空間形状特性とファジィ推論を活用した GPS 信号対雑音比による 半屋外空間の滞在検知手法の設計

田端 謙一^{*a)}, 中島 円^{*}, 神武 直彦^{*}

Design of Stay Detection Method for Semi-Outdoor Spaces Covered with Topsides Based on GPS
Signal-to-Noise Ratio Using Spatial Characteristics and Fuzzy Inference
Kenichi TABATA^{*}, Madoka NAKAJIMA^{*}, Naohiko KOHTAKE^{*}

あらまし 上部が覆われており、かつ側面は開けている半屋外空間は、GPS による測位精度は低下するものの一方である程度の GPS 信号は受信できるため、既存の屋内外シームレス手法を適用することが難しい。そのような特殊な環境での滞在を安定的に検知するために、高さ、奥行き及び側面の開放方向の 3 つのパラメータで構成する半屋外空間の空間特性から滞在検知に必要な衛星を選定する手法を設計した。さらに、滞在検知のための明確な閾値を設定することは難しいため、選定した衛星の信号対雑音比の値をもとに、ファジィ推論を利用して滞在を判定するための判定フローを設計した。この手法を利用することにより、3 か所の評価実験箇所において 89.4%の確率で上部を覆われた半屋外空間の滞在を検知できることを確認した。

Abstract The semi-outdoor space covered with the upper part and open on the side is difficult to apply the existing indoor-outdoor seamless methods because the GPS positioning accuracy is reduced but some degree of GPS signal can be received. In order to detect a stay in such a special environment, we designed a method to select satellites for stay detection based on the spatial characteristics of the semi-outdoor space, which consists of three parameters: height, depth and side opening direction. Furthermore, since it is difficult to set a specific threshold for stay detection, we designed a decision flow to determine the stay by using fuzzy inference based on the values of signal-to-noise ratio of the selected satellites. Using this method, we confirmed that we could detect the stay in the semi-outdoor space covered by the upper part of the space with 89.4% probability at three evaluation experimental locations.

キーワード GPS, 信号対雑音比, ファジィ推論, 半屋外空間

Keyword GPS, Signal-to-Noise Ratio, fuzzy inference, semi-outdoor space

1. まえがき

GNSS が内蔵されたスマートフォンが普及し、この 10 年でナビゲーションアプリケーションが広く利用されるようになった。また、インドアマップもアプリケーション内で提供されるようになり、iBeacon などのように屋内測位に必要なセンサーが手軽に利用できるようになったことによって、空港や美術館等では屋内のナビゲーションアプリケーションや屋内位置に基づくコンテンツ提供サービスも提供されるようになった[1-3]。加えて、人々は屋内と屋外との間を頻繁に移動するため、屋内外をシームレスに接続するナビゲーションは人々が望む主なサービスの 1 つである[4]。シームレス測位における重要な要素技術の 1 つとして、対象物が屋外にいるのか屋内にいるのかを検知する処理がある。この技術は Indoor-Outdoor (IO) Detection または Handover と呼ばれる[5]。正確な IO Detection の実現のために様々なアプローチで研究が行われており、機械学習等を利用することにより高い確率で IO Detection を実現する方法も提案されている[6]。

しかしながら、実際には現実空間を屋外空間と屋内空間の 2 つに分類するのが難しいという側面がある[7]。このような空間には、上部は屋根や庇に覆われているが側面が開けている空間や、上部は覆われていないが側面が覆われている空間などが該当することから、現実空間を屋外、屋内、上部を覆われた半屋外空間、側面を覆われた半屋外空間の 4 つに分類することも提案されている[8]。特に、上部を覆われた半屋外空間は GPS による測位では上部の遮蔽により測位精度の低下が予想されるため、この空間では屋内測位環境の構築が求められる。しかし、側面が開いているため GPS の電波もある程度受信できることから、屋外空間と屋内空間の 2 種類の空間検知を対象とした IO Detection 手法の適用が難しい[9]。上部を覆われた半屋外空間への進入に伴い受信する GPS の信号が減衰するという事象は、都市空間において GPS の信号を直接受信できない Non-Line-of-Sight (NLOS) の状態と類似する。そのため、3D 建物モデルを利用して取得した GPS の信号が NLOS かどうかを判定し、IO Detection に活用することも考えられる[10][11]。しかし、上部を覆われた半屋外空間の滞在検知に利用するには精緻な 3D 建物モデルが求められるため、コストの面で課題がある。また、衛星配置は時間とともに常に変化することと、上部を覆われた半屋外空間の空間形状の特性も空間により様々であることも考慮する必要がある。上部を覆わ

^{*}慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
〒223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1
Graduate School of System Design and Management, Keio University, 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa, 223-8526

れた半屋外空間を考慮したシームレス測位や空間コンテキスト検知の研究は一部に見られるが、上部を覆われた半屋外空間の空間形状特性の違いや衛星配置の変化に対応した手法は見受けられない[12-14].

本研究では、3D 建物モデルを使わずに上部を覆われた半屋外空間への滞在を GPS の信号の変化によって検知する方法として、上部を覆われた半屋外空間の空間形状特性を簡易的に抽出することに着目した。具体的には、上部を覆われた半屋外空間の高さ、奥行き、側面の開放方向をパラメータとして使用することにより、軌道上の衛星の中から上部を覆われた半屋外空間の滞在によって GPS の信号が減衰する可能性の高い衛星を選定できると考え、空間特性と衛星配置の関係から GPS の信号の減衰をモニタリングする衛星を特定する手法を設計した。この提案手法は、National Marine Electronics Association (NMEA) 0183 Standard に基づく GSV メッセージで取得した各衛星の仰角及び方位角を利用して上部を覆われた半屋外空間の滞に伴い GPS の信号が減衰する可能性の高い衛星を選定する手法であり、常に変化する衛星の配置にも対応可能である。加えて、上部を覆われた半屋外空間に滞在しているかどうかを判定するための判定手法として、ファジィ推論を利用した判定フローを設計した。ファジィ推論を利用することにより、判定のための閾値を明確に設定できないこのような特殊な環境においても推論により判定を行うことが可能になる。設計した手法の有効性を検証するために、私達は上部を覆われた半屋外空間を3か所抽出し、評価実験を行った。評価実験は上部を覆われた半屋外空間に進入する深さを3段階変化させて計測を行い、本研究の提案手法は高い確率で上部を覆われた半屋外空間の滞を検知することが出来た。

上部を覆われた半屋外空間は、Yan ら[15]によって top-bounded space (TBS) と定義されている。TBS が存在する代表的な空間の事例としては工場や物流施設が挙げられ、上から見ると細長い矩形の形状であり、長辺方向の1辺は側面が開けており屋外と繋がっている。このような細長い形状の top-bounded space を本研究では Elongated top-bounded space (ETBS) と呼ぶこととする。これらの施設では、大型トラックが ETBS に乗り入れ、作業員やフォークリフトが積荷の搬入や仕分け作業を行っている。製造や物流の分野では、Smart Factory や Smart Industry の実現に向けて、作業員やフォークリフトの位置を計測し、行動を分析することによって生産性向上に役立てる取り組みが進んでいる。作業員やフォークリフトが屋外で作業をしているのか ETBS で作業しているかを正しく検知できないと計測したデータの信頼性が損なわれることから、本研究では工場や物流施設における作業員やフォークリフトのトラッキングを、代表的な利用場面に設定した。

なお、現実空間に存在する TBS の形状は非常に様々であり、すべての事例に適用可能な手法を設計することは難しい。本研究では、工場や物流施設に見られる細長い矩形の形状で、長辺方向の1辺の側面が開けている空間を対象とした。一方で、Yan ら[16]が TBS の例として挙げている側面に壁が全く無く4辺が全て開けている TBS や長辺方向の2辺が壁面

で覆われている TBS、加えて、上から見た時に矩形の形状ではない TBS は、本研究で提案する手法の対象外とする。

2. 関連研究

屋内外シームレスな測位や IO detection の提案は数多く行われているが、TBS も考慮した手法の研究は一部に限られる。Zou ら[12]や Gao ら[14]の研究では、TBS の滞の検知に GPS の Signal-to-Noise Ratio (SNR) の値の変化が利用されており、取得可能な衛星の SNR の平均値が、屋外滞在時と比較して下がった場合に、TBS の滞と判定している。Zou ら[12]は、TBS 滞時における取得可能な衛星の SNR の平均が屋外と比較して 20%以上減衰することを閾値として提案している。Gao ら[14]は、Open-sky/Urban/Intermediate/Indoor の4つの空間分類を GPS の SNR を用いて検知する手法を提案している。具体的には、SNR の値が 25dB 以上の衛星の合計と SNR の合計を屋外の場合と比較すると明確な差が出ることを利用している。しかしながら、どちらの研究も対象とする TBS の特性が定量的に示されていない。そのため、提案された手法が他の空間でも適用可能かどうかは定かでない。

一方、TBS 進入時に SNR の値が変化するという事象は、受信端末が建物などの遮蔽の影響を受けて GNSS の電波を直接受信できない NLOS の状態になり、直接受信できる Line-of-Sight (LOS) の状態と比較して SNR の値が低下するという性質を利用している[17]。LOS/NLOS の判定を行う代表的な方法の1つとして、3D 建物モデルを利用する方法がある。あらかじめ、衛星の位置と 3D 建物モデルとのマッチングにより、各位置における衛星の見通し状況をフィンガープリントとして保持し、実際に取得した衛星の SNR の LOS/NLOS 比率を算出し、LOSと推定される衛星のみを採用することで都市部における精度向上を図っている[11]。3D 建物モデルを利用することで LOS/NLOS の予測をある程度行うことが可能になるが、庇の形状を考慮した 3D 建物モデルの構築は CityGML で定める Level of Detail 2 以上の精緻なモデル化が必要となり、モデルの構築コストの面で課題がある[18]。

また、空間のコンテキストを判定する際にファジィ推論を利用した事例として、Gao ら[14]は取得した衛星の SNR のデータを入力値としてファジィ推論を利用して、都市空間かオープンスカイな状況かの空間コンテキストを判定する判定フローを提案している。一方で、この判定フローは他の空間コンテキストの判定には用いることが出来ないため、本研究で対象とする ETBS の検知のためには新たな判定フローを設計する必要がある。

3. 予備実験

本研究で対象とする ETBS は、物流施設等によく見られる大きな庇や屋根に覆われた空間である。真上から見ると長方形の形状であり、長辺方向の1辺に壁面があり、もう1辺には壁面がなく開けている。関連研究で述べたとおり、TBS を考慮したシームレス測位や IO detection 手法は一部の研究で行われているが、空間的な特徴が異なるため、既存の手法がこのような ETBS でも適用できるかは定かでない。また、このような特

殊な環境で取得する GPS の信号がどのように変化するかはこれまでの研究で十分に明らかになっていない。

そこで、ETBS 進入時や退出時に GPS の SNR 値がどのように変化するかを確認するために、工場や物流施設に存在する ETBS と類似する空間を選定し、予備実験を行った。予備実験実施箇所の概要を図 1 に示す。予備実験では、被験者が屋外から約 1m/s で歩行しながら ETBS に進入し、ETBS の中を約 20m 歩行後屋外に再び出てくるルートを設定した。そして歩行中は NMEA 0183 Standard に基づく GSV メッセージで取得される各衛星の 1 秒ごとの仰角、方位角、SNR 値を、スマートフォンアプリケーションを利用して取得した。Site-A 及び Site-B における歩行ルートを、図 2 に示す。ETBS への進入の度合いによる値の変化を確認するため、1m 進入/2m 進入/3m 進入の 3 ルートを設定し、それぞれ 3 回計測を行った。また、衛星の配置は時間帯によって常に変化することから、各サイトに対して午前と午後にそれぞれ計測を行い、異なる衛星配置の中で計測を行った。計測回数は、各ルートを午前と午後に 3 回ずつ計測したため、1 サイトにつき 18 回、合計で 36 回である。計測端末にはスマートフォン機種 A (Fujitsu Arrows m4 OS version : Android 7.1.1) を使用し、地上から 1.2m の地点で画面を上向きに手で水平に固定した状態で歩行した。

Site-A での午前の実験において、各ルートにおける取得した衛星全体の SNR の平均値の変化を示したグラフを図 3 に示す。グラフの縦軸は、計測開始時に取得した全衛星の SNR の平均値を基準に、その値と 1 秒毎に取得する全衛星の SNR の平均値を比較し、変化の度合いを示している。例えば、1m 進入ルートの 1 回目の計測において、計測開始時の全衛星の SNR の平均値は 33.2dB-Hz だった。この値を基準とし、5 秒歩行地点での全衛星の SNR の平均値は 33.8dB-Hz であったため、変化率は 0.02 となる。また、10 秒歩行地点での平均値は 29.9dB-Hz であったため、-0.10 となる。また、緑の線は ETBS に進入した時点と退出した時点を示しており、緑の線に囲まれた範囲が ETBS 内を歩行していた時間と

図 1 予備実験実施箇所 (著者撮影)

Fig.1 Preliminary experiment site (photo by author)

図 2 予備実験での歩行ルート

Fig.2 Walking route of preliminary experiment

なる。グラフ内の赤の点線は、変化率が-0.2 を示すラインである。Zou ら[12]の手法では、屋外歩行時の SNR 平均に対して 20%以上 SNR が減少した時をコリドー状の TBS への進入の閾値としていたが、本研究で対象とする ETBS では 20%以上減るケースと減らないケースがさまざまであることが分かった。

次に、取得した全衛星の SNR 平均値ではなく、個々の衛星の SNR 値の変化を確認した。Site-A の午前計測における 2m 進入ルートでの主な衛星の SNR 値の変化を、図 4 に示す。この図も図 3 と同様に緑の線に囲まれた範囲が ETBS 内の歩行であるが、縦軸は SNR の値を示している。個々の衛星の SNR の値の変化をみると、仰角の高い衛星は TBS への進入前後に大きく SNR が減少する衛星し、仰角の低い衛星は進入しても SNR が変化しないことが確認できる。また、同じルートで 3 回計測するとき、回ごとに取得する SNR が大きくばらつくことはないが、値が取得できないことがあることがわかった。このことは、同じルートを走行しても全体の SNR 平均にば

図3 Site-Aの午前計測におけるSNR平均値の変化
Fig.3 Change in average SNR for morning measurements at Site-A

らつきが発生する原因の一つであると考えられる。衛星の配置は時間とともに常に変化するため仰角の高い衛星と低い衛星の割合も常に変化することを併せて考えると、既存手法による衛星全体でのSNRの平均値というアプローチは、衛星の配置が常に変化する中で安定的にETBSの滞在を検知するのは難しいと考えられる。

4. 空間形状特性とファジィ推論を利用したETBS滞在検知手法の設計

4.1 進入角度閾値の算出と空間特性を利用した衛星の分類手法の設計 予備実験の結果から、ETBSの滞に伴いSNRが変化する衛星を特定することができれば、その衛星のSNRの変化をモニタリングすることで安定的にETBSでの滞を検知することができると推定できる。また、衛星の配置は時間とともに常に変化するが、ETBSの存在を加味することにより軌道上の衛星は図5に示すように4つのグループに分類

図4 各衛星のSNR値の変化(Site-Aの2m進入ルート午前計測時)

Fig.4 Change in SNR value of each satellite (in the morning measurement of 2m entry route at Site-A)

することができる。仰角が高く、側面の開放方向にあるSatellite (a)の衛星は、屋外にいるときは底や建物の影響を受けずに衛星の信号を受信することができるが、ETBS内に入ると底の影響を受けて十分に信号を受信できなくなる。Satellite (b)の衛星は建物方向に位置するため、SNRが減衰したときに底の影響なのか建物の影響なのかを判断するのが難しいが、SNRの減衰は起こると考えられるためTBS滞在の検知に利用することができる。Satellite (c)の衛星は、仰角が高くないため、TBSへの進入に伴うSNRの減衰が起きづらい。一方でSatellite (a)の衛星が減衰してもSatellite (c)の衛星の減衰が起こらないことの組み合わせによって受信端末のTBS滞在検知に利用することが出来る。あるいは、受信端末がETBSの奥まで進んだ時などに減衰が起こる可能性がある。Satellite (d)の衛星は、建物方向に存在する仰角の高くない衛星のため、屋外にいても十分なGPS信号の受信が見込めない衛星といえる。

図5 Elongated top-bounded spaces (ETBS) を考慮した衛星配置と GPS 信号減衰の関係

Fig.5 Relationship between satellite configuration and GPS signal attenuation considering elongated top-bounded spaces (ETBS)

一方で、衛星の配置は常に変化しており、かつ、ETBS の形状も様々であることから、ETBS 滞在検知のために監視対象とする衛星を固定の閾値によって抽出することは難しい。そこで、本研究では滞在を検知したい ETBS の空間的な特性を利用して簡易な方法で監視対象の衛星を特定する手法を設計した。ETBS は屋外との境界面から壁までの奥行きと地上からの高さを計測することで、どの程度まで深く進入できる空間なのかを以下の式によって定量的に示すことが出来る。

$$\theta_{max} = \tan^{-1} \frac{D}{(H_{tbs} - H_m)} \quad (1)$$

ここで、 θ_{max} は最大の進入角度、 D は ETBS の奥行き、 H_{tbs} は ETBS の高さ、 H_m は地上から受信端末であるスマートフォンの保持高さを示す。例えば、Site-A の場合、最も奥まで進入したときの角度は図 6 に示す通り 54° となる。したがって、論理上はスマートフォンを持った作業員が一番奥まで進入すると 36° より仰角の高い衛星は底の影響を受けて SNR が低下することになる。逆に、仰角が 36° より低い衛星は作業員が一番奥まで進入しても底の影響を受けないことになる。ただし、実際には一番奥まで行かずに進入角度の浅い位置で作業することも想定される。そのような状態であっても ETBS の滞在を検知できる可能性を上げるため、奥行きの 1/2 を基準に進入角度を設定することで、底の影響を受ける衛星を抽出することとした。Site-A の場合、この進入角度は 54° となる。本研究ではこの角度のことを進入角度閾値と定義する。進入角度閾値は、以下の式で表すことが出来る。

$$\theta_{eat} = 90 - \theta_{med} \quad (2)$$

図6 進入角度閾値の算出例 (Site-A)

Fig.6 Calculation example of entering angle threshold at Site-A

$$\theta_{med} = \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2}D}{(H_{tbs} - H_m)} \quad (3)$$

ここで、 θ_{eat} は進入角度閾値、 θ_{med} は奥行きの 1/2 を基準とした場合の進入角度を示す。また、側面の開放方向は Google Maps 等の地図サービスや地理情報システムを利用することにより取得できる。Site-A の場合の側面の開放方向の角度は、図 7 に示すとおり、 87° から 267° となる。

図7 側面の開放方向の例 (Site-A)

Fig.7 Side opening orientation example at Site-A

表 1 Elongated top-bounded space (ETBS) 滞在検知のための衛星の分類

Tab.1 Satellites classification for elongated top-bounded space (ETBS) stay detection

	Whether the elevation angle is higher than the entry angle threshold	Whether the azimuth is in the side open orientation
Group 1a	Yes	Yes
Group 1b	Yes	No
Group 2	No	Yes
Group 3	No	No

軌道上の衛星は、“進入角度閾値”と“側面の開放方向”の2つのパラメータにより、表1に示すグループに分類することが出来る。このうち、Group 1には Group 1aと Group 1bが存在するが、Group 1aに属する衛星がETBSへの進入検知の対象として最も優先度の高い衛星となる。衛星の配置状況により Group 1aに該当する衛星が存在しない場合、次に優先度の高い衛星は Group 1bの衛星となる。Group 2の衛星は、仰角は高くないが側面の開放方向に存在する衛星である。このグループの衛星は仰角が進入角度閾値より低いため受信端末がETBS内にいてもSNRの値が減衰する可能性は低い。Group 3の衛星は建物方向にある仰角の低い衛星のため、滞在検知の判定には使用しない。Group 1と Group 2の各 Groupに複数の衛星が該当した場合、4.2に示す判定フローには Group内で最も仰角が高い衛星を選定する。

4.2 ファジィ推論を活用した滞在判定フローの設計 関連研究で述べた通り、幾つかの既存研究では、TBSへの進入検知にSNRの値が屋外空間滞在時と比較して減衰することを利用している。しかし、この手法を利用するには、受信端末が屋外空間に位置していることがあらかじめ分かっている必要がある。Seco-Granadosら[19]によると、SNRの値は屋外空間では35~45dB-Hzの間であり、窓の近くなどの明るい屋内では25~35dB-Hzになることが報告されている。しかしながら、受信端末の機種ごとに算出されるSNRの値は異なるため、この値だけで屋外か屋内にいるかを判定するのは問題がある。一方で、傾向として値が大きければ屋外にいる可能性が高く、値が小さければ屋内やETBSにいる可能性が高いことは明らかである。このように、一律の閾値を設定するのは難しいあいまいな事象を取り扱う推論手法の代表的なものとしてファジィ推論がある[20][21]。本研究では、ファジィ推論を活用することで受信端末が取得したSNRの値を入力値として受信端末が屋外にいるのかETBS内にいるかを判定するフローを設計した。

ファジィ推論を適用するためには、メンバシップ関数とファジィルールを設計する必要がある。メンバシップ関数は、入力値

図 8 SNR の判定のためのメンバシップ関数
Fig.8 Membership function for SNR determination

図 9 コンテキスト判定のためのメンバシップ関数
Fig.9 Membership function for context determination

がある集合に対してどの程度適合するかを0から1の間の数値で表す関数であり、ファジィルールは、メンバシップ関数によって得られた出力値からどのような推論を導くかを

$$\text{If } x \text{ is } P \text{ then } y \text{ is } Q \quad (4)$$

の形式で記述したルールである。この時、“ x is P ”の部分の前件部、“ y is Q ”の部分の後件部と呼ぶ。受信端末が屋外にいるかETBS内にいるかを判定するために本研究で設計したメンバシップ関数を図8、図9に、ファジィルールを表2に示す。図8は前件部においてSNRの値が“高い(HIGH)”か“低い(LOW)”かを推論するためのメンバシップ関数である。SNRの値が“高い(HIGH)”ほど屋外に滞在している可能性が高く、“低い(LOW)”ほどETBSにいる可能性が高いと推論する。既存の研究から、SNRの値が35dB-Hz以上の場合には多くの場合LOSの状態であり、逆に20dB-Hz以下の場合には多くの場合NLOSであることが報告されている[11]。そのため、SNRの値が“高い”場合の閾値を35dB-Hzに、SNRの値が“低い”場合の閾値を20dB-Hzに設定した。一方で、20~35dB-Hzの間はLOSとNLOSが混在するがSNRの値が高くなるほどLOSの状態である確率が高いことも同様に報告されている[11]。そこで、20dB-Hzと35dB-Hzとの間を直線で結ぶメンバシップ関数を設計した。図9は後件部において、前件部の結果から推定されるコンテキストの取る値を示している。本研究で求めたいコンテキストは“Outdoor”か“ETBS”のどちらかであるため、シングルトン型ファジィ推論を採用し、“1”または“-1”を付与する。表2は、受信端末がETBS内に滞在しているかどうかを判定するために設計したファジィルールであり、

表 2 コンテキスト判定のためのファジィルール

Tab.2 Fuzzy rules for context determination

No.	Rule
R1	If aveSNR _{g1} is HIGH, and aveSNR _{g2} is HIGH, then IC _i = 1
R2	If aveSNR _{g1} is HIGH, and aveSNR _{g2} is LOW, then IC _i = -1
R3	If aveSNR _{g1} is LOW, and aveSNR _{g2} is HIGH, then IC _i = -1
R4	If aveSNR _{g1} is LOW, and aveSNR _{g2} is LOW, then IC _i = -1

aveSNR_{g1}は Group 1 の SNR の 5 秒間平均値, aveSNR_{g2}は Group 2 は Group 2 の SNR の 5 秒間平均値を表す. 第 1 章で述べたとおり, 本提案手法の代表的な利用場面は工場や物流施設における行動分析のための作業員やフォークリフトのトラッキングである. 作業員やフォークリフトをトラッキングするうえで屋外か ETBS にいるかを秒単位で判定する必要は生じないため, SNR の値を 5 秒間取得し, その平均値によって判定を行うこととした. また, IC_iは, 想定されるコンテキストを表す. 表 2 に示した 4 つのルールは選定された 2 つの衛星の状態を表している. 例えば, R1 の場合, 前件部はaveSNR_{g1}とaveSNR_{g2}の値がともに高い場合の状態の推定を示している. R1 の場合, “Outdoor”が想定されるコンテキストのため, 1 を値として付与する. R2~R4 の場合, aveSNR_{g1}とaveSNR_{g2}の値のいずれかまたは両方が低い場合の推定を示しているため, 後件部においてIC_iの値として-1 を付与する. 4 つのファジィルールから, 式 (5) によってIC_{total}の値が算出される.

$$IC_{total} = \frac{\sum_i \mu_i IC_i}{\sum_i \mu_i} \quad (5)$$

ここで, μ_i はファジィルールを構成する各ルールにおける適合度を示す. この時, IC_{total}の値は,

$$-1 \leq IC_{total} \leq 1 \quad (6)$$

となるため, 最終的なコンテキストの判定は, 式 (7) によって決定することとする.

$$IC_{fin} = \begin{cases} ETBS & (-1 \leq IC_{total} < 0) \\ Outdoor & (0 \leq IC_{total} \leq 1) \end{cases} \quad (7)$$

例として, 2 つの入力値がaveSNR_{g1}=28, aveSNR_{g2}=33 だった場合のIC_{fin}の算出過程を, 図 10 に示す. この場合, IC_{total}の値が-0.16 のため, IC_{fin}は ETBS と判定される.

5. 評価実験

5.1 概要 設計した検知手法の有効性を確認するために, 予備実験とは異なる ETBS を 3 箇所選定して評価実験を行った. 評価実験実施箇所の概要を, 図 11 に示す. Site-C および Site-D は鉄製の素材の庇によって空間が覆われており, Site-E は上部に建設物が存在する. 空間の上部を覆う素材や形状について, 本研究で提案する手法は, 光を透過する素材に関しては実験を実施できていないため適用外とするが, それ以外の素材や形状については特に限定をしない.

図 10 提案手法に基づくコンテキストの判定例
Fig.10 Example of context determination based on the proposed method

【Site-C】

Height : 4.6m
Depth : 4.3m
Entering Angle
Threshold : 58°
Side Opening
Orientation : from
273° to 93°

【Site-D】

Height : 4.5m
Depth : 4.5m
Entering Angle
Threshold : 56°
Side Opening
Orientation : from
10° to 190°

【Site-E】

Height : 4.6m
Depth : 4.0m
Entering Angle
Threshold : 59°
Side Opening
Orientation : from
200° to 20°

図 11 評価実験実施箇所(写真は著者撮影)
Fig.11 Evaluation experiment sites (photos taken by author)

実験は、図 12 に示すように 1 つの箇所に対して 4 箇所計測点を設定し、計測点ごとに 5 秒間静止して 1 秒ごとに NMEA 0183 Standard に基づく GSV メッセージで記録される各衛星の SNR、仰角及び方位角の値をスマートフォンアプリケーションを利用して取得した。P0 は屋外での計測であり、ETBS と誤検知する可能性を確認するために実施した。P1～P3 に関しては、庇と屋外の境界面から 1m ずつ進んだ位置に計測点を設定した。計測端末は、予備実験の時と同様に機種 A を使用し、地上から 1.2m の高さで体の前でスマートフォンを水平に保持した状態で計測した。計測点ごとに 3 回計測を行い、さらに、時間に伴う衛星の配置の変化を考慮するため、これらの計測を各実験箇所に対して午前と午後にそれぞれ行った。Site-E に関しては利用状況の関係から P3 での計測は実施しなかった。計測回数は、合計で 66 回である。

図 12 実験実施箇所における計測点の位置

Fig.12 Position of the measurement points at the experimental site

5.2 提案手法による ETBS 滞在の検知精度の評価 まず、設計した手法に従って監視対象とする衛星の選定を行った。実験実施時の衛星の配置例として、Site-C での実験時の午前と午後の衛星配置を図 13 に示す。点内の数字は衛星の Pseudo Random Noise (PRN) コードを示す。衛星の配置は時刻とともに常に変化するため、選定される衛星も時刻とともに変化するが、図 13(a) の時点では、Group 1 の衛星として PRN=28 の衛星が、Group 2 の衛星として PRN=22 の衛星が選定された。Group 1b に属する衛星として PRN=3 の衛星が存在したが、Group 1a の衛星が存在したため、分析には使用しなかった。

各計測点で計測した Group 1 と Group 2 の衛星の SNR の値から平均値 aveSNR_{g1} 及び aveSNR_{g2} を算出した。P0 から P3 の計測点ごとに分けてまとめた結果を、表 3 に示す。なお、実験時の計測位置と NMEA 0183 Standard に基づく GGA メッセージに含まれる測位位置との誤差は、最大で 16.17m だった。屋外の計測点である P0 の場合、Group 1 及び Group 2 の平均値はともに 35dB 以上となり、4.2 で示した

図 13 評価実験の衛星配置例

Fig.13 Example of satellite configuration in evaluation experiment

判定フローで“Outdoor”と判定されるために十分大きな値となった。Group 1 の場合、境界面から奥に進んだ計測点に従って aveSNR_{g1} の値は減少し、P3 の計測点では全ての計測で屋外と比較して大きな減衰が見られた。一方で、P1 の計測点では aveSNR_{g1} の値が 40dB と全く減衰していない場合もあった。

次に、算出した aveSNR_{g1} 及び aveSNR_{g2} を基に、4.2 で示した判定フローに従って“Outdoor”か“ETBS”かを判定した。P0 から P3 までの検知精度を、表 4 に示す。全体では 89.4% の検知精度となり、P3 の計測点では 100% の検知精度となった。一方で、P1 の計測点での検知精度は 66.7% に留まった。P1 での計測点で誤判定となった計測における衛星配置の例として、 aveSNR_{g1} 及び aveSNR_{g2} の値を図 14 に示す。いずれの場合も、 aveSNR_{g1} の値が高い値だったために誤判定となった。

表 3 各計測点における取得した SNR 平均

Tab.3 Acquired SNR average at each measurement point

	aveSNR value (dB-Hz)	Group 1	Group 2
P0	Average	35.68	37.79
	Maximum	38.00	42.60
	Minimum	33.60	32.60
	Standard deviation	1.41	3.22
P1	Average	33.20	32.41
	Maximum	40.00	36.80
	Minimum	26.60	26.60
	Standard deviation	4.50	3.05
P2	Average	27.46	31.60
	Maximum	34.20	39.80
	Minimum	19.00	27.00
	Standard deviation	4.88	4.16
P3	Average	24.68	28.56
	Maximum	28.80	32.20
	Minimum	20.60	22.20
	Standard deviation	2.50	3.88

表 4 評価実験における検知精度

Tab.4 Detection accuracy in evaluation experiment

	Number of measurement	Number of correct detections	Detection accuracy
Outdoor	18	18	100.0%
1m entry	18	12	66.7%
2m entry	18	17	94.4%
3m entry	12	12	100.0%
Total	66	59	89.4%

図 14 誤判定時の衛星配置の例

Fig.14 Example of satellite configuration for the false decisions

5.3 異なる受信端末を使用した場合の検知精度の評価

スマートフォンに搭載される GPS 受信機は機種によって異なり、性能面で違いがある。同じ場所でも機種が違えば取得する SNR の値が異なることも想定される。予備実験及び 5.1 の評価実験は同一機種で実施したが、機種が異なる場合での提案手法の有効性を確認するために、機種 B (Google Pixel3, OS version: Android 10) を用いて同様の実験を行い、検知精度を算出した。実験は Site-D で行い、機種 A と機種 B を 2 台平行に保持した状態で P0 から P3 の各計測点で 3 回ずつ計測を行い、Group 1 および Group 2 の衛星の SNR を 5 秒ずつ計測した。

表 5 に、各機種の計測結果を示す。また、4.3 で提案した判定フローに基づく検知精度を、表 6 に示す。機種の違いにより平均値で 3~5dB-Hz 程度の値の違いがみられたが、どちらの機種も全ての計測で正しい検知が行われ、値の違いが検知精度に影響を与えるほどではないことを確認した。また、提案した判定フローが他の機種にも適用可能であることを確認した。

6. 考察

本研究は、上部が覆われており、かつ側面は開けている ETBS での滞在を安定的に検知するために、高さ、奥行き及

表 5 機種の違いによる取得した SNR 平均の比較

Tab.5 Comparison of acquired SNR averages for different models

	Model A		Model B	
Model name	Fujitsu Arrows m4		Google Pixel3a	
OS version	Android 7.1.1		Android 10	
Average of aveSNR (dB-Hz)	Group 1	Group 2	Group 1	Group 2
P0	36.40	34.40	35.67	38.20
P1	30.60	27.47	26.87	28.93
P2	32.20	26.80	27.73	26.67
P3	26.47	37.80	27.40	36.6

表 6 各機種における計測点ごとの検知精度

Tab.6 Detection accuracy at each measurement point in each model

	Model A		Model B
	Number of measurement	Number of correct detections	Number of correct detections
Outdoor	3	3	3
1m entry	3	3	3
2m entry	3	3	3
3m entry	3	3	3
Total	12	12	12

び側面の開放方向の 3 つのパラメータで構成する ETBS の空間特性から監視対象とする衛星を選定する手法を設計した。さらに、選定した衛星の SNR の値をもとに、ファジィ推論を利用して ETBS の滞在を判定するための判定フローを設計した。この手法を利用することにより、3 か所の評価実験箇所において 89.4% の確率で滞在が検知できることを確認した。

一方、本研究の実験では、スマートフォンを体の前で水平に保持した状態で測定しており、実運用時に想定される保持状態とは異なっている。保持状態が異なると GPS の信号の受信状況も異なるため、実際に提案手法を工場や物流施設に適用する際には、実際のスマートフォンの保持状態を考慮して閾値の変更が必要となる可能性がある[22]。また、例えばトラック内にいるドライバーやトラックのコンテナ内で作業をする作業員等は GPS の信号の受信状況が大きく異なるため、提案手法による滞在検知は難しいと想定される。これらのユースケースもトラッキングの対象とする場合は、代替の検知手法が必要となる。

加えて、提案手法には大きく 3 つの課題が残っている。1 つめは 1m 進入のケース、つまり進入の角度が浅いケースでは検知精度が 66.7% に留まっている点である。滞在を検知できなかった計測における Group 1 の衛星の仰角は特段低くはな

かったが、図 14 にあるとおり開放している側面に対して衛星の方位角がほぼ正対している位置関係にあった。正対している位置関係にある時は、進入の角度が浅い場合は仰角がより高くないと GPS 信号を直接受信できてしまい SNR の減衰が発生しにくい。本研究の ETBS の側面の開放方向の角度と衛星の方位角を詳細に比較して SNR の減衰の発生しにくさを考慮することは出来ておらず、今後この点を改良することで検知精度を改善させることは可能であると考え。また、高い仰角にある衛星をより利用できるようにするうえでは、本研究では利用しなかったが、Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) も利用することにより、QZSS の利用可能地域では検知精度を改善できると考える。加えて、提案手法では 5 秒間計測した SNR の平均値を用いてファジィ推論による判定を行っているが、表 3 に示すとおり、屋外と ETBS との境界に近い P1 や P2 の計測点では標準偏差の値が大きく、計測回ごとの値のバラつきが大きくなっている。計測時間を変更することによってバラつきの改善や進入角度が浅いケースでの検知精度改善が見込めるかについては、さらなる分析が必要である。

2 つ目は、現時点では提案手法の利用は側面の開放方向に高いビル等の建物がない環境に限られるという点である。ビルが林立する都市空間では屋外にいても LOS の状態の GPS 信号を受信することが難しいため、監視対象の衛星の選定方法やファジィ推論で用いたメンバシップ関数は都市空間で使用する場合には改良が必要である。また、この点に関連して、本研究では NMEA 0183 Standard に基づく GSV メッセージで取得した値を補正等せずに利用しているが、実際にはマルチパスや回折等の影響を受けていることも想定される。検知精度をさらに向上させる上で、それらの影響をどのように考慮する必要があるかはさらに検討が必要である。

3 つ目は、ETBS 進入に伴う SNR の減衰の度合いがスマートフォンの機種によって異なる可能性があることが挙げられる。本研究では 2 つの機種を利用して提案手法の有効性を検証し、高い確率で検知できることを確認したが、その他すべての機種で汎用的に利用できることを示せた訳ではない。機種が異なれば端末に内蔵されている GNSS 受信機の性能も異なるためすべての機種に適用可能な手法を設計することは難しいと考える。一方で、本研究では Android スマートフォン 2 機種を実験に用いたが、iPhone 端末等より多くの機種を用いて ETBS への進入実験を行うことで、特にメンバシップ関数の妥当性をより精緻に検証することは可能である。

7. むすび

本研究では、既存の IO detection 手法では検知が難しい ETBS の滞在を安定的に検知できるようにするために、対象とする ETBS の高さ、奥行き及び側面の開放方向からなる空間特性を利用して軌道上の衛星から検知に必要な衛星を簡易に選定するための手法を設計した。さらに、GPS の SNR を利用して滞在を検知するための、ファジィ推論を用いた判定フローを設計した。そして、提案手法の有効性を確認するために、

3 か所の ETBS を対象に評価実験を行い、高い確率で ETBS の滞在を検知できることを確認した。本研究の結果は、ETBS のような特殊な環境の滞在検知を、3D 建物モデル等を使用せず簡易な方法によって GPS の SNR を利用して検知を実現できるようことを示した点に価値がある。

今後は、本研究で課題となった点を解決するためのファジィ推論による判定フローを改良し、改良の度合いを検証するための実験を実施する。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省宇宙航空技術推進委託費「社会サービスデザインに基づく持続的な宇宙利用連携研究教育拠点の構築」によって実施したものである。

(令和 2 年 11 月 7 日受付, 令和 3 年 1 月 9 日再受付)

文 献

- [1] F. Zafari, A. Gkelias, and K.K. Leung, "A survey of indoor localization systems and technologies," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568-2599, 2019.
- [2] Amar Technolabs Pvt. Ltd., "Use of Bluetooth Beacon Technology in Smart Airport," <https://www.amarinfotech.com/use-of-bluetooth-beacon-technology-in-smart-airport.html>, Oct.2020.
- [3] P. Spachos, and K.N. Plataniotis, "BLE Beacons for Indoor Positioning at an Interactive IoT-Based Smart Museum," *IEEE Syst. J.*, 1-11, 2020.
- [4] H.S. Maghdid, I.A. Lami, K.Z. Ghafoor, and J. Lloret, "Seamless outdoors-indoors localization solutions on smartphones," *Implementation and challenges. ACM Computing Surveys (CSUR)*, 48(4), 1-34, 2016.
- [5] T. Gallagher, B. Li, A.G. Dempster, and C. Rizos, "Power efficient indoor/outdoor positioning handover," *In Proceedings of the 2nd International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN11)*, Sep.2011.
- [6] Y. Zhu, H. Luo, Q. Wang, F. Zhao, B. Ning, Q. Ke, and C. Zhang, "A fast indoor/outdoor transition detection algorithm based on machine learning," *Sensors*, 19(4), 786, 2019.
- [7] S. Zlatanova, J. Yan, Y. Wang, A. Diakité, U. Isikdag, G. Sithole, and J. Barton, "Spaces in spatial science and urban applications—state of the art review," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(1), 58, 2020.
- [8] J. Yan, A.A. Diakité, S. Zlatanova, and M. Aleksandrov, "Finding outdoor boundaries for 3D space-based navigation," *Transactions in GIS*, 24(2), 371-389, 2020.
- [9] F. Feriol, D. Vivet, and Y. Watanabe, "A Review of Environmental Context Detection for Navigation Based on Multiple Sensors," *Sensors*, 20(16), 4532, 2020.
- [10] L.T. Hsu, Y. Gu, and S. Kamijo, "3D building model-based pedestrian positioning method using GPS/GLONASS/QZSS and its reliability calculation," *GPS solutions*, 20(3), 413-428, 2016.
- [11] 内山彰, 勝田悦子, 上嶋祐紀, 山口弘純, and 東野輝夫, "都市区画における GPS 衛星の見通し判定を用いた位置精度向上法の提案," *情報処理学会論文誌*, 55(1), 389-398, 2014.
- [12] H. Zou, H. Jiang, Y. Luo, J. Zhu, X. Lu, and L. Xie, "Bluedetect:

- An ibeacon-enabled scheme for accurate and energy-efficient indoor-outdoor detection and seamless location-based service, ” *Sensors*, 16(2), 268, 2016.
- [13] M. Li, P. Zhou, Y. Zheng, Z. Li, and G. Shen, “IODetector: A generic service for indoor/outdoor detection, ” *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 11(2), 1-29, 2014.
- [14] H. Gao, and P.D. Groves, “Environmental context detection for adaptive navigation using GNSS measurements from a smartphone, ” *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 65(1), 99-116, 2018.
- [15] J. Yan, A.A. Diakit, and S. Zlatanova, “AN EXTRACTION APPROACH OF THE TOP-BOUNDED SPACE FORMED BY BUILDINGS FOR PEDESTRIAN NAVIGATION, ” *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4(4), 2018.
- [16] J. Yan, A.A. Diakit, S. Zlatanova, and M. Aleksandrov, “Top-Bounded spaces formed by the built environment for navigation systems, ” *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(5), 224, 2019.
- [17] L.T. Hsu, “Analysis and modeling GPS NLOS effect in highly urbanized area, ” *GPS solutions*, 22(1), 7, 2018.
- [18] Open Geospatial Consortium, “OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 2.0.0; 2012, ”. <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>, Oct.2020.
- [19] G. Seco-Granados, J. Lopez-Salcedo, D. Jimenez-Banos, and G. Lopez-Risueno, “Challenges in indoor global navigation satellite systems: Unveiling its core features in signal processing, ” *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(2), 108-131, 2012.
- [20] H.J. Zimmermann, “Fuzzy set theory, ” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(3), 317-332, 2010.
- [21] 上原清彦, and 廣田薫, “ファジィ推論: 基本的手法とその拡張 (1), ” *知能と情報*, 28(4), 107-112, 2016.
- [22] C. Vaitl, K. Kunze, and P. Lukowicz, “Does on-body location of a GPS receiver matter?, ” In *2010 International Conference on Body Sensor Networks*, 219-221, Jun.2010.

著者紹介

田端 謙一（非会員） 平 12 横浜国立大学大学院博士前期課程了。同年国際航業(株)入社。現在、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科博士後期課程在学中。屋内外シームレスな測位技術に関する研究に従事。

中島 円（非会員） 平 25 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科博士後期課程了。博士(システムエンジニアリング)。国際航業(株)に勤務し、地理情報システムの開発、研究に従事。令和 2 年より慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科特任教授。

神武 直彦（正会員） 平 17 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士後期課程了。博士(政策・メディア)。令和元年より慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授。主にシステムズエンジニアリング, 宇宙 IoT に関する研究教育に従事。