

2020（令和2）年度 修士学位論文

地磁気センサを用いた車両速度検出システムの開発

Detection system of vehicle speed using magnetic sensor

2021年3月11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

1235082 清藤 沙矢佳

指導教員 岡 宏一 教授 原田 明德 准教授

目次

1 章 緒言	1
1-1 研究背景	1
1-2 研究概要	5
2 章 しきい値を用いた車両検出方法.....	6
3 章 実験車両を用いた基礎実験.....	7
3-1 実験車両	7
3-2 実験方法	8
3-3 実験結果	9
3-4 考察	13
4 章 磁束密度の波形を用いた車両検出方法.....	14
5 章 実際の道路での走行実験.....	15
5-1 実験方法	15
5-2 実験結果	15
5-3 考察	17
6 章 指数関数近似を用いた車両検出方法.....	19
6-1 検出精度向上	19
6-2 検出方法	20
7 章 指数関数近似を用いた車両検出実験.....	23
7-1 実験概要	23
7-2 実験結果	23
7-3 考察	25
8 章 車両速度検出方法.....	27
8-1 シミュレーションを用いた検討	27
8-2 解析結果	27
8-3 考察	31
9 章 実験車両を用いた速度検出実験.....	32
9-1 実験車両	32
9-2 実験方法	33
9-3 実験結果	34
9-4 考察	41
10 章 速度検出の精度向上.....	42
10-1 走行実験	43
10-2 実験結果	44
10-3 考察	47

11 章 結言.....	49
11-1 まとめ.....	49
11-2 今後の課題.....	49
謝辞.....	49
参考文献.....	50

1 章 緒言

1-1 研究背景

1-1-1 交通管制システム

交通管制システムとは、道路交通の安全と円滑を基本とし、交通管理を一元的に行うため、警察が設置し運用するものである。交通管制システムでは、交通量を計測する車両検知器などにより交通情報を収集し、収集した交通情報に基づき交通信号機を制御する。また、フリーパターン式交通情報板や路側通信、ラジオ放送などを通じてドライバーへ交通情報を提供する。交通管制センターから現場の警察官へ指示を行い、また、収集した情報を分析し、将来の交通管理に役立てる⁽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)(図 1-1(a))、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)(図 1-1(b))、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)(図 1-1(c))、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)(図 1-1(d))などに用いられている⁽²⁾。

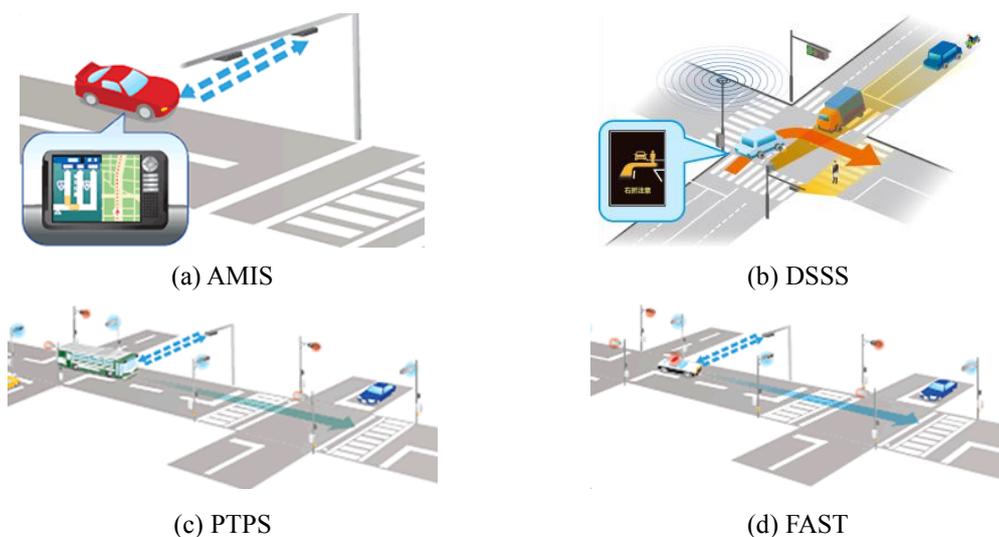


Fig. 1-1 Traffic control system

現在、使用されている車両検知器には、主にループコイル式、超音波式、画像式などがある。これらの特徴を以下に示す。

ループコイル式車両検知器

地中に電線をコイル状に埋設した状態で電流を流すと磁界が発生し、その上を車両が通過すると、ループコイルのインダクタンスが変化し、その変化を捉え車両の有無を検知する。車両（金属物）のみに反応し、人やその他非金属には反応せず、コイル幅を調節することで幅広い場所での検知が可能である。しかし、コイルの埋設工事が必要であり道路工事が頻繁に行われる場合はループコイルの切断が生じやすい⁽³⁾。



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

超音波式車両検知器

超音波を発信してから反射されてくる超音波を受信することにより物体を検知する。埋設工事が必要ないため、比較的工事が簡単で取り付けしやすい。しかし、人や動物など車両以外のものに反応する場合があります、ごみや雨などに反応し誤動作することがある⁽³⁾。



Fig. 1-3 Supersonic wave type vehicle detector⁽⁴⁾

画像式車両検知器

道路の上に設置したカメラからの映像を画像処理することで、交通量や速度を計測したり、渋滞や事故等の異常事象を検出することができる。交通管理センターでは、これらの情報を利用して最適な信号制御を行う⁽⁵⁾。



Fig. 1-4 Image type vehicle detector⁽⁵⁾

1-1-3 研究で使用する機器

本研究で使用する地磁気センサの説明を行う。地磁気センサとは、地球の磁気を検出するセンサであり、被検出量を磁界を介して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、種々のトランポンダ（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知する⁽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、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⁷⁾。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 の地磁気センサを用いる。

Table 1-1 Type and characteristic of the magnetic sensor

検出方法	ホール	MR	MI
構成	<p>磁界の変化によりホール効果で電圧が変化</p>	<p>磁界の変化によりMR素子の抵抗値が変化</p>	<p>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	×	△	◎

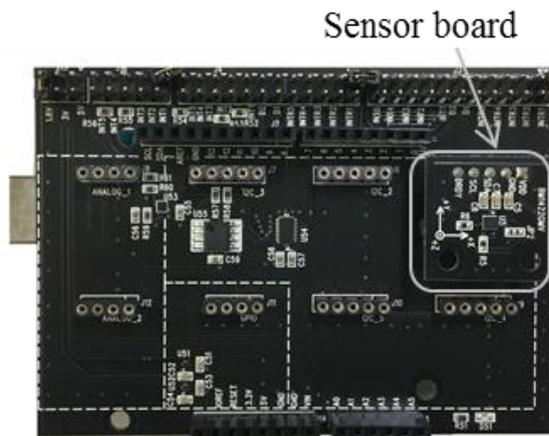


Fig. 1-5 Board of the magnetic sensor

1-1-4 研究目的

現在使用されている車両検知器と比較して、地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地磁気センサを用いた車両検知器を提案する。

1-2 研究概要

地磁気センサを用いた車両検出方法と速度検出方法を提案する。はじめに、しきい値を用いた車両検出方法を提案し、しきい値を用いた車両検出が有効かを確認するため実験車両を用いた基礎実験を行う。また、車両検出精度を向上させるためしきい値を用いるだけでなく、検出される磁束密度の波形を用いた検出方法と磁束密度の値を指数関数近似した検出方法を提案する。実際の道路での走行実験を行い、この検出方法の有用性を確認する。また、地磁気センサを二台使用した車両速度の検出方法を提案する。この検出方法の有用性を確認するため、電磁解析ソフト JMAG を用いてシミュレーションを行う。その後実際に車両を走行させて実験を行い、検出方法について検討する。

2章 しきい値を用いた車両検出方法

地磁気センサとは、地球の磁気を検出するセンサであり、磁束密度を数値として検出することができる。自動車の車体は、鉄板できている。また、自動車部品であるモータなどは磁石の要素できている。これらの部品により自動車全体が磁気を帯びていると考えられる。これにより、センサで自動車通過したときの磁束密度を検出する。具体的な検出方法を以下に示す。図 2-1 に示すように、道路上に地磁気センサを埋設し、その上を一定の速度で自動車通過すると図 2-2 に示すような磁束密度の波形が検出できる。しきい値を点線で示し、しきい値以上の値になったところを丸で示した。磁束密度の値がしきい値より大きい場合、センサ上を通過したと判断できる。この磁束密度の波形は自動車ごとに異なるので一台ずつ自動車を判断することができる。



Geomagnetic sensor

Fig. 2-1 Vehicle runs over a sensor

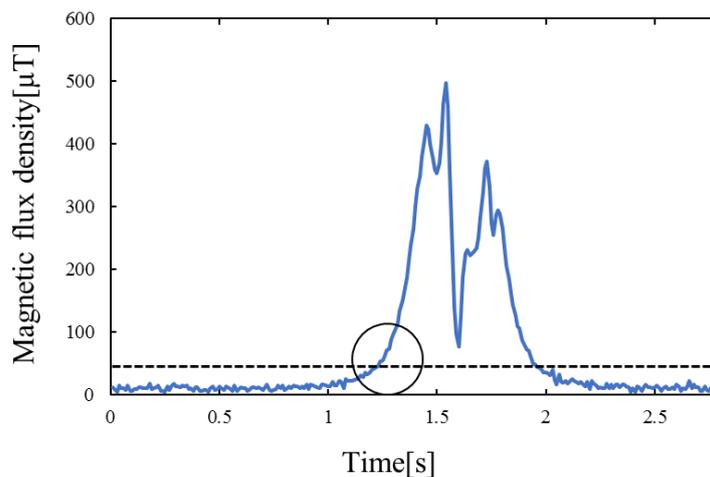


Fig. 2-2 Detection of wave pattern

3 章 実験車両を用いた基礎実験

2章で示したしきい値を用いた車両の検出方法の有用性を確認するため、実験車両を用いた基礎実験を行った。実験場所は、図 3-1 に示すように高知工科大学グラウンド東側の通路で行った。地磁気センサを道路に約 5cm の深さに埋設し、図の矢印の向きに車両を走行し実験を行った。地磁気センサと PC を USB ケーブルで接続し、一回の条件ごとにログを取得した。



Fig. 3-1 Experiment place

3-1 実験車両

本研究で使用した実験車両の概略を以下に示す。



Fig. 3-2 Experimental vehicle

Table 3-1 The details of the experiment vehicle

車種	TOYOTA COROLLA
型式	TA-ZZE122
全長×全幅×全高[mm]	4356×1695×1470
エンジン型式	IZZ-FE
総排気量[cc]	1796
車両重量[kg]	1080
駆動方式	FF

3-2 実験方法

はじめに、ワイパーやパワーウィンドウなど自動車部品での磁束変化を確認するため、それぞれの部品をセンサの真下にくるように停車し、自動車のエンジンをかけた状態で各部品を約 10 秒間稼働した。例として、ワイパーの場合を図 3-3 に示す。次に速度の変化による磁束変化を確認するため、一定の速度(20km/h)で車両を走行させた。図 3-4 に示すように、道路の真ん中、道路の左側、右側にずれたときの 3 つの条件でそれぞれ 2 回ずつ計測を行った。最後に 10km/h, 20km/h, 30km/h と速度を変化させ、同様に図 3-4 の 3 つの条件でそれぞれ 2 回ずつ計測を行った。

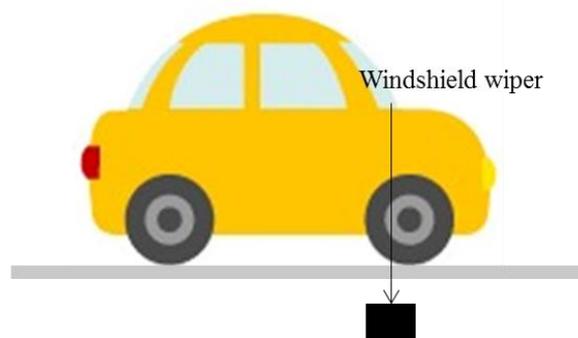


Fig. 3-3 Measurement procedure of the magnetic flux of each part (Windshield wiper)

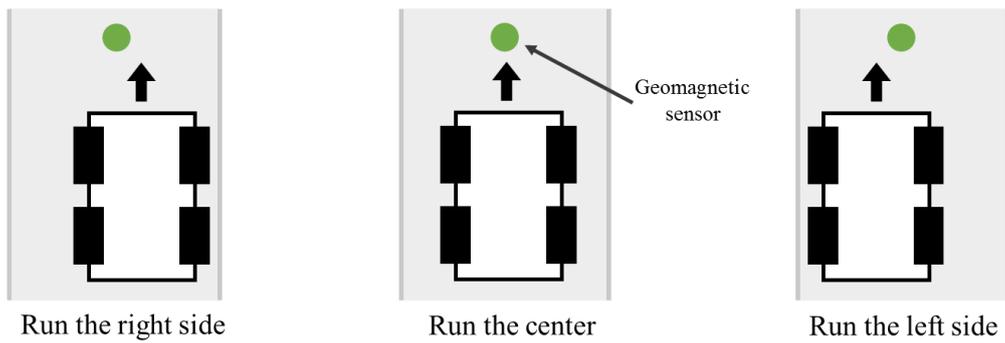


Fig. 3-4 The place that runs of the vehicle

3-3 実験結果

自動車の各部品を 10 秒間稼働させた結果を図 3-5 に示す。10 秒間計測した磁束密度の値を平均した値を示している。自動車がないときと比較すると、計測した全ての部品で磁束密度の値が大きくなっていることがわかる。また、図 3-6 に各部品の時間変化を示す。(a)にワイパー、(b)にパワーウィンドウ、(c)に冷却ファン、(d)にアクセルを稼働させたときの結果を示す。センサで計測を開始してから 10 秒間で何度か部品の稼働と停止を繰り返したが、時間による大きな磁束変化は見られなかった。

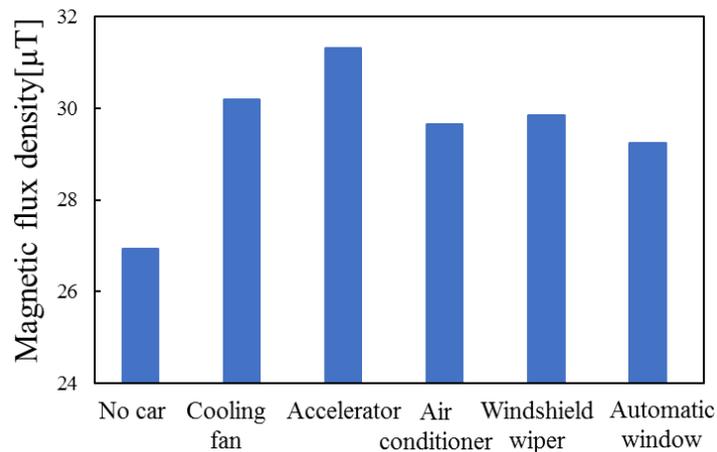


Fig. 3-5 Magnetic flux density of the vehicle parts

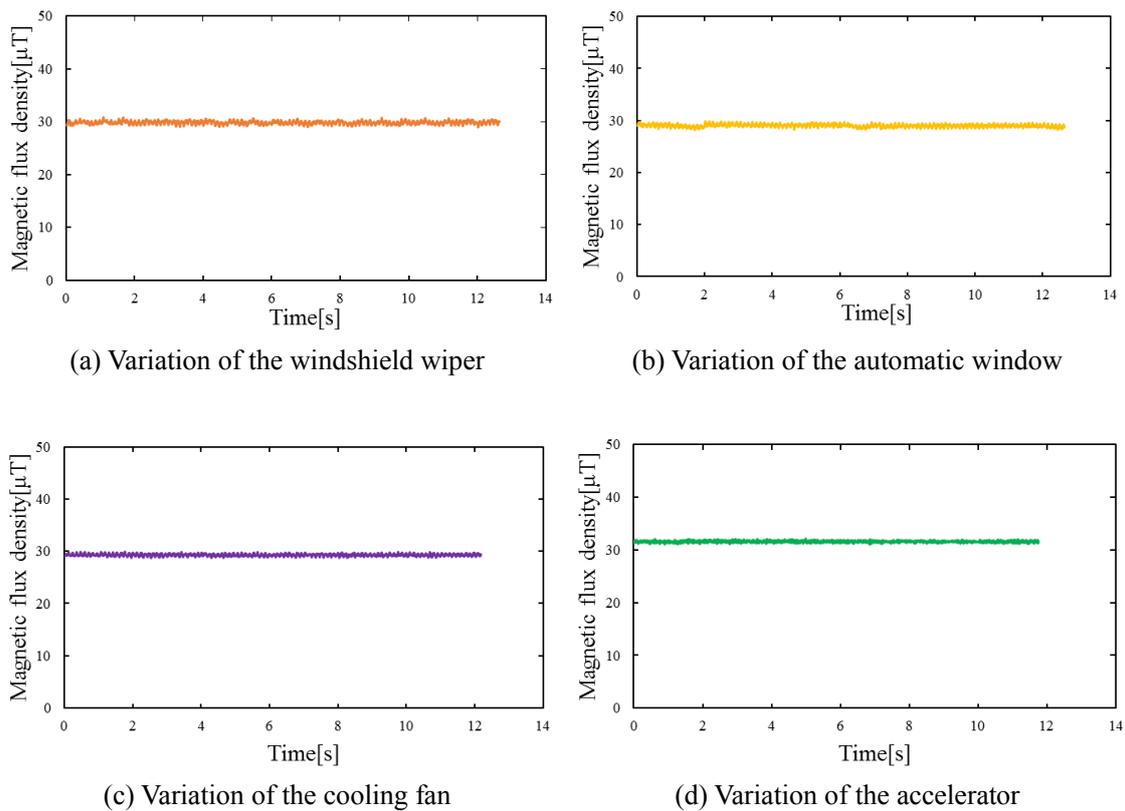


Fig. 3-6 Result in the vehicle parts

次に、速度が一定(20km/h)でセンサを通過させる位置を変化させて計測し、1回目と2回目の結果を重ね合わせたグラフを図3-7~3-9に示す。図3-7は道路の右側、図3-8は道路の真ん中、図3-9は道路の左側を走行した結果を示している。車両が同じ位置を通過した場合、時間に対する磁束密度の波形は2回ともほぼ同じであった。通過させる位置は同じで、速度を変化させた結果を図3-10~3-12に示す。道路の真ん中を走行し、センサを通過する速度が10km/hの結果を図3-10、20km/hの結果を図3-11、30km/hの結果を図3-12に示す。速度を変化させても、車両は同じ位置を通過した場合、磁束密度の波形はほぼ同じであった。

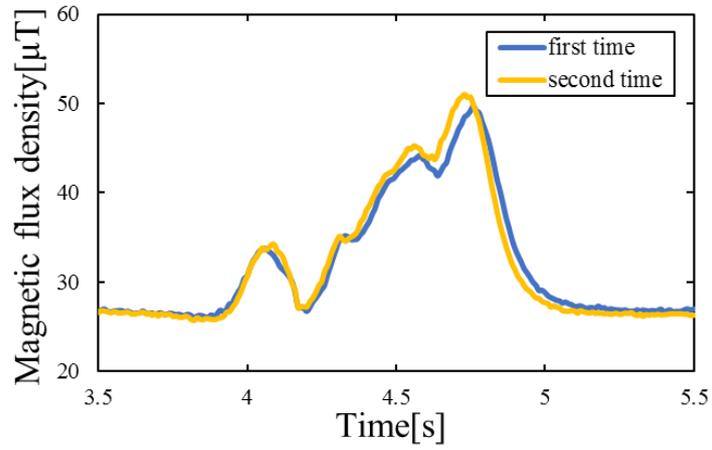


Fig. 3-7 Run the right side at 20km/h

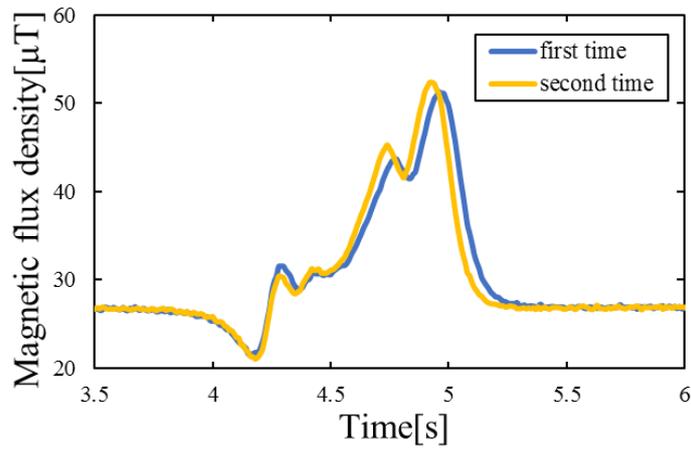


Fig. 3-8 Run the center at 20km/h

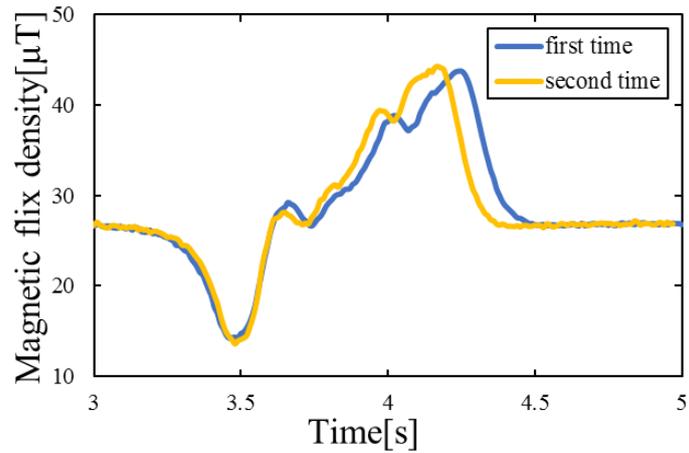


Fig. 3-9 Run the left side at 20km/h

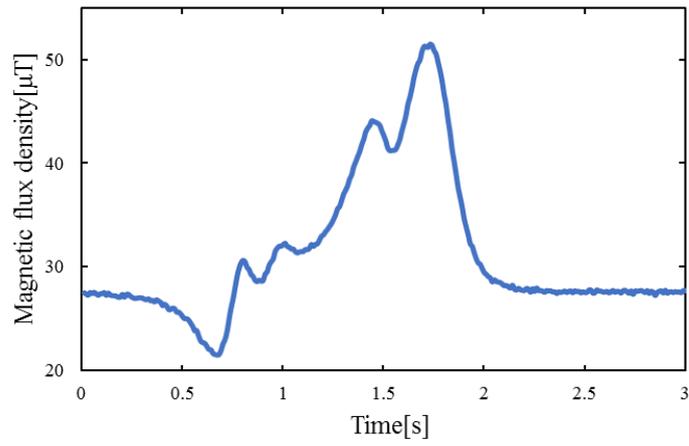


Fig. 3-10 Run the center at 10km/h

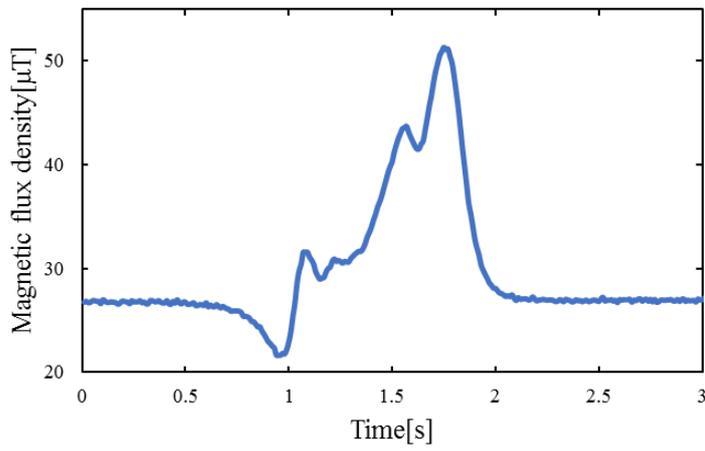


Fig. 3-11 Run the center at 20km/h

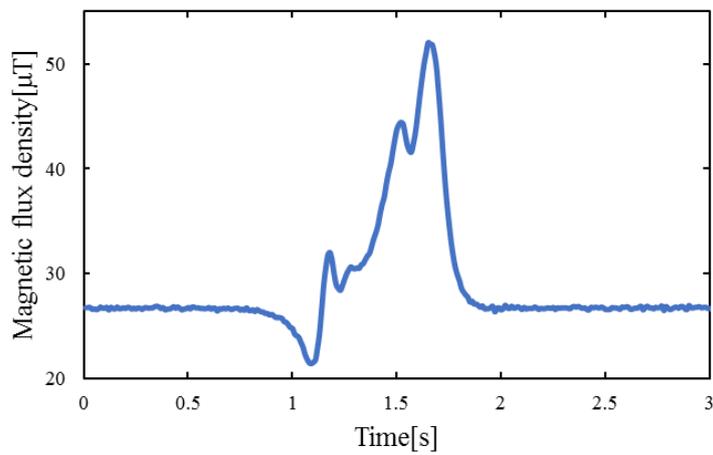


Fig. 3-12 Run the center at 30km/h

3-4 考察

センサの真上に各部品を配置して稼働させた結果、自動車がないときと比較すると磁束密度の値は大きくなったが、自動車部品を稼働させたことによる時間による磁束密度の変化は見られなかった。この結果から、自動車が局所的に磁気を帯びていると考えられる。速度を変化させた結果や、車両がセンサの真上ではなく横にずれる位置で走行させた結果から、同じ位置を通過すると磁束密度の波形は同じ形で検出させることがわかった。このことから車両が走行する位置に関わらず車両が走行するときの磁束変化のみをセンサで検出していることがわかった。

基礎実験の結果から、車両を検出するときに磁束密度の波形を用いることは有効であると考えられる。

4 章 磁束密度の波形を用いた車両検出方法

3 章の基礎実験の結果から，磁束密度の波形を用いた検出方法は有効であるとわかった．以下に磁束密度の波形から一台の車両の検出方法を示す⁽⁸⁾．車両が一台，センサ上を通過するときの波形を図 4-1 に示す．一定の速度でセンサ上を通過すると，検出される磁束密度の波形はセンサに近づいてくる波形と遠ざかっていく波形は対称になると考える．車両の始まりである立ち上がりの波形を反転させた波形が車両の終わりである立ち下がりの波形が一致すると，二つの波形が対称であるとわかるので，立ち上がりの波形と立ち下がりの波形が一致しないところは，車両の途中であると判断する．図 4-1 を拡大したグラフを図 4-2 に示す．立ち上がりの波形を反転させたグラフをしきい値を下回るところに重ね合わせた．図の A の部分は立ち上がりの波形を反転させたグラフと一致していないので車両の途中であると考えられる．B の部分では立ち上がりの波形を反転させたグラフと一致しているのでここが車両の終わりであると判断する．

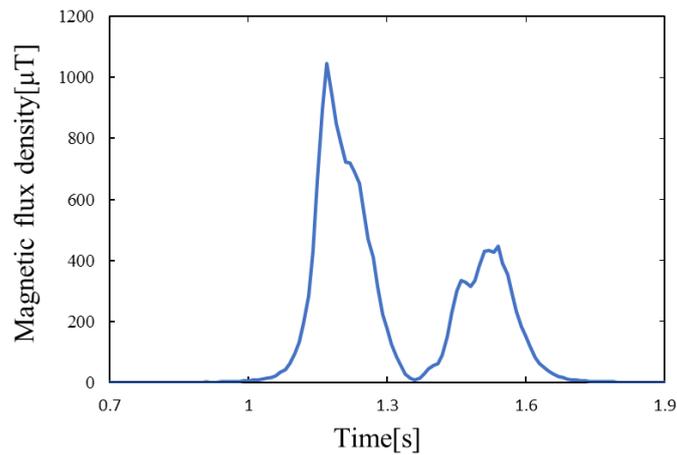


Fig. 4-1 Detection wave pattern

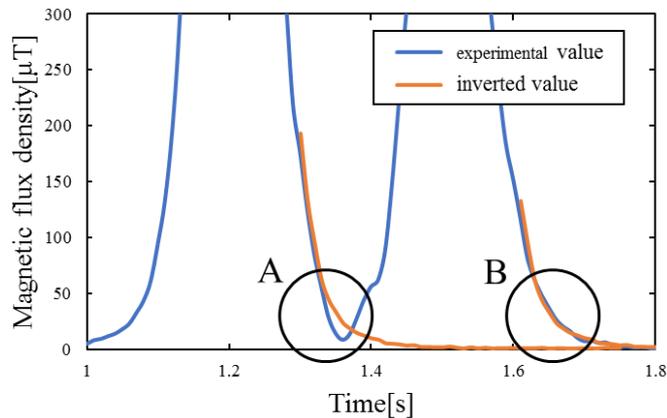


Fig. 4-2 The detection method using the wave pattern

5 章 実際の道路での走行実験

5-1 実験方法

4章で示した磁束密度の波形を用いた車両の検出方法の有用性を確認するため、実際の道路に地磁気センサを埋設して走行実験を行った。実験場所は図 5-1 に示すように、高知工科大学地域連携棟前の道路で行った。地磁気センサを道路に約 15cm の深さに埋設し、センサ上を通過した車両のデータを取得した。



Fig. 5-1 Experiment place

5-2 実験結果

今回の実験で 90 台の車両のデータを取得した。車両の内訳は軽自動車が 57 台、普通車が 19 台、トラックなどの大型車が 14 台であった。このうち、磁束密度の立ち上がりとしち下がり波形が対称となったものは軽自動車で 55 台、普通車で 17 台、大型車で 9 台であった。よってこの検出方法ではセンサ上を通過した車両は 81 台であると検出した。検出率を表 5-1 に示す。立ち上がりとしち下がり波形が対称とならず検出できなかった車両は 9 台であり、大型車が最も多かった。一台の車両と検出できた結果の一例を以下に示す。図 5-2 は軽自動車、図 5-3 は普通車、図 5-4 は大型車を示しており、立ち上がりの波形を反転させたグラフを立ち下がり波形のグラフに重ね合わせた。

Table 5-1 Details of the experiment vehicle

	Experiment cars	Correct number	Percentage
Mini car	57	55	96%
Passenger car	19	17	89%
Large vehicle	14	9	64%

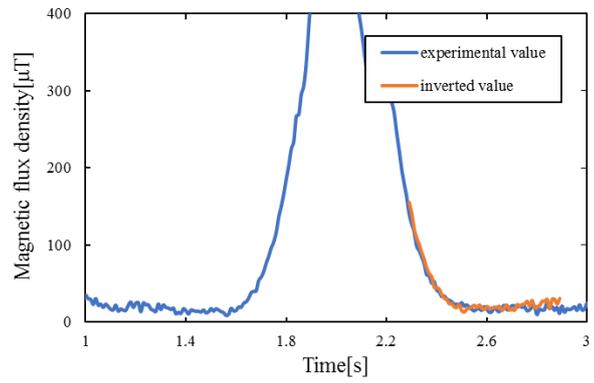


Fig. 5-2 Experimental result of Mini car

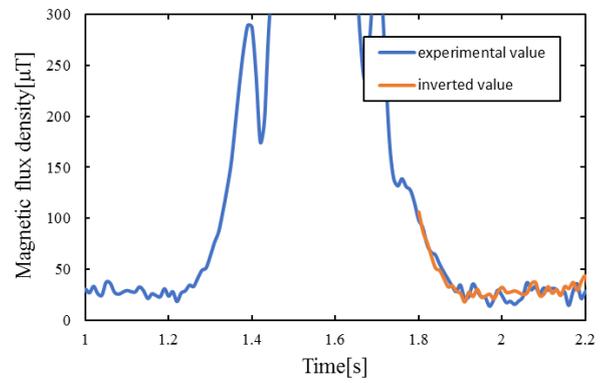


Fig. 5-3 Experimental result of Passenger car

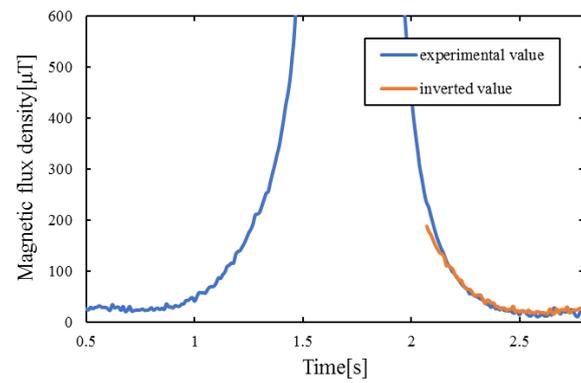


Fig. 5-4 Experimental result of Large vehicle

5-3 考察

センサで検出された磁束密度の値の立ち上がり立ち下りの波形を重ね合わせた結果二つのグラフは対称であることがわかった。軽自動車、普通車、大型車など様々な車種で同様の結果を得られたため、磁束密度の立ち上がり立ち下りの波形を用いて一台の車両を検出することは可能であると考え。しかし、90台中9台の車両が立ち上がり立ち下りの波形が対称とならず、車両を検出することができなかった。以下にその例を示す。図5-5に軽自動車、図5-6に普通車、図5-7に大型車を示す。立ち上りの波形を立ち下りの波形に重ね合わせた二つのグラフは対称となっていないことがわかる。立ち上りのグラフと立ち下りのグラフが対称とならないとき、走行している車両の写真から、地磁気センサが埋設されている場所の真上ではなく、横にずれた場所を走行していることがわかる。車両がセンサの真上を走行しなかったことが、立ち上がり立ち下りの波形が対称とならなかった原因であると考え。また、トラックなどの大型車では他の車種と比較して検出率が最も低かった。これは、大型車はエンジンやワイパーなどの自動車部品と埋設されている地磁気センサの距離が大きいことが原因であると考え。

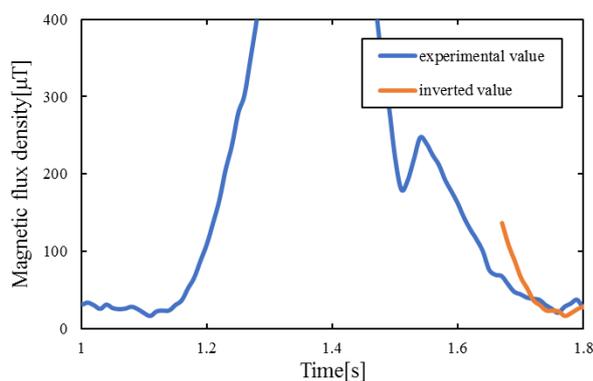


Fig. 5-5 Experimental result of Mini car (undetectable case)

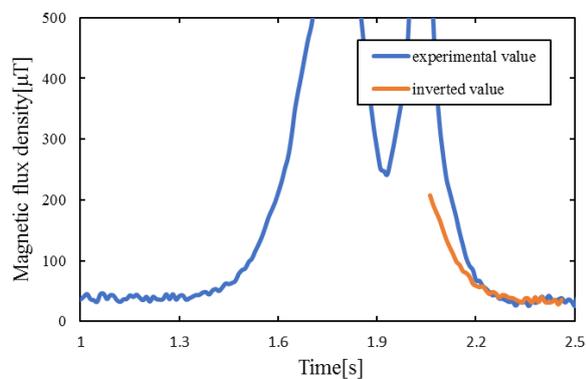


Fig. 5-6 Experimental result of Passenger car (undetectable case)

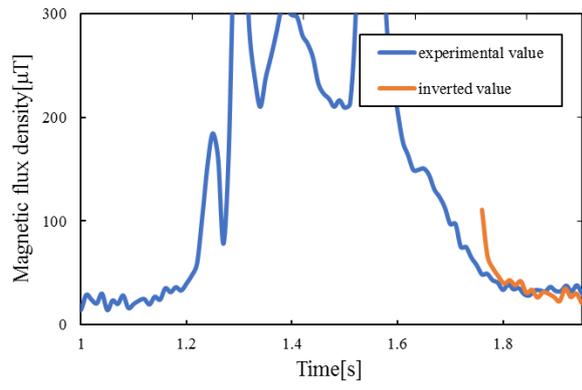


Fig. 5-7 Experimental result of Large vehicle (undetectable case)

6 章 指数関数近似を用いた車両検出方法

6-1 検出精度向上

4 章で磁束密度の波形を用いた検出方法を提案し、5 章の結果から波形の立ち上がりとしち下がりを用いた車両検出は可能であるとわかった。しかし、車両がセンサの真上を走行しない場合は車両を検出することができなかった。今回は検出精度を向上させるため、指数関数近似を用いた車両検出方法を提案する。

3 章の基礎実験の結果から、しきい値を用いて車両を判断することができるとわかった。しかし、図 6-1 に示すように車両の途中でしきい値を下回り、波形が複数に分かれることがある。この場合、図の丸で示した部分でしきい値を下回っているため、一台の車両を二台と検出する可能性がある。この対策として、車両がセンサに近づき、遠ざかっていく波形を指数関数で近似することにより、しきい値だけの検出方法よりも検出精度を向上させることを提案する。ひとつの例として、図 6-1 の丸で囲んだ部分を指数関数で近似したものを図 6-2、車両が終わる部分を指数関数で近似したものを図 6-3 に示す。実際にセンサで計測した値を青色の点、その値を指数関数で近似したものを赤色の線で示す。図 6-2 では、実際に計測した値と指数関数近似した曲線の誤差は大きいですが、図 6-3 のほうでは誤差が小さくなっていることが分かる。これらの結果より、指数関数近似を用いた検出方法を提案する。

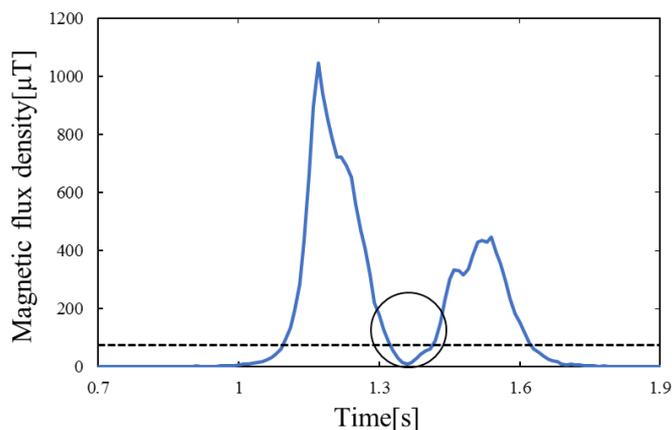


Fig. 6-1 Example of the detection

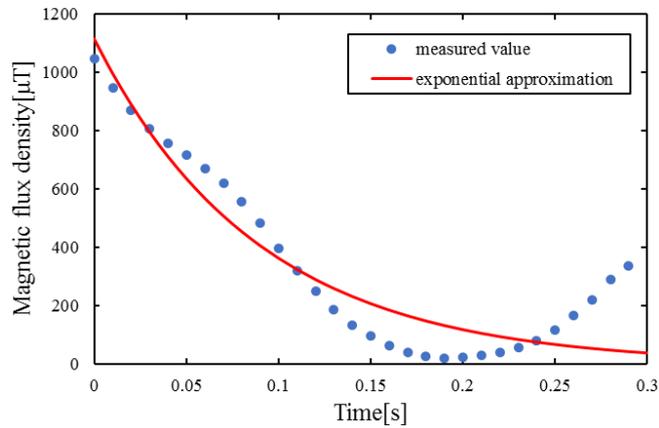


Fig. 6-2 In the case of no similar

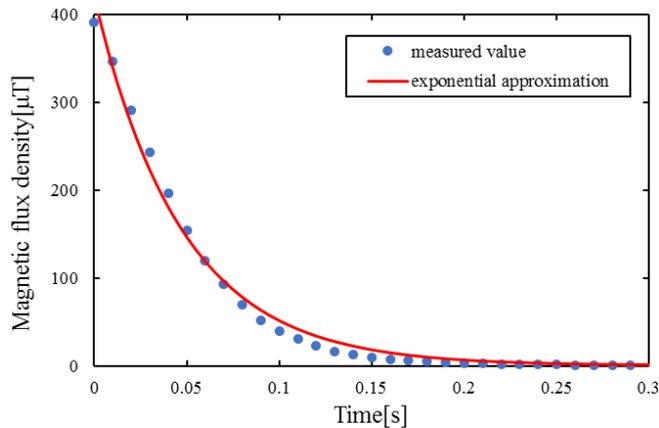


Fig. 6-3 In the case of similar

6-2 検出方法

今回提案する一台の車両検出の方法として、車両の始まりの検出にはしきい値を用いて、車両がセンサ上を通過したと判断し、一台の車両の終わりを判断することに指数関数近似を用いる。以下で図を用いて説明する。

図 6-4 にセンサで検出した一台の車両の磁束密度の波形を示す。初めに、図 6-4 の A に示すように、しきい値以上の値を検出したときに車両の始まりと判断する。次に車両の終わりを判断する。B に示すように、しきい値以上の値を検出してからの値を 0.3 秒ずつに区切り、その値を指数関数 $y = a \cdot e^{bx}$ で近似する。近似した結果を図 6-5 に示す。近似した指数関数の係数 a 、 b 、指数関数で近似した値と実際に検出された値との誤差を示している。係数 a が $a > 0$ かつ、係数 b が $b < 0$ かつ、誤差が小さくなったところで車両が終わると判断する。図 6-5 の C に示すように、 $a > 0$ かつ $b < 0$ の条件は満たしているが、誤差が大きいため車両の

途中であると考え、Dに示すように、 $a > 0$ かつ $b < 0$ の条件を満たし、また、指数関数で近似した値とセンサで検出した値との誤差が小さくなっているため、この部分で車両が通過したと考える。これをまとめたものを図6-6に示す。しきい値以上の値を検出してから0.1秒の間隔で時間を進めていき、条件を満たしたところで一台の車両が通過したと判断する。

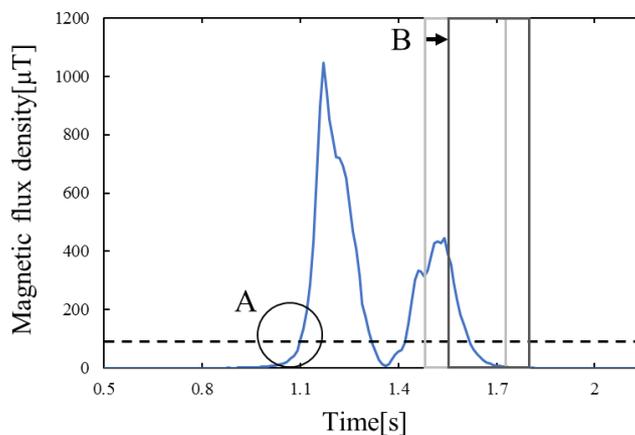


Fig. 6-4 Explanation of vehicle passage

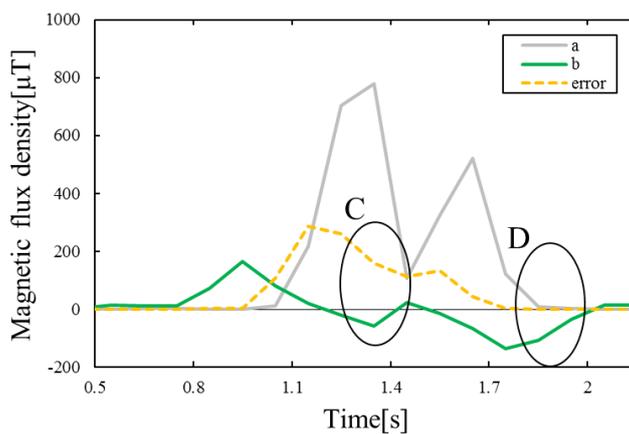


Fig. 6-5 Result of the having been similar

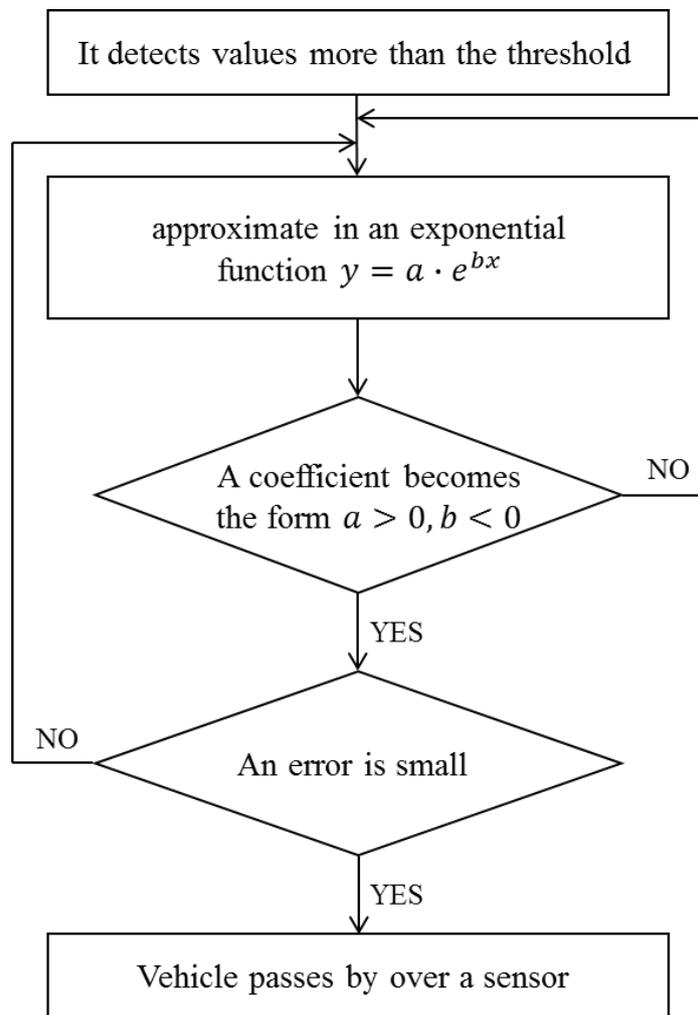


Fig. 6-6 Condition of the detection

7 章 指数関数近似を用いた車両検出実験

7-1 実験概要

6 章で示した指数関数近似を用いた検出方法の有用性を確認するため、走行実験を行った。車両検出に用いるデータは 5 章で行った走行実験と同じものである。同じデータを用いて検出精度の比較を行う。

7-2 実験結果

表 7-1 に検出率を示す。5 章で示したデータと同様に 90 台の車両データを取得し、その内訳は軽自動車 57 台、普通車 19 台、大型車 14 台である。このうち、軽自動車と普通車は一台の車両の終わりで検出の条件を満たしており、軽自動車と普通車の台数を合わせて 76 台は全て検出することができた。大型車 1 台が、車両の途中で検出の条件を満たし、1 台を 2 台と検出したため、実際にセンサ上を通過した車両は 90 台であったが、この検出方法では 91 台と検出した。以下に車両の終わりで検出の条件を満たし、正常に検出できた例を示す。図 7-1 に軽自動車、図 7-2 に普通車、図 7-3 に大型車を示す。センサで検出された値を指数関数で近似したときの係数 a 、 b 、指数関数で近似した値と実際に検出された値との誤差を示す。検出条件を満たす部分を図中に丸で示す。また、図 7-4 に 6 台の車両を正常に検出できた結果を、図 7-5 には 1 台分の車両を 2 台と判断し、通過した車両は 6 台であるが 7 台通過したと検出した結果を示す。正常に検出できたところを黒丸で示し、車両の途中で条件を満たし、正常に検出できなかったところを赤丸で示す。

Table 7-1 Details of the experiment vehicle

	Experiment cars	Correct number	Percentage
Mini car	57	57	100%
Passenger car	19	19	100%
Large vehicle	14	13	93%

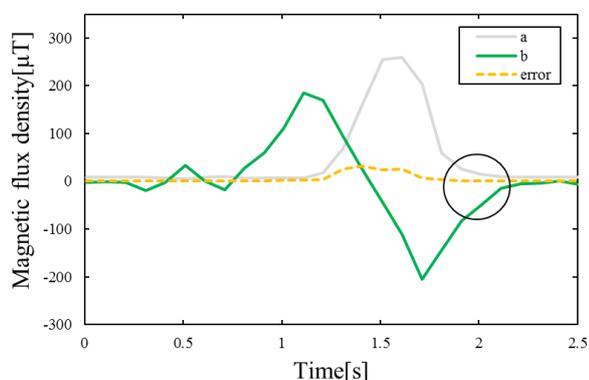


Fig. 7-1 Experimental result of Mini car

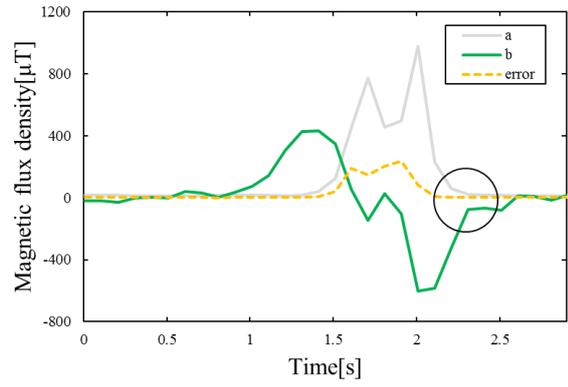


Fig. 7-2 Experimental result of Passenger car

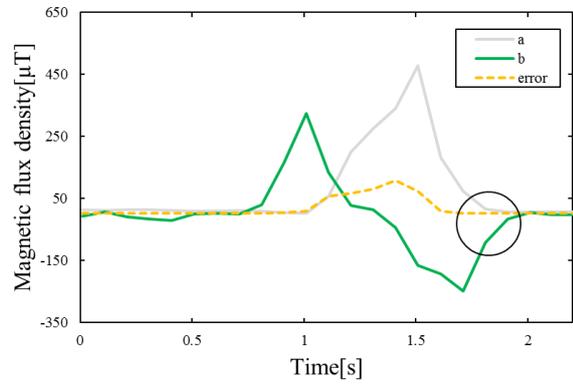


Fig. 7-3 Experimental result of Large vehicle

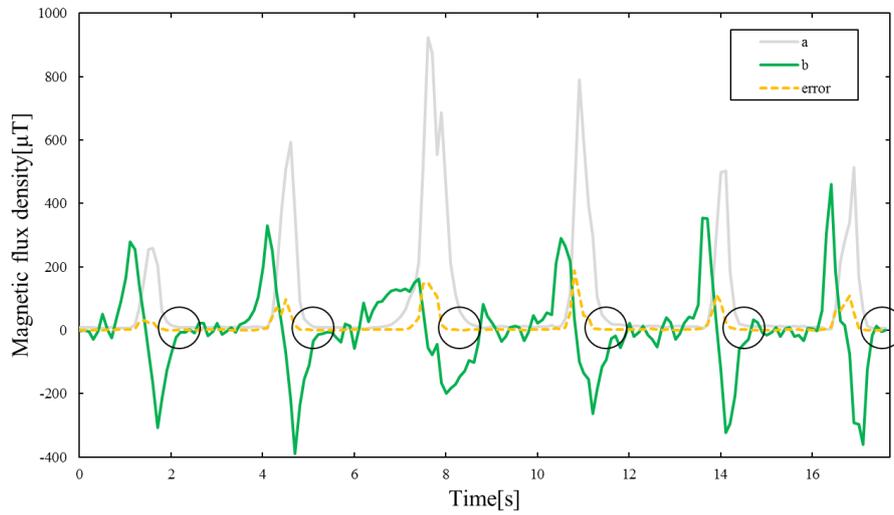


Fig. 7-4 The vehicle of six runs consecutively

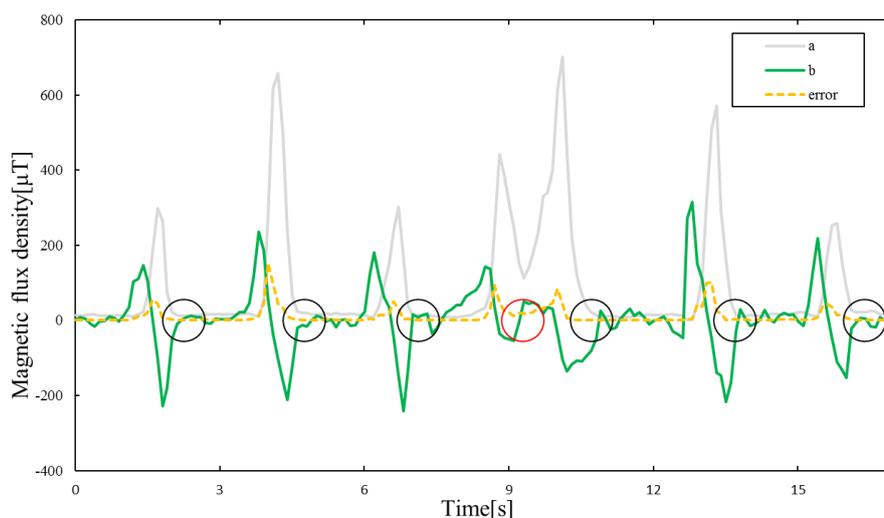
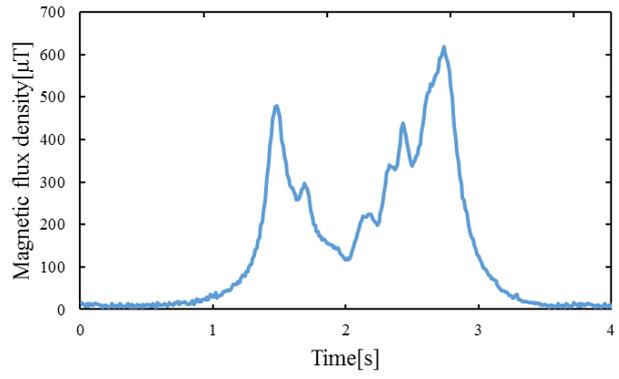


Fig. 7-5 The vehicle of six runs consecutively (undetectable case)

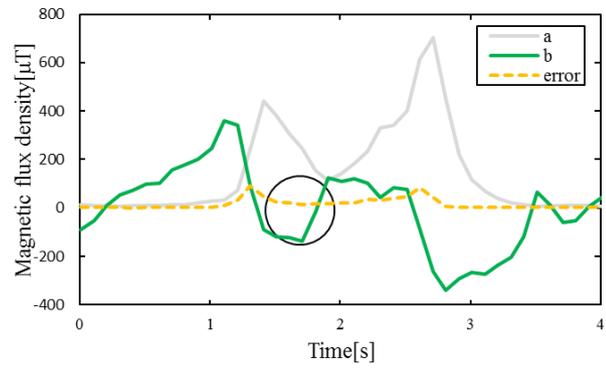
7-3 考察

センサ上を通過した車両 90 台のうち、89 台が車両の終わりで検出の条件を満たした。車両の始まりをしきい値で、車両の終わりを指数関数で近似しその誤差により車両を検出することで、立ち上がりと立ち下がりの波形が対称となっていない場合でも車両を検出することができたと考える。また、センサに近づき、遠ざかっていく波形を指数関数で近似しているため、車両がセンサの真上を通過しない場合でも車両を検出することができたと考える。この検出方法は、5 章で示した波形の対称性による車両検出方法より、車両とセンサの位置による影響が少なく、検出率を向上することができた。また、6 台の車両が連続で通過したとき、車両の終わりで条件を満たす部分が 6 つあるので連続して車両を検出することができたとわかる。このシステムによりセンサ上を通過する車両の磁束密度を検出し、指数関数近似を行うことで、自動で車両検出を行うことができると考える。

次に、大型車について 1 台を 2 台となり正常に検出できなかった結果について考察する。図 7-6(a)に正常に検出できなかった大型車の磁束密度の波形を示し、(b)にこの波形を指数関数で近似したときの係数 a 、 b 、指数関数で近似した値と実際に検出された値との誤差を示す。車両の途中で条件を満たした部分を丸で示した。車体が磁化される方向により、波形が複数に分かれる場合があるが、大型車は車体が長く車両の途中で曲線的に磁束密度の値が小さくなってしまふ部分があるため、指数関数で近似したときに誤差が小さくなる。センサで検出された値と近似曲線の誤差が小さくなり、通過途中で通過の条件を満たすため、1 台を 2 台と検出したと考える。しかし、図 7-6(a)からわかるように、車両の途中で条件を満たした部分において、センサで検出された磁束密度の値はしきい値よりも大きいため、車両通過の条件にしきい値を加えることで検出精度を向上することができると考える。



(a) Vehicle runs over a sensor



(b) Experimental result

Fig. 7-6 Experimental result of Large vehicle (undetectable case)

8 章 車両速度検出方法

一台の地磁気センサを用いて、車両台数の検出方法について述べてきたが、この章ではセンサを二台使用した車両速度の検出システムについて提案する。初めにシミュレーションにより、センサ二台を用いた速度検出の有用性を確認し、実際に車両を走行させて実験を行った。

8-1 シミュレーションを用いた検討

車両の磁束の向きは様々な方向を向いていることを考慮し、車体がモータなどの自動車部品により磁化されていると仮定し、車体に永久磁石を用いた磁束密度の変化について解析を行った。解析は電磁解析ソフト JMAG を使い、磁石の向きや使用する磁石を変更し、シミュレーションを行った。車体は普通車の1/10の大きさと仮定し、全長0.47m、全幅0.17m、全高0.15mである。車体に使用した磁石は、NMF-6CとNMF-12Gである。また、センサ間も1/10として0.3mで解析した。概略を図8-1に示す。X軸方向がN極の場合を(a)、Z軸方向がN極の場合を(b)に示す。シミュレーションは、時速20km/h、30km/hで行った。20km/hのときは0.01秒で56mmずつ移動させ、30km/hのときは0.01秒で83mmずつ移動させた。

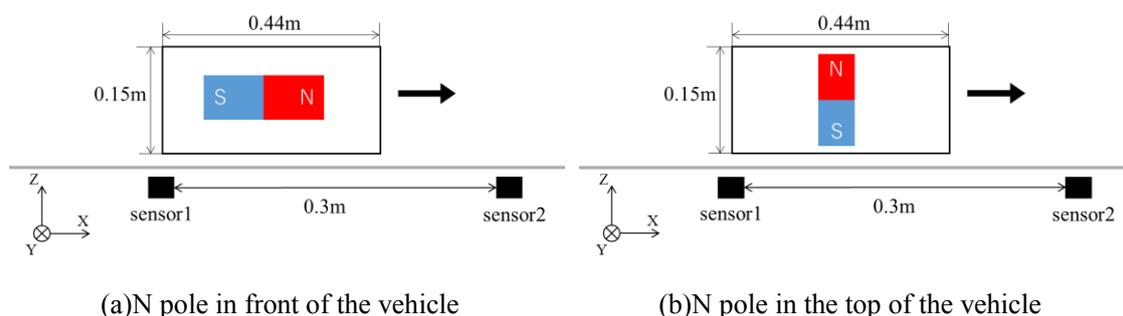


Fig. 8-1 Direction of the magnet

8-2 解析結果

図8-2は、図8-1(a)の条件で時速20km/h、車体の磁石がNMF-6Cのときの結果である。センサ1で車両の始まりを検出してからセンサ2で車両の始まりを検出するまでの時間は0.06秒で、センサ間が30cmであるので、時速18km/hと求められる。速度、条件は同じで車体の磁石がNMF-12Gのとき、センサ1で車両の始まりを検出してからセンサ2で車両の始まりを検出するまでの時間が0.06秒であったので、同様に時速18km/hと求められる。結果を図8-3に示す。図8-1(b)の条件で時速20km/h、車体の磁石がNMF-6Cのときの結果を図8-4に、速度、条件が同じで車体の磁石がNMF-12Gのときの結果を図8-5に示す。どちらの車体の磁石もセンサ間でかかる時間が0.06秒であり、速度は18km/hとなった。

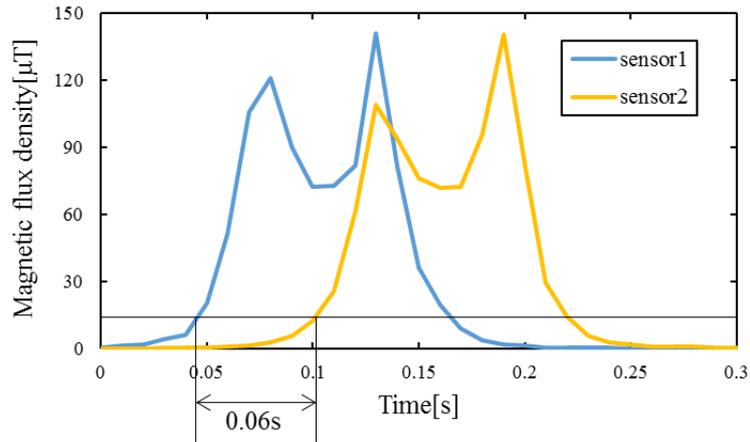


Fig. 8-2 In the case of N pole in front of the vehicle made from NMF-6C (20km/h)

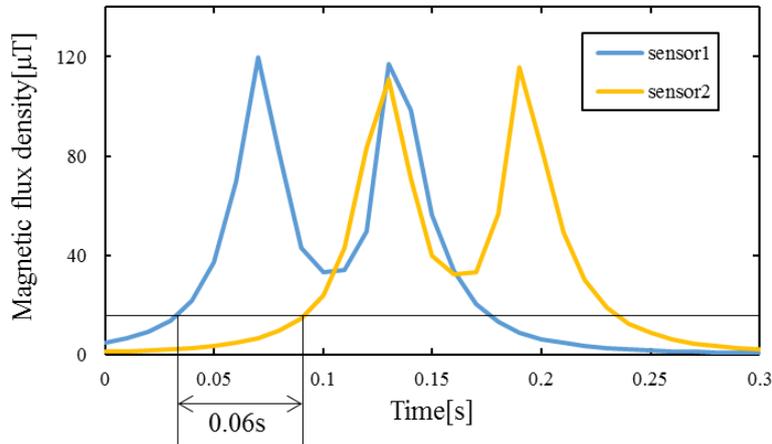


Fig. 8-3 In the case of N pole in front of the vehicle made from NMF-12G (20km/h)

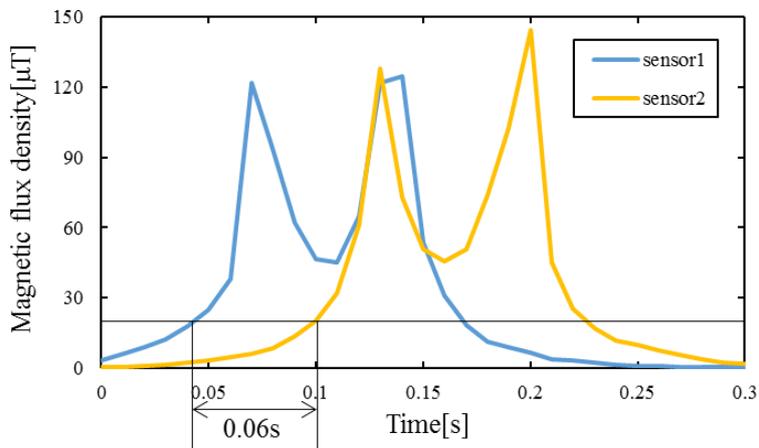


Fig. 8-4 In the case of N pole in the top of the vehicle made from NMF-6C (20km/h)

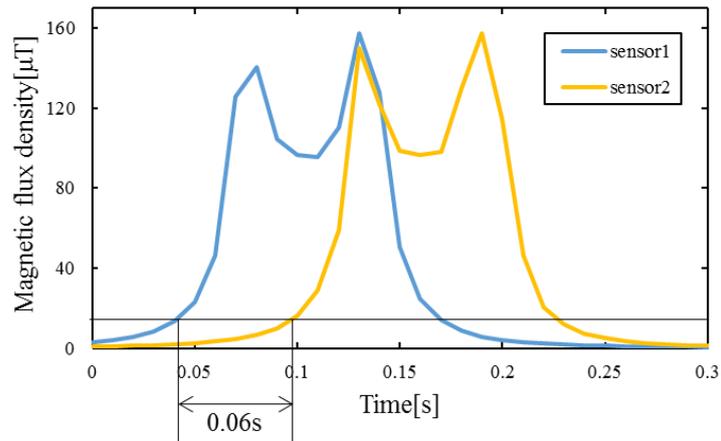


Fig. 8-5 In the case of N pole in the top of the vehicle made from NMF-12G (20km/h)

次に速度 30km/h のときの結果を示す。図 8-1(a)の条件で車体の磁石が NMF-6C のときの結果を図 8-6, 同じ条件で車体の磁石が NMF-12G のときの結果を図 8-7, 図 8-1(b)の条件で車体の磁石が NMF-6C のときの結果を図 8-8, 同じ条件で車体の磁石が NMF-12G のときの結果を図 8-9 に示す。4 つ全ての条件で, センサ 1 で車両の始まりを検出してからセンサ 2 で車両の始まりを検出するまでに 0.04 秒かかり, また, センサ間が 0.3m であるので, 速度は 27km/h となった。

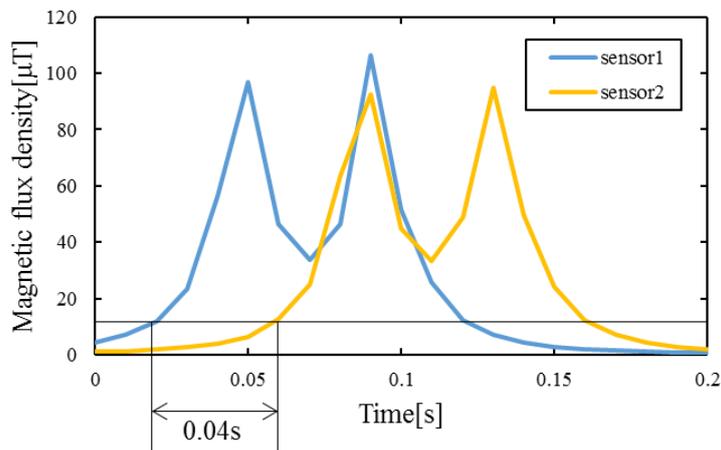


Fig. 8-6 In the case of N pole in front of the vehicle made from NMF-6C (30km/h)

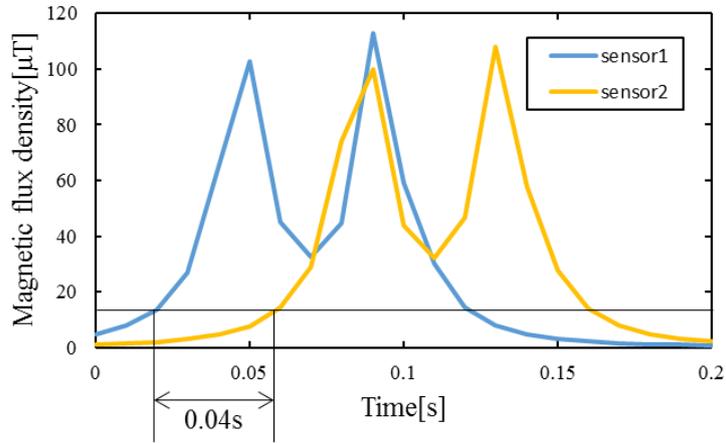


Fig. 8-7 In the case of N pole in front of the vehicle made from NMF-12G (30km/h)

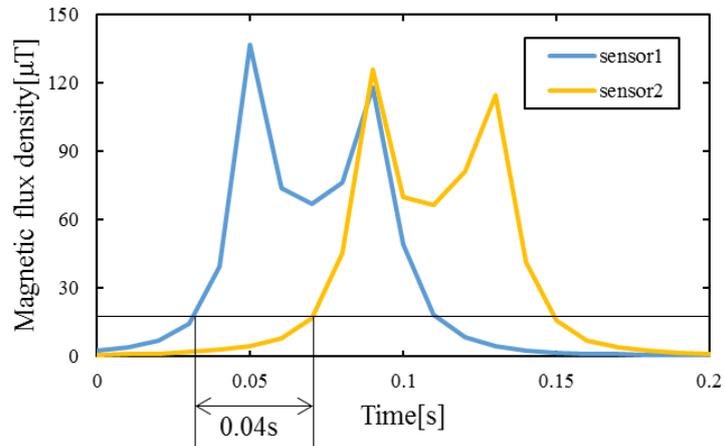


Fig. 8-8 In the case of N pole in the top of the vehicle made from NMF-6C (30km/h)

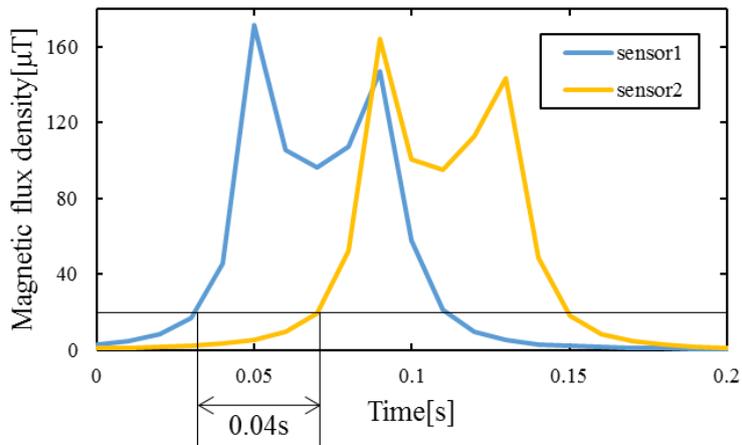


Fig. 8-9 In the case of N pole in the top of the vehicle made from NMF-12G (30km/h)

8-3 考察

様々な車種に見立てるため、磁石の種類や磁石の向きを変化させてシミュレーションを行った。それぞれ速度が 20km/h, 30km/h となるように、車体を移動させた。しきい値以上の値になったときが車両の始まりであるとして、センサ 1 で車両の始まりを検出してからセンサ 2 で車両の始まりを検出するまでにかかる時間を計測した。4つの条件でシミュレーションを行ったが、どの条件でも速度を検出することができた。これらの結果から、センサを二台使用した速度検出は有効であると考ええる。

9 章 実験車両を用いた速度検出実験

シミュレーションの結果，二台のセンサを用いた車両検出の有用性を確認できたので，実際に車両を走行し，速度を検出できるか実験を行った．実験場所は3章の図3-1で示した高知工科大学グラウンド東側の通路で行った．3mの間隔をあけて地磁気センサを二つ，道路の中央に固定設置した．地磁気センサとPCをUSBケーブルで繋げたものを二つ使用し，一回の条件ごとにログを取得した．

9-1 実験車両

速度検出の実験には三台の車両を使用した．一台は3章で使用した車両と同じである．残りの二台の車両の概略を以下に示す．



Fig. 9-1 Experimental vehicle (Mini car)

Table 9-1 The details of the experimental vehicle (Mini car)

車種	SUZUKI WAGON R
総排気量[cc]	658
全長[mm]	3395
全幅[mm]	1475
全高[mm]	1640
車両重量[kg]	780
駆動方式	FF



Fig. 9-2 Experimental vehicle (Hybrid vehicle)

Table 9-2 The details of the experimental vehicle (Hybrid vehicle)

車種	TOYOTA AQUA
総排気量[cc]	1496
全長[mm]	4050
全幅[mm]	1715
全高[mm]	1490
車両重量[kg]	1090
駆動方式	FF

9-2 実験方法

車両がセンサの中央を通過するよう(図 9-3(a))に、速度 10km/h, 20km/h, 30km/h, 40km/h と変化させて走行した。また、センサを道路の横に設置(図 9-3(b))して、車両は道路の中央を走行し、速度を 20km/h, 30km/h と変化させた。それぞれの速度で 3 回ずつ計測した。

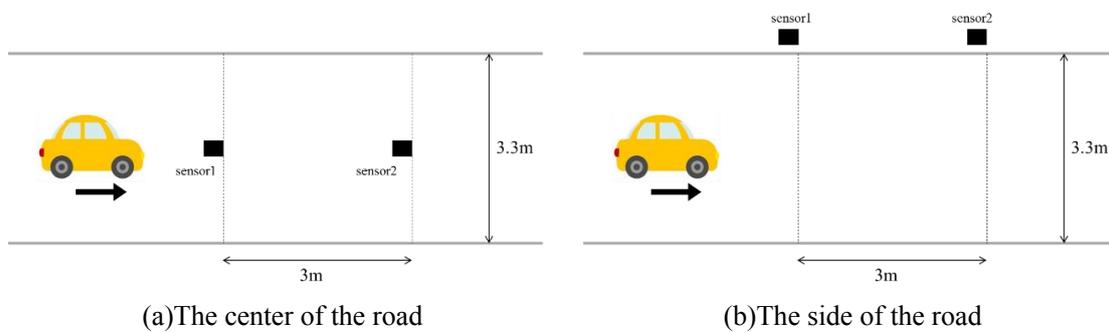


Fig. 9-3 Placement of the sensor

9-3 実験結果

はじめに、図 9-3(a)に示した場所にセンサを配置して走行した結果を示す。速度 10km/h で走行したときの軽自動車の結果を図 9-4、普通車の結果を図 9-5、ハイブリッド車の結果を図 9-6 に示す。軽自動車は、センサ 1 で車両の始まりを検出してからセンサ 2 で車両の始まりを検出するまで 1.32 秒であった。センサ間は 3m であるので速度は 8.2m/s と検出した。普通車は、センサ間で車両を検出するまで 1.91 秒であったので速度は 5.7km/h と検出した。ハイブリッド車は、センサ間で車両を検出するまで 1.58 秒であったので速度は 6.84km/h と検出した。

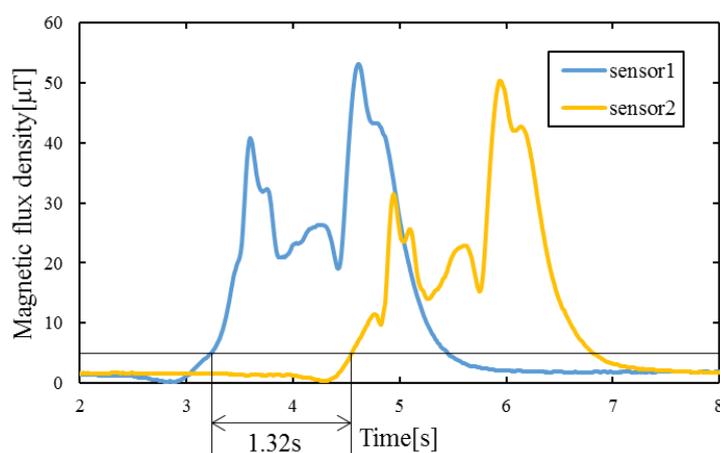


Fig. 9-4 In the case of sensor on the center of the road at Mini car (10km/h)

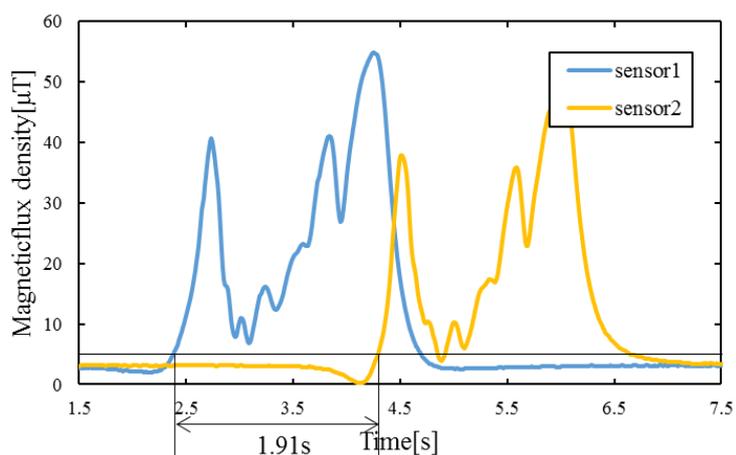


Fig. 9-5 In the case of sensor on the center of the road at Passenger car (10km/h)

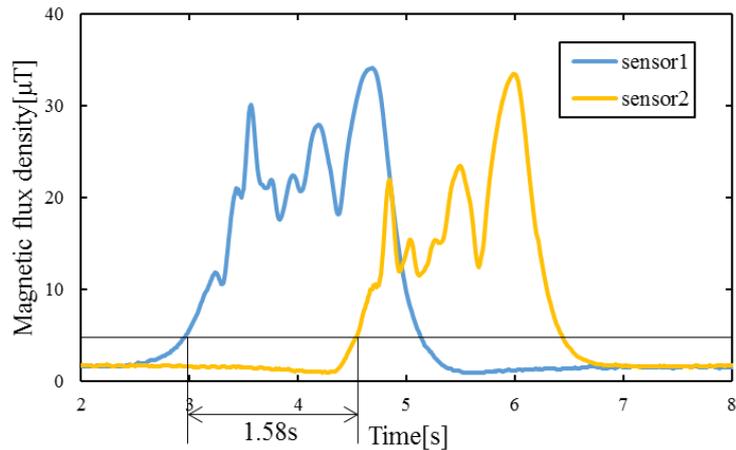


Fig. 9-6 In the case of sensor on the center of the road at Hybrid vehicle (10km/h)

次に、センサの位置は図 9-3(a)に示すように、センサが車両の中央を通過し、速度 20km/h のときの結果を示す。軽自動車の結果を図 9-7、普通車の結果を図 9-8、ハイブリッド車の結果を図 9-9 に示す。軽自動車は、センサ 1 で車両の始まりを検出してからセンサ 2 で車両の始まりを検出するまで 0.62 秒であった。センサ間は 3m であるので速度は 17.4km/h と検出した。普通車は、センサ間で車両を検出するまで 0.70 秒であったので速度は 15.4km/h と検出した。ハイブリッド車は、センサ間で車両を検出するまで 0.76 秒であったので速度は 14.2km/h と検出した。

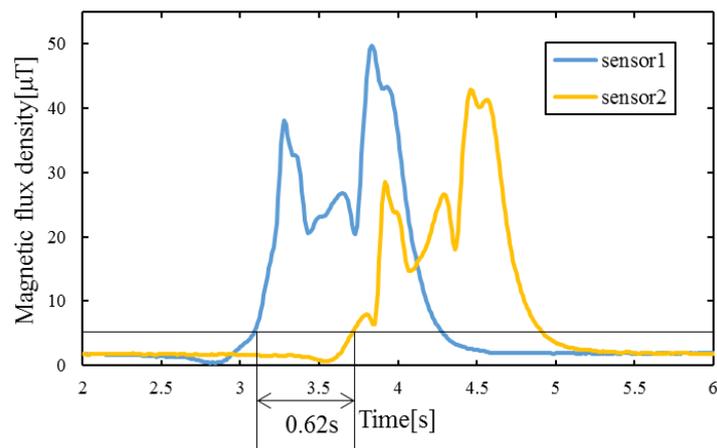


Fig. 9-7 In the case of sensor on the center of the road at Mini car (20km/h)

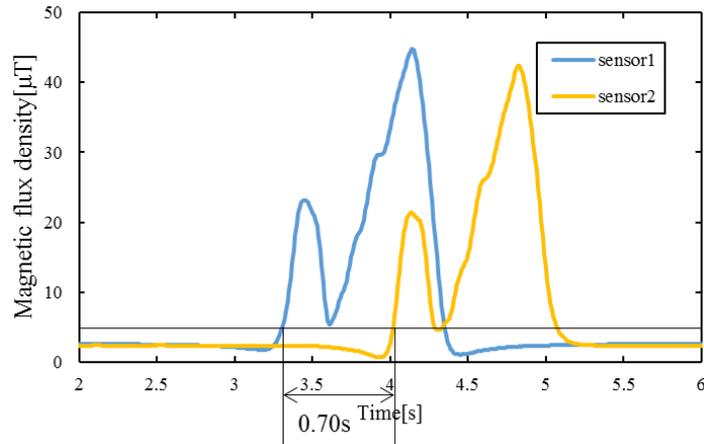


Fig. 9-8 In the case of sensor on the center of the road at Passenger car (20km/h)

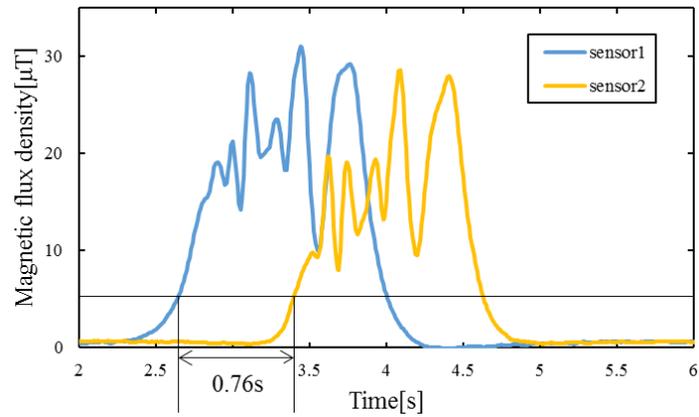


Fig. 9-9 In the case of sensor on the center of the road at Hybrid vehicle (20km/h)

センサの位置は図 9-3(a)に示すように、センサが車両の中央を通過し、速度 30km/h のときの結果を示す。軽自動車を図 9-10、普通車を図 9-11、ハイブリッド車を図 9-12 に示す。軽自動車は、センサ 1 で車両の始まりを検出してからセンサ 2 で車両の始まりを検出するまで 0.46 秒であったので、速度は 25.1km/h と検出した。普通車は、センサ間で車両を検出するまで 0.41 秒であったので、速度は 26.3km/h と検出した。ハイブリッド車は、センサ間で車両を検出するまで 0.43 秒であったので、速度は 25.1km/h と検出した。

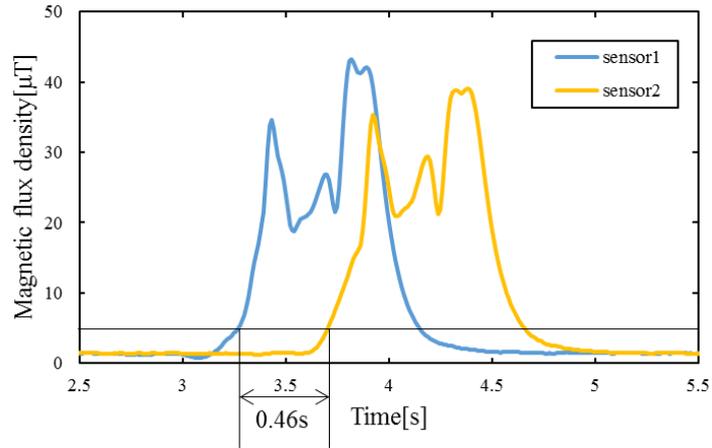


Fig. 9-10 In the case of sensor on the center of the road at Mini car (30km/h)

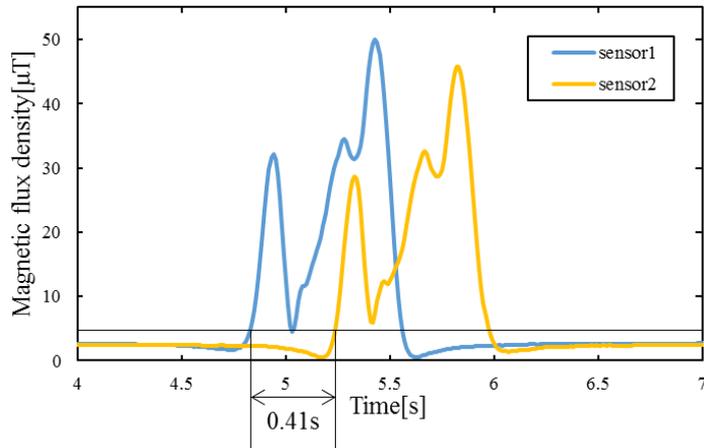


Fig. 9-11 In the case of sensor on the center of the road at Passenger car (30km/h)

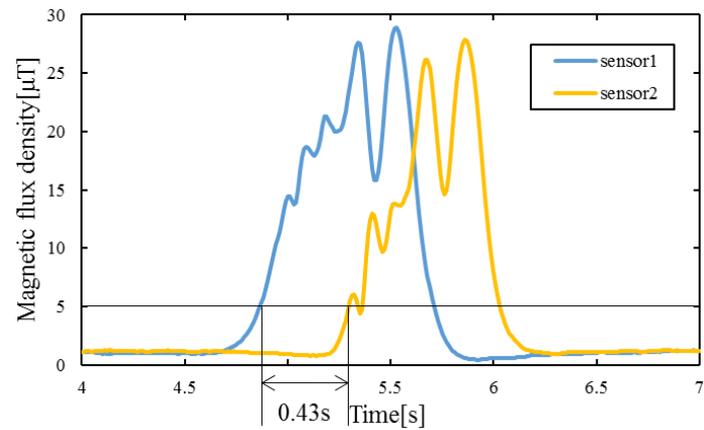


Fig. 9-12 In the case of sensor on the center of the road at Hybrid vehicle (30km/h)

センサの位置は図 9-3(a)に示すように、道路の中央に設置し速度が 40km/h のときの結果を示す。軽自動車を図 9-13、普通車を図 9-14、ハイブリッド車を図 9-15 に示す。軽自動車はセンサ 1 で車両の始まりを検出してからセンサ 2 で車両の始まりを検出するまで 0.30 秒であったので速度は 36.0km/h と検出した。普通車はセンサ間で車両を検出するまで 0.29 秒であったので速度は 37.2km/h と検出した。ハイブリッド車はセンサ間で車両を検出するまで 0.29 秒であったので速度は 37.2km/h と検出した。

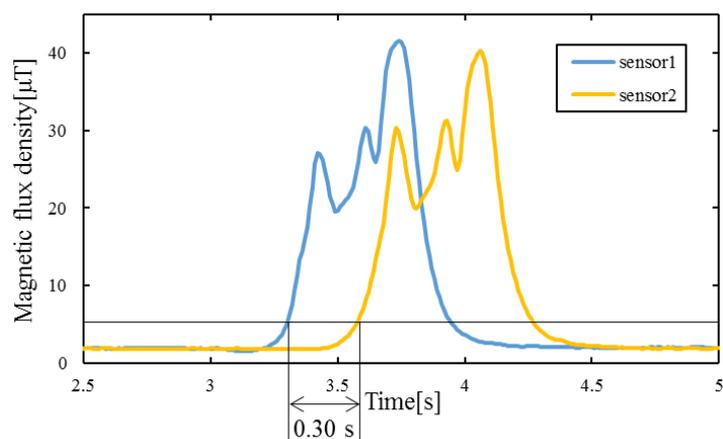


Fig. 9-13 In the case of sensor on the center of the road at Mini car (40km/h)

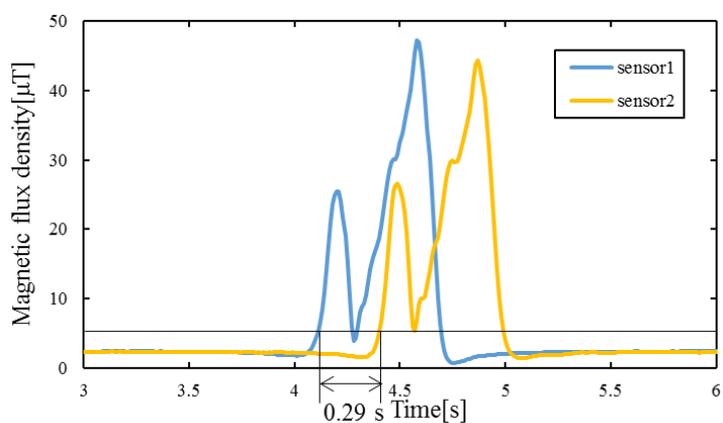


Fig. 9-14 In the case of sensor on the center of the road at Passenger car (40km/h)

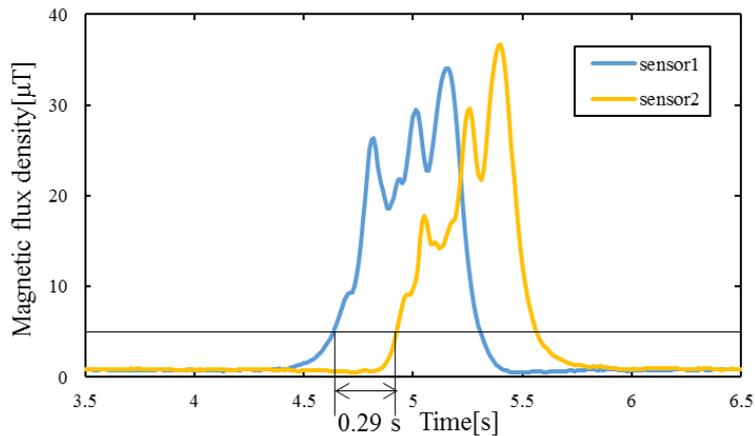


Fig. 9-15 In the case of sensor on the center of the road at Hybrid vehicle (40km/h)

軽自動車, 普通車, ハイブリッド車をそれぞれの速度で3回ずつ実験を行った結果を以下の表にまとめた.

Table 9-1 Speed of each vehicle

	軽自動車			普通車			ハイブリッド車		
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
10km/h	8.2	8.3	8.6	5.7	9.3	8.5	6.8	7.2	7.3
20km/h	17.4	15.9	16.1	15.4	18.0	19.0	14.2	14.2	13.3
30km/h	25.1	32.7	23.0	26.3	28.4	25.7	25.1	27.0	24.6
40km/h	36.0	37.2	37.2	31.8	37.2	37.2	37.2	38.6	36.0

センサの位置を図 9-3(b)に示すように, センサを道路の横に配置して走行した結果を示す. 普通車の速度 20km/h のときの結果を図 9-16, 速度 30km/h のときの結果を図 9-17 に示す. 図 9-16 では, センサ 1 で車両の始まりを検出してからセンサ 2 で車両の始まりを検出するまで 0.64 秒であったので, 速度は 16.9km/h と検出した. 図 9-17 では, センサ間で車両を検出するまで 0.43 秒であったので, 速度は 25.1km/h と検出した.

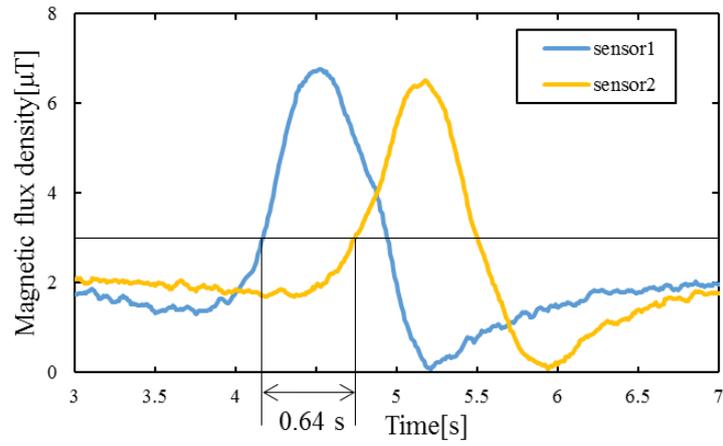


Fig. 9-16 In the case of sensor on the side of the road at Passenger car (20km/h)

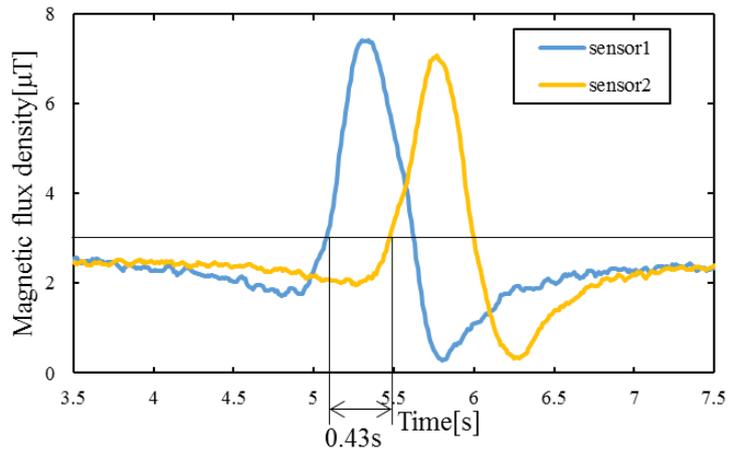


Fig. 9-17 In the case of sensor on the side of the road at Passenger car (30km/h)

9-4 考察

今回の実験では、車両の速度は全て車両の速度計が示している速度で走行した。車両の速度計は、国土交通省の基準により計測した速度が次式に適合するものであると定められている⁽⁹⁾。

$$10(V_1 - 6)/11 \leq V_2 \leq (100/90)V_1 \quad (9-1)$$

V_1 :自動車に備える速度計の指示速度[km/h]

V_2 :速度計試験機を用いて測定した速度[km/h]

車両の速度計が 10km/h と示しているとき、式(9-1)より、

$$3.64 \leq V_2 \leq 11.11 \quad (9-2)$$

また、車両の速度計が 20km/h と示しているとき、式(9-1)より、

$$12.73 \leq V_2 \leq 22.22 \quad (9-3)$$

と表せる。同様に車両の速度計が 30km/h のとき、式(9-1)より、

$$21.82 \leq V_2 \leq 33.33 \quad (9-4)$$

と表せる。40km/h のとき、式(9-1)より、

$$30.91 \leq V_2 \leq 44.44 \quad (9-5)$$

と表せる。速度計で 10km/h を示したときの結果は全ての車種で式(9-2)の範囲を満たしている。また、速度計で 20km/h を示したときの結果は全ての車種で式(9-3)の範囲を満たしている。同様に、速度計で 30km/h を示したときの結果は全ての車種で式(9-4)の範囲を満たしている。同様に、速度計で 40km/h を示したときの結果は全ての車種で式(9-5)の範囲を満たしている。今回の実験で使用した軽自動車、普通車、ハイブリッド車など様々な車種で車両速度が、それぞれの速度の条件式(9-2)~(9-5)を満たしており速度範囲内にあるため、センサ二台を使用した速度検出が可能であると考え。また、センサを道路の横に設置して走行した結果、全体的に検出された値が小さくなったのは、センサから車体が離れるため計測される値が小さくなったためであると考え。センサの位置により、しきい値の取り方を変えなければならないと考える。実際の道路に埋設することを想定した場合、全ての車両がセンサの真上や同じ位置を通過するとは限らないが、この実験結果からセンサの位置によらず、速度を検出することができる。と考える。

しかし、車両に備わっている速度計の速度範囲の条件式は速度の範囲が広いため、車両速度と今回の検出方法で求めた速度の誤差を出すためには、車両の速度を計測しなければならないと考える。

10 章 速度検出の精度向上

9章で行った速度検出実験の結果から、センサ2台を用いた速度検出方法は有効であるとわかった。今回の実験では、速度検出の精度を向上するため、車両を走行中に速度計を用いて車両速度を計測し、実際の実速度と、今回の検出方法で検出した速度の誤差を算出し、有用性を検討する。また、センサを設置する位置について検討する。車両がセンサを通過する位置によって検出される波形が異なるため、センサを設置する位置により検出精度が変化すると考える。図 10-1 に示すように、道路の中央にセンサを設置し矢印の向きに斜めに走行させた結果を図 10-2 に示す。センサ1を通過する波形とセンサ2を通過する波形が異なるため、センサ1で通過した車両が、センサ2で通過したと判断できないため速度を検出することができない。よって、道路の端にセンサを設置することで、車両が道路に対して斜めに走行した場合にも車両を検出することができると考える。今回は、センサを道路の真ん中に設置した場合とセンサを道路の端に設置した場合で実験を行う。

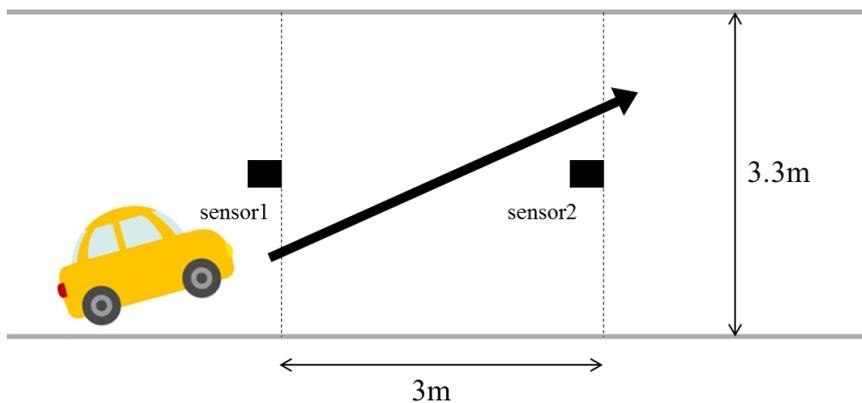


Fig. 10-1 Run position of the vehicle

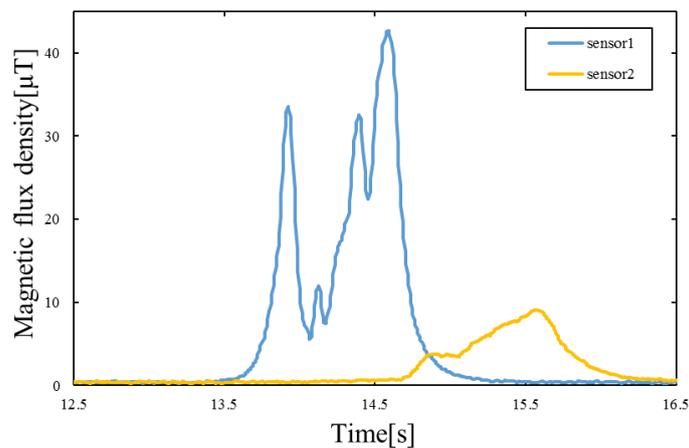


Fig. 10-2 Run result (undetectable case)

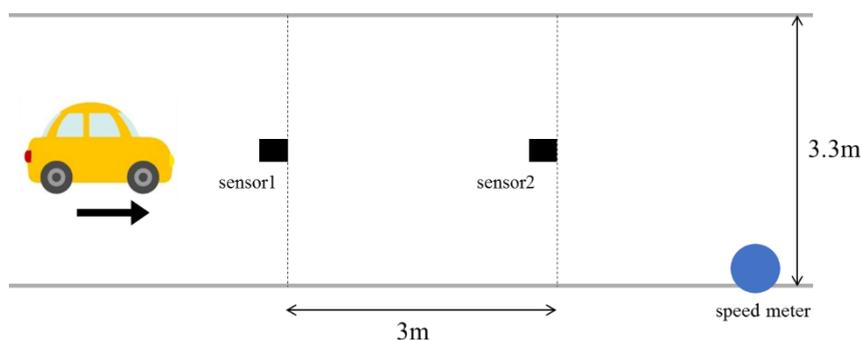
10-1 走行実験

10-1-1 実験概要

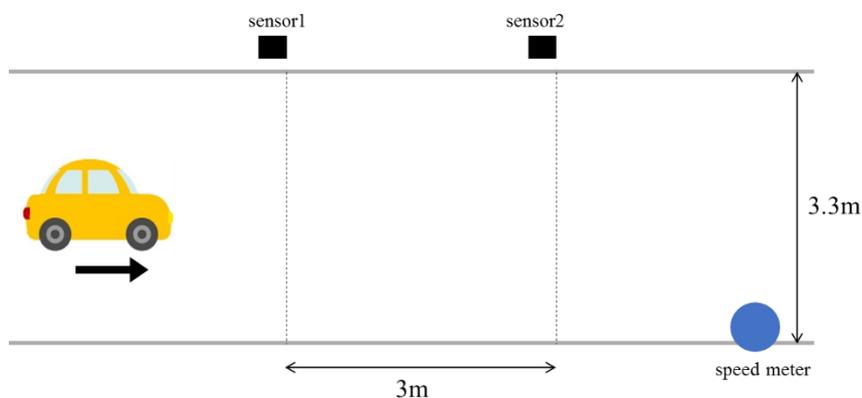
道路の中央に 3m の間隔をあけてセンサを固定設置し，車両の外から速度計を用いて車両速度を計測した．センサと PC を USB ケーブルで繋げたものを二つ使用し，一回の条件ごとにログを取得した．実験に使用した車両は 3 章で使用した車両と同じである．実験場所は 3 章の図 3-1 で示した高知工科大学グラウンド東側の通路で行った．

10-1-2 実験方法

車両がセンサの中央を通過するよう(図 10-3(a))に，速度を 20~30km/h と変化させて走行した．またセンサを道路の横に設置(図 10-3(b))して，車両は道路の中央を走行し，速度を 20~30km/h と変化させて走行した．図に示す位置から速度計を用いて速度を計測した．今回の実験で使用した速度計は，阪神交易社のスピードスターV である．車両がセンサ 1 の手前 1m からセンサ 2 を通過するまでの速度を計測した．速度計には，計測中の最高速度が表示される仕様である．また，計測精度は $\pm 1\text{km/h}$ である．



(a)The center of the road



(b)The side of the road

Fig. 10-3 Placement of the sensor

10-2 実験結果

10-2-1 時間の算出方法

はじめに、センサ間にかかる時間の算出方法について説明する。センサ 1 で検出された値がしきい値を超えてからセンサ 2 で検出された値がしきい値を超えるまでの時間をセンサ間にかかる時間として速度を算出していたが、センサ 1 とセンサ 2 で立ち上がるまでの時間が異なる場合があり、誤差が大きくなる可能性がある。今回は、センサ 1 で検出される磁束密度の値とセンサ 2 で検出される磁束密度の値のグラフを重ね合わせて、誤差が小さくなるまでの時間を算出し、速度計算に用いる。センサ 1 で検出される値を $h(t)$ 、センサ 2 で検出される値を $g(t)$ とする。

$$T(t) = \sum (h(t) - g(t - t_0))^2 \quad (10-1)$$

上式で $T(t)$ が最小となるときの t_0 を用いて計算を行った。図 10-4 に示すように、 $g(t)$ を $h(t)$ に 0.01 秒ずつ近づけていき、ふたつの値の誤差が小さくなるまでの時間 t_0 を用いて速度を計算した。

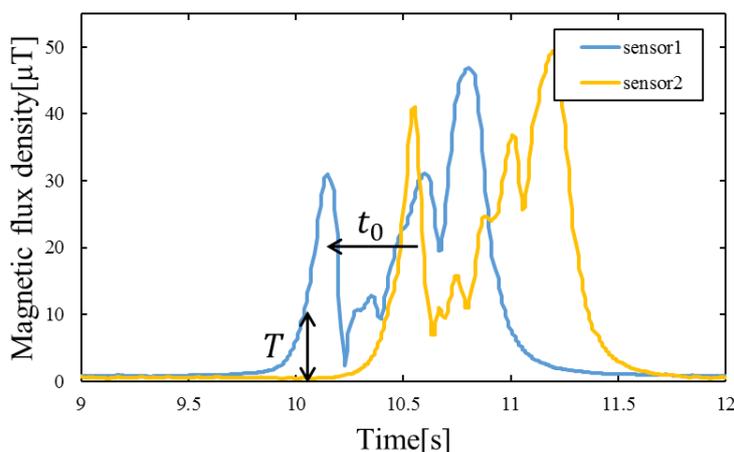


Fig.10-4 Method of the time calculation

10-2-2 速度検出結果

図 10-3(a)に示すように、センサを道路の中央に設置し、車両が道路の中央を走行したときの結果を示す。図 10-5 に速度計で時速 23km/h と計測したときの結果を示す。センサ 1 で車両を検出してからセンサ 2 で車両を検出するまで 0.48 秒であったので速度は時速 22.3km/h と検出した。図 10-6 に速度計で時速 29km/h と計測したときの結果を示す。センサ 1 で車両を検出してからセンサ 2 で車両を検出するまで 0.42 秒であったので速度は時速 25.8km/h と検出した。速度を変化して走行したその他の結果を表 10-1 に示す。

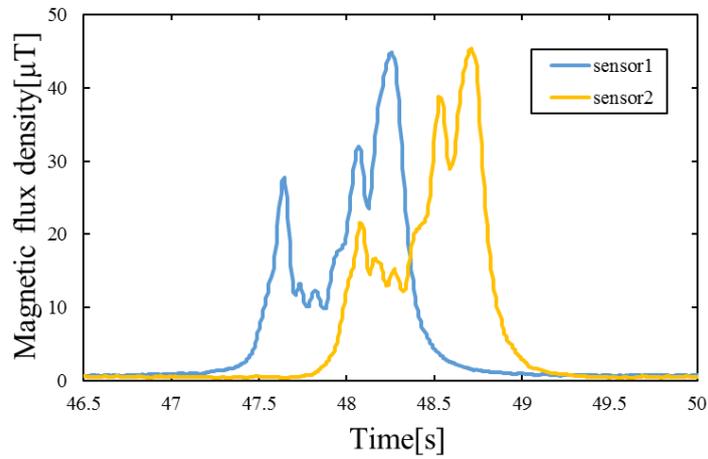


Fig. 10-5 In the case of a run of 22.3km/h

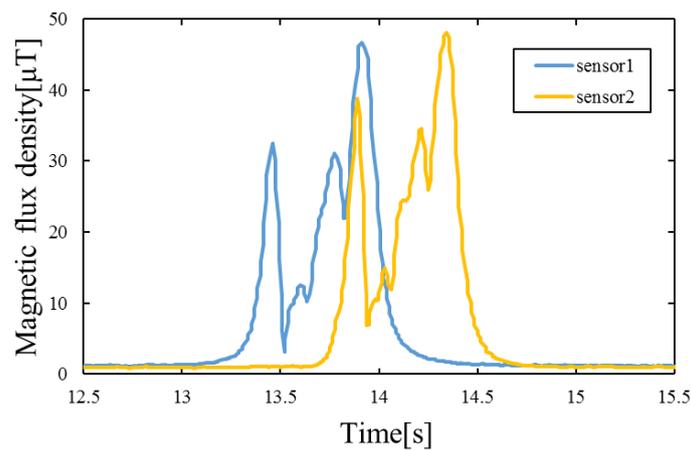


Fig. 10-6 In the case of a run of 25.8km/h

Table 10-1 In the case of sensor on the center of the road

速度計の速度	検出した速度	誤差
22km/h	21.9km/h	-0.1
22km/h	23.2km/h	+1.2
23km/h	22.3km/h	-0.7
25km/h	21.5km/h	-3.5
29km/h	25.8km/h	-3.2
30km/h	25.3km/h	-4.7

次に、図 10-3(b)に示すようにセンサを道路の端に設置し、車両が道路の中央を走行した結果を示す。図 10-7 に速度計で時速 25km/h と計測したときの結果を示す。センサ 1 で車両を検出してからセンサ 2 で車両を検出するまでにかかる時間が 0.47 秒であったので速度は時速 23.2km/h と検出した。図 10-8 に速度計で時速 30km/h と計測したときの結果を示す。センサ 1 で車両を検出してからセンサ 2 で車両を検出するまでにかかる時間が 0.40 秒であったので速度は 29.0km/h と検出した。速度を変化して走行したその他の結果を表 10-2 に示す。

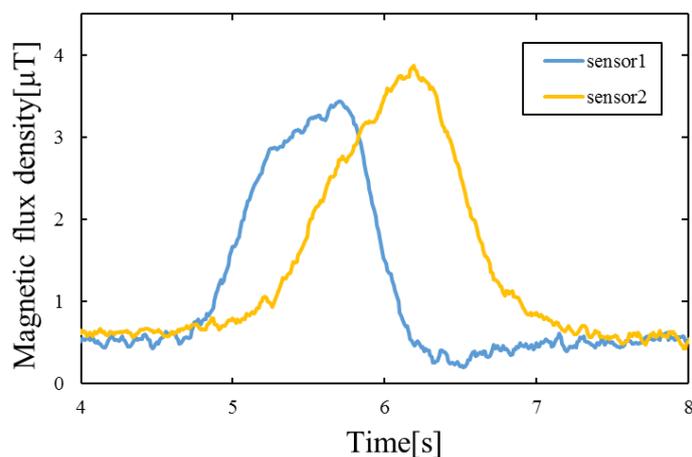


Fig.10-7 In the case of a run of 23.2km/h

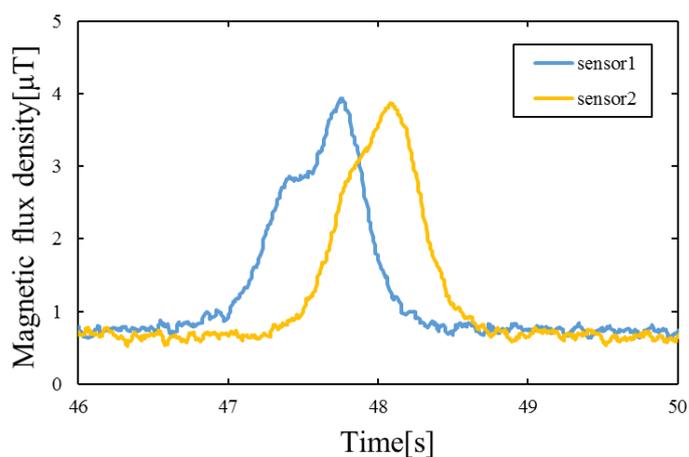


Fig.10-8 In the case of a run of 29.0km/h

Table 10-2 In the case of sensor on the side of the road

速度計の速度	検出した速度	誤差
22km/h	23.2km/h	+1.2
25km/h	23.2km/h	-1.8
25km/h	22.8km/h	-2.2
29km/h	25.3km/h	-3.7
30km/h	29.0km/h	-1
31km/h	25.3km/h	-5.7

10-3 考察

速度検出精度を向上させるため、センサの位置を変化させて実験を行った。図 10-2 に示したように、センサ 1 で検出される波形とセンサ 2 で検出される波形が異なる形であれば今回の検出方法では速度を検出することができないため、センサを道路の端に設置することで車両が道路を斜めに走行した場合も速度を検出することができ、検出精度を向上できると考える。しかし、センサを設置する位置については対向車などの影響を考慮し、実験を行うことで走行車線のみ車両検出が行える場所を確認する必要があると考える。また、センサ 1 で車両を検出してからセンサ 2 で車両を検出するまでにかかる時間の算出方法としてしきい値を用いていたが、車両の始まりの一部だけでは実際の速度との誤差が大きくなったため、車両の始まりから終わりまでを重ね合わせて、ふたつのグラフの差が最小となるまでにかかる時間を用いた。ふたつの方法で計算した速度を表 10-3 に示す。ふたつのグラフを重ね合わせて時間を算出したほうが誤差は小さくなり、検出精度を向上することができたと考える。

センサを道路の中央に設置し、車両が道路の中央を走行したとき、時速 22km/h から 30km/h までを速度計で計測し、このときの検出結果から誤差は-4.7km/h から+1.2km/h であった。またセンサを道路の端に設置し、車両が道路の中央を走行したとき、時速 22km/h から 31km/h を速度計で計測し、このときの検出結果から誤差は-5.7km/h から+1.2km/h であった。この結果から、センサ 2 台を用いて車両の速度を検出することは可能であるとわかった。また、センサ上を車両が通過しない場合も車両の速度を検出することができるとわかった。しかし、センサを道路の中央に設置した場合も、道路の端に設置した場合も時速 25km/h から 31km/h の範囲で誤差が大きくなっている。これは、速度計が走行中の最高速度を表示する仕様になっており、車両がセンサの手前で最高速度で走行したときの速度を感知したことが原因であると考えられる。誤差を小さくするためには、速度の計測方法を改善する必要があると考える。

また、速度が速いほうが誤差が大きくなる原因としては、センサ間の距離が近かった可能性がある。今回の実験では時速 20~30km/h 程度の速度でしか走行しておらず、全て 3m 間隔でセンサを設置したため、速度とセンサ間の距離の関係性を確認する必要があると考える。

Table 10-3 Comparison of the detection precision

速度計の速度	しきい値を用いた計測	誤差	グラフを重ねた計測	誤差
22km/h	23.1km/h	+1.1	21.9km/h	-0.1
22km/h	24.3km/h	+2.3	23.2km/h	+1.2
25km/h	22.9km/h	-2.1	22.3km/h	-0.7
25km/h	23.9km/h	-1.1	21.5km/h	-3.5
29km/h	25.2km/h	-3.8	25.8km/h	-3.2
30km/h	25.0km/h	-5	25.3km/h	-4.7

11 章 結言

11-1 まとめ

本研究では、地磁気センサを用いた車両台数と速度検出方法について提案した。はじめに地磁気センサを用いた車両検出の有用性を確認するため、実験車両を用いて基礎実験を行った。また実際の道路で走行実験を行い、検出精度を確認した。センサ 1 台を用いた車両検出の有用性を示すことができたため、次にセンサ 2 台を用いた速度検出方法について提案した。速度検出の有用性を確認するため、電磁解析ソフト JMAG を用いてシミュレーションを行った。また、実験車両を用いて走行実験を行い、様々な速度での検出精度を確認した。車両台数では 98%以上の精度で検出が可能であった。速度の検出はセンサ 2 台を用いた検出方法の有用性を示すことができた。

11-2 今後の課題

車両速度を検出するための実験において、速度が速くなるほど速度計で計測した速度との誤差が大きくなったため、このときの検出方法を改善しなければならないと考える。センサ間の距離が短いことが原因のひとつであると考えられるため、センサ間の距離を長くして実験をする必要があると考える。今後の展望としては、車両台数と速度を同時に検出することができるシステムを作成していきたいと考える。また、センサで検出される磁束密度の値と車両速度を用いることで車両の長さを求めることができ、車種を判別できると考える。

謝辞

本研究を行うにあたり、丁寧かつ熱心なご指導をいただ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。また、研究についてご助言を賜りました原田明德准教授に深く感謝いたします。多くのご指摘や示唆をいただいた機械・航空システム制御研究室の皆様にも感謝いたします。特に同級生の皆様には多くのご助言やご支援をいただきましたこと感謝いたします。最後に、6年間にわたり大学、大学院に進学させていただき、学費や生活面、精神面など支えていただいた両親、家族に感謝いたします。

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>, 2021/02/01
- (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, 2021/02/01
- (3) FUREX 株式会社, 車両検知センサーの方式比較
https://www.fu-rex.co.jp/product1/sensor_info.html, 2021/02/01
- (4) NEXCO 中日本, 安全性向上 3 年計画の取り組み状況
<http://www.c-nexco.co.jp/corporate/safety/torikumi/torikumi/vol08/>, 2021/02/01
- (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/sensor/>, 2021/02/01
- (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, 2021/02/01
- (8) 清藤沙矢佳, 岡宏一, 原田明德 (2019), 地磁気センサを用いた自動車検出システム, 2018 年度学士学位論文
- (9) 国土交通省, 道路運送車両の保安基準を定める告知 第 148 条 (速度計等)
<https://www.mlit.go.jp/common/000187518.pdf>, 2021/02/08