

## 全方位観測情報の対称性評価による 移動ロボットの経路誘導

長井宏之\* 山澤一誠\*\* 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

\*\*奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科

本研究では、建物内の廊下や市街地の道路といった経路（床面にはテクスチャはなく一様な明るさを持つ環境）を対象に、移動環境の持つ性質と、我々が提案してきた双曲面ミラーを用いた全方位視覚センサHyperOmni Visionの特性を利用することで、安定に経路誘導を行うための視覚誘導方法を提案する。

## Route Navigation Method for a Mobile Robot by Evaluating Symmetric Variation in an Omnidirectional Image

Hiroyuki Nagai\* Kazumasa Yamazawa\*\* Yasusi Yagi\* Masahiko Yachida\*

\*Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University

\*\*Graduate School of Information Systems, NARA Institute of Science and Technology

Described here is a visual navigation method for navigating a mobile robot along a man-made route such as a corridor or a street. We have proposed an image sensor, named HyperOmni Vision, with a hyperboloidal mirror for vision based navigation of the mobile robot. This sensing system can acquire an omnidirectional view around the robot in real time. In the case of the man-made route, road boundaries between the ground plane and wall appears as a closed loop curve in the image. By making use of this optical characteristic, the robot can avoid obstacles and move along the route by tracking the closed looped curve with an active contour model. Experiments that have been done in a real and simulated environment are described.

## 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、障害物や壁、他の移動物体等との関係から総合的に判断し、安全に目的地に移動する必要があり、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。

一般に、視覚誘導を行うためには、周りの物体との衝突検知・回避、経路に沿った誘導、環境内での自己位置の同定などの機能を実現する必要があり、従来より、様々な方法が提案されている。例えば、CMUでは自律走行を行うためにニューラルネットを用い、走行路の画像面への投影パターンと走行制御の関係を記憶することで、走行制御を行う方法を提案している[1]。またSandiniら[2]は、ロボットの両側面（壁）を流れるオプティカルフローに着目して、両壁からの距離が同じになるように誘導を行う方法を提案している。

また衝突回避の方法としては、地面を仮定し逆透視変換の方法を利用する方法[3]やオプティカルフローやSnakesモデルなどから得られるDivergenceと衝突時間を利用した方法などが提案されている[4]。我々も、移動ロボットの誘導に適した全方位視覚センサを用い、ロボット移動に伴う観測エッジの移動軌跡から、衝突危険性を評価、回避行動を行う方法を提案した[5]。

これらの方法は、道路、側壁の射影パターンの性質を利用しているだけで、特別な知識は利用していない特徴を持つ。特に、未知環境や環境変化がある場所を移動する場合は、特別な事前知識を必要としない方法が望ましい。

本研究では、建物内の廊下や市街地の道路といった経路（床面にはテクスチャはなく一様な明るさを持つ環境）を対象に移動環境の持つ性質と全方位視覚センサHyperOmniVisionの持つ光学的な特性を活用することで、障害物を回避し経路誘導を行う方法を提案する。実際には、動的輪郭モデルを用い、全方位画像から移動可能空間を検出、検出された領域の形状からロボットの走行制御を行う。

## 2 システム構成

本研究で用いたシステム構成の概要を図1に示す。本システムは、移動ロボットNomad200（図2）・RadioEthernetなどからなる移動ロボット部、全方位視覚センサHyperOmniVision（図3）・画像送信機からなる全方位視覚部そして画像受信機・画像処理プロセッサ・Work Station等からなるデータ処理部から構成される。全方位視覚センサHyperOmniVisionで撮像された画像は、画像送信機により、UHF無線で地上部の画像処理プロセッサITI150/40に送信され、640×480画素各点8bitのデジタル画像に変換される。この視覚情報を基に、ロボットの制御はRadioEthernetで遠隔接続されたWork Station上の制御用プログラムNserverで行われる。

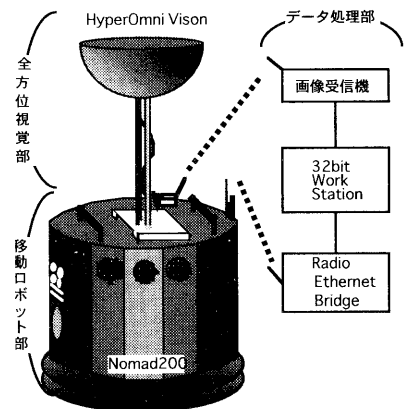


図1 システム構成



図2 Nomad200

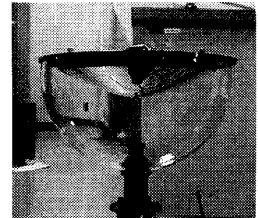


図3 HyperOmniVision

また本システムでは、実ロボットシステムの環境を模擬したシミュレーション環境を持ち、環境の違いに対する評価などをシミュレーション環境を用いることで用意を行うこともできる。

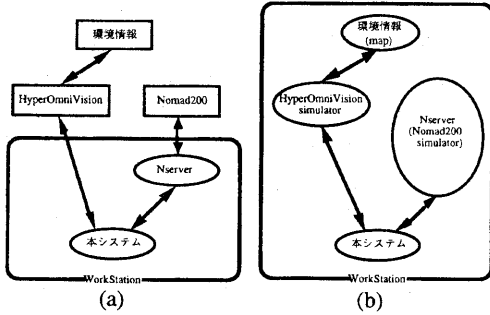


図4 システム構成 (a:実環境 b:シミュレータ)

図4が、実ロボットシステム (図4(a)) と、シミュレーション環境 (図4(b)) のシステム構成である。

本シミュレータでは、仮想環境をワークステーション上に構築し、環境内のロボットの位置で得られるHyperOmniVisionからの画像を作成することができる。またロボット制御用プログラムNserverも、元々ロボットシミュレータを兼ねているため、ロボットへの移動命令、ロボットからのエンコーダ情報はNserverのシミュレーションモードを用いることで。模擬できる。

### 3 HyperOmniVision

HyperOmniVisionは図5に示すように鉛直下向きの双曲面ミラーと鉛直上向きカメラから構成され、センサの周囲360度の画像を一度に撮像できる。

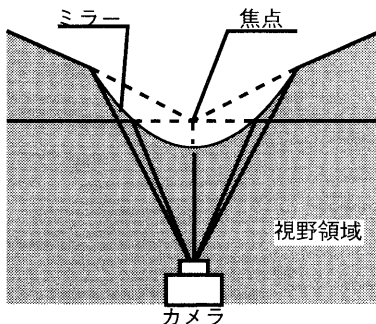


図5 HyperOmniVisionの視野特性

その視野領域は図6で表されるようにセンサの側方と足元の視野領域が得られる。視野領域内にある対象物体の方位は、その物体の画像面上

の画像の画像中心からの方位として直接現れる。

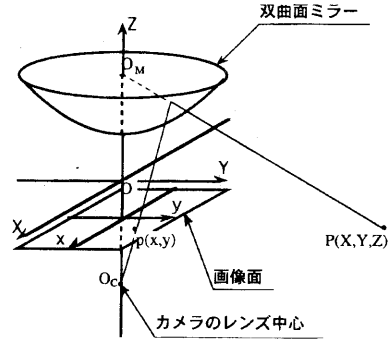


図6 HyperOmniVisionの光学特性

なお光学系の詳細に関しては、参考文献[6]を参照されたい。

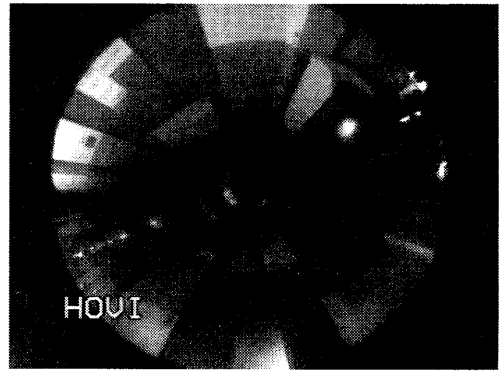


図7 HyperOmniVisionの入力画像

以上、HyperOmniVisionの光学特性から、入力画像には、以下のような射影特性がある。図7は、本校内の廊下で撮像した入力画像の一例である。

- 全方位の情報が一つの画像で得られる。
- 物体方位は、その物体の画像面上の写像の画像中心からの方位として直接現れる。
- 対象物体の高さが一定の場合、ロボットからの距離は、その物体の射影位置と画像中心との長さに比例する。即ち、図7からもわかるようにロボット自身は画像中心近傍に射影され、またロボットの側方より足元のほうが画像の中で中心近くに写る。

#### 4 スネークモデルを用いた経路誘導

前章より、画像中においてロボットの移動可能な空間（床領域）を考えた場合、図7のようにロボット自身の写像を包む閉領域として現れる。そこで、本手法では、この射影特性を利用し、局所ノイズに強い輪郭抽出方法であるスネークモデルを用い、ロボットの移動可能空間の検出を行う。

##### 4.1 スネークモデル

スネークモデルは、Kassら[7]の提案したエネルギー最小化原理に基づく動的輪郭モデルで、前方の物体（車）などとの衝突発見、人などの追跡などの目的に利用される手法である。一般にスネークモデルは、変形可能なスプライン曲線で、線分やエッジのような画像の特徴によって形状が制御される。実際には、いくつかのエネルギー項から構成されており（式1）、それらのエネルギーを最小化していくことによって対象物体の輪郭に収束していく。

$$E_{snake}(v(s)) = \int_0^1 (E_{int}(v(s)) + E_{ext}(v(s))) ds \quad (1)$$

(v(s)は輪郭線の位置ベクトル)

スネークモデル自身の曲線の持つエネルギーを内部エネルギー、画像の特徴やその他の作用によって外部より曲線を制御するエネルギーを外部エネルギーと呼ぶ。内部エネルギーは曲線の滑らかさなどの拘束力を生じ、スネークモデルの形状により決定される。外部エネルギーは画像中のエッジなどの特徴へスネークモデルを引きつける力を生じさせる。スネークモデルは、従来の輪郭抽出法に比べてノイズに強く、滑らかに連続した輪郭線が得られる特徴を持つ。

##### 4.2 移動可能領域の発見

本手法では、画像中心が必ず移動可能空間に含まれるなどの射影の性質がある。そこで本手法では、センサの性質を考慮し、さらに計算コストも考慮し、以下に示す内部、外部エネルギーを用いた。

内部エネルギーは、3つのエネルギーからなり。曲線の滑らかさを仮定して、滑らかでないときと大きくなるエネルギー（以下int1）、閉曲線が楕円であると仮定して、現在の閉曲線から最小2乗近似計算される楕円との差に比例するエネルギー（以下int2）、連続画像中での閉曲線の位置の変化が微小であるとして、前回の収束位置との差に比例するエネルギー（以下int3）の3つである。具体的には、図8に示すように、int1は両隣のコントロールポイントを結ぶ直線と、自身の移動できる直線との交点位置との差（すなわち、3点が1直線上にあればエネルギーは0）、int2は全コントロールポイントが、楕円の二次元での一般式  $ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f = 0$  を満たすと仮定して、最小2乗近似計算して求められる楕円の輪郭位置との差である。

前章でも述べたように経路のような環境では、射影される移動可能領域は、経路に沿った長円状の形状となるため、従来のような均一な形状変化だけでなく、楕円のように軸を持つような形状をモデルとして用いた。最後にint3は前フレームでの、同一方向のコントロールポイントの収束位置との差である。また、外部エネルギーには、画像における輝度の一次微分の大きさを用いた。なお一次微分にはsobelオペレータを用いた。

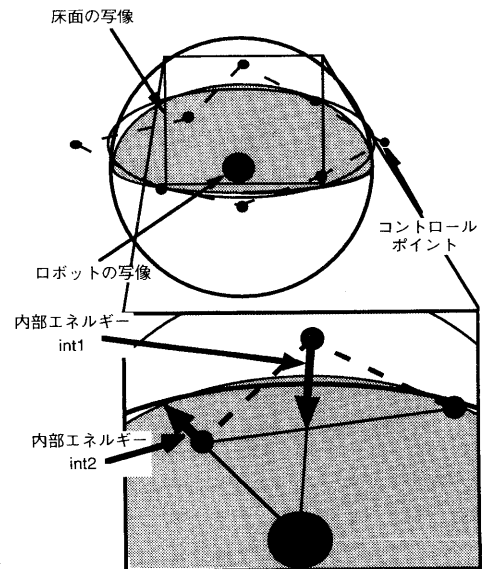


図8 内部エネルギー

また画像の特徴から、Snakesの探索方向を次のように決める。

- 画像中心を原点とした極座標を用いる。
- コントロール・ポイントは一定角度毎に全方位に放射方向にのみ動く。
- 各点の初期位置はロボット自身の写像の周りとする。

そして、次式の条件式を収束情念とすることで移動可能空間を決定する。

$$w_{ext}E_{ext}(v(s)) + w_{int1}E_{int1}(v(s)) + w_{int2}E_{int2}(v(s)) + w_{int3}E_{int3}(v(s)) < E_{threshold} \quad (2)$$

(v(s)は位置ベクトル  
w<sub>ext</sub>, w<sub>int1</sub>, w<sub>int2</sub>, w<sub>int3</sub>は重み係数  
E<sub>threshold</sub>は定数)

### 4.3 ロボットの走行制御

検出された床面領域情報を用い、ロボットの経路に沿った走行制御を行う。

分岐路のない道で構成された環境でのロボットの移動を考える。図10.1のようにまっすぐな道の中心にロボットがあった場合の移動を考える。HyperOmniVisionより得られる画像は図10.2のように経路に沿った方向に検出された領域は、対称系となる。一方、図11.1のようにロボットの位置が道の中心から少しずれた場合、図11.2のように床面領域の対称性がくずれる。即ち、経路の中心を走行するようにロボットを制御するためには、検出された領域が対象となるような行動を行えばよい。

そこで本手法では、経路方向の対称性を評価するために検出領域の重心位置と重心点周りの慣性主軸の情報を利用する(図9)。

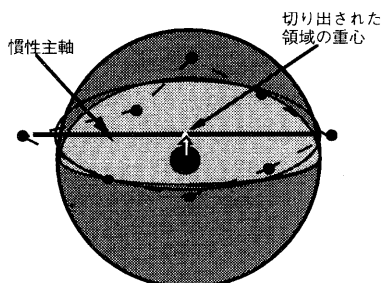


図9 慣性主軸と領域の重心

即ち、図10.1の例では、経路方向は矢印の方向となり、この方向への走行は、慣性主軸の方向と一致する。また図11.2の場合では、丁度ロボットがよった方向の床領域が狭くなるため、重心位置は、その逆方向により、また移動したい方向は床面領域の慣性主軸と直交する方向の成分を持つようになる。

その他、図12.1のような曲がり角、13.1のように障害物がある場合でも、図12.2、13.2のように曲がり角や障害物により検出領域の対称性がくずれることを利用し、慣性主軸方向成分と直交方向成分を移動方向とすることで障害物回避が可能となる。

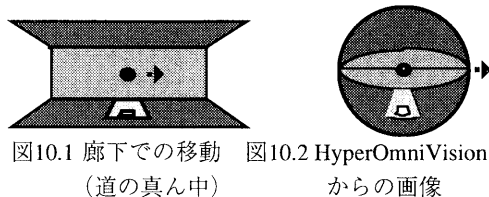


図10.1 廊下での移動 (道の真ん中)

図10.2 HyperOmniVisionからの画像

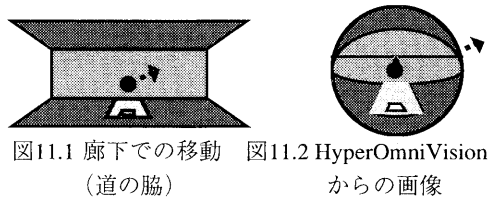


図11.1 廊下での移動 (道の脇)

図11.2 HyperOmniVisionからの画像

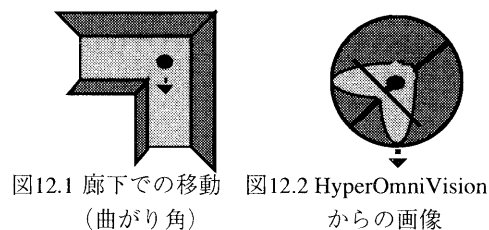


図12.1 廊下での移動 (曲がり角)

図12.2 HyperOmniVisionからの画像

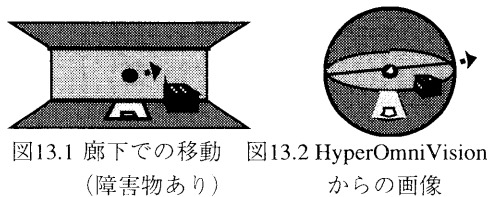


図13.1 廊下での移動 (障害物あり)

図13.2 HyperOmniVisionからの画像

即ち、検出された領域の慣性主軸と重心位置を制御パラメータとすることでロボットの経路誘導を行うことができる。

具体的には、移動方向は、次式に示すロボットの自己位置から床面領域の重心へのベクトル、慣性主軸と直交する方向成分と、領域の長軸方向のベクトルの重み付き合成ベクトルで表す。

## 5 実験

提案手法の評価のために、シミュレーション実験並びに実際のロボットを用いた実験環境での実験を行った。

図14、15は、ロボットが障害物を回避する場合と、直角の曲がり角に沿って移動する場合についてのシミュレーション実験結果である。シミュレーションで用いたセンサのパラメータは、実際の全方位視覚センサと同じ値である。またスネークにおけるコントロールポイントは、全周3度毎に全120点とし、 $int1, int2, int3$ の重み係数および閾値は、各々120、1、1、580とした。これらの値は、すべて実験で用いた値と同じである。

なお、このシミュレータでは、センサからの画像はノイズのない状態を想定している。床面が正しく得られたときの移動方向の決定方法の検証を行うのが本実験の目的である。図中の丸がロボットの軌跡、塗りつぶされているのが最終位置である。直角の曲がり角に沿って移動する場合は、特に検出領域の形状が直進路と異なる場合であるが、図のように問題なく経路誘導を行うことができている。

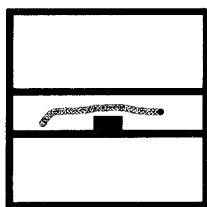


図14 障害物がある場合

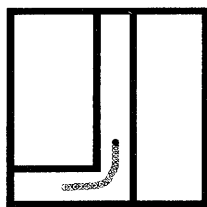


図15 直角の曲がり角の場合

次に障害物を含む場合について、実験環境内で実験を行った結果を以下に示す。実験環境は、本学内の廊下(図16)で、約10m弱の経路に複数の障害物を設置した。ロボットの移動速度は1inch/secとした。計算サイクルは8secである。

図17は、図7の画像に対するスネークによる移動可能空間検出結果である。求められた床面領域の境界と慣性主軸を元画像に重ねて表示している。

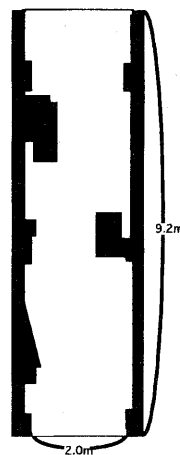


図16 実験環境

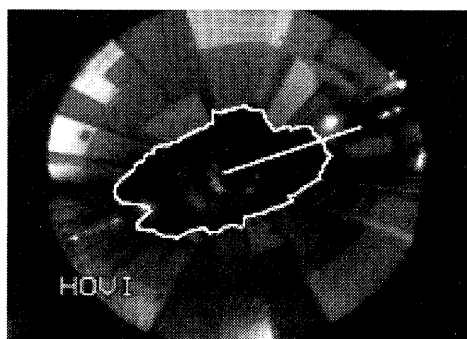


図17 Snakesを用いた床面の切り出し

図18は、本手法を用いロボット誘導を行った時のロボットの移動経路である。複数の障害物があるが、回避しながら経路を誘導することができた。図17にも現れているが、実験環境中では、ライトの映り込みの影響で床面領域とならなかったものの、長軸等の特徴量はその影響を大きく受けなかった。

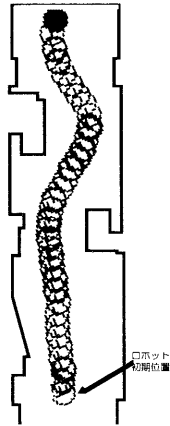


図18 ロボットの移動経路

おわりに

本報告では、建物内の廊下や市街地の道路といった経路を対象に移動環境の持つ性質と全方位視覚センサHyperOmniVisionの持つ光学的な特性を活用することで、障害物を回避し経路誘導を行う方法を提案した。

シミュレーションと実環境双方の実験から、本手法の有用性が示せた。しかし、スネークモデルでは、複数のエネルギーの重み付き総和で表現されるため、実際にはパラメータ・チューニングの問題があると考えられる。特に床面との境界が曖昧な場合、ただしい移動可能空間が検出されるとは限らない。従って、画像の質に合わせたパラメータ調整機能を持つ必要があり、今後の課題とする。

また実際の道路環境では、横断歩道や停止線などの標識が路面上にあるため、現状のように外部エネルギーとして輝度値のみを利用していたのでは、適用できない場合がある。従って、高さ情報を持つ特徴をエネルギーとして含める必要があると考える。

## 参考文献

- [1]Chuck Thorpe : " Machine Learning and Human Interface for the CMU Navlab" ,In Proc.Computer Vision for Space Applications,1993
- [2]Giulio Sandini,Francesca Curotto and Stefano Garibaldi : " Divergent Stereo in Autonomous Navigation:From Bees to Robots" ,International Journal of Computer Vision,14,pp159-177,1995
- [3]K. Storjohann,T. Zielke, H.A. Mallot and W. von Seelen : " Visual obstacle detection for automaticallycycles" ,Proc.Robotics and Automation,pp.761-766,1990
- [4]R. Cipolla and A. Blake : " Surface orientation and time to contact from image divergence and deformation" ,Proc. 2nd European Conference on Computer Vision,pp.187-202,1992
- [5]Yasusi Yagi,Shinjiro Kawato and Saburo Tsuji : " Collision Avoidance Using Omnidirectional Image Sensor" ,Proc.Int. Conf. on Robotics and Automation,pp.910-915
- [6]山澤一誠,八木康史 and 谷内田正彦 : " 移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサHyperOmni Visionの提案" ,電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J79-D-II No.5,pp.698-707,1996
- [7]Michael Kass,Active Witkin Models and Demetri Terzopoulos : " Snakes:Active Contour Models" , International Journal of Computer Vision,pp321-331,1988