

分散型問題解決における問題割り当て

北村泰彦 奥本隆昭
大阪市立大学工学部

本論文では、複数のエージェントが協調して問題解決を行なう分散型問題解決における問題割り当てのための通信方式として、二方向回覧板プロトコルについて述べる。二方向回覧板プロトコルではエージェントは二重の通信路により物理的にリング状結合されている。割り当てるべき問題を持つエージェントはその問題を記述した解決依頼メッセージを巡回させ、解決に貢献できるエージェントはその貢献度を入札メッセージに記述して解決依頼メッセージに連結する。このようなメッセージを左右両方向に巡回させることにより、各エージェントは二つの解決依頼メッセージが通過した時点で、最も貢献度の高いエージェントを決定することができる。また、メッセージが他のメッセージを追い越さないという性質と、依頼可能/禁止状態の概念を導入することにより、同時に生成された複数の問題を大局的に最適な割り当てを行なう最適問題割り当ても実現可能であることを示している。

PROBLEM DISTRIBUTION
IN DISTRIBUTED PROBLEM SOLVING

Yasuhiko KITAMURA Takaaki OKUMOTO

Faculty of Engineering, Osaka City University

3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558, Japan

This paper describes 2-way Circulation Board Protocol as a communication method for problem distribution in distributed problem solving that is a problem solving by a cooperation of multiple agents. In 2-way Circulation Protocol, agents are connected physically as a ring by double communication channels. An agent with a problem to allocate circulates a REQUEST message, which contains the problem description, and agents which contribute to solve it concatenate BID messages, which contains the contribution description, to the REQUEST message.

By 2-way circulation of these messages, when two REQUEST messages cross over an agent, the agent can choose the most appropriate agent for the problem solving based on the contribution description of BID messages. Moreover, by the nature that a message never passes the other and by the introduction of request critical state, it is possible to realize optimal problem distribution that is to distribute multiple problems generated at the same time to the globally most appropriate group of agents.

1. まえがき

複数の問題解決器（以下、エージェントと呼ぶ）が協調して問題解決を行なう分散型問題解決は、その並列性、拡張性、信頼性、分散アプリケーションへの対応といった利点のゆえに注目されている⁽¹⁾。分散型問題解決の研究課題には、問題の部分問題への分割、部分問題の割り当て、協調的な部分問題の解決といったものがあるが⁽¹⁾⁽²⁾、本稿では特に、適切なエージェントへの（部分）問題の割り当てについて述べる。従来の分散処理では問題割り当てを行なう場合に、特定の管理ノードを設け、そのノードが集中的に問題割り当てを行なってきた⁽⁴⁾。しかし分散型問題解決ではシステムを構成するエージェントの能力は同等であり、特定のエージェントだけではなく、全てのエージェントが問題割り当てを行なうことができる。従って問題を割り当てられたエージェントは、必要に応じてさらに問題を分割し、他のエージェントに割り当てることができる。このような問題割り当てを行なう方法には静的な手法と、動的な手法が考えられる。静的な手法とは各エージェントの能力を記述した大局ディレクトリを用いる方法であり、従来の分散形データベースで用いられてきたものである⁽¹¹⁾。また、動的な手法とはエージェント間でメッセージのやり取りにより問題の割り当てを行なうものである。分散型問題解決ではエージェントの能力や負荷が常に変化する場合があります。静的な方法では大局ディレクトリ管理のための通信量が膨大になるので、動的な手法が適している。このような動的な問題割り当て手法は分散型問題解決の分野だけでなく、解の正当性ととも時間的な制約を受けるhard real-time system^{(2)・(3)}、知的分散システム^{(4)・(5)}、分散型演繹データベースシステム⁽⁶⁾への応用も報告されている。

さて、分散型問題解決においてメッセージのやり取りによる動的な問題割り当ての最初の枠組みを示したのはDavisとSmithによる契約ネットプロトコルである⁽⁷⁾。契約ネットプロトコルでは人間社会における交渉過程をもとに、announcement-bid

-awardの3メッセージのやり取りからなる方法を用いている。また、SinghとGenesereth⁽⁸⁾、山崎⁽⁶⁾はそれぞれ契約ネットプロトコルの通信効率を改善し、announcement-bidの2メッセージのみで問題割り当てを行なう方法を提案した。これらの方法は全て、メッセージ通信の方法として同報通信を用いていたが、筆者らは先にメッセージをリング状に結合されたエージェントに巡回させる回覧板プロトコルを用いた問題割り当て方式を提案した⁽⁹⁾。本論文ではこの回覧板プロトコルを拡張し、両方向にメッセージを巡回させる二方向回覧板プロトコルによる問題割り当て方式について述べる。メッセージを両方向に巡回させ、専用の低レベルプロトコルを仮定することにより、従来の回覧板プロトコルに比べ問題割り当ての高速化が可能になった。

また従来の問題割り当て方式では、複数の問題割り当てが同時に行なわれる場合に大局的に最適な割り当てを行なう最適問題割り当ての実現が困難であった。本論文では最適問題割り当てが従来の同報通信に基づく方法では実現することが困難であることを示し、二方向回覧板プロトコルによる実現方法を示す。

*実際には大局ディレクトリ修正の通信量と、問題割り当てに必要な通信量とのトレードオフの関係になる。

2. 分散型問題解決と問題割り当て

ここでは分散型問題解決における問題割り当てのモデルを明らかにしておく。分散型問題解決システムは通信路で結合された複数のエージェントから構成されており、任意のエージェントとメッセージによる通信が可能である。エージェントは問題が与えられると、自らの知識により解決するか、必要に応じて問題を分割し、他のエージェントにその部分問題を割り当てることができる。問題割り当てはシステム内の特定のエージェントにより集中的に行なうのではなく、全エージェント

が行なうことができる。割り当てるべき問題 p を持つエージェントのことをここでは (p の) マネージャーと呼ぶ。システムの中で p の解決に貢献できるエージェントのことを (p の) ワーカー候補と呼ぶ。またワーカー候補は各々の貢献度を表わす見積りを大局的に共通の基準で算出可能であるとす。従って分散型問題解決における問題割り当てとは、問題 p に対して最も見積りのよいワーカー候補を選択し、問題を割り当てることである。このような単一の問題割り当てを特に単一問題割り当てと呼ぶ。また、この選択されたエージェントを (p の) ワーカーと呼ぶ。マネージャー、ワーカーとはそれぞれ役割であり、固定された特定のエージェントを指すものではない。従ってワーカーが問題 p を解決中に問題を分割し部分問題 q を得て、それを他のエージェントに割り当てるならば、そのエージェントは問題 p に対してはワーカーではあるが、問題 q に対してはマネージャーとなる。

次に、それぞれ割り当てるべき問題 p_1, \dots, p_n を持つ複数のマネージャーが同時に存在するとき、マネージャーとワーカー候補の間で表 1 に示されるような割り当て管理テーブルを構成することができる。このテーブルの中で最適の組合せとなる問題割り当てを最適問題割り当てと呼ぶ^{*)}。例を以下に示す。

【例 1】 4つのエージェント M_1, M_2, W_1, W_2 が存在する。マネージャー M_1, M_2 はそれぞれ同時に割り当てるべき問題 p_1, p_2 を持っており、ワーカー候補 W_1, W_2 はいずれの問題も表 1 に示す見積り (数字が大きいほど良いとする) に従って実行可能である。問題の割り当て方には 2通りが考えられるが、問題 p_1 を W_1 に、問題 p_2 を W_2 に割り当てる (見積りの合計 1.1) よりも、問題 p_1 を W_2 に、問題 p_2 を W_1 に割り当てる (見積りの合計 1.6) 方が大局的に適している。□

このような最適問題割り当ては従来の契約ネットプロトコルでは実現が困難であった⁽⁷⁾。その原因には以下のものが考えられる⁽¹²⁾。

	W_1	W_2
p_1	0.9	0.8
p_2	0.8	0.2

表 1 割り当て管理テーブル

(1) ワーカー判定の局所性

契約ネットプロトコルではマネージャーが大局的な情報なしにそれぞれ独自にワーカーを選択してしまうので、最適問題割り当ては難しい。この問題に対しては、入札メッセージにも同報通信を用いて、他の割り当てに関する情報も利用することができれば、対処可能であると思われる。

(2) 問題発生 の同時性検出

任意の時刻に任意のエージェントがメッセージを送れる同報通信を用いる割り当て方式では、問題が同時に生成されたものかどうかを判定することは難しい。このためには依頼メッセージにタイムスタンプを設ける方法が考えられるが、エージェントの時計が完全に同期していることが前提であり、その時計合わせの方法もある程度の誤差は避けられない⁽¹⁴⁾。

そこでメッセージのやり取りだけで問題生成の同時性を検出できる方式が必要となる。

*この理由には、自らの知識では解決不可能な部分がある場合や、問題解決の負荷を他のエージェントに分散し、解決の並列高速化を行なう場合がある。

**このような最適の組合せを求める方法にハンガリア法がある⁽⁵⁾。

3. 二方向回覧板プロトコル

3.1 ネットワーク構成

エージェントは図 1 に示されるようにリング状に二重の通信路で結合されている。エージェントは隣接するエージェントと通信可能であり、一方の通信路を通じて時計回りに、またもう一方の通

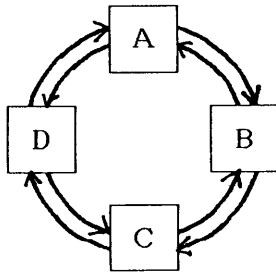


図1 エージェントの結合形態

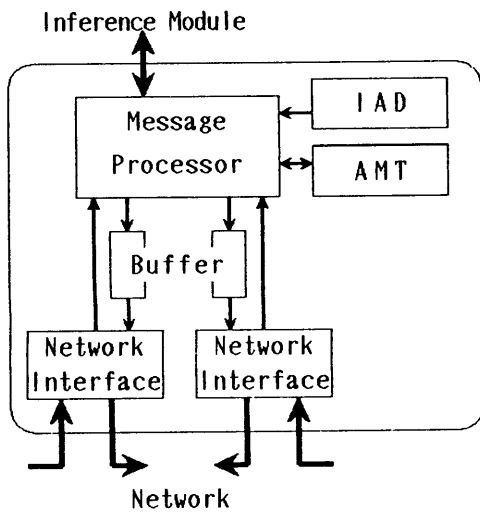
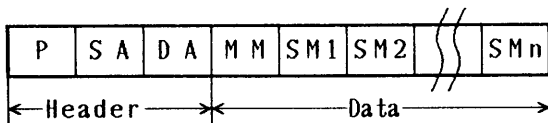


図2 通信部の構成



P: Priority
 SA: Source agent DA: Destination agent(s) list
 MM: Main Message SM_i: Sub message i

図3 パケットの形式

信路を通じて反時計回りにメッセージが送れるとする。各通信路を通じての各エージェントのメッセージ通信はそれぞれ独立してできるものとしている。

3.2 通信部

エージェントの通信部は図2に示すように、二重通信路の各々に接続された二つのネットワークインタフェース(network interface)、問題解決を実行する推論部と結合され、メッセージの処理を行なうメッセージプロセッサ(message processor)、優先度付き通信⁽⁹⁾に用いる送信用バッファ(buffer)、エージェントが貢献可能な問題とその貢献度を記述した関連域データベース(interest area database: IAD)、割り当て管理テーブル(allocation management table: AMT)から構成されている。

3.3 パケット形式

メッセージはパケットを用いて通信され、図3に示すように優先度付き通信⁽⁹⁾に用いられる優先度(priority)、メッセージを送出する送信エージェント名(source agent)、メッセージの宛先となるエージェントのリストを記述した受信エージェントリストからなるヘッダ部(header)と、1個の主メッセージ(main message)と0以上可変個の副メッセージ(sub message)からなるデータ部(data)から構成されている。

3.4 通信モード

二方向回覧板プロトコルには4種類のメッセージ通信モードがある。

(1) 1対1モード: 受信エージェントリストにはエージェント名1個だけ記述され、メッセージは送信エージェントから受信エージェントに他のエージェントのメッセージプロセッサを経由せず、直接送られる。通信路はネットワーク経路の短い方が選択される。

(2) 1対多モード: 受信エージェントリストには複数個のエージェント名が記述され、その順序に応じて受信エージェントのメッセージプロセッサを経由しながらメッセージが送られてゆく。

(3) 一方向回覧モード: 受信エージェントリストの記述が '*R' (または '*L') の場合、メ

ッセージは送信エージェントから送られ、時計回り（または反時計回り）に全てのエージェントのメッセージプロセッサを経由しながら送られてゆき、最後に送信エージェントに戻ってくる。

（４）二方向回覧モード：受信エージェントリストの記述が'* 2'の場合、同一の内容の（主）メッセージが時計、反時計の両方向に送られる。後の処理は一方回覧モードと同様である。

3. 5 メッセージ操作

通信モードが1対1モード以外の場合には、受信エージェントは以下のような副メッセージへの操作が可能である。

（１）連結型：副メッセージを順々に結合してゆく。

（２）置換型：副メッセージを他の副メッセージと入れ換える。

（３）通過型：副メッセージの操作は行なわない。

*受信エージェントリストは、時計回り、または反時計回りのエージェントの順序によって記述される必要がある。

4. 二方向回覧板プロトコルによる問題割り当て

4. 1 単一問題割り当て

二方向回覧板プロトコルによる単一問題割り当て法について述べる。問題割り当てに用いるメッセージには以下のものがある。メッセージの一般形は

<TYPE; arg1,arg2,...>

であり、0個以上の任意の数の引き数(arg)を記述できる。

（１）解決依頼メッセージ（主メッセージ）

<REQUEST; problem,type>

割り当てべき問題(problem)を他のエージェントに通知する主メッセージである。typeの記述は'single'（単一割り当て）である。

（２）入札メッセージ（副メッセージ）

<BID; agent,estimation>

解決依頼メッセージにより割り当てられる問題に対する、エージェント(agent)の貢献度の見積り(estimation)を示すメッセージである。

また割り当て管理テーブルは表1でも示したように、一つの問題に対して複数のワーカー候補の見積りが記述可能になっている。

単一問題割り当ては以下のメッセージのやり取りにより行なわれる。

[単一問題割り当て]

①割り当てべき問題pを持つマネージャーは二方向回覧モードにより解決依頼メッセージ<REQUEST; p,single>を両方向に送り出す。

②エージェントaが片方からの解決依頼メッセージを受信した場合。

問題pが関連域データベースに登録されていれば（すなわちワーカー候補であれば）、その貢献度の見積りeを記述した入札メッセージ<BID; a,e>を主メッセージに連結して次のエージェントに送る。連結されている入札メッセージの情報を割り当て管理テーブルに登録する。

問題pが関連域データベースに登録されていなければ、メッセージには操作を加えずに次のエージェントに送る。

③エージェントaがもう一方の解決依頼メッセージを受信した場合。

問題pが関連域データベースに登録されていれば、連結されている入札メッセージの情報を割り当て管理テーブルに登録する。エージェントの貢献度の見積りeを記述した入札メッセージ<BID; a,e>を主メッセージに連結して次のエージェントに送る。割り当て管理テーブルを参照し、ワーカーを決定する。自らがワーカーならば、問題を推論部に送り問題解決を実行する。

問題pが関連域データベースに登録されていなければ、メッセージには操作を加えずに次のエージェントに送る。

④マネージャーは両方向から戻ってきた解決依頼メッセージと入札メッセージをもとに割り当て管理テーブルを構成し、ワーカーを認識する。口このように単一問題割り当ては解決依頼メッセ

ージをそれぞれ両方向へ一巡させることにより行える。

4.2 最適問題割り当て

単一問題割り当ては各ワーカー候補が一つの問題に対する割り当て管理テーブルを構成することにより実現されたが、最適問題割り当ては同時に生成された複数の問題を含む割り当て管理テーブルを構成できれば実現できることになる。しかしここでの課題は生成された問題の同時性の検出である。すなわち、各エージェントは分散独立に処理を行なうために、問題が同時に生成されたかどうかをメッセージのやり取りにより決定しなければならない。そこで最適問題割り当てのために新たな概念として依頼可能/禁止状態を設ける。その定義を以下に示す。

【定義】マネージャーは自ら解決依頼メッセージを送り出すと依頼禁止状態になり、両方向からの解決依頼メッセージが返ってくると依頼可能状態になる。また、いずれかのエージェントからの片方の解決依頼メッセージが通過すると依頼禁止状態になり、もう一方の解決依頼メッセージが通過すると依頼可能状態になる。複数の解決依頼メッセージが通過する場合は、両方向からの全ての解決依頼メッセージが通過した時点で依頼可能状態になる。各エージェントの初期状態は依頼可能状態である。□

そして依頼可能/禁止状態を用いた最適問題割り当て手法として、単一問題割り当て法を以下のように拡張する。

(1) マネージャーは割り当て可能状態の場合にのみ、解決依頼メッセージが送れる。

(2) 各エージェントは割り当て禁止状態の間の全ての解決依頼メッセージと入札メッセージの情報を割り当て管理テーブルに登録する。

(3) 各エージェントは割り当て可能状態になった時点で、割り当て管理テーブルを参照し、各問題に対して最適なワーカーを決定する。自らがワーカーとなれば、問題を推論部に送る。

以上の拡張により、以下の定理が成り立つ。

【定理】全エージェントが依頼可能状態の時に、

同時に生成された問題とその見積りは全エージェントの割り当て管理テーブルに登録され、その内容は全エージェントで同一である。

(証明) 文献(12)参照。□

5. 考察

本章では二方向回覧板プロトコルによる問題割り当てに関する考察として、従来の回覧板プロトコルによる問題割り当て^{(9)・(13)}との比較と最適問題割り当てにおける同時性の問題について述べる。

(1) 従来の回覧板プロトコルによる問題割り当てとの比較

文献(9)においては分散型問題解決における通信プロトコルを1対1のエージェント間通信を規定する基本通信プロトコル、1対多、多対1のグループ通信を規定する回覧板プロトコル、問題の割り当てを行なう問題解決プロトコルと三つの階層に分類していた。ここで基本通信プロトコルは通常のLANなどで用いられている汎用プロトコルを前提としており、それを利用する形で回覧板プロトコルを規定していた。従って従来の回覧板プロトコルにおけるリング状のネットワーク形態は論理的なものであり、メッセージ送信の制御はトークンをエージェントに巡回させることにより行なっていた。従ってプロトコルの汎用性があるものの、通信効率が悪く、メッセージを一巡させるための時間 T_1 は、エージェント数を n 、エージェント間のパケット転送時間を t_c 、メッセージプロセッサの処理時間を t_p とした場合、

$$(n^2+n)t_c+(n-1)t_p > T_1 \geq nt_c+(n-1)t_p$$

となった⁽¹³⁾。

それに対して二方向回覧板プロトコルではリング状のネットワーク形態を物理的なものとし、各エージェント間での通信を独立なものとしたため、プロトコルの汎用性はなくなったが、通信効率の改善を図った。二方向回覧板プロトコルではエージェントがパケットを送出するまでの待ち時間は最短で0、最長でも t_c 待てばよい。従ってメッセージが一巡するための時間 T_2 は、 $n-1$ 個のエージェントを巡回することになるので、

$$2nt_c + (n-1)t_o > T_2 \geq nt_c + (n-1)t_o$$

となる。

また、単一問題割り当てを行なう場合には従来の回覧板プロトコルでは、一旦解決依頼メッセージを一巡させた後、ワーカーとなったエージェントに通知を行なう通知メッセージが必要となるので、最悪の場合（マネージャーから $n-1$ 番目のエージェントがワーカーとなった場合）にはその通信時間は T_1 は

$$(2n^2 + n - 1)t_c + (2n - 3)t_o > T_1 \geq (2n - 1)t_c + (2n - 3)t_o$$

となる。

それに対して、二方向回覧板プロトコルでは両方向から解決依頼メッセージを巡回させ、通知メッセージも不要であるので、その通信時間は最悪の場合でも、

$$2(n-1)t_c + (n-2)t_o > T_2 \geq (n-1)t_c + (n-2)t_o$$

ですむ。

(2) 最適問題割り当てにおける同時性について

4章では全エージェントが依頼可能状態の時に同時に生成された問題はすべて同じ割り当て管理テーブルに登録されることを明らかにしたが、これは十分条件であり、必要条件は成り立たない。すなわち必ずしも同時に生成されなくても同一の割り当て管理テーブルに登録されることがある。その許容範囲はマネージャーが他のマネージャーから発せられる解決依頼メッセージにより依頼禁止状態になるまでの間となる。この範囲はエージェント間の通信速度とマネージャー間の距離により決定され、利用者が自由に変更することはできない。従って問題の生成が許容時間を越えてしまった場合には、依頼可能状態になるまでその解決依頼メッセージの発生を待たなければならない。また、同じエージェントで同時に複数個の問題が生じて、その時点で割り当ての対象となるのは一つであり、残りのものは次の依頼可能状態を待たなければならない。すなわち二方向回覧板プロトコルによる最適問題割り当てとは図4に示すように各エージェントの時間を依頼可能状態と依頼禁止状態に区分することであり、同一の依頼可能状態

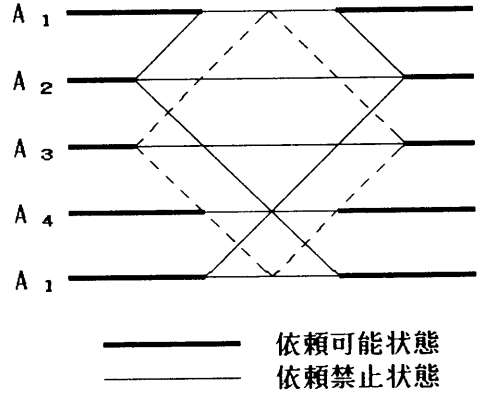


図4 依頼可能／禁止状態

で生成された問題は同一の割り当て管理テーブルに登録されることを保証しているのである。現在の割り当て方式では各エージェントが一度に割り当てられるのは依頼可能状態につき一問題である。しかし一つの PACKET に複数の主メッセージ（すなわち解決依頼メッセージ）を記述できるように拡張すれば、複数の問題を同時に割り当てることも可能である。

6. むすび

本稿では分散型問題解決のための通信方式として、従来の回覧板プロトコルを拡張した二方向回覧板プロトコルを提案し、単一問題割り当て、最適問題割り当て手法について述べた。特に最適問題割り当ては生成された問題の同時性検出のためのエージェント間の同期が必要であり、従来の同報通信に基づく割り当て方式では実現が難しかった。しかし、メッセージ転送に順序性のある二方向回覧板プロトコルにより実現が可能になった。また、物理的な通信路形態も二重リング状にし、エージェント間の通信を独立に行えるようになったので従来の回覧板プロトコルに比べ、通信速度も向上した。しかしその反面、物理的な制約が大きいため通信部の故障した場合にはシステム全体が停止してしまう。障害対策の問題は今後の課題としたい。また、分散型問題解決における最適問題割り当ての評価や、具体的事例への応用も今後の課題とする。

謝辞 本研究に関して議論していただいた大阪市立大学工学部藤原直賀人助教授, ICOT-DICサブWG委員の方々に感謝します。

文献

- (1) A.H.Bond and L.Gasser: "Readings in Distributed Artificial Intelligence", Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo(1988).
- (2) J.A.Stankovic and K.Ramamritham: "Hard Real-Time Systems", IEEE Computer Society Press, Washington,D.C.(1988).
- (3) J.A.Stankovic, K.Ramamritham, and S.Cheng: "Evaluation of a Flexible Task Scheduling Algorithm for Distributed Hard Real-Time Systems", IEEE Trans. Comput., C-34, 12, pp. 1130-1143(1985).
- (4) 田村信介,辻康紘: "知的分散システム",電学誌, 106, 3, pp.239-246(1986).
- (5) 田村信介,岡宅泰邦,関俊文: "知的分散システムのアーキテクチャ", 電学論(C), 108, 6, pp.393-400(1988).
- (6) 山崎晴明: "分散型演繹データベースシステム: SD³ とそのプロトコル", 情処学論, 26, 2, pp.288-295(1985).
- (7) R.Davis and R.G.Smith: "Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving", Artif. Intell., 20, pp.63-109(1983).
- (8) V. Singh and M.R. Genesereth: "A Variable Supply Model for Distributing Deductions", Proc. IJCAI9, pp.39-45(1985).
- (9) 北村泰彦,小川均,北橋忠宏: "分散型問題解決における問題割り当てのための一通信方式", 信学論(D), J71-D, 2, pp.439-447(1988).
- (10) R.G.Smith and R.Davis: "Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving", IEEE Trans. Syst., Man, & Cybern., SMC-11, 1, pp.61-70(1981).
- (11) 永田元康: "分散形データベース", 綜文館(1983).
- (12) 北村泰彦,奥本隆昭: "二方向回覧板プロトコルによる最適問題割当", 人工知能学会誌, 4, 2, pp.207-210(1989).
- (13) 北村泰彦,小川均,北橋忠宏: "分散型問題解決のための一通信方式", 情処知識工学と人工知能研資, 52-9(1987).
- (14) 尾内理紀夫: "分散コンピュータ間の時計合わせ", 信学技報, CPSY88-52(1988).