

室内高精度位置推定によるスマートグリッド性能向上の研究

代表研究者	岡 本 英 二	名古屋工業大学大学院工学研究科・准教授
共同研究者	堀 場 慎 人	名古屋工業大学大学院工学研究科・博士前期課程
共同研究者	中 島 啓 太	名古屋工業大学大学院工学研究科・博士前期課程

1 研究の背景と目的

現在の社会では電力の効率的な利用及び省電力化が必要とされている。これを実現できる技術の一つにスマートグリッド(次世代電力網)がある。スマートグリッドとは電力の流れを供給側、需要側の両方から制御し、最適化できる電力網のことである。スマートグリッドにおいて家庭内の電力制御をつかさどる装置が HEMS(Home Energy Management System)であるが、HEMS の高機能化はスマートグリッドの性能向上に必須といえる。この家庭内 HEMS の高機能化に寄与する技術の 1 つに、人の滞在情報との連携がある。屋内位置推定技術を用いて人の位置情報を把握し、近接の家電に優先的に電力を配分する。一方、滞在のないもしくは少ない部屋の電力配分は可能な範囲で優先順位を下げ、効率的な電力使用と省電力化を実現する。さらに滞在時間と近接家電の重みづけや、人の位置予測も含めることにより、さらなる HEMS の高機能化が実現できる。

この位置連携を可能にする技術が屋内における位置推定技術である。屋内では GPS(Global Positioning System)が使用できないため、その代わりに空間上に多数配置されたセンサが測定したデータを中央制御部に伝送し、情報処理を行うセンサネットワークを用いることで位置推定を行う。位置が既知のセンサが、位置が未知の対象物から送信される電波を受け取り、受信電力強度 RSS (Received Signal Strength)や信号到着時間 TOA (Time of Arrival)等を測定し、三角測量の原理を用いることで 3 次元の座標が算出可能となる。受信信号を用いた位置推定アルゴリズムには数種類あるが、計算量が少なく、高精度な位置推定手法を構築することが目標となる。

見通し内環境、見通し外環境いずれにおいても高性能な位置推定が行える技術が提案されているが、cm 級の位置情報を用いた場合の省電力化の効果については、まだ明らかになっていなかった。既存技術としても現在のところは人感センサによる部屋単位の家電制御までのみが実用化されている。そこで我々はセンサネットワークを用いた位置推定を活用し、照明制御システムの提案を行い、計算機シミュレーションにより評価した[1]。しかし、その照明制御手法は照明の on-off に基づくものであるため、省電力化に改善の余地があり、また手法の照度が不足することもあった。そこで本研究では実環境に近い部屋を構築し、その環境に即した新たな照明制御システムを考案し、省電力効果を明らかにすることを目的とする。

2 室内におけるセンサネットワークを用いた位置推定

2-1 センサネットワーク

センサネットワークとは、複数のノードと呼ばれるセンサ付き無線端末を空間上に配置させ、それらが協調して環境や物理的状況を検出することを可能にする無線ネットワークのことである。センサネットワークの応用として、屋内で利用可能な位置推定システムがある。屋外における位置情報の取得システムとして GPS がよく知られているが、GPS は衛星からの電波に基づいて位置推定を行うため、屋内では利用できない。そこで、センサネットワークを利用することで屋内での位置推定を行うシステムが考えられており、限られたノードのみが位置情報を持つような環境で、いかに高い位置推定精度を達成するかが課題である[2]。

ここで図 2.1.1 のようなセンサネットワークを用いた位置推定技術を活用した照明制御のシステムモデルの全体像を説明する。まず、位置が未知である人が持つタグからビーコンが送信される。次に部屋に配置された位置が既知のセンサがビーコンを受信し、測距を行う。3 か所以上のセンサから距離情報を取得できれば、三角測量の原理により人の位置を推定することができ、推定位置から点灯する照明の位置と個数が決定される。そして、推定位置における照度を 5.2 節で述べる計算方法を用いて算出し、位置ごとに設定された目標照度に合わせて照明の調光を行う。このようにして省電力化システムを実現する。

屋内では GPS の代わりに空間上に設置された複数のセンサノードでターゲットからの電波を受信し、セン

サネットワークを用いて得られた情報を統合することによってターゲットの位置が推定される[3]. TOA を用いた位置推定方式は推定精度と演算量のバランスが良いとしてよく用いられる. また, TOA 位置推定においてよく用いられる UWB 信号は時間分解能が高く, 高精度な位置推定が行える[4,5].

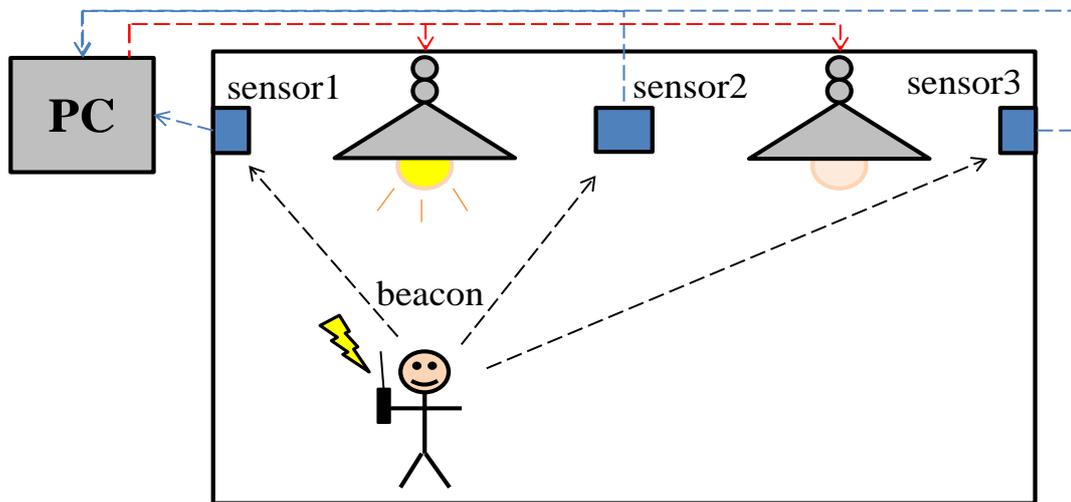


図 2.1.1 省電力化システムモデル

2-2 位置推定手法の原理

無線センサネットワークの位置検出技術はレンジベース(Range-based)方式とレンジフリー(Range-free)方式に大きく分けられる。レンジベース方式は、各ノード間の距離や、受信信号の到来方向 AOA (Angle of Arrival) を測定結果から求め、それに基づきノードの位置を推定する手法である。対して、レンジフリー方式は、予め位置がわかっている一部のノードを用い、それらとの位置関係やホップ数などからノードを推定する手法である。以上のことから、レンジベース方式はコストがかかるものの、位置推定精度は高い。またレンジフリー方式はコストは低く簡易だが、位置推定の精度は落ちてしまうという特徴を持つことがわかる。

(1) レンジベース方式

レンジベース位置検出技術は、到来時刻(TOA)・到来時間差 TDOA (Time Difference of Arrival)・受信信号強度(RSS)に基づき距離を推定し、その結果から位置を推定する手法と、到来方向(AOA)に基づいて位置を推定する手法に大きく分けられる。各位置検出技術を図 2.2.1(a),(b)に示す。

図 2.2.1(a)は TOA、TDOA、RSS を利用した位置検出技術であり、測定値に基づき、位置が既知であるセンサノードからターゲットノードまでの距離を推定する。3 ヶ所以上のセンサノードからの距離が分かれば、ターゲットノードの位置を推定することができる。図では、3 つの円が 1 ヶ所で交わっているが、実際には雑音などの影響で、推定距離には誤差が生まれるため 3 つの円は 1 ヶ所には交わらない。そのような場合は交点の平均をとるなど、様々な位置決定方法がある。図 2.2.1(b)は AOA を利用した位置検出技術であり、位置が予め分かっているセンサノードからターゲットノードの到来方向を推定する。2 ヶ所以上のセンサノードからの角度が分かれば、ターゲットノードの位置を推定できる[6]。

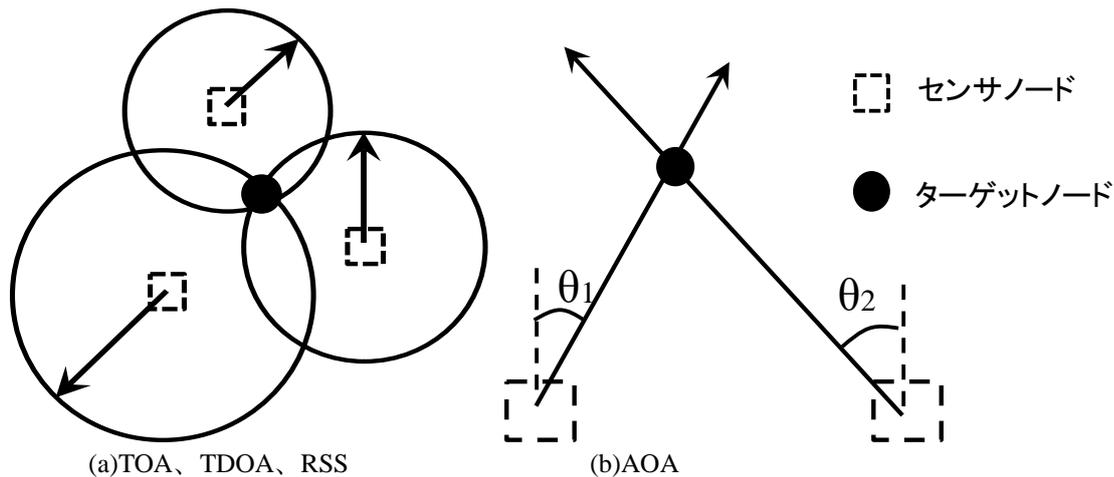


図 2.2.1 位置検出技術

2-3 TOA 位置推定の原理

位置が未知のターゲットノード (x, y) と A 個の位置が既知のセンサノード $(x_k, y_k), k = 1, 2, \dots, A$ が 2 次元空間上に存在しているとすると、見通し内 LOS (Line of Sight) 環境下において、 k 番目のセンサノードとターゲットノードからの距離 $d_{k, \text{LOS}}$ は

$$d_{k, \text{LOS}} = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} + n_k \quad (2.3.1)$$

と計算される。ここで、 n_k は雑音による測定誤差である。また見通し外 (NLOS) 環境下では

$$d_{k, \text{NLOS}} = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} + n_k + b_k \quad (2.3.2)$$

と表される。ここで b_k は NLOS 誤差である。さらに(2.3.2)式をベクトル表記すると

$$\mathbf{d} = \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{n} + \mathbf{b} \quad (2.3.3)$$

と書ける。ここで各項は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} \mathbf{d} &= [d_1 \dots d_A]^T \\ \boldsymbol{\theta} &= [x, y]^T \\ \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) &= [g_1(\boldsymbol{\theta}) \dots g_A(\boldsymbol{\theta})]^T \\ g_k(\boldsymbol{\theta}) &= \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \\ \mathbf{n} &= [n_1 \dots n_A]^T \quad \mathbf{b} = [b_1 \dots b_A]^T \end{aligned} \quad (2.3.4)$$

(2.3.3)式に以下に述べる様々な手法を適用することで、ターゲットノードの位置 (\hat{x}, \hat{y}) を推定する[7]。

2-4 雑音確率モデル

TOA 位置推定の原理から位置が既知の k 番目のセンサノードと位置が未知のターゲットノードとの距離 $r_k (k = 1, 2, \dots, A)$ は

$$r_k = d_k + \varepsilon_k \quad (2.4.1)$$

となる[8]。ここで、 d_k は真の距離、 ε_k は距離誤差である。また、距離誤差 ε_k は測定誤差 $\varepsilon_{k,\text{LOS}}$ 、NLOS 誤差 $\varepsilon_{k,\text{NLOS}}$ を用いて

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{k,\text{LOS}} + \xi_k \varepsilon_{k,\text{NLOS}} \quad (2.4.2)$$

と表せる。ここで、 ξ_k は k 番目のセンサノードが LOS 環境にあるとき 0、NLOS 環境の場合 1 となる 2 値数である。さらに $\varepsilon_{k,\text{LOS}}$ 、 $\varepsilon_{k,\text{NLOS}}$ はそれぞれ、正規分布 $N(\mu_k, \sigma_k^2)$ で表され

$$\mu_{k,\text{LOS}} = \mu_{\text{LOS}} \log(1 + d_k) \quad (2.4.3)$$

$$\sigma_{k,\text{LOS}}^2 = \sigma_{\text{LOS}}^2 [\log(1 + d_k)]^2 \quad (2.4.4)$$

$$\mu_{k,\text{NLOS}} = \mu_{\text{NLOS}} \quad (2.4.5)$$

$$\sigma_{k,\text{NLOS}}^2 = \sigma_{\text{NLOS}}^2 \quad (2.4.6)$$

となる。ここで μ_{LOS} 、 σ_{LOS}^2 は LOS 環境下での平均と分散であり μ_{NLOS} 、 σ_{NLOS}^2 は NLOS 環境下での平均と分散である。式(2.4.3)~(2.4.6)より

$$\mu_k = \mu_{\text{LOS}} \log(1 + d_k) + \xi_k \mu_{\text{NLOS}} \quad (2.4.7)$$

$$\sigma_k^2 = \sigma_{\text{LOS}}^2 [\log(1 + d_k)]^2 + \xi_k \sigma_{\text{NLOS}}^2 \quad (2.4.8)$$

と表せる。

2-5 最小二乗法

最小二乗 LS (Least Squares)法[9]とは、複数の測定値と推定値の残差をとり、その二乗和が最小となる値を求める手法である。求める最確値を X とし、 n 回計測した計測値を $(x_1, x_2 \dots x_n)$ とすると、残差の二乗和の関数 Φ は以下の式で表すことができる。

$$\Phi = \sum_{i=1}^n (X - x_i)^2 \quad (2.5.1)$$

この誤差関数 Φ のグラフは下向きに凸であるので Φ の最小値を求めるには X で微分し、それが 0 になる X を求めればよい。したがって、以下のように計算できる。

$$\frac{d\Phi}{dX} = 2 \sum_{i=1}^n (X - x_i) = 0$$

$$nX - \sum_{i=1}^n x_i = 0$$

$$X = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (2.5.2)$$

以上のようなアルゴリズムを TOA 位置推定に適用すると、センサノードで得られる測定距離 \hat{d}_k と推定距離 \hat{d}'_k の残差の二乗和 $R(\hat{x}, \hat{y})$ は

$$R(\hat{x}, \hat{y}) = \sum_{k=1}^A (\hat{d}_k - \hat{d}'_k)^2 = \sum_{k=1}^A \left(\hat{d}_k - \sqrt{(\hat{x} - x_k)^2 + (\hat{y} - y_k)^2} \right)^2 \quad (2.5.3)$$

と表せる。ここで式(2.5.3)は位置が既知である A 個のセンサノードを用いてセンサノードとターゲットノ

ード間の距離を測定した場合を考えており、 (\hat{x}, \hat{y}) はターゲットノードの推定位置、 (x_k, y_k) は k 番目のセンサノードの位置である。最適なターゲットノードの推定位置は $R(\hat{x}, \hat{y})$ が最小となる (\hat{x}, \hat{y}) であるので

$R(\hat{x}, \hat{y})$ を \hat{x}, \hat{y} でそれぞれ偏微分し、それが 0 となる X, Y を計算することで解を得ることができる。

2-6 Newton-Raphson 法

位置推定において、ターゲットノードの推定位置を決定する際に導出に用いる方程式は解析解のない非線形方程式となり、近似解を求めなくてはならない。そこで Newton-Raphson 法[10]というアルゴリズムを用いることで数値計算によって比較的速く近似解を求めることができる。以下に $y = f(x)$ のときの計算例を示す。はじめに、真の解に近いと思われる適当な点 $x = x_0$ をとる。次に $x = x_0$ の点における $y = f(x)$ の接線 $y = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$ を求め、この接線と x 軸との交点の x 座標を x_1 とする。 x_1 は

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (2.6.1)$$

のように求まり、次は x_1 の点における $y = f(x)$ の接線を求める。このような計算を繰り返すことによって図 2.6.1 のように徐々に真の解に近づけていく。ここで m 回繰り返したときの x_m は

$$x_m = x_{m-1} - \frac{f(x_{m-1})}{f'(x_{m-1})} \quad (2.6.2)$$

となり、ある m に対して x_m が x_{m-1} と比べてほとんど動いていないときに終わりとし、 x_m を $f(x) = 0$ の解とする。ここで「ほとんど動いていない」と判断するための収束基準を δ_{Newton} とすると

$$|x_m - x_{m-1}| < \delta_{Newton} \quad (2.6.3)$$

となったときに、計算を終了し $x = x_m$ を解とする。

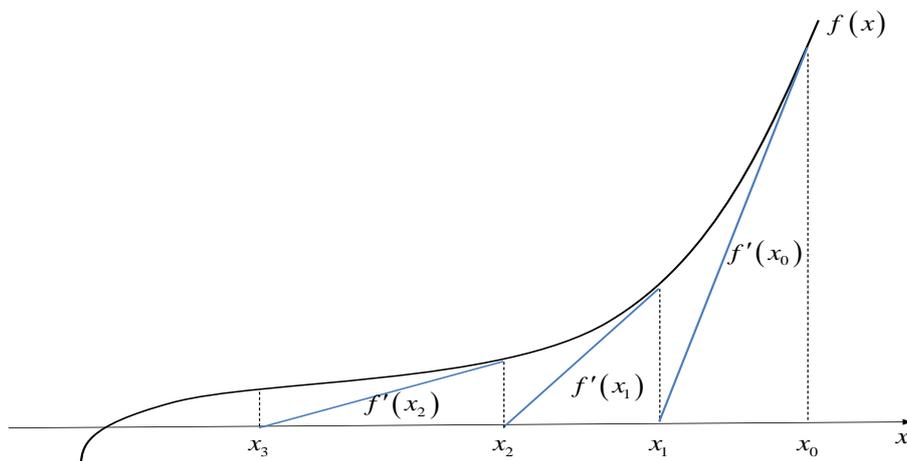


図 2.6.1 1 変数の方程式に対する Newton-Raphson 法

2-7 平均二乗誤差

あらかじめターゲットノードの位置を把握できている場合、センサネットワークを用いた位置推定システムの評価関数として平均二乗誤差(RMSE)を用いることができる。平均二乗誤差はターゲットノードの真の位置と推定位置との標準偏差であり、位置推定を l 回行ったときの RMSE は

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{k=1}^l \left\{ \frac{(x - \hat{x}_k)^2 + (y - \hat{y}_k)^2}{l} \right\}} \quad (2.7.1)$$

で表される。ここで k 番目の推定で得られた位置を (\hat{x}_k, \hat{y}_k) 、ターゲットノードの真の位置を (x, y) としている。これを評価関数として計算機シミュレーションで用い、推定の優劣を判断する。

2-8 最小二乗平均推定

TOA 位置推定においてターゲットノードの位置を計算するための手段として最小二乗平均推定 MMSE (Minimum Mean Square Estimate)がある。以下に二次元の場合の MMSE による計算方法を示す。はじめに、TOA 位置推定の原理の式より $k (k=1, \dots, A)$ 番目のセンサノードが測定した距離 \hat{d}_k と実際の距離との差は

$$f_k(x, y) = \hat{d}_k - \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (2.8.1)$$

で表される。ここで (x, y) はターゲットノードの位置、 (x_k, y_k) は k 番目のセンサノードの位置である。式(2.8.1)で $f_k = 0$ とし、式変形すると

$$-x_k^2 - y_k^2 + \hat{d}_k^2 = x^2 + y^2 + (-2x_k)x + (-2y_k)y \quad (2.8.2)$$

となる。次に、 A 番目のセンサノードによる式を式(2.8.2)から引くことで、 $x^2 + y^2$ の項を消去すると

$$-x_k^2 - y_k^2 + \hat{d}_k^2 - (-x_A^2 - y_A^2 + \hat{d}_A^2) = 2x(x_A - x_k) + 2y(y_A - y_k) \quad (2.8.3)$$

と計算できる。ここで式(2.8.3)は行列で表現すると

$$\mathbf{l} = \mathbf{R}\mathbf{b} \quad (2.8.4)$$

と表され、各項は以下のように定義する。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 2(x_A - x_1) & 2(y_A - y_1) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_A - x_{A-1}) & 2(y_A - y_{A-1}) \end{bmatrix} \quad (2.8.5)$$

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} -x_1^2 - y_1^2 + \hat{d}_1^2 - (-x_A^2 - y_A^2 + \hat{d}_A^2) \\ \vdots \\ -x_{A-1}^2 - y_{A-1}^2 + \hat{d}_{A-1}^2 - (-x_A^2 - y_A^2 + \hat{d}_A^2) \end{bmatrix} \quad (2.8.6)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.8.7)$$

求めたい (x, y) は式(2.8.4)を式(2.8.8)のように変形することで得られる。

$$\mathbf{b} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{l} \quad (2.8.8)$$

2-9 Iterative Minimum Residual 法

位置推定精度を大幅に劣化させる要因として、センサノードが見通し外(NLOS)環境にあることが挙げられ

る。位置推定において、NLOS 環境の影響を低減する手法は推定精度を向上させるために必須である。IMR 法[11]はセンサノードを様々に組み合わせることで得られた LS(最小二乗)推定値の中から、最小残差となる推定値 MRE (Minimum Residual Estimator)を繰り返しによって探し、悪い測定値を除去する手法である。ここで2次元 TOA 位置推定における IMR 法のアルゴリズムを説明する。はじめに、あるセンサフィールドにおいて、各センサノードから合計 A 個の測定値が得られた場合を考える。この測定値から式(2.9.1), (2.9.2)を用いることによって、LS 推定値 $\hat{\theta}$ とその正規化残差 $\bar{\varepsilon}(\hat{\theta})$ を得る。

$$\hat{\theta}(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \min_{\hat{x}, \hat{y}} \sum_{k=1}^A \left\{ \hat{d}_k - \sqrt{(\hat{x} - x_k)^2 + (\hat{y} - y_k)^2} \right\}^2 \quad (2.9.1)$$

$$\bar{\varepsilon}(\hat{\theta}) = \frac{\varepsilon(\hat{\theta})}{N_d} = \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} \left\{ \hat{d}_k - \sqrt{(\hat{x} - x_k)^2 + (\hat{y} - y_k)^2} \right\}^2 \quad (2.9.2)$$

ここで $\hat{\theta}$ はターゲットノードの推定座標 (\hat{x}, \hat{y}) を表し、 (x_k, y_k) は k 番目のセンサノードの座標、 \hat{d}_k はターゲットとセンサとの測定距離である。また、式(2.9.2)は推定に用いたセンサの数 N_d による影響を除くため正規化されており、全ての測定値を用いる場合は $N_d = A$ となる。次に不要な測定値の一つを取り除くため、全部で ${}_A C_1 = A$ 通りの組み合わせが存在する $A-1$ 個の測定値による LS 推定値を求め、そこから最小残差推定値 $\hat{\theta}_{\min}$ を決定する。さらに、 $\bar{\varepsilon}(\hat{\theta})$ と $\bar{\varepsilon}(\hat{\theta}_{\min})$ を比較し、 $\bar{\varepsilon}(\hat{\theta})$ が小さかった場合、推定値 $\hat{\theta}$ を推定結果とし、 $\bar{\varepsilon}(\hat{\theta}_{\min})$ が小さかった場合は N_d を $N_d - 1$ と変更し、 $\hat{\theta}_{\min}$ に用いられた測定値の組を次の繰り返しに使う。こままでの操作を繰り返した回数が $N_d - 3$ に達するか、 $\bar{\varepsilon}(\hat{\theta})$ と $\bar{\varepsilon}(\hat{\theta}_{\min})$ の差が予め設定した基準値 δ_{IMR} よりも小さくなるまで続ける。

2-10 NLOS 判別誤り低減アルゴリズム

あるセンサノードにおいて、距離測定を十分な回数繰り返し、平均化を行った測定距離の構成成分を図 2.10.1 に示す。シミュレーションで用いる伝搬特性のパラメータ μ_{NLOS} は 0 でない値としているため、図 2.10.1 のように LOS 環境下においてもバイアスが残る。これにより NLOS と LOS の区別が難しくなり、測定値を基準にして NLOS 判定を行う IMR 法では誤った判定が行われてしまうことがある。そこで LOS バイアスの大きさを予測し、取り除くための 2 つの手法がある[12]。1 つ目の手法 A は測定値の大きさから減算する割合を決定する方法で、測定距離 \hat{d} が 5[m]以下ならば 8%、それよりも大きい場合は 5%の割合で距離を短くする。したがって減算された距離 \hat{d}' は

$$\hat{d}' = \begin{cases} 0.92\hat{d} & (\hat{d} \leq 5) \\ 0.95\hat{d} & (\hat{d} > 5) \end{cases} \quad (2.10.1)$$

で表わされる。2 つ目の手法 B は、伝搬特性のパラメータ μ_{LOS} を既知として、得られた測定距離から LOS バイアスの推定値を算出し、それを測定距離から減算する手法である。減算された距離 \hat{d}' は

$$\hat{d}' = \hat{d} - \mu_{LOS} \log(1 + \hat{d}) \quad (2.10.2)$$

となる。手法 B は A に比べて精度が向上するが、予め伝搬路特性のパラメータを知る必要がある。IMR 法に以上のようなアルゴリズムを適用した手法を改善 IMR 法 A および B とする。

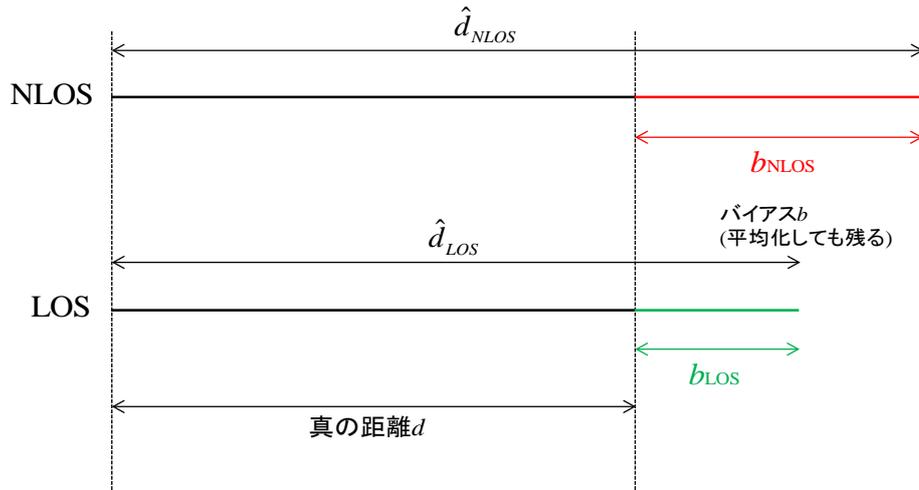


図 2.10.1 測定距離の構成成分

3 位置推定情報を用いた省電力化の検討

3-1 光の単位

・カンデラ[cd]

光を一点の点光源とみなし、その点光源から発する光の強さのことを光度といい、単位には cd(カンデラ)を用いる。一平方メートル当たりに照射される光量を基準とするため、輝度[cd/m²]という単位で用いられる。屋外で視認できるためには、およそ 300[cd/m²]の光が必要とされ、パソコンの液晶ディスプレイは 250~300[cd/m²]のものが多い。

・ルーメン[lm]

光源からある方向に放射されたすべての光の明るさを表わす心理的な量のことを光束といい、単位はルーメン[lm]を用いる。技術的には光度 1[cd]の光源が 1 ステラジアン¹の範囲に放射する光束が 1 ルーメンと定義される。簡単に言うと「光源から一定の範囲内に光がどれだけ集まっているか」を示す数値であり、ルーメンの値が大きいほど人間の目で明るく見えることになる。ここでステラジアンとは、立体角のことであり、球の表面積で三次元的角度を定義したものである。プロジェクターなどにおいては、投射する画面全体に照明をいきわたらせる必要があるため、画面を分割して各部分の明るさを計測し、各画面の明るさを平均した値を算出する方法がとられている。このとき、画面の各部分の明るさはワット[W]で、それらの平均値はルーメン[lm]で計測される。

・ルクス[lx]

光源によって照らされている面の明るさを示す「照度」という指標で利用される単位をルクス[lx]という。光源からの距離によって、照らされる面のルクスは変化する。1 ルクスとは

- ・ 1 ルーメン[lm]の光束が 1 平方メートルの面を平均に照らす時の照度
- ・ 1 カンデラ[cd]の点光源を半径 1m の球の中心に置いた時、その球の内面の照度のことである。

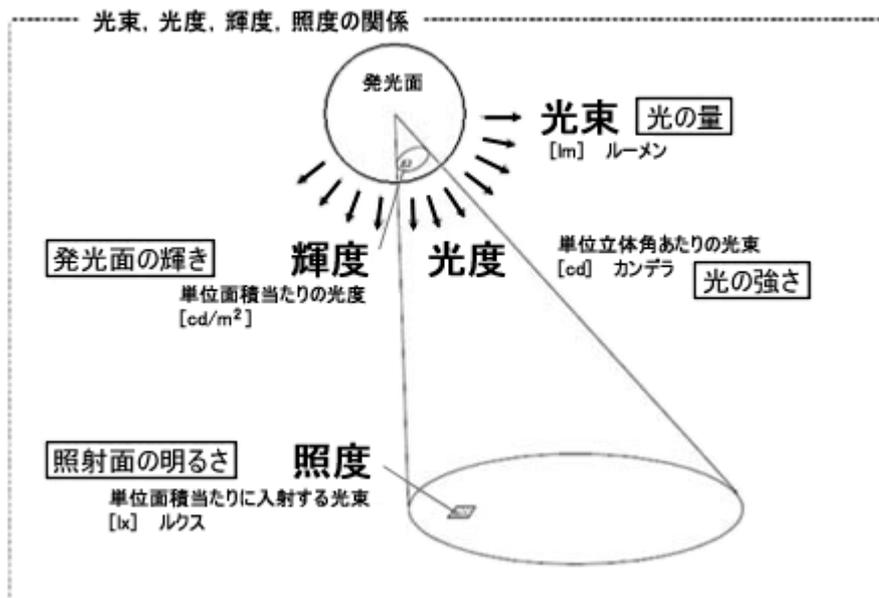


図 3.1.1 光束、光度、輝度、照度の関係

一般に直射日光が約 10 万ルクス、部屋の窓際で 2000 ルクス程度、明るいオフィスで 400 ルクス程度の照度があるとされている。

まとめると、光は、どれだけ量が(光束[lm]=ルーメン)が空間に放射されるかで光度[cd]という単位になり、どれだけ量が面に当たるかによって照度[lx]の単位になり、どれだけ単位密度で放射されるかにより輝度という単位になる[13][14]。また、それらの関係が図で示されたものを図 3.2.1 に示す。

3-2 照明の消費電力

(1) 消費電力等の比較

縦 4m×横 4m の 8 畳の部屋を照らすための照明器具の調査を行い、比較を行った。調査結果を表 3.2.1、表 3.2.2 に示す。表 3.2.1 はシーリングライトの LED (Light Emitting Diode) と蛍光灯との比較を示している。表 3.2.1 より、消費電力については LED のほうが優れているが、照明から発せられる光の量(器具光束)は蛍光灯のほうが多いため、エネルギー消費効率はほぼ同一となっている。表 3.2.2 は電球について LED 電球と白熱電球との比較を示している。ここで、100W 形の電球を 3 つ用いた明るさが 8 畳の部屋を照らすための明るさに相当するため、表 3.2.2 では×3 としてある。表 3.2.2 より、LED の電球にすると白熱電球に比べ 90~100 倍近くコストがかかってしまうものの、消費電力は約 1/6 になるため、エネルギー消費効率はかなり優れた結果となっている。また寿命も連続点灯の場合、白熱電球は約 40 日に対して、LED 電球は 4 年半も持つことが確認された。

表 3.2.1 調査結果 1

シーリングライト	LED	蛍光灯
名称	LEDH94040-LC(東芝)	FVH95403RP(東芝)
値段(円)	12302	7320
消費電力[W]	38.5	50
器具光束[lm]	3850	5230
エネルギー消費効率 [lm/W]	100	104.6
年間電気代目安(円)	1700	2200

表 3.2.2 調査結果 2

電球	LED 電球	白熱電球
名称	E-CORE(東芝)	LW100V90WGE2PK(日本ゼネラル)
値段(円)	8500×3	90×3
消費電力[W]	15.7×3	90×3
光束[lm]	1520×3	1520×3
エネルギー消費効率 [lm/W]	96.8	16.9
寿命[時間]	40000	1000

(2) 消費電力と明るさの関係

消費電力の値と明るさを示す全光束の値を合わせて考えるために、[lm/W]という指標がある。[lm/W]は消費電力 1W 当たりの光の強さを示し、いかに少ない電力で明るい光を効率よく得られるかを表す指標である。表 3.3.2.1 に主なランプ 4 種類の[lm/W]の値を示す。表 3.2.3 より、水銀灯や白熱電球に比べると、Hf32 形の直管形蛍光灯は 110[lm/W]、LED 電球は 76.4[lm/W]と効率が高いことが分かる。ここで注意点として、[lm/W]の計算方法は蛍光灯と LED 照明の場合で変わるということが挙げられる。蛍光灯の場合は、省エネ法が定める「蛍光灯のエネルギー消費効率」として次式で求められる。

蛍光灯器具に装着する蛍光ランプの全光束÷その蛍光灯器具の定格消費電力

ここで、蛍光灯器具に装着する蛍光ランプの全光束とは器具に装着したばかりのランプの全光束を示す。LED 照明の場合は蛍光灯とは異なり、光源部(LED モジュール)を交換できないことが多い。そのため、カタログ等に表示されている全光束の値は、照明器具が放出する全光束(LED 照明器具の定格光束)とする。つまり、LED 照明の[lm/W]は

LED 照明器具が発する全光束÷LED 照明器具の入力電力(定格消費電力)

表 3.2.3 一般的なランプ 4 種類の[lm/W]の値

ランプ名称	消費電力[W]	光束[lm]	lm/W
白熱電球	60	810	13.5
蛍光灯 Hf	32	3520	110
水銀灯	400	22000	55
LED 電球	10.6	810	76.4

となる。よって蛍光灯と LED の効率はそれぞれ全光束の定義が異なるため、同列で比較することができない。そのため、簡単な解決策としては蛍光灯の計算方法をランプ単位ではなく、蛍光灯の照明器具単位で計算して比較する方法がある。

3-3 計算機シミュレーション結果

(1) ターゲットの移動プログラム

室内をランダムに動く人の位置推定を行うシミュレーションを実行するため、はじめに 8m×8m のセンサフィールド(部屋)内をセンサフィールド中心(4,4)に位置しているターゲット(人)が 1 回の試行(1s)で x 軸及び y 軸方向に±0~0.4m 動くプログラムを作成した。ターゲットを 3600 回(1h)動かした時のターゲットの移動過程を図 3.3.1 に示す。図の線はそれぞれ青線は 1~900 回、赤線は 901~1800 回、緑線は 1801~2700 回、紫線は 2701~3600 回の試行の間に動いた軌跡を示している。

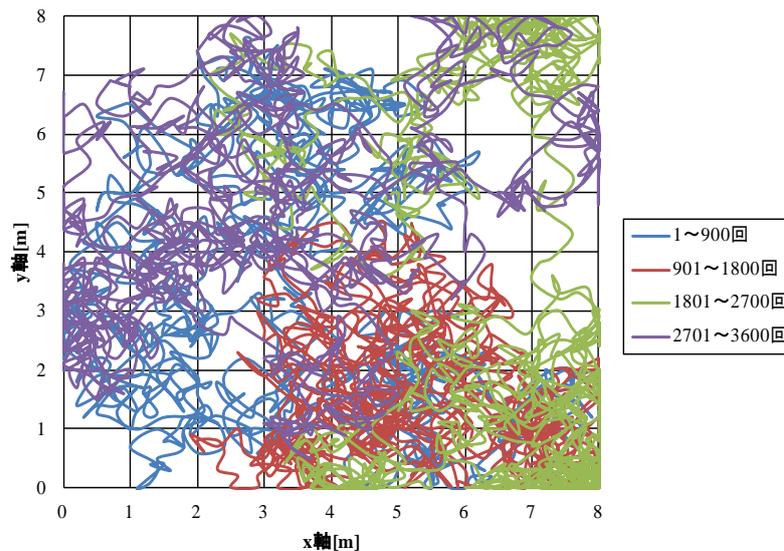


図 3.3.1 ターゲットの移動過程

(2) 照明の点灯条件

3.3で示したように、ターゲットはセンサフィールド内をランダムに移動する。そこで、図 3.3.2 のようにターゲットの位置に応じて点灯させる照明の数を決定する手法を考案した。図はターゲットが白の領域に位置したならば照明が1個点灯し、青の領域ならばその両隣の照明が2個点灯し、赤の領域ならば4個全てが点灯することを示す。この手法により、位置推定を用いた場合の照明の点灯時間の改善による省電力化を図る。

(3) シミュレーション(消費電力量比較)

本節の手法を用いて1時間分の消費電力量を算出し、照明が点き続けている場合(通常点灯)との比較を行い、省電力効果を確認した。シミュレーションに用いた照明は表 3.3.1 のようになっている。ここで各照明の消費電力は4m×4mの8畳の部屋を照らすのに十分な光束を有する照明器具を用いた時の値である。LED照明は定電流ダイオードにより、照明のon-offによる余分な消費電力がなくなるため、LED照明についてのみ省電力操作を行っている。また、ターゲットの位置推定の際のパラメータや手法等は2節と同様であり、改善IMR法Bを用いている。シミュレーションで用いたセンサフィールドを図 3.3.3, 各条件での結果を表 3.3.2 に示した。

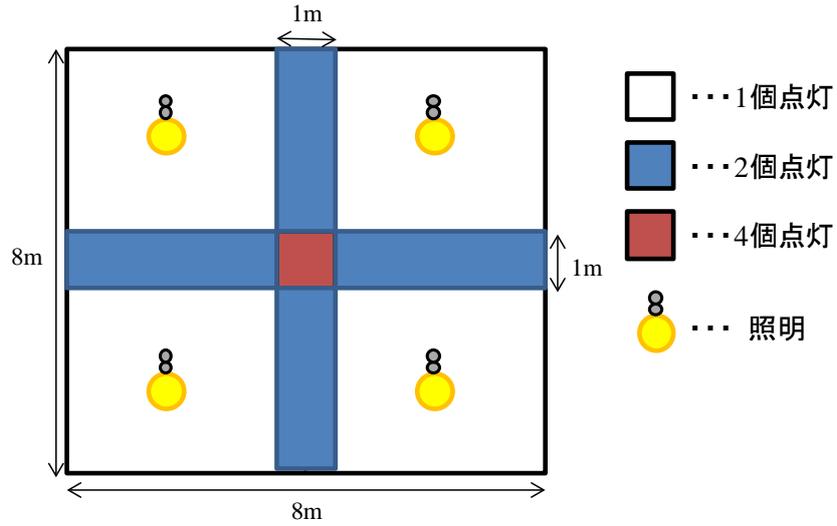


図 3.3.2 照明の点灯条件の割り当て図

表 3.3.1 照明の種類と各条件

シーリングライト	照明の種類	消費電力[W]	点灯の仕方
条件 1	蛍光灯	50	通常点灯
条件 2	LED 照明	38.5	通常点灯
条件 3	LED 照明	38.5	部分点灯
電球	照明の種類	消費電力[W]	点灯の仕方
条件 4	白熱電球	90×3	通常点灯
条件 5	LED 電球	15.7×3	通常点灯
条件 6	LED 電球	15.7×3	部分点灯

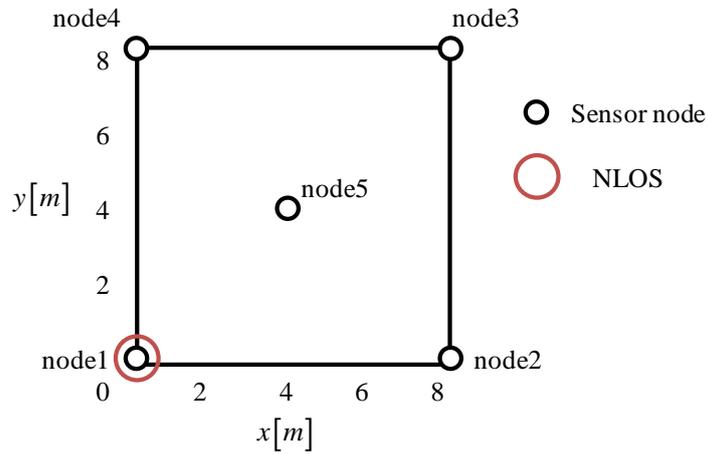


図 3.3.3 センサフィールド

表 3.3.2 シミュレーション結果

シーリングライト	消費電力量 [Wh]	電球	消費電力量 [Wh]
条件 1(蛍光灯,通常点灯)	200	条件 4(白熱球,通常点灯)	1080
条件 2(LED,通常点灯)	154	条件 5(LED,通常点灯)	188.4
条件 3(LED,部分点灯)	48.88	条件 6(LED,部分点灯)	59.79

表 3.3.2 より省電力手法を導入することにより、消費電力量が 1/3 程度に抑えられていることが分かる。

4 オフィス環境における照明制御手法

前節では全て単純な正方形の 32 畳の部屋を想定し、簡易な on-off 照明制御手法によって UWB 屋内位置推定情報を用いた省電力化手法の評価を行った。本節では、より実環境に近いオフィス(研究室)を想定した部屋において、on-off 制御に加えて新たに照度制御による省電力化手法の提案を行い、計算機シミュレーションにより目標照度達成度が十分満たせる省電力化が実現できることを示す。

4-1 水平面照度の計算

照度制御を行う上で、ターゲットの位置における照明からの照度の値が必要となる。ここでは、照明の形状が点光源と直管型の 2 つの場合についての水平面照度の計算方法について説明する[15]。

(1) 照明が点光源の場合

図 4.1.1 のような 1 つの点光源による、ある面上の点 p における水平面照度 E_h は

$$E_h = \frac{I_\theta}{l^2} \cos \theta \quad (4.1.1)$$

で表される。ここで θ は入射角、 I_θ は θ 方向の光度 cd、 l は光源から点 p までの距離 m である。 I_θ の値は用いる照明のカタログ等で入手することが出来る。また 3 節で用いた、図 3.3.2 で表したシミュレーション環境の 4 分の 1 区画である、図 4.1.2 のような部屋の 2 地点において式(4.1.1)を用いて照度を算出する。赤点における照度は 82.0 lx、青点における照度は 33.5 lx と求まる。ここで日本工業基準 JIS(Japanese Industrial Standard)で定められたリビングにおける必要照度は 30~75 lx とされていることから、用いた照明が適していることが照度の観点からも確認できる。

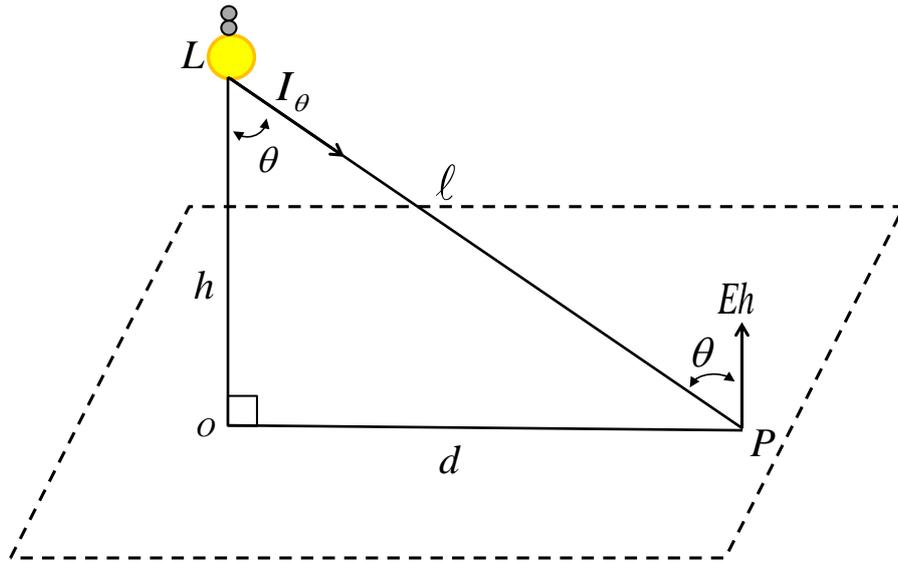


図 4.1.1 点光源による照度

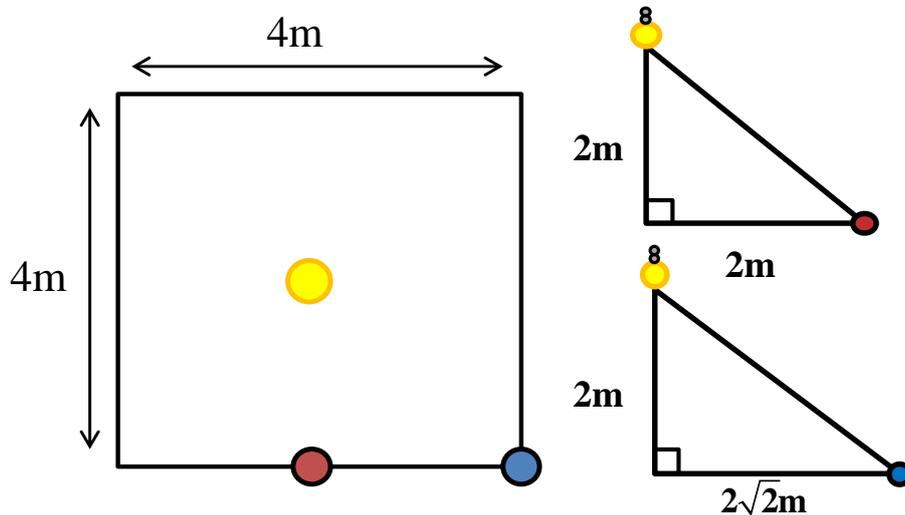


図 4.1.2 8 畳の部屋における 2 地点

(2) 直管型照明の場合

今回は照明からの水平面照度を評価時に採用し、逐点法を用いることによって照度算出を行った。ここでは、照明の形状が直管型の場合についての水平面照度の計算方法について説明する[15]。長さが L の直線光源による点 p における水平面照度は図 4.1.3, 4.1.4 のように照明に対するターゲットの位置の違いに関して 2 種類の算出方法があり、 L を L_1, L_2 と分けて計算する必要がある。以下に点 p が直管型照明の一端を含む垂直面内にある場合の法線照度 En 及び水平面照度 Eh の算出式を示す。

$$En = \frac{I'_\theta}{2} \left\{ \frac{L}{H^2 + D^2 + L^2} + \frac{1}{\sqrt{H^2 + D^2}} \tan^{-1} \left(\frac{L}{\sqrt{H^2 + D^2}} \right) \right\} \quad (4.1.2)$$

$$Eh = En \cos \theta \quad (4.1.3)$$

ここで I'_θ は直線光源 1m 当たりの θ 方向の光度 [cd/m]、 D は照明直下からの水平距離 m、 H は高さ m で

ある。また図 4.1.3, 4.1.4 の場合はそれぞれ式(4.1.4),(4.1.5)で表される。ここで Eh_1, Eh_2 はそれぞれ L_1, L_2 を用いた場合の水平面照度である。

$$Eh_a = Eh_1 - Eh_2 \quad (4.1.4)$$

$$Eh_b = Eh_1 + Eh_2 \quad (4.1.5)$$

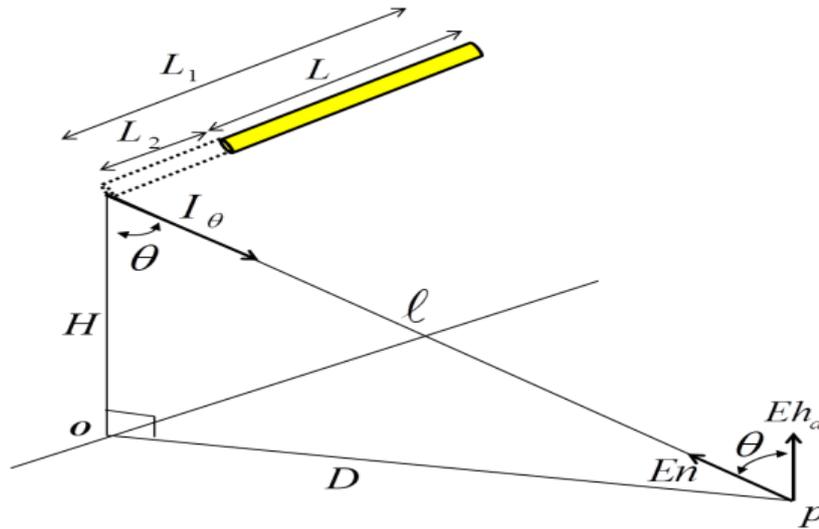


図 4.1.3 点 p が照明の幅外だった場合

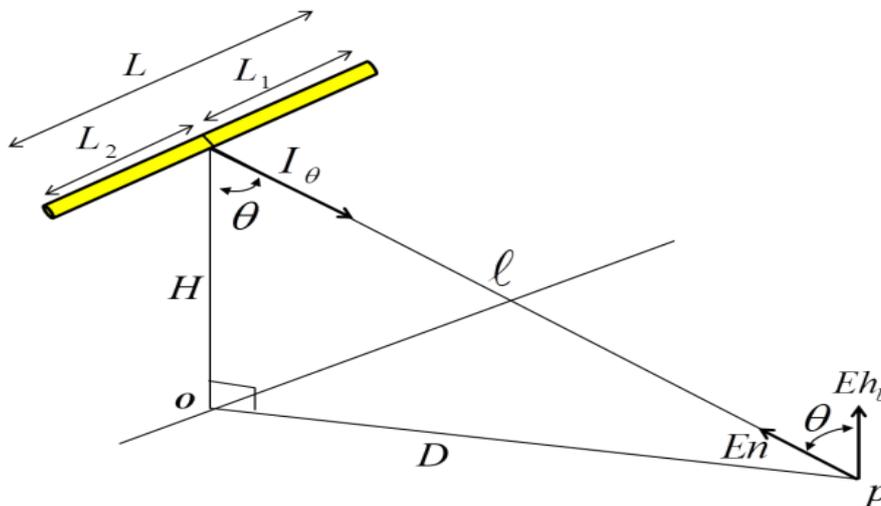


図 4.1.4 点 p が照明の幅内だった場合

4-2 オフィス環境における省電力化シミュレーション

実環境に近いシミュレーションを行うために、我々の研究室である名古屋工業大学 6 号館 1010 室を想定した環境をプログラム上で構築した。構築した空間と照明の配置図を図 4.2.1 に示す。ここで用いている照明は表 4.2.1 のパラメータをもつ直管型 LED ベースライトであり、1 か所に 2 本、計 12 本使用している。また机の上から天井までの高さ $H=2\text{ m}$ とした。

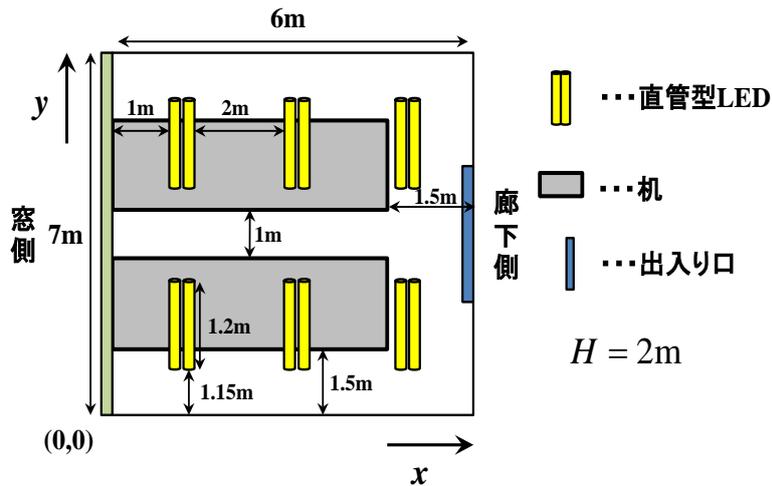


図 4.2.1 オフィス環境の間取り図

表 4.2.1 照明のパラメータ

名称	直管型 LED ベースライト
形名	ERK9307W
消費電力 W	33.9
器具光束 lm	5065

4-3 ターゲットの移動プログラム

室内をランダムに動く人の位置推定を行うシミュレーションを実行するため、はじめに 7 m×6 m のセンサフィールド(部屋)内を出入り口の中央 (6,3.5)に位置しているターゲット(人)が 1 回の試行(1s)で x 軸及び y 軸方向に±0~0.4 m 動くプログラムを作成した。ターゲットを 7200 回(2h)動かした時のターゲットの移動過程を図 4.3.1 に示す。また図のように、机が配置してある地点は進入不可としている。

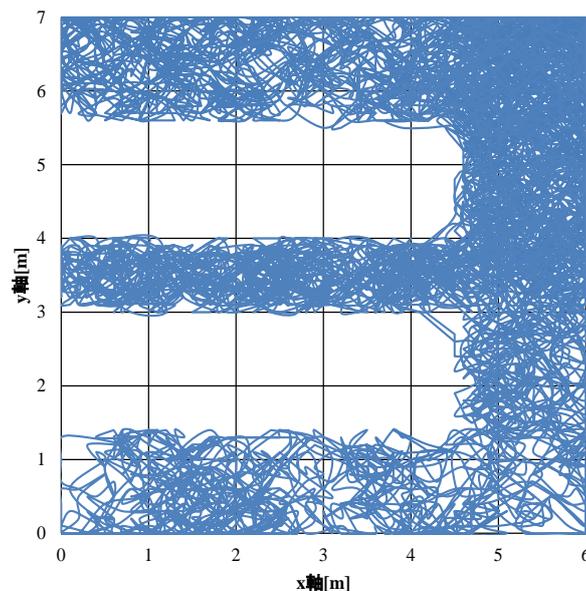


図 4.3.1 ターゲットの移動過程

4-4 照明の点灯条件

前節で示したように、ターゲットはセンサフィールド内をランダムに移動する。そこで、図 4.4.1 のようにターゲットの位置に応じて点灯させる照明の数を決定する手法を考案した。ここで、全点灯以外はすべてターゲットに隣接する照明が部分的に点灯するようにしている。この手法により、位置推定を用いた場合の照明の点灯時間の改善による省電力化を図る。

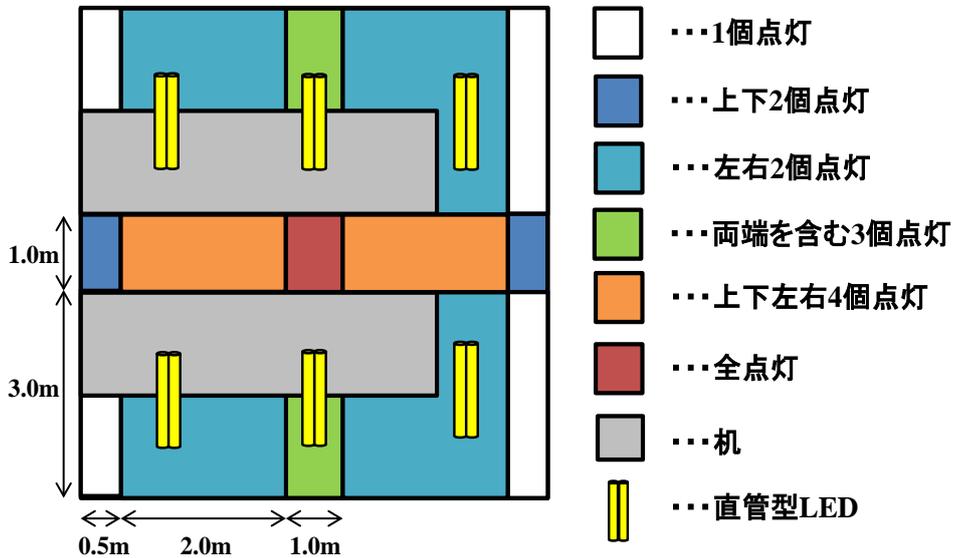


図 4.4.1 照明の点灯条件の割り当て図

4-5 ターゲットの検知補助幅

2 節で説明した NLOS 環境のセンサノードの影響を低減する手法を用いた場合でも、NLOS センサ数が複数となるような環境ではターゲットの推定位置の誤差は補い切れない。そこでターゲットの推定位置に円状の検知補助幅 r を設ける。これにより NLOS 測定誤差による点灯失敗を防止する。補助幅をつけたターゲットの推定位置 $(\hat{x}'_{r,\varphi}, \hat{y}'_{r,\varphi})$ は

$$\hat{x}'_{r,\varphi} = \hat{x} + r \cos \varphi \quad (4.5.1)$$

$$\hat{y}'_{r,\varphi} = \hat{y} + r \sin \varphi \quad (4.5.2)$$

と表される。ただし、 $0 \leq \varphi < 2\pi$ である。また、 r 及び φ の分解能はそれぞれ 0.01 m、0.01 rad としている。

4-6 目標照度未達成率

4.2 節では照明からの水平面照度を算出する方法を説明した。ここではターゲットの手元の照度を照明制御の性能を評価する指標として定めた、目標照度達成率について説明する。照明が直管型の場合の照度算出方法を用いて 6 か所の照明がすべて点灯している場合の部屋全体の照度を表した図を図 4.6.1 に示す。ここで照明からターゲットの手元までの高さ H は 2 m、照明の明かりが届く範囲は真上から見て照明を中心に半径 3 m 以内とし、壁の反射は考慮していない。さらに 2 本で 1 つの照明として考え、設置位置の差は考慮せず計算している。JIS の電気計算機室における必要照度は 500 lx 以上とされており、図より作業をする机付近の照度は基準を満たした環境であることが確認できる。この結果と照度基準をもとに図 4.6.2 のように地点ごとに適切な目標照度を設定し、点灯した照明のターゲットの手元における合計照度と比較することで、目標照度達成率を算出する。ここで壁際では低め、机の周辺では高め、それ以外で最低限の 500 lx と設定している。さらに目標照度は達成しつつ、更なる省電力化を実現するために照明の調光機能を取り入れる。調光率は

0~100%の1%刻みとし、調光はターゲットの推定位置における手元の照度と目標照度の差を計算し、目標照度を満たしていた場合、点灯した全照明の照度を100%から目標照度を満たす範囲で均一に落とすという手順で行う。ここで消費電力と照度は正比例の関係にあると仮定する。

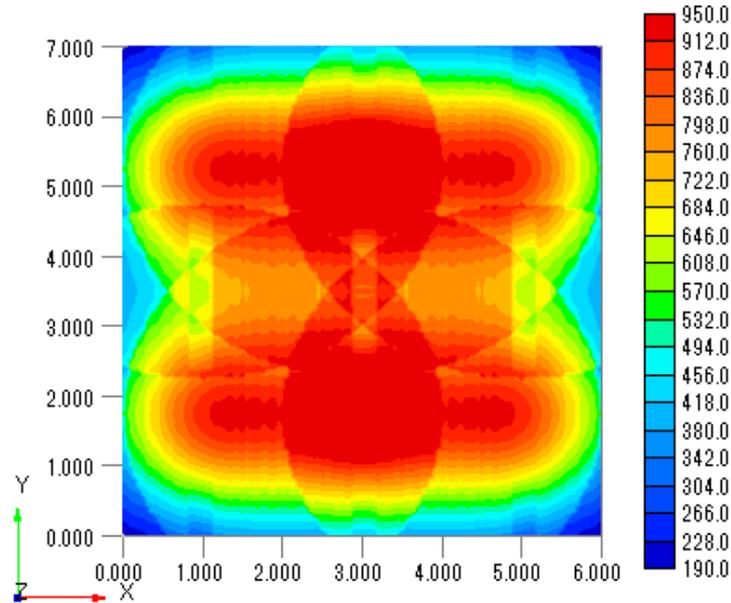


図 4.6.1 フィールド全体の照度

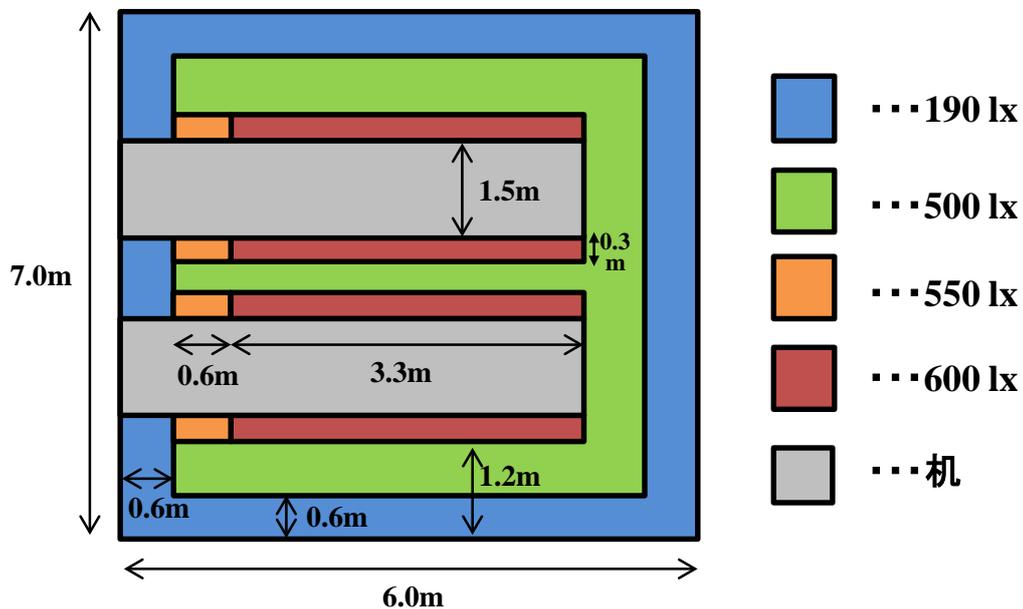


図 4.6.2 目標照度割り当て図

4-7 計算機シミュレーション結果

提案手法を用いて、NLOS 環境のセンサノードが存在する場合の1時間分の照明制御シミュレーションを実行する。ターゲットは一人とし、NLOS センサの個数は固定で1~4個の4通りで行い、NLOS センサの位置はシミュレーション結果の汎用性を高めるため、ループごとにランダムで決定されるものとした。ターゲットの位置推定にはLS法を用いたTOA位置推定手法を用いており、NLOS判定誤りの低減手法には通常の

IMR 法と改善 IMR 法 B の 2 通りを使用している。またループ数は 200 回として行い、未点灯確率、消費電力量、目標照度達成率の平均値を算出し、通常点灯の場合との比較、検知補助幅の変化による改善効果及び調光による消費電力量の改善効果を確認する。ここで点灯成功は真のターゲットの位置と推定ターゲット位置が図 4.4.1 で表される領域について一致した場合であり、未点灯とは点灯成功でないものの中で、本来点くべき照明が点かず暗い場合を意味する。シミュレーションに用いたセンサフィールドを図 4.7.1、結果を図 4.7.2~4.7.5 に示す。ここで目標照度達成率を未点灯確率の特性と比較しやすいように未達成率として表示している。また消費電力量は改善 IMR 法についてのみ表示している。

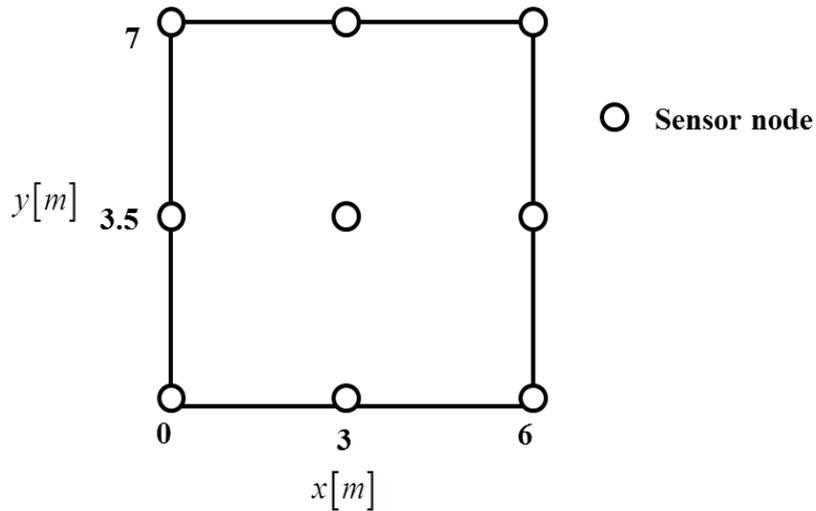


図 4.7.1 センサフィールド

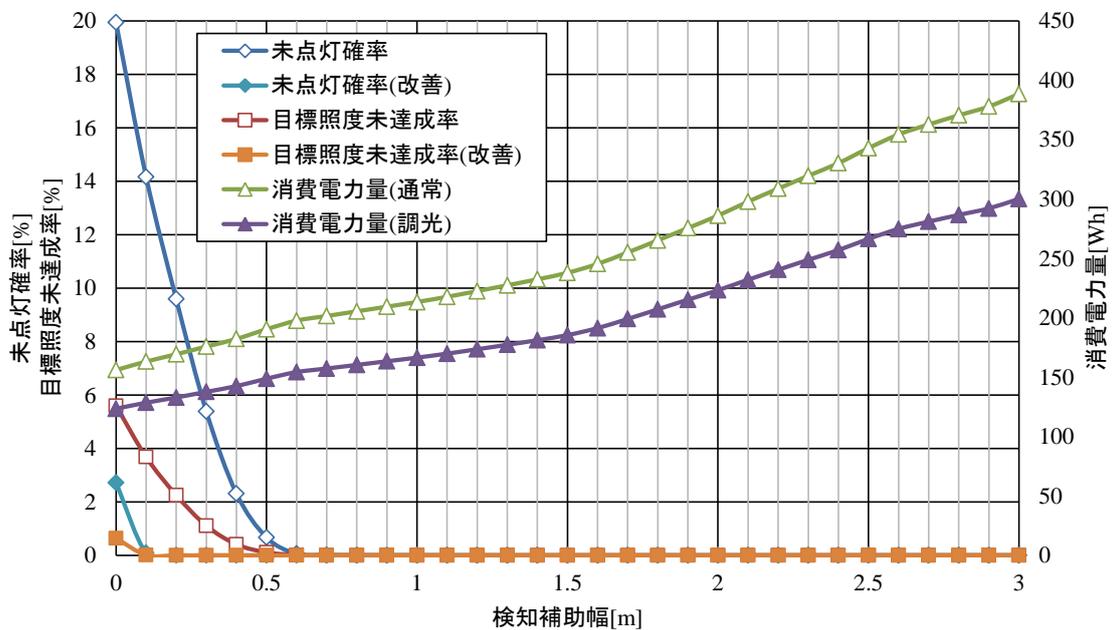


図 4.7.2 NLOS センサが 1 つの場合の特性

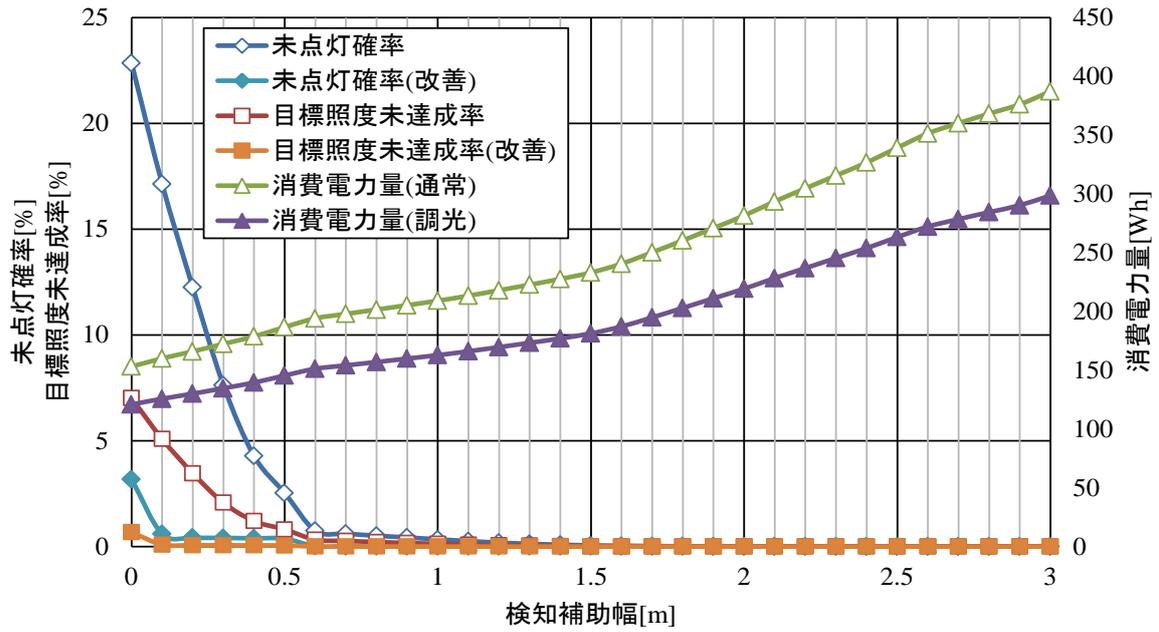


図 4.7.3 NLOS センサが 2 つの場合の特性

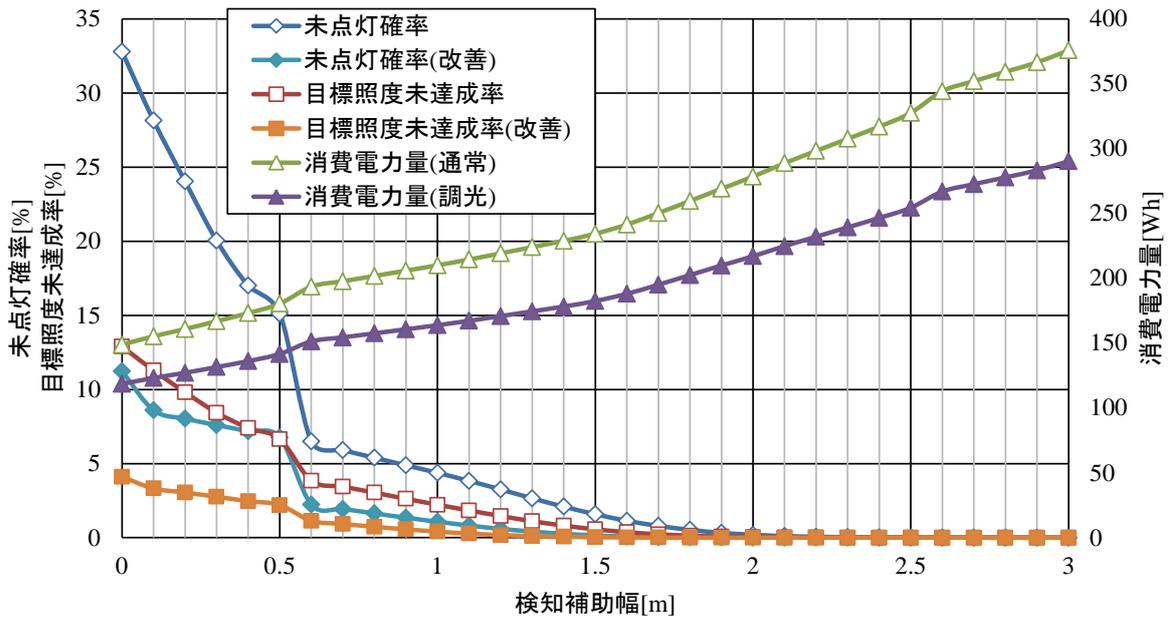


図 4.7.4 NLOS センサが 3 つの場合の特性

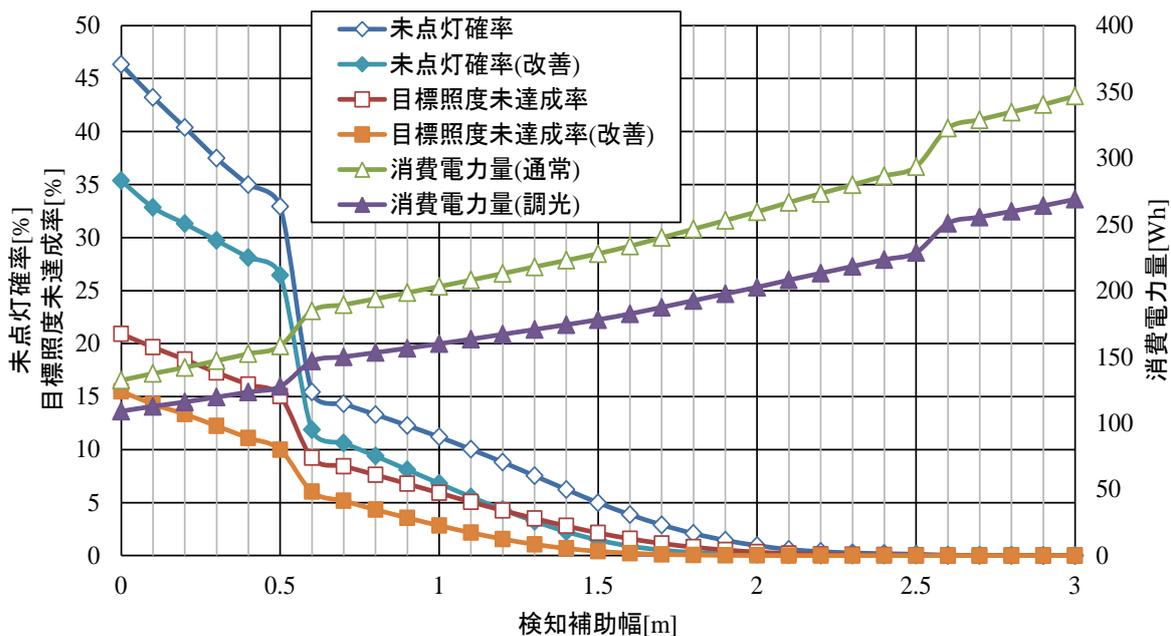


図 4.7.5 NLOS センサが 4 つの場合の特性

表 4.7.1 最適補助幅 r のときの
調光による消費電力量改善率(通常 IMR)

NLOS1	NLOS2	NLOS3	NLOS4
$r=0.9$ m	$r=1.9$ m	$r=2.7$ m	$r=3.0$ m
21.95 %	22.04 %	22.57 %	22.46 %

表 4.7.2 最適補助幅 r のときの
調光による消費電力量改善率(改善 IMR)

NLOS1	NLOS2	NLOS3	NLOS4
$r=0.2$ m	$r=1.0$ m	$r=2.3$ m	$r=2.6$ m
21.49 %	22.13 %	22.19 %	22.27 %

図より、NLOS センサの個数が増えるにつれてターゲットの推定誤差が大きくなるため、未点灯確率及び目標照度未達成率が劣化してしまうが、ターゲットに検知補助幅を設けることにより、どちらも 0% に収束することが確認できる。また、NLOS3,4 のときの特性に顕著に表れているが、通常 IMR 法を用いた未点灯確率の結果は補助幅を広げることによる改善効果が改善 IMR 法の場合よりも大きく、徐々に両者の差が縮まっていくことが確認できる。この結果から、通常及び改善 IMR 法の 2 通りについて、NLOS センサの個数ごとに目標照度未達成率が $2.78E-4$ % (100 時間中 1 秒) 以下となる時の検知補助幅 r を最適とし、その時の調光による消費電力量の改善率を表したものを表 4.7.1, 4.7.2 に示す。表より NLOS の個数が増えるにつれて、わずかながら改善率が大きくなっている。これは補助幅を広げることで点灯する照明が多くなるため、目標照度に対するターゲットの手元の照度に余裕が出来、調光率をより下げることが出来るからである。ある程度の目標照度未達成と消費電力量が許容できる環境下では通常 IMR 法での照明制御でも運用できそうだが、高精度かつ省エネを考えた場合は改善 IMR 法を用いることが必要となる。最後に、改善 IMR 法を用いた場合について、最適幅で on-off 制御を行った場合の NLOS センサ 4 通りの平均の 1 時間の消費電力量は 252.1 Wh、さらに調光を取り入れた場合は 196.4 Wh となり、通常点灯の消費電力量 406.8 Wh と比較して 50% 以上の省電力効果があることが分かった。

5 まとめ

本研究ではスマートグリッドの性能向上を目指し、より実環境に近いオフィス(研究室)を想定した部屋において、必要照度を十分に満たした高性能な照明制御システムを構築した。また照度制御による更なる省電力化手法の提案を行い、計算機シミュレーションにより評価した。第2節では基礎的な位置推定方式として TOA 位置推定方式を取り上げ、位置推定の方法や雑音、推定位置決定におけるアルゴリズムを説明した。また、NLOS 判別に用いる IMR 法、改善 IMR 法について述べた。第3節では光の単位、照明の消費電力について紹介し、室内における照明の省電力化に関する手法を提案し、シミュレーションにより省電力効果を確認した。第4節ではより実環境に近いオフィス(研究室)を想定した部屋において、on-off 制御に加えて新たに照度制御による省電力化手法の提案を行い、計算機シミュレーションにより目標照度達成度が十分満たせる省電力化が実現できることを示した。

以上の結果から、各提案手法によってオフィス環境において必要照度は常に満足しつつ、必要最低限の消費電力で快適な環境を提供するシステムを構築することができた。

【参考文献】

- [1] 中島 啓太, “UWB 位置推定情報を用いたスマートグリッド省電力化の検討,” 名古屋工業大学卒業論文 2014
- [2] 太田義和,菅野正嗣,村田正幸,“センサネットワークにおける位置推定のためのデータ収集方式の提案,” 電子情報通信学会研究報告.IN,情報ネットワーク 104(437),31-36,2004-11-11
- [3] Y. Ishiwatari, J. Kanda, I. Takanashi, T. Kase and A. Tanaka, “Utilizing indoor area information for indoor WLAN positioning system,” IEICE technical report. Information networks 107, pp337-341, 2008
- [4] A. A. D’Amico, U. Mengali and L. Taponecco “TOA estimation with the 802.15.4a standard”, Wireless Communications, IEEE Transactions on Volume 9, Issue 7, 2010 Page(s): 2238 – 2247
- [5] D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti, and M. W. Win, “Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments,” Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 2, pp. 404–426, 2009
- [6] 大槻知明,“位置推定技術,”[online],Available:
<http://www.ohtsuki.ics.keio.ac.jp/theme/localization.pdf>
- [7] 藤田隆弘,大槻知明,金子敏信,“NLOS環境に適した低複雑度 TOA位置推定アルゴリズム,” 電子情報通信学会技術研究報告. USN, ユビキタス・センサネットワーク 107(152), 69-74, 2007-07-12
- [8] Xinrong Li, Member, IEEE, “An Iterative NLOS Mitigation Algorithm for Location Estimation in Sensor Networks,”[online],Available:
http://ee.unt.edu/public/xinrong/Papers/XLI_IST06.pdf
- [9] 誤差と最小二乗法,[online],Available:
<http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/takagi/Survey2/8LSQ.pdf>
- [10] 土居正明,“Newton-Rapson 法と Fisher’s Scoring 法,” [online],Available:
http://www012.upp.so-net.ne.jp/doi/sas/numerical/Newton_Raphson/Newton_Raphson.pdf
- [11] X Li, “An iterative NLOS mitigation algorithm for location estimation in sensor networks,” in Proceedings of the 15th IST Mobile Wireless Communications Summit, Myconos, Greece, June 2006.
- [12] K. Fukuda and E. Okamoto, “Performance Improvement of IMR-based NLOS Detection in indoor ultra wide-band TOA localization,” IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E95-A, no. 10, pp. 1658-1666, Oct. 2012.
- [13] “光度の単位,”[online],Available: <http://www.med.teikyo-u.ac.jp/~ortho/med/pat/light2.htm>
- [14] “発明道,”[online],Available: <http://abikounso.blogspot.jp/2010/10/blog-post.html>
- [15] “Calculation for illumination-IWASAKI ELECTRIC CO.,LTD,” [online],Available:
http://www.tlt.co.jp/tlt/lighting_design/de

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
An accurate indoor-localization scheme with NLOS detection and elimination exploiting stochastic characteristics	IEICE Transactions on Communications	Sept. 2015
Low-complexity indoor UWB localization scheme using particle swarm optimization	Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	Apr. 2015
An energy-efficient adaptive lighting control scheme using indoor localization with prior position information	Proc. International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)	Oct. 2015
An Improved NLOS Detection Scheme Using Stochastic Characteristics for Indoor Localization	Proc. International Conference on Information Networking (ICOIN2015)	Jan. 2015
Electric Power Saving in Smart Grid Using Localization with Ultra Wide-Band Signals	Proc. IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS2014)	Aug. 2014
Particle swarm optimization-based low-complexity three-dimensional UWB localization scheme	Proc. International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN2014)	July 2014
高性能照度制御を取り入れた屋内適応照明制御の省電力化の検討	H27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会	Sept. 2015
事前位置情報を活用した屋内適応照明制御の検討	信学会 2015 年ソサイエティ大会	Sept. 2015
統計性質を活用した高精度 NLOS 判別法の提案	信学会 2015 年総合大会	Mar. 2015
UWB 位置推定情報を用いた適応照明制御による省電力化の検討	信学会 2015 年総合大会	Mar. 2015
屋内位置推定手法を用いた適応照明制御による省電力化の検討	電子情報通信学会技術報告	Jan. 2015
UWB 信号による位置推定手法を用いたスマートグリッド省電力化の検討	電子情報通信学会技術報告	June 2014