

多連クロソイド曲線を用いた曲率変化の滑らかな走行路緩和曲線の提案 (第3報：車線変更への適用)

山本 真^{*1}, 西山 修二^{*2}

Proposal for a transition curve with smoothly changing curvature using multiple clothoid curve (Third report: Application to a lane change)

Makoto YAMAMOTO^{*1} and Shuji NISHIYAMA^{*2}^{*1}Sanei Co., Ltd.

3-26 Kaminobori-machi, Naka-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 730-0014, Japan

^{*2}Nishiyama Engineering Consultant Office

1-17-5 Hesakakurumegi, Higashi-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 732-0008, Japan

Received: 21 November 2018; Revised: 30 January 2019; Accepted: 18 April 2019

Abstract

This paper presents theoretical research on an optimum transition curve with a smoothly changing curvature using a multiple clothoid curve for improving the occupant ride comfort of automobiles when vehicle changes a lane from a traveling lane to a passing lane. In the first report, a three dimensional vehicle occupant model was developed, and the multiple clothoid curve was proposed as a new transition curve. In the second paper, application of a newly-developed multiple clothoid curve for the vehicle turning at an intersection was reported. In this paper, application of the multiple clothoid curve for the vehicle lane change is presented. The traveling path from a slow lane to a fast lane consists of the combination of a straight line and an arc of circle. At the connecting points between an inlet straight line and a circular arc, or between a circular arc and an outlet straight line, vehicles cannot run smoothly owing to the discontinuity of curvature. The discontinuity of curvature at connecting points makes highly precise control of apparatus difficult. Then, the smoothly changed curvature of multiple clothoid curve is applied as a transition curve at connecting points. Four sorts of lane change which consists of various combination of a straight line and a circular arc are investigated, and the validity of the application of a multiple clothoid curve as a transition curve at connecting points is explained. According to the prescribed analysis method, a three-dimensional vehicle passenger model is applied and the validity of applying to a multiple clothoid curve is quantitatively demonstrated as compared with the case where a connecting point is not interpolated. It was found that the influence of multiple clothoid curve on the vehicle movement and a ride comfort is superior to those of the non-interpolation. Some results are presented in the form of parametric plots.

Keywords : Lane change, Optimum transition curve, Multiple clothoid curve, 3D vehicle occupant model

1. 緒 言

高速道路や主要幹線道路などのカーブは、カーブに進入する進入直線部、進入クロソイド曲線部、円弧部、脱出クロソイド曲線部および脱出直線部などを有する。道路がこのように構成されていれば、車両は、カーブを滑らかに走行することができ、乗員の不快感を低減することが可能となる (McConnell, 1957)。しかしながら、市街地の交差点などは、進入直線部と円弧部および脱出直線部のみで構成され、進入クロソイド曲線部および脱出クロソイド曲線部を有しない場合が多い。このような場合、進入直線部と円弧部との接続点および円弧部と脱出直線部との接続点において曲率が不連続となり、車両は滑らかに走行することができない (Malcolm, 1979)。特に、運転者のステアリング操作の支援や運転者に代わってステアリング操作を行う運転支援装置を搭載した車両 (伊

No.18-00468 [DOI:10.1299/transjsme.18-00468], J-STAGE Advance Publication date : 26 April, 2019

^{*1} 正員, (株)三英技研 (〒730-0014 広島県広島市中区上幟町3-26)

^{*2} 正員, 西山技術事務所 (〒732-0008 広島県広島市東区戸坂くるめ木1-17-5)

E-mail of corresponding author: makoto@sanei.co.jp

能他, 2015) は, 車両の振動が増幅し不安定となり, 乗員の不快感が増すことになる(山門他, 2013). 接続点における曲率の不連続性は, 車両に搭載した機器の高精度の制御を難しくする. 交差点通行時に, 車両の振動を抑制するとともに, 乗員の不快感を低減することは重要である.

この課題に対する問題解決の一手法として, 著者らは, 第1報(山本他, 2017)では, 三次元車両-乗員系解析システムを開発し, 車両が旋回する場合の最適走行路緩和曲線を構築し, 車両や人体各部に及ぼす影響について示した. 接続点の緩和曲線として一つの関数で表示できる新規の多連クロソイド曲線を考案した. 接続点が無補間の場合, 単一クロソイド曲線で補間した場合などと比較し, 多連クロソイド曲線の有効性について示した. さらに多連クロソイド曲線の勾配の大小を示すパラメータの影響についても示した.

第2報(山本他, 2018)では, 交差点旋回への適用について示した. 交差点内の車両旋回は直線部と円弧部の組み合わせで侵入から脱出まで一連の運動となる. 直線部と円弧部の種々の組み合わせからなる交差点走行時の旋回経路を種々取り上げ, 接続点の緩和曲線として多連クロソイド曲線を適用して有効性を示した.

本報では, 車線変更への適用について示す. 車両の左車線から右車線への車線変更の走行経路は直線部と円弧部の組み合わせの運動となる. 直線部と円弧部の種々の組み合わせからなる車線変更の走行経路を4種取り上げ, 接続点に多連クロソイド曲線を適用して有効性を示す. 手法としては, 前報(山本他, 2017)で開発した三次元車両-乗員系解析システムを適用し, 接続点が無補間の場合と比較して多連クロソイド曲線の有効性について定量的に示す.

2. 三次元車両-乗員系解析システム

2.1 三次元車両モデル

本報で使用する主な記号の意味は次のとおりとする.

x, y, z : 車体重心の前後, 左右, 上下方向変位 ϕ, θ, ψ : 車体重心のロール角, ピッチ角, ヨー角

$z_{mf1}, z_{mf2}, z_{mr3}, z_{mr4}$: 前輪左, 前輪右, 後輪左, 後輪右のばね下質量の上下変位

z_e, θ_e, φ_e : エンジンの上下変位, ピッチ角, ロール角 x_b, y_b, z_b : 乗員胴体部の前後, 左右, 上下方向変位

x_h, y_h, z_h : 乗員頭部の前後, 左右, 上下方向変位 f_h, q_h : 乗員頭部のロール角, ピッチ角

F_{xn}, F_{yn} : 各タイヤに作用する前後力, 横力 F_{1fn}, F_{1m} : フロント, リアサスペンションの作用力

F_{2fn}, F_{2m} : フロント, リアタイヤの作用力 F_{3fn}, F_{3m} : エンジンと車体間の前部, 後部の作用力

F_{4fn}, F_{4m} : 乗員と車体間の前部, 後部の作用力

$w_{f1}, w_{f2}, w_{r3}, w_{r4}$: 前輪左, 前輪右, 後輪左, 後輪右のタイヤの上下方向入力変位

β, β_n : 車体およびタイヤの横すべり角 δ_f : 前輪操舵入力角

R : 車体重心点の旋回半径 V : 走行速度 g : 重力加速度

添え字 $n=1$: 前輪左, $n=2$: 前輪右, $n=3$: 後輪左, $n=4$: 後輪右を示す.

本研究では, 前報(山本他, 2017)で開発した三次元車両-乗員モデルを適用する. 基本となる車両(西山, 1993a)や乗員(鈴木, 2011)の基本モデルは種々の実績を有するモデルを適用した. 本報で適用する三次元車両-乗員モデルの概要について説明する.

図1は, 三次元車両モデルを示す. 座標系は右手座標系とする. 車両系は, 車体, エンジン, フロントとリアのばね下質量で構成されている. 車体は上下, 左右, 前後, ピッチング, ローリングおよびヨーイング運動, エンジンは上下, ピッチングおよびローリング運動, ばね下質量はフロント左右, リア左右の上下運動をそれぞれ考慮し, 車両系は13自由度のモデルである. タイヤは, ばねとダンパーでモデル化する. ばね上質量とばね下質量の間は, ばねとダンパーおよびサスペンション系フリクションを考慮する. ピッチング運動の中心は車体重心から下方に H_p の位置にピッチング中心を設定する. フロントおよびリアの懸架装置の粘性減衰係数は, ピストン速度に依存した非線形特性を考慮する(西山, 1993a). サスペンション系フリクション力については, 作用力をピストン速度の関数で表す(西山, 1993a, 1993b). 車両のローリング運動は車体重心から下方に H_r の位置にローリング運動の回転中心を設定する. エンジンはトランスミッションを含めたものとし, フロントとリアの左右4か所のエンジンマウント支持点をばねとダンパーでモデル化する. 乗員の乗り心地を検討するためには, エンジンの運動を含めた解析が必要である(西山, 1993a). 車両が旋回するときの横力を精度よく算出するために, 車両のタイヤモデルは Magic Formula タイヤモデル(Pacejka, 2002)を適用する.

図2は, 旋回半径と操舵角, 横滑り角の関係を示し, 上方から見た車両モデルを示す. 車体の前後運動, 左右運

動, ヨーイング運動, 車体重心の横滑り角, 各タイヤに作用する横滑り角, 前後力, 横力などを示す. 旋回半径と車体および前後左右輪の関係について示す (近藤, 1974). 本報で使用する車両系の記号の説明と計算諸元は前報 (山本他, 2017) のとおりとする. また旋回半径と操舵角, 横滑り角の関係を求める理論式に用いた記号の意味と値および単位は前報 (山本他, 2017) のとおりとする.

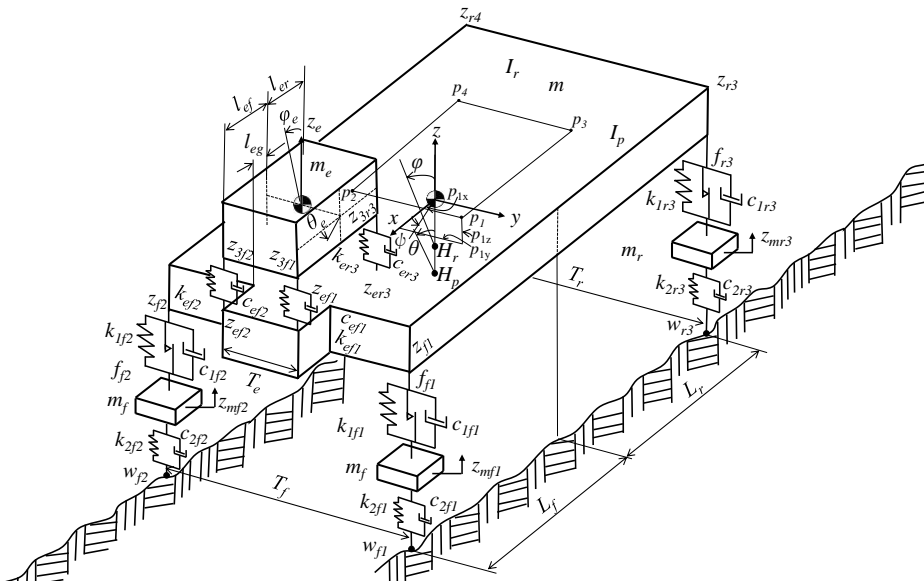


Fig. 1 Three dimensional vehicle model. A vehicle model with six masses has thirteen degrees of freedom. The tire model of vehicle is applied a Magic Formula tire model.

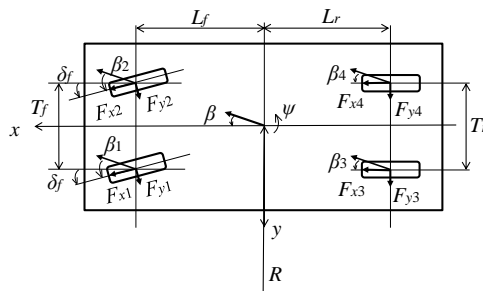


Fig. 2 Geometry of a turning vehicle.

2・2 三次元乗員モデル

図3は, 乗員モデル (鈴木, 2011) を示す. 乗員は胴体部と頭部の運動を対象とする. 胴体部および頭部は慣性を有し, 頭部と胴体部の上下方向はばねとダンパーで接続する. 胴体部は着座位置の点 P_s との間に, 前後, 左右および上下のばねとダンパーを持つ支持点を考慮する. 頭部も胴体部に対して, 上下, 前後, 左右の運動と点 P_r 回りにローリングおよび点 P_p 回りにピッチング運動を有するモデルとする. 自動車の旋回運動を考慮した解析では乗員の左右方向の運動を可能とするモデルが必要である. 本報では, 胴体部下部の支持点位置を変えることにより, 前部左側座席, 前部右側座席, 後部左側座席, 後部右側座席など各位置における応答が算出可能なシステムとする. 乗員モデルの設置位置は前席左を1, 前席右を2, 後席左を3, 後席右を4とする. 数値解析ではNo.1における計算結果を示す. 本報では着座位置の変位に対して乗員の運動が理解しやすいモデルとし, 脚部は簡単化するために省略した. 本報で使用する乗員モデルの記号の定義, 値および単位等は前報 (山本他, 2017) のとおりとする. 当モデルは実験データと比較して高周波での位相のずれが見受けられるようであるが, 本研究で使用する速度領域では特に支障はない (山本他, 2017).

振動系を支配する運動方程式は連立21元の2階常微分方程式の初期値問題である. 変数変換により42元1階連立微分方程式として数値解析する. 解法としてRunge-Kutta-Gill法により時間ステップ毎の各変数とその微係数の値を求める. 計算きざみ幅は0.001秒とし, 数値計算は倍精度で行う. 前報 (山本他, 2017) で開発した三

次元車両 - 乗員系解析システムは突起乗り越しやその他、過渡応答、周波数応答特性など種々の検証を実施し有効性を確認した。三次元の詳細な検討が可能であり実用に供する精度を有するモデルであることを示した。

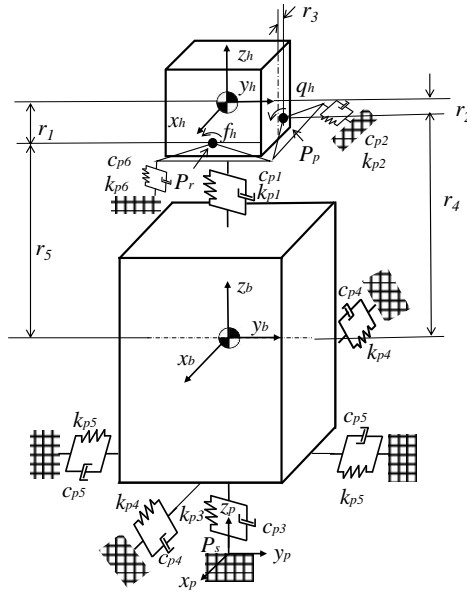


Fig. 3 An occupant model with two masses has eight degrees of freedom.

3. 緩和曲線

3・1 接続点の緩和曲線

図4は点AからB, Cを経て点Dへの経路を示す。AB間は直線部, BC間は半径 R の円の4分の1の円弧部, CD間は直線部とする。AB間の距離を L_1 , BC間の距離を L_2+L_3 , CD間の距離を L_4 とする。また、Oは円弧の中心を示す。

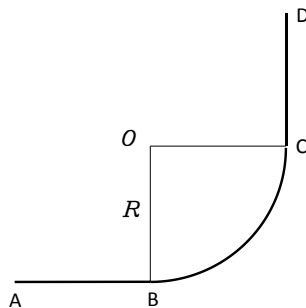


Fig. 4 Traveling route with an inlet straight line and a circular arc and an outlet straight line at connecting points B and C.

3・2 非補間の場合

図4で示す経路を曲率で示すと図5となる。横軸は距離、縦軸は曲率を示す。半径 R の曲率は $1/R=2D_d$ とする。直線と円弧を接続した点、すなわち点BおよびCでは曲率は0から $2D_d$ と不連続に急変する。これらの点BやCを車両などが通過すると、曲率の不連続性から自由度の高い機構を持つ機械製品は制御が難しくなる。

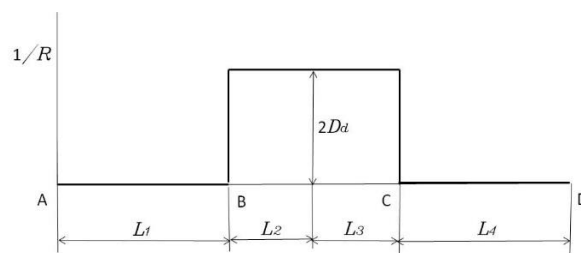


Fig. 5 Curvature distribution of traveling route for non-interpolation.

さらに無駄なエネルギーの消費となり, 乗り物では乗り心地を阻害することになる(蘭他, 2010), (渋谷他, 2012). 図5に示すように点BおよびCにおいて曲率が不連続に鉛直に変化する場合を非補間 (Non-interpolation)と称す.

3・3 多連クロソイド曲線

図6は, 点BやCでの曲率の不連続性を解消するために, 曲率を0から $2D_d$ までを連続的に変化するように工夫したものである. 図6において A_a^* は点Bあるいは点Cにおいて関数の接線の勾配の大小を表すパラメータである. A_a^* が大きいほど接線の勾配は小さくなる. X_l は移動距離を示す. 図に示すように距離を L_1, L_2, L_3, L_4 とおく, 点Bおよび点Cの関数を Y とおく. 曲率を $1/R=2D_d$ とすると, 次式で表すことができる.

$$Y = D_d + D_d \tanh\left(\frac{2}{A_a^*} X\right) \tag{1}$$

ここに, $0 \leq X_l < L_1 + L_2$ の場合は $X = X_l - L_1, L_1 + L_2 \leq X_l < L_1 + L_2 + L_3 + L_4$ の場合は $X = -(X_l - (L_1 + L_2 + L_3)), A_a^* = K^*(L_2 + L_3)$ とする. 式(1)における A_a^* は勾配を決定するパラメータであり, K^* を勾配係数とする.

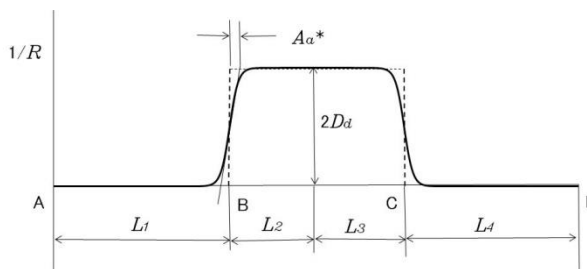


Fig. 6 Curvature distribution of traveling route for a multiple clothoid curve.

また, 式(1)で示される表示方法は, 本研究において新規に提案する関数表示である. 式(1)は解析的に微積分可能な関数であり, 関連した物理量を解析的に求めることができる. 図6に示すように点BおよびCにおいて曲率が滑らかで連続的に変化する場合を多連クロソイド曲線 (Multiple clothoid curve)と称す. シミュレーション解析では, 種々の特性を関数表示することが望まれる. 曲率の不連続性を解消するために直線と円弧, 円弧と円弧, 円弧と直線を接続する接続点にこの関数を緩和曲線として挿入すれば走行経路の曲率の不連続性が解消でき種々の効果が期待できる (Yamamoto et al., 2018). また, 緩和曲線を含む走行経路を車両が走行する場合の走行経路の追従性についても検討した結果, 極めて良好であった (山本他, 2017).

4. 車線変更

Kahya ら (Kahya and Schmidt, 2017) は2輪車モデルを適用して車線変更に関する解析を行っている. 経路の侵入部と脱出部にクロソイド曲線を適用し, 円弧部と円弧部を直線で接続した経路を対象として経路のパラメータを種々変化させて, 特性を検討している. モデルがシンプルで一般的な傾向は把握できるが, 自動車の運動や乗員のダイナミクスまで検討することはできない.

4・1 車線変更の理論

図7は, 左車線から右車線へレーンチェンジする運動を示す. 乗り移り間隔を D , 乗り移り距離を L , 旋回半径を R , 旋回半径の円弧角度を θ , 走行速度を V とする. P_1 から P_5 は通過点とし, 円弧 P_2P_3 と円弧 P_3P_4 の距離は等しいとする. これらの間には次式が成立する.

$$2(R - R \cos \theta) = D \quad 2R \sin \theta = L \tag{2}$$

円弧半径 R と乗り移り距離 L および乗り移り間隔 D が定まれば, 円弧角度 θ は次式から求めることができる.

$$\sin \theta = L/2R \quad \cos \theta = 1 - D/2R \tag{3}$$

また, $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ より $(L/2R)^2 + (1 - D/2R)^2 = 1$ が成り立つので, R, D, L の間には次式が成立する.

$$R = (L^2 + D^2)/4D \tag{4}$$

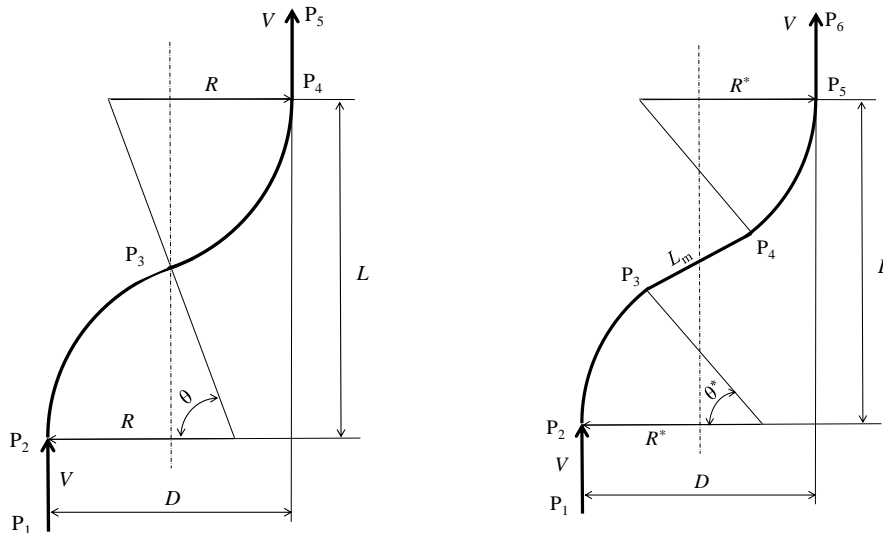


Fig.7 Lane change connecting with circular arcs. Fig.8 Lane change connecting with circular arc and straight line and circular arc.

図8は、円弧間に直線部を挿入した経路を示す。乗り移り間隔 D ，乗り移り距離 L ，旋回半径 R^* ，旋回半径の円弧角度 θ^* の間には次式が成立する。また， P_1 から P_6 は通過点とし，円弧 P_2P_3 ，直線 P_3P_4 ，円弧 P_4P_5 の距離は等しいとする。

$$2(R^* - R^* \cos \theta^*) + L_m \sin \theta^* = D \quad 2R^* \sin \theta^* + L_m \cos \theta^* = L \quad (5)$$

ここに， L_m は円弧 P_2P_3 と円弧 P_4P_5 間に挿入する直線 P_3P_4 の長さを示す。式 (5) より次式が得られる。

$$\sqrt{4R^{*2} + L_m^2} \sin(\theta^* - \alpha) = D - 2R^* \quad \sqrt{4R^{*2} + L_m^2} \cos(\theta^* - \alpha) = L \quad (6)$$

ここに， $\sin \alpha = 2R^* / \sqrt{4R^{*2} + L_m^2}$ $\cos \alpha = L_m / \sqrt{4R^{*2} + L_m^2}$ とする。

式 (6) を $\sin^2(\theta^* - \alpha) + \cos^2(\theta^* - \alpha) = 1$ に代入すると次式が得られる。

$$\left(\frac{D - 2R^*}{\sqrt{4R^{*2} + L_m^2}} \right)^2 + \left(\frac{L}{\sqrt{4R^{*2} + L_m^2}} \right)^2 = 1 \quad (7)$$

式 (5)，(7) より次式が得られる。

$$R^* = (D^2 + L^2 - L_m^2) / 4D \quad \sin \theta^* = \{ 2R^*(L - L_m) + DL_m \} / (4R^{*2} + L_m^2) \quad (8)$$

ここで，図8では，円弧部と直線部の長さを等しいとしているので $R^*\theta^* = L_m$ が成立する。また，式 (8) の $\sin \theta^*$ を級数展開し第2項まで考慮する。そして， θ^* の5乗以上を省略する ($\because \theta^* \ll 1$) と次式を導くことができる。

$$R^* = (D^2 + L^2) / (4D + \theta^*) \quad 1/3 \cdot R^* \theta^{*3} + (6R^* - D)\theta^* - 2L = 0 \quad (9)$$

また， θ^* は D ， L ， R^* に比較して極めて小さいことを考慮して，式 (9) はさらに次式のとおり簡略化できる。

$$R^* = (D^2 + L^2) / (4D) \quad \theta^* = 2L / (6R^* - D) \quad (10)$$

式 (10) の R^* は式 (4) に一致する。式 (10) より乗り移り間隔および距離 D ， L が決まれば旋回半径 R^* および円弧角度 θ^* を決定することができる。Lane change C，Dにおいて式 (10) から得られる値は式 (9) から得られる値と比較して， θ^* に関しては 0.01~0.05% の誤差である。

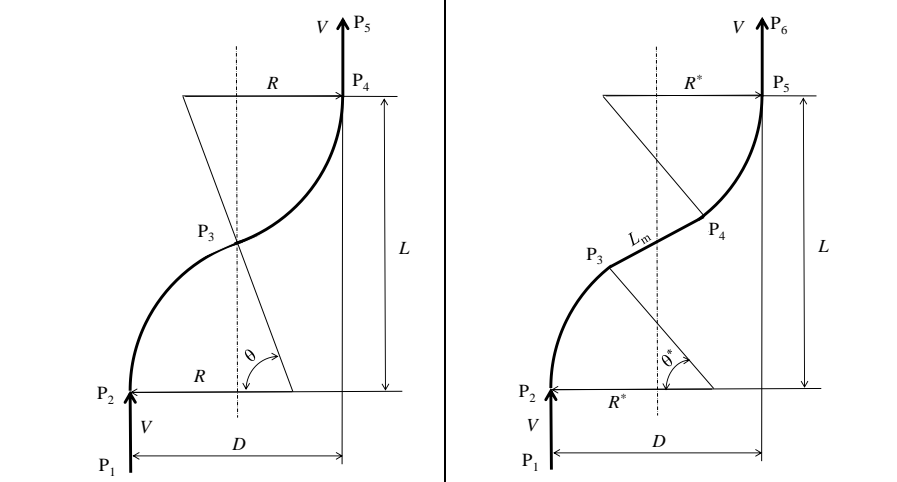
4・2 数値解析に用いるレーン

表1は，本報で検討するレーンチェンジにおける走行経路を示す。走行速度は 100 km/h とする。乗り移り幅は 5 m とする。車線変更 A と C は乗り移り長さ $L=157.3$ m，旋回半径 $R=1238.4$ m とする。車線変更 B と D は乗り移り長さ $L=70.4$ m，旋回半径 $R=249.0$ m とする。その他の円弧部や直線部の長さは表に示すとおりとする。図7は，直

線 P_1P_2 , 円弧 P_2P_3 , 円弧 P_3P_4 , 直線 P_4P_5 を接続した経路を示す. また, 図 8 は, 円弧と円弧の間に直線を接続した経路を示す. すなわち, 直線 P_1P_2 , 円弧 P_2P_3 , 直線 P_3P_4 , 円弧 P_4P_5 , 直線 P_5P_6 を接続した経路である. 図 7 に示すように, $L=157.3\text{ m}$, $D=5\text{ m}$ の場合は, 円弧半径は式 (4) より $R=1238.4\text{ m}$, 円弧角度は式 (3) より $\theta=3.640^\circ$ となる. また, $L=70.4\text{ m}$, $D=5\text{ m}$ の場合は, $R=249.0\text{ m}$, $\theta=8.130^\circ$ となる.

Table 1 Identifications for lane change.

Lane change A	Lane change B	Lane change C	Lane change D
$V=100\text{ km/h}$	$V=100\text{ km/h}$	$V=100\text{ km/h}$	$V=100\text{ km/h}$
$D=5\text{ m}$	$D=5\text{ m}$	$D=5\text{ m}$	$D=5\text{ m}$
$L=157.3\text{ m}$	$L=70.4\text{ m}$	$L=157.3\text{ m}$	$L=70.4\text{ m}$
$R=1238.4\text{ m}$	$R=249.0\text{ m}$	$R^*=1238.4\text{ m}$	$R^*=249.0\text{ m}$
$\theta=3.64^\circ$	$\theta=8.13^\circ$	$\theta^*=2.43^\circ$	$\theta^*=5.42^\circ$
$P_1P_2=39.3\text{ m}$	$P_1P_2=17.7\text{ m}$	$P_1P_2=39.3\text{ m}$	$P_1P_2=17.7\text{ m}$
$P_2P_3=78.6\text{ m}$	$P_2P_3=35.3\text{ m}$	$P_2P_3=52.4\text{ m}$	$P_2P_3=23.5\text{ m}$
$P_3P_4=78.6\text{ m}$	$P_3P_4=35.3\text{ m}$	$P_3P_4(L_m)=52.4\text{ m}$	$P_3P_4(L_m)=23.5\text{ m}$
$P_4P_5=39.3\text{ m}$	$P_4P_5=17.7\text{ m}$	$P_4P_5=52.4\text{ m}$	$P_4P_5=23.5\text{ m}$
		$P_5P_6=39.3\text{ m}$	$P_5P_6=17.7\text{ m}$



この時, 円弧の長さ P_2P_3 は, $R=1238.4\text{ m}$ のとき $2\pi R \times 3.64/360=78.6\text{ m}$, また $R=249.0\text{ m}$ のとき $2\pi R \times 8.130/360=35.31\text{ m}$ となる. 車線変更 C, D は図 8 で示す円弧 P_2P_3 と円弧 P_3P_4 の間に図に示すように直線 P_3P_4 を挿入する. 円弧と直線の長さは図 8 において, 円弧 P_2P_3 =直線 P_3P_4 =円弧 P_4P_5 とする. 車線変更 C の場合は円弧 P_2P_3 の長さ 52.4 m となるので円弧角度 $\theta^*=2.43^\circ$ となる. また車線変更 D では円弧 P_2P_3 の長さが 23.5 m であるので円弧角度 $\theta^*=5.42^\circ$ となる.

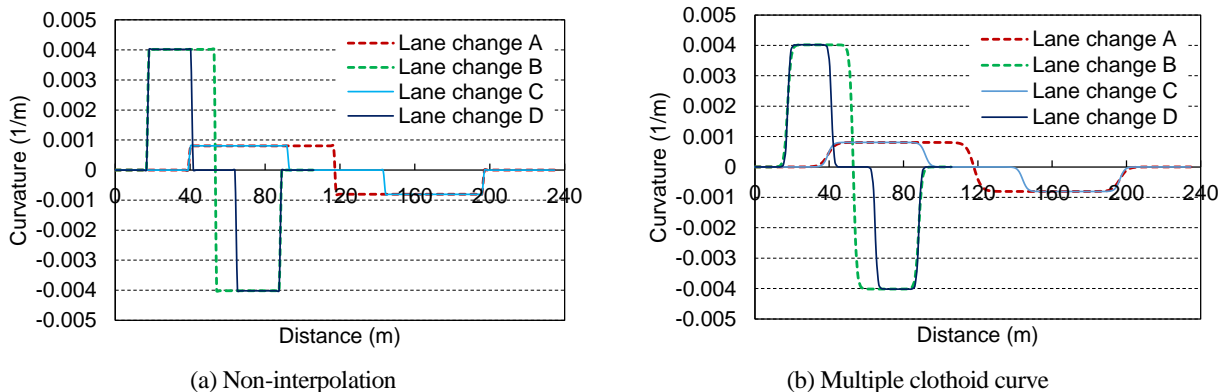


Fig.9 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for curvature of lane change.

表 1 に 4 種類 の 車 線 変 更 に つ い て の 諸 元 を 示 す . 表 1 に 示 す よ う に , 車 線 変 更 A は , $V=100$ km/h, $D=5$ m, $L=157.3$ m, $R=1238.4$ m と す る . 車 線 変 更 B は , $V=100$ km/h, $D=5$ m, $L=70.4$ m, $R=249.0$ m と す る . 車 線 変 更 C は , $V=100$ km/h, $D=5$ m, $L=157.3$ m, $R^*=1238.4$ m, $L_m=52.4$ m と す る . 車 線 変 更 D は , $V=100$ km/h, $D=5$ m, $L=70.4$ m, $R^*=249.0$ m, $L_m=23.5$ m と す る . さ ら に , 数 値 解 析 で は 路 面 の 凹 凸 (山 本 他 , 2017) を 考 慮 す る .

図 9 は , 表 1 に 示 す 4 つ の 車 線 変 更 の 走 行 経 路 の 曲 率 を 示 す . 図 の 横 軸 は 距 離 , 縦 軸 は 曲 率 を 示 す . 図 9(a) は 接 続 点 の 緩 和 曲 線 が 非 補 間 の 場 合 , 図 9(b) は 接 続 点 の 緩 和 曲 線 が 多 連 ク ロ ソ イ ド 曲 線 の 場 合 を そ れ ぞ れ 示 す .

5. 数値解析

表 1 に 示 す 4 種 の 車 線 変 更 に 対 し て , 直 線 と 円 弧 , 円 弧 と 円 弧 , 直 線 と 円 弧 , 円 弧 と 直 線 な ど の 接 続 点 の 緩 和 曲 線 が 非 補 間 の 場 合 と 多 連 ク ロ ソ イ ド 曲 線 の 場 合 に つ い て 検 討 す る . 三 次 元 車 両 - 乗 員 系 解 析 シ ス テ ム の 車 両 の 経 路 追 従 性 に つ い て は 前 報 (山 本 他 , 2017) と 同 様 に 車 両 の 重 心 位 置 で 確 認 し た .

5・1 車線変更 A

表 1 に 示 す 車 線 変 更 A に つ い て 接 続 点 P_2 , P_3 , P_4 の 緩 和 曲 線 が 非 補 間 の 場 合 と 多 連 ク ロ ソ イ ド 曲 線 の 場 合 に つ い て 検 討 す る . 車 両 の 走 行 速 度 は 100 km/h と す る . さ ら に 路 面 の 凹 凸 を 考 慮 す る .

図 10 は , 車 線 変 更 A の 曲 率 を 示 す . 図 の 縦 軸 は 曲 率 , 横 軸 は 距 離 を 示 す . 図 10(a) は , 接 続 点 が 非 補 間 の 場 合 の 曲 率 を 示 す . 図 10(b) は , 接 続 点 が 多 連 ク ロ ソ イ ド 曲 線 の 場 合 の 曲 率 を 示 す . 図 10(a) は , 接 続 点 が 非 補 間 で あ る た め に , 接 続 点 に お け る 曲 率 が 不 連 続 と な る . 一 方 , 図 10(b) は , 接 続 点 で の 緩 和 曲 線 が 多 連 ク ロ ソ イ ド 曲 線 で 接 続 し て い る た め に , 接 続 点 の 前 後 に お い て 滑 ら か に 連 続 的 に 変 化 し て い る . 円 弧 部 の 半 径 は 1238.4 m で る の で , 円 弧 部 の 曲 率 は 0.0008 (1/m) と な る .

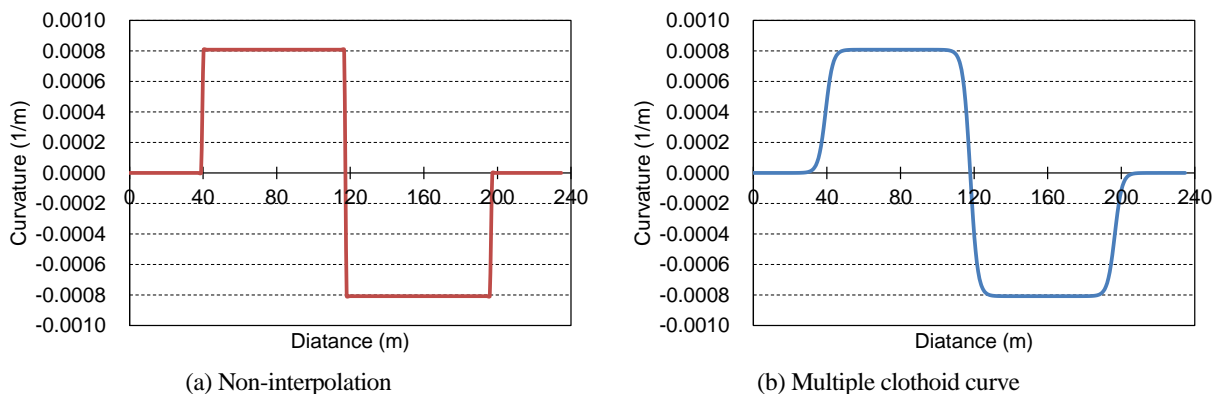


Fig.10 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for curvature of lane change A. The radius of a circular arc is 1238.4 m, the curvature of a circular arc is 0.0008 (1/m). Curvature changes smoothly continuous where the transition curve in a connecting point is connected by a multiple clothoid curve.

図 11 は , 車 両 重 心 位 置 に お け る x , y , z 方 向 加 速 度 の 時 刻 歴 に 関 す る 計 算 結 果 を 示 す . 図 の 縦 軸 は 加 速 度 , 横 軸 は 時 間 を 示 す . 図 11(a) は , 接 続 点 が 非 補 間 の 場 合 の 加 速 度 の 時 刻 歴 を 示 す . 図 11(b) は , 接 続 点 が 多 連 ク ロ ソ イ ド 曲 線 の 場 合 の 加 速 度 の 時 刻 歴 を 示 す . 車 両 重 心 位 置 x , z 方 向 加 速 度 に は 接 続 点 が 非 補 間 の 場 合 と 多 連 ク ロ ソ イ ド 曲 線 の 場 合 の 差 異 は 認 め ら れ ない が , y 方 向 加 速 度 は 走 行 経 路 の 曲 率 が 異 な る の で 変 化 す る . 接 続 点 の 緩 和 曲 線 が 多 連 ク ロ ソ イ ド 曲 線 の 場 合 は y 方 向 加 速 度 は 滑 ら か に 推 移 し て い る が , 非 補 間 の 場 合 は 接 続 点 を 通 過 後 変 位 が や や 乱 れ て い る . ま た , z 方 向 加 速 度 の 値 は 路 面 の 凹 凸 に 起 因 し た も の と 考 え ら れ る .

図 12 は , 車 両 重 心 位 置 に お け る x , y , z 軸 回 り の 回 転 角 加 速 度 を 示 す . 図 の 横 軸 は 経 過 時 間 , 縦 軸 は 角 加 速 度 を 示 す . 図 12(a) は , 接 続 点 が 非 補 間 の 場 合 , 図 12(b) は , 接 続 点 の 緩 和 曲 線 が 多 連 ク ロ ソ イ ド 曲 線 の 場 合 を そ れ ぞ れ 示 す . 図 12(a) に 示 す 非 補 間 の 場 合 は , 直 線 と 円 弧 , 円 弧 と 円 弧 , お よ び 円 弧 と 直 線 の 接 続 点 を 通 過 す る 時 刻 1.40 秒 , 4.25 秒 , 7.08 秒 近 傍 で は ロール角加速度は大きく変化する . ピッチ角加速度もロール運動により誘発されて加速度は大きくなる . ヨー角加速度の変化はほとんど見受けられない . 図 12(b) に 示 す 多 連 ク ロ ソ イ ド 曲 線

の場合も同様の傾向を示しているが、直線と円弧、円弧と円弧、および円弧と直線の接続点を通る時刻 1.40 秒、4.25 秒、7.08 秒近傍ではロール角加速度が大きく変化する様子は見受けられない。ピッチ角加速度は非補間の場合と同様にロール運動により誘発されて変位しているものと考えられる。ヨー角加速度の変化はほとんど見受けられない。

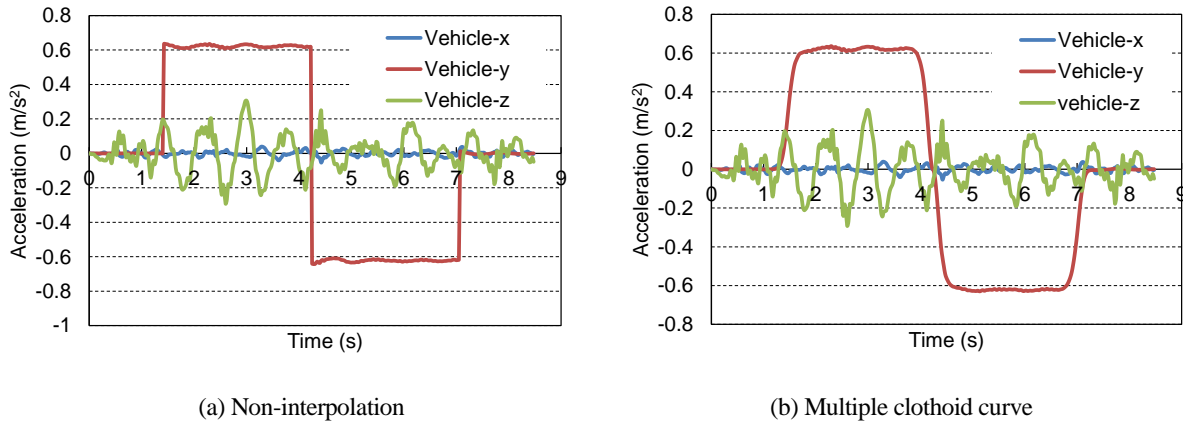


Fig.11 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration of vehicle. The value in the z-direction is due to surface roughness of a road.

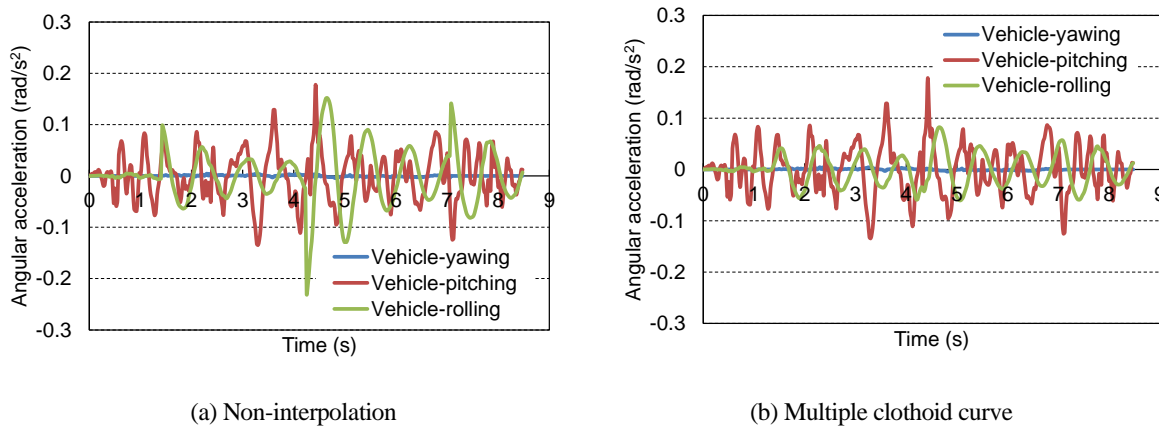


Fig.12 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for angular acceleration of vehicle.

図 13 は、乗員胴体部における x , y , z 方向加速度の時刻歴に関する計算結果を示す。図の縦軸は加速度、横軸は時間を示す。図 13(a)は、接続点が非補間の場合の加速度の時刻歴を示す。図 13(b)は、接続点が多連クロソイド曲線の場合の加速度の時刻歴を示す。乗員胴体部 x , z 方向加速度には接続点が非補間の場合と多連クロソイド曲線の場合の差異は認められないが、 y 方向加速度は走行経路の曲率が異なるので変化する。円弧区間を通過する間は胴体部 y 方向の加速度が大きくなる。

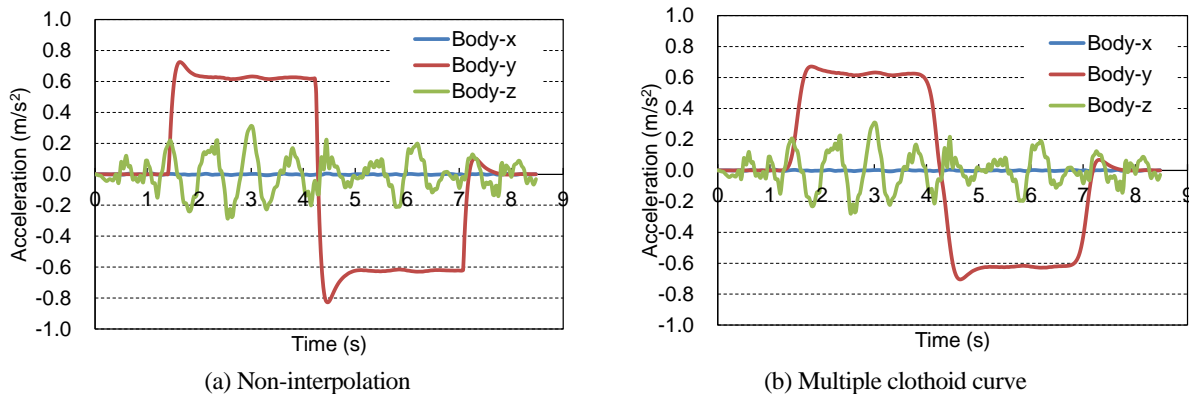


Fig.13 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration of occupant body.

図 13(a)の接続点是非補間であるために時刻が 1.40 秒, 4.25 秒, 7.08 秒近傍においてピーク値が発生している。接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合は y 方向加速度は滑らかに推移しているが, 非補間の場合は接続点を通過後変位がやや乱れている。また, z 方向加速度の値は路面の凹凸に起因したものと考えられる。

図 14 は, 乗員頭部のロール角とピッチ角加速度を示す。図の横軸は経過時間, 縦軸は角加速度を示す。図 14(a)は, 接続点为非補間の場合, 図 14(b)は, 接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合をそれぞれ示す。図 14(a)に示す接続点为非補間の場合は接続点を通過するときにロール角加速度がやや大きくなる。頭部ピッチ角加速度は特に顕著な影響は見受けられない。図 14(b)に示す接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合はロール角加速度はピーク値は見受けられるが値は小さい。

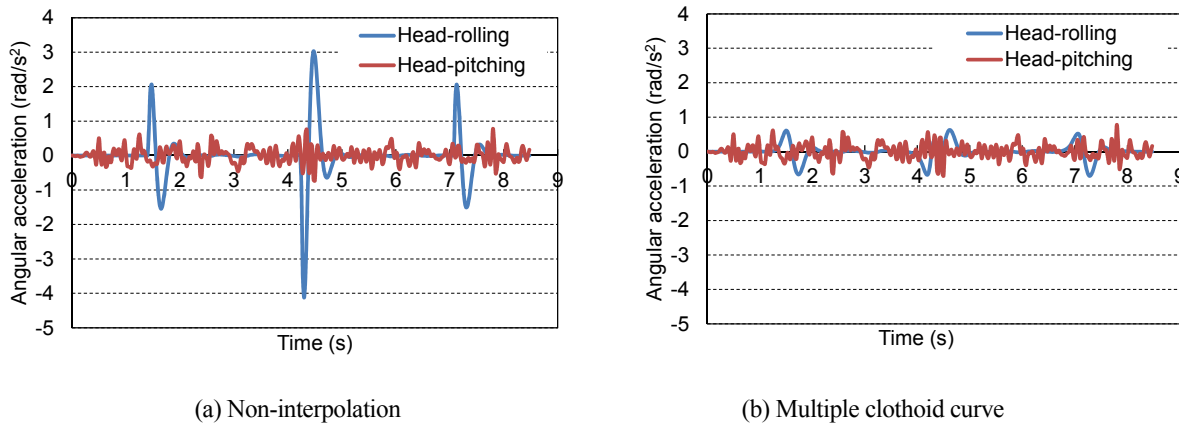


Fig.14 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for angular acceleration of occupant head.

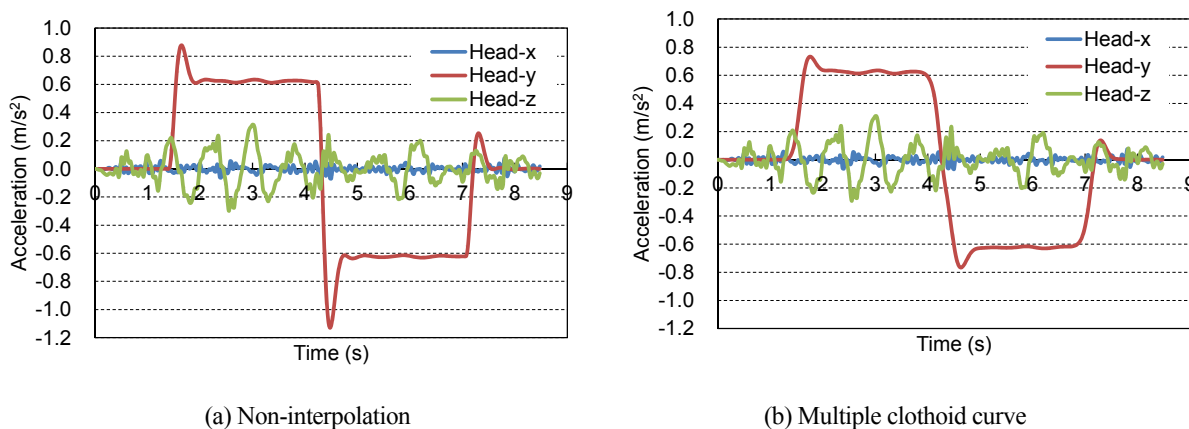


Fig.15 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration of occupant head.

図 15 は, 乗員頭部の x, y, z 方向加速度を示す。図の横軸は経過時間, 縦軸は加速度を示す。図 15(a)は, 接続点为非補間の場合, 図 15(b)は, 接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合をそれぞれ示す。円弧部を走行する時は頭部 y 方向の加速度が大きくなる。図 15(a)に示す接続点为非補間の場合は接続点を通過する時にピークとなり, その後は円弧運動に起因した加速度になる。図 15(b)で示す接続点が多連クロソイド曲線の場合は大きいピークは見受けられず滑らかな変化となる。双方ともに x 方向加速度は顕著な変化は認められない。z 方向加速度は路面の凹凸を考慮しているために車両が上下に振動しその影響と考えられる。

5・2 車線変更 B

表 1 に示す車線変更 B について接続点 P₂, P₃, P₄の緩和曲線が非補間の場合と多連クロソイド曲線の場合について検討する。車両の走行速度は 100 km/h とする。さらに路面の凹凸を考慮する。図 16 は, 車線変更 B の曲率を示す。図の縦軸は曲率, 横軸は距離を示す。図 16(a)は, 接続点为非補間の場合の曲率を示し, 図 16(b)は,

接続点が多連クロソイド曲線の場合の曲率を示す。接続点为非補間の場合は、接続点における曲率が不連続となる。一方、接続点での緩和曲線が多連クロソイド曲線で接続している場合は、接続点において滑らかに連続的に変化している。円弧部の半径は 249.0 m であるので、円弧部の曲率は 0.004 (1/m) となる。

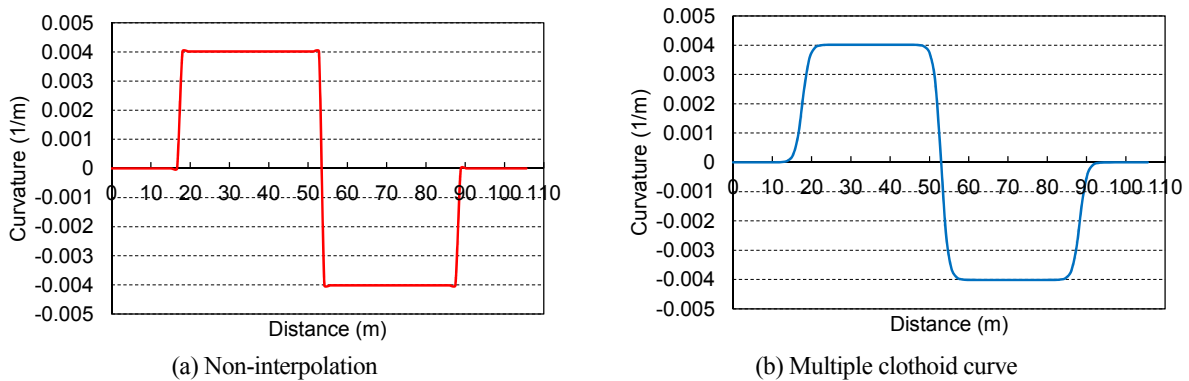


Fig.16 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for curvature of lane change B.

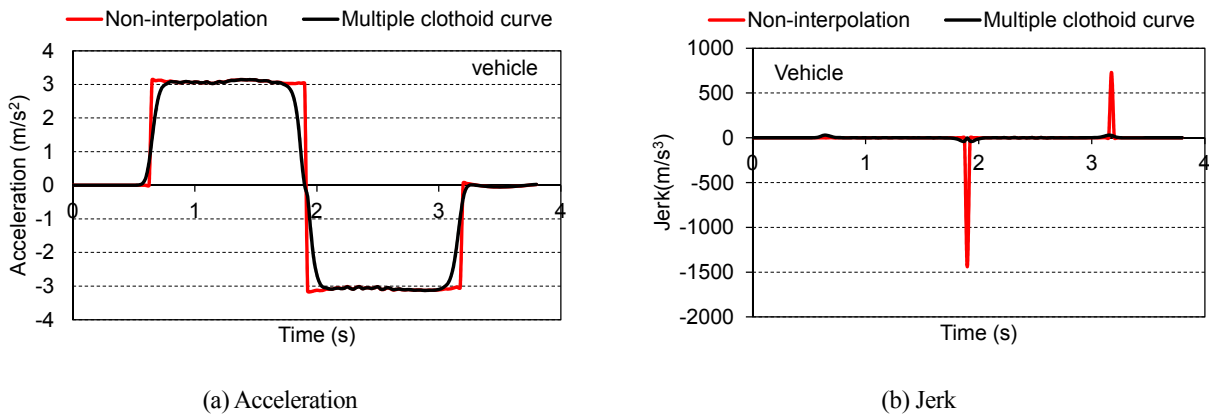


Fig.17 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration and jerk of vehicle.

図 17 は、車両重心位置における y 方向加速度と加加速度の時刻歴を示す。図 17(a)は加速度の時刻歴を示す。図の縦軸は加速度、横軸は時間を示す。接続点为非補間の場合は加速度が急変している。接続点が多連クロソイド曲線の場合は滑らかに変化している。図 17(b)は、加加速度の時刻歴を示す。図の縦軸は加加速度、横軸は時間を示す。接続点为非補間の場合は点 P₂ における直線と円弧、P₃ は円弧と円弧、P₄ は円弧と直線の接続点となる。P₂、P₃ における加加速度は大きいピーク値が発生している。一方、接続点を多連クロソイド曲線とした場合は大きなピーク値は認められない。

図 18 は、乗員胴体部における y 方向加速度と加加速度の時刻歴を示す。図 18(a)は加速度を示す。図の縦軸は加速度、横軸は時間を示す。図 18(a)において、接続点为非補間の場合と接続点が多連クロソイド曲線の場合を比較すると、非補間の場合の方がやや大きい値を示す。y 方向加速度は走行経路の曲率により変化する。円弧区間を通過する間は胴体部 y 方向の加速度が大きくなる。図 18(b)は加加速度を示す。図の縦軸は加加速度、横軸は時間を示す。接続点为非補間の場合は接続点を通過する時刻が 0.63 秒、1.95 秒、3.20 秒近傍においてピーク値が発生している。接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合は、y 方向加加速度はこれらの時刻近傍においてピーク値は発生するが、非補間の場合より小さく滑らかに推移している。

図 19 は、乗員頭部の y 方向加速度と加加速度を示す。図 19(a)の横軸は経過時間、縦軸は加速度を示す。接続点为非補間の場合は接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合と比較すると大きい値を示す。また円弧部を走行する時は頭部 y 方向の加速度が大きくなる。接続点を通過する時にピークとなり、その後は円弧運動に起因した加速度の値となる。図 19(b)は加加速度を示す。図の横軸は経過時間、縦軸は加加速度を示す。接続点においてピークが発生する。接続点が多連クロソイド曲線の場合は、ピーク値は非補間の場合に比較して小さい。

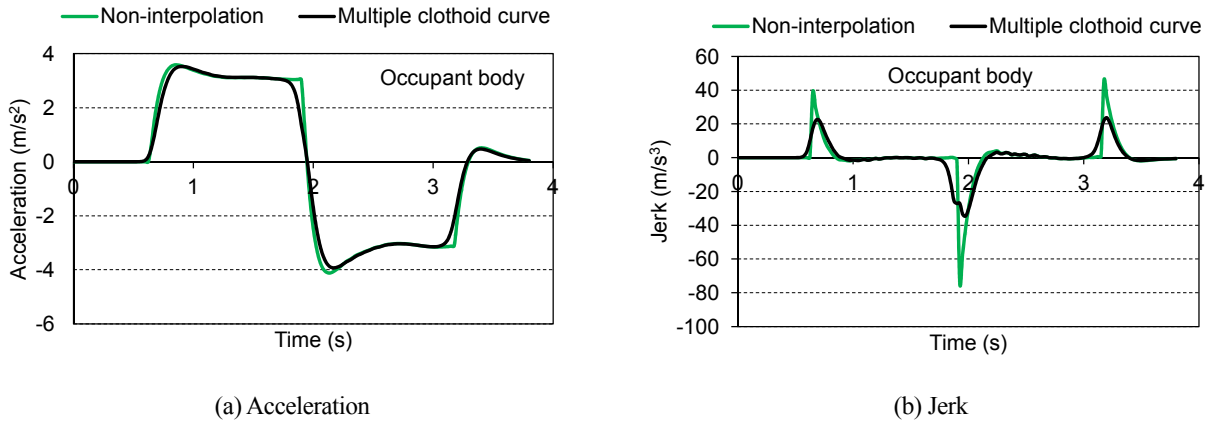


Fig.18 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration and jerk of occupant body.

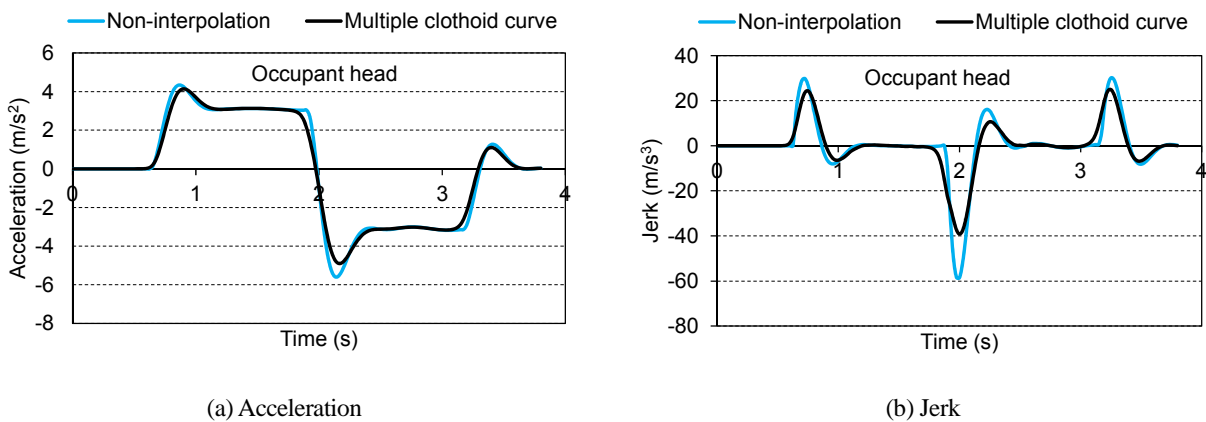


Fig.19 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration and jerk of occupant head.

5・3 車線変更 C

車線変更 C について接続点 P_2 , P_3 , P_4 , P_5 の緩和曲線が非補間の場合と多連クロソイド曲線の場合について検討する。車両の走行速度は 100 km/h とする。さらに路面の凹凸を考慮する。

図 20 は、車線変更 C の曲率を示す。図の縦軸は曲率、横軸は距離を示す。図 20(a) は、接続点が非補間の場合の曲率分布を示す。図 21(b) は、接続点が多連クロソイド曲線の場合の曲率を示す。図 20(a) は、接続点が非補間であるために、接続点における曲率が不連続となる。一方、図 20(b) は、接続点での緩和曲線が多連クロソイド曲線で接続しているために、接続点において滑らかに連続的に変化している。円弧部の半径は 1238.4 m であるので、円弧部の曲率は 0.0008 (1/m) となる。

図 21 は、車両重心位置における x , y , z 方向加速度の時刻歴に関する計算結果を示す。図の縦軸は加速度、横軸は時間を示す。図 21(a) は、接続点が非補間の場合の加速度の時刻歴を示す。図 21(b) は、接続点が多連クロソイド曲線の場合の加速度の時刻歴を示す。車両重心位置 x , z 方向加速度には接続点が非補間の場合と多連クロソイド曲線の場合の差異は認められないが、 y 方向加速度は走行経路の曲率が異なるために変化する。接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合は y 方向加速度は滑らかに推移しているが、非補間の場合は接続点を通過後変位がやや乱れている。また、 z 方向加速度の値は路面の凹凸に起因したものと考えられる。

図 22 は、車両重心位置における x , y , z 軸回りの回転角加速度を示す。図の横軸は経過時間、縦軸は角加速度を示す。図 22(a) は、接続点が非補間の場合、図 22(b) は、接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合をそれぞれ示す。図 22(a) に示す非補間の場合、直線と円弧、円弧と円弧、および円弧と直線との接続点を通過する時刻 1.40 秒、3.30 秒、4.75 秒、7.70 秒近傍ではロール角加速度は大きく変化する。ピッチ角加速度もロール運動により誘発されて加速度は大きくなる。ヨー角加速度の変化はほとんど見受けられない。図 22(b) に示す多連クロソイド曲線の場合も同様の傾向を示しているが、直線と円弧、円弧と円弧、および円弧と直線との接続点を通過す

時刻 1.40 秒, 3.30 秒, 4.75 秒, 7.70 秒近傍ではロール角加速度が大きく変化する様子は見受けられない。ピッチ角加速度は非補間の場合と同様にロール運動により誘発されて変位しているものと考えられる。ヨー角加速度の変化はほとんど見受けられない。

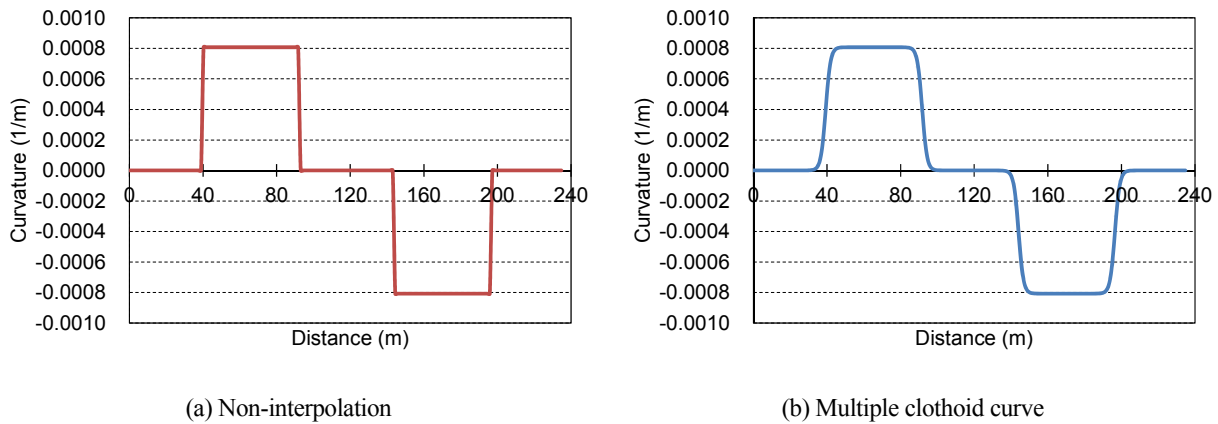


Fig.20 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for curvature of lane change C.

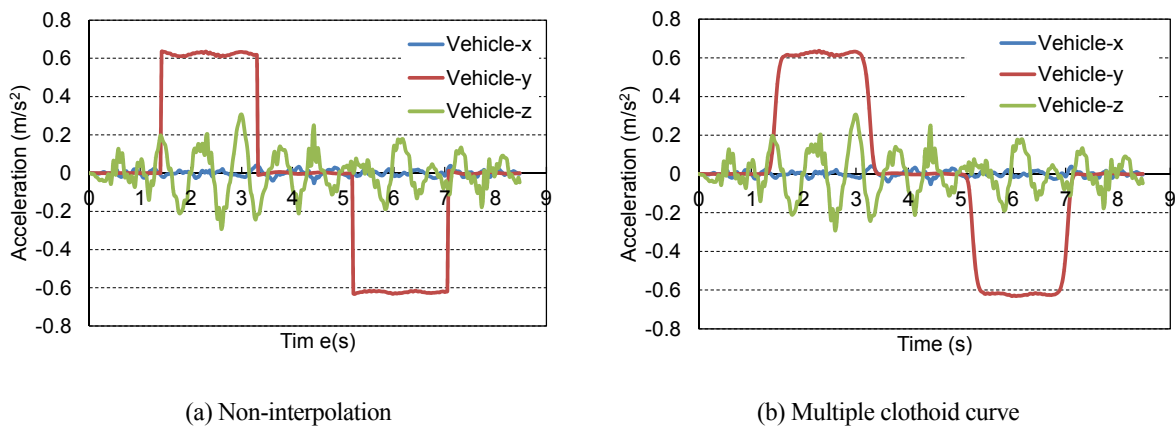


Fig.21 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration of vehicle.

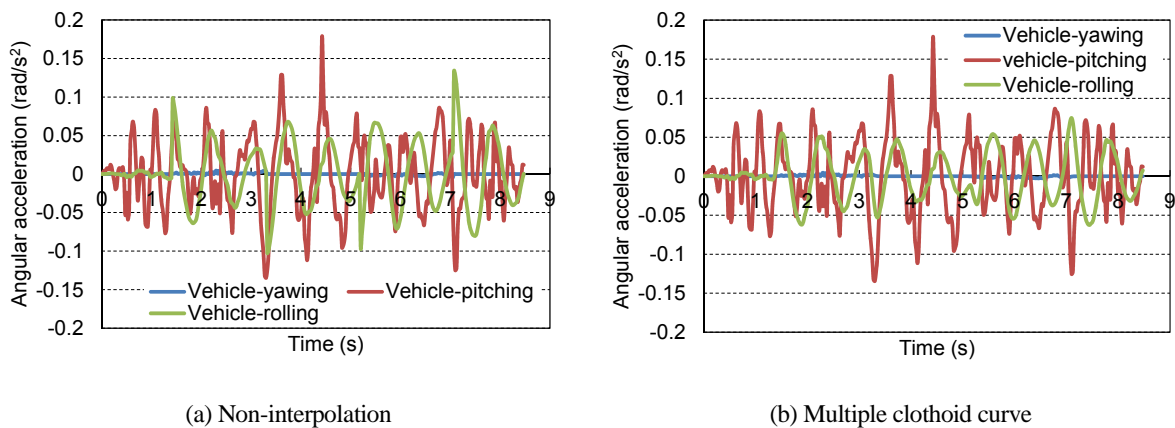


Fig.22 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for angular acceleration of vehicle.

図 23 は、乗員胴体部における x , y , z 方向加速度の時刻歴に関する計算結果を示す。図の縦軸は加速度、横軸は時間を示す。図 23(a)は、接続点が非補間の場合の加速度の時刻歴を示す。図 23(b)は、接続点が多連クロソイド曲線の場合の加速度の時刻歴を示す。乗員胴体部 x , z 方向加速度には接続点が非補間の場合と多連クロソイド曲線の場合の差異は認められないが、 y 方向加速度は走行経路の曲率が異なるため変化する。円弧区間を通過する間は胴体部 y 方向の加速度が大きくなる。図 23(a)の接続点は非補間であるために時刻が時刻 1.40 秒, 3.30 秒, 4.75 秒, 7.70 秒近傍においてピーク値が発生している。

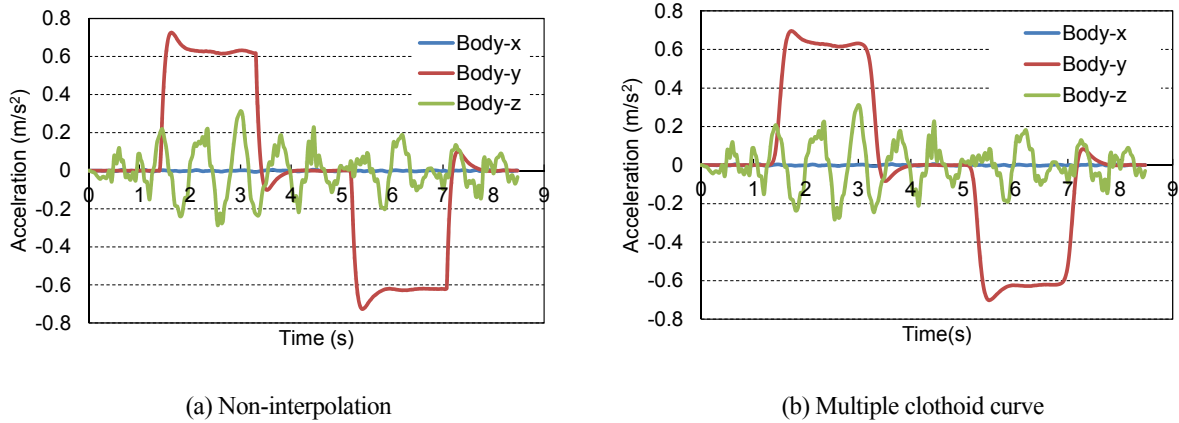


Fig.23 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration of occupant body.

接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合は、 y 方向加速度は滑らかに推移しているが、非補間の場合は接続点を通過後変位がやや乱れている。また、 z 方向加速度の値は路面の凹凸に起因したものと考えられる。

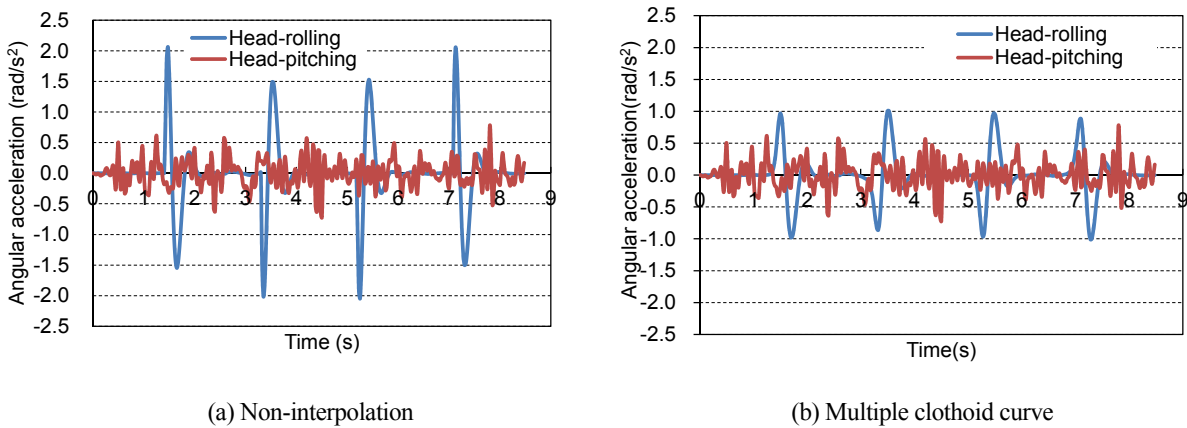


Fig.24 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for angular acceleration of occupant head.

図 24 は、乗員頭部のロール角とピッチ角加速度を示す。図の横軸は経過時間、縦軸は角加速度を示す。図 24(a) は、接続点为非補間の場合、図 24(b)は、接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合をそれぞれ示す。図 24(a) に示す接続点为非補間の場合は接続点を通るときにロール角加速度がやや大きくなる。頭部ピッチ角加速度は特に顕著な影響は見受けられない。図 24(b)に示す接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合は、ロール角加速度はピーク値を有しているが非補間の場合に比較して値は小さい。

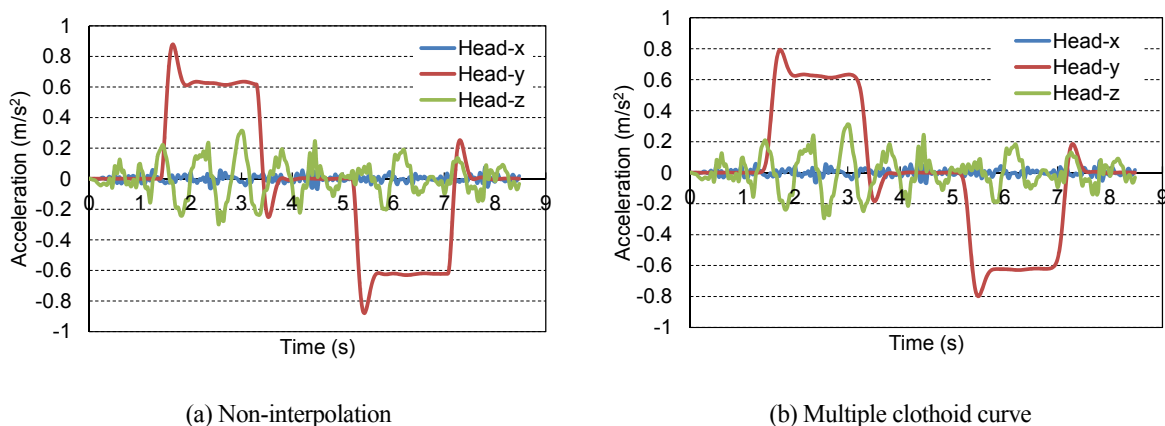


Fig.25 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration of occupant head.

図 25 は、乗員頭部の x , y , z 方向加速度を示す。図の横軸は経過時間、縦軸は加速度を示す。図 25(a)は、接続点为非補間の場合、図 25(b)は、接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合をそれぞれ示す。円弧部を走行する時は頭部 y 方向の加速度が大きくなる。図 25(a)に示す接続点为非補間の場合は接続点を通過する時にピークとなり、その後は円弧運動に起因した加速度になる。図 25(b)で示す接続点が多連クロソイド曲線の場合は大きいピークは見受けられず滑らかな変化となる。双方ともに x 方向加速度は顕著な変化は認められない。 z 方向加速度は路面の凹凸を考慮しているために車両が上下に振動しその影響と考えられる。

5・4 車線変更 D

表 1 に示す車線変更 D について接続点 P_2 , P_3 , P_4 , P_5 の緩和曲線が非補間と場合と多連クロソイド曲線の場合について検討する。車両の走行速度は 100 km/h とする。さらに路面の凹凸を考慮する。

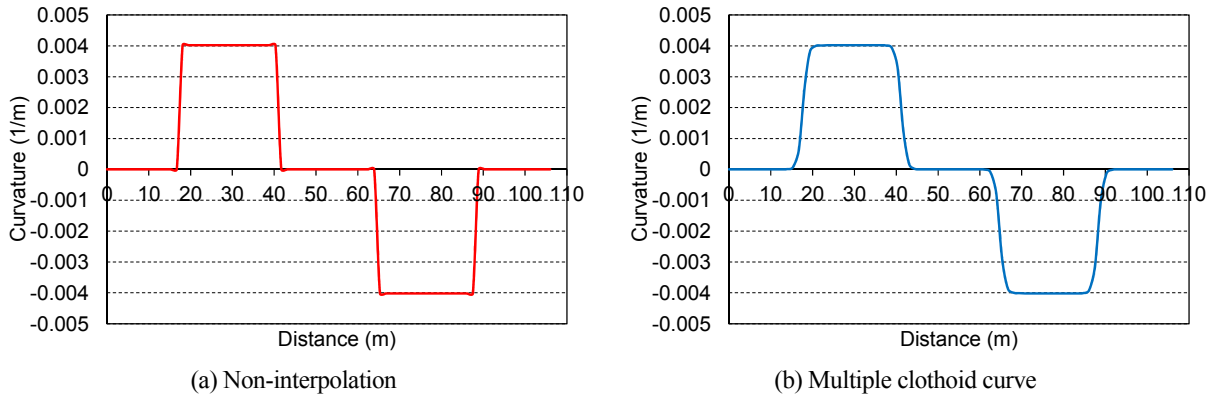


Fig.26 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for curvature of lane change D.

図 26 は、車線変更 D の曲率を示す。図の縦軸は曲率、横軸は距離を示す。図 26(a)は接続点为非補間の場合の曲率、図 26(b)は接続点が多連クロソイド曲線の場合の曲率を示す。接続点为非補間の場合は、接続点における曲率分布が不連続となる。一方、接続点での緩和曲線が多連クロソイド曲線で接続している場合は、接続点において滑らかに連続的に変化している。円弧部の半径は 249.0 m であるので、円弧部の曲率は 0.004 (1/m) となる。

図 27 は、車両重心位置における y 方向加速度と加加速度の時刻歴を示す。図 27(a)は加速度の時刻歴を示す。図の縦軸は加速度、横軸は時間を示す。接続点为非補間の場合は加速度が急変している。接続点が多連クロソイド曲線の場合は滑らかに変化している。図 27(b)は、加加速度の時刻歴を示す。図の縦軸は加加速度、横軸は時間を示す。接続点为非補間の場合は点 P_2 における直線と円弧、 P_3 は円弧と直線、 P_4 は直線と円弧、 P_5 は円弧と直線の接続点となる。 P_4 , P_5 における加加速度が大きいピーク値が発生している。一方、接続点を多連クロソイド曲線とした場合は大きなピーク値は認められない。

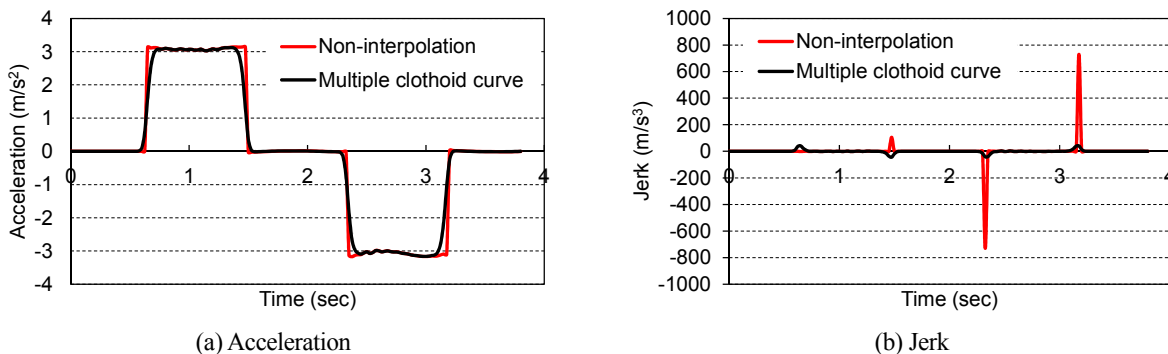


Fig.27 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for a vehicle.

図 28 は、乗員胴体部における y 方向加速度と加加速度の時刻歴を示す。図 28(a)は加速度を示す。図の縦軸は加速度、横軸は時間を示す。図 28(a)において、接続点为非補間の場合と接続点が多連クロソイド曲線の場合を比較すると、非補間の方がやや大きい値を示す。 y 方向加速度は走行経路の曲率が異なるので変化する。円弧区間

を通過する間は胴体部 y 方向の加速度が大きくなる。図 28(b)は加加速度を示す。図の縦軸は加加速度、横軸は時間を示す。非補間の場合は接続点を通過する時刻が 0.63 秒, 1.95 秒, 3.20 秒近傍においてピーク値が発生している。接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合は, y 方向加加速度はこれらの時刻近傍においてピーク値は発生するが, 非補間の場合の値より小さく滑らかに推移している。

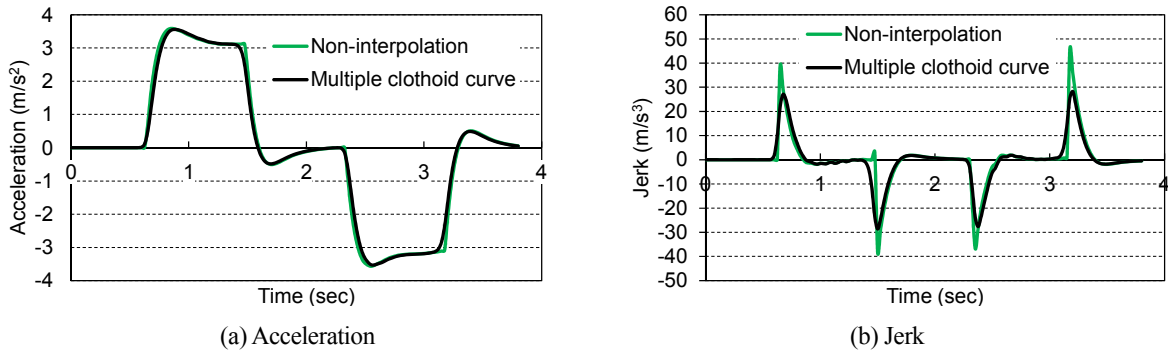


Fig.28 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration and jerk of occupant body.

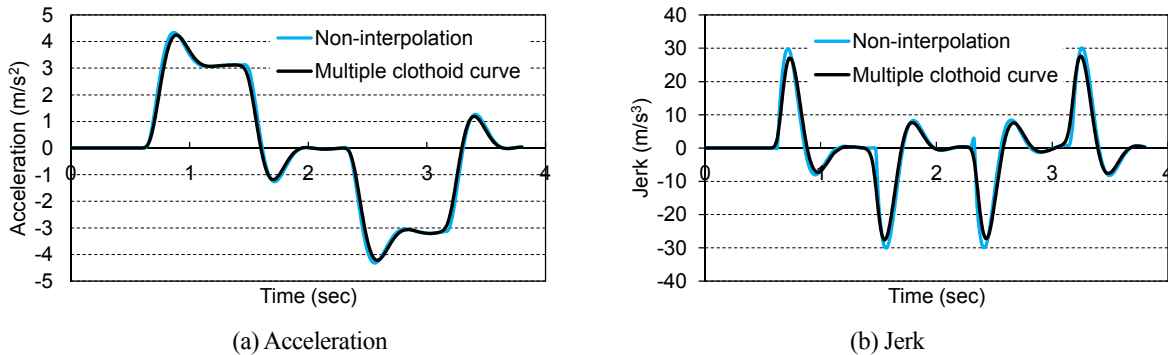


Fig.29 Comparison between the multiple clothoid curve and the non-interpolation for acceleration and jerk of occupant head.

図 29 は, 乗員頭部の y 方向加速度と加加速度を示す。図 29(a)の横軸は経過時間, 縦軸は加速度を示す。接続点为非補間の場合は接続点の緩和曲線が多連クロソイド曲線の場合と比較すると大きい値を示す。また円弧部を走行する時は頭部 y 方向の加速度が大きくなる。接続点を通過する時にピークとなり, その後は円弧運動に起因した加速度になる。図 29(b)は加加速度を示す。図の横軸は経過時間, 縦軸は加加速度を示す。接続点においてピーク値をとる。接続点が多連クロソイド曲線の場合は, ピーク値は非補間の場合に比較して小さい。

5・5 考 察

図 30 から図 33 は車線変更 A から D の計算結果を示す。R=1138.4 m の場合は, 車線変更 A では車体左右方向加速度 rms (root mean square)値は 0.4785 m/s², max 値は 0.6366 m/s²となる。また, 車線変更 C では車体左右方向加速度 rms 値は 0.3950 m/s², max 値は 0.6369 m/s²となる。R=249.0 m の場合は, 車線変更 B では車体左右方向加速度 rms 値は 2.3860 m/s², max 値は 3.1430 m/s²となる。車線変更 D では車体左右方向加速度 rms 値は 1.9730 m/s², max 値は 3.1230 m/s²となる。円弧部と円弧部の間に直線部を挿入して緩和曲線を接続すると, 左右方向加速度が小さくなる。多連クロソイド曲線の場合がいずれの場合においても車両および乗員への影響は小さいが, 本比較では多連クロソイド曲線の勾配係数 K*=0.1 の場合である。この勾配係数を大きくすると, さらなる効果が見込まれる(山本他, 2017)。

図 30 は, 車線変更 A の場合の結果を示す。車両重心位置, 乗員胴体部, 乗員頭部の y 方向加速度 rms 値と加加速度 rms 値をそれぞれ示す。多連クロソイド曲線の場合は非補間の場合に比較して, 加速度 rms 値は, 車両で 5.8%, 乗員胴体部で 5.5%, 乗員頭部で 6.6%小さい値となる。また加加速度 rms 値は, 車両で 91.0%, 乗員胴体部で 50.8%, 乗員頭部で 48.6%小さい値となる。

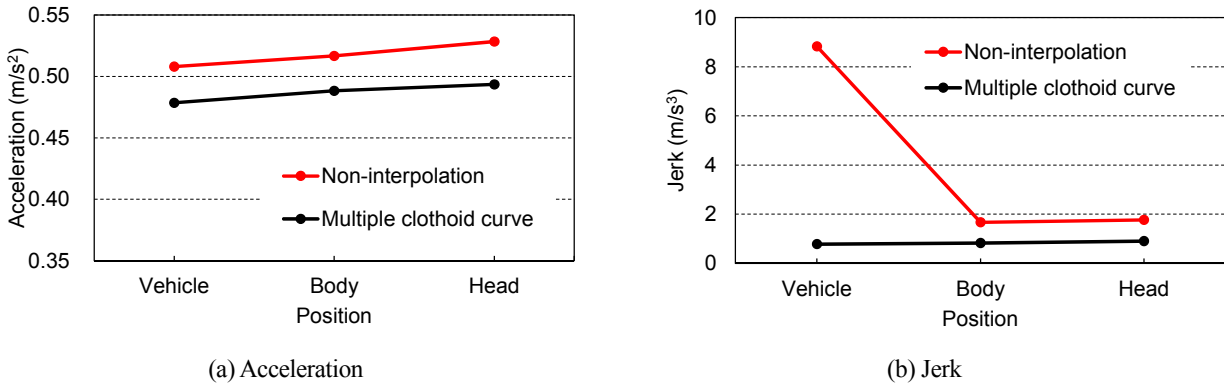


Fig.30 Comparison of acceleration and jerk between the non-interpolation and the multiple clothoid for lane change A. The values of the multiple clothoid curve are lower than those of the non-interpolation.

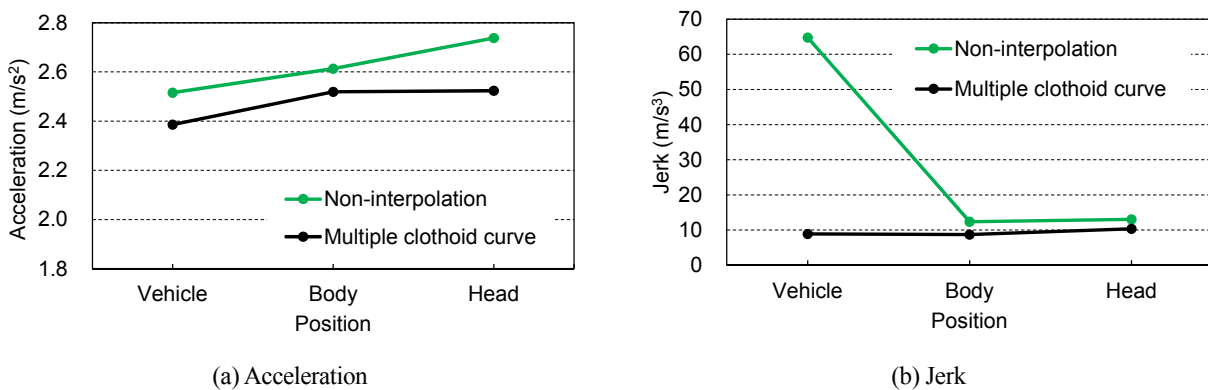


Fig.31 Comparison of acceleration and jerk between the non-interpolation and the multiple clothoid for lane change B. The values of the multiple clothoid curve are lower than those of the non-interpolation.

図 31 は、車線変更 B の場合の結果を示す。車両重心位置、乗員胴体部、乗員頭部の y 方向加速度 rms 値と加加速度 rms 値をそれぞれ示す。多連クロソイド曲線の場合は非補間の場合に比較して、加速度 rms 値は、車両で 5.2%、乗員胴体部で 3.6%、乗員頭部で 7.9% 小さい値となる。また加加速度 rms 値は、車両で 86.2%、乗員胴体部で 29.4%、乗員頭部で 20.7% 小さい値となる。

図 32 は、車線変更 C の場合の結果を示す。車両重心位置、乗員胴体部、乗員頭部の y 方向加速度 rms 値と加加速度 rms 値をそれぞれ示す。多連クロソイド曲線の場合は非補間の場合に比較して、加速度 rms 値は、車両で 4.8%、乗員胴体部で 4.0%、乗員頭部で 4.5% 小さい値となる。また加加速度 rms 値は、車両で 87.6%、乗員胴体部で 32.7%、乗員頭部で 24.4% 小さい値となる。

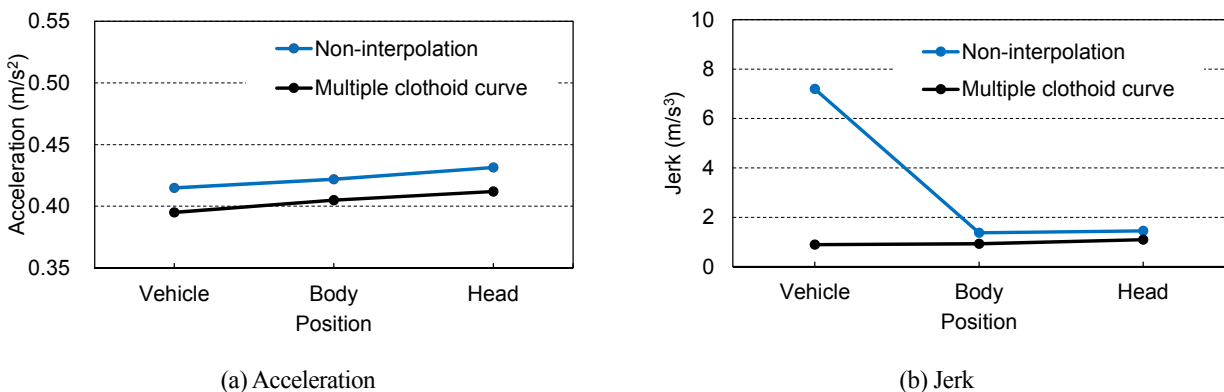


Fig.32 Comparison of acceleration and jerk between the non-interpolation and the multiple clothoid for lane change C. The values of the multiple clothoid curve are lower than those of the non-interpolation.

図 33 は、車線変更 D の場合の結果を示す。車両重心位置、乗員胴体部、乗員頭部の y 方向加速度 rms 値と加加速度 rms 値をそれぞれ示す。多連クロソイド曲線の場合は非補間の場合に比較して、加速度 rms 値は、車両で 4.1 %、乗員胴体部で 2.7 %、乗員頭部で 2.6 % 小さい値となる。また加加速度 rms 値は、車両で 81.3 %、乗員胴体部で 16.4 %、乗員頭部で 7.1 % 小さい値となる。

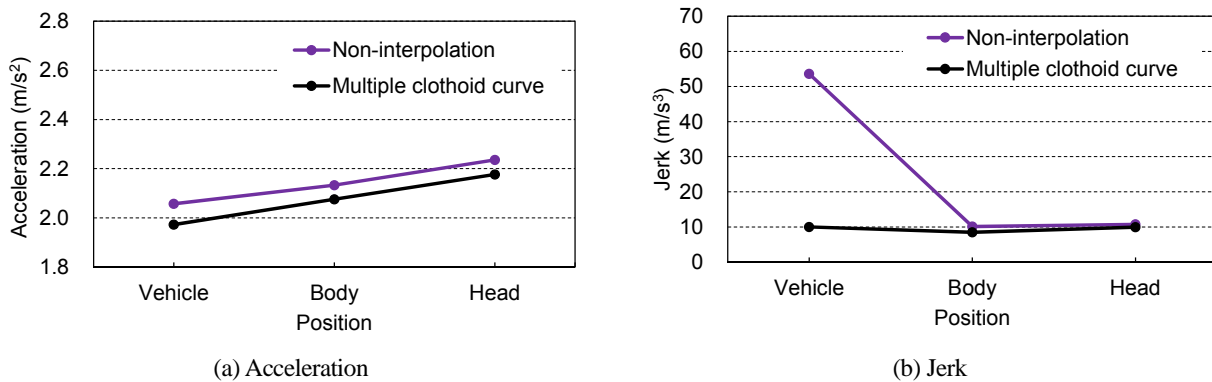


Fig.33 Comparison of acceleration and jerk between non-interpolation and multiple clothoid for lane change D. The values of the multiple clothoid curve are lower than those of the non-interpolation.

表 2 は、4 つの車線変更に対して、緩和曲線が非補間の場合に比較して多連クロソイド曲線の場合の加速度 rms 値と加加速度 rms 値の低減率を示す。4 種の車線変更では車両の走行性の観点からは車線変更 C, A, D, B の順で過酷な走行経路となる。これら 4 種の平均をとると加速度 rms 値では車両が 4.97 %、乗員胴体部が 3.94 %、乗員頭部が 5.40 % 低減している。さらに加加速度 rms 値では車両が 86.55 %、乗員胴体部が 32.35 %、乗員頭部が 25.19 % 低減し、種々の車線変更に対して、緩和曲線を多連クロソイド曲線を適用することにより有効性が確認できる。

Table 2 Reduction rate of acceleration and jerk applying the multiple clothoid function as a transition curve.

Lane change	Acceleration (percentage)			Jerk (percentage)		
	Vehicle	Occupant body	Occupant head	Vehicle	Occupant body	Occupant head
A	5.81	5.50	6.61	91.13	50.89	48.57
B	5.17	3.60	7.85	86.25	29.37	20.67
C	4.80	3.98	4.50	87.62	32.70	24.38
D	4.08	2.67	2.64	81.31	16.43	7.12
Average	4.97	3.94	5.40	86.58	32.35	25.19

6. 結 言

車線変更における緩和曲線として、多連クロソイド曲線を提案し、その有効性について検討した。本研究で明らかになった事柄は次のとおりである。

(1) 車線変更として、乗り移り間隔一定で、直線、円弧、円弧、直線からなる経路と直線、円弧、直線、円弧、直線からなる経路において乗り移り距離が 2 種類で総計 4 種の車線変更に対して接続点の緩和曲線として多連クロソイド曲線の有効性を示した。円弧と円弧の間に直線を挿入した経路は加速度および加加速度 rms 値に低い値が得られた。

(2) 考慮した 4 種の車線変更は車線変更 C, A, D, B の順で過酷な走行条件となった。これら 4 種の平均をとると加速度 rms 値は、多連クロソイド曲線の場合は非補間の場合に比較して、車両が 4.97 %、乗員胴体部が 3.94 %、乗員頭部が 5.40 % 低減した。さらに、加加速度 rms 値は、多連クロソイド曲線の場合は非補間の場合に比較して、車両が 86.55 %、乗員胴体部が 32.35 %、乗員頭部が 25.19 % 低減した。種々の車線変更に対して、緩和曲線とし

て多連クロソイド曲線を適用することにより有効性が顕著に確認できた。

(3) 検討した車線変更で最も良い条件である車線変更 C の場合においては、車両重心位置、乗員胴体部、乗員頭部の y 方向加速度 rms 値と加加速度 rms 値は、多連クロソイド曲線の場合は非補間の場合に比較して、加速度 rms 値は、車両で 4.8 %、乗員胴体部で 4.0 %、乗員頭部で 4.5 % 低減した。また加加速度 rms 値は、車両で 87.6 %、乗員胴体部で 32.7 %、乗員頭部で 24.4 % 低減した。

(4) 検討した車線変更で最も悪い条件である車線変更 B の場合においては、車両重心位置、乗員胴体部、乗員頭部の y 方向加速度 rms 値と加加速度 rms 値は、多連クロソイド曲線の場合は非補間の場合に比較して、加速度 rms 値は、車両で 5.2 %、乗員胴体部で 3.6 %、乗員頭部で 7.9 % 低減した。また加加速度 rms 値は、車両で 86.2 %、乗員胴体部で 29.4 %、乗員頭部で 20.7 % 低減した。

今後の課題として、本報では車線変更する時の走行速度を一定として検討した。実際には車線変更を開始して終了するまでの走行速度を最適に変化して最適経路を生成することも必要である。その他走行環境から最適な走行経路の抽出が必要となる。種々の走行経路として、三次元空間における最適走行路緩和曲線の開発も必要である。本報で示した新規の緩和曲線に関する研究結果は自動車分野のみにとどまらない。溶接、塗装、接着剤塗布などの NC 制御用ロボットの最適経路の作成、船舶・航空機の運航経路の生成、機械要素の運動の軌道設計、工作機械の工具軌跡や工作物の輪郭形状の表現などの理論的考察、さらに高速鉄道車両のレール配置計画 (Hodas, 2014) など適用分野は幅広いと考えている。本研究で開発した技術は種々の分野で寄与できる可能性が期待できる。

謝 辞

本研究は、株式会社三英技研代表取締役故山本忠氏の発想による研究である。氏は本研究成果を公表する目前に逝去されました。ここに付記し、ご冥福をお祈りすると同時に御霊に感謝の意を表します。

文 献

- Hodas, S., Design of railway track for speed and high-speed railways, *Procedia Engineering*, Vol.91 (2014), pp.256–261.
- 伊能寛, 深尾隆則, 戸塚誠司, 岡藤勇希, オプティカル・フロー・モデルを利用した操舵制御システムの開発, *デンソーテクニカルレビュー*, Vol.20 (2015), pp.123–130.
- Kahya, A.H.M. and Schmidt, K.W., Clothoid-based lane change trajectory computation for self-driving vehicles, *Cankaya University Journal of Science and Engineering*, Vol.14, No.2 (2017), pp.152–179.
- 近藤政市, 基礎自動車工学 前期編 (1974), pp.212–232, 養賢堂.
- 蘭豊礼, 玉井博文, 牧野洋, 三連クロソイドによる自由点列補間, *精密工学会誌*, Vol.76, No.10 (2010), pp.1194–1199.
- Malcolm, C. G., 運転者・車両・道路の相互関係に関する研究, *IATSS review*, Vol.5, No.4 (1979), pp.267–277.
- McConnell, A., Motion sensitivity as a guide to road design, *SAE Transactions*, Vol.65 (1957), pp.493–507.
- 西山修二, 車両-乗員系連成振動シミュレーションシステムの開発 (第1報, 理論解析およびシステム検証), *日本機械学会論文集C編*, Vol.59, No.568 (1993a), pp.3613–3621.
- 西山修二, 自動車-乗員系の連成振動を考慮した乗員の上下・左右振動解析, *日本機械学会論文集C編*, Vol.59, No.567 (1993b), pp.3239–3246.
- Pacejka, H. B., *Tire and vehicle dynamics*, 3rd ed. (2002), pp.172–215, Butterworth-Heinemann.
- 渋谷大, 臼井深, 三浦憲二郎, クロソイド曲線を用いた曲率変化の滑らかな軌道生成 (動作計画と制御の新展開), *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集* (2012), 2A1-B01, pp.1–4.
- 鈴木卓馬, 人間の振動特性と走行速度による車両ダイナミクスの変化を考慮した自動車用サスペンションの制御系設計, 慶応義塾大学, 博士論文 (2011), pp.15–41.
- 山門誠, 長塚敬一郎, 高橋絢也, 車両横加加速度に基づくヨーモーメント制御手法の検討 (第2報)–2輪車モデルを用いた解析による本質的理解の試み, *自動車技術会論文集*, Vol.44, No.6 (2013), pp.1383–1390.
- Yamamoto, M., Yamamoto, T. and Nishiyama, S., Investigation of trajectory planning of a travel route while turning at an intersection, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.12, No.7 (2018),

DOI:10.1299/transjsme.2018jamdsm0118.

山本真, 山本忠, 西山修二, 多連クロソイド曲線を用いた曲率変化の滑らかな走行路緩和曲線の提案, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.852 (2017), DOI:10.1299/transjsme.17-00006.

山本真, 山本忠, 西山修二, 多連クロソイド曲線を用いた曲率変化の滑らかな走行路緩和曲線の提案 (第2報 : 交差点旋回への適用), 2018年度日本機械学会年次大会 (2018), J1810202.

References

- Hodas, S., Design of railway track for speed and high-speed railways, *Procedia Engineering*, Vol.91 (2014), pp.256–261.
- Inou, H., Fukao, T., Totsuka, S. and Okafuji, Y., Development of steering control system based on optical flow model, *Denso technical review*, Vol.20 (2015), pp.123–130 (in Japanese).
- Kahya, A.H.M. and Schmidt, K.W., Clothoid-based lane change trajectory computation for self-driving vehicles, *Cankaya University Journal of Science and Engineering*, Vol.14, No.2 (2017), pp.152–179.
- Kondo, M., *Fundamentals of automobile engineering*, Vol.1 (1974), pp.212–232, Yokendo (in Japanese).
- Lan, F., Tamai, H. and Makino, H., Interpolation of arbitrary point sequence by triple clothoid curves, *Japan Society for Precision Engineering*, Vol.76, No.10 (2010), pp.1194–1199 (in Japanese).
- Malcolm, C. G., Some studies of driver-vehicle- roadway interaction, *IATSS review*, Vol.5, No.4 (1979), pp.267–277 (in Japanese).
- McConnell, A., Motion sensitivity as a guide to road design, *SAE Transactions*, Vol.65 (1957), pp.493–507.
- Nishiyama, S., Development of simulation system on vehicle-occupant dynamic interaction (1st report, theoretical and system verification), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.59, No.568 (1993a), pp.3631–3621 (in Japanese).
- Nishiyama, S., Vertical and lateral vibration analysis of vehicle-occupant dynamic interaction with simulation system, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.59, No.567 (1993b), pp.3239–3246 (in Japanese).
- Pacejka, H. B., *Tire and vehicle dynamics*, 3rd ed. (2002), pp.172–215, Butterworth-Heinemann.
- Shibuya, D., Usui, S. and Miura, K., Robot trajectory generation with smoothly changing curvature using the clothoid curve, *Robomec* (2012), 2A1-B01, pp.1–4 (in Japanese).
- Suzuki, T., The control system design of the suspension for cars in consideration of change of the vehicles dynamics by man's oscillation characteristic and speed, *Keio Gijuku University, Ph.D. thesis* (2011), pp.15–41 (in Japanese).
- Yamakado, M., Nagatsuka, K. and Takahashi, J., Study on yaw-moment control method based on vehicle lateral jerk information (second report) -Deep understanding of mechanism through the analysis using bicycle methods -, *Journal of Automobile Engineering*, Vol.44, No.6 (2013), pp.1383–1390 (in Japanese).
- Yamamoto, M., Yamamoto, T. and Nishiyama, S., Investigation of trajectory planning of a travel route while turning at an intersection, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.12, No.7(2018), DOI:10.1299/transjsme.2018jamdsm0118.
- Yamamoto, M., Yamamoto, T. and Nishiyama, S., Proposal for a transition curve with smoothly changing curvature using multiple clothoid curve, *Transactions of the JSME (in Japanese)* Vol.83, No.852 (2017), DOI:10.1299/transjsme.17-00006.
- Yamamoto, M., Yamamoto, T. and Nishiyama, S., Proposal for a transition curve with smoothly changing curvature using multiple clothoid curve (Second report: Application to turning at an intersection), *Mechanical engineering congress 2018 Japan* (2018), J1810202 (in Japanese).