

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、室内人数を算出する。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、センサから人までの距離データから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検知時間とする。本提案では正確な室内人数を算出するために、通路の両側に同間隔で設置した計 6 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る。2 人が同時に通る場合の人数の算出は両側からの距離が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。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 人以下の人数で入退室を行い、85.7 %の正解率で室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]。屋内環境における IoT を用いた人数計測については研究が行われている [2-4]。従来の手作業で高精度にカウントする方法は、計測者に高い人件費を払わなければならない。また、人が行っている以上どんな場合でもヒューマンエラーが起り、正確な人数計測が出来ない [5]。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 [6]。

人数計測の分野において ToF センサを用いた事例がある^{*1}。ToF は、Time of Flight (飛行時間) の略で、光の

飛行時間を用いる方式である [7]。ToF 方式の反射型レーザーセンサは、パルス投光したレーザー光が対象物表面で反射して返ってくるまでの時間を基に距離を測定できる。

課題

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。

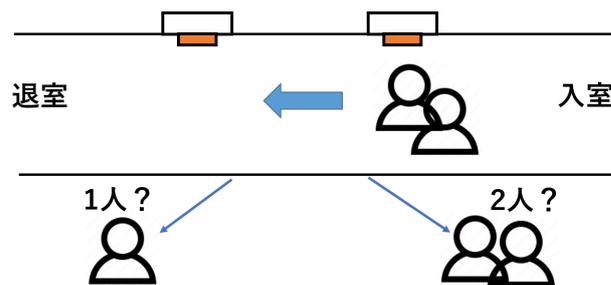


図 1 ToF センサを 2 台用いた計測の人数推移

課題として、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。また、反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。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。図 2 において 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

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・情報メディア研究科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} FootfallCam3Dmini
[https://www.footfallcam.com/ja/Product/FootfallCam-3D-Mini,\(2022/11/20\)](https://www.footfallcam.com/ja/Product/FootfallCam-3D-Mini,(2022/11/20))

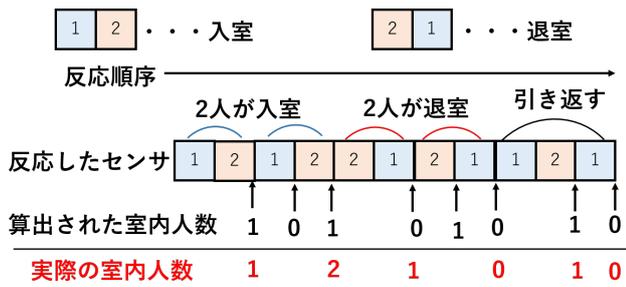


図 2 ToF センサを 2 台用いた計測の人数推移

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 を使用している距離センサ VL53L1X(以下：ToF センサ)を使用した。使用した ToF センサ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。

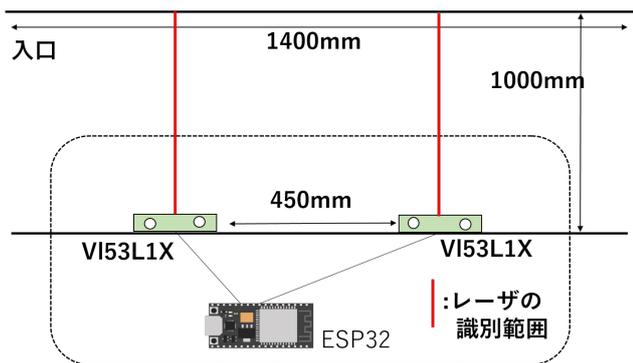


図 3 ToF センサ 2 台による基礎実験の概要図

使用した通路の幅は 100[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。450[mm] よりセンサ間を狭めると、人が通った際に反応する距離センサが 2 つ以上になるため 450[mm] 以上センサ間を開ける必要がある。数値が 500[mm] 以下で値が取得できたときに人が通過したと判断する。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 1000[mm] なので、平均肩幅 410[mm] を引いた 590[mm] 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 500[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。

*2 河内まき子・持丸正明, 2005 AIST 人体寸法データベース, 産業技術総合研究所 H16PRO 287,(2022/11/20)

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。

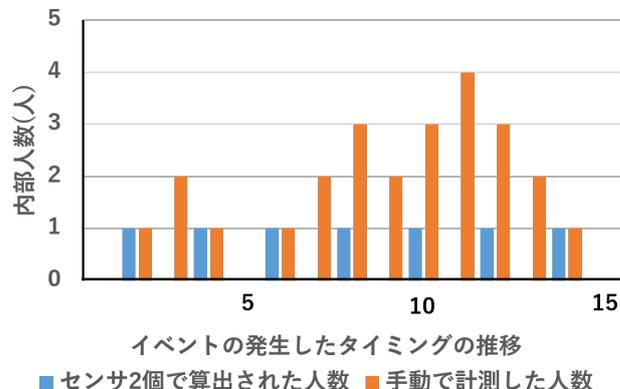


図 4 ToF センサ 2 台による人数算出の結果

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 [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、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 [10]。

Yanni Yang らは非侵入型、低コスト、正確な人数カウントを実現する WiFi 信号を使用した通過人数カウントシステム Wi-Count を提案した [11]。Wi-Count は、人の存在を検出するためのワイヤレス信号の伝播に関する動作を通過させるため、人がデバイスを持ち運ぶ必要がない。これにより、人間は自由に通り過ぎることができる。Wi-Count は、1 人の双方向の通過行動を正確に検出できるだけでな

く、複数の人が同時に出入り口を通過した場合の人数をカウントすることができる。実験結果は、通過方向検出と通過人数カウントの平均精度は、それぞれ約 95 % と 92 % であった。しかし通過した人数から室内の人数を算出することができていない。

M. S. Sruthi は Raspberry pi で PIR センサーを使用して建物内の人数をカウントする IoT システムを実装した [12]。IoT デバイスの普及に伴い、商業ビル内の人の位置特定とカウントのために大量のデータを収集することができる。PIR (パッシブ赤外線) センサーを使用して人の存在を検出し、建物内に入る人をカウントする。PIR センサーが物体を検出すると、Web カメラと照明システムが作動する。しかし実際の人数とシステムによるカウントの誤差が検証できておらず、評価結果が出ていない。

3. 提案

本研究では筆者らの論文で達成出来なかった真横に並んだ 2 人を識別することを目的としている。課題にて 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のが筆者らの論文で示されている [13]。提案手法では通路の両側に同間隔で設置した計 6 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。3 つずつ設置することで両側から距離が取得でき、どのタイミングで何人通過しているかが分かる。また人が同じ歩行速度で歩くとは限らないため対となる位置に ToF センサを配置する必要があるため、ToF センサは 6 個必要である。通路横に設置することでレーザーの識別範囲を必ず通過する。通路の両側に 3 台ずつ ToF センサを設置し計 6 台に増やすことで、真横に並んだ 2 人を識別することができる。提案のアルゴリズムは筆者らの論文と同じものを使用する [13]。提案の条件として以下を定める。

- 同時に入室または退室をする人物は 2 人までとする。
- 人物が途中で停止することはない。

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 人が全く同時に通る場合の人数の算出は通路の両側から取得した距離データを用いて求める。また ToF センサを 6 台用いた場合の距離データの変化を確認するために基礎実験を行った。

ToF センサ 6 台による基礎実験

提案を確立するために実験を行った。通路の上に ToF センサを図 5 のように配置し、基礎実験を行う。

使用した通路の幅は 1000[mm] で長さは 1400[mm] である。ToF センサを 2 台向かい合って配置し ESP32 に計 6 台接続する。実験は同環境で 10 回行った。図 6 は 1 回の実験における 1 人が通過した後、真横に並んだ 2 人が通過

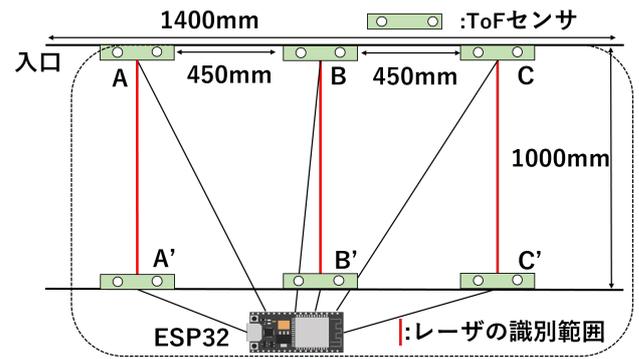


図 5 ToF センサ 6 台による基礎実験の概要図

した時の ToF センサの距離データをグラフ化したものである。

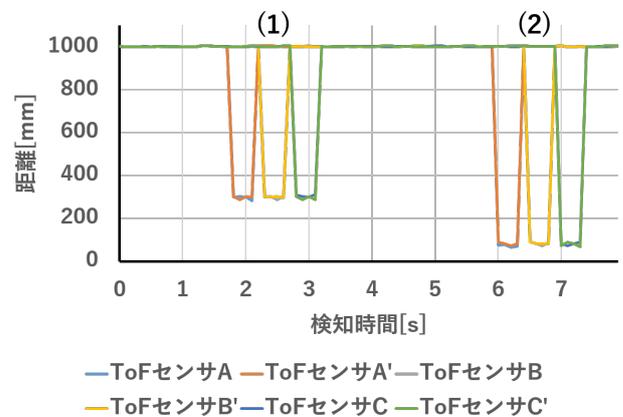


図 6 基礎実験の結果

グラフ上の (1) は 1 人が通過した場合の距離データの推移である。このときの ToF センサからの距離は互いに約 300[mm] である。一人の肩幅が約 410[mm] であるため、合計すると約 1000[mm] と通路の長さ一致する。これにより ToF センサからの距離が合計約 600[mm] であると 1 人と判別できる。グラフ上の (2) は真横に並んだ 2 人が通過した場合の距離データの推移である。このときの ToF センサからの距離は互いに約 90[mm] である。2 人分の肩幅は約 820[mm] であるため、合計すると約 1000[mm] と通路の長さ一致する。これにより ToF センサからの距離が合計約 180[mm] であると 2 人と判別できる。向かい合った ToF センサからの合計距離が約 600[mm] であると 1 人であり、ToF センサからの距離が合計約 180[mm] であると 2 人が通過していると定義する。基礎実験の結果より ToF センサを向かい合って配置することで、1 人か 2 人かを判別できることが確認できた。

提案方式

提案手法では通路の両側に同間隔で 3 つずつ設置した計 6 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。3つのペア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。入退室の判別が行われた回数から室内人数を算出する。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。基礎実験の結果より ToF センサを向かい合って配置することで真横に並んだ2人を2人と判断することができる。向かい合った ToF センサからそれぞれ距離データを取得する。互いの距離データの変動から人が2人通ったか、1人通ったか、誰も通っていないかの3通りで判断する。両側に設置した ToF センサから0人か1人か2人かを判別するアルゴリズムが Algorithm1 である。

Algorithm 1 1人か2人かの判別手法

```

Input: wallDistance 壁までの距離
         ToFDistance1 センサから取得した距離データ
         ToFDistance2 センサから取得した距離データ
Output: N 通過人数
1: while :
2:   if wallDistance * 2 = ToFDistance1 + ToFDistance2 :
3:     N = 0
4:   else if wallDistance - (ToFDistance1 + ToFDistance2) = wallDistance - 410 :
5:     N = 1
6:   else
7:     N = 2
8:   end if
9: end while

```

ToFDistance1 は図5中の ToF センサ A から取得した距離データである。ToFDistance2 は図5中の ToF センサ A' から取得した距離データである。人が通っていない場合の距離データは通路幅の2倍値と一致する。2つの距離データの合計から一人分の肩幅 410[mm] を引いた値になると通過した人数は1人と判別できる。また2つの距離データの合計から二人分の肩幅 820[mm] を引いた値になると通過した人数は2人と判別できる。

次に入退室の判別について記す。図7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7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。また途中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順序に格納されていく。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。これにより途中のセンサで引き返した時でも正しい計測が出来る。

ユースケース・シナリオ

図8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

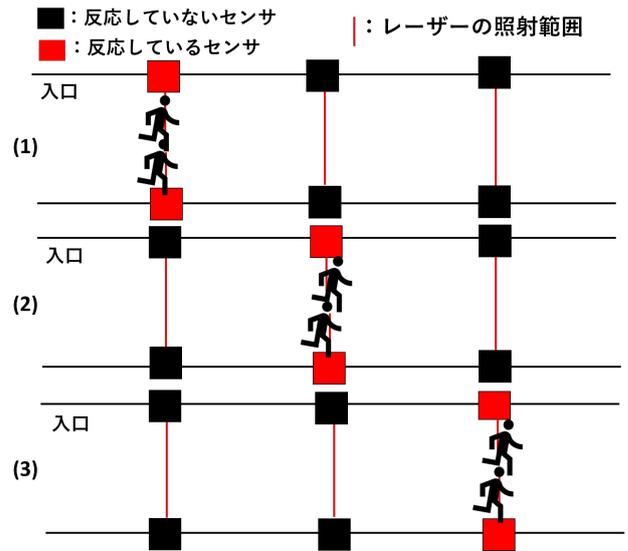


図7 検知順序の判定

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。

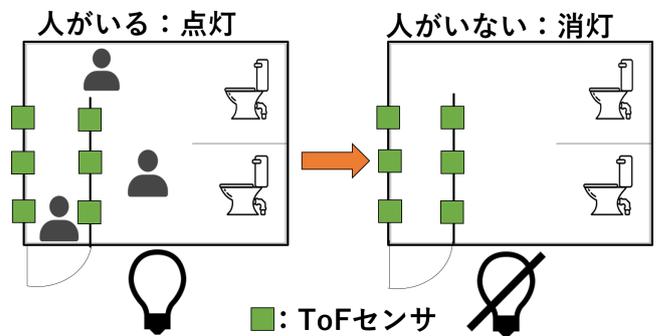


図8 ユースケースの概要図

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ず、本提案は自由に使用できるため有効である。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のため問題はない。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

ToF センサとして距離センサの 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。距離はレーザーで取得される。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
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 9 である。

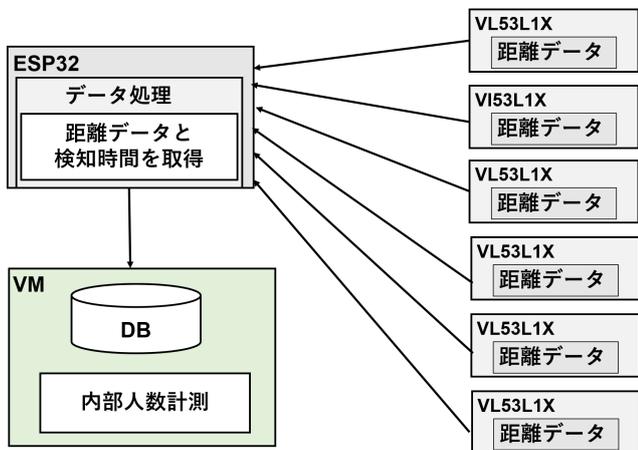


図 9 ソフトウェア・ハードウェア構成図

1 台の ESP32 に対して 6 台の ToF センサである VL53L1X を 6 台繋げた。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。

5. 実験と分析

実験環境

前述した実装を行い基礎実験と同じ環境を整える。実験

環境図が図 10 である。

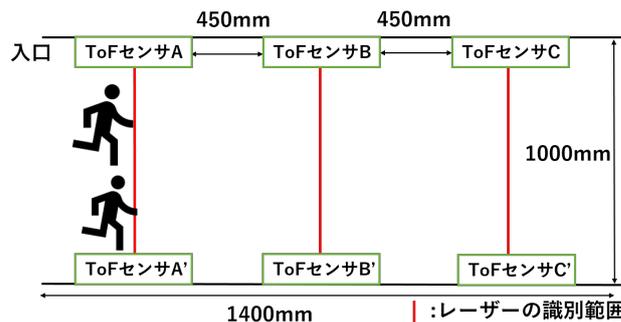


図 10 実験環境図

使用した通路の幅は 1000[mm] で長さは 1400[mm] であり、ToF センサ 2 台のペアを 450[mm] 間隔で 3 セット設置した。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。

実験結果

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 11 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。

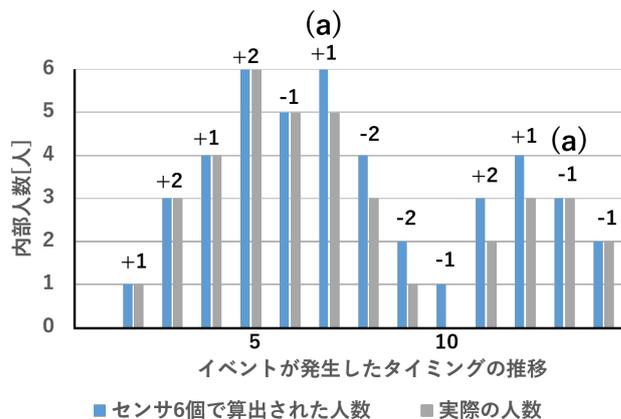


図 11 1 人ずつまたは 2 人ずつが入退室を行った場合の室内人数の推移

図 11 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、85.7%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11中の(a)で表す。(a)は入退室が同時に起きたすれ違いのタイミングである。このとき入退室の判定が正常に作動せず、入退室によって内部人数が変化しないはずが1人増えている。

分析

(a)のタイミングである入退室を同時に行った場合のToFセンサの距離データのグラフが図12である。

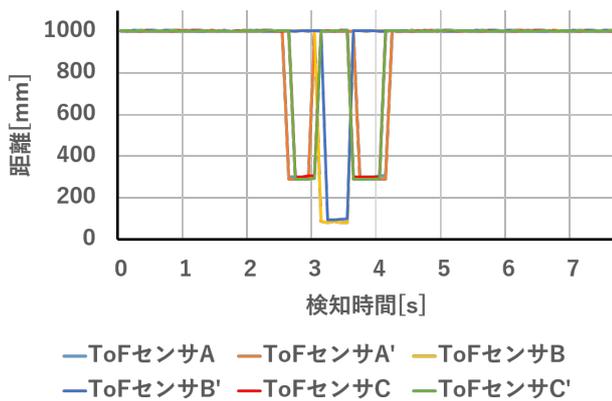


図12 入退室を同時に行った場合の距離データ

まず1人ずつが図10にてAのペアとCのペアにて1人と検知される。次にBのペアにて2人が重なり、2人と判断される。最後にCのペアとAのペアにて1人と検知される。距離データではToFセンサAのペアがCのペアより先に反応したことで、結果的に1人が入室した判定しかなかった。

6. 議論

評価実験では入退室を同時に行った場合人数の算出が出来なかった。入退室した場合の距離データの変化が起きた際に、入退室をしたと判断する処理を加えることで同時に入退室を行った場合でも人数の算出が可能となる。同様にAのペアやCのペアの前ですれ違った場合でもそれぞれの処理をアルゴリズムに加えることで正解率は向上する。

提案の条件として2人以下の人物が入退室を行うと定めているが、2人しか入退室を行わないのは現実的ではない。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。また3人以上が横並びになり通過できるような幅の通路では、天井から距離を取得することで、3人の真ん中の人物の判定もできる。天井から取得したデータで人数を計測する手法は研究されている[14]。

本実験において通行する人物は何も持っていない状態で

行った。歩行者が大型の荷物を背負っていると距離データが正確に取得できない。人のみを検出できるように赤外線センサで補正することで、荷物の有無に関係なく人数の計測ができる。

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、計6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。評価実験では2人以下の人物が入退室を行い85.7%の正解率で屋内人数を算出することができた。

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] 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).
- [6] Grau, A.: Can you trust your fridge?, *IEEE Spectrum*, Vol. 52, No. 3, pp. 50-56 (online), DOI: 10.1109/MSPEC.2015.7049440 (2015).
- [7] Schwarz, S., Sjöström, M. and Olsson, R.: A Weighted Optimization Approach to Time-of-Flight Sensor Fusion, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 23, No. 1, pp. 214-225 (online), DOI: 10.1109/TIP.2013.2287613 (2014).
- [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] Jiang, X., Zhang, L., Lv, P., Guo, Y., Zhu, R., Li, Y., Pang, Y., Li, X., Zhou, B. and Xu, M.: Learning Multi-Level Density Maps for Crowd Counting, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, Vol. 31, No. 8, pp. 2705-2715 (online), DOI: 10.1109/TNNLS.2019.2933920 (2020).
- [11] Yang, Y., Cao, J., Liu, X. and Liu, X.: Wi-Count: Passing People Counting with COTS WiFi Devices, *2018 27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, pp. 1-9 (online), DOI:

10.1109/ICCCN.2018.8487420 (2018).

- [12] Sruthi, M.: Iot based real time people counting system for smart buildings, *International Journal of Emerging Technology and Innovative Engineering*, Vol. 5, No. 2 (2019).
- [13] 山本拓海, 杉本一彦, 串田高幸: 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, 技術報告 12, 東京工科大学コンピュータサイエンス学部, 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, 東京工科大学コンピュータサイエンス学部 (2022).
- [14] 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).