

マシンルームにおける空間光通信端末のレイアウト解析

藤原 一毅^{1,a)} FICHET, Alban^{1,b)} 鯉淵 道紘^{1,c)}

概要：データセンター等のラック上の空間を用いた光無線インターコネクトを想定し、光無線端末の最適な配置を検討する。端末の向きを変えるだけでネットワークを再構成できるよう、できるだけ多くの端末同士が互いを直接見通せるような配置が望ましい。本報告では、ラック上の空間を活用した 15 通りの配置パターンを提示し、レイトレイサを用いて端末同士の見通し率を解析した。

IKKI FUJIWARA^{1,a)} ALBAN FICHET^{1,b)} MICHIMIRO KOIBUCHI^{1,c)}

1. はじめに

最近の HPC (High Performance Computing) システムの相互結合網は、ラック内のリンクは電気ケーブルで、ラック外のリンクは光ケーブルで構築されることが多い。システムの大規模化が進むにつれて、(1) 物理的なケーブルの総量が増大し、(2) 故障ケーブルの代替が困難となり、(3) アプリケーション毎に異なる通信パターンに適したトポロジと物理的な制約にもとづいて設計されたトポロジとの乖離が大きくなっている。

(1) に関しては、例えば、初代地球シミュレータの配線長が 2,000km を大きく超え、京コンピュータが約 1,000km に達していることを考えると、施工性・メンテナンス性・省資源性の観点から、スーパーコンピュータの配線長を抑える技術が今後重要となる可能性がある。加えて、ラック間ケーブルが増えるにつれて、そのバックアップケーブル数も増加する。これらはシステム構築時に設置する必要があるため、負担が無視できない。

(2) に関しては、現状では故障ケーブルの発生を想定して事前にバックアップケーブルをシステム導入時に設置することが行われる。しかし、システム導入時に発生しうるすべてのケーブル故障を見越すことは難しい。

(3) については、理想的には、対象としたアプリケーションの通信パターンに適したトポロジを採用することが望ま

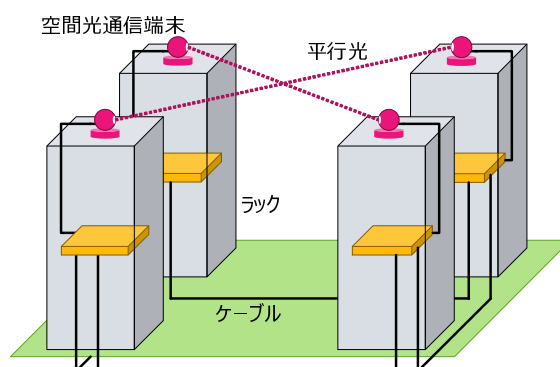


図 1 空間光通信を用いた HPC システム

Fig. 1 HPC system with free-space optical links

しい。しかし、異なる通信パターンを持つアプリケーションを実行する既存の HPC システムでは、そのようなトポロジの選択は難しい。したがって、トーラス、ツリーなどのネットワークトポロジの中から [1] [2]、直径、スイッチの次数、ルーティングの容易性、耐故障性、レイアウトとコストなどの点でトレードオフを考慮した上で、HPC システム毎に設計者の総合的な判断により異なるトポロジが選択されている（例：京コンピュータでは 6 次元トーラス、TSUBAME 2.0 では Fat ツリー）。したがって、システムが採用したトポロジ毎にユーザが並列アプリケーションの最適化を行うことが必要となる。

これまで、我々は、これら 3 つの問題を緩和するため、ラック間リンクを光ケーブルのみならず、空間光（無線）通信により構築する可変トポロジである相互結合網を提案、評価してきた（図 1）。具体的には、安価かつ安定的に動かすために、イーサネットもしくは InfiniBand の光ケーブルを無線化することで空間光リンクを構築する。そして、

¹ 国立情報学研究所
National Institute of Informatics, 2-1-2 Hitotsubashi, Chiyoda-ku,
Tokyo 101-8430, Japan

a) ikki@nii.ac.jp

b) alban.f@gmail.com

c) koibuchi@nii.ac.jp

この空間光リンクを用いてネットワークポロジとそのレイアウトを次のように実現する．(1) ラック間の多数のリンクを，ラックと天井間のフリースペースを利用して空間光により構築することで配線長を削減する．(2) ラック間リンクの接続先を変更することでアプリケーションの通信パターン毎にトポロジを最適化可能とする．空間光リンクは，遮蔽物があると通信が途絶える．そこで，本相互結合網では，通信端末のレイアウトを工夫することでこの問題を直接的に解決する．なお，本空間光リンクのデータ転送において，照明の影響などを受けないことは確認している．

本報告では，1つのマシンルームにおいて，できるだけ多くの空間光通信端末同士を遮蔽物なしに向き合わせる事が可能なレイアウトを提示する．

2. 関連研究

2.1 ネットワークポロジ

HPC システムのネットワークポロジとして，トーラス，メッシュ，ハイパーキューブを含む k -ary n -cubes や，Fat ツリーが広く利用されてきた． k -ary n -cubes の他にも各種の規則的な直接網が提案されており，直径と次数の点でトレードオフを持つ．例えば De Bruijn (3,072 ノードにおいて直径 12，次数 4)，Kautz (同 11，4)，Pradhan (同 12，5)，スターグラフ (5,040 ノードにおいて同 7，6)，パンケーキグラフなどである [1]．さらに，我々はランダムなショートカットリンクがネットワークの直径と平均距離を劇的に小さくする現象に着目し，HPC システムのネットワークへの応用を探究している．これまでの研究 [2] において我々は，ランダムトポロジが同じ次数の規則的なトポロジに比べて低遅延であることを示した．また，HPC システムの高次元ネットワークの場合，乱数によるネットワーク性能のばらつきが十分小さいことを確かめた．

HPC システムのネットワークは高バンド幅 (リンク当たり 10～40Gbps 以上) を必要とするため，ラック内程度の短いリンクには安価な電気ケーブルを利用可能だが，ラック間を結ぶ長いリンクには光ケーブルを使わざるをえない．ドラゴンフライ網 [3] はこの点に着目し，トポロジをラック内とラック外の 2 階層に分け，複数のルータでひとつの仮想ルータを構成する．ドラゴンフライの各階層には，ランダムトポロジを含め，多様なトポロジを埋め込むことができる．

本報告において十分な数の空間光通信端末を設置した場合，これらのトポロジを実現する設計が可能である．

2.2 データセンター向け電波通信技術

60GHz 電波リンクは 2.4GHz 802.11b/g に対し 80 倍のバンド幅を持つことが報告されている．60GHz 電波リンクは端末間を障害物なく向き合わせる必要があるため，データセンターに適用する場合，本研究と同様にラック上のス

表 1 空間光通信と 60GHz 電波通信の比較

Table 1 Comparison between free-space optical and 60GHz radiowave communications

	空間光	60GHz 電波
バンド幅	高	低
干渉	無	有
捕捉	難	易

ペースを用いて有向アンテナを設置することとなる [4]．ただし，この有向アンテナのレイアウトは，干渉，速度低下などをふまえて決定しなければならないため，本報告が対象とする空間光通信端末のレイアウトとは大きく異なる．

さらに，ミラーを用いた反射により，障害物を迂回する通信路の設定についても研究が行われている [5]．しかし，帯域が数 Gbps に留まる点やエラーレートの問題から，HPC 用途ではホットスポットの一時的な退避や故障箇所の一時的な迂回などの用途に留まる可能性が高い．MIMO (Multi Input Multi Output) 化することで帯域が増加する可能性があるが，現時点ではまだ実用化までは進んでいない．

2.3 空間光通信技術

電波より高い周波数領域 (数百 THz 帯) を用いる空間光通信技術は，ビル間・サテライト間通信を対象として，捕捉・追尾・指向の 3 つの要素技術について様々な研究が行われてきた [6–9]．

我々は，空間光通信をデータセンター / スーパーコンピュータ領域に適用するために，想定する通信距離を数十メートルに限定し，汎用のイーサネット規格である 40Gbps-LR (波長 1310nm) の光ファイバをコリメーターレンズに直接接続する空間光通信端末を試作し [10]，その実現性を議論してきた．空間光通信と 60GHz 電波通信の比較を表 1 に示す．

3. 空間光通信端末の配置方法

本報告では，図 1 に示すような空間光通信を用いた HPC システムにおいて，設置場所の空間的制約を満たしつつ，できるだけ多くの空間光通信端末同士が直接通信できるような端末の配置方法を提示する．端末同士が空間光を用いて直接通信するためには，送信端末と受信端末との間に遮蔽物 (別の端末やその支柱など) があってはならない．与えられた設置空間を効率的に利用し，相互に見通し可能な端末ペア数を最大化することが要点となる．

3.1 問題定義

- 「空間光通信端末」あるいは単に「端末」とは，光ファイバに接続されたコリメーターレンズと，コリメーターレンズの方向を調節する駆動機構からなる装置を意味する．光ファイバ内を進んできたレーザー光はコリメー

タレンズによって平行光に変換されて空間中に射出され、空間中を直進したのち、別のコリメータレンズに入射して再び光ファイバ内へ導かれる。コリメータレンズは任意の方向へ向けることができるものとする。本報告は端末自体の構造には言及しない。

- 壁などによって仕切られていない一続きの空間（マシンルーム）内に存在する端末群を対象とする。複数の部屋や建物に分散した端末群は対象としない。
- マシンルーム内のラック群は格子状に並んでいると想定し、ラックの長辺方向を X 軸，短辺方向を Y 軸とする。
- マシンルーム内のすべてのラックの上面は同一水平面上にあると想定する。
- 端末はマシンルーム内のラックに固定され、ラック上面とマシンルーム天井との間の空間に配置されることを想定する。
- 駆動機構を含む端末全体が、レンズの向きにかかわらず、半径 r の球体内に収まるように設計されるものとし、レンズの送受光部は球体の中心にあるものとする。
- 端末を高い場所に設置する場合、半径 s の円柱形の支柱をラックの上に鉛直に立て、その上に端末を載せる。この場合、 r は支柱の高さを含まない。

3.2 考え方

ラック群が格子状に配置されているものとし、Y 方向（長辺方向 / 奥行方向）と X 方向（短辺方向 / 幅方向）に分けて考える。同じ列内にある端末同士の見通しを確保するためには、他の端末が遮蔽物とならないよう、端末の位置をずらせばよい。端末の位置をずらす方法は、X 方向と Y 方向のそれぞれについて、次の 3 通りが考えられる。

- ランダムに水平にずらす。X 方向については各端末の Y 座標をランダムに変化させ、Y 方向については各端末の X 座標をランダムに変化させる。
- 弓形に水平にずらす。X 方向については、はじめにマシンルーム中央の 2 個の端末をラックの端に置き、3 個目の端末は 1 個目の端末から見通せるように Y 座標をずらして置き、4 個目の端末は 2 個目の端末から見通せるように Y 座標をずらして置き、以下同様に Y 座標をずらしながらマシンルームの端へ向かって端末を置いていく。Y 方向については、同様に X 座標をずらしながら端末を置いていく。端末の位置はラックの直上に限らず、通路に張り出してもよい。
- 弓形に鉛直にずらす。はじめにマシンルーム中央の 2 個の端末を置き、3 個目の端末は 1 個目の端末から見通せるように Z 座標をずらして（支柱を介して高い位置に）置き、4 個目の端末は 2 個目の端末から見通せるように Z 座標をずらして置き、以下同様に Z 座標をずらしながらマシンルームの端へ向かって端末を置いていく。

表 2 空間光通信端末の配置パターン

Table 2 Possible patterns of FSO terminal layout

	配置		見通し		レンズ 所要高さ
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	
パターン 0	直線	直線	×	×	低
パターン 1	直線	ランダム	×		低
パターン 2	直線	弓形水平	×		低
パターン 3	直線	弓形鉛直	×		高
パターン 4	ランダム	直線		×	低
パターン 5	ランダム	ランダム			低
パターン 6	ランダム	弓形水平			低
パターン 7	ランダム	弓形鉛直			高
パターン 8	弓形水平	直線		×	低
パターン 9	弓形水平	ランダム			低
パターン 10	弓形水平	弓形水平			低
パターン 11	弓形水平	弓形鉛直			高
パターン 12	弓形鉛直	直線		×	中
パターン 13	弓形鉛直	ランダム			中
パターン 14	弓形鉛直	弓形水平			中
パターン 15	弓形鉛直	弓形鉛直			最高

ていく。

これに「直線」（端末の位置をずらさない）を加えた 4 通りを各軸方向の配置方法とすると、X 方向に 4 通り × Y 方向に 4 通り = 計 16 通りの組合せが考えられる。

3.3 配置パターン

すべての配置方法とその特性を表 2 に示す。「見通し」は各軸方向の見通しの良さ（遮蔽物の少なさ）を定性的に示し、> > × の順で望ましい。「レンズ所要高さ」は端末を高さ方向にずらす場合に必要の高さを示し、低い方が望ましい。代表的な配置方法の例を図 2～5 に示す。これらの配置方法の構成手順を以下に述べる。

3.3.1 パターン 0：直線 × 直線（ベースライン）

パターン 0（図 2）は、すべての端末を各ラック上の同じ位置に置き、かつ、すべての端末を同じ高さとする配置である。この自明な配置方法を用いると、ラック群が格子状に配置されている場合、同じ列内で 2 個以上離れた端末同士は間にある他の端末が遮蔽物となるため通信できない。

3.3.2 パターン 5：ランダム × ランダム

パターン 5（図 3）は、X 方向と Y 方向についてそれぞれ、端末をランダムに水平にずらして置く配置である。パターン 5 を用いると、X 方向と Y 方向の各列内については、すべての端末ペアの見通しは保証されない。本パターンはマシンルームの天井高による制約を受けず、任意の数の端末を置くことができる。

3.3.3 パターン 14：弓形水平 × 弓形鉛直（シアター型）

パターン 14（図 4）は、X 方向については端末を弓形に水平にずらして置き、Y 方向については端末を弓形に鉛直にずらして置く配置である。パターン 14 を用いると、す

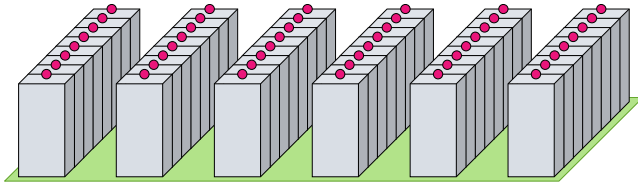


図2 パターン0：直線×直線（ベースライン）配置
Fig. 2 Pattern 0: straight/straight (baseline) layout

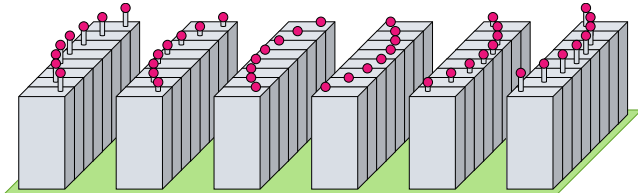


図4 パターン14：弓形鉛直×弓形水平（シアター型）配置
Fig. 4 Pattern 14: vertical-curve/horizontal-curve ("theater") layout

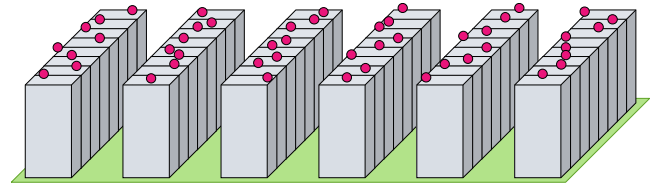


図3 パターン5：ランダム×ランダム配置
Fig. 3 Pattern 5: random/random layout

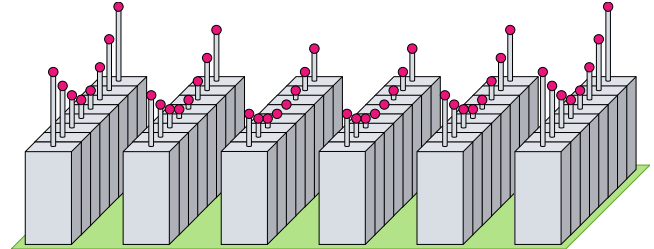


図5 パターン15：弓形鉛直×弓形鉛直（すりばち型）配置
Fig. 5 Pattern 15: vertical-curve/vertical-curve ("bowl") layout

すべての端末ペアの見通しが確保され、任意の端末同士で空間光通信が可能となる。本パターンを適用可能な端末数は、X方向についてはラックの寸法によって、Y方向についてはマシンルームの天井高によって、それぞれ制約を受ける。端末の最大高さはY方向の所要高さに等しく、後述のパターン15に比べて大幅に低いため、天井高の制約が厳しいシステムや端末数の多いシステムにも適用できる。

3.3.4 パターン15：弓形鉛直×弓形鉛直（すりばち型）

パターン15は、各端末をラック上の同じ平面位置に置き、X方向とY方向についてそれぞれ、端末の高さを弓形に鉛直にずらす配置である。パターン15を用いると、すべての端末ペアの見通しが確保され、任意の端末同士で空間光通信が可能となる。本パターンを適用可能な端末数はマシンルームの天井高によって制約を受ける。端末の最大高さはX方向の所要高さとはY方向の所要高さの和に等しく、全パターン中最大であるため、本パターンを適用できるのは端末数の少ないシステムに限られる。

3.4 弓形配置の所要変位量

端末を弓形にずらす場合に必要変位量（鉛直にずらす場合の所要高さ）を定量的に求めよう。一列に並んでいる端末同士の見通しを確保するには、1番目の端末から出る光が2番目の端末によって遮られてできる影の外側に3番目の端末を置けばよい。言い換えると、 $n-2$ 番目の端末の中心（発光点）を頂点とし $n-1$ 番目の端末の球体に接する円錐面上に n 番目の端末を置けばよい。端末を弓形にずらすとき、これらの端末が同一平面上にあるとすれば、端末間の位置関係は図6のように表される。さらに、各端末の設置間隔 W が固定されているならば、端末を弓形にずらす場合に必要 n 番目の端末の変位量 z_n は、最初に置いた2つの端末を $n=0,1$ として、次式によって求められる。

$$z_0 = 0$$

$$z_1 = 0$$

$$z_n = \sum_{k=1}^n h_k$$

$$h_n = 2W \tan \left(\tan^{-1} \frac{h_{n-1}}{W} + \sin^{-1} \frac{r}{\sqrt{W^2 + h_{n-1}^2}} \right) - h_{n-1}$$

ここで W は端末の設置間隔（1台のラックに1個の端末を置く場合はラックの幅または奥行に相当）、 h_n は $n-1$ 番目の端末に対する n 番目の端末の相対変位量、 z_n は n 番目の端末の絶対変位量（すなわち、1番目の端末に対する相対変位量）である。変位量の計算結果を表3に示す。

3.5 弓形配置の最大設置数

端末を弓形に水平にずらす場合、変位量がラック寸法を超えないことが制約条件となる。また、端末を弓形に鉛直にずらす場合、変位量がラック空頭（ラック上面とマシンルーム天井との間の空間の高さ）を超えないことが制約条件となる。なお、パターン15：弓形鉛直×弓形鉛直（すりばち型）の場合、Z方向の変位量はX方向に対する変位量とY方向に対する変位量の和となる。

例として、ラック空頭 $H=1200\text{mm}$ 、端末半径 $r=25\text{mm}$ 、1台のラックに1個の端末を置く条件で、パターン14：弓形鉛直×弓形水平（シアター型）を適用できる最大の端末数を求めてみよう。表3より、X方向（端末間隔 $W=2100\text{mm}$ ）に並べた7番目の端末の変位量は $1,052\text{mm}$ 、8番目は $1,404\text{mm}$ なので、ラック空頭 $1,200\text{mm}$ に収まる最大の端末数は片側7個（両側14個）である。同様に、Y方向（端末間隔 $W=600\text{mm}$ ）に並べた9番目の端末の変位量は $1,876\text{mm}$ 、10番目は $2,369\text{mm}$ なので、ラック奥行 $2,100\text{mm}$ に収まる最大の端末数は片側9個（両側18個）である。したがって、マシンルーム中心から左右に各9個、

トラック間隔 W	$h_0 = 0$	$h_1 = 2W \cdot \tan(p_0 + q_0) - h_0$	$h_2 = 2W \cdot \tan(p_1 + q_1) - h_1$
レンズ半径 r	$d_0 = W$	$d_1 = \sqrt{W^2 + h_1^2}$	$d_2 = \sqrt{W^2 + h_2^2}$
中心仰角 p_n	$p_0 = 0$	$p_1 = \arctan(h_1/W)$	$p_2 = \arctan(h_2/W)$
接線仰角 q_n	$q_0 = \arcsin(R/d_0)$	$q_1 = \arcsin(r/d_1)$	$q_2 = \arcsin(r/d_2)$
中心間隔 d_n			

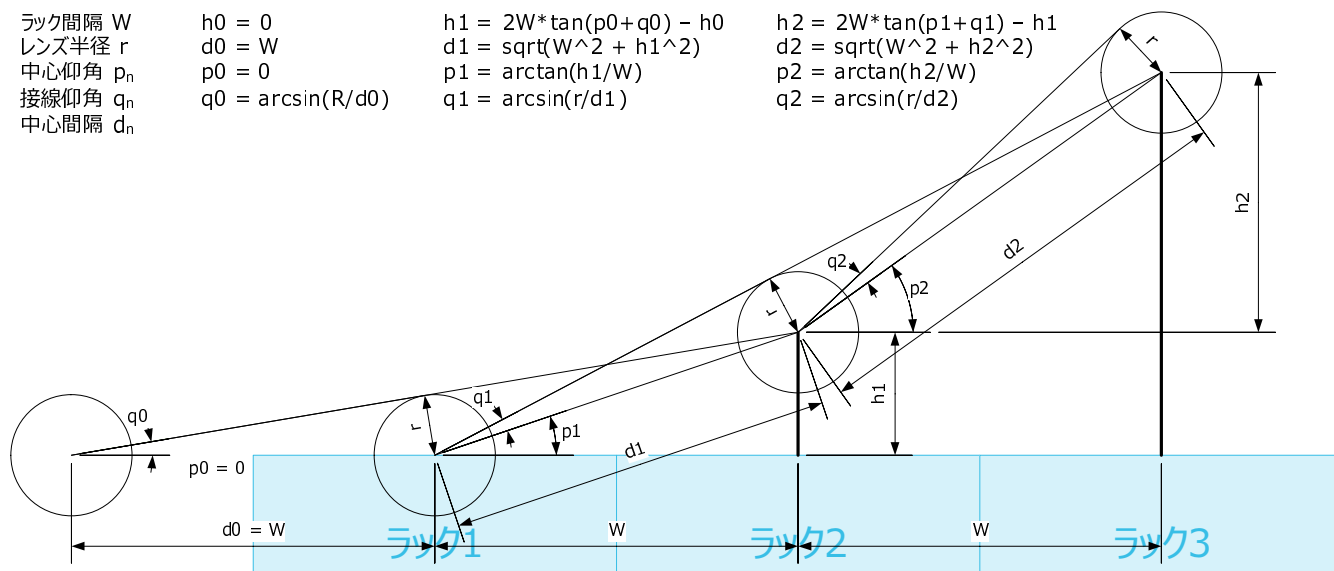


図 6 弓形に配置された空間光通信端末同士の位置関係

Fig. 6 Geometry of FSO terminals with the vertical-curve layout

表3 弓形配置の所要絶対変位量 z_n (単位: mm)**Table 3** Offsets of FSO terminals required by the curved layout (mm)

	$r = 15$	$r = 20$	$r = 25$	$r = 30$	$r = 35$	$r = 40$
$n = 1$	0	0	0	0	0	0
$n = 2$	30	40	50	60	70	80
$n = 3$	90	120	150	180	210	240
$n = 4$	180	240	300	360	420	481
$n = 5$	300	400	500	601	701	802
$n = 6$	450	601	751	902	1053	1204
$n = 7$	630	841	1052	1264	1476	1688
$n = 8$	841	1122	1404	1686	1970	2255
$n = 9$	1081	1443	1806	2171	2537	2905
$n = 10$	1352	1805	2260	2716	3176	3639

	$r = 15$	$r = 20$	$r = 25$	$r = 30$	$r = 35$	$r = 40$
$n = 1$	0	0	0	0	0	0
$n = 2$	30	40	50	60	70	80
$n = 3$	90	120	150	181	211	242
$n = 4$	180	241	302	363	426	488
$n = 5$	301	403	506	610	716	823
$n = 6$	453	607	763	922	1086	1254
$n = 7$	635	853	1075	1304	1541	1786
$n = 8$	850	1143	1446	1759	2087	2431
$n = 9$	1096	1479	1876	2292	2732	3199
$n = 10$	1375	1861	2369	2908	3484	4105

奥と手前に各 6 個，合計 $(7 \times 2) \times (9 \times 2) = 252$ 個の端末が配置できることがわかる。

4. 評価

配置方法の善し悪しを測る指標として、本報告では次式で表される見通し率 V を用いる。

$$V = \frac{2L}{N(N-1)} \quad (1)$$

ここで L は相互に見通し可能な端末ペア数, N は全端末数であり, V は全端末ペア数に占める見通し可能な端末ペア数の割合を表す. 前節で提示した 16 通りの配置パターンのうち, すべての端末ペアが通信可能 (見通し率 100%) となるのはパターン 10, 11, 14, 15 のみであり, 他のパターンでは間にある端末が遮蔽物となり通信できない端末ペアが生じる (見通し率が 100% を下回る). 本節では, これら 16 通りの配置パターンについて, 端末やマシンの具体的な寸法を仮定し, システム規模に対してどの程度の見通

し率が得られるかを幾何学的に計算する.

4.1 方法

ある端末ペアが相互に見通し可能かどうかを知るには、すべての端末と支柱の位置と寸法を厳密にモデル化し、当該端末間を結ぶ光線が他の端末や支柱に遮られるかどうかを判定しなければならない。この目的のために、我々はコンピュータグラフィック用のレイトレーサである PBRT [11] を用いた。具体的な方法を以下に述べる。

- (1) 長方形のマシンルームに N 台のラックを並べた場面想定する．各ラックの上面にそれぞれ 1 個，合計 N 個の光通信端末を設置するものとして，前節で述べた配置方法に従って各端末の座標を定める．うち 1 個を受信機，1 個を送信機，他の $N-2$ 個を遮蔽物とする．
- (2) 受信機の座標に画角 0.01° のカメラを置き，送信機の座標に向ける．
- (3) 受信機以外のすべての端末の座標に半径 $r-t$ の不透

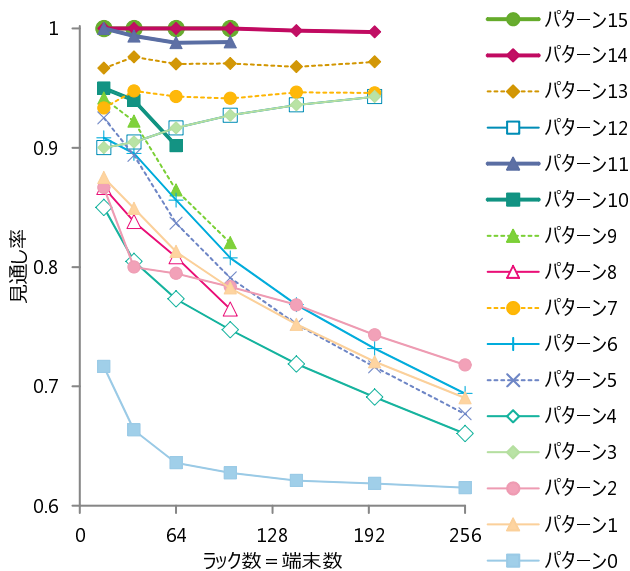


図 7 見通し率とラック数
Fig. 7 Line-of-sight ratio vs. the number of terminals

明な球体オブジェクトを置く。 t は光線の半径である。支柱がある場合は、球体の中心から鉛直下方へ半径 s の不透明な円柱オブジェクトを置く。

- (4) 送信機にあたる球体を赤色、他の球体および支柱にあたる円柱を黒色とする。
- (5) 以上の場面を記述した入力ファイルを PBRT で処理し、カメラの視野を 9×9 ピクセルのビットマップ画像としてレンダリングする。
- (6) 出力画像の中心に位置するピクセルの色を取得する。有彩色なら受信機と送信機は相互に見通し可能、無彩色なら見通し不可と判定する。

以上の手順をすべての受信機と送信機の組合せに対して実行し、見通し可能な端末ペア数 L を求める。これを式 1 に当てはめ、トータルの見通し率 V を得る。

評価に用いたパラメータを以下に述べる。ラックの平面寸法は ANSI/TIA/EIA-942 標準に基づき $X \times Y = 2100 \times 600\text{mm}$ とする (X 方向は通路幅を含む)。ラック数は $N = 16, 36, 64, 100, 144, 196, 256$ 台とし、 X 方向と Y 方向にそれぞれ $\sqrt{N}$ 台のラックを並べる。ラック空頭 (ラック上面とマシンルーム天井との間の高さ) は $H = 1200\text{mm}$ 、端末半径は $r = 25\text{mm}$ 、支柱半径は $s = 5\text{mm}$ 、光線半径は $t = 1\text{mm}$ とする。

4.2 見通し率

上述の方法によって得た見通し率を図 7 に示す。プロットが途切れているのは、そのラック数において変位量がラック寸法または空頭の制約を超えたことを示す。

この結果から、まず、パターン 14 (シアター型) とパターン 15 (すりばち型) が設計意図どおり 100% の見通し率を達成していることがわかる。第 3.3 節で述べたとおり、

パターン 15 (すりばち型) は端末の変位量が鉛直方向に重なり合うため、ラック空頭の制約が非常に厳しくなり、 $N = 100$ 規模までしか適用できない。一方、パターン 14 (シアター型) は端末の変位量を鉛直方向とラック奥行方向に分散するため制約が緩く、 $N = 196$ まで適用可能である。パターン 11 はパターン 14 と同じ設計意図に基づくものだが、端末がラック幅方向に変位するため制約が厳しくなり、パターン 15 と同じ $N = 100$ が適用限界となる。パターン 10 は端末を鉛直方向に変位させない設計であり、端末は水平面上で「中央が膨らんだ」形に並ぶ。この場合、周縁部では異なる列に属する端末同士が非常に接近し、場合によっては重なり合ってしまう場合がある。パターン 11 とパターン 10 の見通し率が 100% を下回っているのは、端末を水平方向に大きく変位させた結果、異なる列の端末同士が接近しすぎたためと考えられる。

パターン 13 とパターン 7 は、ともに鉛直弓形とランダムを組み合わせたパターンであり、 $N = 196$ まで適用可能である。 N パターン 13 は 96% 以上、パターン 7 は 93% 以上の見通し率を達成している。パターン 5・パターン 4・パターン 1 は、端末を弓形に変位させず、寸法の制約を全く受けない設計である。任意の N に適用可能である反面、 N の増加に従って見通し率は減少していく。パターン 5 の場合、 $N = 256$ における見通し率は 66% となる。パターン 0 (ベースライン) は端末を全く変位させない自明な配置である。この場合、 $N = 256$ における見通し率は 62% となる。

5. おわりに

本報告では、データセンター等のラック上の空間を利用して光無線インターコネクトを構築するケースを想定し、できるだけ多くの光通信端末同士が相互に見通し可能となるような端末の配置方法を提示した。さらに、提示した各配置方法を用いた場合の見通し率を、コンピュータグラフィック用のレイトレーサを用いて幾何学的に解析した。解析の結果、各ラック上にそれぞれ 1 個の光通信端末を置く場合、196 ラック規模のシステムですべての端末同士が互いに通信できるような配置が可能であることを確認した。今後は、各ラック上に 2 個以上の光通信端末を置く場合についても解析したい。

謝辞 本研究の一部は総務省 SCOPE 若手 ICT の援助による。

参考文献

- [1] 天野英晴：並列コンピュータ，昭晃堂 (1996)。
- [2] Koibuchi, M., Matsutani, H., Amano, H., Hsu, D. F. and Casanova, H.: A Case for Random Shortcut Topologies for HPC Interconnects, *Proc. of the International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, pp. 177–188 (2012)。
- [3] Kim, J., Dally, W. J., Scott, S. and Abts, D.: Technology-Driven, Highly-Scalable Dragonfly Topology, *Proc. of the In-*

- ternational Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, pp. 77–88 (2008).
- [4] Halperin, D., Kandula, S., Padhye, J., Bahl, P. and Wetherall, D.: Augmenting data center networks with multi-gigabit wireless links, *SIGCOMM*, pp. 38–49 (2011).
 - [5] Zhou, X., Zhang, Z., Zhu, Y., Li, Y., Kumar, S., Vahdat, A., Zhao, B. Y. and Zheng, H.: Mirror mirror on the ceiling: flexible wireless links for data centers, *SIGCOMM*, pp. 443–454 (2012).
 - [6] H. Henniger, and O. Wilfert: An Introduction to Free-space Optical Communications, *Radioengineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 203–212 (2010).
 - [7] Z. Ghassemlooy and H. Le Minh and S. Rajbhandari and J. Perez and M. Ijaz: Performance Analysis of Ethernet/Fast-Ethernet Free Space Optical Communications in a Controlled Weak Turbulence Condition, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 30, No. 13, pp. 2188–2194 (2012).
 - [8] 有本好徳：シングルモードファイバ結合による超光速空間光通信方式の研究，電気通信大学情報システム学研究科博士論文 (2008).
 - [9] Suzuki, Y., Koishi, Y., Hasegawa, Y., Hashimoto, Y., Murata, S., Yamashita, T., Shiratama, K., Toyoshima, M. and Takayama, Y.: Optical Free Space Communication System for 40Gbps Data Downlink from Satellite/Airplane, *Proc. of AIAA ICSSC* (2011).
 - [10] 鯉淵道紘，藤原一毅，長谷川洋平，橋本陽一，松谷宏紀，天野英晴：光空間リンクを用いた省配線・可変トポロジである HPC 相互結合網，情報処理学会 HPC/ARC 研究会 (2012).
 - [11] Pharr, M. and Humphreys, G.: *Physically Based Rendering, Second Edition*, Morgan Kaufmann (2010).