

両眼速度対による衝突予測・回避ロボットの開発

森晃徳、山田博三、水野真、柴田憲佑、宇野孝祐、田口慶、森文彦
玉川大学工学部

(抄録) 自己と対象物の両者が静止あるいは移動状態にある環境で有効な衝突予測方法を提案するとともにロボットの眼に取り込まれた実ステレオ動画像に適用した結果を示す。両眼速度対法と名づけた新しい方法は、静止対象物や移動対象物に衝突することなく目的地まで移動する目標を達成するために導入された。左眼カメラの画像上での移動距離 δL と右眼カメラの画像上での移動距離 δR が両眼の対応画素で抽出され、対象物の3D運動方向と速さが計算され、自己のどこに何時衝突するかが直接求められた。実際に予測・回避可能であることが、簡単な移動ロボットで試された。

A ROBOT WITH COLLISION PREDICTION BY BINOCULAR PAIR UNDER THE CONDITION OF EGO AND OBJECT MOTION

Terunori MORI, Hiromitsu YAMADA, Makoto MIZUNO,
Norisuke SHIBATA, Kousuke UNO, Kei Taguchi and Fumihiko MORI
(Faculty of Engineering, Tamagawa University)

(Abstract) We propose a new method of collision prediction, which is effective in the situation that any object including ego is able to be under the state of motion or stillness and show some results applied to a stereo video camera. A new concept named as "binocular velocity pair" is introduced in order to achieve the purpose that robot arrives at a goal smoothly without coming into collision with a moving or stationary object. The moving distances δ_L on the left camera image and δ_R on the right camera image i.e. "binocular velocity pair" are extracted at each corresponding pixel. Then the 3D relative moving direction of the object, the collision location and the collision time are calculated directly. The effectiveness was confirmed by a robot with the online stereo video camera.

1. はじめに

ここでは、目的地まで障害物と衝突しないように移動する自律移動ロボット技術を取り扱う。(特開2005・182121[1][2][3][6][7])目的地まで移動する手法は、(1)経路につけられたラインなど外部埋め込み情報を利用するものと、(2)地図と空間認知機能に基づくものに大別される。また、空間認知機能には、(a)超音波やレーザーなど触覚的センサーによるものと、(b)視覚センサーによるものがある。当該研究は、後者に属している。(実用上は、必要に応じて種々の方法が併用される。)問題は、如何なる環境設定の中で衝突を予測し、回避移動をするかということである。衝突予測環境を分類すると以下ようになる。

- 1)自己及び周囲の対象物が静止状態にある。(空いている方向を求めて移動)
- 2)自己のみ移動(移動状態で衝突予測)
- 3)自己静止、周囲の対象物は移動するものと静止するものが混在している。
- 4)すべてのものが静止あるいは運動の状態にある。

ここでは、最も困難であるといわれている4番目の環境を取り扱う。そのような環境では、2時刻の抽出空間(両眼視差に基づく瞬間的静止空間)に基づいて衝突を予測するものが、常識的な手法であろうが[11]、ここでは人間が使用している両眼速度対[4][5]による衝突予測と回避行動をするロボットの開発を行う。

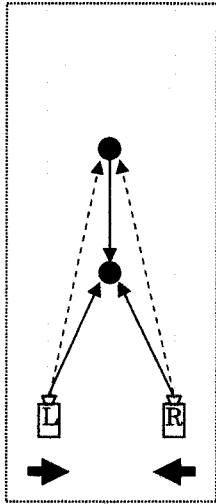
2. 両眼速度対による衝突予測方法

図1のL,Rがステレオカメラである。これら2つのカメラによって、独立した画像を撮影することができる。

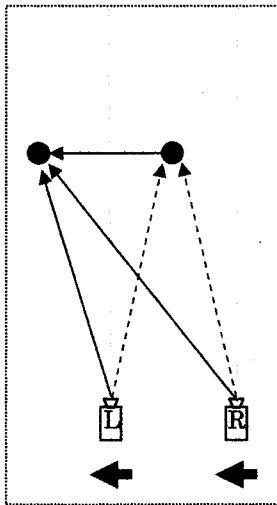
それぞれのレンズの位置はわずかに異なるため、撮影された画像を比較すると左右のずれが生じる。この画像のずれを両眼視差といい、この両眼視差とレンズ間の幅の情報を基に各時刻の奥行き知覚を得ることができる。本研究では、この両眼視差とは別の物体が前後に移動するとき左右の目に映る映像上では異なる方向に移動 ((δ_L, δ_R) 速度対をする) という性質を利用する。

当該手法は、左右カメラの速度対から対象物の 3 次元移動方向と速さを推測し、自己のどの部分 (X_T) に何時衝突するか (T) を予測するものである。

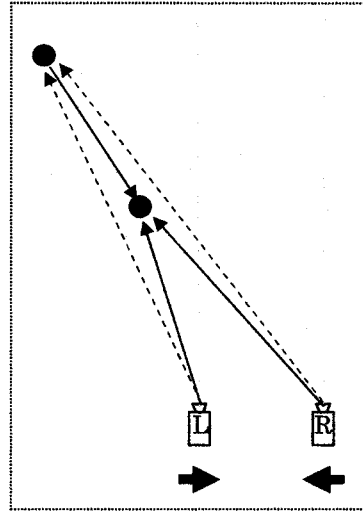
図 2 にその原理図を示しておく。 X_T と T の具体的な計算式を式 (1) と (2) に、また、衝突条件を式 (3) と (4) に示す。



a. forward movement t



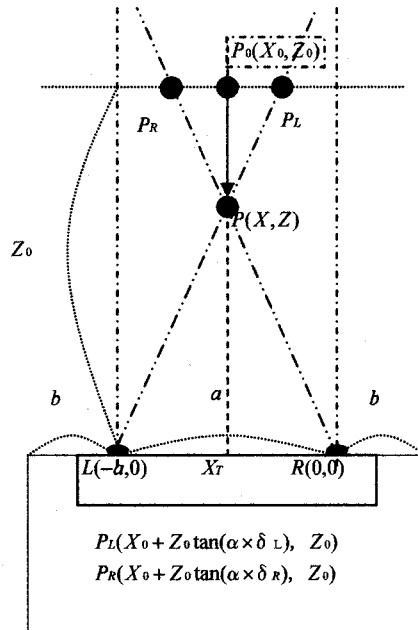
b. leftward movement



c. forward movement from far left point

(図 1) 両眼速度対と 3D 移動

Fig.1. Velocity pairs (The arrows shown at the bottom show the moving direction on the left and right camera images : velocity pair)



(図 2) 衝突点 (X_T) と時刻 (T) 抽出の原理図

Fig.2. Principle of collision prediction by binocular velocity pair

P_0 : 対象点の時刻 t における位置 (X_0, Z_0)

P : 対象点の時刻 $t + \Delta t$ における位置 (X, Z)

PL: 点Pを通り額面と平行な面と直線LPとの交点

PR: 点Pを通り額面と平行な面と直線RPとの交点

α : 一画素あたりの視角(0.0038rad)

a : 左右のカメラ間の距離 (12cm)

δ_L : 点Pの左眼カメラ上の移動画素数: 左眼速度

δ_R : 点Pの右眼カメラ上の移動画素数: 右眼速度

$$X_T = \frac{a \tan(\alpha \delta_R)}{\tan(\alpha \delta_L) - \tan(\alpha \delta_R)} \quad \dots (1)$$

$$T = \frac{a}{Z_0 (\tan(\alpha \delta_L) - \tan(\alpha \delta_R))} \quad \dots (2)$$

衝突条件は、次式で与えられる。

$$-(a+b) \leq X_T \leq b \quad \dots (3)$$

$$T > 0 \quad \dots (4)$$

当該手法の有効性は、(図3)に示されたステレオビデオカメラを備えた(ビュープラス社製)簡単なロボット(東京精機製)を使用して試された。

(図4)に抽出された両眼速度対の例を示す。(図4a)は、垂直棒が、水平に(カメラの光軸に垂直)右方向に移動した場合に結果である。白い線は、左眼カメラ、黒い線は右眼カメラの基準線(零点)を表しており、黒い線と垂直棒との交点あたりで、基準線より少し下がった小線分がある。これは、右眼カメラの画像上で物体が左に移動したことを表している(δ_R)。左眼カメラでも同程度下がった線分を見ることができる。ここでは、移動画素数を上下のずれ画素数で表現されている。 $(\delta_L < 0 \delta_R < 0)$ 白線分と黒線分間の水平のずれは、両眼視差(disparity)を示している。ほぼ期待通りの値が抽出できていることが分る。(図4b)は、垂直棒が、ロボットに接近した場合の速度対を示している。右眼カメラでは、画像上を左に移動し、左眼カメラでは、画像上を右に移動していることが分るのである。 $(\delta_L > 0 \delta_R < 0)$



【図3】ステレオビデオカメラを備えた使用ロボット
Fig.3 Stereo video camera and robot platform

a. leftward movement in horizontal ($\delta_L < 0 \delta_R < 0$)



b. forward movement ($\delta_L > 0 \delta_R < 0$)



【図4】抽出された両眼速度対の例

Fig.4. Some examples of binocular velocity pairs

White long line: $\delta_L = 0$ Black long line: $\delta_R = 0$
衝突部位と衝突時刻の予測結果の例を図5]に示す。

図中央の2つの線は、衝突位置(中央の下の線)と衝突時刻[中央の上の線]の基準線を表している。

衝突位置は、右眼カメラが原点になっているので、この線上に表示されると対象物が右眼に向かって移動していることを示すことになる。この線より上に表示されると右眼より右の部位に衝突することになる。例えば、10画素上なら右眼より10cm右に衝突することを予測したことを表す。

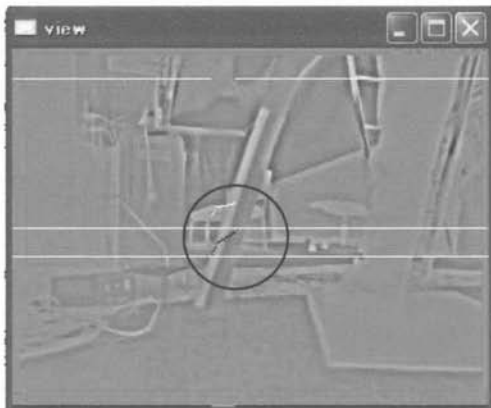
衝突時刻は、現在が、原点に取ってあるので下は、過去あるいは遠ざかることを表すことになる。負の時刻は、衝突危険物としては対象外のものとなる。ここでは、1フレーム/画素で表示してある。対象外の点は、衝突部位に対しては、図の下部に黒い線として、衝突時刻に対しては図の上部に白い線でそれぞれ表示してある。

(図5a)では、図の中央部の黒い丸の中を注意深く見ると、黒い点群と白い点群を見つけることができる。黒い点群の平均は約15画素上にあるので右眼右約15cmに衝突することを予測している。白い点群の平均は約20画素上にあるので、20フレーム後[約2秒]衝突することを予測している。 Δt は、フレーム間の時間であり、現在の処理速度からすると約100msである。[図4]や[図5]のその他においても、ほぼ予想通りの予測ができていようである。

以上の実験結果は、「両眼速度対法」で衝突部位と衝突時刻の予測の可能性を示していると考えられる。ただし、上記実験は、ロボットが静止しており、対象物が動くという環境(予測環境(3))で、予測したものである。当該研究の目標は、予測環境(4)で衝突予測・回避行動を行うことである。この目標を達成するため、まず、予測環境(3)で稼動する応用ロボットを作成し、その有効性を示す[第3章]、続いて、予測環境(2)で稼動するロボットを作成し、その有効性を示す[第4章]、最後に、予測環境(4)で稼動するロボットを作成してその有効性を示す[第5章]という手順で研究を進める。

次章以下の実験では、ある程度連続して同程度の予測値を持つ点群があることを求め、点群の内最も早く衝突する対象に限定して回避行動を行うという手順を取っている。そこでは、まだ、静止空間の全体構造や個々の対象の行動の時系列を保存して全体の状況を予測しながら行動するプログラムは作成していない。また、精緻化の処理、最適パラメータの探索など詳しい実験はまだ行っていない。

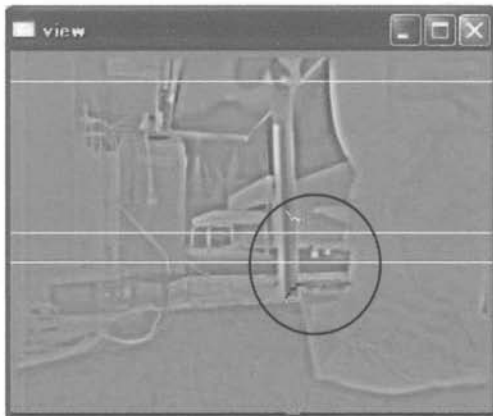
a. $T \sim 20\Delta t$ $X_T \sim +15cm$



b. $T \sim 5\Delta t$ $X_T \sim -2cm$



c. $T \sim 10\Delta t$ $X_T \sim -20cm$



[図5]衝突部位と衝突時刻の予測例

Fig 5. Some examples of X_T and T

Second line: $T=0$, third line: $X_T=0$

3. ボクサーロボット

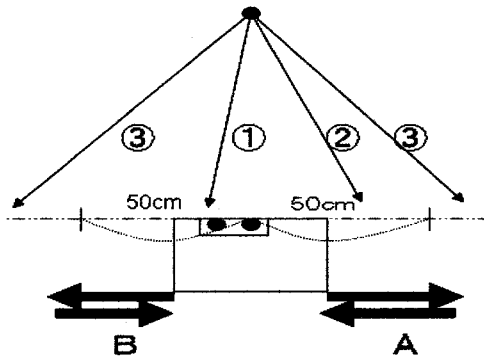
この「ボクサーロボット」(ヨケル君)と名づけたロボットは、小学生向け夏休みのイベント「脳とロボット展」用に作られたものがある。したがって、衝突予測・回避しながら目的地まで行く目標と直接関係しているわけではない。しかしながら、衝突予測環境(3)で、衝突予測・回避の可能性を実地に試す良い機会であると考え、ここに紹介する。ここで有効性を示すことができれば、予測環境(4)で成功する可能性が大きくなるはずである。

人間相手の人型ロボットが、本来のボクサーロボットであるが、拳を突き出したときにそれを予測・回避することが主要な機能と考え、「ロボットに向か

って、ラジコンカーを走らせ、衝突予測をさせ、約3秒以内に衝突すると予測した場合、右または左に移動して衝突回避し、また元の位置に戻る動作をするロボット」を作成した。

ボクサーロボットの行動の説明図を図6に示す。左右移動が、回避行動であるので、ステレオビデオカメラは、ロボットの右サイドに設置された。右眼カメラが、原点にしてあるので、それをロボットの中央にした。ロボットの行動は、原点と右50cmの間を3秒以内にラジコンカーが通過すると予測した場合は②、左側に約100cm移動してからまた元の位置に戻り(行動B)、原点と左50cmの間を通過すると予測した場合は①、行動Aを行うように、その他、今すぐには衝突の可能性がないと判定した場合は、静止状態を保つように設計された。

イベント前のテスト風景を図7に示す。このボクサーロボットは、数百名の小学生、中学生、高校生及び父兄が参加した上記イベントおよび学園祭で公開され、その有効性が試された。



(図6) ボクサーロボットの行動説明図

Fig.6 Behavior pattern of the boxer robot



(図7) ボクサーロボットの実行例

Fig.7 A test scene of the boxer-robot

4. 自己移動状態、対象物静止での衝突予測回避

衝突予測環境(2)で、衝突予測・回避行動が可能であるかどうかを調べるため、前方に図8のような静止コーンを設置し、それに向かってロボット移動させ、衝突予測・回避行動をさせる実験を行った。3秒以内に衝突すると予測した場合は、右または左にS字上に移動して静止コーンを回避し、元の直線上の前方の位置に同じ方向を向いて表れ、何事もなかったごとく前進するように設計された。この間、ロボットは、1度も静止することなく、ほぼ一定の速度で移動した。

右S字の軌道か左S字の軌道かは、静止コーンがロボットのどちらサイドに衝突すると予測したかに依存する。

回避行動実験中の1場面を図8に示す。



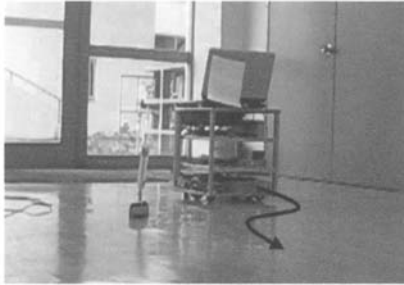
(図8) 自己移動、対象物停止状態での回避行動の実行例
Fig.8 A scene of avoiding the stationary cone

5. 自己移動、対象物移動での衝突予測回避

今回の最終目標である衝突予測環境(4)において、衝突予測・回避行動ができるかどうかをテストするため、「ロボットが、前進して移動している状態で、ラジコンカーをロボットに向かって走らせ、うまく回避行動ができるかどうか」の実験を設定した。具体的には、原点である右眼カメラの左右50cm以内をラジコンカーが、3秒以内に通過するかどうかを判断させ、適切な行動ができるかどうかを試された。その実験状況を、図9に示す。図9のように移動物体が、1つの場合は、うまく予測・回避行動可能であることが分った。

ここでは、ラジコンカーが複数有る場合は、最も早く衝突すると思われるラジコンカーを見つけそれを回避するように設定されている。しかし、本来は、1つの障害物の回避行動をすることによって他の障害物に衝突することがあってはならないように設定

しなくてはならないが、当該研究の目標は、両眼速度対法が、衝突予測・回避に有効化どうかを確かめることにあるので、ここでは、プログラム化されていない。



(図9) 自己移動、対象物移動での回避行動の事例
Fig. 9 A scene of avoiding the moving radio-controlled car

6. まとめと今後の課題

最も困難であるといわれている「自己および対象物がともに静止あるいは移動の状態にある環境(衝突予測環境(4))」において、衝突予測をする手法として「両眼速度対法」なるものを提案し、その有効性を確かめるためステレオビデオカメラを備えた2輪の車型移動プラットフォームを構成した。最初に、両眼速度対が抽出できることおよび衝突部位と衝突時刻を予測できることを実動画像で明らかにした。

次に衝突予測。回避行動が実際に可能であることをテストするため以下の3種類の実験を行った。

まず、「自己静止、対象物移動環境(衝突予測環境(3))」で稼動するボクサーロボットを作成し、その有効性を示した。つづいて、「自己移動、対象物静止環境(衝突予測環境(2))」として、静止コーンを速度を保ったまま衝突予測・回避して目的地に向かうロボットを作成し、その有効性を示すことができた。最後に、本来の目的である衝突予測環境(4)として、移動中のロボットに向かってラジコンカーを走らせる場面を作成し、速度を保ったままラジコンカーとの衝突予測・回避をして衝突予測前に移動していた直線上に同じ向き同じ速度で目的地に向かわせる実験を行い、その有効性を示すことができた。

今回の3つの実験は、それぞれの環境限定で行った要素の実験である。今後の目標は、環境の種々の状況を判断しながら、目的地まで衝突をしないで移動することを実現することである。

当該手法では、静止物体と移動物体を同時に識別できる[8]ので、最適な回避方法をリアルタイムで見つけ、静止せずに目的地まで到着することが実現できるはずである。

この技術は、いろいろな物事に応用が可能で、車椅子に搭載すれば人にぶつかることなく目的地まで行く補助になるであろう。また、車に搭載すれば、衝突事故などの防止に役立つはずである。このように両眼速度対法は応用範囲の広い技術である。

第2章の原理図では、最初の時刻における位置 (X_0, Y_0, Z_0) が既知として衝突予測を行っているが、2番目の時刻における位置が既知でもほとんど同じ式になる。従って、両眼対応点の計算は、1フレーム置きに行えばよいことになる。(半分の計算時間)さらに、画像上の移動量(オブテカフロー)が求められているので、実は、最初の1回の両眼カメラの対応ができていれば、以下は不要となる。ただし、移動方向(視野の中央部)付近では、新たに対象物が発生するので常に対応点の抽出は必要である。また、オクルージョン関連も若干考慮に入れておく必要はある。動的オクルージョンと再出現の予測については、Mori(1990)、森[他](1994)[9][10]を参照されたい。

参考文献

1. 森, 山田:「動的衝突予測法」公開特許公報 2005-182121(2005.7.7)
2. Mizuno, M., Yamada, H., Shibata, N., Uno, K., Taguchi, K., Mori, F. and Mori, T.(2007) A method of collision prediction by binocular velocity pair under the condition of ego and object motion. Proc. of IEVC2007.
3. 森, 水野, 山田(2005)両眼速度対による自己と対象移動環境での衝突予測方法. DIA2006講演論文集
4. 森:「運動物体の視覚情報処理に関する心理学的研究の現状」、電子技術総合研究所調査報告第207号.
5. Regan, D. and Cynader, M., "Neurons in cat visual cortex tuned to the direction of motion in depth: effect of stimulus speed". Investigative Ophthalmology & Visual Science 1982, 22, p.535-550.
6. 宮本, 谷津(2005)玉川大学工学部情報通信工学科平成16年度卒業研究論文「歩行者を避けて目的地に移動するロボットに関する研究」
7. 足立, 植木(2007)玉川大学工学部情報通信工学科平成18年度卒業研究論文「運動対象物回避ロボットの研究」
8. 山田, 森, 水野, 森(2007)物体識別装置. 特願 2007-27480
9. Mori, T. et al.(1990) A dynamic depth extraction method. Proc. Third ICCV, PP.672-678.
10. 森[他](1994)動的奥行き抽出のための時間非対応の繰り返し測定法とオクルージョン. 信学論 D-II, Vol. J77-D-II, PP.1701-1707.
11. 清水, 山本, 王, 佐藤, 棚橋, 丹羽(2004)電気学会論文誌, Vol.124, pp.1288-1295.