

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 15 日現在

機関番号：13903  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21500073  
 研究課題名（和文） 高品質・省電力を目指した次世代ピアツーピア型動画配信システム基盤  
 研究課題名（英文） Next Generation P2P video streaming system with high quality and low power.  
 研究代表者  
 松尾 啓志（MATSUO HIROSHI）  
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：00219396

研究成果の概要（和文）：ネットワーク上の通信，計算，記憶資源を配分するための分散協調型システムを対象として，基本問題についての検討と分析を行った．そして，具体的な基本問題の一つとして，分散協調問題解決の枠組みで，次数制約付き最小生成木生成問題を形式化した．解法として分散制約最適化手法を適用し，提案手法の効果を実験により評価した

研究成果の概要（英文）：We propose the formalization and distributed cooperation methods for d-MST problem in multi-agent systems. The proposed exact/approximate methods resemble the approaches that apply Distributed Constraint Optimization Problem. In the exact method, each agent propagates messages that represent set of sub-trees in a bottom-up manner. We experimentally compare the proposed techniques from the viewpoints of the quality of the solutions and the cost for tree construction.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワークプロトコル，動画配信

1. 研究開始当初の背景

インターネットの高速化により動画を含む大量データの配信が一般的となった。しかし、インターネット上では、テレビ放送のように数万人を対象にした同時配信は現実的でない。BitTorrent に代表されるピアツーピア型配信や、ロードバランサ、サーバや回線速度の増強など、対症療法的な方式により、動画を含む大量データの配信が、まさに“綱渡りの”、“ちからわざ的”に行われている。こ

のような解決法はインターネット社会では一般的ではあるが、今後の発展を考えた場合、基礎から理論的な枠組みをしっかりと構築した後、サービスを再構築することが必要である。従来から我々は、情報が局所的にしか得られない状況で、大局的に制約を充足可能な分散制約充足問題に関する研究を行ったこの研究過程で、実時間、大量データの配信問題を、分散制約充足問題の枠組みで解決できることの可能性に気づき基礎的な検討を行った。その結果、“制約が動的に変化する

際への対応”への問題点はあるもの、配信スケジューリング問題に対応可能であるとの感触を得た。

## 2. 研究の目的

従来から、分散制約充足問題に関して、分枝限定法、ラグランジュ緩和法など、さまざまな方式が提案されている。しかしこれらはすべて静的な環境における最適解の探索を目指したものであり、本研究が想定する制約が動的に変化する環境に対して適用可能な分散制約充足問題の解法は、まだ開発されていない。この研究においての理論的な面での最大の課題はまさにこの一点であると言っても過言ではない。そこで我々は、研究の初期段階において、動的な環境に適用可能な解（必ずしも最適解でなくてもよい）を、安定して解くことのできる可能なアルゴリズムの開発に全力を尽くす。

さらに、開発した分散最適化技術を元に、実際の実時間動画配信システムの実装を行う予定である。またピアツーピア型配信システムが受け入れられるためには、省電力への対応が必須である。そこで動画配信ソフトウェアが適応的にハードウェアを制御することにより、省電力を実現するシステムについて検討する。

## 3. 研究の方法

従来アドホック的に行われてきた分散配送スケジューリング問題に対して、理論的な枠組みを構築することを目的とする。連携研究者の横尾、平山らによる分散制約充足問題の新しい解法 ADOPT の提案、横尾らによる A\*アルゴリズムと分枝限定法を基礎とし、非同期探索を行う完全な解法、松井・松尾による確率的な分散制約最適化による資源割り当て法など、連携研究者を含む我々の研究グループで基礎的な手法の提案はすでに行われている。あとは、動的にネットワークの速度（制約充足問題では制約）が変動する際の枠組みを導入すれば、この問題は解決すると考える。ただし、分散制約充足問題における動的な枠組みの導入が必要となる。

## 3. 研究成果

### (1) P2P 配信システムにおける基本問題の検討

インターネット環境の P2P 網における動画配信のような、ネットワーク上の通信、計算、記憶資源を配分するための分散協調型システムを対象として、基本問題についての検討と分析を行った。

このようなシステムでは、資源を供給するための経路や制御のために配信木などの生成

木を利用することが、しばしば必要である。一般に、配信木の木構造の多くは配信におけるコストを最小化する最小生成木 (MST: Minimum Spanning Tree) として表される。MST は、ネットワークに参加する全ての頂点を含み、辺のコストの総和が最小であるような木であり、配信木として有用であり、広く研究されている。

その一方で、配信を担当する各ノードの能力を考慮した情報の伝播も重要である。このようなより現実的な資源供給ネットワークにおけるノードは、接続される辺の数についての制限である、次数制約を課せられることがある。このような状況では、接続数に制限が必要な場合がある。このように制限された生成木は次数制約付き最小生成木 (DCMST: Degree-Constrained Minimum Spanning Tree) として研究されている。

DCMST 生成問題は、MST 生成問題を拡張した組み合わせ最適化問題である。MST 生成問題の入力は重み付き無向グラフ  $G = (V, E, c)$  である。このグラフは、 $n$  個の頂点の集合  $V$ 、各頂点  $i, j$  を結ぶ辺の集合  $E$ 、および辺のコストの関数  $c(i, j) \rightarrow \mathbb{R}$  により定義される。MST は閉路を含まず、辺のコストの合計が最小であるような連結無向成分  $T = (VT, ET)$ 、( $ET \subseteq E, VT = V$ ) である。

これに加えて、DCMST 生成問題では、各頂点の次数  $d(i)$  に対し、次数の制限数  $b_i$  が与えられる。次数制約付き生成木  $T = (VT, ET)$  に含まれる各頂点  $i$  の次数を  $d_T(i)$  とするとき、 $d_T(i) \leq b_i$  であり、かつ、辺のコストの合計は最小である。T に含まれる辺のコスト合計が解の質  $Q(T)$  と定義される。

図 2(a) のようなグラフが与えられるとき、(b) は MST であり、(c) は DCMST である、また (d) は次数 3 の制約を満足するが辺のコストの合計は最小ではない近似解である。

MST 生成問題の解法には、多項式時間で解が得られる決定的アルゴリズムが存在する。これに対して、DCMST 生成問題は、一般的な場合に NP 困難な問題とされる。多くの近似的な解法が提案されている。

DCMST 生成問題の適用分野として、P2P ネットワークにおける動画コンテンツの配信を挙げる。非構造型の P2P ネットワークには、システム全体の中心となるノードが存在せず、各ノードが互いに対等な立場として扱われる。全てのノードは、サービスをリクエストするクライアントにもなり、リクエストに応えるサーバとしても機能する。ネットワークにおいて、コンテンツの配信を行うために、アプリケーションレベルマルチキャスト (ALM) が用いられる。ALM では一般に、全てのエンドホストにパケットをルーティングするため、全てのエンドホストが論理的な通信線で結ばれるような生成木 (マルチキャスト木) を構築する。

図 1(a)の P2P 論理ネットワークにおける MST をマルチキャスト木として構築すると、実線で示されるような全てのエンドホストを繋ぐ配信経路が構築される。その一方で、同図(b)の実ネットワークでは、複数の配信経路が、特定のエンドホストに接続される 1 本の通信線や、同一のスイッチを過剰共有する状態が起こりうる。したがって、通信線の帯域幅、各エンドホストおよびスイッチの負荷の過剰な増加を抑制するために各ノードの次数を制限することが必要な場合がある。

DCMST 解法の多くは集中的なアルゴリズムであり、系全体の情報の集約が必要である。また、近似解法も定義されているが、比較的簡単な近似手法であり、DCMST に特化されている。より高度な要求のもとで配信木を構築するためには、DCMST にさらに付加価値的な最適化の指標が必要とされることが考えられ、このような問題の拡張に適用可能な汎用的な分散協調的な最適化手法の適用の有用性が期待される。このことから、自律的な複数のエージェントによる分散協調問題解決としての DCMST の形式的な定義、およびその解法としての分散協調最適化アルゴリズムの開発を具体的な研究の方針とした。

(2) 分散次数制限付き最小生成木問題

DCMST 問題のようなネットワーク上の組み合わせ

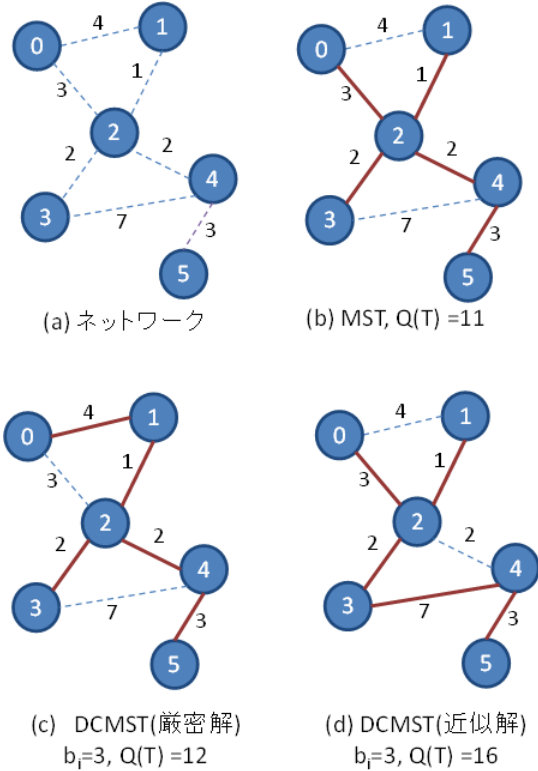
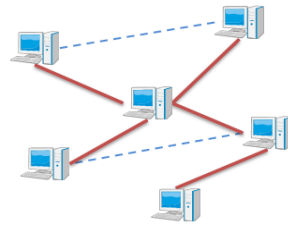
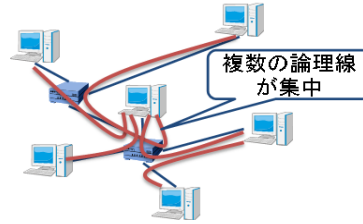


図 2 DCMST



配信経路のために  
最小生成木を構築し  
通信遅延の合計を最適化

(a) P2P 論理ネットワーク



通信線やスイッチの能力の限界を  
接続数(次数)制約として表現

(b) 実ネットワーク

図 1 P2P 網における DCMST

せ最適化問題を、分散された複数の自律的なノードが持つ計算、記憶、通信能力に基づいて問題を解くことを前提とする手法について検討した。特に、このような問題を複数エージェントシステムにおける協調問題解決の枠組みにおいて解くために、分散 DCMST 生成問題を形式化する必要がある。そこで、基礎的な協調問題解決手法として研究されている分散制約最適化問題 (DCOP) を適用した。

DCOP では複数エージェントシステムにおける最適化問題をエージェントに分散して配置された、変数、制約、評価関数により表現する。変数はエージェントの意思決定を表し、変数間の関係が、制約や評価関数により定義される。

DCOP の関連研究に、電力網におけるフィード木の構築に特化した形式化が用いられている。本研究では、このような形式化と類似し、より一般的な木の構築問題である DCMST 生成問題を定義した。問題は、エージェントの集合  $A$ 、変数の集合  $X$ 、および評価関数の集合から構成される。各エージェント  $i \in A$  は、自身の選択した辺を表す変数  $x_i \in X$  を持つ。エージェント  $i$  の隣接エージェント集合を  $Nbr_i$  で表す。変数  $x_i$  の値域を  $D_i$  で表す。  $D_i = Nbr_i \cup \{\emptyset\}$  とし、  $x_i$  の変数値  $d_i \in D_i$  は、エージェント  $i$  のみが決定できる。各エージェント  $i$  は評価関数  $f_i$  を持つ。  $f_i$  は自身と関連する変数値から評価値への写像を表す。

評価関数は、辺のコスト関数および制約条件を反映して定式化した。制約条件として、木であることを満足する制約(木制約)および次数制約を定義した。

この形式化では、エージェント  $i$  が自変数  $x_i$  の値を決定するとき、DCMST の辺として辺  $(i, x_i)$  が選択されることを表す。基本的にはエージェント  $i$  は自身の隣接辺を必ず 1 本選ぶ。ただし、 $n$  個のエージェントが全ての変数値を決定した場合、 $n$  本の辺が選択されることを意味し、生成木であるための制約を満たさない。そのため、 $n$  個のエージェントのうち、ある 1 つのエージェントは自身の変数値を  $\emptyset$  と決定することで、辺を選択しない制約を設ける。これに加えて、単一連結成分に矛盾しないための他の条件の制約、および閉路を違反とする制約を設ける。

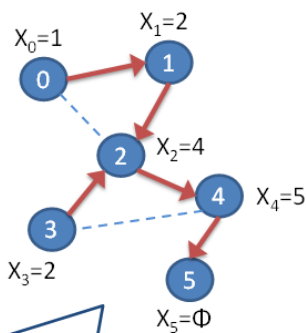
図 4 のネットワークにおいて、各エージェントが自身の変数値をそれぞれ  $x_0=1, x_1=2, x_2=4, x_3=2, x_4=5, x_5=\emptyset$  と決定するとき、図中の矢印で表される辺からなる生成木を表す。

解法として動的計画法などを用いる場合、部分問題として、複数の部分木を列挙することになる。このときには、部分木に対して、前述の次数制約および、生成木であるための制約を定義できる。さらに、冗長な同一の部分木を除去する条件を定義できる。

上記の制約を全て満たし、全てのエージェントの変数値の組み合わせの候補を決定するとき、最終的に残る部分木集合の部分木は、生成木となる。大域的成本  $Q(T)$  が最小の部分木を目的とする。

### (3) 資源制約分散協調資源割り当て問題の解法の適用

分散 DCMST の形式化に基づき、厳密解法 dd-mst を提案した。この解法は、各エージェントがメッセージ交換を伴う協調計算により、大域的に最適な厳密解を得る手法である。この解法は、



変数値  $=\{x_0=1, x_1=2, x_2=4, x_3=2, x_5=\emptyset, x_4=5\}$   
 生成木  $T=(V_T, E_T)$   
 頂点集合  $V_T=\{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$   
 辺集合  $E_T=\{(0, 1), (1, 2), (2, 4), (3, 2), (4, 5)\}$

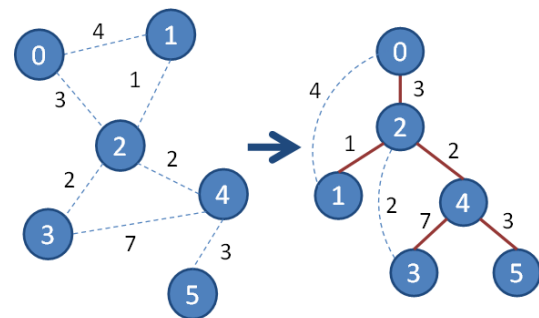
図 4 d-MST の最適化のための形式化

関連研究で提案された電力網におけるフィードバック生成手法の基本的な枠組みを、分散 DCMST に一般化して適用するものといえる。

解法は動的計画法に基づくものであり、各エージェントは、隣接エージェントから受信する部分解(部分木)の集合と自身の変数値との組み合わせを元に、新たに部分解の集合を計算し、次のエージェントに伝達することを繰り返す。

この時に、各部分木のコストも計算される。各エージェントの部分解とコストは、ある順序に従ってボトムアップに集計される。この順序付けの構造は、前処理として順序木を構築することにより得る。最終的には、順序木に沿って大域的な解とコストが最上位のエージェントに伝播され、最上位のエージェントがその情報から大域的な最適解である DCMST を計算する。そして、最上位のエージェントが最適解を下位に伝播する。

前処理である順序木の生成では、問題を解くために必要な意思決定の優先順位をエージェントに与える。例えば図 3(a)のネットワークから (b) の実線で示されるような順序木を生成する。順序木は生成木の一つであるが、DCMST の解ではなく、協調計算のための構造である。各エージェントは、解法 dd-mst の開始に先立って、自身の親と子を決定することにより、局所的な順序の知識を得る。



(a) DCMST のネットワーク

(b) 順序木

図 3 計算のための順序木



問題			解法					
			dd-prim	d-nnt	dd-mst	dd-mst-tc	dd-mst-mdeg	dd-mst-half
n	辺数	タイプ	誤差					
10	18	L	14	148	0	0	1	1
	18	H	47	739	0	0	2	41
20	25	L	9	134	0	4	21	10
	27	H	33	1,033	0	4	151	256
30	42	L	11	329	-	4	113	98
	41	H	116	1,637	-	60	522	636

図 6 精度の比較

部分解の伝播では、図 5(a)で示されるように順序木の最下位から最上位のエージェントまでボトムアップに部分木の集合を伝播する。各エージェントは子エージェントから受信した部分木の集合と、自変数値の組み合わせを基に新たに部分木の集合を計算し、そのコストとともに親エージェントに送信する。部分解の伝播は、順序木の葉エージェントから開始される。葉エージェントは、自変数値からなる部分木集合を計算し、親へ送信する。

また、葉エージェント以外では、全ての子エージェントから部分解を受信し、部分解の統合を行う。得られた部分解と自身の変数値との組み合わせから、新たな部分解を計算する。

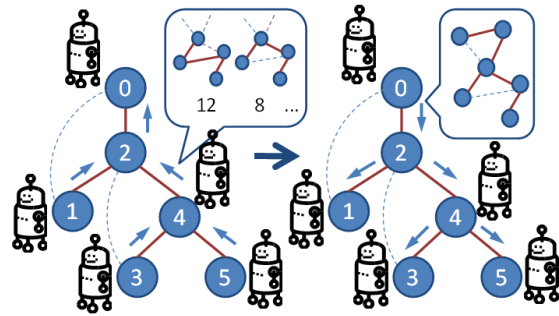
各エージェントの部分解は部分木の集合で表されるため、その部分木集合内の部分木の要素の全ての組み合わせに対して、和集合を計算する。全ての子エージェントの部分解の直和を計算し、自身の値域との和集合をとることにより、最終的な部分解を得る。

最適解の伝播では、図 5(b)のように、部分解の伝播により導き出された最適解を、根エージェントから葉エージェントへ伝播する。根エージェントは、まず最適コストを計算し、次に、自身の最適な変数値を決定する。最後に全ての子エージェントに対してメッセージを送信する。他のエージェントも同様の処理を繰り返し、最終的に、すべての葉エージェントが自身の最適な変数値を決定したとき、全てのエージェントが辺を選択したこととなり、処理を終了する。

#### (4) 近似解法の導入

厳密解法 dd-mst では、最悪の場合、探索すべき最大の組み合わせは、各エージェントの順序木の深さと隣接辺数に対して指数関数的に増加する。そこで、近似解法として、dd-mst の探索空間を削減する手法を提案した。

dd-mst では、各エージェントにおいて制約を違反する部分木を削除することにより、その組み合わせ数(部分木集合における要素数)は削減されるが、削減が不十分であれば、組み合わせ数は爆発的に増大する。このような場合に組み



(a) 最適な評価値の計算 (b) 最適解の決定

図 5 dd-mst のメッセージ通信

合わせ数を強制的に制限することで計算、メモリ、メッセージ複雑度を抑制する。すなわち、送信、保持する部分木の数を  $k$  個に制限する手法を提案した。

これらの手法では、分散探索手法における探索空間の大きさと、解の質、精度とのトレードオフの関係に対する、近似のヒューリスティクスを用いる。代表的なヒューリスティクスとして次のものが挙げられる。a) 部分木の総コストを辺で割った値に基づく優先探索を行う近似 dd-mst-tc. b) 部分木の次数の最小値に基づく優先探索を行う近似 dd-mst-mdeg. c) 両者の混合戦略 dd-mst-half.

厳密解法 dd-mst であるため、必ず実行可能解を得ることができるが、部分木の数を制限する近似解法では、最終的な解が実行不可能解に陥る可能性がある。実行不可能が発生する場合は、エージェントの順序を定める生成木が次数制約を満たすものであれば、ベースラインとして、その木を流用することが考えられる。

さらに、MST の解法 NNT にもとづく近似解法 d-nnt および DMST の近似解法 d-prim を分散処理化した手法 dd-prim を比較手法として提案した。

#### (5) 評価

提案手法の効果についての実験による評価の一例を示す。例題として  $n$  ノード(エージェント)と、異なる密度の辺からなるネットワークを用いた。辺のコストは一様分布に従う整数値とし、 $L(10 \sim 100)$ ,  $H(10 \sim 500)$  の 2 つの場合を用いた。図 6 解は解の精度の比較を表す。図中の誤差とは各手法によって求まる DCMST の辺の総コストの和と、最適解の辺の総コストの和との差である。この評価では、dd-mst-tc, dd-mst-mdeg, dd-mst-half のパラメータ  $k = 30,000$  であり、実行不可能解の数は 0 である。

厳密解法 dd-mst の誤差は常に 0 となるため最も解の質が高いが、図中に示される「-」では、実験環境において、現実的な計算時間による解の算出が不可能であった。

近似手法 dd-mst-tc, dd-mst-mdeg, dd-mst-half 法の誤差は、いずれのエージェント数  $n$  においても、d-nnt より小さい。また、エージェント数が小さいときに関しては、dd-prim より誤差は小さい。しかし、エージェント数が増加すると、dd-mst-mdeg と dd-mst-half の誤差は、dd-prim よりも大きい。dd-mst-tc はいずれのエージェント数  $n$  においても、平均的に小さい誤差であり、dd-prim よりも小さいが、他の例題では実行不可能解の割合が比較的大きかった。

図 7 は、近似の程度に対する、組み合わせ数、解の精度の比較を表す。実行不可能解は 10 例中の内訳を表す。問題に依存するものの、部分木の組み合わせ数  $k$  を制限しても、精度の低下が比較的小さい場合がある。

以上のように、提案手法には一定の効果が得られた一方で、問題のクラスに応じてより適切に近似ヒューリスティクスを適用する余地があると考えられる。

#### (6) まとめ

ネットワーク上の通信、計算、記憶資源を配分するための分散協調型システムを対象として、基本問題についての検討と分析を行った。そして、具体的な基本問題の一つとして、分散協調問題解決の枠組みで、次数制約付き最小生成木生成問題を形式化した。解法として分散制約最適化手法を適用し、提案手法の効果を実験により評価した。また、組み合わせ数抑制のための近似解法を導入した。評価実験では、各エージェントの解探索において、ある程度の部分木を切り捨てて、組み合わせを削減する近似解法を用いて、探索空間を削減しつつ、ある程度の解の質を得ることができた。特に、部分木の辺の総コストと、次数の余剰数の最小値の両方に基づく優先探索を用いる手法の有効性が示された。部分木の削減手法における戦略の改良、分散協調型の分枝限定法を併用するなどの効率化手法、より実際の ALM への応用が今後の展望として挙げられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1) 太田 和宏, 松井 俊浩, 松尾 啓志: "分散制約最適化問題の階層化と分散センサ網における観測資源割当て問題への適用", 人工知能学会論文誌, Vol. 26, No. 6, pp. 657-669

問題 n: 30 辺数: 41 タイプ: H	解法		
	dd-mst-half		
k	組み合わせ数	Q(T)	実行不可能解
10,000	28,332	6,382	0
5,000	14,834	6,429	1
2,500	7,625	6,469	1
1,000	3,153	6,596	1
500	1,646	6,757	1

図 7 近似に対する評価

(Oct. 2011) (査読あり)

[学会発表] (計 1 件)

1) 伊藤 翼, 松井 俊浩, 松尾 啓志: "次数制約付き最小生成木を構築する分散協調探索手法の検討", 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS2011) (2011/10/26-28) (査読あり)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

松尾 啓志 (MATSUO HIROSHI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00219396

##### (2) 連携研究者

松井 俊浩 (MATSUI TOSHIHIRO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60437093

津邑 公暁 (TSUMURA TOMOAKI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00335233

平山 勝敏 (HIRAYAMA KATSUTOSHI)

神戸大学・神戸大学大学院海事科学研究科・准教授

研究者番号: 00273813

横尾 真 (YOKOO MAKOTO)

神戸大学・九州大学大学院システム情報科学研究科・教授

研究者番号: 20380678