

8 隣接格子網の性能評価

丹野州宣*・難波喜由**・山本博章***

*工学部電子情報工学科・**日本電気ホームエレクトロニクス(株)

***信州大学工学部情報工学科

Performance Evaluation of an Eight-Neighbor Mesh-Connected Network

Kuninobu TANNO*, Kiyoshi NANBA**

and Hiroaki YAMAMOTO***

**Department of Electrical and Information Engineering, Faculty of Engineering*

***NEC Home Electronics, Ltd.*

****Department of Information Science Shinsyu University*

(平成3年8月23日受理)

Abstract

This paper deals with performance evaluation of an eight-neighbor mesh-connected processor array, in which each processor has eight links, that is degree 8. We obtain 10 performance measures for the array in two cases of without wraparounds and with wraparounds (that is a torus), and then compare with the four-neighbor mesh-connected processor array and the binary n-cube. As a results, we conclude that (1) the eight-neighbor mesh-connected processor array basically has properties as a lattice as well as the four-neighbor mesh-connected one, (2) the torus is superior to the binary n-cube if the number of processors is not so large, but it is inferior if the number of processors becomes large. A critical number exists between 128 and 256, (3) depending on performance measures, some properties of the array without wraparounds are better than ones of the four-neighbor mesh-connected array with wraparounds, but the others are worse.

1. はじめに

近年並列計算機の研究が活発になってきているが、それは情報処理の高度化、多様化あるいは高信頼化等に対する要求と、VLSI 製造技術の著しい発展、関数型言語等の並列計算無機言語の提案あるいはデータ駆動や要求駆動の新しい計算機アーキテクチャの研究と開発¹⁾など並列計算機を実現するためのいくつかの理論的・技術的発展とが結び

付いたためと考えられる。最近まで精力的に進められたあるいは進められている並列計算機の開発状況が文献²⁾に報告されている。それら並列計算機を構成する網方式を直接網型に限って分類すると、バス結合、木/クラスタ結合、2進n-キューブ、格子/トーラス結合が多く採用されている。

格子/トーラス網の場合、4隣接格子網(正方格子網)とそのトーラス網については、その特性や

網に適合した各種の並列アルゴリズムが研究・開発されている。また、六角格子網についてもいくつかの研究が報告されているが、同じ二次元平面上に構成できる8隣接格子網についてはほとんど報告されていない。しかし、格子網に適するハードウェア・アルゴリズムが多いこと^{3)~5)}、格子網は二次元構成でありハードウェア・アルゴリズムをマッピングしやすいこと、あるいは今までの研究からすべてのアルゴリズムに適するような結合網は見い出せないが、格子網はデータ伝送遅延、メッセージ伝送密度等の評価尺度ですぐれた特性を持ち⁶⁾、特にトーラス構成とすると更に良い特性が得られること⁷⁾等の格子網の利点に加え、興味あるハードウェア・アルゴリズムは接続数が8あるいはそれ以下であること⁸⁾を考慮すれば、8隣接格子網が重要な意味を持つ結合網であることがわかる。しかも、少数ではあるが、従来からセルアレーの一方方式として⁹⁾、また、NASAで開発された並列計算機FEM (Finite Element Machine)のマイクイコンピュータ結合網¹⁰⁾として、あるいは回線交換方式 (switch)を用いた再構成可能な結合網などとして⁸⁾いくつかの並列計算機システムに採用されている。このような観点から筆者は8隣接格子網を利用したソーティング¹¹⁾や二重二進木の埋め込み¹²⁾などのアルゴリズムを研究し、その成果を発表している。しかし、8隣接格子網の特性についてはほとんど報告されていない。

本文では、8隣接格子網について平均距離、平均中継量などいくつかの重要な評価尺度を算出する。さらに、4隣接格子網/トーラス、2進 n -キューブ網と比較することにより、8隣接格子網の特性を明らかにする。以下、2.では8隣接格子網の構成と経路選択について、3.では各種評価尺度について簡単に説明し、次いで8隣接格子網についてそれら評価尺度を算出する。4.では他の結合網と比較し、本網の特性を明らかにする。5.では結論を述べる。

2. 網の構成と経路選択

2.1 網の構成

図1に $N = n \times n$ 個のプロセッサ(演算要素: PE) $P(1: N, 1: n)$ からなる8隣接格子網の構成を示す。図示のように、各PE (○印)は3、

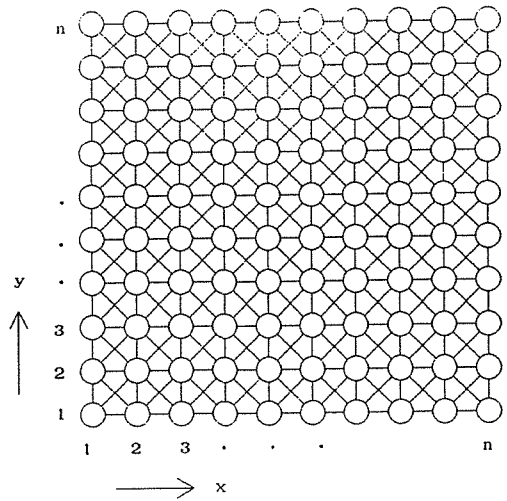


Fig.1 Structure of an 8-neighbor mesh-connected processor array.

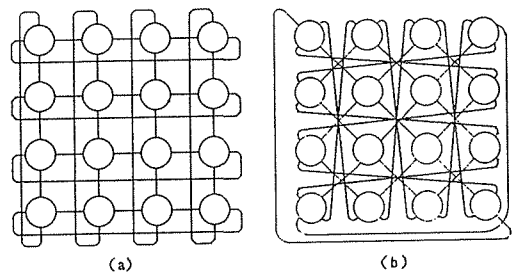


Fig.2 An 8-neighbor mesh-connected torus network consisting of horizontal and vertical wraparounds (a) and two diagonal wraparounds (b).

5あるいは8本のリンクを有し、PE $P(x, y)$ は基本的に $P(x+1, y)$, $P(x-1, y)$, $P(x, y+1)$, $P(x, y-1)$, $P(x+1, y+1)$, $P(x+1, y-1)$, $P(x-1, y+1)$, $P(x-1, y-1)$ の8個のPEと双方向、同時に通信する能力を持つものとする。また、網の縁端に位置するPEを相互に接続すると、例えば、図2に示すようなトーラス網が構成できる。本文では図2(a), (b)を重ね合わせたトーラス網を考察の対象とする。このように、8隣接格子網は接続リンクのしよほうと経路選択法を適切に組合せることにより、各種応用に適する特徴ある結合網を論理的に構成することが可能となる。以後、図1を8隣接格子網と呼び、図2を8隣接格子網トーラス網あるいは単にトー

ラス網と呼ぶ。また、両者を一括して表す場合は8隣接格子/トラス網と記す。なお、特別な場合を除きPEの総数は $N = n \times n$ とする。

2.2 経路選択

8隣接格子網をSIMD型で使用するかMIND型で使用するかなどによって経路選択方式が異なる¹³⁾¹⁴⁾。本文ではMIND型のパケット(メッセージ)交換を仮定し、図3に示すような最短経路選択法を採用する。いま、送信PE $P(i, j)$ から受信PE $Q(k, l)$ にメッセージを送ることを考える。まず、メッセージはNE(North-East)方向に送られ、次いでE(East)方向に転送される。また、PからQ'への経路は図示のようにSW(South-West)方向に、次いでS(South)方向に行われる。このような経路選択は送信・受信PEの位置関係により一意的に決定され、

転送方向(転送されるリンク数)

あるいは

転送方向(受信PEのアドレス)

の形式で与えられる。パケットの転送は各PEのバケット・スイッチング機能により自動的に行われる。例えば、送信PE Pから受信PE QへのパケットはNE方向に送出され、その通信路上の各PEはパケットに含まれている経路情報により、NE方向に順次パケットを転送する。このとき各PEは転送されるNE方向のリンク数から1を減ずる。その結果、あるPEにおいてNE方向のリンク数が0になっていれば、そのPEは転送方向

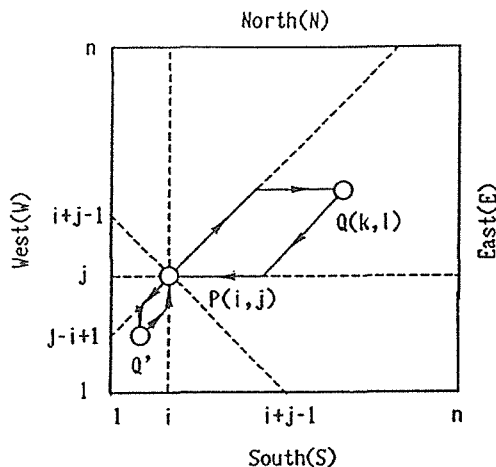


Fig. 3 A routing method.

をE方向に変えて転送し、同時にE方向のリンク数を1減じる。このようにしてメッセージを転送し、2方向のリンク数が0のパケットを受信したPEが受信PEそのものとなる。なお、転送されるリンク数の代わりに受信PEのアドレスを記入する方法も考えられる。

図1の8隣接格子網に対する最短経路選択アルゴリズムを図4に示す。図示のように、送信・受信PEの位置関係により16通りの経路が存在することがわかる。また、図2のトラス網のときは56通りの経路が存在するが、そのアルゴリズムは付録図A1に示す。

3. 評価尺度の算出

3.1 各種評価尺度

網を評価する場合、一般的な意味での最適な結合方式は存在しない。したがって、いくつかの尺度で網を評価し、応用目的に合った性能の良い方式を選択する必要がある。本文では文献¹⁵⁾¹⁶⁾を参考にし、重要と思われる次の10の評価尺度を考える。以下、各評価尺度について説明するが、より詳しくは上述の文献を参照されたい。

(1) 接続数 (degree of a node) : G

結合網を構成している1個のPEに接続されているリンク数、ハードウェア量を計る目安となる。

(2) 全リンク数 (total number of links) : L

網の全リンク数。

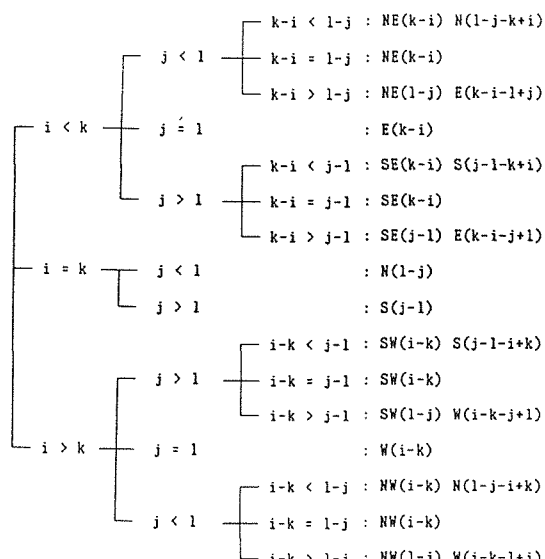


Fig. 4 The shortest path routing algorithm.

(3) 最大距離 (diameter) : D

通信する任意の2つのPE間の最短経路を構成するリンク数の最大値で定義される。伝送遅延を評価するための重要な尺度である。

(4) 平均距離 (average internode distance) : d

すべてのプロセッサ間距離の平均値。重要な尺度の1つである。

(5) 正規化平均距離

(normalized average distance) : s

平均距離とトレードオフの関係にある接続数によって重み付けした平均距離で、「平均距離・接続数」で定義される。

(6) メッセージ伝送密度

(message traffic density) : t

「平均距離・全PE数/全リンク数」で定義される。

各リンクの伝送密度を評価する。

(7) 平均中継量 (average number of messages switched by a processor) : r

あるPEにおいて、そのPEを経由する自分以外のPE同志を結ぶ通信路の数をそのプロセッサの中継量と呼び、全PEの中継量の平均値を平均中継量という。重要な尺度の1つである。

(8) 最大中継量 (maximum number of messages switched by a processor) : R

中継量の最大のものを最大中継量という。網の通信ボトルネックを評価する。

(9) 耐故障性 (fault tolerance) : F

他のPEとの通信が不可となる最小の故障リンク数で、応用分野によっては非常に重要な尺度である。

(10) 網コスト (cost of a structure) : C

「最大距離・接続数」で定義される。(5)の項目より距離の重みを増した尺度となる。

3.2 評価尺度の算出

(a) 8隣接格子網

8隣接格子網のように正則¹⁶⁾でない網の場合、評価尺度によっては計算が長くなる。以下、順を追って10の尺度を求める。

(1) 接続数

$$G = (8n^2 - 12n + 4) / n^2 \quad (1)$$

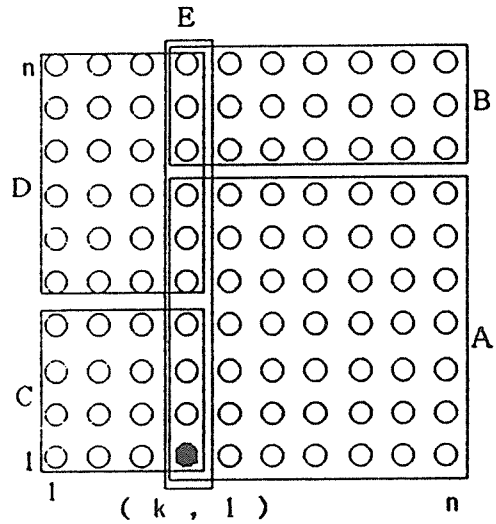


Fig. 5 Partition of the processor array for calculation of internode distance.

(2) 全リンク数

$$L = 4n^2 - 6n + 2 \quad (2)$$

(3) 最大距離

$$D = n - 1 \quad (3)$$

(4) 平均距離

まず始めに、全てのPE間距離を計算するため、(K, l)のPEから他の全てのPEまでの距離を求める。図5のようにA, B, C, D, Eの5つの領域に分けた時、それぞれの領域内にある全てのPEまでの距離は次のようになる。

$$A: \sum_{i=1}^{n-k} i(2i+1) \equiv A_d \quad (4)$$

$$B: \{n - (k-1)\} \{(k-1)n - \sum_{i=1}^{k-1} i\} \equiv B_d \quad (5)$$

$$C: \sum_{i=1}^{k-1} i(2i+1) \equiv C_d \quad (6)$$

$$D: k \sum_{i=k}^{n-1} i \equiv D_d \quad (7)$$

$$E: \sum_{i=1}^{n-1} i \equiv E_d \quad (8)$$

よって、(k, l)のPEから他の全てのPEまでの距離は、

$$A_d + B_d + C_d + D_d + E_d \equiv \alpha \quad (9)$$

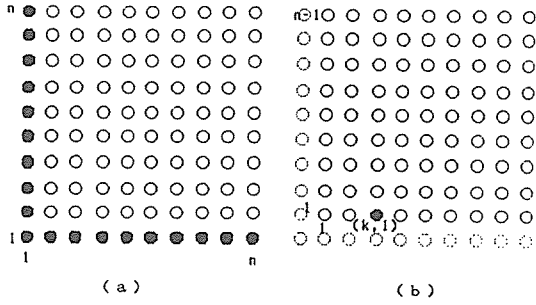


Fig. 6 A calculation method for internode distance.

となる。したがって、全てのPEからの距離を計算するために、kを1からnまで変化させその総和を得ればよいが、例えば、(1, 1)から(3, 1)までの距離と(3, 1)から(1, 1)までの距離を重複して計算してしまうので、どのPE間も重複して計算しないようにするためには、補正項

$$\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{k-1} i \equiv a_c \quad (10)$$

を加える必要があり、結局、

$$\sum_{k=1}^n \{a - a_c\} \quad (11)$$

となる。次に、図6(a)のように1行目の全てのPEからの距離を考える。これは、式(11)を2倍し、重複して計算されている(1, 1)のPEからの距離を補正することによって求められる。このときの補正項は

$$\sum_{i=1}^{n-1} i(2i+1) \equiv b_c \quad (12)$$

となり、さらに、1行目のそれぞれのPEから1列目のそれぞれのPE(例えば、(3, 1)から(5, 1)と(5, 1)から(3, 1)までの距離が重複して計算されているので次の補正項

$$\sum_{k=2}^n \{(k-1)^2 + \sum_{i=k}^{n-1} i\} \equiv c_c \quad (13)$$

を考慮すると、結局

$$\sum_{k=1}^n \{a - a_c\} - b_c - c_c \quad (14)$$

となる。すべてのPEについて計算するために、図6(a)の場合から既に計算されている1行1列を取り除き、図6(b)のように新たに座標を付けて前と同様の計算を行う。これは式(14)においてnを(n-1)に変えれば計算できる。以下、同様にし

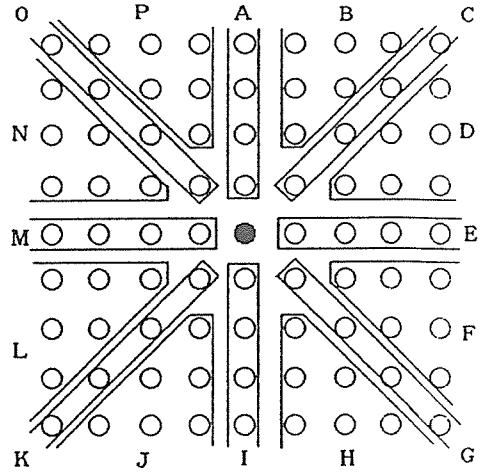


Fig. 7 Relative locations between sending and receiving PEs.

て、(n-2), (n-3), …… , 3, 2についても計算できる。最終的に全てのPE間の距離の総和は

$$\sum_{m=2}^n [2 \sum_{k=1}^m \{a - a_c\} - b_c - c_c] = n(n+1)(n-1)(7n^2+2)/30 \quad (15)$$

と計算できる。ところでn×n個から2個取る組合せは

$$n^2(n^2-1)/2$$

通りあるので、平均距離は

$$d = (7n^2+2)/15n \quad (16)$$

と求められる。

(5) 正規化平均距離

$$s = (7n^2+2)(8n^2-12n+4)/15n^3 \quad (17)$$

(6) メッセージ伝送密度

$$t = n(7n^2+2)/15(4n^2-6n+2) \quad (18)$$

(7) 平均中継量

中継量を計算するためにx, y(横, 縦)の方向のPE数を偶数個として、それぞれ1, 2, 3, …… 2mと番号を付け(i, J)のPEで中継量を考える。図7のように、(i, j)のPEを中心に結合網を16の領域に分けたとき、経路選択法によって送信PEの集合と受信PEの集合は表1のよう

Table 1 Combinations of sending and receiving PEs.

送信PE	受信PE
P U A U B	I
L U M U N	E
H U I U J	A
D U E U F	M
C	I U J U K U L U M
O	E U F U G U H U I
K	A U B U C U D U E
G	M U N U O U P U A

に8通り存在する。この時、送信側PE数を|S|、受信側PE数を|D|とすると、(i, j)での中継量は|S|と|D|を掛け合わせたものであるから、8通りの場合についてそれぞれ中継量を計算する。

$$\begin{aligned}
 & |PUAUB| \cdot |I| \\
 &= \{4m^2 - (1/2)(2m - i + j - 1)(2m - i + j) \\
 &+ j(j - 1) - (1/2)(i + j - 2)(i + j - 1) \\
 &- (2m + j - 1)(j - 1)\} (j - 1) \tag{19}
 \end{aligned}$$

同様にして、

$$\begin{aligned}
 & |LUMUN| \cdot |E| \\
 &= \{(1/2)(i + j - 2)(i + j - 1) \\
 &- (j - 1)^2 - (j - 1)\} (2m - i) \tag{20}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & |HUIUJ| \cdot |A| \\
 &= (j - 1)^2 (2m - j) \tag{21}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & |DUEUF| \cdot |M| \\
 &= \{(1/2)(2m - i + j - 1)(2m - i + j) \\
 &- (j - 1)^2 - (j - 1)\} (i - 1) \tag{22}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & |C| \cdot |IUJUKULUM| \\
 &= (2m - i)(ij - 1) \tag{23}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & |O| \cdot |EUFUGUHUI| \\
 &= (i - 1)\{(2m - i + 1)j - 1\} \tag{24}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & |K| \cdot |AUBUCUDUE| \\
 &= (j - 1)\{(2m - j + 1)(2m - i + 1) - 1\} \tag{25}
 \end{aligned}$$

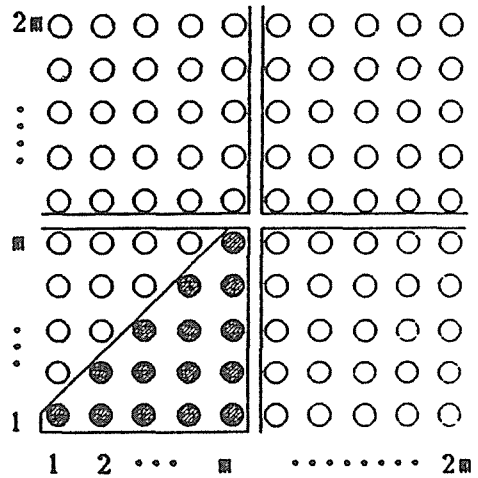


Fig. 8 A calculation method for the number of messages switched by a processor in case of an even number N.

$$\begin{aligned}
 & |G| \cdot |MUNUOUPUA| \\
 &= (j - 1)\{(2m - j + 1)i - 1\} \tag{26}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & |S| \cdot |D| = |PUAUB| \cdot |I| \\
 &+ |LUMUN| \cdot |E| \\
 &+ |HUIUJ| \cdot |A| \\
 &+ |DUEUF| \cdot |M| \\
 &+ |C| \cdot |IUJUKULUM| \\
 &+ |O| \cdot |EUFUGUHUI| \\
 &+ |K| \cdot |AUBUCUDUE| \\
 &+ |G| \cdot |MUNUOUPUA| \\
 &= -j^3 - (3m - 3/2)j^2 - (m - 5/2)i^2 \\
 &+ (6m^2 - 2m - 5/2)j \\
 &+ (2m^2 - 4m - 5/2)i - 5i^2j \\
 &+ (10m + 5)ij - 8m^2 + 2 \tag{27}
 \end{aligned}$$

故に、図8の斜線部分で示される領域内にある全てのPEの中継量の総和は、

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^1 |S| \cdot |D| \\
 &= m(112m^4 + 15m^3 + 140m^2 - 15m + 28)/60 \tag{28}
 \end{aligned}$$

となる。この結合網は図8のように、x, y方向のPE数がそれぞれm個の4つの領域に分けることができる。それぞれの領域内にあるPEの中継

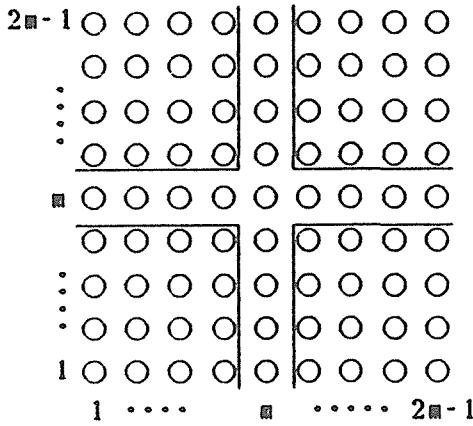


Fig. 9 A calculation method for the number of messages switched by a processor in case of an odd number N.

量の総和は同じであるから、結合網全体の中継量を求めるには式(28)を2倍し、重複して計算されている $i = j$ のPEについて補正をした後4倍すればよい。このときの補正項は、

$$\sum_{i=1}^m \{-6i^3 + (6m+9)i^2 + (8m^2 - 6m - 5)i - (8m^2 - 2)\} = m(9m^3 - 8m^2 - 3m + 2)/2$$

となるので、結合網全体の中継量は、

$$4m(56m^4 - 60m^3 - 10m^2 + 15m - 1)/15 \quad (29)$$

と求められる。全PE数は $N = 2m \times 2m$ だから、式(29)に $m = \sqrt{N}/2$ を代入して、Nで割ると、平均中継量が求められる。したがって、平均中継量 r は

$$r = (7N^{3/2} - 15N - 5N^{1/2} + 15 - 2N^{-1/2})/15 \quad (30)$$

となる。

x, y 方向のPE数が奇数個の場合については、図9のように座標をつけて同様に計算でき、その値は偶数個の場合と同じである。

(8) 最大中継量

図8で中継量が最大になるのは $(m, m), (m, m+1), (m+1, m), (m+1, m+1)$ のPEである。従って最大中継量は式(27)より

$$R = N^{3/2} - (3/4)N - (7/2)N^{1/2} + 2 \quad (31)$$

となる。 x, y 方向のPE数が奇数個の場合に中継量が最大になるのは、 (m, m) のPEで、そのときの最大中継量は

$$R = N^{3/2} - N - N^{1/2} + 1 \quad (32)$$

となる。

(9) 耐故障性

$$F = 3 \quad (33)$$

(10) 網コスト

$$C = (8n^2 - 12n + 4)(n - 1)/n^2 \quad (34)$$

(b) 8隣接格子トラス網

トラス網の場合は正則な網であるので、比較的簡単に各尺度を求めることができる。トラス網の各評価尺度であることを明確にするため、各記号に添字 t を付け、8隣接格子網の場合と区別する。

(1) 接続数

$$G_t = 8 \quad (35)$$

(2) 全リンク数

$$L_t = 4N \quad (36)$$

(3) 最大距離

$$D_t = n/2 \quad (37)$$

ここで、 x は x より小さい最大の整数である。

(4) 平均距離

$$d_t = \begin{cases} n/3 & (n: \text{奇数}) \\ n(2n^2 - 1)/\{6(n^2 - 1)\} & (n: \text{偶数}) \end{cases} \quad (38)$$

と求められるが、偶数の場合にも $n/3$ に近似できるので、以下、 $d_t = n/3$ とする。

(5) 正規化平均距離

$$S_t = 8n/3 \quad (39)$$

(6) メッセージ伝送密度

$$t_t = n/12 \quad (40)$$

(7) 平均中継量

$$r_t = (n^3 - 3n^2 - n + 3)/6 \quad (41)$$

Table 2 Comparison of performance measures between four kinds of networks.

評価項目 \ 結合網	8隣接格子	8隣接格子 トーラス網	4隣接格子 トーラス網	2進n-キューブ
接続数: G	8	8	4	$\log N$
全リンク数: L	$4N$	$4N$	$2N$	$0.5N \log N$
最大距離: D	\sqrt{N}	$\sqrt{N}/2$	\sqrt{N}	$\log N$
平均距離: d	$7\sqrt{N}/15$	$\sqrt{N}/3$	$\sqrt{N}/2$	$0.5 \log N$
正規化平均距離: s	$56\sqrt{N}/15$	$8\sqrt{N}/3$	$2\sqrt{N}$	$0.5 \log^2 N$
メッセージ密度: t	$7\sqrt{N}/60$	$\sqrt{N}/12$	$\sqrt{N}/4$	1
平均中継量: r	$7N^{3/2}/15$	$N^{3/2}/6$	$N^{3/2}/4$	$0.25 \log N$
最大中継量: R	$N^{3/2}$	$N^{3/2}/6$	$N^{3/2}/4$	$0.25 \log N$
耐故障性: F	3	8	4	$\log N$
網コスト: C	$8\sqrt{N}$	$4\sqrt{N}$	$4\sqrt{N}$	$\log^2 N$

(8) 最大中継量

$$R_t = r_t \quad (42)$$

(9) 耐故障性

$$F_t = 8 \quad (43)$$

(10) 網コスト

$$C_t = 4n \quad (44)$$

4. 他の網との比較

以上の結果をまとめて表2に示すが、比較のため文献15), 17)を参考にして4隣接格子トーラス網、2進n-キューブの特性も記入している。ただし、同表は各評価尺度を近似式として表わしている項目もあるので注意されたい。同表より8隣接格子/トーラス網と4隣接格子トーラス網においてはその評価尺度算出式の最初の項のオーダーが全項目について等しいことがわかる。例えば、平均距離は $O(\sqrt{N})$ である。これは8隣接格子/トーラス網にしても4隣接格子トーラス網にしてもお互いに格子網としての共通の性質を持つためと考えることができる。一方、2進n-キューブの場合は $O(\log N)$ か $O(\log^2 N)$ であり、前3者とは異なる性質を持つ。

より詳細な比較を行うために代表的な評価尺度である平均距離、平均中継量および網コストとPE数Nとの関係を図10から図12に示す。同図より8隣接格子トーラス網は2進n-キューブと競合

する特性を持つことがわかる。ただし、PEの数が増加すると2進n-キューブの特性が良くなる傾向にあり、PE数が128~256個がその境界になるようである。これは表2から明らかのようにPE数が256のとき両者の接続数が8となりPE数が255以下なら8隣接格子トーラス網の、257以上なら2進n-キューブの接続数が大きくなること、すなわち接続数と密接に関連していることを窺わせる。

8隣接格子網は4隣接格子トーラス網と競合するが、この競合関係は上述の8隣接格子トーラス網と2進n-キューブの場合と異なり、評価尺度により両者の優劣が変わる。表2と図10~図12で比較すると、PE数にはかかわらず、平均距離やメッセージ伝送密度などでは8隣接格子網が、平均中継量や網コストなどでは4隣接格子トーラス網が優れていることがわかる。

5. おわりに

8隣接格子/トーラス網を最短経路選択法に基づいて性能評価し、他の結合網と比較した。その結果、8隣接格子/トーラス網と4隣接格子トーラス網は基本的に格子網としての共通の性質を持つことを明らかにした。また、8隣接格子トーラス網は2進n-キューブと競合する特性を持ち、PE数が少ないと8隣接格子トーラス網の特性が、PE数が増加すると2進n-キューブの特性が良くなる傾向にあり、PE数が128~256個がその境界になることを示した。一方、8隣接格子網は4

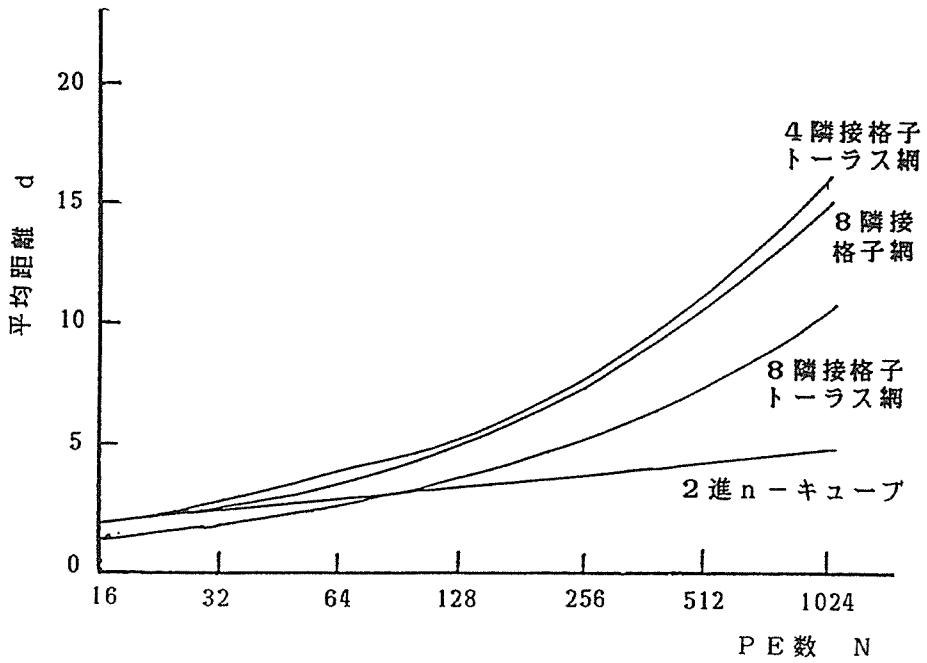


Fig.10 Number of processors vs. average internode distance.

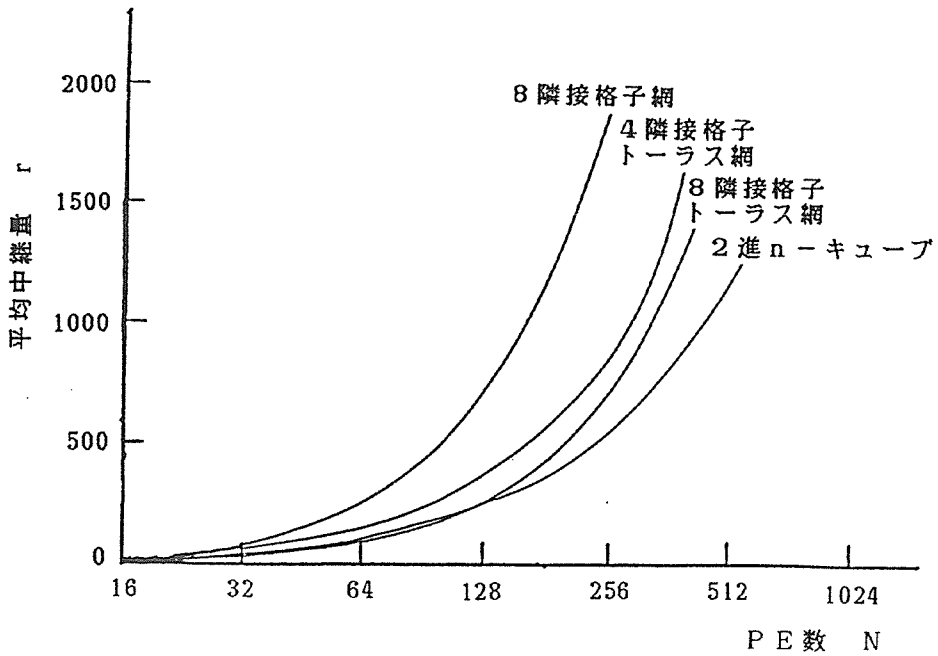


Fig.11 Number of processors vs. average number of messages switched by a processor.

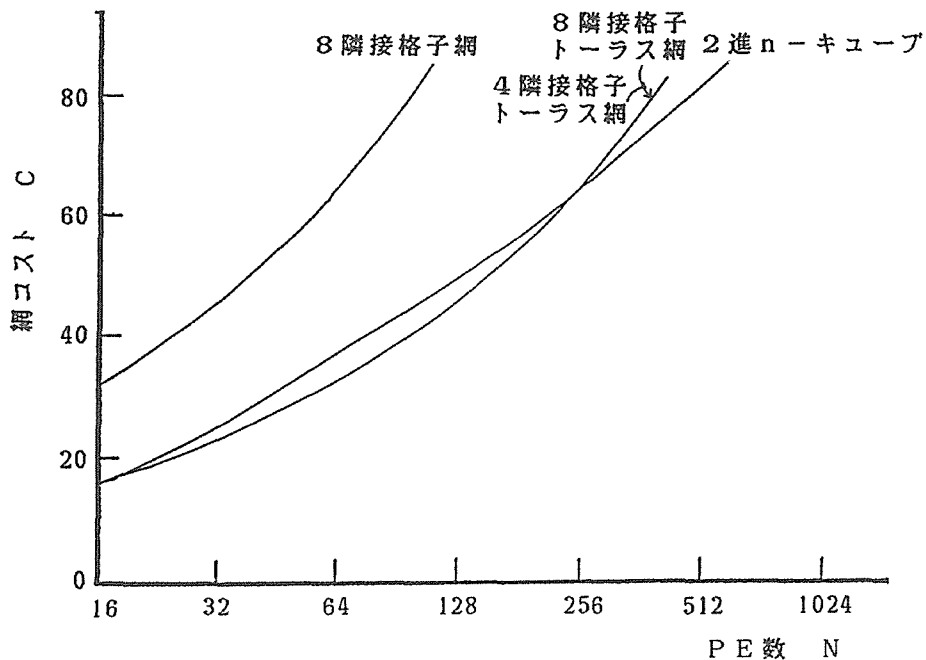


Fig.12 Number of processors ve. cost of structure

隣接格子トーラス網と競合する関係にあり、評価尺度により両者の優劣が決まることを示した。

今後、8隣接格子/トーラス網の特性に適合したアルゴリズムを開発したい。

謝辞

研究を手伝ってくれた卒研究生の木村孝昭君にお礼申し上げる。

参考文献

- 1) Gajski, D.D. and Peir, J. : Essential Issues in Multi-Processor Systems, Computer, Vol.18, No.6, pp.9-28(1985).
- 2) 高橋義造：並列処理マシンの開発の現状, 情報処理, Vol.28, No.1, pp.10-18(1987).
- 3) ミート, C., コンウェイ, L. 著, 菅野, 榊(訳) : 超LSI入門, 培風館(1981).
- 4) 白川, 影山, 阿部, 星野：並列計算機PAX-128, 信学論, Vol. J67-D, No.8, pp.853-860(1984).
- 5) 前田 明：画像処理マシン, 情報処理, Vol.28, No.1, pp.19-26(1987).
- 6) Wittie, L.D. : Communication Structures for Large Networks of Microcomputers, IEEE Trans.Comput., Vol. C-30, No.4, pp. 264-273(1981).
- 7) Reed, D. A. and Grunwald, D. G. : The Performance of Multicomputer Interconnection Networks, Computer, Vol.20, No.6, pp.63-73(1987).
- 8) Snyder, L. : Introduction to the Configurable Highly Parallel Computer, Computer, Vol.15, No.1, pp47-56(1982).
- 9) 樹下, 浅田, 唐津：VLSI の設計II, 岩波書店(1985).
- 10) Schneck, P.B., Squires, S.L. and Wallgren, K. : Parallel Processor Programs in the Federal Government", Computer, Vol.18, No.6, pp43-56(1985).
- 11) 丹野州宣：8-隣接格子結合並列計算機によるソーティング, 情報処理学会アルゴリズム研究会 5-9, pp.65-70(1989).
- 12) 丹野, 難波, 山本：8-隣接格子網の特性と並列ソーティング, 並列処理シンポジウム, pp.9-16(1989).
- 13) Barnes, G.H. : The Illiac IV Computer, IEEE Trans. Comput., Vol. C-17, No.8,

