

誘導線式自動運転によるセミオンデマンド交通の構築

平野 哲

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 大前研究室

少子高齢化により、地方圏の鉄道・バスの廃線・撤退が相次いでいる。その対策として、電磁誘導線を用いたラストマイル自動運転が注目されている。本研究では電磁誘導線方式の自動運転の更なる利便性の向上を目的として、本線では電磁誘導線による自動運転、支線では地図を利用した自動運転とした運用を可能とする自動運転を提案する。これにより、より利用者の目的地や居住地に近い位置での乗降が可能となる。本論文では、提案する自動運転方式の運行をシミュレーションで評価し、実車実験により、自動運転方式の切り替えが可能であることを確認した。

Keyword: Low Speed Automated Driving, Demand Bus, Electromagnetic Guidance

1. はじめに

本研究では、自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式と電磁誘導線を利用した自動運転方式の両方に対応した自動運転車両を用い、2つの方式をエリアによって切り替えることにより、より利便性の高い自動運転を実現することを目指している。本線を電磁誘導線、支線を自己位置推定と高精度地図による自動運転方式を利用した運行を提案し、その有効性を簡易的なシミュレーションにより評価した。さらに、電磁誘導線が埋設されたキャンパス内走行路にて実車実験による技術的検証を行った。

本研究の背景として、少子高齢化の急速な進行による地方都市の公共交通の減少、交通弱者問題が挙げられる。2019年の国連の調べによると、我が国の65歳以上の高齢化率は2位のイタリアの23.6ポイントを大きく引き離し、29.1ポイントと世界1位であり、年々深刻化している[1]。一方で、過疎地を支える路線バスも年々減少しており、総務省の調べによると、毎年2000kmが路線廃止となっている[2]。

そこで、地方都市を中心に交通弱者問題を解消するために注目されているのが、デマンドバスシステムである。デマンドバスシステムは、従来の路線バスとは異なり、決められた路線、決められたダイヤを持たず、利用者の乗降希望地に合わせて経路を変更し、希望があった際にのみ運行を行う。そのため、運行の効率化によるコスト削減が期待されている。しかし、実際、収支率は40%を下回る例が殆どであり、1ケタ代の事例も少なくなく実用化されている例は少ない[3]。そのため、実用化には更なる運行コストの削減が必要であると考えられ、自動運転化も

その手段の一つである。

現在、鉄道駅や道の駅などの拠点から家庭や目的地付近への数km程度を低速で移動するラストワンマイル自動運転実証が進められている。これらの自動運転実証実験は福井県永平寺町や沖縄県北谷町で進められており、永平寺町では2020年3月よりレベル3運用が開始された[4][5]。これらは限定的な地域での自動運転であるため、走路に埋設された電線からの磁界により車両を制御する電磁誘導線方式であり、ゴルフカートを改造した車両が用いられている。それゆえ、家庭や目的地付近での乗降は可能であるものの、高齢者が望むタクシーのような家庭などの目の前での乗降はできない。

以上の背景を踏まえ、本研究では、固定経路にて信頼性の高い電磁誘導線方式の自動運転と様々なエリアにおける細かいデマンドに対応することが可能な自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式の両方に対応した車両による自動運転移動サービスを提案する。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、本研究で提案する自動運転における2つの方式について説明する。第3章では、簡易的な運行シミュレーションによる評価について述べる。第4章では、実車実験における制御の切り替えの検証について述べる。最後に第5章で本研究の成果をまとめる。

2. 自動運転制御の方式

この章では、本研究で提案する自動運転車の運行に用いる2つの制御方式について述べる。本研究では、図1で示す本線と支線から成り立つ走行経路に

て、エリアにより 2つの手法を切り替え、安全性を担保しつつ、広域かつより居住地や目的地に近い利便性の高いデマンドバスの運行を行う。

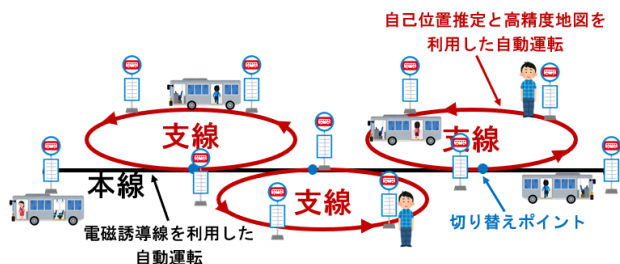


図1 本研究におけるバスの運行

2-1 電磁誘導線を利用した自動運転方式

この節では、電磁誘導線を利用した自動運転方式について述べる。電磁誘導線は25年以上前からゴルフ場にてゴルフカートを自動走行させるために活用されてきた技術で、採用実績は多い[6]。予め走行路を決定し、走行路の中心に電磁誘導線の埋設を行う。電磁誘導線は、約 $300\text{mA} \cdot 1.5\text{kHz}$ の交流電流が常に流されており、周辺に磁界が形成される[7]。そして、車両下部に設置されたセンサーが磁界を検出し、電磁誘導線を追従するように車両が走行する。従って、森林やトンネル内を含め、電磁誘導線が埋設されている限り走行可能なため、走行安定性が高く、長距離の走行に適している。一方で、電磁誘導線への追従走行であるため、経路変更が難しく、またゴルフカート直下の電磁誘導線からの磁界を検出しているため、高速での走行が難しく、長距離の走行では時間を要する場合もある。

2-2 自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式

この節では、自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式について述べる。この方式では、自己位置情報と高精度地図により制御を行う。自己位置情報は RTK-GNSS や LiDAR、カメラで計測した車両周囲情報とのマップマッチングにより取得する。はじめに運行設計領域を設定し、高精度地図の作成を行い、走行パスを決定する。そして、実験車両の RTK-GNSS による位置と向き、リアルタイムの LiDAR やカメラの計測データと高精度地図のマップマッチングにより走行する。なお、筆者の所属する研究室では、RTK-GNSS の位置補正局が建物屋上に設置されており、また低速走行した LiDAR の計測値から高精度地図の作成、走行パスの決定を行っている。従って、パスの設定や変更が容易であり、

予め設定された運行設計領域内で正確な自己位置推定が可能である限り、運用可能である。また RTK-GNSS を用いるため詳細な位置情報の取得が可能であるという利点も存在する。一方で、山間部では RTK-GNSS の高精度測位が難しく、また、樹木の成長などにより LiDAR 点群データとのマップマッチングも不能になる場合があり、このような場合は運用が難しい。

2-3 自動運転方式の切り替え

本研究では、第 2-1 節、第 2-2 節で述べた 2つの自動運転方式を走行エリアによって切り替えを行う。本研究は、図 2 に示すように、比較的長距離の移動である本線部と本線に接続する支線部から成り、本線部は走行安定性の高い電磁誘導線方式の自動運転で走行し、支線部は細かな稼働が可能である自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式で走行する。そのようにすることで、長距離でありつつも、利用者の目的地や居住地に近い利便性の高いデマンドバスの運行を安全に行うことが可能であると考えられる。



図2 自動運転方式の切り替え

3. シミュレーションによる評価

この章ではデマンドに対する簡易的な運行シミュレーションを用いた評価について述べる。

3-1 シミュレーションの概要

はじめに、オンデマンドバスの形態として、処理方法と運行方法で分類される。処理方法は、事前に全てのデマンドの受付を行うバッチ処理方式と逐次デマンドの受付を行うリアルタイム処理方式が挙げられる。本研究では、初めに全てのデマンドについて計算を行うが、デマンドの受付は逐次行い、より利便性の高いとされているリアルタイム処理方式を採用する。運行方法は文献[8]によると、定路線型、迂回ルート・エリアデマンド型、自由経路ミーティングポイント型、自由経路ドアツードア型が挙げられる[8]。

迂回ルート・エリアデマンド型研究事例として、

文献[9]においては、デマンドをエリアにより分類し、小型車両と大型車両などの複数自動車を乗り継ぐ手法(エリアデマンド型)が挙げられている。

一方で、本研究では乗客は乗り継ぐことなく同じ車両に乗り続け、支線部に迂回する(迂回ルート型)。そして、2つのケースを想定し、ケース1では図3で示すように本線を基本としつつも、途中で支線に入るため、迂回ルート・エリアデマンド型である。なお、ケース2についてはデマンドの有無によらず、バスは常に本線上のみを往復走行し続ける。本研究では、迂回ルート型オンデマンドバスであるケース1と固定路線バスのようなケース2について、平均旅行時間と平均バス待ち時間の2つの評価軸でシミュレーション実験を行い、比較した。

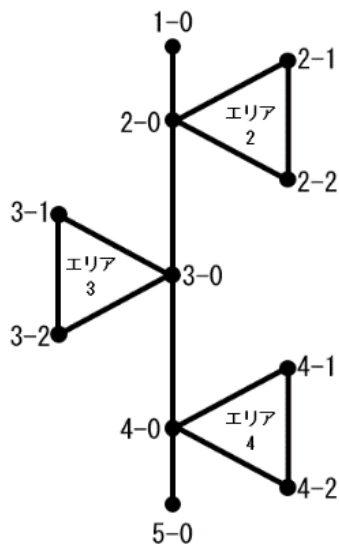


図3 シミュレーションの走行経路

3-2 シミュレーション条件

シミュレーション条件は次の通りである。

<ケース1・ケース2 共通>

- ・走行経路は図3のような1-0と5-0を結ぶ本線部と本線に接続する三角形の3つの支線部を想定する。
- ・乗客の出発地は本線上あるいは支線上のエリア2~4でランダムに発生する。
- ・乗客の目的地は1-0もしくは5-0であり、60%の確率で1-0となり、40%の確率で5-0となる。
- ・乗客は出発地と目的地を往復する。
- ・乗客の発生間隔は、ポアソン分布に基づき、1時間あたり3人、6人、12人発生するパターンを想定し、乗客200人分の需要が処理された後、計算が終了する。
- ・1ステップは5分間の事象としている。

- ・バスは1ステップあたり、本線上の場合1エリア(例:2-0 → 3-0)、支線上の場合は1ポイント(例:4-1 → 4-2)走行し、交通渋滞などは発生しない。
- ・バスの台数は4台であり、乗客の需要による増減はしない。
- ・バスの定員は15人であり、乗降時間はかからないものとする。
- ・バスは1-0到着後5-0を目指し、5-0到着後1-0を目指し、常に1-0と5-0を往復している。
- ・バスと徒歩の速度比は8:1である。
- ・乗客は出発地に到着したバスに乗るものとする。

<ケース1のみ>

- ・往路で支線内にて乗客が発生した場合、そのエリアの分岐点に最も早く到達するバスに迂回の指令が出される。例えば、3-2にて目的地5-0の乗客が発生した場合、エリア2の下り方面、エリア1、エリア2の上り方面、エリア3の上り方面・・・の順で走行しているバスが検索され、迂回指令が出される。
- ・復路での迂回は、乗客は到着したバスに乗車するため、1-0もしくは5-0に到着したバスに迂回の指示が出される。

<ケース2のみ>

- ・支線部でデマンドが発生した場合はそのエリアの本線部まで徒歩で移動するものとする。従って、本線上を走行するバスに乗車可能になるのは、支線部で発生してから8ステップ(=40分)後以降である。

3-3 シミュレーション結果

以下で先述のバスが支線に入る運用であるケース1、徒歩で移動し本線上を走行するバスに乗車するケース2について、平均旅行時間、平均バス待ち時間の比較を行った結果についてそれぞれ図4と図5で示す。

まず、図4の平均旅行時間の比較では、1時間あたりの発生頻度が3人の場合は、支線に入る運用(ケース1)の方がやや短くなり、6人の場合は、ほぼ変わらない。そして、12人の場合は、やや長くなっている。この結果から、発生頻度が上がり、発生間隔が短くなり、バス1台あたりの乗車人数が増えたにも関わらず、旅行時間が大幅に伸びることはないということが分かった。また、往路と復路の比較では、ケース1においてのみ、復路の方が短い結果となった。これは、復路の方が1-0と5-0に頻繁にバスが到着し、乗客は到着したバスに乗車するた

めと考えられる。

そして、図5の平均バス待ち時間の比較では、1時間あたりの発生頻度によらず、支線に入るケース2の方が少なくなっている。これは、ケース1とケース2ではバス台数はどちらも4台であるため、本線のみをより多くのバスが走行するケース2の方が待ち時間が短くなったと考えられる。なお、往路と復路の比較では、ケース1のみ平均旅行時間と同様の理由で復路の方が短くなった。

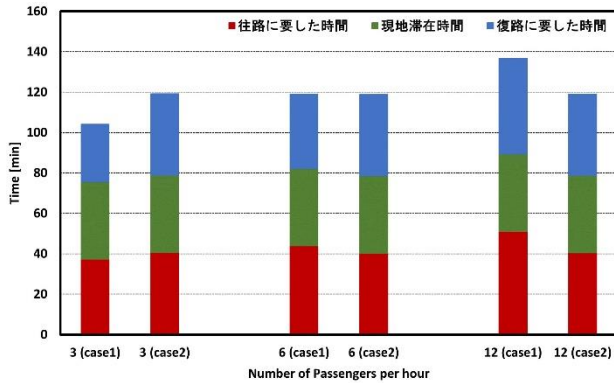


図4 平均旅行時間

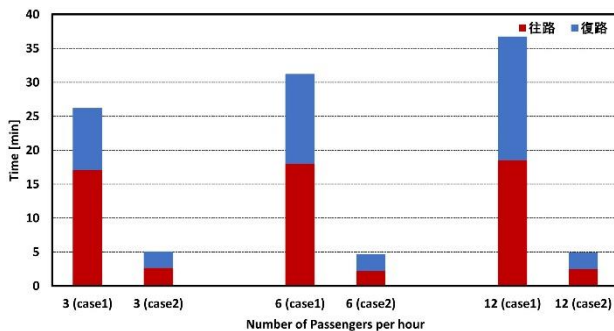


図5 平均バス待ち時間

4. 実車実験による制御の切り替えの検証

この章では、実際に自動運転車両を用いて、本線部と支線部を跨いだ走行を行い、電磁誘導線を利用した自動運転方式と自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式を切り替える検証を行った。

4-1 実車実験概要

本研究では、本線部は電磁誘導線を利用した自動運転方式で走行し、支線部は自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式で走行する。実車実験は電磁誘導線が埋設されている慶應義塾大学新川崎タウンキャンパス内の走路で行った。図6上で示す黒線は電磁誘導線であり、図6下で示す赤線は自己位置推定と高精度地図による走行経路である。また、

図6におけるオレンジ色の丸は電磁誘導線を利用した自動運転方式と自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式を切り替える地点である。また、図6上における青色の丸は電磁誘導線を利用した自動運転方式において前後のセンサーを用いた場合(直線部)と前のみのセンサーを用いた場合(カーブ)を切り替える地点である。

走行は緑丸の走行開始地点から黒線上を反時計回りに1周し、その後、切り替えポイント①にて赤線に切り替わり、反時計回りで切り替えポイント②まで走行後、再び黒線上を走行終了地点まで半周した。

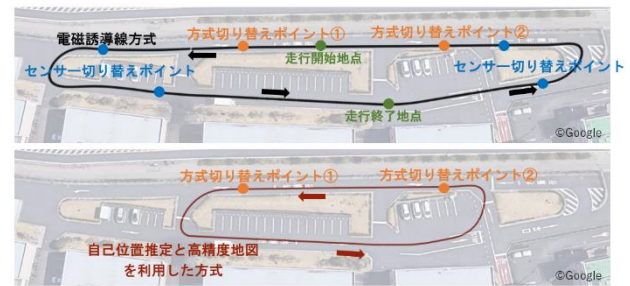


図6 キャンパス内の走路

4-2 実験車両

実験車両は市販のミニバンを改造した車両を用いた。アクセル、ブレーキ、ハンドル角、ギアをPCから制御できるように改造されている。

電磁誘導線方式の制御では、実験車両(図7)前方下部と後部に図8で示す15個と8個のコイルから構成される磁界センサーがそれぞれ取り付けられている。磁界センサーは始めに低速で走行し、個体差のある各モジュールの最大値を保存し、リアルタイムの磁界の出力の強度を算出することで、横変位の計算を行い、ハンドル制御を行う[10]。なお、本研究では、RFIDタグや磁気マーカーによる速度制御は行っておらず、目標速度を直線部では12km/h、カーブでは4km/hになるよう手動で設定を切り替えている。

自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式の制御では、実験車両の前後にRTK-GNSS受信機2機と上部にLiDARを1機搭載しており、RTK-GNSSを用いた自己位置推定とLiDARを用いた高精度地図とのマップマッチングにより走行を行う。走行パスは予め与えられている。また、速度は走路の曲率に基づき制御され、最大20km/hとする。



図7 自動運転実験車両

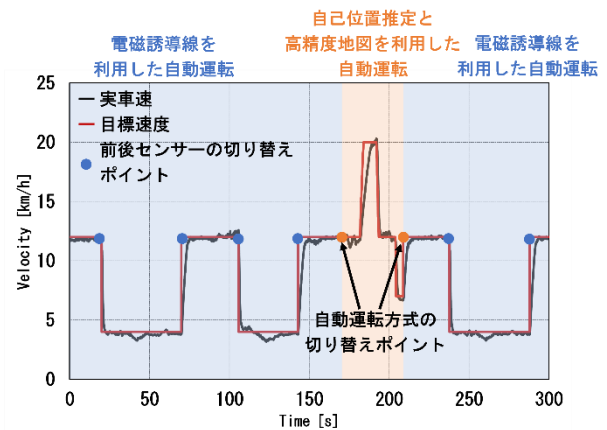


図10 実験結果(速度変化)



図8 電磁誘導線センサー

4-3 実験結果

図9と図10でそれぞれ走行軌跡と速度変化について示す。図9は、黒線が走行軌跡、赤線が目標コースである。電磁誘導線を利用した自動運転方式も自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式も大きなズレなく走行でき、切り替えもできていることが確認できた。図10は、黒線が実車速、赤線が目標速度である。また、オレンジ色の丸は電磁誘導線を利用した自動運転方式と自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式を切り替えた点である。

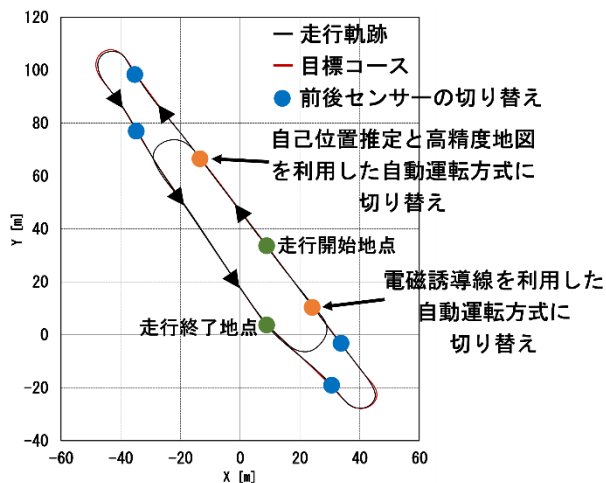


図9 実験結果(走行軌跡)

5. まとめ

本論文では、自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式と電磁誘導線を利用した自動運転方式の両方に対応した自動運転車両を用い、本線部と支線部のエリアによって自動運転方式を切り替えることにより、より利便性の高い自動運転を実現することを目的とした。はじめに、簡易的なシミュレーションを行い、本線・支線を一体としてバスをデマンド運用した場合と本線上のバス停まで歩き、そこからバスに乗り降りする場合について、平均旅行時間と平均バス待ち時間の比較・評価を行った。そして、実車実験では、自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式と電磁誘導線を利用した自動運転方式の両方に対応した自動運転車両を用い、2つの方式をエリアによって切り替えを行う技術的検証を行った。シミュレーションおよび実験の結果から、以下の点を明らかにした。

- 平均旅行時間の比較では、1時間あたりの乗客の発生頻度が高い場合においても、旅行時間が大幅に伸びることはない。
- 平均バス待ち時間は本線のみをバスが運用する場合の方が短かった。
- 自己位置推定と高精度地図を利用した自動運転方式と電磁誘導線を利用した自動運転方式の2つの方式を切り替えながら走行できることを確認した。本研究では3つの支線を設定し、ごく簡単な条件においてバス4台の運行シミュレーションを行ったが、最適な支線の数やバスの台数、配車方法を精緻化していくことが今後の課題である。

参考文献

[1]公益財団法人ニッポンドットコム:日本の高齢化

率はダントツ世界一:人口の3割以上が65歳以上,
ニッポンドットコムホームページ,

<https://www.nippon.com/ja/japan-data/h01120/>,

(参照 2022.1.24).

[2]国土交通省:地域公共交通の現状, 国土交通省近畿
運輸局ホームページ,

<https://www.tb.mlit.go.jp/kinki/content/000010186.pdf>,

(参照 2022.1.24).

[3]国土交通省:デマンドバスの導入, 国土交通省ホーム
ページ,

<https://www.mlit.go.jp/common/000049061.pdf>,

(参照 2022.1.24).

[4]加藤 晋:住宅地等での低速モビリティとの共存,
国際交通安全学会誌, Vol.45, No.3, pp56-65, (2021).

[5]経済産業省:国内初! レベル3の認可を受けた遠
隔型自動運転システムによる無人自動運転移動サー
ビスを開始します(2021年3月23日), 経済産業省ホ
ームページ,

[https://www.meti.go.jp/press/2020/03/20210323006/
20210323006.html](https://www.meti.go.jp/press/2020/03/20210323006/20210323006.html),

(参照:2022.1.24).

[6]山崎 章弘:電磁誘導ゴルフカー向けステレオビ
ジョン「effi-vision」, YAMAHA MOTOR TECHNICAL
REVIEW, Vol.55, (2019).

[7]雄谷 誠祐, 内山 敦, 松下 敏明:電磁誘導ゴ
ルフカーの自動入出庫, YAMAHA MOTOR
TECHNICAL REVIEW, Vol.38, (2004).

[8]国土交通省:デマンド型交通の手引き, 国土交通省
中部運輸局ホームページ, (2013),

[https://www.tb.mlit.go.jp/hokushin/content/000104104.
pdf](https://www.tb.mlit.go.jp/hokushin/content/000104104.pdf), (参照 2022.1.24).

[9]新垣 隆伍, 赤嶺 有平, 上原 和樹, 根路銘 も
え子, 遠藤 聡志:階層型協調交通システムにおける
デマンドバス輸送の経路計画手法, 第14回情報科学
技術フォーラム, Vol.4, pp.305-306, (2015).

[10]大前 学, 平野 哲, 神阪 智大:カート用電磁
誘導線の埋設路を様々な車両の自動運転に活用す
るための横変位検出に関する研究, 自動車技術会秋季
学術講演会前刷集, 20216132, (2021).

申し上げます。ありがとうございました。

謝辞

2020年度に続き, 2021年度も森泰吉郎記念研究振
興基金に採択いただきありがとうございました。本
研究は, ご支援いただいた研究費を活用すること
によって遂行することができました。指導教員である
大前学教授やご支援いただいた関係者の方々に感謝