

ナイトビジョンシステムの開発

Development of Night Vision System (Collision avoidance system to the pedestrian)

辻 孝之*

Takayuki TSUJI

渡辺 正人*

Masahito WATANABE

服部 弘*

Hiroshi HATTORI

長岡 伸治*

Nobuharu NAGAOKA

要 旨

夜間の歩行者事故を低減するために、ナイトビジョンシステムを開発した。

車両前部に搭載されたステレオ赤外線カメラの映像処理によって歩行者とみなせる熱源対象物を捉え、その位置と相対移動ベクトルを算出することによって衝突の可能性を判定した。

また、インストルメントパネル内に搭載したヘッドアップディスプレイ(HUD)を用いて、フロントウインドシールド正面下方に歩行者部を強調した赤外線映像を音声案内と共に表示した。

テストコースにおいて検出性能を確認した結果、路上や横断歩行者との衝突の可能性を判定できることが分かった。

また、提供情報に対する運転者の回避行動を確認した結果、歩行者との衝突を回避するうえで本システムの手法は有効であることが分かった。

ABSTRACT

A Night Vision system has been developed to reduce pedestrian accidents occurring at night.

High temperature objects presumed to be pedestrians are detected by processing the images from infrared stereo cameras mounted on the front of the vehicle, and the possibility of a collision is judged by calculating the position and relative moving vector of the pedestrian.

In addition, voice guidance is provided and a highlighted infrared image of the pedestrian is displayed at the bottom of the front windshield using a head-up display (HUD) installed in the instrument panel.

As a result of confirming detection performance on a test course, it was found that the possibility of collisions with pedestrians on the road and road crossings could be judged.

Further, as a result of confirming evasive action on the part of the driver with respect to the provided information, this system was found to be an effective means of avoiding collisions with pedestrians.

1. まえがき

日本国内における交通死亡事故は年間約1万件発生しており、このうち約3割が交通弱者である歩行者との衝突事故である⁽¹⁾。

現在、このような歩行者事故に対して衝突安全の見地から歩行者保護車体構造の実用化を行なっているが、本報告では予防安全の見地から運転者に事前に歩行者の存在を知らせるシステムの検討を行なったので報告する。

はじめに、システムの機能と仕様を検討するために歩行者事故(死亡)の詳細な解析を行なった。Fig.1に解析結果を示す。

これらの結果より、

*栃木研究所

1) A), B), C)のグラフより夜間、直線路を直進走行しているときに路上や横断歩行者と衝突している事故が多い。

2) D)のグラフより速度 40km/h ~ 80km/h で走行しているときに衝突している事故が多い。
ということが分かった。

そこで、Fig.2に示すような夜間走行時に見え難い路側の歩行者や横断してくる歩行者を検出し、音声案内と赤外線映像表示によって運転者に知らせるナイトビジョンシステムの開発を行なった。

また、本システムの有効性を横断歩行者の検出テストと障害物回避テストによって確認した。

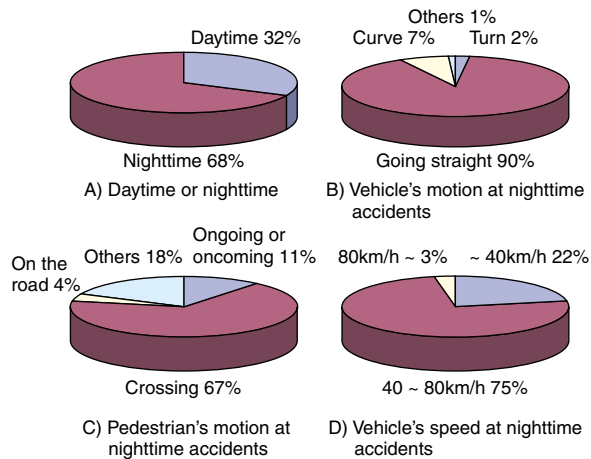


Fig.1 Accident investigation of pedestrian fatalities

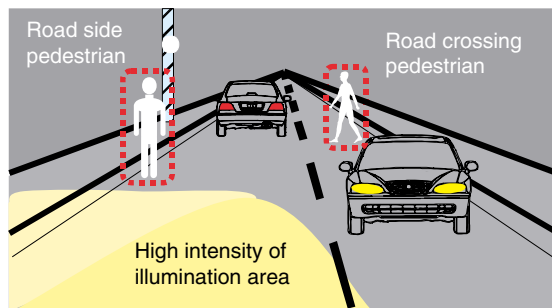


Fig.2 Example of pedestrian who the driver should notice

2. システムコンセプト

2.1. システム機能と構成

システム機能を決定するにあたり、以下の目標要件を設定した。

- 1) 提供情報は運転者の注意喚起が可能であり、かつ前方の状況判断ができる内容であること。
- 2) 一般道における対向車両等による隠蔽を考慮し、歩行者の頭部～全身サイズ(20cm × 20cm ~ 2m × 2m)の対象物を検出できること。
- 3) 情報提供後、衝突発生までの余裕時間(情報提供時間)を3.5sec以上とし⁽²⁾、これに必要な検出距離を有すること。

1)の要件を満足するために、注意を喚起するための音声案内と夜間の前方の状況を映像化できる赤外線カメラの映像をHUDに表示することとした。

また2)、3)の要件を満足する検出性能を得るために赤外線カメラをステレオ化し、歩行者とみなせる熱源対象物までの距離を算出することによって衝突判定を行なうこと

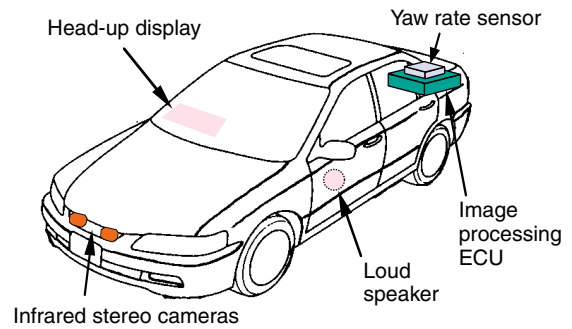


Fig.3 System component locations

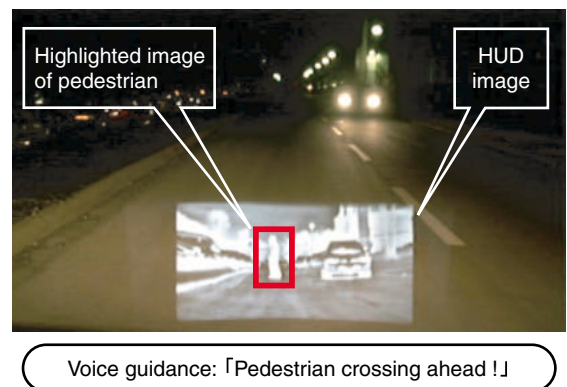


Fig.4 Driver's view point of HUD image and voice guidance

とした。Fig.3に本システムの実車レイアウトをFig.4に情報提供動作状態を示す。

2.2. 情報提供動作条件

本システムはヘッドライトで見え難い領域に対する視覚補助機能という位置付けからヘッドライトの高照度領域(前方30m以内)より遠方の領域を情報提供対象エリアとした。

また、歩行者事故解析結果²⁾より走行速度 40km/h 以上で情報提供動作させることとし、走行速度 80km/h まで情報提供時間 3.5sec 以上の要件を満足できることを目標とした。(すなわち Fig.5 に示す 40m ~ 80m の検出対象エリア。)

2.3. 検出判定条件

衝突しそうな歩行者を検出するために Fig.5 に示す 2 つの検出エリアと判定条件を設定した。

2.3.1. 接近対象物判定と検出エリア

路側の歩行者を想定し、前後に 5 km/h 以下の速度を有する歩行者を、車体巾+左右に 1 m のマージンを持たせた領域において検出する。

自車が旋回走行をしている場合にはヨーレートと車速から自車進行予測走路を推定し、検出エリアを变形修正する。

2.3.2. 横断対象物判定と検出エリア

横断する動きを持った対象物が自転車と衝突する条件は自転車から見た対象物の方位: θ [deg] が一定の場合であり⁽³⁾, θ は自転車走行速度 V_j と対象物の横断速度 V_h によって式(1)により決定される。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_h}{V_j} \quad (1)$$

ここで、歩行者の横断速度を 1 m/s と仮定し、情報提供を行なう最低動作車速を 40km/h とすると、画角 11deg 以上の赤外線カメラの全映像範囲内が横断対象物検出エリアとなる。

また、これ以上の横断速度を有する対象物は赤外線カメラの画角外から短時間に映像上に現れるため、検出は可能であるが情報提供時間は短くなる。

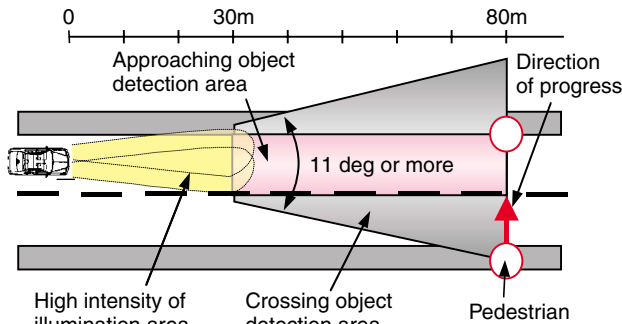


Fig.5 Detection area of pedestrian

3. 検出処理アルゴリズム

3.1. 座標系の定義

本システムでは、Fig.6に示す車体を基準とした3次元座標系と映像座標系の2つを用いる。

3次元座標系の原点Oは右カメラのレンズ中心、軸回転は右ネジ方向を正とし、映像座標系は3次元座標系における $Z=f$ (f : カメラの焦点距離)の平面、原点oはZ軸との交点とする。

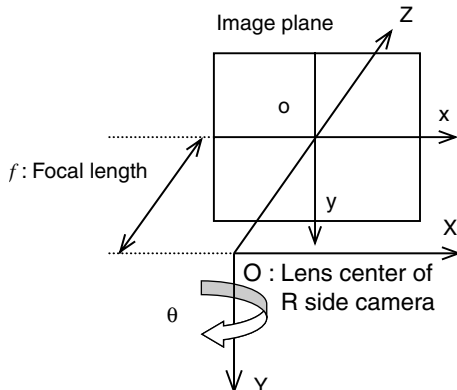


Fig.6 Definition of coordinate system

3.2. 歩行者の抽出と時間追跡

季節を通じて外気温と歩行者の皮膚表面温度の差を計測した結果、外気温30℃程度まで5℃程度の温度差が発生していることが分かった。計測結果を Fig.7 に示す。

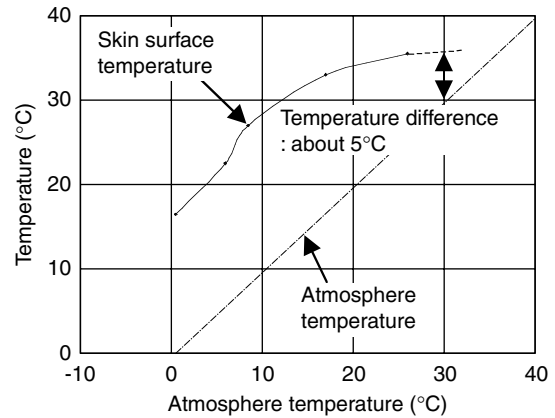


Fig.7 Temperature difference in skin surface and atmosphere at all season

よって、赤外線映像上では歩行者等の熱源対象物は他の背景物に対して高輝度に表示される。

季節毎に一般道を走行して取得した映像データを2値化処理し、映像中から歩行者を抽出できることを確認した。Fig.8に夏に撮影した赤外線映像と2値化処理した結果を示す。



Fig.8 Infrared image and result of two level rendition in summer time condition

実車システムではステレオ赤外線カメラの右映像の輝度ヒストグラムを算出し、頻度分布の中間値に閾値を設定することによって、右映像より歩行者を抽出する。

対象物の重心位置や形状特徴を条件として時間毎に右映像上の対象物の同一性を判定し、時間追跡を行なう。Fig.9に右映像上の対象物の時間追跡状態を示す。

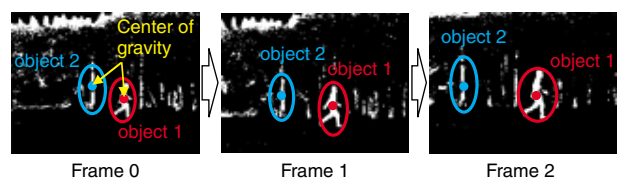


Fig.9 Object tracking

3.3. 対象物の3次元位置座標の算出

ステレオ赤外線カメラの左右の映像間には、Fig.10 に示すように対象物の距離に応じた横位置差(視差) $dn[\text{pixel}]$ が発生する⁽⁴⁾。対象物周辺の右映像を切り出し、左映像との間で相関演算を行なうことによって、発生視差 dn を算出する。次に算出された視差より式(2)を用いて、対象物までの距離 $Z[\text{m}]$ を求める。

また、映像上の重心位置 $q = (xi, yi)^T$ と算出された距離 $Z[\text{m}]$ から式(3)、式(4)を用いて、対象物の3次元位置 $P = (Xi, Yi, Zi)^T$ を算出する。

D はカメラ間距離[m]、 f 、 p はそれぞれカメラの焦点距離[m]と画素ピッチ[m/pixel]である。

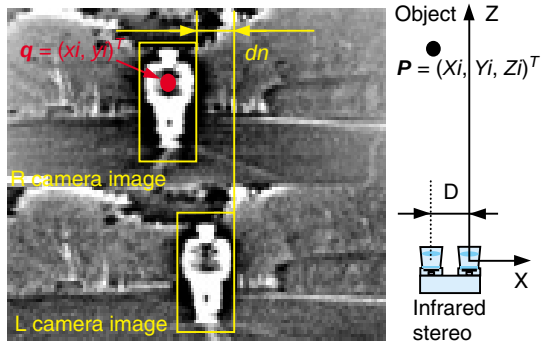


Fig.10 Disparity of infrared stereo cameras

$$Zi = f \times \frac{D}{dn \times p} \quad (2)$$

$$Xi = \frac{xi \times Zi \times p}{f} \quad (3)$$

$$Yi = \frac{yi \times Zi \times p}{f} \quad (4)$$

3.4. 対象物の相対移動ベクトルの算出

走行時に発生する車両のわずかな回頭角度によって、算出された対象物のX軸方向位置が大きく変化するため、走行状態で横断歩行者の発生するX軸方向の3次元位置変化を識別することは困難である。

そこで、Fig.11 に示すように車速センサとヨーレートセンサを用いて、自車の移動量(T)と回頭角度(θ)を算出し、式(5)、(6)を用いてこの変化を補正する。

但し、 $P'[t] = (Xa[t], Ya[t], Za[t])^T$ 、 $P[t] = (Xc[t], Yc[t], Zc[t])^T$ はそれぞれ時刻 t に車両位置A、Cで算出された対象物の3次元位置である。

$$\begin{bmatrix} Xc[t] \\ Yc[t] \\ Zc[t] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xa[t] \\ Ya[t] \\ Za[t] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Tx = \frac{360 \times T}{2 \times \pi \times \theta} \times (1 - \cos \theta) \quad (6)$$

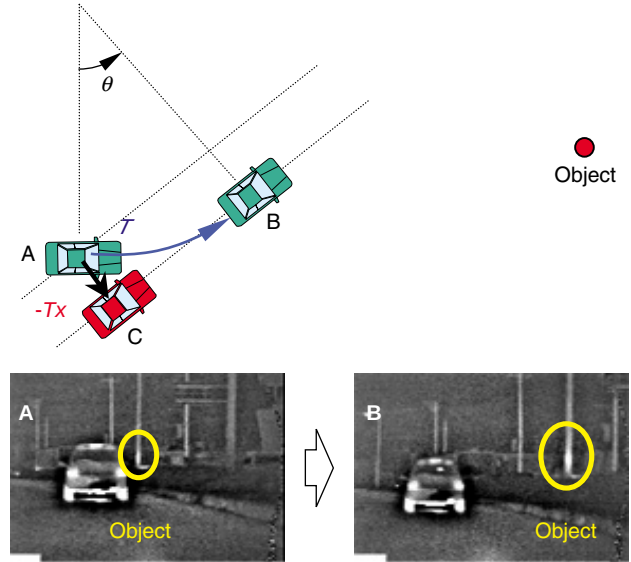


Fig.11 Compensation of the object 3D position

式(5)、(6)を用いて、自車の回頭挙動を補正した時刻 $t=0$ (過去)から時刻 $t=n$ (現在)までの区間の対象物位置群 $P[t] = (Xc[t], Yc[t], Zc[t])^T$ を Fig.12 に示す。

式(7)に示す対象物位置群($P[t]$, $t = 0, 1, \dots, n$)の重心座標 $Q = (\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})^T$ と相関行列より主成分分析を用いて⁽⁵⁾ 直線方向ベクトル $L = (Lx, Ly, Lz)^T$ を算出することによって、対象物の相対移動ベクトルを式(8)に示す直線として求める。

また相対速度(Vs)は対象物位置の時間差分より算出する。

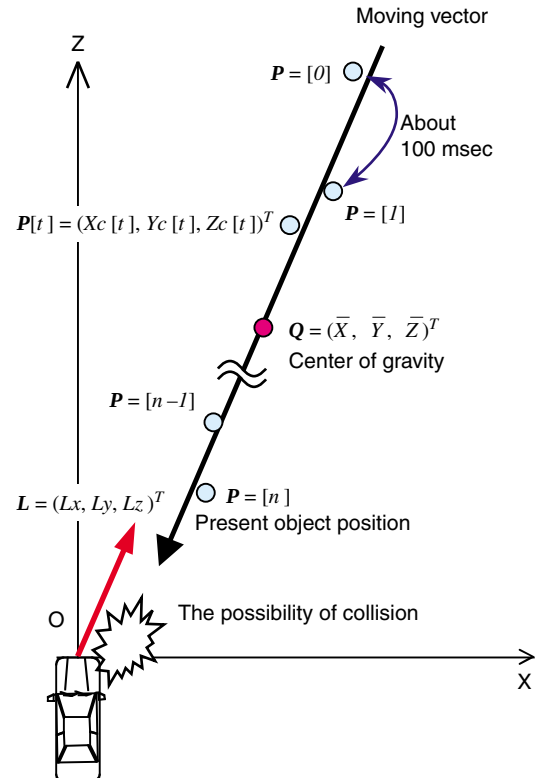


Fig.12 Predict 3-D moving vector

$$\begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = \frac{1}{n+1} \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n X_c[i] \\ \sum_{i=0}^n Y_c[i] \\ \sum_{i=0}^n Z_c[i] \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\frac{X - \bar{X}}{L_x} = \frac{Y - \bar{Y}}{L_y} = \frac{Z - \bar{Z}}{L_z} \quad (8)$$

3.5. 衝突判定処理

算出された相対速度 V_s と車速センサより算出した走行速度 V に対して式(9)に示す条件を満たし、道路平面より高さ2m以内の対象物に対して2.3.節の検出判定条件に示した2つの検出判定を行なう。

$$|V - V_s| \leq \frac{V}{2} \quad (9)$$

3.6. 処理フロー

実時間処理を実現するために処理1)、処理2)に分離し、処理1)をビデオレート：33msec、処理2)を100msec毎の独立の演算周期で行なう。

処理1) ステレオ赤外線カメラの右側の映像のみを使用し、対象物の2値化抽出、追跡、映像表示を行う。

処理2) ステレオ映像から対象物の3次元位置を算出し、相対ベクトル推定、衝突判定を行う。

検出処理フローを Fig.13 に示す。

さらに、カメラ間のアライメント、およびカメラ光学系のひずみについてはソフトウェア処理で補正した。

試作したステレオ赤外線カメラの実車搭載レイアウトを Fig.14 に示す⁽⁶⁾。

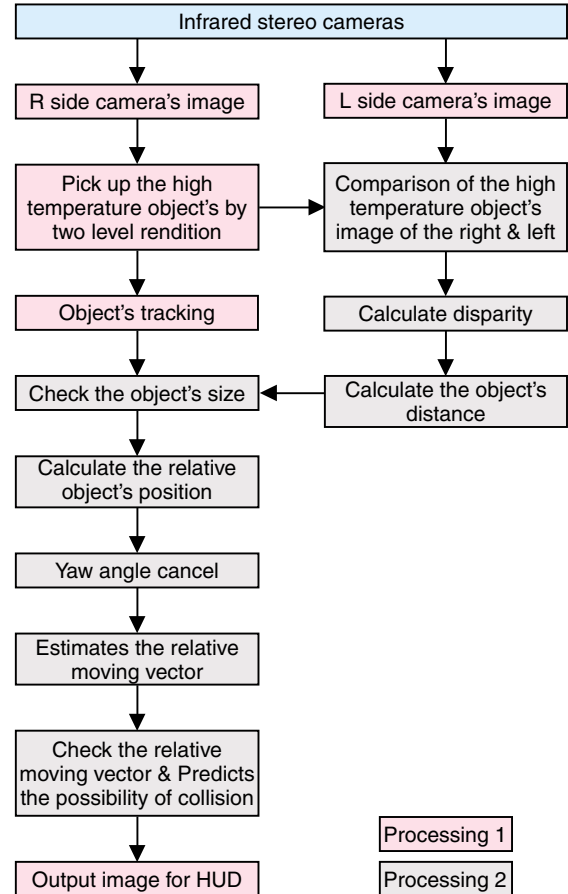


Fig.13 Processing flow of pedestrian detection

4. ハードウェア

4.1. ステレオ赤外線カメラ

使用したステレオ赤外線カメラは画角 $H \times V: 12\text{deg} \times 9\text{deg}$, 320×240 画素の非冷却型赤外線カメラを2個使用することで実現し、カメラ間距離は360mmとした。

対象物の距離を正確に算出するためにはステレオ赤外線カメラの特性に以下の4つの条件が必要となる。

- (1) カメラ間の撮像同期がとれていること。
- (2) カメラ間の映像輝度特性が揃っていること。
- (3) カメラ間のアライメントがとれていること。
- (4) カメラの光学系にひずみがないこと。

撮像同期については同期型撮像回路の試作を行なうことで実現し、カメラ間の映像輝度特性については今回の試作品で十分な同一特性が得られた。

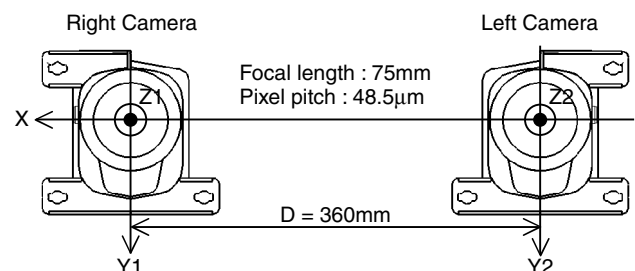
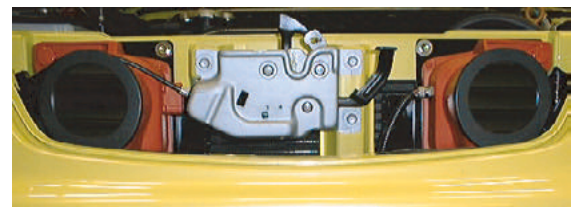


Fig.14 Infrared stereo cameras Installed in the car

4.2. ヨーレートセンサ

相対移動ベクトル推定と接近判定エリアの変形のために、車両回頭角度算出用としてダイナミックレンジ $\pm 50\text{deg/s}$ 、最小検出分解能 0.03deg/s 程度を有する光ファイバージャイロを使用した。

4.3. 画像処理 ECU

ステレオ赤外線カメラの左右の映像はそれぞれ NTSC 出力され上下2分割の 640×480 画素(左右それぞれ 640×240 画素)に合成し、8 bit 階調、ビデオレート(30 フレーム/s)でサンプリングする。(Fig.10 のステレオ赤外線カメラの画像参照)

また、車速、ヨーレート等の車両情報も映像と同様に 33msec 周期で取り込む。画像処理 ECU の構成を Fig.15 に示す。

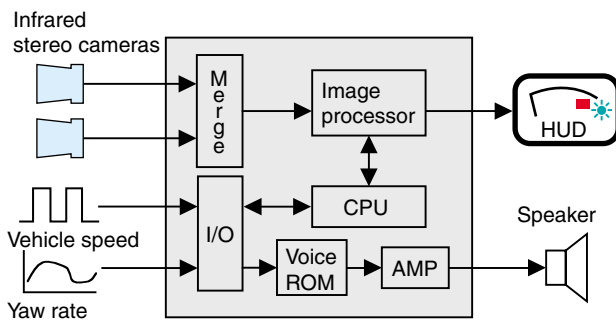


Fig.15 Image processing ECU

4.4. ヘッドアップディスプレイ

表示映像: H image $\times$ V image は横断歩行者検出範囲と 30m 先の歩行者の全身を表示できる $11\text{deg} \times 4\text{deg}$ とした。

また、運転者から見える HUD の表示サイズ: H disp $\times$ V disp は上記表示映像が前方の歩行者の方向や距離を認識するうえで違和感の少ない $10\text{deg} \times 3.5\text{deg}$ とした。

表示位置は運転者正面下方、見下ろし角度 5deg とし、映像位置は約 2m 前方のボンネット先端付近とした。

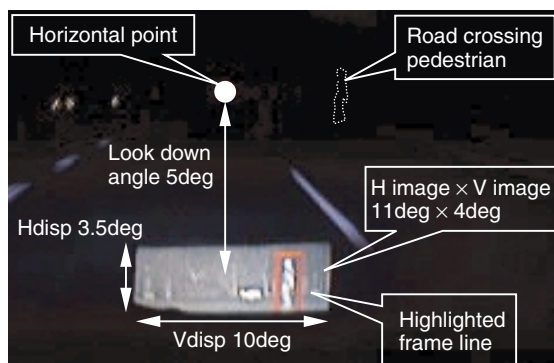


Fig.16 Projected images of HUD



Fig. 17 Appearance of HUD

また、表示虚像輝度は $0 \sim 50\text{cd}$ とし、検出された歩行者部の強調表示色は認識しやすい赤色とした。(Fig.16 参照)試作した HUD の外観を Fig.17 に示す⁽⁶⁾。

5. テスト結果

5.1. 対象物検出結果

試作したシステムが設定した検出性能を満足しているかどうかを判定するために2つの確認テスト行なった。

5.1.1. 相対速度算出テスト

静止対象物に向かって 60km/h で走行し、相対速度を算出した結果を Fig.18 に示す。(横軸は対象物までの距離、縦軸は相対速度誤差を表わす。)

走行速度 60km/h における衝突 3.5sec 前は前方約 60m の距離であり、また、検出すべき対象物の相対速度は式(9)より $\pm 30\text{km/h}$ 以下の対象物である。

Fig.18 より、距離 60m における静止対象物の相対速度算出精度は $\pm 25\text{km/h}$ 以内であるため、歩行速度 $\pm 5\text{km/h}$ 以下の歩行者の相対速度算出精度は $\pm 30\text{km/h}$ 以下と推定され、検出条件: $\pm 30\text{km/h}$ 以下を満足できる。

また、走行速度 $40\text{km/h} \sim 80\text{km/h}$ においても、同様なテストを行ない、衝突 3.5sec 前に歩行者を検出できることを確認した。

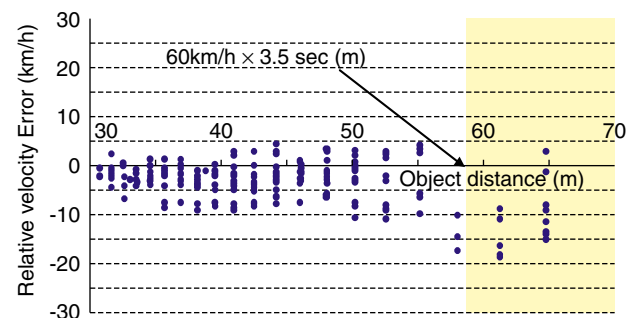


Fig.18 Relative velocity error of the object distance

5.1.2. 相対移動ベクトルの算出テスト

速度 50km/h の走行車両の約 60m 前方を約 1 m/s の速度で横断した歩行者と静止対象物(街灯)の相対移動ベクトルを算出した結果を Fig.19 に示す。

算出された相対移動ベクトルより、歩行者の横断速度は 1.02m/s、街灯は 0.08m/s であり、横移動ベクトルは $\pm 0.1\text{m/s}$ 以内の精度で算出されていることが判る。

また、衝突の 3.5sec 前、約 50m の地点での相対速度算出結果は 40km/h であり、式(9)の条件を満たし、横断歩行者の検出判定が可能であることが分かる。

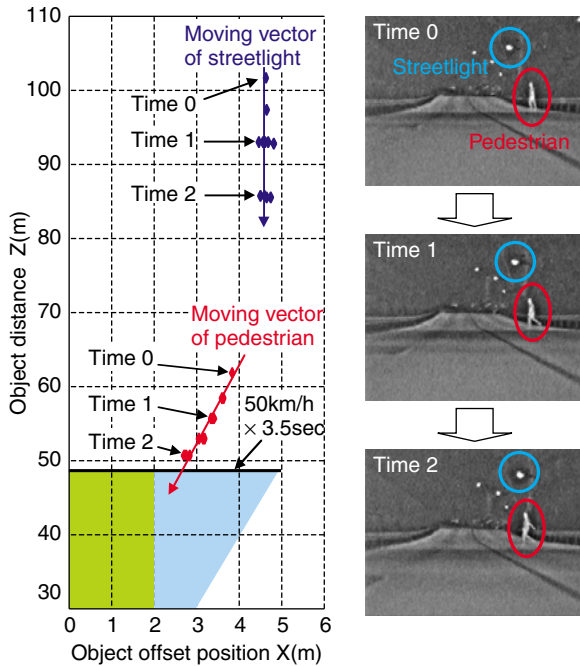


Fig.19 Detected moving vector and infrared images

5.2. 情報提供手法の評価

夜間、障害物が見え難い走行状況をテストコースで再現し、障害物に対する情報提供を複数の手法を使って行い、各手法における回避行動開始時間を比較した。

1) 情報提供方法の比較

「音声情報のみ」と「音声+強調赤外線映像」

2) 提供映像位置の比較

インストルメントパネル内LCDとHUD(Fig.20 参照)。

5.2.1. テスト方法

夜間、フォグライトのみの点灯によって視界範囲を 20m ~ 30m に制限し、速度 40km/h の等速走行を被験者に指示したうえで、障害物の情報提供を行なった。情報提供時の単純反応を避けるために車両正面とセンターライン上の 2 箇所にランダムに障害物を設置し、距離 40m の位置で情報提供(衝突の 3.6sec 前)を行なった。テスト条件を Fig.21 に示す。

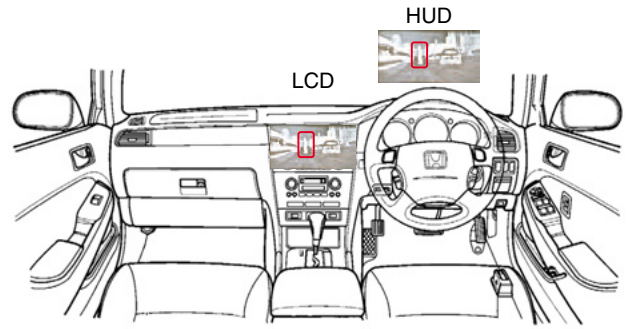


Fig.20 HUD and LCD display position

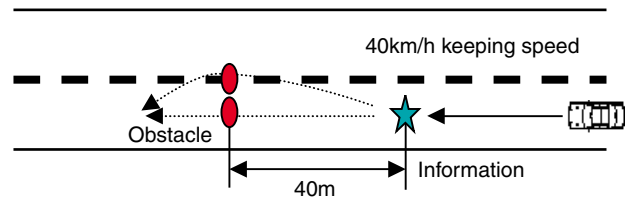


Fig.21 Interface test condition

5.2.3. テスト結果

被験者によって回避行動が異なったため、ステア回避またはブレーキ回避の内、早い方を回避行動開始時間(反応時間)とした。情報提供方法の違いによる比較結果を Fig.22 に、表示位置の違いによる比較結果を Fig.23 に示す。

2つのテスト結果より「音声+ HUD 表示」に対しては 1 sec 程度で回避行動が開始できているが、「音声のみ」、「LCD による映像表示」では回避行動開始が 1 sec 以上の場合が多く発生していることが分かる。このことから、音声+HUD による強調赤外線映像表示は運転者の回避行動に対して、有効であると考えられる。

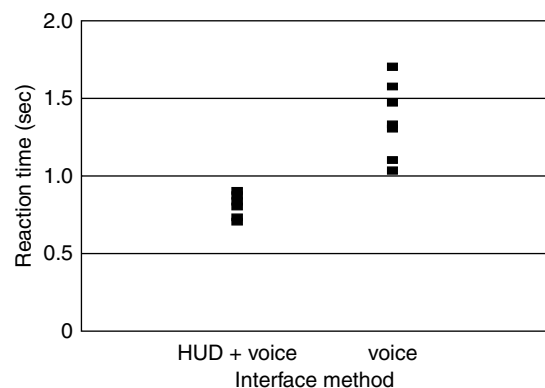


Fig. 22 Comparison voice and IR image with voice

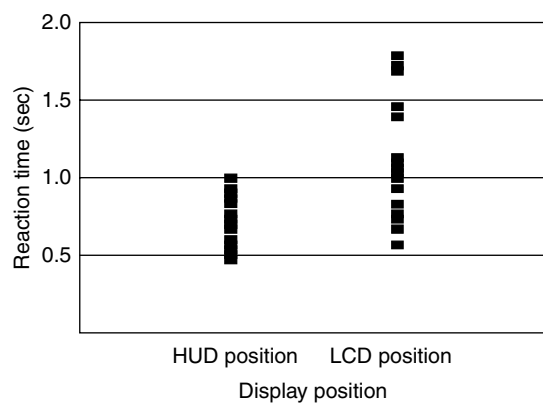


Fig.23 Comparison HUD and LCD position

6. まとめ

夜間の歩行者事故の解析結果に基づき、ステレオ赤外線カメラと画像処理装置、HUDを使って、夜間走行時に路側の歩行者や横断歩行者の存在を運転者に知らせるシステムを実現し、以下の2つの結果を得ることができた。

- 1) ステレオ赤外線カメラの映像処理によって、歩行者とみなせる熱源障害物との衝突判定を行うアルゴリズムを構築し、走行速度 40km/h ~ 80km/h において衝突の 3.5sec 前に衝突の可能性を判定できることが分かった。
- 2) 実視界対比型の HUD を用いて強調赤外線映像を表示することによって、情報提供から 1 sec で回避行動ができるインターフェースが実現できた。

参考文献

- (1) 交通事故統計年報 平成 10 年版, 東京, 交通事故総合分析センター, 1999
- (2) 宇野 宏, 平松金雄: 緊急状況における余裕時間とドライバの操舵回避との関係, 人間工学, Vol.35, No.4, p.219-227 (1999)
- (3) 内田信行, 藤田和男, 片山 硬: 見通しのよい交差点における出会頭事故について, 自動車技術会論文集 Vol.30, No.1, p.133-138 (1999)
- (4) 奥富正敏 ほか: コンピュータビジョン 技術評論と将来展望, p.123-137 (1998)
- (5) 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, p.40-43 (1991)
- (6) 浅沼信吉 ほか: ホンダ ASV-2 の紹介 (乗用車), HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.1-8 (2000)

■ 著 者 ■



辻 孝之



服部 弘



渡辺 正人



長岡 伸治