

# スマートフォン搭載照度センサの集合知による 街灯照度安全性判定システムの開発

松田 裕貴<sup>1</sup> 新井 イスマイル<sup>1</sup>

**概要:** 近年, 防犯意識の向上に伴い, 夜道の明るさなどの「安心・安全面」での情報整備が歩行者向けナビゲーションにおいて重要となってきた。安心・安全情報については, 企業や自治体, 警察署などが独自に提供しているものの, 情報の「明快さ」や「網羅性」が十分に達成されているとはいえない。本研究では, スマートフォンに搭載されている照度センサを用いて, 街灯照度データを収集, 集合知を形成することにより, 安心・安全情報のうち「夜道の明るさ」を地図に付加するシステムの開発を行っている。本稿では, 上記の課題のうち, 情報整備の「網羅性」を解決するために, スマートフォン搭載照度センサの特性に基づいた街灯設置地点推定および街灯照度推定を行う手法を提案し, 各手法について検証を行った。検証の結果, 街灯位置推定手法における再現率は, 事前調査の対象とした街灯については 100 [%], 全サンプルの街灯については約 89 [%] となった。また, 街灯と推定点の平均絶対誤差は全サンプルの街灯について約 1.97 [m] となった。街灯照度推定手法における平均誤差率は事前調査の対象とした街灯については約 17 [%], 全サンプルの街灯については約 31 [%] となった。

**キーワード:** センサデータ解析, 位置情報サービス, 安心・安全マップ, 街灯照度

## 1. はじめに

GPS や加速度センサ, 照度センサなどの多様なセンサを搭載したスマートフォン端末の普及に伴い, 近年では, 歩行者ナビゲーションなど, 位置情報を活用したアプリケーションの需要が高まっている。従来のナビゲーション（主にカーナビゲーション）においては, 車線数や道路混雑状況など, 目的地への到達速度を重視した情報の提供が中心となるが, 歩行者ナビゲーションにおいては, それらの情報に加えて夜道の明るさや人通り, 犯罪発生情報など, 安心・安全面に配慮した情報の提供が求められる。

安心・安全面の情報を提供するシステムとしては, 企業や警察署が独自に作成した安心マップ, また, 自治体や地域団体が作成した夜道の街灯情報マップなどがあるが, 情報整理の自動化が行われておらず, また, 直接安全性に結びつく情報が得られないのが現状である。そのため, ユーザーが情報から直感的に安全性を判断できる情報を, 網羅的に整備することが重要な課題となる。

そこで本研究では, 街灯が犯罪に与える影響 [1] に着目し, スマートフォンの照度センサによって収集した街灯照度データから, 街灯照度や街灯設置間隔などを推定することで, 夜道の安全性判定を行う。また, スマートフォン搭載照度センサの測定データ集合知を形成し, 網羅的な街灯

ネットワークを構築することで, 前述の明快度および網羅性の課題を解決し, 街灯照度による安心・安全情報を提供する歩行者ナビゲーションシステムを開発する。なお, スマートフォン照度センサによる街灯照度測定では, ユーザーの端末保持角度が一定でない, 歩行中に測定が行われる, 街灯設置地点が未知である等の課題があるため, 各測定データごとに補正を行い, 集合知的に処理する必要がある。

本稿では, 前述の 2 つの課題のうち, 「情報整備の網羅性」における課題を解決するため, スマートフォン搭載照度センサ, 加速度センサを用いて測定したデータを集合的に処理することにより, 街灯位置, および街灯照度を推定する手法について提案し, その有効性を検証した。検証の結果, 街灯位置推定手法における再現率は, 事前調査の対象とした街灯については 100 [%], 全サンプルの街灯については約 89 [%] となった。また, 街灯と推定点の平均絶対誤差は全サンプルの街灯について約 1.97 [m] となった。街灯照度推定手法における平均誤差率は事前調査の対象とした街灯については約 17 [%], 全サンプルの街灯については約 31 [%] となった。

次に, 本稿の構成を述べる。まず, 2 章にて, 既存研究の手法を考察し本研究の課題を明らかにする。3 章では, スマートフォン搭載照度センサの特性調査結果について述べ, これらの特性を用いた街灯位置・照度推定手法を提案する。各推定手法を用いた実験およびその評価手法については 4 章にて述べ, それぞれの評価結果について 5 章で考察し, 6 章にてまとめる。

<sup>1</sup> 明石工業高等専門学校 電気情報工学科, Department of Electrical and Computer Engineering, Akashi National College of Technology

## 2. 既存の安全・安心情報提供手法とその課題

本章では、従来の安心・安全面情報を提供する2つのシステムの概要および問題点をまとめ、本研究にて解決すべき課題について考察する。

まず、各地域の警察署が発表する犯罪発生状況データなどを用いたシステムとして、安全安心 map[2] が挙げられる。このシステムでは、各県警の安全情報メールマガジンにて配布されている情報を元に、犯罪発生時間、位置情報、犯罪カテゴリ、詳細情報のデータベースを構築し、地図にマッピングすることで、安全情報提供を実現している。しかし、配布される情報は各県警に委ねられているため、書式が標準化されていない。これにより、データベースを構築するにあたって自動化を行うことができず、マンパワーによって構築しているのが現状である。また、このシステムでは、過去に発生した犯罪の位置と内容が閲覧可能であるが、これから犯罪が起きる可能性のある場所に見られる特徴や、それによる道の危険予測情報など、防犯情報として必要な情報の提供が実現できていない。

また、街灯照度と犯罪発生との関係については、明確な根拠は示されていないものの、街灯が地域の公共空間における防犯対策向上に影響を与え、結果的に犯罪抑止へ繋がることが、日本防犯設備協会の報告[1]によって明らかとなっている。街灯照度データを用いた既存研究には、札幌市 LED 街路灯導入実証実験[3]などが挙げられる。これらの夜道の安全性を判定する手法は、日本工業規格（以下 JIS）の定める照度測定法[4]（以下 JIS 照度測定法）に基づいた測定を行い、各街灯照度が、照度基準を満たしているかどうかによって判定するというものである。JIS 照度測定法とは、道路面をメッシュ分割して各地点における水平照度値を測定、平均する測定法である。しかし、この手法は手間・コスト面などから網羅的に測定することが困難であるため、メッシュ内の平均照度と道路の安全性の関連性を導くに至っていない。そのため、他の自治体の定める街灯の設置基準の多くは、上記の手間・コストの現実性を考慮して、ある照度基準を満たす街灯を規定間隔で設置するというものとなっている。

以上を踏まえると、既存研究には次に示す2つの問題があると考えられる。

- ユーザに提供する安心・安全情報の整備を行うためのシステムが自動化されていないため、情報を網羅的に提供することが難しい「情報整備の網羅性」の問題
- ユーザが提供された安心・安全情報から、そのエリアが安全かどうかを見極める必要があるため、直感的に安全性を判断することが難しい「提供情報の明快度」の問題

なお、本研究の安全性判定には、JIS 道路照明基準[5]に基づき日本防犯設備協会が定める照度基準[6]を用いる。

表 1 防犯灯の照度基準

| クラス     | A         | B           |
|---------|-----------|-------------|
| 平均水平面照度 | 5 [lx] 以上 | 3 [lx] 以上   |
| 最小鉛直面照度 | 1 [lx] 以上 | 0.5 [lx] 以上 |
| 照明効果    | 顔の概要を識別可能 | 挙動・姿勢を認識可能  |

住宅地域における防犯灯の照度基準を表 1 に示す。平均水平面照度とは歩道の路面上（0 [m]）の平均照度であり、鉛直面照度とは歩道の中心線上で、路面より 1.5 [m] の高さにおける道路軸に対して直角な鉛直面の最小照度を示す。また、照明の効果とは、4 [m] 先にいる人の情報をどれだけ得られるかを示している。

## 3. 照度特性の基礎調査および 街灯位置・照度推定手法の提案

本研究の大目標は、2 章で述べた課題点を達成するために、スマートフォン搭載照度センサの測定データを集合的に処理することにより、夜道の安心・安全性を判定するシステムを実現することであるが、本稿においては、2 章で述べた課題のうち「情報整備の網羅性」における課題を解決する手法について提案する。

照度基準による安全判定を行うためには、JIS 照度測定法に準拠した測定を行う必要があるが、JIS 照度測定法は、街灯照度および街灯間における照度を測定し平均することにより、照度を測定する方法である。そのため、街灯が安全判定の指標となる照度基準を満たしているかどうかについては、「街灯の照度」および「隣接する街灯との距離」が重要なパラメータとなる。夜道の安全性判定を行うためには、スマートフォン搭載照度センサで測定した連続データを用い、上記の2つのパラメータを推定することで JIS 照度測定法による照度測定結果に近似する必要がある。以降では、照度の基本的な特性およびスマートフォン搭載照度センサの特性についての調査結果を 3.1 節に示し、特性調査結果を元にセンサ測定データの測定状況による偏りを補正し、集合的に処理することにより、街灯位置・照度を推定する手法について、3.2 節および 3.3 節にて提案する。

### 3.1 照度センサの主な特性

照度とは単位面積当たりに入射する光束量であるため、照度は光源からの距離の2乗に反比例する特性や、入射角によって照度が減衰する余弦特性を持つ。また、これらの2つの特性から、光源から垂直な対向面の照度に対する、ある入射角における面上の照度は余弦の4乗に比例する関係となることから、照度は一般的に距離や角度に影響を受けやすいと考えられる。スマートフォン搭載照度センサを用いて測定する際に、測定状況によりデータに誤差が生じるため、補正を行う必要がある。以降、スマートフォン搭載照度センサ特性の調査結果と、これらの特性から導いた、センサ測定データのシミュレーション（歩行時照度モデル）

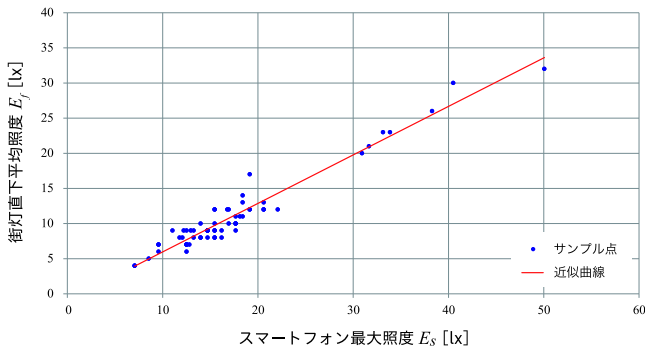


図 1 照度値相関関係

について述べる。なお、本項の内容は過去の論文 [7] にて述べているため詳細を省く。

スマートフォン搭載照度センサは、一般に普及している照度計と、形状や精度に大きな違いがあるため、特有の性質を持つと考えられる。以降では、スマートフォン搭載照度センサについての特性調査結果を述べ、その結果を考慮したセンサ測定データのシミュレーションを行う。なお、以降の実験では、照度計（型番：LX-1108，メーカー：佐藤商事，測定範囲 [分解能]：0～40.00 [0.01]，36.0～400.0 [0.1] [lx]），データロガー照度計（型番：LX-28SD，メーカー：佐藤商事，測定範囲 [分解能]：0～1999 [1] [lx]）および、スマートフォン（型番：Galaxy Nexus GT-I9250，メーカー：サムスン電子，測定範囲 [分解能]：4～約 183000 [1] [lx]）を用いた。

### ■ 死角付き余弦特性

スマートフォン搭載の照度センサは、一般に普及している照度計と異なり、受光面が平面状となっているため、端末内部に設置されている場合が多い。スマートフォン搭載照度センサの縦方向の余弦特性を試験したところ、一般的な特性では余弦に比例すると考えられるが、入射角 30～150 [°] の間において余弦特性を示し、前後 30 [°] では照度値の変化が見られず死角となった。

### ■ 照度計値との関連性

スマートフォンによる測定で得られたセンサ測定データと照度計による測定値の相関性について調査したところ、図 1 に示すような照度値の関係が得られた（標本数は 62）。街灯直下平均照度  $E_f$  は地上約 1.5[m] での照度値である。また、スマートフォンの測定可能範囲から 4 [lx] 以下となる街灯は対象外とした。この関係についての無相関検定（自由度 60，有意水準 0.01 [%]）を行ったところ、標本相関係数は約 0.97 となり、相関係数の限界値 0.325 を上回るため、強い相関関係であるとわかった。

### ■ 街灯位置との関連性

スマートフォンを用いた測定においては、歩行者が画面を見ることから受光面が進行方向手前に傾くため、照度値の最大値を得る地点は街灯が設置されている地点ではなく、

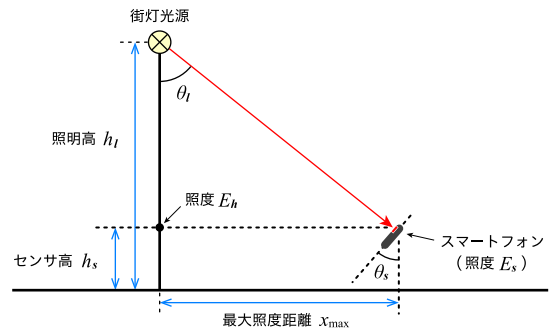


図 2 街灯直下地点の推定

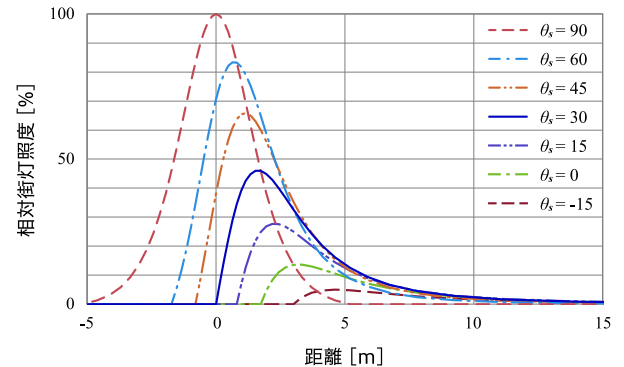


図 3 センサ測定データのシミュレーション（歩行時照度モデル）

街灯直下よりも進行方向奥の地点となると推測される。実際の測定環境における街灯とスマートフォンの位置関係を示したものが、図 2 である。スマートフォン照度センサによる測定データ（以下、センサ測定データ）は、この位置関係から得られる式 1 によって定式化することができる。各文字は、街灯との角度  $\theta_l$ （変数），端末の角度  $\theta_s$ ，照明高  $h_l$ ，センサ高  $h_s$ ，高さ  $h_s$  における街灯直下照度  $E_h$ ，スマートフォン最大照度  $E_s$  とする。 $\alpha_\theta$ ， $\alpha_{\text{ratio}}$  は、スマートフォンの余弦特性によって決まる定数であり、本稿では、前述の特性調査に基づき  $\alpha_\theta = 30$ ， $\alpha_{\text{ratio}} = 3/2$  とした。

$$E_s = \cos^3 \theta_l \cdot \sin((\theta_s + \theta_l - \alpha_\theta) \cdot \alpha_{\text{ratio}}) \cdot E_h \quad (1)$$

また  $\theta_s$  は、スマートフォン搭載加速度センサおよび地磁気センサを用いることで求めることができる。ただし、本稿において照明高・センサ高には、調査を行った測定値の平均を用いるものとし、 $E_s$  は負の値を取らないこととする。なお、最大照度を得た時点での  $\theta_l$  は端末角度  $\theta_s$  に依存するため、最大照度距離  $x_{\text{max}}$  は、 $\theta_s$  と式 2 に示す関係式により求めることができる。これらの式を用い、横軸を距離 [m]，縦軸を相対照度  $E_s/E_h$  [%] にとり、各  $\theta_s$  に対する照度値のシミュレーションを図 3 に示す。

$$\theta_l = \tan^{-1} \left( \frac{x_{\text{max}}}{h_l - h_s} \right) \quad (2)$$

### 3.2 街灯位置推定手法

JIS 照度測定法では街灯間の照度値の測定も行うことから、隣接する街灯までの距離が照度基準により安全性判定

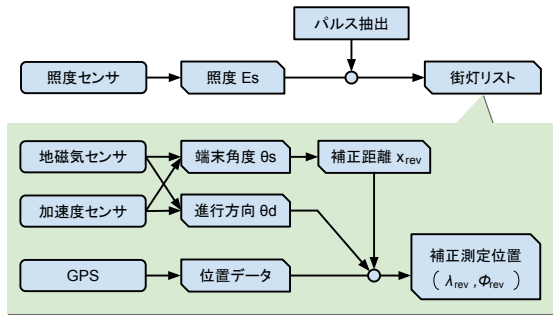


図4 測定位置補正手法処理フロー

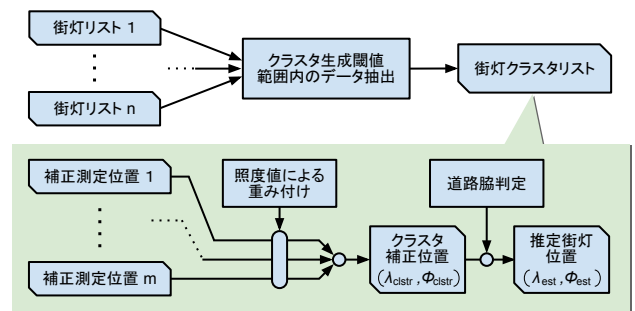


図5 集合知による街灯位置推定手法処理フロー

を行う際に最も影響を及ぼす要因と成りうる。そのため、街灯照度を用いた安全性判定には、街灯照度データに加えて街灯設置間隔データが不可欠なパラメータとなる。しかし、歩行時照度モデルにおいて最大照度を示す地点は、3.1節でも述べたように、実際の街灯設置地点とは異なる地点を示すため、街灯直下地点を推定する必要がある。

本節では、以下に示すプロセスを用いた街灯位置推定手法を提案する。各手法の詳細については、次節に述べる。

- (1) 各センサ測定データから特徴量を抽出し、歩行時照度モデルを用いることにより、測定位置を補正する
- (2) 各推定地点のクラスタを形成し、集合知的に処理を行うことにより、GPSデータの誤差を補正し、街灯位置を推定する

### 3.2.1 歩行時照度モデルによる測定位置補正手法

測定位置補正の処理フローを図4に示す。センサ測定データは、街灯直下付近では図3のような変化を示すと考えられるが、実際の測定においては連続的にセンサデータを収集するため、測定データ全体においては、街灯付近の変化がパルスに似た形状となる。これにより、照度値の連続データからパルス成分を抽出することで、街灯リストを構築することができる。

次に、街灯リストの各要素のGPS緯度経度データを、歩行時照度モデルを用いて補正する。歩行時照度モデルより最大照度を得たときの端末角度 $\theta_s$ と、最大照度取得地点から街灯直下への推定直線距離（補正距離 $d_{rev}$ ）の関係を導くことができる。この補正距離 $d_{rev}$ 、進行方向 $\theta_d$ を用い、補正距離の緯度経度成分 $d_{lat}$ 、 $d_{lng}$ を抽出して、補正測定位置 $(\lambda_{rev}, \phi_{rev})$ を式3、4（ヒュベニの公式<sup>\*1</sup>の変形）により導く。なお、 $\mu_{lat}$ は本来2点の緯度平均であるが、本提案では計算量削減のため近似的に $\mu_{lat} \simeq \lambda_1$ とした。また、 $M$ は子午線曲率半径、 $N$ は卯酉線曲率半径を示す。

$$\lambda_{rev} = \frac{d_{lat}}{M} + \lambda_1 \quad [^\circ] \quad (3)$$

$$\phi_{rev} = \frac{d_{lng}}{N \cos \mu_{lat}} + \phi_1 \quad [^\circ] \quad (4)$$

\*1 2点間の距離を緯度経度データから導く公式。

### 3.2.2 集合知による街灯位置推定手法

前項の街灯推定手法では、端末角度や進行方向による補正について述べたが、スマートフォンによる測定では、GPSデータ自体の誤差についての補正も行う必要がある。そこで、街灯近傍を通過したデータは照度が高くなる傾向にあることが事前調査により明らかとなっていることから、照度による加重平均を用いて、複数の街灯データから作成したクラスタの平均位置を算出する。さらに、一般的な街灯は道路脇に設置されていると考えられるため、道路脇判定により街灯位置を推定する。集合知による街灯位置推定手法の処理フローを図5に示す。各手順について以下に述べる。

まず、測定位置補正手法によって得られた街灯リストを時系列順にサーチし、クラスタ生成閾値の範囲内に位置する街灯データを抽出、街灯クラスタリストを生成する。クラスタ生成のアルゴリズムについて以下に示す。

- (1) 開始街灯データを決め、街灯クラスタリストに追加
- (2) 街灯リストを時系列順にサーチしていき、街灯クラスタリスト要素の閾値内に位置する街灯データを、街灯クラスタリストに追加
- (3) 閾値内の街灯データが存在する間、手順2.を繰り返す
- (4) 全街灯データがいずれかの街灯クラスタリストに追加されるまで、手順1～3.を繰り返す

次に、生成された街灯クラスタリストの各要素が持つ補正測定位置データから、クラスタ補正位置 $(\lambda_{clstr}, \phi_{clstr})$ を導く。なお、街灯の近傍を通過した測定データの方が、照度測定結果が高い値を示す傾向にあるため、補正には式5、6に示すように、照度値による加重平均を用いる。

$$\lambda_{clstr} = \sum_i^{\text{Cluster List}} \left( \lambda_{rev_i} \cdot E_{rev_i} / \sum_j^{\text{Cluster List}} E_{rev_j} \right) \quad (5)$$

$$\phi_{clstr} = \sum_i^{\text{Cluster List}} \left( \phi_{rev_i} \cdot E_{rev_i} / \sum_j^{\text{Cluster List}} E_{rev_j} \right) \quad (6)$$

次に、街灯が一般的に道路脇に設置されていることから、クラスタ補正位置および国土地理院の発表する道路ネット

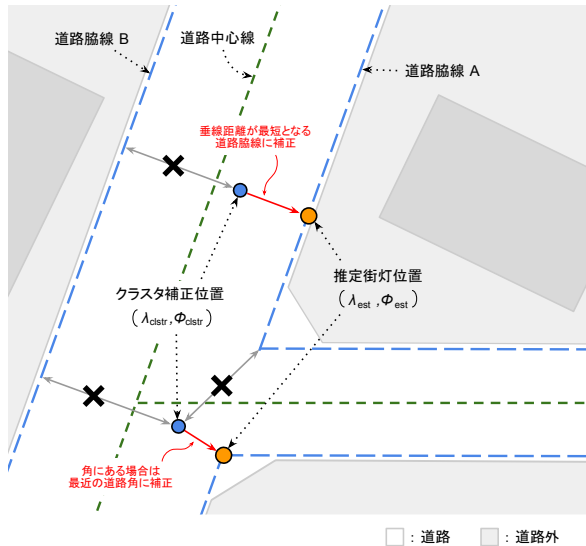


図 6 道路脇判定による街灯位置推定

ワークデータ\*2を用いて、道路のどちら側に街灯が存在するかを判定し、推定街灯位置  $(\lambda_{est}, \phi_{est})$  を導く。道路脇判定を用いた街灯位置推定の概念図を図 6 に示し、アルゴリズムについて以下に示す。

- (1) 道路中心線および幅員データから、道路脇線を導出する。
- (2) クラスタ補正位置から、各道路脇線に垂線を下ろした交点の座標  $(\lambda_h, \phi_h)$  をベクトル計算から得る。
- (3) クラスタ補正位置と道路脇線の距離（垂線の長さ）をヒュベニの公式を用いて導き、距離が最短となる垂線における交点座標  $(\lambda_h, \phi_h)$  を推定街灯位置  $(\lambda_{est}, \phi_{est})$  とすることにより街灯位置を推定する。（道路の角など、垂線を下ろせないクラスタ補正位置においては、最も近い道路角の座標を推定街灯位置とする）

### 3.3 街灯照度推定手法

夜道における街灯の安全性判定を行うためには、センサ測定データから、街灯照度の推定をおこなう必要がある。しかし、スマートフォンを用いたシステムでは、複数ユーザが複数回の測定を行うため、端末保持角度や通過経路など、測定を行う度に測定状況は異なると考えられる。本節では、これらの測定状況の差を補正し、街灯照度を推定する手法を提案する。街灯照度推定の処理フローを図 7 に、手順を以下に示す。各手法の詳細については、次節に述べる。

- (1) 歩行時照度モデルを用いた関係式により、測定状況の差を補正する
- (2) センサ測定データと照度計による測定値の相関関係を用い、街灯照度を推定する

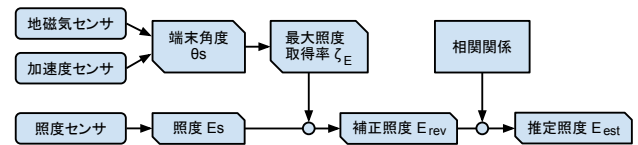


図 7 街灯照度推定手法処理フロー

#### 3.3.1 端末角度による照度減衰の補正手法

センサ測定データによって得られる最大照度は、端末角度に応じた減衰が生じているため、補正する必要がある。ある端末角度  $\theta_s$  で取得可能な最大照度の割合（最大照度取得率  $\zeta_E$ ）は、歩行時照度モデルから得ることができる。なお、 $\zeta_E$  は街灯直下で照度センサを水平に保持したとき  $(\theta_s = 90 [^\circ])$  の照度値を 100[%] とする。この最大照度取得率  $\zeta_E$  を用いて、各測定での端末角度による照度減衰は、式 7 に示す照度補正式を用いて補正することができ、これにより、街灯直下での水平照度（補正測定照度） $E_{rev}$  を得ることができる。

$$E_{rev} = \frac{E_s}{\zeta_E/100} \quad (7)$$

#### 3.3.2 相関関係による街灯照度推定手法

スマートフォン照度センサで測定したデータを安全性判定に用いるためには、照度計を用いて測定した照度値との対応付けを行う必要がある。3.1 節で述べた、センサ測定データと照度計による測定値の相関関係（図 1）を、線形近似を用いた最小二乗法により近似し、式 8 を導いた。この近似式によって、推定照度  $E_{est}$  を得ることができる。

$$E_{est} = 0.69030362 \cdot E_{rev} - 0.93089935 \quad (8)$$

## 4. 街灯位置・照度推定実験および評価方法

本章では、街灯位置推定手法および街灯照度推定手法を導入したシステムによる実験の概要を 4.1 節にて述べ、街灯位置推定手法および街灯照度推定手法の評価方法について 4.2, 4.3 節にて述べる。

### 4.1 街灯位置・照度推定実験概要

本実験では、街灯種類（蛍光・水銀・LED ランプ等）のデータが広く得られる実験ルートとして、JR 魚住駅・山陽魚住駅間の経路（街灯数：28、距離：約 1[km]）を採用した。また、実験中において測定者は自然な速度で歩行しつつ、端末の画面を目視できるように端末を保持するものとする。端末保持角度については、3.3 節にて述べた手法により補正を行うため、条件を設けずに測定者が任意で設定できるものとした。なお、本実験では、3.1 節と同じ実験機材を用いた。

\*2 <http://www.gsi.go.jp/geoinfo/dmap/dm2500sdf/>

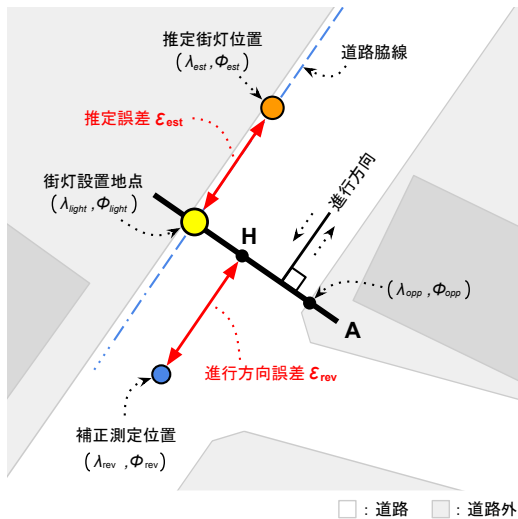


図 8 街灯位置推定評価方法

#### 4.2 街灯位置推定実験の評価方法

街灯位置を推定するにあたり、街灯を正しく認識できるかどうかは重要な評価項目である。本稿においては、推定街灯位置と街灯データとの直線距離が、最短となる街灯データを認識したと考えて評価する。評価は、全街灯数に対する街灯を正しく認識できた割合（再現率  $R$ ）、および認識した街灯数に対する正しく認識できた割合（適合率  $P$ ）を求めることによって行う。なお、1つの街灯データに対し複数の推定街灯位置が認識された場合、正しく認識されていないものとして評価する。

歩行時照度モデルを用いた測定位置補正手法では、進行方向  $\theta_d$  へ補正するため、1次元的な補正であると言える。そのため、評価においても1次元的な評価方法を用いることが必要である。まず、図 8 に示すように、進行方向（道路ベクトル）に対して直角な直線  $A$  を想定し、直線  $A$  上の補正測定位置  $(\lambda_{rev}, \phi_{rev})$  から最も近い地点  $H (\lambda_h, \phi_h)$  をベクトル計算により求める。次に、ヒュベニの公式を用いて、地点  $H$ （直線  $A$ ）と補正測定位置の距離（進行方向誤差  $\varepsilon_{rev}$ ）を各測定データについて計算する。各データについて、歩行時照度モデルによる補正を行った場合と行わなかった場合の進行方向誤差を比較することにより評価する。

街灯位置推定手法では、街灯クラスタを形成し集合知的に処理し、道路脇判定を用いることで進行方向直角の方向への補正を行うことから、2次元的な補正であると言える。まず、街灯クラスタに街灯データが追加される際に、推定街灯位置  $(\lambda_{est}, \phi_{est})$  と街灯設置地点  $(\lambda_{light}, \phi_{light})$  との距離（推定誤差  $\varepsilon_{est}$ ）をヒュベニの公式を用いて算出する。推定誤差は、3.2.2 項前半にて提案したクラスタ補正手法と 3.2.2 項後半にて提案した街灯位置推定手法の各々の補正効果を確認するために、単純平均手法（補正測定位置を単純平均した位置データ）、クラスタ補正手法（補正推定位置を照度値による加重平均により補正した位置データ）、

表 2 街灯認識精度評価結果

| 全街灯数 | 認識した街灯数 | 正しく認識した街灯数 | 再現率 $R$ [%] | 適合率 $P$ [%] |
|------|---------|------------|-------------|-------------|
| 28   | 32      | 25         | 89.2        | 78.1        |

街灯位置推定手法（クラスタ補正位置を道路脇判定によって推定した位置データ）の3手法にて算出し、これらを比較することで評価する。また、街灯クラスタ要素数が増加することにより、街灯位置推定の精度が向上したかどうかについても評価する。

#### 4.3 街灯照度推定実験の評価方法

街灯照度推定実験に対しては、端末角度による照度減衰の補正手法（3.3.1 項）について、相関関係による照度推定手法（3.3.2 項）についての2項目を評価する。実際の街灯照度  $E_{ans}$  については、照度計を用いて収集したものを用いる。まず、推定街灯照度  $E_{est}$  および、実際の街灯照度データ  $E_{ans}$  から、誤差率  $\delta_{est}$  を式 9 を求める。この誤差率  $\delta_{est}$  は、クラスタに街灯データが追加される際に算出する。そして、端末角度による照度減衰の補正手法を用いた推定照度と、用いない推定照度データを比較し評価する。また、クラスタ要素数が増加することによって照度推定の精度が向上したかどうかについて評価する。

$$\delta_{est} = \frac{E_{est} - E_{ans}}{E_{ans}} \quad (9)$$

### 5. 評価結果および考察

本章では、4章にて述べた街灯位置手法および照度推定手法を用いた実験について、評価結果を示し、考察する。

#### 5.1 街灯位置推定の評価結果および考察

まず、街灯認識精度についての評価結果を表 2 に示す。提案手法を用いた位置推定では、再現率は約 86 [%]、適合率は約 73 [%] となった。正しく認識できなかった街灯 (No.0, 5, 17) については、街灯が想定したものと異なる指向性を持っていることや、街路樹や看板などの障害物が存在することなどの要因により、1つの街灯に対し複数の街灯クラスタが推定されていると考えられる。なお、本研究の想定した蛍光、水銀ランプ等の街灯においては、再現率 100 [%] を満たす結果となった。

次に、歩行時照度モデルによる測定位置補正手法についての評価結果を表 3 に示す。なお、認識した街灯 32 サンプルのうち、補正前・補正後の両データが存在するものを評価の対象とした。測定位置補正手法については、補正を行うことによって進行方向誤差平均値が削減されたものは、全サンプルのうち 83 [%] となり、補正前後における全進行方向誤差平均は、それぞれ 3.51, 3.17 [m] となった。

図 9 は測定位置補正前および補正後の進行方向誤差平均を示したものであるが、進行方向誤差平均値のばらつきには大きな差が生じていることが分かる。このばらつきの要

表 3 測定位置補正手法評価結果

|                   |          |
|-------------------|----------|
| 全サンプル数            | 31       |
| 進行方向誤差削減数         | 26       |
| 進行方向誤差削減率 [%]     | 83.9     |
| 全進行方向<br>誤差平均 [m] | 補正前 3.51 |
|                   | 補正後 3.17 |

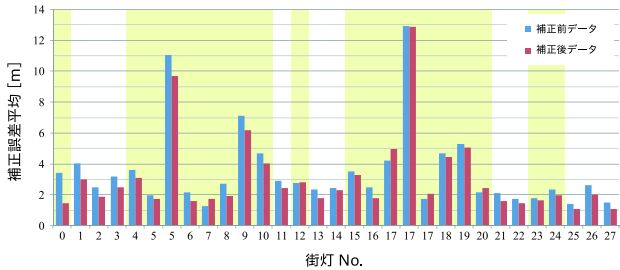


図 9 測定位置補正手法評価結果一覧

因としては、本稿で想定している蛍光、水銀ランプ等の街灯以外の街灯 (LED ランプ) における配光や指向性の違いや、想定外の測定状況 (曲がり角・街灯が低い) が考えられる。なお、想定外街灯・測定状況データについては図 9 にて背景を色付けにより示した。図 10 は、想定街灯・測定状況および、想定外街灯・測定状況についての進行方向誤差平均値のばらつきを示したものである。なお、図 10 は箱ひげ図であり、データを 1/4 (25 [%]) ずつに分割し、最小値 (ひげ下端)、第一四分位 (25 [%] 点、箱下端)、中央値 (50 [%] 点、箱中央線)、第三四分位 (75 [%] 点、箱上端)、最大値 (ひげ上端) の 5 つの要素でデータの分布を可視化するものである。つまり、箱が大きいほどデータの分散が大きく、ばらつきが大きいことを示している。このグラフから、想定街灯・測定状況においては、測定位置補正を行うことによって、進行方向誤差の平均が 0.49 [m] 削減され、分散 (ばらつき) についても 0.68 [m<sup>2</sup>] 削減することができている。しかし、想定外街灯・測定状況の場合においては、想定街灯・測定状況と比較すると補正の効果が少ない結果となった。

今後の課題については、想定外の街灯・測定状況でのセンサ測定データの変動が、想定街灯のものと異なることが事前調査で明らかとなっているため、波形解析を用いて街灯種類を判定する手法について検討すること、そして、それぞれの街灯の配光や指向性を調査することで、街灯別に歩行時照度モデルを構築し、進行方向誤差およびばらつきを削減する手法について検討することが挙げられる。

次に、集合知による街灯位置推定手法についての評価結果を、表 4 に示す。街灯位置推定については、単純平均手法を用いた場合に対する推定誤差の削減率が、クラスタ補正手法を用いた場合は約 78 [%]、道路脇判定を用いた街灯位置推定手法を用いた場合は約 82 [%] となった。これにより、クラスタおよび道路脇判定による補正が有効なものであることが分かる。また平均絶対推定誤差について

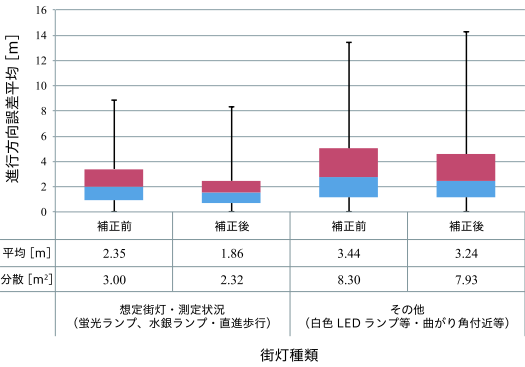


図 10 街灯種類による進行方向誤差平均値のばらつき

表 4 街灯位置推定手法評価結果

|          | 平均絶対<br>推定誤差<br>[m] | 対 単純平均手法        |                |
|----------|---------------------|-----------------|----------------|
|          |                     | 推定誤差<br>削減率 [%] | 平均削減<br>距離 [m] |
| クラスタ補正手法 | 2.34                | 77.8            | 0.38           |
| 街灯位置推定手法 | 1.97                | 81.5            | 0.71           |

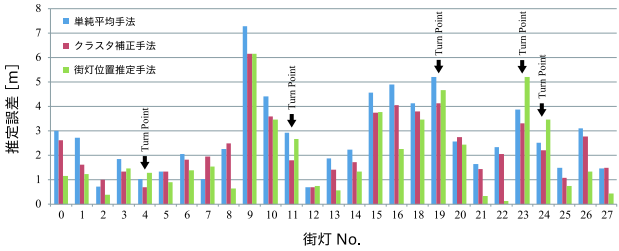


図 11 街灯位置推定手法評価結果一覧

は、クラスタ補正手法では 2.34[m]、街灯位置推定手法では 1.97[m] となった。

図 11 は、比較する 3 つの位置データにおける推定誤差値を示したものであるが、図中の “TurnPoint” に示す街灯データにおいては、街灯位置推定を行うことで、単純平均やクラスタ補正を行ったものより推定誤差が大幅に増加していることがわかる。この推定誤差増加の生じる街灯データに共通する要素は、街灯が交差点または道路合流地点に設置されているということである。提案手法においては、道路脇判定によって推定を行う際、垂線を下ろせる地点に補正するため、道路中心線が Y 字に交差する地点付近において実際の街灯位置と異なる道路脇線に補正される確率が高まる。また、本稿での実験においては、1 経路を複数測定した結果を用いており、交差点に別の方向から進入したデータを収集していなかったため、データに偏りがあることから加重平均が正しく作用しなかった可能性がある。これらの要因により推定精度が低下したと考えられる。交差点の街灯データを評価の対象外とすると、推定誤差の削減率はそれぞれ、90.9 [%]、86.4 [%] となり、直進測定箇所においては道路脇判定を用いた推定により高確率で精度が向上することがわかる。

表 5 街灯照度推定手法評価結果

| データ種別  | 平均誤差率 [%] | 誤差率分散 [% <sup>2</sup> ] |
|--------|-----------|-------------------------|
| 全データ   | 31.9      | 1530.9                  |
| 想定街灯   | 18.0      | 180.4                   |
| その他の街灯 | 43.1      | 2292.2                  |

また、各街灯についてのクラスタ要素数による推定誤差の変化から、クラスタ要素数が増加することにより、多くの街灯においては、突発的な変化が抑えられ、推定誤差が減少した。しかし、いくつかの街灯においては、自動販売機や曲がり角が存在することにより、加重平均の重心がずれたため、推定誤差が増加する結果となった。

今後の課題としては、センサ測定データを解析することで、交差点における進行ルート（進入元・退出先）ごとのデータ数が偏らないようにデータを処理し、交差点における加重平均が正しく作用するよう改良すること、そして、サンプル街灯数を増加し、クラスタ補正手法と街灯位置推定手法のそれぞれが有利になる条件を検討し、街灯種類や測定状況に応じた、推定手法を選択することで位置推定精度を向上することが挙げられる。また、センサ測定データの変動の解析により、街灯種類の判別だけでなく外乱の要因となる街灯以外の光源を検出することが挙げられる。

## 5.2 街灯照度推定の評価結果および考察

街灯照度推定手法についての評価結果を表 5 に示す。街灯照度推定については、全データでは平均誤差率が約 32 [%]、誤差率分散が約 1530 [%<sup>2</sup>] となった。全データを種類別に分析すると、本稿にて想定対象とした街灯（蛍光、水銀ランプ）においては、平均誤差率が約 17 [%]、誤差率分散が約 180.7 [%<sup>2</sup>] という精度で推定が可能であるが、ばらつきが大きい結果となったことがわかる。これは、本稿において推定手法に用いた相関関係を導くサンプル数が少数であったため、想定街灯の場合においても誤差率が高いサンプルが出ていと考えられる。また、想定対象外とした街灯（LED ランプ等）は平均誤差率が約 43 [%]、誤差率分散が約 22.92 [%<sup>2</sup>] となった。これは、提案手法に用いた相関関係が想定街灯のデータのみから生成していることから、配光や指向性の異なる想定対象外の街灯には適さないため、平均誤差率およびばらつきが非常に大きい結果になったと考えられる。

今後の課題としては、照度値の高い街灯のデータを中心にサンプル街灯数を増加し、相関関係の回帰曲線を改良すること、そして、配光の異なる街灯ごとに相関関係を調査し、街灯に合った推定手法を選択することで、照度推定精度を向上することが挙げられる。

## 5.3 本研究の課題解決について

本稿においては、2 章にて述べた課題のうち、「情報整備の網羅性」における課題を解決する手法を提案した。街灯位置推定手法および街灯照度推定手法を用いることによ

り、夜道の街灯の位置および照度のデータベース化を自動化することが可能となった。つまり、スマートフォンを持つ人が収集した情報から集合知を形成することで、「情報整備の網羅性」を達成できると考えられる。

今後の課題としては、本論文にて対象外とした街灯種類における、歩行時照度モデルおよび照度相関関係を調査し、街灯種類を判定することにより、街灯に合った推定手法を適用するシステムへの改良が挙げられる。また、本論文で提案した手法で得られた、街灯位置データベースおよび街灯照度データベースを用いて、照度基準に準拠した安全性判定を行う手法を検討すること、そして、安全性情報から、歩行者を安全な道へナビゲートするシステムを考案することが挙げられる。

## 6. おわりに

本稿では、スマートフォンの照度センサによって収集した街灯照度データから、街灯照度や街灯設置位置を推定することによって、既存研究の課題点の 1 つである「情報整備の網羅性」についての解決手法を提案した。街灯位置推定については、認識精度については十分な結果が得られたが、推定手法の対応できる街灯種類を増加し、街灯種類に応じた推定を行うことによって、推定誤差を削減することが必要である。また、街灯照度推定については、街灯直下の照度値を推定するにとどまっているため、JIS 照度測定法のメッシュによる測定方法による測定結果との相関関係を得ることが必要である。そして、照度基準に照らしあわせた夜道の安全性判定手法を検討することが今後の課題である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、照度基準や照度測定法などに関して丁寧にご指導をいただきました。日本防犯設備協会防犯照明委員会の乗木俊毅様、日本防犯設備協会技術担当部長の保里康様に心から感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] 日本防犯設備協会防犯照明委員会. 防犯照明ガイド vol.4. (2010).
- [2] サイバーエリサーチ株式会社. 安全安心マップ. <http://www.ananmap.com/>.
- [3] 社団法人照明学会北海道支部. 札幌市 LED 街路灯 導入実証実験報告書. Technical report, LED 街路灯研究委員会, 2010.
- [4] 日本工業標準調査会. 照度測定方法. JIS C 7612:1985, (1985).
- [5] 日本工業標準調査会. 道路照明基準. JIS Z 9111:1988, (1988).
- [6] 日本防犯設備協会 技術部会規格調査委員会. 防犯灯の照度基準. 日本防犯設備協会技術標準 SES E 1901-3, (2012).
- [7] 松田裕貴, 新井イスマイル. スマートフォン搭載照度センサの集合知による街灯照度安全性判定システムの開発. 情報処理学会関西支部大会, (2012).