

正十字ラウンドアバウトにおける 直進車両の走行軌跡に関する分析

吉岡 慶祐¹・中村 英樹²・下川 澄雄³・森田 綽之⁴・阿部 義典⁵

¹正会員 日本大学理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
E-mail: yoshioka.keisuke@nihon-u.ac.jp

²フェロー会員 名古屋大学大学院環境学研究科 都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: nakamura@genv.nagoya-u.ac.jp

³正会員 日本大学理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
E-mail: shimokawa.sumio@nihon-u.ac.jp

⁴フェロー会員 日本大学理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
E-mail: hi-morita@i-transportlab.jp

⁵正会員 国際航業(株)技術本部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1)
E-mail: yoshinori_abe@kk-grp.jp

ラウンドアバウトの幾何構造設計では、安全性・円滑性の観点から適切な車両挙動が実現されるよう、設計段階において性能の照査を行うことが重要である。その際、幾何構造をチェックする方法として、図面上から走行挙動を予測し、必要に応じて設計にフィードバックするといった方法が考えられる。しかし我が国では、このような検討に資する十分な知見が得られていない。

そこで本研究では、ラウンドアバウトを直進で通過する車両を対象に、MMS(モバイルマッピングシステム)により取得される走行軌跡データから挙動特性を分析した。さらに曲率の変化を線形近似することで、走行軌跡のモデリングを行った。また、モデリングで得られたパラメータを比較することで、幾何構造と車両軌跡、速度の関係性について考察した。

Key Words: Roundabout, Driving behavior, Vehicle trajectory, Geometric design

1. はじめに

ラウンドアバウトは平面交差点の制御方式の一つとして、平成26年9月の改正道路交通法の施行を契機に全国各地での普及が進んでいる。平成28年4月には「ラウンドアバウトマニュアル」が発行され、計画・設計に関する拠り所として活用されている。

ラウンドアバウトでは信号機による交通制御を行わないため、安全性や円滑性の確保のためには、適切な車両挙動が実現するような幾何構造設計が必要である。例えば、ラウンドアバウトを直進で通過する際、流入から流出まで直線的に走行できるような構造であると、十分に減速されないまま環道内に流入することになり、安全上好ましくない。そこで直線的な走行を防ぐため、物理的にステアリング操作が生じるような幾何構造(外径・環状部の幅員構成・流入部形状等のバランス)とすること

が望ましいが、その際、設計の段階で適切な幾何構造であるかどうかの確認が不可欠である。

海外の設計ガイドラインでは、想定した幾何構造に対して実現し得る速度を推定し、これにより安全性の照査を行う方法が示されている例もある。一方我が国では、安全性の照査を行うための具体的な方法は持ち合わせておらず、先に述べたラウンドアバウトマニュアルでは定性的な確認を行うにとどまっている。幾何構造設計が車両のステアリング操作、さらには走行挙動に影響を与えることを踏まえると、設計の段階で走行挙動を予測し、必要に応じて設計にフィードバックできるような手法の検討が必要である。しかし我が国では、このような検討に資する十分な知見が得られておらず、標準的な正十字のラウンドアバウトですら、走行軌跡の詳細な実態や幾何構造や速度との関係性は明らかとなっていない。

そこで本研究では、正十字の標準的な幾何構造を有するラウンドアバウトにおいて、直進で通過する乗用車を対象に流入から流出までの走行軌跡の特性について分析し、幾何構造や速度との関係性について考察するものである。

2. 国内外における知見の整理

(1) 海外設計ガイドラインの安全性照査の考え方

海外の設計ガイドラインでは、設計の手順や各幾何構造要素の標準値や基本的な考え方のほか、できあがった幾何構造に対して、安全性に関する性能の照査手法が示されている。

ラウンドアバウトの幾何構造は、外径・環状部の幅員構成・分離島の有無・流出入口の形状・接続道路の交差角度等、様々な要素で構成される。これらの構成要素は相互に密接に関連するため、一つの構成要素を見直すとその他の要素にも影響が及ぶ。従って、ある特定の幾何構造要素のみで安全性を議論することは不適切である。そのため海外のガイドラインでは、各種幾何構造の組み合わせの結果生じた走行空間の中で、車両が通行し得る軌跡を図面上で描画し、その曲線半径の大きさを評価指標として照査に活用している例が多い。

さらにアメリカのガイドライン²⁾では、図-1のように各OD方向別に描画した走行軌跡の流入部・環道内・流出部の曲線半径を基に、以下の式(1)により走行速度を推定する方法が示されている。

$$V = \sqrt{15R(e + f)} \quad (1)$$

ここに、 V ：速度(mile/h)、 R ：曲線半径(ft)、 e ：片勾配、 f ：摩擦係数である。

式(1)は、車両が走行する際の力学的なつり合い条件から、横滑りが生じないで安定して走行するための速度を求める式である。図-2は式(1)に基づき、外向き勾配2%または内向き勾配2%の場合の、速度と曲線半径の関係を示したものである。

これを用いた安全性の照査方法としては、ラウンドアバウトの存する地域特性や交差点の利用特性、接続道路のネットワーク特性等を勘案し、適正と考えられる環道内の走行速度を予め設定しておく。これに、式(1)により推定された速度と比較することで、安全性に関する評価を行い、必要に応じて幾何構造設計にフィードバックすることとしている。

またドイツの設計ガイドライン³⁾では、図-3のように流入部とエプロン部の位置関係から容易に算出される「横方向振れ幅」を代理指標とした幾何構造のチェック方法を示している。これは、横方向振れ幅が直進車両の

例えば直進車両の場合、流入～流出までの走行軌跡を描き、流入時・環道内・流出時の3地点で曲線半径を確認

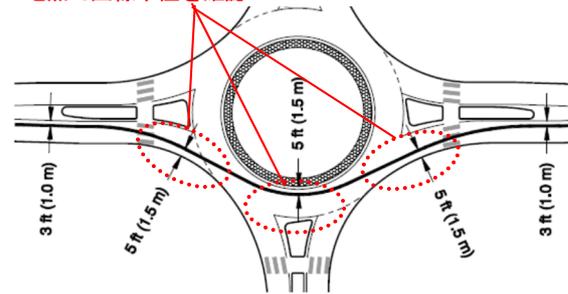


図-1 走行軌跡の描画例(アメリカ)

出典：NCHRP Report 672 Roundabouts: An Informational Guide Second Edition を基に一部追記

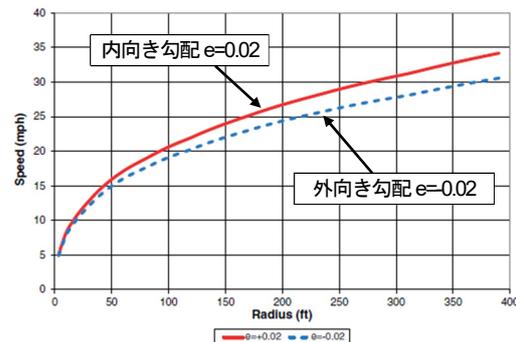


図-2 曲線半径と速度の関係

出典：NCHRP Report 672 Roundabouts: An Informational Guide Second Edition を基に一部追記

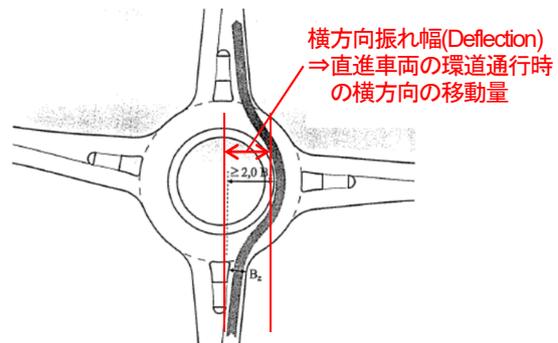


図-3 横方向振れ幅の定義

出典：Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren,2006 を基に一部追記

走行軌跡や環道内の走行速度に大きく影響するとの知見から、安全性に関わる照査の一つとして、このような簡易な手法を用いている。

(2) 我が国のラウンドアバウトにおける既往調査

平成26年の道路交通法改正以降、我が国でもラウンドアバウトの普及が進みつつあり、これまでに導入された箇所における調査を通して、車両挙動に関する知見も徐々に増加している。

国際交通安全学会の調査⁴⁾では、飯田市東和町、焼津

市関方等に導入されたラウンドアバウトにおいて、導入前後における交差点通過時の速度の変化を比較しており、ラウンドアバウトの導入により交差点内での走行速度が大きく低下したことを示している。また飯田市吾妻町の調査では、既存ラウンドアバウトの幾何構造の改良により、速度や環道内での走行位置が変化したことを示している。

また筆者ら⁹⁾は、守山市立田町のラウンドアバウトにおいて、外部観測より車両挙動を観測し、環道内における走行軌跡や走行速度に関する基礎分析を行っている。その結果、環道内の中間に位置する断面において、軌跡の曲率（軌跡の曲がり具合を示す）が小さい車両ほど速度が高い傾向にあることを確認した。

以上のように、我が国のラウンドアバウトにおける基本的な車両挙動特性は、これまでに導入された箇所から少しずつ明らかとなっている。しかし過去の研究例のうち走行軌跡に関する分析では、その傾向把握や特徴を明らかにすることとどまり、幾何構造との関係や実現される速度への影響について定量的に示した結果は見られない。これに対し安全性の照査を考えた場合、幾何構造から走行挙動の予測が必要であると想定すると、流入から流出までの走行軌跡のメカニズム、および幾何構造や速度との関連についてさらに詳細な分析が必要であると考えられる。

3. 走行挙動データの取得

(1) 調査概要

本研究の対象箇所は、正十字の標準的な幾何構造を有する、静岡県焼津市関方の山の手ラウンドアバウトとした。調査の概要は、表-1に示すとおりである。

山の手ラウンドアバウトは、図-1に示すように4枝の正十字であるとともに、外径・環道幅員構成等は、道路構造令の解説と運用に示される目安の数値と同程度である。一方、各流入部の隅角部半径は、セミトレーラ連結車の通行のために曲線半径を大きめ(R=25m)に取っており、内輪差を考慮して外側エプロンが設置されている。

(2) MMSによる位置データの取得

本研究ではより精度の高い軌跡データを取得するため、図-2のMMS（モバイルマッピングシステム）を搭載した車両で走行を行い、位置データ（緯度・経度）の取得を行った。なお、走行方法は各流入部から直進方向へ3回ずつ計12回の走行とし、データの取得間隔は2mピッチとした。図-1は12回の走行で得られた全ての位置データを図面上に示したものである。

表-1 調査概要

調査日時	2016年5月19日(木) 12時~16時
被験者	30代男性
被験車両	日産 X-TRAIL
計測機器	MMS(ニコントリプル製 Trimble MX)
主な幾何構造条件	外径:27m, 環道幅員:50m, エプロン:20m 中央島11.0m, 分離島:あり エプロン:段差構造(2cm→5cm テーパー付)
制御方式	環状交差点指定

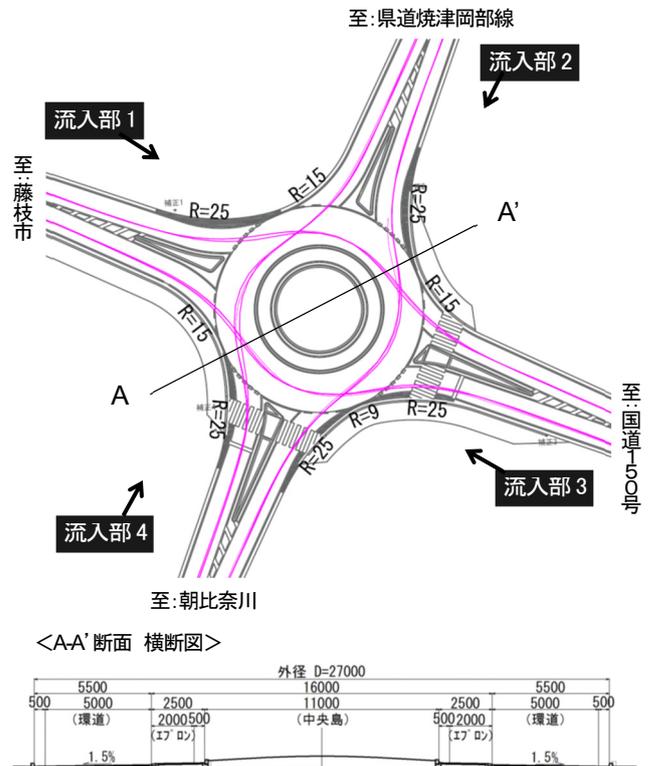


図-1 山の手ラウンドアバウトの幾何構造とMMSによる軌跡データの取得結果



図-2 MMSを搭載した調査車両

(3) 走行挙動データの整理

MMSにより得られた位置データを基に、分析を進めるにあたって座標系の変換および各種走行挙動データの算出を行った。具体的には、ラウンドアバウトの中心位置を原点とし、進行方向の道路中心線を横軸、道路中心

線に対する横断方向の走行位置を縦軸とした座標系に変換した。図-3は、代表的な1回の走行について、上述の座標系の変換を行い道路中心線に対する位置関係を走行軌跡図として示したものである。

また、一定間隔に得られた離散的な位置データから、速度・加速度・進行角度・曲率（進行角度の1回微分）等の走行挙動データを算出する。ここで進行角度 θ は図-4に示すように、道路中心線に対する車両の進行方向の角度として定義しており、左向きを正としている。また曲率 k は、進行角度の走行距離 L に対する変化量であり、車両の曲がり具合（ステアリング操舵の程度）を示す量として以降の分析で用いている。また、速度・加速度は位置データの差分から算出し、カルマンフィルターによる平滑化処理を行っている。

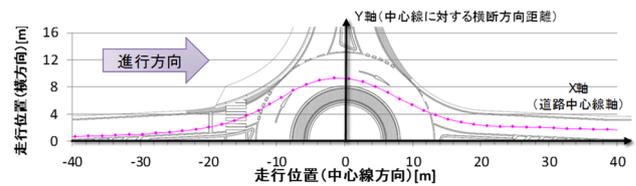


図-3 座標変換した軌跡データ

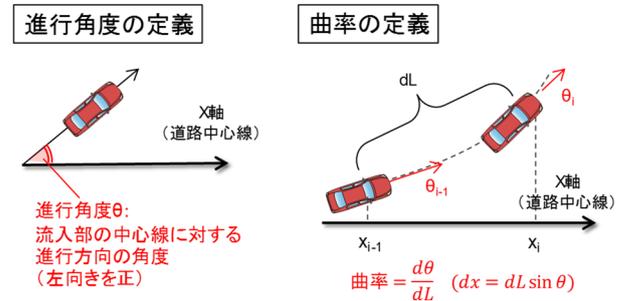


図-4 進行角度と曲率の定義

4. 直進車両の走行軌跡特性

(1) 流入～流出までの走行プロファイル

図-5は、流入部1から流入部3に直進で通過した3回の走行に対して、速度・進行角度・曲率・曲率の変化量（曲率の1回微分）を算出し、道路中心線方向の位置関係と合わせてそれぞれ比較したものである。3回分の走行について、走行位置（走行軌跡）や進行角度は大きく変わらない。速度に関しては、流入から流出までの中で最も速度が低下する位置（最減速位置）が異なる走行ケースが見られる。次に、ステアリング操舵角の程度を示す曲率の変化について着目すると、流入時・環道内・流出時の3回ピークが発生していることが分かる。これはステアリングを左方向・右方向・左方向と3回切って走行していることを示すものである。さらにステアリングの操舵速度を示す進行角度の2回微分については、環道内で左から右へのステアリング操作、または右から左へのステアリング操作の際に最も高くなっており、環道内においては短時間の間に逆方向へのステアリング操作が連続して発生していることを示している。

このステアリング操作の連続は、ラウンドアバウトの幾何構造設計において意図することの一つであり、これらのステアリング操作が適度に生じることで、速度抑制が期待できるものと考えられる。

(2) 走行軌跡のモデリング

(1)で述べたように、ラウンドアバウトを直進で通過する際は左方向・右方向に合わせて3回のステアリング操作が必要となるが、ドライバーは極力スムーズなステアリング操作で走行するものと考えられる。例えば鈴木ら⁹⁾の研究では、通常の十字交差点の右折挙動において、曲率が一定の割合で変化すると仮定した線形近似により、

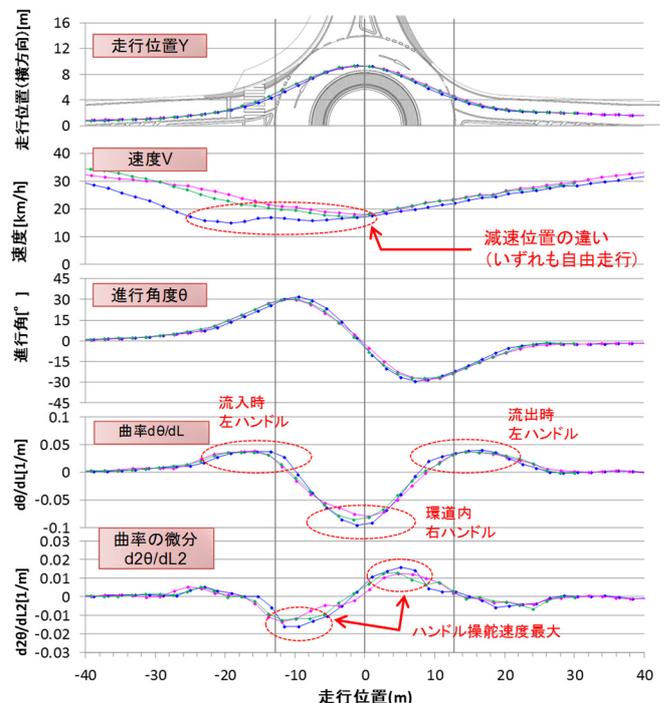


図-5 速度等の挙動変化(流入部1→流入部3)

※進行角度 θ はグラフ上のみ度数表示としている

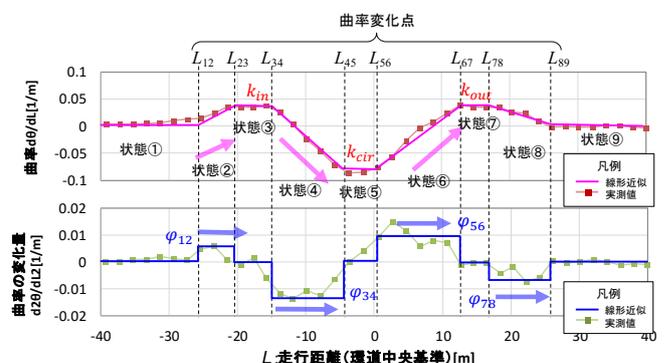


図-6 曲率および曲率の1回微分の観測値と走行状態別の線形近似

走行軌跡が滑らかな直線-クロソイド-円弧-クロソイド-直線によって構成されることが示されている。ラウンドアバウトの走行においても、同様に曲率の変化が一定であると仮定し、図-6に示すように曲率の変化に応じて、以下の9段階の走行状態を考える。

走行状態①：ラウンドアバウト手前の単路区間では、ステアリング操作は発生しないため曲率は0である。

走行状態②：走行位置(L_{12})から、流入部の線形に合わせて一定の割合でステアリングを切っていく。(曲率は一定の割合 ϕ_{12} で変化)

走行状態③：走行位置(L_{23})から、一定のステアリング操舵角となり、その際の曲率は k_{in} である。

走行状態④：走行位置(L_{34})から、環道内の線形に合わせて逆方向へ一定の割合でステアリングを切っていく。(曲率は一定の割合 ϕ_{34} で変化)

走行状態⑤：走行位置(L_{45})から、中央島横を通る際の一定のステアリング操舵角となり、その際の曲率は k_{cir} である。

走行状態⑥：走行位置(L_{56})から、流出部の線形に合わせて逆方向へ一定の割合でステアリングを切っていく。(曲率は一定の割合 ϕ_{56} で変化)

走行状態⑦：走行位置(L_{67})から、一定のステアリング操舵角となり、その際の曲率は k_{out} である。

走行状態⑧：走行位置(L_{78})から、単路部の走行に戻るため一定割合でステアリングを戻していく。(曲率は一定の割合 ϕ_{78} で変化)

走行状態⑨：走行位置(L_{89})から、単路区間の走行としてステアリング操作は発生しないため曲率は0である。

以上のように、ラウンドアバウト直進時の走行における曲率の変化をステアリング操舵の状態別に仮定すると、走行状態*i*における曲率 k_i は、以下の式(2)のように定式化できる。

$$k_i(L) = \begin{cases} 0 & L \leq L_{12} \\ \phi_{12} * L - \phi_{12} * L_{12} & L_{12} \leq L \leq L_{23} \\ k_{in} & L_{23} \leq L \leq L_{34} \\ \phi_{34} * L + \frac{L_{34}k_{in} - L_{23}k_{cir}}{L_{34} - L_{23}} & L_{34} \leq L \leq L_{45} \\ k_{cir} & L_{45} \leq L \leq L_{56} \\ \phi_{56} * L + \frac{L_{56}k_{cir} - L_{45}k_{out}}{L_{56} - L_{45}} & L_{56} \leq L \leq L_{67} \\ k_{out} & L_{67} \leq L \leq L_{78} \\ \phi_{78} * L - \phi_{78} * L_{78} & L_{78} \leq L \leq L_{89} \\ 0 & L_{89} \leq L \end{cases} \quad (2)$$

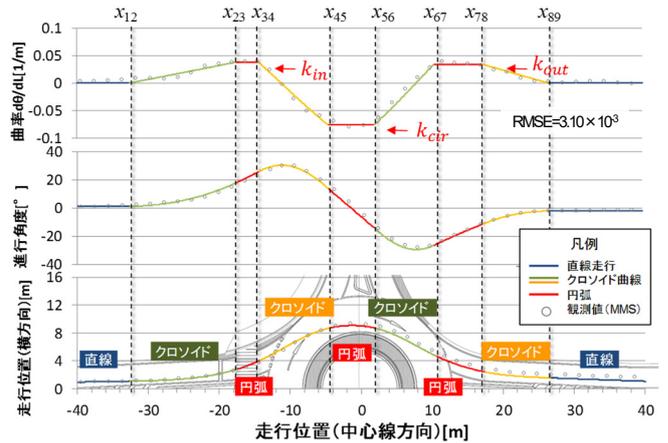


図-7 推定したパラメータから再現した挙動データ (上から順に、曲率・進行角度・走行軌跡を示す)

ここに、 k_i ：走行状態*i*における曲率、 L_{ij} ：走行状態*i*から*j*へ変化する位置、 k_{in} 、 k_{cir} 、 k_{out} は流入時、環道内、流出時に発生する曲率のピーク値である。また、 ϕ_{12} 、 ϕ_{34} 、 ϕ_{56} 、 ϕ_{78} はステアリング操舵時の曲率の変化の割合であり、例えば走行状態④における ϕ_{34} は、一定の曲率変化を仮定するため式(3)で表される。

$$\phi_{34} = \frac{k_{cir} - k_{in}}{L_{45} - L_{34}} \quad (3)$$

式(2)により定式化した曲率と観測データから得られる曲率を比較し、ラウンドアバウトの前後50mずつの走行区間について、式(4)のように誤差の二乗和が最小となるような未知パラメータ Φ^* を準ニュートン法により探索する。

$$\Phi^* = \operatorname{argmin} \left[\sum_{L=-50}^{50} \left\{ k(L|\Phi^*) - \frac{d\theta}{dL}(L) \right\}^2 \right] \quad (4)$$

ここに、 Φ^* は式(5)に示すように、曲率の変化位置および曲率のピーク値に関する未知パラメータベクトルである。

$$\Phi^* = \begin{pmatrix} L_{12} \\ L_{23} \\ \vdots \\ L_{89} \\ k_{in} \\ k_{cir} \\ k_{out} \end{pmatrix} \quad (5)$$

図-7は代表的な1回の走行サンプルについて、推定したパラメータから線形近似された曲率の推定値と、それを基に算出した進行角度と軌跡の推定値、およびMMSによる観測値を、走行状態別に色分けして比較したものである。曲率の平均二乗誤差RMSEは 3.10×10^{-3} となり、

曲率の値と比較しても十分に小さいため、精度は良好である。ここで、進行角度 θ および走行軌跡 Y （道路中心線に対する横断方向の走行位置）はそれぞれ式(6)、式(7)のように曲率・進行角度を積分したものとなるが、境界条件として初期値 θ_0 、 Y_0 を観測結果から設定することでそれぞれ算出する。

$$\theta(L) = \int_{L_0}^L k(L) dL + \theta_0 \quad (6)$$

$$Y(L) = \int_{L_0}^L \sin\theta(L) dL + Y_0 \quad (7)$$

ここに、 θ : 進行角度[rad]、 k : 曲率[1/m]、 Y : 道路中心線に対する横断方向の走行位置[m]である。

なお、図-7では、幾何構造に対する位置関係を分かりやすくするため、横軸は道路中心線方向の走行位置としている。

(3) 走行軌跡と幾何構造の関係

推定された走行軌跡と幾何構造との関係について考察するため、表-2、表-3に示す12回の走行から得られた各種パラメータの平均値から、図-8のように走行軌跡を推定した。これを平均的な走行軌跡とし、流入時・環道内・流出時の円弧部分の曲線半径 R_{in} 、 R_{cir} 、 R_{out} （それぞれ k_{in} 、 k_{cir} 、 k_{out} の逆数）と、隅角部等の曲線部の曲線半径を比較する。その結果、流入時と環道内ではほぼ同程度の値となり、曲線の形状に合わせた走行を行っているものと推察される。一方流出部については隅角部の形状よりも10m程度大きい曲線半径となっている。流入時と流出時の曲率を比較すると、表-3のように流出時の方が小さい曲率 ($k_{in} < k_{out}$) となっており、表中には示していないが、12回ほぼすべての走行において同様の傾向であった。流入部と流出部では必ずしも同様の軌跡とはなっておらず、とくに流出時は加速に移るため、できるだけ小さなステアリング操作でスムーズに流出しようという意識が挙動に現れた結果であると推察される。

(4) 走行軌跡と速度の関係

図-9は代表的な1サンプルについて、曲率の変化と速度および加速度の変化を比較したものである。着目すべきは、流入時・環道内・流出時の曲率がピークとなる箇所が、速度や加速度の変化の中の特徴的な箇所と概ね一致していることである。これらを時系列順に見ていくと、流入部にかけて徐々に減速が大きくなり、流入時の曲率が最大となる地点で減速度も最大となる。その後、環道内で曲率が最大となる地点で減速から加速へ転じ、徐々に加速度が増加する。さらに、流出時の曲率が最大となる地点で一定の加速度に収束し、流出後は希望速度となるまで加速が続く。

ここでは十分なサンプルが無いので、傾向としての

表-2 推定されたパラメータ ($L_{12} \sim L_{89}$) [n=12]

	L_{12}	L_{23}	L_{34}	L_{45}	L_{56}	L_{67}	L_{78}	L_{89}
平均値	-29.153	-18.068	-15.432	-4.556	0.727	10.414	16.528	25.602
標準偏差	3.944	1.426	1.039	0.753	1.029	0.969	1.668	1.987

表-3 推定されたパラメータ (k_{in} , k_{cir} , k_{out}) [n=12]

	k_{in}	k_{cir}	k_{out}
平均値	0.0492	-0.0882	0.0392
標準偏差	0.0104	0.0085	0.0041

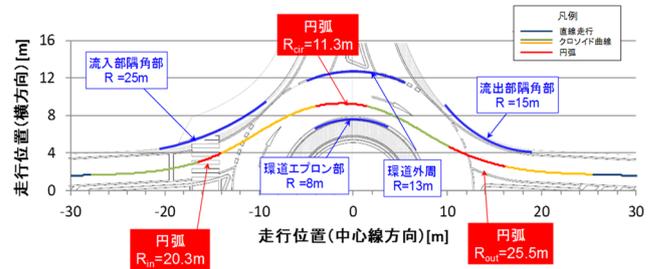


図-8 表 2-3 のパラメータに基づく走行軌跡

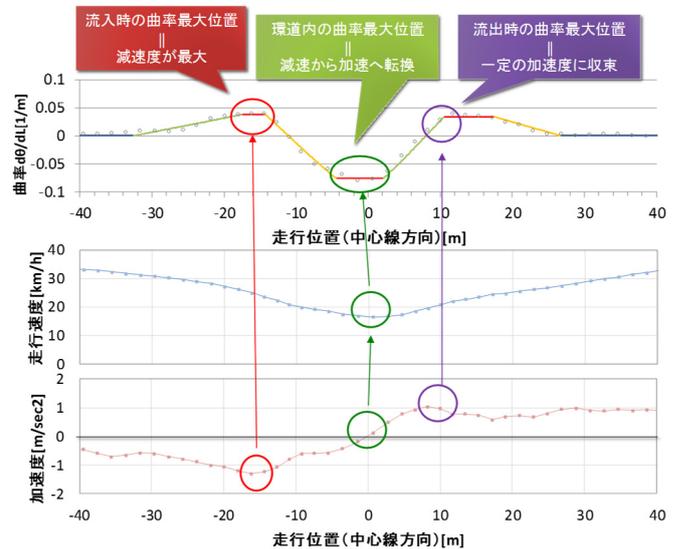


図-9 曲率の変化と速度・加速度の関係 (上から順に、曲率・速度・加速度の変化を示す)

推測のみにとどまるが、ラウンドアバウトを通過する際のステアリング操作のタイミングや操舵角の程度が、実現される速度に影響していることを示す結果であると推察される。

5. まとめ

本研究では、MMSにより取得された高精度の車両軌跡データを用い、正十字の標準的な幾何構造を有するラウンドアバウトにおいて、直進で通過する車両の走行軌跡の特性について分析するとともに、直進-クローズド-円弧の組合せによる走行軌跡のモデリングを試みた。

その結果、曲率の変化位置や流入時、環道内、流出時

の曲率のピーク値を得ることで軌跡の再現が可能となることを示した。さらに、モデリングで得た曲率の変化位置やピーク値を表すパラメータと幾何構造や速度を比較することで、幾何構造、走行軌跡、走行速度それぞれの関係性を説明できる可能性を示唆した。

本研究では、特定の被験者の限られたサンプルのみでの結果であるが、今後は外部観測から得た不特定多数の挙動データから分析を行う予定である。また、左折・右折車両や異なる幾何構造のラウンドアバウトにおいても分析を行うことで、幾何構造と車両軌跡、車両速度の関係性について、さらに詳細に分析する予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、調査の実施・データの整理において (株) 国際航業の村木氏・大島氏・高木氏・阿部氏に多大な協力を賜りました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) (一社) 交通工学研究会：ラウンドアバウトマニュアル, 2016.
- 2) National Cooperative Highway Research Program (NCHRP): NCHRP Report 672 Roundabouts: An Informational Guide Second Edition, 2010.
- 3) Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV): Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren, 2006.
- 4) (公財) 国際交通安全学会：ラウンドアバウトの社会実装と普及促進に関する研究 (Ⅲ) 報告書, 2015.
- 5) 吉岡慶祐・中村英樹・下川澄雄・森田緯之・小久保智明：ラウンドアバウトの走行安全性照査手法に関する検討, 土木計画学研究・講演集, Vol.52, CD-ROM, 2015.
- 6) 鈴木一史・中村英樹・石黒公規：信号交差点における幾何構造と進入条件を考慮した右折走行軌跡のモデル化, 土木計画学研究・講演集, Vol.39, CD-ROM, 2009.

An Analysis on Straight Thorough Vehicle Trajectory for Roundabouts

Keisuke YOSHIOKA, Hideki NAKAMURA, Sumio SHIMOKAWA
Hirohisa MORITA and Yoshinori ABE