複数の案内ロボットが連携してサービス提供する ネットワークロボットシステムの実現

塩 見 昌 裕^{*1} 神 田 崇 行^{*1} Dylan F. Glas^{*1}
佐 竹 聡^{*1} 石 黒 浩^{*1*2} 萩 田 紀 博^{*1}

A Network Robot System for Cooperative Guide Service in a Shopping Mall

Masahiro Shiomi^{*1}, Takayuki Kanda^{*1}, Dylan F. Glas^{*1},
Satoru Satake^{*1}, Hiroshi Ishiguro^{*1*2} and Norihiro Hagita^{*1}

In this paper, we report a field trial with a network robot system in a shopping mall. Our network robot system consists of three components: environmental sensors, network robot platform and social robots. Multiple laser range finders are used as the environmental sensors to estimate people's positions. Position data is used to estimate such human walking behaviors as "stopping" or "idle walking," to direct robots to provide appropriate tasks to appropriate people. By using this information, the network robot platform coordinates multiple social robots to provide efficient service to customers. It coordinates the tasks of robots based on their positions and people's walking behavior, the paths of robots, and the conversation-performance between two robots. Each social robot interacts with people to provide recommendation information about shops and route information of the mall. The system sometimes simultaneously uses two robots to lead people from one place to the specific shop. We conducted a field trial in a shopping mall, in which four robots interacted with 414 people. It demonstrated the effectiveness of the network robot system for guiding people around a shopping mall as well as increasing their interest.

Key Words: Network Robot, Communication Robot, Shopping Mall, Field Trial

1. は じ め に

商業施設や駅構内などの日常環境における、人々に道案内や情報提供などのサービスを提供する新たなデバイスとして、コミュニケーションロボットの研究開発が進んでいる。これまでも、博物館での案内ロボット [1] [2] や、大学構内での受付ロボット [3]、小学校での語学学習支援ロボット [4]、病院や家庭などの施設におけるヘルスケアロボット [5]~[7] など、様々な研究開発が行われている。

さらに、このようなロボットが複数台で連携して活動することで、状況に応じてサービスを行うロボットを切り替えることや、サービス内容そのものを切り替えることが可能になる。例えば広大な商業施設のような、人々が道に迷いやすく、頻繁に地図が利用される環境では、あるロボットは地図の前で待ち受け、訪れた人々に道案内を行っている際に、別のロボットは地

図から離れた場所で巡回を行い、自ら人々へ近づいて道案内を提供する、といった連携が可能になる。また、実際の店舗で人間が行っているように、特定の店舗前へ誘導する役割と店舗前で説明する役割を2台のロボットが分担して行うといった連携が可能になる。そのような連携を実現するために、我々は、複数のロボットが同一環境下で連携してサービスを提供するための、ロボット間の調整を行う仕組みが必要不可欠であると考えた。例えば、人々の位置や行動に応じてサービスを提供するために必要なタスク（巡回する、人にアプローチする、対話を開始する、など）を実行するロボットの切り替え、タスクに応じた各ロボットの移動経路を調整、タスク連携を行うロボットの決定、といった仕組みが必要になるであろう。

これまでも、複数ロボットが連携して主に環境内の地図を効率的に作成するシステム [8] や、ロボットサッカーのアプリケーションを題材にロボット間の移動経路や役割を決定するシステムの開発 [9] は行われてきた。また、科学博物館 [1]、万博会場 [2]、商業施設 [10] といった、一般の人々が行き交う環境での情報提供サービスを行う個別のロボットシステムも開発されている。さらに、家庭内やオフィス内といった、比較的静的な環境において、ロボットが連携してサービス提供を行うシステ

原稿受付 2010 年 5 月 26 日

^{*1}国際電気通信基礎技術研究所

^{*2}大阪大学

^{*1}ATR

^{*2}Osaka Univ.

■ 本論文は提案性で評価されました。

Fig. 1 Overview of the networked robot system

ムも開発されている[5][11]。しかしながら、これらの研究では、一般の人々が行き交う動的な環境下で、複数のロボットが連携してサービスを提供するシステムを実現するために、どのような枠組みに基づいてロボットが活動をすべきか、といった問題は取り組まれていなかった。

本研究では、商業施設のような日常環境において、複数ロボットが連携してサービス提供を実現するためのシステム開発を行う。開発するシステムは、人々の行動を観測するために設置された環境センサ、複数存在するロボット間の役割や移動経路を状況に応じて調整するプラットフォーム、および人々にサービス提供を行う複数のロボットから構成される。本稿では、商業施設内で複数のロボットが連携して店舗推薦や道案内、特定店舗への誘導などを行うための一連のシステム開発と、それをもとに一般の人々へのサービス提供を行うフィールド実験について報告し、開発したシステムの有効性を示す。

2. システムの設計指針

2.1 ネットワークロボットシステム

同一環境内で複数のロボットが連携してサービスを提供するために、我々は、各ロボットのタスク・移動経路・連携シナリオの、3種類の調整を行う必要があると考える。これらの調整を実現するために、環境中のセンサから観測される人々の情報に基づき、中央システムが各ロボットの状況や位置に応じて役割や移動経路を効率的に調整する、ネットワークロボットとよばれるアプローチが注目されている[12]。

我々も、このような中央システムを用いることで、複数ロボット間の連携を実現する。例えば、人々やロボットの位置関係の変化などの状況に応じてロボット間でタスクを調整することで、1人のユーザに複数のロボットが同時に情報提供を行う、何度も同じユーザに各ロボットが情報提供を行う、等の不自然な状況を防ぐことができる。また、移動経路の調整をタスクの優先度や人々・ロボットの位置を考慮して行うことで、ロボットは互い

に邪魔をせずに人々へ近づくことや、特定の場所へ移動することができる。さらに、連携シナリオを調整して2台のロボットが物理的に協調し、タイミングを調整して振る舞うことで、ロボット間でのタスク分担や連携を行う。

このような、各ロボットのタスクや移動経路、連携シナリオの調整を実現するためには、環境中に存在する人々やロボットの位置情報を精度よく取得する必要がある。ロボット単体のセンシング能力はいまだ限られているため、我々は環境側にセンサを設置することでそのセンシング能力を補う手法を用いる。

これらの考察に基づいて我々が提案する、ネットワークロボットシステムの概要図をFig. 1に示す。ネットワークロボットシステムは、1. 環境センサ、2. ネットワークロボットプラットフォーム、3. ロボット、の3要素から構成される。3章以降で、各要素に関する実装の詳細について記述を行う。

2.2 ロボットのタスクデザイン

日本政府のレポート[13]によると、人々が日常環境下においてロボットに求めている役割として、商業施設や駅などの公共空間における情報提供サービスが報告されている。また、荷物を運搬するなどの、物理的なサービスも同様に求められていると報告されている。

これらの報告をもとに、我々は多くの店舗が存在する商業施設内において、道案内や店舗に関する情報提供を行う「案内ロボット」として商業施設に導入されるシナリオを想定してロボットのタスクをデザインした。具体的には、ロボットの役割として、地図の前や特定店舗の前であらかじめ待ち受けて情報提供を行うものと、環境中を巡回しつつ人々の行動予測に基づいてアプローチを行い情報提供するというものの、大きく2種類を設定する。人々対話を開始して情報提供を行う際には、道案内と特定店舗への誘導に関するオファーを行い、人々が望んだ情報の提供を行う。人々が特定店舗への誘導を望んだ場合に、あらかじめ特定店舗の前で待ち受けているロボットがアイドル状態であった場合には、そのロボットとの連携を行い店舗への誘

導と情報提供を行う。

タスクの詳細と、各タスクがどのようにロボットへとアサインされるかのルールは、4.1 節に記述する。

3. 環境センサシステムの実装

本章では、4章で記述するネットワークロボットプラットフォームがロボットのタスクを決定するために用いられる、人々の行動やロボットの位置情報を推定する環境センサシステム (Fig. 1, 左上) の具体的な実装内容について記述する。人々の位置情報は「止まっている」「ゆっくり歩いている」「走っている」などの、移動軌跡に基づく局所的な移動行動 (以下、局所行動と記述) や、「地図の前」「店舗の前」などの場所に関する情報 (以下、空間行動と記述) を推定するために用いられる。さらに、これらの軌跡情報を蓄積することで、「環境内をゆっくり通過する」「店舗の前で立ち止まる」などの大域的な移動行動 (以下、大局行動と記述) を推定する [14]。

3.1 人位置推定

我々は、人々の位置を推定するためのセンサとして、6 台のレーザレンジファインダー (LRF), SICK LMS-200 を環境内に設置する。センサの高さは、85 [cm] とした。実際にセンサを設置した環境の外観と、センサを Fig. 2 に示す。

各センサから得られた距離情報を統合して人々の位置を推定するために、Dylan らによって開発されたアルゴリズムを用いた [15]。手法の詳細は文献 [15] に示すが、パーティクルフィルタを用いて、腰の高さで計測された環境内の距離データと形状データから個人の位置推定を行っている。平均的な歩行速度を想定した場合には、位置推定誤差は ± 6 [cm] の誤差であった。

3.2 局所行動

局所行動とは、人々の局所的な移動行動、例えば「歩いている」「止まる」などを分類したものである [14]。本研究では、局所行動を「早く歩く」「うろろろする」「ゆっくり歩く」「止まる」という四つに分類した。

本システムでは、サポートベクターマシン (SVM) [16] とよばれる学習機を用いることで、移動量や移動速度、移動軌跡の特徴量からこれらの局所行動を動的に推定する。SVM を学習する軌跡データを作成するために、ショッピングモールを実際に訪れた訪問客の軌跡を手動で分類した。最終的に 701 個のデータに対してラベリングを行い、leaving-one-out method を用いて判別

Fig. 2 Shopping arcade and laser range finders

性能を検証した結果、平均推定成功率は 90% 以上であった [14]。

3.3 空間行動

空間行動とは、店舗前やベンチ、地図の前など、特定の場所に関する情報を定義したものである。これらの判定は、人々の XY 座標から行われる。この空間行動を用いることで、例えば地図の前で止まっている人へのみ道案内サービスを提供するなどの、人々の場所に依じたロボットサービスを実現する。本研究では、人々へ提供すべきサービスが変化する場所として、空間行動を「地図の前」「店舗の前」「通路」の三つに分類した。

3.4 大局行動

大局行動とは、「左側から右側へ環境内をゆっくりと通過する」「店舗前までゆっくりと歩いてきたあとに、店舗に入る」などの、空間の利用状況や人々の行動パターンを意味する行動を定義したものである。環境内での大局行動を解析するために、我々は過去に開発されたアルゴリズムを用いて、1 万人以上の移動軌跡の解析を行った。この手法では、大局行動はグリッド上に分割された各空間における局所行動の遷移によって表現される。蓄積された移動軌跡から特徴量を取得し、k-means 法に基づく軌跡のクラスタリング法 [14] を利用することで、大局行動を軌跡群のクラスタとして抽出する。手法の詳細は文献 [14] に示すが、DP マッチングにより軌跡の比較を行うことで類似度の計算を行い、クラスタリングを行っている。

最終的に 300 の典型的な大局行動を意味するクラスタを得ることができ、そのうちいくつかは忙しい人間のパターンを示した (Fig. 3 (a))。またいくつかは、ウィンドウショッピングのパターンを示した (Fig. 3 (b))。Fig. 3 において色の濃い箇所は、そのクラスタに分類された軌跡が頻繁に通過する場所を示す。また色の薄い箇所は、そのクラスタに分類された軌跡が通る頻度の低い場所を示す。

3.5 局所行動と位置の予測

解析された大局行動の情報と、環境センサから観測された人々の移動軌跡を用いることで、大局行動を推定し、数秒後に起きる可能性の高そうな局所行動とその位置を予測する。行動と位置の予測は、観測されたすべての人間に対して行われる [14]。詳細は文献 [14] に示すが、観測開始から T 秒経過した人間の行動を予測する場合、その軌跡と類似する複数クラスタの平均軌跡の、最初の T 秒間に対して DP マッチングによる比較を行うことで、最も類似した五つのクラスタを選択する。それらのクラスタから予測される $T+t$ 秒における局所行動と位置を計算し、局所行動と位置の総出現頻度を予測する。

Fig. 4 に、ある人間の行動予測結果を示す。太線で描かれた丸が、人間の位置を示している。予期された軌道は、廊下を左下から右上へと移動するものであり、システムが人間の移動軌

(a) A “busy person” pattern (b) A “window shopper” pattern

Fig. 3 Extraction of typical behaviors

Table 1 Tasks and path priorities

Task	Contents	Task priority	Path priority
Roaming	Roam around (allowed to be assigned below tasks)	7	6
Approach to a person	Approach to a person who does idle walking or stop	6	1
Guide to the shop	Guide a person who wants to visit to the shop. (If possible, two robots collaborate with each other to do this task)	2	2
Stand-by at the map	Wait at the front of the map	3	3
Stand-by at the shop	Wait at the front of the shop	4	4
Stand-by at the charging point	Wait at the charging point	5	5
Interaction	Provide recommendation information about shopping and/or route guidance	1	-

Fig. 4 Example of prediction of future local behavior

跡を予測できたことが示されている。

4. ネットワークロボットプラットフォームの実装

ネットワークロボットプラットフォーム (Fig. 1, 右上) は、環境センサから得られる人々やロボットの位置情報、タスクの実行状況に基づいて、複数ロボット間のタスクや移動経路、連携シナリオという3種類の調整を行う。例えば、人々が道に迷いやすく、頻繁に地図が利用されるような環境では、あるロボットが地図の前で待ち受けて道案内サービスを提供しつつ、別のロボットは環境中を巡回して人々へ道案内サービスを提供するといった、状況や環境に応じたロボット間連携を実現する。また、実際の商業施設内で人間が行っているような、特定店舗前へと誘導する役割と店舗前で説明する役割を2台のロボットで分担するためのタスク連携に関する調整も行う。以下に、各調整機構の機能について記述する。

4.1 タスク調整機構 (Task coordinator)

タスク調整機構は、環境センサから推定された人々の位置や行動、人々やロボットの位置、およびロボットの内部状態という三つの要素を考慮してタスクを調整する。また、どの人物にどのタスクが行われたかの履歴を用いることで、同じ人物に何度もアプローチを行う、複数のロボットが同時にアプローチを行うといった不自然なタスクアサインを回避する。ロボットが行うタスクと、そのタスクをアサインするルールを、Table 1に示す (priorityの値は、1が最も優先度が高いことを意味する)。

ローミング: 本タスクは、アイドル状態のロボットが環境内を巡回するために用いられる。タスクがアサインされていないロボットに対して、環境内に人々が存在しない場合や、存在する人々の予測された局所行動が「早く歩く」であった場合には、このタスクがアサインされる。このタスクがアサインされたロボットは、ローミングタスク用の移動経路に従って環境内を移動する。

アプローチ: 本タスクは、サービスを提供する対象に、ロボットから近づくために用いられる。具体的には、ローミングタスクがアサインされているロボットに対して、環境内に存在

する人の予測された局所行動が「ゆっくり歩く」「止まる」であった場合で、ロボットの移動速度と人・ロボット間の距離を考慮してアプローチが可能であった場合に、このタスクがアサインされる。アサインされたロボットは、後述するアプローチ用の移動経路に従って対象となるユーザにアプローチを行う。アプローチ中に、ユーザが立ち去るなどの理由によってロボットの距離が離れ、アプローチが困難と判断された場合には、アプローチタスクを終了させる。なお、アプローチタスクを割り当てられたロボットが人にアプローチする際には、ロボットは対象に視線を向けるなど対話意図を対象に伝えながら接近するように設計した [17]。

なお、アプローチタスクにおける移動経路の優先度は、対象への到達時刻を短くするために、最も高い値とした。また、一度アプローチを行った人物や、現在アプローチ対象となっている人物は、アプローチの対象とならないように設計した。これは、複数のロボットが同じ人物に何度もアプローチを行わないようにするためである。

店舗への誘導: 本タスクは、人々を店舗へ誘導して情報提供を行うために用いられる。対話タスクを行っているロボットに対して、人々が店舗への誘導を望んだ場合には、対話タスクが終了され、このタスクがアサインされる。アサインされたロボットは、人々と店舗前まで一緒に移動して、店舗の説明を行う。なお、このタスクがアサインされたときに、店舗前での待ち受けタスクを行っているロボットが存在した場合には、2台のロボットによる連携が行われる。詳細は4.3節に記述するが、これら2台のロボットは連携動作を開始し、店舗への誘導と説明という役割をロボット間で分担して行う。

地図前での待ち受け: 本タスクは、人々が立ち止まりやすい地図の前で待ち受けて、道案内に関する情報提供を求める人たちに効率的に話しかけるために用いられる。このタスクがどのロボットにもアサインされていない状態で、地図近辺で対話タスクを行っているロボットが存在しなければ、最も地図に近く、かつローミングタスクがアサインされているロボットにタスクがアサインされる。このタスクがアサインされるロボットの数は、最大1台である。アサインされたロボットは、地図前へ移動を開始し、待ち受けを行う。

店舗前での待ち受け: 本タスクは、店舗前でロボットが待ち受けることで、店舗に興味を持った人に効率的に話しかけるために用いられる。このタスクがどのロボットにもアサインされていない状態で、店舗前近辺で対話タスクを行っているロボットが存在しなければ、最も店舗に近く、かつローミングタスク

がアサインされているロボットにタスクがアサインされる。このタスクがアサインされるロボットの数は、最大1台である。アサインされたロボットは、店舗前へ移動を開始し、待ち受けを行う。

バッテリー充電：本タスクは、各ロボットの活動時間を効率的に延長させ、複数台のロボットによるサービス提供が可能な時間を増加させるために用いられる。ローミングタスクがアサインされているロボットに対して、バッテリー残量が一定未満になった場合に、このタスクがアサインされる。タスクをアサインされたロボットはバッテリーを充電する場所まで移動を開始し、バッテリーの交換が終了するまで待機する。バッテリーの交換が終了し、バッテリー残量が一定以上になって移動可能になった場合に、バッテリー充電タスクを終了させる。このタスクがアサインされるロボットの数は、最大1台である。

対話：本タスクは、ロボットが人々との対話を開始する際に用いられる。対話タスクは、アプローチタスクがアサインされたロボットがアプローチ対象に1[m]以内に近づいた場合と、待ち受けタスクがアサインされたロボットの周囲1[m]で人々の局所行動が「止まる」と予測された場合に、そのロボットへアサインされる。また、人がロボットに話しかけた場合には、このタスクが最優先でアサインされる。このタスクでは、対象となるユーザに対して挨拶を行ったあと、道案内と特定店舗への誘導に関するオファーを行い、人々が望んだ情報の提供を行う。対話が終了した場合や、対話途中でユーザが立ち去った場合には、対話タスクは終了し、ローミングタスクがアサインされる。対話中に人々が店舗への誘導を望んだ場合にのみ、上述した店舗への誘導タスクがアサインされる。

4.2 移動経路調整機構 (Path coordinator)

移動経路調整機構は、タスクをアサインされたロボットが、タスクを実行するために必要とする移動経路を計算する。移動経路は、ロボットの速度から計算される安全停止距離を考慮して計算され、ロボットがすれ違う場合に衝突が起きないように設定される。Fig. 5に、移動経路の計算結果例を示す。三角の記号がロボットの位置を示しており、そこから延びる線が移動経路を意味している。この例では、2台がそれぞれ店舗前と地図前で待ち受けており、ほかの2台にローミングパスが割り当てられている状態を示している。

各移動経路には、タスクに応じた優先順位が設定される。優先度の低いタスクの移動経路は、優先度の高いタスクの移動経路を迂回するように計算される。移動経路の優先順位は、1. アプローチタスク、2. 店舗への誘導タスク、3~5. 特定場所への

Fig. 5 Example of path information

移動タスク (地図・店舗・バッテリー充電タスク)、6. ローミングタスクとした (Table 1)。

移動経路を受け取ったロボットは、自律的に移動を開始する。移動経路は、環境センサから取得されたロボットの位置や人々の位置が変化した場合に、自動的に再計算される。地図や店舗前、アプローチ対象の人位置など、特定の場所へ移動する経路を計算する際には、最短経路法をグリッド上に分割された空間に対して適用し、移動経路の計算を行った。このとき、人の周辺と他ロボットの周辺、および壁から1[m]の安全領域を設定し、その領域を移動経路の計算には用いないように設定した。

4.3 ロボット間連携シナリオ調整機構 (Scenario coordinator)

本研究では、特定店舗への誘導を行うタスクにおいて、状況に応じて2台のロボットが連携するように設計を行った。ロボット間連携シナリオ調整機構は、この連携を実現するために、店舗への誘導タスクがアサインされた2台のロボットに対して、P2Pのネットワーク通信を確立するためのIPアドレスやポートなどの情報を送信する。ロボットが実際に連携するための詳細は5.2.3項に記述するが、各ロボットはこの情報を利用して相互に動作タイミングの調整を行う。

なお、連携を行う対象となるロボットが存在しない場合 (すでに店舗前で待ち受けているロボットが他のユーザと対話をしている、店舗前で待ち受けているロボットがそもそも存在しない、等) には、タスク調整機構が店舗への誘導タスクを1台のロボットにのみアサインするため、この機構は動作を行わない。つまり、この機構は、店舗への誘導タスクが2台のロボットにアサインされた場合にのみ動作を行う。

5. ロボットシステムの実装

ロボットは、環境センサから得られた位置情報や予測された行動情報を利用して、人々へのアプローチや、特定の場所で人々を待ち受けて情報提供を行うデバイスとして利用される。プラットフォームから割り当てられたタスクに基づいて、ロボットは半自律的に人々との対話を行う。

5.1 ロボットハードウェア: Robovie

我々は、上述したタスクを実行し、実環境下で人々にサービス提供を行うロボットとして、移動可能なコミュニケーションロボット「Robovie」を利用する[18]。Robovieは、ATRで開発された、人間らしい外見の上半身を持つロボットである。2台のカメラと1台のスピーカから構成される顔、2本の腕、および台車による移動機構を備えている (Fig. 6)。身長は120[cm]であり、重さは40[kg]である。両腕に各4自由度、首に3自由度を持ち、様々な身体動作が可能である。

移動機構には、ActiveMedia製のPioneer 3-DXを用いている。環境内の人々の移動速度や安全性を考慮し、最大移動速度は2.5[km/h] (700[mm/second])に設定した。障害物を検出するための距離センサとして、移動台車にHokuyo URG-04LX LRFを取り付けた。このセンサを用いることで、環境センサでは検出できない85[cm]未満の障害物を検出し、安全に停止できる。

ロボットの発話音声は、コーパスベースの音声発話システ

Fig. 6 Scenes of collaboration with two robots

ムによって生成される音声を利用した [19]. 身体動作の制御やロボットに備えつけられたタッチセンサ等の情報処理は、胴体内部に設置された CPU で行う. 無線 LAN により、プラットフォームや環境センサと通信する機能を備えている. バッテリーを用いることで 1 時間弱の連続稼働が可能であり、またバッテリーをホットスワップ形式で 5~10 分程度の時間で交換することが可能である.

5.2 ロボットによるタスク実行処理

5.2.1 シナリオ制御機能 (Scenario controller)

シナリオ制御機構は、タスクに応じてあらかじめ記述されたビヘービアとよばれる状況依存モジュール [18] の遷移を実行する. ビヘービアの遷移はエピソードルールとよばれるルールによって記述されており、環境センサの情報や音声認識結果によってビヘービアの遷移を変化させる. 例えばロボットが「道案内のオファー」ビヘービアを行った際の音声認識の結果が「トイレ」であった場合には、「トイレへの道案内」ビヘービアが実行される.

これらの機能を用いて、Robovie は基本的に自律動作を通じて人々と対話を行う. 例えばロボットが人にアプローチする際には、自律的に移動してアプローチの対象へ近づき、一定の距離以下まで接近したあとに会話を開始する. さらに、対話を行っている際には、人と自身の位置関係を考慮し、人の方へ体を向けるなどの動作を行う. 道案内動作は、目的地までの道順を発話と指差し動作 [20] を用いて行う. 指差しを用いた道案内動作は、商業施設内の 70 箇所以上の施設を案内できるように用意した.

5.2.2 ナビゲーション機能 (Navigation controller)

タスクがロボットに割り当てられると、ナビゲーション機能はネットワークロボットプラットフォームの移動経路調整機構と通信を行い、移動経路の取得を行う. 取得した移動経路に基づいて、ナビゲーション機能はロボットの前進速度や回転速度の制御を行い、ロボットを移動させる.

ロボットの自己位置推定は、環境センサから取得された人の位置情報に加えて、ロボット自身が持つ自己位置情報と移動軌跡

の時系列変化を用いて行う [15]. 詳細は文献 [15] に示すが、カルマンフィルタを用いてロボットの回転方向軸の誤差を減少させることで、精度のよい自己位置同定を行っている.

5.2.3 ロボット間通信機能 (Cooperation controller)

上述した連携による店舗への誘導タスクを、2 台のロボットを用いて自律的に行うために、ロボット間通信機能を実装した. 複数のロボットがタイミングを調整して連携動作を行うために、過去に開発されたロボット連携を実現するためのスクリプト言語を改良した [21]. ロボットはあらかじめ記述されたスクリプト言語を解釈し、2 台のロボットが P2P で連携を取りながら言語で記述された動作を行う.

Fig. 6 に、2 台のロボットが連携して店舗誘導・説明サービスを行っている場面を示す. ある人物がロボット A に店舗への誘導を依頼した場合に、ロボット A はネットワークロボットプラットフォームに連携可能なロボットが存在するかどうかのリクエストを送る. このとき、ロボット B がすでに店舗前で待ち受けるタスクをアサインされており、かつ対話状態ではなかったため、ロボット B が連携の対象としてアサインされた (Fig. 6-a). ロボット A はロボット B との連携を開始し、店舗前への誘導を開始する (Fig. 6-b). このとき、ロボット A は「じゃあ、あとはよろしくね」とロボット B に向けて発話を行い、ロボット B は「はい、了解しました. じゃあ、お店の説明をするから、お客さんはもう少し前に来てね」などと発話し、説明を開始する. その後、ロボット A は移動を開始し、別のタスクを実行する (Fig. 6-c). ロボット B は引き続き店舗の説明を行い、店舗内を訪れるように推薦を行う (Fig. 6-d).

5.3 複数ロボットの遠隔操作システム

本研究では、オペレータがロボットの音声認識機能を代替する. 過去の研究では、実験室環境内では 75 デジベルの雑音環境下において 92.5% の認識率を実現する音声認識システムが、駅構内などの日常環境下で一般の人々に対して音声認識を行った場合には、21.3% での認識精度となったことが報告されている [22]. 本研究で対象とする商業施設においても、同様の問題による音声認識精度の低下が予測され、円滑な対話が困難になると考え、後述するオペレータによる音声認識機能代替を行った.

ロボットの遠隔操作には、環境センサの情報とロボットの対話状態を表示する遠隔操作インターフェースを用いた [23]. インターフェースを通じて、オペレータは各ロボットから取得された音声や画像を確認できる. また、ビヘービアごとに定義された音声認識結果の候補となる単語リストがオペレータに提示される. オペレータが音声を参考にリスト内の単語を選択することで、その単語が音声認識結果としてロボットに送信される. 例えば、「どこかに案内してあげようか?」と問いかけるビヘービアは、音声認識結果の候補として「トイレ」「駅」「いない」などの単語リストを持つ.

6. フィールド実験

本研究では、道案内や情報提供、店舗の推薦や誘導といった、比較的シンプルなロボットサービスを題材に、開発したシステムの有効性を検証するフィールド実験を行った. 商業施設内で連携してサービスを提供するためのロボットとして、4 台の Robovie

Fig. 7 Map of the mall

を用意した。ロボットが4台存在することで、環境内での待ち受けタスクを行うと同時に、複数台のロボットによるローミングタスクの実行が可能となる。この実験を通じて、開発したシステムが4台のロボット間でタスクなどの調整を正しく行うことができたか、またその調整に基づいて活動したロボットが人々にどのように評価されたかを検証する。

6.1 実験設定

本実験は、2009年2月に、ユニバーサルスタジオジャパン(USJ)の入り口付近にあるショッピングモールの通路で行われた。Fig. 7に、実験環境の俯瞰図と、設置したLRFおよびカメラの位置を示す。環境内を利用する人々の多くは、家族やカップル、観光者であった。人々は、ロボットと自由に対話することができた。

昼間の時間帯において、人々は昼食や買い物、およびUSJに向かって移動するために、主に左から右方向に移動していた。夜間の時間帯においては、人々は夕食や買い物、および駅に向かって帰路につくために、主に右から左方向に移動していた。そのため実験では、昼夜の利用者数の違いや数の偏りを避けるため、昼間と夜間においてそれぞれ3時間、合計6時間の実験を行った。

実験では、1人のオペレータが4台の遠隔操作を行う。また、安全を確保するため、1人のスタッフが環境内に滞在した。なお、この実験は研究目的にのみ利用するという条件の下で、ショッピングモールの管理者の承認を得て行われた。この手続きについては、所内の倫理審査委員会により承認済みである。

6.2 実験結果

6.2.1 システムの動作例

はじめに、我々が開発したシステムが実環境でどのようにロボットへタスクがアサインされ、どのような対話が観察されたかについて記述する。

基本的に、2台のロボットに対してローミングタスクがアサインされ、あとの2台には地図前での待ち受けタスクと店舗前での待ち受けタスクがそれぞれアサインされた。環境内に、局所行動が「ゆっくり歩く」「止まる」人物が存在した場合には、ローミングタスクを行っているロボットにアプローチタスクがアサインされ、アプローチが成功した場合には情報提供などの対話が行われた。また、待ち受けタスクを行っているロボット

Table 2 Number of people in each category

	Four robots	No robots
Passing	2,365	2,139
Watching the shop	31	19
Entering to the shop	15	0

の周辺で局所行動が「止まる」と予測された人物が存在した場合には、ロボットはその人物に対して話しかけを行った。待ち受けタスクがアサインされているロボットに、バッテリーの充電や店舗誘導タスクがアサインされた際には、ローミングタスクがアサインされている別のロボットに待ち受けタスクがアサインされた。

実験では、合計2,411人の人々が環境内を通過し、そのうち414人がロボットとの対話を行った。実験では、多くの人々がロボットとの長時間の対話は行わず、むしろロボットがどのような対話や反応を行うのかを試すような、簡単な対話を行った。例えば、ロボットが握手を人々に求めた場合に、人々は握手を行った後にさよならなどと発話して立ち去るなどの、数十秒程度の対話が頻繁に観察された。一方、興味深い対話が観察された事例としては、実際に道に迷った人々がロボットへ特定のレストランや服飾店、喫煙所などへの道案内を依頼し、ロボットへの道案内にお礼を言ってその場へと訪れる場面が観察された。また、ロボットの店舗誘導を受けて実際に店舗内を訪れる人や、店舗を観察する人の存在が観察された。

6.2.2 ロボットによる宣伝効果の検証

本実験における、ロボットによる店舗の推薦効果を検証するために、店舗の入り口から3[m]以内の距離で、3秒以上店舗を観察していた人をカウントした。その結果、環境内を通過した人々のうち、46人が推薦された店舗に興味を持ち、46人のうち15人が実際に店舗内へと足を運んでいた。

さらに、ロボットの有無による店舗の推薦効果を検証するために、比較としてロボットが存在しない条件で6時間の観察を行った。その結果、2,158人の人々が環境内を通過し、19人の人々が店舗に興味を持ったが、店舗内を訪れた人の数は0人であった。Table 2に、ロボットが存在する条件と、ロボットが存在しない条件で計測された人々の数を示す。

ロボットが存在する条件と存在しない条件に対して、カイ2乗検定を行った結果、条件間で有意差が見られた($\chi^2(2) = 15.258$, $p < 0.001$)。残差分析を行った結果、ロボットが存在する条件では店舗内へと足を運んだ人々が有意に多く($\gamma = 3.7$, $p < 0.01$)、ロボットが存在しない条件では店舗内へと足を運んだ人々が有意に少なかった($\gamma = -3.7$, $p < 0.01$)。ただし、環境内を通過した人々の数は、ロボットが存在しない条件が優位に多く($\gamma = 2.9$, $p < 0.01$)、ロボットが存在する条件が優位に少なかった($\gamma = -2.9$, $p < 0.01$)。なお、店舗に興味を持った人々の数に対しては、有意な差は得られなかった。

6.2.3 タスク調整機構の動作検証

タスク調整機構が正しく動作したかを検証するために、各タスクがロボットに正しくアサインされていたかどうかの計測を行った。計測には、記録されたビデオ、ロボットの行動履歴、およびオペレータによるロボットの操作履歴を用いた。

まず、アプローチタスクのアサインに関する検証を行った。フィールド実験中、各ロボットにアサインされたアプローチタスクの合計は、2,080 回であった。タスクのアサインは、基本的に、アプローチ対象に最も近いローミングタスクを実行しているロボットに対して行われた。ただし、タスクのアサインが失敗した事例として、1 人に対して複数台のロボットが同時にアプローチを行うケースが 5 回、ロボットが他のロボットにアプローチを行うケースが 1 回発生していた。アサインの失敗が起きた主な理由は、人追跡システムによる誤認識によって、すでにアプローチ済みの人に割り当てられた ID が変化して別の人と認識される、またはロボットが人として認識されたために発生した。ただし、そのエラー回数は全体のタスクアサイン回数に比べて十分に少なかったと考える。

次に、地図前と店舗前の待ち受けタスクが正しくアサインされたかを検証した。地図前と店舗前での待ち受けタスクがアサインされた時間の割合を計測した結果、地図前では 90.6% (326.4 分)、店舗前では 94.0% (338.5 分) の時間、それぞれの場所で待ち受けタスクがアサインされたロボットが存在していた。ロボットが各地点で待ち受けていなかった時間の主な理由は、待ち受けタスクがアサインされて移動を開始したロボットに人々が話しかけ、対話タスクが開始されてしまい、待ち受けるべき場所にロボットが到達できなかったためであった。そのような場合には、別のローミングタスクを行っているロボットに待ち受けタスクが再度アサインされた。結果的に 90% 以上の割合で待ち受けタスクが実行されており、開発したシステムが設計通りに正しく待ち受けタスクをアサインしていたことが示されたと考える。

次に、店舗への誘導時に連携タスクが正しくアサインされたかを検証した。店舗から離れた場所において、ロボットが対話している人からの店舗誘導の依頼を受けた回数は 6 回であった。店舗前の待ち受けタスクがアサインされたロボットが存在した状況はそのうち 3 回存在し、そのすべての回で 2 台による連携が行われた。それ以外の状況では、すべての回で 1 台のロボットによる店舗誘導が行われた。つまり、連携に関するタスクアサインはすべて正しく行われた。

最後に、バッテリー充電タスクが正しくアサインされた回数を計測した。実験中、ロボットの残バッテリー容量に応じて合計 16 回のバッテリー充電タスクが行われ、ロボットはバッテリー切れを起こすことなく動作を継続することができた。

これらの結果から、タスク調整機構を用いることで、状況に応じてサービスを行うロボットを切り替える、サービス内容そのものを切り替える、複数台のロボット連携による情報提供、などの、ロボット間のタスク調整を正しく実現できたことが示されたと考える。

6.2.4 移動経路調整機構の動作検証

移動経路調整機構が正しく動作したかを検証するために、ロボット同士の移動経路が干渉を行い、ロボットが静止してしまった回数を計測した。その結果、6 時間でロボットの移動経路は 7 回の干渉が発生した。この現象が起きた原因として、人追跡システムが混雑などの要因によってロボットを人として誤認識してしまい、ロボットの自己位置が正しく認識されなかったためであった。ただし、6 時間の動作で発生した干渉の回数とし

Fig. 8 Example of approaching and roaming behavior

ては、システムを運用する中で十分に少ないものであったと考える。なお、この現象が発生した場合にのみ、オペレータはロボットの移動機能を遠隔で制御し、問題を解決した。

Fig. 8 に、複数ロボットの移動経路の調整が正しく行われた場面の例を示す。環境センサによって予測された局所行動が「ゆっくり歩く」（図中の丸で囲まれた人物）であった場合に、タスク調整機構は図中の右から 2 番目のロボットに対してアプローチタスクを設定した。その際に、タスク決定機構は一番右のロボットに対してローミングタスクを引き続き設定した。その結果、移動経路調整機構は一番右のロボットの移動経路を手前側に変更し、アプローチの邪魔にならないように設定された。その結果、右から 2 番目のロボットが「ゆっくり歩く」人にアプローチして対話を開始している際に、いちばん右のロボットが対話の邪魔にならないように手前側に移動することができた。

これらの結果から、移動経路調整機構を用いることで、ロボット同士が安全に移動し、タスクを実行できることが示されたと考える。

6.2.5 タスク連携調整機構の動作検証

タスク連携調整機構が正しく動作したかを検証するために、店舗誘導タスク時に正しくロボットが連携したかどうかの回数を検証した。2 台のロボットによる連携タスクがアサインされた 3 回のうち、すべての回において 2 台のロボットは正しく連携を行い、Fig. 6 に示したように、2 台間で発話や動作のタイミングを調整して店舗への誘導タスクを行っていた。これらの結果から、タスク連携調整機構を用いることで、ロボット同士のタスク連携が実現できたと考える。

6.2.6 ロボットに対する印象評価

実験結果から、開発したシステムがほとんどの状況においてタスクをロボット間で正しく調整できたことが示された。次に我々は、システムによってアサインされたタスクを実行したロボットに対して、実際に対話を行った人々はどうのような印象を持ったかについて検証した。

検証のために、ロボットと対話を行った人々へのアンケート調査を行った。アンケートで用いた三つの質問項目を以下に示す。項目の評価は、1（低評価）～7（高評価）の 7 段階とした。

- ・ロボットの話し内容への興味 (Interesting)
- ・ロボットの有用性 (Effectiveness)
- ・ロボットの楽しさ (Impression)

実験において取得したアンケート数は 103 であった。各項目の平均と標準誤差を、Fig. 9 に示す。アンケートの結果から、すべての項目において平均値以上の評価が得られた。つまり、開発したシステムによってアサインされたタスクを実行したロボット

Fig. 9 Questionnaire results

に対して、対話した人々は好意的な評価を持ったことが示された。

7. おわりに

本研究では、商業施設において複数のロボットが連携して人々へのサービス提供を実現する、ネットワークロボットシステムの開発を行った。開発したシステムは、環境センサ、複数の案内ロボット、およびネットワークロボットプラットフォームから構成される。環境センサは、環境内に存在する人々の行動推定およびロボットの位置推定を行う。ロボットは基本的に自律動作を行うが、対話時にはオペレータによる音声認識機能の代替を利用して道案内や店舗誘導などの情報提供サービスを行う。ネットワークロボットプラットフォームは、環境センサやロボットから得られる情報に基づいて、複数ロボット間のタスクや移動経路、ロボット間連携の調整を行う。

開発したシステムの有効性を検証するため、商業施設において4台のロボットを利用したフィールド実験を行った。実験では2,411人が環境内を追加し、414人がロボットとの対話を行った。ロボットが誘導した店舗にはそのうち46人の人々が興味を示し、15人の人々が店舗内を訪れていた。

実験結果を通じて、商業施設のような日常環境において、複数ロボットが連携して一般の人々へ情報提供サービスを実現するシステムの有効性を検証した。具体的には、開発したシステムを用いることで、状況に応じてサービスを行うロボットを切り替える、サービス内容そのものを切り替える、複数台のロボット連携による情報提供、などのロボット間の調整を正しく実現できることを確認した。さらに、アンケートの結果から、商業施設内で活動するロボットが、人々に対して好意的な印象をもたらしたことを示した。

謝辞 本研究に参加していただき、様々なご支援をいただいた住商アーバン開発株式会社の管理スタッフの皆様には厚く感謝申し上げます。また、実験にご協力いただいたATR 知能ロボティクス研究所の秋本氏、宮下氏、胡桃沢氏に厚く感謝申し上げます。本研究は、総務省の研究委託により実施したものである。

参考文献

[1] W. Burgard, et al.: "The interactive museum tour-guide robot," Proc. of National Conference on Artificial Intelligence, pp.11-18, 1998.

[2] R. Siegwart, et al.: "Robox at Expo.02: A Large Scale Installation of Personal Robots," Robotics and Autonomous Systems, vol.42, no.3, pp.203-222, 2003.

[3] R. Gockley, J. Forlizzi and R. Simmons: "Interactions with a Moody Robot," HRI2006, pp.186-193, 2006.

[4] T. Kanda, T. Hirano, D. Eaton and H. Ishiguro: "Interactive Robots as Social Partners and Peer Tutors for Children: A Field Trial," Human Computer Interaction, vol.19, no.1-2, pp.61-84, 2004.

[5] 小林亮博, 上田博唯, 佐竹純二, 近間正樹, 木戸出正継: "家庭内ユビキタス環境における対話ロボットの実稼動実験と対話戦略の評価", 情報処理学会論文誌, vol.48, no.5, pp.2023-2031, 2007.

[6] H. Kozima, C. Nakagawa and Y. Yasuda: "Interactive robots for communication-care: A case-study in autism therapy," IEEE International Symposium on Robots and Human Interactive Communication, pp.341-346, 2005.

[7] F. Tanaka, A. Cicourel and J.R. Movellan: "Socialization between toddlers and robots at an early childhood education center," Proc. of the National Academy of Sciences of the USA, vol.104, no.46, pp.17954-17958, 2007.

[8] L. Carlone, et al.: "Rao-Blackwellized Particle Filters Multi Robot SLAM with Unknown Initial Correspondences and Limited Communication," ICRA2010, pp.243-249, 2010.

[9] X. Zheng and K. Sven: "Negotiation with Reaction Functions for Solving Complex Task Allocation Problems," IROS2009, pp.4811-4816, 2009.

[10] H.M. Gross, et al.: "TOOMAS: Interactive Shopping Guide Robots in Everyday Use — Final Implementation and Experiences from Long-term Field Trials," IROS2009, pp.2005-2012, 2009.

[11] HONDA 「ASIMO」, <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>

[12] A. Sanfeliu, N. Hagita and A. Saffiotti: "Network Robot Systems," Special Issue: Network Robot Systems, Robotics and Autonomous Systems, pp.793-797, 2008.

[13] Research study for the scope of the strategy map of robotics technology, 2005. (Available at <http://www.nedo.go.jp/database/index.html>, with index code 100007875) (in Japanese).

[14] T. Kanda, et al.: "Who will be the customer? A social robot that anticipates people's behavior from their trajectories," UbiComp2008, pp.380-389, 2008.

[15] D.F. Glas, et al.: "Simultaneous People Tracking and Localization for Social Robots Using External Laser Range Finders," IROS2009, pp.846-853, 2009.

[16] V. Vapnik: The Nature of Statistical Learning Theory. Springer, 1995.

[17] 佐竹聡, 神田崇行, Dylan F. Glas, 今井倫太, 石黒浩, 萩田紀博: "対話ロボットの人間へのアプローチ方法—対話ロボットの対話開始に対する戦略—", 日本ロボット学会誌, vol.28, no.3, pp.327-337, 2010.

[18] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai and T. Ono: "Development and Evaluation of Interactive Humanoid Robots," Proceedings of the IEEE, vol.92, no.11, pp.1839-1850, 2004.

[19] H. Kawai, T. Toda, J. Ni, M. Tsuzaki and K. Tokuda: "XIMERA: A New TTS from ATR Based on Corpus-Based Technologies," Proc. of Fifth ISCA Workshop on Speech Synthesis, pp.179-184, 2004.

[20] O. Sugiyama, et al.: "Humanlike conversation with gestures and verbal cues based on a three-layer attention-drawing model," Connection science, vol.18, no.4, pp.379-402, 2006.

[21] D. Sakamoto, et al.: "Humanoid Robots as a Broadcasting Communication Medium in Open Public Spaces," International Journal of Social Robotics, vol.1, no.2, pp.157-169, 2009.

[22] M. Shiomi, D. Sakamoto, T. Kanda, C.T. Ishi, H. Ishiguro and N. Hagita: "A Semi-autonomous Communication Robot — A Field Trial at a Train Station—," HRI2008, pp.303-310, 2008.

[23] D.F. Glas, T. Kanda, H. Ishiguro and N. Hagita: "Simultaneous Teleoperation of Multiple Social Robots," HRI2008, pp.311-318, 2008.

塩見昌裕 (Masahiro Shiomi)

2004 年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻博士前期課程修了。2007 年同専攻博士後期課程修了。博士 (工学)。現在 ATR 知能ロボティクス研究所研究員としてコミュニケーションロボットの研究に従事。ネットワークロボット、コミュニケーションロボット、集団とロボットの相互作用に興味を持つ。(日本ロボット学会正会員)

興味を持つ。

Dylan F. Glas

1997 年マサチューセッツ工科大学工学部航空宇宙工学科、理学部地学・大気圏学・天文学科卒業。2000 年同大学大学院工学研究科航空宇宙工学宇宙システム工学専攻修士課程修了。現在 ATR 知能ロボティクス研究所研究員としてコミュニケーションロボットの研究に従事。ネットワークロボットシステム、遠隔操作、人間と機械との相互作用、ユビキタスセンサに興味を持つ。

遠隔操作、人間と機械との相互作用、ユビキタスセンサに興味を持つ。

石黒 浩 (Hiroshi Ishiguro)

1991 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士課程修了。工学博士。同年山梨大学工学部情報工学科助手。1992 年大阪大学基礎工学部システム工学科助手。1994 年京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻助教授。2001 年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科教授。現在大阪大学

大学院基礎工学研究科・システム創成専攻教授、ATR 知能ロボティクス研究所第二研究室客員室長。視覚移動ロボット、能動視覚、パノラマ視覚、分散視覚に興味を持つ。(日本ロボット学会正会員)

神田崇行 (Takayuki Kanda)

1998 年京都大学工学部情報工学科卒業。2000 年同大学大学院情報学研究科社会情報学専攻修士課程修了。2003 年同専攻博士課程修了。博士 (情報学)。現在 ATR 知能ロボティクス研究所上級研究員。ヒューマンロボットインタラクション、特にロボットの自律対話機構や社会的能力、人間型ロボットの身体を利用した対話に興味を持つ。(日本ロボット学会正会員)

の身体を利用した対話に興味を持つ。(日本ロボット学会正会員)

佐竹 聡 (Satoru Satake)

2003 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2005 年同大学大学院開放環境科学専攻前期博士課程修了。博士 (工学)。現在 ATR 知能ロボティクス研究所研究員。ヒューマンロボットインタラクション、ネットワークロボットシステム、ヒューマンインターフェイスに興味を持つ。(日本ロボット学会正会員)

ヒューマンインターフェイスに興味を持つ。(日本ロボット学会正会員)

萩田紀博 (Norihiro Hagita)

1978 年慶應義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 武蔵野電気通信研究所に入所。文字認識や画像認識などの研究に従事。NTT 基礎研究所などを経て、現在 ATR 知能ロボティクス研究所所長。工学博士。IEEE、電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会各会員。

能学会各会員。

(日本ロボット学会正会員)