

運転者—車両—道路の相互関係に関する研究

マルコム・C. グッド*

これまでの道路曲線の設計基準は、運転者—車両—道路曲線の運動力学的な関係を無視したものであった。そこでここでは、実験的に自由な円旋回およびコースを与えたときの円旋回における運転者と車両の挙動を調べ、さらにこの結果と実際の路上走行との比較を行なって、適切な道路曲線の設計基準を検討している。また、解析的な力学モデルを用いた理論的な検討を行ない、妥当な緩和曲線の設計基準の設定も試みている。

Some Studies of Driver-Vehicle-Roadway Interactions

Malcolm · C. Good*

It appeared that the past development of road curve design policies resulted in a neglect of the study of driver-vehicle-roadway interactions. Experimental studies of free-path turns and restricted-path turns were executed to investigate the relevant concepts of road curve design assumptions with a validation study carried out on actual road curves. And also application of an analytical vehicle model established limits on transition curve design parameters.

1. はじめに

本論文は著者がこれまでに関連してきた、運転者—車両—道路の相互関係に関する研究について概説しようとするものである。これらは、オーストラリア道路調査局の支援のもとに、メルボルン大学において行なわれた一連の研究の一部である。ここではとくに、道路曲線の設計に関する研究結果について述べてあり、同時に行なわれた車両の操縦性の改善を目的とした研究に関しては言及していない。これらについては参考文献〔1,2,3,4〕を参照して欲しい。

ここではまず、イギリス、アメリカ、オーストラリアなどにおける、道路線形の設計指針の設定と、その指針の基本的な内容について概観している⁵⁾。そして、どのような理由で、それらの指針が適切なものであるということができているのか、ということを検討しようとしている。そこで、ここではとくに次のような点を考察の対象としている。

- (a) 車両の走行速度に関する前提
- (b) 高速道路や道路交差での曲線部における“安全速度”の設定基準
- (c) 片こう配と曲率の関係
- (d) 曲率緩和、片こう配、道路幅員の影響に関する

基準

- (e) 道路交差における曲線設計のための曲線緩和の基準

著者の見解では、1930年代の“設計速度”の設定においては、曲線路上の運転者の挙動に関する研究が無視されており、“安全速度”や、片こう配と曲率の関係などに関する問題についても、正しく考慮されていないといえることができる。このように運転者の挙動に関する適切なデータなしに基準が設定されたため、実質的に意味のある基準は皆無であるといつて良い。さらに、この道路設計の手法は、1954年、American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO) が、高速道路の幾何学的設計指針なるものを刊行して以来、ほとんど変更されなかったのである。

一方これに対して、車両自体の運動力学的モデルについては、1956年、Cornell Aeronautical Laboratories (CAL) の Segel 等の研究によってはじめて明らかになったものである。したがって、実際上、道路と車両の特性がからみあってくる領域における道路設計の基準が、こうした最近の研究成果を有効に利用することなしに設定されてしまったのである。本論文で報告しようとする研究は、こうした状況を、運転者の挙動の研究や車両の力学的な応答モデルを利用して、少しでも改善していこうとすることを目的としたものである。

*メルボルン大学教授 (機械工学)
Senior Lecturer in Mechanical Engineering, University of Melbourne
原稿受理 昭和54年6月25日

2. 自由な円旋回における人—自動車系の挙動

道路曲線の基本的な機能は、車両の円旋回を安全でかつ快適に行なわせることである。またとくに、道路交差部分やインターチェンジでの道路曲線は、車両の速度制御の機能をもはたすことになる。もし、道路曲線を最低の基準で設計するというのなら別であるが、そうでなければ、ある与えられた姿勢角と速度の変化で曲線部を走行しうるための最適な道路曲線がありうるのではないか、ということが問題となる。

ここで最適とは、道路全体として、最大の機能を発揮するという意味であり、もし、コスト、施工可能性、景観、交通容量などについては与えられた条件を満足しているものとすれば、最適な道路曲線の評価の基準は、走行する車両の安全性ということになる。もし、適切な事故のデータがなければ、それにかわる基準としては運転者の好みということになる。仮に、道路曲線が、ある条件下で運転者が最適と判断するように設計されていれば、その曲線を通過する車両運転者の挙動は、他の設計の場合よりは、設計条件に近い挙動となるはずである。このように運転者が好ましいとするように道路曲線が設計されているとすれば、運転者と車両は、安全限界の範囲内で、その曲線部を通過することができると考えて良いと思われる。

以上のような観点から、まず次のような、自由円旋回の実験を行なった⁶⁾。ここでは6人の運転者がそれぞれ132回の円旋回を行なっている。この円旋回では、初期速度 V と変化するべき姿勢角(旋回角 ϕ)および、次の4つ(a~d)の前後方向の加減速に対する制限のみが課せられる(a=加速したままの旋回、b=減速して進入し加速して脱出、c=一定速度での旋回、d=減速したままの旋回)。そして、与えられた角度の旋回を達成するまでの円旋回のコースは、車両の横方向の運動に対する制限を全く加えずに、運転者が自由に定めて良いものとする。また、曲線進入速度は16~80km/h、旋回角度は30°~240°までを設定し、すべての実験を1台の車両(小型セダン)で行なった。

ここでは、車両のヨー角速度 r^* および横加速度 ay を測定し、運転者が円旋回時にとった走行コースが、現在の道路設計時にとられている仮定、つまり

- (i) 横方向ジャーク^{**}一定の緩和区間
- (ii) 横加速度一定の定常円旋回

という前提にどれだけ近いものかを検討した。この実験の結果をまとめればつぎのようになる。

- (a) 左旋回、右旋回の有意な差はほとんどみられない。ただし、右旋回の方がデータのバラツキが少ない(実験車は右ハンドルである)。
- (b) 前後方向の加速度の各条件それぞれの場合、すべて最大横加速度は走行速度および旋回角とともに大となる(前者については、設計基準と大きな差があるものであり、後者については、過去に報告された例がない)。
- (c) 総じて、横加速度のレベルは、コースが与えられたときの運転時の横加速度や道路設計時にとられている値よりも高い。自由円旋回時の最大横加速度およびジャークの平均値はそれぞれ 3.2m/s^2 、 2.9m/s^3 である。
- (d) 横加速度の大きさは、どのような円旋回を行なうかということに関しては、さして重要なファクターではないようである。
- (e) 前後方向加速度に関する各条件下での車両の軌跡は、一定の最大ヨー角速度と深いかかわりあいをもつ。なお、このヨー角速度は、どのような旋回角の場合でも走行速度とは無関係である。この、いわゆる運転者が好ましいとしたヨー角速度は、ほぼ、旋回角の対数に比例して増大する。この関係は、Fig. 1に示されているように、一定速度の旋回や加速旋回のとくのみ、あるいは、最大横加速度(平均)が 3.7m/s^2 を越えたときのみ、成り立たなくなる。
- (f) このようなヨー角速度と旋回角の関係は、6人の運転者すべてについていえることである。この結果は、運転者のヨー角速度を検知し、これを制御する能力に関係するものである。
- (g) 同じような関係は、曲線進入時の最大ヨー角加速度と旋回角の間にもみられる。曲線脱出時のヨー角加速度は一般に進入時に比べて小さくなっている。
- (h) これらの関係は、与えられた旋回角の旋回を行うための時間は走行速度に無関係である、ということを示すものである。

3. コースが与えられた円旋回における人—自動車系の挙動

もし、自由な円旋回の結果が、通常のコースが与

*車両が旋回や進路変更をするとき車体向きを変える速度。
**加速度の変化率。

えられたときの走行と関連があることが明らかにされれば、それは、高速道路のループやランプの設計や夜間走行時のヨー角度の検知のための視覚情報の設置、それに車両の運動力学的な設計などにとって重要な意味をもつことになると考えられる。そこで、16名の運転者に、13種類の低速走行の曲線コースを与え、そのコースに沿って、自由な走行速度で走行させるという実験を行なった⁷⁾。ここでも同じく、実験車は中型のセダン1台とした。曲線は、片こう配はなしで、半径が18~116m、旋回角が30°~270°としている。緩和曲線は、AASHTOの道路交差に関する基準によっている。旋回角30°の2つの曲線(半径が18mと38m)はすべて緩和部分だけであり、円弧の部分はない。

テストは、各コースを2回走行することによって行なわれた。最初の走行ではすべての運転者は、普通の方法で快適と思われるように走行することを指示され、第2回目の走行では、半数の運転者(グループA)は、同じように走行することを指示され、他の半数の運転者(グループB)は、与えられたコースから外れたときにはペナルティーを課して、できるだけ速く曲線を通るように指示された。この実験から得られた主な結論は次の通りである。

(a) 自由な円旋回の結果から得られた、運転者はコースを与えられたときの円旋回において、曲

率と走行速度を最大ヨー角速度が曲線の半径と無関係になるように選ぶであろうという仮定を、この実験データでは確認することができなかった。同じように、最大ヨー角速度が、旋回角とともに増すということもみられない。このように、自由な円旋回における好ましいヨー角速度での旋回は、コースが与えられたときの円旋回と直接的な関連をもたないということができる。最大ヨー角速度は、事実、Fig. 2 から見て取れるように、与えられたコースの曲率にほぼ比例して増加し、旋回角そのものの影響は受けにくいことがわかる。

(b) 2つの緩和部分のみのコースを走行する場合は、運転者は、車両の走行軌跡の最大曲率を小さくするような運転をする。そして、このようなコースを走行するときの走行速度は、同じ程度の半径の他のコースを走行するときの横加速度と同じ程度の横加速度が得られるように選ばれている。したがって、このような曲線を走行するときの横方向のジャークは、他の曲線の場合に比べて大きくなる。このことは、与えられた半径の曲線を走行するときの走行速度は主として最大加速度によって決まり、横方向のジャークの緩和という問題は、必ずしも主要な要件ではないということを示している。

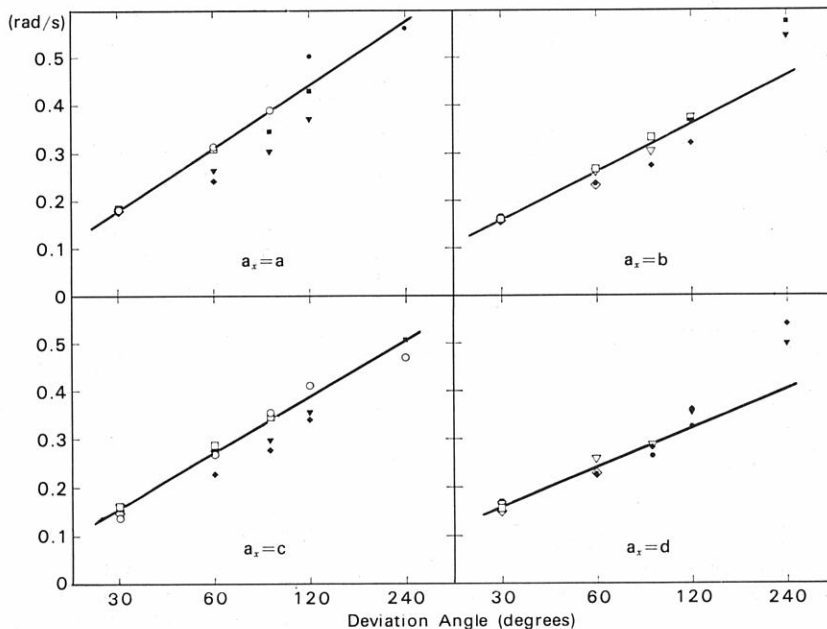


Fig.1 自由な円旋回における最大ヨー角速度の旋回角による変化
Variations of maximum yaw rate with deviation angle in freepath turn

- (c) 第2回目の走行での最大横加速度は、Fig. 3に示されるとおり、グループA、グループBの場合双方とも、曲線の半径の増大とともに減少している。したがって、ある一定の好ましい横加速度があるわけではない。これは、全体としての横加速度の大きさおよび、ある瞬間の最大横加速度の双方についていえることである。
- (d) 曲線の半径による最大横加速度の変化は、走行速度による横加速の増大をおさえることに一致する。しかしながら、先に示したように、測定された最大横加速度と走行速度の間には、それほど強い相関は認められない。設定した独立変数（つまり曲率や旋回角）と運転者の挙動の関係の方が、よりはっきりした相関があるようである。
- (e) 普通の方法で快適に旋回するという指示のもとに走行したときの平均横加速度は、AASHTOが、道路交差の曲線の設計時の最低値として掲げている横すべり摩擦係数と大きな違いはない。もちろん、運転者各個人によって、横加速度の大

きさはかなり違っている。

- (f) ヨー角速度や横加速度の最大値と異なり、ヨー角速度や横加速度の、緩和区間進入あるいは脱出時の変化率は、与えられたコースの旋回角の影響をかなり受け、その角度の増加とともに減少する。この効果は、小さい半径で小さい旋回角のときのほうがはっきりしている。
- (g) 曲線進入部分の緩和区間と脱出部分の緩和区間の間には顕著な差がみられ、曲線脱出の緩和区間の方が、一般に、進入の緩和区間より長くなる。平均的にみると、脱出時の横方向のジャークは、進入時のジャークに比べ55%高くなっている。この関係は、自由な円旋回の場合には逆になっている。
- (h) 旋回の方法、最大ヨー角速度や横加速におよぼす影響はごく小さい。右旋回の方が左旋回に比べ平均的にみて、これらの値が5%程度大きいだけである。このことは、どの運転者にも共通していえることである。また、これは、曲率半径が小さくて曲線の見やすさが右旋回と左旋回でかなり違ってくるときほど顕著になる。旋回の方法は、曲線進入時のヨー角速度にはほとんど影響を与えないが、曲線脱出時のヨー角速度は一般に右旋回のときの方が大となる。

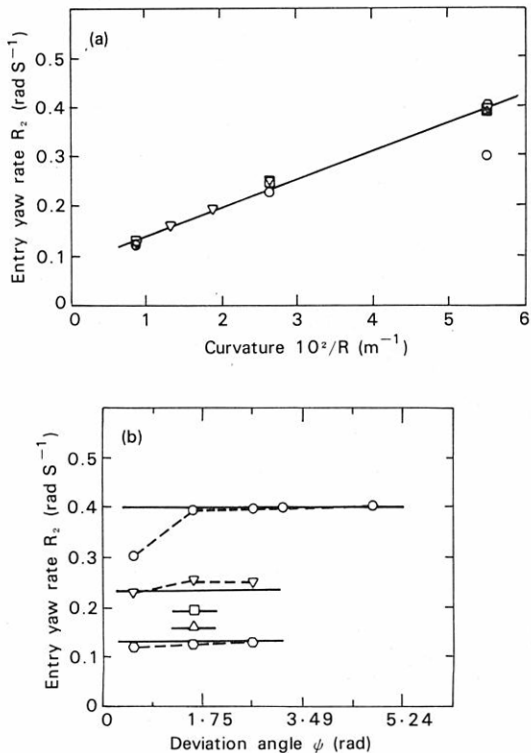


Fig.2 与えられたコースの(a)曲率、(b)旋回角による、進入時のヨー角速度 R_2 の変化
Variations of entry yaw rate R_2 with (a) curvature and (b) deviation angle of restricted path

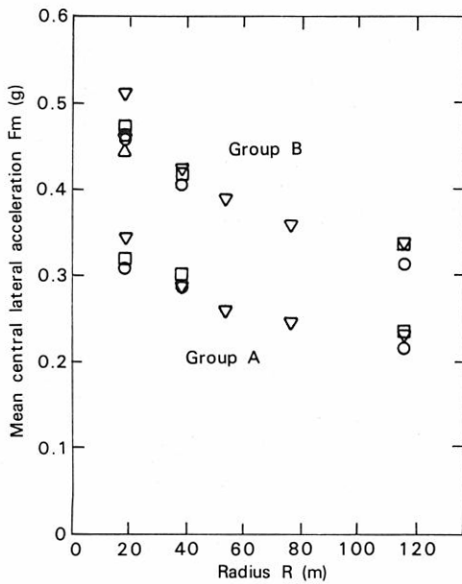


Fig.3 曲線の半径による、グループA、グループBの第2回目の試走時の中央での平均横加速度の変化
Variations with curve radius of mean central lateral acceleration for second trials of groups A and B drivers

この曲線進入時と脱出時の違いは、曲率半径の小さい曲線に進入していくときと脱出するときでの、前方視野の違いで説明することができる。

(i) 走行速度、横加速度、ヨー角速度、曲率などのデータの分布を見ると、とくに低速走行では、運転者と車両の挙動がかなり複雑なものであることがわかる。そのいくつかの例を Fig. 4、5、6 に示してある。一定の減速あるいは加速状態での旋回の場合も含めて、各曲線コースに対する走行速度の分布は対称である。しかしながら、曲線全体を通して走行速度が一定となる曲線もあり、また、曲線の円弧部分で走行速度が一定となるものもあり、分布が非対称となるものもある。

(j) Fig. 5 に示すように、全曲線長に対して、円弧部分が50~75%、をしめる曲線を走行したときの横加速度やヨー角速度の分布には、多くの場合、ちょうど円弧部分の両端付近に2つのピークが認められる。この2つのピークは、曲線の曲率の分布にも明らかに出てくる。これらは、左旋回するときよりは、右旋回するときの方が良く出ており、これは、曲線進入と脱出での緩和区間の非対称性に関連しているようである。この2つのピークは、明らかに走行中与えられたコースから外れないようにするため生じるものであり、これらは、自由な円弧旋回では見られないものである。幾何的に、与えられたコースに対して、ある範囲内の位置関係を保って走行せよ、という条件は、運転者にある慎重な運転を強いるということができる。しかし、その目的が何であるかは未だ確言できない。

(k) ヨー角速度の計測データの中には、周波数が0.5~1.0Hz の振動成分が見られる。これを Fig. 6 に示す。過去に行なわれた、運転者の制御動作の研究や、車両のシミュレーションの結果などから考えて、この振動成分は、与えられたコースへの運転者の追従動作によるものと考えられる。

(l) 出来るだけ速く、しかも、与えられたコースから外れることなく走行せよという指示により、どの曲線を走行する場合でも、すべて一様に横加速度のレベルが上昇するということがわかった。Fig. 3 に示すように、曲線の半径が増えると横加速度が多少小さくなる。これ以外、運転者の制御動作がかわるとい証拠は認められない。

普通の方法で走行せよという指示をした場合と、短時間でコースから外れずという指示をした場合の、走行速度、曲率、横加速度の分布を比較すると、挙動の再現性は非常に良く、大きな相違は曲線を走行する場合の速度に現れるのみである。また、この外の有意な差としては、後者の方がより曲率の分布の非対称性が強くなるということである。

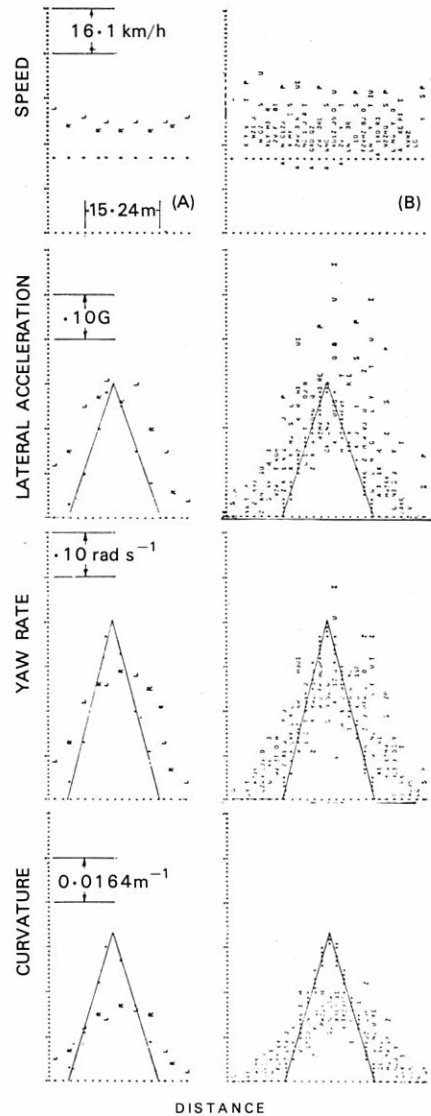


Fig.4 第1回目半径18mで30°の曲線の試走での(a)10人の運転者、(b)すべての運転者の、走行速度、横加速度、ヨー角速度、曲率の分布
Distribution of speed, lateral acceleration, yaw rate and curvature for first trials of (a) subject 10, (b) all subjects on 18m radius, 30° curve

4. 昼間と夜間における道路交差の曲線部での
人-自動車系の挙動

コースを与えたときの円旋回の実験により、多くの曲線部を走行するときの運転者と車両の挙動を良く理解することのできるデータが得られた。しかしながら、これらのデータは、片こう配はなくて、実際の交通がある道路とは違ったところに意図的に与えられた曲線コースを走行して得られたものである。そこで、4人の運転者が、計測器を積んだ車両で、メルボルン付近の道路80kmにルートを設定し、このル

ートを走行するという実験を行なって、上記データの有効性を確認することにした。⁷⁾

測定は、このルートに沿った9個所の道路の交差部分とインターチェンジにおける曲線路で行なわれた。これらの曲線は、それぞれ半径が約15, 30, 45, 50mの4つのグループに分けることができる。半径が30m以内のグループには、旋回角が104°~304°までの曲線があり、半径が45mのグループには、旋回角が77°~262°までの曲線がある。このようにグループ分けすることによって、先のコースを与えたときの円旋回の実験における曲線の半径や旋回角の影響

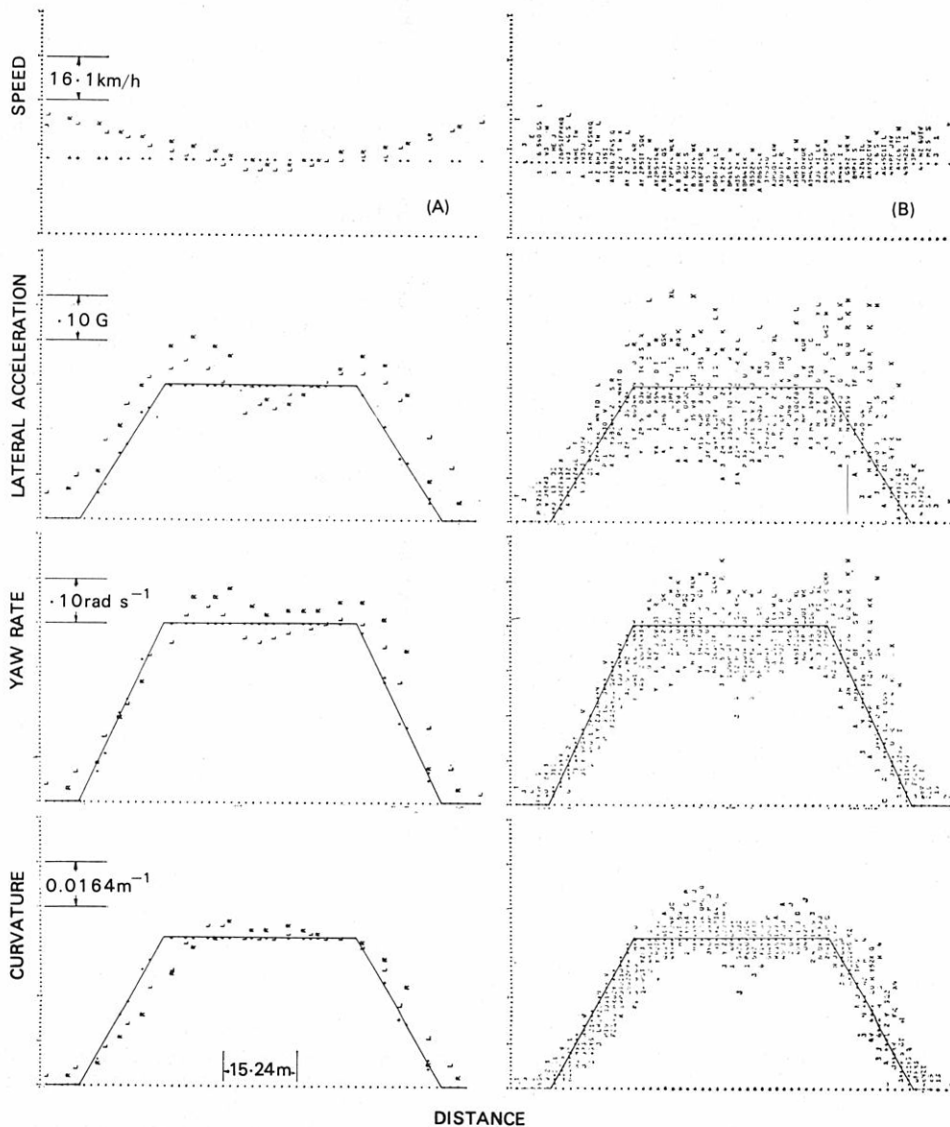


Fig.5 第1回目、半径18m、180°の曲線の試走での、走行速度、横加速度、ヨー角速度、曲率の分布
Distribution of speed, lateral acceleration, yaw rate and curvature for first trials on 18m radius, 180° curve

と対応づけて検討できるようにしている。

実験は、昼間と夜間に行なわれ、このような前方視界の差の影響が大きくどうかをみている。夜間は視界が限られており、道路標識の照明などで、運転者の視認力が落ちる。したがって、夜間における運動体の視認と昼間におけるそれとは違うのではないかと考えられる。しかし、この点に関しては、被験者数が少ないこと、照明をいろいろかえて実験するということができないことのため、単なるひとつの実験結果という程度のことしか得られていない。この実験における道路交差やインターチェンジの

曲線部での運転者と車両の挙動は、コースを与えたときの円旋回の実験結果とほぼ一致している。とくに、次のような点で、コースを与えたときの円旋回で得られた結果が、正常なものとして確認された。

(a) 曲率によるヨー角速度と横加速度の中央値の変化は、双方の実験で同じになっている (Fig. 7, 8)。平均ヨー角速度は、実際の道路上の方が高くなっており、横加速度はこれに対して少し低くなっている。(これは、実際の道路の片こう配の影響によるものである)。データのばらつきが多いため、片こう配のある曲線におけ

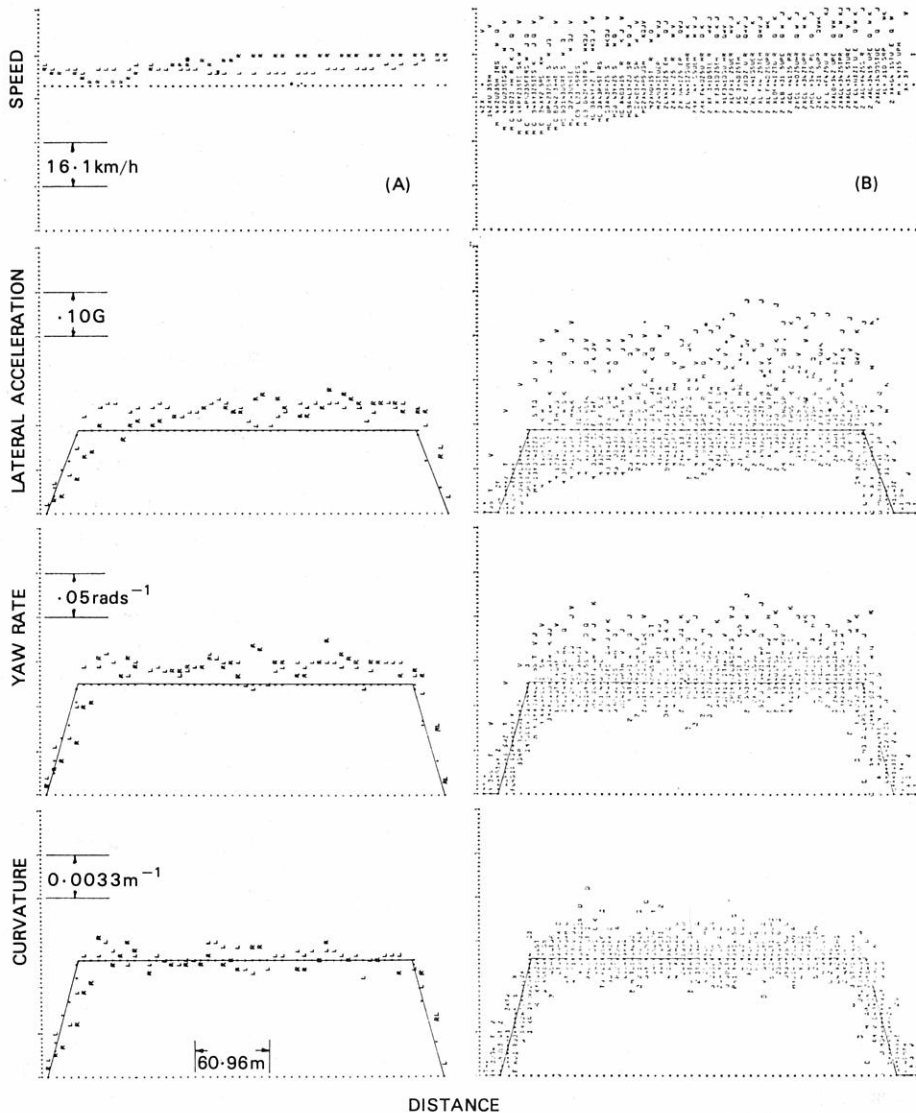


Fig.6 第1回目、半径116m、150°の曲線の試走での、走行速度、横加速度、ヨー角速度、曲率の分布
Distributions of speed, lateral acceleration, yaw rate and curvature for first trial on 116m radius, 150° curve

る運転者の挙動を見るのにヨー角速度を基準にして見るのが良いのか、横加速度を基準にして見るのが良いのかは判断ができない。

- (b) Fig. 7 から分かるように、次の(c)で示す以外は、曲線の旋回角は、運転者と車両の挙動に影響を与えることはない。
- (c) 半径が15mの曲線の走行では明らかに、“corner cutting”（角を落すような軌跡をたどること）が生じている。これは、コースを与えた円旋回の実験における小さい半径で、小さな旋回角の曲線を走行するときに見られたことと同じである。
- (d) 道路交差部分の曲線の進入およびそれからの脱出時の道路の曲率半径に伴うヨー角加速度と横方向のジャークの変化は、緩和曲線のあるときのコースを与えた円旋回の実験で得られた結果と同様である。しかしながら、実際の道路を走行するときの方がその変化の程度はやや小さいようである。
- (e) コースを与えられたときの円旋回の実験のときと同じように、曲線脱出の緩和部分での挙動

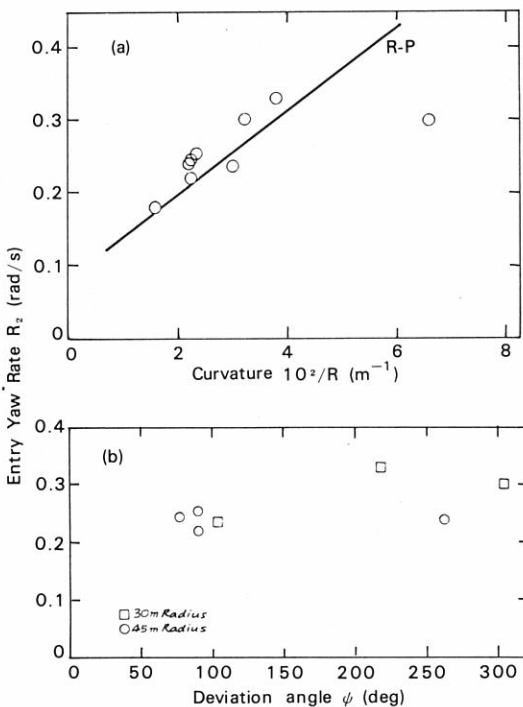


Fig.7 道路交差部分の曲線の(a)曲率、(b)旋回角による、進入時のヨー角速度 R_2 の変化
Variations of entry yaw rate R_2 with (a) curvature (b) deviation angle of intersection curve

の変化の方が、曲線進入の緩和部分でのそれよりも大きく、脱出時点でのヨー角加速度や横方向のジャークの方が進入時点より大きくなっている。

- (f) 自由な円旋回の実験、コースを与えた円旋回の実験、およびこの実験での、曲線進入時のヨー角加速度と中央でのヨー角速度との関係を調べてみると、車両の運動に横方向の制限を与えるかどうかで、運転者と車両の挙動が大きく違ってくるのがわかる。つまり、大ざっぱにみて、自由な円旋回のヨー角加速度は、コースを与えられた場合の約2倍になっている（後者の場合は、一般に、設定された曲線の幾何学的形状から推定されるものに一致する）。緩和曲線がない場合の今回の実験におけるヨー角加速度は、コースを与えた円旋回の実験のときより小さな値になっている。この関係は、運転者が、片こう配とは無関係に曲線の半径だけの関数として、走行速度とコースに対する横方向の変位（または位置）を選ぶということを意味する。例外は、この実験における2回の右旋回の場合と、小さな半径の曲線部を運転者が角（カド）を落すように走行する場合に生じている。この2つの例外は、コースを与えた円旋回の実験でも同じように見られる。しかし、さらに道路の片こう配が、運転者と車両の挙動に与える影響をはっきりさせるための信頼性のあるデータが必要である。
- (g) コースを与えた円旋回の実験における操舵角、ヨー角速度、横加速度などにみられた2つの特徴、つまり、2つのピークと1 Hz 程度の振動

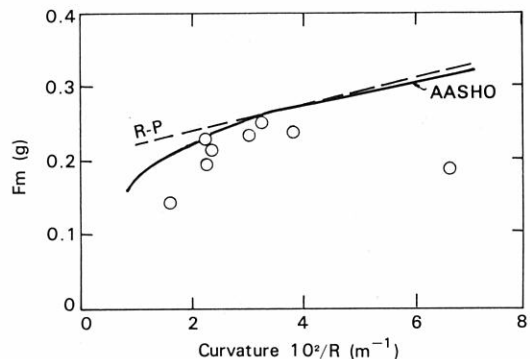


Fig.8 道路交差部分の曲線の曲率による中央での平均横加速度 F_m の変化
Variations of mean central lateral acceleration F_m with curvature of intersection curves

成分は、この実験データの中にもいくつか認められる。

昼間と夜間とでの挙動を比べても、データ分析の限界範囲内で、ほとんどその差を認めることはできない。夜間では全体の走行速度は平均で約6%程度低下している。しかしながら、操舵角、走行速度、ヨー角速度、横加速度などの時間的な変化は両者ともほとんど同じであり、従って、運転者の制御動作はほとんど、昼夜間とも同じとみることができる。

5. 曲線道路上での運転者の制御動作

異なる半径の曲線での横加速度の相違は (Fig. 3, 8 に示す) 運転者の各曲線での走行速度の選定方法を推測させるものである。文献〔9〕には、それぞれの運転者は、それぞれ違った範囲の走行速度をとっているの、何人かの運転者の平均的な横加速度/走行速度のデータに基づいた運転者個人の挙動のモデルは必ずしも有効ではないことが示されている。このことは、要求される横方向の摩擦力などに関する研究結果は、運転者の挙動と直接的な関連のある独立変数 (つまり道路の曲率や旋回角など) を固定し、それと関連づけて考えていかななくてはならないことを示唆している。

横加速度のレベルや、双方とも曲線の半径によって変わってくるが、片こう配のあるときの出し得る最大の摩擦力と実際の摩擦力の間の余裕それ自体は、曲線走行時の走行速度を決める決定的要因ではない。高速走行で要求する、横方向の摩擦力が小さければ、車両の応答の振動成分による車両のギクシャクした挙動をおさえることになることがわかっている。このようなことがらについては、文献〔9〕で、円弧の曲線に沿って走行する車両に外乱を加え、運転者はこの外乱の修正動作をしながら走行するという実験によって検討が加えられている。高速走行でも、低速走行と同じ程度の快適さの閉ループ系の制御が達成できるためには、高速での定常円旋回時の横方向の摩擦力を減らさなければならない。

また文献〔9〕では、運転者は、定常円旋回時の横すべり速度 (車両速度の横方向成分) がある一定限度内に入るように曲線走行時の走行速度を選定している、ということについても検討している。普通の性能の車両の場合、ある曲線路での走行速度を測定してみると、それはちょうど、横すべり速度が0.13m/s以内になるような値であることがわかる。ドイツのVolkswagenとBraunschweigで行なわれた研

究では、運転者は車両の横すべり応答に敏感で、横すべり速度が小さいものをとくに好むとしている。このような、運転者の走行速度の選定に関する仮説を検討するために、メルボルン大学の変特性車を用いた研究が計画されている。

6. 緩和曲線の設計パラメーターの評価

緩和曲線は通常、道路の直線部と曲線部の間の曲率と片こう配をなめらかにするために設けるものである。これまで、緩和曲線の幾何学的特性が、運転者の快適性、運転の容易性、車両運動の安定性などに及ぼす影響について多くの推定がなされて来た。しかしながら、これらの推定は、車両の力学的な挙動に関する現実的なモデルを有効に利用してなされたものであるとはいえない。

緩和曲線の設計は、その曲線が車両と運転者の力学的な運動特性に適合することをひとつの目標にしなければならない。したがって、運転者と車両が、与えられた曲線に正確に追従して走行する様子を調べることは、重要なことである。このような研究によって、種々の設計パラメーターが、運転者への道路からの視覚情報と運転者のなすべき制御動作の適合性や、過度的な運動とそのときの力などに及ぼす影響を検討することができる。このような目的のもとに、軌跡を与えたときの車両の運動モデルがつけられた¹⁰⁾。ここでは、車両が、与えられた道路線形に正確に沿って走行するために必要な操舵角を計算しようとするものである。

このモデルでは、車上の基準点の路面への投影が、与えられた曲率 k と片こう配 e をもつ道路のセンターラインに沿って、一定速度 \dot{v} で運動するようになっている。運動方程式を数値的に解くことによって、車両が与えられた軌跡をたどって走行するために必要な前輪の操舵角 δ が計算され、さらに車両の横すべり角 β 、ピッチ角 θ 、ロール角 ϕ 、バネ上質量の上下変位 z が算出される。また補足的に、運転者の頭部にかかることになる力の横方向と鉛直方向成分 b_x 、 b_y および車両のヨー角速度 $\dot{\gamma}$ も計算される。これらの変数を走行距離に対してコンピューターでプロットしたものをFig. 9に示す。

この計算は、1970年のオーストラリアの道路管理局 (National Association of Australian Road Authorities) の道路設計基準に従った、50km/hの最低基準で設計された2車線の左旋回の曲線に進入する場合についてのものである。数値的な検討をするた

めにタイヤ、サスペンションの特性や、種々の慣性項の値などは、総重量1800kgの典型的なセダンに相当するように選んだ。

ここでは、もし、操舵角の最大値が、定常状態の値から、その10%以上あるいは 0.15° （ハンドル角の動きで普通 3° に相当）を越えることがなければ、操舵修正（正確に与えられた曲線に沿って走行するための）は“許容範囲”である、とする曲線の評価基準を設ける。この程度の、いわゆる“なめらか”な操舵からの操舵角のずれは、運転者の制御動作あるいは車両応答の双方からみても小さいとみることができる。様々の緩和曲線設計のために軌跡を与えた車両の運動モデルを利用して得た結果に、上記の評価基準を適用することによって次のような結論が得られた。¹¹⁾

- (a) 半径方向のジャークCの影響 片こう配がなく、最大摩擦係数が $f_m=0.15$ の曲線の場合には50km/hでは $C=0.60\text{m/s}^3$ 、100km/hでは $C=0.45\text{m/s}^3$ で操舵角は基準のレベルに達した。しかし、ら旋状の曲線の場合には、半径方向のジャークは、運転者が正確に曲線に沿って走行することのむずかしさを表現するには不十分である。つまり、車両の走行速度や横加速度もそれに影響を与える。高速での横すべり応答の減衰の低下は、必要な修正操舵を決める、とくに重要な要件である。

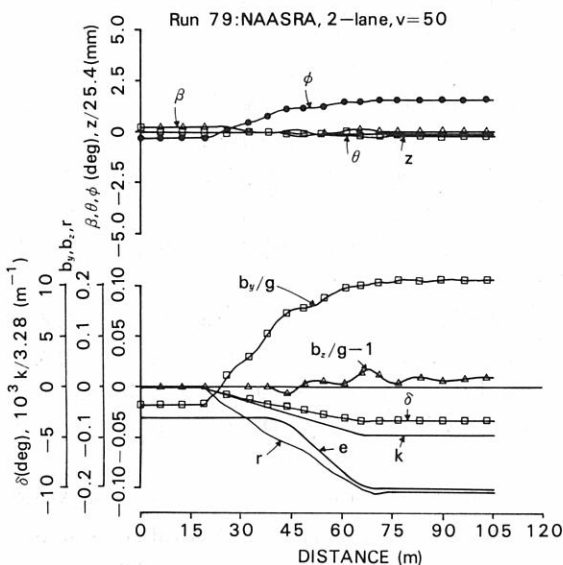


Fig.9 50km/hのNAASRA、最小半径の曲線に進入したときのシミュレーション結果
Simulation results for entry to 50km/h NAASRA minimum-radius curve

- (b) 垂直方向のカーブの長さ L_v の影響 AASHTOが、片こう配のある緩和区間の始めと終りの部分での垂直方向のカーブの最小長さとしているものは $[L_v(\text{ft})=V(\text{mile/h})\text{または}L_v(\text{m})=V(\text{km/h})/5.3]$ 。確かに、次の2つの相反する影響の最適なトレードオフとなっている。

(i) 舗装路の回転加速度が過大となり過ぎる、ということ

(ii) 垂直方向のカーブの全長にわたっての曲率と片こう配の対応が欠けるということ。

しかしながら、もし、純粋なら旋状の曲線ではなく、曲率と片こう配の傾きが、曲線の同じ長さにわたってつけられていれば、このようなトレードオフは不要となる。

- (c) 舗装路の回転速度 $\dot{\epsilon}$ の影響 車両が片こう配のあるところを走行しているときの回転速度 $\dot{\epsilon}$ は、操舵角や車両の過渡運動にはほとんど影響を与えない。その主な効果は、垂直方向の曲線の全長 $L_v=V$ にわたって加速度 $\dot{\epsilon}$ に影響を与えるということである。緩和区間の始めと終りに与えられる外乱の影響は、高速では減衰が低下するから、走行速度が50km/hのときより、100km/hのときの方が大となる。

- (d) 横方向のジャークQの影響 タイヤの発生する摩擦力を利用して円旋回を行なう場合には、横方向のジャークQが、 $\dot{\epsilon}$ よりは、いま考えている円旋回を適切に表現できるパラメーターである。前と同様に、要求される最大の摩擦力や走行速度もまた重要なパラメーターである。 f_m が0.15での走行においては、走行速度が50km/h、100km/hの双方とも、 $Q=0.45\text{m/s}^3$ で、操舵角が評価基準レベルを越えている。これは、片こう配のない曲線の場合のCの値（またはQ）に一致するものである。

- (e) 舗装路の回転軸位置の影響 緩和曲線の始めと終りの部分で受ける外乱は、舗装路の回転軸が、車両の走行コースから離れるに従い大となる。この影響は、垂直方向の曲線が長くなるほど小さくなる。しかし、これは、曲率と片こう配が、垂直方向の曲線の全長にわたって正しく対応しているときのみ有効である。他の方法としては、ある設計基準でとられているように、

* 激しい旋回のとときに生じる車体の向きと車の進行方向とのズレの様子。
** 片勾配の摺り付けによって生じる車両の進行方向を軸とする回転速度。

さらに幅員を広く、緩和曲線を長くするということがある。

- (f) 全般 操舵角に関する評価基準（これは、曲線に沿って走行するのに必要な操舵の修正を、相対的にも絶対的にも小さくすることを目指している）を適用することによって、現在の道路設計基準で採用されている設計パラメーターに相当し、それと大差のない道路の幾何学的なパラメーターに関するひとつの基準を設定することができた。しかしながら、この結果は、偶然的

な要素もあり、さらに、現在の車両のモデルを用いた合理的な操舵角基準の設定や、与えられた軌跡からのズレなどの特性を推定することのできる新たな人—自動車系のモデルの開発など、今後の研究が必要である。また、どのような評価や解析モデルを用いるにしてもそこで良いとされた設計パラメーターのもつ、実際の道路建設の場面での意味についても検討されなければならない。

翻訳監修：芝浦工業大学助教授 小口泰平

参考文献

- 1) Dorey, A.D., Good, M.C. and Joubert, P.N.: The effect of free control variables on automobile handling — a pilot study. Human Factors Group Report No. HF 34, Department of Mechanical Engineering, University of Melbourne, 1978.
- 2) Dorey, A.D., Good, M.C. and Joubert, P.N.: A variable free control characteristic vehicle. Vehicle System Dynamics (in press).
- 3) Good, M.C.: Sensitivity of driver-vehicle performance to vehicle characteristics revealed in open-loop tests. Vehicle System Dynamics 6, pp. 245–277, 1977.
- 4) Good M.C.: Effects of free-control variables on automobile handling. Vehicle System Dynamics, special issue for AVSD — IUTAM Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and on Railway Tracks, Berlin, September 1979.
- 5) Good, M.C.: Road curve geometry and driver behaviour. Australian Road Research Board Special Report No. 15, 1978.
- 6) Good, M.C., Rools, K.J. and Joubert, P.N.: Driver-vehicle behaviour in free-path turns. Transportation Research 3, pp. 43–68, 1969.
- 7) Good, M.C. and Joubert, P.N.: Driver-vehicle behaviour in restricted-path turns. Ergonomics 20 (3), pp. 217–248, 1977.
- 8) Good, M.C. and Joubert, P.N.: Driver-vehicle behaviour on intersection curves during day and night. Proceedings Australian Road Research Board, Vol. 8, Session 21, pp. 15–25, 1976.
- 9) Good, M.C. and Sweatman, P.F.: Driver Strategies on road curves. Proceedings XVI International Automobile Technical Congress of FISITA, Tokyo, May 1976.
- 10) Good, M.C.: Prescribed trajectory vehicle model. Proceedings of IUTAM Symposium on The Dynamics of Vehicles on Roads and on Railway Tracks, Delft, August 1975, pp. 60–85. See also Vehicle System Dynamics 4 (2–3), pp. 87–92, 1975.
- 11) Good, M.C.: Evaluation of transition curve design parameters using an analytical vehicle model. Australian Road Research 7 (2), pp. 14–22, 1977.