

自転車の出会い頭事故防止のためのディテクター開発

A Study on development of “Inductive-loop Bicycle Detector” at the unsignalized intersection

屋井研究室 08M30359 渡邊 竜太 (Watanabe, Ryuta)

Keywords : 無信号交差点, 自転車検知センサー, 視認行動
unsignalized intersection, Inductive-loop Bicycle Detector, Driver Visual Behavior

1. はじめに

近年、自転車と自動車とが接触する事故数が増えている。中でも無信号交差点での出会い頭事故が最も多く、細街路から幹線道路へ出る自動車と、幹線道路沿いの歩道を走行し、自動車側から見て左方向から交差点に進入する自転車が接触する形態の事故が各地で同様に発生している。その要因として、交差点の構造により自動車から自転車を視認しづらい上に、幹線道路に左折して合流するために右方向を注視しがちになるため、特に左方向からの自転車を発見するのが遅れてしまうことが挙げられる¹⁾。これに対して、現状ではカーブミラーや停止線を設けるなどの対策が取られているが、事故は減少していないため、より効果的な対策が求められている。こうした事故への対策として、オービスやゲート式駐車場で主に用いられているループコイルセンサーを用いた接近情報の提供の有効性が検討されている¹⁾。ループコイルセンサーは、接近情報の提供の手段として現在多く検討されている ITS(Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム)技術に比べ、設置や運用の際にコストがほとんどかからないので、汎用性が高く、また、日本特有の様々なモードが存在する歩道環境下で、原理的には自転車のみを識別することが可能であると考えられる。従って、事故多発地点だけでなく、各地で同様に発生している細街路と幹線道路が接続する交差点での事故防止策になり得るものと考えられる。しかし、日本にはまだループコイルセンサーを用いた防止策は実用化されていないことから、本研究ではループコイルセンサーを利用したディテクター開発を目的とし、自転車を検知するためのループコイルセンサーの設計と、実走行環境のビデオ観測から交差点での自転車と自動車の走行特性を踏まえ、ディテクターが適切に機能するための設置場所やその設置方法の検討を行うこととした。

2. ループコイルセンサーの設計

(1) ループコイルセンサーの概要

ループコイルセンサーとは地中に埋設したループコイルを使

って、車両の有無によるループコイルのインダクタンスの変化を検知する車両センサーのことである。自転車や自動車がコイルの上を通過した際に、その比透磁率の値が変化することによって、磁束が変化するとともに、コイルのインダクタンスも変化する。この変化をセンサーが検知するという仕組みである。

$$e = -L \frac{dI(t)}{dt}$$

$$L = \frac{k \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot n^2}{b}$$

e : 誘導起電力、 L : インダクタンス、 I : 電流、 k : 長岡係数、 μ : 芯の素材の比透磁率、 μ_0 : 真空の透磁率($=4\pi \times 10^{-7}$)、 a : コイルの半径、 n : コイルの巻数、 b : コイルの長さ

(2) 検知させる金属の検討

インダクタンスの変化分はコイルに近付けた素材の比透磁率によって決定される。鉄はその比透磁率が 5000 と非常に高く、またその汎用性も高いので、検知対象金属として適していると考えられる。自転車には表 1 に示すように多くの金属が使われているが、自転車チェーンは一般的に鉄成分を多く含むジंकアロイという金属でつくられている事から、本研究では自転車チェーンを検知する部位として想定する。さらに、自転車のリムは比透磁率の低いスチールや金属ではない CFRP(炭素繊維強化プラスチック)といった素材でつくられているものがあるという問題があるものの、自転車の中で最も地表面に近い金属であるので、併せて検知する部位として想定する。

表 1 自転車に使われている金属

| 素材名 | 使われている部位 | 比透磁率 |
|------------|------------------------------------|-------------|
| アルミ | フレーム・ほとんどのパーツ | 1.0002 |
| カーボン | フレーム・ハンドル・ステムなど | - |
| クロモリ | クロームモリブデン鋼の略 フレーム・ペダル軸・サドルレールなど | - |
| 真鍮 | ニップル ブラス(真鍮)ニップルと表示される場合がある。 | - |
| ジュラルミン | 航空金属(7075アルミ) ハンドル・XTRのクランクなど | 0.8 |
| スカンジウム | 希少金属(レアメタル) アルミなどと混ぜてフレームに使われる。 | - |
| スチール(スチール) | スプロケット・フォークコラムなど | - |
| ステンレス | スポーク・ディスクローダーなど | 1.003~1.004 |
| チタン | 加工が難しい金属。フレーム・ハンドル・ステムなど | 1.0001 |
| ハイテン | ママチャリのフレームに使われる鉄 | - |
| マグネシウム | 他の素材と混ぜてフレームに使われることがある。リム・ステムなど | - |
| ジंकアロイ | ママチャリのチェーン | - |

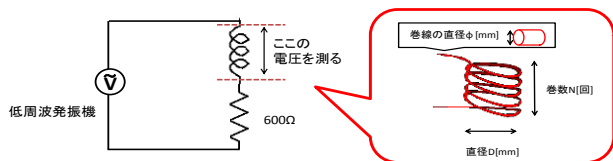


図 1 実験回路

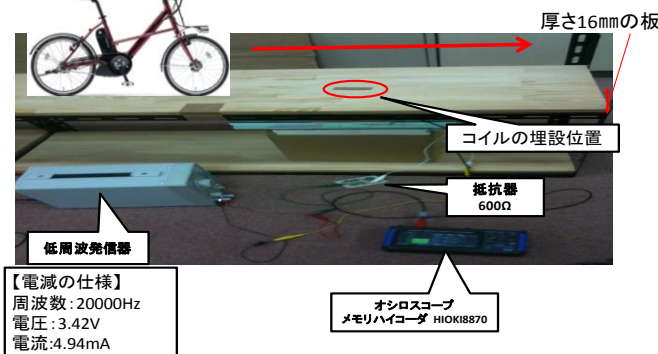


図 2 実験様式

(3) ループコイルセンサーの回路設計

回路の設計にあたり、1. で示した自動車を検知するループコイルセンサーの仕様を参考に交流電圧をかけて、その電流と電圧の変化からインダクタンスの変化を読み取る指針にする。具体的な実験回路については簡易なものであるが、念のため図 1 に示す。コイルと抵抗器を直列につなぎ、コイルの電圧の変化を読み取るという設計回路である。

(4) 実験概要

実験様式について図 2 に示す。厚さ 16 mm の板の下に検知コイルを設置し、その上で自転車を通過させる。電圧の変化は日置電気株式会社のメモリハイコーダ HI0KI8870²⁾を用いて計測を行った。また、周波数発生装置としてテクシオ社の低周波発振器(10Hz~1MHz)AG-203E³⁾を用いた。なお、この低周波発振器の出力特性を考慮して、抵抗器の抵抗は 600Ω としている。

(5) 実験結果

図 2 に示す条件(周波数 20000Hz, 電源電圧 3.42V, 電流が 4.94mA)と表 2 に示す検知コイルを用いて実験をしたところ、図 3 のように、0.2mV から 0.3mV 程度の電圧の降下という変化を読み取ることが出来た。なお、図 3 の縦軸は電圧で、横軸は検知時間である。

図 4 のように自転車チェーンのような比透磁率が高い金属と同じ実験様式のコイルの上部で通過させると、電圧が上昇する変化が見られることから、図 3 の変化は比透磁率が低い金属が反応したと考えられる。コイルを直に自転車リムに近づけたところ同じような反応を示し、また、表 2 のコイルの検知域が上

表 2 自転車を検知するコイルの仕様

| コイル(エナメル線) | | | | | |
|-------------|-----------|---------|-------------|------------|-------------|
| 巻線の直径φ [mm] | 直径 D [mm] | 巻数N [回] | インダクタンス[μH] | インピーダンス[Ω] | コイルの内部抵抗[Ω] |
| 0.2 | 60 | 30 | 108.36 | 0.034 | 3.7 |

自転車の通過を確認(電圧が通過と同時に効果)

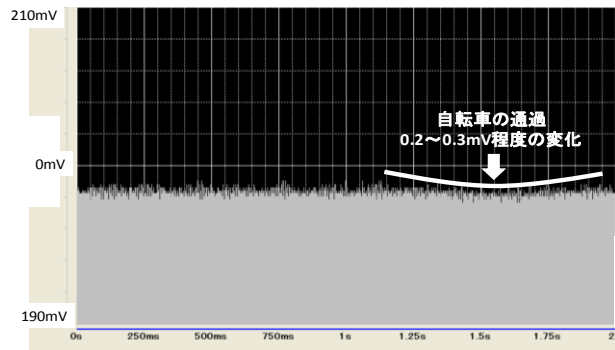


図 3 コイル上部を自転車が通過した時の反応

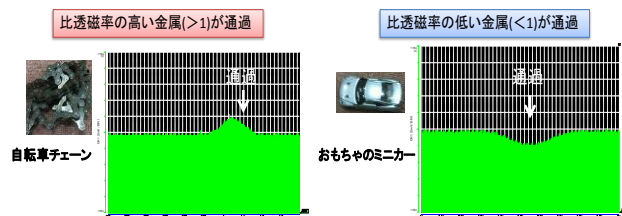


図 4 比透磁率の違いによる電圧の変化の違い

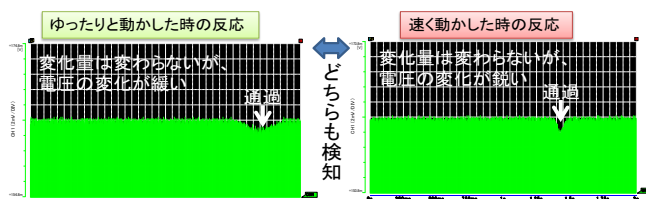


図 5 速度のある金属の検知

部 40mm 程度であることから自転車リムが反応したと考えられる。図 5 は図 4 にある比透磁率の低い、おもちゃのミニカーを同じ実験様式で、コイル上部で手を使って、速く動かした時と、遅く動かした時の反応である。速度の緩急にかかわらず計測が可能であり、また、比透磁率の低い金属の検知も可能であることがわかる。以上の結果により、ループコイルセンサーは自転車を実際に走らせた際にも、速度のある自転車の検知が可能であることが確認出来た。

(6) コイルの形状の検討

表 3 に示すように、表 2 のコイルを基準に、円形コイルと四角形コイルの径を変え自転車を検知する感度の比較検討を行った。その結果、円形コイルより四角形コイルの方が同じような形状でも感度がよく、またそのインダクタンスは 70[mm]×150[mm]の長方形コイルで 300[μH] 程度のコイルの反応が良いことがわかった。

表 3 コイルの形状の検討

| No | コイル(エナメル線) | | | | 周波数 [Hz] | 電源電圧 [V] | 電源電流 [mA] | チェーンをかざした時の電圧の変化 [mV] | 感度 | | 備考 | |
|----|----------------|-------------|-----|----------------|----------|----------|-----------|-----------------------|-------|----|---|---------------------|
| | 巻線の円形直径 φ [mm] | 長方形径 D [mm] | 巻数 | インダクタンス L [μH] | | | | | 基準 | 基準 | | |
| 1 | 0.2 | 60 | 30 | 108.36 | 20000 | 3.42 | 4.90 | 基準 | 基準 | 表2 | | |
| 2 | 0.2 | 64 | 340 | 4821.29 | 10000 | 1.367 | 4.41 | 1800.0 | ⊙ | x | 40mm上部のチェーンを検知 | |
| 3 | 0.2 | 125 | 23 | 8018.95 | 8000 | 8.01 | 13.54 | 200.0 | ⊙ | x | | |
| 4 | 0.2 | 70 | 12 | 26.74 | 20000 | 3.42 | 4.90 | 4.0 | x | x | インダクタンスを小さくした 1000~10000までほぼ同じような電圧の変化 | |
| 5 | 1.0 | 55 | 55 | 100 | 20000 | 3.42 | 4.90 | | x | x | コイルを太くして実験 | |
| 6 | 1.0 | 55 | 55 | 100 | 12500 | 5.95 | 10.04 | | x | x | 10mVの基準値で測れる最大の周波数 | |
| 7 | 1.0 | 55 | 55 | 100 | 27000 | 2.145 | 1.20 | 3.0 | x | x | 20mVの基準値で測れる最大の周波数 | |
| 8 | 1.0 | 55 | 55 | 100 | 21000 | 3.186 | 4.23 | 0.5 | x | x | 電圧の変化が最大ぐらい | |
| 9 | 0.2 | 60 | 60 | 340.91 | 20000 | 3.42 | 4.90 | | ○ | x | インダクタンスを増加 | |
| 10 | 0.2 | 60 | 60 | 340.91 | 1950 | 10.40 | 17.17 | | ○ | x | 10mVの基準値で測れる最大の周波数 | |
| 11 | 0.2 | 60 | 60 | 340.91 | 6250 | 8.59 | 14.52 | | ○ | x | 20mVの基準値で測れる最大の周波数 | |
| 12 | 0.2 | 60 | 60 | 340.91 | 30000 | 1.699 | 0.54 | 10.0 | ○ | x | 電圧の変化が最大ぐらい | |
| 13 | 0.2 | 60 | 25 | 79.26 | 20000 | 3.42 | 4.90 | | x | x | | |
| 14 | 0.2 | 60 | 25 | 79.26 | 11750 | 3.99 | 11.36 | | x | x | 10mVの基準値で測れる最大の周波数 | |
| 15 | 0.2 | 60 | 25 | 79.26 | 26500 | 2.228 | 1.42 | | x | x | 20mVの基準値で測れる最大の周波数 | |
| 16 | 0.2 | 60 | 25 | 79.26 | 30000 | 1.699 | 0.54 | 4.0 | x | x | 電圧の変化が最大ぐらい | |
| 17 | 0.2 | 80 | 80 | 21 | 108.89 | 20000 | 3.42 | 4.90 | ○ | ○ | 47mm上部のチェーンを検知しただけでなく、リムに対する感度も良い | |
| 18 | 0.2 | 80 | 21 | 108.89 | 14700 | 1.121 | 8.6 | | ○ | ○ | 10mVの基準値で測れる最大の周波数 | |
| 19 | 0.2 | 80 | 21 | 108.89 | 35000 | 0.504 | 0.18 | | ○ | ○ | 20mVの基準値で測れる最大の周波数 | |
| 20 | 0.2 | 80 | 21 | 108.89 | 40000 | 0.54 | 1.699 | | ○ | ○ | 電圧の変化が最大ぐらい | |
| 21 | 0.2 | 86 | 130 | 17 | 107.11 | 20000 | 3.42 | 4.90 | 4.0 | x | - | |
| 22 | 0.2 | 86 | 130 | 17 | 107.11 | 12800 | 5.85 | 9.97 | | x | - | 10mVの基準値で測れる最大の周波数 |
| 23 | 0.2 | 86 | 130 | 17 | 107.11 | 30600 | 1.515 | 0.38 | | x | - | 20mVの基準値で測れる最大の周波数 |
| 24 | 0.2 | 86 | 130 | 17 | 107.11 | 40000 | 0.54 | 1.699 | 2.0 | x | - | 電圧の変化が最大ぐらい |
| 25 | 0.2 | 104 | 142 | 16 | 113.74 | 20000 | 3.42 | 4.90 | | x | ○ | |
| 26 | 0.2 | 104 | 142 | 16 | 113.74 | 11250 | 6.50 | 11.03 | | x | ○ | 10mVの基準値で測れる最大の周波数 |
| 27 | 0.2 | 104 | 142 | 16 | 113.74 | 27800 | 2.039 | 0.99 | | x | ○ | 20mVの基準値で測れる最大の周波数 |
| 28 | 0.2 | 104 | 142 | 16 | 113.74 | 40000 | 0.54 | 1.699 | | x | ○ | 電圧の変化が最大ぐらい |
| 29 | 0.2 | 90 | 150 | 16 | 111.56 | 20000 | 3.42 | 4.90 | | x | - | |
| 30 | 0.2 | 90 | 150 | 16 | 111.56 | 19500 | 3.496 | 5.23 | | x | - | 10mVの基準値で測れる最大の周波数 |
| 31 | 0.2 | 90 | 150 | 16 | 111.56 | 51000 | 0.089 | 0.02 | | x | - | 20mVの基準値で測れる最大の周波数 |
| 32 | 0.2 | 90 | 150 | 16 | 111.56 | 40000 | 0.54 | 1.699 | 1.0 | x | - | 電圧の変化が最大ぐらい |
| 33 | 0.2 | 70 | 150 | 50 | 312.57 | 20000 | 3.42 | 4.90 | | ○ | ⊙ | |
| 34 | 0.2 | 70 | 150 | 50 | 312.57 | - | - | - | - | - | - | 10mVの基準値で測れる最大の周波数 |
| 35 | 0.2 | 70 | 150 | 50 | 312.57 | 2550 | 10.14 | 16.90 | | x | x | 20mVの基準値で測れる最大の周波数 |
| 36 | 0.2 | 70 | 150 | 50 | 312.57 | 40000 | 0.54 | 1.699 | 10.0 | ○ | ⊙ | 電圧の変化が最大ぐらい |
| 37 | 0.2 | 100 | 100 | 165 | 4425.68 | 20000 | 3.42 | 4.90 | | ⊙ | - | |
| 38 | 0.2 | 100 | 100 | 165 | 4425.68 | - | - | - | - | - | - | 200mVの基準値で測れる最大の周波数 |
| 39 | 0.2 | 100 | 100 | 165 | 4425.68 | 17200 | 4.02 | 6.80 | | ⊙ | - | 500mVの基準値で測れる最大の周波数 |
| 40 | 0.2 | 100 | 100 | 165 | 4425.68 | 15000 | 4.94 | 8.36 | 200.0 | ⊙ | - | 電圧の変化が最大ぐらい |

3. ディテクターの設置位置の検討

設置位置を検討するに当たり、自動車のドライバーの視認行動に着目する。細街路から交差点に進入する自動車のドライバーは幹線道路に合流する際に、合流する幹線道路と左右から交差点に進入してくる歩行者や自転車を確認しなければならず、左右確認の視認行動や自転車の速度、位置によって、左方向から来る自転車を確認できない時間帯があり、それが出会い頭事故につながる一つの原因になるものと考えられる。そこで本研究では、走行位置関係を座標軸に置き換え、見落としを許される時間と自動車のドライバーが自転車の存在に気づきブレーキを踏んでも自転車が停止しない限り衝突してしまう自転車の位置と速度とを求める。次に、実走行環境の観測調査から自動車のドライバーの視線行動をモデル化し、左方向から交差点に進入してくる自転車を発見するまでに要する平均時間を算出する。その時間が見落としを許される時間よりも長ければ、事故に至ると考え、その時点での自転車の位置にディテクターが設置されていることが重要であると考えた。

(1) 見落としを許される時間と自転車の位置

見落としを許される時間とは「本来、自動車のドライバーが左方向を向いていれば、自転車を発見できる瞬間から、実際に自転車を発見し、ブレーキをかけて衝突を回避できる瞬間までの時間」を指す。条件として、図6のように座標上に自転車と

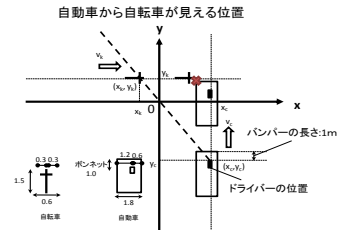


図 6 自転車と自動車と衝突するまでの位置関係

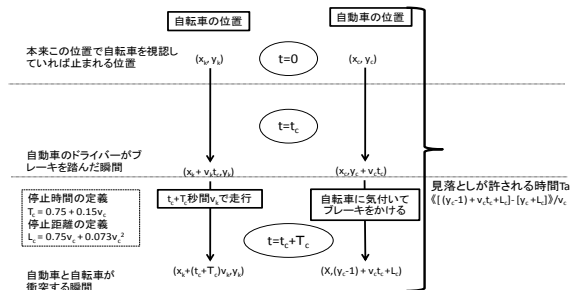


図 7 見落としを許される時間

自動車が一台ずつ存在し、自転車と自動車が直線上に等速で進むものとする。また、ディテクターが検知する自転車の速度は4~12[km/h]と想定しているの、自転車の速度 v_k [km/h]は4~12[km/h]とする。見落としを許される時間 T_a [s]、衝突するまでに自動車が進む距離を D_c [m]とすると(1)式が成立つ。

$$D_c = [(y_c - 1) + t_c v_c + L_c] - [y_c + L_c] \quad (1)$$

$$T_a = \frac{D_c}{v_c}$$

ここで、自動車の速度を v_c [km/h] (観測調査より 5.21 [km/h]とする)、自動車のドライバーが本来自転車を視認しなければならない位置の y 座標を y_c 、自動車のドライバーが本来自転車を視認しなければならない瞬間からブレーキを踏む瞬間までにかかる時間を t_c [s]、自動車の停止距離を L_c [m] ($=0.75v_c + 0.073v_c^2$)とする。ここで、 $(y_c - 1)$ の1は自動車のドライバーからボンネットの先端までの長さ[m]を表す。また、図6のような自動車のドライバーが自転車を視認出来る位置関係により、(2)式が成立つ。

$$x_k = \frac{x_c}{y_c} y_k \quad (2)$$

衝突する瞬間の自転車と自動車の位置関係は図7のようになる。 X は自転車と自動車とどの位置で衝突するかを表現するため、図6より(3)のような幅を持たせる。

$$x_c - 1.2 \leq X \leq x_c + (0.6 + 1.5) \quad (3)$$

ここで、自動車のドライバーが本来自転車を視認しなければならない位置の x 座標を x_c 、自転車の座標を (x_k, y_k) 、自動車の停止時間を T_c [s] ($=0.75 + 0.15v_c$)とする。この時、(4)、(5)式が成立つ。

$$y_k = (y_c - 1) + t_c v_c + L_c \quad (4)$$

$$X = x_k + (t_c + T_c) v_k \quad (5)$$

表 4 調査環境

| | 日付 | 歩行者 [人] | 自転車[台] | 全走行自動車[台] (二輪車を含む) | 左折自動車[台] | 視線行動が 確認できる自動車 [台] |
|----|--------|------------|--------|-----------------------|----------|--------------------------|
| 1 | 12月22日 | 210 | 246 | 131 | 44 | 20 |
| 2 | 12月24日 | 224 | 187 | 160 | 100 | 68 |
| 3 | 12月28日 | 210 | 132 | 136 | 86 | 19 |
| 4 | 1月5日 | 218 | 129 | 112 | 76 | 50 |
| 5 | 1月6日 | 206 | 142 | 140 | 98 | 82 |
| 6 | 1月13日 | 234 | 174 | 165 | 116 | 24 |
| 7 | 1月14日 | 165 | 187 | 140 | 89 | 73 |
| 合計 | 7日 | 1467 | 1197 | 984 | 609 | 336 |

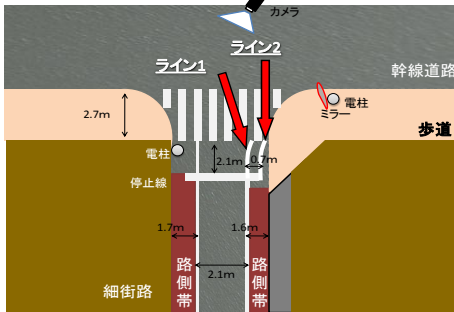


図 8 観測交差点

先ほど求めた(3), 及び, (4), (5)式により, t_c [s]が求まる.

$$\frac{x_c L_c - 1.2y_c - T_c y_c y_k}{y_c v_k + x_c v_c} \leq t_c \leq \frac{x_c L_c + 2.1y_c - T_c y_c y_k}{y_c v_k + x_c v_c}$$

この時間 t_c [s]から, 自転車の位置ごとの見落としを許される時間 T_a [s]を算出する.

(2) 実走行環境の観測調査

東京都品川区の東急大井町駅前通り(都道 420 号鮫洲・大山線)において, ビデオ観測による調査を行った. 観測対象地の特徴として, 細街路の自動車や歩道走行をする自転車の交通量が非常に多く, また, マンションやビル等により左右(特に左側)の見通しが悪いことが挙げられる(図 8). さらに, ここは警視庁により発表されている事故発生マップ⁴⁾を確認すると事故が多発しているエリアにあたる. 調査期間は, 2009 年 12 月 22 日から 2010 年 1 月 14 日の期間のうち 7 日間で(表 4), 観測時間は午前 8 時から 9 時までの 1 時間である.

(3) 自転車を発見するために要する時間と設置位置

自転車を発見するために要する時間とは, 停止線からの自動車のドライバーの視線の動きをモデル化したものから算出した自転車を発見するために要する時間の平均を指す. なお, ここでも, 観測地を座標軸上に置き換えて考える. 分析自動車は, 左折自動車のうち停止線から横断歩道の間で停止しないボンネットのある普通自動車(n=107 台)を対象に行った(タクシーを含む). 分析の結果, 分析対象自動車の走行位置 x_c は観測地の環境特性から, 細街路の左側の壁から順に, 2.9, 3.05, 3.2, 3.55, 3.9[m]の 5 つの位置に分類できる. y_c 上を進む自動車の位置ごとの視線の角度から視線の移動を表現した図 9 の視線移動の式に計測した各ドライバーの視線移動回数と停止線に差し掛かっ

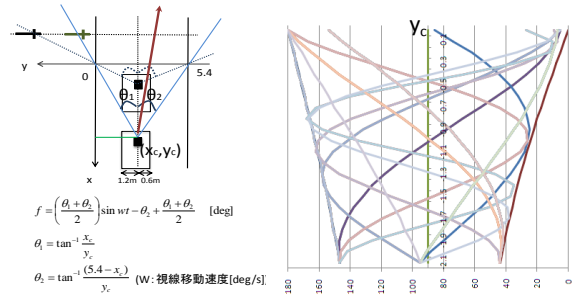


図 9 視線の移動式 図 10 視線モデル(細街路の左端から 3.2m)

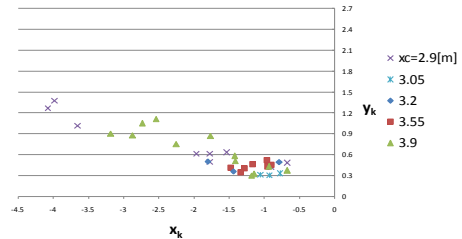


図 11 衝突する位置

た瞬間の視線開始方向(右・真中・左の 3 つに分類)を用いることで, 停止線から横断歩道に至るまでの自動車のドライバーの視線の動きを 5 つの走行位置ごとにモデル化を行った(図 10). このモデルにより, 走行位置ごとに, 現在の視線位置から左方向から交差点に進入してくる自転車を発見するまでに要する時間 T_a [s]をそれぞれ算出した. 自動車が交差点に近づく位置 y_c ごとに T_a [s]の平均時間を算出し, その時間が自動車の位置 (x_c, y_c) における 3. (1)で求めた見落としを許される時間より長い場合には事故に至るとして, 図 11 のようにその時の自転車の位置 (x_k, y_k) を求めた. この結果により, ループコイルの設置すべき位置 (x_k, y_k) は下記のように求められた.

$$-4.07 \leq x_k \leq -0.67 \quad [m]$$

$$0.3 \leq y_k \leq 1.37 \quad [m]$$

4. 終わりに

本稿では, ループコイルセンサーの設計と設置位置について検討した. その結果, 検討したループコイルセンサーの設計回路によって, 自転車の検知が可能であることが確認された. さらに, 様々なコイルから, 検知に適したコイルの形状を検討した. また, 自動車のドライバーの視認行動に着目することにより, ループコイルセンサーが検知すべき自転車の位置を試算した. なお, 設置方法の検討等に関しては, 発表時および本論に譲る.

【参考文献】

- 鈴木美緒: 自転車配慮型道路の安全性と設計方針に関する研究, 学位論文, 東京工業大学, 2009
- 電気計測器 日置電機株式会社 HP(<http://www.hioki.co.jp/>)
- 株式会社テクシオ HP(<http://www.endokagaku.co.jp/shop/generators/textio-ag-200e.html>)
- 警視庁 HP(<http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/tonkei/jikomap/jikomap.htm>)