ピクセル並列処理による
ボリューム・レンダリング向きの超高速専用計算機
アーキテクチャ

金 喜都　對馬雄次†　中山明則　荻野友隆　森眞一郎　中島浩　富田眞治

京都大学工学部 (†:現在日立製作所)

本稿では，512^3ボクセル集合に対する半透明ボリューム表示、遠近法による投影、高速な画像生成を目的とした、レイキャスティングを超高速に行える専用並列計算機のアーキテクチャを提案する。それは表示図形歪みを抑える妥当な視角で3次元ボリューム空間を直接視覚化し、ユーザーに正しく認識、理解、洞察できる画像を提示する。

本計算機では、ボリューム空間を、メモリバンク群に対応するスライス群に写像することにより、512^2ピクセルをもつスクリーンの一行分 (または一列分) のピクセルを通る512本視線に交差する全ボクセルを獲得する。同時に、512個プロセッサを1次元に接続し、並列に動作させ、80ns の固定パイプラインサイクルΔTで各視線の前進ステップの計算を各プロセッサの上に同期的に完成することで、512 ΔTごとに512本視線のレイキャスティングを行える。 従って、1秒間に48枚動画が形成できる。

The Super-high Speed Special-Purpose Computer Architecture Based on the Pixel Parallel Processing for Volume Rendering

Xidu Jin　Yuji Tsushima†　Akinori Nakayama　Tomotaka Ogino
Shin-ichiro Mori　Hiroshi Nakashima　Shinji Tomita

Faculty of Engineering ,Kyoto University (†: Hitachi, Ltd)

This paper presents a super-high speed ray casting system for volume rendering of 512^3 volumetric datasets. In order to realizes real-time image generation from a translucent volume by the parallel or perspective projection, this system restricts the view angle within a certain range. Since the range is determined so that no distortion will be appeared on the generated image, this system can provide the users with proper understanding about the unknown 3D objects.

This system adopts a conflict free memory of 512-banks and the highly parallel one-dimensional pipelined architecture. Provided with the constant pipeline cycle of 80ns, this system processes 512 rays every 512 cycles, resulting 48 frames generation per second.

1　はじめに

医療画像や科学技術計算結果の可視化のため、ボリュームレンダリングが注目されている。ボリュームレンダリングは、従来のサーフィスレンダリングでは不可能であった物体の内部構造の可視化ができ, また、テクスチャマッピングなどきめの細かい映像表現が容易に行い得る。しかし、3 次元情報をそのままの形で保持する必要のあるため、ボリュームデータを保持する 3 次元メモリの構成 (容量と高速性) が重要な研究課題となっている。著者らは、視線に沿ったボクセル群への並列アクセス可能な 3 次元メモリを提案してきたが、この方式では 3 重化が必要であり、容量の面より難点があった。

本稿では、視点の位置を物体空間から実用上問題のない範囲で遠ざけるという制約を課することによってアクセス競合のない 3 次元メモリを構成する手法について述べる。

2　ボリューム映像の並列化

2.1　基本概念

以下本稿で用いる用語について説明する。

(1) ボリューム・レンダリング　ボリューム・レンダリングとは、3 次元空間に配置されたデータを 2 次元のスクリーン空間に投影することにより、3 次元空間を可視化する手法である。この 3 次元空間をボリューム空間と呼ぶ。

(2) ボリューム空間とスクリーン空間　ボリューム空間は, 対象となる 3 次元空間を, 整数格子座標値を持つ最小空間単位の格子構造 (lattice), ボクセル (**voxel=volume element**) の集合で表現したものである。ボリューム・データの処理方法に応じ. 以下の 2 種類のモデルが定義される。

I. 離散モデル　:各ボクセル値を中心とした単位立方体をボクセルと呼び, ボクセル内の任意の点データの属性値は、ボクセル値と等しいと見なす。

II. 連続モデル　:8 つの頂点各々が, 独自のボクセル値を持つ単位立方体をボクセルと呼び, ボクセル内での属性値は通常, 3 重 (tri-linear) 補間手法を用いて求められる。

3 次元格子状のボリューム空間が n^3ボクセルを持つものであるとする。それを 3 次元直交座標系 O_{-LAB}上の L, A, B 軸の $[\,0\,,\,n\,)$ 半開区間上に定義し, 各ボクセルの 8 つの頂点を 3 次元座標系の整数座標点上に置く。また、対応したスクリーン空間は、n^2ピクセルを持つものとする。

(3) レイ・キャスティング法　ボリュームレンダリングを施す最も基本的なアルゴリズムはレイキャスティング (**ray casting**) 法である。ボリュームを半透明なものとして扱うには、視点からスクリーンの各ピクセルに対して視線を発生し、その視線に沿って不透明度が 1 になるまで光を吸収するボリューム内を前進する。そして、最終的にはそれまでの累積カラーを求めてそのピクセルの色とする。

(4) 主軸等間隔サンプリング　視線上のボクセル値のサンプリングは, 主軸等間隔サンプリング法によって行う。アルゴリズムとしては、視線のサンプリングを、当該視線の方向ベクトルの成分の絶対値が最大となる座標軸 (以後主軸と呼ぶ) 上で、等間隔　(ボクセル間の距離) で行なうようにする。即ち、あるピクセルを通る視線 $Ray_i\,(\,i = 1 \sim n^2)$ 上のサンプリング間隔ΔD_iは次の式によって決る。

$$\Delta D_i = \sqrt{\Delta {L_i}^2 + \Delta {A_i}^2 + \Delta {B_i}^2} \tag{1}$$

ただし,　$0 \leq |\Delta L_i|\,,\,|\Delta A_i|\,,\,|\Delta B_i| \leq 1$ 且つ
$\exists \Delta V \in \{|\Delta L_i|\,,\,|\Delta A_i|\,,\,|\Delta B_i|\}\,,\,\Delta V = 1$
ここで, ΔV は主軸サンプリング間隔でもあり、ボクセル (Voxel) の稜線の長さでもある。
故に,　$1 \leq \Delta D_i \leq \sqrt{3}$

従って、各視線上でサンプリングされたボクセルの数は多くても n 個である。ところが, 主軸等間隔サンプリングでは、軸と平行でない視線が通常の視線等間隔サンプリングと比べるとそのサンプリング間隔は最大で$\sqrt{3}$倍となる。このため、ピクセル値の補正が必要となる。

2.2　並列処理手法と画面生成率

(1) ボリューム・レンダリングの並列処理手法　レイ・キャスティングアルゴリズムを用いて、高速処理のための並列化手法は以下の 2 種類に分けられる。

ボクセル並列処理 ボリューム空間で任意一つの視線と交差する全てのボクセルのデータを同時に取り出して、視線のピクセル値を計算する。

ピクセル並列処理 複数の視線を同時に追跡して各視線に交差するボクセルデータを探索しながらピクセル値を計算する。

(2) 並列処理に適するメモリによる画面生成率　3 次元ボリューム空間の n^3 個ボクセルのデータを格納してあるメモリシステム及び n^2 ピクセルからなるスクリーンに対し

て、仮にメモリ・サイクルΔTでメモリシステムから任意のn個ボクセルのデータを同時に読み出されるとすると、離散モデルでボリュームレンダリングする場合には単位時間で生成できる画面の数、即ち、画面生成率は$(n^2\Delta T)^{-1}$である。

これはボクセル並列処理にもピクセル並列処理にも正しいのである。

3　コンフリクト無しのメモリ設計

3.1　ボリューム空間からメモリ空間への写像

ボリューム空間を、図1の(a)に示すように, L軸の整数座標点$1, 2, \ldots, n-1$に沿って, L軸に垂直なn個のスライスに薄く切り、**L**軸スライス群とする。各軸上のi ($i = 0$ ~ $n-1$) 番目スライスの厚さは、該当軸上の半開区間$[i, i+1)$に対応する。ここで、各スライスの横断面はスライスの断面、スライスの厚さを表す面はスライスの側面、スライス群の両側にある面（断面に平行な表面）はスライス群の底面、スライス群のあと4つの表面はスライス群の側面と名付ける（図1の(b)参照）。

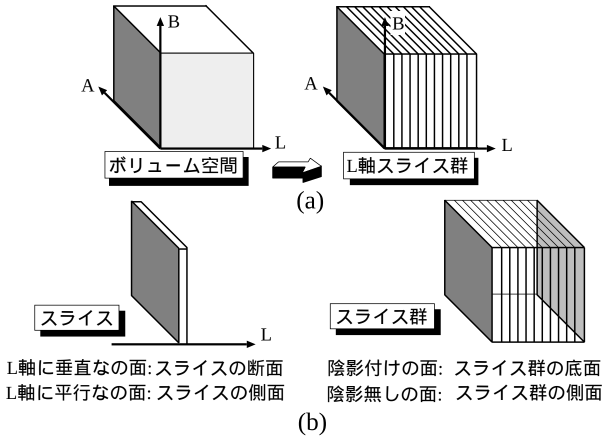


図 1: ボリューム空間の分割

3.2　視線, 入射規則と視点空間の区分など

(1) 平行視線と放射視線　平行投影を行なう視線は平行視線、透視投影を行なう視線は放射視線と呼ぶことにする。

(2) 視線群と視線群方向線及びその主軸　スクリーンのn^2ピクセルを通る視線のうち、1行分のピクセルまたは1列分のピクセルを通るn本の視線を視線群と呼ぶ。視線群の各視線が平行か放射かいずれでもよい。放射視線の場合, 図2(a)に示すように視線群の真中にある矢印を視線群方向線とし、また、この方向線の主軸を視線群主軸に定義する。平行視線の場合, 各視線の主軸は同じである。

(3) 視線空間方向線とその主軸　平行投影は視点を無限遠点に持って行ったときの透視投影と考えれば、同様に処理されることになる。視点からスクリーンのn^2ピクセルを通る視線が通過する空間は視線空間と呼ぶことにする。この空間の範囲は、ピラミットのような形状を呈するので、視点ピラミットとも言われる。また、ピラミットの頂角は視角（視野角度）と言われる。図2(b)に示すように、視点からスクリーン中心を通過し、ボリューム空間への矢印は、視線空間方向線と呼び、その主軸は視線空間主軸と呼ぶ。

(4) ボリューム空間への視線入射規則　全ボリューム空間を観察するため、視線の入射は以下の2つの規則に従う。

規則1　ボリューム空間のすべてを視線空間の囲いに取り入れ、スクリーンの中に投影する。

規則2　視線空間方向線を、始終一貫、ボリューム空間の中心へ指向させ、ボリューム空間はスクリーン上の投影面積が最大となるようにする。

(5) スライス群を囲んだ視点空間の区分　スライス群(ボリューム)の中心から、表面の四頂点を通った半直線を引くと、その表面の各辺の両端点を通る二半直線で限られた部分平面が4つあり、この4つの部分平面で囲まれた空間を底面無限大の四角錐空間と考えられる。

六面体のスライス群を囲んだ視点空間は、この方法により、6つの四角錐空間に分けられる。その中に、スライス

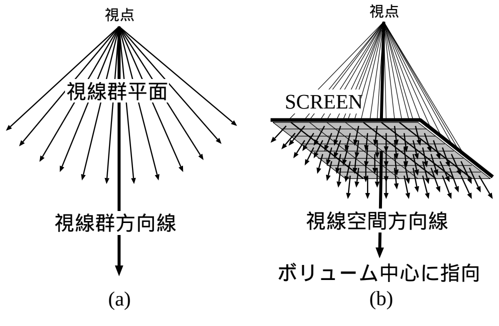


図 2: 視線群方向線と視線空間方向線

群の底面を含む四角錐空間をスライス群の底面観察空間と呼び、スライス群の側面を含む四角錐空間をスライス群の側面観察空間と呼ぶ。

(6) 視点からボリューム表面に至る視線の分布　視角が定まると、ボリューム表面に到達した視線の分布は (1) スクリーンのピクセル間隔; (2) ボリューム表面の各局所から視点までの距離、によって決まる。表面に至った視線は、視点に近いところでは密集し、遠いところでは疎ら (まばら) となっている。視点の移動につれて、n^2ピクセルのスクリーンを通して、見えることが可能なボリューム表面のボクセルの数は n^2から $3 \times n^2$までである。ところが、ただ n^2本だけの視線であるから、視点から見えるボリューム表面上の各ボクセルに 1 本ずつの視線の到達は不可能である。故に、視点から見えるボクセルの表面に 2 本以上の視線が到達していけないように視点からボリューム中心までの距離を決め、レイ・キャスティングを行うことにする。

3.3　視角制限方式

3.3.1　視角制限方式とは

視角制限方式では、以下の点を前提としている。

(1) 視点からボリューム中心までの距離： 視線空間の各視線と, 視点から見えるボリューム表面との各隣合う交点の, スライス群の断面に垂直な座標軸方向に沿う間隔がボクセル稜線の長さより短くないように決める。これで、ボリューム表面のボクセルに 2 本以上の視線が到達しない。

(2) スクリーンでの視線群選択： レイキャスティングを行うスライス群を, 図 3に示すように座標系O_{-LAB}に定義して,LA平面を基準平面とする。スクリーンの延長平面と基準平面との交線がスクリーンの行線となす角θは45^0以下であるならば、スクリーンの 1 行分ピクセルを通る n 本視線を視線群とする。さもないと、1 列分ピクセルの n 本視線を視線群とする。前提 (1) により、視線群とスライス群の側面との交点が各スライスの側面毎に一個を超えない。

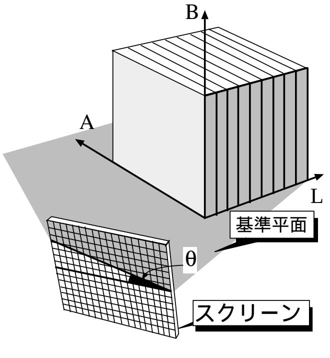


図 3:スライス群の座標系

(3) 視線空間のスライス群への視線入射方法： 視線群ずつ投入する。ここで、

1. スライス群の側面に至った視線を、同時に入射する；
2. スライス群の底面に至った視線を、順番に入射する。

(4) 視線がボクセルを通過する時間間隔　(ボクセル値の処理時間) をΔTにする。

3.3.2　視角制限方式の性質

性質 1　異なる視線が同時に同一スライスを通過することはない。

性質 2　もし視点がスライス群の側面観察空間の内にあるならば, 視線群は $n \times \Delta T$ ごとにスライス群空間に進入し始め, 必ず、$n \times \Delta T$ 時間後にスライス群を出て来るようにできる。

性質 3　もし視点がスライス群の底面観察空間にあるならば, $n \times \Delta T$ ごとに新しい視線群をスライス群へ入射すると。視線群がスライス群空間を通る時間間隔は $2 \times n \times \Delta T$ を超えない。

性質 4　性質 2 と性質 3 の場合では, 1 番目の視線群の全てがスライス群を出た時点からは、$n \times \Delta T$ ごとに相次いで来る視線群が順番にスライス群を出て来る。従って、$n^2 \times \Delta T$ ごとに 1 枚の、視点の移動に伴う動画が形成できる。パイプラインによって、これはコンフリクト無しメモリを実現できる。

3.3.3　視角制限方式の性質の証明

[証明] 以下, 基準平面への正射影を正射影と略称する。3.3.1節の前提 (2) より、スライス群の各断面の正射影が一直線であり、視線群の各視線はその正射影が互いに不重畳であることが分かった。従って、各視線の正射影がスライス群の各断面の正射影を跨る状況だけで、スライス群の各断面を通過する視線群の状況が反映できる (図 4参照)。

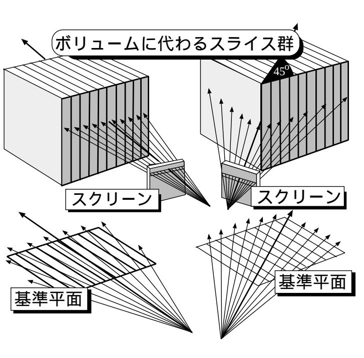


図 4:視線群とスライス群との正射影

故に、本証明は視線群とスライス群との正射影に準じて検討する。

(1) 性質２の「視点がスライス群の側面観察空間の内にある」とは、スライス群の二底面のスクリーンへの投影が重ならないので、二底面を通過する視線がないことである。

この時、視線群はすべてがスライス群の側面に入射する場合もあるし, スライス群の側面と底面に入射する場合もある。従って、図 5に示すように実スライス群の底面の外側に若干の仮想スライス (仮想スライスのボクセルに対応する透明度を１、色を０とする) を加え, スライス群の底面に至る視線を、仮想スライスの側面ごとに至るようにする。また、この拡張されたスライス群を拡張スライス群と呼ぶ。

拡張スライス群の側面に到達した視線群を、同時に拡張スライス群空間に入射させると。視線群の各視線 Ray_i ($i = 1, 2, \ldots, n$) は、同時に、主軸等間隔サンプリングによって求められた$\overrightarrow{\Delta D_i} = (\overrightarrow{\Delta L_i}, \overrightarrow{\Delta A_i}, \overrightarrow{\Delta B_i})$ (ここで、$\overrightarrow{\Delta L_i}, \overrightarrow{\Delta A_i}, \overrightarrow{\Delta B_i}$ は視線が前進する方向の各軸成分ベクトルである) に従い、各ΔTごとに$\overrightarrow{\Delta D_i}$距離ずつ進んでいく。前提 (2) より, 拡張スライス群の側面へ同時進入した視線群の各入射点のうち, 隣合う入射点は、スライス群の断面に垂直な方向の間隔がボクセルの稜線の長さより短くないことが分かった。従って、各視線は、スライス群内で$\overrightarrow{\Delta D_i}$進んでも, 拡張スライス群の内、同時サンプリングする各点の間隔も, ボクセルの稜線の長さより、少なくとも、短くないわけである。故に、これらの同時サンプリングする点のうち、異なる点は同時に同一スライスの内にある理由はない。従って、性質 **1** がすべてのスライスで成立する。

視線群の内、主軸がスライス群の断面に平行な視線 $Ray_j\,(1 \leq j \leq n)$ は $|\Delta L_j| < 1$ による$\overrightarrow{\Delta D_j}$で, 主軸がスライスの断面に垂直な視線 $Ray_k\,(1 \leq k \leq n)$ は、$|\Delta L_k| = 1$ による$\overrightarrow{\Delta D_k}$でスライス群空間を通過していくことになる。

また、実スライス群の側面に入射した各視線は長くとも $n\times$ $\overrightarrow{\Delta D}$の距離でスライス群を出ていくので, 必ず、$n \times \Delta T$までスライス群空間を出て来る。一方、仮想スライスの側面に入射した視線に対しては, 二底面を通過する視線がないので、これらの視線の主軸がスライスの断面に平行 $(max\{|\Delta A|, |\Delta B|\} = 1$ 且つ$\Delta L < 1)$ である。そこで、必ず $n \times \Delta T$までにスライス群の側面から出力される。

これで、性質 **2** を証明できた。

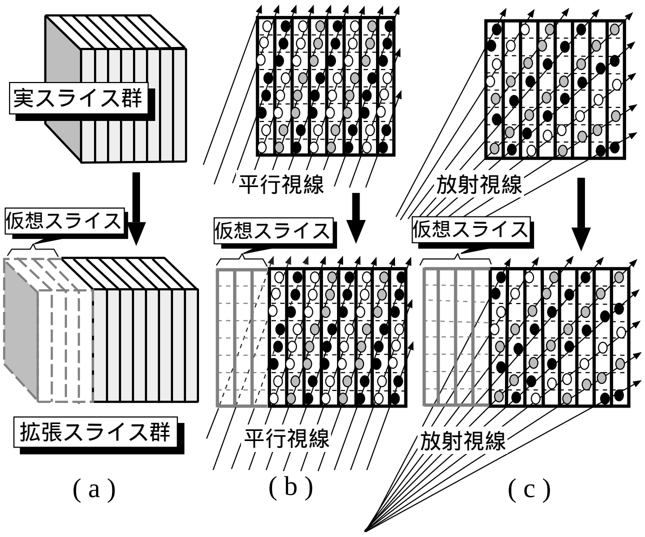


図 5: 底面に至る視線を仮想スライスに入射する

(2) 性質３ の「視点がスライス群の底面観察空間にある」とは, スライス群の二底面のスクリーンへの投影が重なっているのである。この時, 視線群の半分以上はスライス群の底面に至る。しかもスライス群の底面に入射した視線の一部はその反対側の底面を出るようになる。仮に 図 6 のように、

1. 視線群の m 本はスライス群の底面に至る。このなかに、
    (a) l 本の正射影とスライス群の断面とのなす角は 45^0 以上、l 本の中に,
        i. k 本はスライス群の両側の底面を貫く。
        ii. $l - k$ 本はスライス群の側面を出る。
    (b) $m - l$ 本の正射影とスライス群の断面とのなす角は 45^0 を越えない。
2. $n - m$ 本はスライス群の側面に至る。

とする。

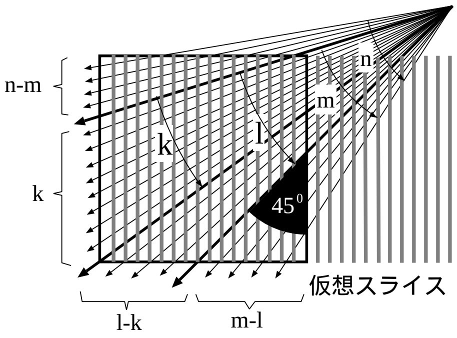


図 6: 視点がスライス群の底面観察空間にある場合

ある時点にこの視線群は実スライス群に入射する。実スライス群の側面に同時に入射できる $n - m$ 本の視線はその

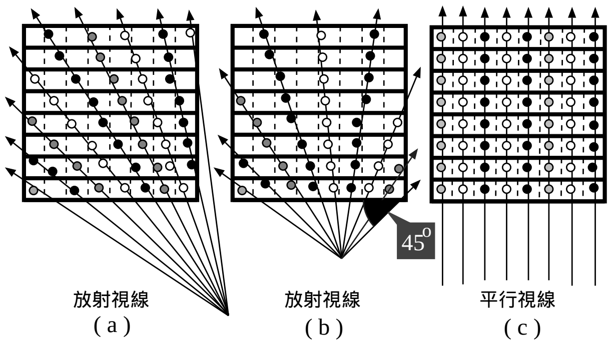


図 7: 視線群主軸がスライスの断面に垂直な場合

主軸がスライス群の断面に垂直 (即ち $|\Delta L| = 1$) なので、$n \times \Delta T$をしてから、必ずスライス群の底面を出る。スライス群両側の底面を通過する k本視線は $|\Delta L| = 1$ なので、順番に入射し、$(n + k) \times \Delta T$をしてから、スライス群の底面から出るわけである。あとの $l - k$本の視線も $|\Delta L| = 1$ なので、先行の視線がスライス群を通過する時間間隔は後続の視線より少なくても一個ΔT多いから、後続の視線が先行の視線よりスライス群を遅く出ることはない。従って、これらの視線は $(n + k) \times \Delta T$までスライス群を出る。残った $m - l$ 本の正射影とスライス群の断面とのなす角が 45^0以下となる視線は前述により必ず $(n + k) \times \Delta T$までスライス群を出て来る。故に、視線群に対しては、もしスライス群の両側の底面を通過する視線は k ($k \leq n$) 本があるならば、視線群はスライス群を出る時点が $(n + k) \times \Delta T$を超えない。

$n \times \Delta T$ で順番にスライス群の底面に入射していた平行視線 (図 7の (c) 参照) は、必ず $2 \times n \times \Delta T$ までスライス群の反対面の底面から全部出る。放射視線の場合には, 視線群のすべてがスライス群の底面に至るとすると (図 7の (b) 参照) , その一部の視線がスライス群の側面を出て来るから、視線群が全部出た時刻は $2 \times n \times \Delta T$ より速い。一方、全視線群がスライス群の底面に入射した場合、$n \times \Delta T$ まで全視線群の入射を完成するため, 視点から底面までの最も近い距離は、視線群の両側の 2 本の視線のうち、少なくとも、1 本の正射影を, この底面に 45^0以上の角となるように決める。

故に、$n \times \Delta T$ まで視線群のすべてがスライス群の中に進入することができる。また、全視線群は必ず$n \times \Delta T$時点から $2 \times n \times \Delta T$ 時点にわたる間のある時刻までスライス群を出て来る。

(3) ところが、視点からスクリーンを通して見えたスライス群の表面が 3 つ、即ち底面と二側面になったとき、スライス群の各断面の辺線に平行な A 軸と B 軸とのスクリーンへの投影はそれぞれスクリーンの水平線と垂直線または垂直線と水平線となす角が 45^0未満になる場合、スクリーンの列視線群を取っても行視線群を取っても、一部スライスの側面に到る視線は 1 本を超えるようになる (例えば、図 8 の (a) の白○ を通る視線群)。この問題を解決する方法の一つとしては、いつも視点からスライス群の二表面しか見えないようにすることである。このため、幅拡張スライス群の概念を導入する。

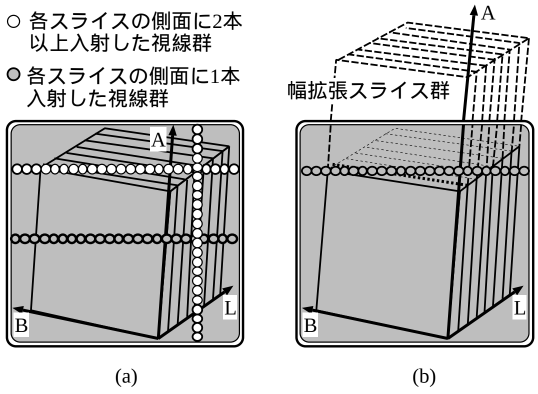


図 8: スクリーンで見えた実スライス群と幅拡張スライス群

スライス群の底面観察空間でスライス群の二表面しか見えないようにするため、次の規則により各スライスを広げる。図 3 の座標系のスライス群にとって、B 軸とスクリーンとのなす角は、もし A 軸とスクリーンとのなす角より大きいならば、各スライスを、A 軸に沿って伸ばし, 等しいならば、A と B のいずれかに沿って伸ばし, 小さいならば、B 軸に沿って伸ばす (図 8の (b) 参照)。また、伸ばした部分はボクセルの透明度を 1 、色を 0 とする。伸ばされたスライス群は幅拡張スライス群と呼ぶ。勿論、前述の討論に従い、このような視線群も必ず $2 \times n \times \Delta T$ まで実スライス群を通過する。また、スライスが伸ばされた部分の長さは n を超えない。これで性質 **3** が成立できた。

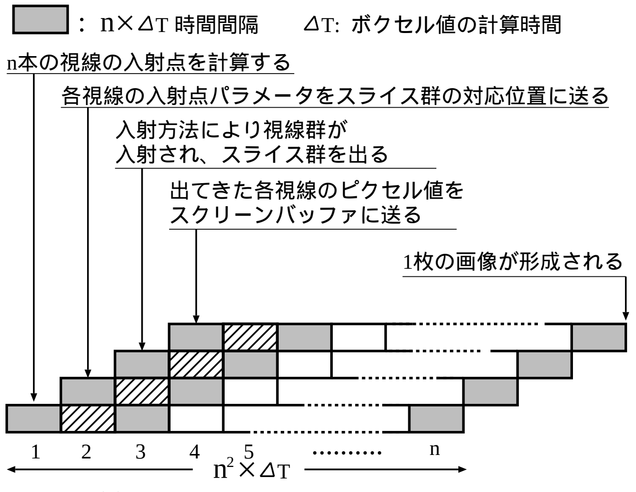
性質 **4** の説明は 3.4.1節で述べる。

3.4 視角制限法のパイプライン ・メモリ構成

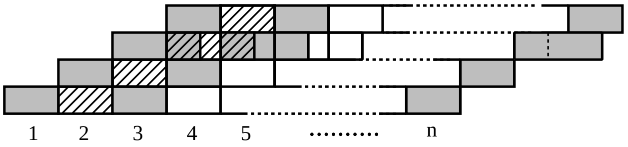
3.4.1 パイプライン

視線空間の n 個視線群が順番にスライス空間を通過する処理は, (a)視線計算 :$n \times \Delta T$ で n 個の入射点の計算, (b) 次の視線ディスパッチ :$n \times \Delta T$ で計算済の n 個の入

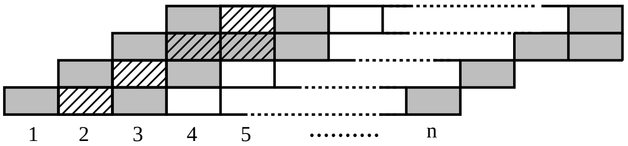
射点パラメータをスライス群表面の対応位置にΔTごとに１個ずつ送出、(c)視線入射 :$n \times \Delta T$ で各視線をスライス群の内に入射させる。各視線がスライス群を出て来て、(d)スクリーン構築 :$n \times \Delta T$ で出て来た各視線のピクセル値をΔT ごとにピクセル値ずつスクリーンバッファの該当ピクセルの位置に書き込む, のパイプラインで構成される。明らかに、$n \times (n \times \Delta T)$ でスクリーンの n^2ピクセルを通る視線がスライス空間に全部入射できるので、パイプラインにより $n^2\Delta T$ごとに１枚の画像は形成される。



(a) 視点がスライス群の側面観察空間にある場合



(b) 視点がスライス群の底面観察空間にある放射視線の場合



(c) 視点がスライス群の底面観察空間にある平行視線の場合、
また、これらの平行視線はスライス群の断面に垂直である

図 9: １枚の画像を形成する視線群パイプライン

視点がスライス群の側面観察空間にあるとき、１枚の画像を形成するパイプラインを図 9の (a) に示す。

視点がスライス群の底面観察空間にあるとき、側面観察空間と違って、視線入射ステージの $n \times \Delta T$で入射した視線群が $(n+k) \times \Delta T(k \leq n)$ までスライス群を出て来るので, 次の視線入射ステージの $n \times \Delta T$の内、初めの $k \times \Delta T$ では、スライス空間を通過している視線が前後２つの視線群の各一部からなる。即ち図 9の (b) と (c) のようなパイプラインの重畳になっている。図 9の (b) と (c) の様子は図 7 の (b) と (c) に対応する。

3.4.2 メモリ構成の概要

視線群がスライス群を通過するピクセル値計算過程に適するプロセッサ群とメモリモジュール群との組合せは図 10 に表す。

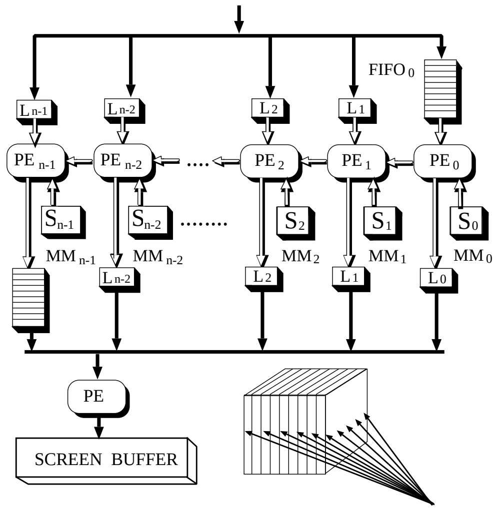


図 10: プロセッサ群とメモリモジュールの組合せ

同一構造をした各プロセッサをスライスに１個ずつ１次元アレイ状に規則正しく配置し, 近接プロセッサ間でデータ交換ができるように構成した VLSI 向きの構成を採用している。スライス$_i$ $(i = 0 \sim n-1)$を s_iとしてメモリモジュール$_i$に格納する。アレイへの視線入射点の入力と計算済の各視線ピクセル値のスクリーンバッファへの出力を逐次的に、アレイ上での各視線累積カラー計算を並列に行い、しかもこれらの動作はパイプライン化され重畳的に進められる。プロセッサの入力 FIFO でスライス群の底面に至る視線の入射点を格納する。あとのプロセッサの入力ラッチでスライス群の側面に到る視線の入射点を格納する。従って、スライス群の側面に到る視線は同時に入射でき, スライス群の底面に到る視線は順番に入射できる。視線群がスライス群を出た時, 各視線の累積カラーの最終値、ピクセル値は, スライス群の底面から出たものが底面プロセッサの出力 FIFO に, 各スライスの側面から出たものがプロセッサの出力ラッチに書き込まれる。

4　視角制限法の妥当性検証

4.1　スクリーンと平面スクリーンの視覚特性

スクリーン形状により平面スクリーンと球面スクリーンがある。

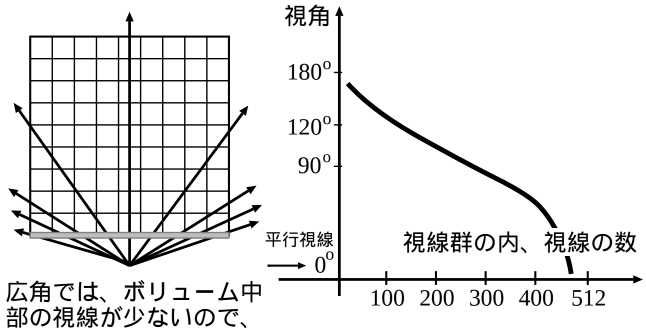
人間の目で物体を見ると, 変形する現象が起こらないというのは目のスクリーンが球面スクリーンだからである。ところが、通常のスクリーンはまだ平面なものである。カメラ撮影により平面スクリーン投影の視覚特性は以下である。

1. 標準視角 40^0までではほとんど変形しない。
2. 視角 23^0は極めて自然な視覚効果表現である。

4.2　平面スクリーンは視線空間への客観的制限

ボリューム空間で、スクリーンを通る n^2本視線の分布は平面スクリーンの各ピクセルによって制約され, 視点がスクリーンに近ければ近いほどボリューム中部空間を通過する視線の数は少なくなる (図 11(a) 参照)。結局, 広角で形成した画像は, 中部では、ぼんやりになっているのに, 周りでは、きれいになっている。

図 11は (a) 広角での視線群の分布と, 及び (b) 視角が 0^0から 120^0にわたる範囲で、ボリュームの 80 パーセント中部空間を通過する視線群の数を示す。



広角では、ボリューム中部の視線が少ないので、画像は、中部がぼんやり、まわりがきれい。
(a)

ボリュームの 80 ％ 中部空間を貫く視線の数と視角との関係
(b)

図 11: 広角での視線分布及び視角と視線との関係曲線

4.3　視角を広角にする表示図形の歪み

カメラ撮影により, 54^0視角が EF35mm の広角レンズに、65^0視角が EF28mm の広角レンズに、74^0視角が EF24mm の広角レンズに、84^0視角が EF20mm の広角レンズに当たる。ご存知のように表示図形は広角をすればするほど変形されるように決まっている。

この表示図形の歪み原因は広角で平面スクリーンに投影するに限る。つまり、広角で球面スクリーンに投影すると, この現象が起こらない。

4.4　表示図形歪みからみた視角制限法の妥当性

視点が立方体のスライス群対角線の延長線上にある場合、立方体の頂角が 90^0を超えない, この時、本計算機の視角が最小 54^0に制限される。54^0視角が広角範囲に入る、また、計算により 50^0くらいの視角で、ボリューム中部空間を通過する視線の密度が周辺と同じみてよい、35^0くらいの視角で、視線の大部がボリューム中部空間を通過するので、形成した画像中部のほうがきれいになる。故に, 3.3.1節の前提 (1) による視角でレイキャスティングを行うと, 科学的可視化の要求を満足できることが明らかである。

5　おわりに

ボリューム表示を超高速に行うアーキテクチャを提案した。その特徴は,1) 半透明表示,2) 透視投影,3) 主軸等間隔サンプリングによるレイキャスティングの採用, である。このアーキテクチャによるボリューム表示の速度について、n を 512, 固定パイプラインサイクルΔTを 80ns とするので、画面生成率は 48 画像/秒である。ピクセル値計算の各プロセッサが $m\Delta T$で一つの前進ステップ (ΔD間隔) 累積カラーの計算を完成すると, 各プロセッサを m ステージのパイプラインに設計して,$\Delta T = 80ns$ ごとに累積カラー値を流させてくる。これらのプロセッサはプログラマブル VLSI-FPGA で設計する。

謝辞

日頃から御討論頂く京都大学工学部富田研究室の皆様に感謝致します。

参考文献

[1] 明石英也, 他 :ボリュームレンダリング向き並列計算機のアーキテクチャ, 情報処理学会計算機アーキテクチャ研究会, 92-ARC-15, 1992

[2] Hanspeter pfister. Cube-3: A Real-Time Architecture for High-resolution Volume Visualization. In proceeding of 1994 Workshop on Volume Visualization