

スマートフォン搭載照度センサの個体差に対応した 夜道における街灯照度推定値校正手法の提案

松田 裕貴^{1,a)} 新井 イスマイル² 荒川 豊¹ 安本 慶一¹

受付日 2015年5月14日, 採録日 2015年11月5日

概要: 防犯意識の向上にともない, 歩行者向けナビゲーションにおいても夜道の明るさなどの「安心・安全面」の情報整備が重要となることから, 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を収集, 集合知を形成することによる, 夜道の安全判定手法を検討している. 本稿では, 事前調査を実施し異機種端末間だけでなく同機種端末間においても照度センサ特性に差異があることを明らかにした. そこで, 街灯周辺を歩行した際の照度測定値の波形形状を比較, 波形のフィッティングを行うことで, センサ特性が既知であるデバイスを校正基準とした相対的な照度測定値校正手法を提案する. 実験フィールドにおける複数の被験者による実証実験の結果, 照度測定値校正手法では約 90%の街灯において街灯種によらずセンサ特性の差異が削減され, また, 街灯照度推定では高照度・広照射範囲を有する街灯における照度推定精度が向上した.

キーワード: 位置情報サービス, モバイルアプリケーション, センサデータ解析, 安心・安全マップ, 街灯照度

A Correction Method for Individual Differences among Smartphones' Light Sensor to Measure Streetlamps' Illuminance for Sidewalks at Night

YUKI MATSUDA^{1,a)} ISMAIL ARAI² YUTAKA ARAKAWA¹ KEIICHI YASUMOTO¹

Received: May 14, 2015, Accepted: November 5, 2015

Abstract: In pedestrian management systems, there is a growing demand for public managing security information, such as the brightness of night sidewalks. We are investigating methods of inferring the safety of sidewalks at night based on the illuminance data of streetlamps collected using the light sensors of smartphones. In this paper, we found differences of characteristics of illuminance sensor between same model-type devices by preliminary survey. From these results, we propose a relative correction method of measuring the illuminance of streetlamps by comparing new data with measurements from devices with well-known specifications. The proposed method compares the shapes of illuminance transitions from walking under the streetlamps. Results show that our method reduced the effects of differences of light sensor characteristics for 90% of streetlamps in a study area, regardless of type. Furthermore, our method improved inference accuracy for streetlamps that have high illuminance and wide dispersion.

Keywords: location based services, mobile applications, analysis of sensor-data, security map, illuminance of streetlamps

¹ 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nara Institute of
Science and Technology, Ikoma, Nara 630-0192, Japan

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

^{a)} matsuda.yuki.mr3@is.naist.jp

1. はじめに

GPS や加速度センサをはじめ多数のセンサを搭載したスマートフォンの普及が進んでいる. また, 近年の防犯意識の向上は著しく, 子ども見守りや災害対策アプリケーションなど, 安心・安全面の情報と位置情報を組み合わせ

たスマートフォンアプリケーションの需要は増大しているといえる。歩行者ナビゲーションにおいて、従来の経路決定の大きな指標は目的地への到達速度を重視した情報であるが、今後は、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・安全面の情報を考慮することが求められる。

安心・安全面の情報を整備する試みとしては、各自治体や県警、民間企業が独自に作成している、犯罪発生情報を地図上にマッピングした Web サービス [1] があげられる。これらは、ユーザが各事案を把握し、安全なエリアを見極めることが必要であるため、ユーザ側にかかる負担が大きいという点が課題となっている。夜道の明るさを可視化した地図を作成している大学や自治体、地域団体が点在しているものの [2]、測定機材やそれにとまなうコンピュータ機器など、大がかりな装置が必要であることなどから、網羅的な情報を提供できていないのが現状である。以上から、安心・安全面の情報を整備するシステムの課題としては、情報の明快さと情報の網羅性の 2 点があげられる。

そこで本研究では、街灯が犯罪に与える影響 [3] に着目し、スマートフォン搭載照度センサによって収集した街灯の照度データから、街灯間の照度や街灯設置間隔などを推定し、安全性判定を行う手法を検討している。前述の網羅的な情報整備を実現するために、筆者らは複数台のスマートフォン搭載照度センサから得られた測定値の集合知により、網羅的な街灯設置状況を推定する手法 [4], [5] や、照度センサ特性が既知である特定の端末を用いた、街灯照度推定手法および夜道の安全性判定手法 [6] について提案している。しかし、本研究は各地に点在する一般ユーザのスマートフォン搭載照度センサにより街灯照度情報を収集することを前提としているため、これら照度センサの個体差は、解決すべき課題といえる。

本稿では、まず照度センサの入射角度特性および照度追従特性について調査を行い、異機種間だけでなく同一機種間においても特性に大きなばらつき（照度入射角特性：最大 15%、照度追従特性：最大 50%）があることを確認した。そこで、街灯周辺を歩行した際の照度測定値の分布波形形状を比較し、照度特性が既知であるユーザを基準とした分布波形のフィッティング処理を施すことにより、端末間の測定値を相対的に校正する手法について提案する。検証の結果、提案手法を適用することにより、約 90% の対象街灯において、街灯種によらず端末間のセンサ特性の差異が削減され、特に、分布波形のフィッティングでは類似性が約 29% 向上した。また、校正した照度データを用いた街灯照度推定では、高照度・広照射範囲を有するインバータ式蛍光灯や LED 灯において推定精度の向上が見られ、全街灯種での平均照度推定誤差は約 0.55 lx、提案手法適用前と比較して約 80% の誤差削減を実現した。

2. 既存研究

安心・安全面に関する情報を提供する手法として、県警が発表する犯罪発生状況データなどを用いたシステムである安全安心 map [1] があげられる。このシステムは、県警の安全情報メールマガジンで配信されている情報から、犯罪発生状況を抽出し、地図上にマッピングするものである。しかし、配信される情報は書式が標準化されておらず、機械処理が困難であるため、データを人手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。

次に、高野らが行っている街灯の照度情報を地図にマッピングする研究 [2] があげられる。日本防犯設備協会の報告 [3] によると、街灯の照度と犯罪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、結果的に犯罪抑止へつながることが実例により明らかとなっている。生活道路などにおいては、街灯（防犯灯）の設置基準を定めている自治体も存在するが、努力基準化している場合も多く、設置基準に基づく夜道の定量的な安全性判定は困難である。高野らは、この夜道の安全性を判定する手法として、JIS 照度測定法 [7] に基づいた測定を行い、各街灯の照度が、表 1 に示す照度基準を満たしているかどうかによる安全性判定法を提案している。しかし、この手法は測定者の労力や機材費用といったコストが高いこと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を導くまでには至っていない。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、巡回により街灯の照度を調査する必要があると考えられる。

以上から、安心・安全面の情報を整備するシステムの課題としては、情報の明快さと情報の網羅性の 2 点があげられる。

これらの課題を解決する 1 つの手法として Participatory Sensing に代表されるユーザ参加型の環境センシングがあ

表 1 防犯灯の照度基準

Table 1 The illumination standard for security lights.

| クラス | 平均水平面照度*1 lx | 最小鉛直面照度*2 lx | 照明効果 |
|-----|--------------|--------------|------------|
| A | 5 以上 | 1 以上 | 顔の概要を識別可能 |
| B | 3 以上 | 0.5 以上 | 拳動・姿勢を認識可能 |

*1 歩道の路面上 (0m) の平均照度

*2 歩道の中心線上で、路面より 1.5m の高さ、道路軸に対して直角な鉛直面の最小照度

る。青木ら [8] は、複数のスマートフォンのマイクを用い周囲の雑音データを収集、解析することで、車通りなどといった環境音の発生源をマッピングした環境地図を作成している。その中で、ユーザの足音や服の擦れる音など固有の雑音がデータに混入するという問題点があるため、異なるユーザ間のデータどうしを比較し校正する手法を提案している。また、Participatory Sensing を活用した既存のシステムとして、OpenSignal^{*3}があげられる。このシステムは、一般ユーザがスマートフォンアプリケーションを用い、自身のいる地点の電波状況をクラウド上にアップロード、解析を行うことにより世界規模の電波状況を共有することができる。

以上から、一般に広く普及しているスマートフォンを用いたユーザ参加型センシングによって、網羅的に情報収集することが可能となり、本研究の課題である「情報の網羅性」を解決することができる。また、収集した照度測定値を表 1 の照度基準に照らし合わせることで夜道の安全性を定量的に評価できることから、「情報の明快さ」についても解決できる。

しかし、スマートフォン搭載センサを用いる場合には、センサ単体の精度が低いことやセンサ特性差、測定条件の差異などにより、街灯照度推定精度が低下することが想定されるため、「情報の明快さ」に影響を与えられられる。そこで、収集した情報から集合知を形成、処理を行うことにより、補う必要が生じると考えられる。

本稿で提案する照度測定値校正手法は、センサ特性差を校正することで、夜道の安全性の定量的評価の精度向上、ひいては「情報の明快さ」向上に寄与するものである。

3. 照度特性の事前調査および照度測定値校正手法の提案

3.1 照度特性の事前調査

照度は一般的に距離や角度に影響を受けやすいことが知られている。計測機器として販売されている照度計が半球状の受光面となっているのに対し、スマートフォン搭載照度センサは端末内部に設置されているため平面状の受光面となっている場合が多い。このことから、スマートフォン搭載照度センサは照度計とは異なる特性を有すると考えられる。そこで、光の入射角を変化させた場合における「照度入射角特性」、および光源の照度を変化させた場合における「照度追従特性」について、事前調査を実施した。

これまでの取組み [4], [5], [6] では、Galaxy Nexus (メーカー：サムスン電子、型番：GT-I9250) を利用しており、同機種間の特性差は同一であると仮定したうえで各手法を提案してきた。しかし、この仮定がどの機種においても成立するかどうかの検証は実施していなかったため、本

節では、4 台の同機種端末で実験を行い、端末間の特性差を調査することとした。なお、本研究では照度計 (型番：LX-1108, メーカー：佐藤商事, 測定範囲 [分解能] : 0~40.00 [0.01] lx, 36.0~400.0 [0.1] lx) および、複数台同一機種を持ち合わせていたタブレット端末 (型番：Nexus 7 ME571-16G, メーカー：サムスン電子, 測定範囲 [分解能] : 0~約 32000 [0.01] lx) を用いた。本実験は、端末の表面はクリーナーで皮脂などを除去、また画面保護フィルムなどの被覆物がない状態とし、統一の実験環境下において実施した。

図 1 に照度入射角特性の調査結果を示す。照度入射角特性については、照度の基本特性である余弦特性と比較して角度に対する減衰が激しく、余弦の 5 乗に近い特性を示すことが分かる。しかし、90° 付近に着目すると減衰の仕方には差異があり、最大で約 15% 以上の誤差が生じる。次に、図 2 に照度追従特性の調査結果を示す。なお、照度追従特性調査においては、光源からの入射角を 90° としてい

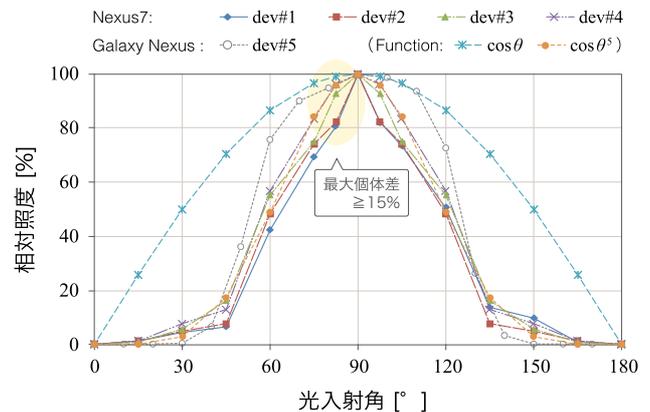


図 1 同一機種 4 台 (Nexus 7) および Galaxy Nexus における照度入射角特性

Fig. 1 The incidence angle characteristics of the illuminance of Nexus 7, Galaxy Nexus.

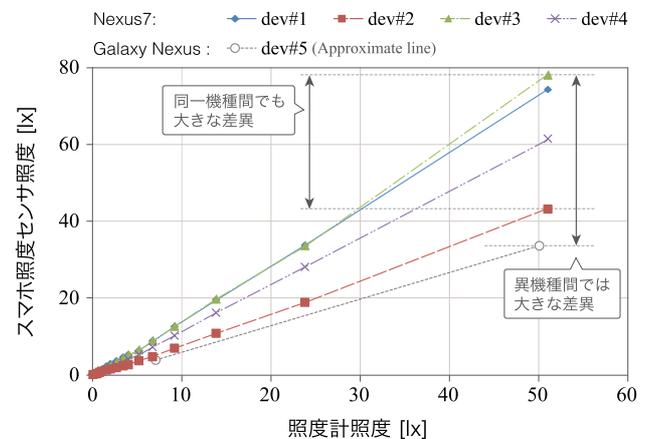


図 2 同一機種 4 台 (Nexus 7) および Galaxy Nexus における照度追従特性

Fig. 2 A correlation chart of illuminance (illuminometer vs Nexus 7, Galaxy Nexus).

*3 <http://opensignal.com/>

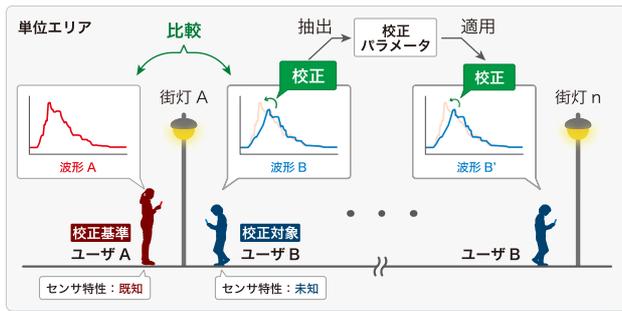


図 3 照度測定値校正手法のコンセプト (単位エリア内)

Fig. 3 The concept of the relative correction method of measured streetlamp's illuminance at a unit area.

る。いずれの端末においても、照度計による測定値に比例する特性を示すものの、係数が大きく異なる値となっており、最大で 50% の誤差が生じる。

以上のことから、同一機種種の端末間においても照度入射角特性および照度追従特性には差異が存在するため、同一の補正処理を適用できない。本研究では、不特定多数のユーザの持つ様々な機種種での測定を想定しているため、これらの照度センサ特性パラメータを校正したうえで、同一の補正処理を適用することが必須である。

3.2 照度測定値校正手法のコンセプト

端末間の特性の個体差を校正する方法として、これまでの取組みでは各機種種の特性調査の結果を基にした機種単位での校正を検討していたが、事前調査の結果から、機種単位の校正では不十分である。これに対し、すべての端末について特性調査を行うことは、本研究の課題である網羅的な測定という観点から現実的ではない。

そこで、本研究では相対的に照度測定値を校正することとする。以下に手順を示す。

- (1) 図 3 に示すように、ある単位エリア内で、任意の街灯 (図中街灯 A) における照度分布を、照度センサ特性が既知である校正基準ユーザ (図中ユーザ A) と、その他の校正対象ユーザ (図中ユーザ B) が測定した場合、それらと比較することにより、波形の校正を行う。
- (2) 手順 (1) の校正を行った際、ユーザ A-B 間の校正パラメータを抽出する (3.3, 3.4 節で詳述)。このパラメータを用いて、同一エリア内に存在する他の街灯の照度測定データに対しても同様の校正を行う (誤差伝播への対応については 3.6 節で詳述)。
- (3) 図 4 に示すように、校正パラメータを抽出済みのユーザがエリア外に出た場合、新たに他のユーザの照度測定データを比較し校正、パラメータを抽出する。
- (4) 手順 (1)~(3) を繰り返すことで、網羅的かつ相対的な校正履歴ツリーを形成する (校正履歴ツリーに関する詳細については、3.6 節で述べることとする)。

照度センサ特性が既知である端末によって測定された照

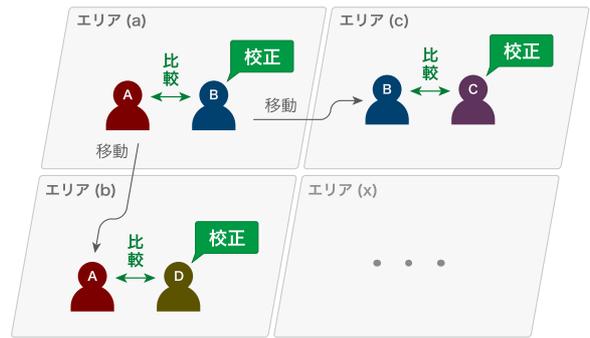


図 4 照度測定値校正手法のコンセプト (全体)

Fig. 4 The concept of the relative correction method of measured streetlamp's illuminance at all areas.

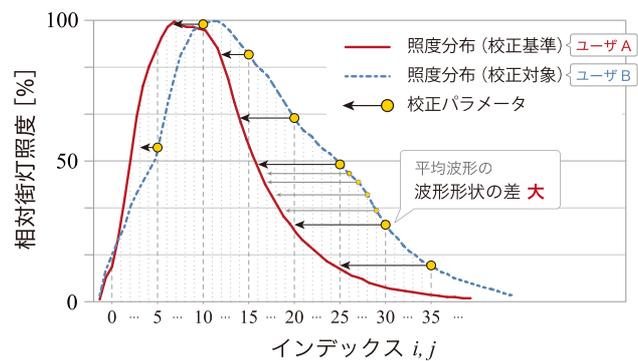


図 5 照度入射角特性の校正パラメータ

Fig. 5 Correction parameters of an incident angle characteristics of illuminance.

度値による、JIS 照度測定法に基づく照度値の推定手法についてはすでに実証 [6] しているため、本稿における提案手法により校正した照度分布波形データをもとに、JIS 照度測定法に従った測定照度値 (平均水平面照度) を推定できる。

以降、3.3 節で照度入射角特性の校正手法、3.4 節で照度追従特性の校正手法について詳述し、3.5 節で校正済みの照度測定値を用いた街灯照度推定手法について述べる。

3.3 照度入射角特性の校正

ユーザが歩行しつつ街灯直下を通過した際の照度分布は、照度入射角特性によって大きく形状が変化することが、これまでの調査で明らかになっている。図 5 の実線は、2 台の Nexus 7 により、同一街灯において照度を複数回測定したデータを、端末保持角度および余弦定理 (照度の基本特性) を用いて補正し、正規化、平均したものである。照度値の立ち上がり・立ち下がり時間や減衰の仕方が異なることから、これらは異なる照度入射角特性を持つと考えられる。端末保持角度の補正に関しては、歩行時の街灯の位置関係およびスマートフォン搭載照度センサの入射角特性に基づく手法を、著者らの先行研究 [9] ですでに提案しているため、詳細は付録 A.1 に示す。

本節では、照度入射角特性の校正、すなわち波形形状を

補正する手法について述べる。なお、スマートフォン搭載照度センサによる測定では、測定環境によるばらつきが見られるため、複数回測定された街灯の照度データをもとに波形形状の補正、校正パラメータの算出を行うこととする。以下に手順を示す。

- (1) 連続的な時系列データである各測定データから、街灯下通過時データを抽出したうえで各街灯ごとに分離、距離系列データへと変換する（詳細は後述）。
- (2) 各測定点における端末保持角度と街灯直下からの距離を用い、入射角を推定、余弦特性により補正する。
- (3) 式(1)に示す重み付き移動平均を適用し、高周波ノイズを除去する（現在の照度値を E_i 、1つ前の照度値を E_{i-1} とする）。なお移動平均の重みは、経験的に得た波形形状を維持しつつ高周波ノイズが除去可能な限界値を設定した。

$$E_i = 0.7 \times E_{i-1} + 0.3 \times E_i \quad (1)$$

- (4) 波形を [0,1] 区間で正規化する（照度追従特性の影響を除去する）。
- (5) 各測定点における平均を計算することで、端末ごとの平均波形を得る。
- (6) 図5に示すように、校正基準の波形 A（ユーザ A）と校正対象の波形 B（ユーザ B）における対応点を探し、距離系列上の差分を得る。この差分を照度入射角特性の校正パラメータとする（校正パラメータ導出については後述する）。
- (7) 校正パラメータを用い、他の測定データを校正する。

手順(1)における街灯ごとの分離、距離系列への変換方法を述べる。本研究では、ユーザが夜道を歩行する際に断続的な測定を行う環境を想定しているため、スマートフォン搭載照度センサによって測定された照度データは、連続的な時系列データとなる。生活道路における測定データにおいて、街灯設置地点付近の照度変化はパルスのような形状を示し、それ以外の地点においては最低照度値付近（約 0lx）を保つことが明らかになっている。このことから、パルスを抽出することで1街灯ごとにデータを分離することができ、また、同時にロギングしている GPS 情報から、ある2点間の距離を導出することで、1街灯ごとの距離系列測定データに変換することができる。なお本研究では、距離系列データへの変換には、任意の2点間の距離を緯度経度データから算出可能なヒュベニの公式を用いる。

手順(6)における、校正基準の波形 A（ユーザ A）と校正対象の波形 B（ユーザ A）における対応点の検索および照度入射角特性の校正パラメータ P の導出方法について述べる。なお、それぞれの波形は手順(3)で重み付き移動平均を適用しているため、おおよその場合1つの山状となっていると仮定し、以下の手順に基づき対応点を検索する。波形 A, B は、原点から一定間隔ごとにサンプリングされ

たリストであり、街灯直下からの距離、その地点における照度の2つの要素を持つものとする。この波形 A, B のリストのインデックスは、それぞれ自然数の添字 i, j で示す。また、照度入射角特性の校正パラメータ P は、街灯からの距離に対応した補正距離のリストであり、 P_j は P の要素である。本稿では、人の歩く速度と照度センサのセンシング間隔を考慮し、波形データのサンプリング間隔は約 0.5 m に設定した。

- (1) $i = 0, j = 0$ とする。なお $A_0 = 0, B_0 = 0$ である。
- (2) $A_i < B_j$ の場合、 $A_i \geq B_j$ となるまで i をインクリメントする。
- (3) P_j を $i - j$ とし（インデックス j における校正パラメータ）、 j をインクリメントする。
- (4) 手順(2)、手順(3)を繰り返す。
 $A_i = 1$ かつ $B_j = 1$ 、すなわち波形の頂点に到達した場合、次の手順に進む。
- (5) $A_i > B_j$ の場合、 $A_i \leq B_j$ となるまで i をインクリメントする。
- (6) P_j を $i - j$ とし、 j をインクリメントする。
- (7) 手順(5)、手順(6)を繰り返す。

なお、波形に乱れが存在し（山が2つ存在するなど）、上記手順が続行不可能となった場合は、推定に悪影響を与える波形であると推測されるため、校正対象の波形 B を除外することにより対処する。

3.4 照度追従特性の校正

ユーザが歩行しつつ街灯直下を通過した際の照度分布において、照度追従特性の差異は、各測定点の絶対照度の違いとなって現れると考えられる。しかし、前述のとおり波形形状が異なるため、全測定点における絶対照度を比較できない。

そこで、本節では代表測定点として最大照度を用いた、照度追従特性の校正手法について述べる。照度入射角特性の校正と同様に、複数回測定された街灯の照度データをもとに特性の補正、校正パラメータを算出することとする。以下に手順を示す。

- (1) 連続的な時系列データである各測定データから、3.3節で述べた方法を用い、街灯下通過時データを抽出したうえで各街灯ごとに分離、距離系列データへと変換する。
- (2) 各測定点における端末保持角度と街灯直下からの距離を用い、入射角を推定、余弦特性により測定データを補正する。
- (3) 重み付き移動平均を適用し、高周波ノイズを除去する。
- (4) 波形形状によりフィルタリングする（詳細は後述）。
- (5) 最大照度を平均し、校正基準と校正対象の平均最大照度を比較する。この比率を照度追従特性の校正パラメータとする。

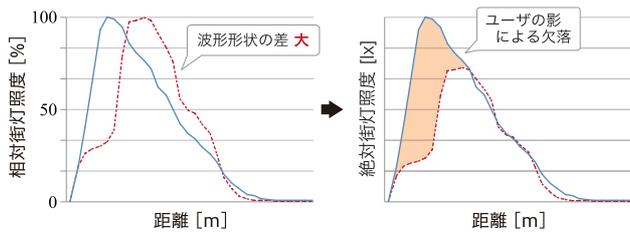


図 6 ユーザの影による影響の例
Fig. 6 An adverse effect of a user's shadow.

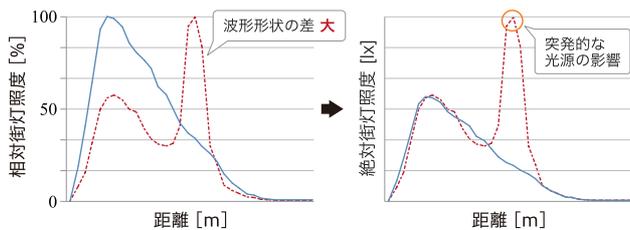


図 7 突発的に生じる光源による影響の例
Fig. 7 An adverse effect of an accidental light incident.

(6) 校正パラメータを用い、他の測定データを校正する。
手順(4)における波形形状によるフィルタリングとは、3.3節の手順(5)で得た平均波形と、一時的に正規化した各波形との波形比較により、外乱の影響を大きく受けたデータを除外するものである。これは、ユーザが歩行しつつ測定する環境では、ユーザ自身による影により正しく照度センサに入光しない場合(図6)や、車など突発的に生じる光源や、門灯、自動販売機など街灯以外の光源から入光する場合(図7)など、最大照度が正しく取得できていない測定データが一定数存在するためである。このフィルタリングには、波形の各測定点における二乗誤差を算出し、閾値を設定する方法を用いた。

3.5 校正済み照度測定値に基づく街灯照度推定手法

本節では、本稿で提案した照度測定値校正手法により校正された照度データを用いた、街灯照度推定について述べる。校正済みの照度波形分布データ(以下、照度データ)は街灯直下を通過した際の距離系列データであるため、このデータからJIS照度測定法に基づく照度を推定する。

はじめに、照度データは校正手法適用時に余弦特性(一般的な照度入射角特性)による端末保持角度補正を行っているため、校正基準となるデバイスの照度入射角特性に従って補正を適用し直すことで、街灯直下を通過した際の水平面照度を推定する。なお、本稿ではNexus7を用いるため、事前調査で得られた余弦の5乗を適用することにより、端末保持角度を補正する。

JIS照度測定法では図8に示す、道路中心線および反対側の道路脇線上における水平面照度を算出する必要がある。水平面照度では、街灯光源とのなす角 θ_l は街灯設置位置からの直線距離にのみ依存する。そこで、以下の手順に

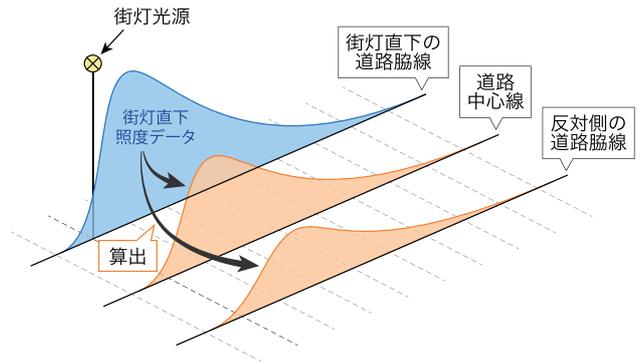


図 8 道路中心線、反対側の道路脇線上の照度推定
Fig. 8 The inference of illuminances on the centerline of the road and the opposite line of the road.

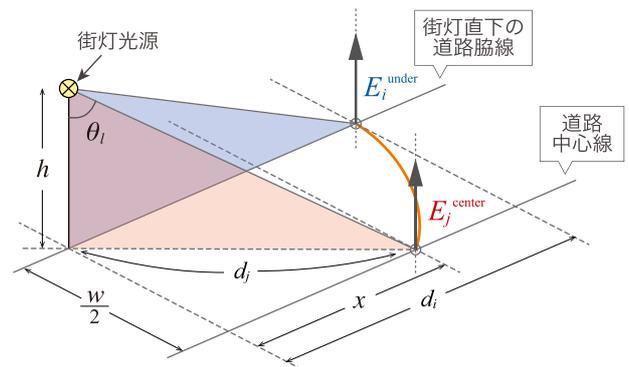


図 9 道路中心線上の照度推定法
Fig. 9 The inference of illuminances on the centerline of the road.

より各線上における水平面照度を推定する。なお、図9に示すように、街灯直下の照度データを E_i^{under} 、道路中心線上における照度データを E_j^{center} 、それぞれのリストのインデックスを i, j とする。また、街灯直下の道路脇線上における街灯からの距離を d_i 、道路中心線上における街灯からの距離を d_j とし、 x, w はそれぞれ街灯直下からの進行方向距離、道路幅である。

- (1) $i = 0, j = 0$ とする。
- (2) d_j を式(2)により算出する。

$$d_j = \sqrt{x^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad (2)$$

- (3) $d_i \geq d_j$ となるまで、 i をインクリメントし、式(3)により道路中心線上の照度 E_j^{center} を算出する。

$$E_j^{\text{center}} = \begin{cases} E_i^{\text{under}} & (d_i = d_j) \\ E_{i-1}^{\text{under}} + R_{ij} \times E_{\text{diff}}^{\text{under}} & (d_i > d_j) \end{cases} \quad (3)$$

$$R_{ij} = \frac{d_j - d_{i-1}}{d_i - d_{i-1}} \quad (4)$$

$$E_{\text{diff}}^{\text{under}} = E_i^{\text{under}} - E_{i-1}^{\text{under}} \quad (5)$$

- (4) 手順(2), 手順(3)を繰り返す。

なお、反対側の道路脇線上における照度データに関し

ても、道路幅を $\frac{w}{2}$ から w とすることで同様に算出可能である。

以上により、街灯直下、道路中心線上、反対側の道路脇線上の照度データを得られるため、この照度データを等間隔に分割し、平均をとることにより、JIS 照度測定法に基づく平均水平面照度を推定することができる。

3.6 複数回の校正処理にともなう誤差伝播への対策

3.2 節で概念を述べたとおり、提案手法では校正済みユーザを新たな校正基準とすることを繰り返して、図 10 に示す校正履歴ツリーを形成、網羅的な街灯照度測定値の校正を実現する。しかし、校正処理を繰り返すうちにもの校正基準との誤差が増大する、つまり誤差伝播が生じると考えられる。なお、校正履歴ツリーとは、ユーザ間の校正・被校正の関係を表すものであり、あるユーザがどのような校正済みユーザを経由して校正されたかの履歴となる。

そこで、校正回数のラベリングを導入することにより対応する。図 10 において、ユーザ A, B, C に注目した場合における、校正回数のラベリングを用いた誤差伝播対策の

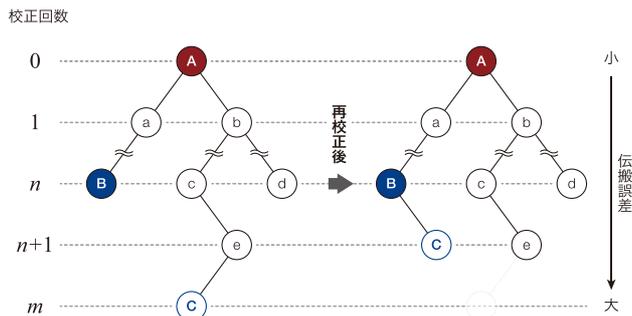


図 10 校正履歴ツリー

Fig. 10 The history tree of the correction.

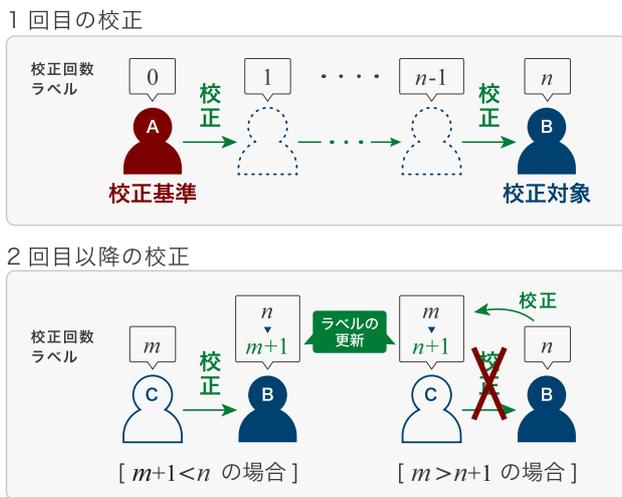


図 11 校正回数のラベリングによる誤差伝播対策

Fig. 11 The reduction of the accumulative error of propagation by labeling the number of times applying the correction method.

概要を図 11 に示し、以下に詳述する。まず、1 回目の校正は前述しているとおりであるが、校正を行う際に、自身が何回目に校正されたか（ツリーの深さ）をラベルとしてユーザが各々保持することとする。2 回目以降の校正では、そのラベルを比較することにより再校正を行う（校正回数ラベルを更新する）。なお、 n, m はそれぞれユーザ B, C の校正回数ラベルである。

- $m + 1 < n$ の場合
ユーザ C の波形をもとに、ユーザ B の校正パラメータを更新する（再校正）。
- $m > n + 1$ の場合
ユーザ B の再校正は行わず、反対にユーザ B の波形をもとにユーザ C を再校正する。
- その他の場合 ($m = n$ など)
ユーザ B, C ともに、再校正は行わない。

校正回数ラベルに基づく再校正を繰り返すことにより、図 10 の右図に示すように、校正履歴ツリーの深さを浅くする、すなわち誤差伝播の影響を抑えることが可能となる。

4. 照度収集実験・照度測定値校正実験および評価方法

本実験では、街灯種類（スタータ式蛍光灯・インバータ式蛍光・LED 灯）のデータが広く得られる実験ルートとして、図 12 に示す JR 魚住駅南側の周回ルートを採用した。なお、実験ルートは生活道路であり、スタータ式蛍光灯 8 灯、インバータ式蛍光灯 7 灯、LED 灯 6 灯の計 21 灯が設置されている。図中の円はそれぞれ街灯種ごとの街灯設置位置を示し、数字は街灯 No. を示している。なお、本稿での街灯 No. と街灯種の対応は以下のとおりである。

- 街灯 No.0~7 : スタータ式蛍光灯 (20 W)
 - 街灯 No.8~14 : インバータ式蛍光灯 (32 W)
 - 街灯 No.15~20 : LED 灯
- 使用する端末は、特性の異なる 4 台の Nexus 7 を個別の



図 12 照度測定値校正実験フィールド

Fig. 12 The evaluation field of the correction method.

ユーザが用いることとした。端末4台のうち校正基準となる端末は1台、校正対象となる端末は3台とし、すべての被験者は、同実験期間中に測定を行う。なお、実験中において被験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、補正を行うため条件を設けずに被験者が任意で設定できるものとした。また、校正パラメータについては、街灯種ごとに2灯ずつ校正基準を設け（街灯 No.0~1, 8~9, 15~16）、2灯の照度分布波形を各々算出した後、平均したものを校正基準波形とする。校正パラメータは、この校正基準波形と比較することにより算出する。

なお、本稿では、校正パラメータ抽出と波形校正の有効性の検証を主目的とするため、3.6節で述べた誤差伝播の影響が生じない（校正回数を1回までに制限）環境下で実験を行った。

照度測定値校正実験については、校正対象の照度値がいかに校正基準へと校正されているかどうか（波形フィッティング実験）、校正を行うことで街灯照度推定精度が向上したかどうか（校正済み測定照度に基づく街灯照度推定実験）の2点について評価する。以下にそれぞれの実験の評価方法について述べる。

4.1 波形フィッティング実験

提案した照度測定値校正手法は、照度分布波形のフィッティングに相当する。センサ特性の差異により生じる波形のずれは、各測定点における系統的な誤差となって現れると考えられる。そこで、以下の3波形を比較することで照度分布波形のフィッティング精度を評価する。

- 校正基準となる照度分布波形 W^{master}
- 校正適用前の照度分布波形 W^{before}
- 校正適用後の照度分布波形 W^{after}

フィッティング精度の評価は、波形の類似性（絶対誤差の総和）を校正前後において算出することで行う。なお、波形の類似性 S^{before} , S^{after} は式(6)で表され、 W_d は距離 d における照度値、 D は照射範囲の最大距離を表す。

$$S^{\{\text{before|after}\}} = \sum_{d=0}^D \left| W_d^{\{\text{before|after}\}} - W_d^{\text{master}} \right| \quad (6)$$

4.2 校正済み測定照度に基づく街灯照度推定実験

校正を適用することにより街灯照度推定精度が向上するかどうかについて、評価を行う。まず、提案手法により取得した照度分布波形データをもとに、3.5節で述べた方法を用い、JIS 照度測定法に従って測定した照度値（平均水平面照度）を推定する。そして、以下の推定照度を比較することで推定精度を評価する。

- JIS 照度測定法に従い照度計で測定した平均水平面照度 \bar{E}_{ans} （正解データ）

- 照度センサの平均照度 \bar{E}_{raw} （センサ特性は考慮しない）
- 照度センサの平均照度 \bar{E}_{cos} （一般的な照度の余弦特性による補正を適用）
- 照度センサの平均照度 \bar{E}_{cos^5} （校正基準デバイスのセンサ特性による補正を適用）
- 照度センサの平均照度 \bar{E}_{pr} （提案手法を適用）

なお、街灯照度推定精度の評価は式(7)に示す、測定値・推定値との絶対誤差 ϵ_{raw} , ϵ_{cos} , ϵ_{cos^5} , ϵ_{pr} を算出することにより行う。

$$\epsilon_{\{\text{raw|cos|cos}^5|\text{pr}\}} = \bar{E}_{\{\text{raw|cos|cos}^5|\text{pr}\}} - \bar{E}_{\text{ans}} \quad (7)$$

5. 照度収集実験・照度測定値校正実験の評価結果および考察

実験の結果、検証フィールド内の対象街灯 21 灯に対し、1,613 の検証用サンプルが得られた。検証用サンプルは、それぞれ校正基準端末が 137 サンプル、校正対象端末が 1476 サンプルであった。それぞれの評価および考察について以下に述べる。

5.1 波形フィッティング実験

照度分布波形のフィッティング実験の評価結果を図 13 に示す。校正前後の校正基準となる照度分布波形との類似性 S^{before} , S^{after} を街灯ごとに示している。約 90% (19 灯) の街灯において、校正前後で類似性が向上したことが分かる。また、全街灯において類似性は約 29% 向上した。なお、高照度を示すインバータ式蛍光灯や指向性が強い LED 灯については、ばらつきが大きくなることが事前調査より明らかになっていたが、本手法を適用することで、大きく類似性が向上するという結果が得られた。

類似性が向上しなかった 3 灯における、類似性悪化の原因としては、道路の形状や外乱の影響があげられる。

図 14 は街灯 No.2 は比較波形を示しており、校正により

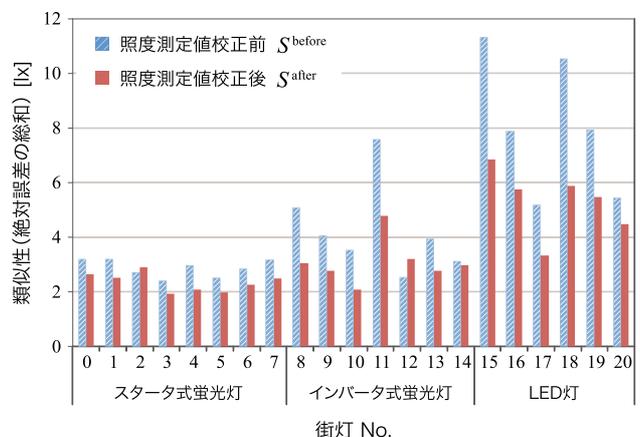


図 13 照度分布波形のフィッティング実験の評価結果

Fig. 13 The result of the fitting method of illuminance transition.

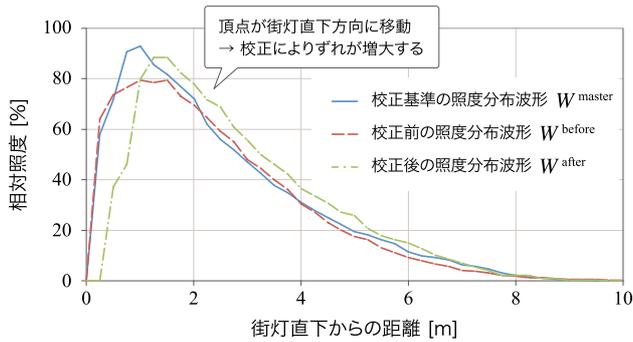


図 14 街灯 No.2 における波形の比較

Fig. 14 The comparison of the illuminance transition on the streetlamp No.2.

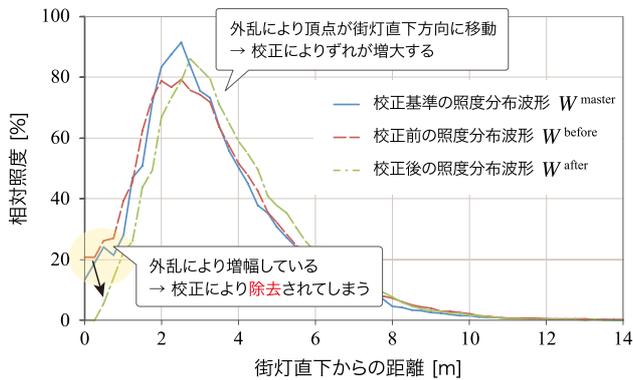


図 15 街灯 No.12 における波形の比較

Fig. 15 The comparison of the illuminance transition on the streetlamp No.12.

波形形状は想定どおり正しく校正されているといえるが、波形全体が街灯直下から遠ざかることにより誤差が増大している。これは、街灯直下付近に Y 字路が存在し、東から西へと測定した場合に波形の減衰が早くなるため、波形を平均した際に最大照度を得る地点（波形頂点）が街灯直下付近に移動、照度入射角特性の校正パラメータにより波形頂点のずれが増大することが要因であると考えられる。

さらに、街灯 No.12 については、街灯が設置されている道路の向かい付近に高照度の照明（外乱）が設置されていることから、対象街灯の照度よりも大きく測定されてしまったと考えられる。図 15 は街灯 No.12 の比較波形を示しており、校正基準・校正対象ともに街灯直下付近における外乱による増幅が見られる。しかし校正する際に、照度追従特性の校正パラメータの影響でこの増幅は除去されてしまい、街灯直下付近の誤差が増大、さらに、外乱の影響により最高照度を得る地点（波形頂点）が街灯直下付近に移動していることから、街灯 No.2 と同様に誤差が増大すると考えられる。同様に高照度街灯が近くに設置されている街灯 No.7 については類似性の悪化は見られないが、これは、対象街灯と隣接しほぼ同位置に設置されていることから、前述の最大照度を得る地点が移動しなかったためであると推測される。

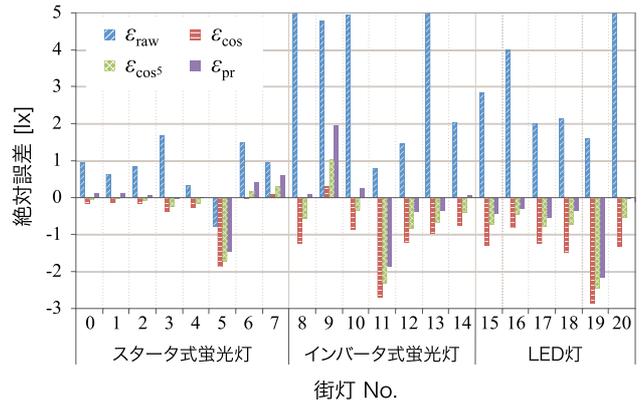


図 16 街灯照度推定実験の評価結果

Fig. 16 The result of illuminance inferring method of streetlamp.

また、街灯 No.11 に関しては、大幅な類似性向上が見られるものの、同街灯種で比較すると依然として大きな誤差を持つといえる。この要因としては、街灯 No.12 と同様に高照度の照明（外乱）が設置されていることがあげられる。しかしながら、前述の街灯 No.2, 12 は類似性が悪化しているのに対し、街灯 No.11 では類似性が向上している。これは、街灯 No.11 は外乱により波形頂点が街灯直下から離れる方向に移動していることから、前述の類似性悪化の要因は影響せず、提案手法が寄与したためであると考えられる。

今後の課題としては、屈折した道路における校正パラメータを導出し、直線道路における校正パラメータを複数作成し各々を比較することで、系統的な違いが生じるかどうかについて調査を行う必要があること、そして、高照度街灯が近くに設置されている場合に、それぞれの測定値を分離する方法を検討することなどがあげられる。

また、3.1 節では、端末の表面に皮脂や画面保護フィルムなどの被覆物がない状態での実験を行ったが、本提案手法は、相対的な照度測定値校正によるものであるため、これらの被覆物が存在する場合においても有用であると考えられる。しかし、被覆物は動的に変化することが想定されるため、校正パラメータの定期的な更新を行うことが必要となる。今後は、被覆物が存在する場合においても、本提案手法が寄与することを検証する。

5.2 校正済み測定照度に基づく街灯照度推定実験

校正済み測定照度に基づく街灯照度推定実験の評価結果を図 16 に示す。 ϵ_{raw} , ϵ_{cos} , ϵ_{cos^5} , ϵ_{pr} は、前節で列挙した照度センサの平均照度における絶対誤差である。

センサ特性を考慮しない場合 (ϵ_{raw}) は、絶対誤差が非常に大きくインバータ式蛍光灯や LED 灯では、5lx を超える場合もあるが、端末保持角度の補正を適用することにより $\pm 3lx$ の範囲内に補正できている。以下、街灯種別に提案手法の有用性について考察する。

スタータ式蛍光灯については、端末保持角度による補正

を行うことでおおよその場合絶対誤差が減少していることが分かる。また、全街灯種での平均照度推定誤差は約 0.55 lx, 提案手法適用前と比較して約 80%の誤差削減を実現した。

しかし、絶対的な街灯照度が低いこと、照射範囲が狭く街灯直下通過時の入射角の変動が少ないことから、校正の効果はあまり得られないという結果となった。なお、街灯 No.5, 6, 7 では、提案手法を適用することにより誤差が増大している。この原因としては、これらの街灯が坂道に設置されているため、ユーザの通過方向によって端末と街灯の位置関係、特に光の入射角が変化することが考えられる。提案手法においては、街灯が道路面に対し直角に設置されていることを想定しているため、端末保持角度の補正時に誤差が増大したと想定される。街灯 No.7 に関しては、対象街灯に隣接して高照度街灯が設置されているため、提案手法によって照度測定値が過剰補正されることにより誤差が増大したと推測される。

インバータ式蛍光灯については、高照度の街灯であるため全体としての誤差は大きくなっているが、提案手法を適用することにより、誤差を削減できていることが分かる。なお、街灯 No.9 は坂道に設置されているため、前述のとおりの誤差が増大していると考えられ、前節で述べたとおりの街灯 No.11 では高照度街灯の影響により全体の誤差が大きくなっていると推測される。

LED 灯については、最も高照度な街灯であるが、照射範囲が広く光の入射角の変動の幅が大きいため、提案手法の適用により誤差を削減できているといえる。しかし、安全性判定の基準を考慮すると 0.5 lx 程度の誤差は依然として大きな誤差であるといえる。

以上から、提案手法で想定されている道路の状態においては、低照度街灯であるスタータ式蛍光灯については、 ε_{\cos} , ε_{\cos^5} , ε_{pr} とともに ε_{raw} よりも減少傾向にあることから端末保持角度を補正することで推定精度がおおむね向上するといえる。また、高照度街灯、特に照射範囲の広いインバータ式蛍光灯と LED 街灯については、 ε_{pr} が最小となる場合が多く、提案手法が最も有効であることが示された。

今後の課題としては、提案手法で考慮していない道路の状態に対応することがあげられる。具体的には端末保持角度の補正を行う際に、道路の斜度パラメータを追加することで坂道における照度測定値校正精度を向上させ、そして外乱による測定値を分離、または除去する手法を検討したい。

6. おわりに

本研究では、昨今の人々の防犯意識向上にともなう「安心・安全面」を考慮した歩行者向けナビゲーションシステムの重要性に着目し、これらの情報整備、特に夜道の明るさ情報の整備手法について検討している。そして、スマー

トフォン搭載照度センサを用いて街灯照度を収集、集合知を形成することによる、夜道の安全判定手法を提案している。

本稿では、スマートフォン搭載照度センサにおける、端末間のセンサ特性の差異について事前調査を行った結果、機種間だけでなく同機種端末間においても、照度入射角特性や照度追従特性において差異が存在することが明らかになった。そこで、スマートフォン搭載照度センサによって測定された照度分布を比較することで、端末間の校正パラメータを生成、照度分布波形をフィッティングすることにより、照度測定値を校正する手法を提案した。

波形フィッティング実験では、提案手法を適用することにより、約 90%の対象街灯において類似度の向上、つまり端末間のセンサ特性の差異が削減され、特に、分布波形のフィッティングでは類似性が約 29%向上した。また、街灯種によらず類似度の向上が見られたため、提案手法は街灯種によらず有効であることが示された。

そして、校正済み測定照度に基づく街灯照度推定実験では、提案手法を適用することにより、高照度を有し、照射範囲の広いインバータ式蛍光灯や LED 灯において絶対誤差が削減された。しかし、曲がり角や坂道など、道路の状態が異なる場合は誤差が増大するという結果が得られた。また、全街灯種での平均照度推定誤差は約 0.55 lx, 提案手法適用前と比較して約 80%の誤差削減を実現した。

今後の課題としては、道路の状態が校正パラメータに与える影響について調査し、パラメータを補正する手法、または新しいパラメータの導入を検討すること、外乱による測定値を分離することで波形の乱れを補正することなどがあげられる。また、複数回の校正を行った際の誤差伝播の実態を調査し、3.6 節で述べた校正回数ラベリングを導入したシステムを構築すること、そして、広範囲のエリアを対象とした多人数・多種端末による実験を実施し、複数回の校正を繰り返した場合においても、本提案手法が有効であることを実証することがあげられる。本研究ではスタータ式蛍光灯、インバータ式蛍光灯、LED などを対象としてきたが、実環境においては、低圧ナトリウムランプや水銀灯をはじめとする、より多種多様な街灯が存在すると想定される。今後は、現在対象としている街灯種に加え、より多くの街灯種への対応にも取り組む。また、街灯の種類だけでなく、面的、時間的なカバー率を改善するために、ゲーミフィケーションによる継続的な参加促進機構 [10] についても検討していく予定である。

謝辞 本研究の一部は、戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) で得られた知見を利用したものである。ここに記して謝意を示す。

参考文献

[1] 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/>).

[2] 高野 剛，奥井 茜，山田祥人，三浦昌生：夜間照度実測とアンケート調査を通じた優先改善地点の抽出と夜間照度改善計画の立案：住宅と農地の混在する地区における住民主体の夜間照度改善活動の支援その2（住民参加，環境工学 i, 2014 年度日本建築学会大会（近畿）学術講演会・建築デザイン発表会），学術講演梗概集，pp.1155-1156 (2014).

[3] 日本防犯設備協会防犯照明委員会：防犯照明ガイド，Vol.5, p.2 (2013).

[4] 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網羅的な街灯情報収集システムの開発，情報処理学会論文誌，Vol.55, No.2, pp.750-760 (2013).

[5] Matsuda, Y. and Arai, I.: An experiment of a street-lamp classifying and a vertical illuminance assessing utilizing smartphones' light sensors, *3rd International Symposium on Technology for Sustainability*, No.264 (2013).

[6] 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センサ入光特性を考慮した夜道の安全性判定システムの構築，マルチメディア，分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集，pp.966-974 (2014).

[7] 日本工業標準調査会：照度測定方法，JIS C 7612:1985 (1985).

[8] 青木俊介，劉 広大，岩井将行，瀬崎 薫：ユーザ固有の雑音を考慮する参加型環境センシングのデータ校正手法，情報処理学会研究報告ユビキタスコンピューティングシステム，2013-UBI-38, No.18, pp.1-7 (2013).

[9] 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，情報処理学会研究報告ユビキタスコンピューティングシステム，2013-UBI-37, No.52, pp.1-8 (2013).

[10] Arakawa, Y. and Matsuda, Y.: Gamification mechanism for enhancing a participatory urban sensing: survey and practical results, *Journal of Information Processing*, in press.

付 録

A.1 端末保持角度の補正

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 に示し，端末保持角度の補正手順について以下に示す。

光源と照度センサのなす角度が θ_l であり，ユーザが角度

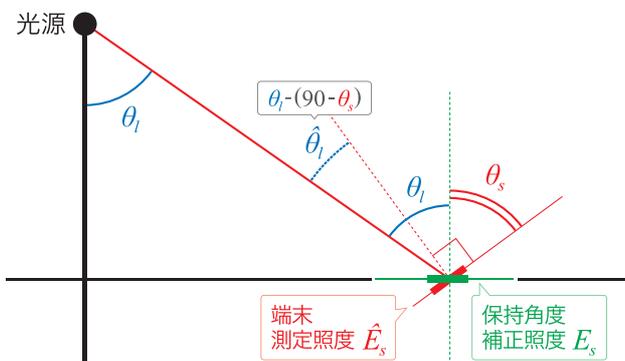


図 A.1 端末保持角度の補正

Fig. A.1 The correction of the holding angle of a smartphone.

θ_s でスマートフォンを保持していると想定した場合，照度センサへの入射角 $\hat{\theta}_l$ は式 (A.1) で示すことができる。

$$\hat{\theta}_l = \theta_l - (90 - \theta_s) \tag{A.1}$$

ここで，端末保持角度 $\theta_s = 90$ となるように照度値を補正する場合を想定する。端末保持角度を補正した照度 E_s は，端末測定照度 \hat{E}_s を用いて，式 (A.2) により算出することができる。なお，照度入射角特性は照度の基本特性である余弦定理を満たすものとする。

$$E_s = \hat{E}_s \times \frac{\cos(90 - \theta_l)}{\cos(90 - \hat{\theta}_l)} \tag{A.2}$$

また，照度入射角特性を図 1 から得られた余弦の 5 乗に従うものとした場合，端末保持角度を補正した照度 E_s は，式 (A.3) により算出することができる。

$$E_s = \hat{E}_s \times \frac{\cos^5(90 - \theta_l)}{\cos^5(90 - \hat{\theta}_l)} \tag{A.3}$$



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。2015 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。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程入学。Participatory Sensing, ウェアラブルコンピューティング等，モバイル，ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。



新井 イスマイル (正会員)

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情報科学研究科博士課程修了。博士 (工学)。2008 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

年より明石工業高等専門学校電気情報工学科助教。現在，同校同学科准教授。コンテクストアウェアサービス，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 会員。



荒川 豊 (正会員)

2001年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2003年同大学大学院修士課程修了。2006年同大学院博士課程修了。博士(工学)。2006年同大学院特別研究助手(2007年より助教に変更)。2009年3月九州大学大学院システム情報科学研究科助教。2011年11月EN-SEEIHT(Toulouse, France)訪問研究員。2012年2月DFKI(Kaiserslautern, Germany)訪問研究員。2013年3月より奈良先端科学技術大学院大学准教授。主として、ネットワークアプリケーション、ソーシャルデータマイニングに関する研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会各会員。



安本 慶一 (正会員)

1991年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1995年同大学大学院博士後期課程退学後、滋賀大学経済学部助手。2002年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。博士(工学)。現在、同校同研究科教授。モバイル、ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。ACM, IEEE 各会員。