Utilisation de modèles mécaniques et géométriques pour la synthèse et le contrôle d'images animées

Annie Luciani, Claude Cadoz

▶ **To cite this version:**

Annie Luciani, Claude Cadoz. Utilisation de modèles mécaniques et géométriques pour la synthèse et le contrôle d'images animées. Deuxième Colloque Image du Centre d'étude des systèmes et des technologies avancées, 1986, Nice, France. pp.705-711. hal-00910581

HAL Id: hal-00910581
https://hal.science/hal-00910581

Submitted on 20 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SEMAINE INTERNATIONALE DE L'IMAGE ELECTRONIQUE/INTERNATIONAL *ELECTRONIC IMAGE WEEK*

Deuxième colloque image/Second Image *Symposium*

traire me nt, synthèse, technologie et applications / *imag(' proccssing computer generatcd imagcs,t('(h"ology and applications*

Nice, Avril 1986

UIIUSATION DE MODELES MECANIQUES ET GEOMETRIQUES POUR LA SYNIHESE ET LE CONTROLE D'IMAGES ANIMEES

Application of mechanical and geometrical modeling ta generate sequences of motion in animated pictures

A. LUCIANI - C. CADOZ

ACAOE • Association pour la Création et la Recherche sur les Ou1ils d'Expression
LIFIA • Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle
ENSIMAG - BP 68 - 38402. SI Martin d'Hères Cedex - Tel 76.51.46.00

RESUME

Nous discuterons de l'intérêt respectif des modèles mécaniques et des modèles géométriques pour modéliser des objets en mouvement, dans l'objectif de produire des images animées. Nous proposerons une méthode pour intégrer dans un même langage ces 2 types de modèles.

Les spécificités des modèles mécaniques sont les suivantes: 1. un objet mécanique code structurellement une information cinétique; ces objets représentent alors un ensemble de mouvements potentiels; 2. La 2ème loi de la mécanique ou principe d'action-réaction nous indique que les objets mécaniques sont en interaction; Les modèles mécaniques sont donc bien adaptés à la modélisation des interactions; 3. L'homme est également un système mécanique; Ce type de modèle décrit naturellement l'interaction entre un opérateur humain et des objets mécaniques; 4. Les modèles mécaniques sont bien adaptés à la description d'objets déformables.

Cependant, la simulation d'un objet modélisé mécaniquement est souvent lourde et a ses limites. On attribuera ce type de modèle à la modélisation de certains constituants de l'objet, particulièrement ceux qui ont une grande importance sur le mouvement

D'autres types de modèles sont alors nécessaires pour donner une description complète d'un objet quelconque. Les modèles géométriques apparaissent comme complémentaires aux modèles mécaniques. Les objets géométriques sont passifs; ils n'interagissent pas entre eux; Ils sont adaptés à la modélisation d'habillages ou des parties de l'objet qui interviennent peu dans le mouvement, "-

En les considérant comme des cas particuliers d'objets mécaniques, ceux de masse nulle, on dispose d'une méthode pour assurer leur combinaison avec des objets mécaniques et créer ainsi des objets complets aux mouvements complexes et bien contrôlés.

SUMMARY

We will describe an application of mechanical and geometrie models to generate sequences of animated pictures. Specifie relevance of mechanical and geometrie approaches will be emphasized, and we will suggest a method to integrate both in one object description language.

The mechanical modeling involves the following features : 1. Â mechanical object contains a tirne-dependant-inforrnation, 5o that this object represents a sel ofpotential movements; 2. Foremost arnong mechanicallaws is Newton's actionlreaction principle: mechanical objects are in mutual interaction. Interaction arnong objects can thus be convenientJy described with mechanical modeling; 3. The hurnan subject himself can aIso be considered as a mechanicaI object, The same language can be used to describe inter-object relation ship as weil as animator-object relationship; 4. Mechanical modeling is particularly convenient to describe plastic objects, mostly required in animation.

However, complete mechanical modeling implementation would be very heavy and complex. It is generally admitted that it is more efficient to modelize a skeleton.

Geometrie modeling is necessary to complete the description : Geometrie elements are "passive" : they do not interact with each other not do they influence the mechanicaI skeleton; they do not contain tirne-dependant information. Geometric modeling is thus convenient to describe hulls of the mechanicaI skeleton or any other object part which does not influence motion.

Since zero-maas mechanicaJ objccts do not affect their environment, geometric clements, 'as defined above, can be also considered as mechanical objects with null mass.

Consequently : I. This yields a method for combining in a common language both rnechanical and geometric clements; 2. We will then show how 10 build ail types of objects; 3. The above definition of geometrie objects aIlows highly tolerant geometric rules, 1

UIIUSATION DE MODELES MECANIQUES ET GEOMETRIQUES POUR LA SYNTHESE ET LE CONTROLE D'IMAGES ANIMEES

A. LUCIANI - C. CADOZ

1. MODELES POUR L'ANIMATION

Lorsque l'on veut représenter des objets en mouvement, la première question qui se pose est le choix des modèles et plus particulièrement le choix entre modèles descriptifs et modèles générateurs. Un modèle descriptif est un modèle qui découle d'une analyse d'un mouvement réalisé; par exemple un mouvement de chute décrit par une trajectoire parabolique et un timing sur cette trajectoire indiquant les positions de l'objet à intervalles de temps réguliers est un modèle descriptif. Un modèle générateur est un modèle susceptible de spécifier une classe plus grande de mouvements ce qui suppose qu'il spécifie des lois ou des régles de production pour cette classe. Par exemple, pour le cas d'un objet qui tombe, donner les lois mécaniques qui décrivent la chute relève du modèle générateur, puisqu'il explique et est capable de générer tous les mouvements de chute.

Nous allons tout d'abord remarquer que l'outil cinématographique impose le premier type de représentation, alors que l'outil informatique permet l'accès également au second.
En effet, pour réaliser cinématographiquement un mouvement, l'animateur choisit un mouvement particulier (par exemple: une chute particulière), puis analyse ce mouvement et le décrit par une suite d'états ou d'images fixes. Le mouvement est donc décrit par (position(to), position(tl), ...position (ti) ..., positionttnj).
L'ordinateur permet par contre de modéliser une chute par représentation de l'objet et des actions auxquelles il est soumis. La description sera du type (Masse M, pesanteur G, actions extérieures (hauteur h et vitesse initiale Vi». Un mouvement particulier découlera, pour une masse et une pesanteur données, d'une instanciation particulière des actions extérieures.

La réponse à ce choix dépend donc d'abord de contraintes technologiques. Nous nous distancierons de 13.référence aux techniques cinématographiques (cels par exemple) pour nous centrer sur l'étude de modèles générateurs que nous ouvre l'informatique.

Un autre critère de réponse porte sur le type d'efficacité demandée à l'outil de représentation. Ainsi, si le mouvement s'est déjà réalisé, est parfaitement connu et analysé, et que l'on s'intéresse exclusivement à celui-ci, la première méthode s'averera immédiatement opérationnelle, pour réaliser à postériori et par synthèse ce mouvement
Par contre, si l'on n'a pu disposer au préalable de ce mouvement pour l'analyser, mais si l'on connait quelques-unes de ces propriétés, ou des mouvements de même nature, alors on fera appel plutôt à la deuxième méthode, puiqu'elle va permettre. de le rechercher par l'exploration à l'intérieur d'un domaine de règles décrivant plusieurs mouvements.
En ce qui concerne l'animation, lorsque l'animateur cherche un mouvement, ce dernier n'est à priori pas connu dans tous ses détails. Cependant son savoir-faire lui permet d'en décrire certaines propriétés. Le second type de modèle s'avère par principe adapté à cette activité.

Pour choisir les types de modèles générateurs, il faut nous interroger sur la nature des propriétés connues à priori par l'animateur, ainsi que sur leur capacité à permettre la recherche du mouvement souhaité.
L'animateur, comme tout être humain, agit sur, et observe, le plus souvent les objets du monde naturel. Ces objets et leur comportement dynamique lui servent de référence et il cherche un mouvement par proximité avec les mouvements connus (Schweppe 84). C'est de cette référence implicite que découlent beaucoup de règles parmi les plus importantes de l'anima tion.
Ainsi la figure (la) révèle qu'un déplacement se double nécessairement d'une déformation et que ces 2 mouvements sont corrélés, leur corrélation étant dévoilée par une exagération du phénomène, De même, dans la figure (lb), l'évocation non-ambigüe d'une loi essentielle de la mécanique, le principe d'action-réaction, permet à la perception d'inférer les objets en cause et de donner un sens même symbolique à la situation représentée (Engler 81).
Ces propriétés sont alors celles que nous regrouperons sous le terme d'"objet", et plus précisément encore d'"objet physique".

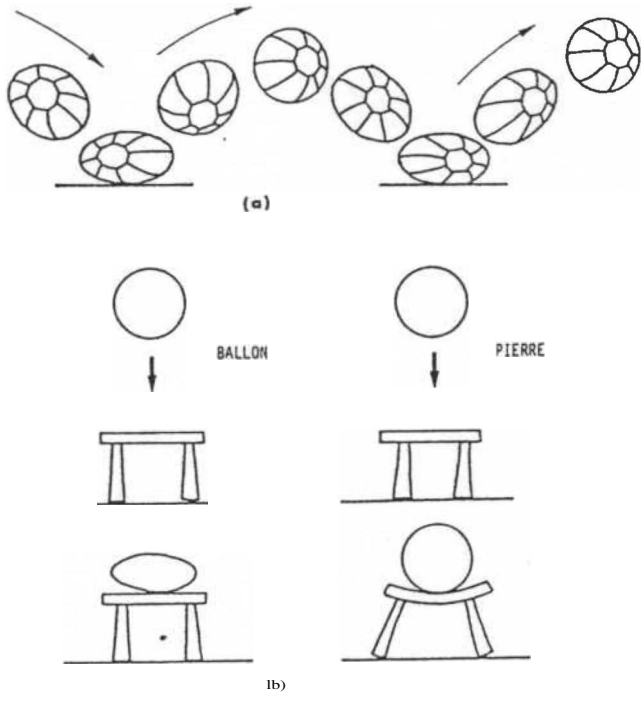

Figure l-I'anirnation et les lois du réel (Engler 81)

UTILISATION DE MODELES MECANIQUES ET GEOMETRIQUES POUR LA SYNTHESE ET LE CONTROLE D'IMAGES ANIMEES

A. LUCIANI - C. CADOZ

Un autre critère de choix va porter sur la nature du contrôle du mouvement, ou de l'objet en mouvement, que l'on souhaite avoir. Dans le cas où le mouvement est parfaitement connu et prédéterminé, l'action de funirnateur, se limite à un choix: "je veux le mouvement X". Lorsque le mouvement n'est à priori pas totalement connu, sa recherche suppose une action de la part de l'animateur.
Dans le cas général, cette action combine une action mentale et une action physique. L'objet doit être manipulable concCJ2tuellement et physiQuement:

* Conceptuellement, en disposant non pas uniquement de modèles d'objets, mais d'un langage pour construire et expérimenter ces modèles d'objets.
* Physiquement, en permettant l'expérimentation sensori-rnotrice des objets ainsi créés (saisir, lacher, comprimer, lancer, pousser...).

A titre d'exemple, l'animateur doit pouvoir créer un modèle d'oiseau, l'animer gestuellement comme il le fait lorsqu'il mime ce mouvement, modifier et expérimenter ce modèle, jusqu'à trouver le mouvement voulu.

Ainsi, on définit une catégorie de modèles générateurs qui nous semblent bien adaptés à la création d'animations : il s'agit de modèles 'permettant de définir les propriétés intrinsèques d'un objet physique qui, lorsque cet objet est soumis à des actions en provenance d'autres objets qui interagissent avec lui ou en provenance de l'animateur, il se mette en mouvement, conformément à ces propriétés et à ces actions. Nous appellerons un tel objet. "Objet Mobile Manipulable" .

Nous allons examiner 2 types de modèles pour créer et simuler des objets mobiles manipulables, les modèles "mécaniques" et les modèles "géométriques", et, pour chacun d'eux, déterminer quel type de fonctionnalités de l'objet mobile manipulable ils semblent particulièrement bien servir.

II. LES MODELES MECANIQUES

Un objet mobile manipulable est un objet dont le comportement est régi par les lois de la mécanique et qui, lorsqu'il est soumis à une action, se déforme et se déplace.
Il a également de ce fait un certain nombre de propriétés essentielles pour l'animation.

IL! PrOJlriétés intrinsèQues

Un tel objet code structurellement des informations cinétiques.
Ainsi, l'objet physique "ressort" déterminé par un paramètre d'élasticité et une longueur au repos et dont le comportement physique est décrit par l'équation F = K * DL, contient implicitement ses modalités de déformation. De même, un objet indéformable déterminé par son moment d'inertie, contient implicitement les informations nécessaires à son déplacement autour d'un axe.

La donnée de cette physique de l'objet, ou autrement dit des lois intrinsèques de son comportement, qu'il s'agisse de corps rigides ou de milieux déformables, permet de déduire les déformations et les déplacements des objets, c'est à dire leur mouvement, à partir d'actions extérieures.

Un tel objet représente une classe de mouvements. Il réalise donc un principe d'économie au niveau de la représentation du mouvement,

IL2. Optimisation du contrôle

Le corollaire de cette première propriété est une optimisation du contrôle. La notion de contrôle suppose que la quantité d'informations à donner est plus faible que celle contenue dans le résultat. En effet, avec ce type de modèle, la donnée des actions extérieures suffit à déterminer la totalité du mouvement d'un objet ainsi défini.
Ainsi, dans le cas d'un corps déformable, il suffit de déplacer un point pour que la déformation affecte tous les points de l'objet.

Les 2 exemples qui suivent ont été réalisé avec le système ANIMA.
La figure (2) montre la simulation d'une surface déformable. L'animateur donne en temps réel uniquement la position d'un des points de la surface, celui par lequel il entraine celle-ci.

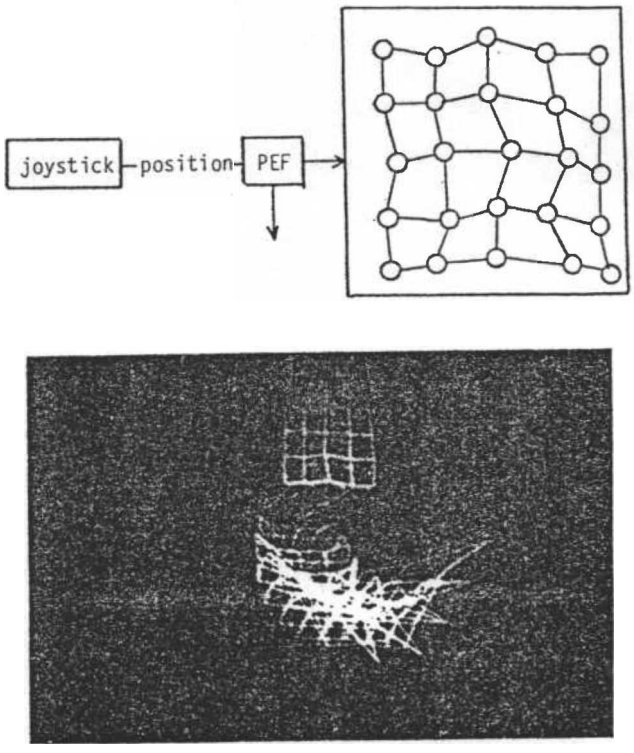

Figure 2 - Description et animation d'une surface élastique

La figure (3) illustre également cette propriété. Le squelette de la marionnette est un squelette mécanique constitué d'éléments de masse, d'élasticité et de frottement. La quasi rigidité de la posture est obtenue par un agencement judicieux de ces éléments. 11ne s'agit donc pas d'un système articulé rigide modélisable géométriquement. Cette marionnette est animée par 2 sticks fixés sur les pieds. A partir des variables de position de chacun des pieds, on obtient le mouvement de toute la marionnette: balancement de la tête, des bras, des mains, du cou, du bassin.

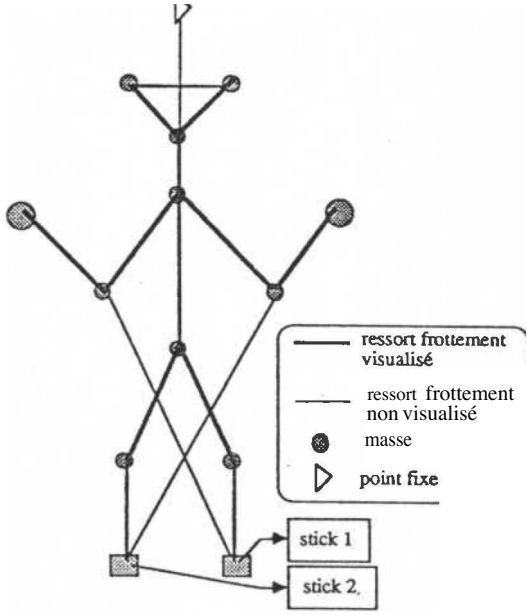

Figure 3 - Description et animation d'une marionnette

Ce type de modèle réalise une économie du contrôle puisque le contrôle consiste à donner les actions extérieures qui permettent dynamiquement de choisir à chaque instant parmi les mouvements potentiels de l'objet

Avec de tels modèles, le problème du mouvement se trouve donc résolu à partir d'une structuration de l'information cinétique en 2 niveaux :
...au niveau structurel de l'objet par la donnée d'informations statiques intrinsèques à l'objet, appelées aussi "lois de comportement"; celles-ci relèvent de la physique .
...au niveau du contrôle de manière dynamique par la donnée des actions extérieures s'appliquant dynamiquement sur l'objet.

11.3 Capacités d'interaction

2ème loi de la mécanique: "A toute action exercée par un point A sur un point B correspond un réaction exercée par le point B sur le point A , qui est opposée à la première quelques soient les mouvements de A et de B".
Cet énoncé nous indique que ce type de modèles est bien adapté à la description des interactions entre objets, ce qui n'est pas le cas pour les modèles les plus usuellement utilisés en animation par ordinateur tels que les modèles géométriques ou les modèles à base de dessins ou d'états.
Les objets mécaniques sont des objets en interaction. Ainsi si l'on prend 2 masses Ml et M2 reliées par un ressort, l'ensemble des positions de Ml et de M2 sont corrélées. Cela signifie, du point de vue de la simulation, qu'il y a un échange bilatéral d'informations entre chaque élément; les masses fournissent des informations au ressort et réciproquement. Plus généralement, il y a échange d'énergie entre les différents éléments mécaniques. Une description de cet échange peut s'effectuer en définissant 2 variables conjuguées, une intensive, l'autre extensive, par exemple des forces et des déplacements (ou des déformations). Il s'agit alors d'un système bouclé où une circulation de forces produit un ensemble de déplacements et réciproquement. On produit alors ainsi des mouvements complexes à partir de descriptions
relativement simples.

Voici une simulation réalisée avec le système ANIMA, d'une balle déformable qui rebondit sur des murs rigides (figure 4).
La description et le calcul sont simples :
Balle = ensemble de masses reliées par des éléments élastiques, dont le calcul consiste en la résolution des équations de la mécanique:
Pour chaque masse de la balle:
Résultante des forces = M ...accélération
Résultante des forces = forces exercées par les éléments élastiques(l) + forces exercées par les murs(2) + forces extérieures(3)
(1) F = KI * déformation
(2) F = K2 * déformation si distance(masse/mur) < seuil, sinon F = 0
(3) F en provenance de capteurs manipulés par l'animateur.

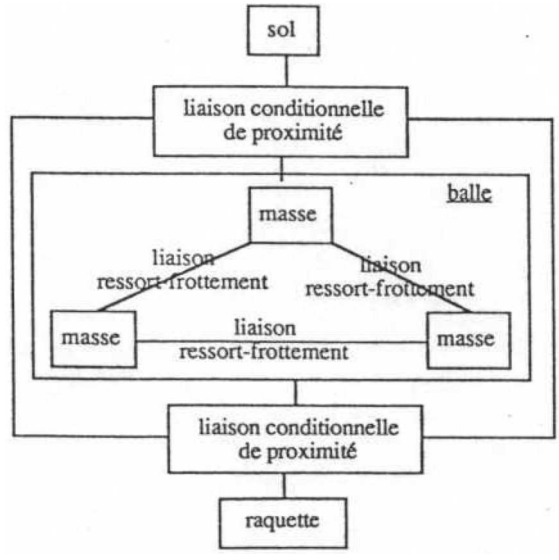

figure 4 - le "jeu de tennis"

UIILISAIION DE MODELES MECANIQUES ET GEOMETRIQUES POUR LA SYNTHESE ET LE CONTROLE D'IMAGES ANIMEES

A. LUCIANI - C. CADOZ

0.4 Interaction avec J'animateur

Le manipulateur humain peut également s'analyser selon les termes de la mécanique. En effet. en tant que système mécanique, l'opérateur humain produit des actions qui peuvent se décrire à partir des variables conjuguées forces et déplacements. Les interactions entre objets ou parties d'un objet, et les interactions entre un opérateur et un objet se formalisent et se calculent de la même manière. Ce type de modèle est donc naturellement capable d'introduire une interaction avec l'opérateur humain comme composante de la définition d'un mouvement Le problème de l'interaction et du contrôle humain se trouve donc bien résolu.

II.5 Le naturel ct l'exptrimentabilité

Les objets mécaniques sont naturels et expérimentables. fis seront d'une aide précieuse pour la recherche et la création d'objets en mouvement nouveaux..
En effet, on connait naturellement le sens d'une masse plus ou moins grande, d'un élément plus ou moins rigide ou visqueux. Par ailleurs, on peut déplacer une masse, comprimer un ressort, expérimenter concrétement une résistance à un déplacement

lJ.6. Simplification du contrôle

Le nombre de degrés de liberté d'un objet ou d'une scène croit très vite. Dans la mesure où il est impossible, pour J'animateur, de contrôler ces degrés de liberté par des processus indépendants, à fortiori par des gestes, la nécessité d'une réduction de la complexité par une réduction du nombre de degrés de liberté à contrôler s'impose.
"Il est peu probable que les 792 degrés de liberté articulaire du corps humain soient contrôlés par autant de processus ... L'analogie du marionnettiste commandant les mouvements complexes de sa poupée par la combinaison d'un nombre limité de déplacements des doigts offre un bon exemple de sous-système à plusieurs degrés de liberté contrôlé par un système supérieur à degrés de liberté réduit" (Beaubaton).
Le marionnettiste obtient cette simplification par l'introduction d'un système mécanique intermédiaire entre sa marionnette et ses doigts.

Cette idée est généralisable en introduisant entre les objets à contrôler et les dispositifs de contrôle tout un ensemble de systèmes mécaniques. La modélisation d'.une scène susceptible de produire du mouvement contient donc la modélisation mécanique des objets et la modélisation mécanique de leur système de contrôle.

Nous avons simplifier le contrôle d'un mouvement de marche (figure 5) en interposant entre les pieds d'une marionnette et l'animateur une roue déformable élastique. Cette roue introduit une relation entre le mouvement de chaque pied. L'animateur contrôle donc le mouvement de marche par un seul geste. De même, l'opposition entre le mouvement des bras et des jambes se réalise simplement par

. l'adjonction d'une liaison mécanique croisée (figure 3),

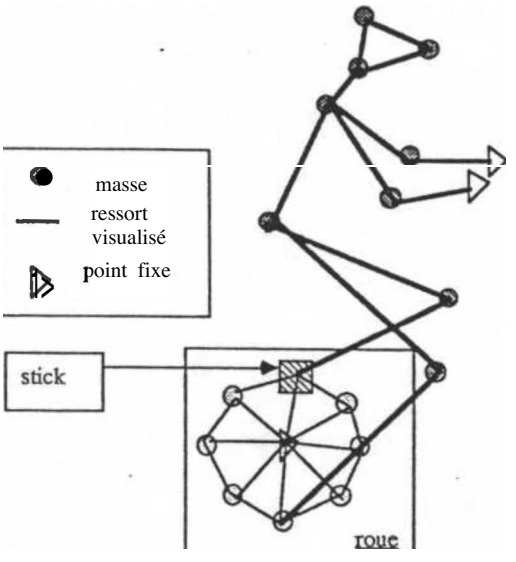

figure 5 - Modèle d'une structure de contrôle

II.?. Réalisme

Il n'est pas nécessaire de calquer la structure mécanique d'un objet réel pour restituer ou approcher le mouvement de cet objet Nous dirons que l'on peut donner une représentation mécanique d'un objet ou d'un phénomène mécanique ou non.
Ainsi,le mouvement de la marche, étant donné un ensemble d'éléments physiques parfaitement définis (muscles, articulations ...) consiste en un ensemble de données de contrôle en provenance d'un plan moteur, défini soit au niveau du cerveau, soit à différents niveaux plus ou moins périphériques. Il n'est pas nécessaire d'entrer dans la compréhension poussé du contrôle moteur humain, pour trouver un modèle mécanique qui permet d'en restituer ses manifestations extérieures. Les ms de la marionnette ou la roue sont en fait des modèles de ce plan moteur.
On peut évidemment afflOer ces modèles. Ce que nous avons voulu expérimenter c'est la possibilité de représenter mécaniquement des phénomènes à priori non exclusivement mécaniques dans le monde réel.
Ces modèles ne nous figent donc pas dans le réalisme, de la même manière que la référence qu'a l'animateur des objets du monde réel et de la mécanique newtonnienne ne figent ni son imagination ni ses créations.

]1.8 Un exemple de 1anuee de spécification de modèles mécaniques - le système ANlJy1A

A partir de 3 familles de modèles de comportement simple, on peut représenter par combinaison la plupart des comportements des objets réels,

D s'agit:
• de la masse (ou de l'inertie) : dont le comportement est décrit par l'équation fondamentale de la dynamique
F .. M.acctl&ation

UTIUSATION DE MODELES MECANIQUES ET GEOMETRIQUES POUR LA SYmHESE ET LE CONTROLE D'IMAGES ANIMEES

A. LUCIANI - C. CADOZ

• du comportement élastique. La plupart des solides ont un comportement élastique, au moins sous des contraintes faibles. Les fluides et les gaz ont aussi un comportement élastique. En général. J'élasticité est linéaire. Alors, la déformation est reliée linéairement à l'effort: on a F = K • déformation. Le modèle rhéologique représentant l'élasticité linéaire est le ressort de raideur K.

• du comportement visqueux : Dans cet élément sont associées vitesse de déformation et contrainte. Lorsque cette relation est linéaire, on a F= Z • V. Le modèle rhéologique représentant la viscosité linéaire est l'amortisseur.

Un tel comportement est inélastique. La viscosité pure ne se rencontre que dans les fluides. Dans un solide. elle est combinée avec l'élasticité.

Le système ANIMA propose un mode de combinaison de ces éléments à partir de leur répartition en 2 classes, les modules matériels (du type "masse") et les modules de liaison (du type "élasticité" et "viscosité"). Les modules matériels ont pour entrée des forces et pour sortie des positions. Les modules de liaison ont pour entrée des positions et pour sortie des forces. Ces 2 types de modules peuvent donc se combiner pour former des objets plus complexes. La figure (6) décrit un exemple de combinaison: on construit une portion de surface de forme et de matière quelconques à partir des 3 éléments de base ci-dessus.

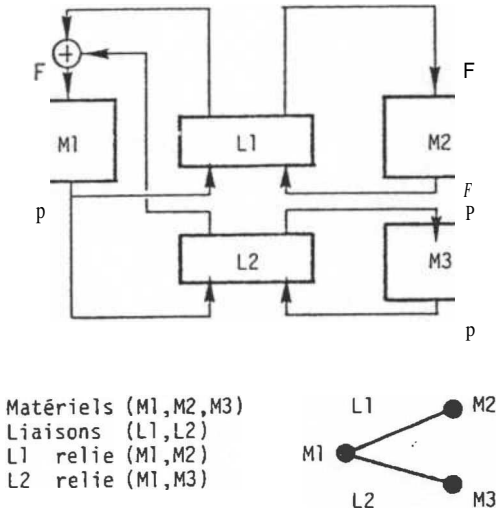

Figure 6 - Combinaison d'éléments mécaniques

III. LES MODELES GEOMETRIQUES

ru.1 Limites et suffisance des modèles mécaniQYes

Il peut exister dans l'objet des constituants où l'une quelconque des propriétés ci-dessus n'est pas requise ou n'intéresse pas l'animateur (interaction faible. comportement dynamique propre négligeable, contrôle éloigné).

Par ailleurs. il est difficile de représenter à l'aide des seuls modèles mécaniques, des constituants de masse nulle ou de raideur infinie.

Il est donc important de différencier les constituants d'un objet en fonction de leur rôle dans la détermination du mouvement.

On peut par exemple admettre que l'enveloppe extérieure d'une marionnette, sa "peau", influence peu le mouvement, déterminé essentiellement par la conformation de l'ossature et des muscles;

De même pour des constituants de masse faible.

Cette idée est plus générale: dès que l'on admet qu'un objet ou une partie d'objet intervient peu sur le mouvement, on tentera de le dissocier des modèles support du mouvement pour lui trouver des descriptions plus adéquates.

De tels constituants se caractérisent par le fait qu'ils n'échangent pas d'énergie avec leur environnement. Ils sont "passifs". On peut donc décrire leur comportement par des lois à un seul type de variables, les déplacements par exemple.

Les modèles géométriques sont de ce type. Ils apparaissent comme une alternative intéressante au "tout-mécanique". parfois trop lourd.

U.2. Spécificité des modèles eéométriQyes

Les éléments géométriques sont des points, des droites, des surfaces ... et les règles qui gérent leur position relatives (conservation de distances, conservation de surfaces ou de volumes ...). Ces éléments sont "passifs", ne codent aucune information temporelle et n'interagissent pas entre eux. Pour déterminer le mouvement d'un objet géométrique, il faut en effet appliquer la matrice de transformation géométrique, par exemple translation ou rotation, à tous les points de l'objet Ainsi, si l'un des points d'un solide géométrique se déplace sur une trajectoire, les autres points se déplaceront de la même manière sur une trajectoire translatée.

m.3. Les modèles eéométriQues comme cas limjte des modèles mécaniques

Nous avons introduit les modèles géométriques pour modéliser des cas où les interactions sont faibles. négligeables. On peut alors considérer les objets géométriques comme des cas limites d'objets mécaniques de masse nulle. Les seules variables utiles sont alors les déplacements. Ainsi considérés, de tels objets se combinent aisément avec des objets mécaniques. La logique de construction sera la même, qu'il s'agisse de combiner des éléments mécaniques entre eux, des éléments géométriques entre eux ou des éléments géométriques et des éléments mécaniques.

mA OyelQllcs éléments eéométriQYes de base

m 4 1. l'articylation géométriQye

Sa règle de base est l'invariance des distances. A partir de 2 points mécaniques (Ml, M2). ou géométriques. on déduit un 3ème point P tel que PMI = dl et PM2 = d2 (figure 1).

Dans le cas où il existe des solutions pour P, le calcul est simple (intersection de 2 cercles de centres Ml et M2 et de rayons dl et d2).
La position de P est déduite de celle de Ml et M2. P ne peut imposer des contraintes sur les positions respectives de Ml et M2. Il existe des positions MI et M2 qui ne donnent pas de solutions pour P si l'on maintient la regle d'invariance des distances. On cherchera alors à trouver des solutions pour P, par analogie avec la mécanique. Le point p. s'il était mécanique, serait un élément de masse nulle, relié aux masses Ml et M2 par des ressorts de raideur quelconque.
Un tel système mécanique est également une articulation. On supposera alors que les liaisons PMI et PM2 sont des ressorts dont la longueur est susceptible de varier. On calculera ainsi les positions géométriquement inexistantes de P en autorisant des variations des distances analogues à un comportement mécanique. P est toujours un point géométrique défini uniquement par sa position. Sur P ne s'applique aucune force. Mais la règle géométrique qui le relie aux points MI et M2 est une règle "souple" sur les distances. La géométrie à laquelle appartient le point P est une géométrie "souple", intermédiaire entre la géométrie classique et la mécanique.

iIJ.4.2. Le solide indéformable

Un solide indéformable (figure 7) peut se construire géométriquement à partir de 2 points (P, Q) dont la distance est constante. Les autres points du solide (TI, TI, ... Ti ....) s'en déduisent par la règle ci-dessus d'invariance des distances. Les points P et Q peuvent se connecter par des règles quelconques à des éléments mécaniques.

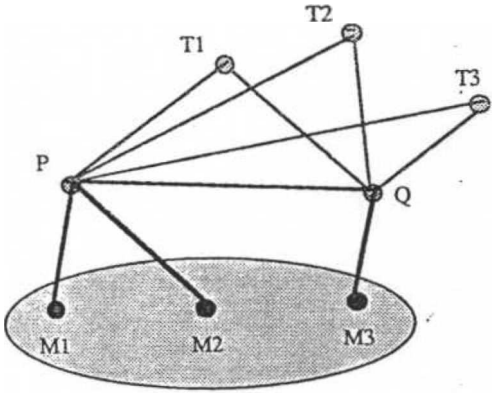

Figure 7 - Elérnents géométriques

mA 3. Comportement plastiQue

A partir de 2 points mécaniques (Ml, M2), on approche un comportement plastique sans étirement en définissant un point géométrique P par conservation de la surface Ml.M2.P.

m.4.4 Exemples

Exemple 1 : habillage d'un matériau élastique
Les points Ml et M2 reliés par un ressort définissent un objet élastique simple (figure 8). Pour définir un contour géométrique à cet objet - il pourrait s'agir d'une pâte à modeler de masse équivalente à (M 1 + M2) - il faut, à partir des points Ml et M2, créer des points supplémentaires (P1, P2. P3, ...), qui "suivraient" le mouvement donné par Miel M2. On peut choisir pour ces points les regles "articulation géométrique" ou "comportement plastique".

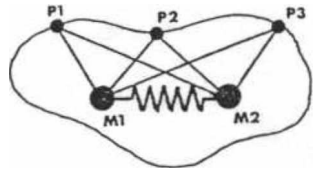

Figure 8 - Matériau déformable

Exemple 2 : un objet complexe, un bras
On peut donné de cet objet un modèle simplifié constitué de 3 éléments :
- le muscle, représenté par un élément mécanique élastique et par un élément de contrôle (un moteur ou un système mécanique relié à l'animateur),
- l'ossature, qui est une articulation, descriptible par une articulation géométrique,
- l'habillage. décrit à partir des points de l'ossature ou du muscle, par des éléments géométriques du type "comportement plastique".

IV, MODELISATION D'UN OBJET

Un objet sera constitué:
- d'un ensemble d'éléments mécaniques, qui interagiront entre eux et qui seront les éléments de contrôle et de définition du mouvement. Il peut s'agir des lois de comportements intrinsèques aux objets ou de systèmes définissant des contraintes mécaniques entre 'objets ou parties d'objets. Ces constituants ne sont pas nécessairement visibles.
- d'un ensemble d'éléments géométriques, influençables par les premiers. mais non-influençants.

La figure (9) donne un exemple de construction d'un objet hybride. Les points (Ml, Ml. M3) sont des points matériels mécaniques définis par leur position et leur masse; Ils sont reliés par des éléments visee-élastiques; Ce sont ces points qui déterminent le mouvement. Les points (pl, P2, P3, P4) sont des points géométriques définis uniquement par leur position. Celle-ci se détermine à partir de règles géométriques RG : Pl se déduit de (MI,M2) par la relation géométrique RG 1; de même P4 se déduit de (P2, P3) par la relation géométrique RG4.