

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 18 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280036

研究課題名(和文) スマートフォンのための屋内音響測位インフラストラクチャの研究

研究課題名(英文) A study on indoor acoustic localization infrastructure for smartphones

研究代表者

橋爪 宏達 (Hiromichi, Hashizume)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号：40172853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,400,000円

研究成果の概要(和文)：スマートフォン等の屋内ナビゲーションを可能とする建物側設備インフラストラクチャを研究した。位置計測はインフラの発する高域音波の遅延計測で行った。精密な遅延計測は、研究グループの超音波方式で実績のある位相一致法を使用し、10mm程度の精度で行えた。座標測位のため、音響到着時刻の時間差による TDoA方式を最初に試験したが、誤差が大きくなり実用は困難であった。その対策として、音響の発生時刻をLEDランプの発光で表示し、スマートフォン動画カメラで観測した。この方法で精密な ToA計測が可能となり、数10mmの精度を達成した。計測のための設備は天井照明の形で設置できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：This research is for the development of infrastructure enabling indoor navigation system for smartphones. Localization for smartphones is carried out using high frequency audio sounds. For time measurement of sound time-of-flight we used phase accordance method, which was developed also in this research group. The localization accuracy is achieved around 10mm using smartphones. In this research we first tested TDoA (Time Difference of Arrival) method, however, the accuracy was under the desirable level. So we added time synchronization mechanism with LEDs, which send sound submission timing to a smartphone's movie camera. With this scheme enables us to adopt accurate ToA (Time of Arrival) measurements the 3D measurement accuracy was achieved around 10mm. The developed infrastructure equipment of indoor navigation system is integrated as lighting facility of buildings.

研究分野：情報学

キーワード：音響測位 室内測位 デジタル信号処理 スマートフォン 時刻同期 可視光通信

### 1. 研究開始当初の背景

(1) スマートフォンなどモバイル情報端末の浸透にともない、地図参照しながら行うナビゲーション応用は急速な普及をみた。屋外では GNSS (GPS 等の衛星測位システム) による測位でナビゲーションできるが、その電波の届かない屋内では屋外のように手軽なナビは実施できなかった。屋外・屋内のシームレスナビゲーション実現に強い要請があった。

(2) 研究者らは従来から超音波を使用した測位の研究を行っており、位相一致法という高精度の音響測位をする手法を確立していた。それをスマートフォンに適用することで屋内ナビゲーションが可能となるのではないかと考えた。

(3) 屋外ナビの完成度を考慮すると、屋内ナビシステムも十分に実用可能な形態で提案すべきであろう。よって研究提案時から屋内測位を実現するインフラストラクチャすなわち建物設備の製作を志した。

### 2. 研究の目的

実用システム構築を最終目的とするため、それを分割して次のような部分目的を置いた。

(1) スマートフォンの音響測位により、屋内で数センチメートルの精度をもつ 2 次元ないし 3 次元測位アルゴリズムを提案し、また評価すること。

(2) 音響測位システム送信側(建物側設備)は容易に既存建築物に追加設置されなければならない。コンパクトな測位インフラストラクチャを開発・提案すること。

(3) 上記インフラストラクチャを使用するモバイル情報端末向け測位応用ソフトウェアを、一般のスマートフォン端末において無改造で実行できるアプリとして実現すること。スマートフォンの機能を活用した測位システムを提案すること。

(4) このインフラストラクチャを使用するナビゲーション応用を共同実験してくれる企業パートナーを募ること。

### 3. 研究の方法

(1) 数台の(位置のわかった)スピーカから 15kHz 内外の高域可聴音響を発生させ、それをスマートフォン内蔵マイクで受信し、遅延時間を計測して各スピーカからの距離を求める。多点測量の原理によりスマートフォンの 2 次元ないし 3 次元座標を求める。

(2) 上記計測は位相一致法にもとづいて行う。各スピーカからの音響を識別するため、異なった周波数の音波による周波数分割多

重を採用する。

(3) 測位結果を集計し、精度を求め、誤差を理論値と比較する。

(4) 上記の送信機をコンパクトな建物設備にまとめ、また受信解析アルゴリズムをスマートフォンのアプリとして実装する。

研究はおおむねこのシナリオで進行したが、特に 3 次元測位において、上記のみでは十分な安定な測位性能を達成できないことが判明した。そのため音響信号の送信に加え、送信信号の送信タイミングを LED ランプの発光で通知し、スマートフォンは動画カメラでそのタイミングを受信する方式を追加した。これにより、研究方法に次を加えた。

(2.5)(追加) 音響送信タイミングを LED 発光により通知し、それをスマートフォン動画カメラで受光することで、インフラストラクチャと高度に時刻同期を行う方式の開発と実験。

### 4. 研究成果

(1) 位相一致法の距離計測は高域可聴音響でも実施できることが判明した。精度は 10mm 内外である。その具体的な方法は雑誌論文にて発表した。

(2) 当初、4 台のスピーカを用いて計測した。各スピーカからの音響の到来時刻の差を使う、TDoA (Time Difference of Arrival) 計測であった。しかし計測システムをコンパクトにしようとして、各スピーカ間距離を近づけると、誤差が大きくなり、安定に計測位置が収束しない現象が発生した。

(3) 音響発生とともに LED ランプをフラッシュさせ、それをスマートフォン動画カメラで受光する方式を提案した。これによれば音響遅延時間を絶対計測でき、ToA (Time of Arrival) による測位が可能となる。幾何学的には、双曲線の交点で位置を測位する TDoA 計測より、円の交点で求める ToA が、原理的に精度に優れる。しかしスマートフォンの動画カメラは毎秒 60 フレーム程度の撮影なので、1/60 秒より細かい時間分解をできない。これではインフラストラクチャと十分な精度で同期できず、ToA のための手段とならない。

(4) CMOS 動画センサはローリングシャッター撮影を行っている。これは 1000 本ほどの走査線を、上から下へ、おのおのわずかな時間だけずらしながら露光するもので、動く物体がゆがんで撮影されるため、同センサの欠点とされる特性である。われわれはそれを逆に使い、1/60 秒の時間分解能をさらに 1000 倍程度高める手法を提案した。これは新しい光学同期手法であり、特許出願した。(産業

財産権出願状況参照)

(5) 上記方式の ToA 計測精度を実験した。成果は雑誌論文などに発表している。達成できた光学的時刻同期の精度は  $0.5\mu\text{s}$  である。これは距離計測では  $0.17\text{mm}$  に相当し、音響測位に比べ十分高精度であった。ToA によれば TDoA に比べ大幅に高精度な測位を実行できることが実験でも確認された。図1上は TDoA、下は ToA による測位結果であり、ToA は分散の小さいことがわかる。

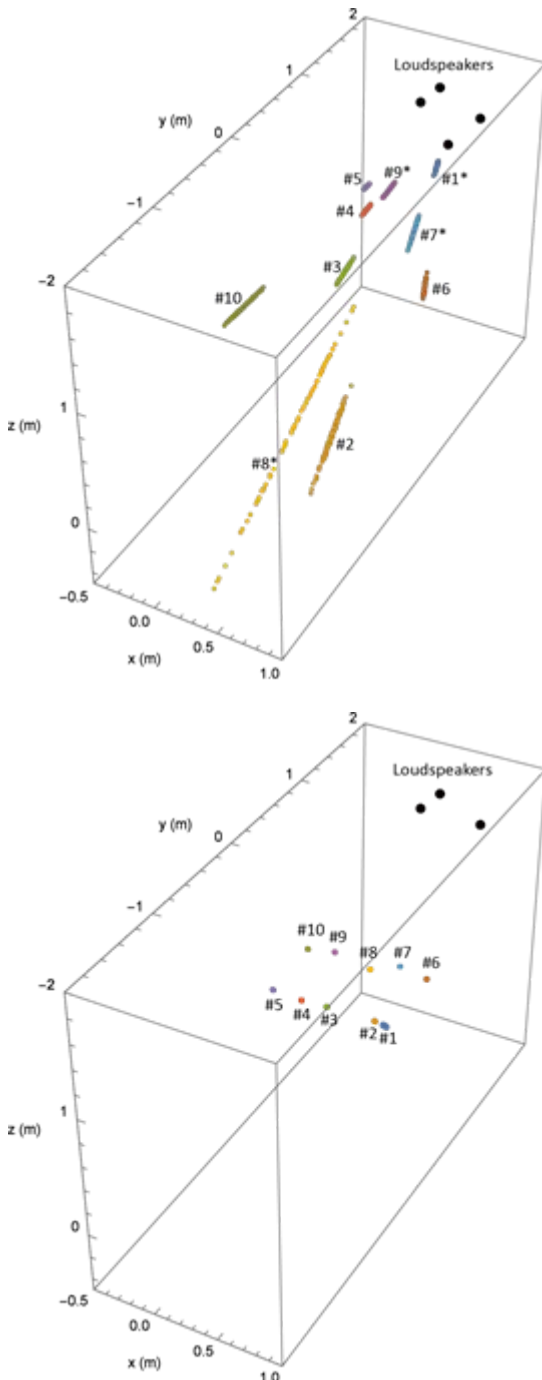


図1 TDoA (上) と ToA (下) の測位結果

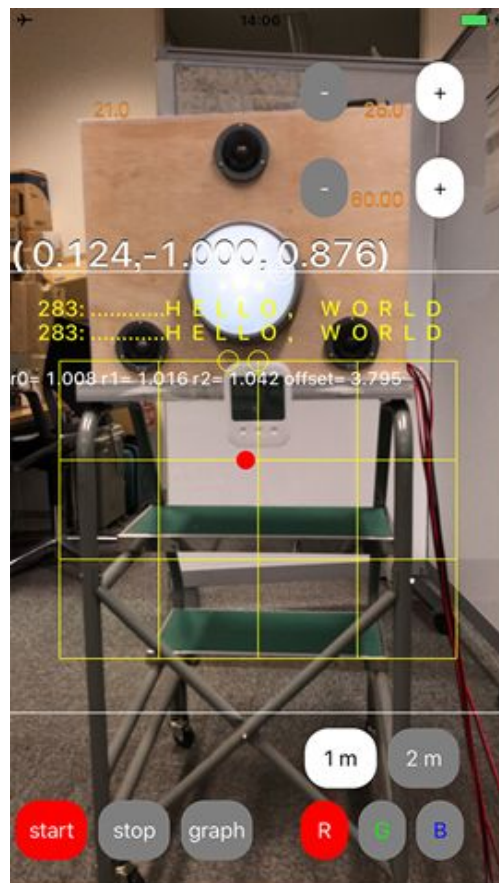
(6) インフラストラクチャ用の測位システムを、LED 照明と 3 次元測位音響生成のスピー

ーカをタイル状にまとめた測位ユニットとして完成させた。図2はその写真である。このままの形で天井照明として建築物に埋め込むことができる。



図2 インフラストラクチャ送信装置

(7) iPhone 用の測位アプリを作成した。まず動画カメラで照明の発光を捕えると、数秒でインフラストラクチャとの時刻同期が成立する。それに伴い現在の位置を音響 ToA 計測した結果が座標値で、またグリッド上の位置で表示される(図3)。総合精度は座標値で数センチメートルである。また測位可能な範囲はインフラストラクチャ送信装置からの距離で数メートルである。



### 図3 スマートフォンの測位アプリ

(8)以上の成果について、特許出願を行い、また国際学会・雑誌論文に発表した。この装置は病院での医師のガイドや患者見守りに応用することが見込まれ、関係企業からも注目されている。早期の実用が期待される研究である。スマートフォンは高度な力学センサを搭載して、自立航法でのナビゲーション (pedestrian dead-reckoning, PDR) を行うことができる。これを併用すると、本装置のようなインフラストラクチャは建物内数10mおきに設置し、中間地点は PDR でナビゲーションを行える。建物設備を節約する上でも、また近年の高機能モバイル情報端末を活用する上でも、有効な実施形態であろう。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計 5 件)

Akiyama Takayuki, Masanori Sugimoto, Hashizume Hiromichi, Time-of-Arrival Based Acoustic Localization Technique Using Visible Light Communication for Smartphones, 電子情報通信学会 英文論文誌, 査読有, 2017 年 (掲載予定) (採録決定)

Masanori Sugimoto, Hayato Kumaki, Takayuki Akiyama, Hiromichi Hashizume, Optimally Modulated Illumination for Rapid and Accurate Time Synchronization IEEE Trans. on Signal Processing, 査読有, Vol.65(Issu2)pp.505-516, 2017 年

中村将成、秋山尚之、杉本雅則、橋爪宏達、可聴周波数帯域を用いることによるスポット制御可能な情報伝送手法、査読有 Vol.57(No.11) pp.2501-2514, 2016 年

中村将成、秋山尚之、杉本雅則、橋爪宏達、音響信号を用いたスマートフォンの高速・高精度屋内 3 次元位置認識手法、査読有、Vol.57(No.11), pp.2489-2500, 2016 年

橋爪宏達、杉本雅則、高速高精度デバイス間同期技術とその応用、査読有、化学工業、Vol.67. pp.85-88, 2016 年

##### [学会発表](計 12 件)

Koki Kudo, Masanori Sugimoto, Takayuki Akiyama and Hiromichi Hashizume, Multicamera Synchronization for Smartphones using Optimally, Proceedings of ACM MobiSys 2017, USA, NY

Takayuki Akiyama, Masanori Sugimoto and Hiromichi Hashizume, Time

Synchronization Method Using visible Light Communication for Smartphones, Proceedings of ICWMC 2016 1-4, Spain Barcelona, (査読有り)

Masanori Nakamura, Takayuki Akiyama, Hiromichi Hashizume, Masanori Sugimoto, A Spot-controllable Data Transfer Technique Using COTS Speakers, 7<sup>th</sup> Int '1 Conference on Indoor Positioning and Navigation (IPIN2016)38-RP 1-8 2016 Spain, Madrid, (査読有り)

Masanori Nakamura, Takayuki Akiyama, Hiromichi Hashizume, Masanori Sugimoto, 3D Indoor Positioning and Rapid Data Transfer Technique using Modulated Illumination, 7<sup>th</sup> Int '1 Conference on Indoor Positioning and Navigation (IPIN2016)198-WIP pp.1-4 2016 Spain, Madrid, (査読有り)

Takayuki Akiyama, Masanori Sugimoto, Hiromichi Hashizume, An Acoustic Indoor Positioning Method Assisted by Visual Light Synchronization for Smartphones, Proceedings of International Workshop on Asia-Pacific, 2016 年, 韓国, (査読有り) 秋山尚之、杉本雅則、橋爪宏達、可視光通信による時刻同期とスマートフォン測位、可視光通信協会 2016 ワークショップ、日吉 慶應大学 (査読なし)

島田将太、秋山尚之、橋爪宏達、杉本雅則、汎用動画カメラによる高速可視光通信とその応用、情報処理学会 第 50 回ユビキタスコンピュータ 2016 台湾 Chi Nan University 台中、(査読なし)

橋爪宏達、市販カメラを使った高速可視光通信、可視光通信協会セミナー (招待講演) 2016、日本、川崎 (査読なし)

Masanori Sugimoto, Takayuki Akiyama, Hiromichi Hashizume, SyncSync: Time-of-arrival Based Localization Method Using Light-synchronized Acoustic Waves for Smartphones, Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2015), Banff Canada (査読有り)

Hayato Kumaki, Masanori Sugimoto, Takayuki Akiyama, Hiromichi Hashizume, Taishi Saito, A Rapid and Accurate Time-synchronization Technique for Acoustic Localization Using Modulated Illumination, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2015), Banff Canada (査読有り)

Takayuki Akiyama, Masanori Sugimoto, Hiromichi Hashizume, Light-synchronized Acoustic ToA Measurement System for Mobile Smart

Nodes Proceedings of 2014, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2014) 2014年10月29日,大韓民国, Busan(査読有り)  
中村将成、秋山尚之、杉本雅則、橋爪宏達、音波による3次元位置認識手法の系統誤差低減のための基礎検討、情報処理学会第44回ユビキタスコンピューティングシステム研究会2014年10月、沖縄(査読なし)

〔図書〕(計 3件)

橋爪宏達、杉本雅則、超音波テクノ、空中超音波のドップラーイメージング  
2015,4

HASHIZUME, Hiromichi

ISJP 78th National Convention Report  
IEEE, 2016, 2

橋爪宏達、杉本雅則  
高速高精度デバイス間同期技術とその応用  
化学工業, 2016, 4

〔産業財産権〕

出願状況(計 2件)

名称: 情報送信装置、情報受信装置、情報伝送システム及びプログラム、測位システム、照明器具並びに照明システム

発明者: 橋爪宏達、杉本雅則、秋山尚之、熊木逸人

権利者: 同上

種類: 特許、特願

番号: 2016-163574

出願年月日: 2016年8月24日

国内外の別: 国内

名称: 同期タイミング検出システム及び検出方法、測距システム及び測位システム、並びに受信装置及びそのプログラム

発明者: 橋爪宏達、杉本雅則、秋山尚之

権利者: 同上

種類: 特願

番号: 2015-196873

出願年月日: 2015年10月

国内外の別: 国内

取得状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋爪宏達(HASHIZUME, Hiromichi)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号: 40172853

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

杉本雅則 (SUGIMOTO, Masanori)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 90280560

(4) 研究協力者

( )