

# コンピュータグラフィックスにおけるランダムスキャンディスプレイとラスタースキャンディスプレイの相補的使用

木村 滋

(九州芸術工科大学 情報処理センター)

## 1. はじめに

コンピュータグラフィックスはCAD/CAMはもちろんのこと、動画制作など芸術的分野や、更に一般のEDPにおいても重要な要素になりつつある。コンピュータグラフィックスにおいて、従来主として用いられて来た表示装置はストレージ管形ランダムスキャンディスプレイであった。それはストレージ管形ディスプレイが次のような利点を備えていることによる。

- (1) 比較的安価な装置で、フリッカのない高精度の表示を得ることができる。
- (2) プログラミングが容易であり、またプロッタとの互換性も容易に実現できる。

しかし、ストレージ管形ディスプレイ特有の欠点として次のことが指摘される。

- (1) 部分消去が不可能なため、表示図形更新の効率が悪い。\*
- (2) 表示速度が遅く、かつ画面消去の際のフラッシュが目障りなため動画表示に適さない。

これに対し、リフレッシュバッファを有し、30フレーム/秒以上で繰返し表示するリフレッシュ形ランダムスキャンディスプレイを用いると、上記の欠点がないため、図形の変形、移動、回転等を含む動的な表示を行うことができる。リフレッシュ形ディスプレイの中には、動的な表示を更に効率よく行うため、座標変換演算機構を内蔵した高級形ディスプレイと呼ばれるもの

がある。それを用いると、2次元あるいは3次元の物体を、制御用のコンピュータに負担をかけることなくスムーズに動的表示を行うことができる。

一方、家庭用及び産業用テレビジョンモニタの発達につれてフレームバッファを有するラスタースキャン形ディスプレイが多く使用されるようになって来た。それらは次のような利点を有している。

- (1) 価格が安い。
- (2) リフレッシュ形ディスプレイと異なり、複雑な図形を表示してもフリッカーが生じない。
- (3) 多種類のカラー表示ができる。

反面、次のような欠点がある。

- (1) 一般にラスター数が256~1024本程度であり精度が低い。また、斜線のギザギザが目障りである。\*
- (2) ストレージ管形ディスプレイと同様、表示図形を蓄積(フレームバッファに)する必要があるため図形更新の効率が悪い。

上の比較はいずれも、広く使用されている線画表示(Drawings)を想定したものであった。しかし、ラスタースキャン形ディスプレイは、濃淡あるいはカラーの面画表示(Paintings)の可能性があるとランダムスキャンディスプレイでは、絶対に得られない特長を有している。これにより、ラスタースキャンディスプレイには次のような利点加わる。

- (1) 多角形などを豊富なカラーで塗りつぶすことにより印象的な表示を行うことができる。
- (2) 光学モデルに基づき3次元物体の

表面輝度を求めることにより、非常にリアルな表示を行うことができる。

- (3) 実写画像と生成図形との合成ができる他、画像処理の種々の手法を適用することができる。

本稿では、高級リフレッシュ形ディスプレイとラスタースキャン形ディスプレイを有する九州芸工大情報処理センターのシステムを利用して3次元物体を表示するため、筆者が開発中のソフトウェアについて概説し、次いで今後のグラフィックハードウェアの構成に際して提言を行う。

- \* セグメントバッファを有し、更新の効率を改善したものが最近市販された。
- \* キザキザを目立たなくする工夫が種々行われており、市販品もある。

## 2. ハードウェア仕様

九州芸工大情報処理センターに設置されている電子計算機システムのうち本稿に関連する部分を図1～図3に示す。

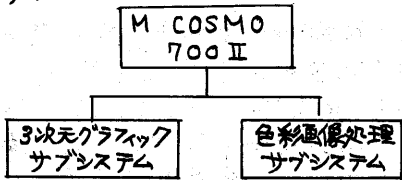


図1. システム構成

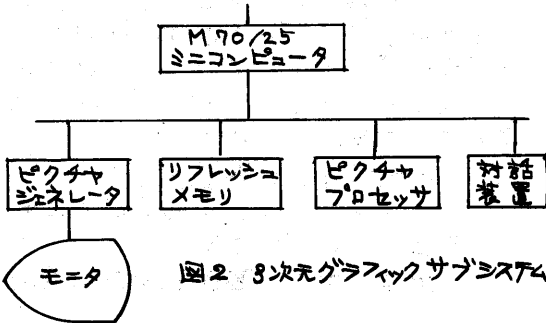


図2. 3次元グラフィックサブシステム

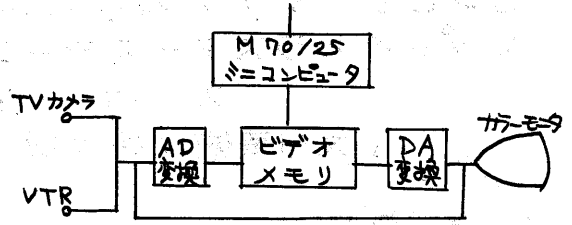


図3. 色彩画像処理サブシステム

高級リフレッシュ形ディスプレイである3次元グラフィックサブシステムの主体をなすのは、米E&S社製のPicture System 2 (以下PSと略す)である。PSは4行4列のマトリクス演算機構を有するピクチャプロセッサにより、表示データに対して高速に座標変換を行う。即ち、座標系として同次座標系を採用することにより、透視変換を含むすべての3次元座標変換が4行4列のマトリクスで表せる。これにより複雑な複合変換も単一のマトリクスに結合(コンカテネイト)できるため高速な座標変換が実現でき、動的表示が行える。動的表示に不可欠な対話装置としては、英数字キーボードの他、タブレット、ファンクションスイッチ、コントロールダイヤル、ライトペンが備えられている。ハードコピー装置がないため、ハードコピーはソフトウェアでXYプロッタに出力するようプログラムを作成した。

色彩画像処理サブシステムは、TVカメラなどからの、画像を凍結するためのAD変換装置を有するラスタースキャンディスプレイである。フレームバッファ(ビデオメモリ)は512x512の画素分のカラー・メモリ(16ビット/画素)とトレース・メモリ(1ビット/画素)から成る。各画素の色を表すカラーコードはR, G, B 3色各4ビットから成り、上位4ビットは使用されていない。表示は、20インチカラーモニタ上に512x480画素分が、ラインレース方式で毎秒30フレーム分

行われる。対話手段としては英数字キーボードの他、カーソル制御用としてジョイスティック及び方向キーが備えられている。(以下これを Image System に因んで IS と呼ぶ)

### 3. 相補的使用のためのソフトウェア

PS 及び IS 各々の特長を最大限に活用するため、ソフトウェアを設計するにあたって次の点を念頭に置いた。

- (1) PS 及び IS のためメーカーより提供された基本ライブラリと同様、FORTRAN コーラブルなライブラリとする。更に、一部独立プログラム(ユーティリティ)も作成する。
- (2) 表示対象は主として3次元物体とする。
- (3) 座標系や用語については標準グラフィックソフトウェア(CORE など)を参考にし、ライブラリの移植性にも留意する。
- (4) 可能な限り、PS 用 IS 用のライブラリで共通の呼び出し形式を用いる。
- (5) 曲面生成法・基本物体の追加や輝度計算法の改善など、将来起り得る変更についても矛盾なく拡張できるように基本構造を定める。
- (6) 主たる利用者を、機器設計者、建築設計者等をはじめとする設計者と想定する。しかも、工学的と言うより芸術的な設計(デザイン)にも適合するよう、プログラミングの容易さの他、形状の生成・制御や表面の材質感、色彩の制御の容易さを重視する。

まず、PS 用の応用ソフトウェア KIDGSL を開発した。<sup>2)</sup> つづいて IS を用いて3次元物体を表示するための KIDCSL について、仕様を

検討し、表示の実験を行った。<sup>2)</sup>

図4及び図5に、ソフトウェア関連図を示す。

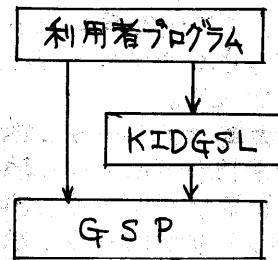


図4 PS用ソフトウェア

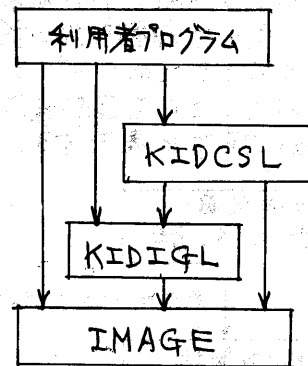


図5 IS用ソフトウェア

GSP (Graphic Subroutine Package) は PS 用の、メーカー提供基本ソフトウェアである。IMAGE は IS 用のメーカー提供基本ソフトウェアで、フレームバッファ・アクセス用サブルーチンなどを含ま。KIDIGL (Kyushu Institute of Design Image and Graphic Library) は画像処理や線画表示のため著工大で作成したライブラリである。KIDGSL (KID Graphic Subroutine Library) 及び KIDCSL (KID Color Shading Library) が本稿で述べる3次元物体表示のための PS 用及び IS 用応用ソフトウェアである。

## 4. ライブラリの構成

本稿の主題である 3次元表示に關する GSP, KID GSL 及び KID CSL に含まれるサブルーチンは次の 4群に大別される。

- (1) 物体定義サブルーチン群
- (2) 座標変換サブルーチン群
- (3) 図形表示サブルーチン群
- (4) その他のサブルーチン群

図6に示すように物体定義サブルーチン群により生成された表示用3次元データに対して座標変換が施され、CRTに表示するためのデータが生成される。次に、これを図形表示サブルーチン群がCRTに表示する。

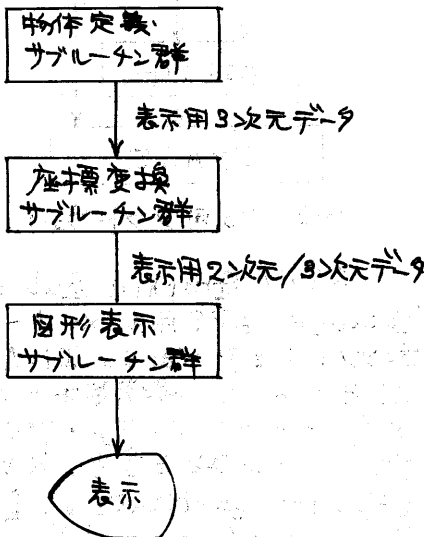


図6 表示の手順

PSにおいては、表示の重点が図形の動的表示に置かれる。従って図形表示ルーチンが座標変換を制御することになり、図6の2番目と3番目の処理は画数とは分けられない。一方、ISでは表示は静的で、座標変換後のデータに対して、輝度計算や隠れ面消去などの処理が行われる。

## 4.1. 物体のモデル

表示物体を定義することは、物体を特定のモデルに属するデータとして数値化することである。PSにおいてはランダムスキャンディスプレイの本質である線画に適合するモデルとしては、ワイヤフレームモデル(Wire Frame Model)が採用される。隠れ線消去を行う必要からは、多面体モデル(中空の表面モデル及び体積を有する固体モデル)も考えられているが、PSにおいては、隠れ線消去は動的表示と相容れないため、ハードコピーを取る場合を除いてこれを採用しない。一方、ISにおいては、ベクトル表示による線画も可能であるが、その特性を最大限に活用するため面画表示を行う。従って一般的には多面体を含む曲面モデル(Surface Model)を採用する。

図7及び図8に、PSに表示したワイヤフレームモデルと、ISに表示した曲面モデルを各々示す。

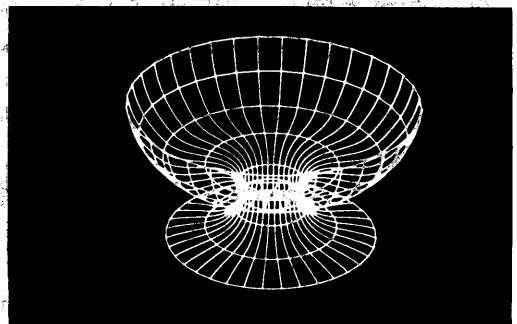


図7. ワイヤフレームモデル

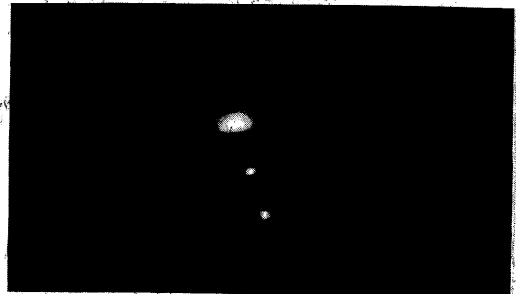


図8 曲面モデル

PSとISにおいて互換性を保持するためには、ワイヤフレームモデル及び曲面モデルを統一する抽象モデルを設定する必要がある。抽象モデルは種々の立体の数学的モデルであり、多角形柱、球、錐体、回転体などを含む。面と面の交線や日影の計算、あるいは、立体と立体の集合演算などの便宜を考えると、そのような基本物体は単純かつ少数の種類であることが望ましいであろう。しかし、3節で述べたような設計目標から考えると基本物体には自由曲面を含む豊富な曲面を生成する能力が必要である。従って、筆者のシステムでは基本物体は固定せず、随時追加・拡張できむようにして置く。

一つの抽象モデルが決まると、PSの物体定義ルーチンはそれを3次元折れ線の集合であるワイヤフレームモデルに展開する。ISのための曲面モデルとしては三角形パッチによる多面体モデルを採用する。三角形パッチによる方式を採用するのは、次のような利点があるからである。

- (1) 基本的には直線(バートル)から成るワイヤフレームモデルと、三角形の辺とは同一の幾何学的対象であるため、抽象モデルからの展開論理がPS、ISで共用できる。
- (2) 輝度計算を、Phong<sup>4)</sup>の方式に従って行う際に必要となる頂点及び面の法線が容易に求まる。
- (3) 三角形は最も簡単な多角形であり、かつ、3頂点は必ず同一平面上に存在するため、多面体に矛盾が生ずることがない。
- (4) 座標変換が、曲面上のすべての点の代りに三角形の頂点についてのみ行われ、その効率が高い。

KIDCSLの物体定義ルーチンで物体を多数の三角形に展開する。

## 4.2. 座標系と座標変換

3次元物体を表示する場合に必要となる座標系としては、前節で述べたモデルに従って物体を定義する場合に用いる世界座標系(World Coordinate System)と、それを表示させるCRT表示面の画面座標系(Screen Coordinate System)又は装置座標系(Device Coordinate System)がある。

一方、座標変換には、世界の中で基本物体を移動、回転、スケーリングなどの変換をするための世界内変換(Intra-world Transformation)、3次元のウィンドウを用いて行う透視変換及びクリッピング変換(これらを併せてウィンドウ変換 Windowing Transformationと呼ぶ)、そして最後にウィンドウからCRT画面のビューポートへのビューポート変換(Viewport Transformation)がある。

これらの関係を図9に示す。なお、物体座標系も透視座標系も、世界座標系と同一であるが、後者は前者に対し透視変換による変形を施した仮想の3次元世界であるので、2つを区別してこう呼ぶこととする。

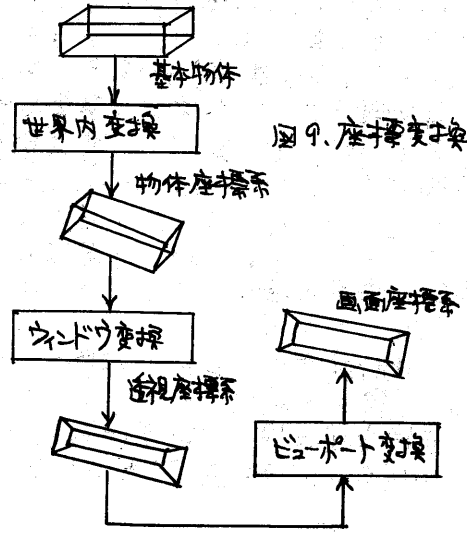


図9. 座標変換

前述したように、PSにおいては座標変換を高速度に行うため、すべての変換を結合して単一の(複合)変換マトリクスとしている。これに対し、ISにおいては、輝度計算は物体座標系可視性検査は透視座標系と、変換途中のデータが必要となるので、複合変換の結合(マトリクス乗算 Concatenation)は世界座標系についてのみ行う。なお、PSにおいては、座標変換サブルーチンはすべてGSPに含まれているため、KEDGSLには含まれる必要がない。これに対し、ISでは、基本ライブラリIMAGEには3次元表示機能は一切含まれないため、すべてのサブルーチン群がKEDCSLに含まれる必要がある。

次に座標系の各座標値の取る値について考察する。論理的には実数、整数のいずれでもよいはずであるが、等者は、PSの基本ライブラリとして現に存在するGSPとの互換性、及びハードウェア構成上の問題(PS、IS及びコントローラとしてのミニコンピュータがすべて16ビット/ワードである)を考慮に入れて、16ビットの整数を世界座標系の各座標が取るものとする。画面座標系についても、装置によらない規格化座標値を取る方法も考えられるが、特にISにおいてはラスターユニット(又は画素)が表示のための計算処理において本質的に重要な役割を果たすため、PS及びISの装置固有の座標値(PSは-2048~2047、ISは0~511)をそのまま用いることとする。なお、世界座標系はPSの体系に適合させるため、左手系を採用している。

物体定義サブルーチン群においては、通常の3次元データを生成するが、座標変換に際して必要になった時点で4成分の同一座標系に移される。

#### 4.3. 表示の方法

PSにおいては、表示はダイナミックな表示を容易にコントロールすることに重点が置かれなければならない。これを基本ライブラリGSPのみを用いて行うにはかなりのプログラム上の技法が必要となる。しかし、エンドユーザにそれらを期待することはできない。従って、KEDGSLの図形表示サブルーチン群は、その技法を標準化しプログラミングを容易にすることが中心課題となり、多くのGSPの座標変換サブルーチンの引用と、対応のための装置からのデータ入力を含むものとなる。図形表示サブルーチン群は次の4種のサブルーチンを含む。

- (1) 物体表示サブルーチン 1
- (2) 同 2
- (3) 風景表示サブルーチン 1
- (4) 同 2

物体表示サブルーチンは、あなたが物を手に取って眺めるように、コントロールダイヤルにより直接、回転移動の量を与えるものである。風景表示ルーチンは、あなたが飛行機に乗って風景を眺めるように、等速あるいは等加速運動を行うものであり、コントロールダイヤルとファンクションスイッチを併用する。末尾の数字1は物体そのものの定義の変更、即ち物体の変形や、物体相互間の位置関係の変更を含まないものである。即ち、プログラムの物体定義部分が静的なものである。同じく2のものは、それらがダイナミックに変化するものである。

一方、KEDCSLによるISへの表示は、各画素毎の色コードの決定が中心課題となる。色コードは次のような式によって決められる。

$$I_p = I_d + I_s$$

$I_p$  は画素  $p$  の色コード,  $I_d$  は拡反射成分 (Diffusive Reflection Component),  $I_s$  は鏡面反射成分 (Specular Reflection Component) である。物体表面の材質感や重量感を表現するには、鏡面反射成分 (ハイライト) が特に重要であることが経験上知られている。これらの計算を行うためには、各画素の曲面の法線の値が知らなければならない。これを多角形の頂点の値から内挿によって求める方法が Bui Tuon Phong <sup>(4)</sup> によって開発されており、筆者のシステムもこれを採用している。なお、頂点の法線を隣接する三角形のベクトル外積の和から求めることや、ハイライトの計算に閾値を導入したのは筆者独自の工夫である。<sup>(5)</sup>

## 5. 相補的使用の事例

PS と IS を、各々の特性を最大限に活用して用いる事例として、グラスあるいは陶器の壺のようなものを設計する例について説明する。

図形は、数個の点に二次式によるフィッティングを行った曲線を 1本の直線の回りに回転してできる回転体である。計算を簡単にするため、物体は厚みのない表面を持つ中空の物体で、表面は赤く、裏面は青く塗られているものとする。入射する白色光は右手前上から来るものとし、表面の光沢を制御するハイライト成分のみ、入カデータによって制御できる。

設計手順は次の通りである。

- (1) PS のタブレットを用いて、曲線を生成するための数個の点を入力し、滑らかな曲線を生成する。
- (2) PS 上にダイナミックに回転体を表示し、形状の評価を行う。
- (3) IS 上にカラーハーフトーン表示を行う。

図 10、図 7、図 8 が各段階で得られる表示である。

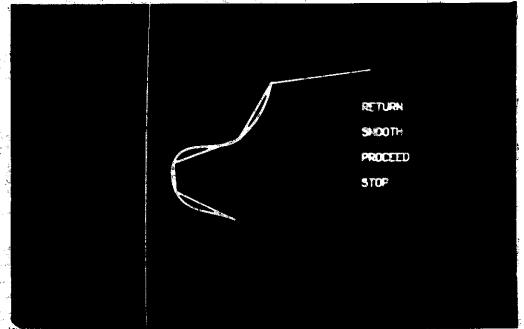


図 10. 曲線フィッティング

## 6. グラフィックハードウェアへの提言

現在、筆者が九州工大において用いている PS 及び IS は、各々ランダムスキャン及びラスタースキャンのディスプレイとして、フライトシミュレータなど特殊なものを除き、一般市販のものとしては高い水準の装置と考えることができる。

にも拘りらず、そこには多くの改善すべき点を有している。一方、コンピュータ関係のハードウェア、とりわけ半導体回路については、その発展がめざましく、比較的容易に手に入ることができるようになっている。これらの点を考慮して、グラフィックハードウェアの望ましい構成についての提言を行って本稿の結びとする。

### 6.1 高級リフレッシュ形ディスプレイ

現在のリフレッシュバッファの他にセグメントバッファを導入することが必要と思われる。これにより利用者のプログラムは表示データの絶え間ない更新の仕事から解放される。特に、4.3 節で述べた、表示図形の再定義の必要のない場合というのは実用上多くあり、その場合は利用者プログラムは

変換マトリクスの更新のみに専念すればよい訳で、交差の向上は著しい。

図11に示すようにセグメントバッファには、座標変換マトリクスのセット命令や、セグメント呼出し命令を含むセグメントプログラムと、セグメントを定義するセグメントデータとが格納される。CPUの制御装置に相当するセグメントプロセッサが、セグメントプログラムの取出しと解釈を行い、それに制御されて座標変換を実行するピクチャプロセッサが、CPUの演算装置に相当する。

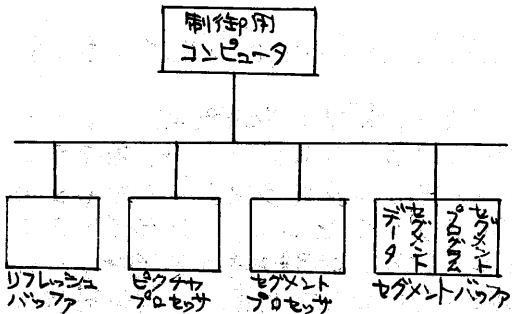


図11 高級リフレッシュ形ディスプレイ

## 6.2 ラスタースキャンディスプレイの構成

一方、ラスタースキャンディスプレイは計算の対象となる画素の数が、数十万点から数百万点と巨大になるため、ハードウェア構成上の要求水準はランダムスキャンディスプレイの場合とは比較にならない程厳しいものとなる。

実際、滑らかなアニメーションを表現するには、 $7000 \times 1000$ 画素の場合、30フレーム/秒として、1画素当り30ms程度の実効演算速度を確保が必要がある。1画素毎に、乗算や加算計算を複数回行うことを考えると非常に困難な数値である。従ってハードウェア構成を考えた場合には、リフレッシュ形のような機能単位の縦割り分割の他に、各機能段階の処理と

のものを高度の並列同時処理によって高速化する必要がある。(5)(6)

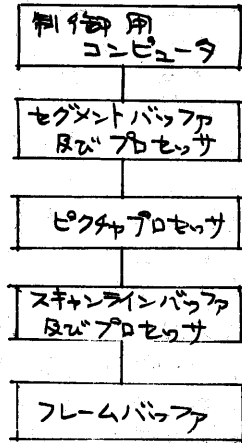


図12 ラスタースキャンディスプレイ

## 7. おわりに

本システムは、一部利用者の用に供しているが、まだ改善すべき点の多い試作段階である。今後、改善を重ねて実用的なシステムとしたい。

本システムの作成にあたり、種々相談に応じてくれた平山善一君はじめ九州若工大情報処理センターの諸氏に感謝する。

## 参考文献

- (1) 木村 9次元図形処理用ライブラリKIDGSLの利用について 情報学会 21回大会
- (2) 木村 曲面を有する9次元物体のカラーハーフトーン表示方式 情報学会 22回大会
- (3) 木村 コンピュータによって生成した物体の連続ハーフトーン表示 テレビジョン学会 1981年大会
- (4) Bui Tuon Phong Com. ACM 1975
- (5) C. Csuri et al Proc. SIGGRAPH 1979
- (6) G. Roman and T. Kimura CAD 1981