

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

山本 拓海¹ 杉本 一彦² 串田 高幸¹

概要: 半導体デバイスの一つに ToF(Time of Flight) センサがある。ToF センサは入退室管理に用いられる。入退室管理を行うと、入退室の記録から室内人数の算出が可能である。例えば、トイレでの室内人数の算出は入室しているにも関わらず消灯することを防ぐために必要である。2つの ToF センサを用いた入退室管理では複数人の同時入室の場合、ToF センサから人までの距離データを用いて正確に室内人数を算出できない。ToF センサの距離データが通路幅より短い場合、人が通過しているため、これを人が通っていると検知するものとする。ToF センサから室内人数を算出するために、本提案では通路の片側に同間隔で設置した3つの ToF センサで取得する距離データと ToF センサが人を検知した時間の差を用いる。基礎実験では1人と2人が入退室をした場合の ToF センサの距離データの増減から検知順序を求めた。2人が同時に通る場合の人数の算出は反応する ToF センサの順序が1人の場合と変化することから求める。評価実験では1人ずつまたは2人ずつが入退室を行う場合で行う。目視で確認した室内人数の計測値と提案手法にて算出された室内人数を正解率で評価する。評価結果では2人以下の人物が入退室を行い、81.25%の正解率で屋内人数を算出することができた。

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る。屋内環境における IoT を用いた人数計測について研究が行われている [2-4]。人数計測に関して、視覚センサベースの解決方法が研究されてきた。視覚センサベースによる計測はセンサ自体が安価であるため、コストが低いことがメリットに挙げられる。しかし、視覚センサベースの人数計測には制限があり、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の自動人数計測装置がある。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して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ない。

課題

歩行者の人数を計測する手段として、ToF センサを使用する方法がある*1。ToF センサは2台使うことで入退室を判別することが出来る。図1は課題の概要図である。

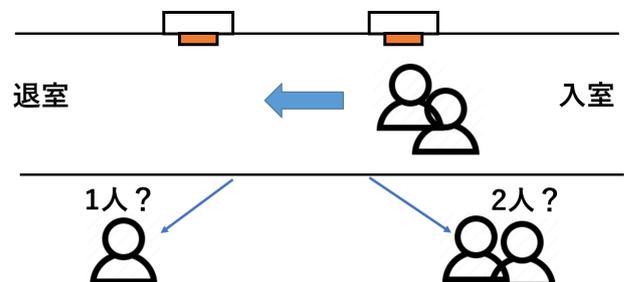


図1 課題の概要図

しかし課題としては、通路にて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ことである。また、反

¹ 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
² 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

*1 マクニカ人数カウントソリューション
<https://www.aperza.com/catalog/page/4412/55721/>

応した順序に応じて入退室を判別することは出来るがそこから人数の算出が出来ない。図2でToFセンサを2台用いた計測の人数推移を説明する。

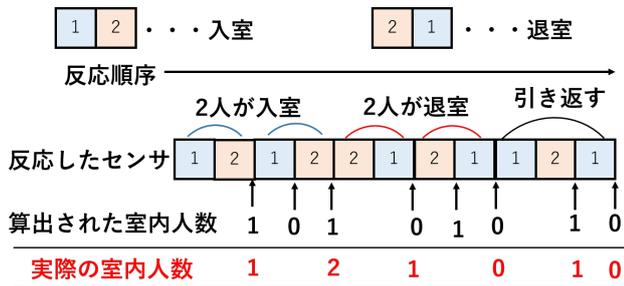


図2 ToFセンサを2台用いた計測の人数推移

2台では2人が入室をするタイミングで、室内人数が2人になるはずが、入退室の判定により1人となる。1,2または2,1の順で検知されたときに入退室の判別を行えば正しく内部人数が算出出来る。しかし2のセンサが反応した直後に引き返したときに0人になるはずが、1人になる。よってToFセンサにより計測された人数と実際の人数が一致しない。

ToFセンサ2台による基礎実験

課題を実証するため、基礎実験を行った。ToF(Time of Flight(飛行時間))を使用している距離センサvl53l1x(以下ToFセンサ)を使用した。vl53l1xはレーザーで距離を取得し、誤差は3[mm]程度発生する。レーザーで取得するため、ToFセンサの直線上で距離を取得する。図3は基礎実験の概要図である。

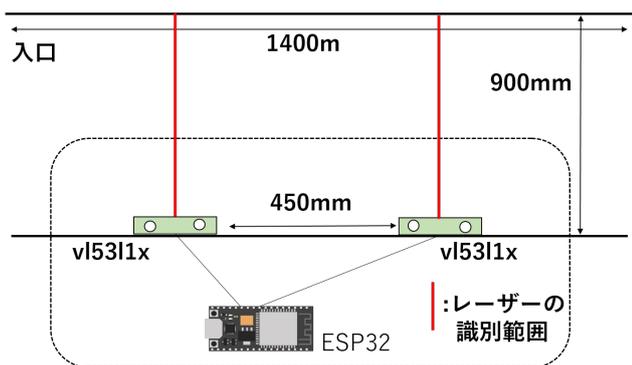


図3 基礎実験の概要図

使用した通路の幅は900[mm]である。また、通路の長さが1400[mm]に対してセンサを等間隔に設置するためにセンサ間を450[mm]空けた。数値が600[mm]以下で値が取得できたときに人が通ったと判断する。これは日本人の平均肩幅が410[mm]であることから値を算出した*2。通路幅が900[mm]なので、平均肩幅410[mm]を引いた490[mm]

*2 人体寸法データベース参照

以下の距離が算出されると人が通ったと判断している。センサ自体の誤差と平均肩幅の差を考慮した結果、通路幅から300[mm]を引いた値以下が人が通過したときの距離の値としている。ToFセンサから一番離れた場所から入室をしても通路幅から肩幅差を引いた距離で人が通ったかの検知ができる。

通路に2つToFセンサを取り付け、入退室から人数を算出した。目視で確認した室内人数の計測値とToFセンサにて算出された室内人数を比較する。結果を図4に示す。

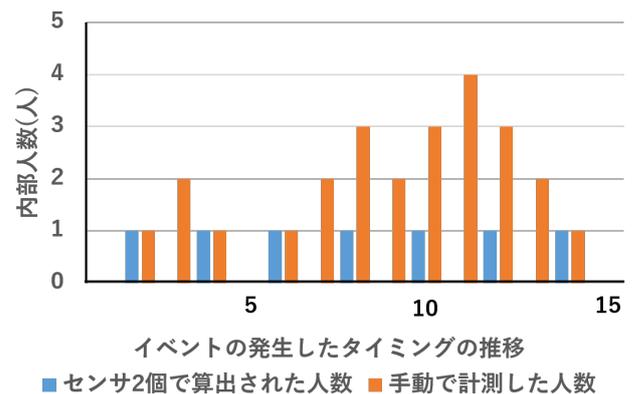


図4 ToFセンサ2台による人数算出の結果

入退室の検知をイベントとする。イベントが発生すると室内の人数が変化する。2台では入退室の検知が正常に作動せず、室内人数を算出できなかった。

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 [7]。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 [8]。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 [9]。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^{*3}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 の RF 信号を使用した人数計測が研究されている [10, 11]。無線信号強度 (RSSI) は、追加コストなしで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

提案手法では通路の片側に同間隔で設置した 3 つの ToF センサで取得する距離データと検知時間の差を用いて入退室の判別を行う。ToF センサを 2 台用いると、検知順序から室内人数の算出は出来なかった。3 台に増やすことで、入室と退室に差異が生まれ検知順序から室内人数の算出が可能となる。提案の条件として以下を定める。

- 人は等速直線運動で動くこととする。
- 同時に入室または退室をする人物は 2 人までとする。
- 入室と退室が同時に起きるすれ違いが発生しない。

1 人が通る場合の人数の算出は ToF センサの検知順序から求める。また 2 人が同時に通る場合の人数の算出は検知時間の差から求める。通路幅から 300[mm] を引いた値以下を人が通過したときの距離の値としている。提案方式を確立させるために ToF センサ 3 台による基礎実験を行った。基礎実験からは ToF センサ 3 台を使用した場合の検知順序が判明する。

ToF センサ 3 台による基礎実験の概要

提案手法では ToF センサを 3 台用いる。ToF センサを 3 台用いる理由として、2 台では達成できなかった室内人数の算出を正確に判定するためである。3 台で入室か退室かを判別し、検知順序から人数の算出ができるかを検証する。ToF センサを 2 台使用した基礎実験と同じ環境で実験を行った。図 5 のように ESP32 に ToF センサを取り付け、通路の片側のみに設置し人の通過を計測した。ToF セ

ンサはそれぞれ 0.1 秒ごとに距離の値を取り続ける。IoT デバイスとしてマイクロコントローラである ESP32 を用い、また使用した ToF センサは vl53l1x である。通路幅は 900[mm] で、通路の長さは 1400[mm] である。ToF センサは 450[mm] 間隔で設置した。また通過する人は以下のパターンで考える。

- 1 人が入室を行う場合
- 2 人が列になり入室を行う場合
- 2 人が一部重なり入室を行う場合

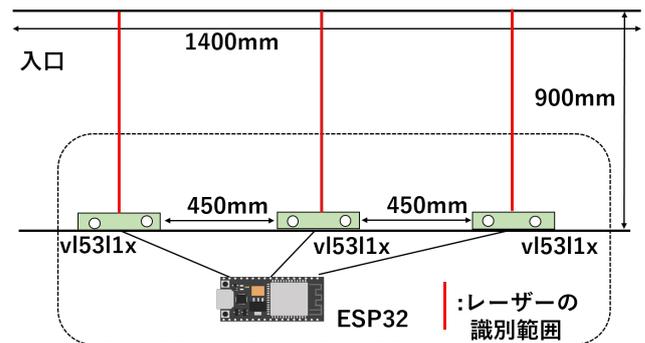


図 5 ToF センサを 3 つ用いた基礎実験

1 人が入室を行う場合

1 人が入室を行う場合の ToF センサの距離データの変化と入室における検知順序について基礎実験を行う。この基礎実験の目的は ToF センサの距離データと検知順序を確認するためである。図 6 は 1 人の入室における人と ToF センサの配置状況を示している。



図 6 1 人が入室を行う場合

図 7 は 1 人が入室した場合、3 つの ToF センサの距離データをグラフ化したものである。図 7 中の (1),(2),(3) はそれぞれの ToF センサにおける人が通過した際の検知開始時を示している。図 7 中の (1) は①の前を通過したことを示す。次の (2) は②の前を通過したことを示す。その後の (3) で③の前を通過したことを示す。

提案手法では距離データが通路幅から 300[mm] を引いた値以下の場合、人が通過したとしている。そのため図 7 より 1 人の場合は人が通過した時に反応した順に ToF センサの距離データが壁の幅の 900[mm] から 300[mm] を引いた 600[mm] 以下になっているので人が通ったと判断できる。また検知順序において人が通過した場合、図 6 より ToF センサ①, ②, ③の順序になる。そして実際に計測し

*3 平均絶対誤差

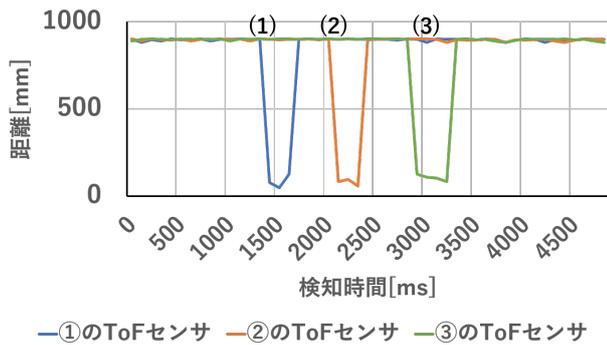


図 7 1人が入室した場合の距離データの推移

た結果, 図 7 より ToF センサ①, ②, ③の順序で反応したため, 通過した順序と一致している. これにより入室か退室かを判別することができる.

2人が列になり入室を行う場合

2人が列になり入室を行う場合の ToF センサの距離データの変化と入退室における検知順序について基礎実験を行う. この基礎実験の目的は1人の場合との検知順序の差を確認するためである. ToF センサ1台に対して2人が通過する. 図 8 は人が通路に沿って列になり入室における人と ToF センサの配置状況を示している. 2人の距離は約 600[mm] 間とした. これはパーソナルスペースの個体距離の近接相の平均に基づいている*4. 個体距離の近接相とは 450[mm] から 750[mm] までの距離を指し, この平均が 600[mm] であるため約 600[mm] の間隔を空けた.



図 8 2人が列になり入室を行う場合

図 9 は 2人が列になって入室した場合, 3つの ToF センサの距離データをグラフ化したものである.

図 9 中の (1), (2), (3), (1'), (2'), (3') はそれぞれの ToF センサにおける人が通過した際の反応開始時を示している. 図 9 中の A の人物の検知順序は (1), (2), (3) と示される. 同様に B の人物の検知順序は (1'), (2'), (3') と示される. 図 9 中の (1) は①の前を A が通過したことを示す. 次の (1') と (2) は①の前を B が通過しており, ②の前を A が通過したことを示す. 次の (2') と (3) は②の前を B が通過しており, ③の前を A が通過したことを示す. その後の (3') で③の前を B が通過したことを示す. 2人の場合は1人の場合と変わり, 人が通過した時に反応する順序が変化した.

*4 エドワード・T・ホール『かくれた次元』日高敏隆・佐藤信行共訳, みすず書房, 1970年

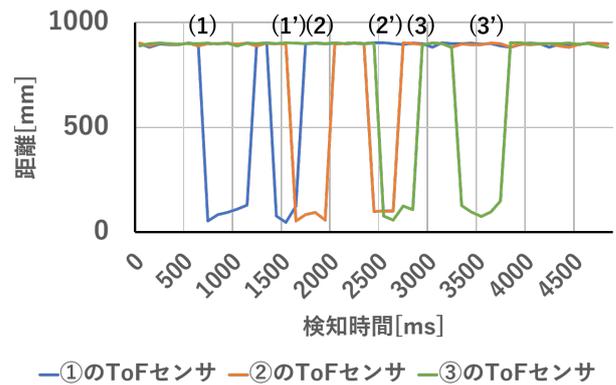


図 9 2人が列になり入室した場合の距離データの推移

2人が一部重なって入室を行う場合

2人が一部重なって入室を行う場合の ToF センサの距離データの変化と入退室における検知順序について基礎実験を行う. この基礎実験の目的は2人それぞれの距離データが2段階に変化することを確認するためである.

2人が一部重なって入室した場合がある. 図 10 は 2人が一部重なった場合の入室における人と ToF センサの配置状況を示している.

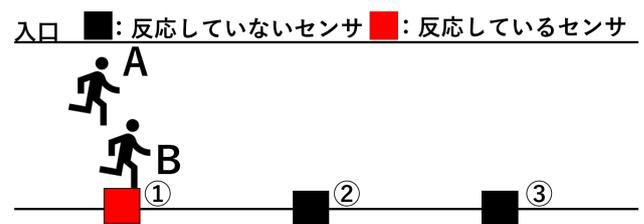


図 10 2人が重なって入室を行う場合

Bの人物が先に距離センサの前を通過する. その後Aの人物が距離センサの前を通過する. このときの3つの ToF センサの距離データをグラフ化したものが図 11 である

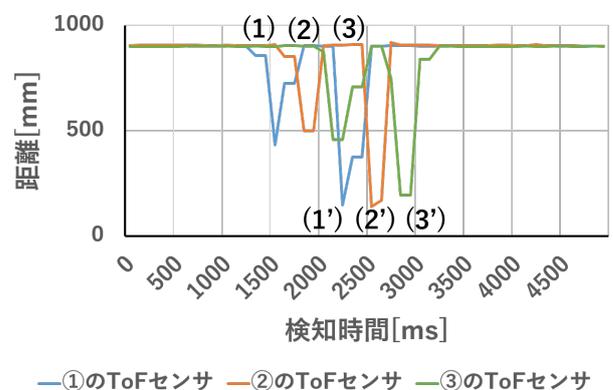


図 11 2人が列になり入室した場合の距離データの推移

図 9 中の (1) は①の前を B が通過したことを示す. 次の (2) は②の前を B が通過しており, 次の (3) は③の前を B が通過している. (1') ①の前を A が通過した

ことを示す。次の(2')は②の前をAが通過しており、その後の(3')の③の前をAが通過したことを示す。結果、距離データの値が高い方と低い方の2段階に変化した。高い方が図10のAである。低い方が図10のBである。ToFセンサに近い方が距離データが低くなる。

3つの基礎実験から1人と2人の場合で取得できる距離データと検知時間の差に違いがある。2人の場合は反応する順序が1人の場合と違いがあり、1人か2人かを判別することが出来る。

提案方式

提案手法では通路の片側に同間隔で設置した3つのToFセンサで取得する距離データと検知時間の差を用いて入退室の判別を行う。入退室の判別が行われた回数から室内人数を算出する。距離データが壁の距離から300[mm]を引いた値以下になると人が通っていると判別する。2人が重なって入退室した場合は2人の距離データが2段階に変化することから求める。距離データの値が高い方と低い方の2段階に変化し、それぞれの距離の検知順序から2人と判別する。3つの反応していたセンサの順序に応じて、入退室を判別する。入室であれば内部人数が増加し、退室であれば内部人数が減少する。Algorithm1はToFセンサで人が通っているかを判別するアルゴリズムである。

Algorithm 1 ToF センサの検知判定

Input: *wallDistance* 壁までの距離
flag 通過判定
Output: *N* 検知回数

```

1: while :
2:   if wallDistance - 300 > ToFDistance :
3:     while wallDistance - 300 > ToFDistance :
4:       if wallDistance - 300 < ToFDistance :
5:         N = N + 1
6:       end if
7:     end while
8:   end if
9: end while

```

基礎実験の内容より壁の距離から300[mm]を引いた値以下が人が通っている状態である。壁までの距離(*wallDistance*)から300[mm]を引いた値以下になると人が通っている。その後距離が(*wallDistance*)から300[mm]を引いた値以上になると人が通り終わると判断され、*N*が1増える。この検知回数*N*の回数で同時に入室した人の数を判断する。

次に入退室の判別について記す。図12の(1), (2), (3)の順に人が通ったと判定される場合、入室が行われている。逆に図12の(3), (2), (1)の順に人が通ったと判定される場合、退室が行われている。

Algorithm2は入室と退室を判断する疑似コードである。検

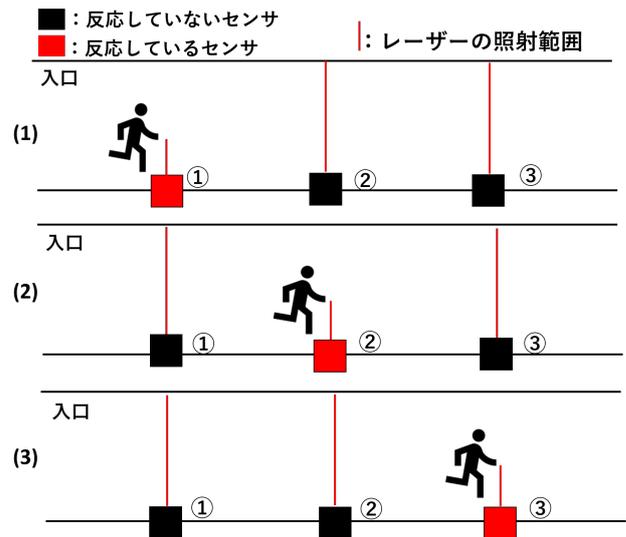


図12 検知順序の判定

Algorithm 2 入室と退室を判断する

Input: *sensor_1* センサ1からの取得データ
sensor_2 センサ2からの取得データ
sensor_3 センサ3からの取得データ
motion 人を検知

Output: *N* 内部人数

```

1: a ← sensor_1
2: b ← sensor_2
3: c ← sensor_3
4: buffer[] = [0, 0, 0]
5: while :
6:   if a == motion :
7:     buffer[] ← a
8:   else if b == motion :
9:     buffer[] ← b
10:  else if c == motion :
11:    buffer[] ← c
12:  end if
13:  if buffer[] == [a, b, c] :
14:    N ← N + 1
15:  else if buffer[] == [c, b, a] :
16:    N ← N - 1
17:  end if
18:  buffer[] ← buffer[-1]
19: end while

```

知順序による判別で内部人数*N*が変化する。また②や③のセンサで引き返す人がいることを考慮する。反応したセンサの番号が*buffer*に格納されていく。入退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。これにより図12の②や③のセンサで引き返した時でも正しい人数計測が出来る。よって内部人数の算出に影響はない。

ユースケース・シナリオ

図13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人数計測にお

いてカメラが使用できない状況下である。例としてトイレの入り口にある通路を想定している。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、トイレ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、トイレ内部に人がいても電気が消えることがなくなる。

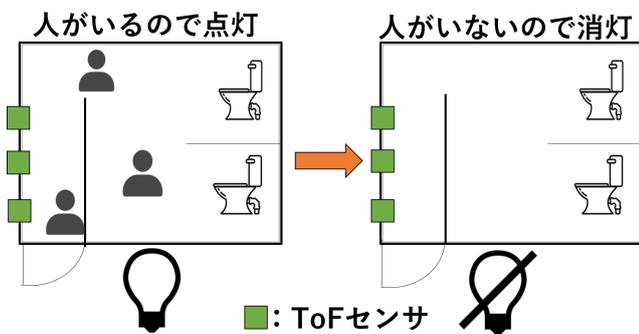


図 13 ユースケースの概要図

トイレにカメラを置くのはプライバシーの観点から適さないため、本提案は有効である。また、トイレが混んでいると途中で入室を止めて引き返す場合がある。本提案では引き返した動作も検知が可能なので問題はない。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) センサの反応した順に応じて入退室を判断する。
- (5) 内部の人数が0人のとき、電気が消える。1人以上のときは電気が付いている。

4. 実装と実験方法

実装

ToF センサとしてレーザーセンサの 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。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
ToF センサは vl53l1x を使用する。最大 4000[mm] 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。
- サーバにある VM(Virtual Machine)
ToF センサで計測した距離データと検知時間は Wi-Fi

- を通じて、送信される。
- VM 内の DB(Data Base)
ToF センサで計測した距離データがデータベースに送信される。
- PC
距離データ、検知時間、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 14 である。

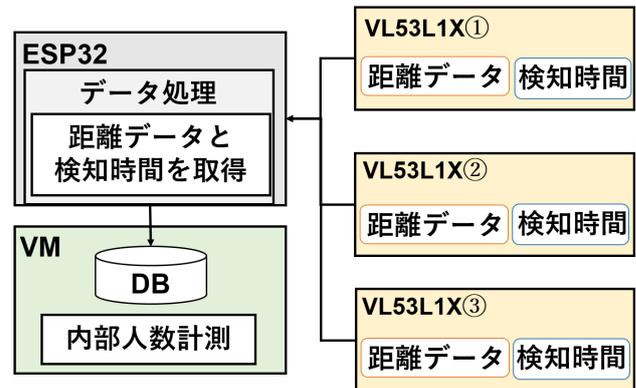


図 14 ハードウェア構成図

サーバは Ubuntu20.04 が OS であり、取得した距離データを RestfulAPI で受け取るための Web サーバである Apache2.4、受信した距離データを格納するためのデータベースである MongoDB を使用した。

実験環境

前述した実装を行い実験環境を整える。使用した通路の幅は 1000[mm] で長さは 1400[mm] であり、ToF センサ 3 台を 450[mm] 間隔で設置した。取得したデータは CSV ファイルとして出力され距離データを確認できる。VM 内の DB で取得したデータを用いて、人数を算出する。図 15 は実験環境の概要図である。

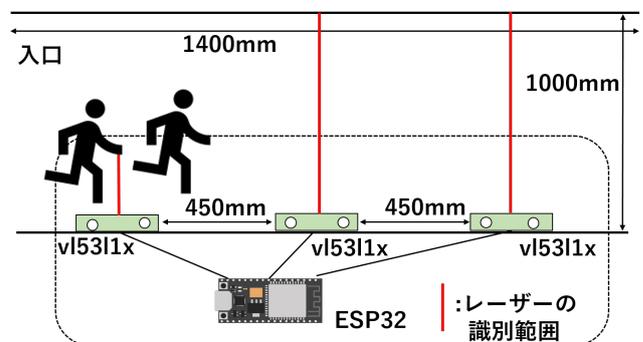


図 15 実験環境の概要図

2 人が真横に並んで同時に入室したときの差分を取るため、基礎実験では通路幅が 900[mm] であったが、通路幅を 1000[mm] に変更した。平均肩幅が 410[mm] であるため、

2人が真横に並ぶと肩幅が約820[mm]となる。肩幅の個体差を考慮し、900[mm]から1000[mm]に変更する。上記の環境で1人または2人が入退室を行う。提案手法に基づき、室内人数がPCに表示される。

5. 評価と分析

目視で確認した室内人数の計測値と提案手法にて算出された室内人数を正解率で評価する。入退室の検知をイベントとする。イベントが発生すると室内の人数が変化する。正解率の計算式は(1)で示される。Accは正解率である。Atは目視で確認した入退室の人数と提案手法にて計測された人数が一致した回数である。nはイベントが発生したタイミングの合計数である。

$$Acc = \frac{At}{n} \quad (1)$$

図16は1人ずつまたは2人ずつが入退室を行った場合の室内人数の推移である。

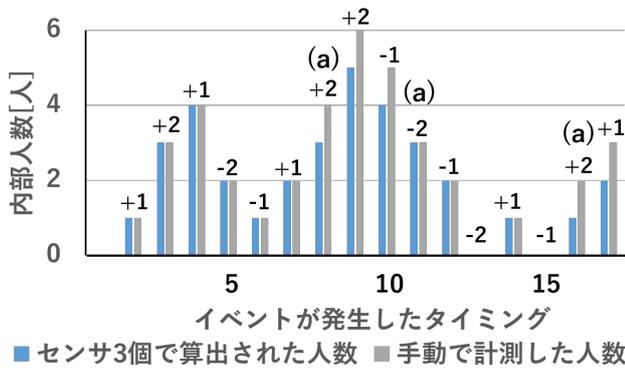


図16 1人ずつまたは2人ずつが入退室を行った場合の室内人数の推移

図16中上部の数字は手動で計測した室内人数の推移である。結果、1人ずつまたは2人ずつが入退室を行う場合は(1)の式を用いて、81.25%の正解率で屋内人数を算出することができた。目視で確認した入退室の人数と提案手法にて計測された人数が正しく一致しなかったイベントを図16中の(a)で表す。(a)は2人が真横に並んで同時に入室したときである。このとき2人が入退室を行っているにも関わらず1人と判別されている。この原因を分析するために実験を行った。評価実験と同じ環境で2人が真横に並んだ場合で入室を行う実験をした。幅1000[mm]の通路を使用し、ToFセンサを1つ配置した。ToFセンサの前を真横に並んだ2人が通過する場合の距離データを図17に示す。図17の2人が通過した場合の検知時間と図7の1人が通過した場合との検知時間に変化がない。図7のToFセンサ前の通過時間はそれぞれ0.3秒、0.3秒、0.4秒である。このときの1台のToFセンサに対する平均通過時間は0.33秒であった。2人が横に並んだ場合の距離データを表した

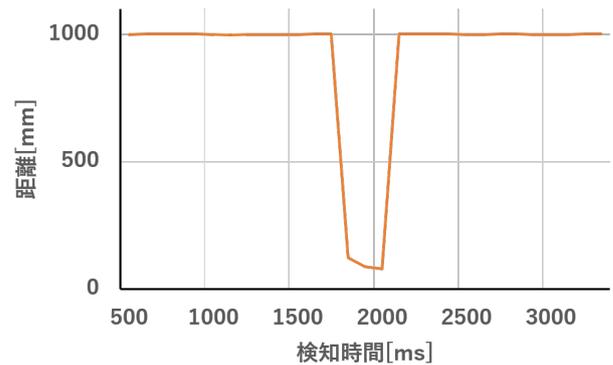


図17 ToFセンサの前を真横に並んだ2人が通過した場合の距離データ

図17の通過時間は0.3秒である。よって1人と2人が横に並んだ場合のToFセンサ前の通過時間に差異はないといえる。結果、1人か真横に並んだ2人かを判別することができない。

また、途中で引き返す動作を13回目のイベントのタイミングで行った。入口から3つ目のToFセンサが反応した直後に引き返したが15回目で室内人数が0人に戻ったので誤検知はなかった。

6. 議論

本提案では等速直線運動することを条件にしている。しかし、人の歩行速度は常に一定であるとは限らない。歩行速度と検知時間に関係なく、入退室のイベントが発生すると人数の変化が生じるようにする。その結果、歩行速度に関係なく入退室の検知ができる。また、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る通路の方がより現実的である。ToFセンサの距離データに応じて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。さらに、すれ違いが発生しないことを条件にしている。通路幅の両方にToFセンサを配置し、距離データを取得することで、すれ違った場合の人数の取得も可能である。

評価結果から完全に2人が横に重なることで、ToFセンサでは片側の人物しか検出ができない。図18は解決方法の概要図である。

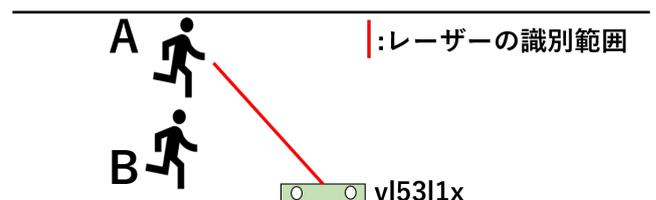


図18 真横に並んで同時に入室した2人を判別する手法

ToFセンサのレーザーを斜めに設置することで横に並ん

だ2人でも2人と検出することができる。まずAの人物が先に検知される。Aの検知が終了した後、Bの人物の検出が始まる。AとBの検知のタイミングをずらすことで横に並んだ2人を検出することができる。

本提案のユースケースはトイレが挙げられている。老若男女が使用するため親が幼児を連れて入室することがある。幼児を抱えているときや背負っているときに2人以上と検出ができない。2人が密着したときの距離の検知時間が1人より長くなることを用いると、密着した人物の検知も可能である。

7. おわりに

本稿では2つのToFセンサでは正確な人数の算出が出来ない課題に対して、3台のToFセンサの検知順序に基づき入退室を判別する手法を提案した。2人以下の人物が入退室を行い、81.25%の正解率で屋内人数を算出することができた。本提案はトイレ以外のカメラが使用できない環境下でも役立てられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、実装面にて適切な助言を賜った東京工科大学学部4年の高橋祐之介さんに感謝します。

参考文献

- [1] Akhter, F., Khadivizand, S., Siddiquei, H. R., Alahi, M. E. E. and Mukhopadhyay, S.: IoT Enabled Intelligent Sensor Node for Smart City: Pedestrian Counting and Ambient Monitoring, *Sensors*, Vol. 19, No. 15 (online), DOI: 10.3390/s19153374 (2019).
- [2] Shankar, M., Burchett, J., Guenther, B. and Brady, D.: Human-tracking systems using pyroelectric infrared detectors, *Optical Engineering - OPT ENG*, Vol. 45 (online), DOI: 10.1117/1.2360948 (2006).
- [3] Xiong, J., Li, F., Zhao, N. and Jiang, N.: Tracking and Recognition of Multiple Human Targets Moving in a Wireless Pyroelectric Infrared Sensor Network, *Sensors*, Vol. 14, No. 4, pp. 7209–7228 (online), DOI: 10.3390/s140407209 (2014).
- [4] Jo, O., Kim, Y.-K. and Kim, J.: Internet of Things for Smart Railway: Feasibility and Applications, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 482–490 (online), DOI: 10.1109/JIOT.2017.2749401 (2018).
- [5] Grau, A.: Can you trust your fridge?, *IEEE Spectrum*, Vol. 52, No. 3, pp. 50–56 (online), DOI: 10.1109/MSPEC.2015.7049440 (2015).
- [6] Zhao, X., Delleandrea, E. and Chen, L.: A People Counting System Based on Face Detection and Tracking in a Video, *2009 Sixth IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, pp. 67–72 (online), DOI: 10.1109/AVSS.2009.45 (2009).
- [7] Roqueiro, D., P. V.: Counting people using video cameras. (2007).
- [8] Lawson, T., Rogerson, R. and Barnacle, M.: A comparison between the cost effectiveness of CCTV and improved street lighting as a means of crime reduction, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 68, pp. 17–25 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compenurbysys.2017.09.008> (2018).
- [9] Choi, J.-H., Kim, J.-E. and Kim, K.-T.: People Counting Using IR-UWB Radar Sensor in a Wide Area, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 8, No. 7, pp. 5806–5821 (online), DOI: 10.1109/JIOT.2020.3032710 (2021).
- [10] Depatla, S., Muralidharan, A. and Mostofi, Y.: Occupancy Estimation Using Only WiFi Power Measurements, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 33, No. 7, pp. 1381–1393 (online), DOI: 10.1109/JSAC.2015.2430272 (2015).
- [11] Yuan, Y., Zhao, J., Qiu, C. and Xi, W.: Estimating Crowd Density in an RF-Based Dynamic Environment, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 13, No. 10, pp. 3837–3845 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2013.2259692 (2013).