

2024（令和6）年度 修士学位論文

高分解能磁気センサを用いた側方車両検出装置

Side vehicle detection device using high-resolution magnetic sensor

2025年2月10日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械工学コース

1275009 香川 拓未

指導教員 岡 宏一

目次

1章 緒言	1
1-1 研究背景	1
1-1-1 交通管制システム	1
1-1-2 車両検知器	1
1-1-3 前研究で使用した磁気センサ	4
1-1-4 本研究で使用する磁気センサ	5
1-1-5 研究目的	6
1-2 研究概要	6
2章 埋設式を用いた磁気センサでの車両検出	6
2-1 車両検出原理	6
2-2 大型車駐車単体マス検知	8
2-2-1 子機埋設工事	8
2-2-2 大型車単体マス車両検出	8
2-2-3 進入時における磁束密度の変化	9
2-2-4 退出時における磁束密度の変化	11
2-2-5 進入時と退出時における磁束密度の変化についての考察	12
2-2-6 センサ#8における進入時と退出時の磁束密度比較	12
2-3 隣接マスの磁束密度の変化	13
2-4 他の駐車マスでの車両検出	14
2-4-1 進入時における磁束密度の変化	14
2-4-2 他の駐車マスでの退出時における磁束密度の変化	16
2-4-3 隣接マスの磁束密度の変化についての考察	17
3章 埋設式を用いた単独駐車と隣接駐車における磁束密度の比較	18
3-1 比較方法	18
3-2 隣接駐車の影響	19
3-2-1 比較結果	19
3-2-2 単独駐車と隣接駐車の前平均値比較	19
3-2-3 単独駐車の前最小値と隣接駐車の前最大値の比較	20
3-3 考察	20
4章 埋設式を用いた駐車判定アルゴリズムの提案	21
4-1 急激な変化点の検出ischange関数を用いる方法	21
4-2 微分により求めた傾きと閾値を比較する方法	22
5章 側方からの車両検出装置の提案	24
5-1 側方式車両検出装置の利点	24
5-2 車両検出方法	25
5-3 使用環境による違い	26
5-4 車両別磁束密度変化の比較	26
5-5 考察	28
6章 高分解能磁気センサを用いた側方からの車両検出装置の提案	29

6-1	使用する高分解能磁気センサ.....	29
6-2	車両検出方法.....	31
6-3	高感度磁気センサでの磁束密度変化比較.....	32
6-4	車種別車両判別比較.....	36
6-5	考察.....	37
6-5-1	磁性材料を含む車両の移動による磁場変動とその影響.....	37
6-5-2	車両の移動に伴う磁束密度の時間変化と磁気双極子モデルによる解析.....	38
6-5-3	磁場の垂直成分および水平成分の差異と車両の磁気履歴の影響.....	39
7章	結言.....	40
7-1	まとめ.....	40
7-2	今後の展望.....	40
	謝辞.....	40
	参考文献.....	41

1章 諸言

1-1 研究背景

1-1-1 交通管理システム

交通管制システムとは、道路交通の安全性や効率性を向上させるために、交通の流れを監視・制御・調整するシステムであり、センサ、カメラ、通信機器、信号機などのハードウェアと交通状況を分析・最適化するためのソフトウェアで構成されている。このシステムの主な目的は、交通安全の向上、交通渋滞の緩和、環境負荷の軽減、そして緊急時の迅速な対応である。交通安全の向上は、事故を防止し交通ルールの遵守を促進することにより達成され、交通渋滞の緩和は効率的な信号制御やリアルタイムでのルート案内を通じて実現される。さらに、車両の不必要なアイドリングを減らすことでCO2排出量を削減し、環境負荷を軽減する効果もある。また、事故や災害などの緊急事態においては、リアルタイムで情報を提供することで迅速な対応を支援する。

交通管制システムは複数の構成要素から成り立っている。まず、交通監視装置が重要な役割を果たしており、カメラや車両感知器（ループコイルセンサー、赤外線センサなど）を活用して交通量や車速、車両の種類を検出する。これらのデータは、交通情報センターで統合・解析され、システム全体の制御に活用される。また、信号制御システムは、交通状況や時間帯、曜日に応じたパターンで信号機を動的に制御し、効率的な交通管理を実現する。この信号制御を支える通信ネットワークは、センターと現場機器を結ぶ重要なインフラであり、近年では5Gや光ファイバーを活用することで高速で安定した通信が可能になっている。

交通情報センターでは、これらのセンサや機器から得られたデータを統合し、リアルタイムで解析を行う。そして、得られた情報をドライバーや公共交通機関に提供し、交通流の最適化や事故防止につなげている。ユーザーインターフェースも重要であり、ナビゲーションシステムやスマートフォン向けのアプリケーションを通じて運転者に情報を提供する。これにより、渋滞を回避するルートの案内や、交通規制の通知などが可能となる。

交通管制システムはさまざまな分野で応用されている。例えば、スマートシティにおける交通管理や、高速道路のインターチェンジ管理、都市部の駐車場管理システムが挙げられる。また、自動運転車両との連携（V2X 通信）にも活用されており、未来の交通インフラの中核を担っている。このように、交通管制システムの導入は交通の円滑化だけでなく、都市全体の効率的な運営や環境負荷の軽減にも寄与しており、持続可能な社会の実現に向けた重要な取り組みの一つといえる⁽¹⁾。

1-1-2 車両検知器

車両検知器は交通管制システムを用いて、交通量、道路状況、速度、車両占有率などを収集している。これらの交通情報により、道路の渋滞予測を行い、事故を未然に防ぐことができる。車両検知器は、交通管制センターで収集した情報を基に渋滞情報や旅行時間情報などを作成し、VICS を通じて一般ドライバーに提供する他、交通情報板や交通情報ラジオ等を通じて提供する交通情報提供

システム(AMIS)、ドライバーから直接見えない、または見落としのおそれがある交通事象を ITS 無線路側等を通じて車載機に送信し、状況に応じてドライバーに情報を提供することで、交通事故

を低減させる安全運転支援システム (DSSS), 交差点手前に設置された車両検知器でバスを検知し, 青信号の延長や赤信号の短縮などの信号制御を行い, 優先的に通行させる公共車両優先システム (PTPS), 緊急車両を検知し, 信号を優先制御することで, 緊急車両の現場に到着するまでの時間の短縮を支援する現場急行支援システム (FAST) などに用いられている⁽²⁾.

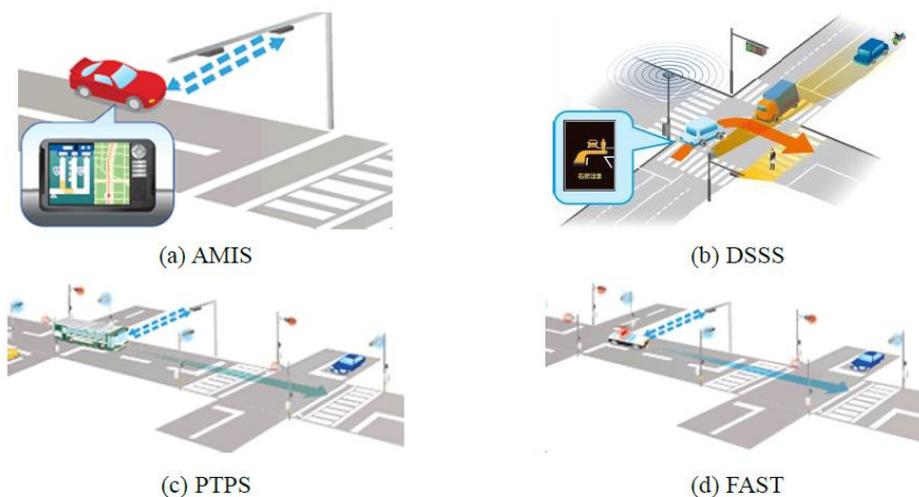


Fig.1-1 Traffic control system

現在の駐車車両検知器には, 主にループコイル式, 画像式, 超音波式がある. これらの特徴を以下に示す.

○ループコイル式車両検知器

ループコイル式車両検知器は, 道路の地中に埋め込まれた電線を利用して車両を検知するシステムである. この検知器は, コイル状に巻いた電線に電流を流すと磁界が発生するという電磁誘導の原理を利用している. この磁界は, コイルの上を金属を含む車両が通過する際に変化する. その変化をセンサーで検出することで, 車両の有無を判別する仕組みである. 具体的には, 車両がコイルの上を通ると, 車両の金属部分が磁界を乱し, その結果, ループコイルのインダクタンス (電気的な特性) が変化する. この変化を高感度な電子回路で解析することで, 車両の通過や停止を正確に検知する.

しかし, このシステムにはいくつかの課題も存在する. 最大の課題は, 設置時に道路の地中にコイルを埋め込む工事が必要になる点である. この工事は比較的成本が高く, 時間もかかるため, 新設や改修工事の計画が必要である. さらに, 道路の舗装や修繕が頻繁に行われる場所では, ループコイルが切断されるリスクが高まる. 例えば, 道路工事でアスファルトを削る際や, 地下設備の修理のために掘削が行われる場合, 埋設されたコイルが破損することがある. このような場合, ループコイルの修復には再工事が必要となり, 追加のコストや作業時間が発生する⁽³⁾.

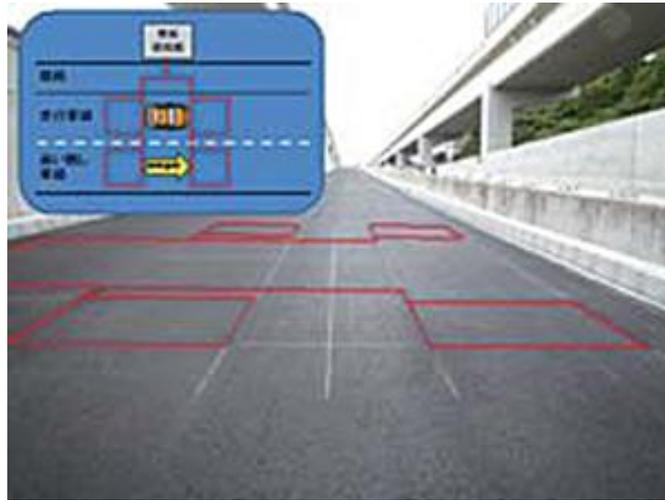


Fig.1-2 Loop coil type vehicle detector⁽⁴⁾

◦画像式車両検知器

画像式車両検知器は、道路上の高所に設置されたカメラを使用して、リアルタイムで交通状況を監視するシステムである。これは、カメラから送られてくる映像を画像処理技術で解析することで、さまざまなデータを取得できる。具体的には、交通量（道路を通過する車両の台数）や車両の速度を測定するほか、渋滞や事故といった異常事象を検出することが可能である。

しかし、外部環境の影響を大きく受けるという特性がある。例えば、雨や雪といった悪天候時には、カメラの視界が悪化し、映像が不鮮明になることで車両の正確な検出が困難になることがある。また、昼夜の明るさの違いや、日差しによる影の変化などの光景の変化も、画像処理の精度に影響を与えてしまう。こうした環境的要因が原因で、実際には存在しない車両を検知することや、逆に検知漏れが発生する場合がある⁽⁵⁾。



Fig.1-3 Image type vehicle detector⁽⁵⁾

◦超音波式車両検知器

超音波式車両検知器は、超音波送受器から発射される超音波を利用して車両の存在を検知するシステムである。この仕組みは、送受器が超音波を路面に向けて間欠的に発射し、その反射波を受信することで動作する。具体的には、車両が路面上に存在する場合、車両からの反射波が路面からの反射波と異なる特性を持つため、これらと比較することで車両の有無を感知することが可能である。

しかし、超音波式車両検知器にはいくつかの課題が存在する。最も一般的な課題は、人間や動物、さらには風で動く植物やその他の非車両物体にも反応してしまう場合がある点である。これは、超音波

が物体の材質や形状に応じて反射する特性を持つためであり、車両以外の対象を誤って検知してしまうことが原因である。このような誤検知が発生すると、収集されたデータの精度が低下し、交通管制システム全体の信頼性に影響を及ぼす可能性がある。

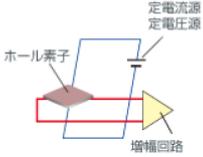
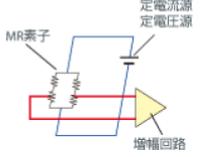
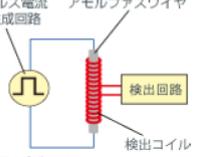


Fig.1-4 Ultrasonic vehicle detector

1-1-3 前研究で使用していた磁気センサ

磁気センサとは、地球の磁気を検出するセンサであり、磁界を介して被検出量を電圧に変換する電子デバイスである。電磁気量、力学量、生化学量などの被検出量を磁石や着磁媒体、磁束跳躍素子などの、種々のトランポнда（中継変換器）による一次変換器によって磁界に変換し、その磁界を種々の動作原理の磁気ヘッドで検出する⁽⁶⁾。地球により生じる磁場である地磁気を検出し、磁束密度の大きさや方向を測定することを目的としたセンサであり、電子コンパスとも呼ばれている。カーナビゲーションやスマートフォンなどにも利用されており安価に入手することができる。また、前研究で用いた地磁気センサには X 軸、Y 軸の 2 軸で計測するものや、Z 軸を加えて 3 軸を用いたものがあり、その方向の磁力の値を計測する。目的に応じて様々なセンサがあり、以下に代表的なセンサの例を示す。ホールセンサは、ホール効果を用いて磁束密度を測定するセンサで磁束密度に比例した電圧を出力する。ドアやノートパソコンなどものの開閉検出など、主に非接触スイッチ用途に用いられる。MR(Magneto Resistance)センサは、磁気抵抗効果センサとも呼ばれており、個体の電気抵抗が磁界によって変化することを利用して磁場の大きさを測定するセンサである。ホールセンサに比べ、感度が高く消費電力も小さい。地磁気検出用途のほか、モータの回転、位置検出用途などに用いられる。MI(Magneto Impedance)センサは特殊なアモルファスワイヤを使用し、その磁気インピーダンス効果は特殊なアモルファスワイヤを使用し、その磁気インピーダンス効果を応用した次世代磁気センサである。ホールセンサに対して 10000 倍以上も感度に倍以上も感度に優れており、地磁気の微小な変化も高精度に測定ができる小さな変化も高精度に測定ができる⁽⁷⁾。代表的なセンサをまとめたものを代表的なセンサをまとめたものを表 1-1 に示す。本研究では、以下の図 1-5 に示す 3 軸タイプで MI センサである ROHM 社の SensorShield-EVK-001 の磁気センサを用いる。現在使用されている車両検知器と比較して、磁気センサを用いた車両検知器は、小型なユニットで設計が可能であり、数十 cm の工事で設置できるため、埋設工事が容易である。低電力で稼動することができるため、費用削減が期待できる。また、天候など外部環境の影響を受けないなどの利点があるため、磁気センサを用いた車両検知器を提案した。

Table 1-1 Type and characteristic of the magnetic sensor

検出方法	ホール	MR	MI
構成	 <p>ホール素子 定電流源 定電圧源 増幅回路 磁界の変化により ホール効果で電圧が変化</p>	 <p>MR素子 定電流源 定電圧源 増幅回路 磁界の変化により MR素子の抵抗値が変化</p>	 <p>パルス電流 生成回路 アモルファスワイヤ 検出回路 検出コイル 磁界の変化により パルス電流でコイルから電圧を検出</p>
対ノイズ(感度)	×	△	◎
消費電流	×	△	◎
応答速度	×	△	◎

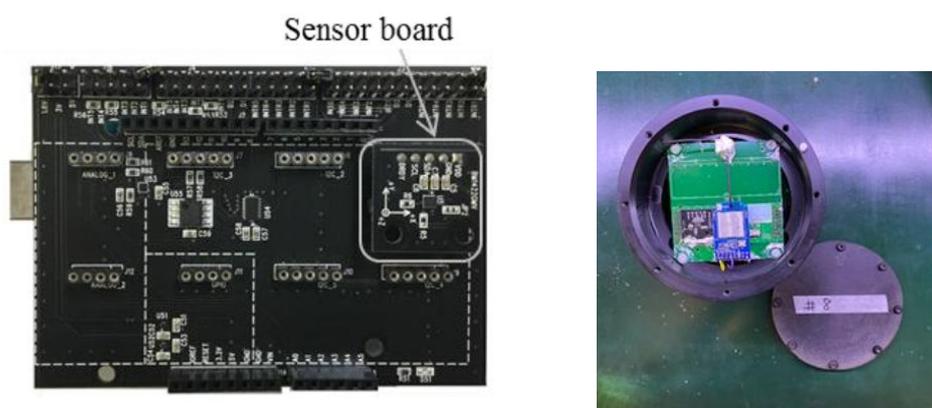


Fig.1-5 Board of the magnetic sensor

1-1-4 本研究で使用する磁気センサ

MIセンサ (Magneto-Impedance Sensor, 磁気インピーダンスセンサ) は磁気インピーダンス効果を利用して磁場を検出する高感度な磁気センサである。磁気インピーダンス効果とは、磁性材料に高周波電流を流した際にインピーダンスが外部磁場に応じて変化する現象であり、これを利用して微弱な磁場を高精度に検出可能である。MIセンサは高感度、高速応答、小型化、低消費電力を特徴とし、構造として高周波電流を流すコイルと磁性材料の感知素子、信号を検出する回路から成る。外部磁場によって感知素子の透磁率が変化し、その結果コイルの電流や電圧が変化することを信号として測定する。応用分野は医療分野での心磁図や脳磁図、産業分野での非破壊検査や磁気セキュリティシステム、車載用途でのモータ制御、IoTデバイスでのセンサなど多岐にわたり、高感度や小型化が要求される場面で重要な役割を果たす技術である。

本研究では、愛知製鋼が開発した MIセンサ「Type DJ」を用いる。同社製品群の中で最も高い磁気分解能を有するセンサであり、地磁気の 1/50000 に相当するナノテスラ (nT) オーダーの微小な磁界変化を検出可能であり、静磁界成分を除去し、交流成分のみを検出する特性を有する。こちらのセンサを用いて研究を行っていく。図 1-6 に今回用いた高感度磁気センサを示す⁽⁸⁾。

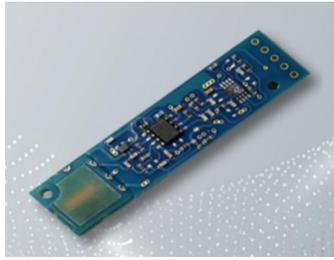


Fig.1-6 High sensitivity magnetic sensor

1-1-5 研究目的

磁気センサを用いた側方からの車両検出方法を提案する。学部時には磁気センサを地面に埋設し、車両検出や駐車判定アルゴリズムの作成を行った。しかし、埋設式には工面的な課題や横軸方向の磁力による誤検知などの課題が残った。今回提案する側方からの車両検知器は、埋設式磁気センサの車両検知器と比較してさらに設置工事が容易である。また、規制工事が困難な1車線道路やIC流入道路など、更なる利用範囲の拡大を見込める。

1-2 研究概要

磁気センサを地面に埋設し、磁気変化を測定することにより、車両検出や駐車判定する検出方法があり、その術は上記の問題を解決できる可能性がある。しかし、埋設式にも工面的な課題や横軸方向の磁力による誤検知などの課題が残った。今回はセンサを側方に配置する方法を提案する。側方からの車両検知器は、埋設式磁気センサの車両検知器と比較して設置工事が容易である。また、規制工事が困難な1車線道路やIC流入道路など、更なる利用範囲の拡大を見込める。センサの原理は、磁化された車両の磁性体が持つ残留磁束密度の大きさを磁気センサによって車両の有無を検出するものである。本研究では、磁気センサを用いて実際に側方から車両を検出し、側方からの車両検知器の可能性を検証する。

2章 埋設式を用いた磁気センサでの車両検出

2-1 車両検出原理

磁気センサとは、磁気の大きさを検出するセンサであり、 x 軸、 y 軸、 z 軸の3軸の磁束密度検出が可能である。自動車の車体は通常、鉄板で残留磁気を持っており、発生する磁束密度の大きさを検出することにより、車両を検出することができる。図2に示すように、車両が2つのセンサ上を通過すると、図2-2のような磁束密度の波形が検出できる。このように磁束密度の値の大きさを比較することで車両の有無を判定する。

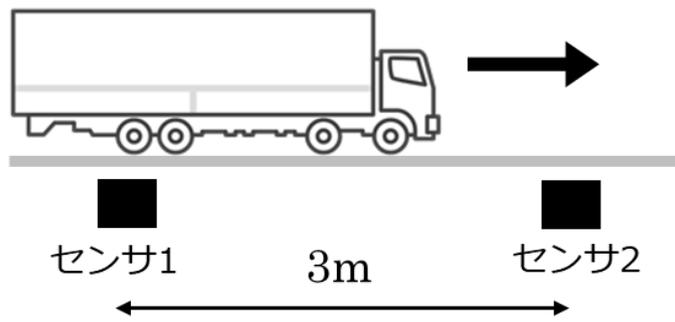


Fig.2-1 Vehicle passes over two sensors

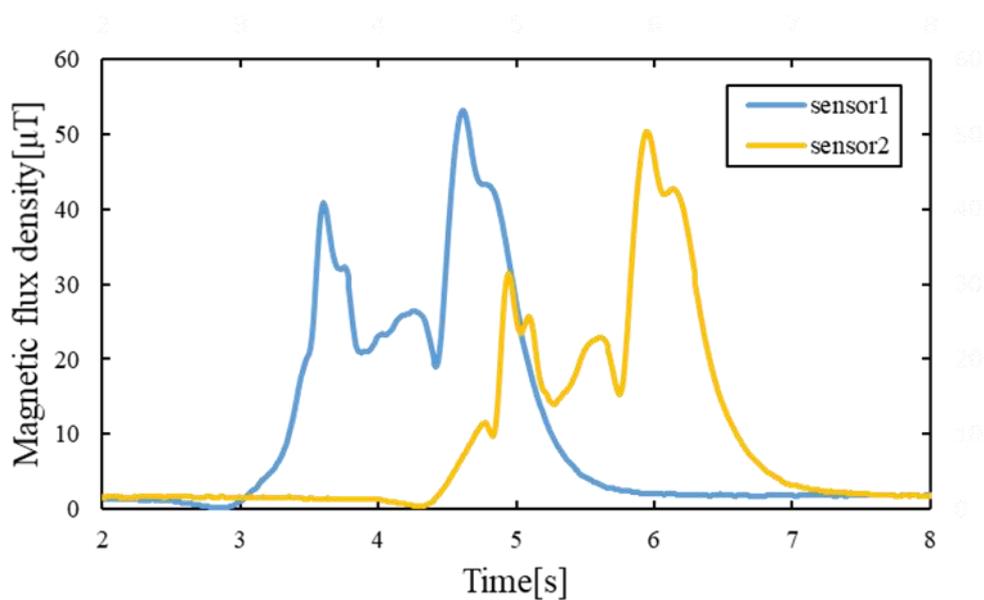


Fig.2-2 Variation of the magnetic flux density

2-2 大型車駐車単体マス検知

2-2-1 子機埋設工事

実際に高知自動車道下り南国サービスエリア（南国 SA）の大型車駐車マスで行った.図 2-3 に,下り南国 SA の全体図を示す.また,図 2-4 に工事写真と,図 2-5 に子機の埋設寸法を示す.

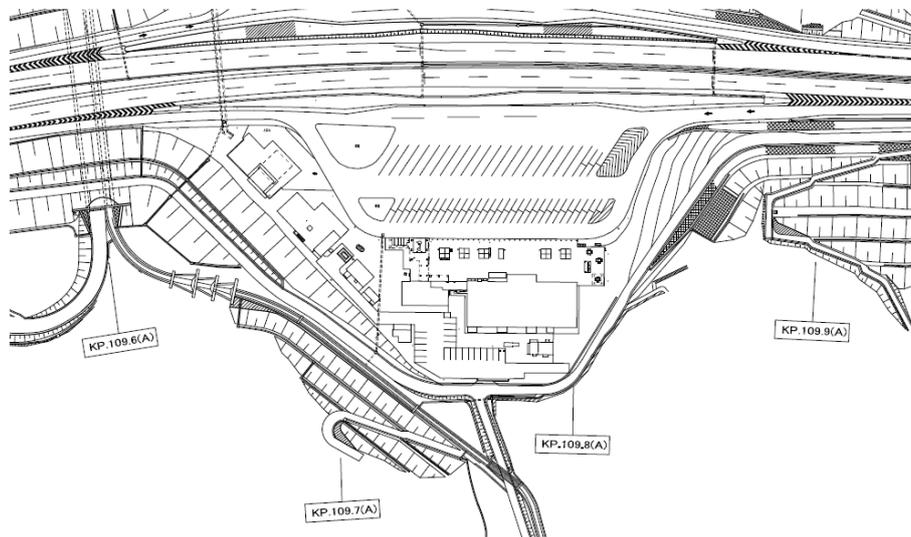


Fig.2-3 Overall view of Nankoku SA



Fig.2-4 Construction scenery

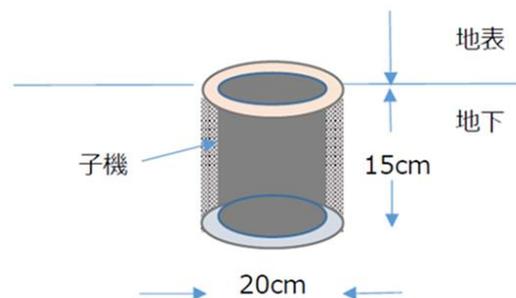


Fig.2-5 Sensor burial dimensions

2-2-2 大型車単体マス車両検出

実測データ取得のため,磁気センサの親機及びビデオは,大型車マス近くに駐車した車両の中に設置し,計測を行った.図 2-6 のように,計 4 マスの駐車スペースに各 2 つの磁気センサ#1~#8 を埋設した.親機は,これら 8 つのセンサの x 軸, y 軸, z 軸の磁束密度を 2 秒間隔で受信収集している.駐車マスに進入,退出するときの x 軸, y 軸, z 軸の 3 軸それぞれの磁束密度の変化量を観察し,大型車駐車単体マス検知を行う. また,大型車両による磁束密度の大きさ,向きの違いなども検証するために別の車両でも同じ実験を行う.

さらに,当該マスへ駐車した際の隣接マスの磁束密度の変化と比較することで,判定の際の精度向上を目指す.

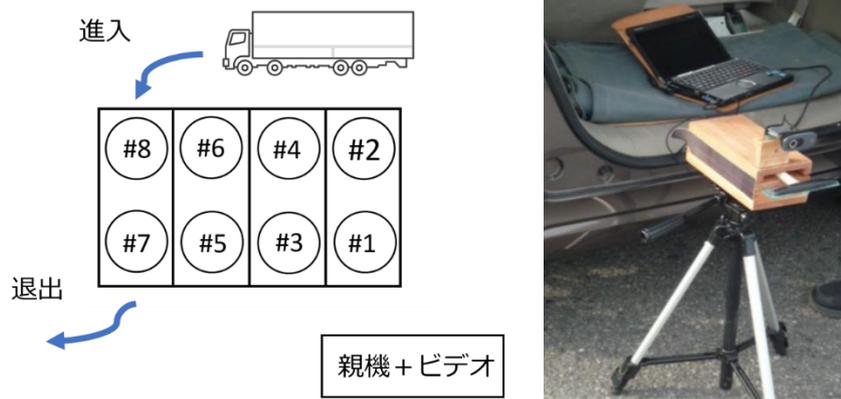


Fig.2-6 Data acquisition information

2-2-3 進入時における磁束密度の変化

実際に磁気センサを用いて,南国 SA にて 10 日間駐車データの取得を行った.図 2-7 に車両が駐車マスへと進入する時のビデオからの写真と,その状況を図にしたものを示す.

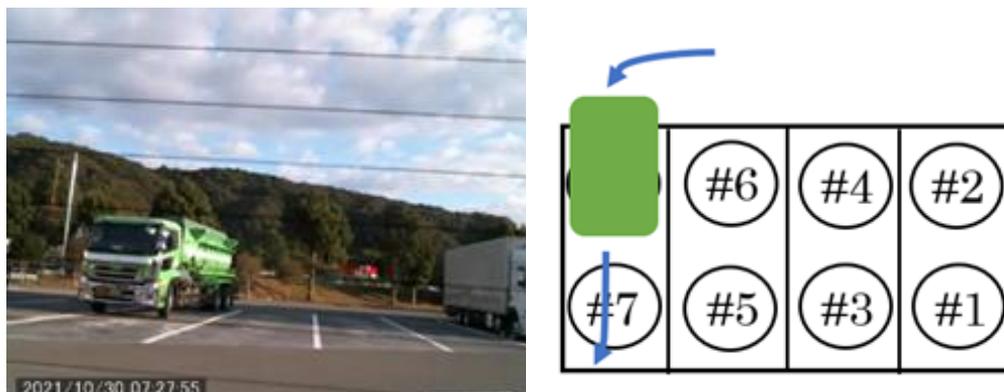


Fig.2-7 Vehicle enters the parking space

図 2-8 および図 2-9 には, 車両がセンサ#7 およびセンサ#8 が埋設された駐車マスに進入した際の磁束密度の変化を示す. 車両はセンサ#7 に先行してセンサ#8 上を通過するため, 図 2-9 のグラフに比べ, 図 2-8 のグラフの立ち上がりが早くなっている. また, 三軸方向のうち z 軸の磁束密度は, センサ#7 およびセンサ#8 の双方において増加している. しかし, x 軸および y 軸の磁束密度は, センサ#7 とセンサ#8 で増減の傾向が逆転している. さらに, 変化の割合に着目すると, センサ#7 の方が大きいことが確認される. センサ#7 およびセンサ#8 の双方において, z 軸の磁束密度は最終的に増加して一定となることから, 駐車されたことを判定可能である.

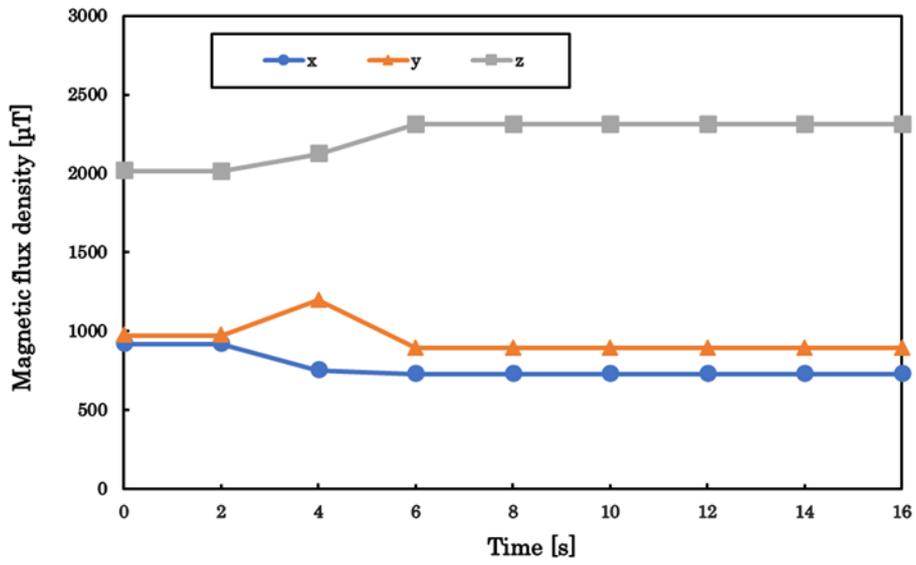


Fig.2-8 Change in magnetic flux density of sensor #8

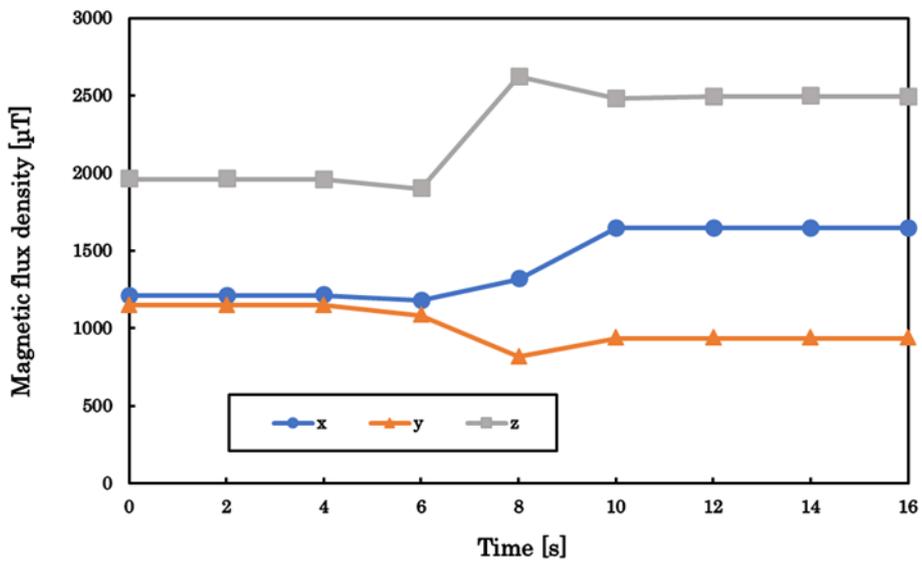


Fig.2-9 Change in magnetic flux density of sensor #7

2-2-4 退出時における磁束密度の変化

図 2-10 に車両が駐車マスから退出するときのビデオからの写真と、その時の状況を図にしたものを示す。



Fig.2-10 Vehicle leaves the parking space

図 2-10 および図 2-11 に、車両がセンサ#7 およびセンサ#8 が埋設された駐車マスから退出した際の磁束密度の変化を示す。センサ#8 の z 軸の磁束密度は、車両が退出すると大幅に減少し、増加傾向は観測されない。一方、センサ#7 においては、磁束密度が減少した後に増加し、その後再び減少して一定値に収束する。この現象は、センサ#7 が車両の前方および後方の通過の影響を受けるためであると考えられる。センサ#7 およびセンサ#8 のいずれにおいても、最終的に駐車時と比較して z 軸および x 軸の磁束密度の値が低下していることから、本手法により退車を判定することが可能である。

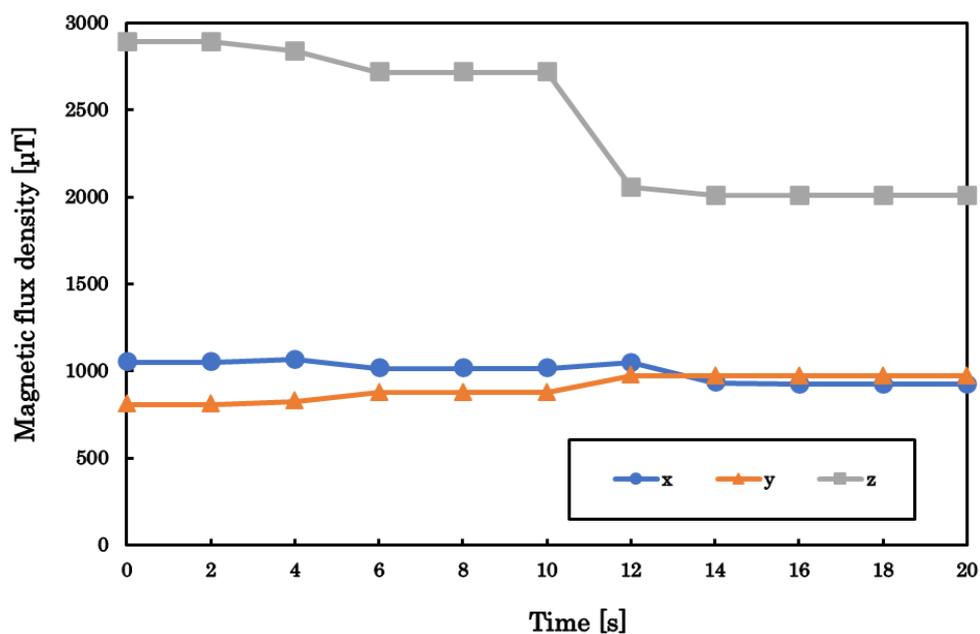


Fig.2-10 Change in magnetic flux density of sensor #8

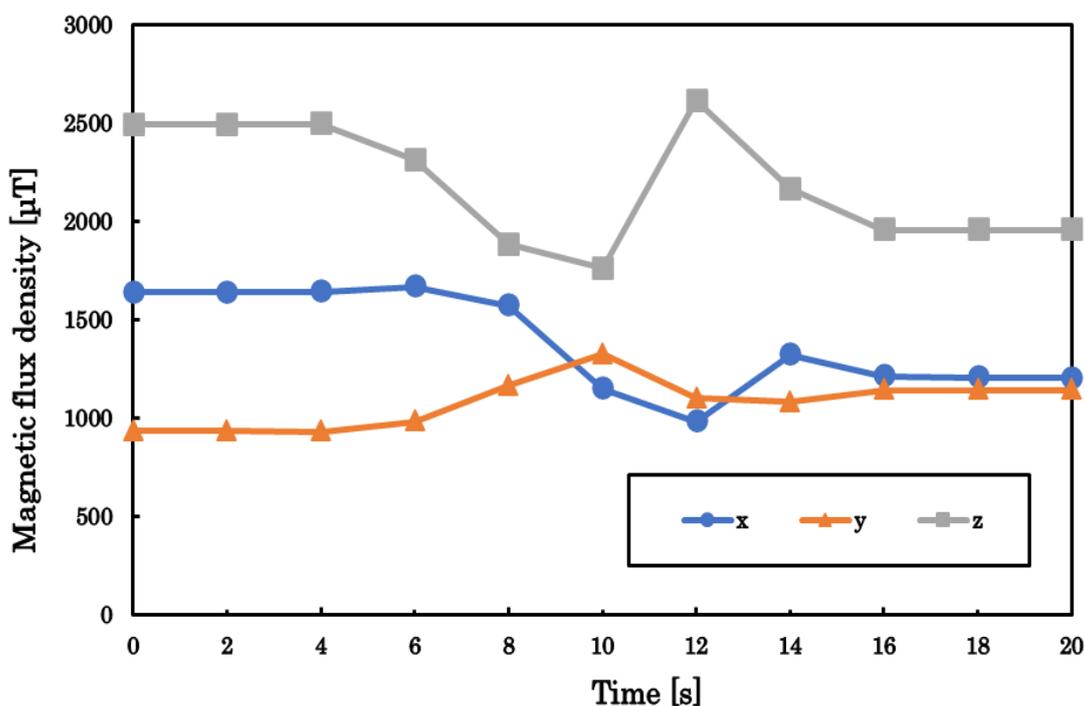


Fig.2-11 Change in magnetic flux density of sensor #7

2-2-5 進入時と退出時における磁束密度の変化についての考察

最初に、進入時における磁束密度の変化について考察する。図 2-8 および図 2-9 より、磁束密度の 3 軸成分のうち、z 軸の磁束密度はセンサ#7 およびセンサ#8 の双方において増加している。しかし、センサ#7 とセンサ#8 において、x 軸および y 軸の磁束密度の増減が逆転している。1つの駐車マスに 2つのセンサが同一の向きで埋設され、かつ車両がそのマスに駐車されたにもかかわらず、両センサにおける x 軸および y 軸の磁束密度の変化が反転していることは不自然である。この要因として、センサ#7 とセンサ#8 が 180度回転した状態で埋設されている可能性が考えられる。

また、センサ#8 に関しては、車両が斜め方向から進入したことにより磁束密度の向きが変化し、その結果、センサ#7 およびセンサ#8 の x 軸および y 軸の磁束密度の変化が逆転した可能性もある。さらに、磁束密度の変化率がセンサ#7 の方が大きくなっている要因として、センサ#8 は車両が斜め方向から進入する影響を受ける一方、センサ#7 は車両の中心がセンサ上を通過することが挙げられる。

2-2-6 センサ#8 における進入時と退出時の磁束密度比較

図 2-8 における一定値となった z 軸の磁束密度と図 2-10 における最初の z 軸の磁束密度を比較すると、約 500 μ T の増加が確認される。図 3-12 に、センサ#8 のみ値が変動した際の磁束密度の変化を示すグラフを示す。このグラフより、磁束密度が徐々に増加する傾向は見られず、急激に増加した後、すぐに一定値へと収束していることがわかる。なお、他のセンサ#1~#7 は、この間一定値を維持していた。

さらに、ビデオ映像を確認できる範囲では、この変化が生じた瞬間に周囲の環境に変化は見られなかった。したがって、この磁束密度の変化は外部環境の影響によるものではなく、偶発的に発生したセンサの出力変動である可能性が高い。この現象は、用いたセンサ基板のプログラムの異常によるものであると考えられる。

以上の結果から、新たな検知アルゴリズムを作成する際には、他の駐車マスのセンサ出力と比較し、

このような突発的なセンサの誤作動が発生した場合に、適切に補正できるような処理を組み込む必要がある。

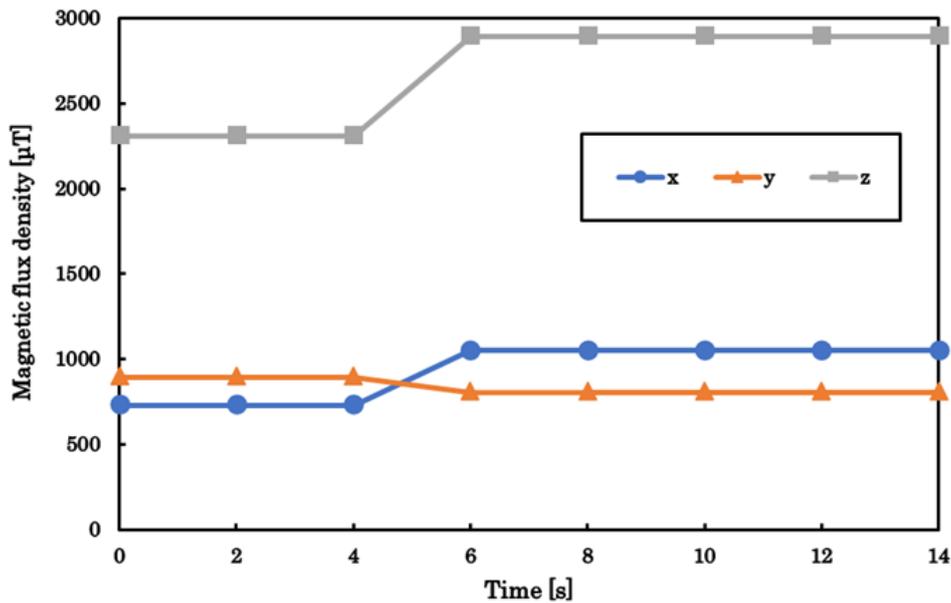


Fig.3-12 Change in magnetic flux density of sensor #8

2-3 隣接マスの磁束密度の変化

次に、センサ#7 およびセンサ#8 に車両が駐車した際の当該マスの磁束密度変化と、隣接マスに埋設されたセンサ#6 およびセンサ#5 の磁束密度変化を比較した。図 2-13 に、進入時における隣接マスの磁束密度変化を示し、図 2-14 に、退出時における隣接マスの磁束密度変化を示す。

センサ#6 と比較して、センサ#5 の y 軸の磁束密度の値がわずかに大きくなっているものの、全体的な磁束密度の値にセンサ間の大きな差異は認められない。また、進入時および退出時ともに、隣接マスにおいて僅かな磁束密度の変化が確認されるが、当該マスへの進入時の磁束密度変化を示した図 3-6 および図 3-7 と比較すると、磁束密度の変化は隣接マスではなく当該マスに起因するものと判定できる。

したがって、隣接マスへの駐車と誤検知することを防ぐ手段として、当該マスと隣接マスの磁束密度変化を比較することは有用であると考えられる。

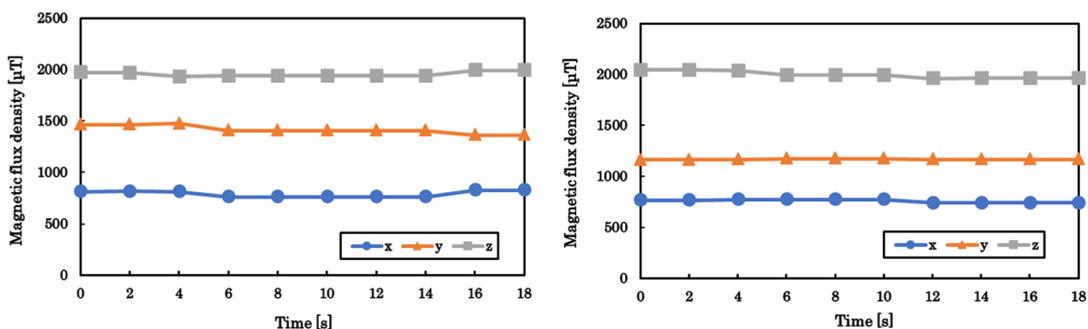


Fig.2-13 Change in magnetic flux density of sensor #6 and sensor#5 at the time of approach

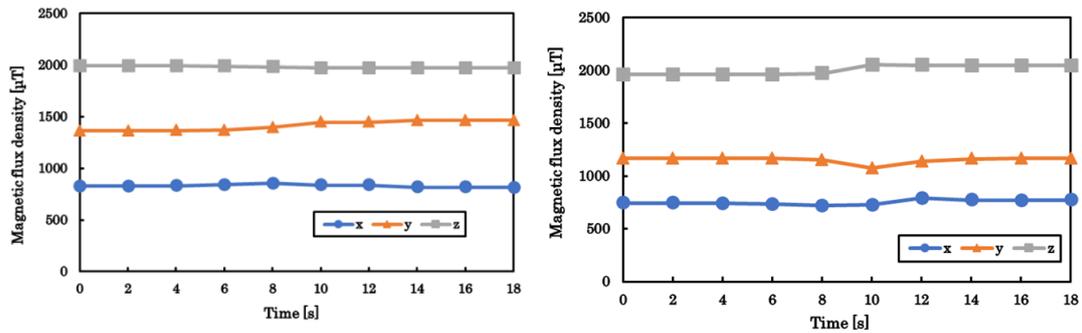


Fig.2-14 Change in magnetic flux density of sensor #6 and sensor#5 when leaving

2-4 他の駐車マスでの車両検出

2-4-1 進入時における磁束密度の変化

センサによる特性の違いや,他のマスでも駐車判定が可能かを検証するため,同様の実験を別の車両と別のマスで実験した.図 2-15 に車両が駐車マスから退出するときのビデオからの写真と,その時の状況を図にしたものを示す.

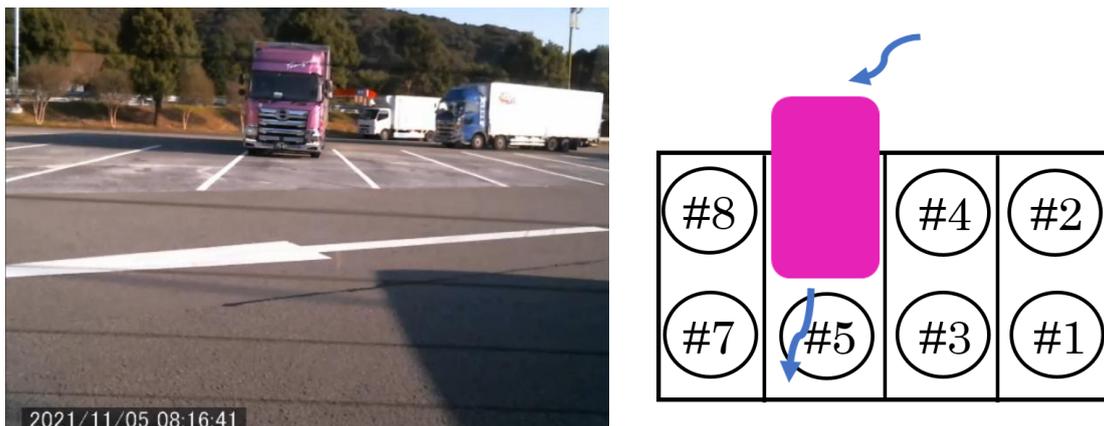


Fig.2-15 Vehicle enters the parking space

図 2-16 および図 2-17 に, 車両がセンサ#5 およびセンサ#6 が埋設された駐車マスに進入した際の磁束密度の変化を示す. 車両はセンサ#5 よりも先にセンサ#6 上を通過するため, 図 2-17 のグラフと比較すると, 図 2-16 のグラフの立ち上がりが早くなっている.

また, 図 2-8 および図 2-9 と比較した場合, 今回は磁束密度の増減が反転することなく, 適切に検出されている. さらに, センサ間における z 軸の磁束密度変化の割合を比較すると, センサ#5 の方が大きくなっている. この要因として, 車両がセンサ#6 を通過する際よりも, センサ#5 上を通過する際の方が, 車両の中心がセンサの真上を通過していることが挙げられる.

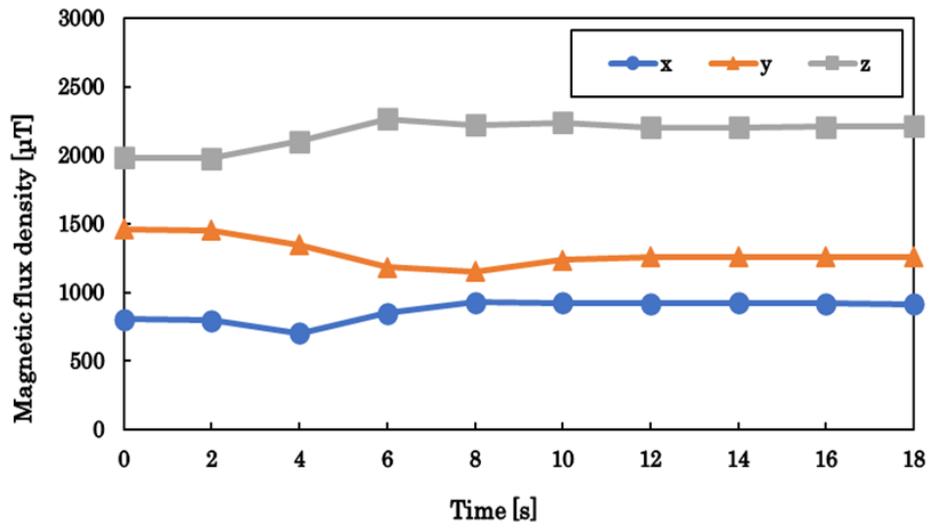


Fig.2-16 Change in magnetic flux density of sensor #6

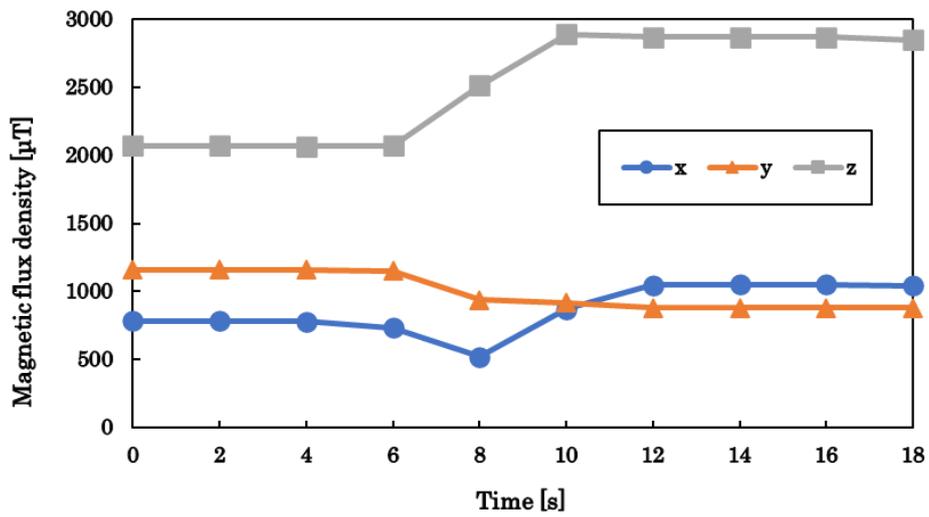


Fig.2-17 Change in magnetic flux density of sensor #5

2-4-2 他の駐車マスでの退出時における磁束密度の変化

図 2-18 に車両が駐車マスから退出するときのビデオからの写真と、その時の状況を図にしたものを示す。

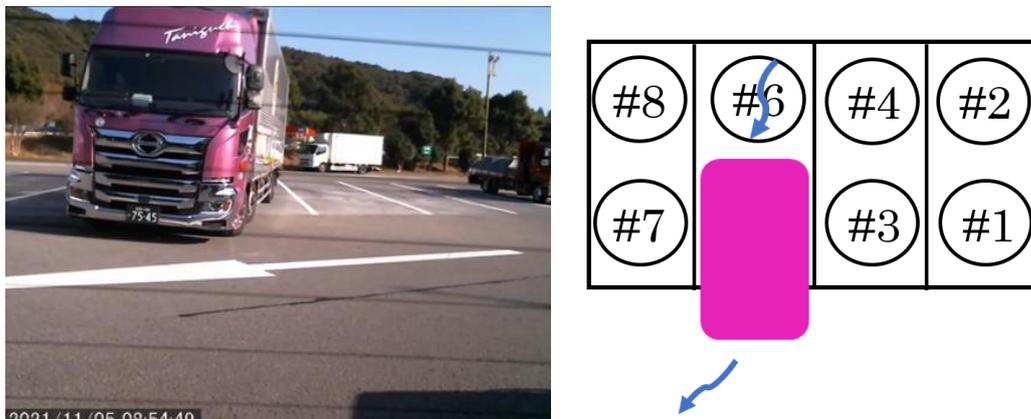


Fig.2-18 Vehicle leaves the parking space

図 2-19 および図 2-20 に、車両がセンサ#5 およびセンサ#6 が埋設されている駐車マスから退出した際の磁束密度の変化を示す。センサ#6 は一度大きく変化した後、一定値を示しているが、センサ#5 は複数回の増減を繰り返した後一定値へと収束している。これは、センサ#5 の位置において車両の前方および後方がセンサ上を通過することに起因するものである。しかしながら、両センサの最終的な磁束密度を比較すると、いずれも減少していることが確認されるため、退車の判定が可能である。

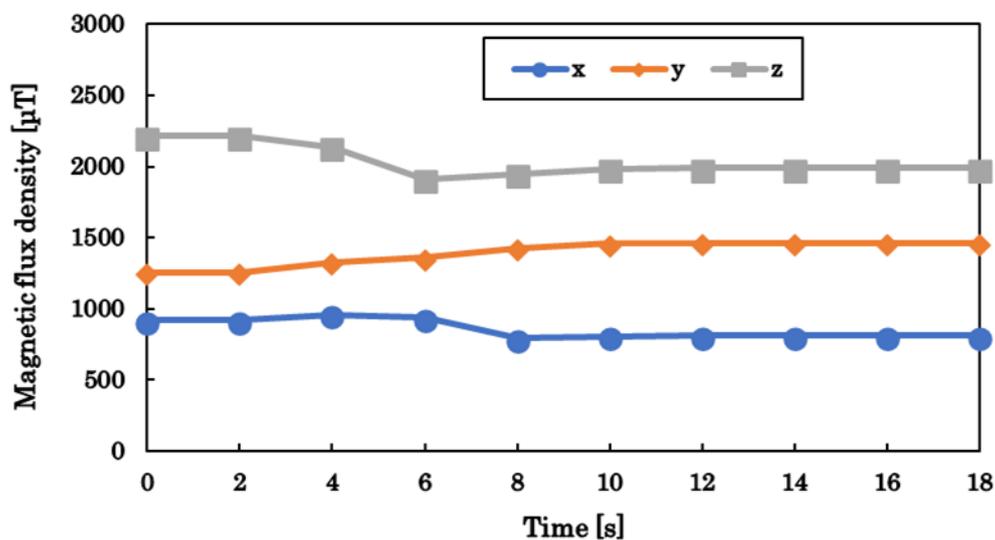


Fig.2-19 Change in magnetic flux density of sensor #6

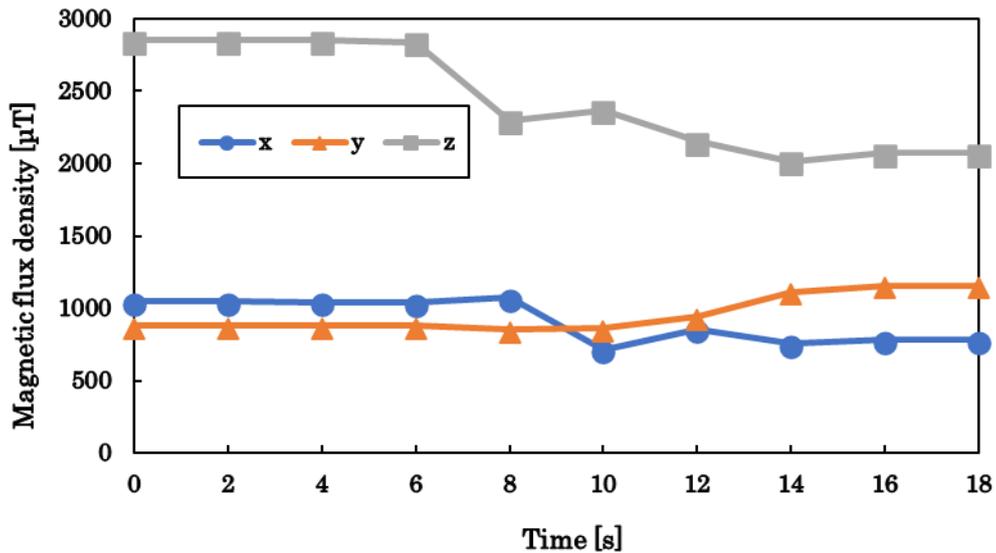


Fig.2-20 Change in magnetic flux density of sensor #5

2-4-3 隣接マスの磁束密度の変化についての考察

センサ#6 およびセンサ#5 に車両が駐車した際の当該マスにおける磁束密度変化と、隣接マスに設置されたセンサ#4 およびセンサ#3 の磁束密度変化を比較した。図 2-21 に、進入時における隣接マスの磁束密度変化を示す。また、図 2-22 に、退出時における隣接マスの磁束密度変化を示す。センサ#4 の z 軸の磁束密度は、センサ#3 と比較して小さい値を示している。このことから、センサごとに磁束密度の差が存在することが確認された。

さらに、センサ#6 およびセンサ#5 の隣接マスの変化を示した図 2-13 および図 2-14 と比較すると、今回のセンサ#3 およびセンサ#4 の方が磁束密度変化の割合が大きいことがわかる。このことから、車両やセンサによって、隣接マスへの影響を与えやすさや受けやすさに個体差があると考えられる。

しかし、当該マスへの進入時の磁束密度変化を示した図 2-16 および図 2-17、当該マスから退出する際の磁束密度変化を示した図 2-19 および図 2-20、ならびにその際の隣接マスの磁束密度変化を示した図 2-21 および図 2-22 を比較することで、隣接マスへの駐車ではなく、当該マスへの駐車であることを判定できると考えられる。

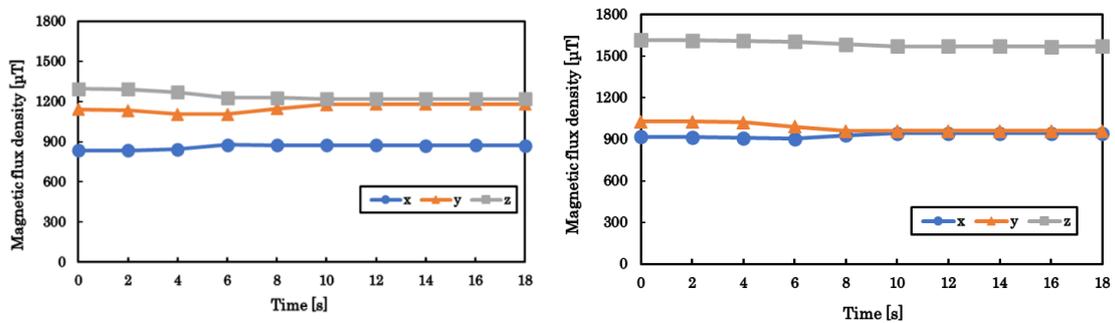


Fig.2-21 Change in magnetic flux density of sensor #4 and sensor#3 at the time of approach

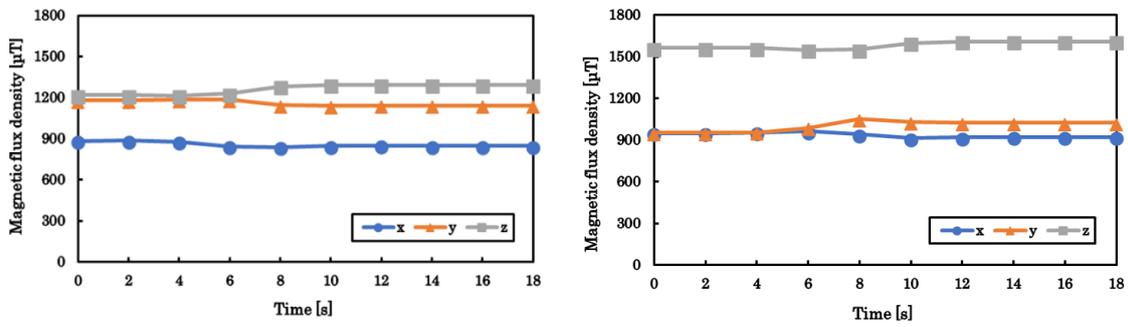


Fig.2-22 Change in magnetic flux density of sensor #4 and sensor#3 when leaving

3章 埋設式を用いた単独駐車と隣接駐車における磁束密度の比較

3-1 比較方法

磁力の3軸方向の内、横軸方向の磁力が隣接マスに影響を与え、誤検知を起こす可能性がある。そこで、単独駐車と隣接駐車時の磁束密度の平均値、最大値、最小値を比較して隣接駐車の影響を検討した。図3-1、図3-2に単独駐車と隣接駐車を比較した時の状況を示す。

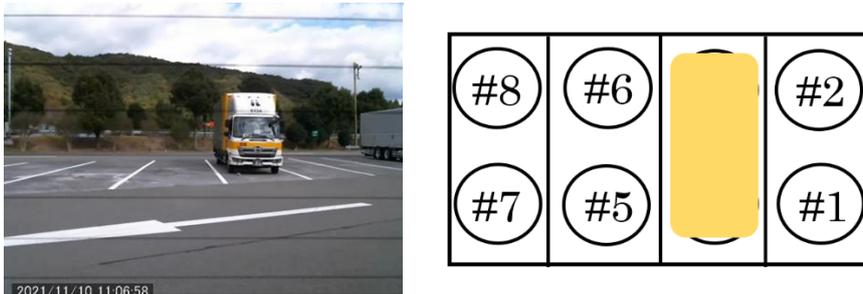


Fig.3-1 Single parking

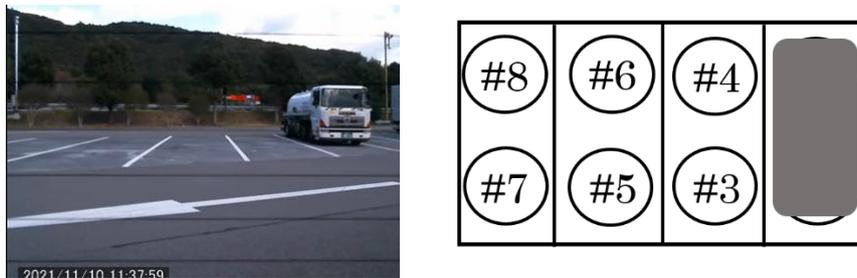


Fig.3-2 Adjacent parking

3-2 隣接駐車の影響

3-2-1 比較結果

表 3-1 に単独駐車と隣接駐車それぞれの 3 軸磁束密度の平均値,最大値,最小値の検知結果を示す.

Table.3-1 Comparison of single parking and adjacent parking

		Sensor 3	Sensor 4
Single parking	Average	1101	1210
	Max	1332	2418
	Min	948	405
Adjacent parking	Average	1182	1070
	Max	1613	1265
	Min	914	749

3-2-2 単独駐車と隣接駐車の前平均値比較

図 3-3 に,単独駐車時の平均値と隣接駐車時の平均値をセンサごとに比較した結果を示す.図 3-3 より,センサ#4においては単独駐車時の磁束密度の方が高い値を示しているが,センサ#3においては隣接駐車時の磁束密度の方が高い値を示していることが確認された.また,表 3-1 より,センサ#3 の磁束密度の平均値および最大値は,隣接駐車時の方が高いことがわかる.

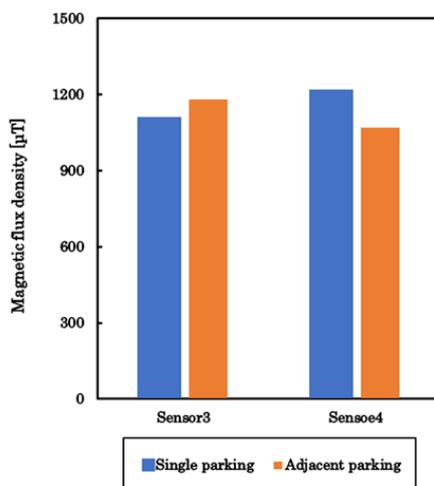


Fig.3-3 Comparison of average values of single parking and adjacent parking

3-2-3 単独駐車と隣接駐車時の磁束密度の比較

図 3-4 に、単独駐車時の最小値と隣接駐車時の最大値をセンサ別に比較したものを示す。図 3-4 より、センサ#3 もセンサ#4 も隣接駐車時の磁束密度の方が大きくなっているが、センサ#3 の方が隣接駐車時の影響を受けやすいことがわかる。

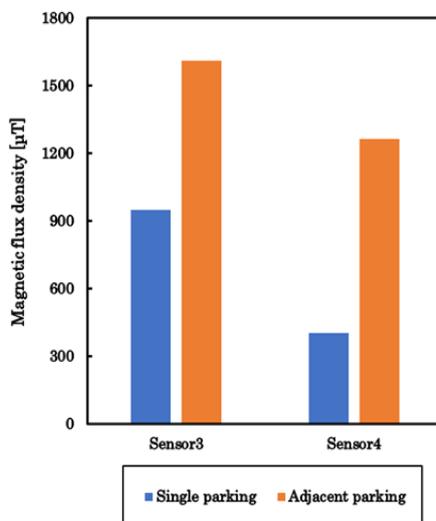


Fig.3-4 Comparison of minimum value for single parking and maximum value for adjacent parking

3-3 考察

図 4-3 に示す単独駐車時と隣接駐車時の平均値を比較した際に、センサ#3 において隣接駐車時の値が大きくなる要因について考察する。表 4-1 より、単独駐車時と隣接駐車時の最大値を比較すると、隣接駐車時の方が大きいことが影響していると考えられる。一方、センサ#4 においては単独駐車として判定可能である。

この結果より、車種によっては、当該マスへの単独駐車時よりも隣接駐車時の方が磁束密度が大きくなる逆転現象が発生することが確認された。このことから、駐車判定において、単独駐車時に得られた 3 軸のデータを絶対値の総和で評価し駐車マスを判断する方法は、誤検知を引き起こす可能性が高いと考えられる。

また、図 4-4 に示すように、単独駐車時の最小値と隣接駐車時の最大値を比較すると、隣接駐車時の影響が大きいことが明らかである。したがって、当該マスの磁束密度変化のみを基に判断するのではなく、両隣接マスを含めた 3 マスの磁束密度変化を比較することで、当該マスにおける入退出の判定が可能となると考えられる。さらに、具体的なしきい値を設定し、それ以下の変化をオフセットするプログラムを作成することが、誤検知の低減に有効な手法として考えられる。

4章 埋設式を用いた駐車判定アルゴリズムの提案

4-1 急激な変化点の検出ischange関数を用いる方法

ischangeとはデータの急激な変化点を検出できる MATLAB の関数である.以下にその構文を示す.

$$[TF, S1, S2] = ischange(A, '^' \text{linear}' , '^' \text{Threshold}' , '^' \tau')$$

入力引数の A は入力データである.Threshold は変化点の閾値で, τ を 1 より大きい値にすると変化点が少なくなる.また,linear は変化点メソッドであり,データの勾配と切片の急激な変化の検出を行う.出力引数の TF は入力引数の A と同じサイズの logical 値で 0 か 1 を返す.S1 は各セグメントの勾配,S2 は各セグメントの切片を出力する.図 4-1,4-2 に, 急激な変化点の検出ischange関数を用いる方法の判定結果を示す.

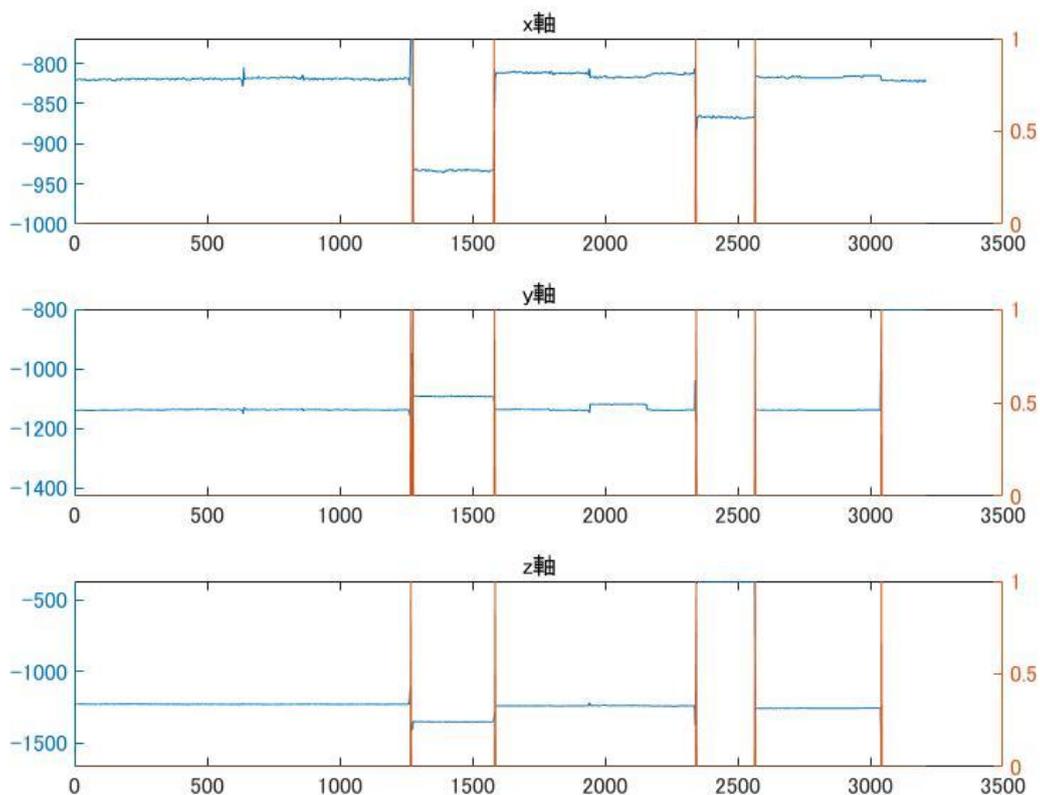


Fig.4-1 Judgement result sensor #4

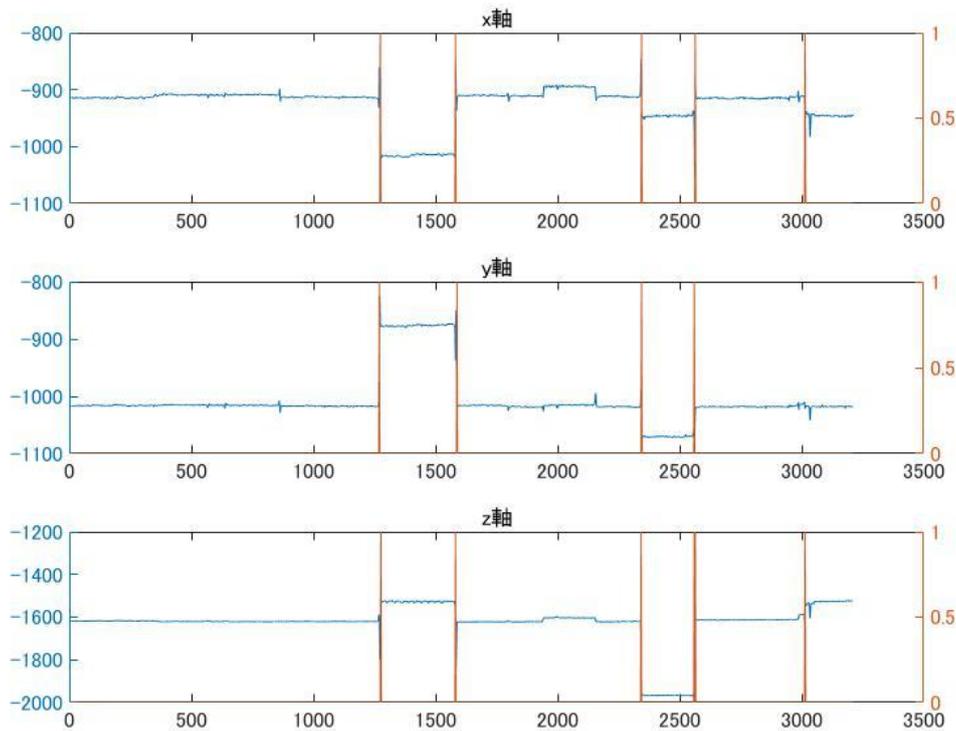


Fig.4-2 Judgement result sensor #3

この時間帯に駐車された車両の台数は、ビデオで確認すると2台だった。図4-1,4-2より、水色の数値は、センサ3とセンサ4のマス1時間の磁束密度変化を表す。オレンジ色の数値は、0か1の判定結果である。1が2回判定されたら車両の進入、退出が終了とすると、図5-1,5-2より3軸とも車両検出できていることがわかる。また、ここで閾値 τ は $\tau_x = 20000$, $\tau_y = 20000$, $\tau_z = 10000$ と設定した。

4-2 微分により求めた傾きと閾値を比較する方法

図4-3のように、微分により各データの傾きを算出し、その傾きと閾値を比較する方法を提案する。この方法のメリットは、傾きの時間変化を参照しながら、閾値が設定できる点であると考えられる。図4-4,4-5に微分により求めた傾きと閾値を比較する方法の判定結果を示す。なお、磁束密度変化は、図4-1,4-2と同じである。

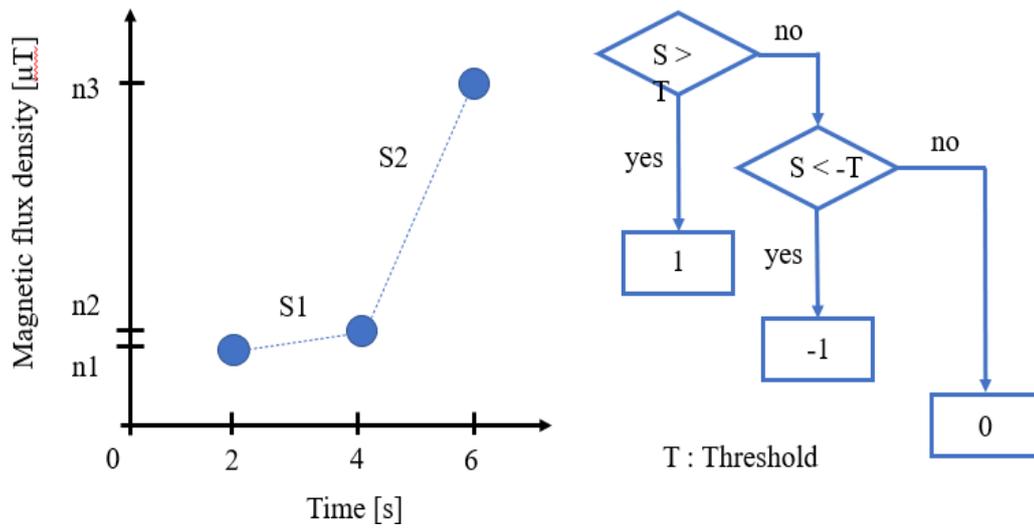


Fig.4-3 A method of comparing the slope obtained by differentiation and the threshold

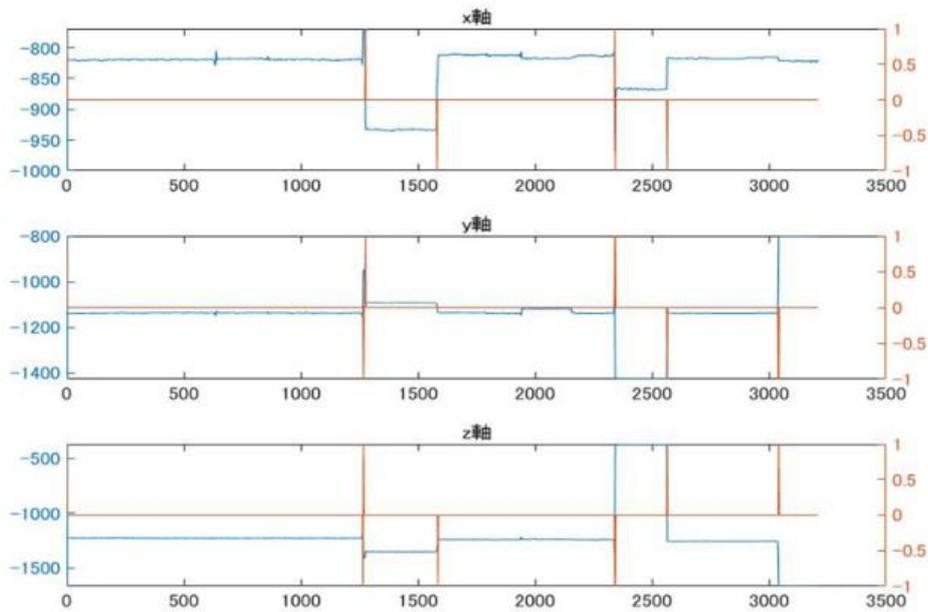


Fig.4-4 Judgement result sensor #4

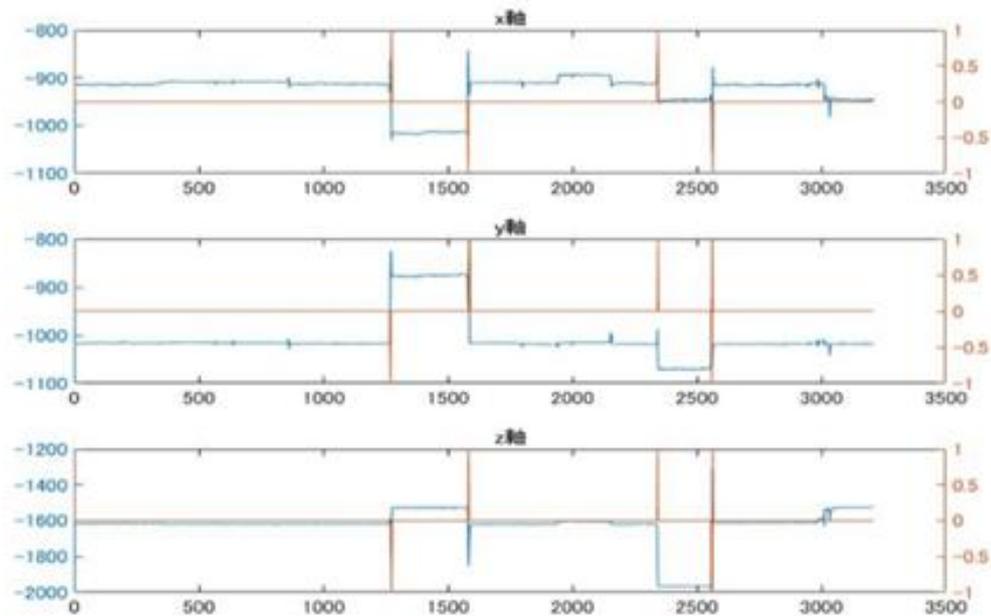


Fig.4-5 Judgement result sensor #3

微分により求めた傾きと閾値を比較する方法では 1 と-1 が交互に検出されると車両の進入,退出が終了とする.図 4-4,4-5 より,全体的に車両検出はできていることがわかる.しかし,どのセンサであっても車両が進入した際は一度大きく変化してから,定常値に落ち着くため,変化量によっては,いくら閾値を調整しても,同時に 1,-1 が検出されている箇所がある.また,閾値を調整すると駐車のない箇所にも 1,-1 が検出されることもある.そこで,今後の改善案として,2 秒間隔ではなく,4 秒間隔で傾きを算出することで,1,-1 の同時検出は抑えることが考えられる.

5 章 側方からの車両検出装置の提案

5-1 側方式車両検出装置の利点

埋設式磁気センサによる車両検出においては,横軸方向の磁力による誤検知や,埋設に伴う費用および施工時間などの課題が残る.そこで,本研究では,センサを側方に配置する手法を提案する.

側方配置型の車両検知器は,埋設式と比較して設置工事が容易である.図 5-1 に示すように,車両のセンサ通過位置によって波形が変化することが確認されており,これが車両特定時の誤検知の要因となる.しかしながら,側方から車両検出を行うことで,波形の特徴を利用し,車両の特定が可能であると考えられる.

さらに,本手法は,規制工事が困難な 1 車線道路,IC 流入道路,トンネル内道路などにおいても適用可能であり,その利用範囲の拡大が見込まれる.

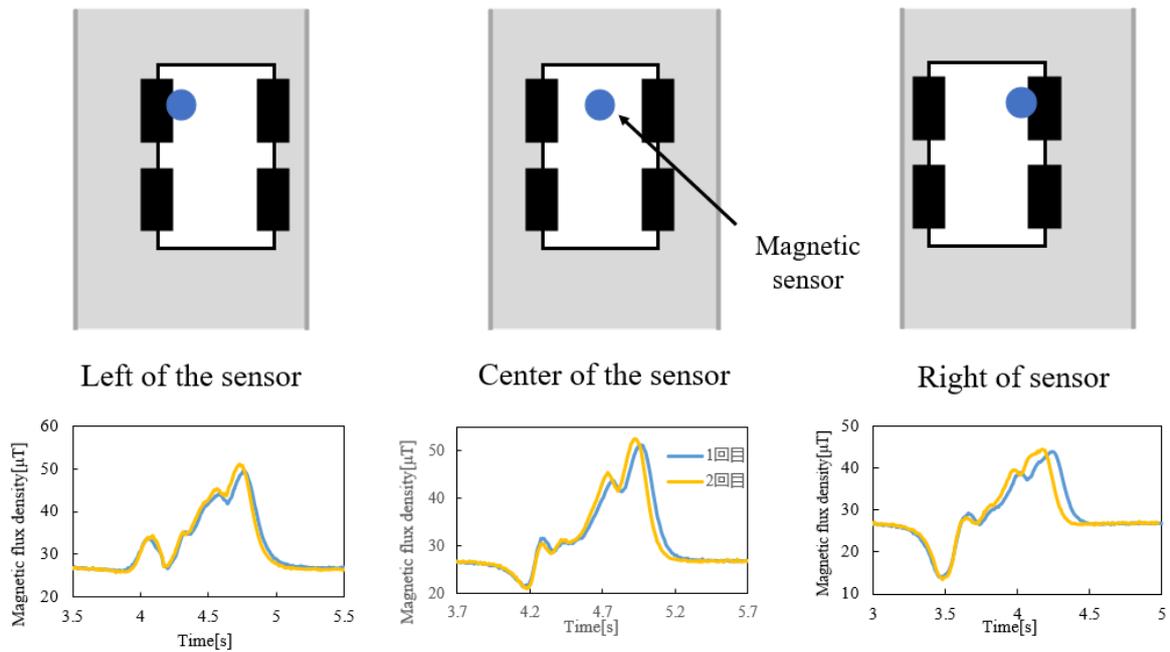


Fig.5-2 Differences in waveform depend on driving position

5-2 車両検出方法

車両の鉄製対象物による残留磁気の変化を用いることで、センサ横を通過する車両を検出することができる。グラフの x 軸は車両の進行方向、 y 軸は道路に対し垂直方向、 z 軸は奥行き方向を表す。車両とセンサ間の距離 d 、センサ高さ h 、車両速度 v とする。図 6-2 のように車両の進行方向に対し側方に設置したセンサによって車両を検出する。右側のグラフは、車両がセンサ横を通過した際の3軸別の波形のグラフである。

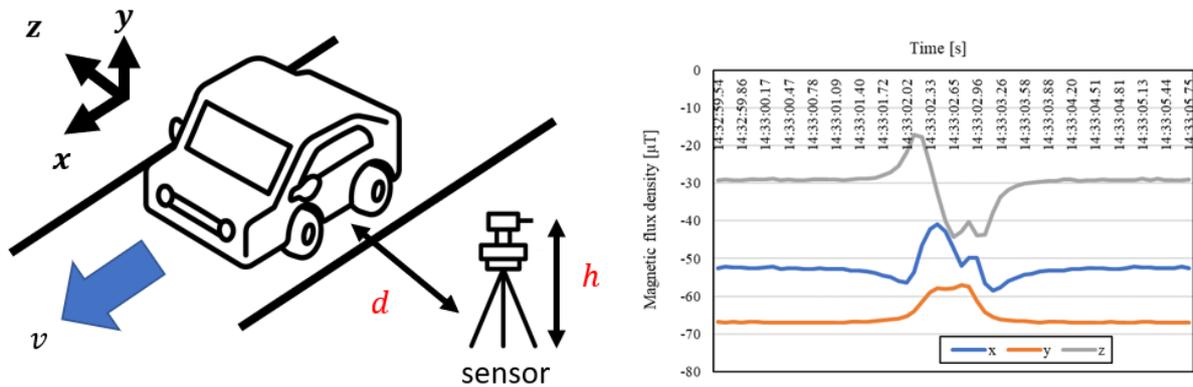


Fig.5-2 Vehicle detection method

5-3 使用環境による違い

実際にz軸方向に建物の有無による磁束密度の変化や波形に違いを検証した。図 5-3,5-4 に車両が通過した際の写真と、3 軸別の磁束密度変化を示す。グラフを比較すると、z軸の磁束密度の 0 点の値は変化しているが3軸ともに波形に変化はないことがわかる。これより、側方からの車両検知器は埋設式と比較すると、車両通過位置にも依存しないことがわかる。

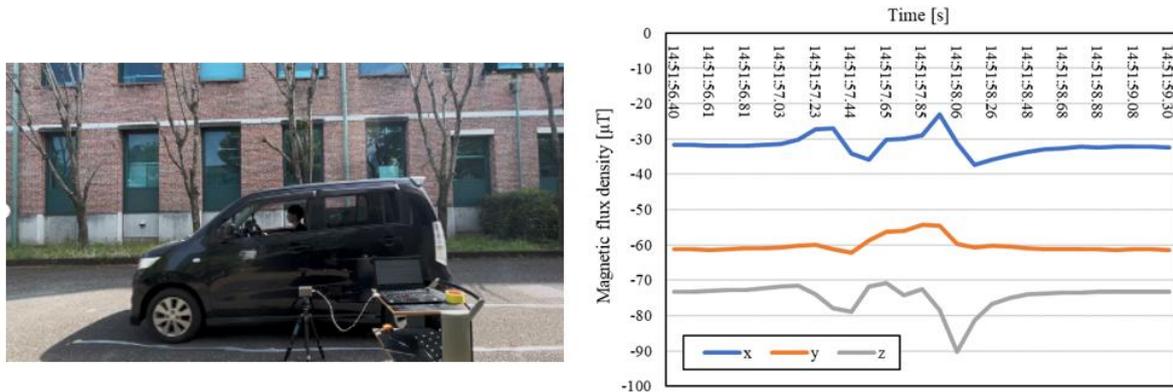


Fig.5-3 When there is a building in the Z-axis direction



Fig.5-4 When there is no buildings in the Z-axis direction

5-4 車両別磁束密度変化の比較

センサ間の距離 d ，センサ高さ h をそれぞれ変化させ車体の大きさの違う車両の磁束密度変化の波形を比較した。表 5-1 に使用した車両の寸法や重量をまとめたものを示す⁽⁹⁾。図 5-5 にワゴン R を 4 つの条件で比較したものを示す。また、図 5-6 にラクティスとノアを 2 つの条件で比較したものを示す。

Table.5-1 Vehicle information

	SUZUKI ワゴンR	TOYOTA ラクティス	TOYOTA ノア
全長	3395 mm	3995 mm	4710 mm
全幅	1475 mm	1695 mm	1735 mm
全高	1650 mm	1585 mm	1870 mm
車両重量	840 kg	1110 kg	1700 kg

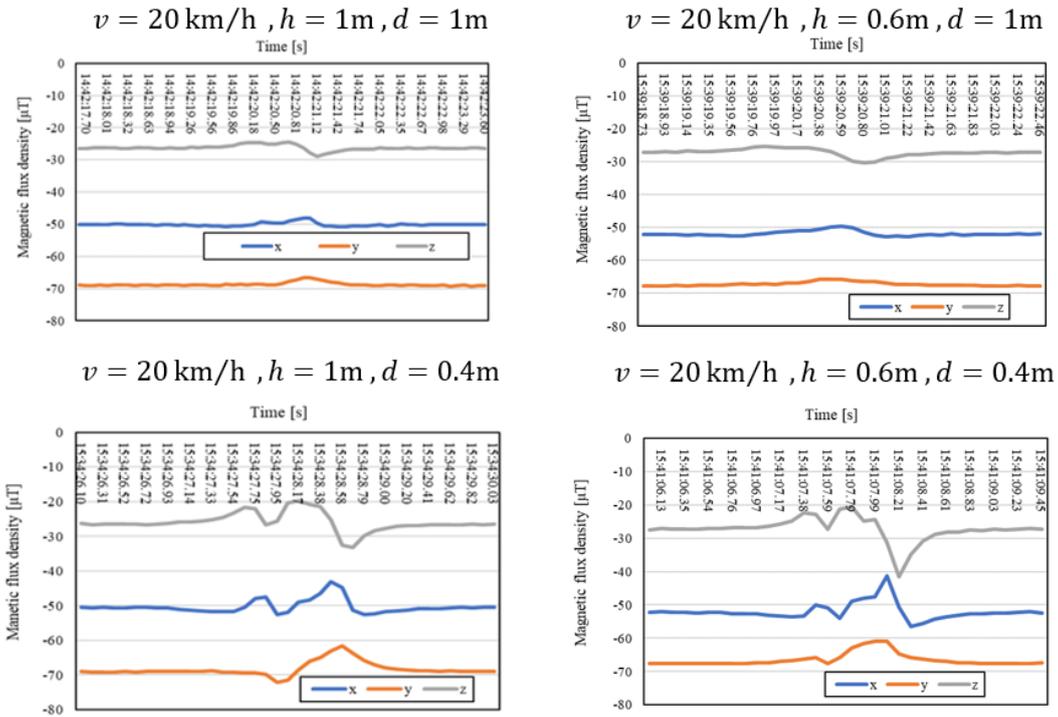


Fig.5-5 Compare Wagon R in 4 conditions

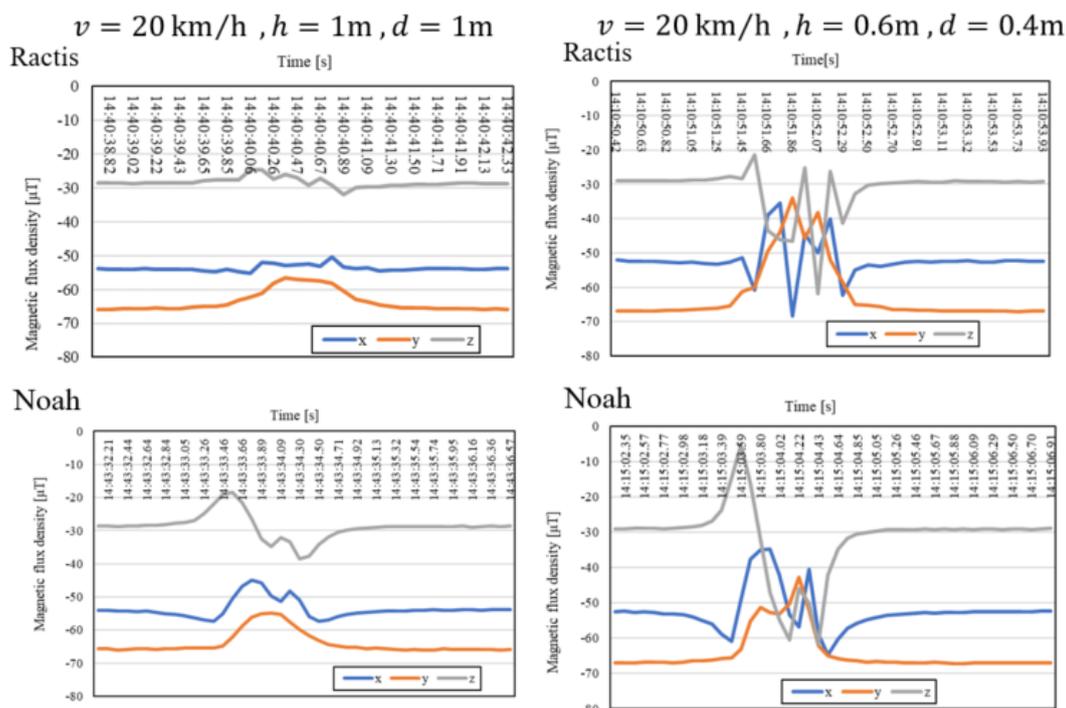


Fig.5-6 Compare 2conditions between Ractis and Noah

図 5-5 より $h = 1\text{m}$, $d = 1\text{m}$ の時, 車両検出できていないことがわかる. センサ高さを $h = 0.6\text{m}$ と変化させたが, 車両の検出はできなかった. センサ間距離 $d = 0.4\text{m}$ とすると波形が出力され, 車両検出できている. センサ高さ h とセンサ間距離 d 両方を変化させると, 磁束密度変化が大きくなった. これは $h = 0.6\text{m}$ 周辺にエンジンなどの磁性体部品が多いことが要因と考えられる. よって, 側方からの車両検出において, センサ高さ h よりも車両とセンサ間の距離 d に依存することがわかる. 図 5-6 より, ラクティスとノアでは $h = 1\text{m}, d = 1\text{m}$ の時, ワゴン R と比較すると波形の概形が表れている. $h = 0.6\text{m}, d = 0.4\text{m}$ と比較すると, 概形が類似している. よって, 車体が大きいほど磁束密度変化量が大きくなり, 大型車以上の大きさの車両であればセンサ間距離 d は 1m 確保できることがわかる. また図 5-5, 5-6 より, 車両によりそれぞれ波形に特徴があることから, 波形の概形の違いを利用した車両特定が可能だと考えられる.

5-5 考察

図 5-5, 5-6 より, 車体が大きいほど磁束密度の大きさと変化量ともに大きくなる傾向があることがわかる. このことから大型車両の車両検出には, 4章で述べた傾きの閾値検出は有効だと考えられる. また, 車両によりそれぞれ波形に特徴があったことから, 車両検出システムでの車両特定に生かすことができる. しかし, 車両とセンサ間の距離 $d = 0.4\text{m}$ が実用的な距離でないため, より高感度な磁気センサを用いて車両検出距離の拡大を図ることが重要である.

6章 高分解能磁気センサを用いた側方からの車両検出装置の提案

6-1 使用する高分解能磁気センサ

1章の1-1-4で記載した磁気センサを用いて本研究を行った。図6-1に今回用いた高感度磁気センサのセンサ素子位置と磁気ノイズ特性を示す⁸⁾。また、表6-1に各々の性能を比較したものを示す。この高感度磁気センサはMIセンサの中で最高の磁気分解能をもつセンサである。地磁気の1/50000のnTオーダーの磁界変化を検出が可能である。

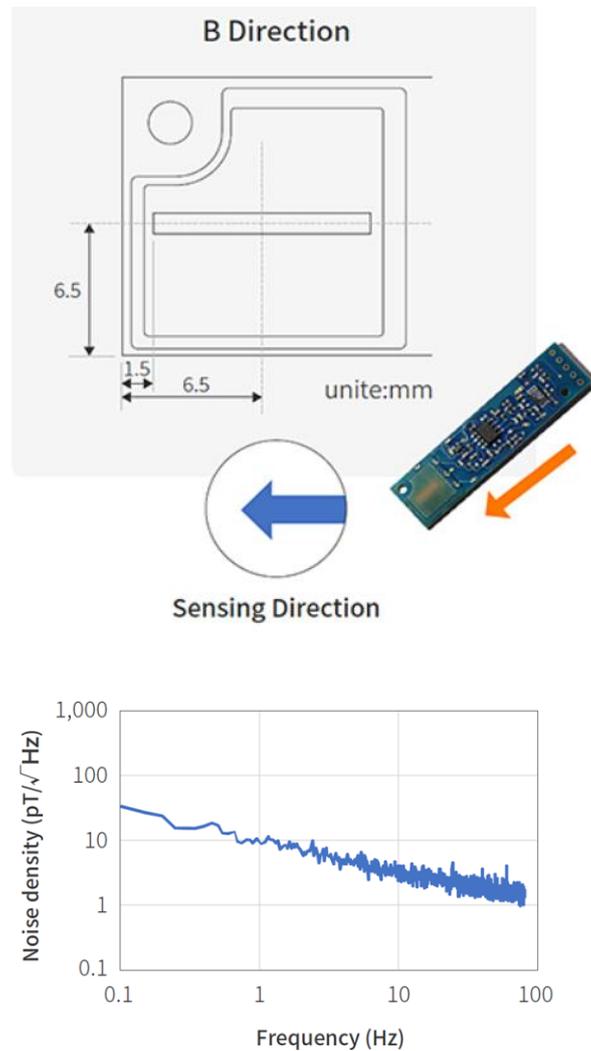


Fig.6-1 MI-CB-1DJ Sensor Element Position and its magnetic noise characteristics

Table.6-1 Sensor performance comparison table

	ローム株式会社 BM1422AGMV	愛知製鋼(株) MI-CB-1DJ-S-B
感磁方向	3軸	1軸
電源電圧	4.5 V	15 V
磁気感度	0.042 $\mu\text{T}/\text{LSB}$	0.000195 $\mu\text{T}/\text{LSB}$
分解能	0.3 μT	10 pT
基板サイズ	2mm \times 2mm	55mm \times 13.5mm

本研究では、MIセンサを2個搭載した装置を用いて実験を行う。図6-2に、MIセンサを2つ搭載した装置のセンサ配置および感磁方向に関する図を示す。本装置においては、2個のMIセンサを適切に配置することにより、縦軸および横軸の磁場を同時に検出することが可能である。これにより、各軸の磁場成分に応じて出力される波形を観測し、磁場変動に対するセンサの応答特性を詳細に評価する。この構成に基づく観測は、縦横軸方向の磁場分布を可視化し、磁気センサの性能を多角的に検証する上で有用であると考えられる。

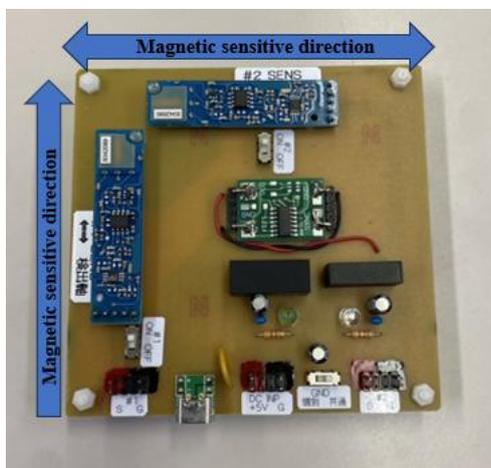


Fig.6-2 Sensor arrangement and magnetic sensing direction of a device equipped with two MI sensors

また、高精度なアナログ信号処理と多チャンネル入力を必要とするため、データ収集および制御用デバイスとして AIO-160802GY-USB を採用する。AIO-160802GY-USB は、16 ビットの高精度分解能を有し、最大 16 チャンネルのアナログ入力に対応しており、複数のセンサ信号を同時に測定可能であることが特徴である。さらに、USB インターフェースを備えているため、PC への簡易接続が可能であり、外部電源を必要としない利便性を提供する。また、高速なサンプリングレートにより、リアルタイムでの信号処理が可能であり、動的な信号や急激な変化を伴う測定にも適している。これに加え、LabVIEW や MATLAB などの主要なソフトウェア環境と容易に統合できる API やドライバが提供されているため、柔軟かつ効率的なデータ処理が可能である。小型軽量設計による設置の容易さやコストパフォーマンスの高さも特筆すべき点であり、これらの利点を総合的に考慮し、AIO-160802GY-USB は本研究におけるアナログ信号処理デバイスとして最適であると判断した⁽⁹⁾。図6-3、6-4にAIO-160802GY-USB本体と外形寸法の図を示す。



Fig.6-3 AIO-160802GY-USB main body

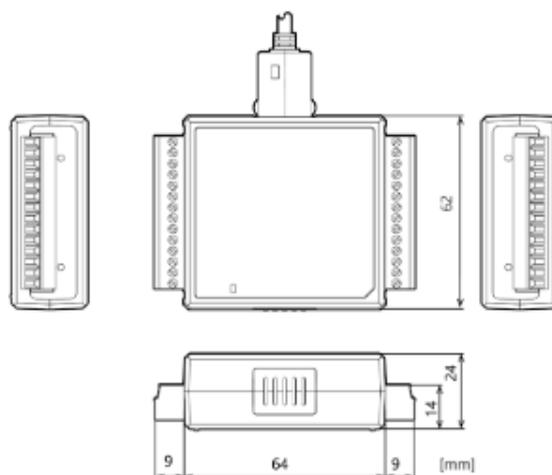


Fig.6-4 External dimensions

6-2 車両検出方法

車両とセンサ間の距離 d ，センサ高さ h ，車両速度 v とする．図 6-5 のように車両の進行方向に対し縦、横に設置したセンサによって車両を検出する．右側のグラフは，車両がセンサ横を通過した際の波形である．従来のセンサは感磁方向が 3 軸であることに対し高感度磁気センサは感磁方向が 1 軸であることから 1 つの車両に対して 1 つの波形が出力される．

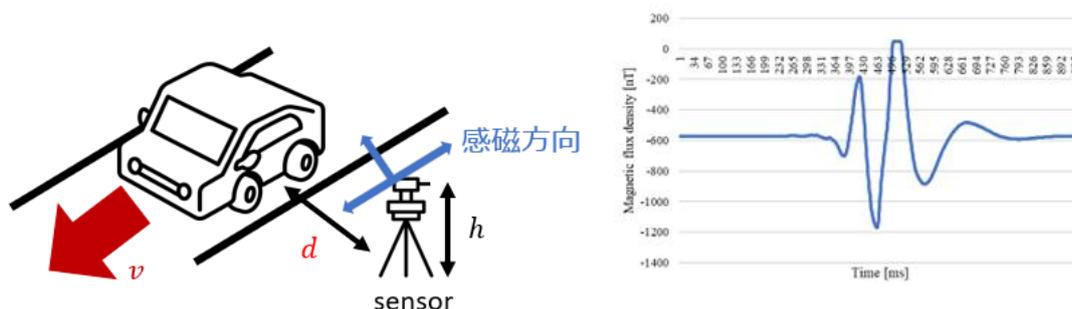


Fig.6-5 Vehicle detection with high sensitivity sensor

また、愛知製鋼製造の MI センサ「Type DJ」を用いて磁気を検出し、AIO-160802GY-USB を使用して電圧に変換する場合、センサの感度に基づいて電圧を磁気に変換する必要がある。「Type DJ」の公称感度は $5 \text{ V}/\mu\text{T}$ であり、センサ出力電圧を V 、対応する磁気量を B 、 S をセンサの感度 ($5 \text{ V}/\mu\text{T}$) とすると、以下の式で磁気量を計算できる．

$$B = \frac{V}{S}$$

この式を利用することで、取得した電圧データから磁気量を直接求めることが可能である．なお、この計算においては、センサの感度が公称値であることを前提としているため、正確な測定を行うにはキャリブレーションを実施することが推奨される．また、測定データには環境ノイズが含まれる可能性があるため、必要に応じてフィルタリングや平滑化などの処理を行うことが望ましい．さらに、測定環

境や用途に応じて感度の単位や係数が異なる場合があるため、製品仕様書やデータシートを参照することが求められる⁽⁸⁾。

6-3 高分解能磁気センサでの磁束密度変化比較

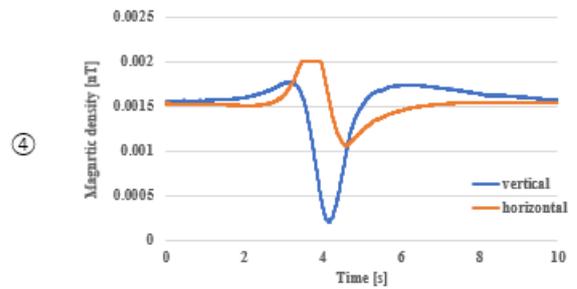
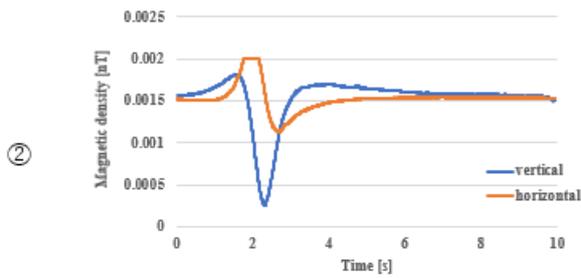
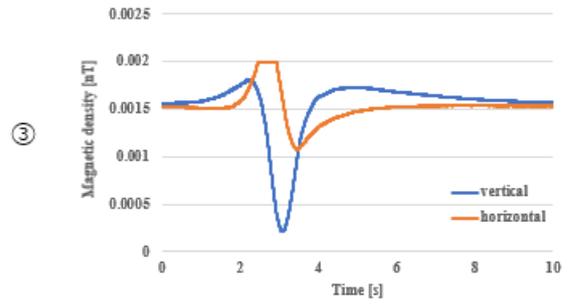
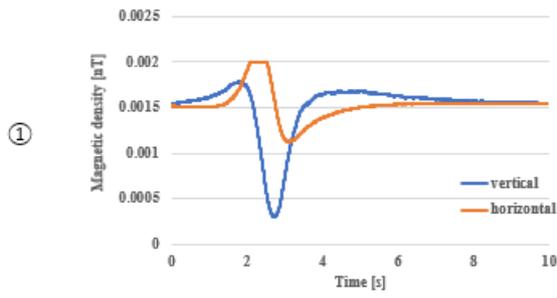
車両とセンサ間の距離 d 、センサ高さ h 、車両の速度 v をそれぞれ変化させ車体の大きさの違う車両の磁束密度変化の波形を 10 秒間検出し、比較した。しかし、今回の研究では車両とセンサの距離 d を 2m に、センサの高 d を 1m に固定した。これまでの研究より、車両とセンサの距離を 2m に設定することで、車両による磁場変化を十分かつ安定的に検出可能であると同時に、センサが車両との直接的な物理的接触を避けることができ、耐久性の向上と破損リスクの低減にも寄与し、センサの高 d を 1m にすることで車両の金属部品やエンジンが発する磁場は車両から一定の距離で強度がピークに達するため、多くの車両において磁場が明瞭に検出される適切な高さである考えられる。また、この高さはトラックやバスなどの大型車両から小型車両まで幅広い種類の車両に対応可能であり、同一条件下で安定した検出が可能であると判断した。

表 6-2 に使用した車両の寸法や重量をまとめたものを示す⁽¹⁰⁾。図 6-6 にパレットで速度を変更したそれぞれ 4 つの条件で検出した磁束密度の縦軸、横軸の時間変化を示す。また図 6-7 ラクティスでも速度を変更したそれぞれ 4 つの条件で検出した磁束密度の縦軸、横軸の時間変化を、それぞれ 4 回データを取得し、比較したものを示す。

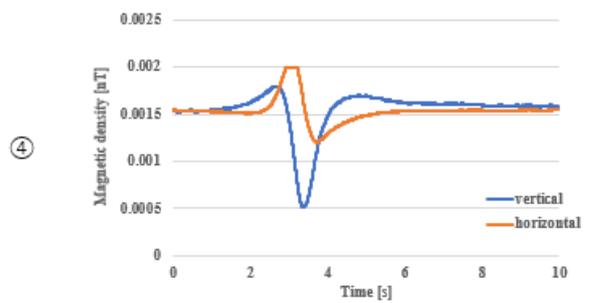
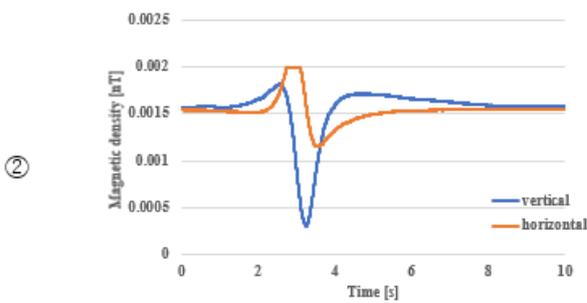
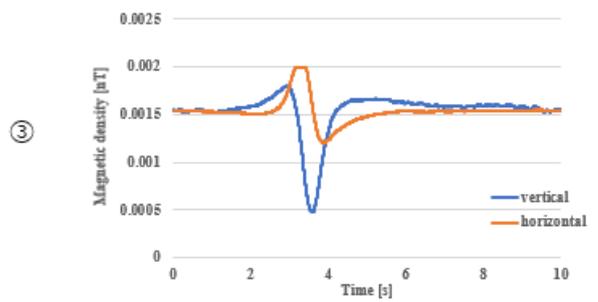
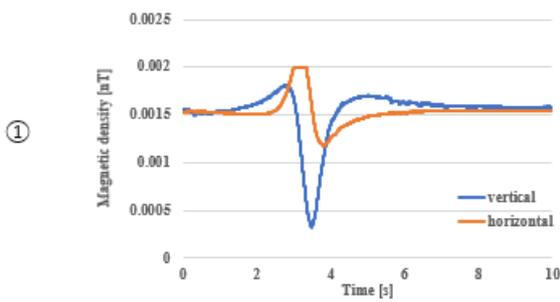
Table.6-2 Vehicle information

	SUZUKI パレット	TOYOTA ラクティス
全長	3339mm	3995mm
全幅	1475mm	1695mm
全高	1735mm	1585mm
車両重量	930kg	1110kg

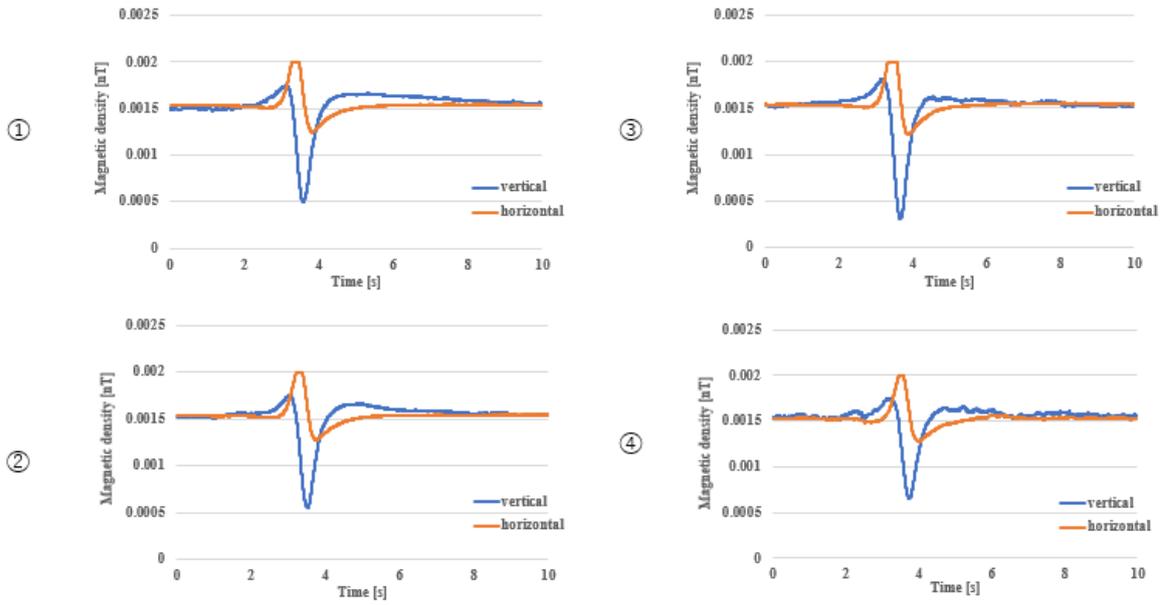
$h=1m, d=2m, v=10km$



$h=1m, d=2m, v=20km$



$h=1m, d=2m, v=30km$



$h=1m, d=2m, v=40km$

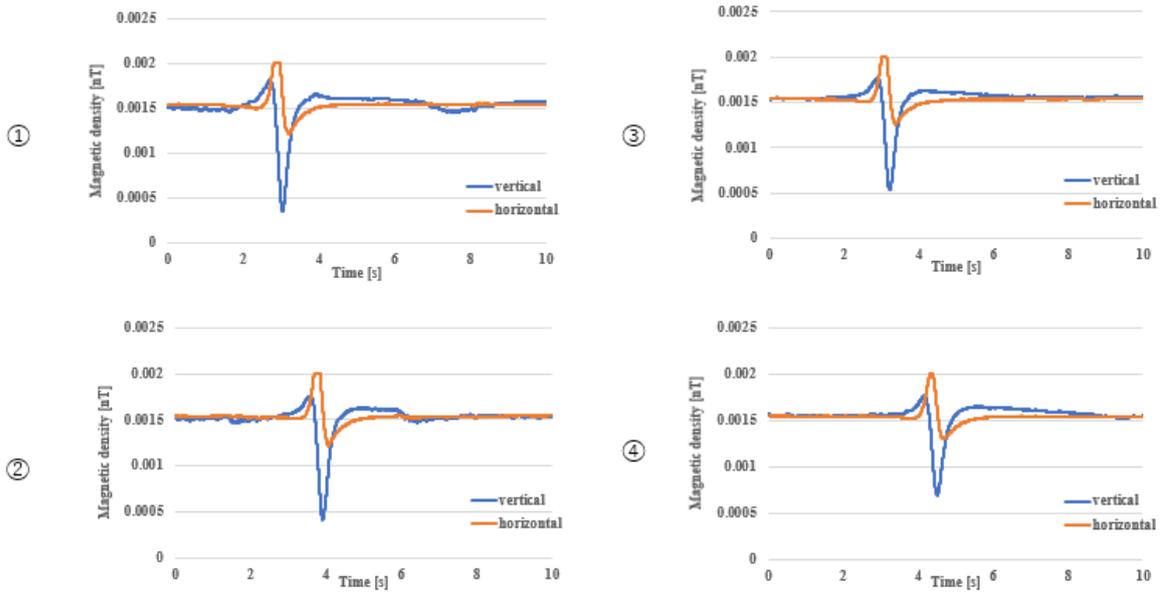
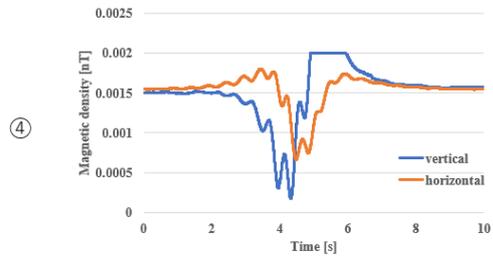
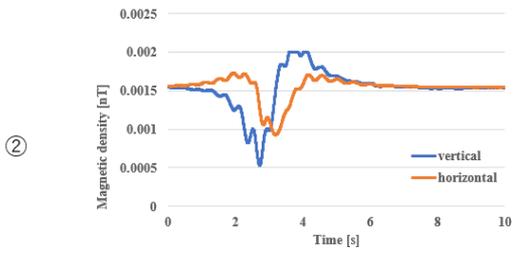
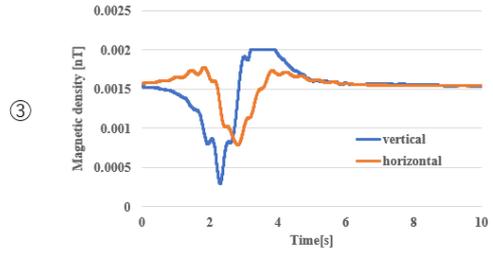
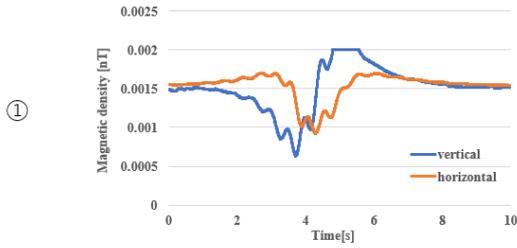
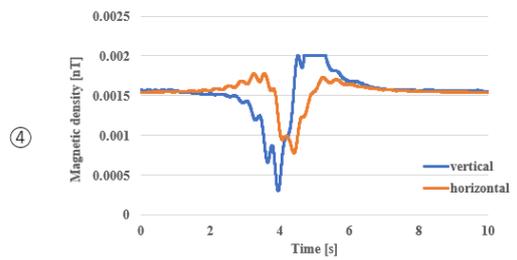
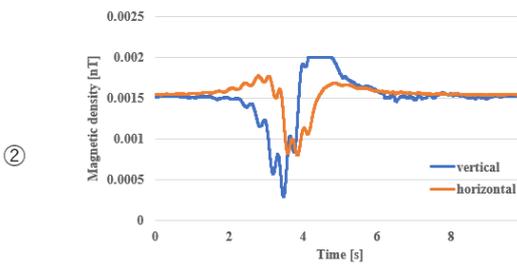
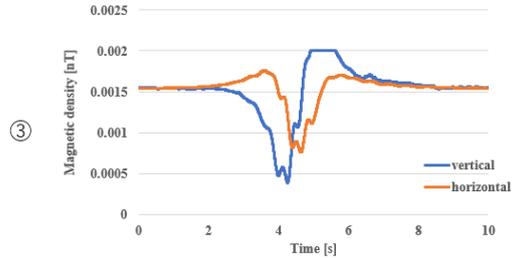
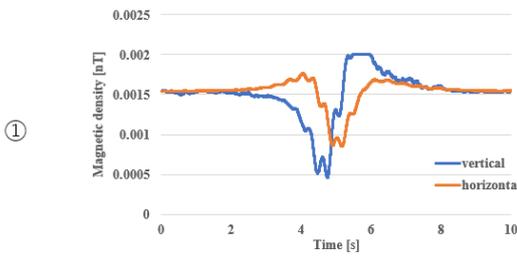


Fig.6-6 Temporal change in magnetic flux density depending on the speed of palette

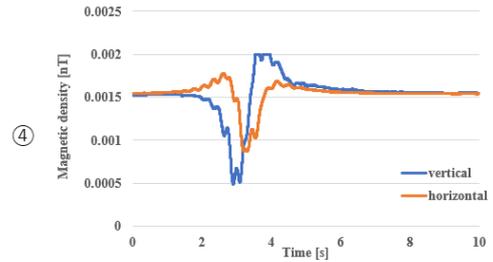
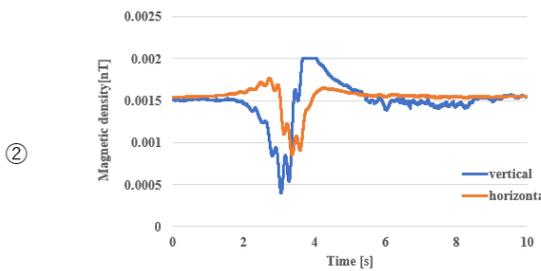
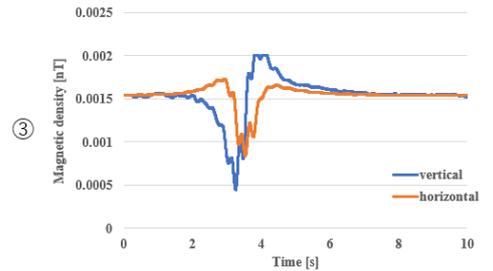
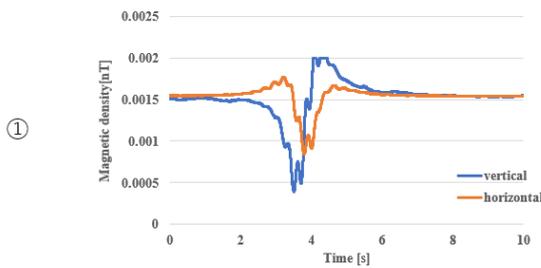
$h=1\text{m}, d=2\text{m}, v=10\text{km}$



$h=1\text{m}, d=2\text{m}, v=20\text{km}$



$h=1\text{m}, d=2\text{m}, v=30\text{km}$



$h=1m, d=2m, v=40km$

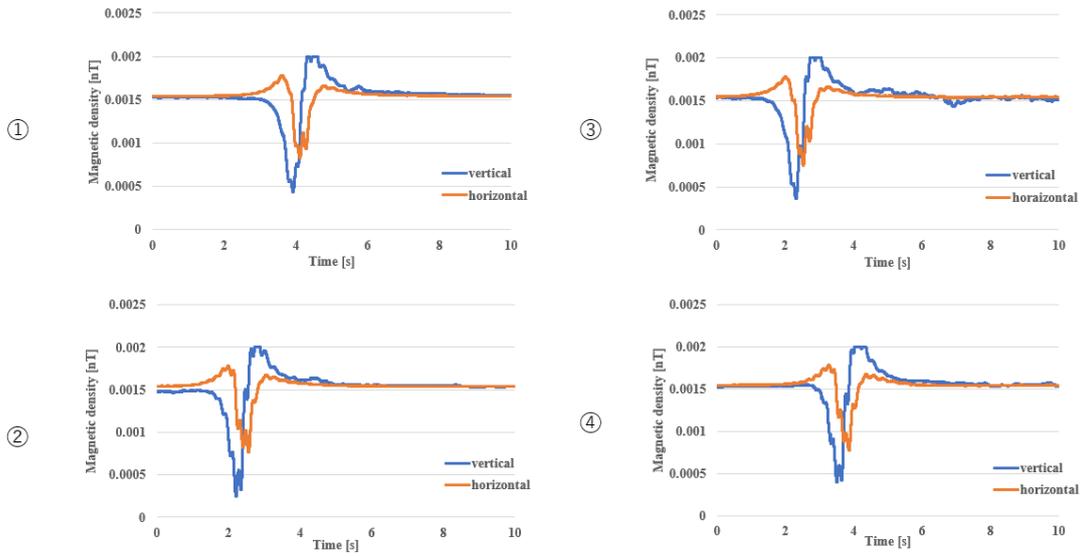


Fig.6-7 Temporal change in magnetic flux density depending on the speed of lacticis

図 6-6, 6-7 より, パレット, ラクティスともに高感度センサを用いると 4 つの条件全て車両検出できている. また, 速度を上げるごとに反応時間を短くなっているものの, 全ての波形が類似していることから車両特定は可能だと考える. また, 前回の研究では速度を上げることに磁束密度の最大値が上昇したことに對して, 今回その反応が見られず, すべてほぼ類似していることがわかる. これより, 車両特定するには, 波形の山ごとの最大値を平均し, 車両の波形を決定する必要がある. 図 6-6, 6-7 よりパレットでは 4 つの条件ともに波形が類似しているうえに, ラクティスとは波形が異なることから, 車両特定は可能であるといえる.

6-4 車種別車両判別比較

車両速度 v をそれぞれ変化させ, 車両の磁束密度変化の波形を比較し, 車両判別のために比較を行った. 図 7-8 に 4 つの条件でパレットとラクティスの 1 回目に測定した磁束密度の波形の比較を示す.

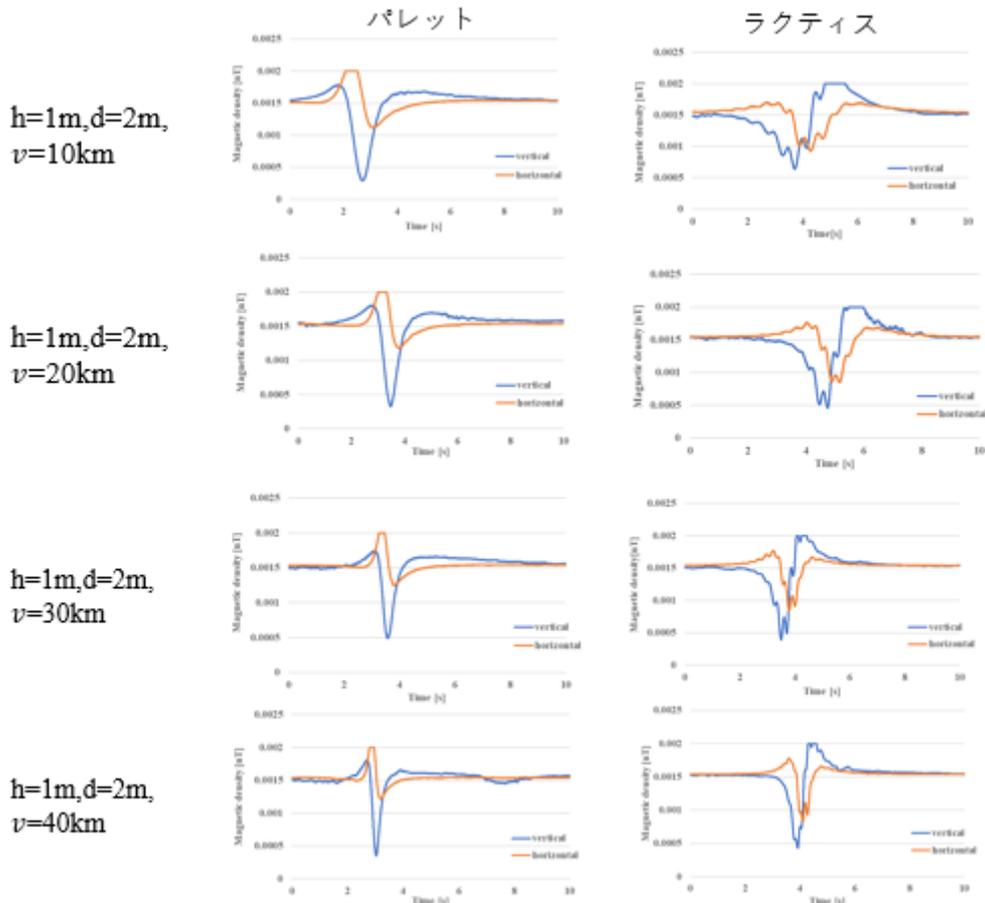


Fig.6-8 Changes in magnetic flux density depending on conditions

図 6-8 より，車両速度 v を変化させても車両判別できることがわかる．また，パレットの波形はラクティスの波形に比べてシンプルな波形であることがわかる．これは車に用いられる永久磁石（モーターやセンサー用のネオジム磁石など）は，温度変化や酸化により磁力が低下することがある．特に高温環境では不可逆減磁が起こることがあり，磁力が元に戻らない場合がある．よって磁気が低下したことによるものであると考えた．これは新車に近い車種のもの磁気を計測し値を比較する必要があると考えた．上記より，磁束密度の波形から側方からの車両検知での車両特定においては，波形の概形の違いを利用できると考える．

6-5 考察

以下より，図 6-6,6-7,6-8 についての考察を行う．

6-5-1 磁性材料を含む車両の移動による磁場変動とその影響

図 6-8 より，車両は，その構造において鉄を主成分とする部品を多数含有しており，その結果，周囲の磁場に対して一定の影響を及ぼす．特に，車両が磁化されている場合，その移動に伴い，センサが設置された位置における磁場は時間的に変動することとなる．この現象は，車両の磁氣的性質と移動特性に起因し，磁気センサを用いた検出システムの設計および信号処理において重要な考慮要素となる．

磁気の影響に関して，車両に使用される鉄は主に常磁性体および強磁性体の特性を有する．常磁性体としてはパーマロイなどが挙げられ，強磁性体としては鋼鉄などが代表的である．このような磁性材料を多量に含有する車両においては，個々の車両ごとに特有の残留磁気が生じる．この残留磁気は，車両の製造工程，使用環境，ならびに経年変化によってその強度および分布が異なるため，磁気センサ

を用いた車両検出において、各車両の磁気的特徴を考慮する必要がある。

さらに、車両の形状および構造は、磁場の空間的変動に大きな影響を及ぼす。例えば、パレット車両は、四角い箱型の単純な形状を持つことが多く、磁場変動も比較的規則的かつ単純なパターンを示す傾向にある。一方で、ラクティスのような車両は、曲線的なボディデザイン、補強材の配置、および配線の存在など、より複雑な構造を有する可能性が高い。このような車両では、磁気の分布および変動がより複雑なものとなり、磁気センサによる測定値も車両の移動に伴って高度に変動することが予測される。

したがって、車両の磁気的特性、形状、および移動特性を包括的に考慮することで、磁気センサを用いた車両検出の精度向上が可能となる。特に、車両ごとの残留磁気の影響を適切に補正し、形状による磁場変動の特徴を統計的に解析することにより、より高度な車両識別および検出手法の開発が期待される。

6-5-2 車両の移動に伴う磁束密度の時間変化と磁気双極子モデルによる解析

車両が磁気センサに接近すると、車両に起因する磁場の影響により、センサ位置における磁束密度は増加し、逆に車両が遠ざかるにつれて磁束密度は減少する。この磁束密度の時間変化は、車両の移動速度 v に大きく依存し、その時間依存性を定量的に評価することが可能である。本研究では、車両の磁気特性を磁気双極子モデルによって表現し、車両とセンサの相対的位置関係に基づいて磁場の時間変化を解析する。

車両が持つ磁気的性質は、磁気双極子モデルを用いることで簡略化して表現することができる。すなわち、車両の磁気を磁気モーメントを有する点磁石と仮定し、センサと車両の中心までの距離を r とすると、磁束密度 B は以下の式で表される。

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(m \cdot \hat{r})\hat{r} - m}{r^3} \right]$$

ここで、

μ_0 : 真空透磁率 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

m : 磁気モーメント [$A \cdot m^2$]

r : センサと磁気双極子（車両の中心）までの距離 [m]

この式から、磁場は距離 r の3乗に反比例して減衰することが分かる。したがって、センサの測定値は、車両がセンサに接近するにつれて急激に増加し、離れるにつれて急減するという特性を持つ。

また、本研究では、センサの位置を固定し、車両がその側方を直線的に通過するモデルを想定する。車両の進行方向を x 軸とし、車両の中心がセンサの側方を通過する場合、センサと車両の中心との距離 r は以下の関係式で表される。

$$r = \sqrt{h^2 + x^2}$$

ここで、

h : センサから車両までの距離[m]

x : 車両の前後位置 [m]

この式に基づき、車両がセンサの前方から接近し、通過し、遠ざかる際の距離変化を評価することができる。

最後に、車両が一定の速度 v でセンサの側方を通過する場合、時間 t における車両の前後位置 $x(t)$ は以下のように表される。

$$r(t) = \sqrt{h^2 + (vt)^2}$$

この関係式により、車両がセンサに接近する際、距離 r は時間とともに減少し、通過後は再び増加することが分かる。また、車両の速度 v が大きくなるほど、距離 r の変化率が大きくなり、磁場の時間変化も急激になる。これは、磁場の時間変化をグラフ化した際に、車両の速度が大きいほど磁束密度のピークが鋭くなることと一致する。

以上の解析より、磁気センサを用いた車両検出において、車両の移動速度が磁束密度の時間変化に直接影響を及ぼすことが確認された。磁気双極子モデルを適用することで、車両の磁場分布の基本的な特徴を理論的に説明できるだけでなく、センサの出力信号の変動を定量的に評価することが可能となる。今後の研究では、より詳細な磁場分布の測定を行い、車両ごとの磁気特性の違いや、実際の運用環境でのノイズの影響を考慮した精度向上の手法について検討を進める必要がある。

6-5-3 磁場の垂直成分および水平成分の差異と車両の磁気履歴の影響

車両が移動する際に発生する磁場の成分には、主に垂直成分 (Vertical) と水平成分 (Horizontal) が存在し、それぞれ異なる要因によって影響を受ける。これらの成分は、車両の構造や内部に含まれる磁性体の分布、および車両の移動履歴による磁気履歴効果 (ヒステリシス効果) によって変化する。本研究では、車両の磁場の垂直成分および水平成分の特性を詳細に解析し、車両ごとの磁気的挙動の違いを考察する。

垂直成分は、主に車両に含まれるエンジンプロック、サスペンション、およびその他の強磁性体部品による影響を受ける。特にエンジン部は、車両の中でも磁性体が高密度に集積されている領域であり、その配置や種類によって、周囲の磁場分布が変化する。例えば、エンジンが車両の前方に搭載されている場合、車両の進行方向に応じて、前方領域での磁場強度が大きく変化することが観測される。さらに、エンジンの材質や構造によっては、その磁気特性が車両ごとに異なり、結果として車両が磁気センサを通過する際の磁束密度の変動パターンにも違いが生じる。

一方で、水平成分は、車両の磁気履歴に大きく影響される。磁性体は、過去に受けた磁場の影響を保持する性質を持ち、この履歴効果 (ヒステリシス効果) により、車両の移動方向や過去の磁化状態に応じて、異なる磁気応答を示す。この影響を検討するために、本研究ではラクティスとパレットという 2 種類の車両について、その磁気履歴の違いを考慮した比較を行った。

ラクティスにおいては、車体全体の磁気履歴が均等に残る傾向がある。これは、車両の構造上、左右のフレームや補強材の磁化特性がほぼ均質であるためと考えられる。その結果、センサが検出する磁束密度の時間変化も左右対称の波形となり、車両がセンサの側方を通過する際の磁気変動が均等に発生する。

一方、パレットでは、左右の車体構造における磁気履歴が非対称に残る傾向が観測された。特に、フレームや補強材に強磁性体が片側に偏って配置されている場合、その部分における磁場の履歴効果が顕著となり、左右の磁気応答に違いが生じる。この影響により、磁場の水平成分において左右非対称な波形が現れることが確認された。すなわち、車両の移動履歴による磁気の影響は、ラクティスでは左右均等に作用するのに対し、パレットでは左右非対称に作用するため、磁場の水平方向の変動パターンにも顕著な違いが生じる。

以上の結果より、車両の磁場の垂直成分は、主にエンジンやサスペンションなどの磁性体の配置や材質に依存する一方で、水平成分は、過去の磁気履歴によって決定されることが明らかとなった。特に、磁気履歴の影響は車両の構造や使用状況によって大きく変化し、その結果として、センサが観測する磁場の時間変化特性にも顕著な違いが生じることが分かった。今後の研究では、車両ごとの磁気履歴の影響

をより詳細に解析し,車両識別や磁場補正アルゴリズムの構築に向けた検討を進める必要がある。

7章 結言

7-1 まとめ

磁気センサを用いた側方からの車両検知方法を提案し,車両検出の原理について言及した。また,使用環境による影響や従来の磁気センサでは車両検出距離に課題があることを示した。そこで,高感度磁気センサを用いることで,車両ごとの波形を特定することを提案した。その際,従来の磁気センサとの性能比較を行い,様々な磁気センサについて検討した。実際に高感度磁気センサを用いて様々な条件下で磁束密度変化を比較し,高感度磁気センサを用いて側方からの車両検知の有用性を示した。そこで,車両ごとに波形に特徴を利用するような車両判別のプログラムの有用性を提案した。

7-2 今後の展望

今後は,提案した車両判別システムのプログラム作成を行う。また,様々な条件で実験を行った後,磁束密度の最大値の平均値を算出し,はずれ値を補正することができるようなプログラムの作成を行う。また,今回測定した車両以外の普通車や大型車など,同車種の年代の新しいものの磁束密度を測定し,その値について検討する。

謝辞

本研究を行うにあたり,丁寧かつ熱心なご指導を頂きました指導教官の岡宏一教授に心から感謝いたします。さらに,西日本高速道路株式会社(NEXCO 西日本),株式会社の筒井啓造氏,東北大学の熊谷靖彦教授に多くの知識やデータの提供をして頂きました。また MI センサを提供していただいた愛知製鋼様、センサ製造に携わったすべての人にここに感謝の意を表します。最後に,学費や生活面,精神面など全面的に支えていただいた両親に感謝致します。

参考文献

- (1) 公益財団法人, 日本交通管理技術教会, 交通管制システムの構成
<https://www.tmt.or.jp/research/index5-02-1.html> 2022/01/24
- (2) 住友電工ソリューション株式会社, ITS インフラ 管制・制御システム
https://www.seiss.co.jp/products/its/traffic_control 2022/01/24
- (3) FUREX 株式会社, 車両検知センサの方式比較
https://www.fu-rex.co.jp/product1/sensor_info.html , 2022/01/24
- (4) NEXCO中日本, 安全性向上3カ年計画の取り組み状況
<http://www.c-nexco.co.jp/corporate/safety/torikumi/torikumi/> , 2022/01/24
- (5) 住友電工ソリューション株式会社, ITSインフラ感知器
<https://www.seiss.co.jp/products/its/> , 2022/01/24
- (6) 毛利佳年雄, 磁気センサ理工学 (増補) - センサの原理から電子コンパスまで-, コロナ社, 2016
- (7) ROHM株式会社, エレクトロ豆知識地磁気センサ
https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/sensors/sensor_what2 , 2022/01/24
- (8) Type DH | 製品情報 | MI センサ - 愛知製鋼
<https://www.aichi-steel.co.jp/smart/mi/products/type-dj.html> , 2024/01/25
- (9) 機用・仕様 | AIO-160802 -USB | アナログ入出力
<https://www.contec.com/jp/products-services/daq-control/pc-helper/usb-module/aio-160802gy-usb/specification/#section> .2024/12/5
- (10) パレット SW (SUZUKI) XS (2012年2月)
https://www.goo-net.com/catalog/SUZUKI/PALETTE_SW/10074702/
トヨタ ラクティス 主要諸元表
https://toyota.jp/pages/contents/ractis/002_p_007/pdf/spec/ractis_spec_201506.pdf , 2024/01/25