

オープンプランオフィスにおける UWB を用いた推定位置誤差を補完する知的照明システムの検討

小久保友裕¹ 岡本英二¹

概要: オフィスにおける電力消費量の内、照明が占める割合は全体の 20-45%と大きく、その削減が課題となっている。赤外線センサや照度センサを用いた知的照明システムが研究されているが、正確な位置情報を用いることでより多くの電力を削減することが可能となる。そこで本研究では Ultra-Wide Band (UWB)センサによる位置情報を用いた推定位置誤差に適合した知的照明システムを提案し、既存の赤外線センサを用いたものと比べ消費電力量が約 90%、既存の UWB を用いたものと比べても約 27%削減できることを示す。提案する推定位置誤差を補償できるシステムは拡張性が高く、他の位置情報システムに活用できる意味で重要である。

キーワード: 知的照明システム, ultra-wide band, 非線形位置推定, ターゲット位置, 赤外線センサ

A Study of Intelligent Lighting System to Complement the Estimated Location Error Using UWB in Open Plan Office

TOMOHIRO KOKUBO^{†1} EIJI OKAMOTO^{†1}

Abstract: Lighting accounts for 20-45 % of the total power consumption in office buildings, and its reduction is an important issue. Smart lighting systems using infrared occupancy sensors and light sensors have been studied, but more power can be saved by using accurate location information. In this study, we propose a smart lighting system that can compensate for the estimated location error using Ultra-Wide Band (UWB) sensor location information, and show that it can reduce the power consumption by about 90 % compared to the existing infrared occupancy sensor system, and by about 27 % compared to the existing UWB system. The proposed system, which can compensate for the estimated location error, is highly scalable and important in the sense that it can be used for other location information systems.

Keywords: smart indoor lighting system, ultra-wide band, nonlinear position estimation, human location, infrared occupancy sensor

1. はじめに

照明はオフィスにおける消費電力量の内 20-45 %の多くのエネルギー消費割合を占めている[1]。そのため、照明の消費電力量削減のために、人感センサや照度センサを用いた知的照明システムの研究がなされている[2]。しかし、従来手法では人感センサなど低精度のセンサを用いており正確な位置が把握できないため、冗長な調光を行う必要があり消費電力の増加を引き起こしていた[6]。一方、Ultra-Wide Band (UWB) センサを用いた位置推定は見通し内 (Line of Sight: LOS) 環境において数 10 cm 級の精度であることが知られており[7]、非常に高い位置推定精度をもつ。そのため我々のグループでは人感センサと比べ高精度な UWB センサを用いた知的照明システムを提案してきた[8]が、さらなる性能向上が課題となっていた。そこで本研究では UWB センサ使用時に生じる位置推定誤差を補償可能な知的照明システムについて提案し、シミュレーションにより必要な照度を満足しつつ、消費電力量を削減できることを示す。

以降第 2 章では UWB を用いた知的照明システムについて

述べる。第 3 章では計算機シミュレーションを用いた消費電力量削減の検討と考察、第 5 章でまとめと今後の展望を述べる。

2. システムモデル

この章では提案手法に用いる手法について説明する。提案手法のアルゴリズム概要は図 1 のようになる。提案手法は推定位置誤差を推定するための事前情報を得るフェーズと実際に調光を行う 2 つのフェーズで成り立っている。ターゲットの測距には UWB で一般に用いられる Time of arrival (TOA) を用いることを想定しており、Least square (LS)法で推定位置を算出する。また、照明の調光率最適化は照明の全光束及び配光曲線、消費電力量が既知としたとき、目標照度を満たす消費電力量が最小となる照明の調光率を求める線形計画問題とみなすことができる[9]。そのため、線形計画問題を解くアルゴリズムの一つである simplex 法を適用することで、最適な調光率を求めることができる。照明制御インターフェイスは Digital Addressable Lighting

¹ 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

Interface control (DALI) を仮定する。DALI とは照明制御の国際標準通信規格となっている。特徴としては照明器具 1 台ごとにアドレスを持っており、1 台単位で明るさの変更が可能である。また、双方向通信により器具の点灯状態をフィードバックすることができるなどの機能を備える。この規格に対応した照明器具は流れる電流を制御することで 0~100% で調光制御ができ、1% 以下の細かさでの調光も可能である[10]。

2.1 位置推定手法

LS 法はセンサから得られた距離情報から、三辺測量により推定位置を得る方式である[11]。推定位置を (\hat{x}, \hat{y}) 、 $i = 1, 2, \dots, N$ 番目のセンサ座標を (x_i, y_i) 、 i 番目のセンサの測定距離を \hat{d}_i 、センサ数を N とすると、

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \operatorname{argmin}_{\hat{x}, \hat{y}} \sum_{i=1}^N \left(\hat{d}_i - \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} \right)^2 \quad (1)$$

となる。図示すると図 2 のようになる。ここでの \hat{d}_i と $\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2}$ との差が最小になるような点を推定位置とする。

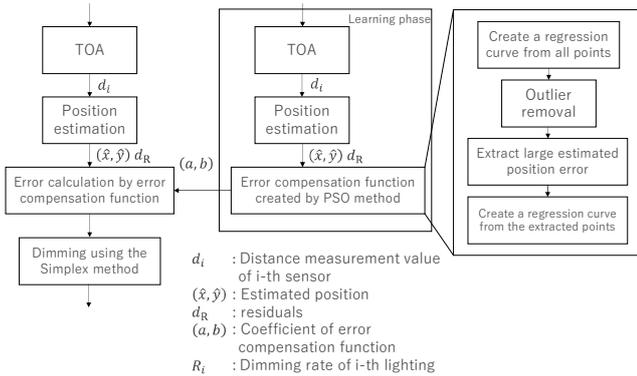


図 1 提案手法におけるシステム図

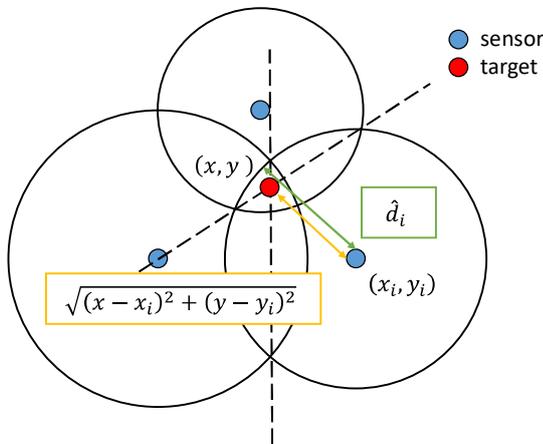


図 2 LS 法における位置推定手法

2.2 Line of position

Line of position (LoP) は LS 法を解く方法の一つであり、式(1)の右边を

$$f_i(\hat{x}, \hat{y}) = \hat{d}_i - d_i = \hat{d}_i - \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} \quad (2)$$

のように置く。この $f_i(\hat{x}, \hat{y})$ を 0 と近似して解く。 $f_i(\hat{x}, \hat{y}) = 0$ と仮定し、両辺を 2 乗して整理すると

$$-x_i^2 - y_i^2 + \hat{d}_i^2 = (\hat{x}^2 + \hat{y}^2) + \hat{x}(-2x_i) + \hat{y}(-2y_i) \quad (3)$$

ここで $i = N$ のとき

$$-x_N^2 - y_N^2 + \hat{d}_N^2 = (\hat{x}^2 + \hat{y}^2) + \hat{x}(-2x_N) + \hat{y}(-2y_N) \quad (4)$$

となる。この時、式(3)から式(4)を引いて $(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)$ を消去すると

$$\begin{aligned} -x_i^2 - y_i^2 + \hat{d}_i^2 - (-x_N^2 - y_N^2 + \hat{d}_N^2) \\ = 2\hat{x}(x_N - x_i) + 2\hat{y}(y_N - y_i) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。これを行列に直すと

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} -x_1^2 - y_1^2 + \hat{d}_1^2 - (-x_N^2 - y_N^2 + \hat{d}_N^2) \\ \dots \\ -x_{N-1}^2 - y_{N-1}^2 + \hat{d}_{N-1}^2 - (-x_N^2 - y_N^2 + \hat{d}_N^2) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 2(x_N - x_1) & 2(y_N - y_1) \\ \dots & \dots \\ 2(x_N - x_{N-1}) & 2(y_N - y_{N-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

となる。上式を一般化すると

$$\mathbf{I} = \mathbf{R}\mathbf{b} \quad (7)$$

となる。ここで

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} -x_1^2 - y_1^2 + \hat{d}_1^2 - (-x_N^2 - y_N^2 + \hat{d}_N^2) \\ \dots \\ -x_{N-1}^2 - y_{N-1}^2 + \hat{d}_{N-1}^2 - (-x_N^2 - y_N^2 + \hat{d}_N^2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 2(x_N - x_1) & 2(y_N - y_1) \\ \dots & \dots \\ 2(x_N - x_{N-1}) & 2(y_N - y_{N-1}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}$$

である。 \mathbf{b} について解くと、

$$\mathbf{b} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{I} \quad (9)$$

となる。ここで \mathbf{x}^T は \mathbf{x} の転置行列を表す。この式(9)を計算することで推定位置を算出する。ここでの解は近似による解であり、一般的に精度は高くない。

2.3 Newton Raphson 法

LS 法における式(1)を解くにあたり、有効になる方法が Newton Raphson 法というアルゴリズムである。以下に 2 変数の場合の Newton Raphson 法の原理を示す。式(1)の右边である $(\hat{d}_i - \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2})^2$ は必ず正の値をとり、この値が最小値をとるのは右边を微分した結果が 0 となる場合であることがわかる。これより右边を微分して 0 になるような (\hat{x}, \hat{y}) を求めることによって推定点を得る。

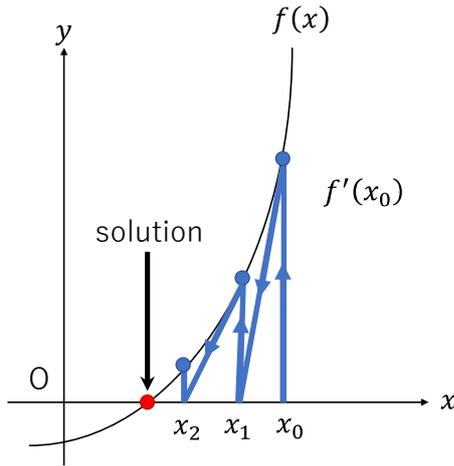


図3 Newton Raphson 法における解収束

$R(\hat{x}, \hat{y}) = (\hat{d}_i - \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2})^2$ とおくと, \hat{x}, \hat{y} で偏微分した式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} R(\hat{x}, \hat{y}) &= 2 \left(1 - \frac{\hat{d}_i}{\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2}} \right) (\hat{x} - x_i) \\ \frac{\partial}{\partial y} R(\hat{x}, \hat{y}) &= 2 \left(1 - \frac{\hat{d}_i}{\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2}} \right) (\hat{y} - y_i) \end{aligned} \quad (10)$$

のようになる. Newton Raphson 法はこのような非線形方程式の解を数値計算によって求めることが可能である. 真の解に十分に近い $\hat{x} = x_0$ が与えられたとき, $\hat{x} = x_0$ における $\hat{y} = f(x)$ の接線を考える.

$$\hat{y} = f'(x_0)(\hat{x} - x_0) + f(x_0) \quad (11)$$

この接線と x 軸との交点の x 座標を x_1 とする. x_1 について解くと

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (12)$$

これを m 回繰り返すと,

$$x_m = x_{m-1} - \frac{f(x_{m-1})}{f'(x_{m-1})} \quad (13)$$

のようになる. この試行が

$$|x_m - x_{m-1}| < \delta \quad (14)$$

の条件を満たしたとき終了する. ここで δ は既定値であり $\delta \ll 1$ を満たす. これを用いて式(10)より,

$$\begin{aligned} f(\hat{x}, \hat{y}) &= 2 \left(1 - \frac{\hat{d}_i}{\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2}} \right) (\hat{x} - x_i) \\ g(\hat{x}, \hat{y}) &= 2 \left(1 - \frac{\hat{d}_i}{\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2}} \right) (\hat{y} - y_i) \end{aligned} \quad (15)$$

を解くことを考える. 便宜上 (x, y, z) で表される 3 次元空間と考えて $(\hat{x}, \hat{y}) = (x_0, y_0)$ における $z = f(\hat{x}, \hat{y}), z = g(\hat{x}, \hat{y})$ の接平面はそれぞれ

$$z = f(x_0, y_0) + \frac{\partial}{\partial x} f(x_0, y_0)(\hat{x} - x_0) + \frac{\partial}{\partial y} f(x_0, y_0)(\hat{y} - y_0) \quad (16)$$

$$z = f(x_0, y_0) + \frac{\partial}{\partial x} g(x_0, y_0)(\hat{x} - x_0) + \frac{\partial}{\partial y} g(x_0, y_0)(\hat{y} - y_0)$$

と置くことができる. これらに対して, $z = 0$ を代入して得られる解 (\hat{x}, \hat{y}) を (x_1, y_1) と置く. これを行列で表現すると

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x_0, y_0) \\ g(x_0, y_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} f(x_0, y_0) & \frac{\partial}{\partial y} f(x_0, y_0) \\ \frac{\partial}{\partial x} g(x_0, y_0) & \frac{\partial}{\partial y} g(x_0, y_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

これを (x_1, y_1) に関して解くと,

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} f(x_0, y_0) & \frac{\partial}{\partial y} f(x_0, y_0) \\ \frac{\partial}{\partial x} g(x_0, y_0) & \frac{\partial}{\partial y} g(x_0, y_0) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} f(x_0, y_0) \\ g(x_0, y_0) \end{pmatrix} \quad (18)$$

となる. 同様の操作を繰り返し, m 回目には

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x_{m-1} \\ y_{m-1} \end{pmatrix} \\ &- \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} f(x_{m-1}, y_{m-1}) & \frac{\partial}{\partial y} f(x_{m-1}, y_{m-1}) \\ \frac{\partial}{\partial x} g(x_{m-1}, y_{m-1}) & \frac{\partial}{\partial y} g(x_{m-1}, y_{m-1}) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} f(x_{m-1}, y_{m-1}) \\ g(x_{m-1}, y_{m-1}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

と表すことができる. これを用いて繰り返し計算を行うことで近似解を得ることができる. Newton Raphson 法における解が収束するときの図を図 3 に示す. また本稿では (x_0, y_0) を \mathbf{b} とし, 収束条件を

$$\left\| \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{m-1} \\ y_{m-1} \end{pmatrix} \right\| < 10^{-8} \quad (20)$$

と設定した.

2.4 誤差補償関数の作成

誤差補償関数の算出について述べる. UWB センサ使用時に生じる誤差により推定位置と真の位置にずれが生じ, 推定位置に対して照明の最適化を行った際に, 真の位置では必要な照度を満たさない場合が存在する. そこで誤差を推定し, 誤差の影響下においても真の位置において目標照度を満たすことが可能なシステムを構築することを考える. 推定位置誤差の値を推定するため, いくつかの指標を検討した結果, 位置推定時に生じる残差を用いることとした.

残差を d_R とすると, $d_R = \sum_{i=1}^N (\hat{d}_i - \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2})^2$

と表せる. 表 1 の条件においてシミュレーションを行い, 残差と推定位置誤差の関係を調べる. センサフィールドを文献に存在するオープンプランオフィスに設定した[12]. センサフィールドおよびセンサ配置を図 4 に示す. これより結果は図 5 のようになる. 結果より残差の値が小さいほど推定位置誤差の値が大きくなる事が分かる. 推定位置精度と残差が反比例する理由をケーススタディにより検討した. 図 6 に位置推定精度が悪くなりやすいフィールド端 $(x, y) = (0.1, 0.1)$ にターゲットが存在する場合と, 位置推定精度が比較的高いフィールド中央 $(x, y) = (9.5, 12.0)$ にター

ゲットが存在する場合の位置推定結果の例を示している。図中の円が各 UWB センサの測距値の距離円を表し、赤い点が推定位置座標を表す。図 6 の(a)では推定位置と距離円が近接しており、残差が小さくなるのが分かるが、一方ターゲットの位置からは遠ざかり、位置推定精度が低くなるのが分かる。一方で図 6 の(b)ではセンサの誤差が打ち消しあい、推定位置精度は良くなるが、推定位置が距離円から遠ざかることで残差が大きくなるのが確認された。これらの理由により推定位置精度と残差が反比例すると考えられる。

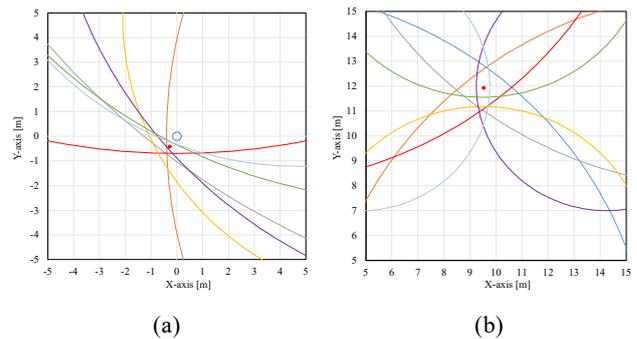


図 6 各推定位置精度におけるケーススタディ
(a) フィールド端, (b) フィールド中央

表 1 推定位置誤差と残差の関係におけるシミュレーション緒元

Position estimation method	LS method
Sensor field	19.0 [m] × 24.0 [m] [12]
Number of UWB sensor	8
Sensor position (x, y) [m]	(0.0, 0.0), (19.0, 0.0), (19.0, 24.0), (0.0, 24.0) (9.5, 4.8), (14.25, 12.0), (9.5, 18.0), (4.75, 12.0)
Number of positioning LoopMax	10
Number of distance measurements	30
Noise averaging and variance in an LOS environment (m _{LOS,TOA} , σ _{LOS,TOA} ²) [m]	(0.21, 0.269 ²) [13]

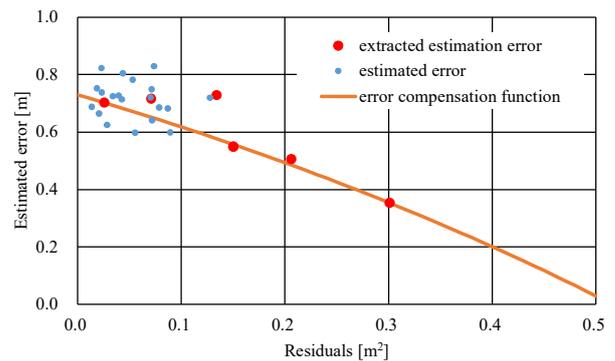


図 7 誤差補償関数の生成

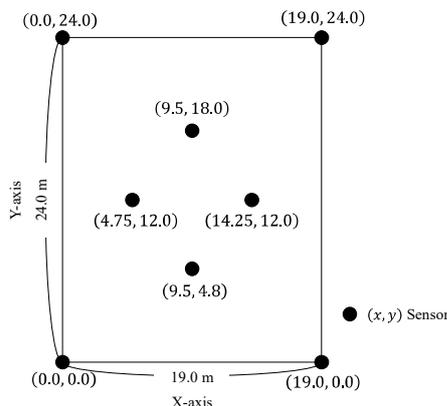


図 4 センサフィールド

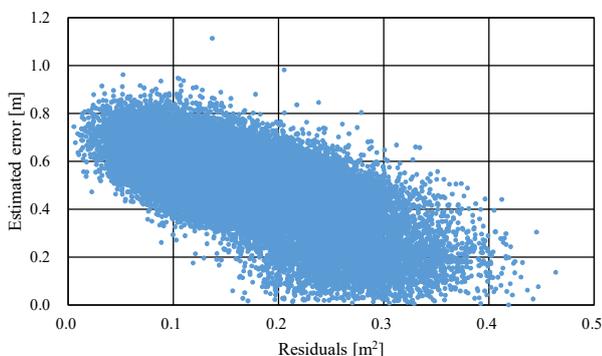


図 5 残差と推定位置誤差の関係

これらの関係から、残差の値から推定位置誤差を算出する関数を経験的に $u = -e^{aR} + b$ とした。u は推定する推定位置誤差である。これを誤差補償関数として定義し、この a, b の値を事前情報から求める。手順としては次のようになる。

- (i) 事前の測定から推定位置誤差と残差を計測
- (ii) (i) で得たデータから a, b の値を決定
- (iii) 誤差補償関数とのずれから外れ値を除去。ここでは残差が正規分布に従うと仮定し、標準偏差の ±3 倍を上回る点を除去する。
- (iv) 残差に対し推定位置誤差が大きい事前情報を抽出
- (v) 抽出した点から改めて a, b を算出し、誤差補償関数を決定する。

推定位置誤差の抽出及び誤差補償関数の作成は図 7 のようになる。青い点が抽出された推定位置誤差の点、灰色の点が事前情報の点を示す。

2.5 位置推定誤差補償手法

2.4 節で記述した位置推定誤差補償関数を用いて、推定位置誤差の値を半径とし、推定位置を中心とする範囲に対し目標照度を達成するように調光することにより、真の位置においても目標照度を満たすように調光を行う。この時の最適化問題を式に表すと次のようになる。

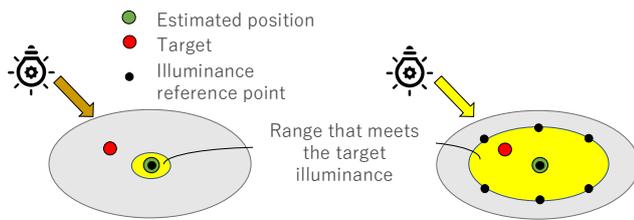


図8 simplex 法を適応する照度参照点

$$\begin{aligned} & \min_{R_i} W \\ & \text{subject to } \begin{cases} E_{hj} \geq E_G \\ R_i \leq 1.0 \\ R_i \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

$$(i = 0, \dots, N_L), (j = 0, \dots, N_r)$$

ここで W は消費電力の和、 E_{hj} は j 番目照度参照点における水平面照度、 E_G は目標照度である。 N_r はすべての照度参照点数を表す。また、 W と E_{hj} はそれぞれ

$$W = \sum_{i=1}^N \alpha_i R_i \quad (22)$$

$$E_{hj} = \sum_{i=1}^N E_{hji} = \sum_{i=1}^N E_{nji}(R_i, d_i) \cos \theta_i \quad (23)$$

と書ける。 α_i は i 番目照明の調光率 100%時の消費電力、 N_L を全照明の個数、 E_{hji} は推定位置における i 番目点光源照明の水平面照度、 E_{nji} は推定位置における i 番目照明の法線照度、 θ_i は i 番目照明のターゲット位置に対する天頂角とする。この最適化問題に対し simplex 法を適応することにより、各位置において目標照度を満たす最適な調光率の組み合わせを算出することができる。simplex 法は面に対しては適用できないため、図8のように、推定位置を中心とした推定位置誤差を半径とする円の円周上に simplex 法に適用する座標、照度参照点を設定することで、面に対して simplex 法を適用し照度計算を行っている。

3. 計算機シミュレーション

シミュレーションにより提案手法が消費電力量を削減できることを示す。赤外線センサを用いた手法、既存の UWB を用いた照明システムと比較して結果を算出した[8]。赤外線センサを用いた手法において、2.5 節で述べたように Simplex 法は面に対して適用できないため、検知した領域に対して複数の照度参照点を設定し、照度計算を行うことで調光率を決定する[14]。位置推定における緒元は表1、その他の緒元は表2のようになる。文献に従って照明を設定し性能評価を行った。本シミュレーションではオープンプランオフィス内において人が歩き回る状況を想定しており、ターゲットはセンサフィールド中央の(9.5,12.0)の座標から

スタートさせ、1回の試行(1s)でx軸及びy軸方向にランダムに±0~0.4m移動するものとした。また、誤差補償関数を作成するための事前情報として、センサフィールドを6.0m刻みで位置推定を行い、その残差と推定位置誤差の関係から誤差補償関数を生成した。この時の事前情報数は20個程度であり、RSSIなどの事前情報を用いる他の位置推定方法と比較し、比較的少ないことから実現可能な個数であると考えられる[15]。本シミュレーションでは必要な照度を満たす条件での消費電力量の比較を行うため、目標照度達成率が99%を下回った場合50lx刻みで照度に余裕を持たせ調光を行う。

シミュレーション結果を表3に示す。結果から提案手法は赤外線センサを用いた手法と比べ平均消費電力が約90%の削減、既存のUWBセンサを用いた手法と比べ約27%ほど削減していることがわかる。これは赤外線センサは検知範囲内に人が存在しているかどうかしか把握できず、検知領域の全領域で目標照度を満たすように調光を行うため消費電力量が大きくなっており、また既存のUWBを用いた手法と比べると、提案手法は推定位置誤差の値を推定できるようになったことにより、目標照度を満たすべき範囲をより狭くすることができたためだと考えられる。

4. まとめ

UWBセンサを用いた推定位置誤差を補償する知的照明システムを提案し、計算機シミュレーションにより有効性を評価した。その結果、赤外線センサおよび既存のUWBセンサを用いたシステムに対し、有効性を示すことができた。今後の課題として、実際のオフィスでは外光の影響があるため、外光を考慮した知的照明システムを構築し更なる省電力化を検討すること、また、グレアなどの快適性に関する指標を入れ込んだ照明システムを構築することが課題として挙げられる。

表2 シミュレーション緒元

Number of moves	180000 (10 h)
Number of prior information	20
Timeout time of infrared occupancy sensor	5 min [17]
Number of lights	80
Lighting arrangement	[12]
Lighting type	XND9999SNK LR9 [18]
Distribution curve of the luminous intensity	[18]
Lighting power consumption	143.4 W [18]
Target illuminance at work surface	300 lx [19]

表3 シミュレーション結果

	300 lx achieve rate [%]	Avg. power consumption [W]
Infrared occupancy sensor	99.15	627.31
Existing method (UWB)	99.14	81.23
Proposed method	99.54	59.13

参考文献

- [1] M. C. Dubois and Å. Blomsteberg “Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: a literature review,” *Energy Build.* 43 (2011) pp. 2572–2582, 2011.
- [2] M. Fächtenhans, E. H. Grosse and C. H. Glock, “Smart lighting systems: state-of-the-art and potential applications in warehouse order picking,” *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 12, pp. 3817-3839, Mar. 2021.
- [3] A. Pandharipande, M. Rossi, D. Caicedo, L. Schenato, and A. Cenedese, “Centralized lighting control with luminaire-based occupancy and light sensing,” *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, July 2015.
- [4] L. T. Doulos, A. Kontadakis, E. N. Madias, M. Sinou, and A. Tsangrassoulis, “Minimizing energy consumption for artificial lighting in a typical classroom of a Hellenic public school aiming for near Zero Energy Building using LED DC luminaires and daylight harvesting systems,” *Energy and Buildings*, vol. 194, pp. 201-217, July 2019.
- [5] A. Schaeper, C. Palazuelos, D. Denteneer, and O. Garcia-Morchon, “Intelligent Lighting Control Using Sensor Networks,” *2013 10th IEEE international conference on networking, sensing and control (ICNSC)*, Apr. 2013.
- [6] C. D. Bakker, M. Aries, H. Kort, and A. Rosemann, “Occupancy-based lighting control in open-plan office spaces: A state-of-the-art review,” *Building and Environment*, vol. 112, pp. 308-321, Feb. 2017.
- [7] K. Mizugaki R. Fujiwara, T. Nakagawa, G. Ono, T. Norimatsu, T. Terada, M. Miyazaki, Y. Ogata, A. Maeki, S. Kobayashi, N. Koshizuka, and K. sakamura, "Accurate Wireless Location/Communication System With 22-cm Error Using UWB-IR," *2007 IEEE Radio and Wireless Symposium*, pp. 455-458, Jan. 2007.
- [8] K. Nakashima and E. Okamoto, “An energy-efficient adaptive lighting control scheme using indoor localization with prior position information,” *2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering*, Oct. 2015.
- [9] Y. Wen and M. Agogino, “Personalized dynamic design of networked lighting for energy-efficiency in open-plan offices,” *Energy and Buildings*, vol. 43, issue 8, pp. 1919-1924, Aug. 2011.
- [10] DALI, [Online] Available: <https://www.dali-alliance.org/>.
- [11] K. W. Cheung, H. C. So, W.-L. Ma, Y. T. Chan, “Least Squares Algorithms for Time-of-Arrival Based Mobile Location,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, issue. 4, Apr. 2004.
- [12] N. Meugheuevel, A. Pandharipande, D. Caicedo, and P. P. J. Hof, “Distributed lighting control with daylight and occupancy adaptation,” *Energy and Buildings*, vol. 75, pp. 321-239, June 2014.
- [13] B. Alavi and K. Pahlavan, “Modeling of the TOA-based Distance Measurement Error Using UWB Indoor Radio Measurements,” *IEEE Communications letters*, vol. 10, no. 4, Apr. 2006.
- [14] M. J. Min, W. Dong, J. Shuqi, C. Qi, W. Xu, L. Baohua, and W. Hao, “Optimization control method for office lighting,” *2020 Chinese Automation Congress*, Nov. 2020.
- [15] S. Yiu, M. Dashti, H. Claussen, and F. P.-Cruz, “Wireless RSSI fingerprinting localization,” *Signal Processing*, vol. 131, pp. 235-244, Feb. 2017.
- [16] N. Eduardo, B. Peuker, and M. Quan, “Wi-fi localization using RSSI fingerprinting,” *Diss. California Polytechnic State University*, 2010.
- [17] M. Haq, H. Adbullah, “A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 268-279, May 2014.
- [18] Panasonic XND9999SNK LR9, [Online] Available: https://www2.panasonic.biz/ls/lighting/lighting_export/haiko/pdf/a004/a004kw.pdf.
- [19] European Norm 12464-1: Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places, 2011.