

平成 25 年度修士論文

# 三次元レーザースキャナーを用いた インテリジェント自動ドア

大学院情報システム学研究科  
情報メディアシステム学専攻

学籍番号 : 1250028  
氏名 : 西田 大樹  
主任指導教員 : 工藤 俊亮 准教授  
指導教員 : 阪口 豊 教授  
指導教員 : 富沢 哲雄 助教  
提出年月日 : 平成 26 年 2 月 21 日

# 目次

第1章 緒言	6
1.1 研究背景	6
1.2 関連研究	9
1.3 研究目的	11
1.4 論文構成	11
第2章 インテリジェント自動ドアの概要	12
2.1 想定する環境	12
2.2 ドアセンサと判定アルゴリズムの検討	15
2.2.1 ドアセンサに求められる要件	15
2.2.2 ドアセンサの検討	16
2.2.3 判定アルゴリズムに求められる条件	19
2.2.4 判定アルゴリズムの検討	20
2.3 まとめ	21
第3章 インテリジェント自動ドアシステムの実現	22
3.1 使用する三次元センサの概要	22
3.2 開閉判定アルゴリズム	27
3.2.1 前処理	27
3.2.2 放射状セルを用いた歩行者の位置と速度の推定	29
3.2.3 ストライプ状のセルを利用した歩行者の進路予測	35
3.2.4 開き判定	37

3.2.5	その他の機能	40
3.3	評価実験	43
3.3.1	開きタイミングの判定	43
3.3.2	進入と素通りの判定	47
3.3.3	開き幅の判定	48
3.4	監視領域が広い場合の開閉判定アルゴリズムについての検討	51
3.4.1	実験環境	51
3.4.2	開きタイミングの判定	54
3.5	まとめ	56
<b>第4章</b>	<b>結言</b>	<b>57</b>
4.1	本研究のまとめ	57
4.2	今後の展望	59
<b>付録A</b>		<b>68</b>
A.1	自動ドアと歩行者を観察するための装置の開発	68
A.1.1	歩行者の動画	68
A.1.2	歩行者の位置・速度データ	70
A.1.3	ドアの開きタイミング・任意の時刻の開き幅	70
A.1.4	自動ドアの動きのパラメータの取得	70
A.1.5	各種データの取扱い	72
A.2	電気通信大学構内の自動ドアに関する調査	73

# 目 次

1.1	従来の自動ドアの問題点	8
1.2	タッチセンサ	8
2.1	例1：狭い道路に面した出入口	14
2.2	例2：ドアの近くが大きく開けている出入口	14
2.3	レーザースカナーの観測範囲	18
3.1	センサの外観	24
3.2	スキャンの軌跡	25
3.3	共振ミラー	25
3.4	投光ユニット	26
3.5	レーザーの走査軌跡	26
3.6	座標系	31
3.7	放射状のセル	32
3.8	あるエリアのスキャン点とセル番号のヒストグラム	32
3.9	スキャンの方向によるスキャン時刻の違い	33
3.10	あるエリアの位置データの変化と近似直線	33
3.11	セルの幅データ	34
3.12	ストライプ状のエリア	36
3.13	pending zone ( 保留エリア )	36
3.14	開き判定の流れ	39
3.15	判定エリアの設定例	41

3.16	仮想スイッチ	41
3.17	高さ判定のようす	42
3.18	実験環境	43
3.19	センサの配置	45
3.20	歩行者の接近方向	46
3.21	歩行者の移動速度とドアが開き始めたときの歩行者の位置の関係(実験1)	46
3.22	実験結果((d)-(g))	48
3.23	実験結果((h)-(j))	49
3.24	実験結果((k)-(m))	49
3.25	実験結果((n),(o))	50
3.26	実験環境とドアセンサの外観	52
3.27	センサの取付角度による監視領域の違い	52
3.28	本実験におけるセンサの監視領域	53
3.29	歩行者の移動速度とドアが開き始めたときの歩行者の位置の関係((3.4))	55
A.1	装置の外観	69
A.2	web カメラ	69
A.3	左から受信モジュール、開きセンサ、バッテリー	71
A.4	データ取得の様子	71
A.5	プロットしたデータとあてはめ曲線	72
A.6	電気通信大学構内の自動ドアの感度の分布	73
A.7	電気通信大学構内の自動ドアの設置位置	74

# 表 目 次

3.1	Specification of the sensor . . . . .	24
3.2	Specification of Resonant mirrors . . . . .	26
3.3	Setup of the intelligent automatic door system for experiments(3.3) . . . . .	44
3.4	Setup of the intelligent automatic door system for experiments(3.4) . . . . .	53
A.1	電気通信大学構内の自動ドアの感度 . . . . .	75

# 第1章 緒言

## 1.1 研究背景

近年、自動ドアは広く普及しており、日本における自動ドアの普及率は世界一といわれている [1]。従来の自動ドアの多くは、ドア上部に取り付けた近接センサを用いてドアに接近する歩行者の検出を行っている。近接センサを使った自動ドアは歩行者がセンサの監視領域に接近するだけで動作するため、歩行者はドアに対して特別な操作をすることなくドアに入ることができる。このような自動ドアは開閉に力を必要としないため、妊婦や大きな荷物を持った人、障がいを持った人等、日常生活において行動に制限がある人でもストレスなく使うことができる。また、閉め忘れ、閉め残しが起こらないため、自動ドアによって仕切られた空間の温度・湿度管理、防音・気密効果を得ることができる。

しかし従来の自動ドアには以下の問題点がある。

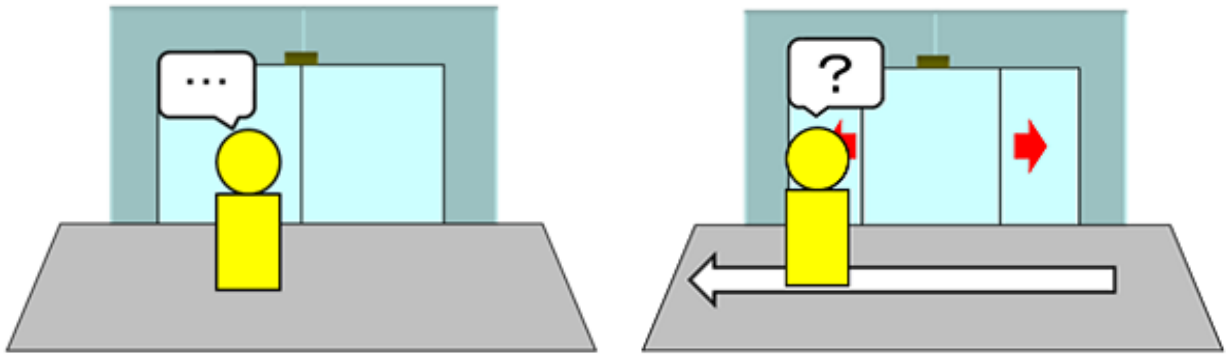
- 反応が鈍い (図 1.1(a))
- 誤動作が起きる (図 1.1(b))

反応が鈍い自動ドアとは、センサの監視領域の狭さや感度の悪さが原因でなかなか開かない自動ドアのことで、その結果として歩行者がドアの前に近づいても開かなかったり、高さの低いベビーカーに反応せず、乳幼児帯同者が思ったようにドアを通ることができなかつたりして、歩行者のスムーズな通行を妨げている。誤動作というのは特にドアに進入する意志がなく、単にドアの前を素通りしようとする歩行者に対しても誤ってドアを開けてしまうという欠点のことを指している。このようなドアの誤開閉は、開閉時の動力のほか、建物の空調の効率の面でも不経済である。センサの感度が低いことによる反応の鈍さと、センサの感

度が不必要に高いことによる誤動作は、相反する要求であり、従来の近接センサを用いる限り同時に解決することはできない。

人通りが多い道路に面した店舗の出入り口など、このような誤開閉が起きやすいと考えられる場所では、一般的に近接センサの感度を低くする、近接センサの監視領域を狭くする、近接センサの代わりにタッチセンサ（図 1.2）を用いる等の対策が取られている。しかしこれらの方法では歩行者がドアの前で減速したり、停止したりする必要があるため、歩行者の円滑な通行を阻害してしまう。このため、センサの感度を落としたり、タッチセンサを使用したりすることなく、ドアに進入しようとする歩行者に対してのみドアを開ける自動ドアが実現できれば世の中がより便利になると考えられる。





(a) 反応が鈍い

(b) 素通りに対する誤動作

図 1.1: 従来の自動ドアの問題点



図 1.2: タッチセンサ

## 1.2 関連研究

近年、自動ドアに関連する様々な分野の研究が行われている。

建築学の分野ではユニバーサルデザインや省エネの観点から研究が行われている。北川らの研究では、妊婦や乳幼児帯同者が日常生活において、どのような要因でストレスを感じているかについて議論されており、自動ドアが設置されていることで移動する際のストレスが軽減されるというアンケート結果が示されている [2] [3]。また、伊藤らの一連の研究では自動ドアの設置による省エネ効果を調べるためのモデルについて検討している [4] [5]。

ユビキタス・コンピューティングの分野では、自動ドアを入退室管理のための装置として利用している研究がある。保坂らの研究では、病棟において、患者の進入を制限したい区画の入り口に自動ドアを設置し、病院スタッフ用の RFID タグを検知した場合のみ開くようにすることで自動ドアを病棟の安全管理に役立てている [6] [7]。また、杉本らは RFID タグを利用し、障がい者でも安全に利用できる入退室管理システムを提案している [8]。李らはレーザーキャナーを用いて歩行者のトラッキングを行うことで、入室を許可された人物といっしょに許可されていない人物が入室してしまう「共連れ現象」を検出するセキュリティドアシステムを開発している [9] [10]。これらの研究により、自動ドアを設置することで日常生活が便利になることが示されている。しかし、これらの研究は従来の自動ドアの問題点を解決しようとするものではない。

一方、素通りする人に対する誤開閉や開き動作の遅れといった問題を解決しようとする研究として、近接センサを用いた本江らの一連の研究や CCD カメラを用いた画像処理によるもの、遺伝的プログラミングによるものがある。また、レーザーキャナーを使って人をトラッキングする手法に関する研究がある。

本江らの一連の研究 [11] [12] [13] では、従来の近接センサの解像度を 2 倍にし、ドアセンサの監視領域を広くすることで、ドアの誤動作を減らし、不必要なドアの開き時間を 3 分の 1 程度に抑えている。この研究では、まだ多くの誤動作が見られるが、実際に駅構内に提案システムを設置し、様々な状況について検討することでドアセンサの改良が歩行者のスムーズな通行や建物の省エネに対して有効であることを示している。また、三宅らは自動ドア上

部に設置した CCD カメラを用いて自動ドア付近画像の色空間の距離情報に基づき、移動物体検出をしている [14]。石堂らは、既存の赤外線センサを複数台用いて、自動ドアに進入する場合と前を素通りする場合の歩行パターンを遺伝的プログラミングにより学習させることで、進化するドアをシミュレートしている [15]。その結果、既存ドアに比べ無駄なドア開閉を減らすことに成功している。しかし、この手法では対応可能な歩行パターンが少なく、実際の歩行者の多様な歩行パターンに対して十分なドアコントロールを行うことは容易ではない。

本研究グループの先行研究としてはインテリジェント自動ドアの研究がある [16] [17] [18]。この研究では、2次元のレーザースキャナーを用いて歩行者の向きと速度を推定し、開閉判定を行っており、以下の結果が得られている。

- ドアと平行に素通りする歩行者に対して、80 % 程度の確率でドアを開けないことに成功している。
- ドアに進入する歩行者に対し、歩行者がドアに到達する前にドアを開ける。

これらの結果によって、従来の自動ドアからの性能向上を果たしている。しかし、以下の様な課題もまだ残されている。

- ドアの横に2次元のレーザースキャナーを設置しているため、オクルージョンの発生が避けられない。
- 従来の自動ドアのドアセンサはドアの上部に設置されているため、実際の施工を考慮するとドアセンサの配置が好ましくない。
- 従来の自動ドアと比較して誤動作が減っているが、実際の運用を考えるとより高い精度が求められる。

## 1.3 研究目的

前節で述べた先行研究の問題を解決するために、本研究ではドアの横に2次元センサを置くのではなく、ドア上部に取り付けたセンサで上方から歩行者を観測することとし、以下の機能を実現することを目的とする。

1. ドアに進入しようとする歩行者にのみドアを開ける。
2. 歩行者の位置と速度を推定し、ドアの開きタイミングと開き速度を制御する。
3. 歩行者の人数を推定し、ドアの開き幅を制御する。

1. では歩行者がドアに進入するのか、それとも単に素通りするのかをドア上部に取り付けたセンサによって判断し、ドアに進入する歩行者に対してのみドアを開ける。ドアに進入する意思のない歩行者に対してドアの誤動作を減らすことで、省エネ効果が期待できる。

2. ではドア上部に取り付けたセンサを用いてドアに接近する歩行者の位置と速度を推定し、歩行者がドアに到達する時刻に間に合うようなタイミングと速度でドアを開ける。歩行者の位置と速度に合わせた開閉動作を行うことで、様々な速度で接近する歩行者に対してスムーズな通行を促すことが期待できる。

3. ではドア上部に取り付けたセンサを用いて歩行者が1人なのか、それとも複数人なのかを判断し、ドアの開き幅を変化させる。歩行者の人数が少ないときにドアの開き幅を小さくすることで、建物の空調面での省エネ効果が期待できる。

## 1.4 論文構成

本論文の構成は次の通りである。2章ではインテリジェント自動ドアの仕様について具体的に検討する。3章ではインテリジェント自動ドアシステムを構成するセンサとアルゴリズムについて詳細に述べる。最後に4章では本論文のまとめを述べる。

## 第2章 インテリジェント自動ドアの概要

インテリジェント自動ドアを実現するには歩行者を検出するためのドアセンサと、ドアセンサから得られたデータを用いてドアを開けるかどうかを判定するための判定アルゴリズムが必要である。本章では、インテリジェント自動ドアのドアセンサとして採用するセンサについて、またこのセンサに対応した判定アルゴリズムについて検討する。

### 2.1 想定する環境

インテリジェント自動ドアに搭載されるドアセンサと判定アルゴリズムは、前述した機能を満たすとともに、自動ドアが設置される環境に対応したものである必要がある。自動ドアは屋内だけではなく、屋外でも利用される。屋外環境では、太陽光が強く当たる日中や光源が全くない夜間などで、照明条件が大きく異なる。また、季節や時間帯の変化による温度の変化や風雨、積雪といった天候条件の変化が発生する。以下にいくつかのシチュエーションを想定し、インテリジェント自動ドアの機能が日常生活でどのように活かされるかを述べる。

#### 例1：狭い道路に面した出入口（図 2.1）

狭い道路に面した出入口は人通りのある通路に面しているため、ほとんどの人がドアの前を単に素通りし、ときどきドアに進入する人がいる。このようなシチュエーションでは、従来の自動ドアに採用されている近接センサだと、建物に入らず、単に素通りする人に対しても誤ってドアを開けてしまい効率が悪い。このため、近接センサにかわって、タッチセンサを使って利用者に自分でドアを開けさせていることが多い。インテリジェント自動ドアであれば、このようなシチュエーションでも「1. ドアに進入する歩行者にのみドアを開ける」機能によってドアの前に立ち止まった人にだけドア

を開けることができる。この機能によって利用者は特別な操作をすることなく自動ドアを利用することができ、空調の省エネの面でもタッチセンサと同等の効果が期待できる。

#### 例 2：ドアの近くが大きく開けている出入口（図 2.2）

ここで例に挙げる空港やデパートの出入口は、ドアの近くが大きく開けており、ドアから遠くまでを見渡せるような環境のことを指している。インテリジェント自動ドアの機能はこのような環境でも活かされる。空港やデパートの出入口は、人通りが多い上に大きな荷物を持っている人が多い。このような場所にタッチセンサを設置するのは省エネの面では効率が良いが、荷物で両手がふさがった状態でタッチセンサを押すのは利用者にとっては不便である。このため、このような場所では特に「1. ドアに進入する歩行者にのみドアを開ける」機能が役に立つ。また出入口の周辺が大きく開けている場合には、ドアに入ってくる歩行者を事前に検出することができると考えられるため「2. 歩行者の位置と速度を推定し、ドアの開きタイミングと開き速度を制御する」と「3. 歩行者の人数を推定し、ドアの開き幅を制御する」の機能が実現可能だと予想される。歩行者がドアにいつ到達するかを予測してドアを開けることができれば、人通りが多く自動ドアが多数設置されているような環境でもスムーズな通行を促すことができる。また、近接センサを用いた従来の自動ドアでは、感度の問題でベビーカーに反応せずドアが開きづらいケースがあるが、この問題についても事前に歩行者を検出することで解消できる。さらに、歩行者の人数によってドアの開き幅を調節することができれば、ドアを全開にする必要が無い状況では、ドアの開き幅を小さくし、ドアが開いている時間を減らすことができるため、さらなる省エネ効果が期待できる。

#### 例 3：病院や介護施設の出入口

病院や介護施設は障がいを持った人や妊婦、車いすに乗った人など、身体の動きに制限がある人が多く利用する。手動でドアを開けたり、自動ドアであってもタッチセンサを押したりする動作は身体の不自由な人にとって負担となるため、利用者が特別な操作をすることがなく、スムーズに開くインテリジェント自動ドアはこのような場所

でも役立つと考えられる。



図 2.1: 例 1 : 狭い道路に面した出入口



図 2.2: 例 2 : ドアの近くが大きく開けている出入口

## 2.2 ドアセンサと判定アルゴリズムの検討

この節ではインテリジェント自動ドアのドアセンサに採用するセンサと、そのセンサに対応した判定アルゴリズムについて関連研究を挙げながら議論する。

### 2.2.1 ドアセンサに求められる要件

インテリジェント自動ドアに搭載するドアセンサは以下の要件を満たす必要がある。

- ドア上部に取り付けられるサイズに収められること
- 歩行者の位置・速度・人数を推定するのに最低限必要な監視範囲、分解能、計測周期を持つこと
- 屋外で使用可能であること（気候や照度の変化に強い）

まず、ドアセンサはドア上部に取り付けることができる必要がある。これは上方から歩行者を観測することでオクルージョンを抑えるためである。また、駆動系に従来の自動ドアの機構を使う関係上、ドアセンサの配置も従来の近接センサと同じであることが好ましいと考えられる。

次にセンサから取得するデータは、そのデータから歩行者の位置・速度が推定できるものでなければならない。一般に人間の歩行速度は0.5-1.6 m/s程度とされている。そしてJADA (Japan Automatic Door Association) が定める自動ドアの安全ガイドラインでは、両開きの自動ドアの開き速度が1000 mm/s以下であることと、開き幅が800 mm以上であることが推奨されている。これらの条件を踏まえると両開きの自動ドアを推奨設定で運用する場合、歩行者がドアから約1.3 m離れたところにいるときにドアを開け始める必要があり、速度の判定を0.3秒で行う場合、センサには最低でも半径1.8 mをカバーするレンジが必要である。さらに本研究では子供の検出も行うため、200 mm以上の物体を検出できる分解能が要求される。



また、自動ドアは屋内と屋外を繋ぐ出入口に設置されていることが多いため、屋外でも使用可能である必要がある。屋外で使用するには、雨や雪等の気候の変化や時間帯による照度の変化が起きても安定して動作する必要がある。日中の太陽光の照度が 32000 lx-100000 lx であることから、自動ドアが一日中動作するには 0 lx-100000 lx で動作する必要がある。また、雨天・雪天時にセンサ表面に水滴が付着したり、反射光が存在したりするときでも影響を受けないようにしなければならない。

### 2.2.2 ドアセンサの検討

歩行者の検出や進路予測に関する研究には様々なセンサが用いられている。以下に代表的なセンサを列挙する。

- 複数の監視領域を持つ近接センサ
- ステレオカメラ（パッシブステレオ）
- デプスセンサ（アクティブステレオ）
- レーザースキャナー

現在市販されているドアセンサで最も高機能だと思われるのは複数の監視領域を持つ近赤外線反射式の近接センサである [19] [20]。監視領域を複数のエリアに分けることで監視領域の細かい設定を可能としている。さらに、本江らの研究 [11] [12] [13] では市販のものよりもエリアを増やし、監視領域を広げたセンサを用いて歩行者の移動軌跡を推定することで素通りする歩行者に対する誤動作をある程度無くすことに成功している。しかし、この近接センサのひとつのエリアは大きさが最小でも一辺 200 mm ほどあり、各エリアで検出できるのは物体の存在の有無とセンサに対して物体が近づいているか遠ざかっているかといった情報だけである。このため、この近接センサを用いて歩行者の速度を推定するのはセンサの解像度の面で困難である。

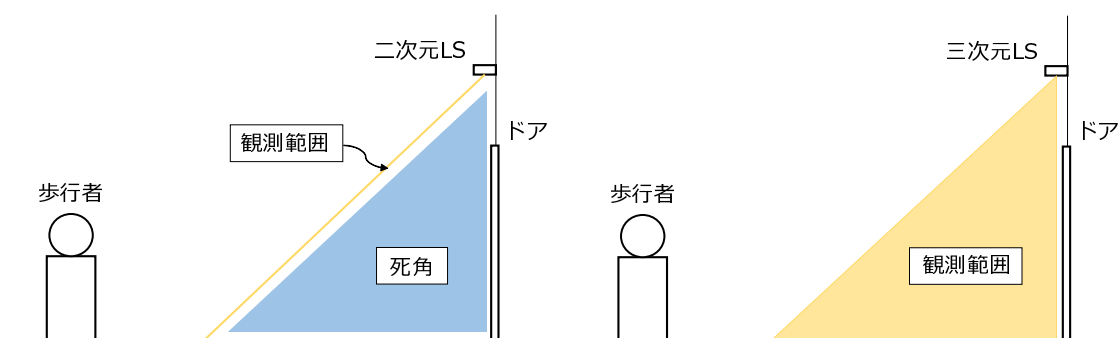
ステレオカメラは2つのカメラを異なる位置に設置し、視差を利用することで、物体の色情報だけではなく、カメラから物体までの距離を算出することができるセンサである。ステ

レオカメラを使って人間の検出や追跡を行う手法は多数提案されている [21] [22] [23] [24]。しかし、ステレオカメラから得られる情報から物体の距離を算出するためには、2つの画像から対応する特徴点を求める必要があり、一般にこの処理は計算量が大きくマイコンで処理するのは困難である。また、自動ドアが設置されるような屋外では、天候や時間帯によって照度条件が大きく異なり、夜間ではほとんど光源が無い場合がある。通常のカメラだとほとんど光源が無い夜間に鮮明な画像を得ることはできないため、この点からもステレオカメラをインテリジェント自動ドアのドアセンサとして利用するのは困難であると考えられる。

また、物体の形状や距離を取得できるセンサとしてアクティブステレオ方式のデプスセンサがあり、このセンサを使った人間の検出手法も提案されている [25] [26]。この方式は既知のパターンをプロジェクターで物体に投影し、カメラで撮影したパターンと比較して3次元形状を復元することで物体の形状や距離の情報を取得することができる。しかし、この方法は物体にパターンを投影する必要があるため、プロジェクターの光が弱まってしまう遠方の物体を観測することができない。また、屋外において直射日光がある場合、物体に投影されたパターンを認識することができず、うまくデプス画像を得ることができない。これらの問題があるため、アクティブステレオ方式のデプスセンサもドアセンサとして用いるには不適切である。

距離値が取得でき、照度変化に強いセンサとしてTOF(Time-of-Flight)方式のデプスセンサがあり、インテリジェント自動ドアの先行研究では2次元のレーザースキャナーをドアセンサとして利用している [16] [17] [18]。TOF方式とは、センサから投射した音や光が物体に当たり、反射して返ってくるまでの時間を計測することで距離値を取得する手法で、レーザースキャナーではその名の通り赤外光のレーザーを物体に投射している。レーザースキャナーの特徴は屋外でも広い範囲を観測することができ、高い精度で距離値を取得できることである。TOF方式のデプスセンサとしては、レーザースキャナーのほかに、距離値を距離画像として取得するデプスカメラがあるが、利用者の姿を画像として取得してしまうことに対するプライバシー保護の問題や距離値の精度がレーザースキャナーと比較すると低いことを考慮し、本研究では先行研究と同じくレーザースキャナーをドアセンサとして用いることとする。

レーザーセンサーを用いる際に問題となるのがセンサの配置である。先行研究ではレーザーを一定の角度間隔で放射状に投射する2次元のレーザーセンサーをドアの横に設置した柱に固定しているが、この配置は既存の自動ドアの駆動系に設置することを考えると好ましくなく、従来の近接センサと同様にドア上部に取り付けるのが理想的である。しかし2次元のレーザーセンサーをドア上部に取り付けると死角が生まれてしまうため、補助センサなしでは安全なドアシステムを構築することができない(図 2.3(a))。このため、本研究では3次元レーザーセンサーをドアセンサとして用いることができる。3次元レーザーセンサーは2次元レーザーセンサーと異なり、空間中を立体的に走査するため、ドア上部に取り付けても死角が生まれることがない(図 2.3(b))。また、物体の上方からレーザーを当てるため物体の「高さ」に着目した付加機能を自動ドアに持たせることが可能である。



(a) (a)2次元レーザーセンサー

(b) (b)3次元レーザーセンサー

図 2.3: レーザーセンサーの観測範囲

### 2.2.3 判定アルゴリズムに求められる条件

1.3 節で述べたとおりインテリジェント自動ドアについて、本研究では以下の機能の実現を目的とする。

1. ドアに進入しようとする歩行者にのみドアを開ける。
2. 歩行者の位置と速度を推定し、ドアの開きタイミングと開き速度を制御する。
3. 歩行者の人数を推定し、ドアの開き幅を制御する。

実際にインテリジェント自動ドアシステムを構築する際には、これらの機能の他に安全面への配慮も必要である。そのために、ドアの動作に以下のような優先順位を設けて判定アルゴリズムを設計することとした。

- r1. ドアが開いているときにドア付近に歩行者がいる場合、ドアを閉めない。
- r2. ドアの直近に歩行者が静止している場合、ドアを「高速」で開ける。
- r3. 単にドアの前を素通りする歩行者に対してはドアを開けない。
- r4. ドアに進入する歩行者に対し、状況に合わせたドア開閉を行う。
  - r4a. 歩行者が1人のときは「半開」、複数人のときは「全開」でドアを開ける。
  - r4b. 歩行者がドアへ到着するのに間に合うような開き速度と開きタイミングでドアを開ける。

r1～r4はドアを開ける際の判定ルールで、r1が最も優先度が高く、r4が最も優先度が低い。r1は挟まれ防止のための判定ルールで、歩行者が連続してドアに進入するような場合に、ドアを閉めないようにするためのものである。r2は歩行者がドアに進入できなくなるのを防ぐためのルールで、従来の自動ドアと同様にドアの前に立っている歩行者を検出し、ドアを開ける。インテリジェント自動ドアでは、基本的に歩行者がドアに到着するのに間に合うようなタイミングでドアを開けるが、状況によっては開くタイミングが遅れることがある。そう

いった場合でも  $r_2$  があることで、ドアに進入したいのにドアが開かないといった事態を防止することが出来る。 $r_3$  はインテリジェント自動ドアの機能 1 にあたるルールである。 $r_4$  はドアに進入する歩行者に対するルールで、 $r_{4a}$  と  $r_{4b}$  はそれぞれインテリジェント自動ドアの機能 2 と 3 に対応している。一般的な自動ドアにはドアの開き速度と開き幅がそれぞれ 2 種類ずつ用意されており、具体的な数値はドア側の設定で変更できることが多い（開き速度：「標準」「高速」、開き幅：「半開」「全開」）。本研究では自動ドアの駆動部については従来の自動ドアのものを用いるため、判定アルゴリズムもこの仕様に沿ったものとなる。このため、 $r_4$  における開き幅と開き速度の組み合わせは計 4 種類となる。本研究で用いる自動ドアの具体的な数値については、実装や実験の部分でその都度紹介する。

また、判定アルゴリズムはマイコンに実装可能である必要がある。近年のマイコンは高性能化が進んでおり、簡単な画像・音声処理ができるものも多く存在している。しかし、ドアセンサに搭載されるようなマイコンの性能には限りがあり、コスト面でも判定アルゴリズムはできるだけ軽量なものであることが望ましい。本研究では、インテリジェント自動ドアの機能に特化した軽量なアルゴリズムの開発を目指す。

#### 2.2.4 判定アルゴリズムの検討

レーザースキャナーを用いて歩行者の検出や進路予測をしている研究には、柴崎らによる一連の研究 [27] [28] [29] [30] や複数のセンサを使うことで安定した人物追跡を実現しているもの [31] [32] [33]、パーティクルフィルタを用いることでオクルージョンがある環境下での人物追跡を実現しているもの [34] [35] 等がある。しかし既存の研究には、人間を 2 次元のレーザースキャナーで真横から観測したものが多く、ドアの上にセンサを取り付け、上方から歩行者を観測するような環境にそのまま適用することはできない。また、これらの手法は人物をできるだけ正確に追跡することを目的としていることもあり、計算量が大きく、ドアセンサに搭載されるマイコンに実装することは難しい。このため、本研究ではドアの制御だけに特化した軽量なアルゴリズムを開発する。

## 2.3 まとめ

本章では、インテリジェント自動ドアのドアセンサとして採用するセンサについて、またこのセンサに対応した判定アルゴリズムについて検討した。

2.1 節では、本研究が想定する環境について例を挙げ、どのようなシチュエーションでインテリジェント自動ドアが役立つかを説明した。

2.2 節では、インテリジェント自動ドアに搭載するドアセンサとそのセンサに対応した判定アルゴリズムについて議論した。本研究では、ドアセンサとして3次元レーザースキャナーを採用し、自動ドアの制御に特化した軽量なアルゴリズムを開発することとした。

# 第3章 インテリジェント自動ドアシステムの 実現

本章では、実際に構築したインテリジェント自動ドアシステムについて詳細に述べ、実現した機能について評価実験を行う。

## 3.1 使用する三次元センサの概要

本研究では北陽電機株式会社がドアセンサとして開発中のセンサを用いる。センサの外観を図 3.1 に、仕様を表 3.1 に示す。このセンサはレーザーを二次元に走査し、対象物までの距離を測定する TOF 式の三次元レーザースカナである。

センサはドアの框部への取付を想定しており、3500 mm の高さにと付た場合、有効検出面積は横方向に 5000 mm、奥行方向に 3000 mm となる。センサから得られるデータはレーザーの投射角度と対象物までの距離で、5440 本分のデータを 10 Hz で取得できる。データはスキヤンの片道分ずつ受け取ることもでき、その場合は 2720 本のデータを 20 Hz で取得する。図 3.2 にスキヤンの軌跡を示す。この図の赤色の点がスキヤンの往路、青色の点が復路を表している。このように片道のスキヤンでも監視領域全体をカバーしており、2つの軌跡はちょうど半分位相がずれた関係となっている。

距離の計測はパルス発光による TOF (Time of Flight) で行っている。TOF 方式はレーザーを投射した時刻と物体に反射して返ってきた時刻との時間差から距離を計測する方式である。この時間差の計測には AM 変調された信号の位相差から求める方法とパルス光変調された信号の立ち上がり時間差から求める方法があるが、位相差から求める方法は距離精度が良いという利点があるが検出距離が短く、ドアセンサには不向きである。このため、この

センサでは光強度を大きくでき、検出距離が長いパルス発光方式を採用している。また、距離の演算には不要反射による信号を除去するため、マルチエコー信号を高感度で分離できるADコンバータを使用した波形解析から距離を演算する方式が採用されている。

センサの走査ユニットは高速に振動するミラーと低速に振動するミラーの2つで構成されており、レーザーはこのミラーに反射して監視領域へと投射される。共振ミラーの形状を図 3.3 に、仕様を表 3.2 に示す。2つのミラーはそれぞれ金属製の高速ミラーとカーボンナノチューブの入ったシリコンゴムで作られた低速ミラーである。高速ミラーは縦（ ）方向に 400 Hz で振動し、低速ミラーは横（ ）方向に 10 Hz で振動する。

投光ユニットは半導体レーザーと投光レンズからなり、短パルスのレーザー光の光芒をできるだけ小さくするよう絞られている。レーザー光は投受光ユニット部のミラーで90度に曲げられ、2個の共振ミラーにより二次元に走査される。検出物に当たって返ってきた光は、両ミラーを経由して、受光ユニットに導かれる。投受光は同軸光学系で、ミラーにより光学的に分離されている。投光ユニットの外観を図 3.4 に、レーザーの走査軌跡を図 3.5 に示す。

本センサはTOFを使った同軸光学系のため、太陽光等の強い光が直接入っても計測に影響せず、200000 lxの環境でも使用できる。さらにマルチエコー技術によるソフトウェアフィルタにより、光学面についた水滴や雪、雨による反射光、多数台設置したときの相互干渉光などを除去できる。この技術と共振ミラーを2つ組み合わせた走査系の採用により、比較的小型で安定性があり環境に強く、ロバスト性が高いセンサが実現されている。





図 3.1: センサの外観

表 3.1: Specification of the sensor

Specification	
Optical source	laser diode
Measuring	TOF (Pulse Modulated Signals)
Scanning device	Resonant Mirror
Horizontal Range	72 deg
Vertical Range	42 deg
Frame Rate	10 Hz
Observation Points	5440 points/frame
Temperature Resistance	-20 ~ 50
Size [mm]	127(H)×230(L)×83(W)

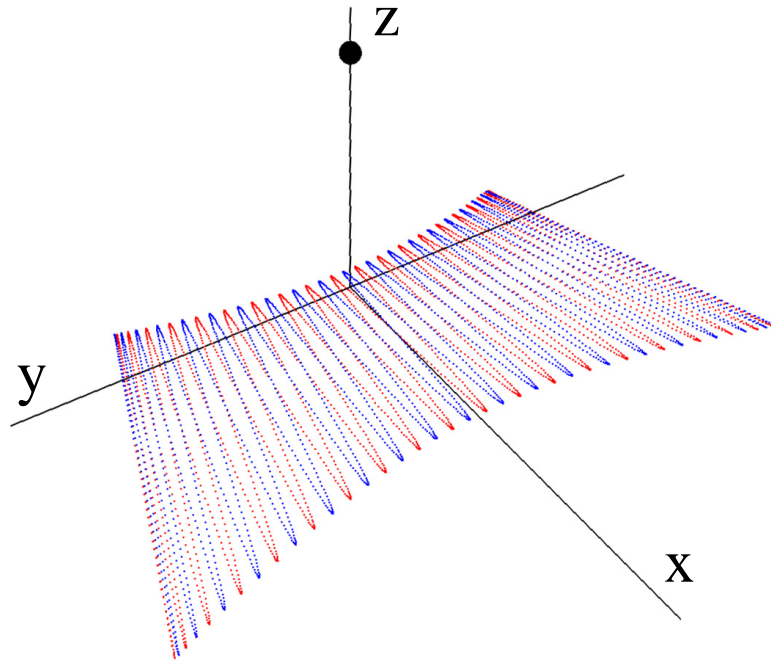


図 3.2: スキャンの軌跡

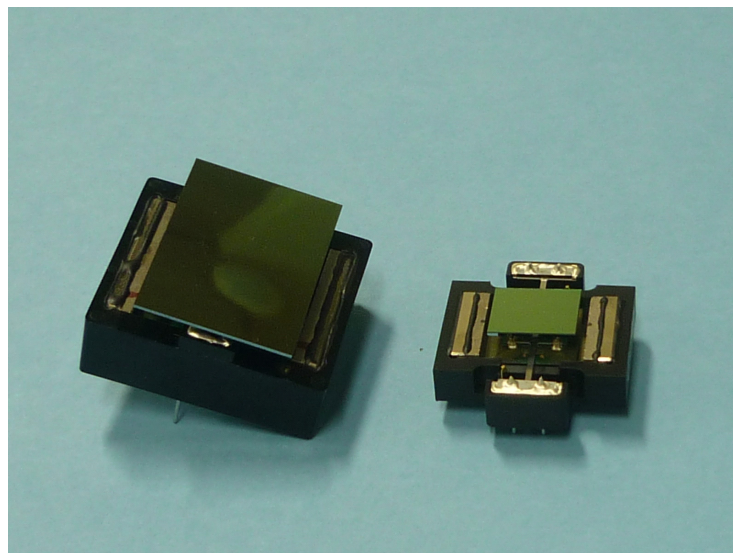


図 3.3: 共振ミラー

表 3.2: Specification of Resonant mirrors

	low-speed mirror	high-speed mirror
Resonant frequencies	12.7 Hz	387 Hz
Hinge material	silicon rubber	SUS t=0.25
Q	4.4	78
Mirror	22 × 20 Au mirror	12 × 10 Au mirror

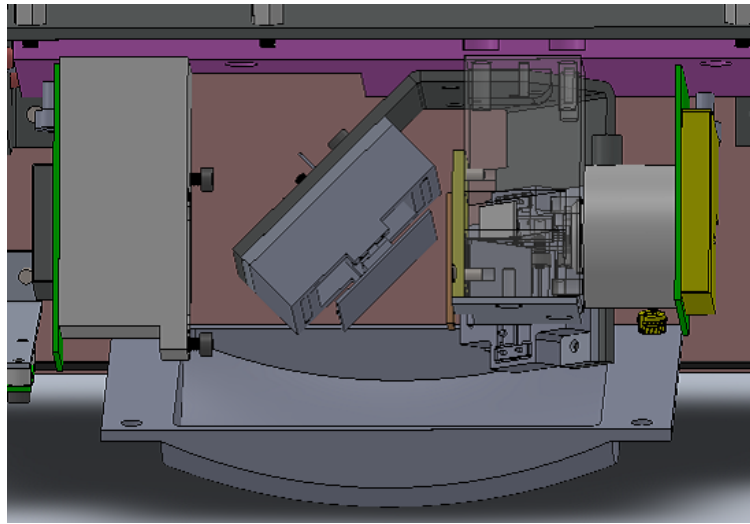


図 3.4: 投光ユニット

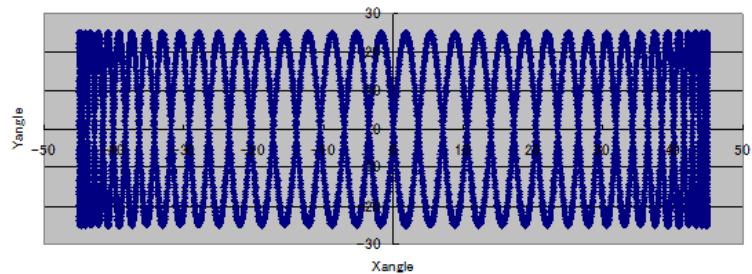


図 3.5: レーザーの走査軌跡

## 3.2 開閉判定アルゴリズム

本章では、インテリジェント自動ドアを制御するためのアルゴリズムについて説明する。本稿で提案するアルゴリズムはドアに近づく物体のデータのみを抽出し、分割されたセルごとに物体の動きを推定する。このため、複雑なクラスタリングや物体の追跡などを必要とせず、ドアに背筋する物体の進路とドアへの到着時刻を推定することができ、マイコンにも実装可能である。アルゴリズムは大きく分けて「前処理」、「放射状セルを用いた物体の位置と速度の推定」、「ストライプ上のセルを用いた歩行者の進路予測」、「開き判定」の4つのステップに分かれている。

### 3.2.1 前処理

このステップでは、センサから得られたデータのうちドア開閉に關与するデータのみを抽出し、座標変換を行う。

#### step1：判定に用いるビームの抽出

前述したようにドアセンサは1 スキャンあたり 5440 本のビームを投射しており、センサからビームが当たった点までの距離を出力している。これらのデータのうち、ドアに接近する物体のデータのみを抽出する。

まず歩行者が居ない状態で記録した環境データと取得したデータとの背景差分を取る。この処理によって、物体だけを抽出することができる。

次に、抽出したビームを前時刻との距離の変化に応じて2種類に分類する。自動ドアの判定において、重要なのはドアに接近する歩行者に関するデータであり、単にドアの前を素通りしたり、ドアから離れたりする歩行者については無視して良い。このため、前時刻と比較して一定値以上センサ方向に近づいたものを c-beam、変化が一定値以下のものを s-beam とし、遠ざかるものについては分類せず、判定には用いない。ドアに接近する歩行者の検出には c-beam のみを使い、s-beam はドア前に留まっている人の検出に利用する。

## step2 : 座標変換

前節で分類したビームの距離値とビームが投射される角度を用いて、ビームが物体に当たった位置を xyz 座標系で表現する。本アルゴリズムの座標系を図 3.6 に示す。この座標系はセンサを地面に投影した場所を原点とし、ドアから見て奥行方向を  $x$  軸、平行方向を  $y$  軸、高さ方向を  $z$  軸としている。ビームが当たった位置のことを、以後 scan point と呼ぶこととする。センサを原点としたときのスキャン点の 3 次元座標は以下の式で示される。

$$\begin{aligned}x &= d \times \cos(\theta) \times \cos(\phi) \\y &= d \times \sin(\theta) \times \cos(\phi) \\z &= d \times \sin(\phi)\end{aligned}\tag{3.1}$$

ここで、 $d$  は距離データ、 $\theta$  と  $\phi$  はそれぞれ水平・垂直走査ミラーの光学角である。

本研究では図 3.6 のように座標系を設定し、以下の式を用いて変換した座標値を用いた。

$$\begin{aligned}x' &= z \times \sin(\alpha) + x \times \cos(\alpha) + S_x \\y' &= y + S_y \\z' &= z \times \cos(\alpha) - x \times \sin(\alpha) + S_z\end{aligned}\tag{3.2}$$

$\alpha$  はセンサの取付角、 $S_x, S_y, S_z$  はセンサの取付位置である。

### 3.2.2 放射状セルを用いた歩行者の位置と速度の推定

ドアに接近する可能性のある物体の位置と速度を推定するために、c-beam に属する点群を図 3.7 に示すような放射状のセルに割り当てる。そしてそれぞれのセルごとにドアに近づく物体の位置と速度を計算する。なお、ここでは 6deg おきに 30 の領域に分割している。放射状のセルの間隔は各セルに割り当てられる scan point の数と、セルの最大幅を考慮して決定した。センサの特性上ドアの正面のデータの密度が小さいため、セルの間隔が小さすぎると走査の方向によってはまったく scan point が無くなってしまうことがある。このようなことがないようにセルにある程度の大きさを持たせ、毎回の走査でどのセルにも scan point が割り当てられるようにした。また、歩行者の人数の推定にセルの幅を利用するため、セルの幅が大きすぎると推定の分解能が下がってしまう。詳しくは後述するが、セルの幅が最大でも 300 mm 以下になるようにセルの間隔を決めた。

放射状のセルごとに物体の動きを観測することで、複雑なクラスタリングや追跡を行わずに物体の位置と速度を推定できる。また、ドアに進入しようとする歩行者は同じセルの上を長時間移動するのに対して、素通りする歩行者は同じセルの上に長く留まらずすぐに他のセルに移動する点に注目することで、歩行者がドアに進入しようとしているのか、それとも素通りしようとしているのかをある程度予測することができる。

#### step1 : グループ分け

本アルゴリズムでは、あるセルに複数の物体が存在する場合、最もドアに近い物体に注目する。これは、もし後ろにある物体のほうが移動速度が大きかったとしても、ドアに進入するためには前の歩行者を避けて他のセルに移る必要があり、結果的に最もドアに近い物体が最も早くドアに到達する可能性が高いと考えられるためである。

ドアに近い物体だけを抽出するために図 3.8 に示すようなヒストグラムを作成する。このヒストグラムは横軸が scan point の  $x$  座標値 (100 mm ごと)、縦軸が対象物に当たった scan point の数を表している。ここでは scan point がひとつもない区間が 2 つ続いたところをヒストグラムの谷と定義し、物体の境界とみなす。以降の処理ではドアに最も近いグループのデータのみを使う。

#### step2：位置とスキャン時刻の算出

step1 で抽出したデータの  $x$  座標の平均値をそのセルで最もドアに近い物体の位置とする。センサから物体までの距離値の平均ではなく、 $x$  座標の平均を取るのは、このステップの最終目的が、歩行者がドアに到達する時刻を推定することだからである。 $x$  座標値にのみ注目することで、 $y$  軸方向の位置と速度の推定はできなくなるが、ドアへの到達時刻を推定することへの影響はない。また、scan point の観測時刻の平均も合わせて算出する。これはセンサが1回スキャンするのに0.1 sec かかるため、scan point ごとの観測時刻が異なるためである。図 3.9 にスキャンの方向によるスキャン時刻の違いを示す。観測時刻を考慮することで、物体の場所が監視領域の端にいたとして正しく速度の推定を行うことができる。物体の位置データと観測時刻の平均は常に過去数フレーム分を記録しておく。

#### step3：速度の算出

物体の速度データの算出はセルごとの物体の位置データとスキャン時刻をもとに最小二乗法を用いて行う。最小二乗法を用いて算出した近似直線の傾きがそのセル内の物体の速度データとなる。あるセルの位置データの変化を表したグラフと最小二乗法を用いて近似直線を図 3.10 に示す。前時刻との差が極端に大きいときや2フレーム以上連続して位置データが得られないとき、つまり位置データが同一物体のものではないと考えられる場合には、それ以前の位置データを無視し、最近検出された物体のデータだけを使って速度を推定する。

#### step4：歩行者の人数の推定

ドアの開き判定では、ドアに向かう歩行者が1人なのか、それとも複数人なのかをもとにドアの開き幅を決める。このため、監視領域内の歩行者の人数を推定する必要がある。

まず、ドアに近づく物体が存在する放射状セルのうち、左端と右端のセルを抽出し、それらの間のセルの数を数える。次に、左端と右端のセルのうち、物体の位置データがよりドアに近い方のセルに注目し、位置データが存在する部分のセルの幅データを算

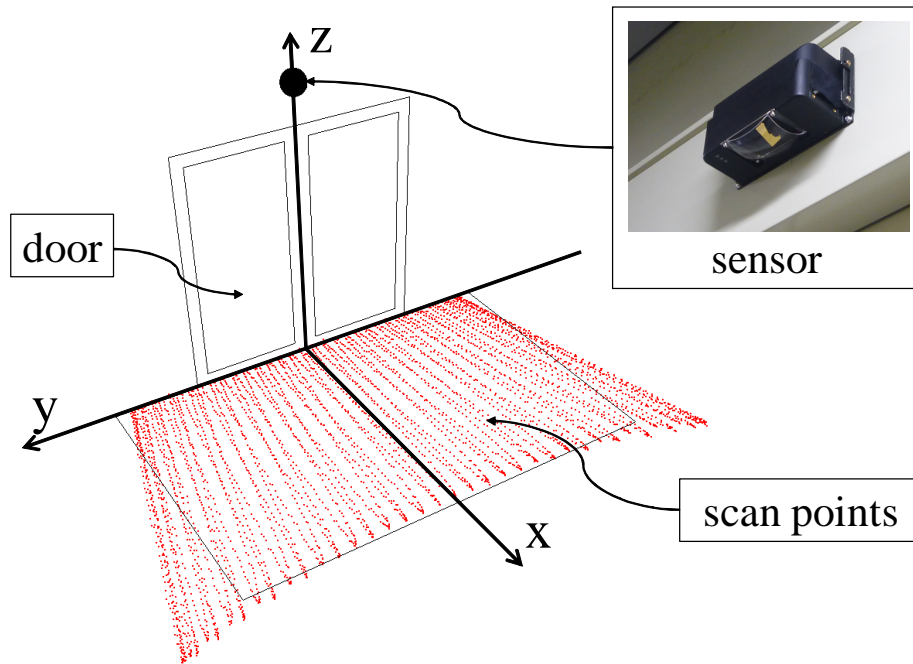


図 3.6: 座標系

出する。セルの幅データは図 3.11 の  $w$  の部分を指し、以下の式で算出する。ここで、 $w_n$  を幅の基準値、 $x_n$  を  $w_n$  に対応した  $x$  座標値、 $w$  を求める幅データ、 $p_x$  をセルの位置データとする。

$$w = \frac{p_x}{x_n} \times w_n \quad (3.3)$$

最後に、算出したセルの幅データとセルの数の積を計算し、この値がある閾値を超えたとき、つまり値が歩行者 1 人の幅よりも明らかに大きいとき、ドアに向かう歩行者が複数人いると判断する。



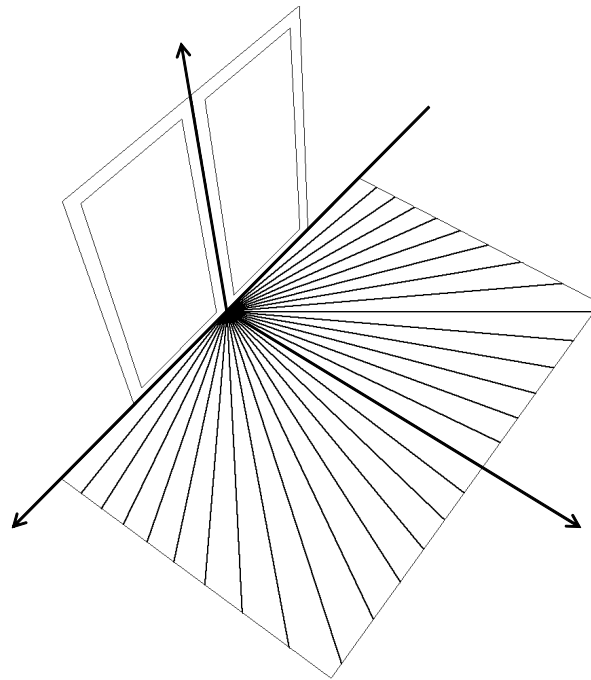


図 3.7: 放射状のセル

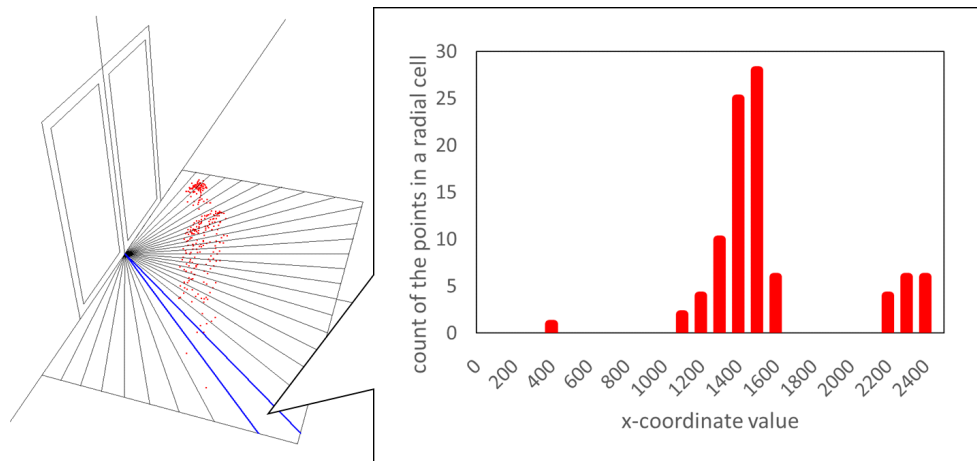


図 3.8: あるエリアのスキャン点とセル番号のヒストグラム

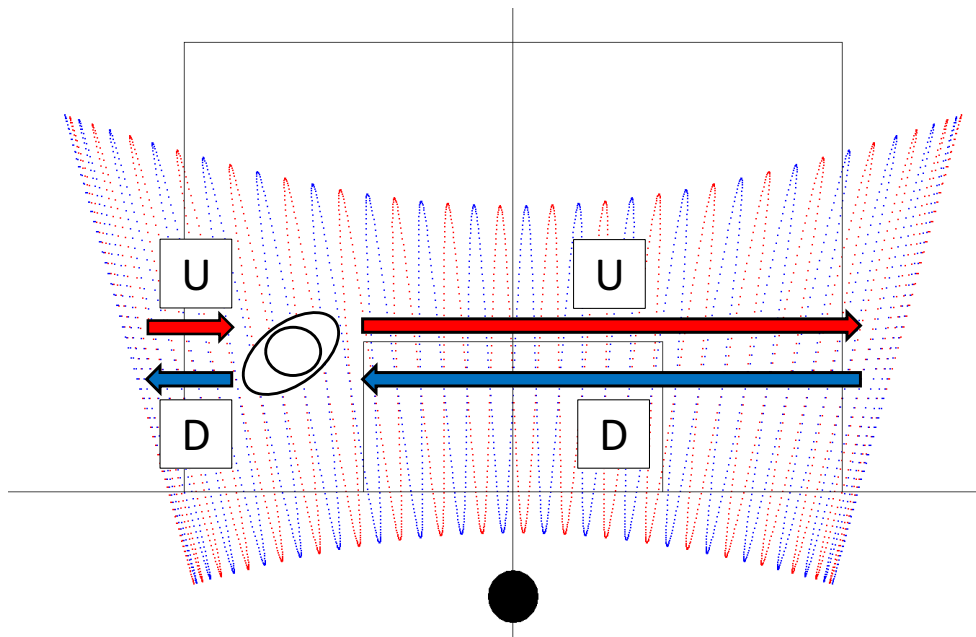


図 3.9: スキャンの方向によるスキャン時刻の違い

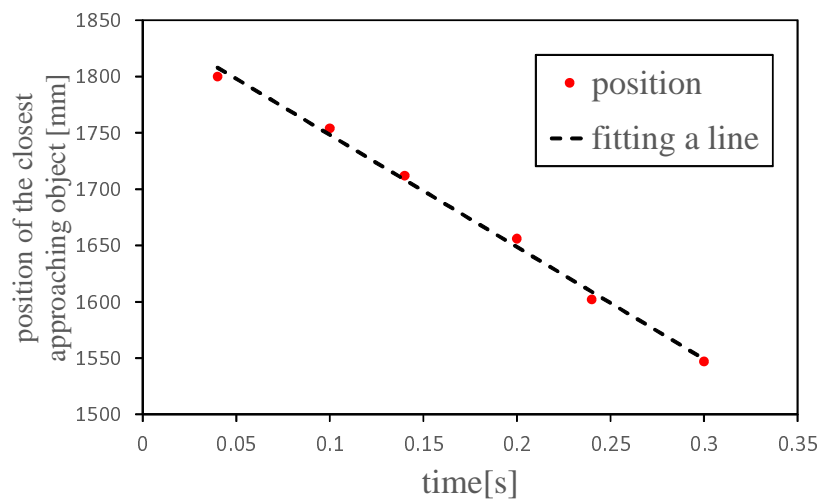


図 3.10: あるエリアの位置データの変化と近似直線

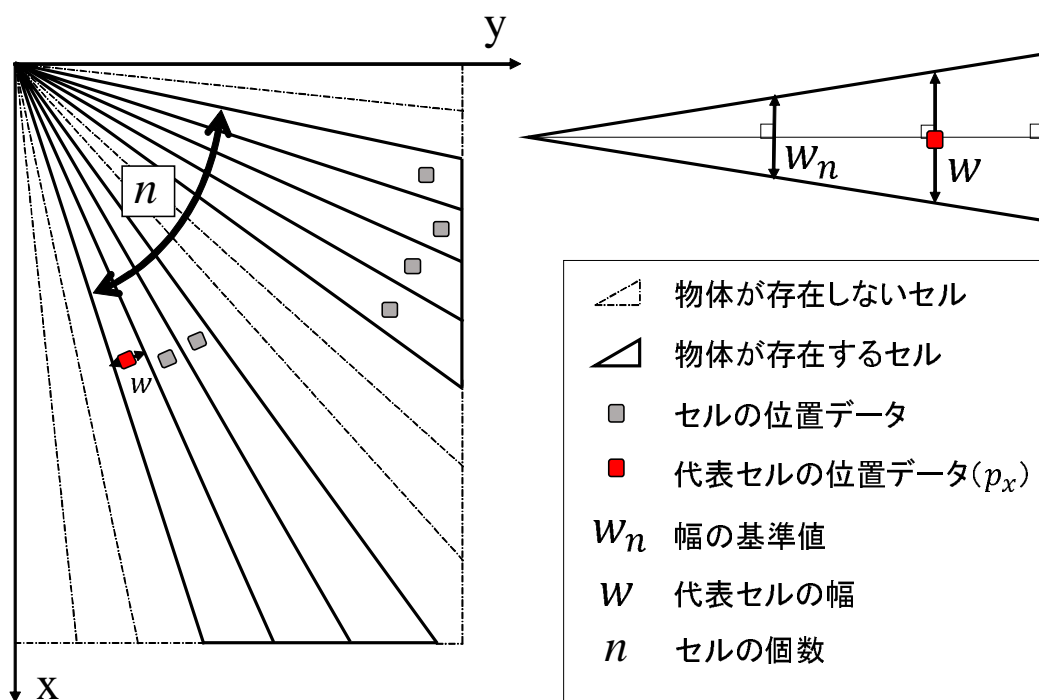


図 3.11: セルの幅データ

### 3.2.3 ストライプ状のセルを利用した歩行者の進路予測

放射状のセルを使って歩行者の位置とドア方向の速度を推定することができた。しかし、実際には歩行者が素通りする場合でもドア方向の速度がある場合があるため、放射状セルの情報だけでは歩行者がドアへ向かっているのか、単に素通りするだけなのかを完全に判断することはできない。そこで、放射状のセルを利用して物体の位置を推定した後に、単に素通りする歩行者を除外し、ドアに向かう歩行者だけを抽出する処理を行う。

ドアに向かう歩行者だけを抽出するために、放射状セルに加えて、素通り方向に平行なストライプ状のセル(図 3.12)を設定し、歩行者の進路を観測することで歩行者の移動方向を推定する。ストライプ状のセルの幅は 100 mm とした。

歩行者が初めて検出されたとき、位置データが存在するセルとその近くのいくつかのセルを pending zone とする(図 3.13)。歩行者が pending zone にいる間は速度や幅の推定は行わず、pending zone から出た時にその歩行者はドアに向かっていると判断し、速度や幅の推定を再開する。pending zone を利用し、ドアに向かう歩行者だけに注目することにより、単に素通りする歩行者を無視することができる。いくつかのセルを pending zone とするかで素通りと判定する歩行者の移動方向の角度を調節することができ、pending zone の幅が大きいほどドアは開きにくくなり、小さいほど素通りに対する誤動作が多くなる。pending zone の具体的な幅は、実際にドアを動作させるところで示す。

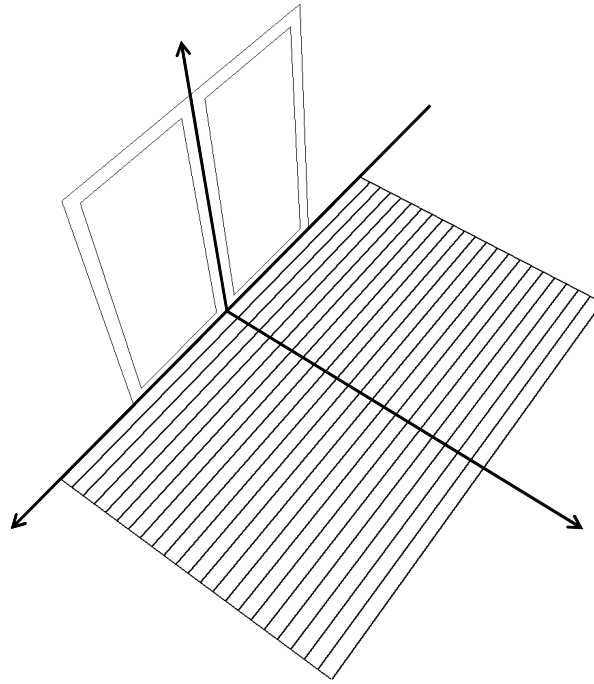


図 3.12: ストライプ状のエリア

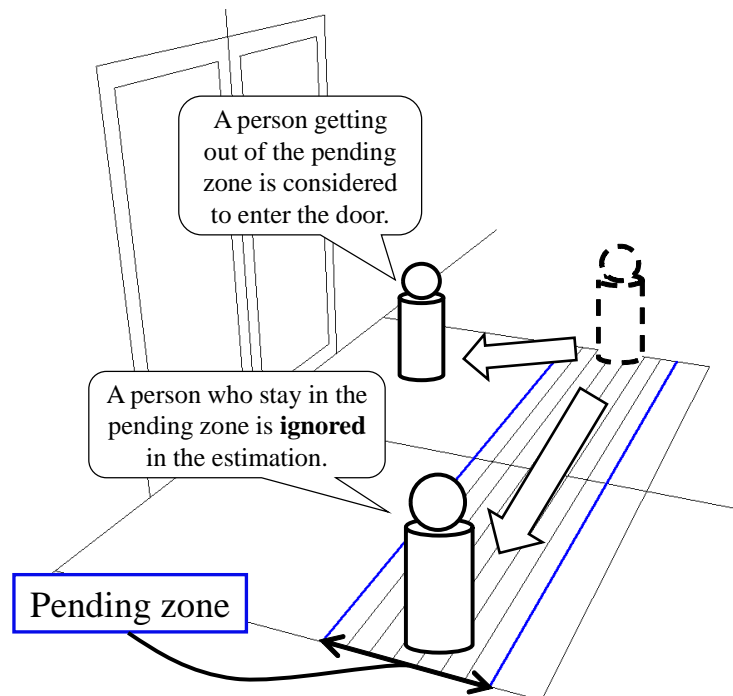


図 3.13: pending zone ( 保留エリア )

### 3.2.4 開き判定

インテリジェント自動ドアは歩行者の移動速度、移動方向、人数を推定し、ドアの開きタイミングと開き速度、開き幅を状況に合わせて変化させる。本節では具体的な開き判定の流れについて述べる。開き判定の流れ図を（図 3.14）に示す。

#### step1：進入する歩行者の有無の判定

開き判定では、まずドアに向かう人が存在するかどうかを判断する。具体的にはドア向きの速度をもつ物体が存在し、かつその物体が前述した保留エリア内に入っていないとき、ドアに向かう人が存在するとみなす。ドアに向かう人が存在しない場合には、開き命令を発行せずに開き判定を終了する。

#### step2：開き幅の判定

ドアの開き幅はドアに進入しようとする歩行者の人数に応じて決める。歩行者の人数の推定には前述したように放射状セルの幅と数を利用し、ドアに進入する歩行者が1人のときには「半開」、ドアに進入する歩行者が複数人のときには「全開」で開ける。開き幅の具体的な設定値については使用するドアごとに異なるため、実験の節で改めて記述する。

#### step3：開きタイミングの判定

開きタイミングの判定では、各放射状セル上の物体がドアに到達する時刻を推定し、歩行者がちょうどドアに到着するときにドアが開き終わるようなタイミングで開き命令を発行する。到達予想時刻  $t_{arrival}$  を求める式を以下に示す。ここで、放射状セルの位置データを  $p_{cell}$ 、速度データを  $v_{cell}$ 、センサの観測周期を  $c_{scan}$  [Hz] とする。また、到達予想時刻はフレーム数で表すこととする。

$$t_{arrival} = \frac{p_{cell}}{v_{cell}} \times c_{scan} \quad (3.4)$$

到達予想時刻が求めた後、以下の関係式を満たすかどうかを判定する。以下の関係式を満たすとき、ドアを開けるべきタイミングだと判断する。ここで、ドアを標準速度

で開けるために必要な時間を  $t_{open}$ 、マージンを  $m$  とする。

$$t_{arrival} \leq t_{open} + m \quad (3.5)$$

市販の自動ドアに設定できるドアの開き速度は一般に「標準」と「高速」の2種類である。本研究では自動ドアの駆動系は市販のものを利用するため、判定アルゴリズムもこの仕様にあわせることとする。「標準」は通常の開閉動作に用いる速度で、ドアの駆動系に負担をかけずに運用することができる。このため、判定アルゴリズムは基本的に「標準」の速度でドアの開き動作が間に合うようなタイミングでドアを開ける。

マージンはドアを開けるタイミングを歩行者がちょうど到達するようなタイミングからずらしたいときに設定するパラメータで、マージンを正の値に設定すると歩行者がドアに到達する前にドアが開き終わるようになる。

#### step4：開き速度の判定

歩行者が急に方向を変えた場合や、放射状のセルを使った速度推定がうまくいかなかった場合など、歩行者が到着するまでにドアを開けることができない場合には「高速」で開けることとする。「標準」と「高速」の具体的な設定値についても開き幅と同様に実験の節で記述する。

#### step5：開き命令の発行

ドアを開けるべきタイミングだと判断される場合、状況に応じた開き命令を発行する。

#### 例外・その他の処理

図 3.14 に示した状況以外でも、歩行者がドアにぶつかったり、挟まれたりすることがないように、歩行者に危険が及ぶ可能性がある場合にはドアを開ける。例えばドア直近に歩行者がいる場合にはドアを「高速全開」で開ける。この判定には s-beam を利用する。ドアの直近に設定した静止物体検出用の領域内の s-beam の数を数え、s-beam の数がある閾値を超えたときにドアの開き命令を発行する。また、補助センサの情報から歩行者がドアに接触している判断される場合にも「高速全開」でドアを開く。

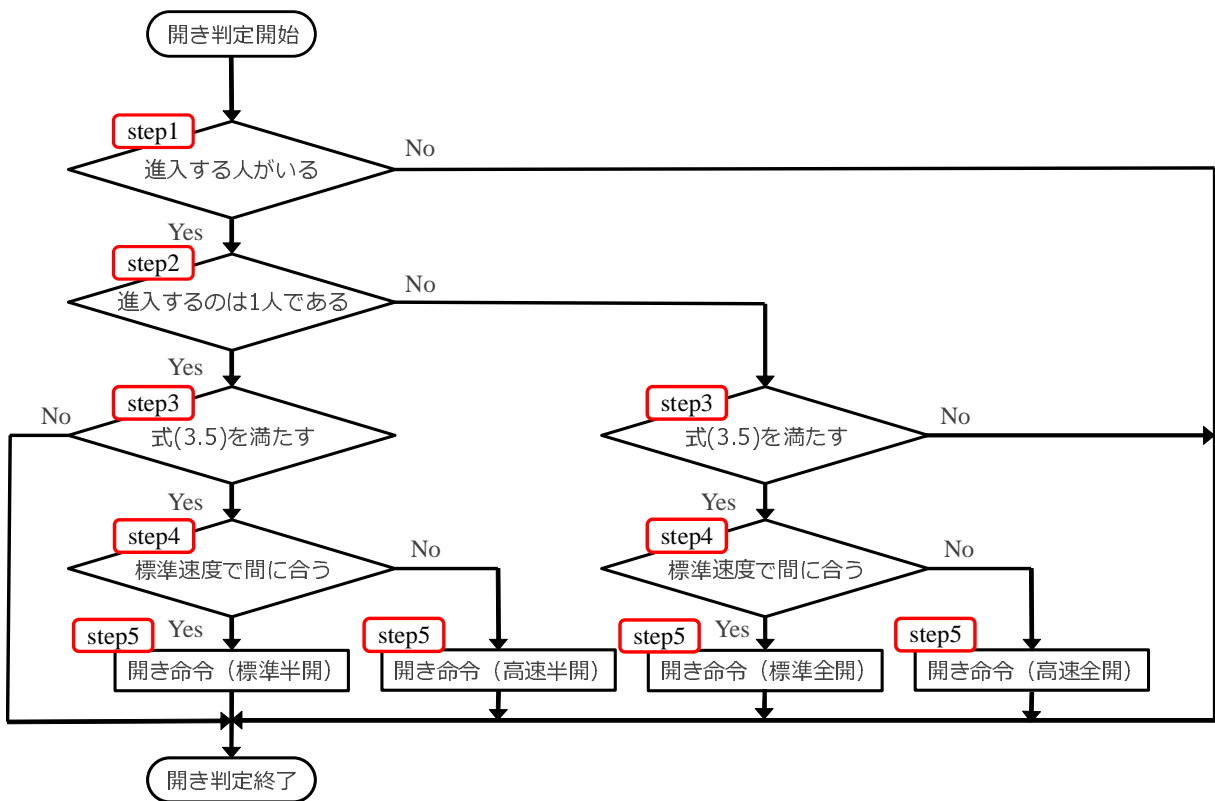


図 3.14: 開き判定の流れ



### 3.2.5 その他の機能

1.3節挙げた機能の他にもいくつかの付加機能を実装した。ここでは「判定エリア設定」と「高さ判定」について述べる。

#### 判定エリア設定

インテリジェント自動ドアに搭載される3次元レーザースキャナーはそれぞれのビームの距離値が取得できるため、従来の近接センサよりも細かく立体的に判定エリアの設定を行うことができる。

インテリジェント自動ドアのエリア設定例を図 3.15 に示す。図 3.15 ではドアの前方に木が植えてあり、木が風などによって揺れるとドアが誤って開いてしまうため、木がある部分は不感帯に設定している。また、ドアの直近には安全のために静止物体検出エリア（物体が入っただけでドアが開くエリア）を設置している。

また、立体的にエリアを設定可能であることを利用して図 3.16 のような仮想スイッチを設置することができる。この例では、ドアの前方に立てた台の上に立方体の静止物体検出エリアを設定することで、仮想スイッチを設置しており、このエリアの中に手を入れることでドアを開けることができる。

#### 高さ判定

インテリジェント自動ドアは物体の高さを判定することができ、判定に応じた制御を行うことができる。図 3.17 に高さ判定の例を示す。図 3.17 では高さが 1000 mm を超えるものを緑、それより低いものを赤で描画している。ドアの開き判定の際に、物体の高さに応じて条件分けすることで、動物に対してはドアを開けない、積雪時の誤動作の防止といった制御を行うことができる。

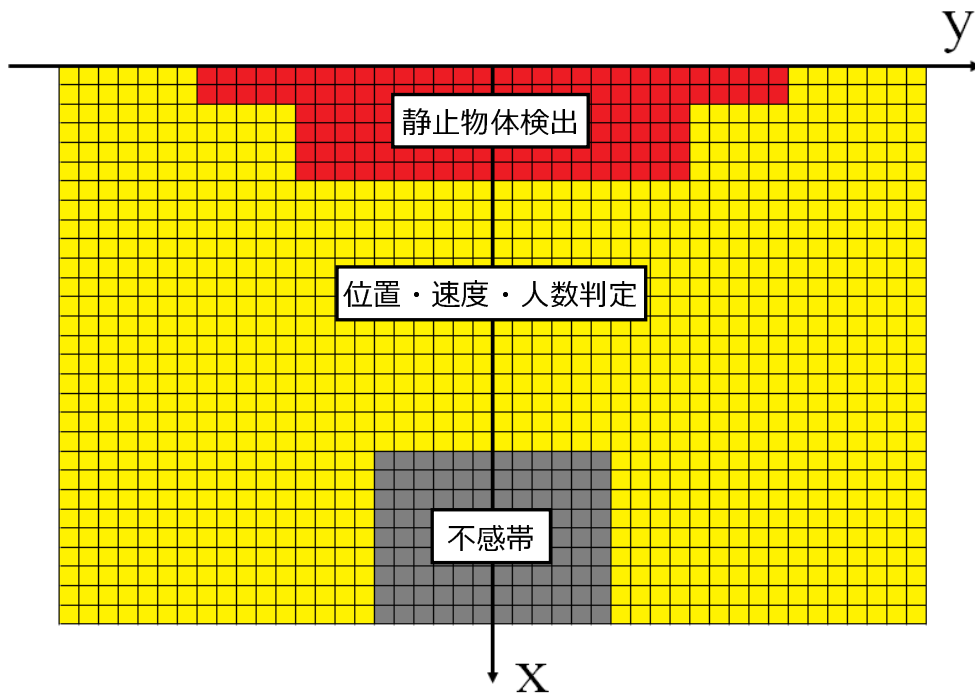


図 3.15: 判定エリアの設定例

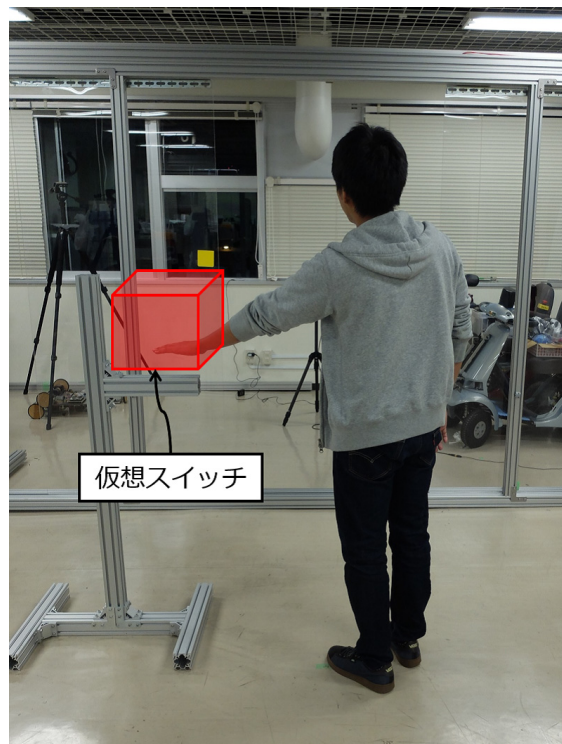


図 3.16: 仮想スイッチ

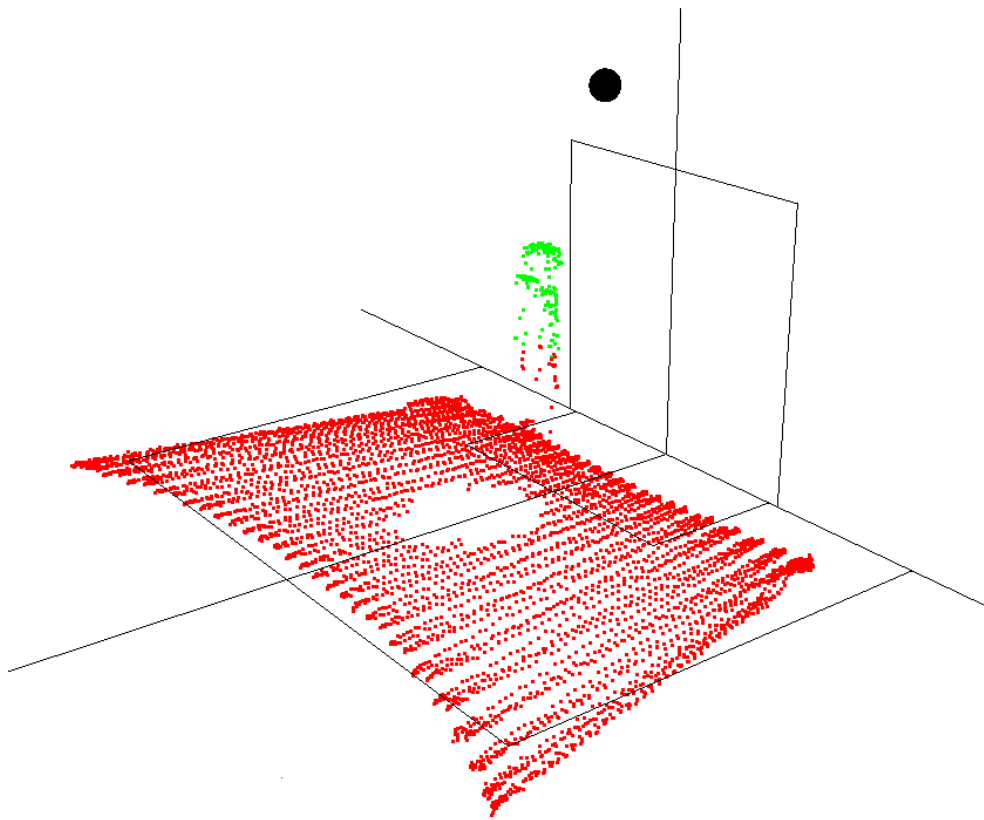


図 3.17: 高さ判定のようす

### 3.3 評価実験

インテリジェント自動ドアの機能を評価するために、実験用のドアに三次元レーザースキャナーを組み込み、3種類の実験を行なった。設置した自動ドアとドアセンサの外観を図 3.18 に示す。また、ドアとドアセンサのパラメータは表 3.4 のように設定した。ドアセンサの設置位置と取付角度は 2.2.1 節で述べた要件を満たすように設定してあり、ひとつのセンサで監視領域のすべてをカバーできるように設定してある。ドアの開き幅、開き速度は自動ドアの安全ガイドライン [1] に基づき、従来の自動ドアで一般的に用いられている値を設定した。

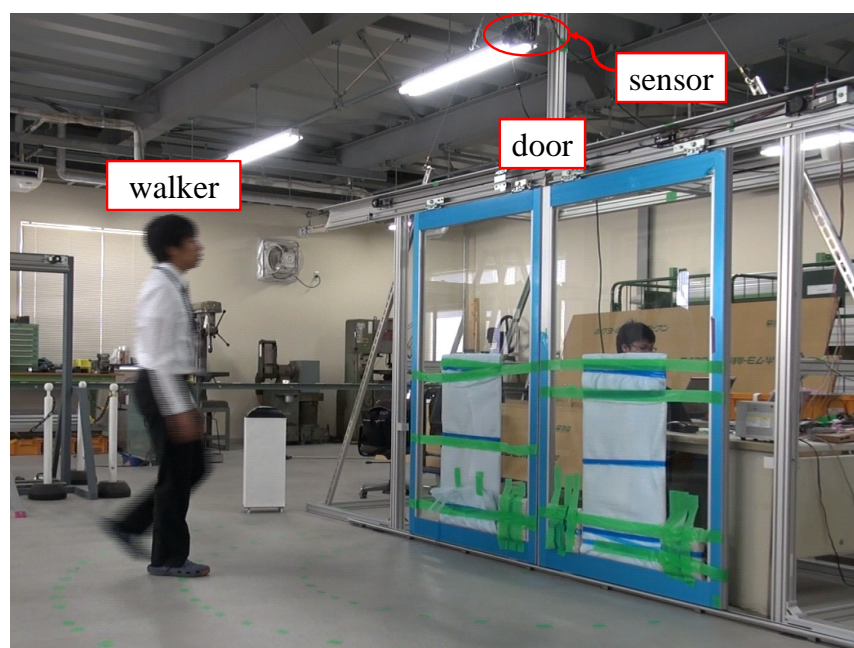


図 3.18: 実験環境

#### 3.3.1 開きタイミングの判定

この実験では、1人の歩行者が様々な角度からドアに接近し、ドアの開き命令が発行されたときの歩行者の位置と速度を記録する。接近角度はx軸周りに0,22.5,45 degで、角度ごとに30試行ずつ行う。歩行者の接近経路を図 3.20 に示す。また、歩行者の位置と速度の真値

表 3.3: Setup of the intelligent automatic door system for experiments(3.3)

Parameter	
Mounting height of the sensor	3,000 mm
Mounting angle of the sensor	21 deg
Width of opening the door ( <i>half-open</i> )	800 mm
Width of opening the door ( <i>full-open</i> )	1,100 mm
Speed of opening the door ( <i>normal speed</i> )	800 mm/s
Speed of opening the door ( <i>high speed</i> )	1,100 mm/s
Time required to open the door ( <i>half-open</i> )	1.0 sec
Time required to open the door ( <i>full-open</i> )	1.375 sec
Width of pending zone	700 mm
Threshold of the number of people estimation	800 mm

を測定するために、北陽電機者製 UTM-30LX [39] を歩行者の背後に設置し、ドアセンサの観測と同時に、約 10 Hz でデータを記録する。センサの配置を図 3.19 に示す。このセンサはレーザーを水平面上に一定間隔で放射状に投射する 2 次元レーザーキャナーで、ドアセンサに用いるセンサと同じく、センサから物体までの距離値を取得できる。UTM-30LX から投射される 1080 本のビームのうち、歩行者に最も垂直に当たっているビームを 1 本だけ抜き出した後、ビームの距離値から歩行者の位置と速度を算出し、このデータを真値としてドアセンサのデータと比較する。歩行者に対して垂直に投射したビームは、歩行者が直進するとき、どの時刻でもおおよそ身体と同じ位置に当たるため、歩行者の位置の真値に近いデータが取得できると考えられる。

図 3.21 に結果を示す。このグラフは横軸が歩行者の移動速度、縦軸はドアが開き始めたときの歩行者のドアからの距離である。破線は歩行者がドアに到達したときにちょうどドアが開き終わるタイミングでドアを開き始めたときの歩行者の位置を表している。つまりこの破線よりも実測値が上側にあるとき、歩行者はドアにぶつかったり、減速したりせずにドアに

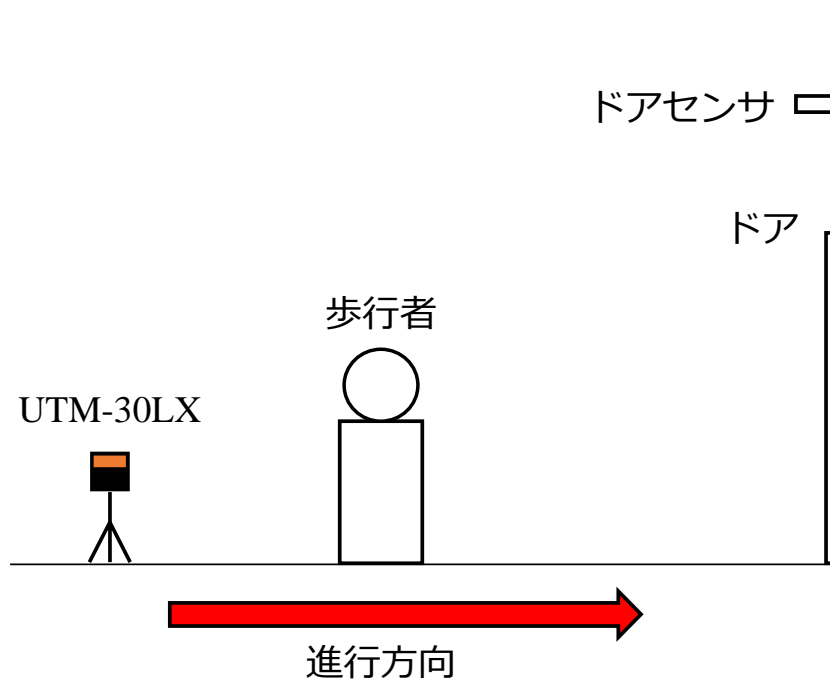


図 3.19: センサの配置

進入することができる。

しかし、いくつかの試行ではグラフの点が破線の下にあり、これはドアが開き終わる前に歩行者がドアに到着していることを示している。このままでは歩行者がドアにぶつかってしまう恐れがあるため、実際の運用ではドアの開き命令を出す時間に余裕を持たせる。今回の実験で最も大きなタイミングの遅れは0.15秒であった。このため、歩行者が到着するよりも0.15秒余裕を持って早くドアを開ける設定にしておけば、理論上はすべての歩行者に対して理想的なタイミングでドアを開けることができると考えられる。

以上の実験結果から、インテリジェント自動ドアの機能のひとつである「歩行者の位置と速度を推定し、ドアの開きタイミングと開き速度を制御する」機能がおおむね実現できていることが確認できた。

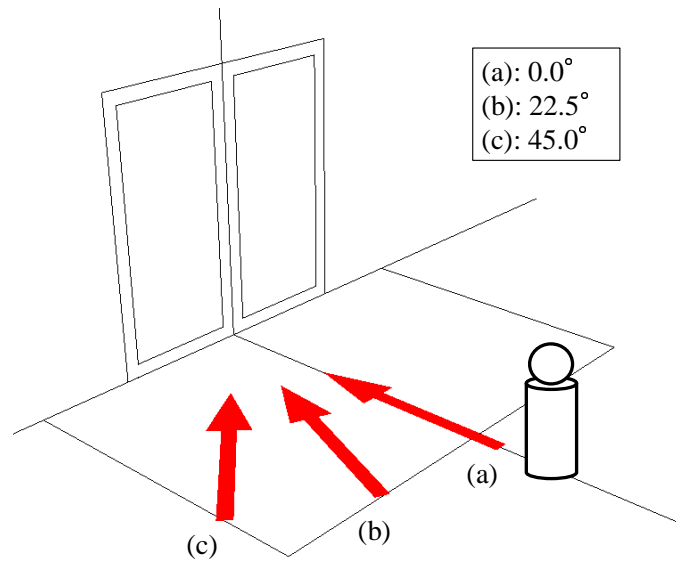


図 3.20: 歩行者の接近方向

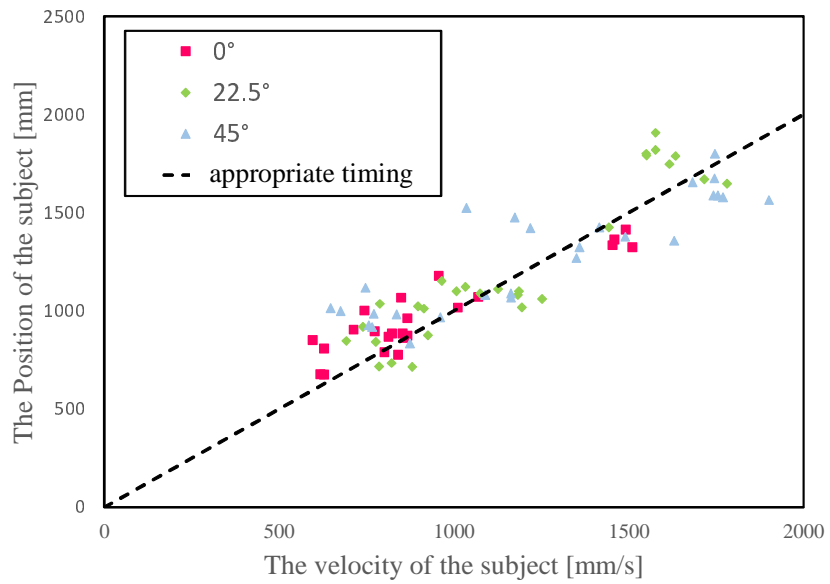


図 3.21: 歩行者の移動速度とドアが開き始めたときの歩行者の位置の関係 (実験 1)

### 3.3.2 進入と素通りの判定

この節では2つの実験を行い、インテリジェント自動ドアが歩行者の進入と素通りの判定をできるかを評価する。

1つ目の実験では、1人の歩行者がドアの前を素通りし、そのときのドアセンサによる開閉判定を記録する。歩行者は7種類の方向に0.5-1.5 m/sで歩行する。実験はそれぞれの移動方向について30試行ずつ行う。歩行者の移動速度は3.3節の実験と同様の方法で測定した。歩行者の移動方向と判定の成功率を図3.22と図3.23に示す。試行(d)-(g),(i),(j)では、素通りする歩行者に対してドアが誤動作することはなかった。しかし試行(h)ではドアが誤って開いたことが一度あった。これは歩行者がドア方向に大きく近づきながら素通りしたことにより、pending zoneから出てしまったことが原因だと考えられる。

2つ目の実験では、複数人の歩行者にドアの前を通行させた。この実験では、5分間の実験中に103人の歩行者がドアの前を素通りし、6人の歩行者がドアを進入した。センサの監視領域内には同時に最大で3人の歩行者が存在した。素通りする歩行者に対してドアが誤って開くことは無かったが、ドアを進入する歩行者のうち、理想的なタイミングでドアを開けることができたのは6人中4人だけだった。これはドアに進入する歩行者に対して開き命令を出すべき時刻に素通りする歩行者が同時に存在したため、ドアに接近する歩行者がpending zoneの中に入ってしまったためだと考えられる。実際の運用では、安全面を考慮してドアの直近に静止物体を検出するエリア(従来の自動ドアと同様の動作をするエリア)を設定するため、開くタイミングが遅れたとしても必ずドアが開く。本稿のアルゴリズムでは、歩行者ごとの追跡は行っておらず、ドアを開けるタイミングが遅れる問題には原理的に対応することができない。しかし実際の運用では、ドアに進入する人に対してはタイミングが遅れたとしても前述した静止物体検出領域で必ずドアが開くようになっているため、致命的な欠陥にはならないと思われる。

これらの実験結果より、インテリジェント自動ドアにおいて最も優先度が高い機能である「ドアに進入しようとする歩行者にのみドアを開ける」機能が実現されていることが確認できた。実際の運用では、環境に合わせてpending zoneの幅を変え、進入・素通り判定の感度



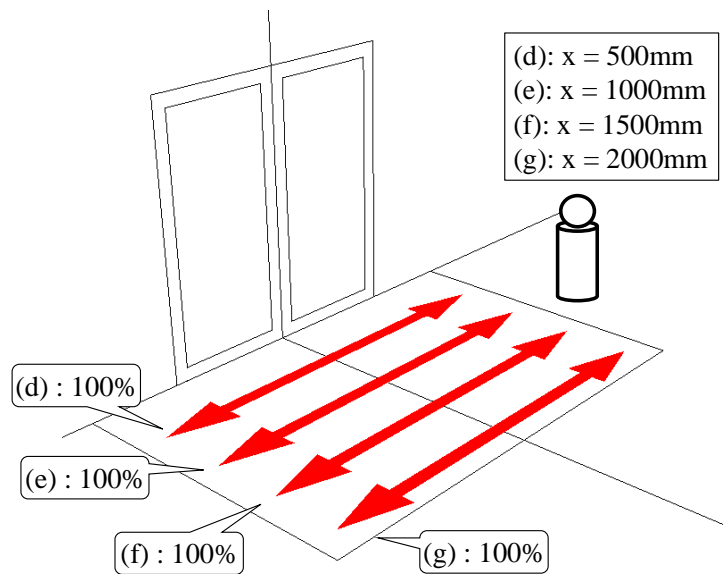


図 3.22: 実験結果 ((d)-(g))

を調節することで、より利用者のニーズにあったドアの制御が行えると考えられる。

### 3.3.3 開き幅の判定

これまでの実験でドアが開き命令を発行するとき、1人の歩行者に対して開き幅は常に「半開」であった。この結果から、1人の歩行者に対してはドアの開き幅を正しく制御できていると言える。

次の実験では、複数人の歩行者に対して正しく開き幅を判定できるかを評価する。この実験では、2人の歩行者が同時にドアに接近する。接近の仕方は5種類で、歩行速度は0.5-1.5 m/s、試行回数は10回ずつである。歩行者の移動速度は3.3節の実験と同様の方法で測定した。歩行者の移動方向と判定の成功率を図 3.24、図 3.25 に示す。

図 3.24、図 3.25 から分かるように、今回の実験ではすべての試行で「全開」の判定が出ており、正しく歩行者の人数を推定し、開き幅を判定することができていた。この実験結果から、インテリジェント自動ドアの機能のひとつである「歩行者の人数を推定し、ドアの開き幅を制御する」機能が実現されていることが確認できた。

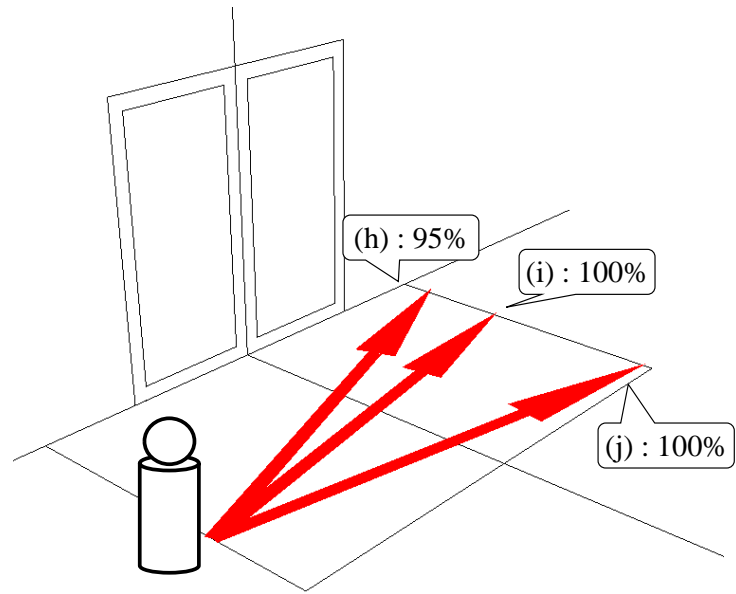


図 3.23: 実験結果 ((h)-(j))

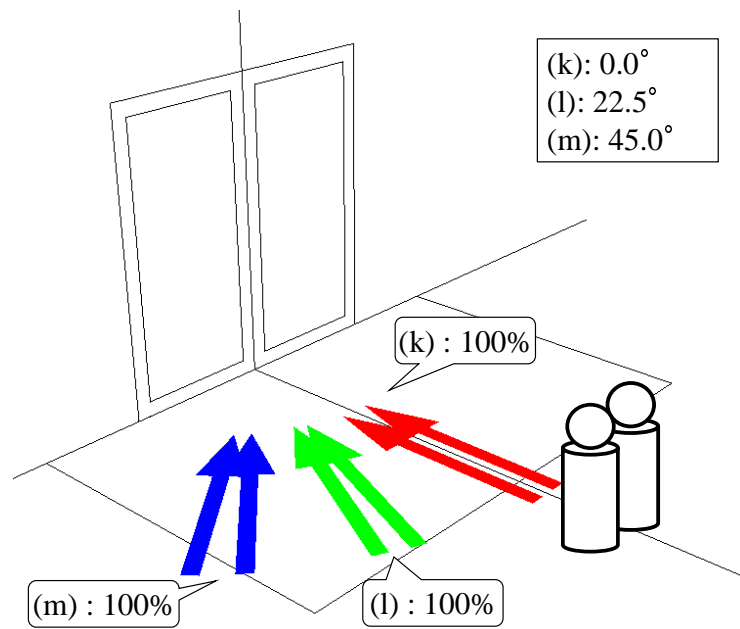


図 3.24: 実験結果 ((k)-(m))

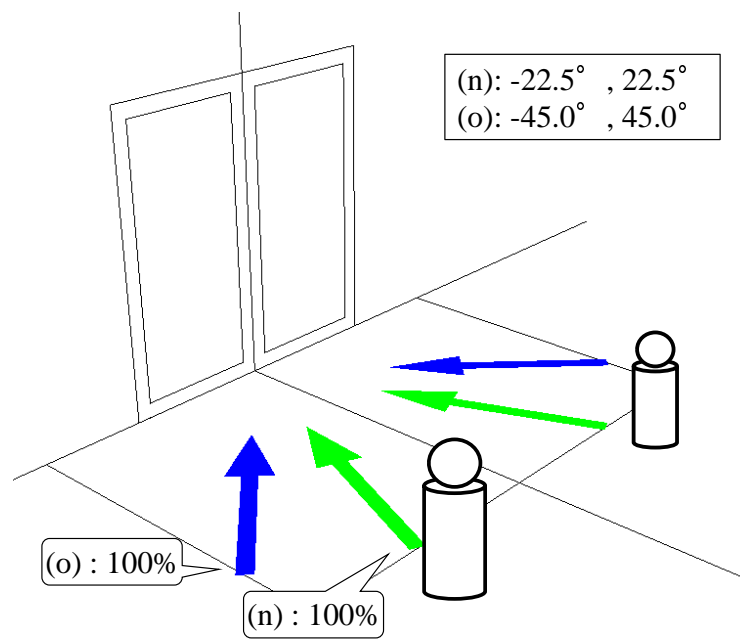


図 3.25: 実験結果 ( (n),(o) )

## 3.4 監視領域が広い場合の開閉判定アルゴリズムについての検討

3.3 節の実験環境は、2.2.1 節で述べた要件を満たすことを想定しており、ひとつの三次元レーザースキャナーで監視領域を全体をカバーできるような位置・角度でセンサが設置されていた。現状のドアセンサの奥行き方向の視野角は42 deg であるため、このような設置条件の場合、ドア直近から遠方までを同時に観測することはできない。センサの監視領域外の歩行者について開閉判定を行うことは不可能であるため、3.3 節の設置条件では駆け足 (2000 mm/s–4000 mm/s) でドアを進入しようとする歩行者に対して適切なタイミングでドアを開けることは原理上出来ない。

高速でドアに進入しようとする歩行者に対応するには、早い段階で開閉判定を行う必要があるため、センサの監視領域を広げることが不可欠である。ドアの上部に取り付けるという要件を満たそうとすると現状のセンサではこれ以上監視領域を広げることができないが、本節では、センサが改良されて視野角が広がったと仮定し、開閉判定アルゴリズムが適切な動作を行えるかどうかを評価する。また、監視領域が広い場合に、アルゴリズムにどのような変更を加えればよいかについて検討する。具体的には、ドアセンサの取付角度を変えて監視領域を広くしたときに、より速い速度でドアに進入しようとする歩行者に対して適切な開き動作が行えるかどうかを調査し、結果について議論する。

### 3.4.1 実験環境

実験には3.3 節で使用した装置をベースに、ドアセンサの取付角度を変えられるようにした自動ドアを用いる。実験環境とドアセンサの外観を図 3.26 に、ドアとドアセンサのパラメータを表に示す。ドアセンサの取付角度が3.3.1 節の実験と比較して30 deg 上向きになったことで監視領域の奥行きが約2400 mm から約5500 mm に大きくなっており、理論上は4000 mm/s で接近しようとする歩行者に対しても間に合うようにドアを開けることができるような広さになっている。その他の判定アルゴリズムのパラメータについては、監視領域が

狭い場合と比較するために3.3.1節の実験と同じ設定にしている。図 3.27 にドアセンサの取付角度を変えたときの監視領域の違いを、また図 3.28 に本実験におけるセンサの監視領域を示す。

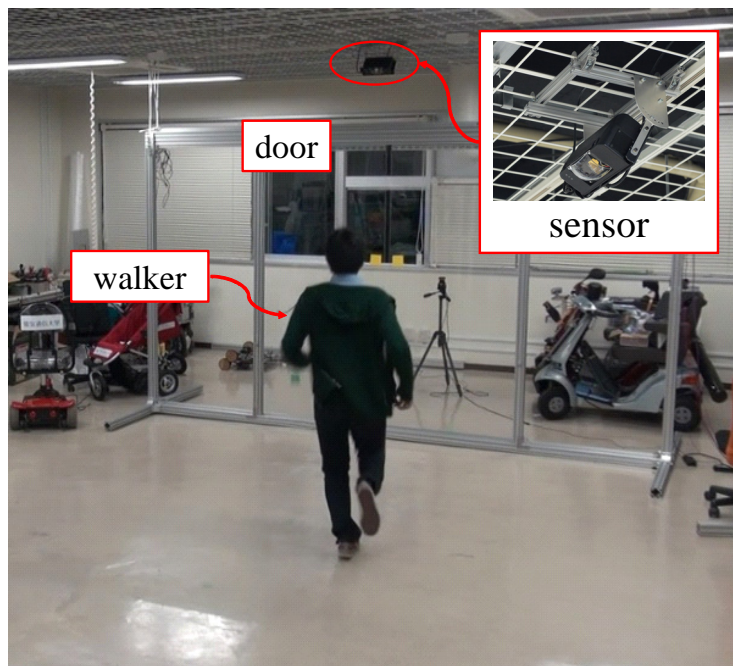


図 3.26: 実験環境とドアセンサの外観

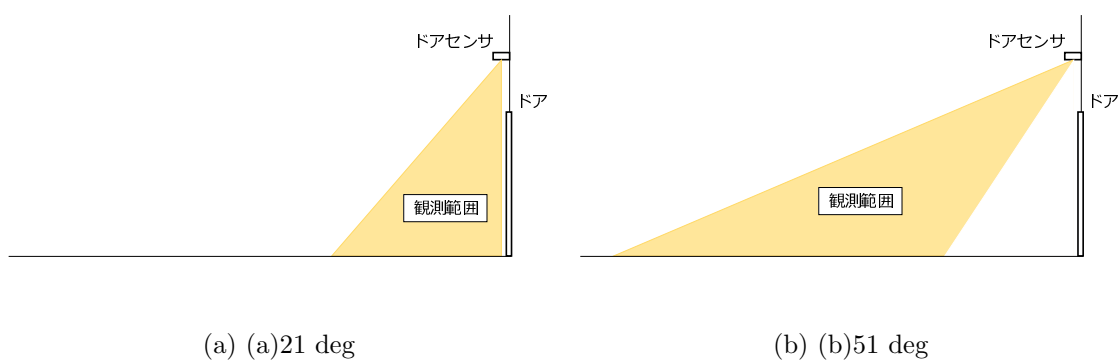


図 3.27: センサの取付角度による監視領域の違い

表 3.4: Setup of the intelligent automatic door system for experiments(3.4)

Parameter	
Mounting height of the sensor	2,520 mm
Mounting angle of the sensor	51 deg
Width of opening the door ( <i>full-open</i> )	1000 mm
Speed of opening the door ( <i>normal speed</i> )	1000 mm/s
Time required to open the door ( <i>full-open</i> )	1.0 sec
Width of pending zone	700 mm
Threshold of the number of people estimation	800 mm

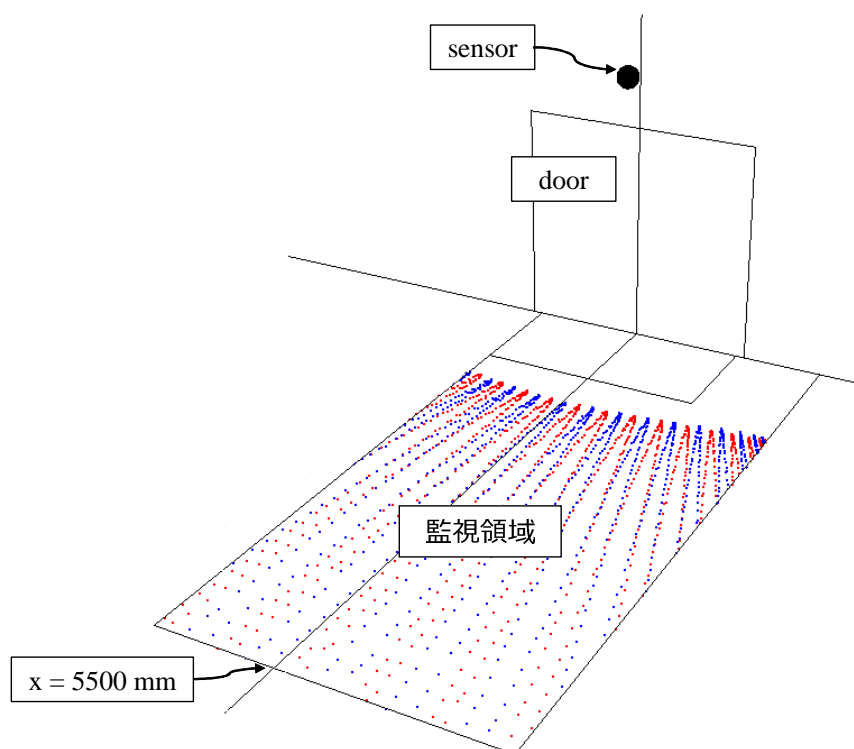


図 3.28: 本実験におけるセンサの監視領域

### 3.4.2 開きタイミングの判定

この実験では1人の歩行者が様々な速度でドアに接近し、ドアの開き命令が発行されたときの歩行者の位置と速度を記録する。歩行者の速度は500 mm/s–4000 mm/sで、ドアへの接近は63試行行う。また、歩行者の位置と速度の真値を測定するために、3.3節の実験と同様にUTM-30LXを用いて歩行者の位置、速度を測定した。

図3.29に結果を示す。このグラフは3.3.1節で示したものと同様のもので、横軸が歩行者の移動速度、縦軸はドアが開き始めたときの歩行者のドアからの距離である。破線は歩行者がドアに到達したときにちょうどドアが開き終わるタイミングでドアを開き始めたときの歩行者の位置を表しており、破線よりも実測値が上にあるとき、歩行者はドアにぶつかったり、減速したりせずにドアに進入することができる。

図3.29よりこの実験においても、想定したすべての速度域でおおよそ適切にドアを開けることができていることが確認できる。その結果から、監視領域が大きくなれば、駆け足でドアに進入しようとする歩行者に対しても間に合うようなタイミングでドアを開けることができると言える。しかし、開き信号を出すタイミングのバラつきに関して、3.3.1節の実験と比較して異なる傾向が見られた。この実験環境では、すべての速度域、特に歩行者が高速でドアに接近するときにドアを早く開けすぎる傾向があった。具体的には最大で0.85sec(17フレーム)早くドアを開けており、これは3.3.1節の実験環境では最大0.3sec(6フレーム)だったことを考えるとかなりバラつきが大きいと言える。ドアを開けるのが早すぎる現象は、実際の歩行者の到達時刻よりもドアセンサが推定した到達予想時刻が早過ぎることで起きる。本実験の環境におけるタイミングのバラつきの要因は以下の2つが考えられる。

1つ目の要因は開き判定アルゴリズムの原理によるものである。本アルゴリズムでは、歩行者がドアに進入しようとするとき、一度でも開き判定が出たらドアを開けている。本実験の環境では監視領域が広がったぶん、歩行者がドアに到達するまでに位置・速度推定を行う回数が増えており、歩行者の位置・速度の推定値のバラつきによって到達予想時刻が早めに推定されたときにドアをすぐに開けてしまう危険性が、監視領域が狭い環境と比較して大きくなっている。到達予想時刻が遅めに推定されたときには、ドアは動作しないため、

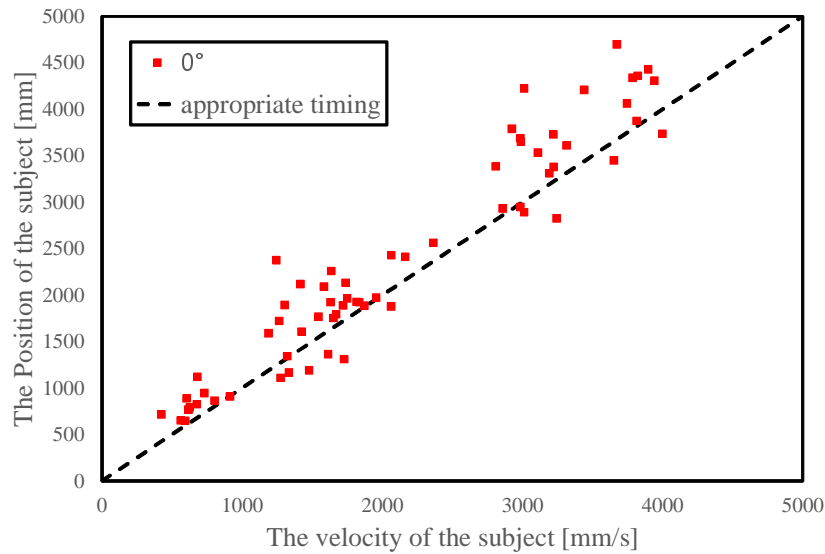


図 3.29: 歩行者の移動速度とドアが開き始めたときの歩行者の位置の関係 ( (3.4) )

目立った影響は出にくい。

2つ目の要因は歩行者の移動速度のゆらぎによるものである。人間が歩行するとき、短期的に見るとその移動速度は一定ではなく、歩行者の姿勢によって周期的に速度が変わっている。本研究の判定アルゴリズムでは、監視領域が小さい場合でもできるだけ速い速度の歩行者に対応するために短時間(6フレーム)の位置情報をもとに速度を推定している。歩行速度の変化は人間が二足歩行する以上、どんな速度で移動しているときでも起きているが、走っているときには特に速度の変化が激しくなる。このため歩行者が高速でドアに接近するときにドアを早く開けすぎてしまう。

これらの要因はより長時間の位置データを使って速度を算出することで解消でき、開きタイミングのバラつきを抑えることが期待できる。また、監視領域が広く、長時間位置データを取得できる場合には、歩行周期のモデルを速度の推定式に反映することでより正確に歩行者の速度を推定できると考えられる。しかし、開き判定を出すまでに長時間歩行者を観察するということは、移動速度の大きい歩行者に対応できなくなるということでもあるので、歩行者の速度に対する要求と監視領域の広さに合わせて観察時間を調節する必要がある。



## 3.5 まとめ

本章では、実際に構築したインテリジェント自動ドアシステムについて詳細に述べ、実現した機能について評価実験を行った。

3.1 節では使用する三次元センサの概要について述べた。

3.2 節ではインテリジェント自動ドアの機能を実現するための判定アルゴリズムについて詳細に述べた。また、インテリジェント自動ドアの付加機能を紹介した。

3.3 節ではインテリジェント自動ドアの機能を評価するための実験について述べ、2.2 節で議論した要求仕様を満たしながら、以下の機能を実現していることを確認した。

1. ドアに進入しようとする歩行者にのみドアを開ける。
2. 歩行者の位置と速度を推定し、ドアの開きタイミングと開き速度を制御する。
3. 歩行者の人数を推定し、ドアの開き幅を制御する。

3.4 ではドアセンサの取付角度を変えた状態で実験を行い、監視領域が大きくなれば、駆け足でドアに進入しようとする歩行者に対しても間に合うようなタイミングでドアを開けることができることを確認した。また、監視領域が大きい場合に、アルゴリズムにどのような変更を加えればより正確に開きタイミングが判定できるかを議論した。

## 第4章 結言

### 4.1 本研究のまとめ

本研究では、単に素通りする歩行者への誤動作や反応の鈍さといった従来の自動ドアの問題点を解決するために新しいインテリジェント自動ドアシステムを構築した。このシステムにはドアセンサとして、歩行者の位置情報が取得でき、環境の変化に対してロバストな三次元レーザースキャナーを採用し、このセンサに対応した開閉判定アルゴリズムを開発した。開発した開閉判定アルゴリズムの主な機能を以下に示す。

1. ドアに進入しようとする歩行者にのみドアを開ける。
2. 歩行者の位置と速度を推定し、ドアの開きタイミングと開き速度を制御する。
3. 歩行者の人数を推定し、ドアの開き幅を制御する。

1. では歩行者がドアに進入するのか、それとも単に素通りするのかを判定し、ドアに進入する歩行者に対してのみドアを開ける。ドアに進入する意思のない歩行者に対してドアの誤動作を減らすことで、省エネ効果が期待できる。この機能はストライプ状のエリアを定義し、このエリアを利用して歩行者の移動軌跡（進入・素通り）を判定することで実現した。

2. ではドアに接近する歩行者の位置と速度を推定し、歩行者がドアに到達する時刻に間に合うようなタイミングと速度でドアを開ける。歩行者の位置と速度に合わせた開閉動作を行うことで、様々な速度で接近する歩行者に対してスムーズな通行を促すことが期待できる。歩行者の位置と速度の推定には放射状のエリアを用い、物体の位置と速度をそれぞれのセルごとに考えることで、複雑なグルーピングや追跡をすることなく、軽量なアルゴリズムで歩行者の位置と速度のドア方向の成分を推定した。

3. では歩行者が1人なのか、それとも複数人なのかを判断し、ドアの開き幅を変化させる。歩行者の人数が少ないときにドアの開き幅を小さくすることで、建物の空調面での省エネ効果が期待できる。歩行者の人数の推定には放射状のエリアのセルの幅の値を利用した。

これらの機能を評価するためにインテリジェント自動ドアシステムの実機を用いて実験を行い、開発したシステムがインテリジェント自動ドアの要求を満たしていることを確認した。さらにドアセンサの取付角度を変えて実験を行い、センサの監視領域が大きくなれば、開発した開閉判定アルゴリズムを用いて、駆け足でドアに進入しようとする歩行者に対しても間に合うようなタイミングでドアを開けることができることを確認した。

まだ完全ではないものの、実用に耐えるインテリジェント自動ドアシステムを構築したことで、今後の自動ドア研究の発展に寄与することができた。

## 4.2 今後の展望

本研究で解決することができず、今後扱うべき問題をいくつか挙げる。

### 適切なドアパラメータの調査

インテリジェント自動ドアの開発における最終目的は、誤動作を減らすことで省エネの面での効率を良くしつつ、歩行者がスムーズに進入できるような自動ドアを実現することである。本研究の成果によって自動ドアの誤動作が減り、歩行者がスムーズに通行するための基礎となる機能が実現された。しかし、いずれの機能においても、実際にどのような動作をさせれば最もスムーズに歩行者が進入できるのかということについては議論されていない。

開きタイミングを例に挙げると、本研究の成果によって、ドアに進入しようとする歩行者の位置と速度を推定し、歩行者がドアを通過するときにちょうどドアが開き終わるようなタイミングでドアを開けることが可能になった。しかし、実際に自動ドアを使う際に、歩行者がドアに到達するギリギリまでドアが開かなければ、歩行者は恐怖感を覚え、ドアの前で減速したり、立ち止まったりしてしまう。このため、歩行者がスムーズにドアに進入できるようにするためには、歩行者の位置と速度を推定するだけでなく、いつドアを開ければ歩行者がストレスを感じないかを調査する必要がある。開き幅や開き速度についても同様で、歩行者の幅や人数を推定するだけでなく、どのくらいの開き幅があれば歩行者がドアをストレスなく進入できるかについて検討しなければならない。

従来の自動ドアについては、自動ドアの安全ガイドライン [1] や若井らの研究 [40] によって、歩行者が安全に、かつストレスなく進入するための自動ドアの形状や動作について検討されている。しかし従来の自動ドアにない動作が可能となったインテリジェント自動ドアについては、その動作についての明確な指針はまだ存在しない。インテリジェント自動ドアの機能を最大限に活かすためには、歩行者がストレスなくドアを利用するための動作の指針が必要であり、そのための知見を得るために、本研究で開発したシステムを用いた被験者実験や、フィールドテストが必要である。

## 開閉判定アルゴリズムの改良

本研究で開発したドアの開閉判定アルゴリズムでは、素通りする歩行者とドアに進入しようとする歩行者が同時に存在した場合に、ドアに進入しようとする歩行者へドアを開けるのが遅れることがあった。これはアルゴリズムを開発する際に機能に優先順位をつけており、本研究ではドアの誤動作を無くすことが最も優先順位が高かったためであるが、理想的にはすべての機能が同時に実現できるのが望ましい。

また、歩行者の速度推定については精度が悪く、ドアの開きが遅れることは少ないものの、センサの監視領域を大きくしたときに、ドアを早く開けすぎる傾向が見られた。これは歩行者をスムーズに通行させるという面では問題ないが、省エネの面では建物の空調の効率が落ちてしまうため望ましくない。歩行者の歩行周期のモデルを速度推定のための式に組み込む等の改良を行い、ドアの開きタイミングのバラつきを小さくすることが期待される。

# 謝辞

本研究を行うにあたり、日頃よりご意見、ご指導いただきました、知能システム学講座末廣尚士教授、工藤俊亮准教授、富沢哲雄助教に感謝いたします。

また、高井和夫様をはじめとした北陽電機株式会社の社員の方々には、研究を行う上で様々なサポートをして頂き、大変感謝しております。

最後になりますが、日々の学生生活でお世話になった知能システム学講座の皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 全国自動ドア協会，“自動ドアの知識 第12版 2010”，
- [2] 長坂 真理子, 北川 啓介, 碓井 将義, 吳 明宣, “5435 妊婦と乳幼児帯同者の行動制限とその要因：妊婦と乳幼児を取り巻く建築・都市空間に関する研究(日常災害・安全計画, 建築計画I)”，学術講演梗概集. E-1, 建築計画 I, 各種建物・地域施設, 設計方法, 構法計画, 人間工学, 計画基礎 2006, 881-882, 2006-07-31
- [3] 北川 啓介, 長坂 真理子, 吳 明 宣, 井上 暁代, “妊婦と乳幼児帯同者の行動制限とその要因”，日本建築学会計画系論文集 73(628), 1243-1250, 2008-06-30
- [4] 酒井 孝司, 小野 浩己, 伊藤 雅敏, “41312 自動ドアの省エネルギー性能に関する研究(その1)：風除室奥行きの実態調査と換気計算用相当全開時間率の算出(換気測定・圧力損失, 環境工学 II, 2012 年度大会(東海)学術講演会・建築デザイン発表会プログラム)”，学術講演梗概集 2012(環境工学 II), 631-632, 2012-09-12
- [5] 伊藤 雅敏, 小野 浩己, 酒井 孝司, “41313 自動ドアの省エネルギー性能に関する研究(その2)：一重自動ドアの外気侵入量実測とCFD(換気測定・圧力損失, 環境工学 II, 2012 年度大会(東海)学術講演会・建築デザイン発表会プログラム)”，学術講演梗概集 2012(環境工学 II), 633-634, 2012-09-12
- [6] 保坂 良資, 石井 豊恵, 清水 佐知子, 大野 ゆう子, 東村 昌代, “UHF 帯パッシブRFID タグによる病棟内患者自動検知の可能性に関する研究”，電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティクス 109(106), 5-10, 2009-06-19

- [7] 保坂 良資, “新たな UHF 帯 RFID タグによる病棟内患者認証の可能性評価について”, 湘南工科大学紀要 44(1), 37-42, 2010-07-14
- [8] 杉本 弘道, 長舟 利雄, 一瀬 直樹, “5311 障がい者雇用施設における UD : トヨタ自動車 S&S における取組み事例を基に : 人の建物内移動・入退室の安全性の確保 その 3 ハンズフリーシステム (視覚障害者配慮のユニバーサルデザイン, 建築計画 I)”, 学術講演梗概集. E-1, 建築計画 I, 各種建物・地域施設, 設計方法, 構法計画, 人間工学, 計画基礎 2010, 667-668, 2010-07-20
- [9] 李 在勲 金 容植 川田 浩彦, 大矢 晃久, 油田 信一, “測域センサを用いたセキュリティーシステムの開発 -人物追跡・計数アルゴリズム-”, 日本ロボット学会学術講演会, 2B22, RSJ2006
- [10] Jae Hoon Lee, Yong-Shik Kim, Bong Keun Kim and Kohtaro Ohba, Hirohiko Kawata, Akihisa Ohya and Shinichi Yuta, “Security Door System Using Human Tracking Method with Laser Range Finders”, Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.2060-2065, 2007
- [11] 本江 慶亮, 山澤 忍, 柳澤 剛, 阿出川 南, “5317 バリアフリーに配慮した駅自動ドア開閉制御装置の研究 その 1(建築各部位の UD, 建築計画 I)”, 学術講演梗概集. E-1, 建築計画 I, 各種建物・地域施設, 設計方法, 構法計画, 人間工学, 計画基礎 2011, 667-668, 2011-07-20
- [12] 阿出川 南, 山澤 忍, 柳澤 剛, 本江 慶亮, “5318 バリアフリーに配慮した駅自動ドア開閉制御装置の研究 その 2(建築各部位の UD, 建築計画 I)”, 学術講演梗概集. E-1, 建築計画 I, 各種建物・地域施設, 設計方法, 構法計画, 人間工学, 計画基礎 2011, 669-670, 2011-07-20
- [13] 本江 慶亮, 杉山 敬宏, 柳澤 剛, 阿出川 南, “5450 バリアフリーに配慮した駅自動ドア開閉制御装置の研究 その 3(トイレ・バリアフリー, 建築計画, 2012 年度大会 (東海) 学術講演会・建築デザイン発表会)”, 学術講演梗概集 2012(建築計画), 941-942, 2012-09-12



- [14] 三宅 宏典, 森本 章雄, 岸本 真一, 大北 正昭, 大木 誠, “色空間の距離情報に基づく自動ドア付近画像の局所的種類分類”, 第 4 回情報科学技術フォーラム, pp.143-144, FIT2005
- [15] 石堂 正弘, 川真田 進也, “人の動きを環境とし, 環境との干渉から学ぶ進化自動ドア・システム”, 電子情報通信学会技術研究報告・AI, 人工知能と知識処理 98(58), pp.75-82, 1998
- [16] 松原 正季, 富沢 哲雄, 嶋地 直広, 工藤 俊亮, 末廣 尚士, “インテリジェント自動ドアのための LRF を用いた歩行者行動予測”, 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2010), 1B3-3, 2010
- [17] 富沢 哲雄, 松原 正季, 工藤 俊亮, 末廣 尚士, 嶋地 直広, “LRF を利用したインテリジェント自動ドア”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'11, 2P1-Q08, 2011.5
- [18] 大谷 洋介, 富沢 哲雄, 工藤 俊亮, 末廣 尚士, “LRS を用いた移動体の進路予測”, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2012), 3F2-3, 2012
- [19] ナブコ自動ドア, “SSP-4/SSP-N4 スーパーセンサー 商品カタログ”, [http : //nabco.nabtesco.com/products/CATALOG/S39SP - 4.pdf](http://nabco.nabtesco.com/products/CATALOG/S39SP-4.pdf), 2014.1.27
- [20] メカライフ編集委員, “知って納得 メカランド 自動ドア編”, 日本機械学会誌, Vol.109, No.1057, p.986, 2006
- [21] T.Darrell, G.Gordon, J.Woodfill, and M.Harville, “Integrated Person Tracking using Stereo, Color, and Pattern Detection”, Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Santa Barbara, June 1998
- [22] A.Ess, B.Leibe, K.Schindler, L.Van Gool, “Robust Multiperson Tracking from a Mobile Platform”, IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, VOL.31, NO.10, OCTOBER 2009

- [23] S.Nedevschi, S.Bota, and C.Tomiuc, “Stereo-based pedestrian detection for collision-avoidance applications” , IEEE Trans. on ITS, vol.10, no.3, pp.380-391, 2009
- [24] M.Arie, A.Moro, Y.Hoshikawa, T.Ubukata, K.Terabayashi, and K.Umeda, “Fast and Stable Human Detection Using Multiple Classifiers Based on Subtraction Stereo with HOG Features” , Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2011), pp. 868-873, 2011
- [25] C.Plagemann, V.Ganapathi, D.Koller and S.Thrun, “Real-Time Identification and Localization of Body Parts from Depth Images” , Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2010), 2010
- [26] L.Xia , C.Chen and J.Aggarwal, “Human detection using depth information by Kinect” , Proc. Int. Workshop HAU3D, pp.15 -22 2011
- [27] H.J.Zhao and R.Shibasaki, “A novel system for tracking pedestrians using multiple single-row laser range scanners” , IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, part A, November 2004
- [28] 中村 克行, 趙 卉菁, 柴崎 亮介, 坂本圭司, 大鋸朋生, 鈴川尚毅, “マルチレーザー スキャナを用いた歩行者の抽出” , 第 10 回画像センシングシンポジウム講演論文集 , pp.409-414 , 2004
- [29] 中村 克行, 趙 卉菁, 柴崎 亮介, “複数のレーザーレンジスキャナを用いた歩行者トラッキングとその信頼性評価” , 電子情報通信学会論文誌 D-II , Vol.J88-D-II , No.7 , pp.1143-1152 , 2005
- [30] J.Cui, H.Zha, H.Zhao, R.Shibasaki, “Multi-modal tracking of people using laser scanners and video camera” , Image and Vision Computing, Volume 26, Issue 2, 1 February 2008, Pages 240-252

- [31] 奥迫 伸一, 坂根 茂幸, “レーザーレンジファインダを用いた移動ロボットによる人の追跡”, 日本ロボット学会誌, 24(5), pp.605-613, 2006
- [32] 山田 弘幸, 倉爪 亮, 村上 剛司, 長谷川 勉 “Level Set Tracking を用いた複数レーザーレンジファインダとカメラによる歩行者のトラッキング”, 第 12 回 ロボティクスシンポジウム講演会予稿集, 289, 2007
- [33] A.Carballo, A.Ohya, and S.Yuta, “People detection using range and intensity data from multi-layered Laser Range Finders”, In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.5849-5854, 2010
- [34] R.Kurazume, H.Yamada, K.Murakami, Y.Iwashita, and T.Hasegawa, “Target Tracking Using SIR and MCMC Particle Filters by Multiple Cameras and Laser Range Finders”, In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.3838-3844, 2008
- [35] 山田 弘幸, 倉爪 亮, 村上 剛司, 長谷川 勉, “SIR/MCMC パーティクルフィルタを用いたカメラとレーザーレンジファインダによる複数移動体の同時追跡トラッキング”, 第 13 回ロボティクスシンポジウム講演会予稿集, pp252-258, 2008
- [36] 西村 彬宏, 森下 壮一郎, 浅間 一, “隠れマルコフモデルによる歩行パターンからの目的地推定”, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, SI2006
- [37] 西村 彬宏, 森下 壮一郎, 浅間 一, “隠れマルコフモデルによる歩行パターンからの目的地推定 - 推定結果評価手法の検討 -”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門, 2P1-C10, ROBOMECH2007
- [38] 寺田 善貴, 森下 壮一郎, 浅間 一, “行動ダイナミクスに基づく歩行者の目的地推定における候補点の抽出”, 日本ロボット学会学術講演会, 3P1-6, RSJ2010
- [39] 北陽電機, “測域センサ URG-LX30 仕様書”

- [40] 若井 正一, “5315 自動ドアにおける歩行者の通過行動特性に関する検討：開き始めのタイミングと歩行動作の関係(ロボット・センサー, 建築計画,2012 年度大会(東海) 学術講演会・建築デザイン発表会)”, 学術講演梗概集 2012(建築計画), pp671-672, 2012-09-12

# 付録A

付録として、本研究で開発した装置や調査結果のうち、本編で述べられていない点について補足する。

## A.1 自動ドアと歩行者を観察するための装置の開発

インテリジェント自動ドアにどのような動作をさせれば最もスムーズに、かつストレスなく歩行者が通行できるのかを調べるためには、自動ドアを使用した被験者実験を行う必要があると考えられる。そこで被験者実験のための下準備として、自動ドアの動きと自動ドアを利用する歩行者を観測し、記録する装置を開発した。装置全体の外観を図 A.1 に示す。この装置は各種センサとデータ記録用PCから構成されており、以下のデータを取得することが出来る。

- 歩行者の動画
- 歩行者の位置・速度データ
- ドアの開きタイミング・任意の時刻の開き幅

本章では、これらのデータを取得するための仕組みを詳しく説明する。

### A.1.1 歩行者の動画

歩行者の動画はセンサ台に取り付けた web カメラ (図 A.2) を用いて取得する。動画データは web カメラの映像をそのままキャプチャしたもののだが、実験中たえず動画データを記録するとデータサイズが大きくなってしまふ。また、1つのファイルに長時間記録すると、見たい場面までシークするのに手間がかかる。このため、この装置では歩行者がドアを通ったときの映像のみを記録するようにしている。歩行者がドアを通ったかどうかの判断は自動ドアの動きを観測するためのセンサから送られてくるドアの開閉状態をもとにしており、ドアが開いているとき、歩行者がドアを利用しているとみなす。ドアが開き始めた時刻の前後5秒を動画データとして記録する。

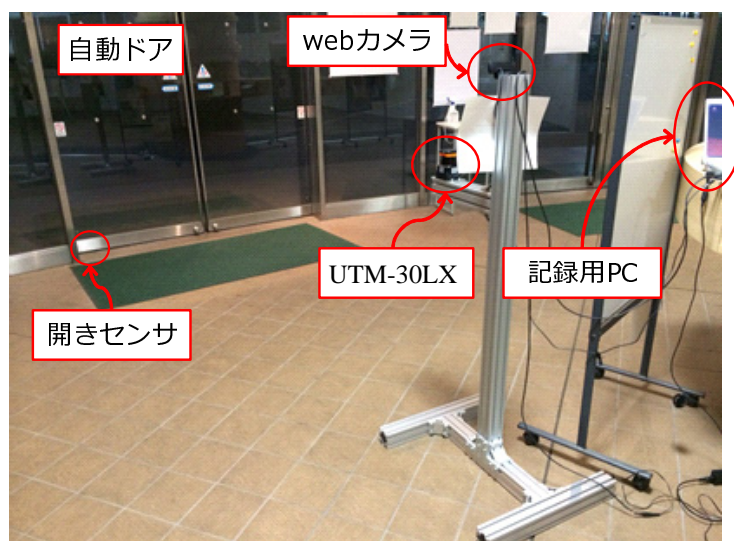


図 A.1: 装置の外観



図 A.2: web カメラ

### A.1.2 歩行者の位置・速度データ

歩行者の位置と速度のデータはセンサ台に取り付けた2次元レーザースキャナ（UTM-30LX）を用いて取得する。

歩行者の位置データは、歩行者に当たったビームとして抽出されたスキャン点の座標値の重心とした。歩行者の抽出は事前に取得した環境データとの背景差分によって行っている。

速度データは、歩行者の位置データを追跡し、歩行者の総移動量を求め、これを観測時間で割ることで算出している。この装置では現在の時刻から遡って1秒間を観測時間としている。

### A.1.3 ドアの開きタイミング・任意の時刻の開き幅

自動ドアを通過する歩行者を観測するにあたって、歩行者の位置・速度とあわせて自動ドアの開きタイミングと任意の時刻の開き幅を取得したい。開きタイミングを観測するための最も正確な方法として考えられるのは、自動ドアを制御するための回路にアクセスして自動ドアを動作させるための信号を計測する方法だが、多数の自動ドアに対して大規模な実験を行う場合、各自動ドアに対して改造を行う必要があるこの方法は現実的ではない。そこで、ドアが開いているのか閉まっているのかを外部から検出できるセンサ（開きセンサ）を自作した（図 A.3）。開きセンサは反射型のフォトリフレクタと無線モジュールを組み合わせたものである。反射型フォトリフレクタは投光機から光を出して反射した光を受光器で受けるセンサで、反射光の有無による抵抗値の変化を読み取ることでセンサの前の物体の有無を検出することができる。あらかじめ自動ドアの一部に、光を吸収する黒いテープを貼っておき、このテープに合わせてセンサを設置することで、自動ドアが開いたかどうかを検出することができる。無線モジュールにはXBee（Digi社製）を用いた。

このセンサを用いて取得できるのは自動ドアが開いているか、閉まっているかという情報だけだが、あらかじめ取得しておいた自動ドアの動きのパラメータと、自動ドアが開き始めてから経過した時間とを照らし合わせることで任意の時刻の自動ドアの開き幅を算出することができる。自動ドアの動きのパラメータの取得方法については後述する。

### A.1.4 自動ドアの動きのパラメータの取得

自動ドアの動きのパラメータとは、自動ドアが開き始めてからどのような加速度と速度でドアが開くのかを式で表したものである。具体的には距離センサと開きセンサを用いてドアが開き始めてから開き終わるまでのドアの移動量の変化をプロットし、プロットしたデータに曲線当てはめを行うことでドアの動きの関数を推定する。データ取得の様子を図 A.4 に、測定データをプロットしたものとあてはめた曲線を図 A.5 に示す。

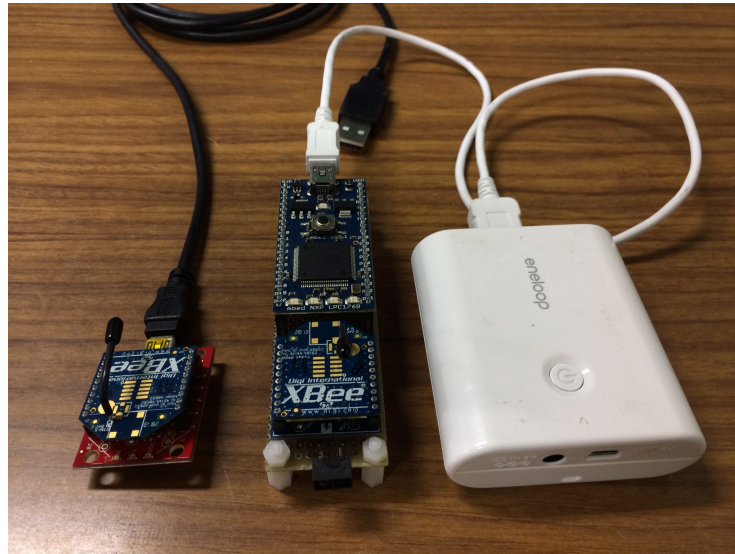


図 A.3: 左から受信モジュール、開きセンサ、バッテリー



図 A.4: データ取得の様子



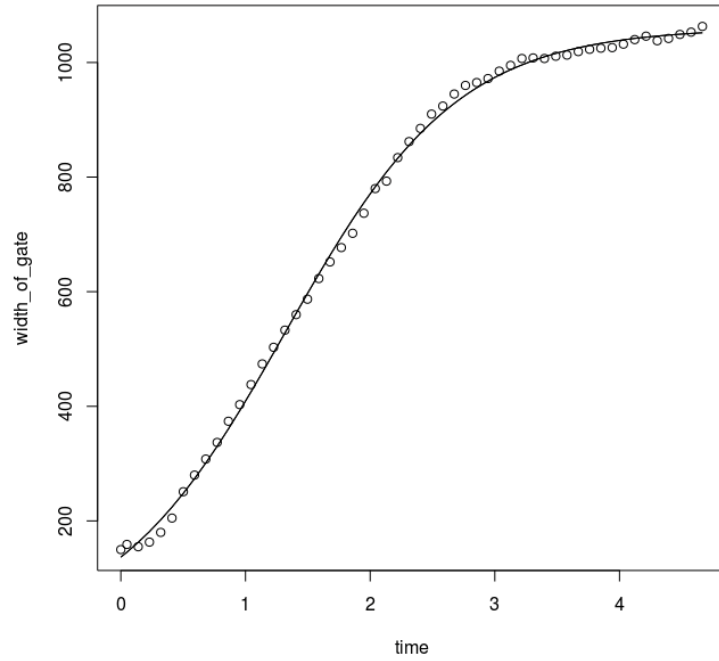


図 A.5: プロットしたデータとあてはめ曲線

### A.1.5 各種データの取扱い

各種センサで得られたデータにはタイムスタンプが埋め込まれている。このため、それぞれのデータは時刻を合わせて参照することができる。

## A.2 電気通信大学構内の自動ドアに関する調査

既存の自動ドアを使った実験を想定し、予備調査を行った。調査は電気通信大学構内の自動ドア（64箇所）を対象とし、それぞれの自動ドアの感度を調べた。ここで、自動ドアの感度とは自動ドアが開き始めるときの歩行者の位置のこととする。

図 A.6 に学内の自動ドアの感度の分布を、図 A.7 と表 A.1 に学内の自動ドアの感度を示す。調査結果から、学内の自動ドアは0.5 m～1.5 mの位置まで近づくと開くことが分かった。また、ドアの開き速度は300～500 mm/sだった。

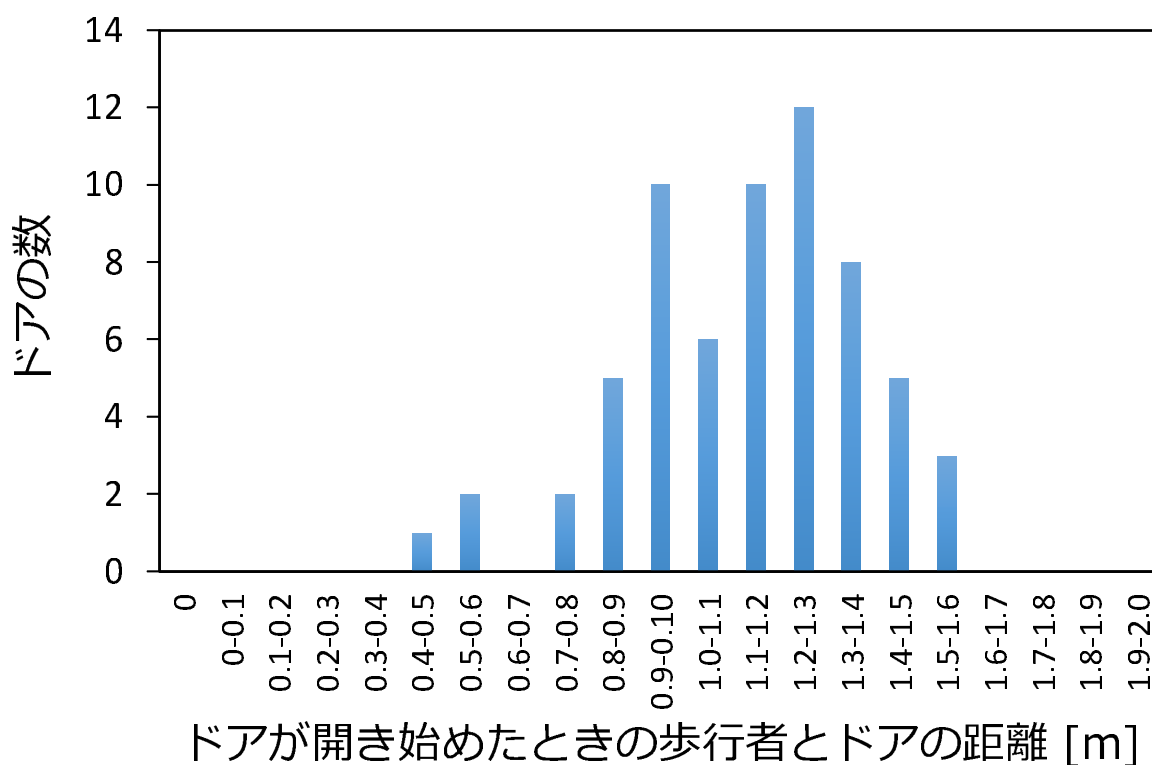


図 A.6: 電気通信大学構内の自動ドアの感度の分布



図 A.7: 電気通信大学構内の自動ドアの設置位置

表 A.1: 電気通信大学構内の自動ドアの感度

No.	向き	感度 [m]	No.	向き	感度 [m]	No.	向き	感度 [m]
1	内側	1.1	16	内側	1.31	28	内側	1.345
1	外側	1.35	16	外側	1.472	28	外側	1.362
2	内側	1.422	17	内側	1.466	29	内側	1.22
2	外側	1.245	17	外側	1.547	29	外側	1.171
3	内側	1.315	18	内側	1.157	30	内側	1.453
3	外側	1.54	18	外側	1.317	30	外側	1.279
4	内側	1.24	19	内側	0.945	31	内側	1.238
4	外側	1.37	19	外側	1.535	31	外側	1.297
7	内側	1.095	20	内側	1.122	32	内側	1.019
7	外側	1.078	20	外側	1.418	32	外側	1.078
8	内側	1.384	21	内側	0.512	33	内側	1.6
8	外側	1.438	21	外側	0.686	33	外側	1.361
10	外側	1.068	22	内側	0.952	34	内側	1.641
11	内側	1.242	22	外側	1.182	34	外側	1.533
11	外側	1.37	23	内側	1.251	35	内側	1.363
12	内側	1.69	23	外側	0.921	35	外側	0.674
12	外側	1.421	25	内側	1.046	36	内側	1.039
13	内側	1.231	25	外側	0.902	36	外側	1.203
13	外側	1.475	26	内側	0.83	37	内側	1.518
14	内側	1.097	26	外側	1.034	37	外側	1.171
15	内側	1.347	27	内側	0.996			
15	外側	0.829	27	外側	1.074			

# 発表論文リスト

1. D.Nishida, S.Kudoh, K.Takai, T.Momodori, N.Asada, T.Mori, T.Suehiro, T.Tomizawa, “Development of Intelligent Automatic Door System” , Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2014), 2014 (採択済み)
2. 西田 大樹, 高井 和夫, 百鳥 達裕, 浅田 規裕, 森 利宏, 工藤 俊亮, 末廣 尚士, 富沢 哲雄, “三次元レーザースキャナを用いたインテリジェント自動ドア” , 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2013), 2K2-3, SI2013