The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化
Author(s)	梅谷, 智弘
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1001
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

工学 9963

添付型記憶媒体を用いた
物体と環境の情報化

梅谷 智弘

大阪大学大学院基礎工学研究科
システム人間系専攻システム科学分野

２００４年１月

添付型記憶媒体を用いた
物体と環境の情報化

梅谷 智弘

２００４年１月

論文要旨

近い将来，我々人間が活動する環境で，複数のロボットが様々なサービスを提供することが期待されている．また，建設作業環境などの一品生産の現場でも，作業の効率化，安全化を目標としてロボット化が検討されている．このような環境では，環境中の物体の状態は時々刻々と変化するため，作業を達成するその場で，ロボットが情報を取得することが望まれる．したがって，環境中の物体の情報を取得しやすい環境を構築することが必要となる．本研究では，環境中に存在する物体や環境に，バーコードやIDタグなどの記憶媒体を添付し，ロボットが容易に物体や環境に関する情報を蓄積，取得できるようにする手法を適用する．本論文では，この手法を物体や環境の情報化と呼ぶ．

添付型記憶媒体の基本機能は，環境や物体に関連した情報を環境や物体そのものに持たせる，つまり，物体と環境とその情報との関連付けを容易かつ確実に行えることにある．そこで，本論文では記憶媒体が持つ基本機能をもとに，情報を更新する機能，物体を識別する機能，記憶媒体の添付位置を情報として扱う機能を考え，それらの機能により実現する効果を体系的に論じる．これらの効果を以下の具体的な問題に適用し，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化手法の実現可能性，有用性を示す．

記憶媒体を用いた物体と環境の情報化を実現するためには，物体や環境中の現実世界における状態と，記憶媒体やデータベース内に蓄積された情報で表現される状態とを一致させることが必要となる．本論文では特に，状態変化に適応する事例として，作業内容が変化する場合，物体が組み合わされる場合，位置情報を取得する場合を考える．

まず，作業内容が変化する課題に対して，ロボットが作業を達成する場合に単位時間あたりにその作業情報を利用することで削減が期待できるコストの量を作業情報の有用さとして評価し，より有用な作業情報を蓄える手法を提案する．環境内で要求される作業内容にあわせ，作業情報をより必要とする場所に記憶媒体を移動させることで，環境全体でより有用な情報を蓄える．複数の移動ロボットによる繰り返し搬送シミュレーションにより本手法の有用性を示す．

次に，物体が組み合わさる場面を想定した作業の進捗にともなう物体情報の更新法について述べる．組み付け作業では，組み付けに用いられた部品それぞれに関連した部品情報や作業情報を更新することが必要となる．次の作業を行う場面で，組み合わされた物体を1つの作業対象の物体として取り扱えるように，物体情報が蓄えられたデータベースを更新する．組み付け作業におけるデータベースの更新実験を行い，提案手法の有効性を示す．

そして，記憶媒体が物体に添付されることの性質を利用した読み取り器による記憶媒体からの情報取得の応用について議論する．ここでは，物体に添付された複数の記憶媒体を読み取ることで物体の位置姿勢を推定する手法を提案する．記憶媒体を添付した物体と読み取り器との幾何学的な関係を導出し，位置姿勢を推定するための読み取り器の動作計画について述べる．物体の位置姿勢推定実験を行い，提案手法の有用性を示す．

目 次

第1章 序論 **1**
1.1 研究の背景と目的 1
1.2 物体と環境の情報化 2
1.2.1 センサ群を用いた環境の情報化 2
1.2.2 添付型記憶媒体を利用した物体と環境の情報化 4
1.2.3 本研究の立場 6
1.3 添付型記憶媒体を用いた従来研究 6
1.3.1 作業対象物と環境の認識 7
1.3.2 作業情報の取得とロボットの行動生成 8
1.3.3 作業対象物識別のためのデータベース管理 8
1.4 本論文における研究方針 9
1.5 本論文の構成 10

第2章 添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化 **11**
2.1 はじめに 11
2.2 添付型記憶媒体 11
2.2.1 画像マーク 11
2.2.2 IC タグ 12
2.3 添付型記憶媒体を用いた情報の取得と蓄積 13
2.4 添付型記憶媒体の持つ機能と効果 15
2.5 物体と環境の情報化における課題 16
2.5.1 ロボットに与える作業内容の変化 17
2.5.2 組み合わさった物体の状態変化 17
2.5.3 物体の位置姿勢情報 18
2.5.4 記憶媒体を用いた物体と環境の情報化における課題のまとめ 19
2.6 添付型記憶媒体の機能を用いた課題の解決とその意義 19
2.7 おわりに 22

第3章　ロボット間における情報共有のための添付型記憶媒体の動的配置　23
3.1　はじめに 23
3.2　有用な作業情報の蓄積 23
3.2.1　有用さの定義 24
3.2.2　有用さの評価法 25
3.2.3　有用さに基づく作業情報の蓄積 26
3.3　記憶媒体の動的配置 28
3.4　複数ロボットのナビゲーションへの適用 30
3.4.1　問題設定 30
3.4.2　ロボットによる作業情報の獲得 31
3.4.3　ロボットの搬送行動 32
3.4.4　シミュレーション 33
3.5　おわりに 40

第4章　作業の進捗に伴う物体情報の自動更新　43
4.1　はじめに 43
4.2　物体の情報化を利用した自動組み立てシステム 44
4.3　組み付け作業における物体情報の取得 45
4.3.1　物体情報の一意性 45
4.3.2　物体情報の利用 45
4.4　サーバによる情報管理と操作 46
4.4.1　データベースに蓄えられている物体情報の性質 46
4.4.2　サーバによる物体情報の更新 48
4.4.3　情報更新に掛かるコストの評価 50
4.4.4　提案手法の特徴 52
4.5　モジュールの組み付け実験 53
4.5.1　問題設定 54
4.5.2　組み立て作業の手順 56
4.5.3　実験結果 57
4.6　おわりに 59

第5章　複数の添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢推定　61
5.1　はじめに 61
5.2　添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢推定 62
5.2.1　読み取り器を利用した情報取得 62
5.2.2　複数のタグを利用した物体の位置姿勢推定 63
5.3　物体の3次元位置姿勢推定 64

5.3.1 読み取り器のモデル化 64
5.3.2 物体に添付されたタグの位置姿勢 67
5.3.3 2個のタグを用いた物体の位置姿勢推定 69
5.3.4 読み取り器の動作計画 73
5.4 物体の位置姿勢推定実験 74
5.4.1 問題設定 75
5.4.2 位置姿勢推定実験 76
5.5 物体の姿勢の誤差評価 79
5.5.1 物体の姿勢誤差のモデル化 79
5.5.2 タグの読み取り位置誤差の向上 81
5.6 おわりに 83

第6章 結論 **85**
6.1 本論文のまとめ 85
6.2 今後の課題 86

謝辞 **89**

参考文献 **91**

研究業績 **101**

図目次

1.1 Robot using the task information sent by the environment attached device 3
1.2 Achieving task using the task information through the attached device . . 4
1.3 Basic concept of achieving tasks using object-related information 5

2.1 Acquisition of required information using attached devices 14
2.2 Available component data through the ID devices attached to each component 18
2.3 Application of functions of environment-attached storage devices 20

3.1 Data structure of storage 27
3.2 Relocation of memory unit 29
3.3 (a)Office map (b)Location of storage device 31
3.4 Office floor model 32
3.5 Change of usefulness for change of task ratio 34
3.6 Change of number of achievement per term T (for the change of task ratio) 35
3.7 Average of achievement of tasks before and after change of task ratio . . . 36
3.8 Change of average of memory unit attached to each position according to the change of task ratio 38
3.9 Change of average usefulness M evaluated by robots 39
3.10 Average of achieving tasks per term T 40

4.1 Concept of automated assembly system using the unification of objects and their information 44
4.2 Change of data of composed module on achieving task 47
4.3 Autonomous data renewal in module assembly process 48
4.4 Reconfiguration of data reference 49
4.5 Assembly experiment 54
4.6 Prototype of hybrid arm 55
4.7 Procedure of experiment 57
4.8 Data reconfiguration result 58

4.9 Assembly tree according to task result 58

5.1 Estimation of pose of the object using ID devices 61
5.2 Acquisition of an ID of the device attached to the object 62
5.3 Reader example 64
5.4 Coordinate frame of ID reader and ID device 65
5.5 Relation of ID reader and ID devices attached to an object 72
5.6 Planning of ID reader for pose estimation 73
5.7 Flow of the pose estimation experiment 77
5.8 Position error of object origin $\mathbf{p}$ 79
5.9 Planning of ID reader for precise search for position of the ID device 81

表目次

3.1 Change of number of stored destinations for change of task ratio 37

4.1 Comparison of characteristics of the proposed method with those of the relational database 53

5.1 Experiment result of pose estimation 78

5.2 Experiment result of pose estimation using precise search 82

第1章　序論

1.1　研究の背景と目的

近年のロボット研究の発展と共に，人間が活動する環境で，複数のロボットが人に様々なサービスを提供することが期待されている．また，建設作業環境などの一品生産の現場でも，作業の効率化，安全化を目標としたロボット化，情報化が検討されている [1,2]．人が日常活動する環境には様々な物体が存在し，また，ロボットは様々な作業が要求される．そのため，物体の色や形状などといった属性や，物体に対してロボットが取るべき行動など，作業に必要となる情報を，人間がロボットにあらかじめ全て与えることは困難である．したがって，ロボット自身により作業を行う環境内で，作業に必要となる情報を取得することが望まれる．

この問題を解決する手法として，知能ロボットを導入する方法，および，ロボットが行動する空間を整備する方法 [5] が考えられる．近年，知能ロボットの日常作業空間における行動を獲得し，人が存在する環境で行動を創発し，コミュニケーションを取るといった研究が数多くなされている．しかしながら現在において，情報を取得して作業を達成できる万能な知能ロボットは，開発途上にある．

本研究では，ロボットが行動できる空間を整備する方法，およびそれを利用したロボットの作業の高度化の手法に着目する．本研究では，バーコードやICタグに代表されるIDタグのように，物体や環境に添付でき，データを取得できる記憶媒体を用いて，ロボットが容易に物体や環境に関する情報を蓄積，取得できるようにする手法を取り扱う．本論文ではこの手法を，物体や環境の情報化と呼ぶ．

ここで，現在の情報通信技術の発展を省みると，物体に添付できる記憶媒体の研究開発が急速に進んでいる．例えば，ICタグなど記憶媒体を物体に添付し，物品の在庫管理に用いる大規模な実験が行われている．近い将来，添付型記憶媒体が物体に添付され，我々人間が様々な情報を物体から取得し，その情報を利用して，様々な利益を享受することが期待されている．しかし，これらの事例は，“情報を蓄える”という記憶媒体の一面のみを使用している．また，ロボットへの応用を考えたものではない．

本論文では，添付型記憶媒体の様々な性質や機能を分析し，それによって発揮される効果を明確にする．その上で，“添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化”を体系的に論じる．その効果を具体化した実例を示し，有用性を明らかにする．

1.2 物体と環境の情報化

ロボットにとって作業を行いやすい環境を実現するために，ロボットが容易に情報を蓄積，取得できる環境，すなわち情報化された環境の実現を考える．ロボットが動ける環境には，移動しやすい環境，作業対象となる物体が限られている環境なども考えられる．また，環境そのものがロボットの行動を規定するという考え方も存在する．しかし，ロボットによる作業の達成を考えると，作業に必要な情報を取得しやすい環境 [3] を考えることが妥当である．

ロボットが作業環境中で行動することを考えると，環境中の障害物を発見し，ロボットが移動できる空間を構築するためには，ロボットは環境をセンシングし，地図を作成することが必要となる．このような環境センシングの研究は従来より活発に行われている [4,29]．

ところで，実環境で作業を達成するためには，環境の理解と同時に，作業内容の取得が必要となる．実際に作業を達成するためには，何らかの方法で作業を達成するために必要となる情報，作業情報をロボットに与える必要がある．作業情報をロボットに与える方法として，環境を情報化する方法がこれまでに提案されている．以下では，センサや添付型記憶媒体を利用した物体と環境の情報化手法について整理し，研究の方向性の参考とする．

1.2.1 センサ群を用いた環境の情報化

環境の情報化を行うための手法として，環境に配置したセンサ群，例えば，環境カメラ，床センサなどを用いる手法 [7,10,11] が考えられる．作業環境内に存在する人間の行動をセンシングする [13–17] ことで，人間の行動をデータベース化したり，人間の能力を高めるようにロボットが行動および動作する研究が行われている．

Figure 1.1 に，センサ群を用いた環境の情報化の一例を示す．環境内に配置されたカメラが環境中の人とロボットを認識し，衝突を防ぐために，回避のための動作計画を立てる．動作計画をカメラに接続された計算機からロボットに送り，ロボットは回避行動を取り衝突を回避する．このように空間中に配置されたネットワーク化された装置がロボットや作業環境をセンシングし，ロボットが必要とする作業情報を生成する．この方法では，ロボットは，環境に配置されたセンサ群からの情報をもとに，行動計画を立てることができる．このシステムが成立するためには，ネットワーク化されたセンシング機器類，および，その情報を解析する計算機および記憶装置を必要とする．

佐藤らは，人間がサービスを受ける空間として部屋を想定し，その中で，人に対してサービスを適切に提供するロボット，および，センサ群として，“Robotic Room” を提案している [7]．ロボットが人間に対して作業を行うことで，その行動が情報の伝達手段と

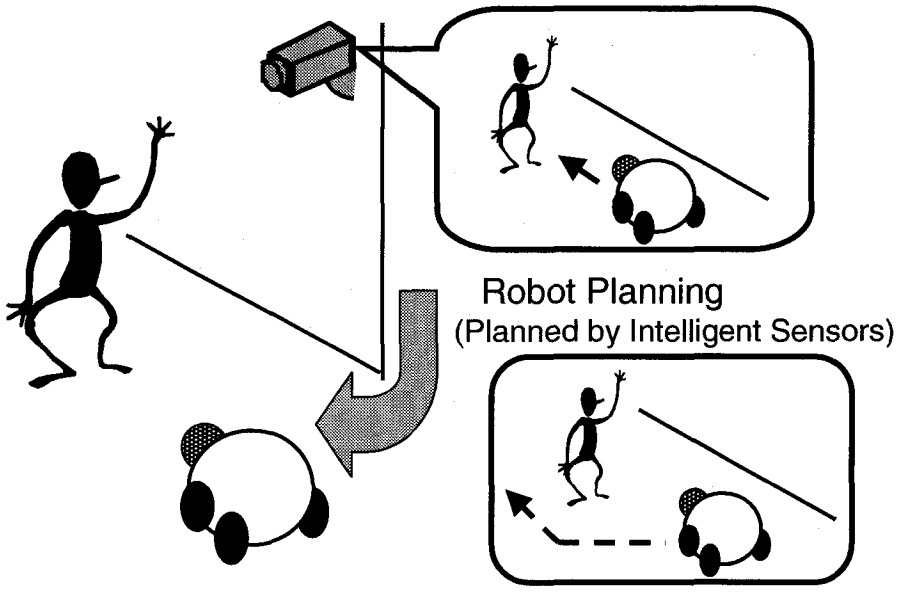


Figure 1.1: Robot using the task information sent by the environment attached device

なることを提唱した．また，人間を観測する時間を，人間へのサービスの提供する時刻だけでなく，サービスを提供していない時間にも広げることで，人間の生活行動のデータベース化を実現している．

橋本らは，ネットワーク化された装置群 (Distributed Intelligent Network Device) を用いて，空間全体を知的化する "Intelligent Space" [8,9] を提案している．ネットワーク化したセンシング装置を利用して，作業環境中の人，ロボットを計測し，ロボットの動作計画についての研究を行っている．人間の動ける領域はロボットにとっての移動空間になることから，人間の移動領域を基にしたロボットのための記号化された地図を生成している．これらの知的化した空間を利用して人間の能力を高めることを目標としている．

これらのロボットや人の能力を高める空間や環境は，最近では知的空間，知的環境と呼ばれ，空間知能化という分野で様々な研究が行われている [12]．知能化された環境には，環境中にセンシング機器が多数配置されている．それらを統合的に管理するネットワーク技術，実際に計測を行うためのセンシング機器の開発 [18] が重要である．また，知的な環境を構築するために，事前の環境整備を必要とする．

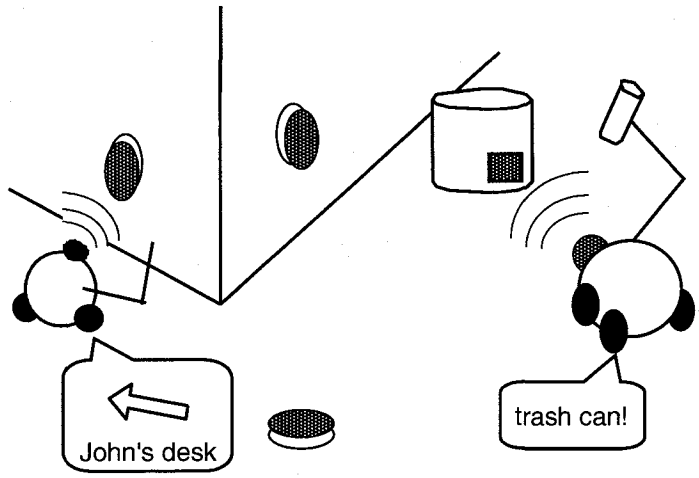


Figure 1.2: Achieving task using the task information through the attached device

1.2.2 添付型記憶媒体を利用した物体と環境の情報化

ロボットが作業を行う際に必要となる情報，例えば，物体の種類，形，また，その物体に対して行うべき作業などは，作業を行うその場で得られればよい [20–22]．必要な情報を場に埋め込むための手法のひとつに，記憶媒体を物体に添付する方法が考えられる．このような環境添付型の記憶媒体を用いた物体と環境の情報化の概念を **Figure 1.2** に示す．図中右のロボットは，ごみ箱に添付した記憶媒体に蓄えられた情報を利用してごみ箱を識別している．左のロボットは，目的地の方向を記憶媒体から得ている．この方法では，環境や作業対象となる物体に，ID タグ [37] やバーコード [28,38–40]，ランドマーク [44–46] など添付型記憶媒体を添付する．ロボットは添付された記憶媒体の情報をもとに，作業を行う．結果として，ロボットの作業を高度化することが可能となる．

この手法では，複数ロボット間における作業情報の共有が行いやすい．複数のロボットや作業機械が存在する場合，獲得した作業情報，物体の属性情報は蓄えられ，ロボット間で共有することが望まれる．作業情報の共有が行われない場合，記憶量の無駄が生じ，ロボット間で協調して作業を行うことが困難となる．ところで，作業情報の共有手法では，ロボットが獲得した情報を1つの装置で集中的に管理する手法がある [26]．この場合，蓄える情報の量の増加に伴い，ロボットが知識を利用する際の検索コストが増大する．加えて，物体の情報を取得して蓄積する場合，取得した情報がどの物体に関するものかを識別することが必要であるが，誤認識の問題もあり困難な課題である．また，複数のロボットによる通信量が増大するという欠点も指摘されている [27]．

一方で，記憶媒体を用いて物体や環境を情報化した場合 [28,30–32]，ロボットは作業情

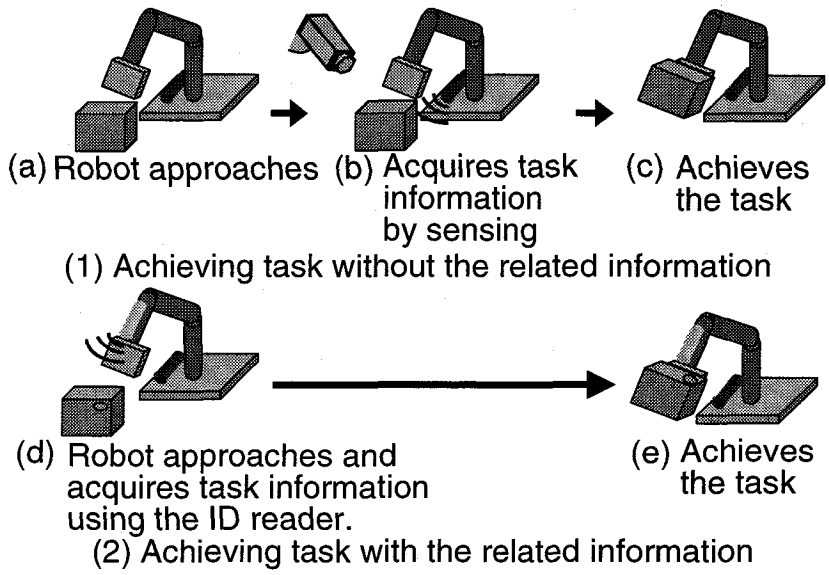


Figure 1.3: Basic concept of achieving tasks using object-related information

報を環境中に整備された記憶媒体の読み取りを通して取得できる．同じ記憶媒体の読み取りで同じ情報を取得することが可能となるため，作業情報の共有化が図れる．

ここで，添付型記憶媒体を利用したロボットの作業への適用について述べる．物体に記憶媒体を添付することで，実際の環境に存在する物体と情報とを関連付けることが可能となる．そして，添付された記憶媒体からロボットが情報を取得することで，作業が達成できる．**Figure 1.3** に，物体と情報が関連付けられた状態でのロボットによる作業達成の概念 [47] を示す．Fig.1.3(a) より，作業対象の物体と情報が関連付けられていない場合では，ロボットは作業に先立ってセンシングする必要がある．一方で，作業対象の物体と情報が関連付けられている場合，ロボットは作業に必要となる情報を物体に添付された記憶媒体を用いて取得できる．

添付型記憶媒体を利用することで，次のような利点がもたらされる．第1の利点は，作業を行うときに，作業対象となる物体の識別のためのコストを軽減できる点である．添付型記憶媒体を利用して作業を行う場合でも，物体のセンシングは作業を達成するために必要となる．添付型記憶媒体を用いることで物体と情報との対応付けが行えるため，識別のためのコストが軽減できる．その結果，作業の効率化が図れる．また，添付型記憶媒体を利用しないで認識を行う場合，誤認識の課題が存在するが，添付型記憶媒体を利用して物体を識別すると，情報が関連付けられていれば完全に識別ができる．

第2の利点は，物体と情報との対応付けを行うことで，物体に関する情報を物体固有の情報だけでなく，作業のスケジュール，物体に関する作業の情報を取得できる点である [40,48,49]．この情報は，物体をセンシングするだけでは得られない．その結果，ロボッ

トの全体の行動計画を，物体に添付した情報を用いて表現できる．このことは物体に目印をつけることでも実現できるが，添付型記憶媒体を利用することで，大量の物体を識別でき，かつ，完全な情報取得が可能となる．

一方，添付型記憶媒体を利用して物体と環境を情報化することで，以下の課題が存在する．まず，情報化を実現する記憶媒体が環境中に存在し，情報の取得を記憶媒体を通して行うため，物体や環境の情報の更新は，記憶媒体が存在する場所で行うことになる．もうひとつの課題として，物体と環境の情報化を実現するためには，記憶媒体を通して取得する情報が正しいことが前提となる．取得する情報が正しくない場合，情報化を行う意味が失われる．また，物体や環境の状態は，時々刻々と変化する．したがって，物体や環境の状態変化への適応として，物体や環境の情報更新を，記憶媒体が存在する場所で行うことが，記憶媒体を用いた情報化における課題となる．

本論文では，記憶媒体としてバーコードやICタグを想定している．記憶媒体については第2章でより詳しくでまとめる．

1.2.3 本研究の立場

本節では，ロボットが行動しやすい環境を構築するために，作業を行う環境やその中に存在する物体を情報化し，ロボットに対して作業情報を転送する環境を整備する手法を紹介した．センシング機器を配置した環境の情報化，記憶媒体を用いた物体と環境の情報化について例を示した．

本研究では，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化手法に着目する．センシング機器を用いる環境の情報化は，事前に環境の整備を必要とし，コストが掛かる．空間全体にセンシング機器を配置するため，空間の構築時に施工を行うことが望まれる．また，物体の認識の場面では，物体と情報との関連付けの行いやすさの点で，記憶媒体を用いた物体と環境の情報化が優れている．また，環境から取得した情報を利用して作業情報を生成できる．記憶媒体を用いた物体と環境の情報化手法を研究の対象とする．

なお，本論文は，環境添付型記憶媒体とその読取装置を利用して，要素技術として何ができるのかを追求することを目標とする．次節では，添付型記憶媒体を用いた従来研究を分類し，これまでに扱われた課題をまとめる．

1.3 添付型記憶媒体を用いた従来研究

従来より，環境中に存在する物体，もしくは床，壁面，天井などに，記憶媒体を添付し物体や環境を情報化し，ロボットの作業の高度化を図る研究が行われている．環境を記憶媒体を添付し，ロボットの能力を高め，作業の達成効率を向上させる研究が数多く行われている．研究を分類すると次のように分けられる．

(1) 作業対象物を認識し，ロボットの自己位置，作業対象の位置姿勢を推定する研究

(2) 作業情報を取得し，局所的な環境情報を利用してロボットの行動を生成する研究

(3) 作業対象物の識別を行うためのデータベースを管理する研究

本節では，これまでに報告された記憶媒体を用いて物体と環境を情報化し，人やロボットの作業を支援する研究を分類する．

1.3.1 作業対象物と環境の認識

作業対象物の認識は，ロボットが作業を達成するために重要な課題である．ロボットは作業対象物を認識した後に，物体の位置姿勢を推定して環境の状態を理解し，作業を達成する．しかし，画像等のセンシング情報を用いて直接データベースを検索し物体を認識することは，多様な物体が存在する場合に，複数の認識結果の可能解が存在するため，困難である．一方，添付型記憶媒体を物体に添付することで，物体とデータベースに蓄えられた情報とが容易に関連付けられる．その性質を用いて，作業対象となる物体の認識を行うことができる．また，記憶媒体とロボットとの位置関係から，物体の位置姿勢を同時に推定できる．本稿では，添付型記憶媒体を用いた作業対象物や環境を認識する手法についての研究例を示す．

青柳ら [38] は，食器にバーコードを利用した画像マークを添付し，食器の認識に適用している．食器の認識を行いハンドリングすることで，認識コストの軽減，および，実機での適用可能性を示している．

作業対象物を認識するために，コード付き画像マークを添付し，物体の認識を行い作業を達成する研究例 [44] が報告されている．また，認識や作業対象の位置を評価するために，超音波と赤外線による発信装置が取り付けられた“インテリジェントマーク” [51–53] が提案され，マークの識別および，マークの位置姿勢の推定実験が行われている．

Kanda らは環境内の人間がタグを埋め込んだ名札を持ち，ロボットや環境内の計算機が名札に埋め込んだタグを読むことで，個人ごとにインタラクティブなコミュニケーションを提供する手法を提案している [50]．タグを用いることによる人間の一意的な識別，人間に応じたカスタマイズ情報を蓄えておくことで実現される．

記憶媒体に読み取り器を近づけることで，あるいは，画像マークをカメラを利用して情報を取得するため，環境に固定された記憶媒体を利用して，ロボットの自己位置推定に使用できる [55, 60]．Miyama ら [54] はレスキュー作業で必要となるロボットの位置姿勢を推定するための手がかりとなる “Communication Tag” を開発し，実験を行っている．

Parker ら [33] は，室内環境で活動するロボット群として，それらが協調するためのネットワークロボット群を提案した．ロボット群は，環境中のセンシングを行うが位置を計測できず，それだけでは動作計画が立てられない “Sensor Node”，目的地に到達するため

の動作計画を立てる "Leader Helper"，ロボット群全体の位置姿勢を計測する "Follower Helper" が存在し．それらのロボットを識別と，複数のロボットの位置姿勢を測るために，画像マークをロボットに搭載し，ロボット群での識別を行う．

壁や床など環境中の動かないものに記憶媒体を添付することで，参照座標系における記憶媒体の位置が決まる．特に屋外での位置推定手法として，環境中に配置されたタグの読み取りを利用した位置姿勢推定手法が提案されている [36]．廣瀬ら [34,35] は，人間の誘導を目的として，環境中の床にタグを埋設し，読み取り器を持つ人の位置姿勢をタグの読み取りから推定している．複数のタグの読み取りを利用した読み取り位置精度の向上を図っている．

1.3.2 作業情報の取得とロボットの行動生成

ロボットが知的に行動するためには，作業内容を理解し，作業情報を取得することが重要となる．環境への適応という課題から，センシング情報から直接行動を生成する行動規範型のロボット [6] も考えられるが，より知的に行動を実現するためには，ロボット外部からロボットへ作業情報を入力することが現実的である．

ロボット外部からの作業情報の入力手段として，作業者が直接入力する方法も存在するが，環境中の記憶媒体および，関連付けられたデータベースからの作業情報の入力が考えられる．例えば，記憶機能付き画像マークを用いて，作業内容の理解 [40]，例えば，扉開けなどの知的作業 [28]，および，片付け [38] などの例が報告されている．

また，環境中の記憶媒体を利用することで，局所的な情報の検索が容易となる．局所的な位置関係は相対的なものとして表せる．例えば，記憶媒体同士の相対的な位置関係を用いた移動ロボットのナビゲーション [43,46] が報告されている．Kurabayashi らは，地震など災害時における情報伝達手段として，"Rescue Intelligent Data Carrier" [56] を提案している．災害時での情報収集を行い，中央のサーバへ送信する [57]．ロボットは環境中に配置された IDC を利用して動作計画を立て，被災者を探索する．

前項と重なるが，ロボットが作業内容を理解し，実際に作業を達成するためには，物体および環境に添付した記憶媒体との位置関係を把握することが，物体認識と同様に重要である．Katsuki ら [41] は画像マークを利用した物体の認識および，それを用いた物体の把持を行っている．

1.3.3 作業対象物識別のためのデータベース管理

物体と情報とが関連付けられる性質を用いて，作業対象や作業計画の管理，および，その効率化を実現する研究例が報告されている．以下に添付型記憶媒体を用いた工程の管理，作業現場における資材管理，作業環境内の物体情報の管理法を紹介する．

Arai らは，建設作業において部品にタグを用いて管理することにより，作業の計画を動的に変更させる手法 [58] を提案している．建設作業の現場において，作業計画は部品の生産，現場の進捗，天候などによって変更される．物体に添付した添付型記憶媒体を利用して，物体とその情報とを統合的に管理することにより生産現場における作業機械，作業者など資源の配分を動的に変更することができる．その結果，全体として効率よく作業を達成できることをシミュレーションにより示している．

Jaselskis らは，建設作業現場における資材管理に RFID タグを適用し，管理を行うことを提案した [48]．作業現場への資材の搬入を行うトラックにタグを添付し，搬入時間，搬入量，および資材の生産管理を行うことを提案している．その中で情報の蓄積，取得のための媒体として RFID を選択している．

Chen らは建設作業における資材の無駄を省くために，バーコードを用いて資材を管理する手法を，実際のビル建築に適用した [81]．建設作業現場において，資材の無駄はコスト高をもたらす．資材にバーコードを添付し，作業時の資材をデータベース化し管理することによって資材の無駄を減らすことを試みた．バーコードを添付することでコストは掛かるが，資材の無駄を減らすことで全体のコストを削減している．

以上のように，ロボットとその周囲への適用だけでなく，環境中の物体の管理，生産計画への適用例が提案されている．

1.4 本論文における研究方針

前節において，添付型記憶媒体を用いたロボットの作業の効率化手法について過去の研究事例を示した．詳しくは第 2 章で述べるが，添付型記憶媒体は，いくつかの機能を備えている．それらの機能は，情報を蓄積する機能，識別する機能，物体に添付されたマークとしての機能であると考えられる．しかし，従来の研究では，これらの機能についての議論はあまりなされてこなかった．そのため，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化の実現にはなお多くの課題が存在している．その中でも，物体や環境の状態変化への適応は，問題設定が成立するために解決が必要な課題である．

本論文では，添付型記憶媒体が持つ，環境や物体に関連した情報を環境中の物体そのものに持たせるという基本的な特徴に着目し，その上で本研究における機能を考える．次に，この機能によって発揮される効果を明らかにする．それらの効果を，物体や環境の状態変化への適応に関する課題として，以下の具体例に適用する．具体例への適用を通して，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化の有用性を論じる．

- 作業内容の変化に伴う，環境内における有用な情報の更新
- 作業の進捗に伴う，組み合わさった物体に関する情報の更新
- 物体の位置姿勢情報の取得

最終的に，本研究の内容が，作業環境の情報化手法の1つの方法，利用法として定着し，実用化されることを目標とする．

1.5 本論文の構成

本論文は6章で構成される．以下に本論文の概要をまとめる．

第1章では，本研究の背景と目的を述べた．ロボットの作業を効率化するために，作業空間の情報化手法を適用し，センサ群および環境添付型記憶媒体を用いた作業環境の情報化手法を紹介した．環境添付型記憶媒体を用いた作業環境の情報化手法について本研究で取り扱う課題，および方針を述べた．

第2章では，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化について述べる．物体と環境を情報化するために用いられる記憶媒体について議論を行い，添付型記憶媒体が持つ特徴をまとめる．記憶媒体が持つ特徴から得られる本論文で考察した機能を整理し，機能を実現することで生じる効果を述べる．その効果を利用して実際の課題への適用について議論し，研究の意義を詳しく述べる．第3章以降で述べる研究課題の背景および目的を詳しく述べる．

第3章では，作業を効率よく達成することを目標とした環境添付型記憶媒体の動的配置法を提案する．作業情報を利用することで削減できるコストを，作業情報の有用さとして評価し，その基準を用いて環境全体でより有用な作業情報を蓄えることを提案する．また，有用さを用いて環境中の記憶媒体を動的に配置することを提案する．移動ロボットの繰り返しナビゲーションを例にしたシミュレーションを行い，本手法の有用性を示す．

第4章では，組み付け作業を例にした作業の進捗に伴う，物体データベースの更新法を提案する．作業対象にRFIDタグ，バーコードに代表される記憶媒体を添付することで，物体，そして，組み合わさったモジュールの情報を統合的に管理する．物体と情報とが一体化された部品の組み立て実験を行い，本手法の可能性を示す．

第5章では，作業情報の取得を目標とした，複数の環境添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢推定法を提案する．物体に添付された複数の記憶媒体の読み取り結果と，記憶媒体を読み取った読み取り器の幾何学的対応から物体の位置姿勢を推定する．推定実験およびその評価をとおして，本手法の有用性を示す．

第6章で，論文全体のまとめとして，本研究で得られた知見を整理する．

第2章　添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化

2.1　はじめに

本章では，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化手法について，記憶媒体が持つ機能と，機能を発揮させることでもたらされる効果を議論する．そのうえで，物体と環境を情報化するための問題点とその解決法を検討する．第1章で述べたように，ロボットの能力を高め，結果として効率よく作業を達成するための環境を整備する手法として，物体や環境を情報化することが考えられる．本研究では，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化手法を取り扱う．

本章の構成を以下に示す．まず最初に，バーコードやICタグに代表される添付型記憶媒体をまとめ，実世界での適用法について議論する．次に添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化の実現法についてまとめ，情報を物体に関連付けるという記憶媒体の基本機能について論じる．そして，記憶媒体が持ついくつかの機能と，それらの機能を発揮させることでもたらされる効果をまとめる．その上で，添付型記憶媒体を用いることの問題点を列挙し，研究課題を抽出する．最後に，記憶媒体の機能を課題に対して適用することによる，本研究における解決法について述べ，次章以降の研究背景と課題としてまとめる．

2.2　添付型記憶媒体

本節では，物体と環境を情報化するために用いる添付型記憶媒体をの使用法について述べる．ロボットや人間は読み取り器を利用して添付型記憶媒体から情報を取得し，その情報を用いて作業を達成する．ここでは，一般的に良く用いられる添付型記憶媒体として，画像マーク，ICタグ(データキャリア)を挙げる．

2.2.1　画像マーク

添付型記憶媒体の例としてまず，バーコードに代表される画像マークを取り上げる．画像マークはカメラで読み取ることが可能であるため，様々な分野で適用されている [44].

バーコードは1次元であるが，2次元のマークを配置することにより，より複雑な情報を記録できる．2次元バーコードの一つにQRコードが存在し，それを利用した例として，移動ロボットの行動支援 [28] がある．この手法では，あらかじめ人が作業に必要となる情報を書き込んでおき，ロボットはその与えられた情報をもとに作業を行う．

また画像マークは，目印としての役割をもつため，ロボットは，画像マークを基にして自分の位置を推定することができ，作業を行うことができる．

以下に，添付型記憶媒体として画像マークを導入した場合における，長所と短所を列挙する．

長所

- 安価である．
- 製作および取り付けが簡単である．
- ロボットの作業や人に邪魔とならない．

短所

- 汚れに弱い．
- 情報の書き換えが不可能．
- 情報を読むときに画像マークを見つける必要がある．
- 隠れに弱い．

2.2.2 ICタグ

電気的に読み書きを行う記憶媒体として，ICタグ [19] がある．これは，電磁波によって情報を読み書きする．記憶媒体としてのICタグの開発としては，知的データキャリア (IDC) [31,32] がある．また，一般的に用いられるICタグとして，スマートカードやRFIDタグがすでに製品化されている．

ICタグは，電気的な手法で情報の読み書きを行う．リーダライタから発した電磁波をICタグ側のアンテナが受け取り処理を行う．ICタグからは応答波を発する．パッシブ型のタグは，リーダライタからの電気的エネルギを用いて駆動する．他には，タグ自身が発信器となる無線タグが存在する [23–25]．この種類のタグはアンテナを用いて検波することで，タグの識別，情報取得を行う．

ICタグの一例として，オムロン社の媒体の仕様を示す．

- 大きさ　直径 $20mm \times 2.7mm$
- 電源　なし
- 記憶容量　128バイト

IC タグの一般的な特徴を以下に示す.

長所

- 非接触で読み書きが可能である.
- 一般的な環境で使用が可能である.
- 電波が届く範囲では，媒体が隠れても読み書きが可能である.

短所

- 特殊な読み取り器を必要とする.
- 記憶容量が小さい.
- 大きな媒体の場合，邪魔になる.
- 電磁波を利用するため金属に弱い.
- タグを探索することが必要となる.

このなかで，タグの探索について述べる．一般に IC タグを用いる場合，読み取り器にタグを近づけるか，タグを視覚センサ等で確認して読み取り器を近づけることで情報を読み書きする．そのため，視覚等のセンサを組み合わせずに，タグから情報を取得するためには，他の情報を利用するか，読み取り器を動かして走査することが必要となる.

近年では，IC タグの識別機能に注目して，流通業などでの産業応用が考えられている．IC タグの小型化が進み，紙に埋め込むことも可能となった．例として，入場券の認証に券に埋め込まれた IC タグが利用されることが計画されている.

上記に述べたバーコード，IC タグを想定している．実験環境の構築には IC タグを使用する．以降，これら添付型記憶媒体を称して，タグと呼ぶ.

2.3 添付型記憶媒体を用いた情報の取得と蓄積

本節では，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化を実現した場合における，ロボットによる情報の取得と蓄積について述べる．その中で，添付型記憶媒体の基本的な特徴について考える.

Figure 2.1 に，物体に添付された添付型記憶媒体を利用してロボットが物体の情報を取得する過程を示す．Figure 2.1 (a) は，記憶媒体から情報を直接取得する場合，(b) は記憶媒体から情報を間接的に取得する場合を示す．直接取得する場合では，記憶媒体に物体に関する識別情報や，動作計画など作業情報が蓄積されている．間接的に取得する場合では，記憶媒体には情報を識別するための ID が蓄積されており，識別情報や作業情報はサーバに蓄積されている．いずれの場合でも物体に関する情報を，読み取り器によって記憶媒体から取得していることがわかる.

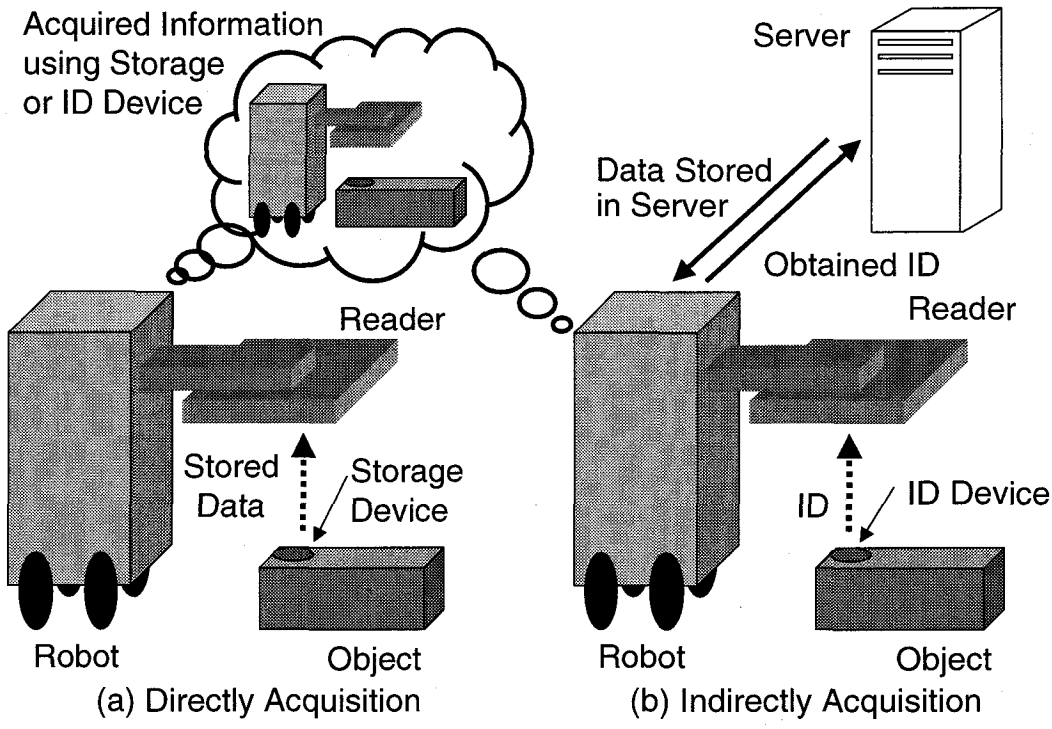


Figure 2.1: Acquisition of required information using attached devices

ここで，物体に添付された記憶媒体に情報を蓄積することを考える．添付型記憶媒体が書き込み可能である場合，記憶媒体に直接情報を蓄積することができる．また，記憶媒体が書き込みできない場合でも，情報をサーバに書き込むことができる場合，記憶媒体から取得した情報を利用して，サーバ内に情報を蓄積できる．よって，添付型記憶媒体に対して，直接，あるいは，サーバを経由して間接的に情報を蓄積できることがわかる．

次に，情報を直接あるいは間接的に蓄積することの長所，短所を論ずる．情報を直接蓄積する場合は，物体と環境の情報化における最も単純な形態である．そのため，情報を取得するために通信を行う必要がなくなる．データを保持する媒体が独立しているため，記憶媒体に蓄えられている情報の独立性，局所性が強くなる．また，必要とする情報を取得する場合での検索コストが小さくなる．一方，情報を蓄積する記憶媒体が環境中に存在するため，記憶媒体の容量に制約が存在する．情報の更新は記憶媒体が添付されている場所で行うことが必要となる．

情報を間接的に蓄積する場合，情報の更新をサーバ内で行うことになるため，大量の情報を蓄積することができる．複数の記憶媒体が添付された物体など，複数の記憶媒体に関連する情報を一度に更新できる．一方で，情報を取得するために通信コストや，必要とする情報を検索するためのコストが掛かる．以上のことから，物体と環境の情報化を行うと

きに情報を直接，あるいは間接的に蓄えるかどうかは，情報化を行うときに選択する課題であることがわかる．

以上の議論から，物体や環境に関する情報を直接，間接的に蓄えるいずれの場合でも，添付型記憶媒体が持つ基本的な特徴として，環境や物体に関連した情報を，環境や物体そのものにもたせることにあることがわかる．つまり，物体や環境とそれに関連した情報との関連付けが容易かつ確実に行えることがわかる．この特徴をもとに，添付型記憶媒体が持ついくつかの機能について議論する．

2.4 添付型記憶媒体の持つ機能と効果

前節において，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化を実現した場合での，ロボットによる情報の取得と蓄積について述べた．この中で，添付型記憶媒体が本来持つ特徴として，物体や環境とそれに関連した情報との関連付けを容易かつ確実にする特徴を有することがわかった．本節では，記憶媒体の持つ特徴より生じるいくつかの機能について述べ，機能が発揮することで得られる効果を議論する．

添付型記憶媒体が持つ特徴から生じる機能がいくつか考えられる．以下にその機能を列挙する．

(1) 直接，あるいは間接的に，蓄えられている情報が書き換えられる．リーダ・ライタを用いて直接書き換えたり，サーバとの通信を用いて間接的に書き換えることができる．

(2) 物体に記憶媒体が添付されているため，個々の物体を識別する ID をつけられる．

(3) 記憶媒体が添付された位置自体が (記憶媒体をどこに添付したかが) ひとつの情報として扱える．位置情報を記憶媒体に関連付けられた情報として蓄えられる．

各機能を発揮することでもたらされる効果を以下に示す．括弧内の番号は各機能に対応付けられる．

(1) 物体や環境の状態変化に応じて情報を更新することが可能となる．情報の更新は，ロボットによって自律的に行える．つまり，複数ロボット間で，物体や環境の状態に適応した情報を共有することができる．その結果，ロボットにとってその場で必要となる情報を取得しやすい環境をロボットにより構築できる．

(2) 大量の物体を一つ一つ区別することが可能となり，物体に関連付けられているその情報を正確に操作できる．その結果細かい情報の管理ができる．

(3) 記憶媒体を物体に添付してある位置とその ID を記憶媒体を利用して取得できるよう

にすることで，識別可能な物体上の目印として記憶媒体を使用できる．

ここで挙げている効果を用いることで，ロボットが記憶媒体を有効に利用し効率よく作業を達成することが可能となる．一方，これらの効果を利用しない場合，物体と環境の情報化の問題設定が成立しなくなる場合が存在する．次節では添付型記憶媒体を利用することの課題をまとめ，研究課題の抽出を図る．

2.5 物体と環境の情報化における課題

本節では，物体と環境の情報化の課題を検討する．近年，マイクロ，ナノ技術の発展とともに，より小型で廉価な添付型記憶媒体が開発されている．ID タグの廉価化とともに，用途の種類，適用範囲も広がり，ロボットだけでなく流通業など産業界で，添付型記憶媒体を用いた作業の効率化，高度化が期待されている．

ところで，これまでにも添付型記憶媒体を利用して，物体の認識，作業内容の理解などの研究が数多く行われているが，なお多くの課題が残されている．以下に本論文で検討する課題を列挙する．

- 記憶媒体の容量の制約
- 物体と環境の状態変化への適応

このうち，記憶媒体の容量の制約について検討を行う．環境添付型記憶媒体は，環境中に記憶媒体を配置するため，記憶媒体の容量に制限が存在する．これは，作業情報を集中して蓄積している場合には起こらない問題である．

容量の制約を解決するために，前らは，有用な作業情報，物体情報のみを蓄えて，容量の制約を克服することを提案している [20,61]．この手法を環境中の物体の認識のために必要となる物体の見えを蓄積する手法に適用している．また，記憶媒体そのものには，データベース中に蓄えられている蓄積情報へのポインタのみを書き込んでおけばよい．記憶媒体からの情報を間接的に取得する手法を適用すればよいことがわかる．ただし，この手法では，通信コストの課題が存在する．

よって，本論文では物体と環境の状態変化への適応を取り上げる．記憶媒体を用いて環境中の物体と蓄積情報を関連付ける場合，現在の作業環境の状態と蓄積情報とが正しく関連付けられることが必要となる．ロボットは環境中の記憶媒体からの情報の取得を通じて物体の識別や，作業情報の取得を行う．したがって，物体と蓄積情報との関連付けが成立しない場合では，問題設定自体が成立しない．本論文では，物体と環境の状態変化への適応が必要な場合として以下の事例を取り上げる．

(1) ロボットに与える作業内容の変化

(2) 組み合わさった物体の状態変化

(3) 物体の位置姿勢情報

これより，これらの事例を紹介する．

2.5.1 ロボットに与える作業内容の変化

まず，ロボットに与える作業内容の変化について述べる．ロボットに与える作業内容は人間が与えると仮定すると，環境内の状況により作業内容は変化する．たとえば，巡回ナビゲーションを例にする．巡回目的地を作業内容として与えると仮定すると，その目的地は，作業内容および環境の状態により変化する．作業を達成するために必要となる作業情報は，目的地への到達方法となる．

ここで，移動ロボットのための作業環境を添付型記憶媒体を利用して情報化する場合，記憶媒体には，物体が移動されたり，周囲が変化する場合にも不変な作業情報を蓄えることが考えられる．どこにどのような作業情報が必要になるかはあらかじめわからないので，ロボットが作業をしながら記憶媒体の配置を自律的に行う必要がある．このとき，ロボットは環境全体での作業効率が向上するように，記憶媒体を配置することが望まれる．

また，作業の種類や発生頻度が変化すると，一度配置した記憶媒体が使われなくなることが起こりうる．使わない記憶媒体を多くの作業情報を蓄える必要がある場所に移動させれば，資源の有効利用が図られ，全体での作業効率が向上できる．

2.5.2 組み合わさった物体の状態変化

物体に関する情報の関連付けを維持することが必要な場合として，組み付け作業が考えられる．組み付け作業では，複数の部品が組み合わされる．部品にタグを添付し作業対象である部品を情報化した場合，組み付け時には，組み付けに関わった全ての部品についての情報が更新される，あるいは，組み合わさった構成物に関する情報と実際の構成物とはタグを介して関連付けられることが必要となる．また，物体に添付された記憶媒体を利用して情報を取得する場合，ロボットや人が物体に対して行動した場合に情報を更新することが必要となる．例えば，物体の位置姿勢を物体に添付された記憶媒体を利用して取得した場合，物体を移動させると，物体の移動後の位置姿勢を記録することが必要となる．

また，作業を始める場合に，ロボットは物体から情報を取得する．そのとき，組み合わさった作業対象からの取得情報の一意性の課題が存在する．1台のロボットの場合，組み立てに用いた部品の記憶媒体をロボットが記憶することは可能である．複数のロボットや作業者によって組み立てが行われるとすると，部品に添付されている記憶媒体に蓄えられているポインタやアドレスなどの情報を共有する必要がある．

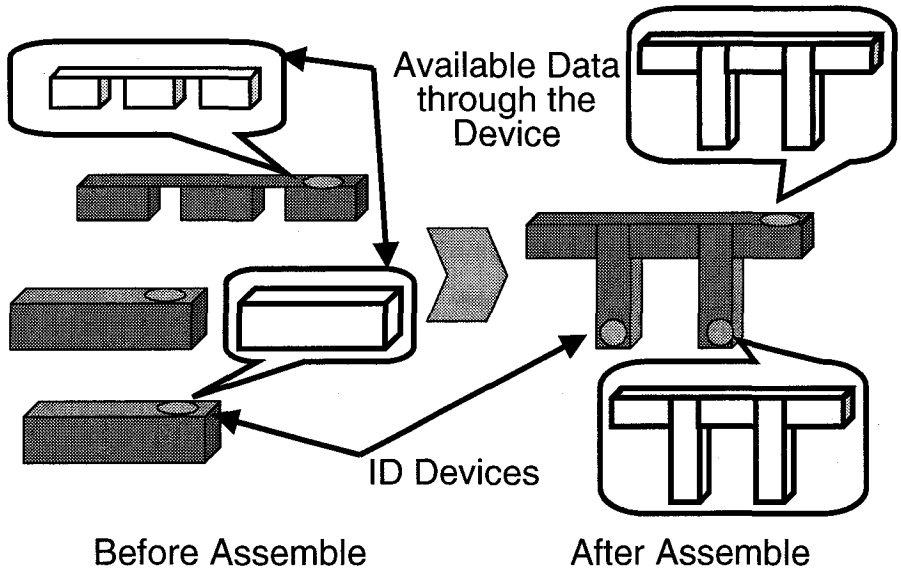


Figure 2.2: Available component data through the ID devices attached to each component

そして，組み立てられた物体を次の組み立ての場面での部品とするならば，組み立てられた物体からは，個々の部品の情報だけでなく，1つの組み立てられた物体として，組み立てられた物体に添付された複数の記憶媒体のどれからでも，組み立てられた物体の物体情報が一意に取得することが望まれる．**Figure 2.2** に概要を示す．図中の丸印は，物体に添付される記憶媒体，噴き出しは，記憶媒体に関連付けられた物体に関する情報を示す．組み立て前では，部品に添付された記憶媒体を利用して個々の部品の情報を取得できる．一方，組み立て後では，物体に添付されたどの記憶媒体からも，組み立てられた物体に関連付けられた情報を一意に取得できることを示している．情報を一意に取得できるようにすることで，ロボットの動作計画がより簡単化できると考えられる．

2.5.3 物体の位置姿勢情報

物体の位置姿勢情報を，物体と環境の状態変化への適応という側面から考察する．ロボットは，物体に対して作業を行う前に，物体の位置姿勢情報を取得する．ところで，物体の位置姿勢は，人間やロボットによる作用のために変化しうる．作用した人間やロボットが読み取り器を持つ保証はなく，位置姿勢が変化した後，計測され物体に関する情報として更新されないことが考えられる．このことから，物体の位置姿勢情報は，添付型記憶媒体から直接取得することができないことがわかる．よって，物体の位置姿勢情報の取得

は，物体の状態変化への適応という面から必要となる．

物体の位置姿勢を推定するためには，画像認識などを利用することが一般的である．画像認識は広く使われており位置姿勢の計測に用いられているが，隠れに弱く，光源の影響を受けやすい．また，誤認識の問題が存在する．誤認識を回避するためには，添付型記憶媒体による物体の識別結果をもとに，画像認識を行う手法が考えられる．しかし，この方法では光源の影響は回避できない．それに対して，添付型記憶媒体の利用法として，自由な姿勢をとりうる物体の位置姿勢を添付型記憶媒体の読み取りを利用して推定する方法が考えられる．例えば，記憶媒体が画像マークである場合，画像認識を用いて記憶媒体の位置姿勢を推定し，その結果から物体の位置姿勢を推定できる．

2.5.4 記憶媒体を用いた物体と環境の情報化における課題のまとめ

以上の議論を通して，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化，およびそれを利用したロボット作業の効率化には，多くの課題が存在することがわかった．そのうちで，本論文で取り扱う具体的な事例として，作業環境で必要な情報の蓄積，作業時における物体情報の更新，そして，物体の位置姿勢情報の取得を取り上げた．次節では，これらの課題への解決法と本研究で取り扱う意義を述べる．

2.6 添付型記憶媒体の機能を用いた課題の解決とその意義

これまでで，添付型記憶媒体が持つ機能と，機能を発揮させることでもたらされる効果，および，物体と環境の情報化の課題を検討した．この課題に対して，ロボットの知能化，センサ群を用いた環境の情報化など，問題をより包括的に解決する方法が考えられる．これに対し，本論文では，添付型記憶媒体の持つ機能およびそれらの機能から生じる効果を，以下の課題に適用させることで，添付型記憶媒体からの情報取得を利用した解決法として提案する．

本論文では，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化における課題として，物体と環境の状態変化への適応を考える．作業環境で必要な情報の蓄積，作業時における物体情報の更新と物体の位置姿勢情報の取得を取り挙げる．

まず，作業内容が変化する場合に対して，添付型記憶媒体が持つ情報更新の機能を適用する．情報更新の機能から得られる自律的な情報更新，および，ロボット間での情報共有が可能となる効果を，移動ロボット環境における作業内容の変化に対応した作業環境内でより必要とする情報を蓄積するために適用する．環境全体での作業情報の有用さを作業情報を用いることで削減できるコストを基準として定義し，その基準を用いて作業環境中に配置された記憶媒体を動的に再配置することを提案する．移動ロボットを例にしたシミュレーションを行い，有用性を示す．

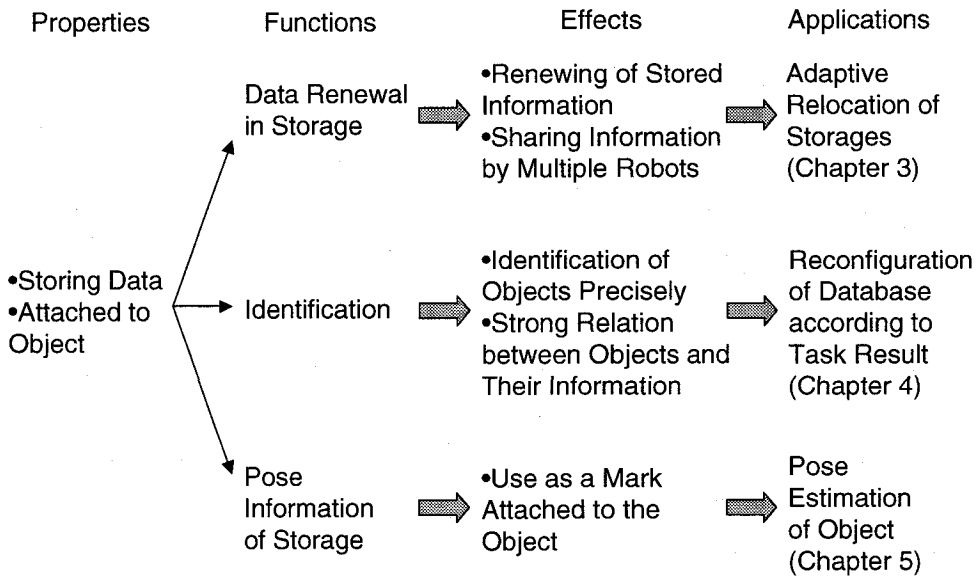


Figure 2.3: Application of functions of environment-attached storage devices

次に，作業対象となる物体の状態が変化への適応に対して，添付型記憶媒体が持つ識別の機能を適用する．物体に関連付けられているその情報を正確に操作できる効果を物体情報の更新問題に適用する．参照表を利用した，作業達成時に物体情報が蓄えられたデータベースを作成する．物体の組み付け作業をモデル化したデータベースの更新実験を行い，提案手法の可能性を示す．

そして，添付型記憶媒体が持つ位置情報を記憶媒体に関連付けられた情報として蓄えられる機能を物体の位置姿勢情報の取得に適用する．添付型記憶媒体であるタグを読み取った読み取り器の位置と，タグを利用して取得した物体上の位置情報を利用して，参照座標系における物体の位置姿勢を推定する．物体の位置姿勢推定実験を行い，提案手法の実現可能性および有用性を示す．

先に述べた記憶媒体が持つ特徴および，本論文で検討したいくつかの機能，機能を発揮させることによってもたらされる効果，そして，実際に適用する具体的な課題を **Figure 2.3** に示す．図中の左から，記憶媒体が持つ特徴，特徴から抽出できる機能，機能を利用することで得られる効果，具体的な課題への適用を示している．実際の課題への適用するためには，記憶媒体のもつ複数の機能を利用することが必要となる．図中の矢印による結合は，実際の課題に適用するにあたり，記憶媒体の特徴から最も強く現れる機能および効果を示している．

ここで，この課題を解決することの意義および，その課題に対する先行研究との比較を簡単にまとめる．記憶媒体を用いて物体や環境の情報化を実現するにあたり，情報の蓄積という課題が存在する．物体や環境とその情報との関連付けを維持するために情報を更新することが必要である．

移動ロボットにおける取得情報の更新例として，環境の変化に伴う蓄積情報の更新 [63] も存在するが，蓄積情報が正しいとして情報取得を行う研究例が多く存在する．さらに，移動ロボット以外の例，例えば，物体の操作などでは，記憶媒体から情報を取得し，作業を達成する例は多く研究されている．しかし，作業内容として，一度のみの作業を想定する場合が多く，組み付けなど複数の記憶媒体が添付された物体に関する情報を同時に更新する必要がある作業を想定した研究例は少ない．

一方，記憶媒体を添付した部品を組み付け作業に適用する場合，個々の部品の管理，組みつけられた物体の管理をどのように行うかという課題が存在する．作業時では，組み合わさった物体に添付された全ての記憶媒体から情報を取得することは，記憶媒体へのアクセスを考えると困難である．また，作業が行われたときに自動で情報を更新することが必要となる．以上のことから，自動的な物体や環境に関する情報の更新手法が望まれている．

次に，複数の添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢推定法について述べる．先に述べたように，屋内外を問わず，地面や床などの環境に IC タグなどを埋設し，複数のタグの読み取りを通して，読み取り器を持つ人やロボットの位置姿勢を推定する手法は，従来より研究されている [34–36]．また，この他にも壁面に添付された記憶媒体の読み取りを利用してロボットの位置決めを行う手法が存在する．しかし，これらの例では記憶媒体が添付された場所は動かない．一方，把持などでの作業対象となる物体に記憶媒体を添付した場合，その物体の姿勢は自由に取ることができる．

記憶媒体にバーコード等を用いた場合，物体上の記憶媒体を視覚により測定することで，物体の環境中における位置を測定できる [39,41,42]．一方で，記憶媒体に ID タグを用いた場合，読み取り器では記憶媒体であるタグの位置を測ることは想定されていない．タグに対して読み取りに用いる電磁波を発生し，反射波の強度を用いて，読み取り器に対するタグの相対的な位置を求める実験が本宮らにより行われている [69]．しかし，読み取り器から出る電磁波の性質より，タグ 1 個の読み取りのみで位置姿勢を求めることは読み取り器を複数使用する必要があり，コストが掛かる．

複数の ID タグを利用した物体の位置姿勢推定手法は，Furlani らにより提案されている [67,68]．物体の位置姿勢を物体座標系におけるタグの位置と，読み取り器の位置とを用いて，互いに平行でない最低 3 個以上のタグを利用して物体の位置姿勢を推定する．しかし，これは人間による読み取り器の動作，情報取得を想定している．ロボットに読み取り器を取り付けて物体の位置姿勢を推定する場合，動作計画を立てる必要がある．本論文では，1 つのタグを読み取ることによる物体の位置姿勢の性質を考察することで，読み取

り器の動作計画を立てることができることを示す.

また，物体の位置姿勢を推定するために，画像情報を利用して，位置情報および面の識別を可能にする手法が提案されている [87]. 実環境への適用を考えると，画像情報との組み合わせは有用である. しかし，物体と環境の情報化を実現するためには，要素技術として，記憶媒体からの情報の取得で可能な事例を検討することが必要である.

本論文で提案する物体の位置姿勢推定手法は，ロボットによる物体の位置姿勢の推定を想定した，ID の読み取りのみから物体の位置姿勢を推定する手法である. これは，記憶媒体が物体に添付されている状態を利用して，記憶媒体の取り付け位置の情報から位置姿勢を推定する手法である.

2.7 おわりに

本章では，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化，および，それを利用したロボット作業の効率化について，添付型記憶媒体の持つ特徴を，本研究の背景としてまとめた. 記憶媒体の持つ特徴から得られる機能を議論し，その機能を発揮することで得られる効果をまとめた. また，環境添付型記憶媒体を利用することの課題を整理し，本論文における解決法とその意義を述べた.

添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化における課題として，物体と環境の状態変化への適応に着目した. この課題は，問題設定が成立するために解決が必要である. 具体的な事例として，作業環境で必要な情報の蓄積，作業時における物体情報の更新と物体の位置姿勢情報の取得を取り上げた. この課題に対して本論文では，記憶媒体を利用することでもたらされる効果を適用した以下の手法をもって解決にあたる.

(1) ロボット間の作業情報の効率よい共有を目標とした添付型記憶媒体の動的配置

(2) 組み付け作業を例にした作業進捗に伴うデータベースの自動更新

(3) 複数の添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢推定

それぞれの手法について，次章以降でより詳しく議論する.

第3章　ロボット間における情報共有のための添付型記憶媒体の動的配置

3.1　はじめに

本章では，環境中の記憶媒体を有効利用するために，記憶媒体が持つ情報を更新する機能を適用する．情報更新の機能から得られる自律的な情報更新，および，ロボット間での情報共有が可能となる効果を，移動ロボット環境における作業内容の変化に対応した作業環境内でより必要とする情報を蓄積するために適用する．ロボットが環境中の記憶媒体をより多くの情報を必要とする場所に自律，動的に配置する手法を提案する．

まず，作業情報の有用さとして，その情報を蓄えておくことによる単位時間あたりの期待削減コストを評価する．そして，有用な作業情報が蓄えられるように，作業情報の取捨選択，記憶媒体の移動を行う．本手法では，記憶媒体を訪れるロボットが逐次に作業情報の有用さを評価するために，作業割合や作業頻度の変化に応じて有用な知識を蓄えることができる．作業情報として，環境中の物体の配置などが変わっても変化しない情報を蓄える．本手法では，作業情報の有用さをコストにより評価しているため，コストが定義できれば，あらゆる作業に適用可能である．本章では，複数ロボットのナビゲーションを例にシミュレーション実験を行った．記憶媒体を移動させる場合，ロボットが記憶媒体を移動させている間は，他のロボットはその媒体を利用できないため，環境中に蓄えられる作業情報の量が減少する．この影響も含めて，作業効率を評価するために，複数のロボットでの作業を仮定する．作業割合や作業頻度の変化に応じて，ロボットが必要とする作業情報を適切に環境中の記憶媒体に蓄え，全体での作業コストを削減できることを示し，本手法の有効性を示した．

3.2　有用な作業情報の蓄積

環境Sに作業ロボットがn台存在すると仮定する．各ロボットは同じ時刻tを持ち，独立して行動する．ロボットは，人間から与えられた作業を実行する能力を持ち，作業に必要となる知識も獲得できるとする．獲得した知識は，作業対象となる物体や場所に添付された記憶装置に蓄える．記憶装置は，複数の小さな記憶媒体から構成されており，その記

憶媒体は1つ1つ取り外しが可能であるとする．以下では，環境中の物体や場所を両方含めた意味で「場」と呼び，環境中の場に添付した記憶装置を $p \in P$ で表す．ここで，P は環境全体の記憶装置の集合を表し，その数を $|P|$ とする．記憶装置はロボットや人間が環境 S に添付する．

環境に配置された記憶装置を有効に使うために，記憶媒体にはできるだけ作業に有用な情報を蓄えることが望まれる．作業コストをより大きく削減できる知識をより有用な情報とする．ひとつの作業を達成する方法が複数ある場合，より少ないコストで作業を達成できる作業情報を蓄えておけばよい．

記憶装置 p に複数の作業についての情報を蓄える場合，容量の制約により，全ての作業情報を蓄えられないことがある．そこで，作業情報を蓄えておくことによる単位時間あたりの削減コストを有用さとして評価し，削減コストが大きい作業情報を蓄えることにする．有用な作業情報の蓄積は，環境中で活動するロボットによって行う．作業情報は，情報を獲得するために行動するロボット，あるいは，ロボットが別の作業を行う過程で得られることもある．本節では，時間あたりの削減コストを評価基準とした情報の有用さの定義と評価方法，有用さに基づいた作業情報の蓄積方法について述べる．

3.2.1　有用さの定義

ロボットが記憶装置 p を添付した場に関係した作業 x を達成するときの方法を $tr_p[x]$ と定義する．方法 $tr_p[x]$ を実行するために必要となる作業情報 $k_p[tr_p[x]]$，および，ロボットが目的作業を与えられてからその作業を完了するまでに要するコスト $c_p[tr_p[x]]$ が定義できる．例えば，ごみをごみ箱に入れる作業を考えると，作業を達成するためには，ごみ箱を認識し，ごみを入れる口を見つけ，物体をごみ箱に入れなければならない．これら一連の作業にかかる時間や，計算量，エネルギがコストとなる．作業時間や，消費エネルギをコストとして見積もれば，様々な作業が混在する場合にも適用可能である．

一般には，記憶装置 p を添付した場で発生する1つの作業 x に対して複数の方法 ${tr_p}^{(i)}[x]$ が存在し，それぞれの方法に対して作業情報 $k_p[{tr_p}^{(i)}[x]]$ とコスト $c[{tr_p}^{(i)}[x]]$ が存在する．その中で，コストが最小となる方法が存在し，その知識を，作業 x に要する $K_p[x]$，およびコスト $C_p[x]$ と定義する．以下，単に作業情報 $K_p[x]$，コスト $C_p[x]$ と書く．

ロボットは記憶装置 p が添付された場で作業 x を与えられた場合，作業情報 $K_p[x]$ の使用を要求する．従って，作業情報と知識の要求頻度とが一致する．このことより，次式で定義する単位時間あたりの削減コストを用いて，有用さを定義する．

$$U_{px} = \gamma_{px}(\bar{c}_p[x] - C_p[x]) \tag{3.1}$$

γ_{px} は $K_p[x]$ の要求頻度，$\bar{c}_p[x]$ は，作業 x を達成する全ての方法 $tr_p[x]$ についての，$c[tr_p[x]]$ の平均である．従って，$(\bar{c}_p[x] - C_p[x])$ は，作業情報を蓄積しない場合での作業 x を達成

するための平均コストに対しての，作業情報 $K_p[x]$ を使用することによる削減コストである．式 (3.1) は，情報 $K_p[x]$ を記憶装置に蓄えておいたときに期待できる単位時間あたりの削減コストを表している．従って，U_{px} が大きな作業情報は時間あたりに削減できるコストが大きくなるため，作業情報 $K_p[x]$ は有用となる．

3.2.2 有用さの評価法

ロボットは事前に $K_p[x]$，$\bar{c}_p[x]$，$C_p[x]$ や γ_{px} を知りえないため，ロボットが環境中で様々な行動を繰り返しながら作業情報を獲得し，これらを推定する．以下，推定値を $K'_p[x], \bar{c}'_p[x]$, $C'_p[x], \gamma'_{px}$ と置く．

記憶装置 p が添付されている場所において N 回目の作業 x を達成したとき，ロボットがそのときの作業 x を達成するために用いた作業情報 $k[tr_p[x]^{(N)}]$ と，コスト $c_p[tr_p[x]^{(N)}]$ と定義する．ここで，N 回目の作業での，作業 x を達成するための最小コスト $C'_p[x]^{(N)}$，作業情報 $K'_p[x]^{(N)}$，平均コスト $\bar{c}'_p[x]^{(N)}$ と定義すると，$N+1$ 回目の作業 x を達成したときに，記憶装置 p に蓄えられる，作業情報 $K'_p[x]^{(N+1)}$，コスト $C'_p[x]^{(N+1)}$，平均コスト $\bar{c}'_p[x]^{(N+1)}$ は，以下で記述できる．

$$K'_p[x]^{(N+1)} = \begin{cases} k_p[tr_p[x]^{(N+1)}], c_p[tr_p[x]^{(N+1)}] < C'_p[x]^{(N)} \\ K'_p[x]^{(N)} \qquad , \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.2}$$

$$C'_p[x]^{(N+1)} = \begin{cases} c_p[tr_p[x]^{(N+1)}], c_p[tr_p[x]^{(N+1)}] < C'_p[x]^{(N)} \\ C'_p[x]^{(N)} \qquad , \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.3}$$

$$\bar{c}'_p[x]^{(N+1)} = \frac{N\bar{c}'_p[x]^{(N)} + c[tr_p[x]^{(N+1)}]}{N+1} \tag{3.4}$$

式 (3.2) は，記憶装置 p に蓄えられている作業 x を達成するための最小コストの推定値 $C'_p[x]^{(N)}$ よりも，より少ないコストで作業 x を行えた場合 ($c[tr_p[x]^{(N+1)}] < C'_p[x]^{(N)}$) には，その作業方法を新たな作業情報 $K'_p[x]^{(N+1)}$ とすることを意味する．同様に，式 (3.3) は，そのときのコストを作業 x にかかる新しいコストの推定値 $C'_p[x]^{(N+1)}$ とすることを意味する．平均コスト $\bar{c}'_p[x]^{(N+1)}$ は式 (3.4) で，作業を達成するたびに逐次で推定する．この操作をロボットが作業 x を達成するたびに行うことで，作業情報 $K'_p[x]$，コスト $C'_p[x]$，コストの平均値 $\bar{c}'_p[x]$ が推定できる．

要求頻度 γ_{px} の推定値 γ'_{px} は次のように求める．ある時刻 t で作業情報 $K_p[x]$ を使用要求したかどうかを表す関数 $g_{px}[t]$ を次式で定義する．

$$g_{px}[t] = \begin{cases} 1, & \text{作業情報 } K_p[x] \text{ を使用要求した場合.} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases} \tag{3.5}$$

記憶装置を設置した時刻を T_{set_p} とすると，一定時間 T あたりの作業情報 $K_p[x]$ の使用要求度数 γ'_{px} は次式で表せる．

$$\gamma'_{px}[t] = \begin{cases} \dfrac{\sum_{\tau=t-T_{set_p}}^{t} g_{px}[\tau]}{t - T_{set_p}}, & t \leq T + T_{set_p}. \\ \dfrac{\sum_{\tau=t-T}^{t} g_{px}[\tau]}{T}, & t > T + T_{set_p}. \end{cases} \tag{3.6}$$

上の式で，T は作業情報の使用要求の履歴を保存する長さを表している．このパラメータはあらかじめロボットに与える指標である．T は，同一基準で作業情報の有用さを評価するために，事前に環境に存在する全てのロボットに与えておく．履歴長 T が小さい場合，γ'_{px} が正しく推定できないため，有用さが正しく評価できない．一方，T が大きい場合には，作業割合が変化すると作業情報 $K_p[x]$ の要求度数も変化するが，そのときに，有用さが正しく推定できない期間が長くなる．したがって，T は，全ての作業情報の有用さが評価できる程度の長さをとればよい．また，T_{set_p} は，人・ロボットを問わず，記憶装置を環境中に置く存在が，環境中にその記憶装置を配置するときに記憶装置に書き込む．

3.2.3　有用さに基づく作業情報の蓄積

ロボットは記憶装置に，有用さ U_{px} の和が大きくなるように作業情報を蓄える．記憶装置 p への作業情報の蓄積は次のように行う．記憶装置 p は m 個の記憶媒体から構成されており，簡単のために1個の記憶媒体には1種類の作業情報が蓄えられるとする．したがって，記憶装置には m 個の作業情報を蓄えられる．最初は，獲得した作業情報が m 個になるまで，書き加えていく．記憶装置に，既に m 個の作業情報が蓄えられている場合に，ロボットが別の作業情報を獲得したら，$(m+1)$ 個の作業情報のうち，最も有用でない1つの作業情報を消去する．次に，有用さの計算，蓄える作業情報の評価を数値例を用いて示す．

[数値例]

ある記憶装置 p が添付された場で獲得された作業情報について考える．以下に，ある作業にかかるコストと，作業情報の使用要求回数を示す．履歴の長さは，$T = 1000$ として計算する．

	Request	Cost
task 1	300	5.0, 8.0, 12.0, 15,0
task 2	400	3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 12.0
task 3	200	5.0, 7.0, 9.0

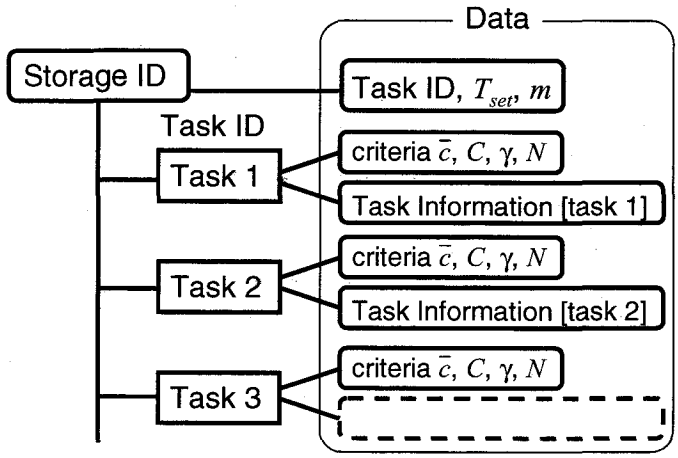


Figure 3.1: Data structure of storage

ここで，それぞれの作業に関する作業情報の有用さは，task 1 については，

$$U_{p,task1} = \frac{300}{1000}(\frac{5.0+8.0+12.0+15.0}{4} - 5.0) = 1.5$$

$\gamma_{p,task1} = 0.3$，$\bar{c}_p[task1] = 10.0$ である．同様に，task 2 では $U_{p,task2} = 1.36$，task 3 では $U_{p,task3} = 0.4$ となる．となる．また，例えば作業情報 $K_p[task\,1]$ のコストは，$C_p[task\,1] = 5.0$ となる．

ここで，記憶装置 p には 2 つの作業情報が蓄えられるとすると，作業情報を全て蓄えることができない．有用さの和を求めると，task 1 と task 2 の組み合わせで U_{px} の総和は最大となる．よって，task 3 にかかる作業情報 $K_p[task\,3]$ が消去される．

作業情報を消去する場合にも作業情報の評価値 U'_{px} と U'_{px} を計算するための $\bar{c}'_p[x]$，$C'_p[x]$，γ'_{px}，N' は記憶装置に残す．作業情報の評価値を残しておくことで，有用さの変化を知ることができる．このため，作業情報を再び獲得したときに，その情報が有用と判断されれば，再び蓄えることが可能となる．その結果，作業の頻度の変化に合わせて記憶装置により有用な作業情報の蓄積が可能となる．

一般に，ある作業を達成するために必要となる作業情報の容量は，その情報の有用さの評価値 ($\bar{c}'_p[x]$，$C'_p[x]$，γ'_{px}，N) を蓄えるための容量と比較して，十分大きいと考えられる．そこで，本章では，評価値を蓄えるための容量は十分小さく，無視できるものとして議論する．実際に適用するときには，何らかの手法で，評価値の数を制限する必要がある．例えば，ある一定期間，作業情報の使用要求が無ければ，その作業情報は使われることが無いと判断して，作業情報に対する評価値についても消去するという方法が考えられる．

Figure 3.1 に，記憶装置のデータ構造を示す．図中の "Storage-ID" は記憶装置自身の ID を，"criteria" は，それぞれの作業情報についての評価値 $(\bar{c}'_p[x], C'_p[x], \gamma'_{px}, N)$ を示す．Figure 3.1 では，task 3 については，作業情報が蓄えられていないが，"criteria" は，作業情報のある無しに関わらず蓄えられていることを示している．task 3 についての作業情報の要求頻度が大きくなり，task 3 についての作業情報が他の知識よりも有用であると判断され，コスト $C_p[task3]$ で達成できる作業情報が得られた場合には，その作業情報が蓄えられる．

3.3 記憶媒体の動的配置

十分な数の記憶媒体が配置されていない場合，ある場所では有用な作業情報が蓄えられない一方で，別の場所では有用でない作業情報が蓄えられるということが起こりうる．そこで，それぞれの場所に配置された記憶媒体をより有用な作業情報を必要とする場所に移動させることで，環境全体でより有用な作業情報を蓄えさせ，記憶装置を有効に使うことを提案する．

Figure 3.2 に，記憶媒体の動的配置の例を示す．環境中のある 2 つの場に記憶装置 A，B を添付し，A，B それぞれには，複数の記憶媒体を添付でき，1 つの記憶媒体に 1 つの知識を蓄えられるとする．濃い円は記憶媒体が存在することを表し，図中の数字は，それぞれの記憶装置に蓄えている知識の有用さ U_{px} を示す．記憶装置 A，B それぞれに最大 5 つの記憶媒体を配置でき，最初は 3 つ記憶媒体を配置している．記憶装置 A には，記憶装置 B に比べ有用な知識が多く蓄えられており，記憶装置 A で 4 番目に有用な知識は，記憶装置 B で 3 番目に有用な知識より，有用であることが期待される．そこで，記憶装置 B に存在する記憶媒体を 1 つ，記憶装置 A に移動させ，記憶装置 A で 4 番目に有用な知識を蓄える．この過程でロボットが，作業情報の有用さのみを評価していることに注目できる．記憶装置に蓄えられている作業情報の内容は評価していない．

以下に記憶媒体を置き換える条件を述べる．記憶装置の集合は P，数は $|P|$ であるので，記憶装置 p で有用さが最小の作業情報の評価値 $\min_x\{U_{px}\}$ とそれらの環境全体の平均

$$M = \frac{1}{|P|}\sum_{p\in P}\min_x\{U_{px}\} \tag{3.7}$$

とを比較する．$\min_x\{U_{px}\}$ が M より大きいならば，記憶媒体を 1 つ増やしたときに蓄えられる作業情報が，環境全体での平均より有用である可能性があるため，記憶媒体を置き，そうでないならば，記憶媒体を取り除く．こうすることで，環境全体でより有用な作業情報を蓄積できる．Figure 3.2 の場合における M は，移動前は 4.4，移動後は 3.0 となる．また，環境全体での有用さの総和の増加は 4.2 である．

ロボットの持つ記憶媒体の数を n_r，記憶装置 p の記憶媒体の数を n_p，ロボットが所持可

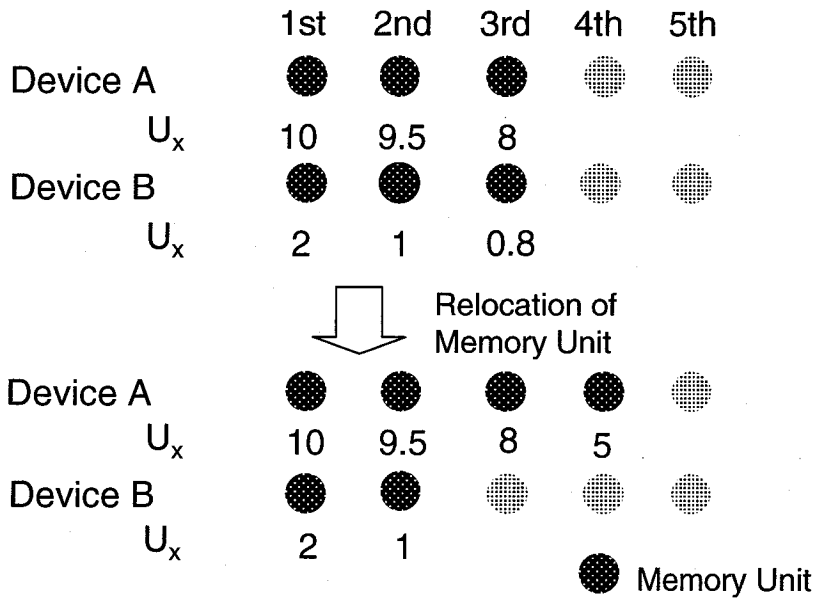


Figure 3.2: Relocation of memory unit

能な記憶媒体の数を $n_{r_{\max}}$, 記憶装置 p で配置可能な記憶媒体の数を $n_{p_{\max}}$ とすると，n_r,n_p の変化は次で表せる．

$$n_p \leftarrow \begin{cases} n_p + 1, & \min_x\{U_{px}\} \geq M, \\ & n_p < n_{p_{\max}}, n_r > 0 \\ n_p - 1, & \min_x\{U_{px}\} < M, \\ & n_p > 1, n_r < n_{r_{\max}} \end{cases} \tag{3.8}$$

$$n_r \leftarrow \begin{cases} n_r + 1, & \min_x\{U_{px}\} < M, \\ & n_p > 1, n_r < n_{r_{\max}} \\ n_r - 1, & \min_x\{U_{px}\} \geq M \\ & n_p < n_{p_{\max}}, n_r > 0 \end{cases} \tag{3.9}$$

ロボットは，実際には M の近似値として M' を以下のようにして求める．ロボットが記憶装置 p に到達したときに，p における最も有用さの小さい作業情報の評価値 $\min_x\{U_{px}\}$ が獲得でき，それを $\hat{u}_{\min_p}$ として記憶し，次式に従ってしきい値 M' を推定する．

$$M' = \frac{1}{|\hat{P}|} \sum_{p \in \hat{P}} \hat{u}_{\min_p} \tag{3.10}$$

ここで，$\hat{P}$ はロボットが訪れたことのある記憶装置の集合，$|\hat{P}|$ は，ロボットが訪れたこ

とのある記憶装置の数である．以上のように，ロボットは環境中を移動しながら M' を計算し，M' を M の代わりに用いて記憶媒体の配置を行う．

ロボットが記憶媒体を移動させている間は，その媒体を利用できないため，環境中に蓄えられる知識の容量が減少する．しかし，記憶媒体を移動させることで，環境全体でより有用な作業情報を蓄えることができ，作業割合の変化などによる有用さの変化を記憶媒体の配置に反映させることができる．その結果，より多くの有用な作業情報を使用できるので，ロボットの作業効率の向上が期待できる．

一方で，本手法では，記憶媒体を移動させるために必要とするコストは考えていない．そのため，実際には，記憶媒体を動かすことによりコストが増大され，提案手法の能力が発揮できないことも考えられる．

3.4　複数ロボットのナビゲーションへの適用

環境に蓄えられた作業情報の有用さの指標と，それを利用した記憶媒体の動的配置の効果を示すため，複数ロボットによるオフィス環境での繰り返し搬送作業を例にしたシミュレーションを行う．**Figure 3.3** にオフィスモデルと，オフィス内での記憶装置の配置例を示す．ロボットは各場所で別の場所への搬送作業を与えられる．搬送作業の補助として，目的地，交差点，外部環境への接点など，分岐点に相当する場所に，記憶装置が配置されている．ロボットは，記憶装置に蓄えられた作業情報を利用して作業を行う．また，繰り返し作業は，それぞれの場所で，各目的地への到達という作業を一定の割合を与えることで行い，与えられる目的地の割合を作業割合とする．作業頻度は時間あたりの作業が与えられる度数である．

実験では，作業割合や作業頻度が変化する場合での環境中に蓄えられている作業情報の有用さの変化，ならびに，作業達成効率として時間あたりの作業達成数の変化を調べる．また，各ロボットが独立に評価するしきい値 M' の安定性を示す．記憶媒体を多数用いれば，作業にかかるコストが小さくなり作業達成効率が向上するが，記憶媒体導入に要するコストが大きくなる．よって，環境に添付される記憶媒体の最適な数が存在し，最適数は，作業内容や記憶媒体の価格に依存する．そこで，全ての作業情報を記憶するために必要となる記憶媒体の数に対する環境に配置した記憶媒体の数の比率を変化させた場合の時間あたりの作業達成数の変化を，作業達成効率として評価して提案手法の有用性を検討する．

3.4.1　問題設定

ナビゲーション環境として，**Figure 3.4** に示す環境を用いる．図中の $\{A, \ldots, Y\}$ は，別の場所へ物体を移動する作業が与えられる場所を示している．また，図中の数値は，隣接する場所同士の距離を示す．作業を達成するコストは，ある場所から目的地までの，移

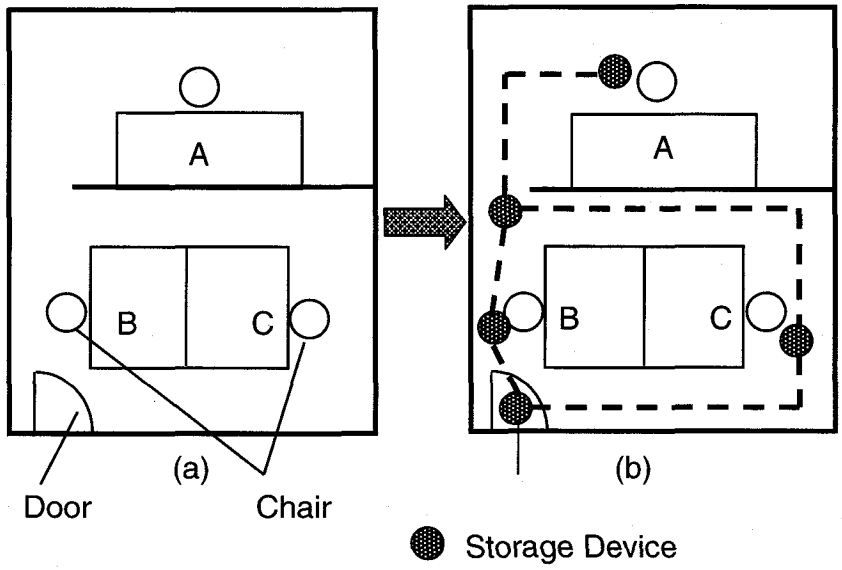


Figure 3.3: (a)Office map (b)Location of storage device

動距離として評価される．あらかじめ記憶装置は各場所に配置されている．環境中のそれぞれのロボットは，独立に作業を与えられる．ロボットは，環境全体の地図は持たず，環境中の記憶装置に蓄えられている作業情報を用い，移動方向を選択する．

今回，それぞれの場所における作業情報 $K_p[x]$ は，その場所から目的地 $p = \{A, \ldots, Y\}$ への最適な移動方向である．例えば，場所 H における目的地 Q への最適な方向は，“右”である．ロボットは，環境中を行動する際に，最適な方向 $K_p[x]$ を獲得する．作業情報 $K_p[x]$ は，今いる場所から目的地に到達するための作業情報のうち，隣接する記憶装置までの最適な移動方向が記述されている．したがって，場所 H から Q まで最小コストで移動するためには，場所 H と I にそれぞれ蓄えられた場所 Q への作業情報を必要としている．

環境全体での記憶媒体の数は，配置する比率を様々に変化させて，提案手法の効果を検討するため，各場所での記憶装置には全ての目的地への最適な移動方向は蓄えられないとする．

3.4.2 ロボットによる作業情報の獲得

ロボットは，移動距離を見積もりながら環境中を移動する．ある記憶装置に到達したときロボットは，記憶装置に到達した方向とは逆向きの，出発点から経由したそれぞれの場所への移動方向を獲得する．また，式 (3.2) を用いて，記憶装置に蓄えられているコスト

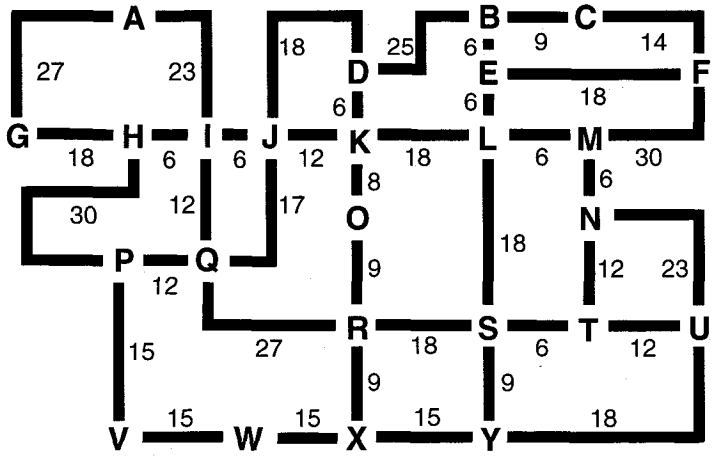


Figure 3.4: Office floor model

とロボットが移動してきたコストとを比較し，記憶装置に蓄えられているコストより小さい場合には，最適な移動方向が得られたとする．Figure 3.4 を例にすると，ロボットが，A から，I，J，K を経由して L に移動したと仮定する．そのとき，ロボットは A から L への途中経路にある $L \to A$，$L \to I$，$L \to J$，$L \to K$ への方向を獲得し，そのときにかかったコスト $c_L[tr_L[A]]$ と，これまでに L に蓄えてある $C'_L[A]$ とを比較して，最小コストの移動方向を作業情報として蓄える．その結果，例えば，L における A の最適な移動方向 $K'_L[A]$ は "左" となる．

以上の過程で，ロボットは，各場所への最適な移動方向を獲得する．記憶装置が置かれた場所でロボットが行う処理は次のようになる．ロボットが目的地への方向を記憶装置に使用要求するときに要求頻度 γ'_{px} は，式 (3.6) で更新される．ロボットは，式 (3.10) で M' を求める．そして，記憶装置に蓄えられている作業情報の有用さ U'_{px} を評価して作業情報を入れ替える．次ににしきい値 M' とその場での最も有用さの小さい知識とを比較して式 (3.8) に従って記憶媒体を置く，または，取り除く．

作業情報の有用さを評価するために，各場所に添付された記憶装置に作業情報だけではなく，γ'_{px} を評価するための最近の情報の使用要求の履歴や，有用さを評価するための $\bar{c}'_p[x]$，$C'_p[x]$ も蓄える．

3.4.3 ロボットの搬送行動

ロボットは，ある場所で，目的地 x を与えられる．そのとき，記憶装置中に目的地 x への知識が蓄えられているかどうかを調べる．もし，作業情報が利用できるならば，ロボッ

トは最適な移動方向を選択し，そうでない場合，ランダムに方向を選択する．次に，ロボットは，途中の記憶装置まで移動し，そこに蓄えられている目的地へ到達するための作業情報を調べる．この過程を，目的地に到達するまで繰り返す．目的地に到達したときには，ロボットに新しい目的地が与えられる．

3.4.4 シミュレーション

作業割合が変化した場合，ロボットが各場所を訪れる頻度が変化し，それに伴って作業頻度が変化する．この作業頻度の変化に伴って，有用さが変化し，蓄えられている作業情報が置き換わっていくことをシミュレーションにより確認する．

シミュレーションの開始時には，環境中のそれぞれの場に設置された記憶装置に記憶媒体を同数配置する．初期状態では1つの記憶装置に12個添付する．また，各記憶装置における記憶媒体の最大数 $n_{p_{\max}}$ は，環境中の目的地となる数が25なので，24となる．記憶媒体の配置のために，ロボットは記憶媒体を最大で1つ持てるとする．初期状態では，ロボットの持つ記憶媒体の数は0である．

履歴の時間長 T は，$T = 2.0 \times 10^4$[step] で固定してシミュレーションを行う．このとき，それぞれのロボットは，T の間に200 ~ 500回ほど各記憶装置に到達し，作業情報の有用さを評価する．環境中にロボットは同時に4台，独立に行動する．シミュレーション開始時には，

ロボットが各目的地を巡回できていないため，各場所における各目的地へのコスト $C'_p[x]$ が正しく評価できていない．また，開始直後では各場所における各目的地への到達するための作業情報の要求頻度が評価できていない．そのため，有用さ U'_{px} が正しく評価できないので記憶媒体の移動は，T[step] 後より開始する．

作業割合の変化への適応

作業割合をシミュレーション開始の一定時間後に変化させた場合での，場所 E における目的地に到達するための作業情報の有用さ U'_{px} の変化と，環境全体での作業情報や記憶媒体の分布の変化を調べた．また，作業割合の変化への適応として，時間当たりの作業達成数を作業達成効率として評価する．作業割合は次の(A)(B)2種類を用いる．

(A) 目的地 $\{A - H\}$ とその他の目的地との割合を5:1とする．

(B) 目的地 $\{Q - Y\}$ とその他の目的地との割合を5:1とする．

シミュレーションの開始時は，作業を割合(A)で与え，一定時間経過後，割合(B)に変化させる．作業割合は，時刻 $t = 5T$[step] で変化させた．

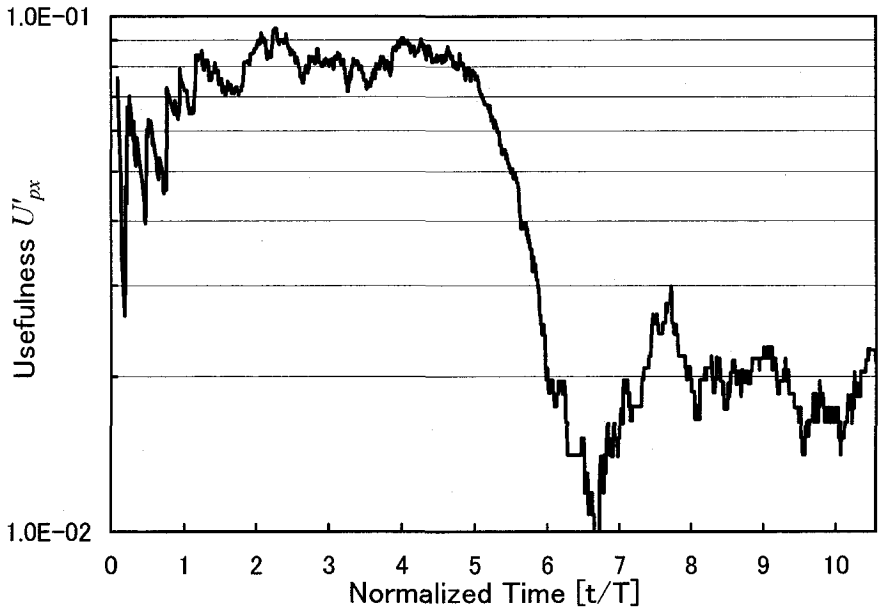


Figure 3.5: Change of usefulness for change of task ratio

Figure 3.5 に，環境中に蓄えられている，ある作業情報 (場所 E における目的地 B への方向) の有用さの変化を示す．図の横軸は，一定時間 T で正規化した経過時間，縦軸は作業情報の有用さ U'_{px} を示している．Figure 3.5 より，作業割合の変化の前後で，有用さが小さくなっている．これは，作業割合が小さくなった結果，作業情報の要求頻度が小さくなったことを表している．また，作業割合を固定して与えた期間での変化量は小さいことがわかる．作業割合が変化しない期間でも有用さが変動するのは，ある有限の履歴長 T で有用さの推定期間を区切っていて，その時々の作業の与えられ方によって有用さが変化するためである．履歴長 T を大きくして，過去の履歴を参照することで，U'_{px} の変動は小さくなるが，一方で，作業割合が変化したときの，知識使用頻度の変化に対する評価値の適応性が悪くなる．

記憶媒体の動的配置法の評価

次に，有用さの評価基準の妥当性と記憶媒体の動的配置手法の有用性について検討する．下記の 4 種類の記憶媒体の配置について，ロボットの時間当たりの作業達成数を比較する．

(1) 作業中のロボットによる動的配置 (Proposed Method)

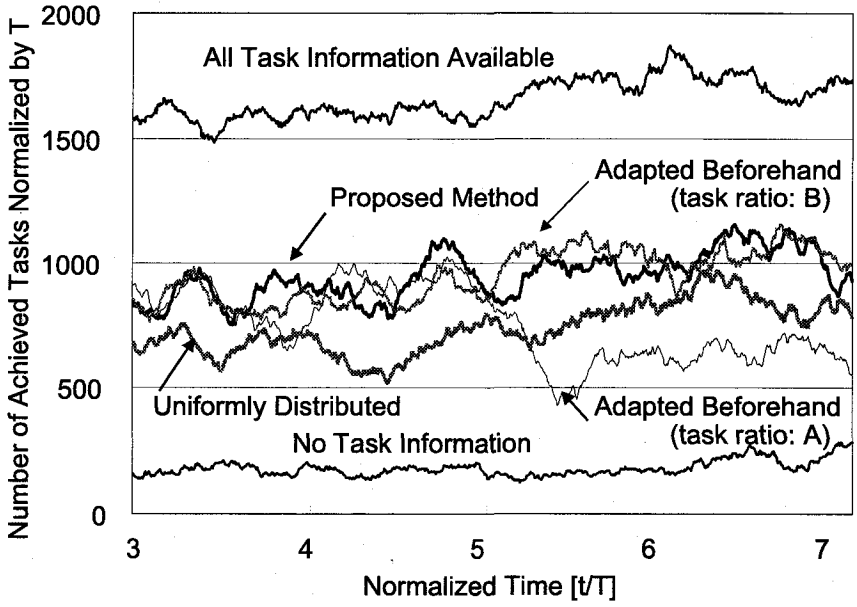


Figure 3.6: Change of number of achievement per term T (for the change of task ratio)

(2) 作業割合 (A) に適応させた配置 (Adapted Beforehand(A))

(3) 作業割合 (B) に適応させた配置 (Adapted Beforehand(B))

(4) 全ての記憶装置に一様配置 (Uniformly Distributed)

配置 (2)(3) では，あらかじめ作業割合 (A)(B) を一定時間ロボットに与えることで，作業割合に適応した記憶媒体の配置と作業情報の蓄積を求めておく．作業情報の評価，記憶媒体の移動は行わない．一方，配置 (4) では，記憶媒体の移動は行わないが，作業情報を評価し置き換える．

Figure 3.6 に，作業割合の変化前後における，時間あたりの作業達成数の変化を示す．図の横軸は一定時間 T で正規化した経過時間，縦軸は時間 T あたりの作業達成数を示している．比較として，全ての作業情報が蓄えられている場合 (All task information abailable)，作業情報が全く蓄えられていない場合 (No task information) の変化も示してある．図より，一定の作業割合が与えられている場合でも，時間当たりの作業達成数が変化していることがわかる．これは，ロボットが作業を与えられる場所と目的地によって，目的地までの移動距離が異なるので，ある小さな時間で区切った時間当たりの作業達成数という指標が，見かけ上大きく変化するためである．そこで，時間当たりの作業達成数の平均を比較する．作業割合が変化する前後の作業割合 (A) と (B) の期間における，時間当たりの作業達成数の平均を **Figure 3.7** に示す．縦軸は，時間当たりの作業達成数の平均，各棒の誤

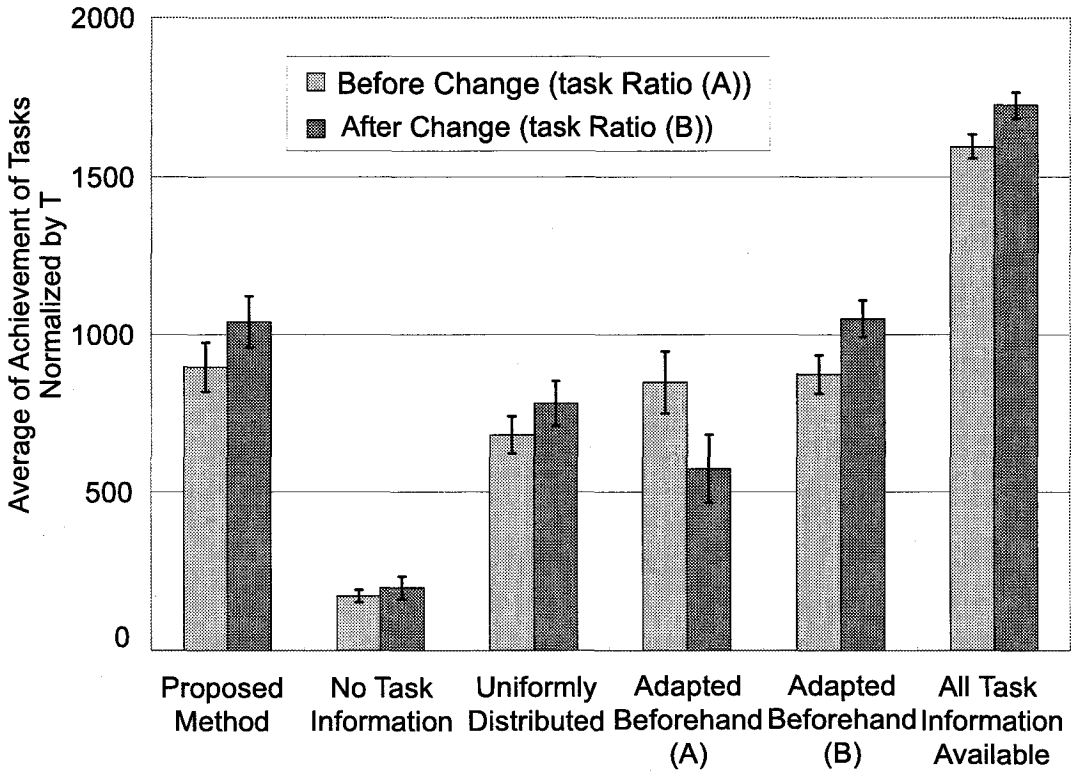


Figure 3.7: Average of achievement of tasks before and after change of task ratio

差棒は，標準偏差を表している．

Figure 3.7 では，提案手法での作業達成数の平均が，記憶媒体を各場所に同数配置した場合の作業達成数の約 1.3 倍となっている．よって，記憶媒体をより必要とする場所に移動させることによって，同じ記憶媒体数でも効率よく作業を達成できるといえる．

次に，記憶媒体の配置 (1) と配置 (2)(3) と配置 (4) について，作業割合変化前後での時間当たりの作業達成数の変化を比較する．図より，配置 (1) と配置 (2)(3) の場合では，それぞれを適応させた作業割合の期間 (配置 (2)：前半，配置 (3)：後半) で，ほぼ同様の作業達成数を示している．そして，作業割合 (A)(B) のいずれの期間でも，それぞれの割合に適応させた配置で，配置 (4) の場合よりも作業達成数が増加している．このことは，記憶媒体を有用さの評価基準により移動させ，有用な作業情報を蓄える提案手法によって，作業達成数が増加していることを示している．ゆえに，有用さの評価基準が妥当であると考えられる．

一方，配置 (3) の場合では，作業割合 (A) を与えた期間でも配置 (1) の場合と同様の作業達成数を示している．しかし，実際には，作業割合の変化に強い記憶媒体の配置をあら

Table 3.1: Change of number of stored destinations for change of task ratio

	Increasing Position	
	Destination	Stored Position
1	J	4 → 17
2	T	9 → 21
3	W	9 → 19
	Decreasing Position	
	Destination	Stored Position
1	E	20 → 6
2	C	23 → 13
3	H	21 → 9

かじめ求めることは困難である．これは，配置 (2) の場合では作業達成数が減少することからわかる．このことは，ある作業割合に適応させて蓄えた作業情報，記憶媒体の配置は，作業割合の変化したあとでも有効であるかどうかが保証できないことを示している．したがって，作業割合が変化した場合でも時間当たりの作業達成数を高くするために，記憶媒体の動的な配置が有用であることがわかる．

次に，目的地 C，E，H，J，T，W への作業情報が蓄えられている記憶装置の数の変化を **Table 3.1** に示す．作業割合 (A) における代表値として，作業割合が変化した $t = 5T$ での数，変化後の割合 (B) の代表値として $t = 6T$ での数を示す．例えば，場所 J への作業情報が蓄えられている記憶装置の数は，$t = 5T$ から $6T$ の間で 4 から 17 に増加している．表より，作業割合の変化に応じて，蓄える作業情報を自律的に変化させていることがわかる．Table 3.1 では，変化の大きかった 3 つの目的地について示してある．

作業割合の変化に伴う，環境中の各場所に存在する記憶装置に添付されている記憶媒体の数の変化を **Figure 3.8** に示す．図の横軸は，環境中の各場所を表している．縦軸は，各場所に配置された記憶装置に添付されている記憶媒体の数の平均を示している．破線は，作業割合 (A) での記憶媒体の数の平均であり，実線は作業割合 (B) での記憶媒体の数の平均を示している．実線と破線を結ぶ，白と灰色の線は作業割合の変化前後での記憶媒体の増加・減少を表している．Figure 3.8 より，作業割合の変化に応じて作業情報の有用さが変化することで，$\{Q - Y\}$ に添付されている記憶媒体の数が増加する一方で，$\{A - N\}$ に添付されている記憶媒体の数が減少していることがわかる．また，作業割合変化前で，$\{I - L\}$ は，$\{A, G, H\}$ と，$\{B - F\}$ 間の途中経路にあたるため，多くの記憶媒体が配置されている．

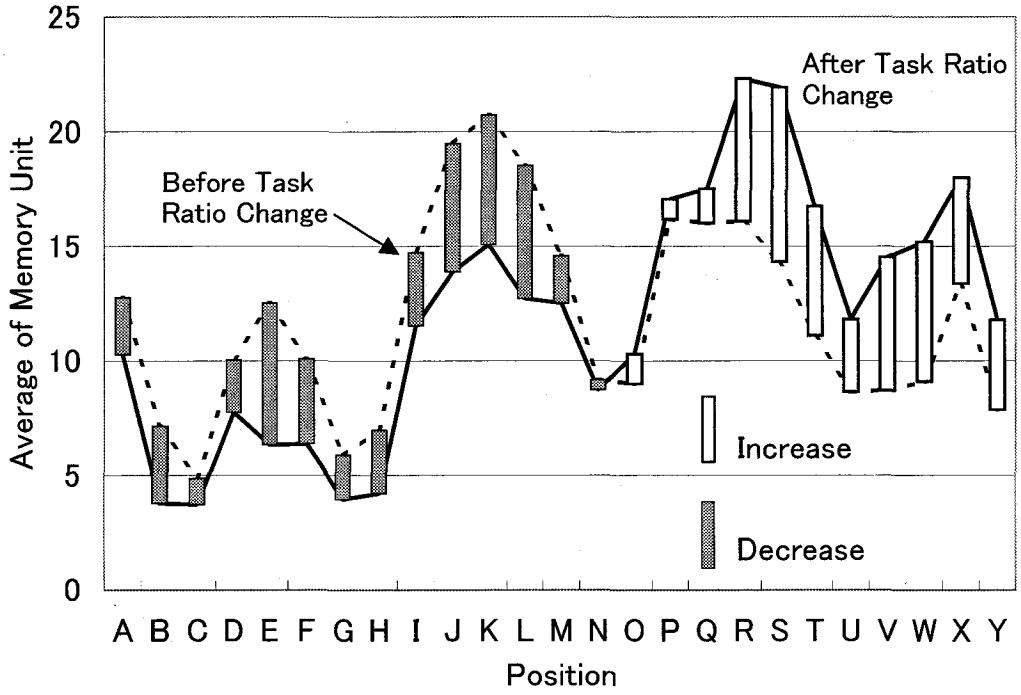


Figure 3.8: Change of average of memory unit attached to each position according to the change of task ratio

また，記憶媒体の移動基準となる，ロボットが求めたしきい値 M'(式 (3.10)) と真値 M との比を **Figure 3.9** に示す．図の横軸は，一定時間 T で正規化した経過時間，縦軸は真の有用さの平均 M とロボットが求めた M' との比である．式 (3.10) によって求めた M' と M との比より，発散せず 0.8 ～ 1.2 に安定して収まっていることがわかる．図では 1 つのロボットの M' と M との比を示したが，他のロボットに対しても同様の結果が得られた．

作業達成効率

環境に配置した記憶媒体の数，つまり，全ての作業情報を記憶するために必要となる記憶媒体の数を変化させたときの作業達成効率を比較することで，その環境に最適な記憶媒体の数を求めることが可能となる．目的地として与える場所の割合をすべて等しくした条件での，記憶媒体を配置した数に対する時間あたりの作業達成数を調べた．提案する手法を適用することでより効率よく作業を達成できることを示すために，全ての必要となる作業情報を蓄えてある条件と，記憶媒体を再配置しない条件と比較する．動的配置をしない

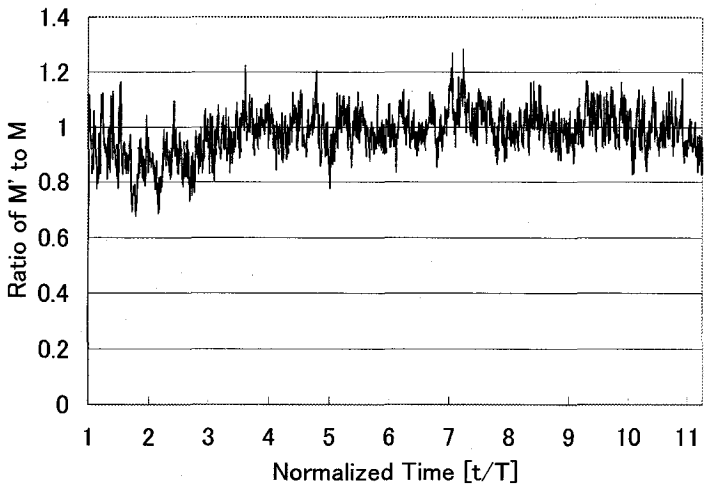


Figure 3.9: Change of average usefulness M evaluated by robots

条件では，シミュレーション開始時にランダムに選択した作業情報 K_p を蓄えてある．

Figure 3.10 に，環境に添付した記憶媒体の数を変化させた場合での，時間 T あたりの平均作業達成数を示す．図の横軸は，必要とされる記憶媒体の数に対する環境中に添付されている数の割合，縦軸は，時間 T あたりの作業達成数を示す．Figure 3.10 より，記憶媒体を再配置することで，同数の媒体を配置した他の条件と比較して，ロボットが効率よく作業を達成することができることがわかる．また，時間あたりの作業達成数に着目すると，同じ作業達成数を達成するために必要となる記憶媒体の数が，提案手法を用いることで小さくできることがわかる．例えば，時間あたりの作業達成数を 1000 にするために，記憶媒体を移動させない場合，記憶媒体を全体の 2/3 だけ配置することで条件を満足するが，提案手法を用いると，記憶媒体を 1/2 だけ配置すればよいことがわかる．

実際には，環境に添付する記憶媒体のコストを考慮する必要がある．記憶媒体数を大きくすれば，全体での作業コストが小さくなるので，記憶媒体の導入コストと作業コストの和が最小となる記憶媒体数が存在し，その数だけ記憶媒体を配置すればよいことがわかる．

提案手法では，作業情報を蓄えてある記憶媒体を作業中に移動させるため，ロボットが利用できる知識が減少する．従って，記憶媒体の数がある割合を超えると動的配置をしないほうが，時間当たりの作業達成数が多くなるということが起こりうる．

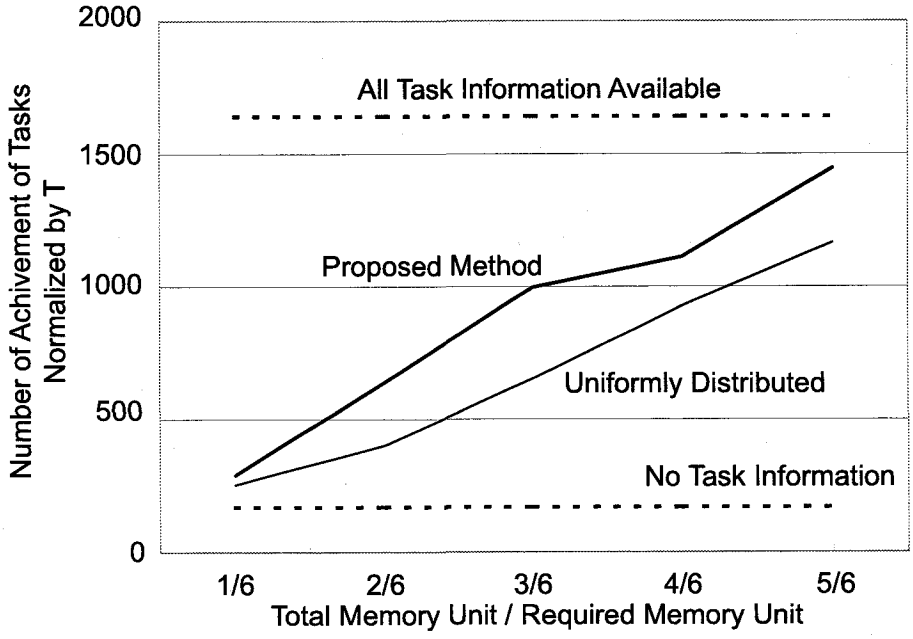


Figure 3.10: Average of achieving tasks per term T

3.5 おわりに

環境中の記憶媒体を有効利用するために，記憶媒体が持つ情報を更新するという機能を適用した．情報更新の機能から得られる自律的な情報更新，および，ロボット間での情報共有が可能となる効果を，移動ロボット環境における作業内容の変化に対応した作業環境内でより必要とする情報を蓄積するために適用した．本章では，環境中に添付された記憶媒体を有効に使用するために，記憶媒体を作業を行うロボットによって蓄える作業情報の有用さに応じて動的に配置する手法を提案した．

この手法では，作業情報を利用したときに期待される削減コストをもとに有用さを定義する．そのため，環境の状況の変化に応じて，記憶媒体を適切に移動させることができ，その結果，ロボットは効率よく作業を達成することができる．ナビゲーションのシミュレーションを通して，状況の変化に応じた，ロボットによる自律的な記憶媒体の配置を行うことで，より効率よく有用な作業情報を蓄えることができた．

提案手法は，与える作業割合や頻度は変化することはありえるが，環境そのものは変化しないことを仮定している．つまり，記憶媒体に蓄えておく作業情報 (適用例ではナビゲーションにおける移動方向) が環境の変化によって誤りとならないことを想定している．しかし，より一般化された動的環境に適用する場合，獲得した作業情報が，正しくなく

なるといったことが起こりえる [62,63]．そのため，蓄積した作業情報の正誤をロボット自身で判断し，修正することが必要となる．また，作業割合や，削減コストが有意に求められない場合が存在する [64]．蓄えている作業情報の自律的な修正は，今後の検討課題である．

第4章　作業の進捗に伴う物体情報の自動更新

4.1　はじめに

工場に代表される定型的な生産環境だけでなく，建設作業環境に代表される非定型な作業空間において，ロボット化などによる自動化，効率化が検討されている [72–80]．現在，建設作業環境では，作業対象物である建設部材と，作業計画に代表される作業情報とが独立に管理されている．さらに，作業の進捗と共に部材やその構造物は形状や状態が変化するため，それに伴って管理される情報も変化，更新されることが必要となる．その結果，情報の管理が煩雑となり，再作業の要因の1つとなっている．作業者，ロボットを問わず，作業を効率よく達成するために，また，作業対象を効率よく管理するために，作業対象となる物体そのもの，作業対象の識別情報，作業情報を統合的に管理することが提案されている [81,82]．

ところで，組み付け作業を例にした場合，作業の進捗に伴い作業対象となるそれぞれの物体の持つ，形状，作業内容，といった属性は変化する．例えば，複数の物体が1つに組み合わされたモジュールとなったとき，ロボットは，モジュールを構成しているそれぞれの物体に添付されているIDタグから，モジュールの属性を一意に取得することが望まれる．環境中の物体にタグを添付して作業を行う場合，ロボットは，タグから取得できる情報に基づいて行動する．タグから取得した物体の情報，作業情報が正しくない場合，ロボットが作業を達成することができなくなる．したがって，作業の進捗，環境の変化に伴い，物体に添付したタグに関連する情報を更新することが必要となる．

本章では，添付型記憶媒体が持つ識別の機能を，作業の進捗に伴う物体データベースの更新法に適用する．作業対象にRFIDタグ，バーコードに代表されるタグを添付することで，物体，そして，組み合わさったモジュールの情報を統合的に管理する．モジュールに添付された複数のタグからモジュールの情報を一意に取得できる一方で，モジュールを構成する各部品の情報を取得できるよう，参照表を用いた物体情報の管理手法を提案する．作業達成時に物体情報が蓄えられたデータベースを更新することで，ロボットは引き続き作業を達成できる．物体の組み付け作業をモデル化したデータベースの更新実験を行い，提案手法の可能性を示す．

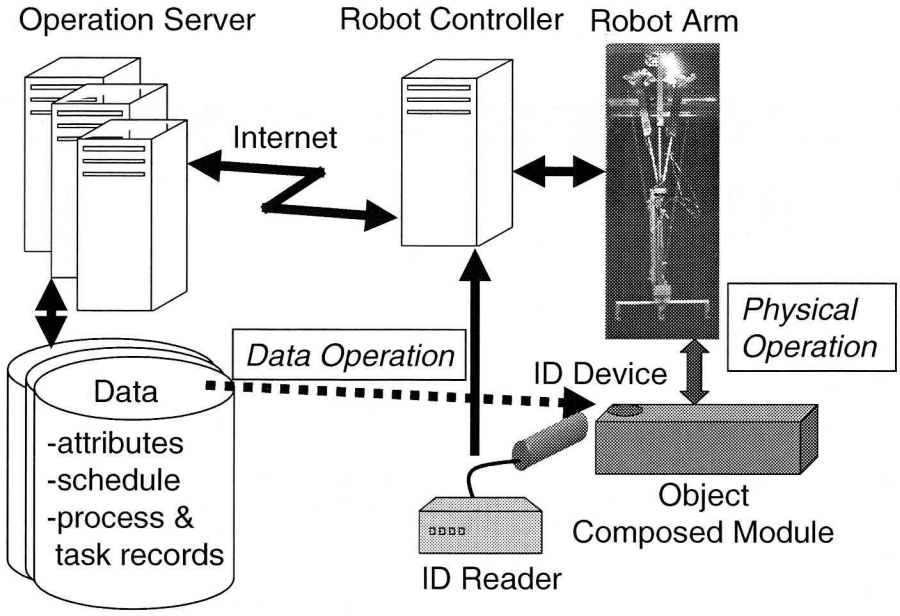


Figure 4.1: Concept of automated assembly system using the unification of objects and their information

4.2 物体の情報化を利用した自動組み立てシステム

作業対象となる物体の情報化を利用した自動組み立てシステムについて述べる．**Figure 4.1** に概念を示す．ロボットは，作業対象物に添付された記憶媒体に書き込まれている ID を介して物体固有の情報，作業情報を取得し，物体を操作する．物体の操作と同時に，ロボットからサーバへ，操作している物体の ID と作業結果を送る．一方，サーバは，物体に関連付けられた情報の操作と管理を行い，部材に関する情報を部材 ID に従って，ロボットに送る．ここで，ロボットと物体の関係，サーバと部材情報との関係について考察すると，ロボットによる部材の操作，サーバによる部材情報の操作は対応付けられる．具体的にこのシステムの部材 ID の取得手法としては，RFID タグ，バーコードなどが挙げられる．また，ロボットとサーバ間については，プライベートなネットワークによる高速通信や，インターネット接続をベースに Web とブラウザによる汎用的な通信方法など，多様なネットワーク接続，通信手段が考えられる．

ところで，サーバによる情報の管理と操作，ロボットによる ID の取得は，組み立てシステムが成立するための重要な課題となる．そこで，物体の情報を生成し管理する方法を以下で述べる．

4.3 組み付け作業における物体情報の取得

本節では，組み付け作業における物体情報の取得について議論する．物体と環境の情報化を組み付け作業に適用すると，組み付け時に組みつけられた物体に添付された記憶媒体に関連付けられた部品に関する情報を更新することが必要となる．そのときに，ロボットが情報を取得しやすいように，また，情報の更新が行いやすいように物体情報を更新する必要がある．ロボットが取得する情報を蓄積するデータベースの構成について述べる．

4.3.1 物体情報の一意性

記憶媒体を用いた物体の情報化を組み付け作業に適用する場合，モジュールとして組み付けられた部品の情報を取得する，このとき，組み付けられている部品に添付された記憶媒体を利用して，組み合わされているモジュールとしての物体の情報を取得することが望まれる．つまり，組み付けや移動などの作業を達成した場合に，情報を取得した記憶媒体に関連付けられる物体情報だけでなく，モジュールとして構成されている物体に添付された全ての記憶媒体について関連付けられた物体の情報を更新する必要がある．

この更新を行わない場合，情報を取得するために使用した記憶媒体に関連する情報のみが更新されることになる．ロボットや人間が情報を取得する場合，記憶媒体を通じて得られる情報が正しいことを保証するためには，作業を達成するために，モジュールを構成する部品に添付された全ての記憶媒体からあらかじめ情報を取得しておくことが必要となる．記憶媒体が情報を取得できない状況になることも考えられるし，また，モジュールを構成する全ての部品に添付されている記憶媒体から情報を取得することは情報を取得するための読み取り器の移動を考えると現実的では無い．したがって，組み合わさった部品に添付されている全ての記憶媒体から，同じ情報を取得することができるよう，データベースを自動で更新する枠組みが必要となる．

4.3.2 物体情報の利用

前項では，物体に添付された記憶媒体から一意な情報を取得できるように，データベースの枠組みを検討することの必要性を考えた．一方，物体情報の利用の面からデータベースの枠組みを考えると，添付されている個々の記憶媒体に関連する情報を取得することも考えられる．例えば，組み合わさったモジュールの座標系における記憶媒体の位置，姿勢が考えられる．あるいは，部品の製造元や納品日など，モジュールを構成している部品の個々の情報が考えられる．

モジュールを構成する部品の管理は，生産現場において重要な課題である．モジュールを構成している部品の個々の情報は，組み合わさったモジュールの情報として，一括して

管理することも可能である．ただ，個々の部品に注目するときに部品に添付されている記憶媒体と直接関連付けることが可能であるので，個々の部品についての情報を直接取得できることが望まれる．また，組み合わさったモジュールに添付されている個々の情報の親子関係などを解析することで，その物体がどのように組み合わさっているかを知ることもできる．

このような点から，組み付け作業に適用するための物体情報の蓄積手法として，モジュールを構成する個々の部品に関連付けられた情報を直接取得することができる枠組みが考えられる．

4.4 サーバによる情報管理と操作

本節では，物体と情報との関連付けを維持するために必要となるサーバによる情報管理手法について述べる．物体や，それが組み合わさったモジュールの，それ自身の情報や他の物体との結合状態，作業情報などは，作業の進捗によって変化する．環境中のタグを利用して情報を取得する場合，ロボットや作業者が次の作業を行う場合に，変化した情報を取得できる必要がある．そこで，特に組み付け作業時におけるサーバに蓄えられているデータの性質，特に，物体の属性について記述する．物体の属性は作業の進捗に伴い変化するが，ある種の属性は，作業達成後も作業前の属性の性質を保っている．

また，前節で述べたように，組み付け作業時における情報を更新する枠組みとして，以下の条件が考えられる．

- 組み合わさったモジュールに添付された記憶媒体から情報が一意に取得できる．
- 組み合わさっている部品個々の情報を記憶媒体から取得できる．
- 組み付け作業時に自動で更新され，ロボットや人間が必要とする情報を取得するために読む記憶媒体の数を減らす．

そこで，これらの条件を満足しうるデータベースの枠組みとして，参照表を用いた物体情報の管理手法について述べる．以下で，データベースに蓄えられている物体情報の性質について述べ，物体情報の更新手法について述べる．データベースを更新するためのコストについて議論し，参照票を用いる情報管理法の特徴を考察する．

4.4.1 データベースに蓄えられている物体情報の性質

モジュールにロボットや機械が作用することで，情報の構成が変化する．例えば，重さ，重心位置，姿勢などのような，ロボットや機械などが実際にモジュールと作用することに

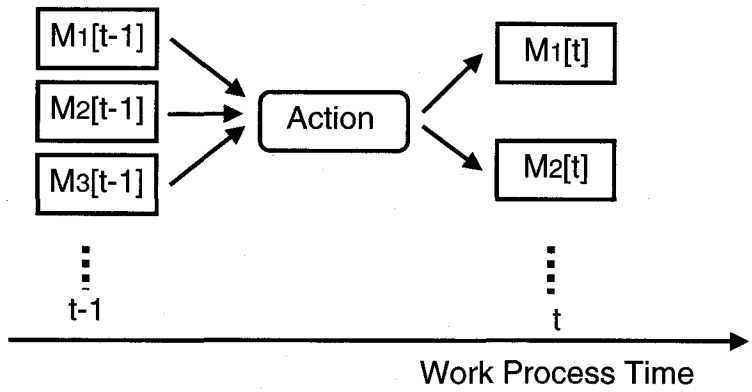


Figure 4.2: Change of data of composed module on achieving task

よって変化しうる属性をきちんと把握することは，省エネルギ化，並びに作業員や建設機械，ロボットの安全確保などに大きな効果がある．そこで，属性の変化を知るために，変化する情報をモジュールの演算として取り扱うことを考える．

Figure 4.2 に，工程時間上におけるモジュールの状態変化の一例を示す．図中の "Action" は，モジュールの更新，データベースの更新，属性の演算など，モジュールに何らかの変化が作用した時に伴う行為を示している．ここで，モジュールの更新は，位置の変化やモジュール同士の結合などで生じる変化を含むものとする．属性の演算例として，各モジュール情報から得られた重心，慣性主軸，モーメント，モジュールの寿命などから，次の工程で得られたモジュールのそれぞれの情報を新たに求めることが挙げられる．

ところで，作業時間・工程の経過と共にモジュールの属性が変化するが，新たな属性が，作業前の属性を引き継ぐもの，すなわち，依存する属性と，以前の属性を引き継がないもの，非依存な属性とに分類できる．以前の属性に依存する例として，物体の形状や，重さ，モーメント，モジュール固有の情報(経年など)が挙げられる．依存型の属性の演算は，各モジュールの前の状態を利用して行える．

一方，非依存な属性の例として，物体の見え，ロボット・作業者の違いによる状態の変化，前の状態のモジュールを加工した場合が挙げられる．ここで，ロボット・作業者による属性の差異の例として，組み付け精度，加工精度の違いが挙げられる．また，前のモジュールを加工した場合では溶接などが考えられる．この場合，新たな属性を獲得するために，センシングを必要としている．つまり，非依存な属性は，Action で新たに付け加えられる属性であるといえる．

4.4.2 サーバによる物体情報の更新

物体と物体情報とが一体化された組み立てシステムでは，作業対象となる部品は，IDタグを添付することで独自のIDを持っている．ロボットは，部品のIDを取得することで，そのIDを用いてデータベース内に蓄えられた部品の完全なデータにアクセスすることが可能である．部品が組み合わさって1つのモジュールに構成されたとき，そのモジュールには，部品の数と同じ数のタグが添付されている．ロボットがモジュールに添付されているどのタグからIDを取得した場合でも，同じモジュールの情報にアクセスできるように，データベースを更新することが望まれる．同時に，ロボットが取得したIDに関連付けられている部品固有のデータも取得できることが望まれる．データベースは，実際の物体(部品，モジュール)とそれらの情報を関連付ける参照テーブルによって，確実に操作，管理されている．したがって，サーバは，データベース中に蓄えられている部品の情報を操作するために，個々の部品に添付されているタグに割り振られたIDを通して，個々の部品のデータが蓄えられている箇所を取得できる．

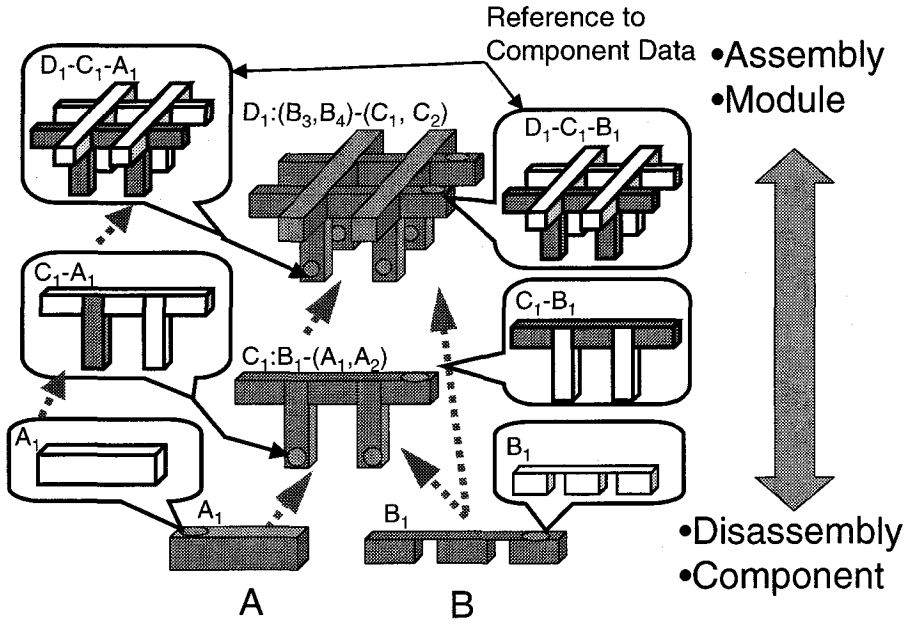


Figure 4.3: Autonomous data renewal in module assembly process

Figure 4.3に，モジュール組み立ての過程における，部品に添付されたタグから参照可能な部品，およびモジュールの情報の参照例を示す．あるモジュールの構造は，モジュール自身のシンボルの上のリストに例えば，$C_1 : B_1 - (A_1, A_2)$のように示される．部品の上に描かれた円状のマークは，ロボットがアクセスするタグを示している．ロボットはタ

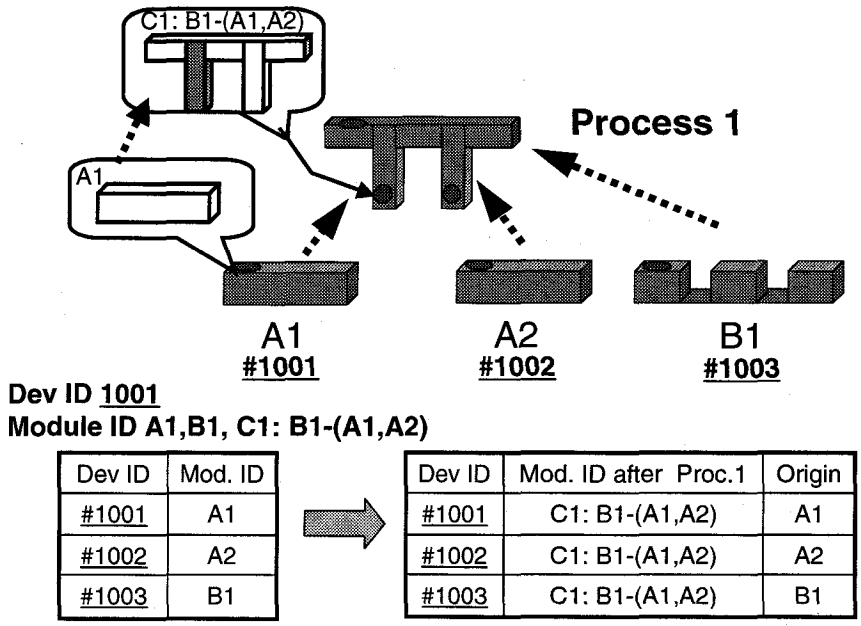


Figure 4.4: Reconfiguration of data reference

グからタグに割り振られたIDを取得できる．モジュール自身のシンボル中に書かれているリストは，組み合わさったモジュールについての部品情報 (C_1) と，モジュールを構成している部品の情報 (A_1) への参照からなっている．リストの先頭のシンボルは，データベースの更新によって付け加えられたデータのシンボルであり，それは，部品情報の参照表が直接参照している部品のデータを示している．Figure 4.3 を例にすると，部品 A_1 が，モジュール C_1 に組み合わさったとき，部品 A_1 に添付されたタグから参照されるデータは1番目はモジュール C_1 であり，2番目に部品 A_1 であることが図よりわかる．そのリストを使用することで，ロボットは組み立て時の部品に添付されているタグのIDによって参照されるアドレスを用いて部品データを取得できる．この場合，部品 A_1，B_1，他の部品 A_2 が，モジュール C_1 に組み合わさっている．モジュール C_1 に添付されている全てのタグからの第1参照を利用して，モジュール C_1 の部品情報を取得できる．一方，部品 A_1 に添付されたタグからは，参照リストをたどることで，部品 A_1 の部品情報を取得できる．なお，部品 A_1 に添付されたタグからは，部品 A_2 固有の部品情報を取得することは不可能である．

データベースの自動更新を行うために，データベース中に参照表を用意する．**Figure 4.4** は，部品 A_1 と B_1 がモジュール C_1 に組み合わされるときの，部品情報の参照表の変化を示している．組み付け時の初期状態でデータベースの参照表には，それぞれの部品の属性や，部品に対する作業情報を指すアドレスが個々の部品について対応付けがなされて

いる．モジュールが組み合わされる段階で，モジュールに組み合わされる部品やモジュールを参照するアドレスが，タグの読み取りによって取得できる．新たに組み合わさったモジュールの属性や作業情報を指すアドレスが，モジュールの組み合わせに用いられた部品やモジュールの参照表の第1番目に挿入される．今までに参照表を構成したアドレスの列は参照表の2番目以降に移される．Figure 4.4では，部品A_1，A_2，B_1に関する情報を指すアドレスの前に，モジュールC_1に関する情報を指すアドレスが挿入されている．

新しいアドレスは，モジュールの構成時に新たに生成される場合もあれば，あらかじめモジュールの情報が用意されている場合もある．いずれの場合でも，モジュールを構成している最小単位である部品に添付されたタグのIDについて更新されている．その結果，ロボットは部品に添付されたどのタグからも，組み合わさったモジュールの情報を作業時に取得できる．また，必要に応じて個々の部品の情報を取得できる．

4.4.3 情報更新に掛かるコストの評価

ここで，物体情報の更新に掛かるコストを評価する．評価指標として，データベースの検索に掛かる計算量，データベースの参照表を構築するための記憶量である [83]．データベースの更新例として，組み付けを伴わない例，および組み付けの例を考える．タグの各部品に取り付ける数の最大をk，タグを取り付けた部品の数をn，部品または組み付け途中のモジュールの数をmとする．例えば，Figure 4.4の場合，タグを取り付けた部品の数nは3，部品またはモジュールの数mは4となる．

nとmの数は製品の設計時に決まり，一般に$n < m$となる．また，取り付けた部品の数nに比較して，部品に取り付けるタグの最大数kは非常に小さい．

組み付けを行わない場合の情報更新

組み付けを行わない場合，すなわち，組み合わさった物体の状態が変化する場合について考える．例として，モジュールを移動させる場合が考えられる．この場合での作業手順は以下で示される．

(1) モジュールに取り付けられたタグを読み取る．

(2) タグのIDをもとに，参照表を検索する．参照IDと，モジュールに関する情報を取得する．

(3) モジュールに対して作業を達成する．

(4) 参照IDをもとに，モジュールに関する情報を検索し，データベース内の情報を更新する．

この場合，参照表の更新は行わない．一連の作業におけるデータベースの検索は，手順(2)(4)でおこる．手順(2)における検索コストはタグIDの検索($O(kn)$)と，参照IDを用いたデータベースの検索($O(m)$)である．手順(4)における検索コストは同様に，($O(m)$)となる．以上の結果から，情報更新に必要なコストは$O(2m+kn)$となる．

組み付けを行う場合の情報更新

物体同士の組み付けがおこる場合を考える．この場合の作業手順は以下で示される．

(1) 組み付けに用いるモジュールに取り付けられたタグを読み取る．

(2) タグのIDをもとに，参照表を検索する．参照IDと，モジュールに関する情報を取得する．

(3) モジュールに対して組み付け作業を達成する．

(4) 参照IDをもとに，モジュールを構成する部品モジュールについて，データベースを更新する．

(5) モジュールを構成する部品モジュールに関して参照表を検索し，新たに生じたモジュールを指す参照IDを参照表に挿入する．

参照表の更新は手順(5)でおこる．一連の作業におけるデータベースの検索は手順(2)(4)(5)でおこる．一度の組み付けに用いた部品モジュールの数をlとする．このとき，$l \ll n,\ m$である．手順(2)における検索コストは，タグIDの検索コスト($O(lkn)$)と，参照IDを用いたデータベースの検索コスト($O(lm)$)となる．手順(4)における検索コストは同様に($O(lm)$)となる．最後に手順(5)における検索コストは($O(kln)$)となる．以上の結果から，情報更新に必要なコストは$O(2l(m+kn))$となる．

参照表の維持コスト

ここで，提案したデータベースを維持するために必要となるコストを評価する．評価指標は参照表の大きさを用いる．組み付け過程での工程数をp，部品の総数をnとする．部品に取り付けられているタグの総数は，knであるため，データベースが正常に働くために必要となる参照表の大きさは，$O(kn+np) \longrightarrow O(np)$で表現される．組み合わせを行う場面で参照を挿入すると仮定すると，最大の参照表の大きさのオーダは，$O(n^2)$となる．

4.4.4 提案手法の特徴

物体情報を更新するために掛かるコスト，および，参照表を維持するための記憶量としてのコストを評価した．提案手法における参照表で，タグのIDに関して先頭の参照のみを扱う場合，これは関係データベース(Relational Database)における，ある1つの属性間における関係(タグの物理的なID — 物体情報の参照ID)の表現となる[84].

よって，提案手法の特徴は以下でまとめられる．

- 参照表を介して情報を取得するために掛かるコストは，関係データベースにおける属性間の関係を利用して情報を取得するコストと同じ計算量となる．
- 参照表自体が物体の組み付け構造，および，作業記録を示している．
- 物体を構成する個々の部品情報を，各レベルにおいて参照表を利用して容易に取得できる．
- 作業記録を参照表により残すため，参照表の大きさは，関係データベースにおける1つの関係記述より大きくなる．

物体情報を取得するための，データベースの操作は，関係データベースでの情報取得と同様になるため，構築が行いやすい．参照表の更新時には参照の変化が記録される．そのため，参照表は，物体の組み付け構造，および，作業記録も示している．その結果，物体全体，部品だけでなく，物体を構成するモジュールの情報も，タグに取り付けられているIDを利用して容易に取得できる．解体時の動作計画を考えると，参照表で参照数が小さい順に部品を取り外すことで，組み立ての逆順を実現できる．

そのうえ，物体を構成する個々の部品情報を参照表のみを利用して取得できる．たとえば，物体を構成する部品に不良が発生した場合，その識別が容易に行える．また，部品に取り付けられたタグのIDを利用することで，ID取得を利用した物体の位置姿勢推定法が提案されている[66]．この方法を実現するためには，個々のタグの識別が必要となるが，提案手法では容易に実現できる．

実際には，タグのIDと物体座標系における位置姿勢をデータベースにおける1つの関係として実装する．この問題にかかわらず，一般の関係データベースを利用する場合，作業記録や部品情報，モジュール情報を更新するためには，それぞれで別の関係を構築することが必要となる．組み付けなどを行う場合では．複数の関係データベースを更新することが必要となる．提案手法を用いると，作業記録，モジュール情報の保持を自動で行える．

一方，参照表は物体情報の参照のみを記述するが，関係データベースの1つの関係記述と比較すると，参照表を記述するための記憶量が大きくなる．関係データベースでは，タグのIDと物体の関連付けの関係を記述するために必要な容量は$O(n)$となる．

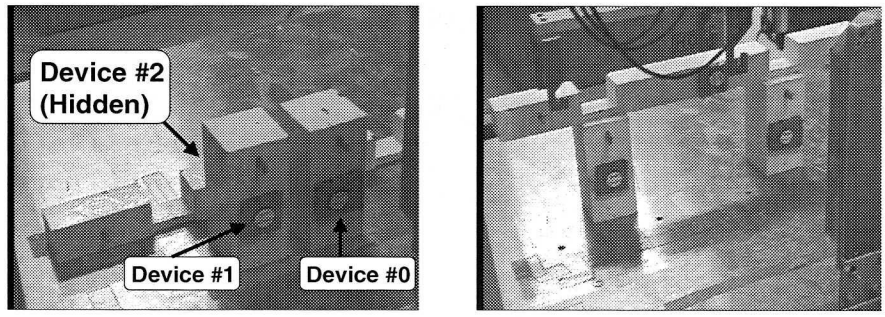
Table 4.1: Comparison of characteristics of the proposed method with those of the relational database

	Proposed Method	Relational Database
Cost of Data Renewal (Not Assemble)	$O(2m+kn)$	$O(2m+kn)$
Cost of Data Renewal (Assemble)	$O(2l(m+kn))$	$O(2l(m+kn))$
Size of the Reference Table	$O(n^2)$	$O(n)$
Number of the Renewal of Database in Assembly Process	1	Plural
Structure of Composed Module	Composed	Expressed by the other relation
Data for Each Component	Composed	Expressed by the other relation

以上の議論のまとめとして，両者の比較を **Table 4.1** に示す．本手法では，作業の記録が自動で残るため，物体内のモジュールを再利用するための取り外しへの適用が行える．また，組み合わさった物体の移動や，部品の組み付けに対応した情報を参照表を用いて取得できる．

4.5 モジュールの組み付け実験

本節では，提案手法の可能性を示すために，組み付け実験を行う．データベースの自動更新を実現するためには，ロボットによる情報取得システム，作業を達成するためのセンシングシステム，および，データベースを操作するためのサーバが必要となり，これらが密接に連携することが求められる．実験の手順を以下に示す．まず，ロボットが部品を識別する ID を，部品に添付されたタグから取得する．次に，ロボットが取得した ID をもとに得た作業情報を利用して，作業を達成する．最後に，データベースが作業結果をもとに新たなモジュールの属性情報を生成し，サーバは，データベース中のタグの参照表を更新する．**Figure 4.5** に組み付け実験の概要を示す．本実験では 2 つの柱部品と 1 つの梁部品が Figure 4.5(b) に示されている 1 つのモジュールに組み合わされる．データベースの更新過程および更新結果から，本手法の可能性を示す．



(a) Start (b) Finish

Figure 4.5: Assembly experiment

4.5.1 問題設定

部品情報の取得

本実験で議論する作業情報はロボットが作業を達成するために必要な情報である．例えば，部品の種類，部品の現在位置，部品の目標位置，そして組み立て手順である．作業情報の取得は，ロボットにとっての重要な課題である．本実験では，物体とその情報との一体化の概念をもとにした情報取得手法を用いることで，情報取得コストの削減の可能性も示す．部品に書かれた情報を取得するひとつの方法として，部品に書かれた文字やマーク，記号を認識する手法 [85] が存在する．この手法は，実際の生産現場で作業員が行っている方法と同じであり，実用化されると親和性が高いと言える．しかしながら，この手法では視覚によるセンシングを必要としており，部品の表面状態や光源の影響を強く受け，コストも大きいため，ロボットにとっては良い手法とはいえない．本実験では，情報取得の媒体として，RFID タグを用いる．RFID タグは電磁波を用いるため，温度や湿度など，環境の変化に対して頑健である．ただし，例えば建設作業環境などで用いられる金属の影響を強く受ける．したがって，実環境での適用には，十分なテストの上で使用することが必要となる．

実験環境

実験の問題設定にあたり，計算機を2台用いる．片方の計算機 (A) はロボットを制御し，もう一方の計算機 (B) は，RFID 読み取り器の制御および，部品のデータベースを管理する．それぞれの計算機はネットワークにて接続されている．計算機の構成は Figure 4.1 と

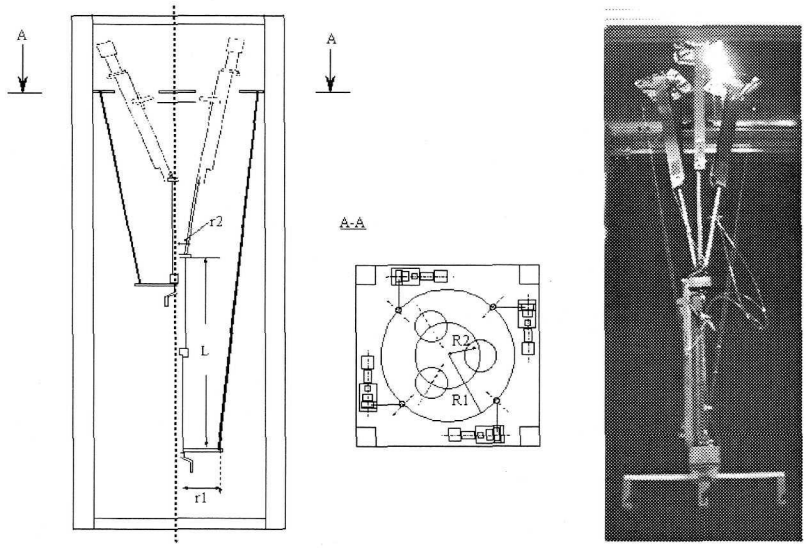


Figure 4.6: Prototype of hybrid arm

ほぼ同一になっている．実験環境における機器の接続の構成上，読み取り器は計算機 (A) ではなく計算機 (B) に接続されている．実際には，計算機 (B) とは別の計算機に接続することが必要となる．作業環境中には，読み取り器のアンテナ，部品，組み付け作業を行うためのロボットアームとしてハイブリッドアーム [77] （**Figure 4.6**）が存在する．部品についての実験条件を以下に示す．

(1) RFID タグがそれぞれの部品に添付されている．タグは OMRON V700-D13P21 を使用し，部品表面とタグの間に絶縁体を挿入してタグを添付する [86].

(2) 部品の ID は，データベースに登録され，それぞれの ID は Figure 4.5 に対応付けられる．また，それぞれのタグについての参照表があらかじめ作成されている．

(3) 部品情報は，データベースに登録されている．部品情報は，部品の情報を参照するアドレス，参照表，部品の種類 (梁，柱，モジュール)，目標位置，現在位置からなる．

(4) 部品情報はサーバにより管理される．

また，ロボットアームの実験条件を以下に示す．

(1) 実験で用いた ID 読み取り器がロボットより大きいため，ロボットに取り付けられない．そのため，読み取り器は環境中に存在する．理想的には，ロボットアームは小さい読み取り器を装備しており，目標となる作業対象物に近づくことで，部品を把持するための詳細な位置を含む作業情報を取得することが望まれる．今回の実験では，ロボットは読み取り器を持っていないため，ロボットは部品に接近する前に，部品の

ID を取得することができない．そのため，それぞれの部品と，アンテナの詳細な位置をロボットに与えておく必要がある．ロボットが情報を取得するまでの手順を以下に示す．

- ロボットはあらかじめ与えられた軌道をもとに，部品を把持する．
- ID を取得するために部品を読み取り器のアンテナに近づける．
- 読みとり器によって ID を取得し，部品についての情報を取得する．

この手順は現実的なものではないが，物理的制約のためにこのような実験条件となった．この課題は，読み取り器の改善により解決できる．

(2) 部品の把持，および，取り付けに関する局所的なアームの軌道，また，部品を把持するための部品の初期位置，および，読み取り器のアンテナの位置は既知であるとする．

(3) ロボットが部品を把持した後の目標位置，どの部品を把持するかの情報は，ロボット側には与えない．

ロボットアームは部品の ID，およびそれぞれの部品に対する作業情報を持たない．そのため，ロボットが作業を達成するためには読み取り器によって作業前に ID を取得することが必要となる．また，アームは ID を通して作業情報を取得する．

4.5.2 組み立て作業の手順

組み立て作業実験の手順を以下に示す．

(1) アームが部品を把持する．アームは実験条件より部品の詳細な位置を与えられている．

(2) アームが部品を読み取り器のアンテナの位置まで移動させる．今回の実験では，読み取り器の大まかな位置が与えられている．アンテナとタグとの通信可能距離は，本実験では約 10[cm] であった．

(3) 読み取り器はタグの ID を取得する．読み取り器は計算機 (B) に接続されているため，ロボットアーム側計算機 (A) に ID を送信する．

(4) ロボットアーム側計算機 (A) は，サーバ計算機 (B) に ID を送る．サーバは送られた ID をもとにデータベースを検索し，作業達成に必要となる情報，今回の場合は目標位置を取り出し，ロボットアーム側計算機 (A) に送信する．

(5) ロボットアーム側計算機 (A) は，局所的な動作計画を立て，それを実行する．部品を目標位置に取り付ける．

(6) ロボットアームは作業結果をサーバ計算機 (B) に作業結果を送る．サーバはデータベースを自動的に更新する．

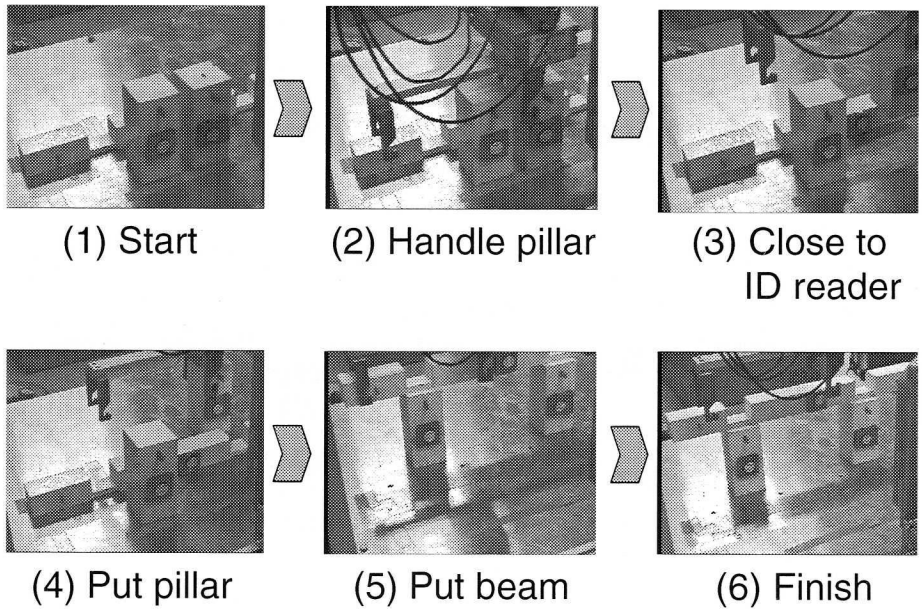


Figure 4.7: Procedure of experiment

(7) 上記の手順を組立作業が終了するまで繰り返す.

実際の実験の様子を **Figure 4.7** に示す.

4.5.3 実験結果

Figure 4.8 に組み付け前後におけるデータベース内における個々の部品の参照表の変化を示す. Figure 4.5(a) に対応するそれぞれの部品に添付されたタグの ID を取得することで, 参照される情報を Figure 4.8 に示す. 図中の数は, 部品の情報を管理するための ID を示している. 部品のデータベースの ID の脇のシンボルはそれぞれ, その ID がどの部品のデータを指し示しているのかを示している.

組み付け前の初期状態では, 参照表により, それぞれの部品の情報への参照を行っていることを示している. 例えば, タグ# 0 は柱部品の情報を指すアドレス "1000" を示している. 組み付け終了後では, モジュールの情報への同じ参照を全てのタグから指し示されていることがわかる. 例えば, タグ# 0 から# 2 まで全てのタグが組み合わさったモジュールの情報を指すアドレス "1004" を参照している. それらは, 最終的にそれぞれの部品の情報を示すアドレス "1000" から "1002" まで, それぞれ指していることが参照表から読み取れる. すなわち, それぞれのタグの ID は, 組み合わさったモジュールとそれを

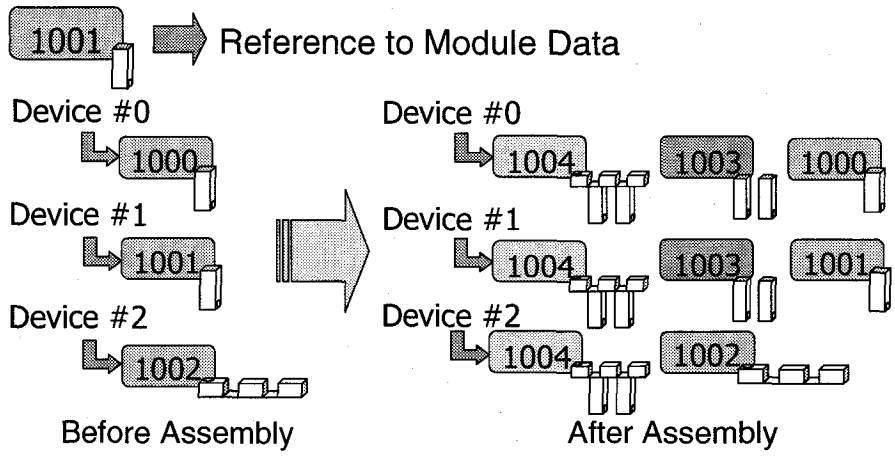


Figure 4.8: Data reconfiguration result

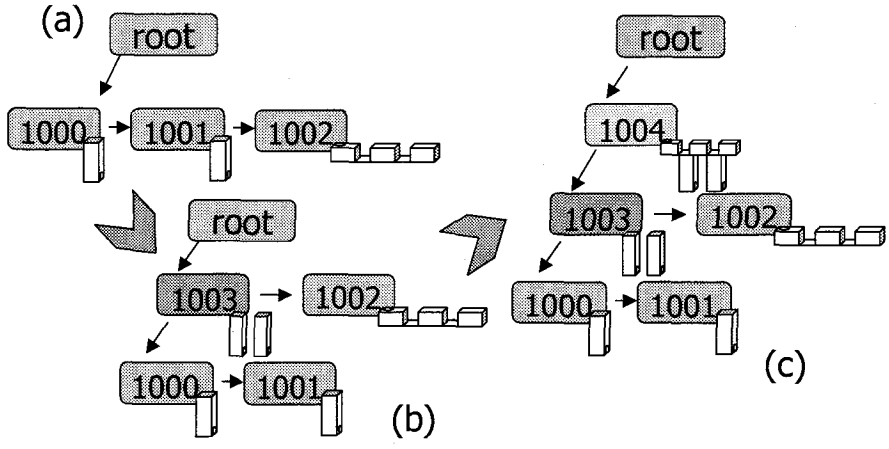


Figure 4.9: Assembly tree according to task result

構成している個々の部品の両方を指し示している．

サーバ計算機はモジュールを構成している部品に対する参照表をもとに，モジュールの組み立て木を生成することができる．組み立て木は作業結果により生成される．本実験で生成した組み立て木を **Figure 4.9** に示す．ここで，“Root” は，組み立て木の開始点を示している．組み立て木はモジュールの組み立てを反映したものであり，応用として，モジュール解体時における動作計画に適用することが考えられる．モジュールの解体手順は組み立ての逆手順であるため，組み立て木を逆にたどることで可能となる．

本実験を通して，いくつかの可能性を示した．まず，ロボットが物体に添付されたタグを通して，部品の ID を取得することができた．取得した ID をもとに作業情報を取得することが可能となった．そして，作業結果を用いた自動データベース更新が実現した．

4.6 おわりに

本章では，添付型記憶媒体が持つ識別の機能を，作業の進捗に伴う物体データベースの更新法に適用することを提案した．環境添付型記憶媒体を用いて作業環境の情報化を行う場合，作業対象となる物体とその情報の関連付けの維持が重要な課題となる．例えば組み付け作業では，一度の作業で，多数の部品に関する情報が更新される．作業を行うときに，モジュールに添付されている全てのタグから作業で使用される部品の情報を取得することは，組み付けが進むとタグが隠れ ID を取得することが困難になる．そのため，データベースの自動更新が必要となる．次に，部品やモジュールの情報を蓄えるデータベースの実際の構造，作業の進捗に伴う部品情報の更新，そして，部品情報の性質について議論した．また，データベースに蓄えられた物体情報の更新に掛かるコストを議論した．関係データベースにおける 1 つの関係と同様な情報更新のコストがかかることがわかった．

また，データベースの自動更新システムのプロトタイプを RFID タグを利用して構築した．このシステムでは，情報を更新し，新たなモジュールについての追加情報を生成できる．モジュール生成時には，モジュールを構成する部品に添付されたどのタグからも，組み合わさったモジュールと，添付されている部品自身の情報を取得することができる．

本手法が成立するためには，作業前に部品の情報を作業前に取得できることが必要となるが，本手法では，ID の取得によっては部品の位置は特定できない．ID の読み取り器では物体の位置を特定することは困難である [65]．組み立て作業を行う現場では，部品はロボットおよび作業者によって移動される．作業者によって移動した場合，部品の正確な位置を記録することは困難である．この場合，物体と情報の一体化が成り立たない．以上より，自由に動きうる物体の位置姿勢は，ロボットによって取得することが望まれる．物体の位置姿勢は視覚等のセンサを用いることにより可能となる．あるいは，環境添付型記憶媒体を物体に添付しているため，記憶媒体を利用した物体の位置姿勢の同定法が考えられる．添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢推定法を次章で述べる．

第5章　複数の添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢推定

5.1　はじめに

本章では，添付型記憶媒体が持つ，位置情報を記憶媒体に関連付けられた情報として蓄えられる機能を物体の位置姿勢情報の取得に適用する．ロボットによる自律作業を目的とした，物体に添付された複数のタグを利用した物体の位置姿勢の推定手法を提案する [65,66]．タグを読み取った読み取り器の位置と，タグから取得した物体上の位置情報を利用して，参照座標系における物体の位置姿勢を推定する．**Figure 5.1** に概略を示す．

ロボットに読み取り器を取り付けて物体の位置姿勢を推定する場合，動作計画を立てる必要がある．本章では，読み取り器の動作計画について議論し，自動化を目標とした物体の位置姿勢推定法を提案する．

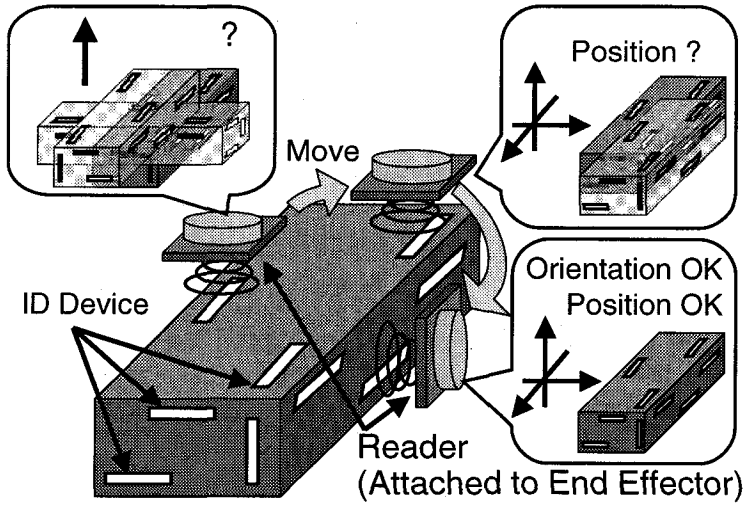


Figure 5.1: Estimation of pose of the object using ID devices

本章の構成を以下に示す．まず，読み取り器とタグの位置関係のモデル化について述べる．読み取り器の位置姿勢と物体座標系で定義されたタグの位置姿勢との関係を定義し，

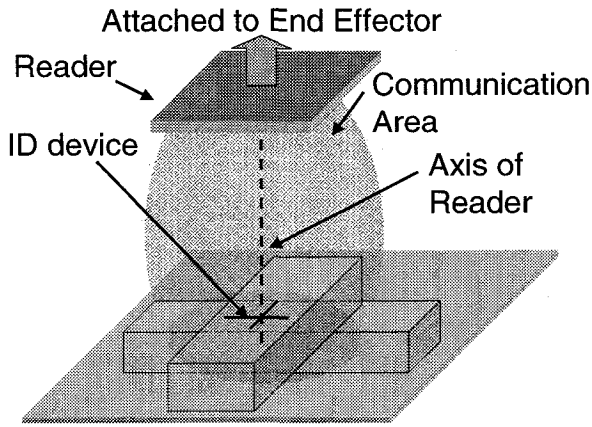


Figure 5.2: Acquisition of an ID of the device attached to the object

互いに平行な面の上に存在しない最低2個のタグを使用すれば物体の位置姿勢が推定できることを示す．モデルの正しさ，および，実機による提案手法の可能性を示すために，2次元平面上における物体の位置姿勢推定実験を行う．また，読み取り器の性質を利用した精探査手法を提案し，物体の位置姿勢推定の精度向上を図る．本手法では，読み取り器のみで物体の位置姿勢を推定できるため，システムの簡略化と，読み取り器の種類によっては，光源の影響を受けないシステムが構築が可能である．

5.2 添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢推定

5.2.1 読み取り器を利用した情報取得

Figure 5.2 に，RFID 等を利用した部材情報取得手法を示す．読み取り器を利用して，物体に添付されたタグの ID を読み取り，データベースから作業情報を取得する．また，読み取り器は，ロボットや作業機械に取り付けられており，読み取り器の位置姿勢は，ロボットや作業機械のパラメータから求められる．

対象物の把持など，物理的作業を伴う作業を行うとき，作業対象物の位置や姿勢を知る必要がある．タグをカメラで読み取り ID を取得する場合，カメラの位置姿勢を利用して物体の位置姿勢 [45] を求めることが可能である．しかし，RFID など電波を利用して ID を読み取った場合，読み取り器の読み取り範囲内にタグが存在することはわかるが，物体の位置や姿勢が得られない [65]．物体座標系におけるタグの位置情報がわかっていれば，物体に添付されたどの面のタグを読み取っているかを識別することは可能であるが，物体の位置や姿勢を直接求めることはできない．

対象物の位置，姿勢を取得するために，視覚等のセンサを用いるか [70]，あるいは，物

体の位置，姿勢の情報をデータベースに蓄えておく方法がある [71]．前者の方法ではレーザレンジファインダやカメラなど別のセンサを必要とするし，後者の方法では，作業環境内の物体の位置や姿勢を記録しておくことが必要となる．後者の方法では，人間と共存する環境では，人間による作業や，外乱が存在するため困難である．人間による作業終了後に物体の実際の位置姿勢とデータベース上での物体の位置姿勢を一致させるためには，物体の位置姿勢を正確に測定し，記録することが必要となる．

5.2.2 複数のタグを利用した物体の位置姿勢推定

物体に添付された複数のタグと読み取り器の幾何学的関係を利用した物体の位置姿勢推定法を提案する．まず，読み取り器の読み取り範囲で，タグがただ1つ存在すると仮定する．タグを読み取った位置を，読み取り器の読み取り位置とする．読み取り器がタグを読み取った結果，読み取り器によって読み取り範囲が決定できるため，参照座標系におけるタグの位置姿勢と，読み取り器の位置姿勢との対応を取ることができる．したがって，物体上の各面に複数のタグを添付することで，物体の位置，姿勢を推定できる．この手法では，タグの読み取り結果から，物体の位置姿勢推定に必要となる読み取り器の移動計画を立てることが可能である．

読み取り器の位置は，ロボットによって制御されるため，物体の位置姿勢の推定時に既知であるといえる．また，物体座標系におけるタグの位置は，読み取り器によって読み取られたIDとデータベースの照合によって得られる．その結果，視覚等のセンサを使用せずに，物体の位置姿勢を推定できる．また，この手法は，物体と情報との関連づけによって得られる特徴を全て含んでいる．したがって，ロボットは，関連付けを利用した，作業環境中の物体の識別や，作業を行う場での作業に必要な局所的な情報の取得が可能である．

次に，読み取り器の読み取り範囲内にタグが複数存在する場合を仮定する．この場合，読み取り範囲内に存在する複数のタグが読み取れる．しかし，一般には複数のタグが存在することがわかるが，タグの位置姿勢は読み取り器による読み取りでは得られない．しかし，読み取り器を移動させることで，読めるタグ，読めないタグとが区別できるため，読み取り器からみた，物体上に添付されたタグの大まかな位置関係がわかる．その結果，タグの探索コストの減少が期待できる．

本稿で提案する物体の位置姿勢推定時では，読み取り器の読み取り範囲内でタグが1つだけ存在するような読み取り器とタグの配置を選択する．この性質をもとに，位置姿勢の推定を行う物体にタグを添付する指針，およびタグが取り付けられる物体の条件を考察する．タグを同じ面に添付する場合，ロボットに取り付けられた読み取り器に平行な面での読み取り範囲の断面の大きさより大きな間隔を取ってタグを添付することが必要となる．また，後に述べるように，異なる面に複数のタグが添付されることが必要となる．

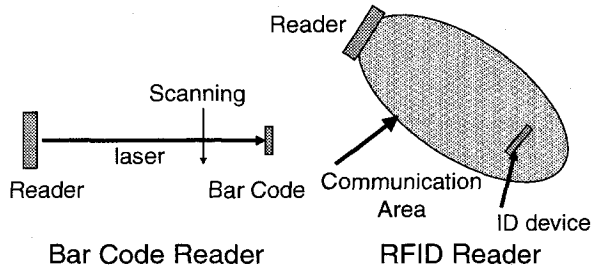


Figure 5.3: Reader example

位置姿勢を推定する物体の形状を検討する．提案手法ではタグの相対位置関係と，読み取り器の読み取り位置の相対的な位置関係から物体の位置姿勢を推定する．したがって，添付される物体の必要条件は以下で示される．

- タグの物体座標系における位置姿勢を計測でき，データベースに登録できる．
- 異なる面に複数のタグが添付できる．
- 物体が読み取り器の読み取り範囲と比較して大きい．

これらの条件を満足するならば，どのような物体の形状でも良いことがわかる．次節では，タグ同士の相対位置関係，読み取り器の読み取り位置の位置関係を利用した物体の3次元位置姿勢推定法を説明する．

5.3 物体の3次元位置姿勢推定

本節では，物体の3次元位置姿勢推定に必要となる，読み取り器の位置姿勢と物体上に添付されたタグの位置姿勢との幾何関係を導出する．まず，読み取り器の性質をもとに想定する物体の条件を述べ，読み取り器のとタグの位置姿勢関係のモデル化を行う．次に，物体の異なる面上に添付された最低2つのタグの読み取りによって，物体の位置姿勢が推定できることを示す．最後に，導出した幾何関係を用いて，実用的な物体の位置姿勢推定手法について議論する．

5.3.1 読み取り器のモデル化

はじめに，タグを読み取ったときの読み取り器のモデル化を行う．**Figure 5.3**に，想定する読み取り器の例を示す．図中左はバーコードリーダ，右はRFIDリーダである．バーコー

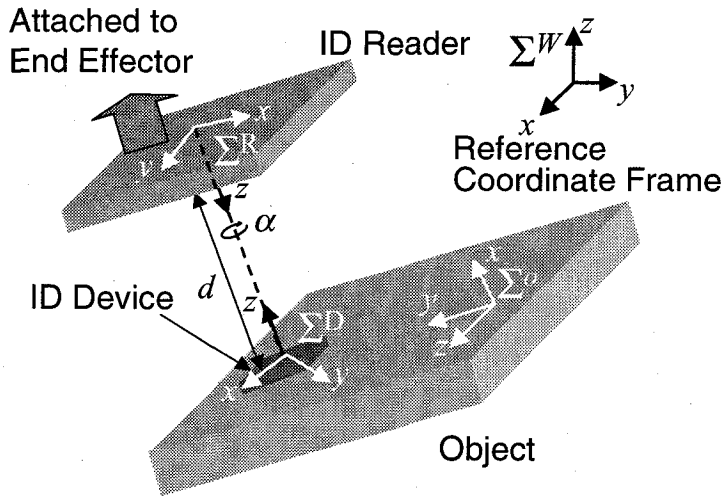


Figure 5.4: Coordinate frame of ID reader and ID device

ドリーダはレーザの走査により，リーダ正面に存在するコードを読み取る．一方，RFIDでは，リーダは電磁波を出し，通信範囲内に存在するタグに電力が供給される．それに対し，タグは反射波を出し，リーダは反射波によりID等データを取得する．以上より，読み取り器の性質を以下に挙げる．

- 読み取り器の正面軸方向に読み取り範囲が存在する．読み取り範囲はある3次元領域で表現できる．
- 読み取り範囲内にタグが存在し，かつ，タグが読み取り器を向いている場合，読み取り器はタグのIDを読める．
- 読み取り器は，タグが読み取り器の正面軸まわりに回転してもIDを読める．
- タグは表側からのみ読める．

Figure 5.4 に，ロボットのエンドエフェクタに取り付けられた読み取り器と，タグの座標系を示す．図中の Σ^W は参照座標系，Σ^R は読み取り器の座標系，Σ^D はタグの座標系を表す．また，読み取り器およびタグの座標系の向きは図に示すように取る．d は，読み取り器とタグの距離を示している．また，α は読み取り器の z 軸に関する回転を表す．

先に挙げた読み取り器の性質をもとに，読み取り器のモデル化を行う．タグを読み取れる条件として以下を仮定する．

- タグは読み取り器座標系における z 軸上に存在する．

- 読み取り器の読み取り位置とタグとの距離 d は，読み取り時においては決まらない．
- タグと読み取り器のなす角 α がどの値であっても，タグが読み取れると仮定する．
- タグの読み取り方向は1方向のみとする．すなわち，タグの z 軸の負の向きからは読めないとする．

仮定したモデルは単純であるが，ここに挙げた特徴は全ての読み取り器が持っている．読み取り器はそれぞれの機器に応じて様々な読み取り範囲を持つが，ここでは，物体の位置姿勢を推定できることを示すために単純なモデルを採用した．実際には，Figure 5.3 に示すように，読み取り範囲が存在する．そのため，読み取り器の正面から離れても，タグの姿勢がずれていてもタグを読み取ることができる．この事実は，単純なモデルを用いても物体の位置姿勢推定を可能とする一方で，位置姿勢の推定誤差が生じる原因であり，読み取り器によるタグの読み取りの失敗の原因となる．簡単な実験例での誤差の検証および，解決法は後で述べる．

なお，読み取り器の読み取り範囲を仮定した場合でも，読み取り器を用いてタグの位置姿勢は直接計測できないため，推定誤差が発生する．これを解決する方法として，読み取り器正面からのタグの位置を推定することで，推定誤差を小さくすることが考えられる．一例として，タグからの反射波の強度を測定することでタグの位置を推定する手法が提案されている [69]．よって本章では，位置姿勢推定に必要となる，読み取り器とタグとの位置関係，および，推定のための読み取り器の動作計画を議論する．

先の仮定より，読み取り器の位置に対するタグの位置は，読み取り器の座標系から参照座標系への同次変換行列を ${}^{W}T_R$，タグの座標系から参照座標系への同次変換行列を ${}^{W}T_D$ とすると，以下の関係が得られる．

$$ {}^{W}T_R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{W}T_D \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5.1} $$

また，読み取り器の z 軸の方向と，タグの z 軸の方向とが参照座標系のもとで，対向する．したがって，読み取り器の座標系から参照座標系への変換行列における回転行列部分の第3列成分 $\mathbf{a}^R$ と，タグの座標系から参照座標系の変換行列における回転行列部分の第3列成分 $\mathbf{a}^D$ との関係は，以下で表せる．

$$ \mathbf{a}^R = -\mathbf{a}^D \tag{5.2} $$

これらの関係を用いて，物体の位置姿勢推定のための幾何学的な関係を導出する．

5.3.2 物体に添付されたタグの位置姿勢

読み取った物体上のタグの位置を利用した物体の位置姿勢推定手法について検討を行う．Figure 5.4より，あるタグD1を読み取った参照座標系における読み取り器の位置姿勢を，位置 $\mathbf{p}_{R,D1} = [x_{R,D1}, y_{R,D1}, z_{R,D1}]^T$，姿勢行列 ${}^{W}R^{(D1)}{}_{R}$ で表す．また，参照座標系における読み取り器の位置姿勢を表す同次変換行列を ${}^{W}T^{(D1)}{}_{R}$ と置く．

あるタグD1を読み取ったとき，そのタグD1の位置は，式（5.1）より，次式で表せる．

$$
{}^{W}T_R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_{D1} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{W}T_o \begin{bmatrix} x_{o,D1} \\ y_{o,D1} \\ z_{o,D1} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5.3}
$$

ただし，タグD1の物体座標系における位置を $\mathbf{p}_{o,D1} = [x_{o,D1}, y_{o,D1}, z_{o,D1}]^T$ とする．また，${}^{W}T_o$ は，物体の位置姿勢を表す同次変換行列を表す．

一方，物体の姿勢は，読み取り器とタグの姿勢についての関係式(5.2)から導出する．式(5.2)における，ベクトル $\mathbf{a}^R$，および $\mathbf{a}^D$ の各係数は，タグは物体に添付されているため，それぞれ，読み取り器の姿勢行列 ${}^{W}R^{(D1)}{}_{R}$，タグの姿勢行列 ${}^{W}R_o{}^{o}R_{D1}$ の第3列成分に相当する．あるタグD1を読み取った時の読み取り器およびタグの姿勢についての関係は，次式で表せる．

$$
{}^{W}R^{(D1)}{}_{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + {}^{W}R_o{}^{o}R_{D1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \tag{5.4}
$$

式(5.4)を変形して，

$$
{}^{R}R^{(D1)}{}_{W}{}^{W}R_o{}^{o}R_{D1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = I_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \tag{5.5}
$$

を得る．ただし，I_3 は単位行列である．ここで，

$$
{}^{R}R^{(D1)}{}_{W}{}^{W}R_o{}^{o}R_{D1} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}
$$

とおく．式（5.5）は，左辺の第3列成分が $[0, 0, -1]^T$ であることを意味する．また，左辺は合成回転行列であるため，

$$
{}^{R}R^{(D1)}{}_{W}{}^{W}R_o{}^{o}R_{D1} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{5.6}
$$

と書ける．したがって，例えば，

$$
\begin{aligned}
&{}^{R}R^{(D1)}{}_{W}{}^{W}R_{o}{}^{o}R_{D1} = \\
&\quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\alpha & -S\alpha & 0 \\ S\alpha & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \mathbf{R}_{x,\pi}\mathbf{R}_{z,\alpha}
\end{aligned} \tag{5.7}
$$

と書ける．ただし，$C\alpha = \cos\alpha$，$S\alpha = \sin\alpha$，$\mathbf{R}_{x,\pi}$ は，x 軸についての π の回転を表す．

ここで，読み取り器が物体に添付されたあるタグを読み取ったときの，物体の位置姿勢について考察を行う．物体の同次変換行列 ${}^{W}T_{o}$ は，式（5.7）を用いて，次式で表せる．

$$
{}^{W}T_{o} = \begin{bmatrix} {}^{W}R^{(D1)}{}_{R}\mathbf{R}_{x,\pi}\mathbf{R}_{z,\alpha}{}^{D1}R_{o} & \mathbf{p} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.8}
$$

ただし，$\mathbf{p} = [x, y, z]^{T}$ である．よって，式（5.3）の両辺は，

$$
{}^{R}T^{(D1)}{}_{W}{}^{W}T_{o} \begin{bmatrix} x_{o,D1} \\ y_{o,D1} \\ z_{o,D1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_{D1} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5.9}
$$

となる．ここで，読み取り器の座標系における物体の位置 $\mathbf{p}^{R}$ を定義する．

$$
\mathbf{p}^{R} = [x^{R}, y^{R}, z^{R}]^{T} = {}^{R}R^{(D1)}{}_{W}(-\mathbf{p}_{R,D1} + \mathbf{p}) \tag{5.10}
$$

と置いて，式（5.9）を展開し，整理すると，

$$
\begin{bmatrix} x^{R} \\ y^{R} \\ z^{R} \end{bmatrix} = -\mathbf{R}_{x,\pi}\mathbf{R}_{z,\alpha}{}^{D1}R_{o} \begin{bmatrix} x_{o,D1} \\ y_{o,D1} \\ z_{o,D1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_{D1} \end{bmatrix} \tag{5.11}
$$

を得る．ここで，${}^{D1}R_{o}$ は定数行列であるため，式（5.7）より，x^{R}, y^{R} は，定数項を含まない三角関数の和によって表せる．よって，物体座標系の原点はある z^{R} に対して円で表せる．

上記の結果から，読み取り器が物体上に添付されたタグを読み取った場合，参照座標系における物体座標系の原点，つまり物体の位置は，読み取り器の軸を中心とする円筒上に存在する．また，物体の姿勢は1自由度の回転で表せることがわかる．

5.3.3 2個のタグを用いた物体の位置姿勢推定

物体に添付された複数のタグの位置姿勢情報を利用して，物体の位置姿勢を推定する．あるタグD1を読んだ時の読み取り器の位置$\mathbf{p}_{R,D1}$，姿勢を${}^{W}R^{(D1)}{}_{R}$とする．2個のタグを用いて物体の位置姿勢推定が可能であることを示す．

あるタグD1と別のタグD2を読み取ったときの読み取り器の位置姿勢と，物体の位置との関係は，次式で表せる．タグD1についての関係を表す．式（5.3）の両辺の変換行列は，

$$
\begin{aligned}
{}^{W}T^{(D1)}{}_{R} &= \begin{bmatrix} {}^{W}R^{(D1)}{}_{R} & \mathbf{p}^{R}{}_{D1} \\ 0\ \ 0\ \ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^{W}T^{(D1)}{}_{o} &= \begin{bmatrix} {}^{W}R^{(D1)}{}_{o} & \mathbf{p} \\ 0\ \ 0\ \ 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}
$$

であるので，式（5.3）を展開すると，次式を得る．

$$
\mathbf{p} = \mathbf{p}_{R,D1} - {}^{W}R^{(D1)}{}_{o}\mathbf{p}^{o}{}_{D1} + {}^{W}R^{(D1)}{}_{R}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_{D1} \end{bmatrix} \tag{5.12}
$$

別に読み取ったタグD2についても同様に考える．タグD2を読み取った参照座標系における読み取り器の位置姿勢を，位置$\mathbf{p}_{R,D2} = [x_{R,D2}, y_{R,D2}, z_{R,D2}]^{T}$，姿勢行列${}^{W}R^{(D2)}{}_{R}$で表すと次式で表せる．

$$
\mathbf{p} = \mathbf{p}_{R,D2} - {}^{W}R^{(D2)}{}_{o}\mathbf{p}^{o}{}_{D2} + {}^{W}R^{(D2)}{}_{R}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_{D2} \end{bmatrix} \tag{5.13}
$$

タグD1を読み取ったきのタグと読み取り器の位置姿勢の関係式に存在する物体の姿勢行列${}^{W}R^{(D1)}{}_{o}$と，タグD2を読み取ったときの物体の姿勢行列${}^{W}R^{(D2)}{}_{o}$は同じ姿勢行列${}^{W}R_{o}$である．よって，式（5.12）（5.13）より，

$$
\begin{aligned}
&\mathbf{p}_{R,D1} - \mathbf{p}_{R,D2} + {}^{W}R_{o}(\mathbf{p}^{o}{}_{D2} - \mathbf{p}^{o}{}_{D1}) \\
&\quad + {}^{W}R^{(D1)}{}_{R}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_{D1} \end{bmatrix} - {}^{W}R^{(D2)}{}_{R}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_{D2} \end{bmatrix} = 0
\end{aligned} \tag{5.14}
$$

と表せる．ただし，式（5.7）より，

$$
{}^{W}R_{o} = {}^{W}R^{(D1)}{}_{R}\mathbf{R}_{x,\pi}\mathbf{R}_{z,\alpha_{D1}}{}^{D1}R_{o} \tag{5.15}
$$

である．

式(5.14)の第1行，第2行，第3行成分でそれぞれ方程式ができる．未知数は，α_{D1},d_{D1},d_{D2}であるので，α_{D1}について解析解を導出する．α_{D1}は，物体の姿勢行列のパラメータであるので，$\sin\alpha_{D1}$,$\cos\alpha_{D1}$を求めることに帰着できる．読み取り器とタグの座標系に関する物体の姿勢行列，すなわち，物体座標系に関するタグの姿勢行列の逆行列の要素を示す．

$$
\begin{aligned}
{}^{W}R^{(D1)}{}_{R} &= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}, \\
{}^{W}R^{(D2)}{}_{R} &= \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix}, \\
{}^{D}R^{(D1)}{}_{o} &= \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5.16}
$$

式 (5.14) の${}^{W}R^{(D1)}{}_{o}(\mathbf{p}^{o}{}_{D2}-\mathbf{p}^{o}{}_{D1})$の項を展開する．$\mathbf{p}^{o}{}_{D2}-\mathbf{p}^{o}{}_{D1}=[d^{o}{}_{x},d^{o}{}_{y},d^{o}{}_{z}]^{T}$と置くと，次式で表せる．

$$
\begin{aligned}
{}^{W}R^{(D1)}{}_{o}\begin{bmatrix} d^{o}{}_{x} \\ d^{o}{}_{y} \\ d^{o}{}_{z} \end{bmatrix} &= {}^{W}R^{(D1)}{}_{R}\mathbf{R}_{x,\pi}\mathbf{R}_{z,\alpha_{D1}}{}^{D}R^{(D1)}{}_{o} \\
&= \begin{bmatrix} e_1 C\alpha_{D1} - f_1 S\alpha_{D1} - g_1 \\ e_2 C\alpha_{D1} - f_2 S\alpha_{D1} - g_2 \\ e_3 C\alpha_{D1} - f_3 S\alpha_{D1} - g_3 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5.17}
$$

を得る．ただし，

$$
\begin{aligned}
e_i &= (m_{i1}k_{11} - m_{i2}k_{21})d^{o}{}_{x} \\
&\quad + (m_{i1}k_{12} - m_{i2}k_{22})d^{o}{}_{y} + (m_{i1}k_{13} - m_{i2}k_{23})d^{o}{}_{z} \\
f_i &= (m_{i1}k_{21} + m_{i2}k_{11})d^{o}{}_{x} \\
&\quad + (m_{i1}k_{22} + m_{i2}k_{12})d^{o}{}_{y} + (m_{i1}k_{23} + m_{i2}k_{13})d^{o}{}_{z} \\
g_i &= m_{i3}(k_{31}d^{o}{}_{x} + k_{32}d^{o}{}_{y} + k_{33}d^{o}{}_{z})
\end{aligned}
$$

この結果を式 (5.14) に代入することで，次式を得る．

$$\begin{bmatrix} {d^R}_x \\ {d^R}_y \\ {d^R}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 C\alpha_{D1} - f_1 S\alpha_{D1} - g_1 \\ e_2 C\alpha_{D1} - f_2 S\alpha_{D1} - g_2 \\ e_3 C\alpha_{D1} - f_3 S\alpha_{D1} - g_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} d_{D1} + \begin{bmatrix} n_{13} \\ n_{23} \\ n_{33} \end{bmatrix} d_{D2} = 0 \tag{5.18}$$

ただし，

$$\mathbf{d}^R = \begin{bmatrix} {d^R}_x \\ {d^R}_y \\ {d^R}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{R,D1} - x_{R,D2} \\ y_{R,D1} - y_{R,D2} \\ z_{R,D1} - z_{R,D2} \end{bmatrix} = \mathbf{p}_{R,D1} - \mathbf{p}_{R,D2}$$

である．ここで，式 (5.18) の，第1,2,3行目をそれぞれ，式 (5.18-1,2,3) と置く．$n_{13} \neq 0$ の場合，式 (5.18-1) (5.18-2) の d_{D2} の項を消去すると，

$$\begin{aligned}(n_{23}e_1 - n_{13}e_2)C\alpha_{D1} - (n_{23}f_1 - n_{13}f_2)S\alpha_{D1} + (m_{13}n_{23} - m_{23}n_{13})d_{D1} \\ + n_{23}{d^R}_x - n_{13}{d^R}_y + n_{23}g_1 - n_{23}g_2 = 0\end{aligned} \tag{5.19}$$

を得る．同様に，式 (5.18-1) (5.18-3) についても，

$$\begin{aligned}(n_{33}e_1 - n_{13}e_3)C\alpha_{D1} - (n_{33}f_1 - n_{13}f_3)S\alpha_{D1} + (m_{13}n_{33} - m_{33}n_{13})d_{D1} \\ + n_{33}{d^R}_x - n_{13}{d^R}_z + n_{33}g_1 - n_{13}g_3 = 0\end{aligned} \tag{5.20}$$

が得られる．次に，式 (5.19) (5.20) について，d_{D1} の項を消去し，整理すると次式を得る．

$$\begin{aligned}\mathbf{e} \cdot (\mathbf{a}^{R,D1} \times \mathbf{a}^{R,D2}) \cos\alpha_{D1} - \mathbf{f} \cdot (\mathbf{a}^{R,D1} \times \mathbf{a}^{R,D2}) \sin\alpha_{D1} \\ + \mathbf{d}^R \cdot (\mathbf{a}^{R,D1} \times \mathbf{a}^{R,D2}) + \mathbf{g} \cdot (\mathbf{a}^{R,D1} \times \mathbf{a}^{R,D2}) = 0\end{aligned} \tag{5.21}$$

ただし，

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}, \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}, \mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{a}^{R,D1} = \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{a}^{R,D2} = \begin{bmatrix} n_{13} \\ n_{23} \\ n_{33} \end{bmatrix}$$

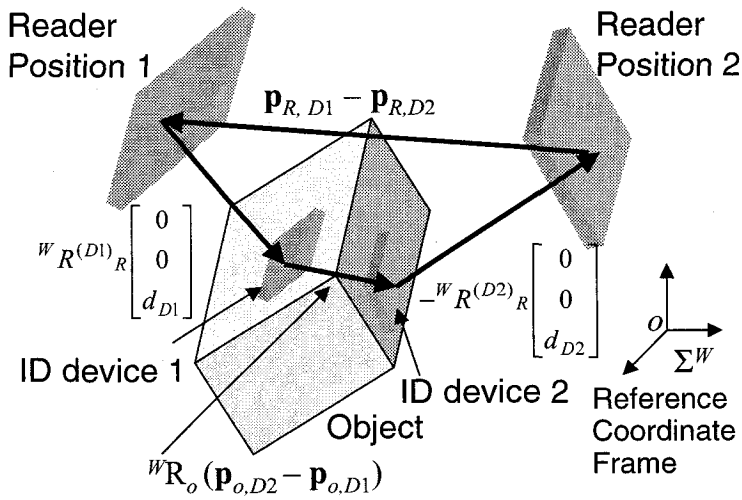


Figure 5.5: Relation of ID reader and ID devices attached to an object

である．ここで，

$$\begin{cases} p = \mathbf{e} \cdot (\mathbf{a}^{R,D1} \times \mathbf{a}^{R,D2}) \\ q = \mathbf{f} \cdot (\mathbf{a}^{R,D1} \times \mathbf{a}^{R,D2}) \\ r = (\mathbf{d}^{R} + \mathbf{g}) \cdot (\mathbf{a}^{R,D1} \times \mathbf{a}^{R,D2}) \end{cases}$$

と置くと，式（5.21）は，次式で表せる．

$$p \cos \alpha_{D1} - q \sin \alpha_{D1} + r = 0 \tag{5.22}$$

これを解いて，

$$\sin \alpha_{D1} = \frac{qr \pm p\sqrt{p^2 - r^2 + q^2}}{p^2 + q^2} \tag{5.23}$$

が得られる．p, q, r はそれぞれ観測および，データベースからの検索により得られる定数である．したがって，$|\sin \alpha_{D1}| \leq 1$ となるものが，$\sin \alpha_{D1}$ の解となる．これを用いて，$\cos \alpha_{D1}, d_{D1}, d_{D2}$ を順に求めることが可能となり，物体の位置姿勢が求まる．

式（5.21）より，タグ D1 とタグ D2 を読み取った時の読み取り器の姿勢の向きのベクトルの外積を使用していることがわかる．よって，同じ向き，もしくは物体の反対側に添付されたタグを読み取った場合は，この方法では，物体の姿勢行列が求まらないことを示している．

この結果を式（5.12），(5.15）に代入することで，物体の位置と姿勢行列が求まる．**Figure 5.5** に式（5.14）の関係を図示する．物体上におけるタグの相対位置と，読み取り器の相対位置から，物体の位置姿勢を求めていることがわかる．

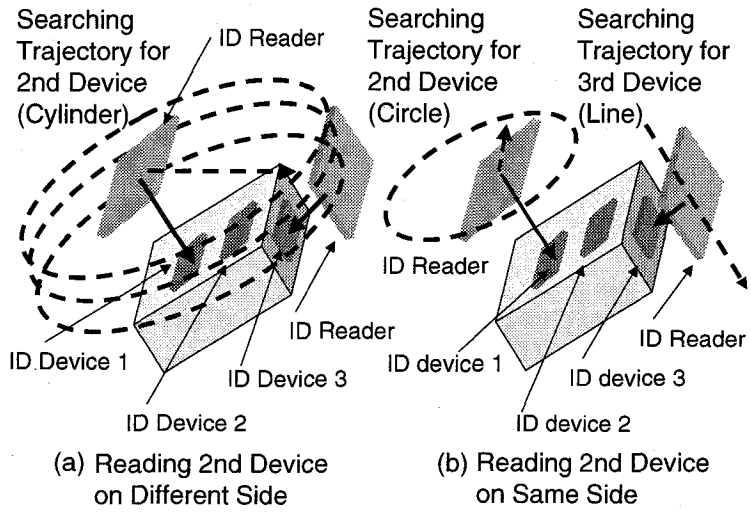


Figure 5.6: Planning of ID reader for pose estimation

ここで，${}^{W}R^{(D1)}{}_{R}$ と，${}^{W}R^{(D2)}{}_{R}$ の第3列成分が等しい，すなわち，読み取り器が同じ方向のタグを読んでいる場合を考える．タグは物体に添付されているので，互いに平行な面上に添付されたタグを読み取った場合である．このとき，$d = d_{D1} - d_{D2}$ と置くことで，d は式（5.14）で求められるが，d_{D1}，d_{D2} は決定できない．ただし，物体の姿勢行列は求まる．

互いに平行な面に添付された複数のタグを利用して物体の位置姿勢を推定する場合，物体側に，例えば，物体がある平面上に存在するなどの別の仮定を必要とする．また，3個以上のタグを使用する場合，複数のタグの相対位置関係から，物体の位置姿勢を求めることができる．この場合，誤差が減少できるため，物体の位置姿勢精度の向上が期待できる．

5.3.4 読み取り器の動作計画

ここで，位置姿勢推定のための読み取り器の動作計画について議論する．式（5.11）より，物体に添付されているタグを1個読んだ場合，物体の位置，すなわち物体座標系の原点は，円筒面上に存在することがわかる．したがって，物体の位置姿勢を推定するために必要となる2個目，3個目のタグの探索軌道を，**Figure 5.6** に示す．

Figure 5.6(a) は，2個目のタグの探索として，物体の異なる面に添付されているタグを選択した場合の読み取り器の軌道，(b) は，2個目のタグとして，物体の同じ面に添付されているタグを選択し，2つのタグの読み取り結果をもとに3個目のタグを探索する場合の読み取り器の軌道を示している．ここで，Figure 5.6(a) における2個目のタグの探索軌

道，(b) における3個目のタグの探索軌道は，それぞれ以下の情報を取得するための軌道である．(a) では，1個目のタグを読み取ったときに得られていない，読み取り器とタグの距離，および，1軸の回転情報を取得するための軌道である．(b) では，2個のタグを読み取ったときに得られていない，読み取り器とタグとの距離を取得するための軌道である．これらの読み取り器の軌道と，読み取り器の姿勢は，1個目のタグを読み取ったときに，データベースを参照し，隣接するタグまでの距離とタグの姿勢を取得することで得られる．

Figure 5.6(a) より，異なる面上のタグを読む場合の2つ目のタグを探索するための軌道は，円筒空間軌道となる．円筒空間軌道は，読み取り器の移動距離を考えると，コストが掛かる．そこで，3つのタグの読み取りによる，物体の位置姿勢推定法を考察する．

Figure 5.6(b) の場合，2個目のタグを読み取るための軌道が円軌道となる．前節の議論より，2個目のタグを読み取った段階では，読み取り器の向きに対して奥行き方向の物体の位置が定まらないが，物体の姿勢は求められる．したがって，3個目のタグを読むときには，物体の姿勢が定まっているため，探索のための軌道は，並進軌道で表現できる．これらの読み取り器の軌道は，2個目のタグとして，異なる面のタグを選択した場合と比較すると簡単である．

また，この場合，3個のタグを読み取った読み取り器の位置姿勢を使用するため，タグの相対位置関係が3組表現できる．そのため，位置姿勢の推定精度の向上が期待できる．

ここで，実際の読み取り器を使用した場合での，物体の位置姿勢推定に必要な読み取り器の動作計画を考える．読み取り器軸正面からのタグの位置姿勢のずれを，並進成分，回転成分で考える．並進成分のずれの場合，タグの想定する読み取り範囲内にタグが存在すると読めるため，本探索手法を使用した場合，推定結果の誤差が生じる．一方，回転成分のずれは，物体が回転しているため，2個目，3個目のタグの読み取り器の軌道で想定する読み取り範囲内に，タグが存在しないことも考えられる．そのため，探索範囲の幅を大きくとることが必要となる．

また，読み取り器の読み取り範囲内にタグが存在すれば，タグを読み取ることができるため，実際には，タグを見つけるだけでなく，読み取り器の軸正面に近い位置を読み取り器を利用して取得することが必要となる．

5.4 物体の位置姿勢推定実験

本節では，前節で提案したタグを利用した物体の位置姿勢推定手法の実機での実現性，および，読み取り器のモデルの正しさを示すために位置姿勢の推定実験を行う．ここでは，ロボットの姿勢が自由に取れないため，2次元平面上に存在する物体の位置姿勢の推定実験を行う．

5.4.1 問題設定

物体の位置姿勢推定手法の数値例として，2次元平面上の物体の位置姿勢を推定する．応用例としては，地面上に置かれた建設部材の位置姿勢を推定することが考えられる．簡単のために以下の問題設定を行う．

物体には2個のタグが同一面上に添付されており，物体の物体座標系の z 軸方向に関する大きさは0である．そして，読み取り器はタグを読めていることとする．また，物体は平面 $z=0$ 上に存在する．読み取り器がタグ D_x を読み取った位置 $\mathbf{p}_{R,D_x}$ を $(x_{R,D_x}, y_{R,D_x}, z_{R,D_x})$ とする．ここで，$z_{R,D_x}>0$ とする．タグを読み取った時の姿勢を $(\pi,0,0)$ とする．姿勢の第1，2，3成分は，それぞれ，参照座標系に対する x,y,z 軸の回転とする．また，物体座標系におけるタグ D_x の位置 $\mathbf{p}_{o,D_x}$ を $(x_{o,D_x}, y_{o,D_x}, 0)$，タグの姿勢 $(0,0,0)$ とする．

前節の結果に，上記の条件を代入することで2次元平面上に存在する物体の位置姿勢の推定モデルを得ることができる．タグ D1 について，タグの読み取り位置 $\mathbf{p}_{R,D1}$ と，タグの物体座標系における位置 $\mathbf{p}_{o,D1}$ との関係は，式（5.12）を用いて表せる．式中の姿勢行列 ${}^{W}R^{(D1)}{}_{o}$ は，式（5.15）より，

$$
{}^{W}R^{(D1)}{}_{o} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_{D1} & -\sin\alpha_{D1} & 0 \\ \sin\alpha_{D1} & \cos\alpha_{D1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.24}
$$

と表せる．したがって，物体の位置 $\mathbf{p}=[x,y,z]^T$ は，式（5.12）（5.24）より，

$$
\begin{aligned}
\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_{R,D1} \\ y_{R,D1} \\ z_{R,D1} \end{bmatrix} \\
&- \begin{bmatrix} \cos\alpha_{D1} & -\sin\alpha_{D1} & 0 \\ \sin\alpha_{D1} & \cos\alpha_{D1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{o,D1} \\ y_{o,D1} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_{D1} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5.25}
$$

と表せる．タグ D2 についても同様に表せる．よって，2つのタグの読み取り位置の相対位置関係は，姿勢行列 ${}^{W}R_o$ が同一であることに着目すると，式（5.14）より，$d_x^o = (x_{o,D1}-x_{o,D2}), d_y^o = (y_{o,D1}-y_{o,D2})$ と置くと，x 座標，y 座標については次式で表せる．

$$
x_{R,D1} - x_{R,D2} = d_x^o \cos\alpha_{D1} - d_y^o \sin\alpha_{D1} \tag{5.26}
$$

$$
y_{R,D1} - y_{R,D2} = d_x^o \sin\alpha_{D1} + d_y^o \cos\alpha_{D1} \tag{5.27}
$$

式（5.26）（5.27）の左辺を消去すると，次式を得る．

$$
\{-d_x^o(y_{R,D1}-y_{R,D2}) + d_y^o(x_{R,D1}-x_{R,D2})\}\cos\alpha_{D1}
$$

$$+\{d_x^o(x_{R,D1}-x_{R,D2})+d_y^o(y_{R,D1}-y_{R,D2})\}\sin\alpha_{D1}=0. \tag{5.28}$$

したがって，回転 α_{D1} は次式で表せる．

$$\alpha_{D1}=\mathrm{atan2}(a_x,-a_y) \tag{5.29}$$

ただし，

$$\begin{aligned} a_x &= -d_x^o(y_{R,D1}-y_{R,D2})+d_y^o(x_{R,D1}-x_{R,D2}) \\ a_y &= d_x^o(x_{R,D1}-x_{R,D2})+d_y^o(y_{R,D1}-y_{R,D2}) \end{aligned}$$

である．式 (5.25) に代入することで，(x,y) は計算できる．物体の z 座標については，最初の仮定より $z=0$ とする．したがって，$d_{D1}=z_{R,D1}$ となる．姿勢については，姿勢行列が式 (5.24) と与えられるため，例えば，$(0,0,\alpha_{D1})$ となる．タグ D1,D2 のいずれを用いても，(x,y) は求まる．

以上の議論より，姿勢については，1軸の回転 θ で表現することとする．以下では，読み取り器の平面上の位置 (x_{R,D_x},y_{R,D_x})，および，タグの物体座標系における位置 (x_{o,D_x},y_{o,D_x}) を考える．また，物体の位置姿勢を，(x,y,θ) で表現する．

5.4.2 位置姿勢推定実験

読み取り器として OMRON V700HMD-11 を使用し，読み取り器はハイブリッドアーム [77] のエンドプレートに取り付けられている．なお，読み取り器の読み取り範囲は，約 30[mm] である．計算機は，1台はアームの制御 (Robot Controller)，もう1台は，読み取り器の制御，および，データベース，物体の位置推定 (Operation Server) に使用した．タグは物体に取り付けておき，取り付けた位置を物体の座標系での位置としてタグ ID と共にデータベースに登録する．

1個目のタグの探索では読み取り器は y 軸の負から正の向きへの掃引で行った．2個目のタグの探索は円軌道を与えた．探索領域は，アームの動作領域より，x，y ともに，±130[mm] とした．物体には，2つのタグを添付した．タグ間の距離は，100, 200[mm] の2種類設定した．物体座標系での位置は，間隔 100[mm] の条件で $\mathbf{p}_{o,D1}=(0,50),\mathbf{p}_{o,D2}=(0,-50)$，間隔 200[mm] の条件では，$\mathbf{p}_{o,D1}=(0,-100),\mathbf{p}_{o,D2}=(0,100)$ である．

実験の手順を以下に示す．**Figure 5.7** にこの流れを図示する．

(1) 読み取り器を用いて1個目のタグを探索する．

(2) タグを検知したら，タグの ID を読み取り器で読み取る．取得したタグの ID をサーバに送る．

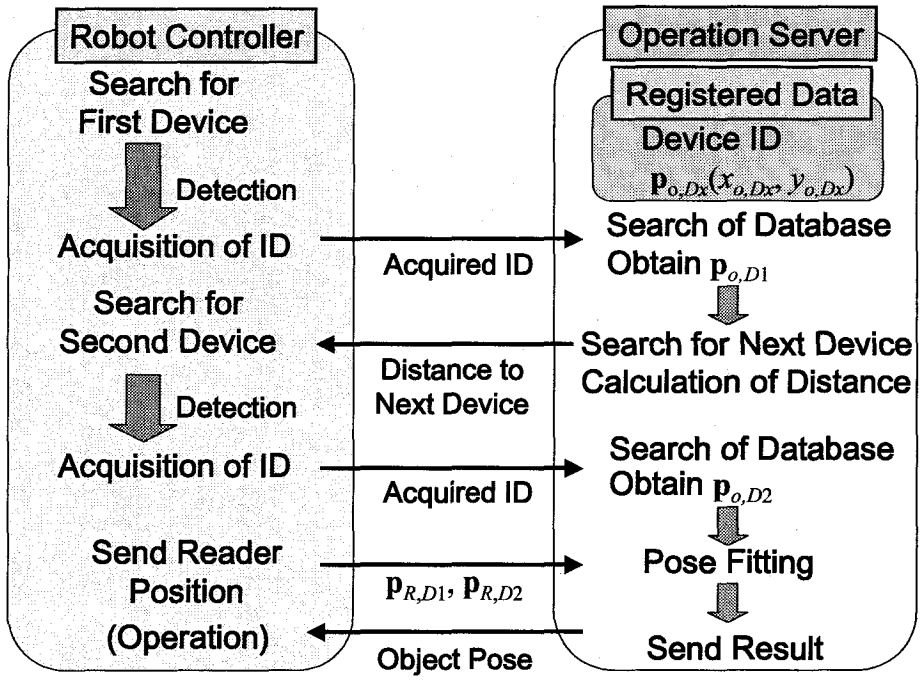


Figure 5.7: Flow of the pose estimation experiment

(3) サーバは，送られてきた ID を用いて，データベースを検索する．対応する物体座標系における位置 $\mathbf{p}_{o,D_x}$ を取得する．

(4) 物体座標系における位置を用いて，最も近接するタグを検索する．最も近いタグまでの距離を，ロボットに送る．

(5) 2 個目のタグを探索する．円軌道で探索し，円軌道の半径は，サーバから送られてきた距離である．

(6) タグを検知したら，タグの ID を読み取り器で読み取る．取得したタグの ID をサーバに送る．

(7) サーバは送られてきた ID を用いて，データベースを検索する．対応する物体座標系における位置 $\mathbf{p}_{o,D_x}$ を取得する．

(8) ロボットは 2 つのタグを読み取った位置 $\mathbf{p}_{R,D_x}$ をサーバに送る．

(9) サーバはタグの物体座標系における位置 $\mathbf{p}_{o,D_x}$ と，ロボットから送られてきた読み取

Table 5.1: Experiment result of pose estimation

Distance of devices [mm]	Trial (Success /Total)	Position Error [mm] (Ave./Std./Max)	Orientation Error [deg] (Ave./Std./Max)
100	19/20	20.9/7.0/29.0	10.8/11.6/36.3
200	14/20	15.0/6.7/26.9	8.3/5.3/18.8

り位置 $\mathbf{p}_{R,D_x}$ を用いて，物体の位置姿勢 $\mathbf{p}$ を推定する．

(10) 推定した物体の位置姿勢 $\mathbf{p}$ をロボットに送る．

ロボットは，サーバから送られてきた距離を用いて，その場で2個目のタグの探索軌道を計画する．1個目のタグは掃引で探索するため，ロボットは，環境中に存在する未知物体の位置姿勢を推定していることになる．

ある物体の姿勢について物体の位置姿勢を2つのタグの読み取りから推定することを1回の推定とする．物体は，探索範囲内に2個のタグが入り，かつ，様々な姿勢をとるように置いた．実験の結果を **Table 5.1** に示す．表中の Trial は実験の試行数，Success は2個のタグを読み取ることができ，位置姿勢の推定が成功した数を示している．(Ave./Std./Max) は，それぞれ，推定が成功した場合における，誤差の平均，標準偏差，最大値を示している．表より，タグ間の距離が変化しても，位置推定誤差は有意な差が存在しない．一方，姿勢推定誤差はタグ間の距離が大きいと，小さくなることがわかる．2個のタグを読み取り，推定結果が得られた場合を成功，2個目のタグを読み取れなかった場合を失敗とした．

位置姿勢の推定が失敗する理由を以下に述べる．モデルの定義では，読み取り器の軸上にタグが存在する場合にタグを読み取れると仮定していたが，実際には，読み取り器の読み取り範囲内にタグが存在する場合に，タグを読み取れる．読み取り位置がずれているため，2個目のタグを探索するときに，動作計画から想定される読み取り器の読み取り範囲内に2個目のタグが入らない場合がある．そのため，物体の位置姿勢の推定に失敗する．

また，物体の位置姿勢が推定できた場合の，物体座標系の原点の位置誤差の分布を **Figure 5.8** に示す．全体的に，推定した原点の位置が実際の物体の原点の位置より，y 軸の負の方向に分布していることを示している．これは，1個目のタグを探索する際に，y 軸の負から正に向かう向きへ掃引を行ったことにより起こったと考えられる．タグの読み取り範囲による物体の位置姿勢推定の誤差について次節で議論する．

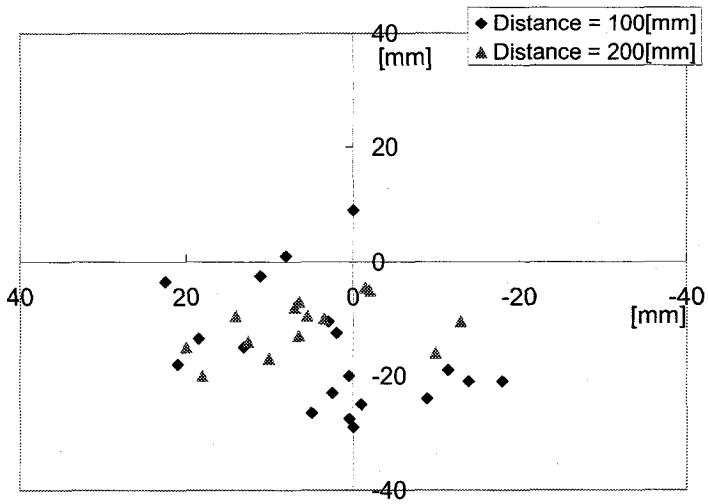


Figure 5.8: Position error of object origin **p**

5.5 物体の姿勢の誤差評価

本節では，2次元平面上に存在する物体の位置姿勢を推定した時に発生する姿勢の誤差を評価する．提案したモデルでは，読み取り器の軸上のみでIDを読み取れると仮定したが，実際には読み取り器の読み取り範囲が存在する．そこで，物体の姿勢の微小変位を評価し，姿勢の誤差と読み取り器の読み取り範囲に起因するタグの読み取り位置の誤差との関係を導出する．実験結果との比較によりモデルの有用性を示す．

また，物体に取り付けられたタグの位置を推定するための精探査手法として，読み取り範囲を考慮したより高精度なタグの読み取り位置の推定手法を提案する．タグの検知のために行う粗探査と組みあわせることにより，迅速かつ物体の位置姿勢推定の精度を高めることを試みる．実験により提案手法の有効性を示す．

5.5.1 物体の姿勢誤差のモデル化

位置姿勢推定の評価指標として，推定した物体の位置や姿勢の精度がある．そこで，物体の姿勢 θ の微小変位を，変数 $x_{R,D1}, y_{R,D1}, x_{R,D2}, y_{R,D2}$ について微小解析を行う．物体の姿勢 θ は，式（5.29）より，次式で表される．

$$\theta = \mathrm{atan2}(a_x, -a_y) = \tan^{-1}\left(\frac{a_x}{-a_y}\right) \tag{5.30}$$

ただし，

$$
\begin{aligned}
a_x &= -d_x^o(y_{R,D1} - y_{R,D2}) + d_y^o(x_{R,D1} - x_{R,D2}) \\
a_y &= d_x^o(x_{R,D1} - x_{R,D2}) + d_y^o(y_{R,D1} - y_{R,D2}) \\
d_x^o &= (x_{o,D1} - x_{o,D2})\ ,\ d_y^o = (y_{o,D1} - y_{o,D2})
\end{aligned}
$$

である．両辺を微分し展開する．

$$
\delta\theta = \frac{1}{{a_x}^2 + {a_y}^2}(-a_y\delta a_x + \delta a_y a_x) \tag{5.31}
$$

このとき，

$$
\begin{aligned}
\delta a_x &= d_y^o(\delta x_{R,D1} - \delta x_{R,D2}) - d_x^o(\delta y_{R,D1} - \delta y_{R,D2}) \\
\delta a_y &= d_x^o(\delta x_{R,D1} - \delta y_{R,D2}) + d_y^o(\delta y_{R,D1} - \delta y_{R,D2})
\end{aligned}
$$

であるので，式（5.31）に代入して，

$$
\delta\theta = \frac{-d_{R,y}(\delta x_{R,D1} - \delta x_{R,D2}) + d_{R,x}(\delta y_{R,D1} - \delta y_{R,D2})}{{d_{R,x}}^2 + {d_{R,y}}^2} \tag{5.32}
$$

を得る．ただし，

$$
d_{R,x} = x_{R,D1} - x_{R,D2}\ ,\ d_{R,y} = y_{R,D1} - y_{R,D2}
$$

である．ここで，${d_{R,x}}^2 + {d_{R,y}}^2$ は，は，2つのタグを読み取った位置間の距離の2乗である．また，$\delta x_{R,D_x}$，$\delta y_{R,D_x}$ は，位置誤差を表しているが，ロボットに取り付けられた位置が正確であり，ロボットが位置を正確に制御できると仮定するならば，これは読み取り器の読み取り範囲に起因するタグの読み取り位置の誤差といえる．式（5.32）より，物体の姿勢誤差は，物体上でのタグ間の距離，および，タグの読み取り位置の誤差の影響を受けることがわかる．

したがって，物体の位置姿勢の推定精度を向上させるためには，以下の条件を必要とする．

- 互いに離れているタグを読み取る．
- タグの読み取り位置の誤差を小さくする．

ここで，前節の実験結果で得られた物体の姿勢誤差を式（5.32）を用いて評価する．$x_{R,D1}, x_{R,D2}, y_{R,D1}, y_{R,D2}$ は，実験でのタグの読み取り位置，$\delta x_{R,D1}, \delta y_{R,D1}, \delta x_{R,D2}, \delta y_{R,D2}$ については，読み取り位置と，実際の物体の位置との差を使用した．式（5.32）に結果を代入したものと，測定結果から得られた誤差との比をとることで比較する．100[mm] の場合，0.84 – 1.07，200[mm] の場合，0.94 – 1.01 となった．したがって，おおよそ1次の誤差基準により，物体の姿勢のずれを表現できていると考えられる．

応用として，タグ間の読み取り距離と，読み取り器の読み取り範囲による物体の読み取り位置の誤差から，事前に物体の姿勢の推定誤差を評価することが考えられる．

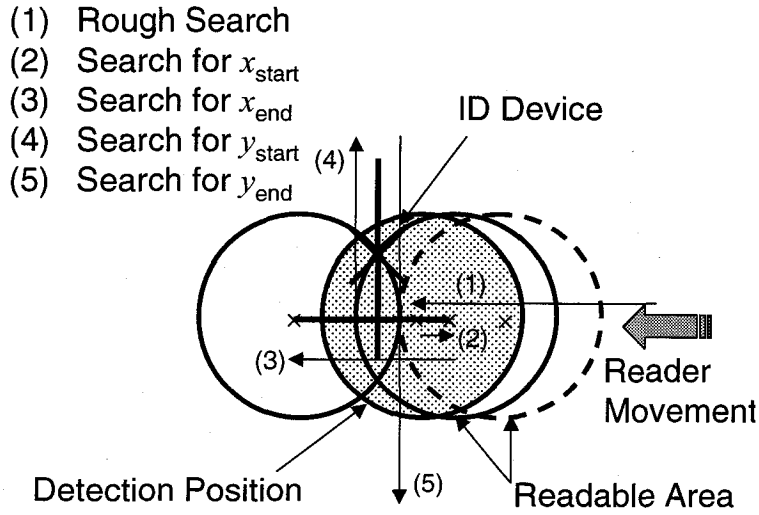


Figure 5.9: Planning of ID reader for precise search for position of the ID device

5.5.2 タグの読み取り位置誤差の向上

読み取り器の読み取り範囲内にタグが存在するとIDが取得できるため，タグを検知した段階でタグの読み取り位置と仮定すると誤差が大きくなる．そこで，タグを検知するための粗探査とタグの位置を推定するための精探査の2段階の読み取り手法を考える．2段階の探査手法を組みあわせることで，最終的に物体の位置姿勢の推定誤差が小さくできることを示す．

Figure 5.9 に，粗探査と精探査を組み合わせたタグの探索手法の概要を示す．図中の "Readable Area" は，読み取り器の読み取り範囲を示している．一般に読み取り器の読み取り範囲は，読み取り器の軸に対して対称となる．図中央に，タグが存在すると仮定する．以下にタグの位置を推定するための精探査手法を記す．以下の順番は，図中の番号に対応する．

(1) タグを検知するための粗探査を行い，タグを探索する．

(2) タグを検知した位置から，タグを読み取れる限界の位置 x_{start} を探索する．

(3) 読み取り器がタグを読み取れる領域を横切るように読み取り器を移動させる．タグを読み取れる限界の位置 x_{end} を探索する．

(4) タグの読み取り可能領域内の線分を2等分する位置で，先の探索軌道とは垂直な方向に読み取り器を移動させる．タグの読み取れる限界の位置 y_{start} を探索する．

Table 5.2: Experiment result of pose estimation using precise search

Condition	Trial (Success /Total)	Position Error [mm] (Ave./Std./Max)	Orientation Error [deg] (Ave./Std./Max)
Normal	10/10	22.9/3.8/27.2	10.7/7.9/22.0
Precise search	10/10	3.3/1.6/4.7	2.2/1.5/4.5

(5) タグの読み取れる限界の位置 y_{end} を探索し，(4)(5) で得られた限界位置の中点を，タグの位置と想定する．

このときのタグの読み取り位置 $\mathbf{p}_{R,D}$ を以下に示す．

$$x_{R,D} = \frac{x_{start} + x_{end}}{2}\ ,\ y_{R,D} = \frac{y_{start} + y_{end}}{2}$$

この方法では，タグの読み取り範囲によらずタグの位置を推定できることが，式よりわかる．欠点としては，読み取り器の読み取り領域の射影が円であることを仮定していること，および，読み取り器の信頼性に依存することが挙げられる．読み取り器の信頼性が悪い場合，読み取り器の読み取り範囲が外界のノイズなどにより変化する．タグを読み取った場合の読み取り領域が変化する場合，この仮定は使えない．

提案手法の有用性を示すために，物体の位置姿勢推定実験を行った．物体には，2つのタグを添付した．タグ間の距離は，100[mm] とした．物体座標系での位置は，$\mathbf{p}_{o,D1} = (0, 50), \mathbf{p}_{o,D2} = (0, -50)$ である．効果を調べるために，ある1回の試行で，同じ位置姿勢をとっている物体の位置姿勢を，精探査ありとなしの条件で推定した．

実験結果を **Table 5.2** に示す．表より，精探査と組み合わせることで，位置の誤差が減少していることがわかる．また，姿勢誤差についても平均，最大誤差ともに改善していることがわかる．また，この結果からも，物体の位置姿勢の推定精度が，読み取り器によるタグの位置の同定方法に依存することがわかる．

今回提案した精探査手法では，読み取り器の読み取り範囲によらずこの手法が適用できる．しかし，精探査のために読み取り器を移動させるため，広い動作領域を必要とする．また，この手法では読み取り範囲内に高々1つのタグが存在するという仮定を使用していることに注意する必要がある．

課題として，精探査を併用した場合，タグの探索に掛かる時間が非常に大きくなる点があげられる．今回の実験では1回の位置姿勢推定に対し，精探査を行わない場合で2-3分なのに対し，精探査を行った場合，7-8分掛かった．これは，読み取り器の制御方法によるものである．読み取り器の平均移動速度は，粗探査部分で20[cm/min]，精探査部分で5[cm/min] であった．ここで，精探査を行った場合での位置姿勢推定に必要な時間の内訳

を説明する．1個のタグの位置を推定する精探査では，読み取り器の読み取り範囲を十字に横切る．読み取り器の平均速度と，読み取り器の読み取り範囲の大きさより，読み取り器が精探査時に読み取り範囲を横切るのに1分程度かかる．したがって1個のタグの精探査1回につき，2-3分掛かる．よって，全体では，1回の推定につき，2個のタグの精探査を行うため，全体として7-8分かかることがわかる．

また，実際に読み取り器が動いた距離を考えると，精探査のために，通信範囲を推定するための探索部分の移動量が増えていることがわかる．実用的な動作計画を立てるためには，通信範囲と読み取り器の動作速度を考慮することが必要となる．

5.6 おわりに

本章は，添付型記憶媒体が持つ位置情報を記憶媒体に関連付けられた情報として蓄えられる機能を物体の位置姿勢情報の取得に用いることについて述べた．物体に複数添付されたRFID等の環境添付型記憶媒体を利用した物体の位置姿勢推定手法を提案した．

まず，3次元空間中での物体の位置姿勢を推定するための手法を考察した．読み取り器の面の向きとタグの読み取り方向が一致することを利用して，物体上の互いに平行でない面に添付された2つのタグを読み取ることで，物体の位置姿勢推定が可能であることを示した．また，読み取り器が平行な面に存在するタグを読んだ場合，物体の姿勢は求まるが，位置が定まらないことを示した．逆にこの結果は，平面等に置かれた物体の場合，物体における互いに平行な面上のタグを読んだ場合でも，位置姿勢が求まることを示している．

また，物体に添付されたタグを1個読んだ場合，物体の位置が読み取り器の軸を中心とする円筒上に存在し，物体の姿勢が1自由度の回転で表現できることを示した．このことは2個目のタグの位置を得ることができ，2個目のタグを読み取るための読み取り器の動作計画を立てるために有用である．

次に提案手法の有用性を示すために，物体の位置姿勢推定実験を行った．まず，提案したモデルの例として，2次元平面での物体の位置姿勢のモデル化を行った．その結果を用いて，姿勢の誤差のモデル化を行った．読み取り実験を通して，物体の位置姿勢を求めることが可能となった．物体の位置の精度は読み取り器の読み取り方に依存し，姿勢の精度はそれに加えて，読み取るタグの間隔に依存することが，実験および誤差のモデルからの推定により得られた．読み取り器の性質を利用した精探査手法を提案し，物体の位置姿勢推定の精度が向上できることを示した．

実際には，読み取り器には読み取り器の軸方向以外にも読み取り範囲は存在する．この範囲は，物体の位置姿勢を推定する際の，そして，読み取り器の動作計画を立てるときの誤差として現れる．2次元の位置姿勢推定誤差については議論したが，提案した3次元空間における誤差は議論されていない．また，今回のモデルでは物体に添付されたタグの姿勢をそのまま使用しているが，その場合，物体に添付されたタグをデータベースに登録す

るときに，改めてタグの姿勢を測定する必要がある．

今回では，タグを取り付けられた配置が2種類であったが，実際に適用するためには，物体に取り付けるタグの配置問題が存在する．タグの配置には，タグを発見しやすい配置，誤差を小さくする配置，探索コストが小さくなる配置が考えられ，それらのトレードオフとして，1つ1つの物体に対するタグの最適な配置の基準が存在する．今回では，2次元での物体の位置姿勢推定における，誤差を小さくする観点からの，タグの配置を検討したが，3次元環境における物体の位置姿勢推定について実験を行い，タグの配置基準，読み取り器の動作計画について議論することが必要となる．

また，本手法の問題点として，1個目のタグの発見問題が存在する．今回提案した読み取り器の探索軌道では，1個目のタグを発見できたとして，2個目のタグの位置姿勢を議論している．本手法を適用するためには1個目のタグを読み取ることが必要となる．これに対しては，タグの発見しやすい配置法，あるいは，ロボットに事前知識（把持問題の場合，物体の配置場所）を与え，読み取り器の探索範囲を減らす方法が考えられる．

読み取り器の読み取り範囲を考慮した，タグの読み取りモデルの考察，および，物体の位置姿勢推定，そして，その情報を利用した物体の把持は今後の課題である．

第6章　結論

6.1　本論文のまとめ

本論文では，環境添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化に着目し，それを用いたロボットによる作業の効率化，作業情報の取得法，および情報の管理手法についての研究を報告した．報告内容を以下にまとめる．

添付型記憶媒体が持つ，環境や物体に関連した情報を環境や物体そのものにもたせる特徴をもとに，記憶媒体が持つ機能と，機能を発揮させることでもたらされる効果を議論した．添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化を実現するための課題として，物体と環境の状態と蓄積情報との一致を取り上げた．これは，本手法が成立するために解決が必要な課題である．情報と実際の環境の状態が一致しない場合，ロボットは正しい情報を取得できなくなる．本研究では，状態が変化する例として，(1) ロボットに与える作業内容が変化する場合，および，(2) 作業が進捗して作業対象となる物体の状態が変化する場合，(3) 環境中に存在する物体の位置姿勢が変化する場合を取り上げた．これらの事例に対して記憶媒体の機能を発揮することでもたらされる (1) その場に応じた情報を共有できる効果，(2) 物体を識別し細かな情報管理を行える効果，(3) 記憶媒体の位置情報として利用できる効果をそれぞれ適用した．そのうえで，物体と環境の情報化の実現可能性と有用性を論じた．具体的な内容を以下に示す．

(1) 複数ロボットによる作業情報を効率良く共有するための記憶媒体の動的配置法を提案した．これは，記憶媒体が持つ情報更新の機能から得られる，自律的な情報更新，および，ロボット間での情報共有が可能となる効果を利用したものである．環境添付型記憶媒体のみで作業情報を蓄える場合，蓄えることのできる作業情報の量が有限である．また，どこにどれだけの作業情報が必要かということは，環境の各場所での作業の内容と頻度に依存し，これらは時間の経過に伴い変化するため，環境内のどこにどれだけの記憶媒体を配置するのかを決めるのが困難である．そこで，環境全体での作業情報の有用さを作業情報を用いることで削減できるコストを基準として定義した．また，その基準を用いて作業環境中に配置された記憶媒体を作業を行うロボットによって動的に再配置することを提案した．移動ロボットを例にしたシミュレーションを行い，有用性を示した．

(2) 作業が進捗した場合の物体情報の更新法を提案した．これは，記憶媒体が持つ識別の機能から得られる，物体情報の正確な管理を可能にする効果を利用したものである．組み付け作業を行った場合，組み付けに用いられた部品それぞれに関連した物体の部品情報や作業情報を更新することが必要となる．組みつけられた物体をモジュールとすると，モジュールに関連付けられた情報は，次に作業を行う場面ではモジュールを1つの作業対象の物体として取り扱いたい．そこで，ロボットが引き続き作業を達成できるように，作業達成時に物体情報が蓄えられたデータベースを更新するための手法を提案した．物体の組み付け作業をモデルとしてデータベースの更新実験を行い，提案手法の可能性を示した．

(3) 環境添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢の推定手法を提案した．これは，添付型記憶媒体が持つ位置情報を記憶媒体に関連付けられた情報として蓄えられる機能を利用したものである．記憶媒体を読み取った読み取り器の位置と，記憶媒体から取得した物体上の位置情報を利用して，参照座標系における物体の位置姿勢を推定する．物体の位置姿勢推定実験を行い，提案手法の有用性を示した．また，2次元平面上に存在する物体について，姿勢の誤差解析を行い，評価を行った．記憶媒体を検知する方法とは別に読み取り器の性質を利用した記憶媒体の読み取り位置の推定法を提案し，提案手法を利用することで物体の位置姿勢推定精度が向上することを実験により示した．

6.2 今後の課題

本論文では，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化を行うことの問題点の1つとして，物体や環境の状態変化への対応を取り上げた．実際に物体と環境の情報化を行い，ロボットや人間が利益を享受するためには，なお多くの課題が存在する．本研究の今後の課題を以下に列挙する．

- 環境内で活動するロボットによる記憶媒体の添付
- 物体や環境と情報の関連付け
- センサ情報との融合
- 物体の状態変化への適応の事例の統合

まず，環境中に存在する物体に記憶媒体を添付する場合，現在の問題設定では，人間が添付することを想定している．環境内でロボットが作業に必要とする情報を蓄える場合，情報を共有するために，記憶媒体が添付されていることが必要となる．ロボットが記憶媒体を添付することができる場合，新たな環境においても，ロボットが必要とする情報を蓄積できる．この課題を達成するためには，記憶媒体を添付する判断基準を構築することが必要となる．

また，記憶媒体の価格の低下に伴い，現在では記憶媒体の添付を行えるようになった．しかし，物体と環境の情報化を行うにあたっては，どのような情報を蓄えるのかが解決されていない．実際の環境で適用するためには，物体や環境に関する情報の蓄積について，効率の良い情報の蓄積手法が求められている．

次に，環境カメラや，ネットワーク化されたセンサを利用することで，ロボットが効率よく環境を理解し作業を達成できる環境を構築する課題が存在する．例えば，第5章で提案した物体の位置姿勢推定法では，記憶媒体の読み取りのみを用いて物体の位置姿勢を推定した．本論文では，要素技術として，画像情報を用いずに物体の位置姿勢を推定できることを示したが，例えば，物体の発見，認識するためには，画像との組み合わせる方法が考えられる．今後は，センサを利用して，ロボットが安全かつ，効率良く作業を達成できる環境を構築することが目標となる．

そして，本論文で取り扱った具体的な課題は，それぞれが独立していた．しかし，実際の課題，例えば組み立て作業を考えると，物体情報の自動更新，物体の位置姿勢推定は，同じ場面で適用される．実際の作業への適用を考えた情報の蓄積手法，データベースの更新法の検討が必要となる．

ICタグやバーコードなどを用いた物体を情報化するための要素技術は実用の段階に到達している．それらを用いたロボットによる作業の高度化，知的動作の実現のために，本論文で取り組んだ手法が適用されることが期待される．将来，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化を通して，ロボットが人間に様々なサービスを提供されることが期待される．

謝辞

本論文は筆者が1998年に研究室配属された当初より取り組んできた，添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化に関する研究をまとめたものであります．本研究は，大変多くの皆様のご指導，ご協力のうえに成り立つものであり，ここに感謝の意を表します．

まず，本研究を遂行するにあたり，終始丁寧なご指導をいただき，また，対外的なプロジェクトに参加する機会を与えていただきました大阪大学大学院基礎工学研究科 新井健生教授に深く感謝いたします．教授の議論を重視する研究の進め方，そして，実現可能性を重視する考え方に，大きな影響を受けました．ここに厚く御礼申し上げます．

本論文をまとめるにあたり，大阪大学大学院基礎工学研究科 研究科長 西田正吾教授，ならびに，大阪大学大学院基礎工学研究科 佐藤宏介教授には，ご多忙な中にもかかわらず審査を引き受けて頂き，貴重なご助言を頂きました．深く感謝いたします．

大阪大学大学院基礎工学研究科 井上健司助教授，前泰志助手，田窪朋仁博士には，日常より熱心にご議論，ご指導頂きました．論文発表や研究発表でのご指導は，筆者の研究を肉付けし，体系化するにあたり大切なものでした．ここに深く感謝いたします．井上先生には研究を進めるにあたり，肯定，否定両方の側面から，多くのご助言，ご議論頂きました．また，研究対象に対する多面的な捉えかたを示してくださいました．今後，少しでも見習えるよう努力したく思います．前先生には，筆者が研究室に配属された当初より，公私にわたりお世話になりました．添付型記憶媒体を用いた物体と環境の情報化という課題は，前先生の発案により始められたものです．先生による激励および，日夜行われた議論は，筆者の支えとなるものでした．田窪博士には，研究対象のモデル化および，手法の妥当性，有用性について貴重なご助言，ご議論を頂きました．先生方には，学生および研究者としての日々の悩みに対し，激励いただきました．改めて深く御礼申し上げます．

早瀬敏夫技官，土居良子事務補佐員，小林慶子事務補佐員には研究室生活において多大なるご協力を頂きました．増田峰知博士（現 三重県科学技術振興センター研究員），吉田晴行博士（現 大阪電気通信大学講師），田中航氏をはじめとする新井研究室の学生の皆様とは，論文の執筆，および，日常の研究への取り組みについて，共に切磋琢磨し，忌憚のない意見交換ができました．このことは，本研究を遂行する大きな支えとなりました．そして，研究室の皆様には，研究上における議論にとどまらず，日常生活でも励まされました．特に，皆様の激励なしには，本論文の完成はなかったものと考えます．新井研究室

のスタッフおよび学生の皆様に改めて深く御礼申し上げます．

本研究の一部は，IMS 国際共同研究プログラム革新的・知的部品化建設システムの研究開発 IF7-II プロジェクトの一環として行われました．プロジェクト内で様々な研究・開発に触れることができ，刺激となるものでした．プロジェクトのメンバーの皆様には，実現性，実用性を重視する考え方を示され，ご議論を通して，研究の方向性をより確かにすることができました．ここに深く感謝いたします．また，様々な会議において研究に関して議論いただいた諸先生方に深く感謝いたします．

ここには名前をあげていませんが，大学や研究会での友人の方々との忌憚無い意見交換，日常生活における日々の交遊は，筆者の研究活動における活力となりました．ここに感謝いたします．そして，筆者の今までの学生生活に関係した数多くの方々に深く感謝いたします．

最後に，筆者が博士後期課程に進学するにあたって，経済的・精神的に支えていただいた両親に感謝して謝辞といたします．

参考文献

[1] 革新的，知的フィールドファクトリの研究　研究成果報告書，(財) 国際ロボットエフエー技術センター，pp. 53 – 83, 1997.

[2] 革新的・知的部品化建設システムに関する研究成果報告書，(財) 製造科学技術センター，2002.

[3] 本宮浩，丁洛榮，大場光太郎，大原賢一，宮崎学，竹村浩司，平井成興，谷江和雄："知識分散型ロボット制御フレームワーク"，第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集，3K32，2003.

[4] 根岸善朗，三浦純，白井良明："全方位ステレオとレーザレンジファインダの統合による移動ロボットの地図生成"，日本ロボット学会誌，Vol. 21, No. 6, pp. 690 – 696, 2003.

[5] 佐藤知正，森武俊，原田達也："ロボティックルームの知能 — ユービキタス知能 —"，日本ロボット学会誌，Vol. 20, No. 5, pp. 482 – 486, 2002.

[6] R. A. Brooks: "A Robust layered control system for a mobile robot," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, No. 1, pp. 14-23, 1986.

[7] T. Sato: "Robotic Room: Human Behavior Measurement, Behavior Accumulation and Personal/Behavioral Adaptation by Intelligent Environment," *in Proc. of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2003.

[8] G. Appenzeller, J. H. Lee and H. Hashimoto: "Building Topological Maps by Looking at People: An Example of Cooperation between Intelligent Spaces and Robots," *in Proc. of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1326 – 1333, 1997.

[9] J. H. Lee, G. Appenzeller and H. Hashimoto: "Physical Agent for Sensored, Networked and Thinking Space," ***in Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation***, Vol. 1, pp. 838 – 843, 1999.

[10] J. H. Lee, N. Ando, et al.: "Applying Intelligent Space to Warehouse — The First Step of Intelligent Space Project —," ***in Proc. of the 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics***, pp. 290 – 295, 2001.

[11] N. Ando, J. H. Lee and H. Hashimoto: "Cluster-Camera Networking and Geometric Configuration for Intelligent Space," ***in Proc. of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics***, 2003.

[12] K. Eng, A. Bäbler, et al.: "Ada — Intelligent Space: An artificial creature for the Swiss Expo. 02," ***in Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation***, Taipei, Taiwan, September, pp. 4154 – 4159, 2003.

[13] I. A. Essa: "Ubiquitous Sensing for Smart and Aware Environments," ***IEEE Personal Communications***, Vol. 7, No. 5, pp. 47 – 49, 2000.

[14] K. Kogure, H. Hagita, et al.: "Toward Ubiquitous Intelligent Robots," ***in Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems***, Las Vegas, Nevada, USA, October, pp. 1826 – 1831, 2003.

[15] T. Hori, Y. Nishida, et al.: "SELF-Network: Design and Implementation of Network for Distributed Embedded Sensors," ***in Proc. of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems***, pp. 1373 – 1378, 2000.

[16] Y. Nishida, T. Hori, et al.: "Sensorized Environment for Self-communication Based on Observation of Daily Human Behavior," ***in Proc. of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems***, pp. 1364 – 1372, 2000.

[17] T. Mori, T. Sato, et al.: "One-Room-Type Sensing System for Recognition and Accumulation of Human Behavior," ***in Proc. of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems***, pp. 344 – 350, 2000.

[18] J. Hightower and G. Borriello: "Location Systems for Ubiquitous Computing," ***IEEE Computer***, Vol. 34, No. 8, pp. 57 – 66, 2001.

[19] エーアイエムジャパン編："これでわかったデータキャリア"，第1章，オーム社，1998.

[20] Y. Mae, T. Umetani, et al.: "Object Recognition using Appearance Models Accumulated into Environment," *in Proc. of 15th International Conference on Pattern Recognition (ICPR-2000)*, Vol. 4, pp. 845 – 848, 2000.

[21] 前泰志，新井健生："環境への知識埋め込みとその共有手法", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol. 3, pp. 1425 – 1426, 1998.

[22] 倉林大輔，淺間一："知的データキャリアを用いた自律ロボット群と環境の情報交換"，日本ロボット学会誌，Vol. 17, No. 5, pp. 633 – 636, 1999.

[23] T. C. Henderson, J. C. Park, et al.: "From Moves to Java Stamps: Smart Sensor Network Testbeds," *in Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, USA, October, pp. 799 – 804, 2003.

[24] D. Kurth, G. Kantor and S. Singh: "Experimental Results in Range-Only Localization with Radio," *in Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, USA, October, pp. 974 – 979, 2003.

[25] R. Want, A. Hopper, et al.: "The Active Badge Location System," *ACM Transactions on Information Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 91 – 102, 1992.

[26] M. Pauly et al.: "Control and Service Structure of a Robot Team" *in Proc. of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.2, pp. 1069 – 1074, (1999)

[27] E. Yoshida et al.: "Evaluating the Efficiency of Local and Global Communication in Distributed Mobile Robotic Systems" *in Proc. of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.3, pp. 1661 – 1666, 1996.

[28] 太田 順他："記憶機能付き画像マークによる作業移動ロボットのための環境整備"，日本ロボット学会誌，Vol. 17, No. 5 , pp. 670 – 671, 1999.

[29] S. Takeda et al.: "Generation of Environment Map by Multiple Robots" *in Proc. of the 30th International Symposium on Robotics* , pp. 561 – 568, 1999.

[30] T. von Numers et al.: "An Intelligent Data Carrier System for Local Communication Between Cooperative Multiple Robots and Environment," *Preprints of 2nd IFAC Conference on Intelligent Autonomous Vehicles 95*, pp. 366 – 371, 1995.

[31] T. Fujii et al.: "Knowledge Sharing among Multiple Autonomous Mobile Robots through Indirect Communication using Intelligent Data Carriers," *in Proc. of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.3, pp. 1466 – 1471, 1996.

[32] T.Fujii et al.: "Co-evolution of a multiple autonomous robot system and its working environment via intelligent local information storage," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 19, pp. 1 – 13, 1996.

[33] L. E. Parker, B. Kannan et al.: "Heterogeneous Mobile Sensor Net Deployment Using Robot Herding adn Line-of-Sight Formations," *in Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, USA, October, pp. 2488 – 2493, 2003.

[34] 雨宮智浩，檜山敦他："バリアフリー実験のためのユビキタス空間の構築"，ヒューマンインタフェースシンポジウム 2002 論文集，pp. 749 – 752, 2002.

[35] M. Hirose and T. Amemiya: "Wearable Finger-Braille Interface for Navigation of Deaf-Blind in Ubiquitous Barrier-Free Space," *in Proc. of the 10th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2003)*, Vol. 4, pp. 1417 – 1421, 2003.

[36] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin: "GPS-less Low-Cost Outdoor Localization for Very Small Devices," *IEEE Personal Communications*, Vol. 7, No. 5, pp. 28 – 34, 2000.

[37] R. Want, K. P. Fishkin, et. al.: "Bridging Physical and Virtual Worlds with Electronic Tags," *in Proc. of ACM conference on SIGCHI*, Pittsburg, USA, May, pp. 370 – 377, 1999.

[38] 青柳誠司，紀之本浩司他："RECS コンセプトに基づいたロボットによる食器の認識とハンドリング"，電気学会論文誌 C 編，Vol. 120 - C, No. 5, 2000.

[39] 羽田芳朗，高瀬國克，鮎沢務："マークベースド 3 次元ビジョンシステムの開発"，電気学会論文誌 C 編，Vol. 120 - C, No. 5, 2000.

[40] 香月理絵，太田順他："知能ロボットのための環境整備法（第 1 報：環境への作業情報配置法）"，第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 353 – 354, 2001.

[41] R. Katsuki, J. Ota, et al.: "Design of an Artificial Mark to Determine 3D Pose By Monocular Vision," ***in Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation***, pp. 995 – 1000, 2003.

[42] 香月理絵, 太田順他："マークを用いたロボットの物体ハンドリング", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 講演論文集, 2A1-1F-E2, 2003.

[43] M. Shibata, T. Oomichi and Y. Fuke: "Research on Practical Use of High Reliability AGV Transportation Control System — Study of Hierarchy Control System Based on Range Sensor —," ***in Proc. of the First International Symposium on Systems & Human Science (SSR2003)***, Osaka, Japan, November, pp. 352 – 357, 2003.

[44] S. J. Ahn, W. Rauh and M. Recknagel: "Circular Coded Landmark for Optimal 3D-Measurement and Robot Vision," ***in Proc. of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems***, pp. 1128 – 1133, (1999).

[45] H. Hontani, K. Baba, et. al.: "Visual Tracking System using an ID-Tag and the Network," ***in Proc. of SICE Annual Conference***, pp. 743 – 748, 2003.

[46] 及川一美, 高氏秀則, 江丸貴紀, 土谷武士, 大久保重範："座標系を用いない人工ランドマークを用いたナビゲーション", 第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3J11, 2003.

[47] Y. Mae, T. Umetani, et al.: "Relocation of Storage Devices Attached to Environment for Effective Knowledge Sharing among Multiple Robots", ***in Proc. of the 6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems***, pp. 479 – 486, (2000).

[48] E. J. Jaselskis, M. R. Anderson, et al.: "Radio-Frequency Identification Applications in Construction Industory," ***Journal of Construction Engineering Management***, Vol. 121, No. 2, pp. 189 – 196, 1995.

[49] T. Umetani, T. Arai, et al.: "Parts and Packets Unification for Construction Automation and Robots," ***in Proc. of the 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction***, Gaithersburg, USA, September, pp. 311 – 316, 2002.

[50] T. Kanda, T. Hirano, et al.: "Person Identification and Interaction of Social Robots by Using Wireless Tags," ***in Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems***, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 1657 – 1664, 2003.

[51] 佐藤弘康，永谷圭司，五福明夫："環境からの助言を用いた移動マニピュレータによる知的動作の実現— インテリジェントマークとロボット間の相互通信の構築 —"，計測自動制御学会システム・インテグレーション部門講演会講演論文集，

[52] 柴田光宣，五福明夫，田中豊："インテリジェントマークとその認識システムの開発"，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集，1A1-1F-A1，2003.

[53] 佐藤弘康，田坂栄徳，永谷圭司，五福明夫："環境からの助言を用いた移動マニピュレータによる物体把持の実現— IMS を適用した移動マニピュレータの動作戦略 —"，第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2003.

[54] S. Miyama, M. Imai and Y. Anzai: "Rescue Robot under Disaster Situation: Position Acquisition with Omni-directional Sensor," ***in Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems***, Las Vegas, Nevada, USA, October, pp. 3132 – 3137, 2003.

[55] 新井義和他: "環境埋め込み情報に基づく自律移動ロボットの自己位置同定"，日本機械学会論文集 (C 報), vol.64, no.619, pp.945 – 950, (1998).

[56] D. Kurabayashi, H. Asama, et al.: "Information Assistance in Rescue using Intelligent Data Carriers," ***in Proc. of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems***, Maui, Hawaii, USA, October, pp. 2294 – 2299, 2001.

[57] 野田賢一，倉林大輔他："レスキュー支援用知的データキャリアによる被災者探索システム情報収集エージェントの動作計画"，計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集，Vol. 3，pp. 195 – 196，2002.

[58] E. Arai, A. Tsumaya, et al.: "Dynamic Schedule Management Architecture Based on Parts and Packets Unified Product System," ***in Proc. of the 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction***, Eindhoven, the Netherland, September, pp. 307 – 312, 2003.

[59] T. Tsukimiyama: "Navigation System for Mobile Robots using RFID Tags," ***in Proc. of the 11th Int. Conf. on Advanced Robotics***, Coimbra, Portugal, June, 2003.

[60] W. Lin, S. Jia and K. Takase: "Research on Modeling of Localization for Service Mobile Robot Using ID Tag," ***in Proc. of the First International Symposium on Systems & Human Science (SSR2003)***, Osaka, Japan, November, pp. 65 – 70, 2003.

[61] 前泰志，梅谷智弘他："環境への知識埋め込み手法による物体認識"，ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集，2000.

[62] 倉林大輔他: "知的データキャリアによる自律ロボットの誘導情報獲得と環境変化への適応", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集，vol.1, pp. 269 – 270, (1999).

[63] 倉林大輔，浅間一: "知的データキャリアによる誘導情報と環境変化に適応した情報更新", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集, (2000).

[64] 梅谷智弘，前泰志他："環境添付型記憶媒体を用いた知識共有 – 環境の複雑さを考慮した記憶媒体の配置 –", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集，2P1-E6，2001.

[65] 梅谷智弘, 前泰志他："部材情報を一体化した建設部材の自動把持"，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 講演論文集，1A1-2F-A2，2003.

[66] T. Umetani, Y. Mae, et al.: "Automated Handling of Construction Component Based on Parts and Packets Unification," *in Proc. of the 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Eindhoven, the Netherlands, September, pp. 339 – 344, 2003.

[67] K. M. Furlani and W. C. Stone: "Architecture for Discrete Construction Component Tracking," *in Proc. of the 16th IAARC/IFAC/IEEE Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction*, Madrid, Spain, September, pp. 289 – 294, 1999.

[68] K. M. Furlani and L. E. Pfeffer: "Automated Tracking of Structural Steel Members at the Construction Site," *in Proc. the 17th Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction*, Taipei, Taiwan, September, pp. 1201 – 1206, 2000.

[69] 本宮弘，丁洛榮，谷江和雄："Omniscient Spaces における物体の位置と姿勢認識"，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 講演論文集，1A1-1F-A4，2003.

[70] N. K. Chong and K. Tanie: "Dependable Manipulation Based on RFID," *in Proc. of Int. Symp. on Robotics and Automation*, Mexico City, Mexico, October, pp. 330 – 335, 2002.

[71] 梅谷智弘，前泰志他："部材と部材情報を一体化した自動建設"，計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集，Vol. 1, pp. 197 – 198, 2002.

[72] R. Bostelman, A. Jacoff, et al.: "Cable-Based Reconfigurable Machines for Large Scale Manufacturing," *in Proc. of 2000 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, Ann Arbor, USA, 2000.

[73] H. Osumi and T. Arai: "Cooperative Control between Two Position Controlled Manipulator," *in Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, USA, Vol. 2, pp. 1509 – 1514, 1994.

[74] 前泰志，新井健生他："ハイブリッド駆動パラレルアームの張力補正と外力推定"，日本ロボット学会誌，Vol. 21, No. 4, pp. 436 – 443, 2003.

[75] 上島啓史，新井健生他："ハイブリッドパラレルアームによる鉄骨モジュール組み立て"，第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2001.

[76] T. Arai, K. Yuasa, et al., "A Hybrid Drive Parallel Arm for Heavy Material Handling," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 9, No. 1, pp. 45 – 54, 2002.

[77] 湯浅恵，新井健生他："重量物ハンドリング用ハイブリッド駆動パラレルアーム"，日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 102 – 109, 2000.

[78] 見浪護，羽田野正俊，朝倉俊行："移動マニピュレータによる建設作業システムに関する研究— 実システムによる基本ブロック組積作業と精度 —"，日本ロボット学会誌，Vol. 17，No. 1，pp. 91 – 100，1999.

[79] 加藤将夫，谷尻秀雄他："全天候型ビル自動建設システムの開発— 超高層ビルへの適用計画と実施結果 —"，第7回建設ロボットシンポジウム論文集，pp. 67 – 76, 1998.

[80] 水谷亮，江崎信哉他："プッシュアップによる自動化建設システムの適用— 市街地における検証 —"，第7回建設ロボットシンポジウム論文集，pp. 77 – 86，1998.

[81] Z. Chen, H. Li, et al.: "An application of bar-code system for reducing construction wastes," *Automation in Construction*, Vol. 11, No. 5, pp. 521 – 533, 2002.

[82] W. C. Stone, K. Reed, et al., "NIST Research Toward Construction Site Integration and Automation," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 50 – 57, 1999.

[83] 茨木俊秀：アルゴリズムとデータ構造, 昭晃堂, 1989.

[84] 北川博之：データベースシステム, 昭晃堂, 1996.

[85] 澤和弘，大山航他："鋼材に印字された低画質文字列の認識"，電気学会論文誌C編，Vol. 122，No. 1，pp. 84 – 89，2002.

[86] 梅谷智弘，新井健生他："情報化部材を用いた部材駆動型建設システム"，第9回建設ロボットシンポジウム講演論文集，pp. 267 - 272，2002.

[87] D. L. Brock and B. W. Lewis: "Object Location — Pose Identification using Automatic Identification and Distributed Sensing," *White Paper: MIT AUTO-ID Center*, 2003.
(`http://www.autoidlabs.org/whitepapers/mit-autoid-wh018.pdf`)

研究業績

学術論文

[1] 梅谷智弘，前泰志，井上健司，新井健生："自律作業ロボット間における知識共有を目指した環境添付型記憶媒体の動的配置"，日本ロボット学会誌，Vol. 20，No. 6，pp. 631 - 639，2002 (第 3 章).

[2] Tomohiro UMETANI, Tatsuo ARAI, Yasushi MAE, Kenji INOUE and Jun-ichiro MAEDA: "Construction Automation Based on Parts and Packets Unification," Automation in Construction, (条件付採録), (第 4 章).

[3] 梅谷智弘，前泰志，井上健司，新井健生，八木淳一："複数の環境添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢推定"，日本ロボット学会誌，(照会中), (第 5 章).

国際会議

[1] Yasushi MAE, Tomohiro UMETANI, Tatsuo ARAI and Kenji INOUE: "Relocation of Storage Devices Attached to Environment for Effective Knowledge Sharing among Multiple Robots," Intelligent Autonomous Systems 6 (IAS-6), IOSpress, Ohmsha, pp. 479 - 486, 2000.

[2] Yasushi MAE, Tomohiro UMETANI, Tatsuo ARAI and Kenji INOUE: "Object Recognition using Appearance Models Accumulated into Environment," Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition (ICPR-2000), Vol. 4, pp. 845 - 848, 2000.

[3] Tomohiro UMETANI, Yasushi MAE, Kenji INOUE and Tatsuo ARAI: "Adaptive Relocation of Environment-Attached Storage Devices by Multiple Robots," Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, May, pp. 2998 - 3003, 2001.

[4] Tomohiro UMETANI, Yasushi MAE, Kenji INOUE and Tatsuo ARAI: "Adaptive Relocation of Environment-Attached Storage Devices for Effective Knowledge-Sharing among Multiple Robots," Proceedings of 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Como, Italy, July, pp. 171 - 176, 2001.

[5] Yasushi MAE, Tomohiro UMETANI, Tatsuo ARAI and Kenji INOUE: "Acquisition and Accumulation of Object Appearances using Successive Eigenspace Construction," Proceedings of the fifth Asian Conference on Computer Vision, Vol. 2, pp. 545 - 551, 2002.

[6] Tomohiro UMETANI, Tatsuo ARAI, Yasushi MAE, Kenji INOUE and Jun-ichiro MAEDA: "Parts and Packets Unification for Construction Automation and Robots," Proceedings of the 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Gaithersburg, USA, September, pp. 311 - 316, 2002.

[7] Tomohiro UMETANI, Yasushi MAE, Kenji INOUE, Tatsuo ARAI and Jun-ichi YAGI: "Automated Handling of Construction Component Based on Parts and Packets Unification," Proceedings of the 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Eindhoven, the Netherlands, September, pp. 339 – 344, 2003.

国内会議

[1] 前泰志，梅谷智弘，井上健司，新井健生："環境への知識埋め込みによる複数ロボットのナビゲーション"，ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集，2P1-56-084，1999.

[2] 前泰志，梅谷智弘，井上健司，新井健生："環境への知識埋め込みとその共有手法–複数ロボットによる搬送作業への適用 –"，第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol. 2，pp. 709 - 710，1999.

[3] 梅谷智弘，前泰志，新井健生，井上健司："知識の有用さを評価した環境への知識埋め込みとその共有手法"，第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol. 2，pp. 695 - 696，1999.

[4] 前泰志，梅谷智弘，新井健生，井上健司："環境への知識埋め込み手法による物体認識"，ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集，2000.

[5] 梅谷智弘，前泰志，Hugo B. Arreola S.，新井健生，井上健司："環境への知識埋め込み手法における知識の有用さの評価"，ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集，2000.

[6] 前泰志，梅谷智弘，新井健生，井上健司："複数ロボットによる物体の見えモデルの獲得手法"，第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol. 2，pp. 781 - 782，2000.

[7] 梅谷智弘，前泰志，新井健生，井上建司："複数ロボットによる知識共有のための環境添付型記憶媒体の配置法"，第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol. 2，pp. 667 - 668，2000.

[8] 梅谷智弘，前泰志，新井健生，井上健司："環境添付型記憶媒体を用いた複数ロボットによる知識共有の効率化"，第6回ロボティクスシンポジア予稿集，pp. 192 - 197，2001.

[9] 梅谷智弘，前泰志，新井健生，井上健司："環境添付型記憶媒体を用いた知識共有– 環境の複雑さを考慮した記憶媒体の配置 –"，ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集，2P1-E6，2001.

[10] 梅谷智弘，新井健生，井上健司，前泰志，上島啓史："建設作業における部材と部材情報の統合"，ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集，1A1-A02，2002.

[11] 梅谷智弘，新井健生，井上健司，前泰志，上島啓史："情報化部材を用いた部材駆動型建設システム"，第9回建設ロボットシンポジウム講演論文集，pp. 267 - 272，2002.

[12] 梅谷智弘，新井健生，前泰志，井上健司，前田純一郎："自動建設のための部材と情報を一体化した部材情報管理"，日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集，2002.

[13] 梅谷智弘，前泰志，井上健司，前田純一郎，新井健生："部材と部材情報を一体化した自動建設"，計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集，Vol. 1，pp. 197 - 198，2002.

[14] 梅谷智弘, 前泰志, 井上健司, 八木淳一, 新井健生："部材情報を一体化した建設部材の自動把持"，ロボティクス・メカトロニクス講演会2003講演論文集，1A1-2F-A2，2003.

[15] 梅谷智弘，前泰志，井上健司，新井健生，八木淳一："環境添付型記憶媒体を用いた物体の位置姿勢推定"，第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2003.