

単眼カメラを用いた衝突までの残り時間 τ の抽出と衝突検知システムへの適用：消失点と τ の同時推定アルゴリズムの提案

KAWAI, Yuichi / 河合, 雄一

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

56

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2015-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00011128>

単眼カメラを用いた衝突までの残り時間 τ の抽出と 衝突検知システムへの適用 ～消失点と τ の同時推定アルゴリズムの提案～

ESTIMATION METHOD FOR TIME TO CONTACT FROM VISUAL INFORMATION
-A SIMPLE APPROACH THAT REQUIRES NO RECOGNITION OF OBJECTS-

河合雄一

Yuichi KAWAI

指導教員 伊藤一之

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程

Recently, intelligent safety systems for automobiles, such as autonomous collision avoidance, have attracted considerable attention. Usually, automobiles have distance sensors to detect obstacles. On the other hand, animals and insects can behave adaptively, even in an unknown environment, even though they do not have such sensors. In ecological psychology, it is assumed that animals and insects use information related to the time to contact instead of distance information. This time-to-contact information is called the “ τ -margin,” and it is calculated from the apparent size of the approaching object and its temporal change in conventional studies. Therefore, the detection of each object is required before calculating the τ -margin. In this paper, we propose an algorithm to estimate the τ -margin without detecting objects. To verify the effectiveness of the proposed algorithm, we conducted experiments using 1/10-scale automobiles and a real vehicle.

Key Words : crush avoidance system, ecological psychology, monocular camera, τ -margin

1. はじめに

近年、科学技術の発達に伴い自動車の環境性能や快適性、安全性能などは大幅に向上しつつある。その中でも衝突防止システムはここ数年注目を集め、すでに多くの自動車メーカーで衝突回避システムが実用化されている[1]。これらの衝突防止システムは、ステレオカメラや距離センサーを用いて前方の物体との相対距離や相対速度などを取得し、衝突を検知している[2]-[4]。そのため従来の衝突検知システムは、高価な距離センサーや複雑な画像処理計算を要している[5],[6]。

一方で、昆虫や動物などの自然界の生物は上述のようなセンサーを有していないにも関わらず未知環境において適応的に行動することが可能である。

これについて生態心理学では、生物は距離情報の代わりに視覚情報から物体に衝突するまでの残り時間を直接知覚することで適応的な動きを可能にしていると考えられている。この衝突までの残り時間は τ マージンと呼ばれ、接近物体の見かけ上の大きさとその変化量から求められる[7],[8]。

従来研究では、視覚情報のみから τ を取得する自動車の衝突検知システムが提案されており、1/10 スケールの

縮小環境においてその有用性が示されている。しかし、従来研究は直進時における τ の取得を主な目的としており、頻繁に進行方向が変化するような車載映像では τ の取得が困難であった。

そこで本研究ではこの問題を解決する為に、進行方向が変化する際の画像特性を考慮して τ を取得するアルゴリズムを提案し、1/10 スケールのモデルと実車を用いて検証する。

2. τ マージン

生態心理学では、生物は接近する物体を回避する際、物体との距離情報の代わりに物体に衝突するまでの時間を知覚していると考えられている。

この衝突までの残り時間は τ マージンと呼ばれ、接近する物体の見かけ上の大きさとその変化量から取得できる。

図1は先行車とカメラを通して映る画像の関係図である。カメラのレンズから先行車までの距離を L 、焦点距離を f 、画像上に映る任意の点の画像中心からの距離を r 、衝突までの残り時間を τ 、実車における中心からその点までの実寸を R とする。

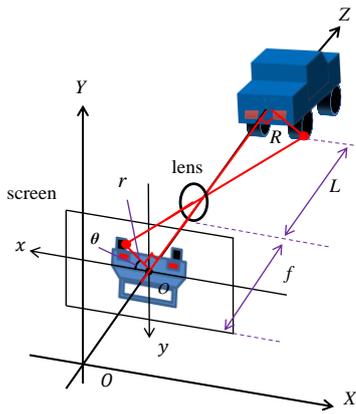


図1 先行車とその像の距離関係

図1の相似関係から(1)式が得られる。また(1)式を時間微分したもので除算すると(2)式が得られる。

$$r = \frac{f}{L} R \quad (1)$$

$$\frac{r}{\dot{r}} = -\frac{L}{\dot{L}} = \tau \quad (2)$$

\dot{L} は先行車との相対速度を表しているため、 $-L/\dot{L}$ は衝突までの残り時間を表している。従って(2)式は、 τ が接近する物体の見かけ上の大きさとその変化量から取得できることを表している。

3. 従来研究

τ は画面に写る物体の見かけ上の大きさとその変化量から求められる。物体の大きさを知覚するためには画面上の物体を認識する必要がある。しかし、画面上の物体認識は、既知環境や物体の数が少ない未知環境では容易であるが、図2に示すような実環境においては非常に多くの物体が存在する為、計算時間が膨大になってしまうという問題がある。

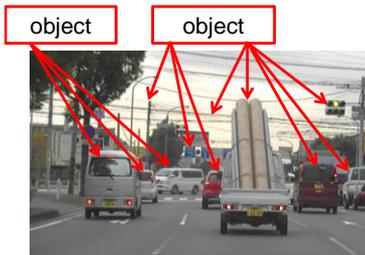


図2 多くの物体が存在する環境

(1) 従来研究における τ 推定アルゴリズム

この問題に対して、従来研究では視覚情報から物体の

認識をせずに τ を推定するアルゴリズムを提案し、衝突回避システムに適用することでその有用性の検証を行った。以下に従来研究で提案された τ の取得アルゴリズムを示す。

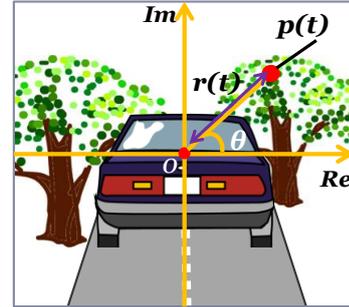


図3 極座標系における車載カメラ画像

図3のように車載カメラに写る画像上に極座標系を定義した場合を考える。カメラが先行車へ接近すると、画像は中心から放射状に拡大する。ある時刻における画像上の任意の画素を $P(t)$ 、画像の中心から $P(t)$ までの距離を $r(t)$ 、 $P(t)$ から中心まで引いた線と横軸のなす角を θ とすると、 $P(t)$ の位置は(3)式で表すことができる。また Δt 秒後の $P(t)$ の位置 $P(t+\Delta t)$ は(4)式で表わされる。さらに(4)式に(2)式を代入すると、(5)式が得られる。

$$P(t) = r(t)e^{i\theta} \quad (3)$$

$$P(t+\Delta t) = \{r(t) + \dot{r}(t) \cdot \Delta t\} e^{i\theta} \quad (4)$$

$$= \left\{ r(t) + \frac{1}{\tau(t)} r(t) \cdot \Delta t \right\} e^{i\theta}$$

$$= P(t) \left\{ 1 + \frac{1}{\tau(t)} \cdot \Delta t \right\} \quad (5)$$

(5)式は、画像上に写る物体の τ はその物体が写る画素の移動量のみから推定可能であることを示している。したがって画像上の物体を認識することなく τ の取得が可能となり、計算時間は画像の画素数のみに依存する。

(2) 従来研究の問題点

従来研究で提案された τ の取得アルゴリズムは、実環境に比べ簡素な縮小環境では有用性が確認されたが、実際の車載カメラの映像のような実スケール環境下では τ の取得が困難であった。その理由として、従来のアルゴリズムは観測車の進行方向が変化することに伴う消失点の移動を考慮していない点が挙げられる。

観測車が直進する場合、カメラに写る画像が拡大する中心点は画像の中心に存在する。しかし観測車の進行方向が変わる場合、画像が拡大する中心点は移動する(図4)。この拡大の中心点は消失点と呼ばれる。また、車載カメラの向きが観測車の進行方向と完全に一致していない場合でも消失点は画面の中心から外れる。さらに画素の移

動量は消失点から離れるほど大きくなる特性があるため、消失点为中心からずれる場合、画像の左右で拡大率に差が生じる(図5).

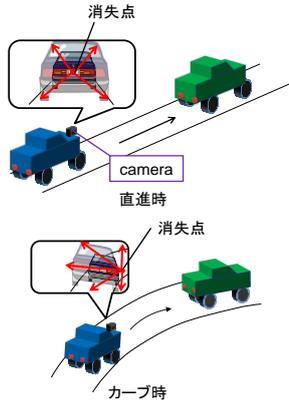


図4 進路変更に伴う消失点の移動

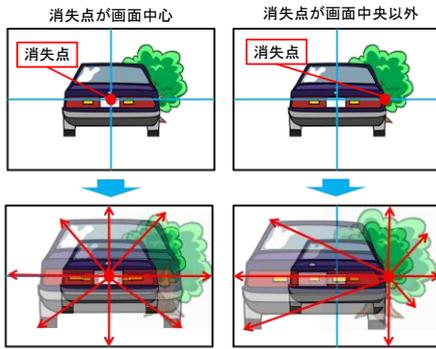


図5 消失点の位置移動による画像特性の変化

これに対して従来研究における τ 取得アルゴリズムでは、消失点の位置は常に画像の中心と仮定されており消失点の移動に伴う画像特性の変化が考慮されていなかった。

従って本研究では、従来研究で提案された物体を認識せずに τ を取得するアルゴリズムを用いて、観測車の進路変更に伴う画像特性の変化を考慮して τ および消失点の位置を同時に推定するアルゴリズムを新たに提案する。そして1/10スケール環境と車載カメラの映像を用いた実験をそれぞれ行い、提案したアルゴリズムの有用性を検証する。

4. 提案手法

(1) 消失点の移動を考慮した τ の取得アルゴリズム

前章で述べた問題を解決するために、本節では観測車の進路変更に伴う消失点の移動および画像特性の変化を考慮した τ の取得アルゴリズムを提案する。

以下のように、x-y座標系と極座標系を定義する(図6)。x-y座標系は画面中央を原点とし、極座標の原点はx-y平面上の任意の位置(a, b)に存在する消失点とする。この時、ある時刻における任意の画素 $P(t)$ の位置は(3)式で表され、 Δt 秒後の $P(t)$ の位置 $P(t + \Delta t)$ は(5)式で表される。

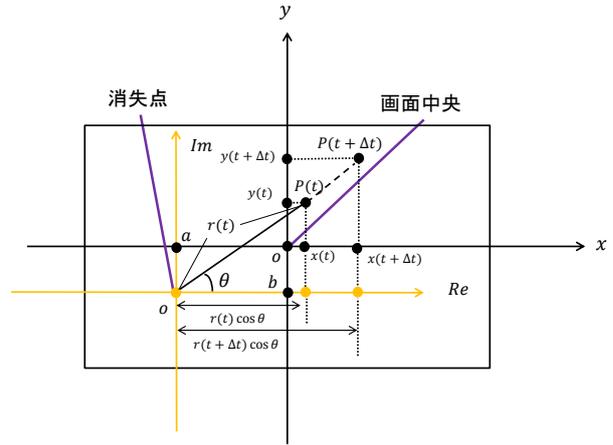


図6 定義した二つの座標系

$$P(t) = r(t)e^{i\theta} \quad (3)$$

$$P(t + \Delta t) = P(t) \left\{ 1 + \frac{1}{\tau(t)} \cdot \Delta t \right\} \quad (5)$$

極座標の原点から $P(t)$ までの距離 $r(t)$ とすると、(5)式から(6)(7)式が得られる。(6)(7)式は $P(t)$ の Δt 秒間におけるx-y各方向への移動量と消失点の座標のみから τ が得られることを表している。従って、画像情報のみから物体の認識を行うことなく τ の推定が可能となる。

$$x(t + \Delta t) = \{x(t) - a\} \left\{ 1 + \frac{\Delta t}{\tau} \right\} + a \quad (6)$$

$$y(t + \Delta t) = \{y(t) - b\} \left\{ 1 + \frac{\Delta t}{\tau} \right\} + b \quad (7)$$

本研究で(6)(7)式を用いて微小時間前の過去画像から、任意の消失点の位置と τ の時の拡大画像を作成し、カメラに写る画像と比較することで輝度値の二乗誤差を算出する。そして最小二乗法によって最適な消失点の座標及び τ を取得する。

(2) 画面の分割

取得画像には、進行方向だけでなく、背景や、路肩なども写る。各部分に写る物体と観測車の τ はそれぞれ異なるため、画素の移動量は各部分によって大きく異なる(図7)。そこで本研究では車載カメラから取得された画像を複数の領域に分割し、それぞれの領域で τ の推定を行う(図8)。



図7 カメラ画像上での画素の移動量



図 8 画面分割

(3) パラメーターの設定

a) τ の取得間隔

提案手法は現在取得している画像と、過去に取得した画像を任意の τ および消失点で拡大したものを比較するため、2 画像が十分に变化している必要がある。また、警視庁のホームページでは車間距離を時間換算した場合の値を車間時間と呼び、安全な車間時間を 2 秒としている。そのため、その間に十分な回数 τ を取得する必要がある。そのため画像の取得および τ の取得は 0.1 秒おきに行い、画像の比較は現在画像と 0.5 秒前に取得された過去画像で行うものとする (図 9)。

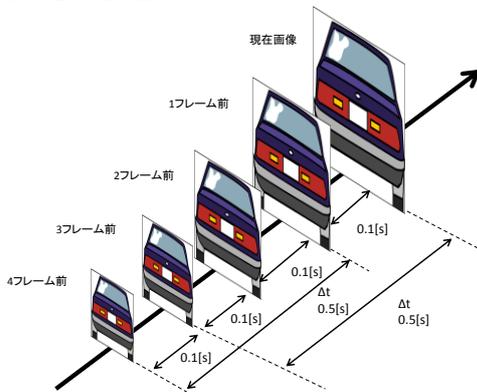


図 9 τ の取得間隔

b) 画面の分割数

図 7 のような車載カメラ映像において、背景にある物体は観測車から離れているため、背景の τ は非常に大きい。これは背景部分の画素の移動量は非常に小さいことを意味しており、 τ の推定は困難である。従って、画面の分割数は進行方向正面と両脇の 3 つとする (図 10)。



図 10 3 つに領域分け

c) カメラの画角の設定

映像を取得するカメラの画角は画素の移動量に大きな影響を与える。画角が小さい場合、カメラの振動に伴う画像の揺れが大きくなり、 τ の取得が困難になる。また画角が大きい場合では、先行車に接近した際に十分な画

像の変化が得られなくなり、 τ の取得が困難となる。そのため接近に伴う画素の変化を十分に確保しつつ画像の揺れが小さくなるような画角を設定する必要がある。

日本における一般的な道路の幅員は 3.0 m ~ 3.2 m 程度とされている。また、安全な車間距離として車間時間 2 秒分の距離が推奨されており、市街地における一般的な制限速度は 40 km/h とされている。よって本研究では幅員 3.2 m の道路を 40 km/h で走行した場合を想定して画角の設定を行う。

40 km/h で走行した場合、推奨される車間距離は 22.2 m となる。取得画像の横方向の全画素数は 640 pixel であり、これを 3 つの領域に分割すると進行方向の領域における横方向の画素数は 210 pixel 程度となる。そのため、取得画像の中心から 210 pixel の範囲に自車の走行車線が写る必要がある。この条件を満たしつつ、カメラの振動に伴う画像の揺れが小さい画角は 25° となる (図 11)。

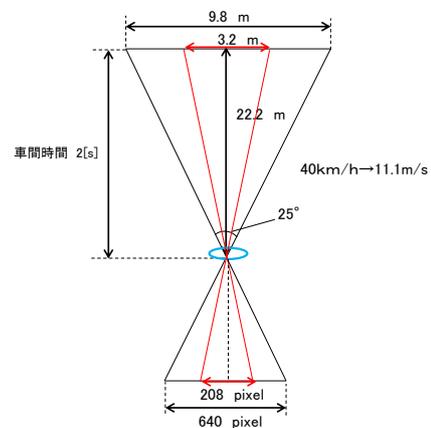


図 11 車間距離と画像上に占める画素の関係

5. 縮小環境における実験

提案手法の有用性を確認するために実験を行う。本章では取得された τ の精度を検証するために、1/10 スケールの縮小環境で実験を行う。ただし本実験は、提案手法の計算時間が大きいのでオフラインで行う。計算時間の短縮への取り組みは今後の課題とする。

(1) 実験環境

図 12 のような実験環境で実験を行う。単眼カメラを搭載した観測車で、3 m 前方に停車している車両へ接近し、衝突の直前で停車する。また、50 cm おきに通過する時間を記録し、 τ の理論値を算出する。さらに路肩の物体として前方の車両の 60 cm 先に 2 台の車両を配置する。実験の設定を表 1 に示す。

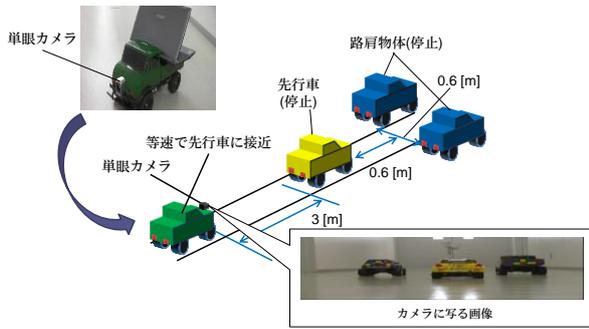


図 12 縮小環境における実験環境

表 1 実験の設定

接近速度 [m/s]	0.6
カメラの画角 [degree]	25
画素数 [pixel]	76800
τ マージンの取得間隔 [s]	0.5

(2) 実験結果

図 13 に各領域で取得された τ を、図 14 に単眼カメラで取得された画像を示す。

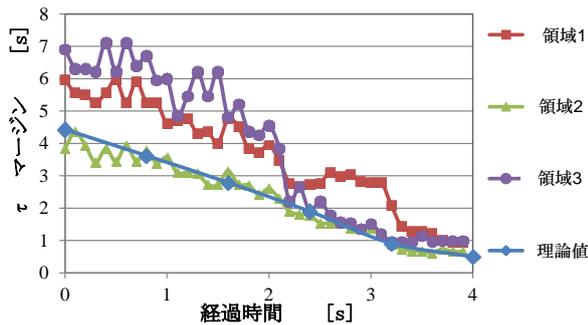


図 13 各領域で取得された τ



図 14 単眼カメラで取得された画像

(3) 考察

この実験では観測車は前方の車両へ等速で接近しているため、 τ は線形に減少する。

図 13 より、領域 2 における τ がほぼ理論値と同じ値を取りながら線形に減少していることが確認できた。 τ が減少するにつれて、誤差が小さくなっているのは、画像の拡大に伴い Δt 秒間での画素の移動量が大きくなったためである。この結果から、前方の車両の τ が取得可能であることが確認できた。

領域 1 と 3 で取得された τ に注目すると、前半では領域 2 で取得されたものよりも高い値である。これは両脇の物体が前方の車両よりもさらに前方にあるためである。両脇の物体は前方の車両の 60 cm 前方にあるので、 τ の理論値は領域 2 の理論値より 1 秒大きい値になる。従って領域 1 と 3 で取得された τ も概ね理論値に一致する。領域 2 で取得された τ よりも誤差が大きい理由としては、両脇の物体の τ が前方車両のそれよりも大きいため、領域 2 に比べて画素の移動量が小さかったということが挙げられる。

領域 1 と 3 で取得された τ の後半に注目すると、領域 3 は経過時間 2 秒付近で、領域 1 では経過時間 3.5 秒付近で急激に減少し、前方車両の τ と一致している。これは観測車が前方物体に接近するにつれてその画像が拡大し、領域 1 と 3 でも前方車両の τ が取得されたからである。

以上の結果より、各領域で τ の取得が確認され、概ね理論値と一致する精度が確認された。また、接近に伴い取得される τ の精度が上がることで、および前方車両に接近すると画像の拡大によって領域 1 と 3 でも前方車両の τ が取得されることも併せて確認した。

6. 実環境における実験

提案手法の実環境における有用性を検証するために、車載カメラの映像を用いて実験を行う。ただし本実験も前章と同様にオフラインで行う。

実験環境の概要図を図 15 に示す。車載カメラを搭載した実車で停車している先行車に等速で接近し、その後停車する。

本実験では片側 1 車線の道路(環境 1)、片側 2 車線の道路(環境 2)、緩やかな S 字カーブのある片側 3 車線の道路(環境 3)、急カーブのある片側 1 車線(環境 4)の 4 つの環境でそれぞれ同様の実験を行う。実験の設定は表 2 の通りである。

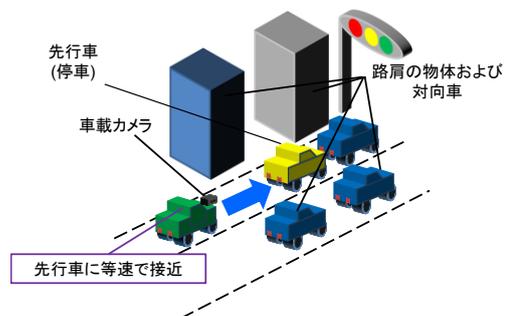


図 15 実環境における実験環境

表 2 実験設定

速度 [km/s]	0~40
画角 [degree]	25
画素数 [pixel]	76800
τ の取得間隔 [s]	0.5

(1) 環境 1 における実験

a) 実験環境



図 16 環境 1

図 16 に示す片側 1 車線の環境で実験を行う。先行車は信号で停車しているスクールバスである。

b) 実験結果

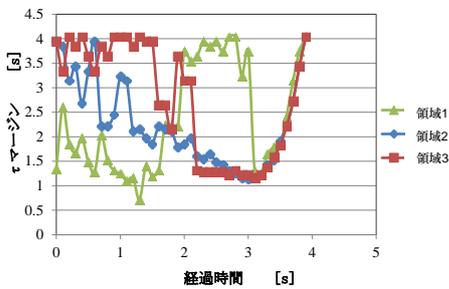


図 17 各領域で取得された τ

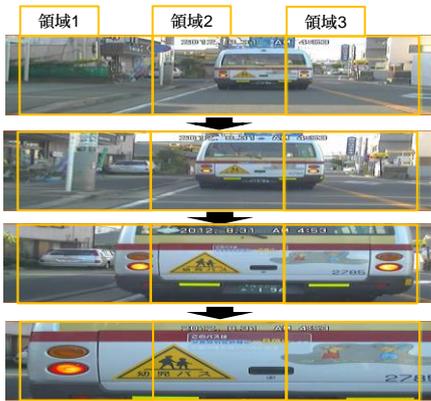


図 18 車載カメラで取得された画像

各領域で取得された τ を図 17 に示す。また、図 18 に車載カメラで取得された画像を示す。

c) 考察

領域 2 に注目すると、 τ は線形に減少した後急激に増加している。これは観測車が先行車に等速で接近した後減速したためである。よってこの結果から、提案手法によって実環境において先行車の τ を取得可能であることが確認できた。次に領域 1 に注目すると、取得値は 2.5 秒から 1 秒まで減少した後、4 秒付近まで急激に増加してい

る。この時図 17 の領域 1 では、路肩の電柱が写り、それが通過した後に民家の駐車車両が写っている。従って領域 1 では最初に道路脇にある電柱の τ を取得した後、電柱が画面外へ出たためその奥の駐車車両の τ を取得したと考えられる。その後領域 2 の取得値と重なっているのは、先行車への接近に伴い先行車の画像が領域 1 まで拡大したためである。領域 3 で取得された τ に注目すると、4 秒付近で飽和している。これは領域 3 に写る物体が遠くにあるのに対して、 τ の最大値を 4 秒と設定したためである。また、先行車の画像が領域 1 よりも早く領域 3 へ拡大したため、領域 1 よりも先に先行車の τ を取得したことも併せて確認された。上記の結果から、実環境において提案手法の有用性が確認された。

(2) 環境 2 における実験

a) 実験環境



図 19 環境 2

b) 実験結果

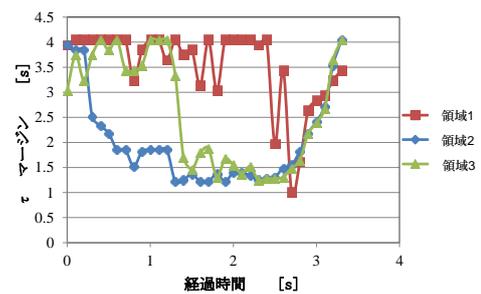


図 20 各領域で取得された τ



図 21 車載カメラで取得された画像

各領域で取得された τ を図 20 に示す。また、図 21 に車載カメラで取得された画像を示す。

c) 考察

領域 2 に注目すると、取得された τ は減少した後

加している。これは先行車に等速で接近して、その後減速したためである。しかし先行車のボディが環境1の先行車に比べ単色であり、横方向へ類似した形状をしているため線形減少に乱れが見られる。領域1と領域3の取得値は、遠くの物体の τ を取得したため飽和状態となり、その後先行車の画像が拡大したことで先行車の τ を取得している。これらの結果から取得した τ には誤差が含まれるものの、環境1の実験結果と同様の結果が得られた。

(3) 環境3における実験

a) 実験環境



図22 環境3

b) 実験結果

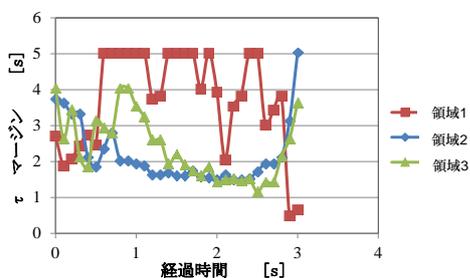


図23 各領域で取得された τ

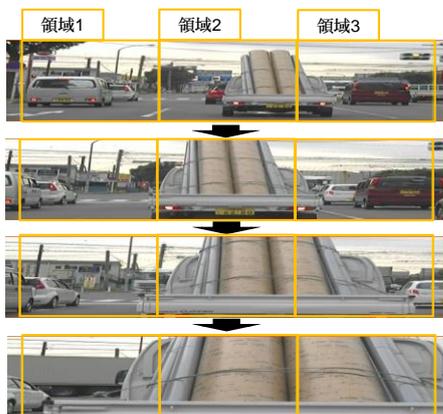


図24 車載カメラで取得された画像



図25 消失点のx座標

各領域で取得された τ を図23に示す。また、図24に車載カメラで取得された画像を示す。さらに、消失点のx座標を図25に示す。

c) 考察

領域2に注目すると、他の環境での取得値と同様に、先行車に接近に伴い τ が線形減少することが確認された。領域3に注目すると、前半に領域2で取得された値と近い値を取得した後増加している。これは先行車の画像が領域3に写った後領域3の外へ出たため、先行車の τ が取得された後、右側の車線を走る車両の τ を取得したと考えられる。領域1に注目すると、取得値が領域2のそれと一致していない。これは、先行車に接近後も領域1に写る先行車の部分が僅かであったためと考えられる。

図25に注目すると、消失点は左右に大きく動いていることが確認できる。これは環境3の道路は緩やかなS字カーブであり、観測車が進行方向を変えるにつれて消失点が移動したためである。また、取得された消失点は最終的に100 pixel付近に収束している。このことから直進時における消失点の位置は画面中心であるため、観測車に搭載した単眼カメラの中心が進行方向と一致していなかったと考えられる。単眼カメラは目視で観測車に搭載されるため、カメラの中心と進行方向にズレが生じる。実験に使用した単眼カメラの画角は25°に設定されており、進行方向に対してカメラが1°ずれたときの画素のずれは25 pixelとなる。従って、単眼カメラは進行方向に対して4°左方向にずれていたと考えられ、実際の消失点の移動範囲は150 pixel~-250 pixel程度の範囲であったと考えられる。

以上の実験結果から、提案手法によって τ と消失点の推定が可能であることを確認した。

(4) 環境4における実験

a) 実験環境



図26 環境4

b) 実験結果

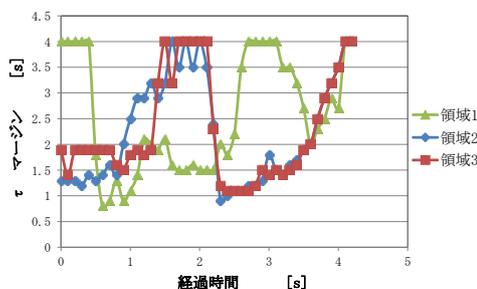


図27 各領域で取得された τ

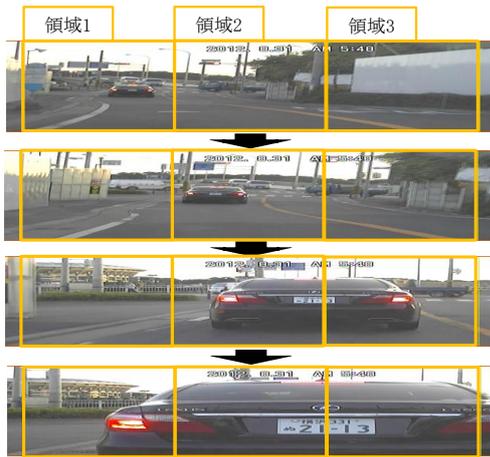


図 28 車載カメラで取得された画像

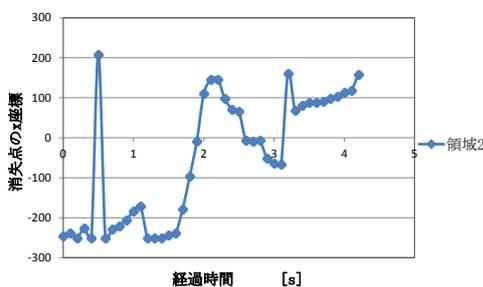


図 29 消失点の x 座標

各領域で取得された τ を図 27 に示す。また、図 28 に車載カメラで取得された画像を示す。さらに、消失点の x 座標を図 29 に示す。

c) 考察

領域 2 に注目すると、先行車との距離が大きいにも関わらず、取得 τ は経過時間 2 秒まで低い値を取得している。これは同時間において消失点の x 座標が頭打ちとなっているためである(図 27)。

領域 1 に注目すると、取得値は 1.5 秒付近から 4 秒へ急激に増加している。これは路肩の壁の τ を取得した後、左前方の背景の τ を取得したためである。

図 29 に注目すると、消失点は左から右に大きく移動し、その後 100 付近に収束している。これは環境 4 の道路が急な左カーブした後、右に小さくカーブするためである。また、取得された消失点は最終的に 100 pixel 付近に収束している。これは環境 3 の実験結果と同様に、搭載した単眼カメラが進行方向に対して 4° 左方向にずれていたためと考えられる。

7. 結論

本研究では、車載カメラから τ を用いて衝突を検知するシステムの開発を目的とし、従来のシステムでは考慮されていなかった、進路変更に伴う画素の移動量の変化を組み込んだ τ を推定するアルゴリズムを提案した。

そして 1/10 スケールの縮小環境と、実車の車載映像を用いた実験を行う事によって、提案手法の有用性を検証した。その結果、縮小環境では理論値に近い値で τ を取得できることを確認した。また、先行車に接近した場合、他の領域でも自動的に先行車の τ が取得されることが確認された。実環境下での実験では、多少の誤差や外れ値が含まれるものの、先行車や路肩の物体などの τ が取得可能であることが確認され、進路変更に伴う消失点の移動も取得可能であることが確認された。しかし交通量が少ない道路や山間部で見られる様な曲率半径が小さいカーブでは、消失点の移動が計算範囲を超え、 τ の取得が困難になるという結果も得た。

謝辞：最後に本研究に際して多大なるご指導、ご協力をいただいた法政大学理工学部伊藤一之准教授、伊藤研究室の方々に心から感謝いたしております。また、今後の皆様のご健闘を願うとともに、法政大学における各研究で、本論文がほんのわずかながらでも参考になればと願うものであります。

参考文献

- 1) J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robot in cluttered environments," J. Robot. Autom., vol. 1, pp. 572–577, 1990.
- 2) M. I. Scolnik, Introduction to Radar Systems. New York: McGraw-Hill, 1980.
- 3) B. D. Lucas and T. Kanade, "An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision", Proc 7th Intl Joint Conf on Artificial Intelligence, pp. 674-679, 1981.
- 4) D. Scharstein and R. Szeliski, "A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms", International Journal of Computer Vision 47(1/2/3), 7-42, 2002.
- 5) I. Joung and I. Ahn, "Two-dimensional depth data measurement using an active omni-directional range sensor," IEICE Trans. Fund. Electron., Commun. Comp. Sci., vol. E84-A, no. 5, pp. 1288–1292, 2001.
- 6) T. Nakamoto, A. Yamashita, and T. Kaneko, "3-D map generation by a mobile robot equipped with a laser range finder," IEICE Tech. Report Image Eng., vol. 105, no. 500, pp. 167–172, 2006.
- 7) D. N. Lee, "The optic flow field: The foundation of vision," Phil. Trans. Royal Soc. London B, vol. 290, no. 1038, pp. 169–179, 1980.
- 8) K. Kaneta, Y. Hagiwara, and K. Ito, "Determination of time to contact and application to timing control of mobile robot," Robot. Biomechanics, pp. 161–166, 2010.