

全方位視覚センサCOPISを搭載した移動ロボットによる 環境マップの作成

西澤慶満 八木康史 谷内田正彦
大阪大学基礎工学部情報工学科

近年、環境を理解し移動することのできるロボットのセンサとして、カメラを用いた視覚センサが有望視されており、視覚付き知能移動ロボットの研究が盛んに行なわれている。従来の視覚を用いた知能移動ロボットの研究では、前方環境のみの観測で、横方向、後方の観測は行なっていなかった。しかし、一般環境では、後方から接近する移動物体など、前方情報だけでは不十分な場合も起こり、そのため移動しながら全方位の情報を獲得することが望ましい。そこで本研究では、全方位の環境を一度に観測できる視覚センサ COPIS (COnic Projection Image Sensor) を用いた移動ロボットを作成し、ロボットが移動しながら全方位の環境マップを構築する方法について述べる。

Generation of Environmental Map by Mobile Robot with Omnidirectional Image Sensor (COPIS)

Yoshimitsu Nishizawa, Yasushi Yagi and Masahiko Yachida
Department of Information and Computer Sciences
Osaka University
1-1 Machikaneyama-chou, Toyonaka, Osaka 560, Japan

Recently vision-based navigation of autonomus mobile robots has been intensively studied. These mobile robots, however, view only in front of themselves and, as a result, they may collide against objects approaching from the side or behind. Thus we need an image sensor to view the environments around the robot so that it may navigate safely. This paper describes our mobile robot with a conic projection image sensor (COPIS) and the method with which the robot generates an environmental map while it is moving in the environment.

1. はじめに

近年、環境を理解し移動することのできる知能移動ロボット用のセンサとして、カメラを用いた視覚センサが有望視されており、視覚付き知能移動ロボットの研究が盛んに行なわれている^[1-3]。

従来の視覚を用いた知能移動ロボットの研究では、前方環境のみの観測で、横方向、後方の観測は行なっていなかった。しかし、一般環境では、後方から接近する移動物体など、前方情報だけでは不十分な場合も起こり、そのため移動しながら全方位の情報を獲得することが望ましい。我々は、移動ロボット用センサとして、円錐ミラーを用いた全方位視覚センサ COPIS (COnic Projection Image Sensor) を提案した^[4,5]。本センサは円錐ミラーを利用するため、画像ひずみは発生するが、視野領域はロボットを誘導するうえで最も重要な側方が中心となり、また、移動ロボットの周囲パノラマ状の領域を一度に観測することができ実時間処理にも対応できる利点を持つ。

我々は、環境内の柱などの垂直エッジ成分を特徴量とし、ロボット移動に伴う垂直エッジの観測方向の変化から、位置計測を行なった。この研究では、ロボットは等速直線運動するという前提条件を付けていた。しかし実環境において、位置計測し環境マップを生成しようとした場合、ロボットの走行路が曲がっている場合、また、障害物があり迂回する必要がある場合など、様々なケースがあり、等速直線運動では十分な計測が行なえなかった。そこで、本研究では、ロボットに対する前提条件はロボットの移動量は既知で床面上を移動するという条件にし、ロボットは回転運動を含めた自由運動をするようにした。

本報告では、我々が構築した実時間移動ロボットシステムと、このシステムを用いて環境マップを作成する方法について報告する。

2. システム構成

試作したCOPISシステムの構成を図2-1に、また、移動ロボットの外観・環境図を図2-2に示す。本システムは、COPIS搭載の移動ロボット・画像送信機等からなる移動ロボット部と、画像受信機・画像処理プロセッサ・ワークステーション等からなる地上部とから構成される。地上部は、画像処理系とデータ処理系からなる。

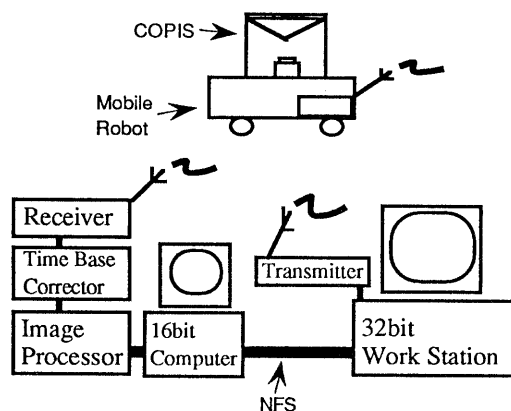


図2-1 システム構成

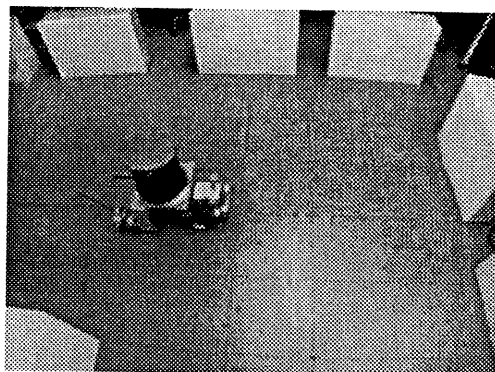


図2-2 環境図

2-1. 移動ロボット部

移動ロボットは、撮像系と駆動系からなり、ワイアレスで自走することができる。

入力画像からエッジデータを抽出する処理は処理時間を要するため、アルゴリズムを高

速化するとともに画像処理プロセッサ上で実行した。位置算出、環境マップ生成などの処理はワークステーション上で行なっている。全体の処理時間は、エッジ抽出のプロセスと距離計算・環境マップ生成のプロセスを並列処理にすることで高速化した。

2-1-1. 撮像系

撮像系は、円錐ミラー・ITVカメラ・ガラス管からなるCOPIS部と画像送信機から構成され、COPISで得られた画像はUHF電波により伝送される。

COPISは、円錐ミラーとITVカメラを組み合わせた視覚センサである。図2-3のように鉛直下向きに設置された円錐ミラーにより、水平面下方鉛直軸周り360度全方位が視野範囲となる。COPISにより撮像された入力画像の一例を図2-4に示す。画像中では環境内における柱などの垂直エッジが画像の中心から放射状に伸びた線分として現われる。

2-1-2. 駆動系

駆動系は、CPU8085の速度制御用ボード、ワイアレスRS232Cモデム、及びステッピングモータから構成され、ロボット上では、RS232Cによる地上部との通信、及び、ロボット移動のためのモータの速度制御の計算を行なっている。但し、現在、制御方法はオープンループで、フィードバックは行なっていない。

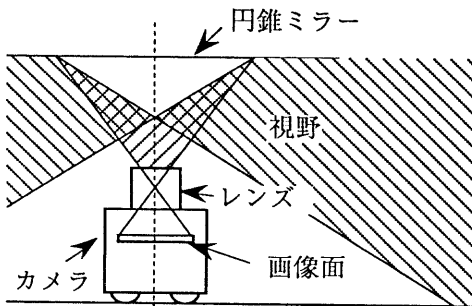


図2-3 視野範囲

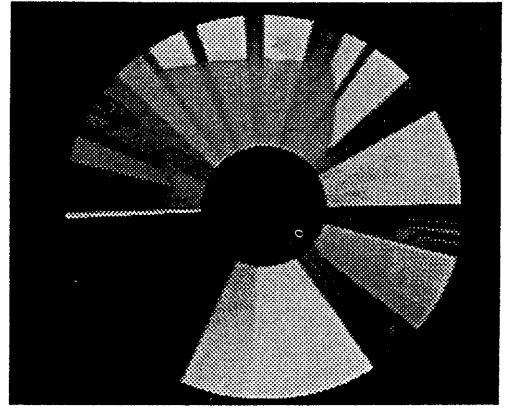


図2-4 入力画像

2-2. 地上部

2-2-1. 画像処理系

移動ロボット上からUHF電波で送られた画像は、映像受信機を介し、イメージプロセッサTAICHIに送られ512×432画素各点8ビットのデジタル画像に変換される。イメージプロセッサTAICHIは16ビットパーソナルコンピュータによって制御され、ここで、入力画像からエッジデータを抽出し、NFSを介してワークステーションに送られる。

2-2-2. データ処理系

ワークステーション上では、送られてきたエッジデータを処理して、位置情報を計算し環境マップを作成する。また、システム全体の制御を行なう。

3. 位置計測の原理

3-1. 対象物体の方位角の算出

図3-1に示すように、環境内における物体の垂直エッジは、画像面上で放射状に現われる。この時、図3-2に示す様に位置計測を行なう任意の点P(X_p, Y_p, Z_p)に対する画像面上の写像点をp(x_p, y_p)とすると、次式の関係がある。

$$\tan \theta = Y_p / X_p = y_p / x_p \quad (3-1)$$

即ち、 Y_p/X_p で定まる対象物体の方位角は、 y_p/x_p で定まる画像面内の像の方位角を算出することで得られる。この様に360度パノラマ状の領域を円錐ミラーを介して、撮像面上に投影する本方式では、対象物体の方位角 θ がその物体の画像面上の投影の方位として直接現われる。即ち、環境内の垂直エッジ上の点は全て同一の方位角を持つと言う撮像上の特徴がある。

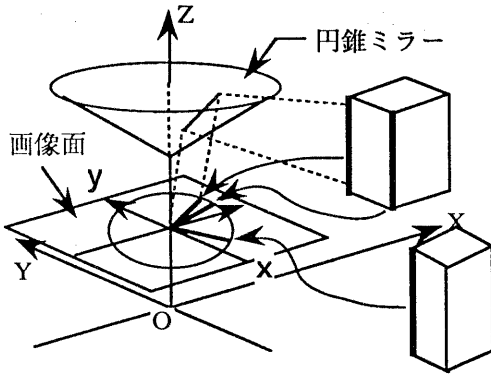


図3-1 投影図

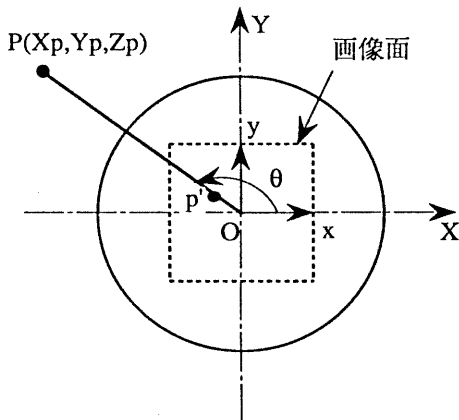


図3-2 方位角

3-2. 対象物体の距離の算出

式(2-2)より対象物体の方位角は、画像面に現われる垂直エッジの回転角から求められる。そこで、ロボット移動に伴う異なった観測点での物体方位角を計測することで、

3角測量の原理から対象物体の相対位置を求める。

今、移動ロボットが、 $(v_x(t), v_y(t))$ の速度ベクトルで移動したとする。点Pの相対速度は、 $(-v_x(t), -v_y(t))$ となるので、時刻 t_1 における点Pの座標位置を $P_1(X_1, Y_1)$ とすると、時刻 t_1+t における点Pの相対位置 (X_p, Y_p) は次式となる。

$$\begin{aligned} X_p &= \int_{t_1}^t (-v_x(t))dt + X_1 \\ Y_p &= \int_{t_1}^t (-v_y(t))dt + Y_1 \end{aligned} \quad (3-2)$$

従って、ロボットが移動したとき時刻 t_1+t における対象物体の方位角は次式となる。

$$\begin{aligned} \tan\theta(t) &= \frac{Y_p}{X_p} = \frac{-Y(t)+Y_1}{-X(t)+X_1} \quad (3-3) \\ \left[X(t) = \int_{t_1}^t v_x(t)dt, Y(t) = \int_{t_1}^t v_y(t)dt \right] \end{aligned}$$

ここで、各時刻 t_1, t_1+t でのロボットの相対位置を既知とする。このとき、各時刻の方位角が観測できれば、図3-3に示すように、式(3-3)で得られる2式の連立方程式を解くことで時刻 t_1 における座標位置 (X_1, Y_1) は計算できる。即ち、2ヶ所で垂直エッジの方位角を観測することで、垂直エッジまでの位置情報が獲得できる。

本方法では、既知量として各撮像位置間の相対的位置関係のみを利用しているため、ロボットが回転及び、ランダムに移動する場合でも位置計測をすることができる。

なお、実際には、垂直エッジの方位角に計測誤差があるため、2点から計算するだけでは精度が悪い。そこで、計測精度を上げるためにロボットが移動しながら撮像した連続画像を用い、方位角の変化を観測することで算出する。

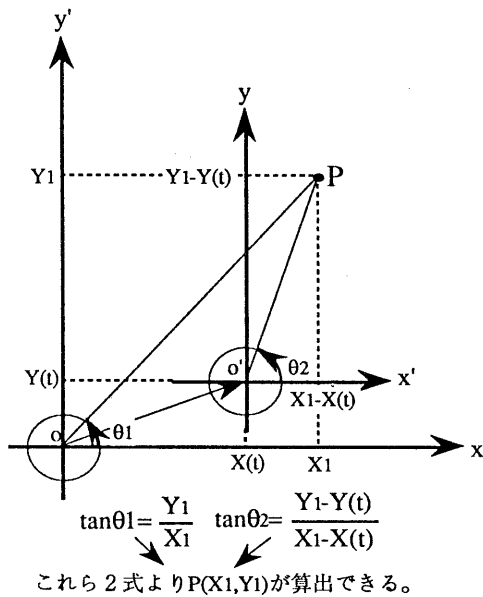


図 3-3 座標位置の算出

4. 環境マップの生成

4-1. 垂直エッジの抽出

第2章で述べたように、対象物体の方位角を求めればロボットと対象物体との距離を算出できる。この節では、方位角を求めるために、画像面上で垂直エッジを抽出する方法について述べる。

一本の垂直エッジ上の点は、高さに関わりなく同一の方位角を示す。そこで、極座標変換を行ない、各回転角 θ ごとに画素数を計数することで回転角方向の投影変換を行なう。この投影データの計数値がある閾値以上になる角度をエッジ方向とする。

これらは、次のように処理される。

1. 入力画像(図2-4)に対し、メディアンフィルタをかけてノイズ除去を行なう。
2. 次に、ソーベルオペレータをかけて微分処理を行ないエッジ画像を生成し、一定の閾値で2値化する。(図4-1)
3. 各画素に対し、画像中心からの距離 r

と回転角 θ で (r, θ) 座標系に極座標変換を行ない各方位角 θ ごとに投影データを求める。(図4-2)

4. この投影データが、ある閾値以上になる方向を検出しエッジ位置とする。(図4-3)

以上の処理は、画像処理装置と16ビットパソコン上で約1秒で実行でき実時間処理にも対応できると考える。

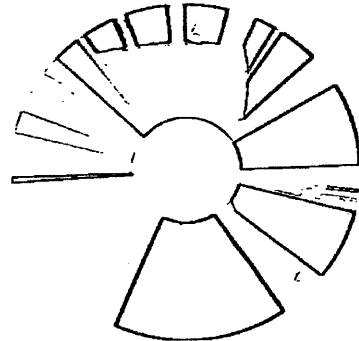


図 4-1 2 値化されたエッジ画像

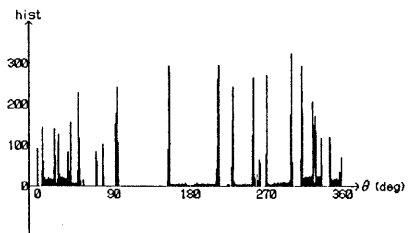


図 4-2 投影データ

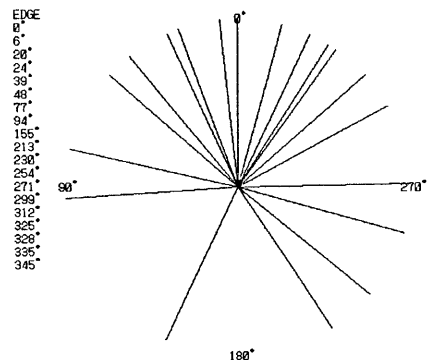


図 4-3 エッジ方向

4-2. 連続画像間の対応付け

ロボットが移動しながら撮像した連続画像間で、垂直エッジの方位変化を観測する場合、同一の垂直エッジが連続画像間でどの位置にあるかを検出するいわゆる対応付けを行なう必要がある。本節では、連続画像間での対応付け方法について述べる。

一般に、環境内に移動物体がない場合、柱・壁などの垂直エッジの軌跡は、連続フレーム間で突発的に変化する事はなく、誤差を見込んだ範囲に収まる。そこで前2フレーム間で対応付けが得られる場合は、図4-4に示すように前フレームでの移動量 $\Delta\theta$ を次フレーム間での推定移動量とし、 P_n を中心とした探索範囲 S を設定し、対応付けを行なう。隣接フレーム間のエッジ位置の対応付けは、極座標変換された投影データ間での残差を計算することで行なう。探索範囲の限定と投影データを用いて対応付けを行なうことにより高速化を図っている。図4-5はロボットの移動に伴って検出された垂直エッジの方位をプロットしたものである。線で結ばれたものが対応付けられたエッジである。

4-3. 最小自乗法による距離の算出

環境内の物体とロボットとの距離は、ロボットの移動量と移動前後の2点で計測されたエッジの方位角より計算できるが、ロボットが移動する際の揺れに影響されやすい。そこで、計測精度を向上させるために、一連の方位角から最小二乗法により物体位置 (X_1, Y_1) を算出する。

式(3-3)より真値と計測値の誤差の2乗和を次式で表現する。

$$D = \sum_{t=0}^1 \{(-X(t)+Y_1)\sin\theta(t) - (-Y(t)+Y_1)\cos\theta(t)\}^2 \quad (4-1)$$

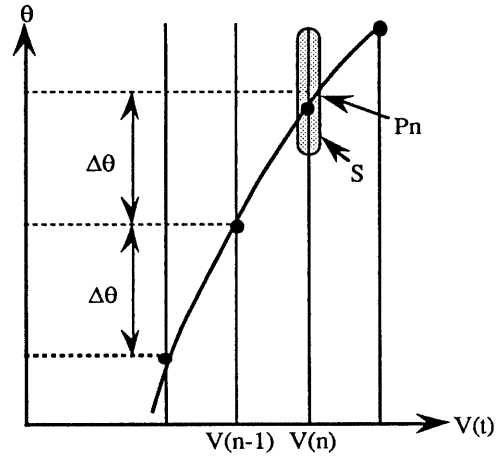


図4-4 隣接フレーム間での対応づけ

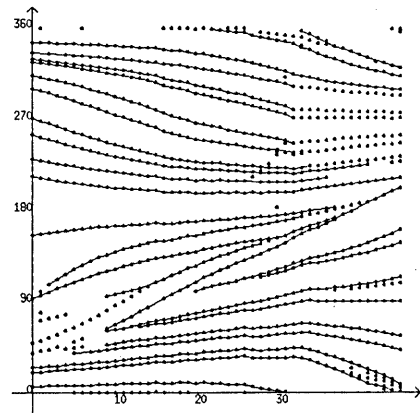


図4-5 垂直エッジの運動軌跡

式(4-1)の D を最小にするような (X_1, Y_1) を求める。

$\frac{\partial D}{\partial X_1} = 0, \frac{\partial D}{\partial Y_1} = 0$ の2つの連立方程式を解くと、

$$X_1 = \frac{BS - CT}{AB - C^2}, Y_1 = \frac{CS - AT}{AB - C^2} \quad (4-2)$$

となる。但し、

$$\begin{aligned} A &= \sum \sin^2\theta, B = \sum \cos^2\theta, C = \sum \sin\theta \cos\theta \\ S &= \sum (X(t)\sin^2\theta - Y(t)\sin\theta \cos\theta) \\ T &= \sum (X(t)\sin\theta \cos\theta - Y(t)\cos^2\theta) \end{aligned} \quad (4-3)$$

従って、式(4-3)に一連の対応付けられたエッジの方位角を代入し、式(4-2)によって位置 (X_1, Y_1) を算出する。

環境マップは、算出された垂直エッジの位置情報を計算機内の2次元データ上にマップすることで生成する。

5. 実験結果とその検討

5-1. 実験結果

図5-1は実験を行なった環境のレイアウト図である。ロボットの移動量を既知として図の環境内で実験を行ない、環境の位置情報を求めた。実験結果を図5-2(a),(b)に示す。図5-2は、ロボットが環境内を移動しながら構築した環境モデルの位置を●で示してレイアウト図に重ねて表示したものである。◎はロボットの最終位置である。図5-2(a)は、直線運動のみで、画像の撮像は移動距離5cm/フレーム毎に行なった。総移動距離は75cmで、16フレームの撮像を行なった。そのうち、7フレーム以上対応付いた垂直エッジについて位置を算出した。図5-2(b)は、75cm直進後、回転運動を行なった結果である。回転運動の部分は、角度5度の移動毎に撮像を行ない、さらに75cm直進した場

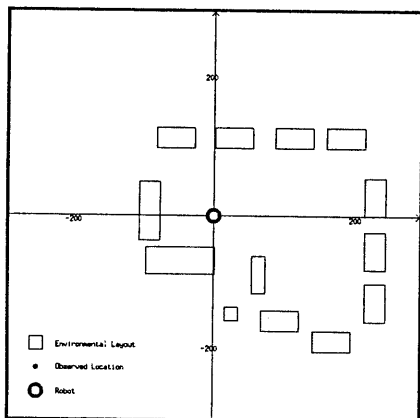


図5-1 環境のレイアウト図

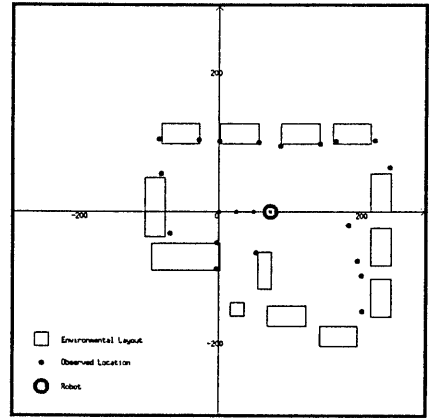


図5-2(a) 環境マップ(直線運動のみ)

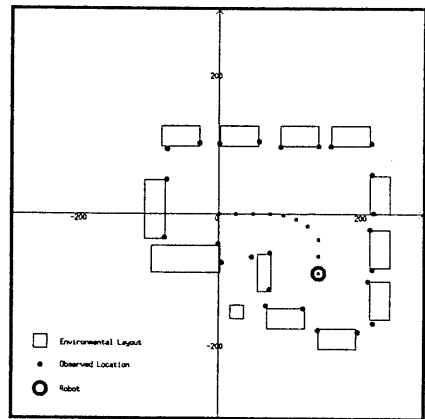


図5-2(b) 環境マップ(回転運動含む)

合である。合計で47フレームの撮像を行ない、そのうち、14フレーム以上対応付いた垂直エッジについて位置を算出した。

5-2. 検討

位置算出の結果、直線運動のみの場合で平均誤差約9cmの精度で環境マップの作成ができた。これは、ロボットの全長が4.5cmであることを考えると、ロボットが移動するうえにおいては、問題ない精度であると思われる。直線運動のみの場合、ロボットの進行方向前後で計測誤差が大きいが、これについ

ては次の原因が考えられる。進行方向±90度の左右方向については、位置を計算するうえで、垂直エッジの方位角がロボットの移動に伴い大きく変化し、しかも、変化率が滑らかであるので誤差は少なかった。しかし、進行方向前方及び後方においては、方位角の変化がほとんどなく、対応付けられた一連のエッジデータから最小自乗法により位置計測をしても十分な誤差改善ができなかった。これは、ロボットが進行方向を変え今までは違う方向に進むようにすれば、エッジの変化が大きくなり位置計測精度が上がると思われる。実際、回転運動を加えた図5-2(b)では、直線運動で、精度が悪かった進行方向の精度が向上している。また、回転運動を加えてロボットの移動方向を変えると、精度が向上するだけでなく、直線運動の時にはロボットから観測できなかったエッジが新たに計測できる。誤差の大きな部分が出たもう一つの原因としては対応ミスが考えられる。エッジ位置は角度1度毎の1次元投影データより算出しているので、垂直エッジが密な領域では各々のエッジ毎に投影データを分離することが困難なこと、現在エッジの方位角分解能が1度であるので±0.5度誤差がありうること等エッジの方位角の計測精度に問題があること、また、対応付けのプロセスがまだ不十分であり更に改良の余地が残っていることから対応付けがうまくいかないことが挙げられる。図5-2(b)でエッジ位置が1つだけずれているのは、この対応ミスのためである。

6. 結論

本研究では、全方位視覚センサCOPISを用いた移動ロボットシステムを構築し、回転運動を含むロボットの自由な運動によって、環境マップを作成する方法について提案した。位置情報を獲得するにあたっては、建物内に

一般に存在する柱等の垂直エッジ成分を特徴量として、連続画像間で対応付けを行なった。そして、この特徴量の移動軌跡と移動ロボットの移動量とから位置情報を求めた。その結果、ロボットを誘導する上では、十分な環境マップの作成が行なえたと考える。また、処理内容は、2値化、微分など一般的処理のため、100ms以下の高速処理実現も容易と考える。

今後は、対応付け方法を改善し、よりよい環境マップを生成する予定である。さらに、本手法は、一部を除いて移動物体を含む環境にも適用できるため、実時間での衝突回避についても検討する予定である。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費一般研究(B)02452282と(財)立石科学技術振興財団の援助を受けた。

参考文献

- [1] 金出武雄：“米国における自立移動ロボットの研究動向”，日本ロボット学会誌，5，5，pp. 376-383 (1987-10)
- [2] 八木康史，浅田 稔，谷内田正彦，辻 三郎：“動画像処理を用いた移動ロボットの環境認識”，信学論(D)，J69-D，6，pp. 967-974，(1986-06)
- [3] 森 英男，小谷信司，石黒 浩，安富 敏，茅野之雄：“構内道路を走行する自立移動ロボット”，日本ロボット学会誌，5，5，pp. 361-374 (1987-10)
- [4] 八木康史，川戸慎二郎：“円錐投影による全方位環境認識”，信学技法，PRU89-46，pp. 47-53，1989
- [5] 八木康史，川戸慎二郎：“円錐ミラーを用いた全方位視覚センサによる位置情報の獲得”，信学論，Vol. J74-D-II，No. 1，pp19-26，1991年1月