

潜在反応モデルを利用した交通コンフリクト指標の定式化

山田健太郎¹・黒木学²

¹学生会員 総合研究大学院大学 複合科学研究科 統計科学専攻 (〒 190-8562 東京都立川市緑町 10-3)

²正会員 統計数理研究所 データ科学研究系 准教授 (〒 190-8562 東京都立川市緑町 10-3)

本報告では、ICSTCT¹⁾によって与えられた交通コンフリクトの定義にある反事実的表現に着目し、この反事実的表現を考慮に入れた交通コンフリクト指標として“Potential Response Inspired Conflict (PRIC)”を提案する。提案に先立ち、既存の交通コンフリクト指標がこの反事実的表現を適切に反映していないケースがあることを指摘する。次に、この反事実的表現を考慮するために、潜在反応モデルを導入し、PRICを定義する。続いて、本報告では、PRICが識別可能であるための3つの十分条件を与える。さらに、PRICの観点から、ある条件のもとでは、統計的な観点では、既存のコンフリクト指標が交通コンフリクトの定義を適切に反映したものであることを示す。最後に、PRICを“100-Car Study⁶⁾”データに適用し、その有用性について議論する。

Key Words: *traffic conflict, causal inference, potential response, counterfactual*

1. はじめに

交通事故を分析し、その対策を講じることで安全な交通環境を構築することは重要な課題である。そのためには交通事故に至る状況を分析し、そのメカニズムを知ることが求められる。しかしながら、交通事故は散発的にしか発生しないこと、事故の程度によって報告されないことがあるなど¹⁴⁾、事故の状況を十分に観察することが困難となるケースが多い。また、十分な数の事故を観察するためには交通事故が起こる危険性を排除してはならないなどといった倫理的な問題に対して異論が唱えられることがある²⁾。これらの問題を回避し、交通事故メカニズムを解明する方策として、交通事故そのものを観察するのではなく、交通事故を引き起こす危険性が存在する状況¹⁷⁾を解析対象とする交通コンフリクト技術が開発され、社会・時代のニーズに応えるべく発展してきた²⁵⁾。

交通コンフリクトの概念は、もともとは、ドライバーの回避行動をとまうような潜在的に危険な状態を示唆するものである。この概念は、自社生産の自動車が他社生産の自動車に比べてどの程度危険な状況に陥りにくいかを調査するために、1967年にゼネラル・モータースの研究者であったPerkins and Harris¹⁷⁾によって提唱された²⁾。その後、交通コンフリクトの定義をめぐって、多くの交通工学分野の研究者や実務家によって数多くの議論が展開された^{7),8),11),21)}。現在では、ICSTCT (International Calibration Study of Traffic Conflict Techniques)¹⁾によって与えられた以下の定義が標準的なものとして採用さ

れている。

“A traffic conflict is an observable situation in which two or more road users approach each other in space and time to such an extent that there is a risk of collision if their movements remain unchanged.”

さて、交通コンフリクト技術は、主観的方法と客観的方法に大別することができる¹³⁾。主観的方法は、ブレーキランプや車頭の沈み込み、車線変更をとまうような回避行動そのものを観測するものである。主観的方法では、回避行動が主たる観測対象であるが、回避行動を伴わない交通違反¹⁷⁾やドライバーの誤判断により回避行動が行われない場合¹⁴⁾も興味の対象とするケースもある(詳細については、元田¹²⁾を参考にしたい)。客観的方法は、時間的・空間的な物理量(距離、時間、減速度)に基づくものであり、近年は交差点付近のビデオカメラによる定点観測や車載ビデオデータの解析を行った事例の報告などが数多く存在する。その中で、交通コンフリクトを定量的に評価する指標として、TTC (Time To Collision), TA (time to accident), PET (Post-Encroachment Time)などがしばしば用いられている。また、現在も世界各地の交通環境に応じた交通コンフリクト指標が数多く提案されており、国内においても宇野他²³⁾や飯田他⁹⁾によるPICUD (Possibility Index for Collision with Urgent Deceleration)、若林他²⁴⁾によるPTTC (Potential Time To Collision)などが知られている。一方、Davis et al.⁵⁾は、交通コンフリクトを適切に評

価するためには、その定義の背後にある反事実的表現

“if the movements had remained unchanged then a collision would probably have resulted”

を考慮する必要があることを指摘し、構造的因果モデル¹⁶⁾の考え方を交通コンフリクト技術に導入した。Davis et al.⁵⁾の指摘は、回避行動に関する反事実的表現が直接的には反映されていない TTC, TA, PET などといった既存の交通コンフリクト指標が交通コンフリクトを定量的に評価するのに適切ではない状況があることを意味すると同時に、交通コンフリクトを適切に評価するためには、統計的因果推論で使われている潜在反応アプローチあるいはデータ生成過程という概念を用いることが有用であることを示唆している。

このような状況を踏まえて、本報告では統計的因果推論の考え方、特に潜在反応モデルを用いた新たな交通コンフリクト指標を3つ提案し、これを Potential Response Inspired Conflict (以降、PRIC) と呼ぶことにする。直観的には、PRIC は、回避行動をとらなければ衝突事故を起こし、回避行動をとれば衝突事故を起こさないであろうドライバー群を想定し、そのドライバー群において実際には衝突事故が起こっていない確率である。続いて、本報告では、PRIC が識別可能であるための3つの十分条件を与える。さらに、PRIC の観点から、ある条件のもとでは、既存のコンフリクト指標が統計的な意味で交通コンフリクトの定義を適切に反映したものであることを示す。このことは、ある条件のもとでは、回避行動に基づく主観的方法や TTC など時間的・空間的な物理量に基づく客観的方法による交通コンフリクトの定量的評価が、PRIC をとおして統計的な観点から正当化されることを示唆する。最後に、PRIC を“The 100-Car Naturalistic Driving Study⁶⁾”のデータに適用し、その有用性について議論する。

2. 潜在反応モデル

潜在反応モデルは、興味あるドライバーが回避行動をとったとき、あるいはとらなかったときに起こるであろう潜在的な危険性と、そのドライバーが持つ特徴や周辺環境を決定論的に結びつけたうえで、統計的要素を付加して因果効果を定量的に評価する因果モデルの一つである¹⁰⁾。そこで、本節では、PRIC を定義するに先立って、この潜在反応モデルについて概説する(詳細については、Pearl¹⁶⁾や黒木¹⁰⁾を参照されたい)。

X をドライバー i がとる 2 値の回避行動からなる変数 (x_1 : 回避行動あり; x_0 : 回避行動なし) とする。また、 Y は交通事故の状態を表す変数であり、与えられた閾値 y に対して、 $Y > y$ かつ y に近いほどドライバー i が障害物や他車に近い状態にあることを示し、 $Y \leq y$

を満たすとき衝突することを示す。ドライバー i が回避行動をとった場合 ($X = x_1$) に起こるであろう交通事故の状態を表す変数 (潜在反応変数) を $Y_{x_1}(i)$ 、回避行動をとらなかった場合 ($X = x_0$) に起こるであろう状態を表す変数を $Y_{x_0}(i)$ と記す。ドライバー i が実際に回避行動をとった場合 ($X = x_1$) には $Y_{x_1}(i)$ が観測され、 $Y_{x_0}(i)$ が観測されることはなく、ドライバー i が実際に回避行動をとらなかった場合 ($X = x_0$) には $Y_{x_0}(i)$ が観測され、 $Y_{x_1}(i)$ が観測されることはない。このような性質を一致性という。一方、ドライバーがランダムサンプリングされているような場合には、 $Y_{x_1}(i)$ と $Y_{x_0}(i)$ はそれぞれ確率変数 Y_{x_1} と Y_{x_0} とみなせる。ここで、 $Y_{x_j} > y$ である確率を $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ とおく。ここに、 $Y_{x_j} > y$ は“ X が x_j であったならばとるであろう Y の値は $Y > y$ を満たす ($j = 0, 1$)”と解釈される。また、 $\text{pr}(x, y)$ を $(X, Y) = (x, y)$ の同時確率、 $\text{pr}(y|x)$ を $X = x$ を与えたときの $Y = y$ の条件付き確率、 $\text{pr}(x)$ を $X = x$ の周辺確率とする。

さて、ランダム割りつけが適切に行われ、ドライバーがその割りつけにしたがう場合、 X と (Y_{x_1}, Y_{x_0}) は独立とみなせる。この条件を外生性という。外生性が成り立つとき、 $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ は

$$\text{pr}(Y_{x_j} > y) = \text{pr}(Y > y|x_j)$$

により推定することができる ($j = 0, 1$)。一方、観察研究においても、強い意味で無視可能である場合には $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ は識別可能となる¹⁹⁾。すなわち、 X について、 X と (Y_{x_1}, Y_{x_0}) を条件付き独立にするような変数集合 U が存在するとき、 U を与えたときに処理割りつけは無視可能である、あるいは (X, Y) に対して U は SITA (Strongly Ignorable Treatment Assignment) 条件を満たすという。この条件は、グラフィカルモデルに基づく統計的因果推論では、バックドア基準に対応する¹⁶⁾。SITA 条件を満たす U を観測できれば $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ は

$$\text{pr}(Y_{x_j} > y) = E_u\{\text{pr}(Y > y|x_j, U)\}$$

で与えられる ($j = 0, 1$)。ただし、 $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ を識別するのに SITA 条件を満たす変数集合の観測が不可欠というわけでないことに注意する^{16), 22)}。

3. 潜在反応モデルに基づく交通コンフリクト指標：PRIC

(1) 定式化とその解釈

本節では、Davis et al.⁵⁾のアイデアにしたがって、交通コンフリクト指標を定式化するために、図-1のような状況を考えよう。ここに、図-1にある U は、 Y に関連し、かつ X の影響を受けない共変量全体からなる変数の集合である。

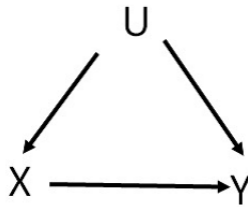


図-1 交通事故状況のデータ生成過程

図-1の X から Y への矢線は、 X から Y への直接効果が存在する可能性があることを示しており、 Y から X への矢線が存在しないことは、 Y は X の原因でないことを示している。また、 U から X を経由して Y へ向かう有向道は U が X をとおして Y へ影響を与える可能性があることを示している。

ここで、Davis et al.⁵⁾にしたがって、興味あるドライバーからなる母集団を以下のように分割する。

$(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y)$: 回避行動の有無に関わらず衝突事故を起こさないドライバー群。本報告では、この群に属するドライバーを「安全なドライバー」とよぶ。

$(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$: 回避行動をとれば (x_1) 衝突事故を起こさず、回避行動をとらなければ (x_0) 衝突事故を起こすドライバー群。本報告では、この群に属するドライバーを「標準的なドライバー」とよぶ。

$(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y)$: 回避行動の有無に関わらず衝突事故を起こすドライバー群。本報告では、この群に属するドライバーを「危険なドライバー」とよぶ。

$(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} > y)$: 回避行動をとらなければ (x_0) 衝突事故を起こさず、回避行動をとれば (x_1) 衝突事故を起こすドライバー群。本報告では、この群に属するドライバーを「不運なドライバー」とよぶ。

この分割にしたがって、本報告では交通コンフリクト指標 Potential Response Inspired Conflict (PRIC) を以下のように定義する。

$$\text{PRIC} = \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \quad (1)$$

(1) 式は標準的なドライバーが回避行動をとり衝突事故を起こさない確率を意味している。このとき、(1) 式は

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\ &= \frac{\text{pr}(Y_{x_0} \leq y | x_1, Y > y)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} \text{pr}(x_1, Y > y) \end{aligned} \quad (2)$$

と書き直すことができる。したがって、 $\text{pr}(Y_{x_1} > y | x_0, Y \leq y) = 0$ のとき PRIC は 1 となり、 $\text{pr}(Y_{x_0} \leq y | x_1, Y > y) = 0$ のとき PRIC は 0 となる。 $\text{pr}(Y_{x_1} > y | x_0, Y \leq y)$ は実際には回避行動をとらずに衝突事故を起こしたドライバーが回避行動をとったならば衝突事故を起こさなかったであろう反事実の確率であり、統計的因果推論においては、Robins and Greenland¹⁸⁾によ

て原因の確率、Pearl¹⁶⁾によって必要性の確率と呼ばれているものに相当する。 $\text{pr}(Y_{x_0} \leq y | x_1, Y > y)$ は現実には回避行動をとって衝突事故を起こさなかったドライバーが回避行動をとらなかつたならば衝突事故を起こすであろう反事実の確率であり、Pearl¹⁶⁾によって十分性の確率と呼ばれているものに相当する。必要性の確率、十分性の確率から生まれる自然な概念として必要十分性の確率を考えることができるが、この確率は PRIC の分母である $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ によって定義される。必要十分性の確率は回避行動をとることが衝突事故を起こさない必要かつ十分な原因である程度を表したものと解釈することができる。原因の必要性、十分性、必要性について、一般的な議論については黒木¹⁰⁾や Pearl¹⁶⁾を、交通工学の観点からの議論については Davis^{3),4)}を参照されたい。

(2) PRIC の識別可能条件

PRIC は一般に $\text{pr}(x, Y < y)$ と $\text{pr}(x, Y_{x'} \leq y)$ ($x, x' \in \{x_1, x_0\}, x \neq x'$) のいずれか一方のみの情報ではもちろんのこと、かりに両方の情報が得られたとしても何らかの因果的仮定を付加しなければ識別することはできない。ここに、PRIC が識別可能であるとは、PRIC が観測変数の確率分布によって記述できることをいう。

PRIC の識別可能条件を与えるために、まず、母集団が標準的なドライバーから構成される場合、すなわち、 $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = 1$ であるケースを考えよう。このとき、 $\text{pr}(x_0, Y > y) = \text{pr}(x_1, Y \leq y) = 0$ であることに注意すると

$$\text{PRIC} = \text{pr}(x_1, Y > y) = \text{pr}(Y > y) \quad (3)$$

および

$$\text{PRIC} = \text{pr}(x_1) \quad (4)$$

を得ることができる。 Y が TTC などの既存の交通コンフリクト指標に基づいて定義されているとき、(3) 式は、PRIC が既存の交通コンフリクト指標に関する確率的評価指標となっていることを意味する。つまり、母集団が標準的なドライバーに限定されるような場合においては、TTC など既存の交通コンフリクト指標を用いても交通コンフリクトを統計的な観点で適切に評価できることを示唆している。また、 $Y > y$ は衝突事故が起こっていない事象を示していることから、PRIC の値が大きい場合には衝突事故を起こさない確率が高く、PRIC の値が小さくなるほど衝突事故を起こす確率が高くなることを意味している。一方、 $\text{pr}(x_1)$ はドライバーが回避行動をとった確率であることから、PRIC の値が大きい場合には回避行動をとったドライバーの割合が多く、PRIC の値が小さくなるほど回避行動をとったドライバーの割合が小さくなることを意味している。

次に、外生性を仮定すると、

$$\text{PRIC} = \text{pr}(x_1) \quad (5)$$

を得ることができる。Perkins and Harris¹⁷⁾ は

“Over 20 objective criteria for traffic conflicts (or impending accident situations) have been defined as to specific accident patterns at intersections. Essentially, these traffic conflicts are defined by the occurrence of evasive actions, such as braking or weaving, which are forced on a driver by an impending accident situation or a traffic violation.”

と述べ、回避行動の有無という観点から交通コンフリクトの概念を導入しているが、(4)式は標準的なドライバーしか存在しない状況、そして(5)式は外生性が仮定できる状況においては、Perkins and Harris¹⁷⁾の考察が統計的な観点から正当化されることを示唆している。

最後に、母集団が標準的なドライバーに限定されることも外生性も仮定できない場合について考える。このとき、興味ある母集団に属するドライバーが $Y_{x_1} \geq Y_{x_0}$ を満たすものとしよう。この仮定は単調性と呼ばれており、不運なドライバーが存在しないことを意味する。単調性の仮定の下では $\text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} > y) = 0$ が成り立つことに注意すると

$$\text{PRIC} = \frac{\text{pr}(Y > y|x_1) - \text{pr}(Y_{x_0} \geq y|x_1)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y) - \text{pr}(Y_{x_0} \geq y)} \text{pr}(x_1)$$

が得られる。 $\text{pr}(Y > y|x_1) - \text{pr}(Y_{x_0} \geq y|x_1)$ は実際に回避行動をとったドライバー群を標準母集団としたときの因果リスク差と呼ばれるものであり、 $\text{pr}(Y_{x_1} > y) - \text{pr}(Y_{x_0} \geq y)$ は母集団全体を標準母集団としたときの因果リスク差と呼ばれるものとなっている²⁰⁾。したがって、これら2つの因果リスク差の割合は、回避行動による衝突事故への影響が母集団全体と標準ドライバー群でどの程度異なるのかを示した尺度となっている。また、SITA条件を満たす共変量集合 U が観測可能であるとき、一致性より

$$\text{pr}(Y_{x_0} \geq y|x_1) = E_u(\text{pr}(Y \geq y|x_0, U)|x_1)$$

$$\text{pr}(x_1, Y_{x_1} \geq y) = \text{pr}(x_1, Y \geq y),$$

$$\text{pr}(Y_{x_0} \geq y) = E_u(\text{pr}(Y \geq y|x_0, U)),$$

$$\text{pr}(Y_{x_1} \geq y) = E_u(\text{pr}(Y \geq y|x_1, U))$$

となる。したがって、単調性の仮定の下で SITA 条件を満たす共変量集合 U を観測可能であれば、PRIC は識別可能となる。

一般に、交通コンフリクト技術を適用する際には、 U として運転状況（車間距離、車両間の相対速度、加速度、ドライバーの反応時間など）が考慮され、計測されることが多い。これに対して、本来であれば、 U には路面状況（滑りやすさなど）や車両メンテナンス状況

（タイヤの摩耗状態など）を含む車両挙動に関連する重要な因子も含まれるにもかかわらず、これらを考慮に入れることなく解析が行われているケースを見かける。このような場合には、一般に、PRIC は識別可能とならないため、何らかの因果的な仮定において感度解析を行うことが重要となる。

4. “The 100-Car Naturalistic Driving Study”データへの応用

本節では、前節までの結果を Dingus et al.⁶⁾によって与えられた“The 100-Car Naturalistic Driving Study（以降、100-Car Study と呼ぶ）”データに適用する。このデータは、多様かつ複雑な衝突事故への対策や差し迫る危険な状況に対するドライバーの認知心理学的な側面を明らかにするために、2003年1月から2004年7月の期間に100人のドライバーから約1年以上をかけて、National Highway Traffic Safety Administration と the Virginia Department of Transportation によって収集されたものである。ドライバーは新聞広告をとおして募集されており、“naturalistic”なデータが収集されていることから、100-Car Study は典型的な観察研究であると判断できる。Dingus et al.⁶⁾は、このデータに基づいて、ドライバーの運転操作や行動、周辺車両状況や天候などを含む運転環境などといった周辺状況と衝突事故の発生可能性との関連性について詳細な報告を行っている。

まず、本報告では、100-Car Study において、後続車を回避行動の観察対象車両とした加害追突状況を取りあげることにし、そのデータを表-1に与える。ここに、回避行動あり (x_1) は、車両性能の限界に近いブレーキング、ステアリング、加速(減速)やそれらの組み合わせによる運転操作を表しており、回避行動なし (x_0) は、ドライバーが回避行動を一切とらないことを示している。また、衝突あり (y_0) は、観測対象車両が他の車両や物体に接触していることを示しており、前節までの議論では $Y \leq y$ に相当する。一方、衝突なし (y_1) について、Dingus et al.⁶⁾は衝突事故が引き起こされる可能性の程度を、(a) 加減速度の値、(b) 車間距離と相対速度、(c) ドライバー自身による「イベントボタン」の押下や分析者によるビデオ画像に基づいた判断といった主観的評価、の3つの観点から総合的に判断し、4段階で評価している。しかし、本報告では、観測対象車両が他の車両や物体に接触することないものの衝突寸前の差し迫る危険な状態（ニアミス）のみを対象とし、 $Y > y$ とみなす。

加害追突のコンフリクト状況（衝突もしくはニアミス）は、一般に後続車両のドライバーの回避行動が衝突に対して支配的であると考えるため、前出の標準

表-1 加害衝突データ

	回避行動あり (x_1)	回避行動なし (x_0)
衝突なし (y_1)	380	0
衝突あり (y_0)	8	7

的なドライバー群が母集団, つまり $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \simeq 1$ と仮定しても自然であると考える. この仮定の下では,

$$\text{PRIC} \simeq \text{pr}(Y > y) \simeq \text{pr}(x_1) \quad (6)$$

となる. そこで, 表-1の事例をとおして(6)式が成り立つかどうかを確認してみよう. 表-1における交通コンフリクト指標の推定値は(3)式より $\text{PRIC} = \text{pr}(y_1) = 380/395 = 0.962$ (標準誤差:0.010)である. 一方, (4)式より $\text{PRIC} = \text{pr}(x_1) = 388/395 = 0.982$ (標準誤差:0.007)であり, $\text{pr}(x_1)$ と $\text{pr}(y_1)$ に大きな差異はない. 衝突事故が引き起こされる可能性の程度が Y によって適切に評価されていることが前提であるが, このことは, $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \simeq 1$ のもとでは, 回避行動に基づく主観的方法, 時間的・空間的な物理量に基づく客観的方法, あるいは Dingus et al.⁶⁾ のような主観的方法と客観的方法の両方に基づく総合的判断による交通コンフリクトの定量的評価が, PRIC をとおして統計的な観点から正当化されることを示唆する.

次に, 100-Car Study において, 前走車両を回避行動の観察対象車両とした被害追突状況について考えてみよう. このデータを表-2に与える.

表-2 被害衝突データ

	回避行動あり (x_1)	回避行動なし (x_0)
衝突なし (y_1)	70	21
衝突あり (y_0)	5	7

表-2に基づいて $\text{pr}(y_1)$ と $\text{pr}(x_1)$ をそれぞれ計算すると, $\text{pr}(y_1) = 91/103 = 0.883$ (標準誤差:0.032), $\text{pr}(x_1) = 70/103 = 0.728$ (標準誤差:0.043)となる. これらの推定値は大きく食い違っていることから, $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \simeq 1$ を仮定することは適切ではないと推察される. 実際, 被害追突の場合は, 一般に前走車両のドライバーの回避行動が衝突に対して支配的であるとは考えにくく, 解析対象となる母集団にはさまざまなドライバーが存在していると考えるのが自然である. このような状況においては, 既存指標による交通コンフリ

クトの評価は困難であることが確認できる. 一方, 単調性が仮定できる場合には, X と Y について SITA 条件を満たす共変量集合 U を観測することで, 被害追突のような状況においても, PRIC を用いてドライバーの危険状態を定量的に評価することができる. このような共変量集合は, 路面状況(滑りやすさなど)や車両メンテナンス状況(タイヤの摩耗状態など)であるが, 100-Car Study ではこれらの要因は観測されていないため, 残念ながら PRIC を推定することはできない. このような場合には, 感度分析を実施したり, PRIC の存在範囲を評価することが重要となる.

5. まとめ

本報告では, 既存の交通コンフリクト指標の問題点を指摘するとともに, 統計的因果推論のフレームワークを利用した交通コンフリクト指標として, Potential Response Inspired Conflict (PRIC) を提案し, その性質のいくつかをあきらかにした. そのうえで, 交通工学の観点から比較的合理的な仮定の下では, 既存の交通コンフリクト指標は ICSTCT¹⁾ が与えた交通コンフリクトの定義を反映した指標となっていることを明らかにした. また, (i) 母集団に標準的なドライバーしかいない, (ii) 外生性が成り立つ, (iii) 単調性が成り立ちかつ十分な共変量集合を観測できるといった状況では, PRIC は識別可能であることを示した. 続いて, Dingus et al.⁶⁾ によって与えられた “The 100-Car Naturalistic Driving Study” データへ PRIC を適用し, 交通コンフリクト状態を考察した. 観察データがこれらの仮定が成り立たない交通状況において採取されている場合には, PRIC に基づいた感度解析を行うことが重要となるが, これについては研究を進めている段階にある. しかしながら, 本報告の結果は, 交通コンフリクトの定義にある反事象的表現を踏まえたものであり, 交通コンフリクト状態を適切に評価するのに重要な役割を果たすものと考えられる.

謝辞: 本研究は, 文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)による研究助成を受けて行われた.

参考文献

- 1) Amundsen, F. and Hyden, C.: *First Workshop on Traffic Conflicts, Institute of Transport Economics, 1977.*
- 2) Chin H., Quek S.: Measurement of traffic conflicts, *Safety Science*, Vol.26, pp.169-185, 1997.
- 3) Davis, G. A.: Accident reduction factors and causal inference in traffic safety studies: a review, *Accident Analysis and Prevention*, Vol.32, pp.95-109, 2000.
- 4) Davis, G. A.: Bayesian Reconstruction of Traffic Accidents and the Causal Effect of Speed in Intersection and Pedestrian Accidents, *University of Minnesota, Center for Transportation Studies, ITS Institute, Technical Report, CTS 06-01B, 2006.*

- 5) Davis, G. A., Hourdos, J., Xiong, H., and Chatterjee, I.: Outline for a causal model of traffic conflicts and crashes, *Accident Analysis and Prevention*, Vol.43, pp.1907-1919, 2011.
- 6) Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J. D., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D. J., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z. R., Jermeland, J. and Knippling, R. R.: The 100-car naturalistic driving study, Phase II-results of the 100-car field experiment, *National Highway and Traffic Safety Administration*, HS-810 593, 2006.
- 7) Hauer, E. and Garder, P.: Research into the validity of the traffic conflicts technique, *Accident Analysis and Prevention*, Vol.18, pp.471-481, 1986.
- 8) Hyden, C.: The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique, *Department of Traffic Planning and Engineering, Lund University, Lund, Sweden*, 1987.
- 9) 飯田恭敬, 宇野伸宏, 井坪慎二, 菅沼真澄: 織込み部におけるコンフリクト分析と車線変更のモデル化, 土木計画学研究・講演集, No.24, 2001.
- 10) 黒木学: 統計的因果推論における原因の確率とその評価, *統計数理*, 62, pp.45-58, 2014.
- 11) Migletz, D. J., Glauz, W. D. and Bauer, K. M., Relationships between traffic conflicts and accidents, *US Department of Transportation, Federal Highway Administration*, FHWA-RD-84-041, 1985.
- 12) 元田良孝, 道路の安全性評価と錯綜手法に関する研究, 東京工業大学博士論文, 1992.
- 13) Oppe, S.: Joint international study for the calibration of traffic conflict techniques, *Background paper ICTCT-Meeting, Copenhagen*, 1983.
- 14) Parker, M. R. and Zegger, C. V., Traffic Conflict Techniques for Safety and Operations – Observers Manual, *US Department of Transportation, Federal Highway Administration*, FHWA-IP-88-027, 1989.
- 15) Pearl, J.: Probabilities of causation: Three counterfactual interpretations and their identification, *Synthese*, 121, pp.93-149, 1999.
- 16) Pearl, J.: Causality: Models, Reasoning, and Inference, *The 2nd Edition. Cambridge University Press*, 2009. 黒木学訳, 統計的因果推論 -モデル・推論・推測-, 共立出版, 2009.
- 17) Perkins, S. R. and Harris, J. L.: Traffic conflict characteristics: Accident potential at intersections, *General Motors Research Publication*, GMR-718, 1967.
- 18) Robins, J. M. and Greenland, S.: The probability of causation under a stochastic model for individual risk, *Biometrics*, Vol.45, pp.1125-1138, 1989.
- 19) Rosenbaum, P. and Rubin, D.: The central role of propensity score in observational studies for causal effects, *Biometrika*, Vol.70, pp.41-55, 1983.
- 20) Rothman, K. J., Greenland, S. and Lash, T. L.: *Modern epidemiology*. Lippincott Williams & Wilkins, 2008.
- 21) Spicer, B. A.: Study of traffic conflicts at six intersections, *Transport and Road Research Laboratory Report*, LR551, 1973.
- 22) Tian, J. and Pearl, J.: A General identification condition for causal effects, *Proceedings of the Eighteenth National Conference on Artificial Intelligence*, pp.567-573, 2002.
- 23) Uno, N., Iida, Y., Itsubo, S., and Yasuhara, S.: Microscopic Analysis of Traffic Conflict Caused by Lane-Changing Vehicle at Weaving Section, *Proceedings of The 13th Mini-Euro Conference "Handling Uncertainty in Transportation Analysis of Traffic and Transportation System*, pp.143-148, 2002.
- 24) 若林拓史, 高橋吉彦, 新美栄浩, 蓮花一己: 交通流ビデオ解析システムを用いた交通コンフリクト分析と新しい危険度評価指標の提案, 土木計画学研究・論文集, No.20, pp.949-956, 2003.
- 25) Zheng, L., Ismail, K. and Meng, X.: Traffic conflict techniques for road safety analysis: open questions and some insights, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.41, pp.633-641, 2014.

(2015. 7. 31 受付)

A New Traffic Conflict Measure Using Potential Outcome Models

Kentaro YAMADA and Manabu KUROKI

We propose a new traffic conflict measure, “Potential Response Inspired Conflicts (PRIC)”, taking the counterfactual sentence “there is a risk of collision if their movements remain unchanged” into account, based on the potential outcome models. Such a counterfactual sentence is used in the widely acceptable definition of the traffic conflict given by ICSTCT¹⁾. First, we point out that most of the existing traffic conflict measures may not take such a counterfactual sentence into account. To solve this problem, we introduce the potential outcome model used in causal inference to the concept of the traffic conflict, and formulate the PRIC. In addition, we provide three identification conditions for the PRIC, and show that the existing traffic conflict measures can statistically reflect the definition of the traffic conflict through the PRIC under certain conditions, in the sense that they can be expressed by the PRIC. Finally, through the application of the PRIC to “The 100-Car Naturalistic Driving Study⁶⁾”, we discuss the usefulness and limitation of the traffic conflict measures.