

APPLICATION DE LA MECANIQUE A L'ANIMATION INTERACTIVE

APPLICATION OF MECHANICS TO INTERACTIVE ANIMATION

Khalil JAHIDI

LA 369 CNRS - Université de Lille I - 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex

RESUME

L'animation d'objets s'effectue généralement par application d'opérateurs géométriques ; cela nécessite le contrôle de tous les éléments qui composent ces objets

Nous proposons une méthode interactive pour l'animation d'objets graphiques basée sur les résultats de la cinématique. Les objets considérés sont des ensembles "connexes" obtenus par assemblage de tâches planes et indéformables qui évoluent dans des plans parallèles. Les tâches sont liées entre elles par des contraintes mécaniques qui autorisent des mouvements de type glissement, rotation ou engrenage. La structure des objets obéit à des règles qui assurent leur cohérence mécanique. Des contraintes relatives à cette structure et à celle de l'espace dans lequel évoluent les objets, ont de plus été introduites afin de rendre leur animation plus automatique.

Une maquette expérimentale est en cours de réalisation sur une machine utilisant un 8086 couplé à un co-processeur réel 8087 et une mémoire de trame $512 \times 512 \times 8$. La visualisation est faite sur un moniteur couleur haute résolution. L'implémentation est faite en PLM/86

SUMMARY

Object animation is generally obtained by applying geometrical operators ; it involves the control of every basic object component.

An interactive method based on kinematic is proposed for animating graphic objects. The objects are sets of connected solids moving in parallel planes. The connections may be of three types : revolute, prismatic or gear. The structure of the objects responds to a set of constraints that ensures their mechanical coherence and makes the production of their animation more automatic.

Experiments are now being made with a micro-computer based on an 8086 coupled with an 8087 co-processor, associated with a $512 \times 512 \times 8$ frame buffer. Images are displayed on a high resolution TV color monitor ; the language used is PLM/86.



0 - Introduction

Le processus de création d'images dynamiques passe par deux phases, une phase de création de l'image et une phase de production de la dynamique. Si nous cherchons à distinguer les logiciels d'animation en fonction de la manière dont ils produisent le mouvement, nous trouvons essentiellement deux catégories, selon que ces deux phases sont conceptuellement identiques ou non.

Nous trouvons dans le premier cas les systèmes d'animation qui s'inspirent des techniques traditionnelles du dessin animé : le mouvement est obtenu par interpolation entre dessin-ciés [5, 9]. Dans le second cas le mouvement est obtenu par application d'opérateurs aux objets qui composent la scène, ces derniers pouvant être déformables ou solides [7, 12]. Dans les systèmes interdisant les déformations [3, 13, 15], le mouvement se réduit à l'application de transformation géométriques (rotation, translation, symétrie) aux objets. Ceux-ci peuvent de plus être libres ou liés. L'application d'un opérateur à un objet libre s'effectue indépendamment de tout autre objet de la scène.

Inversement, en réduisant la famille des mouvements relatifs entre deux objets, on crée entre eux une liaison. Parmi les systèmes qui obéissent à ces contraintes, nous trouvons :

- l'animation d'objets de type marionnettes, ...
- l'animation d'objets de type robots, bras articulés, ...

Le système que nous proposons appartient à cette catégorie. Toutefois, nous constatons que, malgré les contraintes de liaison et d'indéformabilité introduites, l'animation de tels objets peut devenir complexe dans la mesure où il est nécessaire de contrôler toutes les parties qui les composent. Sachant qu'un squelette humain comporte près de 200 degrés de liberté, l'animation "brutale" de ce dernier nécessiterait le contrôle de 200 "moteurs" !

Nous avons plutôt cherché, par l'introduction de contraintes supplémentaires, relatives à la complexité des objets et à celle de l'espace dans lequel ils évoluent, à réduire au maximum les contrôles externes, afin d'obtenir une animation plus automatique. Pour cela nous nous sommes tournés vers l'animation d'objets à structure mécanique, dont le mouvement obéit à des lois mathématiques qu'on sait déterminer.

I - Le système proposé.

I.A - La scène.

1°) - Les constituants.

La scène est découpée en n plans parallèles à l'écran, qui correspondent à un espace 2D 1/2. Le constituant de base d'un objet de la scène est la tâche plane indéformable. Une tâche est affectée à un plan et ne peut en sortir.

La scène comprend deux objets, l'objet fixe ou DECOR, l'objet mobile ou ACTEUR. L'ACTEUR est lié au DECOR par des contraintes mécaniques (Fig. 1).

<scène> ::= <décor><liaison décor-acteur><acteur>

11 - Le décor.

Le décor est constitué par un ensemble de tâches fixes, un ensemble d'axes fixes de rotation ou de glissement, sur lesquels viennent s'articuler diffé-

rentes parties de l'acteur.

```
<décor> ::= <tâches-fixes><axes-fixes>
<tâches-fixes> ::= <tâche-fixe><tâches-fixes>/
<tâche-fixe>
<axes-fixes> ::= <d-axe><axes-fixes> / <d-axe>
d-axe ::= axe-de-rotation-fixe/
axe-de-glissement-fixe
```

12 - L'acteur.

L'ACTEUR est un objet articulé "connexe". Il est constitué par un ensemble de tâches mobiles, un ensemble d'axes affectés aux différentes tâches et qui leur sont rigidement liés, un ensemble de contraintes mécaniques de type rotation, glissement ou engrenage liant les axes de différentes tâches.

```
<acteur> ::= <couple1><acteur>/<couple1>
<couple1> ::= <entité-mobile><liaison-acteur-acteur><entité-mobile>
<entité-mobile> ::= tâche-mobile <a-axe>
<a-axe> ::= axe-de-rotation-mobile/
axe-de-glissement-mobile
<liaison-acteur-acteur> ::= rotation / glissement /
engrenage
```

13- La contrainte décor-acteur.

C'est l'ensemble des contraintes qui existent entre les axes fixes et les axes de tâches mobiles. Elles sont de type rotation ou glissement.

```
<contrainte-décor-acteur> ::= <couple2><contrainte-décor-acteur>/<couple2>
<couple2> ::= <entité-fixe><liaison-décor-acteur><entité-mobile>
<entité-fixe> ::= <tâches-fixes><d-axe>
<liaison-décor-acteur> ::= rotation / glissement
```

2°) - Création de la scène.

A la phase de création et de placement des tâches, vient s'ajouter une phase d'assemblage pendant laquelle on crée les axes fixes du DECOR, les axes de l'ACTEUR et les contraintes entre ceux-ci. Les tâches retenues dans l'implémentation sont de type cercle ou polygone. Les axes sont créés par la donnée de deux points, origine et direction. L'assemblage deux axes se traduit sur la scène par la mise en coïncidence de ceux-ci. Les axes étant rigidement liés ceci revient au placement automatique d'une des deux tâches. Des règles d'assemblage ont été introduites afin d'assurer la connexité de l'objet assemblé et la validité des connections.

I-B - Le mouvement.

L'objet articulé précédemment défini, présente un certain nombre de degrés de liberté. Pour pouvoir l'animer de façon convenable, il est nécessaire que le nombre de ses moteurs soit égal au nombre de ses degrés de liberté [1]. Auquel cas on pourra en agissant sur ses parties motrices, déterminer de façon unique la position des parties restantes. L'ACTEUR est mu dans ce cas particulier, par un mécanisme dont on sait déterminer le comportement en appliquant les résultats de la cinématique des mécanismes.

1°) - Le schéma cinématique.

L'étude du comportement du mécanisme de l'ACTEUR passe par l'élaboration du "schéma cinématique", sorte de squelette bâti sur l'ensemble des axes de la scène, qui comprend toutes les informations nécessaires au calcul du mouvement [1, 10, 11, 13].

Le schéma cinématique est obtenue :

- en associant un repère cartésien R_i à chaque axe A_i de la scène,
- en exprimant les contraintes d'indéformabilité d'une tâche mobile ou du DECOR, à l'aide de transformations géométriques constantes entre les repères qui lui sont rigidement liés. L'ensemble de ces transformations et des repères constitue un lien,
- en exprimant les contraintes de liaison à l'aide d'une transformation géométrique variable entre repères associés. Une telle transformation est une liaison.

Le schéma cinématique se définit comme un ensemble de liens et de liaisons.

2°) - Le graphe cinématique (Fig. 2).

Notons N l'ensemble des liens et P l'ensemble des liaisons. Un schéma cinématique peut être représenté par un graphe $G(N,P)$ [11, 13] où N est l'ensemble des sommets, P est l'ensemble des arêtes et tel que :

pour tout (n_i, n_j) de $N*N$, (n_i, n_j) appartient à P si et seulement n_i et n_j sont liés.

3°) - Les mécanismes de l'acteur.

31 - Mécanismes élémentaires.

Une décomposition préalable d'un mécanisme complexe en mécanismes beaucoup plus élémentaires, simplifie l'analyse du mouvement de ce dernier [11].

Nous rencontrons deux systèmes de base (fig.3) :

a - mécanisme élémentaire ouvert :

Le graphe cinématique d'un tel mécanisme est une chaîne. Toutes les liaisons de ce dernier sont indépendantes. L'étude du mouvement peut se faire de deux manières :

- le problème cinématique direct [6] : il s'agit, connaissant les liaisons, de déterminer la position des différentes parties du système.

- Le problème cinématique inverse [4, 6] : quelle suite de valeurs doit on attribuer aux liaisons pour que le système passe d'une configuration donnée à une autre. Nous n'aborderons pas ici ce problème, qui relève plutôt de la robotique.

b - Mécanisme élémentaire fermé :

Le graphe cinématique d'un tel mécanisme est un cycle élémentaire. Les liaisons de ce dernier sont interdépendantes de sorte que l'étude du mouvement passe par la résolution d'une équation qui exprime la dépendance entre ces différentes liaisons [10, 11, 14]. Nous appelons *BOUCLE* un tel mécanisme.

32 - Mécanismes complexes.

Un mécanisme complexe est un mécanisme dont le graphe cinématique n'est réduit ni à une chaîne ni à un cycle élémentaire (exemple : fig. 1). Un tel mécanisme peut être décomposé en mécanismes élémentaires de sorte que son activité peut être vue comme l'ensemble des activités des mécanismes élémentaires qui le constituent. Nous séparons un mécanisme en deux parties le *TRONC* (ensemble des boucles) et les *BRAS* (ensemble des mécanismes élémentaires ouverts) (fig. 4). L'acti-

vité des *BRAS* est indépendante de l'activité du reste du mécanisme. L'activité du *TRONC* est par contre la résultante de l'ensemble des activités des boucles qui le constituent ; celle-ci peut être modélisée grâce à un système d'équation.

<mécanisme> := [<tronc, <bras>]
 <tronc> := [mécanisme-complexe, fermé]
 <bras> := [mécanisme-complexe, ouvert]
 <mécanismes-complexe-fermé> := mécanisme-élémentaire-fermé, <mécanisme-complexe-fermé> / mécanisme-élémentaire-fermé
 <mécanisme-complexe-ouvert> := mécanisme-élémentaire-ouvert, <mécanisme-complexe-ouvert> / mécanisme-élémentaire-ouvert.

4°) - Acteurs à mécanismes séquentiels.

41 - Position du problème.

Un *ACTEUR* se décompose en un *TRONC* et des *BRAS*. Nous nous limitons dans ce qui suit à des *ACTEURS* dont le *TRONC* est mu par un mécanisme à 1 moteur. En limitant le nombre de degrés de liberté total des *BRAS*, l'analyse du mouvement de ces derniers ne présente pas de problème particulier, sinon qu'il faut disposer d'un nombre de moteurs suffisant pour pouvoir agir sur toutes les articulations. L'analyse du mouvement d'un *TRONC* à 1 moteur contenant $P+1$ liaisons (dont le moteur) se ramène au calcul de P valeurs, par la résolution d'un système $(P \times P)$. Le coût de l'opération est de l'ordre de $(P)^3$. En introduisant des contraintes supplémentaires quant à la structure du *TRONC* nous pouvons ramener ce coût à un ordre P .

42 - TRONCS séquentiels.

Un *TRONC* séquentiel admet un mécanisme pour lequel il existe une décomposition en k boucles B_1, B_2, \dots, B_k et un ordre sur ces boucles $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{ik}$ tel que :

- B_{i1} contient la liaison moteur,
- B_{i1} est un mécanisme à 1 moteur,
- l'analyse de B_{ij} ne nécessite que la connaissance des B_{ir} tel que $r < j$.

La structure d'un tel mécanisme permet l'analyse de son mouvement boucle après boucle. On se ramène ainsi à la résolution de k systèmes plus petits que le système global (exemple : (fig.1), (fig. 5-A)).

Nous écartons ici le cas particulier des boucles de longueur 3, qui sont des boucles du type :

E-F rotation E-M engrenage E-M rotation E-F

où E-F désigne une entité fixe et E-M désigne une entité mobile.

L'analyse de ce type de boucle est triviale. Celles que nous considérons sont de longueur supérieur à 3 et comprennent des liaisons de type rotation/translation.

Le degré de mobilité d'un mécanisme qui comprend N liens et P liaisons est $3*N-2*P$. Ce dernier est un mécanisme à M moteurs si $3*N-2*P = M$. [1]

Dans le cas particulier des mécanismes séquentiels nous pouvons appliquer ce résultat aux différentes boucles de la décomposition. Les moteurs d'une boucle $B_i(n, p, m)$ lui sont transmis par les boucles qui la précèdent. Le mécanisme étant séquentiel B_i doit vérifier $3n - 2p = m$. Or dans ce cas particulier nous avons $n=p$. Nous en déduisons que le nombre d'inconnues $p-m$



Application de la mécanique à l'animation interactive.

Application of mechanics to interactive animation.

Khalil JAHIDI

dans une boucle est de 3. Le coût de l'analyse d'un mécanisme séquentiel est donc de $9k$ si k est le nombre total des boucles. Nous en déduisons que le coût de l'analyse d'un *TRONC* séquentiel est d'ordre P .

Nous pouvons associer à un *TRONC* le graphe de ses boucles (fig. 5-B), obtenu de la façon suivante :

- nous assimilons une boucle B_i à l'ensemble de ses liaisons
- le graphe des boucles est un graphe $G(X,A)$ tel que :

$$X = B_1, B_2, \dots, B_k$$

$$A = [u/v = (B_i, B_j) \text{ et } B_i \cap B_j \neq \emptyset]$$

$B_i \cap B_j$ représente l'ensemble des liaisons communes à B_i et B_j .

Le graphe des boucles traduit l'interdépendance des différentes boucles du *TRONC*. A l'aide de ce graphe on pourra vérifier la séquentialité du *TRONC*. Cela se fait en deux étapes :

Première étape :

On décompose le graphe des boucles en p niveaux de sorte que si B_m est la boucle qui contient le moteur :

$$\begin{aligned} N_0 &= B_m, \\ N_1 &= [B_i \text{ de } X / (B_i, B_m) \text{ est dans } A], \\ &\vdots \\ N_i &= [B_i \text{ de } X / \text{il existe } B_k \text{ dans } N_{i-1} \\ &\quad \text{et } (B_i, B_k) \text{ est dans } A] \end{aligned}$$

On arrête cette décomposition quand on a épuisé toutes les boucles.

Deuxième étape :

On vérifie les critères de séquentialité suivants :

- B_m est un mécanisme cohérent,
- Pour tout niveau $N_i = B_1, B_2, \dots, B_k$ de la décomposition il existe une permutation sur $[1, 2, \dots, k]$ qui définit un ordre $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{ik}$ sur les boucles de sorte que le calcul de B_{ij} (pour tout j) ne nécessite que la connaissance des boucles de N_{i-1} et de A_j , ensemble des B_{ir} tel que $r < j$. Ce qu'on peut exprimer de la façon suivante :

$$\text{CARD}(B_{ij} \cap (A_j \cup N_{i-1})) = 3 \quad \begin{aligned} 2 &\leq i \leq p \\ 1 &\leq j \leq k \end{aligned}$$

Sous ces conditions on peut orienter le graphe des boucles, selon l'ordre établi par la décomposition en niveaux et les permutations. On obtient un graphe de dépendance des boucles (fig. 5-C).

II - La réalisation.

Un système expérimental d'animation mécanique interactive (fig. 6) est en cours de réalisation. Conçue autour d'une structure de donnée qui permet la description de la géométrie de la scène et du graphe cinématique, il se compose des quatre modules suivants :

- le module de dialogue,
- le module de création de la scène,
- le module de l'animation de la scène,
- le module de visualisation de la scène.

II.A - Le module de dialogue.

Outre la gestion de l'interaction, ce module effectue la traduction des commandes de l'utilisateur sous une forme intermédiaire directement interprétable par les modules de création et d'animation.

II.B - Le module de création.

Ce module assure les fonctions de création de la géométrie de la scène, ainsi que celle du graphe cinématique.

- 1 - - création de tâches,
- destruction de tâches,
- placement de tâches,
- modification de géométries,
- modification de couleurs,

- 2 - - création d'axes,
- destruction d'axes,
- assemblage,
- désassemblage.

II.C - Le module d'animation.

Ce module a deux types d'activité :

- une activité d'analyse structurelle,
- une activité d'analyse comportementale.

1°) - L'analyse structurelle.

La phase d'animation de la scène est précédée par une phase d'analyse de la cohérence mécanique de l'*ACTEUR*. Lorsque cette cohérence est vérifiée, on passe à la décomposition du *TRONC* en boucles afin d'en vérifier la séquentialité. On peut alors établir l'ordre de calcul des boucles. Nous avons les fonctions suivantes :

- affectation de moteurs,
- détection des blocages,
- détection des indéterminations,
- séparation du *TRONC* et des *BRAS*
- décomposition du *TRONC* en boucles,
- vérification de la séquentialité,
- calcul du graphe de dépendance,
- aide à la correction de mécanismes non cohérents.

2°) - L'analyse comportementale.

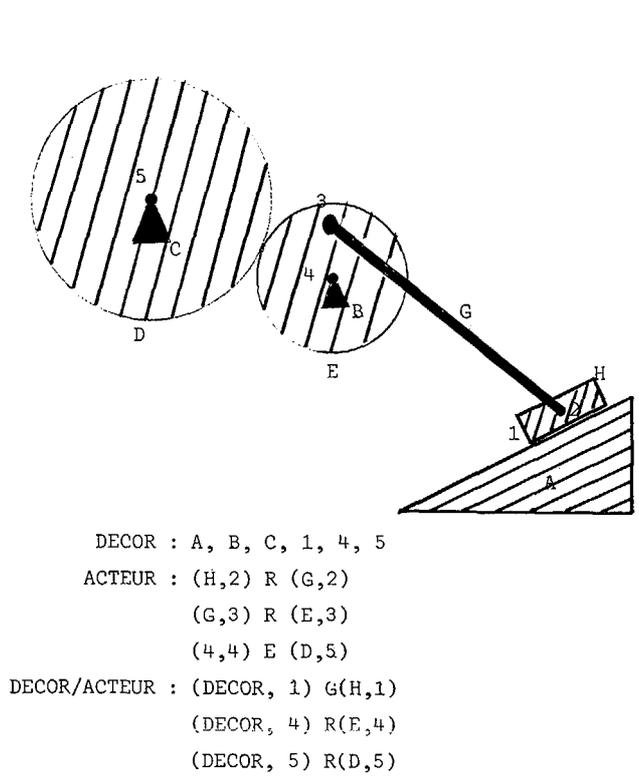
C'est la phase de production du mouvement. Pour les *BRAS* il s'agit d'affecter aux différentes liaisons de nouvelles valeurs fournies par les moteurs externes. Pour le *TRONC*, il s'agit de parcourir le graphe de dépendance des boucles établi au cours de la phase précédente et de les analyser successivement, afin de calculer à partir d'une configuration courante de l'*ACTEUR* sa configuration suivante.

Les fonctions de ce module :

- obtention de la boucle courante,
- calcul des paramètres du système associé à la boucle courante,
- résolution de systèmes (3*3),
- analyse des boucles de type engrenage,
- affectation d'une valeur à une liaison.

II.D - Le module d'affichage.

Ce module interprète le codage abstrait de la géométrie de la scène et en fournit une image sur l'écran. Les paramètres des tâches du *DECOR* sont toujours connus



R : rotation G : glissement
 E : engrenage

Fig. 1.

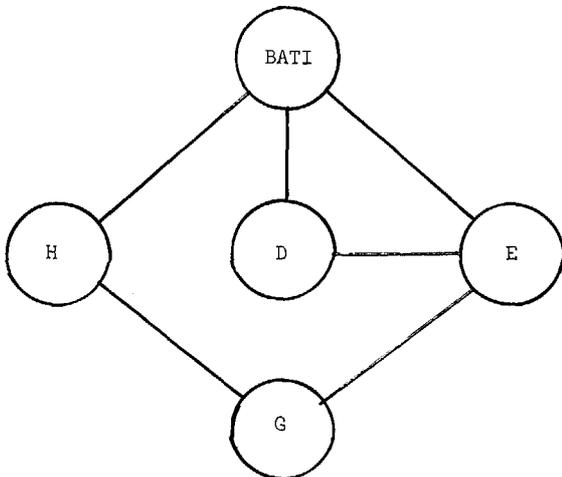


Fig.2.: Graphe cinématique associé à l'objet de la figure 1.

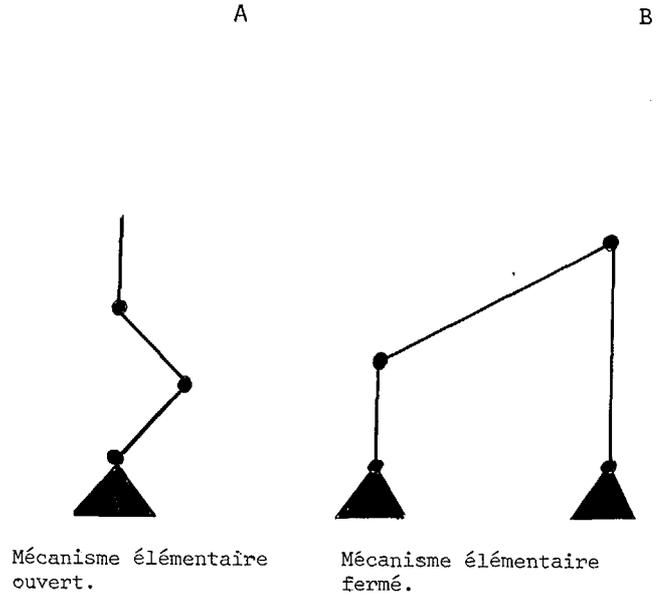


Fig. 3.

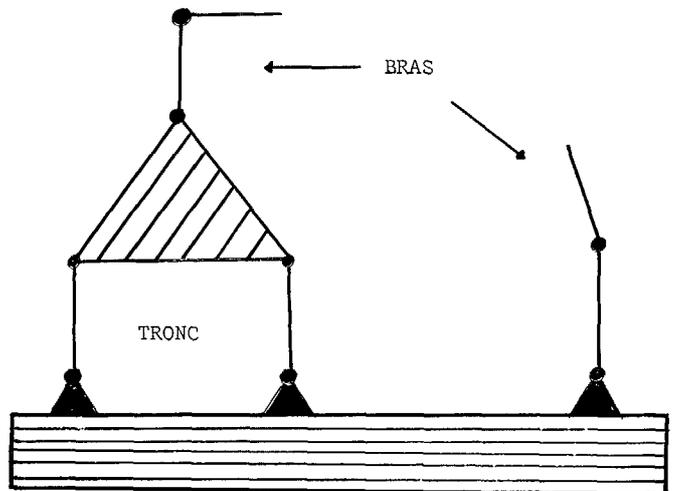


Fig. 4.

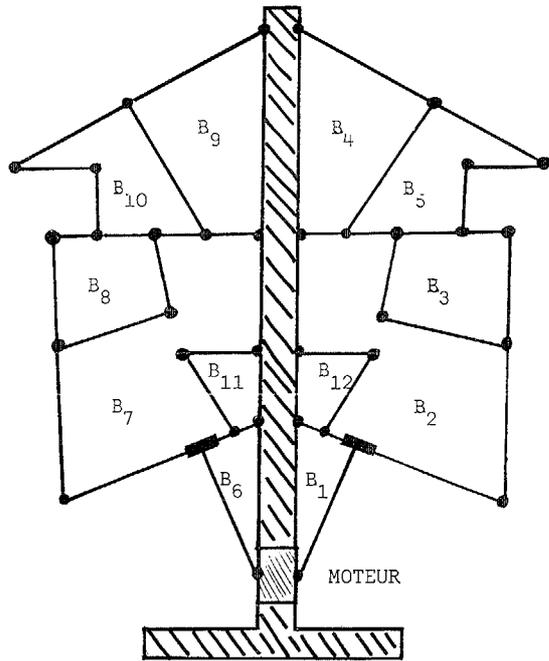
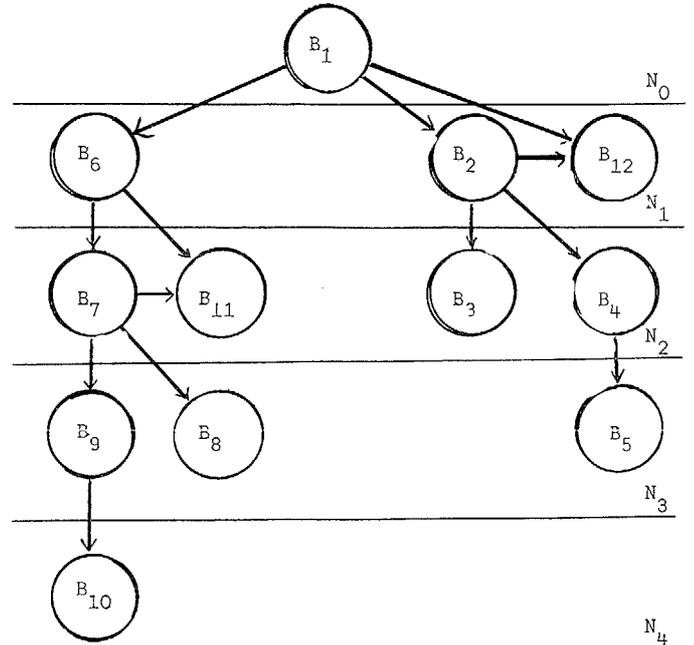


Fig. 5.A TRONC séquentiel.



B₁ : boucle motrice.

Fig. 5.C Graphe de dépendance.

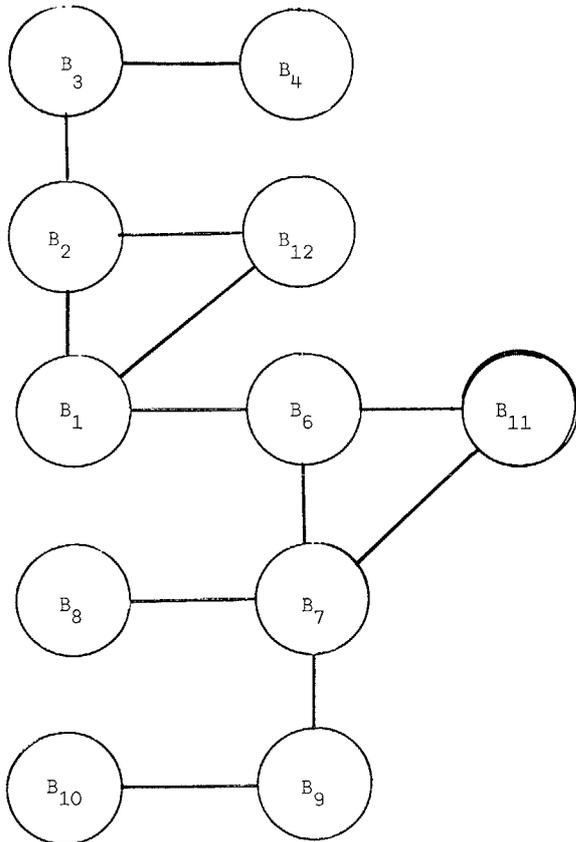
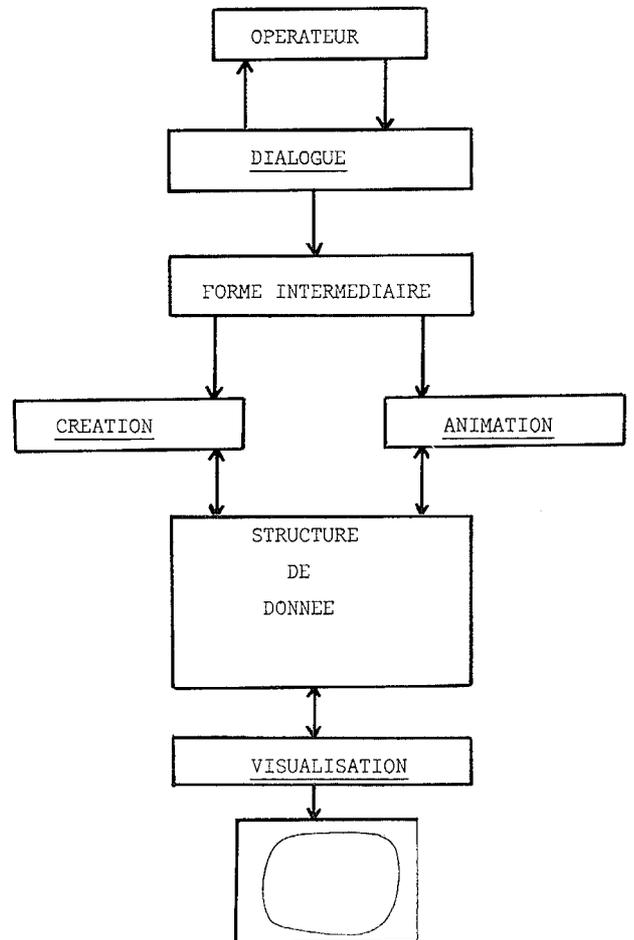


Fig. 5.B Graphe des boucles.

Fig. 6.





Application de la mécanique à l'animation interactive
Application of mechanics to interactive animation.

Khalil JAHIDI

dans le repère absolu. Ceux d'une tâche de l'ACTEUR le sont pendant la phase de création. Pendant la phase animation ils sont connus dans un repère local à la tâche. Il est alors nécessaire pour visualiser la tâche, d'appliquer aux paramètres la composée des transformations géométriques liant la tâche au repère absolu.

Ce module a donc trois fonctions :

- traduction du codage relatif en codage absolu,
- interprétation du codage de la scène,
- affichage.

II-E - Implémentation.

Les modules de dialogue et de création, ainsi qu'une partie du module d'affichage tournent actuellement sur une machine MATROX utilisant un 8086 couplé à un co-processeur réel 8087 qui dispose de possibilités de calcul en réel très satisfaisantes. Les temps de calcul observés lors d'opérations de création et de placement de tâches nous laissent penser qu'une animation en temps réel (temps d'affichage inférieur à une seconde) d'acteurs dont les tâches sont réduites à leur contour, est réalisable dans le cadre de cette configuration matérielle et ceci malgré l'utilisation de fonctions d'affichage rudimentaires. Outre l'unité centrale le poste de travail se compose d'un moniteur couleur à mémoire de trame 512x512x8 couplé à une table de fausse couleur, ainsi que des moyens d'entrée-sortie light pen et clavier. Seul le clavier est utilisé actuellement. Les programmes sont écrits en PLM/86.

III- Conclusion.

Malgré les contraintes que nous avons introduites les ACTEURS considérés correspondent à une large variété d'objets usuels. Pour nous en convaincre ouvrons un ouvrage de mécanique, le coeur d'un moteur ou celui d'une horloge afin de nous rendre compte qu'une bonne partie des mécanismes qui y figurent répondent aux critères de séquentialité que nous avons défini. Quant aux applications, l'utilisation eclectique des systèmes mécaniques dans la vie quotidienne, ouvre un large domaine d'utilisation à ce système. Nous pensons quant à nous à l'enseignement (cours de mécanique, mathématique, astronomie...) à la conception assistée par ordinateur (conception de mécanismes plans : trains d'engrenage, systèmes articulés...) et pourquoi pas à des applications purement artistiques !

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] I. ARTOBOLEVSKI "Théorie des mécanismes et des machines", Moscou, mir 1977.
- [2] N.I. BADLER "Motion graphics, description and control", Computer Graphics, vol. 18, n°1, January 1984, pp. 22-23.
- [3] N.I. BADLER, J. O'ROURKE, B. KAUFMAN "Special problems in human movement simulation", Computer Graphics, vol. 14, n° 3, july 1980, pp. 189-197.
- [4] N.I. BADLER, J.U. KOREIN "Techniques for generating the goal directed motion of articulated structures", IEEE CG & A, vol. 2, n° 4, november 82, pp 71-80.
- [5] N. BURTONYK, M. WEIN "Interactive skeleton techniques for enhancing motion dynamics in key frame animation" CACM october 1976 volume 19 number 10.
- [6] C.S. GEORGE LEE "Robot arm kinematics, ani control" Computer, december 82, pp. 62-89.
- [7] R.J. HACKATHORN "ANIMA II : a 3-D color animation system", ACM Computer Graphics, vol. 11, n° 2, 1977 pp. 54-63.
- [8] F. MARTINEZ "Les concepts liés à la description de l'animation assistée par ordinateur", AFCET Actes du Congrès, novembre 1978, Tome 2, pp. 283-292.
- [9] W.T. REEVES, "Inbetweening for computer animation utilising moving points constraints", IEEE CG vol. 15, n° 3, august 81, pp. 263-269.
- [10] P.N. SHETH, J.J. UICKER "A generalized symbolic notation for mechanisms", Transactions of the ASME, vol 93, série 3, n° 1, february 1971, pp. 102-112.
- [11] P.N. SHETH, J.J. UICKER "IMP (Integrated Mechanisms Program), a computer aided design analysis system for mechanisms and linkage", J. engineering for industry, Trans. ASME, vol. 94, may 1972, pp. 454-464.
- [12] E.J. TAJCHMAN "Computer animation using mapping techniques", Proceeding IEEE Computer Conference, february 1975, San Francisco California, pp. 295-297.
- [13] R.B. TILÖVE "Extending solid modeling system for mechanism design and kinematic simulation", IEEE CG & A, vol.3, n° 3, may/june 1983 pp. 9-19.
- [14] J.J. UICKER, J. DENAVIT, R.S. HARTENBERG "An iterative method for the displacement analysis of spatial mechanisms", J. Applied Mechanics, vol. 31, Trans ASME, vol 86, series E, n° 2, june 64, pp. 309-314.
- [15] D. ZELTZER "Motor control techniques for figure animation", IEEE CG & A, vol. 2, n° 9, nov. 1982, pp. 53-59.
- [6] C.S. GEORGE LEE "Robot arm kinematics,