OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	パターン解釈における観測者依存性を考慮した言語的指示の理解
Author(s)	柴田, 史久
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3155143
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

パターン解釈における観測者依存性を考慮した

言語的指示の理解

1999年1月

柴田　史久

パターン解釈における観測者依存性を考慮した

言語的指示の理解

1999年1月

柴田　史久

内容梗概

本論文は，筆者が大阪大学大学院基礎工学研究科（情報数理系専攻ソフトウェア科学分野）後期課程在学中に行ったパターン解釈における観測者依存性を考慮した言語的指示の理解の研究をまとめたものであり，次の６章から構成される．

第１章は緒論であり，人間とエージェント間のコミュニケーションの重要性とその問題点について触れ，本研究の目的および位置付けについて述べる．

第２章では，言葉や表情，ジェスチャなど様々なメディアを用いたコミュニケーションについて議論し，その中において，ある環境を共有する場合の言葉を用いたコミュニケーションの位置づけを明確にするとともにそれをモデル化する．まず，これらのメディアを用いたコミュニケーションにおいて発信者の意図が如何にして受信者に伝わるかを示し，そこに概念モデルの相違が如何にかかわるかについて検討する．次に言葉を用いたコミュニケーションの特徴を述べ，そこにおける概念モデルの相違によって生じる問題点を明らかにする．概念モデルの相違による情報伝達の失敗は，人間同士においても起こり得ることであるが，多くの場合は発生しない．その理由を言葉に含まれる文脈情報の利用であると考え，文脈情報を利用したコミュニケーションをモデル化する．また，円滑な情報伝達の実現のために，成功した情報伝達の結果を利用した概念モデルの擦り合わせについて述べる．

第３章では，第２章で述べた文脈情報を利用した情報伝達の利用例として，移動ロボットのナビゲーションを取り上げる．まず，経路指示に文脈情報として含まれる道標間の位置的な制約を利用して考慮しうる部分環境の組合せを経路仮説として生成し，生成した経路仮説を交差点の概念モデルとの相違をもって評価し行動を決定する観測行動プランニングを提案する．さらに，提案したプランニングにおいて問題となる，情報の発信者と受信者それぞれの道標のモデルの相違に起因する経路探索の失敗や探索範囲の増加などの問題について議論する．経路探索の失敗については，ロボットに与える経路情報の詳細さを変化させることによって解決する方法を提案する．また探索範囲の増加に関しては，過去の行動の結果から得られる事例を利用して，ロボットの道標モデルを学習・修正することを通じて解決する手法を提案する．

第４章では，これまでの手法を観測範囲に制限のある実際の移動ロボットを用いて

実装する手法について論じる．実機におけるナビゲーションでは，センサやアクチュエータに起因する誤差の問題が常に存在する．ここではこのような誤差の影響を受けにくい環境の記述方法として，大局的な地図はグラフ構造でのみ獲得し，局所的な地図でおいてのみ数値的なデータを用いる手法を提案する．その上で，観測範囲が制限されたロボットが，第３章での観測行動プランニングを実現するための行動について検討する．

第５章では，第３章，第４章で用いた“交差点”という道標に対する，実存する環境への適用可能性について検討するために，地図情報処理システムを取り上げる．ここでは，地図情報システムにおいて文脈情報を利用することによって，ユーザの意図する正しい経路を探索し，それを提示する手法を提案する．

第６章は結論であり，本研究で得られた成果を総括すると共に，その意義，及び今後の課題について述べる．

関連発表論文

A. 学会論文

1. 柴田, 芦田, 角所, 北橋：移動ロボットによる言語的経路指示理解のための記号情報とパターン情報の対応付け, 人工知能学会誌, Vol.13, No.2, pp.221-230(1998).

2. 柴田, 志摩, 芦田, 角所, 北橋：道標認識の曖昧性を考慮した移動ロボットのナビゲーション, 日本ロボット学会誌 （照会中）.

B. 国際会議

1. F.Shibata, M.Ashida, K.Kakusho, N.Babaguchi and T.Kitahashi: Mobile Robot Navigation by User-friendly Goal Specification, Proceedings 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN'96), pp.439-444(1996).

2. F.Shibata, M.Shima, M.Ashida, K.Kakusho and T.Kitahashi: Agent Navigation under Linguistic Instructions of a Route Using Contextual Information, Proceedings 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.4133-4138(1998).

C. シンポジウム，学会研究会

1. 柴田, 芦田, 角所, 馬場口, 北橋： 道標の認識に基づく経路記述の理解のための観測行動の計画と道標モデルの学習, 第１回ロボティクスシンポジア予稿集, pp173-178(1996).

2. 柴田, 芦田, 角所, 北橋：自律移動エージェントによる道標を用いた記号的な経路記述の理解のための認識機構の学習, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU97-13, pp.97-104(1997).

3. 柴田, 芦田, 角所, 北橋：言語的な経路指示による移動ロボットの誘導とユーザへのカスタマイズ, 電子情報通信学会技術研究報告 HIP97-9, pp.63-70(1997).

D. 学会講演発表

1. 柴田, 芦田, 角所, 馬場口, 北橋：自律移動エージェントによる道標モデルの学習に関する一考察, 平成 7 年電気関係学会関西支部連合大会予稿集, pp.G387(1995).

2. 芦田, 柴田, 角所, 馬場口, 北橋： 道標の認識に基づくナビゲーションのための観測行動における意思決定, 平成 7 年電気関係学会関西支部連合大会予稿集, pp.G386(1995).

3. 柴田, 芦田, 角所, 馬場口, 北橋：道標の認識に基づく経路探索のための能動的観測, 第 38 回自動制御連合講演会予稿集, pp.289-290(1995).

4. 柴田, 芦田, 角所, 北橋：人間－ロボット共存系における道標を用いた記号的な経路記述の伝達手法, 1997 年度人工知能学会全国大会（第 11 回）論文集, pp.429-432(1997).

5. 志摩, 北野, 柴田, 芦田, 角所, 北橋：骨格線を用いた交差点認識のための能動的観測計画手法, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.2, pp.581-582(1997).

目次

第 1 章 緒論 **1**

第 2 章 言葉を用いたコミュニケーション **5**

2.1 緒言 5
2.2 一般的なコミュニケーション 6
2.3 環境共有による暗黙の情報伝達 8
2.4 文脈情報を利用した情報伝達の実現 11
2.5 コミュニケーションの結果からの概念モデルの学習 15
2.6 結言 17

第 3 章 経路指示文理解のための観測行動プランニング **19**

3.1 緒言 19
3.2 問題設定 21
3.2.1 交差点に基づく経路表現 21
3.2.2 骨格線に基づく観測データの表現 24
3.3 経路仮説の生成 28
3.4 経路仮説の評価に基づく観測行動プランニング 29
3.5 観測行動プランニングの実験 32
3.5.1 実験 1：付加的な情報を十分に含む場合（1） 33
3.5.2 実験 2：付加的な情報を十分に含む場合（2） 35
3.5.3 実験 3：付加的な情報が不十分な場合 35
3.6 行動結果による概念解釈モデルの学習 38
3.6.1 行動結果の利用 38

3.6.2 観測データの評価内容の学習 39
3.7 概念解釈モデル学習の実験 42
3.7.1 実験４：観測データの分割の仕方の学習 43
3.7.2 実験５：未知形状概念の学習 43
3.7.3 学習に関する考察 43
3.8 結言 46

第４章 実ロボットによるナビゲーションの実現 **47**
4.1 緒言 47
4.2 グラフ構造に基づく環境記述の獲得 48
4.2.1 部分距離データからの骨格線抽出 48
4.2.2 グラフ構造に基づく環境記述の獲得 52
4.3 骨格線追跡のための行動計画 55
4.3.1 移動ロボット 55
4.3.2 骨格線追跡の計画 56
4.3.3 行動候補の評価関数 57
4.4 実験および考察 63
4.4.1 実験システム 63
4.4.2 投光法による距離データの獲得 65
4.4.3 走行実験 67
4.4.4 考察 71
4.5 結言 73

第５章 地図情報処理システムにおける経路指示文の利用 **75**
5.1 緒言 75
5.2 問題設定 76
5.2.1 地図情報処理での利用を考慮した経路表現 76
5.2.2 経路探索エージェントにおける環境の記述 80
5.3 経路仮説の生成と選択した経路仮説の展開 84
5.4 経路仮説の評価に基づく経路探索 85
5.5 結言 87

第６章 結論 **89**

謝辞 **93**

参考文献 **95**

図 目 次

2.1 メディアを用いた一般的なコミュニケーションの基本モデル 7
2.2 実際のコミュニケーションの結果 8
2.3 環境共有による暗黙の情報の利用 10
2.4 環境を共有する場合における情報伝達の失敗 11
2.5 環境から獲得可能な付加的な情報を利用した情報伝達 12
2.6 暗黙の情報を利用した経路情報の伝達 14
2.7 環境からの事例獲得による概念モデルの学習 16

3.1 骨格化処理の過程 26
3.2 環境とその観測データ 27
3.3 環境の骨格線による記述例 27
3.4 同一の観測データに対する交差点の分割の仕方 28
3.5 ロボットの移動に伴う経路仮説の生成例 30
3.6 実験１：付加的な情報を十分に含む場合（１） 34
3.7 実験２：付加的な情報を十分に含む場合（２） 36
3.8 実験３：付加的な情報の違いによる移動結果の変化 37
3.9 パラメータ w_S による観測データの評価値の変化 40
3.10 骨格線に基づく交差点の形状特徴 41
3.11 骨格線による分岐点の構成 42
3.12 実験４：観測データの分割の学習 44
3.13 実験５：未知形状概念の学習による効果 45

4.1 部分距離データの獲得 48
4.2 部分距離データから占有グリッドへの変換 49

4.3 部分距離データの変換における場合分け 50
4.4 占有グリッドからの輪郭線の抽出 51
4.5 骨格線の抽出 52
4.6 骨格線からのグラフ構造の抽出 54
4.7 ロボットの仕様と１ステップでの動作および観測範囲 55
4.8 障害物との衝突 57
4.9 衝突の判定基準 58
4.10 関数 IO のグラフ 58
4.11 現在位置を見失わないための条件 59
4.12 観測距離限界に対する評価値のグラフ 59
4.13 視野角に対する評価値のグラフ 60
4.14 目標１の評価関数 G_1 の評価対象 S_{TT} 61
4.15 観測を必要とする未観測領域 $A_1 \sim A_3$ 62
4.16 マイクロマウスの概観 64
4.17 マイクロマウスの大きさ 64
4.18 ロボット中心座標系の設定 65
4.19 ロボット中心座標系とカメラ中心座標系の関係 66
4.20 実験環境 68
4.21 実験環境の概観図 69
4.22 実験１：移動の軌跡および途中過程での占有グリッドと骨格線 70
4.23 実験２：移動の軌跡および途中過程での占有グリッドと骨格線 72

5.1 地図データ中の道路領域とその骨格線 83
5.2 ある分岐点集合に対する交差点の分割の仕方 84
5.3 新たな分岐点集合の生成 85

表目次

3.1 ロボットへの経路指示における道標に付随する制約 22
3.2 ロボットへの経路指示における順序制約の記号表現とキーワード 23
3.3 ロボットへの経路指示における通路数制約の記号表現とキーワード . . 23
3.4 ロボットへの経路指示における形状制約の記号表現とキーワード 23
3.5 ロボットへの経路指示における方向制約の記号表現とキーワード 23
3.6 ロボットへの経路指示における形態素解析の例 25

5.1 部分経路指示に含まれる制約 77
5.2 経路探索エージェントへ与える順序制約の意味とキーワード 78
5.3 経路探索エージェントへ与える通路数制約のキーワード 78
5.4 経路探索エージェントへ与える形状制約のキーワード 78
5.5 方向の種類と方向を意味するキーワード 79
5.6 数値地図 10000（総合）における目印制約のキーワード例 81
5.7 経路探索エージェントへの経路指示の形態素解析例 82

第 1 章

緒論

近年，計算機の急速な発展・普及にともない，現代社会は情報化社会と呼ばれる時代へと足を踏みいれた．情報化社会においては，計算機システムを介して多種多様な情報を利用した知的活動が繰り広げられている．特に最近では，計算機システムやそれのネットワーク上という仮想環境において，ユーザに代わってメールの管理や情報収集など一定の作業を行うソフトウェアエージェント [西田 95] に対する要求が高まりつつある．また，ロボットの分野に目を転じてみれば，日常生活という実環境において人間の作業を支援・代行する生活支援型ロボット [加藤 93, 小林 94] への期待が強まりつつある．ここでロボットを，計算機に実環境からの情報獲得のためのセンサ，および実環境への働きかけのためのエフェクタが搭載されたものだと考える．すると，ソフトウェアエージェントおよびロボットは一まとめに，実／仮想を問わず環境からの情報獲得およびそこへの働きかけ（環境とのインタラクション）を行う能力を持つ主体と見なすことができる．以下これをエージェントと定義すると，近年の情報化社会における要求は，エージェントに対する知的活動の要求と捉えることができる．このようなエージェントに人間側が何らかのタスクを与えて知的活動を行わせるために伝達する情報（以下，**指示情報**と呼ぶ）とは，要するに環境への働きかけ，あるいは操作に関する記述であり，そこではこの指示情報を人間と計算機の間で受渡しするコミュニケーションのためのメディアが重要な位置を占めている．しかるに，現状でのコミュニケーションにおいては，人間の側が，計算機システムにおける処理手順を記したマクロやロボットにおける作業手順を決めた教示データ [松島 95] 等，エージェントが理解可能な形態へと情報を変換し伝達するのが一般的である．これは人間にとって大きな負担であり，両者の間の円滑なコミュニケーションを妨げる要因ともなっている．

このようなコミュニケーションの手段について，人間にとっての使い易さの観点から検討すると，言葉や表情，ジェスチャ等，人間同士のコミュニケーション [樋口 93] において一般的に使用されるメディアと同様のものが利用できることが望ましい．これらのメディアの持つ特徴について考察してみると，言葉というものは抽象性が高く，表現できる概念も豊富で効率的であり，表現における負担が少ない一方，映像メディアが持つような個別性・具体性に乏しい．また，人間の第一義的な発想は言語であることが多い．表情は，Yes/No などの単純な意味や感情を表す場合に有用であるが，それ以外の情報を伝達するには使いにくい．またジェスチャは，動作などを表現する場合には具体性が高く有用な反面，伝達すべき内容が頻繁に変化する場合には，表現のための負担が増大する．このような特徴から，人間とエージェントとの間のコミュニケーションにおける人間の負担を軽減するために，言葉によるメディアは，今後ますます重要なものとなると考えられる．そこで以下では，人間－エージェント間での言葉を用いたコミュニケーションをモデル化し，そこで発生する問題について論じる．

指示情報を言葉によって表現するコミュニケーションにおいては，上述のように，言葉というメディアは抽象性が高く具体性が低いため，情報の発信者や受信者は言葉の表現する概念と環境中の具体的な対象とを対応付ける概念のモデルを必要とする．すなわち，人間とエージェントのコミュニケーションにおいて各々は，情報を発信する場合には，環境から獲得される情報をもとに自己（発信者）の持つ概念モデルにしたがって言葉に抽象化（以下，記号化と呼ぶ）し，情報を受信する場合には，受け取った言葉をもとに自己（受信者）の持つ概念モデルにしたがって環境中の対象に具体化（以下，**復号化**と呼ぶ）し理解する．エージェントにおいては，環境からの情報獲得，および環境中の対象への具体化の過程では，最終的にはパターンデータとして環境とのインタラクションが行われると考えられるため，この送・受信における記号化および復号化はそれぞれ，送信者が有する概念モデルによるパターン認識，およびある概念記号に対応した受信者が有するパターンモデルの想起に照応する．このような機構のもとで正しく情報を伝達するには，両者の概念モデルがほぼ同一であることが要求される．しかし，過去のパターン認識に関する研究から，人間と同一の認識結果を保証するような汎用的な画像理解システムを構築することが難しい [谷内田 89] ということがいわれているのと同様に，人間とエージェント間において同一の概念モデルを与えることは容易ではない．しかしながら，両者の間で概念モデルに差異が存在すると，

記号化と復号化を経て得られるエージェントの理解内容は，元情報の発信者の意図するものとは一致せず，意思疎通に失敗する．

このようなパターン解釈の個別性に起因する問題は人間同士の場合にも生じていると考えられるが，多くの場合は意思疎通に成功している．その理由として考えられるのは，伝達される内容に含まれるいわば意味的な冗長性の利用である．これは例えば，“α”という物体を指示するにあたって，“βの隣にあるα”と表現する場合にあたる．もし，情報の発信者と受信者が“α”という物体について同一の概念モデルを持つならば，“β”および“隣”という概念は対象物体“α”が特定された後に，そこから獲得可能な情報となっている．しかし両者の概念モデルが異なる場合には，“α”，“β”，“隣”というそれぞれを認識対象としてそれらを別個に認識するのではなく，“βの隣にあるα”という記述によって与えられる，これら３つの間の文脈的制約を利用して，同時に真とする対象物体の組を探索することによって正しい認識が可能となる．すなわち，受信者の側で，“自分にとって最も自然にαと思われる物体の隣にはβと思われる物体はないが，その他にもαと思われる物体は存在し，それはβと思われる物体の隣にあるため辻褄があう”といった推論が可能となる．さらに，このような推論によって対象物体が正しく認識された後には，逆にその物体から得られる情報をもとにして自己の概念モデルを修正・学習することも可能である．これはつまり，受信者の側で，対象物体の認識の後に，“発信者にとってのαとはこの物体なのだな”という推論を行うことにあたる．

このように，情報の発信者の側では，環境から獲得される情報をもとに自己（発信者）の持つ概念モデルにしたがって記号化する際に，所与の環境中でその対象を特定するに足る必要最小限ではなく，ある程度冗長に記述することは可能である．その場合には受信者の側で，たとえ概念モデルの違いによって個々の概念記号の意味するものとして発信者の意図したものとは異なるものが復号化されても，上記のように文脈的な制約により個別の概念としては整合性が低いものを含んでいるとしても全体的には整合性の高いものを選択することを通じ，結果的に正しい理解を得ることが可能となる．

以上のような考察に基づいて，本論文では，第２章において，言葉や表情，ジェスチャなど様々なメディアを用いたコミュニケーションについて議論し，その中において，ある環境を共有する場合の言葉を用いたコミュニケーションの位置づけを他のメ

ディアと比較しながら明確にする．その後，環境を共有することで言葉によって伝達される明示的な記号情報に加えて，環境から獲得可能な暗黙の情報を利用するというモデルを導入し，このモデルにおける問題点を，情報の発信者と受信者の概念モデルの違いによる認識誤りの例を取り上げて説明する．概念モデルの差異による情報伝達の失敗は，人間同士においても起こり得ることであるが，多くの場合は発生しない．その理由を言葉に含まれる文脈情報の利用であると考え，その方法について議論する．また，円滑な情報伝達の実現のために，成功した情報伝達の結果を利用した概念モデルの擦り合わせについて述べる．

第3章では，第2章で述べた文脈情報を利用した情報伝達の利用例として，移動ロボットのナビゲーションを取り上げ，それを実現するための観測行動プランニング[芦田 95, 柴田 95b, 柴田 96a, Shibata 96b, 柴田 98a, Shibata 98b] を提案する．さらに，提案したプランニングにおいて問題となる，情報の発信者と受信者それぞれの道標のモデルの相違に起因する経路探索の失敗や探索範囲の増加などの問題について議論する．経路探索の失敗については，ロボットに与える経路情報の詳細さを変化させることによって解決する方法を提案する．また探索範囲の増加に関しては，過去の行動の結果から得られる事例を利用して，ロボットの道標モデルを学習・修正することを通じて解決する手法を提案する [柴田 97a, 柴田 97b, 柴田 97c].

第4章では，これまでの手法を観測範囲に制限のある実際の移動ロボットを用いて実装する手法について論じる [Shibata 98b, 柴田 98c]．実機におけるナビゲーションでは，センサやアクチュエータに起因する誤差の問題が常に存在する．ここではこのような誤差の影響を受けにくい環境の記述方法と観測範囲が制限されたロボットが第3章での観測行動プランニングを実現するための行動方針について検討する．

第5章では，第3章，第4章で用いた “交差点” という道標に対する，実存する環境への適用可能性について検討するために，地図情報処理システムを取り上げる．ここでは，地図情報処理システムにおいて，文脈情報を利用することによって，ユーザの意図する正しい経路を探索し，それを提示する経路探索エージェントという枠組について提案する．

第6章は結論であり，本研究で得られた成果を総括すると共に，その意義，及び今後の課題について述べる．

第 2 章

言葉を用いたコミュニケーション

2.1 緒言

本章では，言葉や表情，ジェスチャなど様々なメディアを用いたコミュニケーションについて議論し，その中において，ある環境を共有する場合の言葉を用いたコミュニケーションの位置づけを明確にする．ここでいう環境とは，言葉によって伝達される対象が存在する世界，言い換えれば，言葉に含まれる概念の事例が存在する世界，のことを指す．まず，これらのメディアと意図との間での記号化，復号化を経て発信者から受信者にどのように意図が伝達されるのかを述べ，その際に概念モデルの相違が如何にかかわるかについて検討する．次に言語メディアの特徴を他のメディアと比較することを通じて，情報を言語メディアで伝達する場合の問題点を明らかにする．

ここでの基盤となる考え方は次のようになる．コミュニケーション一般の目的とは，それによって何らかの情報を伝達することである．情報の伝達には何らかのメディアを用いる必要がある．以下に述べるように意図した情報が映像情報であり伝達の媒体として言語メディアを利用する場合には，映像情報を言語情報に変換する必要があり，このとき概念のモデルが必要となる．概念のモデルは，対象とするメディアや目的，および関連する人物によって様々に異なるものであり，この違いによって意図した情報が伝達できないという状況が発生する．しかしながら逆に，コミュニケーションが成立している場合には，情報自体を介して，発信者と受信者の概念モデルの対応がとれていることになる．したがって，両者のモデルに相違がある場合にも，この対応を利用することにより発信者の概念モデルと受信者の概念モデルとの擦り合わせが可能となる．すなわち，概念モデルが異なる場合に，何らかの手段をもってコミュニ

ケーションが成立するならば，そこで得られる対応付けを利用して概念モデルを調整することが可能となる．

このような考えに基づいて，本章ではまず，情報を言語メディアで伝達するには欠落する情報を復元・補完するために環境を共有することが重要であること，また逆に環境を共有することによって，受信者側で環境から獲得可能な情報が暗黙に伝達されることを前提として，それ以外の情報のみを抽出して伝達することにより，明示的に伝達される情報の削減や抽象化が可能となることを説明する．その後，環境を共有することによって言葉によって伝達される明示的な記号情報に加えて，環境を観測することで獲得される暗黙の情報を利用するというモデルを導入し，一般的なコミュニケーションのモデルと比較しながら議論する．続いて，上述のモデルにおける問題点を，情報の発信者と受信者の概念モデルの違いによる認識誤りの例を取り上げて説明する．概念モデルの差異による情報伝達の失敗は，人間同士においても起こり得ることであるが，多くの場合は発生しない．その理由を言葉に含まれる文脈情報の利用であると考え，その方法について議論する．また，円滑な情報伝達の実現のために，成功した情報伝達の結果を利用した概念モデルの擦り合わせについて述べる．

2.2 一般的なコミュニケーション

人間のコミュニケーションは，原始の時代には，しぐさ，表情，音声に加えて，身体に付随する装飾や，手に持った道具の運動などを用いた身体全体を使うものであり，それに絵や音や文字などを使った表現が補助的に用いられてきた．その後，長い歳月を経て，音声言語，文字，手話などの体系化された自然言語へと発達し，コミュニケーションにおける中心的メディアになったといえよう．現在でも人間は，言葉や表情，手話，ジェスチャなど様々なメディアを用いてコミュニケーションを行っている [樋口 93]．これらの様々なメディアを用いた一般的なコミュニケーションの基本モデルは図 2.1 のように表すことができる [野口 93]．この図はA，B両者の間のコミュニケーションを表している．Aは自分自身の世界の情報をBに伝えるために，その情報をメディア上に写像しなければならない．一方，Bは情報を受け取るためにメディアで表現されたものを自分自身の世界に写像する．ここでいう 2 種類の写像とは，それぞれ第 1 章の議論における記号化と復号化にあたる．

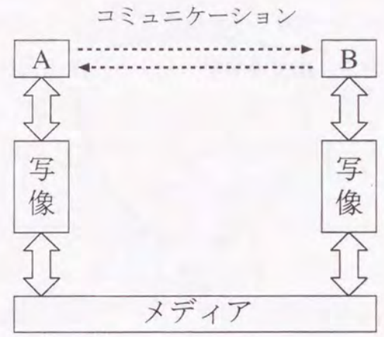


図 2.1 メディアを用いた一般的なコミュニケーションの基本モデル

このモデルの上でAの情報がBに正確に伝達されるためには，次の 2 つの変換が正確に行われる必要がある．

- Aの情報が復元するのに必要かつ十分な精度でメディアに変換（記号化）されること
- メディアの情報がBによって，Aによるメディアへの変換の逆変換として，メディアからBが認知する世界像へ変換（復号化）されること

一般のコミュニケーションにおいては，これら 2 つの操作の可逆性を可能にする精度あるいは枠組が常に保証されているわけではない [野口 93]．その結果，実際のコミュニケーションにおいて，起こり得る状況は図 2.2 のようになる．一般的にいえば，Aの概念世界における α という概念を持つ情報は，記号化と復号化の過程を経て，Bの概念世界において，α とは異なる β という概念を持つ情報に写像される．これは第 1 章でも述べたように，AとBとの間の概念モデルの相違によって引き起こされる．すなわち，Aが記号化の過程において用いるAの概念モデルとBが復号化の過程において用いるBの概念モデルが異なっているため，α と β の間に相違が生じるのである．このとき α と β の差が小さければ小さい程，それだけ正しい情報が伝達される．

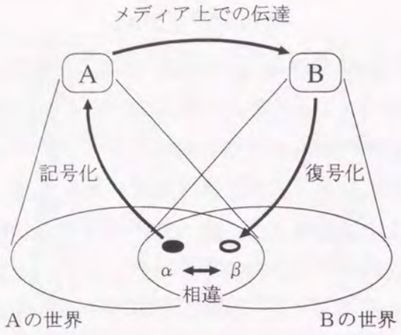


図 2.2 実際のコミュニケーションの結果

2.3 環境共有による暗黙の情報伝達

上述のようなコミュニケーションのモデルは，言葉を用いたコミュニケーションにも当てはまる．すなわち，言葉を用いたコミュニケーションにおいて，情報の発信者は，伝えたい情報を自己の持つ概念モデルを用いて言葉というメディアに変換し，情報の受信者は自己の持つ概念モデルを用いてその言葉を実世界のものと対応付ける．ここで言葉について検討してみると，言葉というメディアは他のメディアと比べて以下のような特徴を持つ．

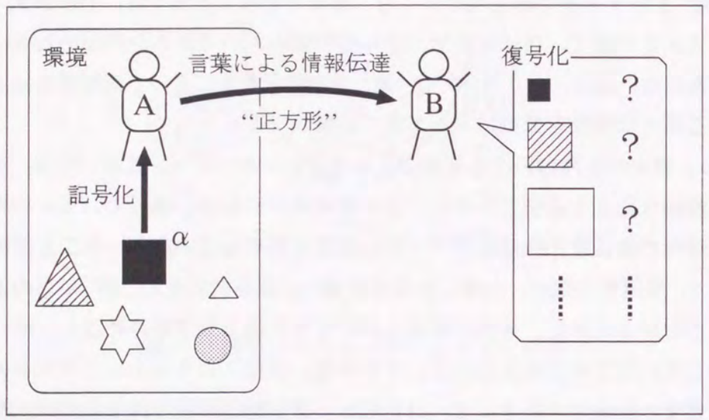
- 抽象性が高く，具体性に乏しい．
- 表現できる概念が豊富である．
- 表現における負担が少ない．

例えば，言語メディアを用いたコミュニケーションと画像メディアを用いたそれとを比較してみると，言語メディアはその抽象性の高さゆえにシーンにおけるある部分に特化した情報を伝達する能力に優れ，一方画像メディアはシーン中の情報をまんべんなく伝達する能力に優れている．このような言葉の特徴はコミュニケーションにおいてしばしば弊害を引き起こす．特に問題となるのは，言葉というものは抽象性が高く具体性に乏しい，という点である．これは，具体的な情報を言葉を用いて伝達する場合，欠落する情報があるということを意味する．例えば，目の前にある “箱” をみて，これを “箱” という言葉で伝えたとしても，情報を受信した側では，それが具体的にどのような大きさの箱で，色は何色で，どんな材質のものであるかがわからない，という状況にあたる．逆に，より具体的な “箱” の情報を言葉によって伝達するには，“箱” に付随する様々な情報を言葉によって表す必要がでてくる．

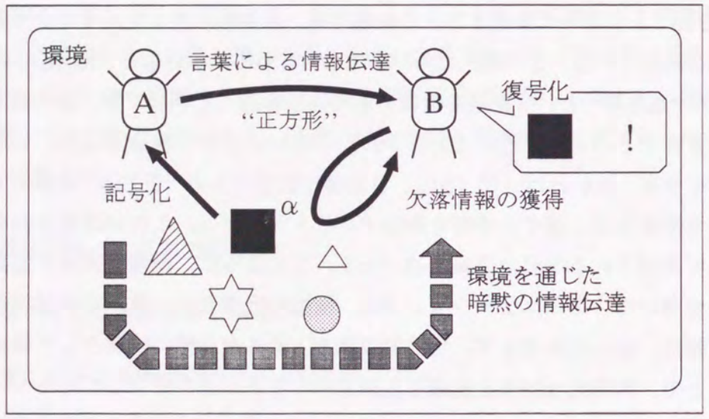
しかし，我々の日常における言葉によるコミュニケーションにおいては，それほどまでには詳細な記述を必要としない．この理由の一つには，多くのコミュニケーションでは，情報の発信者と受信者が一つのの環境を共有しているということがあげられる．つまり，受信者の側が，欠落した情報を補い，具体的にその “箱” がどのようなものであるかを知るために，実際の環境においてその箱を受信者が特定し，そこから情報を獲得しているためと考えられる．すなわち，言葉によるコミュニケーションにおいては，言葉の抽象性の高さによって生じる，具体的な情報の欠落を復元・補完するために，両者の間で同一の環境を共有することによって得られる暗黙の情報を利用している．

これを図 2.3 を用いて説明する．この図では，AがBに対して，α で示す物体の情報の伝達を試みている．この時，両者が環境を共有していない場合（図 (a)）には，例えば，Aが “正方形” という言葉に情報を記号化し伝達したとしても，Bの側ではどのような大きさでどのような色の正方形かわからない，という状態となる．しかし，両者が環境を共有していれば（図 (b)），Bの側で環境中から “正方形” を特定し，そこから大きさや色などに関する情報を取得することができる．これが環境を共有することによって実現される暗黙の情報伝達である．このように，環境を共有する状況における言葉を用いたコミュニケーションでは，情報の発信者は，受信者が環境から獲得可能な情報は，陽には伝達せず，受信者の側で，それを暗黙の情報として環境から獲得することで，明示的な情報を削減した抽象的な意思伝達が成立している．

一般的なコミュニケーションにおいては，言葉を用いて具体的な情報を伝達するには，言葉の抽象性が高いために多くの言葉を必要とする．しかし，環境を共有している場合の言葉を用いたコミュニケーションでは，環境から獲得可能な情報を陽には伝達しないために，少ない言葉で具体的な内容を伝達することが可能となっている．



(a) 環境を共有しない場合



(b) 環境を共有する場合

図 2.3 環境共有による暗黙の情報の利用

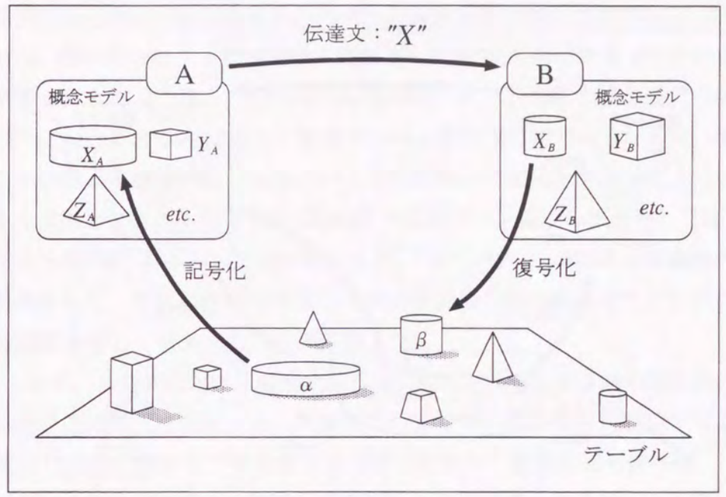


図 2.4 環境を共有する場合における情報伝達の失敗

例えば，直接相手と会って商談をする場合と，電話を使って商談をする場合を比較してみる．直接会って商談をする場合には，対象となる商品の説明が掲載されたパンフレット等を用いるが，ここではこれが共有される環境にあたり，伝達すべき情報は，その商品の特徴などである．このとき，直接会っている場合は，パンフレットから得られる商品の写真などと，言葉による説明を統合して提示することが可能であるのに対し，電話の場合では，商品の概観などから特徴まで全てを言葉で説明する必要があり，前者の方が少ない言葉でコミュニケーションが円滑に進む．対面する対話では，環境を通じた暗黙の情報伝達が行われているためと考えられる．

2.4 文脈情報を利用した情報伝達の実現

2.3 節に述べた環境共有による暗黙の情報伝達を利用した言葉によるコミュニケーションにおいても，依然として，2.2 節において論じた概念モデルの相違による伝達情報の差異は存在する．そして，この差異が大きくなると情報の伝達が達成できない場合が発生する．これを図 2.4 を用いて説明する．

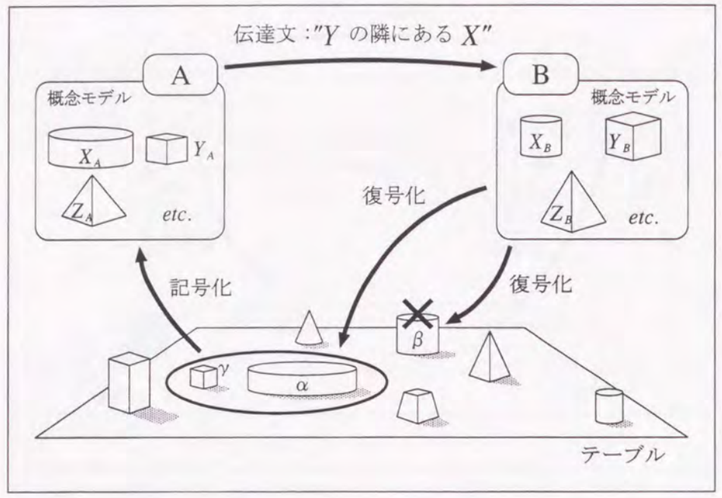


図 2.5 環境から獲得可能な付加的な情報を利用した情報伝達

図中において情報の発信者Aは，テーブルという環境中に存在する物体の中からαについての情報を受信者Bに伝達することを試みている．このときAにとってαに最も近い概念モデルは X_A であり，環境中からαを特定するには，X_A を指定するだけで十分である．これを利用してAは “X” という記号に変換してこれをBへ伝達する．ところが，Bのもつ記号 “X” に対応した概念モデルは X_B であり，環境中でこれに最も近い物体はβとなってしまう．結果としてBは，伝達された情報はβであると誤って認識し，情報伝達は失敗に終る．

このような状況があり得るにもかかわらず，人間同士においては多くの場合，意思伝達に成功している．この理由として考えられるのが，第 1 章でも述べた記述に含まれる文脈的な情報の利用である．これを，上で用いたのと同様の図 2.5 を使って説明する．

図中において情報の発信者Aは，テーブルという環境中に存在する物体の中からαについての情報を情報の受信者Bに伝達することを試みている．このとき情報の発信者Aの側が，発信者Aと受信者Bの概念モデルの間に相違が存在する可能性を考慮して，環境中から獲得可能な情報を，明示的に伝達する情報に付加することができる．この例では，隣にある物体γを付加的な情報として，“Y の隣にある X” という制約を加えた表現を与える．このような付加的な情報は，AとB両者の概念モデルが同一であり，“X” という記号のみによって環境中からαを特定可能であるならば，環境を観測することによって獲得可能であるという意味において冗長な情報となっている．しかし，その付加的な情報を利用することよりBの側では，個別の概念としては，図 2.4 に示したように “X” をβとして誤認識するが，“X”，“Y”，“隣” という概念それぞれを認識対象として，それらを同時に満たす部分を環境中から探索することによりαについての情報を正しく伝達することが可能となる．

次にこれを，本論文における議論に即して，環境を共有する 2 者の間における経路情報の伝達を例にあげて説明する．人間同士が環境中の経路情報を伝達する場合，両者は通常同じ環境に存在してその環境を共有しており，意思伝達の際には，2.3 節において述べたように，言葉として陽に表現される記号情報に加えて，この環境の観測データとして得られるパターン情報を暗黙に利用している．すなわち，経路情報の伝達の例で言えば，情報の発信者側では，観測データとして得られる環境情報のうち，伝えたい経路を環境中の他の部分から区別して一意に特定するための相対的な特徴に関する情報を分離し，これを言葉として抽象化して伝える一方，受信者の側では，伝えられた言葉の意味を観測データレベルに具体化することによってこれを環境中の各部分の観測データと統合し，その結果得られる制約を満足する部分として発信者の意図した経路をその環境中で特定する（図 2.6 参照）．

この場合も，両者の概念モデルが異なれば，経路の特定に失敗するはずであるが，経路情報に含まれる付加的な情報を利用することでこれを回避できる．いま，発信者から受信者に対して，(1) “2 番目の 3 叉路を右折し，最初の T 字路へ移動せよ” という指示が与えられていたとする．この場合，発信者と受信者が同一の交差点の概念モデルを持ち，両者による交差点認識の結果に相違が生じる危険がなければ，この経路を特定するのに，“2 番目の交差点を右折し，最初の交差点へ移動せよ” という指示を与えれば十分である．したがって，(1) の経路指示は，2 番目の交差点が 3 叉路であること，および，そこを右折した最初の交差点が T 字路であることなど，正しい経路が特定されたならば環境から獲得可能な（逆に言えば言葉で陽に伝達する必要のない），個別の概念に関する情報，およびそれら配置に関する情報を含む記述となって

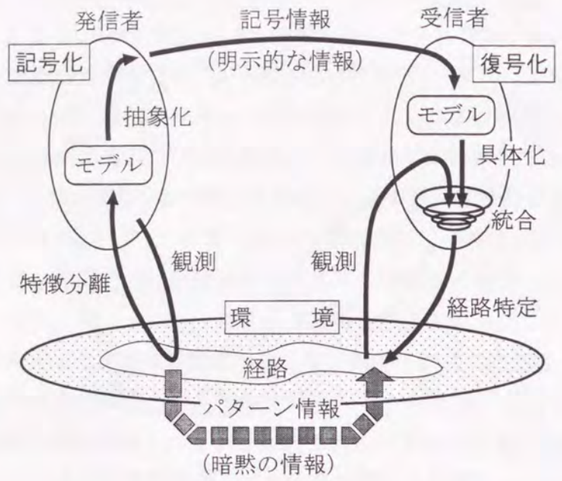


図 2.6 暗黙の情報を利用した経路情報の伝達

いる．しかし，発信者と受信者の概念モデルが異なり，両者の間で，“交差点” や “T 字路” などの認識結果に相違が生じ得る場合には，これらの付加的な情報を利用することによって認識結果の修正が可能である．例えば，受信者の側で，“自分にとって最も自然に３叉路と思われるところを曲がっても，T字路と考えられる場所は存在しないが，その他にも３叉路らしき場所は存在し，そこを曲がるとT字路らしき場所に到達して辻褄が合う” といった推論を行うことが可能となる．これによって，“交差点” や “T字路” を別々に認識するのではなく，すべてを同時に真とするような環境を探索することが可能となる．

このように，情報の発信者の側では，伝えたい経路の相対的な特徴を環境情報から分離して記号化する際に，所与の環境中でその経路を特定するに足る必要最小限ではなく，ある程度冗長に記述することは可能である．その場合には受信者の側で，たとえ概念モデルの違いによって個々の概念記号の意味するものとして発信者の意図したものとは異なるものが復号化されても，上記のように，“３叉路を曲がった先にT字路がある” などという道標間の位置関係に関する一種の文脈的な制約により，個別の概念としては整合性が低いものを含んでいるとしても全体的には整合性の高い別の経路

を選択することを通じ，結果的に正しい理解を得ることが可能となる．

2.5 コミュニケーションの結果からの概念モデルの学習

2.4 節では，情報の発信者と受信者の間で，概念モデルが多少異なっている場合にも，伝達される情報に含まれる付加的な情報を利用することで正しく意思伝達が可能となるモデルを導入した．しかし，このような形での意思伝達過程では，情報の発信者の側は概念モデルの相違に見合う付加的な情報を伝達する必要がある一方，受信者の側でも自己の概念モデルに基づく自然な解釈結果を曲げてそれを理解する必要がある．これは，より簡潔な内容によって正確に情報を伝達するという観点からすれば，効率の悪い意思伝達過程となっている．より効率的な意思伝達のためには，発信者と受信者両方の概念モデルが近いことが望まれる．

ところで，2.4 節で述べた言葉を用いたコミュニケーションのモデルでは，正確に情報が伝達された場合に，受信者の側では，伝達された情報が対象とするもの，言い換えれば，言葉に含まれる概念の事例を環境中から認識している．この事例は，情報の発信者の概念モデルに基づいて評価した場合に正事例となるものである．これを利用すれば，後のコミュニケーションの円滑さを目指して，概念モデルを学習することが可能となる [柴田 95a]．これを図 2.7 を用いて説明する．

この図では，図 2.5 で説明した文脈情報を利用した情報伝達により，発信者Aから受信者Bにαについての情報が正しく伝達できている．この時，Bの側では，“X” や “Y” に対応する事例αやγを環境を観測することによって獲得している．このαやγは発信者Aの概念モデル X_A，Y_Aの正事例となっているため，この事例を用いてBの概念モデルを学習することにより，受信者Bの概念モデルを発信者Aの概念モデルに近づけることができる．その結果，受信者Bの側ではαやγをより容易に認識可能となり，場合によってはαのみの情報によっても正しく解釈する可能性が増す．すなわち，より簡潔な記述で正確に情報を伝達することを円滑なコミュニケーションとするならば，上記の学習によって，それより後における両者の間のコミュニケーションをより円滑にすることができる．

このような学習を 2.4 節で述べた人間同士の経路情報の伝達の例に当てはめてみると，次のような場合にあたる．例えば３叉路であると考えにくい場所を経路情報の与

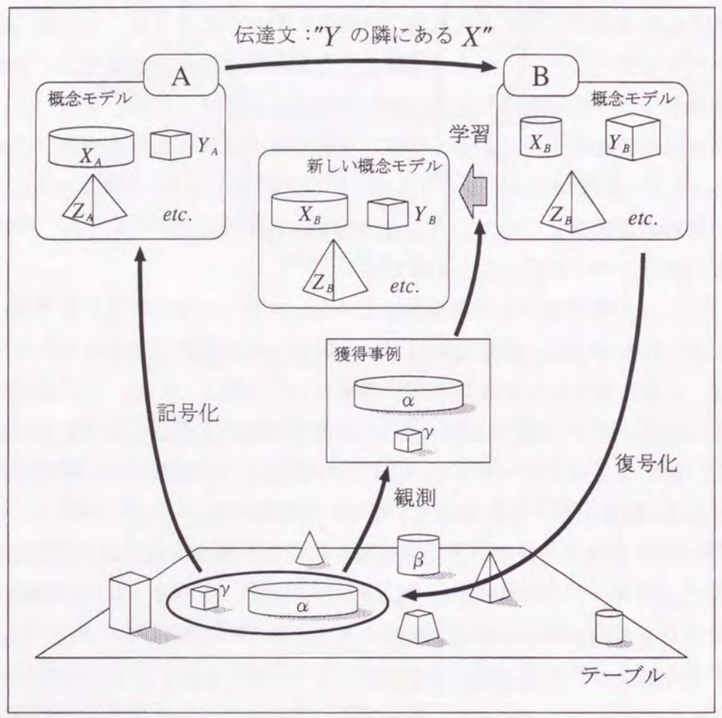


図 2.7 環境からの事例獲得による概念モデルの学習

える文脈情報との整合性を考慮して３叉路であると拡大解釈して移動し，正しい目的地に到達した場合に，“相手にとっての３叉路とはこのようなものなのだな” という推論を行うことにより，相手の持つ３叉路の概念に関する知識を獲得する．また，経路情報に自分の知らない道標が存在する場合に，その道標の存在を無視して他の道標や位置的な情報のみを利用して正しい目的地に到着できた結果から，経路中にでてきた未知の道標に対して “自分の知らない相手のいう○○とはこのことだな” という推論を行うことにより，未知の道標概念に関する知識を獲得する．そして，以降の情報伝達においては獲得した知識を有効に活用することによって，より円滑なコミュニケーションを実現する．これは成功した情報伝達の結果に基づく，共有する環境から獲得可能な情報を利用した概念モデルの擦り合わせであり，環境を共有する状況における言葉を用いたコミュニケーションの重要な要素となっている．

2.6 結言

本章では，一般的なコミュニケーションのモデルについて述べた後に，本研究が対象とする，環境を共有する状況における言葉を用いたコミュニケーションの位置づけを明確にした．一般のコミュニケーションをモデル化すると，交信者間の概念モデルの相違によって伝達された情報の解釈にも相違が生じる可能性が存在する．これは言葉を用いたコミュニケーションについても同様であるが，人間同士の場合は，それにもかかわらず情報伝達がおおむね成功している．言葉を用いたコミュニケーションにおいては，環境を共有することによって，環境から獲得可能な情報は陽には伝達せず，それによって具体的な内容を少ない言葉で伝達することが行われている．この時に人間同士では，環境から獲得可能な情報の一部を陽に伝達することによって，意図的に言葉に含まれる情報を増し，それによって概念モデルの相違による問題を解消している．ここでは，このようなコミュニケーションを，環境を共有する場合における文脈情報を利用したコミュニケーションとしてモデル化した．

また，上記の方法で正しく情報が伝達された際には，結果として環境中の対象が特定される．これを利用して受信者の側が概念モデルを発信者の側に近づけるという学習を行うことによってより円滑なコミュニケーションが目指せるという可能性を示唆した．

次章以降では，このようなコミュニケーションを，人間－ロボット間におけるナビゲーションのための経路情報の伝達という具体例によって実証する．

第 3 章

経路指示文理解のための観測行動プランニング

3.1 緒言

前章では，言葉を用いたコミュニケーションにおいて，人間同士の場合はそこで問題となる概念モデルの相違を如何にして克服しているかについて検討し，それを環境を共有する場合における文脈情報を利用したコミュニケーションとしてモデル化した．本章では，このようなコミュニケーションの利用例として，移動ロボットのナビゲーションを取り上げる．

ロボットの研究に関しては，古くからナビゲーションの問題 [油田 87] が取り上げられてきており，その目的地の指示の仕方にも対象とするタスクの内容によって様々なものが存在する．例えば，経路探索自体を問題とするいわゆるパスプランニングの研究では，目的地の環境中での絶対座標自体を与える方法 [Kambhampati 86] が用いられることが多い．また，経路部分の構造が予め分かっているような場面での誘導には，道路境界や花壇等のサインパターンと定型行動からなる指令書によって経路を与える手法 [森 87]，進行方向と環境の構造に関する情報を地図としてロボットに与える方法 [松本 87]，経路上で観測される視野画像列によって経路を表現する方法 [松本 97] などがある．さらに，システムに与える経路の情報の簡潔性を追求したものには，交差点間の進行方向と移動距離による簡潔な記述を与え，与えられた距離を利用して交差点を逐次的に認識し移動する方法 [西川 94] が挙げられる．

一方これとは別に，日常生活での作業を支援・代行するような生活支援型ロボッ

ト [加藤 93, 小林 94] への期待が近年しだいに高まりつつある．このような生活支援型のロボットには，それまでに多く研究されてきた極限作業ロボット [大山 91, 高野 91, 高瀬 91] に必要な自律移動能力に加えて，人間とのコミュニケーション能力が求められる．ここでこれまでの議論におけるエージェントの１つとしてロボットを考えると，ロボットに対しても人間の扱いやすい言葉を用いたコミュニケーション，すなわち言葉によるナビゲーションが実現されることが望ましい．人間同士が見知らぬ場所を指示する場合を想定すると，“２番目の角を曲がって...” といった形で，目的地に至る経路をその上に現れる道標（landmark）を用いて表現するのが一般的である．そこでロボットに対しても同様の道標を利用した経路指示を与えて，ナビゲーションを実現することを考える．

ロボットは与えられた経路指示を理解するにあたり，自己の持つ道標の概念モデルにしたがってそれを解釈し，環境中の部分環境と照合・認識するわけであるが，ロボットの持つ道標の概念モデルと経路指示者のそれとの間には相違が存在するため，道標の認識には曖昧性が生じる．しかしながら，道標の認識を誤るとロボットによる経路指示の理解内容は経路指示者の意図するものとは一致せずに，目的地に到着できない，途中で道に迷ってしまう，などの問題が発生する．

そこで，前章で定義した環境を共有する場合における言葉を用いたコミュニケーションのモデルを適用してみると，経路指示者，すなわち経路指示を与える人間の側は，これまでの議論における情報の発信者にあたり，経路指示を受け取るロボットの側は，情報の受信者にあたる．また，経路指示はこれまでの議論におけるエージェントに与える情報であり，その指示中に含まれる道標が環境中の対象を表す概念である．その上で，上述のモデルにおける文脈情報として，経路指示者の側が伝えたい経路の相対的な特徴を環境から分離して記号化する際に，与えられた環境中でその経路を特定するのに十分な必要最小限ではなく，道標の位置関係などの付加的な情報を記述しているという仮定をおく．すると，ロボットの側で，道標の概念モデルの相違により個々の道標を表す記号の意味するものとして指示者の意図するものとは異なるものが復号化されても，道標間の位置関係などにより，個々としては整合性が低いが経路全体としては整合性が高いものを選択する枠組を採り入れることにより，経路を正しく移動するナビゲーションが実現できる．これはすなわち，(１) 経路指示者は適当な概念モデルの下で環境について正しいことを述べている，(２) 経路指示者とロボットの

概念モデルは（全く同一ではないが）近い，という前提の下に，環境の観測データと矛盾しない言葉の意味内容を与え，かつロボットの概念モデルから相違が最も小さいような，概念とパターンの対応付けを探索する処理である．

以下ではその具体的な手法として，道標間の位置的な制約を利用して考慮しうる部分環境の組合せを経路仮説として生成し，生成した経路仮説を交差点の概念モデルとの相違をもって評価し行動を決定する観測行動プランニングを提案する [芦田 95, 柴田 95b, 柴田 96a, Shibata 96b, 柴田 98a, Shibata 98b]．さらに，提案手法において問題となる，情報の発信者と受信者それぞれの道標のモデルの相違に起因する経路探索行動の失敗や移動コストの増加などの問題について議論する．次に前者についてはロボットに与える経路情報の詳細さを変化させることによって解決する．また後者に関しては過去の行動の結果から得られる事例に基づいた道標モデルの学習を通じて解決する手法を提案する [柴田 97a, 柴田 97b, 柴田 97c]．

3.2 問題設定

ここでは，上述の観測プランニングを実現するにあたって，どのような形で経路指示を与え，環境の観測データをどのように記述するかについて述べる．

3.2.1 交差点に基づく経路表現

我々が言葉で経路を記述する場合，その経路を特徴付ける単位として，環境に関する様々な種類の情報を利用している．辻は尺度，トポロジー，シーンのパターン，および道標による経路表現の例として以下の４つを挙げている [辻 91]．

- １ km ほど歩いて，それから･･･
- ３番目の角を左に曲がって，･･･
- 並木路を通りすぎて繁華街に入り，･･･
- 古いお寺の次の角を左に曲がって，･･･

本研究では，道標の意味するものをより広く捉え，上記の例のうち，“角”，“ 並木路”，“繁華街”，“お寺” などのように，通常，名詞を用いて表現されるような部分空

制約	意味	キーワード例	記号表現
順序制約	交差点の順番	“1 番目”	1
通路数制約	交差点につながる通路の本数	“3 叉路”	3
形状制約	交差点の形状	“T 字路”	T
方向制約	交差点での移動方向	“左折する”	left

表 3.1 ロボットへの経路指示における道標に付随する制約

間をすべて道標と考える．また，“古い” や “3 番目” など道標を修飾する形で表現されるような情報，および “1km ほど歩いて”，“左に曲がって” など，ある道標と次の道標との位置関係に関する情報を，道標の制約と呼ぶ．

以上のような経路表現のための道標および制約として，人間が日頃利用しているものには，環境によって様々なものが考えられる．しかし現時点では，郵便局や信号などの一般的な物体は，その一般的なモデルを与えることが難しくあるばかりでなく，たとえそれの汎用モデルが記述できたとしても種々の事例に容易に対応できるようなことはほとんど望み得ない．そこで本研究では，認識のための一般的なモデルを与えることが可能であり，かつモデルに含まれるパラメータおよび個人の主観および状況によってその意味する対象に曖昧さが生じやすい例である “交差点” を具体的な道標として考え，これに付随する制約として表 3.1 に示すものを導入する．ここで，**通路数制約**とは “3 叉路” などの交差点につながる通路の本数であり，**形状制約**とは “T 字路” などの交差点の形状を表現する記号（以下，形状記号と呼ぶ）である．**順序制約**および**方向制約**は交差点間の位置関係に関する情報で，これらが経路指示において文脈情報として与えられる．順序制約は “1 番目” などの交差点の順番に関する制約を表し，方向制約は “左に曲がる” などの方向に関する制約を表現する．以下では順序制約と方向制約から与えられる制約を位置的制約と呼ぶ．

経路指示者は，ロボットに経路を指示するとき，経路を指示者自身の道標のモデルに従って記号化し道標およびそれに付随する制約を表現した自然言語文を用いる．ロボットはこれを日本語形態素解析システム JUMAN[松本 97] を利用して品詞を付した語に分割し，その結果を用いて，上記の 4 種類の制約に関して予め準備したキーワードと照合して具体的制約を獲得する（表 3.2 ，表 3.3 ，表 3.4 ，表 3.5 参照）．

記号表現	キーワード
1	1 番目，1 個目，1 つ目，最初の，はじめの，次の
i	i 番目，i 個目，i つ目 （i は 2 以上の自然数）

表 3.2 ロボットへの経路指示における順序制約の記号表現とキーワード

記号表現	キーワード
3	三叉路，3 叉路
4	四叉路，4 叉路
i	i 叉路 （i は 5 以上の自然数）

表 3.3 ロボットへの経路指示における通路数制約の記号表現とキーワード

記号表現	キーワード
T	T 字路
Y	Y 字路

表 3.4 ロボットへの経路指示における形状制約の記号表現とキーワード

記号表現	キーワード
left	左折，左に曲がる，左に折れる，左へ行く
right	右折，右に曲がる，右に折れる，右へ行く
forward	前へ進む，前方へ進む，まっすぐ進む，前進，直進
goal	行く，移動する，向かう

表 3.5 ロボットへの経路指示における方向制約の記号表現とキーワード

例えば，

“2番目の三叉路かつT字路を右折し，1番目の交差点まで行け”

という経路指示を形態素解析すると，表 3.6 のような結果が得られる．この解析結果をもとに，キーワードと照合して獲得される具体的制約は，以下のようなものとなる．

<2, 3, T, right> <1, ?, ?, goal>

経路指示によってはこれらの制約のうちのいくつかが特に指定されない道標も存在する（上の例では？で表現している）．なお，本研究では自然言語自体の持つ意味の曖昧さは議論の対象とはせず，“1番目の3叉路”という表現は“1番目”でなおかつ“3叉路”である交差点を意味するものとする．

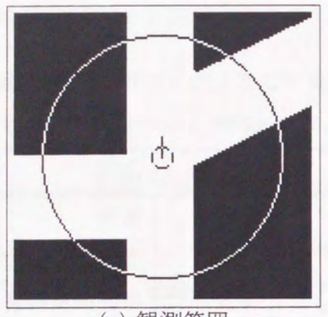
3.2.2 骨格線に基づく観測データの表現

ロボットは各時刻 t において 図 3.1 （a）のような自分の周囲一定範囲内の全方位の距離データを獲得し，観測データとして蓄積するものとする．交差点認識のための観測データの記述特徴としては，主に地図情報処理の分野において平行線分対の接続関係など様々な提案なされているが [早川 91, 早川 94]，本研究は，普遍的な交差点モデルの考案を目的とするものではなく，ロボットと経路指示者の交差点モデルの相違を乗り越えて正しい経路理解を実現するためのメカニズムに関する議論であるので，最も単純に骨格線の分岐構造に基づいて環境を記述する．すなわち，距離データに基づいて得られる環境中の自由領域（図 3.1 （b））に対して Wavefront Expansion 法 [Barraquand 91] を適用し，自由領域の輪郭線から内側に向かって伝播する波面同士の出会った位置を骨格線として抽出する [Kakusho 95]（図 3.1 （c）参照）．ロボットが行動をはじめてから時刻 t までの間に 図 3.2 のような範囲を観測して図中 $s_1 \sim s_7$ で示す骨格線を得たとすると，このときの観測データ D^t は図 3.3 のように，骨格線の分岐点（$J_1 \sim J_3$）のリストとして記述される．ロボットが通路を移動していくことにより，その通路部分の骨格線が延長されたり，その先に新たな分岐点が発見された場合，それらの情報に基づいて観測データが更新される．

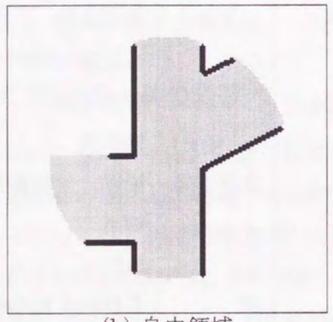
このような形で経路指示と環境記述が与えられた場合に，上述の枠組は，以下の4つのステップで実現される．

形態素	読み	基本形	品詞
2	(に)	2	数詞
番	(ばん)	番	名詞性名詞助数
目	(め)	目	名詞性名詞接尾
の	(の)	の	名詞接続助詞
三叉路	(さんさろ)	三叉路	普通名詞
かつ	(かつ)	かつ	名詞接続助詞
T字路	(てぃじろ)	T字路	普通名詞
を	(を)	を	格助詞
右折し	(うせつし)	右折する	動詞，サ変動詞，基本連用形
,	(，)	,	読点
1	(いち)	1	数詞
番	(ばん)	番	名詞性名詞助数
目	(め)	目	名詞性名詞接尾
の	(の)	の	名詞接続助詞
交差点	(こうさてん)	交差点	普通名詞
まで	(まで)	まで	格助詞
行け	(いけ)	行く	動詞，子音動詞カ行促，命令形
.	(．)	.	句点

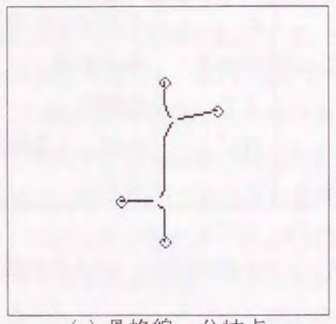
表 3.6 ロボットへの経路指示における形態素解析の例



(a) 観測範囲



(b) 自由領域



(c) 骨格線，分岐点

図 3.1 骨格化処理の過程

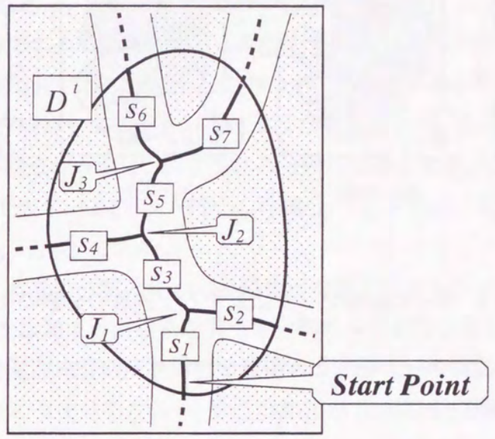


図 3.2 環境とその観測データ

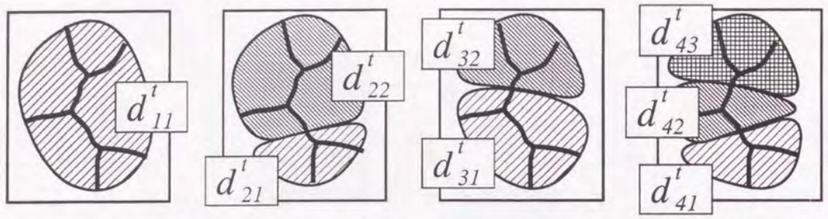
分岐点リスト

J_1 = {接続骨格線 (s_1, s_2, s_3)}
J_2 = {接続骨格線 (s_3, s_4, s_5)}
J_3 = {接続骨格線 (s_5, s_6, s_7)}

骨格線リスト

s_1 = {分岐点 (J_1 ,) , (長さ／輪郭線までの距離) の比 L_{S_1} }
s_2 = {分岐点 (J_1 ,) , (長さ／輪郭線までの距離) の比 L_{S_2} }
s_3 = {分岐点 (J_1, J_2) , (長さ／輪郭線までの距離) の比 L_{S_3} }
s_4 = {分岐点 (J_2 ,) , (長さ／輪郭線までの距離) の比 L_{S_4} }
s_5 = {分岐点 (J_2, J_3) , (長さ／輪郭線までの距離) の比 L_{S_5} }
s_6 = {分岐点 (J_3 ,) , (長さ／輪郭線までの距離) の比 L_{S_6} }
s_7 = {分岐点 (J_3 ,) , (長さ／輪郭線までの距離) の比 L_{S_7} }

図 3.3 環境の骨格線による記述例



(a) 分割 r^t_1 (b) 分割 r^t_2 (c) 分割 r^t_3 (d) 分割 r^t_4

図 3.4 同一の観測データに対する交差点の分割の仕方

1. ある時点での観測データをもとに環境を，環境中の自由領域の中心線で記述し，それまでの環境記述に統合する．

2. その時点で得られている環境記述をもとにして，経路指示中に文脈的な情報として存在する道標の位置的制約を満たす環境記述の分割の仕方を経路仮説として生成する．

3. 生成した経路仮説を道標モデルとの相違をもって評価する関数を定義し，この関数の評価が最も良くなる，すなわち相違が最も小さくなる経路仮説を選択する．

4. 選択した経路仮説の評価がさらに良くなるような観測行動を決定する．

以下の節では，上の各ステップを順をおって説明する．

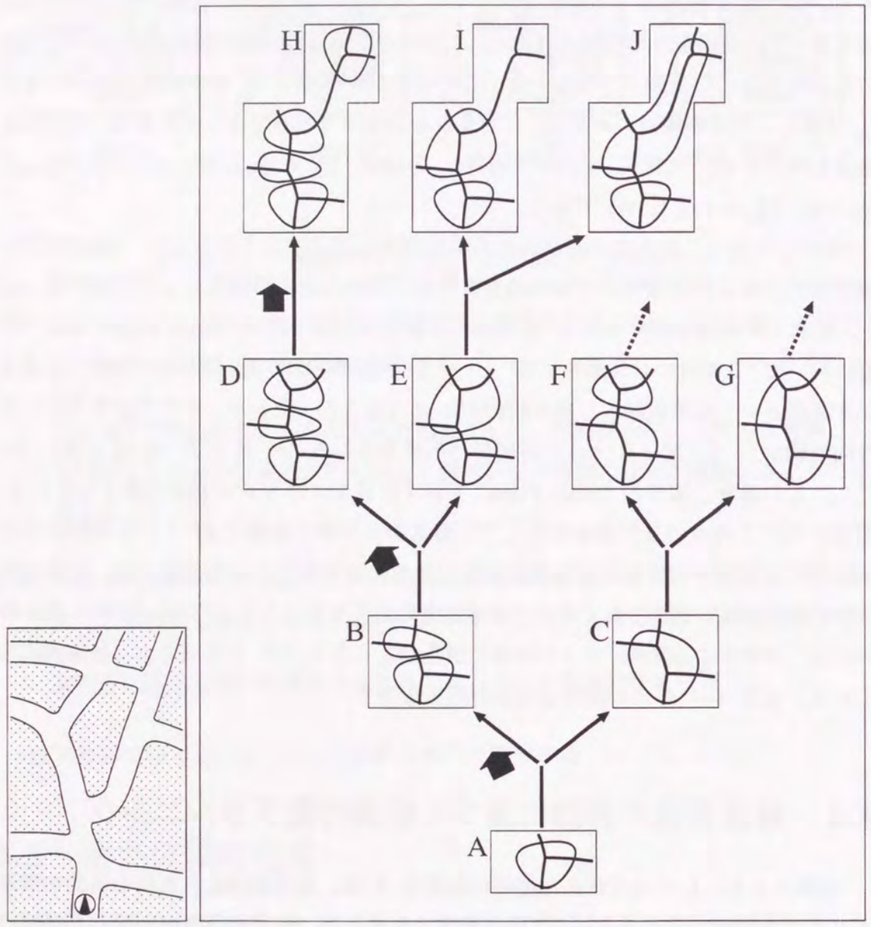
3.3 経路仮説の生成

ある時刻 t での観測データ D^t（図 3.2 中の分岐点 $J_1 \sim J_3$）はどれだけをもって各々 1 つの交差点とみなすかによって様々な分割の仕方がある（図 3.4 (a)(b)(c)(d)）．これらを $r^t_1, r^t_2, \cdots$ で表す（$r^t_i = \{d^t_{i1}, d^t_{i2}, \cdots, d^t_{im}\}$）．このとき，$d^t_{ij}$ は D^t に対する i 番目の分割 r^t_i において，j 番目の交差点とみなされる部分の分岐点の集合を意味する（$D^t = d^t_{i1} \cup \cdots \cup d^t_{im}$）．$m$ はその分割中に含まれる交差点の数，$m'(m \leq m')$ は経路指示の与える全交差点の数であり，$m < m'$ の場合は全ての交差点が発見されていないことを意味する．分割 r^t_3（図 3.4 (c)）を例に取ると，1 番目の交差点を表す d^t_{31} は 2 つの分岐点 J_1, J_2 によって構成され（$d^t_{31} = \{J_1, J_2\}$），2 番目の交差点を表す d^t_{32} は分岐点 J_3 によって構成される（$d^t_{32} = \{J_3\}$）．これらの分岐点は，図 3.3 に示すように，骨格線をその構成要素として持つが，ある骨格線の両端点が共に同じ d^t_{ij} に含まれる 2 つの分岐点であるとき，このような骨格線を d^t_{ij} の内部骨格線と呼んで I^t_{ij} で表し，一方の端点のみが d^t_{ij} に含まれる分岐点であるとき，これを d^t_{ij} の外部骨格線と呼んで O^t_{ij} で表す．上の例の分割 r^t_3 の場合，$I^t_{31} = \{s_3\}$，$O^t_{31} = \{s_1, s_2, s_4, s_5\}$，$I^t_{32} = \phi$，$O^t_{32} = \{s_5, s_6, s_7\}$ である．

ロボットは，これらの分割の中から経路指示を満足するものとして，通路数制約，順序制約，および道標間の方向制約を満たす分割のみを経路仮説として生成する．以下，これらの経路仮説の集合を R で表す．例えば，図 3.2 の “*Start Point*” で示す位置において “2 番目の 3 叉路を左折” という経路指示をロボットに与えた場合，2 番目が 3 叉路という通路数制約と順序制約から r^t_2（図 3.4 (b)）が，また左折するという方向制約から r^t_3（図 3.4 (c)）が仮説から除外される（$r^t_1, r^t_4 \in R$, $r^t_2, r^t_3 \notin R$）．ただし，この場合，図中の *“Start Point”* で示す位置をロボットの初期位置としている．図 3.5 に “3 番目の 3 叉路を右折して 1 番目の 3 叉路へ移動せよ” という指示を与えた場合のロボットの移動に伴う経路仮説の生成例を示す．この図のように，経路仮説は新たな分岐点が観測される毎に，木構造をなして生成される．なお，図中の (a) がロボットが存在する環境，および初期位置を示しており，(b) が生成された経路仮説木である．また (b) の太い矢印を仮説の選択を表す．

3.4 経路仮説の評価に基づく観測行動プランニング

前節のようにして生成された経路仮説集合 R は，経路指示に含まれる制約を満足するような観測データの分割のみから構成されるため，経路指示者が意図した経路はこれらの経路仮説中の 1 つになる．そこで 3.1 節の後半に述べた方針に基づいて，これらの経路仮説のうちで，仮説を構成する各交差点の観測データと，ロボットの持つ交差点モデルとの相違が最も小さいものを，正しい経路と考える．このロボットの持つ交差点モデルとして，本論文では，“内部骨格線が短く，かつ外部骨格線が長い分岐点集合” というものを考える．経路仮説集合 R に含まれる分割 r^t_i の中で，j 番目の交



(a) 環境　　(b) 経路仮説木

図 3.5 ロボットの移動に伴う経路仮説の生成例

差点とみなされている分岐点集合 d_{ij}^t に対して，この交差点モデルからの相違度（モデルに近いほど 0 に近く，そうでなくなるほど 1 に近い値をとる）を与える評価関数 $f(d_{ij}^t)$ とすると，これは d_{ij}^t に含まれる内部骨格線 I_{ij}^t および外部骨格線 O_{ij}^t に基づいて，例えば以下のように定義できる．

$$h(s_k) = w_L \cdot \exp(-L_{s_k}^2) \tag{3.1}$$

$$f(d_{ij}^t) = \left\{(1-w_S)\sum_{s_k \in I_{ij}^t}(1-h(s_k)) + w_S \sum_{s_k \in O_{ij}^t} h(s_k)\right\}/n \tag{3.2}$$

ここで w_L $(0 \leq w_L \leq 1)$ は L_{s_k} に対する評価関数の感度，w_S $(0 \leq w_S \leq 1)$ は外部骨格線と内部骨格線の評価の重みを決定する係数であり，n は外部骨格線集合 O_{ij}^t の要素数である．関数 $h(s_k)$ は骨格線 s_k の通路らしさを評価する関数と考えることができる．この $f(d_{ij}^t)$ の線形和として各々の経路仮説 $r_i^t \in R$ を評価する評価関数 $g(r_i^t)$ を以下のように定義する．

$$g(r_i^t) = \left\{\sum_{j=1}^{m} f(d_{ij}^t)\right\} / m \quad (r_i^t \in R) \tag{3.3}$$

この評価関数 $g(r_i^t)$ の値として最小のものを与える経路が求めるものである．ここで仮に，時刻 t において $g(r_{min}^t) = \min g(r_i^t)$ $(r_i^t \in R)$ である仮説 r_{min}^t を選択したとする．選択された仮説は，その時刻で得られている観測データを与えられた経路指示に対応するロボットのモデルによって評価した場合に，それとの相違度が最も小さいものにあたる．ロボットはこの仮説に対して，その評価値をさらにできるだけ小さくするための行動をとれば経路指示に与えられた目的地へと向かうことができる．評価値を小さくするための行動は以下の 2 つである．

1. 既観測の環境中に観測が不十分な交差点，すなわち相違度が大きい交差点が存在した場合にそこを追加観測する．
2. 観測が不十分な交差点がない場合に，未観測の交差点へ向かって移動を行う．

このようなロボットの観測行動は，経路の評価関数 $g(r_i^t)$ による経路仮説の木構造に対する一種の最良優先探索として以下のように計画される．なお，定数 F は未観測の交差点に対する相違度の期待値である．

1. 各時刻 t において D^t から経路仮説集合 R を生成する.
2. $g(r^t_{min}) = \min g(r^t_i)\,(r^t_i \in R)$ を満たす経路仮説を選択する.
3. r^t_{min} に対して, $f(d^t_{min,max}) = \max f(d^t_{min,j})\,(j = 1, \cdots, m)$ を満たす分岐点集合, すなわち最も相違度が大きい交差点に対応する分岐点集合, を選択する.
4. (a) $f(d^t_{min,max}) > F\,(F$: 定数) のとき, $d^t_{min,max}$ から外に伸びる骨格線のうちで, 最短のもの, すなわち観測が最も不十分な骨格線, を選択する.
   (b) $f(d^t_{min,max}) \leq F$ のとき, そこから未観測の交差点に向かって延びる骨格線を選択する.
5. 選択した骨格線の未観測部分の情報を追加獲得して D^t を D^{t+1} に更新する.

この処理を繰り返し, 経路指示中のすべての交差点が発見され, かつ $g(r^t_{min}) < \delta\,(\delta$: 定数) である D^t が得られたときに指示された目的地までの経路を発見したとして処理を終了する.

上記の処理では, 最良優先探索であるのに加え, d_{ij} に含まれる通路の本数が増えるにつれて関数 f の値は増大するため, 経路指示が以下の条件を満たす程度の情報を含んでいる場合には, 環境の有限, 無限にかかわらず指示者の意図した経路を発見できる.(1) 経路指示者が意図した経路の関数 g による評価 (ロボット自身のモデルによる評価) が δ よりも小さくなる.(2) 経路指示者が意図した以外の全ての経路の評価が δ よりも大きくなる. このような経路指示を, 以下では付加的な情報を十分に含む経路指示と定義する.

なお, ロボットは, 探索終了後に得られた経路をそれに対応する経路仮説と予め与えられた自然言語のテンプレートを利用して再び言葉で表現し, 確認のために経路指示者に伝達する. 指示者はこれを利用して, ロボットが正しい目的地に到達したか否かを判断できる.

3.5 観測行動プランニングの実験

現在位置から経路指示によって与えられた目標位置への移動を, 上に示した観測行動の繰り返しによって実行するロボットのシミュレーションを計算機上に実装した.

なお, ここではパラメータを $w_L = 0.5, w_S = 0.5, F = 0.15, \delta = 0.15$ として実験を行った.

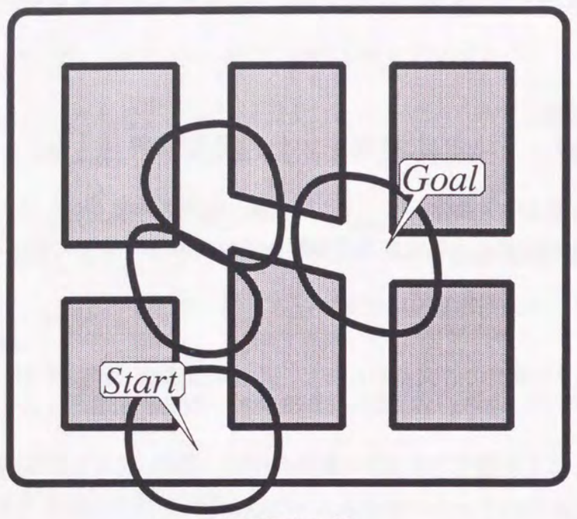
3.5.1 実験 1 : 付加的な情報を十分に含む場合 (1)

図 3.6 (a) のような環境において初期位置, 目標位置を *Start, Goal* に示す位置に設定し, 指示者の解釈による交差点の分割を図中の楕円のように考えて, 以下の経路指示を与えた.

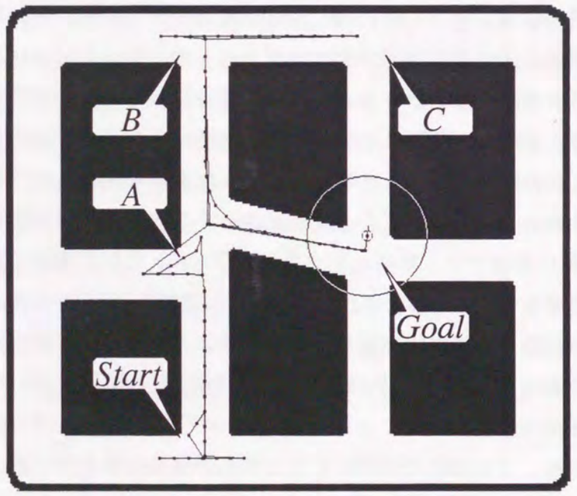
"2 番目の 3 叉路を右折し, 最初の 4 叉路へ移動せよ"

図 3.6 (b) にこの時のロボットの軌跡を示す. まず, ロボットは *Start* の位置 (0 番目の交差点) において, この交差点につながる通路を行きつ戻りつする. それは, f によって評価されるその部分のモデルとの相違度が, 未観測交差点の期待値 F よりも小さくなるまでの間は, 長さの短い外部骨格線を延長するための移動を繰り返すためである. その結果, 未観測交差点の期待値が 0 番目の交差点の評価値より大きくなった時点で, 次の交差点に対応する A の方向へ移動を開始し, A の空間に至ると, そこを 1 つの交差点と解釈するか, 2 つの交差点と解釈するかという仮説を生成する. この実験の場合, この時点では, 1 つの交差点とみなす経路仮説の方が関数 g による評価値が小さいため, ロボットはこの仮説を選択し, その下での追加観測の繰り返しによって B の空間に到達する. ロボットはここでさらに, この空間を 2 番目の 3 叉路とみなす仮説を選択してここを右折し, その先の C の空間に到達するが, 経路指示通りにこれを 4 叉路とみなす仮説を生成できないため, ここまでの一連の交差点認識に対応する仮説の関数 g による評価が悪化し, 代わりに A の空間において生成したもう一方の仮説—経路指示者と同様に A の空間を 2 つの交差点と解釈する仮説—の評価値が最小となるため, この仮説を選択してここからの経路探索をやり直し, 最終的に正しい目標位置へ到達した. そのときのロボットの移動結果の報告を以下に示す (経路仮説から獲得されたデータを太字で示す).

"3 叉路を出発し, 3 叉路を直進し, 3 叉路を右折し, 4 叉路に到着しました."



(a) 環境の例



(b) ロボットの軌跡

図 3.6 実験１：付加的な情報を十分に含む場合（１）

3.5.2 実験２：付加的な情報を十分に含む場合（２）

図 3.7（a）のような環境において初期位置，目標位置を *Start, Goal* に示す位置に設定し，指示者の解釈による交差点の分割を図中の楕円のように考えて，以下の経路指示を与えた．

“２番目の３叉路を左折し，１番目の３叉路まで移動せよ”

図 3.7（b）がこの時のロボットの軌跡である．実験１と同様にロボットは途中で，A の空間を２つの３叉路と間違って解釈し，誤った経路へと移動している．しかしながら，その先の B の空間において指示には存在しない４叉路を発見したために，A の空間の解釈が誤りであるということを検出し，結果正しい目標位置に到達した．この時，ロボットが示す移動結果の報告は以下のようになる．

“３叉路を出発し，４叉路を直進し，３叉路を左折し，３叉路に到着しました.”

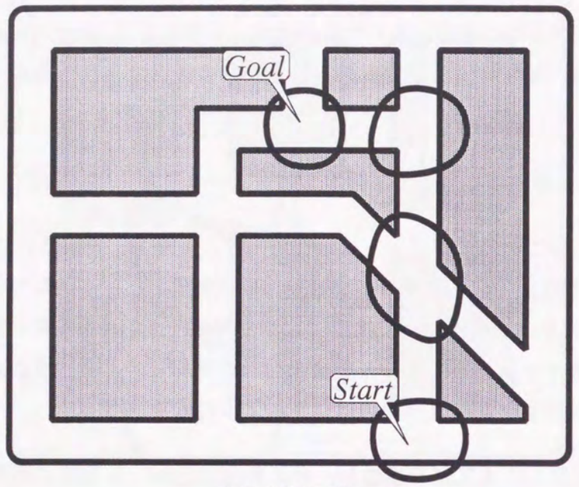
この実験からわかるように経路指示者にとっては明らかに１つの交差点と認識できる空間（A の空間）でも骨格線の抽出されかたによっては２つの交差点と認識される場合がある．そのとき，ロボットが個々の道標を独立に認識していたならば経路から逸脱するが，本手法のように経路指示の文脈情報を利用していればこれを防ぐことが可能となる．

3.5.3 実験３：付加的な情報が不十分な場合

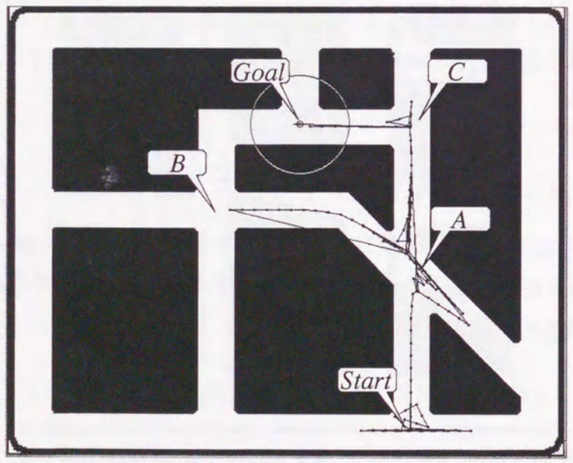
次に図 3.8（a）のような環境において初期位置，目標位置を *Start, Goal* のように定め，環境の中央左下の A の空間を１つの交差点と解釈するような指示者を想定して，以下の経路指示を与えた．

“２番目の３叉路を右折し，最初の３叉路へ移動せよ”

このときロボットは図 3.8（a）に示すように正しい経路に沿って B まで移動したものの，最終的には目標位置とは異なる位置 C に到達し停止した．これは経路指示者にとって１つの交差点である A の空間を２つの交差点であると解釈し，かつその解釈のもとで行動した結果，経路指示に与えられた“３叉路を右折した先に３叉路が存在す

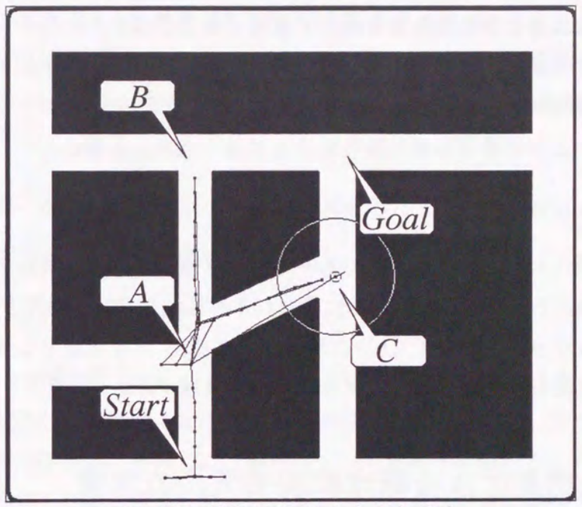


(a) 環境の例

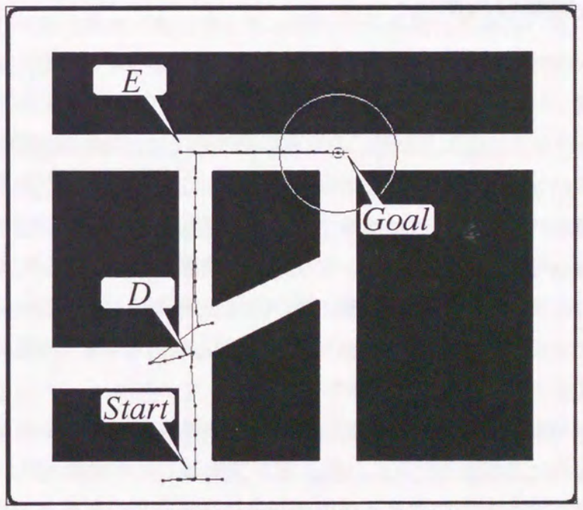


(b) ロボットの軌跡

図 3.7 実験 2 ：付加的な情報を十分に含む場合（2）



(a) 付加的な情報が不十分な場合



(b) 付加的な情報を増やした場合

図 3.8 実験 3 ：付加的な情報の違いによる移動結果の変化

る" という位置的制約を満たす３叉路 C を発見できたためである．すなわち，環境中に経路指示に含まれる位置的制約を満たす空間が複数存在するために，その中で誤った選択を行った結果といえる．これは与えられた経路指示が，交差点モデルの相違による誤解を位置的制約を利用して検出できるだけの付加的な情報持っていない場合に相当する．このような場合には，例えば，

"最初の４叉路を直進し，次の３叉路を右折し，最初の３叉路へ移動せよ"

のような，１番目の交差点が４叉路でありそこを直進するという情報を付加した詳細な経路指示を与えることで，経路指示に含まれる付加的な情報を増やすことができる．これにより，ロボットは図 3.8 （b）に示すように空間 D を直進する４叉路，空間 E を右折する３叉路と認識して，正しい目標位置に到達できる．

3.6 行動結果による概念解釈モデルの学習

3.6.1 行動結果の利用

前節では，人間とロボットの交差点モデルが多少異なっていても，文脈情報として与えられる位置的制約を利用して，正しい経路を理解することが可能であることを示した．しかしながら，このような形での意思伝達過程では，経路指示者の側では，交差点モデルの相違に見合った付加的な情報を含む指示を与える必要がある一方，ロボットの側でも，自分の交差点モデルに基づく自然な解釈結果を曲げて正しい目的地に到達するための余分な探索行動が必要となり，より簡潔な指示によってより正確に意思を伝達するという観点からすれば効率の悪い意思伝達過程となっている．より効率的な意思伝達のためには，人間－ロボット間で交差点モデルに基づく観測データの評価内容が一致していることが望まれる．

ところで，ロボットが 3.4 節で述べたような経路探索によって正しい経路を発見した場合，最終的に選択された経路仮説と途中で棄却された経路仮説から，それぞれ，経路指示者の交差点モデルに基づく観測データの評価内容の正事例，負事例を得ることができる．例えば，ロボットが，図 3.5 に示す仮説の木構造を生成し，矢印の順に仮説を選択したとすると，最終的に選択された仮説Hに含まれる太線で囲まれた観測データは，経路指示者の交差点モデルによる評価のもとでは，経路指示中の対応する

交差点の正事例にあたる．これに対して，最終的に選択された仮説の祖先から派生した仮説（図 3.5 における仮説C，E）には，対応する交差点の負事例が含まれる．そこで，ロボットが最終的に目的地に到達した後に，これらを事例として獲得し，以下で述べるように，ロボット側の交差点モデルに基づく観測データの評価内容を修正することにより，両者の解釈結果を一致させることを考える．

3.6.2 観測データの評価内容の学習

観測データの分割の仕方の学習

獲得した個々の負事例については，それに対応する正事例が存在する．例えば，図 3.5 における仮説Cの負事例に対応する正事例は，仮説Bである．同様に仮説Eにも対応する正事例が存在し，それらの正事例はすべて最終的に選択された仮説Hに含まれる．ロボットが不必要な探索行動を行わずに正しい目標位置に到達するには，観測データを評価するときに上記のような負事例と正事例の組において常に正事例を含む仮説を選択する必要がある．そこで，それぞれの負事例と正事例の組について，両者の関数 g による評価値を比べた場合に，(負事例の評価値）＞（正事例の評価値）となるような関数 f を求める．

交差点の評価関数（式 (3.2)）において関数 h は骨格線の通路らしさを評価する関数となっており，$h(s_k)\,(s_k \in O_{ij}^t)$ は外部につながる骨格線の通路らしさを，$1-h(s_k)\,(s_k \in I_{ij}^t)$ は内部に含まれる骨格線の通路らしくなさを評価している．この両者の重みを決定しているのがパラメータ w_S であり，このパラメータによってどれだけの骨格線をひとまとまりの交差点とみなすかの評価内容が左右される．例えば，ある環境（図 3.9 (a)）に対する正事例と負事例が存在したとする（図 3.9 （b）(c)）．このときパラメータ w_S を 0 から 1 の範囲で変化させると正事例と負事例に対する評価値は図 3.9 (d) のように変化する．このとき正事例の評価値は負事例の評価値より小さくなる必要があるため，パラメータ w_S の範囲は，$w_{S_L} \leq w_S \leq 1$ （図 3.9 （d）中の（2）の範囲）となる必要がある．このような範囲の決定をそれぞれの正事例と負事例の組について繰り返していくことによりパラメータ w_S の区間を限定する．そして，限定された区間の中で最も重なりが多い部分の中央値を新しいパラメータとして利用する．

このような区間限定法を利用してある空間を１つの交差点とみるか否かに関する正

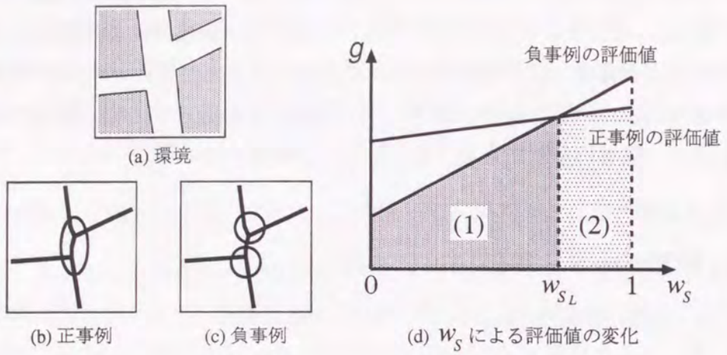


図 3.9 パラメータ w_S による観測データの評価値の変化

しい評価を得るためには，事例として与えられる経路指示者による交差点としての評価が観測データに対する単調関数となっている必要がある．このような条件が一般的な空間概念に対して満足されることは少ないと考えられるが，ここで扱う交差点などの単純な空間概念については，人間の場合でも，その評価が本稿で定義したような通路の長さと幅の比，分岐点間の距離などに基づく特徴量に対する単調関数となっていると考えられ，上で述べたような方法によっても対処可能であると考えている．

未知形状概念の学習

経路指示に利用される交差点の形状制約には “T字路” や “Y字路” など様々なものが考えられ，これらに関する概念モデルが予め全てロボットに与えられているという前提は現実的ではない．このような場合を想定し，ロボットが交差点の形状制約に関する概念モデルを持っていない場合には，獲得された事例に基づいてその認識のための評価関数を生成する．

ここで，交差点の形状の概念は，前節のような交差点の分割の仕方の場合とは異なり，その評価値を観測データの単調関数として与えるような一般的な特徴量が定めにくく，前項で述べたような区間限定法の適用は困難である．このため形状の概念の学習に関しては，類似した特徴を持つ事例同士は同じクラスに属するという仮定をおき，

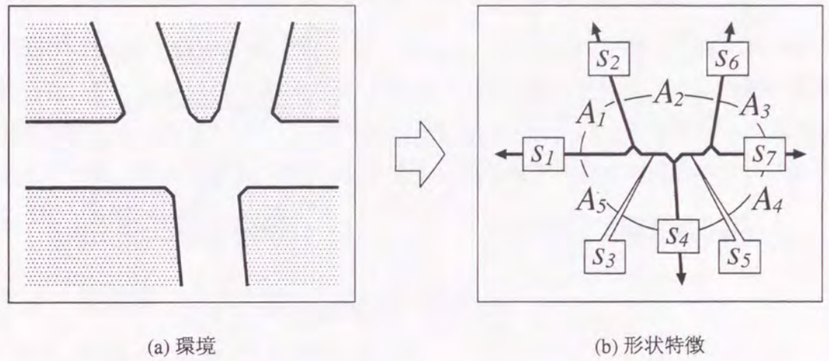
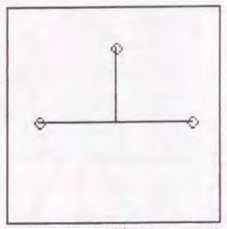


図 3.10 骨格線に基づく交差点の形状特徴

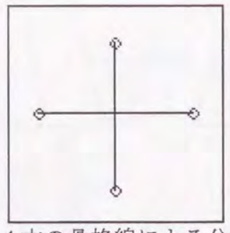
Nearest Neighbor 法 [Dasarathy 91, 毛利 97] における事例の追加記憶を利用して実現する．ここでは学習アルゴリズムとして，追加学習が可能でかつノイズにもある程度頑強なものの 1 つである IB3[Aha 91] を利用する．

交差点に対する形状特徴は，例えば，4 叉路に対して十字路など，それぞれ固有の通路数を有する交差点に対して定義されるものであり，形状制約の事例を記述する際には，通路数に対応する外部骨格線数毎に予め決められたものを用いることとする．観測データ d_{ij}^t が n 叉路である場合，これに含まれる外部骨格線 O_{ij}^t は n 本であり，その交差点において互いに隣接する通路に対応する外部骨格線同士（図 3.10（b）の s_1 と s_2，s_2 と s_6 等）のなす角（同図 $A_1 \sim A_5$）は，360 度を n 個に分割する．また，3.2 節で述べた骨格線抽出では，3 本の骨格線からなる分岐点と，4 本の骨格線からなる分岐点が生じる（図 3.11 参照）．このとき d_{ij}^t に含まれる分岐点のうち，後者のものを長さ 0 の内部骨格線で接続された前者の分岐点 2 つであると解釈すれば，n 叉路に対応する d_{ij}^t の中では，$n-3$ 本の内部骨格線が連鎖的に接続することになる．n 叉路に対する形状制約の事例は，これらの n 個の外部骨格線間の角度，および $n-3$ 個の内部骨格線の長さと輪郭線までの距離の比によって記述する．

以上の特徴量に基づく観測データの記述には方向依存性が生じるため，$A_1, A_2, \cdots$



(a) 3本の骨格線による分岐点



(b) 4本の骨格線による分岐点

図 3.11 骨格線による分岐点の構成

については，最大の角を起点として，その隣接角のうちの大きい方に向かう回り方で順序付け，L_{s_k} $(s_k \in I_{ij}^t)$ については，これらの連鎖の2端点のうち，L_{s_k} が大きい方を起点として連鎖を辿る向きに順序付ける．例えば，図 3.10 の観測データは，$\boldsymbol{x} = (A_5, A_4, A_3, A_2, A_1, L_{s_3}, L_{s_5})$ のように記述される．

形状記号が σ_l である形状制約に対し，上のような方法で記述・獲得された事例集合を $X_{\sigma_l} = \{\boldsymbol{x}_1, \cdots, \boldsymbol{x}_{N_l}\}$，新たに得られた交差点の観測データ d_{ij}^t の上に基づく記述を $\boldsymbol{x}'$ とすると，d_{ij}^t が σ_l に該当するか否かの評価値は，X_{σ_l} 中の最近傍事例との距離 $d_{\boldsymbol{x}'} = \min ||\boldsymbol{x}_o - \boldsymbol{x}'|| \ (\boldsymbol{x}_o \in X_{\sigma_l})$ をもとに以下の式を用いて算出する．ただし，w_D は事例間の距離に関する感度を定めるパラメータである．

$$s(\boldsymbol{x}') = 1 - \exp(-(w_D \cdot d_{\boldsymbol{x}'})^2) \tag{3.4}$$

3.7 概念解釈モデル学習の実験

3.4 節のシミュレータに本章で述べた観測データの評価内容の学習機能を追加して実験を行った．パラメータは，$w_L = 0.5, F = 0.15, \delta = 0.15, w_D = 0.25$ とし，w_S の初期値は 0.5 とした．

3.7.1 実験4：観測データの分割の仕方の学習

実験1における移動の後に 3.6.2 節で述べたような観測データの分割の仕方の学習を行った．その結果，パラメータ w_S が $w_S = 0.45$ に修正された．この後再び**実験1**と同じ経路指示を与えたところ，図 3.12 (a) に示すように A の空間のみを追加観測するだけで正しい目標位置への到達に成功し，経路探索のための移動ステップ数は 91 から 70 へと減少した．

3.7.2 実験5：未知形状概念の学習

まず，**実験3**（図 3.8 ）の環境において

“最初の4叉路を直進して，次のT字の3叉路を右折し，最初の3叉路へ移動せよ”

という経路指示を与えた．これは，普通ならば直進するために記述する必要のない最初の交差点を4叉路であると述べているという点で詳細な記述となっている．このとき，ロボットは“T字”で表される3叉路の形状制約に関するモデルを持たないため，2番目の交差点に関してこの記号を無視して**実験3**の場合と同じ制約のみを利用して観測行動を行い，図 3.13 (a) に示す軌跡を描いて目標位置に到達した．この段階で“T字”の事例が獲得されるため，3.6.2 節で述べた方法によってこの未知概念を学習した．これにより次回からこの形状制約を利用できる．

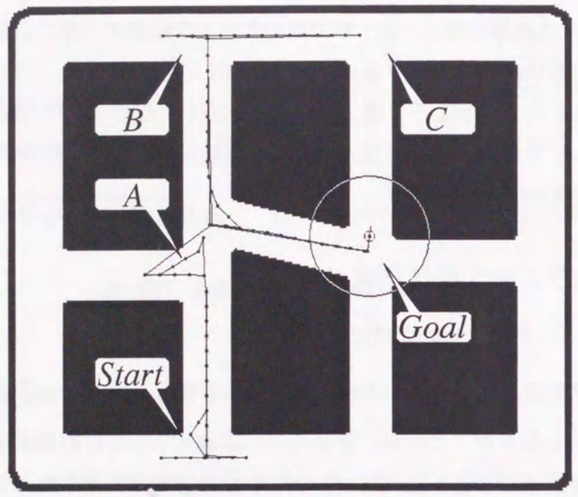
この後，再度同じ経路に対して以下に示す経路指示を与える．

“2番目のT字路かつ3叉路を右折し，最初の3叉路へ移動せよ”

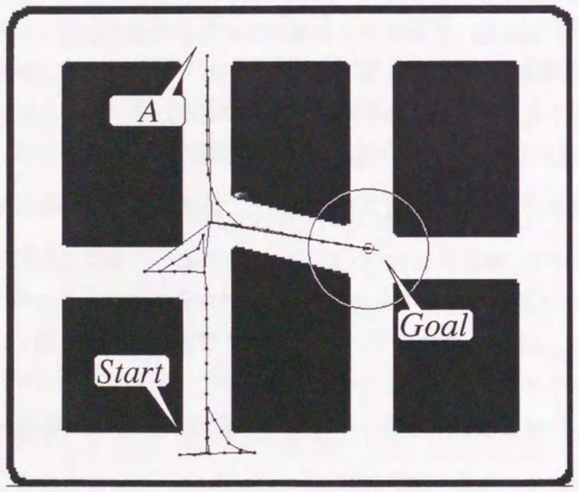
この経路指示は，実験3においては正しい目的地への到達に失敗した簡潔な指示に，“2番目の3叉路がT字路である”という形状制約を追加したものである．この経路指示の下では，図の B の空間で，形状が“T”で表される3叉路とは異なった3叉路が観測されるため，ここを2番目の3叉路かつT字路とは判断せず，結果，**実験3**とは異なり正しい目標位置へ到達した．このときの移動の軌跡を図 3.13 (b) に示す．

3.7.3 学習に関する考察

上の実験において示したように，正しい経路探索の結果得られる事例を基にした概念モデルの学習により，経路を発見するための探索範囲が少なくなることによる移動

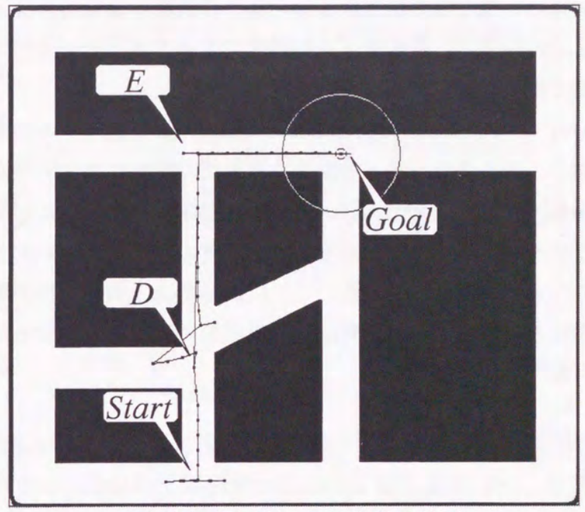


(a) 学習前のロボットの移動の軌跡（移動ステップ 91）

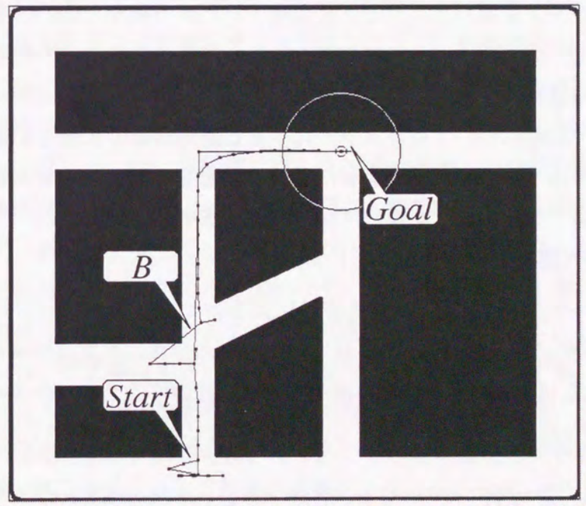


(b) 学習後のロボットの移動の軌跡（移動ステップ 70）

図 3.12 実験 4 ：観測データの分割の学習



(a) 詳細な記述による移動の軌跡



(b) 未知形状概念の学習後の簡潔な記述による移動の軌跡

図 3.13 実験 5 ：未知形状概念の学習による効果

距離の減少や，経路指示の簡略化が可能となる．コミュニケーションが円滑になるということを，少ない言葉で相手が誤解しないような情報の伝達を実現するという観点で捉えると，上述の結果は，概念モデルの学習によってコミュニケーションを円滑化することが可能であると考えることもできる．

しかしながら，この学習は，結果として人間と同一の概念モデルの獲得を目指しているわけではない．これはロボットの動作する特定の環境において特定の指示者との間の意思伝達の効率にのみ注目したタスク指向型の学習である．よって指示者が複数存在するような状況においては，それぞれの指示者の概念モデルが大きく異なる場合に学習が収束しないことが考えられる．これに関しては，例えば指示者Aの概念モデル，といった形でそれぞれの指示者毎に異なる概念モデルを学習することによって対処することが可能である．

3.8 結言

本章では，第 2 章で述べた文脈情報を用いた情報伝達の利用例として，移動ロボットのナビゲーションを取り上げ，それを実現するための観測行動のプランニングを提案した．さらに，提案手法において問題となる，情報の発信者と受信者それぞれの道標のモデルの相違に起因する経路探索行動の失敗や移動コストの増加などの問題について検討した．前者についてはロボットに与える経路情報の詳細さを変化させることによって解決することとし，また後者に関しては過去の行動の結果から得られる事例に基づいた道標モデルの学習を通じて解決する手法を提案した．

本章によって得られた知見を以下にまとめる．

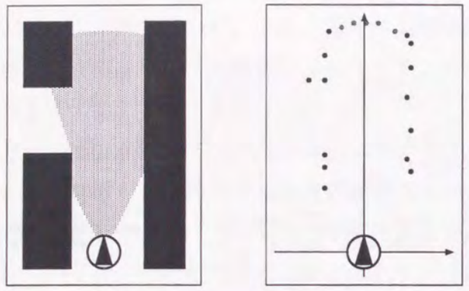
- 人間とエージェント間における言葉によるコミュニケーションの一例としてロボットのナビゲーションを取り扱い，指示中に含まれる文脈情報を利用し，そこに含まれる複数の概念を同時に満たすものを探索することで両者の概念モデルの相違を乗り越えてコミュニケーションが可能であることを示した．
- 円滑なコミュニケーションをより簡潔な指示によってより正確に意思を伝達することと定義すると，一度，コミュニケーションが成立し移動が成功した場合に，その時に観測データとして得られる事例を基にして概念モデルを学習することにより，より円滑なコミュニケーションが実現できる．

第 4 章

実ロボットによるナビゲーションの実現

4.1 緒言

本章では，第 3 章で提案した観測行動プランニングの手法を観測範囲に制限のある実際の移動ロボットを用いて実装する [Shibata 98b, 柴田 98c]．提案手法では，交差点を利用した経路指示との対応がとりやすいとの理由から環境中の自由領域の骨格線により環境を記述することとしていた．実際の移動ロボットでこれを実現するには，環境中を移動しながら得られた観測データをもとにして，骨格線を逐次抽出し，これを順次統合していくことにより，環境記述を獲得することが求められる．しかし，実機におけるナビゲーションでは，センサやアクチュエータに起因する誤差の問題が常に存在する [油田 87]．そこで，本研究では，第 3 章で提案した手法が必要とする環境記述が，骨格線の分岐構造，および骨格線の長さと輪郭線までの距離の比のみであることを利用して，誤差の影響を受けにくいように，大局的な地図はグラフ構造でのみ獲得し，局所的な地図でおいてのみ数値的なデータを用いる手法を提案する．さらに上記のような特徴をもつ地図のもとで，観測範囲が制限されたロボットが第 3 章での観測行動プランニングを実現するための骨格線追跡の手法を提案する．ここでは，ロボットの行動に対する評価基準を制約と目標に分割する．制約とは，必ず満たされなければならない基準であり，目標とは，できるだけ多くが満たされる方がよい基準を意味することにする．観測のための移動はこれらが総合的に最もよくなる方向に向かうことという枠組を採り入れる．これらの提案手法の有効性を検証するために，マイクロマウスと呼ばれる小型の移動ロボットとこれに対して移動の指示を与えるホストコンピュータからなる実験システムを構築し，実験を行う．



(a) 環境 (b) 部分距離データ

図 4.1 部分距離データの獲得

4.2 グラフ構造に基づく環境記述の獲得

ここでは，ロボットの視野に限界を置き，有限視野を持つものと仮定する．最近盛んに用いられている全方位視覚センサ [佐藤 96, 出原 97] では全周の帯状空間については奥行き方向にも距離上の制約がないかのように扱われているが，実際には奥行き方向の観測データには限界がある．したがって，有限視野を持つという仮定は，全方位ではないことと，奥行き方向の限界の量的な差異を除けば一般的な仮定である．

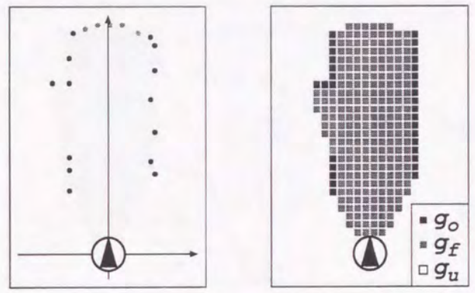
4.2.1 部分距離データからの骨格線抽出

部分距離データの獲得

有限視野を持つロボットが，図 4.1（a）に示すような環境に配置された時，ロボットは有限視野（図中の灰色部分）の範囲に存在する障害物領域（図中の黒色部分）までの部分距離データを図 4.1（b）に示すような形で獲得することができる．

占有グリッドの獲得

次に自由領域の骨格線を獲得するために，獲得された部分距離データを以下に示す手順で，障害物が存在する障害物領域 g_o，障害物が存在しない自由領域 g_f および観測が行われていない未観測領域 g_u で区別した占有グリッド [Elfes 89] に変換する（図



(a) 部分距離データ (b) 占有グリッド

図 4.2 部分距離データから占有グリッドへの変換

4.2 参照）．

隣り合う 2 つの距離データについて，

1. 2 つの距離データ間の長さ Δp が閾値 d より小さく，かつどちらかの距離データが観測限界距離 l_{lim} よりも小さい場合，障害物領域が連続するとして，2 つの距離データ間を障害物を表すグリッド g_o で埋める（図 4.3（a）参照）．

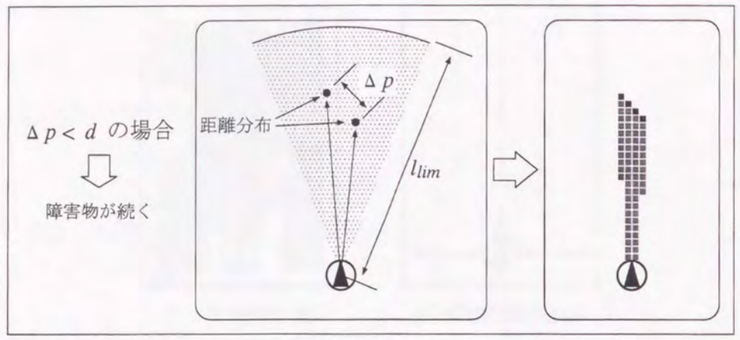
2. Δp が閾値 d より大きい場合，その部分に障害物によって隠されている遮蔽が存在するとして，2 つの距離データ間を自由領域を表すグリッド g_f で埋める（図 4.3（b）参照）．

3. 2 つの距離データが共に観測距離限界 l_{lim} である場合，観測距離限界が続くとして，2 つの距離データ間を自由領域を表すグリッド g_f で埋める（図 4.3（c）参照）．

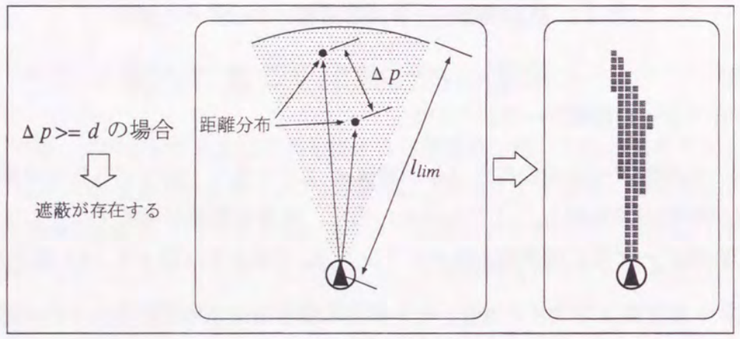
なお，以下では，処理が全てこの占有グリッド上で行われるため，単一のグリッドを “点”，占有グリッドにおける 8 連結の意味での点列を “線” と呼ぶ．

輪郭線の抽出

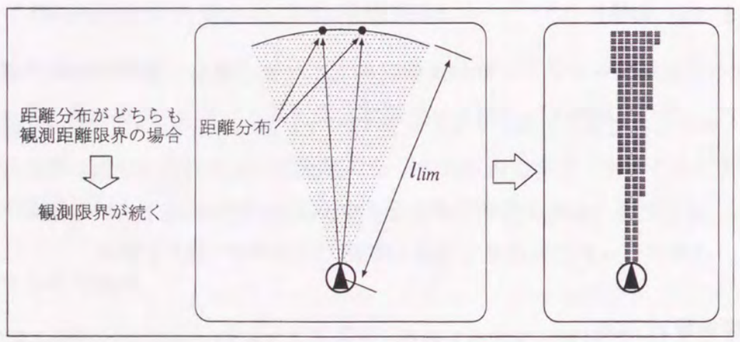
この占有グリッド中の自由領域 g_f の輪郭線に対応する点の集合（以後輪郭点と呼ぶ）B は，障害物領域に隣接するものと未観測領域に隣接するものの 2 種類に分類さ



(a) 障害物が続く状況

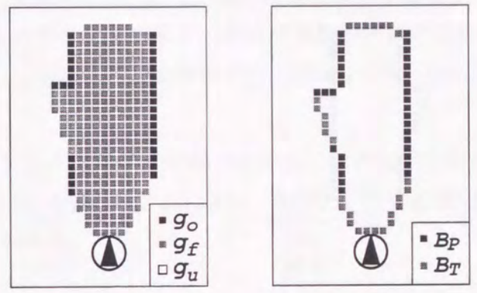


(b) 遮蔽が存在する状況



(c) 観測限界が続く

図 4.3 部分距離データの変換における場合分け



(a) 占有グリッド (b) 境界線

図 4.4 占有グリッドからの輪郭線の抽出

れる．本稿では，これをそれぞれ確定輪郭点と未確定輪郭点と呼び，B_P と B_T で表す（図 4.4 参照）．確定輪郭点は，この点に対応する環境中の位置が，自由領域の輪郭線上にあるという事実を今後の追加観測の結果に依らずに確定できる点であり，未確定輪郭点はそうではない点である．

これは，以下のように表される．

$$B = \{(x,y) \mid (x,y) \in g_f, \exists (x_n,y_n) \in Ngh(x,y), (x_n,y_n) \in g_o \cup g_u\} \quad (4.1)$$

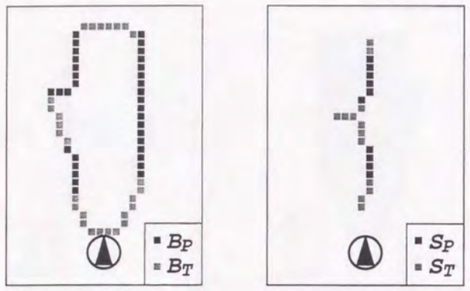
$$B_P = \{(x,y) \mid (x,y) \in B, \exists (x_n,y_n) \in Ngh(x,y), (x_n,y_n) \in g_o\} \quad (4.2)$$

$$B_T = B - B_P \quad (4.3)$$

ただし，$Ngh(x,y)$ は点 (x,y) に 4 近傍隣接する点の集合である．

骨格線の抽出

最後に，得られた各輪郭点 $(x,y) \in B$ から，自由領域の内部に向けて波を伝播させ，波面同士が衝突した点（以下，骨格点と呼ぶ）の集合 S として自由領域の骨格線を抽出する [Kakusho 95, 谷口 96]．このとき，骨格点 (x_s,y_s) を生じさせた波の出発点となった輪郭点 $(x_s^{w1},y_s^{w1}),\cdots,(x_s^{wn},y_s^{wn}) \in B$ を (x_s,y_s) の波源と呼び，抽出された各骨格点は，以下のように波源として確定輪郭点のみを持つ確定骨格点 S_P と波源に



(a) 境界線 (b) 骨格線

図 4.5 骨格線の抽出

未確定輪郭点を含む未確定骨格点 S_T に分類できる．以下に，骨格点の定義を示す．

$$S_P = \left\{(x_s, y_s) \mid (x_s, y_s) \in S, \forall i \left[(x_s^{wi}, y_s^{wi}) \in B_P\right]\right\} \tag{4.4}$$

$$S_T = \left\{(x_s, y_s) \mid (x_s, y_s) \in S, \exists i \left[(x_s^{wi}, y_s^{wi}) \in B_T\right]\right\} \tag{4.5}$$

図 4.5 （a）の輪郭点から，骨格点を抽出すると，同図（b）のような骨格点が得られる．

前述のように，確定輪郭点は未観測領域に対する追加観測結果に依らず輪郭点であることが確定しているため，これのみを波源とする確定骨格点も同様に追加観測結果に依らず骨格点であることが確定する．したがって，確定骨格点は環境全体の自由領域の骨格線の一部分であると考えられる．

4.2.2 グラフ構造に基づく環境記述の獲得

ロボットの移動に伴って更新される距離データから抽出した確定骨格点を，内界センサから得られるロボットの現在位置に基づいて順次重ね合わせれば理論的には既観測部分全体の骨格線が獲得可能であるが，実際にはこのような処理には距離センサや内界センサの計測誤差の蓄積が避けられない．本研究では，第 3 章で述べた観測行動プランニングに必要な環境記述 D^t が骨格線の分岐構造，および骨格線の長さと輪郭

線までの距離の比の 2 種類のみで，その幾何形状自体は必要としないことを利用して，以下のように隣接 2 ステップ間のみでの骨格点の重ね合わせに基づいて，既観測部分全体に対するこれら 2 種類の情報を獲得する（図 4.6 中の (1)~(6) 参照）．

(1) ステップ $t-1$ とステップ t において抽出された確定骨格点同士を重ね合わせ，その積 $\cap_{T=t-1}^{t} S_P^T$ を得る．これにより，距離センサの誤差によって偶発的に生じる骨格線を排除する．

(2) 上によって得られた積から骨格線を辺，骨格線の分岐点および端点を頂点とした無向グラフ D_{local}^t（以下，局所グラフと呼ぶ）を生成する．

(3) D_{local}^{t-1} の生成に利用した $\cap_{T=t-2}^{t-1} S_P^T$ と，D_{local}^t の生成に利用した $\cap_{T=t-1}^{t} S_P^T$ との間の距離に基づいて，マッチングをとり，D_{local}^{t-1} と D_{local}^t の間での辺，頂点の対応付けを得る．

(4) 局所グラフ D_{local}^{t-1} と環境記述 D^{t-1} との間における，辺，頂点の対応関係（これは D^{t-1} の生成時にわかる）を利用して，環境記述 D^t と局所グラフ D_{local}^t の間での辺と頂点の対応付けを得る．なお，最初の観測においては，局所グラフ D_{local}^1 と環境記述 D^1 は同一である．

(5) (2) で得られた，(4) での対応付けに含まれない D_{local}^t の辺と頂点を新たな観測部分として D^t に追加し，D_{local}^t で情報が得られた辺に対応する D^t の辺の長さの情報を更新する．

(6) ロボットは，局所的な現在位置として，時刻 t における占有グリッド上での位置を記憶し，大局的な現在位置として，占有グリッド上での現在位置に最も近い確定骨格点に対応付けられた D^t における辺を記憶する．

次節では，以上の手続きによって距離データから環境記述を抽出・蓄積しながら第 3 章で述べた観測行動プランニングに基づくナビゲーションを実行するための骨格線追跡の方針を提案する．

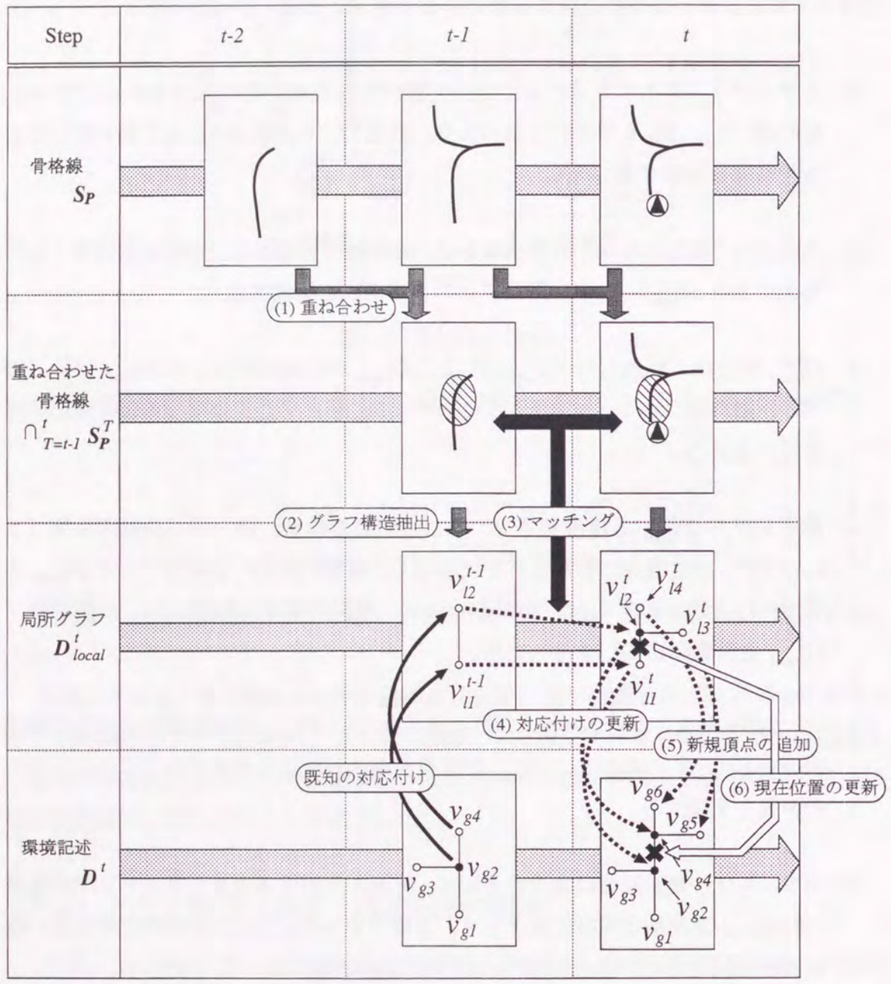
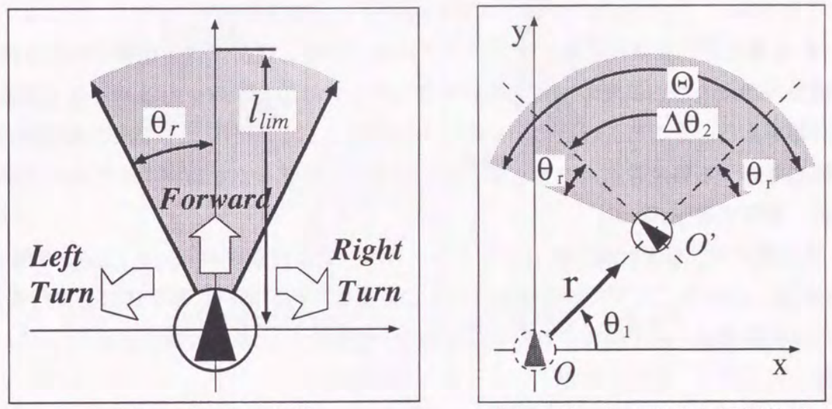


図 4.6 骨格線からのグラフ構造の抽出



(a) ロボットの仕様 (b) ロボットの動作と観測範囲

図 4.7 ロボットの仕様と 1 ステップでの動作および観測範囲

4.3 骨格線追跡のための行動計画

4.3.1 移動ロボット

本研究ではロボットに搭載する距離センサとして，半径 l_{lim}， 中心角 $2\theta_r$ の扇型の範囲で障害物までの距離データを獲得可能なものを仮定する．またロボットの動作としては，前進および左右の回転が可能とする（図 4.7 (a) 参照）．観測行動計画における 1 ステップの基本動作は，現在位置を原点 O とし，正面方向を y 軸とした座標系を基準として，角度 θ_1 までの回転，距離 r の前進，および移動先での観測のための $\Delta\theta_2$ の回転を 1 まとめにして，$<(r,\theta_1),\Delta\theta_2>$と表現する．またこの過程でロボットは，半径 l_{lim}，中心角の大きさ $\Theta = |\Delta\theta_2| + 2\theta_r$ の扇型の範囲の距離データを獲得するものとする（図 4.7 (b) 参照）．なおステップ $t+1$ での θ_1^{t+1} の条件として，衝突回避のためにステップ t において観測されている範囲以外には移動しないことを，$\Delta\theta_2^{t+1}$ の条件として，全周の距離データを獲得するための最小回転角以上は回転しないことを仮定する．

4.3.2 骨格線追跡の計画

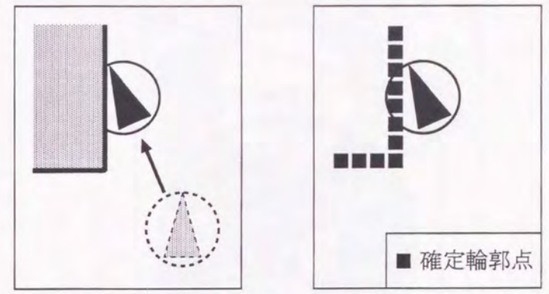
第3章で述べた観測行動プランニングにおける追加観測では，選択された骨格線の現在の端点のさらに先の未観測部分に存在する骨格線の情報をなるべく多く獲得する必要がある．そこでこのためのロボットの行動として，そのような未観測部分の骨格線に対応する確定骨格点を最も多く抽出できる距離データを獲得するための行動を選択・実行する [志摩 97].

具体的には，前節で述べたロボットの1ステップの行動候補 $<(r,\theta_1),\Delta\theta_2>$（図 4.7 (b) 参照）の内で，以下の評価基準に照らして最も評価が高いものを選択し実行する．この評価基準は，必ず満たされなねばならない制約と，より多く満たされた方がよい目標とに分けて，それぞれ以下のようなものを考える．

- 制約1：障害物に衝突しない
- 制約2：現在位置を見失わない
- 目標1：追跡先の環境データをより多く獲得する
- 目標2：センシング時の回転誤差をなるべく小さくする

これらの制約および目標を満足する行動を決定するために，制約1，2および目標1，2をそれぞれ満足しているほど大きな値をとる関数 C_1，C_2，G_1，G_2 を用いて次式で定義される関数 E を考え，この関数 E の値が最も大きい行動候補をステップ $t+1$ での骨格線追跡のための行動 $<(r^{t+1},\theta_1^{t+1}),\Delta\theta_2^{t+1}>$ として決定する．各関数の定義については，次節で述べる．

$$E = C_1C_2(wG_1 + (1-w)G_2) \tag{4.6}$$
$$(w : G1, G2 \text{の重み付け定数})$$



(a) 障害物との衝突　(b) 確定輪郭点との重なり

図 4.8 障害物との衝突

4.3.3 行動候補の評価関数

制約1の評価関数：C_1

制約1を満たすためには，次の観測地点においてロボットの大きさの範囲内に障害物が存在しないようにする必要がある（図 4.8 （a）参照）．障害物がある領域は，言い換えれば確定輪郭点が存在する領域である（図 4.8 （b）参照）．そこで，次の観測地点 $O'(x,y)$ からロボットの大きさ R_{robot} の範囲内に存在する，現在観測されている確定輪郭点 $P_i(x_i,y_i) \in B_P$ の有無をもって評価基準とする．これを評価するために $|\overrightarrow{O'P_i}| < R_{robot}$ の場合に0となり，そうでないときに1となる関数 IO を準備し（図 4.9 参照），制約1の評価関数 C_1 を以下のように定義する．実際には，ロボットの移動誤差のために確実に $|\overrightarrow{O'P_i}| \geq R_{robot}$ とはいえないため，IO は図 4.10 に示すような値をとる関数としている．

$$C_1 = \prod_{P_i \in B_P} IO(O', P_i) \tag{4.7}$$

制約2の評価関数：C_2

ロボットの大局的な現在位置は 4.2.2 節の手順 (6) によって更新されるため，同節の手順 (3) における確定骨格線同士のマッチングができなければ，現在位置は見失わ

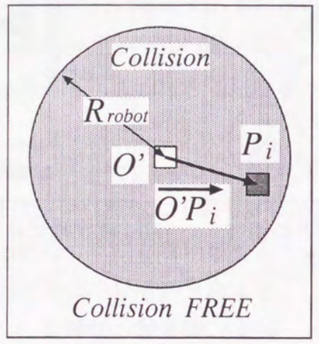


図 4.9 衝突の判定基準

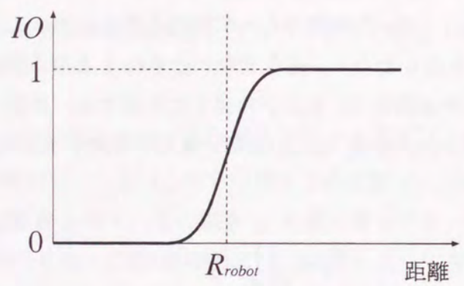


図 4.10 関数 IO のグラフ

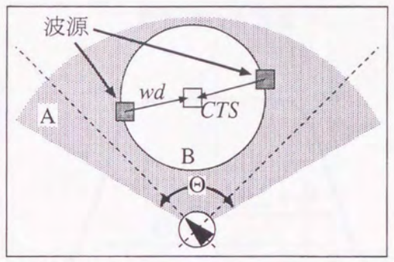


図 4.11 現在位置を見失わないための条件

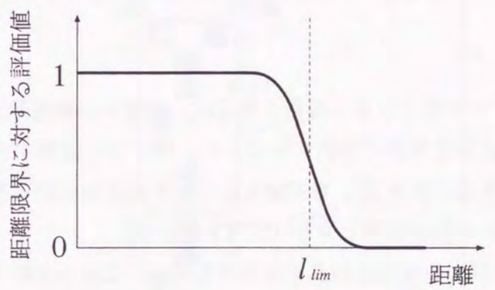


図 4.12 観測距離限界に対する評価値のグラフ

れる．そこで，少なくとも 1 つの点が重なるようにするために，現在追跡中の確定骨格線の先端 $CTS(x, y)$ を次の観測においても抽出可能か否かを評価基準とする．骨格点 CTS が抽出されるには，図 4.11 に示すように，次の観測範囲 A に，骨格点 CTS を中心とし骨格点を生じさせた波源までの距離 wd を半径とする円 B が完全に含まれる必要がある．この条件が満足されるときに最大値 1 をとる関数 SD を用いて評価関数は以下のように定義できる．実際のロボットでの誤差に対処するために，厳密には関数 SD は，観測距離限界の評価値のグラフ（図 4.12 参照），および視野角の評価値のグラフ（図 4.13 参照）に示すような値をとる関数を用いて評価値を計算する．

$$C_2 = SD(\theta_1, r, \Delta\theta_2, P) \tag{4.8}$$

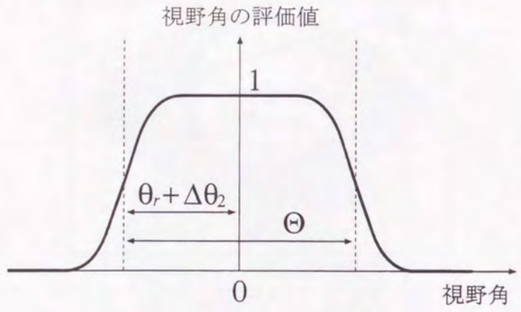


図 4.13 視野角に対する評価値のグラフ

目標 1 の評価関数：G_1

追跡先の環境データをより多く獲得するには，追跡中の確定骨格線の先端 CTS に連結する確定骨格点をより多く抽出すればよい．そこで，追跡中の確定骨格線の先に存在する未確定骨格点の集合 S_{TT} を対象として，それらに代わる確定骨格点をどれだけ多く抽出できるかを評価基準とする（図 4.14 参照）．

未確定骨格点に代わる確定骨格点を抽出するには，これを骨格点として抽出可能か否かの評価と，それを確定できるか否かの評価が必要となる．抽出可能か否かについては，制約 2 の評価関数 C_2 に利用した関数 SD を用いて評価できる．確定できるか否かについては，未確定骨格点 $P_T(x_T, y_T) \in S_{TT}$ は未確定輪郭点 $P_T^{wi}(x_T^{wi}, y_T^{wi}) \in B_T$ の存在により生じるため，未確定骨格点を確定するには，それを生じさせた未確定輪郭点 P_T^{wi} の外側に存在する未観測領域をできるだけ多く観測し，それに代わる確定輪郭点を発見する必要がある．

そこで，以下の各場合において生じる未観測領域に対して，次にどれだけ多くの部分を観測できるかを評価する関数 UA を定義する．各場合における評価の方針は次の通りである（図 4.15 参照）．

(1) 遮蔽による未観測領域（同図 (1) の A_1）

視線の外側に回り込めば良いため，その角度 α が大きいほど評価が良く，小さいほど評価が悪くなるようにする．

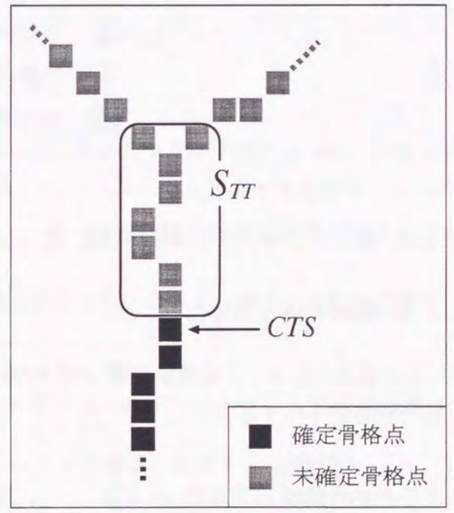


図 4.14 目標 1 の評価関数 G_1 の評価対象 S_{TT}

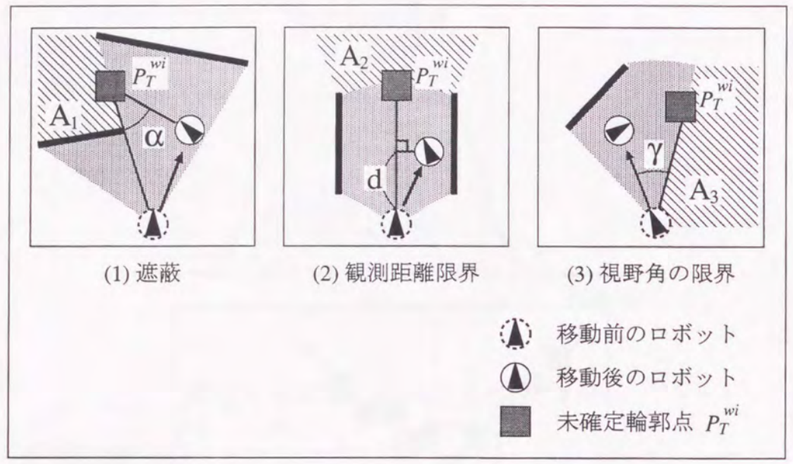


図 4.15 観測を必要とする未観測領域 $A_1 \sim A_3$

(2) 観測距離限界による未観測領域（同図 (2) の A_2）

距離限界の方向に進めば良いため，その移動距離 d が大きいほど評価が良く，小さいほど評価が悪くなるようにする．

(3) 視野角の限界による未観測領域（同図 (3) の A_3）

視野角の外側を観測する必要がある．ただし，衝突回避のため次の観測地点を現在観測されている範囲の外側には設定できない．そこで境界線から離れるほど評価が悪くなるように，この境界線との角度 γ が小さいほど評価が良く，大きいほど評価が悪くなるようにする．

この UA と SD を組み合わせて，目標 1 の評価関数 G_1 を以下のように定義する．

$$G_1 = \sum_{P_T \in S_{TT}} \left\{ \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n} \cdot UA(\theta_1, r, P_T^{wi}) \right) SD(\theta_1, r, \Delta\theta_2, P_T) \right\} \tag{4.9}$$

目標 2 の評価関数：G_2

センシング時の回転誤差を小さくするために，次の観測地点での回転角の大きさ，$|\Delta\theta_2|$ が小さいほど評価が良くなるような評価関数 G_2 を以下のように定義する．

$$G_2 = 1 - \frac{|\Delta\theta_2|}{2\pi} \tag{4.10}$$

4.4 実験および考察

4.4.1 実験システム

移動ロボット

実験に用いたロボットは日本システムデザイン（株）のマイクロマウス 1（図 4.16 参照）をベースとした．マイクロマウスが有する機能を下に列挙する．マイクロマウスの大きさ，およびレーザー照射装置を搭載する高さは図 4.17 に示す通りである．

- 前方方向に固定された CCD カメラ，およびそれの画像を UHF にて転送するトランスミッター
- 床面に平行なレーザー光を照射するレーザー光照射装置
- ホストコンピュータとの通信に使用する RS232C

ロボットの 1 ステップにおける処理手順は以下のようになる．

1. ロボットが CCD カメラにより環境をセンシングする．
2. ホストコンピュータでセンシングした画像から距離データを獲得し，骨格線を抽出する．
3. ホストコンピュータで抽出した骨格線から環境記述を獲得し，それをもとに次の観測行動を決定する．
4. 決定した観測行動を実行するためのコマンドをロボットへ送信する．

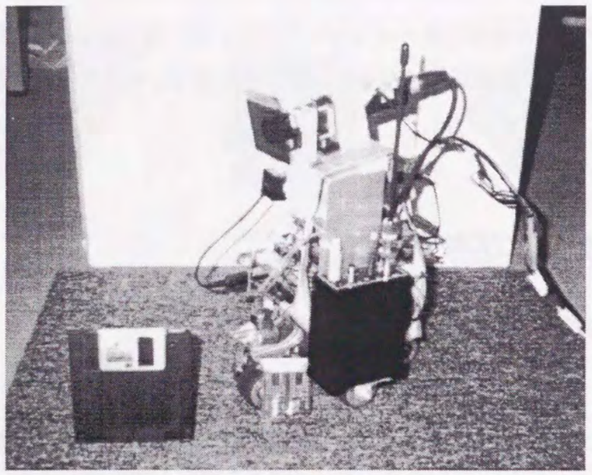


図 4.16 マイクロマウスの概観

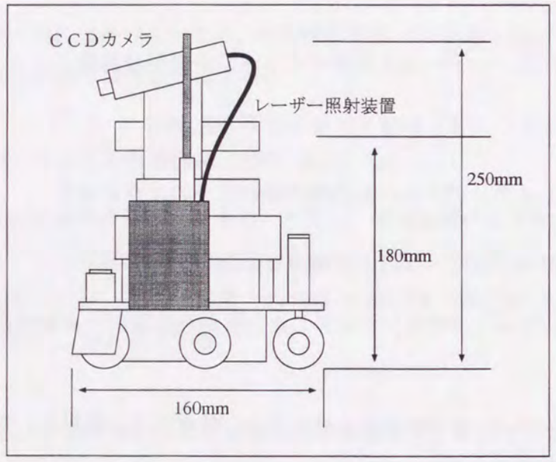


図 4.17 マイクロマウスの大きさ

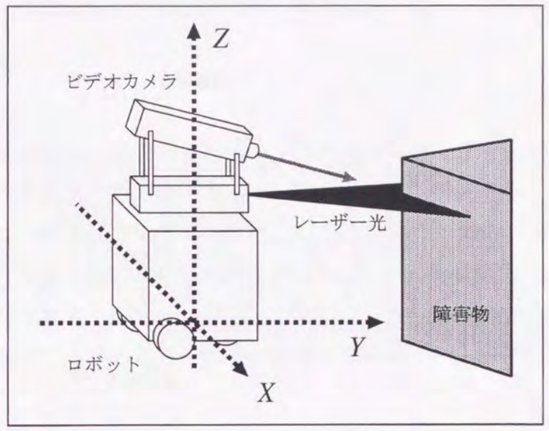


図 4.18 ロボット中心座標系の設定

4.4.2 投光法による距離データの獲得

マイクロマウスには，環境に対してレーザー光線を照射するレーザー照射装置，およびレンズの前にフィルタを設置したビデオカメラが搭載されている．障害物に対してレーザー光線を照射し，障害物表面に照らし出された部分をカメラ画像から抽出することにより距離を測定する投光法に基づいた距離計測を実現している [谷内田 90]．

研究における距離計測を説明するために，まず図 4.18 に示すように，ロボットの床面上の中心を原点とし，ロボットの正面に対する方向に Y 軸，床面の垂直方向に Z 軸をとるロボット中心座標系を設定する．

また，カメラ中心を原点とし，画像平面上に x-y 平面を対応させ，カメラ中心から画像平面の中心への方向を z 軸に対応させたカメラ中心座標系を設定する（図 4.19 参照）．ただし，この 2 つの座標系における，1 座標分に対する実質的な大きさ (本研究では cm) は，いずれの座標系においても，また，x 軸方向 y 軸方向ともに同じであるとする．

図 4.19 において，レーザ照射平面と障害物との境界線上に存在する点 P が，画像平面上に，カメラ中心座標系において $p(x, y, f)$ の点として投影されたとすると（た

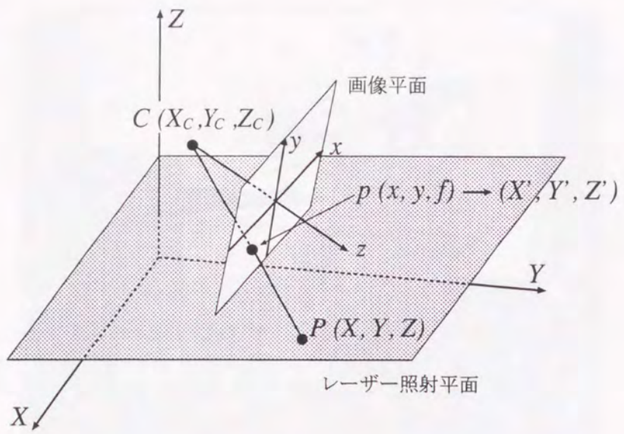


図 4.19 ロボット中心座標系とカメラ中心座標系の関係

だし，f は焦点距離），点 p のロボット中心座標系による座標 (X', Y', Z')，およびカメラ中心のロボット中心座標系における座標 (X_C, Y_C, Z_C) を求めることにより，レーザ平面のロボット中心座標系における方程式 $aX + bY + cZ + d = 0$ が既知であるとして，次式により，点 P のロボット中心座標 (X, Y, Z) を求めることができる．

$$X = k(X' - X_C) + X_C \tag{4.11}$$

$$Y = k(Y' - Y_C) + Y_C \tag{4.12}$$

$$Z = k(Z' - Z_C) + Z_C \tag{4.13}$$

$$k = \frac{-aX_C - bY_C - cZ_C - d}{a(X' - X_C) + b(Y' - Y_C) + c(Z' - Z_C)} \tag{4.14}$$

本研究では，レーザ平面は床面に平行，すなわち，$Z = l$ であるとし，l の値は既知であるとする．

CCD カメラから入力された画像を A/D 変換し，画素単位による画像へのアクセスを行なう為，1 画素当たりの実質的な大きさ，および焦点距離 f といった内部カメラパラメータ，および画像平面中心座標 (x, y, f) をロボット中心座標 (X', Y', Z') に変

換するための変換行列 M，すなわち

$$(X', Y', Z', 1)^t = M(x, y, f, 1)^t \tag{4.15}$$

を満たす 4 × 4 正方行列の要素，そしてカメラ中心のロボット中心座標 (X_C, Y_C, Z_C) といった外部パラメータをカメラキャリブレーションによりあらかじめ求めておく必要がある．しかし一般に，カメラキャリブレーションにより内部パラメータと外部パラメータを一度に導く方法，すなわち統一法（Unified method）ではあまり精度を上げることができないため [出口 96]，本研究では，内部パラメータは，CCD カメラの仕様をそのまま利用することとし，次の値に設定する．

画像平面の 1 画素当たりの長さ = 0.00075(cm，縦横共通) (4.16)

焦点距離 f = 0.6(cm) (4.17)

そして，これらの内部パラメータより，外部カメラパラメータを求める [Yuan 90] 手法を用いてカメラパラメータの精度を上げることとした．

4.4.3 走行実験

実験 1

環境として，ダンボール等を用いて図 4.20 に示すものを作成した．環境の概観図を図 4.21 に示す．

環境中に初期位置（Start）と目標位置（Goal）を想定し，経路指示として以下のものを与えた．

“2 番目の 3 叉路を右折して，最初の 3 叉路へ移動せよ”

ロボットは図 4.22 中の破線に示すような軌跡を描いて目標位置に到達した．図中には，各ステップにおける占有グリッドおよび骨格線を示す．ロボットは最初，初期位置 S において観測行動を開始する（Step 1）．ここでは左右の壁を小さい視野範囲で十分に観測できるため，進行方向 $\pi/4$ 程度の範囲を観測するのみで骨格線を抽出し，

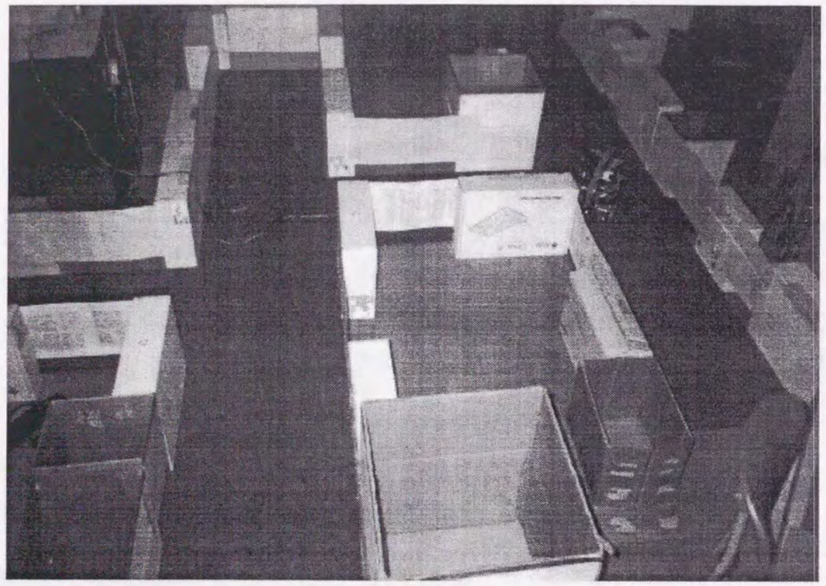


図 4.20 実験環境

A 地点へ向かう．その後，A 地点に近づくにつれて進行方向左側の確定輪郭点が通路の存在のために減少し，結果として，骨格線を抽出するために全周を観測するようになる．A 地点ではロボットは，周囲の部分空間を 1 つの 3 叉路と認識し（Step 9），C 地点へ向かう．C 地点に到達すると（Step 15），ロボットは A，C 地点をまとめて 1 つの 4 叉路と解釈する仮説と，別々に 2 つの 3 叉路と解釈する仮説を生成する．ここではロボットは，1 つの 4 叉路と解釈する仮説を選択し，結果，指示にある 2 番目の 3 叉路を探索するために D 地点の方向へと向かう．しかし，D 地点において通路の突き当りを発見したため（Step 19），A，C 地点を 2 つの 3 叉路と解釈する仮説の評価が高くなり，仮説の切替が発生する．その結果，ロボットは方向転換して C 地点へ向かう．C 地点に到達した後は（Step 25），経路指示にしたがって，初期位置を起点とした向きによる右方向へ進路を変え，目標地点 G に向かって移動し，G に到達した時点で停止する（Step 33）．

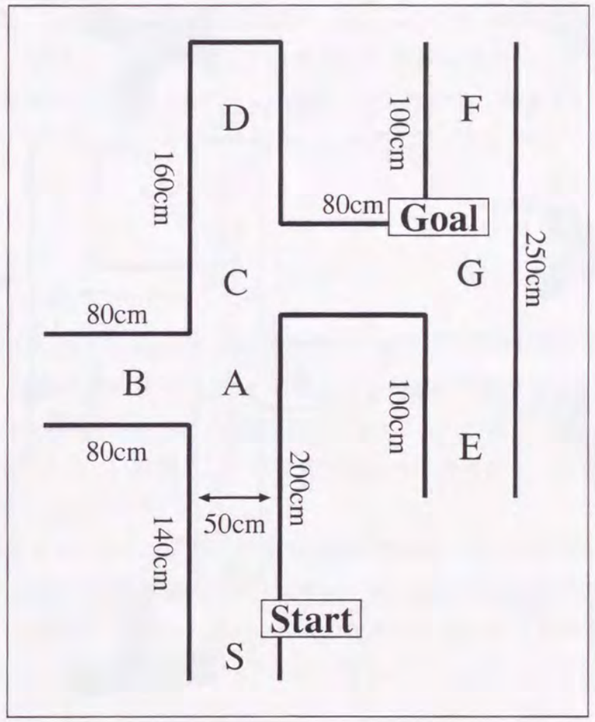


図 4.21 実験環境の概観図

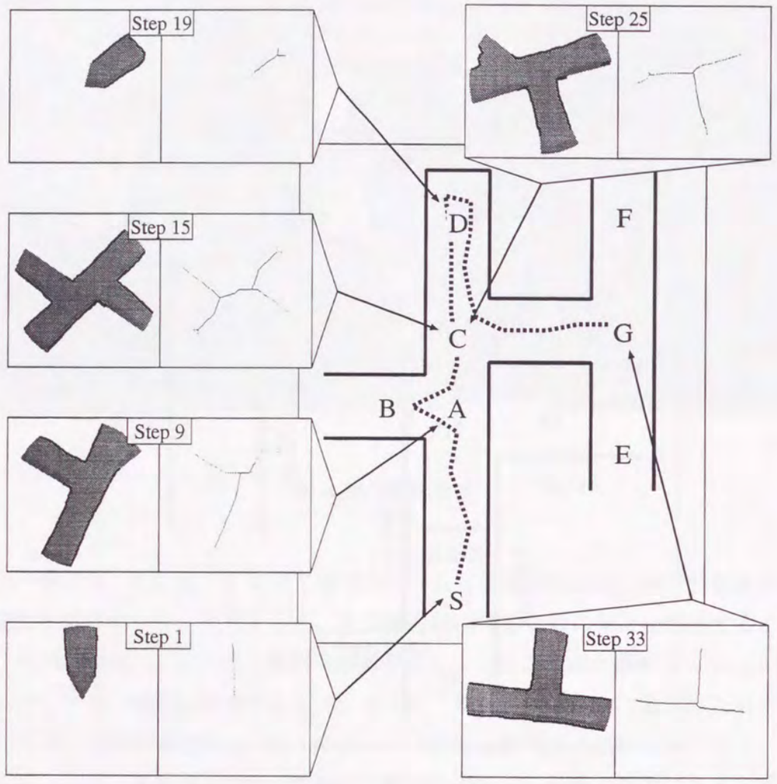


図 4.22 実験 1 ：移動の軌跡および途中過程での占有グリッドと骨格線

実験 2

実験 1 と同じ環境，同じ経路指示を与えた場合の別の結果を図 4.23 に示す．ロボットは，実験 1 とは異なり，図中の破線で示すような軌跡を描いて目標位置に到達した．ロボットは最初，初期位置 S において観測行動を開始する（Step 1）．その後，A 地点において周囲の部分空間を 1 つの 3 叉路と認識する（Step 10）．さらに，C 地点（Step 14）では，実験 1 と異なり周囲の部分空間を 2 番目の 3 叉路と解釈する仮説を選択し，目標位置 G へと向かう（Step 17）．C 地点から G 地点に向かう過程では，通路を進むため，進行方向 $\pi/4$ 程度を観測しつつ移動し（Step 18），目標位置である G 地点で周囲を観測して，3 叉路であることを確認し停止する（Step 23）．

4.4.4 考察

前節の実験 1 における Step 15 での動作から，ロボットが交差点を逐次的に認識していたならば，道標認識の誤りにより，目標地点へ到達不可能であったと予想される．しかし道標間の位置関係を利用した通路移動計画によって，個々の道標認識の結果のみにとらわれることなく，経路としての大局的な整合性を考慮して正しい目標地点へ到達可能であることが示せた．

実験結果の図よりセンシング時の誤差や移動時の誤差，特に回転における誤差がかなり発生していることが読み取れるが，本手法では，局所的な距離データ処理においてのみ定量的な情報を利用し，大局的な環境の情報には定性的なグラフ構造を用いているため，このような誤差の存在にもかかわらずロボットは正しい目標位置に到達できた．

また，同一の初期位置と目標位置に対して同一の経路指示を与えた複数回の実験では，このような誤差のために異なる環境記述が得られ，その結果，上の実験における A，C 地点における交差点の解釈をはじめから 2 つの 3 叉路とした仮説を選択する場合も生じた（図 4.23 参照）．このような場合でも 23 ステップ程度で目標位置に到達できた．この結果は，経路指示との大局的な整合性を考慮することによって道標モデルの相違のみならず，環境の観測誤差による道標認識の曖昧性にも対処可能であることを示すものといえる．

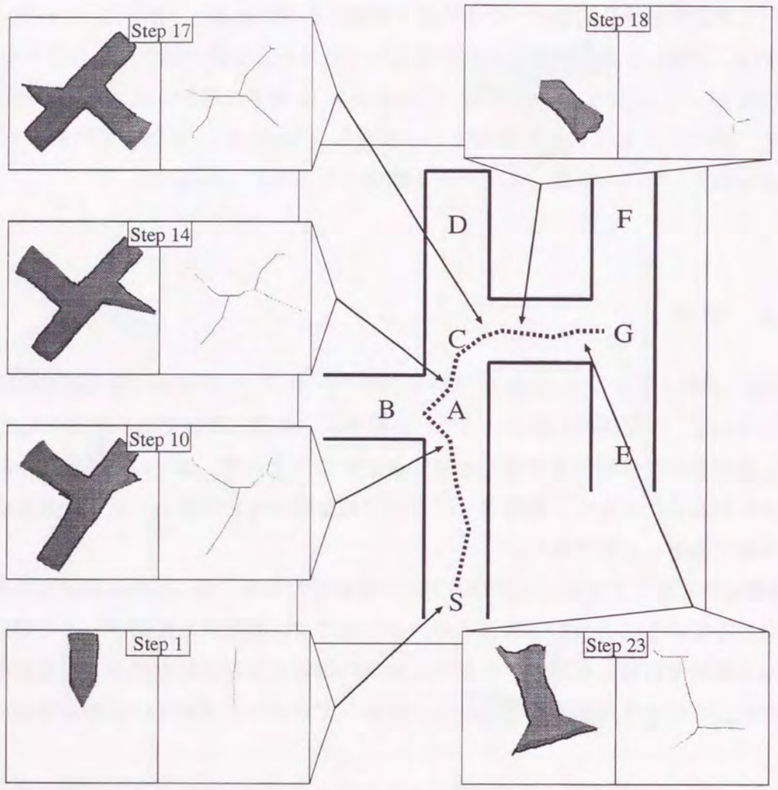


図 4.23 実験 2 ：移動の軌跡および途中過程での占有グリッドと骨格線

4.5 結言

第 3 章にて提案した観測プランニングを実際のロボットに実装する方法について論じた．実機におけるナビゲーションでは，センサやアクチュエータによる誤差の問題がついてまわるが，このプランニングが必要とする環境記述が，骨格線の分岐構造，および骨格線の長さと輪郭線までの距離の比のみであることを利用して，誤差のの影響を受けにくいように，大局的な地図はグラフ構造でのみ獲得し，局所的な地図でおいてのみ数値的なデータを用いる手法を考案した．さらにこの環境記述を用いてプランニングを行った結果として，追跡する骨格点が確定した場合に，それを効率良く観測するための骨格線追跡のための行動計画を提案した．これを用いて行った実機による実験の結果，以下のような知見が得られた．

- 実際の移動ロボットにおいても，経路指示に含まれる文脈情報を利用した観測行動によって個々の道標の認識結果のみにとらわれることなく，正しい目標位置への到達が可能である．
- 局所的な距離データ処理においてのみ定量的な情報を利用し，大局的な環境の情報については定性的なグラフ構造を利用することで，誤差の影響を軽減できる．
- 文脈情報を利用して経路指示との大局的な整合性を考慮することにより，道標モデルの相違のみでなく，環境を観測する場合における誤差によって生じる道標認識の曖昧性にも対処可能である．

一方，今後の課題として，実機による実験のさらなる充実が挙げられる．現在は，ロボットの大きさなどの制約上，ダンボール等で作成した環境においてのみ実験を行っているが，今後はオフィス環境など，より現実的な環境において有効性を実験的に検証する必要がある．また，本章では，実機による概念モデルの学習について検討していないが，これも今後の課題である．

第 5 章

地図情報処理システムにおける経路指示文の利用

5.1 緒言

第 3 章，第 4 章で取り上げた移動ロボットのナビゲーションにおいては，認識のための一般的なモデルを与えることが可能であり，かつモデルに含まれるパラメータおよび個人の主観および状況によってその意味する対象に曖昧さが生じやすい例であるという理由から “交差点” を具体的な道標とした経路指示文の理解について検討してきた．しかしながら，ロボットを対象としているため，人工的な環境においてのみでの検証しか実現できていない．そこで本章では，実際の環境の構造を反映した例として地図に着目し，地図情報処理システム（GIS : Geographic Information System）における経路指示文の利用について検討する．

地図情報処理システムとは，地図情報を計算機上で処理するシステムの総称であり，関連する研究も数多く存在する [嶋田 86, 大西 92, 飯村 94, 馬場口 97]．システムの利用目的に着目すると，近年爆発的に普及しつつある車の運転を支援するカーナビゲーションシステム，地質調査や海底調査などの学術研究を目的とするシステム，市場調査などのマーケティングに利用するシステム，鉄道路線や道路交通網などを管理するシステムなどが開発されている．このような多くの応用分野の中で本研究では，地図本来の主要な使用目的である経路案内に着目する．地図情報処理における経路案内について考えてみると，下に示すような 2 つの方向性が存在することがわかる．

(1) 目標地点の住所や電話番号が正確に分かっている場合に，ある地点を起点とする

目標地点までの経路を地図上から探索し，案内する．

(2) 目標地点までの経路指示文が分かっている場合に，そこまでの経路を地図上から探索し，案内する．

(1) については，カーナビゲーションシステムなどで既に実用化されているものであり，本研究では (2) に示すような形態の経路案内について検討する．ここで問題となるのは，経路案内文に含まれる道標，特に交差点の曖昧性である．これまでも述べてきたように，交差点という概念は人それぞれで異なっており，同じ空間をみて“1つの4叉路”と考える人もいれば，“2つの3叉路”と考える人もいる．しかしこのような形で交差点の認識が変われば，それによって経路案内文に含まれる交差点の数も変わり，経路の探索に失敗する．この種の経路案内に関する研究の1つとしては，経路案内文から地図へのメディア変換を取り扱った研究 [鈴木 98] がある．これは，その前提として地図から抽出した道路をアークとし交差点をノードとする道路ネットワークを利用しているため，交差点自体の解釈が変わるような経路の探索は不可能である．

この問題に対処するため，ここでも第 3 章のロボットのナビゲーションにおいて導入したのと同様の環境記述と経路評価の枠組を採り入れ，経路案内文を全体的にみて最も整合性の高い経路を選択することで正しい経路を探索する経路探索エージェントの実現を目指す．日本の道路，特に住宅街の道路は，複雑に入り組みどこが交差点であるかを，すぐに判断しにくいものも多数存在する．そのような場所で与えられた経路案内文に沿って経路を探す時にこれまでは，自分の足で行つ戻りつして確かめるしかなかったが，このようなエージェントを携帯情報端末（PDA : Personal Data Assistant）などの上に実現することによってその手間を減少させることが可能となる．

5.2 問題設定

5.2.1 地図情報処理での利用を考慮した経路表現

第 3 章 3.2 節においても述べたように，人間は言葉で経路を記述する場合に，環境の特徴に関する様々な情報を利用する [辻 91]．そのような情報の中で，我々は，“角”，“並木路”，“繁華街”，“お寺”などを広く道標として捉え，“古い”や“3番目”などの道標を修飾する形で表現された情報，および“左に曲がって”などのある道標と次の道

制約	意味	キーワード例
目印位置制約	交差点からみた目印の方向	“右手にある”
目印制約	交差点の付近にある目印	“郵便局”
順序制約	交差点の順番	“1番目”
通路数制約	交差点につながる通路の本数	“3叉路”
形状制約	交差点の形状	“T字路”
方向制約	交差点での移動方向	“左折する”

表 5.1 部分経路指示に含まれる制約

標の位置関係に関する情報を道標の制約と定義した．このような道標のうち，ロボットのナビゲーションにおいては，郵便局などの一般的な物体はその認識処理の複雑さを理由として，考慮の対象から除外した．しかし，地図情報処理に利用できる地図データでは，郵便局などの建物の情報が地図上の点もしくは領域として与えられていることが普通であり，認識処理の過程を経ずにその利用が可能となる．

経路とは，ある地点から目標地点までの道路のつながりを与えるものである．そのため，その進行方向を変更する地点には交差点が存在する．つまり，経路を特定する上での主要な道標は交差点であり，郵便局などの建物情報は交差点に関連する予備的な知識，すなわち，その交差点を同定するための制約条件である．そこで本研究では，ある交差点から次に進路が変更される交差点までを**部分経路**と定義し，進路が変更される交差点での進行方向や通路数，地図データ中から利用可能な建物情報などの制約を含めた**部分経路指示**として以下のものを想定する（表 5.1 参照）．

部分経路指示 ：＜目印位置，目印，順序，通路数，形状，方向＞

ここで，**目印制約**とは交差点の付近にある目印となる道標であり，**目印位置制約**とはその道標が存在する方向を意味する．**通路数制約**とは“3叉路”などの交差点につながる通路の本数であり，**形状制約**とは“T字路”などの交差点の形状を表現する記号（以下，**形状記号**と呼ぶ）である．**順序制約**および**方向制約**は交差点間の位置関係に関する情報で，これらが経路指示に関する文脈的制約を与える．順序制約は“1番目”などの交差点の順番に関する制約を表し，方向制約は“左に曲がる”などの方向に関する

意味	キーワード
1番目	1番目，1個目，1つ目，最初の，はじめの，次の
i番目	i番目，i個目，iつ目 （iは2以上の自然数）

表 5.2 経路探索エージェントへ与える順序制約の意味とキーワード

意味	キーワード
3叉路	三叉路，3叉路
4叉路	四叉路，4叉路
i叉路	i叉路 （iは5以上の自然数）

表 5.3 経路探索エージェントへ与える通路数制約のキーワード

制約を表現する．

ユーザは，目的地を知りたい経路指示を，道標およびそれに付随する制約を表現した自然言語文を用いて経路探索エージェントに与える．エージェントはこれを日本語形態素解析システム JUMAN[松本 97] を利用して品詞を付した語に分割し，その結果を用いて，上記の6種類の制約に関して予め準備したキーワードと照合して具体的制約を獲得する（表 5.2 ，表 5.3 ，表 5.4 ，表 5.5 参照）．なお，方向制約には，表 5.5 に示す方向を意味するキーワードの後に，“曲がる” 等の動詞がくることとし，目的地を表す特別なキーワードとしては，第 3 章の表 3.5 中の記号表現 “goal” に対応するキーワードと同じものを用いる．また，利用できる目印制約に関しては，地図データ中に記号として存在すると仮定する．すなわち，地図データ中には，ある座標に例え

意味	キーワード
T字路	T字路
Y字路	Y字路

表 5.4 経路探索エージェントへ与える形状制約のキーワード

方向の種類	意味	キーワード
相対方向	左	左，左側，左手，左方向，左折
	左奥	左奥，左斜め，斜め左
	左手前	左手前
	右	右，右側，右手，右方向，右折
	右奥	右奥，右斜め，斜め右
	右手前	右手前
	前	前，前方，まっすぐ，前進，直進
絶対方向	北	北，真北，北方
	南	南，真南，南方
	東	東，真東，東方
	西	西，真西，西方
	北東	北東，東北
	北西	北西，西北
	南東	南東，東南
	南西	南西，西南

表 5.5 方向の種類と方向を意味するキーワード

ば“銀行”という道標が存在するという記号データが含まれており，認識という過程を経ずにその情報を利用できるものとする．このような情報は，経路探索の対象とする地図データによって様々に異なるため，ここでは予め限定はしないが，1つの例として建設省国土地理院発行のベクトル地図（数値地図 10000（総合），1993 年版）に含まれるデータを用いた目印制約のキーワード例を挙げておく（表 5.6 参照）．

例えば，

“右手に住友銀行のある4番目の交差点を左折して，
左手に郵便局のある次の三叉路かつT字路まで行け.”

という経路指示を形態素解析すると，表 5.7 に示す結果が得られる．この解析結果から，キーワードと照合して獲得される具体的な制約は以下のようなものとなる．

＜右，住友銀行，4番目，?，?，左＞
＜左，郵便局，1番目，3叉路，T字路，目的地＞

経路指示によってはこれらの制約のうちのいくつかが特に指定されない道標も存在する（上の例では？で表現している）．なお，本研究では自然言語自体の持つ意味の曖昧さは議論の対象とはせず，“1番目の3叉路”という表現は“1番目”でなおかつ“3叉路”である交差点を意味するものとする．

5.2.2 経路探索エージェントにおける環境の記述

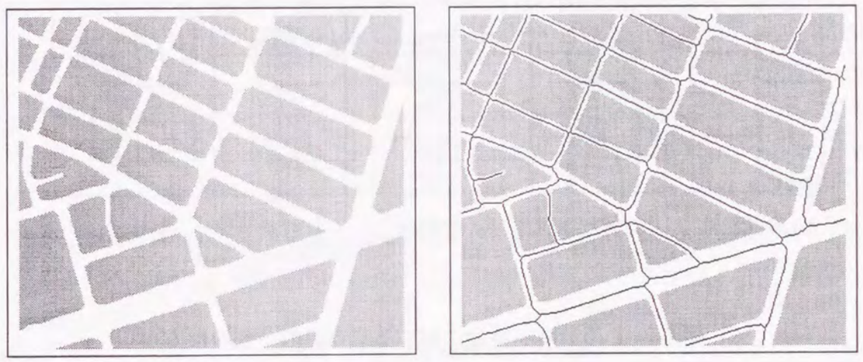
地図情報処理において経路探索エージェントは地図データを予め保持しており，ロボットのように未知環境を観測したデータから環境の記述を獲得する処理は必要ない．しかし，地図データの形式によりその記述方法は様々に異なっている．そこで，本研究では，交差点を利用した経路指示との対応がとりやすいという理由により，第 3 章の手法と同様に地図データの道路部分の領域の骨格線によって環境を記述する．すなわち，地図データから得られる地図中の道路領域（図 5.1 （a）中の白い部分）に対して Wavefront Expansion 法 [Barraquand 91] を適用し，自由領域の輪郭線から内側に向かって伝播する波面同士の出会った位置を骨格線（図 5.1 （b）中の黒い線）として抽出する [Kakusho 95, 谷口 96]．最近では，例えば，建設省国土地理院発行のベクトル地図（数値地図 2500 （空間データ基盤））などのように，最初から道路中心線が

目印の種類	キーワード
一般的な建物	神社
	寺院
	キリスト教会
	学校
	病院・医院
	県庁・役場
	警察署
	郵便局
	消防署
	その他の官署
	幼稚園・保育園
	図書館
	公会堂・公民館
	銀行
	デパート・スーパー
	ホテル・旅館
	工場
	倉庫
	史跡・名勝・天然記念物
	発電所・変電所
固有名詞	“テレビ大阪”，“大阪合庁2号館”など

表 5.6 数値地図 10000（総合）における目印制約のキーワード例

形態素	読み	基本形	品詞
右手	(みぎて)	右手	普通名詞
に	(に)	に	格助詞
住友	(すみとも)	住友	固有名詞
銀行	(ぎんこう)	銀行	普通名詞
の	(の)	の	格助詞
ある	(ある)	ある	動詞，子音動詞ラ行，基本形
4	(よん)	4	数詞
番	(ばん)	番	名詞性名詞助数
目	(め)	目	名詞性名詞接尾
の	(の)	の	名詞接続助詞
交差点	(こうさてん)	交差点	普通名詞
を	(を)	を	格助詞
左折して	(させつして)	左折する	動詞，サ変動詞，タ系連用テ形
,	(,)	,	読点
左手	(ひだりて)	左手	普通名詞
に	(に)	に	格助詞
郵便局	(ゆうびんきょ	郵便局	普通名詞
の	(の)	の	格助詞
ある	(ある)	ある	動詞，子音動詞ラ行，基本形
次の	(つぎの)	次の	連体詞
三叉路	(さんさろ)	三叉路	普通名詞
かつ	(かつ)	かつ	名詞接続助詞
T字路	(てぃじろ)	T字路	普通名詞
まで	(まで)	まで	格助詞
行け	(いけ)	行く	動詞，子音動詞カ行促，命令形
.	(.)	.	句点

表 5.7 経路探索エージェントへの経路指示の形態素解析例



(a) 地図データ中の道路領域　(b) 抽出した道路領域の骨格線

図 5.1 地図データ中の道路領域とその骨格線

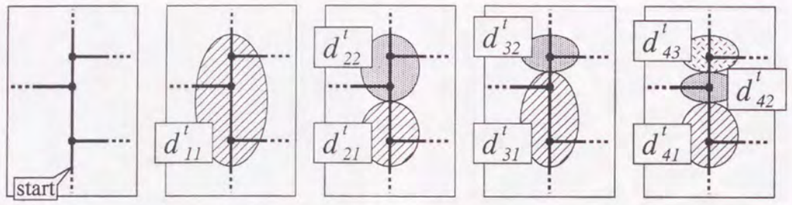
データとして地図データ中に含まれているものもあり，そのような地図データをもとにする場合には，道路中心線データをそのまま環境記述として利用する．

このような形で経路指示と環境記述が与えられた場合に，経路探索エージェントの枠組は以下に示す3つのステップの繰り返して実現される．なお，ここでは，経路の始点が骨格線の上に存在すると仮定している．

1. ある時点において評価対象となっている分岐点集合から，経路指示中の制約を満足する分岐点の分割の仕方を経路仮説として生成する．

2. 生成した経路仮説を道標モデルとの相違をもって評価する関数を定義し，この関数の評価が最も良くなる，すなわち相違が最も小さくなる経路仮説を選択する．

3. 選択した経路仮説において，経路指示で指示された進行方向に延びる骨格線を決定し，その先に続く分岐点を新しく評価の対象とする分岐点集合に追加する．



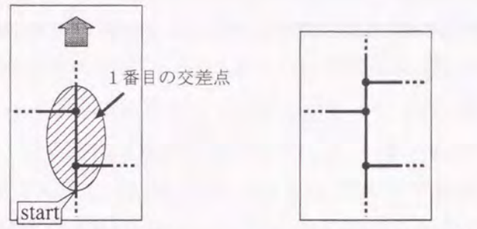
(a) 環境記述 (b) 分割 r^t_1 (c) 分割 r^t_2 (d) 分割 r^t_3 (e) 分割 r^t_4

図 5.2 ある分岐点集合に対する交差点の分割の仕方

5.3 経路仮説の生成と選択した経路仮説の展開

ここでは，まず経路仮説の生成方法について述べる．ある時点において評価対象となっている分岐点集合 D^t が，図 5.2（a）に示すものだったとすると，どれだけをもって各々1つの交差点とみなすかによって様々な分割の仕方がある（図 5.2（b）(c)（d）(e)）．これらを $r^t_1, r^t_2, \cdots$ で表す（$r^t_i = \{d^t_{i1}, d^t_{i2}, \cdots, d^t_{im}\}$）．このとき，$d^t_{ij}$ は D^t に対する i 番目の分割 r^t_i において，j 番目の交差点とみなされる部分の分岐点の集合を意味する（$D^t = d^t_{i1} \cup \cdots \cup d^t_{im}$）．$m$ はその分割中に含まれる交差点の数である．この $r^t_1, r^t_2, \cdots$ の中から，経路指示を大局的に満足し得るものとして，各交差点の通路数，交差点間の順序と位置関係が，与えられた経路指示の内容と矛盾しないものだけを経路仮説として選び出す．この経路仮説の集合を R で表す．例えば，“2番目の3叉路を左折して...” という経路指示のもとでは，2番目が3叉路という記述との矛盾から r^t_2（図 5.2（c））が，左折するという記述との矛盾から r^t_3（図 5.2（d））が仮説から除外され，$R = \{r^t_1, r^t_4\}$ となる．

次に，選択された経路仮説を展開して新たな分岐点集合 D^{t+1} を生成する方法について説明する．これは，ある時点で選択された経路仮説において，経路指示が与える進行方向に向かう骨格線を決定し，その先につながる分岐点を評価対象の分岐点集合に加えることによって実現される．例えば，ある時点で選択された経路仮説が図 5.3（a）に示すものであるとする．ここで，経路の始点を “Start” で示す位置とし，経路指示として “2番間の3叉路を左折して...” というものが与えられていたとすると，経



(a) 現在の経路仮説 (b) 新たな分岐点集合

図 5.3 新たな分岐点集合の生成

路指示より進行方向は同図中の矢印で示した方向となる．このとき新たな分岐点集合 D^{t+1} は，矢印の方向に存在する分岐点を含んだものとなる（図 5.3（b）参照）．

5.4 経路仮説の評価に基づく経路探索

前節のようにして生成された経路仮説集合 R は，経路指示を文脈的制約を含めて満足するような環境記述の分割のみから構成されるため，ユーザが求める経路はこれらの経路仮説中の1つになる．経路探索エージェントにおいても第3章と同様の方針で，これらの経路仮説のうちで，仮説を構成する各交差点の環境記述と，エージェントの持つ交差点モデルとの相違が最も小さいものを，正しい経路と考える．そこで，まず経路探索エージェントにおける交差点の評価関数を定義する．

経路探索エージェントでは，第3章において定義した交差点の評価関数（式（3.2）参照），および形状の評価関数（式（3.4）参照）に加えて，目印に関する評価関数が必要となる．すなわち，経路探索エージェントは，現在評価の対象となっている1つの交差点を表す分岐点集合 d^t_{ij} が，(1) 交差点らしいか，(2) 形状として指示されたものと近いか，(3) 指示された目印が目印位置の方向に存在するか，という3点を評価する必要がある．(1)，(2) については既に定義済であるからここでは，(3) の定義について考える．

地図データ中に目印に対応するような建物等の情報を含んでいる場合，そこからそれらの地図上での座標を獲得できる．また，現在評価の対象となっている1つの交差

点を表す分岐点集合 d_{ij}^t に含まれる分岐点の座標も計算可能であることから，これらの分岐点の座標を平均した点を交差点の中心 C と仮定し，その座標と目印 T の座標の位置関係をもって (3) を評価する．すなわち，交差点の中心座標が $C_P(X_C, Y_C)$ で，目印の座標が $T_P(X_T, Y_T)$ であったとすると，交差点中心から目印へ向かう方向 ベクトル $\overrightarrow{T_PC_P} = (X_T - X_C, Y_T - Y_C)$ が目印位置を表す方向と近いか否かで評価ができる．例えば，“北” を表す方向が ベクトル $\overrightarrow{N} = (0,1)$ によって表されるとすると，ある目印が北方向に存在するか否かは，$\overrightarrow{N}$ と $\overrightarrow{T_PC_P}$ のなす角を評価する下に示すような関数で評価できる．

$$u(T) = \frac{\overrightarrow{N} \cdot \overrightarrow{T_PC_P}}{|\overrightarrow{N}||\overrightarrow{T_PC_P}|} \tag{5.1}$$

これらの関数を利用して，交差点を総合的に評価する関数は以下のように定義できる．

$$F(d_{ij}^t) = w_a \cdot f(d_{ij}^t) + w_b \cdot s(\boldsymbol{x}') + w_c \cdot u(T) \qquad (w_a + w_b + w_c = 1) \tag{5.2}$$

この関数を利用して，第 3 章と同様に以下のように経路仮説の評価関数を定義する．

$$G(r_i^t) = \left\{ \sum_{j=1}^{m} F(d_{ij}^t) \right\} / m \quad (r_i^t \in R) \tag{5.3}$$

この評価関数 $G(r_i^t)$ の値として最小のものを与える経路が求めるものである．これは，経路仮説の評価関数 $G(r_i^t)$ による経路仮説の木構造に対する一種の最良優先探索として以下のように計画される．

1. ある時点で評価の対象となる分岐点集合を決定する．
2. その分岐点集合をもとにして，経路指示によって与えられる制約を満足する経路仮説を生成する．
3. $G(r_{min}^t) = \min G(r_i^t)(r_i^t \in R)$ を満たす経路仮説を選択する．
4. 選択した経路仮説において，経路指示で指示された進行方向に延びる骨格線を決定し，その先に続く分岐点を新しく評価の対象とする分岐点集合に追加する．

この処理を繰り返し，経路指示中のすべての交差点が発見され，かつ $G(r_{min}^t) < \delta$ (δ : 定数) である経路が得られたときに指示された目的地までの経路を発見したとして処理を終了する．

5.5 結言

第 3 章，第 4 章で取り上げた移動ロボットのナビゲーションにおいて利用した “交差点” という具体的道標の現実の環境への適用可能性について検討するために，実際の環境の構造を反映した地図を例として，そこにおける経路指示文解釈への適用を試みた．言葉による経路指示においては，第 2 章 において述べた概念モデルの相違に起因する情報伝達の失敗が起こり得る．それを解消する 1 つのアプローチは，言葉に含まれる文脈情報を利用して，そこに含まれる複数の概念を同時に満たすものを環境中から探索するというものであり，本章ではその枠組を経路探索エージェントの上に実現する方法を提案した．

ロボットにおける実験では，実験室内における筆者によって作られた環境における経路指示文の理解についての検討した．しかしながら，現実に存在する環境は，複雑な構造を有しており，そこにおいてパターンで表現された交差点と経路指示文に含まれる “交差点” という言葉を対応付けることは難しいと考えられる．そのため，筆者の意図にとらわれない現実環境を反映した一例として地図というものは妥当であり，そこでの本手法の振る舞いについて検討することは価値があると思われる．今後の課題として，これを実際に地図情報処理システムという枠組の上で完成させ，実験により有効性を検証する，というものがあげられる．

第 6 章

結論

近年盛んに検討されているユーザに代わって様々な作業を行う知的エージェントを実現する上では，人間とエージェントの間における人間にとって扱いやすいコミュニケーションの実現が必須である．このようなコミュニケーションのためのメディアとしては，既に述べたように様々なものが存在するが，中でも特に人間にとっての利便性が高いものに言葉があり，その特徴から今後益々重要なメディアとなると考えられる．そこで本論文では，人間－エージェント間の言葉を用いたコミュニケーションの構造について論じ，両者の間の概念モデルの相違に起因する問題点を明らかにした．この問題点を解決する手法として，文脈情報を利用したコミュニケーションによって，両者の概念モデルの相違を解消するアプローチを具体的に示した．以下に，本研究で得られた諸成果をまとめる．

まず，様々なメディアを利用した一般的なコミュニケーションについて議論し，そのようなコミュニケーションの中で，言葉を用いたコミュニケーションについて，以下のような特徴を明確にした．すなわち，一般的なコミュニケーションにおいては，伝達したい情報をそのコミュニケーションに用いるメディアに変換する必要があるが，この時に用いる概念モデルが情報の発信者と受信者の間で異なっているため情報の伝達に失敗することがある．特に言葉は抽象性が高いという特徴を有するため，具体的な情報を伝達する場合には欠落する情報があるが，言葉を用いたコミュニケーションではそれほど不都合を感じない．この理由として，情報の発信者と受信者が環境を共有しているため，受信者の側が欠落した情報を環境から獲得している，言い換えれば言葉として明示的に伝達する以外の情報を環境を通じて暗黙の情報として伝達しているためである，ということを示唆し，そのようなコミュニケーションをモデル化した．加

えて，環境を共有する場合に，発信者の側が，環境から獲得可能な情報の一部を陽に伝達することによって，意図的に言葉に含まれる情報を増し，受信者の側でそれらの情報を同時に満たすものを環境中から探索することによって，発信者と受信者の概念モデルの相違を解消するアプローチを提案した．さらに，それによって意思伝達が成功した場合に，環境から獲得される情報に基づいて両者の概念モデルの整合をとることにより，一層円滑なコミュニケーションが実現できることを示唆した．

次に，環境を共有する場合における文脈情報を利用したコミュニケーションを，人間ーロボット間におけるナビゲーションのための経路情報の伝達という具体例に適用して，その有効性を実証した．ロボットのナビゲーションにおいては，人間とロボットが存在する環境が，共有する環境にあたり，伝達する情報とはその環境中でロボットが移動すべき経路の情報である．ロボットは，経路に沿って現れる道標を認識する必要があるが，この道標のモデルは経路指示者のそれとは必ずしも一致していない．このモデルの相違を吸収するために，個々の道標ではなく，それらを組み合わせて経路として評価する観測行動プランニングについて議論した．これをシミュレーションにより実験的に評価した．また，提案したプランニングにおいて問題となる，指示者とロボットの道標モデルの相違に起因する経路探索行動の失敗や移動コストの増加について議論し，これらを解決するために，経路情報の詳細さを変化させること，および過去の行動の結果として観測された道標の事例から道標モデルを学習する手法を提案した．さらに，その学習によって移動のコストが減少すること，および経路探索の失敗が解消されることを確認した．以上の結果は，言葉によるコミュニケーションにおける，文脈情報の利用が，概念モデルの相違に起因する情報伝達の失敗を解決する有効なアプローチとなることを示唆していると考えられる．

続いて，観測範囲に制限のある実際の移動ロボットを用いて，上記のナビゲーションを実装する手法について論じた．実機におけるナビゲーションにおいて問題となるセンサやアクチュエータに起因する誤差に対して，大局的な地図をグラフ構造で持つことによりこの誤差を解消する手法を提案した．さらに，環境の情報獲得のための骨格線の追跡行動において，複数の評価関数を組み合わせた指針により総合的に効果的な情報を獲得できる方向への観測行動を実現した．これを距離計測のためのレーザー光照射装置と CCD カメラを搭載した移動ロボットで実現し，実際の環境においても文脈情報の利用が有効であることを実証した．また，文脈情報を利用して経路指示と

の大局的な整合性を考慮することにより，道標モデルの相違のみでなく，環境を観測する場合における誤差によって生じる道標認識の曖昧性にも対処可能であるという知見が得られた．

さらに，“交差点” という道標に対する，実存する環境への適用可能性について検討するために，地図情報処理システムについて論じた．ここでは，地図情報システムにおいて，文脈情報を利用することによって，ユーザの意図する正しい経路を探索し，それを提示する経路探索エージェントの枠組を提案した．

以上，本論文で論じた言葉を用いたエージェント間のコミュニケーションに関する研究成果について総括的に述べると，以下の２点に集約される．

- 環境を共有している状況での言葉を用いたコミュニケーションにおいては，情報の発信者が，環境から獲得可能な情報を意図的に明示的な言葉で伝達し，受信者の側がその情報を同時に満たすものを環境中から探索することにより，概念モデルの相違が存在したとしても正しく情報を伝達することが可能となる．

- 上述のように正しく情報を伝達した後には，環境から獲得した情報を利用して情報を受信した側が自己の概念モデルを送信した側のモデルへと近づけるように学習することによって，より円滑なコミュニケーションが実現される．

コミュニケーションの目的とは，それによって意図を伝達することである．この意図というものはそのままでは伝達不可能なものであり，それを伝達するには何らかのメディアを用いてそれを表現する必要がある．このとき，それぞれのメディアにおける意図の表現方法は目的や人によって様々に異なっており，パターン認識の難しさの一つは，これに起因していると考えられる．このような問題は，コミュニケーション全般に共通していえる問題である．本論文で述べた文脈情報を利用したアプローチはこの問題に対する一つの対処方であり，本論文で述べたロボットのナビゲーションや地図情報処理への応用以外にも様々な分野に適用可能であると考えている．また近年，人間との対話を通じて，ロボットが環境に関する知識を獲得する対話ベース型の学習 [Asoh 97] が提案されているが，本研究はこのような対話ベース学習によって，人間の持つ概念モデルに関する知識を獲得することを目指したものとも捉えることができる．ただし，この学習は，結果として人間と同一かつ汎用的な概念モデルの獲得を目指す

ものではなく，エージェントの動作している特定の環境における特定の指示者との間の意思伝達効率のみを焦点に据えたタスク指向型の学習である．

最後に，本研究に関する今後の課題を挙げる．

本論文で取り扱ったコミュニケーションにおける概念モデルの相違の問題は，コミュニケーション一般において存在する問題である．ここでは，これを文脈情報を利用して解消するアプローチを提案し，それをロボットや地図エージェントなどに対する経路情報の伝達に適用して，その有効性を実証した．しかし，このアプローチは上でも述べたように様々な分野において適用可能であると考えられるため，それを実証するために，例えば，物体認識などの分野に適用して検討を加える必要がある．

また，本論文では，言葉を用いたコミュニケーションとして特に，人間からエージェントへの情報伝達に適用する場合について論じてきたが，これをエージェント同士の間の情報伝達に適用することも可能である．その場合，本論文で議論した情報の受信者側の処理に加えて，情報の発信者側で相手との概念モデルの相違に応じて情報の詳細さを制御する枠組が必要となる．これが実現できるとエージェント間において，両者の意思疎通のための協調対話が実現できると考えている．対話理解の分野においては，異なる文法体系を持つ２者が，対話を通じて共通の文法体系を獲得する処理が議論されているが [中村 97]，上のような協調対話ではエージェント間で共通の概念を形成できる可能性が期待される．この課題は今後検討すべき中で最も重要なものであるといえる．

近年，人間にとって使いやすいインタフェースとして人間同士のコミュニケーションと同様のメディアを利用しようという考えから，様々なメディアを利用したインタフェースの実現が試みられているが，メディアにおける意図の表現方法をコミュニケーション全般の問題として捉えたような研究は少ない．しかしながら，近い将来，第 1 章で述べたようなエージェントへによる作業の支援・代行への期待が高まるにつれ，このようなコミュニケーションの重要性は益々高まっていくであろう．本研究の成果が，これらの実現に際して多少なりとも先駆的な役割を担えば筆者の最も幸いとするところである．

謝辞

本論文は，大阪大学産業科学研究所 北橋 忠宏 教授の御指導の下に，筆者が同大学大学院基礎工学研究科在学中に行った研究の成果をまとめたものです．

まず最初に，本研究を遂行するにあたり，懇切なる御指導，および御鞭撻を戴きました 北橋 忠宏 先生 に対し，深甚なる感謝の意を表します．

本論文をまとめるにあたり貴重な御教示を戴きました大阪大学大学院基礎工学研究科 萩原 兼一 教授，ならびに大阪大学医学部 田村 進一 教授に心から感謝致します．また，コミュニケーションにおける学習につきまして有益な御助言を戴きました大阪大学大学院基礎工学研究科 谷内田 正彦 教授に深く感謝いたします．

大阪大学大学院基礎工学研究科 井上 克郎 教授，今井 正治 教授，柏原 敏伸 教授，菊野 亨 教授，谷口 健一 教授，都倉 信樹 教授，故 西川 清史 教授，橋本 昭洋 教授，故 藤井 護 教授，藤原 融 教授，宮原 秀夫 教授，首藤 勝 教授（現 大阪工業大学情報科学部 教授）には講義などを通じ様々な御指導と御教示を賜わりました．厚く御礼申し上げます．

本研究の遂行にあたり，日頃より貴重な御助言を戴きました大阪大学産業科学研究所 馬場口 登 助教授に深謝いたします．

本研究の全過程を通じ，直接の御指導を賜わり，終始熱心なる御助言を戴いた京都大学総合情報メディアセンター 角所 考 助教授に心より感謝申し上げます．特に博士後期課程におきましては，京大から阪大まで幾度となくお越し戴き夜遅くまで熱心な討論をして戴きました．このような懇切なる御指導がなければ，本論文はここにはなかったと考えられます．重ねて深謝いたします．

大阪大学大学院基礎工学研究科 谷内田研究室 山口 智浩 助手（現 奈良高専 助教授）および学生諸兄には，マイクロマウスのシステム構築に際して，貴重な時間を割いてシステムを見学させて戴くとともに，貴重なる御助言を戴きました．ここに深く感謝いたします．

大阪大学産業科学研究所 大原 剛三 助手には研究室において日頃から終始御配慮を賜わりました．また，筆者の所属する研究室の元スタッフである近畿大学淡 誠一郎 講師，松下電工株式会社 顧 海松 博士，兵庫大学 高野 敦子 講師には御厚意溢れる御

助言と御支援を戴きました．ここに深く感謝いたします．

和歌山大学経済学部 芦田 昌也 助教授には，共同研究者として熱心な御討論，的確なアドバイスを戴きました．ここに深謝申し上げます．

筆者の共同研究者であった志摩 昌和 氏（現，リコー），北野 泰之 氏（現，関西電力），吉田 武史 氏にはミーティングなどを通じ，熱心な御討論を戴きました．ここに深く御礼申し上げます．特に，志摩氏にはマイクロマウスのシステム構築を率先して実行して戴き，様々な問題に対してアイデアを出して戴きました．重ねて心より感謝いたします．

北橋研究室の皆様には日頃から研究などいろいろな面でお世話になりました．ここに記して感謝の意を表します．

最後に，私を今まで暖かく見守り励ましてくれた 父 正美，母 雅子 に心より感謝申し上げます．

参考文献

[芦田 95] 芦田 昌也, 柴田 史久, 角所 考, 馬場口 登, 北橋 忠宏：道標の認識に基づくナビゲーションのための観測行動における意思決定, 平成７年電気関係学会関西支部連合大会予稿集, pp.G386(1995).

[飯村 94] 飯村 伊智郎, 加藤 誠巳：ルックアップ・テーブルにより探索領域を限定した日本全国道路網における経路探索手法, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.12, pp.2831–2841(1994).

[出原 97] 出原 進一, 八木 康史, 谷内田 正彦： 複数の移動ロボットにより観測された環境地図の統合, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, pp.439–447(1997).

[大西 92] 大西 啓介, 加藤 誠巳：交差点内コストを考慮した道路網における経路探索の手法とそのマルチメディア型経路案内システムへの応用, Vol.33, No.7, pp.970–979(1992).

[大山 91] 大山 尚武：機械技術研究所における極限作業ロボットの研究成果, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5, pp.623–627(1991).

[加藤 93] 加藤 一郎：リリスロボット—生活支援ロボット—の構想, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.5, pp.614–617(1993).

[小林 94] 小林 尚登：ロボットと人間のコミュニケーションと協調, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, pp.796–801(1994).

[佐藤 96] 佐藤 和也, 八木 康史, 谷内田 正彦：全方位視覚センサ COPIS を

用いた環境マップ生成 — 実環境適用のための処理改善 —, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.887–895(1996).

[柴田 95a] 柴田 史久, 芦田 昌也, 角所 考, 馬場口 登, 北橋 忠宏：自律移動エージェントによる道標モデルの学習に関する一考察, 平成 7 年電気関係学会関西支部連合大会予稿集, pp.G387(1995).

[柴田 95b] 柴田 史久, 芦田 昌也, 角所 考, 馬場口 登, 北橋 忠宏：道標の認識に基づく経路探索のための能動的観測, 第 38 回自動制御連合講演会予稿集, pp.289–290(1995).

[柴田 96a] 柴田 史久, 芦田 昌也, 角所 考, 馬場口 登, 北橋 忠宏：道標の認識に基づく経路記述の理解のための観測行動の計画と道標モデルの学習, 第 1 回ロボティクスシンポジア予稿集, pp173-178(1996).

[柴田 97a] 柴田 史久, 芦田 昌也, 角所 考, 北橋 忠宏：自律移動エージェントによる道標を用いた記号的な経路記述の理解のための認識機構の学習, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU97-13, pp.97–104(1997).

[柴田 97b] 柴田 史久, 芦田 昌也, 角所 考, 北橋 忠宏：言語的な経路指示による移動ロボットの誘導とユーザへのカスタマイズ, 電子情報通信学会技術研究報告 HIP97-9, pp.63–70(1997).

[柴田 97c] 柴田 史久, 芦田 昌也, 角所 考, 北橋 忠宏：人間－ロボット共存系における道標を用いた記号的な経路記述の伝達手法, 1997 年度人工知能学会全国大会（第 11 回）論文集, pp.429–432(1997).

[柴田 98a] 柴田 史久, 芦田 昌也, 角所 考, 北橋 忠宏：移動ロボットによる言語的経路指示理解のための記号情報とパターン情報の対応付け, 人工知能学会誌, Vol.13, No.2, pp.221–230(1998).

[柴田 98c] 柴田 史久, 志摩 昌和, 芦田 昌也, 角所 考, 北橋 忠宏：道標認識の曖昧性を考慮した移動ロボットのナビゲーション, 日本ロボット学会誌 （照会中）.

[志摩 97] 志摩 昌和, 北野 泰之, 柴田 史久, 芦田 昌也, 角所 考, 北橋 忠宏：骨格線を用いた交差点認識のための能動的観測計画手法, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.2, pp.581–582(1997).

[嶋田 86] 嶋田 茂, 江尻 正員：日本語インタフェースを有する知識処理型マルチメディア地図情報処理システム GENTLE, 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.12, pp.1162–1173(1986).

[鈴木 98] 鈴木 祥宏, 馬場口 登, 北橋 忠宏：道順伝達のための地図と案内文との表現メディア変換, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU97-272, pp.49–56(1998).

[高瀬 91] 高瀬 國克：電子技術総合研究所における極限作業ロボットの研究開発成果, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5, pp.619–622(1991).

[高野 91] 高野 政晴：極限作業ロボットプロジェクト, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5, pp.614–618(1991).

[谷口 96] 谷口 慶治 編：画像処理工学 基礎編, 共立出版, pp.118–120(1996).

[辻 91] 辻 三郎：環境のパノラマ表現, 電子情報通信学会誌, Vol.74, No.4, pp.354–359(1991).

[出口 96] 出口 光一郎：画像の生成過程を記述する, 情報処理学会誌, Vol.37, No.6, pp.549–556(1996).

[中村 97] 中村 誠, 東条 敏：マルチエージェント・モデルによる共通文法の獲得, 人工知能学会研究会資料 SIG-FAI-9603, pp.30–35(1997).

[西川 94] 西川 和弘, 森 英雄：簡潔な経路情報を基にした移動ロボットの誘導法, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.8, pp.1183–1191(1994).

[西田 95] 西田 豊明：ソフトウェアエージェント, 人工知能学会誌, Vol.10, No.5, pp.704–711(1995).

[野口 93] 野口 正一：高次コミュニケーション, 人工知能学会誌, Vol.8, No.6, pp.725–728(1993).

[馬場口 97] 馬場口 登, 堀江 政彦, 上田 俊弘, 淡 誠一郎, 北橋 忠宏：経路理解支援のための略地図とその案内文の生成システム, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J80-D-II, No.3, pp.791–800(1997).

[早川 91] 早川 卓哉, 渡邉 豊英, 吉田 雄二, 川口 邦雄：市街地地図からの道路ネットワーク情報の抽出, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J74-D-II, No.6, pp.757–765(1991).

[早川 94] 早川 卓哉, 渡辺 豊英, 杉江 昇：仮説の生成・検証パラダイムに基づいた市街地地図からの道路情報抽出, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.1, pp.62–78(1994).

[樋口 93] 樋口 一枝, 戸田 正直：人間–人間コミュニケーションにおけるコンピュータ, 人工知能学会誌, Vol.8, No.6, pp.721–724(1993).

[松島 95] 松島 幹治：オフライン教示, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5, pp.611–614(1995).

[松本 87] 松本 勉, 油田 信一：経路地図に従った移動ロボットの自律走行システム, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.5, pp.351–360(1987).

[松本 96] 松本 裕治, 黒橋 禎夫, 山地 治, 妙木 裕, 長尾 真：日本語形態素解析システム JUMAN version 3.1 使用説明書 (1996).

[松本 97] 松本 吉央, 稲葉 雅幸, 井上 博允：視野画像列を利用した経路表現に基づくナビゲーション, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2, pp.236–242(1997).

[毛利 97] 毛利 隆夫：Nearest Neighbor 法と記憶に基づく推論, 人工知能学会誌, Vol.12, No.2, pp.188–195(1997).

[森 87] 森 英雄, 小谷 信司, 石黒 浩, 安富 敏, 茅野 之雄：構内道路を走行する自律移動ロボット （移動ロボットの一戦略—晴信 4 号機）, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.5, pp.361–374(1987).

[谷内田 89] 谷内田 正彦： 画像処理から画像理解へ, 人工知能学会誌, Vol.4, No.1, pp.5–12(1989).

[谷内田 90] 谷内田 正彦：ロボットビジョン, 昭晃堂, pp.188–193(1990).

[油田 87] 油田 信一：自律移動ロボットにおける知能化技術 (2) ナビゲーションとガイダンス, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.5, pp.403–406(1987).

[Aha 91] David W.Aha, Dennis Kibler and Marc K.Albert : Instance-Based Learning Algorithms, Machine Learning, Vol.6, pp.37–66(1991).

[Asoh 97] Hideaki Asoh, Satoru Hayamizu, Isao Hara, Yoichi Motomura, Shotaro Akaho and Toshihiro Matsui : Socially Embedded Learning of the Office-Conversant Mobile Robot *Jijo-2*, Proceedings of 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vol.2, pp.880–885(1997).

[Barraquand 91] J.Barraquand and J.C.Latombe : Robot Motion Planning : A Distributed Representation Approach, International Journal of Robotics Research, Vol.10, No.6, pp.628–649(1991).

[Dasarathy 91] B.V.Dasarathy : Nearest Neighbor (NN) Norms: NN Pattern Classification Techniques, IEEE Computer Society Press(1991).

[Elfes 89] Alberto Elfes : Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation, IEEE Computer, Vol.22, No.6, pp.46–57(1989).

[Ikeuchi 94] Katsushi Ikeuchi and Takashi Suehiro : Toward an Assembly Plan from Observation Part I : Task Recognition With Polyhedral Ob-

jects, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.10, No.3, pp.368–385(1994).

[Kakusho 95] Koh Kakusho, Tadahiro Kitahashi, Koichi Kondo and Jean-Claude Latombe : Continuous Purposive Sensing and Motion for 2D Map Building, Proceedings 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol.2, pp.1472–1477(1995).

[Kambhampati 86] Subbarao Kambhampati and Larry S. Davis : Multiresolution Path Planning for Mobile Robots, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-2, No.3, pp.135–145(1986).

[Kuniyoshi 94] Yasuo Kuniyoshi, Masayuki Inaba and Hirochika Inoue : Learning by Watching : Extracting Reusable Task Knowledge from Visual Observation of Human Performance, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.10, No.6, pp.799–822(1994).

[Shibata 96b] Fumihisa Shibata, Masaya Ashida, Koh Kakusho, Noboru Babaguchi and Tadahiro Kitahashi : Mobile Robot Navigation by User-friendly Goal Specification, Proceedings 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN'96), pp.439–444(1996).

[Shibata 98b] Fumihisa Shibata, Masakazu Shima, Masaya Ashida, Koh Kakusho and Tadahiro Kitahashi : Agent Navigation under Linguistic Instructions of a Route Using Contextual Information, Proceedings 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.4133–4138(1998).

[Yuan 90] Shu-Yuan Chen and Wen-Hsiang Tsai : A Systematic Approach to Analytic Determination of Camera Parameters by Line Features, Pattern Recognition, Vol.23, No.8, pp.859–877(1990).