

スマートフォン搭載照度センサの集合知による 網羅的な街灯情報収集システムの開発

松田 裕貴^{1,a)} 新井 イスマイル²

受付日 2013年5月8日, 採録日 2013年10月9日

概要: 防犯意識の向上にとともに、夜道の明るさなどの「安心・安全面」に配慮した情報整備が、歩行者向けナビゲーションにおいて重要となってきた。街灯照度に基づき歩道の安全性を可視化する取り組みは、各自治体などによって実施されているが、安全性判定に必要な街灯照度測定にかかるコストや手間などから、網羅性に欠けているのが現状である。そこで本研究では、スマートフォン搭載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、情報整備における「網羅性」問題の解決を検討している。なお、スマートフォンを用いた測定には、端末の保持角度が不定、歩行中に照度が測定されるといった課題があるため、照度センサの特性に基づく街灯位置推定手法および街灯照度推定手法を提案し、検証を行った。検証の結果、街灯位置推定の再現率は、全街灯種について約 89%、一般的な生活道路の大多数に用いられている街灯種（水銀・蛍光灯）について 94.1%となった。また、街灯と推定地点の平均絶対誤差は全街灯種について約 1.97 m となった。街灯照度推定の平均誤差率は全街灯種について約 31%、事前調査の対象とした街灯種について約 17%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

Comprehensive Gathering System for Streetlamps Brightness Utilizing Collective Smartphone Light Sensor Data

YUKI MATSUDA^{1,a)} ISMAIL ARAI²

Received: May 8, 2013, Accepted: October 9, 2013

Abstract: There is a growing demand for public managing security information such as the brightness of night sidewalks in the field of pedestrian navigation systems. Such security information is collected and visualized by some municipalities, but the coverage of the survey is not sufficient due to measurement equipment costs and labor costs. Therefore, in this study, we address these cost problems by collecting the illuminance of streetlamps with the light sensors of smartphones and applying collective intelligence. However, there is a problem with the randomness of a smartphone's measurement angle because users measure illuminance while walking down a sidewalk. So, we propose an inferring method regarding each streetlamp's position and illuminance based on the properties of each light sensor, and we evaluate each method of collection. As a result of the evaluation, the recall of position estimation method was 94.1% (kinds of streetlamps which are generally installed), 89% (in all streetlamps). In addition, the average absolute error between the estimated point and streetlamp was 1.97 m (in all streetlamps). The mean error rate of illuminance estimation method was 17% (expected streetlamps), 31% (in all streetlamps).

Keywords: analysis of sensor-data, location based service, security map, illuminance of streetlamps

¹ 明石工業高等専門学校専攻科機械・電子システム工学専攻
Advanced Course of Mechanical and Electronic System Engineering, Akashi National College of Technology, Akashi, Hyogo 674-8501, Japan

² 明石工業高等専門学校電気情報工学科
Electrical and Computer Engineering, Akashi National College of Technology, Akashi, Hyogo 674-8501, Japan

^{a)} tbonfukitama110@gmail.com

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とともに、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

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の1つとして、大学や自治体、地域団体が作成した夜道の街灯情報マップがある。これは、街灯が犯罪に与える影響 [1] に着目したものであるが、安全性を判定するための街灯照度測定において、測定機材にかかるコストや、測定にかかる手間から、情報の整備を自動化できていないため、広範囲な情報整備が困難であるのが現状である。なお、各自治体の管理する街灯のほか私設の街灯が多く存在し、またそれらの管理がなされていないことや、街灯の経年劣化を考慮しなければならないことから、巡回により街灯照度を調査する必要があると考えられる。つまり、街灯照度情報を自動的かつ網羅的に整備するシステムの開発が、解決すべき重要な課題であると考えられる。

街灯の安全性判定方法には、日本防犯設備協会の定める照度基準 [2] が知られている。この基準は、日本工業規格の定める道路照明基準 [3] に準拠し、また測定方法についても日本工業規格の定める照度測定法 [4]（以下 JIS 照度測定法）に従っていることから、信頼性の高い指標であるといえる。また、この基準を上回る信頼性を持つ基準を独自に得る見込みはたっていないことから、本研究の安全性判定基準として日本防犯設備協会の定める照度基準を採用することとした。この判定においては、JIS 照度測定法に従うことから、図 1 に示すように街灯間をメッシュ分割、測定した照度値が必要となる。この測定法によって得られる街灯の照度値分布は、街灯種ごとにモデル化できると考えられるため、街灯種を判定し、センサにより測定したデータをモデルに適用することで、各メッシュの照度値を近似することが可能であると考えた。安全性判定には、各メッシュの照度値の平均照度や最小照度が必要となるた

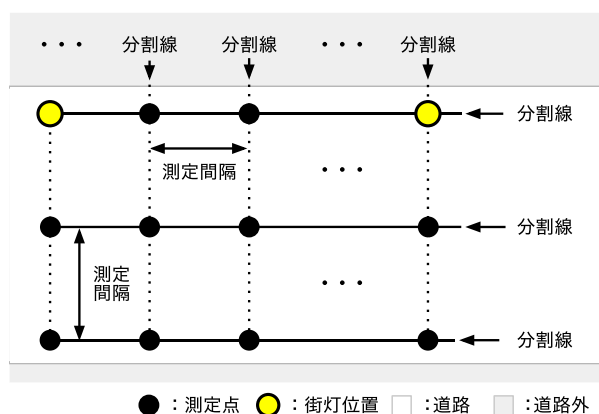


図 1 JIS 照度測定法

Fig. 1 The illuminance measurement method of JIS.

め、隣接する街灯までの距離が判定に影響するパラメータであると考えられる。そのため、照度値に加えて街灯間隔のデータを取得することが重要となってくる。

そこで本稿では、スマートフォン搭載照度センサ、および加速度センサなどにより収集した街灯データから、集合知を形成することで街灯照度や街灯位置を推定する手法を提案し、網羅的な街灯ネットワークを構築することを目的とする。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などの課題があるため、照度シミュレーションを用いた測定データの補正手法について提案する。

提案手法の有効性を検証した結果、街灯位置推定手法における再現率は、一般的な生活道路の大多数に用いられており、本研究の事前調査の対象とした街灯（蛍光・水銀ランプ）については 94.1%、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 章で、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、評価手法については 4 章で述べ、各評価結果について 5 章で考察する。最後に 6 章でまとめる。

2. 既存の安心・安全情報提供手法とその課題

本章では、従来の安心・安全情報を提供する 2 つの研究の概要および問題点をまとめ、本研究で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 [5] があげられる。このシステムでは、各県警の安全情報メールマガジンで配布されている情報をもとに、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。

日本防犯設備協会の報告 [1] によると、街灯照度と犯罪

表 1 防犯灯の照度基準

Table 1 The illumination standards for security lights.

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

発生の関係については、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、結果的に犯罪抑止につながる実例により明らかとなっている。小林らは、街灯照度情報を地図にマッピングする研究 [6] を行っており、この夜道の安全性を判定する手法は、JIS 照度測定法 [4] 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。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ことから、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。また、各自治体が管理する街灯情報を収集する手法が考えられるものの、私設の街灯が多く存在することや、街灯の経年劣化を考慮しなければならないことから、巡回により街灯照度を調査する必要があると考えられる。

以上をふまえると、既存研究における大局的な課題は次に示す 2 項目であると考えられる。

情報整備の網羅性

ユーザに提供する安心・安全情報を網羅的に整備するためのシステムを構築すること

提供情報の明快度

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直感的に判断しうること

なお、本研究の安全性判定には、日本工業規格の定める道路照明基準 [3] に基づき日本防犯設備協会が定める照度基準 [2] を用いる。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 (0m) 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 1.5m 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、4m 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

本稿では、2 章で述べた課題のうち「情報整備の網羅性」の課題を解決する手法を提案する。なお、「明快度」の高い安心・安全情報の提供については、今後の課題とするが、網羅的に得られた情報をもとに照度値および街灯種を推定、照度基準を適用することにより、機械的な情報提供が可能であると考えられる。

前述のとおり、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ことから、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。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た夜道の安全性判定を行うためには、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。なお、「隣接する街灯との距離」については、各街灯の位置、つまり緯度経度を推定することで導出可能である。そこで、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、特性調査結果をもとにセンサ測定データの測定状況による偏りを補正し、集合知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 節で提案する。なお本研究では、現在の一般的な生活道路に用いられている街灯の大多数が蛍光・水銀ランプとなっていることから、この 2 種類の街灯を対象に基礎調査を実施し、街灯位置・照度推定手法について提案する。

3.1 照度センサの主な特性

照度とは単位面積あ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「距離の逆 2 乗特性」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の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。

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。著者らは、過去にスマートフォン搭載照度センサについての特性調査を実施し、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っている [7]。なお、特性調査においては、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), データログ照度計 (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 183,000 [1] lx) を用いた。以降に各特性調査およびシミュレーションの概要について述べ、結果を示す。

■ 死角付き余弦特性

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異なり、受光面が平面状となっており、端末内部に設置されている場合が多い。そのため、一般的には余弦に比例する特性となるが、スマートフォン搭載照度センサ

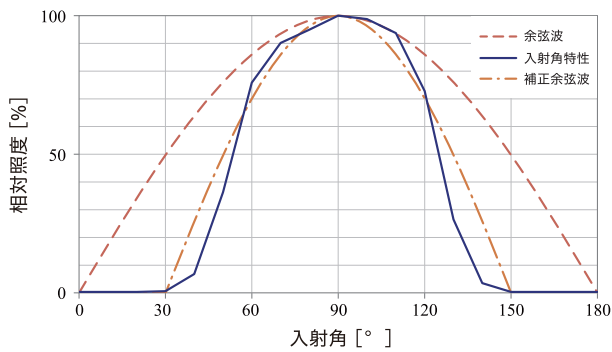


図 2 死角付き余弦特性

Fig. 2 The cosine characteristics with the blind spot.

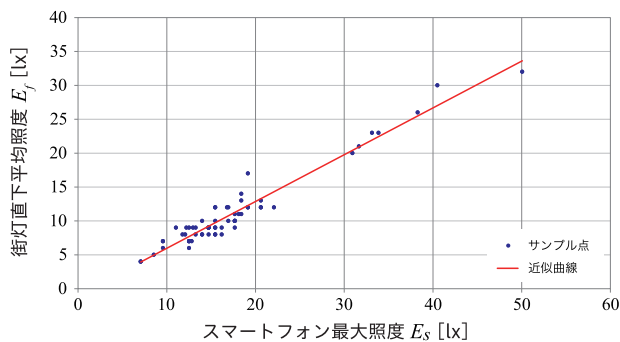


図 3 照度値相関関係

Fig. 3 The output correlation between illuminometers and light sensors of smartphones.

では、特有の特性を示すと考えられる。そこで、スマートフォン搭載照度センサのピッチ方向の余弦特性を調査するために、小型スポットライトを用い 10° ごとの照度値を測定した。測定の結果、図 2 に示すように、入射角 $30^\circ \sim 150^\circ$ 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ない死角が存在することが分かった。なお、この死角は端末機種固有のものである。

■ 照度計値との関連性

一般に、照度計とスマートフォン搭載照度センサによって得られる照度値には差が存在する。そこで、スマートフォン搭載照度センサおよび照度計で同時測定したデータをもとに、スマートフォン搭載照度センサによる測定データと照度計による測定値の相関性について解析を行った。解析の結果、図 3 に示すような照度値の関係が得られた（標本数は 62）。なお、街灯直下平均照度 E_f は地上約 1.5 m での照度値であり、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分かった。

■ 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

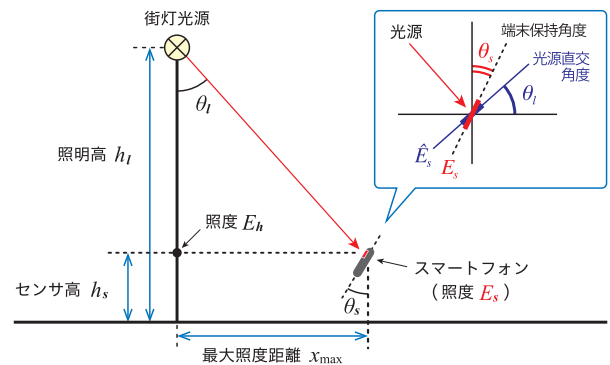


図 4 街灯直下地点の推定

Fig. 4 The positional relationship of a smartphone and a streetlamp.

く、街灯直下よりも進行方向奥の地点となると推測される。図 4 は、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である。スマートフォン搭載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。なお、式 (1) の導出については付録 A.1 で詳述する。各文字は、街灯との角度 θ_l (変数)、端末の角度 θ_s 、照明高 h_l 、センサ高 h_s 、高さ h_s での街灯直下照度 E_h 、スマートフォン最大照度 E_s とする。

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

なお、余弦特性で死角となる角度 α_θ 、および死角を補正するための係数 α_{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るため、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。各定数の詳細については付録 A.1 を参照されたい。

また θ_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て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 は負の値をとらないこととする。なお、最大照度を得た時点での θ_l は端末角度 θ_s に依存するため、最大照度距離 x_{max} は、 θ_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、横軸を街灯直下からの距離 m 、縦軸を相対照度 $E_s/E_h\%$ にとると、各 θ_s に対する照度値のシミュレーションは図 5 に示すようになる。ただし、図 5 における相対照度とは、端末を水平に保持し街灯直下で照度測定した際に得られる照度値を 100% としたものである。

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

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を行う際に最も影響を及ぼす要因となりうる。そのため、

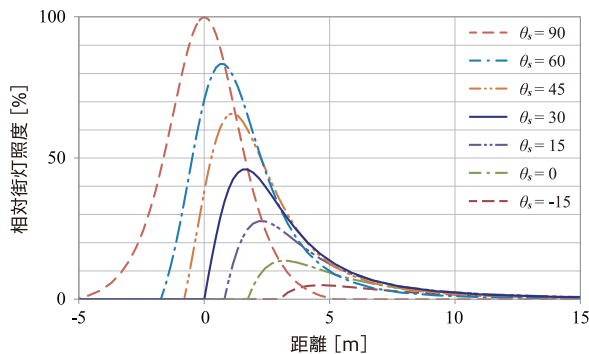


図 5 センサ測定データのシミュレーション (歩行時照度モデル)

Fig. 5 The simulation result of sensor data measured by the smartphone light sensor (A model of illumination while walking).

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。

なお、日本防犯設備協会の基準において、鉛直面照度の最小値が判定に必要であることに着目すると、街灯直下から最も離れた位置、つまり隣接する街灯直下の直前での照度値を正しく推定することが求められる。また、事前調査により以下の 2 点が明らかとなっている。

- 想定街灯の場合、街灯間隔は約 19 ± 3 m となる。
- 隣接する街灯の直前の鉛直面照度は、1 m のずれによって、最大鉛直面照度の約 2% 程度の誤差が生じる (5 lx の場合 0.1 lx の誤差が生じる)。

なお、JIS 照度基準におけるクラス B の鉛直面照度基準が「0.5 lx 以上」であることから、照度推定の誤差は、その最も低い桁の最小単位である 0.1 lx 以下のオーダーに抑えなければならない。つまり、一般的な街灯においては最大鉛直面照度は 5 lx 以上となることから、位置推定の誤差は 1 m 程度以内に収めなければならないと考えられる。

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、次項に述べる。

- (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 6 に示す。センサ測定データは、街灯直下付近では図 5 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、図 7 に示すように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

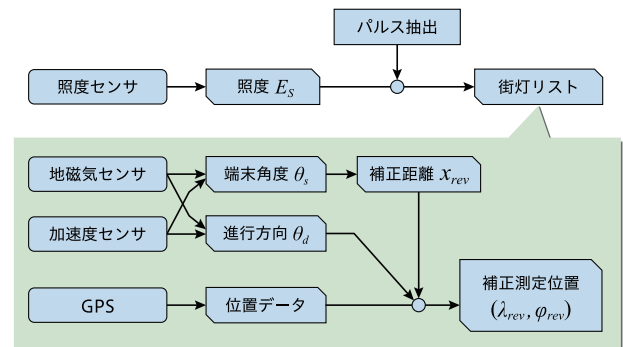


図 6 測定位置補正手法処理フロー

Fig. 6 The processing flow of the correction method of measurement position.

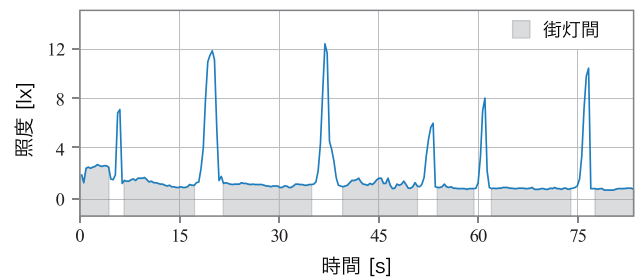


図 7 スマートフォン搭載照度センサによる照度測定値例

Fig. 7 An example of illuminance data of smartphones' light sensors.

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 θ_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}) の関係を得ることができる。この補正距離 d_{rev} 、進行方向 θ_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) (ヒュペニの公式^{*1}の変形) により導く。 μ_{lat} については、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。なお、この補正手法はピッチ方向の回転角 (θ_s) に対しての補正を行うものであるため、ロール、ヨー方向に関しては補正を適用していない。ロール、ヨー方向の補正を行うためには計算において道幅を考慮する必要があるが、計算が複雑化するため、ロール、ヨーが水平状態から大きく逸脱している測定値を除外することで対応することとする。

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

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

3.2.2 集合知による街灯位置推定手法

前項の街灯位置推定手法では、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

^{*1} 2 点間の距離を緯度経度データから導く公式。

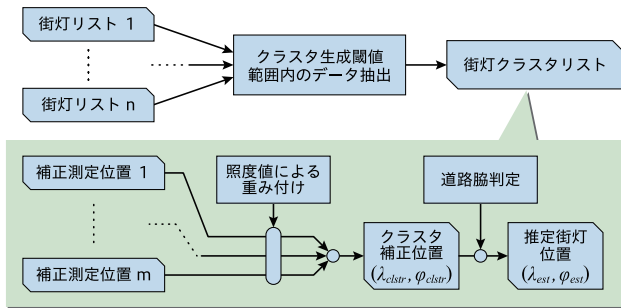


図 8 集合知による街灯位置推定手法処理フロー

Fig. 8 The processing flow of the inferring method of the streetlamp's position using collective intelligence.

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。事前調査において、街灯近傍を通過した際に測定されたデータは照度値が高くなる傾向にある、ということが明らかとなっている。このことから、より高い照度値が観測されたデータほど、より街灯に近い地点で測定されたものであると推測することができるため、照度による加重平均を用いることで、複数の街灯データから作成したクラスター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 8、各手順を以下に示す。

- 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

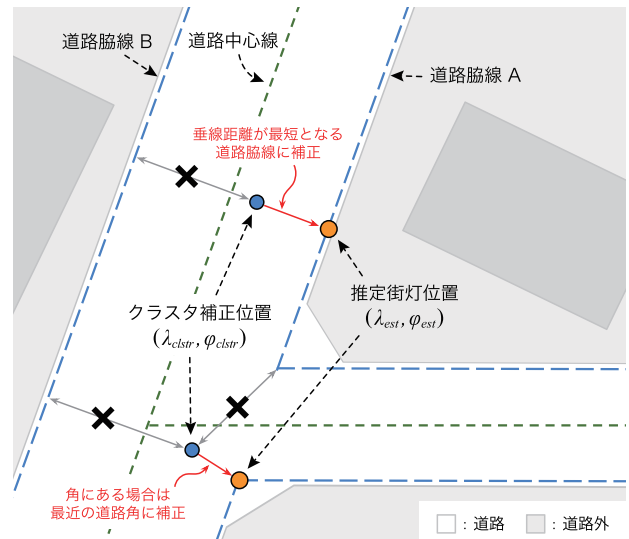


図 9 道路脇判定による街灯位置推定

Fig. 9 The overview of the inferring streetlamp's position by judging which side of the road when a measurer is walking.

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 9 に示し、アルゴリズムについて以下に示す。

- (1) 道路中心線、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 (λ_h, ϕ_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 (λ_h, ϕ_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、街灯照度を推定する必要がある。しかし、スマートフォンを用いたシステムでは、複数ユーザが自由な姿勢で複数回の測定を行うため、端末保持角度や通過経路など、測定を行うたびに測定状況は異なり、照度値にも差が生じると考えられる。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 10、手順を以下に示す。各手法の詳細については、次項に述べる。

- (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。

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

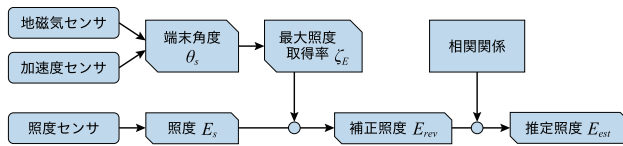


図 10 街灯照度推定手法処理フロー

Fig. 10 The processing flow of the inferring method of the streetlamp's illuminance.

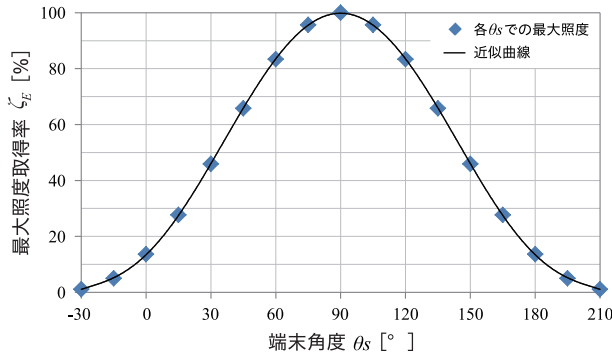
図 11 端末角度 θ_s に対する最大照度取得率

Fig. 11 Maximum illuminance measurement ratio of each smartphone's angle.

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 θ_s で取得可能な最大照度の割合（最大照度取得率 ζ_E ）は、式 (1) から得られる図 5 に示す歩行時照度モデルの各 θ_s での最大点をプロットした図 11 によって求めることができる。なお、 ζ_E は街灯直下でスマートフォン搭載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 ζ_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

スマートフォン搭載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 3）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 節で述べ、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

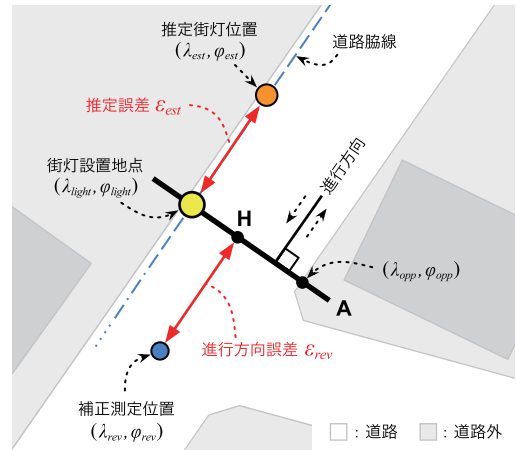


図 12 街灯位置推定評価方法

Fig. 12 An overview of the evaluation for the estimation method of the streetlamp's position.

4.2, 4.3 節で述べる。

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 ランプなど）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 節で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。

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 θ_d へ補正するため、1 次元的な補正であるといえる。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 12 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 (λ_h, ϕ_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 ε_{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いえる。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 ($\lambda_{\text{est}}, \phi_{\text{est}}$) と街灯設置地点 ($\lambda_{\text{light}}, \phi_{\text{light}}$) との距離 (推定誤差 ε_{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 項前半で提案したクラスタ補正手法と3.2.2 項後半で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)、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手法で算出し、これらと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) と、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 δ_{est} を式 (9) より求める。この誤差率 δ_{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。

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

5. 評価結果および考察

本章では、4章で述べた街灯位置推定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89%、適合率は約78%となった。また、提案手法の基本性能を評価するために、3章で述べた理由から本研究の想定街灯とした蛍光・水銀ランプ街灯に着目すると、位置推定の評価結果は、再現率が94.1%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

表2 街灯認識精度評価結果

Table 2 The evaluation result for the accuracy of the street-lamp recognition.

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

表3 測定位置補正手法評価結果

Table 3 The evaluation result for the correction method of measurement position.

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	補正前 3.51
誤差平均 m	補正後 3.17

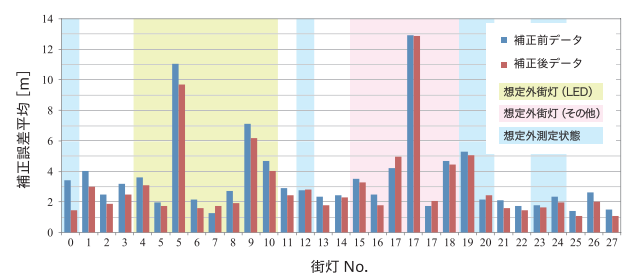


図13 測定位置補正手法評価結果一覧

Fig. 13 The evaluation result of the correction method of measurement position.

の街灯クラスタが推定されていると考えられる。

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, 3.17mとなった。

また、図13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には、大きなばらつきが生じていることが分かる。このばらつきの要因としては、本稿で想定している蛍光、水銀ランプ街灯以外の街灯 (LED ランプ) において配光や指向性が異なることや、想定外の測定状況 (曲がり角・街灯が低い) などが考えられる。なお、想定外街灯 (LED ランプ、その他車道灯など) および測定外の測定状況データについては図13で背景を色付けすることにより示した。

今後の課題は、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

表 4 街灯位置推定手法評価結果

Table 4 The evaluation result of inferring method of the streetlamp's position.

	平均絶対 推定誤差 m	対単純平均手法	
		推定誤差 削減率%	平均削減 距離 m
単純平均手法	2.68	-	-
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

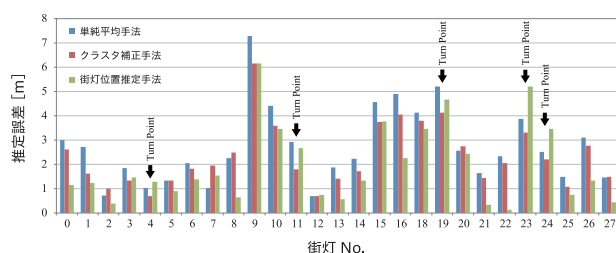


図 14 街灯位置推定手法評価結果一覧

Fig. 14 The evaluation result of inferring method of the streetlamp's position.

る手法について検討することがあげられる。

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%、さらに道路脇判定を加え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。

ここで、3.2 節で述べた、位置推定の誤差が照度値に与える影響について考察すると、最大鉛直面照度が 5 lx 取得された場合、補正前の誤差 3.51 m、および街灯位置推定手法によって推定した場合の誤差 1.97 m は、それぞれ、鉛直面照度の最小値に、約 0.351, 0.197 lx の誤差として影響するといえる。このことから、街灯位置推定手法を用いることにより、位置推定の誤差を抑え、照度値に与える影響を低減させることができていると考えられる。なお、街灯位置推定手法を用いた場合においても、誤差 0.1 lx 以下のオーダを達成できていないことから、今後、さらなる位置補正の手法を検討する必要がある。

図 14 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分かる。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、道路脇判定の性質上、道路中心線が Y 字に交差する地点

表 5 街灯照度推定手法評価結果

Table 5 The evaluation result of the inferring method of the streetlamp's illuminance.

データ種別	平均誤差率%	誤差率分散 ²
全データ	31.9	1,530.9
想定街灯	18.0	180.4
想定外街灯	43.1	2,292.2

付近で、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こと、また、交差点への進入方向の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。これらが推定精度を低下させる要因であると考えられる。なお、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単純平均手法に対し 90.9%、クラスタ補正手法に対し 86.4% となるため、直線道路の街灯に対しては道路脇判定を用いた推定によって高確率で精度が向上することが分かる。

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させることがあげられる。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あげられる。

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 1,530%² となった。全データを種類別に分析すると、本稿で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%² 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分かる。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たと考えられる。また、想定対象外とした街灯（LED ランプなど）は平均誤差率が約 43%、誤差率分散が約 2,292.2%² 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させ、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させることがあげられる。

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、本稿で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あげられる。また、本稿では Galaxy Nexus 1 機種のみで基礎実験、検証を行ったため、スマートフォン搭載照度センサの機種依存性については検討できていない。この点に関しては、今後の調査により、死角付き余弦特性の α_θ , α_{ratio} をはじめとする機種依存のパラメータを明らかにすることが課題としてあげられる。そして、本稿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により得られる安全性情報から、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課題としてあげられる。

6. おわりに

本稿では、スマートフォン搭載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、照度センサの機種依存性について解析したうえで、街灯種類に応じた推定を行い、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、そして、照度基準に照らし合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, 入手先 (<http://www.ssaj.or.jp/>) (2010).
- [2] 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).
- [3] 日本工業標準調査会：道路照明基準, JIS Z 9111 (1988).
- [4] 日本工業標準調査会：照度測定方法, JIS C 7612 (1985).
- [5] サイバーエリアリサーチ株式会社：安全安心マップ, 入手先 (<http://www.ananmap.com/>) (2012).
- [6] 小林和幸, 櫻田峻一, 三浦昌生：街灯の設置状況に問題を抱える地区における水平面照度および街灯直下照度の実測, 街灯設置間隔が広い戸建住宅地における夜間照度改善へ向けた住民主体の改善計画の立案その1, 日本建築学会大会, pp.1191–1192 (2008).
- [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).

付 録

A.1 歩行時照度モデルの導出過程

街灯とスマートフォン搭載照度センサの位置関係の詳細図を図 A.1 に示す。まず、どの方向にも均等な光度を持つ拡散性点光源と想定したうえで計算すると、照度の持つ距離の逆2乗特性から、測定者が端末受光面を光源に対して直角に保持した場合の照度 $\hat{E}_s$ は式 (A.1) で表すことができる。

$$\hat{E}_s = E_h \cdot \cos^2 \theta_l \quad (\text{A.1})$$

ここで、測定者が端末受光面を角度 θ_s で保持する場合では、点光源から垂直に照度を得る面に対して式 (A.2) に示すように θ_x だけ受光面が傾く ($\theta_{l+s} = \theta_l + \theta_s$ とおく)。

$$\theta_x = |90 - (\theta_l + \theta_s)| = |90 - \theta_{l+s}| \quad (\text{A.2})$$

しかし、スマートフォン搭載照度センサの余弦特性には死角が存在するため、前述の余弦特性の死角 α_θ を考慮した $\hat{\theta}_{l+s}$ は式 (A.3) に示される。

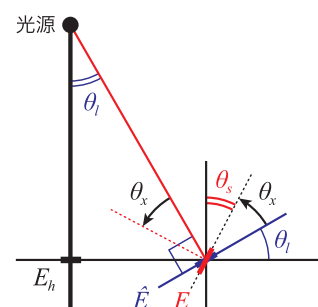


図 A.1 街灯・スマートフォン搭載照度センサの位置関係
Fig. A.1 The detailed positional relationship of a smartphone and a streetlamp.

$$\hat{\theta}_{l+s} = \begin{cases} 0 & (\theta_{l+s} \leq \alpha_\theta) \\ \theta_l + \theta_s - \alpha_\theta & (\theta_{l+s} > \alpha_\theta) \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

なお $\hat{\theta}_{l+s}$ のとりうる範囲は $0^\circ \leq \hat{\theta}_{l+s} \leq 60^\circ$ であり、また、この範囲で前述の死角付き余弦特性をとるため、角度補正係数 $\alpha_{\text{ratio}} = 3/2$ を乗じることにより、 $0^\circ \leq \alpha_{\text{ratio}} \cdot \hat{\theta}_{l+s} \leq 90^\circ$ に補正する。ただし、 α_{ratio} は式 (A.4) で与えられる。

$$\alpha_{\text{ratio}} = \frac{90}{90 - \alpha_\theta} \quad (\text{A.4})$$

以上で得られた値より、角度 θ_s で保持する場合の照度 $\bar{E}_s$ は式 (A.5) のように示される。

$$\begin{aligned} \bar{E}_s &= \hat{E}_s \cdot \cos |90 - \alpha_{\text{ratio}} \cdot (\theta_l + \theta_s - \alpha_\theta)| \\ &= \hat{E}_s \cdot \sin (\alpha_{\text{ratio}} \cdot (\theta_l + \theta_s - \alpha_\theta)) \\ &= E_h \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin (\alpha_{\text{ratio}} \cdot (\theta_l + \theta_s - \alpha_\theta)) \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

実際の光源は上記の均等な光度を持つ拡散性点光源ではないため、配光特性は、角度 0° 方向に比べ、 θ 方向の光度は余弦に比例して減衰する。この減衰を加味すると、実際にスマートフォンで測定される照度 E_s は式 (A.6) で示される。

$$\begin{aligned} E_s &= \bar{E}_s \cdot \cos \theta_l \\ &= E_h \cdot \cos^3 \theta_l \cdot \sin (\alpha_{\text{ratio}} \cdot (\theta_l + \theta_s - \alpha_\theta)) \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$



松田 裕貴 (学生会員)

1993 年生。2013 年明石工業高等専門学校電気情報工学科卒業。同年同校専攻科機械・電子システム工学専攻入学。



新井 イスマイル (正会員)

1980 年生。2002 年明石工業高等専門学校専攻科機械・電子システム工学専攻修了。2008 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。同年立命館大学総合理工学研究機構ポストドクトラルフェロー。2011 年明石工業高

等専門学校電気情報工学科助教。2013 年同校講師、現在に至る。博士 (工学)。コンテキストウェアサービス、センサフュージョン等ユビキタスコンピューティングの研究開発に従事。ACM, IEEE 各会員。