

## IV. 移動ロボットの知的制御

たち  
館すすむ  
障

機械技術研究所

## 1. はじめに

メカニズムやセンサに加えて、自らが動くためのエネルギー源や情報処理装置をすべて内蔵し、それ自体が一つの個体として自由に移動し作業する自律移動作業ロボットを目指した研究が活発になってきている。いわゆる知能移動ロボットの研究がこれにあたる。工場に据え付けられ、電力線からエネルギーの供給を受けながら作業するロボットを、大地にしっかり根をおろし土中から養分を得る植物に例えるならば、この知能移動ロボットは、さしづめ動物形のロボットといえるであろう。

カーネギーメロン大学の Moravec 氏<sup>(1)</sup>は、知能のうち動物の持つ直観的な認識および行動の能力は、移動することと極めて密接に関連をもつと主張している。つまり、移動可能なロボットに必要な技術の方向は一般的な知能の方向に向かうのに対して、移動しないロボットの場合は、その作業に固有の特殊な解決法に終わることが多いとしている。

自由に移動して回るといふことは、構造化されていない環境に対処していかなければならないことを意味しており、既知の知識のみでは不十分となって、そこに人間や動物の持つ知能が必要となるのである。

本解説では、最近内外で活発に研究され始めている移動ロボットの知的制御技術について、その典型的なシステム構成を説明し、各サブシステム実現のための技術の現状を最近の研究成果を中心として紹介する。

## 2. 自律移動ロボットのシステム構成

このような自律的移動機能を達成するためには、いかなるシステムが必要とされるであろうか。図1にシステム構成の例を示す。系は、全体システムを管理する中枢系、その知識データベース、外部環境情報採取する外界センサ系、人とのインタフェースであるコミュニケーション系、実際の移動に必要な効果器系

と内界センサ系の六つのサブシステムに分けられる。

移動にとって最も重要なものは環境に関する知識である。知識としては、いわゆる地図にあたる環境の構造に関する知識、その環境内でナビゲーションを行う際の目印となるランドマークに関する知識、また障害物に関する知識からなるデータベースがあげられる。このデータベースに加えて、実際に判断したり行動する際のルールを示したルールベースも必要である。例えば、ある物体が障害物であるかないかの判断を行うためには、種々のルールを用意しておいて、センサからのデータを解釈して決定することなどが行われる。そのような情報は、中枢系の環境情報管理サブシステムで管理される。

コミュニケーション系を介して、あるいはロボット自身の判断で目的地が定まると、目的地までの経路のプランニングがプランニングサブシステムで行われる。これには最適な経路を通過する地点のシーケンスの形で定める大局的なプランニングと、実際の道の許容領域の中でロボットの走行する軌跡を発生させるローカルな経路プランニングがある。

経路が定まると、次はその経路に従って実際のロボットを誘導するナビゲーションの問題に移行する。ナビゲーションでは、障害物がない場合にはプランニングサブシステムで創製した経路に沿うように制御指令を操縦サブシステムに送る。プランニングサブシステムで計画した経路は実際の環境の状態を必ずしも正確に反映していない場合がある。また、実際に走行する経路は計画した経路に対して誤差を生じる。そのため必要に応じてロボットの位置と姿勢とを、環境内のランドマークの測定から同定し、誤差をキャンセルする。

障害物がある場合には、計画した経路を進むことができない。その場合には、それを回避したり、あるいは、別の経路を計画しなおしたりする必要が生じる。障害物とは、実際の環境に存在する物体で、移動ロボ

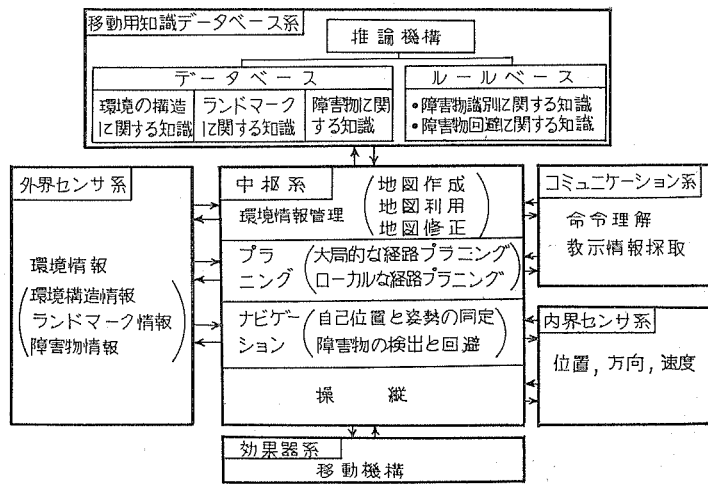


図 1 自律移動ロボットのシステム構成

ットのもつ知識データベース上の環境構造として登録されていないか、あるいは、登録された情報と異なっている物体あるいはその部分で、移動ロボットの通行の妨げになるものをいう。障害物には静止障害物と移動障害物とがあり、それぞれに適切に対処していかなければならない。

最終段階は操縦サブシステムである。これは、移動機構系を経路に沿わせて制御するシステムであり、移動機構系の構造（脚機構とか車輪形）に密接に関連する部分である。

逆にいえば、それより上位の制御に関しては実際のメカニズムの構造とは切り離して研究を進めることができるのである。その意味で、ここでは具体的な移動機構とその操縦サブシステムには触れないこととする。

### 3. 知識ベースの構成

#### 3.1 環境の構造に関する知識

移動ロボットが移動する環境が屋外か屋内か、また屋外でも、道のない山林や荒野か、道のある街や村なのか、あるいは電車、バスなどの交通機関の利用できるところであるのかにより、その移動環境の記述の仕方が異なる。

道のない荒野を記述するには、その荒野の地形そのものを記述せざるを得ない。最も基本的なものは、地点の絶対座標系における  $x-y$  座標（緯度と経度）の関数として、その場所の高度を記述する  $f(x, y)$ 。更にその地点にある木とか岩などについても  $g(x, y)$  として記述したり、その他の土質や地盤の強さについて

も  $h(x, y)$  の形で記述できる。代表的な例としては、広瀬氏らによるレーザビーム投射形レンジファインダを用いた地形地図作成の試みがあげられる<sup>(2)</sup>。

道のある場所では、その記述方法は異なる。道のある街路の通行では道のつながり方の情報が最も重要な情報となる。すなわち、交差点に関する情報や道の連結状態である。

交差点を十字路、三叉路、L字路などに分類し、それらの交差点に番号を与え、交差点のつながり方を有限状態オートマトンとして表現し記述した例を図2に示す<sup>(3)</sup>。まず交差点を、ランドマークと呼ぶ位置と方向の修正のためのチェックポイントに置き換える。両側通行が可能とした場合、十字路は8つのランドマークで記述できるし、三叉路は6つのランドマークで置き換えられる。このランドマークがオートマトンの状態に対応される。ランドマークとランドマークの関係

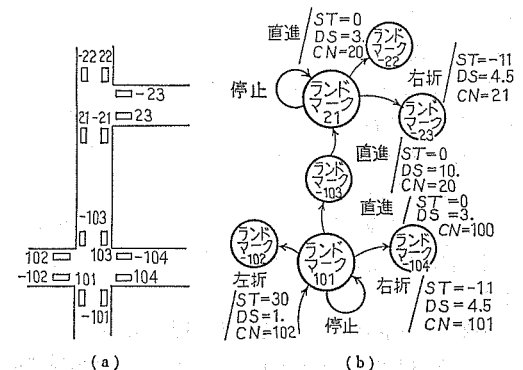


図 2 移動環境のオートマトン表現による記述<sup>(3)</sup>

は、一つのランドマークから他のランドマークに直進で到達する、右折で到達するといった関係になるわけで、その関係を、右折、左折をオートマトンへの入力、次のランドマークまでの距離や、そのときの方向などをオートマトンの出力に割当て記述する。

屋内の代表的な例がオフィスである。それは、各オフィスの部屋と部屋を結ぶ廊下、各階を結ぶエレベータにより構成されている。廊下の部分の記述の方法は、道の記述の方法と同一の手法で行える。例えば、オートマトンによる記述<sup>(3)</sup>などがそのまま利用できる。その際、エレベータは前述のオートマトンの前進、左折などに加えて、上昇( $n$ )、下降( $n$ ) (但し $n$ は階数)といった出力を付加すればよい。

部屋の記述は、これに比べてかなり複雑であり、効率が良く一般的な記述方法はいまだ定まっていない。もっとも、部屋の中にあらかじめ通路領域を指定しておけば、前述のオートマトンの方法がここでも利用できる、問題は簡単となる。

例としては、SRI(スタンフォード研究所)のSHA-KEYに用いられたグリッドモデルによる環境記述法がある<sup>(4)</sup>。全世界を $4 \times 4$ のセルに分割し、そこに障害物があるかないかを判別する。障害物がない場合にはそれ以上の分割を行わないが、障害物がある場合には、そのセルを更に $4 \times 4$ に分割して同一の操作を行い、その記述を詳細なものにしていくやり方である。

このようなデータベースを作成する方法としては、実際の地図から画像処理の方法でオフライン的に作る方式<sup>(5)</sup>、あるいは、あらかじめ実際の環境をロボットに走行させて作る方式の二つがある。後者は、人が援助する方式とロボットが自律的に行う方式に分けられる。環境のモデルを自動的に得る試みは近年特に盛んになってきている。Giralt氏らは、移動ロボットHIRALEを用いて、図3に示すような環境モデルの作成法を提案した<sup>(6)</sup>。(a)図のような空間内を移動ロボットが探索して回り、レーザレンジファインダを用いて障害物のない自由空間を見出す。その自由空間に番号をつけ、それらがどのようにつながっているかをセルグラフの形で表現する。それに対して、グラフを分解して幾つかの核に分ける。それを解釈することで、例えば(d)のようにドアで結ばれた幾つかの部屋として環境を構造化できるのである。またCrowley氏も超音波を用いて同様の試みを行っており<sup>(7)</sup>注目される。

### 3.2 ランドマークと障害物に関する知識

構造化された地図を使うにあたり、幾つかの重要な地点において目印となる物体を登録しておく、その

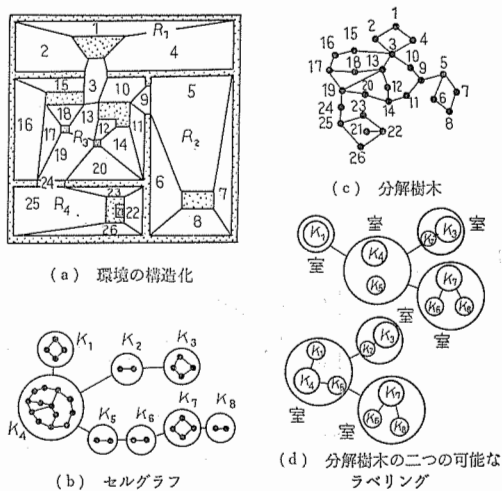


図3 環境モデルの自動作成<sup>(6)</sup>

データベースの利用価値が高まる。それにより、ロボットの実際にいる位置と方向とが確認できるからである。そのようなランドマークとしては、人工的な建物の壁面や電柱などが選べる。ランドマークに関する知識ベースは実際上、極めて有用なものである。

障害物は、あらかじめある場所がわかって、それが固定したものであれば、それはむしろ障害物ではなくランドマークである。障害物の特徴は、そのある場所を、あらかじめデータベースに登録しておけないところにある。しかし、遭遇する可能性のある障害物の形とその属性に関する知識を有していると実際問題の解決に大いに役立つ。例えば、自動車は $0 \sim 100$  km/h程度のスピードで、幅は約2m、長さは約5m、鉄できていて、形は箱形であるといった種類の情報や、ある場所には、どのような物が置いてある確率が何%程度あるという知識でもよい。例えば、ドアなどは開いている状態と閉った状態とそれぞれの確率で記述できる。

更に、そのような障害物を識別するための基本的なルールや、それらを回避する際の方法などの知識も整理して蓄えておく必要がある。

## 4. プランニング

### 4.1 大局的な経路プランニング

大局的な経路のプランニングの一つの例は、盲導犬ロボットの経路探索に用いられた方法である<sup>(8)</sup>。用いるデータベースは、図2に示した交差点とランドマークとを対応させ、オートマトン形式で表現したものである。そのオートマトンを用いてtree構造を実現する。頂点が発点であり、各ノードは各ランドマークに、

各ブランチは一つのランドマークから次のランドマークへの左折、直進、右折などの経路関係を示している。実際にはループが存在するが、そのようなループは結ばないように、その一つ前で探索を打ち切ることとする。実際には、目的地のノードが見つかるまで depth-first を多小変形した探索法で探索を行う。選ばれた道が複数ある場合には、例えば最短時間、最短距離、交差点の数が少ない経路、十字路や五叉路で右折せずしかも最短距離、交通量の少ない道など種々の評価関数を利用して最適な経路の選択が行える。

さて、このような探索を一度に行える領域は、メモリーの容量などから定まるある一定の大きさとなる。従って、更に広い領域を通行するためには、何枚ものマップを接続して、しかも最適な経路をいく必要が生じてくる。そのような場合にも、ブロックごとのマップを接続しながら最適な経路を求める方法が既に求められている<sup>(9)</sup>。

#### 4.2 ローカルな経路プランニング

大局的な経路ができて、それに従って進んでいても、物が置いてあったりして実際にはそれを回避していかなければならないことが頻繁に生じる。例えば大局的なプランニングで  $A$  という部屋からドアを出て、 $B, C$  という廊下の交差点を曲がって  $D$  の部屋の入口に入って目的地に向かうといった場合、 $A$  の部屋の出発点からドアのところまでいくローカルな経路を定めなければならない。その場合、机や棚などが置いてある場所がわかっていない場合には、後述するナビゲーションのうちの障害物回避の問題となる。前もって配置がわかっていたり、実際に動くときに、例えば視覚装置などで全体的な配置が決定されれば、ここで述べるプランニングの方式が利用できる。

このような、既知の物体を回避して目的地まで到達する問題を系統的に調べたのは Lozano-Pérez 氏である<sup>(8)</sup>。まず仮想的に移動ロボットが点であるとする。図 4 (a) に示すメッシュを施した凸多角形を避けながら  $S$  点から  $G$  点に向かうとする。そのときの最短経路は、図に示すように明らかに障害物の頂点を結ぶ直線である。いま、ノード集合  $N$  を、 $VU\{S, G\}$  で定義する。但し  $V$  は避けるべき物体の頂点の集合である。更に、リンク集合  $L$  を、 $N$  のエレメント  $n_i, n_j$  を結び、物体とオーバラップしないすべての  $(n_i, n_j)$  の集合として定義する。そのとき  $VG(N, L)$  のグラフをビジビリティグラフという。このビジビリティグラフの中で  $S$  から  $G$  へ向かうものすべてを探して、その中の最小の物を選びだせば、それが最短経路となる。

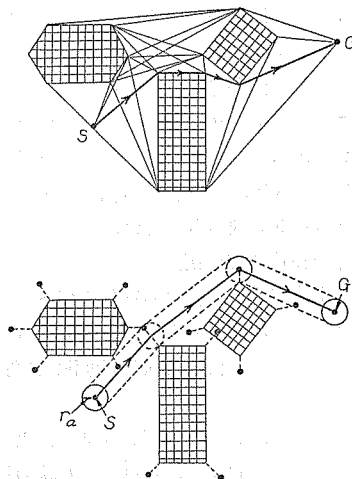


図 4 ローカルな経路設計<sup>(8)</sup>

上記の方法は移動ロボットを点と仮定しているために非現実的である。実際には (b) 図のように移動ロボットは大きさをもつ。これを半径  $r_a$  の円で近似すれば、この問題は実は、避ける物体を  $r_a$  だけ大きくして (つまり、各頂点を  $r_a$  だけ伸ばしたところに仮想的に設定して)、移動ロボットのほうは中心点だけで考えることと等価になり、(a) 図の問題に帰着する。

更に厳密に考えると、ロボットを半径  $r_a$  の円で近似するのは少し損であり、実際には長方形の短いほうの辺を前方に向ければ、(b) 図で通れなかったところも通れるかもしれない。それを解決するのが、より一般的な禁止領域を回避物体の周りに設定する方式であるが、移動ロボットの任意の回転を考えると問題は複雑になる<sup>(9)</sup>。しかも実際問題ではそこまで厳密に行う必要がない場合が多い。

現実的な解決法の一つとして、通過領域を一般化円すいで近似して、その中を移動ロボットが通過しているかを調べる方式も提案されている<sup>(10)</sup>。また、すべての回避物体や移動ロボットを円で囲み近似する方式<sup>(11)</sup>も実用上は優れている。

## 5. 障害物対応ナビゲーション

### 5.1 自己位置と姿勢の同定

自己の位置と方向 (姿勢) とを、マップの上で同定することは、プランニングシステムで示された経路に従って走行する際の最も基本的な機能である。自己位置と姿勢の同定法には大別して 2 通りの方法がある。すなわち、自律ロボット内の内界センサのみを利用して行う方法と、外部環境の目印 (ランドマーク) を用いて行う方法の二つである。前者のみでは実際には長い

距離を誤差 0 で走行しつづけることはできない。しかし、後者のみに頼ることも一般には効率的ではない。従って、ある程度は内界センサ情報で走行し、適当な要所ごとにランドマークを参照して、内界センサの誤差をキャンセルして、更に走行を続ける方式が現実的である。この方式は、航空機や巡航ミサイル、あるいは盲導犬ロボットで利用されている。

## 5.2 障害物の検出と対応

(1) 静止障害物 実際の屋外環境下で、自律形のハードウェアを利用して実時間の回避を行った例としては盲導犬ロボットによる障害物回避があげられる<sup>(11)</sup>。

このロボットは、プランニングシステムにより決定され、 $(x, y)$  座標と方向からなるベクトル状の目標値のシーケンスをもっている。そのシーケンスは、結ぶ経路も円弧と直線の組合せからなる経路（スプラインなどの曲線でもよい）として自動的に作成し、それに沿って自律移動を行う。途中で障害物がある場合には、それを検出し、道幅に関するデータから、その障害物を避けられる場合の最も安全側によった新しい経路を発生し、それに沿って進行する（図5）。そのとき、障害物センサは常に真正面を向くように制御される。もし、最初に設定された一番安全サイドの経路に入る前に、この障害物センサが移動ロボットの通行可能な幅の通路を見い出したならば、その地点で新しい経路を作成し、それに従って進行する。もし、最初に発生した経路に入っても、障害物が存在すれば、その場合は通行不能であるわけで、もう一度プランニングをしながら、現在の道を通らずに最終目的地まで到達し得る別の経路を大局的に見つけて、それに従う。この方式では、時速 1 km/s 程度に速度が下がるが、動きながら障害物を避けることができる。

さて、最も一般的な障害物の検出と回避は Moravec 氏のスタンフォードカートにより、やはり実際のハー

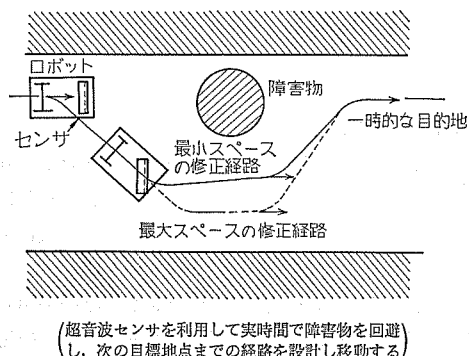


図5 盲導犬ロボットにおける障害物回避<sup>(11)</sup>

ドウェアを利用して屋外で行われている<sup>(11)</sup>。スタンフォードカートは、立体視の方法で物体の三次元的な位置を測定し、それに基づいて新しい経路を設計していく。問題点は処理速度であり、10分から15分かかって1m進み、そこで止って長い時間、計測と情報処理を行う。20mのコースをいくのに約5時間かかると報告されている。

(2) 移動障害物 移動している障害物に対しては、それが何であるかを識別することよりは、一刻も早く、その物体の移動速度、進行方向を知って、それに対する適切な処置をとることが必要である。

筆者らは、超音波計測システムを利用して、移動している障害物の速度と方向とを実時間で計測し、制御するシステムを研究した。そのシステムでは、例えば、前を同一方向に同じような速度で動いている場合には、前方の物体（通常は歩行者）に合せて速度を制御し移動する。前を横切る物体がある場合には、それがいきすぎのを待つ。こちらが止っていても衝突する危険がある場合には相手に対して警告を発するといった融通性のある行動をとる<sup>(12)</sup>。

視覚センサを用いた移動体の検出の研究も重要である。築山氏らは、下向きに傾いた TV カメラから一定の時間間隔で入力された画像を用いて、人の平面上での動きの軌跡を求める方式を提案している<sup>(13)</sup>。

また、山本氏は、動画像より物体像の運動軌跡が描かれるよう画像を合成し、合成画像から直接運動軌跡を抽出して物体を追跡する手法を提案している<sup>(14)</sup>。この手法を用いれば、オフラインではあるが、見え隠れしながら運動している車や歩行人の追跡が可能となる。

## 6. 知能移動ロボット研究の動向

我が国においては、1970年代から機械技術研究所、電子技術総合研究所、東大、大阪府立大、筑波大、阪大など、多くの大学や国の研究所あるいは民間の研究所で移動ロボットの自律制御のための基礎的な研究が進められ、1982年からは知能移動ロボットと銘打ったシンポジウムが開催されるなど、世界的にこの分野の重要性に早くから注目していた。

この分野に注目していたもう一つの国としてはフランスをあげることができる。LAAS（自動化技術とシステム解析研究所）では、HILARE と呼ばれる一般目的用自律移動ロボットの制御のための基礎研究を行っている。アメリカでは、1968年に SRI（スタンフォード研究所）で SHAKEY と呼ばれる移動ロボットの研究を行い、ある意味では最も早くこの種の

研究を計画したともいえるが、その後は、ほとんど研究が行われず、この分野での活性を失っていた。

しかし、最近になって急にカーネギーメロン大学やスタンフォード大学を中心として、知能移動ロボットの研究が再び活発になってきた。特に視覚を従来研究してきたグループと、移動技術を研究してきたグループの共同による研究体制を作っているところが特徴的である。

知能移動ロボットの研究が世界的に活発になってきたことは、今まではほとんど研究発表のなかったアメリカにおいても、例えば、1985年の3月に開催されたIEEEの第2回International Conference on Robotics and Automationの166件の論文発表のうち、一割を越す18件の知能移動に関する発表が行われたことからもうかがい知れる。DARPA (Defense Advanced Research Project Agency) は、Strategic Computingの一部としてALV (Autonomous Land Vehicle)のプロジェクトを計画している<sup>(15)</sup>。これは、1986年1月までに3km、6月までに10kmの道を5km/hの速度で自律誘導することを一応の目標としており、このようなプロジェクトがアメリカの知能移動ロボット研究にインパクトを与えているのである。このように、国の内外で知能移動ロボットの研究が盛り上がりつつある。(昭和61年6月16日受付)

## 文 献

- (1) H. P. Moravec: "Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover" *Stanford Univ. Tech. Rep. AIM-340*, p. 1 (1984)
- (2) 広瀬・前川・梅谷: 「地図作成型視覚システムの情報処理」

- 日本ロボット学会誌 2, 3, 191 (昭 59)
- (3) 館・小森谷・谷江・大野・阿部・清水・松田: 「ランドマークとマップを用いる移動機械の誘導法」 *バイオメカニズム* 5, 208 (昭 55)
- (4) N. J. Nilsson: "A Mobile Automation; An Application of Artificial Intelligence Techniques" *Proc. 1st International Conference on Artificial Intelligence* p. 509 (1969)
- (5) 金子・館・小森谷: 「移動ロボット誘導用データベースの一作成法」 *機械技術研究所報* 37, 4, 10 (昭 58)
- (6) G. Giralt, R. Chatila, & M. Vaisset: "An Integrated Navigation and Motion Control System for Autonomous Multisensory Mobile Robots" *Proc. of 1st International Symposium of Robotics Research* p. 191 (1983) MIT Press
- (7) J. L. Crowley: "Navigation for an Intelligent Mobile Robot" *IEEE J. Robotics and Automation* RA-1, 1, 31 (1985)
- (8) T. Lozano-Pérez & M. A. Wesley: "An Algorithm for Planning Collision-Free Paths among Polyhedral Obstacles" *Communications of ACM* 22, 10, 560 (1979)
- (9) R. A. Brooks & T. Lozano-Pérez: "A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Find-Path with Rotation" *IEEE Trans. Syst. Man, Cybernetics*, SMC-15, 2, 224 (1985)
- (10) R. A. Brooks: "Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free Space" *ibid.* SMC-13, 3, 190 (1983)
- (11) S. Tachi & K. Komoriya: "Guide Dog Robot" *Proc. 2nd International Symposium of Robotics Research* p. 333 (1984) MIT Press
- (12) S. Tachi, K. Komoriya, K. Tanie, T. Ohno, & M. Abe: "Guide Dog Robot-Feasibility Experiments with MEL-DOG MARK III" *Proc. 11th International Symposium on Industrial Robots* p. 95 (1981)
- (13) 築山・白井: 「無人走行車のための移動物体(人の動き)検出」第1回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集 p. 55 (昭 57)
- (14) 山本: 「画像化された運動軌跡による動画像処理」情報処理学会論文誌 22, 5, 442 (昭 56)
- (15) J. J. Nitao & A. M. Parodi: "A Real-Time Reflexive Pilot for an Autonomous Land Vehicle" *IEEE Control Systems Magazine* 6, 1, 14 (1986)