

# ToF センサで取得する距離データと検知時間差に基づく 入退室の識別による室内人数の算出

山本 拓海<sup>1</sup> 杉本 一彦<sup>2</sup> 串田 高幸<sup>1</sup>

**概要:** 人数計測のためにセンサを利用した IoT デバイスが取り入れられている。室内環境における計測方法の一つに人感センサを取り入れた例があるが、人感センサを1つだけ用いた人数計測では入室と退室を判別することが出来ない。また複数人が同時に入退室を行う。すると複数人が1人と判別され正確な計測が出来なくなる。複数人の検知が可能なセンサを決める基礎実験を行った。その結果、精度がよく物体までの距離をレーザーで取る距離センサを使用する。本研究では、任意の場所において歩行者の通過人数を計測するために、通路に3つ設置した距離センサを用いて、その計測断面を通過した人数及び通過方向を自動的に計測する手法を提案する。結果1人が入室と退室を行う時提案手法で検知が出来た。評価は実際に入退室をした人数と提案で算出した人数との精度で行う。

## 1. はじめに

### 背景

人数計測の目的として都市計画、店舗開発、大規模イベントの群集評価、歩行者の安全、交通流管理、街路開発が挙げられる。研究者は、オフィスビルだけでなく、駅のような公共の場でも人数を数えることに興味を持っている [1]。展示会やスタジアムでは、入口からの来館者数を数え、警備員に情報を提供することができる。訪問者数を管理することは非常に重要である。そのため、入口からの人数の情報は参考になりえる。屋内環境におけるさまざまな技術を使った人物計数については、数多くの研究が行われている [2][3][4]。人数計測に関して、これまで多くの視覚センサベースの解決方法が研究されてきた。しかし、視覚センサベースの人数カウントには制限があり、デメリットはプライバシーの問題で日常生活で自由に使用できないことである [5]。従来の手作業で高精度にカウントする方法は、高い人件費を払わなければならない。また計測者が疲れるとヒューマンエラーが起り、正確な計測が出来ない [6]。この問題を解決するために提案されている機械式シャフト装置などの自動人数カウント装置がいくつかある。それは人的資源の人的コストを節約することができる。また、計測精度も高精度であるが欠点は一度に1人しかデバイスを通

過できないことである。そのため、歩行者に対して使用することは出来ない。

### 課題

歩行者の人数を計測する手段として、人感センサを使用する方法がある。人感センサは設置環境や設置方法、対象の動き方によって検知精度が変動する [7]。図1は課題の概要図である。2人が通過しているが、1人なのか2人なのか判別が出来ない。人感センサは検知内の赤外線を検知すると反応するセンサである。出力される値は検知内に人がいるかないかという1か0の判別であり、どこから検知内に入ったのかという方向を判別することは出来ない。人感センサは赤外線を検知したかどうかで1か0を切り替えるため1つの人感センサでは入室と退室を判別することが出来ない。また複数人が同時に入退室をすると1人なのか複数人なのかの判断が出来ない。よって計測された人数と実際の人数が一致しない。

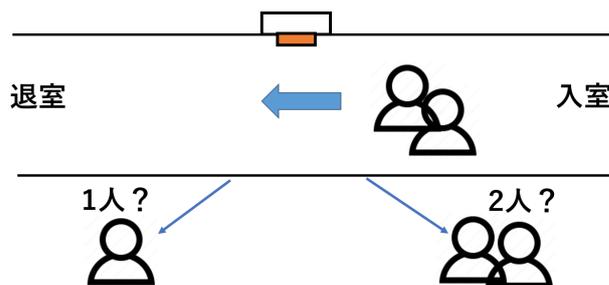


図1 課題の概要図

<sup>1</sup> 東京工科大学コンピュータサイエンス学部  
〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

<sup>2</sup> 東京工科大学大学院バイオ・情報メディアコンピュータサイエンス専攻  
〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

## 各章の概要

第2章では関連研究について述べる。第3章では提案するシステムの具体的な説明と、ユースケース・シナリオについて述べる。第4章では提案したシステムの実装や実験環境について述べる。第5章では実験の評価と分析について述べる。第6章では提案したシステムの議論を述べる。第7章で本研究のまとめを行う。

## 2. 関連研究

人数計測の方法として最も広く用いられているのがビデオカメラの使用である [8]。また、異常事態を検知するための潜在的なエリアの監視、資産の動きを制御・監視するための小売店での顧客追跡、一人で家に滞在する高齢者や病人の監視、人の認識や追跡という幅広い用途で利用されている。ビデオカメラの各フレームに写っている人の数は、画像処理アルゴリズムに基づいて決定され、頭を数えて人数を数える方式や撮影した画像から顔を数える方式もある [9]。しかしイベント会場のような広範囲かつ混み合う場所では、設置台数が増える問題がある。また場所によってはプライバシー保護の理由により設置できない場合がある。

Jeong らは IR-UWB を用いた人数の計測方式を提案した [10]。人から直接反射されるメインクラスターとマルチパスクラスターの両方の情報を使って、1台の IR-UWB レーダーに基づいて人数のカウントを行うアルゴリズムを提案した。アルゴリズムの性能を検証するために、室内および金属充填エレベータでの検証を行い、それぞれ MAE\*<sup>1</sup> が 0.5, 0.68 となった。IR-UWB レーダーを用いた人数計測は、光のない環境だけでなく、プライバシーの問題も解決されるため、コンテキスト認識への応用が可能であると考えている。IR-UWB レーダーの広帯域周波数特性により良好な時間分解能、良好な透過率、および単純なハードウェア構成が可能になる。しかし MAE が低く、正確な検出には適さない。

また、Wi-Fi や Zigbee などの RF 信号を使用した人数計測が研究されている [11][12]。無線信号強度 (RSSI) は、追加コストなしでさまざまなワイヤレスデバイスから簡単に取得できるため、屋内アプリケーションでますます採用されている。しかし無線信号強度 (RSSI) またはチャンネル状態情報 (CSI) に基づいており、精度の向上には限界がある。

## 3. 提案方式

### 基礎実験

提案方法を確立させるため、最適なセンサを決定する。まず基礎実験として1人が50回入室と退室を行う実験を行った。

使用した通路の幅は共に 160[cm] である。また、通路の長さが 240[cm] に対してセンサを等間隔に設置するためにセンサ間を 90[cm] 開けて設置した。

### 人感センサによる人数計測

人感センサは赤外線の変化量を検出する PIR (Passive Infrared Ray) センサである HC-SR501 を使用した。PIR は、人間検出のための技術である。低コストな人感センサは、赤外線を放射している被写体 (人間や動物) が通過すると反応する。PIR センサは、屋内監視における人間検出、位置特定、歩行速度推定に採用されている。3つ連続して配置したセンサで人数が計測できるかを実験した。

図2のように ESP32 に人感センサを取り付け、通路の片側に設置し人がどの方向で通ったかを計測した。計測する高さにも精度に影響が出る。

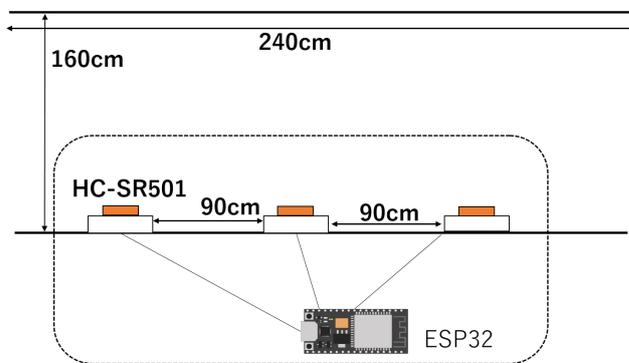


図2 人感センサを3つ用いた

図3は人感センサを、顔の高さ (160[cm]) と肩より下 (120[cm]) でそれぞれ設置し計測した結果である。顔の高さ (160[cm]) の精度が 100% に対して、肩より下 (120[cm]) では 39 回の精度が 78% と下がっている。

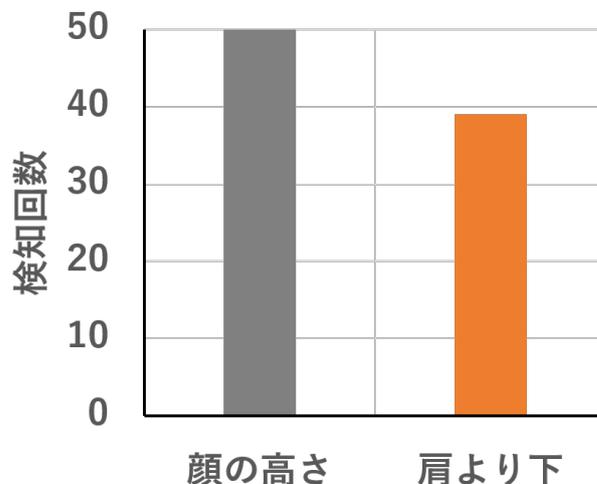


図3 高さによる影響

本実験では人間の顔の高さ (160[cm]) に設置した。1人

\*1 平均絶対誤差

が入室した後、退室を行う実験を 50 回ずつ行った。結果内部人数が 0 人と表示された。よって 1 人が入退室を行う時、人感センサを 3 つ置くことで判別することが出来る。しかし一度人感センサが反応すると出力が 5 秒ほど行われるため、入退室が何度も行われる人の行き来が多い場所では使用に向かない。

### 距離センサによる人数計測

ToF(Time of Flight(飛行時間))を使用している距離センサ VL53L1X(以下距離センサ)を使用した。数値が 130[cm]以下で値として取れた時に人が通ったと判別する。これは日本人の平均肩幅が 40[cm]であることから値を算出した\*2。通路幅が 160cm なので、平均肩幅 40[cm]を引いた 120cm の距離が算出されると人が通ったと判断している。平均肩幅なので肩幅差を考慮した結果、130[cm]が人が通過したときの距離の値とする。距離センサから一番遠い場所から入室をしても 130[cm]の位置で人が通ったかの判別ができる。人感センサと同様に図 4 のように ESP32 に距離センサを取り付け、通路の片側に設置し人の通過を計測した。距離センサはそれぞれ 0.1 秒ごとに距離の値を取り続ける。距離センサの値に変化があると図 5 のように距離

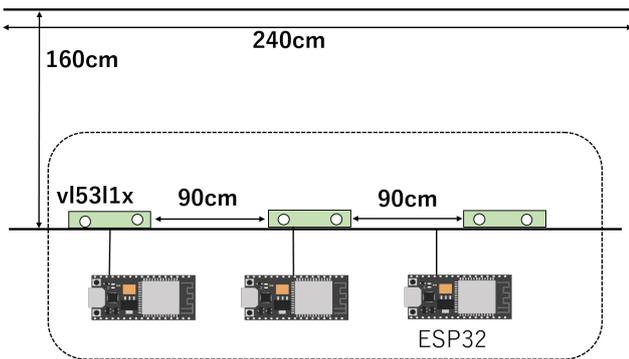


図 4 距離センサを 3 つ用いた基礎実験

が 90mm~100mm になったため、人が通過したと判別される。

また、一人が距離センサの前を通過する時間を調べるために、100 回センサ前を通過する実験を行った。結果は図 6 になった。平均通過時間は 0.49 秒であった。設置する高さに影響はないので、本実験では 150[cm] に設置した。1 人が入室又は退室を行う実験を 50 回ずつ行った。結果内部人数が 0 人と表示された。よって 1 人が入退室を行う時、センサを 3 つ置くことで判別することが出来る。また 0.1 秒ごとに距離の値を取り続けるため、検知間隔が人感センサより距離センサの方が短い間隔でデータを取得することができる。

また距離センサを 2 つのみ用いて計測を行う実験も行っ

\*2 人体寸法データベース参照

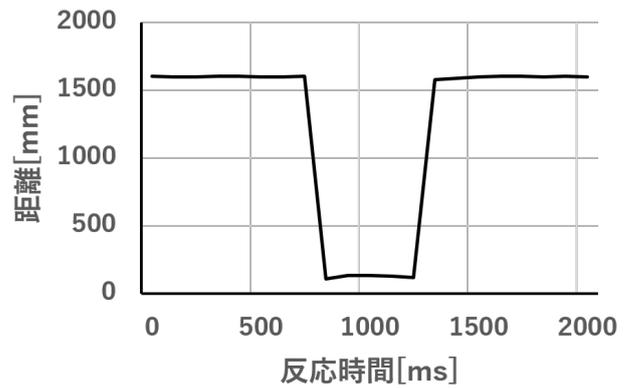


図 5 距離センサの結果

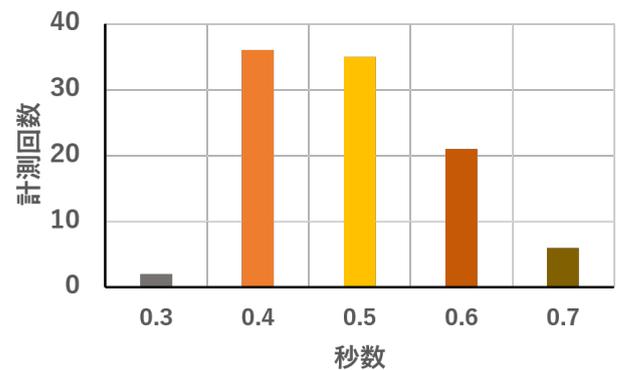


図 6 センサ前の通過時間

た。しかし 2 つを用いた計測だと、図 7 のように 2 人が入室しているのに対して、内部人数は 0 人と表示されている。

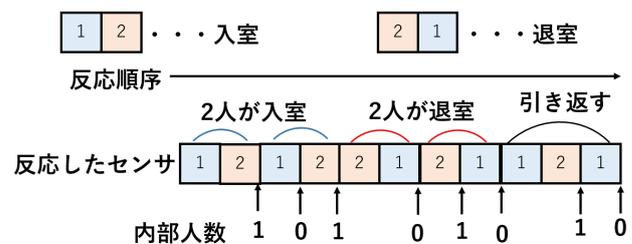


図 7 距離センサ 2 つを用いた計測

上記の結果から距離センサを 3 つ用いた人数計測を行うことにする。また通過する人は以下のパターンで考える。

#### 1 人が通過

基礎実験の結果から距離センサで 1 人が通過するときは正しく通過する方向が検出できる。

#### 2 人が縦並びに入室を行う場合

図 8 のような、人が縦並びに入室することを想定する。

図 9 は 2 人が縦並びに入室した場合、1 つの距離センサの値をグラフ化したものである。図 9 中の (1) の振幅は A

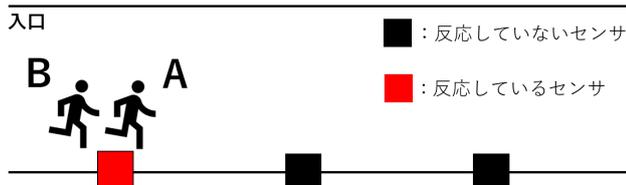


図 8 2人が縦並びに入室を行う場合 1

が通過したことを示す。次の(2)の振幅は縦2人のAとBの間にある隙間である。その後の(3)の振幅でBが通過したことを示す。

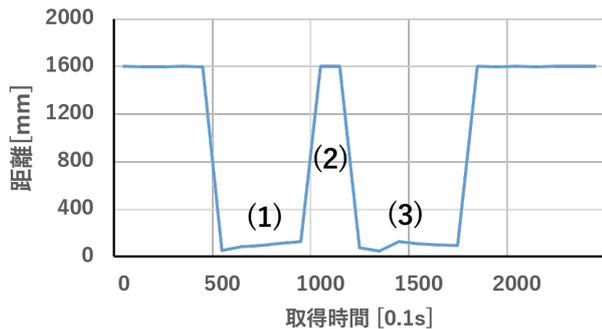


図 9 2人が縦並びに入室を行う場合

## 2人が横並びに入室を行う場合

2人が横並びに入室を行う場合は以下の3通り考えられる。

### センサに近い方が先に入室

図10のような入室を想定する。図のBの人物の方が先にセンサに反応する。

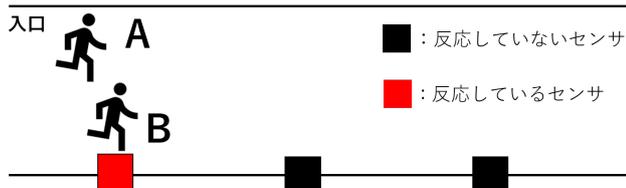


図 10 2人が横並びに入室を行う場合 1

図11は2人が横並びに入室した場合、1つの距離センサの値をグラフ化したものである。このグラフの図11中の(1)の起伏でまずBの腕が反応する。その後(2)で2人の重なる部分が発見され、最後にAが発見される。

### センサに近い方が後に入室

図12のような入室を想定する。図のAの人物の方がセンサに近い。この時の距離センサの変動を図13に示す。

図13は2人が横並びに入室した場合、1つの距離センサの値をグラフ化したものである。このグラフの図13中の(1)の起伏でまずBの腕が反応する。その後(2)で2人の重なる部分が発見され、最後にAが発見される。

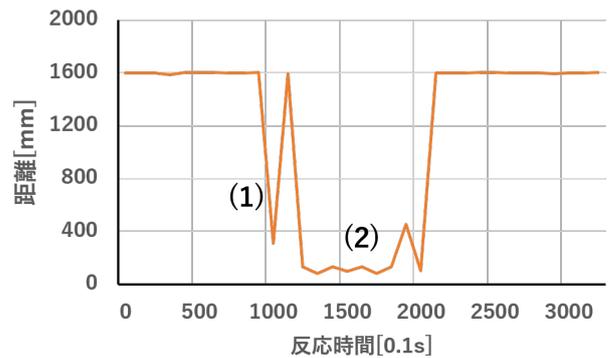


図 11 図10における距離の変化

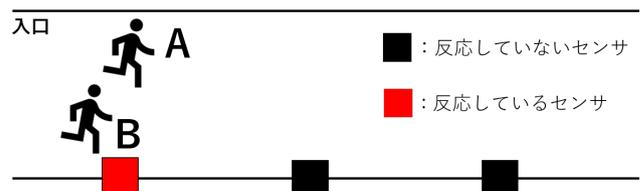


図 12 2人が横並びに入室を行う場合 2

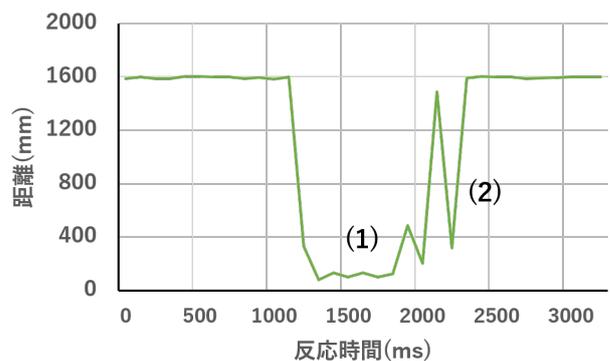


図 13 図12における距離の変化

## 2人が同時に入室

図14のような入室を想定する。図のAの人物とBの人物が同じタイミングで入室をする。この時の距離センサの変動を図15に示す。図15は2人が同時に入室した場合、1つの距離センサの値をグラフ化したものである。1人の時よりBの人物が距離センサに近づくため、距離の値が低くなる。しかし反応時間は1人の場合とさほど変わらない。これは、人が重なっていることで、検知時間が変わらないからである。

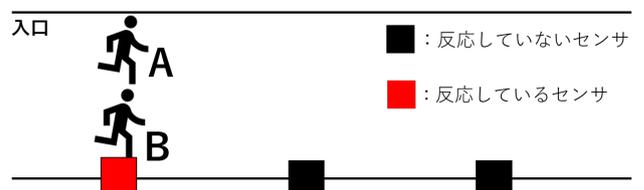


図 14 2人が横並びに同時に入室を行う場合

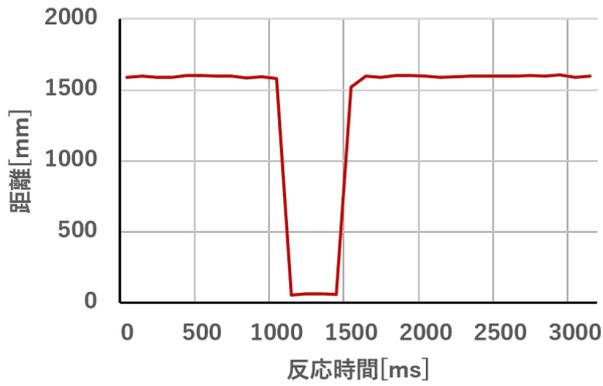


図 15 図 14 における距離の変化

提案方式

本提案では壁に3つセンサを配置し、反応した順序に基づき入室を判断する。基礎実験の結果から距離センサを使用する。提案の条件として以下が挙げられる。

- ・人は等速直線運動で動くこととする。
- ・平均通過速度が0.49秒であるので0.4~0.5秒の間、距離が120cm以下になると人が通ったと判断する。

図 16, 図 17, 図 18 の順に反応する場合、入室が行われると判断される。逆に図 18, 図 17, 図 16 の順に反応する場合、退室が行われたと判断される。

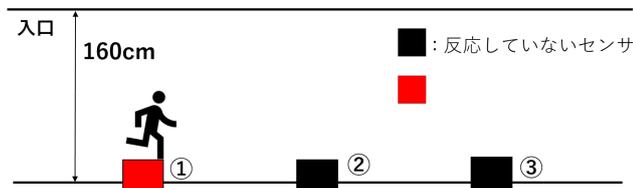


図 16 ①のセンサが反応

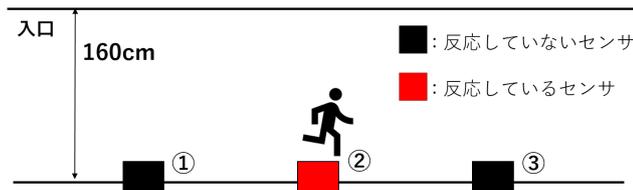


図 17 ②のセンサが反応

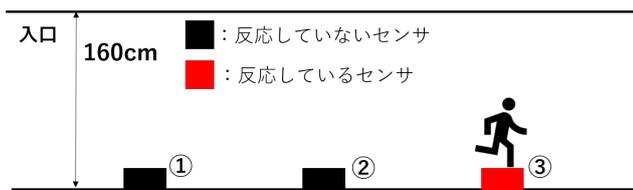


図 18 ③のセンサが反応

下記のアルゴリズムのように、反応順序による判別で

人数  $N$  が変化する。また①や②のセンサで引き返す人がいることを考慮する。反応したセンサの固有の識別子が  $buffer[]$  に格納されていく。入室の判別は最初に格納された値から3つ目までを参照する。判別が行われると最初に格納された値は削除され、次の値から3つ目までを参照し続ける。これにより①や②のセンサで引き返した時でも正しい計測が出来る。

Algorithm 1 入室と退室を判断する

**Input:** センサ 1 からの取得データ  $sensor\_1$   
 センサ 2 からの取得データ  $sensor\_2$   
 センサ 3 からの取得データ  $sensor\_3$   
 人を検知  $motion$

**Output:** 内部人数  $N$

```

1:  $a \leftarrow sensor\_1$ 
2:  $b \leftarrow sensor\_2$ 
3:  $c \leftarrow sensor\_3$ 
4:  $sensornum \leq buffer[]$ 
5: while :
6:   if  $a = motion$  :
7:      $buffer[] \leftarrow a$ 
8:   else if  $b = motion$  :
9:      $buffer[] \leftarrow b$ 
10:  else if  $c = motion$  :
11:     $buffer[] \leftarrow c$ 
12:  end if
13:  if  $[a, b, c]$  :
14:     $N \leftarrow N + 1$ 
15:  else if  $[c, b, a]$  :
16:     $N \leftarrow N - 1$ 
17:  end if
18:   $buffer[] \leftarrow buffer[-1]$ 
19: end while
    
```

ユースケース・シナリオ

図 19 は本研究のユースケースの概要図である。本研究のユースケースは、プライバシーの観点からカメラが使えない状況下である。例として通路があるトイレを想定して

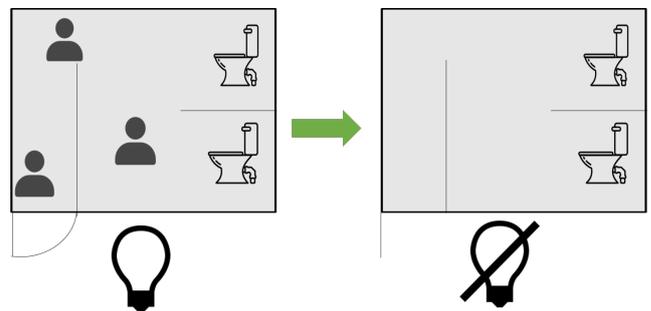


図 19 ユースケースの概要図

いる。公衆トイレでは、人感センサを用いて照明のオン/オフを切り替えている。人の動きが検知されずにいると、内部に人がいても時間経過と共に電気が消えることがある。トイレの通路で人数計測を行い、内部の人数が0人だと電気が消えるようにすることで電力消費の削減になり、内部

に人がいても電気が消えることがなくなる。トイレにカメラを置くのはプライバシーの面から適さないため、今回の提案は有効である。このユースケースでは以下の順序で構成される。

- (1) 壁に配置されたセンサで計測
- (2) 人が通ると反応したセンサの識別子がデータに格納
- (3) 格納されたデータの最初の3つを参照
- (4) センサが1,2,3の順で反応したなら入室と見なす。3,2,1なら退室と見なす。
- (5) 内部の人数が0人の時、電気が消える。

#### 4. 実装と実験方法

##### 実装

距離センサとしてレーザセンサの VL53L1X を用いる。このセンサは ToF を利用しており、発した信号が対象物に反射して返ってくるまでの時間をもとに距離を計測する。ESP32 に VL53L1X を接続し、人の動きの検知ができる状態にする。ESP32 内に、人を検知した時にカウントするプログラム count.py を作成及び保存する。図 20 は count.py のフローチャートである。検知順が 1, 2, 3 の順で距離の

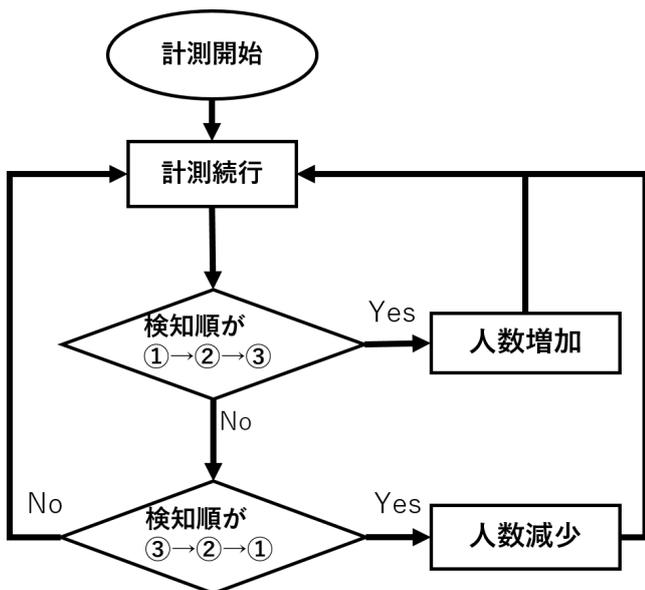


図 20 フローチャート

変化が起こると、入室が行われたと判断され、人数が1人増える。反対に3, 2, 1の順で距離の変化が起こると、退室が行われたと判断され、人数が1人減る。距離の値が変化すると、そのセンサは0.5秒間計測を止める。これは距離センサが0.1秒ごとに距離を取り続けているため、連続して反応するのを防ぐためである。

##### 実験環境

実験は以下の機材を使用して行った。

- ESP32

IoT 機器として、ESP32 を使用する。ESP32 は Wi-Fi と Bluetooth を内蔵する低消費電力なマイクロコントローラである。

- VL53L1X  
距離センサは VL53L1X を使用する。最大 400 cm までの距離を計測でき I2C にてデータを受け取ることができる。
- 研究室のサーバーにある VM (Virtual Machine)  
距離センサで計測した値と人数は本研究を行ったクラウド分散システム研究室の Wi-Fi を通じて、送信される。
- VM 内の DB (Data Base)  
距離センサで計測した値と時刻がデータベースに送信される。
- PC  
距離データ、反応時間、どのセンサから取得したかの3つを画面に表示する。

実験環境のハードウェア構成図が図 21 である。研究室の

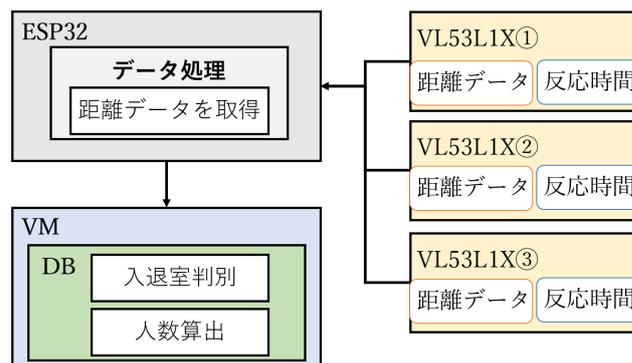


図 21 ハードウェア構成図

通路に3つの距離センサを設置した。距離センサで計測した値と人数は本研究を行ったクラウド分散システム研究室の Wi-Fi を通じて、ブラウザで WebREPL にアクセスすることによって画面に表示される。実験では、幅 160[cm] の研究室の通路を使った。

#### 5. 評価手法と分析手法

実際に入退室を行った人数と提案手法による計測値との精度を評価する。評価は以下のパターンで行う予定である。

- (1) 1人が入室、退室を行う
- (2) 縦並びの2人が入室、退室を行う
- (3) 横並びの2人が入室、退室を行う
- (4) 1人が入室、1人が退室を行う

それぞれを50回ずつ行い、提案方式により計測を行う。計測は本研究を行っているクラウド分散システム研究室の入口にある通路を使って行う予定である。

## 6. 議論

人感センサと距離センサでの基礎実験では多くても2人が通ることを条件にしている。しかし、3人以上の複数人が同時に通らない通路は現実的ではない。距離センサの値に応じて3人以上が通ったかという判別を決めることでより正確な計測が出来る。

縦並びと横並びに2人が通過した計測を行ったが、2人と判別するアルゴリズムが出来ていない。以下の方法を用いると2人でも計測することが出来る。

縦並びで2人が入室した場合は1人の場合より、反応時間が0.4秒ほど長い。1人の平均通過時間が0.49秒なので反応時間が0.8~0.9秒であると2人が通ったと判別する。よって反応時間の長さによって1人か2人かの判別が出来る。

1人の場合のセンサの反応時間が0.4秒だったのに対し、横並びに入室した場合の反応時間は0.4~0.6秒であった。縦並びの場合と違い、2人分の反応時間を得られない。提案手法では片側にしかセンサを設置していないため、2人が横並びに入室したときに1人と計測される。これは、壁の両方から距離をとることで1人分の横幅と2人分の横幅が判別できるため、横に並んだ人物も計測することができる。

幼児を抱えていたり背負っているときに2人以上と検出ができない。天井にセンサを配置することで、密着した人物の検出も可能である。

## 7. おわりに

本稿では人感センサでは入室と退室を見極める人数計測が出来ないという課題に対して、反応順序に基づき判別する手法を行った。結果、100%の精度で1人の入退室を判別することが出来た。本提案はトイレ以外のカメラが使えないような環境下でも役立てられる。また、途中で引き返すような動作も検出が出来る。本稿ではまだ複数人の人数計測が出来ていないので、複数人の検出が出来るアルゴリズムを今後研究していく。

## 参考文献

- [1] Fowzia Akhter, Sam Khadivizand, H. R. S. M. E. E. A. a. M.: *IoT Enabled Intelligent Sensor Node for Smart City: Pedestrian Counting and Ambient Monitoring*, <https://doi.org/10.3390/s19153374> (2019).
- [2] Shankar, M.; Burchett, J. Q. B. B. D.: *Human-tracking systems using pyroelectric infrared detectors*, opt. eng., 45, 106401. edition (2006).
- [3] Xiong, J.; Li, F. Z. N. J. N.: *Tracking and Recognition of Multiple Human Targets Moving in a Wireless Pyroelectric Infrared Sensor Network*, sensors, 14, 7209–7228 edition (2014).

- [4] Jo, O.; Kim, Y. K. J.: *Internet of Things for Smart Railway: Feasibility and Applications*, IEEE Xplore, ieej iot j. 2018, 5, 482–490. edition (2018).
- [5] Grau, A.: *Can you trust your fridge?*, IEEE Spectr., vol. 52, no. 3, pp. 50–56 (2015).
- [6] Chen, T.-Y., Chen, C.-H., Wang, D.-J. and Kuo, Y.-L.: *A People Counting System Based on Face-Detection*, 2010 Fourth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, pp. 699–702 (online), DOI: 10.1109/ICGEC.2010.178 (2010).
- [7] Ade Irma Purnamasari, A. S.: *Pengembangan Passive Infrared Sensor (PIR) HC-SR501 dengan Microcontrollers ESP32-CAM Berbasis Internet of Things (IoT) dan Smart Home sebagai Deteksi Gerak untuk Keamanan Perumahan*, prosiding sisfotek, 3(1), 148 - 154 edition (2019).
- [8] Roqueiro, D., P. V.: *Counting people using video cameras*, prosiding sisfotek, 3(1), 148 - 154 edition (2007).
- [9] Lawson, T., R. R. B. M.: *A comparison between the cost effectiveness of CCTV and improved street lighting as a means of crime reduction*, urban syst 68, 17–25. edition (2018).
- [10] Jeong Woo Choi, D. H. Y. and Cho, S. H.: *People Counting Based on an IR-UWB Radar Sensor*, IEEE Xplore, South Korea (2022).
- [11] Mostofi, S. D. A. M. Y.: *Occupancy Estimation Using Only WiFi Power Measurements*, IEEE Xplore, Electronic ISSN: 1558-0008 (2015).
- [12] Xi, Y. Y. J. Z. C. Q. W.: *Estimating Crowd Density in an RF-Based Dynamic Environment*, IEEE Xplore, Electronic ISSN: 1558-1748 (2013).