3D CG 鏡像シミュレーション法に基づく交差点出会い頭事故事例分析*

西村洋^{*1}, 野口絵理香^{*1}, 森みどり^{*2}, 久保登^{*2}, 堀野定雄^{*1}Ergonomic Case Study of a Crossing Collision at an Intersection
Based on a 3-Dimensional Computer Visibility SimulationHiroshi NISIMURA, Erika NOGUCHI, Midori MORI^{*2}, Noboru KUBO and Sadao HORINO^{*2} Faculty of Engineering, Kanagawa University
Rokkakubashi 3-27-1, Kanagawa-ku, Yokohama, 221-8686 Japan

This paper discussed the effectiveness of a visibility simulation method using 3-dimensional computer graphics (3D CG) to analyze the causes of crossing collision and to propose an optimal solution. Crossing collisions occur partly because of the poor quality of visual environment at intersections which consist of direct visibility and indirect visibility provided by traffic convex mirrors. The authors assessed the indirect visibility and also proposed the optimal solution for installing mirror at an uncontrolled intersection where crossing collisions took place repeatedly. The result of the 3D CG simulations confirmed that blind areas in the mirror image were critical to crossing collisions and they could be reduced by a slight adjustment of the position and angle of the mirror. Road administrators can surely improve the visual environment at intersections with optimal visible and blind distance along the crossing road based on the results. In conclusion, the optimal conditions on installation of mirrors as preventive measures can be assured by the objective method and the systematic analysis of traffic accidents could be carried out more precisely and efficiently.

Key Words : Simulation, Optimal Design, Ergonomics, Traffic Accident, Traffic Convex Mirror, Visibility

1. はじめに

警察庁交通局が発行する交通統計によると、2008 年の人身事故件数は 766,147 件であり、ここ数年来減少傾向にあるものの、依然高水準にある。全事故に占める事故類型別の発生割合は追突事故が最も多く 31.2%、次いで出会い頭事故が 27.2% を占め⁽¹⁾、出会い頭事故の多くは生活道路の無信号交差点で発生している⁽²⁾。

出会い頭事故に関する研究は、道路交通管理や安全教育を重視する視点からヒューマンエラーと人的要因に焦点を当てた研究⁽³⁾やドライバーの視認行動特性に着眼した研究⁽⁴⁾など、様々な視点から行われてきた。しかし、出会い頭事故が多発する生活道路交差点の道路環境がドライバーの認知・行動に及ぼす影響に関する研究は数少なく⁽⁵⁾⁽⁶⁾、カーブミラー（道路反射鏡ともいう）を含む交差点視環境について定量的な検討を主眼としていない。これに対して、著者らは、交差点接近時のドライバーからみた左右見通しに着眼し、交差点の直接視界および直接視界を補完すべきカーブミラーによる間接視界の良否と事故発生状況には関連性があること、カーブミラーで良好な視界を確保する条件などについて、人間工学の観点から明らかにしている⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

従来、十分な視認性を持つカーブミラー設置条件については満足な公的指針がなく⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、視認性を保証するカーブミラー設置方法論や具体的効果の検討⁽¹²⁾も充分なされてきたとはいえない。

そこで、著者らは、現場での設置作業以前に、カーブミラー設置・調整条件等の検討を精密かつ定量的に机上で行えるように、3 次元コンピュータグラフィックス(以下、3D CG)手法を用いたカーブミラー鏡像シミュレーション環境を構築した⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。カーブミラーの設置条件検討に 3DCG 環境を用いるのは、カーブミラーがさまざま

* 原稿受付 2010 年 8 月 20 日

^{*1} 神奈川大学 工学部 (〒221-8686 神奈川県横浜市神奈川区六角橋 3-27-1)^{*2} 正員, 神奈川大学 工学部

E-mail: mori@kanagawa-u.ac.jp

な曲率を持つ曲面鏡であり、単純な入射角・反射角の条件を用いて、作図や通常の CAD ソフトウェアなどで鏡像範囲を検討するのは非常に困難なためである。使用した汎用 3DCG ソフトウェアは、鏡像範囲を忠実に計算する「レイトレーシング機能」が使用でき、実際の鏡像に忠実な描画が可能であることから、構築した環境を用いて、交差点環境やカーブミラー鏡像を再現し分析・評価することができる。

本論文では、構築したシミュレーション環境を出会い頭事故が発生したフィールドに適用し、事故原因分析と再発防止策の検討における有効性を検討、本手法が迅速、精密かつローコストな検証手法であることを実証した。

2. 方 法

2・1 対象フィールドと事故概要

神奈川県茅ヶ崎市の住宅街生活道路(片側 1 車線の市道)にある無信号・カーブミラー設置丁字路(以下「交差点 N」、図 1)で、図中の③非優先道路を右折した乗用車が、①ー②優先道路を右方(北)から走行してきた自転車と出会い頭に衝突する人身事故が発生した(2009 年 6 月, 15 時頃, 天候: 晴れ)。乗用車ドライバーの証言によると、交差点境界線付近でカーブミラーを見て左右の安全を確認し、時速 5~6km ぐらいで右折しようとした時には、自転車はミラーに映っていなかった、という。

Fig. 1 The T-shaped uncontrolled intersection with traffic convex mirror where the crossing collision occurred., the photo was taken from the eye-point of the driver in the passenger car in Fig. 5 (Chigasaki City, Kanagawa, Japan)

2・2 現地調査

交差点 N とその周囲において、道路構造・寸法や道路上の電柱など公共施設、隣接する民家など建造物の寸法・位置等を実測するとともに、標識・標示、カーブミラー諸元(素材, 曲率半径, 直径, 位置, 高さ, 角度), 交通環境等の実態を調査した。なお、対象としたカーブミラーは民有地内に設置されているため、設置角度(水平角)は実測しておらず、シミュレーション条件を検討する参考値として、写真計測法による推定を行った。カーブミラー設置角度(俯角および水平角)の定義は 2・5・1 項で、水平角の推定方法については 3・1 節で詳述する。

また、ドライバー証言を確認するため、③非優先道路境界線に位置する乗用車のドライバーアイポイント (EP: 地上高 1.2m, 境界線から 1.8m 手前, 道路左端から 2.5m)位置から直接視界・カーブミラー間接視界を観測し、死角となる範囲を特定した。

2・3 シミュレーション手法の利用

3D CG を活用したシミュレーションで交差点環境を再現した先行研究⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾では、現実の交差点とシミュレーション結果のカーブミラー鏡像がよく一致すること、カーブミラーの設置角度 1 度の差でミラーによる視認距離が 10m 以上も変化する場合があるなどカーブミラーの最適設置範囲は狭いことが分かった。著者らが開発したシミュレータの概要は以下の通りである。

2・3・1 開発環境

市販の汎用型 3D CG ソフトウェアエンジンを用いて、カーブミラー鏡像および交差点とその周辺の道路、建物、自動車などが実物に忠実に再現できるシミュレーション環境を構築した。本シミュレーション環境では、物体および鏡像の形状、色彩、明るさ、鏡面反射率などの設定などが任意に行え、視点（EP）を決めることで実際と同様の交差点視界および鏡面内鏡像を描画できる。

2・3・2 カーブミラー設置状況の再現

この 3D CG シミュレータに、交差点 N の現地実測結果、インターネット航空写真のデータを反映した交差点平面図を作成し、交差点環境を再現した。カーブミラーは曲率半径と直径および位置（平面位置・高さ）、角度（俯角・水平角）を入力する。道路形状、路面標示、塀・電柱・建物、車両などのデータも同様にシミュレータに入力して、カーブミラー視認状況を検討する交差点の状況を計算機上に再現した。なお、交差点形状については、別途、専用の入力アプリケーションソフトウェアを作成して、入力の簡便化を図った。

2・3・3 カーブミラー視認性の検討

入力した交差点環境を用いて、③非優先道路境界線に位置する乗用車 EP から見たカーブミラー鏡像を再現し、後述のパラメーターを変化させながら、EP から見たカーブミラー鏡像が良好な視界を有するかどうかを検討した。

2・4 死角範囲の特定と事故原因分析

現地実測およびシミュレーション再現結果から、③非優先道路境界線に位置する乗用車 EP において、直接視界の死角とカーブミラー間接視界の死角の重なる範囲を求めた。この範囲は③非優先道路の交差点手前からは視認することができない。これを基に、ドライバー証言にある、死角が原因で事故が発生した可能性を分析した。

また、事故再発防止の観点から、死角を解消するためのカーブミラー最適設置条件について系統的に分析した。なお、本研究は実際に発生した事故事例分析を主眼とするため、交差点右方の直接視界および右側カーブミラーによる間接視界を分析の対象とし、左方視界・左側カーブミラーについては分析をしていない。

2・5 カーブミラー最適設置条件の検討

2・5・1 パラメーターの選定と定義

カーブミラー最適設置条件を導くために、以下の(1)の座標系を用いて交差点環境を表すこととし、(2)に示す 4 項目のパラメーターを変化させた。

(1)座標系

- ・座標原点：ミラー支柱中心
- ・x 軸：①－②優先道路中心に平行手前向き
- ・y 軸：x 軸に直角方向
- ・z 軸：xy 平面に鉛直上向き（座標系は右手系である）

(2)パラメータ

- ・ミラー支柱の平面位置 x, y [m]
- ・ミラー高さ z （地上からミラー下端までの高さ） [m]
- ・ミラー俯角 d （ミラー光軸が水平面となす角度） [°]
- ・ミラー水平角 h （③非優先道路から見たミラーの左右の角度） [°]

なお、俯角の値は、カーブミラー光軸が水平な状態を 0° とし、真下方向に前傾した状態を 90° とした(図 2, 右図：俯角 10° 、以降俯角が正の場合は+を省略)。水平角の定義は、カーブミラー背面と x 軸(①－②優先道路)が平行な時を水平角 0° とし、反時計回りに計測した(図 3, 右図：水平角 45°)。

Fig. 2 Definition and notational system of depression angle d . Fig. 3 Definition and notational system of horizontal angle h .

2・5・2 カーブミラーの視認性要件

著者らの先行研究⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾に基づき、③非優先道路境界線に位置する乗用車ドライバーから見て十分な安全視界を確保できる場合、カーブミラー視認性が良好であるとした。そのため、交差道路（②優先道路）全体が鏡像中心に映り、(1)視認距離が現状の視認距離(70m)と同程度であり、(2)死角範囲が最小となることを良好な視認性の要件とした。

2・5・3 最適設置条件の検討手順

(1)設置位置・高さ不変、(2)設置高さのみ変更、(3)設置位置変更という、既設カーブミラーの改修工事が容易に実施できる順序に沿って、各々16通りのカーブミラー設置条件を系統的に評価・検討し、設置最適案を導いた。今回検討したカーブミラー設置位置・角度の組み合わせは、以下の通りである。

シミュレーションに用いたカーブミラー角度の選定は、実ミラーの計測および、予備的なシミュレーション計算結果から交差道路（②優先道路）がおおむね鏡面中央に映る範囲を求めた。角度の刻み幅は、2・3節で述べた先行研究結果⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾に基づき、角度変化による鏡像の変化が適度で、設定上も切りのよい 1° 単位とした。

- (1)設置位置・高さ不変：設置位置・高さ(鏡面下端高 3.3m)は既設のままで不変
(俯角： $22^\circ, 23^\circ, 24^\circ, 25^\circ$) × (水平角： $140^\circ, 141^\circ, 142^\circ, 143^\circ$) の計 16 通り。
- (2)設置高さのみ変更：ミラー高さを 0.5m 下げて鏡面下端高 2.8m とする。
(俯角： $19^\circ, 20^\circ, 21^\circ, 22^\circ$) × (水平角： $140^\circ, 141^\circ, 142^\circ, 143^\circ$) の計 16 通り。
- (3)設置位置変更：カーブミラー設置位置を x 軸マイナス方向に 4.3m 移動する。
(俯角： $15^\circ, 16^\circ, 17^\circ, 18^\circ$) × (水平角： $126^\circ, 127^\circ, 128^\circ, 129^\circ$) の計 16 通り。

2・6 道路管理者への改善提案

交差点 N の道路管理者である茅ヶ崎市役所道路管理課に対し、交差点 N カーブミラーの改善提案を行った(2009 年 12 月)。

3. 結 果

3・1 現地調査

道路交通環境の現地実測および実態調査の概要は、以下に示す通りである(図 4)。カーブミラーの水平角および俯角の測定は、以下のように行った。(1)俯角：カーブミラー背面に傾斜計を当て、実測した。(2)水平角：ミラー支柱とアイポイントを通る直線の延長線上後方に下がり、ミラー鏡面を望遠撮影した鏡面画像の縦横

比から、水平角を求めた（画像に写った鏡面の縦の長さ A をミラー直径とみなし、横の長さ B とから、水平角 $\theta = \cos^{-1}(B/A)$ とした）。

道路構造：丁字路交差点

道路幅：①南側優先道路幅=3.8m

②北側優先道路幅=4.3m

③非優先道路幅=3.8m

標識・標示：丁字路標示・標識なし

カーブミラー：大きさ：φ600mm，曲率：R=2200mm

ミラー素材：ステンレス

設置高さ(鏡面下端高)：3.3m

設置角度：俯角 21°，水平角(推定値)137°

交通環境は、南向きの交通流が多く、交差点全体では車，自転車，バイクの順に多い。1 時間当たり交通量は約 80 台程度であった。

3.2 カーブミラー鏡像の再現シミュレーション

3DCG 上で交差点平面図を作成し、塀・家・電柱・カーブミラー等を配置して交差点環境を再現した(図 5)。

図 5 において路面の白黒表示は、交差点内：1m 単位の白黒市松模様，道路：交差点境界線を基点に 10m 単位の白黒縞模様で、距離表示スケールとする。次に、カーブミラーの設置角度を 1°単位で変化させ、③非優先道路の乗用車 EP から見たカーブミラー鏡像を再現した(図 6)。

その結果、シミュレーションミラーの俯角は実測値と同じ 21°であり、水平角は 135°であった（写真計測法による推定値は 137°）。

図 6 の実物ミラーとシミュレーションミラーの鏡像を比較すると、道路、家、電柱の形状・位置・大きさ等はよく一致している。このことから、シミュレーションの鏡像は実際の交差点視環境を良く再現できていると考えられる。

現地実測とカーブミラー鏡像の再現結果より、③非優先道路の乗用車 EP からみて、直接の目視でもカーブミラーでも視認できない右方直近の死角範囲は、直接視認できる範囲(図 5、EP と交差点右角を結ぶ直線)とシミュレーション鏡像(図 6)内の道路に表示された白黒縞模様スケールから、図 5 に示すように、おおむね最大長さ 9.2m、最大幅 3.7m の黒い三角範囲と推定できた。

Fig. 4 Dimensions drawing of the T-shaped Intersection N for the computer input.

Fig. 5 3D CG diagram of the T-shaped Intersection N for the simulation.

Fig. 6 Consistency of mirror images between the real mirror (left) and the simulation study (right) for the right view from the driver's viewpoint in a passenger car at the boundary line between the intersection area and the crossing minor road.

3.3 カーブミラー既設位置の改善案

次に、現状のカーブミラー鏡像の死角範囲を削減するための設置条件をシミュレーションで検討した。

(1)既設位置・高さ不変の場合の改善案

既設位置・高さを変えず死角範囲が最小(5.5m)となる組み合わせは、(俯角: 22°, 23°, 24°, 25°) × (水平角: 143°) の4条件であった(図7)。しかし、この4条件ではいずれも現状と同程度(70m)の交差道路視認距離を確保できない(図8)。すなわち、ミラーにより現状と同程度(70m以上)の安全視認距離を確保した上で死角範囲が最小となる条件は、俯角=22°, 水平角=142°であった(図7, 8)。現状ミラーとの角度差は、俯角1°下方、水平角7°で、水平方向反時計回りにかなり調節する必要がある。この設置角度調節のみで、長さ9.2mの死角を最小6.5mまで削減できる(図9-1(3), 図9-3左図(1)白+灰色部分)が、死角の長さを自転車全長1.5m以内に削減することはできなかった(死角の長さを自転車全長以内にできれば、常時自転車を視認できる)。

Fig. 7 Distribution of blind distances in simulated mirror images against horizontal angles and depression angles. (*the best result)

Fig. 8 Distribution of visible distances in simulated mirror images against horizontal angles and depression angles. (*the best result)

(2)既設位置不変，高さ変更の改善案(図 9)

そこで，カーブミラーの高さを-0.5m 変化させて，最適設置条件を検証した．2・5・3(2)項の16通りの角度条件を3・3(1)項と同様の方法で評価・検討したところ，俯角=20°，水平角=142°と，俯角を1°上方に，水平角を7°反時計回りに調整することで死角は最小5.5m 程度まで削減できた(図 9-1(2)，図 9-3 左図 (2)白色部分)．しかし，(1)と同様に常時自転車視認に必要な死角改善効果を得ることはできなかった．

Fig. 9 Examples of the improvement proposal by the 3D CG simulation and the effect for reducing blind area by adjusting (1) only mirror angles, (2) mirror height and angles at the real fixed position and (3) all the mirror position and angles.

3・4 カーブミラー設置位置変更改善案(図 9)

以上のように、既設位置を変えない条件では十分な死角改善効果を得られなかったため、(3)カーブミラー設置位置を x 軸マイナス方向に 4.3m 移動させた上で、俯角と水平角を調節して 2・5・3(3)項の 16 通りの設置条件を 3・3(1)項と同様の方法で検討した。その結果、死角の全長を 1.0m まで削減できた(図 9-1(3)、図 9-3 右図 (3)白色部分)。これは、死角に自転車が隠れることなく、常時自転車を視認できる状態である。

3・5 道路管理者への提案

上記のようなシミュレーション結果から得た改善提案(図 9)を道路管理者、茅ヶ崎市役所道路管理課に対して行った。道路管理者はカーブミラー改善効果を認め、理解を示した。一方、事故発生時に直接／間接視界の死角の主要因であった生垣・住宅は、偶然、その後駐車場に変わり、直接視界が大幅に改善されたので、カーブミラー改善の必要性は少ない状況になった(図 10)。

Fig. 10 A contrast of visual environment between before (left, July 2009) and after (right, December 2009) the renovation work of the private residence at the right corner of the intersection

4. 考 察

4・1 鏡像シミュレーションに基づく出会い頭事故原因分析

本研究で用いた鏡像シミュレーションは実際の交差点視環境の再現性が高く(図 6)、現地実測およびカーブミラー鏡像の再現結果より、交差点接近時の事故車ドライバーからみた右方直近の死角範囲は、最大長さ 9.2m、最大幅 3.7m になると分かった(図 5, 6, 9)。すなわち、事故に関わった自転車(全長 1.5m)が 10km/h (=2.8m/s)で走行したと仮定すると、直接視界の死角とカーブミラーの死角の重なる領域に入り込んで、ドライバーからは約 3 秒間自転車が見えない状況が起きたと推測できる。従って、今回の事故は、この死角が原因で発生した可能性が高いと考えられる。

4・2 死角解消による事故再発防止の効果

カーブミラー設置位置を x 軸マイナス方向に 4.3m 移動させ、俯角と水平角を調節することで、死角の全長を 1.0m まで削減でき、自転車全長が死角に隠れる危険性を防止できることが明らかになった(図 9)。また、今回、直接視界の阻害要因であった生垣・住宅が駐車場になり死角が解消したため(図 10)、直接視界により右方視距離が常時確保できるので、視環境が主因の事故は減少することが予測される。

4・3 カーブミラー設置位置による死角改善効果

丁字路交差点におけるカーブミラーは、丁字の交差点内(丁字路突き当たり中央など)に設置されていることが多い。しかし、本事例の死角改善シミュレーション結果から、右方視界確保のためには、右方用のミラーは交差点の左方向へずらすことが望ましいことが見出された。事故再発防止対策として、ミラー角度調整だけでは限界があり、ミラー設置位置の変更が必要になる場合があると分かった。今後のカーブミラー新設・改修時の指針として、設置位置の選定基準を明確化する必要がある。

4.4 3D CG 鏡像シミュレーション手法の有効性

従来の実地調査手法では、カーブミラーに事故原因があるとの仮説があっても、設置位置・高さ・角度等の条件を現場で調整し改善効果を検証するためには、多くの人手や工数、機材等のコスト、時間がかかり、かつ精度の高い調整・確認作業は困難であった。また、本事例のカーブミラーは民地内電柱に設置されているため、実際に設置位置の修正効果を検討するには、地権者の許可、電柱移動など大きな困難を伴う。

一方、本シミュレーション手法を利用すれば、設置位置の移設を含めた多数の設置条件について、机上で、効率的かつ制約なしにカーブミラーの視認性を系統的に評価、検証することができる。さらに、本シミュレーション手法は、カーブミラーの設置条件を迅速、精密かつコストをかけずに検討できるだけでなく、改善提案の効果を視覚化し客観的に比較できるように呈示できる。従って、事故分析・改善策立案だけでなく、道路管理者・地域住民等に対する改善提案の実現ステップでも非常に有効なツールとなりうる。

5. 結 論

本論文では、3D CG による鏡像シミュレーション手法は、出会い頭事故の原因分析およびカーブミラー改善案・再発防止策の系統的分析に有効であることを示した。従来の設置時現物合わせ的な視認性の検証手法に比べて、事故原因と再発防止策を迅速、精密かつローコストに検証し、その効果を客観的に明示することができる。このシミュレーション手法を事故多発交差点などに応用すれば、交差点事故の減少に繋げることができると考えられる。

本シミュレーション手法の各種応用例を増やし、道路管理者・カーブミラー施工者等による実用化を目指して改良、発展させることが、今後の課題である。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費基盤研究(C) (課題番号 18510149 : 2006-2008 年度, 21510184 : 2009 年度)および神奈川大学工学研究所共同研究(2007-2009 年度)の助成を受けて実施された。ここに、心からの謝意を表す。

文 献

- (1) 警察庁交通局交通企画課, “平成 20 年中の交通事故の発生状況” (2009).
- (2) 警察庁交通局交通企画課, “平成 17 年中の交通事故の発生状況” (2006).
- (3) Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis, Analysis of Human Factors in Crossing Collisions, ITARDA Information, No. 56 (2005).
- (4) Uchida, N., Fujita, K. and Katayama, T., Detection of vehicles on the other crossing path at an intersection: Visual search performance of elderly drivers. JSAE Review, Vol. 20 (2008), pp. 381-386.
- (5) Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis, Crossing Collisions in View of Road Environment, ITARDA Information, No. 69 (2007).
- (6) 神田直弥, 石田敏郎, “出合頭事故における非優先側運転者の交差点進行情況の検討”, 日本交通科学協議会誌, Vol. 1, No.1 (2001), pp. 11-22.
- (7) 堀野定雄, 松原佑, 湯浅貴徳, 北島創, 森みどり, 上山勝, “無信号出合い頭事故再発防止とカーブミラー設置要件—横浜市鶴見区芦穂崎地区フィールド研究から—”, 人間工学, Vol. 41, 特別号 (2005), pp.168-169.
- (8) Mori, M., Horino, S., Kitajima, S., Ueyama, M., Ebara and T., Itani, T., Ergonomics Solution for Crossing Collisions based on a Field Assessment of the Visual Environment at Urban Intersections in Japan, Applied Ergonomics, Vol. 39, No. 6, (2008), pp. 697-709.

- (9) Mori, M., Horino, S., Kubo, N. and Kitajima, S., Ergonomics proposal for visibility requirements at urban intersections in Japan for preventing frequent crossing collisions, Proceedings of the Applied Human Factors and Ergonomics 2nd International Conference, (2008), CD-ROM.
 - (10) (社)日本道路協会, 道路反射鏡設置指針 (1980), 丸善.
 - (11) 国土交通省道路局監修, (社)全国道路標識表示業協会編, 道路反射鏡ハンドブック (2001), (社)全国道路標識表示業協会.
 - (12) Moukhwas, D., Road junction convex mirrors, Applied Ergonomics, Vol. 18, (1987), pp. 133–136.
 - (13) 森みどり, 堀野定雄, 久保登, 福永佳洋, 渡邊修平, “市街地無信号交差点における視環境評価と出会い頭事故防止”, 人間工学, Vol. 45, 特別号 (2009), pp.286-287.
 - (14) 久保登, 森みどり, 堀野定雄, “鏡像シミュレーションによる交差点ミラー視認性向上のための設置条件検討”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 768 (2010), pp. 2154-2159.
-