

## 注視点追跡による移動制御

小野口 一則, 渡辺 睦, In So Kweon, 久野 義徳

株式会社 東芝 総合研究所

画像中で設定した注視物を追跡することにより、移動ロボットの動きを制御する手法を開発した。本手法は、注視物を絶えず追跡することで、注視物に接近したり、注視物間をすり抜けたりするためのステアリング制御角を容易に算出することができる。また、追跡結果の軌跡を用いることで、移動ロボットの制御や注視物の追跡が成功しているか否かが確認できる。本文では、主として前者に関し、その詳細を述べ、簡単な注視物を実際に追跡し、移動ロボットの走行を制御した結果を示す。

### Vehicle Control Using Target Tracking

Kazunori Onoguchi, Mutsumi Watanabe, In So Kweon, Yoshinori Kuno

Research and Development Center, Toshiba Corporation.  
1, Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 210, Japan.

We have been developing a vehicle control method using target tracking. By tracking fixated targets, our method can easily calculate a steering angle necessary for which a vehicle runs toward a fixated target or through a center between two fixated targets. And our method also can recognize whether or not a vehicle is controled exactly, and whether or not tracking a target is succeeded. This paper mainly describes how to calculate a steering angle by tracking fixated targets and the experimental result which controls a vehicle by tracking simple fixated targets.

## 1. はじめに

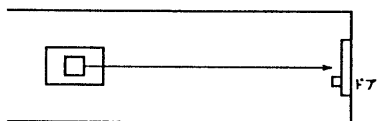
我々は、オフィス等の屋内環境を、目的地まで自律的に移動する移動ロボットシステムを開発している。このような環境は、人間等の移動障害物や椅子等の可動物体が多数存在し、流動的であるため、TVカメラや超音波センサ等の情報を用いて周囲の環境を常に把握し、移動する必要がある。各種センサ情報を用いて環境を理解しようとする研究は、例えば、超音波センサとステレオ視の結果から環境の地図を作成する<sup>(1)</sup>、レンジデータとカメラ画像データを統合して環境を解釈する<sup>(2)</sup>、また、画像中で注視した点を中心に垂直エッジの位置を計測し地図を作成する<sup>(3)</sup>等、盛んに行われている。しかし、これらはセンサ情報の融合や環境地図の作成自体が主な目的であり、設置物の位置が絶えず変化するオフィス等の環境にこれらを適用し詳細な地図を作成しても、移動中、頻繁に修正しなければならず効率が悪い。また、移動体が環境内に存在する場合、移動体を観測結果から切り分けないと地図との照合ができず、移動経路が発生できない。人間がこのような屋内環境を移動する場合を考えると、環境の詳細な地図に基づいて移動経路を生成し、動いているとは思われない。目的地までの概略経路は生成するにしても、経路からのずれを定量的に計測し、修正するのではなく、例えば、曲がるべき交差点の角や障害物などに適宜注意を払い、その位置や動きに応じて定性的に移動方向や速度を制御していると考えられる。このように、定量的な経路生成に依らず、特定の対象物に注視し、追跡するなどして移動に必要な情報のみを獲得することが、複雑な環境下でのナビゲーションを容易にする上で有効と考える。最近、注視した点を原点とする座標系を用い、問題を容易にしようとするanimate vision<sup>(4)</sup>や、目的に応じて引き出した定性的な情報を用い、問題を扱おうとするqualitative vision<sup>(5)</sup>等が提案されている。我々の立

場もこれらに通じるものである。つまり、ロボットの移動のために最低限必要な情報は確実に確保する。このため、詳細な解析をするより、定性的な簡単な情報を絶えず求めていくという考え方である。動的な環境を移動するロボットにとっては有効で実際的な方法と考えている。ここでは、目標物への接近や障害物間のすり抜け等に必要情報を、これらを注視・追跡することで容易に獲得できる手法について報告する。

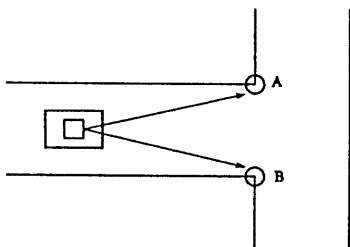
## 2. 注視による走行制御

人間は、移動する時、移動先の目標地点を注視ながら動くとき容易にかつ確実に目標地点まで到達できる。また、障害物や交差点の間を通過する時も、障害物や交差点の両端点を注視して移動すると確実にすり抜けることができる。これは、注視物の位置や動きにより、注視物と自分の進行方向との間の概略の関係を掴み、進行方向の妥当性(例えば、左に寄り過ぎている、または、右に寄り過ぎている等)を高速に判定し、補正しているためと考えられる。

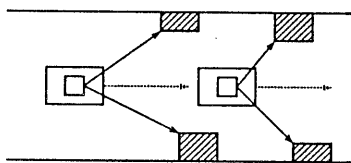
移動ロボットの場合も、注視物の動きを絶えず追跡することにより以下の2つの利点が得られる。第1点は、注視物と自分の進行方向との間の関係が連続的に得られ、目標地点に接近したり、障害物の間をすり抜けたりするための制御が容易になるということである。例えば、図1(a)のように、ドアに近づこうとする場合、ドアを画像上で追跡して車体とドアの成す角を常時算出し、走行系にフィードバックをかければドアまで移動ロボットを容易に誘導することができる。図1(b)のように、交差点の中央に向かって近づこうとする場合には、交差点の端の2点を画像上で追跡して車体とこの2点の中心方向の成す角を算出し、走行系にフィードバックをかければ良い。また、図1(c)のように、障害物の間をすり抜けようとする場合には、車体



(a) ドア



(b) 交差点



(c) 障害物

図1. 注視による移動

に近い障害物の組をまず注視し、その中央に向かって近づいていく。そして、注視した障害物の組が画像の両端から外に消えたならば、再び車体に近い障害物の組を選び直し同様の処理を繰り返す。これにより、障害物を順次すり抜けて移動することが容易にできる。

このように、頻繁にフィードバックをかけることで、かりに個々のステアリング角度の持つ誤差が大きくとも、人間が行っているような少し右に、または、左に寄るといった定性的な制御が実現できる。

注視すべき複数の追跡物体の中から実際に注視する2つの組を選択する必要があるが、本手法では、画像中の追跡結果を用いて以下の2つの条件を満たす物体の組を注視物とし

て選んでいる。

(a) 画像中で水平方向の間隔ができるだけ広い。

(b) 2つの物体の間の方向にあるすべての追跡物体が、この2つの物体を通り床面と垂直な平面の後ろにある。

これらの条件を満たす2つの注視物の間は、その他の追跡物体が存在せず、かつ間隔もその他の追跡物体の組に比べ広いため、すり抜けるのに適した空間を形成しているといえる。

ここで、モーションステレオの手法を用いると、移動ロボットに対する追跡物体の3次元位置が直接算出できるが、移動精度が極めて良い場合を除き誤差が大きくなる。このため、追跡結果から、物体間の相対的な前後関係のみを判定し、注視物を選択する手法を開発した。

注視物を絶えず画像中で追跡することにより得られる第2の利点は、追跡している注視物の軌跡を用いて移動ロボットの走行状態や追跡モジュールの成否が確認できることである。例えば、移動ロボットが注視物に向かって正しく直進している場合、画像中の追跡結果は画像中心を通る垂直線を単調に上昇または下降する軌跡を描くはずである。また、2つの注視物の中心に向かって移動している場合には、注視物は画像の中央から外側へ湧き出すような軌跡を描くはずである。追跡結果から算出したステアリング制御角の持つ誤差や、移動ロボットのふらつきにより、短時間の追跡結果は不安定な軌跡を示すが、移動ロボットが正しく進行している場合、追跡結果の全体としての軌跡は上述のような動きを示すため、この軌跡を用いて、移動ロボットの制御や注視物の追跡が成功しているか否かが判定できる。さらに、この軌跡を用いて、注視物を見失った際の探索方針の概略が決定できる。例えば、軌跡を辿ることで、フレーム外に出てしまい見失ったのか、フレーム内部で突然消失してしまったのか判定できる。そして、フレーム外に出た場合には出た方向

に移動ロボットを向ければ良く、また、フレーム内部で消失してしまった場合には追跡モジュールの失敗かオクルージョンが考えられるため、一定時間同じ処理を繰り返して追跡モジュールが成功するか否かチェックし、成功したら追跡を続行し、失敗したら追跡処理を打ち切り、超音波センサ等を用いた這回動作により注視すべき物体を探し回れば良い。

以上のように、算出したステアリング制御角の精度が良くなくても、高速なフィードバックや、追跡結果の軌跡から得られる定性的な情報等により、注視物に接近したり、注視物間をすり抜けたりする制御が容易にできる。

本文では、上述した2つの点のうち、第1の点の詳細と実験結果に関し述べる。

### 3. 注視物選択手法

複数の障害物の間を通過する時のように、注視すべき追跡物体が3つ以上存在する場合、移動ロボットに最も近い2つの追跡物体の組を画像中の追跡結果とロボットの移動量を用いて選択する。この手法を以下の(s1)～(s3)に示す。

(s1) 移動ロボットを一定距離Z0だけ直進させる。

(s2) 2つの追跡物体に任意に着目し、これら間にある追跡物体に着目した追跡物体を含

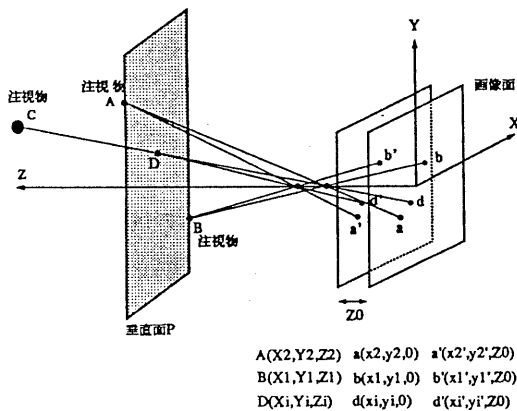


図2. 注視物選択における座標系

み床面に垂直な平面の前にあるか後ろにあるかを判定する。TVカメラの光軸は床面と平行になるよう設定しておく。図2に示すように座標系を設定し、着目した2つの追跡物体をA(X2, Y2, Z2), B(X1, Y1, Z1)、直進前におけるA, Bの画像上の投影位置をa(x2, y2, 0), b(x1, y1, 0)、直進後におけるA, Bの画像上の投影位置をa'(x2', y2', z0), b'(x1', y1', z0)、A, Bを通りZ-X平面に垂直な平面をP、前後判定を行う追跡物体をC、直進前におけるCの画像上の投影位置をd(xi, yi, 0)、Cとdを結ぶ直線がPと交わる点をD、追跡物体CがDの位置にあるとしたときの直進後におけるDの画像中の投影点をd'(xi', yi', Z0)、焦点距離をfとする。

この時、d'の位置を画像上で得られるa, b, d, a', b'の位置から求めれば、d, d'により得られるフローと実際に観測された追跡物体Cのフローとの大小関係によりCがPの手前にあるか後ろにあるかが判定できる。よって、d'の位置を算出すれば良い。

移動ロボットの移動環境が平面であるとすると、X軸回り、Z軸回りの回転、及びY軸方向の平行移動は無視できる。このため、画像面上のY軸方向の移動量の方がX軸方向の移動量に比べて直進する際に生じる移動誤差の影響を受けにくい。よって、まず、Y座標値の画面上の動きを用いて注視点A, Bまでの距離Z1, Z2を求める。図3に、図2に示す関係をY-Z平面に投影した図を示す。図3から以下の関係が成り立つ。

$$-f/y_1 = (Z_1 - f) / Y_1 \quad (1)$$

$$-f/y_2 = (Z_2 - f) / Y_2 \quad (2)$$

$$-f/y_1' = (Z_1 - Z_0 - f) / Y_1 \quad (3)$$

$$-f/y_2' = (Z_2 - Z_0 - f) / Y_2 \quad (4)$$

よって、

$$Z_1 = f + Z_0 y_1' / (y_1' - y_1) \quad (5)$$

$$Z_2 = f + Z_0 y_2' / (y_2' - y_2) \quad (6)$$

となる。また、図4に、図2に示す関係をX-Z平面に投影した図を示すが、この図4から以下の関係が成り立つ。

$$-f/x1 = (Z1 - f) / X1 \quad \text{--- (7)}$$

$$-f/x2 = (Z2 - f) / X2 \quad \text{--- (8)}$$

(5), (6), (7), (8)式より

$$X1 = -x1 y1' Z0 / f(y1' - y1) \quad \text{--- (9)}$$

$$X2 = -x2 y2' Z0 / f(y2' - y2) \quad \text{--- (10)}$$

となる。

図4に示すように、図2の垂直面PをX-Z平面へ投影したときの直線をL1、2点D,dを通る直線をX-Z平面へ投影した時の直線をL2とすると、

$$L1 : Z = k1 X + k2$$

$$k1 = (Z1 - Z2) / (x1 - X2)$$

$$k2 = -k1 X1 + Z1$$

$$L2 : Z = -f X / xi + f$$

となり、この2直線の交点を求めると、

$$Zi = k1(f - k2) / (k1 - f / xi) + k2 \quad \text{--- (11)}$$

が成り立つ。

また、図3より

$$Zi = -f Yi / yi + f \quad \text{--- (12)}$$

$$Zi = -f Yi / yi' + f + Z0 \quad \text{--- (13)}$$

の関係が成り立つため、(11) (12) (13)式より

$$yi' = \{yi - k1 yi / (k1 - f / xi)\} / \{1 - k1 / (k1 - f / xi) + Z0 / (f - k2)\} \quad \text{--- (14)}$$

が得られる。

直進後の追跡物体Cの画像上のY座標値が $y_r$ であるとするとし、

$$dif = |y_r - yi| - |yi' - yi|$$

とすると、 $dif > 0$ ならば追跡物体CはPの手前にあり、 $dif < 0$ ならば後ろに存在する。このように、一定距離直進し、追跡物体の動きを画像上で追跡することで、着目した2つの追跡物体の構成する床面と垂直な平面Pとその他の追跡物体Cとの間の前後関係が判定できる。(s3)着目した2つの追跡物体の間にあるすべての追跡物体に対して、(s2)の前後判定を行う。すべての追跡物体が着目した2つの追跡物体の構成する垂直面の後ろにある場合、この2つの追跡物体が最も移動ロボットに近く、

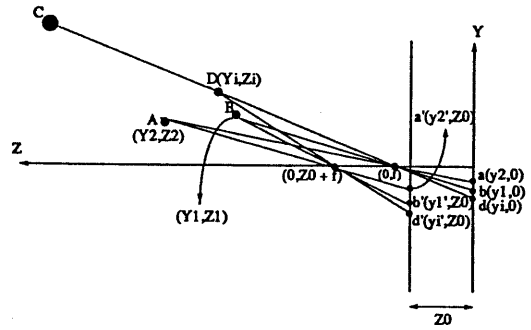


図3. Y-Z平面投影図

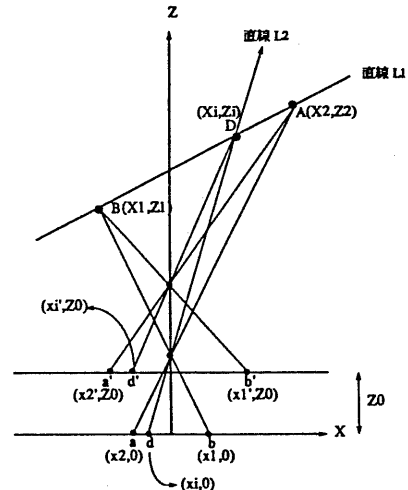


図4. X-Z平面投影図

これらの中央に向かって進んでも他の追跡物体に衝突することはないため、この2つの追跡物体を注視物として選択する。

#### 4. 走行制御手法

画像中で注視した物体を追跡し、注視物に向かって接近したり、2つの注視物の間をすり抜けたりするのに必要な移動ロボットのステアリング制御手法について述べる。

##### (1) 注視物に向かって接近する場合

図5に示すように、追跡している注視物(X1, Z1)の画像上の投影位置を(x1, 0)とすると、移動ロボットの進行方向と注視物との間の成す角 $\theta$ は

$$\tan \theta = -x_1 / f$$

により求めることができる。このため、 $\theta$  だけステアリング操作すれば移動ロボットの進行方向を注視物に向けることができる。

## (2) 2つの注視物の間を通過する場合

2つの注視物の中央に向かうためのステアリング制御量を注視物の画像上の追跡結果から算出する。図6に示す様に、2つの注視物  $(X_1, Z_1)$ ,  $(X_2, Z_2)$  の中央の位置を  $C(X_c, Z_c)$  とする。移動ロボットを  $Z_0$  だけ直進させた際の注視物の画像上の動きから、移動ロボットの進行方向と  $C$  の方向との成す角  $\theta$  を求めれば、この角度  $\theta$  が移動ロボットを2つの注視物の中央へ向かわせるためのステアリング制御角となる。

2つの注視物の直進前における画像上の投影位置を  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ 、直進後における画像中の投影位置を  $(x_1', y_1')$ ,  $(x_2', y_2')$  とすると、(5) (6) (9) (10) 式、及び

$$X_c = (X_1 + X_2) / 2$$

$$Z_c = (Z_1 + Z_2) / 2$$

の関係式より

$$\begin{aligned} \tan \theta &= X_c / (Z_c - Z_0 - f) \\ &= \{-x_1 y_1' (y_2' - y_2) \\ &\quad - x_2 y_2' (y_1' - y_1)\} / \\ &\quad \{y_1 (y_2' - y_2) + y_2 (y_1' - y_1)\} \end{aligned}$$

が得られる。よって、注視物1、2の直進時における画像中の追跡結果から、直進後に移動ロボットの方向を注視物の中央に向けるためのステアリング制御量  $\theta$  が算出できる。

## 5. 実験結果

図7に示す移動ロボット「EXTASY-2」を用い、注視物の選択や注視による走行制御実験を行った。EXTASY-2はPan, Tiltが可動な雲台を備えており、計算機制御可能なズームカメラと  $f=4.8\text{mm}$  の広角レンズを装着したカラーカメラ（今回の実験で使用）を掲載している。

注視物としては、高速に追跡可能な赤色のマーク（図8, 11, 13において椅子の背

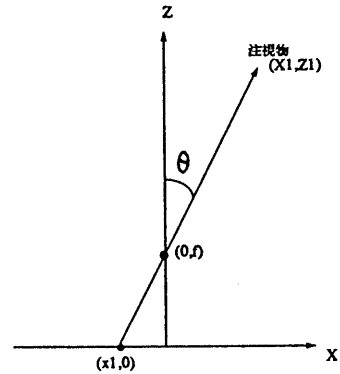


図5. 注視物への接近

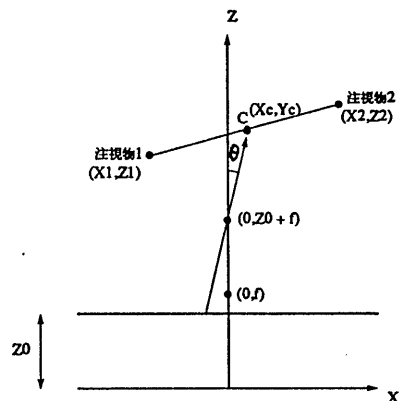


図6. 2注視物の中央へ接近

に張り付けられている)を用いた。ビデオレートで色抽出できるカラーロックアップテーブルを備えたビジョンプロセッサ<sup>(6)</sup>（画像入出力系を備えた16cpuの並列計算機）を用い、1秒間に10回以上の注視物追跡を行っている。

図9に、図8の注視物に接近させた場合の走行制御結果を示す。注視物の位置を黒丸、移動ロボットの位置を白丸、方向を直線の向きで示している。移動ロボットの制御手法は、直進とピボットターンを繰り返すだけの単純なものであるが、注視物へ接近するようロボットの向きが制御されていることがわかる。図10は、注視物に対し移動ロボットを斜め

に置いてスタートさせた結果であるが、この場合もロボットの進行方向は即座に修正され、注視物に接近している。

図12に、図11の3つの注視物の中から2つを選び、その中心に向かって移動ロボットの走行を制御した結果を示す。両端の注視物に対し、中央の注視物は後方にあるため、画像中での追跡結果を用いてこの両端の注視物が選択され、その中央に向かって走行が制御されている。図14に、図13に対し同様の走行実験を行った結果を示す。図13では、中央の注視物が両端の注視物の前方にあり、左の注視物との間隔が右の注視物よりも広いいため、中央の注視物と左の注視物の組が選ばれ、その中心に向かって走行が制御されている。

このように、注視物の画像中の動きを用いて、移動ロボットに近く、その中心に到達可能な2つの注視物の組が選択できる。また、選択された注視物を画像中で追跡しステアリングを制御することにより、2つの注視物の中心に移動ロボットを誘導することができる。

## 6. まとめ

注視物を画像中で追跡することにより、注視物に向かって接近したり、注視物の間をすり抜けたりする動作が容易にできる移動ロボットの誘導手法を提案し、走行制御実験結果を示した。本手法は、現在構築している Behavior based に基づく移動ロボットシステムの機能の一部であるが、このシステムは本機能の他に超音波センサ等による自由空間検出機能等を有しており、これらと組み合わせることでオフィス内を障害物を避けながら移動することができる。

今回は、注視物を絶えず追跡することによりステアリング制御量が常時得られ、かつ移動ロボットの制御が可能であることを中心に示したが、追跡結果の軌跡を用いることにより移動ロボットの様々な走行状態が判定でき

ると考えられる。このため、今後、この点に関し検討を進めるとともに、一般の特徴（例えば、交差点の角点や垂直線）を高速に追跡できる特徴追跡モジュールの開発を行っていく。

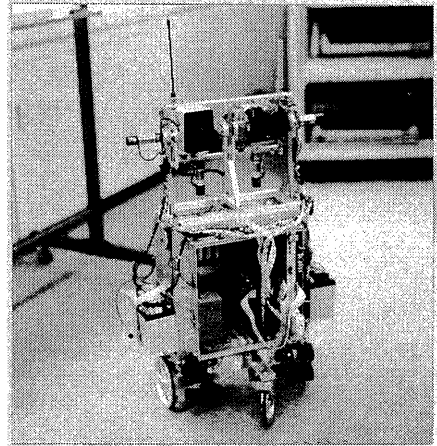


図7. 移動ロボットEXTASY-2

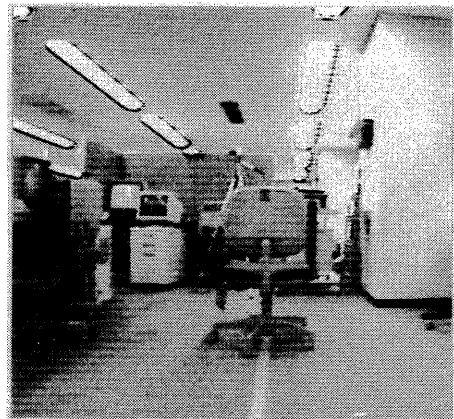


図8. 注視物が1つの場合



図9. 走行制御結果-1



図10. 走行制御結果-2

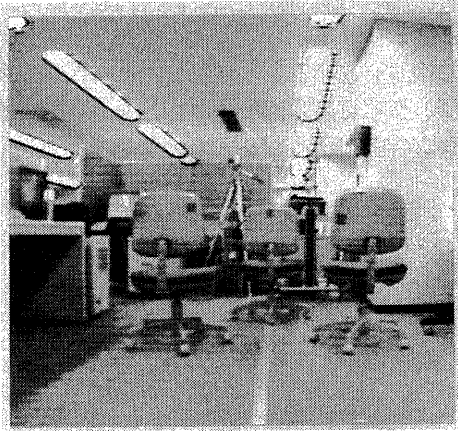


図1.1. 注視物が3つの場合-1

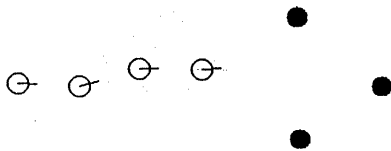


図1.2. 走行制御結果-3

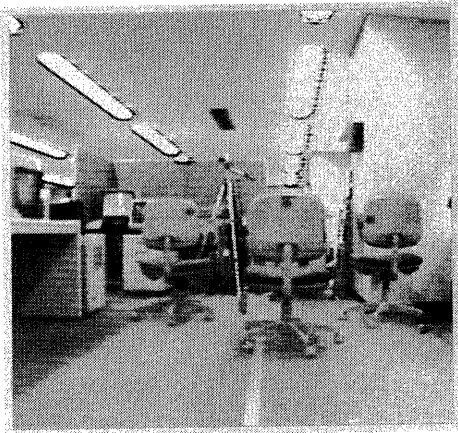


図1.3. 注視物が3つの場合-2

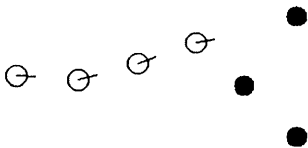


図1.4. 走行制御結果-4

[参考文献]

(1) Elfes, A., "Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation", *Computer*, vol. 22, No. 6, pp. 46-57 (1989).

(2) 浅田、「センサ統合と環境モデルの構築」、*信学研資PRU89-101* (1989).

(3) 石黒、山本、辻、「全方位視野の距離情報獲得」、*信学会論文誌*, vol. J74-D-II, No. 4, pp. 500-508 (1991).

(4) Ballard, D., "Eye Fixation and Early Vision : Kinetic Depth", *Proceedings of ICCV'88*, pp. 524-531 (1988).

(5) Aloimonos, J., "Purposive and Qualitative Active Vision", *Proceedings of ICPR'90*, pp. 346-360 (1990).

(6) 久保田、他、「物体の認識・識別を旨としたビジョンプロセッサの構想と試作モデルの開発」、*信学研資PRU89-107* (1990).