

平成 21年 6月 15日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760255  
 研究課題名（和文） 光グリッドにおけるハイブリッド制御を用いた計算機資源・波長資源の動的管理技術  
 研究課題名（英文） Dynamic Management of Computing and Wavelength Resources with Hybrid Control in Optical Grid  
 研究代表者  
 橘 拓至（TACHIBANA TAKUJI）  
 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教  
 研究者番号：20415847

## 研究成果の概要：

本研究では、制御工学で近年注目されているハイブリッド制御を光グリッドの資源管理に導入した。本方式では、ジョブ伝送量を変動させるコントローラと光パスの動的設定・解放を処理するコントローラを高度に連携させることで、計算資源と波長資源の有効利用を実現する。具体的には、PID 制御を資源管理に用いて多数のユーザが計算資源と波長資源を有効利用できることを示した。さらに、PID 制御をハイブリッド制御に拡張し、光パスの動的設定・解放処理をモデルに組み込むことで資源管理の性能向上を行った。シミュレーション結果から、ハイブリッド制御を用いることで光パス設定・解放処理の影響を考慮して資源管理を行えるようになった。またさまざまな性能評価から、本研究で確立した方式が光グリッドの資源管理に有効であることを解明した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

研究分野：光ネットワーク

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：光グリッド，ハイブリッド制御，資源管理，光パス，グリッドコンピューティング，制御理論

## 1. 研究開始当初の背景

近年のネットワーク性能の向上および計算機の高速化に伴い、インターネットを介して地理的に分散した計算機資源を利用するグリッドコンピューティングが実用段階に入りつつある。グリッドコンピューティングでは、クラスタ計算機を利用した従来の並列

計算処理とは異なり、各ユーザは地理的に分散した計算機資源（計算機サイト）を使用してグリッド計算を行う。そのため計算機サイト内の計算機資源は複数のユーザに共有され、利用可能な計算機資源量は時間変動する。Globus Project Team, Foster et al. (2002), Osaki et al. (2005)などでは、計算機資源を

複数ユーザが効率よく共有利用できるように、計算機資源の動的管理に関する研究開発が行われている。Osaki et al. (2005)で提案されている動的資源管理方式では、計算ジョブの伝送を管理するジョブマネージャが、計算機サイトを管理する計算資源管理サーバから利用可能資源量の情報を随時フィードバックしてもらい、その情報を基にサイトへの送信ジョブ量を調整する。具体的には、計算資源管理サーバに設けられたバッファ内の蓄積ジョブ量が一定に保たれるようにジョブ伝送量を調整して、計算機資源の共有利用を実現する。

またテラバイト級・ペタバイト級のグリッド計算処理を実現するために、WDM伝送技術を用いた光ネットワーク上でグリッドコンピューティングを展開する光グリッドの研究開発がHabib et al. (2006)やLehman (2006)などで活発に行われている。光グリッドでは、クライアントが計算を要求したジョブは、ゲートキーパでの認証後、ジョブマネージャによって管理される。ジョブマネージャは、ジョブを処理する計算機サイトを選択して、光パスと呼ばれる専用波長を用いて計算ジョブを高速伝送する。しかしながら、現在のWDM技術で多重可能な波長数は数百~数千程度であるため、光グリッドでは波長資源の有効利用が必要不可欠である。

申請者は過去の研究において、WDMネットワーク上で波長資源を有効利用しながらデータを効率よく伝送するために、動的な光パス設定/解放方式について研究を展開して成果を得てきた。この研究では、WDMとGMPLS技術を組み合わせた環境下において、WDMノードの輻輳状況に応じて動的にエンド・トゥ・エンドの光パスを設定する方式について検討を行っている。これまでの解析およびシミュレーション実験により、静的な光パス設定方式と比較して提案手法の方がネットワーク内の波長を有効利用でき、かつデータスループットも向上することが確認できた。

しかしながら、光グリッド内のジョブマネージャで本方式を使用した場合をシミュレーションで評価すると、大容量のグリッド計算を管理しているジョブマネージャは輻輳状態であると判断し、計算機資源と波長資源を優先的に使用してしまう。結果として、ジョブマネージャが管理しているグリッド計算量に応じて、両資源の利用状況に不公平が生じることが観察された。

また従来の動的資源管理方式では波長資源の動的管理を考慮していないため、利用可能な計算機資源が増加した場合でも光パス数を増加させることができず、計算機資源を有効利用できないことが確認できた。これらの結果から、光グリッドでは計算機資源の動的管理と波長資源の動的管理が必須である

ことを痛感した。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下に示す3点を研究目的とする。

(1) 計算機資源と波長資源を共有利用するための動的な資源管理方式の確立

WDMネットワーク上でグリッドコンピューティング環境を展開する光グリッドでは、計算機資源と波長資源を管理する方式が必要不可欠である。そこで本研究では、利用可能な計算機資源量のフィードバック情報を基にデータ伝送量を動的に変化させ、さらにデータ伝送量に応じて光パスを動的に設定/解放する動的資源管理方式を確立する。特に、データ伝送量を変動させるコントローラと、光パスの動的設定/解放を処理するコントローラの有機的な連携を目指す。そのため、制御工学で近年注目されているハイブリッド制御をフィードバックコントローラに導入する。

(2) 複数の計算機サイトに対して負荷分散可能な方式への拡張

大容量のグリッド計算を迅速に処理するためには、複数の計算機サイトでグリッド計算を同時に処理する必要がある。そこで本研究では、大容量の計算ジョブを複数サイトに負荷分散してネットワーク全体の資源を共有できるように上記(1)の方式を拡張する。具体的には、負荷分散機能を導入し、各サイトの計算機資源利用可能量に関する情報と各リンクの波長資源利用可能量に関する情報を基にコスト計算を行い、コストが最小となるように計算機サイトの選択・光パスの設定/解放・計算ジョブの伝送を行う。負荷分散機能の導入によって、提案方式の適用範囲が大幅に拡大することが期待される。

(3) 実グリッド環境を想定した性能評価および提案方式のさらなる改良

上記(1)、(2)で提案した2つの方式をグリッド用離散時間シミュレータSimgridに実装してシミュレーション実験を行う。特に、各方式が有効に機能するネットワーク条件を洗い出し、スケーラビリティ向上を目指した提案方式のさらなる改良を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 計算機資源と波長資源に対する動的資源管理方式の提案

従来のグリッド環境で利用される動的資源管理方式では、ジョブマネージャ内のフィードバックコントローラにPI制御を使用し、計算資源管理サーバからのフィードバック情報を基に伝送ジョブ量を動的に調整して計算機資源の動的管理を実現する。しかしながら光グリッドでは、計算機資源だけでなく波長資源も動的に管理する必要がある。

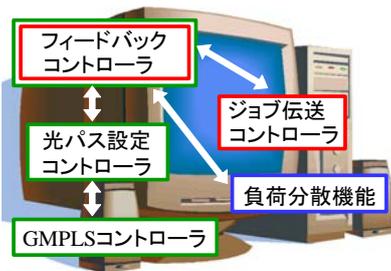
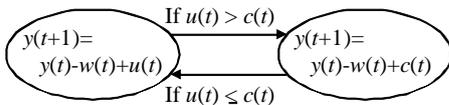


図1 提案方式のジョブマネージャ

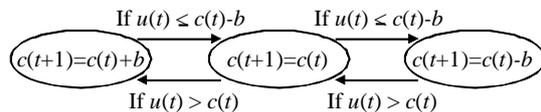
そこで本研究では、ジョブマネージャ内のフィードバックコントローラにハイブリッド制御を導入し、伝送ジョブ量を調整しながら光パスを動的に設定/解放して両資源の動的管理を実現する(図1参照)。ここでハイブリッド制御とは、図2に示すような連続システムと離散システムが混在し相互に影響しあうシステム(ハイブリッドシステム)に対してモデル予測制御を適用することを示し、近年の制御工学で注目されている制御手法の一つである。

提案方式のフィードバックコントローラでは、伝送ジョブ量を決定する連続システムと光パス設定/解放を処理する離散システムが混在したシステムに対して、モデル予測制御を行う。モデル予測制御では、光パスの動的な設定/解放がシステムに与える影響をあらかじめ予測して伝送ジョブ量を決定することができ、結果として計算機資源の動的管理を実現しながら波長資源の有効利用も実現できる。また、光グリッドに適した光パス設定/解放処理手順についても検討し、提案方式の性能向上を目指す。提案方式のブロック線図は、図3に示すPID制御のブロック線図を拡張したものになる。

?バッファ内ジョブ量モデル



?光パス設定/解放モデル



バッファ内ジョブ量: $y(t)$ 計算機によるジョブ処理量: $w(t)$ 伝送ジョブ量: $u(t)$ 1本の光パスでの伝送量: $b$ 現在の最大伝送ジョブ量: $c(t)$
--

図2 提案方式におけるハイブリッド

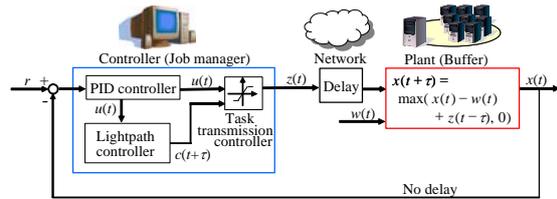


図3 ブロック線図

(2) 提案方式の数値解析およびネットワークシミュレーションによる性能評価

上記(1)で提案する動的資源管理方式の性能は、利用可能な計算機資源量の時間変動によって大きな影響を受ける。計算機資源の利用可能量が少ない場合には光パス数は少なくても良く、現在設定されている光パス数が十分多い場合には不必要な光パスは解放される。一方、利用可能量が多くなると現状の光パス数では不十分になり、新しい光パスが設定される。ここで、光パスの設定/解放には処理遅延が発生し、頻繁な光パスの設定/解放処理が提案方式の性能を劣化させるかもしれない。

そこで、数値解析とネットワークシミュレーションによって提案手法の性能を評価し、特に計算機資源量の時間変動が提案方式の性能に与える影響について調査する。さらに提案方式が有効に機能するネットワーク条件の洗い出しを行う。

(3) 負荷分散機能をもつ動的資源管理方式への拡張

前述の(1)で提案した動的資源管理方式では、一つの計算機サイトの計算機資源しか管理することができない。それゆえ、大容量のグリッド計算を複数サイトで処理する場合を想定して、複数サイトに対する計算機資源と波長資源を動的に管理可能な方式への拡張を目指す。ここで光グリッドの各サイトは地理的に分散しており、光パスの使用波長数は伝送ホップ数によって異なる。それゆえ、伝送ホップ数の多いサイトに利用可能な計算機資源が多く存在する場合でも、このサイトの計算機資源はあまり使用しない方が波長資源の利用効率は向上する。

そこで本研究では、各サイトまでの伝送ホップ数を考慮して計算ジョブを複数サイトへ負荷分散させる方式を提案し、前ページ(1)の方式に導入する。例えば、サイト $k$ の計算機資源と波長資源の使用コスト $C_k$ および $W_k$ を、最大波長数・最大計算機資源量・現時点における各資源の利用可能量を基に計算し、得られた $C_k$ と $W_k$ からサイト $k$ の資源使用コスト $R_k$ を導出する。それから、ネットワーク全体のコスト $F = \sum_k R_k$ が最小となるように計算機サイトの選択・光パスの設定/解放・計算ジョブの伝送を行い、負荷分散を実現する。コスト最小化問題の解法には、最急降下法やニ

ュートン法, 準ニュートン法などを使用する.

(4) 実グリッド環境下でのシミュレーションによる性能評価および提案方式の改良

上記の(3)で提案した拡張方式の性能を, 前術の(2)と同様に数値解析とネットワークシミュレーションによって評価する. 特に, 負荷分散機能の有効性について詳細に調査する. また, 実際のグリッド環境下における提案方式の性能を評価するために, グリッド計算用に開発された離散時間シミュレータ Simgrid に提案方式を実装してシミュレーション実験を行う. Simgridは, 資源を管理するマスタが複数資源(ワーカ)のスケジューリングによってジョブを割り当てるマスターワーカ型アプリケーションを想定しており, ジョブマネージャをマスタ, 計算機資源をワーカとしてシミュレーションを行う.

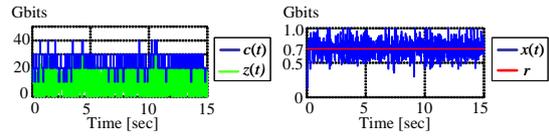
性能評価では, ネットワークトポロジ, 計算機サイト数, 波長多重数, 各サイトのジョブ処理能力などが提案方式の性能にどのような影響を与えるかを徹底的に調査する. 特に, 計算機サイト数の増加は負荷分散処理の計算時間を増加させ, 動的資源管理処理のボトルネックになる場合が想定される. そこで, 計算機サイト数に対するスケーラビリティに注目して, 提案方式が有効に機能する条件の洗い出しを行う. その結果, (3)で提案した負荷分散機能が不十分であると判明した場合は, コスト計算の改良を行う. また光パス設定手順やハイブリッド制御に関しても, ネットワークトポロジやネットワーク条件の影響を受けないような方式への改良を目指す.

#### 4. 研究成果

提案方式の性能を Matlab を用いた離散時間シミュレーションにより評価する. 以下では単位時間を 10ms とし, 1つのジョブマネージャから1つの計算サイトへのジョブ伝送に注目する.

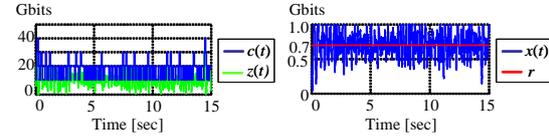
資源マネージャのバッファ容量は 1.0 Gbits とし, バッファ内タスク量の目標値  $r$  を 0.7 Gbits とする. 光パス1本の伝送容量は  $BW=10$  Gbps で, 最大光パス設定数は 5 本とする. ここで, バッファ内タスク量の初期値を 0.4 Gbits とし, 光パス設定数の初期値を 1 とする. また, GMPLS を用いた光パス設定に要する時間を  $T_s=50$  ms とし, 光パス解放用閾値を  $T_r=50$  ms に設定する. 計算サイトのタスク処理量  $w(t)$  は,  $[0, A(t)]$  の一様分布に従うと仮定し, 最大処理量  $A(t)$  は時刻  $t$  に応じて変動する.

図 4 および図 5 は, PID パラメータ  $K_p$  を 0.2 と 0.9 に設定した場合の提案方式の性能を示している. 各図(a)は拘束条件の上界  $c(t)$  と伝送タスク量  $z(t)$  を示し, 各図(b)はバッファ内タスク量  $x(t)$  と目標値  $r$  を示している. また両図において,  $K_i=0.05$ ,  $K_d=0.1$ ,



(a)  $c(t)$  と  $z(t)$  (b)  $x(t)$  と  $r$

図 4 提案方式の性能 ( $K_p=0.2$ )



(a)  $c(t)$  と  $z(t)$  (b)  $x(t)$  と  $r$

図 5 提案方式の性能 ( $K_p=0.9$ )

$A(t)=0.2$  である.

図 4 および図 5 から, 提案方式の性能はパラメータ  $K_p$  の影響を受けることが分かる. そのため提案方式を使用する際にはパラメータ設定が重要となる. その一方で, パラメータ設定の自動化が可能であることが, いくつかの先行研究により示されている. したがって, 本方式の利用時にはそれらのパラメータ設定法が有効であると考えられる.

さらに以下では, 提案方式の比較対象として, 使用する光パス数をあらかじめ事前予約する事前予約方式の性能も評価する. 事前予約方式で使用する光パス数は  $N$  本で, 提案方式と同様に PID 制御が用いて計算資源の有効利用を実現している. 以下では, 両方式のパラメータを  $K_p=0.65$ ,  $K_i=0.05$ ,  $K_d=0.1$  とし,  $A(t)$  は図 6 に従うと仮定する.

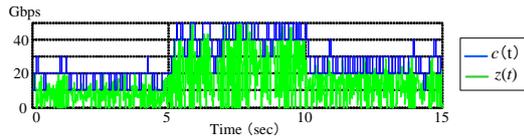
時刻 $t$ (秒)	0 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 15
$A(t)$	15	45	25
時刻 $t$ (秒)	15 ~ 20	20 ~ 25	25 ~ 30
$A(t)$	5	15	45

図 6  $A(t)$  の時間変動

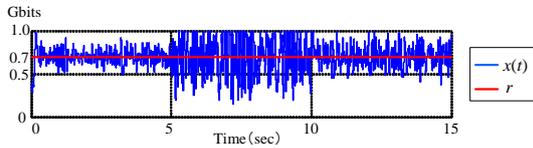
図 7(a) および図 7(b) は, 提案方式を用いた場合の拘束条件の上界  $c(t)$  と伝送タスク量  $z(t)$ , およびバッファ内タスク量  $x(t)$  と目標値  $r$  をそれぞれ示している. また図 8(a) および図 8(b) は,  $N=3$  の事前予約方式を用いた場合の結果を示している. 両図ともに 15 秒までのシミュレーション結果を示している.

図 7(a) および図 8(a) から, 提案方式を用いた場合には光パスが動的に設定/解放されて波長が有効利用されているのがわかる. 特に, 伝送すべきタスク量が少ない 0 秒から 5 秒までは光パスを 1~2 本しか使用せず, 伝送すべきタスク量が増加した 5 秒から 10 秒までは, 約 4~5 本の光パスを使用している.

このように提案方式を用いた場合, 伝送タスク量に応じた光パスの動的設定/解放が実



(a) 拘束条件の上界  $c(t)$  と伝送タスク量



(b) バッファ内タスク量  $x(t)$  と目標値  $r$

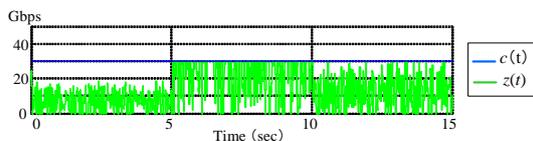
図7 提案方式の性能

現する。

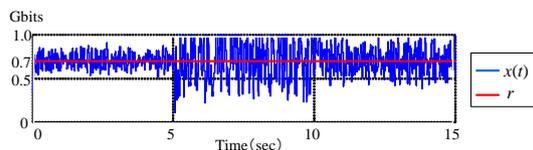
さらに、図7(b)および図8(b)から、提案方式のバッファ内タスク量  $x(t)$  と事前予約方式のバッファ内タスク量  $x(t)$  はともに目標値  $r$  に追従していることがわかり、提案方式は計算資源の有効利用も実現している。

図9は、30秒間のシミュレーションを20回実行した際の各方式に対する平均光パス数および平均の標準偏差を示している。この表から、提案方式を用いた場合の平均パス数は2.4922であるが、標準偏差はN=3の事前予約方式よりも小さいことがわかる。それゆえ、提案方式を用いることによって、波長資源を有効利用しながら計算資源も有効利用が可能となる。

また、N=4およびN=5の場合と比較しても、光パス数が1本以上少ないにも関わらず提案方式の標準偏差と事前予約方式の標準偏差にあまり差がない。それゆえ、光グリッドにおいて計算資源とネットワーク資源の両方を有効利用するためには、提案方式が有効であることがわかる。



(a) 拘束条件の上界  $c(t)$  と伝送タスク量  $z(t)$



(b) バッファ内タスク量  $x(t)$  と目標値  $r$

図8 従来方式の性能

	平均光パス数	標準偏差
提案方式	2.4922	11.0528
事前予約方式 ( $N = 2$ )	2.0	28.2694
事前予約方式 ( $N = 3$ )	3.0	11.1107
事前予約方式 ( $N = 4$ )	4.0	10.5892
事前予約方式 ( $N = 5$ )	5.0	10.6326

図9 平均光パス数と標準偏差の比較

## 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6件)

- ① Tachibana, Takuji, and Kasahara, Shoji, Recent Research and Development in Optical Burst Switching toward Next-Generation Ultra High-Speed Networks, Far East Journal of Electronics and Communications, vol. 2, no. 2, 133-151, 2008, 査読あり
- ② Tachibana, Takuji, and Kasahara, Shoji, QoS Provisioning with Shared Wavelength Allocation for Limited-Range Wavelength Conversion, Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems (DCDIS) Series B: Applications & Algorithms, vol. 15, no. 4b, 459-482, 2008, 査読あり
- ③ Ueda, Masayuki, Tachibana, Takuji, and Kasahara, Shoji, Intermediate-Hop Preemption to Improve Fairness in Optical Burst Switching Networks, IEICE Transactions on Communications, vol. E91-B, no. 3, 710-721, 2008, 査読あり
- ④ Arima, Satoshi, Tachibana, Takuji, Kaji, Yuichi, and Kasahara, Shoji, FEC-Based Reliable Transmission for Multiple Bursts in OBS Networks, IEICE Transactions on Communications, vol. E90-B, no. 12, 3541-3551, 2007, 査読あり
- ⑤ Tachibana, Takuji, and Kasahara, Shoji, QoS-Guaranteed Burst Transmission for VoIP Service over Optical Burst Switching Networks, The Journal of Optical Networking, vol. 6, no. 8, 991-1002, 2007, 査読あり
- ⑥ Tachibana, Takuji, and Kasahara, Shoji, Two-Way Release Message Transmission and Its Wavelength Selection Rules for Preemption in OBS Networks, IEICE Transactions on Communications, vol. E90-B, no. 5, 1079-1089, 2007, 査読あり

〔学会発表〕(計8件)

- ① Oulad Nassar, Badr, Takuji Tachibana, Sugimoto, Kenji, Fairness Improvement by Burst Reordering for Hop-based Burst-Cluster Transmission in OBS Mesh Networks, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2008.12.18-19, 神戸
- ② 小柳 衣津美, 橋 拓至, 杉本 謙二, 波長変換に制限のある WDM 網におけるサービスの差別化を実現するマルコフ決定過程モデル, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2008.12.18-19, 神戸
- ③ Oulad Nassar, Badr, Tachibana, Takuji, Sugimoto, Kenji, Dynamic Burst Ordering for Burst-Cluster Transmission to Improve Fairness in OBS Networks, The International Conference on Communications Systems and Technologies 2008 (ICCST 2008), Oct. 2008, Berkeley, CA, USA, 査読あり
- ④ Oulad Nassar, Badr, Tachibana, Takuji, Sugimoto, Kenji, Random Scheduling Method for Hop-based Burst-Cluster Transmission in Optical Burst Switching Networks, The 7th International Conference on the Optical Internet (COIN 2008), Oct. 2008, Akihabara, Tokyo, 査読あり
- ⑤ Tachibana, Takuji, Kogiso, Kiminao, Sugimoto, Kenji, Dynamic Management of Computing and Network Resources with PID Control in Optical Grid Networks, IEEE ICC 2008, May 2008, Beijing, China, 査読あり
- ⑥ Tachibana, Takuji, Reliable Data Transmission with Burst Clustering and Preemption in Optical Burst Switching Networks, Networking and Electronic Commerce Research Conference 2007 (NAEC 2007), Oct. 2007, Riva del Garda, Italy, 査読あり
- ⑦ 橋 拓至, 高性能光バースト交換網におけるバーストクラスタ伝送と割込優先制御を用いた高信頼データ伝送方式の性能評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2007.9.10, 鳥取
- ⑧ Tachibana, Takuji, Kasahara, Shoji, Sugimoto, Kenji, Dynamic Lightpath Establishment for Service Differentiation Based on Optimal MDP Policy in All-Optical Networks with Wavelength Conversion, the 2007 IEEE International Conference on Communications (ICC2007), June 2007, Glasgow, Scotland, 査読あり

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋 拓至 (TACHIBANA TAKUJI)  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教  
研究者番号：20415847

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：