

平成 22 年度 修士論文

電車のブレーキ操作器の操作性向上に関する研究

指導教員 池浦良淳 教授

三重大学大学院工学研究科機械工学専攻

システム設計研究室

409M124 佐藤亮

目次

第1章 序論

1.1	研究背景	1
1.2	本研究の目的	3
1.3	本論文の構成	3

第2章 実験装置

2.1	角度入力式ハンドルの概要	5
2.2	力入力式ハンドルの概要	6
2.3	実験システムの構成	8

第3章 車両停車シミュレータ

3.1	電車のモデル化	9
3.1.1	一般的な電車のモデル表現	9
3.1.2	電車の簡易モデル化における条件	11
3.1.3	電車の簡易モデルの構築	11
3.2	車両停車シミュレータの概要	13
3.2.1	車両停車シミュレータの構築	13
3.2.2	車両停車シミュレータの仕様	16

第4章 実験方法

4.1	習熟操作	17
4.2	低速域停車操作実験	19

第5章 実験結果	20
第6章 考察	
6.1 過不足距離と停車時間の評価	34
6.2 ブレーキ操作の評価	38
6.2.1 ブレーキパターンに対する重量変化の影響	38
6.2.2 ブレーキパターンの調整操作の評価	45
6.3 ブレーキハンドルの方式による乗り心地の評価	53
第7章 結論	
7.1 本研究のまとめ	61
7.2 今後の課題	62
参考文献	63

第1章

序論

1.1 研究背景

現在の社会には、自動車や航空機、船舶、電車等、様々な交通機関が存在し、これらの交通機関は物資輸送や移動手段として我々の生活になくてはならないものとなっている。その中でも市民生活に密接に関連している電車は、交通渋滞の影響を受けないこと、年齢の影響を受けないこと、免許不要等から、通勤や通学等に広く利用されており、その目的上運行ダイヤに沿った正確な運転が求められている。運行ダイヤを守る上で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決められた停車位置からずれた位置で停車してしまうことを言う。大きなオーバーランの場合、停車位置を修正するのに時間がかかってしまうことで運行ダイヤが大きく乱れ、最悪の場合、運行ダイヤの遅れを取り戻そうとして無理な加減速等を用いた運転を行い、大事故が発生してしまう可能性がある。小さなオーバーランの場合でも乗客の乗降に余分に時間がかかってしまうなど、電車の運行状況に少なからず影響を及ぼす。また、駅によっては電車への接触事故等を防ぐためのプラットフォームスクリーンドア（Fig.1.1）などの設備が設置されている場合があり、こうした駅の場合停車位置の許容範囲は従来の駅のものより厳しく設定されている。電車を運行ダイヤに沿って運転するには、運転士がオーバーランをできる限り少なくし、停車範囲内での正確な停車を行う必要がある。正確な停車操作を行うためには、運転士の技量が必要となる。これは、電車のブレーキシステムは操作からブレーキの動作までにタイムラグが存在することや、扱うブレーキ力が大きく調整が難解であること、線路や車輪の状況、乗客数の増減等によってブレーキ力の掛かり方が異なっ

くこと、ブレーキ力を加えようとした場合ブレーキハンドルを傾け、電車のブレーキ力を指示する必要があるということ等に起因する。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、必要なブレーキ量を判断して入力しており^[1]、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に伝えるため、ブレーキハンドルには細かなブレーキ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ている方式は、ブレーキハンドルを傾けてブレーキ力を入力する方式のため操作量の判断が行いにくく、応答も悪い。ブレーキ操作には前述したブレーキハンドルの他に車輪の摩擦等が影響を与える。これまでの電車のブレーキに関する研究は、車輪変更等の制動特性改善といった粘着ブレーキに関する研究や^{[2] [3] [4]}、ブレーキ制御弁をはじめとするブレーキ機器の応答性、信頼性の改善といった空気ブレーキに関する研究^{[5] [6] [7]}、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^{[8] [9]}、停車距離を運転士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^[10]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 従来方式のブレーキハンドル

1.2 本研究の目的

従来のブレーキハンドルの操作方式はブレーキ力が角度に対応しており，操作量を直感的に判断しづらく，応答特性も悪いという特性を持つ．

そこで本研究では，従来方式のブレーキハンドルとは異なり，ブレーキ力がハンドルに加える力に対応しており，ブレーキ力を直感的に判断しやすく，応答の良い新たな指令方式として力入力式ブレーキハンドルを提案する．従来方式のブレーキハンドルと提案方式のブレーキハンドルの操作性を，低速域での停車操作を対象として評価し，停車時の操作性と乗り心地を比較検討することで，提案した力入力式の有効性を示すことを目的とする．

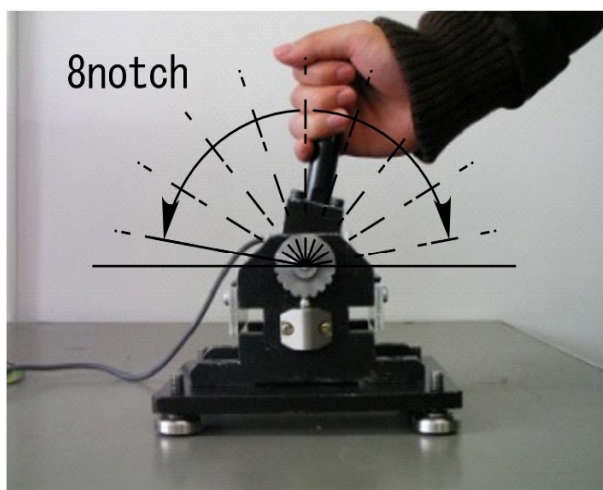
1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す．まず，第2章では本研究で使用した実験装置である角度入力式ハンドルと力入力式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，習熟操作と低速域停車操作実験について説明する．第5章では，低速域停車操作実験によって得られた結果について述べ，第6章において実験結果について考察を行う．最後に第7章では本研究のまとめと今後の課題について述べる．

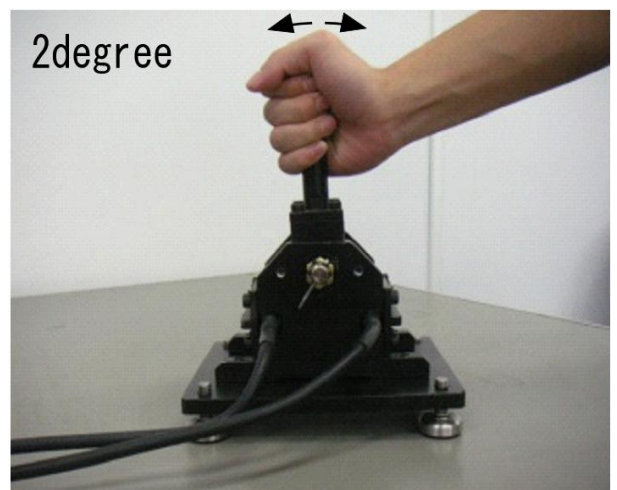
第2章

実験装置

本章では本研究で使用する実験装置について述べる．実験装置はハンドルの角度をブレーキ力に変換するノッチ式ハンドル（従来方式）と，ハンドルに加える力をブレーキ力に変換する力入力式ハンドル（提案方式）を用いる．2.1 節で角度入力式ハンドルの概要について述べ，2.2 節で力入力式ハンドルの概要について，2.3 節では実験システムの構成について述べる．Fig.2.1 に実験装置の外観を示す．Fig.2.1(a) は角度入力式ハンドルを示し，Fig.2.1(b) は力入力式ハンドルを示す．



(a)角度入力式ハンドル



(b)力入力式ハンドル

Fig 2.1 ブレーキハンドル

2.1 角度入力式ハンドルの概要

角度入力式ハンドルには、現在入力している角度を判別しやすくするために 20degree 毎に切欠き（ノッチ）があり、ハンドルは 8 ノッチ、160degree まで回転できるようになっている。ハンドルを被験者から見て前方方向に回転させることで角度検出機構が回転軸の回転量を読み取り、その値に応じてブレーキ力が加えられる方式となっている。角度入力式ハンドルは、ブレーキ操作の再現が容易である、長時間のブレーキ操作に優れる、ブレーキ力はブレーキハンドルに与えられた角度に対応しているため直感的に操作量を判断しづらい、角度操作を経てブレーキが入力されるため応答特性が悪いという特性をもつ。Table2.1 は角度検出機構であるエンコーダの仕様を示し、Fig.2.3 はエンコーダの入出力段回路図を、Fig.2.4 は角度入力式ハンドルの概略図を示す。Fig.2.5 は角度力入力式ハンドルのシステム構成を示す。

Table2.1 エンコーダの仕様

Model	E6 - B2 - C
Resolution	200 [pulse/rotation]
Supply voltage	5~24[V] DC

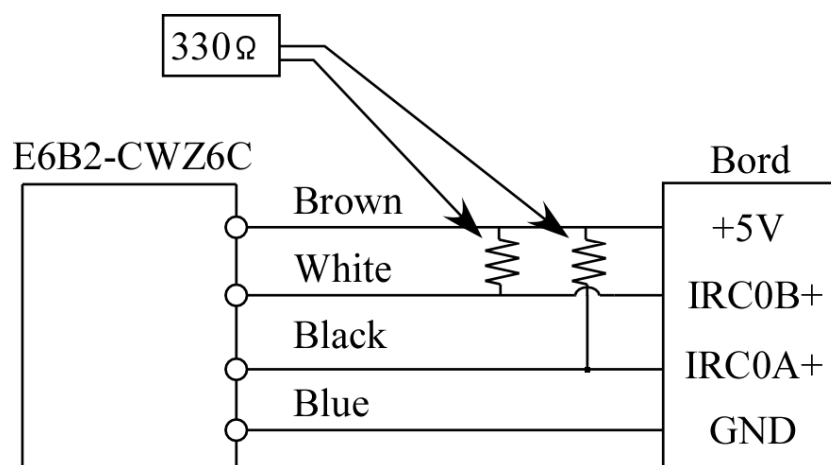


Fig.2.3 エンコーダの入出力段回路図

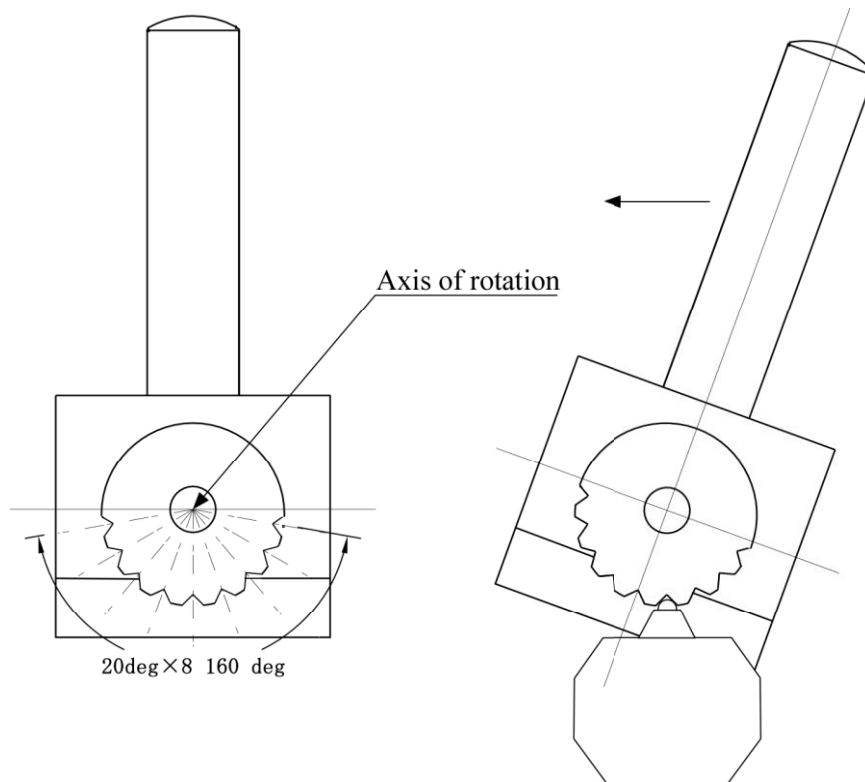


Fig.2.4 角度入力式ハンドルの概略図

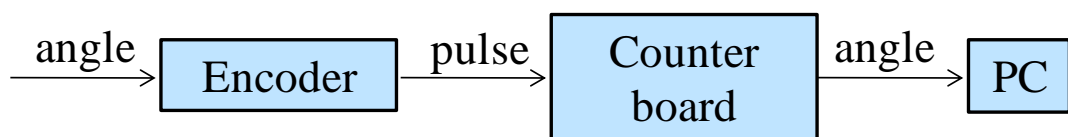


Fig.2.5 角度入力式ハンドルのシステム構成

2.2 力入力式ハンドルの概要

力入力式ハンドルは、大きく可動する角度入力式ハンドルとは異なり、ハンドル可動域が前後 2degree 程度となっている。ハンドルに被験者から見て前方方向に力を加えることで力検出機構がその力を読み取り、その値に応じてブレーキ力が加えられる方式となっている。力入力式ハンドルは、ブレーキ力がブレーキハンドルに与えられた力に対応しているため直感的に操作量を判断しやすい、角度操作がないため応答特性が良いという特性を持つ。Table2.2 は力検出機構であるロードセルの仕様を示し、Fig.2.6 は力入力式ハンドルの概略図を、Fig.2.7 は力入力式ハンドルのシステム構成を示す。

Table2.2 ロードセルの仕様

Model	LCN - A - 500
Rating capacity	500 [N]
Recommended applied voltage	1~12[V] AC or DC
Over Load	200[%]

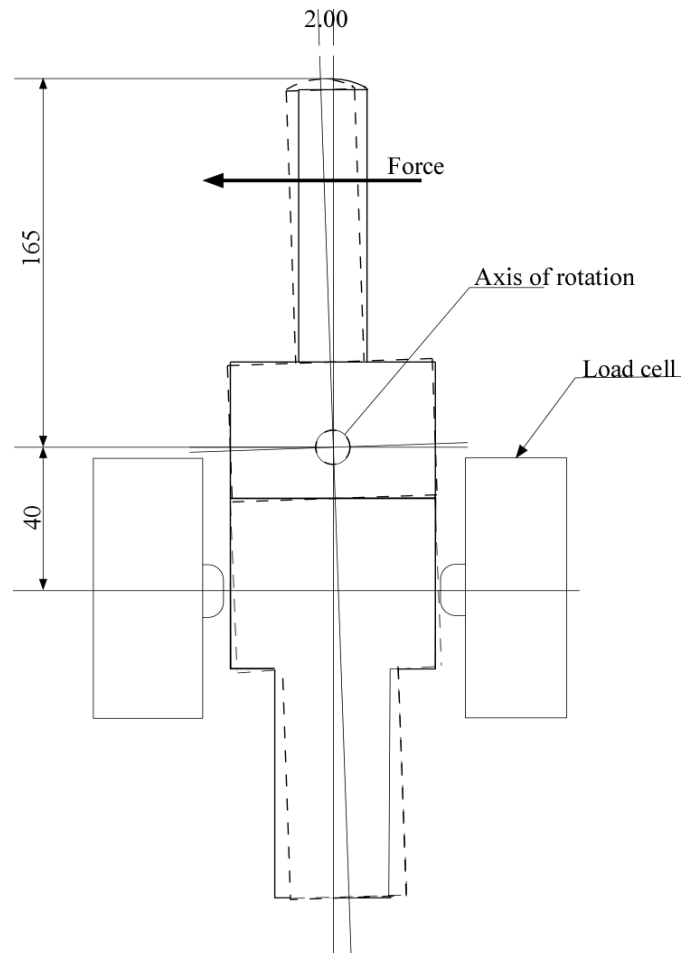


Fig.2.6 力入力式ハンドルの概略図

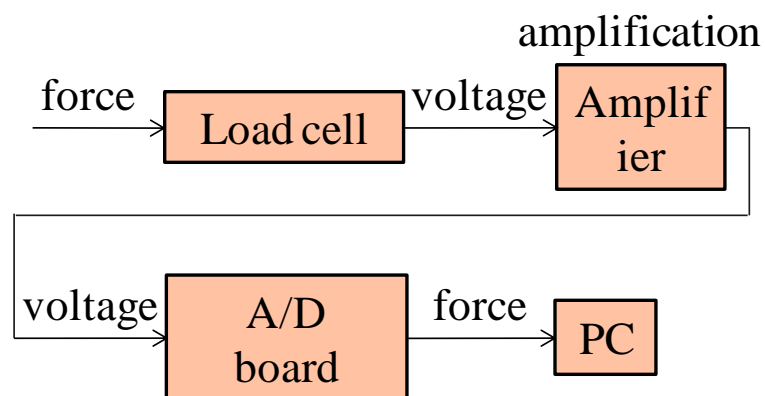


Fig.2.7 力入力式ハンドルのシステム構成

2.3 実験システムの構成

実験システムはブレーキハンドル、増幅器、PC、操作画面によって構成されている。Fig.2.8 は実験システムの構成を示す。増幅器は周波数 AC \sim 25kHz の AC ストレインアンプ(NEC 三栄 AS1203)を用いた。PC にはカウンターボードと A/D 変換ボードの役割を果たす多機能データ収集ボードとして、PCI アドバンス MF624 を搭載している。Table2.3 は PCI アドバンス MF624 の仕様を示す。

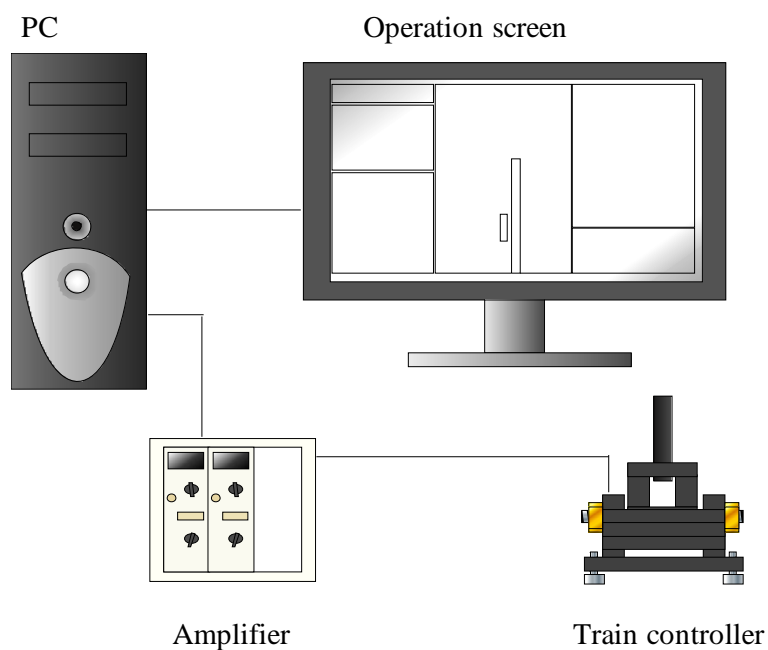


Fig.2.8 実験システムの構成

Table2.3 PCI アドバンス MF624 の仕様

model	MF 624
A/D Converter	
Resolution	14bits
Conversion time	1.6 μ s single channel
	1.9 μ s 2 channels
	2.5 μ s 4 channels
	1.9 μ s 8 channels
Input ranges	\pm 10V
Input impedance	$>10^{10}$ Ohm
Counters/Timers	
Number of channels	4
Resolution	32 bits
Clock frequency	50 MHz
Inputs	TTL, Schmit triggers
Outputs	TTL

第3章

車両停車シミュレータ

本章では実験で使用した，ブレーキ力が加えられた時の車両の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，その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付随車が連結器によって複数台連結し，走行している．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た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ブレーキ力（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．さらに，電車は一度に多数の乗客を収容し走行する形態のため，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ことがわかる．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．

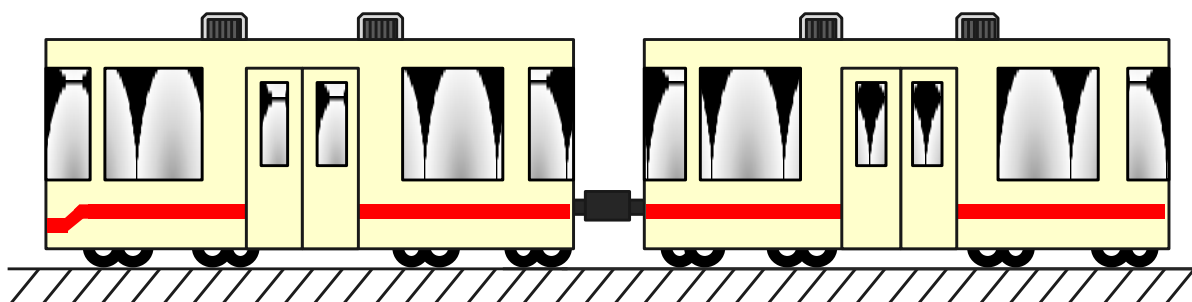


Fig.3.1 一般的な電車の概略図

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 brakes	T_1 [s]
Time constant of motor in the regeneration brake	T_2 [s]
Time constant of trailer in the machine brakes	T_3 [s]
Waste time of motor in the machine brakes	L_1 [s]
Waste time of motor in the regeneration brake	L_2 [s]
Waste time of trailer in the machine brakes	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]

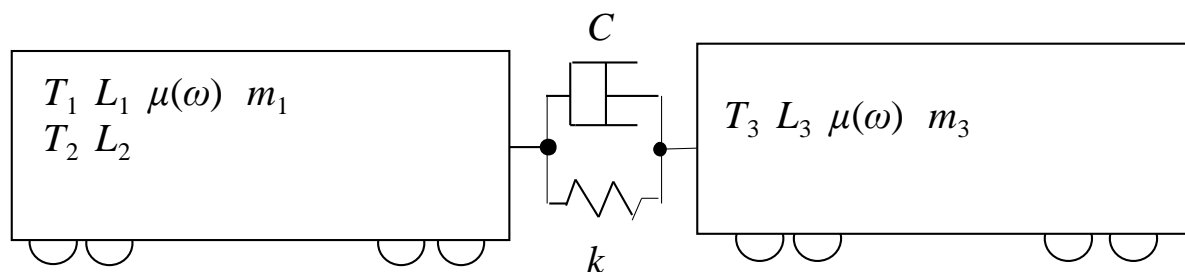


Fig.3.2 一般的な電車のモデル

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、今回の研究目的はブレーキハンドルの停車時における操作性評価にあるため、以下の2条件下で電車のモデルを簡略化する。

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. 電車に加わる抵抗力は機械ブレーキ力のみであるとする

本研究の目的がハンドル操作による機械ブレーキ力の変化の評価にあるため、運動方程式の簡略化のためこれを無視する。

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、ブレーキ力の運動方程式を立て、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。

運動方程式は

$$m\ddot{x} = -F \quad (3.1)$$

となり、ブレーキ力は、

$$F = k\mu(\omega) \frac{1}{1 + T_s} e^{-Ls} f \quad (3.2)$$

角度変換式は

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

となっている。また、粘着係数 $\mu(\omega)$ は速度に応じて変化するため本研究では電車の粘着係数の実測値より近似式を求め、運動方程式にはこの式を $\mu(\omega)$ として適用している。

実測データより得られた粘着係数 $\mu(\omega)$ の多項式近似式は

$$\mu(\omega) = 0.0022\dot{x}^2 - 0.0953\dot{x} + 2.079 \quad (3.4)$$

となっている。Fig.3.4 は粘着係数実測値グラフを示す。

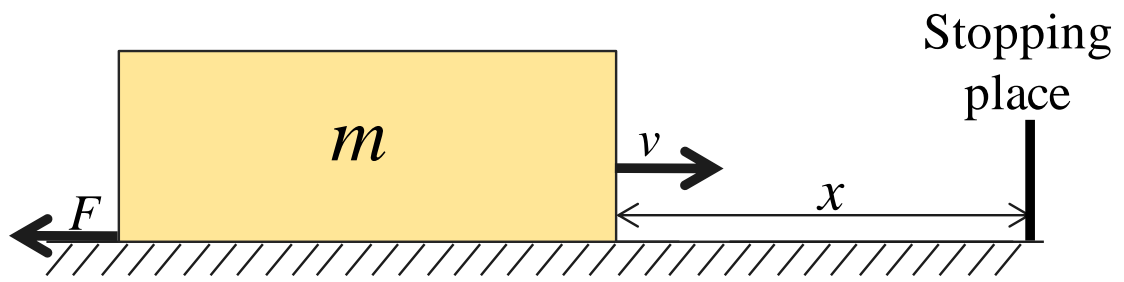


Fig.3.3 簡略化モデル

Table3.2 モデル内計算パラメータ

Mass	m [kg]
Brake force	F [N]
Velocity	v [m/s]
Waste time	L [s]
Time constant	T [s]
Friction coefficient	$\mu(\omega)$ [-]
Distance	x [m]
Force applied to handle	f [N]
Handle rotation	θ [rad]
Gain 1	k [-]
Gain 2	k' [-]

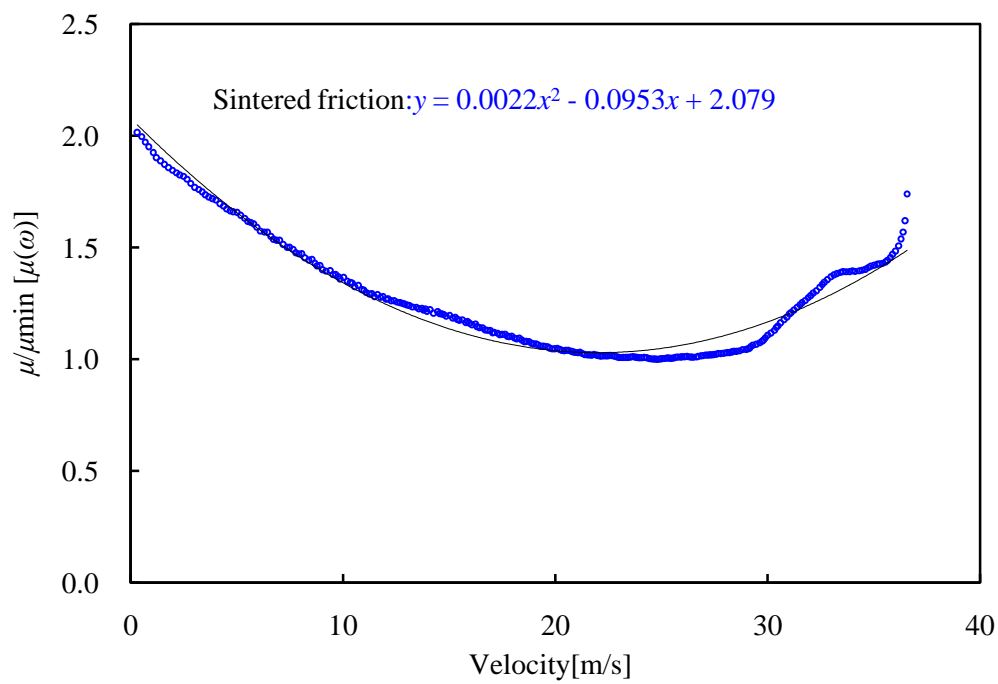


Fig.3.4 粘着係数実測値

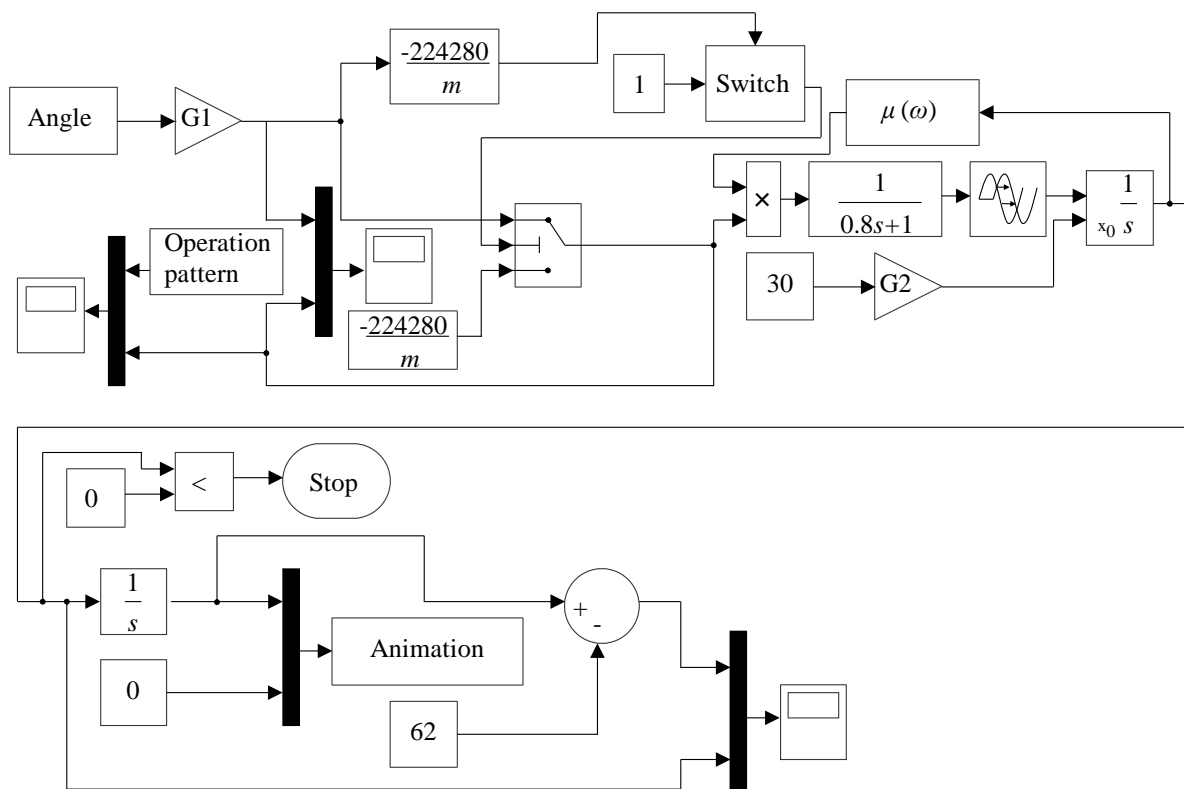
3.2 車両停車シミュレータの概要

モデル化によって電車の挙動が計算可能となったため、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。

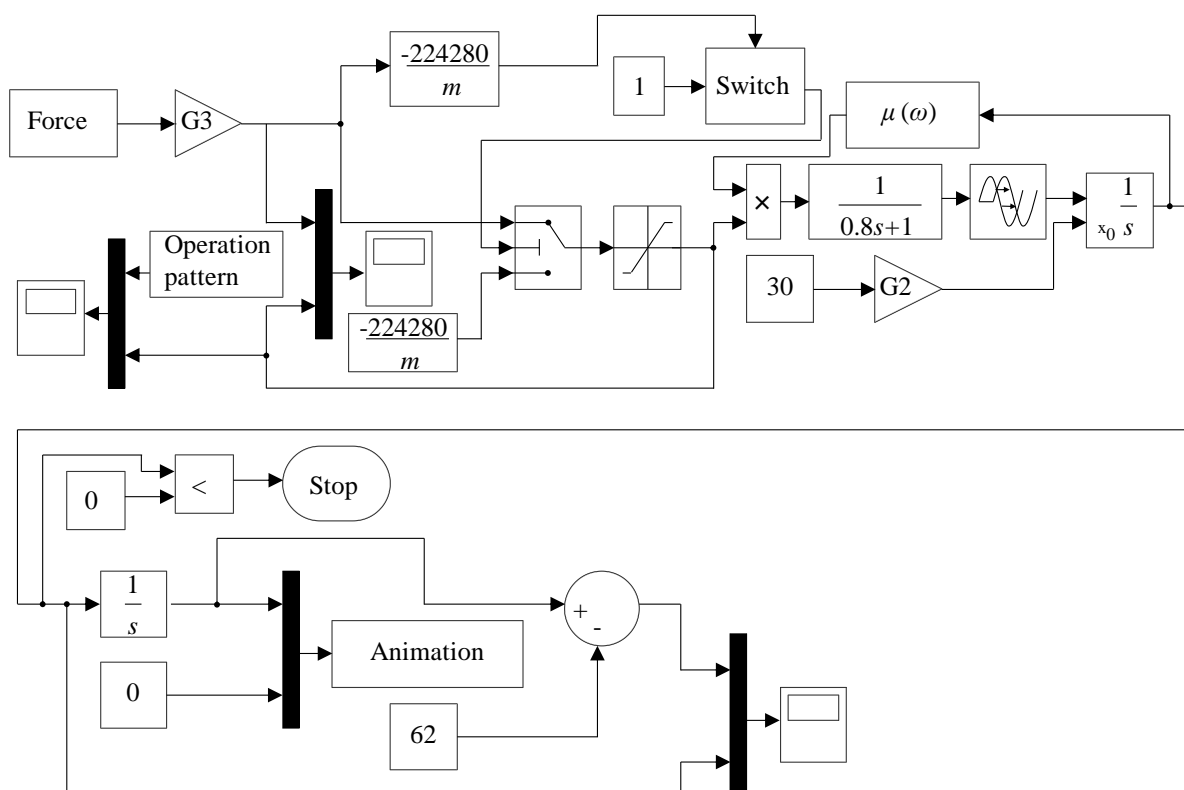
そこで、従来方式のブレーキハンドルと提案方式のブレーキハンドルの操作性を、ブレーキ力の調整が困難な低速域での停車操作を対象として評価し、停車時の操作性を比較検討することで、提案した力入力式の有効性を示すという目的のため、車両停車シミュレータを構築した。

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 とリアルタイムツールボックス (RTR) を用いて構築した。RTR 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 は実験用車両停車シミュレータのプログラム図を示す。Fig.3.5(a)は角度入力式ハンドル用車両停車シミュレータのプログラム図を示し、Fig.3.5(b)は力入力式ハンドル用車両停車シミュレータのプログラム図を示す。力入力式ハンドル用車両停車シミュレータでは指示減速度の上限は、角度入力式ハンドルにおける最大値（ハンドルを 120degree 回転させた時の指示減速度）に設定した。図中のゲイン G1, G2, G3 の値はそれぞれ $k \cdot k'$, $1000/3600$, k となっている。Fig.3.6 は後述する習熟操作用の車両停車シミュレータのプログラム図を示す。Fig.3.6(a)は習熟操作用角度入力式ハンドル用車両停車シミュレータのプログラム図を示し、Fig.3.6(b)は習熟操作用力入力式ハンドル用車両停車シミュレータのプログラム図を示す。習熟操作用車両停車シミュレータでは、理想的な指示減速パターンが表示される仕様になっている。

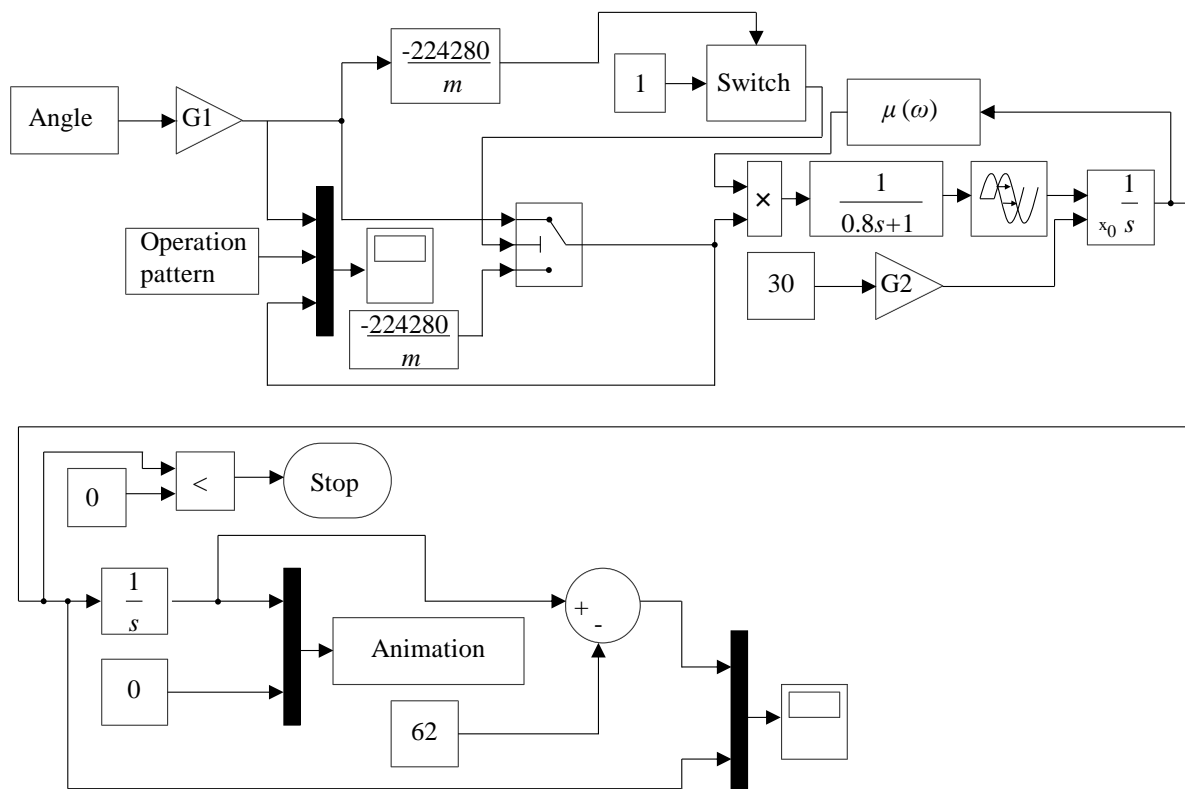


(a) 角度入力式ハンドル用シミュレータ

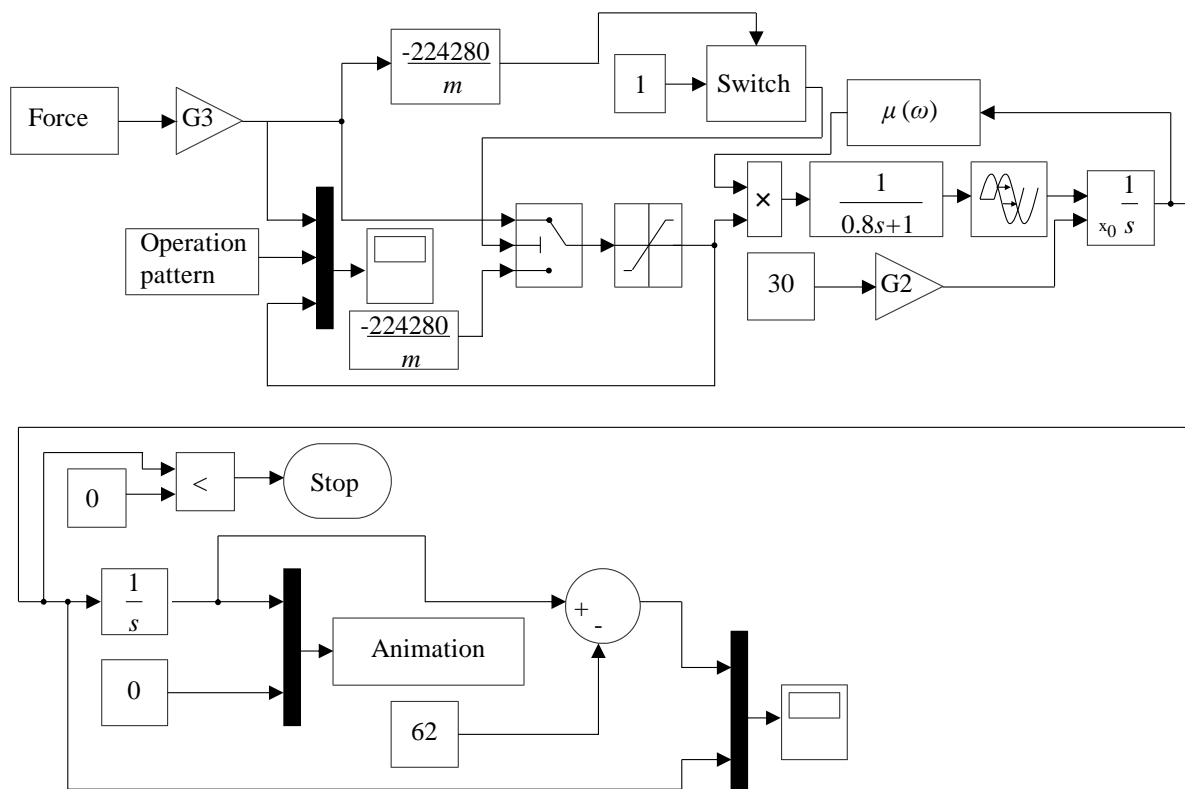


(b) 力入力式ハンドル用シミュレータ

Fig.3.5 車両停車シミュレータのプログラム図



(a) 角度入力式ハンドル用シミュレータ



(b) カ入力式ハンドル用シミュレータ

Fig.3.6 習熟操作の車両停車シミュレータのプログラム図

3.2.2 車両停車シミュレータの仕様

シミュレータでは、電車は初速 30km/h，初期減速度 0.56m/s^2 ，停止目標位置の 62m 手前からスタートするという初期条件を設けている。62m という距離は、実在する駅のホーム長を参考に設定した。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。Fig.3.7 にシミュレータの操作画面を示す。このシミュレータにより停止位置と電車先端との距離（過不足距離）と速度の変化，停車までにかかった時間（停車時間），それぞれのハンドルによって与えられた指示減速度を収集する。

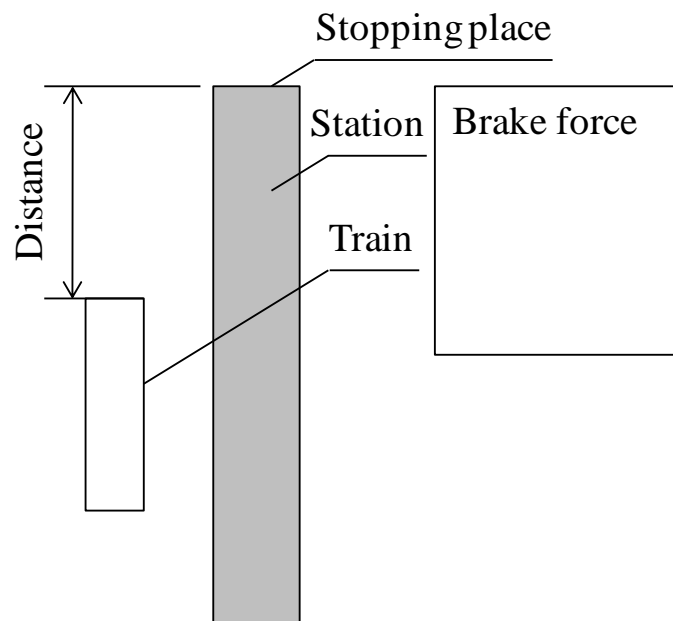


Fig.3.7 シミュレータ操作画面

第4章

実験方法

本章では実験方法について述べる。実験は、被験者にブレーキハンドル操作を習熟してもらうための習熟操作を行った後に本実験である低速域停車操作実験を行うという手順を踏んだ。実験の被験者は、平均年齢 22 歳前後の男子大学生 3 名である。4.1 節で習熟操作について述べ、4.2 節で低速域停車操作実験について述べる。

4.1 習熟操作

電車の停車操作では、停車位置を合わせる事のみでなく、乗客の感じる乗り心地や安全性に配慮したブレーキ操作を行う必要がある。一般に加減速が大きくなると、乗り心地は悪くなる。また、ブレーキ時には減速度のみでなく、さらにジャーク（減速度の時間変化量）も乗り心地に強く影響すると言われている^{[11][12][13]}。そこで、習熟操作では被験者が車両停車シミュレータの扱いを学ぶという目的に加え、乗客の乗り心地に配慮したブレーキ操作の習得を目的とした。習熟操作には習熟操作用車両停車シミュレータ（Fig.3.6）を用いた。習熟操作中は、シミュレータ操作画面右側の指示減速度グラフに、理想操作パターン（Fig.4.1）が表示される。理想操作パターンのジャークは乗り心地指標を用いて求めた。乗り心地指標は

$$z = \frac{100}{1 + \exp(\alpha \cdot \beta + b \cdot j + c)} \quad (4.1)$$

より求める。 β は減速度[m/s²], j はジャーク[m/s³], a, b, c は定数である。

乗り心地指標とは財団法人鉄道総合技術研究所によって提示されたブレーキパターンによる乗り心地を判定するための式であり^[4]、高減速運転においても乗り心地を損なわない運転を実現するブレーキパターンを検討するため、被験者を使った試験により減速度およびジャークと乗り心地評価の関係を調査した結果より得られたデータに基づいて得られたものである。この式の値が小さくなるようなブレーキパターンが乗り心地からみてよいブレーキパターンと考えられる。また、列車の速度制御において作業者は自らの判断タイミングを自覚した上で、その誤差を修正するという戦略が習熟に影響を与えるという結果が報告されており^[5]、理想パターンを用いた習熟操作は、自らの判断タイミングの自覚にも効果があると考えられる。理想操作パターンは電車の重量が 400t 時の操作を想定している。

習熟操作ではブレーキハンドル操作についての習熟のために、被験者は以下の操作を順に行った。

習熟操作1. ブレーキハンドルの基本動作を学ぶため、5 回操作

習熟操作2. 理想的な操作パターンを学習するため、5 回操作

習熟操作3. 質量変化に対する適応力を身につけるために、質量を変え 12 回操作

被験者ははじめに習熟操作 1 で、ハンドルの操作方法とシミュレータの概要、乗客への負担を仮定し滑らかにブレーキ力を操作するという前提条件の説明を受け、制限を設けずシミュレーションを 5 回行った。その後習熟操作 2 で、表示された理想減速パターン通りに減速度を調整するシミュレーションを 5 回行った。最後に習熟操作 3 で、質量を 400t、430t、465t の順に変化させるシミュレーションを 12 回行った。尚、この時試行開始前に現在の重量がどの値に設定してあるかの情報を被験者に毎回与えた。

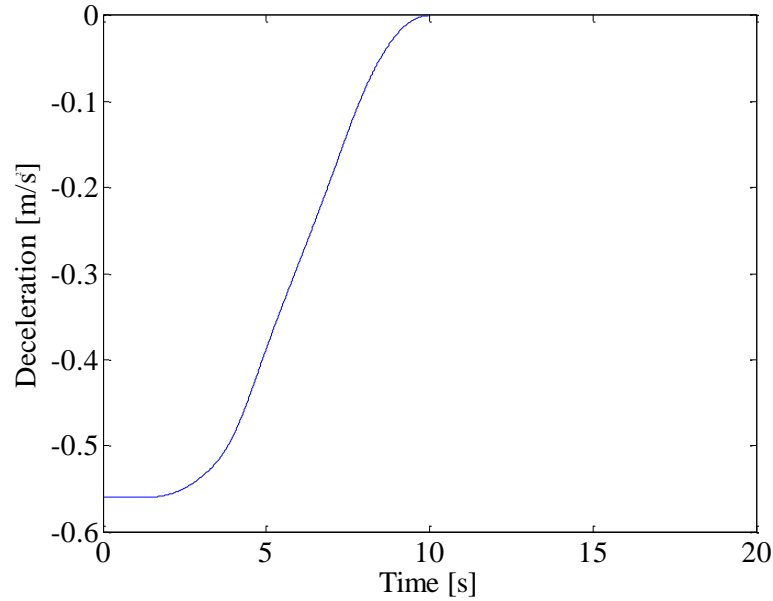


Fig.4.1 指示減速度理想操作パターン

4.2 低速域停車操作実験

従来方式のブレーキハンドルと提案方式のブレーキハンドルの操作性を、低速域での停車操作を対象として評価するために、車両停車シミュレータを用いて低速域停車操作実験を行った。

被験者は各コントローラについて習熟操作を行った後、コントローラの方式毎に9回、1人計18回低速域停車操作実験を行った。実験では、乗客の質量変動を考慮し、車両重量400tを軽、430tを中、465tを重として毎回変化させており、変化順は軽、中、重、軽、中、重、重、中、軽とした。尚、被験者は重量が試行の度に变化するという情報は与えられているが、現在の重量が軽、中、重のうちどの値に設定されているかの情報は与えられていない。また、被験者には、乗客の乗り心地を考慮し、滑らかに指示減速度を推移させるという説明を行った上で実験を行った。

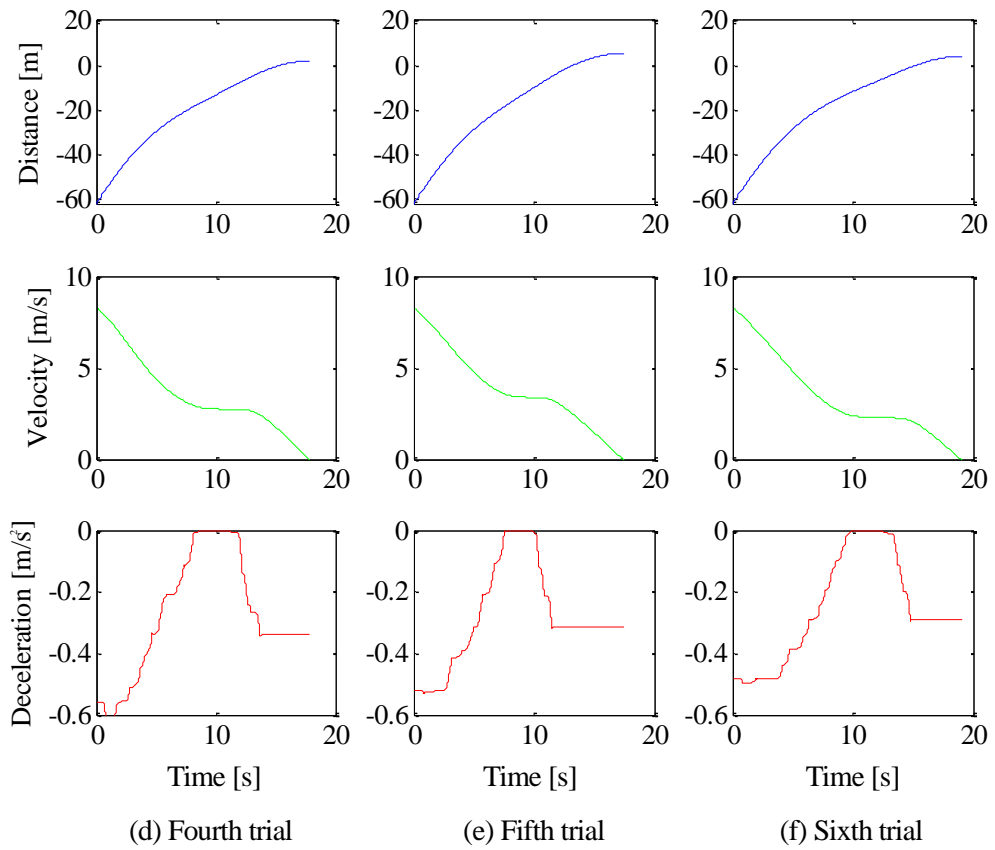
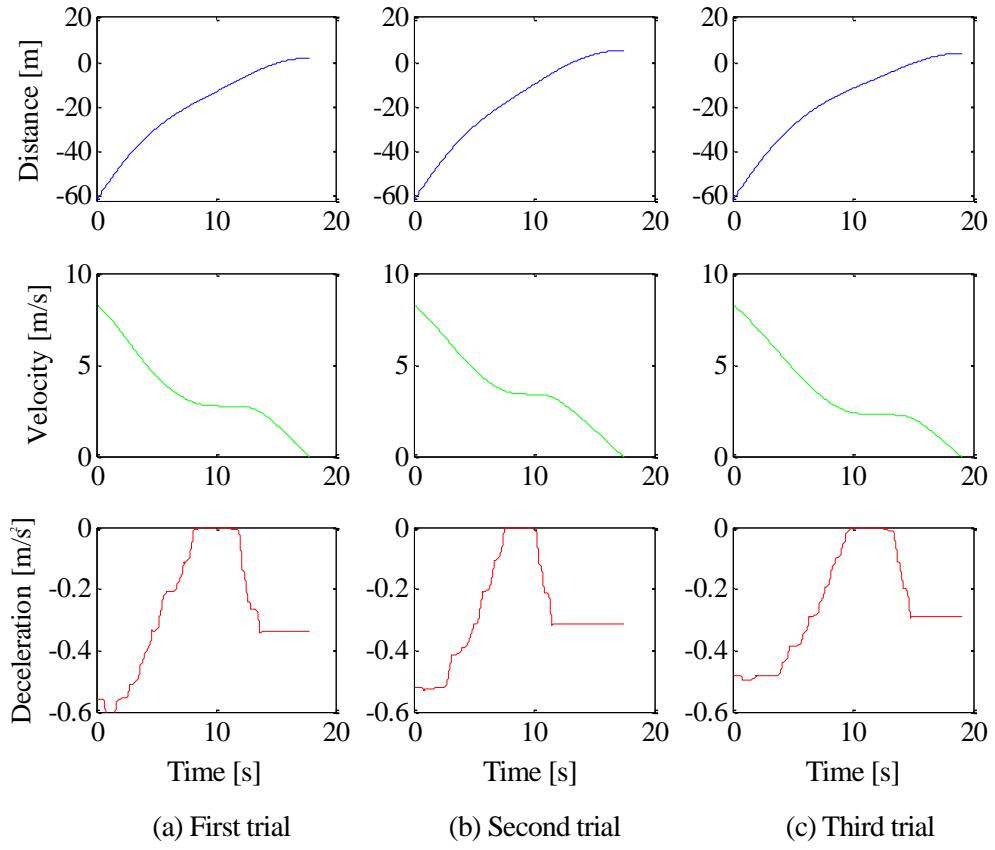
第 5 章

実験結果

本章では、低速域停車操作実験の実験結果について述べる。Table5.1 及び Fig.5.1～Fig.5.6 に実験結果を示す。Table5.1 は、被験者 A から C の実験によって得られた各ハンドルにおける過不足距離（Distance）と停車時間（Time）を示す。Angle が角度入力式ハンドルの、Force が力入力式ハンドルの結果を示している。表中、過不足距離の符号が負のときは、停車位置まで車両が達しなかったことを、正の時は停車位置を超えてしまったことをそれぞれ意味する。過不足距離、停車時間共に平均値に差はほとんどなく、分散については方式間で大きな違いがあることがわかる。Fig.5.1～Fig.5.3 に角度入力式ハンドルにおける被験者 A～C のブレーキ操作の例を示し、Fig.5.4～Fig.5.6 に力入力式ハンドルにおける被験者 A～C のブレーキ操作の例を示す。Fig.5.1～Fig.5.6 の縦軸は距離[m]、速度[m/s]、指示減速度[m/s²]を示し、横軸は時間[s]を、図中(a)～(i)は試行回数を示す。全体のブレーキパターンの特徴として、先行研究でも示されていたように、被験者は速度偏差と停止位置までの距離を基準にブレーキ操作を行っている傾向がみられた。また、被験者はブレーキ操作前半に指示減速度を少しずつ緩めていき、後半に速度偏差と停車位置までの距離を判断し、指示減速度を調整するような操作（調整操作）を行っている。角度入力式ハンドルと、力入力式ハンドルの違いは後半の調整操作に顕著に見られる。角度入力式ハンドルの場合は調整操作に一定のパターンが見られ、力入力式ハンドルの場合は調整操作が臨機応変なものとなっている。

Table5.1 過不足距離と停車時間

		Time[s]		Distance[m]	
Subject	Trial	Angle	Force	Angle	Force
A	1	18.18	19.30	0.38	-0.21
	2	19.36	17.65	1.90	-0.25
	3	16.92	19.68	2.35	0.70
	4	17.78	20.92	2.60	1.11
	5	20.72	16.69	0.47	0.39
	6	17.47	19.22	-0.40	-0.52
	7	17.75	18.92	0.99	0.38
	8	21.35	17.73	1.91	3.12
	9	19.51	18.41	1.68	0.91
B	1	17.26	17.01	3.37	-1.81
	2	16.83	18.21	2.47	-0.01
	3	17.84	15.79	3.42	0.86
	4	17.79	19.41	1.91	-0.79
	5	17.43	16.16	5.27	1.46
	6	19.02	19.13	3.92	-0.93
	7	18.01	17.47	4.79	-0.06
	8	17.53	17.45	5.87	0.70
	9	19.53	23.08	2.75	-0.14
C	1	18.52	16.91	2.81	4.04
	2	20.75	21.69	-0.93	0.09
	3	24.05	16.07	-0.51	-1.06
	4	20.97	15.74	-0.70	1.61
	5	29.87	17.22	-3.73	2.23
	6	22.90	15.16	-0.60	2.12
	7	23.58	17.24	-1.27	0.72
	8	31.44	20.97	-5.37	0.95
	9	21.47	23.50	-2.10	-0.43
Average		20.14	18.40	1.23	0.56
Variance		13.40	4.77	7.02	1.68



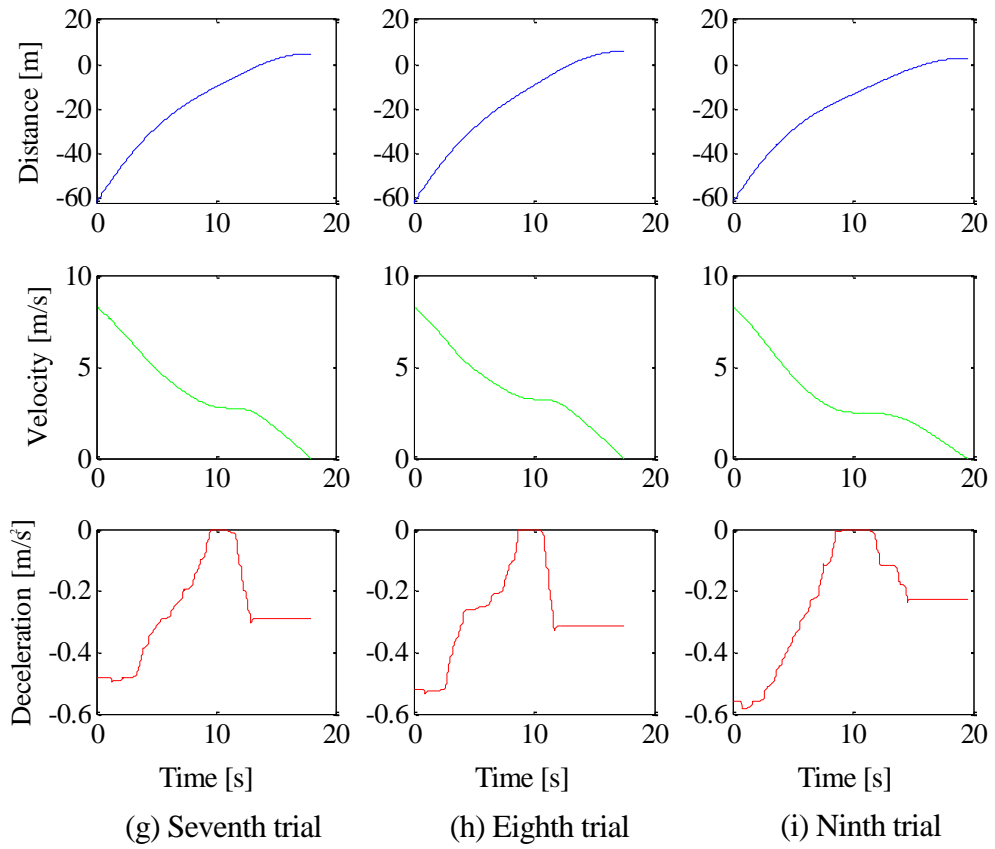
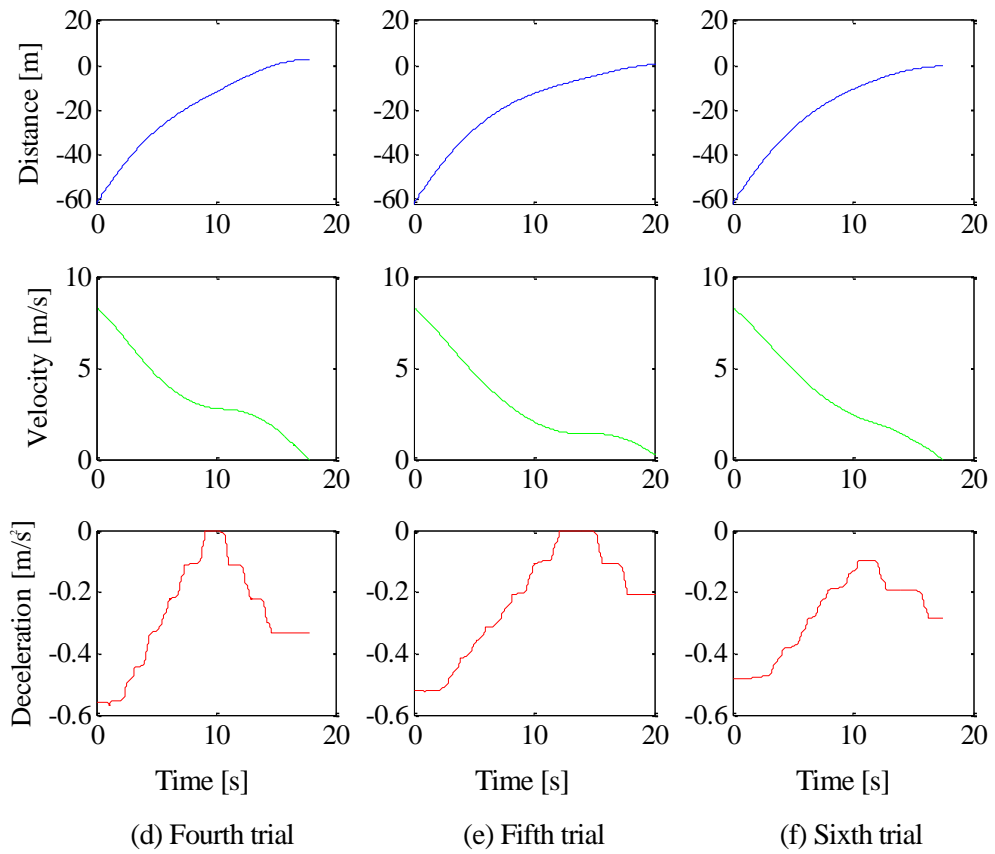
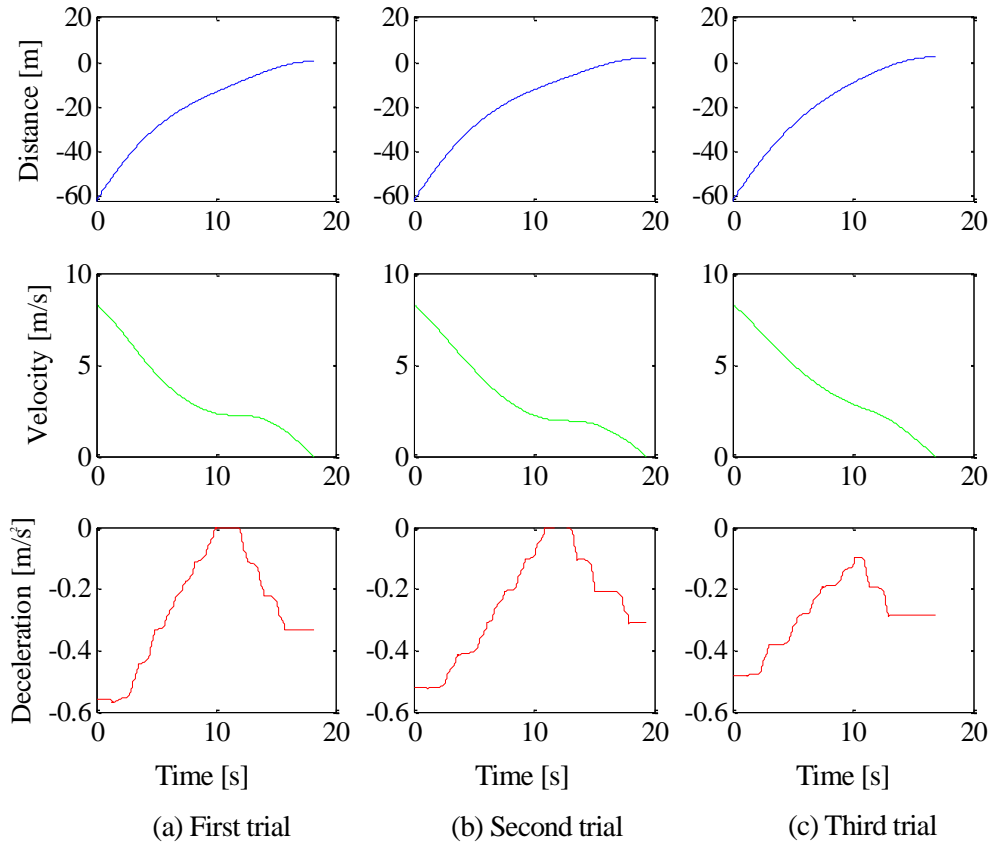
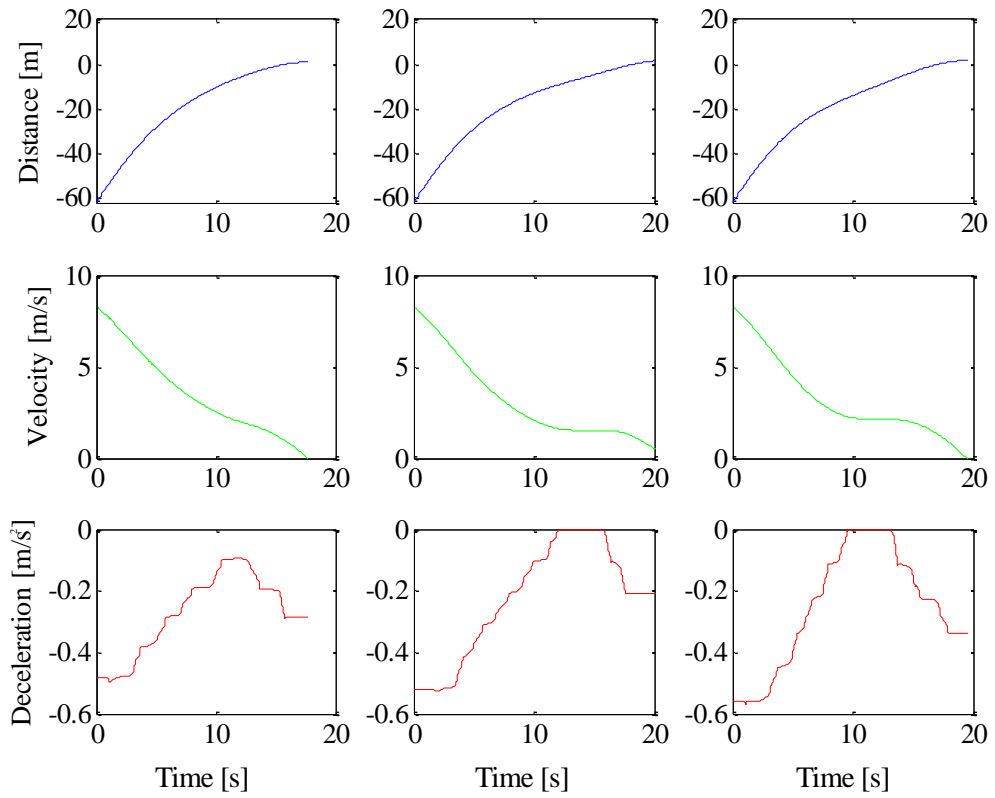


Fig.5.1 被験者 A の角度入力式ハンドルにおけるブレーキ操作



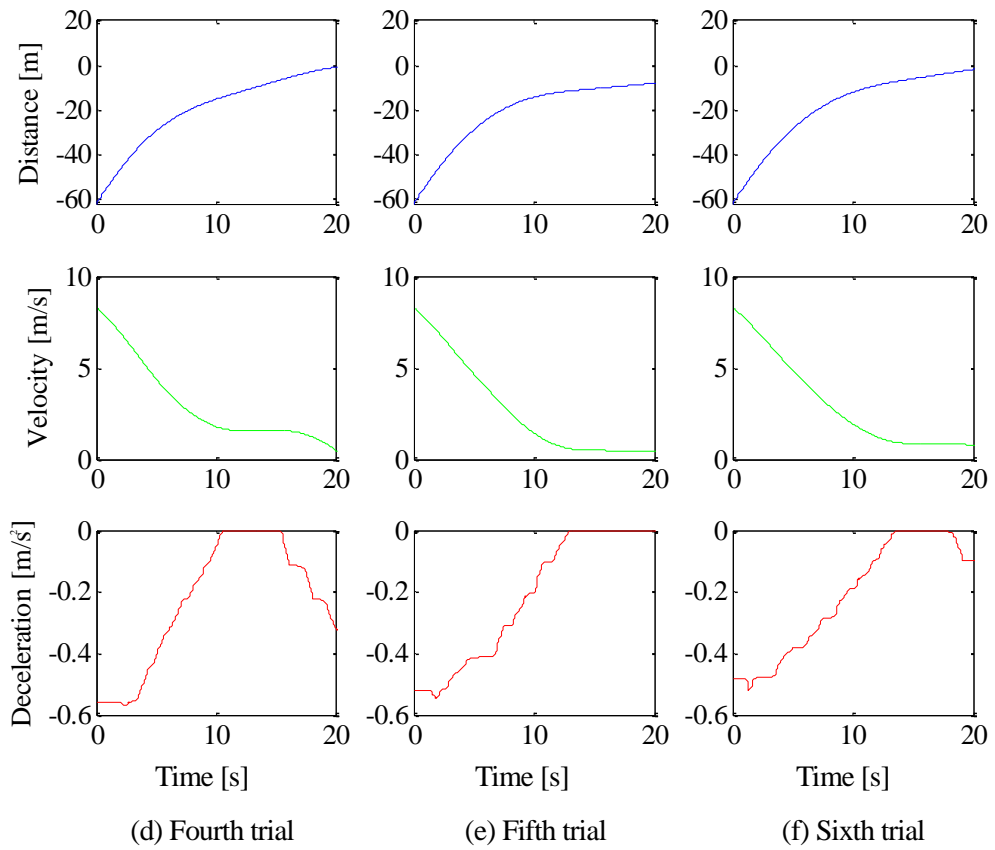
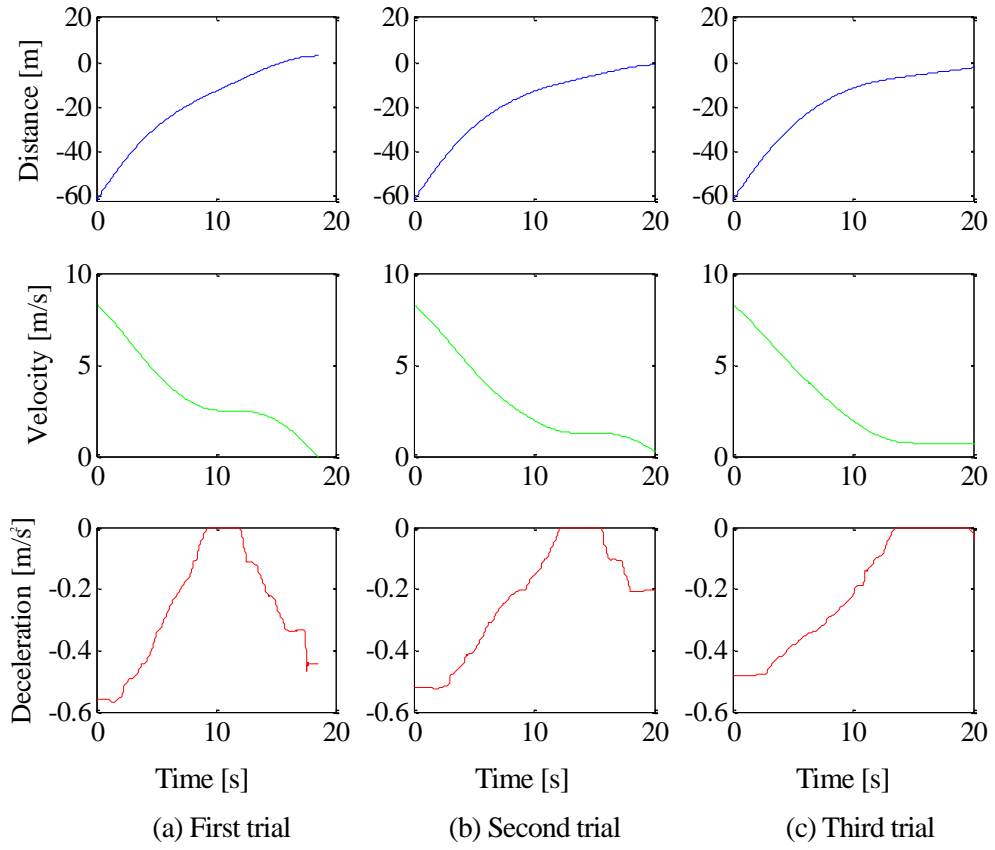


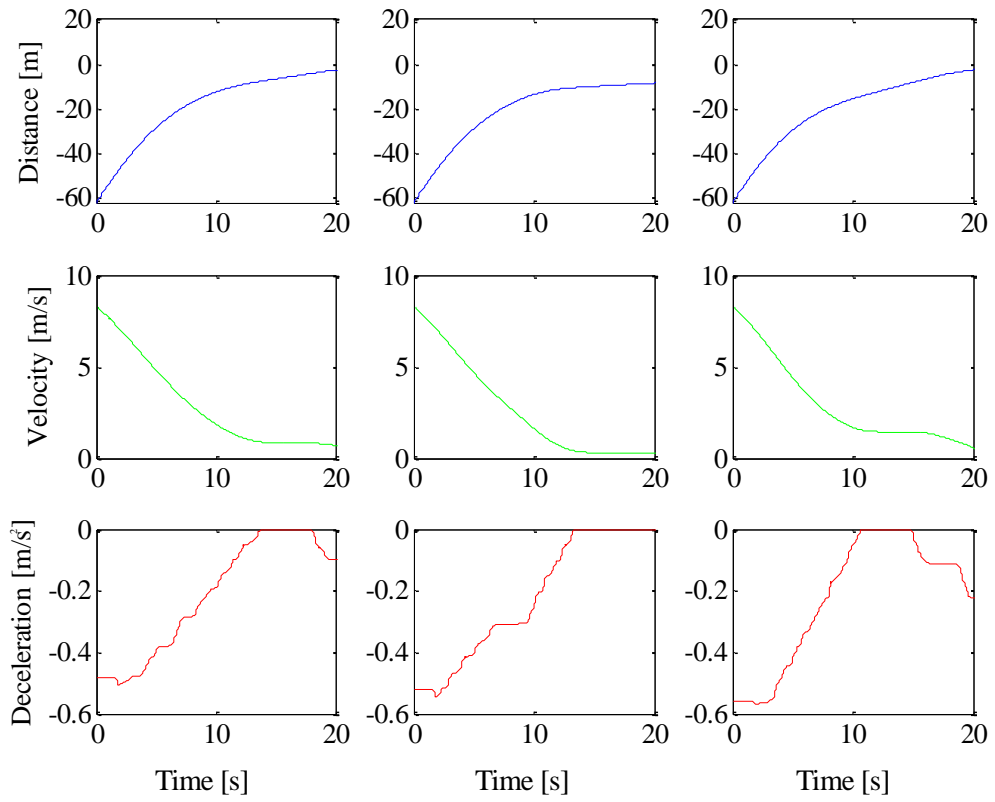
(g) Seventh trial

(h) Eighth trial

(i) Ninth trial

Fig.5.2 被験者 B の角度入力式ハンドルにおけるブレーキ操作



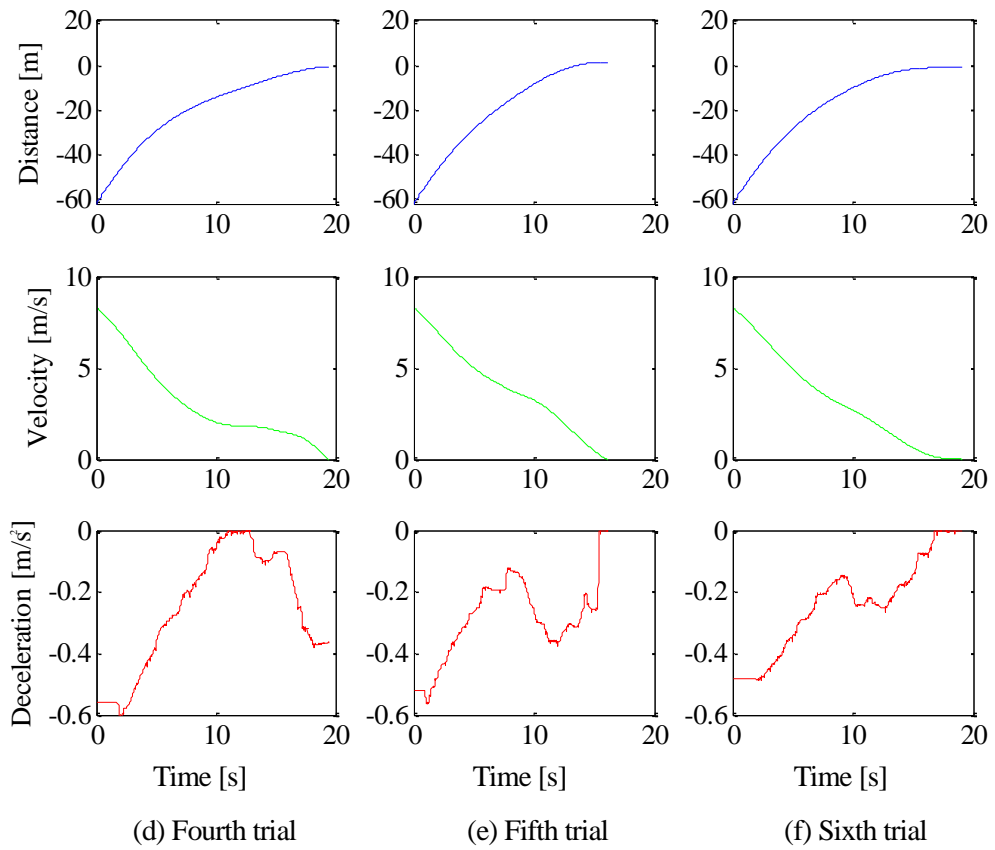
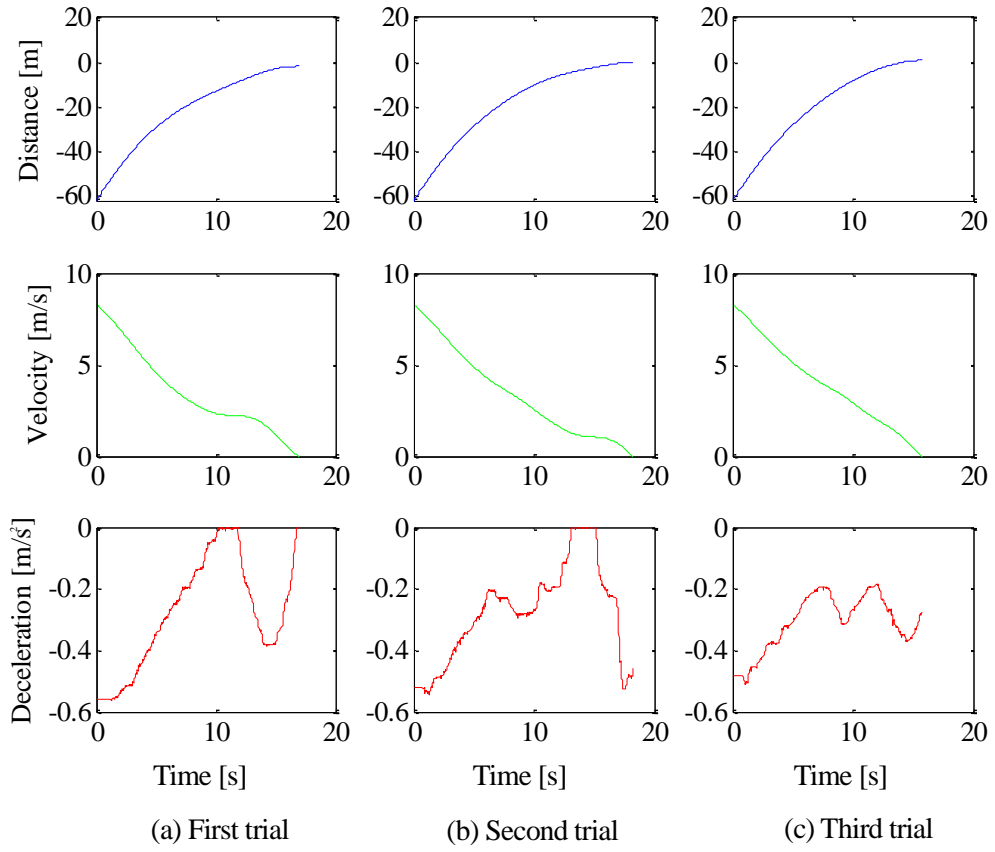


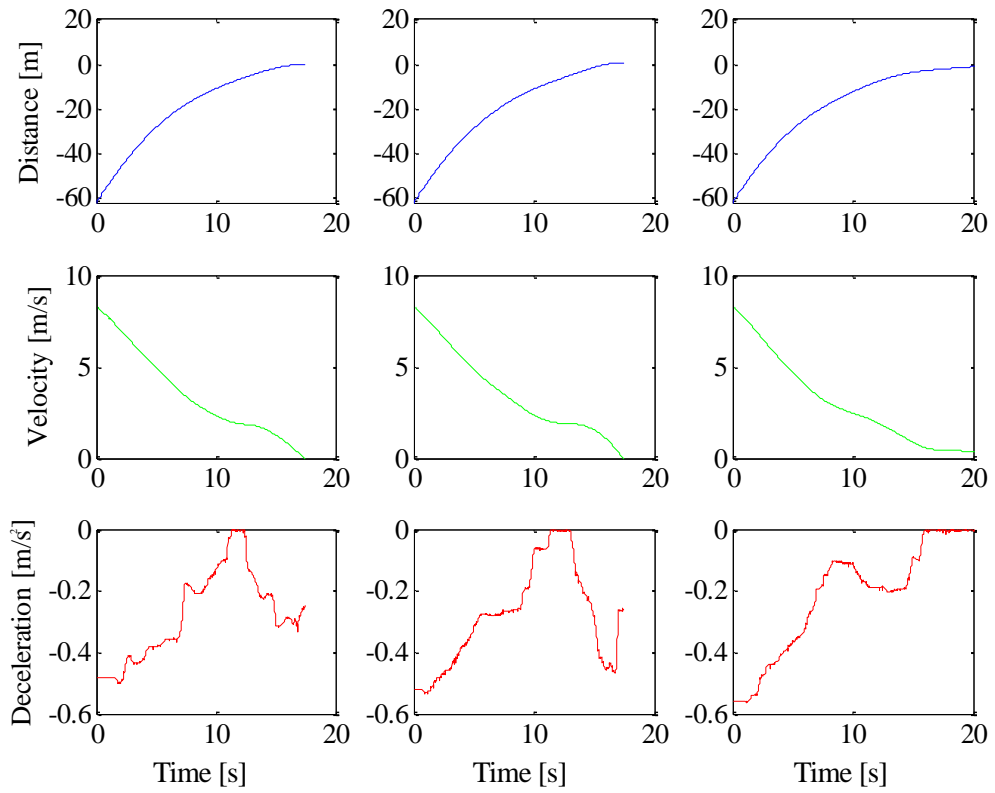
(g) Seventh trial

(h) Eighth trial

(i) Ninth trial

Fig.5.3 被験者 C の角度入力式ハンドルにおけるブレーキ操作



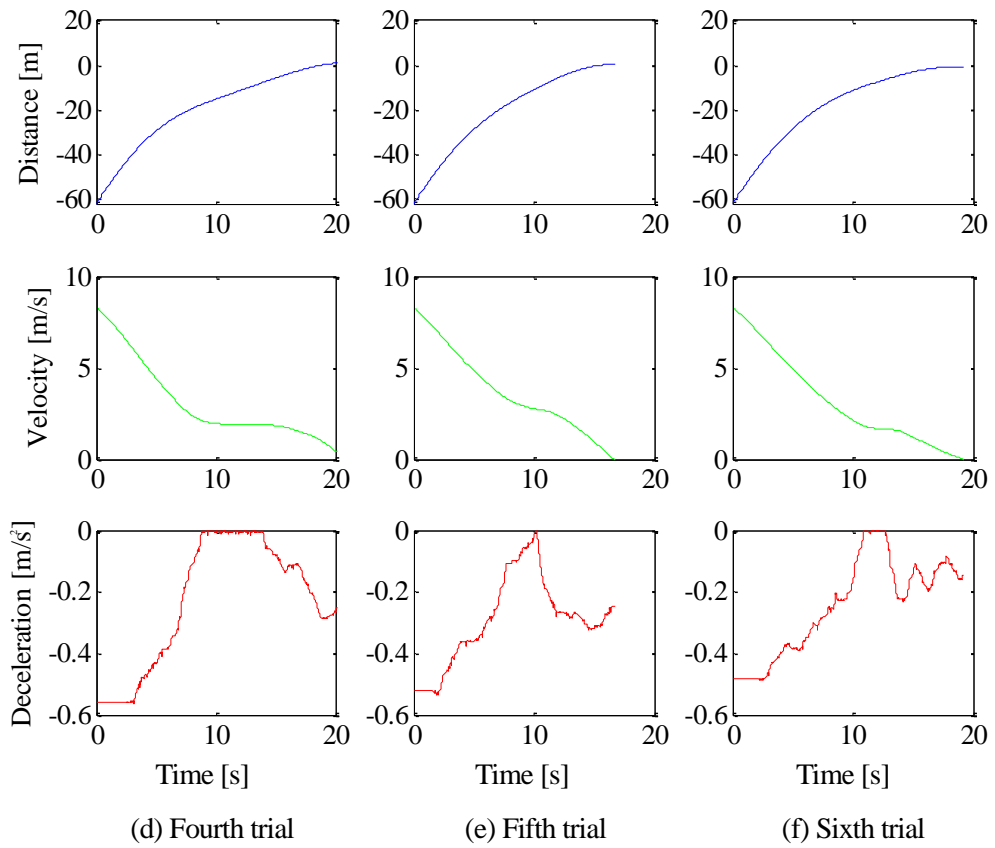
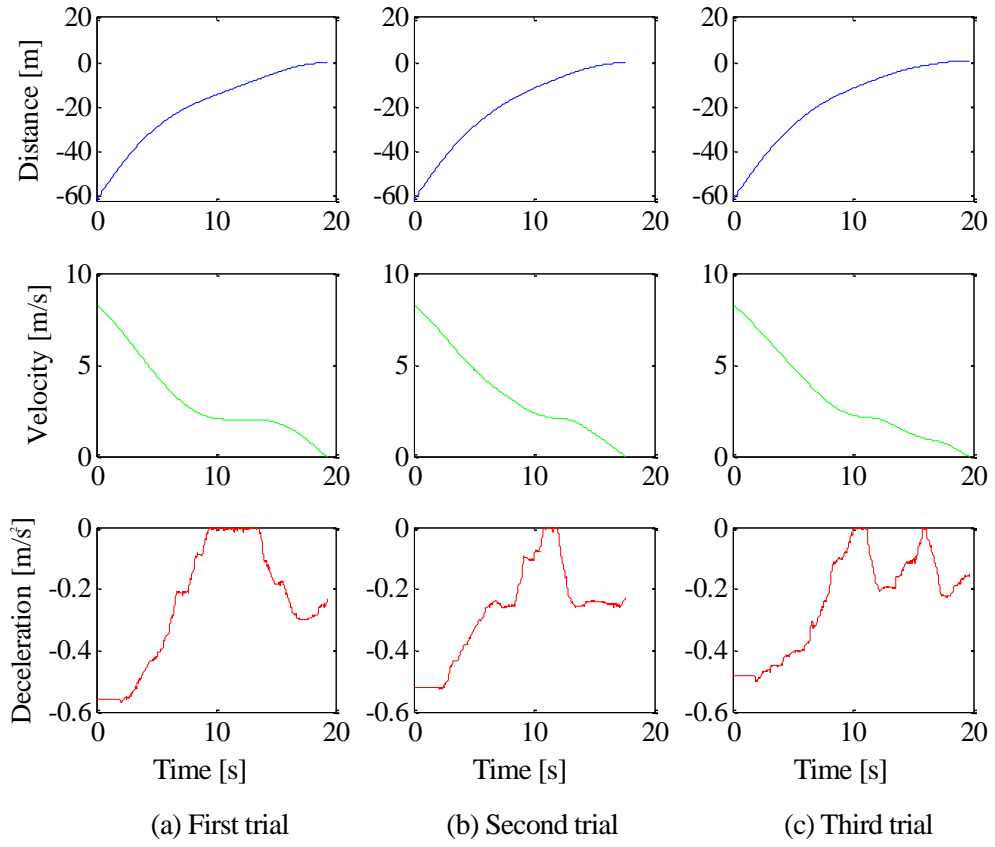


(g) Seventh trial

(h) Eighth trial

(i) Ninth trial

Fig.5.4 被験者 A の力入力式ハンドルにおけるブレーキ操作



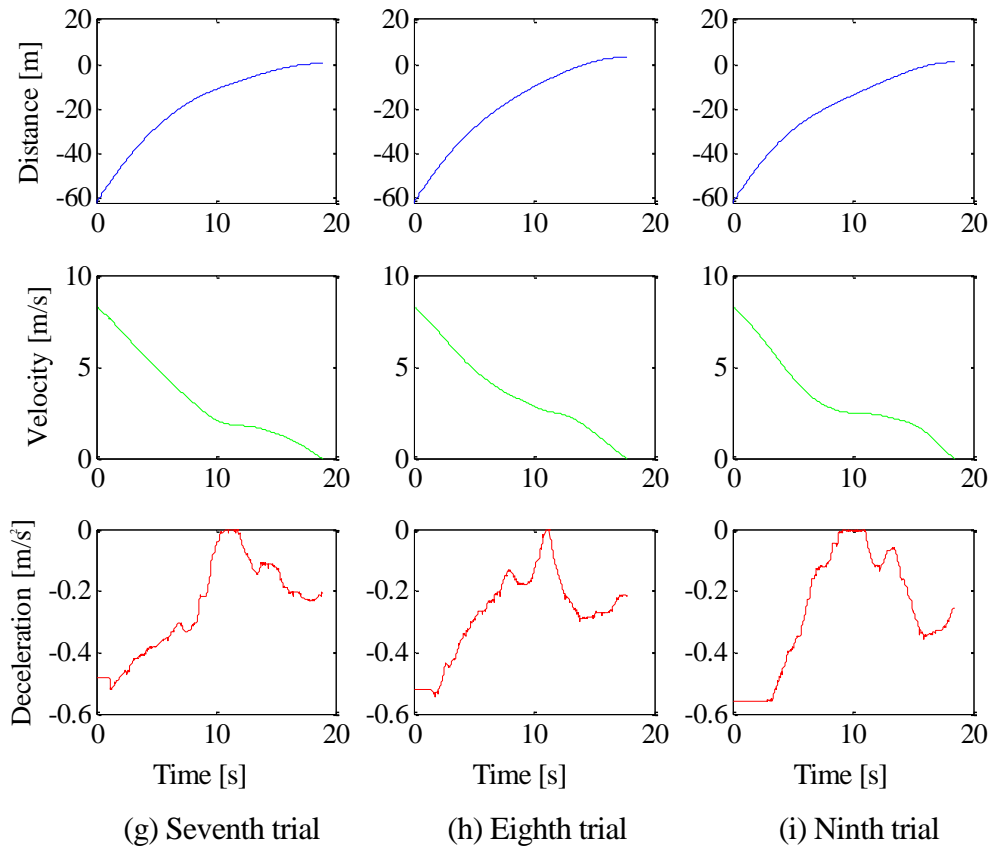
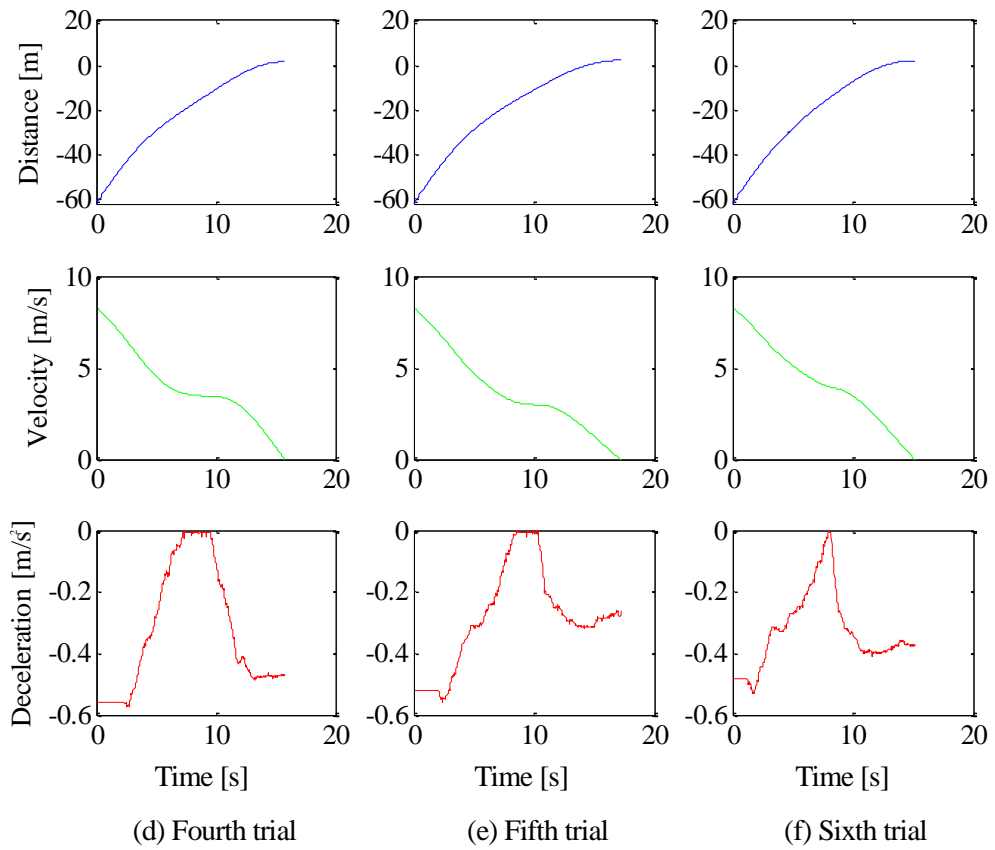
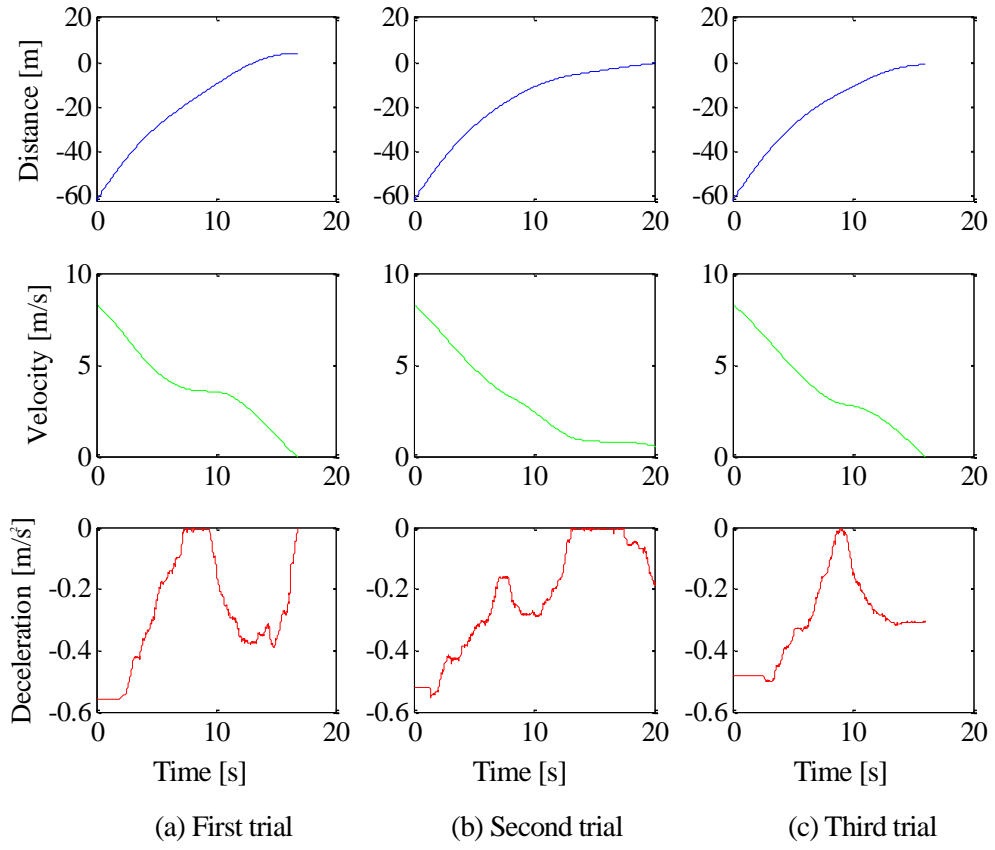


Fig.5.5 被験者 B の力入力式ハンドルにおけるブレーキ操作



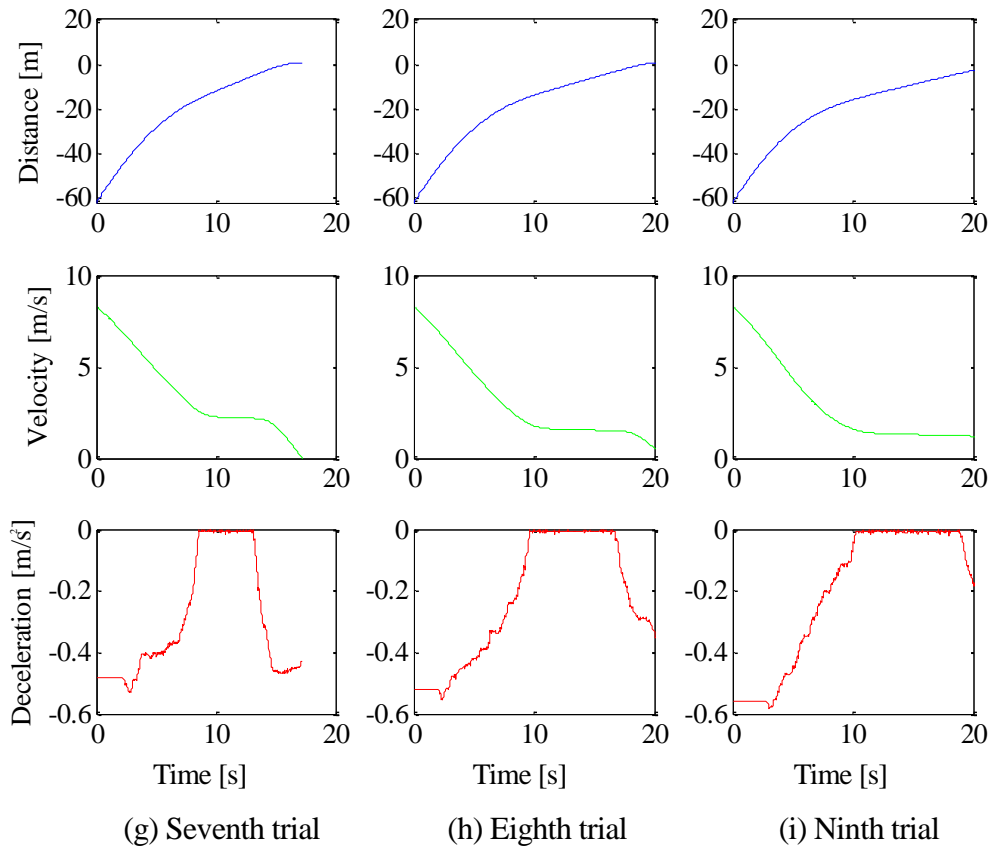


Fig.5.6 被験者 C の力入力式ハンドルにおけるブレーキ操作

第 6 章

考察

本章では実験結果についての考察を述べる。停車操作の方式によって結果にどのような差異が生じたのかを判定するために、はじめに方式間の停車位置と停車時間に対する評価を行い、次に方式間でのブレーキ操作の評価を、最後に乗り心地の評価を行った。6.1 節で停車時間と過不足距離の評価について述べ、6.2 節でブレーキ操作の評価について、6.3 節でブレーキハンドルの方式による乗り心地の差異の評価について述べる。

6.1 過不足距離と停車時間の評価

停車操作時、方式の違いによって停車時間と停車距離にどのような差異が生じたのかを評価するため、実験によって得られた各被験者の停車時間と過不足距離に対して二元配置分散分析を行った。過不足距離に対し分散分析を行うに当たり、停車位置と電車先頭との差について検定を行う必要があったので、実験によって得られた過不足距離の絶対値を検定対象とした。

Fig.6.1 は全ての被験者に対する停車位置と停車時間に対する二元配置分散分析結果を示す。図中青グラフは角度入力式ハンドルを示し、赤グラフは力入力式ハンドルを示す。Fig.6.1(a)は停車時間の分析結果である平均値と分散、有意差を示し、縦軸が停車時間[s]を、横軸がハンドルの方式を示す。Fig.6.1(b)は過不足距離の分析結果である平均値と分散、有意差を示し、縦軸が過不足距離を、横軸がハンドルの方式を示す。Fig.6.1(a)において、被験者 A～C の停車時間に方式間で 5%水準の

有意差が見られ、角度入力式ハンドルのばらつきが力入力式ハンドルのばらつきに対し大きな値を示している。また被験者と停車時間との間に 1%水準で交互作用がみられた。このことから、力入力式ハンドルと比較して角度入力式ハンドルのばらつきが小さく、短い時間で停車操作を終えているということ、方式間の差に各被験者の結果が大きく影響しているということがわかった。

Fig.6.1(b)において、被験者 A～C の過不足距離に方式間で 0.1%水準の非常に大きな有意差がみられ、角度入力式ハンドルのばらつきが力入力式ハンドルのばらつきに対し大きく値を示している。また被験者と過不足距離との間に 0.1%水準で交互作用がみられた。このことから、力入力式ハンドルは角度入力式ハンドルと比較してばらつきが小さく過不足距離が安定しないということ、方式間の差に各被験者の結果が大きく影響しているということがわかった。停車位置と停車時間の分析結果で強い交互作用が判定されたため、被験者間で一元配置分散分析を行った。

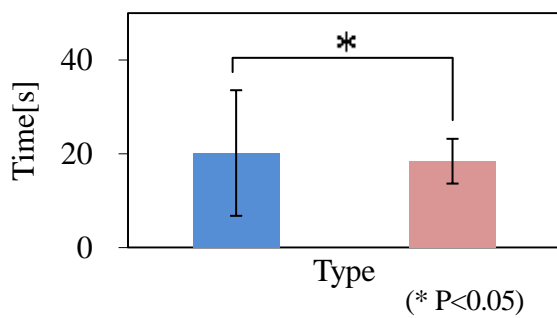
Fig.6.2～Fig.6.4 は各被験者の停車位置と停車時間に対する一元配置分散分析結果を示す。図中青グラフは角度入力式ハンドルを示し、赤グラフは力入力式ハンドルを示す。Fig.6.2(a)～Fig.6.4(a)は各被験者の停車時間の分析結果である平均値と分散、有意差を示し、縦軸が停車時間[s]を、横軸がハンドルの方式を示す。被験者 A の停車時間の分析結果では、方式間での有意差は見られず、ばらつきは角度入力式ハンドルの方が大きい値を示したが極端に差があるとはいえない程度である。被験者 B の停車時間の分析結果では、被験者 A と同様方式間に有意差は見られなかったが、ばらつきは力入力式ハンドルの方が角度入力式ハンドルに対し大きな値を示している。被験者 C の停車時間の分析結果では、方式間に 1%水準の有意差が見られ、ばらつきは角度入力式ハンドルが力入力式ハンドルに対し大きな値を示した。ばらつきの値と有意差が強くでている被験者 C の結果が、停車時間の分析結果に大きな影響を与えたと考えられる。停車時間に一元配置分散分析を行うことで、各被験者によって停車時間の操作結果が異なっているということがわかった。

Fig.6.2(b)～Fig.6.4(b)は各被験者の過不足距離の分析結果である平均値と分散、有意差を示し、縦軸が停車時間[s]を、横軸がハンドルの方式を示す。被験者 A の過不足距離の分析結果では、方式間での有意差は見られず、ばらつきは両方式共に小さな値を示した。被験者 B の過不足距離の分析結果では、方式間で 0.1%水準の非常に大きな有意差が見られ、ばらつきに関して力入力式ハンドルの方が角度入力式ハンドルに対し小さな値を示した。被験者 C の過不足距離の分析結果では、方式

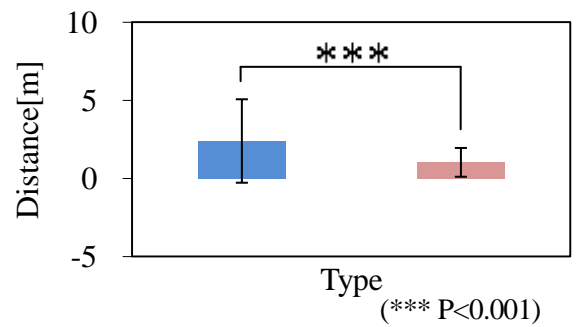
間で有意差は見られず、被験者 B と同様に力入力式ハンドルに対して角度入力式ハンドルの方がばらつきに関し大きな値を示している。過不足距離に一元配置分散分析を行うことで、各被験者の平均値は力入力式ハンドルを用いた場合小さく、分散値も小さくなる傾向があるということがわかった。

これらのことを以下にまとめる。

- 停車時間の場合、被験者毎に異なる結果を示し、平均値においてわずかに力入力式ハンドルの方が角度入力式ハンドルに比べ短い時間で停車している。
- 過不足距離の場合、力入力式ハンドルは角度入力式ハンドルと比較してより停車位置に近く、ばらつきの小さい正確な停車を行っている。

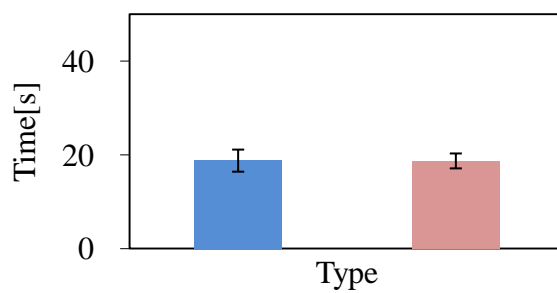


(a) 停車時間の二元配置分散分析結果

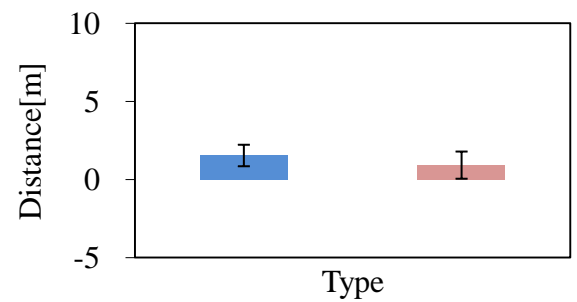


(b) 過不足距離の二元配置分散分析結果

Fig.6.1 全ての被験者の結果評価

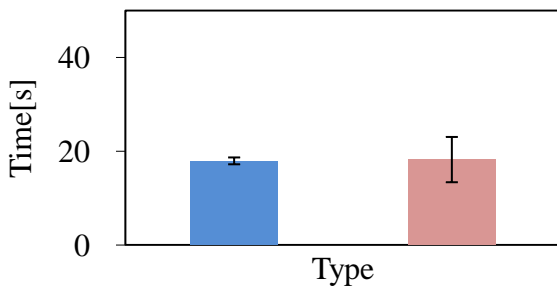


(a) 停車時間の一元配置分析結果

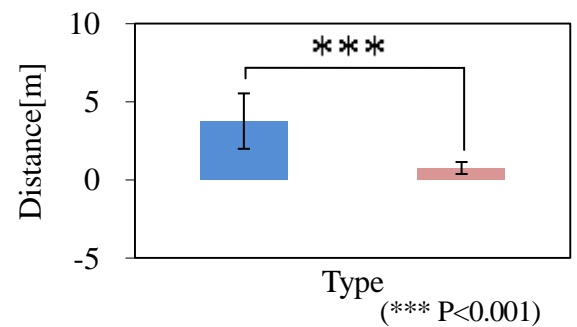


(b) 過不足距離の一元配置分析結果

Fig.6.2 被験者 A の結果評価

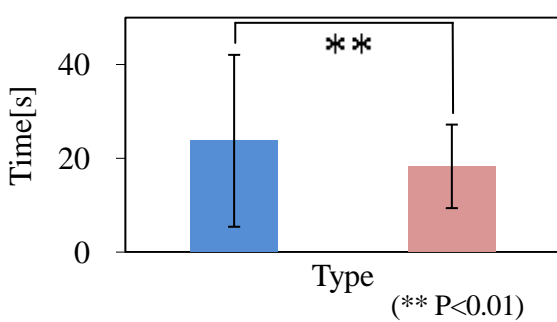


(a) 停車時間の一元配置分析結果

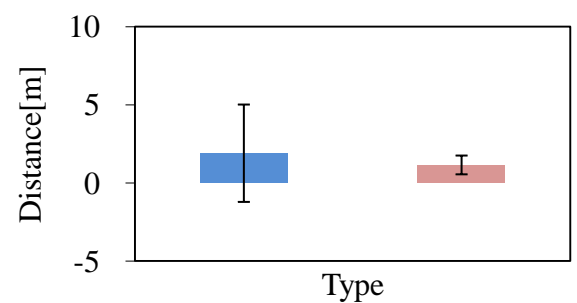


(b) 過不足距離の一元配置分析結果

Fig.6.3 被験者 B の結果評価



(a) 停車時間の一元配置分析結果



(b) 過不足距離の一元配置分析結果

Fig.6.4 被験者 C の結果評価

6.2 ブレーキ操作の評価

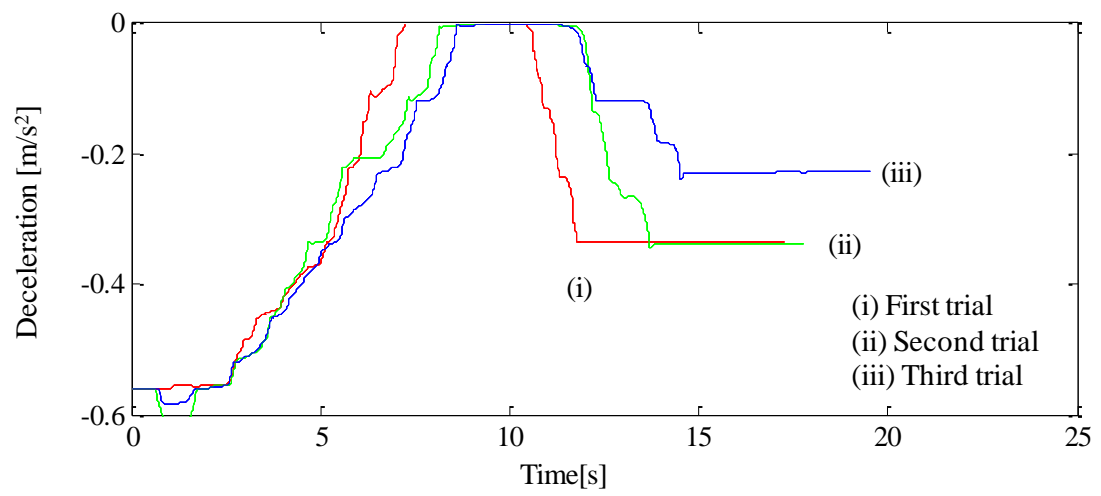
過不足距離と停車時間の評価で判明した方式間の差異の原因がブレーキハンドルによって与えられる指示減速度の推移にあると考え、ブレーキ操作の評価を行った。

6.2.1 ブレーキパターンに対する重量変化の影響

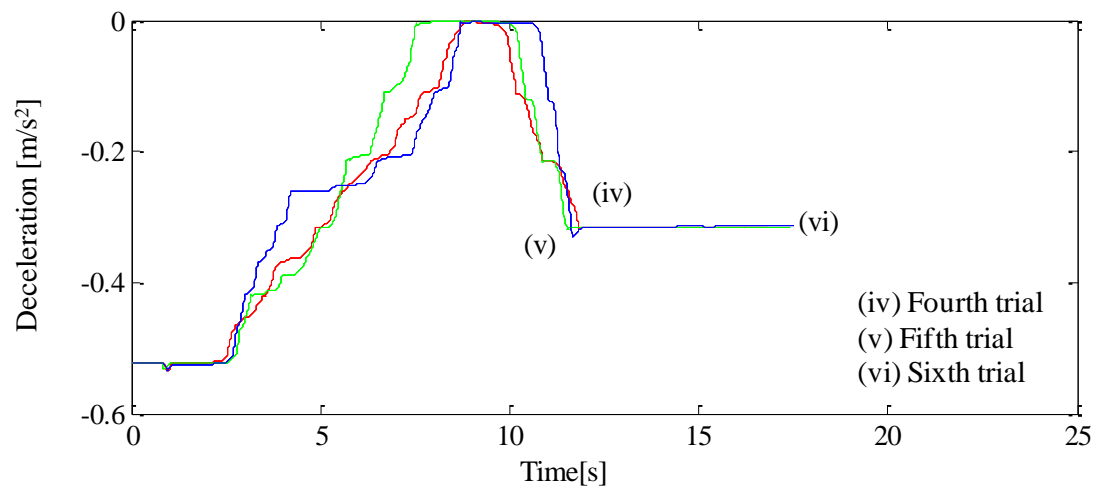
はじめに被験者のブレーキ操作が重量変化による影響をどのように受けて推移しているかを見るために、Fig.5.1～Fig.5.6 を、被験者ごと、重量ごとに分類した。Fig.6.5～Fig.6.10 は重量毎にブレーキ操作を分類した図を示す。Fig.6.5～Fig.6.10 の縦軸は指示減速度[m/s²]を示し、横軸は時間[s]を示す。図中 (a) ～ (c) は電車の重量を示し、(i) ～ (ix)を示す。これらの図より、操作パターンは方式によらず、前半の指示減速度を緩めていく区間と、後半の指示減速度を停車に向け調整する区間が存在する事がわかる。重量の変化は操作パターン前半の、指示減速度を緩めていく操作における傾きに影響を与えており、重量が重くなるにつれ、指示減速度の傾斜（ジャーク）は緩やかになっている。この変化は両方式で共通して観測されるため、ハンドルの方式間の差ではなく、ブレーキ操作全体における特徴であるといえる。操作パターン後半になると、方式間で異なる特徴が現れる。角度入力式ハンドルでは被験者全員が共通して、停車の 10 秒前後から指示減速度を強める調整操作を行っている。また、重量変化によるジャークへの影響もみられない。一方力入力式ハンドルでは停車の 15 秒前後から指示減速度を強めたり緩めたりする調整操作を行っていることが分かる。また、角度入力式ハンドルと同様重量変化によるジャークへの影響はみられない。

これらのことを以下にまとめる。

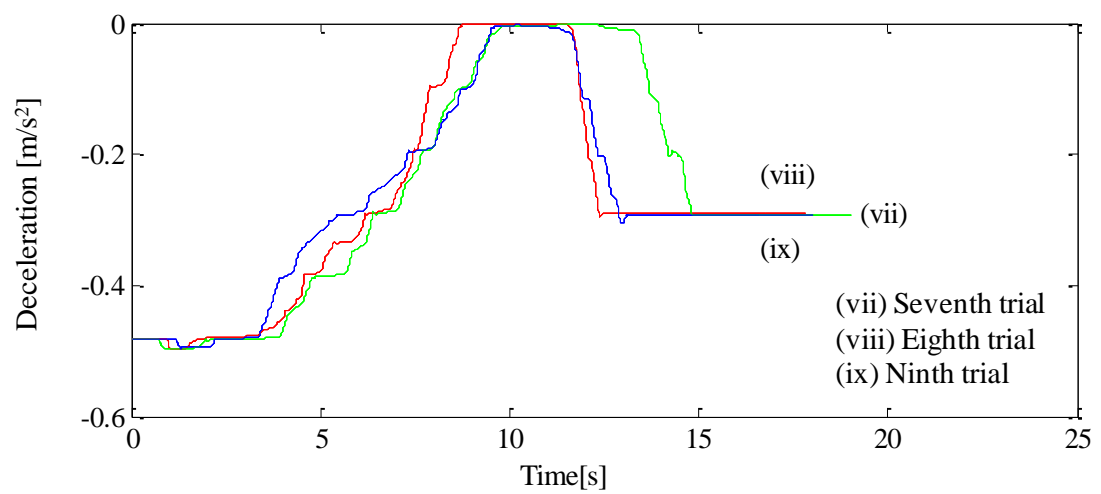
- ブレーキ操作の前半、被験者は一定のジャークで指示減速度を緩めていき、重量の変化に応じてジャークの調整を行っている。
- ブレーキ操作の後半、両方式共に重量の影響はみられず、被験者は角度入力式ハンドルの場合と力入力式ハンドルの場合で異なる指示減速度の操作を行っている。



(a) Light



(b) Middle



(c) Heavy

Fig.6.10 被験者 A の力入力式ハンドルにおけるブレーキ操作

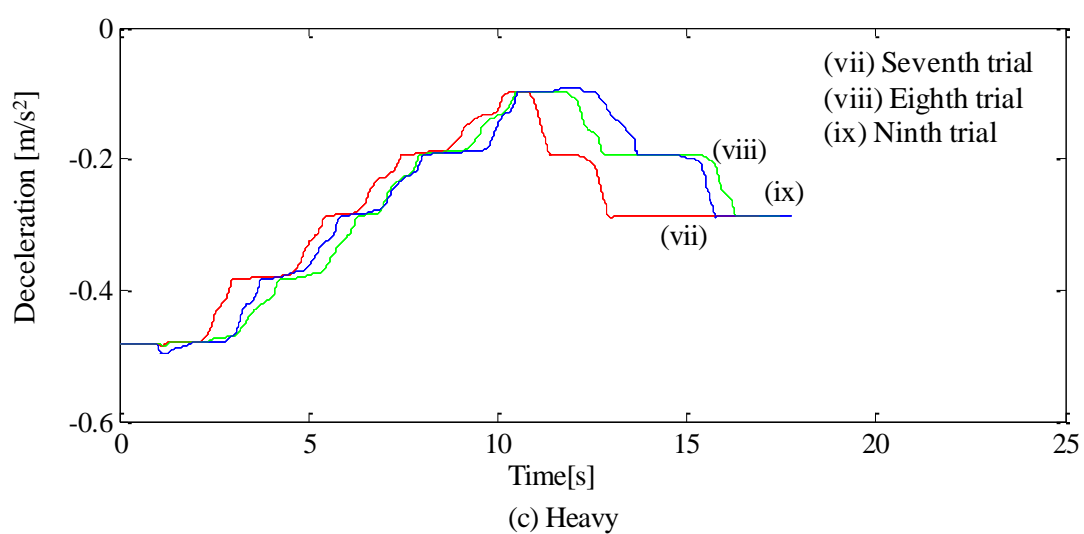
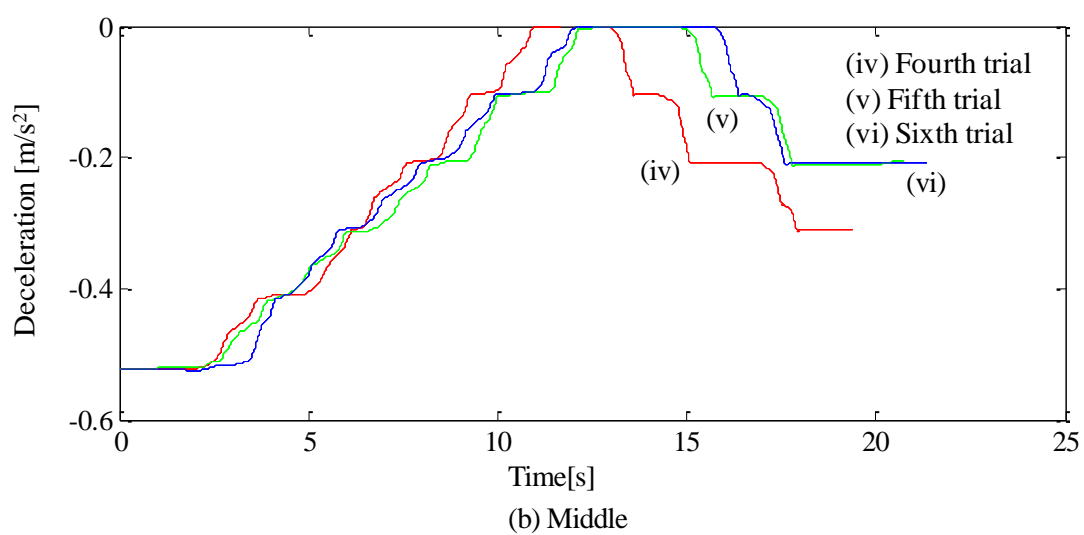
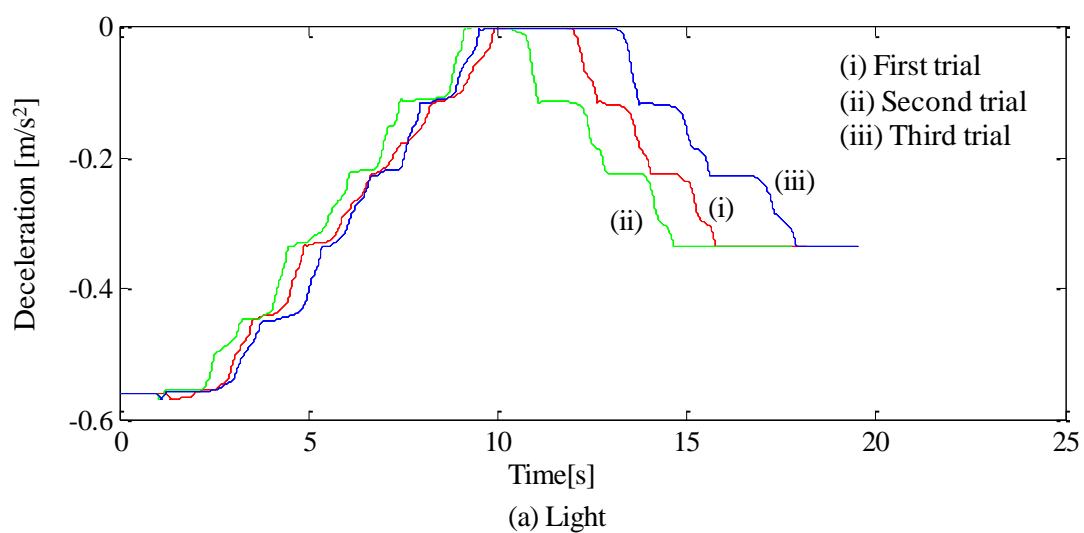
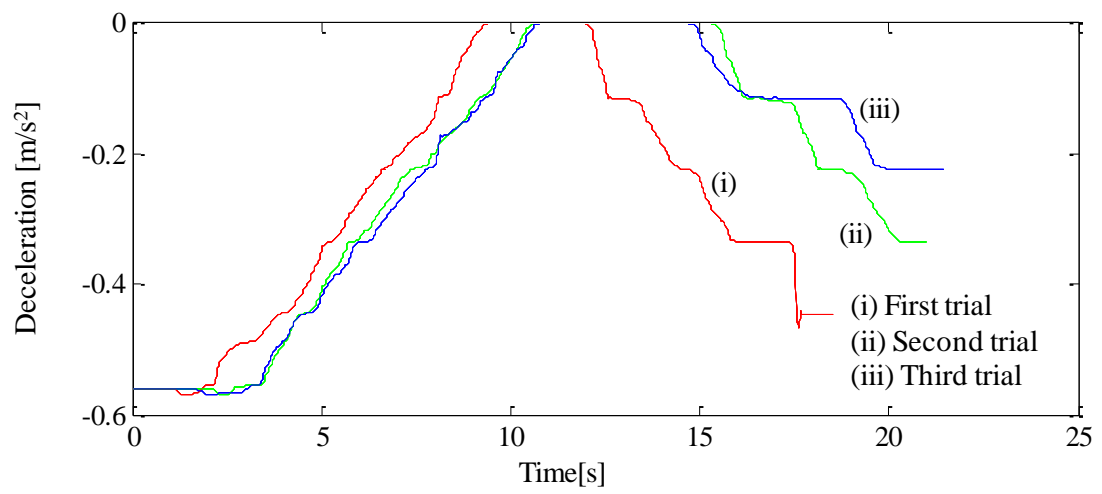
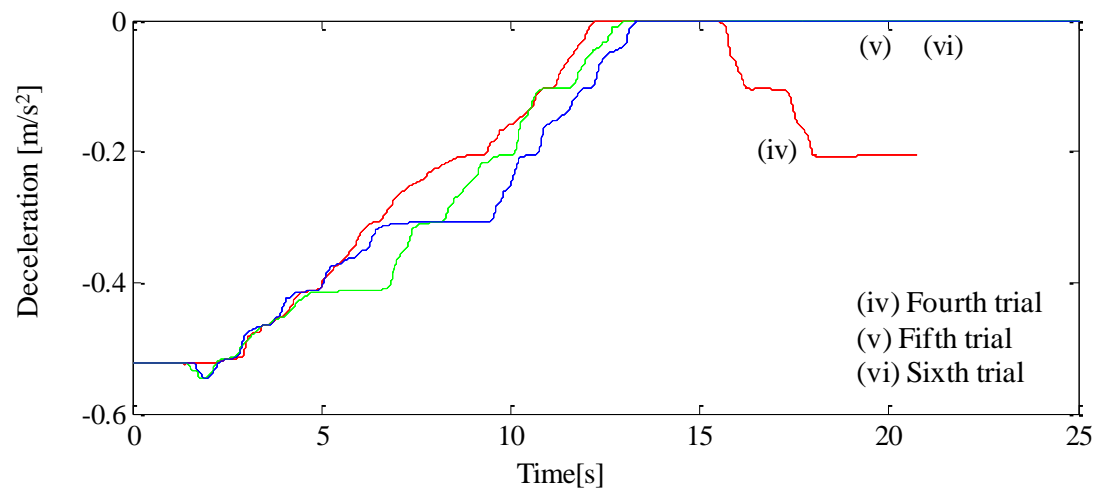


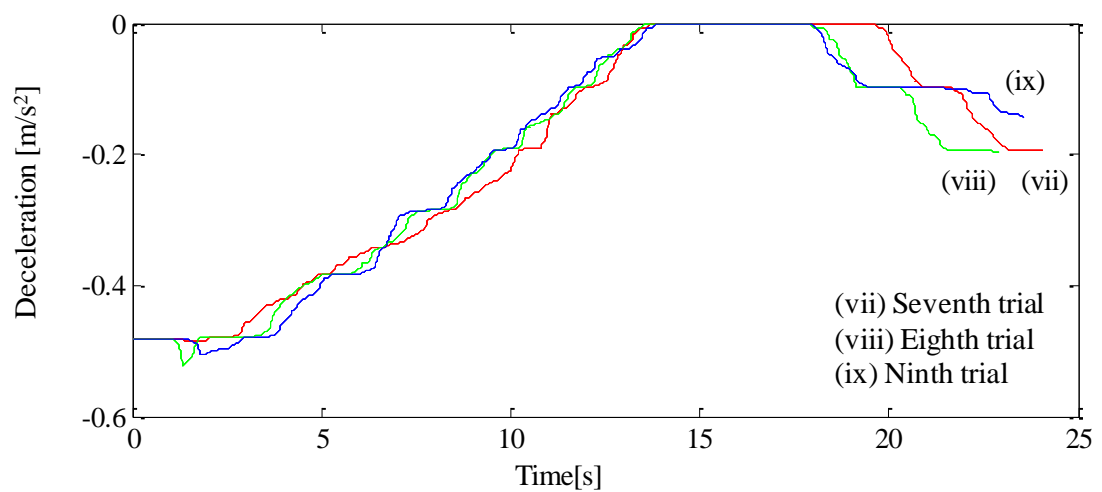
Fig.6.5 被験者 B の角度入力式ハンドルにおけるブレーキ操作



(a) Light

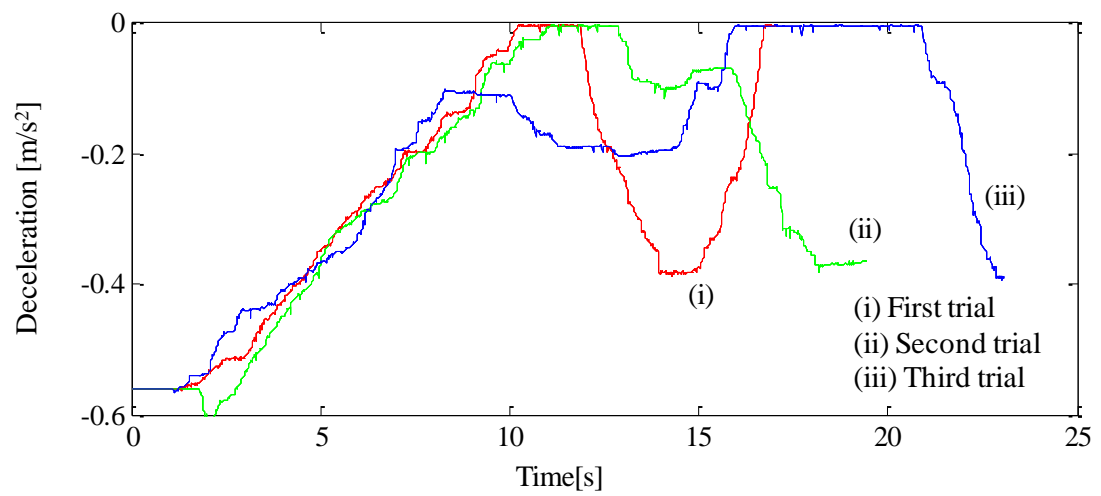


(b) Middle

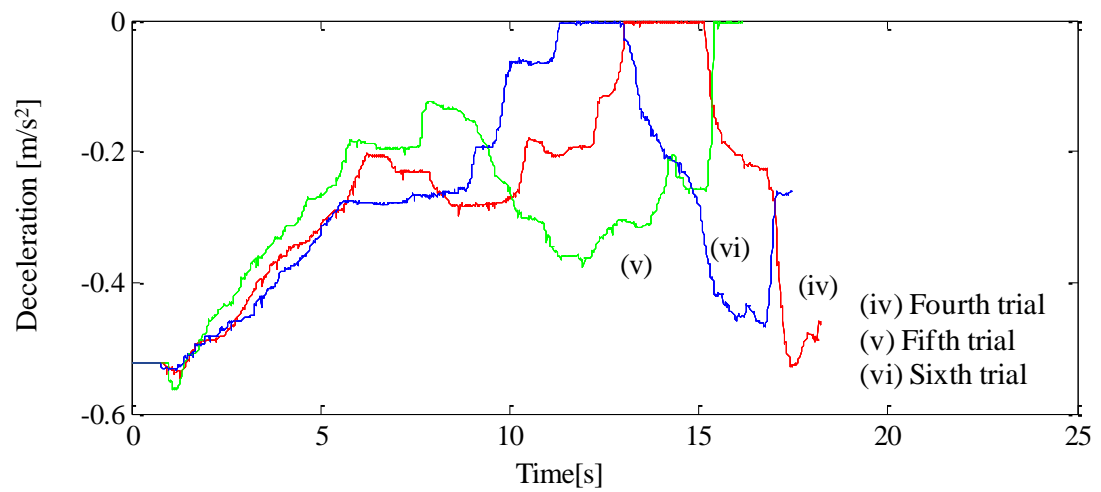


(c) Heavy

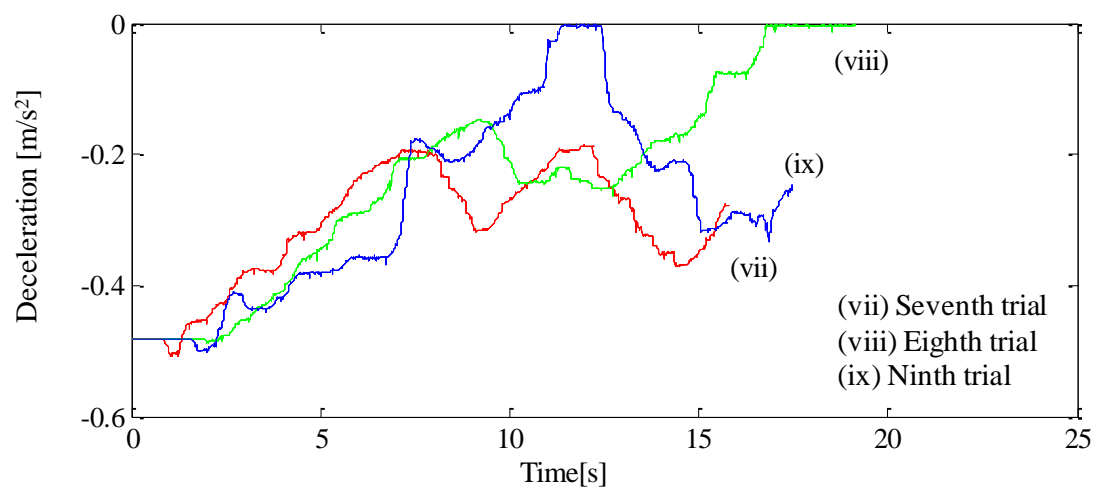
Fig.6.6 被験者 C の角度入力式ハンドルにおけるブレーキ操作



(a) Light



(b) Middle



(c) Heavy

Fig.6.7 被験者 A の力入力式ハンドルにおけるブレーキ操作

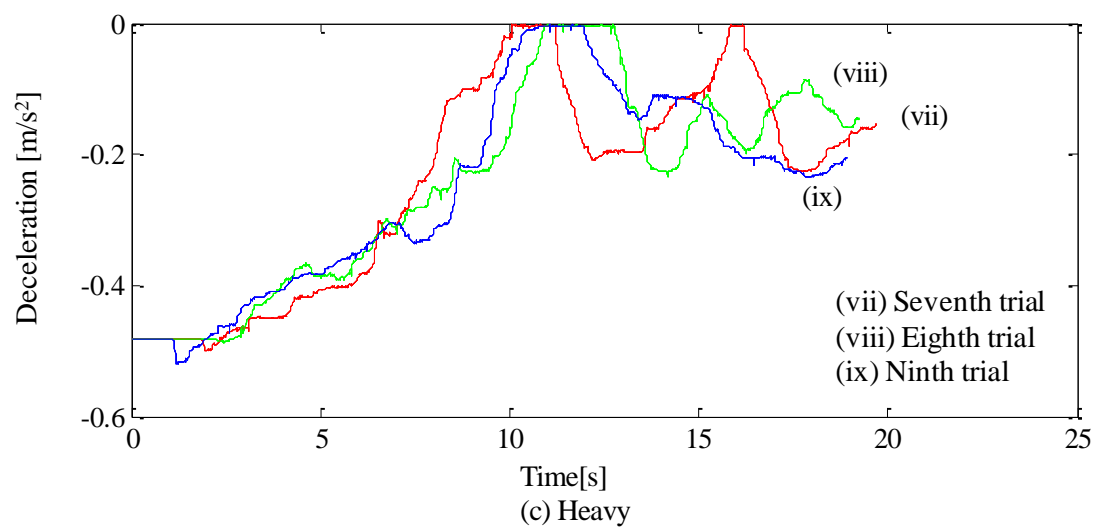
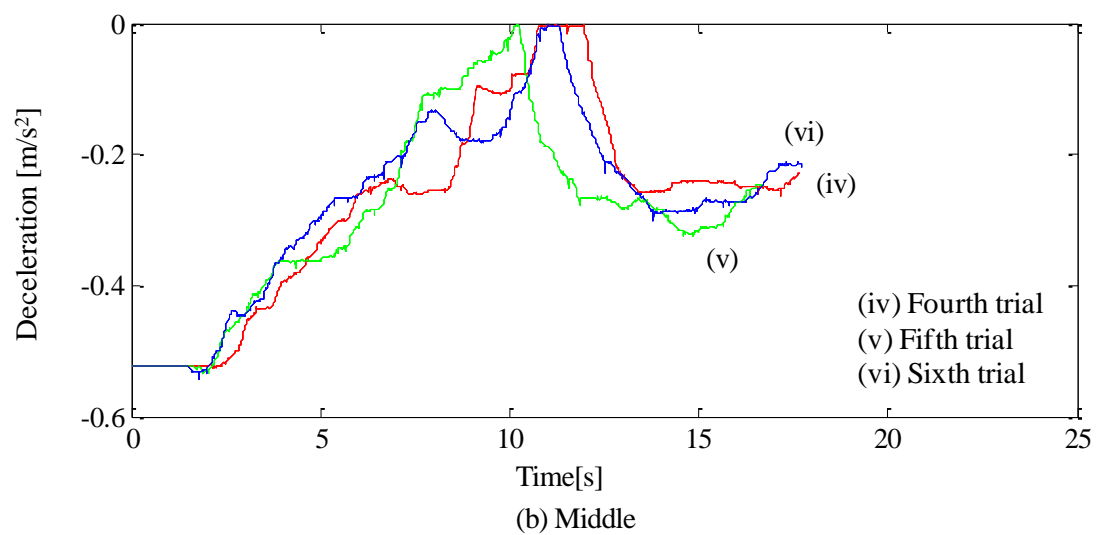
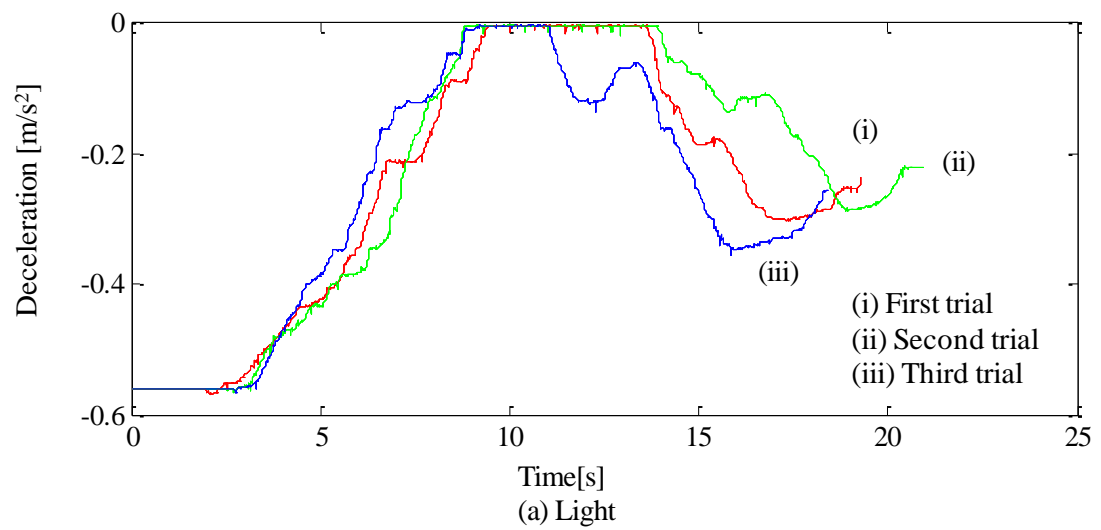
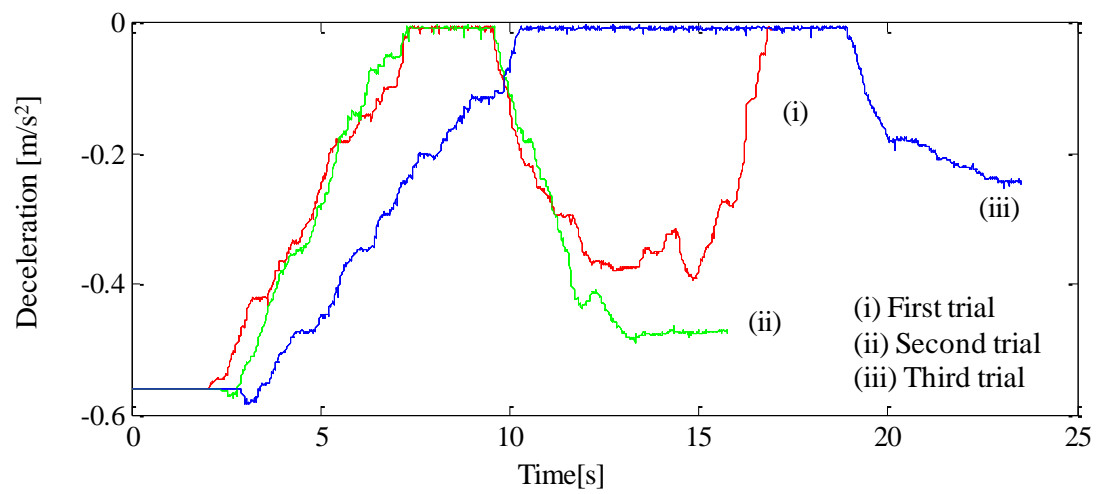
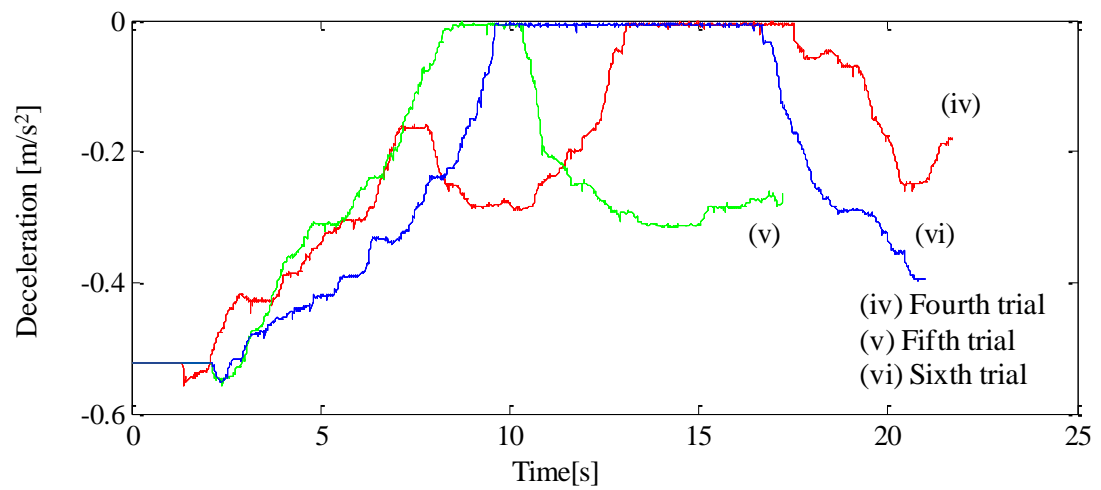


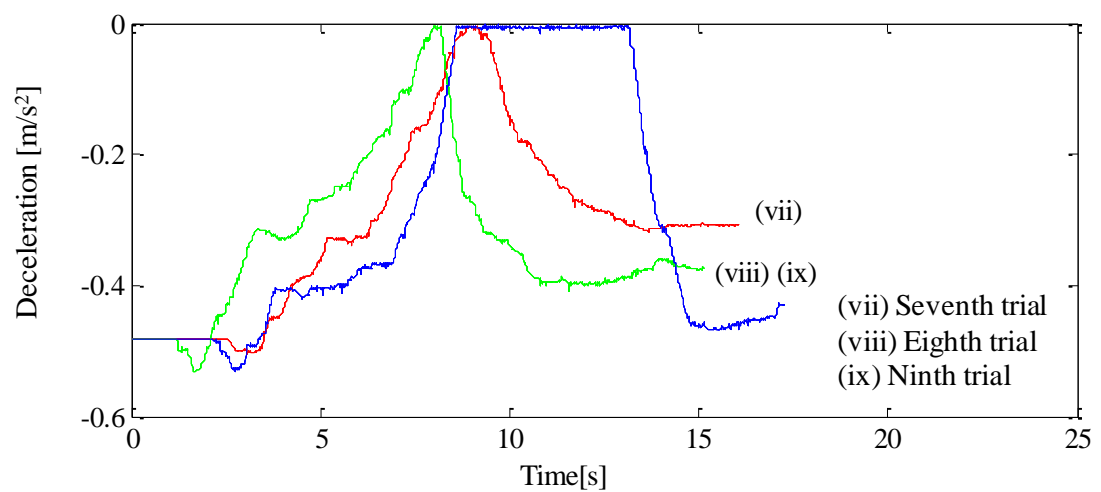
Fig.6.8 被験者 B の力入力式ハンドルにおけるブレーキ操作



(a) Light



(b) Middle



(c) Heavy

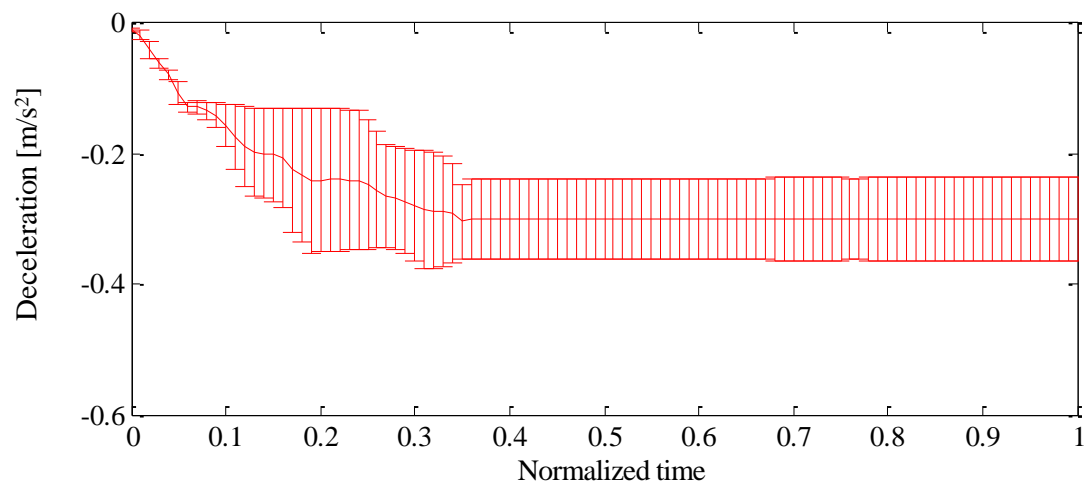
Fig.6.9 被験者 C の力入力式ハンドルにおけるブレーキ操作

6.2.2 ブレーキパターンの調整操作の評価

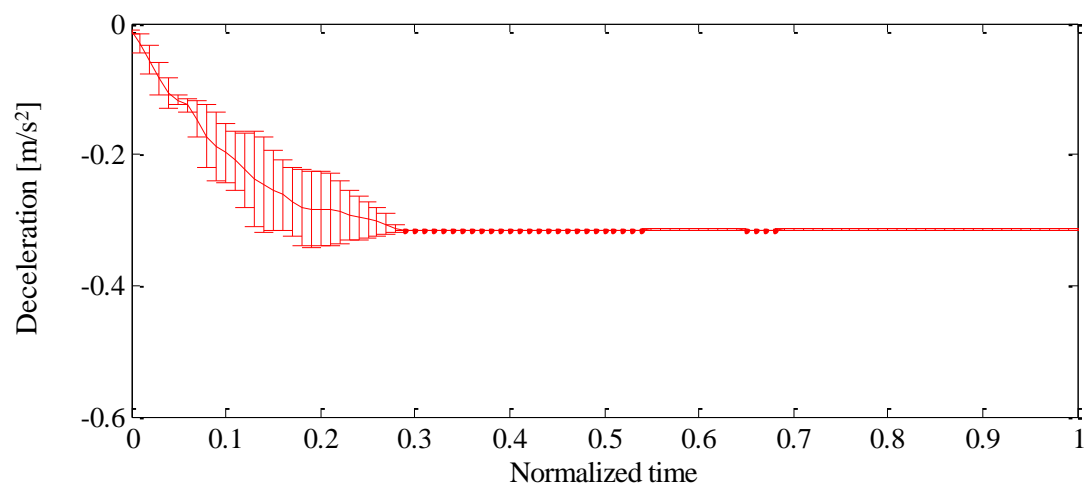
ブレーキ操作に対する重量変化の影響の評価により、ブレーキハンドルの方式による差異がブレーキ操作後半の調整操作区間にあることがわかった。そこで停車時間と過不足距離の結果が調整操作区間における方式間の差異に影響を受けたのではないかと考え、ブレーキパターンの調整操作の差について評価を行った。Fig.6.11～Fig.6.16 は調整操作の評価のため、Fig.6.11～Fig.6.16 内のそれぞれの調整操作区間を時間について正規化し、平均値とばらつきを比較したグラフを示す。Fig.6.11 と Fig.6.16 の縦軸は指示減速度[m/s²]を示し、横軸は時間を正規化した値[s]を示す。図中 (a) ～ (c) は電車の重量を示す。図より、両方式に共通して、前述の通り重量変化の影響はみられず、角度入力式ハンドルの場合、平均値グラフに対しばらつきが小さい傾向がみられたことから、被験者は9回の実験で同様の調整操作を行っていることがわかる。一方力入力式ハンドルの場合、各操作についてばらつきが大きくでており、被験者は9回の実験で異なる調整操作を行っているということがわかる。ここで、方式間の調整操作に差があるのかを定量的に判断するため、各グラフのばらつきの和に対して分散分析を行い、その差を評価した。Fig.6.1 は各方式の調整操作のばらつきに対する二元配置分散分析結果を示す。図中青グラフは角度入力式ハンドルを示し、赤グラフは力入力式ハンドルを示す。Fig.6.17 の縦軸は指示減速度のばらつきを示し、横軸がハンドルの方式を示す。分析の結果、各方式の分散値の間に 0.1%水準の非常に大きな有意差がみられた。交互作用は判定されなかった。

これらのことを以下にまとめる。

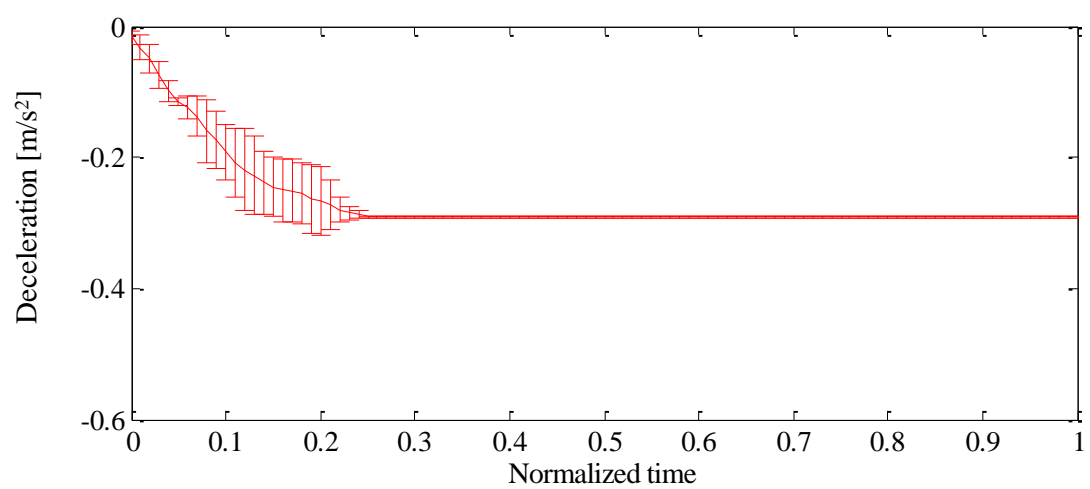
- 指示減速度の調整操作において、被験者は角度入力式ハンドルと力入力式ハンドルで異なる調整操作を行っており、角度入力式ハンドルの場合は共通の操作を行うことで停止距離を調整し、力入力式ハンドルの場合は決まったパターンを持たず、臨機応変な操作を行うことで停止距離を調整している。



(a) Little

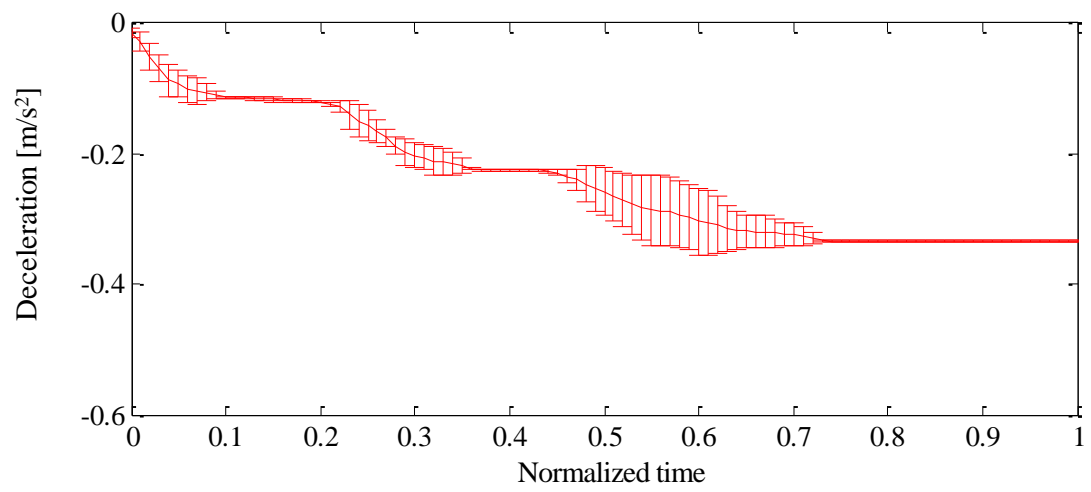


(b) Middle

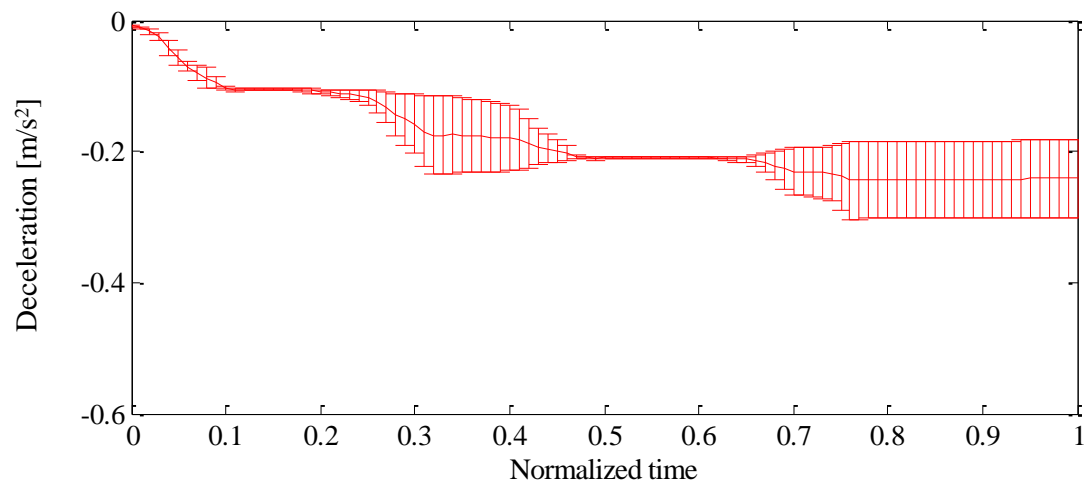


(c) Heavy

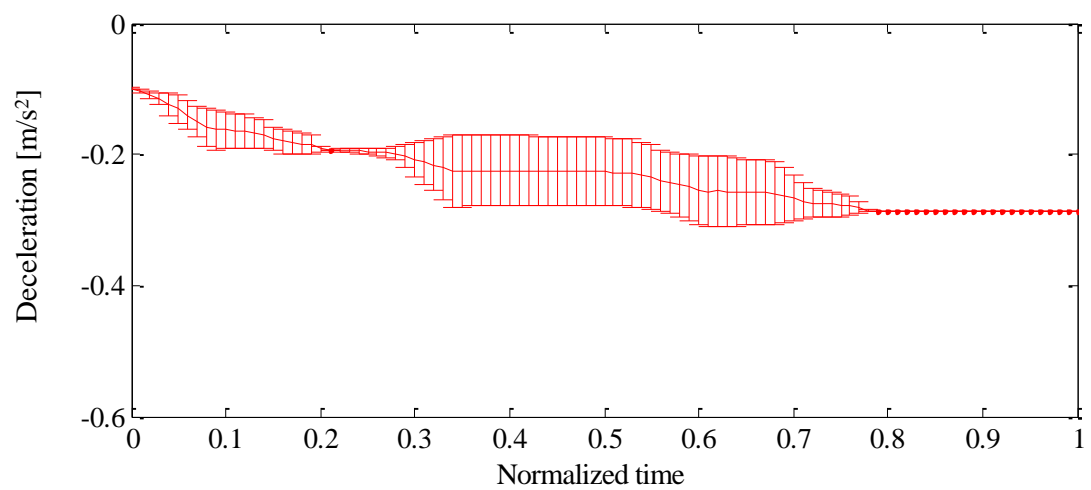
Fig.6.11 被験者 A の角度入力式ハンドルの調整操作比較図



(a) Little

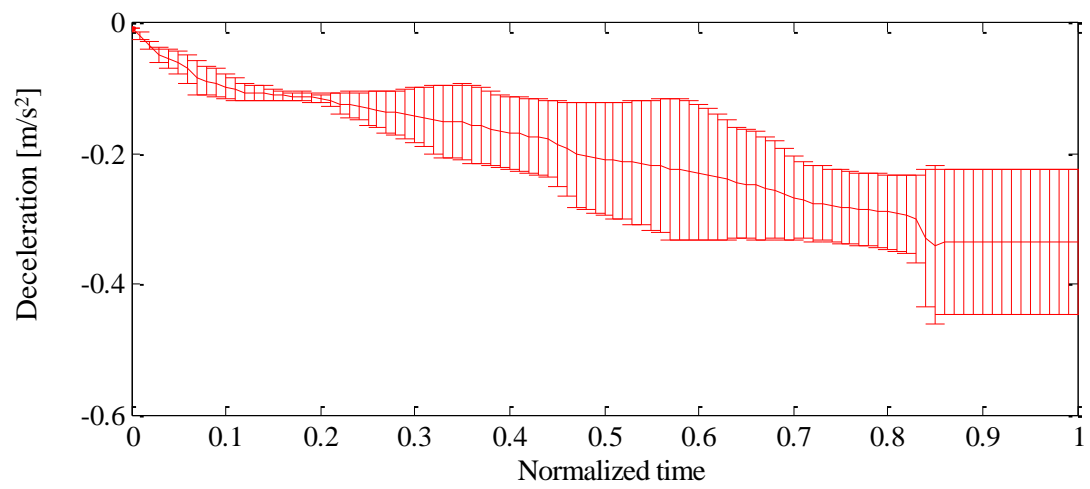


(b) Middle

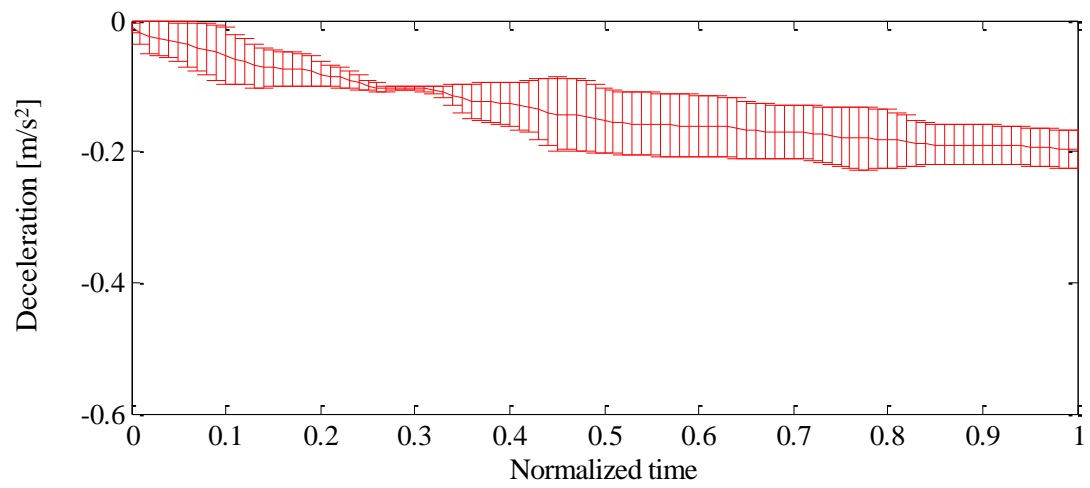


(c) Heavy

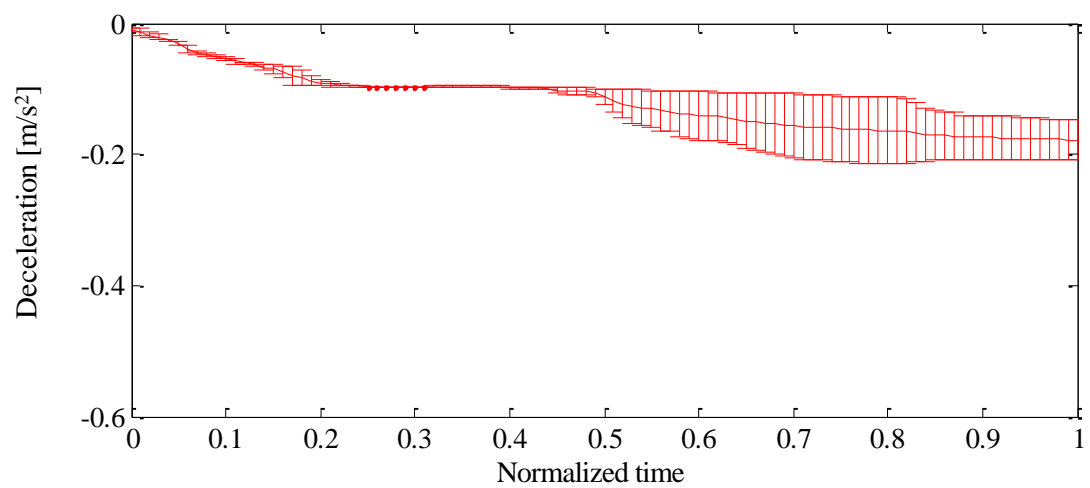
Fig.6.12 被験者 B の角度入力式ハンドルの調整操作比較図



(a) Little

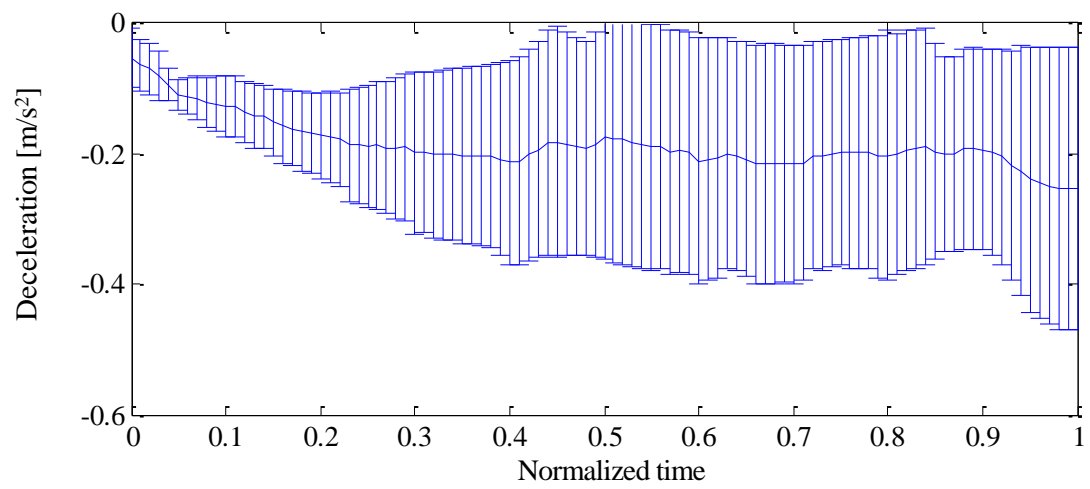


(b) Middle

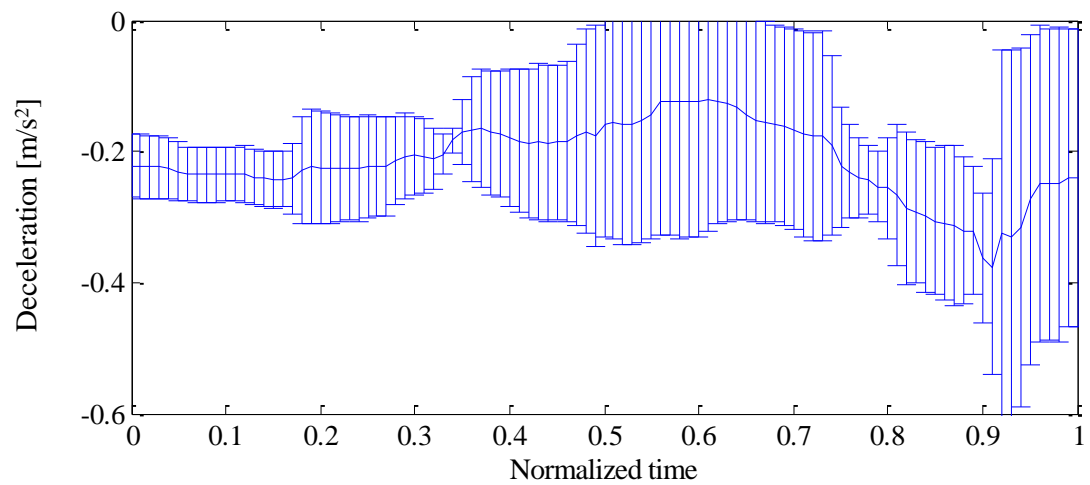


(c) Heavy

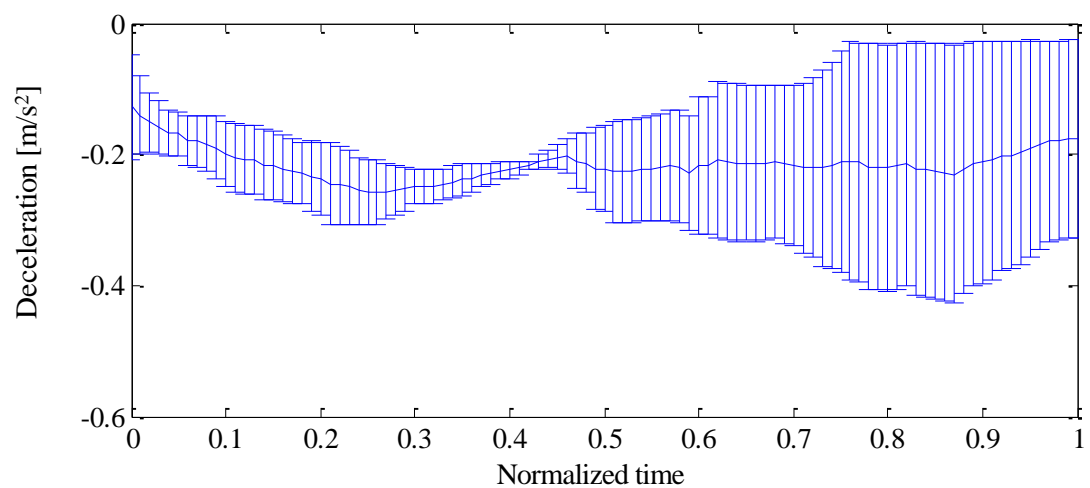
Fig.6.13 被験者 C の角度入力式ハンドルの調整操作比較図



(a) Little

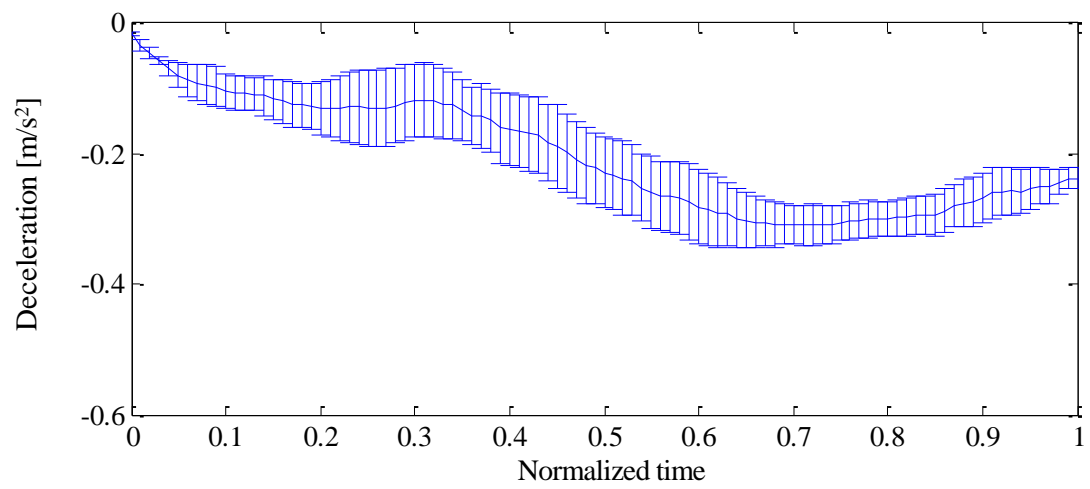


(b) Middle

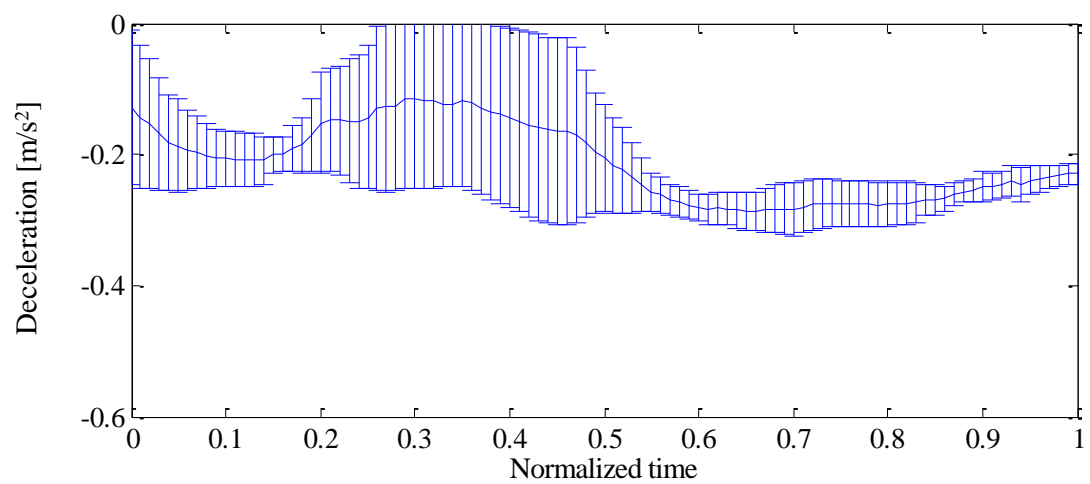


(c) Heavy

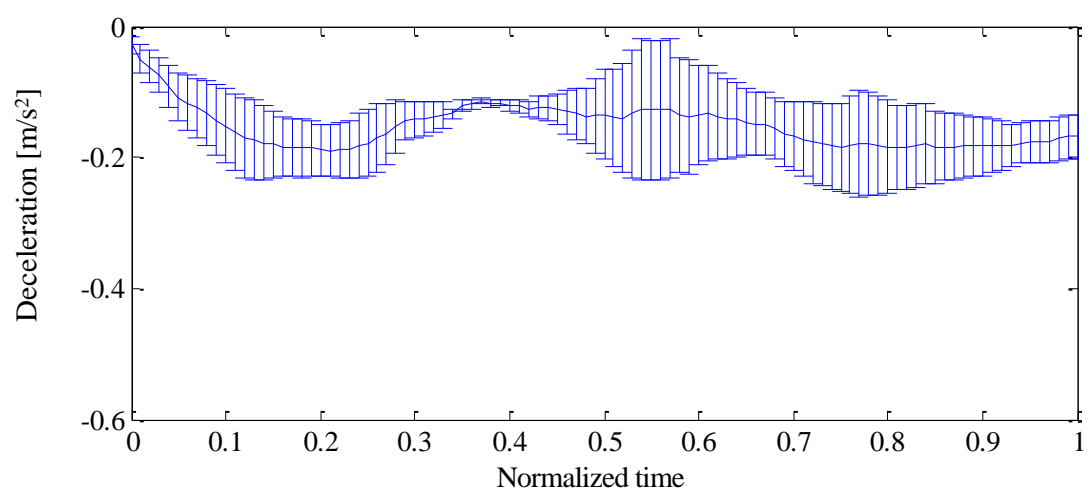
Fig.6.14 被験者 A の力入力式ハンドルの調整操作比較図



(a) Little

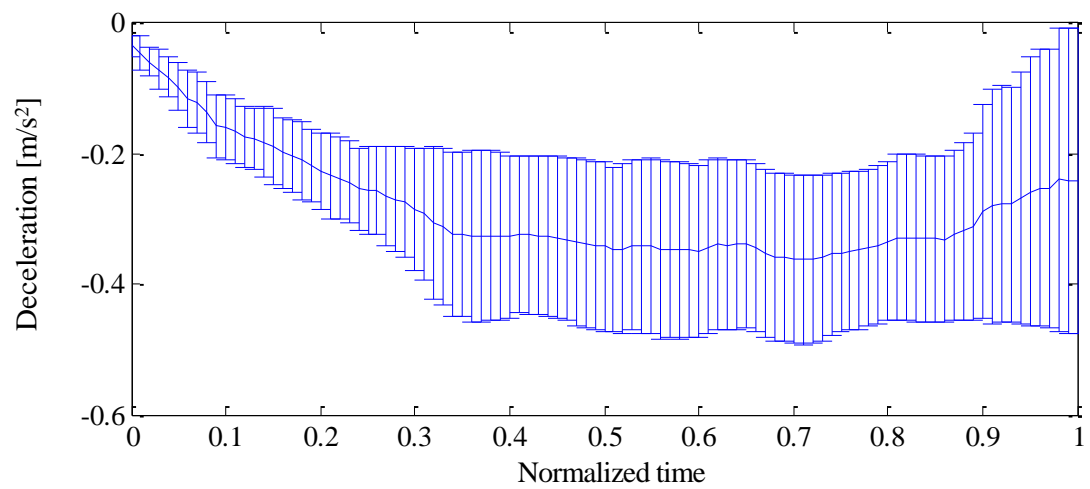


(b) Middle

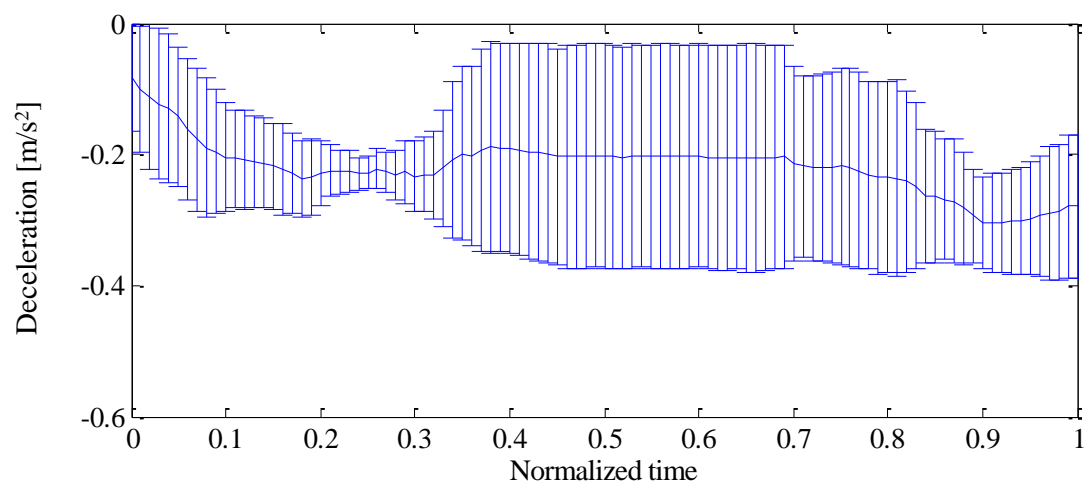


(c) Heavy

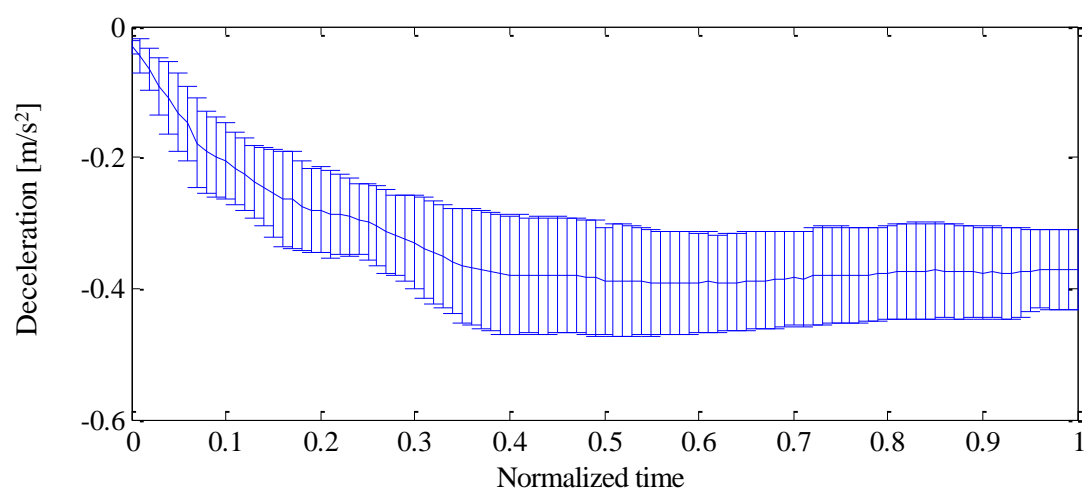
Fig.6.15 被験者 B の力入力式ハンドルの調整操作比較図



(a) Light



(b) Middle



(c) Heavy

Fig.6.16 被験者 C の力入力式ハンドルの調整操作比較図

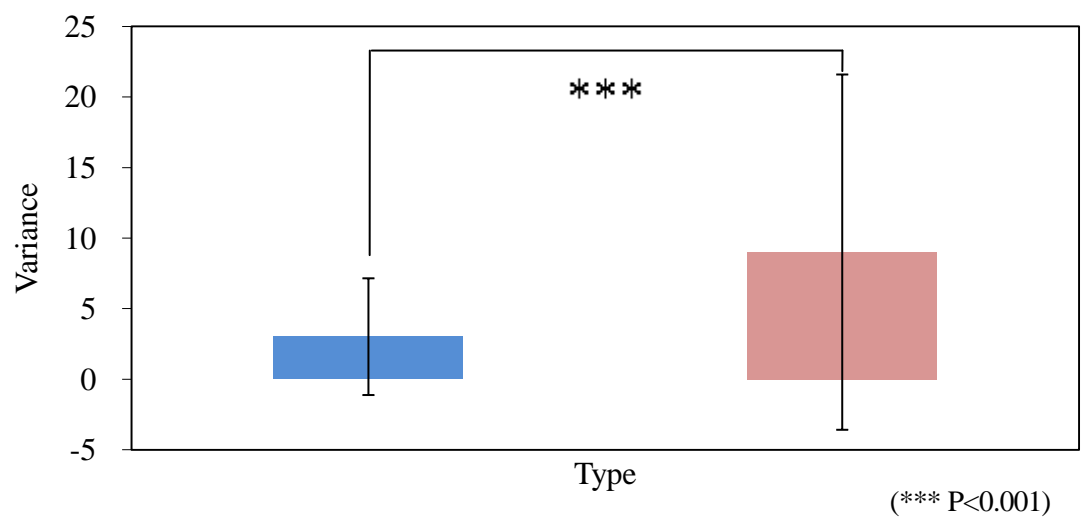


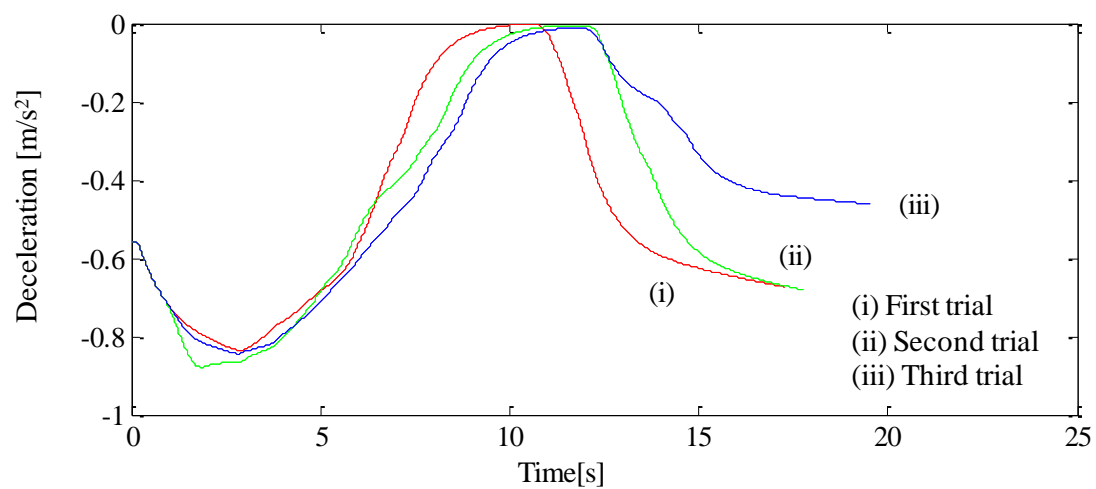
Fig.6.17 指示減速度のばらつきの分散分析結果

6.3 ブレーキハンドルの方式による乗り心地の評価

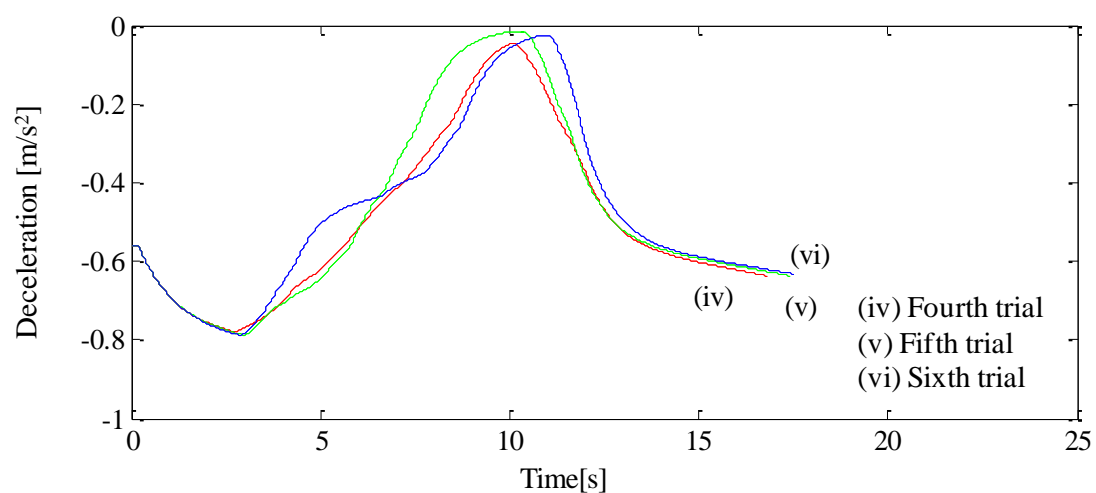
ブレーキハンドルの方式間の差が乗り心地にもみられるかを判断するため、操作パターンに差がある調整操作区間において、電車で働く減速度（以下減速度と呼ぶ）の評価を行った。Fig.6.18～Fig.6.20 は角度入力式ハンドルの被験者ごとの減速度を示し、Fig.6.21～Fig.6.23 は力入力式ハンドルの被験者ごとの減速度を示す。Fig.6.18～Fig.6.23 の縦軸は減速度を示し、横軸は時間を示している。図中 (a) ～ (c) は電車の重量を示し、(i) ～ (ix)を示す。減速度は、指示減速度に摩擦係数の影響と入力の遅れ要素の影響が乗った値であるため、指示減速度と比較して減速値が摩擦係数分大きく、時間軸方向の変動が少ない、滑らかな推移を示した。ここで、角度入力式ハンドルと力入力式ハンドルの乗り心地の差を定量的に評価するため、時間軸について正規化したジャークの二乗和を、二元配置分散分析により比較した。Fig.6.24 は電車のジャークの分散分析結果を示す。図中青グラフは角度入力式ハンドルを示し、赤グラフは力入力式ハンドルを示す。Fig.6.24 の縦軸はジャーク[m/s³]を示し、横軸がハンドルの方式を示す。分析の結果、方式間の減速度に有意差はみられず、交互作用も判定されなかった。このことから、角度入力式ハンドルと力入力式ハンドルを用いた場合に、乗り心地に差がないということがわかった。

これらのことを以下にまとめる。

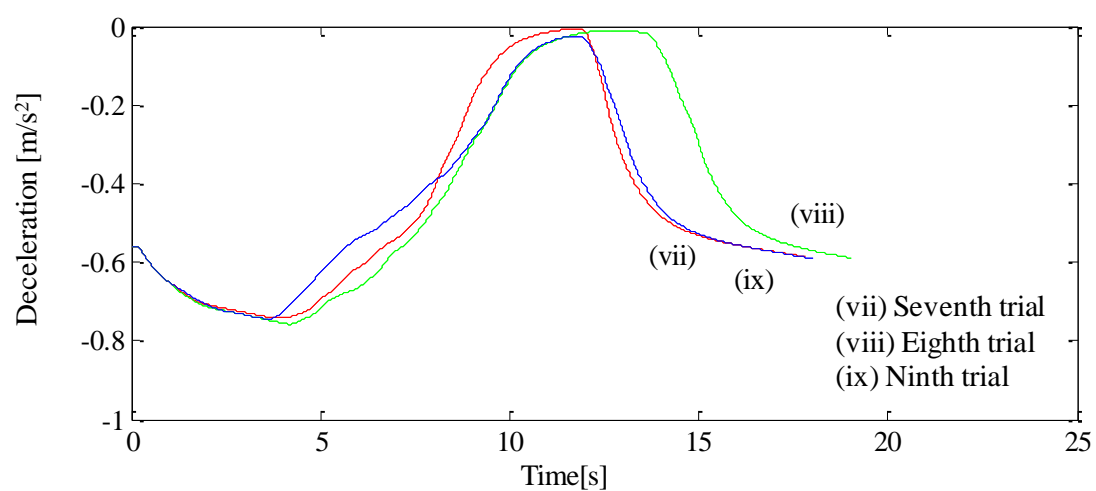
- 角度入力式ハンドルと力入力式ハンドルの減速度には有意な差がなく、同程度の乗り心地で停車操作が行われている。



(a) Light



(b) Middle



(c) Heavy

Fig.6.18 被験者 A の角度入力式ハンドルの減速度

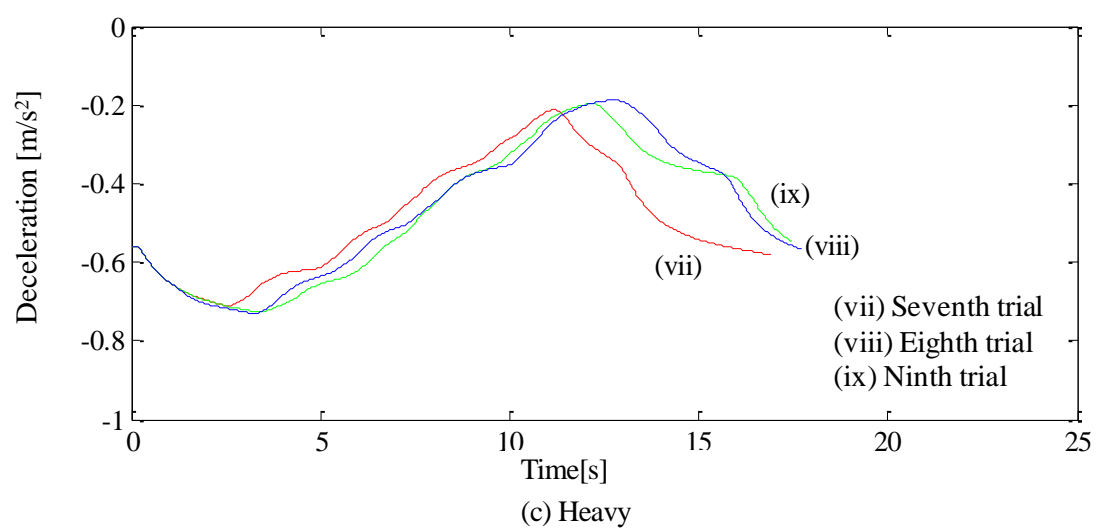
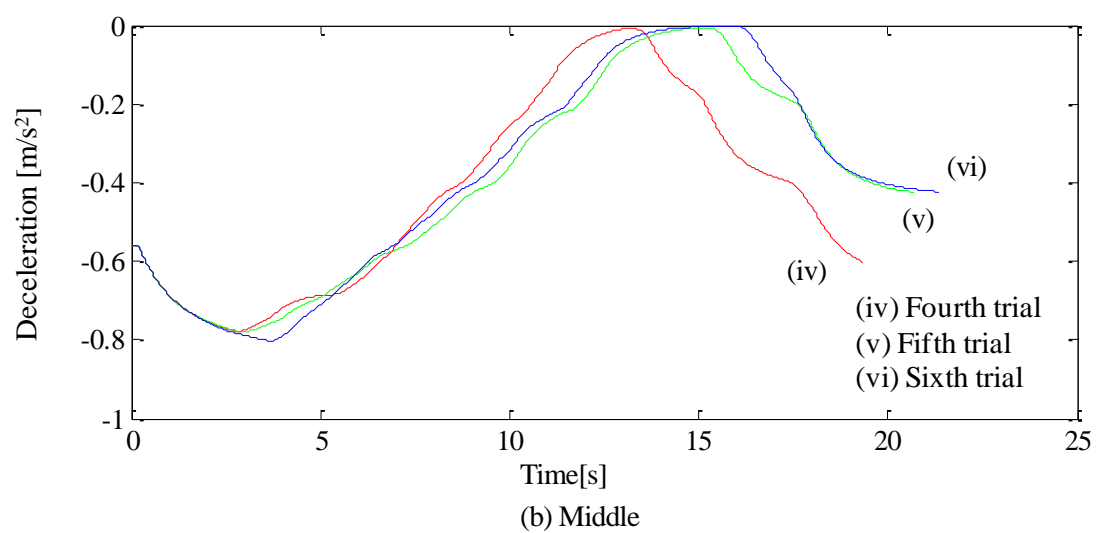
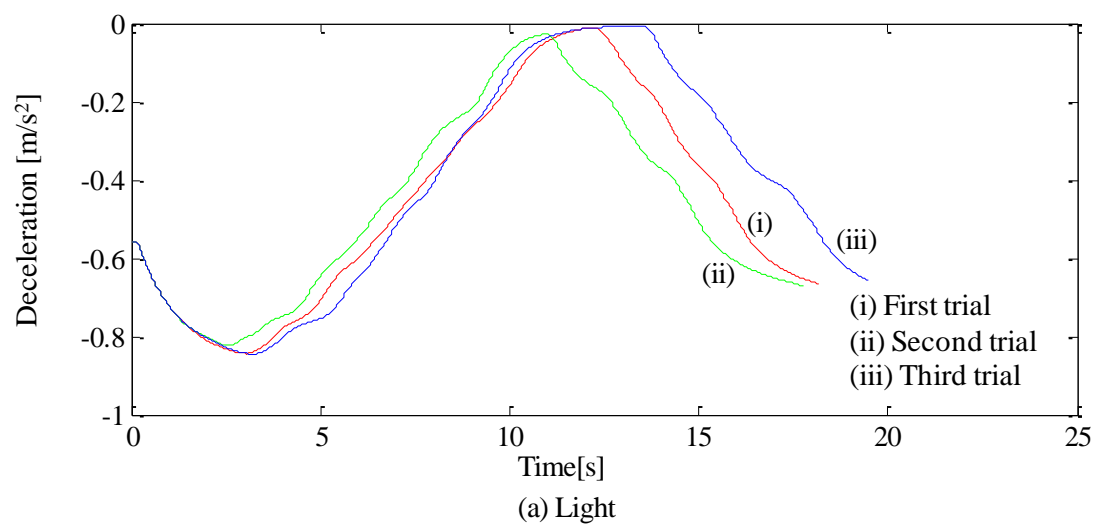


Fig.6.19 被験者 B の角度入力式ハンドルの減速度

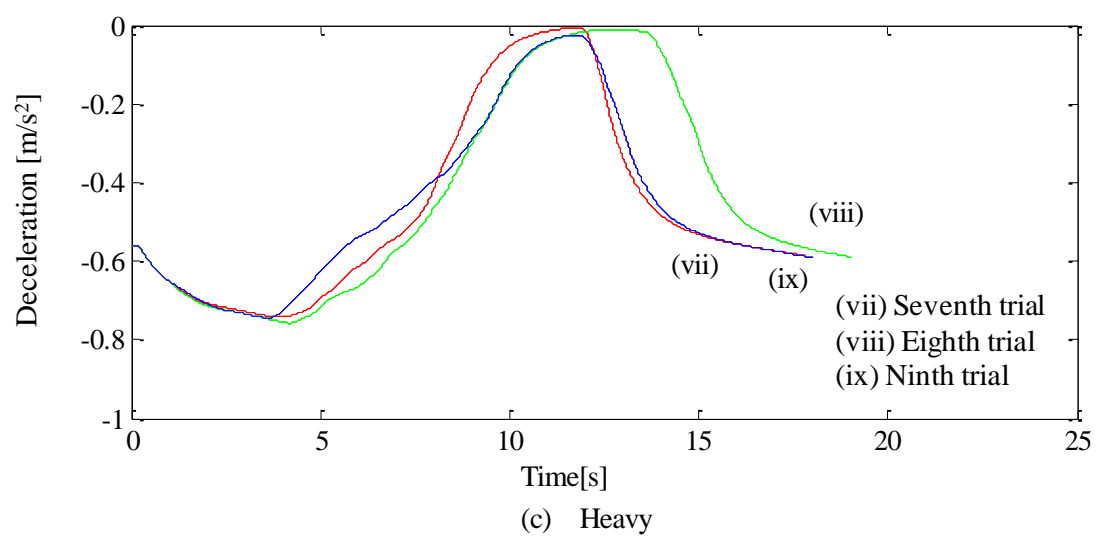
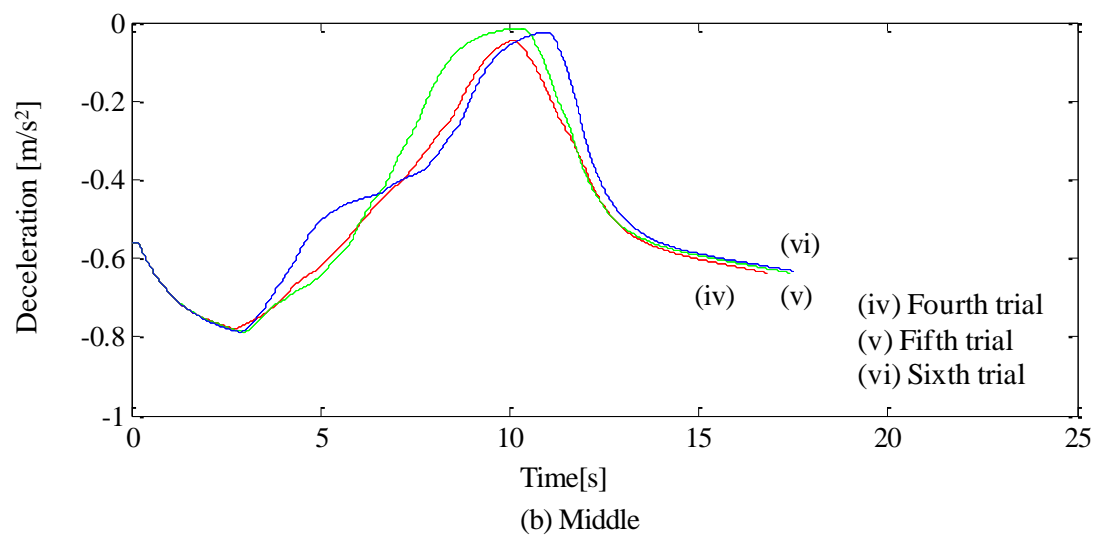
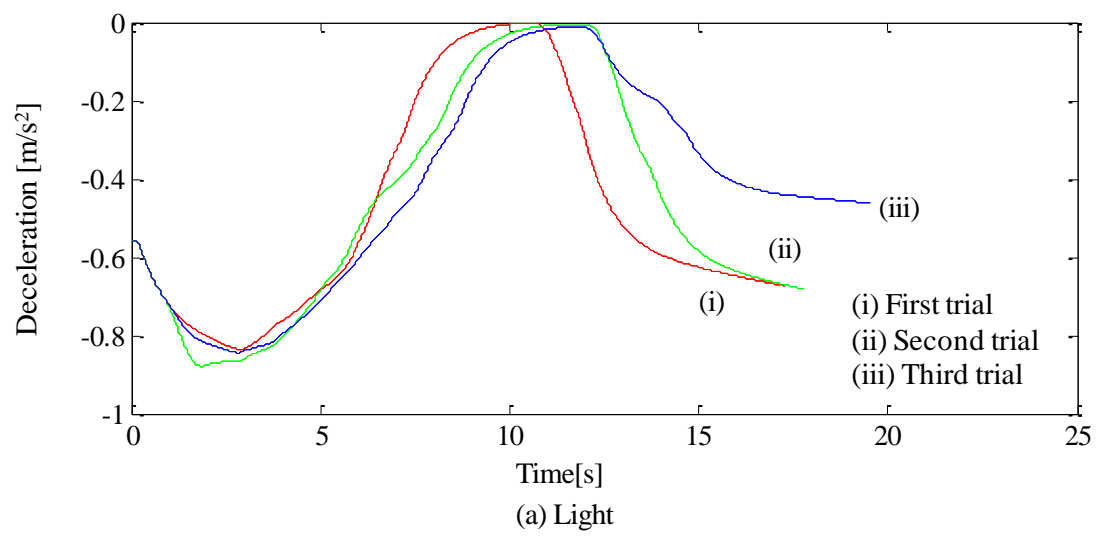


Fig.6.20 被験者 C の角度入力式ハンドルの減速度

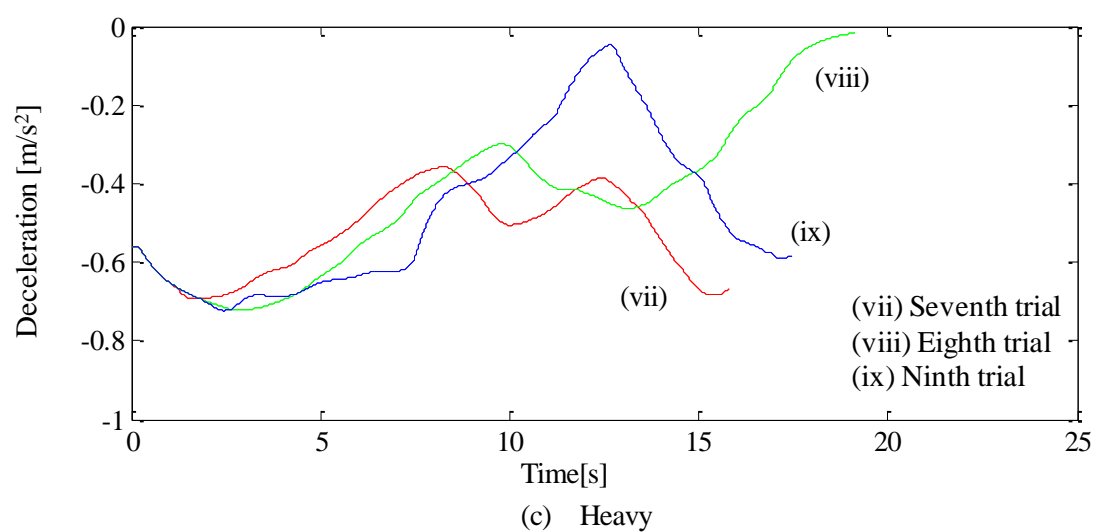
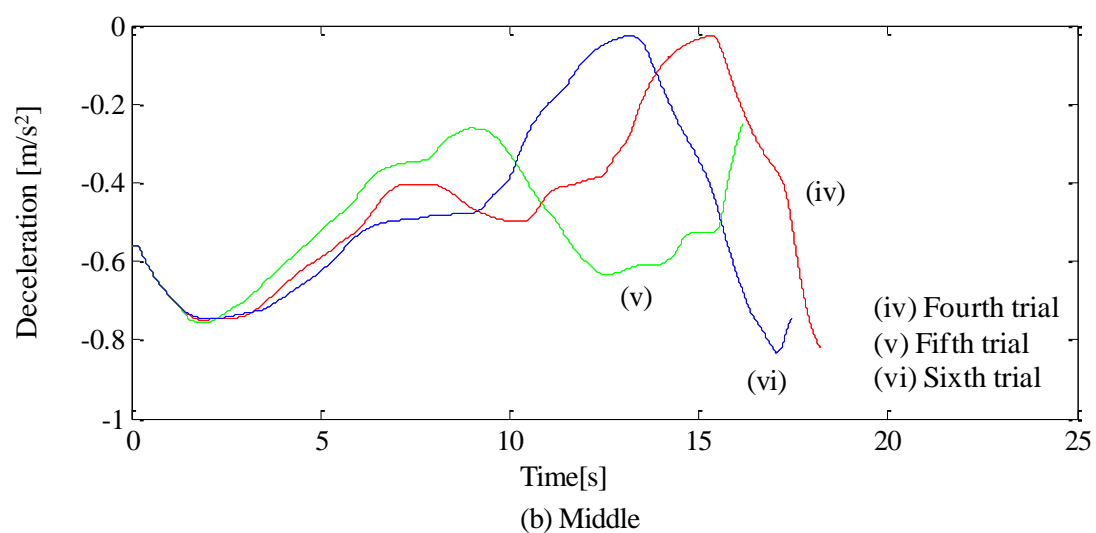
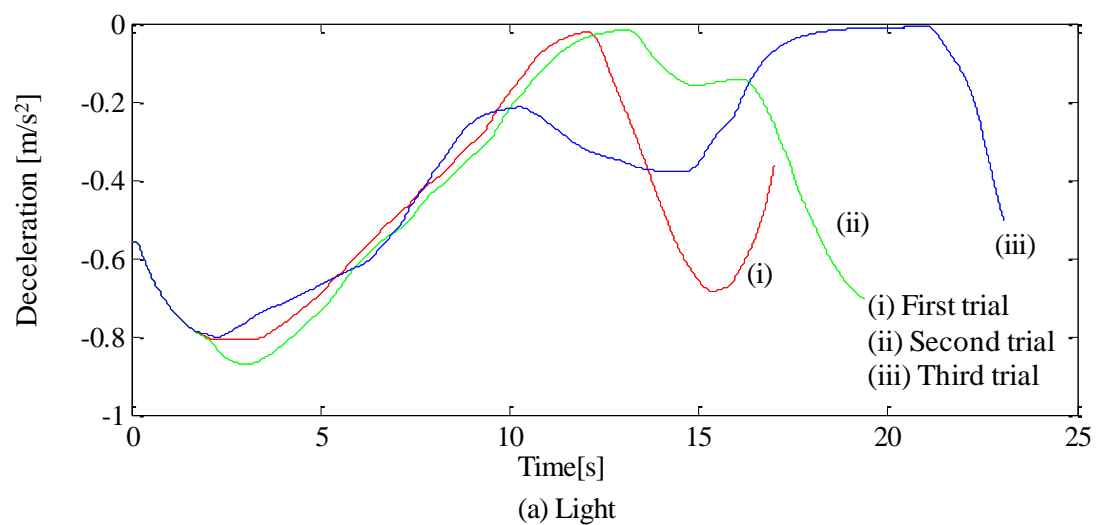


Fig.6.21 被験者 A の力入力式ハンドルの減速度

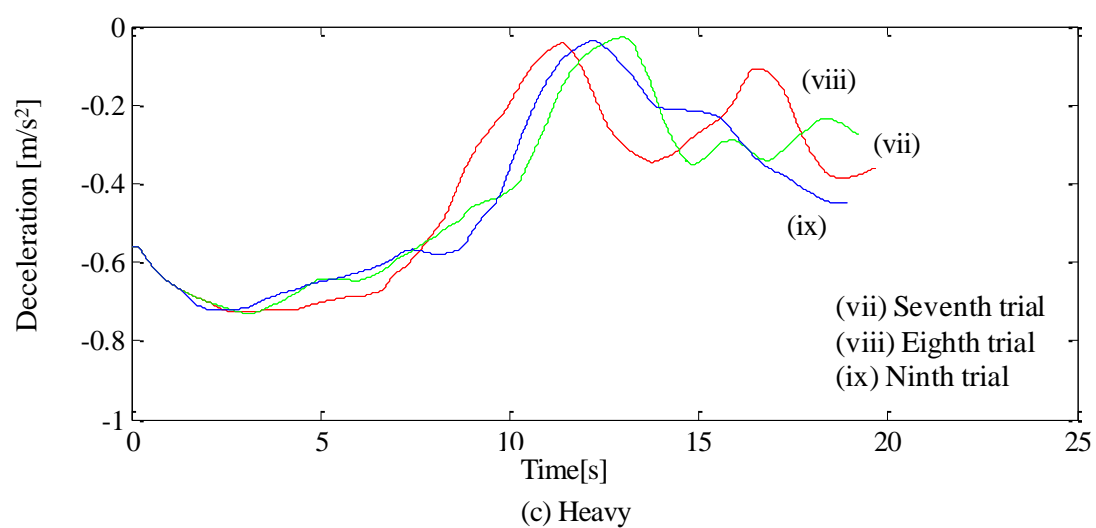
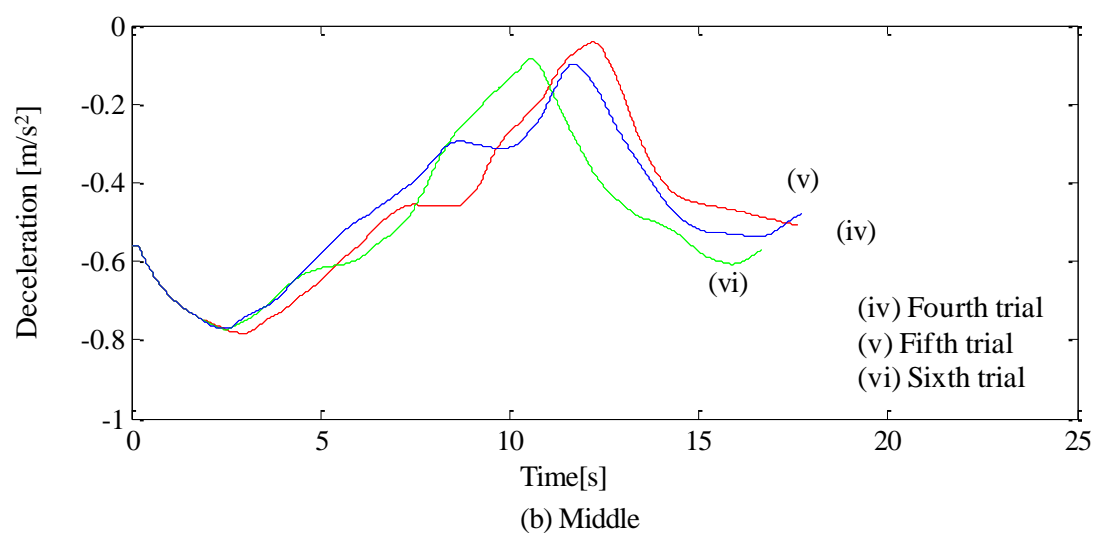
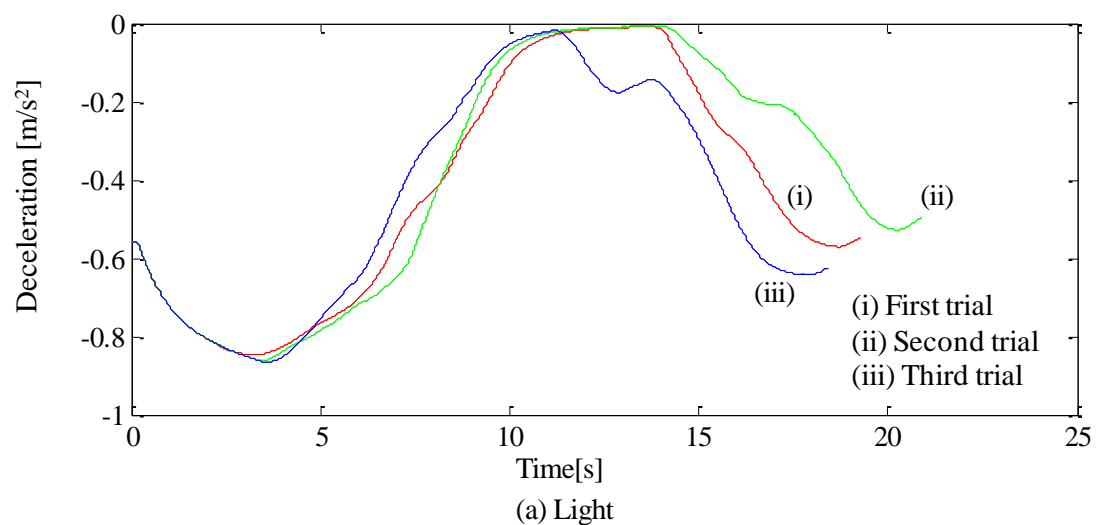


Fig.6.22 被験者 B の力入力式ハンドルの減速度

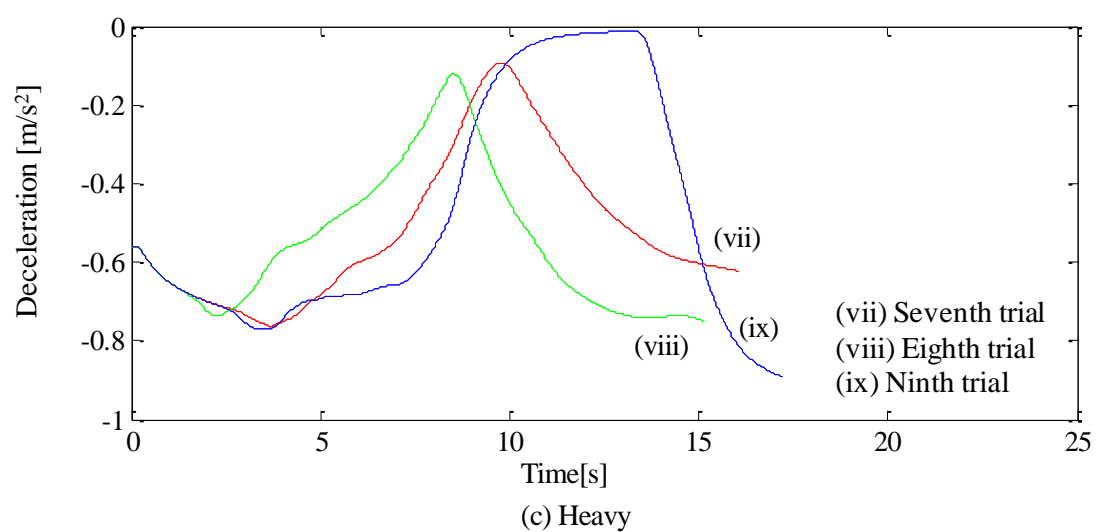
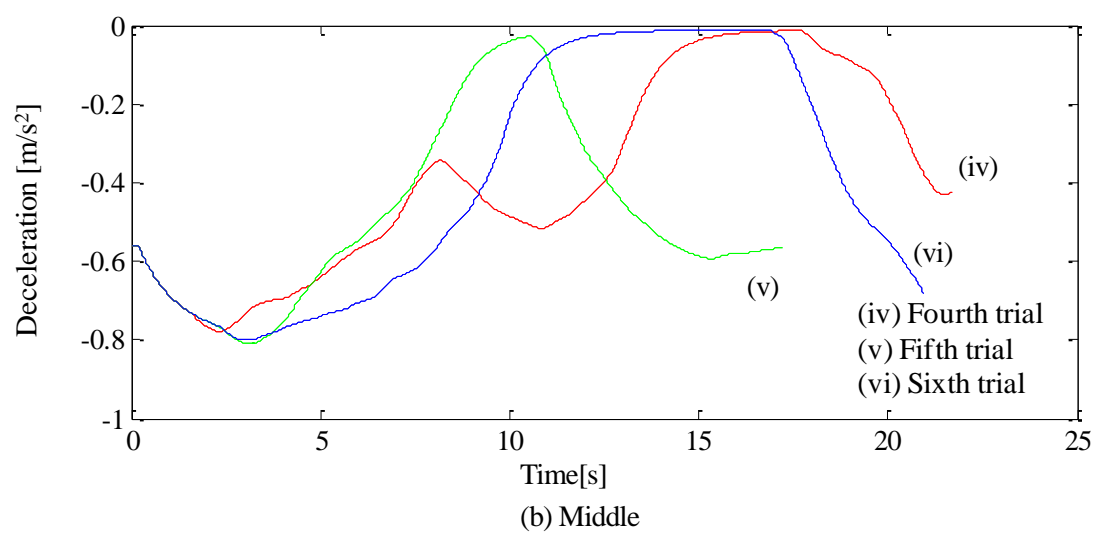
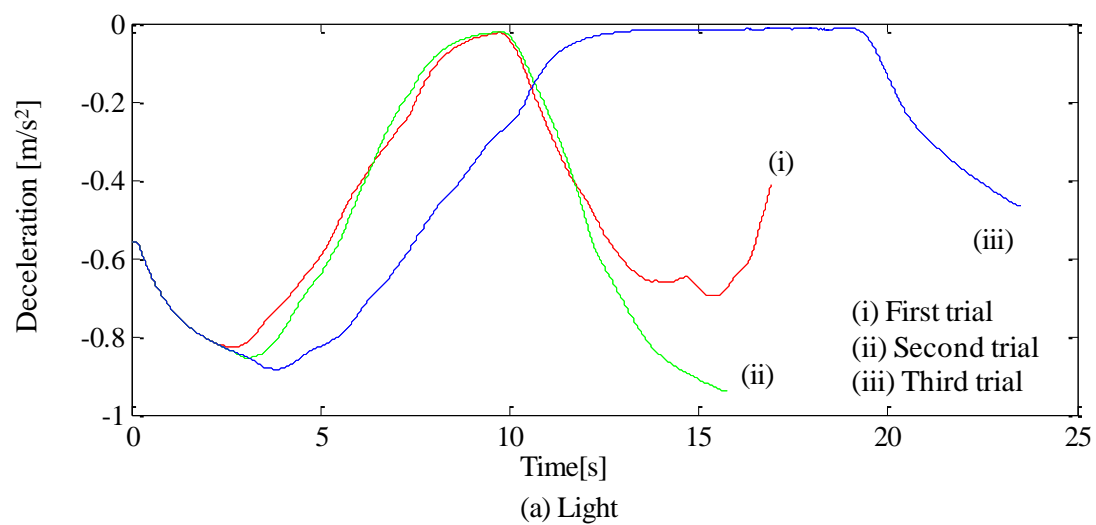


Fig.6.23 被験者 C の力入力式ハンドルの減速度

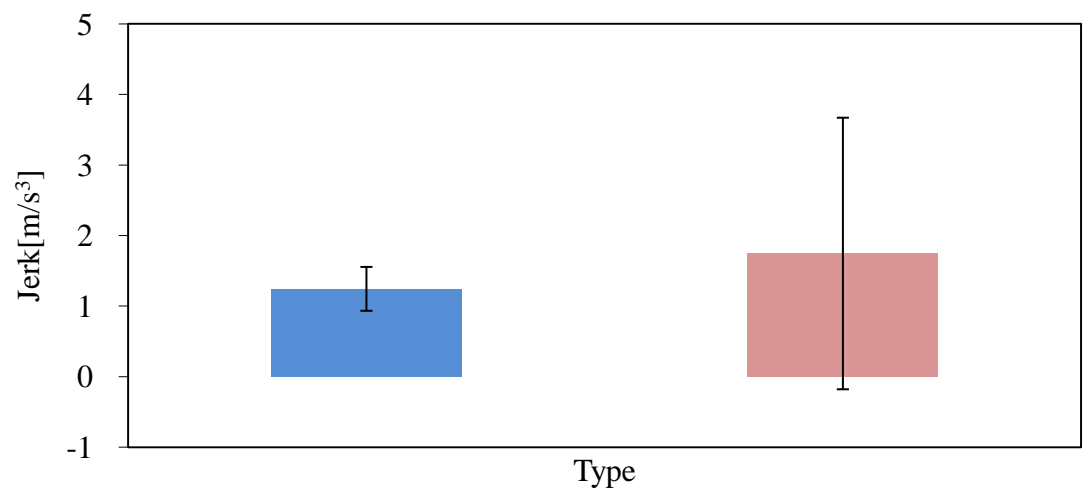


Fig.6.24 ジャークの分散分析結果

第7章

結論

7.1 本研究のまとめ

本研究では、電車に加えられるブレーキ力がハンドルに加える力に対応した新たな指令方式として力入力式ブレーキハンドルを提案し、現在の電車に用いられている方式のブレーキハンドルと提案方式のブレーキハンドルの操作性を、低速域での停車操作を対象として評価し、停車時の操作性と乗り心地を比較検討することで、提案した力入力式ハンドルの有効性を示すことを目的とした。

まず、ブレーキ力を加えた際の列車の挙動を再現し、ブレーキ操作性の評価を行うために、低速域停車操作実験用のシミュレータである車両停車シミュレータを、Matlab/Simulink とリアルタイムツールボックス（RTR）を用いて構築した。

次に従来方式のブレーキハンドルと提案方式のブレーキハンドルの操作性を、低速域での停車操作を対象として評価するために、車両停車シミュレータを用いて低速域停車操作実験を行い、方式間の差を検証した。指示減速度の操作で、両方式共に操作前半で重量変化への対応を行っており、操作後半で角度入力式ハンドルの場合はほぼ一定パターンの減速を行い、力入力式ハンドルの場合は決まったパターンのない細かな操作で減速を行っていた。このことから、力入力式ハンドルは応答の良い微細な調整操作を行い、必要なブレーキ力を随時入力することで、停車位置付近に正確な停車を行っていることがわかり、こうしたことから、力入力式ハンドルの低速域停車操作における有効性を示した。

7.2 今後の課題

本研究の今後の課題としては以下のことが挙げられる。

- 本研究では、低速域での停車操作という前提条件のもと比較実験を行った。しかし、実際の電車のブレーキ操作は操作開始時間から停車が非常に長く、かつ高速域からブレーキを掛け始めることから、今回の実験結果をブレーキ操作全体に対して当てはめることが適当であるとすることはできない。今後は調査対象をブレーキ操作全体へ拡大し、方式毎の差を検証する必要がある。
- 本研究では、従来方式である角度入力式ハンドルの問題点に注目し、その問題点を補う形式の力入力式ハンドルを提案した。ブレーキハンドルの操作性向上を目的とした場合、従来方式とそのデメリットを補う提案方式両方のメリットを生かした方式のハンドルの提案が必要となる。

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 雅和ら：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：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：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 万基ら：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：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] 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)
- [12] 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)
- [13] 小美濃 幸司ら：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)
- [14] “ブレーキ時の乗り心地評価法”：財団法人鉄道総合研究所 人間科学研究部 人間工学研究室 (2006) [online] <http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd52/rd5220/research02.html>
- [15] 鈴木 大輔ら：手動制御における戦略の教育・訓練方法に関する研究—列車の速度制御における操作戦略—：日本人間工学会第48回大会講演集 人間工学 第41巻特別号, pp.352-353 (2007)

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，車両停車シミュレータ構築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メカトロニクス研究室 矢野賢一 教授に厚く御礼申し上げます．

また，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．

実験装置の調整や概要の説明，今後の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 技官に深く感謝いたします．厚く御礼申し上げます．

本研究の当初から，実験装置の御説明や，装置の調整，設定に関する御指導賜り，さらには車両停車プログラムの構築や調整に関する御助言，実験全般における御指導賜りました中村創一先輩に心から感謝いたします．厚く御礼申し上げます．

また，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へ深く感謝いたします．