

複数移動ロボットの協調観測による移動物体の運動推定

林 涯 八木康史 谷内田正彦
大阪大学基礎工学部 システム工学科

移動ロボットが未知環境を自律的に移動するためには、環境に対する自己位置の同定や未知物体との衝突回避を行わなければならない。

本研究では、複数の移動ロボットが互いに観測した情報を相互に利用することで、行動のために必要な情報を効率的に獲得する方法を確立する。具体的には、我々が考案した円錐ミラーを用いた全方位視覚センサCOPIS搭載の2台の移動ロボットが、互いの観測情報（物体の方位情報）を協調利用し、移動環境内を移動する未知物体の位置及び運動情報を推定する。

Motion Estimation of Moving Object by Cooperative Observation among Multiple Mobile Robots with Omnidirectional Image Sensor

Ya Lin, Yasushi Yagi and Masahiko Yachida
Department of System Engineering, Osaka University
1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka 560, Japan
Tel.+81-6-844-1151 Ext.4621, Fax.+81-6-854-7664
E-mail: y-yagi@sys.es.osaka-u.ac.jp

This paper describes a method for navigating multiple mobile robots which estimate locations and motion of unknown moving objects and avoid colliding against them. Each robot with conic projection image sensor COPIS can observe an omnidirectional view around the robot in real-time with use of a conic mirror. The compass mounted on the robot is used for discriminating moving object and robots. Furthermore, their motion and locations are estimated by cooperative observation of azimuth changes among them.

1. はじめに

移動ロボットが未知環境を自律的に移動するためには、環境に対する自己位置の同定や未知物体との衝突回避を行なう必要がある。一般に視覚センサは、これらの行動を行う上で必要な外界情報を獲得する入力手段として有望視されている^[1-3]。

従来の視覚センサは、そのほとんどが前方環境のみを観測するもので、側方や後方の観測は行っていなかった。しかし一般に建屋内や道路等の人工環境では、前方ばかりでなく、移動物体の接近等による側方、後方からの危険が生じる。従ってロボットには、移動しながら全方位の情報を獲得し、移動物体や静止障害物との衝突を回避することが望まれる。

全方位を実時間観測するセンシング方法には、魚眼レンズまた球面ミラーを利用する方法等がある^[4,5]。魚眼レンズを利用する場合は、得られる画像情報が必ずしも観測する必要のない天井等を多く含むため、本来衝突回避に必要なロボット自身の側方の観測が不十分となりやすいと言う問題があった。

これらに対し、我々は円錐ミラーを用いた全方位視覚センサとしてCOPIS (COncic Projection Image Sensor) を提案し、そのシステムを構築してきた^[6,7]。本センサは、周囲パノラマ状の領域を一度に観測できると共にその視野領域はロボットを誘導する上で最も重要な側方中心となる利点を持つ。また本COPISにより撮像された画像には、環境内の垂直エッジが放射状に投影される特徴がある。しかしCOPISは、単眼視のため環境内に未知移動物体が存在し、かつロボット自身も動いている場合にはスケールファクタが定まらず、未知物体の位置や運動を推定し衝突回避を行なうことが容易でなかった。しかし未知物体が直線運動すると仮定すれば、ロボット移動による物体の方位角変化から衝突の危険性がある移動物体や障害物を検出できる。

これまで我々はこの性質を利用して、ロボットの移動により連続的に撮像された画像から垂直エッジの抽出を行い、そのエッジ方位の変化から未知物体の発見及び位置・運動推定を行ってきた^[8,9]。この位置・運動情報の推定では、「衝突回避動作中も移動物体は等速運動し続ける」と言う仮定を設けることでスケールファクタの不足を補った。しかし実環境では必ずしも未知物体が等速運動を

継続してくれるとは限らず、特に衝突の危険性が高い状況下では未知物体も減速や方向転換などを行う可能性がある。従って、衝突危険性の評価と同時に未知物体の位置・運動情報が獲得されることが望ましい。

本研究では、複数の移動ロボットが互いに観測した情報を相互に利用することで、行動のために必要な情報を効率的に獲得する方法を確立する。具体的には、我々が考案した円錐ミラーを用いた全方位視覚センサCOPIS搭載の2台の移動ロボットが、互いの観測情報(物体の方位情報)を協調利用し、移動環境内を移動する未知物体の位置及び運動情報を推定する。

2. 全方位視覚センサ COPIS

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1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。

図のように、画像中では環境内における柱などの垂直エッジが画像中心から放射状に伸びた線分として現われる。

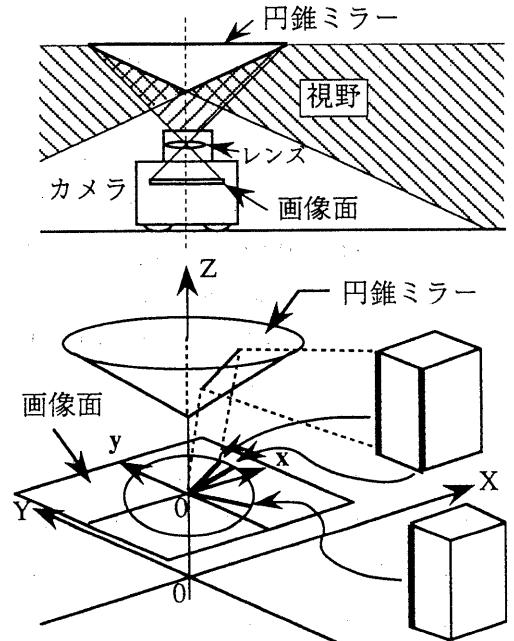


図1 視野範囲

即ち、対象物体の方位角 θ がその物体の画像上の投影方位として直接現われる。この時、位置計測を行なう任意の点 $P(X, Y, Z)$ に対する画像面上の写像点を $p(x, y)$ とすると、次式の関係がある。

$$\tan \theta = Y / X = y / x \quad (1)$$

即ち Y / X で定まる対象物体の方位角は、 y / x 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。

3. 前提条件

本報告では、環境並びにロボット・未知移動物体に対し、以下の前提を置く。

(1) 環境

ロボットの移動空間は、人工の環境、例えば建屋内の廊下や室内とする。壁は平面で構成され床に対して垂直で、床はほぼ平坦である。また机や本棚等の構造物は、一般に床に対して垂直に立つ。

(2) ロボット・未知物体

ロボットと未知物体は、床面上を等速直進運動する。未知物体は静止環境の構造物と同様に床に対し垂直に立つ。ロボットは地磁気センサ等により絶対方位が観測できるものとし、絶対座標系とロボット座標系は平行関係を保てるものとする。

4. 複数移動ロボットの協調観測による

未知移動物体の運動推定

ロボットの移動速度を $(U_i, V_i) (i=1, \dots, n)$ 、絶対座標系 $O-XYZ$ に対するロボットの初期位置を $(X_i(0), Y_i(0))$ とすると、ロボットの時刻 t における位置 $(X_i(t), Y_i(t))$ は、次式で定義される。

$$\begin{aligned} X_i(t) &= U_i t + X_i(0) \\ Y_i(t) &= V_i t + Y_i(0) \end{aligned} \quad (2)$$

さらに未知物体 m の移動速度を (U_m, V_m) 、絶対座標系に対する初期位置を $(X_m(0), Y_m(0))$ とすると、時刻 t における未知物体 m の位置 $(X_m(t), Y_m(t))$ は次式で定義される。

$$\begin{aligned} X_m(t) &= U_m t + X_m(0) \\ Y_m(t) &= V_m t + Y_m(0) \end{aligned} \quad (3)$$

従って、ロボットに対する移動物体の相対位置 $(XR_m(t), YR_m(t))$ は式(2)(3)より次式で表現される。

$$\begin{aligned} XR_m(t) &= X_m(t) - X_i(t) \\ &= U_m t + X_m(0) - \{U_i t + X_i(0)\} \\ YR_m(t) &= Y_m(t) - Y_i(t) \\ &= V_m t + Y_m(0) - \{V_i t + Y_i(0)\} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、初期値をロボットに対する移動物体の相対位置とすれば、以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} XR_m(0) &= X_m(0) - X_i(0) \\ YR_m(0) &= Y_m(0) - Y_i(0) \end{aligned} \quad (5)$$

またこの時、ロボットから見た移動物体の観測方位角 $\theta_{im}(t)$ には、式(1)より以下に示す関係がある。

$$\tan \theta_{im}(t) = YR_m(t) / XR_m(t) \quad (5)$$

よって未知数は、1つの未知物体について2個 U_m, V_m 、1台のロボットについて2個 $XR_m(0), YR_m(0)$ となる。複数のロボットが存在したとすれば、各ロボット間の関係は次式で表現できる。

ロボット i から見たロボット j の方位角

$$\tan \theta_{ij}(t) = \frac{(V_j - V_i)t + YR_{ij}(0)}{(U_j - U_i)t + XR_{ij}(0)} \quad (6)$$

ロボット j から見たロボット i の方位角

$$\tan \theta_{ji}(t) = \frac{(V_i - V_j)t + YR_{ji}(0)}{(U_i - U_j)t + XR_{ji}(0)} \quad (7)$$

ここで、2台のロボット間の相対位置は次式の通り符号が異なる関係にある。

$$\begin{aligned} XR_j(t) + XR_i(t) &= 0 \\ YR_j(t) + YR_i(t) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

よって、式(6)(7)(8)から、各々のロボットからの観測方位角には次式のような規則的な関係がある。

$$\theta_{\hat{y}}(t) + \theta_{\hat{z}}(t) = 0, \pi \quad (9)$$

従って2台のロボット間で観測方位角の和をチェックすることでロボット同士の確認を行うこともできる。

またロボット*i*から見た移動物体*m*の方位角は、

$$\tan \theta_{im}(t) = \frac{(V_m - V_i)t + YR_{im}(0)}{(U_m - U_i)t + XR_{im}(0)} \quad (10)$$

で表現される。従って移動物体に対しては、各ロボットからの観測より、*n*個の関係式が成り立つ。またロボット同士の観測においても*nC2*の組み合わせ分の関係式が生まれる。さらに観測回数を*k*回とすると*k(n+n(n-1)/2)*個となる。ここで未知数はロボットが*n*台存在する場合、 $2+2n=2(n+1)$ となるため、未知物体の位置及び運動情報を復元するためには、 $kn \geq 4$ を満たせばよい。よって、2台のロボットが移動しながら2回撮像すれば、位置及び運動の推定は可能となる。

ここで、式(6)(10)より2つの時刻*t1, t2*における各観測方位角は以下の式で表現される。

時刻*t1*

ロボット1から見たロボット2の方位角

$$\tan \theta_{12}(t1) = \frac{(V_2 - V_1)t1 + YR_{12}(0)}{(U_2 - U_1)t1 + XR_{12}(0)} \quad (11)$$

ロボット1から見た移動物体*m*の方位角

$$\tan \theta_{1m}(t1) = \frac{(V_m - V_1)t1 + YR_{1m}(0)}{(U_m - U_1)t1 + XR_{1m}(0)} \quad (12)$$

ロボット2から見た移動物体*m*の方位角

$$\tan \theta_{2m}(t1) = \frac{(V_m - V_2)t1 + YR_{2m}(0)}{(U_m - U_2)t1 + XR_{2m}(0)} \quad (13)$$

時刻*t2*

ロボット1から見たロボット2の方位角

$$\tan \theta_{12}(t2) = \frac{(V_2 - V_1)t2 + YR_{12}(0)}{(U_2 - U_1)t2 + XR_{12}(0)} \quad (14)$$

ロボット1から見た移動物体*m*の方位角

$$\tan \theta_{1m}(t2) = \frac{(V_m - V_1)t2 + YR_{1m}(0)}{(U_m - U_1)t2 + XR_{1m}(0)} \quad (15)$$

ロボット2から見た移動物体*m*の方位角

$$\tan \theta_{2m}(t2) = \frac{(V_m - V_2)t2 + YR_{2m}(0)}{(U_m - U_2)t2 + XR_{2m}(0)} \quad (16)$$

また相対位置の間には次式の関係がある。

$$\begin{aligned} XR_{12}(0) &= XR_{1m}(0) - XR_{2m}(0) \\ YR_{12}(0) &= YR_{1m}(0) - YR_{2m}(0) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sin \theta_{12}(t1) & -\cos \theta_{12}(t1) & -\sin \theta_{12}(t1) & \cos \theta_{12}(t1) \\ t1 \sin \theta_{1m}(t1) & -t1 \cos \theta_{1m}(t1) & \sin \theta_{1m}(t1) & -\cos \theta_{1m}(t1) & 0 & 0 \\ t1 \sin \theta_{2m}(t1) & -t1 \cos \theta_{2m}(t1) & 0 & 0 & \sin \theta_{2m}(t1) & -\cos \theta_{2m}(t1) \\ 0 & 0 & \sin \theta_{12}(t2) & -\cos \theta_{12}(t2) & -\sin \theta_{12}(t2) & \cos \theta_{12}(t2) \\ t2 \sin \theta_{1m}(t2) & -t2 \cos \theta_{1m}(t2) & \sin \theta_{1m}(t2) & -\cos \theta_{1m}(t2) & 0 & 0 \\ t2 \sin \theta_{2m}(t2) & -t2 \cos \theta_{2m}(t2) & 0 & 0 & \sin \theta_{2m}(t2) & -\cos \theta_{2m}(t2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_m \\ V_m \\ XR_{1m}(0) \\ YR_{1m}(0) \\ XR_{2m}(0) \\ YR_{2m}(0) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} t1 \sin \theta_{12}(t1) & -t1 \cos \theta_{12}(t1) & -t1 \sin \theta_{12}(t1) & t1 \cos \theta_{12}(t1) \\ t1 \sin \theta_{1m}(t1) & t1 \cos \theta_{1m}(t1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t1 \sin \theta_{2m}(t1) & -t1 \cos \theta_{2m}(t1) \\ t2 \sin \theta_{12}(t2) & -t2 \sin \theta_{12}(t2) & -t2 \cos \theta_{12}(t2) & t2 \cos \theta_{12}(t2) \\ t2 \sin \theta_{1m}(t2) & -t2 \cos \theta_{1m}(t2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t2 \sin \theta_{2m}(t2) & -t2 \cos \theta_{2m}(t2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ U_2 \\ V_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

よって上記の式(11)~(16)から式(17)を用い $X_{R_{12}}(0)$ 、 $Y_{R_{12}}(0)$ を消去すると、式(18)に示す線形方程式が得られ、各変数は計算できる。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、最小二乗法により算出する。

5. 実験結果と検討

室内環境において1台の未知物体に対し2台の移動ロボットからの観測により未知物体の位置並びに運動推定実験を行い、本方法の有効性評価を行った。以下実験に用いたシステムの構成並びに実験結果について報告する。

5.1 システム構成

本研究で用いた視覚システムの構成を図2に示す。本システムは、COPIS等を搭載した移動ロボットと、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成る。移動ロボット上では、COPISより得られた画像を地上部に伝送し、地上部から送られる命令によって走行を行う。ただし、今回の実験においては、本方法の有効性評価を目的としているため、実時間での視覚誘導は行わず、移動、停止、撮像を繰り返すことで時系列画像の取り込みを行った。地上部に伝送された画像は、画像処理装置で 512×432 画素各点8ビットのデジタル画像に変換され前処理が施された後、ワークステーションで処理される。図3(a)(b)は、各々の移動ロボットで撮像した入力画像の一例である。

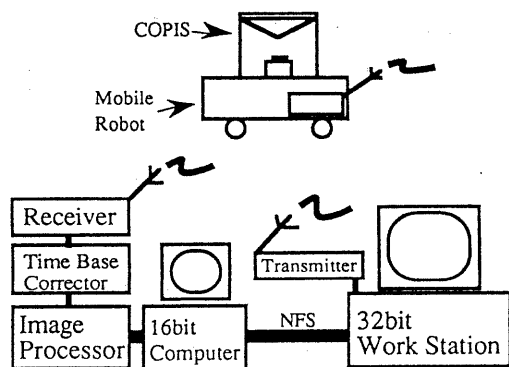
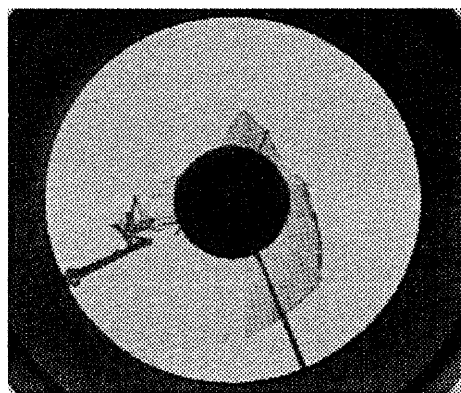
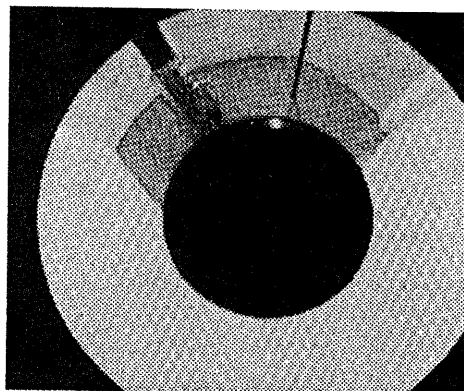


図2 システム構成



(a)



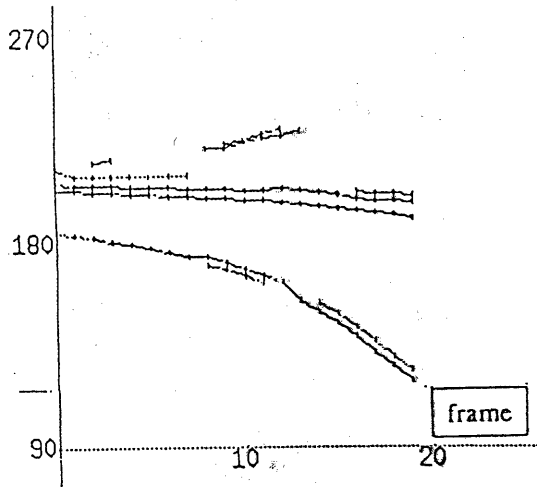
(b)

図3 入力画像

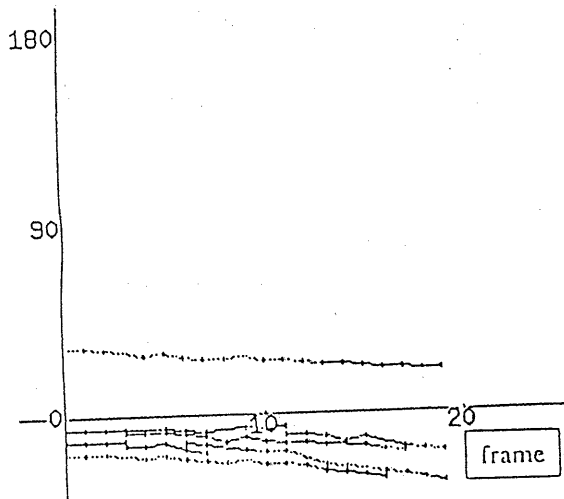
5.2 実験結果

図5(a)(b)が各々のロボットで観測された時系列間でのエッジの方位角変化である。両ロボットとも $5\text{ cm}/\text{フレーム}$ で20フレーム移動した。また未知移動物体の移動量も1フレーム当り 5 cm である。図5は20フレーム移動後の未知物体の位置情報の推定結果である。図中、ロボットの位置を■印、移動軌跡を点線で示し、また検出した未知物体の位置を●印、本来の位置を◎印、で示した。図6(a)(b)に示す様に得られた未知物体の位置には、当初両ロボット共数 10 cm の誤差があったが、移動するにつれ最小二乗法を用いることで位置/運動情報とも計測誤差は減少した。10、11フレームでは 4 cm 以下となった。また

運動情報についても移動速度 5 cm/frame に対し、13 フレームでは 0.5 cm 程度の誤差となった。しかし、12 フレーム以降では計測誤差が増加した。これは、図 4 (a) に示す様に 12 フレームで対応付けの誤りが発生したことが原因と考えられる。対応付けの改善は今後の課題と言える。しかし計測誤差は未知物体との衝突回避を行う上では十分な精度が得られたと考える。



(a)



(b)

図 4 観測方位角の変化

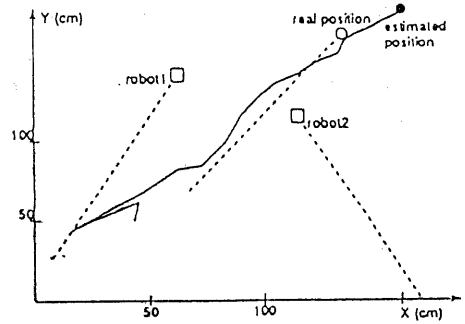
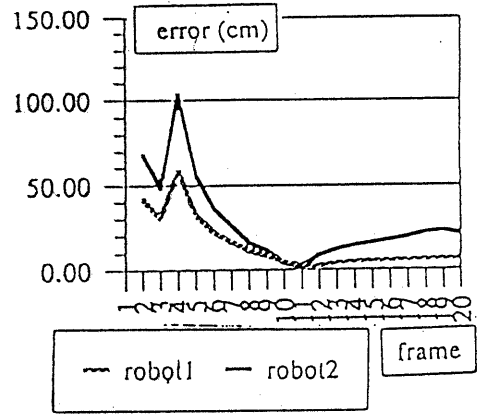
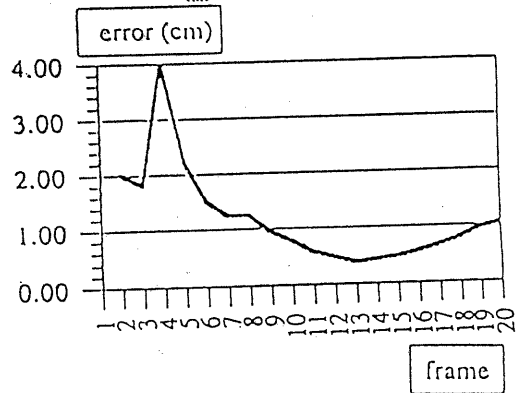


図 5 未知物体の位置推定結果



(a) 位置情報推定誤差



(b) 運動情報推定誤差

図 6 位置及び運動情報推定誤差

6. 結論

本報告では、2台の全方位視覚センサCOPISを搭載した移動ロボットを用い、未知移動物体の位置及び運動情報を推定する方法について述べた。位置及び運動情報の推定精度は、ロボットを視覚誘導する上では十分と考える。

また今後は複数の移動物体を含む環境内へ展開する予定である。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費の援助を受けた。

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)
- [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)
- [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).
- [4] J.Hong,X.Tan,B.Pinette,R.Weis and E.M.Riseman, Image-based homing,Proc.Int.Conf.Robotics& Automation,pp.620-625(April 1991)
- [5] Oh S. J. and Hall E. L. : " Guidance of a Mobile Robot Using an Omnidirectional Vision Navigation System", Proc. SPIE 852 MOBILE Robots II, pp.280-300 (1987)
- [6] 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, pp.19-26 (1991)
- [7] Y.Yagi and M.Yachida, " Real-time Generation of Environmental Map and Obstacle Avoidance using Omnidirectional Image Sensor with Conic Mirror ", Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.160-165, (1991).
- [8] 八木康史，川戸慎二郎，辻三郎：“全方位視覚センサ COPIS を用いた衝突回避”，電子情報通信学会論文誌(D-II)，Vol.J74,No.7, 908-917（平成3年）。
- [9] Y.Yagi, S. Kawato and S. Tsuji, Collision Avoidance for Mobile Robot with Omnidirectional Image Sensor (COPIS), Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation,Vol.1,910-915, (1991).