

2009 年度 修 士 論 文

レーザスキャナを用いた交差点周辺の移動体の抽出
および安全運転支援への応用

Application to safe driving and extraction of moving objects
around intersection using laser scanners

広瀬 久也

Hisaya, Hirose

東京大学大学院新領域創成科学研究科

社会文化環境学専攻

目次

第1章 序論	・・・1
1.1. 研究背景	・・・1
1.1.1. 移動体の計測技術	・・・1
1.1.2. 既往研究	・・・3
1.2. 本研究の目的	・・・3
1.3. 論文構成	・・・6
第2章 環境側レーザスキャナを用いた移動体の追跡方法	・・・7
2.1. 計測システム概要	・・・7
2.2. マルチレーザスキャナの統合	・・・9
2.3. 移動体の抽出	・・・10
2.4. 歩行者の追跡手法	・・・11
2.5. クラスタリング手法	・・・12
第3章 車載レーザスキャナを用いた移動体の追跡方法	・・・15
3.1. 計測システム概要	・・・15
3.1.1. 東京大学駒場キャンパスの実験で使用した車載センサ	・・・17
3.1.2. 東京大学柏キャンパスの実験で使用した車載センサ	・・・17
3.2. SLAMによる移動型レーザスキャナの位置追跡・自車の位置推定	・・・20
第4章 画像センサを用いた移動体の追跡方法	・・・27
4.1. 計測システム概要	・・・27
4.2. 幾何モデル	・・・27
4.3. カメラの幾何的キャリブレーション	・・・29
第5章 座標系統合・移動体の経路予測の手法	・・・30
5.1. 座標系統合の概要	・・・30
5.2. 移動体の経路予測の概要	・・・34
5.3. 移動体経路予測の手法	・・・34

第6章 本手法の適法結果	・ ・ ・ 35
6.1. 東京大学駒場キャンパスにおける実験概要	・ ・ ・ 35
6.1.1. 座標系統合の結果	・ ・ ・ 37
6.1.2. 考察	・ ・ ・ 38
6.2. 東京大学柏キャンパスにおける実験概要	・ ・ ・ 44
6.2.1. 移動体の抽出結果	・ ・ ・ 44
6.2.2. 座標系統合の結果	・ ・ ・ 44
6.2.3. 移動体の経路予測結果	・ ・ ・ 46
6.2.4. 車載カメラでの描画	・ ・ ・ 48
6.2.5. 考察	・ ・ ・ 50
第7章 結論	・ ・ ・ 51
7.1. 本研究の成果	・ ・ ・ 51
7.2. 今後の方向性	・ ・ ・ 53
参考文献	・ ・ ・ 55
謝辞	・ ・ ・ 57

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、交通事故の多発に伴い、自動車の安全性への配慮が高まりつつある。また、交通事故のおよそ9割が、危険に対する認知・判断の誤り、すなわちドライバーのヒューマンエラーに起因するというデータがある。交通事故数を減少させるためには、ドライバーの危険予知をサポートし、事故そのものを回避する必要がある。例えば、死角の多い交差点や見通しの悪いカーブなどにおいて、車両間の相互通信を利用し、相手車両の情報を事前にドライバーに知らせることで、見落としや判断ミスを防ぎ、出会いがしら事故などを防ぐことができる。これらのことを可能にするため、車載センサと環境側のセンサから得られるデータを統合することが必要である。本節ではまずドライバーの安全運転を支援するための主要な人物を計測するセンサについて述べ、続いてドライバーの安全運転を支援するための既存の手法について述べる。

1.1.1 移動体の計測技術

まずドライバーの安全運転を支援するためには、自動車周辺の歩行者、自転車、自動車（以降、移動体）を正確に計測する必要がある。移動体の計測、とくに人物を対象としたセンサには、図 1.1 に示すように接触/拘束型のセンサと非接触/非拘束型のセンサがある。前者は人体に装着が可能なセンサ（ウェアラブルセンサ）を用いてデータを取得するものであり、代表的には GPS・電子タグ・加速度センサ・ジャイロセンサなどが挙げられる。移動する場所に制約されることなく、ID 付きの位置や加速度、生体データ（体温・脈拍・血圧）などの詳細な情報を取得できるが、センサを個々の人物に持たせる必要があるため大人数のセンシングには不向きである。

後者は、カメラなどの環境設置型センサによって非接触で人物をセンシングする手法である。また後者を表 1.1 にまとめる。ビジュアルで観測可能な位置や速度などのように得られる情報は限られるが、大人数のセンシングに適している。非接触/非拘束型センサは大別して、(1) カメラタイプ、(2) レーダタイプの二つに分けることができる。(1) のタイプは通常の画像センサであり、光学系として魚眼カメラ・全方位カメラ・ステレオカメラ・パンチルトズームカメラ、分光特性として可視域・赤外域・マルチ/ハイパースペクトルなどに細分化される。(2) のタイプは特殊画像センサとしてとらえることができ、レーザレーダ・ミリ波レーダ・超音波レーダ・UWB レーダなどが代表例である。このように様々な

センサがあるが、利便性・コスト・既設状況・人間による解析との親和性などの理由から CCD ビデオカメラが使われることが多く、人物計測に関する研究のほとんどは CCD ビデオカメラを用いたものである。

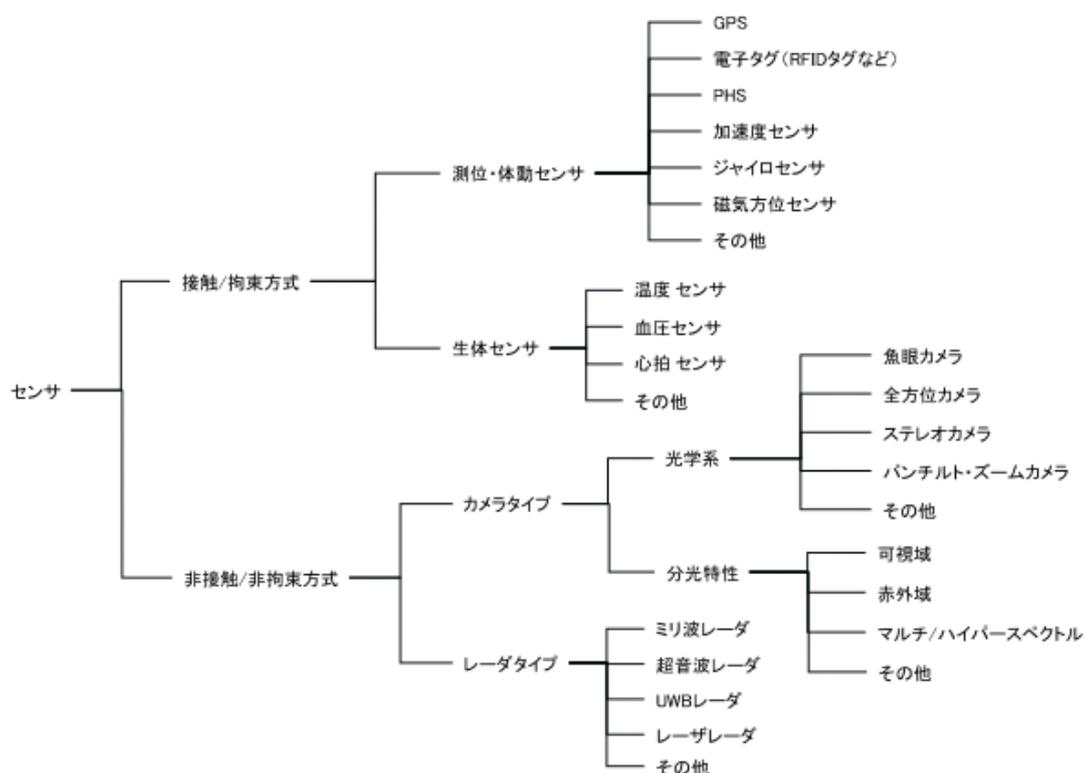


図 1.1 人物計測を対象とした類型

表 1.1 非接触型センサ

センサの種類	計測範囲	角度分解能	計測距離	距離分解能	日照の影響の有無	使用機器の価格	アルゴリズムの複雑さ
カメラ	中	中	低	中	夜間使用不可	低	高
赤外線センサ	広	中	中	中	夜間でも使用可	中	高
レーダ	低	低	低	高	夜間, 雨, 霧でも使用可	高	低
レーザー スキャナ	広	中	中	高	夜間でも使用可	高	低

1.1.2 既往研究

このようななか、近年、ロボット工学の分野でレーザスキャンのマッチングにより位置姿勢決め、同時にレーザスキャンデータの統合により、SLAM(Simultaneously Localization And Mapping) [1, 2, 3]が多く研究されている。この手法は連続に計測した周囲静止物物体のデータマッチングにより、センサ自身の位置変化を推定する原理である。ただし、特徴量の少ない環境では、細い廊下などの位置決めは困難である。また、移動体が存在する環境では、移動体のデータはマッチングの失敗や、位置決め誤差の原因になる。このような誤差の累積を軽減するため、Loop Closure などの手法が開発された[4, 5, 6, 7]。このように、車載センサからデータを取得する方法や、環境側センサからデータを取得する方法はそれぞれ開発されてきている。しかしながら、このような車載センサから得られるデータと環境側のセンサから得られるデータを統合する試みは、これまでの研究事例からもまだ殆ど見られない。そのため本研究では環境側センサと車載センサから得られるデータの座標系の統合を行う。

1.2 本研究の目的

本研究では、自動車の安全走行を支援するため、前方にある障害物を検知するだけでなく、周囲にある移動体、静止物体を検知・識別する。また、各物体の状態、例えば、位置、速度、方向などを正しく推定し、危険状況を予測するのが必要である。こうした目的のため、本研究はレーザスキャナを用いた手法開発を試みた。ここで、以下の課題がある。1. 環境側に設置した固定型センサと、車載側のセンサとの時刻同期や座標系の統合、2. 移動体データと静止物体データの識別、3. 移動体のトラッキング、などの課題がある。本研究は上記の三点の課題を克服するため、レーザスキャナを用いたマップ作成と移動体の統合の手法を開発する。そして、図 1.2, 図 1.3 に示すように人間や車両が混在する環境で安全運転を支援するため、レーザスキャナを車両の前方と交差点にそれぞれ設置する。そして、そのような環境で車両と交差点の双方から歩行者・自動車・自転車などの移動体を自動的に検知し、自動車及び各移動体の状況を正しく推定することを本研究の目的とする。例えば、位置、速度、方向など、を正しく推定し、自動車及び移動体の危険状況を予測することが必要である。ここで、自動車の前方に設置したレーザスキャナ（以降、車載センサ）と、交差点に設置したレーザスキャナ（以降、環境側センサ）との時刻同期や座標系の統合、移動体データと静止物体データの識別、移動体のトラッキングなどの課題がある。本研究はこうした課題を克服するため、レーザスキャナを用いたマップ作成と移動体の統

合の手法を開発した。このような車載センサから得られるデータと環境側センサから得られるデータを統合する試みは、これまでの研究事例からもまだ殆ど見られない。よって、実走実験を行い、本研究手法の有効性を検証した。また、実応用への適用可能性を検討した。

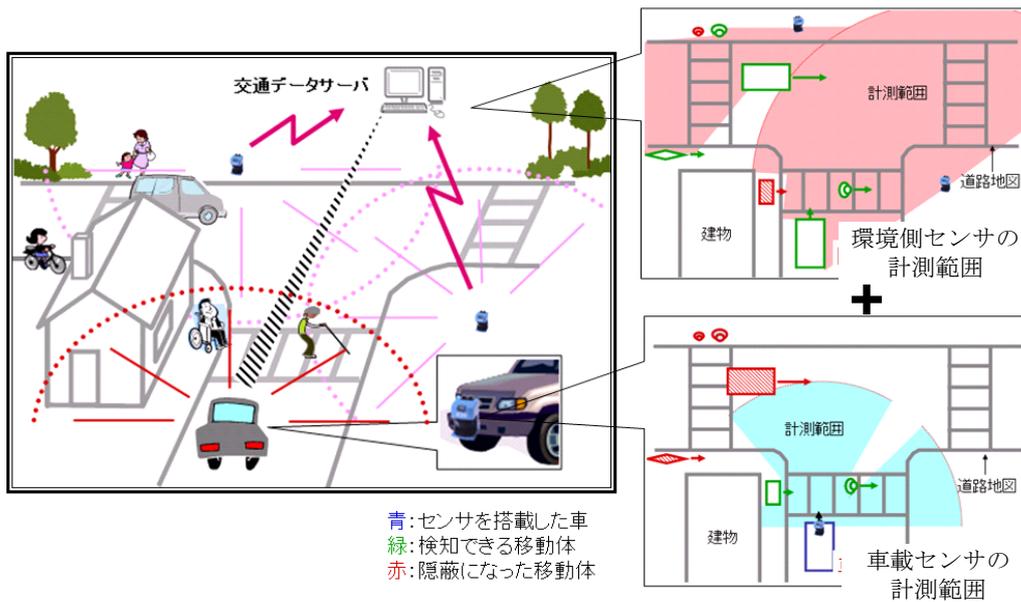


図 1.2 本システムのイメージ図

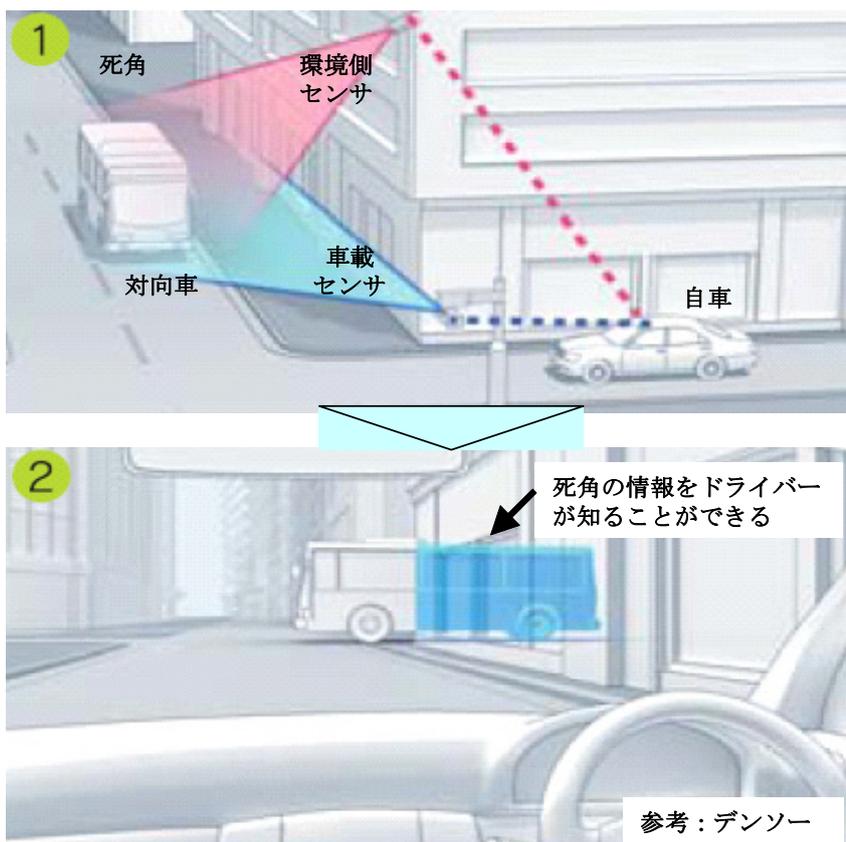


図 1.3 本システムのイメージ図

1.3 論文構成

本論文の構成は以下の通りである。

第一章：序論

第二章：環境側レーザスキャナによる移動体の追跡方法

第三章：車載レーザスキャナによる移動体の追跡方法

第四章：画像センサを用いた移動体の追跡方法

第五章：座標系統合・移動体の経路予測の手法

第六章：実証実験

第七章：結論

第 2 章では、まず、本研究で使用した計測機器について説明を行う。次に、環境側レーザスキャナによる移動体の検知の方法について紹介する。さらに計測されたデータのなかから、歩行者・自転車・自動車の識別方法（クラスタリング手法）について紹介する。

第 3 章では、まず、車載レーザスキャナによる移動体の検知の方法について紹介する。次に、SLAM による台車に取り付けた移動型レーザスキャナの位置追跡方法について説明を行う。さらに、計測されたデータ中からの歩行者追跡法、自車の位置推定について紹介する。

第 4 章では、まず、画像センサを用いた移動体の追跡方法について述べる。次に画像センサの幾何モデルについて述べ、さらに幾何学的キャリブレーションについて述べる。

第 5 章では、第 2 章及び第 3 章で得られた自車の位置情報をもとに、環境側レーザスキャナと車載レーザスキャナの座標系の融合方法を述べる。次に移動体の経路予測の手法について述べる。

第 6 章では、東京大学駒場キャンパスで行ったデータ取得実験、及び東京大学柏キャンパスで行った実験についてそれぞれ説明する。得られたデータを第 2～4 章で紹介した手法によって処理した結果を示し、その結果について考察を行う。

第 7 章では、本研究の結論と今後の課題について述べる。

第2章 環境側レーザスキャナを用いた移動体の追跡方法

2.1. 計測システム概要

これまでレーザスキャナは，ITS やロボティクス等の研究分野で注目されてきており，近年はコンピュータビジョンの分野でも注目を浴びつつある．本研究で歩行者・自転車・自動車などの移動体追跡のために使用する．本システムで使用するレーザスキャナは，2種類ある．一つは道路など環境側に設置するSICK社(ドイツ)のレーザレンジスキャナLMS-200(環境側センサ)である．図2.1，図2.2に環境側センサ，表2.1に環境側センサの使用をそれぞれ記載する．二つ目は，自動車に設置するセンサ(車載センサ)である．これらのセンサは照射するレーザ光の伝播時間を計測することで測距を行う．ここで第2章では，環境側センサについて紹介した後，第3章で車載センサについてそれぞれ紹介する．

まず，環境側レーザスキャナについて説明する．本研究で用いた環境側センサは内部の回転鏡より 180° の計測範囲を 0.5° 刻みで計測する．計測距離は最大30m，計測周期は37.5Hz，測定誤差は最大4mである．使用するレーザ光はクラス1Aであり，目に入射しても安全な強度のレーザパルスを用いている．レーザスキャナの利点としては，広範囲測定，日照状況に影響を受けないといった点がある．既存の研究では，人物追跡はカメラを用いた解析が主流であった．しかしながら，カメラは日照に左右されやすく，計算コストが高いなどの問題がある．また，交差点などの環境側に固定するカメラでは，高い位置から対象物を見下ろすように設置するのが一般的である．しかし，画素サイズや撮影範囲の問題で，簡易に設置することが困難であることが多い．そのため本研究では近年高性能化，低価格化，小型化が著しく簡易に設置できるレーザスキャナ(15cm×15cm×21cm)を用いた．



図 2.1 レーザスキャナ (SICK-LMS200)



図 2.2 レーザスキャナによる歩行者計測の様子

表 2.1 SICK LMS-200 の仕様

項目	システムの仕様	本研究での仕様
計測距離 [m]	80(最大値)	30
観測角 [deg]	100/ 180	180
分解能 [deg]	0.25/ 0.50/ 1.00	0.50
サンプリング間隔 [ms]	53/ 26 /13	26
システム誤差 [cm]	1.5/ 4.0	4.0
インタフェース	RS-232/ RS-422	RS-422
レーザ保護クラス	1A	"
光の波長 [nm]	905(近赤外波長域)	"
電源電圧 [DC/V]	24 ± 15%	"
消費電力 [W]	20(出力負荷を除く)	"
重量 [kg]	4.5	"

2.2. マルチレーザスキャナの統合

本研究では、広範囲な計測、隠蔽領域の緩和を目的として、複数のレーザスキャナを時間的・空間的に同期させて計測を行う。それぞれのレーザスキャナは、計測領域にて分散配置し、センサの影の領域ができるだけ少なくなるように配置する。例えば、特に注目したい箇所や、人が集まりやすい場所にはレーザ光が複数箇所から当たるように配置すべきである。図 2.3、図 2.4 に複数台のレーザスキャナによる隠蔽領域の緩和の概念図を示す。1 台で計測するよりも、2 台で多方向から計測した方がお互いの隠蔽領域をカバーし合うことが分かる。

各レーザスキャナは、それぞれ 1 台のクライアント PC にて制御が行われる。クライアント PC は取得したレンジデータを保存して、後述する背景差分によって移動体のみの情報を抽出し、LAN を通じてサーバ PC へと転送される。サーバ PC は、受信したデータを幾何的に統合して、歩行者追跡を実現する。ここで、各クライアント PC から得られるレンジデータは、それぞれ独自に定義されたローカル座標系であるため、これらをいずれかの座標系に変換させることで、共通の座標系に統合する。ここで、それぞれのレーザスキャナは同一の水平面をスキャンしていると仮定すると、重複する計測領域は、幾何的に一致する。し

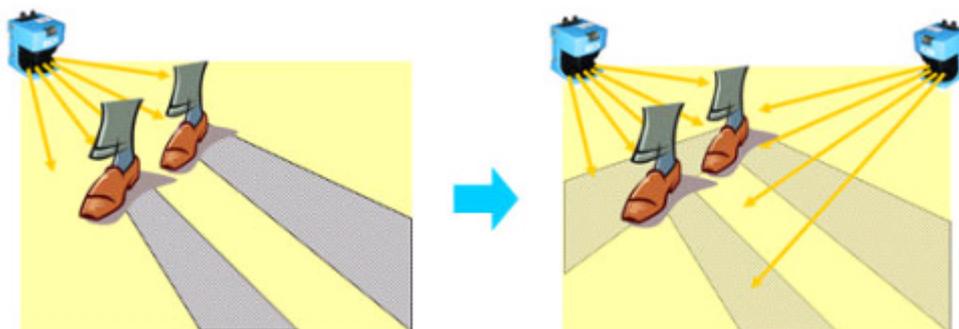


図 2.3 複数台のレーザスキャナによる隠蔽緩和の概念図

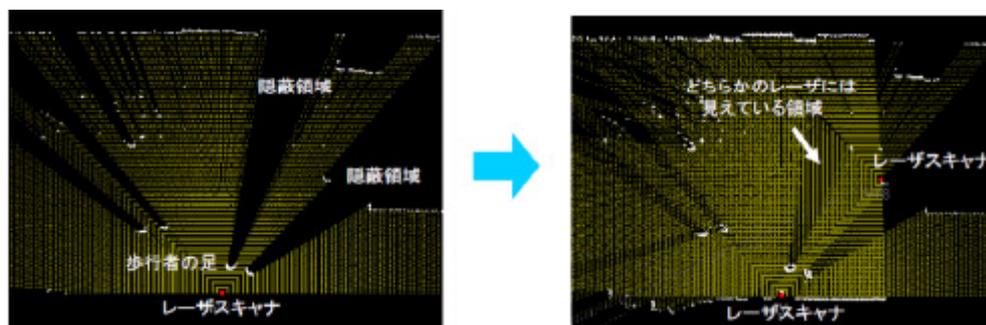


図 2.4 実際に得られたデータの計測領域を図示した様子

たがって、この重複領域を重ね合わせるように、回転・平行移動を司るヘルマート変換（一次等角変換）によって座標変換を行う。並進量および回転量は、各センサから計測された壁や柱などの共通の固定物を参照し、目視にて回転・並進を行うことで対応づけることにより、お互いの座標系を順に統合していく。この操作を行うインターフェースは計測プログラムに実装しており、センサの数が増えても容易な統合操作が可能である。また、時刻同期はサーバ PC を NTP サーバとして稼働させ、それぞれのクライアント PC から定期的にサーバ PC と時刻を同期することで実現する。また、計測されたレンジデータを保存する際にも、各フレームを取得した瞬間の PC の内部時刻をタイムスタンプとして保存し、後処理においてはこのタイムスタンプを頼りに、同一時刻となるそれぞれのフレームを統合する。

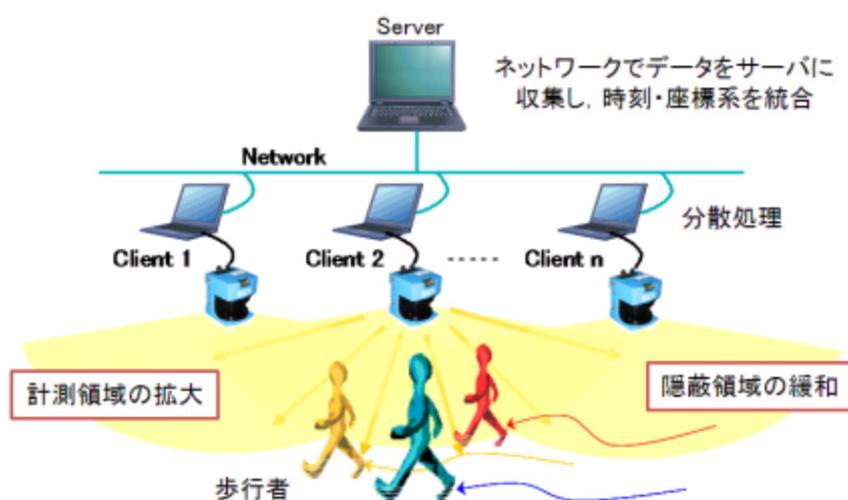


図 2.5 マルチレーザ計測システムの概要

2.3 移動体の抽出

レーザスキャナから得られるレンジデータには、壁や柱といった静止物及び歩行者などの移動体の情報が含まれている。そのため背景情報から背景画像を生成し、背景との差分を取ることによって、移動体のみを抽出する必要がある。まず静止物はレーザスキャナまでの距離がほとんど変動しないため、1) 過去数百フレーム分のレンジデータを保存し、2) サンプリング角毎に距離値のヒストグラムを計算することによって、その最頻値を背景情報とみなすことができる。次に、上記で得られた背景情報をもとに以下の方法によって、移動体を抽出する。1) 新たに得られるレンジデータに対して背景情報との距離を比較し、2) 閾値 20cm 以内に存在するレンジデータを除外することにより、移動体のみを抽出する。

2.4 歩行者の追跡手法

上記の手法で移動体のみを抽出し、その情報をもとに歩行者の追跡を行う。以下で歩行者の追跡方法を述べる（図 2.6）。

- 1) まず上記の方法で抽出した歩行者のデータを中心とし、その 20cm 以内に存在するレーザデータを移動体もしくは背景情報か識別する。
- 2) 60cm 以内に存在する足候補のうち最も近い二つを一組として、一人の歩行者候補とする。ここで、前フレームにおける歩行者データの速度から現在のフレームにおける歩行者の位置を推定する。
- 3) 歩行者候補の位置と前フレームの速度から推定した歩行者位置が 20cm 以内に存在している場合、同一の歩行者として ID を引き継がせる。
- 4) 過去の歩行者と対応付けられなかった歩行者候補に対しては、新しい ID を割り振り歩行者として扱う。

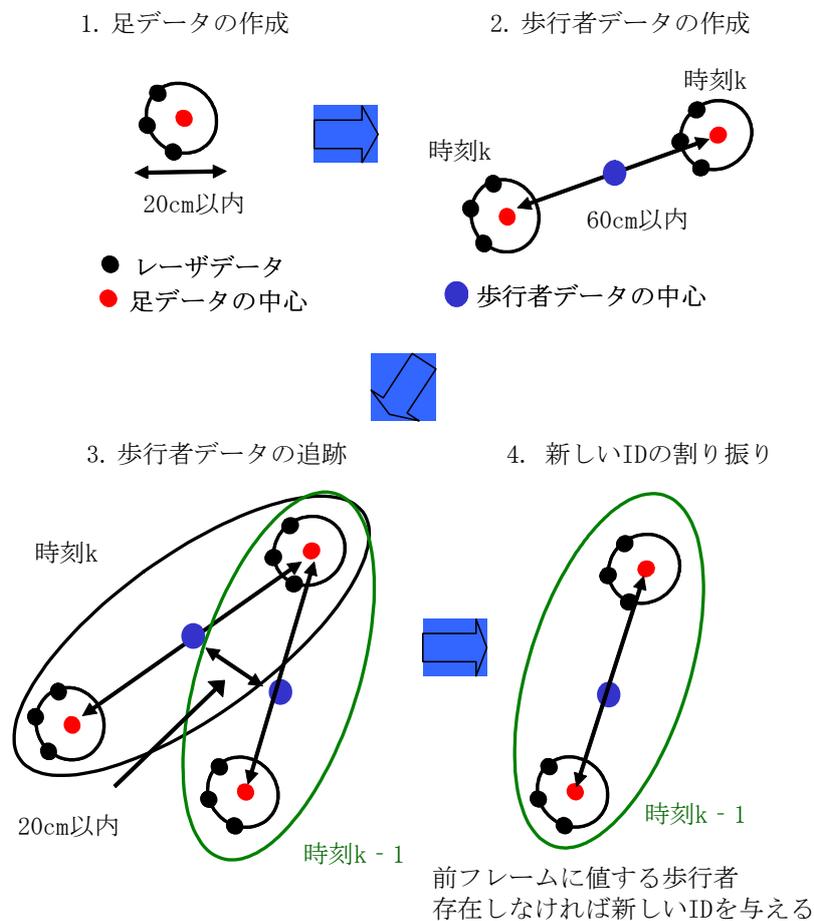


図 2.6 歩行者の追跡手法

2.5 クラスタリング手法

クラスタリングとは、レーザスキャナによって取得したデータより、歩行者、自転車、自動車などの移動体をそれぞれ識別することをいう。本研究では表 2.2 のクラスタリングの手法を適用した。クラスタリングを行うことで、様々な移動体が混在する交差点などでも歩行者、自転車、自動車の識別ができる。ここで移動体の分類表を、表 2.3 に載せる。また図 2.7 にクラスタリングの実証実験の写真、図 2.8 にクラスタリングの結果を載せる。

表 2.2 クラスタリングのフロー

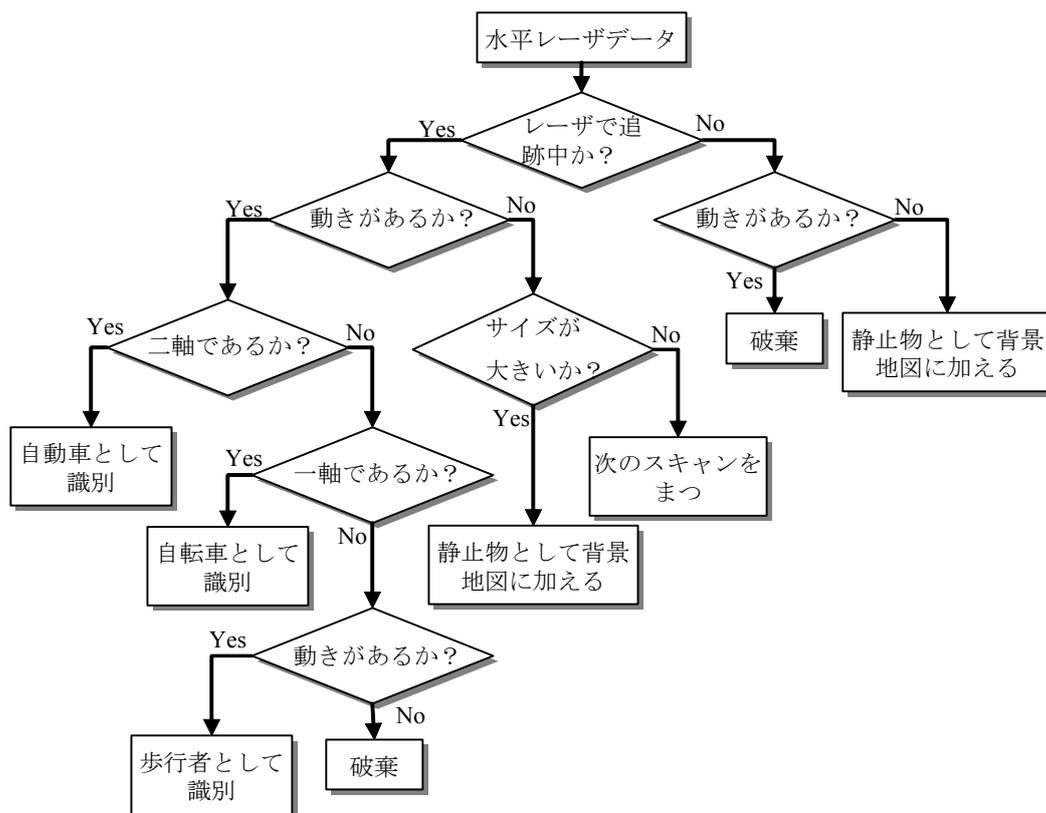
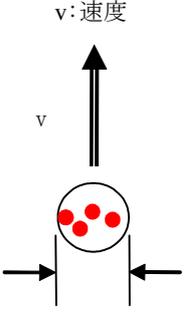
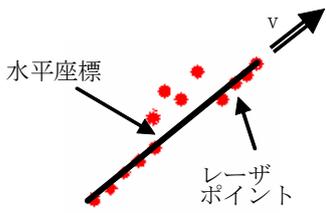
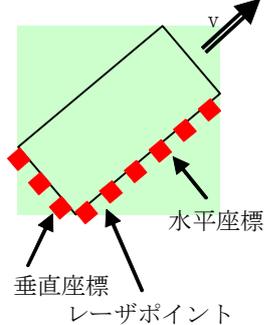


表 2.3 移動体の分類表

	歩行者	自転車	自動車
モデル	<p>v: 速度</p>  <p>ポイント郡</p>	 <p>水平座標</p> <p>レーザーポイント</p>	 <p>水平座標</p> <p>垂直座標</p> <p>レーザーポイント</p>
座標軸	0軸	1軸	2軸
生データ			

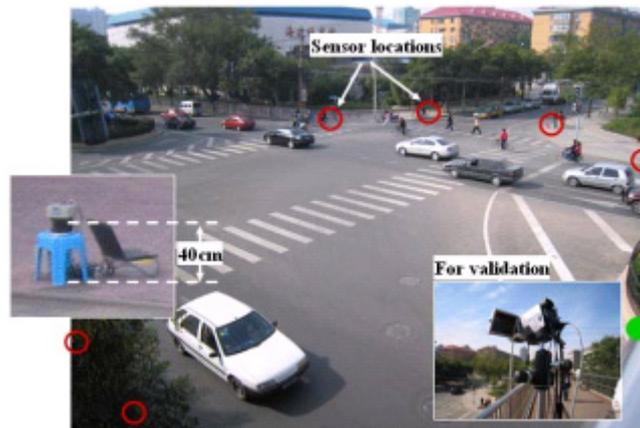


図 2.7 交差点における実験場所

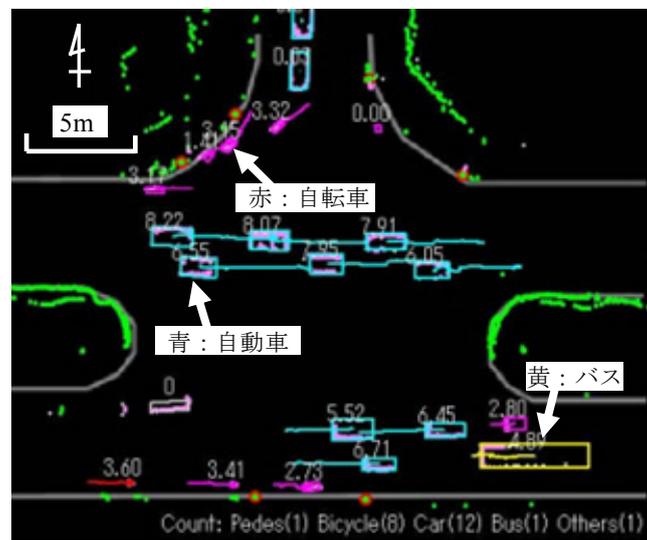


図 2.8 図 2.7 のクラスタリング結果

第3章 車載レーザスキャナを用いた移動体の追跡方法

3.1 計測システムの概要

第2章では、道路に設置した環境側センサの概要について紹介した。ここで第3章では車両に搭載した車載センサについて紹介する。これは実社会で使用する場合、自動車に設置するセンサを想定している。車載センサを使用する利点は大きく分けて以下の三点ある。1) SLAM という手法 (3.2 で後述) によって自車の位置を推定できる, 2) 車載センサによってより広域な範囲を計測できる, 3) 前方の検知 (よそ見運転の防止など) 以下でそれぞれを説明する。

1) SLAM という手法 (3.2 で後述) によって自車の位置を推定できる

節 3.2 で後述するが, SLAM という手法を用いることで, 自車の位置を推定することができる。図 3.1 はレーザスキャナのデータを用い, T 字路におけるある時刻を表した図である。ここで中央の黄色の点は, SLAM によって自車の位置を推定した。また黄色の線は GPS によって位置を推定した。また白色の四角形は自動車を表し, 環境側センサによって検知したものである。図 3.1 の結果から, GPS の位置より SLAM で推定した車載センサの位置のほうがより正確な値となることがわかる。

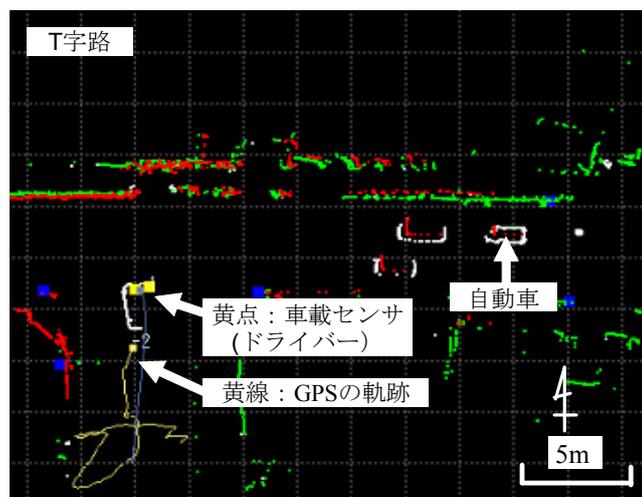


図 3.1 T 字路

2) 車載センサによってより広域な範囲を計測できる

第 2 章で紹介した環境側センサは、基本的に交差点など交通事故の多い箇所に設置する(図 3.2 の上図)。しかし環境側センサのみだと、道路の全体を把握することが難しい。よって図 3.2 の下図のように自動車に車載センサを搭載し、自動車の交通量が増え、それに伴い車載センサが増えることにより、車載センサの計測範囲が増えるにつて、地図の未計測の部分が減る。またそれぞれのデータは、リアルタイムに共有することで、全体像をつ

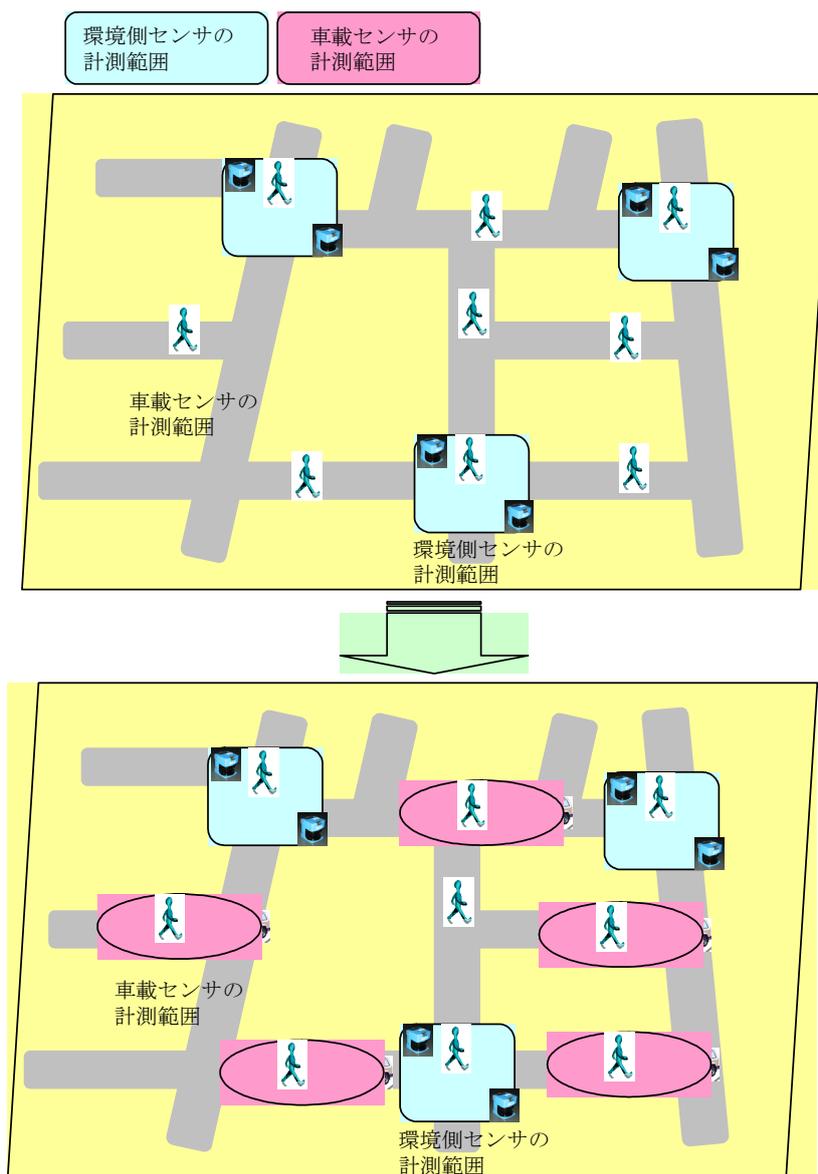


図 3.2 道路の全体像

(a)環境側センサのみの計測範囲 (上図)

(b)環境側センサと車載センサの計測範囲 (下図)

かむことができる。

3) 前方の検知（よそ見運転の防止など）

車載センサを設置し，そのセンサによって移動体（歩行者，自転車，自動車など）を検知することができる．そのためドライバーがよそ見運転をして，自動車の前方にいる移動体に気がついていない場合でも，センサによる検知によりその移動体を知ることができる．またこのような機能は認知能力が低い高齢者のドライバーなどに役立つと考えられる．

本研究では，1) 東大駒場キャンパスでの実験，2) 東大柏キャンパスでの実験，の二つの実験を行った．各実験で使用した車載センサが異なるため，以下でそれぞれの実験で用いた車載センサの概要を説明する．

3.1.1 東京大学駒場キャンパスの実験で使用した車載センサ

本実験では，レーザスキャナ(LD)を車の前方の二箇所に搭載した．自動車の搭載するセンサは図 3.3 のようになり，ある水平面で広角にスキャンする．このように，車載から搭載したセンサにより，自動車周辺の移動体を検知する．ここで，車載センサが検知したデータの中で，どれが移動体で，どれが静止物かを識別する必要がある．さらに，移動体のなかでも，歩行者，自転車，自動車を判別する必要がある．

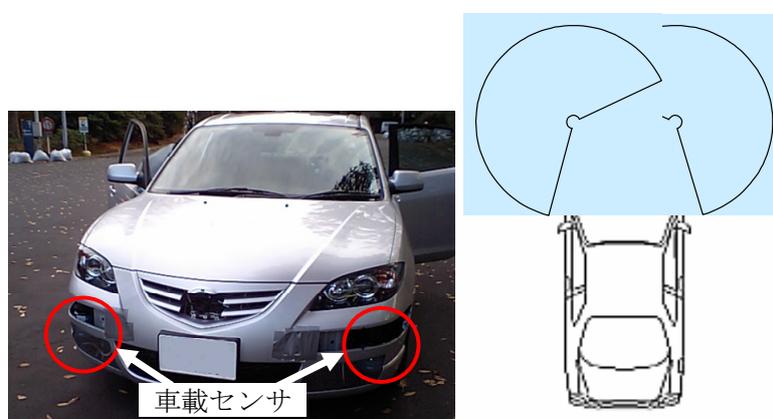


図 3.3 車載センサ

(a)車載センサの様子 (左)

(b)車載センサの計測範囲のイメージ (右)

3.1.2 東京大学柏キャンパスの実験で使用した車載センサ

本実験では東大駒場キャンパスで用いたレーザスキャナとは異なり，SICK 社製 LMS-291

というレーザスキャナを用いた (図 3.4)。これらのレーザスキャナは環境側レーザと同様に平面状に一定の角度刻みでレーザを照射する。これを利用することで、レーザスキャナからの距離と角度で位置が計測されたデータを点群として得ることができる。LMS-291 は 180 度の範囲を 0.5 度刻みでレーザを照射し、1 回のスキャンで 361 ポイントのデータを得ることが出来る。以下に基本情報をまとめる。

本実験では車載センサとみなし、レーザスキャナのプラットフォームとして台車を用いた。台車には LMS-291 を台車の進行方向に対して水平に 90 度回転させ、背中合わせで 2 台取り付ける。1 台で 180 度の範囲を計測することが出来るため、2 台取り付けることによって隠蔽となる台車後方を除いた範囲を計測することが出来る。またレーザ射出部の高さは床から 20cm である。この高さで水平方向に人間を観測すると足首の部分にレーザがぶつかる。足首は胴体や大腿部と比較して直径が小さいため隠蔽部を少なくすることが出来る。また、頭部や頸部と比較して個人による高さの差が小さいため、身長差を考慮に入れる必要がないという利点がある。図 2.4 にレーザスキャナを取り付けた台車を示す。この台車を移動させながらデータ計測を行う



図 3.4 SICK 社のレーザスキャナ LMS-291

表 3.1 車載センサの詳細

項目	値
計測距離[m]	30
観測角[deg]	180
分解能[deg]	0.5
計測間隔[ms]	50
計測誤差[cm]	4
光の波長[nm]	905



図 3.5 台車に設置した車載センサ

3.2 SLAM による移動型レーザスキャナの位置追跡・自車の位置推定

移動するレーザスキャナから得られるデータを用いて、移動する歩行者を観測するために、レーザスキャナの移動量を正確に知る必要がある。なぜなら移動量推定の誤差が大きくなってしまうと計測している物体の位置のずれが物体の移動によるものか、レーザスキャナ自身の移動によるものか判別がつかなくなってしまうためである。レーザスキャナから得られる距離データと角度データは、レーザスキャナからレーザの反射が起きた点までの相対的な位置関係を示すものである。したがって、台車を移動させながら計測を行うと、時間によってレーザスキャナの位置が変わってしまうために各フレームにおけるレーザポイントを同一の座標系で扱うことが出来なくなってしまう。そこで、本研究では SLAM (Simultaneously Localization And Mapping) を適用してレーザスキャナを搭載した台車の位置追跡と周囲の地図構築を行う。SLAM を用いることにより、台車の位置を追跡しながら、台車の位置決定のために必要な地図を構築していく。次ページから SLAM の処理手順を示す。図 3.6 は SLAM のフローチャートである。

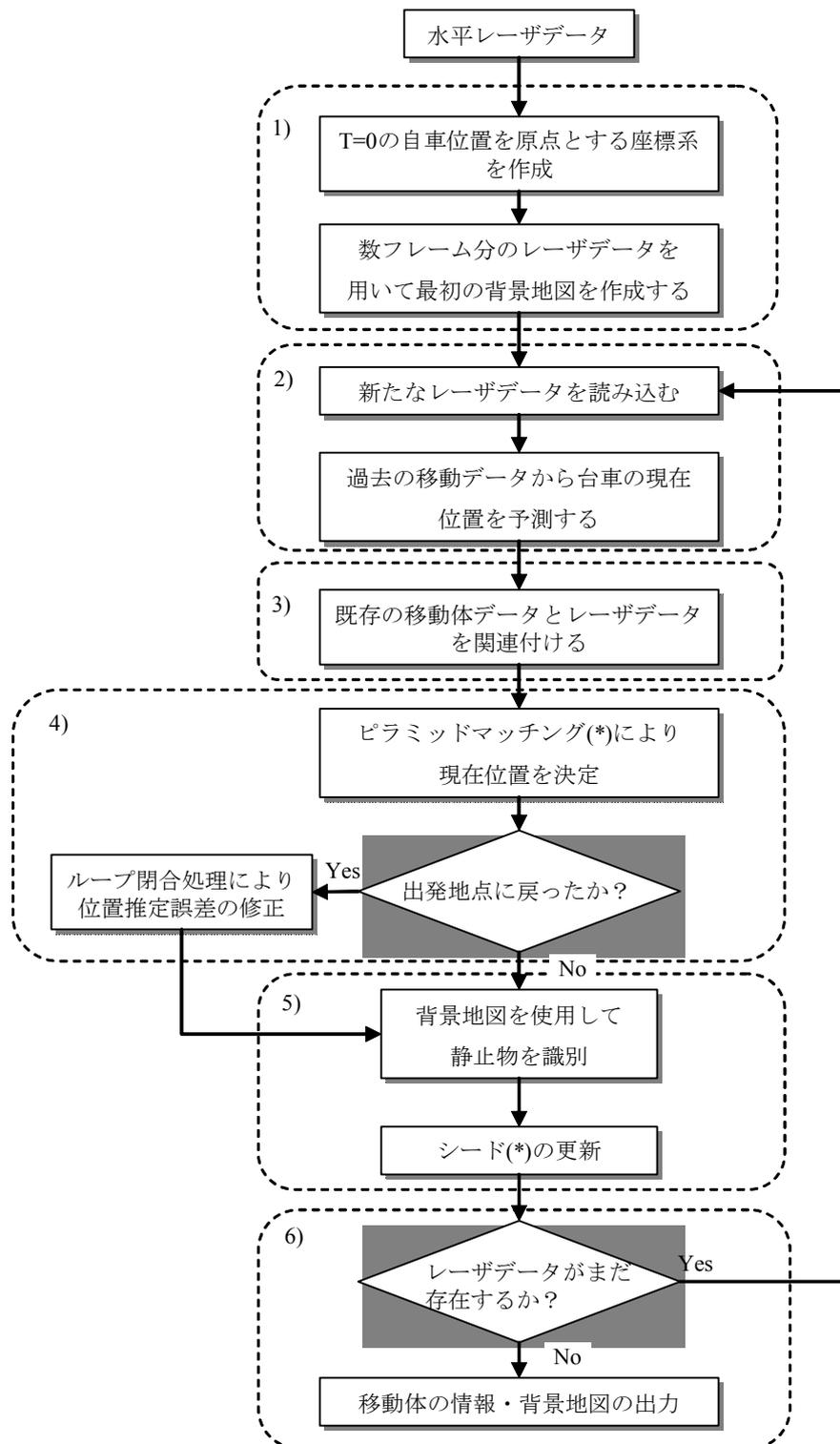


図 3.6 SLAM による台車の位置追跡のフローチャート

1) 初期の背景地図の作成

レーザスキャナによる観測を開始したら、最初の数フレームの間は台車を静止させる。この時の台車の位置を原点とした座標系を作成する。この座標系をその計測におけるグローバル座標系とする。ある時刻 k における台車の位置姿勢を \mathbf{x}_k で表す。 \mathbf{x}_k は台車の x 座標, y 座標, 向き θ の三つの変数からなる。台車の位置が決定するので得られた数フレーム分のレーザデータを用いて最初の背景地図を作成する。

2) 台車の現在位置姿勢の予測値を得る

新しいレーザデータが得られたら、台車の移動量 \mathbf{u}_k を計算し、台車の現在位置姿勢の予測値 $\bar{\mathbf{x}}_k$ を得る。つぎに、既存の歩行者データと計測されたレーザデータの対応付けを行う。現在の台車位置が予測できたので、計測されたレーザデータをグローバル座標系へと変換する。変換されたレーザデータを背景地図と重ね合わせて、背景地図に登録されている物体から 20cm 以内に存在するレーザデータを静止物と見なして除外する。

3) 歩行者の抽出

Zhao ら[9]によるクラスタリング手法を用いて、残ったレーザデータから歩行者の抽出を行う。ここでは 15cm 以内に存在する点群をクラスタリングし、一本の足候補とする。さらに、60cm 以内に存在する足候補のうち最も近い二つを一組として、一人の歩行者候補とする。ここで、前フレームにおける歩行者データの速度から現在のフレームにおける歩行者の位置を推定する。歩行者候補の位置と前フレームの速度から推定した歩行者位置が 20cm 以内に存在している場合、同一の歩行者として ID を引き継がせる。過去の歩行者と対応付けられなかった歩行者候補に対しては、新しい ID を割り振り歩行者として扱う(第 2 章の図 2.6 参照)。

4) 台車の現在位置姿勢の決定

計測されたレーザデータから歩行者として認識されたものを取り除き、マッチングによって正確な台車の位置を決定する。台車の位置は Zhao[8]らによる式を用いて決定される。

$$\mathbf{x}_k = \arg \max_{\mathbf{x}_k} \{p(\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_k^{(y)} | \bar{\mathbf{x}}_k, \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{x}_{k-n:k-1}, \mathbf{z}_{k-n:k-1}^{(m)+(s)}))\} \quad (3.1)$$

ここで \mathbf{x}_k : 時刻 k における台車の位置姿勢, \mathbf{z}_k : 計測されたレーザデータ, $\mathbf{z}_k^{(y)}$: 歩行者データ, $\bar{\mathbf{x}}_k$: 台車位置の予測値, $\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{x}_{k-n:k-1}, \mathbf{z}_{k-n:k-1}^{(m)+(s)})$: $k-n$ から $k-1$ までの台車位置姿勢と計測データから得られる背景地図, $\mathbf{z}_k^{(m)}$: 静止物データ, $\mathbf{z}_k^{(s)}$: 未分類のレーザデータである。2)において前フレームにおける台車の移動速度 u_{k-1} から予測した台車の位置姿勢を初期値として台車の位置姿勢 $\bar{\mathbf{x}}_k$ を少しずつずらしながら歩行者データを除いたレーザデータ $\mathbf{z}_k - \mathbf{z}_k^{(y)}$ と時刻 $k-1$ までに得られた背景地図 $\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{x}_{k-n:k-1}, \mathbf{z}_{k-n:k-1}^{(m)+(s)})$ のマッチングを行い、マッ

マッチングの度合いが最も良かった $\bar{\mathbf{x}}_k$ を時刻 k における台車の位置姿勢として扱う。マッチング方法としてピラミッドマッチングという手法を用いた。ピラミッドマッチングとは、マッチングを行う際に元のデータよりもピクセルサイズの大きいレイヤーを作成し、最もピクセルサイズが大きいレイヤーから小さいレイヤーへと順にマッチングを行うことにより通常よりも少ない探索回数でマッチングを行うことができる手法である (図 3.7)。マッチングでは台車の X 座標, Y 座標, 向きの 3 つの変数を変化させていく。各変数について 3 回ずつ値を変化させるため, 各ピクセルサイズのレイヤーにおいて 9 回, 背景地図とレーザデータの重ね合わせを行うこととなる。最終的に, 最もピクセルサイズが小さいレイヤーにおいてマッチングのスコアが最大となった台車位置を現在の台車位置として扱う。SLAM による位置追跡を続けていくと徐々に誤差が蓄積していく。そのため図 3.8 に示すように, 台車が長い距離を移動して以前計測を行った領域に再び戻ってきた場合, 実際の台車の位置と推定している台車の位置がずれてしまっているために, 以前計測した物体が前回とは異なる位置に別の物体として登録されてしまう。すると, 背景地図と実際の環境との間に差が生じてしまうために SLAM が失敗して台車の位置を見失ってしまう原因となる。したがって, SLAM が以前計測を行った領域に戻ってきた場合にループの閉合処理を行うことによって誤差を修正する必要がある。ここで, ループとはある地点を通過した台車が再び同じ地点に戻ってくるまでの軌跡のことを指す。本研究では, Newman ら [6] による手法を用いて, 図 3.9 に示すように 10m 間隔の格子地図を作成して台車が通過したピクセルを登録していく。台車が以前通過したピクセルに戻ってきた時に同じ場所へ戻ってきたと判断しループの閉合処理を行った。ループの閉合処理では, 過去に通過した時のフレームの前後 100 フレームにおいて得られたレーザデータから作成した背景地図と最新のレーザデータを用いてマッチングを行い台車の位置を決定する。ここで得られた台車位置と 4) で得られた台車位置との差を計算し, このループによって蓄積した位置推定誤差の合計とする。位置推定誤差の合計をループ中のフレーム数で割り, 各フレームにおける台車位置の修正量として補正を行う。

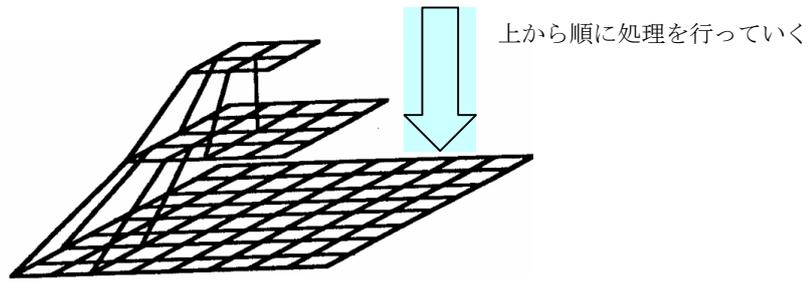


図 3.7 ピラミッドマッチングの処理のイメージ

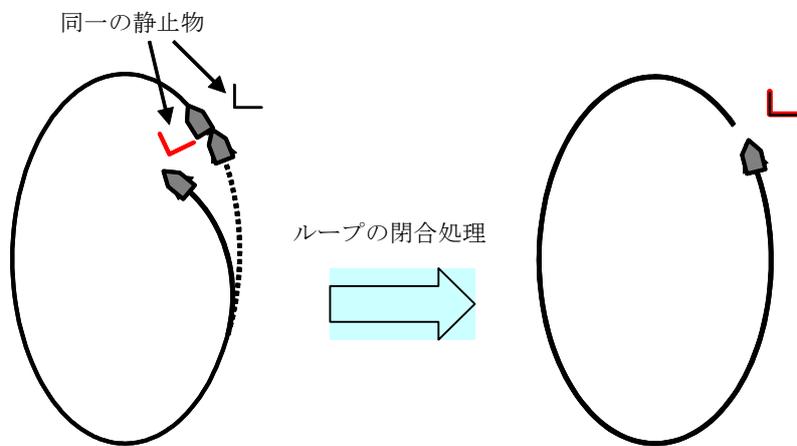


図 3.8 ループの閉合処理

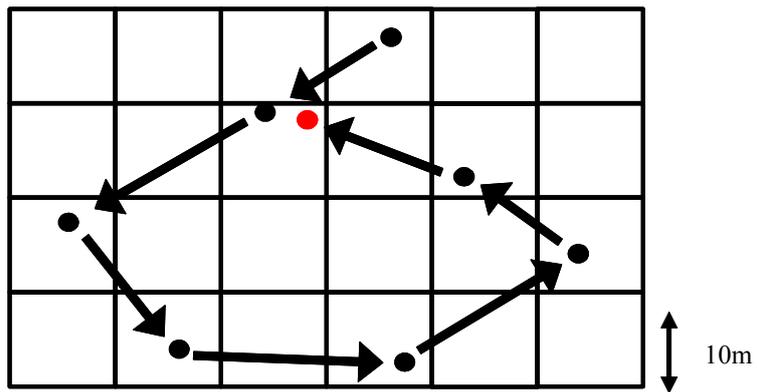


図 3.9 始点に戻ったか判断する格子図

5) レーザデータの分類

台車の正確な位置を決定することが出来たので、レーザデータをグローバル座標系へと変換する。ここで、座標変換を行ったレーザデータを背景地図と重ね合わせ、背景地図中の物体から 6cm 以内に存在する物体を静止物として地図に登録する。3)で歩行者として識別されず、ここで静止物としても認識されなかったレーザポイントは未識別のシードとして取り扱う。シードは図 3.10 に示すような手順で識別が行われる。シードは最大 30 フレームまで追跡される。その間に動きが認められるもので、クラスタリングによって足候補が作成でき、さらに足候補を 2 本一組の歩行者としてグループ化できるものについては歩行者データとして ID を与えて追跡を行う。30 フレームの間動きが認められなかったシードについては静止物として背景地図に登録を行う。30 フレームの間に動きが認められたが歩行者としてグループ化できなかったシードについては識別不可能なデータとして登録し、それ以上の追跡は行わない。

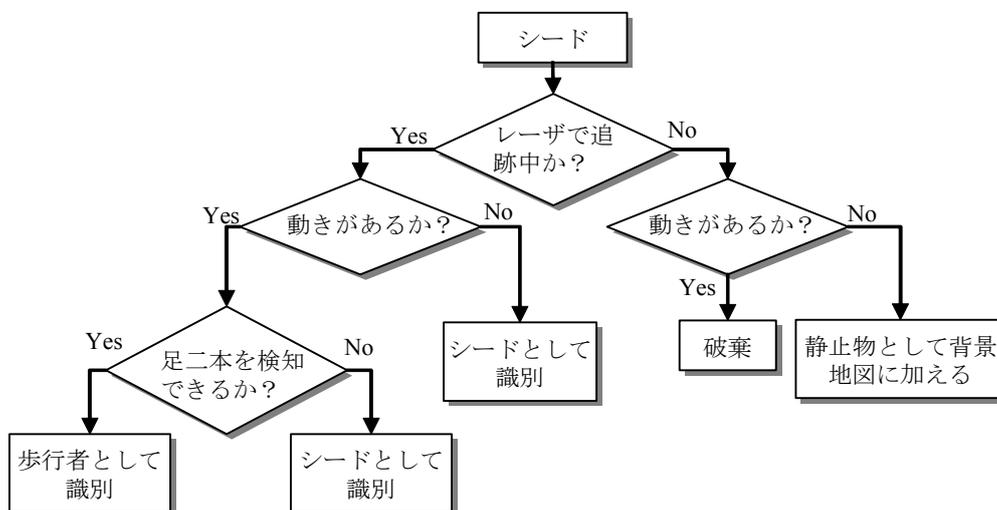


図 3.10 レーザデータの識別条件

6) 終了処理

新しい計測データが得られる場合は 2) へと戻り同様の手順で SLAM を行っていく。これ以上データがない場合は、各フレームにおける歩行者の数・位置、静止物が登録された背景地図、台車の軌跡を出力して処理を終了する。

第4章 画像センサを用いた移動体の追跡方法

4.1 計測システムの概要

第2章では、マルチレーザスキャナを用いた広域における群集追跡手法を提案した。しかしながら、この手法はレンジデータのみを用いているため、追跡されている人物の外観や属性情報（身長・性別・年齢層など）を取得することができない。これは、プライバシーを保護できるという利点もあるが、その反面でセキュリティ分野に適用しにくいという欠点が出てくる。レーザスキャナと画像センサを融合利用することで、歩行軌跡と人物画像を同期・管理することができ、いつ・どこで・誰が・何をしていたのかを効率よく把握することができる。また、レンジデータのみだと一度人物を見失ってしまうなど、対応付けが失敗した場合の修正が困難である。人物画像があれば、レンジデータのみでは限界のある高精度化や属性推定の実現が期待できる。

そこで本章では、レーザスキャナと画像センサを併用したハイブリッド群集計測手法を提案する。提案手法は、Tsai のカメラモデルに基づき、レーザスキャナと画像センサの幾何的な関係を求める。追跡されている人物の位置をカメラ画像に投影することで、画像におけるおおまかな人物領域を推定する。また、追跡の高度化や通過ログとしての利用に向け、逐次的に得られる画像シーケンスからベストショットを求める手法を提案する。最後に、展示会場における実験により、提案手法の有効性を示す。

4.2 幾何モデル

本システムにおける幾何モデルを図4.1に示す。レーザセンサの座標系は世界座標系 O_w (x_w, y_w, z_w) であり、人物が存在する3次元座標系である。カメラ座標系 O_c (x, y, z) とは、レンズ中心 O_c を原点とする3次元座標系であり、 z 軸をカメラの光軸に一致させるように設定する。画像座標系 O_i (X, Y) とは主点 O_i を原点とする2次元座標系である。 XY の両軸はカメラ座標系の xy 平面と平行に取り、 z 座標は f (焦点距離) の位置に取る。

ここで、レーザスキャナによって検出された人物の足首位置を $PF = (x_w, y_w, z_w)$ とする。 z_w はスキャン面の高さであり、典型的には $z_w \approx 16 \text{ cm}$ である。理想的なピンホールカメラの場合、点 PF の座標は画像平面上で (X_u, Y_u) と表される。しかしながら、レンズの幾何学的な歪み（ラジアルディストーション）によって、実際には画像平面上では (X_d, Y_d) の位置に対応する。 (X_d, Y_d) のデジタル画像上での離散化された座標を (X_f, Y_f) と表す。これはピクセル座標に対応する。こうしたモデルが与えられた際、Tsai のカメラモデルに基づき、点 PF の世界座標 (x_w, y_w, z_w) から、 PF に対応する画像座標 (X_f, Y_f) を求める手順を以下に示す。

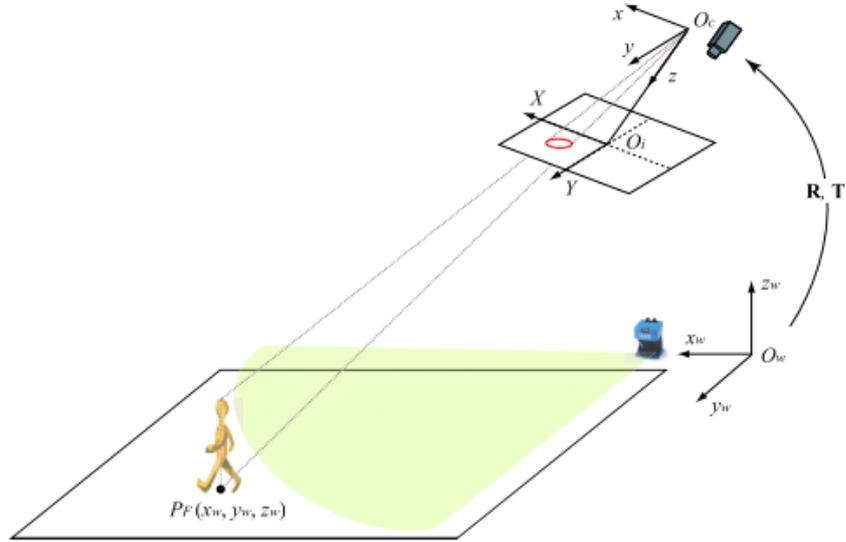


図 4.1 幾何モデル

Step 1 世界座標 (x_w, y_w, z_w) からカメラ座標 (x, y, z) への変換 :

回転行列 $R = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{pmatrix}$ と並進ベクトル $T = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}$ を用いて表す.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} + T \quad (4.1)$$

Step 2 (x, y, z) から (X_u, Y_u) への変換 : 焦点距離 f を用いて表す.

$$X_u = f \frac{x}{z}, \quad Y_u = f \frac{y}{z} \quad (4.2)$$

Step 3 (X_u, Y_u) から (X_d, Y_d) への変換 :

$$X_d = X_u - D_x, \quad Y_d = Y_u - D_y \quad (4.3)$$

ただし, D_x, D_y はレンズの半径方向のひずみ係数 κ_1, κ_2 を用いて次のように表す.

$$D_x = X_d(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4) \quad (4.4)$$

$$D_y = Y_d(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4) \quad (4.5)$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \quad (4.6)$$

Step 4 (X_d, Y_d) から (X_f, Y_f) への変換 :

$$X_f = s_x d_x^1 X_d + C_x \quad (4.7)$$

$$Y_f = d_y^1 Y_d + C_y \quad (4.8)$$

ここで、 s_x はスケール係数、 (C_x, C_y) はデジタル画像上での原点座標（画像中心）、 d_x, d_y はそれぞれ X 方向、Y 方向の CCD 素子の間隔を表す。なお、 d_0x は X 方向の CCD 素子数 N_{cx} と一走査線のサンプル数 N_{fx} を用いて d_x を補正したものである。

$$d_x^1 = d_x \frac{N_{cx}}{N_{fx}} \quad (4.9)$$

4.3 カメラの幾何的キャリブレーション

上記の手法を適用するに当たり、幾何学的特性が既知の対象物をレーザスキャナと CCD カメラで計測・撮影し、カメラモデルに基づいて必要となる内部パラメータ ($f, C_x, C_y, k1, s_x$) と外部パラメータ (R, T) を事前に求めておく。キャリブレーション用の対象物は、図 3.3 に示すような箱型の対象物でも良いし、エッジの明確な壁や柱などでも問題ない。なお、提案手法においては幾何学的キャリブレーションのみを行っており、シェーディングやノイズ・カラーなどの光学的キャリブレーションは考慮していない。しかし、将来的にマルチカメラを利用する場合、マルチポイントで撮影された人物画像はカメラやレンズの光学的特性・照明条件などの影響を受けていることが想定される。したがって、将来の拡張に当たっては光学的キャリブレーションについても検討する必要があるだろう。

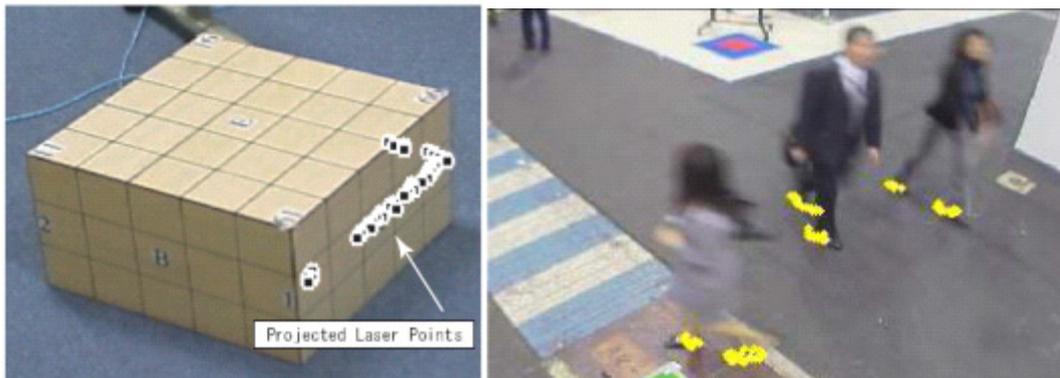


図 4.2 レーザ座標系とカメラ座標系の幾何的キャリブレーション結果
 (a)カメラとレーザの対応関係を求めるための箱型オブジェクト（左）と
 (b)レーザポイントをカメラ画像内に投影した結果（右）

第5章 座標系統合・移動体の経路予測の手法

5.1 座標系統合の概要

本項目では座標系統合のアルゴリズムについて説明する。ここでは座標系統合とは、環境側レーザの座標系と車載レーザの座標系を統合することをいう。本研究は建物などのドライバーの死角から、歩行者や自転車、自動車などの移動体を事前に知ることができるシステムの開発を想定している。環境側センサによって交差点の状況を連続的に計測でき、同一の点で連続的に計測できる。また車載センサによってレーザを移動させることによって交差点以外のより広い領域を計測できる。そのためこれらのセンサの特徴を活かし座標系を統合する利点は、以下の二点である。1) 座標系を統合することでドライバーからは死角の情報を得ることができる。2) 両方のセンサがあることで計測範囲が時間スケール、空間スケールともに広域になる、という利点がある。

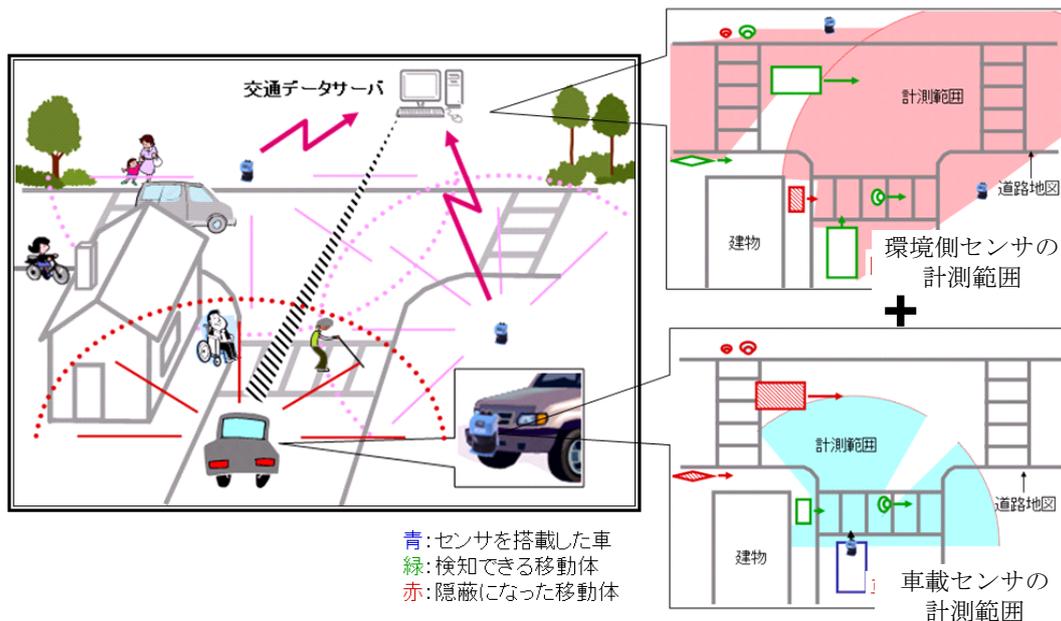


図 5.1 環境側センサと車載センサの座標系の統合

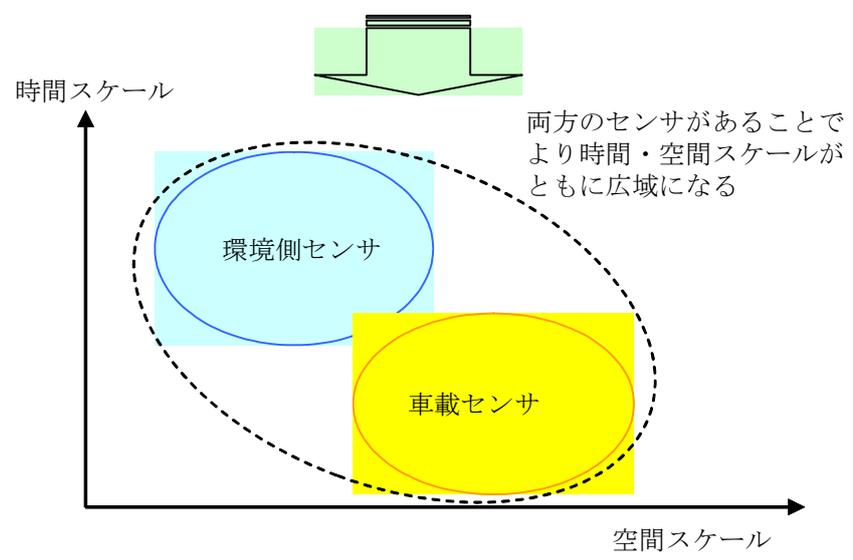
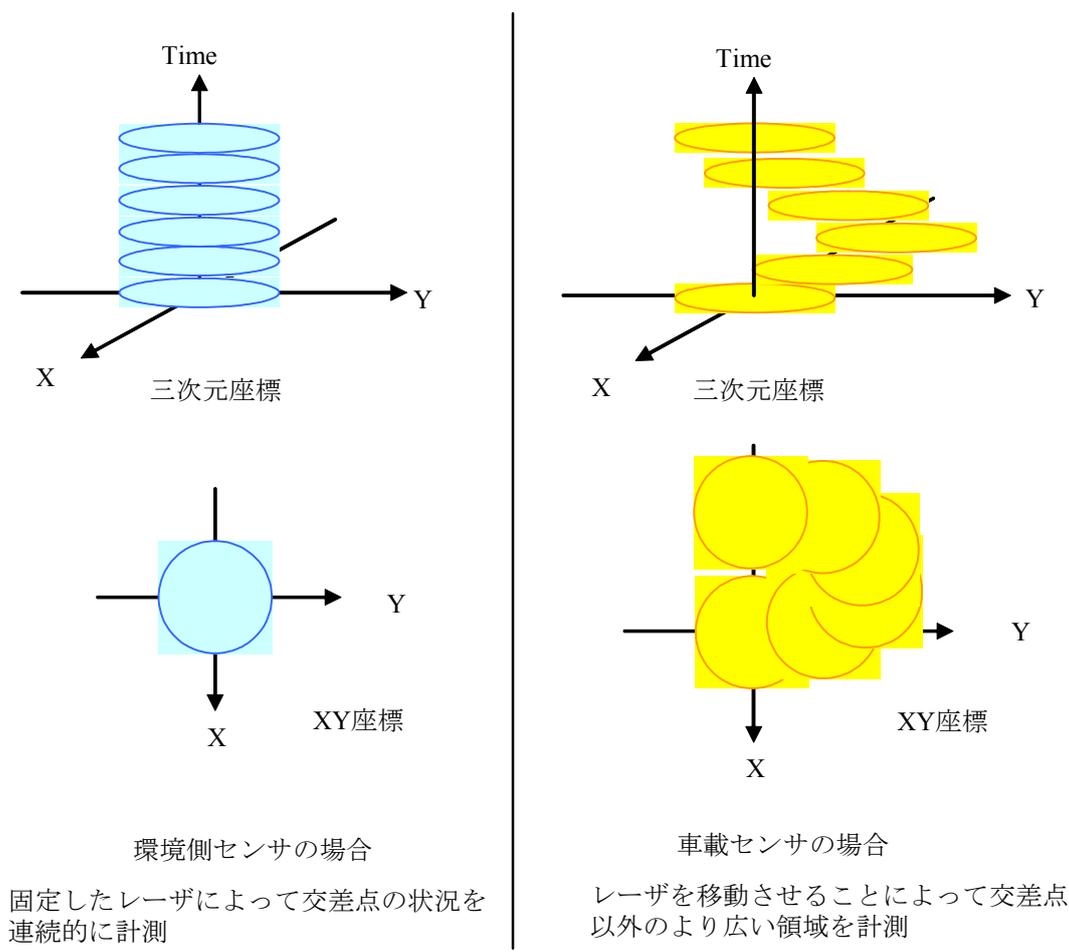


図 5.2 環境側センサ及び車載側センサの特徴
 (a) 環境側センサの特徴 (左)
 (b) 車載センサの特徴 (右)

座標系統合の手法

本研究は建物などのドライバーの死角から，歩行者や自転車，自動車などの移動体を事前に知ることができるシステムの開発を想定している．そのため以下の手順で（Step1～Step3），ドライバーの死角の情報を得る．

Step1 車載センサによって移動体を検知する（図 5.3）．

Step2 環境側センサによって，車載レーザでは検知できなかった移動体を検知する（図 5.4）．

Step3 Step2 で検知した移動体の情報をホストサーバーに送り，ピラミッドマッチング（後述）という手法により，環境側センサと車載センサの座標系を統合する（図 5.5）．

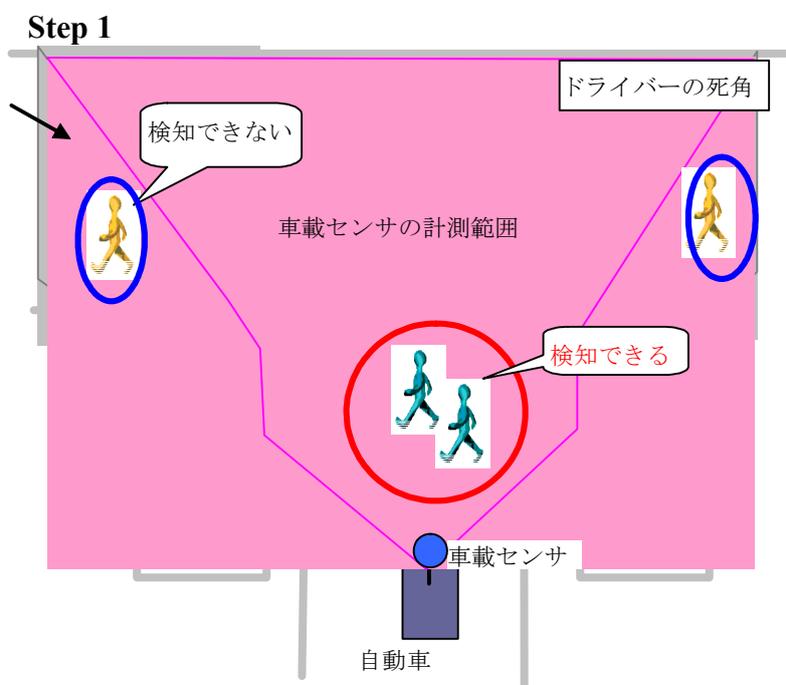


図 5.3 車載センサによる移動体の検知

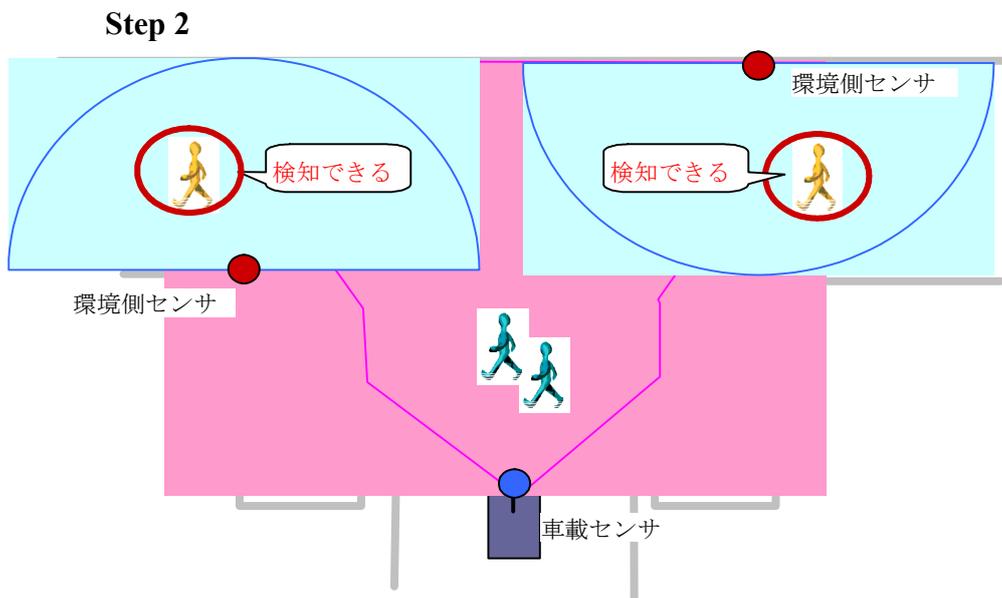


図 5.4 環境側センサによる移動体の検知

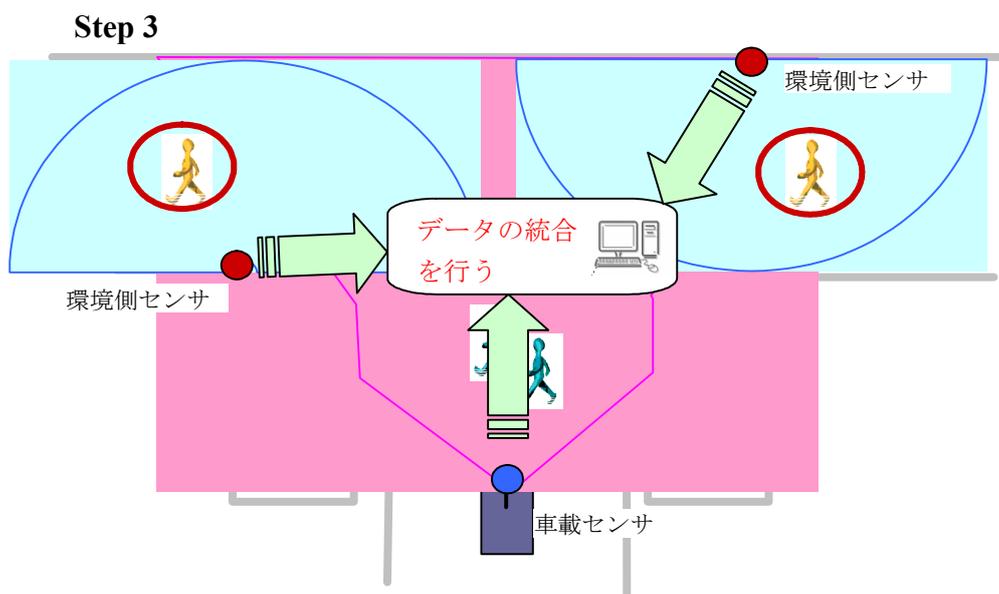


図 5.5 環境側センサと車載センサの座標系の統合

ピラミッドマッチング

Step3 では、環境側レーザの情報と、車載レーザの情報の統合方法としてピラミッドマッチングという手法を用いた。ピラミッドマッチングの手法は、第 3 章でも紹介し、繰り返しのなるがここでも再度紹介する。ピラミッドマッチングとは、マッチングを行う際に元のデータよりもピクセルサイズの大きいレイヤーを作成する。そして最もピクセルサイズが大きいレイヤーから小さいレイヤーへと順にマッチングを行うことによって通常よりも少ない探索回数でマッチングを行うことが出来る手法である（第 3 章の図 3.7）。ここで環境側センサから得られた背景情報（静止物）と車載センサから得られた地図情報から、一致する計上の特徴を重ね合わせることで座標系を統合する。また GPS データは、マッチングを行う際の初期値として利用される。マッチングでは台車の X 座標, Y 座標, 向きの 3 つの変数を変化させていく。各変数について 3 回ずつ値を変化させるため、各ピクセルサイズのレイヤーにおいて 9 回、環境側センサと車載センサの重ね合わせを行うこととなる。

5.2 移動体の経路予測の概要

数秒後の移動体の経路を予測することで、移動体との衝突箇所を検知し、ドライバーに注意を喚起することができ、ドライバーの事故防止に役立てることができる。具体的には、第 2 章で述べた追跡処理によって得られた軌跡の位置情報、時間情報をもとに以下の手順で移動体の経路予測を行った。

5.3 移動体の経路予測手順

具体的には以下の手順で移動体の経路を予測した。

Step1 第 2 章の手法より、移動体の軌跡の情報からある時刻 t 、及び位置 (x,y) を取得

Step2 Step1 の情報より、過去 50 フレーム分 (0.025 秒) の平均速度 \bar{V} を算出

Step3 Step2 で算出した平均速度 \bar{V} に、求めたい時間後 t (今回は 2 秒後, 4 秒後) を乗じて、予測位置 L_t を算出する。なお 2 秒後, 4 秒後の値は任意に設定した。

$$L_t = \bar{V} \times t \quad (5.1)$$

第6章 本手法の適用結果

以上の提案手法を実証するために以下の二つの実証実験を行った。一つ目の実験は、2008年12月に東京大学駒場キャンパスの正門前で、環境側センサと車載センサの統合の実験を行った。二つ目の実験は、2009年9月に東京大学柏キャンパスで実験を行った。本章ではそれぞれの実験概要について以下で詳しく述べる。

6.1 東京大学駒場キャンパスにおける実験概要

使用機器・実験場所

2008年12月、東京大学駒場キャンパスのT字路にて実走実験を行い提案技術の実証を行った(図6.1の左図)。今回、計測を行った範囲は東京大学の周辺の道路(約200m×600m)である。使用したレーザスキャナは車載センサが2台、環境側センサは8台である。また、検証用に自動車にCCDカメラを搭載し、交通状況を撮影した。

実験内容

実験は車載センサを載せた自動車で、東京大学正門を出発点・終点とし、正門からJR代々木上原駅の周辺を一周(一周約5分、平均時速50km)で走行した。交通状況は混雑しておらず、スムーズに走行ができた。また、正門前の交差点に図6.1のように8台の環境側センサを設置し、交差点の自動車、自転車、歩行者の挙動を検知した。図6.3にデータ計測時の周辺の様子を示す。

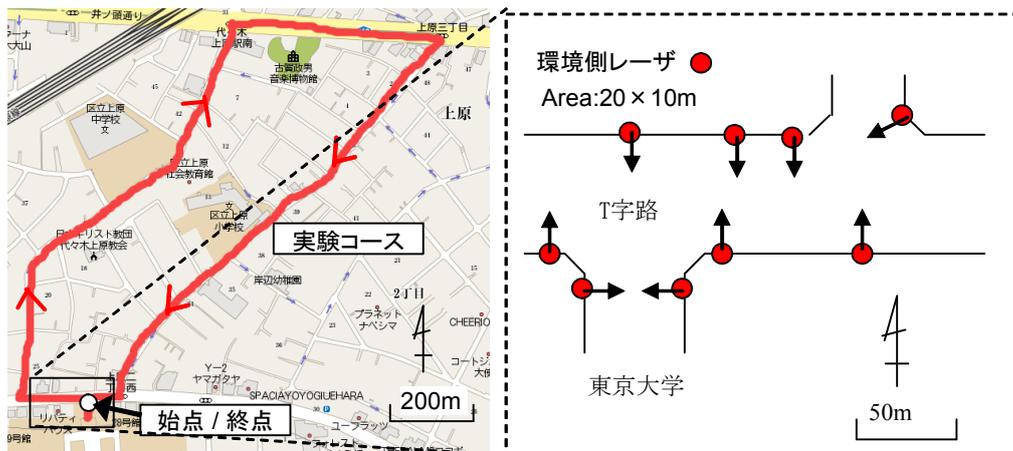


図 6.1 実験場所

(a)実験の走行コース全体(左)

(b)実験の始点/終点のレーザ設置図(右)



図 6.2 各センサの設置の様子
 (a)環境側センサの設置の様子 (左)
 (b)車載センサの設置の様子 (右)

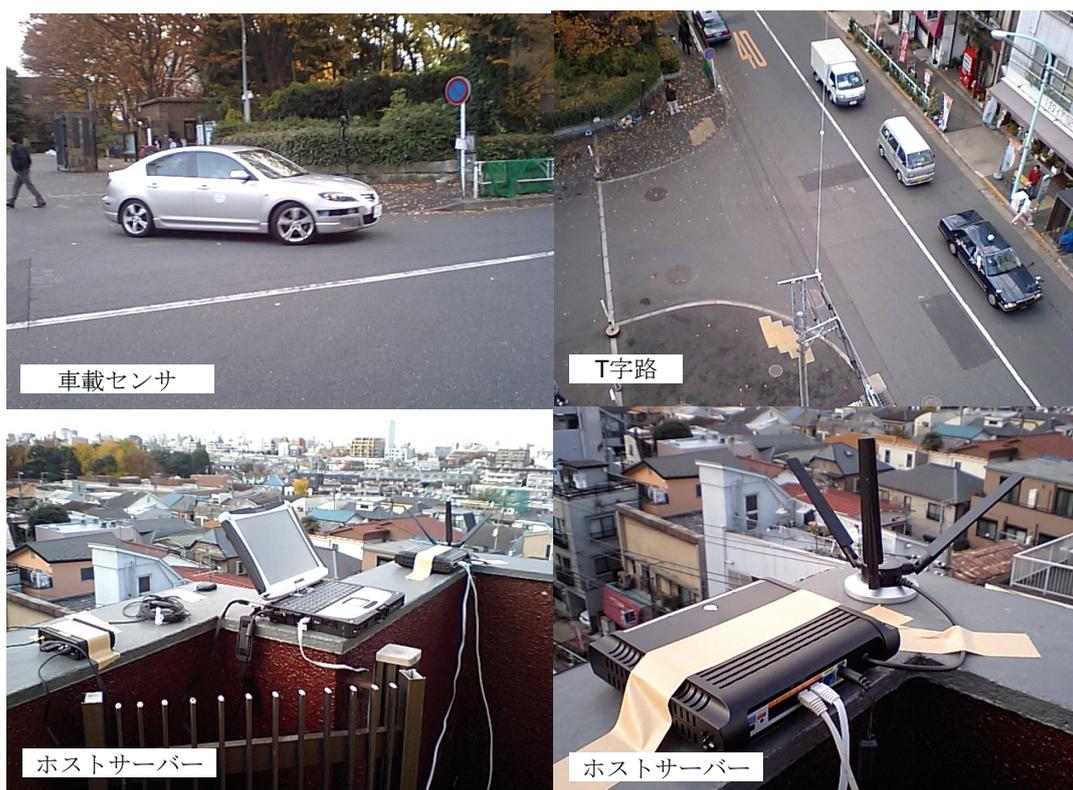


図 6.3 実験の様子

6.1.1 座標系統合の結果

実験により計測されたデータに本論文の手法を適用した結果を以下に示す．交差点に設置した 8 台の環境側センサより背景地図の図 6.4 の右図を作成した．図 6.4 の右図は左図と比較しても，道路の外郭を描画出来ていることが分かる．次に作成した背景地図をもとに図 6.5 のようにマップマッチングを行う（第 3 章参照）．ここで図 6.5 の黒色の背景は，環境側センサにより作成した背景地図，青色の背景は車載センサより作成した背景地図を示している．このマップマッチングを用いることで環境側センサと車載センサの座標系を統合することができる．また図 6.6 の左図は環境側センサで得られた情報，右下図は車載センサより得られた情報，右上図は車載カメラから見える映像である．これらの環境側センサと車載センサの情報をマップマッチングによって統合した結果が図 6.7 である．図 6.7

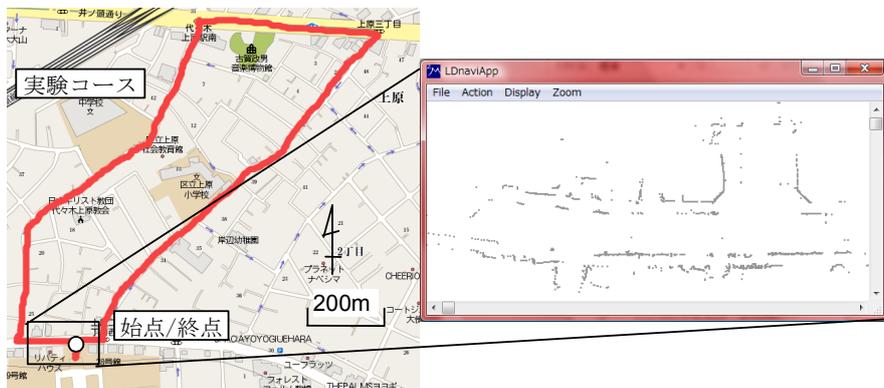


図 6.4 T 字路に設置した環境側センサより背景地図を作成

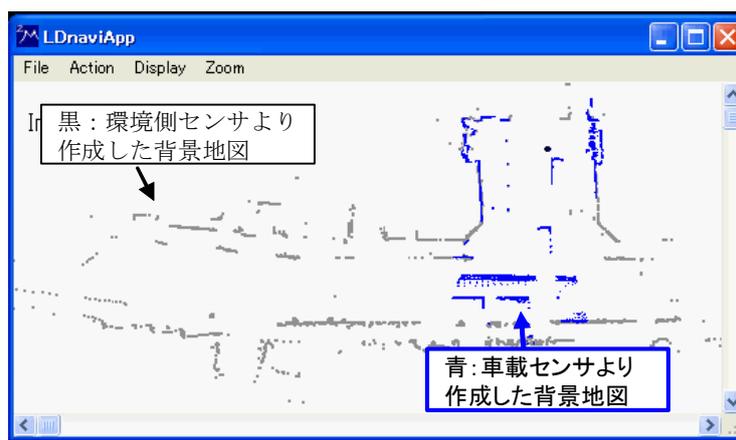


図 6.5 マップマッチングによる環境側センサと車載センサの座標系の統合

は交通状況のある時刻を表しており，直線は道路の外形，四角形は自動車をそれぞれ示している．また，緑色の点は環境側センサで得られたデータ，赤色の点は車載センサより得

られたデータである。なお、本研究で開発したシステムは連続的に交通状況を把握することが出来た。自動車や自転車、歩行者などの移動体と、壁や道路側面などの静止物を自動的に判別することもできた。

6.2 駒場キャンパスの実験の考察

本実験では、開発したシステムにより、環境側センサから得られたデータと車載センサから得られたデータの座標系の統合に成功した（図 6.7）。座標系の統合を行うことで、交差点など見通しのわるい場所で、自動車・自転車・歩行者が来ていることが検知できる。図 6.8 はある時刻の T 字路の状況である。上図では自車からは対向車の状況を把握できないが、環境側センサによって対向車の位置を検知できている。そのためその対向車の情報をドライバーに事前に知らせることで、ドライバーは危険を予測することができる。また図 6.8 上図の 3 秒後の映像を下図に示す。以上より、座標系の統合をする有用性が実験より実証された。このような座標を統合する試みは、これまでの研究事例はまだ殆ど見られず、本研究成果の意義は大きい。一方で、車載センサは地面と水平に照射するため、凹凸のある坂道では地面を障害物として読み込んでしまうなどの課題も残る。またドライバーの危険を喚起するため、予めドライバーや対向車の移動経路を予測することが望ましい。そのため、次に東京大学柏キャンパスにおいて実験を行い（次項で説明）、移動体の経路予測をするシステムの構築を行った。



図 6.6 環境側センサと車載センサのそれぞれの情報



図 6.7 環境側センサと車載センサの統合結果

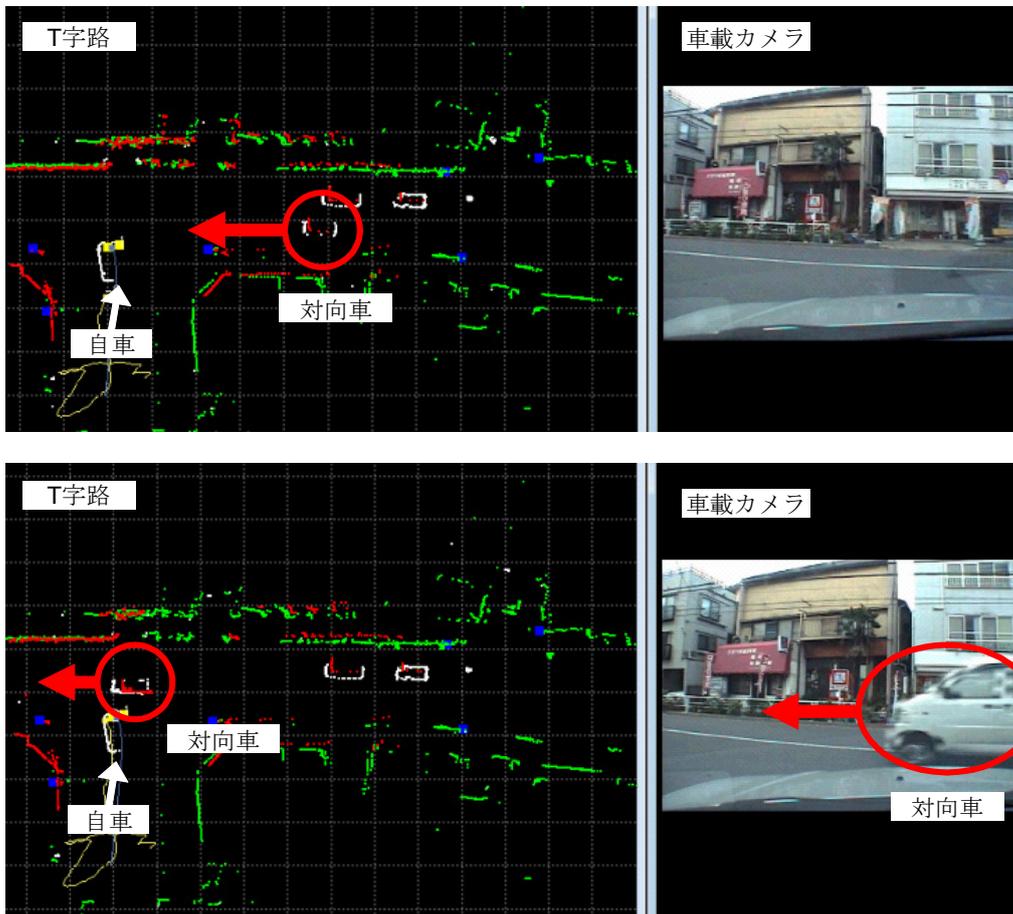


図 6.8 環境側センサと車載センサの統合結果
 (a)ある時刻の自車と対向車の位置 (上)
 (b)ある時刻から 3 秒後の自車と対向車の位置 (下)

6.2 東京大学柏キャンパスにおける実験概要

使用機器・実験場所

2009年9月5日、東京大学柏キャンパス内の総合研究棟において実験を行った（図6.9上図）。実験の目的は、ドライバーの危険を喚起するため、予めドライバーや対向車の移動経路を予測するシステムの構築である。実験周辺は約30m×50m、使用したレーザスキャナは車載センサが2台、環境側センサは5台である。なお環境側センサの一台は検証用として使用した。また、検証用に環境側にCCDカメラを一台搭載し、移動体の全体像を撮影した。同様に台車にもCCDカメラを一台搭載し、ドライバーから見える映像を再現した。

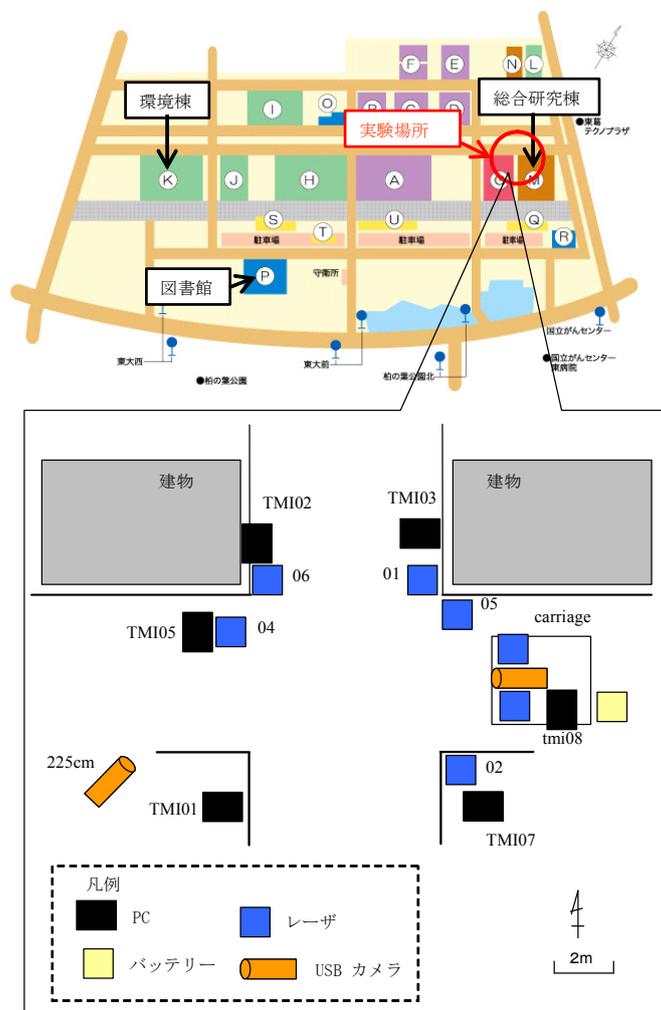


図 6.9 実験概要図

(a)東京大学柏キャンパス地図（上）

(b)各センサの設置図（下）

そしてそれぞれのセンサを図 6.9 のように配置し実験を行った。

実験内容

実際の交通事故を再現するため、図 6.12 のようにドライバーの死角から歩行者・自転車の移動体が現れる状況をつくり実験を行った。なお、本実験は台車にレーザスキャナを載せ、それを自動車とみなし移動させた。図 6.11 に示すように台車を後方から手で押して計測を行った。また環境側に図のようにレーザを設置した。実験は以下の実験ケース 1～2 の 2 パターンの実験を行った。以下でそれぞれ説明する（図 6.12～図 6.13）



図 6.10 使用した台車



図 6.11 実験の様子

1) 実験ケース1

実験ケース1では、歩行者、自転車などの移動体が図6.12のように①、②の方向に左右に動くケースで行った。同時に台車が矢印の下方の向きに移動し、各移動体と台車が交差するように動く。また図6.11のように移動体が一列に並んで動くケースも行った。移動速度は、遅い・普通・早い、の三つの速度で実験を行った。同様に移動体が、a)歩行者、b)自転車という2パターンで実験を行った。

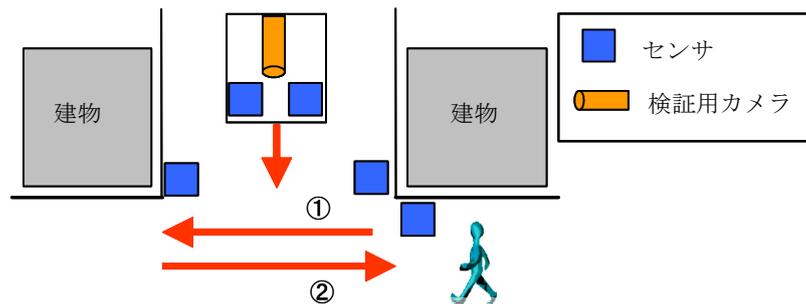


図 6.12 ケース1の概要図

2) 実験ケース2

実験ケース2では、歩行者、自転車などの移動体が図6.13のように①、②の方向に左右に動くケースで行った。同時に台車が矢印の下方の向きに進み、左折し、各移動体と台車が交差するように動く。また図6.11のように移動体が一列に並んで動くケースも行った。移動速度は、遅い・普通・早い、の三つの速度で実験を行った。同様に移動体が、a)歩行者、b)自転車という2パターンで実験を行った。

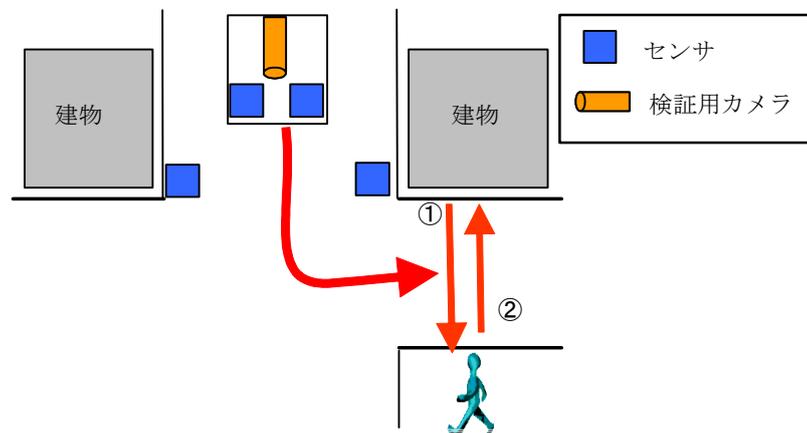


図 6.13 ケース2の概要図

6.2.1 移動体の抽出結果

クラスタリング

本実験では第 2 章で提案した手法で、歩行者と自転車のクラスタリング（識別）を行った。以下にそれぞれの結果を示す。ここで赤色の枠は自転車、白色の枠は歩行者を表している。図 6.14 の左図は、歩行者が密集しているため、それら群集を一つの移動体としてみなし、誤認識している。また図*の右図は、歩行者を自転車として誤ってクラスタリングしている。

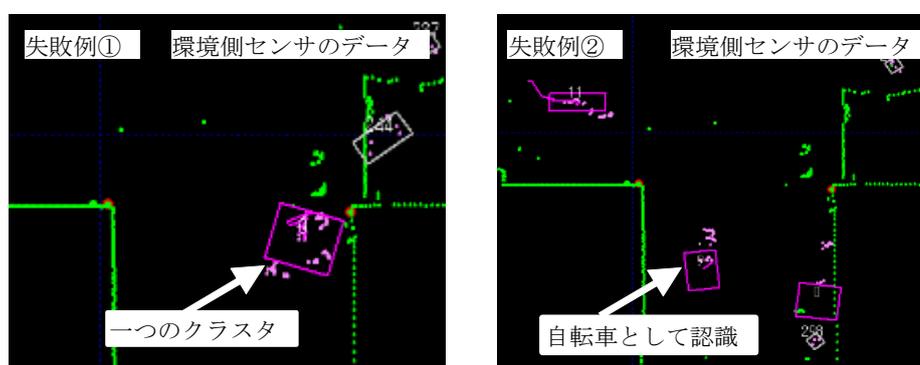


図 6.14 クラスタリング失敗例

- (a)人の群集を一つの移動体をして誤認識した例（左）
- (b)歩行者を自転車として誤認識した例（右）

よって歩行者，自転車，自動車と識別する手法は用いず，第 2 章の手法より，歩行者に絞り移動体の追跡を行った。以下に結果を載せる。

追跡結果

第 2 章で紹介した手法により，各移動体の追跡を行い，図 6.15 のように各移動体の軌跡を得ることができた。しかし歩行者は追跡ができるものの，自転車は二人の歩行者として誤認識してしまう。そのため，本解析は歩行者のみが移動しているケースに着目し，解析を行った。

6.2.2 座標系の統合結果

実験により計測された環境側センサと車載センサのデータをもとに，それぞれの座標系を統合した。その結果を図 6.16 に示す。ここで図中の緑色の部分は背景を表し，赤色の部分は車載レーザより得た結果である。また図中央の黄色は車載レーザを表している。図 6.16 では車載センサから歩行者の位置は検知できないが，環境側センサと車載センサの座標系

を統合することで、車載センサからは死角である移動体の情報を検知できることが分かる。

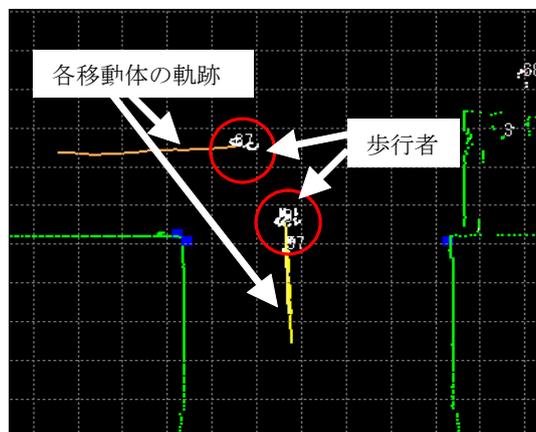


図 6.15 歩行者の追跡

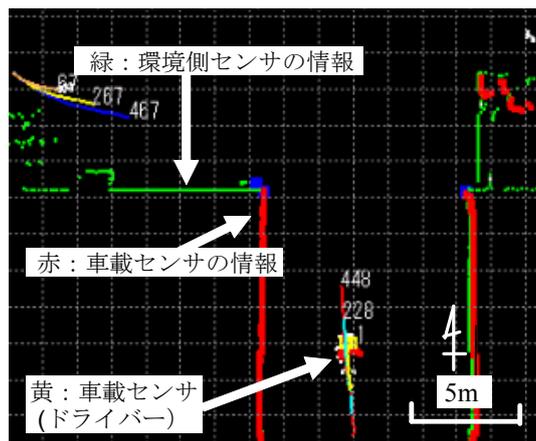


図 6.16 環境側センサと車載センサの座標系統合

6.2.3 移動体の経路予測結果

2 秒後, 4 秒後予測位置の描画

移動体の軌跡の出力結果をもとに, 第 5 章の移動予測経路の算出手法により移動体の 2 秒後, 4 秒後の行動を以下のように予測した. 以下のケースは歩行者が自動車 (台車) の死角から歩いてくる状況である. ここで丸印の茶色, 緑色, 黄色はそれぞれ, 移動体の現在位置, 2 秒後の位置, 4 秒後の位置を表している. ここで 2 秒, 4 秒という値は, 科学的な裏づけがあるものではなく任意の値として決めた.

1) ケース 1

歩行者が図中の左方から (台車の死角から) ゆっくりと歩いてくるケースを取り上げる.

経路の予測結果

ここでは, ①歩行者の 4 秒後の予測結果と実際の移動経路でそれぞれ同じ軌跡をたどる, ②歩行者と台車のそれぞれの予測位置と, 実際の位置のそれぞれの位置の差がほぼ等しい, 点が挙げられる.

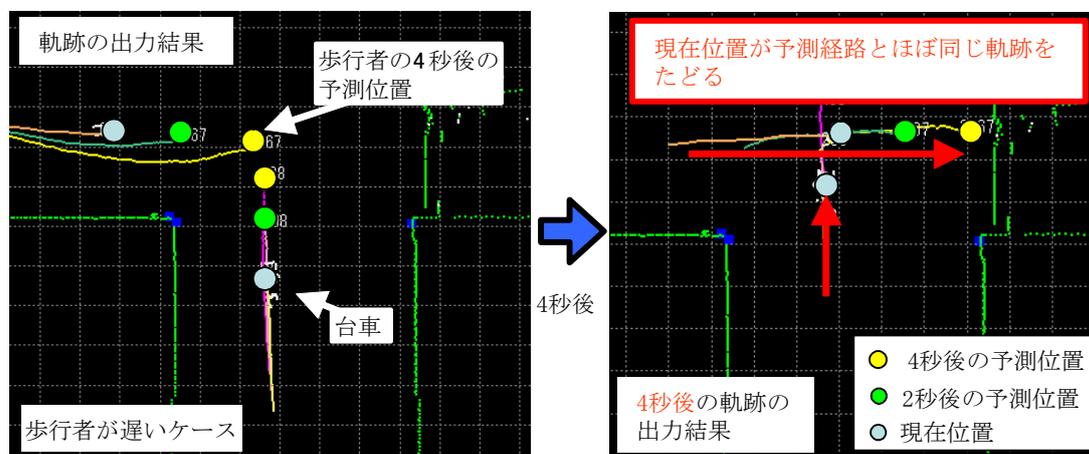


図 6.17 歩行者の予測位置

(a)ある時刻の歩行者と台車の位置 (左)

(b)ある時刻から 4 秒後の歩行者と台車の位置 (右)

考えられる理由

このように予測経路の精度が高い理由として, 以下の点が考えられる. ①歩行者の移動速度が遅いため, 急に歩行者が経路を変えるなど, 過去の経路とは大きな変動がなく移動

したと考えられる。②歩行者が加速せず，等速に動いている。そのため過去の速度から算出した予測経路とほぼ同じ経路をたどった。このように移動体の移動速度が遅い場合は，移動体の経路をある程度正確に予測することができる。例えば高齢者などは移動速度が遅いため，経路を予測しやすいと考えられる。

2) ケース2

歩行者が図中の左方から（台車の死角から）走るケースを取り上げる。

経路の予測結果

ここでは図 6.18 のように，以下の二点の結果を得た。①2 秒後の予測結果では，歩行者と台車は衝突するが，実際は衝突しない。②歩行者の 2 秒後，4 秒後の予測結果と実際の結果で異なる経路を選択した，などの点が挙げられる。

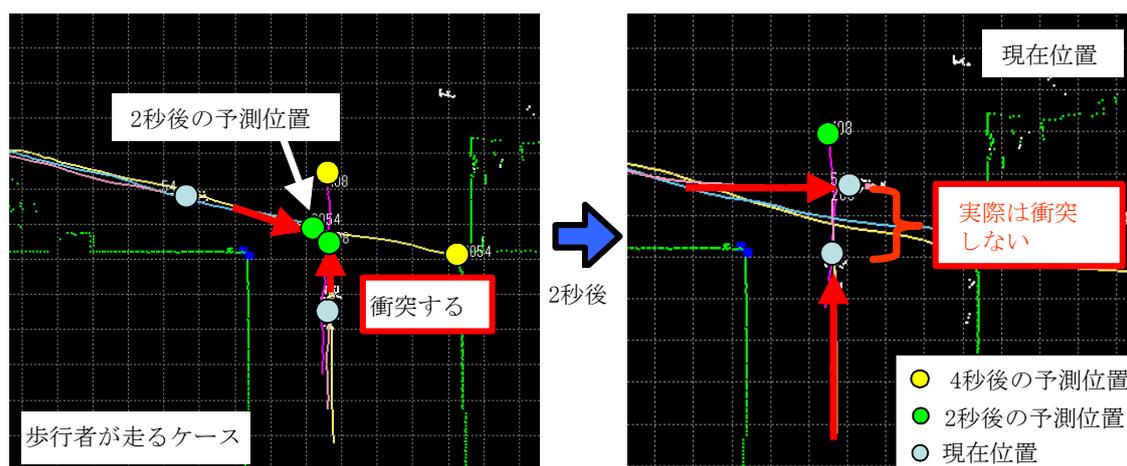


図 6.18 歩行者の予測位置

(a)ある時刻の歩行者と台車の位置（左）

(b)ある時刻から 4 秒後の歩行者と台車の位置（右）

考えられる理由

以上の結果になった理由として，以下の点が考えられる。①移動体は加速しているため，等速で計算している予測経路と異なる経路になった，②移動体が台車を見て，経路を変更した，などの理由が考えられる。今回のケースのように移動体の移動速度が速い場合，将来の経路を予測することは難しくなる。また以上の結果より，2 秒前にドライバーに危険を喚起できれば，経路を変更し事故を回避できることがわかる。

6.2.4 車載カメラでの描画

以上の予測結果を第 4 章で紹介した幾何学的キャリブレーション方法によって、車載カメラ上に描画した。以下が開発したアプリケーションの概要図である。また現在位置を描画すると共に、2 秒後、4 秒後の移動体の位置もカメラ上に描画した。ここで図 6.19 の左図は環境側センサ、車載センサより得た情報を表し、右図は車内から見た映像である。環境側センサ、車載センサより移動体の 2 秒後、4 秒後の経路を予測し左右二つの画面に描画した。ここでこれら二つの映像は時刻同期しており、同時に二つの画面を見ることができる。右図では自転車からは移動体の現在位置（赤枠）を検知することはできないが、センサの情報より、死角の移動体の位置を知ることができる。

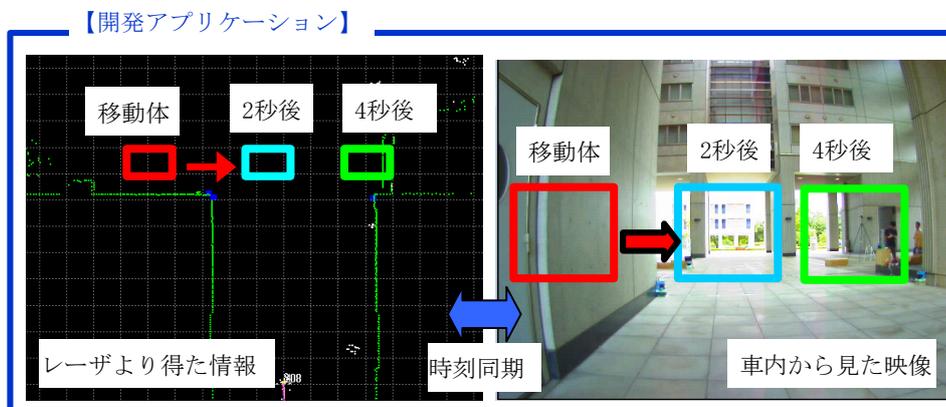


図 6.19 開発アプリケーションのイメージ図

- (a)レーザより得た情報（左）
- (b)車内から見た映像（右）

ここで図 6.20 に実際の解析結果を示した。左図はレーザより得た情報で、右図は車載カメラから見た映像である。これらの画面は時間が同期しており、同時に見ることができる。左図はレーザから得た情報をもとに移動体の経路を予測した図である。ここで左図中の赤点、青点、黄点はそれぞれ自転車の 4 秒後の予測位置、2 秒後の予測位置、現在位置を表している。また右図中の赤枠、緑枠はそれぞれ自転車の 4 秒後の予測位置、2 秒後の予測位置を表している。図 6.20 の (a) はある時刻の歩行者と自転車の位置、(b) はある時刻から 2 秒後の歩行者と自転車の位置、(c) はある時刻から 4 秒後の歩行者と自転車の位置を表している。ここでは、環境側レーザより移動体の情報を得ることができるため、車載カメラからは死角である移動体の情報をドライバーが得ることができる。また 2 秒後、4 秒後の予測位置も同時にわかるため、予め移動体の経路を予測しドライバーに注意を喚起することで、衝突防止に役立てることができる。

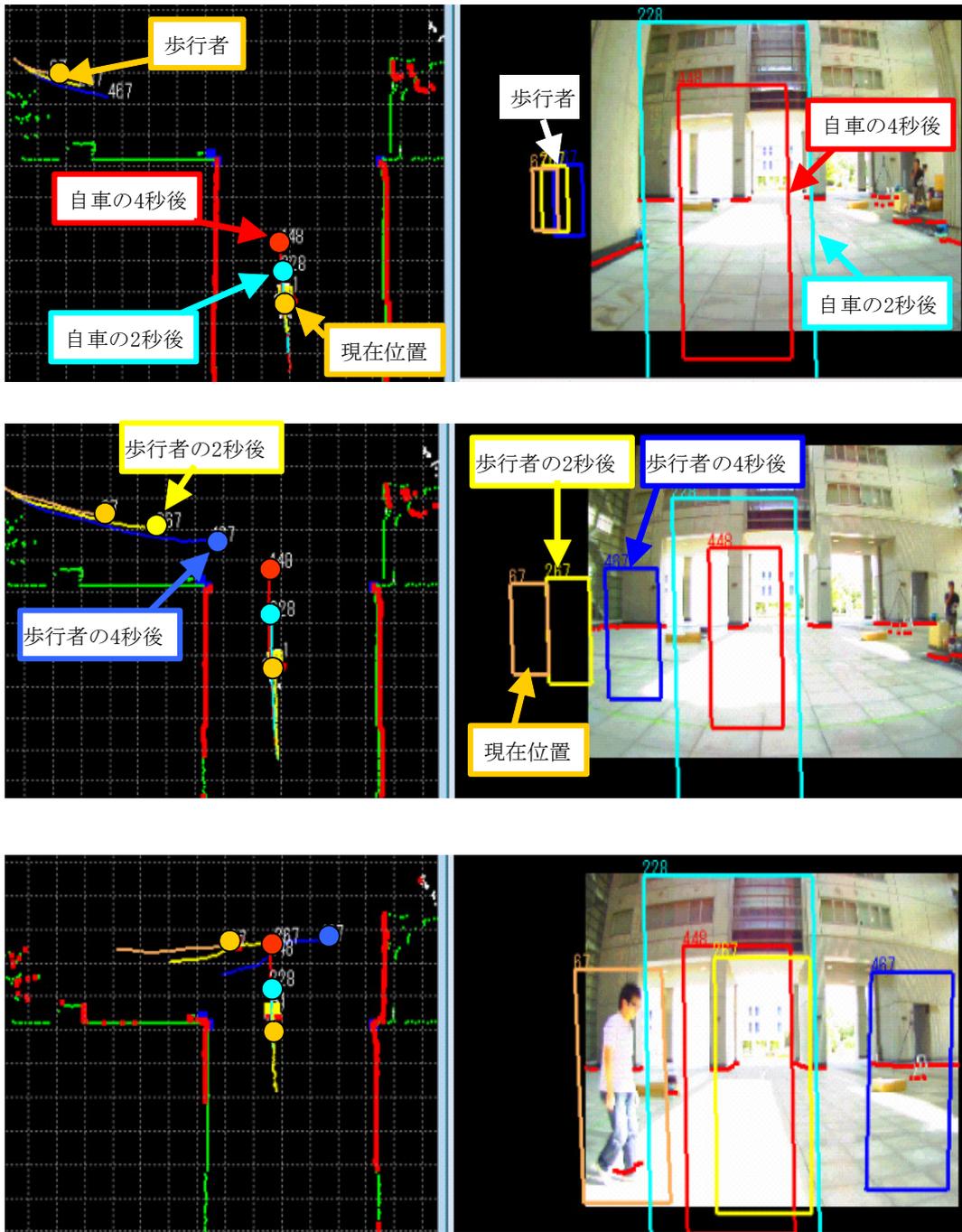


図 6.20 開発したシステムの結果

(a)ある時刻の歩行者と自車の位置 (上)

(b)ある時刻から 2 秒後の歩行者と自車の位置 (中)

(c)ある時刻から 4 秒後の歩行者と自車の位置 (下)

6.2.5 柏の葉キャンパスの実験の考察

本実験では、環境側センサで得た情報と車載センサで得た情報を統合し、台車から死角の移動体の位置を車載カメラの映像上に投影した。また各移動体の2秒後、4秒後の経路を予測し、同様に車載カメラの映像上に投影した。

この結果を応用させると、例えば見通しの悪い交差点において、建物で死角になる場所から突然出てくる歩行者・自動車など、建物を透視するなどして、事前に検知することができる。また移動体の経路を予測することで、移動体と自車の衝突位置を確率的に算出することができる。そのため交通事故の危険度を予めドライバーに知らせることが可能となる。

また本実験で開発したシステムにより、このような危険度をドライバーに知らせるシステムの開発の基礎を築くことができた。

一方で、現状のシステムは歩行者のみを対象としている。そのため今後は実用化に向け自転車や自動車の識別をし、経路を予測するシステムの構築を目指す。例えば交差点で連続的にデータを取ることで自動車の移動経路の軌跡を蓄積し、その過去の軌跡の傾向より、自動車の経路の予測を行うシステムの開発など行うなどが考えられる。

第7章 結論

7.1 本研究の成果

本論文は、レーザスキャナを用いた自動車の安全運転に対する検知する方法について述べ、車載センサから得られるデータと環境側センサから得られるデータを統合する手法について提案した。本提案手法を東大駒場キャンパス前の一般道路で適用した結果、交差点など見通しの悪い場所で、危険を検知することに成功した。

また東大柏キャンパスで行った実験では、環境側センサ、車載センサより、ドライバーから死角から移動体の現在位置を把握した。同時に2秒後、4秒後の移動体の経路の予測を行い、カメラ上に示すことができた。この結果を応用させると、例えば見通しの悪い交差点において、建物で死角になる場所から突然出てくる歩行者・自動車を建物を透視するなどし、検知することができる。また2秒後に歩行者と衝突するなどといった交通事故の危険度を事前にドライバーに知らせることができる。

一方で、現状のシステムは歩行者のみを対象としている。そのため今後は実用化に向け自転車や自動車の識別をし、経路を予測するシステムの構築を目指す。例えば交差点で連続的にデータを取ることで自動車の移動経路の軌跡を蓄積し、その過去の軌跡の傾向より、自動車の経路の予測を行うシステムの開発など行うことが考えられる。また今後は上記の点を改良し、実用化に向けてリアルタイムに対応したシステムを構築していく。

以下、本論文を構成する各章について、その成果をまとめる。

(第2章)

第2章では、本研究で使用した環境側レーザスキャナにおける概要を説明し、移動体の検知手法、歩行者の追跡手法、クラスタリングの手法を提示した。また歩行者の追跡の結果やクラスタリングの結果について説明した。

(第3章)

第3章では、本研究で使用した車載レーザスキャナにおける概要を紹介した。また東京大学駒場キャンパスで行った実験で使用した車載レーザスキャナ、また東京大学柏キャンパスで行った実験で使用した車載レーザスキャナについてもそれぞれ説明した。次にSLAMにおける自車の位置推定の手法を説明した。

(第4章)

第4章では、座標系統合の手法、及び移動体の経路予測の手法について説明した。次にカ

メラの幾何学的キャリブレーションについて説明した。

(第5章)

第5章では、東京大学駒場キャンパスで行った実験及び東京大学柏キャンパスで行った実験について述べた。ここでは各実験に対して、第4章で述べたマップマッチングという手法により環境側センサと車載センサの座標系の統合を行い、その結果を示した。各結果ともドライバーからは死角である移動体の位置を知ることができ、その有用性を実証した。また柏キャンパスで行った実験のデータをもとに、移動体の2秒後、4秒後の経路の予測を行った。移動体がゆっくりと動いているときの予測結果は比較的良好であった。しかし移動体が早く動いているときは、実際の移動体は予測結果と異なる経路を選択した。これは二つの理由が考えられる、一つは、移動体が加速していたため、過去の速度をもとにしてある予測結果と異なる結果になった。二つ目は、移動体が台車を見て移動経路を変更したため、予測結果と異なる結果になった。

7.2 今後の方向性

本研究の適用分野

本手法の検証実験は、東京大学駒場キャンパスの玄関前や東京大学柏の葉キャンパス構内など比較的、自動車や歩行者の行動の予測が行いやすい場所で行った。そのためこのような状況においては移動体の進む方向が右か左の 2 通りといったように行動に限りがある。例えば東京大学駒場キャンパスの玄関前の T 字路の実験では、自動車の進む方向が右か左の 2 通りであったため、自動車の経路の予測が比較的しやすい状況であった。そのため今後はより実社会に適用したシステム構築のため、交通事故が多く、見通しのわるい交差点などで移動体の経路予測の検証実験を行う必要がある。

また東京大学柏の葉キャンパスの実験では、見通しの悪い状況をつくり、移動体がドライバーの死角から突然出てくるという状況を想定し、実験を行った。そのため本実験は、見通しの悪い交差点という実社会に近い状況をつくり、実験を行うことができた。

本手法においては、レーザスキャナによる追跡を基本としているために広域において移動体の位置や動線そのものの取得が可能である。そしてそれらの情報をもとに移動体の将来の位置や経路を予測することができる手法を提示した。この手法を実社会に応用させると、例えば見通しの悪い交差点において、建物で死角になる場所から突然出てくる歩行者・自動車を建物を透視するなどし、検知することができる。また 2 秒後に歩行者と衝突するなどといった交通事故の危険度を事前にドライバーに知らせることができる。この際にドライバーへ危険を知らせる方法として、建物の透視や、危険を音で知らせるサービスなど、様々な方法が考えられる。

今後は実社会の実用化に向け、今回の実験以上に広域かつ交通量の多い交差点などで本手法の有効性を示すことが今後必要であると考ええる。

技術的な改善点

本研究の技術的な改善点として、①クラスタリングの評価の向上、②SLAM の位置推定の精度向上、③移動体の経路予測の向上、④リアルタイムの構築を目指す、などがある。具体的に以下にそれぞれ示す。

1) クラスタリングの評価の向上

本提案手法におけるクラスタリング手法は、移動体が単体で移動している際は、クラスタリングの精度はよい。しかし歩行者が一行で歩いているなど密集している際には歩行者の集まりを一つの移動体として認識してしまう。今後は以上の点を改善し、実用化に向けより移動体が密集した場所でも適用できるシステムの構築を行う。

2) SLAM の位置推定の精度向上

東大駒場キャンパス及び東大柏キャンパスで行った二つの実験において、本研究で開発した SLAM を適用した。これらの二つの実験では SLAM の処理を行う際に必要な目立つ場所があるため、SLAM の精度は図のように良い。しかし実用化を考える際に、幅が広い交差点などでは、SLAM の処理を行う際に必要な特徴を見出せないため、SLAM の精度が悪くなることが予測される。よって道路幅が広い状況でも適用できるように精度を向上させる必要がある。

3) 移動体の予測結果

本研究では、まず移動体の速度ベクトルを算出し、その速度ベクトルに対して時間を乗じて、その時間後の移動体の予測位置を算出した。今後は、交差点など交通量の多い箇所を実験を行い、それらの移動体の軌跡を蓄積し、過去の軌跡より確率的に予測経路を算出することが求められる。

4) リアルタイムの構築を目指す

本研究では、処理は全て後処理で行った。今後は実用化に向けリアルタイムに対応したシステムを構築していく。

参考文献

- [1] Durrant-Whyte, H., Bailey, T.” Simultaneous localization and mapping” Part 1, IEEE Robotics & Automation Magazine, vol.13, issue 2, pp.99-108, 2006.
- [2] Bailey, T.” Durrant-Whyte, H., Simultaneous localization and mapping” Part 2, IEEE Robotics & Automation Magazine, vol.13, issue 3, pp.108-117, 2006.
- [3] Thrun, S., et al.” FastSLAM: An efficient solution to the simultaneous localization and mapping problem with unknown data association” Journal of Machine Learning Research (to appear).
- [4] Ramos, F. T., Nieto, J., Durrant-Whyte, H.F. ” Recognizing and modeling landmarks to close loop in outdoor SLAM” Proc IEEE IEEE International Conference Robotics Automation, pp.2036-2041, 2007.
- [5] Bailey, T.” Mobile robot localization and mapping in extensive outdoor environment,” Ph.D. dissertation, Univ. Sydney, Australian Ctr. Field Robotics, 2002.
- [6] Newman, P., Cole,, D., Ho, K., ” Outdoor SLAM using visual appearance and laser ranging” Proc. IEEE International Conference Robotics Automation, 2006.
- [7] Hahnel, D., Burgard, W., Fox, D., Thrun, S., “An efficient FastSLAM algorithm for generation maps of large-scale cyclic environments from raw laser range measurements,” Proc. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2003.

- [8] Huijing Zhao, Chiba, M., Shibasaki, R., Xiaowei Shao, Jinshi Cui, Hongbin Zha, “SLAM in a dynamic large outdoor environment using a laser scanner” , ICRA2008, pp. 1455-1462, 2008.
- [9] Huijing Zhao, Shibasaki, R. “A Novel System for Tracking Pedestrians Using Multiple Single-Row Laser-Range Scanners” , IEEE TRANSACTIONS ON SYSEMS, MAN, AND CYBERNETICS, Vol. 35, No. 2, pp. 283-291, 2005.
- [10] Tarak Gandhi, Mahan M Travel, “Pedestrian Collision Avoidance Systems: A survey of computer vision based recent studies” , IEEE International Conference ,2006.

謝辞

多くの方々のご協力があり、この修士論文の執筆を行うことが出来ました。皆様への感謝の気持ちを込めて、ここにお礼の言葉を述べさせていただきます。

指導教官である柴崎亮介教授には、ご多忙を極める中、多くのアドバイスをいただき、研究を進める上での大きな手がかりとなるだけでなく、研究に対する楽しさを知ることができました。また、国内海外でご活躍される柴崎教授の姿をみて、人と同じことを敢えてやらず、人の通らない道を切り開く重要性、人と違うアプローチでものを考える事の重要性を学びました。そして若輩者であるにもかかわらず企業との重要な打合せに参加させて頂き、大学の中だけでは味わえない産学連携の喜びを感じることができ、そのなかで企業や大学の研究をつなげていくコミュニケーション能力、視野を広くもつことの重要性を学びました。国際学会では、海外の多くの優秀な学生に会うことができ、自分自身の英語力や研究に対する姿勢を改めて考えるきっかけとなり、大いに刺激を受け、大変貴重な機会でした。

副指導教官・副査をご担当していただいた佐久間哲哉准教授には本研究に関する貴重なご意見をいただき、広い視点から研究の完成度を高めることが出来ました。深く感謝しております。

北京大学の趙卉菁教授には、研究に関して非常に貴重なアドバイスをいただきましたことを深く感謝しております。また北京大学に訪問した際にも、温かく迎えてくださり、非常によい思い出として残っています。またいつも笑顔で丁寧に研究のアドバイスをしてくださるなど、人柄も大変尊敬できる人物であり、本当に様々なことを勉強させていただきました。心より感謝しております。

柴崎研究室の邵肖偉助教には、クラスタリングやテンプレートマッチングに対する様々なアドバイスをいただきました。また実験や研究においても、いつもの確かなアドバイスをくださり、大変心強く思っていました。その妥協を許さない姿勢に非常に感銘を受けました。

以上の先生方からのご指導は、私の人生において非常に貴重な財産として残っています。厚くお礼申し上げます。

マツダ株式会社の千葉正基氏、株式会社アイ・トランスポート・ラボの堀口良太博士とは、私の研究テーマについて議論を行うことができました。交通の分野の専門家からの的確なアドバイスは非常に勉強になりました。また大学の研究と実社会をつなぐ場にいれたことは私にとって、非常に素晴らしい経験となりました。深くお礼申し上げます。

柴崎研究室博士課程の帷子京市郎氏には、二年間、私の研究を全面的にサポートしていただきました。また、本研究で行った実験においてもハード・ソフト両面からご協力をい

ただきまたした。帷子氏の研究に対する姿勢や、研究を丁寧に教えてくださり、非常に感銘を受けました。ご卒業され、離れてしまいますが、近い将来またお会いできるのを楽しみにしています。心より感謝しております。

段玉林氏、岡田尚樹氏、中村敏和氏は、同じレーザーチームということもあり、実験に協力していただくなど、様々な場面でサポートしていただきました。深くお礼申し上げます。非常に優秀なメンバーに囲まれて2年間を過ごせたことを幸せに思います。

また同期の古賀隆之氏、吉田雄太郎氏とも公私ともに交友を深めることができ、非常に感謝しております。

柴崎研究室秘書の木田ミキさん、秋枝久美子さん、小堀かおるさんには出張手続きや経理手続きなど研究を円滑に行う上で多大なサポートをいただきました。

柴崎研究室メンバーの皆様には、様々な行事や研究室生活においてお世話になりました。柴崎研究室における2年間の研究生活を楽しく、そして実りのある日々を送ることが出来たのも、皆様のおかげであると考えています。

最後に、精神面・経済面の両面において支えとなり、不自由なく研究を行うための環境を与えてくれた両親に心より感謝致します。

2010年1月25日

広瀬 久也