

在来幹線鉄道の踏切道におけるコンフリクト指標に関する基礎的考察

高石 大輔*・谷口 順一朗・岩倉 成志 (芝浦工業大学)

Basic Consideration to Develop Traffic Conflict Index on Local Railway Crossing'

Daisuke Takaishi*, Junnitirou Taniguchi, Seiji Iwakura (Shibaura Institute of Technology)

Recently, improvement of railway crossings is vital to carry out high speed driving of the existing railway, to introduce the free-gauge-train and to increase operation stability and safety. In provinces, it is hoped to consider effective measures to crossings at low cost. This study aims to examine conflict index for evaluation of danger by generation of conflict by pedestrian and car that passes in crossing and to apply conflict index to conflict simulation in crossings composed by multi agent simulation.

キーワード：コンフリクト，踏切，交通錯綜，マルチエージェントシミュレーション

Keywords : conflict index , railway crossing , traffic complication, multi agent simulation

1. はじめに

近年，早期の利用者利便の確保，地域への経済効果，観光地活性化を目指し，在来線の高速走行が可能となる新在直通運転の導入や標準軌と狭軌との軌間変換が可能な軌間可変電車の開発が進められている．これらのメリットとしては，低廉なコストで，所要時間の短縮や乗換の排除などのサービス向上を図れる点が挙げられ，現在は山形新幹線（福島～新庄）と秋田新幹線（盛岡～秋田）の2路線で新在直通運転が導入されている．一方でデメリットとして，高速運転化による踏切部での危険度の上昇が挙げられる．列車の運行安定性を高め，列車利用者と通行者双方の安全性を確保するためには踏切部の改良が不可欠である．本来は列車が高速で通過する踏切全箇所において，根本的対策である道路と鉄道の立体交差事業を推し進め，踏切の統廃合を行っていくべきである．しかし，新在直通運転の導入が期待される地方部では都市部と比べ交通量が少なく踏切改良工事の費用対効果が低いことや財政上の制約などの観点から現状のまま残置される踏切が散見される．地方部においては低廉かつ効果的な対策案が切望されている．

しかしながら，各踏切部が抱える危険性の構成要素はいまだ不明瞭であり，踏切改善対策案の安全性向上の評価手法や評価指標もいまだ確立されていないのが現状である．

そこで本研究においては，踏切部における危険性の大きさを図るコンフリクト指標の確立を目指すとともに，改善対策案実施時の安全性向上の定量評価手法の検討を目的とする．地方幹線鉄道である山形新幹線（福島～新庄）の踏切を対象に，現地調査とシミュレーションシステムの開発を試みる．

以下，2．では既存の交通交錯の危険性を評価する指標を紹介する．3．ではシミュレータ構築の際に使用する各交通主体の挙動データ取得方法と実際に構築したマルチエージェントシミュレータの施策システムの紹介を行う．4．でいくつかの踏切改善対策案の安全性の評価結果を示す．5．は本研究で得られた知見の整理を行い，今後の課題や研究の方向性を述べる．

2. 既存のコンフリクト指標

事故は突発的に発生するため，事故発生時における詳細なデータを収集することは非常に困難であり，多大なる時間を要する．また，データ収集期間に物理的構造や周囲の状況，交通量などの条件が変化してしまうことも大いに考えられる．そこで現在は，数少ない事故の代わりに，事故と高い相関性が見られる現象の洗い出しをおこない，それらを事故の代替指標とし，危険性の評価を行うといった発想のもと，数多くの研究が進められている．これらの評価手法が確立すれば短時間かつ容易に危険性の評価が行えることとなる．

池之上¹⁾，若林ら²⁾，宇野ら³⁾は事故の代替指標としてコンフリクト（錯綜）に着目し危険性の評価を行っている．諸外国では回避行動を伴わない場合の衝突までの推定時間をTMTTC（後のTTC指標）とし，コンフリクトを定量的に定義する事が試みられている．コンフリクトに関しての研究は主に道路の合流部や織込み部，交差点部など比較的交通流が複雑化する部分を対象としており，対象物は車両のみに限定していることが多い．

池之上は，コンフリクトとは運転者による危険回避動作

または違反行為のことを指すと定義している。ここで挙げた回避動作とは制動動作もしくは進路変更動作のことを指す。また、違反行為とは交通法令の違反を指す。この研究において用いた技法が有用であるかを確認する為に、妥当性（コンフリクトと発生事故件数との相関性）、信頼性（観測者間の個人差）、再現性（日によるバラツキの大小）の3点による確認を行っている。確認方法としては諸外国の類似研究を整理するとともに、自国で取得したデータでの分析結果にて確認を行っている。結果としてはコンフリクトと事故との相関は0.277と良好とはいえない結果となっている。しかし、速度変化量や回避動作1件あたりの平均初速度などの種々の要因を取り込み、説明変数を6変数に増加させ重回帰分析を行った結果、重相関係数は0.896と飛躍的に向上している。

このような結果を受け若林らは、既存の指標は車間距離が接近した状況かつ高速交通流であるわが国の交通特性を反映するためには不適切であり、新たな交通コンフリクト指標が必要であると考察している。既存の指標の美点と欠点を整理した上で新たな指標としてPTTC指標の提案を行っている。PTTC指標とは先行車の進行方向が変化しない状態で速度変化が生じた場合に、後続車はその時点における速度と進行方向を維持したまま進行すると衝突するまでにかかる時間で定義される。

PTTCではTTC指標の欠点を補う為に両者の速度と2車間での距離を用いて危険性の評価を行うため、速度が拮抗している場合の危険性評価に適している。基本的考え方は宇野らの提案するPICUD指標と同様であるが、PICUD指標は相対距離差であるのに対し、PTTC指標は衝突までの時間である為、警告信号提供の閾値として利用するにはPTTC指標の方が便利である。今後の課題として、交通錯綜は複雑な現象であるため、複数指標の組み合わせの妥当性の検討を行っていきたいとしている。

本研究において扱う踏切部は歩行者と自転車、自動車が混在するような複雑な交通状況のため、総合的な危険度評価を行うためには複数指標の組み合わせによる評価が必要であると考えている。

楠神⁴⁾ 福田⁵⁾ は踏切部の危険性の評価手法として数量化理論を用いている。福田は28、楠神は30の説明変数を用いて重回帰分析を行っている。楠神においては実態調査の前後5年の事故件数データと踏切実態調査表より得られた踏切特性データを用いて各項目のパラメータの算出を行っている。モデルの妥当性については、モデル構築時に使用していない期間の事故データを用いて検証をおこなっているが、具体的な相関係数での検証は行われていない。算出されるパラメータは危険度の内訳を示すものであり、これらを吟味することによって危険の要因を把握することが出来るとしている。

また、福田は危険性の評価手法として、先に挙げた数量化理論を用いる他に、踏切シミュレータの活用も提案している。⁶⁾ コンピュータ内部で擬似的に現象を再現させるこ

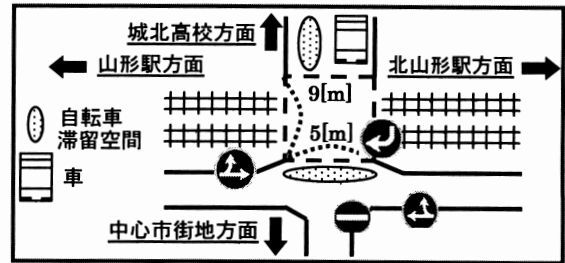


図-1 肴町踏切の概略と周辺交通規制図

とによって、踏切事故・支障や交通渋滞等をシミュレートできるシステムを開発している。

3. マルチエージェントシミュレータの構築

(3.1) 使用データの概要

本研究では新在直通運転が導入されている山形新幹線の軌道上に存在する肴町踏切を対象とした。肴町踏切は山形駅と北山形駅との間に位置する。図-1に肴町踏切の概略と周辺交通規制を示す。肴町踏切は過去10年間支障回数が20回にも及んでいる。幅員が狭小であるにもかかわらず対面通行であることや歩行者、自転車の滞留スペースが不足であることなどの問題を抱えている。また、中心市街地への自動車通勤路であるとともに、近接する高校への通学路となっており、8:00~8:20をピークに激しい交通錯綜が生じている。

挙動データは、踏切道内の交通状況を納めたビデオ画像より取得する。ビデオ画像は踏切近傍に高所作業車を設置し、高角度上方（地上高約13~15m）からデジタルビデオカメラで撮影した画像である。高角度から撮影した画像を用いる理由は、主体間でのオクルージョンの回避や座標変換処理時の誤差を減少させる為である。

得られたビデオ画像より各主体の挙動の軌跡の抽出を行う。0.5秒間隔に分割した画像において各主体の位置座標をマーキングし、数値化されたデータとして取得する。しかしながら、このデータはビデオ座標系であるため、現地測量を行い測地座標を取得した上で、射影変換法を用いて測地座標系への変換を行う。この位置座標データをもとに、各主体の挙動データを得る。

(3.2) マルチエージェントシステム

マルチエージェントシステムとは、それぞれ異なった判定アルゴリズムを持ち、自律的に行動を行うエージェントを複数設定し、各エージェント同士の相互作用のシミュレーションを行うシステムを指す。

踏切道内においては、衝突回避と通過時間短縮という単純な行動原理のもとで、各主体が相互影響を及ぼし合いつつ、自律的に行動判定を行っており、マルチエージェントシステムの適応性は高いと考える。

本研究では株式会社構造計画研究所が開発したプログラミングソフトウェアであるマルチエージェントシミュレータ artisocを使用することとした。artisocはVisual Basic言語をベースとし、操作性が高いといった特徴を有する。

次節以降でシミュレーション環境設定と行動ルール設定の2種類に大別し記述する。

〈3.3〉 シミュレーションの環境設定

(1) エージェント設定

エージェントには車と自転車を設定した。本来、歩行者もエージェントとして設定すべきではあるが、撮影時間帯の歩行者が非常に少なく、得られたサンプル数が少ないため、データの信頼性に乏しく、本研究ではエージェントから除外することとした。

(2) 空間設定

本研究では、シミュレーション上で扱う最少の数値である自転車エージェント幅、つまりは人間の肩幅に1セルの大きさを合わせるため、1セルを0.5m×0.5mと設定した。一般的に99%の人の肩幅は52.6cm以下であるとされ、完全に服を着た状態においては57.9cm以下の肩幅を持つとされている。

全体空間の設定としては踏切道内だけでなく周囲の滞留スペースによる影響も考慮したいため、踏切部を中心として半径約10mの道路構造を取り込んだものとした。

(3) 実行Step間隔の設定

人間の意思決定は瞬間瞬間に行われていると仮定し、実行Step間隔を0.1秒という短い間隔に設定することで、シミュレーション上での現実の反映を試みた。

(4) エージェント種ごとの運動能力

最高速度や加速度、減速度、減速率といった基本的な運動能力をエージェントの種類別に設定を行った。減速率とは現在の速度を1STEP前の速度で除した値のことを指す。設定には3.1で取得した画像より得られたデータを用いた。

〈3.4〉 行動ルールの設定

各交通主体の行動アルゴリズムを基本としてエージェントルールを設定する。各交通主体の行動アルゴリズムでは、そのときのエージェント自体の置かれている状況を条件文により場合分けを行い、場合分けした状況に即した行動を選択させるルールとなっている。

以降にその条件例を示す。

(1) 自転車エージェントの行動ルール

a) 障害検知設定

エージェントを中心とし、半径5m以内かつ前方180°以内の範囲に存在する物体を障害として検知する。さらにその中から、自分の進行ルート上に存在し、かつ一番手前に存在する障害を特定する。なお、遮断機付近では遮断機の開閉状態の検知を行い、閉塞時は遮断機手前1mで停止する。

b) 方向補正設定

障害回避行動のひとつとして設定する。障害対象エージェントが対向方向と同方向の場合で異なる判定条件を課す。前者の場合は、回避行動を行う際に、同方向で先行しているエージェントの背後に出来るスペースに優先して進行方向の補正を行う「追従回避」と、単純に周囲の空き空間を検知し、進行方向補正を行う「通常回避」の2パターンよりどちらか一方を選択する。後者の障害対象エージェント

が同方向の場合は通常回避を行う。進行方向補正角度は5°/Stepとする。

なお、城北高校方面に向かう際に交差点を曲がる自転車エージェントには以下の設定を追加した。自転車と地面がなす角（バンク角）が θ の時、速度 v での回転半径 R は $R = v^2 \tan \theta / g$ で表わされる。バンク角を75°で一定とし、速度とバンク角から算出した回転半径より補正に要する円周長、Step数を求める。Step数と角度差よりStep毎の補正角度 ω を算出し、補正值として使用する。

c) 減速設定

障害回避行動のひとつとして設定する。障害対象エージェントに対して方向補正を行う必要がない場合を選択するものとする。ここでの減速は画像データより取得した減速率に準ずるものとする。

(2) 車エージェントの行動ルール

a) 障害検知設定

自転車エージェント同様に進行方向上の障害を検知する。障害までの接近距離は次に記述するドライバー特性に依存する。なお、遮断機付近では遮断機の開閉状態の検知を行い、閉塞時は遮断機直前で一旦停止する。

b) ドライバー特性設定

3.1で取得した画像データより、障害エージェントへの接近距離はドライバーごとに大きな相違が観測された。そこで変数を用いることでドライバーが障害に接近する距離に幅を設け、個人特性の反映を行う。変数は障害までの距離を車速度で除し、算出される推定障害到達Step数を用いる。本研究ではこの変数を40~60までの値をとるものと設定した。

〈3.5〉 シミュレーションの再現性

図-2に画像データとシミュレーション結果における軌跡、表-1に平均踏切通過時間を示す。画像データ上の軌跡とシミュレーション結果における軌跡は多少の相違が見受けられる。両方向ともにシミュレーション結果の方が、個体間にあまり相違が見受けられず、狭い範囲に軌跡が集中している。また、平均踏切通過時間においては画像データとシミュレーション結果では、両方向とも0.5秒前後の相違がみられた。エージェントの行動ルールや認知能力、運動能力の設定などのさらなる精緻化が今後必要である。

4. 改善対策案による安全性向上の評価

上記のシミュレーションを行うことによって、各エージェント別の1Step毎のX、Yの位置座標データや方向補正回数などが数値出力される。踏切改善対策案ごとの数値データを取得することで踏切改良後の安全性の向上を定量的に評価することが可能となる。

本研究にてシミュレーションした複数の踏切改善対策案の概要とその結果を以下に示す。

〈4.1〉 対策案の概要

対策1) 2段階停止線

停止線の2段階化によって自動車を自転車より後方に

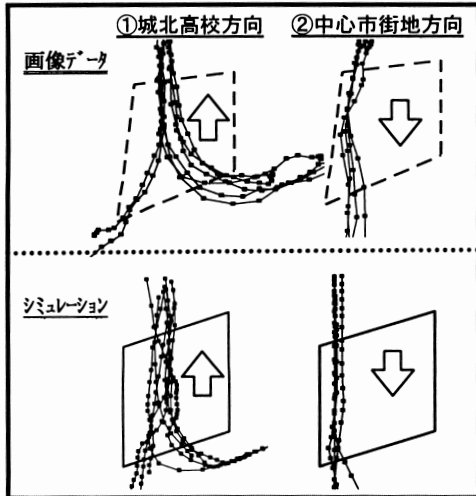


図-2 画像データとシミュレーションの軌跡比較

表-1 平均踏切通過時間(秒)の比較

	実測値	推定値	差分
城北高校方向	5.71	4.98	(-0.73)
中心市街地方向	5.34	4.74	(-0.60)

停止させる。これにより、自転車と自動車の踏切道内侵入タイミングに時間差を生じさせ、自転車通行可能空間の拡大を図る。

対策2) 車両進入禁止

踏切道の車両進入禁止の設定を行う。それによって、自転車の自由通行可能空間の拡大を図る。1台で幅員の半分を占有する自動車を排除することにより、交通流の円滑化を図る。

対策3) 車両進入禁止+通行区分

対策2)に、自転車の通行区分の設定を追加する。これにより踏切道内交通の整流化を図り、回避行動の抑制を試みる。通行区分は踏切中央部を中心市街地方向の通行空間、踏切両脇部が城北高校方向の通行空間とした。

対策4) 拡幅+通行区分

踏切道拡幅により自転車の通行空間の拡大を行う。さらに、通行区分を設け、踏切道内における交通錯綜の抑制を図る。拡幅は車の滞留位置関係などを考慮し、左側のみとする。通行区分は踏切中央部が城北高校方向の通行空間、拡幅部を含む踏切両脇部が中心市街地方向の通行空間とした。

〈4.2〉 対策案の比較、考察

シミュレート結果より算出された各対策案の通過秒数と方向補正回数を表-2に示す。シミュレート回数は各対策案とも20回とした。方向補正時は直進時に比べ不安定な状態であり、危険な状況を誘発する可能性が高いと考え、方向補正回数を危険度の評価指標の1つの要素とした。また、危険とされる錯綜状況との遭遇回数と踏切部の通過秒数は比例すると考え、通過秒数も危険度の評価指標の1つの要素とした。本研究においては、これら2つの要素から危険度の評価を行った。

表-2 各対策案のシミュレーション

		現状	対策(1) (差分)	対策(2) (差分)	対策(3) (差分)	対策(4) (差分)
城北高校 方向	通過秒数 (秒)	4.98	5.99 (+1.01)	5.64 (+0.66)	5.49 (+0.51)	6.13 (+1.15)
	方向補正回数 (回)	6.53	8.49 (+1.96)	6.11 (-0.42)	3.34 (-3.19)	6.18 (-0.35)
中心市街地 方向	通過秒数 (秒)	4.74	5.67 (+0.93)	5.29 (+0.55)	5.21 (+0.47)	4.17 (-0.57)
	方向補正回数 (回)	4.88	8.10 (+3.22)	6.36 (+1.48)	2.33 (-2.55)	2.79 (-2.09)

対策1)と対策2)においては対策2)の城北高校方面の方向補正回数に若干の減少が見られるものの、その他の数値は増加傾向を示す。よってこれらの対策によって交通錯綜状態は改善されず、安全性が向上したとは言い難いと考えられる。これは自転車の自由走行空間の拡大により、市街地方面へ向かう自転車が横長に滞留した状態で踏切道内に進入し、錯綜が複雑化したことが原因である。

対策3)と対策4)は方向補正回数が両方向とも減少しており、踏切道内における交通錯綜状況が緩和されている。但し、対策3)では両方向、対策4)においては城北高校方向にて通過秒数が増加傾向を示している。通行可能空間が限定されたことにより速度低下が生じている。方向補正回数は減少傾向を示すものの、通過秒数は増加傾向を示すといった一長一短の様相を示しており、大幅な安全性向上には至っていない。

上記の結果より自転車の自由走行空間の創出だけでは十分な改善効果は得がたいと推察される。しかし、進行方向ごとの通行帯分離などの他の対策と複合させて1つの対策とする事で、交通錯綜の抑制に効果的に働くと考えられる。

5. おわりに

本研究では、シミュレーション上で検討した4種類の踏切改善対策案の安全性向上に対する効果を、通過秒数と方向補正回数にて評価を行った。今回は危険度をはかるコンフリクト指標として、減速を表す通過秒数と危険回避行動を表す方向補正回数の2項目を使用するに留まったが、今後は複数のコンフリクト指標を作成し、比較検討をおこなっていきたいと考えている。

文 献

- (1) 池之上:「交通事故と交通安全対策」,交通工学,18巻,6号, Pp23-32 (1983)
- (2) 若林,高橋,新美,蓮花:「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,Vol20, No4,pp949-956 (2003)
- (3) 宇野,飯田,安原,菅沼:「一般織込み部における客観的コンフリクト分析と速度調整システムの構築」,土木計画学研究・論文集,Vol20, No4, pp989-996 (2003)
- (4) 楠神:「踏切危険度評価システムの開発」,日本鉄道技術協会誌,36巻,8号, pp21900-21902 (1993)
- (5) 福田:「鉄道の安全確保と評価」,日本機械学会年次大会講演論文集, Pp810-811 (1999)
- (6) 福田:「踏切シミュレータの開発について」,日本鉄道技術協会誌, 37巻,2号, pp22325-22328 (1994)