

氏 名 秋山 尚之

学位(専攻分野) 博士(情報学)

学位記番号 総研大甲第 1969 号

学位授与の日付 平成29年9月28日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Time-of-Arrival Based Acoustic Localization Technique  
Using Visible Light Communication for Smartphones

論文審査委員 主 査 教授 橋爪 宏達  
教授 高須 淳宏  
教授 計 宇生  
准教授 後藤田 洋伸  
准教授 小野 順貴  
准教授 児玉 和也  
教授 杉本 雅則 北海道大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

We describe a precise and autonomous indoor localization technique for smartphones. Almost everyone owns a smartphone nowadays. As a person always carries it with him/her, it can be a good tool for locating the position, or localization. Localization is a key technology for location-aware systems, which provide us information according to the location.

We can use a Global Navigation Satellite System (GNSS) for outdoor localization. However, GNSS's radio frequency signals hardly penetrate into rooms. Therefore, another means are required for indoor localization. Smartphones have many kinds of sensors, such as accelerometers, gyroscopes, and geomagnetic sensors. A Wi-Fi transceiver, a Bluetooth transceiver, video cameras, and microphones are also sensors. We can use these sensors to achieve indoor localization.

In general, indoor localization requires more precise information than that of outdoors. GNSS localization has an accuracy of few meters. It is enough for outdoor localization applications, such as car navigation systems. However, it is coarse for indoor localization even if GNSS could be available indoors. For example, it is difficult to distinguish adjacent doors in a room with this accuracy.

Our goal is to attain accuracy and precision of centimeters. Then, we can realize precise indoor navigation that can alert users to steps or stairs. We can guide users to the targeted shelves of goods in a large warehouse. Tracking the smartphone in one's hand, we are also able to make a machine interface such as motion control.

To accomplish this goal, we developed an acoustic localization system using smartphones. A transmitter consists of loudspeakers emits short acoustic waves, and the smartphone's microphone catches them. As rooms usually have audio equipment, we can make use of it for the sender node. The frequencies of the acoustic waves are in a higher range that is almost inaudible for human ear. However, they can be handled by commercial off-the-shelf loudspeakers and smartphones. The localization system is based on the time of flight of each acoustic wave. We conducted experiments in a 2D arrangement and confirmed the feasibility of this method.

Although the feasibility of the acoustic localization was established, the precision was not satisfied for our requirements. Especially in the sender-receiver direction, the precision was about 150mm to 200mm, although the precision in its perpendicular direction was around 10mm. This uneven distribution was caused by the localization scheme of time difference of arrival (TDoA), which is deployed when the sender and the receiver are not synchronized. Employing time synchronization, we can improve the localization precision with using time of arrival (ToA) scheme.

To realize ToA localization, we devised a time synchronization method using LED light. Almost every room has lighting facility. These days, LED light is commonly

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

used because of its low energy consumption and long-term performance. Now, we modulate LED light. With using a switching circuit, LED is easily modulated at even high frequency that we cannot detect. Smartphone's video camera captures modulated LED light that is a part of the sender node, then the smartphone extracts time information from the captured video images of the modulated LED light. In this situation, we can assume that the time synchronization with the transmitter is established for the smartphone. 3D localization experiments were conducted for both ToA and TDoA. ToA showed better performance than TDoA, and the precision was not more than 10mm.

Finally, to realize the autonomous localization, we deploy visible light communication (VLC) for time synchronization. VLC conveys information on modulated light. VLC's demodulation process includes clock detection, which is inherently equivalent to time synchronization. Therefore, modulation for only time synchronization is wasteful. We can use modulation for also data transmission.

We are able to transmit the data needed for localization, such as coordinates of the sender beacons and the frequencies of acoustic waves using VLC. In this case, we do not have to preset or renew those data in a localization application. In addition, we need not inquire them to external databases that are generally implemented as cloud services.

Experimental results of a 3D localization application using VLC time synchronization showed the precision of around 100mm to 200mm, which could be reduced to 10mm to 20mm by compensating the frequency difference between the transmitter and the smartphone. It was rather worse than the case of time synchronization using dedicated LED modulation pattern. However, the precision is good enough for practical applications, and the localization process could be performed autonomously. Consequently, we have attained a precise and autonomous indoor localization technique.

博士論文審査結果の要旨  
Summary of the results of the doctoral thesis screening

本博士論文は英文で執筆され、「Time-of-Arrival Based Acoustic Localization Technique Using Visible Light Communication for Smartphones (可視光通信を用いた到来時刻に基づくスマートフォン用音響測位手法)」という題名である。スマートフォン等の可搬情報端末に適した音響屋内測位手法を扱うもので、特に可視光通信技術を併用して測位精度を向上させている点が従来手法にない特徴である。

屋外では GNSS (GPS 等の衛星電波を使う測位手法) によるナビゲーションは標準的手法となっているが、その電波の届かない屋内環境では別の方法によらざるを得ず、WiFi や Bluetooth の電波強度を計測する方法、建物の磁化パターンを使う方法などが提案されている。本方法は座標のわかったアンカーノードからの距離を音波の伝搬遅延で計測し、幾何学的手法により可搬端末の座標位置を知る方法に分類され、それ自体は過去にも例があり、センチメートル単位の比較的精度の高い測位のできるものが特徴である。秋山君の論文は、その計測に 1. 音響計測に位相一致法というミリメートル・レベルの精度の出せる手法を利用したこと 2. LED の発光を可搬情報端末の動画カメラで撮影することで、音響計測の精度を十分に座標測位に反映させる手法を提案したこと、が論文の骨子となっている。LED 発光を認識する手法は情報伝達にも使用でき、3. LED 発光による可視光通信技術を併用した音響測位技術、という、従来なかったシステム形態に到達している。

論文は 6 章と付録からなる。第 1 章は導入であり、研究の背景を述べる。第 2 章で音響測位の基本技法と既存の関連研究を概観している。第 3 章は本研究の音響測位技法である位相一致法について述べており、実時間 3 次元測位のため、同測位法を周波数分割多重で実施することを言う。第 4 章では音響の伝搬遅延による測位手法である、ToA (到来時刻法) と TD<sub>o</sub>A (到来時間差法) を紹介し、前者の精度が高いことをのべ、ただし送受信機間に時刻同期機構の必要なことを指摘する。ToA の同期のため LED ランプの明滅を動画カメラで受けて時刻同期をした予備実験について記載する。第 5 章で LED ランプの明滅を汎用情報伝達のための可視光通信に発展させ、このようにしても同様の高精度測位の可能となることを立証している。第 6 章は結論であり、本研究で達成した 1 センチメートル内外の 3 次元測位精度を述べ、また今後の研究展開について展望する。付録では基本数式の導出のほか、本手法をスマートフォンのアプリケーションとして実装した内容をプログラムリストとして収録している。

屋内測位・ナビゲーションと可視光通信は、スマートフォンのような可搬型情報端末に固有な 2 つの主要な応用局面であるが、本研究はその両者を統合する初めての試みであり、実用の観点から興味ぶかいものである。その双方に新しい技術を持って臨み、従来手法の性能を向上させた結果を得たことは、学位論文にふさわしい成果といえる。またスマートフォンのアプリケーションの形で成果を立証できたことは、今後の実用に直結するものとして評価できる。

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

なお本研究の主要な学会等発表として、査読付きジャーナル論文（出願者を筆頭著者とする）1件、査読付き国際会議発表（出願者を筆頭著者とする）5件（予定含む）、特許出願 2件がある。

この論文は可搬型情報端末による屋内測位手法ならびに可視光通信手法に新しい展開方向を提示するのみならず、両手法の統合的サービスも提案できており、学位論文に十分なレベルに達していると判断した。