

リアルタイム通信 Responsive Link の消費電力削減手法

萩原 秀磨¹ 大沢 幸平¹ 山崎 信行¹

概要: 組み込み分散リアルタイムシステムでは通信におけるリアルタイム性と低消費電力であることが要求される。本研究では、リアルタイム通信規格である Responsive Link を対象とし、通信帯域を保証しつつ、消費電力を削減する手法を提案する。提案手法では、通信の使用帯域を元に通信モジュールに供給されるクロックの分周比を制御することで動作周波数を変更し、消費電力を削減する。また、信号のサンプリングレート変更による通信速度制御により、異なる動作周波数のノード間での通信を可能とし、ノード毎の動作周波数制御を行う。実機において測定した消費電力を元にシミュレーション評価を行った結果、提案手法が帯域保証を行いつつ、消費電力削減が可能であることを示した。

キーワード: 分散リアルタイムシステム, Responsive Link, 消費電力削減, 通信速度制御, 動作周波数制御

Power Consumption Reduction Method of Real-time Communication Responsive Link

SHUMA HAGIWARA¹ KOHEI OSAWA¹ NOBUYUKI YAMASAKI¹

Abstract: Embedded distributed real-time systems require real-time constraints and low power consumption. In this paper, we propose a method to reduce power consumption with a guarantee of communication bandwidth, using Responsive Link that is a communications standard for real-time systems. The proposed method controls the division ratio of the clock which is supplied to the communication module based on utilization of communication bandwidth and changes the operating frequency to reduce power consumption. Furthermore we control communication speed by changing sampling rate of a signal and enable communication between nodes that have different operating frequencies to control operating frequencies for each node. The results of the simulation with power consumption measured on actual machine show the proposed method guarantees bandwidth and reduces power consumption.

Keywords: Distributed Real-Time System, Responsive Link, Power Reduction, Communication Speed Control, Frequency Control

1. はじめに

現在、我々の身の周りに存在する多くの機器にコンピュータが組み込まれ、コンピュータにより制御を行うような組み込みシステムが普及している。組み込みシステムではバッテリー制約や冷却コストの観点から低消費電力であることや、周りの環境に合わせて動作を処理するためにリアルタイムであることが要求される。このようなリアルタイム性を要求するようリアルタイムシステムと、機能分散やシステムの耐故障性を向上させる目的で複数のプロセッサから構成される分散システムの 2 つの特徴を兼ね備えたシステムを分散リアルタイムシステムと呼ぶ。

分散リアルタイムシステムはヒューマノイドロボットや自動車といった複雑なシステムに用いられており、通信が低消費電力であることや、単一ノード内の処理だけでなくノード間の処理に必要な通信においてもリアルタイム性を保証しなければならない。しかしながら、近年のバンド幅要求の高まりから、システム全体に占める通信の消費電力の割合は増加しており、低消費電力を達成するためには通信の性能と消費電力のトレードオフの考慮が必要となる。

これらリアルタイム性と通信速度変更による消費電力削減の両方をサポートする通信規格に Responsive Link[12]がある。Responsive Link ではパケットにユーザが優先度を付加可能である。この優先度を用いた機能にスイッチでのパケットの追い越し制御、ネットワークアドレスと優先

¹ 慶應義塾大学 大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University

度によるルーティング等があり、これらの機能によってリアルタイム通信を実現する。また、Responsive Link はモジュールへ供給されるクロック分周比の変更による動作周波数制御と信号のサンプリングレートを変更することによる通信速度制御が可能である。この機能により動作周波数を落とすことによる消費電力削減と、通信速度を合わせることによる異なる動作周波数のノード間での通信を行うことができる。本研究では Responsive Link の動作周波数制御と通信速度制御の機能を用い、通信帯域の保証を行いつつ、消費電力削減を行う手法を提案する。

本論文の構成は次の通りである。まず、第 2 章で背景について述べる。次に、第 3 章で関連研究について述べる。第 4 章では予備実験となる実機での消費電力測定について述べる。第 5 章で本研究で提案する通信の消費電力削減手法について述べ、第 6 章でシミュレーションによる評価及びその考察を行う。最後に、第 7 章で本稿をまとめる。

2. 背景

2.1 リアルタイム通信規格 Responsive Link

Responsive Link は、分散リアルタイムシステムのための通信機構として研究開発されており、ISO/IEC 24740 として標準化されている [4]。Responsive Link は、リアルタイムシステム処理用プロセッサ Responsive Multithreaded Processor(RMTP)[11] を搭載する RMTP System-on-Chip(SoC) や、各種 I/O と RMTP 下位互換のプロセッサから構成される I/O Core SoC[5] 上に実装されている。本章では Responsive Link の特徴について述べる。

Responsive Link は point-to-point の双方向シリアル通信で、1 つのノードにつき 4 つの他ノードへの入出力ポートを持つ。転送されるパケットには 0 ~ 255 の 256 段階の優先度が付加されており、複数の入力ポートから転送されてきたパケットの出力ポートがルーティングにより競合した場合に、優先度の高いパケットから出力ポートに送信することでパケットの追い越しを行う。パケットの追い越し機能実現のため、優先度による調停器と追い越し用のバッファ、追い越し用のバッファがあふれた際にパケットを退避するための外部記憶インタフェースを内蔵したネットワークスイッチを持つ (図 1)。スイッチは 5 つの入出力ポートを持ち、ポート 0 番は自ノード、ポート 1~4 番は他ノードへの入出力ポートとして使用される。パケットの追い越しにより、パケットの最悪応答時間である Worst-Case Response Time(WCRT) は Response Time Analysis(RTA)[1] によって予測可能となる。パケットの追い越しは通信におけるプリエンブションに相当し、リアルタイム OS のスケジューリング理論を通信に適用することが可能であり、Virtual Deadline Monotonic(VDM) といったパケットスケジューリング手法による Responsive Link を用いたリアルタイム通信機構が提案されている [6]。

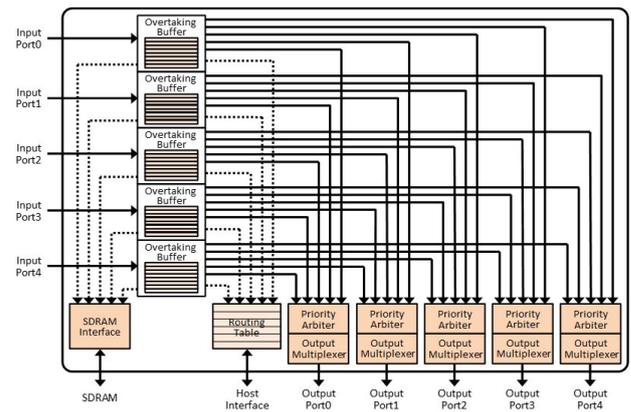


図 1 Responsive Link のネットワークスイッチ
Fig. 1 Network Switch on Responsive Link

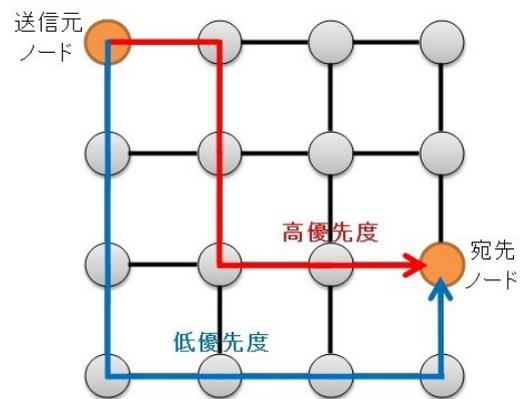


図 2 アドレスと優先度によるルーティング
Fig. 2 Routing by Address and Priority

Responsive Link はトポロジーフリーで、ルーティングテーブルを用いた経路制御を行う。ルーティングにはネットワークアドレスと優先度を用いており、同じ送信元アドレスと宛先アドレスを持つパケットに対して異なるルーティングが可能である。この機能により、専用回線や迂回路を設けることでパケットの衝突を避けることができ、よりリアルタイム性の高い通信を行うことができる。図 2 は高優先度パケットが最短経路を通り、低優先度パケットが迂回路を通るような、優先度毎の異なる経路選択の様子を表している。

Responsive Link はエンベデッドクロック方式を用いたシリアル通信として設計され、クロックジェネレータによりモジュールへ分配されるクロックの分周比を 2 の乗数倍もしくはクロックゲーティングにソフトウェアで設定可能な分周器と共に実装されている。分周比を上げることによって動作周波数を下げると、ノードに接続される全ての通信リンクの通信速度が低下するが、消費電力を落とすことができる。また、クロックデータリカバリに使用する Digital Phase Locked Loop(DPLL) の分解能を 2,4,8,16,32 に設定する機能を持つ。各分解能は通信 Mode と呼ばれ、

通信リンク単位での設定が可能である．通信 Mode を切り替えることで，異なる動作周波数を持つノード同士でも，通信速度を合わせることで通信を行うことができる．実際の通信速度はチップの PLL と分周比，通信 Mode に依存する．PLL が 500MHz の I/O Core SoC の最大通信速度は，分周比 1，通信 Mode2 の 250Mbps となる．また，分周比 1，通信 Mode4 のノードと分周比 2，通信 Mode2 のノードは共に 125Mbps であるため，通信が可能である．本研究では Responsive Link のこの機能に着目し，通信帯域を保証する範囲で通信速度を制御し，システム全体の消費電力を削減する手法を提案する．

2.2 Responsive Link の消費電力

近年ではマイクロプロセッサやメモリ，通信インターフェース，センサなどの回路を 1 つのチップ上に集約した SoC が用いられるようになっており，多くの SoC は CMOS 回路で構成される．その消費電力 P_{TOTAL} は以下の式で表すことができる [2]．

$$P_{TOTAL} = P_{LEAK} + P_{SW} \quad (1)$$

P_{LEAK} はリーク電力， P_{SW} はスイッチング電力で，消費電力はこの 2 つの和で表すことができる．リーク電力は以下の式で表すことができる．

$$P_{LEAK} = I_{LEAK}V_{DD} \quad (2)$$

I_{LEAK} はリーク電流で V_{DD} は供給電圧である．リーク電流は電源が投入されていれば，回路の動作，停止に関わらず発生する．また，スイッチング電力は回路が動作して CMOS 回路で ON/OFF の切り替えが発生することによって生じる電力であり，以下の式で表される．

$$P_{SW} = \alpha CV_{DD}^2 f \quad (3)$$

α はスイッチング率， C は負荷容量， V_{DD} は供給電圧， f は動作周波数である．プロセッサの低消費電力技術はスイッチング電力を削減するための手法とリーク電力を削減するための手法に分類され，スイッチング電力削減手法では供給電圧と周波数を制御する Voltage and Frequency Scaling(VFS) が，リーク電力削減手法ではプロセッサがアイドル状態の時にスリープ状態に移行するような Dynamic Power Management(DPM) が知られている [10]．

Responsive Link は双方向通信のために，パケットの送受信が行われないアイドル状態であっても同期を行うためのアイドルフレームにより通信が行われており，アイドル時であってもスイッチング電力が発生する．そのため，速い通信速度によって通信時間を短くすることでアイドル時間を増やし，消費電力を削減するような手法は効果が薄く，動作周波数制御機構によるスイッチング電力削減による低消費電力化が有効である．このデータの有無に関わらずア

イドル状態とパケット送受信のどちらでも発生する処理のスイッチング率を α_{const} ，消費電力を P_{const} と定義する． α_{const} は受信側のサンプリングレートである通信 Mode により変化する．また，パケットを送受信する場合には通信コーデックに応じたエンコード/デコードやパラレルシリアル変換，図 1 に示されるようなネットワークスイッチの処理が発生する．このパケットの送受信により発生する処理のスイッチング率を α_{packet} ，消費電力を P_{packet} と定義する． α_{packet} はパケット流量に比例し，動作周波数に反比例する．Responsive Link のスイッチング電力は以下の式で表される．

$$P_{SW} = P_{const} + P_{packet} \quad (4)$$

$$P_{const} = \alpha_{const} CV_{DD}^2 f \quad (5)$$

$$P_{packet} = \alpha_{packet} CV_{DD}^2 f \quad (6)$$

3. 関連研究

本章ではネットワークの通信における消費電力削減の手法について説明する．

3.1 プロセッサと通信リンクの動的電圧制御

分散リアルタイムシステムを対象とした消費電力削減手法として，プロセッサと通信リンクを同期し，動的に電圧を制御する手法が提案されている [8]．この論文では回線交換方式で供給電圧に応じて周波数が設定されるようなネットワークに対して，プロセッサと通信リンクに Dynamic Voltage Scaling(DVS) を行い，リアルタイム性を満たしつつネットワークの消費電力削減を行うようなスケジューリングアルゴリズムを提案している．

3.2 Energy Efficient Ethernet

通信の低消費電力化を行う通信規格に IEEE の P802.3az Energy Efficient Ethernet(EEE)[3] がある．EEE はイーサネットにおけるアイドル時のエネルギー消費が大きいことに着目し，通信リンクが使用されない時間に電源供給を止める Low Power Idle(LPI) により消費電力を削減している．また，通信リンクの使用帯域に応じて通信速度を低くすることで消費電力を削減するような Rapid PHY Selection(RPS) が提案されている．

3.3 Responsive Link の通信 Mode 制御

Responsive Link の消費電力削減手法として，通信 Mode を切り替えることにより，スイッチング率を減らすことで，スイッチング電力を削減する手法が提案されている [7]．この論文では通信リンクの使用率を元に通信 Mode を切り替えることにより，通信帯域を保証し，リアルタイム性を大きく損なうことなく消費電力が削減可能であることが示されている．しかしながら，スイッチング率の変更のみで動

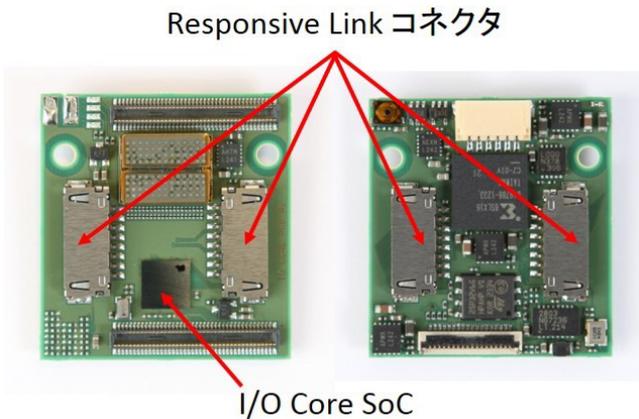


図 3 I/O Core SiP メイン基板
Fig. 3 I/O Core SiP Main Board

作周波数は変わらないため、スイッチング電力に対する消費電力削減率は最大 14%と低くなっている。本論文では動作周波数の設定による更なる消費電力の削減を目指す。

4. 予備実験

予備実験として、2.2節で述べた Responsive Link の消費電力の一部であるスイッチング電力を実機にて測定した。本章では消費電力測定の実験環境、方法、結果について述べる。

4.1 測定環境

Responsive Link は RMTP SoC および、I/O Core SoC 上に実装されている。測定には、I/O Core SoC が実装された I/O Core System-in-Package (SiP) が搭載される評価キットを用いた。I/O Core 評価キットは I/O Core SoC や Responsive Link I/F, SDRAM が搭載されるメイン基板と各種 I/O が搭載される複数のサブ基板から構成されている。図 3 に I/O Core SiP のメイン基板を、図 4 にメイン基板にサブ基板を搭載した評価キットを示す。メイン基板には 5V の AC 電源が安定化電源から供給されており、ボード上の各デバイスには DC/DC コンバータで減圧された電圧が供給される。Processor は 1.0V, Responsive Link は 2.5V, 汎用 I/O は 3.3V に減圧されている。

図 5 に測定環境を示す。I/O Core SiP に供給される電流値と電圧値を、ロジックアナライザとオシロスコープを同期させて測定した(図 6)。測定の際には、評価キットのサブ基板上的 I/O ピンからの出力をロジックアナライザで観測し、共通のトリガーとして用いた。測定値の出力は csv 形式で行われる。使用したロジックアナライザとオシロスコープは以下のとおりである。

- ロジックアナライザ: Agilent 16902A
- オシロスコープ: Agilent infinium DSO 8040B
 - 電圧プローブ: 10073C
 - 電流プローブ: N2783A

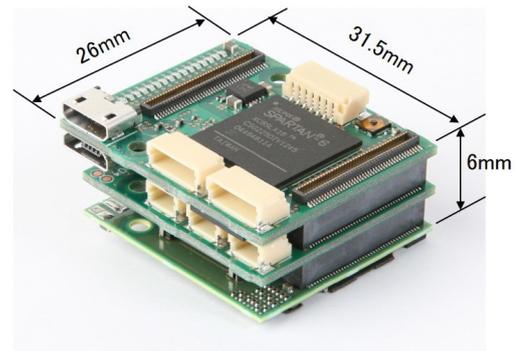


図 4 I/O Core SiP 評価キット
Fig. 4 I/O Core SiP Evaluation Kit

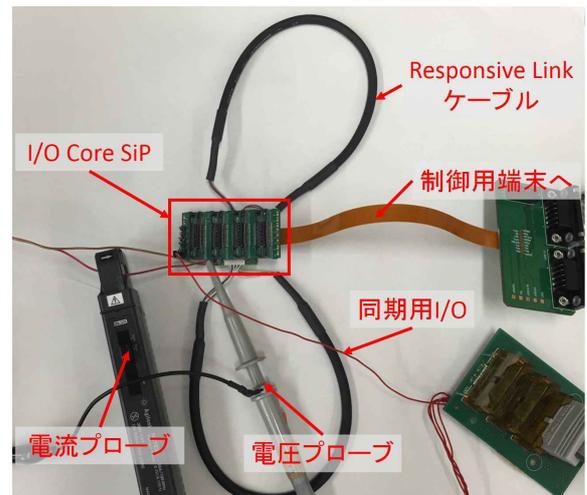


図 5 測定環境

Fig. 5 Measurement Environment



図 6 ロジックアナライザとオシロスコープ
Fig. 6 Logic Analyzer and Oscilloscope

4.2 測定方法

Responsive Link のスイッチング電力である P_{SW} とその構成要素である P_{const} , P_{packet} の測定を行った。それぞれ、 P_{SW} は分周比制御による周波数 f , P_{const} は通信 Mode 制御による α_{const} , P_{packet} はパケット流量の変化による α_{packet} の影響により消費電力が変化する。 P_{SW} は、各分周比での消費電力から Responsive Link をクロックゲーティングした場合の消費電力を引くことで測定した。 P_{const} は各通信 Mode での消費電力の変化を測定した。 P_{packet} はパケットがループするようにルーティングテーブルを設定

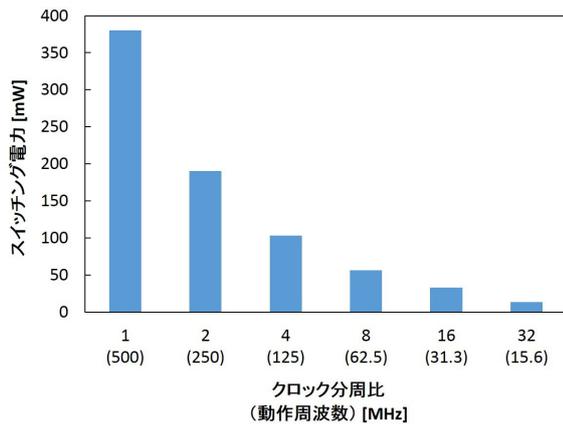


図 7 各分周比におけるスイッチング電力
Fig. 7 Switching Power in Each Division Ratio

し、ループバック接続された各通信リンクからパケットを最大限に受信しスイッチング処理が最も多くなる状態の消費電力を測定した。

各測定項目に対して 5 回の測定を行った。測定には I/O ピンからの出力の立ち上がりエッジから 1.0MSa/s で 100k 個のデータをサンプリングし、その平均値から算出した。

4.3 測定結果

Responsive Link の各分周比に対するスイッチング電力 P_{SW} を図 7 に示す。実機での測定結果より、分周比を大きくすると動作周波数が下がり、動作周波数に比例してスイッチング電力が小さくなることと、評価キット全体の消費電力が 1650mW に対しスイッチング電力の最大値が 380mW であったことから消費電力全体の約 23% を Responsive Link のスイッチング電力が占めていることが分かった。また、通信 Mode とパケット流量によるスイッチング率の違いによる消費電力をそれぞれ図 8 と図 9 に示す。この 2 つのスイッチング率の変化による消費電力の変化は、チップ温度による消費電力の増減といった測定誤差に対して変化量が小さく、今測定では有意的な差が見られなかった。この測定結果から、本論文では分周比制御を用いた消費電力削減手法を 5 章で提案する。また、この測定データを用い、6 章で提案手法のシミュレーションによる評価を行う。

5. Responsive Link における分周比制御による消費電力削減

5.1 ネットワークモデル

本論文は I/O Core SiP を 1 つのノードとし、ノード間を Responsive Link で接続した複数ノードで構成される分散リアルタイムシステムを対象とする。ロボットや自動車に代表される組み込み分散リアルタイムシステムは動作中はシステム設計時の状態から変化しないクロードなシステム構成が多い。理由としては、動作中にネットワークの構

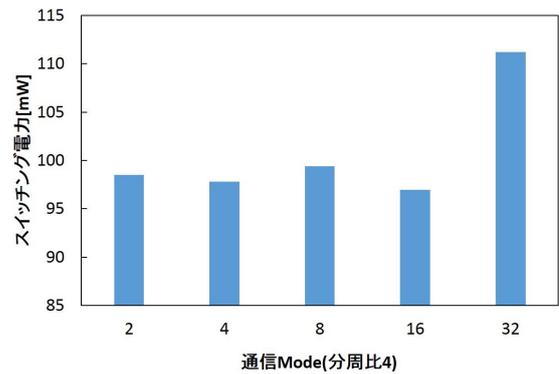


図 8 各通信 Mode におけるスイッチング電力
Fig. 8 Switching Power in Each Communication Mode

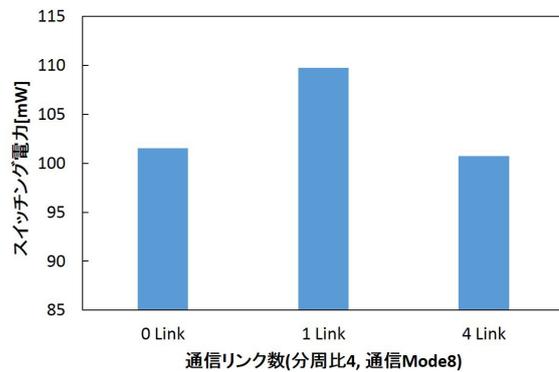


図 9 パケット流量によるスイッチング電力
Fig. 9 Switching Power with Packet Flow Rate

成を変更する場合、重心や形状など物理的な変化が生じるため、制御に支障が出てしまうことや、未知の処理や通信を受け入れると、システム設計時に想定していたリアルタイムな処理が増えた処理によってデッドラインミスするといったトラブルの原因となるからである。そこで、本論文では静的なシステムを対象とし、動的な変更については今後の課題とする。

各ノードは 4 つの入出力ポートを持ち、point-to-point で結合される。結合されたノード同士は通信リンクを形成し、双方向通信を行う。ネットワークは様々な構成をとることが可能であり、通信パケットが複数のノードを経由するマルチホップネットワークとなる。各ノードは分周比制御による全ての通信リンクの通信速度変更と、通信 Mode 制御による各通信リンク毎の速度制御変更機能を持ち、接続された通信リンクの通信速度が双方向で等しい場合に通信が可能である。ルーティングにはネットワーク全体の使用率を抑えるため、静的ルーティングの Shortest Path First (SPF) を採用する。

システムでは周期処理が行われ、周期処理に関連して周期メッセージが発生する。発生する処理や通信は既知であり、周期メッセージの周期および送信元ノード、宛先ノード、転送レートは静的である。また、システム動作中に新

たに発生したり消失しないものとする。

ネットワークの全ノードを N , i 番目のノードを N_i , ノード N_i と N_j 間の通信リンクを $Link_{i,j}$ と定義する。周期メッセージは周期 T でサイズ C のデータを転送し、その転送レート R は C/T により求まる数値である。通信リンク $Link_{i,j}$ の使用帯域 $U_{i,j}$ はその通信リンクを使用する周期メッセージの転送レート R の合計から求めることができる。

5.2 通信速度制御手法

本章では通信帯域を保証することにより、データが到着することを確約しつつ、システム全体における消費電力を抑える通信速度制御手法について述べる。

2.2 節で述べた消費電力を削減するためには、供給電圧 V_{DD} , 動作周波数 f , スイッチング率 α を下げる必要がある。4 章の予備実験より、Responsive Link においては分周比制御による動作周波数 f の変更が効果的であることがわかった。この動作周波数と通信速度はトレードオフの関係にあり、本論文ではリアルタイム通信に消費電力削減手法を適応する前段階として、通信帯域を保証する範囲での動作周波数制御を行う。

Responsive Link は point-to-point の双方向通信のため、通信速度を変更すると通信が一度途切れてしまい、再接続し通信を復元するまでにはオーバーヘッドが発生する。通信速度設定や再接続はソフトウェアで行われるため、時間粒度の細かいリアルタイムシステムではこのオーバーヘッドを許容出来ない場合が考えられる。したがって、本論文では分周比制御と通信 Mode 制御による通信速度設定はシステム構築時に静的に行うとする。システムの通信状況が変化する場合やオーバーヘッドを考慮した動的な制御については今後の課題とする。

分周比制御による通信速度変更の制約に、ノードの全ての通信リンクの速度が変更されるというものがある。通信帯域を保証しつつ速度制御を行うためには、ノードの全通信リンクの中で使用帯域が最も高い通信リンクに合わせて分周比を設定する必要がある。通信帯域を保証する分周比制御の手法を Algorithm1 に示す。まず、ネットワーク上の全てのノードに対し、隣接ノードとの双方向の通信リンクの使用帯域を元に、ノードの最大使用帯域を求める。この使用帯域と最大の通信速度から最適な分周比を決定し、最適値に近い値の分周比を設定可能な 2 の乗数から設定する。

分周比制御のアルゴリズムにより、ノード毎に使用帯域に応じた分周比が設定されるが、異なる分周比のノード間は通信速度が異なり通信が出来ない。よって、通信速度を合わせるために通信 Mode の設定が必要となる。ノード間の通信速度を合わせる通信 Mode 制御の手法を Algorithm2 に示す。まず、ネットワーク上の全てのノードとその隣接

Algorithm 1 分周比制御のアルゴリズム

```

1:  $Link\_Speed \leftarrow PLL/Mode2$ 
2:  $Max\_Use\_Band \leftarrow 0$ 
3: for all  $N_i \in N$  do
4:    $Adjacent \leftarrow \{N_k \mid N_k \in N, \exists link_{i,k}\}$ 
5:   for all  $N_j \in Adjacent$  do
6:      $Link\_Use\_Band \leftarrow \max\{U_{i,j}, U_{j,i}\}$ 
7:     if  $Link\_Use\_Band > Max\_Use\_Band$  then
8:        $Max\_Use\_Band \leftarrow Link\_Use\_Band$ 
9:     end if
10:  end for
11:  $Optimal\_Ratio \leftarrow Link\_Speed/Max\_Use\_Band$ 
12:  $set\_nearest\_division\_ratio(N_i, Optimal\_Ratio)$ 
13: end for

```

Algorithm 2 通信 Mode 制御のアルゴリズム

```

1: for all  $N_i \in N$  do
2:    $Node\_Div \leftarrow get\_division\_ratio(N_i)$ 
3:    $Adjacent \leftarrow \{N_k \mid N_k \in N, \exists link_{i,k}\}$ 
4:   for all  $N_j \in Adjacent$  do
5:      $Adjacent\_Div \leftarrow get\_division\_ratio(N_j)$ 
6:      $Speed\_Ratio \leftarrow Adjacent\_Div/Node\_Div$ 
7:     if  $Speed\_Ratio > 1$  then
8:        $Mode \leftarrow Speed\_Ratio \times Mode2$ 
9:        $set\_link\_mode(N_i, link_{i,j}, Mode)$ 
10:    end if
11:  end for
12: end for

```

ノードに対して、通信速度の比率、つまりは分周比制御アルゴリズムの設定値の比較を行う。結果、隣接ノードより自ノードの方が分周比が小さく、通信速度が速い場合には、通信速度の比率を元に、該当隣接ノードとの通信リンクに適切な通信 Mode の設定を行う。

分周比制御のアルゴリズムに示した通り、分周比の設定値はノードの最大使用帯域に影響されるため、最大使用帯域を下げるためにはネットワークの負荷は分散されていることが望ましい。そこで、Responsive Link の優先度とネットワークアドレスを用いたルーティング機能によりメッセージ毎にルーティングを行い、使用する通信リンクを散らすことでネットワークの負荷の分散を図る。具体的には、転送レートの高い周期メッセージから順番にルーティングを行い、SPF により選択される経路が複数ある場合に、ルーティング済みの周期メッセージの使用帯域が最も低い経路を選択する。

提案手法の例として、分周比 1 , 通信 Mode2 で最大通信速度 250MHz の I/O Core 評価キットをノードとし、表 1 に示されるようなネットワークと使用帯域のシステムを構成する場合について考える。表 1 の $Node$ と $Adjacent$ は全ノード N に対するノード番号を示し、通信リンク $link_{Node,Adjacent}$ が存在する場合の使用帯域 $U_{Node,Adjacent}$ を表す。分周比の設定は自身が送信 ($Node$) の場合と自身が受信 ($Adjacent$) の場合の最大使用帯域の内、大きい方

表 1 各通信リンクの使用帯域例 [Mbps]

Table 1 An Example of The Use Bandwidth of Each Communication Link[Mbps]

Node \ Adjacent	0	1	2	3	4	Max
0	-	50	-	-	-	50
1	60	-	200	100	-	200
2	-	100	-	-	100	100
3	-	120	-	-	50	120
4	-	-	100	60	-	100
Max	60	120	200	100	100	-

表 2 分周比と通信 Mode の設定 (D:分周比, M:通信 Mode)

Table 2 Configure of Division Ratio and Communication Mode(D:Division Ratio, M:Communication Mode)

Node \ Adjacent	0	1	2	3	4
0	D 4	M 2	-	-	-
1	M 8	D 1	M 2	M 4	-
2	-	M 2	D 1	-	M 4
3	-	M 2	-	D 2	M 2
4	-	-	M 2	M 2	D 2

の影響を受ける。N₂ の場合では送信が 100Mbps で受信が 200Mbps のため、設定分周比は大きい方の 200Mbps の帯域保証が可能な 1 となる。各ノードに対する分周比設定を表 2 に示す。link_{Node,Adjacent} の通信 Mode 設定は N_{Node} と N_{Adjacent} の分周比の比から求められており、送受信における通信速度、つまりは通信 Mode と分周比の積は等しくなっている。N₀ と N₁ 間の通信では N₀ の分周比が 4、N₁ の分周比が 1 となっており、周波数が遅いノード側の link_{0,1} の通信 Mode は最大の 2 に、周波数が速いノード側の link_{1,0} の通信 Mode は 4 と 2 の積で 8 となり、互いに 62.5MHz での通信を行う。このシステムでは提案手法を適用した結果、通信帯域を保証しつつ約 35% のスイッチング電力の削減が可能である。

6. 評価

本章では 4 章の実機での Responsive Link の消費電力測定の結果をもとに 5 章で提案した分周比制御による消費電力削減手法について、消費電力、通信速度、通信遅延をシミュレーション評価した内容について述べる。

6.1 評価方法

Responsive Link の機能である、優先度による追い越し、優先度とネットワークアドレスによるルーティング、分周比と通信 Mode による通信速度の変更機能を有するネットワークシミュレータを実装し、評価を行った。

評価のネットワークトポロジーにはヒューマノイドロボット小次郎 [9] のトポロジーである 17 ノードから構成さ

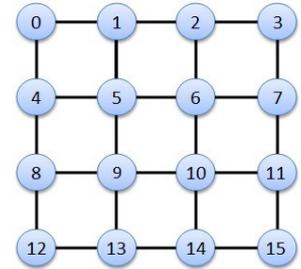
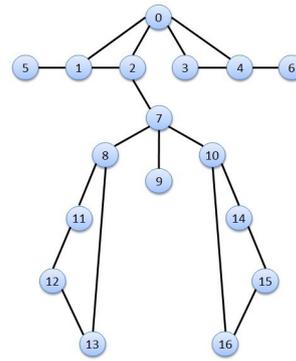


図 10 ヒューマノイドトポロジー 図 11 メッシュトポロジー
Fig. 10 Humanoid Topology Fig. 11 Mesh Topology

表 3 周期メッセージのパラメータ

Table 3 Parameters of Periodic Messages

送信元ノード	各ノード
宛先ノード	ランダム
優先度	0 ~ 255 からランダム
周期 T	{25, 50, 75, 100, 125} [μs] からランダム
転送レート R	{5, 10, 15, 20, 25} [Mbps] からランダム
データサイズ C	R × T

れるヒューマノイドロボットトポロジー (図 10) と 4 × 4 の 16 ノードから構成されるメッシュトポロジー (図 11) を用いた。

この 2 つのネットワークトポロジーに対して、表 3 に示されるようなパラメータを持った周期メッセージセットを作成した。メッセージ量はインジェクションレートを初期値 5Mbps から 5Mbps 間隔で作成することにより変更した。インジェクションレートとは、ネットワーク上の各ノードが他ノードへと転送するメッセージの転送レートの合計であり、宛先ノードはランダムとしている。インジェクションレートが上昇すると、速度変更を行う前の段階から通信帯域を保証不可能なメッセージセットが作成されるようになるため、各インジェクションレートに対して 100 個の周期メッセージセットを作成し、全てのメッセージの通信帯域を保証可能なメッセージセットの数が 80 個を下回るインジェクションレートまでを評価した。

6.2 消費電力の評価

インジェクションレートを変化させた場合の各トポロジーにおけるスイッチング電力の削減率を図 12 に示す。各トポロジーのスイッチング電力の合計値は 17 ノードで構成されるヒューマノイドロボットトポロジーで 6460mW、16 ノードで構成されるメッシュトポロジーで 6080mW であり、縦軸はスイッチング電力の削減率を示している。

インジェクションレートが低い間は、使用帯域が低いため、分周比を高い値に設定することができ、通信がほとんど発生しない状態では最大で 90% 以上の消費電力削減が可

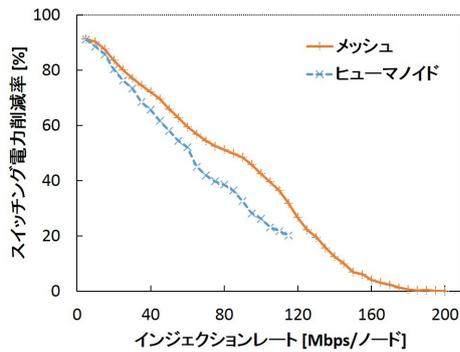


図 12 スイッチング電力削減率
Fig. 12 Reduction Rate of Switching Power

能である．インジェクションレートを上げていくと通信リンクの使用帯域が上がっていくため，分周比を高い値に設定することが出来なくなり，削減率は下がる．またヒューマノイドトポロジーとメッシュトポロジーの消費電力削減率を比較すると，通信リンクの数が多く，負荷を分散しやすいメッシュトポロジーの方が，削減率が高くなっている．

6.3 通信速度と通信遅延の評価

インジェクションレートを变化させた場合の平均の通信速度と通信遅延をヒューマノイドトポロジーは図 13 にメッシュトポロジーは図 14 に示す．通信遅延はメッセージセットを優先度に応じて高・中・低に 3 分割し，それぞれの通信遅延の平均値を示した．

インジェクションレートが上がり，ネットワークの使用帯域が上がることで，帯域保証をするために通信速度が上昇している．また，分周比の設定値が離散的であるため，通信リンクの使用帯域が分周比制御による設定値付近になるインジェクションレートでは通信速度の傾きが緩くなっている．

通信遅延は通信速度の上昇に応じて低下している．優先度が低いメッセージの通信遅延は，通信速度に加えて，パケットの追い越し機能による自身より高優先度メッセージのデータ量の影響を受ける．そのため，通信速度の傾きが緩い設定値付近では，通信速度が使用帯域を保証可能な帯域間際になっており，低優先度メッセージの使用できる帯域が少なく，通信遅延が大きくなっている．

評価の結果，通信遅延は設定された通信速度と優先度，データ量により大きく変化することが分かった．本論文では分周比の設定には最低限の帯域保証のみで通信遅延は考慮されていないが，リアルタイム通信において消費電力削減を行うためには，その制約である通信遅延の考慮が課題となる．

7. 結論

本論文では，分散リアルタイムシステム向けの通信規格である Responsive Link を対象に，消費電力削減手法を提

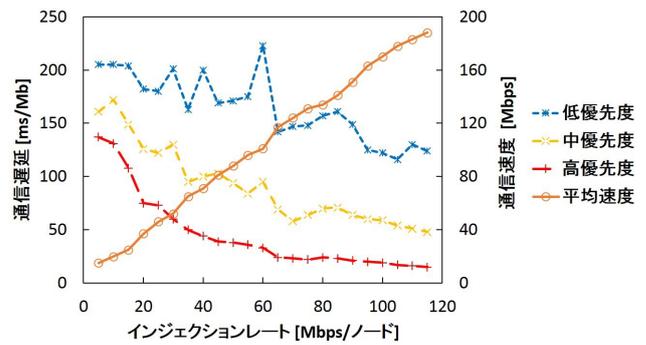


図 13 ヒューマノイドトポロジーにおける通信遅延と通信速度
Fig. 13 Latency and Communication Speed on Humanoid Topology

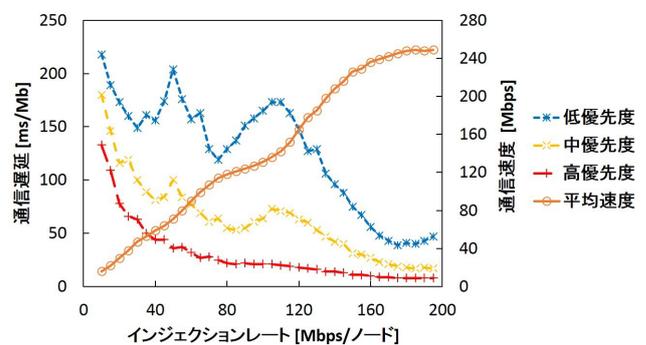


図 14 メッシュトポロジーにおける通信遅延と通信速度
Fig. 14 Latency and Communication Speed on Mesh Topology

案した．提案手法では通信リンクの使用帯域を元に，通信帯域を保証する範囲で，全ての通信リンクの通信速度を変更する分周比制御と通信リンク毎に通信速度変更可能な通信 Mode 制御を適応し，動作周波数を低下させて消費電力を削減した．実機の消費電力を測定する予備実験により，分周比を変更することでスイッチング電力が削減可能であることを示し，測定結果を元に作成したシミュレータを用いて評価を行った．

評価では，通信速度を制御することにより，使用帯域が少ないほど，消費電力を多く削減できることを示した．また，通信遅延が制御された通信速度と優先度，データ量に依存することを示し，リアルタイム通信では通信遅延の制約を満たすような速度制御が必要であることを示した．

今後の課題として，トポロジー構成やルーティング手法を含む理論的側面からの最適な削減手法の模索や，通信速度制御を帯域保証ではなくリアルタイム性保証の範囲で行うことを考えている．リアルタイム性保証では，従来の一定の速度で構成されるネットワークを対象にしてきたリアルタイム通信の理論を，通信速度が異なるネットワークに適応し，算出された最悪応答時間を通信速度制御の指標とする予定である．

参考文献

- [1] Audsley, N., Burns, A., Richardson, M., Tindell, K. and Wellings, A. J.: Applying New Scheduling Theory to Static Priority Preemptive Scheduling, *Software Engineering Journal*, Vol. 8, pp. 284–292 (1993).
- [2] Burd, T. D. and W.Brodersen, R.: Energy Efficient CMOS Microprocessor Design, *In Proceedings of the 28th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Vol. 1, pp. 288–297 (1995).
- [3] IEEE 802.3 ETHERNET WORKING GROUP: IEEE P802.3az Energy Efficient Ethernet Task Force, IEEE (online), available from (<http://www.ieee802.org/3/az/index.html>) (accessed 2010-11-15).
- [4] International Organization for Standardization: ISO/IEC 24840:2008, International Organization for Standardization (online), available from (http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=50352) (accessed 2013-06-19).
- [5] 垣内洋平, 白井拓磨, 菅井文仁, 大久保壮一, 熊谷伊織, 永松裕弥, 岡田慧, 稲葉雅幸, 和田喜久雄, 山崎信行: ディペンダブルなロボット用組み込みプロセッサ系の開発- 組み込みリアルタイムシステム用ディペンダブル SoC 及び SiP に関する基盤技術の研究結果報告 -, 第 32 回日本ロボット学術講演会講演論文集, pp. 1N1–05 (2014).
- [6] Kato, S., Fujita, Y. and Yamasaki, N.: Periodic and Aperiodic Communication Techniques for Responsive Link, *In Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications(RTCSA)*, pp. 135–142 (2009).
- [7] Kumura, Y., Suito, K. and Yamasaki, N.: A Low-Power Link Speed Control Method on Distributed Real-Time Systems, *IEEE 7th International Symposium on Embedded Multicore Socs (MCSoc)*, pp. 49–54 (2013).
- [8] Luo, J., Jha, N. K. and Peh, L.: Simultaneous Dynamic Voltage Scaling of Processors and Communication Links in Real-Time Distributed Embedded Systems, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration(VLSI) Systems*, Vol. 15, No. 4, pp. 427–437 (2007).
- [9] Mizuuchi, I., Nakanishi, Y., Sodeyama, Y., Namiki, Y., Nishino, T., Muramatsu, N., Urata, J., Hongo, K., Yoshikai, T. and Inaba, M.: An advanced musculoskeletal Humanoid Kojiro, *7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 294–299 (2007).
- [10] Weste, N. and Harris, D.: *CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective*, Addison Wesley, 4th edition (2010).
- [11] Yamasaki, N.: Responsive Multithreaded Processor for Distributed Real-Time Systems, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 17, pp. 130–131 (2005).
- [12] Yamasaki, N.: Responsive Link for Distributed Real-Time Processing, *International Workshop on Innovative Architecture for Future Generation High-Performance Processors and Systems(IWIA)*, pp. 20–29 (2007).