

千葉市民のための安全・安心な歩道空間を活用した パーソナルモビリティ等自動運転の実現に向けた研究

平成 30 年 3 月
千葉市・千葉大学

要約

本報告書は、千葉市と千葉大学との共同研究事業として平成29年度に実施された「千葉市民のための安全・安心な歩道空間を活用したパーソナルモビリティ等自動運転の実現に向けた研究」の成果である。

本市の目指すパーソナルモビリティシェアリングサービスを実現する上で最も重要なことは安全確保であるが、現状ではその基準がないことから、本研究を通じてパーソナルモビリティの自動走行を安全に実施するための一定の要件の整理、必要となる規制改革事項の洗い出しを行うことを目指して1年間にわたって実証実験等を行った。

第1章では、本研究の背景がまとめられている。また、千葉市のこれまでの動向についても示している。

第2章では、本研究の目標、方法及び実施体制を示している。

第3章では、本研究の実施内容及び結果がまとめられている。各々の実証実験の結果及び考察、得られた問題とその対策のための提案等を示している。

そして、第4章において、本研究の成果を踏まえた政策提言を行っている。

本研究は、本市の目指すパーソナルモビリティシェアリングサービスの実現に必要な自律走行に関する様々な技術的課題の洗い出しと、パーソナルモビリティの社会受容性の向上に資するものであった。

今後、将来的な事業化を実現するためには、自律走行の実証実験を積み重ねるとともに、産官学連携等による検討体制の構築及び具体的な利用を想定したモデル事業実施など、更なるビジネスモデルの検証が必要である。

目次

1	共同研究に取り組む背景.....	1
(1)	幕張新都心の成り立ち.....	1
(2)	2020年東京オリンピック・パラリンピック開催とユニバーサル未来社会 の実現.....	1
(3)	国家戦略特区を活用した新たな規制緩和.....	1
2	共同研究の目標等.....	2
(1)	研究に係る行政課題.....	2
(2)	研究目標.....	2
(3)	研究方法.....	3
(4)	研究体制.....	3
3	共同研究の実施内容・結果.....	3
(1)	実証実験の場の確保、地域住民への理解促進.....	3
(2)	自律走行の基本性能の検証と3次元地図の作成.....	4
(ア)	実験条件.....	4
(イ)	実験詳細.....	6
(ウ)	問題に対する考察と対策.....	25
(3)	走行エリアごとの回避方法、ロボットのサイズや速度の違いによる安心感等 の検証.....	28
(ア)	追従走行及び夜間での検証.....	28
(イ)	車体の大きさに対する検証.....	31
(ウ)	スロープ等における回避経路計画.....	33
(4)	自動走行に必要な技術検証.....	40
(ア)	横断歩道の検出.....	40
(イ)	歩行者用信号機認識.....	43
(ウ)	信号機の色判別手法.....	50
(5)	ヒヤリハット事例の蓄積及び安全・安心のためのモビリティ用地図の 作成.....	60
(ア)	ヒヤリハット事例と危険エリア.....	60
(イ)	ボラードの自動検出手法.....	61
(ウ)	緊急停止情報の記録.....	65
(6)	利用ニーズの把握、受益者負担の検討.....	69
(ア)	検証の概要.....	69
(イ)	検証結果.....	69

(ウ) 考察.....	7 4
(7) 事業化を想定した取組み及びビジネスモデルの検証.....	7 5
4 まとめ（政策提言）.....	7 6
(1) パーソナルモビリティの技術的課題及び今後の展開.....	7 6
(2) ビジネスモデルの検証.....	7 9
(3) 国家戦略特区を活用した規制緩和の実現に向けて.....	7 9
活動記録.....	8 0

1 共同研究に取り組む背景

(1) 幕張新都心の成り立ち

幕張新都心は、東京都心や成田空港のほぼ中間に位置し、各々へ30分程度という優れた立地条件を有しており、平成29年4月現在、日々約23万人が活動し、年間来街者が約2,700万人にのぼる街である。幕張メッセを核とした国際的な業務機能を集積するなど、「業務研究地区」、「文教地区」、「タウンセンター地区」、「公園緑地地区」、「住宅地区」といった機能ごとのエリア分けによる計画的な整備が進められており、「職・住・学・遊」が融合した未来型の国際都市をコンセプトにまちづくりが進められている。

近年では、観光庁の「グローバル MICE 強化都市」への選定、レッドブル・エアレース千葉の開催、さらには幕張メッセが2020年東京オリンピック・パラリンピックの競技会場に決定するなど、幕張新都心は非常に注目されており、大きな期待が寄せられている。このような中、これからも新たな価値を創造し続けていくことが幕張新都心の「魅力」であり「使命」にもなっている。

(2) 2020年東京オリンピック・パラリンピック開催とユニバーサル未来社会の実現

「日本再興戦略」における改革2020プロジェクト「ユニバーサル未来社会の実現」を推進するため、平成27年9月、文部科学省において「ユニバーサル未来社会推進協議会」が設立された。

あらゆる生活空間でロボットが活躍し、高齢者や障がい者、外国人も含めた多様な者が、ストレスフリーな生活の実現に必要な幅広いサービスを享受するユニバーサル未来社会の実現を目標としており、多くの外国人が訪日する2020年東京オリンピック・パラリンピックの開催期間をショーケースの機会として捉え、多様なロボットが相互に連携してサービスを提供する姿を世界に発信するためプロジェクトを推進している。

本市では、2020年東京オリンピック・パラリンピックが開催される幕張新都心において、近未来技術を活用したまちづくりを推進し、「オリンピック・パラリンピックレガシーの創出」及び「ユニバーサル未来社会の実現」を目的として、平成27年11月に「ユニバーサル未来社会推進協議会」へ参画し、翌年4月に「千葉市幕張新都心ワーキンググループ」を立ち上げ、取組みを推進しているところである。

(3) 国家戦略特区を活用した新たな規制緩和

経済社会の構造改革を重点的に推進することにより、産業の国際競争力を強化するとともに、国際的な経済活動の拠点の形成を促進する観点から、国が定めた国家戦略

特別区域において、規制改革等の施策を総合的かつ集中的に推進することを目的とした国家戦略特別区域法が平成25年12月13日に施行された。

本市は、ドローン宅配や自動運転モビリティに関する規制改革提案を盛り込んだ幕張新都心の中核とした「近未来技術実証・多文化都市」の構築を掲げ、平成28年1月29日、東京圏に追加されるかたちで国家戦略特区に指定された。これまで規制改革メニューの積極的な活用を推進するほか、近未来技術を活用した実証実験を実施するなど新たな規制改革の提案に向け取組みを進めているところである。

2 共同研究の目標等

(1) 研究に係る行政課題

幕張新都心は、先に述べたとおり、機能ごとに計画的に整備されている一方で、施設間に一定の距離があるため、来街者の多くが駅と目的施設との単純往復となっており、街の回遊性に乏しい。拠点間の移動負担が要因の1つと考えられることから、その問題を解決する手段として、パーソナルモビリティシェアリングサービスを実現し、街の回遊性を向上させ、交流人口の増加による賑わいの創出、経済活動の活性化を図りたいと考えている。

本市のパーソナルモビリティシェアリングサービス構想は、平坦で幅員にゆとりのある幕張新都心の歩道空間を最大限に生かし、街の拠点となる施設等に複数ポートを用意し、パーソナルモビリティがシェアサイクルのようにポート間を自由に乗り降り可能であること、スマートフォン等によるパーソナルモビリティの呼び出し、利用者の指定した目的地までの自動走行及び乗り捨てたパーソナルモビリティを自動で回収することなどを目指している。

なお、道路交通法において歩道の走行が認められているパーソナルモビリティ（歩行補助車）の活用を想定しているが、車体の規格や最高速度の制限が定められているほか、「歩行補助車等を通行させている者が当該車から離れた場合には、原動機が停止すること。」と定められており、自動走行が禁止されている。

本市の構想の実現には、これらの規制に対し、国家戦略特区を活用した規制緩和が必要不可欠であり、国家戦略特区に指定された本市だからこそできる取組みである。

(2) 研究目標

本市の目指すパーソナルモビリティシェアリングサービスを実現する上で最も重要なことは、利用者や周囲の人や物の安全を確保することであり、地域住民が安心してサービスを受け入れることができるような基準が必要である。

しかしながら、現状ではその基準がないことから、本研究を通じてパーソナルモビリティの自動走行を安全に実施するための一定の要件を整理し、必要な規制改革事項

の洗い出しを行うことで、地域住民の安全・安心の視点を盛り込んだ国家戦略特区を活用した道路交通法の規制緩和やリスクマップに相当する「パーソナルモビリティのための地図作成」を目指す。

また、事業化に向け利用者の視点に立った調査研究や民間事業者がビジネスとして運営していくため、参入を促すためのより具体的なビジネスモデルの提案を行う。

(3) 研究方法

幕張新都心内の歩道空間を活用し、日常環境で小型の自律走行ロボット（以下「ロボット」という。）を走行させることで、走行に支障が出る場所を洗い出し、走行エリアごとに適した回避方法やモビリティのサイズや速度の違いによる安心感の調査、人の流れを考慮した走行調査を行う。

また、パーソナルモビリティを活用した公道（歩道）での試乗体験ツアーなどを実施し、利用ニーズの把握、市民意識の醸成、受益者負担の設定、対象者（外国人など）に応じたサービスの検証、シェアリングに係る課題抽出などを行う。

(4) 研究体制

	氏名	所属部署・職名
研究対象者	秋庭 慎輔	総合政策局総合政策部国家戦略特区推進課 課長
	石井 明宏	総合政策局総合政策部国家戦略特区推進課 主査
	田母神 裕	総合政策局総合政策部国家戦略特区推進課
	大川 一也(※)	大学院工学研究院 准教授
研究実施場所	千葉市総合政策局総合政策部国家戦略特区推進課事務室 千葉大学西千葉キャンパス、幕張新都心	

(※) 研究代表者

3 共同研究の実施内容・結果

(1) 実証実験の場の確保、地域住民への理解促進

有効な情報を得るため、幕張新都心内の様々な場所で実証実験を実施する必要があった。そこで、実証実験の実施日ごとに走行ルートを事前に定め、所轄する警察や地域住民等への事前周知や、必要な手続等を行った。

具体的には、まず、千葉県警察本部交通部交通規制課へ実証実験の概要、当日の走行ルート、講じる安全対策などを説明するなど、実施内容について事前に協議を行っ

た。次に、実際に走行エリアを所轄する千葉西警察署交通課と協議のうえ、「道路使用許可申請」を行い、「道路使用許可」が受けることで正式に実証実験を実施することが可能となる。あわせて、千葉市中央・美浜土木事務所管理課へ「道路一時使用届出書」を提出し一連の手続きは完了となった。

なお、実証実験を実施する場合等において、ロボットの進行方向前方にのぼり旗を持った人員を配置し、注意喚起を行うなど安全に配慮したこと、丁寧な事前説明及び実施結果の報告を行ったことで、本市の取組みに対し、千葉県警察本部、千葉西警察署からのご理解をいただくことができた。

また、地域住民等への事前周知に関しては、幕張新都心まちづくり協議会への事前説明の実施や、幕張ベイタウン内で実証実験を実施する場合には、幕張ベイタウン自治会連合会や近隣の小中学校に対し実証実験の概要、走行ルート、講じる安全対策などを事前に説明するとともに、幕張ベイタウン内のマンション各棟掲示板への張り出しを実施するなどの周知を図り、実証実験の実施へ理解をいただいた。

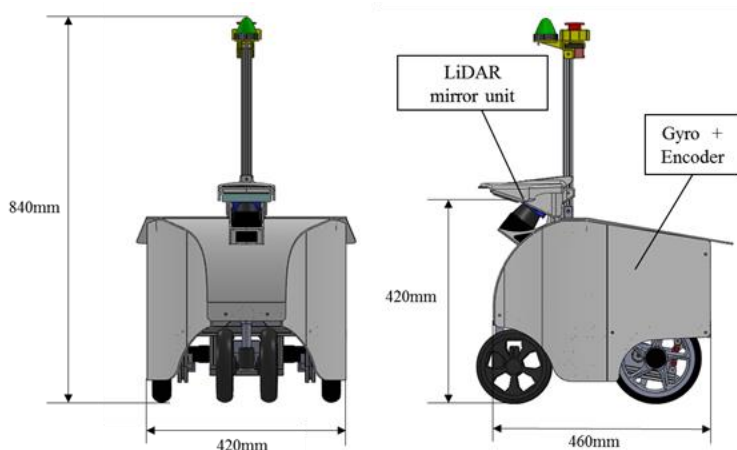
幕張ベイタウンでの実証実験を実施する度に幕張ベイタウン自治会連合会を通してベイタウン住民へ丁寧な対応を心掛けたことや、周囲への安全に配慮した走行を行うことで、地域住民や来街者等とのトラブルが一度も発生することなく実証実験を進めることができた。また、実証実験実施中、足を止めて見学する住民の方や、「ぜひ実現させてほしい」など取組みに対し肯定的な声を多くいただくなど、本市の取組みに対し地域住民の理解促進が図られた。

(2) 自律走行の基本性能の検証と3次元地図の作成

(ア) 実験条件

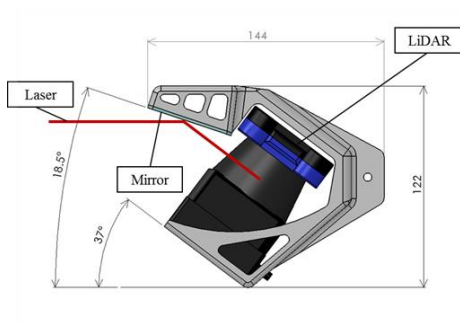
本実験では図表3-1に示す対向二輪型の移動ロボットを使用する。実験機の前輪は従輪であり、後輪は駆動輪である。大きさは長さ460mm、幅410mm、高さ840mmであり、地面からの高さ420mmの位置に外界センサとして、後述するLiDARミラーユニットが設置してある。また、内界センサとしてジャイロセンサとロータリエンコーダを搭載しており、ジャイロオドメトリとして用いることでロボットの角度と走行距離を取得できる。本研究で用いるジャイロセンサはAnalog Devices社製のADIS16136である。ADIS16136が取得しているのは角速度情報であるため、外付けのH8マイコンを用いて角速度を時間積分し、角度情報を得ている。ロータリエンコーダは後輪の駆動モータに直接取り付けられており、後輪の回転数から走行距離を計測する。本研究で使用するロータリエンコーダはBroad Com社製のHEDL-5540#A11である。本研究ではモータはMaxon社製の90WのDCモータ(RE35)を使用し、モータはオカテック社製のモータドライバ(Tiny Power)によって速度と角速度を制御する。実験機には、システム全体を統括する制御PCを搭載し、各センサ情報は制御PCに送られる。制御PCは、マウスコンピュータ製のNEXT GEAR-NOTE i300SA10という機種を用いる。このPCのCPUは

Core i7 であり、プログラムをマルチスレッドで実行するのに十分な性能である。また、本ロボットの上部には緊急停止スイッチがあり、このスイッチを押すと自律走行している場合でもロボットを停止させることができる。



図表 3 - 1 自律走行に用いた移動ロボット

外界センサとして、本研究室で設計された LiDAR ミラーユニット（以降、ミラーユニット）の外観を図表 3 - 2 に示す。ミラーユニットは測域センサ（LiDAR : Light Detection and Ranging）とその近傍に設置されたミラーから構成される。測域センサには、北陽電機社製の UTM-30LX-EW を使用する。このセンサはセンサ正面から左右 135° ずつの計 270° の範囲を 0.25° ずつ走査することができる。レーザの正面部はミラーによって地面と水平方向に照射され、障害物検出に用いられる。側方部は地面に対して 37° 傾いているため、ロボットが走行し、点群情報を蓄積することで三次元地図を取得できる。また、側方部は障害物検出にも用いる。そのため、ミラーユニットを用いることで、単一固定の外界センサで障害物検出と三次元地図の生成を同時に行うことができる。これによりコストの低減と計算処理の軽減が期待でき、ロボットの小型化、軽量化を実現している。



図表 3 - 2 LiDAR ミラーユニット

実験では、まず、ロボットに走行させたい経路を手押しにて走行させ、ロボットは、

内界センサであるジャイロオドメトリによって自己位置を推定するとともに、ミラーユニットで計測した周囲の障害物の三次元的な配置を RGB24bit ビットマップに蓄積し、これをロボットの事前地図とする。

ロボットは、事前地図作成と同様に、自律走行時にも地図を作成する。本報告書では、自律走行時の地図を走行地図と呼ぶこととする。ロボットは、事前地図と走行地図を最適化アルゴリズムの一つである滑降シンプレックス法によって照らし合わせ、事前地図におけるロボットの位置を推定する。また、事前地図に記録された走行すべき経路に沿うように走行制御をする。

走行経路に障害物を検出した場合には、まず減速しながら接近し、それでも障害物が存在し続けた場合には停止をする。停止した後、ロボットの経路の右側と左側に対してロボットが走行可能な領域を探索し、走行すべき経路に一番近い経路を選択し、障害物を回避する。障害物回避後は、もとの経路に戻るような制御を行う。

ロボットに搭載したセンサには必ず誤差が生じる。誤差にはさまざまな種類が存在するが、ジャイロは角速度センサであり得られた情報を時間積分してロボットの向きを算出するため、誤差が累積してしまう問題がある。誤差が累積してしまうジャイロの代わりに、絶対方位が得られる地磁気センサを適用する案もあるが、街灯やマンホールといった金属に含まれる残留磁気の影響を受け、正しい方位が得られないという報告があるため適用していない。この誤差の累積問題を解決するために、事前地図を一边 500m 程度の地図に分割し、適宜切り替えることによって解決している。

(イ) 実験詳細

【海浜幕張駅～イオン幕張店～三井アウトレットパーク幕張】

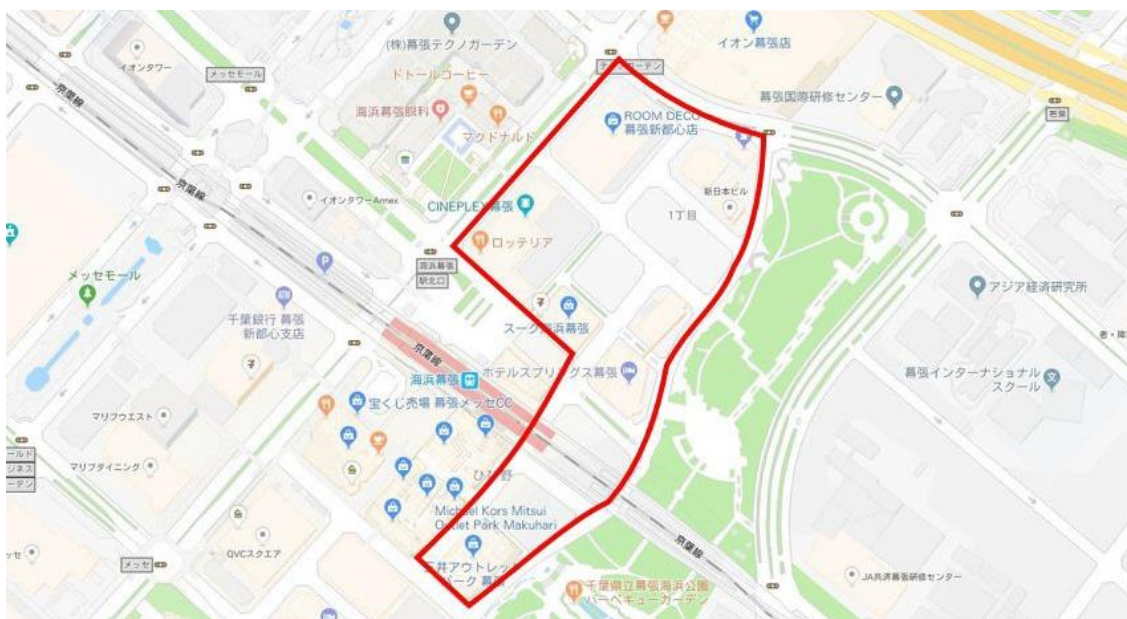
図表 3-3 に示す海浜幕張駅からイオン幕張店へ向かい、その後、三井アウトレットパーク幕張へ向かうルートである。

駅ターミナルにあるバス停には人が多く存在していたが、自己位置推定には特に問題は生じないことを確認した。また、歩行者がロボットに近づいたため、ロボットが減速する様子も見られたが、特に危険を感じる状態は生じなかった。

横断歩道の直前では、ロボットの走行管理者が緊急停止スイッチを押すことで一時停止を行い、車両や歩行者がいないことを人が確認した後、緊急停止スイッチを解除することによって自律走行を再開した。イオン幕張店の近くで地図を切り替えたが、切り替え時に自己位置推定が悪くなることが確認された。その後、十数メートルの走行することにより、自己位置推定に有益な新しい情報が得られ、なんとか自己位置推定はできることが確認された。しかし、交差点を横断している最中に位置推定が少しずつずれ、自己位置推定が破綻することを確認した。

走行ルートの横に空き地があり、細いワイヤーで進入を禁止している領域があった。このワイヤーをセンサが検知できるか否か、また自己位置推定の基準となる障害物が

少ないため、自己位置が破綻する恐れを懸念していたが、自律走行中のセンサ情報を確認すると、正しくワイヤーを検知し、自己位置推定も問題ないことを確認した。



図表 3－3 海浜幕張駅～イオン幕張店～三井アウトレットパーク幕張のルート

図表 3－3 のルートで得られたロボット用地図は図表 3－4～図表 3－6 の三つである。二次元の図ではあるが、光の三原色である RGB（赤緑青）の輝度値を高さ情報に置き換えて記憶しているため、実際には三次元地図が得られている。このルートで得られた特徴的な三次元地図を図表 3－7～図表 3－14 に示す。これらの地図を適切に切り替えることで自律走行ができることを確認した。



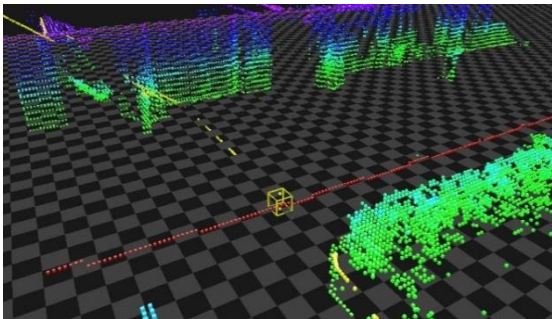
図表 3－4 図表 3－3 のコースで得られた 1 枚目の地図



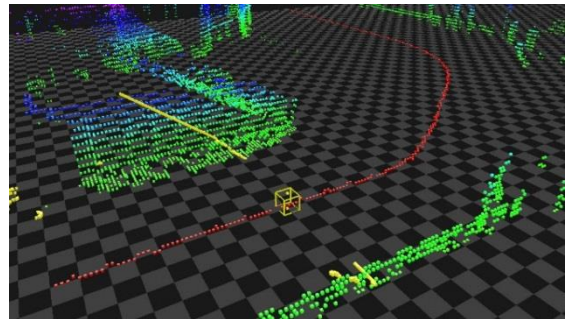
図表 3－5 図表 3－3 のコースで得られた 2 枚目の地図



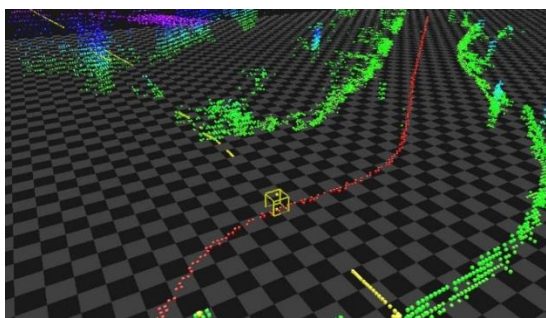
図表 3－6 図表 3－3 のコースで得られた 3 枚目の地図



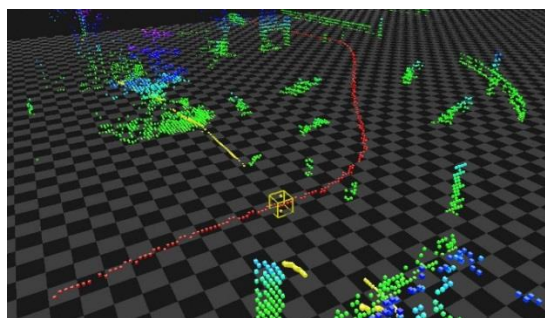
図表 3－7 駅近くの店舗の横



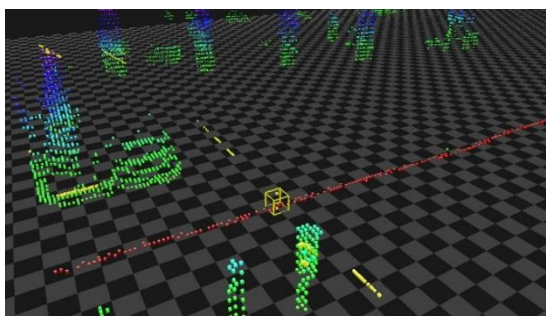
図表 3－8 1 回目の右折



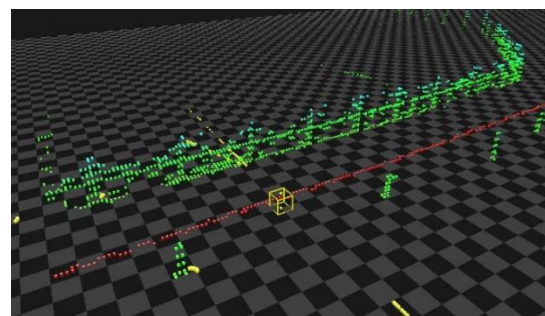
図表 3 - 9 横断歩道の近く



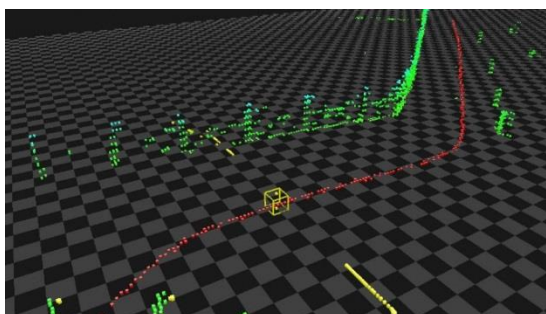
図表 3 - 1 0 2 回目の右折



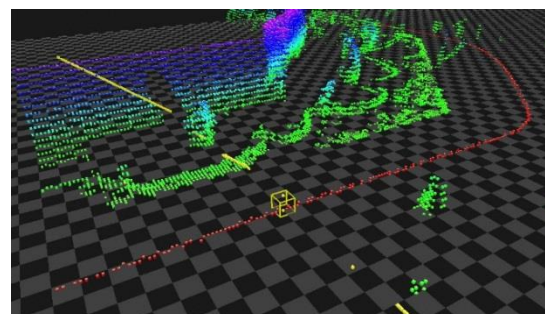
図表 3 - 1 1 ガソリンスタンドの近く



図表 3 - 1 2 ワयरで分けられた空き地



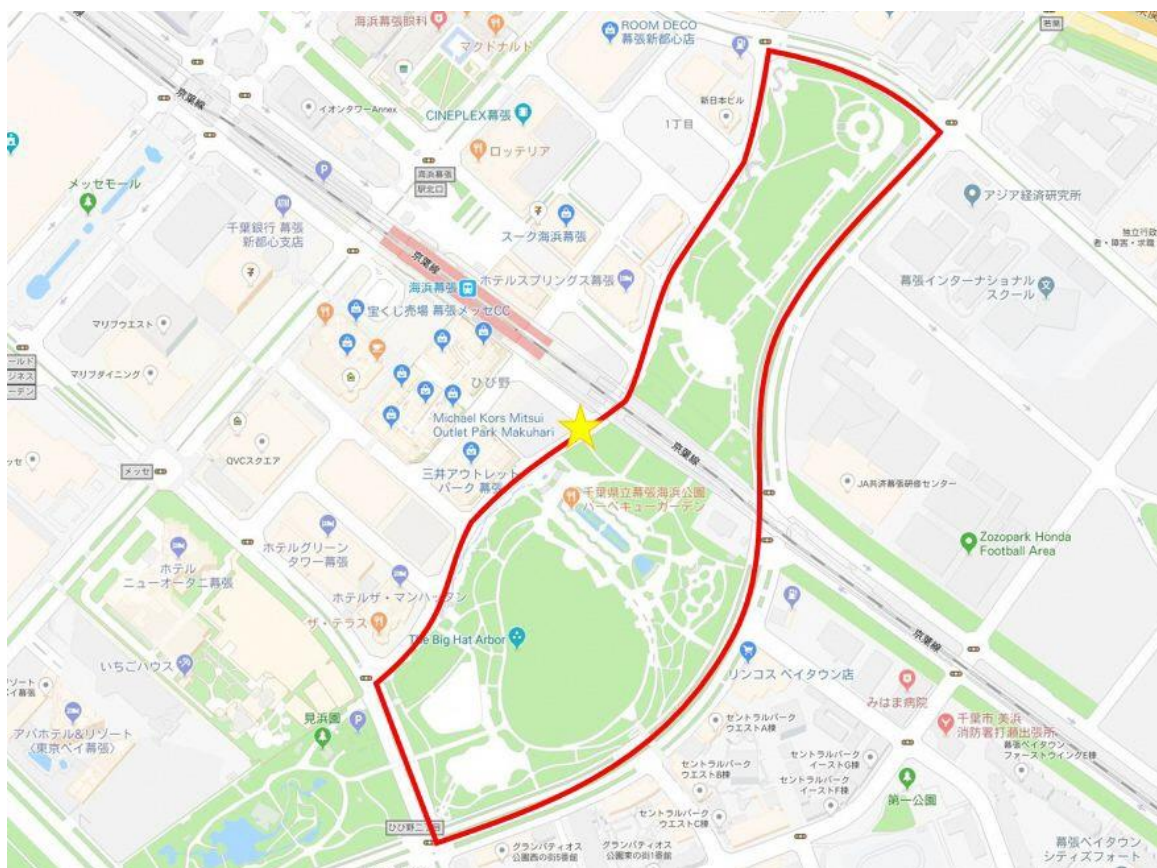
図表 3 - 1 3 横断歩道の近く（その 2）



図表 3 - 1 4 三井アウトレットパーク幕張の近く

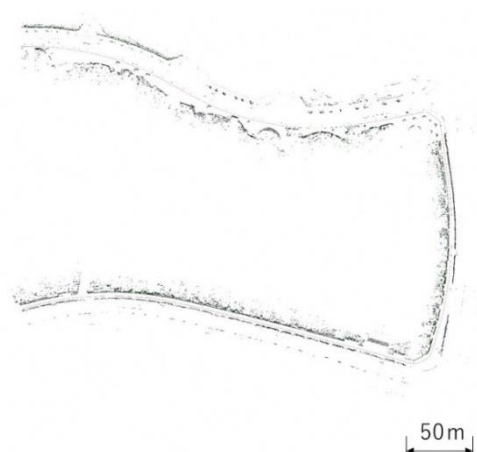
【幕張海浜公園一周】

図表 3 - 1 5 に示す幕張海浜公園を一周するルートである。他のルートに比べて、このルートは比較的長距離であるが、横断歩道を通過する場所はなく、おおむね安定して自律走行できることを確認した。地図の切り替え時には、相変わらず、一時的に自己位置推定が悪くなることを確認したが、その後、走行している間に自己位置推定が良くなることが確認できた。このルートは何度か走行したが、大きな問題になることはなかった。ちなみに、海浜幕張公園を横断する経路があるが、図表 3 - 1 5 の★印の場所において、自転車搭乗者が急に飛び出してきて、ロボットが急停止する様子が見られた。接触はなく問題にはならなかったが、ヒヤリハット事例といえる経験をした。



図表 3 - 1 5 幕張海浜公園を一周するルート

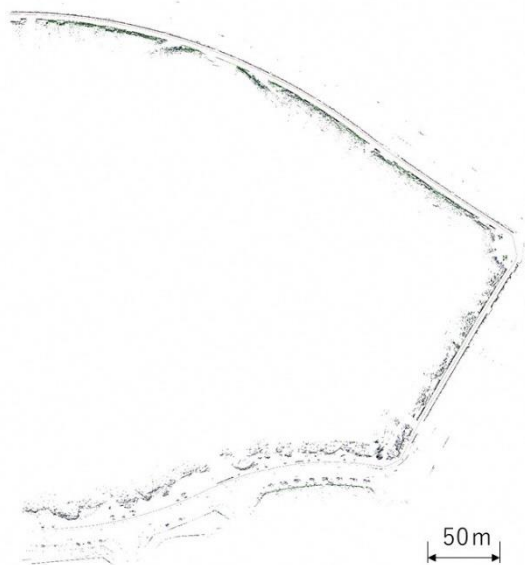
図表 3 - 1 5 のルートでロボットが生成した地図を図表 3 - 1 6 ~ 図表 3 - 1 9 に示す。また、このルートで得られた特徴的な三次元地図を図表 3 - 2 0 ~ 図表 3 - 2 5 に示す。



図表 3 - 1 6 図表 3 - 1 5 のコースで得られた 1 枚目の地図



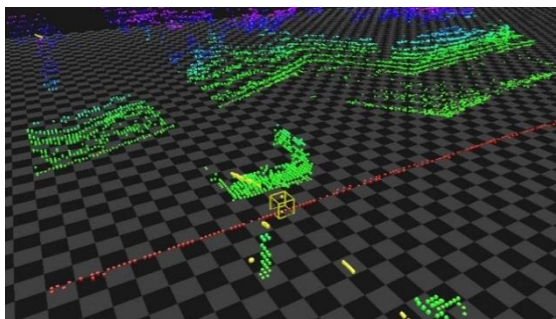
図表 3－1 7 図表 3－1 5 のコースで得られた 2 枚目の地図



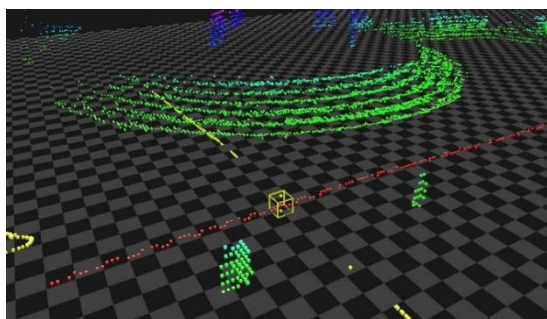
図表 3－1 8 図表 3－1 5 のコースで得られた 3 枚目の地図



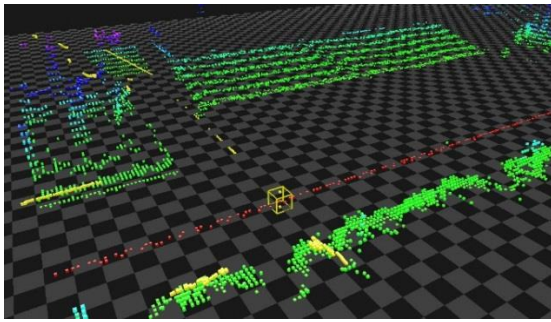
図表 3－1 9 図表 3－1 5 のコースで得られた 4 枚目の地図



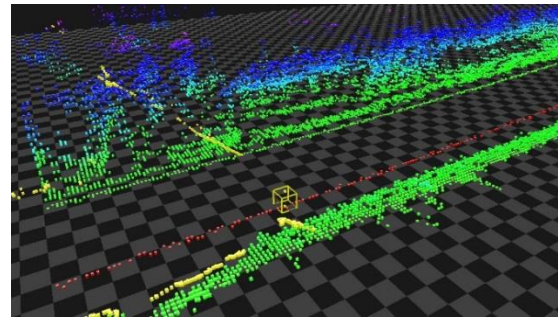
図表 3－2 0 公園西側（その 1）



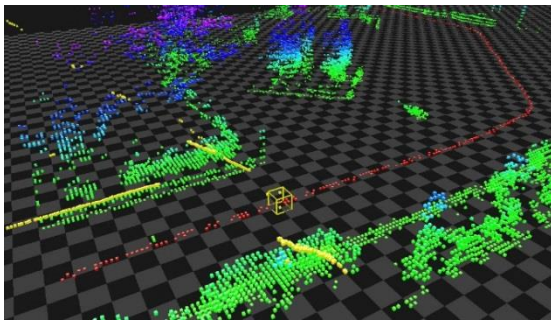
図表 3－2 1 公園西側（その 2）



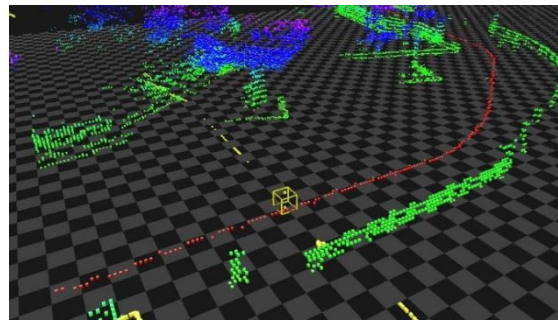
図表 3-2-2 公園東側（その 1）



図表 3-2-3 公園東側（その 2）



図表 3-2-4 3 回目の右折



図表 3-2-5 4 回目の右折

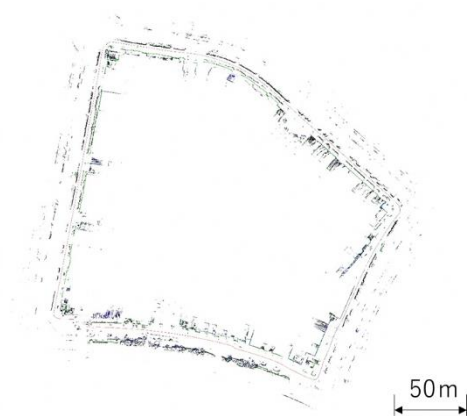
【リンコスベイタウン店とセントラルパーク（マンション）一周】

図表 3-2-6 の右上に示すリンコスベイタウン店付近を一周するルートである。このルートは比較的短く、また、スタート位置とゴール位置が近かったが、位置推定に必要な周囲の障害物による重複が見られなかったため、地図の切り替えは行わなかった。地図の切り替えをせず、かつ、道路横断にともなう一時停止がなかったこともあり、二度同じルートを走行したが、自己位置推定に対する不安はなかった。

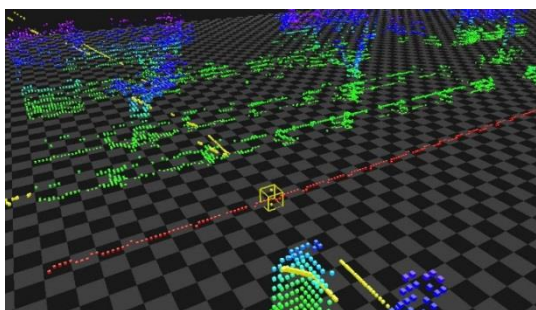


図表 3-2-6 リンコスベイタウン店とセントラルパーク一周のコース

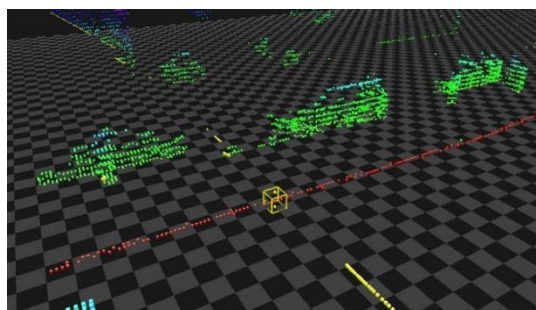
図表 3-2-6 のルートでロボットが生成した地図を図表 3-2-7 に示す。また、このルートで得られた特徴的な三次元地図を図表 3-2-8～図表 3-3-2 に示す。



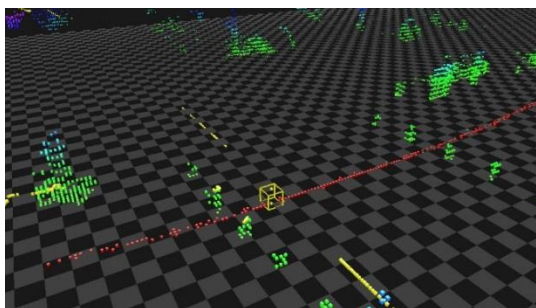
図表 3-27 図表 3-26 のコースで得られた地図



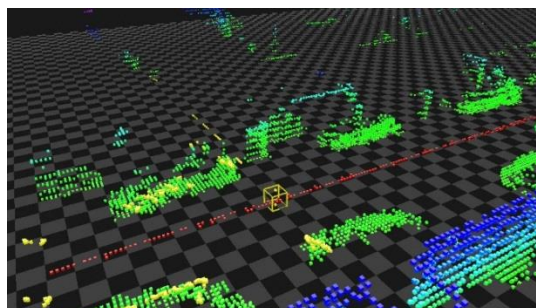
図表 3-28 リンコスベイトウン店北側



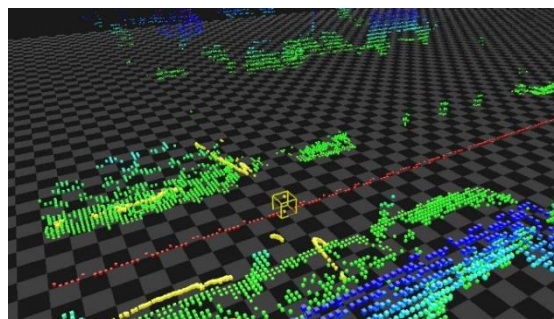
図表 3-29 路上駐車（その1）



図表 3-30 駐車場出入り口とボラード



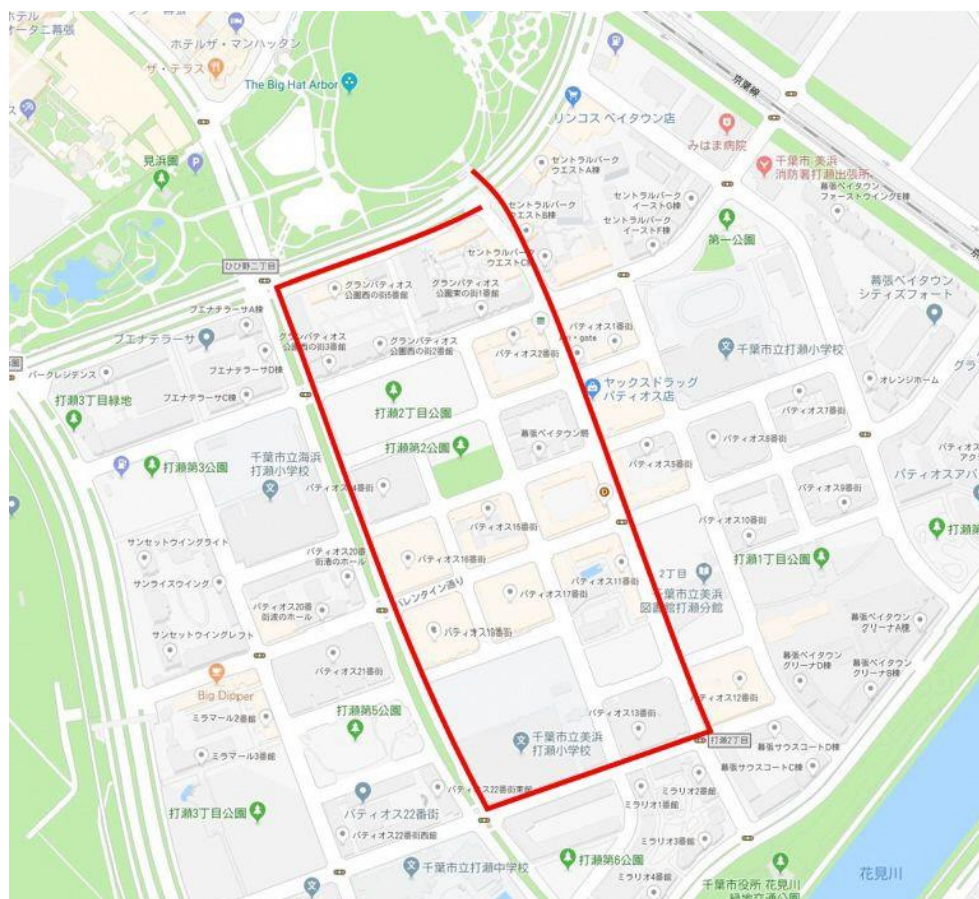
図表 3-31 路上駐車（その2）



図表 3-32 リンコスベイトウン店東側

【グランパティオス公園（マンション）～美浜打瀬小学校～幕張海浜公園横】

図表 3－3 3 の中央のルートであり、グランパティオス公園から美浜打瀬小学校の横を通り戻るルートである。このルートの最後には、傾斜のあるスロープを走行し、陸橋を渡り、幕張海浜公園の横まで到達するルートである。



図表 3－3 3

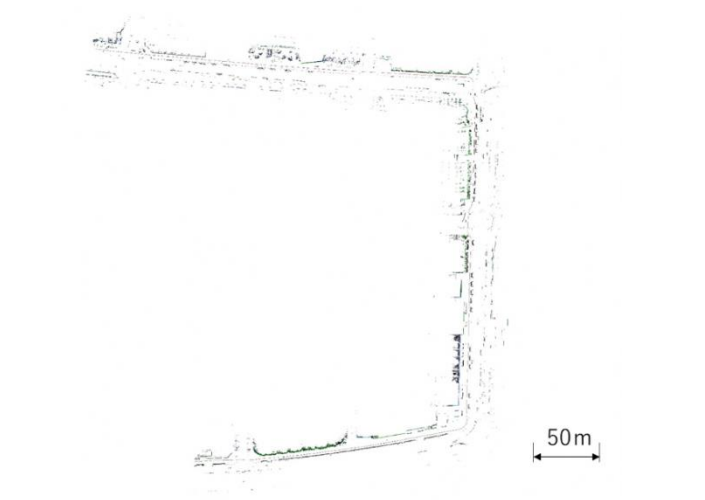
グランパティオス公園（マンション）～美浜打瀬小学校～幕張海浜公園横までのルート

図表 3－3 3 のルートでロボットが生成した地図を図表 3－3 4～図表 3－3 6 に示す。また、このルートで得られた特徴的な三次元地図を図表 3－3 7～図表 3－5 2 に示す。

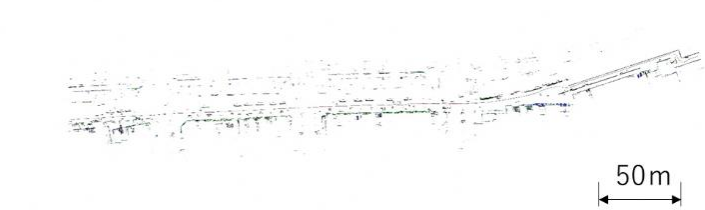
幕張ベイタウンという住宅地であり、これまで以上に建物などの人工物が多く存在する。このため、ロボットにとって、自己位置推定をする際の基準となる固定障害物が多く、自律走行は容易と考えられた。しかし、実際に走行させてみると、他のルートと同様に、横断歩道の場所で自己位置推定が悪くなり、本来の走行すべきルートから外れるなどの問題が生じた。何度も繰り返し検証を行ったが、基本的に、同じような場所で同じ問題が生じることから、周囲の障害物の状況やロボットの初期値の問題などではなく、技術的な問題であることが分かった。これらの問題については、「(ウ) 問題に対する考察と対策」で考察する。



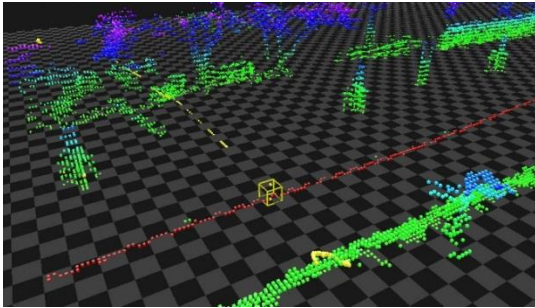
図表 3-34 図表 3-33 のコースで得られた 1 枚目の地図



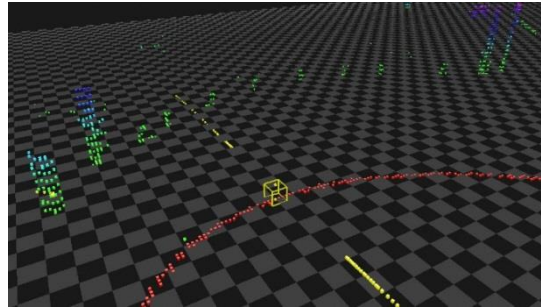
図表 3-35 図表 3-33 のコースで得られた 2 枚目の地図



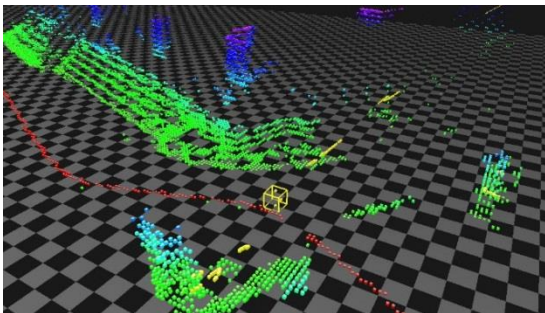
図表 3-36 図表 3-33 のコースで得られた 3 枚目の地図



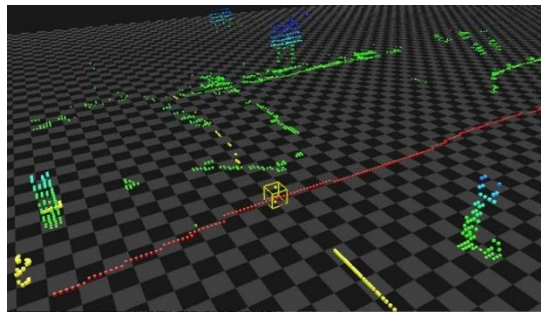
図表 3-37 グランパティオス公園北側



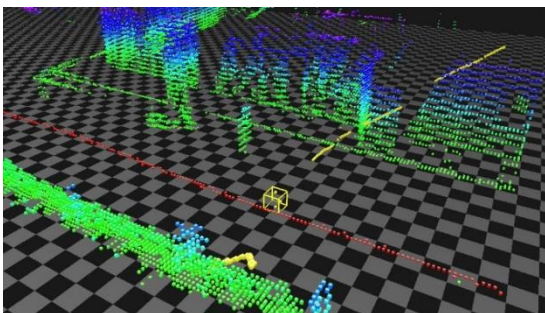
図表 3-38 交差点にあるボラード



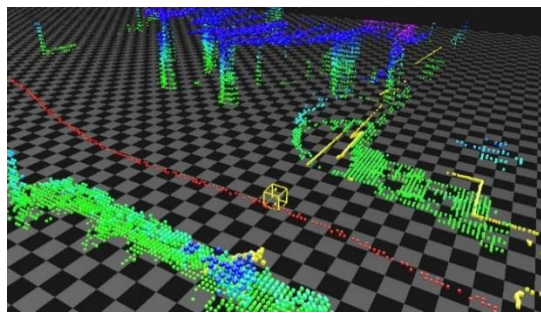
図表 3-39 グランパティオス公園南西側



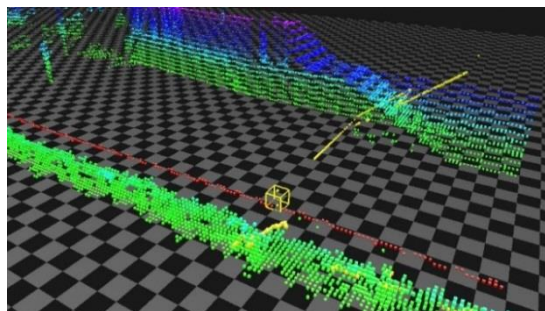
図表 3-40 横断歩道を渡った後



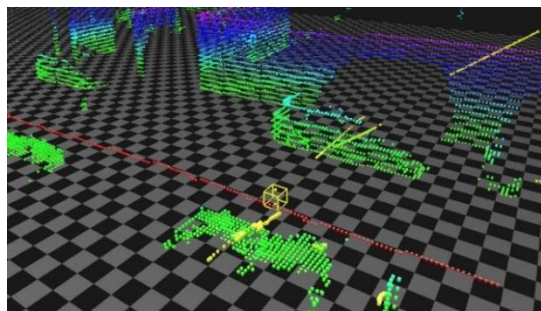
図表 3-41 パティオス16番街



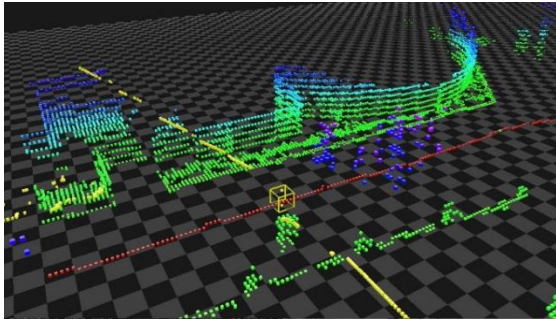
図表 3-42 パティオス18番街



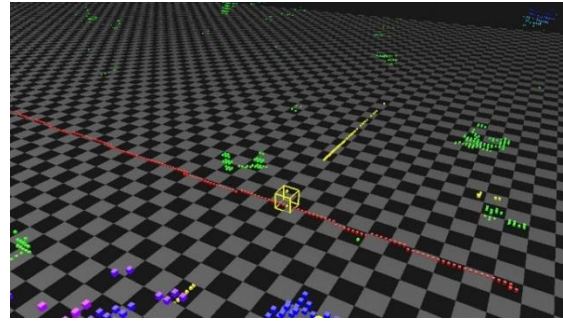
図表 3-43 美浜打瀬小学校西側



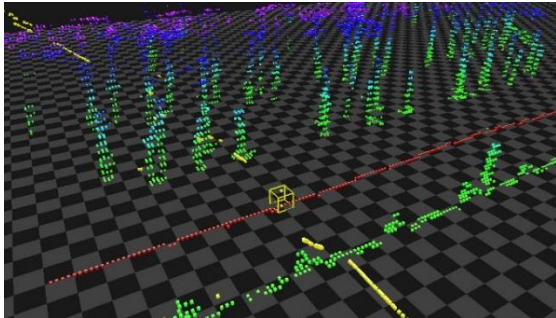
図表 3-44 美浜打瀬小学校南側



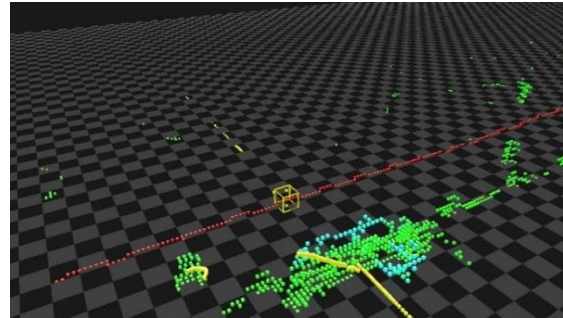
図表 3-45 パティオス 13 番街



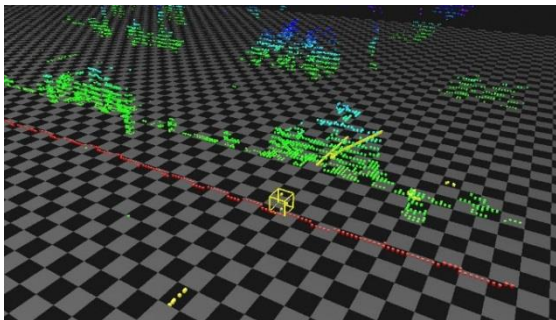
図表 3-46 横断歩道走行中



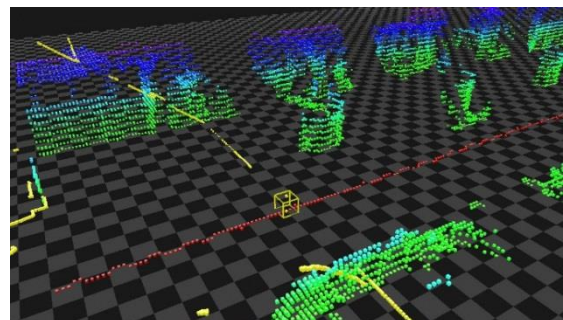
図表 3-47 図書館横の竹林



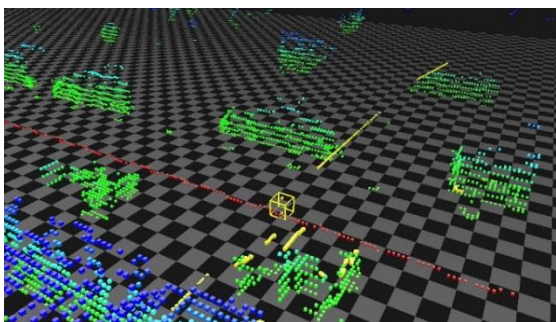
図表 3-48
図書館北側（左側からの視点）



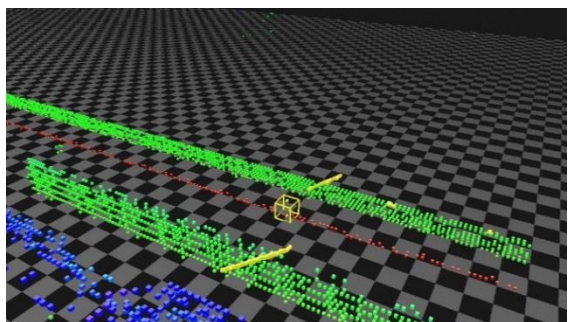
図表 3-49 図書館北側（右側からの視点）



図表 3-50 ヤクストラックパティオス店



図表 3-51 路上駐車している車



図表 3-52 スロープ走行中

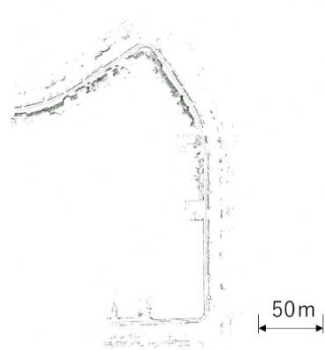
【打瀬小学校周辺を一周するルート】

図表 3－5 3 の打瀬小学校の横からスタートし、打瀬第 1 公園を通過後、パティオス 2 番街の方へ向かい、スタート地点に戻るルートである。



図表 3－5 3 打瀬小学校～打瀬第 1 公園～パティオス 2 番街を通るルート

図表 3－5 3 のルートでロボットが生成した地図を図表 3－5 4、図表 3－5 5 に示す。また、このルートで得られた特徴的な三次元地図を図表 3－5 6～図表 3－6 0 に示す。



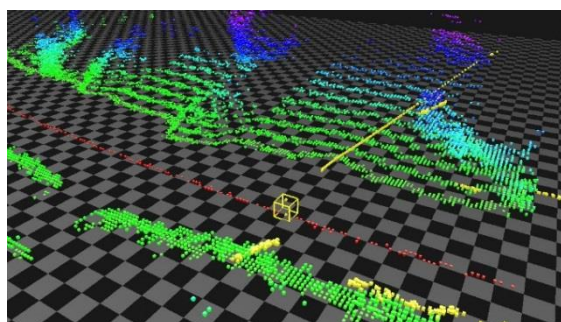
図表 3－5 4

図表 3－5 3 のコース 1 枚目の地図

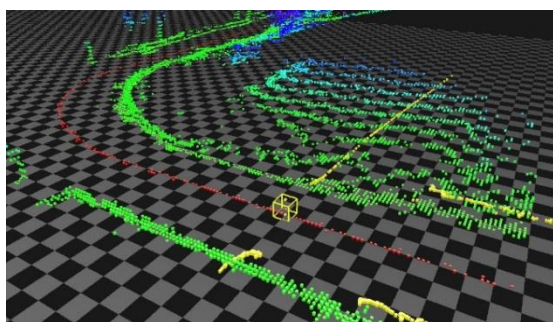


図表 3－5 5

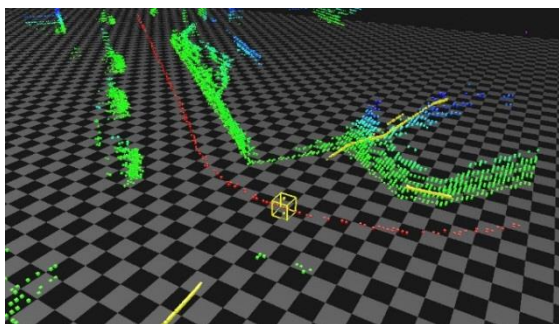
図表 3－5 3 のコースの 2 枚目の地図



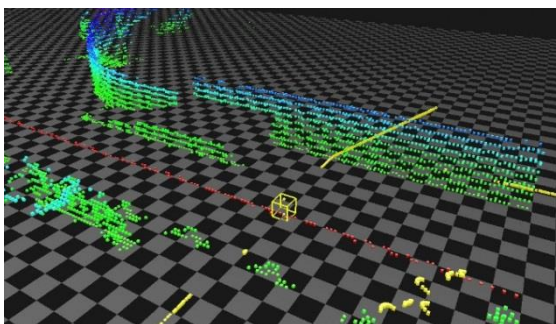
図表 3－5 6 打瀬第 1 公園東側



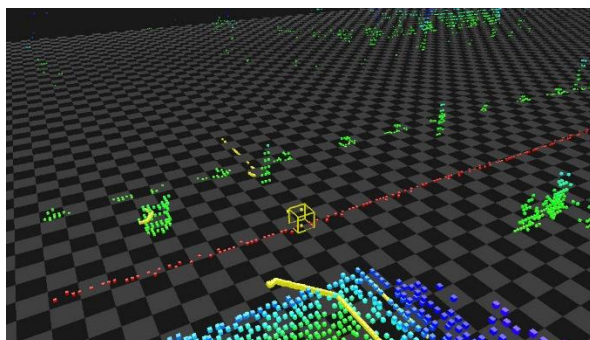
図表 3－5 7 打瀬第 1 公園北側



図表 3-58 パティオ2番街南西側



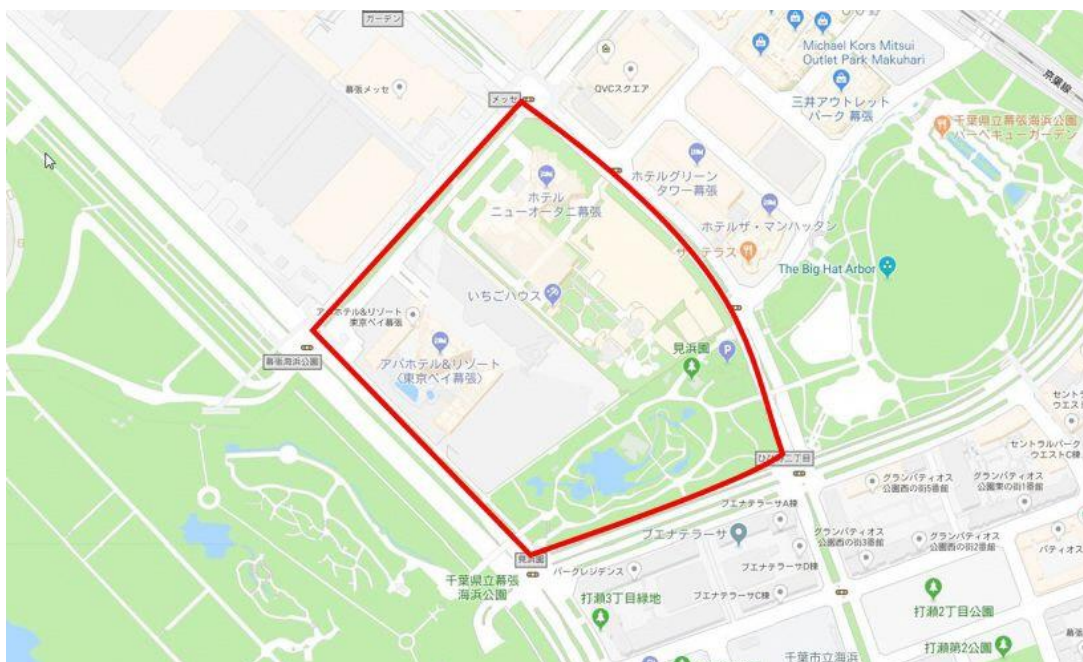
図表 3-59 打瀬小学校



図表 3-60 打瀬小学校横のチェーンボラード

【ホテルニューオータニ幕張周辺を一周するルート】

図表 3-61 のホテルニューオータニ幕張やアパホテル&リゾート（東京ベイ幕張）を一周するルートである。



図表 3-61 ホテルニューオータニ幕張周辺を一周するルート

図表 3-6 1 のルートでロボットが生成した地図を図表 3-6 2～図表 3-6 6 に示す。また、このルートで得られた特徴的な三次元地図を図表 3-6 7～図表 3-7 4 に示す。



図表 3-6 2

図表 3-6 1 のコース 1 枚目の地図



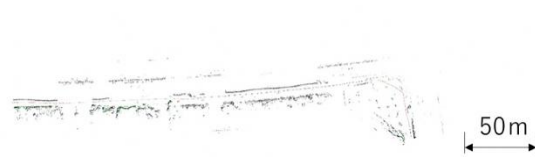
図表 3-6 3

図表 3-6 1 のコースの 2 枚目の地図



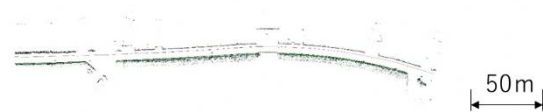
図表 3-6 4

図表 3-6 1 のコースの 3 枚目の地図

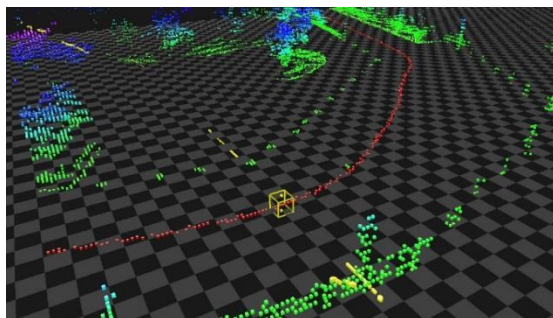


図表 3-6 5

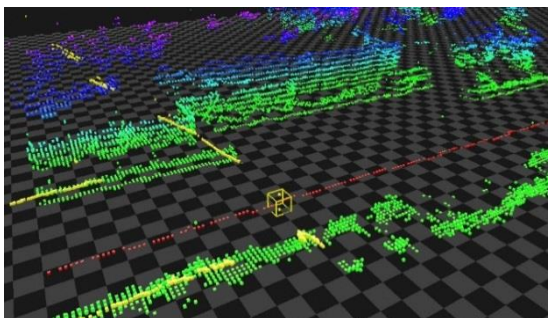
図表 3-6 1 のコースの 4 枚目の地図



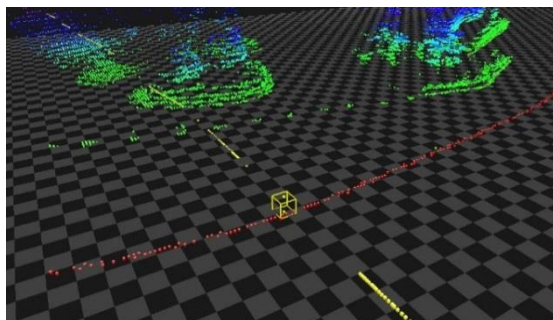
図表 3-6 6 図表 3-6 1 のコースの 5 枚目の地図



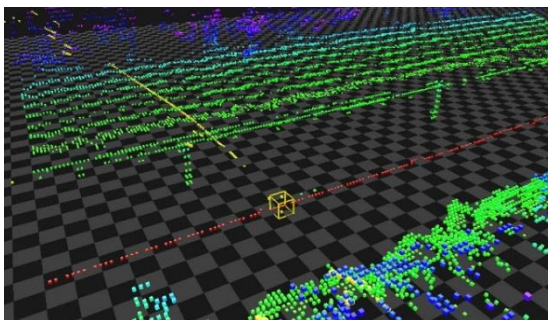
図表 3-6 7 美浜園南東側



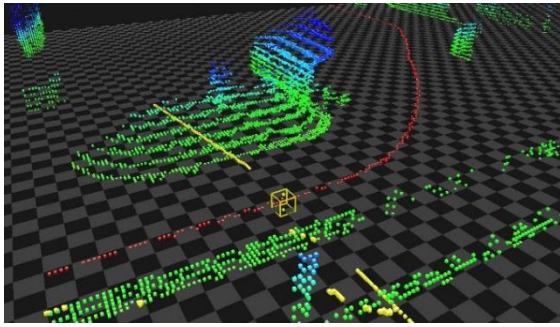
図表 3-6 8 美浜園南側



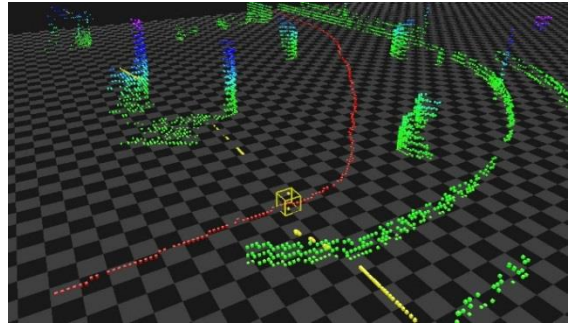
図表 3-6 9 美浜園南西側



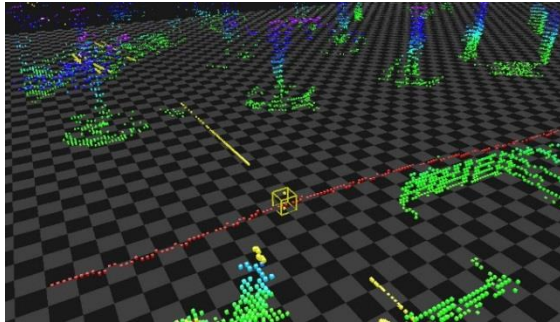
図表 3-7 0 アバホテル&リゾート西側



図表 3-7 1 アハ ホテル&リゾート北西側

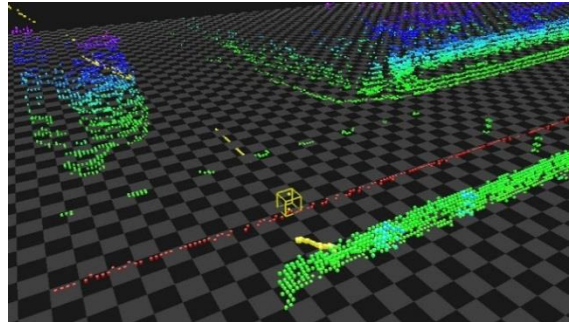


図表 3-7 2 ホテルニューオータニ幕張北東側



図表 3-7 3

ホテルニューオータニ幕張（その 1）



図表 3-7 4

ホテルニューオータニ幕張（その 2）

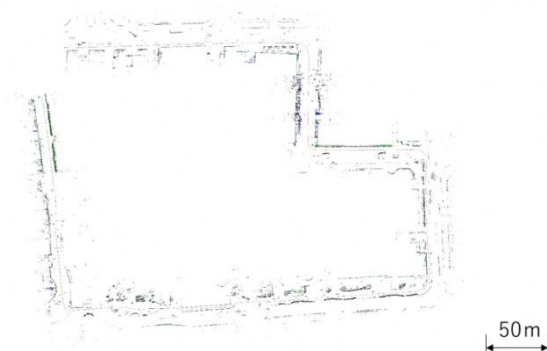
【海浜幕張駅及び三井アウトレットパーク幕張を一周するルート】

図表 3-7 5 に示す海浜幕張駅および三井アウトレットパーク幕張を一周するルートである。



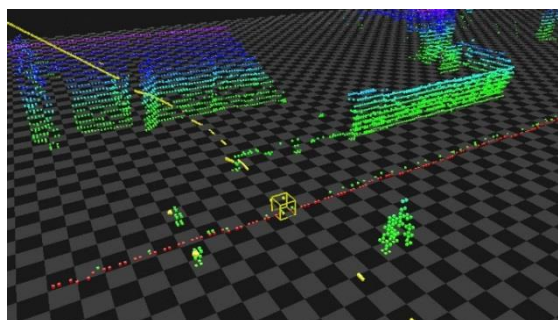
図表 3-7 5 海浜幕張駅および三井アウトレットパーク幕張を一周するルート

図表 3-75 のルートでロボットが生成した地図を図表 3-76 に示す。また、このルートで得られた特徴的な三次元地図を図表 3-77～図表 3-84 に示す。

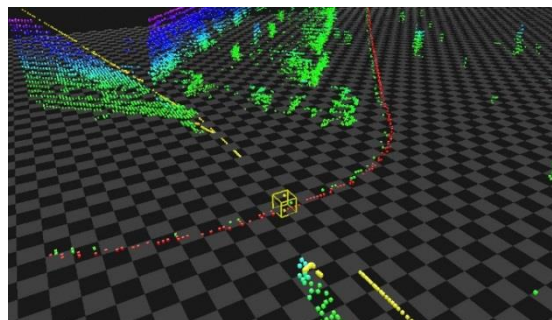


図表 3-76

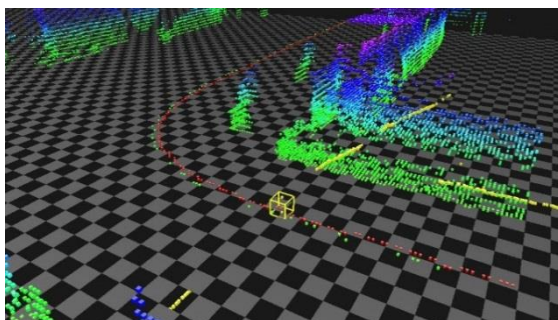
海浜幕張駅および三井アウトレットパーク幕張を一周するルートで生成した地図



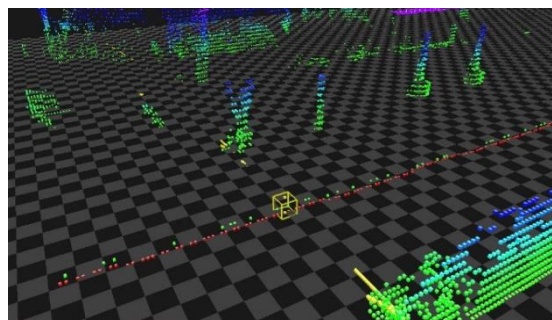
図表 3-77 海浜幕張駅南東側



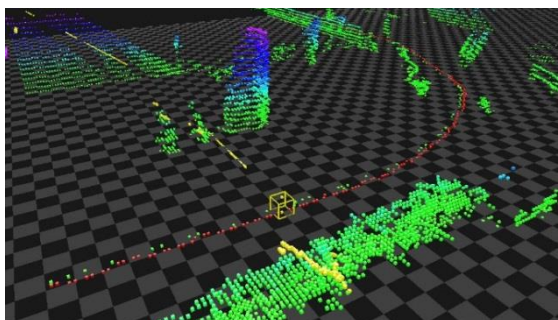
図表 3-78 三井アウトレットパーク幕張南側



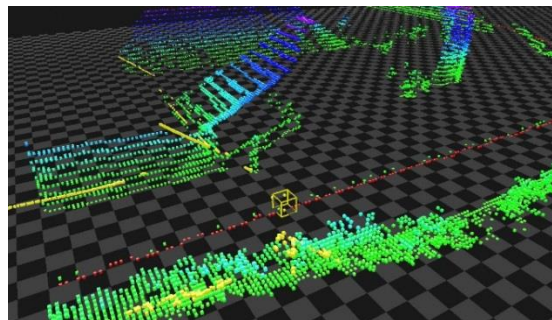
図表 3-79 三井アウトレットパーク幕張中央



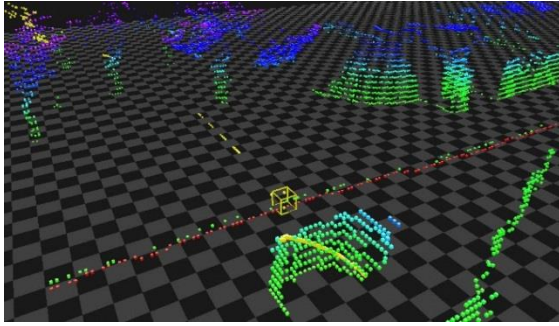
図表 3-80 QVC スクエアからの視点



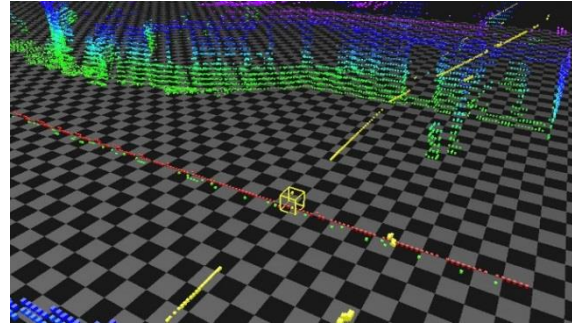
図表 3-81 三井アウトレットパーク幕張北西側



図表 3-82 三井アウトレットパーク幕張北側



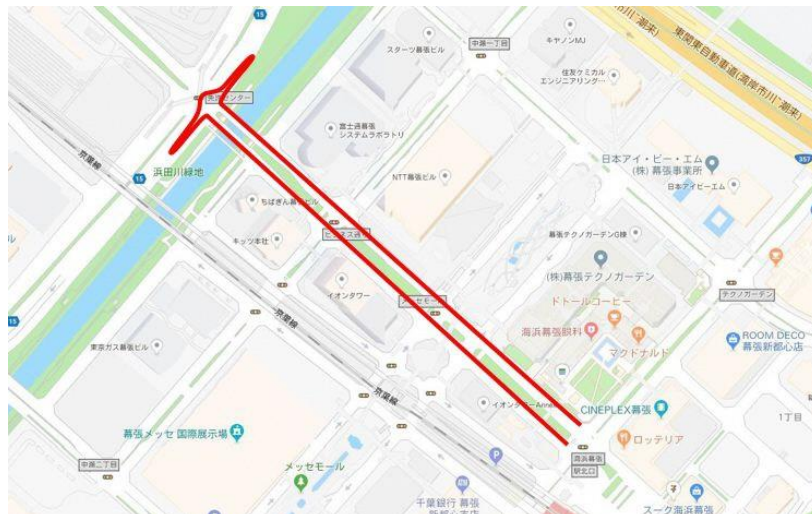
図表 3－8 3 海浜幕張駅の交番付近



図表 3－8 4 CINEPLEX 幕張付近

【海浜幕張駅北口交差点から免許センター交差点陸橋を往復するルート】

図表 3－8 5 に示す海浜幕張駅北口交差点から免許センター交差点陸橋を往復するルートである。

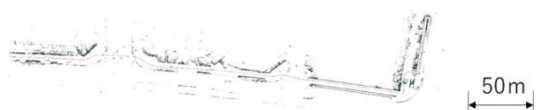


図表 3－8 5 海浜幕張駅北口交差点から免許センター交差点陸橋を往復するルート

図表 3－8 5 のルートでロボットが生成した地図を図表 3－8 6～図表 3－9 0 に示す。また、このルートで得られた特徴的な三次元地図を図表 3－9 1～図表 3－9 8 に示す。



図表 3－8 6 図表 3－8 5 のコース 1 枚目の地図



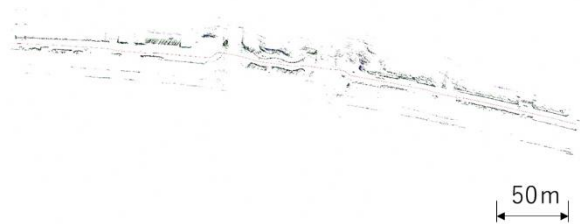
図表 3－8 7 図表 3－8 5 のコースの 2 枚目の地図



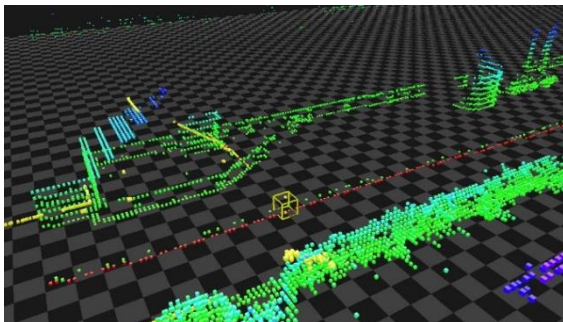
図表 3－8 8 図表 3－8 5 のコースの 3 枚目の地図



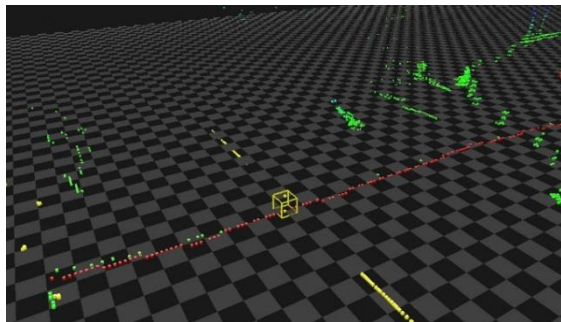
図表 3－8 9 図表 3－8 5 のコースの 4 枚目の地図



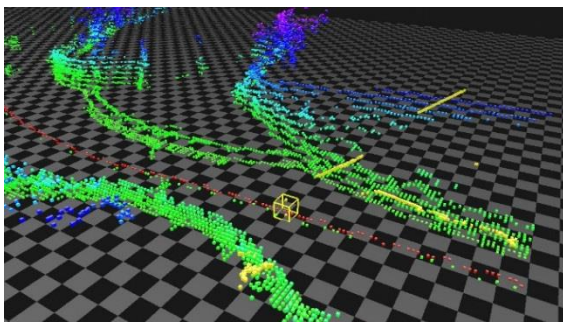
図表 3－9 0 図表 3－8 5 のコースの 5 枚目の地図



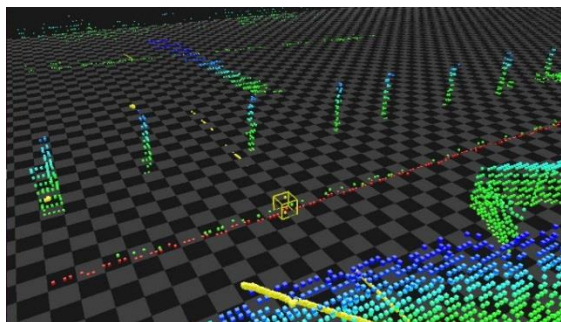
図表 3－9 1 海浜幕張駅北口交差点付近



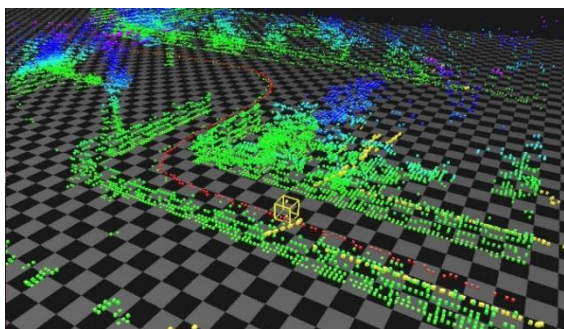
図表 3－9 2 横断歩道走行中



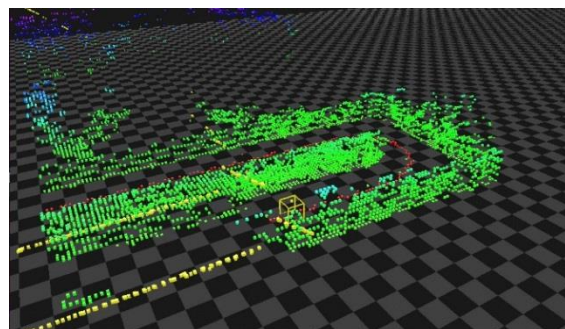
図表 3－9 3 イオンタワー近くの歩道



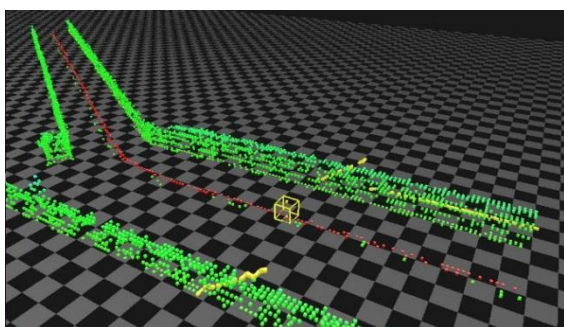
図表 3－9 4 バス乗り場（8 本の支柱）



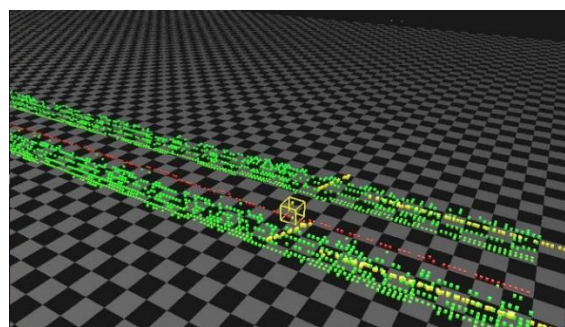
図表 3-95 スロープへ入ったところ



図表 3-96 スロープ (Uターン箇所)



図表 3-97 陸橋の上



図表 3-98 スロープ (直線箇所)

(ウ) 問題に対する考察と対策

これらの実証実験により、多くのルートにおいて問題なく自律走行できることを確認した。しかし、地図切り替え時や横断歩道を通過する際に自己位置推定が悪くなる傾向があり、状況によってはルートから外れてしまう状況もあった。繰り返し実証実験を行った結果分かったことを以下に記す。

なお、ロボットを走行する際には、実証実験を行っていることを周囲の人に周知するとともに安全を確保する幟を持つ人を配置している。このため、ほとんどの歩行者は、親切に、事前にロボットを回避してくれるため、ロボットと歩行者が接触するなどの危険な状況になることは一度もなかった。一方、自転車搭乗者が、ロボットのすぐ横を通過し、ロボットがそれを検知し、一時的に減速する様子が見られた。

【地図に関する問題と対策】

ロボットが向いている角度を検出するためにジャイロを用いている。このセンサは角速度センサであるため、向いている角度に変換するためには時間積分をしなければならない。理論上は特に問題とならないが、実際のセンサは温度にも影響するドリフト誤差や積分を繰り返す際の累積誤差が生じる。このため、例えば、ロボットが直進をしていても、地図上では円弧を描くような地図となる。そこで、地図を切り替えて対処している。

地図作成時、ロボットは地図に障害物や走行経路を記録していくが、自己位置推定

の累積誤差が多くなると、地図を切り替える。ここで、従来は、地図を切り替えた時のロボットの位置をそのまま用いていた。しかし、幕張新都心のような広い走行ルートでは、それらのルートすべてを記録できる大きな地図を用意する必要があった。この場合、走行ルートにもよるが、地図 1 枚あたり数百MBの記憶容量が必要となり、かつ、地図切り替え時の読み込みに時間がかかるという問題が生じていた。そこで、地図を切り替える際に、新しい地図のロボットの位置をリセットする手法を組み込んだ。これにより、例えば 1 枚の地図サイズを 250m 四方とし記憶容量を約 19MB と小さくでき、また、走行ルートの広さを事前に調べることなく地図生成ができるようになった。

この手法を導入したところ、自己位置推定が悪くなることが判明した。繰り返し実証実験を行い、その理由について調査したところ、以下の問題が生じていることが分かった。

ロボットは、地図切り替え位置に到達すると、一時停止し、地図を切り替える。ここで、地図の切り替え位置に精度よく到達できればよいが、地図の切り替え位置に障害物がある場合にはロボットは地図の切り替え位置に到達できないという問題が生じる。このような状況においても対応できるようにするため、ロボットは、地図切り替え位置から半径 1.4m の範囲に入った場合に地図を切り替えることとしている。しかし、この対策によって、ロボットは地図の切り替え位置から離れたところで地図の切り替えを行っていた。従来のように地図上のロボットの位置を維持する場合には、地図切り替え位置までの未到達分の情報も自動的に含まれるため問題となっていなかったが、新しく導入した手法では新しい地図に切り替える際にロボットの位置をリセットするために地図切り替え位置までの未到達分の情報が失われてしまうことが判明した。

このため、地図を切り替える直前において、地図切り替え位置までの未到達分を算出しておき、その分を考慮する手法を導入した。この手法を組み込み、実証実験を行ったところ、地図切り替え時の自己位置推定が悪くなる問題が大きく改善した。

【地図切り替え時の一時停止の問題と対策】

前述の手法により地図が小さくなったものの、地図の読み込みには数秒かかる。このため、ロボットは地図切り替えの際には一時停止し、地図を切り替え、その後、自律走行を再開する。地図切り替え位置は、ロボットの走行経路上であり、例えば、歩道の中央の場合もある。この場合、ロボットの利用者は、地図の切り替え位置を知っているためロボットが一時停止をしても気にならなかったが、周囲の歩行者にとっては障害物などが何もない状況において突然停止していることになる。現在の実証実験では、ロボットの安全を確保するために、ロボットの走行管理者がロボットの後ろを歩いているので問題ないが、将来、ロボットやパーソナルモビリティが完全自律で走行する場合を想定すると、障害物などがいない歩道で突然停止することは安全の上で問

題が生じる。

そこで、本研究のロボットは、使っている地図のほかに、次に切り替える地図を先読みしておく機能を追加した。地図の切り替え位置に到達したときには、先読みしていた地図に切り替えることで、ロボットは一時停止することなく走行し続けることが可能となった。また、走行しつつ、さらに次の地図を先読みすることで、地図の枚数に関わらず適用できることを確認した。

今回は、地図切り替えの際に気づいたが、ロボットが急に停止することは周囲の歩行者にとって危険がともなうことを認識した。安全・安心なパーソナルモビリティを実現させるためには、可能な範囲で緩やかに減速すること、また安全の観点からすればロボットが減速することを音や光で周知する必要があることが分かった。

【横断歩道における一時停止の問題と対策】

ロボットは、横断歩道の直前で一時停止を行い、走行管理者による自律走行再開の指示を待つ。このときに自己位置推定が破綻する可能性が高いことが判明した。これは、前述の地図切り替えの問題とは異なる。そこで、一時停止の様子を詳細に解析したところ、ロボットが一時停止の指令を送ってもロボットは慣性の影響によりすぐには停止しないが、ロボットのプログラムでは自己位置推定を停止しており、その惰性で動いた移動量が考慮されていないことが判明した。このため、ロボットが一時停止の有無に関わらず、常にセンサを計測し続け、惰性で動く移動量も自己位置推定に反映できるように変更した。

この変更を加えて実験を行ったところ、おおむね改善できたが、信号待ちのように数分間待機しているような状況では自己位置推定が悪い場合があることが分かった。これについて考察したところ、ロボットが停止中には車輪の回転数はないためエンコーダに変化はないが、ジャイロは待機している間にドリフト誤差が累積され、ロボットの方向が正しくなくなることが判明した。つまり、ロボットのセンサを信じるならば、信号待ちの間にロボットの向きが少しずつ変わってしまうことを意味する。

そこで、一時停止の状態においては、車輪の回転数をエンコーダ値から求め、車輪が回転していない場合にはジャイロのドリフト誤差が蓄積しないように改良を加えた。これにより、横断歩道等において一時停止した際の問題が改善された。

【道路横断における問題と課題】

前述の対策によって多くの場合の問題が改善され、走行できないルートはなくなった。しかし、それでも道路横断をする際には自己位置推定が悪くなることが分かった。走行中のログを解析したところ、二つの問題があることが分かった。

一つ目の問題は、路面の凹凸である。ロボットは基本的に歩道を走行しているが、一般に、車道は歩道よりも低い位置にある。また、車道と歩道がほぼ同じ高さにあつ

たとしても、その境界部分は、道路の雨水が側溝へ流れるように凹んでおり、完全な平坦とはなっていない。つまり、ロボットが道路を横断する際には、必ず姿勢が変化してしまうため、自己位置推定に重要となる地図が歪んでしまうことが判明した。この問題への対策として、姿勢変化を検出する重力加速度センサの利用が考えられるが、ロボットの振動なども検出してしまうため問題となる。三軸ジャイロの利用も考えられるが、姿勢変化は短時間であることから高価なジャイロを用いる必要があり、それを使う価値については検討が必要である。

もう一つの問題は、自己位置推定として有効な障害物の少なさである。本研究で用いているロボットはコストと処理能力を低減させるために、図表 3-2 に示すミラーユニットで三次元地図を作成している。そのセンサの都合上、自己位置推定はロボットの側方の情報に頼っている。ここで、道路を横断している間のロボットの側方は、障害物のない道路もしくはロボットの横断を待っている車両である。車両の有無や形、位置は、走行のたびに異なるため、自己位置推定には使えない情報である。この問題への対策として、道路横断中は、ジャイロと車輪の回転数から移動量を推定するジャイロオドメトリのみに切り替える必要があるかもしれない。車線の多い交差点などでは、道路を横断する距離が長くなり、ジャイロオドメトリでは対応ができないかもしれない。この場合には、横断歩道の白線が道路に記されていることが多いと考えられるため、この白線を頼りに走行するのが良いかもしれない。

(3) 走行エリアごとの回避方法、ロボットのサイズや速度の違いによる安心感等の検証

(ア) 追従走行及び夜間での検証

パーソナルモビリティの利用は必ずしも一人とは限らず、友達などの複数人で利用することが考えられる。ここで、本研究の自律移動ロボットの手法をそのまま適用した場合の問題について検討するとともに、その対策の一つとしての追従走行について実証実験を行った。

【複数人による利用の問題】

パーソナルモビリティに二人以上が乗る場合には、モビリティが大型になり、歩道を走行する歩行補助車の定義から外れてしまう。そこで、一人乗りのパーソナルモビリティを二台以上で利用する場合を考える。基本的には、パーソナルモビリティに自律移動ロボットのプログラムを移植させ、それぞれ自律走行させることで適用できる。しかし、以下の状況で問題になると考えられる。

今、二台のパーソナルモビリティが前後に並んで走行しているものとする。なお、パーソナルモビリティが横に並んで走行することは、歩道のような限られた場所では適していない。ここで、前方のパーソナルモビリティが障害物を検出し（あるいは歩行者用信号が赤で）停止すると、後方のパーソナルモビリティは一旦停止するものの、

前方のパーソナルモビリティを回避し追い抜こうとする。パーソナルモビリティが三台、四台…と増えた場合には、大きな問題となる。

また、パーソナルモビリティが前後に走行していた場合、モビリティ間の距離が広すぎると、その間を横切る歩行者や自転車利用者がいると考えられ、その場合、後方のパーソナルモビリティは減速もしくは緊急停止をすることになる。

このような背景から、複数人によるパーソナルモビリティの利用では、個々に移動するのではなく、グループとしてある程度集まって走行することが望ましいと考えられる。

【追従走行】

本研究のロボットは、LiDAR ミラーユニットによって、前方の物体を検出することができる。これを利用し、前方の自律走行ロボットを検出し、そのロボットに追従することとした。なお、検出したロボットまでの距離が一定となるように制御しているため、前方の自律走行ロボットが止まれば後方のロボットも止まり、追い抜くことはない。

【実験条件】

この手法の有効性を検証するために、2017 年 8 月 30 日 18:00-19:30 において、図表 3-99 に示すイオンモール近くの歩道にて追従走行の実証実験を行った。なお、この日は夕暮れから日没になる時間であり、夜間走行に関する実験も兼ねている。

前方のロボットは、これまで通りの自律走行のプログラムを用いる。ただし、最高速度は通常 1.0~1.2m/s で走行しているが、今回の場合には後方のロボットが追従しやすいように 0.8m/s としている。また、後方の追従ロボットが前方の自律走行ロボットを検出しやすいように、センサが検出する高さに湾曲させた板を取り付けた。

後方の追従ロボットの最高速度を 1.2m/s と 1.0m/s で実験した。最高速度を前方の自律走行ロボットと同じにしまうと、前方のロボットに追いつけないためである。



図表 3-99 追従走行を行ったイオンモール近くのルート

【実験結果と考察】

最初に、前方の自律走行ロボットの速度を 0.8m/s 、後方の追従ロボットの速度を 1.2m/s として、実験を行った。前の自律走行ロボットの加減速や停止には十分対応できしており、この点は有効であることが確認できた。ただし、前方の自律走行ロボットが直線的な経路を走行している状況において、後方の追従ロボットが少し左右にぶれる様子が確認できた。また、前方の自律走行ロボットが円弧を描く経路を走行する際に、後方の追従ロボットが対象を見失い、その場で停止する、あるいは、周囲の人を対象と誤って検出してしまう問題が確認できた。

次に、後方の追従ロボットの速度を、 1.0m/s にして同じ実験を行った。前方の自律走行ロボットが直線的な経路を走行している状況においては、問題なく追従できていることが確認できた。ただし、前方の自律走行ロボットが円弧を描く経路を走行する際には、改善しているものの対象を見失う問題が確認できた。

これらの実証実験から、対象を見失わない工夫が必要であることが分かった。対象を見失うのは、追従のために追従ロボットが急に旋回することによって追従対象の見え方が急激に変わることが原因と考えられる。追従ロボットは、自身が旋回することを把握しているので、追従対象の位置を予測して検出することで、この問題は改善できると考えられる。その他の対策として、前方のロボットに赤外線 LED を取り付け、それを検出する既存研究もある。しかし、これらは屋内でしか実験しておらず、屋外では太陽光が強く検出できないことが予想される。また、ARToolKit などのような特徴的なマークを前方のロボットに取り付け、カメラで検出する案も考えられるが、暗い場所では見えない可能性もある。一方、ロボットに搭載した LiDAR は対象までの距離だけでなく受光強度（レーザが対象に当たって戻ってきたセンサ値の強さ）も計測できるため、対象に反射テープをバーコードのように貼っておくことで、周囲の人を対象と誤って検出する問題に対処できると考えられる。

実験の様子を、図表 3－100 に示す。ロボットは前方のロボットや周囲の障害物をレーザセンサで検出しているため、日が暮れて暗くなった場合でも、明るい日中と変わらず問題なく走行できることを確認した。



図表 3－100 追従走行の様子

(イ) 車体の大きさに対する検証

車体のサイズが大きくなると、交差点などにある狭いボラード間を通過する際に、余裕が少なくなるため、問題が生じる可能性がある。また、同じ速度であっても、人によっては恐怖を感じる場合がある。そこで、車体の大きさによって、走行にどのような影響があるのか、また、周囲の人にとってどんな印象を与えるのかについて調査することとした。ただし、これまでと同等の安全性を保持する必要があることから、歩行補助車の最大となる大きさのカバーを作成し、これまで用いてきたロボットに搭載することで、車体の大きさに対する検証を行うこととした。

【歩行補助車のサイズ】

現在のロボットは、安全のために、小型でかつ軽量としているが、将来的なパーソナルモビリティでは人が搭乗することから、より大きな車体となる。あまり大きくなると、運転免許やナンバープレートの交付が必要で、かつ、歩道ではなく車道を走行しなければならない。本事業では、電動車椅子などのような歩行補助車に分類されるパーソナルモビリティを目指していることから、歩行補助車の車体の大きさは、長さ 120cm、幅 70cm、高さ 109cm を超えない車体とする。

【ロボットに取り付けるカバーの製作】

ロボットが重くなると、緊急停止ボタンを押しても急に止めることはできない。また、万一、衝突したときに、人や物に与えるダメージが大きくなってしまう。このため、見た目は大きくするものの、できるだけ軽量にすることを意識したカバーを製作した。

ロボットの幅および高さは、歩行補助車の車体の最大の大きさとした。一方、長さ（奥行）は、今回の検証ではあまり重要でないことから意図的に大きくすることはしなかった。結果として、ロボットの幅は従来の約 2.6 倍となった。高さは従来の約 1.3 倍であるが、従来のロボットの上半分は緊急停止ボタンとランプがアルミ棒に取り付けられているだけである。カバーが取り付けられた高さとして考えると、高さは約 2.6 倍となった。製作したカバーの重量は、2.6kg となった。ロボット本体の重さは約 18kg であることから、およそ 15%の重量増加となった。もう少し重量を減らしたかったが、突風でカバーが外れたりしないよう、ある程度の強度が必要であることから、15%の重量増加はやむを得ないと判断した。

製作したカバーを取り付けた車体を図表 3-101 に示す。なお、参考までに、これまでに用いてきたロボットと同等の大きさのロボットを横に並べてある。前方から見た時の面積がずいぶん増加していることが分かる。

【廊下での実証実験】

このカバーを取り付けたロボットを建物内の幅 1.75m の廊下で走行させた。廊下には、靴箱などが一部置かれており、通路の幅は部分的には 1.2m だった。走行自体は問題なかったが、周りから見ていると相当な圧迫感が感じられた。身長の高い子供にとっては、恐怖に感じる可能性があることが分かった。ただし、移動速度を遅くすることで、これらの問題は少なくなることも確認できた。

これらの結果から、大きさはある程度小さくすることが望ましく、廊下などの狭い場所では十分に減速して走行することが安全・安心のために重量であることが分かった。

【屋外での実証実験】

9月25日14時～16時30分と、10月24日13時～15時30分に、海浜幕張駅の近くでカバーを取り付けた実証実験を行った。プログラムとしては、車体の大きさに合わせて、減速や緊急停止をする範囲を変更したものの、それ以外は同じとした。実証実験をしたときの主観的な印象ではあるが、屋内と異なり、屋外ではそれほど圧迫感は感じられなかった。しかし、これまでのロボットの横幅が約41cmなのに対し、横幅が70cmになったため、二本のボラードの間を通過するときに、余裕が少ないことが分かった。具体的には、自己位置推定に誤差が生じると、二本のボラードの中央を通ることができず、減速するだけでなく、場合によってはボラードを障害物のように回避する動作も確認できた。

屋外での実証実験の結果としては、多少の圧迫感はあるものの、ボラードの部分を除けば、大きな問題はないように思えた。

将来的には、ボラードの部分も円滑に走行できる必要があると考えられる。なお、後述する手法によって、ロボットがボラードを認識することができれば、その領域においては経路追従ではなく、二本のボラード間の中央を目指して走行する手法に切り替えることで対応できると考えられる。



図表 3-101 歩行補助車の最大サイズとなるカバーをつけたロボット

(ウ) スロープ等における回避経路計画

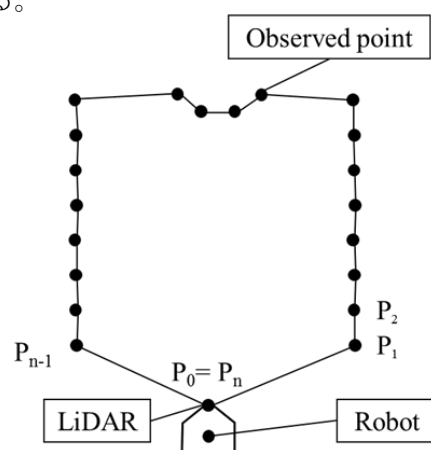
ロボットには、これまでも障害物を回避するプログラムが組み込まれていたが、回避の対象は基本的に静的な障害物であることを想定していた。一方、屋外の日常的な環境では、歩行者などの移動障害物は多く存在する。公園などの広い環境では、障害物を大きく迂回するだけでも対処できるが、スロープ等の限られた空間において、歩行者とすれ違う状況では、問題となっていた。本章では、この問題に対処するプログラムを作成するとともに、実証実験によってその有効性を検証する。

【移動障害物の検出】

スロープ等の限られた空間において歩行者と円滑にすれ違うためには、スロープの左右にある転落防止のための欄干のような静止障害物と、歩行者のような移動障害物を区別することが望ましい。ここで、静止障害物と移動障害物の違いは速度であるが、高精度に速度を算出することは容易ではなく、計算処理も大きくなってしまう。本研究では、速度を算出することなく、静止障害物か移動障害物かを判断する手法を採用することとした。

【安全領域の設定】

ロボットは LiDAR によって障害物を検出しているが、きれいに磨かれたガラスなどを除き、LiDAR のレーザ光は障害物を貫通しない。つまり、LiDAR の設置点と LiDAR によって観測された点によって作られた線分上には障害物が存在しない。これを LiDAR の観測点すべてに適用することで、図表 3-102 に示すような障害物が存在しない領域を生成することができる。本報告では、以後、この障害物が存在しない領域を安全領域と呼ぶこととする。



図表 3-102 安全領域の設定

【観測点の移動性の判定】

現在時刻 t において LiDAR によって取得された点が、一つ前の観測時刻 $t-1$ に生成

された安全領域の内部にあれば、その点は時刻 $t-1$ の位置から移動して安全領域内に進入した移動障害物の一部（以降、移動点）であると判定できる。なお、現在地図座標でのロボットの現在位置はドリフト誤差や積分誤差が含まれているが、サンプリング間隔が 100 m/s 以下と短いため、前後 2 つの時刻の点群情報を比較する分にはこの誤差は無視できる。

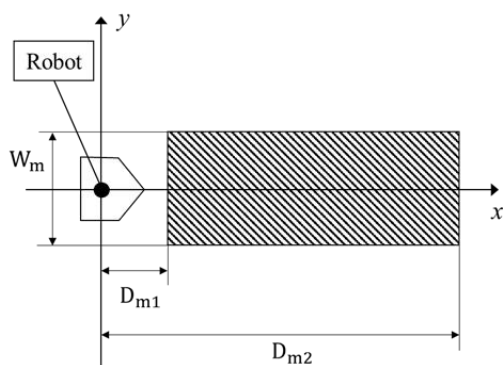
時刻 t において計測した点が、時刻 $t-1$ の安全領域の内部に存在するの否かの判定には、対象の点を基準とした時刻 $t-1$ のすべての点との内積および外積の式を用いる。

【誤判定の防止】

LiDAR で観測した点群情報には、LiDAR の計測誤差やロボットの位置誤差などが含まれる。そのため、わずかな誤差によって点の内外判定が誤ってしまう可能性が存在する。この問題に対処するために、二つの対策を行った。

一つ目の対策は、主に LiDAR の計測誤差への対策である。具体的には、LiDAR で観測した点のすべてに対し、誤差を考慮するための半径 r mm の円領域を設け（以降、誤判定防止領域）、その領域内に別の点が存在するならば、同一の点と判断することとした。

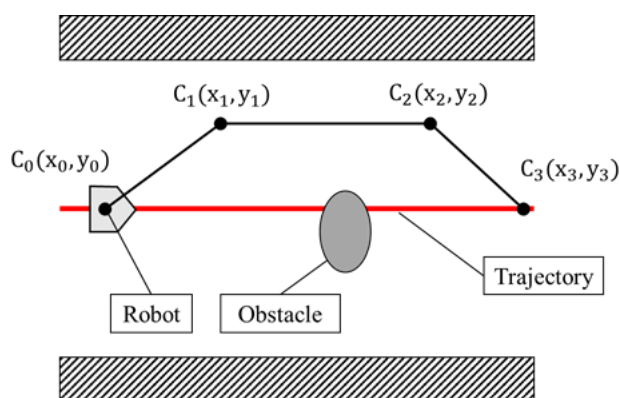
もう一つの対策は、ロボットの位置誤差への対策である。この手法の座標は現在地図座標を用いている。現在地図座標でのロボットの位置取得の際には、サンプリング間隔が微小であり、ロボットはジャイロセンサの取得した角度方向へ進行すると仮定している。そのため、ロボットが短い時間の間に大きく回転すると、ロボットの移動量の誤差が大きくなり、結果として、障害物の位置情報の誤差も大きくなってしまう。この問題に対処するため、ロボットを基準としたロボット座標系において、図表 3-103 に示す移動障害物検出領域を設け、その内部に 2 回連続で観測されたとき、回避すべき移動障害物が存在すると判定することとした。なお、図表 3-103 における移動障害物検出領域の大きさを決定するパラメータは、 $D_{m1}=1000$ mm、 $D_{m2}=5000$ mm、 $W_m=700$ mm とした。



図表 3-103 移動障害物検出領域

【障害物回避経路】

スロープのような道幅が狭い通路内において、ロボットが進む予定の経路上に移動障害物が存在する場合について、図表 3-104 を用いて説明する。図表 3-104 ではロボットは左側に位置し、中央の線上を右側に向かって走行している。図の上下（ロボットに対しては左右）の斜線部はスロープの欄干である。ここで、ロボットの走行予定である中央の線上に、移動障害物が存在すると判断された場合、図表 3-104 に示す三点 C_1 、 C_2 、 C_3 を設定し、ロボットはそれらの点を結んだ線を追従させることで、障害物を回避するものとした。



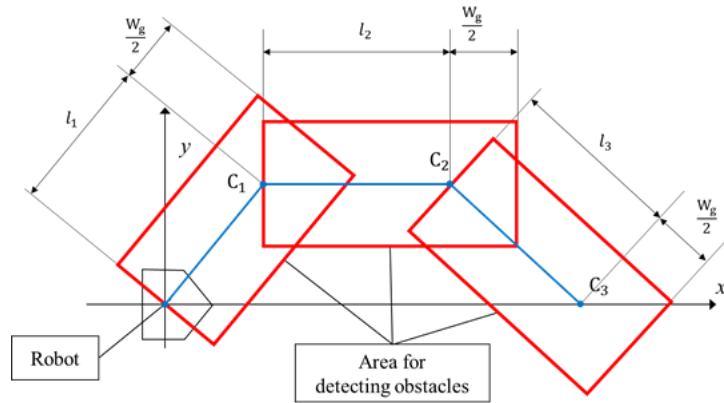
図表 3-104 回避経路を構成する C_1 、 C_2 、 C_3 の設定

この手法で最も重要なことは、三点 C_1 、 C_2 、 C_3 の決定方法である。図表 3-104 では欄干を想定し、直線で描画しているが、必ず直線的とは限らない。また、移動障害物のサイズによって迂回する度合いが異なる。つまり、三点 C_1 、 C_2 、 C_3 は事前に決めておくのではなく、状況によって決める必要がある。

三点 C_1 、 C_2 、 C_3 の組み合わせは無数にある。そこで、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm、以降、GA) を用いて三点 C_1 、 C_2 、 C_3 を決定することとした。GA は生物の交叉、突然変異、淘汰を繰り返し進化していくプロセスをコンピュータ上で再現したアルゴリズムである。GA で最適解を導くためには多くの計算時間が必要であるが、最適解に近い準最適解でよいならば比較的少ない計算時間で導くことができる。ロボットの回避行動では、長い時間をかけて最適経路を求めても、周囲にいる歩行者の動きは時々刻々と変化する。つまり、多くの計算時間をかけて最適経路を求めることよりも、ある程度の基準以上の経路をなるべく少ない計算時間で求めることの方が重要視されることから、ロボットの回避アルゴリズムには妥当であるといえる。

本研究では、使用する GA の世代交代モデルは計算時間の短縮と個体の多様性の維持の観点から佐藤らによって提案された MGC (Minimal Generation Gap) 法を用いた。また、交叉手法については遺伝子を実数値であることを考慮し、Eshelman らによって提案されたブレンド交叉 (BLX- α) を用いた。

GA において最も重要なのは評価関数である。本研究では、図表 3－105 に示すように、三点 C_1 、 C_2 、 C_3 を結ぶ経路上に障害物の有無を調査し、障害物があれば評価を低くし、その経路が選ばれないようにしている。

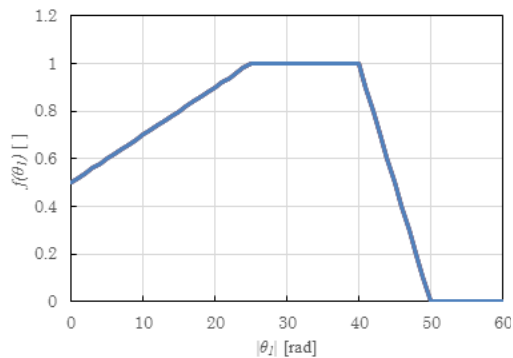


図表 3－105 中距離経路計画における障害物検出

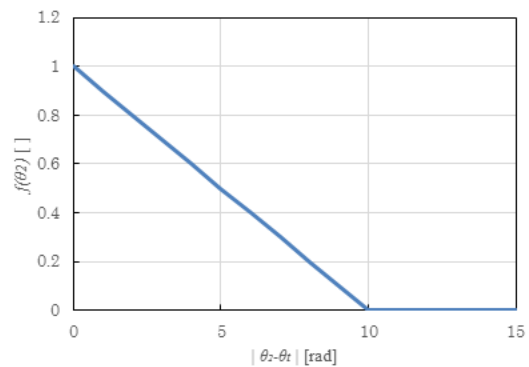
障害物が検出されなかった場合、以下の式により評価値 P を決定する。

$$P = f_1(l_2) + f_2(\theta_2) + f_3(x_3) + f_4(w_{\max})$$

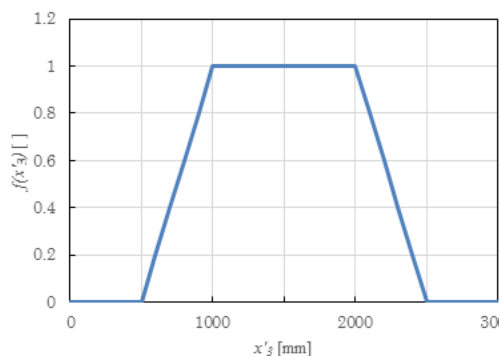
関数 f_i ($i = 0 \sim 4$) の決め方についての詳細は割愛するが、人だったらこういう経路で回避するであろうという既存知識を表現した関数であり、それぞれ図表 3－106～図表 3－109 の形状を持つ。一つ例に挙げて説明するならば、点 C_1 、 C_2 を結ぶ直線は、スロープを走行する状況においては一般に、ロボットが走行する予定だった経路と平行であることが望ましく、平行の角度からずれてくると適切でなくなってくる。これを表現した関数が図表 3－107 に示す関数 $f_2(\theta_2)$ であり、ロボットが走行する予定だった経路に対する角度が 0° 、つまり平行に近いほど評価が高くなるような評価関数にしてある。



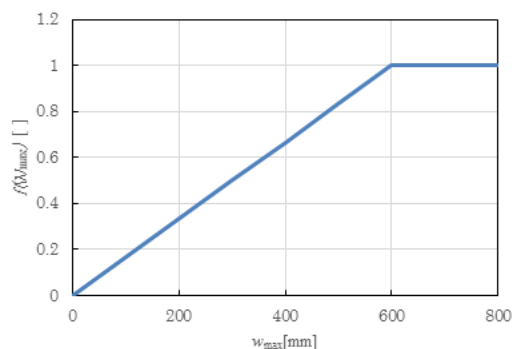
図表 3－106 関数 $f_1(\theta_1)$



図表 3－107 関数 $f_2(\theta_2)$



図表 3-108 関数 $f_3(x_3)$



図表 3-109 関数 $f_4(w_{\max})$

【検証実験】

提案手法の有効性を確認するために、千葉大学構内とちば運転免許センター近くのスロープにて実験を行った。

【千葉大学構内での実験条件】

千葉大学工学部 9 号棟 1 階の廊下で行う。廊下の幅は約 2.3[m]ほどである。廊下でロボットを速度 $v=0.7$ m/s で自律走行させ、正面から 1.0 m/s の歩行者を接近させ、ロボットに中期経路生成による回避を行わせる。歩行者はロボットを回避せず、通路の中央を通路に平行に歩くものとする。また、比較のため、従来手法による移動障害物回避も行う。

【千葉大学構内での実験結果と考察】

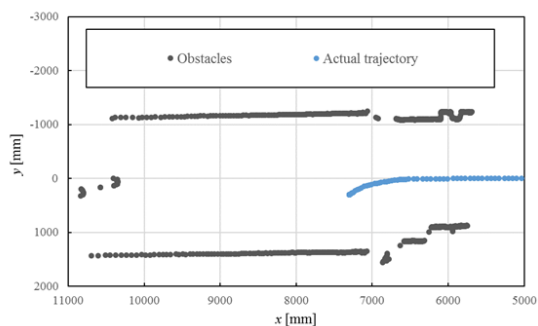
実験時のロボットの走行経路と障害物情報について、従来手法を用いた結果を図表 3-110 に、提案手法を用いた結果を図表 3-111 に示す。なお、図中の障害物情報は、ロボットが障害物を検出した際に取得したロボット周辺の障害物情報である。また、提案手法でのロボットの走行時の写真を図表 3-112～図表 3-115 に示す。なお、図表 3-110、図表 3-111 の x 軸、y 軸は現在地図座標系における変位を表し、図表 3-112～図表 3-115 の写真の向きと合わせるために左向きを x 軸の正方向、下向きを y 軸の正方向としている。

図表 3-110 では走行軌跡が途中で途切れているが、これは歩行者に対して回避が間に合わず、走行の途中で歩行者に接触したためその場で停止させたからである。

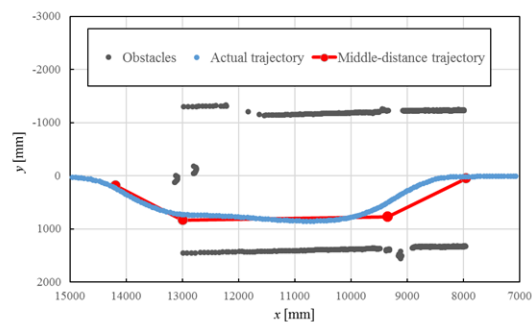
図表 3-111 より約 5 m 前方の移動障害物を検出し、移動障害物を回避する中期経路を生成したことがわかる。また、この中距離経路に追従することで歩行者との円滑なすれ違いが実現されたことが確認できた。

ロボットは歩行者から十分に離れた状態である図表 3-112 において、すでにロ

ボットは左に回避するために向きを変えていることが分かる。歩行者はこのような向きの変化から「このロボットは自分の右側を回避する」ということがわかるため、狭い場所ではあるが安心してすれ違いが実現できた。



図表 3-1-10 従来手法による実験結果



図表 3-1-11 提案手法による実験結果



図表 3-1-12



図表 3-1-13



図表 3-1-14



図表 3-1-15

【免許センター近くのスロープでの実験条件】

イオンタワー横の道路における自律走行と、免許センター近くのスロープで実験を行った。スロープにおける実験条件は、千葉大学構内とほぼ同じである。

【イオンタワー横の道路および免許センター近くのスロープでの実験結果と考察】

6月29日14時～16時に地図を作成し、自律走行を行った。ただし、予想以上にジャイロオドメトリの誤差が大きく、途中で地図を切り替えるべき場所で切り替えなか

ったため、当日の自律走行は橋を渡る付近で自己位置推定が破綻した。その後、研究室に戻り、オフライン実験によって地図を作り直した。

8月7日10時～12時は、研究室で作直した地図を用い、自律走行を行った。この日はスロープを含めて自律走行することができたが、スロープで歩行者がいなかったため回避の実験は行っていない。

12月25日14時～15時30分に、スロープでの実験を行ったが、プログラムに改善点が見つかり、この日は断念し、後述する信号機認識の実験をした。

1月29日14時～15時30分に、スロープのみの実験を行った。その時の様子を図表3-116～図表3-121に示す。歩行者が近づくと遠くから回避が始まり、円滑にすれ違えることを確認した。



図表 3-116



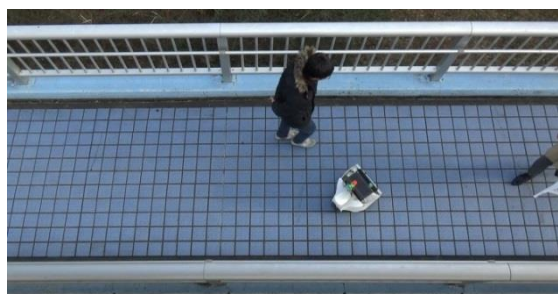
図表 3-117



図表 3-118



図表 3-119



図表 3-120



図表 3-121

(4) 自律走行に必要な技術検証

(ア) 横断歩道の検出

【畳み込みニューラルネットワークによる横断歩道検出】

前述のように、横断歩道を走行中は、自己位置推定に有効な固定障害物が少なく、位置推定が破綻する可能性がある。そこで、ロボットに搭載したカメラを用いて、横断歩道の認識を試みた。具体的には、深層学習の一種である畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network、以後、CNN) を用いて学習し、認識を行う。さまざまな状況においても正しく認識ができるよう、直射日光下・雨天時・日陰といった条件の画像を用意し、訓練データとして学習させた。ただし、微妙な色の変化で認識率が変化することが予想されたため、本研究では k 平均法という手法を用いて画像の減色という下処理をしてから学習させることとした。

検出用のカメラは水平向きに固定してある。そのため、撮影画像の上部から縦 240 pixel、横 640 pixel の範囲には空や建物の壁が写るのみで、道路が写ることが無いいため、横断歩道の検出範囲から除外する。よって、 $0 \leq x \leq 640$ 、 $240 \leq y \leq 480$ の 640×240 pixel の範囲を検出対象とする。

【横断歩道の検出方法】

横断歩道検出は、対象範囲の 640×240 pixel から 100×100 pixel の画像を x 方向に 90 pixel、y 方向に 70 pixel ずつ移動させながら切出し、合計 21 枚に分割する (3 行 7 列)。切出した画像 1 枚ごとに「横断歩道」と「その他」のどちらであるか CNN を用いて認識させる。1 枚の取得画像に対し、画像を分割することで複数回の認識を行うのは、横断歩道の誤認識やかすれで認識が困難な状態の時に、該当領域周囲の状況から認識結果を補完することで影響を抑えるためである。本研究では 1 枚の取得画像において複数の分割画像が横断歩道と認識された場合、横断歩道とロボットが同一平面上に存在すると仮定することで、画像内の横断歩道の検出位置からロボットが停止すべきか否かの判定をする。 $0 \leq x \leq 640$ 、 $240 \leq y \leq 340$ の範囲で横断歩道が検出された場合、0.5 m/s に減速する。また、 $0 \leq x \leq 640$ 、 $310 \leq y \leq 410$ の範囲で三枚以上横断歩道が検出された場合、0.3 m/s に減速し、取得画像内の検出対象の最下部に当たる $0 \leq x \leq 640$ 、 $380 \leq y \leq 480$ の 640×100 pixel の範囲において三枚以上横断歩道が検出された場合、ロボットは停止することとする。

訓練データの作成は、ロボットに搭載したカメラが取得した画像を用いる。取得した画像を、k 平均法を用いて適切な色数に減色し、検出時と同様に 100×100 pixel の大きさに切出した画像を使用する。本研究では訓練用データを「横断歩道」「その他」の二つのカテゴリに手動で分類する。「横断歩道」には、切出した画像の中で横断歩道が含まれている画像を分類する。カメラの設置方向の関係から、遠方ほど横断歩道が小さくなるが、同一カテゴリに分類した際、切出しサイズの関係から影響は少ないと

判断したため、「横断歩道」単一のカテゴリにまとめて分類する。「その他」には、道路だけでなく、路側帯や車道外側線、停止線等、横断歩道以外の白線も分類する。これは、横断歩道以外の白線を「その他」にしない場合、白線を横断歩道と誤認識する恐れがあるためである。作成した訓練データを CNN に学習させることで学習モデルを作成する。

【実験条件】

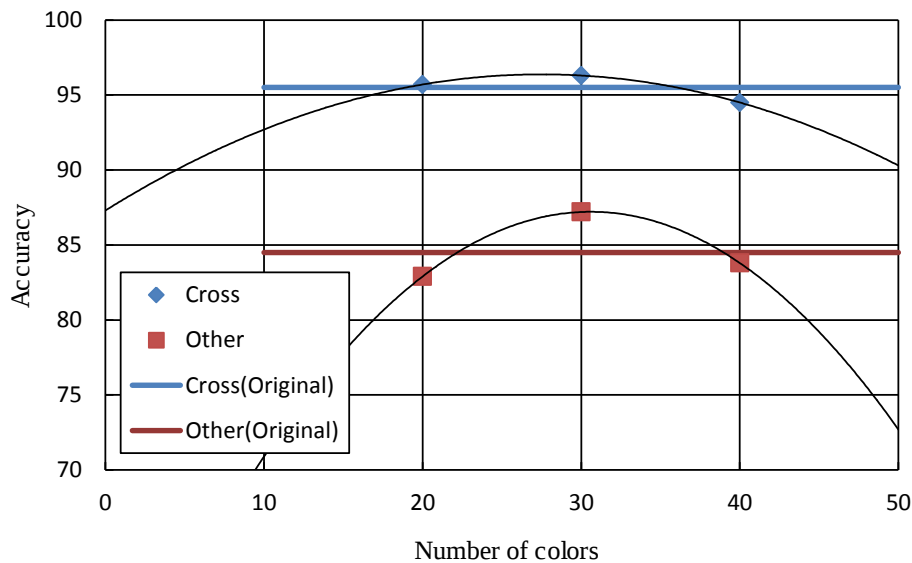
千葉市にある海浜幕張駅周辺にてカメラを使用し撮影した 93 枚横断歩道画像(8bit、3ch)を訓練データとして使用する。これは、実際の横断歩道の画像を学習させるためである。取得した画像を前述した手法で切出し、「横断歩道」と「その他」のカテゴリに分類を行う。切出しの結果、「横断歩道」は 1374 枚、「その他」579 枚となった。この訓練データを CNN に学習させる。CNN のネットワークモデルは本検証では GoogLeNet を使用する。また、画像切出し前に、取得画像を 20 色、30 色、40 色に減色した画像を作成し、同様の手法で訓練データを作成する。減色数を絞っているのは、事前実験により、20～40 色の間に適した減色数が存在することが判明しているためである。

検証用データは、千葉大学周辺にて撮影した横断歩道の画像 44 枚を使用する。訓練データで使った画像とは異なる地点で撮影した画像を用いるのは、学習済みの環境では、検出精度が向上するため、正しい検出精度を算出するためである。また、本研究は任意の地点の横断歩道の認識であるため、未学習の環境を使用することとする。検証用画像も同様に、20 色、30 色、40 色に減色し、100×100 pixel のサイズに切出し、各画像に対しての CNN の検出精度を算出し、その精度を比較する。

また、かすれた状態の横断歩道の検出の可否について調査する。

【実験結果と考察】

k 平均法による減色の効果を調査した結果を図表 3-122 に示す。横軸は減色した色の数、縦軸は横断歩道の認識率である。Original は減色なしの元画像を用いた結果である。横断歩道の検出精度を見ると、40 色減色時の検出精度は 94.5%で減色無しの場合の 95.5%を下回るという結果となった。一方、20 色減色、30 色減色時の検出精度はそれぞれ 95.7%と 94.5%であり、減色無しの場合の 95.5%を上回ったことから、検出精度が改善されたといえる。その他の画像の検出精度を見ると、20 色減色、40 色減色時の検出精度はそれぞれ 82.9%と 83.8%であり、減色無しの場合の 84.5%を下回った。一方 30 色減色時の検出精度は 87.2%であり、減色無しの場合を上回ったことから、検出精度が改善されたといえる。



図表 3－1 2 2 k 平均法による減色の効果

また、減色数を x 、検出精度を y とし、「横断歩道」の検出結果と「その他」の検出結果を多項式近似するとそれぞれ

$$y = -0.012x^2 + 0.66x + 87.3$$

$$y = -0.0385x^2 + 2.355x + 51.2$$

となり、 x で微分して極大値を求めると「横断歩道」では $x = 27.5$ 、「その他」では $x = 30.6$ だった。横断歩道の検出精度は1%弱の変化であったが、その他の検出精度は3%弱向上している。この結果から、30色近傍に最適値が存在しているといえる。本検証では30色減色が「その他」の検出精度の改善に適した値であり、横断歩道の検出精度においても向上が確認できたため30色が減色に適した値といえる。なお、正確な減色数の検証は、最適な減色数は取得環境により変化すると考えられる点、横断歩道の精度改善が1%弱であったことから最適値の精度の向上は30色減色時と比較し微小であると考えられる点から、検証は行わない。

以上の結果から、CNNを用いた横断歩道の検出は、k平均法により取得画像を30色に減色した後に認識することで、元画像よりも高い精度での認識が可能であることが分かった。

理想的な横断歩道での認識は問題ないことが分かっていることから、今回は幕張新都心において横断歩道がかすれている図表 3－1 2 3～図表 3－1 2 5の画像に対して認識の検証を行った。図表 3－1 2 3では横断歩道の認識率が89.5%、その他の認識率が100%であった。図表 3－1 2 4では横断歩道の認識率が90.0%、その他の認識率は81.8%であり、自転車横断帯を横断歩道と誤認識したが、横断歩道の認識は可能であった。その一方で、図表 3－1 2 5のような状態の横断歩道では、CNNによる検出精度

は 20%であり、高精度に認識することはできなかった。以上の結果から、横断歩道の概形が認識可能な程度のかすれの場合は CNN による認識が可能であることが分かった。



図表 3－1 2 3 実験環境その 1



図表 3－1 2 4 実験環境その 2



図表 3－1 2 5 実験環境その 3

(イ) 歩行者用信号機認識

ロボットが任意のエリアに行くためには、現状では、横断歩道を渡る必要がある。そこで、横断歩道にある歩行者用信号機を検出するとともに、赤信号か青信号かを自動識別する手法について実証実験を行った。なお、歩行者用信号機がない横断歩道では、車などが来ないことをロボット自身が判断しなければならないが、そのためには現在のロボットに搭載しているセンサでは能力的に不足しているため、今回は対象としていない。

【信号機認識の問題点と検出手法の概要】

日常環境の不特定の信号機の色を識別する際の問題点として、

- ・ ロボットが停止した位置の違いによる取得画像中の信号機の位置変化
- ・ 横断地点ごとに異なる信号機の位置
- ・ 信号機によって発光部の規格が異なる

という点が挙げられる。これらの問題点が存在する中で信号機認識をするためには初めに取得した画像内の信号機の位置を特定する必要がある。また、歩行者や車両な

どにより信号機が隠された場合に誤判定が起きることを防がなければならない。加えて、信号機認識をする際に、識別領域に背景等信号機以外が含まれる場合、領域内に信号機以外の信号色類似画素が存在する可能性があり、それが原因となり認識に失敗する可能性がある。そのため、信号機認識をするには、信号機のみを厳密に切出すことが望ましい。したがって、信号機認識のための取得画像から信号機のみを切出す手法を採用する。

【畳み込みニューラルネットワークを用いた信号機検出】

信号機の発光部には大きく分けて 2 つの規格があり、枠の色も設置場所により異なる。他にも、ロボットの位置によって信号機の見え方が変化する点、カメラは外乱光の影響を受けやすいため、日照条件や天候に変化が生じると信号機の見え方や色合いに変化が生じてしまう点が挙げられる。これらの問題により、信号機はそれぞれ異なる見た目を有するため、検出することは容易ではない。これらの問題を解決するために、訓練データとして与えられた画像から自動で識別に必要な特徴を学習するという、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を使用する。本研究では NVIDIA 社の深層学習の学習環境である DIGITS を用いて学習させる。

【訓練データの作成】

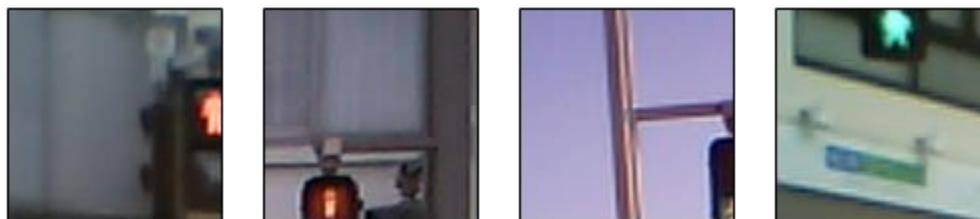
CNN で信号機を検出するためには、訓練データを作成し、それを学習させる必要がある。具体的には、図表 3－1 2 6 に示す「信号機」と、図表 3－1 2 7 に示す「その他」の二種類のカテゴリを用意し、訓練データを作成した。なお「信号機」のカテゴリの画像には赤信号と青信号の画像を、規格ごとに分けて全ての信号機画像が含まれており、「その他」のカテゴリの画像には、信号機が写っていない、木や建物、空等様々な切出し画像が含まれている。加えて、図表 3－1 2 8 のような信号機の一部が切出された画像も「その他」のカテゴリに分類する。これは、信号機の位置を正しく特定できていない画像を信号と判定することを防ぎ、識別した場合でも信号機である確率を減少させるためである。作成した訓練データを CNN に学習させることで学習モデルを作成する。



図表 3－1 2 6 信号機の例



図表 3－1 2 7 その他の例



図表 3－1 2 8 信号機の一部の例

【検出方法】

信号機の検出時に信号機が車両等の移動障害物によって隠されている状況も想定される。そのため、CNN による検出を 3 回まで行い、1 度でも検出された場合は切出しの次の段階に移行、検出されない場合は信号機が常に隠されていると判定し、人追従による道路横断へ移行する。

【CNN のネットワークによる検出精度の比較】

【実験条件】

DIGITS のデフォルトネットワークである AlexNet と GoogLeNet に学習させた場合の検出精度比較のためのオフライン実験を行う。これらは画像認識コンテスト (ILSVRC) においてカメラ画像を 1000 カテゴリに分類するために作られた CNN である。実験に使用する訓練データとして、複数の日時・日付に千葉大学周辺、幕張ベイタウン、つくば、海浜幕張駅周辺にて撮影した画像を使用する。前節にて述べた手法で画像を切出し、信号機 268 枚、その他 1756 枚に分類し、それぞれのネットワークに学習させた。検証用データは訓練データで使った画像とは異なる日時に千葉大学周辺にて撮影した画像 44 枚を使用する。これは、訓練データと同一の環境であった場合、一度学習した画像を検出することになり、ネットワークの検出精度を正しく検証できないためである。

【実験結果・考察】

それぞれのネットワークに検証データを認識させた結果を図表 3－1 2 9 に示す。

信号機の画像 60 枚を認識させた結果、GoogLeNet で学習した場合では認識率が 91.7% であったのに対し、AlexNet では 80.0% であった。この結果から、信号機は GoogLeNet の

方が高い精度での認識が可能であるといえる。それぞれが誤認識した画像例を図表 3-130、図表 3-131 に示す。誤認識した画像は共通して信号機が切出し画像の端に位置している場合であった。これは、その他の訓練データに分類された信号機の一部(図表 3-128)が影響したためと考えられる。なお、GoogLeNet での認識率は 91.7%であるが、これは 1 枚の取得画像から複数枚の信号機を含む画像が切出されたときに、その一部が認識されなかったためである。元画像 44 枚において、各画像から最低 1 枚以上信号機の認識に成功しているため、元画像からの検出率は 100%であるといえる。

その他の画像では、認識率の差が 0.1%ではあるが、GoogLeNet が AlexNet を上回った。それぞれの誤認識の例を図表 3-132、図表 3-133 に示す。それぞれバス、乗用車を信号機と誤認識したが、これはそれらが訓練データに入っておらず、「黒色と信号色」の組合せから信号機と認識したと考えられる。

信号機の一部 135 枚を認識させた結果、GoogLeNet では 12 枚、AlexNet では 4 枚を信号機と認識した。AlexNet の方が誤認識の枚数が少ない結果となったが、GoogLeNet での誤認識における信号機の尤度は、信号機全体が写っている画像の尤度を下回っているため、問題は生じないと考えられる。

以上のことから、これ以降の CNN による認識では GoogLeNet を使用することとする。

	AlexNet	GoogLeNet
Signal	80.0%	91.7%
Other	99.7%	99.8%

図表 3-129 認識率に対するネットワークの比較



図表 3-130 AlexNet



図表 3-131 GoogLeNet

その他と誤認識した例



図表 3-132 AlexNet



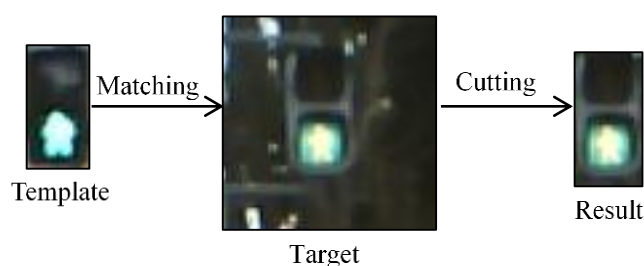
図表 3-133 GoogLeNet

信号機と誤認識した例

【テンプレートマッチングによる信号機切出し】

CNN を用いることで取得画像における信号機の大まかな位置を特定することが可能となった。ここでは、信号色の識別に向けたテンプレートマッチングを使用した信号機のみ切出しについて述べる。

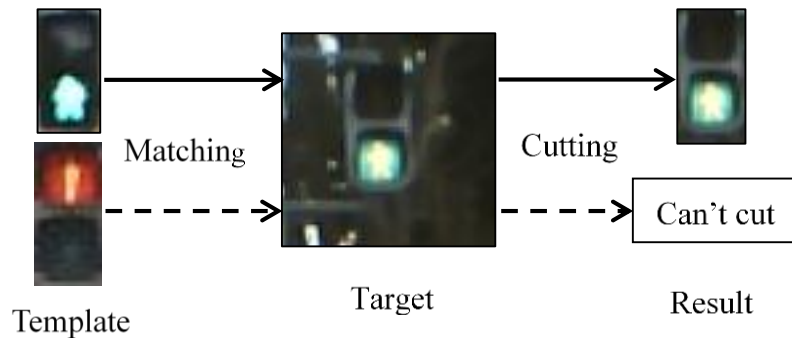
テンプレートマッチングとは画像処理の一手法で、テンプレートと呼ばれる小さな一部の画像領域と同じパターンが画像全体の中に存在するかどうかを調べる方法で、画像内にある対象物体の位置検出、物体数のカウント等に使われている。テンプレートを画像の中で順番に移動させながら、テンプレートとテンプレートに重なる部分の画像の類似度を算出するため、その情報を元に対象物体を特定する（図表 3－1 3 4）。



図表 3－1 3 4 テンプレートマッチングによる切り出し

【テンプレートマッチングの適用手法】

事前に範囲を絞り、その領域に対しテンプレートマッチングにより信号機を切出すという方法には、①「環境によって見え方が変化」、②「信号機との距離に応じて見かけの大きさが変化」といった問題が存在する。これは、信号機は日照条件の変化によって発光部の見え方に変化が生じるだけでなく、前述した発光部の種類が異なる、枠部分の塗装が異なるということである。①の問題に対処し、正しく信号機を切出すためには、類似度を高める必要があり、そのためにはそれぞれに対応したテンプレートが必要となる。したがって、異なる日照条件や環境においてロボットに搭載しているカメラにて信号機画像を取得する。取得した画像から信号機のみを手動で切出し、テンプレートとする（図表 3－1 3 5、図表 3－1 3 6）。発光部だけでなく信号機全体をテンプレートとしたのは、次章で説明する信号色識別において、信号機全体を切出した画像を使用するためである。ロボットに搭載したカメラを用いるのは、マッチングにカメラ特性が影響するためである。また、赤信号に対し青信号画像をマッチングさせるといったように、異なる信号色のテンプレートを使用した場合、信号機と異なる位置で類似度が高くなり、正しく信号機を切出すことができない（図表 3－1 3 7）ため、赤信号、青信号の両方のテンプレートを用意する。



図表 3-137 テンプレートからの切り出しの例

用意した各テンプレートを CNN による切出し画像に対しマッチングを行う。この時、異なる色のテンプレートを使用した場合、基本的には類似度が低下するが、正しい色のテンプレートの場合は類似度が高く維持される。そのため、CNN によって切出された画像の信号色がどちらであるかを事前に把握する必要はないと考えられる。そして、テンプレートマッチングの結果類似度が最も高い範囲を信号機と判定する。

②の問題に対しては、信号機は横断待機者に対し向かい合う方向に設置されていることから、信号機画像を正面方向から取得が可能である点に着目する。この場合、信号機との距離が変化すると、信号機は見かけの大きさが変わるだけで、概形の変化は少ない。そこで、用意したテンプレートを 0.7 倍～1.2 倍まで 0.1 ずつ尺度を変化させながら拡大・縮小しマッチングさせることで対処する。

【信号機切出し時の障害物による遮蔽対策】

CNN による検出と同様に、テンプレートマッチングによる切出し時においても移動障害物による遮蔽が問題となる。そのため、一回のテンプレートマッチングのみで切出し位置を決定すると、切出し時に移動障害物により信号機が隠されていた場合に誤った位置を切出す可能性がある。そこで、一度で切出し位置を決定するのではなく、画像を三枚取得しそれぞれの画像に対しテンプレートマッチングによる信号機の切出しを行い、最も類似度が高い範囲を信号機の位置として切出すこととする。これにより、信号機とは異なった位置を切出してしまう可能性を減らすことができる。

【信号機切出しの検証実験】

テンプレートマッチングによる信号機のための切出しオフライン実験を行う。切出し精度と、テンプレートのスケーリングによる信号機切出し精度の変化を検証する。

【実験条件】

テンプレートは異なる場所・天候条件から取得した赤・青信号それぞれ 5 枚ずつ使用する。これにより、信号機の点灯部の種類、明るさ、取得画像内の信号機の大きさが異なる。対象画像は

(i) 同一環境で取得日時が異なる画像 109 枚

(ii) テンプレートと異なる場所での画像 79 枚

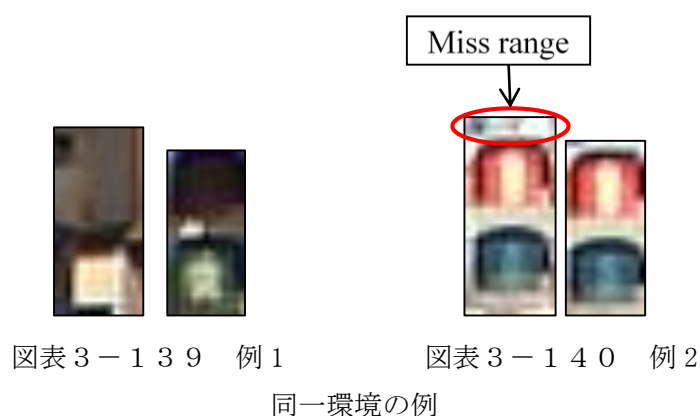
とする。(i) (ii) の画像に対し 0.7～1.2 倍のスケーリング有無のそれぞれの切出し成功率を算出する。

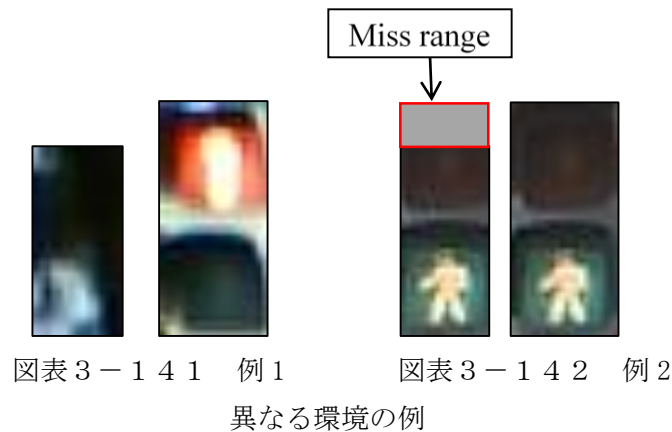
【実験結果】

それぞれの信号機切出しの成功率を図表 3-138 に、それぞれの切出し結果の例を図表 3-139～図表 3-142 に示す。図表 3-139、図表 3-141 が「スケーリング無し」、図表 3-140、図表 3-142 が「スケーリング有」にて切出した画像である。

	Original	Scaling
(i) Same environment	79.8%	93.6%
(ii) Different environment	81.0%	94.9%

図表 3-138 信号機切り出しの成功率





(i)の同一環境で取得日時が異なる場合、テンプレートのスケーリング無しの場合は信号機の切出しの成功率が 79.8%だったのに対し、93.6%と大幅に改善されている。スケーリング無し時の切出し失敗は2種類に分けられた。一つ目は図表 3-139のように、スケーリング無しでは信号機と全く異なる位置を切出ししている状態である。二つ目は図表 3-140に示す、切出し位置は正しいが、赤色点灯部の上部の背景も信号機として切り取られている。つまり切出しのサイズが異なっている状態である。これは信号機を切出す際に大きさが適切なテンプレートが無いことが原因である。その一方でスケーリング有の切出し画像に着目すると、信号機を正しく切出していることがわかる。スケーリング無しでは信号機の大きさの変化に対応できなかったが、スケーリングをすることで信号機を正しいサイズで切出すことが可能であるといえる。

(ii)のテンプレートと異なる環境においても、(i)と同様に、切出しの成功率が 81.0%から 94.9%と改善している。スケーリング無し時の切出し失敗は(i)と同様で図表 3-141のように信号機と異なる位置で切出した場合や、図表 3-142のように、信号機の点灯色が正しく切出せたが、消灯部の切出しに失敗する場合が見られた。その一方で、スケーリング有では適切な位置で適切な範囲を切出していることが確認できる。

以上の結果から、CNN にて信号機の位置を大まかに特定した後に、その範囲に対しテンプレートをスケーリングしマッチングさせることで、信号機のみを適切に切出すことが可能であることが確認できた。また、テンプレートを取得した環境と同一の環境での切出しと異なる場所での切出しの結果がそれぞれ 93.6%と 94.9%と、ほぼ同じ結果であったことから、提案した事前テンプレートによる複数環境での切出しは有効であるといえる。

(ウ) 信号機の色判別手法

【信号色識別の問題点と識別手法の概要】

実験結果より、取得画像内の信号機の有無の判定、検出された場合の信号機のみでの切出し手法についての有効性を確認した。ここでは切出した信号機に対し点灯してい

る色を判別する手法を述べる。信号色識別において、以下の問題点が挙げられる。



図表 3-143 LED 信号機の例



図表 3-144 逆光の例



図表 3-145 白熱灯の信号機の例



図表 3-146 バスの通過



図表 3-147 信号機点滅の例

- ①日射条件による画素値変化(図表 3-143、図表 3-144)
- ②信号灯火部の規格の違い(図表 3-143、図表 3-145)
- ③バス等、移動障害物の通過(図表 3-146)
- ④LED 式信号の点滅(図表 3-143、図表 3-147)

これらの問題を解決しつつ、横断歩道を渡る時間を確保するためには、高速処理が必要となる。

①について、信号点灯部の画素値が変化することで、信号類似色の抽出が困難になるという問題である。この問題の対策として、色抽出の閾値に幅を設けるという方法もあるが、信号機が他の物体により遮られた場合、その物体に対し誤って色抽出をしてしまう可能性がある。

②について、LED 式と白熱電灯式は図表 3－1 4 3 と図表 3－1 4 5 のように発光部が異なる。LED 式は各発光部が一様な色で発光するが、白熱電灯式は中心部と周囲で色が異なる。これにより、抽出する画素値が規格ごとに変化するだけでなく、環境によっては中心の白色部分により、青・赤といった信号色が抽出できなくなる。

③について、カメラの設置高さが地上から 0.7 m の位置であり、自動車の全高を下回っている。そのため、ロボットが信号認識中に道路を車両が通過すると、図表 3－1 4 6 のように信号機が車両によって隠された状態となってしまう。なお、信号色識別においてその障害となる物体を障害物と表記する。この時に、信号機として切出した画像に信号機と障害物のどちらが写っているかを判別できなければ、信号色を誤って判定してしまう。対策の一つとして、カメラの設置位置を高くするという方法もあるが、歩行補助車の規定が「高さ 109 cm 以下」であるため、バスや自動車の影響の受けない位置に設置するのは不可能である。

④について、LED 式信号の点滅を考慮せず、取得画像 1 枚のみで信号色の判定をした場合、図表 3－1 4 7 のように無灯火の画像により信号色の判定ができないだけでなく、信号色を誤って判定してしまう可能性がある。

①と④については、露光時間を任意に変更可能なカメラを用い、露光時間を調整する対策が考えられる。しかし、屋外環境では信号機の識別地点ごとに日射強度が変化するため、適切な露光時間に設定することが必要であり、露光時間が適切な値でなかった場合、取得画像に白とびが発生し信号機の検出が困難となってしまう。そのため、本手法では、画像取得時に調整は行わずにこれらの問題に対処する。

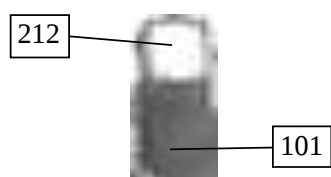
以上①～④の問題に対応する手法を本章では提案する。具体的には、①と②の対策として明度比較による信号色判定を「【明度比較による信号色の識別】」で、③の対策としてテンプレートマッチングを利用した信号機判定を「【切出し範囲の信号機判定手法】」、④の対策として、複数枚の取得画像に対し信号色の識別を行い、その結果を統合しての信号色を判定する手法を「【LED 式信号機の点滅対策】」でそれぞれ述べる。

【明度比較による信号色の識別】

提案した信号検出手法により、信号機のみを切出すことが可能となった。そのため、切出し画像内の赤・青色発光部の大まかな位置を知ることが可能である。また、点灯中の信号機は無灯火と比べ輝度値が高いという特徴がある。そのため、切出し画像を

8bit グレースケールに変換し、信号点灯時に最も明るくなる、画像の中心列を赤信号部と青信号部に分け、それぞれの輝度値の平均値を比較し、高い方の領域の色が点灯していると判定させる。赤信号・青信号の切出し画像を使用したオフライン実験をした結果、この手法により信号色の識別が可能であることを確認した。しかしながら、青信号の点滅時に赤信号と誤判定することがあった。これは、少しでも輝度値が高い領域＝点灯とし、輝度値に閾値を設けなかった結果、無灯火時に取得した画像において、赤信号領域の輝度値の平均が青信号領域の輝度値の平均を上回ったことが原因であった。

この問題の解決策として、信号領域輝度値や輝度値の差分に対し閾値を設けるという方法が挙げられる。しかし、日照条件の変化により画像の輝度値は変化してしまうため、無加工の画像では閾値の決定が容易ではない。そこで、信号機切出し画像中の「明るさ」の要素を正規化することで日射条件の影響を減少させることとした。手法の詳細は割愛するが、図表 3－1 4 8 の元画像に比べて、処理をした後の図表 3－1 4 9 の画像のほうが濃淡の差が明確であることが確認できる。これにより、安定して検出できるようになった。



図表 3－1 4 8 元画像



図表 3－1 4 9 正規化した画像

元画像と正規化した画像の比較

【切出し範囲の信号機判定手法】

提案した信号色識別手法は、切出し画像に信号機が写っていることが前提条件となっている。そのため、信号色を誤識別しないためには、障害物に隠された場合に信号機が隠された状態であることを認識する必要がある。ある横断地点にて、識別対象である信号機の画像を事前に取得していた場合、識別用に取得画像から切出した画像と事前に取得した信号機画像の類似度を算出し、類似度に閾値を設けることで信号機と障害物の判定が可能となると考えられる。しかし、ロボットが横断地点に到着した時点では、識別対象の信号機の見え方が未知である。そのため、適切な識別用の信号機画像を用意することができない。したがって、この手法では信号機と障害物の判定をするには不十分である。そこで、取得画像の信号機の周辺に着目すると、ロボットは信号の識別中は停止しているため、信号色が変わっても背景には殆ど変化が生じていないことがわかる(図表 3－1 5 0)。この「短時間であれば信号機周辺領域の変化は少ない」という点に着目し、明度による信号色識別に「信号機周辺の景色が見えていれば切出し領域に信号機が写っている、見えていない時は切出し領域に障害物が写っている」という判定をすることとする。



図表 3－1 5 0 背景はほとんど変化がないことの確認

切出し画像内の信号機判定は、テンプレートマッチングを行い、類似度を算出し、その結果に閾値を設けることで判定する。そのためには、信号機周辺の背景を切出したテンプレート画像が必要となる。テンプレート画像の作成は、テンプレートマッチングによる信号機切出しの直後に行う。

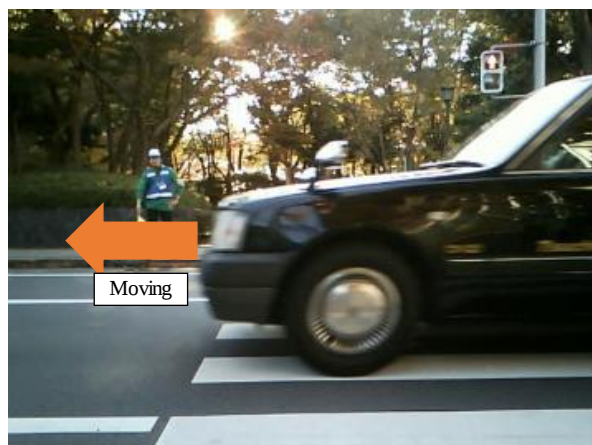
障害物によって信号色の誤判定が発生しないようにするには、信号機が隠れた状態となる前に、障害物によって隠されたと判定する必要がある。そのため、障害物判定用のテンプレートを作成するには、信号機の周辺を切出す形が重要となる。障害物がロボットと信号機の間を通過した時の画像より。以下の特徴が挙げられる。

- ・障害物は切出し範囲の横方向から信号機を隠す(図表 3－1 5 1)
- ・ロボットとの距離により、信号機を隠さずに下側を通過(図表 3－1 5 2)
- ・信号機を隠さず、信号機の上側のみを通過することはない

以上の特徴から、信号機の上部左右端からそれぞれに 40 pixel、信号機下端から下に 20 pixel の範囲を取得した画像から切出し、信号機判定用テンプレートとして作成する。なお、信号色が変化した時は、信号機部分が類似度を低下させる要因となるため、テンプレート作成時に信号機領域を黒色で塗りつぶすことにより、類似度への影響を低減させる(図表 3－1 5 3 の環境においてテンプレートが図表 3－1 5 4 のように作成された。塗りつぶし範囲は赤枠で表示)。テンプレート作成時に、図表 3－1 4 6 のように移動障害物により既に信号機が隠されている場合が考えられる。しかし、テンプレート作成は信号機切出し時に最も類似度が高い領域が含まれていた時の取得画像を使用する。そのため、信号機が完全に隠されていた状態の取得画像をテンプレート作成に使用可能性は少ないといえる。

また、図表 3－1 5 5 のように、移動障害物がテンプレート内に被る可能性がある。この場合、障害物が通過していない図表 3－1 5 4 と図表 3－1 5 6 をテンプレートマッチングする場合、類似度が低いままとなり、信号機が見えていないと判定してしまう。しかし、信号色識別において、車両の移動速度の関係から連続して 5 秒間以上

信号機が見えなくなることは無い。したがって、類似度が連続で 5 秒間設定した閾値を上回らない場合、テンプレートの作成に失敗したとして再作成を行う。



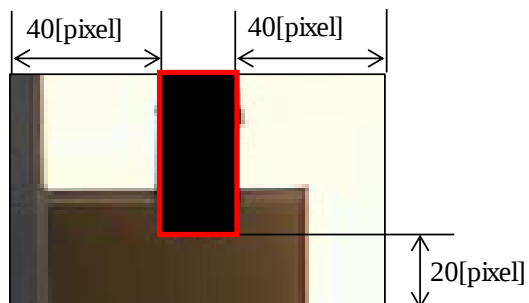
図表 3-151 障害物により信号が横から隠れる例



図表 3-152 障害物が下を通過し、信号が隠れない例



図表 3-153 元画像

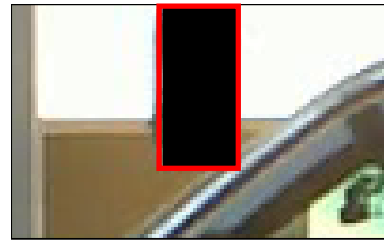


図表 3-154 テンプレート

信号機検出のテンプレート



図表 3 - 1 5 5 元画像



図表 3 - 1 5 6 テンプレート

障害物通過時のテンプレート

【LED 式信号機の点滅対策】

ここまで、1 回の取得画像に対する信号色識別手法、信号機判定手法について述べた。本節では LED 式信号機の点滅対策手法を提案する。

カメラで LED 式信号機の画像を取得した場合、無点灯状態の信号機画像を取得してしまう。そのため、1 枚の取得画像に対してのみ信号色を識別するのではなく、複数の取得画像に対して信号色の識別をする必要がある。本研究で使用しているカメラは 30 fps で動作し、露光時間は日照条件により自動で変化する。LED 式信号機の点滅現象は照度の低い曇天や雨天そのため、連続した 6 フレームの判定を 1 セットとし、以下のように信号色を識別する。

- ・ 赤信号…赤信号が 2 回以上、かつ青信号が 0 回
- ・ 青信号…青信号が 2 回以上、かつ赤信号が 0 回
- ・ 信号機でない…上記以外

上記の条件は、6 フレーム取得に約 166 ms かかり、その間に LED 式信号機が 7 回点滅することから定めた。6 フレームの判定結果から信号色を識別するため、点滅の対策となる。また、例えば赤信号 3 回、不明 2 回、青信号 1 回のように赤信号時に一瞬青信号と誤判定された場合、障害物と判定されるため、信号色の誤識別を防ぐことができる。

【信号色識別の検証実験】

提案した明度による信号色識別、テンプレートマッチングによる信号機判定の有効性を検証するための実験を行う。あらかじめ撮影した動画を使用したオフライン実験である。

【実験条件】

信号機が赤から青、もしくは青から赤に点灯が変わる映像 20 個を使用する。映像には白熱電灯式と、LED 式信号の 2 種類が存在し、信号機の見かけの大きさもそれぞれ異なる。また、天候も晴・曇・雨が存在している。テンプレートによる切出しの後の「①明度のみの信号色識別」、「②障害物通過時の信号機判定」の 2 項目を検証する。

【実験結果・考察】

①明度のみでの信号色識別

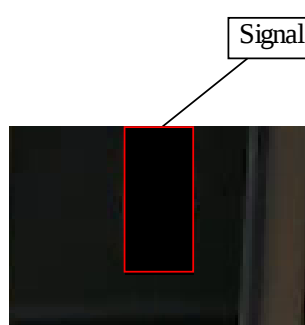
初めに、赤信号、青信号が点灯時の識別結果である、各点灯映像において、白熱電灯式、LED 式といった点灯部の規格の違いに関わらず、信号色の識別が可能であった。LED 式信号の 50 Hz の点滅においても、識別中に信号色を誤識別することは無かった。これにより、6 フレームごとに識別結果を出力するという手法が有効であるといえる。また、赤信号になる前の青信号の点滅についても調査を行った。その結果、灯火部の消灯時は「信号機でない」と結果が出力された。これは、明度の比較の際に、消灯時に明度差の閾値を上回らなかったことにより、信号色を誤識別することを防止しているといえる。

②障害物通過時の信号機判定

信号色識別時に自動車や人がカメラと信号機の間を横切った際は、信号機が隠される前に障害物が写り込んでいると判定され、信号色を識別することは無かった。例えば、図表 3－157 の環境において障害物テンプレートが図表 3－158 のように作成された。その後、図表 3－159 のように車両が通過した際には、信号機判別用の画像切出しは図表 3－160 のようになった。このとき、類似度が 0.85 を下回り、障害物により信号機が写っていないと判定された。その結果、信号色の判定はされず、信号色が誤って判定されることもなかった。これは、信号機の周囲の景色をテンプレートに含んだことにより、背景が障害物により写らなくなった時点で類似度が低下し、画像内の信号機が隠れる前に障害物と判定されたことが理由としてあげられる。この結果から、信号色識別手法と信号機判別手法の有効性を確認した。



図表 3－157 元画像



図表 3－158 テンプレート

実験の一例



図表 3-159 元画像



図表 3-160 テンプレート

障害物で隠される例

【信号機認識の検証】

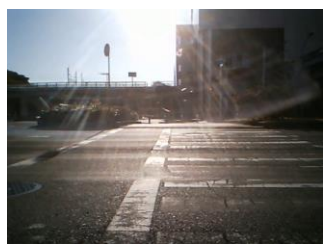
【実験条件】

12 月 25 日の 14 時～16 時頃に千葉市海浜幕張駅周辺の 10 地点にて撮影した赤信号から青信号、もしくは青信号から赤信号に変化する動画を使用する。また、手法の有効性を検証するために、CNN の訓練データには 10 地点の信号機画像は使用せず、信号機切出し用テンプレートについても他の地点にて取得したものを使用する。信号機の検出手法と信号色の識別手法を統合し 10 地点において動作の確認および手法の有効性を検証する。

【実験結果】

10 地点のうち、信号機の検出および信号色の識別が可能であったのは 8 地点であった。失敗した 2 地点での取得画像を図表 3-161 に示す。これは、信号機までの距離が約 30 m であり、使用したカメラに拡大機能が無かったことで信号機が検出不可能な大きさでしか取得できなかったことが原因としてあげられる。この対策としては、望遠機能を持ったカメラを使うという事が考えられる。

信号機認識の成功例を挙げる。図表 3-162 に写っている信号機は約 20 m 離れている。この時の CNN による信号機の位置特定の結果を図表 3-163 に、テンプレートマッチングによる切出し結果を図表 3-164 にそれぞれ示す。なお、図表 3-163 と図表 3-164 は見やすさのため実際より拡大して表示している。それぞれの画像から、提案手法により信号機認識が可能であるといえる。また、同一距離で異なる時刻に撮影した際の画像を図表 3-165～図表 3-167 に示す。この時においても信号機の認識に成功した。そのため、信号色が色飽和した状態においても提案手法により認識が可能であるといえる。また、同一手法で 10 m 離れた信号機の認識を行った。その時の画像を図表 3-168～図表 3-170 に示す。図表 3-169、図表 3-170 から、同一手法により、距離が異なる信号機においても信号機認識が可能であることを確認した。



図表 3-161 信号機認識に失敗した例（午後、信号機まで 30m）



図表 3-162

認識結果



図表 3-163

CNN による認識



図表 3-164

テンプレートによる切り出し

信号機認識に成功した例（午後、信号機まで 20m）



図表 3-165

認識結果



図表 3-166

CNN による認識



図表 3-167

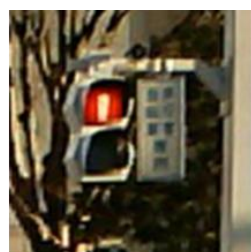
テンプレートによる切り出し

信号機認識に成功した例（夕方、信号機まで 20m）



図表 3-168

認識結果



図表 3-169

CNN による認識



図表 3-170

テンプレートによる切り出し

信号機認識に成功した例（夕方、信号機まで 10m）

以上の結果から、提案手法の有効性は確認できたが、カメラの性能に左右されるといえる。本研究で使用したカメラでは 20 m 離れた信号機の認識は可能であるが、30 m 離れた場合は認識が不可能であると判明した。解像度が低く、望遠機能がないことが原因であるため、使用するカメラを変更することで認識は可能であると考えられる。

（５）ヒヤリハット事例の蓄積及び安全安心のためのモビリティ用地図の作成

（ア）ヒヤリハット事例と危険エリア

実証実験を実施する中で危険と感じる状況はほとんどなかったが、唯一、幕張海浜公園の周りを自律走行している際に、公園から自転車搭乗者が飛び出てきて、ロボットに接触しそうな状況があった。具体的には、図表 3－171 の地点であり、ロボットが歩道を走行中に、右側から自転車搭乗者が飛び出してきた。



図表 3－171 飛び出しがあったエリア（Google Street View から引用）

公園側には「飛び出し禁止」の看板とアーチ型のボラードが、車道側には数本のポール型のボラードが存在している。そこで、本研究では、これらのボラードが存在する場所を「危険なエリア」と定義し、このエリアに侵入するときには事前に減速することとした。ロボットが減速することによって、

- ・ ロボットがセンサで対象を検知し停止するまでの距離が短くなる
- ・ 万一衝突しても、衝突のエネルギーが小さい

という利点がある。将来的には、このエリアでは光や音でロボットの存在をアピール

することもできると考えられる。

また、見通しが悪い交差点など、何らかの理由によってロボットが緊急停止した場所は、今後も同様な危険が起これうと考え、これらのエリアも「危険なエリア」と定義した。

(イ) ボラードの自動検出手法

【ボラードの種類】

ボラードには、大きく「チェーン付きボラード」「ポール型ボラード」「アーチ型ボラード」に分けることができる。それぞれについて、図表３－１７２～図表３－１７４に示す。



図表３－１７２ チェーン付きボラードの例



図表３－１７３ ポール型ボラードの例



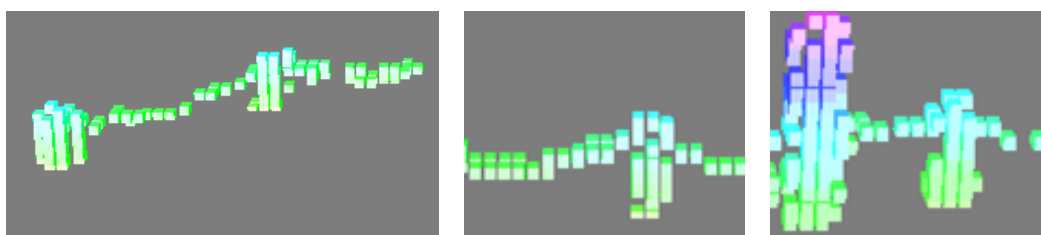
図表３－１７４ アーチ形ボラードの例

図表 3-172 に示すように、チェーン付きボラードは、ポール型ボラードの間をチェーンもしくはロープで連結している構造物である。これらは、例えば、歩道と車道の間に設置されることが多く、チェーンが自転車搭乗者の走行を邪魔するため、基本的に自転車搭乗者の飛び出しは起きない。このことから、チェーン付きボラードに対しては「危険なエリア」ではないものと判断した。一方、図表 3-173 のポール型ボラードや図表 3-174 のアーチ型ボラードは、図表 3-171 に示すように「危険なエリア」である。

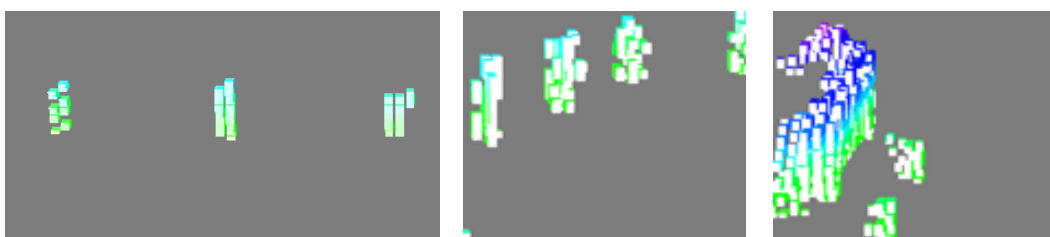
【畳み込みニューラルネットワークによる自動認識】

「危険なエリア」では、センサで検知してから停止するのではなく、事前に地図に書き込んでおき、「危険なエリア」に侵入する際にはすでに減速していることを目指す。

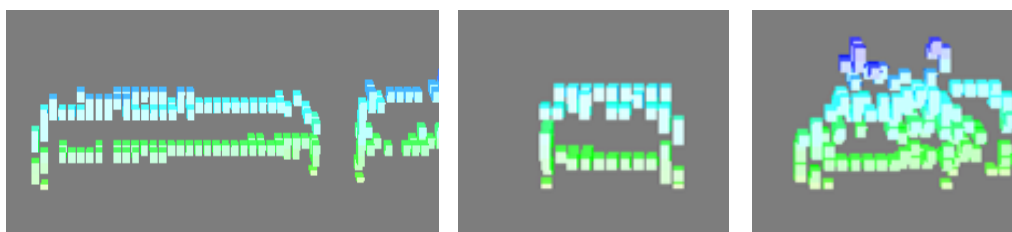
これらボラードを人が認識し、地図に書き込むことは容易ではない。そこで、本研究では、ボラードを深層学習の一つである畳み込みニューラルネットワークで自動検出し、地図に書き込むこととした。なお、カメラによる撮影では、天候の明るさなどの影響を受けやすく、正しく認識することが難しい。そこで、本研究では、レーザセンサが取得した三次元情報からボラードを認識することとした。レーザセンサで計測した三次元情報を図表 3-175～図表 3-177 に示す。



図表 3-175 チェーン付きボラードの例



図表 3-176 ポール型ボラードの例



図表 3-177 アーチ形ボラードの例

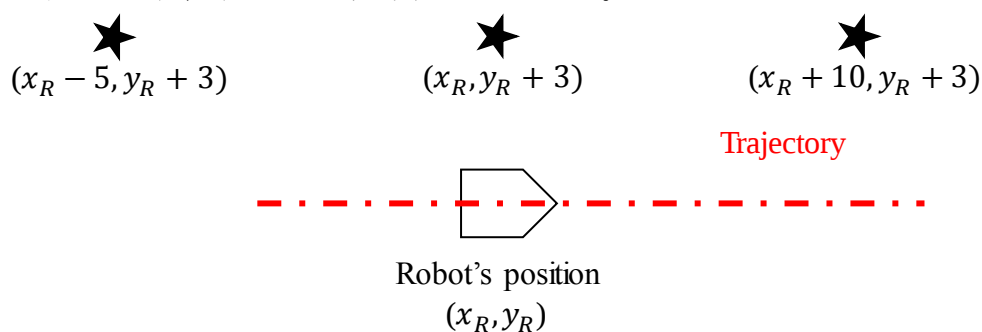
これらの画像を畳み込みニューラルネットワークとして代表的な AlexNet と GoogLeNet を用い、検証を行った。その結果を、図表 3-178 に示す。なお、ボラード A、B、C は、それぞれチェーン付きボラード、ポール型ボラード、アーチ型ボラードを意味する。これらの結果から、チェーン付きボラードについては若干 AlexNet の方の認識率が高いが、全体的に AlexNet に比べて、GoogLeNet の方の認識率が高いことが分かった。このため、本研究では GoogLeNet を用いることとした。

図表 3-178 ネットワーク構造の比較実験

CNN architecture		AlexNet	GoogLeNet
Classification accuracy for each class	bollard A	98.72%	97.44%
	bollard B	92.79%	96.15%
	bollard C	98.11%	98.11%
	part A	83.33%	94.44%
	part B	86.67%	94.44%
	part C	76.92%	84.62%
	Other	65.63%	81.25%

【地図への書き込み】

「ポール型ボラード」および「アーチ型ボラード」を検出した場合、それらがあることを走行地図に記録することとした。具体的には、図表 3-179 のように、ボラードを検出した位置とその前後の 3 箇所に対して、ボラードが存在することの情報を、ロボットの走行経路の近くに記録することとした。



図表 3-179 ボラードの地図への記録

【検証実験】

【実験条件】

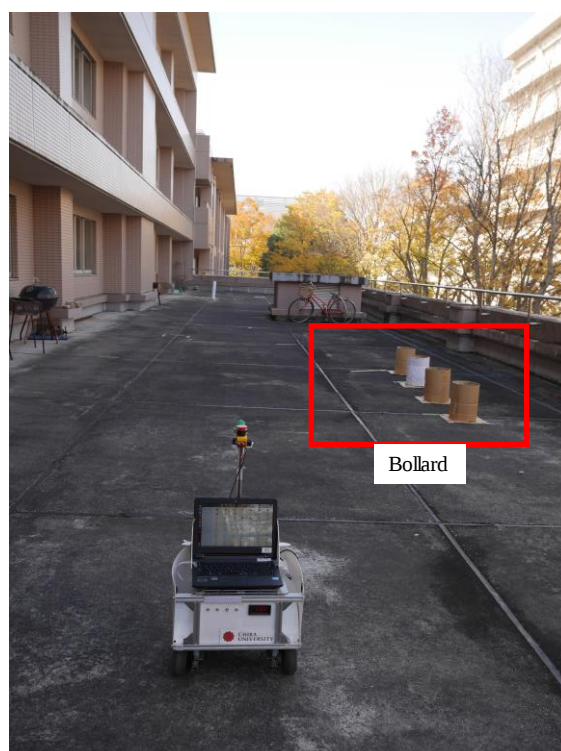
千葉大学構内において、ボラードの模型を製作し実験を行った。具体的な実験環境を図表 3-180 に示す。まず通常通り、ロボットを手押しによって走行経路を教示

した。この際、ロボットは LiDAR による三次元情報を獲得する。その後、オフラインによって三次元画像の切り出しと GoogLeNet による認識を行った。

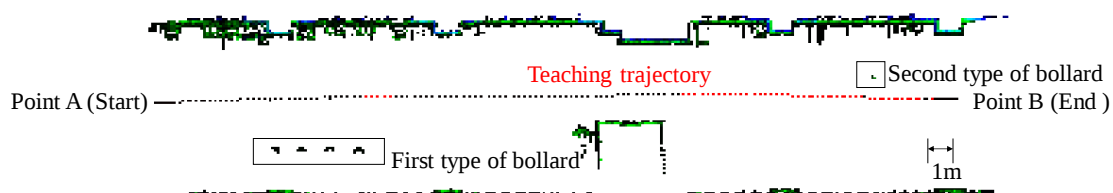
【実験結果】

そのボラードの情報を記載する前の事前地図を図表 3－181 に、ボラードの情報を記録した事前地図を図表 3－182 に示す。図表 3－182 を見ると、ロボットの走行経路の近くに、点情報が付加されていることが確認できる。ロボットは自律走行中に、この情報を検出すると、減速することとした。

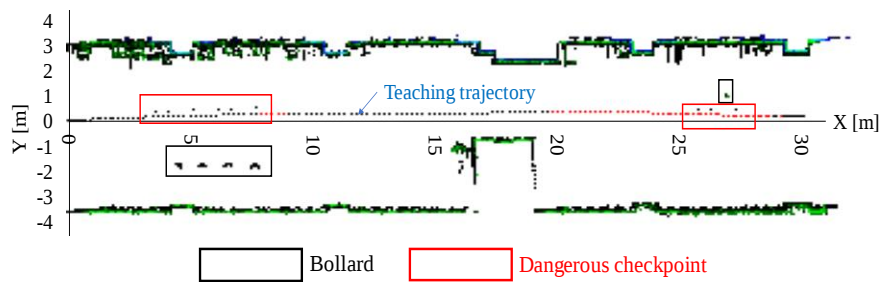
この地図を用いて、初めて自律走行したときの速度指令値を図表 3－183 に示す。ここでは、ロボットの走行を妨げる障害物は存在しなかったが、ボラードの付近で減速していることを確認した。



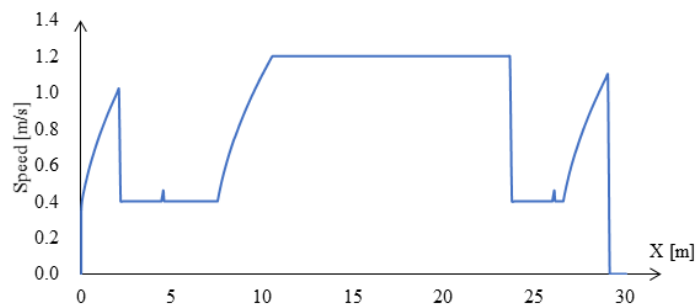
図表 3－180 実験環境



図表 3－181 自律走行用の事前地図（ボラード情報なし）



図表 3-182 ボラード情報を記録した事前地図



図表 3-183 ロボットの速度指令

(ウ) 緊急停止情報の記録

見通しの悪い交差点での歩行者の飛び出しなど、何らかの理由によってロボットが緊急停止することがある。このような場所は、同じような緊急停止をする危険な状況が繰り返し起こりうるため、ボラードを検出したときと同様に、これらの情報も事前地図に記録しておくこととした。

幕張新都心での実証実験においては、実証実験を行っていることを示す幟を持った人をロボットの前方に配置していることもあり、緊急停止をする状況は非常に少なかったが、以下の日時に緊急停止が確認できたため、その時の様子を以下に記す。

【幕張新都心での緊急停止】

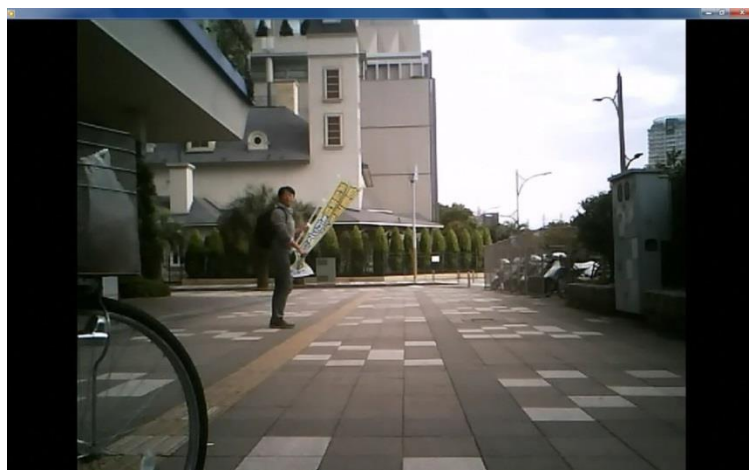
10月24日14時頃、海浜幕張駅付近において、ロボットによる自律走行をしていたところ、自転車に乗った女性に声をかけられ、実証実験の取り組みについて説明した。すると、女性の方から、ロボットが障害物を見つけて止まることができるか試しても良いかとの提案があり、意図的にロボットの前を横切ることとなった。この時、運良く、歩行者用信号機の認識実験のためにロボット用のカメラが起動してあったため、ロボットの視点で目の前を自転車が横切る映像を撮ることができた。その時の写真を図表3-184～図表3-191に示す。

自転車が横切る瞬間にロボットは急減速している様子が確認できた。このロボットにはブレーキ機構がなく、ロボットの慣性もあるため完全なる停止（ロック状態）にはならない。将来的に、人が搭乗するパーソナルモビリティには、ブレーキ機構が搭

載されているはずであり、急な停止も可能である。ただし、急な停止は、搭乗者が前方に飛び出す可能性もあり、どの程度の急減速をするべきなのかは調査や検証が必要と考えられる。



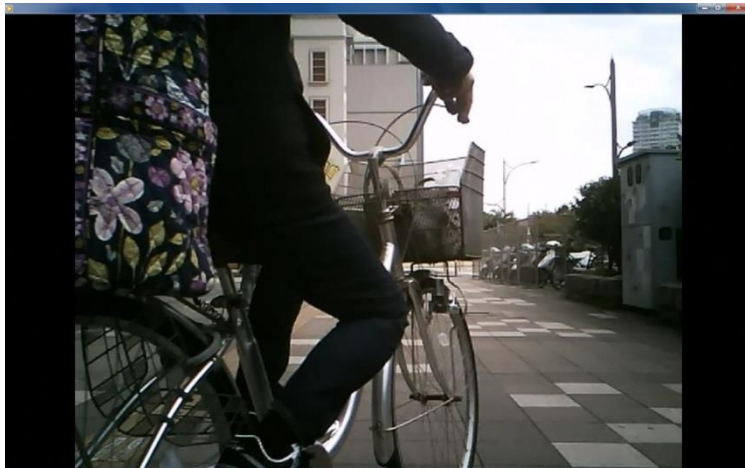
図表 3－184



図表 3－185



図表 3－186



图表 3-187



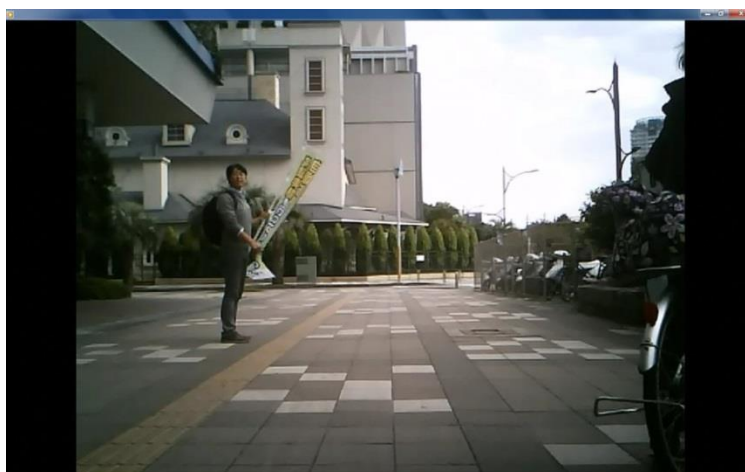
图表 3-188



图表 3-189



図表 3－190



図表 3－191

意図的な自転車の飛び出し

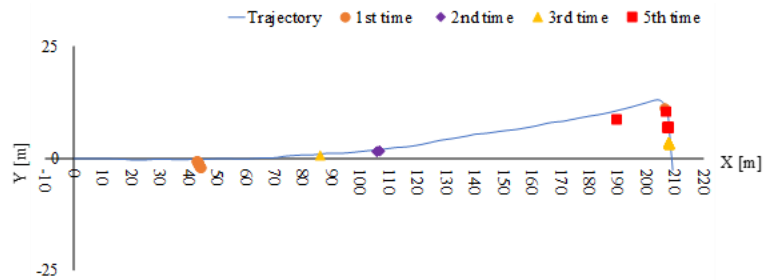
【大学構内での緊急停止】

前述の通り、幕張新都心での実証実験においては、実証実験を行っていることを示す幟を持った人をロボットの前方に配置していることもあり、緊急停止をする状況は非常に少なかったため、千葉大学構内にて幟を持った人を配置しない状態で実証実験を行った。

千葉大学構内において、人が多く存在する時間帯を選び、同じ経路を 5 回繰り返し走行させたときの結果を図表 3－192 と図表 3－193 に示す。このように、走行すればするほど、危険なエリアが記録していくことができることを確認した。これらの情報を、他のロボットにも共有することで、安全・安心な走行が実現できるようになる。



図表 3－192 5回走行させたときの記録（往路）



図表 3－193 5回走行させたときの記録（復路）

（６）利用ニーズの把握、受益者負担の検討

（ア）検証の概要

利用ニーズの把握や市民意識の醸成、事業化を見据えた受益者負担の適切な設定料金などを検証するため、本市WEBアンケートによるアンケート調査、パーソナルモビリティを活用した試乗体験及び参加者へのアンケート調査を実施した。

WEBアンケートについては、平成29年7月1日（土）～10日（月）の期間に本市ホームページを通して「ちば電子申請サービス」を用いて実施した。

パーソナルモビリティを活用した試乗体験及び参加者へのアンケートについては、平成29年8月5日～6日の期間にオリンピック・パラリンピックの3年前イベントとして開催された「千葉にオリンピック・パラリンピックがやってくる！」の1コンテンツとして、会場となったイオンモール幕張新都心のモール間を移動するパーソナルモビリティ「WHILL」4台の隊列による試乗体験ツアーを実施した。併せて、参加者に対しアンケート調査を実施した。

（イ）検証結果

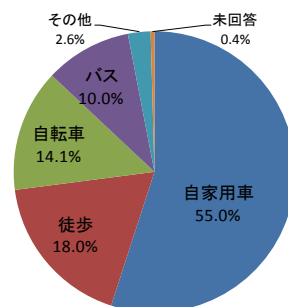
【WEBアンケート集計結果】

①回答数

614人（男性：334人、女性：277人、その他：3人）

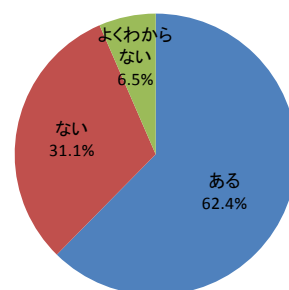
②幕張新都心内で目的地まで移動する際の主な移動手段

自家用車	2 5 4
徒歩	8 3
自転車	6 5
バス	4 6
その他	1 2
未回答	2
計	4 6 2

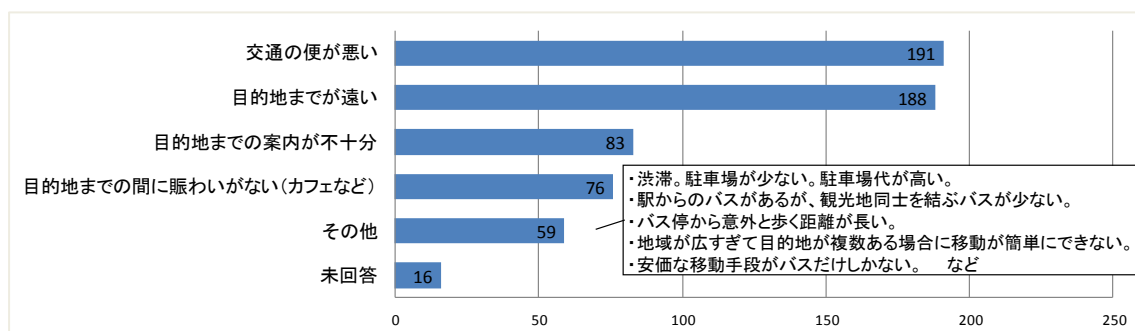


③幕張新都心内での移動で不便に感じたことがあるか

ある	3 8 3
ない	1 9 1
よくわからない	4 0
計	6 1 4

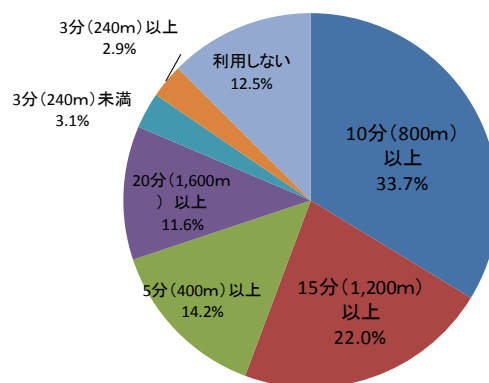


④不便に感じる理由（複数回答可）



⑤パーソナルモビリティを利用したいと感じる移動時間・距離（徒歩）

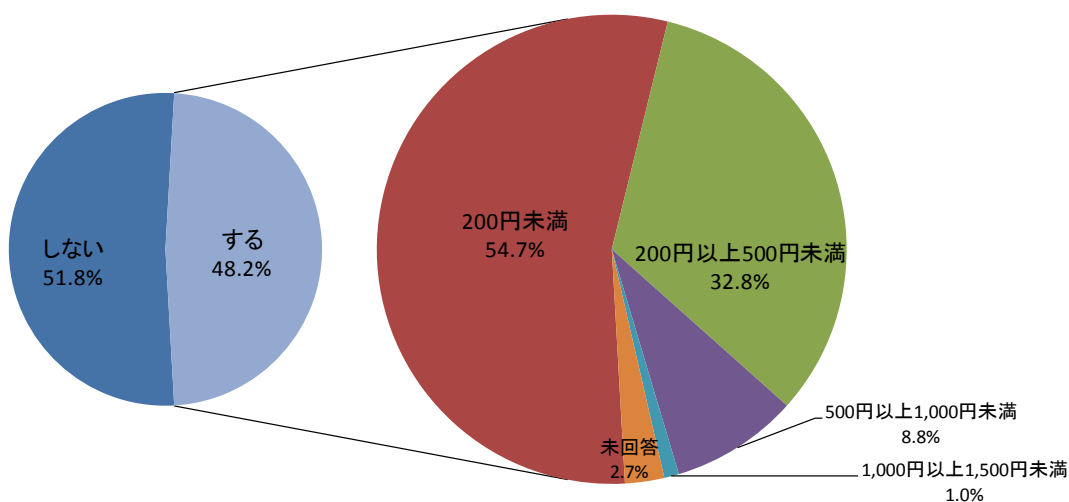
3分(240m)未満	1 9
3分(240m)以上	1 8
5分(400m)以上	8 7
10分(800m)以上	2 0 7
15分(1,200m)以上	1 3 5
20分(1,600m)以上	7 1
利用しない	7 7
計	6 1 4



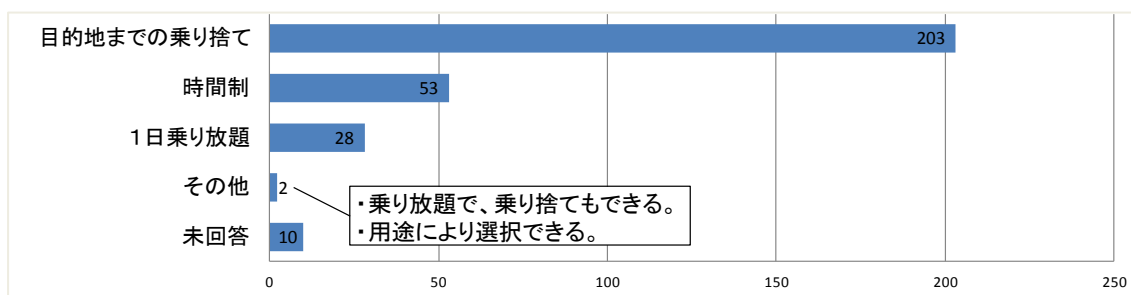
⑥有料での利用の有無・その場合の利用料金の上限

する	2 9 6
しない	3 1 8
計	6 1 4

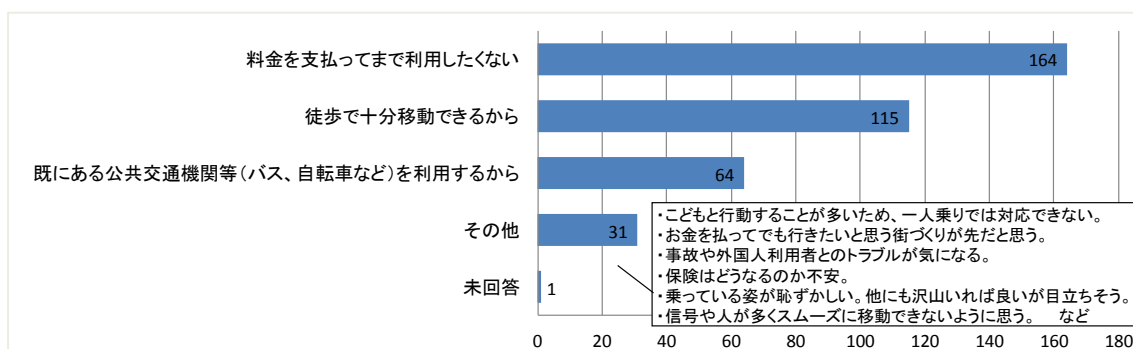
200 円未満	1 6 2
200 円以上 500 円未満	9 7
500 円以上 1,000 円未満	2 6
1,000 円以上 1,500 円未満	3
1,500 円以上	0
未回答	8
計	2 9 6



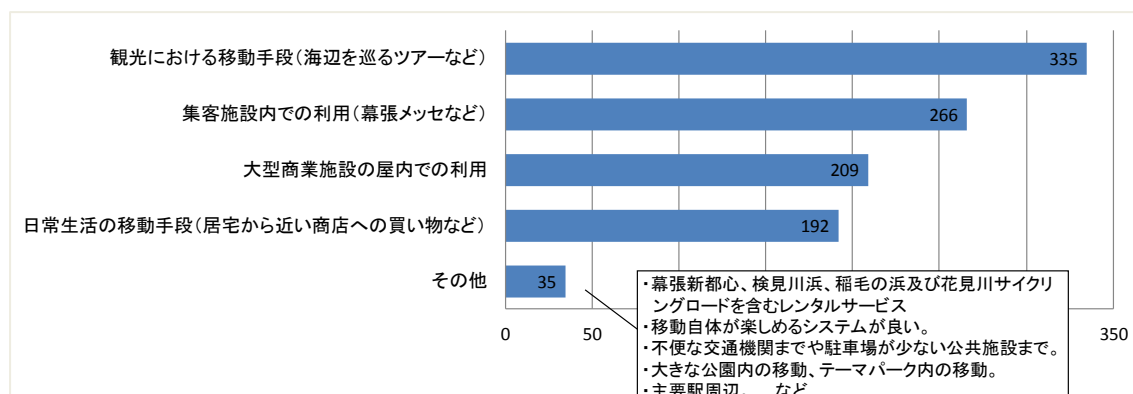
⑦サービス利用形態



⑧利用しない理由（複数回答可）



⑨パーソナルモビリティの利用シーン（複数回答可）



【試乗体験ツアーアンケート集計結果】

①試乗体験参加者数

ツアー	26人
簡易試乗	68人
計	94人

②アンケート回答者数

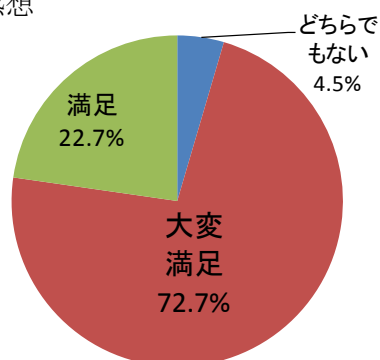
22人（男性：12人、女性：10人）

※ツアー参加者のうち、子どもはアンケート対象外

※簡易試乗者含む（数名）

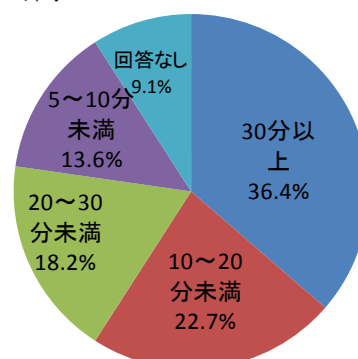
③パーソナルモビリティに試乗した感想

大変満足	16
満足	5
どちらでもない	1
やや不満	0
不満	0
計	22



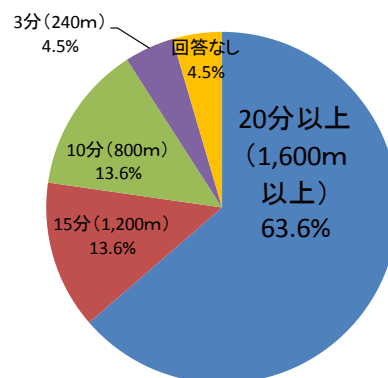
④パーソナルモビリティに乗車できる時間

5分未満	0
5～10分未満	3
10～20分未満	5
20～30分未満	4
30分以上	8
回答なし	2
計	22



⑤ パーソナルモビリティを利用したいと感じる移動時間・距離（徒歩）

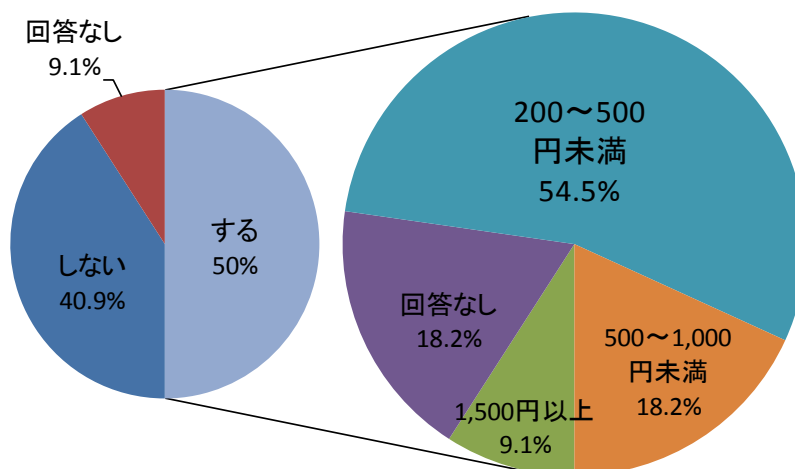
3 分（240m）	1
5 分（400m）	0
10 分（800m）	3
15 分（1,200m）	3
20 分以上（1,600m以上）	14
回答なし	1
計	22



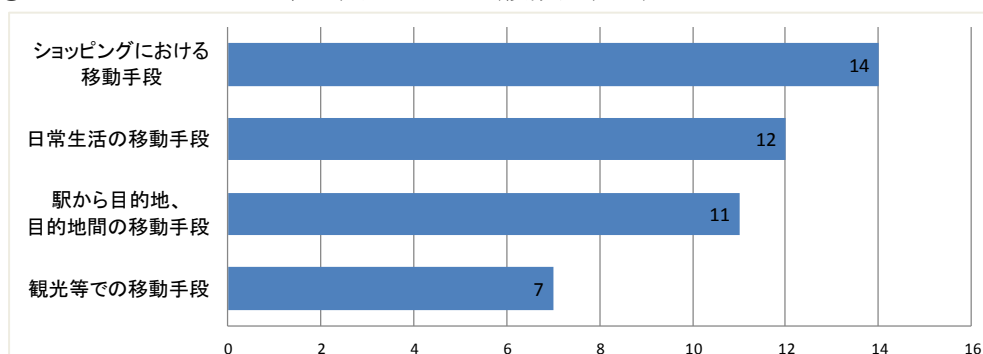
⑥ 有料での利用の有無・その場合の利用料金の上限

する	11
しない	9
回答なし	2
計	22

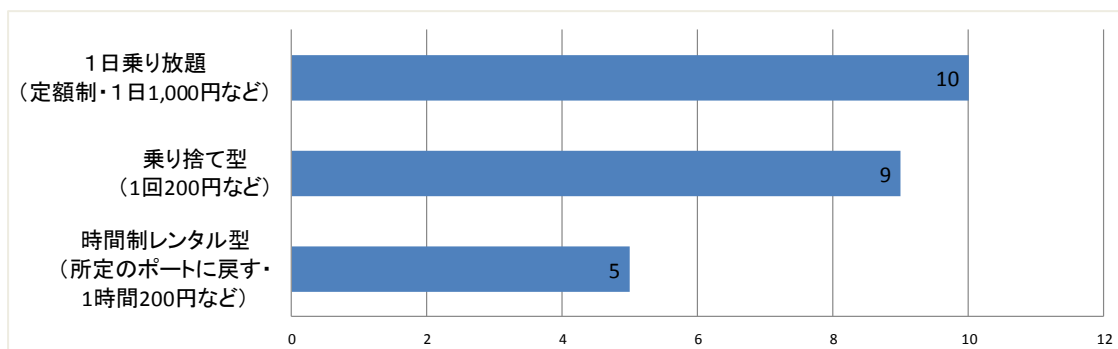
200 円未満	0
200 円以上 500 円未満	6
500 円以上 1,000 円未満	2
1,000 円以上 1,500 円未満	0
1,500 円以上	1
回答なし	2
計	11



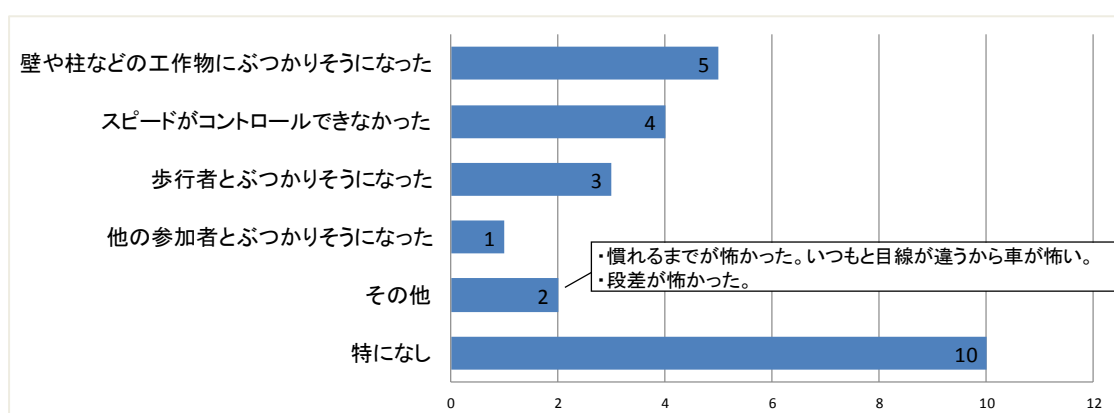
⑦ パーソナルモビリティの利用シーン（複数回答可）



⑧サービス利用形態（複数回答可）



⑨試乗体験中の「ヒヤリハット」、「不具合」（複数回答可）



(ウ) 考察

【満足度】

アンケート調査の結果、試乗体験に参加した者の大半が大変満足（72.7%）、満足（22.7%）と回答しており、実際に乗車することで、乗り物としての面白さを感じる方が多かった。家族連れ、友人同士、カップルなど、複数人での隊列走行により、相乗的な効果があったと推測されることから、パーソナルモビリティを活用したツアーの有効性はあると考えられる。

【パーソナルモビリティを利用したいと感じる距離】

WEBアンケートでは約67%が800m以上の利用をイメージしているが、試乗体験ツアー参加者へのアンケートでは、約64%が1,600m以上の場合で利用するとの回答結果がでた。試乗体験ツアー参加者とWEBアンケートを比較すると、利用したい距離が2倍となっており、その差異については、約15分程度の試乗体験ツアーを通じ、乗り心地も含め中距離移動にも適していると判断したものと推測される。海浜幕張駅を中心に2km圏内に主要施設がある幕張新都心の特性に合致しており、移動手段として有効性があるものと考えられる。

【受益者負担】

有料での利用の有無に関して、WEBアンケート及び試乗体験ツアー参加者へのアンケートのどちらも約50%が有料でも利用すると回答があった。利用料金の上限については、WEBアンケートでは約55%が200円未満の場合に利用するとしている。一方、試乗体験ツアー参加者へのアンケートでは200～500円未満が約55%と最多で、500円以上の場合でも利用するとの回答があった。なお、200円未満と回答した者はいなかった。実際に乗車することで、ある程度の利用料金を払う価値のあるものと判断されたと推測されることから、パーソナルモビリティが移動手段の選択肢の一つとなりうることを示していると考えられる。

【利用形態】

WEBアンケートでは約69%が乗り捨て型を希望しているのに対し、1日乗り放題型は10%未満であった。一方、試乗体験ツアー参加者へのアンケートでは、乗り捨て型と1日乗り放題型がそれぞれ約40%を超えていた。試乗体験ツアー参加者については、大型商業施設での屋内と屋外のシームレスな移動を実際に体験したことで商業施設等での利用がイメージされたことなどから、1日乗り放題型の希望者も多かったと推測され、本市において別に実証実験を実施するシェアサイクルとの差別化が可能という結果が得られた。

ただし、今回の試乗体験ツアーは一過性のものでありサンプル数も少ないため、今後も市民や来街者が実際に体験できる機会を提供し、社会認知度の向上を図っていく必要がある。

（７）事業化を想定した取組み及びビジネスモデルの検討

試乗体験ツアーで使用したパーソナルモビリティ「WHILL」は操作性が非常に高いものであったが、そのことが逆に不慣れな参加者による左右の急な切り返しにつながり、コントロールを失い障害物にぶつかりそうになる事例も見受けられた。このことから、実際にパーソナルモビリティを活用したサービスを提供する際には、安全停止機能が必要であることが再認識された。

また、平成29年5月、パナソニックとWHILLが共同開発した「WHILL NEXT」を活用した羽田空港での取組みを視察した。この取組みは、羽田空港がユニバーサルデザインのコンセプトを取り入れた、全ての方に使いやすい空港づくりを推進しており、その一環として、今後更なる空港利用増加が見込まれるPRM（Passengers with Reduced Mobility）の方の安全で快適な移動を実現するためのものである。

平成29年8月からは、羽田空港の利用者が実際にサービスを体験できるよう公開実証実験が行われており、2020年とその先の実際のサービスインを見据えた取組みとなっている。

このような民間事業者主導の取組みについても注視しながらビジネスモデルの検討を進めていく必要がある。

4 まとめ（政策提言）

（1）パーソナルモビリティの技術的課題及び今後の展開

【安全確保のための技術課題について】

この実証実験では、自律走行するロボットの前方に幟を持った人を配置していた。また、ロボットの後方にはロボットの走行管理者を配置していた。さらに、ロボットの存在に気づいていない歩行者が周囲にいれば、声がけをすることによって安全を確保していた。これにより、一般市民が意図せずロボットに近づくことはほとんどなく、怪我をするような状況は起こらなかった。このように、安全な実証実験が実施できた点においては良かったが、この実証実験の目標の一つである「ヒヤリハットの蓄積」については、ほとんどデータを得ることはできなかった。

もちろん、安全性の確保は最も優先すべき事項であり、走行エリアを所轄する警察署の指示にも従う必要があるが、将来的には安全確保のための人員を配置しない状況での運用を目指すのであれば、何らかの安全性を確保した上で、いずれ完全自律走行による無人の実験をするべきと考えられる。具体的には、遠隔でロボットを停止できる機能を追加搭載した上で、幟を持った人の排除、走行管理者の排除など、段階的に安全確保のための人員を減らしていくことが重要と考えられる。

【位置推定に関する技術課題について】

ロボットが自律走行する上で最も重要な技術は、ロボットの位置推定である。ロボットの位置推定については、大学構内はもちろんのこと、「つくばチャレンジ」に参加することで日常的な環境における有効性を確認してきた。このため、基本的には同じ手法で対応できると考えていたが、当初の予想以上に問題があり、そのままでは対応できないことが確認できた。

具体的な例を挙げるならば、横断歩道を渡る際におけるロボットの自己位置推定の悪化である。横断歩道を走行する際に検出できる物体の代表例としては、赤信号によって停止している車であるが、停止した車の車種はその都度異なり、停止位置も常と同じではない。まったく物体がなければ問題とならないが、微妙に位置が異なる車が存在する場合にはその車の位置情報に基づいてロボットの自己位置を修正してしまう場合があり問題となっていた。同様に、幕張ベイタウンエリアでは路上駐車をしている車が多く、それらの車の情報に基づいて自己位置推定をしまったり、位置推定に有効な建物などの情報が隠されてしまったり、問題が生じることが確認できた。この問題を解決するための一つの対策としては、GPSの一つである準天頂衛星である「み

ちびき」の利用である。横断歩道や路上駐車をしているエリアは、空が見えるような状況が多いため、GPSを受信できる可能性が高い。従来の安価なGPSは、 ± 5 mの誤差があるため利用できなかったが、2017年に「みちびき」と呼ばれる3つの人工衛星が打ち上げられた。2018年3月現在、それらの人工衛星は調整中であるものの、近い将来、それらを利用した高精度な位置推定が可能となる。特に、日本の真上に位置する準天頂衛星となるため、これまで苦手だった都市部の高層ビルの近くでも位置推定が可能となることが期待されている。三井アウトレットパーク幕張のような建物の下を通過する際には適用できないため、「みちびき」にのみ頼ることはできないが、これらを併用することで、より頑健な位置推定ができると考えられる。

【異なるエリアを結ぶ走行に関する技術課題について】

幕張新都心では、ビジネスエリア、住宅エリア、商業エリアなどがあり、各エリアでの実証実験を行ってきた。将来的には、これらのエリアを結ぶ走行が必要となる。ここで生じる問題は大きく二つある。

一つ目の問題は、ロボットの経路計画である。現在は、エリアごとの実証実験であり、一筆書きの経路を追従しているため、経路計画の必要はなかった。しかし、将来的には、例えば、商業エリアにある店舗から住宅エリアのある自宅までを自律走行する必要がある。このように異なる二点間を結ぶ必要があるが、その経路は一つとは限らないため、最適経路の探索が必要となる。また、エリアごとに生成した地図の乗り換えが必要となる。これらの研究は、当研究室で進めており、大学構内という限られた環境において有効性を示しているが、幕張新都心といった広大なエリアに適用できるか検討する必要がある。

二つ目の問題は、エリアを結ぶ道路の横断である。歩行者用信号機のある横断歩道があれば、ロボットが自律的に横断できる基礎技術の有効性は確認できた。しかし、歩行者用信号機のない横断歩道では、ロボット自身が走行してくる車を判断する必要があり、そのためには長距離を高速で計測できるセンサおよび認識技術の確立がひつようとなる。また、一部のエリアでは、歩行者扱いのロボットは道路を横断することはできず、一旦、エレベータに乗り、陸橋を使わなければならない場所が存在する。ここをクリアできなければ、異なるエリアを越えて移動することはできなくなる。エレベータの搭乗を含む技術の確立、もしくは、エレベータに乗らなくても済むような道路の整備が必要と考えられる。

【小型ロボットからパーソナルモビリティへの移行に関する技術課題について】

移動体が軽量であれば、緊急事態において停止させることは容易であり、万一、人や物に衝突しても被害は小さいことは物理エネルギーの点からしても明らかである。このことから、人が搭乗したパーソナルモビリティではなく、小型の自律走行ロボッ

トを用いて実証実験を行ってきた。しかし、本来の目標は、人が搭乗するパーソナルモビリティの運用である。ここで、小型の自律走行ロボットからパーソナルモビリティへの移行に関する技術課題について考察する。

人が搭乗することによる懸念事項として、重量とサイズである。重量が大きくなることによって、急停止がしにくかったり、傾斜を持つ路面（例えば、歩道と車道をつなげる部分）において重力の影響により高さの低い方向へ向かってしまう傾向があったり、問題が生じている。これについては、ブレーキ機構を搭載したり、より大きなトルクを持つモータを使用したりするなどの工夫が必要である。ちなみに、ブレーキ機構を組み込むことで急停止ができるようになるが、急停止すると搭乗していた人が慣性によって転落してしまう可能性もある点に注意が必要である。サイズが大きくなると、狭い二つのボラードの間を走行することが困難であったり、周囲の人が圧迫感を感じてしまったり、混雑環境において広い面積を必要としたり、問題が生じる。

【複数のパーソナルモビリティに対する技術課題について】

今回の実証実験では、基本的に、一台のロボットによる検証だった。しかし、将来的には、同一環境の中で複数のパーソナルモビリティが存在することになる。この場合、狭い歩道やスロープにおいて、二台のロボットが存在した場合、円滑なすれ違いが実現できるかを検証する必要がある。また、友達同士で複数のパーソナルモビリティを使う場合には、個々のパーソナルモビリティが自律走行するのではなく、それら複数のパーソナルモビリティで群れを作るような連携をとる必要が期待されている。連携が取れば、無理な追い越しがなくなったり、二台のパーソナルモビリティの間に割り込んでくるような状況が起こりにくかったりすると考えられる。

また、パーソナルモビリティを利用していた人が降りてフリーになった状態において、どのモビリティがどこへ向かうべきなのかについて、マルチエージェントによる協調の研究の導入が必要となる。ここで、効率性を重視した集中管理型が良いのか、応用性を重視した自律分散型が良いのか、検討する必要があると考えられる。

【混雑環境においても安全・安心なモビリティに関する技術課題について】

現在は、混雑した環境での実証実験は行えていない。しかし、例えば、2020 年の東京オリンピック・パラリンピックの開催期間中は、非常に混雑した環境で動作しなければならない。このような状況で想定される問題としては、周囲にいる人などによって物体が隠されてしまい、位置推定に必要な情報があまり得られないこと、周囲の人の流れに合わせた走行の必要性などが考えられる。

【ビジネス化した際の新規参入する企業に対する技術課題について】

パーソナルモビリティをビジネスとして運用する際は、さまざまな企業が新規参入

すると考えられる。ここで、自律走行に関するノウハウを持っていない企業が新規参入しても、千葉市民の安全・安心を確保できるような仕組みが必要と考えている。例えば、「つくばチャレンジ」では人通りの少ない公園 250m を自律走行できないロボットは、人の多いエリアで自律走行することが認められていない。このように安全・安心を確保するための仕組みについて検討する必要があると考えられる。

また、安全・安心を確保するための遵守事項を策定し、千葉市で走行するためにはその遵守事項に沿ってもらうことを条件にするなどの技術課題が必要であると考えられる。

(2) ビジネスモデルの検証

サービス利用者側に対しては、WEB アンケートや試乗体験ツアーを実施し、市民や来街者の生の声を聞くことができた。ビジネスモデルを検証する上で貴重なデータとなり、その結果からパーソナルモビリティシェアリングサービスの実用化に対する期待感はいかたがえした。ただし、サンプル数が圧倒的に不足していることから、本共同研究終了後も引き続き試乗体験イベントやツアーを実施し、利用ニーズの収集、社会受容性の向上を図る必要がある。

一方で、本市の目指すパーソナルモビリティシェアリングサービスを実現するためには、実際にサービスを提供する事業者を確保する必要があるが、現時点では自律走行等に係る技術開発や法制度が整っておらず、収益性が見込みが立てられない状況である。今後は、サービス提供事業者を確保するため、例えば、産官学連携による検討体制を構築し、具体的な利用シーンを想定した実証実験や実際に利用料を徴収するモデル事業を実施するなど、導入台数や走行エリア、季節、気象による利用への影響など更なるビジネスモデルの検証が必要である。

(3) 国家戦略特区を活用した規制緩和の実現に向けて

本市の目指す幕張新都心をフィールドとしたパーソナルモビリティシェアリングサービスの実現には、パーソナルモビリティの自律走行が必要であるが、本共同研究においては、小型ロボットによる自律走行の実証実験に留まっており、パーソナルモビリティを活用した自律走行の検証は実施できていない。

そのため、今後は、本共同研究の結果を踏まえ、パーソナルモビリティを活用した有人での自律走行の実証実験及び無人での自律走行の実証実験を段階的に実施し、将来の事業化を見据えた課題抽出などが必要であり、平成30年3月13日に閣議決定された「国家戦略特別区域法の一部を改正する法律案」に盛り込まれた、監視・評価体制を設けて事後チェックを強化する代わりに事前規制を最小化することで高度で革新的な近未来技術に関連する実証実験を迅速・円滑に実現できるようにする「地域限定型の規制のサンドボックス制度」の活用も検討し、必要な規制緩和の実現を目指していく。

活動記録

(1) 自律走行ロボット実証実験

日時	走行距離			実施場所	特記事項
	地図作成	自律走行	合計		
平成29年4月26日 平成29年4月27日	2.6km	5.0km	7.6km	幕張ベイトウン	横断歩道の自律走行検証
平成29年5月17日 平成29年5月22日	0.0km	5.0km	5.0km	幕張ベイトウン	信号機認識検証
平成29年6月19日	1.2km	2.2km	3.4km	幕張ベイトウン	
平成29年6月29日	1.8km	1.3km	3.1km	イオンタワー前のおとり、 幕張メッセ周り	走行速度の違いによる自律 走行検証
平成29年6月30日	0.0km	3.0km	3.0km	幕張ベイトウン	
平成29年8月7日	0.0km	1.6km	1.6km	イオンタワー前のおとり	
平成29年8月30日	1.5km	1.5km	3.0km	イオンモール幕張新都心 周辺	カルガモ走行検証
平成29年9月25日	1.0km	3.2km	4.2km	海浜幕張駅周辺	車体の大きさに対する検証
平成29年10月24日	1.0km	3.0km	4.0km	海浜幕張駅周辺	
平成29年11月24日	0.5km	0.8km	1.3km	イオンタワー前のおとり	ボラード認識検証 走行スピード抑制の検証
平成29年12月25日	0.3km	0.4km	0.7km	イオンタワー前のおとり	信号機認識検証 障害物回避検証
平成30年1月29日	0.1km	1.0km	1.1km	イオンタワー前のおとり	障害物回避検証
合計	10.0km	28.0km	38.0km		

(2) その他

日時	場所	内容
平成29年4月9日	幕張ベイトウン地域連携センター	幕張ベイトウン自治会連合会への説明
平成29年4月14日	千葉大学	実証実験内容検討会議
平成29年4月18日	千葉県警察本部	実証実験内容事前協議
平成29年5月14日	幕張ベイトウン地域連携センター	幕張ベイトウン自治会連合会への説明
平成29年5月15日	千葉大学	実証実験内容検討会議
平成29年5月24日	羽田空港	「WHILL NEXT」を活用した取組みの視察
平成29年6月11日	幕張ベイトウン地域連携センター	幕張ベイトウン自治会連合会への説明
平成29年6月19日	千葉大学	実証実験内容検討会議
平成29年7月9日	幕張ベイトウン地域連携センター	幕張ベイトウン自治会連合会への説明
平成29年7月10日	千葉大学	実証実験内容検討会議
平成29年7月27日	千葉県警察本部	WHILLを活用した試乗体験ツアーの事前協議
平成29年8月6日	イオンモール幕張新都心	WHILLを活用した試乗体験ツアーの実施
平成29年8月24日	千葉県警察本部	実証実験内容事前協議
平成29年9月14日	千葉県警察本部	実証実験内容事前協議
平成29年9月22日	千葉大学	実証実験内容検討会議
平成29年12月18日	千葉大学	実証実験内容検討会議