

平成 28 年度 修士学位論文

電車ブレーキ操作における角度・力入力  
切り替え方式の学習効果に関する研究

指導教員 池浦 良淳 教授

三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻  
システム設計研究室  
414M149 森田 朋大

# 目次

---

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	3
第2章	角度・力入力切替え式ハンドル	4
2.1	角度・力入力切替え式ハンドルの概要	4
2.2	角度・力入力切替え式ハンドルの操作方法詳細	7
2.3	実験装置のシステム構成	8
第3章	車両停止シミュレータ	10
3.1	電車のモデル化	10
3.1.1	一般的な電車のモデル表現	10
3.1.2	電車の簡易モデル化における条件	12
3.1.3	電車の簡易モデルの構築	12
3.2	車両停止シミュレータの概要	14
3.2.1	車両停車シミュレータの構築	14
3.2.2	車両停車シミュレータの仕様	17
第4章	入力方式切替判断モデルの同定	18
4.1	ロジスティック回帰モデルの概要	18
4.1.1	ロジスティック回帰モデルの概要	18
4.1.2	入力方式切替判断モデルとしての利用	19
4.2	各変数定義	20
4.2.1	実験に関する変数の定義	20
4.2.2	切替判断の定義	21
4.2.3	結果変数と説明変数の定義	21

4.3	停車操作データ収集実験	22
4.3.1	停車操作データ取得実験条件	22
4.3.2	モデルに用いる被験者の選別	22
4.3.3	入力方式切替判断データの取得	24
4.4	入力方式切替判断モデルの同定	25
4.4.1	入力方式切替判断モデル	25
4.4.2	確率等高線図の説明	25
第5章	自動切り替えモデルの学習効果検証	27
5.1	実験方法	27
5.2	実験結果	27
5.3	学習効果の検証方法	37
5.3.1	被験者の停止距離誤差の平均と標準偏差	37
5.3.2	被験者の入力方式切り替え時における停止距離平均と標準偏差	39
5.2.3	被験者の入力方式切り替え時における速度平均と標準偏差	41
5.4	考察	43
第6章	結論	44
6.1	まとめ	44
6.2	今後の課題	44
	参考文献	46
	付録	48
	謝辞	62

# 第1章

## 序論

---

### 1.1 研究背景

現代社会において、自動車、船舶、飛行機など様々な交通機関が存在し、これらの交通機関は人々の移動手段、また物資運送手段として必要不可欠なものとなっている。その中でも電車は、交通状況の影響を受けない、免許取得の必要が無いなどの理由から通勤や通学に広く利用され、その運転には運行ダイヤに沿った正確な運転が求められる。運行ダイヤ通りの正確に運行する上で大きな障害となるのがオーバーランである。オーバーランとは電車が正確な停止位置を越えて停止することである。オーバーランが大きい場合、超過距離を修正するために時間が掛かかり、運行ダイヤの遅れを取り戻すために無理な運転を行い、最悪の場合、大事故に繋がる可能性がある。小さなオーバーランの場合でも少なからず運行ダイヤに影響は出る。また、駅によっては電車への接触事故を防ぐためプラットホームスクリーンドア(Fig.1.1)などの施設が設置されている場合があり、このような駅では停止位置がより厳密に許容範囲が定められている。運行ダイヤに沿った運転を電車で行うためには、運転士がオーバーランを限りなく少なくし、停止範囲以内で正確に停車する必要がある。運転士は、電車のブレーキシステムは操作までにタイムラグが存在し、扱う減速力が大きく調整が困難であること、路線や車輪の状況で減速力の掛かり方が異なること、減速力を加える場合にブレーキハンドルを傾け電車の減速力を段階的に指示することなどを考慮しながら停止操作を行う。電車の停車操作において、運転士は速度偏差を認知した後、ブレーキ量を判断して入力しており<sup>[1]</sup>、停車位置への正確な停車には運転士のハンドル操作を効率よく車両伝えるため、ブレーキハンドルに細やかな減速力調整と良好な応答特性が必要とされる。しかし、現在の電車で用いられる方式はブレーキハンドル (Fig.1.2) を傾け一定の減速力を段階的に入力する方式のため操作量を直観的に判断しづらく、素早い操作に向いていない。ブレーキ操作には前述したブレーキハンドルのほかに車輪の摩擦等が影響を与える。これまでの電車ブレーキに関する研究は、車両変更等の制動特性改善といった粘性ブレーキに関する研究や<sup>[2]-[4]</sup>、ブレーキ制御弁をはじめとするブレーキ危機の応答性、信頼性の改善といった空気ブレーキに関する研究や<sup>[5]-[7]</sup>、回生エネルギーの増大を目的とした電気ブレーキに関する研究<sup>[8]-[9]</sup>、停止距離を運転が判断しやすくするための支援システム構築等に関する研究<sup>[10]</sup>が主に行われており、ブレーキハンドルの操作性の問題については注目されていなかった。



Fig.1.1 プラットホームスクリーンドア



Fig.1.2 従来の電車ブレーキハンドル

## 1.2 研究目的

従来のブレーキハンドル操作はハンドルレバーを傾ける角度で減速力を調整するため、一定減速力の維持には向いているが、操作量を直観的に判断し難く、素早い操作を行い、減速力を微調整することには不向きである。これに対し、本研究室では、三鬼らが固定されたハンドルレバーに加えた力に応じて減速力を操作し、減速力の微調整しやすい力入力方式を従来の角度入力方式に取り入れた角度・力入力切替え式ブレーキハンドルを提案し、従来の角度入力方式だけで停車操作を行うより、提案手法で停車するほうが停車位置に誤差が少なく停車できることを示した。<sup>[11]-[12]</sup>

また、行方らは提案したブレーキハンドルの入力方式の切り替えタイミングに着目し、複数の被験者に対応でき入力方式が自動で切り替わる汎用的な判断モデルを構築し、妥当性を検証した。本研究では、同定モデルの利用方法を考える。

利用方法を考える上で、同定モデルを実車両実装には問題がある。モデルの切り替え

タイミングを不快に感じる人も存在し、個々のモデルを作ると膨大な時間が掛かることである。この理由より、切り替えの自動化モデルの実車への実装は不向きだと考える。自動化モデルは、入力切替における熟練した人のタイミングを再現できるため、自分のタイミングで熟練した人には効果は見込めないが、停車操作の経験のない被験者には利用できる特性がある。そこで、動力車操縦者養成所などで、運転士を訓練することを目的に停車操作の熟練していない人の習熟期間の短縮への利用を考える。これは、熟練者の切り替えタイミングが再現されるので、切り替えタイミングを初めからつかみ易く、停車操作の経験がない人の習熟期間を短く出来ると考えられるためである。

よって、この同定モデルを用いて入力切替方式を自動切換方式で行うことで、手動方式だけで学習するより学習が早くなるか検証し、自動切り替え方式の学習効果の有効性を示す。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。まず、第2章では本研究室で提案した実験装置である角度・力入力切替え式ブレーキハンドルについて説明する。第3章では電車の挙動を表現するためのシミュレータである、車両停車シミュレータについて説明する。第4章では本研究で使用するモデルであるロジスティック回帰モデルについて説明し、ロジスティック回帰モデルを用いたドライバーの入力方式切替判断モデルの同定方法と同定結果を述べる。第5章では同定した入力方式切替判断モデルを利用した実験と通常の停止実験を行い、比較、考察することで学習効果の妥当性を検証する。第6章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。また、付録として評価が被験者の習熟解析を判断するための手法である達成度理論と、傾向式について記載する。両手法は本研究では正しく習熟解析できなかったため付録として記載する。

# 第2章

## 角度・力入力切替え式ハンドル

---

本研究では本研究室で三鬼らが提案した角度・力入力切替え式ハンドルを用いて実験を行う。本章では角度・力入力切替え式ハンドルについて述べる。2.1 節で角度・力入力切替え式ハンドルの概要について述べ、2.2 節で角度・力入力切替え式ハンドルの操作方法詳細について、2.3 節では実験システムの構成について述べる。

### 2.1 角度・力入力切替え式ハンドルの概要

角度・力入力切替え式ハンドルを Fig.2.1 に示す。このハンドルのブレーキ操作は、前半では一定の減速力をかけ続ける必要があるため角度入力式で操作を行い、停止位置付近では細かい減速力の調整が可能な力入力式に切り替え、減速力の微調整をする。入力方式の切り替えは取手部分に取り付けたスイッチを使用し、電磁ブレーキを作動し、操作レバーの回転を固定することで、角度入力式から力入力式に変更する。

角度・力入力切替え式ハンドルの搭載機器配置図を Fig.2.2 に示す。角度入力時には、エンコーダによりハンドルレバーの回転角度を検出して減速度に変換する。力入力時には、歪みゲージにより固定されたレバーに掛けられたトルクを検出して減速度に変換して角度入力の値に加減算する。また、入力方式を手動で切り替える場合、スイッチを押している場合は力入力、放している場合は角度入力となる。自動で入力方式の切り替えが行われる場合は、システムが電磁ブレーキを作動させ、レバーがロックされて力入力操作へ切り替えられる。Table2.1 はエンコーダの仕様を示し、Table2.2 には歪みゲージの仕様を示す。また Table2.3 には電磁ブレーキの仕様を示す。

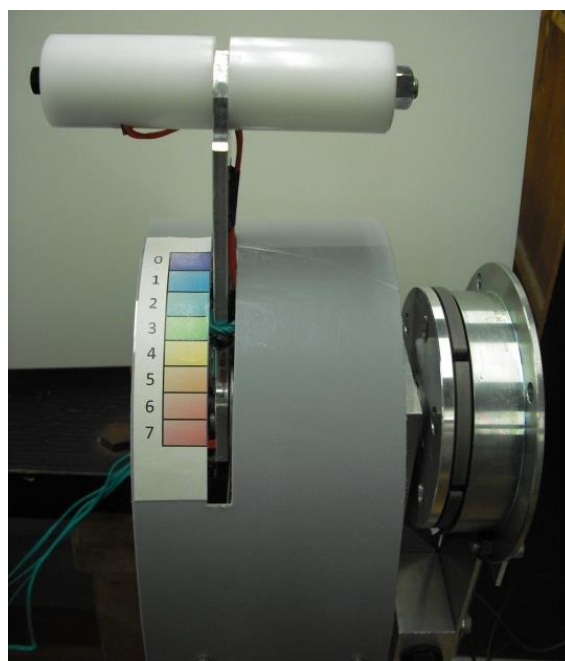


Fig.2.1 角度・力入力切替え式ハンドルの外観

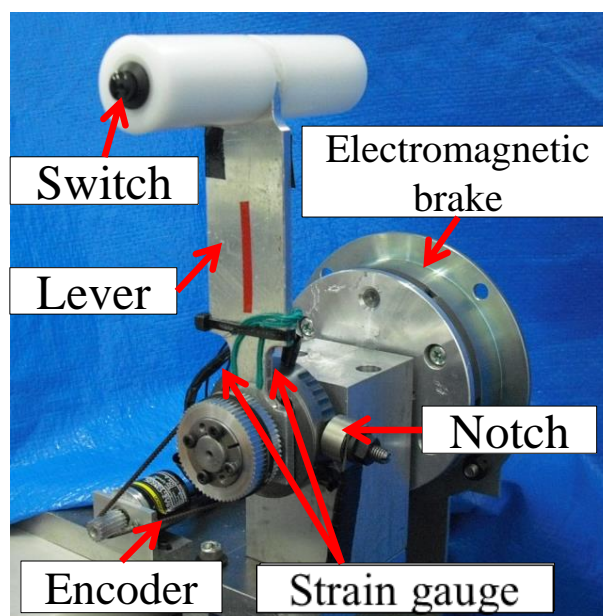


Fig.2.2 搭載機器配置図



Table 2.1 エンコーダの仕様

Maker	OMRON
Model	E6A2 – CWZ3C
Resolution	500pulse/rotation
Power-supply voltage	5～12V DC

Table 2.2 歪みゲージの仕様

Maker	NEC Avio
Model	N11-FA-2-120-11-VSE1
Resistance	120 $\Omega$ $\pm$ 0.3%
Gage factor	2.10 $\pm$ 2%

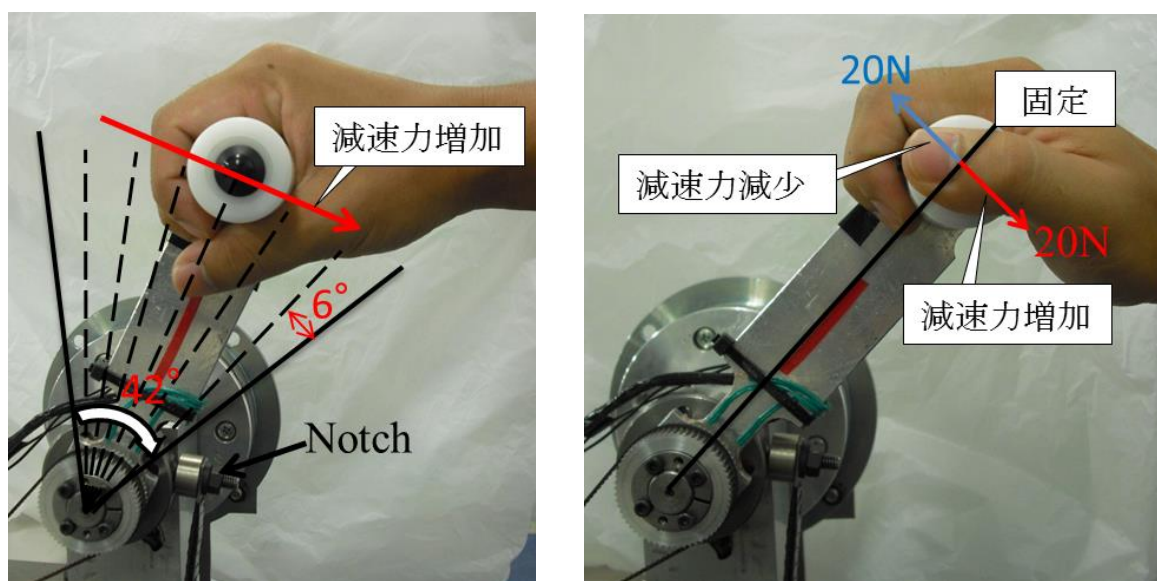
Table 2.3 電磁ブレーキの仕様

Maker	三木プーリー
Model	111-10-12G
Maximum torque	22N · m
Power-supply voltage	24V DC

## 2.2 角度・力入力切替え式ハンドルの操作方法詳細

角度・力入力切替え式ハンドルの操作範囲図を Fig.2.3 に示す。Fig.2.3(a)は角度入力時の操作範囲を示し、Fig.2.3(b)は力入力時の操作範囲を示す。角度入力時にはノッチにより7段階で減速力を操作し、時計回りにハンドルレバーを引くにつれ減速力が増していく。全使用角度は $42^\circ$ 、1ノッチ当たりの角度は $6^\circ$ である。各角度によって操作される減速力の範囲は $0\sim 1.600\text{m/s}^2$ となる。これらは実際の電車で使用されているブレーキハンドルと類似させて製作されている。

力入力時はスイッチを押した時の角度入力の減速力を基準とし、その値にハンドルレバーへ加えた力で減速力の操作を行える。時計回りにハンドルレバーに力を加えるとさらに減速し、反時計回りに力を加えると減速を緩めることができる。ハンドルレバーに加える力の操作範囲は $\pm 20\text{N}$ で、減速力 $\pm 0.200\text{m/s}^2$ の減速力を支持する。ここで、前述の角度入力時の減速力の操作範囲である $0\sim 1.600\text{m/s}^2$ を超えないよう上限を設定している。



(a)角度入力時の操作範囲

(b)力入力時の操作範囲

Fig.2.3 ハンドルの操作範囲

## 2.3 実験装置のシステム構成

実験装置のシステムはブレーキハンドル、増幅器、カウンターボード、A/D変換ボード、D/A変換ボード、PC、操作画面によって構成されている。Fig.2.4は実験システムの構成を示す。エンコーダの値はカウンターボードに、歪センサの値はアンプを通しA/Dボードに、スイッチのON/OFFの値はA/D変換ボードにそれぞれ送られる。それらの値をPCで処理し、操作画面のシミュレーションに反映され、スイッチのON/OFFの値はD/A変換ボードから電磁ブレーキへ送られる。増幅器は周波数DC~2kHzのACストレインアンプ（NEC Avio AS1603）を用いた。PCにはカウンターボードとA/D変換ボード、D/A変換ボードを搭載している。Table2.4にカウンターボード、Table2.5にA/D変換ボードの仕様、Table2.6にD/A変換ボードの仕様を示す。

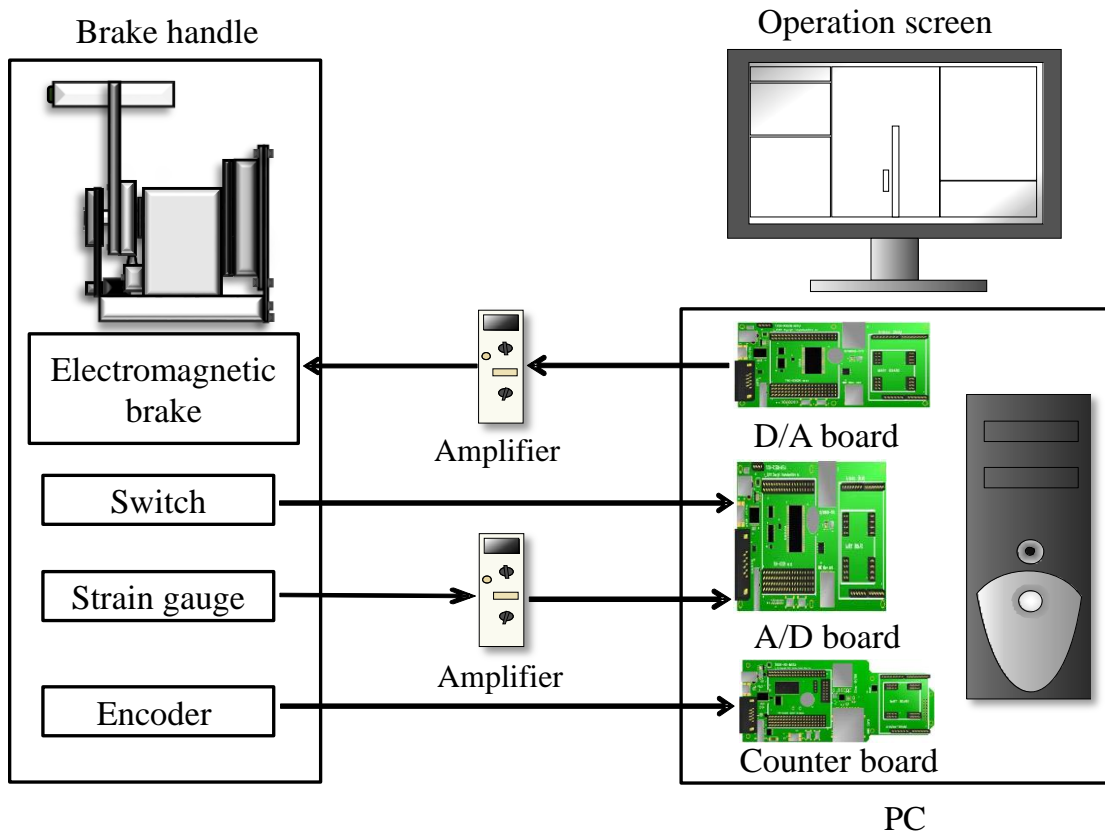


Table2.4 カウンターボード PCI-6205C の仕様

Number of channel	8
Resolution	24bit
Maximum input frequency	2MHz
Power supply	DC+5V

Table2.5 A/D 変換ボード PCI-3168C の仕様

Number of channel	32
Resolution	12bit
Input range	0V~+5V,0V~+10V(unipolar) ±2.5V,±5V, ±10V(bipolar)
Input impedance	10MΩ
Settling time	10μs

Table2.6 D/A 変換ボード PCI-3341A の仕様

Number of channel	8
Resolution	12bit
Output range	0V~+10V(unipolar) ±5V, ±10V(bipolar)
Output impedance	1Ω
Settling time	10μs

# 第3章

## 車両停車シミュレータ

---

本章では実験で使用した、減速力が加えられた際の車両挙動を表現するためのシミュレーションプログラム（車両停車シミュレータ）について述べる。3.1 節でシミュレータの構築のために行った電車のモデル化について述べ、3.2 節では構築した車両停車シミュレータの詳細について述べる。

### 3.1 電車のモデル化

#### 3.1.1 一般的な電車のモデル表現

車両停車シミュレータの構築には電車をモデル化し、挙動を計算する必要がある。一般的な電車は動力車に対して付随車が連結器により複数台連結し走行する。電車を停車させようとした場合、電車全体に元々かかっている走行抵抗や勾配抵抗等の外乱に加え、車両の車輪一つ一つに一定量以上の減速力（制輪子押付力）を加える必要がある。さらに、電車には機械ブレーキの他に、走行エネルギーを電気に変換する電気ブレーキも作動し、これらを合わせたブレーキ力が車両全体に加わる。加えて、電車は多数の乗客を収容し走行するため、連結台数が多く、総全長が非常に長くなる。そのため、ブレーキ力は車両全体に同時に加えられなければならない、電車独自の特殊なブレーキ方式を採用している。以上のことから、電車には多くの物理パラメータが存在し、それらが複雑に影響しあっている。Fig.3.1 は一般的な電車の概略図を示し、Table3.1 は一般的な電車におけるパラメータを、Fig.3.2 は一般的な電車をモデル化した図を示す。

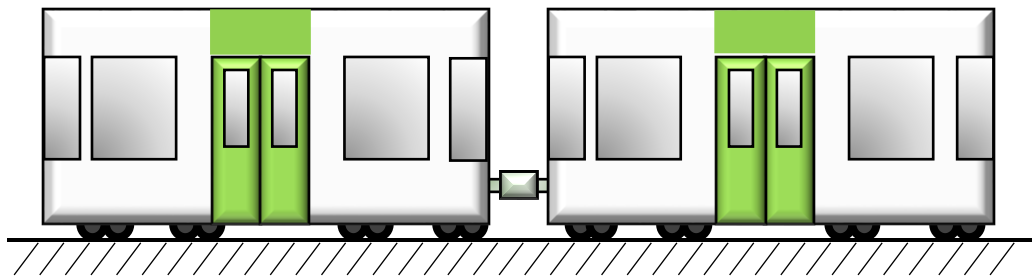


Fig.3.1 一般的な電車の概略図

Table.3.1 一般的な電車におけるパラメータ

Weight of motor	$m_1$ [kg]
Weight of trailer	$m_2$ [kg]
Time constant of motor in the machine brake	$T_1$ [s]
Time constant of motor in the regeneration brake	$T_2$ [s]
Time constant of trailer in the machine brake	$T_3$ [s]
Waste time of motor in the machine brake	$L_1$ [s]
Waste time of motor in the regeneration	$L_2$ [s]
Waste time of trailer in the machine brake	$L_3$ [s]
Friction coefficient of motor	$\mu(\omega)$ [-]
Friction coefficient of trailer	$\mu(\omega)$ [-]
Damping coefficient of coupler	$c$ [Pa·s]
Elastic coefficient of coupler	$k$ [Pa]

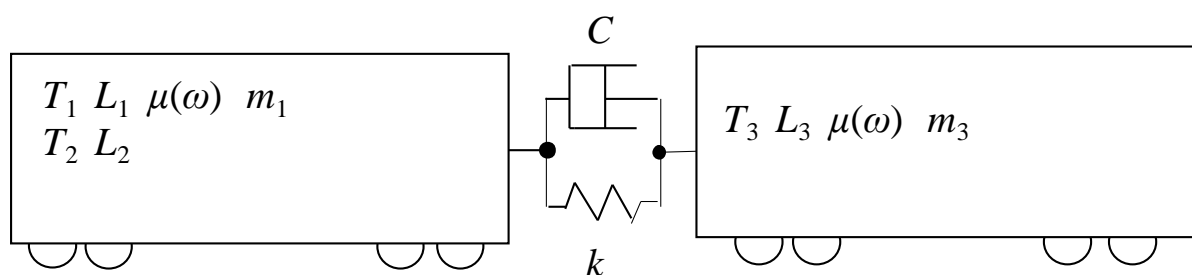


Fig.3.2 一般的な電車のモデル

### 3.1.2 電車の簡易モデル化における条件

電車を厳密にモデル化しようとすることは、3.1.1節で述べたように大変困難である。そこで、今回の研究目的は提案ハンドルの操作性向上のために収集した停車操作データを用いたモデルの構築とそのモデルを用いてブレーキ操作の学習効果を確認することにあるので、以下の2条件下で電車のモデルを簡略化している。

#### 1.列車編成全体を一つの質点として考える

ブレーキ力が車輪一つ一つではなく一つ質点に加わるものと仮定する。この仮定により連結器の影響や、動力車と付随車の挙動の違いを考慮する必要がなくなる。

#### 2.電車に加わる減速力は指示された減速力 $a$ と走行抵抗 $r$ を足し合わせたものとする。

本研究はハンドル操作によって構築したモデルを評価するため、外部の影響は走行抵抗  $r$  のみとする。

### 3.1.3 電車の簡易モデルの構築

3.1.1 節での条件を元に、電車の直進走行を前提として、電車を簡易モデル化する。Fig.3.3 は電車の簡易モデルを示す。モデル内での計算パラメータを Table3.2 に示す。指示減速力  $a$  は

$$a = ik \frac{1}{1+Ts} e^{-Ls} \quad (3.1)$$

ここで  $i[-]$  はハンドルからの入力値となっており、角度入力時には

$$i = k'\theta \quad (3.2)$$

力入力時には

$$i = k'\theta + k''f \quad (3.3)$$

となっている。また、走行抵抗  $r$  は

$$r = (a + bv + cv^2)g \quad (3.4)$$

となっている。この時のゲイン  $a, b, c$  はモデルにした電車の種類や車両の数によって決定される。

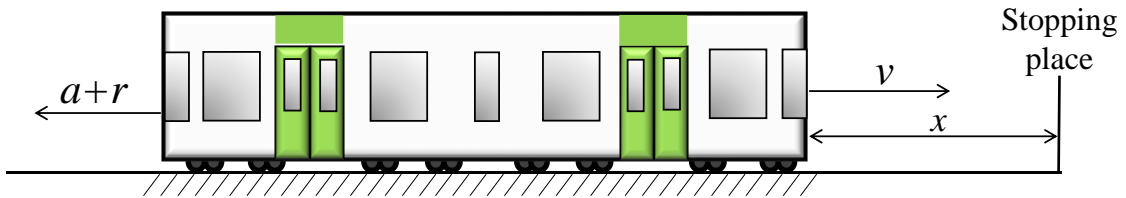


Fig.3.3 簡略化モデル

Table3.2 モデル内計算パラメータ

Deceleration force	$a[\text{m/s}^2]$
Running resistance	$r[\text{m/s}^2]$
Velocity	$v[\text{m/s}]$
Waste time	$L[\text{s}]$
Time constant	$T[\text{s}]$
Distance	$d[\text{m}]$
Input value of handle	$i[-]$
Force applied to handle	$f[\text{N}]$
Handle rotation	$\theta[\text{rad}]$
Acceleration of gravity	$g[\text{m/s}^2]$
Gain	$k, k', k'', a, b, c[-]$



## 3.2 車両停車シミュレータの概要

モデル化により電車の挙動が計算可能となる。よって、ブレーキハンドルの操作を反映した電車の挙動を表現、及び操作時の電車とハンドルのパラメータ収集が可能となった。そして、提案方式のブレーキハンドルによる停車操作データの収集し、入力方式切替判断モデルを構築するという目的のため、車両停車シミュレータを構築している。

### 3.2.1 車両停車シミュレータの構築

車両停車シミュレータは、Matlab/Simulink とリアルタイムウィンドウズターゲット (RTW) を用いて構築している。RTW は、Simulink モデルから実時間で、データ収集、外部デバイスへのデータ送信できる機能を付加するソフトウェアである。Fig.3.5 に実験用車両停車シミュレータのブロック線図を示す。また、入力方式切替自動化の場合のブロック線図は Fig.3.6 に示す。この図での  $i$  はハンドルレバーの入力値、 $Z$  はモデル式、 $p$  は出力確率であり、詳しくは第 4 章にて後述する。本研究では 10 両編成の在来線電車をモデルにシミュレーションを構築した。Table3.3 はシミュレーションで使用されたパラメータの数値を示す。

ここで、粘着係数  $\mu$  は電車の車輪とレールがスリップ現象を起こさない限界を示す値となっている。粘着係数  $\mu$  の計算式は

$$\mu = \frac{0.200}{1 + 0.0059v} \quad (3.5)$$

となっている。Fig.3.7 は、横軸が速度、縦軸が粘着係数  $\mu$  と重力加速度  $g$  を掛けた値となっており、それぞれの速度に対するスリップを起こさない限界の減速度を示している。この値とこれまでに掛かっていた減速力をシミュレーション内で比較し、低い値を選択することでスリップ現象を防いでいる。実際の電車においてもスリップ現象を防ぐためこういった制御がなされている。

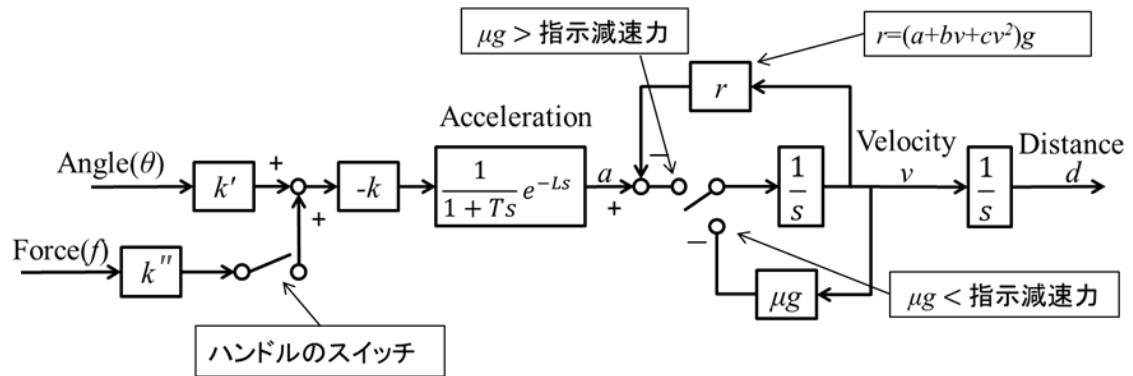


Fig.3.5 車両停車シミュレータのブロック図

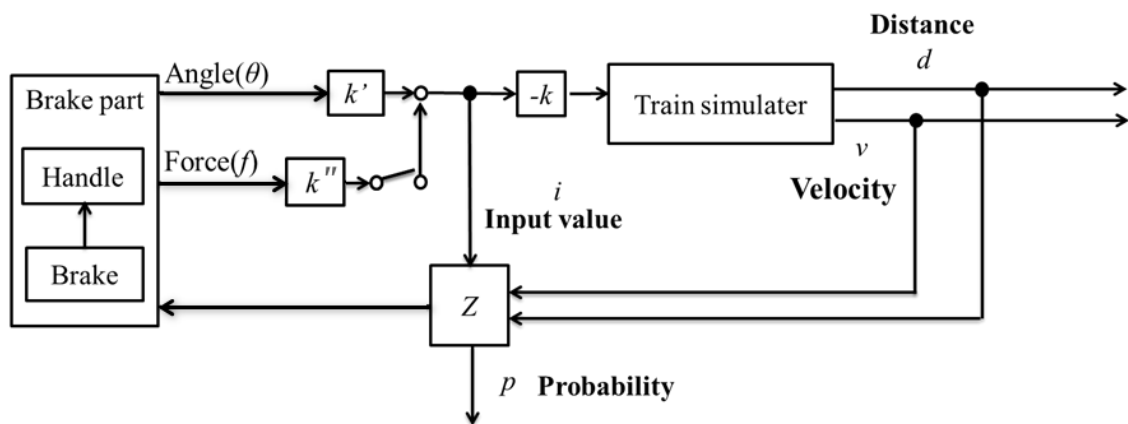


Fig.3.6 車両停車シミュレータのブロック図 (自動切替の場合)

Table3.3 モデル内計算パラメータ

Time Lag : $L$	0.2[s]
Time Delay : $T$	0.8[s]
Adhesive Coefficient : $\mu$	Measured Value [-]
Running Resistance : $r$	Measured Value [-]
Gain 1 : $k$	0.183[-]
Gain 2 : $k'$	1/65[-]
Gain 3 : $k''$	1.43[-]
Gain 4,5,6 : $a,b,c$	1.2,0.015,0.00024

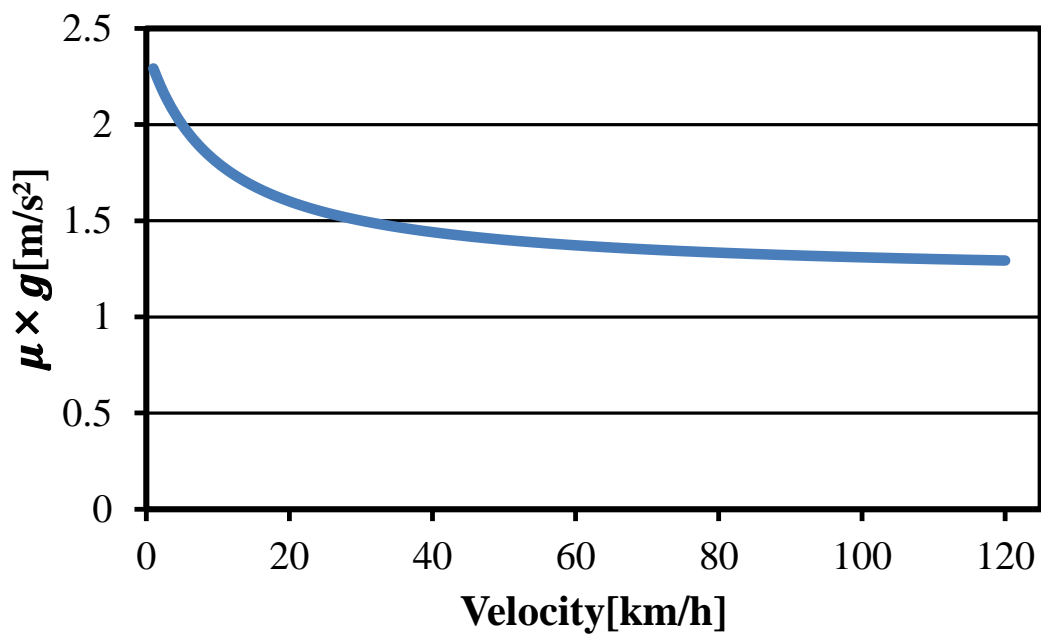


Fig.3.7 速度に対するスリップを起こさない限界の減速度

### 3.2.2 車両停車シミュレータの仕様

シミュレータでは、電車が初速 80km/h，停止目標位置の 500m 手前からスタートする初期条件である。500m という距離は、実在に在来線電車がブレーキをかけ始める距離を参考に設定した。Fig.3.8 にシミュレータの操作画面を示す。実験では、被験者はシミュレータの操作画面を見ながら電車の先頭が停車位置で停止するようにハンドルを操作する。画面右下には、電車の速度メーターを配置している。また、画面左側には躍度が最小になるように停車するための目安速度が表示されている。このシミュレータにより目標停止位置と電車先頭との距離、車両速度、ハンドルレバーによって与えられた入力値、入力方式切替のデータを収集する。

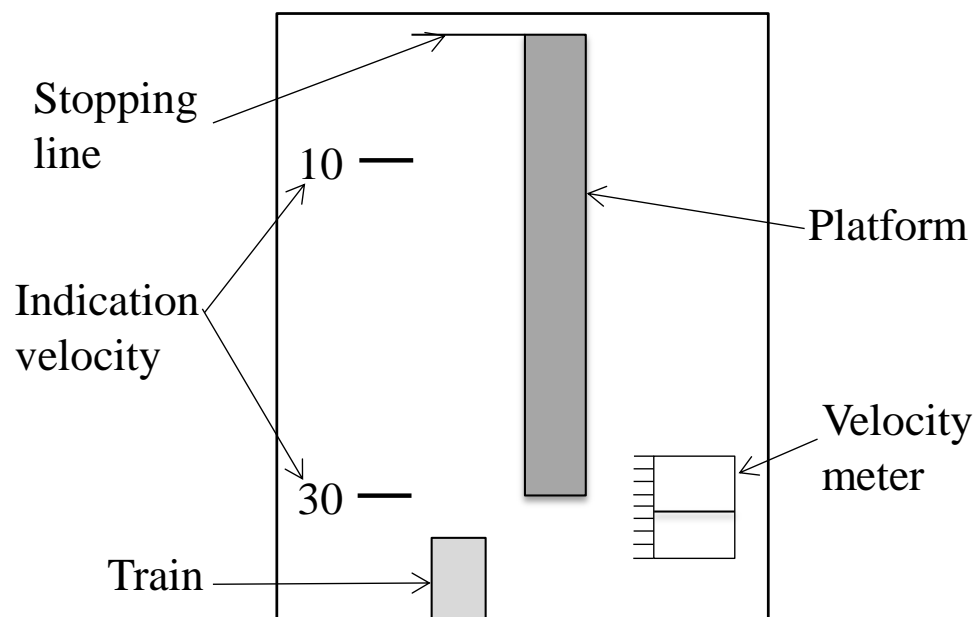


Fig.3.8 シミュレータ操作画面

# 第4章

## 入力方式切替判断モデルの同定

---

本章ではロジスティック回帰モデルを用いた入力方式切替判断モデルを同定する。4.1節ではロジスティック回帰モデルの概要について述べる。4.2節では入力方式切替判断モデルを同定するために用いる変数や式を説明する。4.3節ではモデル同定に使用する停車操作データを収集する。4.4節では収集した停車操作データを基に、入力方式切替判断モデルを同定する。

### 4.1 ロジスティック回帰モデルの概要

#### 4.1.1 ロジスティック回帰モデルの概要

人間の行動判断は、ある物事を「行う」「行わない」の確率的なばらつきを伴う2値変数で表現できると考えられる。このため、入力方式切替行動の判断も同様に考えられ、結果変数が2値であり、確率的なモデル化が可能なロジスティック回帰モデルを使用する。ロジスティック回帰モデルは主に疫学分野において幅広く利用されているモデルであり、2値の結果変数の起こる確率（例えばある病気である、病気でないなど）を連続変数である説明変数（体温、咳の有無、腹痛の有無）を用いてモデル化し、結果変数の起こる確率を求めることができる。したがって、ロジスティック回帰モデルはある条件下における結果変数の発生する確率を算出することに適したモデルであると考えられる。本研究では、このロジスティック回帰モデルを利用して、運転士の入力方式切替判断モデルを同定する。ロジスティック回帰モデルを利用することで運転士の入力方式の切り替えの判断のモデル化に用いる。

ロジスティック回帰モデルは一般に、ある現象の発生する確率  $p$  を、その現象の発生要因となる変数群（説明変数） $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  で説明しようとする場合、説明変数という状態のもとで現象が発生するという条件付き確率  $p(x)$ （結果変数）で表し、これを

$$p(x) = P_m\{\text{Occurrence} \mid x_1, x_2, \dots, x_m\} \quad (4.1)$$

とし、さらに式 (4.1) を

$$p(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (4.2)$$

という関数  $F$  を用いて表す。ここで、 $n$  個の変数の影響を線形な合成関数  $Z$  (ロジット) を使用して表すと

$$Z = \eta_0 + \eta_1 x_1 + \dots + \eta_m x_m. \quad (4.3)$$

となる。このロジット  $Z$  を関数  $F$  に代入し

$$p(x) = F(Z) = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)} \quad (4.4)$$

としたモデルがロジスティック回帰モデルである。式 (4.4) に式 (4.3) の計算結果を代入することにより、その条件の下での現象の確率を算出することができる。また、式 (4.4) を  $-10$  から  $10$  までの範囲で変動する説明変数のロジット  $Z$  を横軸に、 $0$  から  $1$  までの範囲で値を持つ確率  $p$  を縦軸にとりグラフ化すると Fig.4.1 のようになる。横軸のロジットが正の値の時、確率は  $0.5$  よりも大きくなり、ロジットが負の値の時には確率が  $0.5$  よりも小さくなる。ロジスティック回帰モデルは出力確率  $0.5$  を境界として、ロジスティック回帰モデルによる出力確率が  $0.5$  以上ならば「ある現象が発生する」、 $0.5$  未満ならば「ある現象が発生しない」と決定される。

#### 4.1.2 入力方式切替判断モデルとしての利用

ロジスティック回帰モデルを利用した行動判断モデルとして、ロジスティック回帰モデルによる結果変数を「ある行動を判断する」「ある行動を判断しない」とする。本研究では、これを入力方式切替判断モデルに適用し、結果変数を「入力方式切替をした」「入力方式切替をしていない」とする。入力方式切替動作を行う場合は提案ハンドルのスイッチを押す必要があるが、この動作は余程の状況でなければ、運転士がハンドルレバーの動かす途中に行うことはない。このことから、運転士が切替行動を判断したとシステムが判断する条件を「ロジスティック回帰モデルによる出力確率が閾値を超えており、運転士がハンドルレバーを動かしていないとき」とする。

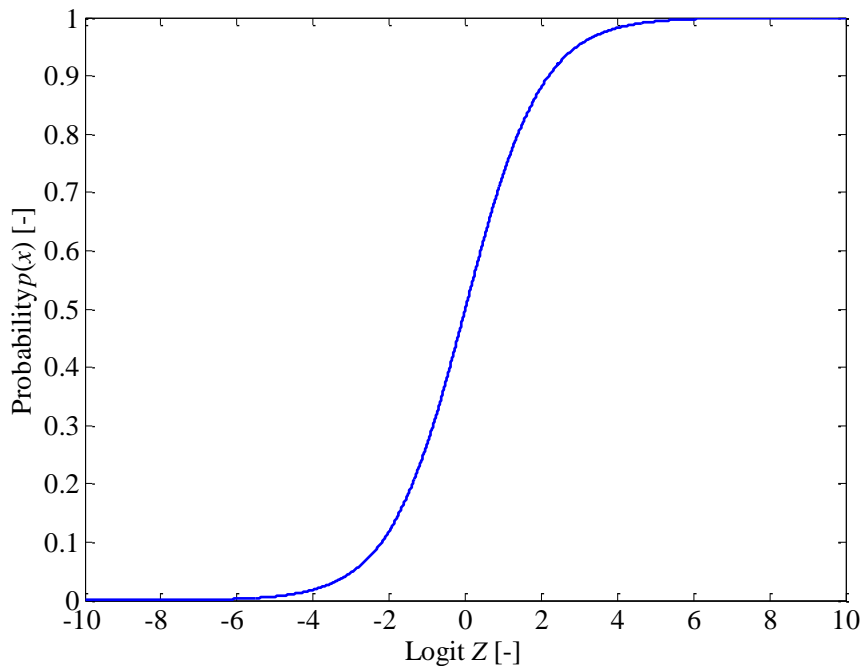


Fig.4.1 Logistic curve

## 4.2 各変数定義

### 4.2.1 実験に関する変数の定義

入力方式切替判断モデルを同定するにあたり, レバーの入力値, 停止位置までの距離, 車両の速度を定義する.

レバーの入力値  $i$  [-]は, 操作したハンドルレバーの角度にゲインを乗算したものである. 停止位置までの距離  $d$  [m]は, シミュレーション上で車両がスタート時の位置を-500m, 目標停止位置を 0m とする停止したときの車両先頭と目標停止位置との距離を示す. 車両速度  $v$  [km/h]はシミュレーションスタート時に 80 km/h とし, 速度は減速していく. 車両速度が 0 km/h となった時点で実験終了とする. 再度, Table4.1 に各種パラメータを定義する.

Table4.1 各種パラメータ

停止位置までの距離	$d$ [m]
車両速度	$v$ [km/h]
ハンドルの入力値	$i$ [-]

#### 4.2.2 切替判断の定義

「被験者が入力方式切替を判断したタイミング」をどのように定めるか説明する。被験者が入力方式切替を行うためには、必ず提案ハンドルのスイッチを押す必要がある。実験においてスイッチを押すタイミングは被験者が車両の速度が低速域に入ったと認識し、目標停止位置に停止するための微調整をする前にスイッチを押す。人によって判断のタイミングは違うが「提案ハンドルのスイッチを押すタイミング」を被験者が入力方式切替行動を判断したタイミングとする。

#### 4.2.3 結果変数と説明変数の定義

本入力方式切替判断モデルを同定するための、ロジスティック回帰モデルに用いる説明変数と結果変数を以下に示す。

・ 結果変数  $y_i$

$y_i = 1$  : 切替を判断した

$y_i = 0$  : 切替を判断していない

・ 説明変数  $x_i$

$d$  : 停止位置までの距離

$v$  : 車両速度

$i$  : レバーの入力値

上記のような説明変数を使用するため、これらを合わせると以下ようになる。

$$x_i = (d, v, i) \quad (4.5)$$

したがって、ロジスティック回帰モデルの確率算出式は式 (4.4) より次式のように定義する。

$$p(x_i) = \frac{\exp(Z_i)}{1 + \exp(Z_i)} \quad (4.6)$$

ここで、ロジット  $Z$  は

$$Z_i = \eta_0 + \eta_1 d + \eta_2 v + \eta_3 i \quad (4.7)$$

であり、式 (4.7) が本研究の入力方式切替判断モデル式となる。



## 4.3 停車操作データ収集実験

### 4.3.1 停車操作データ取得実験条件

停車操作データ取得実験では、被験者が入力方式切替を判断する時点に着目する。第2章で述べた提案ハンドルを用いて、入力方式切替判断モデルを同定するために用いる停車操作データを40回分取得する。停車操作データ取得実験は実験中、任意のタイミングで角度入力方式から力入力方式に切り替えられる状態で実験を行った。被験者は本停車実験を経験し、目標停止位置から1.5m以内に10回中7回以上止まれるまで習熟した年齢20代で右利きの大学生8名で行った。被験者は操作画面を見ながら、シミュレーション内の電車の先頭が停止位置で止まるようにブレーキハンドルを操作する。その間、電車の速度メーターと操作画面左側に表示されている目安の速度を参考に操作を行う。初期条件として電車の先頭から停止位置までの距離が500m、電車の速度が80km/hの状態ではシミュレーションが開始される。

### 4.3.2 モデルに用いる被験者の選別

モデル構築の際に特異な操作傾向を持つ被験者のデータを使用すると上手くモデルの構築ができない可能性が高いため被験者の選別を行う。被験者の選別は階層的クラスタ解析を用いる手法によって行う。階層的手法では階層的にクラスタの結合が行われ、デンドログラムよりその結合距離を得ることができるため、それぞれの被験者の類似度を検討することができる。本研究では、クラスタ間距離として各データの点間のEuclid距離を用いた凝集型のクラスタ解析を用いる。距離としてEuclid距離を用いるため、各情報に対し重み付けが一定となるようにデータは正規化する。

入力方式切替の判断は主に停止位置までの距離と車両速度から行っていると考えられるので、モデル構築に用いる被験者を決定するために、切り替えを判断した時点での速度で目標停止位置に到達するまでの時間(以下TTS[sec])に着目する。このTTSは停止位置までの距離 $d$ [m]と車両速度 $v$ [m/s]から以下の式で表される。

$$TTS = d / v \quad (4.8)$$

被験者ごとの平均TTSとその分散をTable 4.2に示す。正規化した被験者ごとの平均TTSとその分散のEuclid距離を用いてクラスタ解析を行う。凝集型クラスタ解析ではその凝集法としてWard法を用いる。被験者ごとの入力方式切替の判断をデンドログラムに基づいて区分する。クラスタ解析を用いて得られたデンドログラムをFig.4.2に示す。

デンドログラムの横軸には各被験者を示している。縦軸はそれらクラスタが結合され

る際の平方距離を示している。デンドログラムでは、ある分岐から次の分岐までの縦軸座標が離れているほど類似度の低いクラスタがまとめられていることになり、逆に近づいているほど類似度の高いデータがまとめられていることを示す。図を見ると、クラスタ数が2個に結合する箇所から1個に結合する箇所の距離の差は3個から2個に結合する場合の結合距離より大きくなっており、また3個となる分岐より下では左側5名に比べて右側3名のクラスタ同士の結合距離が大きいため、左側の被験者5名の実験データを用いてモデルを構築する。

Table 4.2 被験者ごとの TTS 平均と分散

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
TTS平均[s]	3.79	8.13	3.70	3.92	4.08	3.95	4.39	4.97
TTS分散	0.56	1.17	0.30	0.20	1.31	0.18	0.25	1.55

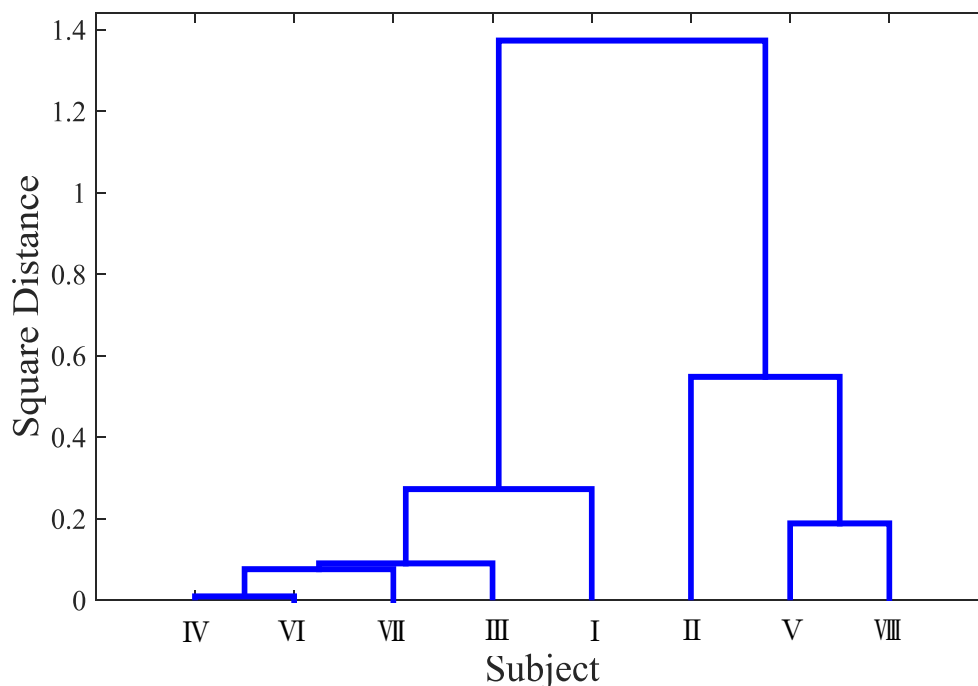


Fig.4.2 デンドログラム

### 4.3.3 入力方式切替判断データの取得

収集した実験データから、入力方式切替判断モデルを同定するためのデータを抽出する。ロジスティック回帰モデルに用いるデータのうち、説明変数は実験データをそのまま用いれば良い。しかし、結果変数は入力方式切替を判断した、または判断していないを表わす値が実験データの中に表されているわけではない。そのため、実験データから入力方式切替を判断した、または判断していない場合を見分ける必要がある。そこで、4.2.2 項で定義した入力方式切替判断の定義に基づき、提案ハンドルのスイッチを押すときを  $y_i = 1$ 、入力方式切替を判断した時点から 1 秒前を  $y_i = 0$  とする。入力方式切替判断を行ったタイミングの停止位置までの距離、車両速度、レバーの入力値のデータを抽出し、モデルの同定に利用する。

実験で得られたデータの例を Fig.4.3 に示す。それぞれのグラフの示すものは上からレバーの入力値[-]、停止位置までの距離[m]、車両速度[km/h]であり横軸は実験開始からの時間である。縦の青い破線は被験者が切り替えを判断したタイミング  $y_i=1$  であり、赤い破線はその 1 秒前  $y_i=0$  である。このような 40 回分の実験データから結果変数を抽出していくことで入力方式切替判断モデル同定用データを作成する。

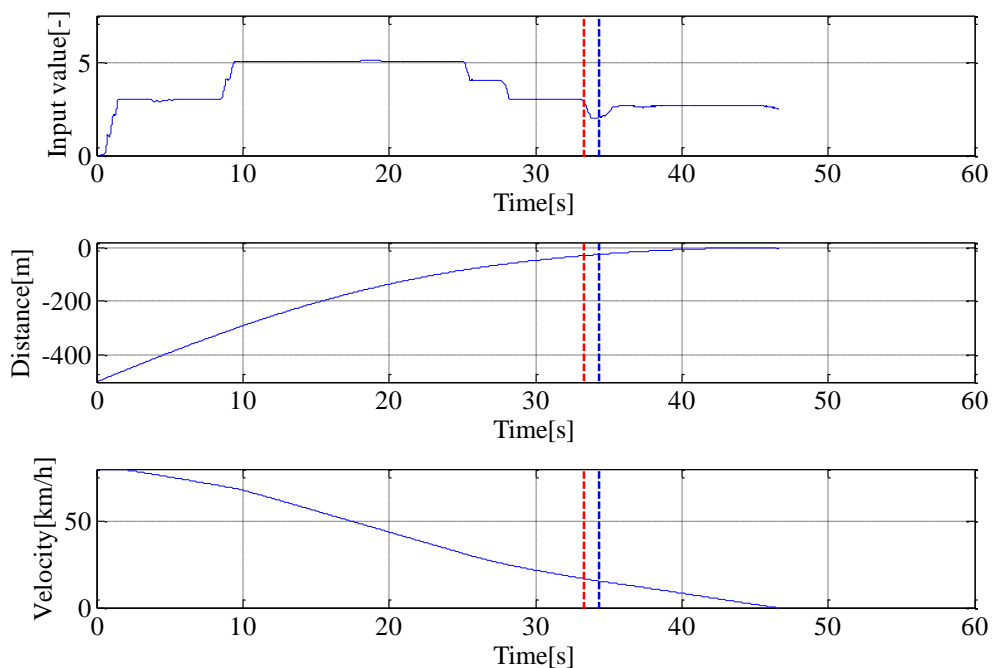


Fig.4.3 実験データ例

## 4.4 入力方式切替判断モデルの同定

### 4.4.1 入力方式切替判断モデル

5名の被験者から収集し抽出した実験データを基に、ロジスティック回帰モデルを同定する。データ収集実験40回分から、被験者は入力方式切替を判断したとするデータと入力方式切替を判断しなかったとするデータを各2点ずつ、合計で80点のデータを抽出する。被験者が5名のため、総計400点の実験データからモデルを同定する。モデル同定には最尤法が用いられ、入力方式切替を判断した、または判断していないデータ群から推定される。同定した入力方式切替判断モデルは以下の式(4.9)のようになり、これを式(4.6)に代入することにより確率の算出が可能となる。

$$Z = 0.5064 + 0.3224d + 0.0133v + 3.4426i \quad (4.9)$$

以下、5名の被験者から同定された式(4.9)のモデルを、共通モデルと呼ぶ。

次にこのモデルでどのような特性を持つかを確認するために確率等高線図を説明する。

### 4.4.2 確率等高線図の説明

ロジット  $Z$  に用いている独立変数(停止位置までの距離、車両速度、レバーの入力値)と従属変数(ロジスティック回帰モデルにより出力される確率)を3次元グラフに表すと、Fig. 4.4に示すグラフとなる。なお、3次元グラフを描くにあたり、3独立変数と1従属変数のものを1つのグラフにプロットするのは不可能であるため、レバーの入力値は2とした。このグラフはDistance[m]が(-40~0)、Velocity[km/s]が(0~40)の値を取るときに、共通モデルの出力確率がどのように変化するかを表したグラフである。図中の青いマルと赤いバツは、共通モデルを同定するに際して使用した走行データである。青マルは被験者が入力方式切替を判断した点であり、赤バツは被験者が入力方式切替を判断していない点、つまり青マルから1秒前の点である。出力確率が高い領域ほど、被験者が入力方式切替を判断する点が増えているのが見て取れる。本研究では、このグラフを見やすくするために、 $Z$ 軸から見下ろしたものを確率等高線図と呼ぶ。

Fig. 4.5にFig. 4.4を $Z$ 軸から見下ろした確率等高線図を示す。 $x$ 軸は停止位置までの距離、 $y$ 軸は車両速度を表す。図中の緑の実線はロジスティック回帰モデルにより出力される共通モデルの確率0.1、0.5、0.9の判断線である。

Fig. 4.5を見ると同定された共通モデルは車両速度が速ければ停止位置から遠く、車両速度が遅ければ停止位置から近い位置で入力方式の切り替えを判断するモデルとなっていることがわかる。

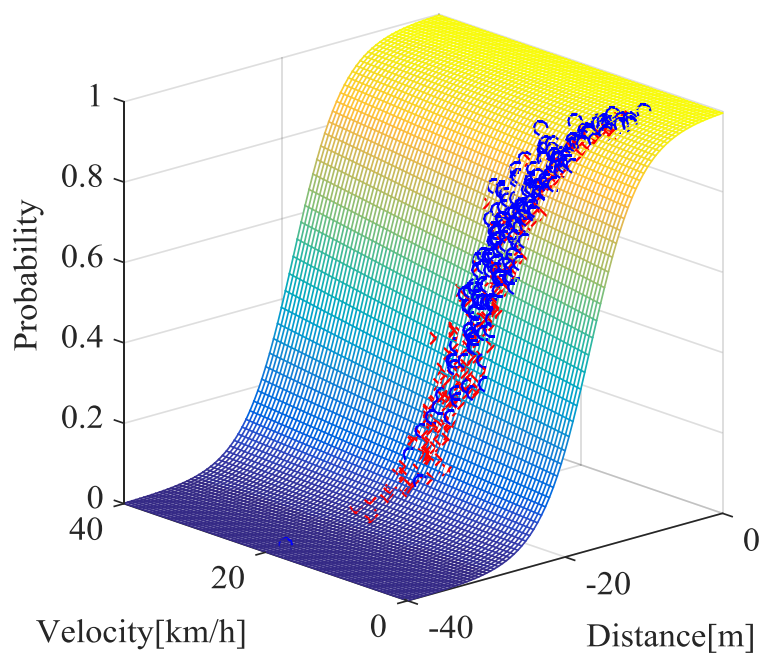


Fig.4.4 3次元プロット

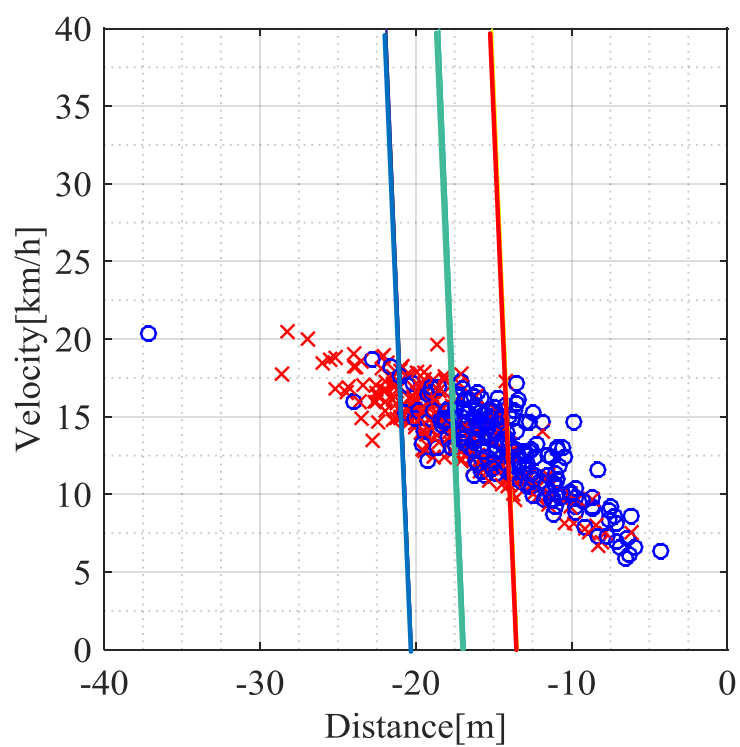


Fig.4.5 確率等高線図

## 第5章

# 自動切り替えモデルの学習効果検証

---

研究目的である自動切り替え方式を経験することで、手動切り替え方式で学習するよりも早く学習できるかをシミュレータを使用して実験することで検証する。5.1 節では実験方法について述べる。5.2 節では実験結果を述べる。5.3 節では学習効果の検証方法について説明する。5.4 節では実験で得られたデータから実際に学習効果があったのか考察する。なお、この章における手動切り替えとは同定モデルを実装せず任意のタイミングで入力方式を切り替えられる方式、自動切り換え方式とは同定したモデルを実装した方式をそれぞれ指す。

### 5.1 実験方法

18 人の被験者を 9 人ずつ、2 つのグループに分けて実験を行う。Group 1 は初め手動切り替え方式の実験を 5 回行い、以下自動切り替え方式と手動切り替えを交互に 5 回ずつ行い、最後は手動切り替え方式の実験を行い、計 45 回実験を行う。Group 2 は手動切り替え実験だけを 45 回行うグループである。それぞれ、Group 1 の被験者は A~I、グループ 2 の被験者は J~R である。なお、被験者全員が電車の停止操作経験がない年齢 20 代の大学生である。実験装置は第 3 章で述べた車両停車シミュレータを用いる。実験条件は 4.3.1 節同様、被験者は操作画面を見ながら列車の先頭が停車位置で停止するようにハンドルを操作し、速度メーターを見ながら、操作画面に現れる指示速度を目安に操作するように指示する。5.3 節では、Group 1 の自動切り換え方式の実験後であり、両グループ共通の手動切り替えの実験回数 11~15, 21~25, 31~35, 41~45 の停車位置よりモデルの学習効果の検証を行う。

### 5.2 実験結果

各グループの実験結果を示す。Fig5.1~Fig5.9 は Group 1, Fig5.10~Fig5.18 は Group 2 の実験回数を表す。図の横軸は実験回数、縦軸は停車位置までの距離の絶対値を表す。青線は手動切り替え実験の結果、赤線は自動切換えの結果を表している。また、緑線は標停車位置からの停車距離までの位置の絶対値に対する近似曲線である。

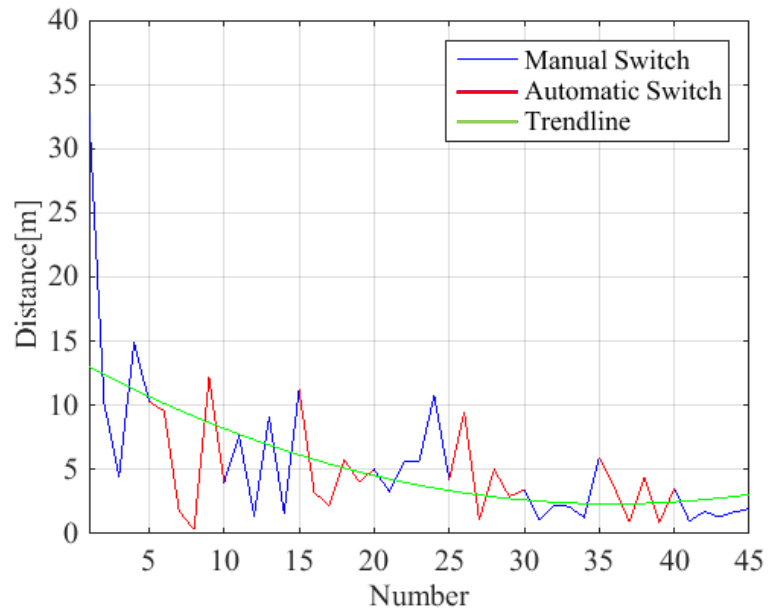


Fig5.1 グループ 1 被験者 A の停止距離

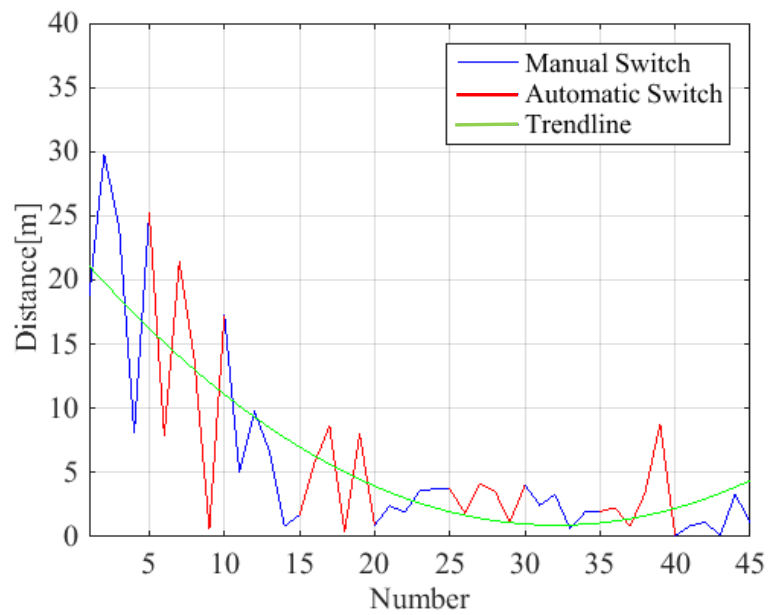


Fig5.2 グループ 1 被験者 B の停止距離

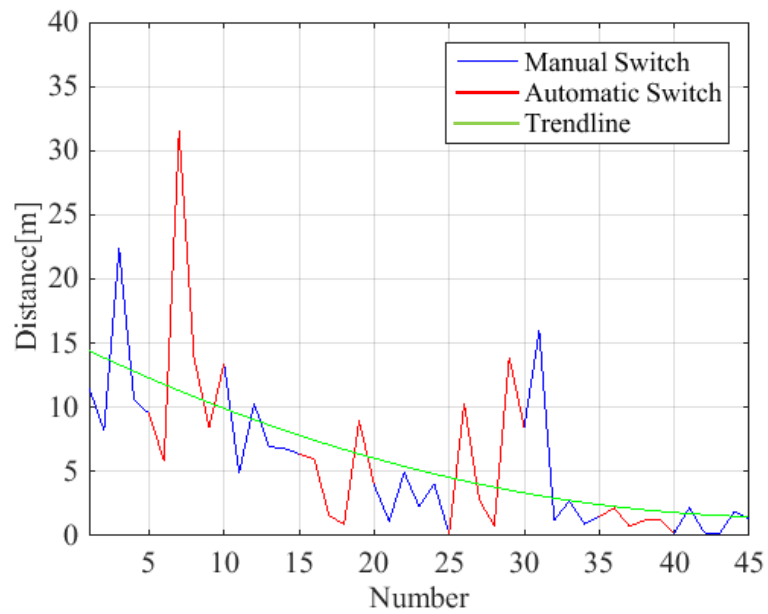


Fig5.3 グループ 1 被験者 C の停止距離

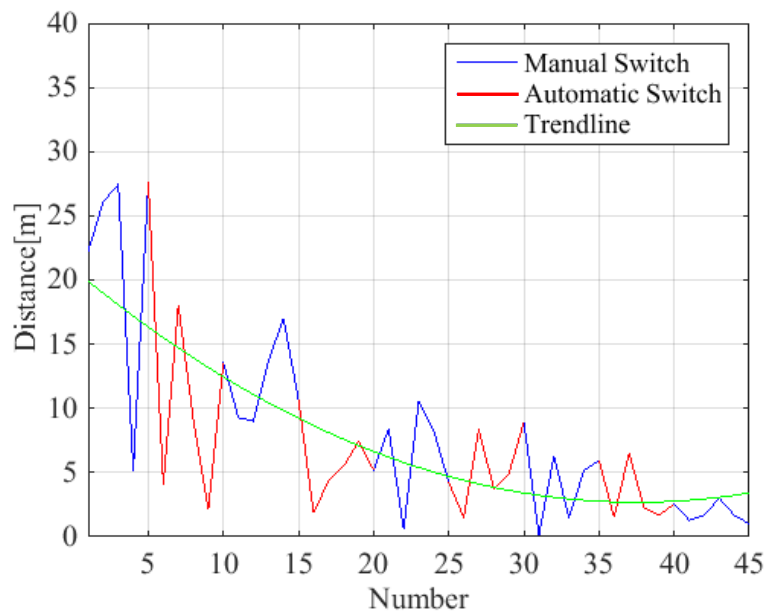


Fig5.4 グループ 1 被験者 D の停止距離



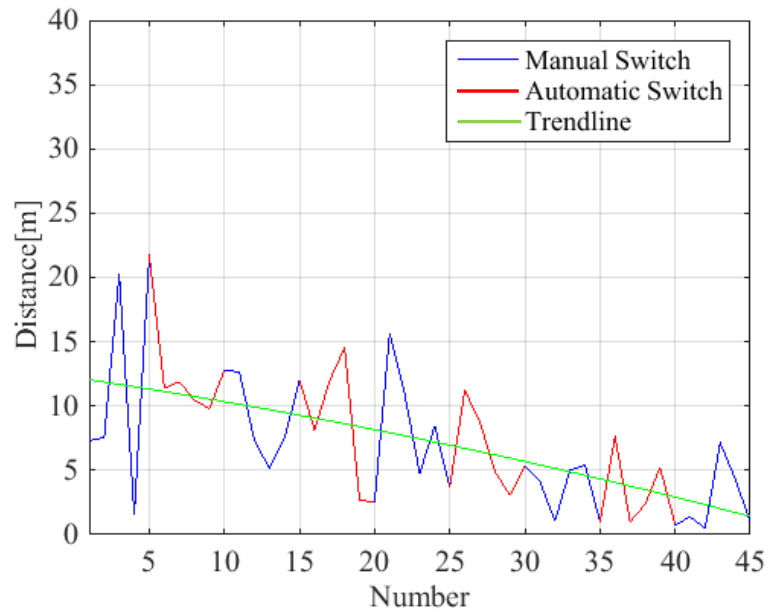


Fig5.5 グループ1 被験者 E の停止距離

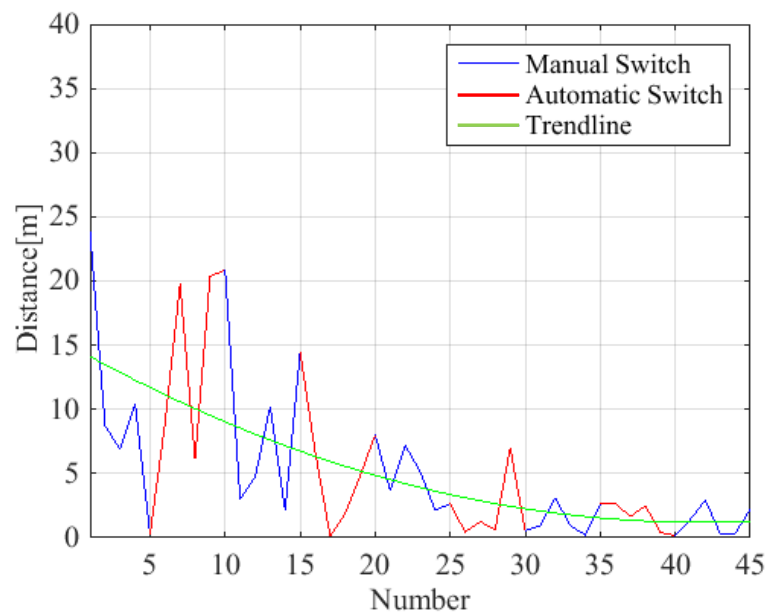


Fig5.6 グループ1 被験者 F の停止距離

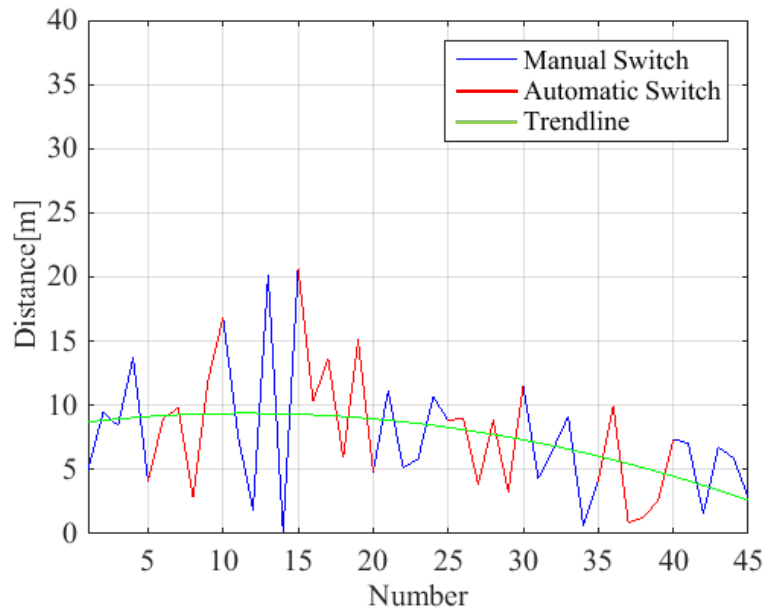


Fig5.7 グループ 1 被験者 G の停止距離

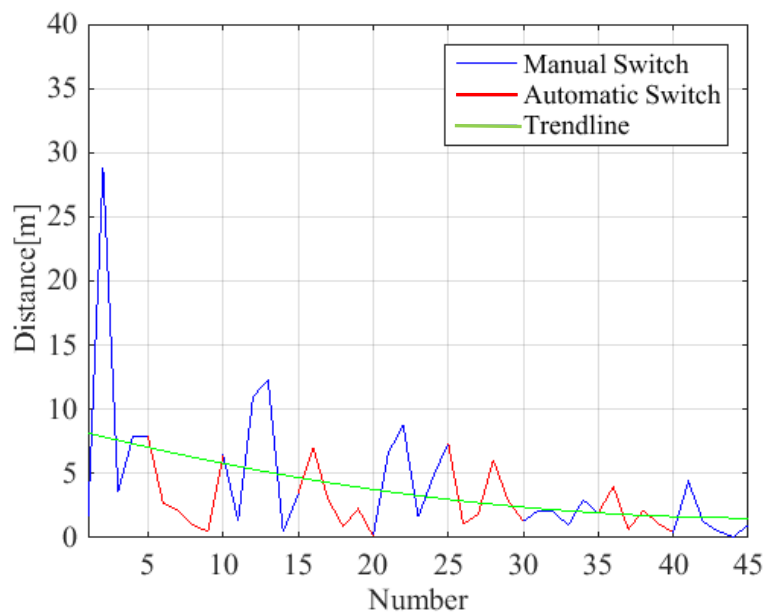


Fig5.8 グループ 1 被験者 H の停止距離

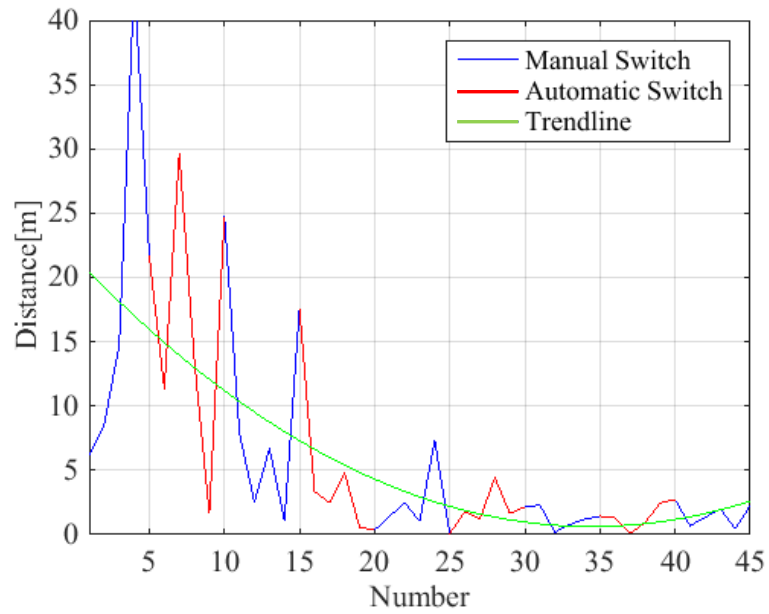


Fig5.9 グループ 1 被験者 I の停止距離

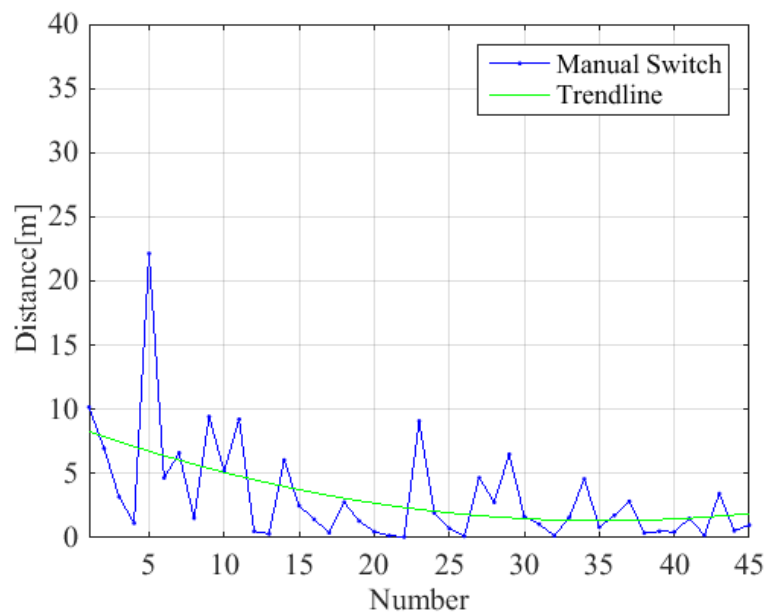


Fig5.10 グループ 2 被験者 J の停止距離

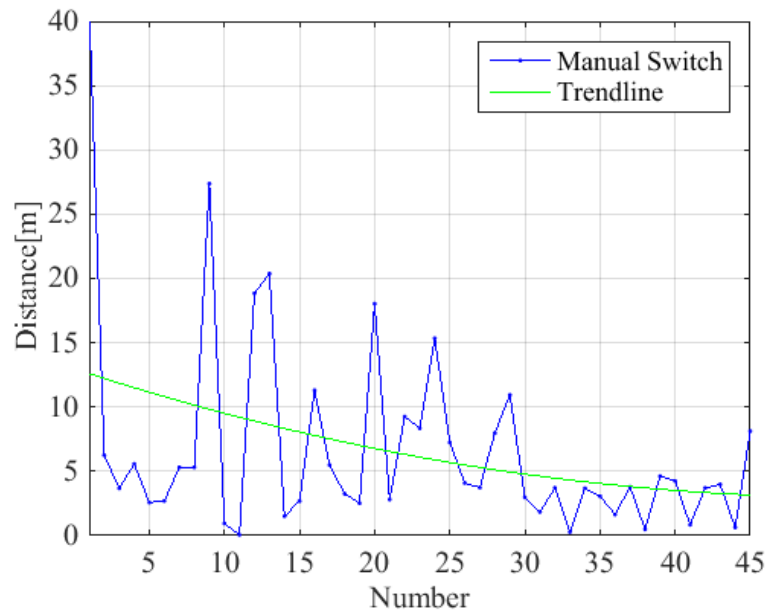


Fig5.11 グループ2 被験者 K の停止距離

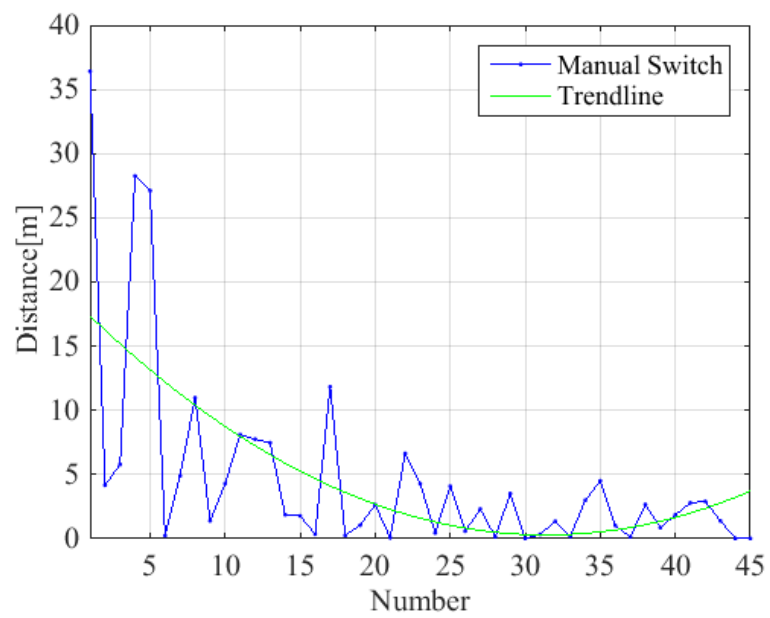


Fig5.12 グループ2 被験者 L の停止距離

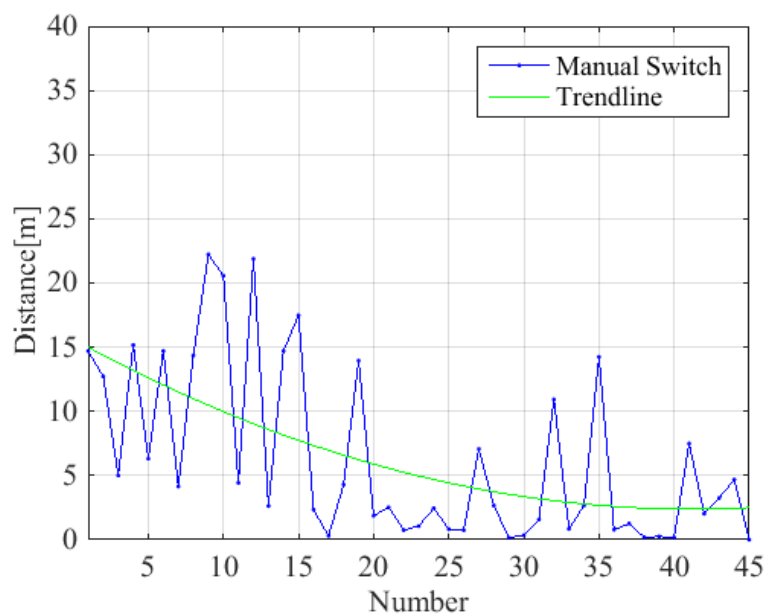


Fig5.13 グループ 2 被験者 M の停止距離

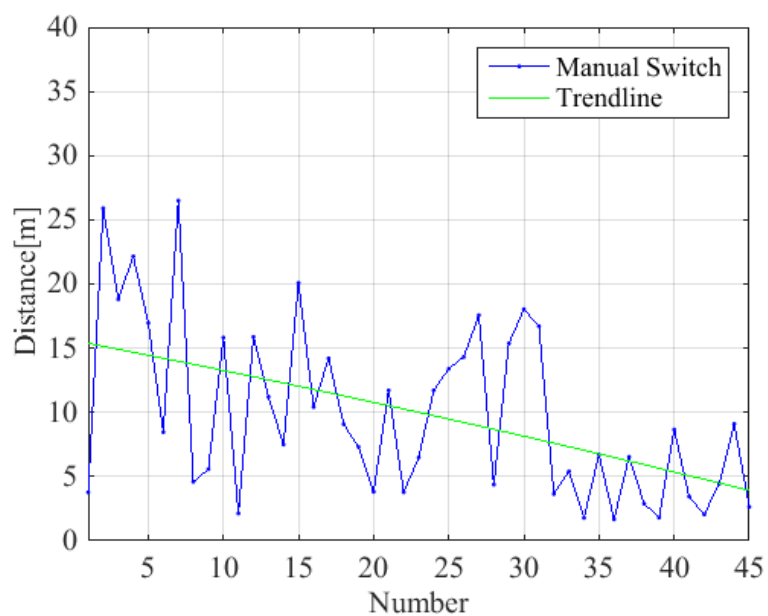


Fig5.14 グループ 2 被験者 N の停止距離

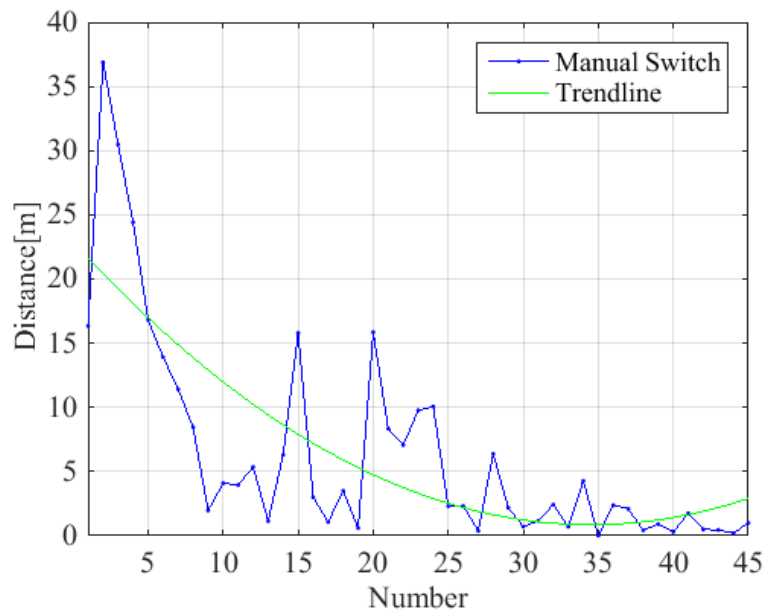


Fig5.15 グループ2 被験者 O の停止距離

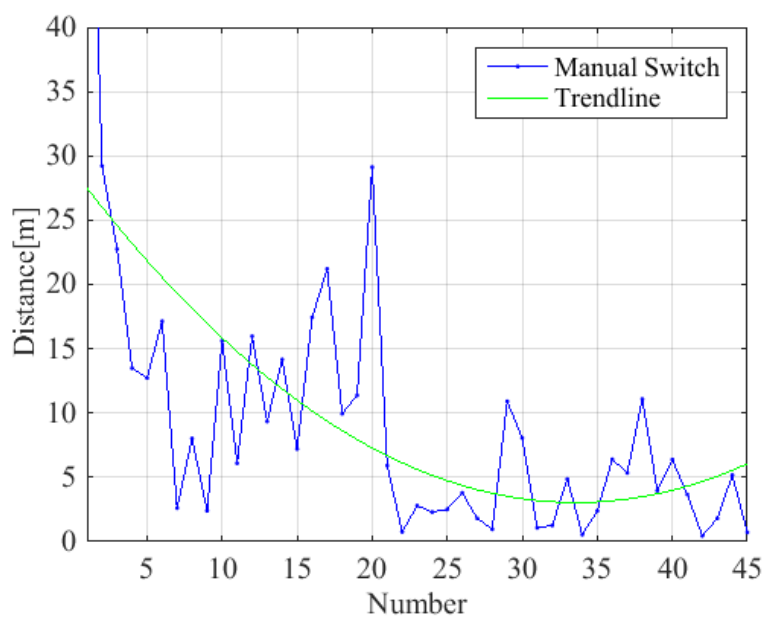


Fig5.16 グループ2 被験者 P の停止距離

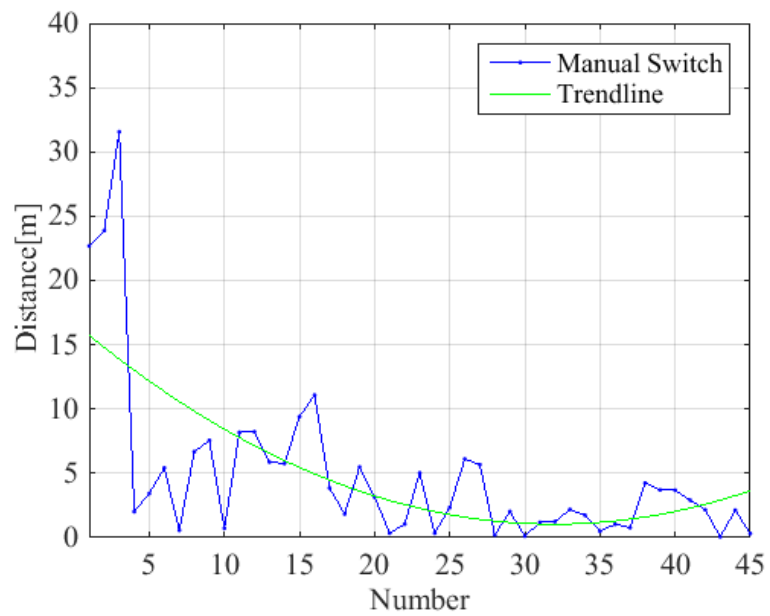


Fig5.17 グループ2 被験者 Q の停止距離

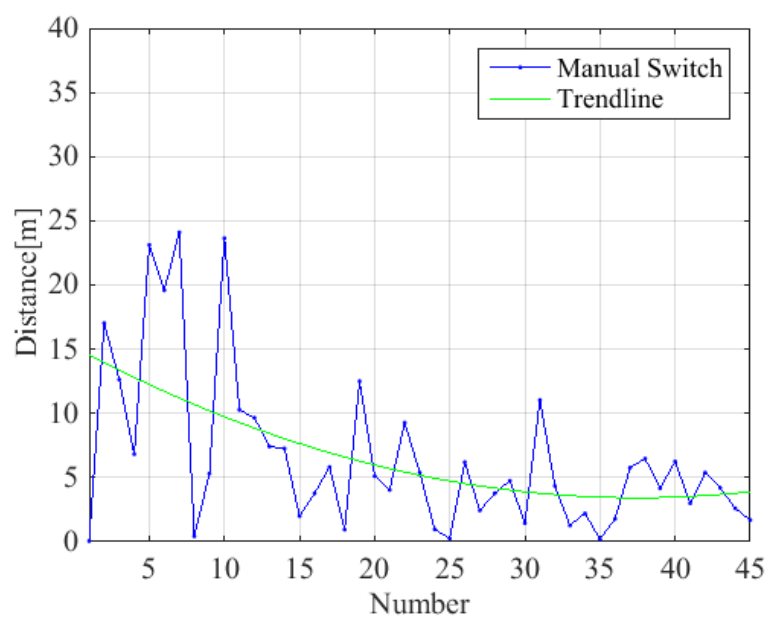


Fig5.18 グループ2 被験者 R の停止距離

### 5.3 学習効果の検証方法

グループ1の自動切り換え方式の実験後であり、両グループ共通の手動切り替え方式の実験回数11~15, 21~25, 31~35, 41~45のデータよりモデルの学習効果の検証を行う。

#### 5.3.1 被験者の停止距離誤差の平均と標準偏差

各被験者の停止距離誤差の平均と標準偏差の実験回数推移を Fig.5.19, Fig.5.20 に示す。Fig.5.19 は Group 1, Fig.5.20 は Group 2 である。グラフ縦軸が示すものは停止位置までの距離であり、横軸は被験者である。青色の棒グラフは実験回数 11~15 回の停止位置までの距離の絶対値の平均と標準偏差を示す。橙色の棒グラフは 21~25 回, 灰色の棒グラフは 31~35 回, 黄色の棒グラフは 41~45 回の同様の値を示す。両グループのほぼ全被験者は図より停止距離の絶対値の平均と標準偏差は実験回数を重ねるごとに少なくなっていることが確認できる。Fig.5.21 は両グループの停止距離誤差の平均と標準偏差の実験回数の推移を示す。青色の棒グラフは Group1, 赤色の棒グラフは Group2 の各グループ全被験者の停止距離誤差の平均と標準偏差の実験回数推移を示す。両グループともに停止距離の絶対値の平均と標準偏差は実験回数を重ねるごとに少なくなっているが、実験回数間 11~15, 21~25 のでは両グループにほとんど差は確認できない。しかし、実験回数間 31~35, 41~45 では明らかに Group1 のほうが停止位置の付近で停止している。

Table5.1 は実験回数 11~15, 21~25, 31~35, 41~45 の停止距離に対する各実験手法の t 検定を、区間を変えて行った結果を示す。実験回数を重ねるたびに有意確率は下がっていき、実験回数 41~45 で両手法の有意差（有意確率 5% 以下）を確認した。

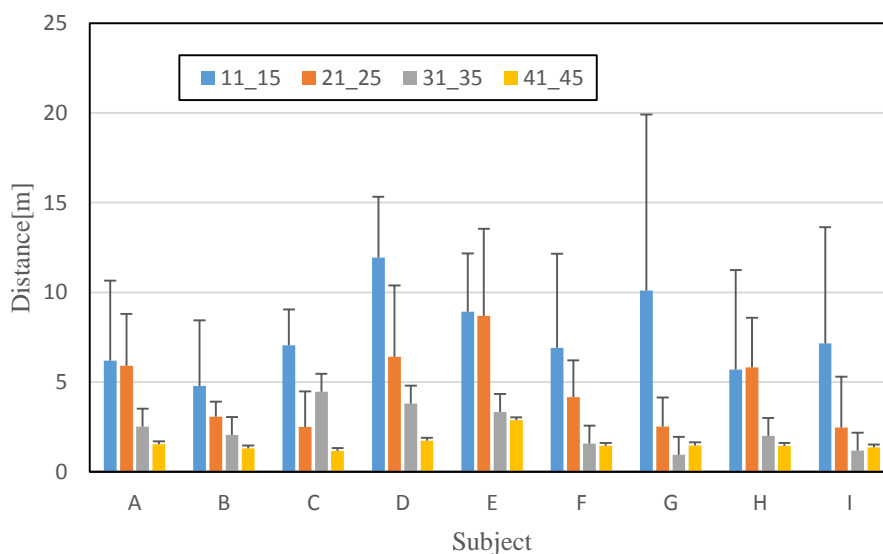


Fig.5.19 Group 1 の停止距離誤差の平均と標準偏差の実験回数推移



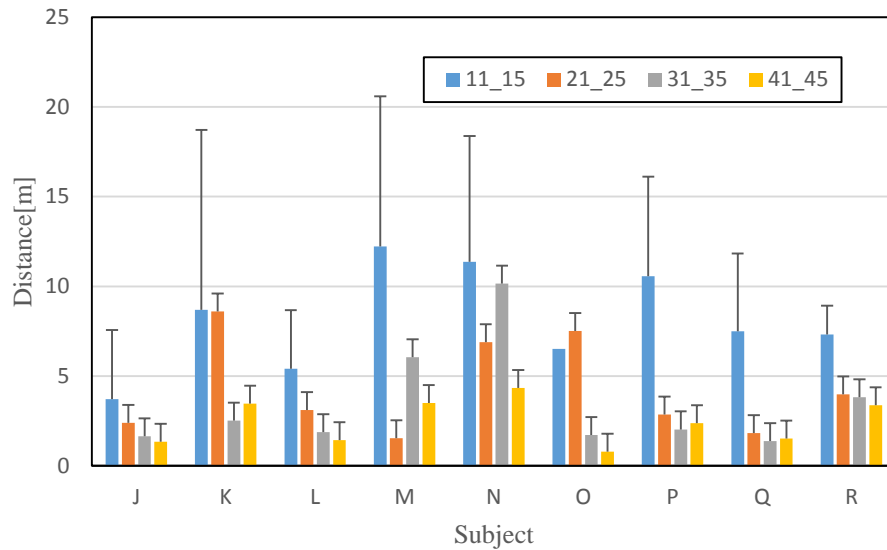


Fig.5.20 Group 2 の停止距離誤差の平均と標準偏差の実験回数推移

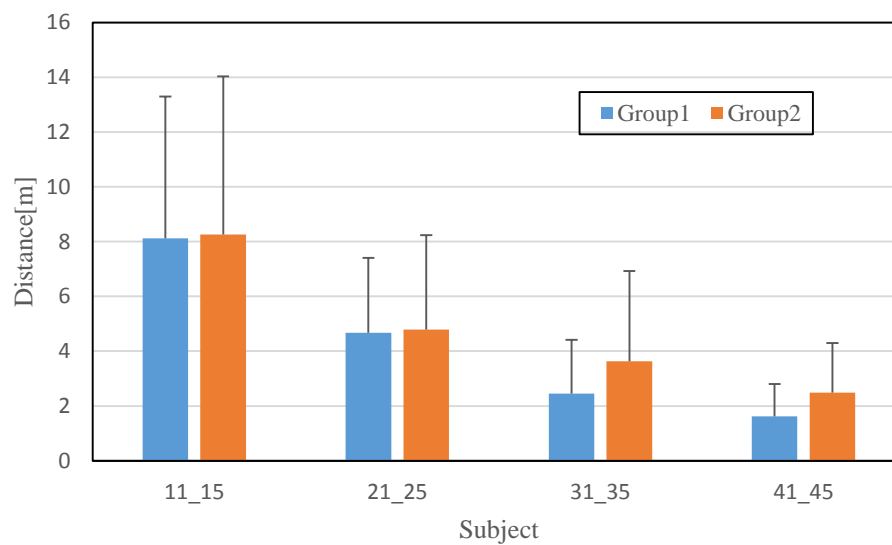


Fig.5.21 両グループの停止距離誤差の平均と標準偏差の実験回数推移

Table.5.1 両グループの停止距離誤差の t 検定結果

	実験回数			
	11~15	21~25	31~35	41~45
有意確率	0.882	0.532	0.216	0.032

### 5.3.2 被験者の入力方式切り替え時における停止距離平均と標準偏差

各被験者の入力方式切り替え時における停止距離平均と標準偏差の実験回数推移を Fig.5.22, Fig.5.23 に示す。Fig.5.22 は Group1, Fig.5.23 は Group2 である。グラフ縦軸が示すものは目標停止位置までの距離であり、横軸は被験者である。青色の棒グラフは実験回数 11~15 回の入力方式切り替え時における停止位置までの距離の絶対値の平均と標準偏差を示す。橙色の棒グラフは 21~25 回、灰色の棒グラフは 31~35 回、黄色の棒グラフは 41~45 回の同様の値を示す。

Fig.5.24 は両グループの入力方式切り替え時における停止距離誤差平均と標準偏差を示す。青色の棒グラフは Group1, 赤色の棒グラフは Group2 の各グループ全被験者の停止距離の平均と標準偏差の実験回数推移を示す。図より、入力切替判断を目標停止距離までの距離が 11~15, 21~25 回までは Group1 の方が Group2 より遠い位置で行っているが、31~35, 41~45 回では Group1 の方が Group2 より近い位置で行っている。標準偏差は、11~15, 21~25 回までは Group1 の方が Group2 よりわずかに大きいですが、31~35, 41~45 回では Group1 の方が Group2 より小さくなっている。

入力切替はいかに判断時の距離のばらつきが少なく同じ判断しているかが重要である。よって、入力方式切り替え時における停止距離の F 検定を行う。Table5.2 は実験回数 11~15, 21~25, 31~35, 41~45 の停止距離にの標準偏差に対する各実験手法の F 検定を、区間を変えて行った結果を示す。実験回数 31~35, 41~45 で両グループの有意差を確認した。

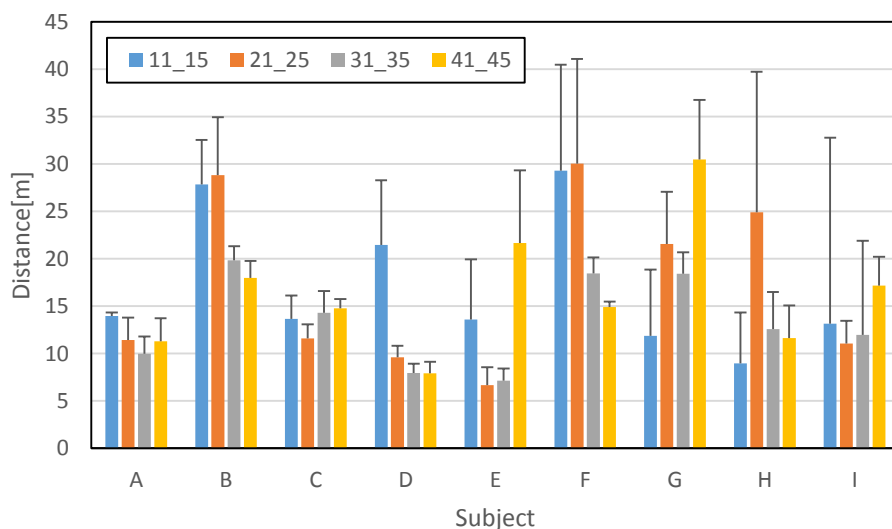


Fig.5.22

Group 1 の入力方式切り替え時における停止位置までの距離平均と標準偏差

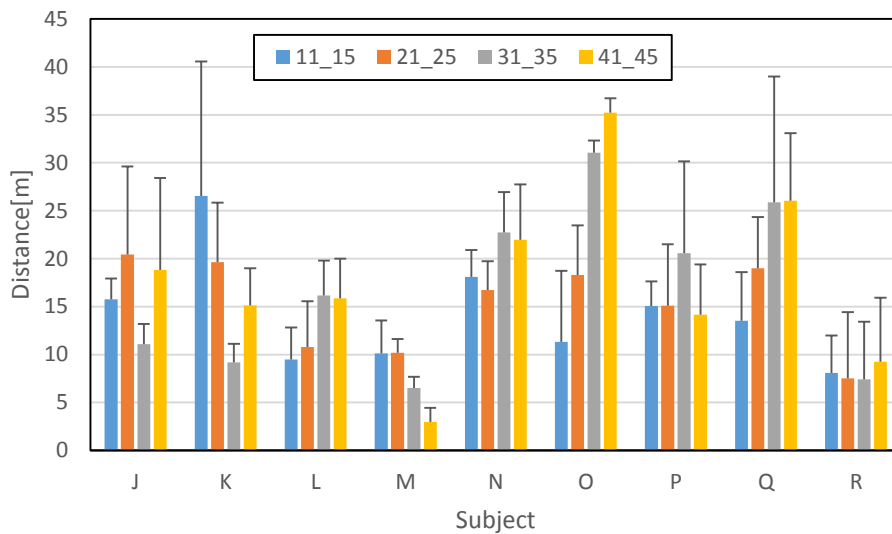


Fig.5.23

Group 2 の入力方式切り替え時における停止位置までの距離平均と標準偏差

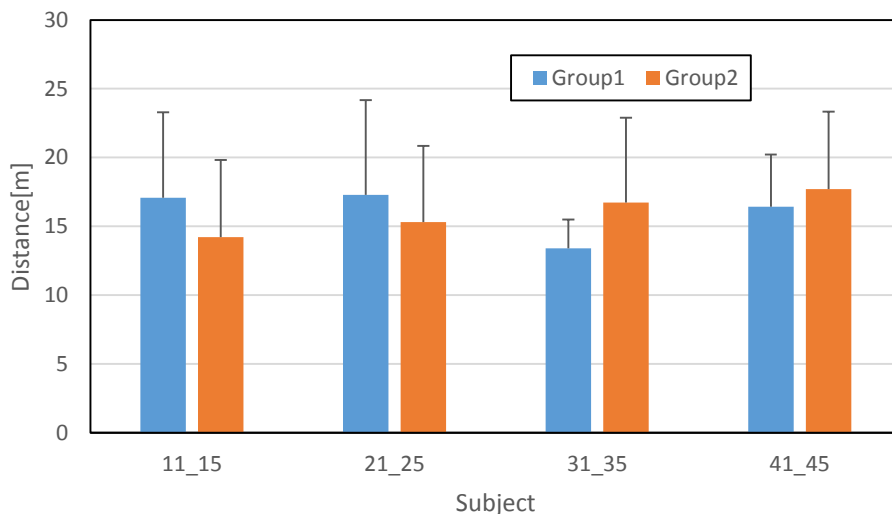


Fig.5.24

両グループの入力方式切り替え時における停止位置までの距離平均と標準偏差

Table.5.2 両グループの入力方式切り替え時における停止位置までの距離の F 検定結果

	実験回数			
	11~15	21~25	31~35	41~45
有意確率	0.128	0.074	0.000	0.001

### 5.3.3 被験者の入力方式切り替え時における速度平均と標準偏差

各被験者の入力方式切り替え時における速度平均と標準偏差の実験回数推移を Fig.5.25, Fig.5.26 に示す. Fig.5.25 は Group1, Fig.5.26 は Group 2 である. グラフ縦軸が示すものは入力方式切り替え時の速度であり, 横軸は被験者である. 青色の棒グラフは実験回数 11~15 回の入力方式切り替え時における速度の平均と標準偏差を示す. 橙色の棒グラフは 21~25 回, 灰色の棒グラフは 31~35 回, 黄色の棒グラフは 41~45 回の同様の値を示す.

Fig.5.27 は両グループの入力方式切り替え時における速度の平均と標準偏差を示す. 青色の棒グラフは Group1, 赤色の棒グラフは Group2 の各グループ全被験者の速度の平均と標準偏差の実験回数推移を示す. 図より, 入力切替判断を速度が 11~15, 21~25, 41~45 回は Group1 の方が Group2 より速い速度で行っているが 31~35 回では Group1 の方が Group2 より遅い速度で行っている. 標準偏差は, 全ての実験回数で Group1 の方が Group2 より小さくなっていった.

5.3.2 節同様に入力切替はいかに判断時の速度のばらつきが少なく同じ判断しているかが重要である. よって, 入力方式切り替え時における速度の標準偏差の F 検定を行う. Table5.3 は実験回数 11~15, 21~25, 31~35, 41~45 の停止距離の F 検定を, 区間を変えて行った結果を示す. 実験回数 41~45 で両グループの有意差を確認した.

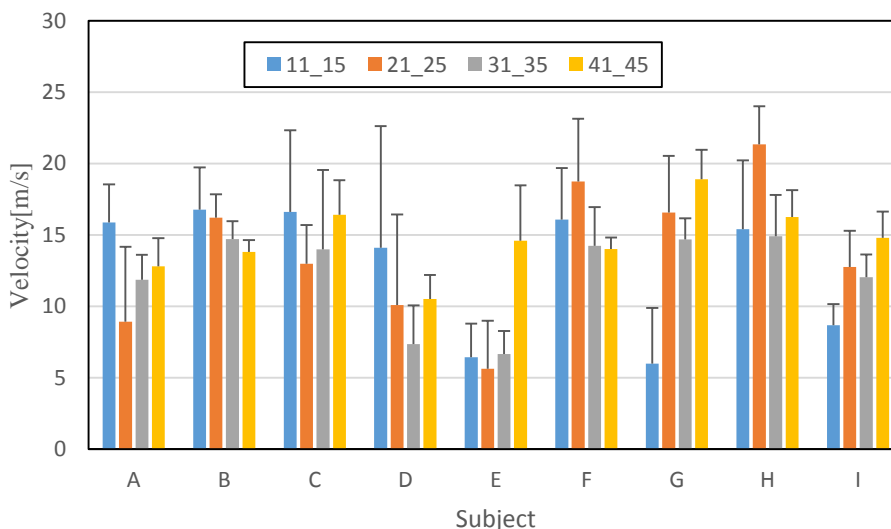


Fig.5.25 Group 1 の入力方式切り替え時における速度平均と標準偏差

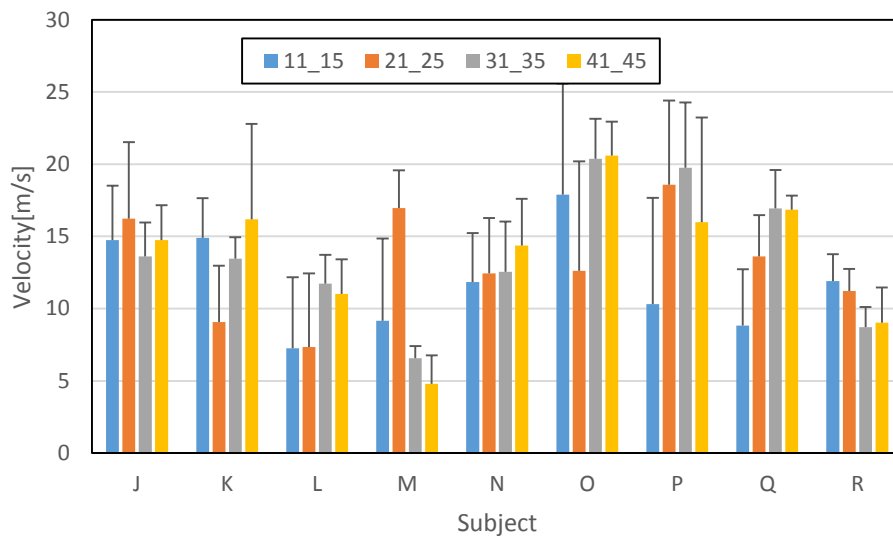


Fig.5.26 Group 2 の入力方式切り替え時における速度平均と標準偏差

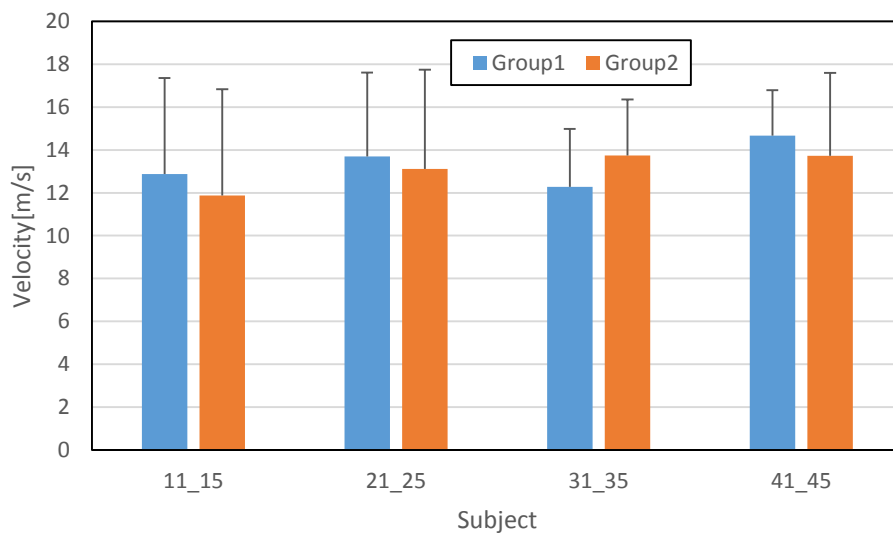


Fig.5.27 両グループの入力方式切り替え時における速度平均と標準偏差

Table.5.3 両グループの入力方式切り替え時における速度の F 検定結果

	実験回数			
	11~15	21~25	31~35	41~45
有意確率	0.807	0.502	0.164	0.000

## 5.4 考察

実験回数 11~15, 21~25, 31~35, 41~45 のデータにおける, 各グループ被験者の停止距離誤差の平均と標準偏差, 入力方式切り替え時における停止位置までの距離, 速度の平均と標準偏差からモデルの学習効果の検証を行う。

停止距離誤差の平均と標準偏差では, 両グループともに停止距離の絶対値の平均と標準偏差は実験回数を重ねるごとに少なくなっているが, 実験回数間 11~15, 21~25 のでは両グループにほとんど差は確認できない。しかし, 実験回数間 31~35, 41~45 では明らかに **Group1** のほうが停止位置の付近で停止していた。また, 各グループで  $t$  検定を, 区間を変えて行った結果は実験回数を重ねるたびに有意確率は下がっていき, 実験回数 41~45 で両手法の有意差 (有意確率 5%以下) を確認した。この結果から **Group1** で同定モデルの学習効果があったと考えられる。

さらに, 入力方式切り替え時における, 停止距離までの距離, 速度において各値のばらつきに着目し  $F$  検定を行った。両グループで, 実験回数 31~35 で, 距離の  $F$  検定で有意差を確認し, 実験回数 41~45 では距離, 速度の  $F$  検定で有意差を確認した。**Group 1** の方が距離のばらつきが先に少なくなり, 終盤で速度, 距離ともにばらつきが少ない入力切替を行った。この結果から **Group1** で同定モデルの学習効果があったと考えられる。

以上, これらの結果より今回の実験で同定モデルを用いて入力切替方式を自動切替方式で行うことで, 手動方式だけで学習するより学習が早くなることを確認した。

# 第 6 章

## 結論

---

### 6.1 まとめ

本研究では、角度・力入力切替え式ハンドルの汎用モデルを用いてブレーキ操作の習熟期間に着目し、入力切替方式を自動切換方式で行うことで、手動方式だけで学習するより学習が早くなるか検証し、自動切り替え方式の学習効果の有効性を示すことを目的とした。

まず、入力方式の切り替えを判断するモデルとして確率型モデルの一つであるロジスティック回帰モデルを用いて、複数の人に対応できる汎用的な入力方式切替判断モデルの構築した。被験者の入力方式切替判断は確率的なばらつきを伴う二値変数で表現できると考えられるため、被験者の入力方式切替判断を確率型モデルであるロジスティック回帰モデルを用いてモデル表現することを考えたためである。

本研究で使用した角度・力入力切替え式ハンドルはブレーキの掛けはじめでは角度入力によって操作し、停止位置付近で力入力へ切り替えることによって減速力の微調整が可能となるハンドルである。本研究の実験装置にはこの角度・力入力切替え式ハンドルを含む車両停車シミュレータを用いた。

ロジスティック回帰モデルを用いた入力方式切替判断モデルを同定するために、被験者の停車操作データを収集した。被験者の任意で角度入力から力入力へ入力方式を切り替えることができる状態で、操作画面に表示される走行中の車両が目標停止位置に停車するようにブレーキハンドルを操作する実験を行い、停車操作データを取得した。

取得した実験データ 5 名分の車両先頭から目標停止位置までの距離と車両の速度、ハンドルレバーの入力値を用いて入力方式切替判断モデルを同定した。さらに、共通モデルの同定に用いた被験者とは別の被験者の実験データより、それぞれ個人モデルを同定した。

同定したモデルの学習効果を検証するために、18 人の被験者を 9 人ずつ、自動切換方式を経験するグループとしないグループの 2 つのグループに分けてモデルのデータ取得実験と同様の条件で実験を行った。

実験回数 11~15, 21~25, 31~35, 41~45 のデータにおける, 各グループ被験者の停止距離誤差の平均と標準偏差, 入力方式切り替え時における停止位置までの距離, 速度の平均と標準偏差からモデルの学習効果の検証を行った. これらの考察より, 同定モデルを用いて入力切替方式を自動切替方式で行うことで, 手動方式だけで学習するより学習が早くなることを確認した.

## 6.2 今後の課題

本研究では, 手動切り替え方式の実験を 5 回行い, 以下自動切り替え方式と手動切り替えを交互に 5 回ずつ行い, 最後は手動切り替え方式で 5 回実験を行うグループを作った. しかし, 実験回数のパターンを変えることでより習熟が早くなることが期待できるので最適なパターンを探り当てる.



## 参考文献

---

- [1] 飯塚 泰行：列車運転におけるブレーキ操作時のドライバモデル構築：交通・物流部門大会講演論文集 2006(15), pp.367-370 (2006)
- [2] 足立 雅和, 松本 陽：車輪とレールの接触特性を考慮した鉄道車両の曲線通過性能向上：各種車輪踏面とレール頭頂面形状の組み合わせによる改善(機械力学, 計測, 自動制御：日本機械学会論文集. C 編 75 (760), pp.3290-3298 (2009)
- [3] 南京 政信：機械ブレーキによる鉄道車両の減速制御：交通・物流部門大会講演論文集 2002(11), pp.149-152 (2002-12-10)
- [4] 山崎 大生：離散時間系スライディングモード制御に基づいた鉄道車両の車輪速度サーボブレーキ(機械力学, 計測, 自動制御)：日本機械学会論文集. C 編 73(735), pp.2968-2975 (2007-11-25)
- [5] 近藤 昭次：鉄道車両のブレーキ：電車の空気ブレーキを主体に：日本機械学会誌, 第 84 回, 第 757 号, pp.26-31 (1981)
- [6] 田中 宏, 長谷川 泉, 保田 秀行, 高橋 宏伸, 山口 隆久：高速電車の速度と粘溝特性に対応した減速度自動制御に関する研究：空気ブレーキのシミュレーション解析：日本機械学会論文集. C 編 52(481), pp. 2432-2436 (1986)
- [7] 熊谷 則道, 長谷川 泉, 永瀬 和彦：鉄道車両空気ブレーキ機器の減圧特性：第 1 報, 特性試験装置と基礎実験結果：日本機械学会論文集. B 編 56(529), pp.2672-2677, (1990)
- [8] 岡田 万基, 古関 隆章：直流き電システムにおける回生ブレーキ最大活用時のエネルギー評価：交通・電気鉄道合同研究会リニアドライブ, pp.7 -12 (2003)
- [9] 小笠 正道：営業電車の回生ブレーキ信頼度調査：社会法人 電子情報通信学会 信頼技法 TECHNICAL REPORT OF IEICE R2003-40 , pp.1-6 (2003)
- [10] 佐藤 洋康, 丸茂 喜高, 綱島 均, 小島 崇：列車停止時のブレーキ操作支援システムに関する研究：日本機械学会2010年度論文集 (7), pp.401-402 (2010)
- [11] 三鬼拓也, 池浦良淳, 早川聡一郎, 澤井秀樹, 中澤伸一：電車ブレーキシステムにおける異なる入力方式の操作性評価, 第13回SICEシステムインテグレーション部門講演会論文集, pp.1931-1932 (2012)

- [12] 三鬼 拓也：電車ブレーキシステムにおける角度・力入力切替え方式の操作性評価，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻2012年度修士論文
- [13] 田口峻：「運転行動における判断の定量化とそれに基づく行動特性解析」，計測自動制御学会論文集，Vol.44, No.3, pp.269-277, 2008
- [14] Giancarlo Ferrari-Trecate, Marco Muselli, Diego Liberati and Manfred Morri, "A clustering technique for the identification of piecewise affine systems," Automatic, Vol 39, No 2, pp. 407-427 (1999)
- [15] 南京 政信：乗り心地向上を目指すブレーキ制御，RRR, Vol57, No.9 pp.16-19 (2000)
- [16] 小美濃 幸司：ブレーキの乗り心地を考える，RRR, Vol59, No.6 pp.8-11 (2002)
- [17] 小美濃 幸司，白戸 宏明，遠藤 広晴，清野 寛：乗り心地に配慮したブレーキパターン，日本人間工学会誌 2006, Vol42, No.3 pp.164 - 171 (2006)
- [18] 小美濃 幸司，白戸 宏明，遠藤 広晴，清野 寛：高減速ブレーキ時の乗り心地評価，RRR, Vol64, No.7 pp.26-29 (2007)
- [19] 福田 康明：達成度手法による作業習熟のための評価基準設定法の確立，日本機械学会論文集. C 編 68(672), 2479-2485, 2002-08-25
- [20] 福田 康明，近藤 薫愛，澤木 基彦，山田 裕昭：達成度手法における作業習熟の解析，日本生産管理学会論文誌，Vol. 9 (2002-2003) No. 2 P 101-106
- [21] 福田 康明，大久保 堯夫：達成度手法による作業習熟の研究，人間工学，Vol. 29 (1993) No. 4 P 215-222

# 付録

付録では5章の実験結果で習熟解析を行うために使った、達成度の理論と傾向式の解析方法を記載する。今回は習熟を正しく評価できなかったため付録として記載する。

## 1 習熟解析

学習効果を検証するに辺り、各被験者の停止操作の習熟を相対的に評価する必要がある。習熟とは同一機能を果たすための行為の繰り返したときに効果があるとき発生する。<sup>[19]-[21]</sup> 習熟に関する研究は心理学をはじめ、人間工学やIEの各分野で研究されている。本研究では、被験者の習熟解析をする上で、IE分野で研究されている達成度の理論と傾向式を利用する。以下その手法を1.1, 1.2節で参考文献より引用し説明する

### 1.1 達成度の理論

達成度とは、同一作業や類似作業を繰り返し行う場合、作業計画の最高予想値（最短時間でばらつきのない理想的な作業状態の評価量）を1として、結果および推定を数値的な基準として区間(0~1)で評価する手法である。

1回の作業で得られる作業結果を $q(0 \leq q \leq 1)$ として、第1回の作業量 $Q_1$ で表すと $Q_1=q$ であり、未達成の作業量は $(1-q)$ である。第2回目以降は、未達成量に対して人為的な努力や改善を行い、前の作業評価量より高めようとする。その人為的な改善割合を、 $r(0 \leq r \leq 1)$ とする。作業モデルを $n$ 回繰り返した場合、その作業評価量 $Q_n$ は次の式で表すことが出来る。

$$Q_n = q(q-r)^{n-1} + r\left(\frac{1-(q-r)^{n-1}}{1-(q-r)}\right) \quad (1.1)$$

この式の $Q_n$ は、一般には $Q$ で表示し、この $Q$ を達成度評価量という。

ここで達成度 $Q_{qr}$ は、式(1)における、 $Q_{qr}=Q=q=r(Q$ の基準値)を示しているもので、 $r, q$ は0~1まで変化するが、実際の作業では $r \geq q$ のみを考える。

ところで、式(1)の $Q$ は $n=2$ ,  $r=1$ で最大値( $Q_{max}$ )となり、 $n=\infty$ ,  $r=1$ では一定値 $Q_\infty$ ( $Q$ の上限値)にて収束する。そこで、 $Q_{max}$ に対応する最小値( $Q_{min}$ )と $Q_\infty$ に対応する下限値 $Q_l(Q$ の下限値)が $Q_{qr}$ との間に次式のように幾何学的な関係が成立するように定義し、実用上 $q > r$ のすべての $Q$ は補うると仮定する。

すなわち

$$(Q_{qr})^2 = Q_{max} \cdot Q_{min} = Q_\infty \cdot Q_l \quad (1.2)$$

ここで

$$\delta_{\max} = \sqrt{\frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}} = \frac{Q_{\max}}{Q_{qr}}$$

または

$$\frac{1}{\delta_{\max}} = \sqrt{\frac{Q_{\min}}{Q_{\max}}} = \frac{Q_{\min}}{Q_{qr}}$$

$$\delta_{\infty} = \sqrt{\frac{Q_{\infty}}{Q_l}} = \frac{Q_{\infty}}{Q_{qr}}$$

$$\frac{1}{\delta_{\infty}} = \sqrt{\frac{Q_l}{Q_{\infty}}} = \frac{Q_l}{Q_{qr}} \quad (1.3)$$

とおき、 $\delta_{\max}$ 、 $\delta_{\infty}$ をそれぞれ最大変動率、標準変動率とする。また、式(1.2),(1.3)の達成度  $Q_{qr}$  は、式(1)より  $r=1$  における  $Q_{\infty}$ を求め、これを式(1.2)および(1.3)の第3式から次式で表すことが出来る。

$$Q_{qr} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1}{\delta_{\infty}}\right)} \quad (1.4)$$

実際に達成度  $Q_{qr}$  を求めるには、作業結果で得られた。

達成度による評価法の特徴は、従来の標準偏差や、分散を考える統計的手法と比較して、作業結果のばらつきを変動率で捉え、作業状態を達成度  $Q(0 \leq Q \leq 1)$ で計数的に評価する手法である。

## 1.2 傾向式

傾向式は達成度の理論を応用したもので、作業習熟と個別時間値の双方の一致性を考慮した習熟の遂行度を示すものである。これを Fig.1.1 および式(1.5)によって表す。

$$t = aN^b \times (\delta_1 N^{b'}) \quad (1.5)$$

$t$ : 作業時間,  $N$ : 作業の繰り返し回数,  $a$ : 常数 (第1回の作業時間),  $b$ : 傾向指数(作業の繰り返し回数  $N$  の指数),  $\delta_1$ : 初期変動率( $N=1$ ),  $b'$ : 変動の指数,  $\times$ :  $\times$ または  $\div$ を示す。

式(1.5)の前項( $aN^b$ )は作業時間の減少を示す一般式と、後項( $\delta_1 N^{b'}$ )の作業時間のばらつきの減少を示す変動式から成立している。この式(1.5)を傾向式という。達成度の理論では前項は式(1.2)(1.3)の  $Q_{qr}$ 、に、後項は式(1.3)の第3式に対応している。また式(1.5)の  $\times$ 印は作業時間の変動範囲を表すもので、式(1.5)の前項に後項を乗ずれば上限線( $t_u = N^{bu}$ )が、前項を後項で叙すれば下限線( $t_l = N^{bl}$ )が求まる。なお、図中における X 点は  $\delta=1.0, Q=1.0$  (100%)を意味するもので、前節における作業計画の最高予測値を示す。

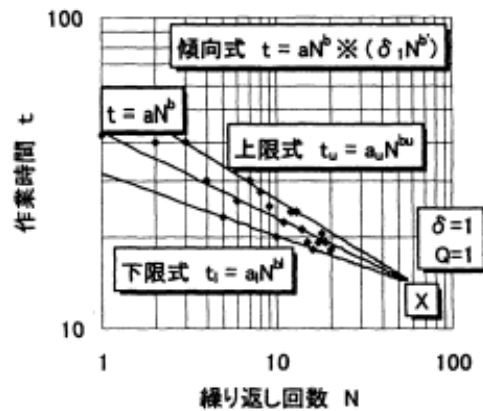


Fig.1.1 傾向式

### 1.3 本研究での傾向式の利用方法

傾向式は本来、ある作業に対しての「被験者の試行回数に対する作業時間の減少」を達成度で表す。本研究では「被験者の実験回数に対しての停止距離の減少」を達成度で表す。ここで、本研究の傾向式での「停止距離」の定義を行う。

停止距離: シミュレータのプラットフォーム開始位置を基準とし電車の停止位置との差

これは、傾向式の解析結果が両対数グラフであり、「停止距離」を目標停止位置からの距離にした場合、実験回数を重ねると停止距離が0に近づくため正しく評価できなくなることを避けるためである。なお、プラットフォーム開始位置から目標停止位置までの距離は220[m]ある。この距離は実際のプラットフォームの長さを参考にしてている。

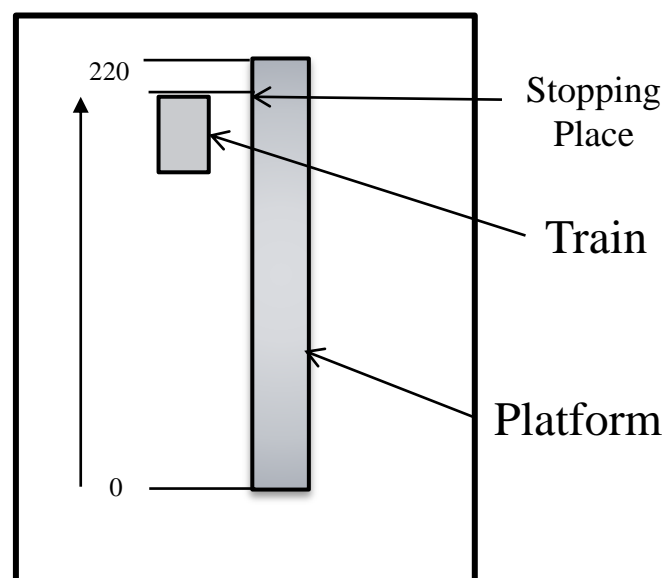


Fig.1.2 傾向式の停止距離イメージ

次に本研究における (1.5) 式にあたる傾向式を示す.

$$d = aN^b \ast (\delta_1 N^{b'}) \quad (1.6)$$

$d$  : 停止距離,  $N$  : 作業の繰り返し回数,  $a$  : 常数 (第 1 回の停止距離),  $b$  : 傾向指数 (作業の繰り返し回数  $N$  の指数),  $\delta_1$  : 初期変動率 ( $N=1$ ),  $b'$  : 変動の指数,  $\ast$  :  $\times$  または  $\div$  を示す.

次に傾向式の解析結果の例を挙げて説明する. Fig.1.3 は実験回数を横軸, 停止距離を縦軸にとる両対数グラフとして表す. 解析の手順は, まず実験回数あたりの停止位置をプロットする. 次に, 黄線である停止距離の最小二乗対数近似線をプロットする. 次に, この近似線を上回る停止位置, 下回る停止位置の点群に分けそれぞれで最小二乗対数近似を行う. 上回った停止位置の点群からなる対数近似を緑線, 上回った停止位置の点群からなる対数近似を橙線で表す. 緑線, 橙線は 1.2 節, Fig.1.1 の上限線, 下限線にそれぞれあたる.

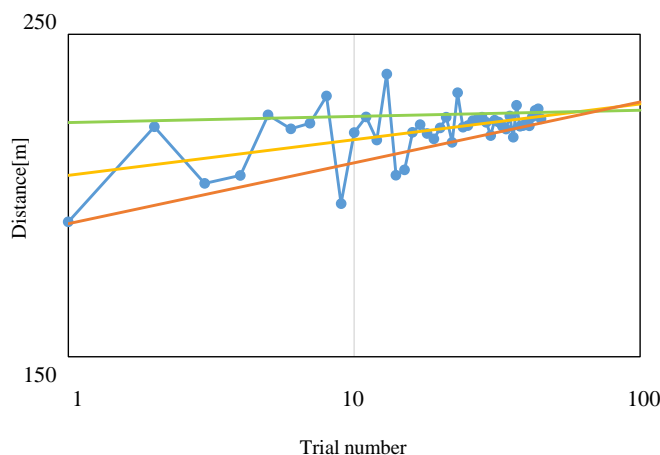


Fig.1.3 傾向式解析結果例

#### 1.4 傾向式の解析結果

Fig.1.4~Fig.1.21 は各被験者の傾向式解析結果を表す. 個人差があるものの全被験者は上式 Table 1.1 は各被験者の諸特性値, Table 1.2 は両グループの諸特性値の平均を表す. なお,  $\delta_1$ ,  $Q_1$  は実験回数 1 回目のばらつきと達成度,  $\delta_{45}$ ,  $Q_{45}$  は実験回数 45 回目のばらつきと達成度を示す. Table 1.2 より Group1 は序盤のばらつきは Group2 のばらつきより大きい, しかし実験回数最後の 45 回目のばらつきは Group1 のほうが小さくなる. 達成度  $Q$  も同様に Group1 は序盤のばらつきは Group2 のばらつきより大きく, 実験回数最後の 45 回目のばらつきは Group1 のほうが小さくなる. しかし, 達成度の差が微少過ぎたため評価に適さず, 本研究には適さないと考察した.

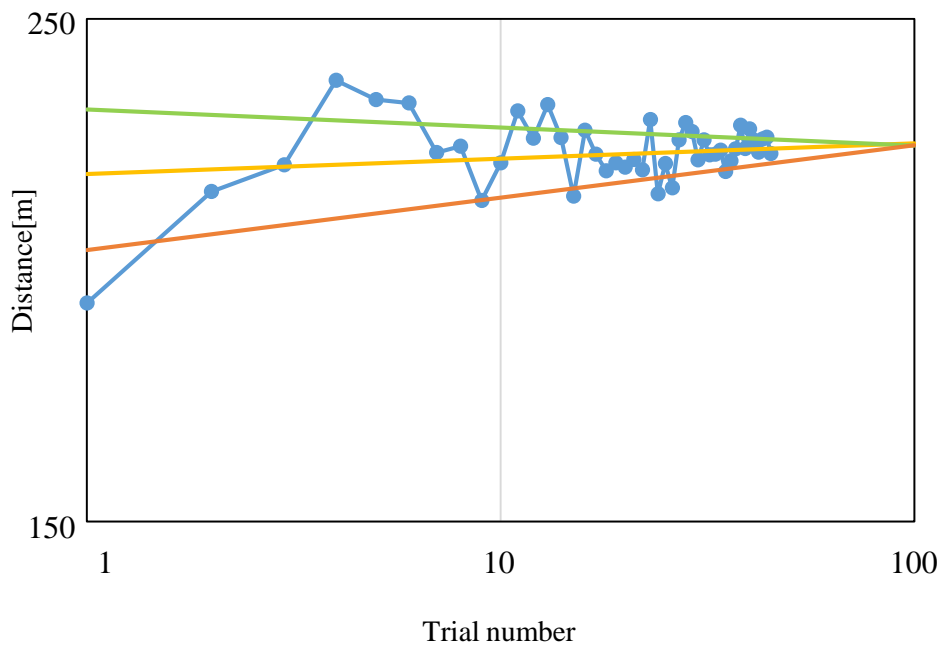


Fig.1.4 被験者 A の傾向式解析結果

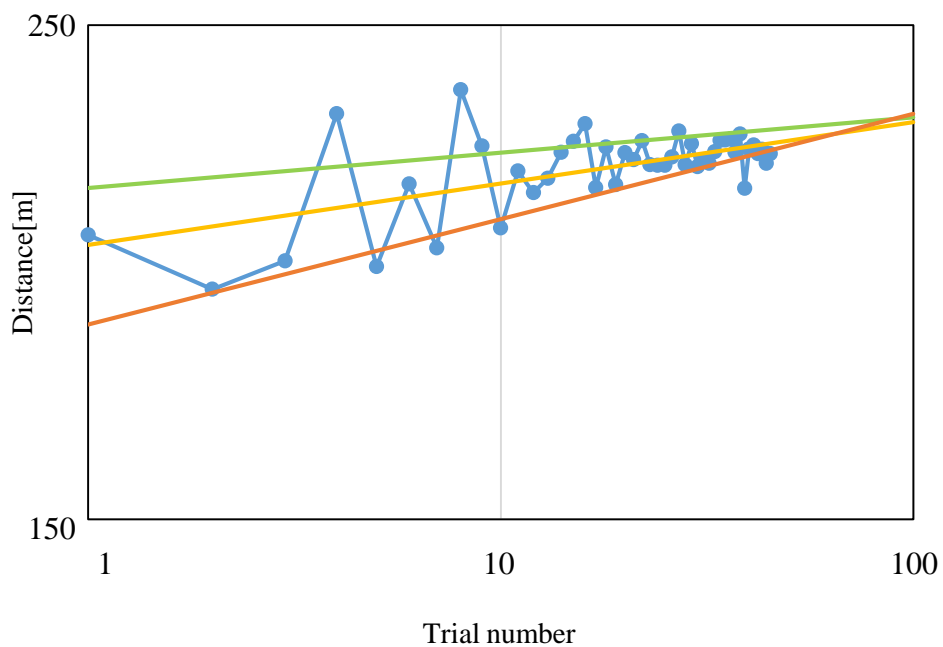


Fig.1.5 被験者 B の傾向式解析結果

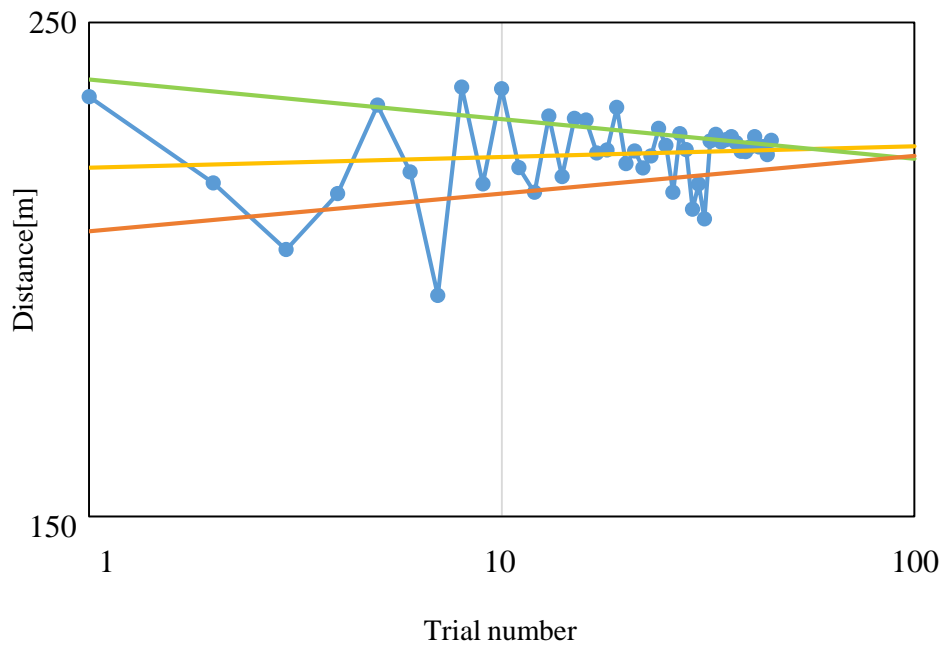


Fig.1.6 被験者 C の傾向式解析結果

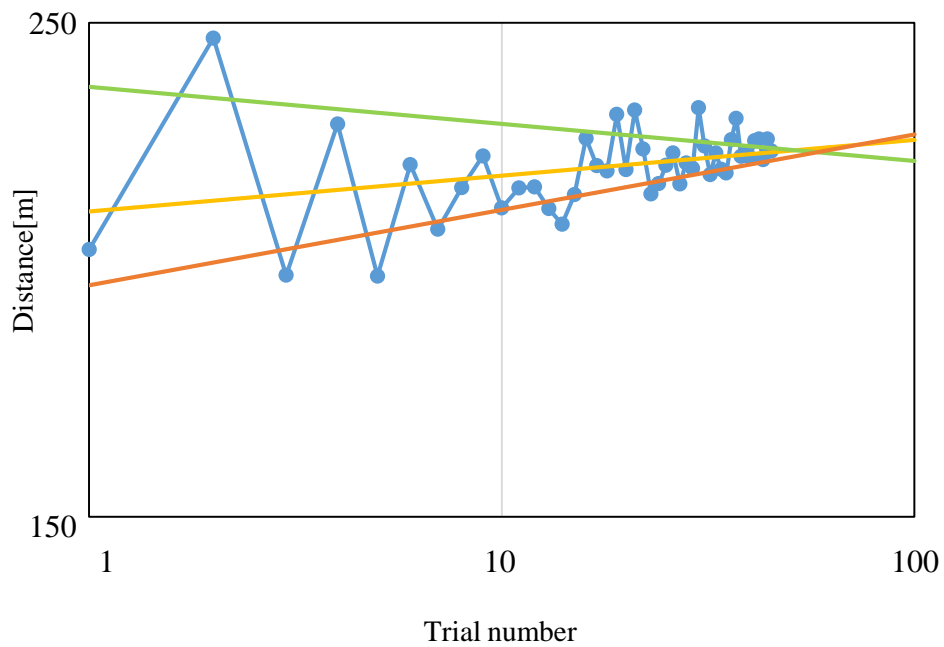


Fig.1.7 被験者 D の傾向式解析結果



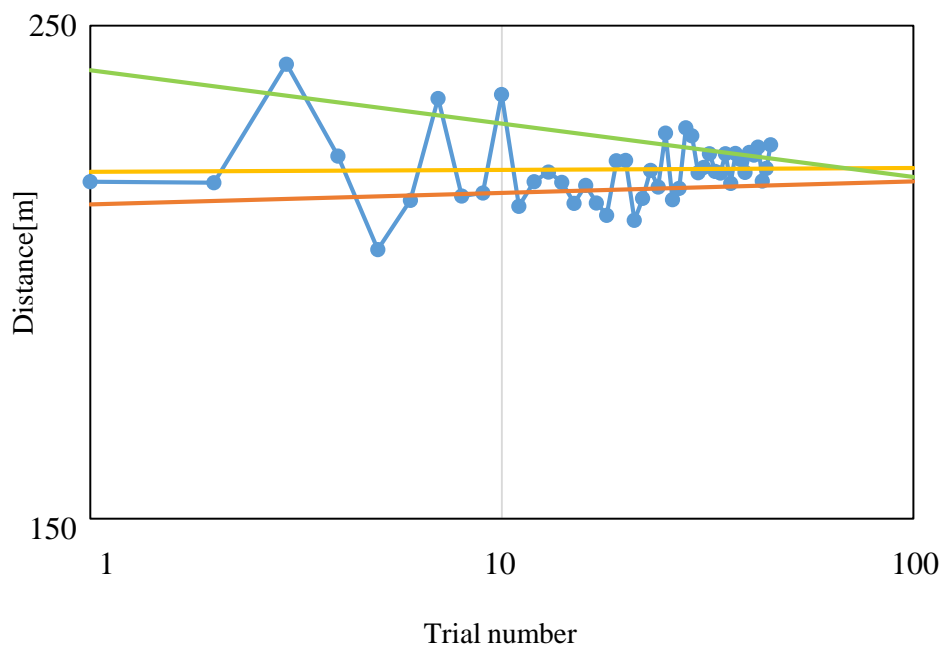


Fig.1.8 被験者 E の傾向式解析結果

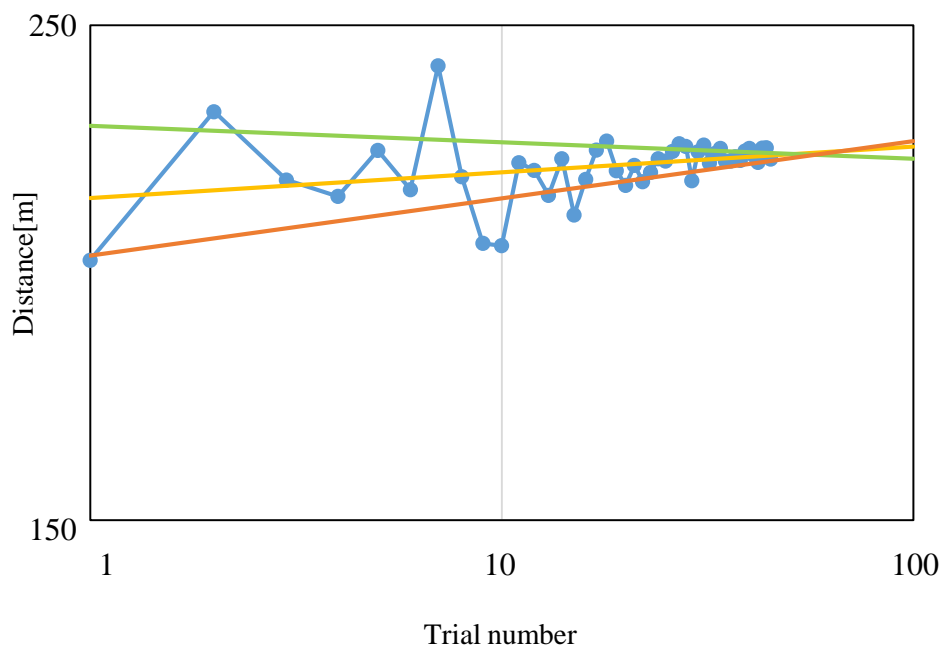


Fig.1.9 被験者 F の傾向式解析結果

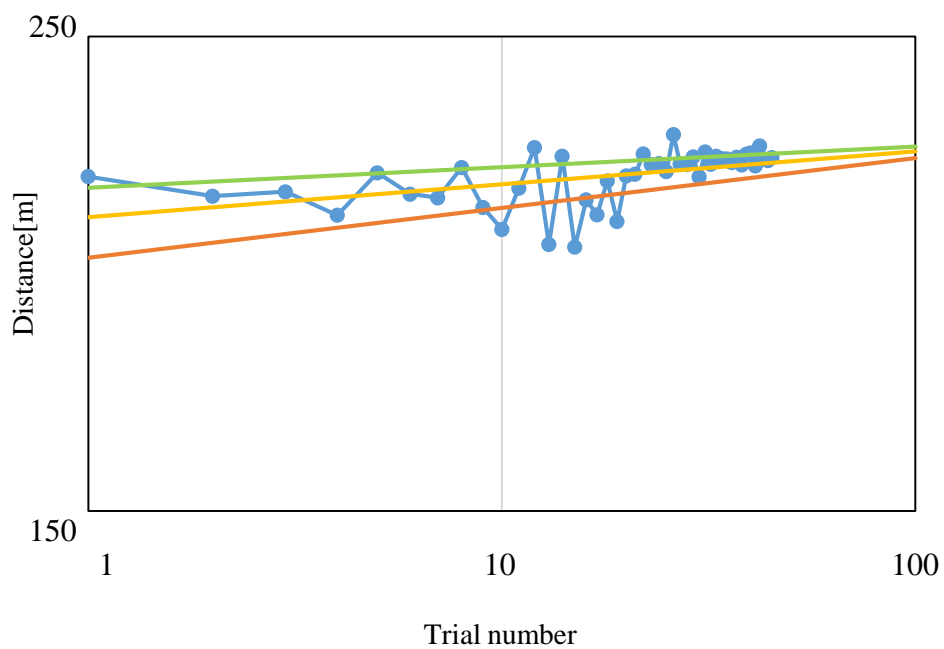


Fig.1.10 被験者 G の傾向式解析結果

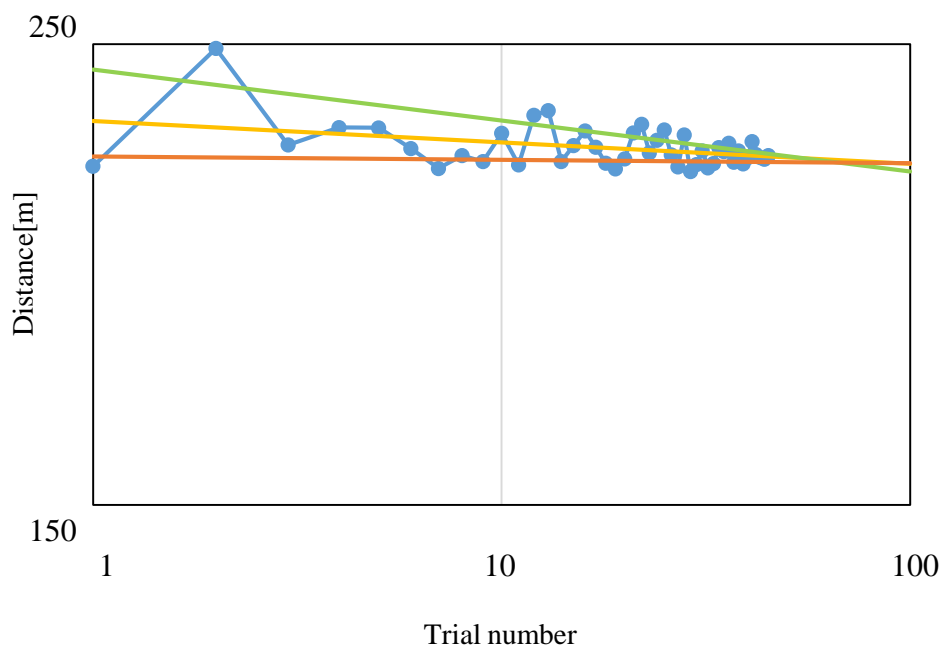


Fig.1.11 被験者 H の傾向式解析結果

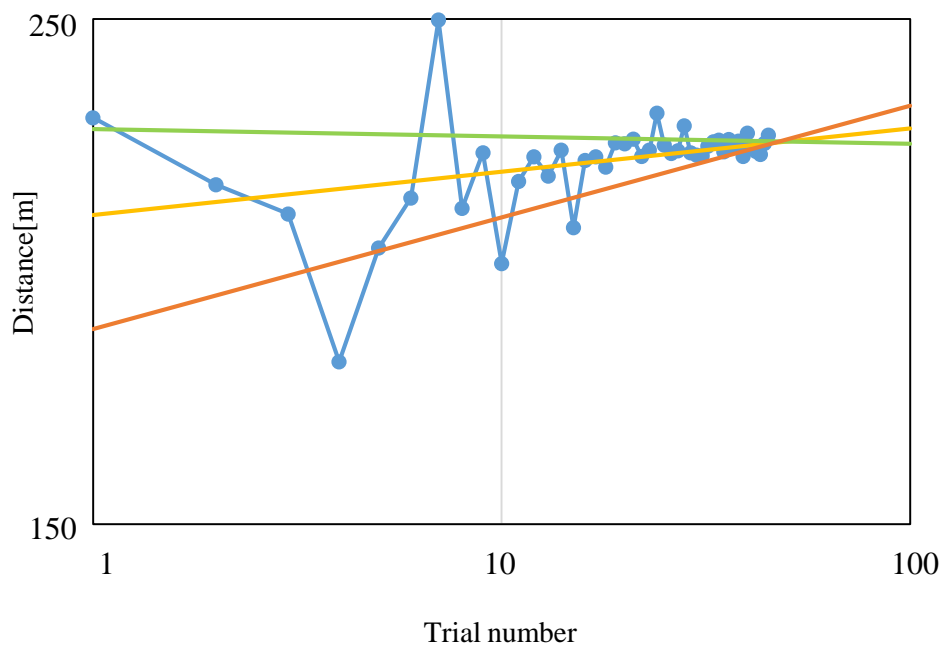


Fig.1.12 被験者 I の傾向式解析結果

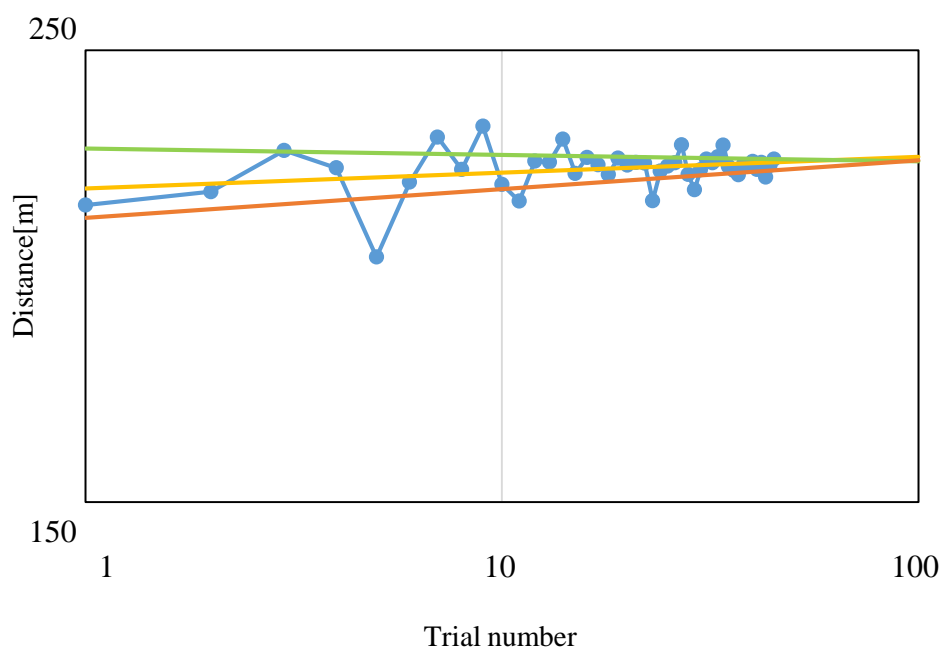


Fig.1.13 被験者 J の傾向式解析結果

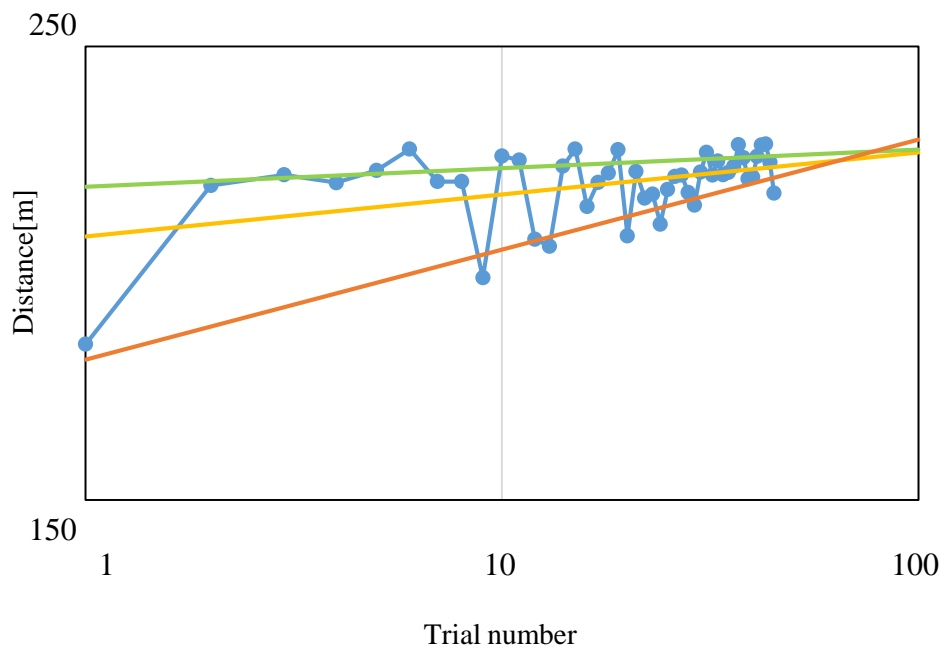


Fig.1.14 被験者 K の傾向式解析結果

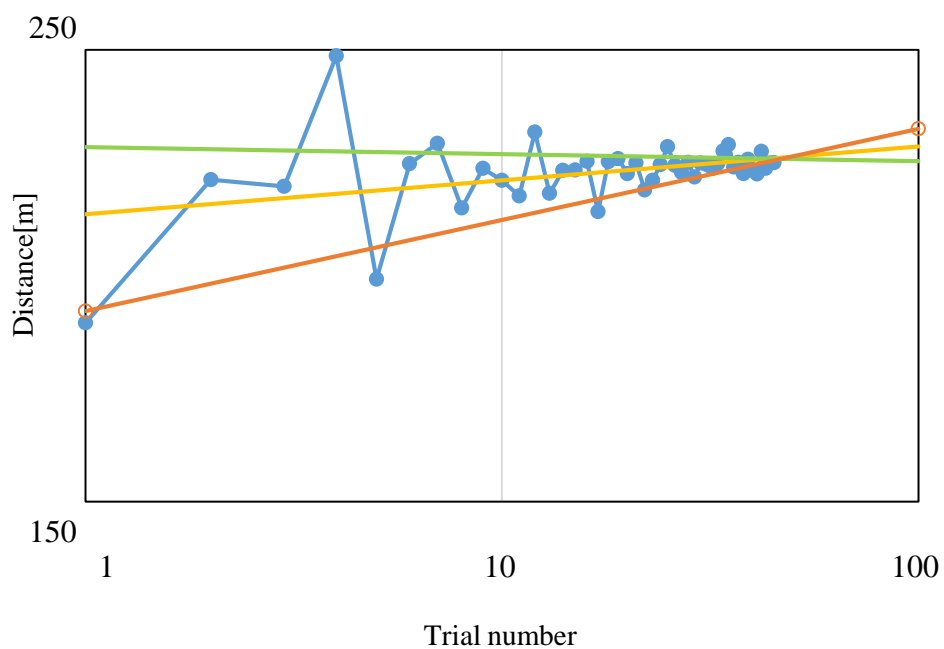


Fig.1.15. 被験者 L の傾向式解析結果

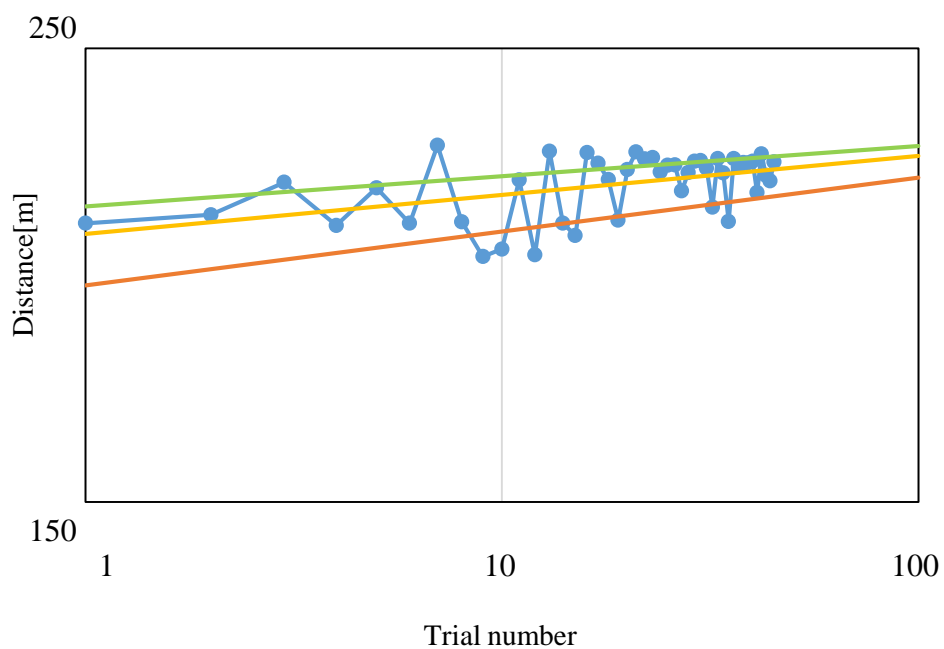


Fig.1.16 被験者 M の傾向式解析結果

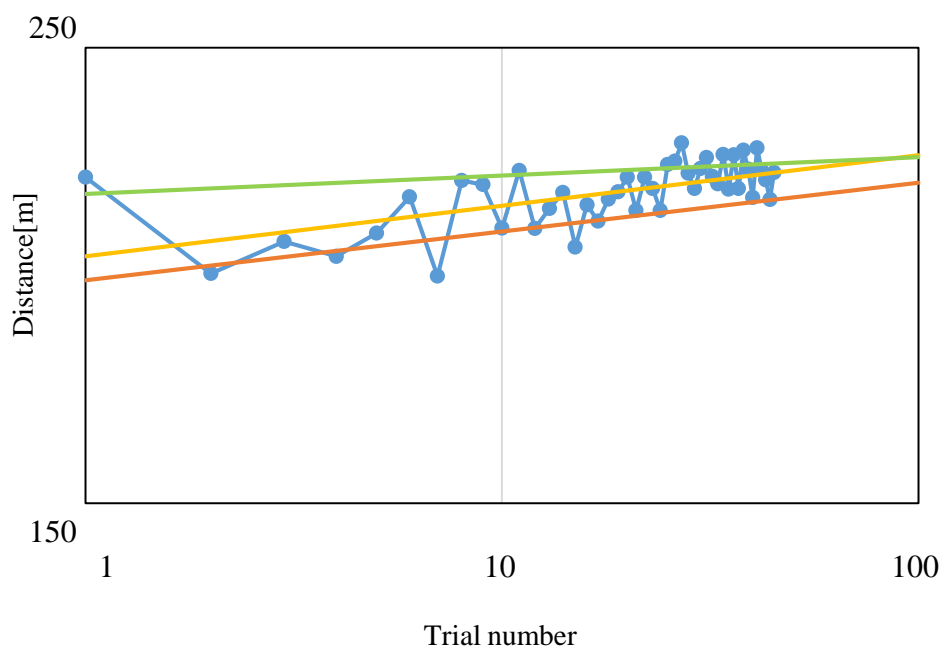


Fig.1.17 被験者 N の傾向式解析結果

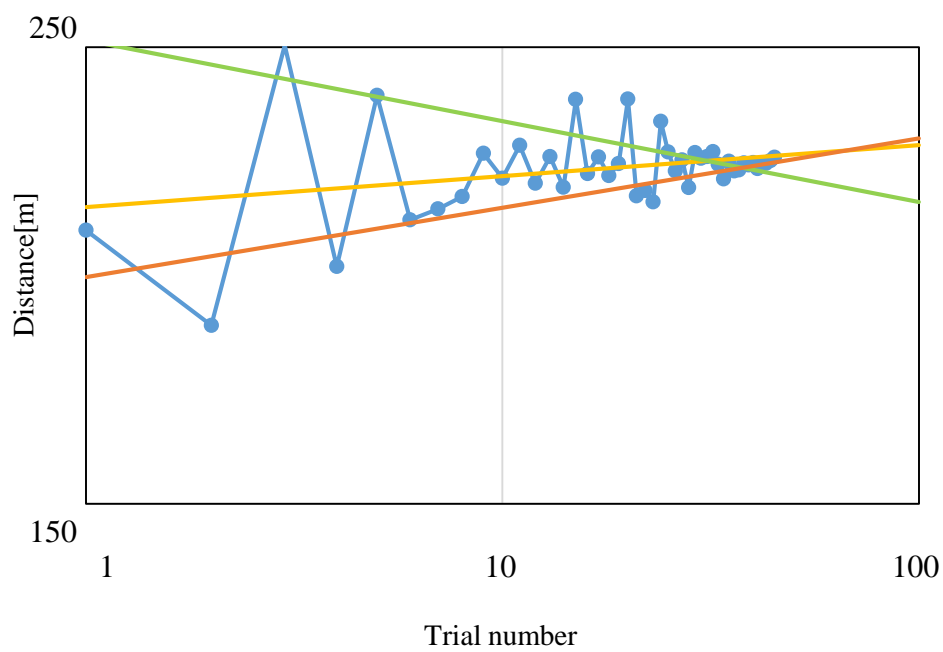


Fig.1.18 被験者 O の傾向式解析結果

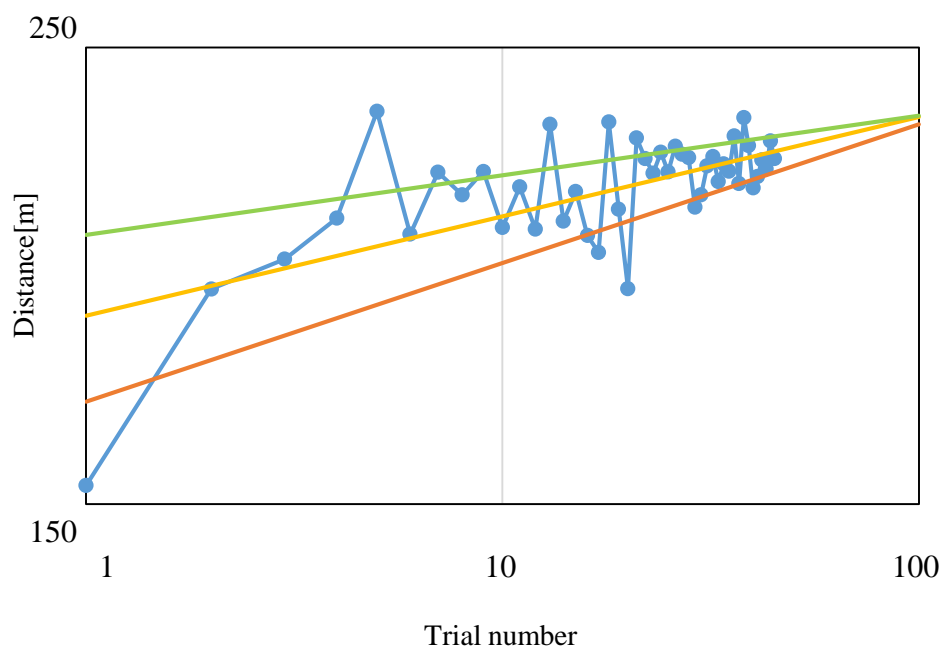


Fig.1.19 被験者 P の傾向式解析結果

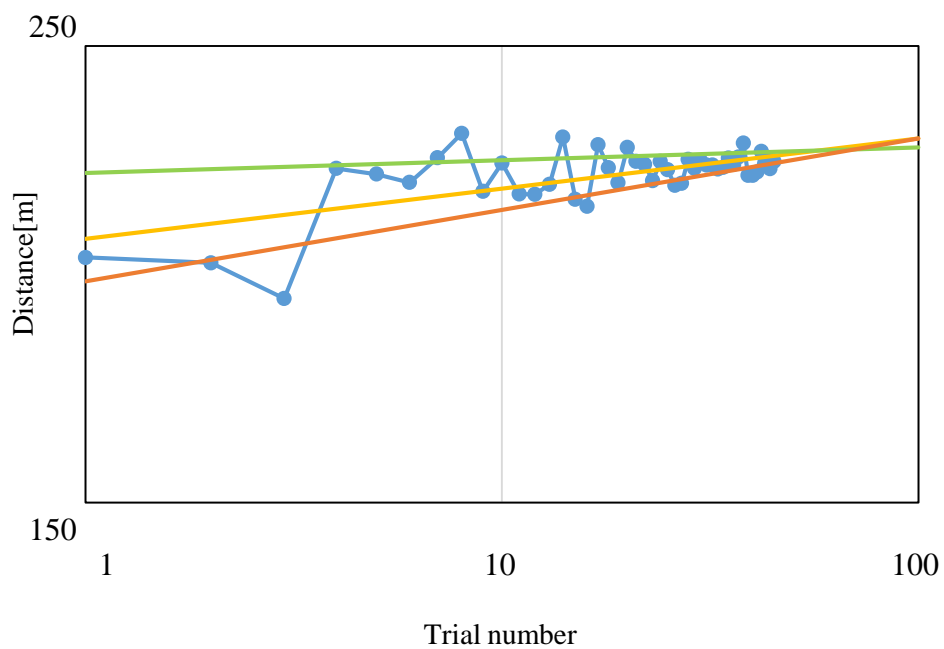


Fig.5.20 被験者 Q の傾向式解析結果

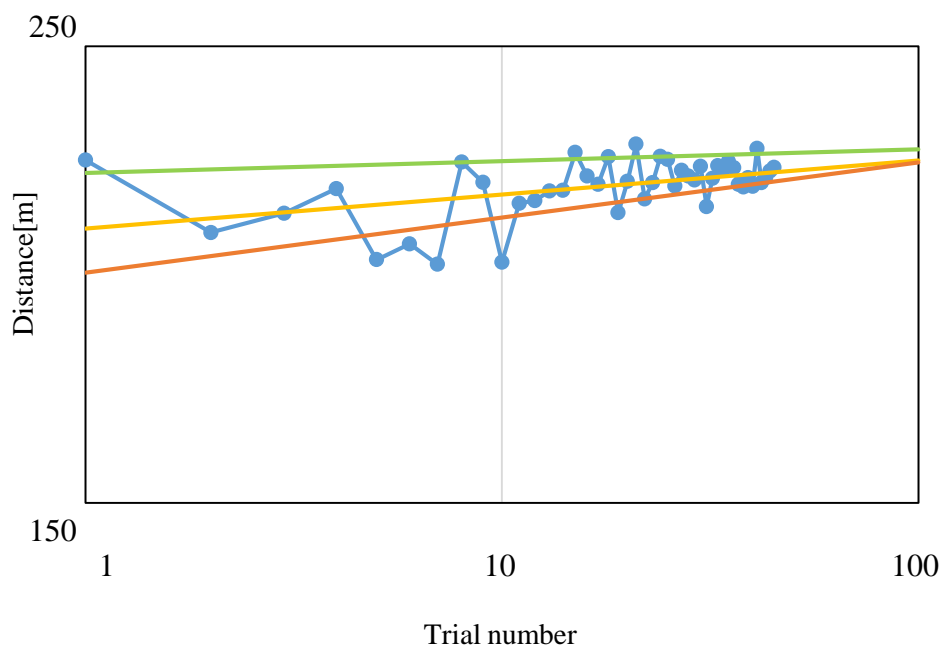


Fig.5.21 被験者 R の傾向式解析結果

Table 1.1 各被験者の諸特性値

	$\delta_1$	$\delta_{45}$	b'	Q1(%)	Q45(%)
A	1.074084	1.012343	-0.01555	73.7	89.0
B	1.073073	1.010792	-0.01571	73.9	89.7
C	1.081685	1.012367	-0.04169	72.5	88.9
D	1.240919	1.019511	-0.02526	68.8	92
E	1.072119	1.014075	-0.01462	74.1	88.2
F	1.069292	1.004197	-0.01650	74.5	93.6
G	1.038471	1.011700	-0.00686	80.8	89.2
H	1.049185	1.004544	-0.01142	78.3	93.3
I	1.106273	1.001587	-0.02612	69.0	96.0
J	1.040028	1.006301	-0.00866	80.0	92.1
K	1.102350	1.012402	-0.02236	69.5	88.9
L	1.097245	1.001016	-0.02411	70.2	96.8
M	1.045484	1.022685	-0.00579	79.1	85.1
N	1.049544	1.020371	-0.00741	78.3	85.8
O	1.138350	1.000000	-0.03647	64.8	100
P	1.097733	1.020401	-0.01919	70.2	85.9
Q	1.062441	1.006361	-0.01425	75.8	92.0
R	1.057406	1.015771	-0.01055	76.7	87.5

Table 1.2 両グループの諸特性値平均

	$\delta_1$	$\delta_{45}$	b'	Q1(%)	Q45(%)
Group1	1.08946	1.01012	-0.01930	74.0	91.1
Group2	1.07673	1.01170	-0.01653	73.9	90.5



# 謝辞

---

本研究を遂行するにあたり、研究の方向性や、制御に関する基礎知識などに関する様々な助言、御指導賜りました池浦良淳 教授に深く感謝いたします。厚く御礼申し上げます。

また、大変お忙しい中本論文を査読して頂くとともに、多数のご教示、ご助言を賜りました野村由司彦 教授に厚く御礼申し上げます。

加えて、本研究を進めるにあたり多数のご教示、ご助言を賜りましたシステム設計研究室 早川聡一郎 准教授に厚く御礼申し上げます。

さらに、実験装置の製作、改善策について等種々の御助言、ご指導を賜りました澤井秀樹研究員に深く感謝いたします。厚く御礼申し上げます。

本研究を行うに際し、お忙しい中貴重な時間を割き、実験にご協力戴いたシステム設計研究室の皆様には誠に感謝申し上げます。

また、同じ車両停車シミュレータを用いた研究である 本道創大氏、には実験の補助を行って戴き、非常に御礼申し上げます。

さらに、この研究室で休学の1年をはさみ学部の中から数えて三年間皆で楽しく、研究内容は違う中で情報交換をしながら共に過ごした元同期の卒業生方、また同じ時期に卒業することになった、有住卓朗君、日下部恭士君、小嶋友輔君、館新太君、山田純君、さん BUI MINH NHAT に深く感謝申し上げます。

そして、日々の研究生活を得るもの多い素晴らしい時間としていただいたシステム設計研究室の皆様には深く感謝いたします。

最後に、学部から修士の間より、惜しめない援助を送ってくださった家族のお陰で、充実した素晴らしい勉強と研究生活を送ることができました。感謝の気持ちを述べることで謝辞の最後とさせて戴きます。ありがとうございました。