

二重バス型 MAN における分散ラウンドロビン制御方式の検討

Study on a Distributed Round Robin Control Scheme for Dual Bus Networks

○塚本 和明*, 加藤 陽介†, 小原 仁†
Kazuaki Tsukamoto*, Yosuke Kato†, Hitoshi Obara†

*秋田大学 大学院工学資源学研究所

*Graduate School of Engineering Resource Science, Akita university

†秋田大学 大学院理工学研究科

†Graduate School of Engineering Science, Akita university

キーワード: 媒体アクセス制御(Media access control), 2重バス網 (Dual bus network),
公平性 (Fairness), ラウンドロビン制御 (Round robin control)

連絡先: 〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1

秋田大学大学院理工学研究科 電気電子工学コース

Tel. 018-889-2488, Email: obara@ee.akita-u.ac.jp

1. はじめに

バス網は理論と実用の両面において基本的なネットワークトポロジーである。1本の高速伝送路を共有して使用することで通信を行うため、構造が簡単で経済的というメリットがある。しかし、衝突が発生するタイプのネットワークでは効率が低いというデメリットがある。そのデメリットは、バスの伝送方向を一方向に限定することで解消されるが、ノードの位置(上流/下流)による不公平性が新たな問題となる。

その不公平性を改善した従来のバス網の例として、Token Passing Bus[1]やDQDB(Distributed Queue Dual Bus)[2]などがある。特に、DQDBはMAN(Metropolitan Area Network)においてIEEE802.6で標準化されたアクセス制御方式である。一方向性のバスを互いに2本用いることや予約型のスケジューリング方式により高い効率と公平性を実現している。しかし、過負荷状態や不均一負荷条件の下ではノードの位置による不公平性が完全に解消されない。

その問題を解決すべくBWB(Bandwidth Balancing)[3]やFDQ(Fair Distributed Queue)[4]などの方式が提案された。しかし、従来の研

究ではノード位置による公平性が定量的に評価されていないことや、不均一負荷の例としてLAN内の1つのサーバーに集中するような単純なパターンのみが考慮されている[5]。本研究ではバス型MANへの応用を想定し、論理的なスター網を構成するConsolidated Ring網[6]に適したバス網のアクセス制御方式について検討する。従来、このような応用を想定した検討は、筆者らの知る限りにおいて前例はない。

以下、本報告では第2章で従来のバス網の代表的なアクセス制御方式であるDQDBの概要と公平性の問題点を示す。第3章において、本研究で提案するラウンドロビン方式を適用した新たなアクセス制御方式の原理を紹介する。第4章では、バス網における公平性を定量的に評価する尺度として、スループットの公平性の尺度であるJain指数[7]を遅延特性の公平性に適用することを新たに提案する。第5章は提案方式のシミュレーション結果と考察について述べる。第6章は結論であり、本報告で得られた主な知見をまとめるとともに、今後の研究課題について述べる。

2. DQDB 方式の概要と問題点

2.1 ネットワーク構成

DQDB は IEEE802.6 で標準化された MAN における通信プロトコルである。その構成の概要を図 1 に示す。一方向性のバスを二重化して、バスの先端にはスロットを生成する SG(Slot Generator)があり、末端にはスロットを消去する ST(Slot Terminator)が接続されている。生成されたスロットのヘッダ部にはスロットにパケットが書き込まれたことを示す B(Busy)ビットと下流からの送信要求を示す R(Request)ビットがある。それぞれのノードには下流からの送信要求の数を表す RQ(Request)カウンタと、パケット送信時に空きスロットを下流に流すための CD(Countdown)カウンタを搭載している。

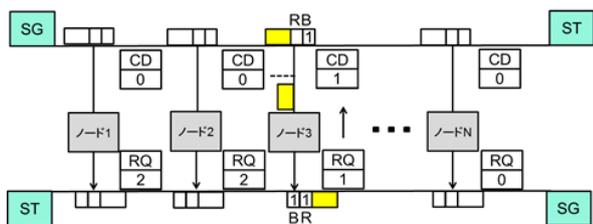


図 1. DQDB の構成

2.2 DQDB の動作原理

図 1 において、ノード 1 を最上流として扱い、ノード N を最下流のノードと定義する。DQDB の動作例として、図 1 においてノード 3 がパケットを送信する時を想定する。ノード 3 は図 1 の下方のバスにおいて、書き込まれていない R ビットに 1 をセットする。この動作により、ノード 3 より上流のノード 1, 2 はノード 3 に送信要求があることを知ることができる。ノード 3 が R ビットをセットした直後、RQ カウンタの値を CD カウンタにセットする。これによりノード 3 より下流のノードの送信要求の数が CD カウンタにセットされたことになる。その後、ノード 3 は CD カウンタにセットされている数に相当する空きスロットを見送る毎に CD カウンタを 1 ずつ減算する。この動作により、ノード 3 は CD カウンタが 0 になった時点から最初に到着した空きスロットを使用しパケット

を送信することができる。

2.3 DQDB の不公平性

DQDB はそれぞれのバスで上流/下流の優先がある。すなわち、上流のノードは空きスロットをつかまえやすいが送信要求を送りにくく、下流のノードは送信要求を出しやすいが空きスロットを捕まえにくいという性質がある。これが不公平性の原因につながっている。また、送信要求を送ることができたノードから順番にパケットを送信するため、パケットの到着数が多い負荷の高いノードは送信要求数も多く優先的にパケット送信を行うという問題点がある。この DQDB の傾向を示すデータを図 2 と図 3 に示す。なお、図 2 と図 3 における遅延時間はパケットが到着してからスロットに書き込まれるまでにかかった時間として定義される(バス上を伝播する固定的な遅延時間は含まれない)。

図 2 は全てのノードに均一に負荷をかけたときの遅延時間のシミュレーション結果である。R ビットを書き込むまでにかかった時間が下流のノードほど小さくなっていて、上流のノードは大きくなっていることがわかる。次に、空きスロットを得るまでにかかった時間は、上流のノードほど小さく、下流になるほど大きくなる事が分かる。

図 3 では中央のノードに集中的に負荷をかけた不均一負荷パターンにおける遅延時間のシミュレーション結果である。平均遅延時間を見ると、負荷の大きい中央のノードが最も遅延が小さく、両端の負荷の小さいノードの遅延時間が大きくなっており、負荷の大きいノードが優先的に送信できていることが分かる。

以上のように、従来の DQDB ではノード位置による不公平性が生じることがわかる。

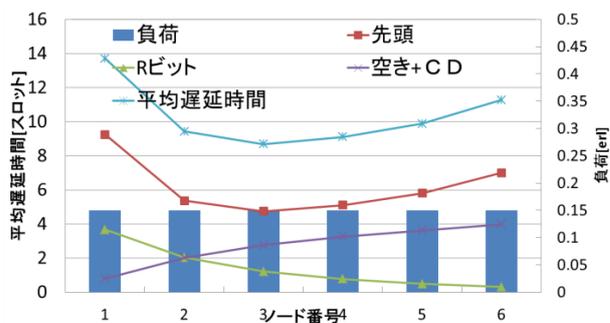


図 2. 均一負荷時の不公平性

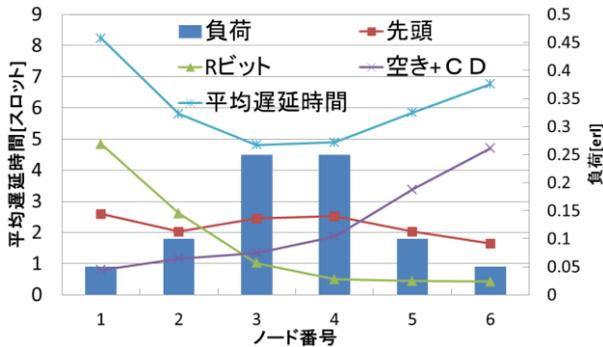


図 3. 不均一負荷時の不公平性

3. 提案方式

3.1 ラウンドロビン制御

第2章で述べたように、従来の DQDB は上流優先の制御と下流優先の制御を組み合わせ、全体として不公平性を補償するというコンセプトで設計されている (Implicit Round-Robin)。このため、中央付近のノードが優先される不公平性は避けられない。そこで、本研究では明示的なラウンドロビン (Explicit Round-Robin) 制御を実現する制御方法を考える。

ラウンドロビン制御とは図4に示すように送信権が順番に与えられる制御のことである。この結果、ノード位置による不公平性はないと考えられる。本報告では、この動作を二重バス網において分散制御を実現する方法を考える。

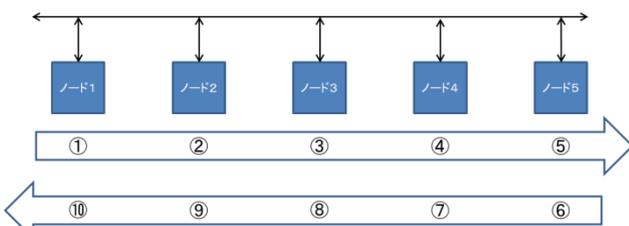


図 4. ラウンドロビン制御

3.2 Explicit Round-Robin (ERR) 方式

提案する構成を図5に示す。DQDB と異なる点は SG から生成されたスロットのヘッダ部が R ビットから A (Active) ビットと I (idle) ビットの2つから成る点と、ノードのカウンタが R カウンタから AD (Active Downstream node) カウンタになっていることである。A ビットはノードのバッファ内にパケットがない状態の時に、初

めてパケットが到着してノードが Active な状態になったことを上流のノードに伝えるために用いる。I ビットはパケットの送信を終えたノードで、バッファ内にパケットがない状態になった時に、ノードが休止状態となったことを上流に伝えるために用いられる。AD カウンタは、あるノードから下流において Active な状態にあるノード数を示すカウンタである。従来の DQDB 方式では1パケットごとに R ビットを送出していたが、提案方式ではノードにパケットが溜まっている状態と、パケットがない状態の2つの状態を上流に通知する動作を行う。

具体的な動作原理を図4に示す。ラウンドロビンで送信させるために、最初はノード1から順番に送信を行う。最下流のノード5が送信したら、今度はノード5から順番に送信を行う。すなわち、上流優先のサイクルと下流優先のサイクルを交互に実行する。上流優先時には下流で送信待機しているパケットがあってもすぐに送信することができる。逆に、下流優先時には下流で活動しているノード分を待機してからパケットを送信するので下流ノードは必ず送信できる。下流優先時の待機動作は、AD カウンタにセットされている値を CD カウンタにセットし、その値分の数空きスロットを見送ることで実現できる。

パケットの送信要求の処理については、A/I ビットを用いる。上述のように、ノードが活動を始めた時 (パケットが到着した時) に A ビットをセットし、ノードが活動を終了した時 (バッファが空になった時) に I ビットをセットする。読み込んだ A ビットがセットされていたときは下流で活動しているノードが発生したとわかるので AD カウンタの値に1加算を行う。逆に、I ビットがセットされた時は下流のノードの活動が終了したとして AD カウンタの値を1減算する。

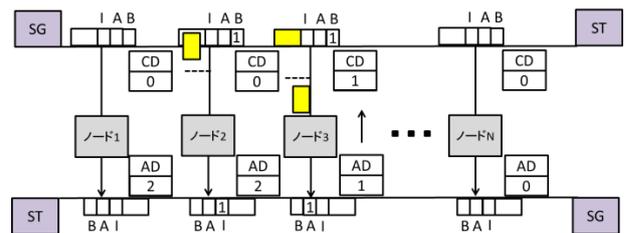


図 5. ERR 方式の構成

4. 公平性の評価尺度

本報告ではノードの位置による不公平性を定量的に評価するため、Jain Index を公平指数として用いる[7]。従来、この指標はスループットの公平性の評価に用いられてきた。本報告ではパケットが到着してから送信するまでにかかった時間に着目して公平度を定義する。本報告における Jain Index を式(1)に示す。Nはノード数、 X_i はノードi番目のある時間内における平均遅延時間である。式(1)の分母は分散に対応し、分子は平均値の2乗に対応している。よって、Jは従来の変動係数とも関連しており、分布の広がりを示す指標である。特にJは0から1の範囲に分布し、J=1で完全に公平であり、J=0で完全に不公平となる。

$$J = \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

一例として、12個のノードから成るバス網を想定する。各ノードにおけるパケット送平均遅延時間の分布を図6に示すように3通り考える。全てのノードとの遅延特性が同一であればJ=1となり、1つのノードに負荷が集中して遅延が大きい状況ではJ=0となることがわかる。

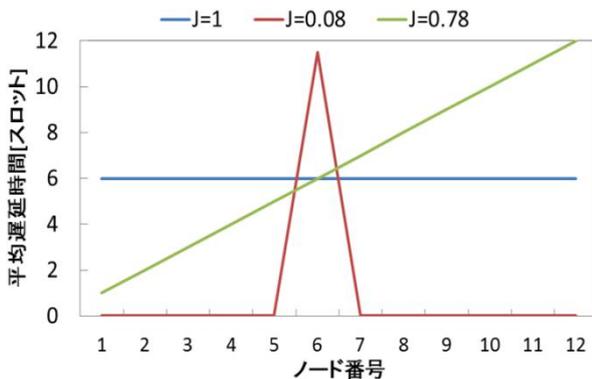


図6. Jain Index の例

5. シミュレーションによる性能評価

5.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件を表1に示す。シミュレータとして Visual SLAM を使用した。なお、表1に示した負荷は式(2)で定義される。ここで

λ は単位時間当たりのパケットの発生率で、 μ はスロット長である。

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} [\text{erl}] \quad (2)$$

表1. シミュレーション条件

方式	提案方式, DQDB
ノード数[個]	3, 6
ノード間遅延時間 [スロット時間]	5, 50
スロット長	1(正規化)
パケット長	1(正規化)
負荷[erl]	0.3, 0.6, 0.9
発生率	指数分布
シミュレーション時間 [スロット時間]	1,000,000

5.2 シミュレーション結果

(1) 3ノード, ノード間遅延=5スロット

シミュレーション結果を図7に示す。また、その場合の公平度を表2に示す。図7より低負荷である0.3erlと中負荷のときの0.6erlのときは2から4スロット時間の平均遅延時間に収まっている。負荷0.9erlの高負荷のときは提案方式の方がDQDBより約0.1スロット時間大きく、約1.3%大きかったが、ほぼ同様の結果となった。

また、表2より公平度をみるとDQDB方式では負荷が大きくなると公平度が小さくなっていくのに対して、提案方式では負荷が大きくなると公平度が上昇していた。以上のことから3ノードの場合では負荷を大きくすると提案方式は遅延時間の上昇率、公平度の性能が向上していることが分かった。

(2) 6ノード, ノード間遅延時間=5スロット

図8, 9に6ノードのときの提案方式, DQDBの平均遅延時間の結果を表3に公平度の結果を示す。図8, 9よりノード数が3から6に増加した場合、DQDBでは低負荷、中負荷、高負荷の全ての負荷で平均遅延時間が増加していることが分かる。高負荷においては平均遅延時間が約0.7スロット時間増加し、約6.9%増加した。提案方式では低負荷、中負荷、高負荷のすべての負荷においてDQDBとは反対に平均遅延時間が減少することが分かった。高負荷では平均遅

延時間が約 0.2 スロット時間減少し、約 2.0%減少した。また、DQDB と比較すると平均遅延時間が高負荷では 7.2%減少した。

次に、表 2 より公平度は DQDB では 3 ノードの場合と同様に負荷が大きくなると公平度が下がっている傾向が見られ、またノード数が多いと公平度の減少が見られた。提案方式では 3 ノードの場合では負荷が大きくなるほど公平度が増加する傾向が見られたが、6 ノードでは高負荷のときが最も公平度が小さい値になった。また、高負荷のとき DQDB より公平度が大きい値になった。以上のことから 6 ノードの場合、提案方式は 3 ノードの場合より平均遅延時間が減少し、高負荷において DQDB より公平度が高いことが分かった。

(3) 6 ノード, ノード間遅延時間=50 スロット

図 10, 11 に 6 ノードでノード間遅延時間を 5 スロットから 50 スロットに拡大した結果を、表 4 に公平度の結果を示す。図 10, 11 より DQDB は平均遅延時間が高負荷では約 2.3 スロット時間増加し、約 22%上昇した。提案方式は高負荷のとき約 0.4 スロット時間増加し、約 4.1%増加した。それぞれの平均遅延時間を全てのノードの平均で比較すると低負荷では提案方式の方が 8%大きく、中負荷では 6%大きく、高負荷では 20%小さかった。

表 4 より公平度は DQDB ではノード間が 5 スロット時間の場合と比較すると高負荷のときに 2.64%上昇していた。一方提案方式では 1.5%減少していた。

5.3 シミュレーション結果のまとめと考察

本報告では二重バス型 MAN におけるラウンドロビン制御による制御方式を提案した。また、3 ノード、6 ノード、ノード間遅延時間を拡張した場合における性能評価をシミュレーションにより行った。ノード数を 3 から 6 個に増やしたとき高負荷においては平均遅延時間が約 2.1%減少し、公平度は約 0.45%減少した。ノード間遅延時間を 50 スロットに拡張した場合、高負荷においては平均遅延時間が約 4.1%増加し、公平度が約 1.5%減少した。従来のもの比べると提案方式は遅延時間の増加率が低いが、公平性の面で改善の余地がある。また、不均一の負荷の状

態での性能評価も必要である。

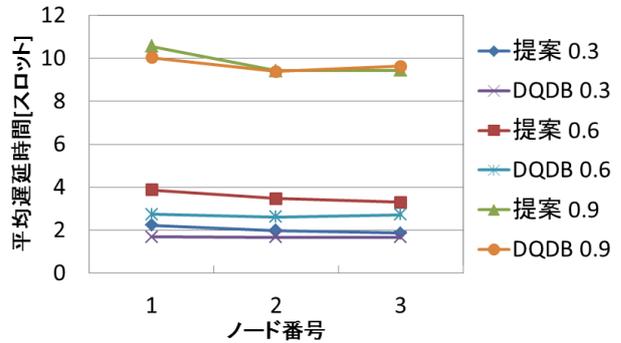


図 7. 3 ノード, ノード間遅延時間 5 スロット

表 2. 3 ノードの公平度

負荷	提案方式	DQDB
0.3	0.9946	1.000
0.6	0.9954	0.9996
0.9	0.9971	0.9992

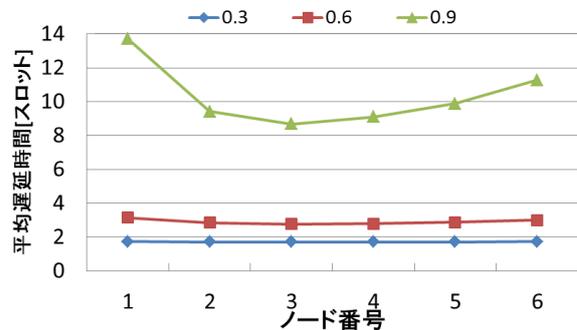


図 8. 6 ノード, ノード間遅延 5 スロット(DQDB)

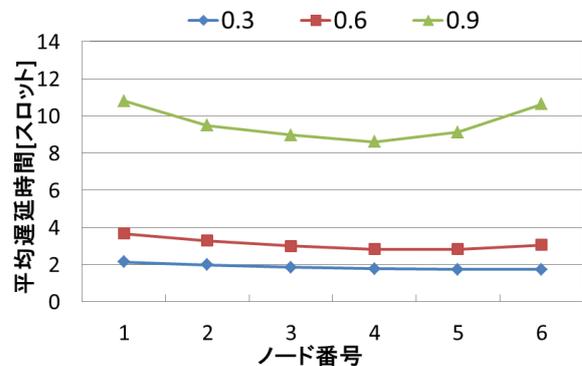


図 9. 6 ノード, ノード間遅延 5 スロット(提案方式)

表 3. 6ノードの公平度(ノード間遅延 5 スロット)

負荷	提案方式	DQDB
0.3	0.9940	0.9999
0.6	0.9910	0.9979
0.9	0.9925	0.9735

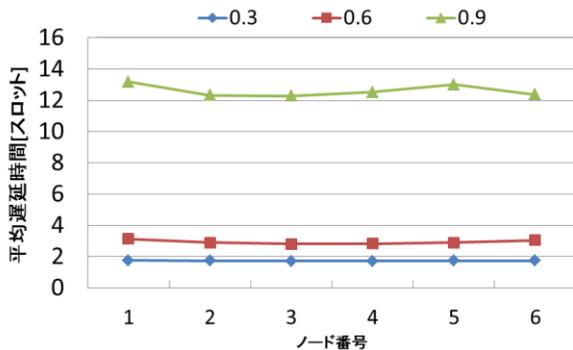


図 10. 6ノード, ノード間遅延 50 スロット(DQDB)

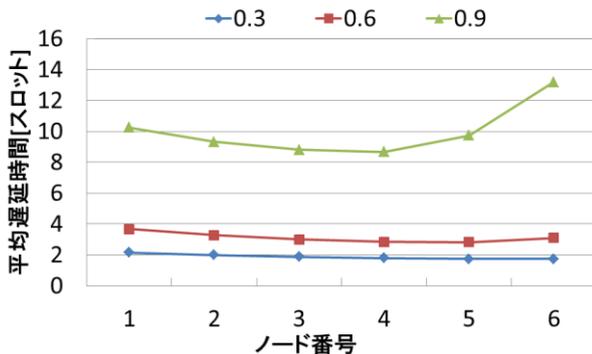


図 11. 6ノード, ノード間遅延 50 スロット(提案方式)

表 4. 6ノードの公平度(ノード間遅延 50 スロット)

負荷	提案方式	DQDB
0.3	0.9939	0.9999
0.6	0.9915	0.9983
0.9	0.9772	0.9992

6. まとめ

本報告では, ラウンドロビン制御を適用した二重バス型 MAN を提案した. 3ノードおよび6ノードのネットワークにおいて, ノード間遅延時間をパラメータとした性能評価をシミュレ-

ションにより行った. ノード数を3から6に増やすと, 高負荷においては平均遅延時間が約2.1%減少し, 公平度は約0.45%減少した. ノード間遅延時間を50スロットに拡張した場合, 高負荷においては平均遅延時間が約4.1%増加し, 公平度が約1.5%減少した. 従来のDQDBと比較すると提案方式は遅延時間の増加率が低いが, 公平度が劣化した.

今後の課題として, 不均一負荷の状態での性能評価が挙げられる. また, ノード数やノード間遅延時間を変化させた時の本提案方式の性能を詳細に評価する必要がある. 本報告で初めて導入したJain指数による不公平性の評価尺度についても改善すべき点が見られた.

参考文献

- [1] IEEE 802.6 Committee: Distributed Queue Dual Bus (DQDB) subnetwork of a Metropolitan Area Network (MAN), Institute of Electrical and Electronics Engineers (1990)
- [2] A.P. Jayasumana, G.G. Jayasama: On the Use of IEEE 802.4 Token Bus in Distributed Real-Time Control Systems, IEEE Transactions on industrial Electronics, vol.36, No3, pp.391-397(1989)
- [3] H. R. van As: Performance analysis of bandwidth balancing in the DQDB MAC protocol, EFOC/LAN-90, pp.231-385(1990)
- [4] M. Kabatepe, K. S. Vastolal: The Fair Distributed Queue (FDQ) Protocol for High-Speed Metropolitan-Area Network, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.4, No3, pp.331-339 (1996)
- [5] T. J. Kim, D.H. Cho: Bandwidth Turning for Fairness of DQDB in Client-Server Traffic Environments, IEEE communications letters, vol. 4, No.6 (2000)
- [6] N. Bouabdallah, A.L. Beylot, E. Dotaro: Resolving the Fairness Issues in Bus-Based Optical Access Networks, IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 23, No.8, pp.1444-1445 (2005)
- [7] C. Vlachou, J. Herzen, P. Thiran: Fairness of MAC Protocols: IEEE 19901 vs. 802.11, IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, pp.58-63 (2013)