ネットワーク環境におけるモバイルエージェント機構に基づいて 個人の継続的な支援を目指した分散ロボット統合法

小川原 光 一* 金 広 文 男* 稲 葉 雅 幸* 井 上 博 允*

Distributed Robot Integration Based on Mobile Agent Architecture that Aims Supporting a Specific User Continuously on the Network Environment

Koichi Ogawara*, Fumio Kanehiro*, Masayuki Inaba* and Hirochika Inoue*

In this paper, we propose a novel method of supporting a specific user in the network connected multi-robot environment. We detach a robot brain from the robot body and make it an autonomous entity "Agent". One unique software agent exclusively interacts with the user, obtains the robots dynamically and support the user physically with control of these robots. An agent obtains only necessary robots and when those are not needed, the agent releases the robots to make them available by the other agents. With a personal agent approach, the user gets supported consistently in the long term. An agent gets sensory information from the robots obtained and observes the user continuously and reorganizes the robots to follow the user in the real world. To reduce traffic and delay on the network, an agent traverses the network and always resides in the center of the controlled robots. We realized this robot environment using the distributed objects technology and the mobile agent technology. We describe the validity of the proposed method, the detailed mechanism and the experimental results using real robots.

Key Words: Mobile Agent, Distributed Robots, Network Robot, Support Robot

1. は じ め に

人間の生活する場に人間と積極的にかかわることを目的とするロボット [1] [2] を浸透させようという試みが近年活発化してきており、多くのロボットが実世界に配置されネットワークに結合される分散ロボット環境の実現が期待される。

このとき、ネットワーク上に分散したロボット群において、個人への支援を継続的に行える技術が不可欠となる。

加藤は、ロボットによる個人に向けた生活支援の観点から、リリースボットの構想を提案した [3]。佐藤らは、部屋自体がロボットであるロボティックルームを用いて個人支援の研究を行っている [4]。また個人に限らず、人間共存環境において人間を支援することを目的とした研究は多数行われている [5]。

本研究では、ネットワーク時代を鑑み、特定の個人用ではないロボットで、それらがネットワークでつながった環境で個人をどのように継続的に支援できるかという問題に着目し、その複数のロボットを分散ロボット環境ととらえて個人のための統合化法として研究することを目的とする。

2. ネットワーク環境で人についていくエージェント

2.1 設計方針

本論文では、個人（ユーザ）を支援する分散ロボットシステムを構築するための設計方針として、次の三つの提案を行う。

- (1) ロボットの行動決定部をロボットボディから切り離し、特定ユーザに専属のソフトウェアエージェント [6] とする
- (2) 支援対象となるユーザの移動に応じて、エージェントがユーザにとって有用となるロボット群をネットワーク上で動的に獲得・制御することで、特定ユーザに対する継続的な支援を行う
- (3) ネットワーク上におけるトラフィックや遅延の低減といった観点から、ロボットとエージェントの局在性を考慮し、モバイルエージェント技術 [6] を利用して、エージェントをネットワーク移動型とする。

2.2 エージェントによる物理作用を伴う個人の継続支援

分散ロボット環境において個人を継続的に支援する方法として、まずユーザごとに専属のロボットが存在し、そのロボットが継続的にユーザを支援するという方法が考えられる。この場合、ユーザに対する支援が必要ないときにもそのロボットが拘束されてしまい、ロボット群の有効利用という観点から非効率である。

また、自立した複数のロボットが協調して個人の支援を行う

原稿受付 1999 年 11 月 18 日

* 東京大学工学系研究科

* The University of Tokyo

Fig. 1 Robot Environment following the user

方法が考えられる。この場合、ユーザの対話の対象が複数かつ入れ替わるため、(i) どのロボットに支援を要求すればよいのかあいまいである (ii) ロボットが切り替わったときにまた同じ要求を繰り返さなければいけない、といったようにユーザ側の負担が増大する可能性がある。

本手法では、ロボット群の有効利用を図るために、Fig. 1 に示すように、ロボットをネットワーク上の分散資源として位置付け、ある時点においてエージェントによって必要とされるロボットのみが動的に獲得・制御され、必要なくなったと判断した場合には、他のエージェントから使用可能のようにロボットを解放する。

また、エージェントがユーザの過去の行動履歴・未来の行動予定などを一括して管理・利用するため、ユーザの対話の対象が明確となり、長期にわたる支援の一貫性を保つことが容易となる。

2.3 異種アーキテクチャ混合環境における通信基盤

エージェントが活動する分散ロボット環境は、実際には異種アーキテクチャ（ハードウェア・OS・ソフトウェア）の混合によって成立していることが予想される。そのため、異種アーキテクチャ間で、分散ロボット環境構成要素（エージェントやロボットなど）同士の通信インターフェースを明確に定義できる枠組が必要となる。

このインターフェースの条件として、(i) 異種プラットフォーム間での統一された通信方式、(ii) 環境の構成変化に柔軟に対応できるスケーラビリティの高い通信手段の二つが要求される。本研究ではその手段として、OMG (Object Management Group) によって仕様の標準化が進められている分散オブジェクト技術 CORBA (Common Object Request Broker Architecture) [7] に着目した。

CORBA の枠組においては、IDL (Interface Definition Language) によって、CORBA object 間の通信インターフェースが環境の差異に依存しない形で明確に規定される。

CORBA を異種プラットフォームが混在するロボット環境における共通バスとして用い、環境構成要素を CORBA object

として実装することで、プラットフォーム非依存に定義されたインターフェースによる環境構成要素間の統一的な通信が可能になり、多様なロボットを本ロボット環境に容易に参入させることが可能になる。

2.4 移動型エージェント

特定ユーザの支援という目的から、ある時点でエージェントが制御しているロボット群は物理的に局所的な場所に集中していることが期待され、そのことからネットワーク的にも近接しているとの仮定をおく。このとき、エージェントとロボットがネットワーク上の近接した位置にいたることが、トラフィックや遅延の減少といった観点から重要となる。

そのためには、エージェントがネットワーク上を移動することで被制御ロボットと常に近接していることが必要となる。このための手法として、(i) ユーザが必要とするときに周囲のロボットにエージェントプログラムをダウンロードする方法、(ii) ユーザが携帯するネットワークに接続されたコンピュータ上でエージェントプログラムを走らせる方法などが考えられるが、この場合エージェントが能動的な支援を行うことができないか、できたとしてもユーザの周囲のロボットの使用に限定されてしまう。

本論文の提案手法では、エージェントが位置を拘束されることなく自律的にネットワーク上を移動するため、例えばユーザの移動の先回りをして、移動先においてロボットを獲得しあらかじめ準備をしておくといった、より積極的な支援が可能になる。

本研究では、モバイルエージェント [6] の技術に着目し、JAVA 言語を用いて、Fig. 1 に示すように、エージェントがロボット群を切り替えるたびに、ロボット群とエージェント間のネットワーク距離を最小化するようにネットワーク上を移動することが可能なエージェントを実現した。

2.5 人についていくエージェントに求められる機能

エージェントがユーザの要求を知る手段には、エージェントが制御下のロボットのセンサ情報を用いてユーザを観察する能動的方法と、ユーザが何らかのユーザインターフェースを介してエージェントに指示を出す受動的な方法の二つがある。

Fig. 2 Robot Environment consists of CORBA objects

ネットワーク上のエージェントが実世界上のユーザを継続支援するためには、上記の能動的な支援が欠かせず、そのためには (i) ユーザのいる位置を常に認識していること、(ii) ユーザの過去の行動履歴を保持しそれによってユーザの指示を待たずに能動的に支援を行いうることの2点が重要である。

ここでは、(i) 移動するユーザをロボットの切り替えによって継続的に追跡するエージェント、(ii) ユーザの過去の行動を視覚画像として記憶することで現在のユーザの状態を推定し、能動的な支援を行うことのできるエージェントの二つのエージェントを実装し、システムの評価実験を行った。

3. CORBA による分散ロボットの管理・獲得・制御

本分散ロボット環境における通信は、Fig. 2 に示すように、すべて CORBA オブジェクトに対するメソッド呼び出しの形で実現する。すなわち、ロボット環境の構成要素はいずれも内部に通信用の CORBA オブジェクト (Com Object) を持ち、それぞれが他の構成要素の CORBA オブジェクトに対して通信メッセージを引数としてメソッドを呼び出すことによって双方向の通信を実現する。このメッセージによって、例えば抽象化された動作指令がロボットに送られ、それをロボット側で解釈することでロボットが制御される。

構成要素は、通信に先立って通信相手の CORBA オブジェクトへの参照を獲得する必要がある。ここでは、管理機構 (Manager) が環境内のすべての構成要素の CORBA オブジェクトの管理を行う。ロボットやエージェントは、自身の CORBA オブジェクトへの参照と同時に、自身の属性 (ロボットかエージェントであるか) や実空間上での絶対位置などの情報 (Entry Object) を管理機構に登録する。絶対位置は、実空間上でのユーザ近辺のロボットを検索することに用いるのと共に、ネットワーク間距離を計算するときの基準としても用いる。本来はネットワーク上のノード間の伝達時間などを考慮するべきであるが、ここでは実空間上でのロボットの位置やエージェントの存在するマシンの位置などで近似する方法をとり、エージェント移動の際にロボット群の重心に存在するマシンにエージェントが移動する方法をとった。Table 1, 2, 3 に、管理機構および通信用の CORBA オブジェクトの代表的なインターフェースを示す。

ユーザの移動をエージェントが検知すると、ユーザの位置と

Table 1 Interface of manager object

Interface	Description
mCreate	create an entry object
mDestroy	destroy an entry object
mGetEntryList	get the entry object list
mSearchEntry	search for an entry object
mChangeComManager	change com object

Table 2 Interface of entry object

Interface	Description
mSetComManager	set the com object
mGetComManager	get the com object
mReleaseEntry	declare the availability of the entry
mSetPosition	set the entity's position
mGetPosition	get the entity's position

Table 3 Interface of com object

Interface	Description
mOpen	open a communication link
mGetMes	send messages
mSuspend	suspend the link
mResume	resume the link
mClose	close the link

現在制御しているロボット群の位置との比較を行い、ユーザから離れてしまい直接支援することが難しくなったロボットは解放し、新たにユーザ近辺に位置する有用なロボットを獲得する。

その結果ネットワーク上において、制御下のロボット群の位置の重心とエージェントの位置が離れてしまった場合には、本章で示すようにロボット群の位置の重心により近いエージェント実行環境があるかどうかを調べ、存在する場合にはそちらに移動する。

エージェントがロボットを獲得する一般的な手順は次の通りである (Fig. 2)。

- (1) ロボットは自身の通信先 (Com Object) を生成し、それに対する参照と自身の情報を管理機構 (Manager Object) に登録 (mCreate) する。
- (2) エージェントは管理機構 (Manager Object) にアクセスし、登録されているロボット群 (Entry Object) の情報を検索 (mGetEntryList) することで、必要とするロボットを選択し、ロボットの通信先 (Com Object) への参照を獲得 (mGetComManager) する。
- (3) エージェントは獲得した通信先 (Com Object) を使ってロボットに制御メッセージを送る (mGetMes)。通信に先立ってエージェントが自身の通信先をロボットに渡す (mOpen) ことによって、双方向の通信を実現する。

4. モバイルエージェント機構

モバイルエージェントについては、異なるモバイルエージェントシステム間の相互運用性を高める目的で、OMG によって MASIF (Mobile Agent System Interoperability Facilities) [8] の標準化が進められている。

モバイルエージェントを記述する言語には、(i) 異なるマシン上を移動することができ、(ii) 移動後に移動前の状態から実行

Fig. 3 Recreation of the agent

を再開できるという二つの機能が求められ、代表的なものには Telescript [9] や JAVA を利用したもの [10] が挙げられる。本研究では、開発環境が充実していることや移植性からエージェント記述言語として JAVA を用い、モバイルエージェント機構を構築した。

モバイルエージェントの実現には、エージェント実行環境（プレース）間でエージェントのクラス情報とコンテキスト（内部状態）の両方を移動し、移動後にエージェントを再構成する必要があるが、本システムでは Fig. 3 に示すように JAVA 言語の RMI (Remote Method Invocation) および動的クラスロード機能を利用して実現した [10]。

RMI とは、CORBA と同様に遠隔にあるオブジェクトのメソッドを呼び出す技術であり、これを利用して移動先のプレースオブジェクトのエージェント受け入れメソッドを、エージェントの情報を引数にして呼び出すことによって、エージェントの移動を実現する。

動的クラスロードとは、プログラム実行中に新しいクラス定義を獲得することである。このクラスからインスタンスを生成してオブジェクトを作ることができる。エージェントの移動時に、そのエージェントのコンテキスト（内部状態）だけでなく、そのクラス定義をも移動することで、そのエージェントのソフトウェア構造を知らないプレース上で、エージェントオブジェクトを再構築し、コンテキストの情報によって移動前の状態に復元することができる。

エージェントから見たとき、移動の前後においてプログラム実行の連続性は途切れるものの、ロボット群やユーザとの通信状態やエージェントの内部変数の状態は維持されたまま実行を継続することができる。

エージェントの行動順序は一般に次の通りである (Fig. 4)。

- (1) ユーザによってエージェントが生成され、あるプレース上で実行を開始する。
- (2) エージェントは管理機構にアクセスし、必要とするロボット群やユーザインターフェースの通信先を獲得し、ロボットやユーザからの入力情報を利用してロボットを制御して、ユーザ支援を行う。
- (3) ロボットを切り替える際には、切り替え後のロボット群により近いプレースが存在するかどうかを管理機構で調べ、存在する場合には現在のプレースに対して新プレースに移動する旨を指示する。
- (4) 移動指示を受けたプレースは、エージェントの実行を停止

Fig. 4 Transportation from place A to place B

し、エージェントが保持している通信先に対して通信の中断 (mSuspend) を指示する。その後、コンテキスト（実行状態）をシリアルライズし、クラス定義と共に RMI を用いて移動先プレースに転送する。転送後は、停止したエージェントを消去する。

- (5) 移動先プレースにおいては、渡されたエージェントを、動的クラスロードを用いて再構成し、エージェントの保持する通信先に対してエージェント自身の新たな通信先を伝えと共に、通信の再開 (mResume) を指示し、エージェントの実行を再開する。

5. エージェントによるユーザ支援の実現

エージェントの行動決定部は、外界からの入力に基づいて内部状態を遷移させる状態遷移方式で記述した。ロボット群を抽象化された指令で扱い、状態遷移を用いることでネットワーク移動に適した比較的簡潔なコードで行動決定部を記述することが可能となる。しかしその反面、その有限状態に収まる限定されたタスクしか遂行できない。本研究では行動記述の異なる二つのエージェントを作成し、Fig. 5 に示す環境中において実ロボット [12] を用いた以下に示す評価実験を行った。

5.1 ユーザの継続的な追跡

ここでは、エージェントがロボットを切り替えることで、実世界上でユーザを継続的に追跡する実験を行った。エージェントがユーザを認識する手段として、現在獲得しているロボットのカメラからの入力画像を利用した。

エージェントは画像処理の結果からユーザの存在を検知し、ユーザの実世界上の三次元座標を推測する。ロボットに搭載されたカメラを利用して常にユーザを観察し、適宜ロボットを切り替え常にユーザと最も近い場所に存在するロボットを獲得し続けることで、ユーザに対する継続的な支援を可能とする。エージェントがロボットを切り替える際に、新たなロボットにより近いエージェント実行環境（プレース）が存在するときには、そのプレースへ移動する。

以下、実験の概要を記す。

- (1) 初期状態ではエージェントは片方のロボットを獲得しており、ユーザの出現を待って待機している。
- (2) ユーザが視界に入ると、ユーザの動きを画像処理（フロー検出）によって検出し、支援の代わりとして簡単なインタ

Fig. 5 Configuration of experiment

Fig. 6 Following a user experiment

ラクションを開始する。インタラクションとして、ユーザの手の動きに合わせてロボットも同じように自身の手を動かす鏡のような動作を行った。

- (3) ユーザがインタラクションを停止し、移動してロボットの視界から出ると、実空間上でどちらに移動したのかをフローの検出によって判断する。管理機構に登録されているロボットの位置情報を調べることで、ユーザの移動した方向に獲得可能なロボットが存在すれば、現在のロボットを解放しよりユーザに近い場所にあるロボットを獲得する。

その際、新たに獲得したロボットにより近いプレースが存在する場合には、エージェントはそのプレースへ移動する。プレースの情報も、ロボットと同様に管理機構に登録されており、それを利用することでプレースとロボットの位置関係を知ることができる。ユーザの移動した方向にロボットが存在しなければ、現在の構成で待機する。

この実験では、エージェントは分散ロボットの効率的な利用のために、同時には必要となる1台のロボットしか制御下におかない。

ユーザは Fig. 6 に示すように、ロボットの前を行ったり来たりし、適宜ロボットとインタラクションを行うことで、Fig. 7 に示すように常時エージェントがユーザに追従していることを確認できた。

5.2 過去の履歴を利用した能動支援

過去の履歴を利用した能動支援のために、物体の運搬・持ち

Fig. 7 Sequential photos of following a user experiment

去り動作を例として行った。エージェントはロボットを制御してユーザの元まで物体を運搬してくる。ユーザがその物体を使用した後、物体を返却すると、エージェントはロボットを制御して物体を持ち去る。このときに、物体を返却するロボットをユーザが選択できるとし、エージェントはユーザからの入力情報と過去の記憶情報を利用して現在の環境情報を調べることで、物体の返却されたロボットを判断し、そのロボットを獲得・制御して物体を運び去る。

環境には、人間型ロボットが2台（ロボット A・ロボット B）とカメラロボット2台（サイドカメラ・フロントカメラ）が存在し、物体としてお茶の缶を用いた。実験の手順は以下の通りである（番号は Fig. 8 中の番号に対応）。

- (1) ユーザはエージェントに対して缶を運んでくるように指示を出す。
- (2) エージェントは、缶を持ったロボット A とサイドカメラを獲得し、サイドカメラの情報を基にロボット A をユーザの待つ指定位置まで移動させる。
- (3) ユーザは缶を受け取り、受けとったという合図をエージェントに伝える。それによって、エージェントはロボット A を解放し、フロントカメラを獲得して現在の環境を視覚画像として記憶しておく。
- (4) ユーザはロボット A か B のいずれかに缶を返却し、エージェントにお茶を持ち去るように指令を出す。
- (5) エージェントはフロントカメラからの情報を利用して、記憶した画像と現在の画像との差分を取り、どちらのロボットに缶が返却されたかを判断する。
- (6) エージェントは返却された方のロボットを獲得し、缶を運び去る。

この実験では、ユーザが缶を返却し得る場所を2台のロボッ

Fig. 8 Sequential photos of bringing a can experiment

トのうちのいずれかと限定しており、エージェントが時系列に沿って2台を観察することで、返却されたロボットを検出している。このように限定された条件下ではあるが、エージェントがユーザの挙動に応じて能動的にロボットを選択することで、ユーザ側の負担を減らすことができた。

6. ま と め

複数のロボットにより個人を継続的に支援するという観点から、モバイルエージェント機構を用いた分散ロボットの統合方法を提案し、このモバイルエージェント機構により継続支援する

ための中核技術として、個人の継続追跡と過去の履歴を利用する方式について実験例を示した。

業界標準である分散オブジェクト技術 CORBA を用いることで、異種プラットフォーム上で動作する分散ロボット環境構成要素間の通信インターフェースが明確に規定され、またモバイルエージェント技術を用いることで、通信トラフィックの局在化を保持した状態で柔軟なロボットの運用を実現できる方式となっている。

なお、本研究の環境は日本学術振興会未来開拓推進事業（研究プロジェクト名：マイクロ・ソフトメカニクス統合体としての高度生体機能機械の研究，課題番号：JSPS-RFTF96P00801）の支援を受けている。

参 考 文 献

- [1] K. Hirai: "Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot," IROS 97, pp.500-508, 1997.
- [2] M. Fujita, H. Kitano and K. Kageyama: "Development of Autonomous Quadruped Robot for Robot Entertainment," Autonomous Robots, 1998.
- [3] 加藤一郎: "リリースロボット—生活支援ロボット—の構想", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.5, pp.614-617, 1993.
- [4] T. Sato, Y. Nishida and H. Mizoguchi: "Robotic Room: Symbiosis with human through behavior media," Robotics and Autonomous Systems, pp.185-194, 1996.
- [5] 特集「人間共存型ロボット」, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.3, pp.1-37, 1998.
- [6] 飯田, 西ヶ谷: "モバイルエージェントとネットワーク", 情報処理, vol.38, no.1, pp.17-23, 1997.
- [7] OMG TC Document: "The Common Object Request Broker: Architecture and Specification, Revision 2.0," 1997-02-25.
- [8] OMG TC Document: "The Open Group: Joint Submission: Mobile Agent System Interoperability Facilities," 1997-10-05.
- [9] J.E. White: "Telescript Technology - Mobile Agent 1991," American Association for Artificial Intelligence, 1996.
- [10] 岩井俊弥: Java モバイル・エージェント, ソフト・リサーチ・センター, 1998.
- [11] 小川原, 他: "モバイルエージェント機構に基づくネットワーク結合分散ロボットの制御", 日本ロボットメカトロニクス講演会, 1999.
- [12] Masayuki Inaba: "Remote-Brained Robots," Proc. of 15th International Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-97), pp.1593-1606, 1997.

小川原光一 (Koichi Ogawara)

1975 年 2 月 5 日生。1998 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専門課程修士課程修了。現在、同大学大学院博士課程在学。ロボットによる人間行動の理解と獲得および人間支援の実現方法に興味を持つ。

(日本ロボット学会学生会員)

稲葉雅幸 (Masayuki Inaba)

1958 年 5 月 23 日生。1986 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専門課程博士課程修了。工学博士。1986 年東京大学講師, 1989 年助教授, 2000 年東京大学教授大学院工学系研究科機械情報工学専攻, 現在大学院情報学環・学際情報学府所属。日本機械学会, 計測自動制御学会, 情報処理学会, 人工知能学会, ソフトウェア科学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

金広文男 (Fumio Kanehiro)

1972 年 7 月 22 日生。1999 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。工学 (博士)。1998 年より日本学術振興会特別研究員。2000 年電子技術総合研究所に入所。現在に至る。人間型全身ロボットの振る舞いの実現方法, ブレインの構成法に興味がある。IEEE, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

井上博允 (Hirochika Inoue)

1942 年 7 月生。1965 年東京大学工学部産業機械工学科卒業。1970 年同大学大学院博士課程修了。工学博士。同年電子技術総合研究所入所。1977 年東京大学工学部機械工学科助教授。1984 年教授。現在、機械情報工学科教授。ロボット全般, 人工知能, 情報システム工学の研究と教育に従事。

(日本ロボット学会正会員)