NAIST-IS-MT9651013

修士論文

弱い知識構造を用いた人間とロボットとのインタラクションに関する研究

内田 恵久

1998 年 2 月 13 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士 (工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

内田 恵久

指導教官： 西田 豊明 教授
横矢 直和 教授
武田 英明 助教授

弱い知識構造を用いた人間とロボットとのインタラクションに関する研究*

内田 恵久

内容梗概

本研究は、オフィスのような人間のいる環境において、備品のようにその存在場所が変化するものの位置を特定できるようなロボットを実現することである。この目的のために、ロボットがすべてのものの位置を把握するというのは困難である。そこで本研究では、ものの位置に関する人間の知識を利用して場所を探すという方法を用いる。そのものの性質によってどのような人がそれを使用するかという知識は、人間が普段の生活を通して獲得していったものである。このような人間の背景知識を記述する方法として弱い知識構造を用いる方法がある。この知識構造を用いることにより、人間は容易に背景知識をロボットに対して与えることができ、ロボットはものを探す行動の知識とすることができる。本研究では実際に、人間の背景知識をもつロボットを実装し、評価を行なった。ロボットが人間の背景知識を用いることにより、ものの位置の変化に対応することができることを確認した。

キーワード

人間、ロボット、弱い知識、インタラクション、CoMeMo

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT9651013, 1998年2月13日.

Interaction between human and robot using a weak knowledge structure*

Yoshihisa Uchida

Abstract

We realized a robot which can specify a position of an object of which position is not determined. It is difficult for the robot to understand every object's positions. To avoid this difficulty, we search positions by using human knowledge on objects.We have knowledge on objects, in particular, what they are and how they are used through our daily life. Weak knowledge structure is a method to describe human's background knowledge. With this type of knowledge, we can provide easily our background knowledge to the robot, and the robot can use this knowledge to serach an object.We implement the robot which has our background knowledge, and evaluate it. We confermed that the robot could find a position of an object by using human's background knowledge.

Keywords:

human being, robot, weak information, interaction, CoMeMo

*Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9651013, February 13, 1998.

目 次

1 序論 **1**

1.1 はじめに . . . 1

1.2 本研究の目的と方針 . . . 2

1.3 本論文の構成 . . . 2

2 人間とロボットの共存 **4**

2.1 人間と共存するロボット . . . 4

2.2 人間との物理的な共存 . . . 5

2.3 人間と共存するロボットに必要な知識 . . . 6

2.3.1 人間の背景知識 . . . 6

2.3.2 人間の背景知識を持つロボット . . . 7

3 人間とロボットの知識共有 **10**

3.1 人間のもつ知識 . . . 10

3.2 連想構造 . . . 11

3.3 CoMeMo . . . 12

3.3.1 CoMeMo ワークベンチ . . . 12

3.3.2 CoMeMo の情報ベース . . . 14

3.4 実環境で人間の作業を手助けするロボット . . . 14

3.5 ロボットへの適用の際考慮すること . . . 15

4 人間との知識共有により「もの」の位置を把握するロボット **17**

4.1 動作シーケンス . . . 17

4.2 連想構造の検索 . . . 18

4.3 得られた結果の提示 . . . 19

4.4 人間からロボットへの教示 . . . 20

4.5 知識の更新 . . . 21

4.5.1 すでに知識の中に存在するものの場合 . . . 22

4.5.2 知識の中に存在しないものの場合 . . . 22

4.6 人間による新しい状況の追加 23
4.6.1 新たに「もの」を追加する場合 23
4.6.2 「もの」に関連する人を追加する場合 25
4.7 ものを取りにいく動作 26
4.7.1 ものを取りにいくために必要な実世界に関する知識 26
4.8 考察 27

5 研究室内物品獲得ロボットの実現 28
5.1 問題設定 28
5.2 システムに用いたロボット 28
5.3 システムの構成 28
5.4 ロボットが持つ知識 33
5.5 タスクの実行 34
5.5.1 巡回モードの実行 34
5.5.2 作業の実行 34
5.6 考察 36

6 関連研究 43

7 結論と展望 45
7.1 結論 45
7.2 展望 45

謝辞 47

参考文献 48

付録 50

A. 自律移動 50
A.1 自律移動 50
A.1.1 障害物の回避 50

A.1.2 環境内の地図情報 51
A.1.3 環境内の位置同定 52
A.1.4 移動のためのプランニング 52
A.2 本研究で用いた手法 52
A.2.1 Path planner 53
A.2.2 位置補正 54
A.3 自律移動に関する問題点 55
A.3.1 障害物 55
A.3.2 環境地図の経路外への移動 55

B. B21の仕様 **56**

図 目 次

2.1 知識構造の共有 9
3.1 連想構造の例 11
3.2 CoMeMo ワークベンチ 13
3.3 CoMeMo のデータ形式 14
3.4 ロボットのための連想構造 16
3.5 特別な情報を付加した CoMeMo のデータ 16
4.1 人間に頼まれた「もの」を持ってくる作業の実行シーケンス . . . 18
4.2 はじめに持っている知識 21
4.3 更新後の知識（ものが知識の中に存在していた場合） 22
4.4 更新後の知識（ものが知識の中に存在していなかった場合） . . . 23
4.5 更新後の知識（人間が新たに付け加えた例１） 24
4.6 更新後の知識（人間が新たに付け加えた例２） 25
5.1 B21 の概観 29
5.2 システムの構成 30
5.3 ロボットが持つ知識 33
5.4 インターフェース 37
5.5 ロボットからの結果表示例 38
5.6 巡回してスナップショットを撮影するロボット 39
5.7 作業を依頼するユーザ 39
5.8 初期地点にいるロボット 40
5.9 「もの」が存在する場所へ向かうロボット 40
5.10 近くにいる人の協力により「もの」を渡してもらう 41
5.11 「もの」を運搬するロボット 41
5.12 依頼者へ「もの」を渡す 42
1.1 環境地図 53
2.2 B21 のセンサー 56

表 目 次

2.1 B21 の仕様 57

第 1 章

序論

1.1 はじめに

現在実用化されているロボットは、自動車工場の中などで見られるように、産業用のものが大半である。そのようなロボットは、人間がそのロボットのために用意した環境の中で作業を行なうため、想定外の環境の変化を考慮にいれなくても作業を行なうことが可能である。またその作業の内容も決められたものであるため、人間とのインタラクションをそれほど行なわなくても作業をこなすことができる。

しかし将来、ロボットは人間の生活環境の中において人間の作業を支援するようになるだろうと思われる。例えば、お手伝いロボットや介護ロボット、秘書ロボットなどというものが考えられる。このような人間の環境内で作業を行なうロボットを実現するためには、ロボットは環境の変化に柔軟に対応していかなければならない。

人間のいる環境では、人間が活動を行なうことで変化が生じる場合がある。例えば、ある人はいつも仕事が忙しく、その人の机の周りには紙のゴミが散らかっており、反対にある人は几帳面であるので、その人の机の周りは常に片づいているということがあるだろう。このようなゴミの散らかりの程度という環境の状態は、人間によって生じたものである。

このような事実を人間は普段の生活を通して経験として獲得している。ロボットが人間のいる環境において、このような人間の経験、すなわち背景知識を用いて作業を行なうことは有効であると考えられる。

ロボットが人間の知識を利用するためには、何らかの方法でそれを表現しなけ

ればならない。しかし、人間の背景知識はあいまいであり、厳密に定義をすることが困難である。このような知識を表現する手法に、弱い構造を用いた知識表現 [9, 6] がある。本研究ではロボットの知識として、弱い知識構造を用いる。

人間の背景知識を用いたロボットの例として本研究では、人間のいる環境の中で、ものの位置を把握するロボットを実現することを目指している。

1.2 本研究の目的と方針

本研究の目的は、人間のいる環境の中で、ものの位置を把握することのできるロボットを実現することである。具体的には、オフィスのような実環境において、人間が使用したいと思う備品をロボットに持ってきてもらえるようにすることである。

ここで扱う「もの」は、日用品などその存在場所が変化するものである。これ以降同様の意味で「もの」という場合は、かぎ括弧つきで表現する。

「もの」というものは存在場所が変化するものであるが、まったく無規則に変化するものではないと考えられる。たとえば、ある特定の分野の論文集などは、その分野に関連した人に最もよく利用されるだろう。あるいはある人の周りには、その人の趣味に関連したものが集まりやすいだろう。

このような情報は人間が普段生活しているうちに、経験を通して獲得していったものである。本研究ではこのような人間の背景知識を人間とロボットが共有し、ロボットが「もの」を見つけるために利用する。

この人間と共有する知識を記述する方法について考察し、さらにこの知識を用いてロボットが「もの」を見つけるための方法について考察する。

最後に、研究室内という実環境にロボットを導入し、実際にシステムを構築して評価をおこなう。

1.3 本論文の構成

本論文は序論および結論を含め、全 7 章で構成されている。第 2 章では「人間とロボットの共存」では、人間とロボットが共存するために、どのようなことを考慮にいれなければならないかについて述べる。第 3 章から第 5 章までは、実環

境において人間に頼まれたものを持ってくるロボットを実現するために必要なことについて述べている。第 3 章「人間とロボットの知識共有」では人間とロボットが共有する知識がどういうものかについて述べる。第 4 章「人間と知識共有により「もの」の位置を把握するロボット」では、第 3 章で述べた知識を、「もの」の位置を把握するロボットがどのように用いるかについて述べる。第 5 章「研究室内物品獲得ロボットの実現」では、実際にシステムを実装し、この手法の有効性を確認する。第 6 章「関連研究」では、本研究で実現をめざしているような人間と共存するロボットの実現を目的とした、他の同様の研究と本研究とを比較する。最後に第 7 章で結論と将来の展望について述べる。

第 2 章

人間とロボットの共存

2.1 人間と共存するロボット

本研究が実現を目指しているロボットは、人間がいる環境の中で「もの」の位置を把握することのできるロボットである。ここではこのような「人間と共存するロボット」を実現するために必要なことについて考察を行なう。

人間と共存するロボットがこれまでのロボットと異なっている点を明らかにするために、まず産業用ロボットの特徴についてまとめてみると、

- 作業を行なう環境があらかじめロボットのために用意されている
- 作業内容は人間があらかじめ決めたステップをこなせばよい
- 人間とのインタラクションをほとんど必要としない
- ロボットが自律的に移動する必要はない
- 人間の干渉を考慮にいれなくてよい

などがあげられる。次に人間と共存するロボットについて考えてみると、

- 作業を行なう環境は人間のために作られている
- 作業内容は決められたステップで表現できない
- 人間とのインタラクションを必要とする
- ロボットは自律的に移動できなければならない

- 人間の干渉を考慮に入れる必要がある

などのように、産業用ロボットの特徴とはまるで反対になっている。

作業を行なう環境は人間のために作られているため、ロボットは環境の変化を認識していかなければならない。また、人間の行動に制約を加えにくいため、環境の変化に対応するための知識が必要である。

人間の干渉は無視することができない。すなわち、ロボットは人間に対して危険や不快感を与えずに作業を行なう必要がある。

人間と共存するロボットを実現する際、考慮すべき点は以下のようにまとめられる。

- 不特定多数の人間と物理的に共存する
- 環境の変化に対応するための柔軟な知識が必要

2.2 人間との物理的な共存

人間と共存するロボットが産業用のロボットと大きく異なる点の一つは、作業を行なう環境が違うということである。人間がいる環境はロボットのためには作られていない。このような環境が作業用ロボットの環境と違う点は、

- 常に人の往来がある
- 環境内の物の場所が決められていない
- ロボット向けに作られたものは存在しない

等があげられる。ロボットは作業を行なうために自律的に移動できなければならないが、このような点を考慮に入れた方法を用いなければならない。これは自律移動ロボットのナビゲーションの研究として多くの方法が提案されている。

人間と物理的に共存するために、ロボットのハードウェアも高度なものが要求される場合がある。例えば階段を登るための機構が必要であったり、あるいは本棚から本を取り出すような微妙な動作をするマニピュレータが必要になる場合もあるだろう。

しかしこれら全てを解決することが本研究の目的ではない。そこで本研究が仮定している環境をまとめておく。

- 環境内に階段は存在しない
- ロボットが通れるだけの通路が存在する
- 「もの」は特別なハードウェアを用いなくても取れる

実際には、オフィスや研究室のような環境を仮定している。

人間とロボットが共存するために必要である自律移動の方法については、どのような方法であっても本研究の主題に影響を与えるものではないため、付録 A で述べる。

2.3 人間と共存するロボットに必要な知識

2.3.1 人間の背景知識

ロボットが人間のいる環境において作業を行なうためには、環境の変化に対応するための柔軟な知識が必要である。人間のいる環境では、人間が活動を行なうことで環境も変化する。例えば、ある人の机の周りには常にいろいろなものが置いてあるが、別の人はきれい好きで常に机の周りをかたずけている、ということがある。このような事実を人間は、普段の生活を通して経験として持っている。ロボットが人間のいる環境内で作業を行なう場合、このような人間の経験による知識、すなわち人間の持つ背景知識を利用することは有効であろう。

その有効性を考察するために、人間と共存するロボットの例を用いて説明をする。

- オフィスゴミ回収ロボット
  オフィスゴミ回収ロボットなるものを考える。このロボットはオフィスにおいて、定期的にオフィス内に点在するゴミ箱を回収し、まとめてゴミ処分場まで持っていってくれるロボットであるとする。

  人間の背景知識を用いない場合であれば、例えばロボットは毎週定期的にゴミ箱を巡回し、単純にゴミを回収するだけである。この場合、たとえゴ

ミ箱にゴミが入っていない場合でも、反対にごみがあふれている場合でも、ゴミの回収はその時にしか実行されない。

次にロボットが人間の背景知識を持っている場合を考える。ロボットが次のような人間の背景知識を持っているとする。

- A 氏はよくコンビニの弁当を利用する人である
- B 氏はタバコをよく吸う人である
- 来週の水曜日は会社の記念日で特別に休みである
- C 氏は最近体調を崩し、会社を休んでいる

このような知識をもとに、ロボットがゴミの回収を行なうと、A 氏のそばに置いてあるゴミ箱の回収は他の人の側にあるものに比べて回数が多くなるだろう。B 氏の側に置いてあるゴミ箱を回収する場合には、タバコの灰がこぼれでないように、特に慎重にゴミの回収を行なうであろう。C 氏の側に置いてあるゴミ箱の回収はしばらく行なわれないであろう。同様に来週の水曜日の回収も行なわれないであろう。

この例のように、人間の背景知識を用いることにより、ロボットは環境の状況を考慮して作業を行なうことが可能となる。

2.3.2 人間の背景知識を持つロボット

人間の背景知識をロボットに持たせる場合に考慮すべき点について考える。

人間の背景知識は長期的に変化しないものと、比較的短期間で変化するものがある。第 2.3.1節で例としてあげた、オフィスゴミ回収ロボットの場合を考えてみる。このロボットに持たせた人間の背景知識のうちで、A 氏はよくコンビニを利用する、B 氏はタバコをよく吸う、という知識は長期的に変化しないものの例である。来週の水曜日は会社の記念日で特別に休みである、C 氏は最近体調を崩し、会社を休んでいる、という知識は短期間で変化するものの例である。

人間の背景知識に短期間で変化するものがある以上、ロボットにこのような知識を持たせるためには、人間がロボットの知識に変更を加えれる必要がある。こ

のような変更は常に起こりうるので、その手間は容易である必要があり、また人間にとっても理解しやすい形式であることも必要である。

さらにこの知識はロボットが作業を行なうために、容易に利用可能なものである必要がある。

以上のような点を考慮して、本研究では図 2.1のような知識をロボットに持たせることを考えている。図のようにロボットは人間と知識を共有する。この共有する知識は人間の背景知識を記述したものである。

ロボットが行なうことは、人間によって記述された共有知識を用いて、作業を行なうための行動計画に利用することである。またロボットは環境を観察して、その様子を経験として共有知識の中に取り入れる。

人間は共有知識に対して、人間の持つ背景知識を与える。またロボットによって取り入れられた経験を、人間が環境を理解することにより、その経験に対して意味づけを行なう。この意味づけのために、人間は他の知識と結び付けたり、新たに知識を書き加えたりする。

すなわち、ロボットは人間と共通の知識を用いて行動し、環境の変化による知識の更新は人間の判断に基づいて行なわれる。

以下 3 章では、人間の背景知識をもつロボットの例として、人間から頼まれた「 もの 」を持ってくるロボットを考える。そしてどのような構造の知識を持てばよいかについて考察を行なう。

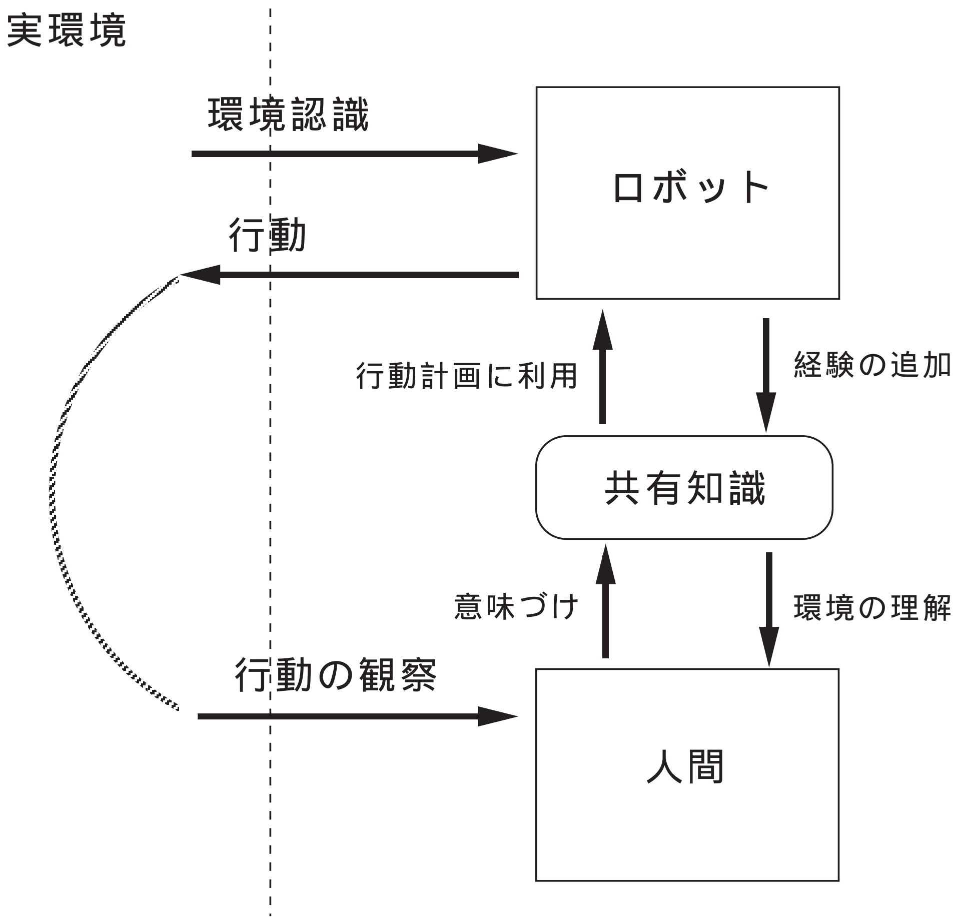

図 2.1　知識構造の共有

第 3 章

人間とロボットの知識共有

前章では、人間の存在する環境の中において作業をするロボットの知識として、人間の背景知識が有効であることを説明した。この章では、人間の環境内で作業を行なうロボットの例として、人間から頼まれた「もの」を持ってくるロボットを取り上げる。そしてこのロボットを実現するために必要な知識構造について考察する。

3.1 人間のもつ知識

実現しようとしているロボットがもつべき知識は、「もの」の存在場所を知るための知識である。その知識はどのようなものであればいいかを考えるために、まず人間がどのような知識を持っているのかについて考察する。つまり、人間が実際に物を探す場合にどのような知識を使っているのかを考察する。

人間が「もの」を探す場合、まず始めにその「もの」が普段置かれている場所を探すであろう。例えばある学会誌を探そうとしたときは、その学会誌が置かれている本棚を見に行く。もしその場所になければ、人間はその「もの」がかつて置かれていた場所を思いだし、その場所を見に行くだろう。さらにそこで見つからなければ、その「もの」に関係のありそうな人の場所を見に行くであろう。例えば、ロボット学会誌を探しているのなら、ロボットの研究に従事している人のところを探すだろう。

このように人間は「もの」を探す場合に、「何らかの関連」を基にして行動している場合が多い。このような情報はたんに関連のみで結び付いているものであって、結びつけられる「もの」として常に決まった種類、形式のものがくるとは限らない。このような知識を記述するためには、この「何らかの関連」をうまく表

現する必要がある。

3.2 連想構造

このような目的にあった知識を表現する方法として、連想構造 [9, 6] を用いる方法がある。連想構造とは、述語論理における意味的関係の定義や、人間向きの構造化文書における章や節のような物理的階層構造などを用いず、概念と概念との間の関係の有無のみを用いた知識表現である。

連想構造は key と呼ばれるいくつかのユニットと value と呼ばれるいくつかのユニットの間に定義され、「key が与えられると value が想起される」というゆるやかな関連を表す。key と value の間の連想関係は厳密に定義されるのではなく、多分に主観的なものであることを許している。すなわち、表現の意味を漠然としか定義せず、表現の意味解釈を書き手と受け手にまかせてしまおうというアプローチをとっている。連想構造の例を図 3.1に示す。

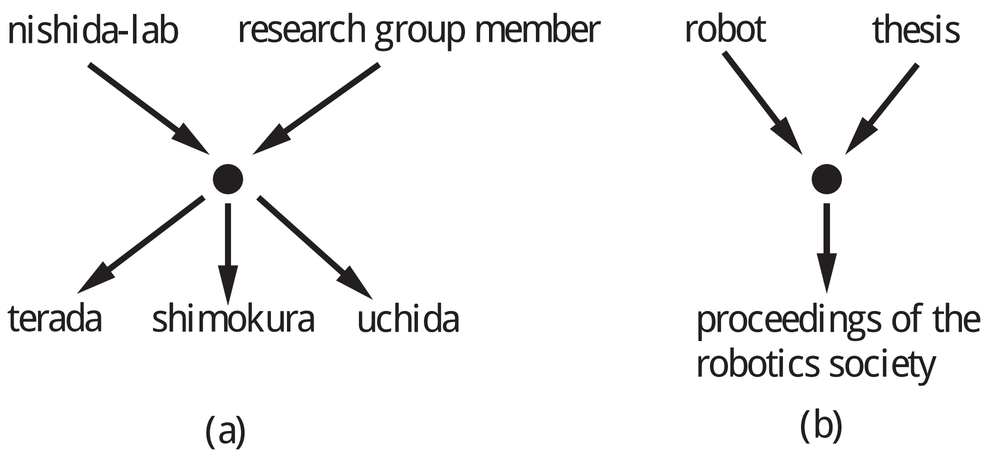

図 3.1 連想構造の例

図3.1(a) は、key「nishida-lab」「research group member」が与えられると value「terada」「shimokura」「uchida」が想起されることを示す。図3.1(b) は key「robot」「thesis」が与えられると value「proceedings of the robotics society」が想起さ

れることを示す。

3.3 CoMeMo

本研究では、この連想構造を用いて人間とロボットの知識の共有を行なう。連想構造で表現される情報ベースを入力、蓄積するシステムとして CoMeMo[12] を使用する。CoMeMo のシステムにはさまざまな要素のものを含んでいるが、本研究ではこのシステムの中で特に CoMeMo ワークベンチのみを使用する。

3.3.1 CoMeMo ワークベンチ

CoMeMo ワークベンチは連想構造の編集、検索、ブラウジングを支援するためのものであり、これを用いて人間は知識を記述し、ロボットはこれによって生成されたデータを使用する。CoMeMo ワークベンチの画面を図 3.2に示す。CoMeMo ワークベンチは Common Lisp で記述され、GUI には gcl/tk を使用している。以下では、情報の入力について簡単に説明する [10]。

情報の入力　概念ユニットの入力と連想構造の生成方法について

1. 概念ユニットの入力
   (a) 概念名をキーボード入力する
2. 連想構造の生成
   (a) キーにしたいユニットをマウスで選択する
   (b) メニューバー上の「編集」メニューから「キーとしてバインド」を選択すると、点と矢印が表示される
   (c) バリューにしたいユニットと、全前項の点をマウスで選択する
   (d) メニューバー上の「編集」メニューから「バリューとしてバインド」を選択する

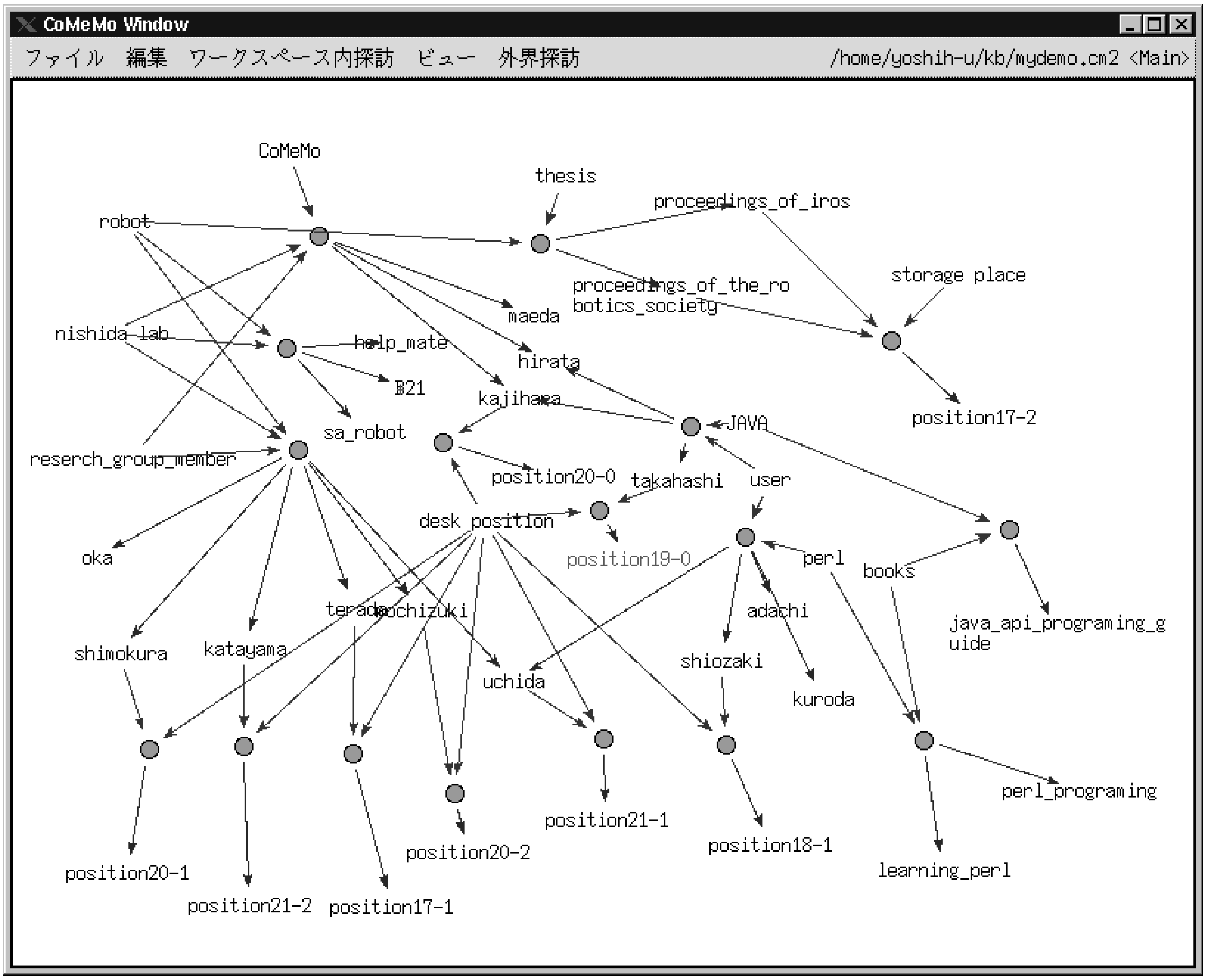

図 3.2 CoMeMo ワークベンチ

3.3.2 CoMeMo の情報ベース

CoMeMo の情報ベースはユニットと呼ばれる構成要素からなる。図 3.2は第 3.3.1節で述べた方法で、ロボットが「もの」を探す際に有効な人間の背景知識を表現した例である。

概念（コンセプト）ユニットは情報ベースで用いられる概念を表すユニットであり、連想構造の key、value がこれに相当する。

塗りつぶした丸いアイコン（●）とそこへ出入りしている有向矢印で表されたユニットが、概念間の連想関係を表す連想関係ユニットである。

実際のデータは Lisp の s 式で記述される。図 3.1(b) を実際のデータ形式で書くと図 3.3のようになる。

(unit-1 (type concept)(label "robot"))
(unit-2 (type concept)(label "thesis"))
(unit-3 (type concept)(label "proceedings of robotics society"))
(unit-4 (type association)(label "a4")(keys unit-1 unit-2)(values unit-3))

図 3.3 CoMeMo のデータ形式

3.4 実環境で人間の作業を手助けするロボット

実環境で人間の作業を手助けするロボットの例として、本研究では「オフィスのような実環境において、人間から頼まれた「もの」を持ってくることができるロボット」を考えている。ここでいう「もの」とは、ホッチキス等の備品、雑誌、書籍、など人間によってその使用場所が変化するもののことをいう。

このロボットは人間の協力を必要とする。ロボットはその「もの」が存在する場所の候補を人間に示す。この候補の発見は共有知識を探索することで得られる。その候補のなかから、その「もの」が存在する場所の判断は人間にまかせる。その判断により、ロボットはその場所へ移動して、その「もの」を取ってくるか、あるいはその「もの」が存在しないことを確認できる。

ロボットは共有知識を増加させるために行動して、「もの」の情報を獲得する。

ここで「もの」の情報としては、必要な場所の静止画像の獲得であり、これを得るため、ロボットは定期的に経路を巡回する。

人間は必要なものが写っている画像を指示すること、及びその画像を発見する途上で見た画像の内容を教示することで、共有知識の中に取り込まれたロボットの経験を意味づけする。

3.5 ロボットへの適用の際考慮すること

連想構造を用いた知識表現では、表現の意味解釈を書き手と受け手にまかせるというアプローチを採用していた。本研究では書き手にあたるのは人間であるが、受け手にあたるのはロボットである。ロボットは連想構造で表現された知識を解釈するための背景知識、手段というものをもっていない。したがって、ロボットが連想構造で記述された知識の中から必要とする情報を得るなんらかの工夫が必要となる。

まず連想構造の記述の方法に、ある程度のルールを決めておく。人間が検索の対象にしそうなもの、例えば本などを連想構造の中に書いた場合、そのものと「収納場所 (storage positon)」を key、そのものが置かれている場所を value として、連想構造を記述することにする。図 3.4(a) にその例を示す。

また、人間の名前を記述した場合にも、その人が普段使っている机の場所を連想構造に書き入れる。この場合、key はその人の名前と「机の場所 (desk positon)」、value は机のある場所とする。図 3.4(b) にその例を示す。

連想構造の検索を容易にするために、本研究では CoMeMo ワークベンチによって作られた情報ベースに特別な情報を付加する。ロボットが必要なものは、探している「もの」の名前、その「もの」が置かれている場所、そして人間の名前である。人間の名前は、「もの」をそれに関連する人から探す場合に用いられる。図 3.3のデータを例にすると、これらのデータに図 3.5のような情報を付け加える。このように、探しているものに対しては、(is-a missing-item) というリストを追加しておく。同様に、人間に対しては (is-a human)、場所に対しては (is-a position) というリストを追加する。すなわち、ロボットに必要なユニットには IS-A 情報を持たせておく。ロボットが「もの」の場所を見つけるために連想構造を検索す

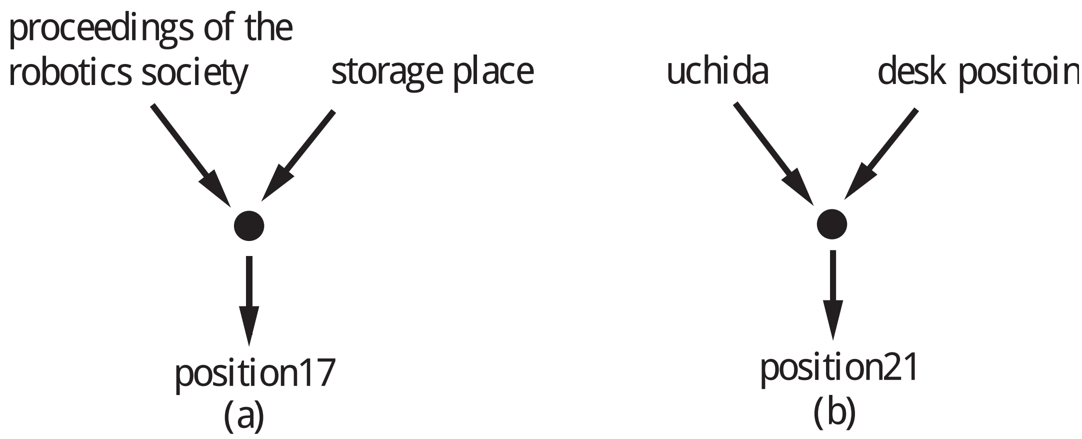

図 3.4　ロボットのための連想構造

る場合、IS-A 構造を持つユニットのクラスを頼りにして検索を行なう。

(unit-1 (type concept)(label “robot”))

(unit-2 (type concept)(label “thesis”))

(unit-3 (type concept)(label “proceedings of robotics society”)(is-a missing-item))

(unit-4 (type association)(label “a4”)(keys unit-1 unit-2)(values unit-3))

図 3.5　特別な情報を付加した CoMeMo のデータ

第 4 章

人間との知識共有により「もの」の位置を把握するロボット

CoMeMo ワークベンチを用いて記述された人間の背景知識は、ロボットが「もの」の存在場所を把握するための知識として用いられる。ロボットはこの知識をどのように検索して、「もの」の存在場所を知るのかについて考案する必要がある。また、常に変化する環境の状況に対処するため、すでに持っている知識を更新していく必要がある。また、人間はロボットに対して新しい環境の状況を教える必要もある。この章では、ロボットがこの知識を用いて、人間に頼まれた「もの」を持ってくる作業を行なう手順について最初に述べる。そして人間から教えられた知識をどのような方法で検索を行なうのか、また知識がどのように更新されていくのかについて述べる。

4.1 動作シーケンス

タスクの一連の流れは以下の通りである。なお、この実行手順を図にしたものを図 4.1に示す。

1. ユーザがユーザインタフェースから目的の「もの」の名称を入力する（図 4.1の１）
2. 知識データを検索して、その「もの」が置かれている候補地のスナップショットをユーザインタフェースに出力する（図 4.1の３）
3. ユーザはそのスナップショットを見て、自分が入力したものが写っているスナップショットを選択する（図 4.1の４, ５）

4. ロボットはその「もの」が置かれている場所へ移動し、その「もの」をユーザのもとへ持っていく

手順 2 で検索に用いる知識データは、前章で説明したようにすでに人間によって作成されているものとする。

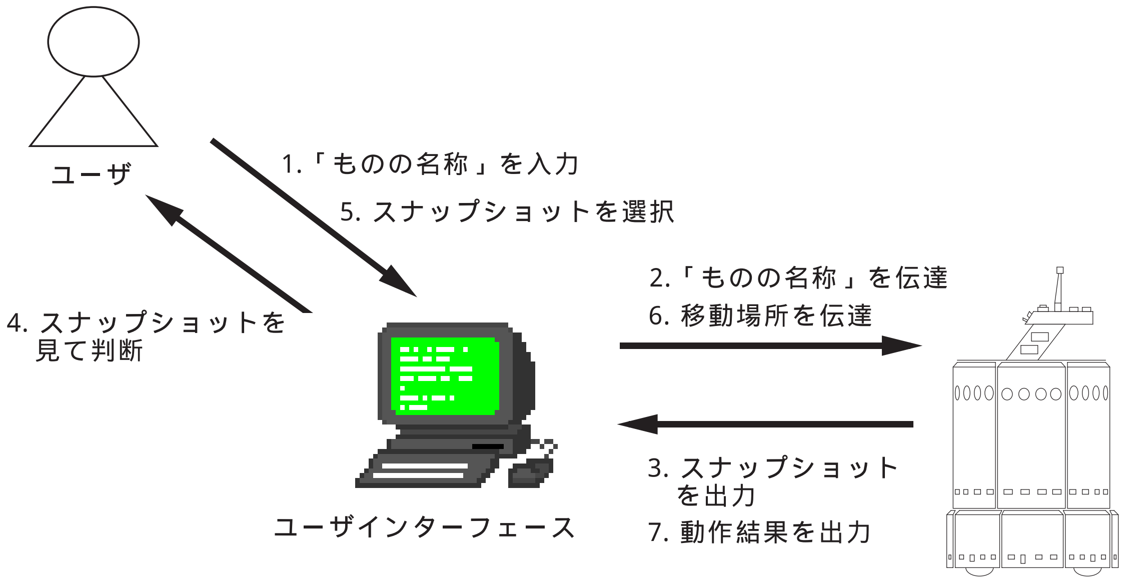

図 4.1 人間に頼まれた「もの」を持ってくる作業の実行シーケンス

4.2 連想構造の検索

ユーザからユーザインタフェースを通して「もの」の名前が与えられると、ロボットはまずその「もの」が知識の中に存在するかを確認する。このとき、ユニット内の IS-A 情報、(is-a missing-item) を頼りにして全てのデータを検索する。見つかれば、その「もの」が置かれている場所の候補を検索する。ここでの検索は、検索の目的が CoMeMo ワークベンチの目的とはことなるため、CoMeMo の検索機能は用いない。実際に検索を行なうときは、CoMeMo ワークベンチから生成されたデータを直接用いて行なわれる。

第 3.1節で述べたような、人間が行なう検索手順をここでも実現したい。すなわち、まず最初にその「もの」が通常置かれているであろう場所を第一の候補とし、その「もの」を普段利用しそうな人の場所を第 2 の候補とする。その「もの」を普段利用する人が多数いる場合は、その人数分だけ第 2 の候補が存在することになる。

そこで検索の手順は以下のようになる。

1. ユーザインタフェースから与えられた名前の「もの」をユニットの中から探す
2. そのユニットが存在すれば、まずそのユニットの近傍で場所という IS-A 情報をもつユニットを探す。存在しない場合はステップ 4 へ飛ぶ。
3. それを存在場所の第一候補とする。
4. 次に人間という IS-A 情報をもつものを探す。
5. みつかればそのユニット（IS-A 情報が人間であるユニット）の近傍で、場所という IS-A 情報をもつユニットを探す。その場所を存在場所の第 2 の候補として付け加える。

検索の戦略は、探したい「もの」のユニットを出発点とした幅優先探索を用いる。これは、探したい「もの」の場所というのは、その「もの」と関連が強いので、そのもののユニットからなるべく近くのユニットにあると仮定しているからである。

4.3 得られた結果の提示

検索の結果、その「もの」が存在しそうな候補地が得られる。このあとユーザが、これらの候補地の中から、その「もの」がある場所を指定する。したがって、ロボットは人間がその場所を探しやすい方法で、これらの候補地を示さなければならない。

その方法の一つとして、「もの」が存在する場所のスナップショットを表示する、という方法を用いる。「もの」が存在する場所の候補が複数存在する場合には、その「もの」が存在する可能性の最も高いスナップショットから順番に並べて表示する。これによりユーザは、探している「もの」が撮影されている可能性の高いスナップショットから、その「もの」があるかどうかを調べることが可能となる。

スナップショットに撮影されているものが環境の変化により、実際と対応しなくなってしまうのを防ぐために、更新しなければならない。そこでロボットは定期的にスナップショットを撮影するために環境内を巡回するようにする。撮影されたスナップショットには撮影時間、撮影場所を情報として記録しておく。この一連の動作をロボットの巡回モードと呼ぶことにする。

検索の結果として場所の候補が得られたとき、ロボットは今までに蓄えられたスナップショットの中から、その場所で撮影されたものに該当するものを提示する。さらに、同じ場所で異なった時間に撮影されたスナップショットも存在するので、それ以前に撮影されたものも表示する。過去に撮影されたものを表示することによって、ユーザは時間の流れをおって、「もの」の存在場所を類推することも可能となる。

4.4 人間からロボットへの教示

人間はスナップショットを見て撮影されているものを認識できるが、本研究ではロボットは画像からの「もの」の認識を行なっていないため、人間が撮影されている「もの」をロボットに対して教えてやる必要がある。これを教え込みモードと呼ぶことにする。

ユーザインタフェースを通してロボットは人間にスナップショットを表示するが、このときに人間からそのスナップショットには何が撮影されているかを教えてもらえるようにする。この際に、探しているものに関わらずに、そのスナップショットに撮影されている「もの」の名前を教えてもらえるようにしておく。もしその名前が探しているものの名前であれば、候補地の優先順位に影響を与える。新しい名前であれば、別の機会の検索時にその名前のものが入力された場合に検

索可能となる。

4.5 知識の更新

このように人間とのインタラクションを通じて、ロボットは現在持っている知識を更新し、次回の検索に役立てられる。具体的には、既存の「もの」のユニットと場所のユニットを、新たに関連づけることである。あるいは、新しい名前のものと、そのスナップショットとを関連づけることである。実際の例を示して、知識の更新の手順を説明する。

図 4.2のような知識をはじめにロボットが持っていたとする。これはロボットと人間が共有している知識の一部分を取り出したものである。ここには、我々の研究室でロボットの研究をしている人の名前と、ロボットの論文が連想構造を用いて記述されている。またその人の机の位置と、論文が普段置かれている場所とが、それぞれ記述されている。

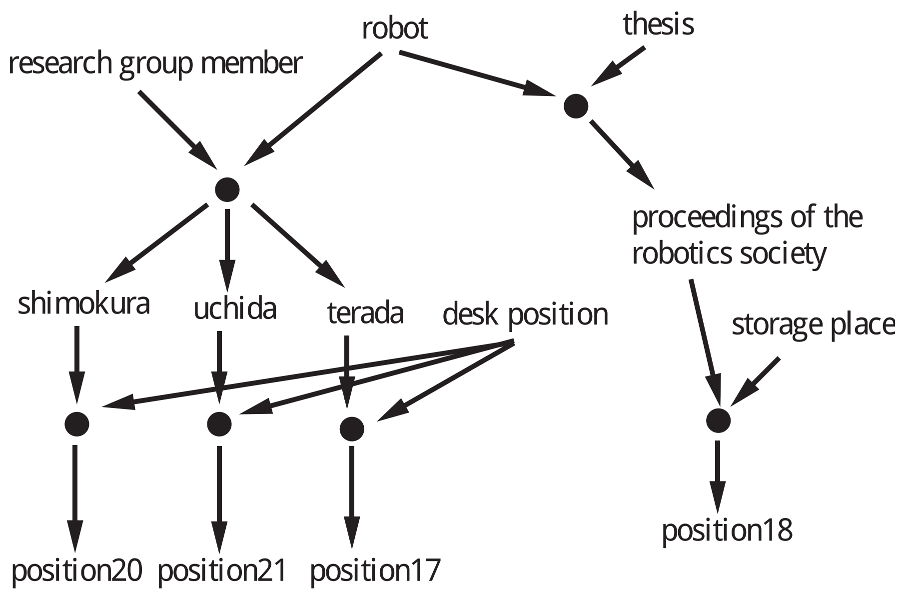

図 4.2 はじめに持っている知識

4.5.1 すでに知識の中に存在するものの場合

人間から教えられたことは、「“terada” という人の机の上には”proceedings of the robotics society” があった」というものであり、”proceedings of the robotics society” はすでに知識の中に存在していたとする。ただし、実際に人間がロボットに教える方法は、”proceedings of the robotics society” が撮影されているスナップショットにその名前を入力するだけである。この場合、図 4.3のようにその名前とスナップショットが撮影された場所とを直接リンクで結ぶ。さらにその場所へのリンクのキーとして、そのスナップショットが撮影された時間も関連づけておく。更新後のデータは図 4.3のようになる。

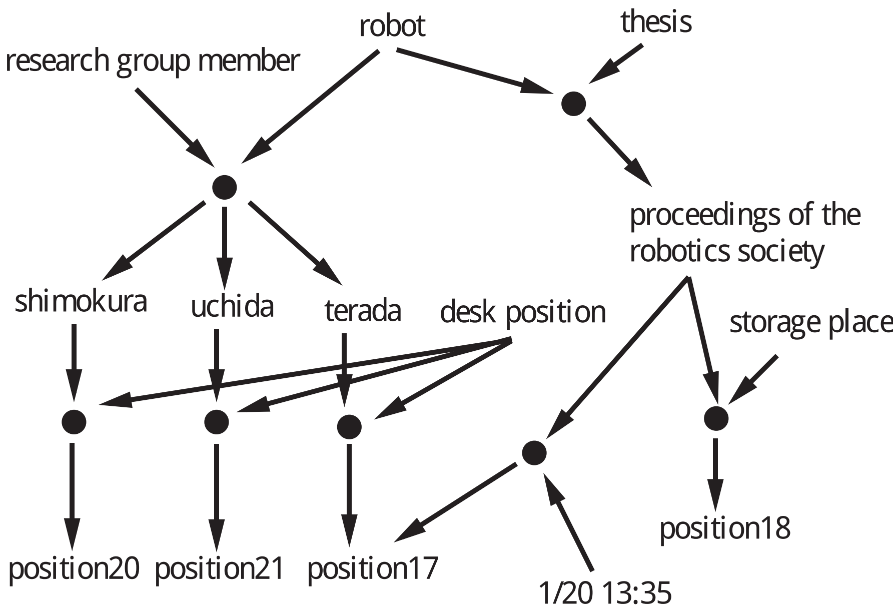

図 4.3 更新後の知識（ものが知識の中に存在していた場合）

4.5.2 知識の中に存在しないものの場合

もし入力された名前のものが、すでに持っている知識の中にない場合、図 4.4 のようにその新しい名前と場所とをリンクで結ぶ。時間も同様に関連づけをして

おく。ここでは、新しいものとして"dictionary" が与えられた例を示している。

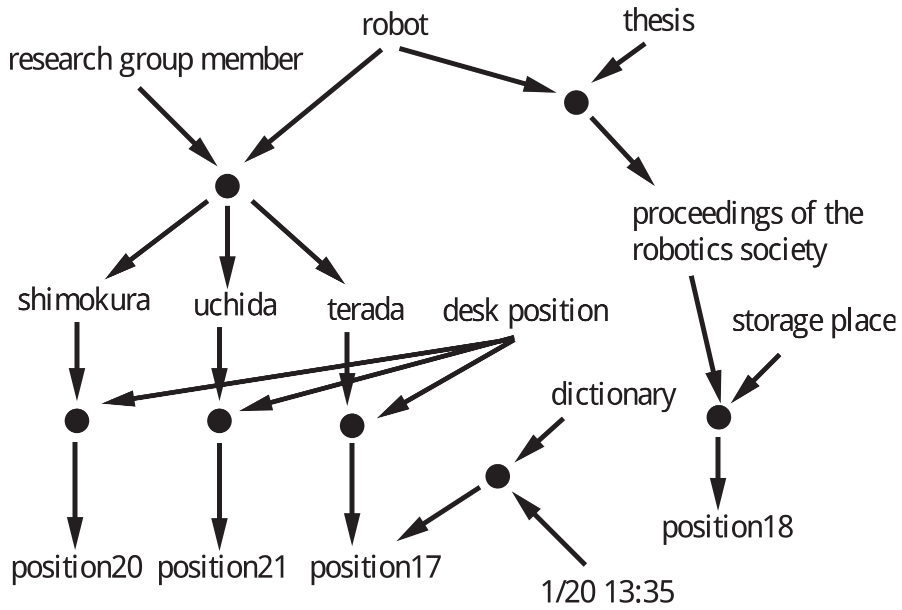

図 4.4　更新後の知識（ものが知識の中に存在していなかった場合）

4.6 人間による新しい状況の追加

ここでは人間が直接共通知識の書き換えを行なうことについて考察する。これは新たな状況が人間によって確認された場合に行なわれる。例えば、これまで知識の中になかった「もの」を新たに付け加えたい場合や、これまでにあった「もの」に新たに関連のある人がいた場合がある。まずはじめに新たに「もの」を追加する場合について考察し、その後、「もの」に関連する新しい人がいた場合について考察する。

4.6.1 新たに「もの」を追加する場合

初めに図 4.2のような知識構造を持っていたとする。ここで新たに"Bee Soft manual" というロボットのマニュアルを知識に追加することを考える。図 4.5は

このマニュアルを新たに知識として追加した例である。

これは西田研究室のロボットには B21 というロボットがあり、そのロボットのマニュアルは"Bee soft manual" であるということを、筆者の背景知識を用いて記述したものである。

このように知識を追加することにより、次回に"Bee soft manual" がロボットの作業対象となっても、それを見つけ出すことが可能となる。リンクを辿れば、このマニュアルもロボットの研究に従事している人の机に存在する可能性がある、ということが分かるようになる。

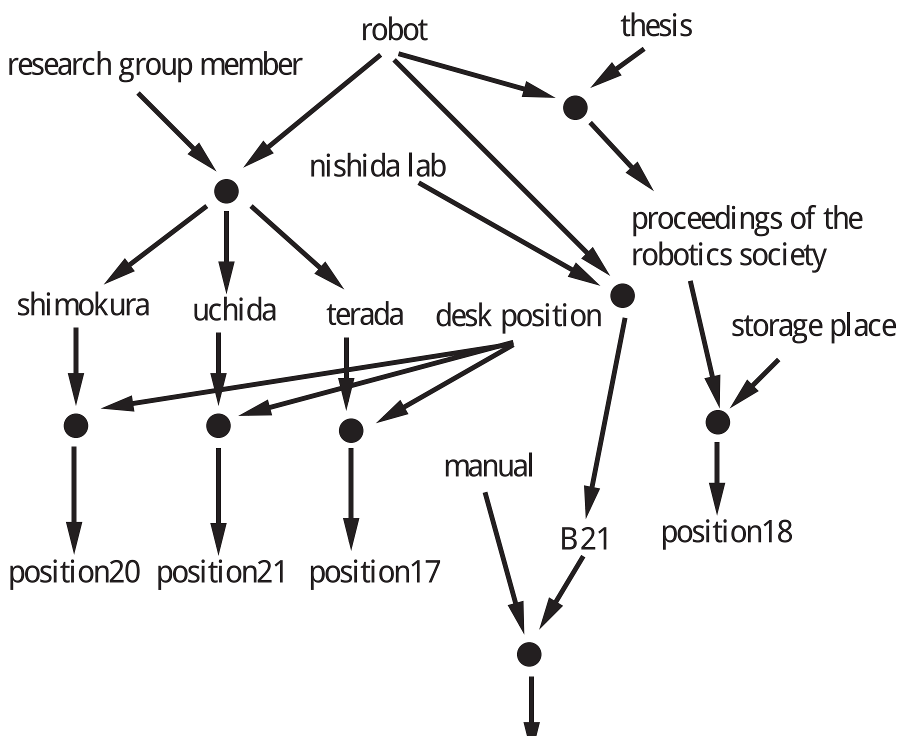

図 4.5 更新後の知識（人間が新たに付け加えた例１）

4.6.2 「もの」に関連する人を追加する場合

同様に、初めは図 4.2のような知識構造を持っていたとする。ここで新たにロボットの研究には従事していない人が"proceedings of the robotics society" を使用していたという事実を付け加えたい。その人はたまたま、ロボット学会の本部がある場所の近くの知人の家に遊びに行く予定で、その学会誌に載っている地図を利用しただけであったとする。

図のように知識を付け加えると、今後"proceedings of the robotics society" が検索の対象となった場合、あらたに付け加えられた人（この例の場合では"maeda"）も検索の結果の対象になりうる。

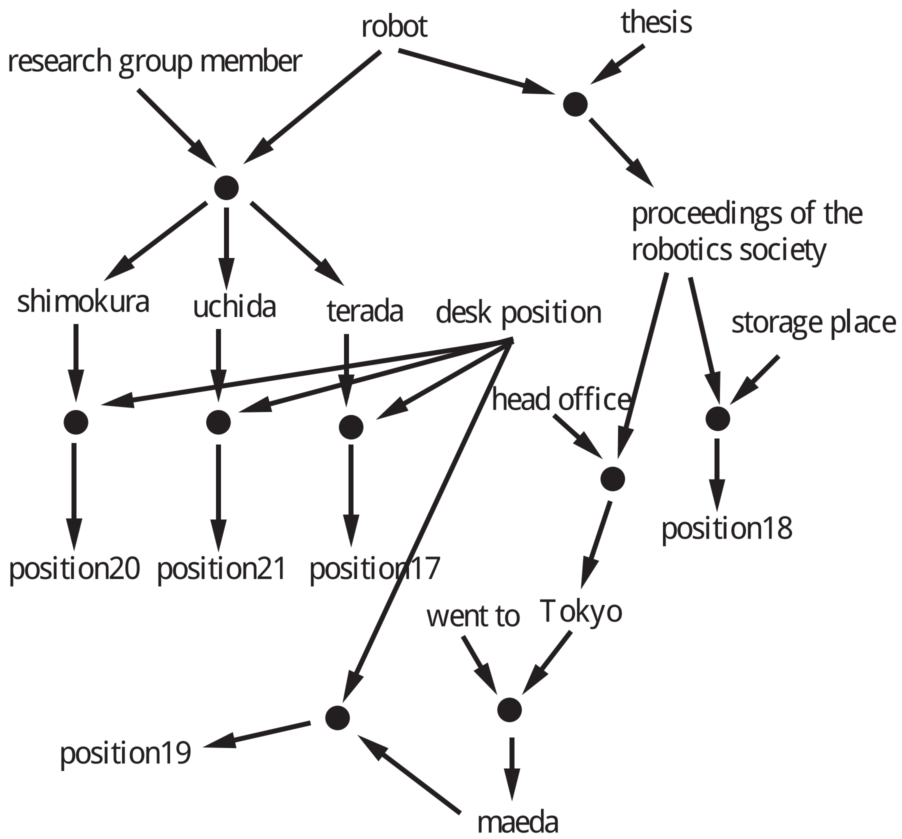

図 4.6 更新後の知識（人間が新たに付け加えた例２）

4.7 ものを取りにいく動作

人間はロボットから提示されたスナップショットを見て、そこに自分の探していた「もの」が撮影されていた場合、ロボットにその「もの」を取りに行くように依頼する。ロボットはそのスナップショットが撮影された場所へ移動し、その「もの」を持って再び依頼者の元へと移動する。ただし、実際にロボットが「もの」をその場所で見つけてアームを使って取るというのは困難であるため、その場所の近くにいる人に依頼してその「もの」をロボットに乗せてもらうようにする。人間に依頼する方法として、音声を用いた方法を使う。「もの」の名前を言って、ロボットに乗せてくれるように、音声で近くにいる人に依頼を行なう。さらにユーザが後で確認できるようにするため、その場所のスナップショットを撮影する。

タスクを依頼した人はロボットが帰ってきてから、その「もの」を受けとる。ここで「もの」がなかった場合はそこには「もの」がなかったとし、ロボットにそのことを新たな知識として教える。その場所に人がいなくて「もの」を載せてもらえなかったこともありうるので、ロボットがその場所へ移動したときに撮影したスナップショットを見てそのことも確認する。

4.7.1 ものを取りにいくために必要な実世界に関する知識

ロボットは人間から「もの」を取りにいくよう命令されたあと、その依頼者のもとへその「もの」を持っていく必要がある。ここで、ロボットはその依頼者の場所を知っていなければならない。

第4章においては、環境の変化、具体的には「もの」の移動を扱うために、ロボットが用いる知識として、人間の背景知識について述べた。しかし依頼者の場所は連想構造を用いなくともよい。本研究ではロボットと人間のインターフェースとして WWW ブラウザを使用しているが、この WWW ブラウザの使用される位置は長期的には変化しない。それは、WWW ブラウザが起動されるワークステーションや PC の位置は、本体の入れ換えでもない限り変化しないからである。このように、長期的に変化が少ないものは連想構造を用いずにに、ロボットに知識を持たせる。

具体的に本研究では、PC やワークステーションのホスト名とそのホストが置かれている場所にもっとも近い環境地図上のポイントとを、一対一に対応づけた表をロボットに持たせてある。

4.8 考察

本システムではものがあるかどうかの判断を人間にまかせている。この判断の部分に画像処理などを用いれば、ロボットにも判断させることが可能であるかもしれない。

「もの」が置かれている場所に移動してものを取る場合にも、その場所の近くにいる人に対して音声を用いて、その「もの」を取ってもらうという方法を用いている。人間の使用する「もの」は、必ずしもロボットが取りやすいように置かれてはいない。したがって、ロボットにとって困難な作業は人間の協力もある程度はやむをえないであろう。

第5章

研究室内物品獲得ロボットの実現

本章では、前章までに述べたシステムをわれわれの研究室内において実装し、動作の確認を行なった結果について述べる。

5.1 問題設定

人間と共有の知識をもち、インタラクションによって知識の更新がなされ、それがうまく反映されるかを確認するために、以下のシナリオを考えた。

「研究室内のある人が、ロボット学会誌を見たくなり、ロボットにそれを取ってきてもらう。さらに後日、別の人がロボット学会誌を参照したくなり、ロボットにそれを取ってきてもらう。」

5.2 システムに用いたロボット

このシステムで用いるロボットは、アメリカの Real World Interface (RWI) 社製の B21 という移動ロボットである。図 5.1にこのロボットの概観を示す。このロボットは、カメラをその上部に 2 台マウントしており、ロボット内部に格納式のアームを所有している。またロボットの周りに超音波センサー、赤外線センサー、衝突センサーを持っている。ロボットを制御するための計算機として、CPU に Pentium Pro を使用したボードを 2 枚持っており、OS は Linux を使用している。ロボット制御のソフトウェアは、RWI 社の BeeSoft というものを使用している。詳細を付録 Bに示す。

5.3 システムの構成

図 5.2にシステムの構成を示す。

図 5.1 B21 の概観

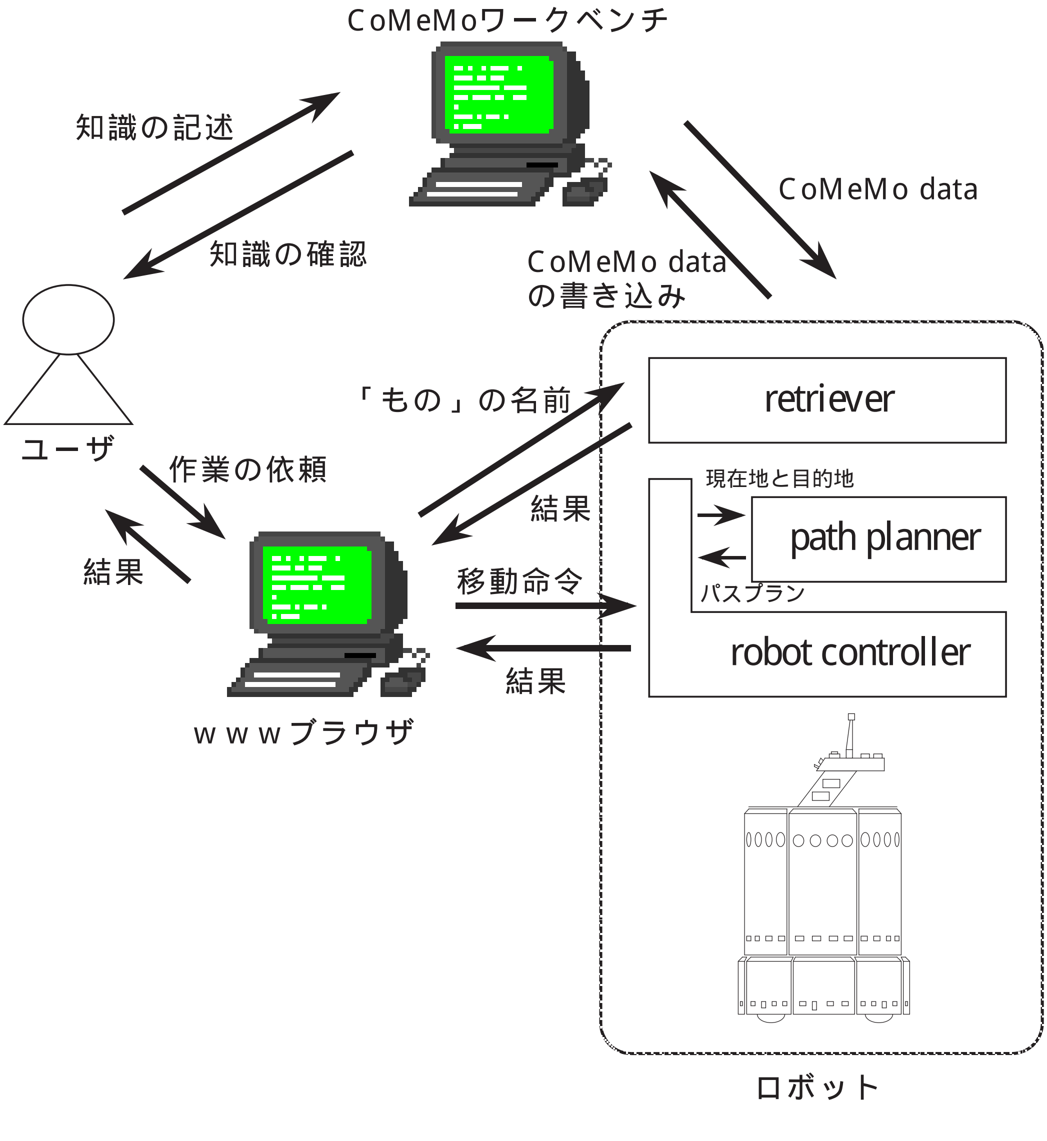
CoMeMoワークベンチ
知識の記述
知識の確認
CoMeMo data
CoMeMo data
の書き込み
ユーザ
「もの」の名前
retriever
作業の依頼
現在地と目的地
結果
path planner
結果
移動命令
パスプラン
robot controller
結果
wwwブラウザ
ロボット

図 5.2 システムの構成

- インタフェース
ロボットへのインタフェースには、WWW のブラウザを使用する。図 5.4 はロボットに巡回をさせたり、探したい「もの」の名前を入力するための画面である。図 5.5はロボットからの結果の表示例である。このインタフェースを用いて人間は、探したい「もの」の名前の入力、ロボットからのスナップショットの閲覧、ロボットにスナップショットに撮影されている「もの」を教える、などの作業を行なう。

  スナップショットには撮影された場所、時間も表示させてある。スナップショットの上にある入力フォームは、そのスナップショットに撮影されている「もの」の名前をユーザに入力してもらうためのものである。また、そのスナップショットに実際には撮影されていなくても、人間がその場所へあるものを移動させた場合には、その「もの」の名前を入力することにより、ロボットの知識を更新させることができる。スナップショットの下のボタンは、そのスナップショットが撮影された場所までロボットを移動させ、探していた「もの」を持ってきてもらうためのものである。ボタンを押したときに探している「もの」の名前も同時に送られ、音声で「もの」を取ってもらうときに用いられる。

- ロボット
ロボットは、retriever、robot controller、path planner の 3 つのモジュールからなる。

  - retriever
  retriever は、CoMeMo で記述した人間の背景知識を検索するためのモジュールである。Common-Lisp を用いて記述されている。WWW のブラウザから探したい「もの」の名前が伝えられると知識データを検索し、その結果を WWW ブラウザへ返す。

  - robot controller
  robot controller はロボットを実際に動かすためのモジュールで、C 言語で記述されている。WWW ブラウザから robot controller に対して

送られてくるのは、ある場所への移動命令、作業実行命令、巡回命令である。

巡回命令が送られた場合、ただちに決められた経路に従ってロボットを自律的に移動させる。ロボットがスナップショットを撮影すべきポイントに到着したときは、そのポイントでスナップショットを撮影させる。

移動命令、作業実行命令であった場合は、移動すべき場所も www ブラウザから同時に送られてくる。これらの場所の情報を path planner に渡し、目的の場所までの経路を path planner から得る。その経路にそってロボットを自律的に移動させる。

– path planner

研究室内の 2 点間を最短距離で移動するための経路を求めるためのモジュールである。robot controller から現在の場所と目的の場所が渡されると、出力として最短の経路を robot controller に渡す。アルゴリズムは dijkstra のアルゴリズム（付録 B 参照）を用いており、C 言語で記述されている。研究室内でロボットが移動する経路として表現したグラフの規模は小さいので、計算時間はほとんどかからない。robot controller との通信には socket 通信を用いている。

なお、ロボットに搭載されている計算機上の OS の制約から、retriever のみロボット上の計算機を用いずに、別の計算機上で実現している。

- CoMeMo ワークベンチ

ユーザは CoMeMo ワークベンチを用いてこれまでの知識にはない事実を追加したり削除したりすることができる。ロボットは CoMeMo ワークベンチから生成されるデータを用いて行動をおこなう。また、データの書き換えも行なう。

5.4 ロボットが持つ知識

図 5.3に CoMeMo ワークベンチを用いて、筆者が持っている研究室に関する背景知識を記述したものを示す。われわれの研究室にある研究グループとそのグループに所属している人の名前などを連想されるままに書いたものである。ただし第 3.5節で述べたように、ロボットがこのデータを検索できなければならないので、「もの」の保存場所、人間の机の場所には IS-A 情報を付け加えておく。また、この中には検索の対象となりうる論文、参考書の名称もデータの中に含ませた。

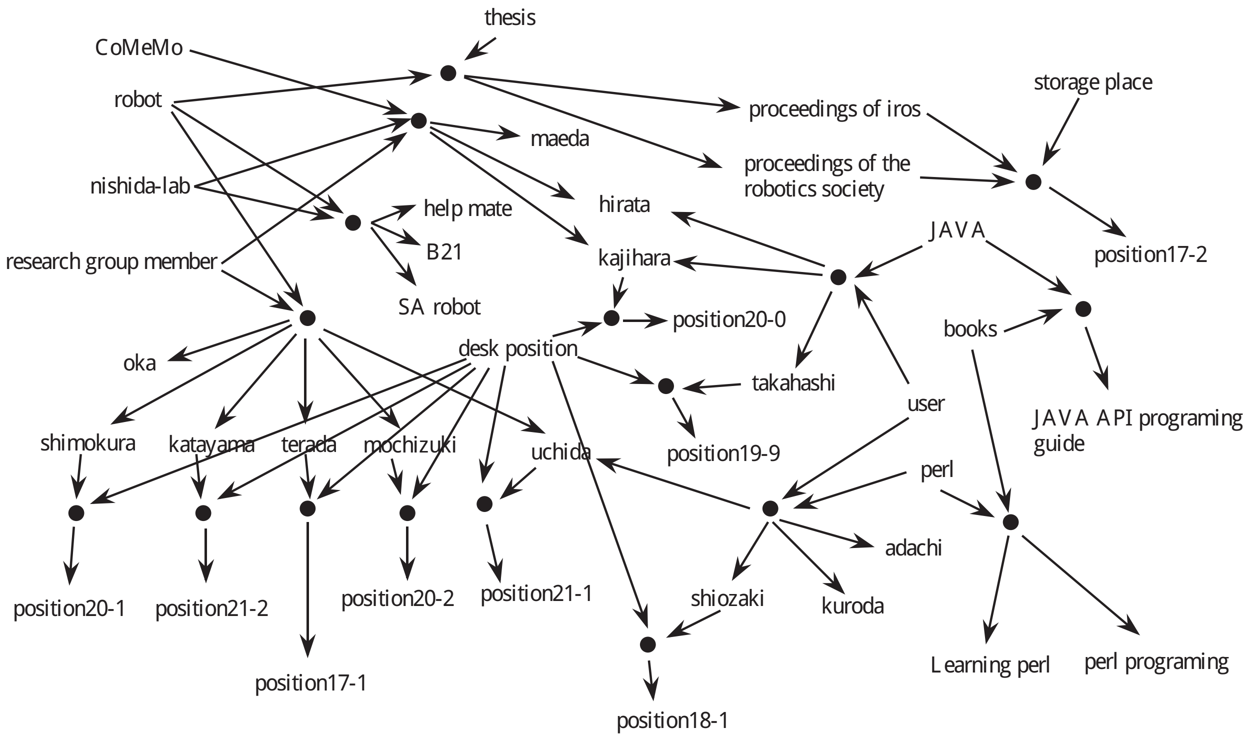

図 5.3 ロボットが持つ知識

5.5 タスクの実行

5.5.1 巡回モードの実行

ユーザに「もの」のある場所の候補として見せるスナップショットを準備するため、まず初めに巡回モードでロボットに研究室のあらかじめ指定しておいたすべての場所のスナップショットを撮影させた。

5.5.2 作業の実行

作業の一例を示す。

はじめにある人(Ａ氏)がロボットに関する論文を見つけたいと思い、CoMeMo ワークベンチ上で"robot" と"thesis" をキーとして検索をかける。検索の結果 "proceedings of iros" と"proceedings of the robotics society" が得られる。Ａ氏は"proceedings of the robotics society" を見たいと思い、その論文が置かれている場所をロボットに尋ねたる。以下それを手順の通りに示す。

1. WWW ブラウザを使い(図 5.4参照)、ロボットに"proceedings of the robotics society" がどこにあるのかを尋ねる。

2. ロボットは"proceedings of the robotics society" を自分の知識データの中に含んでいるので、retriever を使ってそれがどこに存在するかを尋ね、その結果を WWW ブラウザに返しす。それを図 5.5に示す。

3. Ａ氏は示された結果を見て、その論文が撮影されているものを探す。その論文が普段置かれている場所には撮影されておらず、たまたまＢ氏の机の上に置かれているのが撮影されている。

4. Ａ氏はロボットに対して、B 氏の机の所へ移動してその論文を持ってくるように依頼する。

5. ロボットはＢ氏の机の場所へ移動し、その場所で近くにいる人に対して "proceedings of the robotics society" を載せてくれるように音声を用いて要求する。

6. 近くにいた人はロボットにその論文集を載せる。そしてロボットはＡ氏の場所へその論文集を持っていくことができる。

7. Ａ氏は現在自分の手元にその論文集があるので、そのことをロボットに対して教えておく。

次に別のＣ氏が同じようにして"proceedings of the robotics society" を探したいと思ったとする。その結果を以下に示す。

1. ロボットは定期的に研究室を巡回するので、最新のスナップショットを持っているとする。

2. WWW ブラウザを使い、ロボットに"proceedings of the robotics society" がどこにあるのかを尋ねる。

3. ロボットは自分の知識を検索して結果を返すが、今度はＡ氏の机のスナップショットを第一の候補として表示する。

4. Ｃ氏はその結果を見て最初からＡ氏の机の上にあることが分かり、ロボットにそれを取ってきてもらう。

5. ロボットはそれをＣ氏のもとへ持っていく。

図 5.6から図 5.12まで、実際にロボットが作業を行なっている様子を示す。図 5.6はロボットが定期的に研究室内を巡回してスナップショットを撮影しているところである。図 5.7はユーザが WWW ブラウザを用いて作業を依頼しているところである。

人間からの依頼により、ロボットは移動を開始する。図 5.8はロボットが初期位置にいる状態である。この状態からロボットは移動を開始し、目的の場所へ移動する。図 5.9は移動中の様子を示したものである。

目的の場所へ到達したあと、ロボットは音声を用いて近くの人に「もの」を取ってもらうように依頼する。近くにいる人はロボットにその「もの」を載せてあげる。この様子を示しているのが、図 5.10である。

ロボットはそれを自分の上に載せたまま、作業を依頼した人の場所まで持っていく（図 5.11参照）。依頼した人のところに到着して、上に乗っているものを取ってもらう（図 5.12）。

5.6 考察

「もの」の位置の推定に人間の背景知識を用いることにより、その「もの」が存在する場所をある程度特定することができることを、実際にシステムを実装することによって確認することができた。さらに、人間から外界の変化を教えてもらうことにより、次回からはその「もの」が存在する場所をより早く見つけ出すことが可能であることも確認できた。

ただし、人間から新たに知識を教えてもらう部分としてスナップショットの上の入力フォームしか作らなかったことによる欠点がある。スナップショットは、ある「もの」が存在する候補として扱われたもののみが、結果として表示される。すなわち、ロボットに「もの」の場所に関する知識を新たに教えようとした場合、教えられる場所はその候補として挙がったものだけに限定されてしまう。それ以外の場所に「もの」があることを教えることができなくなっている。システムを実装する際、場所に限定せずに教えることができるインタフェースを用意しておくべきであった。システムを実装する際に、このことを考慮すべきであった。

現在実現しているシステムでは、人間から教えられた知識はいままでの知識に追加するのみである。よって、過去に教えられた知識はそのまま残ってしまう。ものの位置は時間が経過すれば変化するものであるので、過去に教えられた知識は変更していかなければならない。現在はその部分を人間が CoMeMo ワークベ

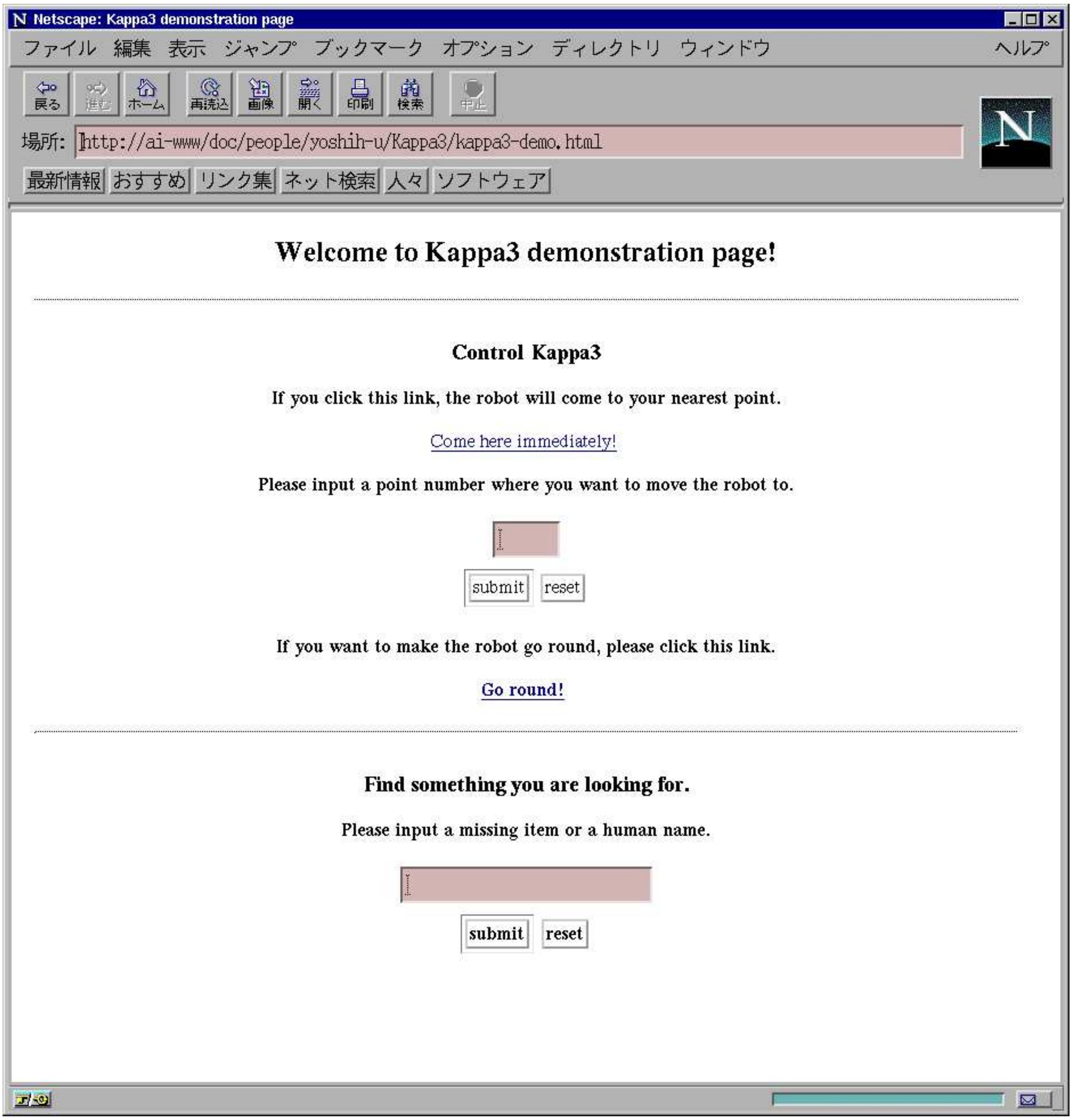

図 5.4 インターフェース

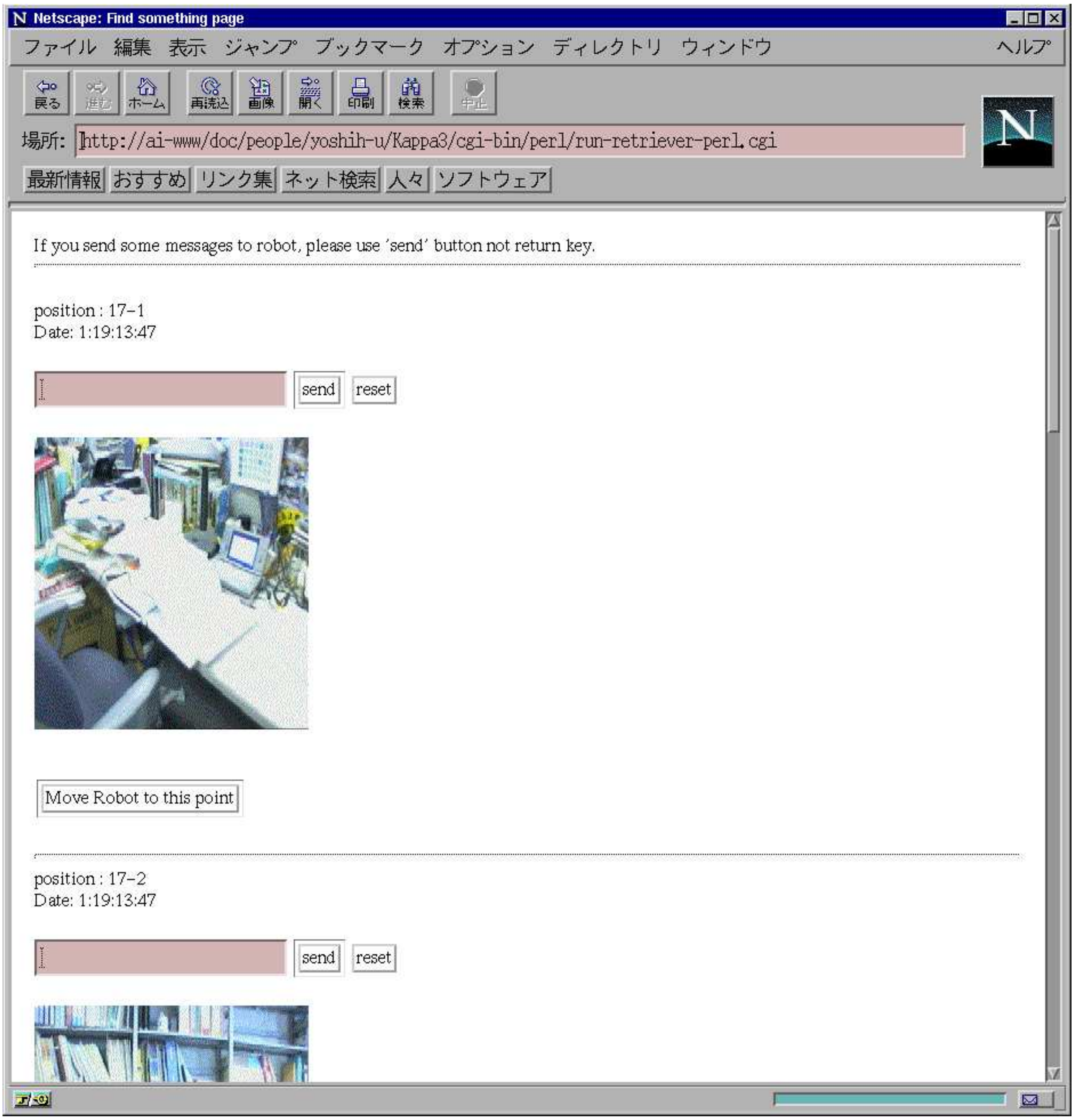

図 5.5 ロボットからの結果表示例

図 5.6 巡回してスナップショットを撮影するロボット

図 5.7 作業を依頼するユーザ

図 5.8　初期地点にいるロボット

図 5.9　「もの」が存在する場所へ向かうロボット

図 5.10 近くにいる人の協力により「もの」を渡してもらう

図 5.11 「もの」を運搬するロボット

図 5.12 依頼者へ「もの」を渡す

ンチを用いて行なうことを仮定しているが、ロボットが時間を考慮して知識を書き換えるようにすれば、さらに人間の負担が減るだろう。

第 6 章

関連研究

この章では、本研究で実現したような人間の存在する環境のなかで作業を行なうロボットの実現を目的とした、他の同様の研究について紹介する。

- 所内事情通ロボット [1, 11, 2]

  電子技術総合研究所が、「所内事情通ロボット計画」として、研究所の建物の内部を自由に移動して、情報収集、案内等を行なう、「自律移動型 能動対話的環境理解エージェント」の構築を行なっているものである。

  このロボットは環境地図として、戸口の前、交差点、などの接続関係を記述したネットワークを用いている。この地図を頼りにロボットは移動し、戸口の前などで停止する。ロボットがその場所に関する情報を持っていない場合は、近くにいる人に対して、この場所はどういう場所であるのかを対話を用いて獲得する。このような学習を繰り返すことにより、環境の様子を知るようになるシステムである。

  この研究は環境の状況を獲得するために、対話を用いているところが本研究と大きくことなっている。ただ、移動環境が廊下を想定しているため、本研究のように実際にオフィスの中に持ち込んだ場合に、うまく移動できるかどうか疑問がある。

- Mops, オフィスのような環境におけるメール分配システム [13]

  Swiss Federal Institute of Technology の Institute of Robotics において開発された、メール分配システムである。このシステムが研究の対象としているのは、衝突の回避、ロバストなナビゲーション、位置の更新、位置の制御、建物の構造物とロボットのやりとり、等ロボットが物理的に人間と共存するために必要な要素についてである。

このロボットは環境地図に本研究に似たようなグラフを用いている。しかし本研究とは異なり、経路上に存在する障害物をセンサーを用いて検出し、それを回避する。実際の行動は、センサー情報、実際の位置、ゴール位置などの状況に応じて、生成する方法を用いている。

この研究で提案されている方法を、本研究に適応することにより、ロバストなシステムを実現できるであろう。

第 7 章

結論と展望

7.1 結論

本研究の目的は、オフィスのような人間のいる環境において、備品のようにその存在場所が変化する「もの」の位置を特定できるロボットを実現することであった。ロボットが全ての「もの」の位置を把握するのは困難であるので、「もの」の位置に関する人間の知識を共有することによって、「もの」の位置を把握する方法を第 2 章において提案した。これは、「もの」の位置というものはそのものによっておおむね使用する人が同じである、という仮定に基づいている。第 3 章では、ロボットが実際に人間のいる環境の中で活動するために必要なことについて考察した。第 4 章では、人間の知識を記述するための方法を考察し、その記述方法として連想構造を用いた記述を採用した。第 5 章においては、ロボットがその知識を検索する方法について述べ、さらに人間がロボットに新たな知識を教えてやることにより、つねに「もの」の位置の変化に対応できることを述べた。第 6 章では実際のシステムについて説明した。あるものを探す場合、ロボットは人間と共通の知識を用いてそのものが存在する場所の候補を絞り、実際にそのものを見つけ出すことができた。さらに人間から新たな知識を教えてもらうことにより、より早くそのものを見つけだすことが可能であることも確認できた。

7.2 展望

本研究では、人間の背景知識を用いたロボットとして、人間から頼まれた「もの」を持ってくるロボットを実現した。このロボットは人間の背景知識、すなわち連想構造で記述された知識を用いて作業を行なう場合、ロボットの推論機構に

相当する部分は、パス探索を行なうだけという簡単なもので実現できた。

しかし、ロボットにより複雑な作業をさせようとすると、複雑な推論機構が必要になるであろう。本研究は人間の存在する環境のなかで作業をするロボットを実現するための、一つの道筋を示したといえるだろう。

謝辞

主指導教官である西田豊明教授には、様々な面で御指導を頂きました。また、ロボットを対象とした研究に携わる機会をつくって頂きました。ここに深く感謝致します。

横矢直和教授には、忙しい中、本研究の副指導教官になって頂きました。ここに深く感謝致します。

武田英明助教授には、研究の方向性や内容について多くの御助言を頂きました。また、本論文をまとめるにあたり、適切な御指導と御助言を頂きました。ここに深く感謝致します。

上野敦志助手には、本研究を進めるにあたり、御助言を頂きました。また、本論文をまとめるにあたり、適切な御指導と御助言を頂きました。ここに深く感謝致します。

久米出助手には、研究会を通じて様々な意見を頂きました。ここに深く感謝致します。

博士課程 1 年の寺田和憲氏には、本研究を進めるにあたり、御指導と御助言を頂きました。また、研究会を通じて様々な意見を頂きました。ここに深く感謝致します。

博士課程 1 年の岡孝明氏には、研究会を通じて様々な意見を頂きました。ここに深く感謝致します。

修士課程 2 年の下倉雅之氏には、研究会を通じて様々な意見を頂きました。ここに深く感謝致します。

修士課程 1 年の片山顕正氏、望月恒治氏にはロボットの環境設定等を手伝って頂きました。ここに深く感謝致します。

研究室の皆様方には、公私にわたりお世話になりました。ここに深く感謝致します。

最後に、研究室での活動を支えて頂きました小布施文代秘書に厚く御礼申し上げます。

参考文献

[1] 麻生英樹, 本村陽一, 松井俊浩, 速水悟, 原功. 対話ベース学習によるオフィス環境での自律ロボットナビ ゲーション. 人工知能学会研究会,AI シンポジウム'95, 1995.

[2] H.Asho et.al. Acquiring a probabilistic map with dialogue-based learning. In *Proc. of ROBOLEARN-96*, 1996.

[3] 麻生英樹. 情報統合 -課題と展望-. 人工知能学会誌 Vol.11 No.2, pp. 185–192, 1996.

[4] W.Burgard D.Fox and S.Thrun. Controlling synchro-drive robots with the dynamic window approach to collision avoidance. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1996.

[5] W.Burgard D.Fox and S.Thrun. The dynamic window approach to collision avoidance. In *IEEE Robotics and Automation*, 1996.

[6] 花川賢治. 日常記憶の弱構造化に関する研究. 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 修士論文, 1995.

[7] 石畑清. 岩波ソフトウェア科学 3 アルゴリズムとデータ構造.

[8] Alexander Zelinsky David Jung. Whisker based mobile robot navigation. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 497–504, 1996.

[9] 前田晴美, 糀谷和人, 西田豊明. 既存の雑多な情報を統合するための連想構造の提案. 情報処理学会研究報告 96-FI-42, pp. 1–8, 1996.

[10] 前田晴美. 日常記憶の共有支援に関する研究. 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 博士論文, 1998.

[11] 松井 俊浩他. 学習型所内事情通ロボットの計画. 日本ロボット学会大会, 1995.

[12] 西田豊明, 前田晴美, 平田高志. 日常記憶の共有によるコミュニティインタラクション支援 を目指して-CoMeMo. システム/制御/情報 Vol.41, No.8, pp. 303–308, 1997.

[13] Tschichod-Gurman S.J.Vestli. Mops,a system for mail distribution in office type buildings. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 489–496, 1996.

[14] Arono Bucken Sebastian Thrun. Integrating grid-based and topological maps for mobile robot navigation. In *National Conference on Artificial Intelligence*, 1996.

付録

A. 自律移動

本研究の目的を達成するためには、ロボットは実世界において実際に行動できなければならない。自律移動の方法はこれまでに数多くの手法が提案されており、その中のどの手法を用いても本研究で述べてきたこととは、直接の関係はない。よりよい手法を用いることにより、実環境においてロバストに作業を行なうことができる。

ここでは、ロボットが人間のいる環境内を行動する方法について述べ、本研究で用いた手法について述べる。

A.1 自律移動

ロボットが人間のいる環境の中で作業を行なう場合、ロボットは自律的に環境内を移動できなければならない。このために考慮すべき点として、

- 障害物の回避ができるか
- 作業環境内の地図情報をもっているか
- 環境内のどこにいるのかを知っているか
- 地図情報をもとに、移動のためのプランニングができるか

などがあげられる。

A.1.1 障害物の回避

ロボットが実環境内を移動するためには、障害物に衝突するようなことがあってはならない。そのため、ロボットはセンサーを用いて障害物を検知し、それを避ける行動ができなければならない。センサーとしては、おもに超音波センサーや赤外線センサーが使用される。このようなセンサーを用いて障害物を回避する方法として Fox らの手法 [4, 5] などがある。

センサーとして、昆虫の触覚のようなセンサーを用いた方法 [8] も提案されている。あるいはカメラを用いて画像処理を行なって障害物を見つけ出す方法も数多く提案されている。

A.1.2 環境内の地図情報

ロボットが実環境内で作業を行なうためには、ロボットが移動できる場所、すなわち移動できる経路を持っている必要がある。これは環境地図と呼ばれる場合もある。この環境地図をロボット自ら獲得する方法と、あらかじめ人間が与えてしまう方法とがある。

ロボットが自ら獲得する方法は、ロボットを環境内のある位置に置き、そこからロボットは各種センサーを用いて障害物や壁を避けながら移動する。ロボットは移動した道筋を記憶しておき、それを環境地図とする。

環境地図としてこれまでに提案されたもののなかで、代表的なものをあげる。[3]

1. 自己状態：$x, y,$ 絶対座標、向きθ
   状態遷移：絶対座標での速度 $v,$ 角速度 a
   線路記述：$v(t), a(t)$ あるいは $x(t), y(t), \theta(t)$

2. 自己状態：空間分割グリッド
   状態遷移：分割グリッド間の移動
   線路記述：上、右、上、上、...

3. 自己状態：分岐点などの特徴的なポイント
   状態遷移：特徴的ポイント間の移動
   線路記述：右、左、左、...

4. 自己状態：ランドマークの見え方
   状態遷移：ランドマークの見え方の変化
   線路記述：ランドマークの見え方の系列記述

環境地図をロボットが生成する例として、Thrun の手法 [14] などがある。

A.1.3 環境内の位置同定

ロボットは環境地図に基づいて移動してなんらかの作業を行なうが、環境地図上のロボットの位置と実環境でのロボットの位置は同じものでなければならない。

環境地図上にロボットの初期位置を決めていない場合は、まず初めにロボットは環境地図上のどこにいるのかを知る必要がある。ロボットは各種センサーを用いて現在の周りの状況を調べ、それを環境地図の中で一致する部分を見つけ出し、現在の場所を推定するという方法が取られる。

環境地図上に初期位置を決めている場合でも、環境地図上の位置と実環境での位置とが一致しているかどうかを、ロボットは確認する必要がある。

A.1.4 移動のためのプランニング

環境地図に基づいてロボットが環境内を移動するとき、ロボットは現在の場所から目的の場所までどのような経路を通って移動するべきかを知る必要がある。

例えば第 A.1.2節で述べた例 2 の場合であれば、現在の場所から「右、左、左、右、左」のように移動すれば目的の場所に行ける、という経路を生成できる必要がある。もし目的の場所まで至る経路が複数ある場合には、最も最短のもとを選択すべきだろう。あるいは、障害物によってある経路が塞がれている場合には、新たに別の経路を生成できなければならない。

A.2 本研究で用いた手法

ここでは以上で述べた点を考慮に入れて、本研究で用いた手法について述べる。

本研究ではロボットの自律移動のために、第 A.1.2節で述べた例 1 の方法を用いる。

図 1.1にロボットが自律移動に用いる研究室内の環境地図を示す。この図で破線の丸で示されたものはロボットが停止できるポイントで、そのポイント間を結んだ線はロボットが移動する経路を表している。実際にロボットが持っているものはこのような全体の地図ではなく、地図上にしめされた各ポイント間の相対的な情報だけである。すなわち図に示されている机や壁などの障害物の位置に関し

ての情報を、ロボットは全く持っていない。

それぞれのポイントには異なった番号が付けられており、隣接ポイントまでの距離と方向を情報として持っている。ポイント間の移動には、この距離と方向の情報をもとに移動を行なう。

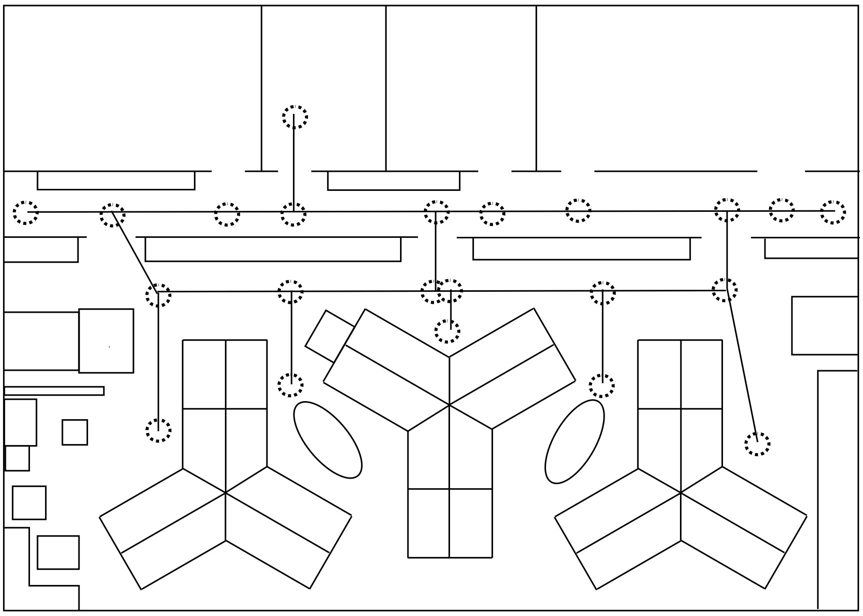

図 1.1 環境地図

A.2.1 Path planner

第 A.1.4で述べたように、ロボットが現在いる場所からどこか別の場所へ移動しようとしたとき、環境地図を用いてその目的の場所までの経路を求める必要がある。

図 1.1のようにポイント間を線で結んだものは、グラフとしてとらえることができる。グラフには、あるポイントから別のポイントへ至る経路が複数存在する場合がある。従って、そのような場合は最短の経路を用いる方がよい。グラフ上で最短の経路を求めるアルゴリズムはこれまでに数多く提案されている。[7]

Path plannner はロボットが移動するための経路を求めるためのものである。

- 機能
  環境地図上で現在ロボットがいるポイントと、ロボットが目的とする場所のポイントを、path planner への入力とする。path planner は入力を受けとると、目的とするポイントまで最短距離で移動する際の経路上のポイントを出力する。

- 実現方法
  path planner が実行することは、グラフの中から最短経路を求める問題と等価である。この問題を解くための効率の良いアルゴリズムとして、**Dijkstra** のアルゴリズム [7] が知られている。path planner はこの **Dijkstra** のアルゴリズムを用いて、現在ロボットがいるポイントから目的のポイントまで、最短経路で移動するために通過すべきポイントを求めている。

A.2.2 位置補正

環境地図上のあるポイントから隣のポイントまでの移動に、ロボットはエンコーダを用いて移動している。しかし、第 A.1.3節で述べたように、移動距離が増えるにしたがい、エンコーダの誤差が段々と積もっていき、あらかじめ指定したおいたポイントからずれた位置に停止してしまうようになる。

このことに対処するために、ロボットはある特定のポイントに到着したときに、位置の補正を行なうようにする。その手順は以下の通りである。

1. 補正を行なうすべてのポイントについて、あらかじめロボットの超音波センサーを用いて、ロボットからある方向の壁までの距離を測定しておく。距離の正確性を確保するため、測定は数回行ない、その平均値を取る。これを正確な距離とする。

2. ロボットが実際に移動する段階において、補正すべきポイントに到着したとき、超音波センサーを用いて補正すべき方向の距離を測定する。この測定には、その方向を向いている超音波センサーを複数個使用する。

3. 得られたデータと最初のステップで得られた正確な距離データとを比較する。前ステップで得られたデータは、測定に用いたセンサーの数だけ存在す

るが、これらの中で正確な距離データの値に最も近いものを測定値とする。

4. 測定値と最初のステップで得られた正確な距離データとの差を求める。

5. その誤差の分だけロボットをその方向に移動させる。

補正を行なうべきポイントとしては、ポイントの横に壁があるなど、超音波センサーを使って距離を測定してもそれほど誤差が生じない場所を選んだ。

A.3 自律移動に関する問題点

人間がいる環境の中でロボットを自律的に動かすのは大変困難なことである。自律移動の部分だけでも一つの大きな研究分野となっている。本研究では自律移動の部分に関してはロバストに設計されていない。そこでここではさらに考察すべき点について述べ、今後の課題とする。

A.3.1 障害物

人間が中心となっている環境では、さまざまな障害物が存在する。そのような障害物がロボットの経路上に置かれていることも十分に起こりうる。したがってロボットは障害物を避けて移動できるものでなければならない。また人間に危害を加えてしまうことのないように、人間を避けて移動できるものでなければならない。

A.3.2 環境地図の経路外への移動

あらかじめ決められた経路のみしか移動できないのでは、さらに進んだ作業を行なおうとした場合に問題となる。例えば机の上に物を置きたい場合に、さらに机に接近する必要が生じる場合があるだろう。そこで決められた経路を多少外れても移動できるものでなければならない。

B．B21 の仕様

図 2.2に B21 のセンサーの配置を示す。また表 2.1に B21 の仕様を示す。

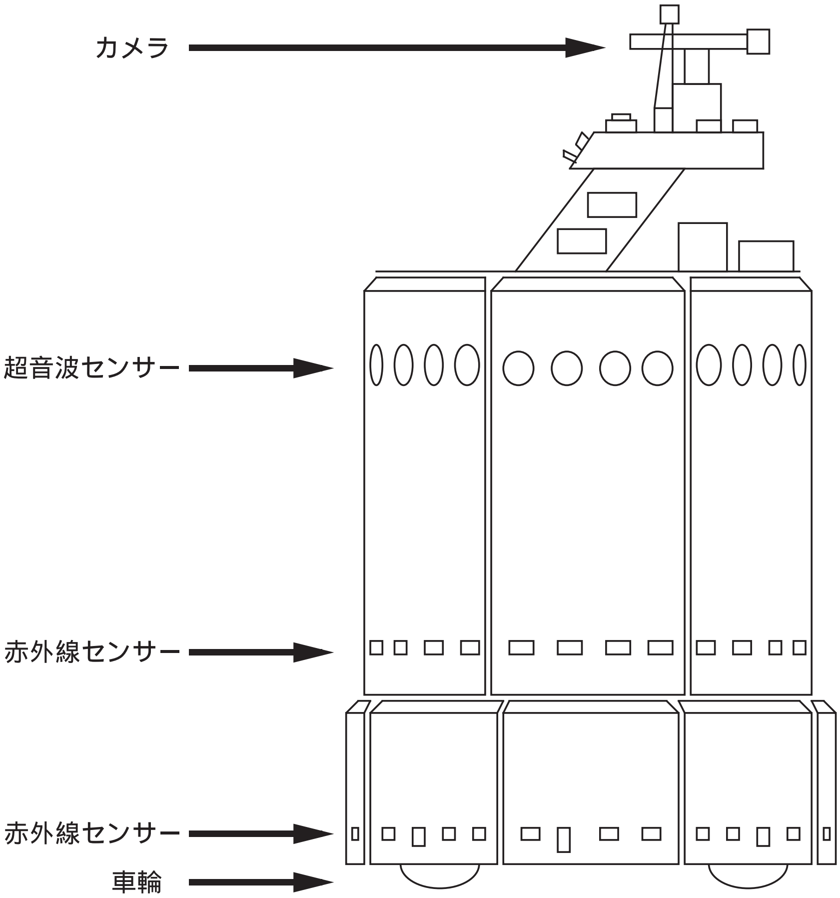

図 2.2　B21 のセンサー

表 2.1　B21 の仕様

赤外線センサー	56 個（ベース部分：32 個うち 8 個は下向き、エンクロージャー部：24 個）
超音波センサー	24 個（12cm～8m まで有効）
衝突センサー	本体の周囲に 56 個
CPU	Pentium Pro（ロボット内部に 2 個）
通信	High speed serial / Ethernet
ネットワーク	Onboard 10baseT and 10base2
バッテリー	4 バッテリー、1440W-hr total
バッテリー持続時間	6 時間
モーター	4 high torque,48V DC servo motors
ドライブ	4-wheel synchronous
ステアリング	4-wheel steering
Translate Speed	90 cm/s
Rotate Speed	167 deg/s
Rotate Resolution	.35°
Translate Resolution	1 mm
直径	52.5 cm
高さ	106 cm
車輪直径	11.186 cm
床面からの高さ	2.54 cm
重さ	122.5 kg