

家庭用機器の動的資源割当問題へのグラフ彩色アプローチ

愛須 英之

株式会社東芝 研究開発センター システム技術ラボラトリー

家電が複数機能を備え機能間の排他関係が複雑化するに伴い、並行処理する機能への共有HW資源の適切な割当が難しくなり、ユーザの負担となり始めている。本報告では、録画機器における複数予約への資源割当をモチーフとし、資源割当をグラフ彩色問題の一種としてモデル化し、組み込み用途に適した汎用的な資源割当決定方式を提案する。

A Graph Coloring Approach to Dynamic Resources Allocation for Home Appliance

Hideyuki Aisu

System Engineering Laboratory, Corporate Research & Development Center, TOSHIBA Corp.

Home appliances with many functions tend to make shared resources allocations to parallel functions more complicated. In this report, we propose the dynamic resources allocation mechanism for recording reservations based on a graph coloring approach.

1. はじめに

近年、家電機器が多機能化し、複数の機能を並行して処理することが一般化している。例えば、録画機器においては、複数の録画資源(チューナ、エンコーダ、トランスコーダなど)を備え、大量の放送を半自動的に録画・蓄積するスタイルが主流になりつつある。さらに、DLNA(Digital Living Network Alliance)、HDMI-CECなどの規格に基づき、家庭内にあるさまざまな機器を組み合わせて連携サービスを動的に構成する試みも、黎明期にある。機能や機器の組み合わせの自由度が増えるに従い、共有HW資源の設定や管理が難しくなり、ユーザの負担となり始めている。各状況に応じ動的に機能の使用する共有資源を決定するための汎用的な仕組みを考えていく必要がある。

本報告では、DVD/HDDレコーダー、HDD搭載テレビなどの録画機器における複数予約への資源割当をモチーフとし、実行要求時刻が事前に決まっている予約型のタスクにおける共有資源割当をグラフ彩色問題の一種としてモデル化し、組み込み用途に適した汎用的な資源割当決定方式を提案する。

2. 録画予約への資源割当問題

2.1 録画予約への資源割当

録画の予約登録タスクは、開始・終了時刻を特定できる情報と、録画するチャンネル情報、資源

の割当変更が可能か否かを特定するための情報、利用可能な録画資源の候補を特定する情報、録画の際の優先度、現在割当されている録画資源などの情報を含んでいる。各予約登録タスクは、録画成功の可否に関係なく自由なタイミングで登録・削除できるが、ユーザが各予約の取捨選択を行う参考とするため、任意の時点の録画可否状態を確定し、GUIなどで確認可能であることが要求される¹⁾。

録画予約の時間帯が重複した場合、近い時間帯の予約を確認し、登録済の予約も含めて資源を再割当しなければならない場合がある。図1に、録画用のHW資源が二種類ある単純な場合の例を示す。

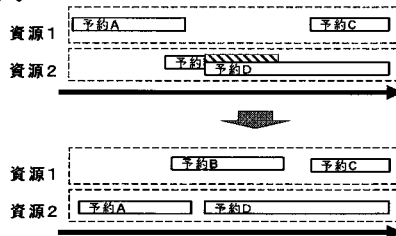


図1 再割当が必要な予約配置の例

予約Dを入れるには予約Bか予約Cいずれかが重複してしまうため、予約A,Bもしくは予約C,Dを同時に変更する必要がある。ここで、各録画タスクは、ある録画タスクを実行している途中にさら

に高い優先度を持つ録画タスクが起動されると、処理が中断されて高い優先度を持つ録画タスクに処理が移る、いわゆるプリエンティブに近い性質を持つ。ただし、一度実行を中断した録画タスクは、再起動しない²。

2.2 家電機器の資源割当における課題

録画予約の資源割当は、各タスクの実行要求時刻と実行時間が事前に決まっている予約型のタスクを対象とした、オフラインのマルチタスクスケジューリング問題の一種とも見なせる。予め利用時間を指定して予約されたタスクを対象とする資源スケジューリング問題は、グリッドコンピューティングなどの分野で検討が始まっている^[1]。

家電機器のマルチタスクスケジューリングに特有の問題点として、均一かつ独立した処理系が並列するマルチプロセッサシステムと異なり、処理系が非均一でタスクの種類により実行可能な処理系が異なること、処理系で一部の資源を共有するため非対称な排他関係が発生する場合も多いことが挙げられる。共有資源の存在はマルチタスクスケジューリングを困難にすることが知られている^[2]。

特に、DVD/HDD レコーダーなどの AV 機器では、画像など大容量ストリーム情報をリアルタイムで処理するために高度なノウハウを要するため、過去の設計の中で汎用的に利用可能な中間処理部分をシステム LSI などとしてモジュール化し、これら過去の IP 資産を段階的に組み合わせることで全体の処理系を実現している場合が多い。このため、多機能化するに従い、複雑な構造になり易い。

図2のモジュール構成の例で説明する。本例では、アナログ放送波を受信するチューナ T1、T4 と、デジタル放送波を受信するチューナ T2、T3、デジタル信号を H.264 形式で変換圧縮するためのトランスコーダ、アナログ信号を MPEG2 形式で圧縮しデジタル化するための MPEG2 エンコーダ、および各形式の信号をバッファリングし、HDD や DVD などの記録媒体に書き込み可能なフォーマットに変換する記録用データフォーマット F1、F2、F3、F4 を備えている。

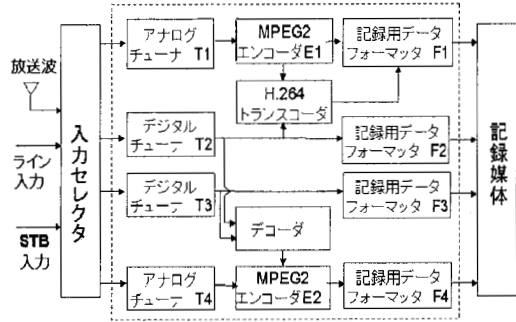


図2 モジュール構成の例

このような複雑な構成の場合、予約の録画条件の種類により使用するモジュールや信号経路が異なり、自由に組合せて利用できる訳ではない。このため、録画資源は個別のエンコーダなどを指すのではなく、録画の際に同時に使用するいくつかのモジュールの組み合わせとして扱う必要がある。表1は図2の録画資源に管理用の資源IDを付与した例である。各モジュールは信号の流れに沿って並べており、例えば、デジタル放送をダウンコンバートして録画する場合は、デジタルチューナ T2 か T3、デコーダ、エンコーダ E2、フォーマット F4 を組み合わせる必要がある。

表1 予約の録画種別と資源の例

録画条件	資源 ID	モジュール 1	モジュール 2	モジュール 3	モジュール 4
デジタル放送 直接録画	R1	デジタル チューナ T2	フォーマット F2		
	R2	デジタル チューナ T3	フォーマット F3		
アナログ放送 直接録画	R3	アナログ チューナ T1	エンコーダ E1	フォーマット F1	
	R4	アナログ チューナ T4	エンコーダ E2	フォーマット F4	
デジタル放送 ダウンコン バート録画	R5	デジタル チューナ T2	デコーダ	エンコーダ E2	フォーマット F4
	R6	デジタル チューナ T3	デコーダ	エンコーダ E2	フォーマット F4
アナログ放送 H.264録画	R7	アナログ チューナ T1	エンコーダ E1	H.264 トランス コーダ	フォーマット F1
デジタル放送 H.264録画	R8	デジタル チューナ T2	H.264 トランス コーダ	フォーマット F1	

3. 資源割当方法

3.1 グラフとしてのモデル化と予約群抽出

予約の競合関係のグラフとしてのモデル化について図3で説明する。図3は予約を時間軸に沿って並べ、対応する部分をグラフとして表現した例である。

1, 2 なお、これらの製品コンセプトや仕様はメーカーにより若干異なる。

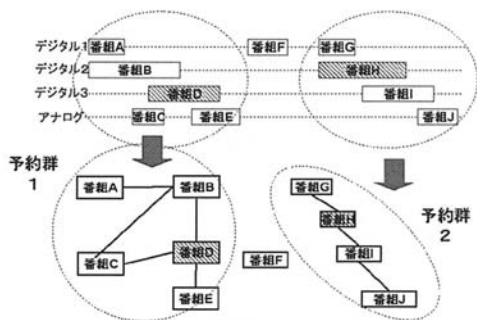


図3 予約のグラフ表現と予約群の抽出

ここで、グラフにおける各頂点は予約された番組を示し、2つの頂点が辺で繋がれている場合は、予約間で実施時間帯が一部重複し、かつそれぞれの予約の利用可能な録画資源の一部が相互に排他関係にあることを示す。

資源割当演算の際には、登録された全ての予約の割当を変更する必要はない。新たに追加・削除された、もしくは放送時間変更や番組延長などにより時間変更された予約を基点予約とし、グラフ上において、基点予約と連結する予約群を基点予約と相互影響を及ぼす予約として部分的に抽出し、割当変更の対象とすればよい。図3の例では、番組Dが基点予約とすると、番組A, B, C, D, Eが予約群1として抽出される。番組Hが基点予約とすると、番組G, H, I, Jが予約群2として抽出される。

3.2 グラフ彩色方法

予約への資源割当は、予約の競合関係を示すグラフにおいて、辺で直接結ばれた頂点同士が同じ色にならないように塗り分ければ良く、グラフのk-彩色問題に近い。ただし、今回想定している録画資源割当では、与えられた資源(色)の範囲内では資源割当(塗り分け)が不可能な場合でも、予約の消去は行わず、いずれかの資源に強制的に割当をする点が異なる。割当られた各予約は、図1に示したように、優先度に従い処理される。

資源とは、表1に示すようないくつかのモジュールの組み合わせであり、互いに一部の資源を共有するため非対称な排他関係が発生する。各頂点(予約)に割当可能な色(資源)がそれぞれ制限され、色同士の排他関係が非均一となる点において、辺に重みの付いたリスト彩色問題の一種と見なせる。リスト彩色問題はほとんどのケースでNP完全となり、効率的な厳密解法は発見されていないため、ここではプログラム変数へのレジス

タ割当^[3]の方法を参考としたヒューリスティックスを提案する。提案手法では、各頂点の辺の数の重みの合計値(次数)を元に、頂点を彩色する順序を決定する。

以下に割当アルゴリズムの概略を示す。ここで、各予約 v には、割り付け可能な資源の集合 A_v が対応し、 $|A_v|$ は A_v の要素数とする。

```

スタック S を空にする
重み定義を参考に初期次数を計算
while (グラフ G に頂点が残っている) {
  if (次数(v) < |A_v| である頂点 v がある)
    頂点 v をグラフ G から除く
  else
    最も優先度の低い頂点 v を G から除く
    頂点 v をスタック S にプッシュ
    頂点 v に接続していた頂点の次数を更新
}
while (スタック S が空でない) {
  頂点 v をスタック S からポップ
  頂点 v の隣接頂点の資源と排他でない
  資源を A_v から選び割当
  if (隣接頂点と排他でない資源が存在しない)
    頂点 v にデフォルト資源を割当
  頂点 v をグラフ G の元の位置に挿入する
}

```

本アルゴリズムは、高々 $O(N^2)$ の演算時間であり、辺情報を記憶しなければメモリ量も少なくて済むので、機器への組み込み用途に適している。

図4に、例を示す。予約A, Bは最優先、D, Eが優先度普通、Cはもっとも優先度が低いものとする。(1)から(5)までは、割当順序を決定する処理、(6)から(10)までは、逐次割当処理に相当する。黒く塗られた予約は、グラフから削除された扱いとなっているものと見なす。

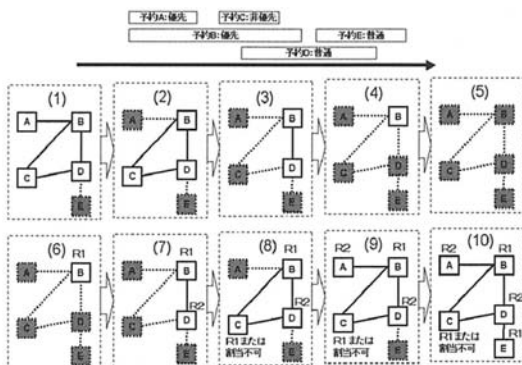


図4 予約群への資源割当処理の例

次数計算の際には、辺の重みは各頂点(予約)の種類の組合せに応じて予め計算し定義しておく。例えば、図2のモジュール構成の例で表1の定義に従うとすると、図5のような重みの設定値となる。

隣接する頂点

頂点(予約)種別	P1	P2	P3	P4	P5
デジタル放送 直接録画 P1	1	0	1	0	1
アナログ放送 直接録画 P2	0	1	1	1	1
デジタル放送 ダウンコンバート録画 P3	1	2	2	0	1
アナログ放送 H.264録画 P4	0	1	0	1	1
デジタル放送 H.264録画 P5	1	1	1	1	1

図5 重み定義の例

重み演算の際には、次数計算の対象となる予約V1とグラフ上で隣接する予約V2において、予約の選択可能な資源集合Av2の内、予約V1と排他関係にある資源の数が最大となるような資源S∈Av2が選択されると仮定する。そして、予約V1の選択可能な資源集合Av1のうち、仮定された録画資源Sと排他関係にある録画資源の数を次数の重みとする。つまり、ワーストケースを想定し、隣接する予約と競合し使用不可能となる資源の数の最大値を重みとする。

例えば、図2の例でアナログ放送録画P2の予約Aとダウンコンバート録画P3の予約Bの組だと、重みが非対称である。次数計算対象がダウンコンバート録画の予約Bの場合、予約Aで資源R4を使用されると予約Bで資源R5とR6の双方が使えなくなるため重みが2となるが、逆方向で考えると、次数計算対象がアナログ放送録画の予約Aの場合は、最悪でも資源R4が使えなくなるだけなので重みは1である。

4. シミュレーション実験

図2及び表1の例について、仮想的に予約を発生させシミュレーション実験を行った。まず、チャンネルが12種類あるものと仮定し、30分から4時間まで30分刻みの長さの番組が等しい確率で出現するように4日分の番組表を生成する。そして、指定した数の番組を予約として番組表からランダムに抽出し、表1に記載した予約種別と1から3までの優先度をランダムに設定する。最後に、予約の中の一つを基点となる予約として選択し、基点予約を含む予約の島を抽出し、再割当の対象とする。

ここでは、次数を元に割当順序を決定する方

法と、予約を開始時刻順に並べ逐次割当していく方式とを比較した。表2に実験結果を示す。評価値として、完全録画に成功した予約の優先度の総和を抽出された予約群の優先度の総和で割った重み付き録画成功率を用い、1000回の試行の平均値を求めた。

表2 シミュレーション実験結果

予約総数	予約抽出数 平均値	次数順	開始時刻順
20	2	0.94	0.92
40	4	0.87	0.83
60	7	0.8	0.75
80	13	0.72	0.67

本例では、大きな差は出ないものの、予約の発生密度に関わらず、次数を元に割当順序を決定する方法の方が常に優れており、予約群が大きくなるにつれて差が大きくなる傾向があることが分かる。実際は、時間帯によって予約の発生頻度が大きく偏ることが予想されるため、さらなるシミュレーション条件の工夫が必要である。

5. おわりに

録画機器における複数予約への資源割当をモチーフとし、家電機器特有の資源特性を考慮した予約型のタスクへの汎用的資源割当決定方式を提案した。提案方式では、資源割当をグラフ彩色問題の一種としてモデル化、再割当する予約群を抽出し、タスクの組合せに応じ予め定義した重みを元に、次数と割当順序を決定する。簡単な例題のシミュレーション実験により有効性を示した。

参考文献

- [1] 藤原, 合田, “資源予約に基づく並列ジョブスケジューリング手法の評価”, 情報処理学会・電子情報通信学会 並列処理シンポジウム JSPP2002, pp.159-160, 2002.
- [2] J.A.Stankovic, M.Spuri, M.D.Natale, G.C.Buttazzo, Implications of Classical Scheduling Results for Real-Time Systems, IEEE Computer, Vol.28, No.6, pp.16-25, 1995
- [3] P.Briggs, K.D.Cooper, L.Torczon, Improvements to graph coloring register allocation, ACM Transactions on Programming Languages and Systems, Vol.16, Issue 3, pp.428-455, 1994