

空間推論による移動ロボットの定性的ナビゲーション

3N-7

森実 克 山田誠二 豊田順一

大阪大学産業科学研究所

1. はじめに

従来のナビゲーションにおいて、その観測方法は定量的なものであった。しかし、角度や距離の測定にはどうしても誤差が出るため、定量的観測には不確実性がつきまとう。また、人間や他の動物は空間を移動する際、必ずしも定量的な情報に頼っているわけではなく、視界に入る対象と自分との関係(対象の見え方)からおおまかな位置を掴み、さらに目的地へのパスを推論していると思われる。

定性的ナビゲーションとしてはいくつかの研究がなされているが[1][2]、本研究では、観測で得た定量的情報を定性的表現に変換し、以後一切の推論及びパスプランニングはこの定性的表現を用いて行う。システム内部でのパスプランニングのための空間表現として、定性的表現から得られる Direct Reachability Map を提案する。

2. 処理の流れ

本研究では以下の仮定をおいている。(1)ロボットは、ランドマークの認識・同定が可能である。(2)認識できるランドマークの近傍への移動が可能である。(3)ロボットは、ランドマークの「指向性をもつ特徴」を認識可能である。(3)の「指向性をもつ特徴」とは、ある範囲の方向からのみ認識可能な特徴のことで、このような概念を導入することで、ランドマークを単なる地形上の質点としてではなく、構造を持ったものとして扱うことができる。

以下に、全体の処理の流れを示す。

- step1: 外界を観測する。
 step2: 観測により得られた定性的及び定量的な情報から、演繹される全ての定性的関係を生成する。
 step3: 得られた定性的関係から到達可能性地図(Direct Reachability Map; DRM)を生成する。この際、定性的関係とショートカットパス生成ルールの不確実性を考慮する。
 step4: 目標位置が与えられると、到達可能性地図上で最適なパスを探索する。このようにして得られたパス上の各アークには、移動方法がラベル付けされており、これらを順次実行することでナビゲーションを実現する。

3. 観測

ロボットは、外界の状態を知るために観測を行うことでランドマーク間の定性的関係を獲得する。実際の観測では、どうしても距離や角度等の定量的情報が必要となるが、これには不可避免的に観測誤差が含まれる。もし、これが無視できるものであったとしても、この情報を使って多段に推論する場合、その累積誤差は無視できないものとなる。これを避けるために、本システムでは観測により得られた定量的情報は、定性的関係に変換した後で全て破棄し、以後は定性的関係のみを扱う。なおランドマークとは、観測対象とする「同定可能な特徴点」[2]のことである。

観測は、ランドマークの近傍で行い、理想的にはランドマークを中心とした半径 r の全方位観測とする。観測により直接得られる情報は、

(1)ランドマーク及びその特徴の認識

$rec(L_1, L_2), frec(L_1, L_2, Feature)$

(2)2つのランドマーク間の角度

$angle(L_1, L_2, L_3, D) (D = \angle L_1 L_2 L_3)$

(3)2つのランドマーク間の距離

$distance(L_1, L_2, Distance)$

の3つである。このうち(1)は定性的情報であるが、(2)(3)に関しては定量的情報であるため、上記の理由から定性的関係に変換する必要がある。

4. 定性的関係

本研究での定性的関係とは、ランドマーク間、及び観測地点と観測対象間の位置関係を記号的に表したものであり、prologのホーン節で表現できる。例えば、ランドマーク1から見て、ランドマーク2が左手に、ランドマーク3が右手に見えるとき、その関係を左右関係 $lr(L_1, L_2, L_3) (0 < \angle L_2 L_1 L_3 < \pi)$ として表わすことができる。また、本システムでは、定性的関係を観測により直接得るだけでなく、それをもとに新たな定性的関係を生成するためのルールも用意している。いくつか例を挙げる。

- 左右関係A $lr(L_1, L_2, L_3) : L_1$ から見て、 L_2 が L_3 の左にある。 $(0 < \angle L_2 L_1 L_3 < \pi)$
 $lr(L_1, L_2, L_3) :- rec(L_1, L_2), rec(L_1, L_3),$
 $angle_0_180(L_2, L_1, L_3).$
- $lr(D, A, C) :- lr(A, C, D).$
- $lr(B, D, A) :- lr(A, B, D).$
- 整列関係 $align(L_1, L_2, L_3, D = same/not_same) : L_1$ から見て L_2 と L_3 が直線上にある。(同じ $D = same$)
 $align(L_1, L_2, L_3, same) :- rec(L_1, L_2), rec(L_1, L_3),$
 $angle_0_e(L_2, L_1, L_3).$
- $align(L_1, L_2, L_3, not_same) :- rec(L_1, L_2), rec(L_1, L_3),$
 $angle_180_e(L_2, L_1, L_3).$

Qualitative Navigation with spatial reasoning

Katsu Morizane

The Institute of Scientific and Industrial Research.

Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibarakishi, Osaka 567, Japan

angle_180_ε(L₂, L₁, L₃).
 これらのルールには、条件部が全て正しいときに結論部が正しくなる条件付き確率を割り当てる。これにより推論された定性的関係には、それが外界において正しい確率が割り当てられる。これは、観測により直接得られた定性的関係は確率1で外界において正しいが、それをもとにルールから前向き推論して得られたものにその保証はないことを表わす。

5. 到達可能性地図：Direct Reachability Map

上述の操作で得られた定性的関係から、到達可能性地図（以下DRM）を生成する。DRMは、ランドマークからランドマークへの直接到達可能性を表わしたネットワークである。n個のランドマーク {L₁, ..., L_n} についてのDRMとは、以下のような有効グラフ(V,E)である。

- すべてのL_iはVに含まれる。
- ∀e(L_i, L_j) ∈ Eには、L_iからL_jへの到達可能性を表わす確率 (reachable(L_i, L_j)の正しい確率) を付加する。

さらに各アークには後々のナビゲーションのために、定性的な移動方法をラベル付けしておく。これは、後述するreachable導出ルールのボディに書かれているものを利用する。

定性的な移動方法としていくつか挙げると、「move1：直接認識できるランドマークに向かって移動する」とか、「move2：直接認識できる2つのランドマークの間を通過して、新たにランドマークが認識できれば、それに向かって移動する」等である。

DRMの生成は、定性的関係reachableを導出することに相当する。reachableの導出法として以下の2種類を挙げる。

- 定性的関係からの直接（直感）的変換。
 「既に到達したことのあるランドマークや、認識できたランドマークには、到達できるだろう」という考えを用いる。このような考えから、以下の変換規則が考えられる。rea(L₁, L₂)は、既にL₁からL₂への到達実績があることを表わし、rec(L₁, L₂)はL₁からL₂が直接認識可能であることを表わす。

$$\begin{aligned} \text{reachable}(L_1, L_2) &:- \text{rea}(L_1, L_2).[\text{move1}] \\ \text{reachable}(L_1, L_2) &:- \text{rec}(L_1, L_2).[\text{move1}] \end{aligned}$$

- 定性的関係からの幾何学的な演繹による変換。
 直接認識できないランドマーク間については、幾何学的な制約を利用した演繹ルールによって、reachableを導出する。このようなルールとしては、幾何学的に妥当なことが保証されるもののみを使用する。以下の例（図1）では、AからCに移動する場合、A→B→CあるいはA→D→Cと移動するよりもA→Cと移動するほうが短いことが分かっている（[move2]）。

reachableを導出するルールの一般形をreachable:-body₁, body₂, ..., body_nとすると、このルールから前向き推論によって得られるreachableが正しい確率

Pr(reachable)は、

$$\text{Pr}(\text{reachable} \mid \text{body}_1 \wedge \dots \wedge \text{body}_n) * \prod_{i=1}^n \text{Pr}(\text{body}_i)$$
 で表せる。

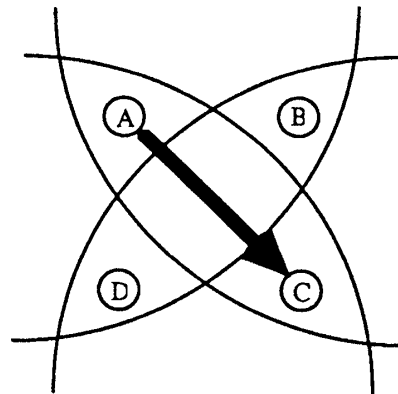


図1 定性的移動

reachable(A, C):-
 lr(A, B, D), lr(B, C, A), lr(D, A, C),
 rec(B, A), rec(B, C), rec(D, A), rec(D, C).[move2]

6. ナビゲーション

目的地が与えられると、ロボットはDRMを利用することでパスプランニングをする。そのためには現在地が判明する必要があるため、まずランドマークの近傍まで移動する。その際、移動先はどのランドマークでもよく、ランダムに移動して最初に行き着いた所を出発地点とする。次に、DRM上で各アークに割り当てられた確率を考慮して、目的地までの確率の積が最大になるようなパスをDijkstraのアルゴリズムを応用することで見つける。ナビゲーションは、選ばれたパス上にラベル付けされている移動方法を順に実行することで実現される。

7. 今後の課題

本論文でも、定性的関係やそれを導出するルールをいくつか挙げたが、これだけでは不十分なので、適当なものを追加する。また、計算機上でのインプリメントを早急に行い、従来の定量的手法とDRMを用いた定性的手法とで、効率上どれ程の差がでるのかを、例えばセンサーの精度を変化させるなどして比較したい。

参考文献

[1] Levitt, T.S., Lawton, D.T., and Chelberg, D.M. : Qualitative Navigation II, Workshop on C.V., pp.319-325 (1988)
 [2] Peter K. Malkin and Sanjaya Addanki : LOGnets: A Hybrid Graph Spatial Representation for Robot Navigation, AAAI-90, pp.1045-1050 (1990)
 [3] Kuipers, B.J. and Byun, Y.T.: A Qualitative Approach to Robot Exploration and Map-learning, Workshop on Spatial Reasoning and Multi-Sensor Fusion, pp.390-404 (1987)