定義(図1(b))
- iii. 四点の測定点を頂点に持つ単位測定区域の照度を式 1 に従って計算(ただし, $E_1{\sim}E_4$ は単位測定区域の四隅の照度値)
- iv. 測定された照度値の基準適合を確認

$$E = \frac{1}{4}(E_1 + E_2 + E_3 + E_4) \tag{1}$$

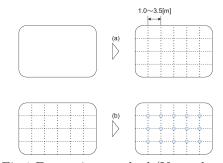


Fig.1 Four-points method (Yontenhou).

3 照度測定システムの巡回アルゴリズム

照度測定システムは,複数台の照度測定ロボットから構成され,システムを構成する照度測定ロボットは同一の仕様である.

照度測定ロボットの外観を図2に示す. また, 照度測定ロボット および各ロボットへ搭載された照度計の仕様を表1に示す. 提案システムの照度測定アルゴリズムを図3に示す.

3.1 「1. コストマップ生成」「2. 巡回点生成」

最初に、本システムは与えられた地図を基に、コストマップを生成する。このコストマップを利用し、障害物や壁等が存在しないことを確認しながら第 2 章で説明した四点法と同様の地点へ、巡回点を生成する。地図の入力は、提案する GUI システムによって施工図面を修正し利用する方法、照度測定ロボットによって地図生成 (SLAM) を実行し生成する方法の二通りが存在する。

3.2 「3. 領域分割」

全巡回点に対し、母点数を照度測定ロボットの台数としたマンハッタン距離による重心ボロノイ分割を適用し、領域を分割する。重心ボロノイ分割の実行時にマンハッタン距離を利用することにより、各ロボットに割り当てられた領域の外形が矩形である方が、巡回時の旋回回数が少なくなり、照度測定を行う際の時間が減少することが期待される。ただし、このとき各ロボットが割り当てられた領域の巡回点を可能な限り直線的に掃引することを前提としている。

3.3 「4. 巡回路生成」

領域の分割後,各分割内の巡回点はロボットへ割り振られ,各ロボットは割り当てられた巡回点をジグザグに巡るような経路を生成する.この際,各ロボットは,四点法に沿って巡回点を生成する際に引いた分割線(図1(a)の点線)が成す二軸に対して,担当する巡回点位置の分散を計算し,分散が大きい軸方向にできるだけ直線的に移動するように巡回路を生成する.

このとき,巡回路は順序付きで格納されたリストの形式で生成される.巡回路生成後,サーバ PC は各照度測定ロボットへ巡回路を送信する.

3.4 ロボットによる巡回

図 3 に示すように,ロボットは Robot Operating System 2 (ROS2)[5] および Nav2[6] を利用し巡回点までの自律移動を行う.そして,すべての巡回点を巡回した後,初期位置へ戻り測定を終了する.自律移動の際の環境地図は 3.1 項で読み込ませた地図と同様のものを利用する.

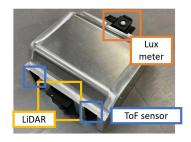


Fig.2 Appearance of the illuminance measurement robot.

Table 1 Specification of the illuminance measurment

robot.	
	仕様
寸法	$350[\text{mm}] \times 300[\text{mm}] \times 200[\text{mm}]$
重量	4.0[kg]
LiDAR測位範囲	半径30[m]
移動最大速度	0.52[m/s]
駆動時間	3[時間]
照度計	FT3425
照度測定周波数	2[Hz]
照度測定精度	±2[%]

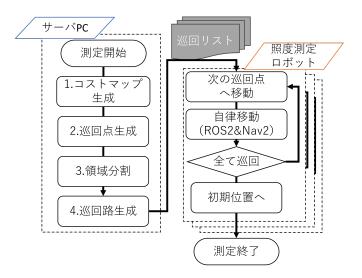


Fig.3 Flow chart for illuminance measurement.

4 制御インタフェース

本稿では、建設現場作業員による群ロボットシステムの利用を容易にするため、従来のコマンドラインによる操作から Graphical User Interface(GUI) へ移行することを目指した。 GUI システムは作業員による巡回のための設定作業を容易にし、ロボットや巡回状況の監視画面を提供する。本章では、インタフェースの設定画面について紹介を行う。

4.1 巡回の設定項目

本項では,巡回に必要な情報を打ち込む設定画面について説明する.巡回に必要な情報を以下に列挙する.

- 使用ロボットの選択
- 環境地図の準備
- ロボット初期位置の指定

4.2 使用ロボットの選択

本システムでは使用するロボットの台数や組み合わせの変更が 任意に可能である. 使用するロボットを任意に選択可能な GUI の画面を図 4 へ示す.

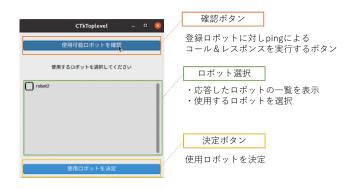


Fig.4 Screen for selection of robots.

4.3 環境地図の準備

第3章で述べたように、本システムでは照度測定の順路計算や自己位置推定が環境地図に基づいて行われている。測定対象環境の施工図面が存在する際は「図面あり」として、図面を修正し環境地図として用いる。一般に、施工図面は寸法線等の書き込みが多く、修正を経ず環境地図として利用することは難しい。しかし、多くの現場では CAD 等で壁面等と書き込み線はレイヤを分けて管理されていることが多く、図面上の照度測定ロボットのLiDAR が検知しうる物体のみを抽出することは可能である。抽

出後に色分けを行った図面を図5へ示す.図面がない場合は照度 測定ロボットを用いて SLAM を行い環境地図を取得する.

また,SLAM を行う際には,実環境と地図画像を紐づける一ピクセルの一辺の長さ [m] (map_resolution) が事前に判明している.一方,図面画像は縮尺等が図面毎に異なるため,作業員によって設定しなければならない.本システムの,設定をマウスを用いて実施可能な設定画面を図 6 へ示す.本画面では画面左の図面上の寸法が判明している 2 点をマウスで指定し,右側に寸法を打ち込むことで map_resolution を設定可能である.

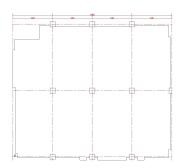


Fig.5 Example of a drawing modified for measurement.

The outline of the environment is drawn and extracted in black lines, and the dimension lines and other writings are extracted in red lines.

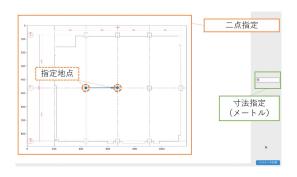


Fig.6 Screen for calculating map_resolution.

4.4 ロボット初期位置の指定

ロボットによる巡回を行っている際の自己位置推定のため,ロボットが走行を開始する位置を作業者はロボット台数分だけシステムへ設定しなければならない. 初期位置設定画面を図7へ示す. 作業者は,左側の選択画面から,初期位置を設定するロボットを選択した後,右側の入力画面上でマウスによる設定を行う.

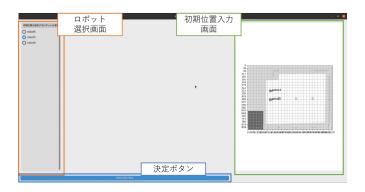


Fig.7 Screen for setting initial poses of robots.

5 スケーラビリティテスト

本稿では、照度測定ロボットの台数を3台から6台へ増加させ、システムが通信や計算に関する負荷の増加に対応可能かを検証した結果について報告する.

5.1 事前実験

事前実験として、従来のシステム構成(図 8)でシステムが動作するかを確認した.

実験の結果、従来のシステム構成では照度測定ロボットの Nav2 等の自律移動に関するソフトウェアのノード数の増加による過負荷により、正常にシステムが動作しなかった。そのため、ノード数増加によるシステム負荷増大を防ぐため、ロボット 3 台毎にポートを分け、それぞれのポート毎に GUI の起動および作業員による操作を行った。システムの構成図を図 9 へ示す。この際、事前地図は、図 10 のように事前に作業員により二分割した。

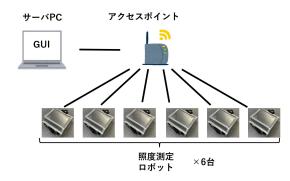


Fig.8 System architecture of illuminance measurement system.

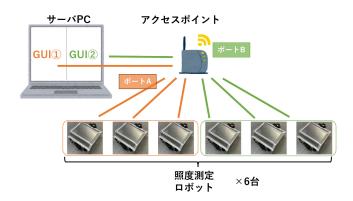


Fig.9 New system architecture.

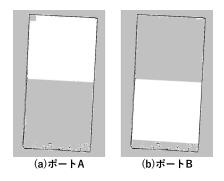


Fig.10 Example of a segmented environmental map.

5.2 実験場所

実験は博多国際展示場&カンファレンスセンターで行った.実験場所の概要を表 2, 図 11 に示す.

Table 2 Condition of a room for experiments.

	仕様
広さ	$29[m] \times 14[m]$
天井高さ	5~6[m]
平均照度	1188[lx]
最大照度	1336[lx]
窓の有無	あり (外光の差し込みは無し)



Fig.11 Photo of a room for experiments.

5.3 実験結果

実験の結果、ロボットは6台での巡回を行うことに成功した、 巡回の様子を図12へ示す。また、巡回によって得られた照度測 定結果と測定結果へロボットの起動を重畳表示した図を図13へ 示す。実験では、6台のうちの1台(黒色の線)で予期しない目 標位置が一部で設定されており、一時的に目標軌道から外れてい た。また、ロボット6台を利用することで、照度測定を193秒 (従来の手動測定では548秒)で完了可能であることを確認した。



Fig.12 Illuminate measurement experiment with 6 robots.

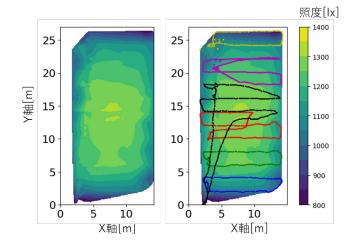


Fig.13 The left graph shows the result of illuminance measurement in the scalability test. The right graph shows the robot trajectories.

6 結言

本稿では、従来の照度測定システムを現場作業員が容易に利用可能な GUI ソフトウェアの開発およびロボット台数を増加させた負荷テストの結果を紹介した。負荷テストの結果、従来のシステム構成ではロボットの台数増加による処理負荷増加によってシステムの動作不良が発生することを確認した。そこで、ロボット3台毎にポートと測定平面を分割したシステム構成に変更し、従来の2倍のロボットの台数での照度測定を完了可能であることを確認した。今後も、実際の照度測定現場への導入を目指し、インターフェースの改良等を行う予定である。

参考文献

- [1] 西山大貴 下村浩史 間博人三木光範. M-003 自動走行ロボットを用いた照度分布実測手法 (m 分野: ユビキタス・モバイルコンピューティング, 一般論文). 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol. 12, No. 4, pp. 319–320, 2013.
- [2] 佐竹 純二可児 周平. 移動型生活支援ロボットによる屋内照度分布計 測と照明機器の操作 (家政学とロボティクス). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2014, pp. 3P1-H04, 2014.
- [3] 辻元誠. 自律走行型照度測定ロボットの開発. 電気設備学会誌, Vol. 40, No. 4, pp. 230–233, 2020.
- [4] 西浦悠生, 酒見和幸, 古野純二, 福田貴子, 池田義明, 松本耕平, 倉爪 亮. 群ロボットを用いた竣工前建築物の照度測定システムの開発. ロ ボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2023, pp. 1A1-B03. 一般社団法人 日本機械学会, 2023.
- [5] Steven Macenski, Tully Foote, Brian Gerkey, Chris Lalancette, and William Woodall. Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics*, Vol. 7, No. 66, p. eabm6074, 2022.
- [6] Steven Macenski, Francisco Martin, Ruffin White, and Jonatan Ginés Clavero. The marathon 2: A navigation system. In 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020.