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

Development of a multi-robot system for illuminance measurement

| ○学 | 西浦 | 悠生 (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) | ТĒ | 松本 | 耕平 | (九州大) |
| 正 | 倉爪 | 亮(九州大) | | | | |

Yuki NISHIURA, Kyushu University, nishiura@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp Kazuyuki SAKEMI, KYUDENKO Corporation Junji, FURUNO, KYUDENKO Corporation Takako, FUKUDA, KYUDENKO Corporation Yoshiaki, IKEDA, KYUDENKO Corporation Kohei MATSUMOTO, Kyushu University 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 an autonomous illuminance measurement robot system consisting of multiple robots. The experiments show that the measurement errors of illuminance compared to the human measurements is 1.36% and the measurement time is reduced about 12%.

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.

本研究では、この照度測定業務を自動化する群ロボットシステムを提案する. 照度測定の自動化システムの先行研究として、これまでに照度測定ロボットが提案されている [2][1][3]. 例えば [3]では、大空間かつ測定点数が多い測定対象においては、ロボット導入の効果が大きいことが報告されている. そこで本研究では、複数台ロボットからなる群ロボットシステムを用いることで、更なる測定業務効率化を可能にする照度測定システムを提案する.

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, E1~E4 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

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

ただし,照度測定面の高さは,測定対象である空間の種類により,表1のように定められている.



Fig.1 Four-points method (Yontenhou).

 Table 1 Standard height for illuminance measurement

 (US)

| (010): | |
|----------|----------------------|
| 測定空間の状態 | 測定面の高さ |
| 室内で机・作業台 | 作業対象面の上面または下面から |
| が存在する場合 | 5[cm] 以内の仮想面 |
| 作業対象面の指定 | 床面から 80 ± 5[cm] |
| がない場合 | |
| 廊下・屋外 | 床面または地上面より 15[cm] 以内 |
| 和室 | 畳上から 40 ± 5[cm] |

3 提案する照度測定システム

本論文で提案する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る群ロボットシステムである.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,および各 ロボットへ搭載された照度計の仕様を表2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.本シス テムでは、まず事前に与えられた地図を基に移動可能領域を計算 する.この事前地図は,建築物の施工図面やSLAMによって得 られ,画像形式で与えられる.また,ピクセル毎に「障害物」, 「障害物無し」,「未知領域」の三種類の状態と,初期位置からの 移動コストが定義されている.移動可能領域の計算では,まず最 初に障害物領域と未知領域に十分に大きなコストを割り当てる. その後,ロボット初期位置からのダイクストラ法によって得られ る最短経路のコストが十分に小さい座標の集合を移動可能領域と する.

次に,得られた移動可能領域に対して,第2章で説明した四 点法を適用して,測定点を定義する.その後,移動可能領域のす べての測定点に対し,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,図4に示すように,各ロ ボットが割り当てられた領域の測定点をできるかぎり直線的に掃 引することを前提としている.

分割された領域は、各ロボットへ割り振られ、各ロボットは各 領域内に存在する測定点をそれぞれ巡回する.この際、各ロボッ トにおいて、四点法による測定点の生成の際に引いた分割線(図 1(a)の点線)が成す二軸に対して、測定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掃引作 業を行う.例えば、図4内では、左右方向と上下方向の二軸で分 割線が引かれており、測定点の座標は左右方向軸に分散が大きい ため、主に左右方向に移動するよう巡回路が生成される.



Fig.2 Appearance of the illuminance measurement robot.



Fig.4 Examples of measurement paths.

4 照度分布図

本研究では、群ロボットシステムによる照度測定を行い、各ロ ボットにより得られたデータを結合した後、測定値と未測定地点 の照度値を線形補間することで照度分布図を作成する.この照度 分布図は、従来の四点法からなる照度測定結果と異なり、測定を 行っていない箇所も照度を計算することが可能である.これによ り、より詳細で面的な照度分布図が得られ、照度基準を満たさな かった場合の原因究明などに役立つことが期待される.

提案するロボットシステムでは、従来の作業員による照度測定 とは異なり、移動しながらの測定が可能である.本研究で使用し ている照度計 FT3425(日置電機)は、表2に示すように、照度 値を0.5秒に1回で取得可能である.また、巡回を行っている間、 ロボットは自己位置推定機能によりロボット座標を常に計算して いる.このロボット座標と移動中に得られた照度値を利用し、線 形補間処理を行うことで、照度分布図が作成できる.照度分布図 の例を図5(a)に示す.さらに、照度データを測定した際のロボッ ト軌道を図5(b)に示す.



Fig.5 An Example of illuminace map and trajectories of robots.

照度分布図の生成は以下の手順で行われる.

- i. 各ロボットが収集した照度データを結合
- ii. 照度データを一定間隔のグリッドに分ける
- iii. データが存在しないグリッドの照度値は線形補間により推定

Table 2 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] |
| センサ測位範囲 | 半径 30[m] |
| 移動速度 | 0.52[m/s] |
| 駆動時間 | 3[時間] |
| 使用照度計 | FT3425 |
| 測定周波数 | 2[Hz] |
| 照度測定精度 | $\pm 2[\%]$ |



Fig.3 Flow chart for illuminance measurement.

5 照度測定実験

本章では、開発した群ロボットを用いた竣工前建築物の照度測 定システムによる測定実験について説明する.本測定実験では、 照度分布図の作成にあたり、グリッド間隔を 0.1[m] とした.ま た、任意地点の照度値の参照は、座標と紐づいているグリッドの 値を読み出すことで実現した.これにより、従来では一定の測定 間隔でしか記録されていなかった照度分布が 0.1[m] 単位で把握 することが可能となった.

5.1 実験の概要と測定精度

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3,図6に示す.実験では,開発したロボット システムによる測定と,従来の作業員による測定をそれぞれ行い, 得られた照度分布図を比較した.ロボットシステムによる測定は 10回行い,手動測定は1回行った.

また、ロボットの移動経路が実験回毎に若干異なり、手動測定 結果と比較する点数が表4に示すように各実験回で異なった. 図 7は比較点数が68点の場合. 図8は67点の場合である. この原 因として、図7に示すように、右下の測定点へロボットが向かう 際の動きの違いが考えられる. 具体的には、図9に示すように、 照度測定ロボットには移動目標地点に対してある一定の許容到達 誤差を設定している. この目標地点への許容到達誤差により、照 度値の測定範囲にばらつきが生じると考えられる.

また得られた結果を表 5, 図 10, 図 11 に示す. 表 5 よ 9, ロ ボットによる照度測定値と手動による照度測定値の相対誤差は 1.36[%] であり, 照度計の誤差 2[%](表 2) と比較して, 十分小さ いことが示された.

Table 3 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.6 Photo of a room for experiments.

Table 4 The number of comparable points in each experiment.

| ۰. | | |
|----|-------|----------|
| | 実験回番号 | 比較点数 [点] |
| | 1 | 67 |
| | 2 | 68 |
| | 3 | 67 |
| | 4 | 67 |
| | 5 | 68 |
| | 6 | 67 |
| | 7 | 67 |
| | 8 | 67 |
| | 9 | 67 |
| | 10 | 67 |



Fig.7 An example of experiments with 68 comparable points (No. 5) .



Fig.8 An example of experiments with 67 comparable points (No. 1).

5.2 照度測定時間

本報で提案した照度測定システムを用いた場合と,従来の手動 測定での測定時間の差を比較した結果を表6に示す.表6に示す ように,本システムは従来の作業員による照度測定と比較して, 作業時間を平均12[%]短縮できることを確認した.

なお,従来の単一ロボットによる照度測定ロボット [3] では, 照度測定を二人で行うことから,ロボットの作業時間を作業人数 での延べ時間と比較していたが,本提案システムでは,延べ時間 ではなく作業員二人が作業した場合の作業時間と比較している.

6 結言

本報告では、新たに開発した群ロボットを用いた竣工前建築物の照度測定システムを紹介した.また実験の結果、提案システムは、従来の作業員による手動測定と比較して、相対誤差1.36[%]で測定が可能であり、また作業時間も平均12[%]減少することが確認された.今後は、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] 佐竹 純二 可児 周平,三浦 純. 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, 2014:3P1-H04, 2014.
- [2] 西山大貴 下村浩史 間博人 三木光範,清水祐希. 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, 12(4):319–320, 2013.

[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**, 40(4):230-233, 2020.



| Table 5 Absolute and rela | ative errors. |
|---------------------------|---------------|
| | 実験結果 |
| 誤差の絶対値の平均 | 16.97[lx] |
| 相対誤差 | 1.36[%] |

Fig.9 This image explains why insufficient working area occurs.



Fig.10 Boxplots of the absolute errors.



Fig.11 Boxplots of the relative errors.

| 実験回 | 測定時間 [秒] | 点数 [点] | 一点当たりの | 一点毎の |
|------|----------|--------|----------|---------|
| | | | 所要時間 [秒] | 所要時間の |
| | | | | 減少率 [%] |
| 手動 | 548 | 80 | 6.85 | 0 |
| 1 | 403 | 67 | 6.00 | 14.6 |
| 2 | 392 | 68 | 5.76 | 13.7 |
| 3 | 400 | 67 | 5.97 | 12.8 |
| 4 | 425 | 67 | 6.34 | 7.4 |
| 5 | 406 | 68 | 5.97 | 12.8 |
| 6 | 398 | 67 | 5.94 | 13.3 |
| 7 | 409 | 67 | 6.10 | 10.9 |
| 8 | 408 | 67 | 6.09 | 11.1 |
| 9 | 404 | 67 | 6.03 | 12.0 |
| 10 | 405 | 67 | 6.04 | 11.8 |
| 10 旦 | 404.9 | — | 6.03 | 12.0 |
| 平均 | | | | |

Table 6 Measurement times.