

複数センサ情報を統合した  
人間の作業・行動支援機械システムの  
フレームワークに関する研究

Study on Framework of Mechanical Systems  
Supporting Human Operation and Action by  
Integrated Sensory Information

2014 年 10 月

武藤 伸洋

Shin-yo MUTO



# 博士論文

## 論文題目

複数センサ情報を統合した  
人間の作業・行動支援機械システムの  
フレームワークに関する研究  
Study on Framework of Mechanical Systems  
Supporting Human Operation and Action by  
Integrated Sensory Information

2014年10月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

武藤 伸洋

Shin-yo MUTO



## 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究動向 .....	2
1.2.1 製造分野におけるセンサ・ロボット利用に関する従来研究 .....	2
1.2.2 生活空間におけるセンサ・ロボットサービスに関する従来研究 .....	4
1.3 本研究の目的と課題 .....	6
1.4 本研究のアプローチ .....	8
1.5 本論文の構成 .....	12
第2章 産業用ロボットにおける運動情報に基づく作業点モデリングを活用した作業者支援 .....	17
2.1 はじめに .....	17
2.2 力覚と速度情報を利用した接触情報センシングの高精度化 .....	18
2.2.1 接触情報センシングの研究 .....	20
2.2.2 力・速度情報の相補利用による接触点検出の高精度化 .....	23
2.3 接触情報センシングによる作業教示の効率化 .....	29
2.3.2 作業前の接触情報センシング利用 .....	31
2.3.3 作業前の接触情報センシング利用 .....	32
2.3.4 実験による評価 .....	34
2.4 センサ情報提示による設定作業の効率化 .....	38
2.4.1 Field-Aid System の提案 .....	39
2.4.1.1 基本構成 .....	39
2.4.1.2 SMV: Sensing Motion Visualizer .....	41

2.4.1.3 MPT: Motion Parameter Tuner .....	42
2.4.1.4 MTA: Multi-modal Teaching Advisor .....	45
2.4.2 Field-Aid システムのインプリメント .....	45
2.4.2.1 ハードウェア構成 .....	45
2.4.2.2 ソフトウェア構成 .....	45
2.4.2.3 ユーザインタフェース .....	46
2.4.2.4 ネットワーク .....	46
2.4.3 実験 .....	47
2.5. まとめ .....	49
<b>第3章 多様なサービスを実現するロボット, ユーザ間での情報共有プラットフォームの構築</b> .....	<b>51</b>
3.1 はじめに .....	51
3.2 複数センサ・ロボットを利用したシステム構築に関する従来研究 .....	52
3.3 ネットワークロボット PF の概要 .....	55
3.3.1 基本構成 .....	55
3.3.2 FDML .....	56
3.3.3 CroSSML .....	59
3.3.4 Pull 型インタフェース .....	60
3.3.5 アプリケーション (サービス) の実装 .....	61
3.3.6 サービスの分配 .....	62
3.4. 実証実験を通じた PF 拡張性の検証 .....	63
3.4.1 大阪市立科学館公開実験 .....	64
3.4.2 CEATEC2006 .....	64

3.4.3 UNS2007.....	65
3.4.4 UCW 実証実験 .....	65
3.4.5 実証実験のまとめ.....	66
3.5 実証実験を通じた PF 化による開発効率の検証.....	68
3.6 まとめ .....	69
第 4 章 携帯端末インフラストラクチャを活用したセンサ情報収集による歩行運動 推定、歩道状況推定への応用 .....	71
4.1. はじめに.....	71
4.2. 提案システム.....	74
4.2.1 システム概要.....	74
4.3.1. 加速度・GPS による歩行計測の基礎実験 .....	78
4.3.2. 携帯端末加速度センサによる歩行計測の妥当性 .....	80
4.3.3. 関節リウマチ患者を対象とした実験例 .....	81
4.3.4. 一連の実験における提案システムの拡張性に関する考察.....	83
4.4 歩道路面状況の収集システムへの応用性の検討 .....	89
4.4.1 歩道路面状況の収集システムのコンセプトと概要.....	89
4.4.2 歩道路面状況の収集システムの基礎的実験検討 .....	92
4.4.2.1 実験方法.....	92
4.4.2.2 実験結果.....	93
4.5 まとめ .....	95
第 5 章 結論 .....	97
5.1 本論文の成果.....	97
5.2 技術的成果の体系化 .....	98

5.3 今後の展望 .....	101
-----------------	-----



## 图目录

Fig. 1.1 Basic framework of interaction point modeling .....	9
Fig. 1.2 Basic framework of information system .....	11
Fig. 1.3 Structure of the thesis .....	15
Fig. 2.1 Basic framework of interaction point modeling .....	17
Fig. 2.2 Representative tasks.....	19
Fig. 2.3 One point contact.....	20
Fig. 2.4 Velocity condition .....	24
Fig. 2.5 Surface velocity condition function .....	26
Fig. 2.6 Evaluation function for contact point detection .....	27
Fig. 2.7 An example of setting the weight coefficients .....	27
Fig. 2.8 Measurement of sensory information .....	28
Fig. 2.9 Experimental results.....	29
Fig. 2.10 Task specifications.....	30
Fig. 2.11 Basic concept for contact sensing information processing.....	30
Fig. 2.12 Direct contour teaching (DCT).....	32
Fig. 2.13 Key spot teaching (KST) .....	33
Fig. 2.14 Experimental manipulator control system.....	34
Fig. 2.15 Experimental results for DTC .....	35
Fig. 2.16 Experimental results for KST.....	36
Fig. 2.17 Schematic of field-aid system.....	40
Fig. 2.18 A spatial tracking task .....	41

Fig. 2.19 The sample work piece .....	41
Fig. 2.20 The sample of the visualized information .....	42
Fig. 2.21 Testing motion for time-lag estimation (with weaving).....	44
Fig. 2.22 Recognized seam points.....	44
Fig. 2.23 Correlation between error and velocity.....	44
Fig. 2.24 Field –aid system using wpc .....	46
Fig. 2.25 Field –aid network system.....	47
Fig. 2.26 Robotic teaching task using wpc .....	48
Fig. 3.1 Basic framework of information system.....	51
Fig. 3.2 Basic framework of NR-PF.....	55
Fig. 3.3 Network robot interface (NR-IF) .....	56
Fig. 3.4 FDML.....	58
Fig. 3.5 Basic framework of CroSSML .....	59
Fig. 3.6 Pull-type interface .....	60
Fig. 3.7 Service structure registered in the nr-pf.....	61
Fig. 3.8 Service allocation procedure.....	62
Fig. 3.9 Field experiment: in osaka science museum(2005).....	64
Fig. 3.10 Field experiment: in ceatec2006 exhibition guide service .....	65
Fig. 3.11 Field experiment: in uns2007-health support service.....	66
Fig. 3.12 Field experiment: in universal city walk(2008) .....	66
Fig. 4.1 Basic framework of interaction point modelling.....	71
Fig. 4.2 Basic framework of information system.....	72

Fig. 4.3 Walking cycle information on the map .....	78
Fig. 4.4 Power spectrum of acceleration .....	79
Fig. 4.5 Self-correlation coefficient of acceleration .....	79
Fig. 4.6 Acceleration waveforms of the smartphone and tri-axial accelerometer ..	80
Fig. 4.7 Sample of FDML (acceleration).....	85
Fig. 4.8 Sample of FDML (GPS) .....	86
Fig. 4.9 Sample of FDML (Acceleration and user conditions).....	87
Fig. 4.10 Sample of FDML (joints and mHAQ) .....	88
Fig. 4.11 Concept of cooperative sidewalk supporting system .....	90
Fig. 4.12 Sample data for the cooperative sidewalk supporting system .....	90
Fig. 4.13 Sample application of the cooperative sidewalk supporting system.....	91

## 表目次

Table 2.1 Evaluation (work: $r_w = 200[\text{mm}]$ ).....	29
Table 2.2 Conventional and proposed teaching methods.....	37
Table 3.1 Main elements of FDML .....	58
Table 3.2 Research target & field experiments .....	63
Table 3.3 Robots and systems that were connected to NW-PF .....	67
Table 3.4 Comparison of development scales .....	68
Table 4.1 Spearman's correlation coefficients for gat parameters and clinical parameters .....	82
Table 4.2 Evaluation result for road shape.....	94
Table 4.3 Evaluation result for road feature .....	94

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

近年、高度な機能を持つセンサが開発され、製造現場や各種設備での利用にとどまらず、一般消費者が所有する携帯電話端末での利用というところまで普及している。社会構造の変化も伴って、センサの利用方法も、ロボット等の製造機器の制御の高精度化や作業対象の不確定性への対応、プラントや特定の設備・装置の状況監視や自然環境の詳細なデータ取得など、技術的専門性の高い分野での利用から、一般市民への情報提供サービスや、高齢化に伴う医療分野やヘルスケア分野などで、生活空間で人々を支援するという形での利用への期待も高まっている。センサ情報を利用する環境が、工場や特定の設備・施設といった環境から、センサから得られた情報をインターネットを介せば世界中どこでも利用できる環境、さらには一般の人が自ら所持するセンサの情報を自分だけでなく、遠く離れた人々からも参照できる環境へと発展してきている。センサの種類も多岐に渡り、例えば市販のスマートフォン本体のみでも、GPS や加速度、方位、温度、照度の計測が可能なものがあるほか、端末の Bluetooth や無線 LAN などの接続インタフェースによって、さらに多くのセンサが日常的に利用できる状況が整いつつある。

このような状況の中で多種多様なセンサやロボットなどの機械を活用したシステムの性能向上や、適応領域を拡大し、実サービスとして普及をさせるためには、センサやロボット単体の機能の高度化のみならず、製造機器のオペレータ、情報・医療・公共等のサービスの提供者側、サービスの利用者側の視点を考慮した検討が必要となる。例えば、複数のセンサ情報の中から効果的な組合せを効率的に実験できる環境の構築、ユーザがセンサ情報を利用する際の理解のしやすい形での情報提供、ユーザの状況をセンシングする場合におけるプライバシーの観点の配慮、端末機器の急速な進展に対応する実験システム構築の効率化、多様なアプリケーション構築の効率化など多岐にわたる課題が考えられる。

製造分野では、ティーチングプレーバック型ロボットの普及に続いて、センサを導入することで対象物形状の個体差への対応や、加工中の変形に自動的に対応することでロボット作業を高度化する様々なアプローチがとられてきた。その一部は実用化されているが、依然としてティーチングプレーバック型ロボットが主流となっている。センサの性能を活用してより高い精度や成功率を実現するためには、人間の判断能力を十分に活用することも必要となっている。

また、センサ・ロボット技術の生活空間での利用に関しては、博物館やアミューズメントパークなどの特定の施設、市街地や観光地、モデルルームや特定の住宅地を対象に各地で実証実験が行われてきた。これらの方式では、特定の実験環境に、特定の情報を計測する目的で設計・配置した複数のセンサの情報を蓄積して、それを限定したアプリケーションに応用した実例としてとらえることができる。このような生活空間で、様々な仕様のセンサやロボットを活用した行動支援サービスを普及させるためには、それぞれの施設の環境の差異や利用する機器への適用、既存の設備や社会インフラの利用など、環境の特性を考慮したシステムを柔軟に構築できるプラットフォームが必要とされる。また、上記の実験検討では、実用化を目指すための取り組みが始まった段階であり、基礎的な実験から実用フェーズへの検証へ段階的に対応するためのシステムの拡張性という観点からの評価検証の例は見当たらない。今後は、ユーザが所持する携帯端末やそこに接続されたセンサを活用したサービスが増加するものと考えられるが、初期段階の実験から実用化に至る過程で効率良く活用可能なシステムが重要になると考えられる。

以上の背景を踏まえ本研究では、生活空間に普及しつつある多様なセンサを統合的に扱い、作業や利用者を支援する新規サービスを継続的・体系的に創出可能とする支援機械システムのフレームワークを構築することを目指す。

## 1.2 研究動向

### 1.2.1 製造分野におけるセンサ・ロボット利用に関する従来研究

製造分野では、1970年代にティーチングプレーバック型ロボットが商用化されて以降、少品種大量生産の自動化を目的に導入が進んできた<sup>1)</sup>。1980年代から1990年代にかけては、センサを導入することにより、対象物形状の個体差への対応や、加工中の変形に自動的に対応することなどを目的に多くの研究がなされてきた。その例としては、溶接線をセンサで認識して追従するアーク溶接マニピュレータ<sup>2)3)</sup>や、継ぎ目の位置をセンサで認識して追従するシーリングマニピュレータ<sup>4)5)</sup>、車体組立工程におけるビジョンセンサの導入など<sup>6)</sup>がある。また、さまざまな認識アルゴリズムを導入した研究<sup>7)</sup>が報告されているが、広く実用導入されたケースは少なく、依然としてティーチングプレーバック型マニピュレータが主流となっている<sup>1)</sup>。この間、複数のセンサを導入することで、性能や信頼性を向上させるセンサフュージョンの考え方が提案されている<sup>8)</sup>が、センサをどのように組み合わせれば所望の性能を達成できるかは、技術者の知識や経験が重視される部分となり、システムティックに所望の性能を期待するコストで達成できるという状況ではない。

一方で、作業教示へのセンサ利用という観点からは、作業教示時に作業者のスキルを活用するアプローチとして、作業者がマニピュレータの手先を直接動作させて、その位置姿勢情報を利用するダイレクトティーチが提案されている<sup>9)10)</sup>。直接動作のためには、作業者が動かそうとする方向を、手先に取り付けた力センサにより検知してその方向にマニピュレータが移動するように制御する方法を用いている。この方法では、作業に適したマニピュレータの位置姿勢を直感的に教示できるというメリットがあるが、基本的にマニピュレータの位置姿勢を再生する方法であり、ワークに対する作業姿勢などの作業仕様の変更などは再教示が必要な場合があるほか、ワーク状態の不確実性に対応できる方法ではない。

さらに、作業者のスキルを接触力と動作の関係として捉え、作業者の実演時の接触力と動作の関係をセンサフィードバック型マニピュレータの制御に利用するという方法として、浅田らは、ブロックの組立作業を対象として位置・力制御を併用した教示法を提案した<sup>11)</sup>。下倉ら<sup>12)</sup>は、バリ取り作業を対象に熟練作業者のスキルを実演時のデータから抽出しロボット教示するための手法について検討し、熟練者のバリ高さ、硬さ情報と、送り速度の対応関係の自動抽出を試みている。これらの効果は、限られた作業で効果が確認されているが、その作業や対象物に特化した詳細な実験検討が必要であり、広く作業に適用された実績はない。また、作業教示時にワークにかかる力センサの情報をユーザに提示することで、作業成功率の高い教示点を教示できるようユーザを支援し、作業実行時はティーチングブレーバック型で動作させるという研究もなされている<sup>13)</sup>。

高性能なセンサフィードバック型マニピュレータシステムは、センサを通じて外界の影響を受けることがある意味で不可避である。そのため、センサの性能を活用してより高い精度や成功率を実現するためには、溶接作業ひとつとってもユーザの置かれた環境でのワーク設置方法や、センサ計測や認識のためのパラメータ設定、それに適した工具の位置姿勢の検討など、工具の種類や対象ワークの種類に応じて技術的なノウハウや時間のかかる設定作業や検証作業が必要となる。さらにグラインダ作業や組立作業など多種類の作業に対してセンサを活用するためには、複数の作業において様々な環境の状況に適用可能な設定・検証作業な枠組みの導入が望まれる。

また上記のことから、ユーザの置かれた環境で、センサフィードバック型マニピュレータの性能を十分に機能させるためには、人間の判断能力を効果的に生かせる環境を提供することでユーザの作業を支援することが望まれる。この支援技術はロボット技術そのものと同様に重要と考えられる。このようなユーザ支援のためには、近年進歩の著しい ICT 技術の活用がその鍵の 1 つと考えられる。1990 年代後半に開発された Wearable Personal Computer<sup>14)</sup>をはじめ現在に至るまで小型・低価格化が進み、スマートフォンとその周辺デバ

イスという形で、インターネットやセンサ機能を含めて一般消費者が利用できるまで、普及が進んできた。このことは、製造現場でのユーザ支援のための ICT 技術の活用という観点だけでなく、そのノウハウを活用することで新たな分野でのセンサ情報を活用したサービスに応用できる可能性があるといえる。

### 1.2.2 生活空間におけるセンサ・ロボットサービスに関する従来研究

センサやロボット技術が製造現場から、一般の生活空間に展開される土壌として、インターネット技術やユビキタス技術の急速な普及がある。このような技術革新の中、センサやロボットの活躍する場を生活空間に拡張し、生活支援サービスを提供するためのインフラとして普及させようとする取り組みも本格化している。ロボットが人々にとって役立つ存在になるためには、人々が既に有効活用している上記のようなセンサ・機器やアプリケーションソフトウェアとネットワークを介して連携することは必須であるが、センサ毎・ロボット毎に対応するのではなく体系的に実現するためのフレームワークを確立することが不可欠となる。こうした背景のもとで「ネットワーク・ロボットに関する調査研究会」においてユビキタスネットワーク技術とロボット技術を融合して実現できるネットワークロボットの実現イメージと技術課題に関して検討が行われた。調査研究会の最終報告では、ユビキタスネットワークで利用される様々な機器・デバイス・ソフトウェア等を包含する形でロボットの概念を拡張して以下のタイプのロボットを定義した<sup>15)16)</sup>。

「ビジブルロボット」： 人型・動物型ロボット等の身体性のあるロボット

「アンコンシャスロボット」： 環境に埋め込まれたセンサやウェアラブルセンサ

「バーチャルロボット」： コンピュータ上のエージェント

加えてこれらのタイプのロボットの多様性を吸収し連携・協調させるため、プラットフォーム型のシステム構成を取ることが効果的であり、ネットワークロボットプラットフォームに関する技術開発が重要課題として挙げられている<sup>15)16)</sup>。

ネットワークロボットプロジェクトと並行する形で、世界各地で類似のプロジェクトがスタートし、実証実験が実施された。代表例として、欧州の URUS (Ubiquitous Networking Robot in Urban Settings)、韓国の URC (Ubiquitous Robot Companion) が挙げられる。URUS は、ヨーロッパの市街地や観光地で道案内をするロボットシステムを開発することを目的としている<sup>17)</sup>。カメラ等のセンサ群から得られる情報に基づいた Localization と Path Planner をサーバが行い、その結果を利用して移動ロボットが観光客を案内する。構築した実験環境では、接続したセンサの種類は固定であり、アプリケーションも案内サービスに



特化して開発されている。DustBot<sup>18)</sup>は道幅が狭く複雑に入り組んだ欧州の旧市街等を巡回し、清掃やごみ収集を行うとともに、大気中に含まれる不純物等を環境センサによりモニタして住民に周知することを目的としている。DustBot のシステム構成も URUS と同等で、センサの種類は固定で実装されたアプリケーションも清掃・ごみ収集・大気のモニタリングに特化している。URC は実験規模が大きく、フィールドテストとして5種類のロボットを用いて1000世帯でサービス提供実験を行ったと報告している<sup>19)</sup>。サーバ側で提供するサービスとしてはユーザやロボットの認証、音声認識、音声合成、画像認識等の基本サービスとホームモニタリングや遠隔操作コンテンツ配信等の Common Service が挙げられている。しかし、ロボットが提供するサービスである auto-cleaning, automatic charging, navigation 等は、説明されている Common Service とは別のサービスとして記載されており、ロボットに関連するこれらのサービスがどのように実装されて機能したのか、URC のフレームワークがどのように活用されたのか、具体的な記述がなく不明確である。これらの研究は特定の施設やエリアにおいてシステムを構築して、一定の期間の実証実験を行ったものである。このようなシステムを普及させる場合には、環境の特性に合わせて適切にセンサやロボットを選択し、システムの性能を維持しつつ、開発コストの観点からも効率的なアプローチが求められる。

多様なロボットが研究開発されるなかで、ロボットを動作させるためのソフトウェア開発という観点からのミドルウェアやOSの研究開発としては、ネットワーク分散コンポーネント化技術を用いた共通プラットフォーム RT-Middleware<sup>20)</sup>がある。RT-Middleware では、サーボモータやセンサ、カメラなどのデバイスや各種処理プログラムなどのロボットの機能要素を RT コンポーネント化し、CORBA ベースの通信でそれらコンポーネントを連携させてシステムを開発する。様々な機能要素をソフトウェア・コンポーネント化することでリソースの再利用性を高め、効率的なソフトウェア開発を目指している。また ROS<sup>21)</sup>では、アクチュエータやセンサなどのデバイスや各種処理プログラムをモジュール化/コンポーネント化しソフトウェアを開発する環境を提供している。インターネットを活用したロボットによるサービス提供という観点からは、RSNP (Robot Service Network Protocol) が提案されている<sup>22) ~24)</sup>。RSNP は、疑似 Push など Web サービス技術を活用した通信機能を提供し、インターネット上の情報コンテンツを活用したサービス提供を目的としている。これらは発展の目覚ましいソフトウェア技術やインターネット技術を適用することで、ロボットによるシステム開発の効率化に貢献するものといえる。今後は、多様なロボットを活用したサービスを構成するうえで、このような各種の技術をもとに構成されたロボットやモジュールを適材適所で有効利用したシステム構成を前提とすることが重要となると考えられる。

生活空間として特に屋内に設置された多種多数のセンサ情報を活用した研究としては、ロボティックルーム<sup>25)26)</sup>の研究がある。病室や個人宅の部屋に多様なセンサを配置し、人間の活動をセンシングしたり記録することで、行動の予測や異常の検知やロボットによる物理的な支援を実現している。また、戦略的創造研究推進事業CREST研究領域先進的統合センシング技術の研究<sup>27)28)</sup>では、乳幼児の遊具利用時等の行動をセンサを用いて大量に記録し、危険行動を抽出することで、事故の防止を目的とした情報システムを構築した例がある。これらの方式では、特定の実験環境に、特定の情報を計測する目的で設計・配置した複数のセンサの情報を蓄積して、それを応用した実例としてとらえることができる。また、これらは、データを収集する側があらかじめ仕様が明確なセンサを主体としてデータ収集のためのシステムを構築した例と言える。特別な施設や室内ではなく一般的な生活空間でのセンサ活用の展開を図った研究としては、ユーザが所有する携帯端末をセンサとして活用した例として、例えば加藤ら<sup>29)</sup>がスマートフォンとセンサを活用したリモート見守りシステムを提案して、応用例を示している。この例では、スマートフォン上のセンサの情報を用いて歩行時には行動推定、運転時には運転状態をサーバに送信し、高齢者等を遠隔で見守るシステム例を示しているが、他のアプリケーションへの拡張性に関しては考慮されていない。

上記の生活空間でのロボットサービスの研究例では、あらかじめ設計された一定の条件の中のセンサを対象に、情報を収集・蓄積しその応用を検討したものである。これらの実験検討ではユーザから実際に情報を収集して、実用化を目指すための取り組みが始まった段階であり、具体的な携帯端末のセンサ特性への考慮や、基礎的な実験から実用フェーズへの検証へ段階的に対応するためのシステムの拡張性という観点からの評価検証の例は見当たらない。今後、ユーザが所持する携帯端末や携帯端末に接続されたセンサの情報を活用したサービスは増加するものと考えるが、初期段階の実験から実用化に至る過程で効率良く活用可能なシステムが重要になる。

### 1.3 本研究の目的と課題

以上の背景を踏まえ、製造分野や情報・医療・公共サービスなどでの複数センサ情報を活用した多様で高度な将来サービスの普及を目指し、本研究では、生活空間に普及しつつある多様なセンサを統合的に扱い、作業や利用者を支援する新規サービスを継続的・体系的に創出可能とする支援機械システムのフレームワークを構築することを目的とする。フレームワークという言葉は、近年はソフトウェアの開発環境を示したり、ビジネスモデルの設計手法などにも幅広く使われているが、本研究で扱うフレームワークとは、システムの構成要素と機能分担、インタフェースを表すものと定義する。具体的には、複数セン

サ情報を統合した人間の作業・行動支援機械システムの持つべき構成要素と、普及したインフラ環境を想定した機能分担を明確にし、重要となるインタフェースを規定するものとする。

本研究では、支援機械システムの構成として、物理世界の観点からは、複数センサによる人間・機械・作業環境の状態の把握、情報世界の観点からは、ネットワークによる複数システムの統合と管理を実行する部分が基本となると考える。目的実現のためには双方の観点からの高度化が必要であり、物理世界（=機械系）の課題と情報世界（=情報系）の課題とを以下のように設定する。

(1) 物理世界（=機械系）の課題：工場内や生活空間で、作業や対象が変化しても複数センサを機能させることで人間・機械・作業環境の状態を把握するシステムの実現

本来のセンサ導入の目的の一つである作業精度の向上や対象物の不確実性への適用性拡大に対してニーズはあるが、溶接やバリ取り、組立などの作業毎、あるいは同一の作業であっても対象ワークが異なる場合に複数センサを組合せて所定の精度を得るには、多くの設定や検証時間を要するという現状がある。また、今後生活空間でセンサがより広範囲で利用されることを想定すると、所定のアプリケーションや計測対象の範囲で、システムティックに複数センサを機能させる仕組みが必要となる。さらに、より高度なセンサ活用にはユーザによる判断を適切に取り入れて設定することができるシステムが望まれる。システム内で複数の作業に適用できる形でセンサ特性を活用した人間・機械・作業環境の状態の把握を行い、センサ情報を効果的に機能させるとともに、適切にユーザに提供することで、これらのセンサ性能やユーザの能力を十分に活用するフレームワークが必要と考える。

(2) 情報世界（=情報系）の課題：普及・進化する社会インフラストラクチャを活用して多種多様なセンサを接続して、種々のサービスを提供する支援機械システムを構築できるプラットフォームの実現

生活空間で、様々な仕様のセンサやロボットを活用した行動支援サービスを普及させるためには、それぞれの施設環境の差異や利用する機器への適用、既存の設備・社会インフラの利用など、情報システムを構成する環境の特性を考慮したシステムを柔軟に構築できるプラットフォームが必要とされる。進展の著しいネットワーク環境やスマートフォンセンサなどの端末は、数ヶ月から数年の単位で新たな機能・性能向上が継続されている。サービスを提供する側が特定の形式のセンサを設置・配布して利用するという形態から、今後はユーザが既に所持している携帯端末をセンサとして利用する形態も出てきている。サービス開発の初期段階から実用化まで数年かかるケースを想定すると、実用化までの間に

センサや端末性能の向上が十分に期待できる一方で、初期段階での携帯端末が入手できないケースも想定される。したがって、新たなサービス開発する場合には、基礎的な実験から実用フェーズへの検証へ段階的に対応するためのシステムの拡張性を具備した枠組みが必要となると考える。

#### 1.4 本研究のアプローチ

本論文では上記の課題を鑑み、複数のセンサ情報を統一的に扱うための基本構想として、マニピュレータと作業環境がインタラクションするポイント、移動機器や人間と床面とが接するポイントを作業点(Interaction points)と呼び、作業点に関連する情報に着目した人間の作業・行動支援機械システムのフレームワークの提案を行う。

ここでは、継続したインタラクションのある作業を対象に、複数センサ情報を個々に扱うのではなく、高次の情報としてハードウェア的なインタラクションのある作業点に関連する情報に変換して扱う。そこで作業点における物理特性やセンサ特性、作業点上のワークや床面の状態などを管理し、これらの情報を基にアプリケーション（フィードバック制御や設定診断プログラム、ロボットによる情報サービス、ユーザへの情報サービス等）を構築する。もともとの個々の複数センサ情報等を基本情報(Basic information)と呼び、作業点情報(Information about interaction points)を基にアプリケーションを構築するモデルを、本研究では作業点モデリングと呼ぶことにする。

次に、この作業点モデリングの考え方をベースに支援機械システムの課題への対応を考える。まず、支援機械システムの物理世界(=機械系)の課題に対して、マニピュレータや移動機器等のインタラクションを扱う作業点モデリングの基本コンセプトをFig. 1.1に示す。

センサフィードバック型のマニピュレータを対象とした場合には、通常の教示点列の補間による制御目標値生成ではなく、ワーク輪郭経路や溶接線などの作業点の3次元モデルを管理したシステムを考える。情報フローは、基本情報として内界センサや外界センサなどの運動情報等から、ロボットに必要な作業点に関する情報を生成する。これは作業対象となるワークの輪郭経路や溶接線の情報となる。次に、この基本情報と作業点情報を活用したアプリケーションとして制御目標値を生成する情報フローを考える。ここで、センサ情報から作業点情報を求めるプロセスにおいて、複数のセンサ情報を作業点における誤差特性を基に相補的に利用した高精度化を行ったり、基本情報と作業点情報をユーザにわかりやすい形で提示するアプリケーションを構築することでユーザによるパラメータ設定を支援したり、規定のワークを使用した動作時の作業点誤差と運動情報の相関性を利用した

自動的なキャリブレーションを行うといった機能をあたえることで、センサ活用した人間・機械・作業環境の状態の把握の高度化を図るアプローチを取る。

さらにこの考え方を同様に歩行や車輪移動を行う人間機械システムへも適用すると、センサフィードバック型マニピュレータに対しては、位置・速度・加速度・力など内界センサや外界センサの運動情報や作業点情報をもとに、経路推定やキャリブレーションの適用するものであるが、ここでは、基本情報として歩行者や車輪移動する自転車などの運動情報等を、作業点情報としては床面や路面に関連する情報という形で考える。マニピュレータと異なり、細かな関節角度等は得られないが、GPS や加速度などの情報により、各種情報の相補的な利用や、ユーザへの提示、相関性利用という考え方で、路面状況推定や、アプリケーションとして各種情報のユーザへの提示や、規定の床面を移動した情報を利用して人間や移動機械の各種の特徴量の推定等を考える。

Fig. 1.1 の基本構成は、基本情報を管理する部分、作業点情報を管理する部分、およびこれらの管理された情報からアプリケーションを構築する部分となり、提案するフレームワークの基本的な構成要素と位置づけられる。またフレームワークにおけるインタフェースの観点からは、複数センサ情報を扱うシステムとそれを活用するユーザとのインタフェースに関して設計指針を与えるものとなる。このようなフレームワークによるアプローチによって、工場内や生活空間で、作業や対象が変化しても複数センサを機能させるシステムの実現を目指す。

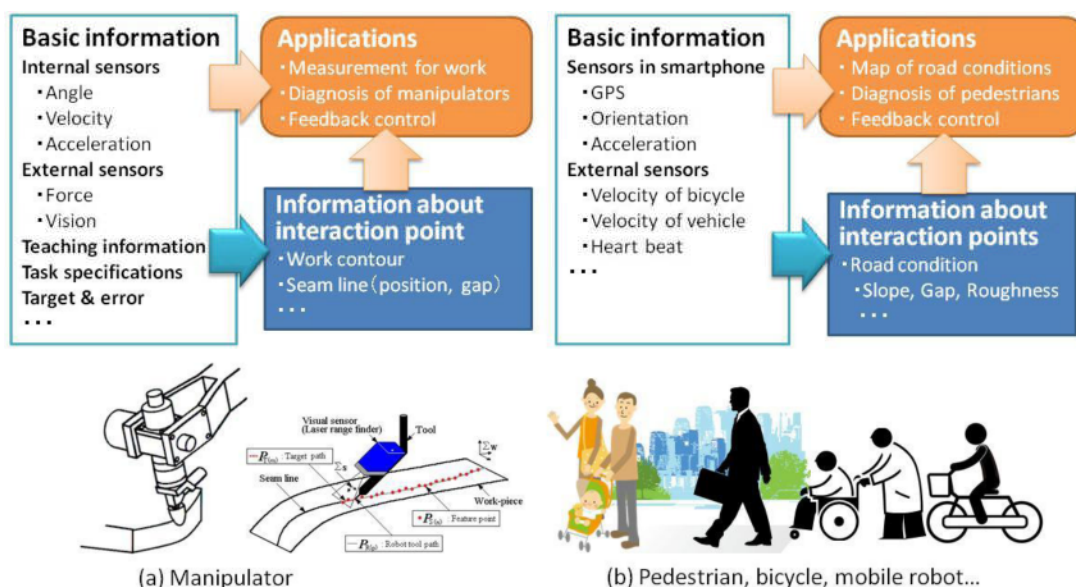


Fig. 1.1 Basic framework of interaction point modeling

提案したフレームワークの基本構成の特徴を以下にまとめる。

- ・継続したインタラクションのある作業を対象に，複数センサ情報を個々に扱うのではなく，高次の情報としてハードウェア的なインタラクションのある作業点に関連する情報に変換して扱う。

- ・作業点における物理特性やセンサ特性を利用した情報管理を行い，これらの情報を基にアプリケーションを構築する。

次に，情報世界 (=情報系) の課題に対しては，上記のコンセプトを一般ユーザの所持するセンサや施設に設置されたセンサを利用して柔軟にサービスを構築できる情報システム上に構築することを考える。基本的には作業点モデリングの考え方を，現在普及・進展しているネットワークインフラや携帯端末等のセンサ利用を前提として，階層化して機能分担した構成となっている。また重要となる複数センサ情報の通信に関するインタフェースとしては XML 技術による情報記述方式を導入するプラットフォーム (PF) 構成により，ロボットや他のシステムとの連携性を高める。

Fig. 1.2 に情報システムの基本構成を示す。client, local server, main server の階層を設け，client としては多様なセンサやロボット，ユーザが所持するスマートフォンなどの携帯端末を想定する。ここで多種多様でかつ技術革新の早い client の特性に対応するため，XML 技術によるセンサ・ロボット情報定義の汎用化を試みる。具体的には，ひとつの XML ファイルで情報の定義と実データを記述できる規約を導入し，この記述に従ったデータに対してデータベースの変更無しにサービスに必要な情報を管理できる機能を考える。こうすることにより，センサ情報のフォーマットやセンサ性能差だけでなく，ユーザやロボットの抽象化された情報にも対応可能となる。例えば，ユーザの移動軌跡のような生のセンサデータに近い情報，しゃがみこんだユーザの位置といった，ひとの動作の認識結果を合わせた情報，ロボットがユーザから聞き取った情報，ロボット自身の状態，といった様々なセンサやロボットの種類に対応することができ，サービスに必要な情報を簡単に扱うことが期待される。さらに，携帯端末から収集されるセンサ情報の特性として，サンプリング周期が一定でない場合がある，複数センサがひとつの端末に搭載されている，数年で機種・性能が変化する点があげられるが，このような特性に対しても柔軟に対応するシステムが構築できると考える。

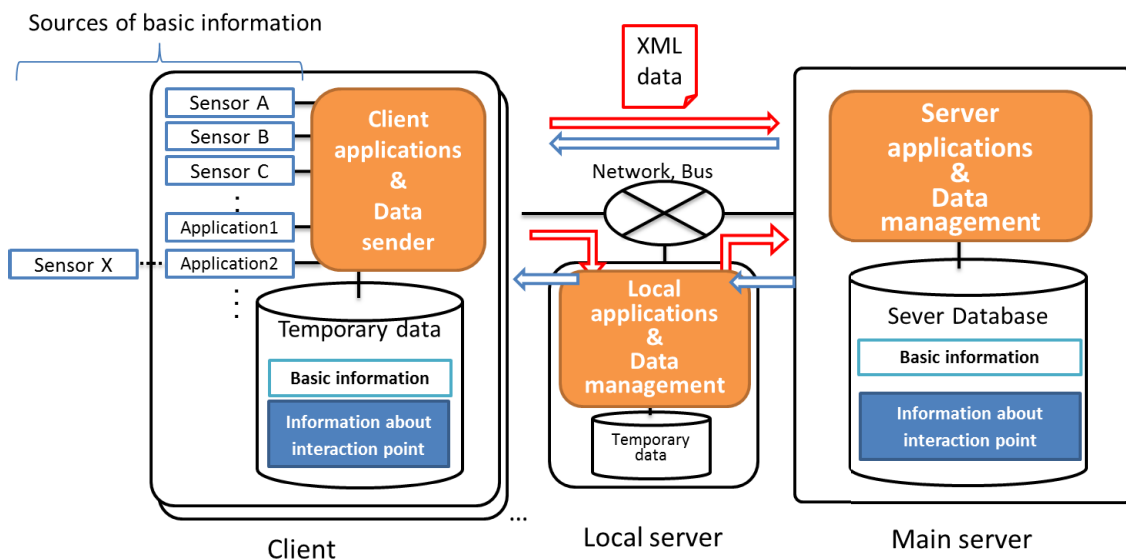


Fig. 1.2 Basic framework of information system

local server としては、一定の広さの設備内に配置された NW 機能を有したコンピュータを想定している。具体的な local server の処理内容としては、複数 client の情報を扱う処理、client では CPU パワーや電池の関係から処理できない、あるいは処理をしないほうが望ましい情報処理の実行、main server とネットワーク接続されていない場合や main server とネットワーク接続環境が悪い場合の処理の実行などが考えられる。また、別の観点からは main server に長期的に残す必要のない情報の破棄、ユーザが長期に残したくないと希望する情報の破棄や匿名化やデータの統計化の処理実行も考えられる。上記のような処理が必要ない場合には、client と main server のみでシステムを構成することも可能である。

main server としては、クラウド環境などで構築されたサーバーシステムを想定している。所定の XML 技術で記述されたデータであれば蓄積管理する機能をベースとして、client の機種等が変更された場合でも、継続した蓄積を容易にしている。蓄積したデータは、所定の権限を持ったアプリケーション・ユーザに対して利用可能とする管理機能を持たせることで幅広いデータを扱ったアプリケーションの構築が期待できる。

また client, local server, main server の各階層では以下のような共通機能の配備や機能分担を考える。

- ① client : サーバとのデータ送受信機能をライブラリ化した共通機能と client 内部のリアルタイムセンサフィードバックなど高い応答性の必要なアプリケーション機能

- ② local server : 複数の client の情報を必要とするアプリケーション機能
- ③ main server: ユーザの状態, センサ・ロボットの機能や情報を蓄積管理する共通機能とこれらを利用したアプリケーション機能

各階層のデータベースでは, 基本情報と作業点情報を扱い, 目的とする応答速度や各階層のコンピュータパワーに応じたアプリケーションの記述が可能となる. また上記のように, PF としてサービス構築に必要な共通機能を整備することで, 新規アプリケーションのコアの部分に注力した効率的なサービス開発の実現を目指す.

上記のシステム構成で, 複数のアプリケーション構築を考える場合, main server のデータ管理部を共用化し, 各階層のアプリケーション部分の構築のみで効率的に対応することが可能となる. また, ほぼ同一のアプリケーションであっても, 端末機種の変更によるサンプリングタイムなど計測性に変動がある場合や, 新たに情報を付加してアプリケーションとしての機能を向上させる場合, client, local server, main server での機能分担を変更する場合に柔軟に対応できると考えられる.

以上のように本論文では, 作業点モデリングの考え方を基軸に上記の機械系と情報系の課題を解決する技術を導入した人間の作業・行動支援機械システムのフレームワークを提案することで, ユーザの生活空間で, 現在の携帯端末やネットワーク環境を活用し, 継続的・体系的にアプリケーション構築を可能としうるアプローチを取る.

## 1.5 本論文の構成

本論文は全5章から構成される. 各章の概要は以下の通りである.

本章では, 本研究の背景, 研究課題と目的について述べた. また, 関連研究の動向について述べ, 本研究の位置づけを明らかにし, 課題を抽出した. 具体的なアプローチとしては, 複数のセンサ情報を統一的に扱うための基本構想として, 継続したインタラクションのある作業を対象に, 作業点モデリングを導入した人間の作業・行動支援機械システムのフレームワークの提案を示した. 機械系の課題に対しては, マニピュレータや移動機器等のインタラクションを扱う作業点モデリングの基本構成を示し, 工場内や生活空間で作業や対象が変化しても複数センサを機能させるシステム構成を提案した. 情報系の課題に対しては, 作業点モデリングの考え方を, 現在普及・進展しているネットワークインフラや携帯端末等のセンサ利用を前提として, 階層化および機能分担の構成を提案した.

第2章では, 機械系の課題解決を目的に, 産業用マニピュレータの作業点モデリングによるユーザ支援機械システムの高度化について述べる. 作業点モデリングを導入したシス



テムは、基本情報を管理する部分、作業点情報を管理する部分、およびこれらの管理された情報からアプリケーションを構築する部分から構成され、支援機械システムのフレームワークの基本的な構成要素の具現化例となる。またフレームワークにおけるインタフェースの観点からは、複数センサ情報を扱うシステムとそれを活用するユーザとのインタフェースに関して設計指針を与えるものとなる。これを工場内でのグラインダ作業や溶接作業という複数作業のセンサフィードバックマニピュレータを対象に、複数センサの特性を利用した高精度化やパラメータの自動設定、ユーザの判断を活用可能なシステム構築に適用することで有効性を検証する、高精度化の例として、力と速度情報との特性を相補的に利用した作業点接触情報センシング方式を提案し、実験による接触点検出精度向上を確認する。次にこれを、力覚センサを有するマニピュレータを対象に、グラインダ接触加工作業への適用し、作業環境への適用性や教示の簡素化に効果があることを明らかにする。さらに、センサフィードバック型ロボットの内部情報から、装置の各処理部の計算結果を同次元で代表するワーク形状の推定値、エンドエフェクタの制御目標値、制御結果等のワーク座標系で記述できる情報を可視化し、作業者に提示することで作業を支援する方法を提案する。この方法を、実際の溶接センサフィードバックロボットを対象に、ウェアラブルコンピュータを利用して実装し、作業点誤差情報の作業員への提示による作業員支援および運動情報との相関性を利用したチューニングへ適用することにより、その有効性を明らかにする。

第3章では、情報系の課題解決を目的に、公共空間でのロボットによる案内等のユーザ支援サービスを想定し、様々な種類のロボットやセンサからの情報を、ネットワークを介して情報共有するプラットフォーム（PF）を提案する。提案PFは、支援機械システムのフレームワークの階層構造と各階層における機能分担、主要な情報インタフェースの設計指針を具現化したものである。実際の複数施設における実証実験により、提案する支援機械システムのフレームワークの、多種センサを接続した複数ロボット情報サービス構築への有効性を検証する。対象とするサービスでは、施設を利用するユーザの運動を計測するセンサは、計測すべきユーザの動作や、施設の広さや明るさなど環境に適用できる形で多種多様なセンサが利用される。また、サービスを提供するロボットも施設の環境によって適切なロボットを利用する形態となる。そのようなセンサ情報を扱う支援機械システムに対して、XML技術を導入して情報を柔軟に記述し、階層化構造により基本的な情報管理が可能な情報共有PFを設計する。このPF上にロボットによる記念写真サービス、展示説明、健康支援、ショッピングモールでの案内サービスをインプリメントし、実証実験を通じた複数のロボット情報サービスの構築への有効性と、システム開発工数の観点からPF化した開

発規模と各実証実験システムを個別開発した場合の想定開発規模比較し、複数システムを構築する場合にPF化による開発効率化が実現できることを明らかにする。

第4章では、現在の携帯端末インフラを活用したアプリケーション開発を対象に、第2章の機械系の課題を解決する技術、第3章の情報系の課題を解決する技術の双方を適用したフレームワークを活用し、ヘルスケア分野等への応用について述べる。ここでは、産業用ロボットで作業点におけるマニピュレータの運動やワークの状況のセンシングを高度化する仕組みと同等の考え方を、歩行者の運動や歩道の状況センシングに適用し、相補利用やユーザへの提示、相関性の利用を可能にしたフレームワークと位置付ける。さらに第3章の情報システムのフレームワークを導入し、携帯端末上でのセンサ情報収集の特性を考慮したシステムを構築する。具体的なアプリケーションとしては、ユーザの運動に関する情報の利用例として歩行モニタリング機能を構築し、段階的にその応用性の検証と並行して、システムの有効性の検討を行う。第一段階では、基礎的なデータ蓄積アプリケーションを構築し、携帯端末を身に付けたユーザの運動情報として、歩行時の加速度・GPS計測から得られる特徴量を用いた、歩行概要評価の検討を行う。次の段階では、医療やヘルスケア分野への応用を想定し、専用センサから得られる情報と、携帯端末のセンサから得られる情報の比較を実施する。さらに、具体的にリウマチ疾病の状態の定量的な把握を目的として、そのために必要となる計測データ、ユーザからの入力データを蓄積するアプリケーションを構築して実験を実施、リウマチ指標と運動情報の相関性を利用した疾患活動性推測への可能性を示す。一連の実験にて、携帯端末センサの特性を考慮したデータ収集、実験のフェーズに応じた蓄積情報の変更・拡張への対応という観点から提案システムの有効性について述べる。さらに利用するセンサ情報を、ベビーカーや車椅子、キャリングケースの運動情報に拡張し、歩道利用者や歩道管理者へのシステム支援を想定した、歩道路面状況の収集システムへの応用のコンセプトと基礎的なデータ収集結果を示す。今後、このようなユーザが所持する携帯端末や携帯端末に接続されたセンサの情報を活用したサービスは増加すると考えられ、初期段階の実験から実用化に至る過程で効率良く活用可能な情報収集システムの有用性が高まる分野と想定している。

第5章では、第2章から第4章で得られた主要な成果についてまとめ、本研究の目的が達成されたことを示すとともに、総括を行う。本論文では、複数センサ情報を統合した人間の作業・行動支援機械システムの構成方法としてマニピュレータと作業環境がインタラクションするポイント、移動機器や人間と路面とが接するポイントである作業点に関連する情報に基軸にしたフレームワークを提案し、それを具現化した、具体的な対象としてセンサフィードバック型マニピュレータの複数の作業、ロボットによる複数の情報サービス、携帯端末インフラストラクチャを活用したヘルスケアサービス等に適用し、機械系の

課題，情報系の課題を解決し得ることを述べ，産業用ロボットや情報支援ロボット，生活空間に普及しつつある多様なセンサを活用した新規サービスの創出に対する提案フレームワークの意義を総括する。

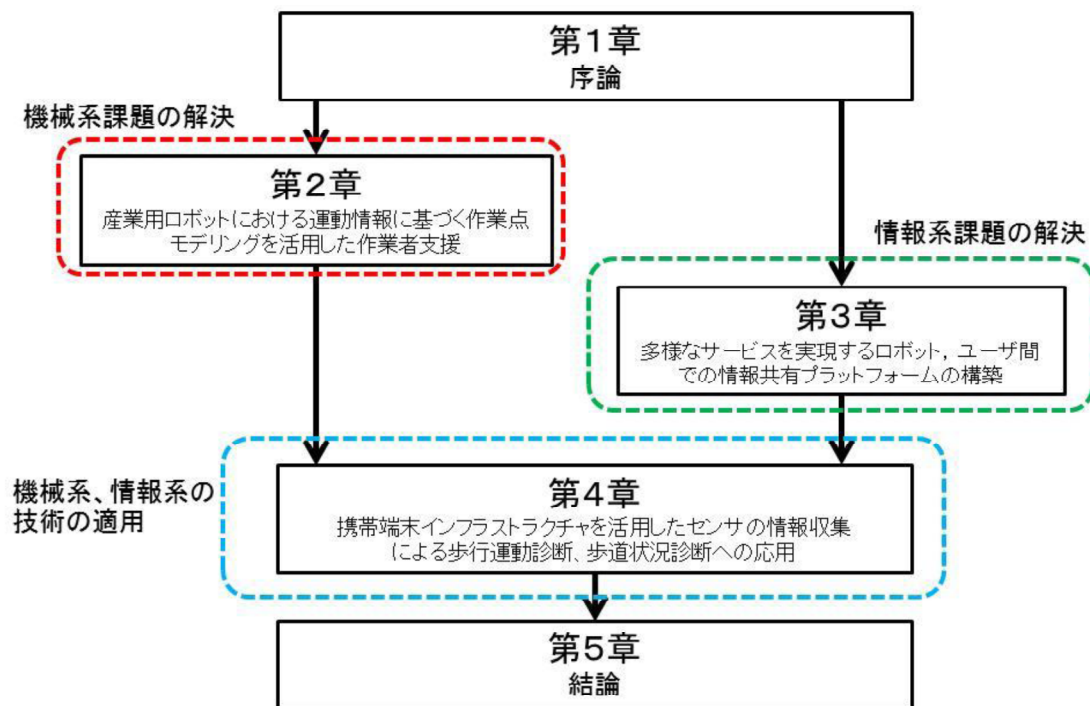


Fig. 1.3 Structure of the thesis



## 第2章 産業用ロボットにおける運動情報に基づく作業点

### モデリングを活用した作業支援

#### 2.1 はじめに

本章では、機械系の課題解決を目的に、産業用のセンサフィードバック型マニピュレータシステムに対し作業点モデリングの考え方を導入した支援機械システムの高度化について述べる。具体的な作業としては工場内における、グラインダや溶接などの複数の作業に対して、センサ特性やユーザの判断を活用することで複数センサを効果的に機能させるシステムの実現を目指す。

まず、Fig. 2.1(a)に示すようにセンサフィードバック型マニピュレータを対象に、作業点モデリングの考え方を導入する。ここでは、通常の教示点列の補間による制御目標値生成ではなく、ワーク輪郭経路や溶接線などの作業点の3次元モデルを管理したシステムを考える。情報フローは、内界センサや外界センサなどの運動情報から、ロボットに必要な作業点に関する情報を生成する。これは作業対象となるワークの輪郭経路や溶接線の情報となる。この作業点情報に対して作業仕様を与えることで制御目標値を生成する情報フローを考える。

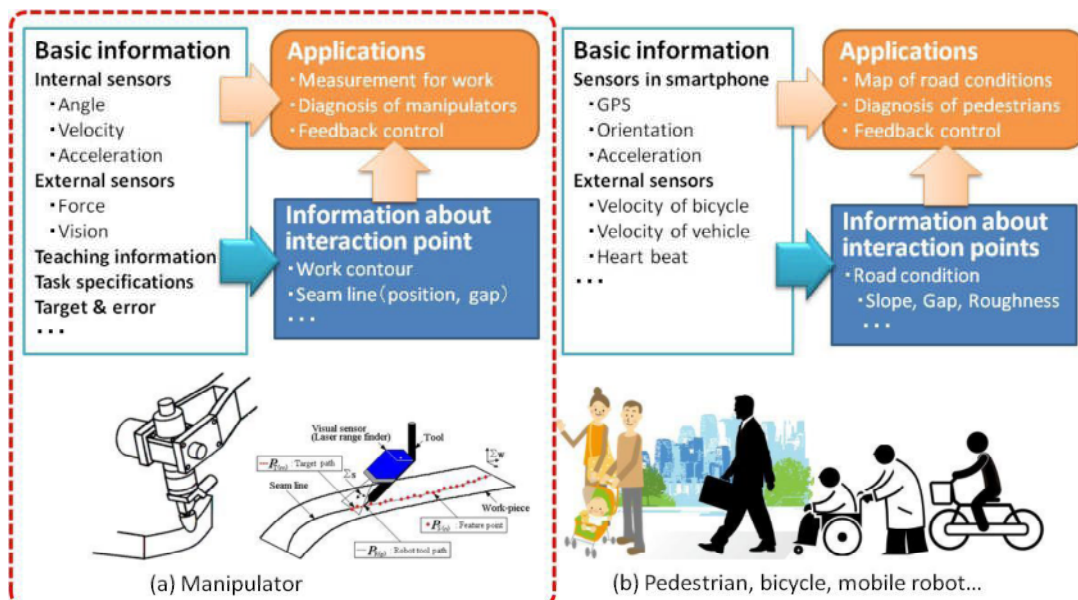


Fig. 2.1 Basic framework of interaction point modeling

ここで、センサ情報から作業点情報を求めるプロセスにおいて、

- ・センサを相補的に利用した高精度化
- ・ユーザへの提示により、ユーザによる実ワークと内部データの比較と対応検討させる、
- ・作業点誤差と運動情報の相関性を利用したチューニング、

という機能をあたえることで、センサ活用の高度化を図るアプローチを取る。

本章では、具体的な運動情報として速度情報と力覚情報との特性を相補的に利用した接触情報センシング方式を提案し、実験による接触点検出精度向上を確認した。次にこれを、力覚センサを有するマニピュレータを対象に、グラインダ等の接触微い作業への適用し、作業環境への適用性や教示の簡素化に効果があることを明らかにする。

次に、生産現場で用いられるセンサフィードバック型ロボットの内部情報から、装置の各処理部の計算結果を同次元で代表するワーク形状の推定値、エンドエフェクタの制御目標値、制御結果等のワーク座標系で記述できる情報を可視化し、作業者に提示することで作業を支援する方法を提案する。

さらに方法を、実際の溶接センサフィードバックロボットを対象に、ウェアラブルコンピュータを利用して実装し、教示やパラメータチューニング作業へ適用することにより、その有効性を明らかにする。

## 2.2 力覚と速度情報を利用した接触情報センシングの高精度化

ロボットハンドによる物体の把持やハンドリングには、接触点の位置や法線ベクトル、さらには対象物の局所的な輪郭情報などを取得するセンシングが用いられる。これによって、ハンドが対象物（工具や部品など）を適切に把持し、実際に作業を行う段階になると、今度は把持した工具や部品が外部環境とどのように接触しているかを認識する技術が必要となる。接触を伴う作業においては、部品の配置誤差、あるいは固体摩擦などの不確実性が問題となる。このため、位置や速度とともに力の制御が必須とされ、これまでも多くの研究がなされてきた。中でも代表的な方法として、ロボットアームの手先に作用する力と、手先の位置・速度など運動とを関連付けた制御則を利用するコンプライアンス制御、作業座標での自由度別に時から制御と位置・速度制御を割り付けるハイブリッド制御などがある。しかし、このような目的で導入された制御法も、目標値や制御パラメータが固定されたままでは、作業適用領域が大きく制限されてしまう。このため、作業中の接触情報を検

出し、そのときの状況に応じて目標値や制御パラメータを適切に切り替える仕組みが必要との認識がますます強くなりつつある。

一方、産業用ロボットシステムに見られる接触情報の検出機能は、力情報にしきい値を設け、接触の有無や異常を検出するという単純なものがほとんどのようである。このため、不確実性のある環境下で作業を遂行するためのセンシング機能としてはまだ不十分で、実用に供しうる高度な接触検出技術が必要とされている。Fig. 2.2 は接触を伴う代表的な作業を示した図で、加工作業では、工具と加工対象物、組み立て作業では部品間の接触が作業中生じることになる。このような作業中に、接触情報（接触点や接触法線ベクトル、接触形態、対象物輪郭形状など）の実時間検出が可能であれば、対象物形状・配置に誤差がある場合にも、ロボットがある程度自律的に適切な軌道や制御目標値・制御パラメータを生成し、作業を成功裏に遂行することができる。こうしたロボット作業の自立化・高度化のためには、ロボット制御システムにおいて、従来のサーボ系と並行して各種センサ情報処理から実時間で接触情報を検出することが重要な課題となる。しかも、これら接触情報の検出機能は、高精度・高信頼であることはもちろん、特定の作業や特定の制御方法に大きく限定されない、汎用性の高い独立したモジュールであることが望ましい。

以下本節では、手先に6軸力センサ有する多自由度マニピュレータを想定し、ツール・ワーク間の接触情報検出法に関する研究状況についてまとめ、その課題を解決する方法として、力覚と速度情報を利用した接触情報センシングの高精度化手法を提案し、実験により有効性を明らかにする。

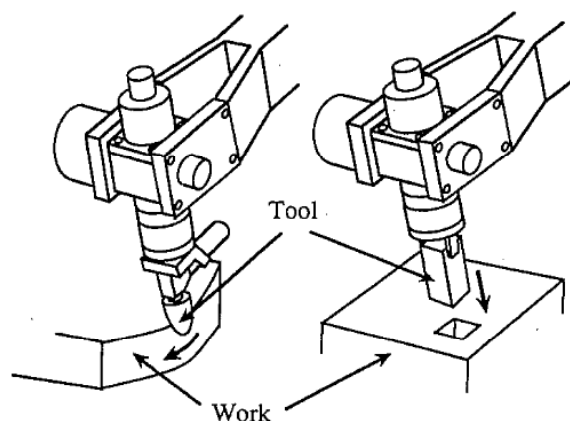


Fig. 2.2 Representative tasks

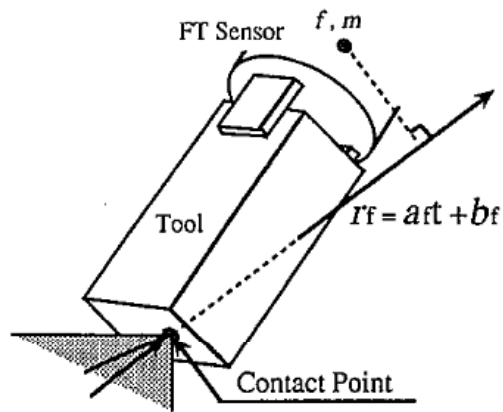


Fig. 2.3 One point contact

### 2.2.1 接触情報センシングの研究

ツールとワーク間の接触情報検出機能として研究が進められている技術を大別すると次のようになる。

- (1) 接触点・接触法線の検出
- (2) 接触状態遷移の検出
- (3) 大域的な接触状態の同定

ここでは、(1)を主体にセンシング機能の役割と関連する研究例をまとめる。

#### (1) 接触点・接触法線の検出

力制御では、ツールのどの点がワークと接触しているか、接触法線がどの方向であるかといった接触情報が重要となる。また、環境に固定された絶対座標系で接触点を考えると、これはワークの局所的な形状情報を得るためにも利用できる。接触法線については、接触点がツール上で法線ベクトルを定義できる点（ツールのエッジや頂点を除く）であれば、接触点と同時に求められることになる。このような厳密な接触情報である接触点の位置を検出する方法には力情報を用いた方法と、位置や速度などの情報を用いた方法とがある。



力情報を用いたものとしては、Salisbury<sup>30)</sup>が、点接触およびツール平面内の線・面接触の検出方法を定式化している。また辻村ら<sup>31)</sup>は、力情報を用いて検出した接触点を基に物体の形状認識を行っている。力情報によれば、一点での接触であれば基本的には力の作用線とツールの表面との交点をもとめることにより、接触点の検出ができる (Fig. 2.3)。ロボットの手先に取り付けられた6軸力センサの情報から力の作用線の直線を求めツール表面との交点を求めることで得られる。この他、グラインダ作業を対象に摩擦モデルを導入し、少ない軸数の力情報から工具上の加工対象物との接触点を検出するという方法も提案されている<sup>32)</sup>。また、Bicchiらは、指と把持物体の接触を面接触としてモデル化し、指と把持物体の接触点を求める方法を提案している<sup>33)</sup>。

ところで、歪ゲージを用いた一般的な力センサでは、非線形性やヒステリシス、温度ドリフトなど、多くの要因によって力検出誤差が生じる。また、ツールとワーク間の接触による外力を、重力などを含んだ形で計算される全作用力から分離する必要がある。しかし、このためのツール質量・重心位置など物理パラメータの誤差もまた力検出誤差につながる。このようなことから、上記のような検出誤差を抑圧して、精度を向上させる試みが精力的に進められてきた。

例えば、北垣<sup>34)</sup>や澤田<sup>35)</sup>らは、複数の力情報を計測し、得られた力の作用線群から最も近い点を接触点とする検出法を提案している。これらの方法にはツール形状を陽に用いずに、力情報のみから接触点を高精度に検出できるという特徴がある。ただし、ツール頂点での接触のみを対象としており、ツール局面上の接触に適用することは困難である。このように、力情報を用いる場合には、力センサの検出誤差の影響をいかに克服するかが重要な課題となる。

一方、位置や速度の情報を基に接触点を推定する方法については多くの研究がなされている。例えば永田<sup>36)</sup>は、物体の把持位置姿勢の検出を目的に、瞬間回転中心を用いた検出方法を示している。瞬間回転中心の軸の方程式は、ツールの速度と角速度により、力の作用線と同様に求められる。把持物体の位置・姿勢が初期の目標からずれている場合、把持物体の頂点を環境に接触させながらロボットを運動させることで接触点が求まり、実際の把持位置姿勢を推定できる。また、接触に伴う拘束運動を利用した検出方法としては、例えば多指ハンドにおける自己姿勢変形性を用いた接触点検出法<sup>37)</sup>がある。この方法では、ハンドと把持物体の接触に主眼を置いている。

位置や速度の情報を用いた検出法では、ロボットの各関節に装着されている角度センサや角速度センサをそのまま利用する点が大きな特徴である。このことは、ハードウェアの大幅な変更を必要としないほか、力センサと比してノイズや摩擦の影響を受けにくいとい

う利点がある。ただし、単独の情報のみでは接触の有無も判定できないという特殊性から、一般に検出可能となる条件がロボットの運動戦略や検出時の制御目標値の与え方に依存することになる。そのため、目的となる作業とは別に検出のための特殊な動作を必要とする場合が生じる。

以上のように力あるいは位置・速度に関する情報を単独に用いる検出法にはそれぞれ一長一短がある。従って、作業中に適用できる実用的かつ高精度な接触点検出法の確立には、複数の有力なセンサ情報に加えて、工具の幾何情報などあらかじめ知りうる情報も最大限に利用することが必須となろう。しかもその方法は、検出のための作業中断を最小限にとどめること、機能的に独立性が高く、複数の有力な制御方法<sup>38)</sup>に適用できることが要求される。

## (2) 接触状態遷移の検出

一定の前提条件が満たされている組立作業では、あらかじめ接触状態を変化させる動作シーケンスを与えることができる。この場合には、各動作の終了を検出するため、接触状態の遷移を実時間で検出する機能が必要となる。末広ら<sup>39)</sup>は、多面体部品の組立を、突きあて、辺合わせ、はめ合いといった基本動作の組み合わせで実現し、これらの動作の終了を瞬間回転中心の変化、作用力の変化による検出している。北垣<sup>34)</sup>は遷移前の接触点と力から推定したモーメントと計測されたモーメントとを比較することにより、一点接触からほかの接触状態への遷移を検出する方法を提案している。また、接触状態遷移における力情報の動的な変化をモニタリングすることにより、遷移後の接触状態も含めて検出する方法も提案されている<sup>40)</sup>。

## (3) 大域的な接触状態の同定

ここでいう大域的な接触状態の同定とは、個々の接触位置や接触力の大きさなど、詳細な接触情報のセンシングと対比して、Face-Edge-Vertexといった接触部位の幾何学的な特徴から状態を分類し、現在どの状態にあるかを同定する方法を指す。各状態の分類はツール・ワークの幾何情報を基に行われ、状態遷移ネットワークとして自動生成する方法<sup>41)</sup>が提案されている。また、このような接触状態の分類は、(2)の接触状態遷移の検出にも利用されている。ここでは、状態遷移が起こった後、どのような接触状態にあるかと同定する方法について述べる。このような同定は組立作業の計画を考える上で重要であり、作業状態に応じて柔軟に組立を実行するためには不可欠な技術である。この分野の代表的な研究として各状態において拘束された把持物体が可能な運動、さらには物体に作用し得る外力が凸多面錐集合（原点を通る線形不等式で記述される集合）を構成することを利用し、状

態識別関数を自動生成する方法がある<sup>41)42)</sup>。また Desai ら<sup>43)</sup>は、センサや幾何情報の誤差を考慮し、静的な力情報のみから状態を確定することができない場合、能動的に微小変位を与えたときの力の変化から状態を同定する方法を提案している。Hou らは、スクリュ理論を用いて位置・姿勢および力情報から、数種の拘束状態を同定する方法を提案している<sup>44)</sup>。この同定についての技術的課題としては、3次元の対象を扱う場合の状態数の増大をいかに克服するか、力情報を用いる場合の摩擦力をどのように考慮すれば良いかといった点が上げられる。

## 2.2.2 力・速度情報の相補利用による接触点検出の高精度化

本節では、接触点検出の高精度化を目的に、高精度化が進んだ光学式の関節角度センサの利用を前提に、まず角度センサからの差分などにより得られる速度情報に着目し、運動時の接触点における並進速度成分の持つべき必要条件を導く。次にこれを表す指標となる表面速度条件化数 (SVF) の概念を導入し、力および速度情報を相補的に利用した接触点検出方法とその実験結果を示す。

まず、速度情報に着目し、運動時の接触点における並進速度成分の持つべき必要条件を示す。解析にあたって以下の3つの前提条件を設ける。

- (1) ツールの表面形状 (法線ベクトルを含む) は既知
- (2) ツールおよびワークは剛体
- (3) ワークは環境に固定

まず、ツール表面上 (稜線、頂点上の点は除く) の点  $P$  における並進速度  $\mathbf{v}_p$  及び法線ベクトル  $\mathbf{n}_p$  について考える。ここで環境に固定されたワークと点  $P$  で接触を維持しながらツールが運動している場合には、 $\mathbf{v}_p$  と  $\mathbf{n}_p$  は直行し、内積は0となる。

$$\mathbf{v}_p \cdot \mathbf{n}_p = 0 \quad (2.1)$$

次に Fig. 2.4 に示すツールの稜線上の点  $P_e$  の並進速度  $\mathbf{v}_{pe}$ 、隣接する2つの面の法線ベクトル  $\mathbf{n}_{1pe}$ 、 $\mathbf{n}_{2pe}$  について考える。いま、それぞれのベクトルに対する二つの内積が同符号である場合には、次式が成立する。

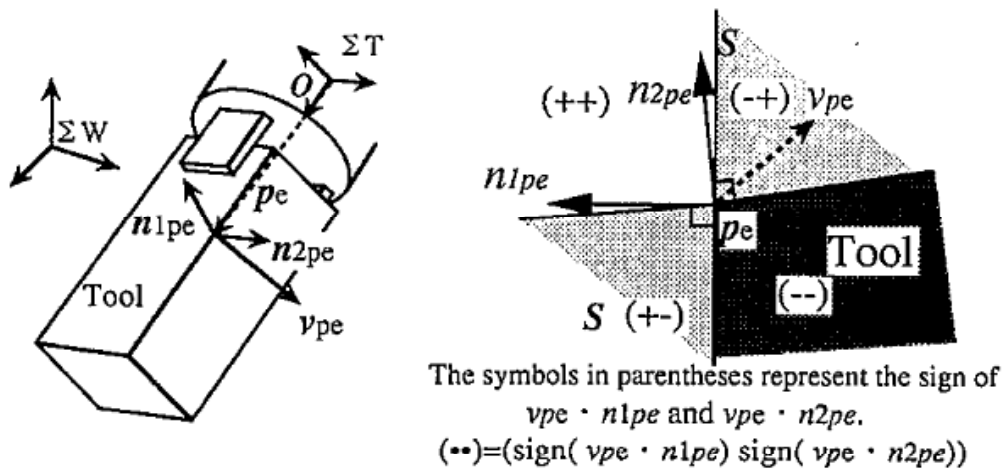


Fig. 2.4 Velocity condition

$$(v_{pe} \cdot n_{1pe})(v_{pe} \cdot n_{2pe}) > 0 \quad (2.2)$$

ここで、内積がともに負の場合には時刻  $\Delta t$  後に点  $P_e$  は現時刻にツールが占有している空間に移動するため、接触を維持した運動にはなりえない。また、内積がともに正の場合には、現時刻の点  $P_e$  が時刻  $\Delta t$  後にツールが占有する空間となるため、接触を維持した運動にはなりえない。したがって点  $P_e$  が環境に固定されたワークと接触を維持しながら運動している場合には必ず次式が成立する。

$$(v_{pe} \cdot n_{1pe})(v_{pe} \cdot n_{2pe}) \leq 0 \quad (2.3)$$

この式は2つの内積の符号がことなる場合、あるいは、いずれか一方の内積が0の場合に成立する。Fig. 2.4においてこれを満たす速度ベクトル  $v_{pe}$  は、点  $P_e$  を支点とした場合、終点が領域  $S$  (境界線を含む) に属するベクトルとなる。上記の議論はツール頂点に関しても成立する。結局、速度の観点から接触点に各ベクトルの条件は以下のようにまとめられる。

- (a) ツール平面・曲面上では並進速度ベクトルと隣接する面の法線ベクトルの内積は0となる
- (b) ツール稜線・頂点上では並進速度ベクトルと隣接する面の法線ベクトル群との内積の中に0または異符号のものが存在する。

これらの条件を満たす並進速度ベクトルは、接触点以外の場合でも発生しうる。したがってこの並進速度の条件は接触点であるための必要条件となる。

次に、前述の接触点における速度の必要条件を判定する指標として、表面速度条件関数 (SVF: Surface Velocity condition Function) の概念を導入する。SVF はツール表面の各点について、次式に示す関数  $f_{svf}$  として定義する。

- ・ ツール平面・曲面  $\boldsymbol{p}_i$ :  $f_{svf}(\boldsymbol{p}_i) = | \boldsymbol{v}_{pi} \cdot \boldsymbol{n}_{pi} |$
- ・ ツール稜線, 頂点  $\boldsymbol{p}_j$ : (2.4)

必要条件 (b) 成立  $f_{svf}(\boldsymbol{p}_j) = 0$

必要条件 (b) 不成立  $f_{svf}(\boldsymbol{p}_j) = \min | \boldsymbol{v}_{pi} \cdot \boldsymbol{n}_{kpj} |$

ここで、 $\boldsymbol{n}_{kpj}$  は  $\boldsymbol{p}_j$  に隣接する法線である。SVF は、接触点における並進速度の必要条件 (a) または (b) が満たされていれば 0、条件から外れるほど大きな正の値をとることから、ツール表面の各点が接触点における並進速度の必要条件を満たしているか否かの指標となる。

Fig. 2.5 にツール稜線における並進速度と SVF の関係を示す。並進速度ベクトル終点が領域 S に属し、接触点であるための必要条件を満たしている場合は SVF は 0 となる (Case[A])。一方、並進速度ベクトル終点が領域 S- (S を除く領域) にある場合は (Case[B], Case[C])、領域 S までの距離 ( $D_b$ ,  $D_c$ ) に相当する量が SVF の値となる。したがって、並進速度ベクトルが領域 S から外れるほど大きな値をとるという性質をもつ。

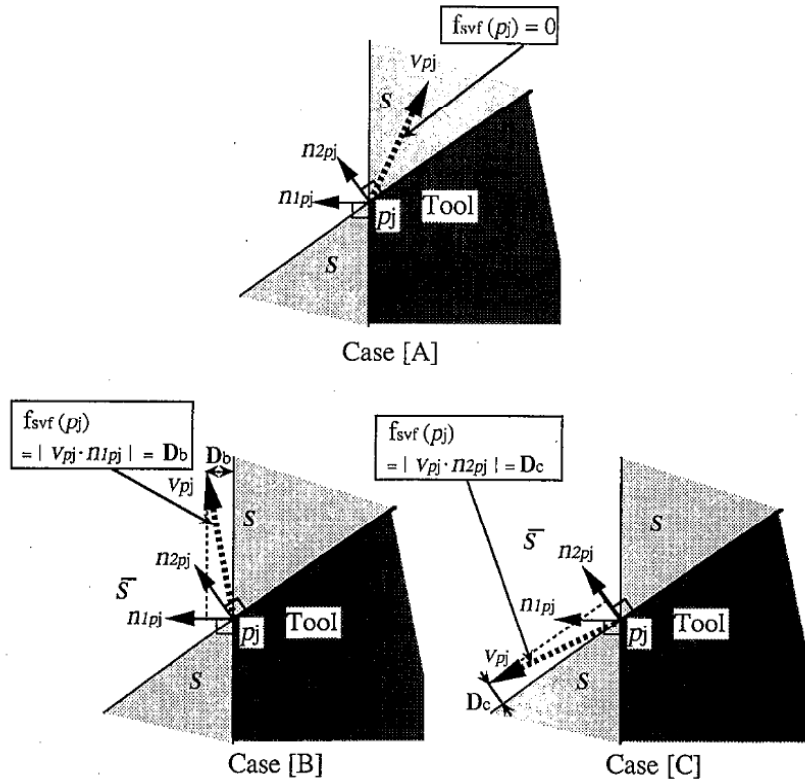


Fig. 2.5 Surface velocity condition function

上記 SVF を用いたツール・ワーク間の一点接触における接触点検出方法を提案する。ここでは、力情報およびツール幾何情報による求められた接触点を SVF により補正し、力情報に含まれる誤差を抑圧する接触点方法を示す。力情報とツール幾何情報に基づく接触点検出法は前述のように、基本的にはツールに加わった力・モーメントより力の作用線の方程式を求め、ツール表面との交点を求めることにより検出される。この点を  $p_0$  とすると、 $p_0$  は力検出誤差の影響を大きく受けることから、ツール表面  $p_0$  近傍に  $N$  個の候補点  $p_1 \sim p_n$  を設定し、接触点の補正を行う。Fig. 2.6 の格子点は候補点の設定例を示している。次に、次式であらわされる評価関数  $H_i$  を各候補点について計算する。

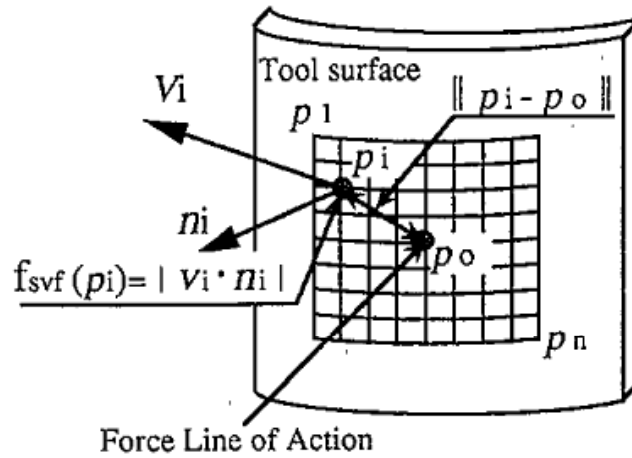


Fig. 2.6 Evaluation function for contact point detection

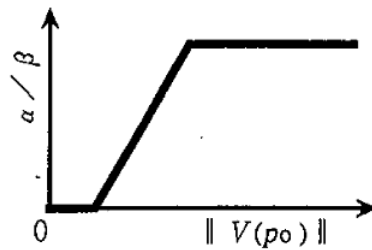


Fig. 2.7 An example of setting the weight coefficients

$$H_i = \alpha f_{svf}(p_i) + \beta \|p_i - p_o\| \quad (2.5)$$

$\alpha, \beta$  : 重み係数

ここで、検出時の速度を指標として重み係数  $\alpha, \beta$  を適切に設定し、これにより  $H_i$  を最小とする候補点  $p_i$  を最も確からしい接触点として推定する。このとき、 $\alpha, \beta$  はそれぞれ速度情報および力情報に関する重みと考えることができる。2つの重み係数は、それぞれの情報の精度を指標として次のように設定する。一般にエンコーダの差分値を用いて速度を計算する場合、速度が大きな運動になるほど力センサの誤差は大きくなるといえる。したがって、推定精度を向上させる一つの指針としては、例えば Fig. 2.7 のように、手先速度大きい領域で  $\alpha/\beta$  を大きく設定することがあげられる。すなわち作業の性質によって重み係数を適切に設定することにより、力と速度の検出精度上の弱点を効果的に相補うことが可能となる。

Fig. 2.8 に実験方法の概略を示す。マニピュレータは通産省電子技術総合研究所（当時）で開発された6自由度ダイレクトドライブマニピュレータ ETA3<sup>45)</sup> であり，各軸にはレーザーロータリエンコーダ（Canon 製，分解能：324000[P/R]）が取り付けられている。手首部には6軸力センサ（日立建機製，LSA6010 A）を，さらにこの先にツールとして半径 15[mm]，長さ 120[mm]の円柱をとりつけた。また，曲率半径  $r_w=200$ [mm]のワークを水平面に固定した。実験では，オペレータがマニピュレータ手首部を動かす，ツールを一点接触でワークに倣わせながら6軸力データ・関節角度データを計測した。計測結果はオフラインで処理し，得られた接触点および接触法線からワーク形状を推定することで評価を行った。

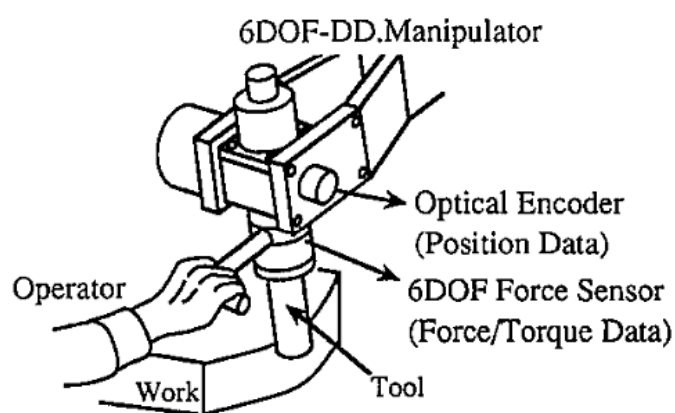
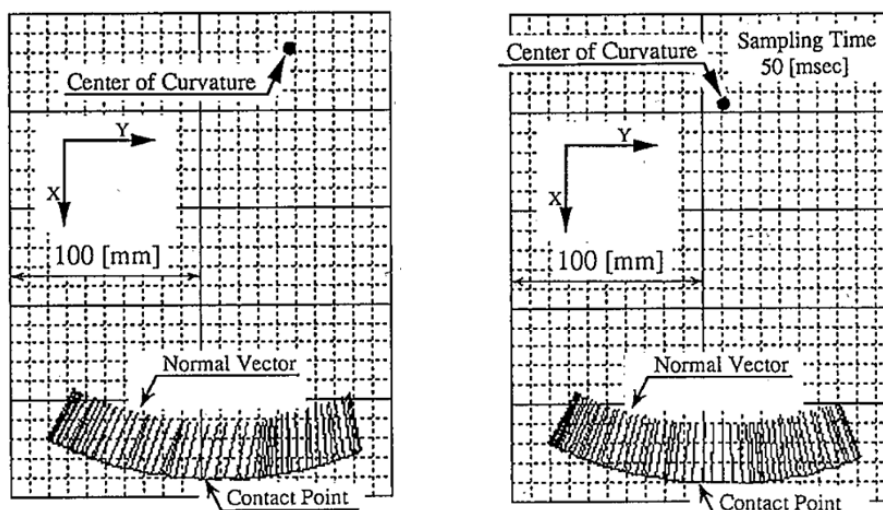


Fig. 2.8 Measurement of sensory information

Fig. 2.9 に実験結果を示す。(a)は力情報のみで検出した接触点および接触法線ベクトルを絶対座標系水平面上に射影したものである。図中の曲率中心は，計測した法線群から最も近い点として推定したものである。理想的にはすべての法線ベクトルがワークの曲率中心を通るはずであるが，結果には明らかな検出誤差が生じている。一方(b)は，同じ計測データから式(2.5)を用いて検出した結果である。力情報によりもとめた接触点をSVFを基に補正することで，すべての接触法線が曲率中心に向かって求心的に検出されていることがわかる。

Table 2.1 に推定した曲率中心から各接触点間の距離として求めた曲率半径  $r_m$ ，および曲率中心-接触点距離の最小値  $\min r_i$ ，最大値  $\max r_i$ ，標準偏差  $\sigma$  を示す。理想的には  $r_m = \min r_i = \max r_i = 200$ [mm]， $\sigma = 0$ [mm]であり， $\sigma$  に関しては10倍以上の精度向上が確認できる。以上の実験結果から，力と速度情報を相補的に用いることにより，高精度な接触点検出が可能となる。





(a) Without velocity information (b) With velocity information

Fig. 2.9 Experimental results

Table 2.1 Evaluation (work:  $r_w = 200[\text{mm}]$ )

	$r_m = \sum r_i / N$	$\min r_i$	$\max r_i$	Standard deviation $\sigma$
(a)	227.6	212.0	239.2	8.79
(b)	195.2	194.2	196.8	0.65

### 2.3 接触情報センシングによる作業教示の効率化

本節では、グラインダ作業などの倣い作業におけるツールとワーク間の接触情報のセンシング機能が果たす役割を、作業における教示の効率化と、不確実性の吸収のふたつの側面から検討する。ロボットによるグラインダ作業の教示を扱った研究で力の教示に関して Asada ら<sup>46)</sup>は、経路の教示と、力の教示という観点から分類し、力の教示に関して有スキル者の実演時の力情報を利用する方法を提案している。複雑な経路の教示を簡素化するという観点では、ダイレクトティーチ<sup>9)</sup>を導入した方法や、CADデータの利用などがあげられる。また、ワーク形状の不確実性に対応するため位置制御だけでなく、力制御を利用した制御方法<sup>47) 48)</sup>、コンプライアンス制御を利用した制御方法<sup>49) 50)</sup>が提案されている。ここでは、前節で説明した接触点・接触法線検出を用いたワーク輪郭経路のセンシング法

を導入し、ワーク輪郭経路および倣い速度、接触力、接触角などの作業仕様に基づき、倣い作業における制御目標値生成を行う枠組みを示す。そして、この枠組みのなかで、ワーク輪郭経路のセンシングの二つの適用形態を提案する。ひとつは、作業教示時におけるセンシングの利用であり、もうひとつは、作業中のセンシング利用である。さらにこれらの適用形態において、従来の教示方法を考慮し、なおかつ作業仕様やツール変更に関する操作が容易となる作業教示方法を提案し、実験により有効性を確認する。

### 2.3.1 システムの基本構成

対象とする倣い作業の仕様として、接触力、接触点、接触角、倣い速度を考える (Fig. 2.10 参照)。ここで、作業仕様としての接触点は、工具砥石部の上端から接触点までのグラインダ軸方向に沿った距離  $P_r$  として表すことにする。なお接触角の基準ベクトルは教示されるものとして扱う。

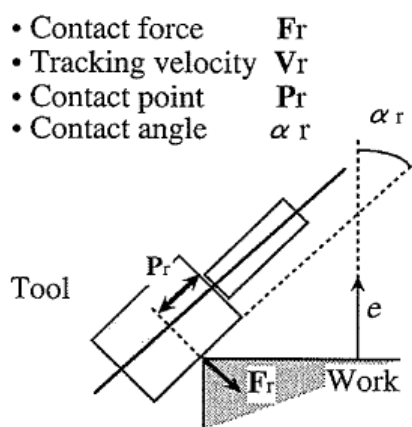


Fig. 2.10 Task specifications

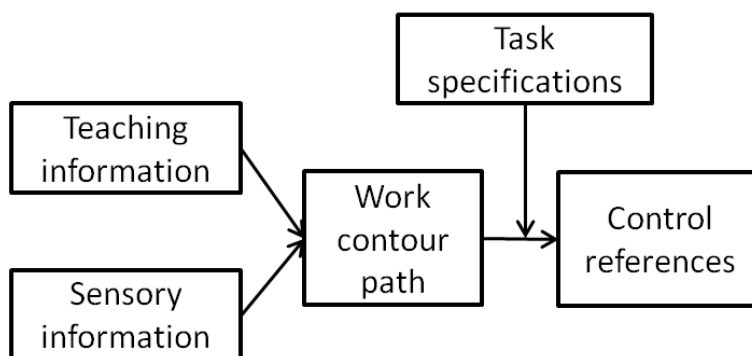


Fig. 2.11 Basic concept for contact sensing information processing

ワーク輪郭経路に加えてこれらの作業仕様が与えられれば、マニピュレータの制御目標値は比較的容易に求められる。一度教示された作業に対し、仕様変更を容易とするためには、ワーク輪郭経路や接触角などの情報をそれぞれ独立な情報として取り扱うことが重要である。この点、従来の教示再生型のマニピュレータでは、これらの情報を関節角度情報として記憶することから、仕様変更は再教示を意味することになる。

ここでは、柔軟な作業仕様の変更を実践するため、Fig. 2.11 に示すような独立な二つの情報（ワーク輪郭経路・作業仕様）から制御目標値を制御システム内で計算する方式をとる。次に、このような枠組みで接触情報センシングの役割を考えると、センシングは、教示時（作業前）のワーク輪郭経路の獲得、作業中のワーク輪郭経路の獲得に利用できる。いずれの場合も、これまでオペレータが教示の際に与えていた情報の一部を、センサ情報から獲得することで、教示を簡素化することができる。例えば、複雑な形状のワーク教示にセンシングを導入することで、教示時間を短縮することができる上、作業仕様変更についても柔軟な操作が可能となる。また、作業中のセンシングにより、比較的大きなワークの不確実性にも対処可能となる。この場合センシングの補助となる情報を教示しておけば、ロバストなセンシングが期待できる。具体的には、教示された経路に対して、作業中の最大誤差範囲などの情報があらかじめ与えられていれば、接触点検出の評価関数による補正の際、評価関数を計算する範囲を制限してセンシングの高速化を図る、あるいは、評価関数を計算する範囲を制限した分、候補点の密度を高くすることで、高精度化を図ることが可能となる。すなわち作業の性質に合わせてワーク経路の獲得方法を選択することが、センシング技術を効率よく活用するポイントとなる。ここで、制御システムとして、Fig. 2.11 に示す構造をとることで、作業仕様の変更に柔軟に対応できるうえ、ワーク輪郭経路が作業前に教示される場合、作業中リアルタイムで獲得する場合の両方に容易に適用可能なシステムが実現できる。上記のコンセプトに基づき、以下では、作業前および作業中における接触情報センシングの利用法ならびに、センシングの導入を前提とした作業教示法を提案する。

### 2.3.2 作業前の接触情報センシング利用

ダイレクトドライブロボットなどのバックドライブ可能なマニピュレータを用いた場合、ダイレクトティーチと同様に、オペレータがツールをワーク輪郭に倣わせた際の関節角度情報および力情報を記録することができる。もちろん、近接や離脱に必要な点も簡単に教示できる。この情報をオフラインで処理し、2.2節の方法を用いて絶対座標系に射影した接触点列の内挿によるワーク輪郭経路を獲得する。この Fig. 2.12 に示す教示方法は、ワーク

輪郭経路を直接的に教示することから、以下では Direct Contour Teaching(DCT)と呼ぶことにする.

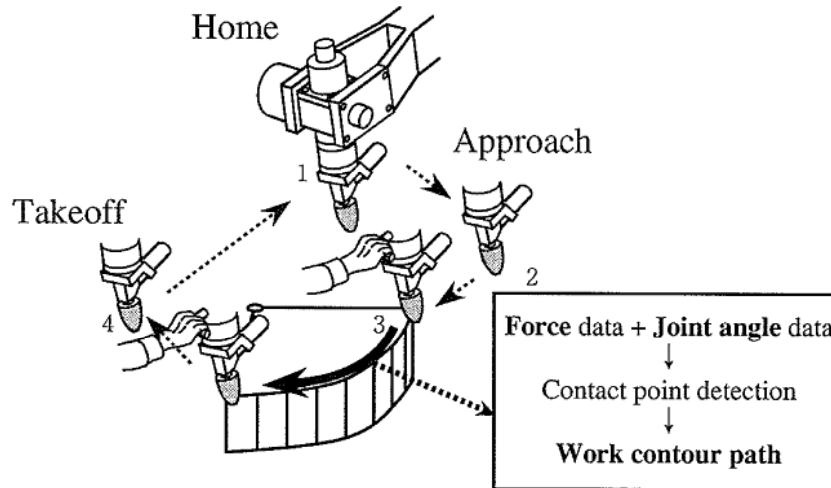


Fig. 2.12 Direct contour teaching (DCT)

一般に姿勢教示の困難性は、三次元ワークではとみに強く言われているが、DCTにおいて特筆すべきことは、教示するのはワーク輪郭経路であり、作業中にツールがとるべき姿勢を教示時に厳密に実現する必要がないという点である。獲得した経路に加えて作業仕様を与えることで、使用する制御方法に応じた制御目標値を生成することができる。

DCTを位置制御型のティーチングプレイバックと比較した場合、教示が簡素化され、また力制御によりプレイバックすることで不確実性を吸収できるという利点がある。この点は従来のダイレクトティーチと同じであるが、さらにDCTでは、接触角や接触位置、あるいはツールの変更に際して、変更する情報のみを与えることで柔軟に対応できるという特徴を有する。

### 2.3.3 作業前の接触情報センシング利用

ワークの位置ずれがある場合、あるいは形状に個体差が存在する場合には、作業ごとにワーク輪郭経路をリアルタイムで検出し、制御目標値を生成する自律的な倣い作業が必要となる。このようなリアルタイムのセンシングは、工具作動という劣悪な環境下に耐えるロバストなセンシングが要求される。本節では、2.2節の接触点検出方法をベースにした自律倣い作業の実現法を示す。この方法は、作業教示、作業中の接触点検出によるワーク

経路推定, およびワーク輪郭経路, 作業仕様に基づく制御目標値生成というプロセスにより構成される.

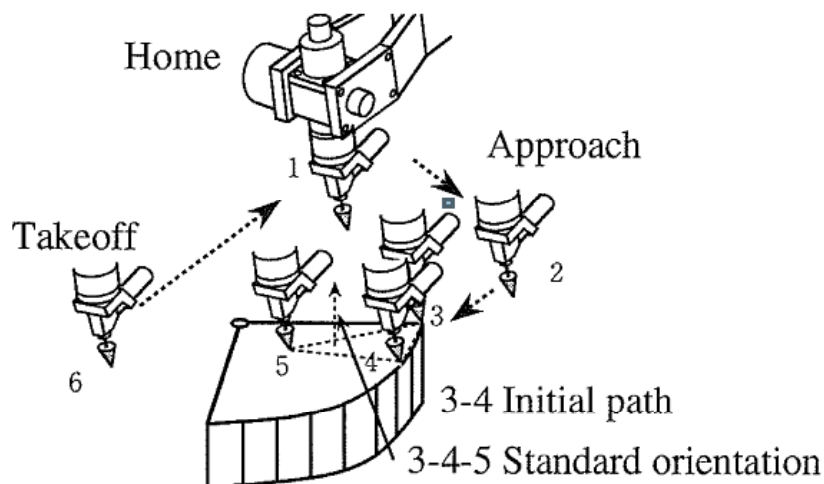


Fig. 2.13 Key spot teaching (KST)

Fig. 2.13 に自律的倣い作業を行う場合の作業教示法の概略を示す. 図中の, Home, Approach, Takeoff と示した 3 点は, 初期位置, ワークへの近接および離脱に必要な教示点である. ワーク上の教示点 3 は, 作業開始点となり, 教示点 3 から 4 に向かう経路が初期経路となるようにする. 教示点 5 は教示点 3, 4 と合わせてワークを代表する平面 P を構成させる. この平面 P の法線ベクトルは, 接触角を  $0[\text{deg}]$  とした場合のツール軸の方向を表す. さらに平面 P を接触点の検出の候補点を限定することに用いることにより, 効率的なセンシングができる. 上記の作業教示法は, 自律的な倣い作業に必要なキーポイントを教示する点の特徴であることから, 以下では Key Spot Teaching (KST) と呼ぶことにする. この方法では, マニピュレータを用いた教示は, 単純な位置姿勢の教示のみで済むため, ダイレクト操作は特に必要なく, ティーチングペンダント等でマニピュレータを移動させて教示するといった, 従来の方法を踏襲した形態での教示も可能となる.

作業実行中には, 動作中の力・速度情報を相補的に利用した接触点検出法を用い, オンラインでワーク輪郭形状を獲得する. 作業ごとにワーク輪郭経路を獲得することで, より広い範囲でワーク個体差や配置誤差といった不確実性を吸収できる. 作業中には, 過去の接触点の情報しか獲得できないため, 得られた接触点を外挿することにより, 先のワーク経路を推定することになる. このような外挿の際に一般的に重要となるのは, 最後に検出されたワーク経路上の点の接線・法線 (あるいは微係数) である. この検出法では, ワーク法線を接触点におけるツール法線から直接算出できる. したがって, ワーク上の二つの

接触点位置の数値微分を用いずに法線の情報を獲得することから、センサノイズに対してロバストな経路生成が期待できる。

### 2.3.4 実験による評価

Fig. 2.14(a)に開発した実験システムの概略を示す。マニピュレータは6自由度ダイレクトドライブマニピュレータ ETA3 を使用し、リスト部に6軸力センサが取り付けられている。エンドエフェクタにはグラインダツールのほか、教示用の治具が脱着可能になっている。コントローラにはトランスピュータおよびパーソナルコンピュータを使用し、各プロセッサは(1)制御部、(2)センサ処理部、(3)目標値生成部、(4)MMI部、(5)モニタ部、(6)I/O インタフェースに割りつけられている。MMI およびセンサモニタにより、DCT および KST の教示作業は対話的に行うことが可能となっている。Fig. 2.14 (b)は作業仕様および工具選択のためのエディタ画面であり、DCT および KST で得られた教示データについて簡便に仕様を設定でき、これらによりマニピュレータ動作のために必要なすべての情報を記述したファイル（動作プログラム）を自動的に生成することができる。

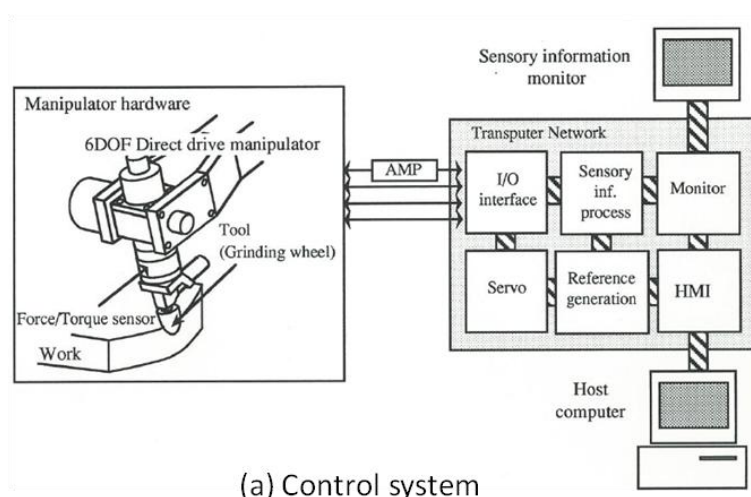
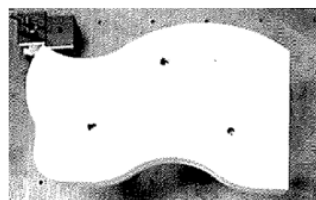


Fig. 2.14 Experimental manipulator control system

### (1) Direct Contour Teaching 実験

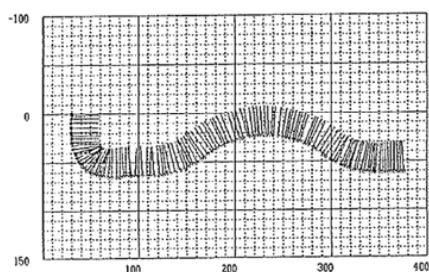
Fig. 2.15 に DCT によるワーク輪郭経路の教示結果を示す. A:塩化ビニール性のダミーワーク, B:アルミホイールの2種類のワークについて行った. また, 教示用のツールには, 実際のグラインダ工具(半径:3[mm])をそのまま用いた. Fig. 2.15 (c)(d)はそれぞれのワークに対して, 教示動作中の接触点および接触法線の軌跡を絶対座標系でプロットしたものである. Fig. 2.15 (e)(f)は接触点を二次のスプライン関数を用いて補間した結果である. ひとつのワーク輪郭教示に要した時間は10秒であり, 複雑な経路に対して短時間に効率の良い教示ができることを確認した. また, 得られた経路に対して使用工具や作業仕様を与えることにより, 再教示することなしに様々な作業仕様に応じた動作が実現できることも検証できた.



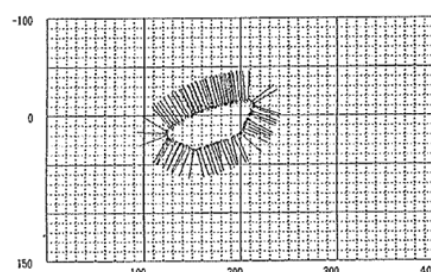
(a) Test work-piece [A]



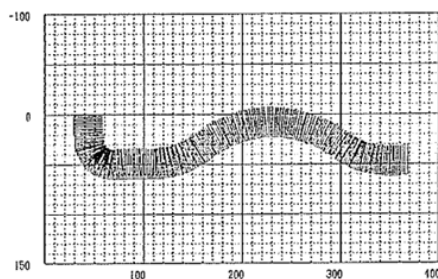
(b) Test work-piece [B]



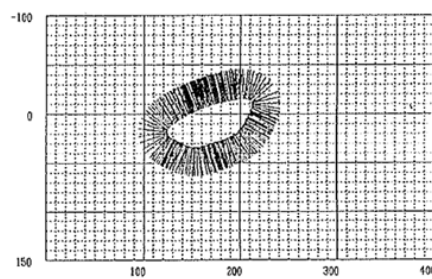
(c) Estimated contact points[A]



(d) Estimated contact points[B]



(e) Estimated work contour[A]



(f) Estimated work contour[B]

Fig. 2.15 Experimental results for DTC

## (2) Key Spot Teaching 実験

ここでは、KSTにより教示を行い、自律做い実験を行った実験例を示す。ワークには半径 $R=160$ [mm]の半円板を用い、Fig. 2. 16 に示す様にワーク上の3点および近接・離脱のための3点、合計6点を作業前に教示している。ツールとしては、市販の半径 $7.5$ [mm]の研磨工具を用い、定格値内の回転数を与える作業環境下で行った。ただし、KSTには円錐先端の専用治具を用いた。Fig. 2. 16 (a)は、ワークを教示した状態のまま作業実行した場合の実験結果を示す。図は作業中に検出した接触点・接触法線、接触力を $160$ [msec]毎に絶対座標系にプロットした図である。この図で接触力は法線方向線分の大きさを法線の長さとして図示している。図よりほぼ一定速度、一定接触力を保ちながら、自律的に做い作業を実現できていることが確認できる。一方Fig. 2. 16 (b)は、教示した状態からワークを水平に $10$ [mm]程度ずらし、作業を行った結果である。この場合にも、接触情報センシングにより、ワークの配置誤差を吸収し、作業が遂行できていることが確認できる。

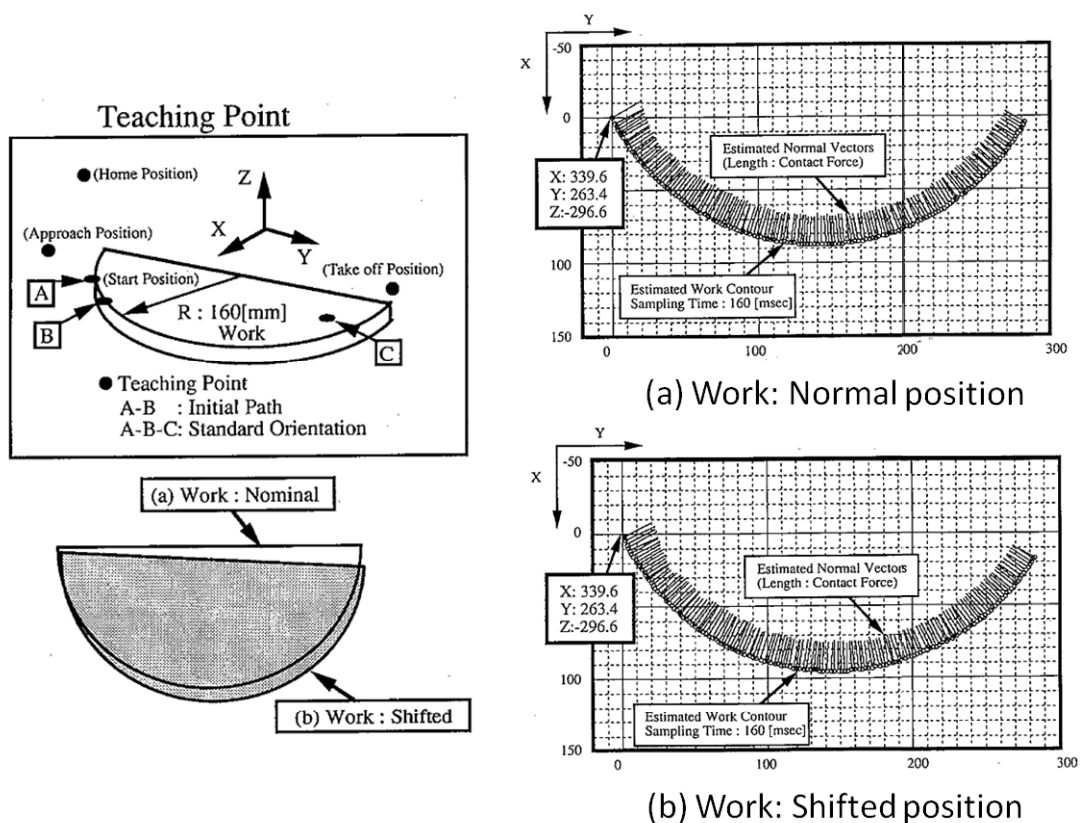


Fig. 2.16 Experimental results for KST



### (3) 教示方法に関する考察

Table. 2.2 に、本節で提案した DCT および KST と、従来法であるティーチングペンダント等を使用する通常の教示法、およびダイレクト教示とを作業教示の観点から比較した結果をまとめる。表中の作業点は、Fig. 2.12 や 2.13 に示した作業例で与えたものであり、退避・接近・離脱のための教示点も考慮している。

Table 2.2 Conventional and proposed teaching methods

	Conventional teaching playback	Conventional direct teaching	Direct contour teaching (DCT)	Key spot teaching (KST)
Control method	Position	Position/Force	Position/Force	Position/Force
Sensor	Joint Encoders	Joint Encoders Force sensor	Joint Encoders Force sensor	Joint Encoders Force sensor
Tool contact sensing	-	-	Off-line	On-Line
Number of teaching points	Many	3 (+ Contour)	3 (+ Contour)	3 + 3
Tool orientation change	Difficult	Difficult	Easy	Easy
Suppression of work uncertainties	Difficult	Force control	Force control	Contact sensing Force control
Human – robot contact	Not necessary	Necessary	Necessary	Not necessary

まず、教示点数という観点から、DCT と従来法、すなわち位置制御型のティーチングプレイバックにおける教示法と比較する。従来法では、ワークの曲率が変化するとに一定間隔で教示点を設定する必要がある。通常では円弧 1 区間に付き 3 点の教示点、以後曲率や中心位置が変わるとに教示点が必要となる場合が多い。さらに円弧でなく自由曲線上の経路を教示するには、コントローラが実現可能な曲線パターンで、誤差が所望の範囲に収まるように多数の点を教示しなければならない。したがって、曲率の変化が多いワークに対しては数十以上の教示点が必要になり、1 点ごとにティーチングボックス操作するという教示に膨大な時間を要した。しかし、DCT では、オペレータが做わせるという動作で、ワーク輪郭経路の教示を行うため、教示に必要な操作を簡略化することができる。また、作業実行の際には力制御によりプレイバックすることで不確実性を吸収できるという利点がある。この点は従来のダイレクトティーチの利点と同様であり、教示操作の形態についてもダイレクトティーチに準じることとなる。DCT として特筆すべきは、接触角や接触位置、あるいはツール変更に対して、変更する情報のみを与えることで柔軟に教示情報を操作で

きるという点と、経路の部分部分に応じた力制御の必要な方向を自動的に設定するという点である。

次に KST については、オペレータが直接マニピュレータに触れる必要は特になく、ティーチングボックスなどにより、いくつかのポイントを教示することで作業実行可能である。この点は従来のティーチングプレイバックにおける教示形態と同様であり、そのノウハウを利用できる。しかしながら、教示点数、教示時間に関しては、単純な比較はできないものの、オンサイトでの作業量に着目すると大幅な短縮が見込める。しかも、作業仕様や工具形状の変更については、前述の DCT と同様に再教示の必要性はなく、変更する情報を与えるのみで柔軟に対応できることになる。また、作業実行時の力制御に関するパラメータも、力の大きさ等の作業仕様のみを指定すればよく、力制御の方向などは作業実行時に検出されたワーク形状に応じて適切に設定されることになる。

## 2.4 センサ情報提示による設定作業の効率化

産業界におけるセンサ付きマニピュレータの重要性が言われて久しい。しかし、センサの導入には技術やコストパフォーマンスの面でクリアすべき課題も多く、生産分野全体ではまさに緒についたばかりである。このような中、アーク溶接や車体シーリングなどの分野では高性能な視覚センサが導入され、ワークの位置ずれを許容した作業が可能となってきた<sup>2)~5),51)</sup>。ロボット作業においてはワーク位置決めコストが未だ大きな壁であることから、このようなセンサの導入は今後も加速されると思われる。さて、従来の教示再生型の産業用ロボットと異なり、高性能なセンサ付きマニピュレータは、センサを通じて外界の影響を受けることがある意味で不可避である。このような条件の中で、センサ付きマニピュレータを簡単かつ高信頼に使いこなすための支援技術は、ロボット技術そのものと同様に重要であり、近年進歩の著しい PC の活用がその鍵の 1 つとなっている。

一方、マニピュレータを導入する作業フィールドはオフィスと異なることから、そこに適合したコンピュータ環境を考えていく必要がある。近年フィールドでの活用を指向した Wearable personal Computer (WPC) が注目されている<sup>14)</sup>。WPC の特徴としては、オペレータ装着型、ハンズフリー操作、小型 HMD などであり、航空機の修理作業、プラントの保守作業などへの試験導入も始まっている。しかし、画像や音声など、基本的なメディアを含めその本格的な検討は今後の課題とされている。

本節では、まずマニピュレータのフィールドオペレーション支援のための Field-AID を提案する<sup>52)53)</sup>。Field-AID は、ロボットなどフィールドで操作するシステムに関する情報の可視化処理系、システムパラメータを半自動的に調整するチューニング処理系、そしてシ

システムの初期教示と編集を行うマルチモーダル教示アドバイザーからなり、ロボットシステムを円滑に **2.4.2.2 ソフトウェア構成**

ソフトウェアの構成としては、前述の SMV、MPT および MTA の構成要素を部品化したコンポーネント構成とした。具体的には、センサインタフェース、マニピュレータインタフェース、演算処理部、ネットワークインタフェース、表示処理部、音声認識部などに部品化された engine 部を基本とし、その組合せによりアプリケーションを構成する。運用するための支援ソフトウェアである。ついで、WPC を活用した事例について、効果と課題を示す。

## 2.4.1 Field-Aid System の提案

### 2.4.1.1 基本構成

センサフィードバック型マニピュレータシステムが作業現場で運転可能になるまでには多くの時間と手間がかかる。新規の生産ラインの立ち上げでは、マニピュレータやセンサの設置が完了しても、その後の機能チェック、システムパラメータ調整、マニピュレータの初期教示とその修正と、さらに時間を要する。Fig. 2.17 はこのようなセンサフィードバック型マニピュレータシステムのフィールド支援ソフトウェア Field-AID のシステム概要である。このシステムは作業点モデリングの考え方を導入しロボット運動情報とセンサ情報を統合・活用し、センサフィードバック型マニピュレータの初期セットアップ、新規作業対象の教示およびトラブルシューティングを高効率に実現する。Field-AID は、①SMV: Sensing Motion Visualizer, ②MPT: Motion Parameter Tuner, ③MTA: Multi-modal Teaching Advisor の3つの主要モジュールから構成されるものとする。ここで SMV は、作業者が所望の作業を実現させるためにそれを妨げる要因を効率良く発見して、短期間での調整を実現するための支援ツールである。また MPT は、規定ワークを計測した場合のセンサ誤差情報とマニピュレータの位置姿勢や速度情報などの運動情報の相関を使用し、不具合パラメータを調整する役割を果たす。MTA は、作業の教示段階での支援情報を作業車に提示すツールとして設計した。

本節では、作業としてワーク上の継目であるシムをセンサで先読み追従する経路倣い作業を対象としている (Fig. 2.18) 。このシステムは視覚センサとマニピュレータから構成され、アーク溶接やシーリングなどの作業で、ワークの精度などの不確実性を吸収するセンサフィードバック型マニピュレータとして実用導入が早くから検討されてきた。図中  $P_s(n)$ ,  $P_t(m)$ ,  $P_r(p)$  の以下を表す、

$P_s(n)$  : センシングにより認識された作業開始から n 番目のシムの特徴点

$P_T(m)$  : センサ情報に基づき計算された  $m$  番目の生成経路,

$P_R(p)$  : マニピュレータツールのサンプリング時間毎  $p$  番目の動作軌跡

制御系の処理としては、まずセンサの特徴点がセンサ座標系  $\Sigma_S$  での特徴点  ${}^S P_S(i)$  として獲得される。これを計測時のマニピュレータ手先の位置姿勢、センサ取付の位置姿勢情報に基づいてワーク座標系  $\Sigma_W$  上の特徴点  ${}^W P_S(i)$  を求める。次に計測した複数の  ${}^W P_S(i) \sim {}^W P_S(j)$  から目標値としての経路  ${}^W P_T(k)$  が生成され、一連の  ${}^W P_T$  を目標値として制御を実施した結果が動作軌跡  ${}^W P_R(1)$  となる。マニピュレータの動情報とセンサ情報は、コントローラからリアルタイムでコンピュータに送信されるか、あるいは、一旦コントローラ内に動作ログとして保存された後、利用される。

以下では、これらの情報の統合的に活用する各モジュールの構成を説明する。

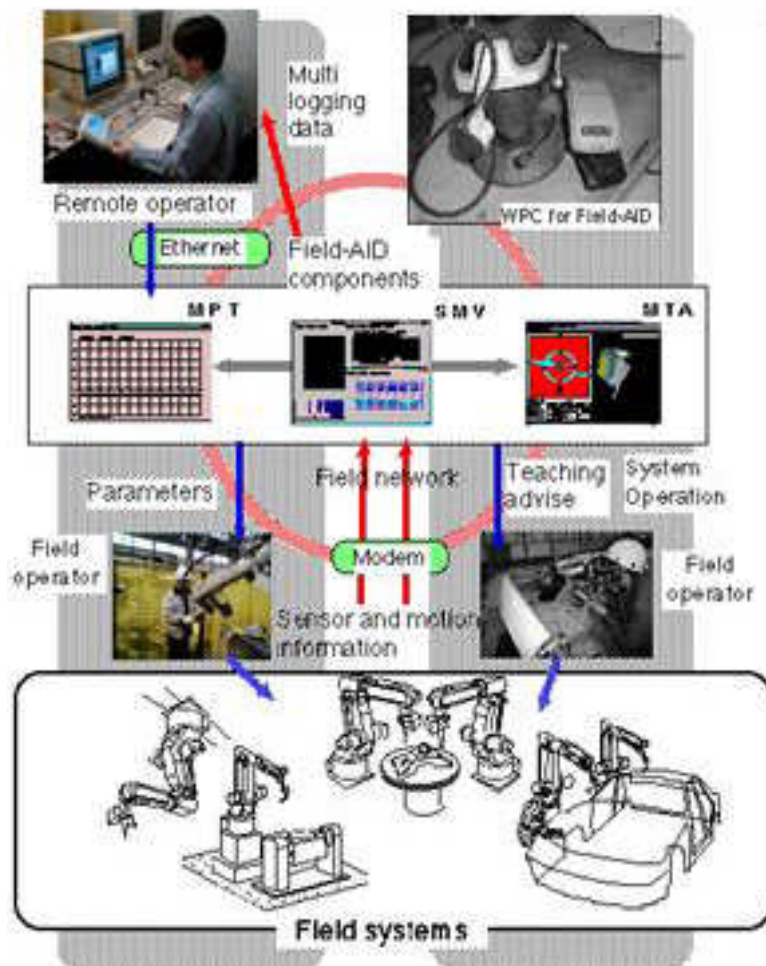


Fig. 2.17 Schematic of field-aid system

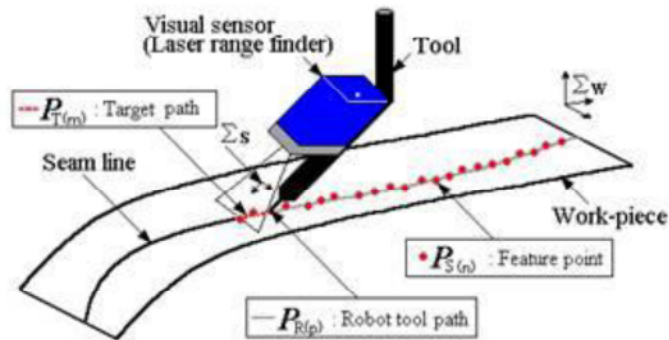


Fig. 2.18 A spatial tracking task

#### 2.4.1.2 SMV: Sensing Motion Visualizer

SMV は作業点に関する主要な情報をワーク座標系に射影して可視化する、一般にセンサフィードバック型マニピュレータの動作に影響を及ぼすパラメータは数多く存在する。溶接やシーリング等の経路依り作業を対象とした場合では、センサの認識に関わるパラメータ、センサ情報から修正すべき制御目標位置姿勢を計算するための経路生成パラメータ、マニピュレータの制御系のゲイン設定等の制御パラメータ等がある。この SMV では、特定の試行での動作ログを処理して、(1)センサによる認識特徴点、(2)制御目標位置姿勢、(3)マニピュレータの実際の動作軌跡の 3 種類の情報をワーク座標系  $\Sigma_w$  に射影し、これを同一次元の情報である  ${}^wP_S(n)$ 、 ${}^wP_T(m)$ 、 ${}^wP_R(p)$  としてコンピュータ上に表示する。この 3 種類の情報はどれも作業対象の形状を表すことになる。オペレータはこれらの表示結果から、調整の必要な箇所を視覚的に判断することが可能となる。



Fig. 2.19 The sample work piece

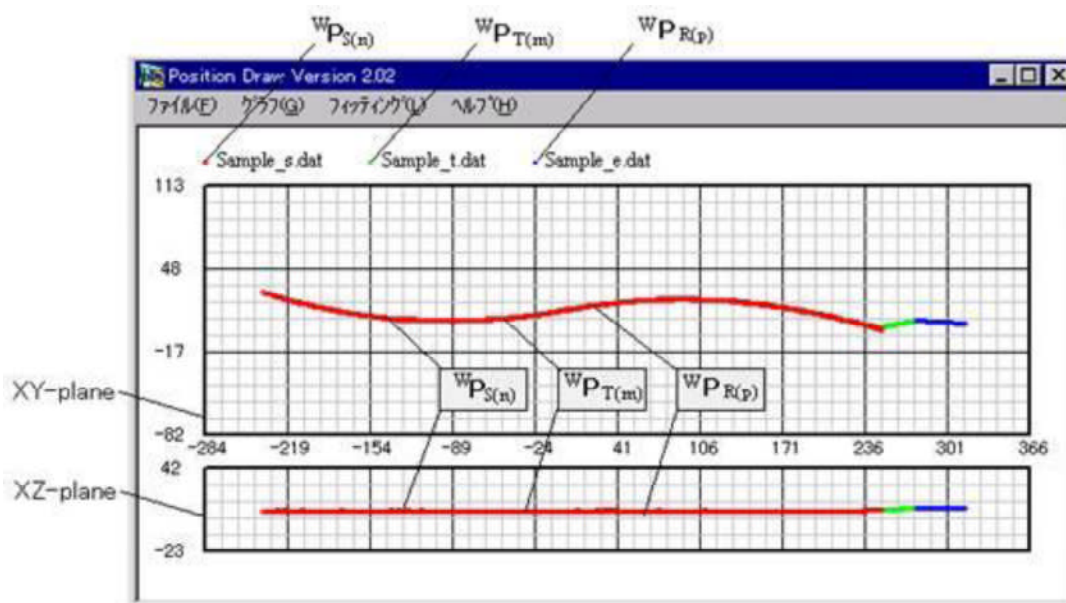


Fig. 2.20 The sample of the visualized information

Fig. 2.20 は、Fig. 2.19 の写真で示す S 字シムラインをもつワークに対する倣い溶接作業の作業点情報を可視化した例である。この図で、右端の直線部分は、溶接開始点までの助走区間の動作となっている。仮にセンサパラメータ調整が適切でない場合には、センサ認識特徴点が S 字から外れた位置にプロットされる場合があり、その後の制御目標位置姿勢やマニピュレータ動作軌跡がその影響を受けることになる。別のケースとして、マニピュレータの位置姿勢が特異点に近い場合や、マニピュレータ制御パラメータが不適正な場合には、正常な制御目標位置姿勢にもかかわらずマニピュレータ動作軌跡が誤差を持つことになる。このように、センサによる認識特徴点、制御目標位置姿勢やおよびマニピュレータ動作軌跡を同一次元の作業点情報として可視化することで、調整の必要なパラメータを短時間で判断することの支援が可能となる。この他、補助的な可視化ソフトウェアとして、動作の速度表示ソフトウェア、センサデータの表示ソフトウェア等が用意されている。

#### 2.4.1.3 MPT: Motion Parameter Tuner

SMV によりシステムの不具合が判明した場合、すみやかにパラメータを調整する必要がある。一般にセンシングはワークの状態に影響を受けることから、多くの場合フィールドでの調整は不可避となる。ここでは作業点における認識誤差のモデリングとそれを利用したパラメータチューニング方法について説明する。

前述の経路倣いマニピュレータにおいて、センサにより計測される特徴点座標ベクトルを  ${}^W P_S$ 、対応する真値を  ${}^W P_{S0}$ 、運動情報と相関する認識誤差ベクトルを  $w$ 、運動と無相関の計測ノイズベクトルを  $e$  とすると次式が成立する。

$${}^W P_S - {}^W P_{S0} = w + e \quad (2.6)$$

ここで  $e$  が微小と仮定すると、有意な認識誤差は  $w$  となる。倣いマニピュレータでの  $w$  の主要因としては、センサ・ツール間の幾何的キャリブレーション誤差、サブシステム間通信同期ずれ、ツールおよびその結合部のダイナミクスの影響などがある。そこで、認識誤差の非線形モデルを次のようにおく。

$$h = H({}^W P_T, {}^W \Phi_T, \partial {}^W P_T / \partial t, \partial {}^W \Phi_T / \partial t, q, {}^W P_S, \rho, \tau) \quad (2.7)$$

これにより、認識誤差モデルの同定は、マニピュレータ位置情報  ${}^W P_T$ 、 $\partial {}^W P_T / \partial t$ 、ロボット姿勢情報  ${}^W \Phi_T$ 、 $\partial {}^W \Phi_T / \partial t$ 、特徴点座標ベクトル  ${}^W P_S$ 、既知の幾何パラメータ  $q$  および観測値  $h$  を用いて、空間および時間に関する未知パラメータ  $\rho$  および  $\tau$  を同定する問題に帰着される。同定に必要な情報はシステム自体の機能を利用して得られるため、フィールドで特殊な計測器は不要である。

Fig. 2.21 はセンサ情報とマニピュレータ位置姿勢情報の同期パラメータ同定のための試験動作例である。この動作は、シムに沿ってツールが正弦波状に並進蛇行するもので、溶接のウィーピング動作をそのまま利用できる。ここでは加速度は小さく、ツール姿勢変化も一定にできる。また空間パラメータの影響については既に除外されているとすると、式 (2) は時間に関するパラメータ  $\tau$  を未知とする式となる。Fig. 2.22 に、試験用外乱動作時のマニピュレータ動作軌跡  ${}^W P_T$ 、センサ特徴点列  ${}^W P_S$  を示す。図より、試験用外乱動作に相関する認識誤差が生じている。Fig. 2.23(a) はこの動作の認識誤差  $w_y$  とツール先端の速度  $\partial {}^W P_{Ty} / \partial t$  との関係を示す。これらはほぼ比例関係にあることから、最小二乗法により次の関係を得る。

$$w_y \doteq 0.089 (\partial {}^W P_{Ty} / \partial t) \quad (2.8)$$

Fig. 2.23(b) は、 $\tau \doteq 0.089$  としてシステムパラメータを補正の実験結果であり、認識誤差  $w_y$  の最大値は  $0.5[\text{mm}]$  以下（補正前の約  $1/3$ ）に低減されたことが確認できる。

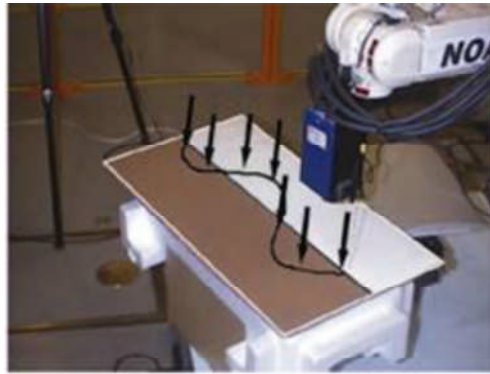


Fig. 2.21 Testing motion for time-lag estimation (with weaving)

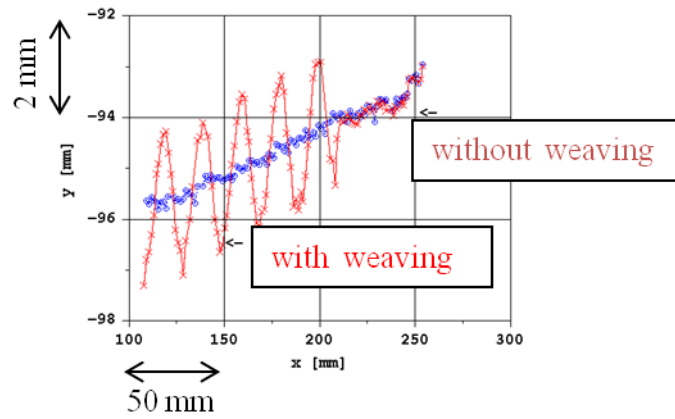


Fig. 2.22 Recognized seam points

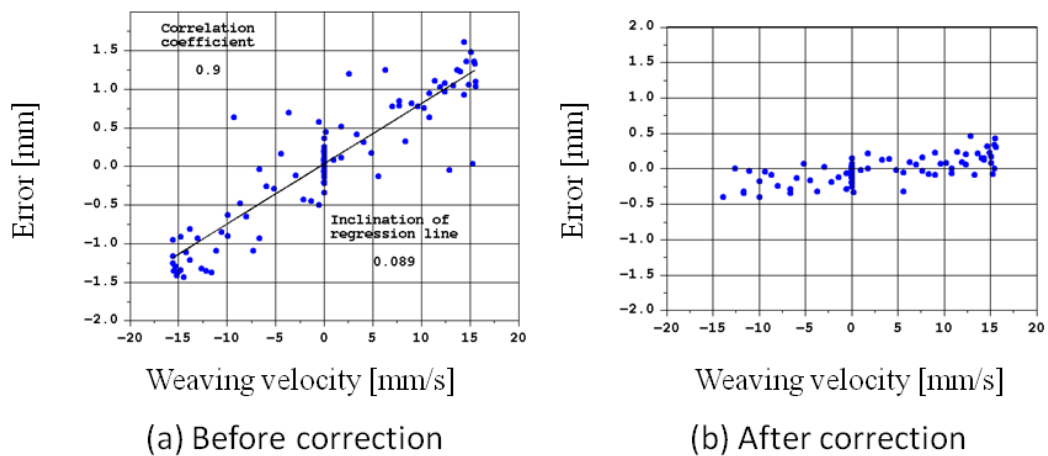


Fig. 2.23 Correlation between error and velocity



#### 2.4.1.4 MTA: Multi-modal Teaching Advisor

MTA は、センサフィードバック型マニピュレータ作業での作業教示を支援する目的で構築している。ここでは作業仕様、システム制約、センサとマニピュレータ運動情報を、作業者の視点での情報に変換する。次に、マルチモーダルインタフェースを介して、これらの情報に基づいた教示支援情報を、作業車にリアルタイムで提示することにより、センサフィードバック型マニピュレータの教示を支援する。

例えば、作業仕様として、センサ視野範囲とシムとの相対関係の制限が与えられている場合、MTA は、SMV からのマニピュレータ運動情報とセンサ情報等を統合し、教示点における作業仕様に関連するシステム状態を算出することができる。ここで、センサ視野範囲と seam の相対関係が作業仕様を満足するようにセンサ/ツール姿勢を修正する必要がある場合には、MTA は教示点の変更方向を、作業者の視点におけるセンサツールの 3D グラフィックス表示、センサ座標系画面、音声指示などのマルチモーダル情報に変換し、その支援情報をオペレータに提供する。オペレータはこれらの情報を利用して、微妙な教示点変更に影響されるシステム状態を容易に把握することが可能となり、高効率なマニピュレータ教示作業が期待できる。

#### 2.4.2 Field-Aid システムのインプリメント

##### 2.4.2.1 ハードウェア構成

マニピュレータ操作のためのティーティングペンダントを使用した作業を想定して、WPC を用いたハードウェア構成を導入した。具体的には、小型 HMD (1 インチ, VGA :640x480) を搭載した WPC (Xybernaut 社製 Mobile-Assistant2) を使用し。OS は Windows95 を利用、作業者は腰部に装備する WPC 本体のポインティングデバイスを利用するか、マイクを通じた音声コマンドを利用して WPC を操作する。Fig. 2.24 に WPC を用いたシステム形態の一例を示す。後述の実験では WPC とセンサ/マニピュレータ間の接続については、ワイヤレス LAN (proxim:RangeLAN2) を導入した。

##### 2.4.2.2 ソフトウェア構成

ソフトウェアの構成としては、SMV, MPT, MTA の構成要素を部品化したコンポーネントを基本に構成した。具体的には、センサインタフェース、マニピュレータインタフェース、演算処理部、ネットワークインタフェース、表示処理部、音声認識部などに部品化された engine 部を基本とし、その組合せによりアプリケーションを構成した。

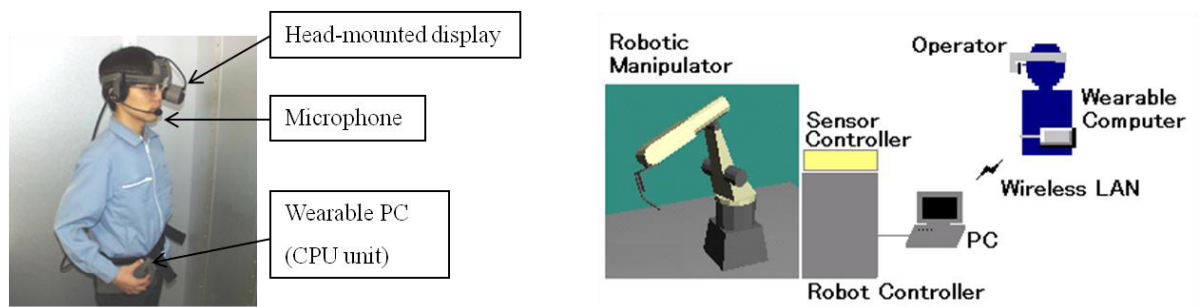


Fig. 2.24 Field –aid system using wpc

### 2.4.2.3 ユーザインタフェース

マニピュレータを操作するフィールドではWPCの手動入力が困難なことが多いことから、音声インタフェースを併用する構成としている。作業者は音声認識ソフトウェア (IBM:VoiceType™)により、WPCのポインティングに相当する操作を行い、センサの起動/停止、画面切替等を行う。また、音声合成ソフト (OKI:SmartTalk™)によりロボット操作中のオペレータに教示操作指示を伝えることができる。音声インタフェースについては今後さらに高性能なものを導入することが考えられる。

### 2.4.2.4 ネットワーク

Fig. 2.25 はネットワークでのシステム構成例である。Case.1 はフィールドでのセットアップ, Case.2 はフィールドとサポートセンタの共同によるトラブルシューティング, Case.3 はサポートセンタからリモートでのモニタリングあるいはメンテナンスに対応している。Case.1 は Fig. 2.24 のタイプを拡張したもので、サポートセンタからソフトウェアコンポーネント、あるいはオンラインヘルプなどをダウンロードできる構成を想定している。Case.2 は、サポートセンタから作業支援するものであり、トラブル箇所についての専門家がフィールドにいない場合に有効な方法となる。この構成は、Case.1 の構成に、センタからの幾つかの操作コマンドとデータ応答機能、フィールドの映像をセンタに送信する機能などを付加したものである。Case.3 は定期的な無人のメンテナンスが可能ないように Case.2 を拡張したものである。ただしこのケースでは通常 WPC を使用する必要はない。上記の3例において、フィールドとサポートセンタの通信に関しては、高速な専用回線や、通常のアナログ回線までさまざまな通信経路を必要に応じて選択可能である。

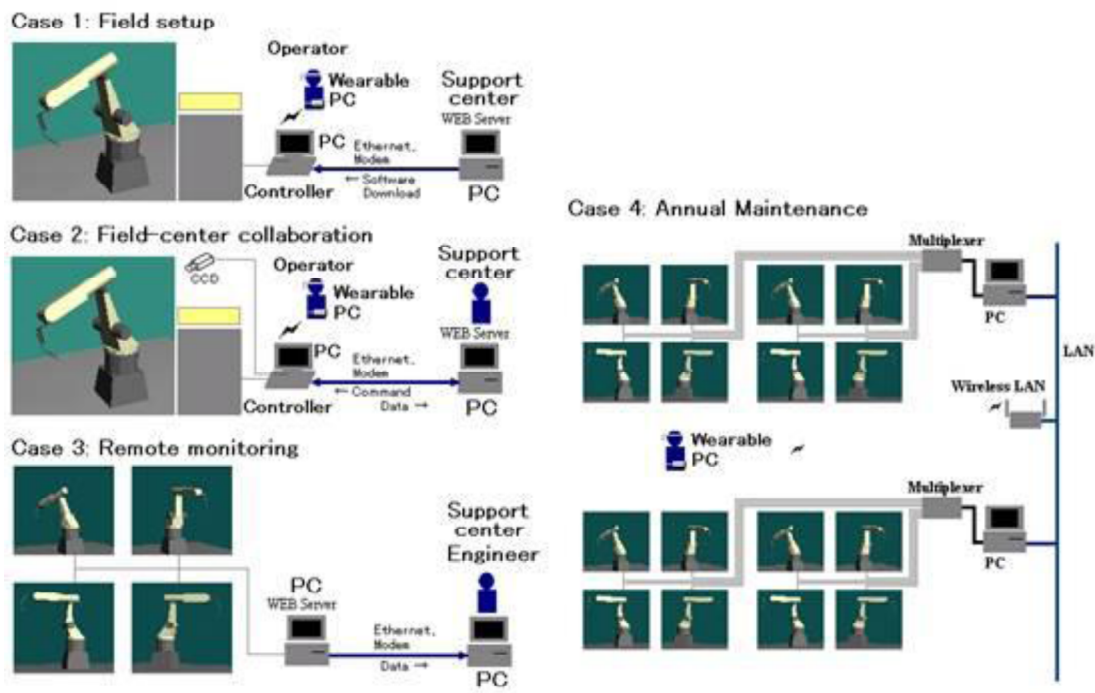


Fig. 2.25 Field –aid network system

### 2.4.3 実験

ここでは、上記のシステムをWPC上に実装し、作業点を扱う作業を対象としたラボテストについての述べる。Fig. 2.26は、MTAでの教示支援にWPCを導入し、HMDでモニタしつつオペレーションをしている様子である。HMDには、センサ計測結果と認識特徴点、さらにセンサ認識可能範囲およびツールの姿勢制約範囲という2つの異なる情報がオーバーレイされる。現在のツールとセンサの位置関係がこの表示で理解できる。オペレータはツール制約を満足しつつセンシング条件を改善するためにマニピュレータを操作する。このときにマニピュレータを動かすべき方向がHMD上のツール・センサモデルに矢印で表示される(図中)。以上の情報は一括表示および分割表示が可能であるが、その切り替えは音声で指示する。またツール・センサモデルについても、オペレータが実際のツール・センサシステムと同一のViewとなるように、音声によりモデル姿勢を変更できる。これらの操作はハンズフリーであることから、オペレータは同時に教示ペンダントも操作できる。この他、センサシステムに不慣れたオペレータの場合には、ブラウザのオンラインヘルプ機能を利用して、簡単なトラブルに対処することができる。

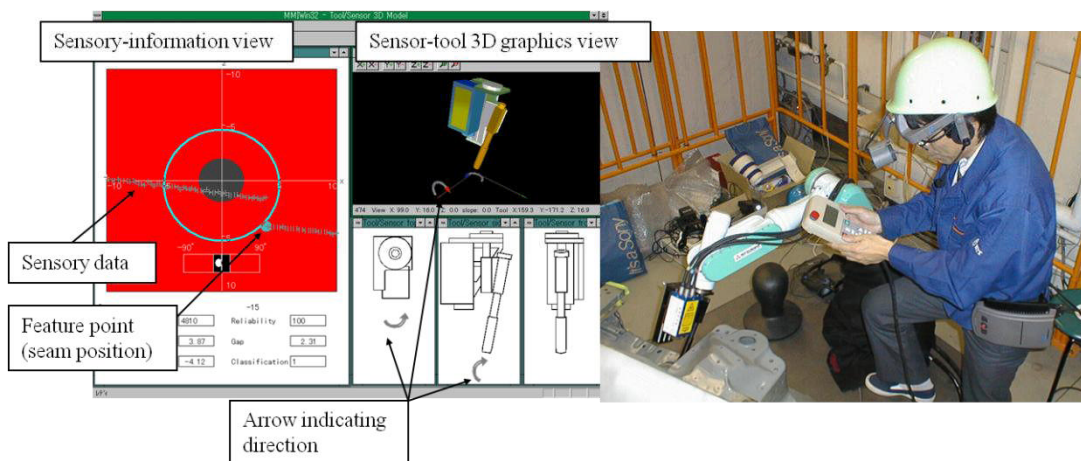


Fig. 2.26 Robotic teaching task using wpc

WPC 導入のねらいは、Field-AID の機能をフィールドオペレータがより効率良く快適に利用することにある。ラボテストでは以下のような点が検証された。

(1)HMD に情報が表示され、また音声コマンドも一部使用できることから、フィールドでマニピュレータ教示ペンダントを操作しながら、ワークの状況に応じて変化するセンサの状態をチェックし、かつ教示アドバイスを確認できる。ただし、このような形態に慣れるにはかなりの時間を要する。

(2)センサやマニピュレータのシステム動作に異常があった場合にも、オンラインマニュアルをその場合すぐさま参照できることから、他者への問い合わせなど立上げ時間のロスが低減される。ただし、当然のことではあるがオペレータの知識・経験レベルに応じて使い勝手に差異が大きい。

(3)HMD は閉鎖型ディスプレイのため準屋外環境のような外乱光のある屋外フィールドでもその視認性が大きく損なわれることがない。ただしテキスト表示の場合には英文フォントでは 8 ポイント程度が限界であり、和文では 9 ポイント以上必要であった。

フィールドでマニピュレータなど他のシステムを扱いつつコンピュータも操作するという場合には、WPC は確かに便利である。しかし、ハードウェアの小型化、ユーザインタフェースの改善など課題も多い。ここでの評価もまだ定性的であり十分とは言えない。ユーザーニーズをきめ細かく分析するとともに従来法との比較を行い、その上でハードウェアそしてソフトウェアプラットフォームへの課題を明らかにしていくことが必要である。

## 2.5. まとめ

機械系の課題解決を目的に、産業用マニピュレータの運動情報の活用による機械支援システムの高度化について述べた。まず、センサフィードバック型マニピュレータを対象に、作業点モデリングの考え方を導入した。ここでは通常の教示点列の補間による制御目標値生成ではなく、ワーク輪郭経路や溶接線などの作業点の3次元モデルを管理したシステムとした。このシステムを用いて、センサ情報から作業点情報を求めるプロセスにおいて、センサを相補的に利用した高精度化、ユーザへの提示により、ユーザによる実ワークと内部データの比較と対応検討させる、作業点誤差と運動情報の相関性を利用したチューニング、という機能をあたえることで、センサ活用の高度化を図るアプローチを取った。高精度化に関しては、力と速度情報を相補的に利用した作業点接触情報センシング方式を提案し、実験により有効性を確認した。次にこれを、力覚センサ活用したグラインダ工具の接触倣い作業へ適用し、作業環境への適用性や教示の簡素化に効果があることを明らかにした。さらに、センサフィードバック型マニピュレータの内部情報から、装置の各処理部の計算結果を同次元で代表するワーク形状の推定値、エンドエフェクタの制御目標値、制御結果等のワーク座標系で記述できる情報を可視化し、作業者に提示することで作業を支援する方法を提案した。この方法を、実際の溶接センサフィードバック型マニピュレータを対象に、ウェアラブルコンピュータを利用して実装し、作業点誤差情報の作業者への提示による作業者支援および運動情報との相関性を利用したチューニングへ適用することにより、その有効性を明らかにした。

本章の作業点モデリングを導入したシステムは、基本情報を管理する部分、作業点情報を管理する部分、およびこれらの管理された情報からアプリケーションを構築する部分から構成され、支援機械システムのフレームワークの基本的な構成要素をセンサフィードバック型マニピュレータに適用した具現化例となる。またフレームワークにおけるインタフェースの観点からは、複数センサ情報を扱うシステムとそれを活用するユーザとのインタフェースに関して設計指針を与えるものとなる。これを工場内でのグラインダ作業や溶接作業という複数作業のセンサフィードバックマニピュレータを対象に、複数センサの特性を利用した高精度化やパラメータの自動設定、ユーザの判断を活用可能なシステム構築に適用可能であることを示した。これにより作業点モデリングを導入したシステム構成が、機械系の課題である工場内で複数の作業に対して複数センサを機能させることで人間・機械・作業環境の状態を把握するシステムの一実現例となるとして有効性を確認した。



## 第3章 多様なサービスを実現するロボット，ユーザ間での

### 情報共有プラットフォームの構築

#### 3.1 はじめに

本章では情報系の課題解決を目的に，公共空間でのロボットによる案内等のユーザ支援サービスを想定し，様々な種類のロボットやセンサからの情報を，ネットワークを介して情報共有するプラットフォーム（PF）を提案する．ここでは，一般ユーザの所持するセンサや施設に設置されたセンサを利用して柔軟にサービスを構築できる情報システムの構築を考え，XML 技術による情報記述方式を導入した階層化構造で PF を構成する．これにより，ロボットや他のシステムとの連携性を高めたフレームワークを実現する．Fig. 3.1 に PF を構成する情報システムの基本フレームワークを示す．

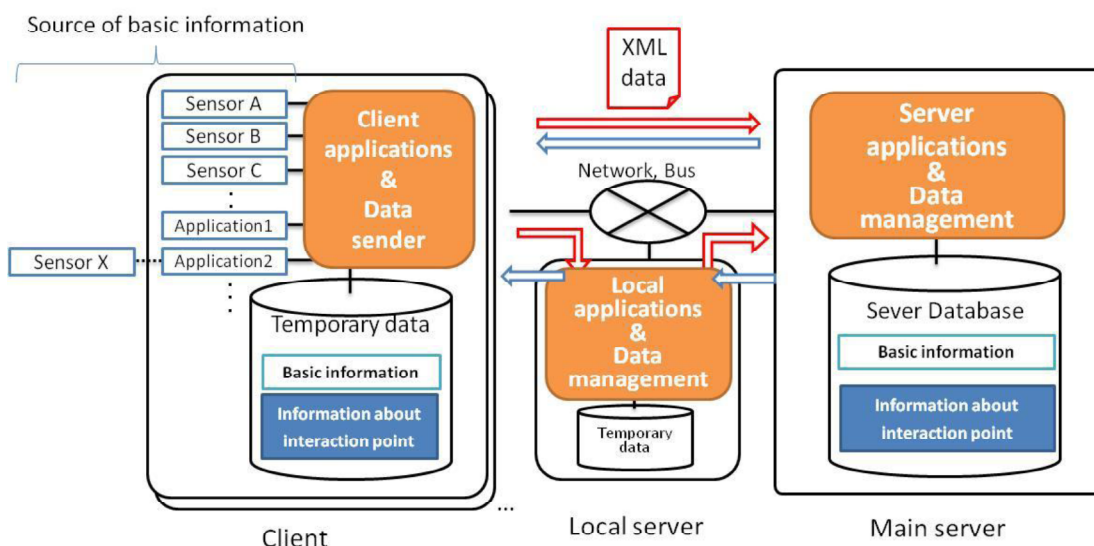


Fig. 3.1 Basic framework of information system

階層として client, local server, main server の 3 階層を設け，client には多様なセンサやロボット，携帯端末等を想定する．ここで多種多様なロボットやセンサに対応するため，client と server 階層のインタフェースとして XML 技術によるセンサ・ロボット情報定義の汎用化を試みる．ひとつの XML ファイルで情報の定義と実データを記述できる規約を導入し，この記述に従ったデータに対してデータベースの変更無しにサービスに必要な情報を管理できる機能を考える．こうすることにより，フォーマットや性能差だけでなく，ユーザやロボットの抽象化された情報にも対応可能となる．例えば，商用施設等でのロボ

ットによる案内情報支援サービスの構築を想定した場合、ユーザの移動軌跡のような生のセンサデータに近い情報、しゃがみこんだユーザの位置といった、ひとの動作の認識結果を合わせた情報、ロボットがユーザから聞き取った情報、ロボット自身の状態、といったセンサやロボットからの様々な種類の情報に対応することができ、サービスに必要な情報を簡単に扱うことが期待される。

また第1章で述べたように client, local server, main server の各階層では以下のような機能配備を基本に考える。

- ① client:サーバとのデータ送受信機能をライブラリ化した共通機能と client 内部のリアルタイムセンサフィードバックなど高い応答性の必要なアプリケーション機能
- ② local server: 複数の client の情報を必要とするアプリケーション機能
- ③ main server: ユーザの状態, センサ・ロボットの機能や情報を蓄積管理する共通機能とこれらを利用したアプリケーション機能

本章では、公共空間でのロボットによる案内等のユーザ支援サービスを想定し、様々な種類のロボットやセンサからの情報を、ネットワークを介して情報共有する PF を提案する。この PF 上にロボットによる複数の情報案内サービスをインプリメントし、実証実験を通じて、多様なセンサ・ロボットを提案 PF に接続したサービス構築の実現と、システム開発工数の観点から PF 化による開発効率化について検証する。

### 3.2 複数センサ・ロボットを利用したシステム構築に関する従来研究

近年、ヒューマノイド型ロボットに代表されるようなロボット技術の研究開発が進められる一方で、多様なロボットを連携させることでロボットの適用範囲を拡張しようとする取り組みがなされている。このようなアプローチのひとつに、ロボットを、①ビジブル型、②バーチャル型、③アンコンシャス型（環境に埋込まれたセンサ等）ロボットの3種類に整理し、ユーザの状況に適用してロボットが連携してサービスを提供するネットワークロボットの概念が提案されている<sup>15)16)</sup>。

筆者らは、現在広く研究開発や商品化が進められているロボットを対象に、ネットワークを利用して連携するための PF の研究開発に取り組んでいる<sup>54)55)56)</sup>。これまでに、ロボットとのプロトコル検討、ユーザ履歴管理機能・サービスアロケーション機能の PF 化を進め、拡張性や効率性の高いシステム構築を目指してきた。この PF ではサービス提供のインフラとしての役割を担う必要から、ロボットの接続性とサービス提供の柔軟性の観点で下記の課題に対応できる要素技術を開発することが重要となる。



ロボット接続性：

(1) ネット接続機能を有するが、性能・処理内容・出力形態等については異なる様々なセンサ・デバイスを、アンコンシャスロボットとして個体差を吸収し共通に扱うことが可能。

(2) 特定用途向けに開発されたスタンドアロンで動作するロボットを、ネットワークを介して様々な機器と連携させることで、ロボットの機能の一部を、別用途で利用することが可能。

サービス提供の柔軟性：

(3) アプリケーションサービスとセンサ・ロボットとの関係を固定せずに、同一のサービスを異なる組み合わせのロボット・センサによって提供可能。また状況に応じてサービス提供するロボットを適応的に変更することが可能。

(4) 複数の異なるアプリケーションサービスを同時に実行可能。

また、これらの技術開発を行っていく過程で、利用可能なロボット・センサの種類を増やしていくことも重要である。

上記のような、ロボット・センサの接続性やサービス提供の柔軟性を向上させることを目的とした研究例としては、生産・製造現場における工作機械などを対象に、メーカーや機種の違いを意識しないインタフェースをサービス開発者に提供する ORiN プラットフォームが提案されている<sup>57)</sup>。このアーキテクチャは CAO (Controller Access Object) Provider, CAO Engine から構成され、CAO Provider では各機器をコンポーネント化して通信手段やデータ構造の違いを吸収し、CAO Engine が提供する統一的な機器インタフェースを介してシステムを開発することを特徴とする。

また、ロボットのソフトウェア開発のミドルウェアや OS というアプローチとしては、ネットワーク分散コンポーネント化技術を用いた共通プラットフォーム RT-Middleware<sup>20)</sup> がある。RT-Middleware では、サーボモータやセンサ、カメラなどのデバイスや各種処理プログラムなどのロボット機能要素を RT コンポーネント化し、CORBA ベースの peer-to-peer 通信でそれらコンポーネントを連携させてシステムを開発する。様々なリソースをソフトウェア・コンポーネント化することでリソースの再利用性が高まり、効率的なシステム開発が可能となる。また ROS<sup>21)</sup> では、アクチュエータやセンサなどのデバイスや各種処理プログラムをモジュール化／コンポーネント化しシステムを開発する環境を提供している。

サービスロボットのための標準化の観点からは、OMGにおいてRT-Middlewareのオブジェクトモデル仕様がRobotic Technology Component仕様<sup>58)</sup>として標準化されている。ロボットとユーザにインタラクションを扱ったRoIS<sup>59)</sup>のフレームワークや様々なサービスで基本となるロボットの位置記述RLS (Robotic Localization Service)<sup>60)</sup>もOMGにおいて標準化されている。

ロボットによるサービス提供という観点からは、ロボットサービスをインターネット経由で利用・共有するためのRSNP (Robot Service Network Protocol)が提案されている<sup>22)~24)</sup>。RSNPは、疑似PushなどWebサービス技術を活用した通信機能を提供する共通サービスや、ロボット動作シーケンスや実行条件などを定義するタスクプロファイル、プリミティブなロボットの動作などを定義するコマンドプロファイルなどで構成された基本サービスプロファイル、情報サービスや天気サービスなどの応用プロファイルからなるロボットサービスで構成されている。また、マルチメディアプロファイルにより、カメラの画像情報やセンサデータ、音声入出力情報を扱うことも可能としている。Webサービス基盤をベースとしているためWebサービス開発者によるロボットサービス開発など、新たなロボットサービスの創出が期待される。

また、上記と第1章で示した従来研究の他に、中野ら<sup>61)</sup>や青木ら<sup>62)</sup>は、ミドルウェアを介して全体を統括するタスクマネージャとセンサやロボットアクチュエータを結合させる方式について検討・報告している。中野らが開発したMONEAでは、展示会を想定して対話しながら説明デモンストレーションを行うアプリケーションと入力(センサ)としてマイク(音声認識機能)、出力としてスピーカ(音声合成機能)/ロボット(ジェスチャ機能)とを連携させている。しかしアプリケーションは接続されたロボット・センサの機能に基づいて開発され、ロボット・センサを組み替えた場合には別なアプリケーションを実装する必要がある。青木らによって開発されたSpinning Sensor NWでは、センサ:4/ロボット:2/表示系ソフト:3、を接続して2種類の簡単なアプリケーションを実現しているが、複数のアプリケーションを同時実行することは想定されていない。

本章では、4年間に実施した複数ロボットによる案内サービスを想定した実証実験を通して、開発したPFにより広範囲のロボットやセンサ・デバイス・他のPFと情報連携が可能となり、多種類のサービスを実現しうる拡張性を確認できたことを述べる。さらに一連の実証実験を通じたPF化による開発効率について、開発規模の観点からの評価検証について述べる。

以下ではまず、開発したネットワークロボットPFの概要を示す。次に、これを用いた実証実験を説明し、本PFでの具体的な実現機能、本PFを利用した多種ロボット、ユビキタ

デバイスや電子タグ認証 PF と連携した複数のサービスシステムの構築例について述べ、拡張性および開発効率に関して検証した結果を述べる。

### 3.3 ネットワークロボット PF の概要

#### 3.3.1 基本構成

Fig. 3.2 に、開発したネットワークロボット PF<sup>63)64)</sup>の構成図を示す。この PF は Fig. 3.1 の基本フレームワークをベースに、client, local server, main server の各階層に対して、接続ユニット、エリア管理ゲートウェイ、ユーザ DB・ロボット DB・サービス DB で構成された認証データベースの機能を配備したものとなっている。

client 階層の接続ユニットは、①各種ロボットやセンサ等からの情報を逐次受信し、共通言語で 4W 情報(Who/When/Where/What 情報)として表記してエリア管理ゲートウェイに送信する機能、②エリア管理ゲートウェイから送信された共通ロボットコマンドを受信し、ロボットを制御する機能を有している。本システムではエリア管理ゲートウェイにアップロードするための共通言語に FDML(Field Data Markup Language)<sup>63)64)</sup>を用い、ダウンロードされる共通ロボットコマンドには、CroSSML<sup>65)</sup>をベースにしたロボットコマンドを用いた (Fig. 3.3)。

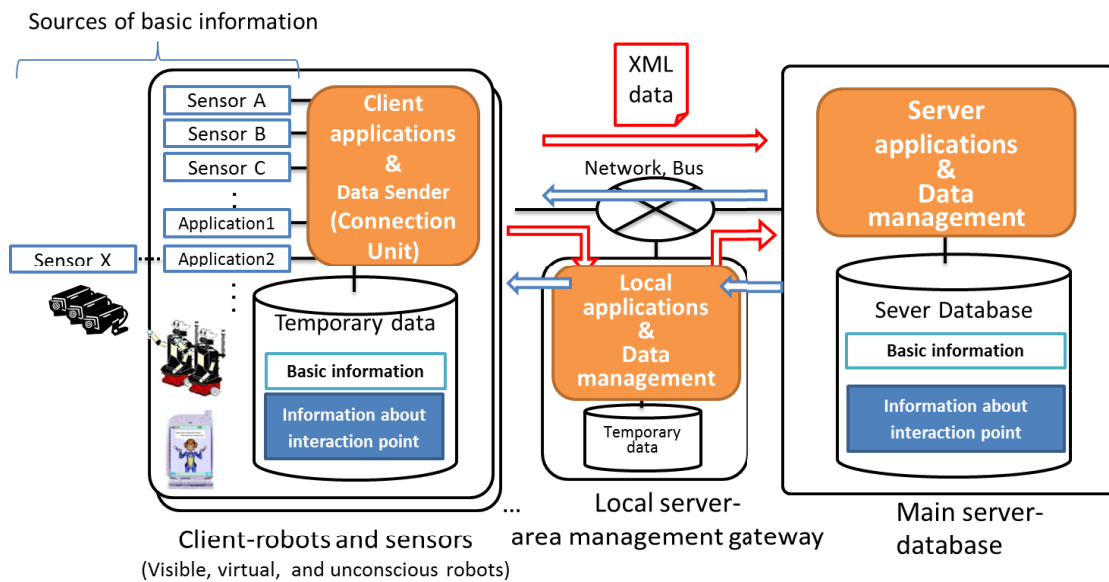


Fig. 3.2 Basic framework of NR-PF

local server 階層のエリア管理ゲートウェイでは、特定のエリア内にある接続ユニットで生成された各種センサとロボットの 4W 情報を組合せて、ユーザとロボットの 4W 情報を逐次生成する。そこで、ユーザとロボットの 4W 情報を照合することにより、具体的なユーザにどのロボットがどのサービスを実行するかというサービス分配に関する処理を行う。

main server 階層のユーザ DB は、エリア管理ゲートウェイが生成したユーザの 4W 情報、ロボット DB は、ロボットの 4W 情報を逐次蓄積する。サービス DB ではサービスとそのサービスコンテンツを蓄積する。これらの情報の一部は HTTP プロトコルにより特定の外部から参照可能な仕組みとなっている。

以下では、上記の各インタフェースを説明するとともに、PF におけるサービスの記述方法、サービス分配について説明する。

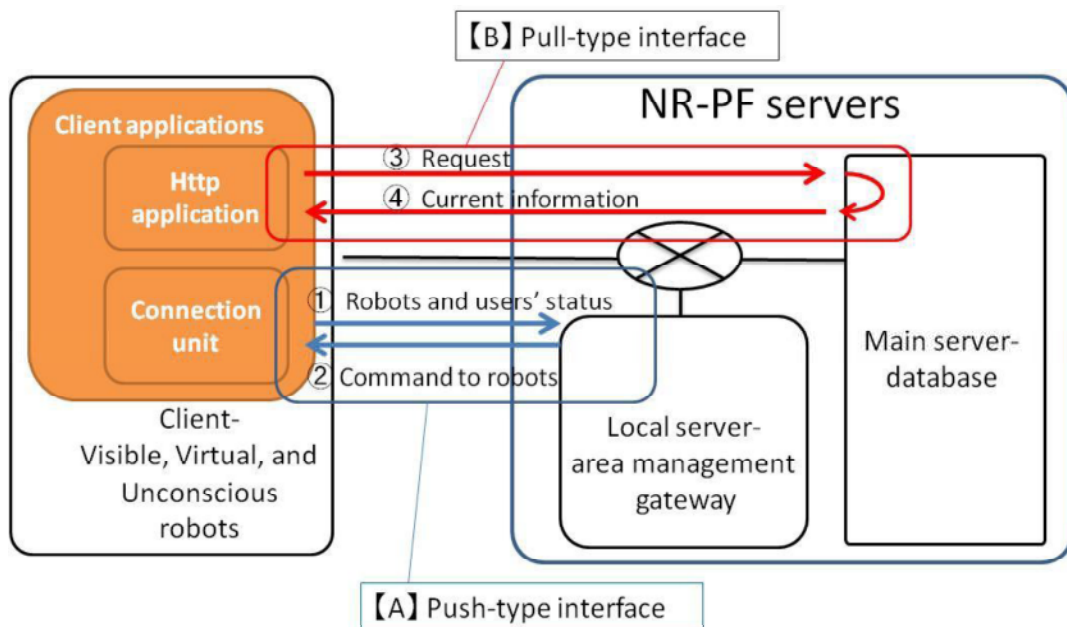


Fig. 3.3 Network robot interface (NR-IF)

### 3.3.2 FDML

FDML は、もともと製造ラインの機器やセンサ情報を効率よく収集し、管理する目的で設計された XML 形式であり、FDML 形式で記述された製造ラインを構成する様々なメーカーの機器やセンサ情報をデータベースに蓄積することで、生産管理や製造ラインの中長期的なモニタリングを効率よく扱うことができる。

FDML の基本構造を Fig. 3.4 に示す。FDML の主要なタグとしては、情報の収集対象となる機器情報を記述する Info タグ、物理的チャンネルと論理的チャンネルの関係やデータ形式を記述する Definition タグ、情報の取得・送信条件を記述する Condition タグ、当該取得データの時系列値を時刻情報と対応づけて記述する Data タグがある。また、Table 3.1 に FDML の主要なタグと属性を示す。ここで、物理的チャンネルとは、「A/D 変換ボードの 1 番ポート」などを指し、論理的チャンネルとはその後の処理で用いる情報の名前で「x 軸方向の加速度データ」などを指している。これらのタグを利用することで、各チャンネルの定義や各サンプルデータ毎の時刻の記述がファイル内で行える。主要タグの中で特徴的なのは、Definition タグと Data タグであり、Definition タグで、データの種類数(nChannel タグ)、物理的チャンネル名称(src 属性)と論理的チャンネル名称(Name タグ)の対応、データ型(Type タグ)や単位(Unit タグ)等を記述している。Data タグでは、各サンプル毎の時刻(time タグ)と各サンプル毎に計測された一連のデータ値(value タグ)を記述している。データ値(value タグ)一つ一つに時刻を記述するのではなく、各サンプル時刻で計測された複数のデータをまとめて効率よく記述することができる。このようにセンサ情報などの時系列データを、一定の規則で XML 形式に変換することで、異なるタイプの情報の関係も統一的に扱うことが可能となる。扱える情報の種類として、センシング周期が一定周期の情報だけでなく、ユーザ入力情報など間欠的に発生するもの、さらには一定周期の計測を目標値としてソフトウェア設定したが実際の計測では処理性能等により間欠的な計測になったものを含み、正確な周期性のない間欠的な計測結果の情報も扱える。またデータ形式としても、論理値、スカラ、ベクトル、マトリックス形式の他、ユーザが機器に入力した情報等も、ひとつの FDML ファイルに記述することが可能となる。

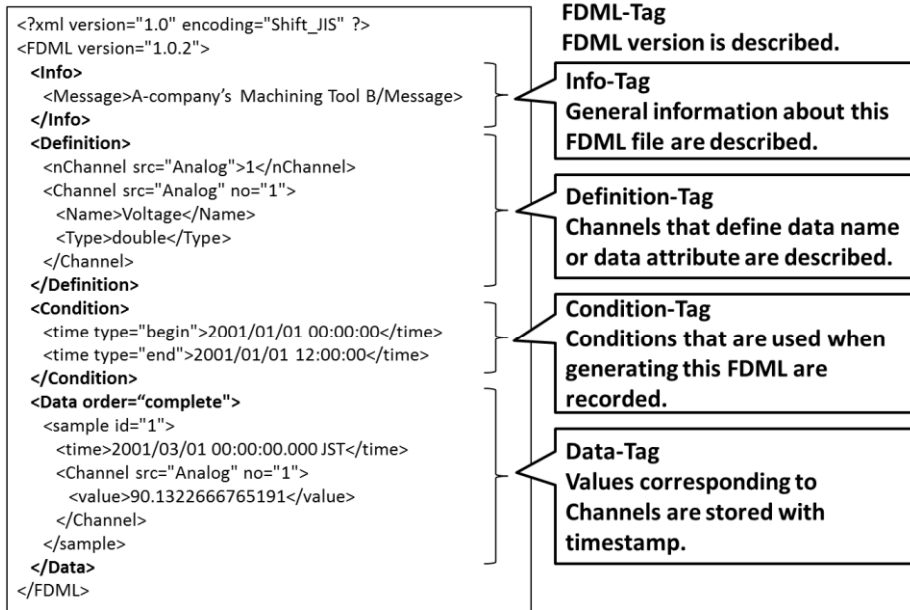


Fig. 3.4 FDML

Table 3.1 Main elements of FDML

Element	Attribute	Contents	
<b>Info</b>	<b>Message</b>	—	
	<b>Comment</b>	—	
	<b>Group</b>	—	
	<b>System</b>	—	
<b>Definition</b>	<b>nChannel</b>	Definition part	
	<i>src</i>	The total number of a data channel	
	<b>Channel</b>	<i>src</i>	Name of data source
		<i>no</i>	Number of a data channel
		<i>no</i>	Name of data source
	<b>Name</b>	<i>no</i>	Number of data channel (1..N)
	<b>Type</b>	-	Name of data channel
	<b>Unit</b>	-	Type of data channel
	<b>Max</b>	<i>time</i>	Specification of a continuation value and a discrete value
	<b>Min</b>	-	Unit of data channel
<b>Condition</b>	-	Maximum value of data channel	
<b>Data</b>	<i>order</i>	-	
	<b>Sample</b>	<i>id</i>	Minimum value of data channel
		<b>Time</b>	-
		<b>Group</b>	-
	<b>Channel</b>	<i>Src</i>	Specification of the order of a data list
		<i>No</i>	Data ID
	<b>value</b>	-	Time when data was acquired
		-	Group ID
		-	Name of sensor
	-	Number of sensor	
	-	Value of data channel	

### 3.3.3 CroSSML

CroSSML は、ネットワークロボットやユビキタスサービスなど、異なるドメイン間でサービスを連携させることを目的として、ネットワークロボットフォーラムの技術部会において岩井らにより提案されたサービスの登録・利用に関わるフォーマットである。ドメインを超えたサービスの相互利用促進が目的であったが、実証実験において複数のロボットが共通で実行できるコマンドとコマンドを PF-接続ユニット間でやり取りできるプロトコルを用意する必要があり、CroSSML のタグ構造にコマンドとユーザが受けたサービス履歴を記述するタグ追加して利用することとした。

Fig. 3.5 にコマンド送信用に規定した CroSSML の記述例を示す。head タグ中に起動すべきサービス名①，サービス提供場所②，サービスを受ける人③，JobRequest タグにロボット側に実行依頼するコマンドとサービス情報を記述④，history タグにサービスを提供されるユーザが過去に受けたサービス履歴/どのロボットからどのようなサービスを受け/結果はどうだったか（⑤から⑨）を記述する。ロボット側では，ロボット固有のコマンド体系と動作プログラム群を管理しているが，NR-PF から送信されてくる共通コマンドと固有コマンドとを対応付け，サービスと動作プログラムとを対応付けることで，共通コマンドに基づいてサービス提供することが可能となる。

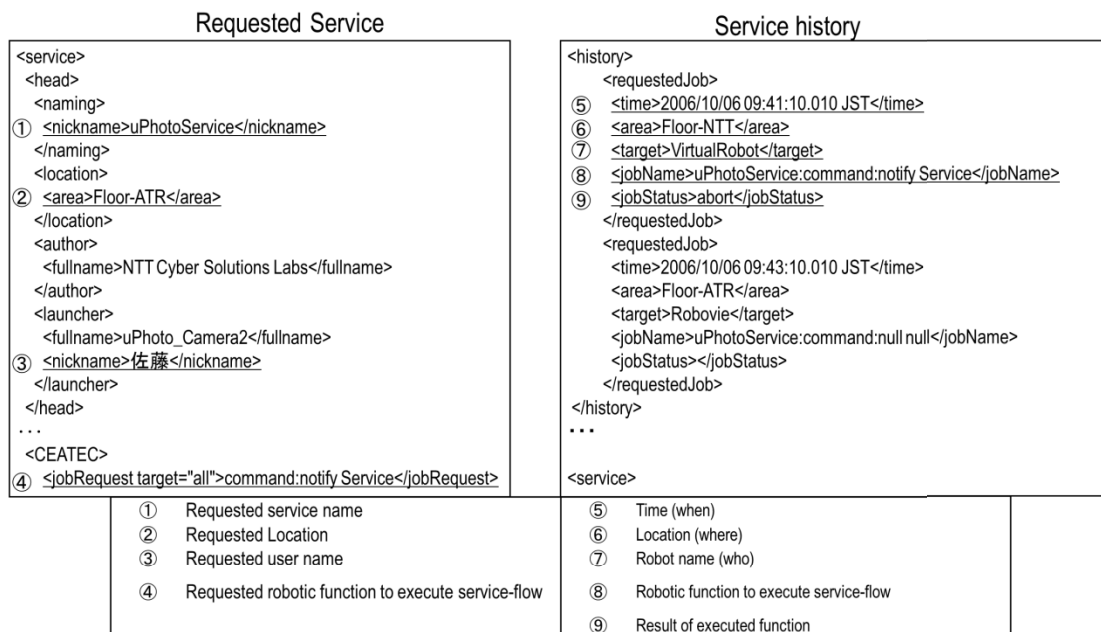


Fig. 3.5 Basic framework of CroSSML

### 3.3.4 Pull 型インタフェース

上記の FDML や CroSSML の Push 型インタフェースを利用したサービス開発のフレームワークでは、センサ・ロボット・サービスを分離して開発できることがメリットである。しかし、自前のロボットを使って簡単にサービス提供したいという場合には、ロボットの接続や、次節で説明する ServiceFlow の開発・実装とシステム構築にかかるコストが増大してしまうことから、簡易に NR-PF を活用してもらうためのインタフェースを提供する必要があった。この課題に対処するため、HTTP GET コマンドにより NR-PF から情報を取得するための Pull 型インタフェースを規定し、取得情報に基づいて PF 外部でサービスアプリケーションを構築・実行できる環境を提供した。Fig. 3.6 に Pull 型インタフェースの概要と、レスポンスで取得できる情報の例(現在のロボット・ユーザ・サービスの情報)を示す。この他、ユーザが過去に受けたサービスの履歴も取得可能であるため、Push 型インタフェースを利用した場合と同等の情報を使ってサービス AP の開発が可能となる。ただし、外部で独立してロボットがサービス提供を行う場合、結果がユーザの履歴に反映されない、ロボットがサービス提供中に PF に接続されたロボットが重複してサービスを行う可能性がある、等の課題を解決する必要がある。

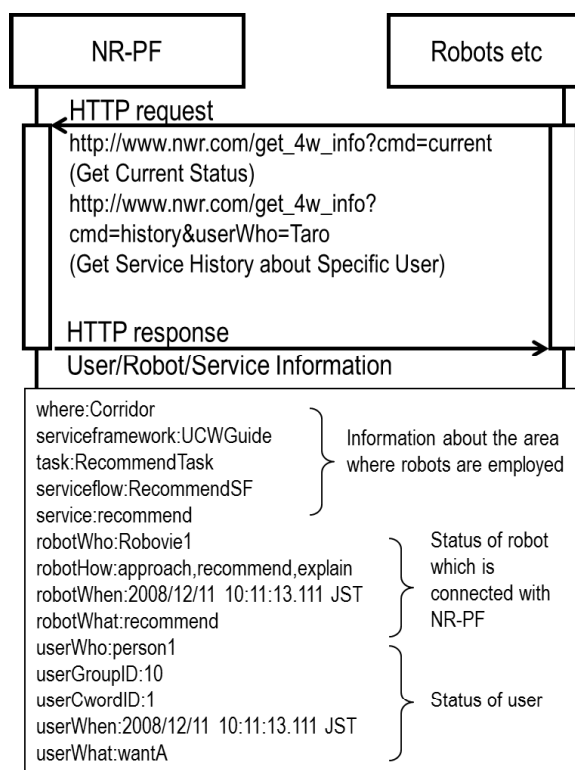


Fig. 3.6 Pull-type interface



### 3.3.5 アプリケーション（サービス）の実装

NR-PF の特長は、センサ・ロボット・サービスを個別・独立に登録・管理するフレームワーク導入していることである。Fig. 3.7 は、NR-PF で管理されるサービスの構造とロボットとの対応関係について示したものである。NR-PF においてサービスは、Parent Service/Task/Service Flow の3階層で管理される。まず、複数の異なるエリアにおいて様々なサービスを提供するため、サービスのおおまかなタイプに登録する Parent Service 階層を設けた。例えば、案内サービスとか清掃サービス等、サービスタイプが異なればそれぞれ別の Parent Service 階層に登録する。Parent Service 階層下ではサービスをエリア毎に分類して登録・管理するため、Task 階層を設け、Task 階層下では具体的な提供方法(手順)の集合を管理するために ServiceFlow 階層を設けて、状態遷移の形で記述し管理することとした。それぞれの状態に対応して実行される Service はサービス AP として実装されるプログラムである。サービス提供者はこの Service 部分を開発して PF に実装し、ServiceFlow に登録すれば良い。またロボット提供者は、これらの Service に対応して(NR-PF からのコマンドを受けて)ロボット固有の機能を活用した動作プログラムを用意すれば良い。

サービス提供者は、物理的なセンサやロボットを選択し、それらを動作させるためのプログラムを開発する必要がなくなり、センサ提供者はサービスやロボットを意識せずにセンサのみの接続を意識した開発を行えば良く、ロボット提供者もロボットの動作のみに集中した開発が可能である。このように、NR-PF の共通機能を活用することで、開発時間の短縮や、ロボットやセンサの変更・更新への柔軟な対応が期待できる。

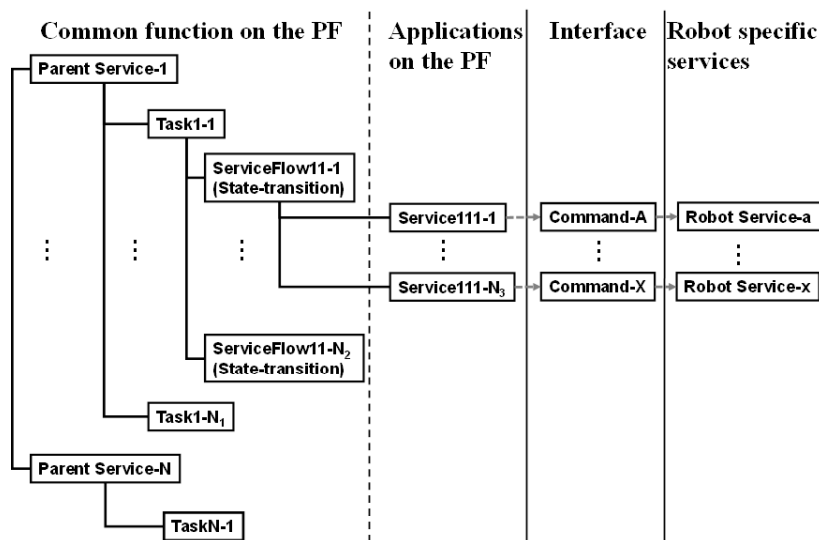


Fig. 3.7 Service structure registered in the NR-PF

### 3.3.6 サービスの分配

NR-PF では、独立に登録されたセンサ・ロボット・サービス情報を組み合わせて、ユーザーの状態に応じて提供するサービスとロボットを決定するサービスアロケーションのメカニズムが共通機能として実装されている。サービスアロケーションの手順はFig. 3.8 に示すように6ステップからなり、詳細は以下の通りである。

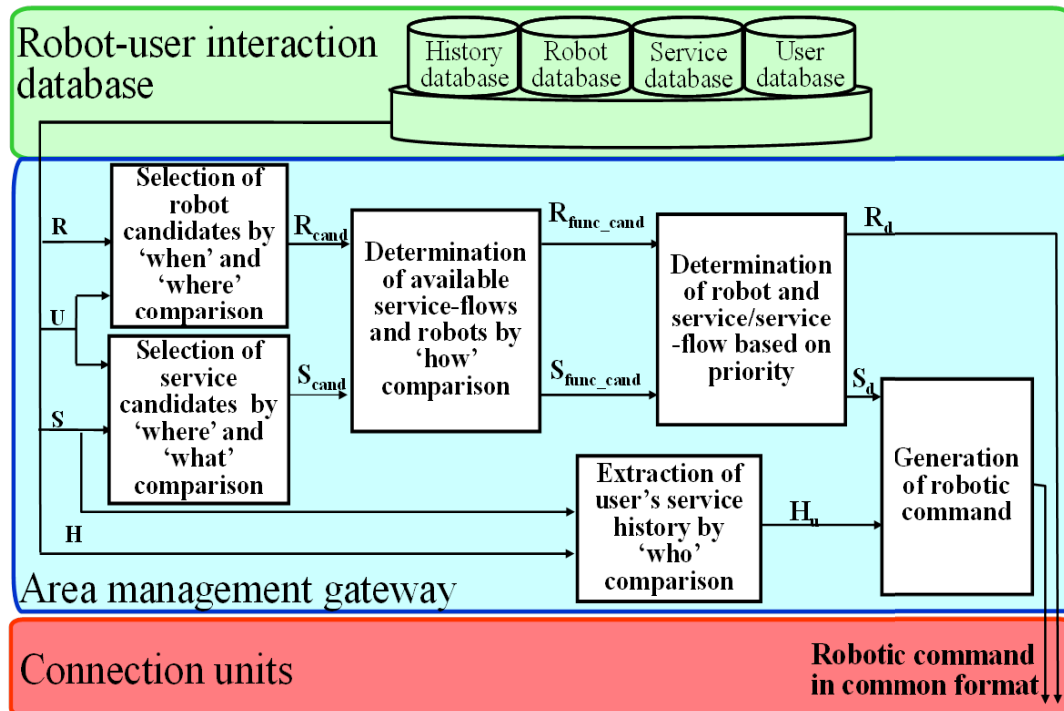


Fig. 3.8 Service allocation procedure.

#### [Step1] サービス候補の選定

センサ情報のユーザーに関する4W情報のうちでwhereとwhat情報が一致するサービス候補を選定。

#### [Step2] ロボット候補の選定

センサ情報のユーザーに関する4W情報のうちでwhenとwhere情報が一致するロボット候補を選定。

#### [Step3] ロボットとサービス候補の絞り込み

ロボットの what が” idle” =待機中であり、かつ NR-PF に登録した提供可能な function の情報(how)とサービス側で登録されている ServiceFlow 実行に必要な function とが一致するロボット・サービスに候補を絞り込む.

[Step4] ロボット・サービスの決定

サービス候補のうちで、最も優先度の高い(ユーザに対してのサービス品質が高い)ServiceFlow と、このサービスが実行可能なロボットを選択し、最終的に決定.

[Step5] ユーザのサービス履歴抽出

ユーザの 4W 情報のうち who 情報で履歴 DB を検索し、who が一致したサービス履歴を 4W に準拠した形(いつ/どこで/どのロボットが/どのようなサービスを提供し/結果はどうだったか)で抽出.

[Step6] CroSSML の生成

Step4, 5 で選択されたロボットに ServiceFlow を実行させるためのコマンドとユーザのサービス履歴とを含んだ CroSSML を生成・送信.

### 3.4. 実証実験を通じた PF 拡張性の検証

上記の PF 開発と並行して、総務省委託研究「ネットワーク・ヒューマン・インターフェースの総合的な研究開発（ネットワークロボット技術）」において、H17~H20 年度の 4 年

Table 3.2 Research target & field experiments

Year	Research Target	Main Field Experiments
2004	Validation of basic function.	(Experiment in Laboratories)
2005	Task allocation according to robot status and ability.	Osaka Science Museum: -Souvenir picture service
2006	Sharing User's historical information to robots in different area. Cooperation with ubiquitous device.	CEATEC (Cutting-edge IT & Electronics Comprehensive Exhibition) 2006: -Exhibition guide service
2007	Cooperation with motion sensing system. Cooperation with electronic tag platform.	UNS (Ubiquitous Network Symposium.) 2007: -Health support service
2008	Cooperation with communication system. Integrated experiment.	UCW (Universal City Walk): -Guidance in a shopping mall

間に実施した実証実験を Table 3.2 に示す。各実証実験においては、開発機能の評価を行うとともに、接続するシステムの種類を拡張しつつ、多種類のアプリケーションを本 PF に実装した。以下では、主な実証実験の概略について説明する。

### 3.4.1 大阪市立科学館公開実験

本実験では、来場者に対する記念写真の撮影サービスの実証実験を行った (Fig. 3.9) 。入口で、入館者とロボットを写真撮影し、出口に近づいた際、タグ ID を読み取り、入館者にロボットが写真を手渡ししたり、呼びかけたりするという流れになっている。PF はロボットの稼動状況と機能を見て、空いているロボットの中でもっとも機能の高いロボットにサービスをアロケートする。

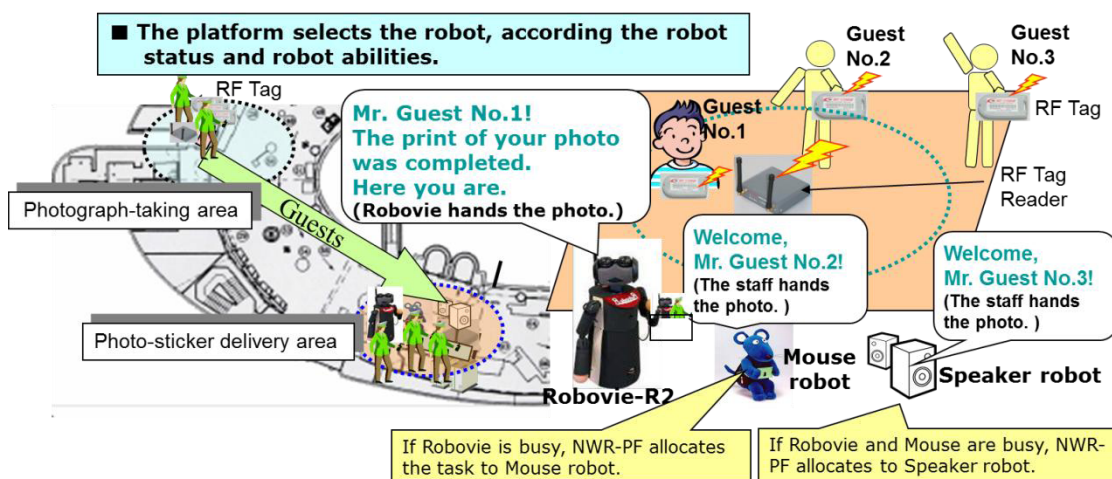


Fig. 3.9 Field experiment: in Osaka science museum (2005)

### 3.4.2 CEATEC2006

この実験では、ロボットによる展示説明サービスの実証実験を行った (Fig. 3.10) 。受付と3つの展示エリアに配置された、ビジブル/バーチャル/アンコンシャス型ロボットの情報と、u-Photo<sup>66)</sup>と呼ばれる写真撮影機能とネットワーク機能をもったユビキタスデバイスからの情報をもとに、PF で来場者の履歴を管理し、履歴に応じて説明内容を変えるデモを実施した。この実験により、複数エリアに分散した3種類のロボットの情報管理機能、ユーザの履歴情報管理機能、ユビキタスデバイスとの連携機能を確認した<sup>54)</sup>。

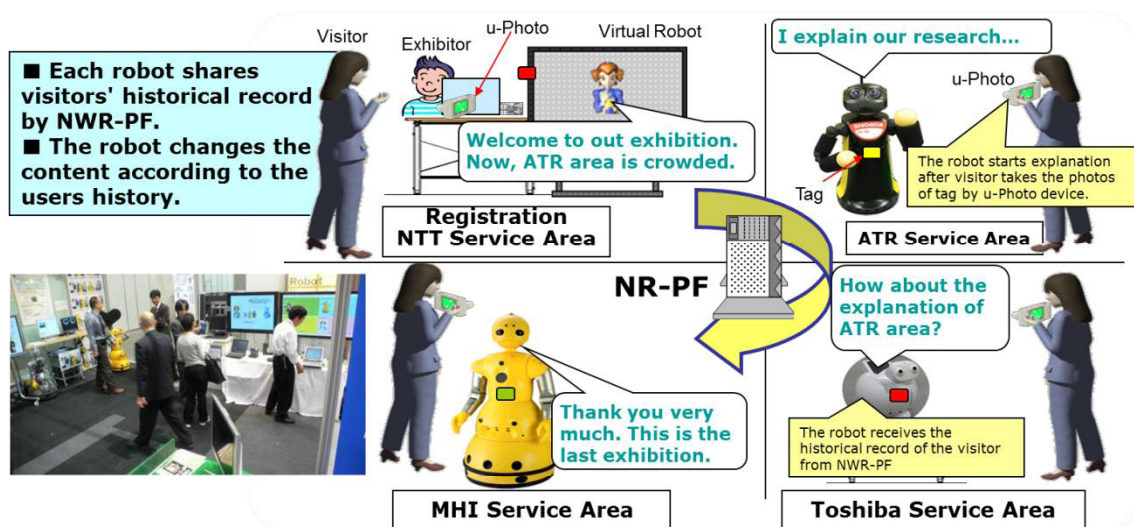


Fig. 3.10 Field experiment: in CEATEC2006 exhibition guide service

### 3.4.3 UNS2007

この実験では、ロボットによる健康支援サービスの実証実験を行った (Fig. 3.11)。計 13 台のビジブル/バーチャル/アンコンシャス 型ロボットの情報を管理するとともに、電子タグ認証 PF との PF 連携を行い、電子タグによる個人情報開示機能を実現している。また体操体験エリアでは、PF を介して画像を用いた行動認識システムの出力情報を共有し、体操状況に応じた先生ロボットと助手ロボットの動作切り替えを行う機能を確認した<sup>55)</sup>。

### 3.4.4 UCW 実証実験

この実験では、実際のショッピングモールでのロボットによる案内サービスの実証実験を行った (Fig. 3.12)。3 タイプのロボット、屋内外の行動認識システム、電子タグを利用し、屋外では、高度対話を行うロボットによる歩行中のユーザに対するショッピングモールの案内サービス、屋内では、ユーザの動作、ユーザが過去に説明を受けた内容を考慮した説明サービスやクーポン券の配布サービスを行った<sup>56) 67) 68)</sup>。また、本実験では、委託研究受託会社以外の企業のロボットと PF との接続を短期間で実現している。

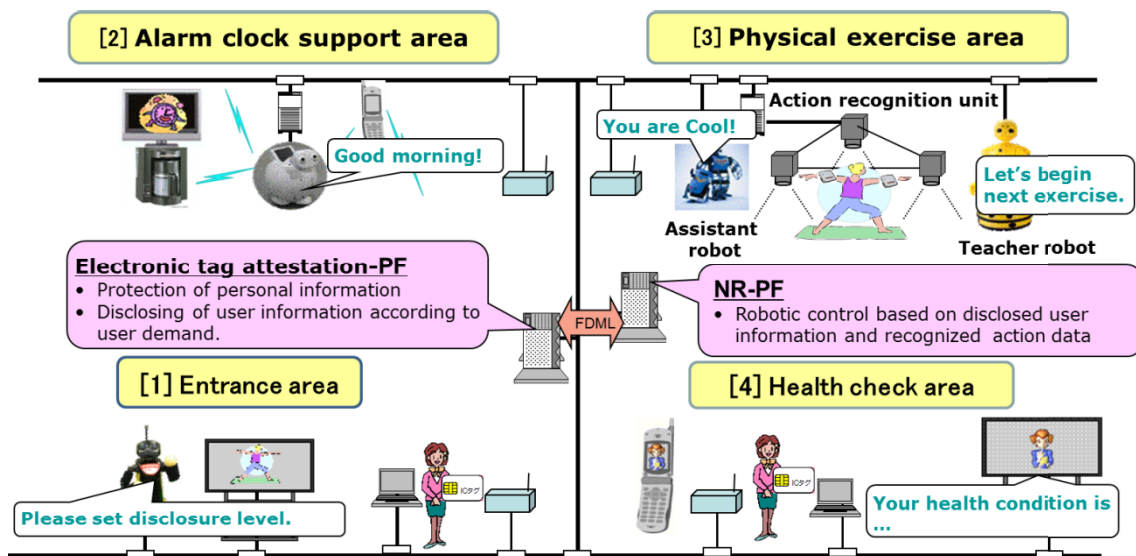


Fig. 3.11 Field experiment: in UNS2007-health support service

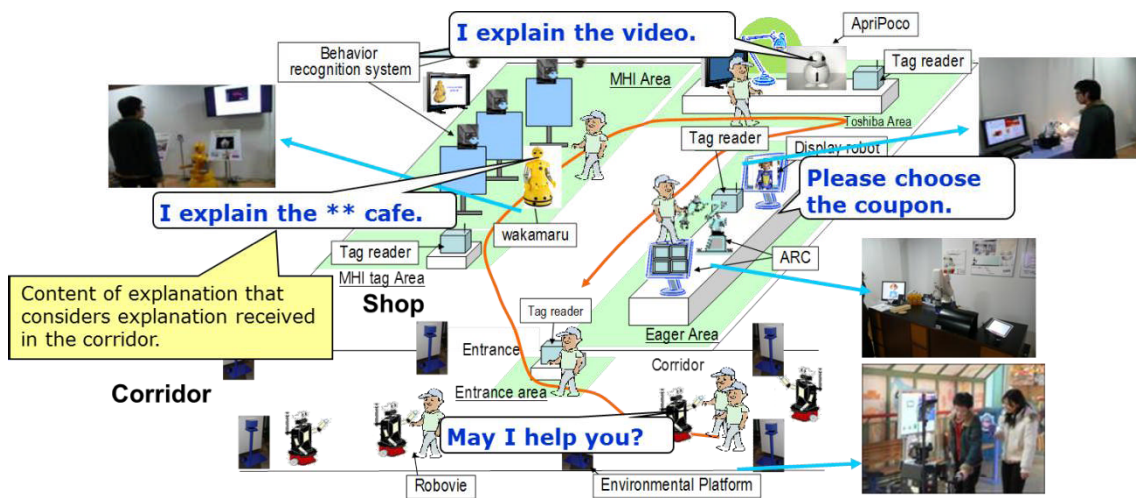


Fig. 3.12 Field experiment: in Universal City Walk (2008)

### 3.4.5 実証実験のまとめ

上記の実証実験を通して得られた主な結果をまとめる。

- ・ 現在国内で開発されている多種類のロボットを実際に PF に接続し， 3 タイプのロボットに対するタスクアロケーションやロボット連携等の PF の基本機能の確認を行った。

・開発 PF 上に、記念写真のサービスや、展示説明、健康支援、ショッピングモールでの案内サービスをインプリメントし、4施設で最大15システムをPFに接続したロボット情報サービスを実施した。

・対象をロボットのみに限らず、ユビキタスデバイスや電子タグ認証PFなど、近年進展の著しいシステムとの連携試験を行った。

・複数のエリアにおいて異なるサービスを同時に実行し、各エリアではロボットがリアルタイムでサービス提供可能であることを実証した。

・ロボットの稼働状態に応じて、柔軟なサービスアロケーションによって、代替ロボットが選択されサービス提供可能であることを確認した。

このことにより、本PFにより、広範囲のロボットやデバイス、他のPFと情報連携することが可能であり、多種類のサービスを実現できうらという、拡張性に関しての有効性を確認できたと考えている。Table 3.3に各実証実験で接続したロボットおよびシステムの数をまとめる。

Table 3.3 Robots and systems that were connected to NW-PF

Field Experiment	Visible Robot	Virtual Robot	Unconscious Robot	Others	Applications
Osaka Science Museum	3 Robovie (ATR) Mouse Robot (NTT) Speaker Robot	—	1 Tag Reader	—	Souvenir picture service
CEATEC (Cutting-edge IT & Electronics Comprehensive Exhibition) 2006	3 Robovie (ATR) Wakamaru (MHI) ApriAlpha (Toshiba)	1 Sign language robot [PC](NTT)	1 Floor Sensor System	3 u-Photo (Keio Univ.)	Exhibition guide service
UNS (Ubiquitous Network Symposium) 2007	5 Robovie (ATR): 2 Wakamaru (MHI) ApriAlpha (Toshiba) Vision (V-Stone)	2 Sign language robot [PC](NTT) Sign language robot [Cellular](NTT)	6 Motion Recognition System (MHI) Acceleration Sensor Tag Reader: 4	1 Electronic tag PF (NTT Com)	Health support service
UCW (Universal City Walk)	7 Robovie (ATR): 4 Wakamaru (MHI) ApriPoco (Toshiba) ARC (Eager)	2 Sign language robot [PC](NTT) Sign language robot [Cellular](NTT)	6 Motion Recognition System (MHI) Environmental information structuring PF (JST-ATR) Tag Reader: 4	—	Guidance in a shopping mall

### 3.5 実証実験を通じた PF 化による開発効率の検証

本節では、ロボットをネットワーク連携させる機能を PF 化したことによる開発規模の観点からの効率化の効果について、検討した結果を述べる。

ここでは、PF 化して開発した各種実証実験システムにおける実際の開発規模と、プラットフォーム化せずに、個々のシステムを個別に開発した場合の想定の開発規模とを比較する。

①プラットフォーム化した場合の開発規模と、②個別開発した場合の想定開発規模の算出は以下の条件で行った。

1. ロボット間での情報連携を行う場合に、明らかに基本となるサーバでのデータ受信機能、データ蓄積機能等は、①②とも共通とする。またこの部分の開発規模（step 数）を基本開発規模の一単位とする。
2. ①の開発規模は、最終の開発プラットフォームの開発規模（上記 1 の共通部分を除く）に、それ以前の開発のみで利用した個別の開発規模の実績値の合計とする。
3. ②の開発規模は、①のステップ数を機能ごとに分割集計し、個別開発の構成で必要な機能を積み上げて集計する（上記 1 の共通部分を除く）。
4. ロボットのコンテンツは開発規模に含めない。
5. 開発期間は、2004 年度から 2008 年度の開発（Table 3.2 参照）を対象とした。

Table 3.4 に、結果をまとめる。

Table 3.4 Comparison of development scales

	①Development that uses platform	②Development of each experiment
<b>Basic part</b>	<b>1</b>	
<b>Application part</b>	<b>2.4</b>	<b>7.0 (4 systems) 1.75( / 1 system )</b>

本研究では、開発プラットフォームを用いて前節で紹介した実証実験を行っている。実証実験は 4 年間にかけて行った。各年度で複数回の実証実験やデモを行った場合も、年度内では大きく機能やアプリケーションを変更していないことから、上記の結果は、ほぼ 4



種類の開発をプラットフォーム化した場合と、個別開発した場合の比較と考えられる。①プラットフォーム化開発規模で開発したものは、この4種類の実証実験の機能の実現が可能なシステムであり、②個別開発時の想定開発規模は、4種類の実証実験の機能を、それぞれ個別開発で行った場合の合計値となっている。

そこで②の開発規模を4で割り、1種類の実証実験システムを個別に開発した場合の平均的な想定開発規模を求めると、 $7/4 = 1.75$ となる。この結果から、今回の実証実験の範囲の中では、1種のシステムのみを構築する場合には、 $2.4 > 1.75$ となり、個別開発の方が開発規模が小さくなると想定されるが、2種以上であれば $2.4 < 3.5 (=1.75 \times 2)$ となり、プラットフォーム化による開発効率化が有効であると考えられる。開発効率化の具体的な効果としては、システム構築の初期費用の低減化、短期間での高信頼なシステム構築に寄与できる。またシステム保守運用時にも、PF化により、一定数の技術者が個別開発の場合と比較してより多い種類のサービスシステムに対応することが可能となる。以上の結果は、ロボットの実用導入・運用における低コスト化という課題に対して、PF型のシステム構築が課題克服の一助となりうる可能性を示唆するものである。

### 3.6 まとめ

公共空間でのロボットによる案内等のユーザ支援サービスを想定し、様々な種類のロボットやセンサからの情報を、ネットワークを介して情報共有するPFを提案した。このようなサービスでは、施設を利用するユーザの運動を計測するセンサは、計測すべきユーザの動作や、施設の広さや明るさなど環境に適用できる形で多種多様なセンサが利用される。また、サービスを提供するロボットも施設的环境によって適切なロボットを利用する形態となる。そのようなセンサ情報を扱うユーザ支援システムに対して、XML技術を導入して情報を柔軟に記述し、階層構造を持ち基本的な共通的な情報管理機能が可能なPFを設計した。このPF上にロボットによる記念写真サービス、展示説明、健康支援、ショッピングモールでの案内サービスをインプリメントし、実証実験を通じて以下の結果を得た。

- ・開発PF上に、複数の案内サービスをインプリメントし、4施設で最大15システムをPFに接続したロボット情報サービスを実施した。
- ・システム開発工数の観点からPF化した開発規模と各実証実験システムを個別開発した場合の想定開発規模を比較し、複数システムを構築する場合にPF化による開発効率化が期待できることを明らかにした。

提案PFは、支援機械システムのフレームワークの階層構造と各階層における機能分担、主要な情報インタフェースの設計指針を具現化したものである。上記の実際の複数施設に

おける実証実験により，支援機械システムのフレームワークの多種センサを接続した複数ロボット情報サービス構築への有効性を確認した．

## 第4章 携帯端末インフラストラクチャを活用したセンサ

### 情報収集による歩行運動推定，歩道状況推定への応用

#### 4.1. はじめに

本章では，現在の携帯端末インフラを活用したアプリケーション開発を対象に，第2章の機械系の課題を解決する技術，第3章の情報系の課題を解決する技術の双方を適用したフレームワークを提案し，医療分野・ヘルスケア分野等への応用について述べる．まず，Fig. 4.1 に示すように産業用ロボットで作業点におけるマニピュレータの運動やワークの状況のセンシングを高度化する作業点モデリングの考え方を，歩行者の運動や歩道の状況センシングに適用し，相補利用やユーザへの提示，相関性の利用を可能にしたフレームワークと位置付ける．さらに第3章で示した情報システムのフレームワークを導入し，携帯端末上でのセンサ情報収集の特性を考慮したシステムを提案する (Fig. 4.2) ．次に，提案システムの具体的なアプリケーションとして，ユーザの歩行モニタリング機能，歩道路面推定等を構築し，段階的にその応用性の検証と並行して，システムの有効性の検討を行う．

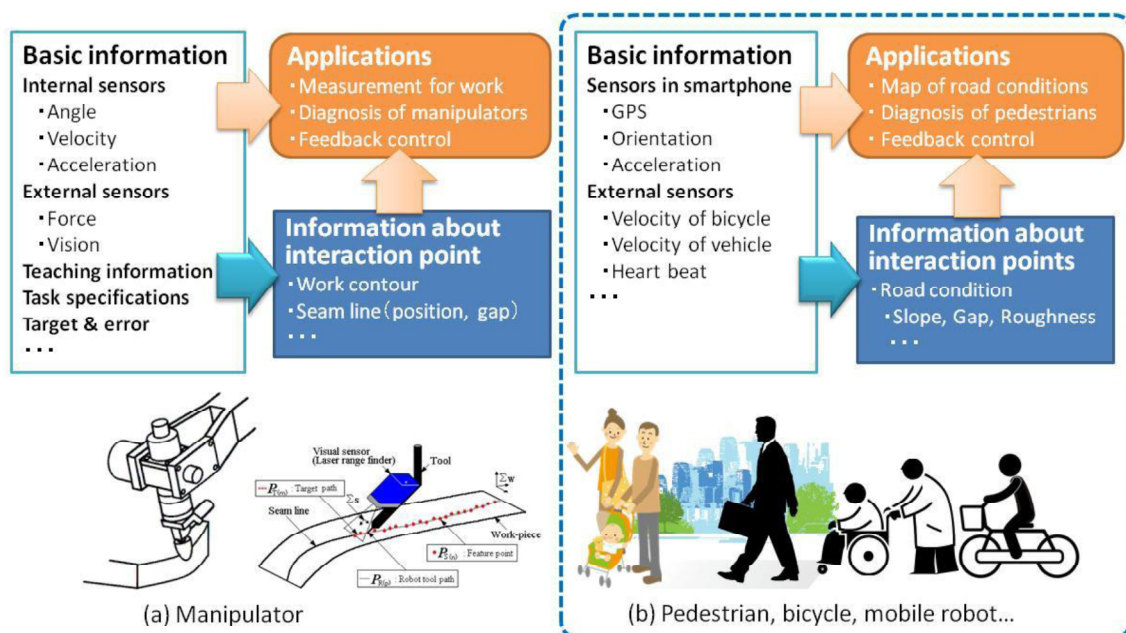


Fig. 4.1 Basic framework of interaction point modelling

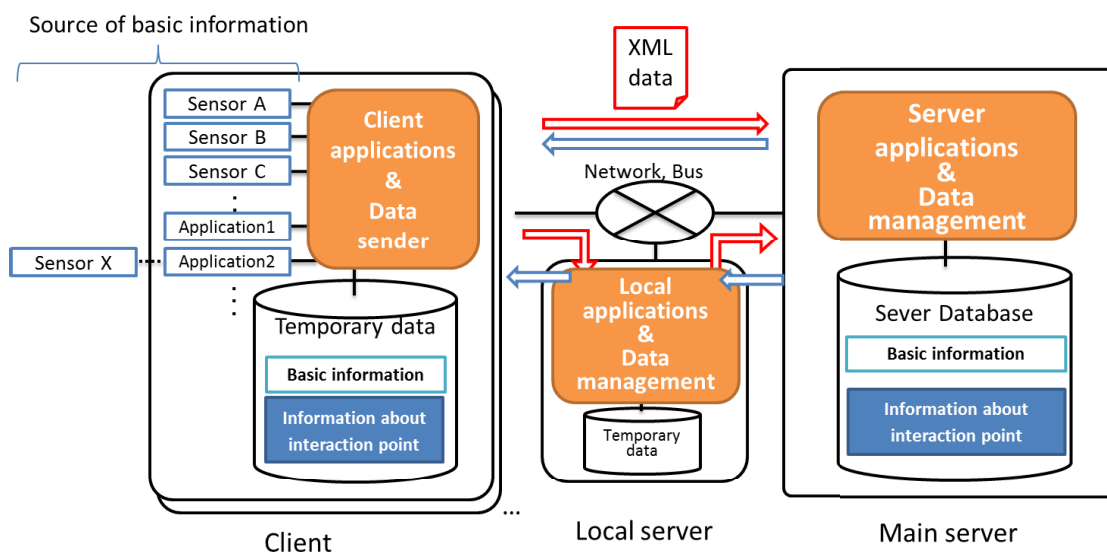


Fig. 4.2 Basic framework of information system

近年，クラウド技術やスマートフォンの飛躍的な普及に伴い，日常の活動の中で発生する個人の活動の記録，例えばインターネットやアプリケーションの操作履歴やGPS情報などのいわゆるライフログを，ネットワークを介して収集，蓄積するという環境が整ってきた．その応用例としては，蓄積したデータから個人の嗜好や生活パターンを推定して，パーソナライズした情報サービスを提供するものなどが提案されている<sup>69)</sup>．また，身の回りのセンサから得られたユーザに関する情報を蓄積して，そのユーザに適したサービスをロボットが行うシステムの研究等<sup>70)</sup>も進められている．

本章では，このようなユーザの携帯するセンサ等の情報を効果的に活用可能なシステムの構築を目指し，主として携帯端末のセンサ情報を対象とした情報収集方式を導入したシステムを提案する．具体的な適用先としてヘルスケア・医療分野，公共分野への応用を想定にした，加速度センサ等による歩行概要モニタリングおよび歩道路面状況の情報収集システムを例に，一連の検証実験に基づき，携帯端末の特性や，実験のフェーズに応じた蓄積情報の変更・拡張への対応という観点から提案システムの有効性を検討する．

歩行概要モニタリングは，作業点モデリングの考え方を適用して人間側の運動状態を把握するものであり，第2章のセンサフィードバック型マニピュレータの設定状態を把握する位置づけと同様のアプリケーションと考えられる．また，歩道路面状況の情報収集はベーカーや車椅子のセンサ情報から歩道路面状況を把握するものであり，センサフィードバック型マニピュレータによるワーク形状やワーク状態を把握するケースと対比するアプリケーションとなっている．

一方、上述のように、主としてスマートフォン等の携帯端末を用いて情報を収集するためには、これまでの専用のセンサを用いた情報収集システムの開発と比較した場合、以下のような考慮すべき点がある。

- ① 携帯端末上で複数のソフトウェアプロセスが動作するなどの原因で、ひとつのセンサのサンプリング周期が一定とならない場合がある。また、ひとつの携帯端末で複数センサの情報を取得できるが、個々の情報のサンプリング周期は異なる場合がある。
- ② 携帯端末センサで計測した情報に加えて、主観的な状態や、付属しているセンサのみでは計測できない情報を、ユーザが文字入力や候補選択することで、センサ情報を補うことやセンサ情報にラベリング付けを行うアプリケーションの設計が可能である。
- ③ 市販される携帯端末の商品サイクルが早く、取得可能な情報の種類の変化や性能の変化が頻繁に起こる。

本章では、上記のような特性を考慮して効率的かつ効果的に情報を収集・蓄積する技術を基に、提案フレームワークを適用した実験例を示す。

これまでの研究例で、複数のセンサデータを扱い、DB上で管理して利用するという枠組として、屋内に設置された多種多数のセンサ情報をXML技術を活用して管理する機能をもつロボティックルーム<sup>71)</sup>や、センサの発見や位置情報の取得に主眼をおいた、SensorML<sup>72)</sup>等が提案されている。SensorMLでは、広く分布したセンサの特定の地域を区切りに、人口や汚染状態などの情報を収集する目的で利用例がある。また筆者らは、第3章で示したようにセンサやロボットからの情報を製造現場で用いられる機械やセンサの情報収集を目的とし、XML形式をベースにユーザやロボットの4W(who/where/when/what)情報という形で抽象化することで、多種類のセンサ情報を扱ったロボットによる案内システムを構築した。ここでは限られた形に抽象化した情報のみを扱うことでシステムを効率化するというアプローチがとられている。これらの方式では、特定の試験環境に、特定の情報を計測する目的で設計・配置した複数のセンサの情報を蓄積して、それを応用した実例としてとらえることができる。また、これらは、データを収集する側があらかじめ仕様が明確なセンサを主体としてデータ収集のためのシステムを構築した例と言える。

一方、ユーザが所有する携帯端末をセンサとして活用した例としては、第1章で述べたように加藤ら<sup>29)</sup>がスマートフォンとセンサを活用したリモート見守りシステムを提案して、応用例を示している。この例では、スマートフォン上のセンサをXML形式で記述するとともに、これらの情報を用いて歩行時には行動推定、運転時には運転状態をサーバに送信し、高齢者等を遠隔で見守るシステムを構築している。

上記の研究例では、あらかじめ設計された一定の条件の中のセンサを対象に、情報を収集・蓄積しその応用を検討したものである。これらの実験検討ではユーザから実際に情報を収集して、実用化を目指すための取り組みが始まった段階であり、具体的な携帯端末の特性への考慮や、基礎的な実験から実用フェーズへの検証へ段階的に対応するためのシステムの拡張性という観点からの評価検証の例は見当たらない。今後、ユーザが所持する携帯端末や携帯端末に接続されたセンサの情報を活用したサービスは増加するものと考えるが、初期段階の実験から実用化に至る過程で効率良く活用可能な情報収集システムが重要になると想定している。

そこで、本章では、スマートフォンに代表される普及した携帯端末のセンサを活用する基盤を構築することを主眼に、製造現場で用いられる機械やセンサの情報収集を目的とした第3章で示したFDML技術<sup>60)61)</sup>をベースに、各種の情報を有効に組合せて情報収集可能なシステムを提案する。次に、提案システムの具体的なアプリケーションとして、ユーザの歩行概要のモニタリング機能等を構築し、段階的にその応用性の検証と並行して、システムの拡張性の検討を行う。

まず、第一段階の実験では、基礎的なデータ蓄積アプリケーションを構築し、携帯端末を身に付けたユーザの歩行時の加速度・GPS計測から得られる歩行の特徴に関する基礎検討について述べる。次の段階では、医療やヘルスケア分野への応用を想定し、歩行の概略を表す特定の特徴量の計測に関して専用のセンサから得られる情報と、携帯端末のセンサから得られる情報の比較により適用可能性を検討する。さらに、具体的にリウマチ疾病の状態の定量的な把握を目的として、そのために必要となる計測データ、ユーザからの入力データを蓄積するアプリケーションを構築して実験を行うことで、提案システムの応用性、携帯端末の特性や実験の進展に伴う拡張性に視点をいたした有効性を検証する。

さらに、利用するセンサ情報を、ベビーカーや車椅子、キャリングケースの運動情報に拡張し、歩道利用者や歩道管理者へのシステム支援を想定した、歩道路面状況の収集システムへの応用のコンセプトと基礎的なデータ分析例を示す。

## 4.2. 提案システム

### 4.2.1 システム概要

Fig. 4.2 に情報システムの概要構成を示す。基本的な仕組みとしては、第1章で示したclient, local server, main serverの階層構造を持たせ、スマートフォンなどユーザが携帯する端末で、加速度およびGPS等の計測したセンサ情報やアプリケーションで処理された情報を一時的に蓄積し、ネットワークが接続されている状態で適切なタイミングで端

末に一時的に蓄積したセンサ情報等を local server, main server に送信する。送信された情報は最終的に main server に蓄積・処理され、蓄積データの利用時には main server のアプリケーションプログラムとデータ管理部を介して利用される。

携帯端末からサーバへの送信される情報は、FDML 形式で記述されている。第3章で述べたこの記述方式は多様なセンサ情報を統一的に記述するために開発した XML 形式のもので、新たなセンサ情報が取得できる環境になった場合や、ユーザが携帯端末に入力した情報を送信する必要があるとなった場合にも柔軟に対応できる構成となっている。サーバ側 (local server, main server) では、FDML 形式の情報であることを前提に情報管理を実行する管理部が携帯端末から送信されてきた情報を適切にデータベースへ蓄積するとともに、アプリケーションの要求に応じてデータベース内の情報を利用できるように管理する。

携帯端末側とサーバ側のデータベースでは、センサデータやユーザが入力したそのままの基本情報と計算処理した高次の作業点情報を扱う。携帯端末側のアプリケーションでは、センサ情報を読み込み、必要に応じて基本情報からの特徴量情報の計算を実行したり、ユーザが入力した情報等を合わせて処理し、そのデータを管理する。

携帯端末側とサーバ側の双方にアプリケーションを構築する部分を具備しているが、これを利用することにより、目的とする応答速度や各コンピュータパワーに応じたアプリケーションの適切な機能分担を扱えるようにする。

上記の構成と、前節であげた携帯端末センサの特性として配慮すべき下記の点への対応を考える。

- ① サンプル周期が一定でなく複数センサが混在する。
- ② ユーザ入力を併用したアプリケーション設計が可能である。
- ③ 取得可能な情報種類の変化や性能変化が頻繁に起こる。

FDML 技術の導入はデータ記述の観点から①②③への対応を図るものである。また、携帯端末上のアプリケーション構築により②への対応を具現化し、主観的な状態や、付属しているセンサのみでは計測できない情報の取得を実現するものである。さらに携帯端末側とサーバ側の双方にアプリケーションを構築する部分を具備していることから、携帯端末の性能向上に応じてサーバ側の負荷を携帯端末側に機能分担変更するといった③への対応が可能となる。

## 4.2.2 複数アプリケーションの構築

上記のシステム構成で、複数のアプリケーション構築を考える場合、サーバ側のデータ管理部を共用化し、携帯端末のソフトウェアと、サーバ側のアプリケーション部分の構築のみで効率的に対応することが可能となる。また、ほぼ同一のアプリケーションであっても、端末機種の変更によるサンプリングタイムなど計測性に変動がある場合や、新たに情報を付加してアプリケーションとしての機能を向上させる場合にも、柔軟に対応できると考えられる。さらに、いままでサーバ側で実行していた基本情報から特徴量情報への変換処理を、クライアントで実行するなどのように機能分担を変更する場合を考えると、該当するクライアントとサーバのアプリケーションのみを変更することで、サーバ側のデータベースを変更することなくデータ収集の機能分担を変更することができる。

## 4.3 歩行モニタリングへの適用

本節では、提案システムの具体的なアプリケーションとして、ユーザの歩行モニタリングの機能を構築し、段階的にその応用性の検証と並行して、システムの有効性の検討を行う。まず、第一段階では、携帯端末を身に付けたユーザの歩行時の加速度・GPS計測から得られる歩行の特徴に関する基礎実験を目的に、アプリケーションを構築した。次の段階では、医療やヘルスケア分野への応用を想定し、専用のセンサから得られる情報と、携帯端末のセンサから得られる情報の比較を行う。さらに、具体的にリウマチ疾病の状態の定量的な把握を目的として、そのために必要となる計測データ、ユーザからの入力データを蓄積するアプリケーションを構築して実験を行うことで、提案システムの応用性、携帯端末の特性や実験の進展に伴う拡張性に視点をおいた有効性の検証を行う。ここでは、個々の実験の結果についての概略を述べ、一連の実験を通しての提案システムの応用性、拡張性について考察を行う。実験の詳細については、引用文献<sup>88)89)90)</sup>を参照されたい。

本章で実験の対象となる関節リウマチ (Rheumatoid Arthritis) は、手足の機能に大きな障害をもたらす慢性疾患であり、患者の数は日本全国で少なくとも 60 万人以上と推定されている。関節リウマチは、全身性多発性進行性関節炎を主症状とし<sup>73)</sup>、様々な慢性炎症性疾患の中でも特に関節リウマチによる関節破壊は長年に渡り、重篤な運動機能障害や日常生活活動機能障害に陥る社会問題となっており、その対策は急務とされている<sup>74)</sup>。関節リウマチの発生原因は不明で、治療方法もいまだ確立されていない難病の一つであるが、近年、関節リウマチの薬物治療および手術治療はめざましい進歩をとげ、適切に治療を行うことで、日常生活に支障をきたさない程度に安定した状態を保つことが現実的になりつつある。関節リウマチの治療においては、患者の日々の健康状態を的確に把握する必要が



あるが、現在広く用いられる評価法は、多くを患者の自覚的症狀に基づいており、多覚的・客観的評価に乏しく、また評価がきめ細やかとはいえない。そのため、少しの変化や経時的な変化を評価することは困難である。そこで、運動や活動、移動といった日々の状態を鋭敏に評価することのできる、客観的・定量的・経時的な評価方法が求められている。

一般的な生活の質 (QOL) を示す指標として、SF-36 (Short-Form Health Survey) <sup>75)</sup> や EQ-5D (Euro-QOL) <sup>76)</sup>、日常生活動作 (ADL) の指標として、Barthel Index (BI) <sup>77)</sup> や FIM (Functional Independence Measure) <sup>78)</sup>、日常生活における生活圏を判定する指標として LSA (Life Space Assessment) <sup>79)</sup> などがある。

一方で、関節リウマチに特化した患者の ADL の指標として、mHAQ (modified Health Assessment Questionnaire) <sup>80)</sup> や AIMS (Arthritis Impact Measurement Scales) <sup>81)</sup> などが用いられている。関節リウマチの機能障害度としてはクラス分類 <sup>73)</sup> が最も有名で用いられている。また、痛みの評価尺度として VAS (Visual Analogue Scale) <sup>82)</sup> やフェイススケール <sup>83)</sup> などが用いられる。

現段階ではこれらの日常活動性の指標は自己申告を中心とする主観評価であり、測定機器等による客観的な評価が困難である。また、関節リウマチ患者においては、関節の変形など、手指の動作に障害を有する患者も多く、そのような場合には筆記用具を使用してデータを記録することは患者に対する負担が大きい。そのため、関節リウマチ患者の客観的な日常活動性を、例えば測定機器を身につけているだけで自動的に記録できるような、患者負担が小さく容易に記録できる手段が望まれている。関節リウマチの病勢の評価指標としては、痛みのある関節数・腫れている関節数・血液データ中の赤沈または CRP・患者の主観的な痛みの程度・患者の主観的な体調等から算出される DAS28 (disease activity score 28) <sup>84)</sup> が最も用いられているが、これらの計算は複雑である。計算がより簡便で関節リウマチの寛解の評価として優れるものとしては、圧痛関節数・腫脹関節数・患者自身による評価 (VAS 方式)・医師による評価 (VAS 方式) から算出する CDAI (clinical disease activity index) <sup>85)</sup> および、CDAI の項目に CRP を加えて算出する SDAI (simplified disease activity index) <sup>86)</sup> など数多くの指標が挙げられる。

以下では、携帯端末センサから得られる情報をもとにした具体的なリウマチ疾病の状態の定量的把握を目的として、そのために必要となる計測データ、ユーザからの入力データを蓄積するアプリケーションを構築して実験を行うことで、提案システムの応用性、携帯端末の特性や実験の進展に伴う拡張性に視点をおいた有効性の検証を行う。

#### 4.3.1. 加速度・GPSによる歩行計測の基礎実験

まず、第一段階の実験として、携帯端末の加速度・GPS計測による基礎的な歩行モニタリングについて述べる。ここでは、携帯端末を胸ポケットに入れておくというユーザに負担のかからない形態で計測した加速度・GPSにより、歩行に関する概略の情報が得られるかを確認することを目的とした<sup>87)</sup>。

被験者は本研究に従事する40代男性会社員1名。計測する歩行形態としては、通常歩行と、右脚の膝および足首に高齢者疑似体験装具を装着して固定し、擬似的に右脚負傷状態とした歩行の2種類の歩行を、約3 [km]の同一区間にて計測した。加速度とGPSの計測周期は3 [minute]とし、加速度は一回の計測周期でサンプリング周波数目標値が約40 [Hz]、15 [sec]間の計測を実施した。計測用端末 (Docomo社製HT-03A)を左胸ポケット内に入れた状態で計測した。

Fig. 4.3は、GPSにより得られる歩行計測地点に、加速度のノルム値をスペクトル分析して得られるピーク周波数を歩行周期として表示をした例である。スペクトル分析には、計測データを30msecで線形補間した256サンプルのデータを用いた。図中のslowは1.7 [Hz]未満、midは1.7 [Hz]以上2.0 [Hz]未満、fastが2.0 [Hz]以上の歩行周期として図示している。図より通常歩行時と比較して、右脚負傷 (擬似) 時の方が歩行開始から早い段階で、歩行周期が遅くなっていることが確認できる。

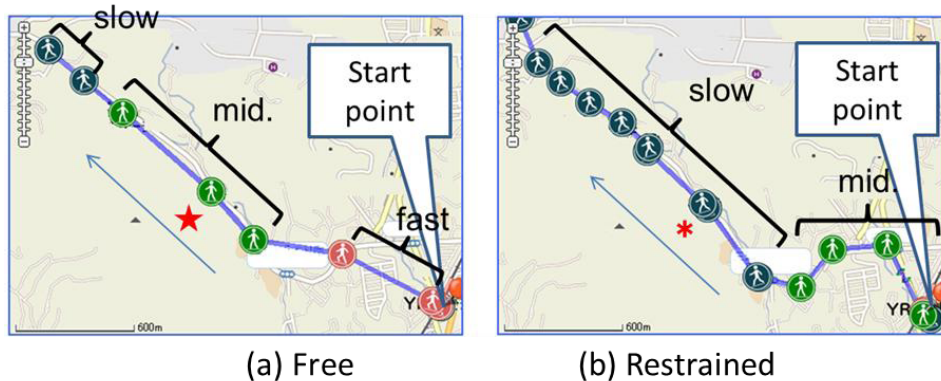


Fig. 4.3 Walking cycle information on the map

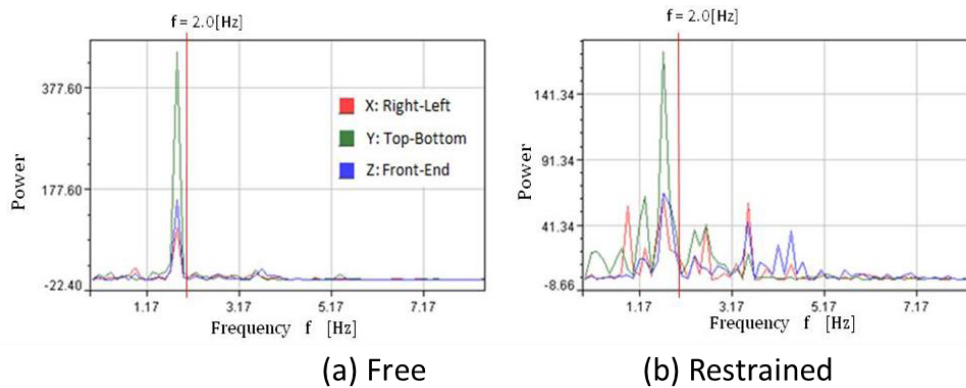


Fig. 4.4 Power spectrum of acceleration

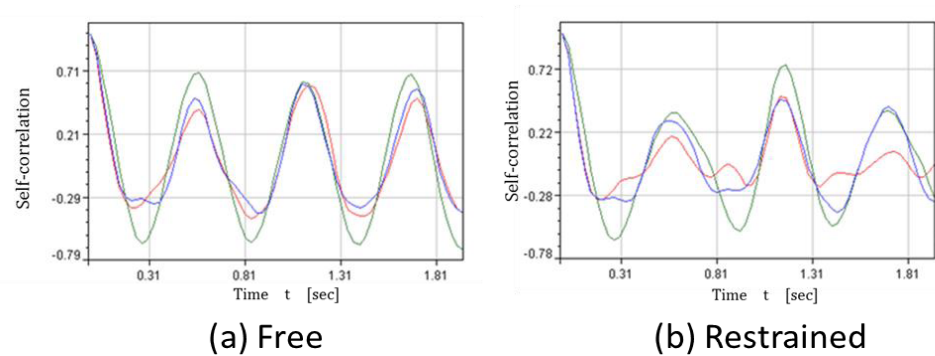


Fig. 4.5 Self-correlation coefficient of acceleration

Fig. 4.4 は、ほぼ同一地点 (Fig. 4.3 (a) ★と Fig. 4.3(b) \*の地点) での通常歩行時と右脚負傷 (擬似) 時の加速度情報のパワースペクトル図を示す. 通常歩行時が 2 [Hz] 弱の歩行周期成分のみが際立った形になっているが, 右脚負傷 (擬似) 時のパワースペクトルは歩行周期以外の周波数成分の増加が確認できる.

Fig. 4.5 は、Fig. 4.4 で用いた加速度の自己相関を比較したもので、計測データを 30 [msec] で線形補間した 256 サンプルのデータを用い、図の横軸は波形をずらした時間を表している. 通常歩行時の自己相関では、一歩にかかる時間に相当する約 0.5 [sec] 毎に自己相関が高い値になっているが、右脚負傷 (擬似) 時のデータでは、一歩にかかる時間約 0.5 [sec] ずらした自己相関は低く、二歩にかかる時間約 1.0 [sec] ずらした自己相関が高い値をとっている. このことは右脚負傷 (擬似) 時の歩行では、左右の足のどちら足で立脚しているかで上体の加速度波形が変わっていることを示し、左右のバランスが取れていない歩行であることを示している.

以上の結果より、携帯端末を胸ポケットに入れておくというユーザに負担のかからない形態で計測した加速度およびGPSの情報により、歩行周期の時間的変化や歩行時の左右のバランスの傾向をみる情報を取得できる見通しを得た。このシステムでは携帯端末の特性に対応し、屋内外の歩行の長期的かつ継続的な計測が可能であり、ヘルスケアや医療分野での継続的な効果測定などへの応用が期待できるとして実験を進めた。

#### 4.3.2. 携帯端末加速度センサによる歩行計測の妥当性

次の段階として、臨床に用いられている加速度計と比較した場合のスマートフォンによる歩行解析の妥当性に関する検証実験を行った<sup>88)</sup>。評価の観点としては、一步一步毎の正確な加速度情報の計測という観点ではなく、一定の時間内での歩行における概略的な歩行の特徴を表す指標を計測するという観点での歩行解析への利用ということに主眼を置き評価を行った。対象は、健常若年成人30名(平均年齢 $20.9 \pm 2.1$ 歳)。歩行計測機器にはA:臨床に用いられている単体の小型三軸加速度計(WAA-006; ATR-Promotions社製)、B:加速度センサ内蔵スマートフォン(Xperia S0-01B; Android 2.1; Sony Ericsson社製)の2種類を用意し、それらを同時に被験者の腰部に固定した。被験者には25[m]歩行路において快適歩行を行うよう教示した結果にて歩行指標の比較を行った。専用の各速度計のサンプリング間隔は30[msec]で設定し、スマートフォンの加速度センサは最高速のサンプリング間隔をソフトウェアで設定し、計測結果として得られた時刻を基に30[msec]間隔で線形補間した。

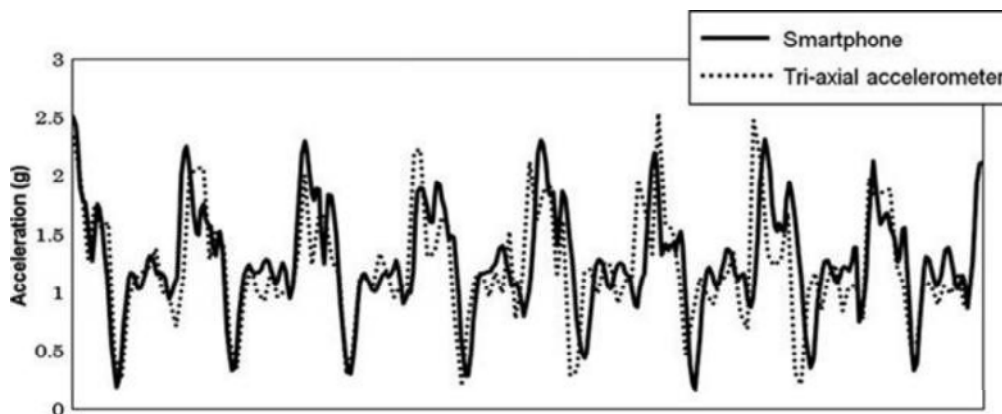


Fig. 4.6 Acceleration waveforms of the smartphone and tri-axial accelerometer

Fig. 4.6 に歩行時のスマートフォンと専用加速度センサによる計測結果の波形の例を示す。波形ではスマートフォンでは、遅れやピーク値の差が見られるが、歩行の概要を評価する可能性の検討として歩行指標に関する評価を行った。

歩行指標には、歩行ペースの指標としてパワースペクトラムピーク周波数 (PF) , 歩行の動揺性の指標として Root Mean Square (RMS) , 左右対称性の指標として自己相関係数第一ピーク値 (AC) , 歩行周期の変動性の指標として変動係数 (CV) を算出した。計算にはそれぞれ歩行中の 256 サンプル (7.68[sec]) のデータを使用した。実験の結果、専用のセンサとスマートフォンセンサで、各歩行指標の妥当性の検討では、PF:  $r=0.99$ , RMS:  $r=0.89$ , AC:  $r=0.85$ , CV:  $r=0.82$  と、いずれも有意に強い相関関係がみられた ( $P<0.01$ ) 。

以上より、概略的な歩行の特徴を表す指標を計測するという観点で、今回の実験で用いたスマートフォン搭載の加速度センサから算出される歩容指標は相関性が高く、従来用いられていた加速度センサとほぼ同等の傾向を示すことが確認できた。すべてのスマートフォン搭載センサで十分な性能があるということは確認できてないが、利用する機種に対して事前に上記のような評価をしておくことで実際の被験者実験に向けた検証が可能となると考えている。

#### 4.3.3. 関節リウマチ患者を対象とした実験例

関節リウマチ患者は関節の痛みや変形などの要因によって異常歩行を呈する 경우가多く、日常生活における活動を制限する主要因になっている。また、この異常歩行の程度は日々刻々と変化する関節痛に依存することから、簡便に歩容をチェックするシステムが求められている。そこで、スマートフォンを用いて関節リウマチ患者の歩容が評価可能であるかについて検証を行った<sup>89)</sup>。

対象は京都大学医学部附属病院リウマチセンターに外来通院中の関節リウマチ患者 39 名および、性別・年齢を揃えた健常者 20 名である。スマートフォンに内蔵された加速度センサから得られた歩行時の加速度データから、歩容指標として上述の PF, AC, CV を算出した。これらの歩容指標と、疾患活動性や日常生活活動能力などの患者の状態を示す 4 つの臨床指標として、DAS (Disease Activity Score) 28-CRP, mHAQ, 歩行能力, 歩行速度との相関関係を求め、妥当性検証を行った。DAS28-CRP は、疼痛・腫脹関節数, 体調を 0~100 までの主観評価で表した VAS 値, および血液検査の CRP 値の結果, 疼痛・腫脹関節数によって求められるリウマチ患者の状態を表す数値である。mHAQ (体調に関する数個の質問の回答内容を点数化したもの) は患者の日常生活活動能力を評価する指標である。歩行能力には、日本足の外科学会 RA 足部・足関節判定基準にある歩行能力で、「全く支障なし」を 20 点、「屋外歩行は可能であるが、家の周囲の散歩程度」を 10 点、「屋内歩行は可能であるが、家外歩行は不能」を 5 点、「歩行不能」を 0 点として数値的に評価する指標を用いた。上記の歩容指標と臨床指標の相関性の検証結果を Table 4.1 に示す。PF に対する歩行速度, AC に対する 4 指標, CV に対する DAS28-CRP, 歩行能力, 歩行速度はともに臨床指標との相

関が認められ、スマートフォンによる歩容計測は妥当性を有していることが示唆された。上記の実験により、関節リウマチ患者の歩行計測の結果から患者の活動性を推定できる可能性が示された。

Table 4.1 Spearman's correlation coefficients for gait parameters and clinical parameters

	DAS	mHAQ	Walking ability	Walking speed
Peak frequency	-0.193	0.075	-0.247	0.280*
Autocorrelation	-0.283*	-0.368*	0.257*	-0.704**
Coefficient of variance	0.334*	0.155	-0.420*	0.608**

\*p<0.05, \*\*p<0.01

次の実験としては、京都大学医学部附属病院リウマチセンターに外来通院中の関節リウマチ患者 65 名（平均年齢 63.1±11.9 歳）を対象とし、リウマチ疾患活動性の評価として、DAS28-CRP を測定した<sup>90)</sup>。また血液検査の結果を除いた疼痛・腫脹関節数、体調、mHAQ に対応する質問回答を患者自身が自己入力するスマートフォンアプリケーションと、3 軸加速度センサを用いた歩行計測アプリケーションを作成した<sup>91)92)93)</sup>。歩行に関しては、ピーク周波数、自己相関係数（AC）、変動係数を歩行指標として算出し、データを蓄積可能なシステムとした。患者にスマートフォンを貸与し 3 ヶ月月間、自己入力、歩行測定を実施した結果を基に、DAS28-CRP を従属変数、スマートフォン上での取得データを独立変数として重回帰分析（ステップワイズ法）を行い、回帰式から DAS28-CRP 予測式を作成した。

分析の結果、疼痛関節数（ $\beta = 0.58$ ,  $p < 0.001$ ）、mHAQ（ $\beta = 0.26$ ,  $p < 0.05$ ）、歩行指標のうち AC（ $\beta = -0.16$ ,  $p < 0.05$ ）が DAS28-CRP を有意な関連要因として抽出された（ $R^2 = 0.67$ ）。回帰式より作成した DAS28 予測式は DAS28-CRP と有意に高い相関関係を示した（ $\rho = 0.82$ ,  $p < 0.001$ ）。

上記により、スマートフォン上で自己入力した疼痛関節数、mHAQ と測定した歩行指標より作成した DAS28 予測式により DAS28-CRP を予測できることが示された。スマートフォンという日常的な機器を用いることで、関節リウマチ患者は日常生活においても疾患活動性を知ることができ、自身のセルフケアを支援する指標として有用であると考えられる。なお本実験は、京都大学大学院医学研究科倫理委員会にて承諾を得た後に実施した。

#### 4.3.4. 一連の実験における提案システムの拡張性に関する考察

4.3.1節の実験および4.3.2節の実験では、上述のように使用する携帯端末の機種が異なっている。加速度のサンプル周期の違いとしては、同様の設定で500サンプルの加速度を計測した場合の例で比較すると、4.3.1節で用いた端末では、平均のサンプリング時間が、26.0 [msec] 標準偏差が45.4 [msec]、4.3.2節で用いた端末では、平均のサンプリング時間が、10.3 [msec] 標準偏差が13.6 [msec]であった。このことは、FDMLを導入したデータの扱いにより、サーバ側のシステムを変更することなく、携帯端末上のセンサの特性である、①サンプリング時間のばらつきや、③機種による性能の違いに対しても、統一的に処理できている一例といえる。別の側面からは、端末の機能向上に即した性能向上（この場合は歩行計測の高精度化）が期待できるシステムであると考えられる。

第一段階の4.3.1節の実験では、Fig. 4.7, Fig. 4.8のFDML形式でのデータ収集を行った。Fig. 4.9, Fig. 4.10は、4.3.3節の実験でのFDML形式を示す。A01:やB01:の記述は、FDMLファイル内の行番号を示す。

Fig. 4.7 (a)の定義部では、行番号A06～A17でChannel no. 9～11に加速度センサのx, y, z軸のデータが、行番号A18～A21でChannel no. 12に計測開始タイミングを表すテキストが記述されることを表している。計測をユーザがマニュアル操作で開始した場合には、”manual”，携帯端末のアプリケーションで指定した計測開始周期で計測が開始された場合には、”auto”等のデータが入る部分となる。Fig. 4.7 (b)データ部では、行番号B03～B37で4サンプル分が記載されているが、id=1からid=2までの時間間隔が40 [msec]、id = 2からid = 3までの時間間隔が1 [msec]、id = 3からid = 4までの時間間隔が30 [msec]とサンプル周期がそれぞれ異なっている。アプリケーションでの加速度計測の目標値としては最大のサンプル速度を設定した状態であり、実際の計測値としては、一定しないサンプル周期でのデータが実例として記述されている。

Fig. 4.8は、携帯端末のGPSデータを記述したFDMLの実例である。Fig. 4.8 (a)の定義部では、行番号A03～A45でChannel no. 1～7にそれぞれ、緯度、経度、海拔高度、速度、方位、精度、プロバイダ（GPSによる位置情報か携帯電話のアクセスポイントを基にしたデータであるか等の種別で、“0”はGPSによる位置情報に割り当てられている）として定義している。Fig. 4.8 (b)のデータ部に実際の計測値の例を示している。

Fig. 4.9(a)の定義部では、行番号A03～A07で加速度情報を処理したパワースペクトラムピーク周波数（PF），A08～A12で歩行周期の変動性の指標として変動係数（CV），A13～A17で左右対称性の指標として自己相関係数（AC），A18～A22で体の痛み(0-100の主観評

価), A23~A27 で体調(0-100 の主観評価), A28~A31 で加速度の計測開始タイミングが定義されており, Fig. 4.9(b) がデータ例の記述となっている.

Fig. 4.10 (a) の定義部では, 行番号 A06~A28 で, それぞれの番号に応じた関節が疼痛関節であるかの状況 (49 関節分 Channel no. 3~51), 腫脹関節であるかの状況 (46 関節分 Channel no. 52~97), mHAQ の質問に対するユーザの回答 (Channel no. 98 以降) が定義されており, Fig. 4.10(b) のデータ例では, ユーザが携帯端末上のアプリケーションの GUI を通して入力した値が記載されている. 実験では Fig. 4.9 のデータを毎朝歩行時に計測, Fig. 4.10 のデータを一週間に一回程度入力するように指示するため, 2つの FDML としている. なお, Fig. 4.8, Fig. 4.9 のサンプルデータは研究員の歩行データおよび疑似的な入力データである. この結果は, 携帯端末上のアプリケーション構築により, 基本情報から特徴量情報に変換したデータを扱っているデータであるとともに, センサでは計測できない体調に関する情報をユーザが入力したものをまとめたデータとなっており, 携帯端末上のセンサの特性である②ユーザ入力を併用したアプリケーション設計が可能である点を具現化した例となっている.

4.3.1 節, 4.3.3 節に実験では, FIG. 4.2 の提案システムで, サーバ側のデータ管理部およびデータベースは共通のものとし, 携帯端末のハードウェア, ソフトウェア, サーバ側アプリケーションを実験の目的や, 実験の実施時期に入手可能な携帯端末に合わせて変更した. 3.2 節での実験では, 既存センサとの加速度データの比較となったため, 携帯端末上にテンポラリに保存されているものをパーソナルコンピュータにコピーしてサーバ側の機能は利用しない実験となった. また携帯端末の 4.3.3 節の実験では, 必要最小限のデータを取得することとし, 携帯端末の処理性能が十分高くなったことから加速度データに関しては携帯端末上で算出した特徴量のみをサーバに送信するデータとしている. この結果は, 携帯端末上のセンサの特性である③の性能変化に対応し, 向上した携帯端末の計算能力に応じて機能分担を変更した実例となっている. 上記のように, 実験の進展にあわせて不要なデータを省いてサーバで管理することは, サーバで蓄積するデータ量を軽減させ, システム運用の効率化につながる. また, 携帯端末のセンサから取得する情報は, 初期段階の実験にて詳細な情報から十分な検討を行い, パーソナルデータ管理の観点からも, 必要以上に蓄積するのではなく, 被験者実験の際には必要最小限のデータとすることが望ましいと考える.



```

.
.
A01: <Definition>
A02: <nChannel src="ACC/standard">12</nChannel>
A03: .
A04: .
A05: .
A06: <Channel no="9" src="ACC/standard">
A07: <Name>Acceleration/x-axis</Name>
A08: <Type>double</Type>
A09: </Channel>
A10: <Channel no="10" src="ACC/standard">
A11: <Name>Acceleration/y-axis</Name>
A12: <Type>double</Type>
A13: </Channel>
A14: <Channel no="11" src="ACC/standard">
A15: <Name>Acceleration/z-axis</Name>
A16: <Type>double</Type>
A17: </Channel>
A18: <Channel no="12" src="ACC/standard">
A19: <Name>Acceleration/Timing</Name>
A20: <Type>String</Type>
A21: </Channel>
A22: .
A23: .
A24: .
A25: </Definition>

```

(a) Definition part

```

.
.
B01: <Data order="no">
B02: .
B03: <sample id="1">
B04: <time>2013/06/07 13:28:10.835 JST</time>
B05: <Group>acc_20130607132825791</Group>
B06: <Channel no="9" src="ACC/standard"><value>3.8664062</value></Channel>
B07: <Channel no="10" src="ACC/standard"><value>11.484375</value></Channel>
B08: <Channel no="11" src="ACC/standard"><value>-1.6460937</value></Channel>
B09: <Channel no="12" src="ACC/standard"><value>>manual</value></Channel>
B10: </sample>
B11: .
B12: <sample id="2">
B13: <time>2013/06/07 13:28:10.875 JST</time>
B14: <Group>acc_20130607132825791</Group>
B15: <Channel no="9" src="ACC/standard"><value>4.0578127</value></Channel>
B16: <Channel no="10" src="ACC/standard"><value>11.94375</value></Channel>
B17: <Channel no="11" src="ACC/standard"><value>-1.5695312</value></Channel>
B18: <Channel no="12" src="ACC/standard"><value>>manual</value></Channel>
B19: </sample>
B20: .
B21: <sample id="3">
B22: <time>2013/06/07 13:28:10.876 JST</time>
B23: <Group>acc_20130607132825791</Group>
B24: <Channel no="9" src="ACC/standard"><value>4.3640623</value></Channel>
B25: <Channel no="10" src="ACC/standard"><value>12.441406</value></Channel>
B26: <Channel no="11" src="ACC/standard"><value>-1.53125</value></Channel>
B27: <Channel no="12" src="ACC/standard"><value>>manual</value></Channel>
B28: </sample>
B29: .
B30: <sample id="4">
B31: <time>2013/06/07 13:28:10.906 JST</time>
B32: <Group>acc_20130607132825791</Group>
B33: <Channel no="9" src="ACC/standard"><value>4.746875</value></Channel>
B34: <Channel no="10" src="ACC/standard"><value>13.015625</value></Channel>
B35: <Channel no="11" src="ACC/standard"><value>-1.6460937</value></Channel>
B36: <Channel no="12" src="ACC/standard"><value>>manual</value></Channel>
B37: </sample>
.
.

```

(b) Data part

Fig. 4.7 Sample of FDML (acceleration)

```

.
.
.
A01: <Definition>
A02:   <nChannel src="GPS">7</nChannel>
A03:   <Channel no="1" src="GPS">
A04:     <Name>GPS/latitude</Name>
A05:     <Type>double</Type>
A06:     <Unit>度</Unit>
A07:     <Max>90</Max>
A08:     <Min>-90</Min>
A09:   </Channel>
A10:   <Channel no="2" src="GPS">
A11:     <Name>GPS/longitude</Name>
A12:     <Type>double</Type>
A13:     <Unit>度</Unit>
A14:     <Max>180</Max>
A15:     <Min>-180</Min>
A16:   </Channel>
A17:   <Channel no="3" src="GPS">
A18:     <Name>GPS/altitude</Name>
A19:     <Type>double</Type>
A20:     <Unit>m</Unit>
A21:     <Max>40000</Max>
A22:     <Min>-999.9</Min>
A23:   </Channel>
A24:   <Channel no="4" src="GPS">
A25:     <Name>GPS/speed</Name>
A26:     <Type>double</Type>
A27:     <Unit>km/h</Unit>
A28:     <Max>3000</Max>
A29:     <Min>0</Min>
A30:   </Channel>
A31:   <Channel no="5" src="GPS">
A32:     <Name>GPS/direction</Name>
A33:     <Type>double</Type>
A34:     <Unit>度</Unit>
A35:     <Max>359.9</Max>
A36:     <Min>0</Min>
A37:   </Channel>
A38:   <Channel no="6" src="GPS">
A39:     <Name>GPS/Accuracy</Name>
A40:     <Type>double</Type>
A41:   </Channel>
A42:   <Channel no="7" src="GPS">
A43:     <Name>GPS/Provider</Name>
A44:     <Type>String</Type>
A45:   </Channel>
A46: </Definition>
.
.
.
B01: <Data order="no">
B02:
B03: <sample id="1">
B04: <time>2013/06/12 11:22:58.000 JST</time>
B05: <Group>gps_20130612112258000</Group>
B06: <Channel no="1" src="GPS">
B07:   <value>35.52936553955078</value>
B08: </Channel>
B09: <Channel no="2" src="GPS">
B10:   <value>139.69491577148438</value>
B11: </Channel>
B12: <Channel no="3" src="GPS">
B13:   <value>-13.0</value>
B14: </Channel>
B15: <Channel no="4" src="GPS">
B16:   <value>0.7846164703369141</value>
B17: </Channel>
B18: <Channel no="5" src="GPS">
B19:   <value>346.48681640625</value>
B20: </Channel>
B21: <Channel no="6" src="GPS">
B22:   <value>262.62493896484375</value>
B23: </Channel>
B24: <Channel no="7" src="GPS">
B25:   <value>0</value>
B26: </Channel>
B27: </sample>
B28:
B29:
B30:
B31: </Data>

```

(a) Definition part

(b) Data part

Fig. 4.8 Sample of FDML (GPS)

```

.
.
.
A01: <Definition>
A02:     <nChannel src="ACC">9</nChannel>
A03:     <Channel no="1" src="ACC">
A04:         <Name>Acceleration/spectrumFreq</Name>
A05:         <Type>double</Type>
A06:         <Max>10</Max><Min>0</Min>
A07:     </Channel>
A08:     <Channel no="2" src="ACC">
A09:         <Name>Acceleration/negativeCV</Name>
A10:         <Type>double</Type>
A11:         <Max>10</Max><Min>0</Min>
A12:     </Channel>
A13:     <Channel no="3" src="ACC">
A14:         <Name>Acceleration/autoCorrelation1stPeak</Name>
A15:         <Type>double</Type>
A16:         <Max>1</Max><Min>-1</Min>
A17:     </Channel>
A18:     <Channel no="4" src="ACC">
A19:         <Name>ClinicalData/pain</Name>
A20:         <Type>int</Type>
A21:         <Max>100</Max><Min>0</Min>
A22:     </Channel>
A23:     <Channel no="5" src="ACC">
A24:         <Name>ClinicalData/trim</Name>
A25:         <Type>int</Type>
A26:         <Max>100</Max><Min>0</Min>
A27:     </Channel>
A28:     <Channel no="6" src="ACC">
A29:         <Name>Acceleration/timing</Name>
A30:         <Type>string</Type>
A31:     </Channel>
A32: </Definition>

```

(a) Definition part

```

.
.
.
B01: <Data order="no">
B02: <sample id="1">
B03: <time>2013/06/12 12:48:44.387 JST</time>
B04: <Group>gait_20130612124844387</Group>
B05: <Channel no="1" src="ACC">
B06:     <value>1.8229166269302368</value>
B07: </Channel>
B08: <Channel no="2" src="ACC">
B09:     <value>0.07073651254177094</value>
B10: </Channel>
B11: <Channel no="3" src="ACC">
B12:     <value>0.7346339821815491</value>
B13: </Channel>
B14: <Channel no="4" src="ACC">
B15:     <value>31</value>
B16: </Channel>
B17: <Channel no="5" src="ACC">
B18:     <value>41</value>
B19: </Channel>
B20: <Channel no="6" src="ACC">
B21:     <value>manual</value>
B22: </sample>
B23: </Data>

```

(b) Data part

Fig. 4.9 Sample of FDML (Acceleration and user conditions)

```

.
.
.
A01: <Definition>
A02:   <nChannel src="clinical">121</nChannel>
A03:   .
A04:   .
A05:   .
A06:   <Channel src="clinical" no="3">
A07:     <Name>ClinicalData/Algia/joint1</Name>
A08:     <Type>boolean</Type><Max>1</Max><Min>0</Min>
A09:   </Channel>
A10:   <Channel src="clinical" no="4">
A11:     <Name>ClinicalData/Algia/joint2</Name>
A12:     <Type>boolean</Type><Max>1</Max><Min>0</Min>
A13:   </Channel>
A14:   .
A15:   .
A16:   .
A17:   .
A18:   <Channel src="clinical" no="52">
A19:     <Name>ClinicalData/Swelling/joint1</Name>
A20:     <Type>boolean</Type><Max>1</Max><Min>0</Min>
A21:   </Channel>
A22:   .
A23:   .
A24:   .
A25:   <Channel src="clinical" no="98">
A26:     <Name>ClinicalData/mHAQ/q1</Name>
A27:     <Type>int</Type><Max>3</Max><Min>0</Min>
A28:   </Channel>
A29:   .
A30:   .
A31:   .
A32: </Definition>

```

(a) Definition part

```

.
.
.
B01: <Data order="no">
B02: <sample id="1">
B03: <time>2013/06/25 20:22:48.075 JST</time>
B04: <Group>clinical_20130625202248075</Group>
B05: .
B06: .
B07: .
B08: <Channel no="3" src="clinical"><value>0</value></Channel>
B09: <Channel no="4" src="clinical"><value>1</value></Channel>
B10: .
B11: .
B12: .
B13: <Channel no="52" src="clinical"><value>0</value></Channel>
B14: .
B15: .
B16: .
B17: <Channel no="98" src="clinical"><value>1</value></Channel>
B18: .
B19: .
B20: .
B21: </sample>
B22: </Data>

```

(b) Data part

Fig. 4.10 Sample of FDML (Joints and mHAQ)

一連の実験を通して、FDMLの仕様およびサーバ側のデータ管理部は変更することなく実験実施に対応できたことから、携帯端末センサの特性を考慮したデータ収集、実験のフェーズに応じた蓄積情報の変更・拡張への対応という観点から提案システムの有効性が確認できた。

## 4.4 歩道路面状況の収集システムへの応用性の検討

### 4.4.1 歩道路面状況の収集システムのコンセプトと概要

本節では、ユーザが安心・安全に移動できる社会基盤を支えるシステムの構築を目的に、歩道利用者のスマートフォン等を介したセンサからの歩道状況に関する効率的な情報収集技術や、収集したデータや処理結果を適切に管理し歩道利用者・自治体等への通行可否などの有益な情報を抽出して提供するサービスの基礎となるシステムを提案する。具体的には、普段の生活の中から、歩道を利用するベビーカー、シニアカー、自転車等のパーソナルモビリティからのセンサ情報を蓄積し、移動するすべての人達、インフラを管理する人達に、有効な情報を提供するシステムのコンセプトを提案するとともに、データ収集系に関する基礎的なシステム構成案を示す。さらに、将来的な展望として、セキュリティ関連技術、機械学習技術、多種センサ情報と連携した新サービスの創出に関する構想について述べる。

基本コンセプトとしては、歩道を利用するベビーカー、シニアカー、自転車や近年開発されているパーソナルモビリティからのセンサ情報を蓄積し、移動するすべての人達、インフラを管理する人達に、有効な情報を提供することを目標としている (Fig. 4.11)。システムやサービス構成としては、まず、歩道利用者のスマートフォンを介して歩道の状況に関するセンサ情報を効率的に収集し、収集したデータや解析結果を活用し、歩道利用者・自治体等へ通行可否などの情報を提供することを想定している。

Fig. 4.12 は、ベビーカーに取り付けたスマートフォン加速度センサのデータ例であり、凸凹の激しい砂利道と整備された歩道でのデータの差を表したものである。左側の砂利道ではベビーカーを押すのにかなり力を要す状況であり、このような状況の中で、大きな加速度が計測されていることから、スマートフォン搭載のセンサであっても路面の状態を反映したデータ計測の可能性がある。

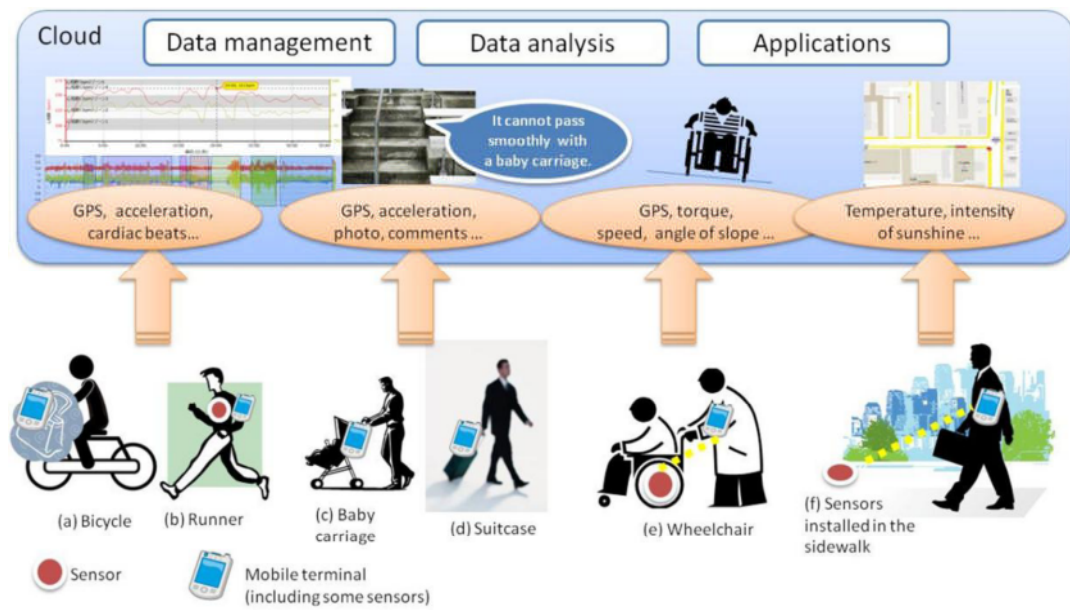


Fig. 4.11 Concept of cooperative sidewalk supporting system

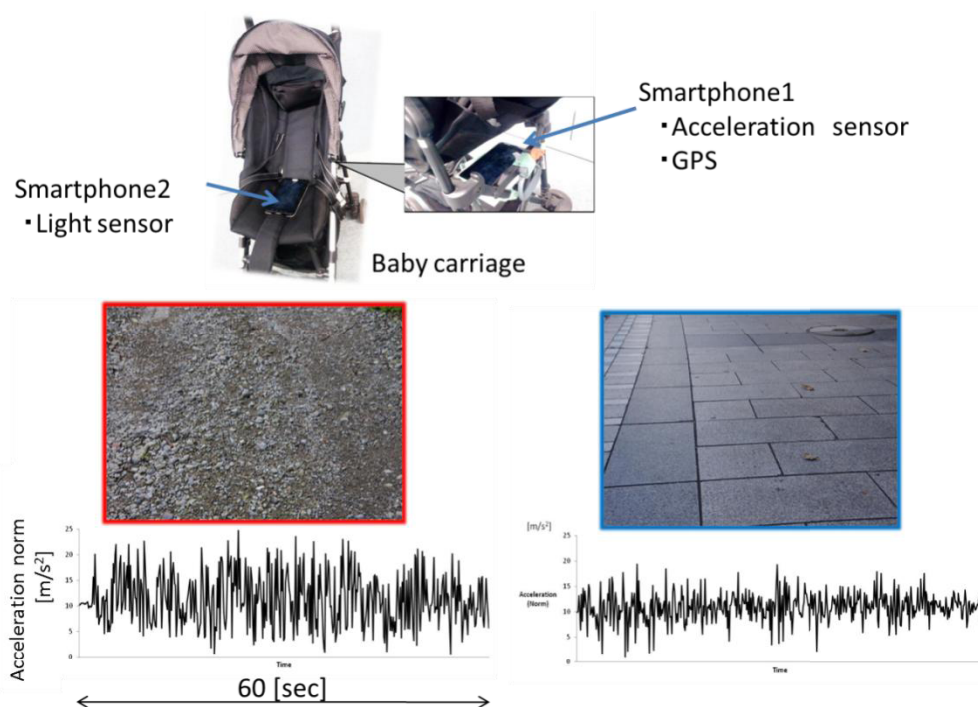


Fig. 4.12 Sample data for the cooperative sidewalk supporting system

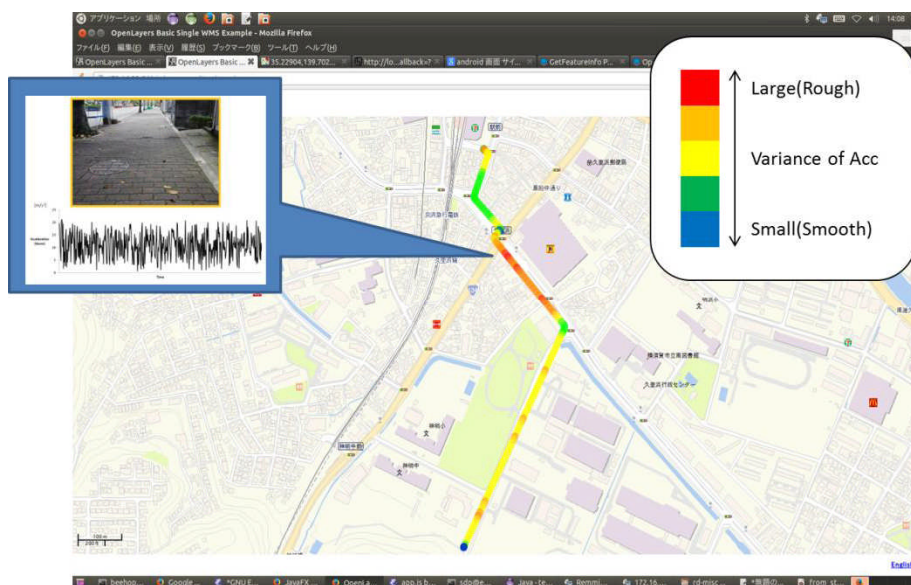


Fig. 4.13 Sample application of the cooperative sidewalk supporting system

また Fig. 4.13 は、上記のようなデータが蓄積された場合の想定アプリケーションを表したもので、ベビーカー通行時の加速度情報と GPS 情報を基に、駅から公園までの経路上での歩道の通りやすさを表した地図を示している。このような例の他に、将来的には、近年進展の著しい自動車の移動情報に関するサービスやユーザの生体センサ情報等と連携した新サービスの創出も期待できると考えている。

路面の状況を検出する従来研究としては、車道に関しては、通行の障害となる段差に対して、車両に固定したスマートフォンの加速度センサを使った検出方法が提案されている<sup>94)95)</sup>。歩道に関しては、歩道に関する情報を整理するためのデータ仕様が提案されており<sup>96)</sup>、車椅子やベビーカー利用者などの通行困難者に対する適切な情報提示が社会ニーズとして求められている。文献<sup>97)</sup>では、車椅子について、勾配や段差を iPhone に組み込まれたセンサを使って検出し、地図上にバリア情報を共有・表示するシステムが示されている。

このような従来研究に対して、体系的に継続的にサービスを構築するために必要となる技術ポイントとしては、

- ・歩道移動ログ収集を目的とした、スマートフォンのセンサからキャリア NW を介した利用者の負担が少ない情報収集技術、
- ・収集するパーソナルデータデータを適切に管理・ハンドリングする技術、

- ・膨大なデータから速く正確に意味のある情報を抽出する技術,

などがあげられる。4.2節で提案したシステムは,その基盤を構成できると考えられる。提案したシステム構成で,複数のデータ収集アプリケーション構築を考える場合,同一のアプリケーションであっても,端末機種の変更によるサンプリングタイムなど計測性に変動がある場合や,新たに情報を付加してアプリケーションとしての機能を向上させる場合,端末とサーバ側での機能分担を変更する場合等にも柔軟に対応できると考えられる。具体的には,サーバ側のデータ管理部を共用化し,携帯端末のソフトウェアと,サーバ側のアプリケーション部分の構築のみで効率的に対応することが可能となる。

#### 4.4.2 歩道路面状況の収集システムの基礎的実験検討

ここでは,歩道路面状況の収集システムの基礎的実験検討として,歩道通行者の主観を利用した歩道状態の推定手法と検証実験結果を述べる。想定としては,個々の歩道で特別な調査活動を行うことなく,歩道を通行することで容易に収集できる情報を分析し,通行の妨げになる情報を提供することで歩道通行者の利便性を向上させることを目的としている。具体的な事例として,ベビーカーの通行時にセンサデータから歩道の勾配や凸凹に対して機械学習により推定の評価結果を示す。

##### 4.4.2.1 実験方法

実験では,センサデータを取得するスマートフォンをベビーカーに固定する。歩道利用には,歩行,自転車,車椅子,ベビーカーなど様々な形態があるが,ここでは子育て世代の快適な外出ニーズの高まりとベビーカーの大型化という状況<sup>98)</sup>を踏まえ,研究の第一段階としてベビーカーの利用を想定する。小塚らの調査によると,ベビーカー利用の際には,段差や傾斜が障害の一因となる<sup>99)</sup>。この調査結果を参考に,歩道に関する有用な情報として,実際のベビーカー通行時のセンサデータを収集し,以下のラベルを推定することを検証実験の目標とした。

- ・[路面形状] 平坦 / 勾配 / 複合勾配
- ・[路面性状] なめらか / 凸凹

勾配には進行方向に対して,上り・下りの勾配(縦断勾配)と左右方向の勾配(横断勾配)がある。複合勾配とは,縦断勾配に加え横断勾配も含んだ路面形状を指す。このような勾配は,ベビーカー利用者に身体負担や危険感を増加させる大きな要因になるとの報告<sup>100)</sup>がある。複合勾配は,客観的基準で測ることが難しく主観的に通行困難と認識される場所の



一例であると考え、平坦と勾配に加え路面形状のラベルとした。また、複合勾配を加えることで、ラベル推定モデルの課題が明確になることを期待した。

データ収集では、スマートフォンをベビーカーに固定し NTT 横須賀研究開発センタ周辺の勾配や凸凹のある歩道を通行することでセンサデータを取得した。勾配や凸凹など通行の妨げになる歩道の情報を収集するため、歩道を通行する間、GPS、角度、角速度に関する内蔵センサから、データを一定間隔で取得し記録した。角度は勾配を表し、角速度は凸凹などの路面性状が反映されることを想定した。データ取得間隔は、GPS は約 1 秒間隔、それ以外は 20[msec]間隔とした。また、センサデータ取得時間は、約 45 分である。ベビーカーはコンビ株式会社製、カルディア オート 4 キヤス エッグショック HB、スマートフォンは、株式会社 NTT ドコモ製 ARROS NX F-01F(OS: Android 4.2)を用いた。また、スマートフォンは National Products Inc. 製の固定器具 RAM MOUNTS X-グリップホルダーRAM-HOL-UN7BU を用いてベビーカーの左右の後輪をわたすパイプ状のフレームに固定した。

取得したセンサデータに対し、下記ラベル付けを手動で行った。

- ・ [路面形状] 平坦 / 勾配 / 複合勾配
- ・ [路面性状] なめらか / 凸凹

実際に手動でラベル付けしたのは、ベビーカーで走行した経路全てのセンサデータではなく、主観的に通行困難と感じた典型的な場所を選定し手動でラベル付けを行った。センサデータは、20[msec]間隔で取得した 1 秒間に相当する 50 点のデータを 1 セットとして扱い、路面形状については、平坦 / 勾配 / 複合勾配それぞれ 150 点、路面性状については、なめらか / 凸凹それぞれ 500 点のラベル付きデータを取得した。

#### 4.4.2.2 実験結果

取得したデータに対して機械学習による交差検定を行った。機械学習には SVM を用い、統計解析向けのオープンソース・フリーソフトウェアの R 言語の kernlab ライブラリ ksvm 関数を使用した。学習に用いた特徴量は、路面形状に関しては、角度センサのピッチ角の平均と分散、ロール角の分散を用いた。路面性状に関しては、角速度のピッチ角の平均と分散とロール角の平均と分散を用いた。交差検定の回数は、路面形状 450 回、路面性状 1000 回である。つまり、路面形状は、1 件のセンサデータをラベルが付与されていないとみなし、449 件のラベルと対応したセンサデータから構築した推定モデルで、路面状態の推定を全件数 450 回繰り返した。路面性状も同様に、999 件のデータから構築したモデルで 1

件のデータを推定した。路面形状・路面性状の交差検定での推定結果をそれぞれ、Table. 4. 2, Table. 4. 3 に示す。

Table. 4. 2, Table. 4. 3 における各欄の数字は、ラベルを付与していないとみなしたセンサデータに対して、それぞれのラベルを推定した個数を表している。太字の数字は、推定結果が正解であった個数である。また、再現率は、ラベルに対して正しく推定した割合を表す。適合率は、推定結果に対して正解した割合を表す。

Table 4.2 Evaluation result for road shape

		Result			Total	Recall [%]
		Flat	Slope	Complex slope		
Original data	Flat	<b>141</b>	3	6	150	94.0
	Slope	7	<b>143</b>	0	150	95.3
	Complex slope	21	0	<b>129</b>	150	86.0
Total		169	146	135	450	91.8
Precision [%]		83.4	97.9	95.6	91.8	91.8

Table 4.3 Evaluation result for road feature

		Result		Total	Recall [%]
		Smooth	Rough		
Original data	Smooth	<b>495</b>	5	500	99.0
	Rough	45	<b>455</b>	500	95.3
Total		540	460	1000	95.0
Precision [%]		91.7	98.9	95.0	95.0

結果をみると、路面形状の判別には角度センサが、路面性状の判別には角速度センサが有効であった。しかし、路面形状の推定結果で、複合勾配に対して、平坦の適合率が83.4%、複合勾配の再現率が88%と他に比べて低い値となっている。複合勾配の推定については、角度センサだけでは不十分な可能性がある。また、複合勾配地点は、凸凹地点と同様にベビ

一カーの走行に押し難さあるいは抵抗感が伴う。このような主観的な通行困難に関する体感が加速度や角速度に影響するとすれば、それらの特徴量を用いて、複合勾配の推定精度を向上できる可能性があると考えられる。今回の実験で利用したセンサデータは、歩道の典型的な場所から取得した基礎的なものであり、現実の様々な勾配や凸凹に対する有効性についてはさらなる検証が必要である。

#### 4.5 まとめ

現在の携帯端末インフラを活用したアプリケーション開発を対象に、第2章の機械系の課題を解決する技術、第3章の情報系の課題を解決する技術の双方を適用したフレームワークを提案し、ヘルスケア分野等への応用について述べた。まず、産業用ロボットで作業点におけるマニピュレータの運動やワークの状況のセンシングを高度化する作業点モデリングの考え方を、歩行者の運動や歩道の状況センシングに適用し、相補利用やユーザへの提示、相関性の利用を可能にしたフレームワークと位置付けた。さらに第3章のXML技術を活用したデータの記述方式を導入し、以下の携帯端末上でのセンサ情報収集の特性を考慮したシステムを提案した。

- ① サンプリング周期が一定でなく複数センサが混在する。
- ② ユーザ入力を併用したアプリケーション設計が可能である。
- ③ 取得可能な情報種類の変化や性能変化が頻繁に起こる。

次に、提案システムの具体的なアプリケーションとして、ユーザの歩行モニタリング機能を構築し、段階的にその応用性の検証と並行して、システムの有効性の検討を行った。第一段階では、基礎的なデータ蓄積アプリケーションを構築し、携帯端末を身に付けたユーザの運動情報として、歩行時の加速度・GPS計測から得られる特徴量を用いた、歩行概要評価の検討を行った。次の段階では、医療やヘルスケア分野への応用を想定し、専用センサから得られる情報と、携帯端末のセンサから得られる情報の比較を実施した。さらに、具体的にリウマチ疾病の状態の定量的な把握を目的として、そのために必要となる計測データ、ユーザからの入力データを蓄積するアプリケーションを構築して実験を実施し、リウマチ指標と運動情報の相関性を利用した疾患活動性推測への可能性を示した。一連の実験では、携帯端末上のセンサの特性①②③に対応することで、効率的なシステム構築を行った。具体的には、FDML技術の導入によるデータ記述、携帯端末上のアプリケーション構築による主観的な状態、付属センサでは計測できない情報の取得、さらに携帯端末側とサーバ側の双方にアプリケーションを構築する部分を具備していることにより、携帯端末の性能向上に応じてサーバ側の負荷を携帯端末側に機能分担変更するといった対応が可能であることを確認した。

さらに利用するセンサ情報を，ベビーカーや車椅子，キャリングケースの運動情報に拡張し，歩道利用者や歩道管理者へのシステム支援を想定した，歩道路面状況の収集システムへの応用のコンセプトと基礎的なデータ分析例を示した．

歩行概要モニタリングは，作業点モデリングの考え方を適用して人間側の運動状態を把握するものであり，第2章のセンサフィードバック型マニピュレータの設定状態を把握する位置づけと同様のアプリケーションと考えられる．また，歩道路面状況の情報収集はベビーカーや車椅子のセンサ情報から歩道路面状況を把握するものであり，センサフィードバック型マニピュレータによるワーク形状やワーク状態を把握するケースと対比するアプリケーションと位置づけられる．

一連の実験にて，携帯端末センサの特性を考慮したデータ収集，実験のフェーズに応じた蓄積情報の変更・拡張への対応という観点から，支援機械システムにおける提案フレームワークの有効性を確認した．

本章で扱った，医療分野での応用での今後の課題としては，臨床的なデータの蓄積と並行して，定期的な計測データから効率良くかつ正確に歩行部分を抽出するアルゴリズムの開発や，大量に蓄積されるデータのセキュリティや処理時間を考慮した管理方法，医療従事者やユーザに向けたデータの可視化方法の研究開発などがあげられる．また，歩道に関連する情報サービス等への応用に関する今後の課題や構想としては，パーソナルデータの管理については，携帯端末やホームサーバを介して，ユーザ許可のもとサーバへ送信するしくみや，サーバ側での秘密計算技術などセキュリティ関連技術を応用したアプリケーションの構築を想定している．また，携帯端末内のセンサ情報や，携帯端末とLAN等で連携したセンサ情報に加えて，携帯端末のアプリケーションを介したユーザ入力の情報に加えることにより，人間の判断によりラベリングされたデータ収集が可能となる．このことは，適切にラベリングされたデータセットをもとにより高度な機械学習等の技術を利用することで，ラベリングされていないデータの自動ラベリングを行うことにより，よりインテリジェントなシステムの構築が期待できる．さらには，歩道のみならず，ITS 関連技術で既に収集が進んでいる情報等と連携したサービスの拡張を想定している．

## 第5章 結論

### 5.1 本論文の成果

本章では、本研究で得られた主要な成果についてまとめ、本研究の目的が達成されたことを示すとともに、総括を行う。本研究では、生活空間に普及しつつある多様なセンサを統合的に扱い、作業や利用者を支援する新規サービスを継続的・体系的に創出可能とする支援機械システムのフレームワークを構築することを目的とした。目的達成のための物理世界 (=機械系) の課題として、工場内や生活空間で、作業や対象が変化しても複数センサを機能させることで人間・機械・作業環境の状態を把握するシステムの実現、情報世界 (=情報系) の課題として、普及・進化する社会インフラを活用して多種多様なセンサを接続し、種々のサービスを提供する支援機械システムを構築できるプラットフォームの実現を挙げた。この課題に対するアプローチとして、継続したインタラクションのある作業を対象に、作業点モデリングの考え方に基づく支援機械システムのフレームワークを提案した。作業点モデリングの特徴は、複数センサ情報を高次の情報としてハードウェア的なインタラクションのある作業点に関連する情報に変換して扱い、作業点における物理特性やセンサ特性を利用した情報管理を行い、これらの情報を基にアプリケーションを構築することであり、フレームワークの基本的な構成要素を示すものである。さらに、現在普及しているネットワークや携帯端末センサの利用を前提に、作業点モデリングの情報系を実現するフレームワークの階層構造と機能分担、主要な情報インタフェースの設計指針を提案した。

この提案フレームワークを、センサフィードバック型マニピュレータを対象にした作業実行システム、情報支援ロボットを利用したシステム、携帯端末センサを利用した情報システムの複数のシステムに適用した。これにより、提案フレームワークを用いることで、工場内や生活空間を対象に複数のサービスや作業において、複数センサを機能させることが可能であることを明らかにし、物理世界 (=機械系) の課題を解決した具現化例を示した。実際に具現化したシステムは、センサフィードバック型マニピュレータに用いた 1990 年代のセンサから、情報支援ロボットや施設内の環境に埋め込まれたセンサ、現在のスマートフォンに至るまで、多種多様なセンサを活用したシステムを構築した。また、リウマチ患者を対象とした歩行概要モニタリングによる疾患活動性推測では、急速な普及と進展の過程にあるネットワーク環境やスマートフォンの特性に対応したフレームワークにより、一つのサービスの基礎実験から患者を対象とした臨床実験まで段階的なシステム構築を行い

その拡張性を示した。これにより情報世界 (=情報系) の課題を解決したフレームワークの具現化例を示した。

以上により、本論文では生活空間に普及しつつある多様なセンサを統合的に扱い、作業者や利用者を支援する新規サービスを継続的・体系的に創出可能とする支援機械システムのフレームワークの有効性を明らかにし、本研究の目的を達成した。

## 5.2 技術的成果の体系化

第1章では、本研究の背景、研究課題と目的について述べた。また、関連研究の動向について述べ、本研究の位置づけを明らかにした。具体的には、センサを利用した産業用ロボットや情報サービス等にかかわる支援システムの研究開発状況を整理し、課題を示した。具体的なアプローチとしては、複数のセンサ情報を統一的に扱うための基本構想として、継続したインタラクションのある作業を対象に、作業点モデリングの考え方を導入したフレームワークの構成要素、階層構造、機能分担、主要インタフェースの構想を示した。機械系の課題に対しては、コンピュータや移動機器等のインタラクションを扱う作業点モデリングの構成要素を示し、工場内や生活空間で作業や対象が変化しても複数センサを機能させるシステム構成を提案した。情報系の課題に対しては、作業点モデリングの考え方を、現在普及・進展しているネットワークインフラや携帯端末等のセンサ利用を前提として、階層化および機能分担の構成、主要な情報インタフェースを提案した。さらに上記の機械系の課題と情報系の課題を解決する技術を導入することで、現在の携帯端末やネットワーク環境を活用し、継続的・体系的にアプリケーション構築を可能とするアプローチを示した。

第2章では、機械系の課題解決を目的に、産業用マニピュレータの運動情報の活用による機械支援システムの高度化について述べた。まず、センサフィードバック型マニピュレータを対象に、作業点モデリングの考え方を導入した。具体的なマニピュレータ作業として、グラインダ作業、溶接作業に適用し、以下の結果を得た。

- ・グラインダ作業における力情報と速度情報の相補的利用による接触点検出の高精度化、作業教示の容易化を確認した。
- ・溶接作業における作業点誤差情報の作業者への提示による作業者支援の効率化および、規定ワークにおける作業点情報の相関性を利用したチューニングによる精度向上確認した。

本章の作業点モデリングを導入したシステムは、基本情報を管理する部分、作業点情報を管理する部分、およびこれらの管理された情報からアプリケーションを構築する部分か

ら構成され、支援機械システムのフレームワークの基本的な構成要素をセンサフィードバック型コンピュータに適用した具現化例となる。またフレームワークにおけるインタフェースの観点からは、複数センサ情報を扱うシステムとそれを活用するユーザとのインタフェースに関して設計指針を与えるものとなる。これを工場内でのグラインダ作業や溶接作業という複数作業のセンサフィードバックコンピュータを対象に、複数センサの特性を利用した高精度化やパラメータの自動設定、ユーザの判断を活用可能なシステム構築に適用可能であることを示した。これにより作業点モデリングを導入したシステム構成が、機械系の課題である工場内で複数の作業に対して複数センサを機能させることで人間・機械・作業環境の状態を把握するシステムの一実現例となるとして有効性を確認した。

第3章では、情報系の課題解決を目的に、公共空間でのロボットによる案内等のユーザ支援サービスを想定し、様々な種類のロボットやセンサからの情報を、ネットワークを介して情報共有するプラットフォーム（PF）を提案した。このようなサービスでは、施設を利用するユーザの運動を計測するセンサは、計測すべきユーザの動作や、施設の広さや明るさなど環境に適用できる形で多種多様なセンサが利用される。また、サービスを提供するロボットも施設的环境によって適切なロボットを利用する形態となる。そのようなセンサ情報を扱う支援機械システムに対して、XML 技術を導入して情報を柔軟に記述し、基本的な情報管理が可能な情報共有 PF を設計した。この PF 上にロボットによる記念写真サービス、展示説明、健康支援、ショッピングモールでの案内サービスをインプリメントし、実証実験を通じて以下の結果を得た。

- ・開発 PF 上に、複数の案内サービスをインプリメントし、4施設で最大 15 システムを PF に接続したロボット情報サービスを実施した。
- ・システム開発工数の観点から PF 化した開発規模と各実証実験システムを個別開発した場合の想定開発規模比較し、複数システムを構築する場合に PF 化による開発効率化が期待できることを明らかにした。

提案 PF は、支援機械システムのフレームワークの階層構造と各階層における機能分担、主要な情報インタフェースの設計指針を具現化したものである。上記の実際の複数施設における実証実験により、支援機械システムのフレームワークの多種センサを接続した複数ロボット情報サービス構築への有効性を確認した。

第4章では、現在の携帯端末インフラを活用したアプリケーション開発を対象に、第2章の機械系の課題を解決する技術、第3章の情報系の課題を解決する技術の双方を適用したフレームワークを提案し、ヘルスケア分野等への応用について述べた。まず、産業用ロ

ボットで作業点におけるマニピュレータの運動やワークの状況のセンシングを高度化する仕組みを、歩行者の運動や歩道の状況センシングに適用し、相補利用やユーザへの提示、相関性の利用を可能にしたフレームワークと位置付けた。さらに第3章のXML技術を活用したデータの記述方式を導入し、携帯端末上でのセンサ情報収集の特性を考慮したシステムを提案した。

提案システムの具体的なアプリケーションとして、歩行概要モニタリングを構築し、段階的にその応用性の検証と並行して、システムの有効性の検討を行った。第一段階では、基礎的なデータ蓄積アプリケーションを構築し、携帯端末を身に付けたユーザの運動情報として、歩行時の加速度・GPS計測から得られる特徴量を用いた歩行概要評価の検討を行った。次の段階で、専用センサと携帯端末センサ情報の比較を実施した後、リウマチ疾病の状態の定量的な把握を目的としたアプリケーションを構築して実験を実施し、リウマチ指標と運動情報の相関性を利用した疾患活動性推測への可能性を示した。一連の実験は、携帯端末上のセンサの特性に対応することで、効率的なシステム構築を行った。具体的には、FDML技術の導入によるデータ記述、携帯端末上のアプリケーション構築による主観的な状態、付属センサでは計測できない情報の取得、さらに携帯端末側とサーバ側の双方にアプリケーションを構築する部分を具備していることにより、携帯端末の性能向上に応じてサーバ側の負荷を携帯端末側に機能分担変更するといった対応が可能であることを確認した。

さらに利用するセンサ情報を、ベビーカーや車椅子、キャリングケース等の運動情報に拡張し、歩道利用者や歩道管理者へのシステム支援を想定した、歩道路面状況の収集システムへの応用のコンセプトと基礎的なデータ分析例を示した。

歩行概要モニタリングは、作業点モデリングの考え方を適用して人間側の運動状態を把握するものであり、第2章のセンサフィードバック型マニピュレータの設定状態を把握する位置づけと同様のアプリケーションと考えられる。また、歩道路面状況の情報収集はベビーカーや車椅子のセンサ情報から歩道路面状況を把握するものであり、センサフィードバック型マニピュレータによるワーク形状やワーク状態を把握するケースと対比するアプリケーションと位置づけられる。第4章の実験を通して、センサフィードバック型マニピュレータのグラインダ作業や溶接作業に加えて、リウマチ疾患活動性や歩道路面状況の状態を把握に対して一定の効果を示した。このことは、作業点モデリングの基本構成が、複数の作業や対象に対して複数センサを機能させ人間・機械・作業環境の状態を把握する、すなわち、物理世界の課題を解決したシステムを具現化させるフレームワークの基本構成の一つとなることを示したものである。



また、歩行概要モニタリングによる疾患活動性推測では、急速な普及と進展の過程にあるネットワーク環境やスマートフォンの特性に対応したフレームワークにより、一つのサービスの基礎実験から患者を対象とした臨床実験まで段階的なシステム構築を行いその拡張性を示した。このフレームワークは、階層構造、機能分担、主要インタフェースの設計指針であり、第3章、第4章の実験により、普及・進化する社会インフラを活用して多種多様なセンサを接続し、種々のサービスを提供する支援機械システムを構築できるプラットフォームを具現化した。これにより、情報世界の課題を解決したフレームワークの実現例を示した。

今後の課題としては、第4章のまとめで述べた医療分野や歩道に関する公共サービス等の利用への課題という観点の他に、より広い応用分野に対してよりシステムティックにシステムを構築することが必要と考える。本論文で提案したフレームワークにおいては、作業員やユーザへの情報提示を契機に、人間が実際の問題解決の重要な部分を担うケースもあるが、この領域に対して、BigData や機械学習技術など、新しい技術を導入することで人間の負担をさらに軽減し、高度化を図ることが望まると考える。

### 5.3 今後の展望

本論文では、高度なセンサの利用が、製造分野での専門的な利用から生活空間で一般の人が日常的に普及していく背景のなか、作業員や利用者を支援する新規サービスを継続的・体系的に創出可能とする支援機械システムのフレームワークの構築を目指した。

製造分野での今後の展望としては、多品種少量生産が進む一方で Only One の製造技術を志向した企業も注目を浴びている。このような状況で、センサを利用した機器の高度化と、作業員の熟練した技術力と判断力が協調できる環境が期待されると考えている。また、専門性の高い分野で、新たな原理でこれまでにない特性を持つセンサが開発されることを想定すると、数年後にはコモディティ化が進み、より広い分野でそのセンサが利用できると期待している。

また、生活空間での利用として施設におけるロボット情報サービスの展開は、ようやくいくつかの実証実験が実施された段階で、実用サービスに向けて多くの企業や研究機関が各種の課題に取り組んでいる。ロボット単体での機能・性能向上に加えて、それを補うセンサや情報システムとの連携は、実用化を加速する上で必須となる技術と言える。従来の実証実験では、特定の都市区画で NW 無線環境を整備して、特注の端末をユーザに配布して実験していた状況であった。それが、ユーザが自費で購入したスマートフォンにセンサが具備されており、使わない人までが NW 機能付きセンサ端末を所有して毎日充電し、予備のバ

ッテリまで持ち歩いているということが現実になっている。そこまで普及した状況で、これらの端末を活用した新たなサービス創出の期待はますます高まっている。

第4章で示したヘルスケア分野での携帯端末センサの利用は、患者の日常生活における継続的で定量的なデータを低コストで蓄積できることを示唆している。今後、様々な疾病に関して日常生活で得られたデータを蓄積することは、高齢化社会のさらなる進展を控え重要なデータになると考えられる。また、歩道状況の把握のような公共的な設備に関するサービスは、今後の街づくりの観点で注目されつつあるサービスであり、2020年の東京オリンピック・パラリンピック開催に伴う訪日外国人や障がい者、高齢者に対する行動支援サービス的一端を担うものである。

上記のように、製造分野から生活空間に広がるセンサ利用は、様々な分野で期待が高まると予想される。特に、ユーザが所持する携帯端末や携帯端末に接続されたセンサの情報を活用したサービスは増加すると考えられ、初期段階の実験から実用化に至る過程で効率良く活用可能な情報収集システムがサービス開発上、重要になると想定している。本研究はその進展の一端に貢献することを期待している。

## 参考文献

1. 楠田喜宏, “国立科学博物館技術の系統化調査報告 第4集 産業用ロボット技術発展の系統化調査”, 独立行政法人 国立科学博物館, pp.1-47, 2004.
2. Bamba T., Murayama H., Kodaira N. and Tsuda E., “A visual seam tracking system for arc-welding robots”, Proc. of 14th ISIR, pp.365-374, 1984.
3. 奥平雅士, 目黒眞一, 武藤伸洋, 片山淳, “溶接作業ロボットシステムの開発”, NTT R&D Vol.47 No. 7, pp.819-824, 1998.
4. Sawano S., Ikeda J., Utsumi N., Ohtani Y. and Kikuchi A., “A Sealing Robot System with Visual Seam Tracking”, Prov. of '83 Int. Conf. on Adv. Rob., pp.351-358, 1983.
5. 柿崎隆夫, 荒川賢一, 望月研二, 梅野光, “高速シーリングロボット用センシングシステムの開発”, NTT R&D, Vol.47, No.7, pp.805-812, 1998.
6. 前川桂一郎, “車体組立工程におけるビジョンセンサ”, 日本ロボット学会誌 Vol. 15, No. 6, pp. 840-843, 1997.
7. 鈴木達也, “「生産システムにおける最近の動向」特集について”, 日本ロボット学会誌 Vol. 15, No. 6, p.811, 1997.
8. 石川正俊, “センサフュージョンシステム-感覚情報の統合メカニズム-”, 日本ロボット学会誌 Vol. 6, No. 3, pp. 251-255, 1988.
9. S. Laerdal, “Further Development and New Application for the Trallfa Robot”, Proc. 5th Symposium on Industrial Robot, pp. 439-452, 1975.
10. 井上康之, 高岡佳市, “産業用ロボットにおけるティーチング方式”, 日本ロボット学会誌 Vol.14 No.6, pp.780~783, 1996.
11. 浅田春比古, 花房秀郎, “力教示機構を備えたロボットのプレイバック制御”, 計測自動制御学会論文集, vol. 15, no. 3, pp. 410-411, 1979.
12. 下倉健一郎, 浅田春比古, 劉申, “バリ取り作業におけるヒューマンスキルの教示方法に関する検討”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp144-149, 1996.
13. 堀口由貴男, 黒野晃平, 中西弘明, 榎木哲夫, 永谷達也, 野田哲男, 田中健一, “産業用ロボット教示作業支援のための複合情報 GUI”, 計測自動制御学会論文集 Vol. 47, No. 12, pp.656-665, 2011.
14. Mann S., “Wearable Computing: A First Step Toward Personal Imaging”, Computer, pp.25-32, 1997.

15. 総務省, “ネットワーク・ロボット技術に関する調査研究会報告書”, [http://www.soumu.go.jp/s-news/2003/pdf/030724\\_1\\_01.pdf](http://www.soumu.go.jp/s-news/2003/pdf/030724_1_01.pdf), 2003.
16. 萩田紀博, “ネットワークロボット概論”, 電子情報通信学会誌, Vol.91 No.5, pp.346-352, 2008.
17. A. Sanfeliu, “URUS Project: Communication Systems”, Proceedings workshop on Network Robot Systems at 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligence Robots and Systems (IROS09-WS), pp.12-31, 2009.
18. Dustbot <http://www.dustbot.org/>
19. H. Kim, Y.J. Cho, and S.R. Oh, “Implementation and application of URC server framework”, Proceedings workshop on Network Robot System at 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA07-WS), No.SF-2-5, pp.23-27, 2007.
20. N. Ando, T. Suehiro, K. Kitagaki, T. Kotoku and Y. Woo-Keun, “RT-middleware: distributed component middleware for RT (robot technology)”, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2005), pp. 3933-3938, 2005.
21. M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler and A.Y. Ng, “ROS: an open-source Robot Operating System”, ICRA workshop on open source software, 2009.
22. 成田雅彦, 島村真己子, 日浦亮太, 山口亨, “ロボットサービスイニシアチブ(RSi)の活動を通して実現したロボットサービス共通プラットフォーム仕様”, 日本ロボット学会誌, vol. 26, pp. 785-793, 2008.
23. 成田雅彦, 村川賀彦, 植木美和, 中本啓之, 日浦亮太, 平野線治, 蔵田英之, 加藤由花, “普及期のロボットサービス基盤を目指す RSNP(Robot Service Network Protocol)2.0の開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 27, pp. 857-867, 2009.
24. 成田雅彦, 村川賀彦, 植木美和, 岡林桂樹, 秋口忠三, 日浦亮太, 蔵田英之, 加藤由花, インターネットを活用したロボットサービスの実現と開発を支援する RSi(Robot Service Initiative)の取り組み, 日本ロボット学会誌, vol. 28, pp. 829-840, 2010.
25. 森武俊, 野口博史, 佐藤知正, “センシングルーム部屋型日常行動計測蓄積環境第2世代ロボティックルーム”, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.6, pp. 25-29, 2005.
26. 森武俊, 佐藤知正, “ロボティックルーム1・2・3の開発”, 電子情報通信学会誌 Vol. 91, No. 5, pp.402/410, 2009.
27. 西田佳史, “戦略的創造研究推進事業CREST研究領域「先進的統合センシング技術」研究課題「事故予防のための日常行動センシングおよび計算論の基盤技術」研究終了報告書”, pp.1-62, 2011

28. 北村光司, 西田佳史, 本村陽一, 溝口博, “乳幼児事故予防のための情報循環システム”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6, pp. 887-896, 2007, [http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/report/sh\\_heisei17/sensing/04nishida.pdf](http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/report/sh_heisei17/sensing/04nishida.pdf) (参照日 2014年5月19日)
29. 加藤大智, 山岸弘幸, 鈴木秀和, 小中英嗣, 渡邊晃, “スマートフォンとセンサを活用したリモート見守りシステムの提案”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02011) シンポジウム論文集, pp.691-696, 2011.
30. J. K. Salisbury, “Interpretation of Contact Geometries from Force Measurement,” IEEE 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Robotics Research, pp. 240-247, 1984.
31. T. Tsujimura and T. Yabuta, “Object Detection by Tactile Sensing and Method Employing Force/Torque Information”, IEEE Trans on Robotics and Automations, Vol. 504, pp.444-460, 1989.
32. 泉他, “3つの反力情報に頼るティーチングレス形ラインディングロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 4, No. 2, pp.101-108, 1986.
33. A. Bicchi, “Intrinsic Contact Sensing for Soft Fingers”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.868-973, 1990.
34. 北垣, “能動的力覚センシングによる物体の辺合わせ動作”, 第8回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.395-398, 1990.
35. 澤田他, “力センサを用いた位置測定法”, 第8回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.399-400, 1990.
36. 永田, “接触情報による把持位置姿勢の検出”, 第1回日本ロボット学会ロボットシンポジウム予稿集, pp.139-144, 1991.
37. 金子, 谷江, “3D リンク系の準静的事故死性変形性に関する基礎的研究”, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 7, pp.857-864, 1991.
38. T. Yoshikawa and A. Sudou, “Dynamic Hybrid Position / Force Control of Robot Manipulators: On-Line Estimation of Unknown Constraint”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1231-1236, 1990.
39. 末広, 高瀬, “スキルに基づくマニピュレータシステム”, 日本ロボット学会誌, Vol. 8, No. 5, pp.551-562, 1990.
40. B. J. McCarragher and H. Asada, “Qualitative Template Matching Using Dynamics Process Model for State Transition Recognition of Robotic Assembly”, ASME DSC-Vol.31 Modelling and Control of Compliant and Rigid Motion Systems, pp. 155-163, 1991.

41. 平井他, “凸多面錐理論を用いたまにマニピュレーションの運動学とその把握および組み立て作業への応用”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 12, pp.1284-1291, 1988.
42. 平井他, “組立作業における位置・力信号の解釈による識別モデルをもとにした認識手続きの自動生成”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No. 2, pp.225-232, 1990.
43. R. S. Desai and R. A. Voltz, “Identification and Verification of Terminal Conditions in Fine Motion in Presence of Sensor Error and Geometric Uncertainties”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.800-807, 1989.
44. E. S. H. Hou, C. S. G. Lee, “Interpretation of Assembly Task Constraints from Position and Force Sensory Data”, SPIE Vol.1193 Intelligent Robots and Computer Vision VIII System and Applications, pp. 2-13, 1989.
45. T. Suehiro, K. Takase, “Development of Direct Drive Manipulator: ETA3 and Enhancement of Servo Stiffness by a Second-Order Digital Filter”, Proc. On 15th ISIR, pp. 479-486, 1984.
46. H. Asada, C. C. Federspiel, S. Lee, “Human Centered Control in Robotics and Consumer Product Design”, Journal of Dynamics System, Measurement and Control ASME Vol. 115, pp.271-279, 1993.
47. K. Kashiwagi, K. Ono, E. Izumi, T. Kurenuma, K. Yamada, “Force Controlled Robot for Grinding”, IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems 1990 (IROS '90), pp.1001-1006, 1990.
48. 柏木邦雄, “バリ取り・グラインダがけ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 3, pp.354-358, 1991.
49. M. G. Her, H. Kazerooni, “Automated Robotics Deburring of Parts Using Compliant Control”, Trans. of the ASME Vol. 113, March, pp. 60-66, 1991.
50. S. Ahmad, C. N. Lee, “Shape Recovery from Robot Contour-Tracking with Force Feedback”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.447-452, 1990.
51. Kakizaki T., et al, “Development of a High-Speed Visual Sensing System for Robotic Seam-Tracking in Automobile Body Sealing”, 31<sup>st</sup> ISATA proceedings: Advanced Manufacturing/Innovation Management, pp.329-337,1998.
52. 武藤伸洋, 手塚博久, 柳原義正, 茂木学, 小阪朋也, “ウェアラブルPCによる作業支援システム(センサベースロボット支援システムへの応用)”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 00, 2P2-39-047, 2000.

53. Yanagihara Y., Kakizaki T., Arakawa K., and Umeno A., “Task World Reality for Human and Robot System -A multimodal teaching advisor and its implementation”, IEEE International Workshop on Robot and HumanCommunication, pp.38-43, 1996.
54. 中村幸博, 武藤伸洋, 岩田義行, 永徳真一郎, 石原達也, 安部匡伸, 加藤英紀, 西孝明, 下倉健一郎, “プライバシーを考慮したロボットサービスシステム”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 1A1-F08(1)-(4), 日本機械学会, 2008.
55. 古結義浩, 見持圭一, 宅原雅人, 中村幸博, 武藤伸洋, 石原達也, 下倉健一郎, “ネットワークロボットを利用した体操補助システム”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 1A1-F09(1)-(4), 日本機械学会, 2008.
56. 中村幸博, 手塚博久, 武藤伸洋, 下倉健一郎, 秋本高明, 阿部匡伸, “ネットワークロボットプラットフォームを用いた複数環境を跨ったロボット連携サービスの実現”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 講演論文集 2A1-C6(1)-(4), 日本機械学会, 2009.
57. ORiN 協議会, <http://www.orin.jp/>
58. Object Management Group, “Documents Associated With Robotic Technology Component (RTC), Version 1.0”, <http://www.omg.org/spec/RTC/1.0/>
59. Object Management Group, “Robotic Interaction Service (RoIS) Formal Version(S) Of RoIS”, <http://www.omg.org/spec/RoIS/>
60. Object Management Group, “Robotic Localization Service (RLS) Version 1.0”, <http://www.omg.org/spec/RLS/1.0/PDF/>
61. 中野鐵兵, 藤江真也, 小林哲則, “MONEA: 効率的な多機能ロボット開発環境を実現するメッセージ指向ネットワークロボットアーキテクチャ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24 No. 4, pp. 543-553, 2006.
62. 青木崇行, 桐原幸彦, 中澤仁, 高汐一紀, 徳田英幸, “制御ルールを考慮したセンサアクチュエータネットワーク機構の構築”, 情報処理学会誌 コンピューティングシステム, Vol. 2 No. 2, pp178-191, 2009.
63. 目黒真一, 遠藤公誉, 山本哲也, 簗内勉, “製造・教育に関する IT ソリューション: 製造業向け IT ソリューションを実現するファクトリデータセンタ”, NTT 技術ジャーナル 14 巻 7 号, pp. 38-40, 2002.

64. H. Tezuka, N. Katafuchi, Y. Nakamura, T. Machino, Y. Nanjo, S. Iwaki and K. Shimokura, “Robot Platform Architecture for Information Sharing and Collaboration among Multiple Networked Robots”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 18 No. 3, pp.325-332, 2006.
65. 岩井将行, “CroSSML: Domain cross over services markup language”, 2006年度第1回ネットワークロボット研究会, No. NR-TG-2-04, pp25-30, 2006.
66. 鈴木源太, 岩本健嗣, 高汐一紀, 徳田英幸, “u-Photo: ユビキタス情報を付加した画像を実現する環境情報スナップショットの開発”, *情報処理学会研究報告[システムソフトウェアとオペレーティング・システム]* 2004(63), pp65-72, 2004.
67. 西尾修一, 神田崇行, 宮下敬宏, 篠沢一彦, 萩田紀博, 山崎達也, “関西環境プラットフォームの利用法”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 26 No. 5, pp427-430, 2008.
68. 志和敏之, 神田崇行, 今井倫太, 石黒浩, 萩田紀博, 安西祐一郎, “対話ロボットの反応時間と反応遅延時における間投詞の効果”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 27 No. 1, pp87-95, 2009.
69. 伊藤浩二, 武藤伸洋, 阿部匡伸, “ユーザ理解モデルを用いた嗜好把握方法と飲食店推薦サービスへの適用”, *信学技報 LOIS2010-25, IE2010-67*, vol. 110, no. 207, LOIS2010-25, pp. 43-48, 2010.
70. Nakamura, Y., Machino, T., Motegi, M., Iwata, Y., Miyamoto, T., Iwaki, S., Muto, S. and Shimokura, K., “Framework and service allocation for network robot platform and execution of dependent services”, *Robotics and Autonomous Systems Journal*, 56, pp. 831-842, 2008.
71. Noguchi, H., Mori, T. and Sato, T., “RDF Sensor description for heterogeneous sensors in human behavior monitoring environment”, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4369-4371, 2006.
72. Open Geospatial Consortium, “SensorML”, <http://www.ogcnetwork.net/SensorML> (参照日 2013年7月20日)
73. 越智隆弘, 山本一彦, 龍準之助(編), “関節リウマチの診療マニュアル(改訂版) -診療のマニュアルと EBM に基づく診療ガイドライン-”, 財団法人日本リウマチ財団, 東京, 2004.
74. D. Murphy, “Lycra working splint for the rheumatoid arthritic hand with MCP ulnar deviation”, *Australian Journal of Rural Health*, Vol. 4, No. 4, pp. 217-220, 1996.
75. 福原俊一, 他, “SF-36v2TM 日本語版マニュアル”, NPO 健康医療評価研究機構, 2004.
76. EuroQol Group, “A new facility for the measurement of health-related quality of life”, *Health Policy*, 16, pp.199-208, 1990.



77. Mahoney, F.I. et al., "Functional evaluation : the Barthel index" , Md State Med J, 14, pp.61-65, 1965.
78. Keith, R.A. et al., "The functional independence measure: a new tool for rehabilitation." , Advances in Clinical Rehabilitation, Eisenberg MG, Grzesiak RC(eds), Springer Publishing Company, New York, pp.6-18, 1987.
79. Patricia, S.B. et al., "Measuring Life-Space Mobility in Community-Dwelling Older Adults" , Journal of the American Geriatrics Society, 51(11), pp.1610-1614, 2003.
80. Bruce, B. et al., "The Stanford Health Assessment Questionnaire: a review of its history, issues, progress, and documentation" , J Rheumatol., 30(1), pp.167-178, 2003.
81. Meenan, R.F. et al., "AIMS 2. The content and properties of a revised and expanded Arthritis Impact Measurement Scales Health Status Questionnaire" , Arthritis Rheum, 35, pp.1-10, 1992.
82. Huskisson, E.C., "Measurement of pain" , Lancet, 2, pp. 1127-1131, 1974.
83. Lorish, C.D. et al., "The face scale ; A brief nonverbal method for assessing patient mood" , Arthritis Rheum, 29, pp.906-909, 1986.
84. Prevo, M.L. et al., "Modified disease activity scores that include twenty-eight-joint counts. Development and validation in a prospective longitudinal study of patients with rheumatoid arthritis" , Arthritis Rheum, 38, pp.44-48, 1995.
85. Aletaha, D. et al., "Acute phase reactants add little to composite disease activity indices for rheumatoid arthritis: validation of a clinical activity score." , Arthritis Res Ther, 7, pp.796-806, 2005.
86. Smolen, J.S. et al., "A simplified disease activity index for rheumatoid arthritis for use in clinical practice" , Rheumatology, 42, pp.244-257, 2003.
87. 武藤伸洋, 伊藤達明, 中村幸博, 石原達也, "携帯端末加速度情報を用いた歩行状態センシングの応用性に関する検討" , 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2011, 2P1-I05, 2011.
88. Nishiguchi, S., Yamada, M., Nagai, K., Mori, S., Kajiwara, Y., Sonoda, T., Yoshimura, K., Yoshitomi, H., Ito, H., Okamoto, K., Ito, T., Muto, S., Ishihara, T. and Aoyama, T., "Reliability and Validity of Gait Analysis by Android-Based Smartphone" , Telemedicine and e-Health, Vol.18, No.4, pp.292-296, 2012.

89. Yamada, M., Aoyama, T., Mori, S., Nishiguchi, S., Okamoto, K., Ito, T., Muto, S., Ishihara, T., Yoshitomi, H. and Ito, H., “Objective assessment of abnormal gait in patients with rheumatoid arthritis using a smartphone”, *Rheumatology International*, Vol. 32, Issue 12, pp.3869-3874, 2012.
90. 西口周, 伊藤宣, 篠原章夫, 吉富啓之, 布留守敏, 松田秀一, 青山朋樹, “スマートフォンを用いた自己測定非侵襲データによる関節リウマチ疾患活動性予測アルゴリズムの作成”, 第57回日本リウマチ学会総会・学術集会・国際リウマチシンポジウムプログラム, p.441, 2013.
91. 伊藤達明, 武田十季, 藪内勉, 浦哲也, 篠原章夫, 定方徹, 西口周, 山田実, 青山朋樹, 岡本和也, 吉富啓之, 伊藤宣, 小林稔, “関節リウマチ患者の日常生活情報共有システムの開発”, 情報処理学会研究会報告 IPSJ SIG Technical Report Vol.2012-GN-84 No.7, Vol.2012-SPT-3 No.7, pp.1-8, 2012.
92. 伊藤達明, 武田十季, 藪内勉, 浦哲也, 篠原章夫, 定方徹, 西口周, 山田実, 青山朋樹, 岡本和也, 吉富啓之, 布留守敏, 伊藤宣, 小林稔, “関節リウマチ患者における日常生活情報の収集に関する検討”, 信学技報 IEICE Technical Report LOIS2012-13, IE2012-45, EMM2012-36(2012-08), pp.7-12, 2012.
93. 西口周, 伊藤宣, 浦哲也, 篠原章夫, 伊藤達明, 岡本和也, 布留守敏, 吉富啓之, 山田実, 青山朋樹, “スマートフォンを用いた関節リウマチ患者のライフログ共有システムの開発”, 日本遠隔医療学会学術大会 JTTA2012 講演論文集 Vol.8 (2), pp102-105, 2012.
94. 八木浩一, “スマートフォンの加速度センサを用いた路面段差検出方法”, 第9回 ITS シンポジウム 2010, pp.394-399, 2010
95. Perttunen, M., Mazhelis, O., Cong, F., Kauppila, M., Leppänen, T., Kantola, J., Collin J., Pirttikangas, S., Haverinen, J., Ristaniemi, T. “Distributed road surface condition monitoring using mobile phones”, *Proc. of Ubiquitous Intelligence and Computing*, pp.64-78, 2011
96. 国土交通省, “歩行空間ネットワークデータ整備仕様案”, <http://www.mlit.go.jp/common/000124059.pdf>, 2010.
97. 井上道哉, 古山宗亮, 金房雄一, 長沢可也, “iPhone を利用したバリア情報記録・公開システム”, 電子情報通信学会技術研究報告 福祉情報工学, 111(424), pp.97-101, 2012.
98. 国土交通省 総合政策局, “安心して子育てができる環境整備のあり方に関する調査研究”, <http://www.mlit.go.jp/common/000116746.pdf>, 2010.
99. 小塚勝紀, 新崎淳史, 波床正敏, “連れ移動者の視点から見た交通バリアフリーの課題抽出”, 土木計画学研究・講演集, 28 巻, VIII(287), 2003.

100. 大神博史, 齋藤誠二, 大倉美鶴, 村木里志, “歩道におけるベビーカー利用者の身体負担と危険性に関する調査研究”, 第3回生活支援工学系学会連合大会, 1P2-C4, 2005.



## 研究業績

種類別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者(申請者含む)
論文	<p>(学術誌原著論文(査読があるもの))</p> <p>○ 携帯端末センサ情報収集方式の歩容概要記録への応用と拡張性に関する研究, 日本機械学会論文集(掲載決定 Vol. 80, No. 819 掲載予定) 武藤伸洋, 中村幸博, 伊藤達明, 石原達也, 篠原章夫, 西口周, 山田実, 青山朋樹, 岡本和也, 吉富啓之, 布留守敏, 伊藤宣</p> <p>ネットワークロボットプラットフォーム -4Wに基づいた異種センサデータ統合-, 計測自動制御学会論文誌, vol.50, No.1, pp. 82-90, 2014/01, 中村幸博, 武藤伸洋, 水川真, 茂木学, 小林透, 高嶋洋一</p> <p>Objective assessment of abnormal gait in patients with rheumatoid arthritis using a smartphone, Rheumatology International, Vol. 32, Issue 12, pp 3869/3874, 2012/12, Minoru YAMADA Tomoki AOYAMA, Shuhei MORI, Shu NISHIGUCHI, Kazuya OKAMOTO, Tatsuaki ITO, Shinyo MUTO, Tatsuya ISHIHARA, Hiroyuki YOSHITOMI, Hiromu ITO</p> <p>○ ネットワークロボットプラットフォームの実証実験による評価, 電子情報通信学会論文誌 D Vol. J93-D, No.10, pp.2240/2256, 2010/10., 武藤伸洋, 下倉健一朗, 中村幸博, 手塚博久, 阿部匡伸</p> <p>Framework and Service Allocation for Network Robot Platform and Execution of Dependent Services”, Robotics and Autonomous Systems Journal, 56, pp.831/842, 2008/10, Yukihiro NAKAMURA, Tamotsu MACHINO, Manabu MOTEGI, Yoshiyuki IWATA, Takanori MIYAMOTO, Satoshi IWAKI, Shin-yo MUTO, Ken-ichiro SHIMOKURA</p> <p>ウェアラブルコンピュータを適用したマルチモーダル教示アドバイザーのユーザインタフェース評価, 精密工学会誌第 67 巻第 5 号, PP.739/.744, 2001/01, 柳原義正, 武藤伸洋, 柿崎隆夫</p> <p>○ センサベースロボットシステムのための運動情報マネージメント, 日本ロボット学会誌 Vol.15, No.8, pp.1156/1163, 1997/11, 手塚博久, 武藤伸洋</p> <p>○ 接触情報センシングを用いた倣い作業の教示と制御, 日本ロボット学会誌 Vol.15, No.5, pp.744/751, 1997/07 武藤伸洋, 下倉健一朗</p> <p>○ 力・速度情報の相補的利用による接触点検出法, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.3 , pp.429/435, 1993/04, 武藤伸洋, 下倉健一朗</p> <p>(国際会議(査読があるもの))</p> <p>○ The Concept of Cooperative Sidewalk Supporting System that Manages Sensory Information from Mobile Terminals and Personal Mobility, 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 364/369, 2013/12, Shin-yo MUTO, Hideaki IWAMOTO, Tatsuaki ITO, Noriyoshi UCHIDA, Masakazu URATA, Hikaru TAKENAKA Jun-ichi NAKAGAWA, Takashi SATOU</p> <p>○ Field-AID System Providing Onsite Data Visualization and Onsite Parameter Tuning for Supporting Sensor-Based Industrial Manipulators, Proceedings of 14th International Conference on Computer-Aided Production Engineering, pp. 459/464, 1998/09, Shin-yo MUTO, Hirohisa TEZUKA, Yoshimasa YANAGIHARA, Takao KAKIZAKI</p>

種類別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者(申請者含む)
論文	<p>(国際会議(査読があるもの)) Teaching and Control of Robot Contour- Tracking Using Contact Point Detection, IEEE International Conference on Robotics and Automation 1994 Vol. 1 pp. 674/681, 1994/05, Shin-yo MUTO, Ken-ichiro SHIMOKURA</p> <p>Accurate Contact Point Detecting Using Force and Velocity Information Complementarily”, IEEE International Conference on Robotics and Automation 1993 Vol. 1 , pp.738/744, 1993/05, Shin-yo MUTO, Ken-ichiro SHIMOKURA</p>
総説	<p>(学術誌の解説, 講座等) 把握中のセンシング戦略: その4 作業中の接触点検出, ロボット学会誌 Vol. 11, No. 7, pp.985/991, 1993/10, 武藤伸洋, 下倉健一郎</p>
講演	<p>(国際会議(査読がないもの)) Field experiments using network robot platform and common interface, IEEE/RSJ IROS 2009 Workshop, 2009/10, Shin-yo. MUTO, Hirohisa TEZUKA, Yukihiro NAKAMURA, Yo-ichi TAKASHIMA, Masanobu ABE, Ken-ichiro SHIMOKURA, Takaaki. AKIMOTO, Norihiro HAGITA</p> <p>Network robot Project Field Experiments in 2006, IEEE/RSJ IROS 2007 Workshop, 2007/10, Ken-ichiro SHIMOKURA, Shin-yo MUTO, Yukihiro NAKAMURA</p> <p>Service Allocation Architecture for Network Robots Based on 4W Information, IEEE International Conference on Robotics and Automation 2007 Workshop, 2007/04, Yukihiro NAKAMURA, Tamotsu MACHINO, Manabu MOTEGI, Yoshiyuki IWATA, Takanori MIYAMOTO, Satoshi IWAKI, Shin-yo MUTO, Ken-ichiro SHIMOKURA</p> <p>(学会発表(研究会)) ユーザ理解モデルを用いた嗜好把握方法と飲食店推薦サービスへの適用, 信学技報 LOIS2010-25, IE2010-67 , vol. 110, no. 207, LOIS2010-25, pp. 43/48, 2010/09, 伊藤浩二, 武藤伸洋, 阿部匡伸</p> <p>ネットワークロボットプラットフォームを介した複数のアンコンシャス・ビジブルロボットの連携実験, 電気情報通信学会ネットワークロボット時限研究会 2007 年度第 2 回研究会, pp.23/38, 2008/03, 下倉健一郎, 武藤伸洋, 中村幸博, 見持圭一, 古結義浩</p> <p>4W に基づいたセンサ情報統合化方式の提案, 電子情報通信学会ネットワークロボット時限研究会 2007 年度第一回研究会, pp.1/6, 2007/07, 中村幸博, 茂木学, 町野保, 岩田義行, 武藤伸洋, 下倉健一郎</p> <p>PC を介したロボット・情報機器の音声操作に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告書ヒューマンコミュニケーション基礎 HCS2000-56~61, pp.1/6, 2001/03, 武藤伸洋, 手塚博久, 中村幸博, 茂木学</p> <p>(学会発表(定期大会)) 携帯端末加速度情報を用いた歩行状態センシングの応用性に関する検討, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会' 11, 2P1-I05, 2011/05, 武藤伸洋, 伊藤達明, 中村幸博, 石原達也</p> <p>多種ロボット連携実験によるネットワークロボットプラットフォームの拡張性・効率性に関する検証, 第 10 回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 SI2009 2D1-3, 2009/12, 武藤伸洋, 中村幸博, 手塚博久, 阿部匡伸, 下倉健一郎</p>

種類別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者(申請者含む)
講演	<p>(学会発表(定期大会))</p> <p>ネットワークロボットプラットフォームを利用した多種ロボット連携の実証実験, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'09, 2A1-C07, 2009/05, 武藤伸洋, 中村幸博, 手塚博久, 阿部匡伸, 下倉健一郎</p> <p>ウェアラブル PC による作業支援システム(センサベースロボット支援システムへの応用), 2P2-39-047, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会00, 2000/05, 武藤伸洋, 手塚博久, 柳原義正, 茂木学, 小阪朋也</p> <p>信頼度ファクタを導入した接触情報センシング, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'95, Vol. B, pp.1299/1300, 1995/06, 武藤伸洋, 下倉健一郎</p> <p>接触センシングに基づく倣い制御・作業教示法, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'94, Vol. A, pp.681/686, 1994/06, 武藤伸洋, 下倉健一郎</p> <p>モータ代数を用いた力・速度情報の処理方式—把持物体の接触点検出に関する検討—, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'92, Vol. A, pp.791/794, 1992/06, 武藤伸洋, 下倉健一郎</p> <p>その他学会発表(定期大会)での筆頭での発表4件</p>
著書	<p>画像電子学会編, 画像電子情報ハンドブック(第4編2, 4, 2ネットワークロボット), 画像電子学会, 東京電機大学出版, 2008/02, (共著)</p> <p>日本機械学会編, 挑戦: 知能化する機械(6.3 節倣いのために触れる)執筆, 日本機械学会編, 養賢堂出版, 1997/07, (共著)</p>
その他	<p>(特許)</p> <p>可視化処理装置および可視化処理システム, 特許 3537075, 2004/06, 武藤伸洋</p> <p>ロボットのシステム制御方法及び装置, 特許 3218553, 2001/10, 武藤伸洋</p> <p>加工・組立装置の倣い制御方法および倣い制御装置, 特許 3206775, 2001/09, 武藤伸洋, 下倉健一郎, 野中潔</p> <p>加工・組立装置における接触点および接触法線検出法, 特許 3196145, 2001/08, 武藤伸洋, 下倉健一郎</p> <p>ロボット診断方法, 特許 3104839, 2000/10, 手塚博久, 武藤伸洋</p> <p>(本論文と直接関係のない査読付き論文)</p> <p>転倒転落事故の予防を目的とした見守りベッドシステム, 電子情報通信学会論文誌 D Vol. J94-D, No.6, pp.1025/1038, 2011/06, 茂木学, 松村成宗, 山田智広, 武藤伸洋, 金丸直義, 下倉健一郎, 阿部匡伸, 大久保由美子, 森田佳子, 葛西圭子, 山元友子, 落合慈之</p> <p>カメラとプロジェクトを搭載した移動ロボットによる実空間視野共有型コラボレーションシステム, 日本ロボット学会誌 Vol.28, No. 6, pp.746/755, 2010/07, 町野保, 南條義人, 柳原義正, 河田博昭, 岩城敏, 下倉健一郎, 武藤伸洋</p> <p>遠隔協調作業支援システム Field-AID の開発と評価, 日本機械学会論文集 C VOL.72, NO.716, pp.1223/1229, 2006/04, 町野保, 柳原義正, 南條義人, 河田博昭, 下倉健一郎, 武藤伸洋, 茂木学</p> <p>On Tracking of Eye for Human-Robot Interface, IEEE International Journal of Robotics and Automation Vol.19, Issue 1, pp.42/54, 2004/08, Md. Al-Amin BHUIYAN, Vuthichai AMPORNARAMVETH, Shin-yo MUTO, Haruki UENO</p>

種別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者(申請者含む)
その他	<p>(本論文と直接関係のない査読付き論文)</p> <p>Evaluating User Interface of Multimodal Teaching Adviser Implemented on a Wearable Personal Computer, Journal of Intelligent and Robotic Systems 31, pp.423/438, 2001/01, Yoshimasa YANAGIHARA, Shin-yo MUTO, Takao KAKIZAKI</p> <p>Assembly Task-oriented Manipulation System(ATOMS)の開発, 日本ロボット学会誌 Vol.13, No.8, pp.1190/1198, 1995/11, 下倉健一郎, 武藤伸洋</p> <p>接触状態変化検出機能を有するマニピュレーションシステムに関する検討, 日本ロボット学会誌 Vol.12, No.6, pp.837/845, 1994/09, 下倉健一郎, 武藤伸洋</p> <p>その他, 本論文と直接関係のない査読付き論文連名8件</p> <p>(本論文と直接関係のない国際会議・シンポジウム(査読があるもの))</p> <p>Proposal of Active Information Supplement Platform Based on 4W Information, 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 951/956, 2012/12, Yukihiro NAKAMURA, Shin-yo MUTO, Manabu MOTEGI, Makoto MIZUKAWA</p> <p>Sensor-Enhanced Robotic Cell Collaboration Using Shared Task Error Information”, IEEE International Conference on Robotics and Automation 1998, pp. 2375/2382, 1998/05, Manabu MOTEGI, Takao KAKIZAKI, Shin-yo MUTO</p> <p>An Analysis Method for Human Assembly Operations Aiming at Automatic Generation of Robot Commands, IEEE International Conference on Robotics and Automation 1993 Vol. 2, pp. 695/700, 1993/05, Tomoichi TAKAHASHI, Hiroyuki OGATA, Shin-yo MUTO</p>



## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり，早稲田大学理工学術院 菅野重樹教授にご指導とご教示を賜りました．ここに深謝の意を表します．早稲田大学理工学術院 藤江正克教授，三輪敬之教授，尾形哲也教授，岩田浩康教授には，幅広い観点から本論文のご指導を頂き深く感謝いたします．

本研究は，著者が NTT ヒューマンインタフェース研究所，サイバーソリューション研究所，サービスエボリューション研究所に在籍した間に行った研究の一部をまとめたものです．本研究を行う機会を作っていただいた木暮賢司博士，NTT エレクトロニクス株式会社 酒井高志 部長，日本大学 柿崎隆夫教授，東京都市大学 奥平雅士教授，故 下倉健一郎博士，岡山大学 阿部匡伸教授，NTT エレクトロニクス株式会社 市森峰樹 部長，NTT アドバンステクノロジー株式会社 内田直樹 部長，NTT 金丸直義 主幹研究員に深く感謝します．一連の研究では，NTT 手塚博久 主幹研究員，毛利忠 主任研究員，中村幸博 主任研究員，茂木学 主任研究員，NTT ファネットシステムズ株式会社 柳原義正博士，芝浦工業大学 水川真教授，広島市立大学 岩城敏教授，NTT 南條義人 担当部長，篠原章夫 主任研究員，NTT 西日本 岩田義行 担当課長，NTT 岩本秀明，研究主任，伊藤達明 研究員，永徳真一郎 研究員，石原達也 研究員，NTTOB の野中潔博士，町野保博士に多大な貢献を頂きました．第 2 章の研究の溶接センサロボットに関しては，株式会社ダイヘンと NTT ファネットシステムズ株式会社との共同開発にて実用化をすすめさせていただきました．私の初めての実用化経験の中，各社のご担当者様から貴重なご意見をいただきましたことを感謝いたします．第 3 章は，総務省受託研究「ネットワーク・ヒューマン・インタフェースの総合的な研究開発(ネットワークロボット技術)」での成果の一部をまとめたものです．このプロジェクトでは，国際電気通信基礎技術研究所，株式会社東芝，三菱重工業株式会社との共同研究で進められました．各社ご担当者様には長期に渡る実証実験に関して貴重なご指導を頂きました．第 4 章の研究の一部は，京都大学院医学研究科，京都大学医部附属病院との受委託研究で進められました．皆様には実験の初期段階から臨床実験に至るまで多大なご指導を頂きました．

また，筆者がロボットやセンサに関わる研究をするきっかけを作って頂き，その後もロボット研究に関する多くのことを教えて頂いた故加藤一郎先生ならびに研究室 OB，関連研究室の皆様は心より感謝いたします．大学の時期からロボットに対する熱意を共有できる皆様と過ごせたことは，その後の研究活動を心強く進める原動力となったと感じています，

最後に，論文をまとめるにあたり，私の長年の目標を理解し協力してくれた妻 照永と，いつも笑顔で元気を与えてくれた娘 詩歩に心から感謝します．

